

Na prawach rękopisu

Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego
Politechniki Wrocławskiej

**Zakotwienie siatek kompozytów wzmacniających
na zaprawie mineralnej w elementach płytowych**

Raport serii PRE nr 4/2023

Praca doktorska

mgr inż. Filip Grzymski

Słowa kluczowe:

konstrukcje żelbetowe, wzmacnianie,
płyty żelbetowe, zginanie,
materiały kompozytowe, FRCM.

Promotor: dr hab. inż. Tomasz Trapko, prof. uczelni

Promotor pomocniczy: dr inż. Michał Musiał

Wrocław, maj 2023

Autor:

mgr inż. Filip Grzymski

.....

Politechnika Wrocławska

Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego

Katedra Konstrukcji Budowlanych

Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

tel. 71 320 23 45

e-mail: filip.grzymski@pwr.edu.pl

Raport został złożony w Redakcji Wydawnictw Wydziału Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej w maju 2023 r.

| | | |
|------------------|---------------------|--------|
| Lista odbiorców: | Recenzenci | 2 egz. |
| | Promotor | 1 egz. |
| | Promotor pomocniczy | 1 egz. |
| | Autor | 1 egz. |
| | Biblioteka Główna | 1 egz. |
| | Archiwum W-2 | 1 egz. |

Razem 7 egz.

Szczególne podziękowania składam:

*Mojemu promotorowi dr. hab. inż. **Tomaszowi Trapko**, prof. uczelni
za interesującą tematykę badawczą oraz wszechstronną pomoc w trakcie
realizacji pracy doktorskiej;*

*Promotorowi pomocniczemu dr. inż. **Michałowi Musiałowi**
za poświęcony czas i liczne dyskusje naukowe;*

***Ireneuszowi Pałęckiemu**
za pomoc w przygotowaniu elementów badawczych;*

*Mgr. inż. **Maciejowi Pazdanowi**
za pomoc w wykonaniu modelu numerycznego.*

Pracę dedykuję mojej Żonie i Najbliższym

Spis treści

| | |
|--|------------|
| Wstęp..... | 9 |
| 1.1 Geneza podjęcia tematu..... | 9 |
| 1.2 Przedmiot, cel i zakres opracowania | 12 |
| 1.3 Oznaczenia literowe przyjęte w pracy | 12 |
| 1.4 Skróty i definicje | 16 |
| 2. Podsumowanie stanu wiedzy | 19 |
| 2.1 Tradycyjne metody wzmacniania płyt żelbetowych..... | 19 |
| 2.2 Ogólna charakterystyka materiałów kompozytowych..... | 23 |
| 2.2.1 Kompozyty na bazie matrycy polimerowej..... | 24 |
| 2.2.2 Kompozyty na bazie zaprawy mineralnej | 28 |
| 2.3 Wzmacnianie płyt żelbetowych materiałami kompozytowymi..... | 44 |
| 2.3.1 Wzmacnianie płyt żelbetowych materiałami kompozytowymi z matrycą mineralną..... | 44 |
| 2.3.2 Wzmacnianie płyt żelbetowych innymi materiałami kompozytowymi | 77 |
| 2.4 Zakotwienie kompozytów na bazie zaprawy mineralnej..... | 84 |
| 2.5 Podsumowanie wyników badań opisanych w literaturze | 96 |
| 3. Cele naukowe pracy..... | 101 |
| 4. Własne badania doświadczalne | 102 |
| 4.1 Cel i zakres badań | 102 |
| 4.2 Przygotowanie elementów badawczych | 105 |
| 4.3 Przygotowanie czujników trwale przytwierdzonych do elementów..... | 109 |
| 4.4 Właściwości mechaniczne materiałów | 111 |
| 4.4.1 Beton | 111 |
| 4.4.2 Stal..... | 114 |
| 4.4.3 Kompozyt PBO-FRCM | 117 |
| 4.5 Zasadnicze badania doświadczalne..... | 118 |
| 4.5.1 Stanowisko badawcze | 118 |
| 4.5.2 Aparatura badawcza i jej rozmieszczenie..... | 120 |
| 4.6 Wyniki zasadniczych badań doświadczalnych | 124 |
| 4.6.1 Nośność elementów i mechanizmy zniszczenia | 124 |
| 4.6.2 Zarysowanie elementów | 133 |
| 4.6.3 Odkształcenia podłużne zbrojenia | 139 |
| 4.6.4 Odkształcenia poprzeczne zbrojenia..... | 141 |
| 4.6.5 Odkształcenia podłużne betonu | 143 |
| 4.6.6 Odkształcenia poprzeczne betonu | 145 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 4.6.7 | Odształcenia podłużne wzmocnienia | 151 |
| 4.6.8 | Odształcenia poprzeczne wzmocnienia..... | 158 |
| 4.6.9 | Rozwój rozkładu odkształceń na wysokości elementu | 162 |
| 4.7 | Podsumowanie badań doświadczalnych | 167 |
| 5. | Analizy teoretyczne..... | 173 |
| 5.1 | Analityczny model obliczeniowy | 173 |
| 5.1.1 | Nośność niewzmocnionego elementu żelbetowego..... | 174 |
| 5.1.2 | Nośność wzmocnionego elementu żelbetowego | 178 |
| 5.2 | Numeryczny model obliczeniowy | 180 |
| 5.2.1 | Nośność i odkształcalność niewzmocnionego elementu żelbetowego | 184 |
| 5.2.2 | Nośność i odkształcalność wzmocnionego elementu żelbetowego..... | 185 |
| 5.3 | Porównanie nośności elementów z badań doświadczalnych i modeli obliczeniowych | 187 |
| 5.4 | Propozycja zmian dla modelu analitycznego | 188 |
| 5.5 | Podsumowanie analiz teoretycznych..... | 191 |
| 6. | Podsumowanie i wnioski końcowe | 193 |
| 7. | Literatura | 197 |
| 8. | Streszczenie/Summary..... | 204 |

Wstęp

1.1 Geneza podjęcia tematu

Konieczność wzmacniania istniejących konstrukcji budowlanych, w tym konstrukcji żelbetowych, jest istotnym zagadnieniem w szeroko rozumianej dziedzinie inżynierii budowlanej. Jest ona najczęściej naturalnym skutkiem procesów starzenia oraz degradacji właściwości mechanicznych materiałów budowlanych wynikających z ekspozycji na agresywne warunki środowiskowe, jednak może również wynikać z nieprawidłowego użytkowania konstrukcji lub też uszkodzeń mechanicznych. Innym powodem konieczności wzmacniania konstrukcji może być również zmiana funkcji użytkowej budynku, która spowodować może planowane zwiększenie obciążeń lub też zmianę jej schematu statycznego. Ostatnim powodem, potencjalnie najgroźniejszym ze względu na trudność wykrycia, są błędy popełnione na etapie projektowania lub wykonywania konstrukcji – w takim przypadku wzmocnienie konstrukcji ma charakter interwencyjny [42]. W każdej przedstawionej powyżej sytuacji należy przeanalizować aktualny stan obiektu budowlanego i na tej podstawie ocenić, czy konstrukcja nadaje się do rozbiórki, czy ekonomicznie uzasadnione będzie jej wzmocnienie. W przypadku, gdy czynniki praktyczne, ekonomiczne i prawne wskazują, że decyzja o wzmocnieniu konstrukcji jest uzasadniona należy dobrać odpowiednie materiały do wykonania wzmocnienia, aby zminimalizować związane z jego przeprowadzeniem niedogodności oraz koszty.

Niemalże od początku istnienia konstrukcji żelbetowych znane są tradycyjne metody ich wzmacniania. W klasycznym ujęciu metody te najczęściej związane są z wytworzeniem dodatkowych podpór lub zwiększeniem sztywności przekroju poprzez dolożenie dodatkowego zbrojenia stalowego, obetonowania konstrukcji (np. zwiększenie grubości płyty poprzez ułożenie dodatkowej warstwy betonu na jej wierzchniej warstwie lub od spodu) bądź też dolożenia stalowych elementów nośnych (podpory, belki, ściagi, kształtki stalowe itp.). Nawiązują one do znanych zależności z zakresu mechaniki konstrukcji oraz wytrzymałości materiałów, przez co zasadniczo sprowadzają się do jednej z dwóch grup: wzmocnienie poprzez zwiększenie przekroju poprzecznego lub wzmocnienie poprzez zmianę schematu statycznego [42]. Tradycyjne metody wzmacniania konstrukcji cieszą się dużym zaufaniem inżynierów, którzy często mają konserwatywne podejście do zagadnień konstrukcyjnych. Zastosowanie tego typu metod tradycyjnych wiąże się jednak z koniecznością przeprowadzenia rozległych robót budowlanych, które najczęściej powodują długotrwałe wyłączenie budynku, lub jego części, z bieżącej eksploatacji. Stosunkowo niski koszt tradycyjnych wzmocnień konstrukcji żelbetowych, może zostać zmarnotrawiony przez brak możliwości wykorzystania budynku przez dłuższy czas, ponieważ nierzadko koszt konstrukcji oraz jej utrzymania jest o wiele niższy niż koszt produkcji oraz innych czynności, które odbywają się wewnątrz. Dodatkowym problemem tradycyjnych metod wzmacniania jest ich stosunkowo wysoki ciężar własny oraz duże rozmiary wzmocnienia, co może mieć znaczenie z punktu widzenia użytkowego i architektonicznego.

W ramach poszukiwania rozwiązania wyżej opisanych problemów tradycyjnych metod wzmocnień konstrukcji żelbetowych w latach 80-tych XX wieku zaproponowano zastosowanie nowoczesnych

materiałów konstrukcyjnych – kompozytów FRP (ang. *Fibre Reinforced Polymers*), które już wcześniej z powodzeniem wykorzystywano w innych dziedzinach techniki. Kompozyty FRP składają się z wysokowytrzymałych włókien zanurzonych w matrycy polimerowej, której rolę najczęściej pełni żywica epoksydowa będąca również klejem łączącym kompozyt z betonem [8, 11]. W zależności od typu zastosowanych włókien skrót FRP rozszerza się jako: CFRP (włókna węglowe), GFRP (włókna szklane), AFRP (włókna aramidowe), BFRP (włókna bazaltowe), a także wiele innych nazw pochodzących od różnorodnych, mniej popularnych włókien. Przez wiele lat stosowania w praktyce, wzmocnienia kompozytowe FRP potwierdziły swoją skuteczność w inżynierii budowlanej. Ponadto, wraz z obniżaniem kosztów ich produkcji, a w szczególności obniżaniem kosztów produkcji wysokowytrzymałych włókien stanowiących największy udział w koszcie kompozytu, stają się one coraz bardziej konkurencyjne, a przez to coraz powszechniej stosowane. Wzmocnienia kompozytowe FRP charakteryzują się przede wszystkim wysoką wytrzymałością generującą duże przyrosty nośności wzmacnianej konstrukcji oraz dobrą przyczepnością do podłoża, która przyczynia się do dobrego wykorzystania potencjału włókien, które jest szczególnie wysokie w przypadku zastosowania wzmocnienia czynnego (sprężonego). Dodatkowo kompozyty FRP są odporne na uszkodzenia mechaniczne oraz korozyjne działanie czynników środowiskowych, co czyni je bardzo atrakcyjnymi z punktu widzenia konstruktora i inwestora.

Kompozyty FRP nie są pozbawione jednak wad, które w niektórych przypadkach mogą uniemożliwić praktyczne zastosowanie tego systemu wzmocnień. Jedną z głównych wad wynika z zastosowania żywicy epoksydowej jako spoiwa, ponieważ wymaga ona bardzo dokładnego oczyszczenia oraz przede wszystkim osuszenia powierzchni, do której przytwierdza się kompozyt wzmacniający. Osiągnięcie odpowiedniego stopnia oczyszczenia i wysuszenia powierzchni w niektórych przypadkach może być pracochłonne, długotrwałe lub nawet niemożliwe. Najpoważniejszą wadą kompozytów FRP jest jednak ich niska odporność na działanie podwyższonej temperatury. Związane jest to ze stosunkowo niską temperaturą zeszklenia (T_g), wynoszącą około 50°C [74, 76], po przekroczeniu której matryca przechodzi w stan ciekły i nie jest w stanie przenosić obciążeń. W praktyce degradacja właściwości mechanicznych matrycy z żywicy epoksydowej rozpoczyna się już przy przekroczeniu temperatury 30°C. Tak wysoka wrażliwość termiczna matrycy kompozytów FRP uniemożliwia ich zastosowanie, gdy konstrukcja musi wykazać się odpornością pożarową lub gdy środowisko panujące wewnątrz wzmacnianego budynku związane jest z występowaniem podwyższonych temperatur. Należy również zwrócić uwagę, że osiągnięcie temperatury powodującej degradację żywicy epoksydowej może być spowodowane wystawieniem wzmocnienia FRP na ekspozycję słoneczną, co dodatkowo ogranicza możliwość stosowania tego typu wzmocnień na nieosłoniętych, zewnętrznych elementach konstrukcyjnych.

Włókna stosowane w materiałach kompozytowych w większości przypadków nie są wrażliwe na podwyższone temperatury, dlatego badania rozwojowe kompozytowych materiałów wzmacniających skoncentrowały się na matrycy łączącej włókna. W wyniku tych rozważań zaproponowano kompozyt wzmacniający FRCM (ang. *Fabric Reinforced Cementitious Matrix*), który charakteryzuje się znacznie większą

odpornością na podwyższone temperatury w porównaniu z kompozytami FRP [76], co wiąże się z zamianą matrycy polimerowej na matrycę mineralną. Poza zwiększeniem odporności termicznej, zmiana matrycy na mineralną rozwiązała również inny problem związany z kompozytami FRP, który wynika z konieczności dokładnego i pracochłonnego przygotowania podłoża. Kompozyty FRCM, ze względu na swoją mineralną matrycę, nie są wrażliwe na pory, nierówności oraz zawilgocenie powierzchni betonowej. Znacznie mniejsza zdolność penetracyjna matrycy mineralnej w porównaniu z matrycą epoksydową powoduje, że w kompozytach FRCM stosuje się siatki o znacznie większych pustych przestrzeniach między splotami tkaniny, co ma na celu umożliwienie, jak najlepszego pokrycia włókien zaprawą. Pomimo zastosowania tych zabiegów nie wszystkie włókna kompozytów FRCM pokrywane są matrycą, co prowadzi do ich wzajemnego przesuwania powodującego tzw. efekt teleskopowy, który nie pozwala na prawidłowe odkształcanie się wszystkich włókien. Bardziej ciągły mechanizm pracy kompozytów FRCM w porównaniu z kompozytami FRP, w połączeniu z niską wytrzymałością matrycy prowadzącą do przedwczesnego odspojenia kompozytu od wzmacnianego elementu lub poślizgu włókien względem matrycy powoduje obniżenie efektywności ich potencjalnego efektu wzmocnienia. Dodatkowo matryce mineralne są wrażliwe na zmianę współczynnika w/c , który wpływa na właściwości mechaniczne matrycy po stwardnieniu oraz zmienia jej urabialność. Efekt zmiany współczynnika w/c najczęściej wynika z połączenia nowej matrycy mineralnej ze starym betonem wzmacnianej konstrukcji, który przejmuje wilgoć niestwardniałej matrycy, co powoduje lokalny spadek współczynnika w/c . Pomimo tych obecnych wad, kompozyty FRCM wykazują duży potencjał przy wzmacnianiu konstrukcji żelbetowych, w szczególności w aspekcie ich mniejszej niż w przypadku kompozytów FRP wrażliwości na warunki podwyższonej temperatury wynikające z sytuacji pożarowej lub też dużej ekspozycji słonecznej.

Charakterystyka mechanizmu pracy kompozytów FRCM prowadzi do niepełnego wykorzystania potencjału wysokowytrzymałych włókien w nim stosowanych, co odbija się na obniżonej efektywności mechanicznej i ekonomicznej tego typu wzmocnień. W przypadku kompozytów FRP mechanizm zniszczenia najczęściej związany jest z rozerwaniem włókien lub oderwaniem się wzmocnienia wraz z częścią wzmacnianego elementu. Takie zachowanie świadczy o niemalże idealnym wykorzystaniu potencjału włókien, co pozwala na zastosowanie mniejszej ich ilości, co przekłada się na korzyść finansową. Zachodzące w kompozytach FRCM niekorzystne zjawiska, takie jak poślizg włókien, przedwczesne odspojenie kompozytu oraz efekt teleskopowy, mogą jednak zostać ograniczone poprzez stosowanie odpowiednio ukształtowanego zakotwienia [78, 51, 73]. Badania w tym temacie nie są jednak obszerne i nie doprowadziły one do opracowania zakotwienia, które prowadzi do pełnego wykorzystania potencjału włókien, które objawia się ich rozerwaniem, w szczególności przy wykorzystaniu włókien PBO (ang. *p-Phenylene BenzobisOxazole*). Opracowanie zakotwień lub innych modyfikacji kompozytów FRCM, które zmaksymalizują jego wykorzystanie oraz dopasowanie ich do najczęściej wzmacnianych elementów konstrukcyjnych ma kluczowe znaczenie z perspektywy rozwoju tego systemu wzmocnień kompozytowych.

1.2 Przedmiot, cel i zakres opracowania

Przedmiotem niniejszej pracy są badania doświadczalne i analizy teoretyczne związane z jednokierunkowo zginanymi płytami żelbetowymi, wzmocnionymi na zginanie kompozytami PBO-FRCM, które składają się z syntetycznych włókien PBO zatopionych w matrycy mineralnej. Analiza pracy wzmocnień kompozytowych była przeprowadzana pod kątem efektywności wykorzystania siatki kompozytu oraz zwiększania tej efektywności dzięki zastosowaniu odpowiednio zaprojektowanych zakotwień.

Celem zadania badawczego jest określenie wpływu sposobu ukształtowania i zakotwienia siatki zewnętrznego kompozytowego wzmocnienia PBO-FRCM na efektywność wzmocnienia na zginanie płyt żelbetowych. Dodatkowym celem jest również sprawdzenie wpływu wzmocnienia PBO-FRCM oraz jego zakotwienia na odkształcenia płyty jednokierunkowo zginanej w kierunku prostopadłym do głównego kierunku zginania. Poznanie tych zjawisk umożliwi praktyczną optymalizację nośności wzmocnień kompozytowych PBO-FRCM.

Do osiągnięcia celów pracy określono następujący jej zakres:

- sporządzenie przeglądu aktualnego stanu wiedzy,
- przedstawienie celów naukowych pracy,
- przeprowadzenie własnych badań doświadczalnych,
- przeprowadzenie analiz porównawczych z obliczeniami teoretycznymi,
- sformułowanie wniosków,
- wyznaczenie kierunków dalszych badań.

1.3 Oznaczenia literowe przyjęte w pracy

Duże litery łacińskie

E_1 – sztywność płyty w pierwszej fazie pracy,

E_2 – sztywność płyty w drugiej fazie pracy,

E_3 – sztywność płyty w trzeciej fazie pracy,

E_{cm} – wartość średnia modułu sprężystości betonu,

E_f – moduł sprężystości kompozytu po zarysowaniu,

E_f^* – moduł sprężystości kompozytu przed zarysowaniem,

E_s – moduł sprężystości podłużnej stali,

F – obciążenie elementu,

$F_{cc,pl}$ – obciążenie, przy którym zachodzi załamanie wykresu odkształceń betonu ściskanego,

F_{cr} – obciążenie elementu powodujące jego zarysowanie,

$F_{cr0,2}$ – obciążenie elementu powodujące osiągnięcie szerokości rysy 0,2 mm,

$F_{cr0,3}$ – obciążenie elementu powodujące osiągnięcie szerokości rysy 0,3 mm,

$F_{cr0,4}$ – obciążenie elementu powodujące osiągnięcie szerokości rysy 0,4 mm,

$F_{frcm,det}$ – obciążenie, przy którym rozpoczyna się odspojenie kompozytu FRCM od powierzchni betonu,

$F_{frcm,eq}$ – obciążenie, przy którym po odspojeniu kompozytu FRCM zrównują się odkształcenia wzmocnienia i zbrojenia dolnego,

$F_{frcm,max}$ – obciążenie, przy którym zarejestrowano maksymalne odkształcenia kompozytu,

$F_{frcm,pl}$ – obciążenie, przy którym rozpoczyna się nagły przyrost odkształceń wzmocnienia FRCM,

F_{pl} – obciążenie elementu powodujące uplastycznienie głównego zbrojenia,

F_{ult} – obciążenie elementu powodujące jego zniszczenie,

$F_{ult,exp}$ – obciążenie elementu powodujące jego zniszczenie (według badań),

$F_{ult,MES}$ – obciążenie elementu powodujące jego zniszczenie (według obliczeń numerycznych),

$F_{ult,an}$ – obciążenie elementu powodujące jego zniszczenie (według obliczeń analitycznych),

$F_{s,1\%}$ – obciążenie elementu przy którym odkształcenia głównego zbrojenia wynoszą 1%,

F_{SLS} – obciążenie elementu powodujące przekroczenie stanu granicznego użyteczności,

I_{ult} – wskaźnik ciągłości zniszczenia płyt,

$I_{frcm,max}$ – wskaźnik wykorzystania siatki kompozytu FRCM,

L – początkowa długość próbki pręta zbrojeniowego,

L_0 – początkowa długość bazy pomiarowej próbki pręta zbrojeniowego,

M_f – część składowa nośności elementu na zginanie wynikająca ze wzmocnienia FRCM,

M_n – nośność całkowita na zginanie elementu żelbetowego wzmocnionego kompozytem FRCM,

M_s – część składowa nośności elementu na zginanie wynikająca ze stali zbrojeniowej,

S_0 – początkowa powierzchnia przekroju pręta,

T_g – temperatura zeszklenia,

T – punkt przejścia między fazami pracy kompozytu,

W_{ult} – energia zniszczenia elementu.

Małe litery łacińskie

a – ugięcie elementu w środku rozpiętości,

a_{cr} – ugięcie elementu w środku rozpiętości w momencie zarysowania elementu,

a_{pl} – ugięcie ply w środku rozpiętości w momencie uplastycznienia głównego zbrojenia,

a_{ult} – ugięcie płyty w środku rozpiętości w momencie zniszczenia elementu,

d – średnica pręta,

$f_{cm,cube}$ – wartość średnia wytrzymałości na ściskanie betonu wyznaczana na próbkach sześciennych,

$f_{cm,cyl}$ – wartość średnia wytrzymałości na ściskanie betonu wyznaczana na próbkach walcowych,

f_{fe} – rzeczywiste naprężenie rozciągające kompozytu,

f_{fi} – naprężenie rozciągające kompozytu odpowiadające momentowi wykonywania pomiaru,

f_{ft} – naprężenie rozciągające kompozytu odpowiadające punktowi przejściowemu,

f_{fu} – naprężenie rozciągające kompozytu odpowiadające zniszczeniu materiału,

f_u – wytrzymałość stali na rozciąganie,

f_y – granica plastyczności stali przy rozciąganiu.

Litery greckie

$\alpha_{cc,pl}$ – kąt nachylenia wykresu zależności odkształceń betonu ściskanego od obciążenia w końcowej fazie pracy płyty,

ΔX – względny wskaźnik wartości „X” w stosunku do analogicznej wartości w elemencie porównawczym,

ΔF_{ult} – stopień wzmocnienia elementu,

ε_c – odkształcenia betonu,

ε_{fe} – rzeczywiste (efektywne) odkształcenie kompozytu,

ε_{fi} – odkształcenie rozciągające kompozytu odpowiadające momentowi wykonywania pomiaru,

ε_{ft} – odkształcenie rozciągające kompozytu odpowiadające punktowi przejściowemu,

ε_{fu} – odkształcenie rozciągające kompozytu odpowiadające zniszczeniu materiału,

$\varepsilon_{frcm,max}$ – maksymalne zarejestrowane odkształcenie wzmocnienia FRCM,

$\varepsilon_{frcm,max,60}$ – maksymalne zarejestrowane odkształcenie wzmocnienia FRCM przy obciążeniu 60 kN,

$\varepsilon_{frcm,max,100}$ – maksymalne zarejestrowane odkształcenie wzmocnienia FRCM przy obciążeniu 100 kN,

$\varepsilon_{frcm,max,150}$ – maksymalne zarejestrowane odkształcenie wzmocnienia FRCM przy obciążeniu 150 kN,

$\varepsilon_{frcm,max,170}$ – maksymalne zarejestrowane odkształcenie wzmocnienia FRCM przy obciążeniu 170 kN,

$\varepsilon_{frcm,max,210}$ – maksymalne zarejestrowane odkształcenie wzmocnienia FRCM przy obciążeniu 210 kN,

$\varepsilon_{frcm,m,60}$ – uśrednione odkształcenie wzmocnienia FRCM przy obciążeniu 60 kN,

$\varepsilon_{frcm,m,100}$ – uśrednione odkształcenie wzmocnienia FRCM przy obciążeniu 100 kN,

$\varepsilon_{frcm,m,150}$ – uśrednione odkształcenie wzmocnienia FRCM przy obciążeniu 150 kN,

$\varepsilon_{frcm,m,170}$ – uśrednione odkształcenie wzmocnienia FRCM przy obciążeniu 170 kN,

$\varepsilon_{frcm,m,210}$ – uśrednione odkształcenie wzmocnienia FRCM przy obciążeniu 210 kN,

$\varepsilon_{frcm,ult}$ – teoretyczne graniczne odkształcenie kompozytu FRCM powodujące jego zniszczenie,

ε_u – odkształcenia stali zbrojeniowej przy zerwaniu,

ε_s – odkształcenia stali zbrojeniowej,

σ_c – naprężenia w betonie,

σ_s – naprężenia w stali zbrojeniowej.

1.4 Skróty i definicje

| | |
|--------------------------|---|
| Efekt teleskopowy | Efekt występujący w kompozytach FRCM wynikający z nieidealnego połączenia wiązki włókien z matrycą, który objawia się wzajemnym przesuwaniem włókien w wiązce (wzdłuż osi pracy), co ma negatywny wpływ na efektywność pracy kompozytu. |
| FRCM | ang. <i>Fabric Reinforced Cementitious Matrix</i> – Materiał kompozytowy składający się z siatki wykonanej z wysokowytrzymałych włókien oraz matrycy mineralnej. |
| FRP | ang. <i>Fibre Reinforced Polymer</i> – Materiał kompozytowy składający się z wysokowytrzymałych ukierunkowanych włókien oraz matrycy polimerowej, najczęściej z żywicy epoksydowej. |
| Kompozyt | Materiał o niejednorodnej strukturze, złożony z dwóch lub więcej faz o różnych właściwościach, którego właściwości nie są sumą, ani średnią właściwości poszczególnych jego składników. W niniejszej pracy jako kompozyt najczęściej określa się kompozyty złożone z włókien oraz jednorodnej lub quasi-jednorodnej matrycy. |
| Laminat (FRP) | Materiał kompozytowy (FRP) w postaci gotowej do przyklejenia do konstrukcji. Najczęściej występujący w formie taśmy lub kształtki dopasowanej do wzmacnianego elementu. |
| Mata | Tkanina z włókien przeznaczona do zastosowania w kompozycie. Składa się z włókien ułożonych w ciasnym splocie. |
| Matryca | Komponent kompozytu spełniający formę lepiszcza scalającego poszczególne włókna. Jej rolą jest zapewnienie odpowiednich warunków pracy włókien w kompozycie, umożliwienie przekazywania naprężeń między poszczególnymi włóknami oraz zagwarantowanie integralności kompozytu. W opisywanych w niniejszej pracy kompozytach najczęściej stosowane są matryce mineralne wykonane z zaprawy mineralnej oraz matryce polimerowe z żywic epoksydowych. |

| | |
|-------------------------------|--|
| Odspojenie wzmocnienia | Mechanizm zniszczenia wzmocnienia polegający na utracie spójności kompozytu związanej z oddzieleniem się nośnej części kompozytu od wzmacnianego elementu. Odspojenie może zachodzić zarówno na styku kompozyt-element wzmacniający, jak i matryca-włókna. |
| PBO | ang. <i>p-Phenylene BenzobisOxazole</i> – Syntetyczny polimer, z którego wykonuje się włókna o bardzo wysokiej wytrzymałości, przewyższające swoimi parametrami wytrzymałościowymi włókna węglowe, czy nawet aramidowe. Dodatkowo charakteryzują się wysoką odpornością termiczną oraz dobrą współpracą z matrycami mineralnymi. W zastosowaniach innych niż wzmacnianie konstrukcji często stosuje się jego nazwę handlową – Zylon. |
| PBO-FRCM | Kompozyt FRCM stworzony z wykorzystaniem siatki z włókien PBO oraz matrycy mineralnej. |
| Poślizg włókien | Mechanizm zniszczenia wzmocnienia kompozytowego polegający na utracie spójności kompozytu związanej z przesuwaniem się włókien wewnątrz matrycy, co uniemożliwia uzyskanie przez nie odpowiednich odkształceń oraz obniża przenoszone przez nie siły. |
| Siatka | Tkanina z włókien przeznaczona do zastosowania w kompozycie. Składa się z włókien ułożonych w dwóch wzajemnie prostopadłych kierunkach, jednak charakteryzuje się znacznie luźniejszym splotem z wyraźnie widocznymi wolnymi przestrzeniami. |
| SRG | ang. <i>Steel Reinforced Grout</i> – Materiał kompozytowy, podobny do FRCM. Jako fazę włóknistą wykorzystuje się w nim drobną siatkę stalową w miejsce siatki z wysokowytrzymałych włókien. |
| SRP | ang. <i>Steel Reinforced Polymer</i> – Materiał kompozytowy, podobny do FRP. Jako fazę włóknistą wykorzystuje się w nim drobną siatkę stalową w miejsce maty z wysokowytrzymałych włókien. |

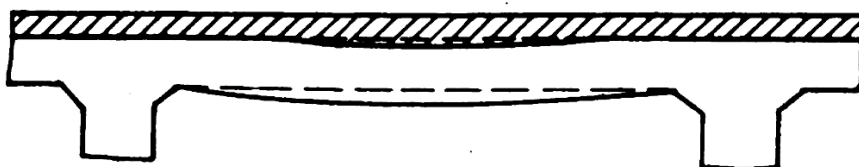
| | |
|--------------------------------|--|
| TRM | ang. <i>Textile Reinforced Mortar</i> – Materiał kompozytowy, podobny do FRCM, jednak zawierający włókna w formie maty zamiast siatki. |
| Włókno | Komponent kompozytu, będący jego głównym elementem nośnym. Najczęściej wykonany z materiałów o bardzo wysokiej wytrzymałości. Jego zadaniem jest przenoszenie naprężeń rozciągających w kompozycie. |
| Wzmocnienie | Szereg zabiegów mający na celu zwiększenie nośności konstrukcji lub poszczególnych jej elementów. Jako wzmocnienie w niniejszej pracy najczęściej rozumie się przytwierdzenie do elementu konstrukcyjnego komponentu, który zwiększa jego nośność. |
| Wzmocnienie kompozytowe | Wzmocnienie konstrukcji wykonane z wykorzystaniem materiałów kompozytowych. |
| Zakotwienie | Sposób zwiększenia nośności wzmocnienia kompozytowego poprzez odpowiednie przytrzymanie jego włókien (lub siatki albo maty). |
| Zaprawa mineralna | Materiał powstający w wyniku połączenia uprzednio przygotowanego (wypalonego i zmielonego) surowca mineralnego z wodą. W wyniku zmieszania tych składników dochodzi do reakcji chemicznych, które powodują proces wiązania, czyli przechodzenia ze stanu ciekłego w stan stały. Zazwyczaj w zaprawach mineralnych występują dodatkowo modyfikatory w postaci drobnego kruszywa, włókien oraz różnego rodzaju dodatków chemicznych poprawiających parametry mechaniczne i fizyczne. |
| Żywica epoksydowa | Tworzywo sztuczne, powstające w wyniku reakcji sieciowania z udziałem ugrupowań epoksydowych. Reakcja ta najczęściej inicjowana jest przez połączenie dwóch składników – żywicy i utwardzacza. |

2. Podsumowanie stanu wiedzy

Dokonano przeglądu literatury krajowej i zagranicznej pod kątem tematów związanych ze wzmacnianiem płyt żelbetowych oraz zastosowaniem nowoczesnych materiałów kompozytowych do wzmacniania konstrukcji żelbetowych. Szczególną uwagę zwrócono na tematykę istotną z punktu widzenia współpracy materiałów kompozytowych ze zginanymi żelbetowymi elementami płytowymi.

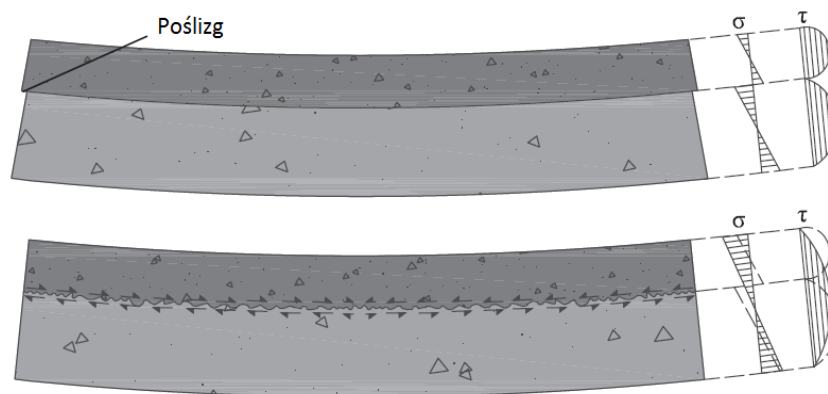
2.1 Tradycyjne metody wzmacniania płyt żelbetowych

Wzmacnianie płyt żelbetowych jest jednym z podstawowych wyzwań inżynierskich, którego wystąpienie może mieć wiele przyczyn. Może być ono spowodowane potrzebą odzyskania pierwotnej nośności elementu, której utrata może wynikać zarówno z degradacji i korozji materiałów, z których został on wykonany, jak i z uszkodzeń mechanicznych konstrukcji. W tym przypadku konieczność wzmocnienia jest najczęściej połączona z innymi działaniami o charakterze naprawczym. Istotnym jest fakt, iż wówczas przyczyna wzmacniania konstrukcji bardzo często uwidacznia się przez zauważalne nawet dla niewprawnego obserwatora przekroczenia rozwarłośc rys, widoczną korozję lub też rzadziej przez przekroczenia ugięć elementów. W innych sytuacjach konieczność wzmacniania konstrukcji spowodowana jest zmianami charakteru użytkowania konstrukcji i związanym z nimi zwiększeniem obciążeń stałych i zmiennych. Zaplanowany charakter oraz nadzór inżynierski nad tego typu przedsięwzięciami powodują, że zagrożenia z nimi związane są stosunkowo niskie. Dużo bardziej niebezpieczną sytuacją, która również jest przyczyną konieczności wzmacniania konstrukcji, są błędy projektowe i wykonawcze [42]. Mają one bardziej ukryty i nieprzewidywalny charakter, co może powodować wiele problemów na etapie rozpoznania i projektowania oraz wykonywania wzmocnienia. W przypadku starych konstrukcji żelbetowych, z czasów gdy mieszanka betonowa często była przygotowywana na budowie, bardzo często uwidacznia się zaniżenie wytrzymałości betonu w stosunku do projektu [44], co jest efektem niskiej kultury technicznej ówczesnych wykonawców. Wzmocnienie może być również konieczne ze względu na błędnie wykonane prowizoryczne naprawy wad konstrukcji powstałych w czasie budowy. W przypadku płyt żelbetowych uzupełnianie krzywizny górnej powierzchni płyty wynikającej z błędnego podparcia szalunków, prowadzić może do zwiększenia balastu. Powoduje to uzyskanie efektu w postaci wyrównania górnej powierzchni płyty, jednak kosztem zwiększenia krzywizny jej dolnej powierzchni, co przedstawiono na rysunku 1 [53].



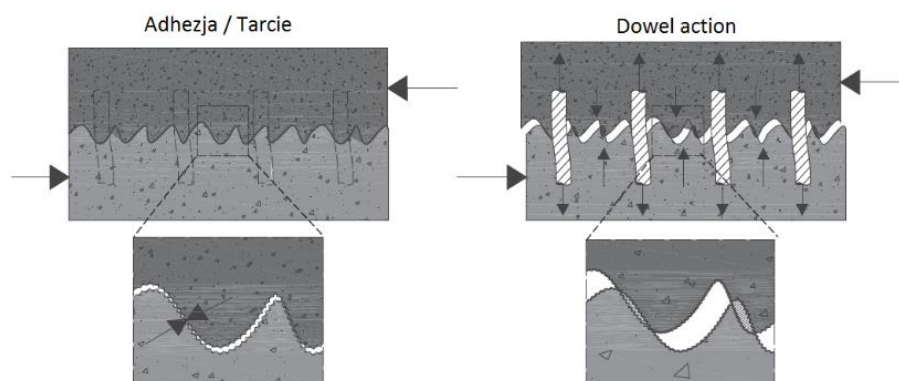
Rys. 1. Wyrównanie górnej powierzchni ugiętej płyty powodujące przeciążenie płyty [53]

Specyfika wzmocnienia konstrukcji żelbetowej musi być dopasowana do charakteru wzmacnianego elementu oraz musi uwzględniać wymagania konstrukcyjne i architektoniczne konstrukcji. W każdym przypadku należy również pamiętać, że zakres wzmocnienia oraz stosowane w tym celu metody powinny zależeć i wprost nawiązywać do oceny bezpieczeństwa i niezawodności wzmacnianej konstrukcji [62]. Typowo wzmocnienia dzielą się na dwie grupy: wzmocnienie przez zmianę schematu statycznego (wytworzenie dodatkowych sztywnych lub sprężystych podpór) oraz wzmocnienie przez zwiększenie przekroju poprzecznego (obetonowanie elementu, dołożenie dodatkowego zbrojenia lub przytwierdzenie dodatkowych zewnętrznych elementów nośnych) [42]. Specyfika geometrii oraz typowego zbrojenia płyt żelbetowych w większości przypadków uniemożliwia wytworzenie dodatkowych podpór i zmianę jej schematu statycznego, co zdecydowanie zmniejsza spektrum dostępnych metod wzmocnień. Dodatkowo wzmacnianie przez zwiększanie przekroju poprzecznego płyt żelbetowych jest również ograniczone, ponieważ jedynym parametrem geometrycznym przekroju płyty podatnym na zwiększenie jest jej grubość. Najłatwiejszym oraz najczęściej wykorzystywanym sposobem wzmocnienia płyt żelbetowych jest dobetonowanie płyty od góry na całej jej powierzchni. Przy takim wzmocnieniu należy zwrócić szczególną uwagę na uwzględnienie współpracy „starej” oraz „nowej” warstwy betonu płyty. Ma to związek z umożliwieniem przenoszenia naprężeń stycznych τ na styku warstw, co pozwala na uzyskanie większej wynikowej sztywności elementu niż ma to miejsce w przypadku niezależnie pracujących warstw o identycznej sumarycznej grubości. Ilustrację tego mechanizmu przedstawiono na rysunku 2.



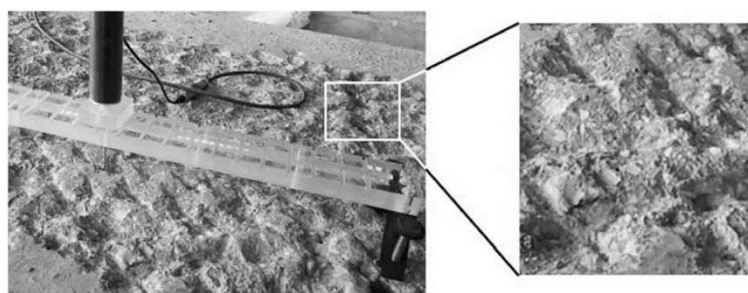
Rys. 2. Praca płyt wzmocnionych przez dobetonowanie od góry bez zespolenia warstw (wyżej) oraz z zespoleniem warstw (niżej) [33]

Współpracę taką uzyskuje się poprzez działanie trzech podstawowych mechanizmów: adhezji wynikającej z wiązań chemicznych i fizycznych między warstwami, tarcia między warstwami wynikającego z szorstkości powierzchni oraz ewentualnie występującego efektu „dowel action”, który uwarunkowany jest występowaniem łączników warstw [33]. Schemat działania tych mechanizmów przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Mechanizm adhezji i tarcia (po lewej) oraz efekt „dowel action” (po prawej) [33]

Przy niewystarczającym zespoleniu nowej warstwy nadbetonu z istniejącą płytą stosuje się różne zabiegi mające na celu zwiększenie naprężeń stycznych możliwych do przeniesienia przez wspomniane wcześniej mechanizmy. Najczęściej stosowanymi metodami pozwalającymi na zwiększenie nośności tego połączenia jest zwiększenie szorstkości istniejącej płyty przez naruszenie wierzchniej warstwy betonu, groszkowanie, piaskowanie, śrutowanie, wykonanie odpowiednich nacięć lub traktowanie betonu strumieniem wody pod ciśnieniem usuwającym zaczyn cementowy i odkrywającym kruszywo, co w założeniu ma doprowadzić do zwiększenia sił tarcia i adhezji pomiędzy warstwami. W przypadku gdy konieczne jest włączenie do współpracy efektu „dowel action” stosuje się specjalne wklejane w istniejącą płytę pionowe łączniki mechaniczne [9, 33, 82]. Przykłady wykonania tego typu zespoleń przedstawiono na rysunkach 4 i 5.

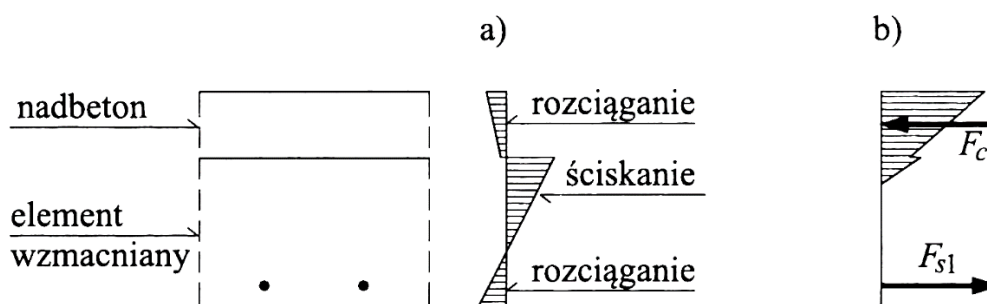


Rys. 4. Zwiększenie szorstkości podłoża wzmacnianej płyty [33]



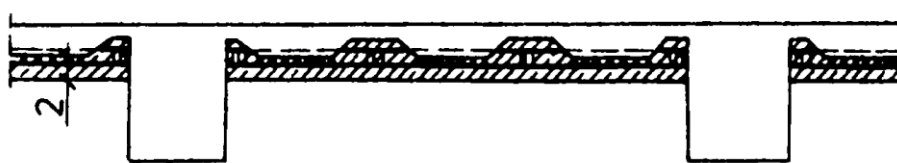
Rys. 5. Łączniki mechaniczne zespalające warstwy płyty [9]

W kontekście połączenia nowej wzmacniającej warstwy płyty z istniejącym elementem, ważnym aspektem jest uwzględnienie wpływu odkształceń skurczowych nowej warstwy płyty [9, 82]. Odkształcenia skurczowe świeżego betonu warstwy wzmacniającej są hamowane przez istniejącą płytę, w której proces skurczu nie zachodzi już tak szybko, czego skutkiem jest powstanie dodatkowych naprężeń w zespoleniu. W wyniku skurczu warstwy wzmacniającej nadbeton jest rozciągany, a element wzmacniany ściskany, co ma swój skutek w końcowych wartościach odkształceń w fazie faktycznej pracy elementu, co przedstawiono na rysunku 6. Naprężenia skurczowe muszą być również brane pod uwagę w kontekście obliczania zbrojenia wzmacniającego nadbetonu. Im starszy jest wzmacniany element, tym większa część jego skurczu będzie już zrealizowana, co będzie skutkowało większą różnicą odkształceń skurczowych elementu wzmacnianego i nadbetonu. Największa koncentracja naprężeń skurczowych zachodzi typowo w strefach przypodporowych, dlatego należy zwrócić na nie szczególną uwagę przy obliczaniu łączników zespalających [82].



Rys. 6. Naprężenia podłużne w płycie wzmocnionej nadbetonem:
a) od skurczu, b) od skurczu i oddziaływań zewnętrznych [82]

Przy stosowaniu tradycyjnych metod wzmacniania konstrukcji żelbetowych istotne jest zwrócenie uwagi na odpowiednie oczyszczenie powierzchni wzmacnianej płyty oraz oczyszczenie jej zbrojenia [9]. Tego typu przygotowania są szczególnie istotne w przypadku wzmacniania elementów wiekowych, które noszą ślady efektów korozyjnego działania środowiska, ponieważ mogą one pogorszyć jakość zespolenia, które jest kluczowe do odpowiedniej pracy wzmocnionego elementu. Jako wzmacniającą warstwę płyty można zastosować również beton zbrojony włóknami (fibrobeton), którego parametry mechaniczne, szczególnie przy rozciąganiu, pozwalają na ograniczenie lub eliminację konieczności stosowania dodatkowego zbrojenia w postaci wkładek stalowych [42]. Dla elementów, w których niemożliwy jest dostęp do konstrukcji płyty od góry, co spowodowane może być występowaniem nienaruszalnych warstw posadzek lub obecnością trudnych do przeniesienia maszyn, możliwe jest również wzmocnienie płyty od dołu. W takim przypadku konieczne jest lokalne usunięcie otuliny zbrojenia podłużnego oraz przyspawanie dodatkowych podłużnych krótkich prętów zbrojeniowych w poszczególnych przęsłach, które następnie pokrywa się warstwą betonu natryskowego o grubości co najmniej 2 cm [52]. Szkic tego typu wzmocnienia przedstawiono na rysunku 7. Przy wzmacnianiu płyty od dołu należy również pamiętać o odpowiednim oczyszczeniu i przygotowaniu wzmacnianej powierzchni.



Rys. 7. Płyta żelbetowa wzmocniona metodą tradycyjną od dołu [52]

Zastosowanie tradycyjnych metod wzmacniania bardzo często wiąże się z koniecznością przeprowadzenia rozbudowanych prac, które prowadzą do wyłączenia budynku (lub jego części) z użytkowania. Dla niektórych inwestorów taka sytuacja może okazać się niedopuszczalna ze względu na koszty związane z koniecznością przerwania normalnego sposobu wykorzystania budynku lub ewentualną czasową przeprowadzką. Dodatkowo wadą tradycyjnych wzmocnień płyt żelbetowych jest znaczne zwiększenie gabarytu wzmocnianego elementu, co może spowodować niespełnienie wymagań technicznych, w szczególności gdy projekt architektoniczny istniejącego budynku został sporządzony blisko ich granicznych wartości wysokości kondygnacji w świetle stropów. Duży gabaryt wzmocnienia wykonanego z betonu związany jest również ze znacznym zwiększeniem obciążeń stałych w budynku, co doprowadzić może też do konieczności wzmocnienia innych elementów konstrukcji m. in. belek, słupów, czy też fundamentów. Tego typu wady ograniczane są przy zastosowaniu kompozytowych wzmocnień konstrukcji żelbetowych, które opisane zostały w dalszej części pracy.

2.2 Ogólna charakterystyka materiałów kompozytowych

Gwałtowny rozwój materiałów kompozytowych w ostatnich 10-leciach spowodował, że stają się one coraz bardziej popularne w różnych dziedzinach techniki. Bardzo wysokie wartości ich parametrów mechanicznych oraz zalety znane były już od dawna, jednak wysoki koszt ich wytworzenia ograniczał ich zastosowanie do wąskiego zakresu dziedzin nowoczesnej techniki. Wraz z rozwojem metod wytwórczych oraz rosnącą skalą produkcji zredukowano ich cenę, co umożliwiło zastosowanie nowoczesnych materiałów kompozytowych w innych dziedzinach – w tym w budownictwie. Kompozyty są szeroką grupą materiałów, w której skład wchodzi wszystkie materiały o niejednorodnej strukturze, złożone z dwóch lub więcej faz o różnych właściwościach, którego wynikowe parametry fizyczne i mechaniczne nie są sumą ani średnią właściwości poszczególnych jego składników. Tak szeroka i ogólna definicja powoduje, że do grupy materiałów kompozytowych, poza nowoczesnymi wysokowytrzymałymi materiałami, można zaliczyć m.in. beton, żelbet, płyty OSB, czy też glinę zmieszaną ze słomą. Komercyjny i marketingowy sukces hasła „kompozyt” spowodował rozmycie oraz dewaluację jego znaczenia, co powoduje wiele przekłamań przy jego wykorzystaniu, w szczególności przez osoby nieobite technicznie. We wzmacnianiu konstrukcji budowlanych szczególne znaczenie mają kompozyty złożone z jednorodnej lub quasi-jednorodnej matrycy połączonej z włóknami o wysokiej wytrzymałości, które przedstawione zostaną szczegółowo w dalszej części niniejszego podrozdziału. Istnieje również wiele innych materiałów kompozytowych

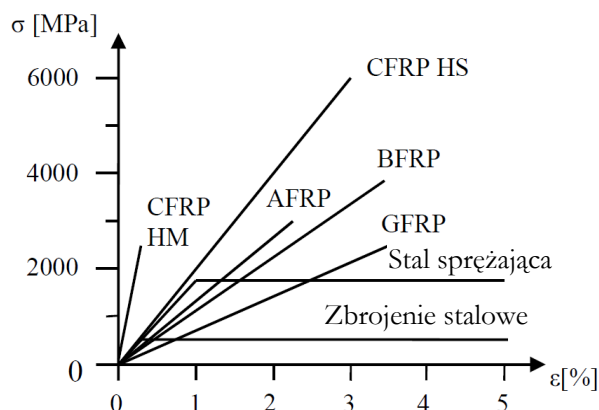
o zróżnicowanych zastosowaniach, do których zaliczają się m. in. mikrokompozyty, nanokompozyty, stopy strukturalne, kompozyty hybrydowe, jednak z powodu ich niskiego stopnia powiązania z tematem rozprawy zostały one pominięte.

2.2.1 Kompozyty na bazie matrycy polimerowej

Kompozyty na bazie matryc polimerowych, najczęściej opisywane skrótem FRP (ang. *Fibre Reinforced Polymer*), wykorzystywane są do wzmacniania konstrukcji żelbetowych już od wczesnych lat 80-tych XX wieku [8]. Kompozyty FRP składają się z dwóch podstawowych składników – matrycy polimerowej, wykonanej najczęściej z żywicy epoksydowej oraz wysokowytrzymałych włókien. Matryca polimerowa pełni w kompozycie funkcję kleju zespalającego poszczególne włókna oraz pozwala na przytwierdzenie wzmocnienia kompozytowego do powierzchni wzmacnianego elementu. Dodatkowo umieszczenie włókien w stwardniałej matrycy polimerowej powoduje utrwalenie kierunku ich ułożenia oraz chroni je przed uszkodzeniami mechanicznymi i negatywnymi wpływami środowiskowymi. Włókna kompozytu FRP wykorzystywane są głównie do przenoszenia obciążeń, dlatego ważne są ich wysokie parametry mechaniczne, a w szczególności wysoka wytrzymałość na rozciąganie i wysoki moduł Younga. Niemniej istotna jest również niska zmienność tych parametrów pomiędzy poszczególnymi próbkami oraz stałość wymiarów typowego włókna. W kompozytach FRP najczęściej wykorzystuje się włókna: węglowe (CFRP), szklane (GFRP), aramidowe (AFRP) i bazaltowe (BFRP) [71, 81]. Możliwości stosowania innych włókien w tego typu kompozytach są praktycznie nieograniczone, jednak nie zawsze uzasadnione z ekonomicznego i praktycznego punktu widzenia. Podstawowe parametry mechaniczne włókien najczęściej wykorzystywanych w kompozytach FRP w porównaniu ze stalą przedstawiono w tabeli 1, a na rysunku 8 graficznie zinterpretowano ich zachowanie przy rozciąganiu. Dane te dotyczą kompozytu FRP wykonanego z wykorzystaniem poszczególnych włókien.

Tabela 1. Podstawowe parametry włókien wykorzystywanych w kompozytach FRP [71]

| Typ materiału | | Gęstość | Moduł Younga | Wytrzymałość na rozciąganie | Wydłużenie przy zerwaniu |
|------------------|--------------------|----------------------|--------------|-----------------------------|--------------------------|
| | | [kg/m ³] | [GPa] | [MPa] | [%] |
| Włókno węglowe | HS (High Strength) | 1800 | 230 | 2480 | 11,00 |
| | HM (High Modulus) | 1900 | 370 | 1790 | 0,50 |
| Włókno szklane | Typ-E | 2540 | 72 | 3400 | 2,12 |
| | Typ-S | 2530 | 89 | 4600 | 1,93 |
| Włókno aramidowe | Kevlar 29 | 1440 | 83 | 2920 | 3,50 |
| | Kevlar 49 | 1440 | 124 | 3600 | 2,90 |
| Włókno bazaltowe | | 2700 | 90 | 4000 | 2,25 |
| Stal | | 7850 | 200 | 500 | 2,50 |



Rys. 8. Zależność naprężenia od ugięcia przy rozciąganiu kompozytów FRP z różnymi typami włókien w porównaniu do stali zbrojeniowej i sprężającej [71]

W przypadkach, w których uzyskanie wysokiego modułu Younga kompozytu nie jest istotne, najbardziej ekonomicznym rozwiązaniem jest zastosowanie kompozytów GFRP. Poza stosunkowo niską ceną charakteryzują się wszystkimi zaletami materiałów kompozytowych FRP, jednak ze względu na właściwości szkła nie są odporne na działanie środowiska alkalicznego. Nieco lepszymi parametrami wytrzymałościowymi charakteryzują się włókna bazaltowe, które dodatkowo są bardziej odporne na podwyższoną temperaturę, jednak jeszcze bardziej uwiadamia się w nich problem przeciwstawiania się środowisku alkalicznemu. Najwyższym stosunkiem wytrzymałości do masy wśród przedstawionych włókien charakteryzują się syntetyczne włókna aramidowe, które wymagają jeszcze większej, w odniesieniu do innych typów włókien, ochrony przed działaniem warunków środowiskowych oraz ochroną przed światłem UV powodującym ich degradację. Włókna węglowe, najbardziej odporne na warunki środowiskowe spośród wcześniej wymienionych, charakteryzują dodatkowo bardzo wysokie parametry mechaniczne (wytrzymałość na rozciąganie i moduł Younga). Ich największą wadą jest wysoki koszt produkcji, przekładający się na wysoką cenę końcową materiału [70, 71].

Kompozyty FRP we wzmacnianiu konstrukcji żelbetowych stosowane są najczęściej w trzech postaciach: taśm, kształtek i mat. Przykłady wzmacniania konstrukcji z wykorzystaniem opisanych wyżej kompozytów FRP przedstawiono na rysunku 9.



Rys. 9. Przykłady wykorzystania kompozytów FRP (od lewej): taśma, kształtka, mata [100]

Taśmy FRP są gotowym kompozytem w formie wstęgi. Włókna w taśmach najczęściej rozmieszczane są w jednym kierunku, wzdłuż osi podłużnej taśmy. Prostoliniowe włókna zatapiane są w matrycy polimerowej z żywicy epoksydowej, która następnie poddawana jest zabiegom utwardzającym. Po zakończeniu procesu produkcyjnego otrzymuje się materiał, w którym włókna są całkowicie chronione przez matrycę oraz ułożone niemalże idealnie w osi laminatu, co sprawia, że wzmocnienie wykonane z wykorzystaniem taśmy jest powtarzalne ze względu na geometrię oraz właściwości mechaniczne. Taśmy przytwierdza się do wzmacnianego elementu z wykorzystaniem klejów na bazie żywic epoksydowych, które są częścią systemu dostarczanego przez producenta. W przypadku elementów o skomplikowanej geometrii (np. przy wzmacnianiu belek na ścinanie) stosuje się kształtki FRP. Pozwalają one na wzmacnianie elementów o załamanej powierzchni, np. w przypadku wzmocnienia belek na ścinanie, gdzie stosuje się strzemiona FRP. Podobnie jak w przypadku taśm stanowią one gotowy kompozyt, który należy jedynie przytwierdzić do wzmacnianej konstrukcji. Maty są arkuszami tkaniny z wysokowytrzymałych włókien, które ułożone są w dwóch, najczęściej prostopadłych do siebie kierunkach. Mata nie jest kompozytem w rozumieniu wcześniej przedstawionych definicji, a jedynie jego składnikiem, ponieważ jest ona pozbawiona matrycy. Kompozyt z maty wytwarza się w miejscu jego finalnego przytwierdzenia poprzez zaimpregnowanie arkusza z włókien żywicą epoksydową, która przenikając przez jego strukturę powoduje jego przytwierdzenie do powierzchni, jednocześnie impregnując włókna. Kompozyty wykonane z mat najczęściej stosuje się w przypadkach, gdy zastosowanie taśm lub kształtek jest niemożliwe lub utrudnione, co ma miejsce w przypadku elementów o złożonej geometrii, przy dużych powierzchniach wzmocnienia lub w przypadkach, w których zastosowanie przygotowanych wcześniej laminatów jest nieuzasadnione technologicznie.

Przed aplikacją wzmocnienia kompozytowego FRP należy dokonać czynności przygotowawczych pozwalających na poprawną pracę wzmocnienia. Szczególnie istotne jest odpowiednie przygotowanie powierzchni polegające na jej dokładnym zeszlifowaniu lub wypiaskowaniu oraz na uzupełnieniu porów, raków i ubytków zaprawą naprawczą lub żywicą epoksydową. W przypadku występowania luźnych fragmentów betonu należy je usunąć i uzupełnić, pamiętając także o odpowiednim zabezpieczeniu antykorozyjnym odkrytych prętów zbrojeniowych przed wypełnieniem ubytków. Bezpośrednio przed aplikacją kompozytu FRP na powierzchnię betonu należy oczyścić ją z pyłu za pomocą szczotek i odkurzacza, a następnie upewnić się, że nie jest ona zatłuszczona. Dodatkowo konieczne jest sprawdzenie wilgotności powierzchni betonu, która nie powinna przekraczać wartości 4% wilgotności wagowo. Metoda aplikacji kompozytu jest zależna od stosowanego typu wzmocnienia. W przypadku mat, aplikację rozpoczyna się poprzez nałożenie warstwy uprzednio przygotowanego kleju epoksydowego na wzmacnianą powierzchnię betonu, do której następnie przykładą się matę, którą należy dobrze docisnąć na całej powierzchni przylegania, a następnie pokryć ją dodatkową zewnętrzną warstwą żywicy epoksydowej. Jeżeli wzmocnienie wykonywane jest z taśm lub kształtek, klej epoksydowy nakłada się na wzmacnianą powierzchnię betonu, ale też na wewnętrzną powierzchnię taśmy lub kształtki (od strony przylegania do powierzchni betonu). W przypadku kształtek i taśm, w przeciwieństwie do mat, nie stosuje się

dodatkowej warstwy kleju na zewnętrznej stronie wzmocnienia. Po zastygnięciu kleju należy skontrolować jakość wykonanego wzmocnienia oraz odczekać około 48 godzin, aż do osiągnięcia pełnej wytrzymałości systemu. Konieczne jest chronienie laminatów przed destruktywnym działaniem promieniowania UV zgodnie z wytycznymi producenta materiału. W przypadku nanoszenia na laminaty tynków należy pokryć je warstwą szepną na bazie kleju epoksydowego oraz piasku kwarcowego [93, 94].

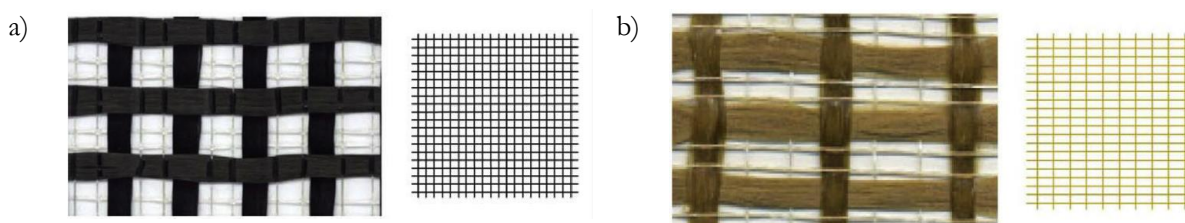
Na podstawie wielu opisanych w literaturze badań można stwierdzić, że laminaty kompozytowe FRP sprawdzają się dobrze przy zwiększaniu nośności różnych elementów konstrukcyjnych, w tym: belek na zginanie [7, 17, 59], belek na ścinanie [57, 79], płyt na zginanie [31, 65, 67], belek wysokich/tarcz [41, 49], ścian [80] oraz elementów ściskanych [75]. O wysokiej sprawności kompozytów FRP we wzmacnianiu konstrukcji żelbetowych świadczą najczęściej obserwowane mechanizmy zniszczenia, które związane są z oderwaniem kompozytu z warstwą otuliny betonowej lub odspojenia kompozytu w obszarach przypodporowych przy wzmacnianiu na zginanie [66]. Dodatkowo możliwe jest zwiększenie efektywności wykorzystania kompozytów FRP w formie taśm poprzez ich sprężenie, co przekształca wzmocnienie pasywne we wzmocnienie aktywne, które pozwala dodatkowo zmniejszyć ugięcia elementów oraz szerokość rys [58].

Poza bardzo dobrymi właściwościami mechanicznymi, kompozyty FRP charakteryzują się kilkoma wadami użytkowymi. Opisana wcześniej technologia aplikacji wzmocnień wymaga wysokiej precyzji przygotowania powierzchni wzmacnianego elementu oraz kontroli wilgotności podłoża, co w niektórych przypadkach jest utrudnione lub nawet niemożliwe. Dodatkowo powierzchnia kompozytów FRP nie zapewnia odpowiedniej przyczepności dla warstw wykończeniowych, co utrudnia ich aplikację. Ma to kluczowe znaczenie w przypadku wzmacniania konstrukcji zabytkowych, gdzie wzmocnienie powinno zostać wykonane w sposób niewidoczny i niezaburzający estetyki konstrukcji. Najważniejszą wadą wzmocnień kompozytowych FRP jest ich niska odporność na warunki podwyższonej temperatury związane z przejściem ich matrycy ze stanu stałego w stan ciekły. Najpowszechniej wykorzystywaną matrycą w kompozytach FRP są substancje na bazie żywic epoksydowych, które charakteryzują się stosunkowo niską temperaturą zeszklenia (T_g), która według producentów wynosi około 50°C [95, 96]. Po przekroczeniu progu temperatury zeszklenia matryca rozpoczyna proces przechodzenia ze stałego stanu skupienia w stan częściowego uplastycznienia, tracąc przy tym swoje właściwości mechaniczne oraz zdolność do zespalania włókien. Powoduje to sytuację, w której wzmocnienie ma ograniczoną zdolność do przenoszenia obciążeń, przy jednoczesnym zwiększeniu odkształceń kompozytu. W typowych warunkach osiągnięcie temperatury rzędu 50°C nie jest sytuacją częstą, jednak należy zwrócić na to uwagę w konstrukcjach przemysłowych lub w konstrukcjach, które mają wysokie wymagania przeciwpożarowe lub wysoką ekspozycję na światło słoneczne powodujące nagrzewanie powierzchni kompozytu. Przeprowadzone badania wskazują jednak, że degradacja właściwości mechanicznych żywic epoksydowych wykorzystywanych w kompozytach FRP zachodzi już przy przekroczeniu progu temperatury 30°C [74, 76]. Badania ściskanych betonowych próbek walcowych wzmocnionych na ściskanie poprzez owinięcie matą z włókna węglowego na żywicy

epoksydowej wykazały, że podniesienie temperatury próbek z 40°C do 60°C i 80°C powoduje spadek nośności elementów o około 10% na każde 20°C podwyższenia temperatury. Dodatkowo pomiędzy temperaturami 40°C i 80°C obserwowano spadek maksymalnych zarejestrowanych odkształceń kompozytu o około 50% [76], co potwierdza degradację właściwości kompozytów FRP nawet przy niewielkich wzrostach temperatur, które mogą wystąpić wskutek np. ekspozycji słonecznej.

2.2.2 Kompozyty na bazie zaprawy mineralnej

W odpowiedzi na opisane w poprzednim podrozdziale wady kompozytów FRP zaproponowano koncepcję kompozytów FRCM (ang. *Fabric Reinforced Cementitious Matrix*). Bazuje ona na zamianie matrycy z żywicy epoksydowej na matrycę mineralną, która charakteryzuje się przede wszystkim większą odpornością termiczną [8]. Ze względu na właściwości nieścwieżającej matrycy mineralnej, która ma znacznie gorsze zdolności penetracyjne, w porównaniu z żywicą epoksydową, konieczna była zmiana rozkładu włókien w kompozycie. W kompozytach FRCM najczęściej stosuje się dwukierunkowe lub jednokierunkowe siatki z rozdzielonymi wiązkami włókien. Rozdzielenie wiązek włókien i pozostawienie wolnych przestrzeni ma na celu zwiększenie możliwości penetracji matrycy mineralnej oraz jak najlepsze pokrycie każdej z wiązek włókien. Dodatkowo wolne przestrzenie między wiązkami włókien pozwalają na możliwość połączenia ze sobą warstw matrycy po obu stronach siatki, zapewniając przy tym odpowiednie warunki pracy kompozytu [11, 68]. Na rysunku 10 przedstawiono zdjęcia typowych siatek wykorzystywanych w kompozytach FRCM: dwukierunkową siatkę o identycznych rozstawach splotów w obu kierunkach (a) oraz siatkę dwukierunkową, w której sploty na jej głównym kierunku są zdecydowanie gęściej rozmieszczone niż w kierunku poprzecznym (b). Na fotografiach widoczna jest również pomocnicza osnowa, która ma znikomy wpływ na nośność, a jej rola sprowadza się do utrzymywania geometrii siatki przed umieszczeniem jej w matrycy mineralnej.



Rys. 10. Przykłady typowych siatek wykorzystywanych w kompozytach FRCM (opis w tekście) [11]

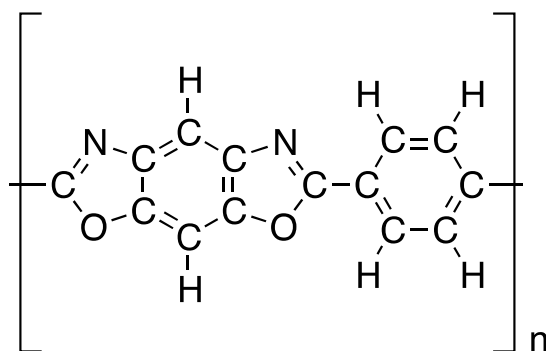
Siatki wykorzystywane w kompozytach FRCM mogą być wykonane z różnych materiałów, często znanych i wykorzystywanych również w kompozytach FRP, takich jak np. włókno szklane, włókno węglowe, czy włókno bazaltowe [18]. Poza typowymi znanymi wcześniej typami włókien, w kompozytach FRCM wykorzystuje się również nowoczesne włókna syntetyczne wykonane z materiału o nazwie PBO (*p-Phenylene*

BenzobisOxazole) [20, 55]. W tabeli 2 przedstawiono porównanie podstawowych właściwości wytrzymałościowych włókien węglowych oraz włókien PBO wykorzystywanych w kompozytach FRCM.

Tabela 2. Porównanie podstawowych właściwości mechanicznych włókien PBO oraz włókien węglowych wykorzystywanych w kompozytach FRCM [20, 32, 55, 86, 98, 101, 102]

| Typ materiału | Moduł Younga | Wytrzymałość na rozciąganie | Wydłużenie przy zerwaniu |
|--------------------------------|--------------|-----------------------------|--------------------------|
| | [GPa] | [MPa] | [%] |
| Włókno węglowe (wg producenta) | 250 | 4900 | 1,9 |
| Włókno węglowe (wg badań) | 240-257 | 3850-4800 | 1,5-3,25 |
| PBO (wg producenta) | 270 | 5800 | 2,15 |
| PBO (wg badań) | 271-276,6 | 4980-5391 | 1,8-1,97 |

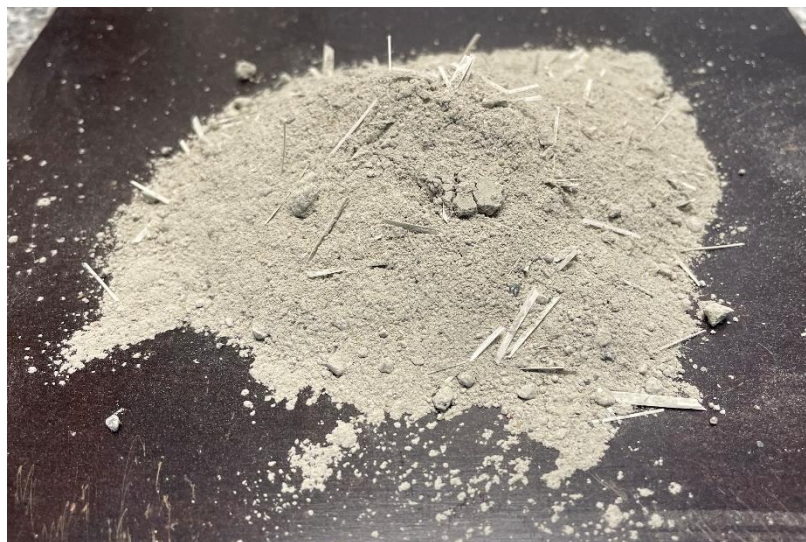
Włókna PBO charakteryzują się przede wszystkim bardzo wysoką wytrzymałością na rozciąganie w porównaniu z innymi włóknami oraz zdolnością do wytworzenia chemicznych wiązań z zaprawą mineralną. Uzyskano ją dzięki strukturze polimeru przedstawionego na rysunku 11, z którego wykonane są włókna PBO [96]. Dodatkowo włókna PBO mają ograniczoną podatność na pękanie oraz bardzo wysoką wytrzymałość na temperatury pożarowe, a ich budowa pozwala na uzyskanie wysokiej zgodności chemicznej z matrycami mineralnymi [55]. Opisane właściwości włókien PBO, a w szczególności podwyższona odporność na wysokie temperatury powodują, że kompozyt FRCM z włóknami PBO jest w stanie pokryć niedoskonałości kompozytów FRP we wzmacnianiu konstrukcji.



Rys. 11. Chemiczna struktura polimeru włókien PBO, na podstawie: [97]

Matryce stosowane w kompozytach FRCM bazują głównie na spoiwach hydraulicznych, najczęściej cementowych. W celu zapewnienia lepszej współpracy z podłożem i siatkami kompozytu, lepszej urabialności mieszanki oraz zmniejszenia spękań skurczowych powierzchni są one często modyfikowane różnymi dodatkami i domieszkami chemicznymi, kruszywem oraz włóknami. Dokładne składy mieszanek do wytworzenia matrycy mineralnej nie są udostępniane przez producentów, ponieważ stanowią element

systemowego wzmocnienia kompozytowego chronionego patentami. Na rysunku 12 przedstawiono typową suchą zaprawę z włóknami polimerowymi wykorzystywaną przy tworzeniu kompozytów FRCM (nazwa handlowa - *Ruredil X Mesh M750 Mortar*), a w tabeli 3 przedstawiono podstawowe właściwości mechaniczne i fizyczne przykładowych zapraw mineralnych wykorzystywanych w badaniach.



Rys. 12. Sucha zaprawa do kompozytów FRCM

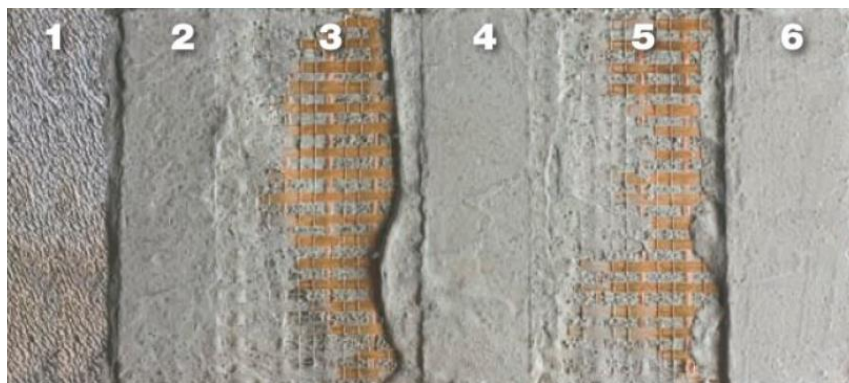
Tabela 3. Właściwości zapraw wykorzystywanych w kompozytach FRCM [15, 20, 21, 25, 55, 68, 78, 98]

| Właściwość | Wartość |
|---|--------------------------------|
| Ciężar właściwy świeżo ułożonej zaprawy | $1,50 \pm 0,05 \text{ g/cm}^3$ |
| Wytrzymałość na ściskanie | 2,55 – 4,75 MPa |
| Wytrzymałość na rozciąganie | 16,1 – 30,4 MPa |
| Moduł Younga | 6 – 6,144 GPa |

W literaturze często zamiennie wykorzystywane są inne nazwy kompozytów FRCM, takie jak TRM (ang. *Textile Reinforced Mortar*), TRC (ang. *Textile Reinforced Concrete*), czy MBC (ang. *Mineral Based Composite*) [8]. Wszystkie wymienione wyżej materiały kompozytowe bazują na identycznych założeniach, a ich zróżnicowane nazewnictwo wynika przede wszystkim z odwoływania się do innych pozycji literaturowych. Pierwszym oficjalnym dokumentem opisującym kompozyty na bazie zaprawy mineralnej był raport wydany przez RILEM [12, 48], w którym nazwano tego typu materiały jako TRC. Najczęściej wykorzystywany skrót FRCM odnosi się do nazewnictwa w amerykańskiej normie ACI 549.4R-13 [89] oraz w międzynarodowym dokumencie AC 434-13 [90]. Najczęściej jako kompozyty TRM oraz TRC opisuje się materiały, w których

jako fazę włóknistą kompozytu stosuje się gęsto utkane maty, podobne jak w przypadku kompozytów FRP, jednak podział ten nie jest ścisły. Istnieją również inne kompozyty wzmacniające na bazie matrycy mineralnej takie jak np. SRG (ang. *Steel Reinforced Grout*), w których zamiast opisanych wcześniej typowych włókien zastosowane są siatki stalowe z cienkiego drutu [10, 54].

Aplikacja wzmocnienia FRCM przypomina wykonywanie wzmocnień kompozytami FRP z wykorzystaniem mat. Wzmacnianą powierzchnię należy odpowiednio oczyścić z pyłu, luźnych fragmentów betonu oraz ewentualnych zabrudzeń i zatłuszczeń. W przypadku występowania większych ubytków betonu należy uzupełnić je odpowiednią zaprawą naprawczą, zabezpieczając antykorozyjnie ewentualne odsłonięte pręty zbrojeniowe. Suchą zaprawę mineralną należy wymieszać z wodą według instrukcji producenta, a następnie nanieść pierwszą jej warstwę na uprzednio przygotowaną i zwilżoną powierzchnię betonu. Kolejnym krokiem jest umieszczenie siatki w odpowiednim miejscu oraz wtopienie jej w niezwiązaną pierwszą warstwę zaprawy. Po odpowiednim dociśnięciu siatki należy pokryć ją drugą warstwą zaprawy oraz wyrównać powierzchnię. W przypadku konieczności uzyskania wielowarstwowego kompozytu możliwe jest wtopienie kolejnej siatki w zewnętrzną warstwę matrycy mineralnej oraz ponowne pokrycie jej zaprawą. Krok ten można powtarzać, aż do uzyskania liczby warstw kompozytu wymaganej według projektu [8, 97, 98]. Kolejno wykonywane warstwy kompozytu na przykładzie dwuwarstwowego kompozytu FRCM przedstawiono na rysunku 13. Numerem 1 opisano powierzchnię betonową wzmacnianego elementu, numerem 2 pierwszą warstwę zaprawy mineralnej, numerem 3 pierwszą warstwę siatki, numerem 4 drugą warstwę zaprawy mineralnej, numerem 5 drugą warstwę siatki, a numerem 6 trzecią, zewnętrzną warstwę zaprawy.

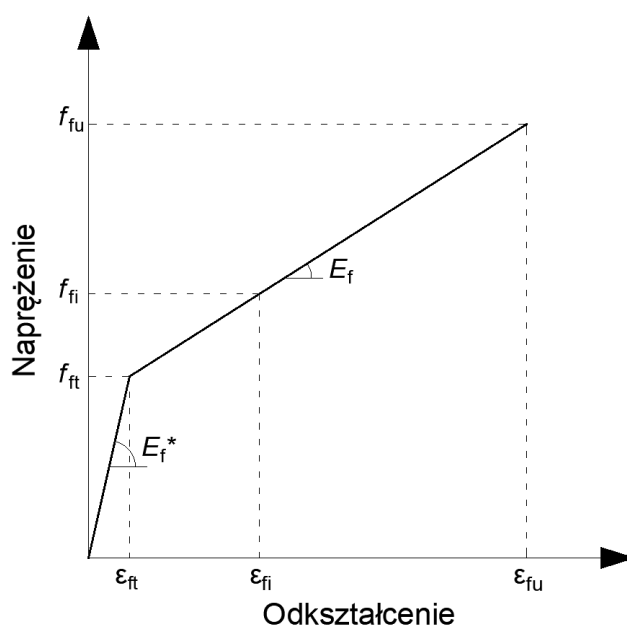


Rys. 13. Kolejność nakładania warstw kompozytu FRCM (opis w tekście) [97]

W przypadku dużego nasłonecznienia lub dużej przewiewności miejsca wykonywania wzmocnienia należy zastosować specjalne osłony ograniczające odparowanie wody z zaprawy oraz nadmierny skurcz. Stosowanie systemu nie ma ograniczeń w przypadku wzmacniania wilgotnych powierzchni, co jest jednym z głównych ograniczeń technologicznych kompozytów FRP. Brak obecności żywic epoksydowych oraz innych toksycznych substancji chemicznych powoduje, że wykonawcy nie muszą stosować przeciwdrocznych środków ochrony dróg oddechowych, a wszelkie narzędzia oraz zabrudzenia można

wyczyścić z wykorzystaniem wody [97, 98]. Technologiczne aspekty aplikacji kompozytów FRCM powodują, że mają one znacznie szersze zastosowanie niż kompozyty FRP, a sam proces aplikacji jest mniej wymagający.

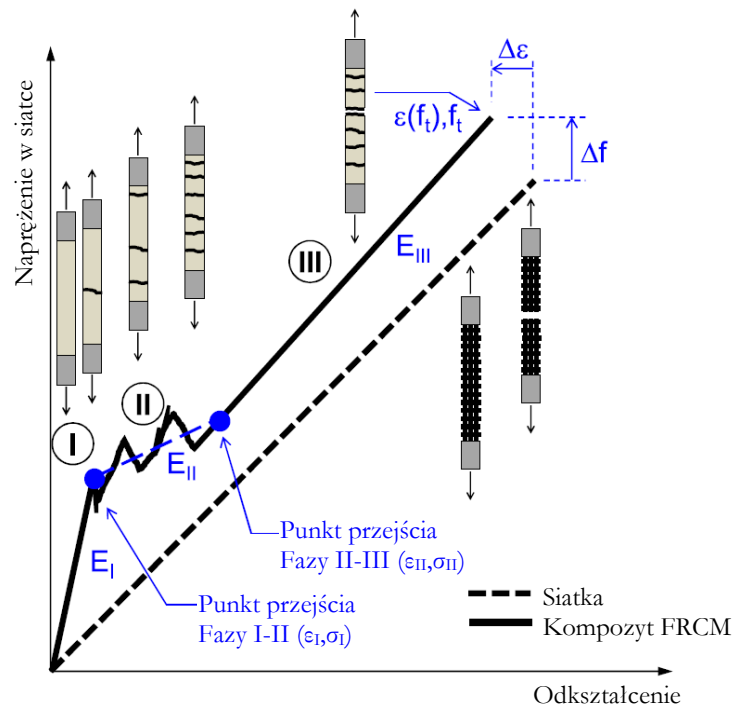
We wspomnianych wcześniej normach opisujących kompozyty FRCM (ACI 549.4R-13 [89] i AC 343-13 [90]) przedstawiony został wyidealizowany model pracy kompozytu FRCM, który służy do oznaczenia podstawowych parametrów wytrzymałościowych. W modelu założono dwuliniowy charakter pracy, który przedstawiono na rysunku 14. Pierwsza faza pracy kompozytu opisuje jego zachowanie przed zarysowaniem matrycy mineralnej. Następnie, w punkcie przejścia „T” dochodzi do nagłej zmiany sztywności kompozytu, rozpoczynając jednocześnie drugą fazę jego pracy. W modelu określono charakterystyczne punkty na osiach wykresów oraz nachylenia prostych, które służą do opisu pracy materiału oraz definiują jego modelowe właściwości mechaniczne. Odształcenia oraz naprężenia związane z osiągnięciem punktu przejścia „T” nazwano odpowiednio ε_{ft} i f_{ft} . Analogiczne wartości związane z rozerwaniem kompozytu określono odpowiednio jako ε_{fu} i f_{fu} . Wartości modułu Younga kompozytów FRCM określa się osobno w obu fazach przyjmując oznaczenia E_f^* dla pierwszej fazy (przed zarysowaniem matrycy) oraz E_f dla drugiej fazy (po zarysowaniu matrycy).



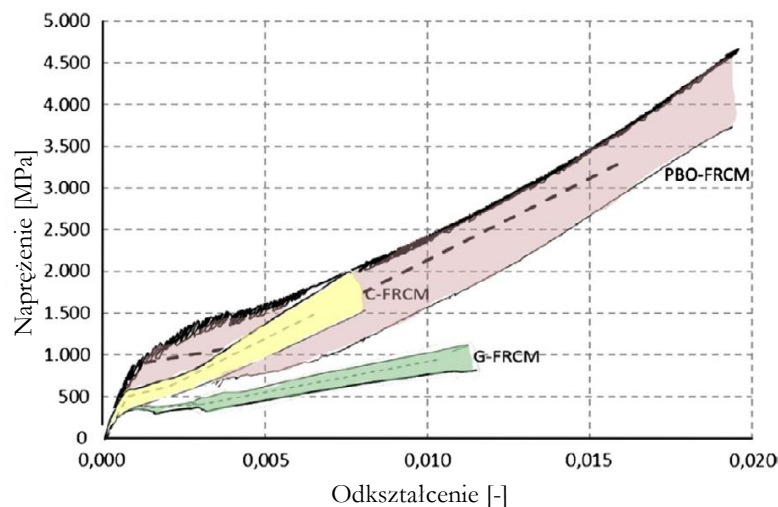
Rys. 14. Model zależności naprężenia od odkształcenia przy rozciąganiu kompozytu FRCM według ACI 549.4R-13 i AC 343-13, na podstawie: [89] oraz [90]

W rzeczywistych badaniach laboratoryjnych okazuje się, że mechanizm działania kompozytów FRCM przy rozciąganiu nie wpisuje się idealnie w przyjęty w normach [89, 90] model dwuliniowy. Opisy literaturowe wskazują bowiem, że bardziej odpowiednim modelem jest model trójliniowy [6, 15, 26, 38]. Model składający się z trzech faz pracy konstrukcji uwzględnia występowanie dodatkowej pośredniej fazy rozwoju zarysowań zamiast punktu przejściowego „T” opisywanego wcześniej. Początkowy rozwój

zarysowania przy stosunkowo niewielkich odkształceniach włókien kompozytu powoduje nagły spadek sztywności, która ponownie rośnie dopiero po całkowitym zarysowaniu matrycy mineralnej i przejściu całości obciążenia przez włókna kompozytu. Model zachowania kompozytu FRCM zmodyfikowany w celu lepszego odzwierciedlenia rzeczywistości przedstawiono na rysunku 15, a na rysunku 16 przedstawiono przykładowe wyniki badań rozciągania kompozytów FRCM z różnymi typami włókien – włóknami węglowymi (C-FRCM), szklanymi (G-FRCM) oraz PBO (PBO-FRCM).



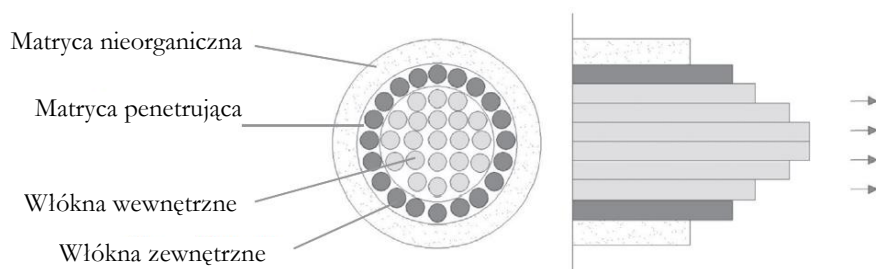
Rys. 15. Rzeczywisty model zależności naprężenia od odkształcenia przy rozciąganiu kompozytu FRCM [26]



Rys. 16. Rzeczywiste zależności naprężenia od odkształcenia dla kompozytów FRCM z różnymi typami włókien [15]

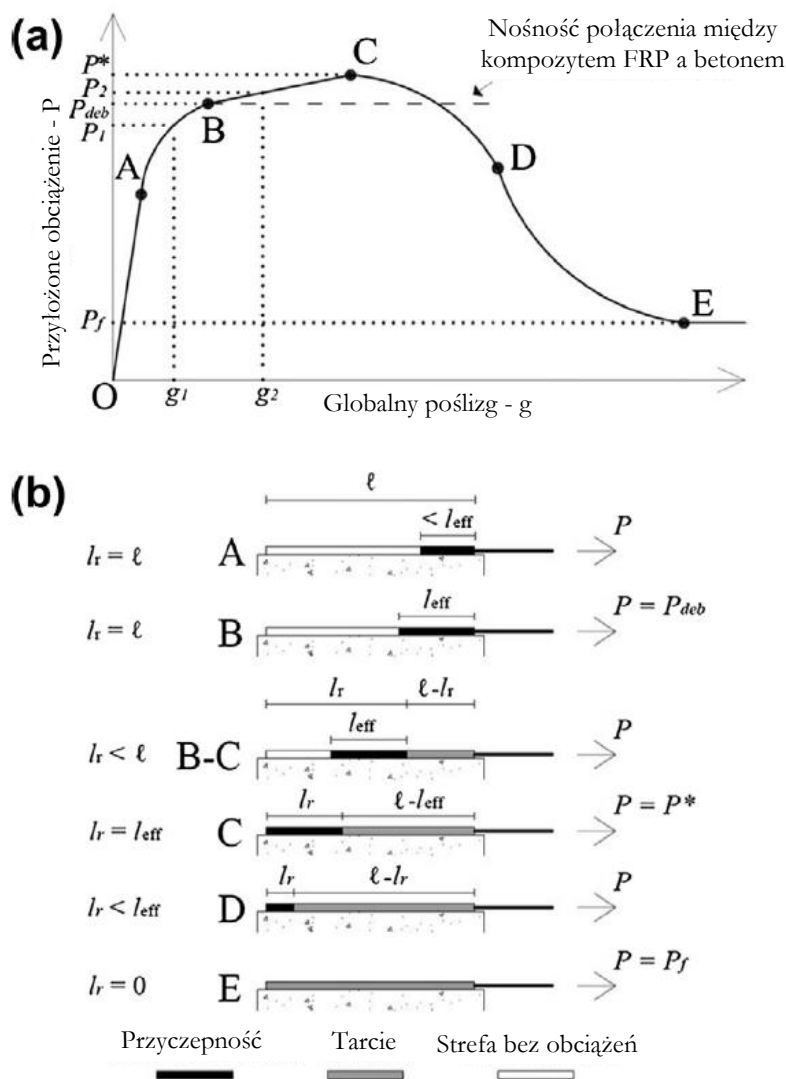
Występowanie dodatkowej fazy pracy kompozytu FRCM związane jest z progresywnym powstawaniem rys w matrycy wraz ze zwiększaniem odkształceń kompozytu. Złożony mechanizm pracy powoduje, że w zależności od poziomu odkształceń kompozytu należy brać pod uwagę różne parametry mechaniczne materiału. Pierwsza faza pracy kompozytu zależna jest od parametrów matrycy oraz włókien. Nachylenie wykresu zależności naprężeń od odkształceń w drugiej fazie oraz zakres jej trwania zależny jest przede wszystkim od przyczepności między włóknami a matrycą oraz od udziału włókien włączonych do przenoszenia obciążeń. Parametry trzeciej fazy pracy kompozytu zależne są niemalże wyłącznie od parametrów mechanicznych włókien kompozytu. Popękana matryca w trzeciej fazie pracy kompozytu pomimo braku możliwości przenoszenia obciążeń na głównym kierunku pracy pozwala na redystrybucję sił na kierunku prostopadłym do kierunku głównego [6, 15, 26]. Dynamiczne badania rozciągania kompozytów na bazie zaprawy mineralnej wskazują dużą korelację między wytrzymałością kompozytu w badaniu ze statycznym przyłożeniem siły oraz przy dużym tempie jej przyrostu [87]. Wskazuje to, że niezależnie od sposobu przyłożenia siły można spodziewać się podobnej pracy wzmocnienia kompozytowego, którego nośność będzie proporcjonalna do parametrów mechanicznych materiału wyznaczonych w badaniach statycznych.

Stosunkowo niewielka przyczepność włókien do matrycy w kompozytach FRCM powoduje, że badania materiałowe (rozciąganie fragmentu kompozytu FRCM) nie oddają w pełni jego zachowania związanego ze współpracą ze wzmacnianymi elementami [34]. Na rzeczywistą pracę kompozytu wzmacniającego wpływają właściwości włókien, matrycy, podłoża wzmacnianego elementu oraz zależności między nimi, takie jak: przyczepność włókien do matrycy lub przyczepność matrycy do podłoża. Matryca mineralna stosowana w kompozytach FRCM ma mniejszą zdolność do penetracji wiązki włókien w porównaniu z żywicą epoksydową, co prowadzi do sytuacji, w której jedynie zewnętrzna warstwa włókien z wiązki jest powiązana z matrycą. Włókna, które nie mają bezpośredniego kontaktu z matrycą mogą się wzajemnie przesuwąć ze względu na zmniejszone siły tarcia między włóknami, co prowadzi do powstania efektu teleskopowego [16], który przedstawiono schematycznie na rysunku 17. Efekt teleskopowy prowadzi do obniżenia wykorzystania potencjału włókien ze względu na mniejsze odkształcenia włókien wewnętrznych, które przenoszą mniejsze siły rozciągające. Nierównomierne odkształcenie wiązki może doprowadzić do zerwania części najbardziej wyłożonych zewnętrznych włókien przed osiągnięciem pełnych odkształceń pozostałe włókna.



Rys. 17. Efekt teleskopowy w kompozytach FRCM [16]

Nieidealne połączenie włókien z matrycą powoduje, że kompozyt FRCM potrzebuje odpowiedniej długości zakotwienia, aby osiągnąć swój pełen potencjał. Dokładna analiza tego zagadnienia oraz badania próbek pasm kompozytów FRCM przytwierdzonych do powierzchni betonu, doprowadziły do przedstawienia złożonego modelu zniszczenia kompozytu FRCM z uwzględnieniem mechanizmów przyczepności, który przedstawiono schematycznie na rysunku 18.

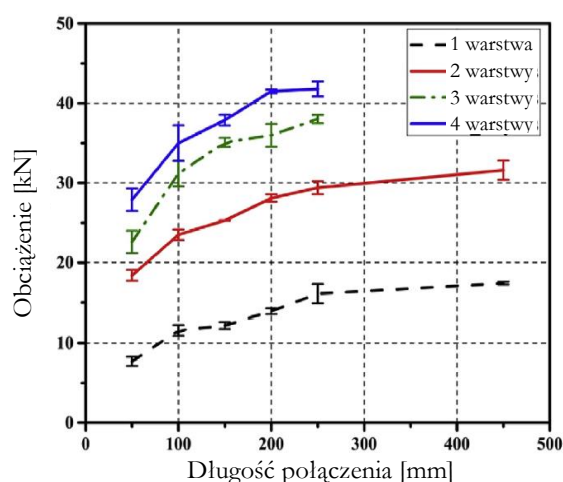


Rys. 18. Schemat pracy kompozytu FRCM z uwzględnieniem różnych faz przyczepności, (a) wykres zależności przyłożonego obciążenia od globalnego poślizgu kompozytu, (b) mechanizmy przenoszenia obciążeń w kolejnych fazach rozwoju pracy kompozytu [22]

W początkowej fazie pracy kompozytu FRCM (OA) obserwuje się sprężyste zachowanie materiału, które wynika z ogólnych zasad wytrzymałości materiałów, co powoduje liniową odpowiedź kompozytu wzmacniającego. Po przekroczeniu punktu A odpowiedź materiału nabiera nieliniowego charakteru, co spowodowane jest powstawaniem mikrouszkodzeń w połączeniu włókien z matrycą. Aż do osiągnięcia punktu B, zachowanie kompozytów FRCM jest niemalże identyczne jak w przypadku kompozytów FRP. W przypadku przekroczenia punktu B na wykresie kompozyty FRP osiągają niemalże pełną nośność

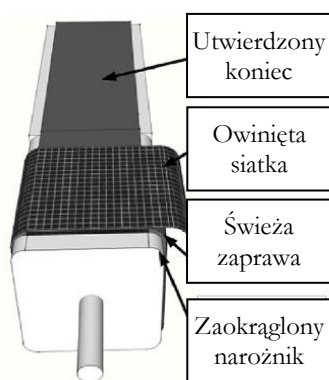
ze względu na odpowiednią długość zakotwienia. Przekroczenie punktu B przez kompozyty FRCM wiąże się ze stopniowym odspajaniem kompozytu, co powoduje przesunięcie rzeczywistej lokalizacji miejsca zakotwienia kompozytu na jego długości oraz powstania reszkowych mechanizmów tarcowych w odspojonej części kompozytu. W punkcie C kompozyt osiąga swoje maksymalne obciążenie, które związane jest z końcem procesu odspajania kompozytu. W kolejnych fazach (CD oraz DE) widoczny jest spadek obciążeń związany ze zmniejszeniem obszaru przyczepnościowej pracy kompozytu na rzecz mechanizmu tarcowego w części odspojonej. Po przekroczeniu punktu E kompozyt jest całkowicie odspojony i przenoszone przez niego rezydualne siły związane są jedynie ze stosunkowo niewielkimi siłami tarcia. W przytoczonym opracowaniu oszacowano, że typowa długość zakotwienia dla kompozytów FRCM przyjmuje wartość około 260 mm [22]. W literaturze opisano również próby analitycznego rozwiązania zagadnienia wyznaczania długości zakotwienia kompozytów FRCM, które skorelowane zostały z wynikami badań [20].

Mechanizm zniszczenia wzmocnienia kompozytowego FRCM jest również zależny od zastosowanej liczby warstw siatki. Jej zwiększanie powoduje, że mechanizm zniszczenia nie zachodzi typowo na połączeniu siatki z zaprawą, lecz na połączeniu kompozytu z powierzchnią betonu [55]. Mechanizm zniszczenia kompozytów FRCM przy 3 lub 4 warstwach siatki zbliżony jest do tego obserwowanego w kompozytach FRP, w których kompozyt odrywa się od wzmacnianego elementu na styku kompozyt-otulina lub odrywa się z cienką warstwą otuliny betonowej. Dzieje się tak, ponieważ zwiększenie liczby warstw kompozytu FRCM powoduje zwiększenie przenoszonej przez niego siły, jednak nie powoduje zwiększenia nośności strefy styku pomiędzy wzmocnieniem, a betonem wzmacnianego elementu. Zwiększenie nośności wzmocnienia kompozytowego nie jest proporcjonalne do liczby zastosowanych warstw siatki [61], co zilustrowano na rysunku 19, na którym przedstawiono zależność maksymalnej siły zrywającej pasy kompozytu FRCM w zależności od długości jego przyklejenia do powierzchni betonu oraz liczby zastosowanych warstw siatki.



Rys. 19. Nośność kompozytu FRCM na odrywanie w zależności od długości jego naklejenia oraz liczby warstw siatki w nim zastosowanych [61]

Wyprowadzone zależności jednoznacznie wskazują, że zwiększenie liczby warstw oraz długości zakotwienia wpływa na nośność kompozytu na odrywanie w sposób nieliniowy. Po przekroczeniu wartości długości zakotwienia nazywanej „efektywną długością zakotwienia”, przyrosty nośności są już niewielkie, a w wielu przypadkach pomijalne. Na podstawie zależności przedstawionych na rysunku 19 oceniono, że dla badanych kompozytów FRCM efektywna długość zakotwienia wynosi pomiędzy 200 mm a 300 mm. Innym istotnym aspektem definiującym sposób zniszczenia kompozytu FRCM jest sposób przygotowania oraz wytrzymałość materiału podłoża, na które aplikowane jest wzmocnienie. Poza oczyszczeniem powierzchni z zabrudzeń oraz zeszlifowaniem mleczka cementowego, możliwe jest także zwiększenie szorstkości podłoża przez wykonanie dodatkowych nacięć lub piaskowania powierzchni w celu odsłonięcia kruszywa. Badania wskazały, że obie proponowane metody są równie skuteczne [61]. Inne badania wskazują jednak, że wpływ przygotowania powierzchni betonu na nośność wzmocnienia jest niewielki (rzędu 5-7%) [24]. Najprawdopodobniej połączenie kompozytu z powierzchnią betonu ma znacznie większy wpływ na nośność wzmocnienia przy mniej typowych dla kompozytów FRCM mechanizmach zniszczeń, związanych z oderwaniem kompozytu od wzmacnianego elementu, co występuje jedynie w przypadku kompozytów wielowarstwowych. Podobne różnice mogą być widoczne również w przypadku wpływu wytrzymałości betonu, z którego wykonano element wzmacniany, na nośność wzmocnienia. Badania wskazują, że przy 50% zmniejszeniu wytrzymałości na ściskanie betonu, redukcja nośności wzmocnienia wynosi średnio 7,5%. [61]. W opisywanych wyżej badaniach sprawdzono również wpływ zakotwienia siatki kompozytu i pokrycia siatki żywicą epoksydową, na nośność kompozytu na odspojenie. Zakotwienie siatki wykonano poprzez owinięcie badanej próbki dodatkową warstwą siatki ułożonej w kierunku prostopadłym do głównego kierunku pracy wzmocnienia, co pokazano na rysunku 20. W przypadku impregnacji siatek żywicą epoksydową zastosowano dwuskładnikową żywicę o niskiej lepkości.



Rys. 20. Sposób zakotwienia siatki kompozytu wykorzystany w badaniach [61]

Zastosowanie zakotwienia siatki spowodowało uniemożliwienie odspojenia się kompozytu w miejscu występowania zakotwienia, co doprowadziło do zwiększenia nośności wzmocnienia o 28-45%. Większe przyrosty nośności spowodowane zastosowaniem zakotwienia siatki kompozytu obserwowano dla

próbek z większą liczbą warstw siatki. W przypadku pokrycia włókien siatki żywicą epoksydową zaobserwowano zmianę mechanizmu zniszczenia kompozytu z poślizgu włókien wewnątrz matrycy na odspojenie kompozytu w strefie połączenia włókna-matryca. Zwiększenie nośności wzmocnienia spowodowane wprowadzeniem impregnacji włókien żywicą epoksydową wynosił on 71,9-79,5% w przypadku jednej warstwy kompozytu i 13,5-16,6% dla dwóch warstw kompozytu, co wskazuje odwrotną tendencję w porównaniu z zakotwieniem siatki kompozytu. Podobnie jak w przypadku mechanizmu zniszczenia samodzielnie pracujących kompozytów FRCM istotnym aspektem związanym z ich przyczepnością jest rodzaj materiałów wykorzystanych do ich wytworzenia. W porównaniu do kompozytów FRCM wykonanych z wykorzystaniem różnych rodzajów siatek: PBO, węglowej i szklanej, obserwuje się znaczące różnice w mechanizmach zniszczenia materiałów. W przypadku włókien szklanych, ze względu na ich stosunkowo niską wytrzymałość często dochodzi do zerwania włókien, co świadczy o ich pełnym wykorzystaniu jednak powoduje znacznie mniejszy efekt wzmacniający niż przy innych rodzajach włókien. Bardziej wytrzymałe włókna węglowe oraz włókna PBO najczęściej nie ulegają zerwaniu, bo dochodzi do poślizgu bądź odspojenia kompozytu. W przypadku włókien węglowych najczęściej obserwuje się poślizg włókien względem matrycy mineralnej, a w przypadku włókien PBO odspojenie kompozytu od wzmacnianego elementu, co świadczy o znacznie lepszym powiązaniu włókien PBO z matrycą w porównaniu do włókien węglowych [84, 85]. Istnieją jednak badania, które jednoznacznie wskazują, że w kompozytach PBO-FRCM poślizg zachodzi na styku włókna-matryca, a nie kompozyt-beton elementu wzmacnianego [68]. Poza włóknami zastosowanymi w kompozycie FRCM istotną rolę związaną z przyczepnością pełni również matryca, której modyfikacje wpływają na sposób przekazywania naprężeń między poszczególnymi komponentami kompozytu oraz między kompozytem a elementem wzmacnianym. Badania wskazują, że wytrzymałość na ściskanie i zginanie matrycy nie jest parametrem kształtującym nośność kompozytów FRCM, ponieważ przy porównaniu matrycy o teoretycznie niższych parametrach wytrzymałościowych uzyskano wyższe nośności wzmocnienia, ze względu na jej lepsze właściwości wiążące [23].

Przyczepność kompozytów FRCM była badana również z wykorzystaniem metody pull-off. Badania tą metodą wskazują, że najczęstszym mechanizmem zniszczenia próbek jest rozerwanie na styku włókien i matrycy mineralnej [28, 32]. W przypadku kompozytów FRCM z siatką PBO obserwowano również oderwanie całego kompozytu od powierzchni betonu, jednak efekt ten był najprawdopodobniej spowodowany dużymi oczkami siatki PBO, przez co zachowano większą powierzchnię matrycy w poziomie występowania siatki. Istotniejszy wpływ na siłę odrywania kompozytu zaobserwowano w przypadku różnicowania szorstkości powierzchni podłoża oraz czasu wiązania badanej próbki [32]. W przypadku badań pull-off przeprowadzonych na podłożu z cegły znacznie częściej obserwuje się zniszczenie wewnątrz materiału podłoża, co wynika z jego mniejszej wytrzymałości na odrywanie w porównaniu z podłożem betonowym. W przypadku kompozytów FRCM z włóknami szklanymi obserwowano jednak rozerwanie próbek na styku włókien z matrycą lub matrycy z podłożem [15].

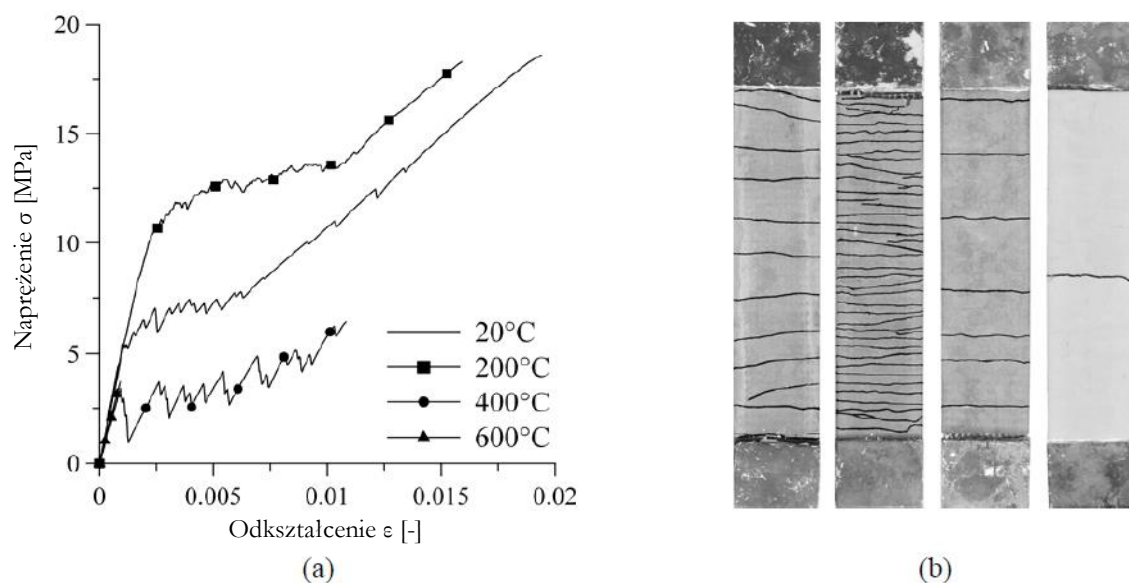
Złożoność zagadnień związanych z pracą oraz przyczepnością kompozytów FRCM spowodowała, że powstaje wiele modeli, których autorzy starają się w sposób ścisły opisać zależności zachodzące w materiale. Opracowano modele dopasowujące parametry związane z wzajemnym przesuwem oraz tarciem do rzeczywistej pracy kompozytów FRCM [35], modele poślizgu włókien w matrycy [88], modele mechanizmów przeniesienia naprężeń wewnątrz kompozytów FRCM [18] oraz inne modele starające się opisać całościowo działanie tego typu materiałów [13]. Poza rozwiązaniami teoretycznymi wykonywane są również rozwiązania numeryczne, które symulują rzeczywistość w modelach komputerowych. Złożona parametryzacja modeli stosowanych w modelach numerycznych ma na celu jak najlepsze odzwierciedlenie prawdziwej pracy materiału [37]. Zagadnieniami związanymi z przyczepnością kompozytów FRCM poświęcono również wiele innych prac badawczych, w których badano między innymi wpływ pominięcia jednej z warstw matrycy lub usunięcia włókien na kierunku prostopadłym do kierunku pracy [14], wpływ mimośrodowej siły odrywającej kompozyt FRCM na jego nośność [25], czy też wpływ metody badawczej na uzyskiwane wartości przyczepności kompozytów [69].

W celu zmniejszenia negatywnego wpływu mechanizmów wynikających z zastosowania matrycy mineralnej, w szczególności redukcji wzajemnego poślizgu włókien powodującego efekt teleskopowy, proponuje się różnego rodzaju modyfikacje kompozytów FRCM. Jedną z najczęściej prezentowanych metod, jest impregnacja włókien przed umieszczeniem ich wewnątrz matrycy kompozytu. Wstępną impregnację włókien można wykonać z wykorzystaniem materiałów mineralnych [39], co nie daje dużego wpływu na kompozyty z siatką o małej gęstości, jednak znacząco wpływa na powiązanie włókien w gęstszych siatkach, w których pozwala na lepsze połączenie pojedynczych włókien, czego skutkiem jest poprawa właściwości mechanicznych kompozytu. Wstępnej impregnacji włókien kompozytu można dokonać również z wykorzystaniem żywicy epoksydowej, która dodatkowo pozwala na ewentualne przyklejenie do włókien ziaren piasku, których celem jest zwiększenie przyczepności włókien do matrycy [28, 30]. Zastosowanie takiego sposobu impregnacji pozwala na ograniczenie wzajemnego poślizgu włókien, o czym świadczy zmiana mechanizmu zniszczenia kompozytu na poślizg całej zaimpregnowanej wiązki włókien względem matrycy. W przypadku dodatkowego zwiększenia szorstkości zaimpregnowanych wiązek włókien obserwowano zniszczenie kompozytu związane z rozerwaniem włókien, co świadczy o ich pełnym wykorzystaniu. Inną drogą prowadzącą do zmiany właściwości mechanicznych kompozytów FRCM jest modyfikacja ich matryc w celu zwiększenia ich ciągliwości oraz zwiększenia zakresu deformacji przy których nie dochodzi do ich pęknięcia, co możliwe jest do uzyskania między innymi przez dodatek włókien stalowych, szklanych lub syntetycznych [64].

Badania wykazują, że właściwości mechaniczne kompozytów FRCM nie są wrażliwe na działanie agresywnych czynników środowiskowych w postaci środowiska o podwyższonej zawartości soli i środowiska alkalicznego. Zaobserwowano obniżenie wytrzymałości na rozciąganie kompozytu o 3% oraz obniżenie jego modułu Younga o 13% w przypadku działania środowiska z cyklami zamarzania i rozmarzania (40 cykli w zakresie od -18°C do $+40^{\circ}\text{C}$), co spowodowane było zaburzeniem warunków

pielęgnacji matrycy mineralnej i jej degradacją [27]. Badania skupiające się na wpływie pielęgnacji matrycy mineralnej potwierdzają, że w nieodpowiednio pielęgnowanej matrycy kompozytu FRCM dochodzi do znacznie większego poślizgu włókien, co redukuje nośność wzmocnienia. Jako kluczowy parametr środowiskowy określono wilgotność otoczenia miejsca wykonywania wzmocnienia FRCM, która powinna być kontrolowana poprzez przykrycie świeżego kompozytu FRCM folią zapobiegającą wysychaniu [83].

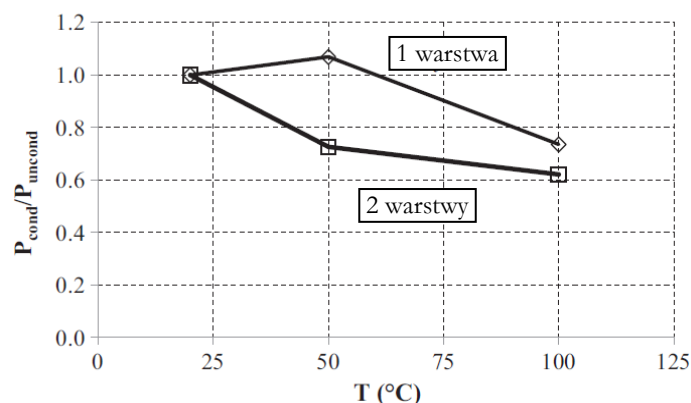
Jednym z głównych zalet technologii kompozytów FRCM, poza wspomnianą w poprzednim akapicie odpornością na agresywne działanie środowiska, jest zwiększenie odporności materiału na warunki podwyższonej temperatury. Warunki podwyższonej temperatury rozumiane są zarówno jako otoczenie w temperaturze spowodowanej nadmiernym nasłonecznieniem powierzchni (od około 50°C), jak i warunki pożarowe (od około 500°C). Badania kompozytów FRCM poddanych działaniu warunków podwyższonej temperatury wykazały, że wytrzymałość matrycy nie ulega znaczącemu pogorszeniu jej działania. Najistotniejszym parametrem kompozytów na bazie zaprawy mineralnej w tym zagadnieniu jest odporność włókien na utratę właściwości mechanicznych przez działanie podwyższonej temperatury. W przypadku wykorzystanych w opisywanych badaniach włókien szklanych nie obserwowano znaczącej zmiany zachowania się kompozytu w zakresie temperaturowym od 20°C do 200°C. Dopiero w przypadku podgrzania kompozytu FRCM do temperatur 400°C oraz 600°C zauważono znaczne zwiększenie jego kruchości oraz odejście od typowego trójliniowego modelu pracy przy rozciąganiu [19]. Znaczna degradacja właściwości mechanicznych kompozytów FRCM zachodzi dopiero przy bardzo wysokich, zbliżonych do pożarowych zakresów temperatur. Pogorszenie właściwości mechanicznych kompozytu w temperaturach zbliżonych do pożarowych spowodowane było bardziej kruchym zachowaniem się materiału i zmniejszeniem się liczby rys w obrębie rozciąganego pasma kompozytu. Anomalne zachowanie kompozytu, którego właściwości mechaniczne uległy poprawie w temperaturze 200°C, było najprawdopodobniej spowodowane skurczem matrycy, co poprawiło przyczepność między włóknami i matrycą. W wyższych temperaturach (400°C i 600°C) dochodzi do znacznej degradacji właściwości matrycy, co powoduje pogorszenie współpracy między włóknami i matrycą, prowadząc do mniejszej nośności wzmocnienia. Wykresy zależności naprężenia od odkształcenia kompozytu FRCM w opisywanych temperaturach oraz mechanizmy zniszczenia próbek przedstawiono na rysunku 21.



Rys. 21. Wykres zależności naprężenia od odkształcenia kompozytu FRCM w różnych temperaturach (a) oraz mechanizmy zniszczenia rozciąganych próbek dla różnych temperatur (b – od lewej: 20°C, 200°C, 400°C, 600°C) [19]

Brak wpływu podwyższonej temperatury na mechanizm zniszczenia kompozytu FRCM obserwowano również przy wzmacnianiu ściskanych filarów murowych [40]. W przypadku impregnacji włókien kompozytu FRCM elastyczną żywicą epoksydową obserwuje się znacznie większą podatność wzmocnienia na działanie podwyższonej temperatury. Temperatura na poziomie 80°C powoduje zmniejszenie nośności kompozytu z włóknami zaimpregnowanymi o 70%, gdy porównywalne próbki bez impregnacji włókien nie wskazywały spadku nośności nawet przy temperaturze 120°C [29]. W warunkach pożarowych istotna jest również przewodność termiczna kompozytów FRCM, które chronią wzmacnianą konstrukcję tworząc wokół niej dodatkową izolację termiczną. Badania wykazują jednak, że modyfikacje zaprawy mające na celu zmniejszenie jej przewodności termicznej negatywnie wpływają na jej parametry mechaniczne i znacznie obniżają parametry wzmacniające kompozytów FRCM [47].

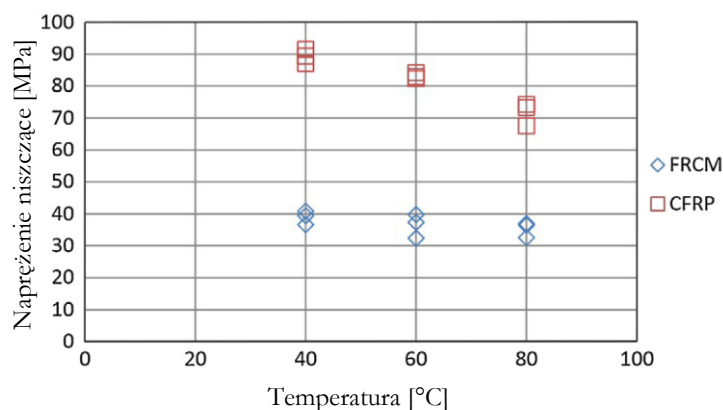
Badania przyczepności kompozytu FRCM w temperaturach 50°C i 100°C wskazały jednak, że w porównaniu do eksperymentu przeprowadzonego w temperaturze pokojowej (20°C) należy spodziewać się spadku przyczepności kompozytu FRCM w warunkach podwyższonej temperatury nawet o 40% w przypadku kompozytu dwuwarstwowego przy temperaturze 100°C [55]. Wyznaczone zależności przyczepności kompozytu FRCM w zróżnicowanych temperaturach przedstawiono na rysunku 22. Podobne wartości spadku nośności kompozytów wzmacniających FRCM w zakresie temperaturowym 20-200°C uzyskano również w innych badaniach [56].



Rys. 22. Zależność przyczepności kompozytu FRCM w zależności od liczby jego warstw oraz temperatury – wartości względne odniesione do badania w temperaturze 20°C [55]

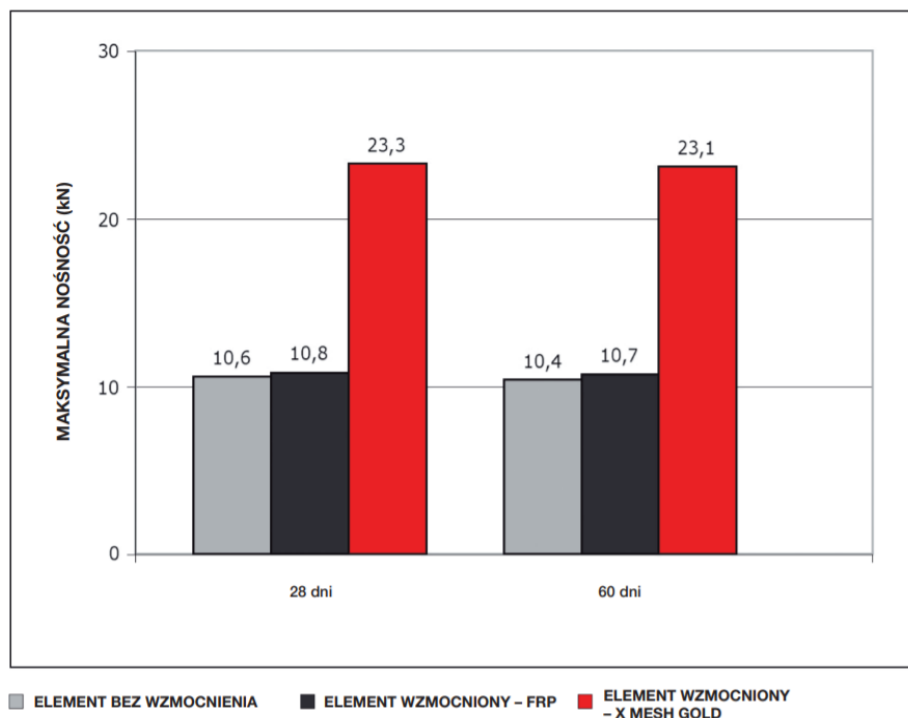
P_{cond} – siła zmierzona przy zadanej temperaturze, P_{uncond} – siła zmierzona w temperaturze 20°C

Bezpośrednie porównanie zachowania kompozytów FRCM i kompozytów FRP w warunkach podwyższonej temperatury zostało przeprowadzone w badaniach przyczepności kompozytu do betonu [60] oraz w badaniach ściskanych walców betonowych owiniętych wzmocnieniem kompozytowym [76]. Badania przyczepności wskazały, że kompozyty FRP tracą średnio 83% przyczepności przy temperaturze 150°C, podczas gdy porównywalne kompozyty na bazie zaprawy mineralnej tracą zaledwie 15% przy temperaturze 400°C [60]. W badaniach elementów ściskanych, które przeprowadzano przy znacznie niższych temperaturach, wykazano że podniesienie temperatury z 40°C do 80°C powoduje zmniejszenie maksymalnych odkształceń kompozytów FRP o 50%, kiedy w przypadku kompozytów FRCM ta różnica wynosi zaledwie 10%. Zależność ta przekłada się również na znacznie mniejszą efektywność wzmocnienia (w tym przypadku współczynnika skrzepowania elementu ściskanego) kompozytami FRP przy podwyższonych temperaturach w porównaniu do wzmocnienia kompozytów FRCM. Dodatkowo ustalono, że w przypadku wzmocnienia FRCM spadek wytrzymałości próbek na ściskanie w badanym zakresie temperatur wynosił pomiędzy 5% a 10%, a w przypadku wzmocnienia FRP aż 40% [76], co przedstawiono na rysunku 23.

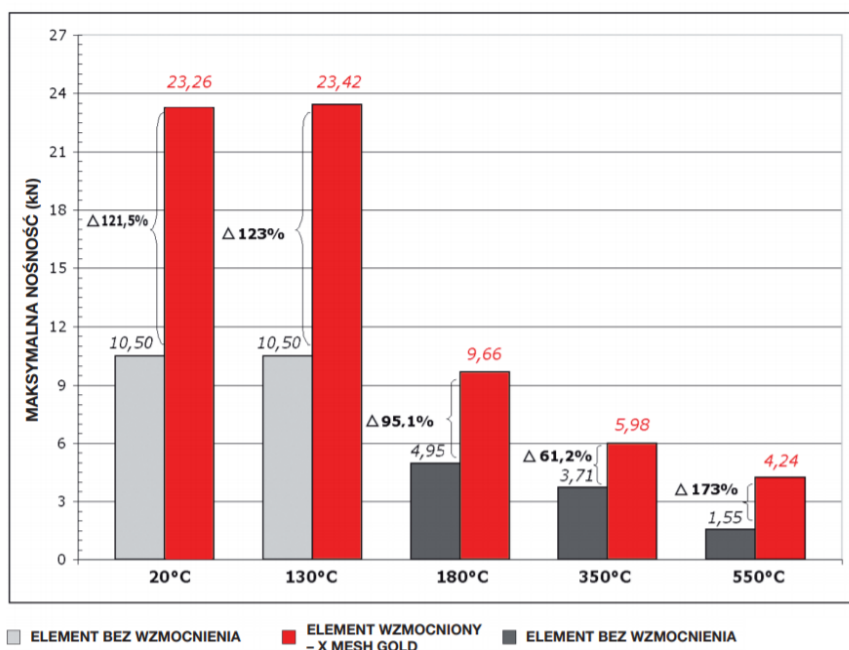


Rys. 23. Porównanie wytrzymałości na ściskanie próbek wzmocnionych kompozytami FRP i FRCM w temperaturach z zakresu od 40°C do 80°C [76]

Wyniki badań i porównań przeprowadzonych przez niezależnych naukowców potwierdzają wyniki badań producenta kompozytów PBO-FRCM, które przedstawiono w karcie technicznej produktu [98] oraz przywołano na rysunkach 24 i 25.



Rys. 24. Nośności próbek wzmocnionych kompozytem PBO-FRCM (X-Mesh Gold), kompozytem FRP oraz elementów kontrolnych w temperaturze 80°C [98]



Rys. 25. Nośności próbek wzmocnionych kompozytem PBO-FRCM (X-Mesh Gold) oraz elementów kontrolnych w różnych temperaturach [98]

Na wykresach przedstawionych na rysunku 24 widoczna jest niska efektywność wzmocnień typu FRP w podwyższonych temperaturach. Już przy temperaturze 80°C ich wpływ na efekt wzmacniający jest pomijalnie mały w porównaniu z wzmocnieniem kompozytowym FRCM. Należy zwrócić uwagę, że temperatura na poziomie 80°C jest stosunkowo niska i w przypadku pożaru osiągnięta jest już w pierwszych minutach jego trwania. Wykres na rysunku 25 wskazuje, że do osiągnięcia temperatury 130°C nie obserwuje się widocznej utraty nośności elementu niewzmocnionego oraz elementu wzmocnionego kompozytem FRCM. Efektywność wzmocnienia jest zachowana nawet w bardzo wysokich temperaturach rzędu 550°C, przy których występuje istotna utrata nośności bazowego elementu bez wzmocnienia. Dodatkowym atutem kompozytów FRCM w sytuacji pożarowej jest deklarowane przez producenta niewydzielanie toksycznych związków chemicznych przy znacznym podgrzewaniu kompozytów PBO-FRCM oraz wystawieniu ich na bezpośrednie działanie ognia [98].

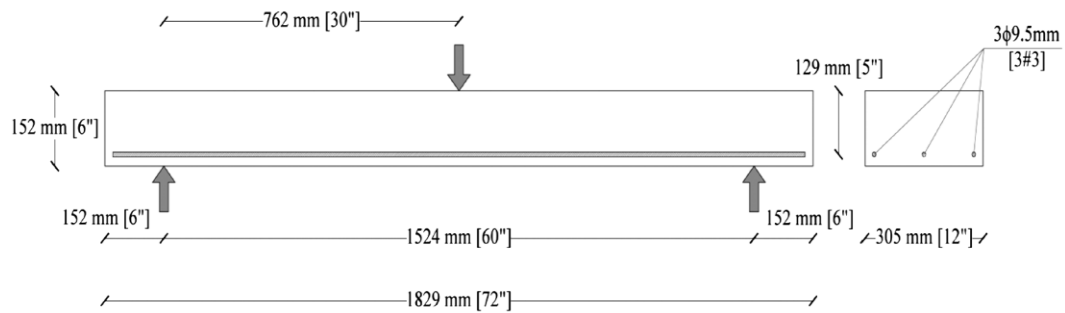
2.3 Wzmacnianie płyt żelbetowych materiałami kompozytowymi

Badania dotyczące płyt żelbetowych wzmacnianych materiałami kompozytowymi nie są najczęściej poruszonym tematem w ramach publikacji związanych ze wzmocnieniami kompozytowymi, jednak w wielu ośrodkach badawczych podejmowane są pojedyncze analizy związane z tym zagadnieniem. Poniżej przedstawiono opisy badań elementów płytowych, które zostały wzmocnione materiałami kompozytowymi.

2.3.1 Wzmacnianie płyt żelbetowych materiałami kompozytowymi z matrycą mineralną

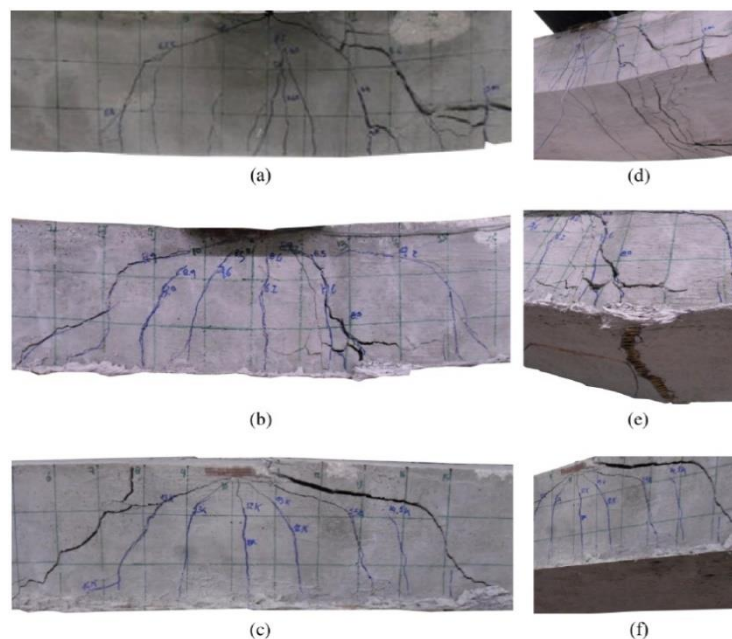
G. Loreto, L. Leardini, D. Arboleda, A. Nanni, Performance of RC slab-type elements strengthened with fabric-reinforced Cementitious-Matrix composites, Journal of Composites for Construction, 18(3), 2014, A4013003 [48]

Celem badań była ocena wpływu wytrzymałości betonu na ściskanie oraz liczby warstw zastosowanego wzmocnienia na efektywność wzmocnienia FRCM w zginanych elementach płytowych. Przedmiotem badań było osiemnaście płyt o przekroju poprzecznym 305x129 mm i długości 1829 mm. Elementy zostały wykonane z betonu o zróżnicowanej średniej wytrzymałości na ściskanie: 29,13 MPa i 42,91 MPa. Stal zbrojeniowa użyta w badaniach charakteryzowała się granicą plastyczności równą 414 MPa. Zbrojenie płyt na zginanie składało się z trzech prętów o średnicy 9,5 mm dołem. Wzmocnienia płyt wykonano z jednej lub czterech warstw siatek PBO w matrycy mineralnej. Płyty zostały poddane trójpunktowemu zginaniu, z odległością między podporami równą 1524 mm. Szkic elementów badawczych oraz sposobu przyłożenia obciążenia przedstawiono na rysunku 26.



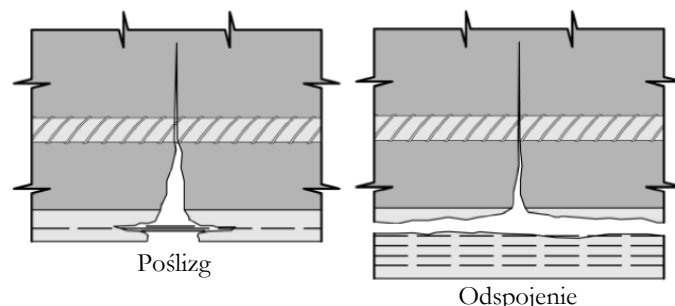
Rys. 26. Szkic elementów badawczych wykorzystanych w badaniach wraz z wymiarami stanowiska badawczego [48]

Elementy podzielono na sześć grup, w których zmiennymi były: wytrzymałość betonu na ściskanie (wysoka lub niska) oraz intensywność wzmocnienia (rozumiana jako liczba warstw wzmocnienia: brak wzmocnienia, jedna warstwa, cztery warstwy). W każdej grupie przebadano trzy próbki, a wyniki uśredniono. Zaobserwowano, że wpływ typu betonu na zachowanie elementów płytowych jest niewielki, a wszystkie elementy o identycznym stopniu wzmocnienia zachowują się podobnie. Wzmocnione płyty przenosiły obciążenia stanowiące 141% i 205% siły niszczącej próbek kontrolnych w przypadku betonu o mniejszej wytrzymałości oraz 135% i 212% siły niszczącej próbek kontrolnych dla betonu o większej wytrzymałości, odpowiednio dla wzmocnienia jedną i czterema warstwami siatek PBO. Wraz ze wzrostem nośności płyt zaobserwowano spadek ich ciągliwości, definiowanej jako stosunek wartości ugięcia końcowego przy zniszczeniu do ugięcia przy uplastycznieniu stali zbrojeniowej. Zależnie od stopnia zewnętrznego wzmocnienia po uplastycznieniu stali zbrojeniowej uzyskiwano różne mechanizmy zniszczenia wzmocnienia kompozytowego.



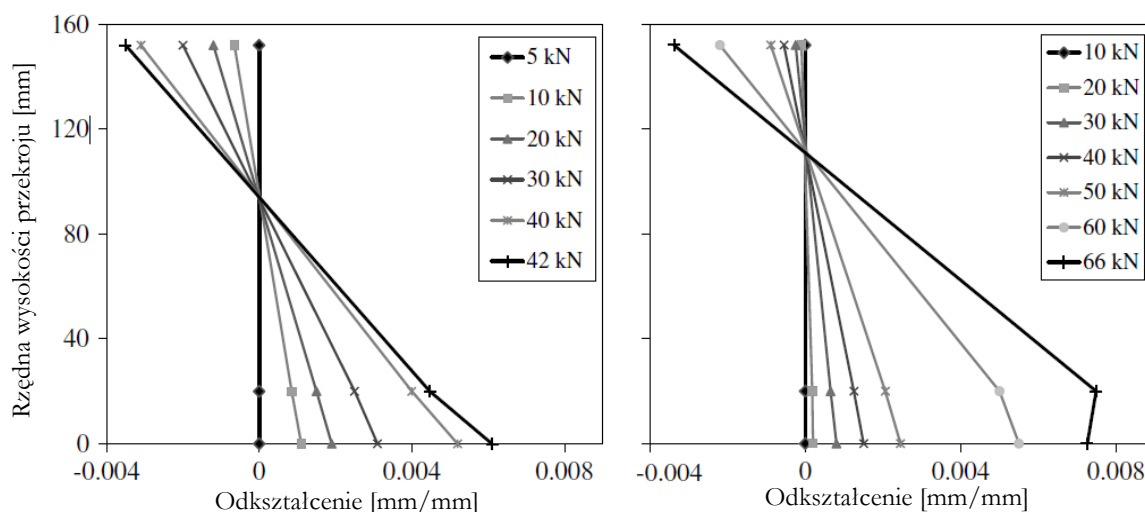
Rys. 27. Zdjęcia zniszczonych płyt, kolejno: niewzmocniona (a, d), jedna warstwa (b, e), cztery warstwy (c, f) [48]

W przypadku wzmocnienia jednowarstwowego obserwowano poślizg siatki PBO w matrycy mineralnej, a przy czterech warstwach wzmocnienia zniszczenie następowało wskutek odspojenia się kompozytu od elementu. Opisywane mechanizmy zniszczenia przedstawiono na rysunku 28.



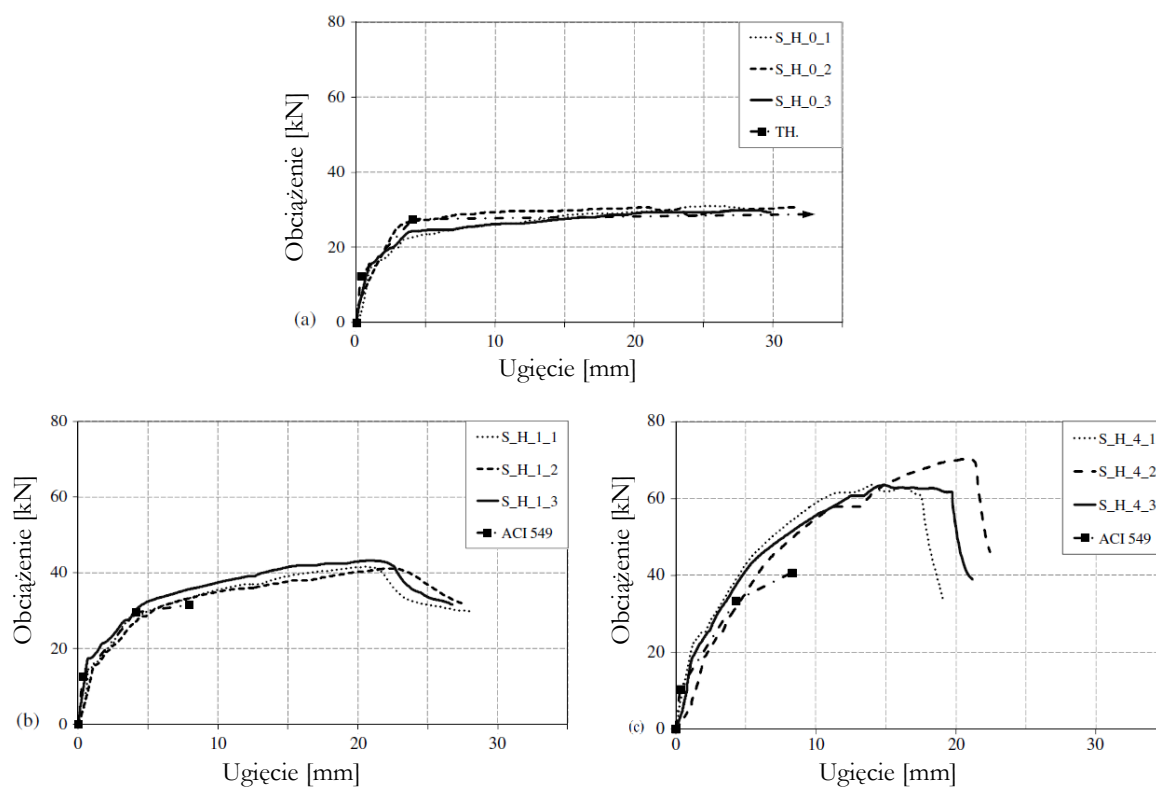
Rys. 28. Mechanizmy zniszczenia uzyskane w badaniach: poślizg siatki w matrycy (po lewej) oraz odspojenie kompozytu (po prawej) [48]

Przy pomiarze rozkładu odkształceń w przekroju środkowym, zaobserwowano tendencję do spowolnienia przyrostu odkształceń siatki po osiągnięciu pewnego poziomu obciążenia, co związane jest z jej poślizgiem w matrycy. W przypadku jednej warstwy siatki, takie zjawisko widoczne jest w momencie zniszczenia elementu, ale dla wzmocnienia wielowarstwowego występuje ono już dużo wcześniej, przez co jest ono widoczne na wykresach rozkładu odkształceń po wysokości przekroju. W momencie poślizgu lub odspojenia kompozytu widoczna jest nieproporcjonalność odkształceń siatki kompozytu do uśrednionej linii wyznaczonej na podstawie odkształceń betonu ściskanego oraz rozciąganej stali zbrojeniowej. Wyżej opisane zależności przedstawiono na rysunku 29.



Rys. 29. Odkształcenia przekroju środkowego płyty wzmocnionej jedną (po lewej) oraz czterema (po prawej) warstwami kompozytu PBO-FRCM [48]

Analizy pomiarów zależności obciążenie-ugięcie, przedstawionych na rysunku 30, wskazują, że przed zarysowaniem elementu wpływ wzmocnienia jest pomijalnie mały. W pierwszej fazie pracy elementów nachylenie wykresów było identyczne, a dopiero po zarysowaniu betonu rozciąganego zaobserwowano nieznaczną zmianę nachylenia wykresów spowodowaną obecnością wzmocnienia. Największe efekty wzmocnienia ujawniają się dopiero po uplastycznieniu zbrojenia, gdzie widoczna jest wyraźna zmiana kąta nachylenia wykresów zależności obciążenie-ugięcie.



Rys. 30. Zależność obciążenie-ugięcie dla elementów kontrolnych (a), elementów wzmocnionych jedną warstwą PBO-FRCM (b) i czterema warstwami PBO-FRCM (c) [48]

W tabeli 4 zestawiono podstawowe wyniki uzyskane w opisywanych badaniach związane z siłą niszczącą oraz ugięciami korespondującymi z charakterystycznymi punktami przejściowymi pomiędzy fazami pracy płyt. Wyniki podane dla poszczególnych serii uśredniono dla trzech identycznych elementów wykorzystanych w badaniach.

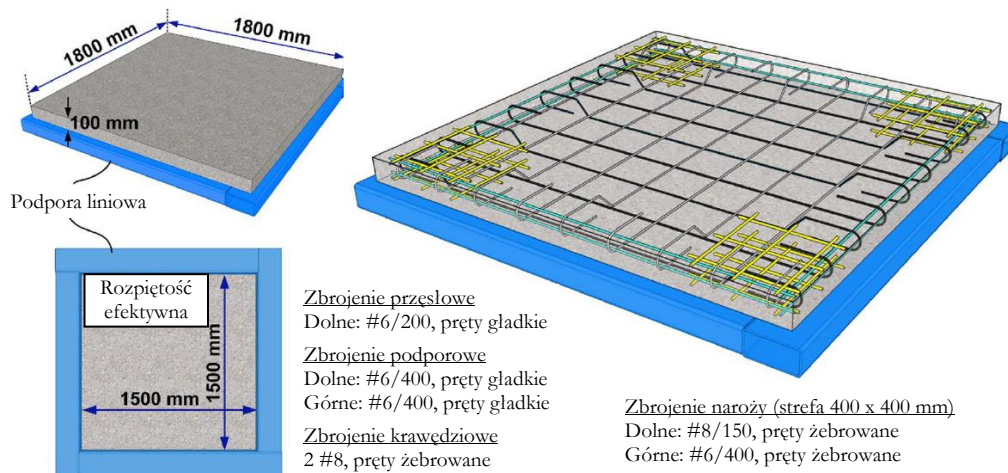
Tabela 4. Wyniki badań nośności płyt [48]

| Seria | Typ betonu | Typ wzmocnienia | Siła niszcząca | Względny przyrost nośności | Ugięcie przy uplastycznieniu zbrojenia | Ugięcie przy zniszczeniu |
|-------|-----------------------|--------------------|----------------|----------------------------|--|--------------------------|
| - | - | - | [kN] | [-] | [mm] | [mm] |
| L_0 | Mniejsza wytrzymałość | brak | 31,83 | - | 2,38 | 26,40 |
| L_1 | | 1 warstwa PBO-FRCM | 45,01 | 1,41 | 3,81 | 16,12 |
| L_4 | | 4 warstwy PBO-FRCM | 65,30 | 2,05 | 4,63 | 11,57 |
| H_0 | Większa wytrzymałość | brak | 31,01 | - | 2,46 | 30,71 |
| H_1 | | 1 warstwa PBO-FRCM | 42,00 | 1,35 | 4,32 | 21,81 |
| H_4 | | 4 warstwy PBO-FRCM | 65,76 | 2,12 | 5,42 | 16,79 |

Zwiększenie nośności uzyskane dzięki zastosowaniu wzmocnienia PBO-FRCM było zbliżone w elementach wykonanych z betonu mniejszej i większej wytrzymałości na ściskanie i wynosiło odpowiednio 35-41% dla jednej warstwy wzmocnienia PBO-FRCM i 105-112% dla czterech warstw wzmocnienia PBO-FRCM. Zastosowanie wzmocnienia wpłynęło na zwiększenie wartości ugięcia, przy którym dochodziło do uplastycznienia zbrojenia, jednak ograniczało końcową wartość ugięcia, co doprowadziło do zmniejszenia ciągliwości płyt. Większa liczba warstw wzmocnienia PBO-FRCM prowadziła do bardziej kruchego charakteru zniszczenia elementów.

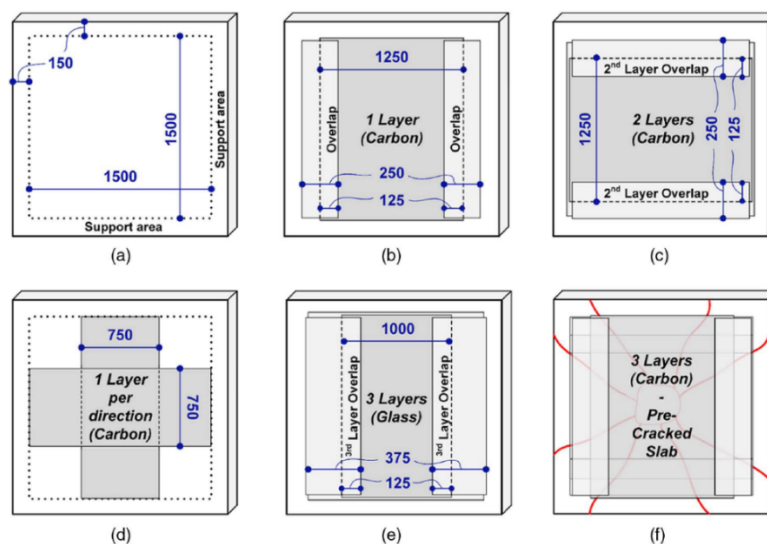
L. N. Koutas, D. A. Bournas, Flexural strengthening of two-way RC slabs with Textile-Reinforced Mortar: experimental investigation and design equations, Journal of Composites for Construction, 21(1), 2017, 04016065 [45]

Celem badań była ocena wpływu sposobu ukształtowania i liczby warstw siatek oraz materiału, z którego zostały one wykonane na efektywność wzmocnienia w zginanych elementach płytowych. Przedmiotem badań było sześć płyt kwadratowych o wysokości 100 mm i długości boku 1800 mm. Elementy zostały wykonane w dwóch partiach, w których uzyskano beton o zróżnicowanej średniej wytrzymałości na ściskanie: 19,8 MPa i 22,2 MPa. Stałe zbrojeniowe użyte w badaniach charakteryzowały się granicą plastyczności 470 MPa i 568 MPa oraz wytrzymałością na rozciąganie równą 508 MPa i 654 MPa odpowiednio dla prętów gładkich o średnicy 6 mm i żebrowanych o średnicy 8 mm. Zbrojenie płyt na zginanie w środku przęsła składało się z prętów o średnicy 6 mm dołem w rozstawie 200 mm rozłożonych w dwóch prostopadłych kierunkach. W obrębie podpór zastosowano zbrojenie prętami o średnicy 6 mm dołem i górną w rozstawie 400 mm, prostopadle do kierunku podpory. Naroża płyt zostały dodatkowo wzmocnione siatkami z prętów o średnicy 8 mm w rozstawie 150 mm, a każdą krawędź dobrojono dwoma prętami o średnicy 8 mm. Szkic wykorzystanych w badaniach elementów przedstawiono na rysunku 31.



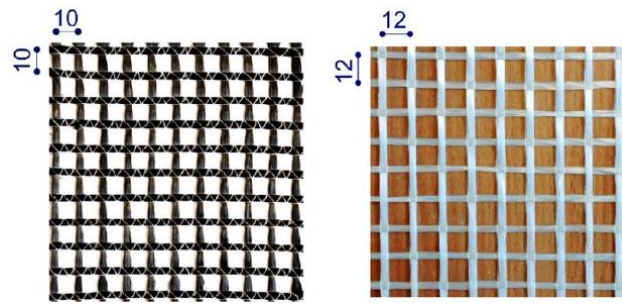
Rys. 31. Elementy wykorzystane w badaniach [45]

Wzmocnienie płyt wykonano w pięciu wariantach, przedstawionych na rysunku 32. W pierwszym zastosowano jedną warstwę siatki z włókien węglowych (b), a w drugim podwojono liczbę warstw wzmocnienia (c). Trzeci wariant składał się z dwóch wąskich pasów siatki z włókna węglowego krzyżujących się w środku rozpiętości płyty (d). W czwartej wzmocnionej płycie zastosowano trzy warstwy siatek z włókna szklanego (e). W ostatnim, piątym wzmocnionym elemencie, zastosowano trzy warstwy siatek z włókna węglowego (f), a próbkę poddano wstępnemu obciążeniu przed wzmocnieniem, w celu jej zarysowania. Jedną płytę pozostawiono bez wzmocnienia, w celach porównawczych (a). Na rysunku 33 przedstawiono włókna wykorzystane w badaniach.



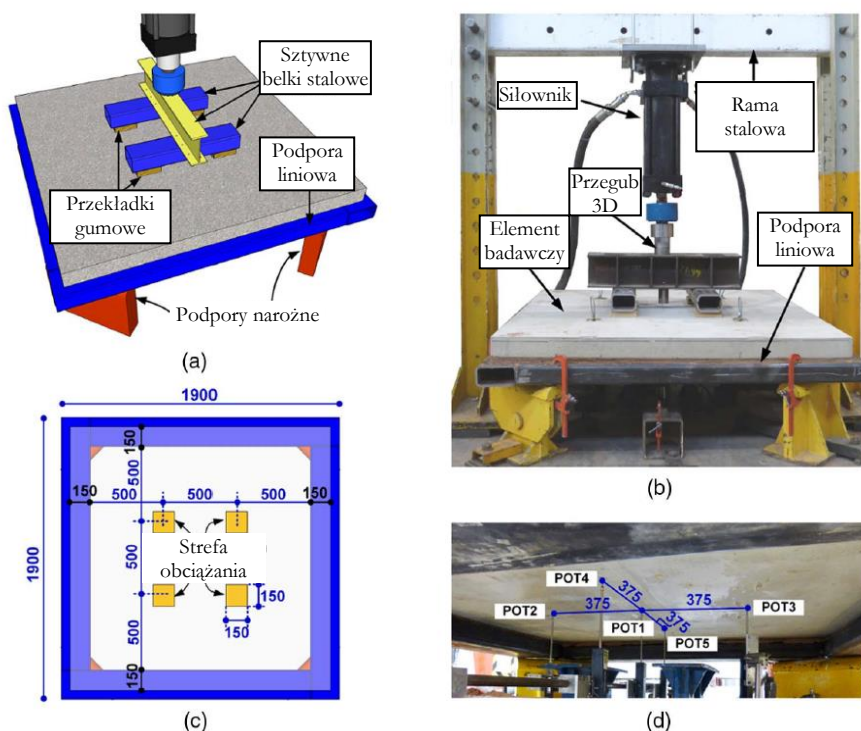
Rys. 32. Schematy zastosowanych wzmocnień (opis w tekście) [45]

Opisy na rysunku: *support area* – strefa podporowa, *1 layer* – jedna warstwa, *2/3 layers* – dwie/trzy warstwy, *overlap* – zakład, *2nd layer overlap* – zakład drugiej warstwy, *3rd layer overlap* – zakład trzeciej warstwy, *1 layer per direction* – jedna warstwa w jednym kierunku, *carbon* – siatka z włókna węglowego, *glass* – siatka z włókna szklanego, *pre-cracked slab* – płyta poddana zarysowaniu przed badaniem.



Rys. 33. Siatka z włókien węglowych (po lewej) i szklanych (po prawej) [45]

Płyty zostały poddane czteropunktowemu zginaniu z odległością między podporami liniowymi równą 1500 mm. Obciążeniem płyt były cztery siły skupione ułożone na planie kwadratu i oddalone od siebie o 500 mm. Pomiary ugięć płyty zostały wykonane za pomocą pięciu czujników indukcyjnych – czterech oddalonych o odległość $L/4$ od podpory, rozmieszczonych na osiach głównych elementu oraz dodatkowo jednym w środku przęsła płyty. Schemat stanowiska badawczego oraz jego fotografie przedstawiono na rysunku 34.



Rys. 34. Schemat stanowiska badawczego (a – widok 3D, b – widok z góry) oraz jego fotografie (c – widok od boku, d – widok o spodu z rozkładem czujników indukcyjnych) [45]

W wyniku badań otrzymano wartości sił niszczących płyty oraz mechanizmy zniszczenia, które przedstawiono w tabeli 5. Dodatkowo autorzy publikacji odnieśli się do sztywności płyt, zarówno przed, jak i po zarysowaniu. Otrzymane wyniki odniesiono do stanu granicznego użytkowalności ugięć dla wartości granicznej $L/250$. Wyniki związane ze stanami granicznymi użytkowalności przedstawiono w tabeli 6.

Tabela 5. Wyniki otrzymane w badaniach związane ze zniszczeniem elementów [45]

| Element badawczy (typ wzmocnienia) | Sila niszcząca | Przyrost nośności | Ugięcie przy zniszczeniu | Mechanizm zniszczenia |
|--|-------------------|----------------------|-----------------------------|---|
| - | [kN] | [%] | [mm] | - |
| Brak wzmocnienia | 95 | - | 52 | Zniszczenie płyty przy zginaniu |
| 1 warstwa siatki z włókna węglowego | 207 | 115 | 37 | Poślizg lub częściowe zniszczenie włókien wzmocnienia wskutek zginania |
| 2 warstwy siatki z włókna węglowego | 291 | 206 | 35 | Poślizg lub częściowe zniszczenie włókien wzmocnienia wskutek przebicia |
| 2 pasy siatki z włókna węglowego ułożone prostopadle | 178 | 87 | 25 | Poślizg lub częściowe zniszczenie włókien wzmocnienia wskutek zginania |
| 3 warstwy siatki z włókna szklanego | 142 | 50 | 20 | Poślizg lub częściowe zniszczenie włókien wzmocnienia wskutek zginania |
| 3 warstwy siatki z włókna węglowego (płyta zarysowana) | 302 | 218 | 35 | Poślizg lub częściowe zniszczenie włókien wzmocnienia wskutek zginania |

Tabela 6. Wyniki otrzymane w badaniach związane ze stanem granicznym użytkowalności elementów [45]

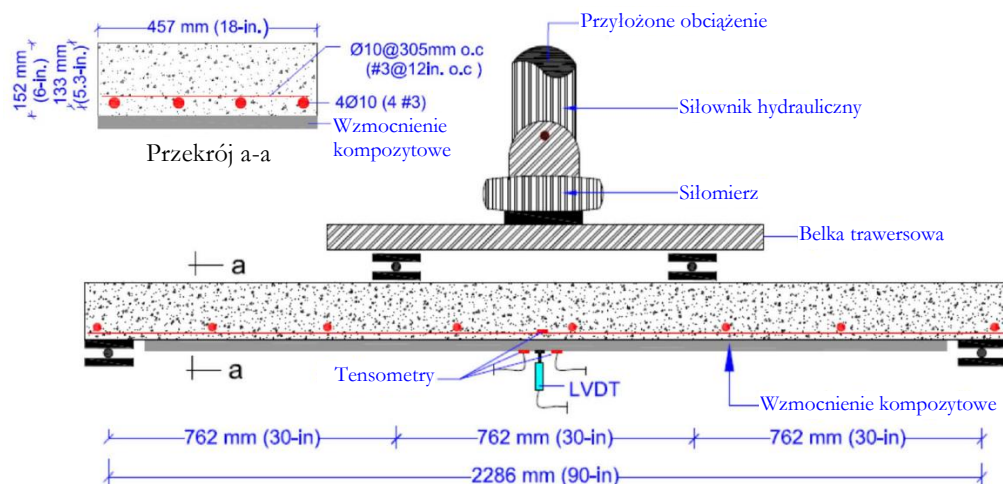
| Element badawczy (typ wzmocnienia) | Sztywność przed zarysowaniem (przyrost) | Sztywność po zarysowaniu (przyrost) | Sila rysująca | Obciążenie przy ugięciu L/250 (przyrost) |
|--|--|---|---------------|--|
| - | [kN/mm] | [kN/mm] | [kN] | [kN] |
| Brak wzmocnienia | 10,1 (-) | 1,0 (-) | 40 | 47 (-) |
| 1 warstwa siatki z włókna węglowego | 14,3 (42%) | 4,25 (325%) | 70 | 79 (68%) |
| 2 warstwy siatki z włókna węglowego | 17,6 (74%) | 7,50 (650%) | 90 | 97 (106%) |
| 2 pasy siatki z włókna węglowego ułożone prostopadle | 24,1 (139%) | 6,25 (525%) | 75 | 89 (89%) |
| 3 warstwy siatki z włókna szklanego | 22,0 (118%) | 4,05 (305%) | 90 | 89 (89%) |
| 3 warstwy siatki z włókna węglowego (płyta zarysowana) | - | 10,5 (905%) | - | - |

Wszystkie zastosowane typy wzmocnienia przyczyniły się do znaczących przyrostów nośności i sztywności badanych płyt. Wyniki wskazują, że zwiększenie liczby warstw wzmocnienia wpływa pozytywnie na zdolność elementu do przenoszenia obciążeń. Uzyskiwane przyrosty nośności i sztywności zarówno przed, jak i po zarysowaniu są proporcjonalne do liczby warstw kompozytu wzmacniającego, a rozłożenie

siatki ma wpływ na nośność elementu. Najefektywniejszym sposobem wzmocnienia okazało się klasyczne rozłożenie siatki na całej powierzchni elementu. Proponowany sposób krzyżowego ułożenia pasów siatki nie pozwala na osiągnięcie przyrostów nośności zbliżonych do konwencjonalnej metody rozkładu. Pozorne zwiększenie sztywności przy krzyżowym ułożeniu siatek wynika z występowania podwójnej warstwy kompozytu w miejscu koncentracji naprężeń pod siłami. Na podstawie porównania zachowania badanych elementów wzmocnionych kompozytami z włókien szklanych i węglowych, autorzy publikacji zasugerowali, że przyrost nośności wzmacnianego elementu jest proporcjonalny do sztywności podłużnej włókien. Wstępne zarysowanie płyty spowodowało redukcję efektywności wzmocnienia we wstępnej fazie obciążenia, jednak w momencie pełnej mobilizacji kompozytu wpływ wstępnego zarysowania nie był istotny. W każdym przebadanym przypadku sztywność zarysowanej płyty była proporcjonalna do liczby warstw siatki wzmacniającej (przy zastosowaniu tego samego typu włókien w kompozycie).

Z. R. Aljazaeri, J. J. Myers, Strengthening of Reinforced Concrete One-way Slabs for Flexure using Composite Materials: Evaluation of Different Composite Materials, Fourth International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies (SCMT4), Las Vegas, USA, 08.2016 [2]

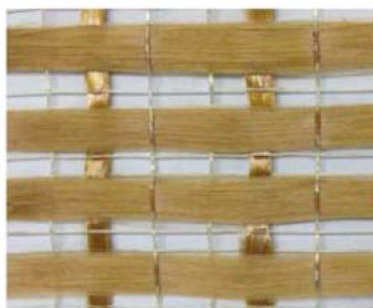
Celem badań była ocena wpływu typu zastosowanego kompozytu oraz liczby zastosowanych jego warstw na efektywność wzmocnienia zginanych płyt żelbetowych. Przedmiotem badań było trzynaście płyt o przekroju poprzecznym 457x152 mm i długości 2438 mm. Elementy zostały wykonane z betonu o średniej wytrzymałości na ściskanie 38 MPa i module Younga 30,33 GPa. Stal zbrojeniowa użyta w badaniach charakteryzowała się granicą plastyczności 482 MPa oraz wytrzymałością na rozciąganie równą 726 MPa. Zbrojenie płyt na zginanie składało się z czterech prętów o średnicy 10 mm, w rozstawie około 150 mm. Dodatkowo w płycie rozmieszczone zostało zbrojenie rozdzielcze z prętów o średnicy 10 mm w rozstawie 305 mm. Płyty zostały poddane czteropunktowemu zginaniu, z odległością między podporami równą 2286 mm. Siły zostały przyłożone w 1/3 rozpiętości płyty, co spowodowało, że odległość siły do podpory wynosiła 762 mm. Dokonano pomiaru ugięć w środku rozpiętości płyty za pomocą czujnika indukcyjnego. Pomiaru odkształceń każdej płyty przeprowadzono z wykorzystaniem trzech tensometrów elektrooporowych – jednego na głównym pręcie zbrojeniowym oraz dwóch na dolnej powierzchni kompozytu. Szkic geometrii elementów badawczych oraz stanowiska badawczego przedstawiono na rysunku 35.



Rys. 35. Geometria elementów oraz stanowiska badawczego wykorzystanych w badaniach [2]

Opisy na rysunku: *LVDT* – indukcyjny czujnik ugięć

Wzmocnienie płyt wykonano w trzech grupach materiałowych: wzmocnienie FRCM z siatkami PBO, wzmocnienie CFRP z siatki z włókna węglowego w żywicy epoksydowej oraz wzmocnienie SRP z siatki z drutu stalowego w żywicy epoksydowej. Siatki wykorzystane w kompozytach przedstawiono na rysunku 36. Wzmocnienie każdej grupy wykonano w wersji jedno-, dwu- i trójwarstwowej.



Siatka PBO



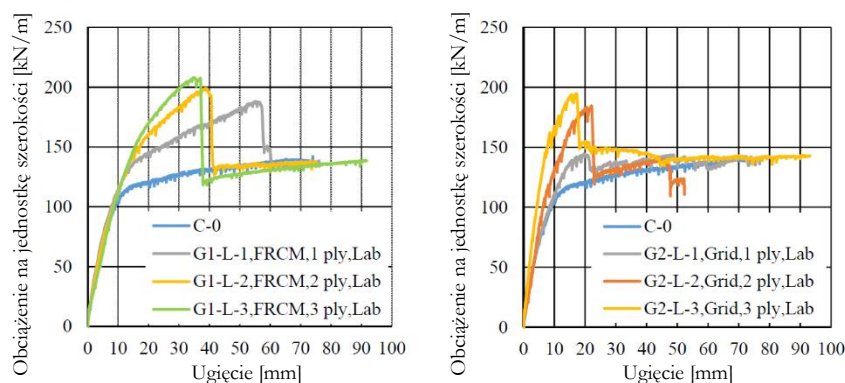
Siatka z włókna węglowego
zaimpregnowana żywicą



Siatka stalowa

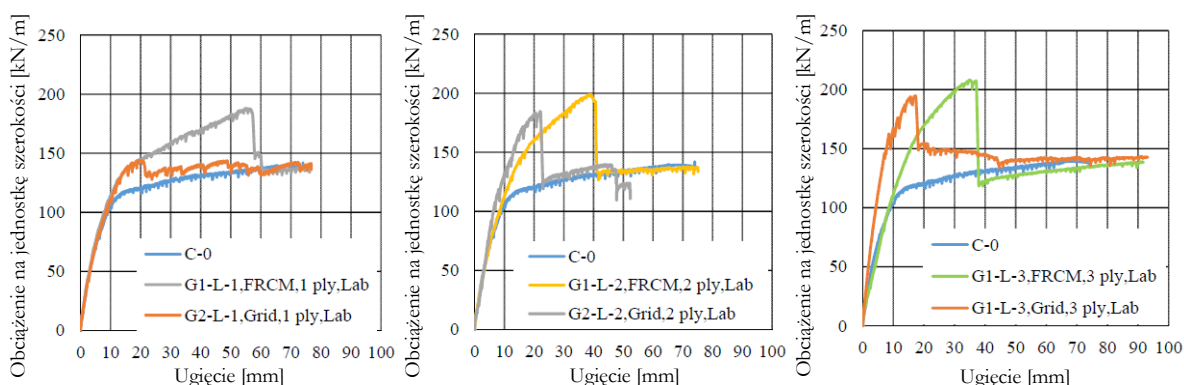
Rys. 36. Materiały siatek do wzmocnień wykorzystanych w badaniach [2]

Płyty zostały obciążone do 65% ich teoretycznej nośności w celu ich zarysowania przed aplikacją wzmocnienia. Wszystkie wzmocnione płyty przeniosły większe obciążenia od płyty kontrolnej. Po zarysowaniu, płyty ugiwały się proporcjonalnie do wartości obciążenia aż do momentu uplastycznienia stali. Płyta kontrolna w stanie plastycznym zmierzała do zniszczenia przy niewielkim zwiększeniu obciążenia. Kompozytowe wzmocnienia włączały się w tym momencie do współpracy, co pozwoliło na przeciwstawienie się większym obciążeniom. Po zniszczeniu wzmocnienia płyty przechodziły na ścieżkę pracy płyty niewzmocnionej. Przebiegi wykresów zależności obciążenia od ugięcia przebadanych próbek przedstawiono na rysunku 37.



Rys. 37. Zależność obciążenia od ugięcia dla płyt wzmocnionych kompozytami FRCM (po lewej) i CFRP (po prawej) [2]

Dla wzmocnienia systemem FRCM otrzymano przyrosty nośności o 36%, 43% i 57%, a dla systemu CFRP 7%, 36% i 43% odpowiednio dla jednej, dwóch i trzech warstw kompozytu. Płyty wzmocnione systemem FRCM charakteryzowały się większymi przyrostami nośności i sztywnością w porównaniu do ich odpowiedników ze wzmocnieniem CFRP. Przy większej liczbie warstw wzmocnienia widoczne było, że płyty wzmocnione systemem FRCM mają większe wartości ugięć od płyt wzmocnionych systemem CFRP przy identycznym poziomie obciążenia. Porównanie wykresów zależności obciążenia od ugięcia uzyskiwanych dla systemów FRCM i CFRP przedstawiono na rysunku 38.

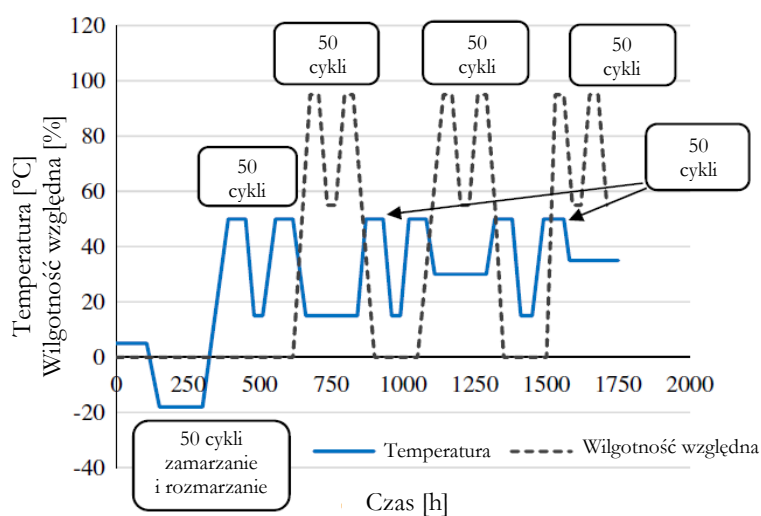


Rys. 38. Porównanie systemów FRCM i CFPR przy jednej (po lewej), dwóch (po środku) i trzech (po prawej) warstwach kompozytu [2]

Wzmocnienia FRCM zostały zniszczone przez poślizg siatki PBO w matrycy w przypadku jednej warstwy wzmocnienia oraz odspojenia kompozytu w przypadku dwóch lub trzech jego warstw. Wszystkie płyty wzmocnione systemem CFRP uległy zniszczeniu wskutek rozerwania siatki z włókna węglowego. Wyniki badań dotyczące wzmocnienia systemem SRP oraz próbek z komory klimatycznej zostały przedstawione w następnej, powiązanej części publikacji [3].

Z. R. Aljazaeri, J. J. Myers, Flexure Performance of RC One-Way Slabs Strengthened with Composite Materials Journal of Materials in Civil Engineering, 30, 2018, 04018120 [3]

W opisywanej publikacji powtórzono opis oraz wyniki badań z przedstawionych we wcześniej wydanych materiałach konferencyjnych [2], które zostały jednak poszerzone o analizę wpływów środowiskowych na badane elementy. Wykonano trzy dodatkowe elementy wzmocnione jedną warstwą opisywanych wyżej materiałów kompozytowych (FRCM, CFRP oraz SRP), które przed zniszczeniem poddano działaniu agresywnych warunków środowiskowych w postaci 50 cykli zamarzania i rozmrażania, 150 cykli ekspozycji na wysoką temperaturę oraz 150 cykli ekspozycji na wysoką wilgotność względną powietrza. Schemat cykli środowiskowych, którym poddane zostały płyty przedstawiono na rysunku 39.



Rys. 39. Schemat cykli środowiskowych wykorzystanych w badaniach [3]

Badania wykazały, że nośność płyt poddanych cyklowi zamarzania i rozmrażania jest równa nośności płyt przechowywanych w warunkach laboratoryjnych, niezależnie od zastosowanego typu wzmocnienia. Zaobserwowano również zwiększenie ciągliwości płyt wzmocnionych kompozytem FRCM o około 13% w stosunku do płyt niepoddanych cyklowi środowiskowym oraz zmniejszenie ciągliwości płyt wzmocnionych kompozytami CFRP oraz SRP. Zjawisko to spowodowane było najprawdopodobniej wpływem cykli środowiskowych na wiązanie matrycy mineralnej kompozytów FRCM w czasie jej twardnienia, co wpłynęło na zmianę warunków jej pielęgnacji. W przypadku płyt wzmocnionych kompozytami CFRP oraz SRP doszło do degeneracji właściwości żywicy epoksydowej, co obniżyło możliwość przenoszenia obciążeń przy dużych odkształceniach płyt.

Dodatkowo w publikacji [3] zamieszczono niepublikowane wcześniej wyniki pomiaru odkształceń głównych prętów zbrojeniowych oraz odkształcenia kompozytów wzmacniających, które przedstawiono w tabeli 7.

Tabela 7. Wyniki otrzymane w badaniach związane z odkształceniami zbrojenia i kompozytów [3]

| Typ wzmocnienia | Liczba warstw wzmocnienia | Odkształcenia głównych prętów zbrojeniowych | Odkształcenia kompozytu wzmacniającego |
|--|---------------------------|---|--|
| - | - | [‰] | [‰] |
| Brak wzmocnienia | - | 10 | - |
| FRCM | 1 | 12 | 10 |
| | 2 | 12 | 3,5 |
| | 3 | 6 | 10 |
| | 1* | 9 | 10 |
| CFRP | 1 | 6 | 3,5 |
| | 2 | 6 | 2 |
| | 2 | 6 | 2 |
| | 3 | 6 | 2 |
| | 1* | 7 | 4 |
| SRP | 1 | 13 | 6 |
| | 2 | 12 | 6 |
| | 3 | 10 | 3,2 |
| | 1* | 7 | 5 |
| * płyta poddana symulacji wpływów środowiskowych | | | |

Zaobserwowano, że kompozyty wzmacniające przytwierdzone do płyt mają zdecydowanie mniejsze odkształcenia niż główne pręty zbrojenia w płycie, co świadczy o ich poślizgu i niepełnym wykorzystaniu spowodowanym brakiem osiągnięcia maksymalnych dopuszczalnych odkształceń. W niektórych przypadkach zaobserwowano przedwczesne odspojenie wzmocnienia przy niskich poziomach obciążeń, co doprowadziło do zmniejszenia wartości pomiarów odkształceń wzmocnienia (np. w przypadku elementu wzmocnionego dwiema warstwami kompozytu FRCM). Wyniki przedstawione w publikacji nie pozwalają jednak jednoznacznie ocenić wpływu liczby warstw kompozytu na zmianę naprężeń w głównych prętach zbrojeniowych płyty.

L. Anania, A. Badalà, G. D'Agata, Numerical simulation of tests for the evaluation of the performance of the reinforced concrete slabs strengthening by FRCM, Curved and Layered Structures, 3(1), 2016, s. 63–73 [4]

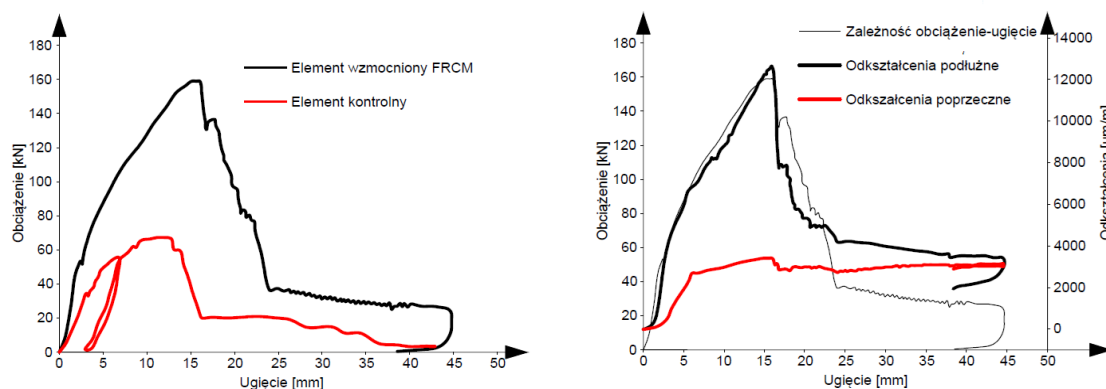
Celem badań była ocena wpływu wzmocnienia PBO-FRCM na nośność zginanych płyt żelbetowych oraz porównanie wyników badań laboratoryjnych z symulacją przeprowadzoną za pomocą metody elementów skończonych. Przedmiotem badań były dwie płyty kwadratowe o długości boku 700 mm oraz grubości 100 mm. Płyty wykonano z betonu o średniej wytrzymałości na ściskanie w zakresie od 50,89 MPa do 51,16 MPa. Zostały one zazbrojone górną i dolną siatką z prętów stalowych o średnicy 5 mm

o rozstawie 100 mm. Jedna z płyt została wzmocniona dwiema warstwami siatek PBO. Ugięcie płyt w próbie zginania zostało zmierzone z wykorzystaniem dwóch czujników indukcyjnych. Dodatkowo w środku rozciąganej części płyty przyklejono prostopadle do siebie dwa tensometry elektrooporowe o bazie pomiarowej 60 mm. Płyty poddano próbie trójpunktowego zginania z odległością między osiami podpór równą 600 mm. Stanowisko pomiarowe wykorzystane w badaniach przedstawiono na rysunku 40.



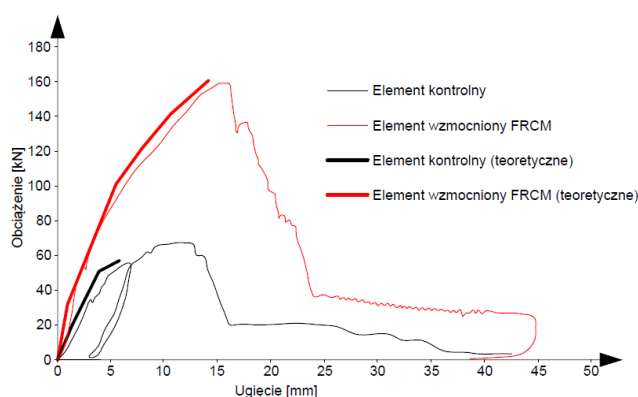
Rys. 40. Stanowisko pomiarowe wykorzystane w badaniach [4]

Zarysowanie niewzmocnionej płyty nastąpiło przy obciążeniu 56,6 kN, a przy sile 64,4 kN doszło do uplastycznienia rozciąganej stali zbrojeniowej, co doprowadziło do zniszczenia elementu. W przypadku płyty wzmocnionej zaobserwowano podobne mechanizmy zniszczenia, jednak ze względu na obecność dodatkowego kompozytu element był w stanie przenosić obciążenia aż do poziomu 160 kN. Poza typowymi odkształceniami rozciągającymi w kierunku głównym zginania, w płycie pojawiają się również odkształcenia na kierunku do niego prostopadłym. Pokazuje to, że wzmocnienie płyty jednokierunkowo zginanej na kierunku prostopadłym do głównego wyężenia włącza się do współpracy zwiększając nośność elementu. Wszystkie zależności siły od ugięcia uzyskane w badaniach przedstawiono na rysunku 41.



Rys. 41. Porównanie zachowania płyty wzmocnionej i niewzmocnionej (po lewej) oraz odkształceń płyty wzmocnionej na głównym kierunku zginania i kierunku do niego prostopadłym (po prawej), na podstawie [4]

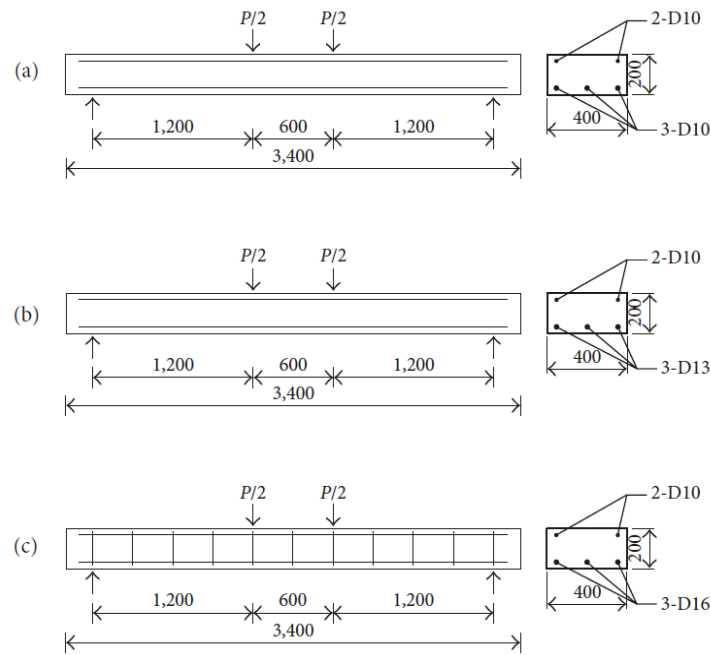
Płyty zostały zamodelowane w programie LUSAS z wykorzystaniem danych materiałowych uzyskanych w badaniach. Beton zamodelowano 20 węzłowymi elementami typu solid, dla zbrojenia przyjęto elementy prętowe, a dla siatek wzmacniających zdecydowano się przyjąć elementy powłokowe. Wynik obliczeń pokryły się z badaniami laboratoryjnymi. Otrzymano teoretyczne wartości nośności na zginanie 60 kN i 160 kN odpowiednio dla płyty niewzmocnionej i wzmacnionej. Porównanie wyników laboratoryjnych i teoretycznych przedstawiono na rysunku 42.



Rys. 42. Porównanie wyników laboratoryjnych i teoretycznych, na podstawie [4]

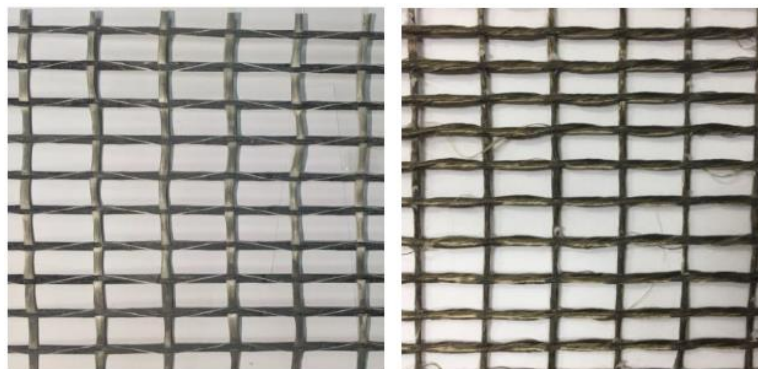
S. Lee, K. Hong, Y. Yeon, K. Jung, Flexural Behavior of RC Slabs Strengthened in Flexure with Basalt Fabric Reinforced Cementitious Matrix, Advances in Materials Science and Engineering, 2018, 2018, 2982784 [46]

Celem badań była ocena wpływu liczby warstw wzmocnienia systemem FRCM z włóknami bazaltowymi oraz stopnia zbrojenia stalą, na efektywność wzmocnienia w zginanych elementach płytowych. Przedmiotem badań było trzynaście płyt o przekroju poprzecznym 400 mm x 200 mm i długości 3400 mm. Zostały one wykonane z betonu o średniej wytrzymałości na ściskanie równej 33,8 MPa. Płyty zostały zazbrojone na zginanie trzema prętami w strefie rozciąganej. Zależnie od serii badań pręty te miały średnice 10, 13 lub 16 mm. W strefie ściskanej płyty w każdym przypadku umieszczono po dwa pręty o średnicy 10 mm. Dodatkowo w każdej próbce zastosowano strzemiona w kształcie litery U z prętów o średnicy 10 mm w 200 mm rozstawach w celu zapobiegnięcia zniszczenia elementów wskutek ścinania. Zastosowana stal zbrojeniowa charakteryzowała się granicą plastyczności 487 MPa, 469 MPa i 449 MPa, wytrzymałością na rozciąganie 621 MPa, 671 MPa i 622 MPa oraz modułem Younga 204 GPa, 199 GPa i 194 GPa odpowiednio dla średnic prętów 10, 13 i 16 mm. Płyty zostały poddane czteropunktowemu zginaniu z odległością między podporami równą 3000 mm. Siły przyłożono w rozstawie 600 mm, co spowodowało, że odległość od siły do podpory wynosiła 1200 mm. Szkice geometrii elementów badawczych oraz sposobu obciążania przedstawiono na rysunku 43.



Rys. 43. Geometria elementów badawczych oraz sposób przyłożenia obciążenia
(a – elementy ze zbrojeniem głównym #10, b – elementy ze zbrojeniem głównym #13,
c – elementy ze zbrojeniem głównym #16) [46]

Dokonano pomiarów ugięć płyt w środku ich rozpiętości z wykorzystaniem dwóch czujników indukcyjnych. Dodatkowo na ściskanej i rozciąganej stali, betonie i siatce wzmocnienia FRCM zainstalowano tensometry elektrooporowe w środku rozpiętości elementu. Płyty o różnych stopniach zbrojenia stałą wzmocniono jedną, dwoma lub trzema warstwami siatek z włókna bazaltowego w matrycy cementowej. Dla każdej serii próbek wykonano również płytę porównawczą bez wzmocnienia. W przypadku serii z najmniejszym stopniem zbrojenia stałą wykonano dodatkowo próbkę wzmocnioną siatką hybrydową z włókna węglowego i szklanego. Żadna z wykorzystanych siatek nie była uprzednio pokryta żywicą epoksydową. Wykorzystane w badaniach siatki przedstawiono na rysunku 44.



Rys. 44. Siatka hybrydowa z włókna węglowego i szklanego (po lewej) oraz siatka z włókna bazaltowego (po prawej) [46]

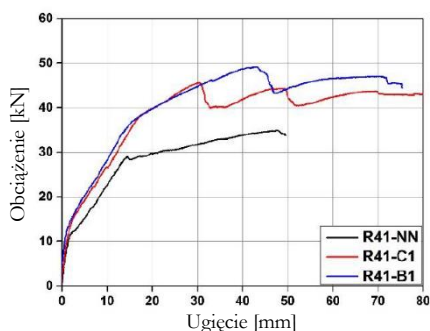
Podczas badania wszystkie płyty wzmocnione uległy zniszczeniu wskutek uplastycznienia rozciąganego zbrojenia, po którym następowało skruszenie betonu w strefie ściskanej. We wszystkich płytach ze wzmocnieniem FRCM zaobserwowano poślizg siatki wzmacniającej w matrycy przy maksymalnej wartości obciążenia, a ostateczne zniszczenie zainicjowane zostało rozerwaniem włókien kompozytu. Ogłędziny włókien po badaniu wykazały, że około 60% z nich uległo zniszczeniu. Wybrane wyniki badań dla poszczególnych płyt przedstawiono w tabeli 8.

Tabela 8. Wyniki badań nośności płyt [46]

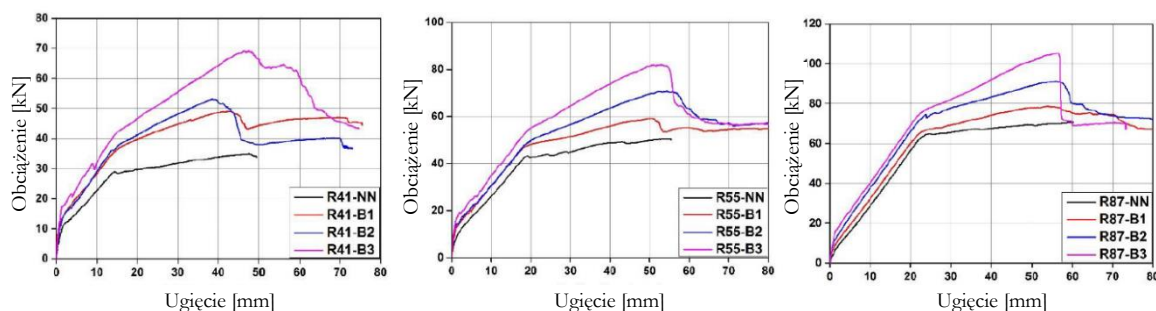
| Stopień zbrojenia | Typ wzmocnienia | Obciążenie uplastycznienia stali | Obciążenie maksymalne | Przyrost nośności |
|-------------------|--------------------------|----------------------------------|-----------------------|-------------------|
| [%] | - | [kN] | [kN] | [%] |
| 0,41 | Brak wzmocnienia | 28,94 | 34,90 | - |
| | 1 warstwa – w. węglowe | 39,70 | 45,60 | 30,7 |
| | 1 warstwa – w. bazaltowe | 36,82 | 49,16 | 40,9 |
| | 2 warstwy – w. bazaltowe | 36,26 | 53,06 | 52,0 |
| | 3 warstwy – w. bazaltowe | 41,36 | 69,16 | 98,2 |
| 0,55 | Brak wzmocnienia | 43,28 | 50,42 | - |
| | 1 warstwa – w. bazaltowe | 47,50 | 59,06 | 17,1 |
| | 2 warstwy – w. bazaltowe | 49,14 | 70,70 | 40,2 |
| | 3 warstwy – w. bazaltowe | 54,22 | 82,08 | 62,8 |
| 0,87 | Brak wzmocnienia | 64,84 | 70,72 | - |
| | 1 warstwa – w. bazaltowe | 66,08 | 78,66 | 11,2 |
| | 2 warstwy – w. bazaltowe | 74,56 | 91,20 | 29,0 |
| | 3 warstwy – w. bazaltowe | 75,54 | 105,24 | 48,8 |

Widoczne są znaczne przyrosty nośności płyt związane z zastosowanym wzmocnieniem, zarówno w przypadku obciążenia, przy którym następuje uplastycznienie stali, jak i maksymalnej siły przenoszonej przez płytę. Praca włókien bazaltowych i węglowych ma zbliżony charakter, co potwierdza wykres zależności obciążenia od ugięcia przedstawiony na rysunku 45. Przyrosty nośności płyt są praktycznie proporcjonalne do liczby zastosowanych warstw wzmocnienia, jednak stwierdzenie to nie jest prawdziwe w przypadku obciążenia odpowiadającego uplastycznieniu stali. Dużo większe przyrosty nośności obserwowano w przypadku płyt słabiej zbrojonych, co widoczne jest na rysunku 46. Przy obciążeniu odpowiadającym około 60% siły niszczącej zaobserwowano poślizg wzmocnienia widoczny na rozkładach odkształceń przekroju środkowego, które uzyskano z odczytów tensometrów przyklejonych na siatce wzmacniającej, stali zbrojeniowej i ściskanej krawędzi betonu. Charakter zniszczenia płyt był tym bardziej kruchy, im większy był zastosowany stopień zbrojenia stalą oraz im większa była liczba zastosowanych warstw wzmocnienia. Kruchość zniszczenia elementów z dużą liczbą warstw wzmocnienia spowodowana była wysoką sztywnością elementu w ostatniej fazie pracy, co prowadziło do wysokich wartości obciążeń,

przy stosunkowo niewielkich ugięciach. Zniszczenie wzmocnienia, które stanowiło znaczną część sztywności zarysowanego elementu, prowadziło do nagłego, kruchego charakteru zniszczenia.



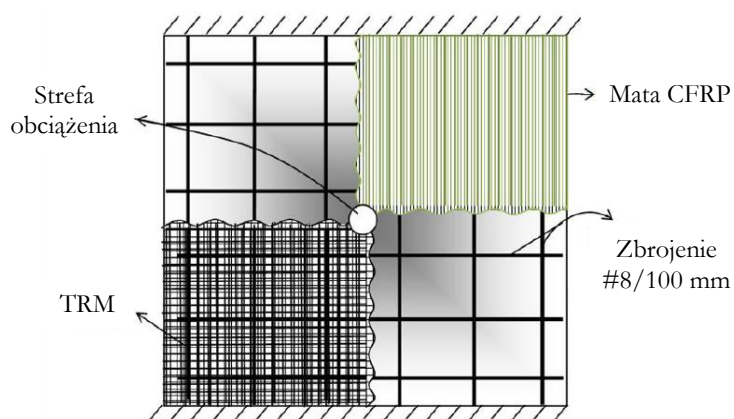
Rys. 45. Porównanie zachowania płyt wzmacnionych FRCM z włóknami węglowymi (czerwony, R41-C1) i bazaltowymi (niebieski, R41-B1) z elementem niewzmocnionym (czarny R41-NN) [46]



Rys. 46. Porównanie pracy płyt niewzmocnionych (czarny, R41-NN, R55-NN, R87-NN) oraz wzmacnionych jedną (czerwony, R41-B1, R55-B1, R87-B1), dwoma (niebieski, R41-B2, R55-B2, R87-B2) i trzema (fioletowy, R41-B3, R55-B3, R87-B3) warstwami kompozytu FRCM dla różnych stopni zbrojenia stałą (oznaczenia R41, R55 i R87, odpowiednio - 0,41%, 0,55% i 0,87%) [46]

H. Abbas, A. A. Abadel, T. Almusallam, Y. Al-Salloum, Effect of CFRP and TRM Strengthening of RC Slabs on Punching Shear Strength, Latin American Journal of Solids and Structures, 12, 2015, s. 1616-1640 [1]

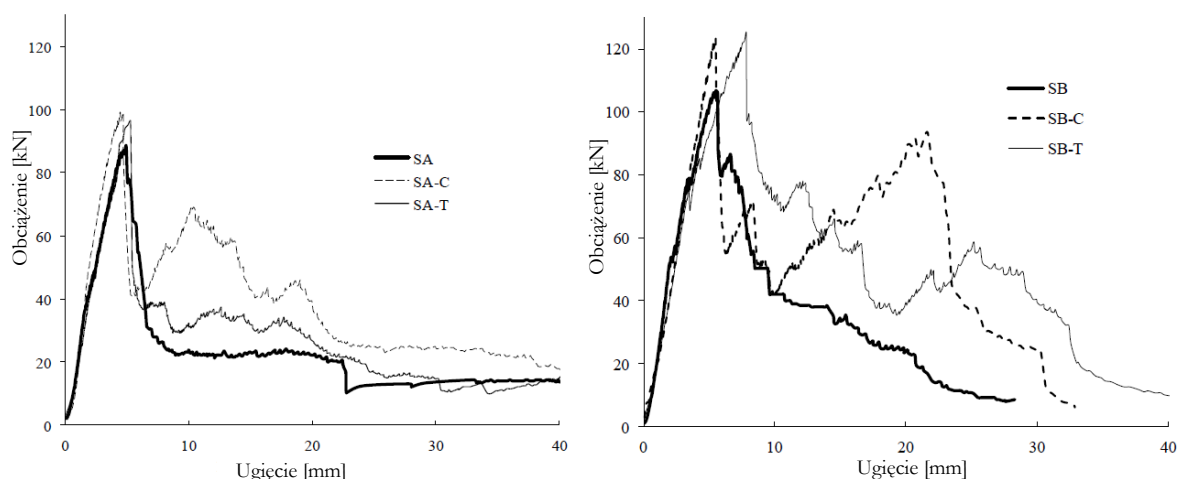
Celem badań była ocena wpływu typu zastosowanego kompozytu oraz wytrzymałości betonu, na efektywność wzmocnienia płyt żelbetowych na przebicie. Przedmiotem badań było dwanaście płyt kwadratowych o długości boku 600 mm oraz grubości 90 mm. Elementy badawcze wykonano z betonu o dwóch wytrzymałościach na ściskanie: 39,9 MPa i 63,2 MPa. Płyty zazbrojone zostały siatką z prętów o średnicy 8 mm w rozstawie 100 mm w obu kierunkach. Granica plastyczności wykorzystanej stali wynosiła 510 MPa. Płyty wzmocniono dwoma typami kompozytu: matami CFRP ułożonymi prostopadłe do kierunku podparcia oraz podwójną warstwą dwukierunkowych siatek TRM z włókna węglowego. Wykonano również płyty porównawcze bez wzmocnienia dla obu badanych typów betonu. Schemat podparcia, obciążenia oraz wzmocnienia płyt przedstawiono na rysunku 47.



Rys. 47. Schemat podparcia, obciążenia, zbrojenia i wzmocnienia badanych próbek [1]

Płyty zostały sztywno zamocowane na dwóch przeciwnych krawędziach i obciążone siłą skupioną za pomocą wałka z zaokrągleniem o średnicy 40 mm na jego końcu. W badaniu zmierzono siłę oraz przemieszczenie płyty. Wszystkie próbki uległy zniszczeniu w bardzo podobny sposób typowy dla przebiecia. Kąty nachylenia stożków zniszczenia były niemalże identyczne dla wzmocnienia TRM i CFRP i są one zbliżone do typowych wartości otrzymywanych w próbach badania na przebiecie. Przy analizie zależności obciążenia od ugięcia elementów wzmocnionych zaobserwowano dodatkowe rezydualne ekstremum nośności spowodowane współdziałaniem zbrojenia i kompozytów wzmacniających. W zależności obciążenia od ugięcia badanych elementów widoczny jest nagły spadek obciążenia przy uzyskaniu maksymalnej siły. Przy niskich wartościach obciążeń zachowanie płyt wzmocnionych systemami CFRP i TRM jest bardzo podobne, jednak przy większych wartościach sił widoczna jest większa sztywność płyt wzmocnionych kompozytami CFRP.

Zastosowanie wzmocnienia CFRP i TRM zwiększa nośność płyt na przebiecie (pierwszy pik w zależności obciążenie od ugięcia), jednak otrzymane przyrosty nie są wysokie (9,1-18,1%). W przypadku przyrostu wartości pierwszego piku wartości nośności nie obserwuje się również zdecydowanych różnic wartości pomiędzy dwoma badanymi systemami. Znaczne przyrosty i różnice widoczne są przy wartości nośności rezydualnej na przebiecie (drugie ekstremum). W przypadku wzmocnienia CFRP uzyskano przyrosty tej wartości o 189,6-275,5%, a dla wzmocnienia TRM 55,4-135,7%. Efektywność zwiększania wartości rezydualnej nośności w obu systemach rośnie wraz ze zwiększaniem wytrzymałości betonu na ściskanie. Znacznie większą efektywność obserwuje się w przypadku kompozytu CFRP. Wartości sił otrzymanych w badaniach przedstawiono w tabeli 9. Zastosowanie wzmocnienia powoduje również zwiększenie ilości energii pochłanianej przy zniszczeniu elementu. W tym przypadku również bardziej efektywnie pracuje system CFRP (przyrosty o 65,5-66,1%). Wzmocnienie TRM spowodowało zwiększenie energii zniszczenia o 22,0-58,7%. Wykresy zależności obciążenia od ugięcia dla badanych płyt przedstawiono na rysunku 48.



Rys. 48. Zależność obciążenia od ugięcia dla betonu o mniejszej (po lewej) i większej (po prawej) wytrzymałości dla elementów kontrolnych (SA, SB), elementów wzmocnionych CFRP (SA-C, SB-C) i wzmocnionych TRM (SA-T, SB-T) [1]

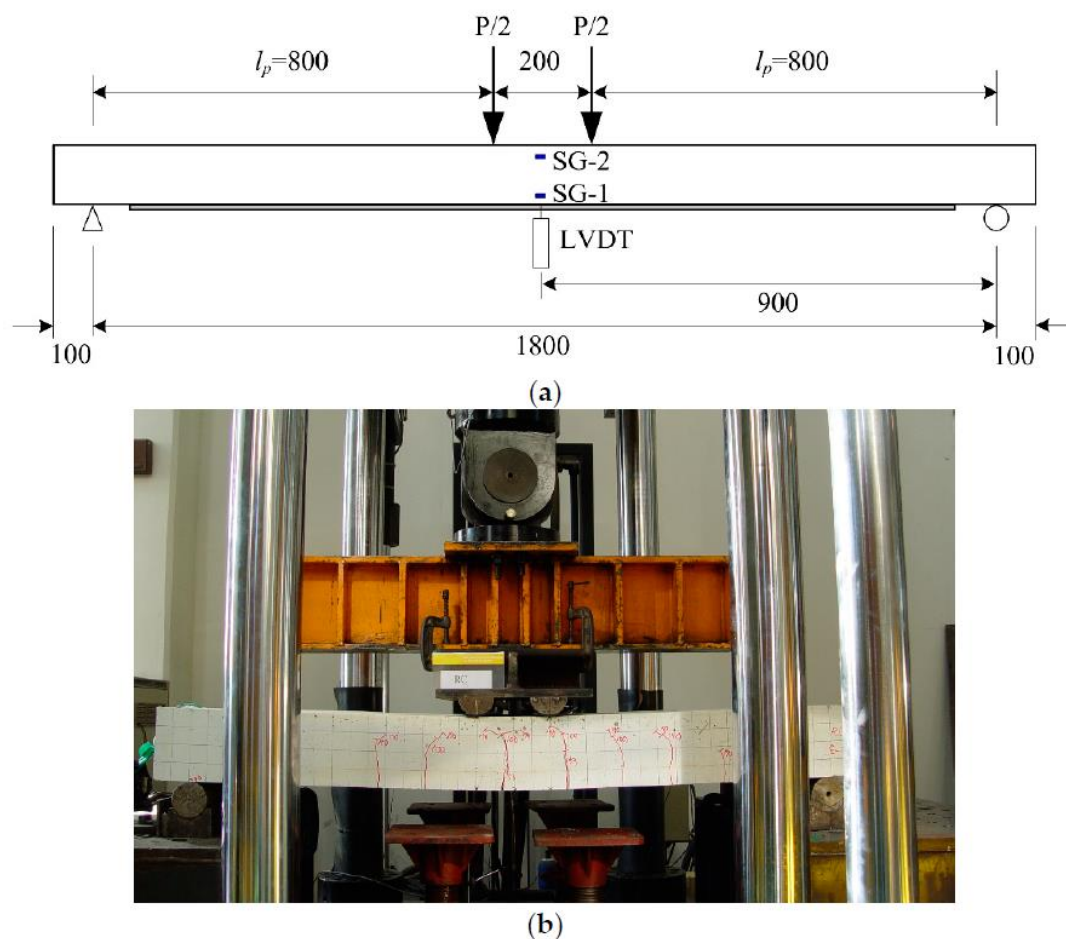
Tabela 9. Wartości sił otrzymane w badaniach [1]

| Wytrzymałość betonu płyty | Brak wzmocnienia | | Wzmocnienie CFRP | | Wzmocnienie TRM | |
|---------------------------|--------------------|------------------|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| | pierwsze ekstremum | drugie ekstremum | pierwsze ekstremum (przyrost) | drugie ekstremum (przyrost) | pierwsze ekstremum (przyrost) | drugie ekstremum (przyrost) |
| | [kN] | [kN] | [kN] (I%) | [kN] (I%) | [kN] (I%) | [kN] (I%) |
| 39,9 | 88,4 | 24,0 | 99,4 (12,4) | 69,5 (189,6) | 96,4 (9,1) | 37,3 (55,4) |
| 63,2 | 106,0 | 33,1 | 123,6 (16,6) | 93,5 (275,5) | 125,2 (18,1) | 57,7 (135,7) |

H.-Y. Kim, Y.-J. You, G.-S. Ryu, K.-T. Koh, G.-H. Ahn, S.-H. Kang, Flexural Strengthening of Concrete Slab-Type Elements with Textile Reinforced Concrete, Materials, 13, 2246 [43]

Celem badań była ocena wpływu dodatku włókien syntetycznych w matrycy mineralnej na efektywność wzmocnienia zginanych płyt żelbetowych za pomocą kompozytu TRC (ang. *Textile Reinforced Concrete*) uzyskiwanego metodą torkretowania. Przedmiotem badań były swobodnie podparte płyty żelbetowe jednokierunkowo zginane o długości 2000 mm (rozpiętość przęsła 1800 mm), szerokości 1000 mm i grubości 200 mm. Zbrojenie główne płyt stanowiło pięć prętów o średnicy 16 mm w dolnej warstwie zbrojenia oraz trzy pręty o średnicy 16 mm w górnej warstwie zbrojenia. Jako zbrojenie na kierunku prostopadłym do głównego kierunku zginania zastosowano pręty o średnicy 10 mm w rozstawie 165 mm. Płyty wykonano z betonu o wytrzymałości na ściskanie 30,2 MPa, a główne pręty zbrojeniowe charakteryzowały się granicą plastyczności równą 477 MPa. Jedna z płyt pozostawiona została jako

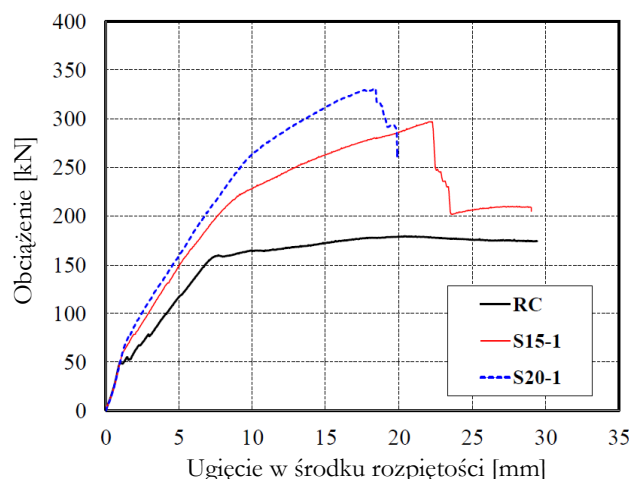
niewzmocniona, a pozostałe sześć podzielono na dwie grupy wzmacnione jedną lub dwiema warstwami kompozytu. W obrębie każdej grupy wykonano po jednym elemencie z różną zawartością włókien syntetycznych w matrycy – 0%; 1% oraz 1,5%. Płyty zniszczono w próbie czteropunktowego zginania, która została przeprowadzona według schematu przedstawionego na rysunku 49.



Rys. 49. Schemat podparcia, obciążenia badanych próbek (a – szkic, b – zdjęcie) [43]

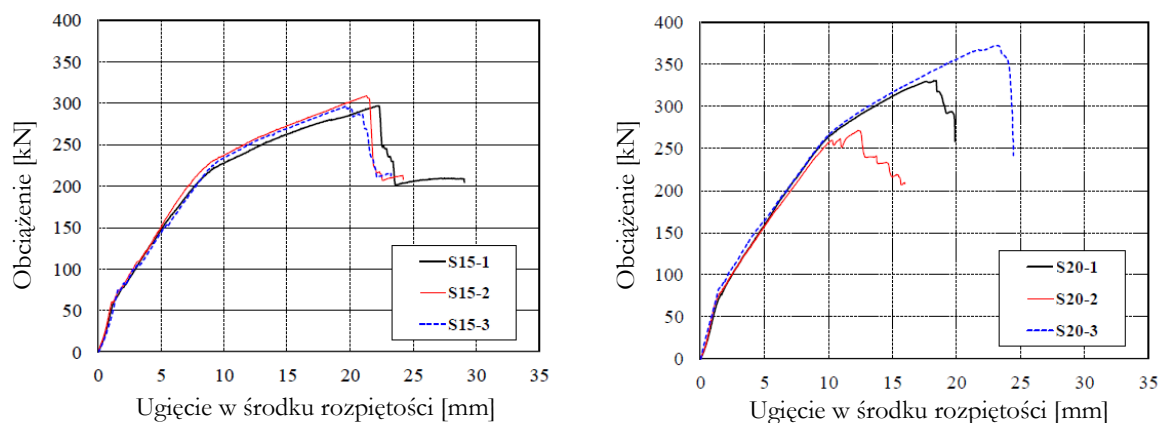
Opisy na rysunku: *LVDT* – indukcyjny czujnik przemieszczeń, *SG* – tensometr.

W czasie badania płyt bez modyfikacji matrycy mineralnej włóknami syntetycznymi zaobserwowano trójliniowy przebieg zależności obciążenia od ugięcia, typowy dla elementów żelbetowych wzmacnionych kompozytami na bazie zaprawy mineralnej. W przypadku płyty wzmacnionej jedną warstwą kompozytu widoczny jest wzrost siły rysującej o 9% w stosunku do elementu niewzmocnionego. Obciążenie związane z uplastycznieniem stali oraz maksymalna siła niszcząca wzrosły o odpowiednio 39% oraz 65% w porównaniu z elementem kontrolnym. Analogiczne wartości związane z płytą wzmacnioną dwiema warstwami kompozytu nie zostały podane. Na podstawie wykresu przedstawionego na rysunku 50 oszacowano ich wartości jako: 10%, 60% oraz 85%. Nie zaobserwowano jednak zmiany sztywności płyty przed momentem zarysowania betonu.



Rys. 50. Zależność obciążenia od ugięcia dla płyty kontrolnej oraz dwóch płyt wzmocnionych jedną (czerwony, S15-1) i dwiema (niebieski, S20-1) warstwami kompozytu TRC oraz elementu kontrolnego (czarny, RC) [43]

W płytach wzmocnionych kompozytami, w których zmodyfikowano matrycę mineralną poprzez dodatek włókien syntetycznych, zaobserwowano niewielki przyrost maksymalnej siły obciążającej, przy jednoczesnym zachowaniu stałej sztywności elementu. Wyniki tych badań przedstawiono na rysunku 51. Ostatnia cyfra opisu serii badań definiuje dodatek włókien syntetycznych w danej serii (1: 0% włókien; 2: 1% włókien; 3: 1,5% włókien). Znacznie obniżona wartość nośności płyty nr S20-2 wynikała z innego nieprzewidzianego mechanizmu zniszczenia, który spowodował przedwczesną utratę nośności elementu.

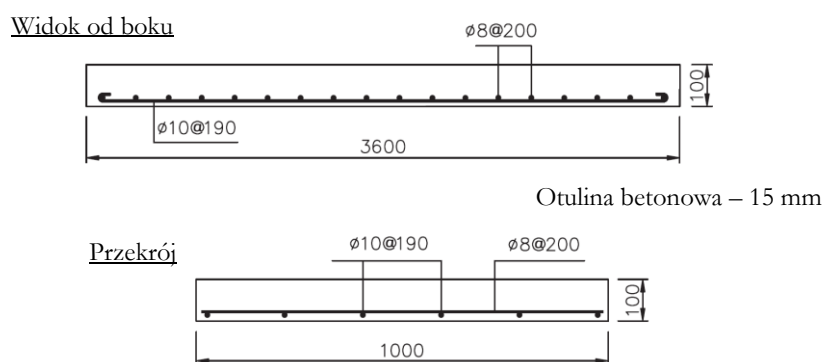


Rys. 51. Zależność obciążenia od ugięcia płyt z różnymi dodatkami włókien syntetycznych w matrycy – bez dodatku włókien (czarny, S15-1, S20-1), z 1% dodatkiem włókien (czerwony, S15-2, S20-2) oraz z 1,5% dodatkiem włókien (niebieski, S15-3, S20-3) dla 1 warstwy kompozytu (po lewej) i 2 warstw kompozytu (po prawej) [43]

Analiza zarysowania wszystkich przebadanych płyt wykazała, że badane kompozyty są bardzo efektywne w zakresie ograniczania szybkości rozwoju oraz rozwartości rys. Wpływ dodatku włókien na obraz rys związanych z obciążeniem był nieznaczny, jednak w wyniku zastosowania dodatkowych włókien syntetycznych znacznie zmniejszono szerokość rys związaną ze skurczem matrycy mineralnej.

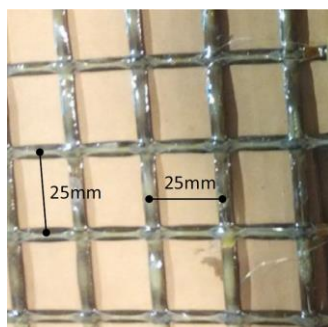
W. -Y. Gao, K. -X. Hu, J. -G. Dai, K. Dong, K. -Q. Yu, L. -J. Fang, Repair of fire-damaged RC slabs with basalt fabric-reinforced shotcrete, Construction and Building Materials, 185, 2018, s. 79-92 [36]

Celem badań, była ocena wpływu wzmocnienia kompozytowego złożonego z siatki bazaltowej oraz matrycy mineralnej na efektywność wzmocnienia zginanych płyt żelbetonowych uszkodzonych w wyniku pożaru. W badaniach różnicowano skład zastosowanej matrycy, liczbę warstw siatki wykorzystanej w kompozycie oraz stopień zniszczenia płyty przez ogień. Przedmiotem badań były płyty jednokierunkowo zginane o długości 3600 mm, szerokości 1000 mm i grubości 100 mm. Elementy wykonano z betonu o wytrzymałości na ściskanie 33,0 MPa oraz module Younga 32,29 GPa. Jako zbrojenie główne płyty zastosowano pręty o średnicy 10 mm w rozstawie 190 mm, a jako zbrojenie rozdzielcze wykorzystano pręty o średnicy 8 mm w rozstawie 200 mm. Pręty główne (średnica 10 mm) charakteryzowały się średnią granicą plastyczności oraz wytrzymałością na rozciąganie na poziomie odpowiednio 388,8 MPa i 563,9 MPa, a w przypadku zbrojenia rozdzielczego (średnica 8 mm) wartości te wynosiły odpowiednio 252,6 MPa oraz 437,1 MPa. Wartość modułu Younga wszystkich prętów zbrojeniowych była równa i wynosiła około 200 GPa. Geometrię elementów badawczych przedstawiono na rysunku 52.



Rys. 52. Geometria elementów wykorzystanych w badaniach [36]

Płyty zniszczono w schemacie czteropunktowego zginania z rozstawem podpór równym 3400 mm oraz z przyłożeniem sił w 1/3 rozpiętości przęsła. Przed badaniem, część płyt została poddana symulacji pożaru, co miało przyczynić się do obniżenia ich nośności. Do wzmocnienia płyt wykorzystano siatkę z włókien bazaltowych, która została uprzednio zaimpregnowana żywicą epoksydową (rysunek 53).

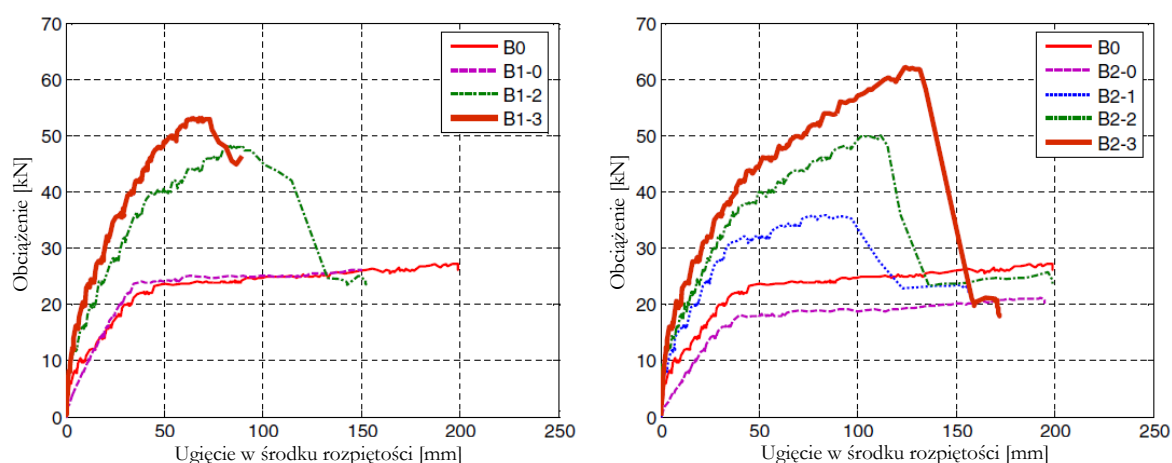


Rys. 53. Geometria siatki wykorzystanej w badaniach [36]

Jako matryce cementowe zastosowano dwie różne mieszanki, które zawierały syntetyczne modyfikatory. W matrycy typu PMM wykorzystano dodatek polimerów do cementu w stosunku 1:8. Drugi typ matrycy, opisany jako ECC uzyskano dzięki zmieszaniu cementu z piaskiem, popiołem lotnym oraz włóknami z alkoholu poliwinylowego. Zestawienie płyt wykorzystanych w badaniach oraz uzyskane wyniki nośności oraz siły rysującej przedstawiono w tabeli 10. Dodatkowo na rysunku 54 przedstawiono wykresy zależności obciążenia od ugięcia we wszystkich przebadanych płytach.

Tabela. 10. Lista elementów badawczych wykorzystanych w badaniach wraz z wynikami badań [36]

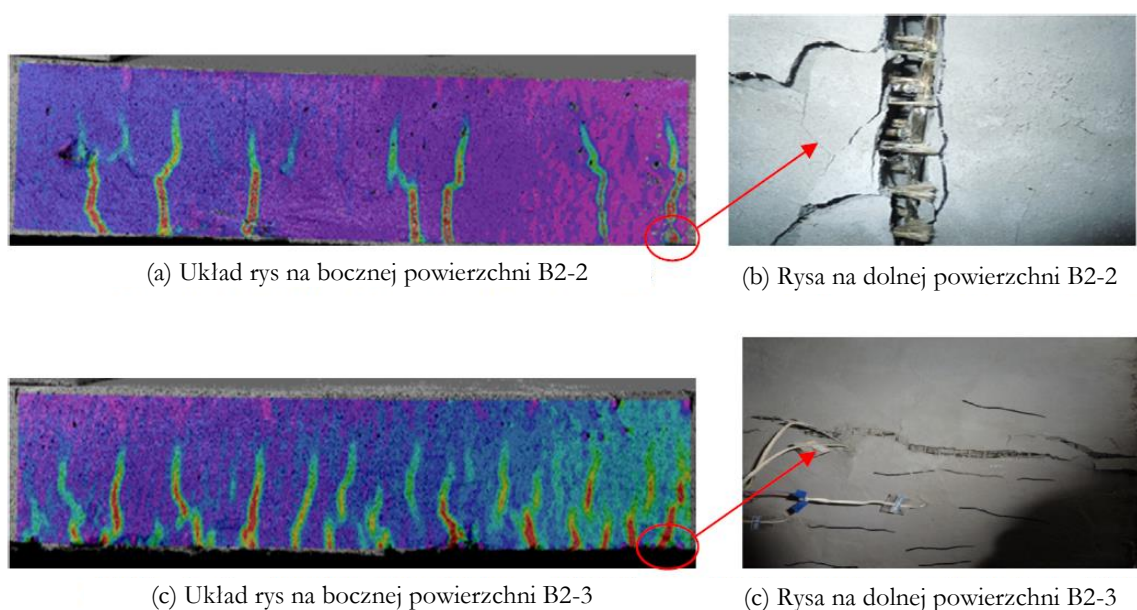
| Oznaczenie elementu | Czas trwania symulacji ogniowej | Liczba warstw wzmocnienia | Typ matrycy | Siła rysująca | Siła uplastycznienia stali zbrojeniowej | Siła niszcząca |
|---|---------------------------------|---------------------------|-------------|---------------|---|----------------|
| - | [min] | - | - | [kN] | [kN] | [kN] |
| B0 | 0 | 0 | - | 8 | 23,8 | 27,3 |
| B1-0 | 60 | 0 | - | 8 | 23,0 | 26,1 |
| B1-1* | | 2 | PMM | - | - | - |
| B1-2 | | 3 | PMM | 12 | 33,8 | 48,3 |
| B1-3 | | 3 | ECC | 16 | 39,8 | 53,3 |
| B2-0 | 81 | 0 | - | 6 | 18,2 | 21,2 |
| B2-1 | | 2 | PMM | 12 | 27,0 | 35,8 |
| B2-2 | | 3 | PMM | 12 | 34,1 | 50,1 |
| B2-3 | | 3 | ECC | 16 | 38,1 | 62,2 |
| * płyta nieumyślnie zniszczona przed przeprowadzeniem badań | | | | | | |



Rys. 54. Zależność obciążenia od ugięcia dla przebadanych płyt [36]

W badaniach pokazano znaczny spadek wszystkich badanych parametrów wytrzymałościowych płyty po wystawieniu na działanie ognia w czasie 81 minut. Spadki te, w każdym rozpatrywanym przypadku,

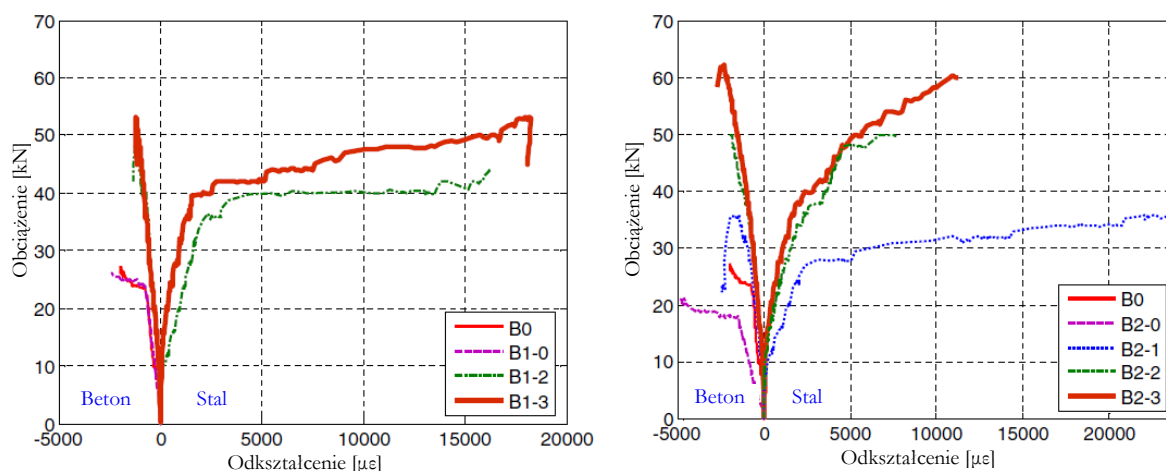
zawierają się w granicach około 20-25%, co jest wartością znaczącą. W przypadku ekspozycji 60 minutowej różnice tych parametrów są niewielkie i nie przekraczają 5%. Zastosowane wzmocnienia wyraźnie zwiększyły siłę potrzebną do zarysowania płyty, nawet w stosunku do elementu niepoddanego symulacji pożarowej. Podobna sytuacja miała miejsce w odniesieniu do siły związanej z uplastycznieniem stali oraz siły niszczącej. Szczególnie efektywne okazały się wzmocnienia z matrycą ECC, które wykazały o 33,3% lepszą skuteczność w podnoszeniu siły rysującej w porównaniu z matrycą PMM, co spowodowane jest najprawdopodobniej obecnością włókien syntetycznych. Podobnie jak w przypadku wyżej opisanych właściwości, kompozyty z matrycą ECC wykazywały się większą skutecznością w podnoszeniu siły niszczącej niż kompozyty z matrycą PMM. Maksymalne zarejestrowane obciążenia dla elementów wzmocnionych kompozytem z matrycą ECC było o 10,4-24,2% większe niż analogiczne obciążenia uzyskiwane w elementach wzmocnionych kompozytami z matrycą PMM. Dodatkowy pozytywny wpływ włókien w matrycy uwidocznił się w charakterze zarysowań, który został wykryty dzięki pomiarom odkształceń bocznej powierzchni płyty z wykorzystaniem metody DIC (ang. *Digital Image Correlation*), co pokazano na rysunku 55. Zarysowania w płycie wzmocnionej kompozytem z matrycą ECC są znacznie drobniejsze i gęściej rozmieszczone, co jest efektem pożądanym.



Rys. 55. Charakter zarysowania płyt wzmocnionych kompozytem z wykorzystaniem matryc PMM (wyżej – a,b) i ECC (niżej – c, d) [36]

W badaniach przeanalizowano również wpływ wzmocnienia kompozytowego na odkształcenia głównych prętów zbrojeniowych oraz betonu ściskanego. Do momentu zarysowania nie ma widocznych różnic w odkształceniach elementów, jednak po przekroczeniu siły rysującej, uwidaczniają się różnice w działaniu poszczególnych badanych konfiguracji wzmocnień kompozytowych. Szczególnie widoczne różnice występują po momencie uplastycznienia stali, kiedy kompozyt wzmacniający zaczyna odgrywać największą rolę. Zwiększenie liczby warstw kompozytu spowodowało obniżenie odkształceń prętów zbrojeniowych,

co uwidoczniło się jeszcze mocniej w przypadku płyt z matrycą z włóknami syntetycznymi ECC. Dokładne wyniki odkształceń betonu i stali zbrojeniowej przedstawiono na rysunku 56.

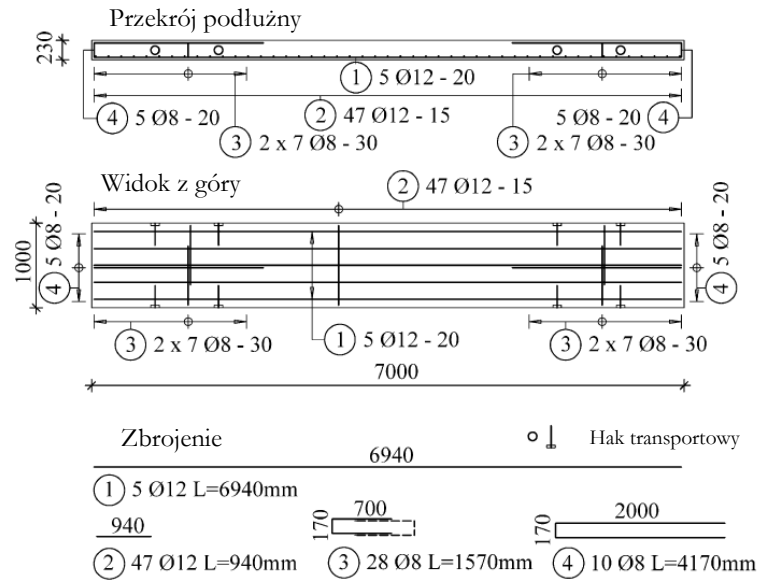


Rys. 56. Odształcenia prętów zbrojeniowych (po lewej) oraz betonu (po prawej) [36]

Przeprowadzone analizy odkształceń siatki kompozytu wzmacniającego wykazały, że odkształcenia prętów zbrojeniowych były większe niż uzyskiwane w włóknach bazaltowych wzmocnienia, szczególnie w końcowej fazie bezpośrednio przed zniszczeniem płyty, co świadczy o częściowym odspojeniu kompozytu. W przypadku matrycy cementowej ECC różnice te były znacznie mniejsze w porównaniu z matrycą PMM, co w połączeniu z wcześniej opisanymi wynikami świadczy o wyższości matrycy z dodatkiem włókien nad matrycami tradycyjnymi.

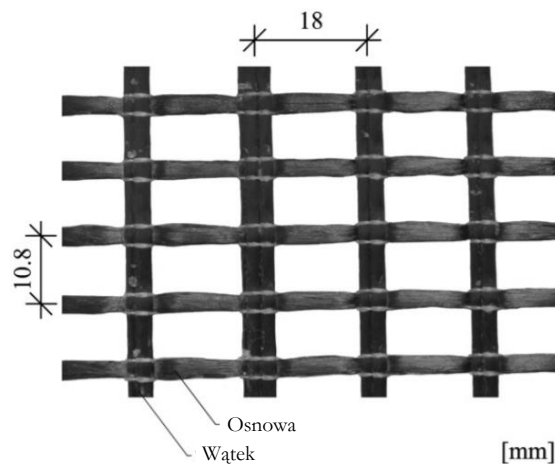
F. Schladitz, M. Frenzel, D. Ehlig, M. Curbach, Bending load capacity of reinforced concrete slabs strengthened with textile reinforced concrete, Engineering Structures, 40, 2012, s. 317-326 [63]

Celem badań była ocena wpływu liczby warstw wzmocnienia siatką z włókna węglowego w matrycy cementowej na efektywność wzmocnienia zginanych płyt żelbetowych. Przedmiotem badań było pięć płyt o przekroju poprzecznym 1000x230 mm i długości 7000 mm. Zostały one wykonane z betonu o średniej wytrzymałości na ściskanie 45,5 MPa i średnim module Younga 26,15 GPa. Stal zbrojeniowa użyta w badaniach charakteryzowała się granicą plastyczności 574 MPa oraz wytrzymałością na rozciąganie równą 682 MPa. Zbrojenie płyt na zginanie składało się z pięciu prętów o średnicy 12 mm w rozstawach 200 mm. Dodatkowo w płycie rozmieszczone zostało zbrojenie rozdzielcze z prętów o średnicy 12 mm w rozstawie, co 150 mm. Zbrojenie dolne zostało zakotwione za pomocą prętów o średnicy 8 mm w kształcie litery U. W celu ustabilizowania prętów zastosowano dodatkowo po siedem strzemion składających się z dwóch prętów o kształcie litery U i średnicy 8 mm na obu końcach belki. Zbrojenie elementów badawczych przedstawiono na rysunku 57.



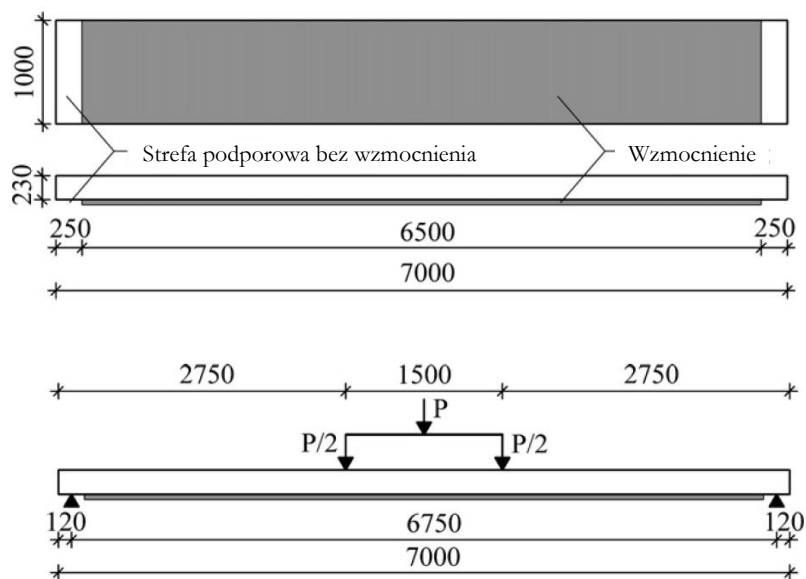
Rys. 57. Geometria zbrojenia elementów badawczych [63]

Cztery z pięciu badanych płyt wzmocniono jedną, dwoma, trzema oraz czterema warstwami siatki z włókna węglowego otoczonego żywicą polimerową, która pokryta została zaprawą cementową. Siatkę wykorzystaną w badaniach przedstawiono na rysunku 58.



Rys. 58. Geometria siatki z włókna węglowego wykorzystanej w badaniach [63]

Badane elementy zostały poddane czteropunktowemu zginaniu z odległością między podporami równą 6750 mm. Siły obciążające zostały przyłożone do płyty w rozstawie 1500 mm, co sprawia, że odległość od siły do podpory wynosiła 2625 mm. Geometrię wzmocnienia oraz stanowiska badawczego przedstawiono na rysunku 59.



Rys. 59. Geometria wzmocnienia elementów oraz stanowiska badawczego [63]

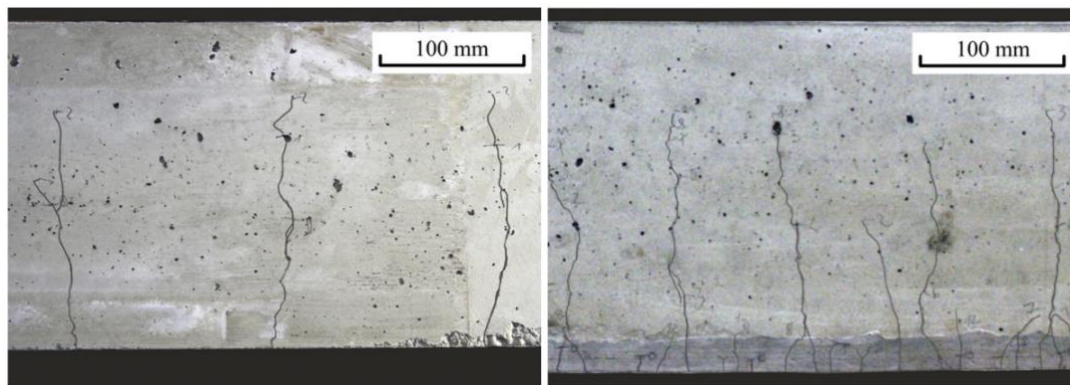
Przemieszczenia płyty zostały zmierzone za pomocą czujników indukcyjnych w środkowej części elementu. Dodatkowo w płycie referencyjnej oraz wzmocnionej dwiema warstwami siatki zastosowano optyczny pomiar odkształceń centralnej części elementu z wykorzystaniem dwóch kamer cyfrowych. Zastosowanie wzmocnienia spowodowało zwiększenie nośności płyty w każdym badanym przypadku. Przyrosty nośności były praktycznie proporcjonalne do liczby zastosowanych warstw siatki z włókna węglowego. Zaobserwowano również znaczny przyrost maksymalnego ugięcia płyt przy zniszczeniu. Wartości tych przyrostów są do siebie bardzo zbliżone i nie są proporcjonalnie zależne od liczby warstw siatki wzmacniającej. Wyniki badań przedstawiono w tabeli 11.

Tabela 11. Wyniki badań płyt [63]

| Element badawczy (typ wzmocnienia) | Siła niszcząca | Niszczący moment zginający | Przyrost nośności | Maksymalne ugięcie |
|---------------------------------------|----------------|----------------------------------|----------------------|-----------------------|
| - | [kN] | [kNm] | [%] | [mm] |
| Brak wzmocnienia | 25 | 66 | - | 94 |
| 1 warstwa | 58 | 110 | 67 | 223 |
| 2 warstwy | 96 | 160 | 142 | 229 |
| 3 warstwy | 119 | 191 | 189 | 240 |
| 4 warstwy | 147 | 228 | 245 | 244 |

Zniszczenie wzmocnionych płyt w każdym przypadku poprzedzone było głośnymi trzaskami spowodowanymi rozerwaniem włókien siatki. Zastosowanie wzmocnienia i zwiększanie liczby jego warstw wpływa pozytywnie na sztywność, co prowadzi do uzyskania mniejszych ugięć przy zadanych wartościach obciążenia. Poza zwiększeniem nośności i sztywności, wzmocnienie na bazie włókna węglowego w matrycy

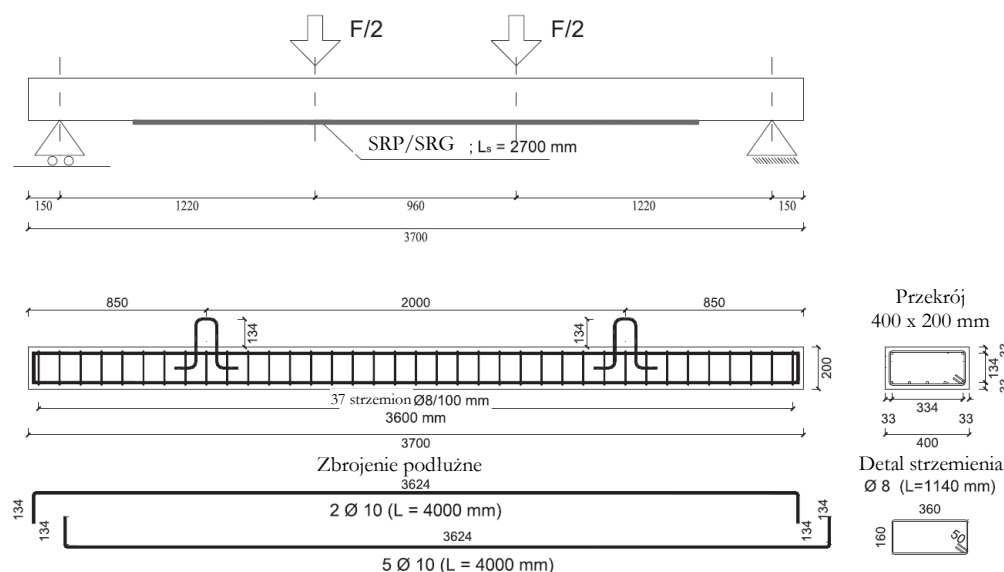
mineralnej prowadzi do uzyskania korzystniejszego układu zarysowania elementu. W przypadku płyty bez wzmocnienia zaobserwowano rysy o dużej rozwartości w rozstawie około 200 mm, które w elementach wzmocnionych zastąpione zostały przez układ drobniejszych rys w rozstawie 10-30 mm. Zwiększenie liczby warstw wzmocnienia powodowało zmniejszenie rozstawów i szerokości rys prostopadłych od zginania. Porównanie charakteru zarysowania płyty niewzmocnionej i wzmocnionej przedstawiono na rysunku 60.



Rys. 60. Porównanie zarysowania płyty niewzmocnionej (po lewej) i wzmocnionej (po prawej) [63]

A. Napoli, R. Realfonzo, Reinforced concrete beams strengthened with SRP/SRG systems: Experimental investigation, Construction and Building Materials, 93, 2015, s. 654–677 [54]

Celem badań było porównanie efektywności systemów wzmocnień typu SRP (ang. *Steel Reinforced Polymer*) i SRG (ang. *Steel Reinforced Grout*). Kompozyty te składają się z siatki stalowej, która zastępuje siatkę włóknistą wykorzystywaną w kompozytach FRCM, a jako matrycę stosuje się zaprawę mineralną (SRG) lub żywicę epoksydową (SRP). Przedmiotem badań było dziesięć płyt żelbetowych o długości 3700 mm, szerokości 400 mm oraz grubości 200 mm. Płyty zazbrojono wzdłużnie pięcioma prętami o średnicy 10 mm dołem oraz dwoma prętami o średnicy 10 mm góraj. Jako zbrojenie rozdzielcze zastosowano pręty o średnicy 8 mm w rozstawie, co 100 mm. Płyty wykonano z betonu o wytrzymałości na ściskanie 18,24 MPa oraz wytrzymałości na rozciąganie 2,60 MPa. Pręty o średnicy 10 mm wykonano ze stali o granicy plastyczności 460 MPa i wytrzymałości na rozciąganie 665 MPa. W przypadku prętów o średnicy 8 mm wartości te wynosiły odpowiednio 524 MPa i 690 MPa. Płyty przebadano w próbie czteropunktowego zginania przy długości przęsła 3400 mm oraz rozstawie sił równym 960 mm. Dziewięć płyt zostało wzmocnionych kompozytami SRP i SRG z różnymi typami zastosowanych siatek stalowych. Kompozyty przytwierdzono do spodniej części płyty na długości 2700 mm symetrycznie względem osi podpór i obciążenia. Geometrię elementów badawczych oraz stanowiska badawczego przedstawiono na rysunku 61. Zestawienie elementów badawczych wraz z przypisanymi wartościami sił niszczących, końcowym ugięciem elementu oraz mechanizmem zniszczenia przedstawiono w tabeli 12.



Rys. 61. Geometria elementów oraz stanowiska wykorzystanych w badaniach [54]

Tabela. 12. Zestawienie elementów badawczych wykorzystanych w badaniach wraz z podstawowymi wynikami badań [54]

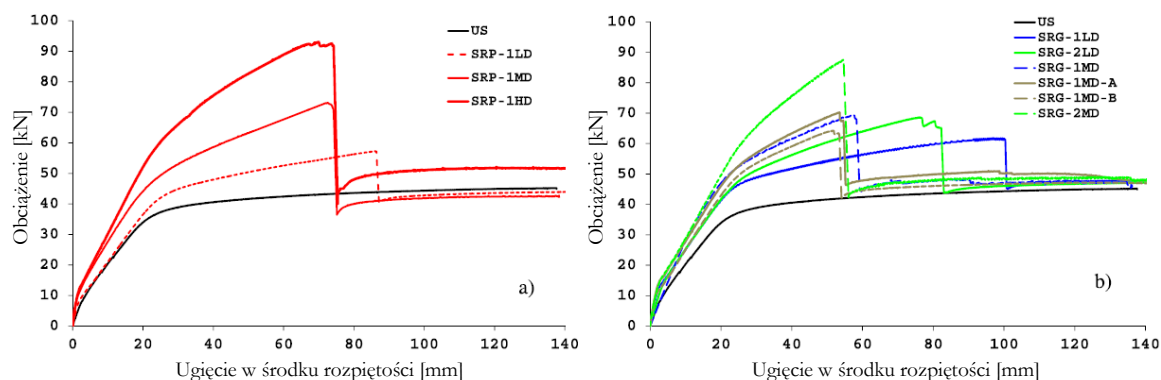
| Oznaczenie elementu | Typ matrycy | Liczba warstw siatki | Gęstość siatki | Siła niszcząca (przyrost) | Ugięcie przy zniszczeniu (spadek) | Mechanizm zniszczenia |
|---|-------------|----------------------|----------------|---------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| - | - | - | - | [kN] | [mm] | - |
| US | - | - | - | 45,23 | 137,61 | Zniszczenie strefy ściskanej betonu |
| SRP-1LD | Polimerowa | 1 | Niska* | 57,30 (27%) | 86,03 (-37%) | Rozerwanie wzmocnienia |
| SRP-1MD | | 1 | Średnia* | 73,15 (62%) | 72,56 (-47%) | Odspojenie wzmocnienia |
| SRP-1HD | | 1 | Wysoka* | 93,10 (106%) | 69,96 (-49%) | Odspojenie wzmocnienia |
| SRG-1LD | Mineralna | 1 | Niska* | 61,85 (37%) | 97,16 (-29%) | Rozerwanie wzmocnienia |
| SRG-2LD | | 2 | Niska* | 68,70 (52%) | 76,28 (-45%) | Odspojenie wzmocnienia |
| SRG-1MD | | 1 | Średnia* | 69,55 (54%) | 57,10 (-58%) | Odspojenie wzmocnienia |
| SRG-1MD-A | | 1 | Średnia* | 70,25 (55%) | 53,49 (-61%) | Odspojenie wzmocnienia |
| SRG-1MD-B | | 1 | Średnia* | 64,28 (42%) | 51,79 (-62%) | Odspojenie wzmocnienia |
| SRG-2MD | | 2 | Średnia* | 87,58 (94%) | 54,65 (-60%) | Odspojenie wzmocnienia |
| * Siatka: niskiej gęstości – 0,67 kg/m ² ; średniej gęstości – 2,00 kg/m ² ; wysokiej gęstości – 3,30 kg/m ² | | | | | | |

W zależności od zastosowanego typu wzmocnienia oraz liczby warstw siatki stalowej obserwowano różne mechanizmy zniszczenia płyty. W przypadku zastosowania jednej warstwy siatki stalowej o niskiej gęstości obserwowano rozerwanie kompozytu, co świadczy o pełnym wykorzystaniu potencjału siatki. W żadnym z pozostałych elementów badawczych nie zaobserwowano rozerwania siatki kompozytu, a wszystkie mechanizmy zniszczenia zostały zainicjowane przez odspojenie kompozytu wzmacniającego od powierzchni płyty. W przypadku zastosowania matrycy polimerowej z żywicy epoksydowej, do odspojenia dochodziło w warstwie otuliny betonowej, o czym świadczą fragmenty betonu przytwierdzone do kompozytu po jego oderwaniu. W przypadku płyty wzmocnionej kompozytem z matrycą z zaprawy mineralnej do odspojenia dochodziło na styku matryca-siatka lub beton-matryca, co potwierdzają fragmenty pierwszej warstwy matrycy przytwierdzone do powierzchni zniszczonej płyty. Opisywane mechanizmy zniszczenia przedstawiono na rysunku 62.



Rys. 62. Zniszczenie kompozytu na bazie matrycy polimerowej (po lewej)
oraz matrycy mineralnej (po prawej) [54]

Wzmocnienia płyt, w zależności od konfiguracji, spowodowały zwiększenie nośności elementu żelbetowego o 27-106%. Dodatkowo zastosowanie różnych badanych wzmocnień kompozytowych spowodowało zmniejszenie końcowego ugięcia płyt o 29-62%. Wyniki wskazują, że siatki stalowe o niskiej gęstości lepiej współpracują z matrycą mineralną niż z matrycą polimerową, co jest skutkiem dobrej penetracji matrycy między rzadkimi oczkami siatki. W przypadku zastosowania siatek o większej gęstości lub większej ich liczby uwidacznia się przewaga matrycy polimerowej z żywicy epoksydowej, która jest w stanie przenosić większe obciążenia i lepiej penetruje pomiędzy ciasno ułożonymi włóknami. Szczegółowe krzywe zależności siła-ugięcie dla kompozytów SRP i SRG przedstawiono na rysunku 63.

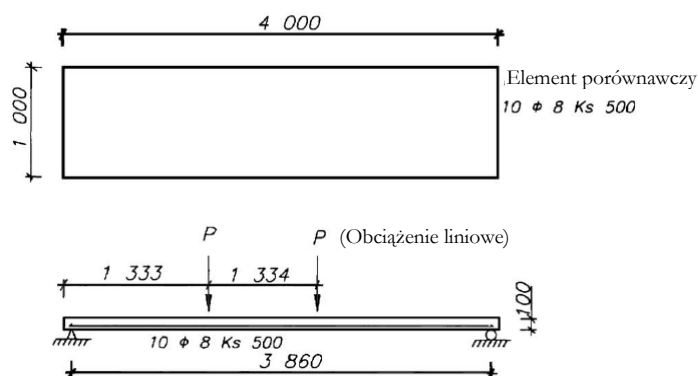


Rys. 63. Zależności siła-ugięcie uzyskane w badaniach dla płyt wzmocnionych kompozytem SRP (po lewej) i SRG (po prawej) [54]

Badania odkształceń kompozytów wykazały, że w centralnej części płyty, w strefie stałego momentu zginającego, odkształcenia kompozytów z matrycą polimerową (SRP) są nieznacznie większe niż w przypadku analogicznych kompozytów z matrycą mineralną (SRG). Przykładowo, dla pojedynczej warstwy siatki o niskiej gęstości zarejestrowano uśrednione odkształcenia o wartości 1,34% w kompozycie SRP i 0,95% w kompozycie SRG. W przypadku dwóch warstw kompozytu, wartości te wynoszą odpowiednio 0,95% i 0,69%. Rozkład odkształceń kompozytu z matrycą polimerową był bardziej równomierny, co spowodowane jest występowaniem mikro i makro spękań matrycy cementowej, co jest naturalnym mechanizmem jej pracy.

B.Täljsten, T. Blanksvärd, Mineral-Based Bonding of Carbon FRP to Strengthen Concrete Structures, Journal of Composites for Construction, 11(2), 2007, s. 120-128 [72]

Celem badań było porównanie i ocena efektywności różnych systemów wzmacniania jednokierunkowo zginanych płyt żelbetowych: metody klasycznej zakładającej dołożenie zbrojenia stalowego, wzmocnienie laminatami CFRP, wzmocnienie kompozytem składającym się z siatki CFRP w matrycy mineralnej. W badaniach wykorzystano płyty żelbetowe o długości 4000 mm, szerokości 1000 mm i grubości 100 mm. Każda z płyt została zbrojona podłużnie 10 prętami o średnicy 8 mm wykonanymi ze stali o granicy plastyczności 483 MPa i module Younga 209 GPa. Płyty zniszczono w schemacie czteropunktowego zginania przy długości przęsła równej 3860 mm i rozstawie sił 1334 mm (1/3 długości przęsła). Geometrię elementów badawczych oraz stanowiska badawczego przedstawiono na rysunku 64. Elementy badawcze zabetonowano w dwóch partiach, z czego wynikała zróżnicowana wytrzymałość betonu na ściskanie. Szczegółowe zestawienie elementów badawczych wraz z podstawowymi wynikami badań przedstawiono w tabeli 13.

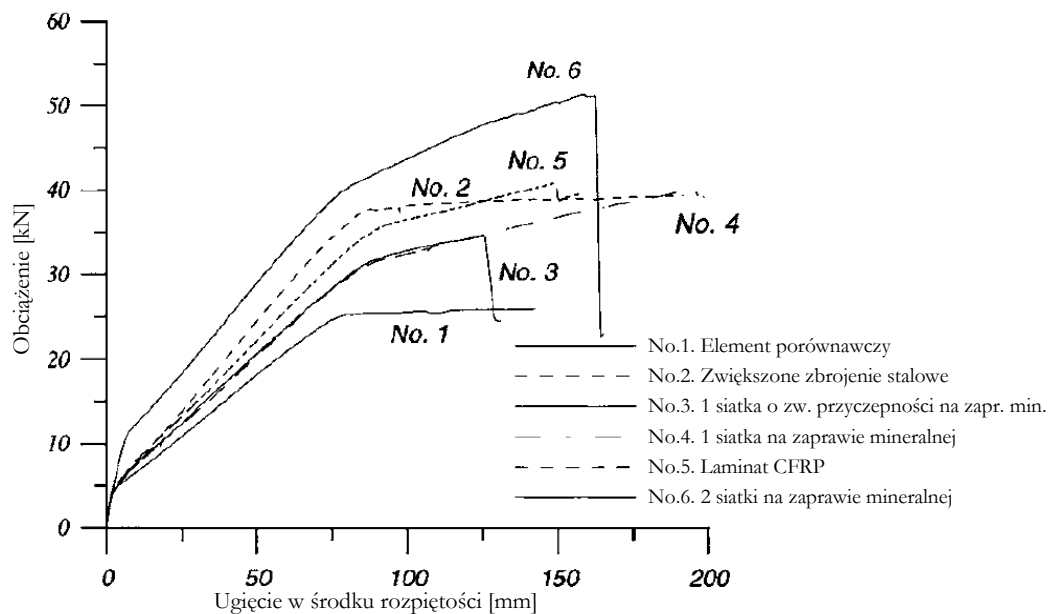


Rys. 64. Geometria elementów badawczych oraz stanowiska badawczego [72]

Tabela. 13. Zestawienie elementów badawczych wykorzystanych w badaniach wraz z podstawowymi wynikami badań [72]

| L.p. | Typ wzmocnienia | Wytrzymałość betonu na ściskanie | Wytrzymałość betonu na rozciąganie | Siła rysująca | Siła przy uplastycznieniu stali zbrojeniowej | Siła niszcząca |
|------|--|----------------------------------|------------------------------------|---------------|--|----------------|
| - | - | [MPa] | [MPa] | [kN] | [kN] | [kN] |
| 1 | - | 49,4 | 5,5 | 4 | 25 | 25 |
| 2 | Dodatkowe zbrojenie stalowe | 49,4 | 5,5 | 5 | 38 | 28 |
| 3 | 1 warstwa siatki o zwiększonej przyczepności w zaprawie mineralnej | 49,4 | 5,5 | 4 | 32 | 35 |
| 4 | 1 warstwa siatki w zaprawie mineralnej | 49,4 | 5,5 | 4 | 32 | 40 |
| 5 | Laminaty CFRP | 50,8 | 5,9 | 5 | 35 | 41 |
| 6 | 2 warstwy siatki w zaprawie mineralnej | 50,8 | 5,9 | 10 | 40 | 51 |

Płyta nr 2 została wzmocniona przez dodanie czterech dodatkowych prętów zbrojeniowych o średnicy 8 mm. W przypadku płyt nr 3, 4 i 6 zastosowano wzmocnienie siatką z włókien węglowych zaimpregnowanych żywicą epoksydową o przekroju $59 \text{ mm}^2/\text{m}$, która w przypadku płyty nr 3 została dodatkowo wypiaszkowana w celu zwiększenia przyczepności. Płytę nr 5 wzmocniono laminatami CFRP, których pole przekroju dopasowano tak, aby otrzymać możliwie zbliżony równoważny przekrój do wzmocnienia płyt nr 3 i 4 ($62 \text{ mm}^2/\text{m}$). Wykresy zależności siła-ugięcie uzyskane w badaniach przedstawiono na rysunku 65.



Rys. 65. Zależności siła-ugięcie uzyskane w badaniach [72]

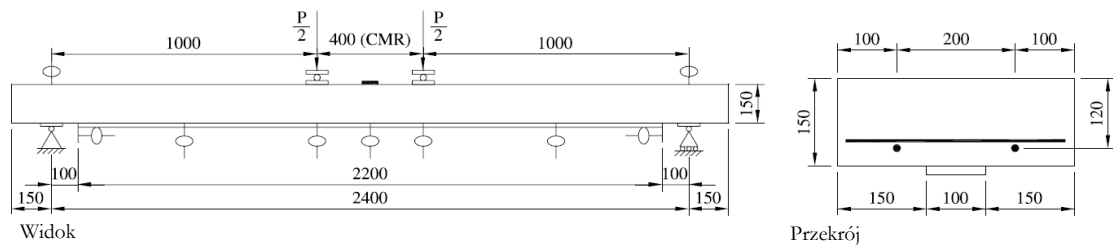
Płyty nr 2-5 zostały zaprojektowane tak, aby w teorii przenosić podobne obciążenia, jednak widoczne są różnice w ich pracy. Płyta, w której zastosowano zabiegi zwiększające przyczepność siatki kompozytu do matrycy, uległa przedwczesnemu zniszczeniu. Było to spowodowane lokalnym pęknięciem siatki, wynikającym najprawdopodobniej z koncentracji naprężeń, które powstało wskutek znacznie zwiększonej przyczepności włókien do matrycy, co uniemożliwiło odpowiednią redystrybucję naprężeń. Z drugiej strony, w płycie nr 4, w której nie zastosowano zabiegów zwiększających szorstkość płyty, zaobserwowano poślizg siatki w matrycy. Dodatkowo uwidacznia się wyraźnie mniejsza sztywność płyt wzmocnionych kompozytami na bazie zaprawy mineralnej w porównaniu z płytami wzmocnionymi laminatami CFRP, jednak uzyskiwane ostatecznie siły niszczące element badawczy są do siebie zbliżone. Zastosowanie podwojonego wzmocnienia przyczyniło się do zwiększenia wszystkich badanych parametrów wytrzymałościowych płyty, jednak efekt ten nie jest wprost proporcjonalny do liczby warstw wzmocnienia.

2.3.2 Wzmacnianie płyt żelbetowych innymi materiałami kompozytowymi

S. T. Smith, S. Hu, S. J. Kim, R. Seracino, FRP-strengthened RC slabs anchored with FRP anchors, *Engineering Structures*, 33, 2011, s. 1075–1087 [65]

Celem badań była ocena wpływu zakotwień wzmocnienia FRP na efektywność wzmocnienia zginanych płyt żelbetowych, ograniczenie ich odkształceń, zmianę reakcji na obciążenie oraz zmianę mechanizmów zniszczenia. Przedmiotem badań było osiem płyt o przekroju poprzecznym 400x150 mm i długości 2700 mm. Elementy zostały wykonane z betonu o średniej wytrzymałości na ściskanie w zakresie od 51,7 MPa do 56,8 MPa i module Younga od 28,389 GPa do 29,234 GPa. Różnice w tych wartościach wynikały z czasu trwania programu eksperymentalnego i nie powinny mieć znaczącego wpływu na główne wyniki badań. Stal zbrojeniowa użyta w badaniach charakteryzowała się granicą plastyczności 566 MPa oraz

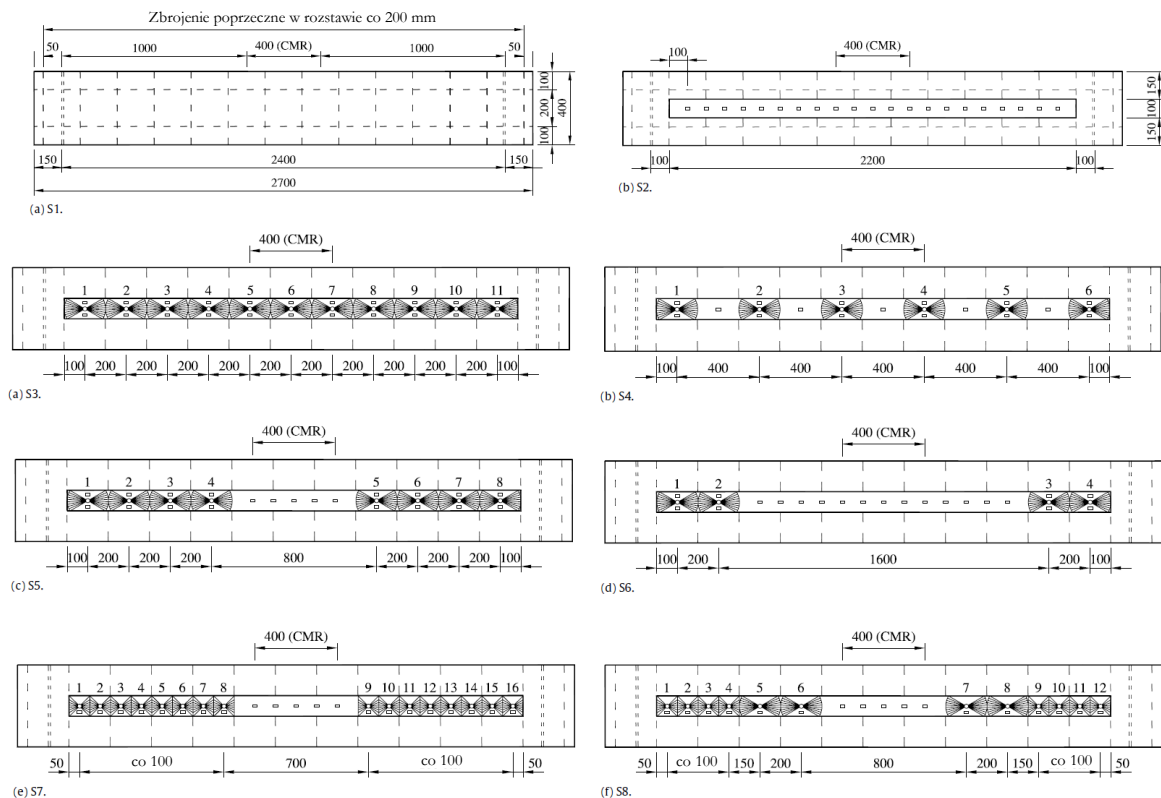
modułem Younga 198 GPa. Zbrojenie płyt na zginanie składało się z dwóch prętów o średnicy 10 mm. Dodatkowo w płycie rozmieszczone zostało zbrojenie rozdzielcze z prętów o średnicy 10 mm o rozstawie 200 mm. Płyty zostały poddane czteropunktowemu zginaniu, z odległością między podporami równą 2400 mm. Siły zostały przyłożone w odległości 200 mm od środka rozpiętości płyty (rozstaw sił 400 mm). Odległość od podpory do siły wynosiła 1000 mm. Geometrię elementów badawczych oraz stanowiska badawczego przedstawiono na rysunku 66.



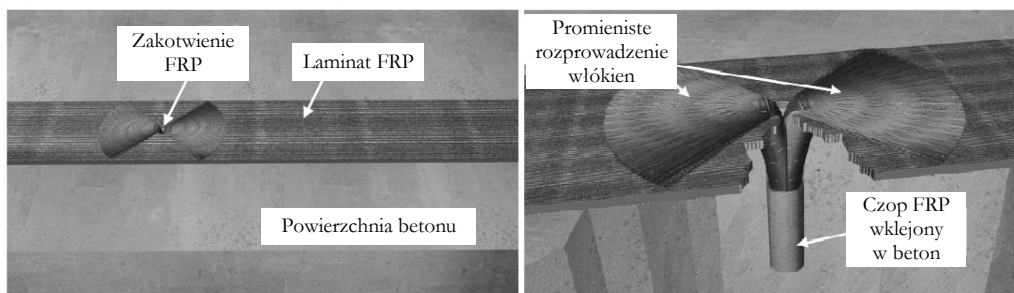
Rys. 66. Geometria elementów badawczych oraz stanowiska badawczego [65]

Opisy na rysunku: CMR – strefa stałego momentu zginającego

Płyty zostały wzmocnione pasem kompozytu FRP o szerokości 100 mm. W sześciu wzmocnionych płytach zastosowano różne rozkłady i wielkości kotew z włókien węglowych, a jedną płytę wzmocniono bez zakotwienia. Dodatkowo jedna z płyt została wykonana bez wzmocnienia FRP dla celów porównawczych. Zaproponowany rozkład kotew przedstawiono na rysunku 67, a schemat ich wykonania na rysunku 68.

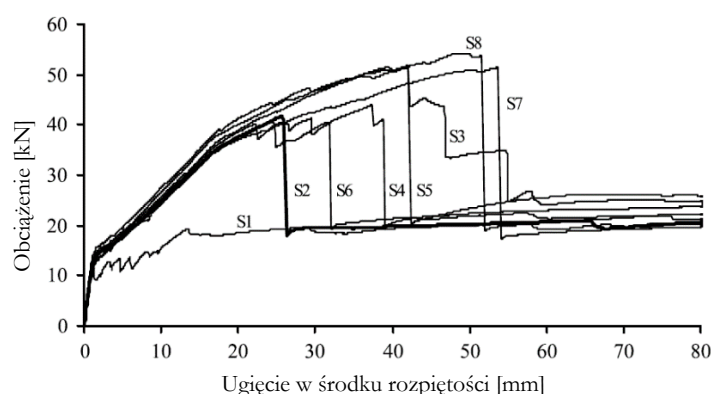


Rys. 67. Schematy wzmocnienia i zakotwienia płyt wykorzystanych w badaniach [65]



Rys. 68. Schemat zakotwienia FRP wykorzystanego w badaniach [65]

W każdej badanej płycie przyklejono po dwa tensometry elektrooporowe o bazie pomiarowej 90 mm na górnej (ściskanej) powierzchni elementu w środku jego rozpiętości. Na długości każdego pasa FRP rozmieszczono równomiernie w rozstawach, co 100 mm tensometry elektrooporowe o bazie pomiarowej 10 mm. Na długości płyty oraz przy podporach rozmieszczono czujniki indukcyjne do pomiaru przemieszczeń, jednak szczegółowej analizie poddane zostały jedynie czujniki w środku rozpiętości przęsła. Dodatkowo za pomocą czujników indukcyjnych dokonano pomiarów poślizgu końcówek pasów wzmocnienia FRP.



Rys. 69. Wykresy zależności siły obciążającej od ugięcia uzyskane w badaniach [65]

Wyniki badań wykazały silną zależność przenoszanej maksymalnej siły oraz odkształceń płyty od sposobu zakotwienia wzmocnienia FRP, co widoczne jest na wykresie przedstawionym na rysunku 69. We wszystkich płytach zauważono trójliniowy charakter zależności obciążenia od ugięcia. Pierwszym punktem załamania wykresu zależności siła-ugięcie jest zarysowanie betonu, a drugim - uplastycznienie stali. Zachowanie płyt po tym punkcie zależy jedynie od wzmocnienia FRP i jego zakotwienia. Wszystkie badane płyty ze wzmocnieniem FRP przeniosły większe obciążenia od elementu kontrolnego, w zależności od typu zakotwienia przyrosty siły maksymalnej wynosiły 100-167% w stosunku do elementu kontrolnego. Przy najkorzystniej ukształtowanym zakotwieniu uzyskano 30% przyrost maksymalnej siły w stosunku do wzmocnienia bez zakotwień. Zdecydowanie większe różnice widoczne były w wartości maksymalnego odkształcenia płyty, przy którym wzmocnienie uległo zniszczeniu. Zakotwienie pozwoliło zwiększyć maksymalną wartość ugięcia w momencie zniszczenia w zakresie 24-110% w stosunku do płyty bez

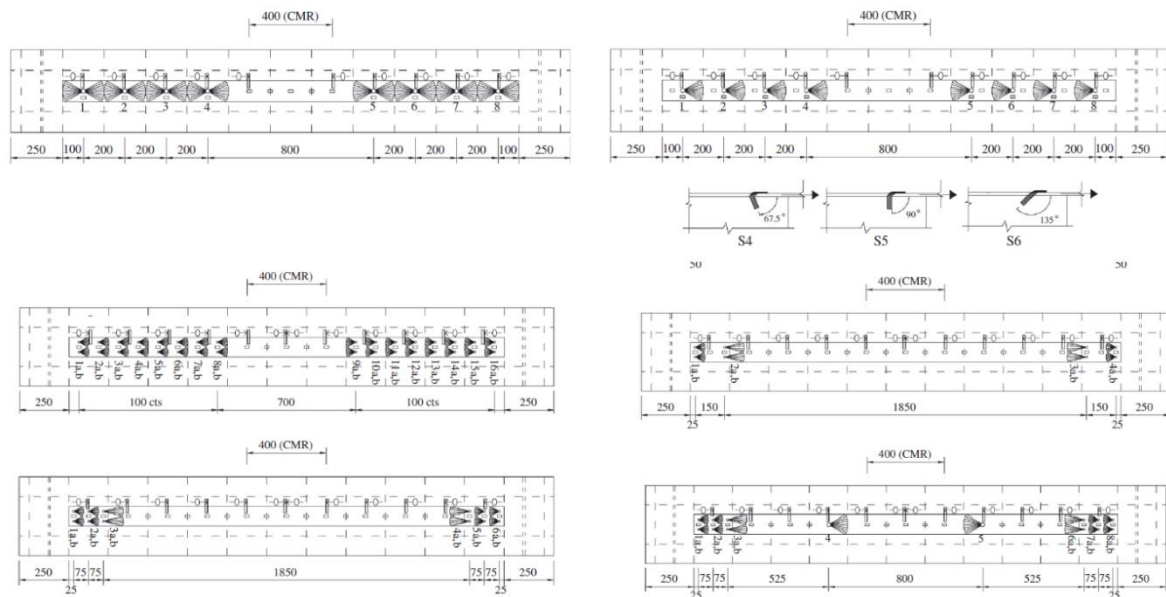
zakotwień. Zwiększone wartości ugięć końcowych są pozytywnym efektem działania zakotwienia, ponieważ pozwalają zachować nośność pomimo dużych odkształceń konstrukcji. Konstrukcja wzmocniona bez zakotwień ulega zniszczeniu dużo wcześniej, a na żadnym etapie obciążeń nie osiąga ugięć mniejszych niż elementy wzmocnione z zakotwieniami. Na podstawie odkształceń wzmocnienia FRP zauważono, że wzmocnienie bez zakotwień wykorzystane jest zaledwie w 45%, a zastosowanie zakotwień pozwoliło zwiększyć wytrzymałość kompozytu nawet do 79%.

Wzmocnienie FRP w badaniach ulegało zniszczeniu przez odspojenie od powierzchni betonu. W zależności od typu zakotwienia następowało ono w różnych miejscach. Zastosowane zakotwienia ulegały zniszczeniu na jeden z trzech sposobów: całkowite rozerwanie zakotwienia, częściowe rozerwanie zakotwienia lub wysunięcie zakotwienia z elementu betonowego. Zaobserwowano, że rysy poprzedzające odspojenie się wzmocnienia FRP rozwijają się mniej dynamicznie w przypadku ciasno rozłożonych zakotwień. Ograniczenie tych zarysowań jest jednym z głównych powodów zwiększenia nośności płyt z zakotwionym wzmocnieniem.

S. T. Smith, H. Zhang, Z. Wang, Influence of FRP anchors on the strength and ductility of FRP-strengthened RC slabs, Construction and Building Materials, 49, 2013, s. 998–1012 [67]

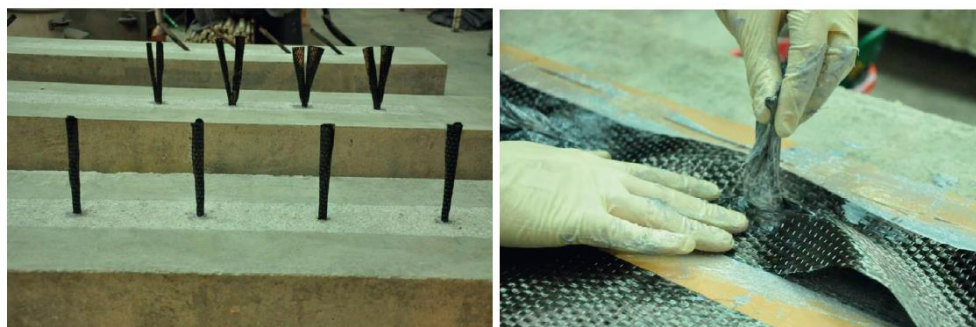
Publikacja opisuje kontynuację badań przeprowadzonych w ramach wcześniej opisanej publikacji [65]. Celem przeprowadzonych pomiarów była ocena wpływu ukształtowania zakotwienia na efektywność wzmocnienia FRP zginanych płyt żelbetowych. Badania wykorzystują schematy sprawdzone w poprzednich próbach, a zaproponowane sposoby zakotwienia bazują na otrzymanych wcześniej wynikach. Przedmiotem badań było dziesięć płyt żelbetowych o przekroju poprzecznym 400x150 mm i długości 2700 mm. Elementy zostały wykonane w dwóch seriach z betonu o zróżnicowanych parametrach wytrzymałościowych. W pierwszej partii otrzymano średnią wytrzymałość na ściskanie 39,9 MPa i moduł Younga równy 26,9 GPa. Druga partia charakteryzowała się średnią wytrzymałością na ściskanie 45,6 MPa oraz modulem Younga 26,8 GPa. Z pierwszej partii betonu wykonano płyty o numerach 2.1-2.3 oraz 2.5 i 2.6. Pozostałe elementy wykonane zostały z betonu drugiej partii. Stal zbrojeniowa użyta w badaniach charakteryzowała się granicą plastyczności 515 MPa oraz modulem Younga 207 GPa. Zbrojenie płyt na zginanie składało się z dwóch prętów o średnicy 10 mm. Dodatkowo w płycie rozmieszczone zostało zbrojenie rozdzielcze z prętów o średnicy 10 mm w rozstawie 200 mm. Płyty wzmocniono pasem kompozytu FRP o szerokości 100 mm. W ośmiu wzmocnionych płytach zastosowano różne rozkłady i wielkości kotew z wiązek z włókien węglowych, a jedną płytę wzmocniono bez zakotwienia. Dodatkowo jedna z płyt została całkowicie pozbawiona wzmocnienia FRP dla celów porównawczych. Zakotwienia zostały ukształtowane w zróżnicowany sposób, a ich schematy przedstawiono na rysunku 70. Część ułożona została w jednym kierunku, inne zostały rozłożone w kształcie muszki, a w niektórych zastosowano nachylenie. Sposób wykonania zakotwień przedstawiono na rysunku 71. Podobnie jak w przypadku poprzednich badań [65] płyty zostały poddane czteropunktowemu zginaniu, z odległością między podporami równą 2400 mm. Siły zostały przyłożone w odległości 200 mm od środka rozpiętości

plyty (rozstaw sił 400 mm), a odległość od podpory do siły wynosiła 1000 mm. W każdej badanej płycie przyklejono po dwa tensometry elektrooporowe o bazie pomiarowej 90 mm na górnej (ściskanej) powierzchni płyty w środku jej rozpiętości. Na długości każdego pasa FRP rozmieszczono równomiernie w rozstawach, co 100 mm tensometry elektrooporowe o bazie pomiarowej 10 mm. Ograniczono liczbę czujników indukcyjnych mierzących ugięcia płyty do trzech. Na długości wzmocnienia FRP zostały rozmieszczone dodatkowe czujniki indukcyjne. Miały one na celu pomiar wzajemnego przemieszczenia płyty i wzmocnienia na całej długości styku.



Rys. 70. Schematy rozmieszczenia zakotwień wykorzystanych w badaniach [67]

Opisy na rysunku: CMR – strefa stałego momentu zginającego



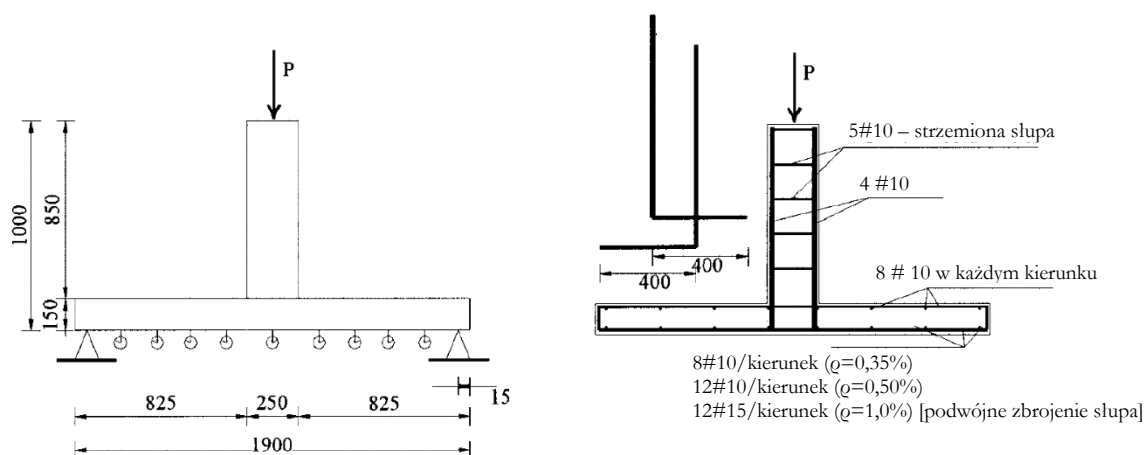
Rys. 71. Sposób wykonania zakotwienia opisanego w publikacji [67]

Wyniki badań ponownie potwierdziły silną zależność maksymalnego obciążenia płyty oraz jej ugięć od sposobu zakotwienia wzmocnienia. Zwiększenie nośności płyty nie zawsze było wprost zależne od przedłużenia jej żywotności przez osiągnięcie wysokich ugięć przy większych obciążeniach. Niektóre płyty cechowały się wysoką nośnością i sztywnością, inne zachowywały się bardziej ciągliwie.

Przyrosty maksymalnej siły w stosunku do płyty niewzmocnionej zawierały się w granicach 61-132%. W przypadku porównania wzmocnień zakotwionych i niezakotwionych zaobserwowano przyrost nośności o 5-44% w zależności od konfiguracji zakotwień. Efektywność wykorzystania wzmocnienia FRP wzrosła z około 47% w przypadku braku zakotwienia do nawet 95% w przypadku najefektywniejszego układu zakotwień. W przeciwieństwie do poprzednich badań [65] nie wszystkie płyty zostały zniszczone wskutek odspojenia się kompozytu od betonu. W przypadkach, w których uzyskano największe wykorzystanie wzmocnienia FRP, doszło do częściowego rozerwania kompozytu. Zniszczenie kompozytu poniżej jego wytrzymałości na rozciąganie (maksymalne wyężenia wynosiło 95%) mogło być spowodowane koncentracją naprężeń w miejscach występowania otworów na zakotwienia. Zaobserwowano również dodatkowy mechanizm zniszczenia zakotwienia związany z odspojeniem zakotwienia od wzmocnienia.

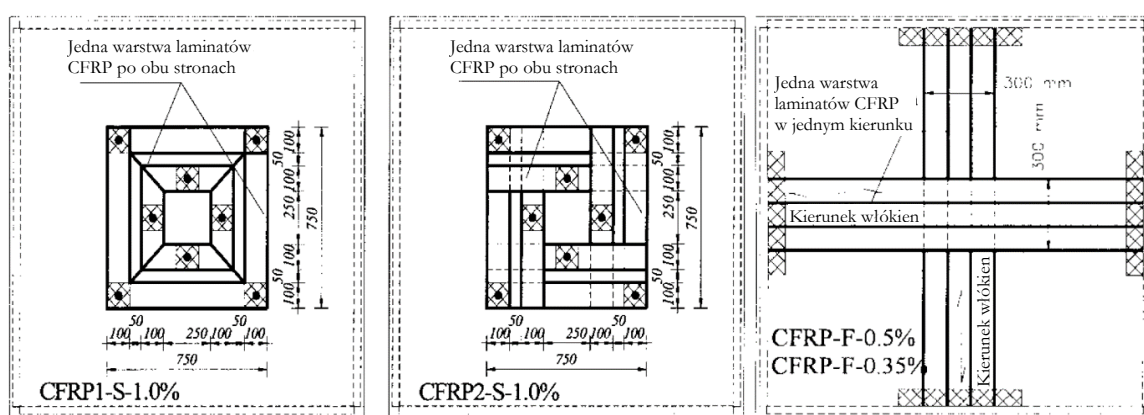
U. Ebead, H. Marzouk, Fiber-Reinforced Polymer Strengthening of Two-Way Slabs, Aci Structural Journal, 101(5), 2004, s. 650–659 [31]

Celem przeprowadzonych badań była ocena wpływu wzmocnienia kompozytami na bazie włókien węglowych lub szklanych oraz żywic epoksydowych przy zróżnicowanym stopniu zbrojenia stałą na efektywność wzmocnienia dwukierunkowo zginanych płyt żelbetowych. Przedmiotem badań było dziewięć płyt kwadratowych o długości boku 1900 mm i grubości 150 mm. Badane płyty były monolitycznie połączone ze słupem, który pośredniczył w ich obciążeniu. Elementy wykonano w kilku partiach z betonu o średniej wytrzymałości na ściskanie w zakresie od 29 MPa do 38 MPa. Płyty zostały zazbrojone w obu kierunkach trzema różnymi zestawami prętów. Dla najniższego stopnia zbrojenia zastosowano osiem prętów o średnicy 10 mm, dla stopnia średniego dwanaście prętów o średnicy 10 mm, a dla największego dwanaście prętów o średnicy 15 mm. Pręty o średnicy 10 mm charakteryzowały się granicą plastyczności 450 MPa, wytrzymałością na rozciąganie 650 MPa oraz modułem Younga 191 GPa. Dla prętów o średnicy 15 mm te wartości wynosiły odpowiednio 435 MPa, 670 MPa oraz 193 GPa. Geometrię elementów badawczych oraz stanowiska badawczego przedstawiono na rysunku 72.



Rys. 72. Geometria elementów badawczych oraz stanowiska [31]

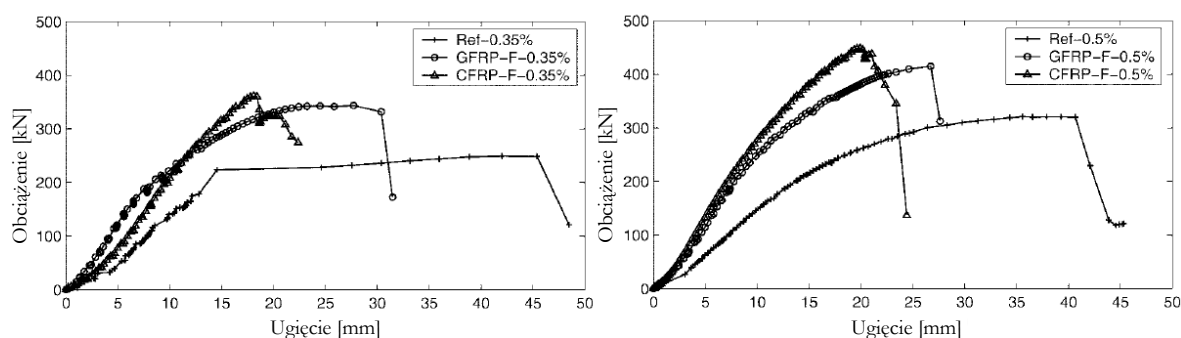
Płyty o niskim i średnim stopniu zbrojenia zostały wykorzystane do badania nośności na zginanie elementu, a na podstawie próbek o najwyższym stopniu zbrojenia oceniono nośność płyty na przebicie. Przed wzmocnieniem próbki poddano wstępnemu obciążeniu odpowiadającemu 50% ich teoretycznej nośności. Płyty zostały wzmocnione na zginanie pasami kompozytu z włókna szklanego o szerokości 300 mm w obu głównych kierunkach zginania. W przypadku wzmocnienia na bazie włókna węglowego zastosowano po trzy pasy o szerokości 100 mm na każdym z kierunków zginania. Końce wzmocnień zostały zakotwione przez przyklejenie w prostopadłym kierunku pasa kompozytu o długości 500 mm i szerokości 100 mm. Płyty o dużym stopniu zbrojenia stałą zostały wzmocnione na przebicie taśmami CFRP. Wzmocnienie na przebicie wykonano z pasów o szerokości 100 mm w dwóch wariantach ułożenia kompozytu. Schematy wzmocnień płyt przedstawiono na rysunku 73.



Rys. 73. Schematy wzmocnień na zginanie i przebicie wykorzystane w badaniach [31]

Płyty zostały obciążone siłą skupioną w środku rozpiętości przy swobodnym podparciu czterech krawędzi elementu. Podczas obciążania płyty zmierzono jej przemieszczenia za pomocą dziewięciu czujników indukcyjnych rozmieszczonych na całej powierzchni płyty. Dodatkowo do wyznaczenia odkształceń stali zbrojeniowej w płycie wykorzystano tensometry elektrooporowe. W badaniu próbek referencyjnych zaobserwowano znaczny spadek ugięć wraz ze wzrostem stopnia zbrojenia. Ugięcie przy maksymalnym obciążeniu wynosiło 42,01 mm dla stopnia zbrojenia 0,35% i 24,50 mm dla stopnia zbrojenia 1,0%. Zastosowanie zewnętrznego wzmocnienia CFRP i GFRP spowodowało znaczny przyrost nachylenia krzywej zależności obciążenia od ugięcia. Dodatkowo ugięcie przy maksymalnym obciążeniu było o około 39% mniejsze niż w przypadku próbek niewzmocnionych. Oszacowano, że wzmocnienie kompozytami zwiększyło początkową sztywność elementów 2,37 razy dla stopnia zbrojenia 0,35% i 1,99 razy dla stopnia zbrojenia 0,5%. Zastosowanie wzmocnienia na przebicie spowodowało przyrost sztywności elementów, jednak nie był on tak znaczący jak w przypadku zbrojenia na zginanie. W wyniku wzmocnienia płyt o stopniu zbrojenia 0,35% otrzymano przyrost siły niszczącej o 44,4% dla kompozytu CFRP i 38% dla GFRP. W przypadku stopnia zbrojenia 0,5% przyrosty wynosiły odpowiednio 36,4% i 25,8% w porównaniu do płyt referencyjnych bez wzmocnienia. Widoczny jest spadek efektywności wzmocnienia wraz ze wzrostem stopnia zbrojenia elementu. W przypadku zbrojenia na przebicie osiągnięto znacznie mniejsze przyrosty

nośności, których średnia wartość wynosiła około 9%. Na podstawie krzywych zależności ugięcia od odkształcenia wyznaczono energię pochłanianą podczas zniszczenia płyt. Zaobserwowano, że wzmocnienie na zginanie materiałami CFRP i GFRP przyczynia się do obniżenia zdolności elementu do pochłaniania energii, pomimo podwyższenia jego nośności. Średni spadek pochłoniętej energii wynosił około 30%. W przypadku zbrojenia na przebicie zaobserwowano odwrotną tendencję, czyli zwiększenie ilości pochłanianej energii, którego wartość oceniono na 31%. Płyty o niskim i średnim stopniu wzmocnienia zostały zniszczone wskutek uplastycznienia stali rozciąganej przy zginaniu. Podobny mechanizm zaobserwowano przy płytach wzmocnionych na zginanie, jednak poprzedzony on został odspojeniem wzmocnienia FRP od powierzchni betonu. Materiał kompozytu nie uległ rozerwaniu w żadnym z elementów badanych na zginanie. Płyty o wysokim stopniu zbrojenia zostały zniszczone przy wystąpieniu bardziej kruchego i gwałtownego mechanizmu przebicia. Zastosowane zbrojenie kompozytami nie wpłynęło znacząco na zachowanie się badanych elementów. Wykresy zależności obciążenia od ugięcia badanych płyt przedstawiono na rysunku 74.



Rys. 74. Zależność obciążenia od ugięcia dla płyt wzmocnionych na zginanie przy różnych stopniach zbrojenia [31]

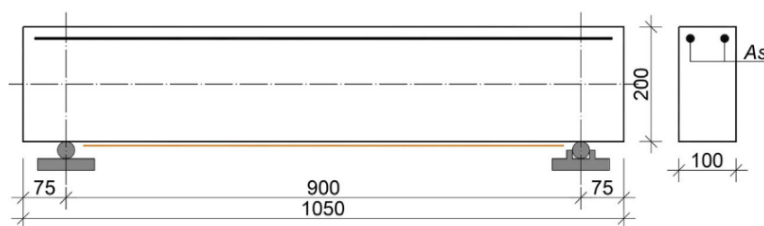
2.4 Zakotwienie kompozytów na bazie zaprawy mineralnej

Temat zakotwienia kompozytów na bazie zaprawy mineralnej nie jest szeroko opisany w literaturze. Dodatkowo nie została wydana żadna publikacja, która łączy temat wzmacniania płyt żelbetowych na zginanie kompozytami na bazie zaprawy mineralnej z tematem zakotwienia. Ze względu na ograniczoną bazę literaturową przedstawiono najważniejsze publikacje związane z zakotwieniem kompozytów na zaprawie mineralnej, w których opisano inne niż płyty elementy żelbetowe.

T. Trapko, M. Musiał, PBO mesh mobilization via different ways of anchoring PBO-FRCM reinforcements, Composites Part B, 118, 2017, s. 67-74 [78]

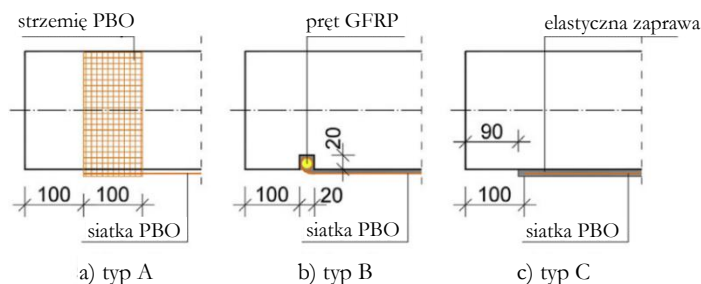
Celem badań była ocena wpływu sposobu zakotwienia i poprawienia przyczepności, na efektywność wzmocnienia zginanych belek żelbetowych, przy wykorzystaniu systemu PBO-FRCM. Badania przeprowadzono na dwunastu belkach żelbetowych w trzech seriach. W każdej grupie próbek zastosowano dwie różne klasy betonu oraz dwa stopnie zbrojenia. Pręty stalowe umieszczone zostały

jedynie w strefie ściskanej przekroju w celu uniknięcia kruchego zniszczenia elementu oraz całkowitego przeniesienia naprężeń rozciągających na siatkę PBO umieszczoną w dolnej części belki. Beton niższej klasy charakteryzował się wytrzymałością na ściskanie równą 37,88 MPa oraz modułem Younga 28,64 GPa. W przypadku betonu wyższej klasy wartości te wynosiły odpowiednio 50,05 MPa i 32,50 GPa. Belki zróżnicowano również przez zastosowanie dwóch stopni zbrojenia strefy ściskanej – dwoma prętami o średnicy 12 mm lub dwoma prętami o średnicy 14 mm. Geometrię belki przedstawiono na rysunku 75.



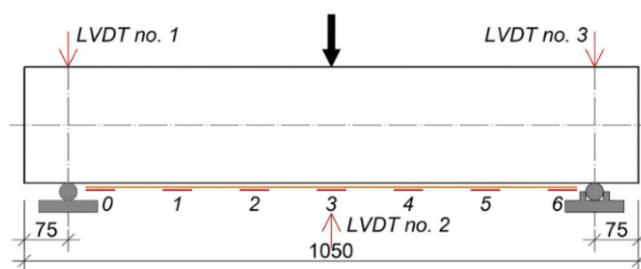
Rys. 75. Geometria belek wykorzystanych w badaniach [78]

Zaproponowano trzy sposoby zakotwienia wzmocnienia elementu na zginanie. W zakotwieniu typu A zastosowano owinięcie belki szerokimi na 100 mm strzemionami wykonanymi z PBO-FRCM w miejscu zakończenia siatki. Zakotwienie typu B polegało na przytwierdzeniu końca siatki PBO do pręta z włókna szklanego, zamocowanego prostopadłe do belki w specjalnie przygotowanej bruździe. W ostatnim zaproponowanym poprawieniu przyczepności typu C siatka wzmacniająca pokryta została elastyczną zaprawą na całej długości belki. Schematy proponowanych zakotwień przedstawiono na rysunku 76.



Rys. 76. Zaproponowane konfiguracje zakotwienia i poprawienia przyczepności wzmocnienia [78]

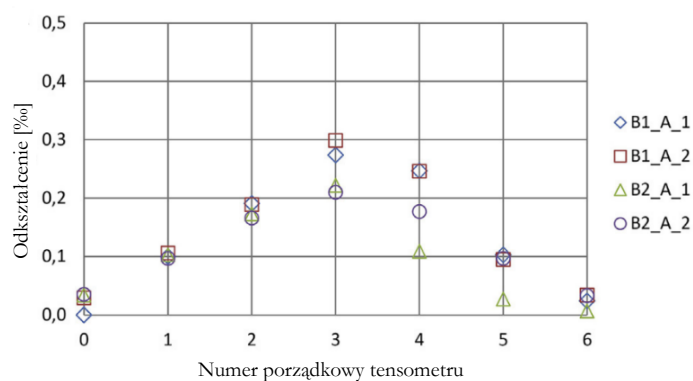
Wzmocnienia belek zostały wykonane z jednej ciągłej warstwy siatki o szerokości 100 mm z ustawieniem głównego kierunku włókien wzdłuż osi belki. Próbkę były poddane zginaniu w schemacie trójpunktowym. Za pomocą czujników indukcyjnych zmierzono wartość przemieszczeń pionowych w środku rozpiętości oraz w osiach podpór. Dodatkowo na każdej siatce PBO zainstalowano po siedem tensometrów elektrooporowych rozłożonych równomiernie na jej długości. Schemat badania wraz z rozkładem tensometrów przedstawiono na rysunku 77.



Rys. 77. Stanowisko pomiarowe i rozkład czujników [78]

Opisy na rysunku: *LVDT* – indukcyjny czujnik przemieszczeń

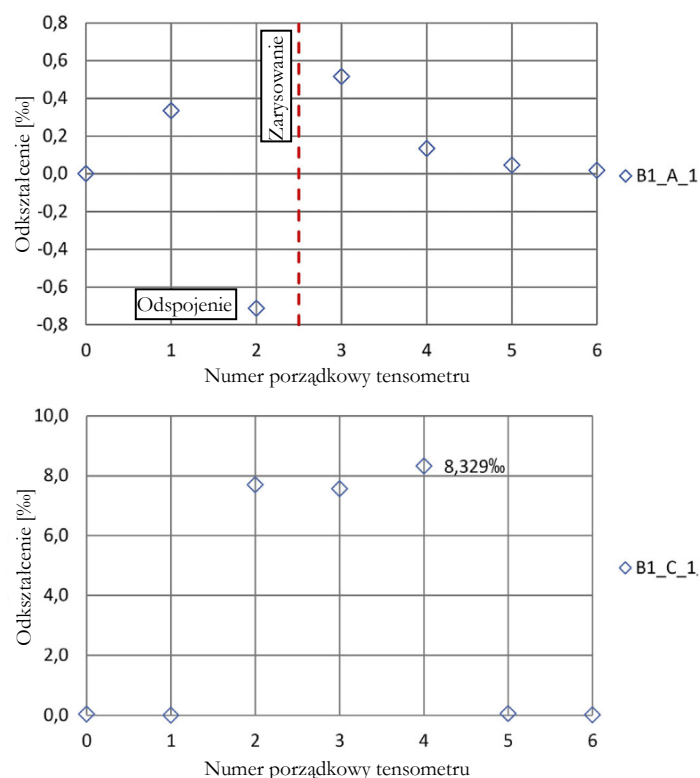
Zachowanie wszystkich belek podzielić można na dwie zasadnicze fazy: przed zarysowaniem i po zarysowaniu. W pierwszej fazie obserwuje się wzrost odkształceń podłużnych w siatce wzmacniającej, który odpowiada rozkładowi naprężeń rozciągających wynikających z momentu zginającego. Ich przebieg jest zgodny z dwuliniowym kształtem wykresów momentów zginających, które występują w belkach swobodnie podpartych obciążonych siłą skupioną w środku rozpiętości. Opisany rozkład odkształceń utrzymywał się do momentu zarysowania, które w belkach z zakotwieniem typu A i B następowało przy odkształceniach siatki 0,2-0,3‰, co stanowi około 1% maksymalnych odkształceń, przy których siatka PBO ulega rozerwaniu. W przypadku wzmocnienia z wykorzystaniem elastycznej matrycy (typ C), zarysowanie następowało przy nieco większych wartościach odkształceń siatki wynoszących 0,3-0,4‰. Niskie odkształcenia w siatce PBO świadczą o słabej współpracy tego typu wzmocnienia z betonem w przenoszeniu obciążeń rozciągających przed zarysowaniem. Przykładowe rozkłady odkształceń przed zarysowaniem przedstawiono na rysunku 78.



Rys. 78. Przykładowe rozkłady odkształceń siatki z zakotwieniem typu A bezpośrednio przed zarysowaniem [78]

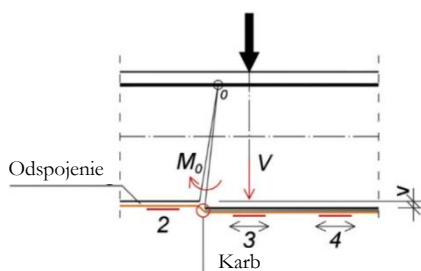
W momencie zarysowania belki obserwowano nagły spadek przenoszonego przez nią obciążenia. Siły wewnętrzne uległy redystrybucji, co doprowadziło do zmiany odkształceń w siatkach wzmocnienia. W przypadku zakotwień na końcach belki (typ A i B) maksymalne odkształcenia spadały do wartości 0,1-0,2‰, a pozostałe przyjmowały wartości proporcjonalnie mniejsze. Wytrzymałość na ściskanie betonu oraz stopień zbrojenia nie wpływały istotnie na uzyskane wyniki. W przypadku belek z poprawioną

pryczepnością wzmocnienia (typ C) zaobserwowano wzrost odkształceń podłużnych siatki zmierzonych przez tensometry w środku rozpiętości. Przyrosty odkształceń uzyskane w belkach z mniejszym stopniem zbrojenia były dwukrotnie większe (4,2-5,3‰) niż w przypadku belek z większym zbrojeniem w strefie ściskanej (2,3-2,8‰). Różnice w wartościach odkształceń spowodowane były różnicami w położeniu głównej osi bezwładności, co ma istotny wpływ jedynie w momencie zarysowania. W każdym przypadku zarysowanie przebiegało pomiędzy tensometrami punktowo mierzącymi odkształcenia siatki, co oznacza, że odkształcenia nie były mierzone w rysie, lecz w jej sąsiedztwie. Przy ocenie wizualnej zniszczonych belek widoczne było znaczne, trwałe wydłużenie włókien w miejscu występowania rysy, lecz mimo to żadna z zastosowanych siatek nie uległa zerwaniu. Ze względu na brak zbrojenia w dolnej strefie belki, całe naprężenia rozciągające musiały być przeniesione przez siatkę PBO. Przykładowe porównanie odkształceń przekroju przy maksymalnym odkształceniu przedstawiono na rysunku 79.



Rys. 79. Porównanie odkształceń w przekroju przy maksymalnym obciążeniu dla zakotwienia typu A (wyżej) i poprawienia przyczepności typu C (niżej) [78]

W belkach z zakotwieniem typu A i B obserwowano powstanie przegubu plastycznego w strefie ściskanej przekroju. Przy dalszym obciążaniu próbki, przekroje belki po obu stronach rysy poddawane były wzajemnemu obrotowi względem środka ciężkości zbrojenia. Zaburzenie ciągłości wzmocnienia spowodowane zarysowaniem i oderwaniem siatki powodowało powstanie w niej naprężeń ściskających. Schemat pracy tego mechanizmu przedstawiono na rysunku 80.

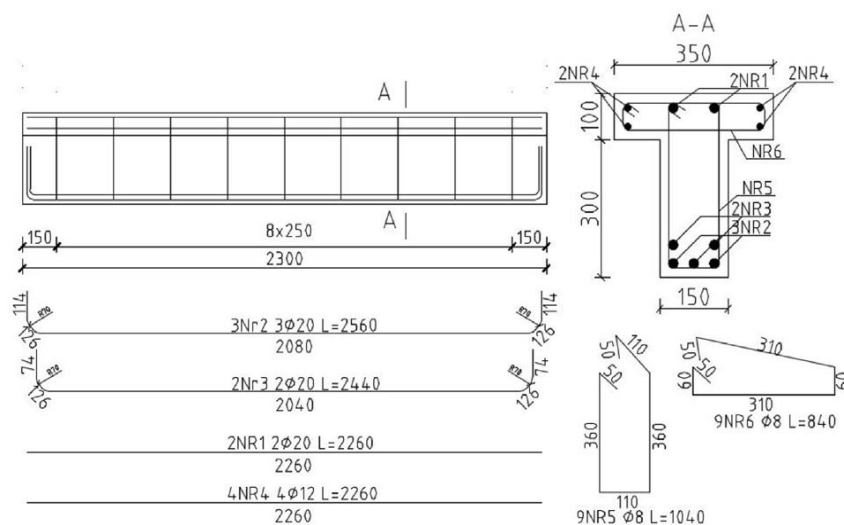


Rys. 80. Sposób odkształcania się belki po zarysowaniu [78]

W przypadku pokrycia siatki PBO warstwą odkształcalnej matrycy nie zaobserwowano oderwania wzmocnienia od betonu, jak miało to miejsce w przypadku zakotwień typu A i B. Pozwalało to na osiągnięcie maksymalnych odkształceń włókien 8,3-8,5‰ występujących przy największym obciążeniu belek. Takie odkształcenia odpowiadają około 40% wykorzystaniu wytrzymałości włókien PBO. Zniszczenie wzmocnienia następowało na skutek odspojenia się siatki od betonu przy jej końcach.

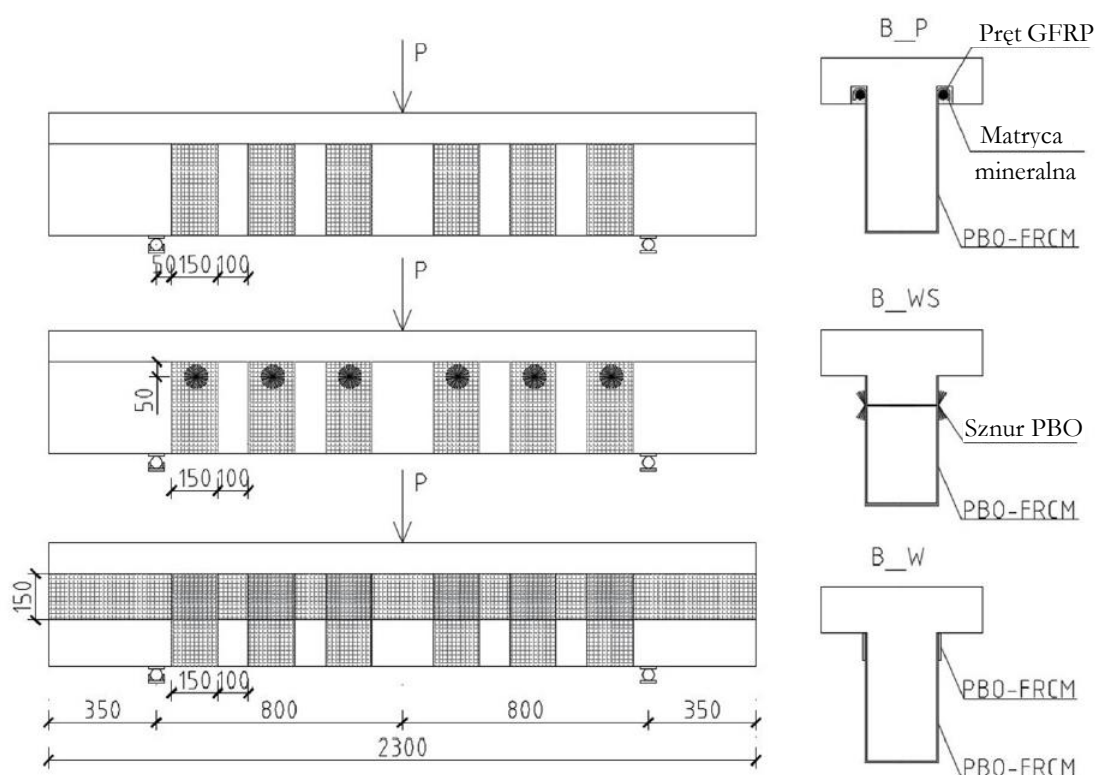
D. Marcinczak, T. Trapko, M. Musiał, Shear strengthening of reinforced concrete beams with PBO-FRCM composites with anchorage, Composites Part B, 158, 2019, s. 149-161 [51]

Celem badań była ocena wpływu zakotwienia siatki kompozytowego PBO-FRCM na efektywność wzmocnienia belek żelbetowych na ścinanie. W tym celu przygotowano dziesięć żelbetowych belek teowych, z których dziewięć zostało wzmocnionych na ścinanie kompozytem PBO FRCM. Belki wykonano z betonu o wytrzymałości na ściskanie 49,95 MPa i module Younga 32,13 GPa. Zastosowano zbrojenie o granicy plastyczności 526,2 MPa, wytrzymałości na rozciąganie 626,3 MPa i module Younga 206,7 GPa. Belki zostały przebadane w schemacie trójpunktowego zginania przy długości przęsła 1600 mm, a geometria oraz zbrojenie zostały ukształtowane w sposób, który zapewnia zniszczenie belki wskutek ścinania. Dokładną geometrię belki oraz schemat zbrojenia przedstawiono na rysunku 81.



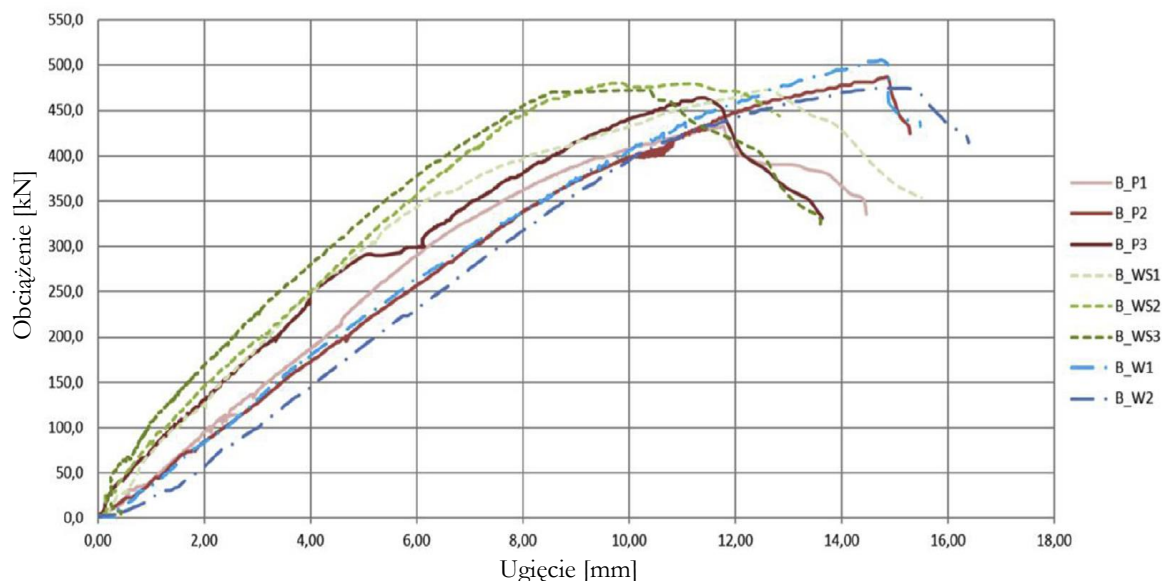
Rys. 81. Geometria oraz schemat zbrojenia belek wykorzystanych w badaniach [51]

Belki zostały wzmocnione na ścinanie sześcioma strzemionami wykonanymi z jednej warstwy kompozytu PBO-FRCM ukształtowanymi w formie litery U. W badaniach zaproponowano trzy sposoby zakotwienia siatki kompozytu PBO-FRCM, które miały pozwolić na lepsze wykorzystanie materiału wzmocnienia. Pierwszy zaproponowany typ zakotwienia polegał na nawinięciu końcówek siatki PBO na pręty z włókna szklanego, które wklejone zostały w bruzdy ukształtowane w półkach belki. Drugi typ zakotwienia wykonano z wykorzystaniem sznura PBO, który został przewleczony przez wywiercone w środku otwory, a następnie połączony z siatką kompozytu poprzez promieniste rozproszenie włókien sznura. Trzeci typ zakotwienia polegał na przyklejeniu dodatkowego paska kompozytu PBO-FRCM wzdłuż osi belki, co miało na celu dodatkowe przytrzymanie wzmocnienia. Geometrię wzmocnienia oraz ukształtowanie zaproponowanych zakotwień wzmocnienia PBO-FRCM na ścinanie przedstawiono na rysunku 82.



Rys. 82. Wzmocnienie oraz zakotwienie wzmocnienia belek wykorzystane w badaniach [51]

W badaniach nie zaobserwowano znaczących różnic w przyrostach siły niszczącej pomiędzy belkami z różnymi typami zakotwienia wzmocnienia. Belki z prętowym zakotwieniem wzmocnienia charakteryzowały się nośnością większą o 10-23% w stosunku do belki niewzmocnionej. W przypadku zakotwienia sznurowego i paskowego wartości te wynosiły odpowiednio 19-21% oraz 15-27%. Większe różnice w zachowaniu kompozytów wzmacniających z różnymi typami zakotwienia są widoczne na wykresie zależności siła-ugięcie, który przedstawiono na rysunku 83. Widoczna jest na nim większa sztywność belek wzmocnionych kompozytem z zakotwieniem sznurowym, która związana jest również z mniejszą wartością końcowego ugięcia belki.

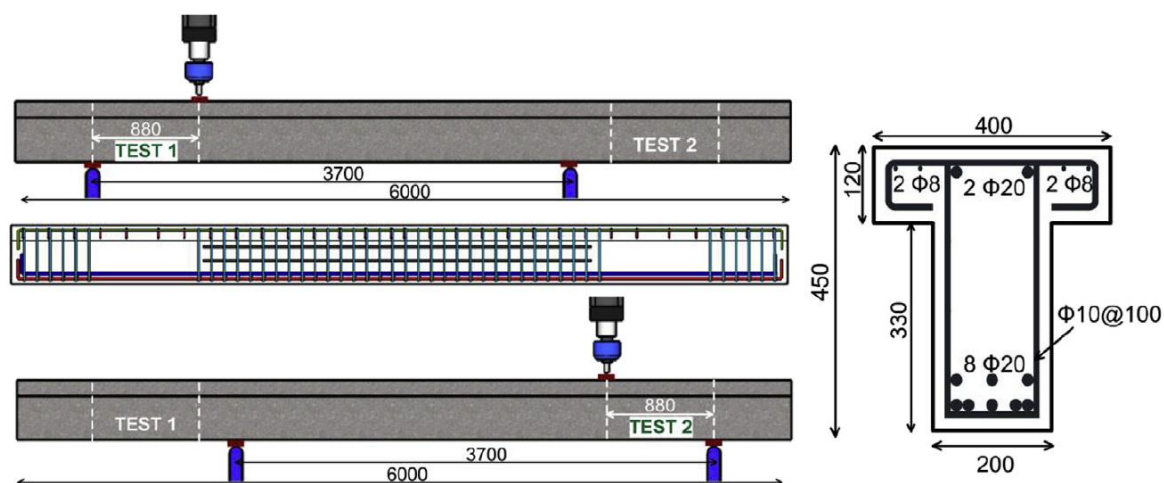


Rys. 83. Zależność siła-ugięcie otrzymana w badaniach [51]

Maksymalne odkształcenia kompozytu wskazane w publikacji wynoszą 8,23‰, co wiąże się jedynie z 47% wykorzystaniem siatki PBO, jednak jest to wartość znacznie większa od typowych odkształceń na poziomie 3,5‰ uzyskiwanych w przypadku braku jakiegokolwiek zakotwienia siatki kompozytu. Świadczy to o pozytywnym wpływie zakotwienia siatki na pracę kompozytu PBO-FRCM i pozytywnym jego wpływie na nośność wzmacnianego elementu.

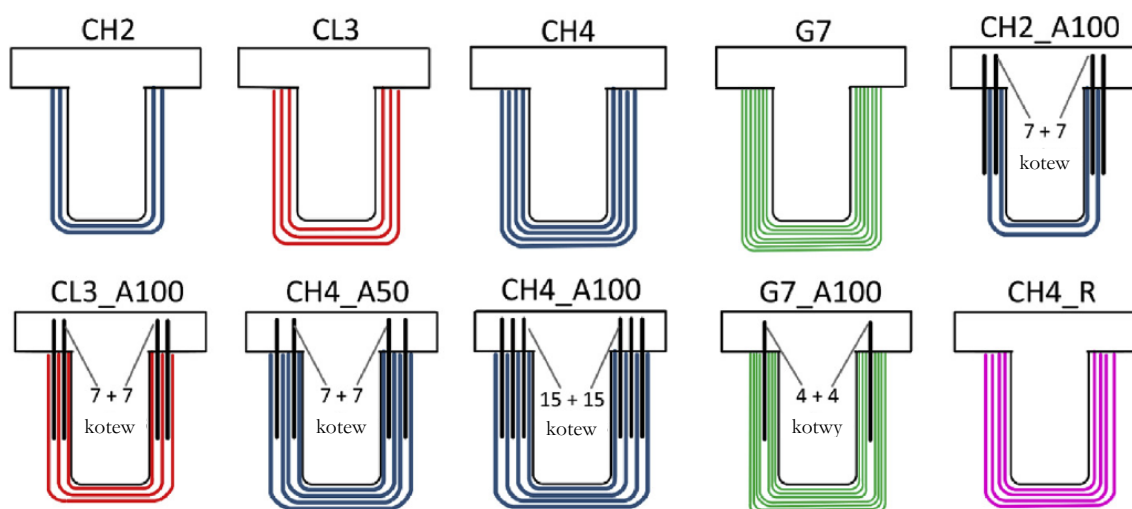
Z. C. Tetta, L. N. Koutas, D. A. Bournas, Shear strengthening of full-scale RC T-beams using textile-reinforced mortar and textile-based anchors, Composites Part B, 95, 2016, s. 225-239 [73]

Celem badań była ocena wpływu liczby warstw wzmocnienia TRM na ścinanie, typu wykorzystanej w kompozycie siatki oraz sposobu ukształtowania zakotwienia siatki kompozytu na efektywność wzmocnienia belek żelbetowych na ścinanie. W badaniu wykorzystano jedenaście żelbetowych belek teowych, z których dziesięć zostało wzmocnionych na ścinanie kompozytem TRM na bazie siatki z włókien węglowych oraz szklanych. Belki wykonano w osobnych partiach. Średnia wartość wytrzymałości na ściskanie betonu wynosiła $14,5 \text{ MPa} \pm 0,7 \text{ MPa}$. Belkę zbrojono na zginanie prętami o średnicy 20 mm, które charakteryzowały się granicą plastyczności 57 MPa, wytrzymałością na rozciąganie 628 MPa. Dla pomocniczych prętów podłużnych o średnicy 8 mm parametry te wynosiły odpowiednio 568 MPa i 630 MPa, a dla strzemion o średnicy 10 mm odpowiednio 552 MPa i 593 MPa. Belki przebadano pod kątem ścinania w dwóch turach, w schematach które wraz z dokładną geometrią belek oraz rozkładem prętów zbrojeniowych przedstawiono na rysunku 84.



Rys. 84. Schematy wykorzystane w badaniu oraz geometria elementów badawczych [73]

W dziesięciu wzmocnionych belkach zastosowano różne typy siatki oraz różne intensywności zakotwienia. W kompozytach TRM, którymi wzmocniono belki na ścinanie wykorzystano lekką siatkę z włókna węglowego (220 g/m^2), ciężką siatkę z włókna węglowego (348 g/m^2) oraz siatkę z włókna szklanego (220 g/m^2). Każdy typ wzmocnienia przebadano jako zakotwiony i niezakotwiony w różnych konfiguracjach. Dodatkowo przebadano jedną porównawczą belkę wzmocnioną na ścinanie kompozytem FRP. Wszystkie zakotwienia wykonano w postaci „miotelek”, które zostały częściowo wklejone w otwory wykonane w półkach belki, a ich luźne końce rozprowadzono promieniście na powierzchni wzmocnienia. Schematy wzmocnień wraz z opisem liczby warstw kompozytu oraz intensywności zakotwienia przedstawiono na rysunku 85. Opisy serii kodują typ zastosowanej siatki (CH – ciężka siatka z włókna węglowego, CL – lekka siatka z włókna węglowego, G – siatka z włókna szklanego), liczbę warstw siatki oraz intensywność zakotwienia (A100 – każda warstwa zakotwiona, A50 – co druga warstwa zakotwiona).



Rys. 85. Schematy wzmocnienia belek wykorzystanych w badaniach [73]

W przypadku belek wzmocnionych kompozytami bez zakotwienia do zniszczenia dochodziło najczęściej przez poślizg włókien siatki wzmocnienia w matrycy mineralnej, odspojenie kompozytu TRM od powierzchni betonu lub częściowe rozerwanie siatki w miejscu występowania największej rysy ukośnej. Belki, w których zastosowano wzmocnienie kompozytowe z zakotwieniem ulegały zniszczeniu w nieco inny sposób. Częściej występowało w nich rozerwanie siatki kompozytu, a dodatkowo obserwowano mechanizm zniszczenia belki wywołany bezpośrednio przez rozerwanie lub wyrwanie zakotwienia. Wyniki przeprowadzonych badań związane z siłą niszczącą oraz maksymalnym zarejestrowanym odkształceniem wzmocnienia przedstawiono w tabeli 14.

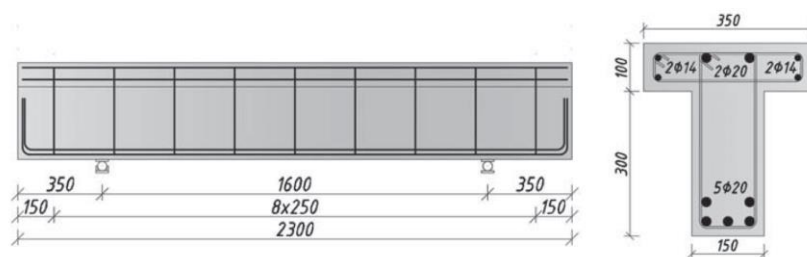
Tabela 14. Wyniki badań belek [73]

| Element badawczy | Siła niszcząca | Ugięcie przy zniszczeniu | Przyrost nośności | Maksymalne odkształcenie wzmocnienia |
|-----------------------|----------------|--------------------------|-------------------|--------------------------------------|
| - | [kN] | [mm] | [%] | [%] |
| CON (Belka kontrolna) | 163 | 5,1 | - | - |
| CH2 | 223 | 4,5 | 37 | 2,03 |
| CL3 | 237 | 5,7 | 46 | 2,58 |
| CH4 | 288 | 7,9 | 77 | 2,10 |
| G7 | 285 | 7,7 | 75 | 7,70 |
| CH2_A100 | 309 | 5,3 | 90 | 4,94 |
| CL3_A100 | 311 | 5,5 | 91 | 5,11 |
| CH4_A50 | 355 | 8,4 | 118 | 3,24 |
| CH4_A100 | 473 | 12,0 | 191 | 5,21 |
| G7_A100 | 302 | 5,3 | 86 | 8,78 |
| CH4_R | 264 | 5,8 | 62 | 1,70 |

Otrzymane w badaniach wyniki wskazują, że zakotwienie wzmocnienia kompozytowego na ścinanie powoduje znaczne zwiększenie jego efektywności, zarówno pod względem przyrostu nośności, jak i maksymalnych odkształceń. Dzięki zakotwieniu wzmocnienia uzyskano większy przyrost nośności dla belek w granicach 53-148% (w porównaniu z odpowiadającym elementem bez zakotwienia) oraz niemalże identyczny zakres zwiększenia maksymalnych zarejestrowanych odkształceń kompozytu. Tak duże zwiększenie efektywności zakotwienia pozwala na uzyskanie podobnych przyrostów nośności przy mniejszym zużyciu materiału wzmacniającego. Belki wzmocnione dwiema warstwami ciężkiej siatki węglowej z zakotwieniem wykazały większy efekt wzmacniający niż w przypadku czterech warstw tej samej siatki bez zakotwienia. Wyniki badań pokazują, że zastosowanie zakotwienia jest istotnym aspektem pracy kompozytów wzmacniających na bazie zaprawy mineralnej.

D. Marcinczak, T. Trapko, Influence of the PBO-FRCM Composite Configuration on the Shear Capacity of RC Beams, Journal of Composites for Construction, 26(4), 2022, s. 1-19 [50]

Celem badań była ocena wpływu zakotwienia siatki kompozytu PBO-FRCM na efektywność wzmocnienia belek żelbetowych na ścinanie. W badaniach wykorzystano 12 belek żelbetowych w kształcie litery T, z których jedna belka pozostawiona pozostała bez wzmocnienia jako belka kontrolna, a pozostałe 11 belek wzmocniono na ścinanie kompozytem PBO-FRCM. Belki wykorzystane w badaniach zostały wykonane z betonu o wytrzymałości na ściskanie równej 50,1 MPa i 45 MPa mierzonej odpowiednio na próbkach sześciennych i walcowych, a moduł Younga stwardniałego betonu wynosił 33,5 GPa. Belki zazbrojono w sposób, który wymusić miał ich zniszczenie na ścinanie, dlatego zbrojenie podłużne dolne stanowiło 5 prętów o średnicy 20 mm, zbrojenie górne 2 pręty o średnicy 20 mm i 4 pręty o średnicy 12 mm, a zbrojenie na ścinanie wykonano w formie strzemion z prętów o średnicy 8 mm w stałym rozstawie co 250 mm. Granica plastyczności stali dla zastosowanych prętów zbrojeniowych wynosiła odpowiednio 524,8 MPa i 499,5 MPa dla prętów o średnicy 20 mm i 8 mm. Wytrzymałość na rozciąganie dla tych prętów wynosiła odpowiednio 652 MPa i 559 MPa, a ich moduł Younga odpowiednio 197 GPa i 208,5 GPa. Nie określano właściwości mechanicznych prętów o średnicy 12 mm ze względu na ich pomocniczy charakter. Geometrię belek wykorzystanych w badaniach przedstawiono na rysunku 86.

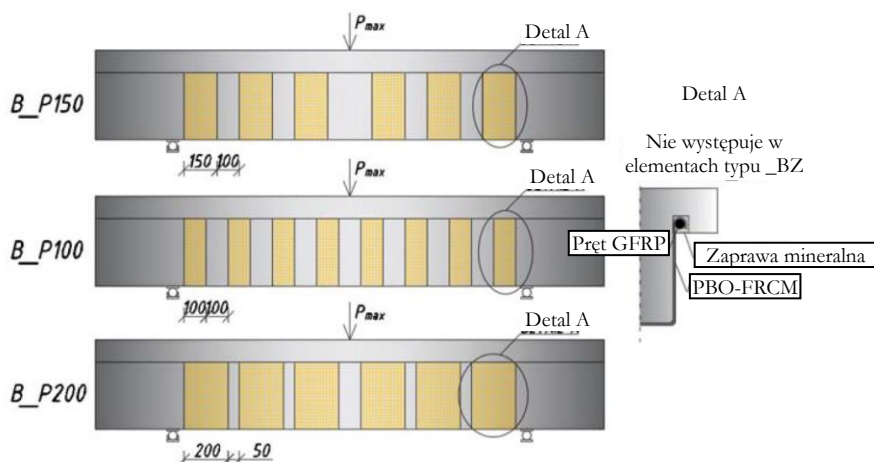


Rys. 86. Geometria i zbrojenie belek wykorzystanych w badaniach [50]

Belki wzmocniono na ścinanie za pomocą kompozytu PBO-FRCM, który ukształtowano w formie strzemion w kształcie litery U. Zaproponowano 3 geometrie układu strzemion z pasmami wzmocnienia o szerokości 100 mm, 150 mm i 200 mm. W niektórych elementach badawczych wprowadzono modyfikacje w postaci zakotwienia siatki kompozytu poprzez nawinięcie siatki kompozytu na pręt GFRP, który został wklejony w bruzdę w pólce belki lub też zmianę dedykowanej zaprawy systemu PBO-FRCM na elastyczną zaprawę naprawczą. Belki poddano trójpunktowemu zginaniu, przy którym mierzono ugięcie belki w środku jej rozpiętości oraz jej przemieszczenia na podporach. Dodatkowo dokonywano pomiaru odkształceń wzmocnienia PBO-FRCM za pomocą tensometrów naklejonych na ich powierzchni. Zestawienie elementów badawczych wykorzystanych w badaniach z opisem zastosowanego wzmocnienia i typu jego zakotwienia lub wprowadzonych modyfikacji przedstawiono w tabeli 15, a geometrię wzmocnień dla poszczególnych grup przedstawiono na rysunku 87.

Tabela 15. Zestawienie elementów badawczych [50]

| Element badawczy | Szerokość pasma wzmocnienia | Zakotwienie | Zaprawa |
|------------------|-----------------------------|-------------|------------|
| - | [mm] | [-] | [-] |
| B_0 | - | - | - |
| B_P150 | 150 | Prętowe | Dedykowana |
| B_P150_Z | 150 | Prętowe | Elastyczna |
| B_P150_BZ | 150 | - | Dedykowana |
| B_P100_1 | 100 | Prętowe | Dedykowana |
| B_P100_2 | 100 | Prętowe | Dedykowana |
| B_P100_3 | 100 | Prętowe | Dedykowana |
| B_P100_BZ | 100 | - | Dedykowana |
| B_P200_1 | 200 | Prętowe | Dedykowana |
| B_P200_2 | 200 | Prętowe | Dedykowana |
| B_P200_3 | 200 | Prętowe | Dedykowana |
| B_P200_BZ | 200 | - | Dedykowana |



Rys. 87. Geometria wzmocnienia w poszczególnych seriach i układ stanowiska badawczego [50]

Na podstawie przeprowadzonych badań ustalono, że zastosowanie wzmocnienia PBO-FRCM na ścinanie nie ma znacznego wpływu na sztywność belki, a co za tym idzie na redukcję ugięć belki. Na zmianę ugięć belki nie wpływała szerokość zastosowanych pasm kompozytu ani zakotwienie siatki PBO, ani zmiana zaprawy na elastyczną. Zastosowanie wzmocnienia pozwoliło jednak na zanotowanie większych ugięć przy zniszczeniu belek w zakresie obciążeń, przy którym belki kontrolne uległy wcześniej zniszczeniu. Badania morfologii rys wskazały, że szerokość rys ukośnych rozwija się znacznie wolniej w elementach wzmocnionych na ścinanie kompozytem PBO-FRCM. Szerokość rozwarcia rysy na poziomie 0,2 mm w belce kontrolnej została uzyskana przy obciążeniu 114 kN, a w przypadku elementów wzmocnionych

przy obciążeniu w zakresie od 142 do 210 kN. Dodatkowo zaobserwowano, że przy zastosowaniu szerszych pasm wzmocnienia na bocznej powierzchni belki pojawiało się mniej rys niż w przypadku węższych pasm. W tabeli 16 zestawiono wyniki pomiarów związanych z siłą niszczącą, maksymalnym zarejestrowanym odkształceniem wzmocnienia i maksymalnym zarejestrowanym ugięciem kompozytu dla poszczególnych serii badań. Dodatkowo przedstawiono również szacowaną efektywność wzmocnienia określoną jako stosunek siły niszczącej w danej serii do elementu kontrolnego.

Tabela 16. Wyniki badań belek [50]

| Element badawczy | Obciążenie niszczące | Maksymalne odkształcenie kompozytu | Maksymalne ugięcie | Efektywność wzmocnienia |
|------------------|----------------------|------------------------------------|--------------------|-------------------------|
| - | [kN] | [‰] | [mm] | [-] |
| B_0 | 454 | - | 3,47 | - |
| B_P150 | 527 | 3,33 | 5,06 | 1,16 |
| B_P150_Z | 511 | 7,77 | 6,44 | 1,13 |
| B_P150_BZ | 507 | 5,20 | 7,31 | 1,12 |
| B_P100_1 | 508 | 9,90 | 7,00 | 1,12 |
| B_P100_2 | 499 | 11,6 | 6,70 | 1,10 |
| B_P100_3 | 499 | 8,27 | 7,38 | 1,10 |
| B_P100_BZ | 477 | 6,39 | 5,39 | 1,05 |
| B_P200_1 | 547 | 7,36 | 7,03 | 1,20 |
| B_P200_2 | 604 | 9,37 | 7,88 | 1,33 |
| B_P200_3 | 522 | 12,9 | 5,83 | 1,15 |
| B_P200_BZ | 535 | 6,03 | 7,45 | 1,18 |

W grupie belek z szerokością pasm wzmocnienia 150 mm uzyskano przyrosty nośności na poziomie 12-16%. W przypadku szerokości pasm 100 mm wartości przyrostów wynosiły 5-12%, a w przypadku szerokości pasm 200 mm 15-33%. Największe przyrosty nośności w każdym przypadku odnotowywano w elementach, w których zastosowano zakotwienie siatki kompozytu, a najmniejsze (z wyjątkiem belki B_P200_3) w przypadku elementów wzmocnionych bez zakotwienia. Świadczy to o pozytywnym wpływie zakotwienia siatki kompozytu na nośność elementów wzmocnionych na ścinanie kompozytami PBO-FRCM. Analiza rozwoju odkształceń kompozytu wskazuje, że w każdym przypadku dynamiczne przyrosty obciążeń kompozytu rozpoczynają się w momencie osiągnięcia szerokości rysy powierzchni betonu na poziomie 0,2 mm. W elementach, w których zastosowano zakotwienie kompozytu odnotowywano większe średnie odkształcenia, co świadczy o efektywności tego rozwiązania. W żadnym z badanych przypadków nie osiągnięto pełnego wykorzystania siatki kompozytu. Zniszczenie wzmocnienia, również w elementach z zakotwieniem siatki, zachodziło z typowym dla kompozytów mechanizmem poślizgu siatki wewnątrz matrycy, bez rozerwania włókien PBO.

2.5 Podsumowanie wyników badań opisanych w literaturze

W przedstawionym w poprzednich podrozdziałach przeglądzie literatury podsumowano obecny stan wiedzy związany ze wzmacnianiem konstrukcji żelbetowych za pomocą materiałów kompozytowych, ze szczególnym uwzględnieniem kompozytów FRCM. W zakres przedstawionego przeglądu wchodziły cztery główne grupy publikacji, które związane były z mechaniką pracy wzmocnień kompozytowych, współpracą wzmocnień kompozytowych FRCM z żelbetowymi elementami płytowymi, zakotwień kompozytów w elementach płytowych oraz zakotwień kompozytów FRCM w innych typach elementów.

Badania wskazują, że zachowanie materiałów kompozytowych przy ich rozciąganiu odbiega od idealnego dwuliniowego modelu przedstawionego w normach ACI 594R-13 [89] oraz AC 323-13 [90]. W rzeczywistości rozciągane pasmo kompozytu FRCM charakteryzuje się trójliniowym charakterem pracy [6, 15, 26, 38], który związany jest z wydłużeniem punktu przejścia „T” w dodatkową, pośrednią fazę pracy materiału. W rzeczywistości zarysowanie kompozytu FRCM nie zachodzi w jednym momencie jak opisano to w teoretycznym modelu, a jest procesem ciągłym, który rozwija się wraz z przyrostem odkształceń. Może mieć to wpływ na późniejszą ocenę pracy materiału oraz różnice w opisach tego samego materiału badanego przez różne zespoły. Rozbudowane badania i analizy przyczepności pomiędzy włóknami a matrycą kompozytu FRCM oraz jego przyczepności do podłoża [16, 22, 34] pozwoliły na dokładne określenie mechanizmów zniszczenia materiału oraz określenie charakteru współpracy pomiędzy wzmocnieniem a wzmacnianym elementem. Określono w nich istotne zjawiska związane z odspojeniem się wzmocnienia od podłoża i z fazami jego pracy (w tym określenie długości zakotwienia kompozytów FRCM) oraz stwierdzono występowanie efektu teleskopowego, który obniża wykorzystanie potencjału włókien w kompozytach FRCM. W literaturze szeroko opisano również badania związane z przyczepnością wzmocnień FRCM do powierzchni wzmacnianego elementu, w których przeanalizowano m.in. wpływ długości przytwierdzenia oraz liczbę warstw siatki [61], wpływ przygotowania wzmacnianej powierzchni [24], wpływ zastosowanych włókien siatki [68, 84, 85] oraz wielu innych parametrów, na mechanizm zniszczenia wzmocnienia oraz jego nośność. Wyniki tych badań pozwalają na racjonalne ustalenie sposobu wzmacniania elementów, ze względu na stosowane materiały, geometrię wzmocnienia i liczbę warstw siatki. Szczególnie istotne z punktu widzenia zasadności stosowania wzmocnień FRCM są również badania jego odporności w warunkach podwyższonej temperatury [19, 40], które wykazały dobrą odporność kompozytów FRCM na takie warunki. Dopiero przy osiągnięciu temperatur możliwych do uzyskania w trakcie pożaru (rzędu 400°C) obserwowano negatywne zmiany w pracy kompozytów FRCM, przez co można zakładać, że nie są one wrażliwe na typowe temperatury występujące przy użytkowaniu konstrukcji. Należy jednak zwrócić uwagę, że większa liczba warstw siatki w kompozycie FRCM powoduje jego większą wrażliwość na warunki podwyższonej temperatury [55, 56]. W zakresie odporności na warunki podwyższonej temperatury, ważny punkt odniesienia dla kompozytów FRCM stanowią badania porównawcze z kompozytami FRP [60, 76]. Przy podniesieniu temperatury z 40°C do 80°C obserwowano pięciokrotnie niższy spadek odkształceń wzmocnienia FRCM w porównaniu z kompozytami FRP. Podczas gdy dla temperatury rzędu 150°C wzmocnienia FRP tracą ponad 80% przyczepności

do wzmacnianego elementu, elementy wzmocnione kompozytami FRCM tracą jedynie około 10% nośności przy temperaturach rzędu 400°C. Wskazuje to, że kompozyty FRCM mają zdecydowanie większą odporność na bardzo wysokie temperatury (porównywalne z temperaturami pożarowymi) w porównaniu z kompozytami FRP, których nośność jest znacznie ograniczana przy dużo niższym poziomie temperatur, który może wynikać z normalnego użytkowania konstrukcji (np. ze względu na procesy technologiczne, czy nawet ekspozycję słoneczną). Potwierdza to, że pomimo wcześniej opisanych zjawisk negatywnie wpływających na efektywność pracy kompozytów FRCM, ich stosowanie i praca nad ich rozwojem ma uzasadnienie technologiczne.

Badania materiałowe związane z kompozytami FRCM opisane w literaturze obejmują bardzo szeroki zakres ich właściwości mechanicznych, w szczególności związany z ich przyczepnością do podłoża i zachowania się materiału wzmocnienia oraz mechaniki jego zniszczenia. Kompleksowe badania pozwoliły na utworzenie złożonych modeli pracy kompozytów FRCM, które świadczą o dobrym rozpoznaniu mechanizmów ich pracy. Należy jednak zwrócić uwagę na mnogość materiałów stosowanych w kompozytach FRCM (zarówno włókien, jak i matrycy), co wpływa na stosunkowo duży rozrzut wyników badań. Parametry włókien stosowanych wewnątrz poszczególnych grup materiałowych są do siebie zbliżone, jednak parametry mechaniczne poszczególnych matryc mineralnych mogą być bardzo rozbieżne w zależności czy zastosowano dedykowaną matrycę mineralną jednego z popularnych producentów materiałów do wzmacniania konstrukcji, czy zdecydowano się na autorską recepturę matrycy z różnymi dodatkami. W szczególności w przypadku własnych receptur matryc w badaniach występować mogą znaczne rozbieżności w efektach pracy kompozytu FRCM, co może mieć wpływ na różniące się wyniki pomiędzy poszczególnymi grupami badawczymi. Nie zmienia to jednak faktu, że pomimo różnic w szczegółowych wynikach badań, stosunkowo dobrze rozpoznano globalną pracę materiału, co może zostać wykorzystane przy szczegółowych badaniach uwzględniających różnice materiałowe pomiędzy poszczególnymi propozycjami komponentów kompozytów. Uzyskane wyniki z badań materiałowych pozwalają lepiej zrozumieć zjawiska zachodzące przy analizach rzeczywistych elementów wzmacnianych kompozytami FRCM, gdzie mechanizmy pracy wzmocnienia są tylko jednym z elementów, które wpływają na globalną pracę elementów.

Najistotniejszą przeanalizowaną grupą badań były badania płyt żelbetowych wzmocnionych kompozytami na bazie matrycy mineralnej. Szczególnie istotne wyniki badań przedstawiono w publikacji [48], w której porównywano pracę jednokierunkowo zginanych płyt żelbetowych wzmocnionych kompozytem PBO-FRCM. Badania wykazały, że przy większej liczbie warstw wzmocnienia istotnym mechanizmem zniszczenia jest odspojenie całego kompozytu od wzmacnianego elementu, a przy mniejszej liczbie warstw wzmocnienia częściej obserwuje się poślizg włókien wewnątrz matrycy. Poślizg włókien wewnątrz matrycy objawiał się poprzez nieproporcjonalne zwiększenie odkształceń kompozytu w stosunku do odkształceń zbrojenia rozciąganego, a odspojenie kompozytu poprzez nieproporcjonalne zmniejszenie odkształceń kompozytu w stosunku do odkształceń zbrojenia wzmacnianego elementu. Opisane mechanizmy pojawiały

się zazwyczaj bezpośrednio przed osiągnięciem obciążenia niszczącego. Dla jednej warstwy wzmocnienia PBO-FRCM osiągnięto wzmocnienie na poziomie 35-41%, co może być wartością odniesienia do innych badań. Podobny poziom wzmocnienia dla jednej warstwy wzmocnienia FRCM z włóknami PBO w jednokierunkowo zginanej płycie otrzymano w badaniach opisanych w publikacji [2], gdzie wynosił on 36%. W innych badaniach [4] uzyskano stopień wzmocnienia jedną warstwą kompozytu PBO-FRCM o wartości aż 148%, jednak wartość tę należy uznać za niereprezentatywną ze względu na efekt skali wynikający z rozmiarów wykorzystanych elementów. W badaniach tych wskazano istotny aspekt włączania wzmocnienia do współpracy na kierunku prostopadłym do głównego kierunku zginania, jednak jego istotność mogła również zostać zawyżona przez efekt skali. Przy wykorzystaniu innych typów włókien w kompozytach FRCM w badaniach dla jednej warstwy wzmocnienia uzyskiwano odpowiednio 30,7% wzmocnienia elementu płytowego dla włókien węglowych i 11,2-40,9% (najwyższa wartość wzmocnienia uzyskana dla bardzo niskiego stopnia zbrojenia) dla wzmocnienia dla włókien bazaltowych [46], co jest wartością bardzo zbliżoną, choć nieco niższą niż w przypadku opisanych wyżej wzmocnień z włóknami PBO. Odrębną grupą badań nad kompozytami FRCM są te, w których zastosowano inny niż jednokierunkowy schemat zginania płyty [1, 45], w których liczba zmiennych związanych z pracą elementów jest na tyle duża, że uzyskane wyniki nie mogą być odnoszone bezpośrednio do innych badań ze względu na ich specyficzność. Istotny z punktu widzenia niniejszej pracy jest jednak wniosek z badań opisanych w publikacji [45], w której wskazano, że zarysowanie płyty przed wzmocnieniem (symulacja rzeczywistego scenariusza wzmocnienia) nie wpływa na efektywność i mechanizm pracy wzmocnienia FRCM w porównaniu z elementami, które wzmocniono bez uprzedniego obciążenia i zarysowania. W badaniach często wykorzystuje się kompozyty FRCM, w których siatki zatopione są uprzednio w matrycy z żywicy epoksydowej [36, 63, 72], co zmienia mechanizm współpracy pomiędzy siatką a matrycą, przez co nie powinny one być porównywane wprost z analizami klasycznych kompozytów FRCM. Istotną obserwacją poczynioną w badaniach [63] były wpływ wzmocnienia FRCM z siatką z włókien węglowych pokrytych żywicą epoksydową na bardziej korzystny układ zarysowania (więcej rys o mniejszej szerokości) elementu w porównaniu z elementem niewzmocnionym.

Aspekt zakotwienia kompozytów FRCM przy wzmacnianiu elementów płytowych nie został poruszony w żadnej publikacji naukowej. W celu sprawdzenia potencjału tego typu rozwiązań w elementach płytowych zasięgnięto do analiz wpływu zakotwienia przy wzmacnianiu elementów płytowych kompozytami FRP [65, 67]. W badaniach tych wykazano istotny wpływ zakotwienia kompozytu na nośność elementów ze wzmocnieniem FRP. Najkorzystniej ukształtowane zakotwienie pozwoliło na zwiększenie nośności elementu o 30% w stosunku do elementu bez zakotwienia, co było efektem podniesienia stopnia wykorzystania kompozytu z 45% do aż 79% [65]. Dalsze prace optymalizacyjne w zakresie zakotwień kompozytu pozwoliły na zwiększenie nośności elementu o 44% w stosunku do elementu wzmocnionego bez zakotwienia, co przekładało się na wzrost wykorzystania kompozytu nawet do 95% [67]. Badania te wskazują duży potencjał zakotwień w zwiększaniu efektywności wzmocnień kompozytowych zginanych żelbetowych elementów płytowych. Zakotwienia kompozytów na bazie matrycy mineralnej

(FRCM) zostały przebadane na innych typach elementów niż płyty poddawane zginaniu. W badaniach belek zginanych [78] zaproponowano dwa typy zakotwień kompozytów FRCM (nawinięcie siatki na pręt i zastosowanie strzemięcia z siatki kompozytu), które pozwoliły na uzyskanie odkształceń włókien kompozytu na poziomie 40% ich odkształceń granicznych. Badania, choć istotne z punktu widzenia rozwoju kompozytów FRCM, nie pozwalają na określenie efektywności zaproponowanych zakotwień ze względu na brak porównawczego elementu wzmocnionego bez zakotwienia. Dodatkowo elementy badawcze zastosowane w badaniach zawierają zbrojenie stalowe jedynie w strefie ściskanej belki, więc praca elementu nie oddaje idealnie mechanizmów zachodzących w rzeczywistych zginanych żelbetowych elementach konstrukcyjnych. Zakotwienie kompozytów FRCM najczęściej opisywane jest w zakresie badań elementów wzmocnionych na ścinanie [50, 51, 73]. W elementach z zakotwieniem wzmocnienia PBO-FRCM na ścinanie [51] uzyskano maksymalny poziom wykorzystania siatki kompozytu równy 47%. Podobnie jednak jak w przypadku badań zakotwień kompozytów FRCM na elementach belkowych [78] nie wskazano punktu odniesienia w postaci elementu wzmocnionego bez zakotwienia, co utrudnia analizę potencjału zaproponowanych zakotwień. W podobnych badaniach tego samego zespołu badawczego [50], w których występowały elementy porównawcze bez zakotwienia, określono, że elementy wzmocnione z zakotwieniem przynosiły obciążenia jedynie o około 4-5% większe niż elementy wzmocnione bez zakotwienia, jednak w zakresie maksymalnych zarejestrowanych odkształceń wzmocnienia, przyrosty związane z zastosowaniem zakotwienia wynoszą aż 55-63%. Znacznie bardziej optymistyczne wyniki związane z zakotwieniem wzmocnienia na ścinanie zaprezentowano w publikacji [73], w których przyrosty nośności belek były proporcjonalne do przyrostu maksymalnych odkształceń kompozytu. Przyrosty nośności elementów spowodowane zastosowaniem zakotwienia wynosiły nawet 148%, jednak należy zwrócić uwagę, że w strefie przypodporowej elementy badawcze nie zawierały zbrojenia na ścinanie, co powodowało, że jedynym elementem przenoszącym ścinanie było wzmocnienie FRCM. Zaproponowany w badaniach schemat nie odpowiada rzeczywistej pracy wzmacnianych elementów żelbetowych, co wpływa na zbyt optymistyczne wyniki badań.

Temat badań kompozytów FRCM w zakresie zginanych płyt żelbetowych nie jest szeroko opisany w literaturze, a dostępne publikacje charakteryzują się dużą różnorodnością typów elementów badawczych oraz zastosowanych wzmocnień, co powoduje trudności w porównaniu uzyskanych wyników. W wielu badaniach zaprezentowano wyniki, które są bardzo optymistyczne, co często jest wynikiem zastosowania specyficznych elementów badawczych, czy też konfiguracji wzmocnienia. Należy jednak stwierdzić, że wzmocnienia kompozytowe FRCM są efektywne w zakresie wzmacniania zginanych płyt żelbetowych, jednak ze względu na charakter zniszczenia wzmocnienia (odspojenie kompozytu lub poślizg siatki w matrycy) nie wykorzystuje się pełnego potencjału materiałowego kompozytów FRCM. Efektywność wzmocnień kompozytowych może być istotnie zwiększona poprzez zastosowanie mechanicznego zakotwienia siatki kompozytu, jednak nie opublikowano dotąd badań, w których analizowano pracę rzeczywistych żelbetowych płyt zginanych wzmocnionych kompozytami FRCM z zakotwieniem. Dodatkowo wiele badań związanych z zakotwieniem kompozytów FRCM odnosi się do pracy samego

wzmocnienia, bez współpracy z typową konstrukcją żelbetową, co uniemożliwia uzyskanie punktu odniesienia w tym zakresie.

Na podstawie przeglądu literatury zidentyfikowano lukę w wiedzy, w zakresie zakotwienia kompozytów FRCM w zginanych żelbetowych elementach płytowych, której uzupełnienie jest istotne z punktu widzenia nauki i inżynierii. Przed przygotowaniem własnych badań w powyższej tematyce przeanalizowano wszystkie stosowane w opisanych badaniach typy zakotwień kompozytowych w celu późniejszego wyboru tych, które odpowiednie będą dla elementów płytowych i charakterystycznych dla nich układów wzmocnienia. Zwrócono również uwagę, że istotne z punktu widzenia oceny efektywności zakotwienia jest wprowadzenie w badaniach porównawczego elementu wzmocnionego bez zakotwienia (poza elementem odniesienia bez wzmocnienia). Istotnym wnioskiem z wszystkich przeprowadzonych badań jest to, że efektywność wzmocnienia jest tym wyższa, im niższa jest pierwotna nośność wzmacnianego elementu. Efekt ten jest widoczny niezależnie, czy wyższa nośność pierwotna elementu jest wynikiem zastosowania większej ilości zbrojenia, czy zastosowania betonu o lepszych parametrach wytrzymałościowych. Dodatkowo ważny w aspekcie przygotowywania własnych badań doświadczalnych był wniosek wskazujący, że wstępne zarysowanie płyty przed wzmocnieniem nie ma istotnego wpływu na pracę wzmocnienia i uzyskiwane finalne rezultaty z badań. Ze względu na stosunkowo dobre rozpoznanie pracy kompozytów FRCM i ich współpracy z powierzchnią betonu ustalono, że bazowe elementy badawcze przeznaczone do wzmocnienia powinny jak najbliżej oddawać rzeczywistą konstrukcję (m. in. poprzez układ zbrojenia), co pozwoli na uzyskanie rzeczywistych parametrów związanych z pracą wzmocnienia.

3. Cele naukowe pracy

Na podstawie przeprowadzonego przeglądu literatury oraz analizy obecnego stanu wiedzy w zakresie technologii wzmocnień kompozytowych, a w szczególności wzmocnień kompozytowych FRCM, oraz wzmacniania płyt żelbetowych na zginanie z wykorzystaniem materiałów kompozytowych, przedstawiono następujące cele naukowe pracy:

1. Wykazanie wpływu wzmocnień na zaprawie mineralnej (FRCM) na nośność i odkształcalność jednokierunkowo zginanych płyt żelbetowych.
2. Wykazanie wpływu zakotwienia siatek kompozytu wzmocnień na zaprawie mineralnej (FRCM) na nośność i odkształcalność jednokierunkowo zginanych płyt żelbetowych.
3. Stworzenie propozycji modelu analitycznego szacowania nośności jednokierunkowo zginanych płyt żelbetowych ze wzmocnieniem na zaprawie mineralnej (FRCM).
4. Weryfikacja modelu oraz badań doświadczalnych z wykorzystaniem modelu numerycznego.

Jako odkształcalność jednokierunkowo zginanych płyt żelbetowych rozumie się zależność odkształceń podłużnych i poprzecznych zbrojenia rozciąganego, odkształceń podłużnych i poprzecznych górnej i dolnej powierzchni betonu oraz odkształceń podłużnych i poprzecznych wzmocnienia, od obciążenia elementu. Do realizacji celów naukowych pracy zaplanowano badania i analizy, które zostały zrelacjonowane oraz przeanalizowane w dalszej części niniejszej dysertacji.

4. Własne badania doświadczalne

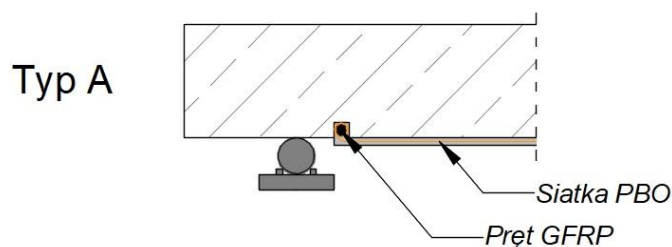
4.1 Cel i zakres badań

Na Wydziale Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej przeprowadzono badania, które miały na celu wykazanie skuteczności zakotwienia siatki kompozytu PBO-FRCM w zwiększaniu efektywności wzmocnienia jednokierunkowo zginanych płyt żelbetowych. W badaniach sprawdzono zależność między typem zastosowanego zakotwienia siatki kompozytu a podstawowymi parametrami związanymi z nośnością i właściwościami odkształcalnościowymi elementów badawczych.

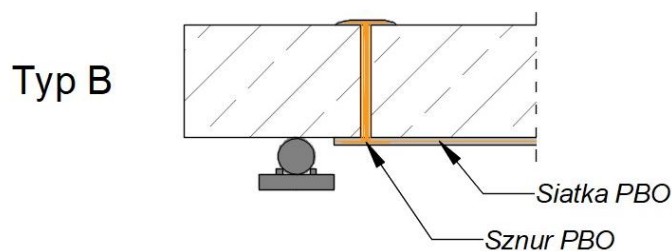
Wykorzystane w badaniach wzmocnienia kompozytowe PBO-FRCM typowo ulegają przedwczesnemu zniszczeniu wskutek poślizgu włókien w matrycy lub odspojenia kompozytu od wzmacnianego elementu. W celu ograniczenia tego zjawiska zaproponowano dwa typy zakotwienia, które mają na celu ograniczenie niekorzystnych zjawisk, co ma pozytywnie wpłynąć na wykorzystanie materiału kompozytowego wzmocnienia oraz zwiększenie jego efektywności. Zaproponowano następujące zakotwienia siatek kompozytu:

- zakotwienie poprzez nawinięcie końców siatki PBO na pręt kompozytowy z włókien szklanych (GFRP), który został wklejony w bruzdę znajdującą się w strefie przypodporowej płyty,
- zakotwienie poprzez przewleczenie sznura PBO przez płytę i zintegrowanie go z siatką kompozytu poprzez promieniste rozprowadzenie włókien sznura i ukształtowanie zakotwienia w formie wachlarza.

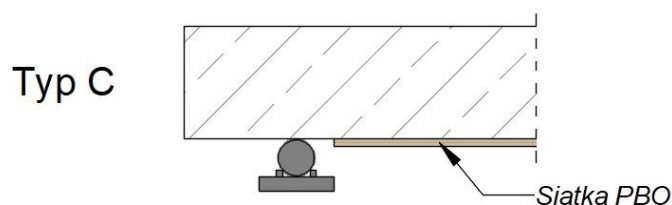
Zakotwienie wykonane z wykorzystaniem pręta GFRP oznaczono jako typ A, zakotwienie wykonane z wykorzystaniem sznura PBO oznaczono jako typ B. W badaniach wykorzystano również płyty wzmocnione kompozytem PBO-FRCM bez dodatkowego zakotwienia, które oznaczono jako typ C. Wszystkie wykorzystane w badaniach typy zakotwienia (A, B i C) przedstawiono schematycznie na rysunkach 88-90.



Rys. 88. Schemat prętowego zakotwienia siatki kompozytu PBO-FRCM (typ A)



Rys. 89. Schemat sznurowego zakotwienia siatki kompozytu PBO-FRCM (typ B)



Rys. 90. Schematy płyty wzmocnionej kompozytem PBO-FRCM bez dodatkowego zakotwienia (typ C)

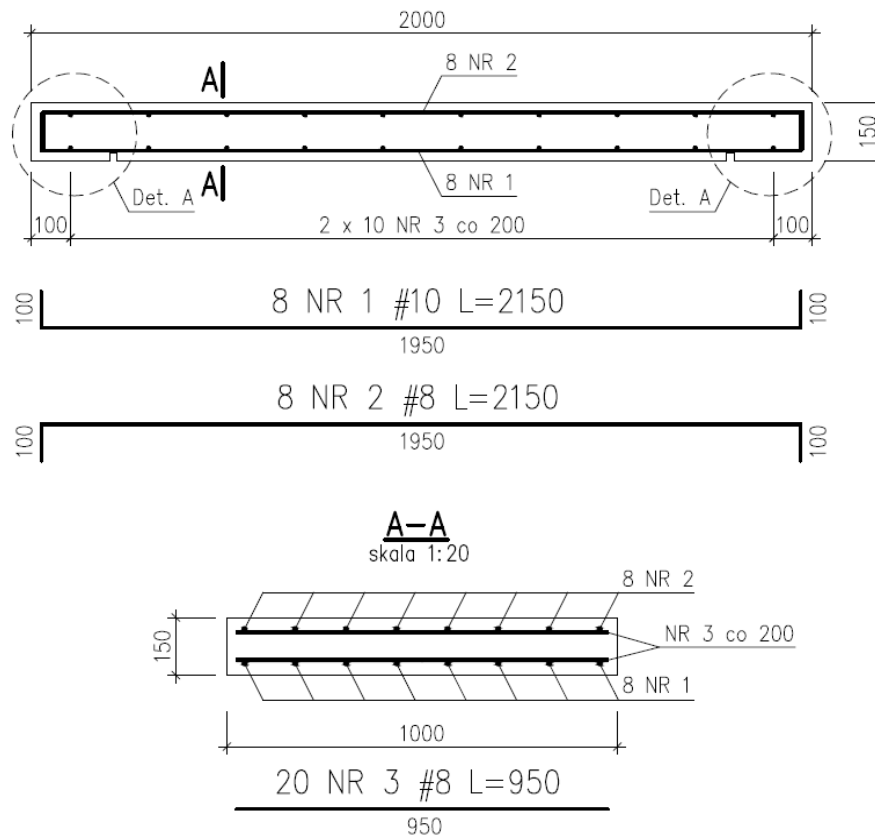
W badaniach wykorzystano po dwa elementy żelbetowe z każdym typem zakotwienia (A, B i C). Wszystkie elementy badawcze wykonano z tych samych materiałów, z takim samym zbrojeniem oraz z identycznym stopniem wzmocnienia i sposobem jego wykonania. Jedyną różnicą pomiędzy wzmocnionymi elementami badawczymi był zastosowany typ zakotwienia. Dodatkowo przygotowano element porównawczy, który był geometrycznym i materiałowym odpowiednikiem wzmocnionych elementów badawczych, jednak nie został on wzmocniony kompozytem PBO-FRCM. Elementy badawcze wraz z ich nazwą kodową oraz opisem sposobu wzmocnienia i jego zakotwienia zestawiono w tabeli 17.

Tabela 17. Zestawienie elementów badawczych

| Nazwa elementu | Wzmocnienie | Typ zakotwienia |
|----------------|------------------------------|------------------------------|
| P_0 | brak | - |
| P_A_1 | 1 warstwa kompozytu PBO-FRCM | Zakotwienie prętowe (typ A) |
| P_A_2 | 1 warstwa kompozytu PBO-FRCM | Zakotwienie prętowe (typ A) |
| P_B_1 | 1 warstwa kompozytu PBO-FRCM | Zakotwienie sznurowe (typ B) |
| P_B_2 | 1 warstwa kompozytu PBO-FRCM | Zakotwienie sznurowe (typ B) |
| P_C_1 | 1 warstwa kompozytu PBO-FRCM | brak (typ C) |
| P_C_2 | 1 warstwa kompozytu PBO-FRCM | brak (typ C) |

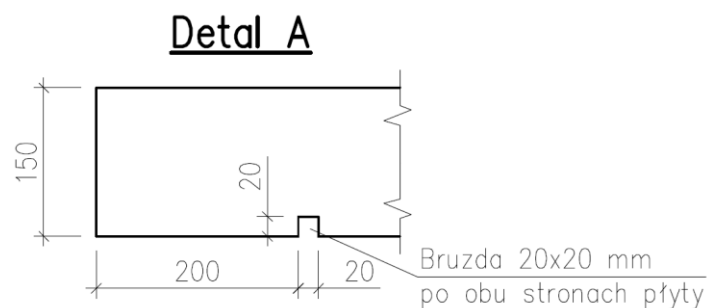
Bazowe elementy badawcze stanowiły płyty żelbetowe o długości 2000 mm, szerokości 1000 mm i grubości 150 mm. Zbrojenie główne dolne płyty wykonano z 8 prętów o średnicy 10 mm, a zbrojenie główne górne z 8 prętów o średnicy 10 mm. W płycie zastosowano również drugorzędne zbrojenie na kierunku prostopadłym do zbrojenia głównego, które stanowiły pręty o średnicy 8 mm w rozstawie 200 mm ułożone w górnej i dolnej warstwie zbrojenia. W płytach zastosowano otulinę betonową o grubości 25 mm,

a do wykonania zbrojenia wykorzystano stal o nominalnej charakterystycznej granicy plastyczności 500 MPa. Szkic wykonawczy płyty wraz ze zbrojeniem przedstawiono na rysunku 91.



Rys. 91. Schemat szalunkowy i zbrojeniowy płyty

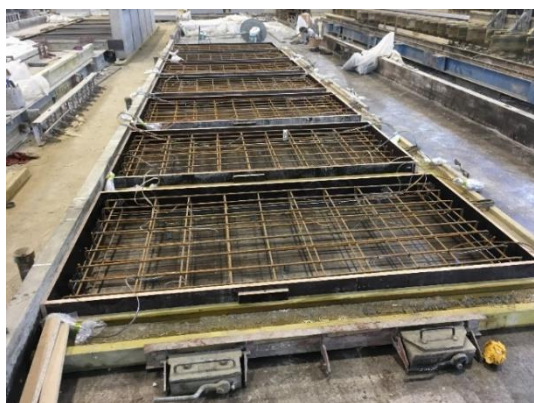
W dwóch płytach, które zaprojektowano z przeznaczeniem do wzmocnienia z prętowym zakotwieniem siatki kompozytu (typ A), przewidziano wykonanie poprzecznej bruzdy w dolnej powierzchni płyty. Bruzdę o wymiarach przekroju 20 mm x 20 mm zaprojektowano na obu końcach płyty w odległości 200 mm od jej krótszej krawędzi. Schemat projektowy bruzdy przedstawiono na rysunku 92.



Rys. 92. Schemat bruzdy wykonanej w płytach przeznaczonych do wzmocnienia z zakotwieniem prętowym (typ A)

4.2 Przygotowanie elementów badawczych

Ze względu na konieczność uzyskania jednorodnych i powtarzalnych elementów badawczych, wszystkie płyty przygotowano w zakładzie prefabrykacji BETARD w podwrocławskiej Długoleśce. W zamówieniu elementów wyspecyfikowano użycie stali o charakterystycznej granicy plastyczności 500 MPa oraz betonu o klasie C20/25. Prace zbrojarskie zostały wykonane przez wykwalifikowanych pracowników zakładu prefabrykacji. Betonowanie elementów odbyło się w pozycji poziomej. Mieszanka betonowa podawana została od góry z niewielkiej wysokości za pomocą kosza, a jej zagęszczenia dokonano z wykorzystaniem wibratora wglębnego, co przeprowadzono z dużą ostrożnością ze względu na ryzyko zniszczenia tensometrów oraz ich okablowania. Dolna powierzchnia płyty oraz jej boczne krawędzie ograniczone zostały szalunkiem (stalowa płyta stołu na powierzchni dolnej oraz sklejka szalunkowa na powierzchniach bocznych), a górna powierzchnia została zatarta na gładko. Bruzdy przeznaczone do wykonania prętowego zakotwienia siatki kompozytu PBO-FRCM (w 2 sztukach płyt) wykonano dzięki umieszczeniu w szalunku dwóch wkładek styropianowych, które usunięte zostały po rozdeskowaniu elementów. Podczas betonowania płyt przygotowano również walcowe i sześciennie próbki materiałowe do badania cech mechaniczno-wytrzymałościowych betonu. Płyty pozostawiono do dojrzewania w zakładzie prefabrykacji na 14 dni, w czasie których zapobiegano niekontrolowanej utracie wilgoci z elementu oraz utrzymywano go w temperaturze około 20°C, a następnie elementy przetransportowano do Laboratorium Badawczego Wydziału Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej, gdzie zostały pozostawione do dalszego dojrzewania w temperaturze około 20°C w zacienionym miejscu przy wilgotności około 50%. Poszczególne fazy opisanego procesu przygotowywania płyt do badań przedstawiono na rysunkach 93-96.



Rys. 93. Zbrojenie elementów ułożone w formach szalunkowych



Rys. 94. Układanie oraz zagęszczanie mieszanki betonowej i zacieranie powierzchni na gładko



Rys. 95. Wykończone elementy badawcze pozostawione do związania i dojrzewania



Rys. 96. Transport rozdeskowanych i wstępnie dojrziałych elementów do laboratorium

Po uzyskaniu pełnej normowej wytrzymałości betonu na ściskanie (po 28 dniach), przystąpiono do procedury wzmacniania sześciu z siedmiu płyt oraz wykonania odpowiednich zakotwień siatki zgodnie z programem badań. Do wykonania wzmocnienia elementów wykorzystano system PBO-FRCM o handlowej nazwie Ruredil X Mesh Gold (aktualnie występujący pod zmienioną nazwą handlową RureGold) [97, 98]. W skład wykorzystanego systemu wzmacniającego wchodzi:

- dwukierunkowa siatka X Mesh Gold, wykonana z włókien PBO o ekwiwalentnej grubości w kierunku głównym równej 0,0455 mm oraz 0,0115 mm w kierunku prostopadłym,
- sucha zaprawa mineralna Ruredil X Mesh M750.

Płyty wzmocniono na ich dolnej powierzchni jedną warstwą opisanego kompozytu na całej ich szerokości i na długości około 1600 mm (w strefie podporowej na długości około 200 mm od końca płyty nie przytwierdzono wzmocnienia). Przed przygotowaniem wzmocnienia dolne powierzchnie płyty zostały wyszlifowane za pomocą szlifierki z diamentową tarczą garbkową w celu usunięcia mlecza cementowego oraz zwiększenia przyczepności kompozytu wzmacniającego do elementu (proces wykonano przed aplikacją tensometrów i czujników światłowodowych). Po odpyleniu oraz odtłuszczeniu wyszlifowanych powierzchni płyt przystąpiono do ich właściwego wzmocnienia. Bezpośrednio przed przystąpieniem do aplikacji kompozytu powierzchnię betonu w obrębie planowanego umieszczenia wzmocnienia zwilżono wodą w celu zminimalizowania zjawiska odbierania wilgoci z zaprawy przez beton elementu wzmacniającego. Następnie zgodnie z zaleceniami producenta rozprowadzono na powierzchni wzmacnianego elementu ciekłą warstwę zaprawy, w którą wtopiono odpowiednio dociętą siatkę PBO (siatkę ułożono głównym wątkiem wzdłuż płyty). Za pomocą szpachelki wciskano siatkę PBO w zaprawę zachowując przy tym jej jak największe napięcie w kierunku podłużnym. Następnie pokryto zatopioną w zaprawie siatkę PBO kolejną warstwą zaprawy, której zewnętrzną powierzchnię wyrównano za pomocą gładkiej pacy murarskiej. Wzmocnienie wykonywano etapami (przy zachowaniu ciągłości siatki) w celu odpowiedniego połączenia obu warstw zaprawy. Elementy pozostawiono do całkowitego związania

zaprawy mineralnej wzmocnienia przy zachowaniu warunków dojrzewania zgodnych z zaleceniami producenta. Poszczególne etapy procesu wzmacniania płyty przedstawiono na rysunkach 97-100.



Rys. 97. Szlifowanie powierzchni wzmacnianego elementu



Rys. 98. Przygotowana powierzchnia płyty zwilżona przed aplikacją wzmocnienia



Rys. 99. Etapowa aplikacja kompozytu (siatka rozwijana stopniowo)



Rys. 100. Wzmocniony element przed pozostawieniem do dojrzewania

We wzmocnionych płytach zastosowano dwa typy zakotwienia kompozytu (poza porównawczą serią bez dodatkowego zakotwienia – Typ C). Oba zaproponowane zakotwienia siatki wykonywane były w czasie opisanego wcześniej etapu wzmacniania elementów, ze względu na konieczność integracji zakotwienia z resztą wzmocnienia. Do wykonania zakotwień wykorzystano:

- kompozytowy pręt zbrojeniowy GFRP o średnicy 6 mm i długości 1000 mm (Typ A),
- sznur z włókien PBO RureGold JX JOINT o średnicy 6 mm połączony z dedykowaną zaprawą mineralną RureGold JM JOINT [99] (Typ B).

Zakotwienie prętowe typu A wykonano w płytach, w których wcześniej na etapie prefabrykacji wykonano bruzdy w strefie przypodporowej. Powierzchnię betonu wewnątrz bruzd oczyszczono z zabrudzeń, a następnie wypełniono niewielką ilością systemowej zaprawy mineralnej z zastosowanego systemu PBO-FRCM. Końcowe nadmiarowe odcinki siatki PBO, o długości około 100 mm, nawinięto na pręt

GFRP przy jednoczesnym pokryciu całości warstwą zaprawy. Siatkę nawiniętą na pręt umieszczono w przygotowanej wcześniej bruździe z zaprawą mineralną, docisnięto zapewniając napięcie siatki, a następnie przykryto zewnętrzną warstwą zaprawy mineralnej. Proces wykonywania zakotwienia typu A przedstawiono na rysunkach 101 i 102.



Rys. 101. Wymierzanie nadmiarowej długości siatki w celu nawinięcia jej na pręt



Rys. 102. Wykonanie zakotwienia prętowego (pokrywanie nawiniętej na pręt siatki zaprawą)

Przy wykonywaniu zakotwienia sznurowego typu B wykonano na obu końcach płyty po 5 otworów o średnicy 12 mm, w odległości około 200 mm od krawędzi końcowej płyty. W otwory zaaplikowano zaprawę mineralną JM JOINT za pomocą mechanicznego pistoletu do iniekcji. Następnie przez otwory przewleczono zaimpregnowany wcześniej zaprawą mineralną sznur PBO o długości około 350 mm. Koniec sznura w dolnej strefie płyty przewleczono przez warstwę siatki PBO, a następnie rozprowadzono promieniście i połączono z warstwą wzmocnienia poprzez pokrycie go dodatkową warstwą zaprawy, która zintegrowała się z wykonywanym równocześnie wzmocnieniem. Koniec sznura w górnej części płyty (bez wzmocnienia kompozytowego) również rozprowadzono promieniście i przytwierdzono do płyty za pomocą dwóch warstw zaprawy mineralnej (warstwy łączącej włókna z betonem płyty oraz zewnętrznej warstwy wykończeniowej). Proces wykonywania zakotwienia typu B przedstawiono na rysunkach 103-105.



Rys. 103. Sznury zakotwienia przewleczone przez płytę



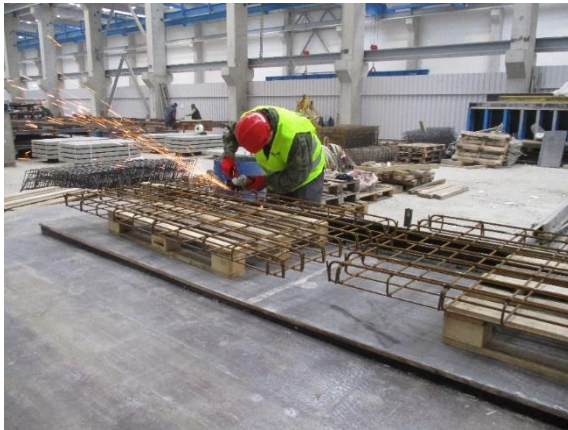
Rys. 103. Zakotwienie przewleczone przez kompozyt



Rys. 105. Promieniste rozprowadzenie włókien sznura

4.3 Przygotowanie czujników trwale przytwierdzonych do elementów

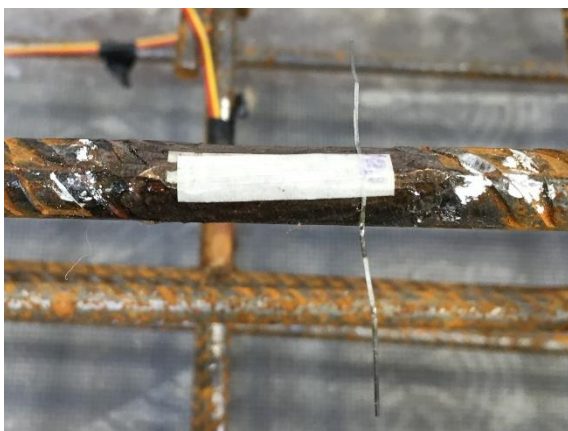
Przed betonowaniem elementów konieczne było przyklejenie oraz zabezpieczenie tensometrów do przygotowanego wcześniej szkieletu zbrojeniowego. W planowanych miejscach umieszczenia tensometrów wygładzono, oczyszczono oraz zagruntowano powierzchnię prętów zbrojeniowych, a następnie przyklejono papierowe tensometry elektrooporowe RL 120/20. Tensometry na prętach zbrojeniowych zostały zabezpieczone przed zniszczeniem w czasie betonowania za pomocą impregnacji woskiem oraz materiałowym plastrem samoprzylepnym. Podczas tego etapu prac wykonano również całe niezbędne okablowanie tensometrów przeznaczonych do mierzenia odkształceń stali zbrojeniowej. Przewody zostały przylutowane do tensometrów, a delikatne miejsca połączenia zabezpieczono klejem na gorąco. Miejsce tensometru zostało dodatkowo zabezpieczone masą zabezpieczającą na folii aluminiowej. Poszczególne etapy przygotowywania miejsc pod tensometry oraz ich zabezpieczania przedstawiono na rysunkach 106-109.



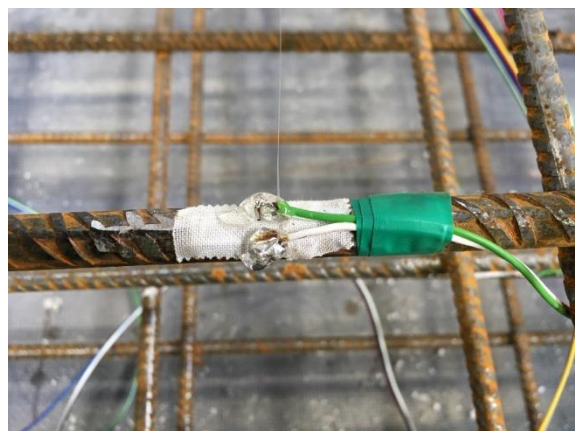
Rys. 106. Szlifowanie oraz oczyszczenie powierzchni w miejscach planowanego przyklejenia tensometrów



Rys. 107. Przyklejanie tensometrów w planowanych miejscach wykonania pomiarów



Rys. 108. Tensometr przyklejony do powierzchni pręta zbrojeniowego przed zabezpieczeniem i przymocowaniem przewodów



Rys. 109. Tensometr zabezpieczony woskiem oraz plastrem wraz z przytwierdzonym przewodem oraz zabezpieczonym miejscem lutowania

Przed przystąpieniem do wzmacniania elementów na powierzchni betonu rozmieszczono na górnej i dolnej powierzchni betonu wszystkie zaplanowane tensometry (RL350/50) i ich okablowanie. Powierzchnia betonu w miejscach rozmieszczenia tensometrów została wyrównana, wyszlifowana, oczyszczona oraz odtłuczona, w celu zapewnienia poprawnej przyczepności tensometrów do podłoża. Miejsca przyklejenia tensometru zagruntowano systemowym klejem, a następnie za pomocą tego samego kleju przymocowano tensometry do powierzchni betonu. Po umiejscowieniu oraz przylutowaniu przewodów tensometrycznych zabezpieczono miejsce lutowania za pomocą kleju na gorąco w celu ochrony tensometru w czasie procesu wzmacniania płyty. W przypadku tensometrów znajdujących się na dolnej powierzchni elementów przeznaczonych do późniejszego wzmocnienia konieczne było ich dodatkowe zabezpieczenie. Powierzchnię tensometru zabezpieczono za pomocą wosku, na który zaaplikowano drobny piasek kwarcowy mający na celu zwiększenia szorstkości zewnętrznej powierzchni punktu tensometrycznego oraz zniwelowania wpływu tego lokalnego zaburzenia na inne pomiary. Proces przygotowywania powierzchni oraz gotowy zabezpieczony tensometr przedstawiono na rysunkach 110 i 111.



Rys. 110. Trasowanie, szlifowanie i oczyszczanie miejsc rozmieszczenia tensometrów



Rys. 111. Zabezpieczony krzyż tensometryczny na powierzchni betonu wraz z okablowaniem

W czterech elementach badawczych (element kontrolny P_0 oraz po jednym elemencie wzmocnionym dla każdego typu zakotwienia – P_A_2, P_B_2, P_C_2) zastosowano dodatkowo światłowodowe czujniki odkształceń, które rozprowadzono na dolnej powierzchni płyty przed wykonaniem wzmocnienia. Podobnie jak w przypadku tensometrów konieczne było odpowiednie przygotowanie powierzchni. W następnej kolejności rozprowadzono światłowód po odpowiednich trasach, zachowując przy tym minimalne promienie zagięcia światłowodu zalecone przez producenta. Do stabilizacji powierzchni światłowodu wykorzystano tymczasowo taśmę samoprzylepną zachowując przy tym odpowiednie napięcie światłowodu pomiędzy punktami przytrzymania. Światłowód przyklejono za pomocą dwuskładnikowego kleju na bazie żywicy epoksydowej, który rozprowadzono pomiędzy punktami przytrzymania za pomocą plastikowej szpachelki. Następnie po wstępnym stwardnieniu kleju usunięto tymczasowe punkty przytrzymania i uzupełniono przerwy punktów przytrzymania klejem, który zintegrował się z pozostałymi

odcinkami. Zastosowana technika przytwierdzania czujników światłowodowych zapewniła im odpowiednią ochronę bez zastosowania dodatkowych zabiegów. W przypadku elementów przeznaczonych do wzmocnienia, na gładką powierzchnię zasychającego kleju zaaplikowano drobny piasek kwarcowy, który miał zminimalizować lokalny wpływ obecności czujnika światłowodowego poprzez zwiększenie szorstkości powierzchni. Końcowe odcinki światłowodów wyprowadzono na boczną powierzchnię płyty w celu ich zabezpieczenia i umożliwienia przeprowadzenia procesu wzmocniania płyty. Sposób przytwierdzenia czujników światłowodowych do powierzchni betonu przedstawiono na rysunkach 112 i 113.



Rys. 112. Tymczasowe przytwierdzenie światłowodów na zaplanowanych trasach



Rys. 113. Światłowody przyklejone do powierzchni betonu za pomocą kleju

Po osiągnięciu pełnej wytrzymałości wzmocnienia, na zewnętrznej powierzchni kompozytu rozmieszczono czujniki światłowodowe i tensometry (RL 350/50). Sposób przygotowania powierzchni oraz ich aplikacji był analogiczny do opisanego wcześniej w przypadku przytwierdzania czujników do powierzchni betonu, jednak pominięto dodatkowe zabezpieczenia przeciwwilgociowe oraz zabezpieczenia przed zniszczeniem czujników.

4.4 Właściwości mechaniczne materiałów

Przy wykonywaniu elementów badawczych pobrano próbki stali zbrojeniowej w celu przebadania ich podstawowych właściwości mechanicznych. Dodatkowo w czasie betonowania pobrano próbki mieszanki betonowej w formie 3 próbek kostkowych i 6 próbek walcowych. Właściwości materiałowe kompozytu PBO-FRCM przyjęto na podstawie wcześniej przeprowadzonych badań materiałowych Promotora, które uzupełniono danymi producenta zawartymi w karcie technicznej produktu oraz danymi opisanymi w literaturze.

4.4.1 Beton

Próbki betonu pobrane w czasie wykonywania elementów zostały umieszczone w formach, a następnie zawibrowane razem z przygotowywanymi elementami badawczymi na stole wibracyjnym przez około 1 minutę. Próbki pozostawiono w zakładzie prefabrykacji w celu dojrzewania w identycznych warunkach

środowiskowych jak elementy badawcze w zacienionym miejscu przy temperaturze powietrza około 20°C i zwiększonej wilgotności powietrza. Zachowanie identycznych warunków dojrzewania elementów badawczych i próbek materiałowych miało na celu jak najdokładniejsze zbadanie parametrów wytrzymałościowych betonu w relacji do betonu w płytach. W dniu poprzedzającym rozpoczęcie badania serii elementów przeprowadzono:

- badanie próbek sześciennych o długości boku 150 mm na ściskanie, na podstawie którego wyznaczono ich średnią wytrzymałość na ściskanie $f_{cm,cube}$,
- badanie próbek walcowych o średnicy 150 mm i wysokości 300 mm na ściskanie, na podstawie którego wyznaczono ich średnią wytrzymałość na ściskanie $f_{cm,cyl}$,
- dodatkowo na pozostałych trzech próbkach walcowych o średnicy 150 mm i wysokości 300 mm wyznaczono ich średni moduł sprężystości podłużnej E_{cm} .

Badania wszystkich próbek przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej ZD 100 o zakresie siły od 0 kN do 1000 kN. Przykładowe fotografie próbek na stanowiskach badawczych do badań materiałowych betonu przedstawiono na rysunkach 114-116.



Rys. 114. Sześcienna próbka betonowa na stanowisku badania wytrzymałości na ściskanie



Rys. 115. Walcowa próbka betonowa na stanowisku badania wytrzymałości na ściskanie



Rys. 116. Walcowa próbka betonowa na stanowisku badania modułu sprężystości podłużnej

Wszystkie przebadane próbki sześcienne zinwentaryzowano poprzez trzykrotne zmierzenie każdego wymiaru płaszczyzny docisku maszyny wytrzymałościowej, czterokrotny pomiar wysokości oraz pomiar masy próbki. Wyniki pomiarów wraz z siłą niszczącą oraz obliczoną wytrzymałością na ściskanie próbek sześciennych przedstawiono w tabeli 18.

Tabela 18. Wyniki badań wytrzymałości betonu na ściskanie na próbkach sześciennych

| L. p. | Nazwa próbki | Bok | | | | Wysokość | Masa | Gęstość | Siła niszcząca | Wytrzymałość na ściskanie |
|-------|--------------|----------------------|--------|--------|--------|----------|------|---------|----------------|---------------------------|
| | | góra | | dół | | | | | | |
| | | A | B | A | B | H | | | | |
| | | [mm] | | | | [mm] | | | | |
| 1 | S1 | 148,24 | 149,30 | 149,81 | 149,30 | 149,29 | 7562 | 2258 | 750 | 33,62 |
| | | 148,97 | 149,82 | 149,76 | 149,64 | 149,88 | | | | |
| | | 149,67 | 150,19 | 149,14 | 149,32 | 149,31 | | | | |
| | | Pow. przekroju [cm²] | | | 223,29 | 151,46 | | | | |
| 2 | S2 | 150,57 | 150,05 | 150,05 | 149,81 | 149,82 | 7630 | 2263 | 940 | 41,75 |
| | | 150,63 | 149,71 | 150,37 | 149,86 | 149,75 | | | | |
| | | 149,68 | 149,68 | 149,74 | 150,35 | 149,87 | | | | |
| | | Pow. przekroju [cm²] | | | 225,12 | 149,63 | | | | |
| 3 | S3 | 149,95 | 149,57 | 149,77 | 150,08 | 149,65 | 7639 | 2283 | 920 | 41,13 |
| | | 149,29 | 149,48 | 149,18 | 149,93 | 150,13 | | | | |
| | | 149,50 | 149,39 | 148,96 | 149,66 | 149,15 | | | | |
| | | Pow. przekroju [cm²] | | | 223,69 | 149,42 | | | | |

W przypadku próbek walcowych wykonano podobną inwentaryzację, w której trzykrotnie zmierzono średnicę walców, czterokrotnie zmierzono ich wysokość oraz wykonano pomiar masy próbek. Wyniki pomiarów wraz siłą niszczącą oraz obliczoną wytrzymałością na ściskanie próbek walcowych przedstawiono w tabeli 19.

Tabela 19. Wyniki badań wytrzymałości betonu na ściskanie na próbkach walcowych

| L. p. | Nazwa próbki | Bok | | Wysokość | Masa | Gęstość | Siła niszcząca | Wytrzymałość na ściskanie |
|-------|--------------|----------------------|--------|----------|-------|---------|----------------|---------------------------|
| | | góra | dół | | | | | |
| | | | | H | | | | |
| | | [mm] | | [mm] | | | | |
| 1 | W1 | 150,12 | 150,06 | 300,66 | 12314 | 2307 | 740 | 41,66 |
| | | 150,30 | 150,98 | 300,83 | | | | |
| | | 150,22 | 150,60 | 300,36 | | | | |
| | | Pow. przekroju [cm²] | 177,61 | 300,39 | | | | |
| 2 | W2 | 149,88 | 150,16 | 301,18 | 12259 | 2304 | 745 | 42,12 |
| | | 150,20 | 150,19 | 300,48 | | | | |
| | | 150,03 | 149,96 | 299,95 | | | | |
| | | Pow. przekroju [cm²] | 176,88 | 301,48 | | | | |
| 3 | W3 | 150,67 | 150,04 | 300,39 | 12282 | 2307 | 720 | 40,67 |
| | | 150,13 | 150,07 | 301,32 | | | | |
| | | 149,88 | 149,97 | 300,34 | | | | |
| | | Pow. przekroju [cm²] | 177,01 | 300,78 | | | | |

Na podstawie przeprowadzonych badań wyznaczono średnią wytrzymałość na ściskanie próbek sześciennych na poziomie $f_{cm,cube} = 38,83$ MPa z odchyleniem standardowym na poziomie $s = 4,53$ MPa

oraz średnią wytrzymałość na ściskanie próbek walcowych na poziomie $f_{cm,cyl} = 41,49$ MPa z odchyleniem standardowym na poziomie $s = 0,74$ MPa.

Oznaczenie modułu sprężystości, wykonane zostało na próbkach walcowych zgodnie z metodą badawczą wypracowaną w laboratorium. Przeprowadzono je z wykorzystaniem tensometrów papierowych RL350/50 przyklejonych do powierzchni próbki. Na każdej z trzech próbek, w środku ich wysokości, przyklejono trzy pionowe tensometry równomiernie rozłożone na ich obwodzie (co 120°). Akwizycji danych do komputera dokonano z wykorzystaniem wzmacniacza Hottinger Baldwin Messtechnik Spider 8. Próbkę obciążono wstępnie w 6 cyklach siłą od 10% do 30% wyznaczonej wcześniej wytrzymałości walcowej próbek na ściskanie. W kolejnym cyklu obciążenia zwiększono górną granicę obciążenia do 80% wytrzymałości walcowej próbek na ściskanie, a po odciążeniu próbki przystąpiono do właściwego obciążenia próbki. Wartość modułu sprężystości podłużnej betonu odczytano na podstawie ostatniego cyklu obciążenia dla obciążeń z zakresu od 10% do 30% siły niszczącej. Średnia wyznaczona wartość modułu sprężystości betonu wynosiła $E_{cm} = 35,2$ GPa i została określona z odchyleniem standardowym na poziomie $s = 1,07$ GPa.

4.4.2 Stal

W elementach badawczych jako zbrojenie wykorzystano pręty o średnicach 8 mm i 10 mm. Pręty o średnicy 8 mm wykonano ze stali gatunku St3SY-b500, a pręty o średnicy 10 mm ze stali gatunku B500SP. Oba gatunki stali cechują się charakterystyczną granicą plastyczności na poziomie 500 MPa. W celu określenia rzeczywistych parametrów wytrzymałościowych zastosowanych prętów zbrojeniowych przeprowadzono badania materiałowe, w których określono:

- granicę plastyczności,
- wytrzymałość na rozciąganie,
- wydłużenie końcowe,
- moduł sprężystości podłużnej.

W tym celu przygotowano po cztery próbki o długości około 30 cm dla obu typów prętów, które pochodziły z tej samej partii materiału. Długość bazy pomiarowej dla wszystkich próbek ustalono jako dziesięciokrotność ich średnicy, co przekładało się na wartość 80 mm dla prętów o średnicy 8 mm i 100 mm dla prętów o średnicy 10 mm. Badania statycznej próby rozciągania przeprowadzono w maszynie wytrzymałościowej UFP 400 sterowaną przemieszczeniem, o zakresie siły od 0 kN do 1000 kN. Do pomiaru odkształceń podłużnych stali, wykorzystano zintegrowany z maszyną wytrzymałościową ekstensometr o dokładności 0,001 mm. Dane z czujników rejestrowano z wykorzystaniem wzmacniacza Hottinger Baldwin Messtechnik Spider 8. Fotografie stanowiska badawczego przedstawiono na rysunkach 117 i 118.

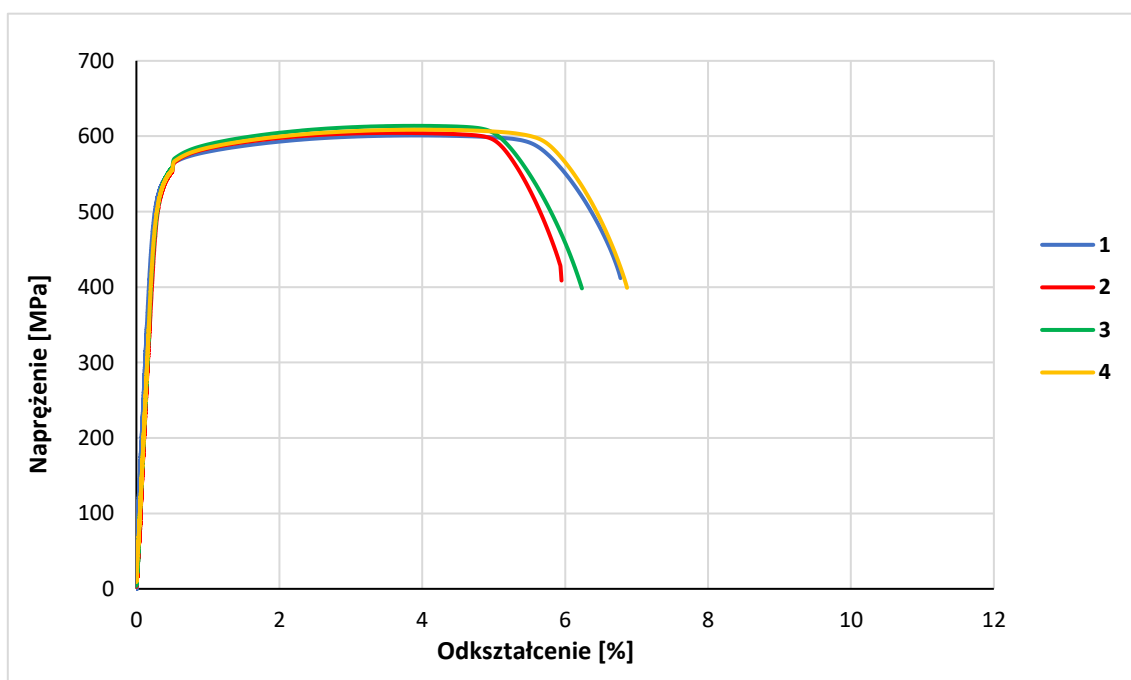


Rys. 117. Stanowisko badania stali zbrojeniowej

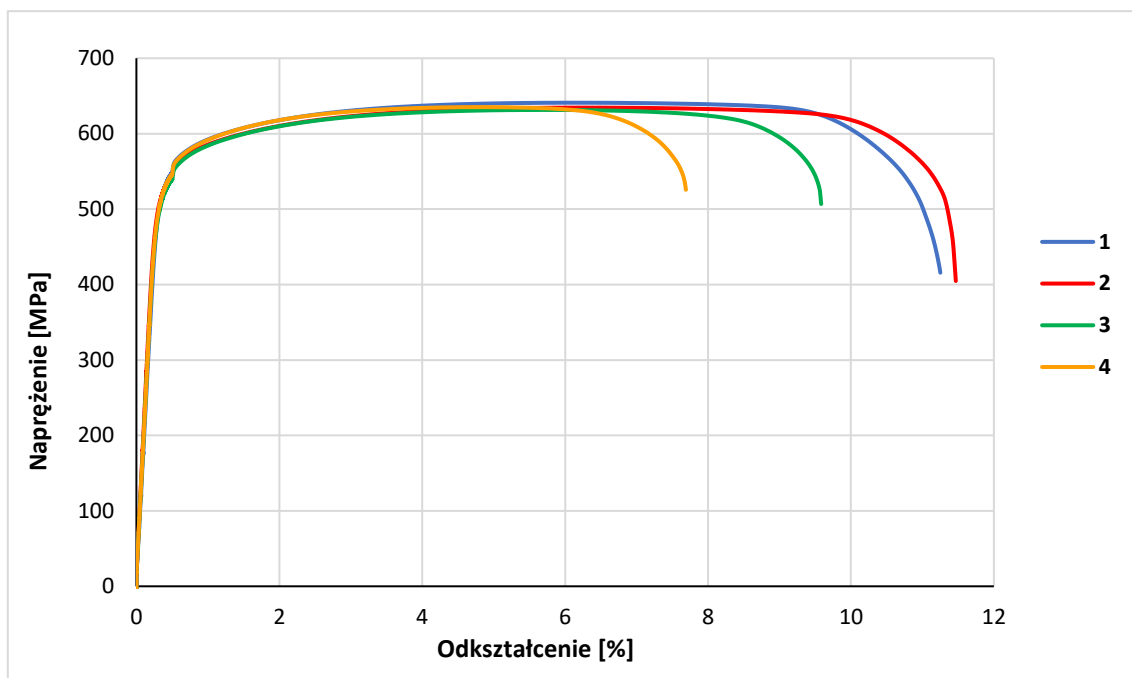


Rys. 118. Próbką stali zbrojeniowej w maszynie wytrzymałościowej z ekstensometrem

Wyniki badań prętów o średnicy 8 mm przedstawiono w tabeli 20 oraz na rysunku 119, a dla prętów o średnicy 8 mm w tabeli 21 oraz na rysunku 120.



Rys. 119. Wykresy uzyskane przy rozciąganiu próbek prętów zbrojeniowych o średnicy 8 mm



Rys. 120. Wykresy uzyskane przy rozciąganiu próbek prętów zbrojeniowych o średnicy 10 mm

Tabela 20. Zestawienie wyników badania wytrzymałości i odkształcalności prętów zbrojeniowych o średnicy 8 mm

| L.p. | d | S_0 | L | L_0 | f_y | f_u | E_s |
|-------------------------|------|--------------------|------|-------|-------|-------|-------|
| | [mm] | [mm ²] | [mm] | [mm] | [MPa] | [MPa] | [MPa] |
| 1 | 8 | 50,27 | 304 | 80 | 550 | 601 | 201 |
| 2 | 8 | 50,27 | 302 | 80 | 552 | 604 | 190 |
| 3 | 8 | 50,27 | 305 | 80 | 557 | 614 | 194 |
| 4 | 8 | 50,27 | 304 | 80 | 552 | 609 | 201 |
| wartość średnia: | | | | | 553 | 607 | 197 |
| odchylenie standardowe: | | | | | 3 | 5 | 5 |

Tabela 21. Zestawienie wyników badania wytrzymałości i odkształcalności prętów zbrojeniowych o średnicy 10 mm

| L.p. | d | S_0 | L | L_0 | f_y | f_u | E_s |
|-------------------------|------|--------------------|------|-------|-------|-------|-------|
| | [mm] | [mm ²] | [mm] | [mm] | [MPa] | [MPa] | [MPa] |
| 1 | 10 | 78,54 | 305 | 100 | 551 | 641 | 177 |
| 2 | 10 | 78,54 | 305 | 100 | 541 | 635 | 195 |
| 3 | 10 | 78,54 | 307 | 100 | 544 | 635 | 187 |
| 4 | 10 | 78,54 | 308 | 100 | 537 | 631 | 187 |
| wartość średnia: | | | | | 543 | 636 | 187 |
| odchylenie standardowe: | | | | | 5 | 4 | 6 |

4.4.3 Kompozyt PBO-FRCM

Wykorzystany w badaniach kompozyt wzmacniający PBO-FRCM składa się z dwóch podstawowych składników:

- siatki PBO Ruredil X Mesh Gold z włókien PBO,
- zaprawy mineralnej Ruredil X Mesh M750.

Właściwości obu składników kompozytu, które zostały zadeklarowane przez producenta oraz przebadane we wcześniejszych analizach przedstawiono w tabelach 22 i 23.

Tabela 22. Właściwości włókien PBO i siatki z nich wykonanych [76, 77, 98]

| Właściwość | Jednostka | Wartość |
|---|-------------------|-------------------------|
| Gęstość | g/cm ³ | 1,56 |
| Maksymalne naprężenie rozciągające | MPa | 5800 [98]/5270 [76, 77] |
| Graniczne odkształcenie rozciągające | % | 2,15 |
| Temperatura zniszczenia | °C | 650 |
| Współczynnik rozszerzalności termicznej | - | $-6 \cdot 10^{-6}$ |
| Masa siatki | g/m ² | 126 |
| Masa włókien PBO w siatce | g/m ² | 88 |
| Ekwiwalentna grubość siatki w głównym kierunku | mm | 0,0455 |
| Ekwiwalentna grubość siatki w drugorzędnym kierunku | mm | 0,0115 |

Tabela 23. Właściwości zaprawy mineralnej [98]

| Właściwość | Jednostka | Wartość |
|---|-------------------|-------------|
| Ciężar właściwy świeżo ułożonej zaprawy | g/cm ³ | 1,50 ± 0,05 |
| Zużycie wody zarobowej na 100 kg suchej zaprawy | l | 24 - 26 |
| Zużycie suchej zaprawy przy 1 mm grubości | kg/m ² | 1,21 - 1,27 |
| Wytrzymałość na ściskanie (po 28 dniach) | MPa | ≥ 15 |
| Wytrzymałość na rozciąganie (po 28 dniach) | MPa | ≥ 2 |
| Sieczny moduł sprężystości (po 28 dniach) | MPa | ≥ 6000 |

Właściwości mechaniczne kompozytu PBO-FRCM opisujące jego zachowanie w oddzieleniu od wzmacnianej konstrukcji, opisywane według ACI 549.4R-13 [89] AC 434 [90] nie zostały przeprowadzone, ponieważ w niniejszej pracy nie analizowano zmian w materiale, które mogłyby wpłynąć na wyniki tych oznaczeń. Głównym przedmiotem badań były modyfikacje wzmocnienia PBO-FRCM w postaci zakotwienia kompozytu, które były analizowane łącznie ze wzmacnianym elementem. Jako punkt odniesienia w zakresie parametrów wytrzymałościowych oddzielnie pracującego kompozytu przyjęto literaturowe wyniki badań, które opisano w pracy [5]. Wyniki badań rozciągania pasma kompozytu PBO-FRCM wraz z odchyleniem standardowym wartości przedstawiono w tabeli 24. Opisane w tabeli wartości w formie graficznej przedstawiono we wcześniejszym podrozdziale 2.2.2 na rysunku 14.

Tabela 24. Właściwości kompozytu PBO-FRCM [5]

| Właściwość | Symbol | Jednostka | Wartość | Odchylenie standardowe |
|--|--------------------|-----------|---------|------------------------|
| Moduł sprężystości podłużnej próbki rozciąganej przed zarysowaniem | E_f^* | GPa | 1805 | 452 |
| Moduł sprężystości podłużnej próbki rozciąganej po zarysowaniu | E_f | GPa | 128 | 15 |
| Naprężenie uzyskane w punkcie przejściowym „T” | f_{ft} | MPa | 375 | 82 |
| Odształcenie uzyskane w punkcie przejściowym „T” | ε_{ft} | % | 0,0170 | 0,0043 |
| Maksymalne naprężenie uzyskane przy zniszczeniu próbki | f_{fu} | MPa | 1664 | 77 |
| Maksymalne odkształcenie uzyskane przy zniszczeniu próbki | ε_{fu} | % | 1,7560 | 0,1388 |

4.5 Zasadnicze badania doświadczalne

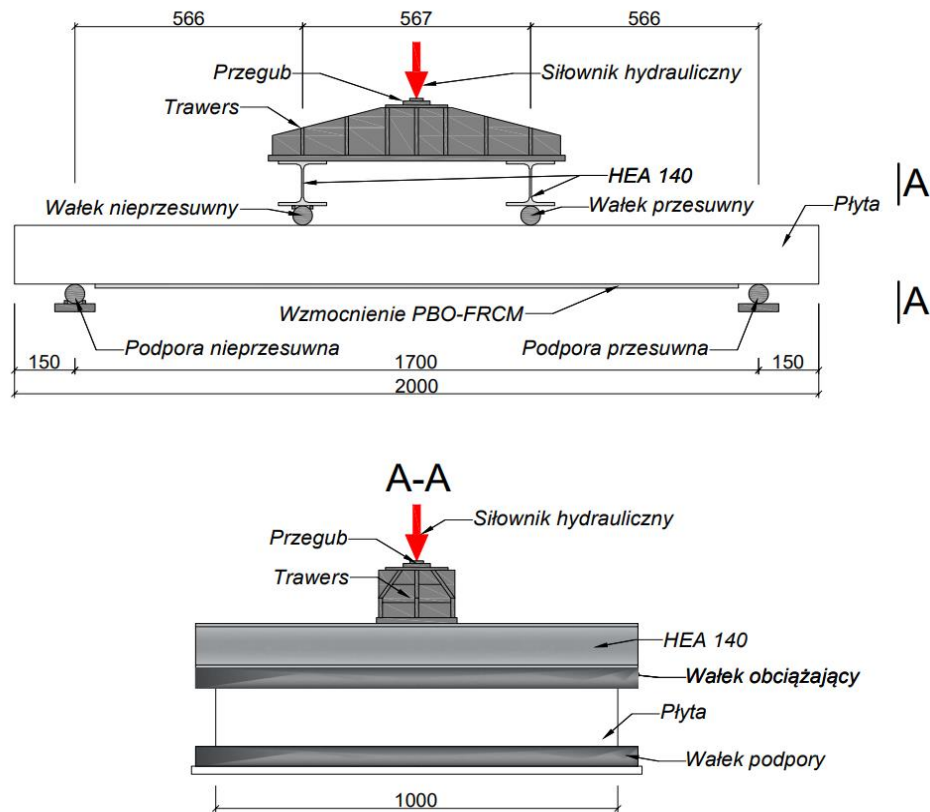
W zaplanowanej zasadniczej serii doświadczalnej przeprowadzono badania niszczące przygotowanych wcześniej elementów. Płyty poddano jednokierunkowemu zginaniu w schemacie czteropunktowego zginania aż do ich całkowitego zniszczenia przy jednoczesnym pomiarze obciążeń, odkształceń i przemieszczeń charakterystycznych punktów elementów.

4.5.1 Stanowisko badawcze

Stanowisko badawcze zaprojektowano w schemacie statycznym założonym w programie badań – płyty jednokierunkowo zginanej w schemacie czteropunktowego zginania. W laboratorium przygotowano podpory liniowe o długości 1200 mm, które ustawiono w rozstawie osiowym równym 1700 mm. W celu zapewnienia przegubowego podparcia płyt na podporach umieszczono stalowe wałki, z których jeden unieruchomiono w celu uzyskania podpory nieprzesuwnej, a w drugim pozostawiono swobodę przesuwu w celu uzyskania podpory przesuwnej. Obciążenie zrealizowano za pomocą siłownika hydraulicznego Instron Dynacell o zakresie siły od 0 kN do 500 kN. Siłę rozdzielono za pomocą sztywnego stalowego trawersu, którym obciążono stalowe wałki ułożone na płycie. Podobnie, jak w przypadku podpór jeden z wałków unieruchomiono w celu uzyskania połączenia nieprzesuwnej, a drugi pozostawiono jako wolny w celu umożliwienia przesuwu. W celu zwiększenia sztywności elementów pośrednich przekazujących siłę na kierunku prostopadłym do głównego kierunku zginania płyty, zastosowano wzmocnienie w postaci kształtowników stalowych HEA 140 przytwierdzonych do trawersu wzdłuż kierunku wałków obciążających płytę. Zdjęcie stanowiska badawczego wraz z wymiarami przedstawiono na rysunku 121, a jego schemat z wymiarami na rysunku 122.



Rys. 121. Widok ogólny stanowiska badawczego



Rys. 122. Schemat stanowiska badawczego

Płyty obciążano siłownikiem ze sterowaniem przemieszczeniem zachowując w miarę możliwe stałe tempo na poziomie około 1 mm na minutę. W przypadku elementów, w których zastosowano pomiary światłowodowe (P_0, P_A_2, P_B_2, P_C_2) zastosowano przerwy w obciążaniu elementów, które konieczne były ze względu na realizację pomiaru światłowodowego (od 5 do 10 s). Przerwy te wykonywano co 10 kN przyrostu siły obciążającej płytę, a przy wyraźnie zbliżającym się zniszczeniu płyty zmniejszono interwał do 5 kN.

4.5.2 Aparatura badawcza i jej rozmieszczenie

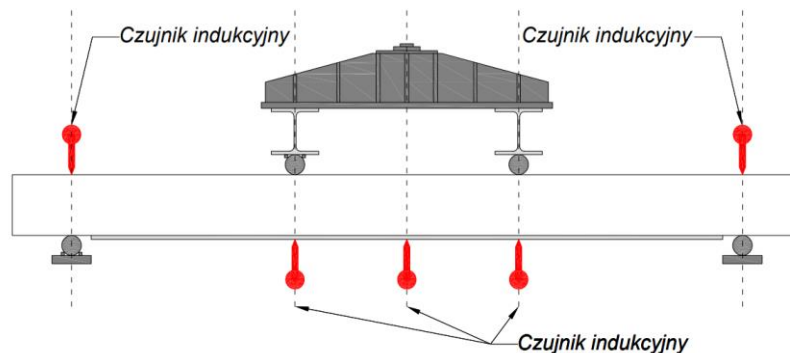
Podczas badań wszystkich elementów płytowych mierzono następujące wielkości:

- ugięcia płyty,
- przemieszczenia podpór płyty,
- odkształcenia podłużne górnej powierzchni betonu,
- odkształcenia poprzeczne górnej powierzchni betonu,
- odkształcenia podłużne dolnej powierzchni betonu,
- odkształcenia poprzeczne dolnej powierzchni betonu,
- odkształcenia podłużne głównych dolnych prętów zbrojeniowych,
- odkształcenia podłużne drugorzędnych dolnych prętów zbrojeniowych.

Dodatkowo w przypadku elementów wzmocnionych kompozytem PBO-FRCM rejestrowano:

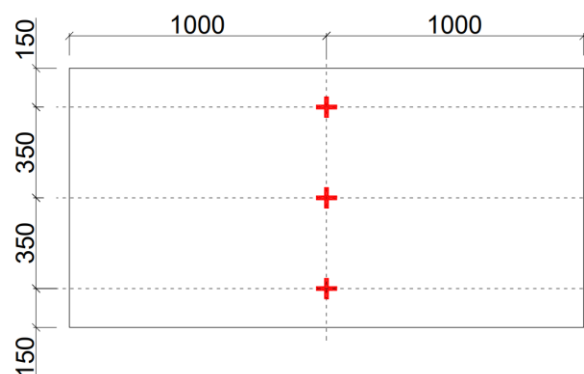
- odkształcenia podłużne kompozytu,
- odkształcenia poprzeczne kompozytu.

Ugięcia płyt oraz przemieszczenia podpór mierzono w środkowej osi podłużnej płyty z wykorzystaniem łącznie pięciu czujników indukcyjnych o zakresie pomiaru 100 mm i dokładności 0,01 mm. Dwa czujniki do pomiaru przemieszczeń podpór umieszczono na statywach wykonując pomiar od górnej powierzchni płyty na obu jej końcach. Trzy czujniki indukcyjne do pomiaru ugięć płyty rozmieszczono pod miejscami przyłożenia siły oraz w środku rozpiętości płyty wykonując pomiar od dolnej powierzchni płyty. Rozkład czujników indukcyjnych przedstawiono na rysunku 123.



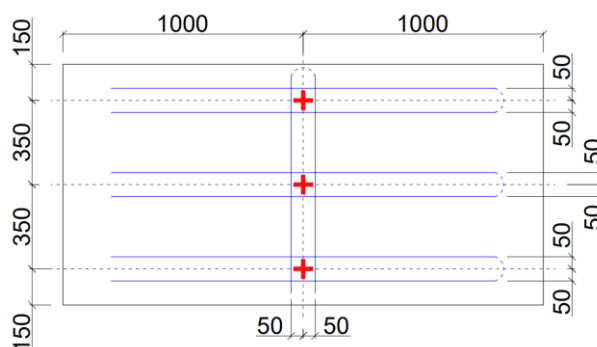
Rys. 123. Rozkład czujników indukcyjnych wykorzystanych w badaniach (widok od boku)

Pomiar odkształceń górnej powierzchni betonu w każdym przypadku przeprowadzono z wykorzystaniem trzech krzyży tensometrycznych wykonanych z dwóch wzajemnie prostopadłych tensometrów, z których jeden ukierunkowany był zgodnie z osią podłużną płyty a drugi prostopadle do niej. Wszystkie krzyże umieszczono w środkowym przekroju płyty – jedną na środku jej szerokości i dwie w odległości 150 mm od krawędzi bocznej płyty. Graficzne przedstawienie rozkładu tensometrów na górnej powierzchni betonu przedstawiono na rysunku 124 (tensometry zaznaczono kolorem czerwonym).



Rys. 124. Rozkład tensometrów na górnej powierzchni betonu (widok od góry)

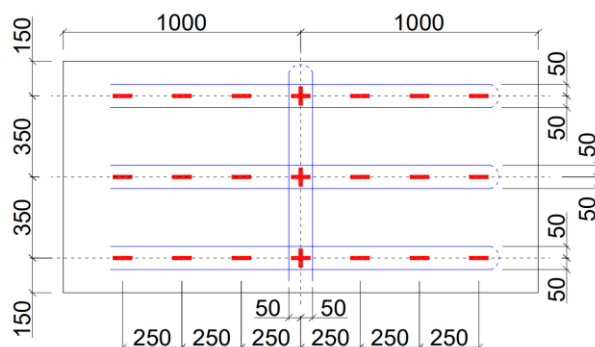
W przypadku dolnej powierzchni betonu zastosowano identyczny rozkład krzyży tensometrycznych, jak w przypadku górnej powierzchni betonu. Dodatkowo w czterech płytach (P_0, P_A_2, P_B_2, P_C_2) powierzchnię dolną betonu uzbrojono w czujniki światłowodowe do pomiaru odkształceń podłużnych i poprzecznych płyty. Czujniki do pomiarów odkształceń podłużnych rozłożono niemalże na całej długości płyty (od podpory do podpory) z zachowaniem ok. 10 cm marginesu ochronnego. Łącznie ułożono 6 wzdłużnych osi pomiarowych, które pokrywały się z rozkładem krzyży tensometrycznych z zachowaniem 5 cm odległości światłowodu od osi tensometru. W przypadku pomiaru odkształceń poprzecznych płyty wykorzystano dwie osie światłowodu, również oddalone o 5 cm od osi tensometrów poprzecznych. Poprzeczne światłowody rozłożono na niemalże całej szerokości płyty z zachowaniem ok. 5 cm marginesu od krawędzi bocznej elementu. Graficzne przedstawienie rozłożenia tensometrów i czujników światłowodowych na dolnej powierzchni betonu przedstawiono na rysunku 125 (tensometry zaznaczono kolorem czerwonym, a światłowody kolorem niebieskim). W celu zwiększenia czytelności, pomocnicze odcinki połączeniowe światłowodu przedstawiono za pomocą linii przerywanej w kolorze niebieskim.



Rys. 125. Rozkład tensometrów i światłowodów na dolnej powierzchni betonu (widok od spodu)

Uwaga – czujniki światłowodowe zastosowano jedynie w elementach P_0, P_A_2, P_B_2, P_C_2

W płytach wzmocnionych kompozytem PBO-FRCM na powierzchni wzmocnienia zastosowano identyczny układ krzyży tensometrycznych w środkowym przekroju elementu, jak w przypadku górnej i dolnej powierzchni betonu. Dodatkowo zastosowano po sześć równo oddalonych rozłożonych po długości płyty (od podpory do podpory) tensometrów w osi każdego z trzech krzyży tensometrycznych. Tensometry te rozłożono w rozstawie 250 mm licząc od środkowego przekroju płyty w kierunku obu podpór. W przypadku trzech elementów wzmocnionych (P_A_2, P_B_2, P_C_2) zastosowano również światłowodowe czujniki odkształceń, które rozłożono w układzie identycznym, do układu opisanego dla rozciąganej powierzchni betonu. Graficzne przedstawienie rozłożenia tensometrów i czujników światłowodowych na powierzchni kompozytu wzmacniającego przedstawiono na rysunku 126 (tensometry zaznaczono kolorem czerwonym, a światłowody kolorem niebieskim). Na rysunku, w celu zwiększenia czytelności, pominięto pomocnicze odcinki połączeniowe światłowodu i przedstawiono jedynie odcinki istotne z punktu widzenia pomiarów odkształceń.



Rys. 126. Rozkład tensometrów i światłowodów na powierzchni wzmocnienia (widok od spodu)

Uwaga – czujniki światłowodowe zastosowano jedynie w elementach P_A_2, P_B_2, P_C_2

Na dolnym zbrojeniu płyty również umieszczono tensometry. Na trzech prętach głównego zbrojenia dolnego (na pręcie najbliższym środka szerokości oraz dwóch przedskrajnych prętach od strony krawędzi bocznej) rozmieszczono równomiernie po 7 tensometrów w rozstawach co 250 mm. W dolnym zbrojeniu drugorzędym (prostopadle do głównego kierunku zginania) na prętach najbliższych środkowego przekroju płyty przewidziano dodatkowe trzy punkty pomiarowe – na środku długości pręta oraz dwa punkty w odległości 150 mm od obu krawędzi bocznych płyty. Celem takiego rozkładu tensometrów było, jak najbliższe odzwierciedlenie układu tensometrów rozmieszczonych na powierzchni wykonanego później wzmocnienia, dlatego jako przybliżony rozkład tensometrów na zbrojeniu dolnym płyty można przyjmować rozkład przedstawiony wcześniej na rysunku 126. Przy pomiarach odkształceń stali zbrojeniowej nie wykorzystywano czujników światłowodowych w żadnym z przebadanych elementów.

Do pomiarów odkształceń powierzchni betonu oraz kompozytu stosowano tensometry elektrooporowe typu RL350/50, a w przypadku pomiarów odkształceń stali zbrojeniowej zastosowano tensometry elektrooporowe typu RL120/20. Do odczytu oraz zapisu danych z tensometrów i czujników indukcyjnych wykorzystano wielokanałowy wzmacniacz Hottinger Baldwin Messtechnik MGCPlus. W przypadku czujników światłowodowych użyto jednokanałowego reflektometru optycznego Luna OBR4600 sprzężonego z wielokanałowym rozdzielaczem stworzonym przez firmę SHM System. Wszelkie dane przetwarzano za pomocą oprogramowania do wyżej wymienionego sprzętu, a następnie eksportowano je w formie arkusza kalkulacyjnego w celu dalszej obróbki.

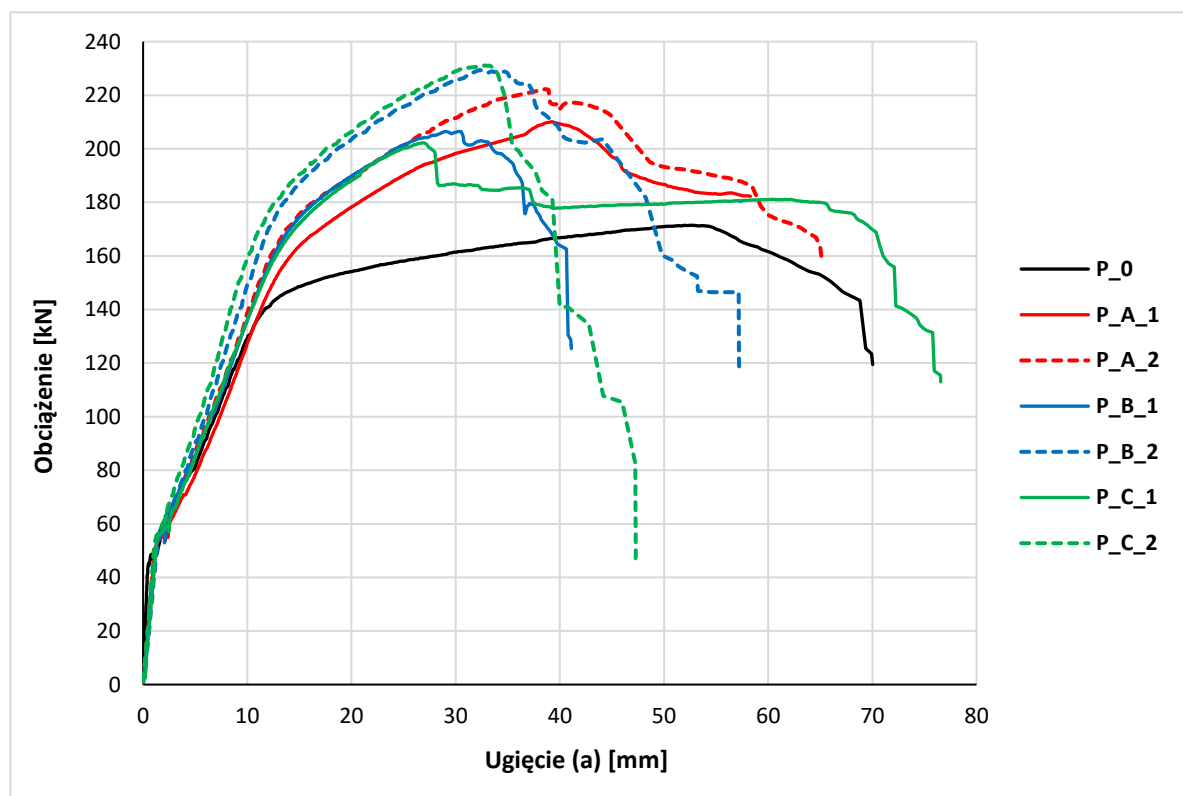
Dodatkowo podczas pomiarów wykonano porównawcze oszacowanie szerokości rys na bocznej powierzchni płyty, które przeprowadzono z wykorzystaniem lupy z podziałką. Pozwoliło to na wyznaczenie szerokości rys z dokładnością do 0,1 mm oraz wykrycie momentu zarysowania elementu. Pomiary prowadzono od początku obciążenia płyty, aż do osiągnięcia subiektywnie dużych obciążeń (zazwyczaj około 90% nośności elementu), które zmuszały do oddalenia się od stanowiska badawczego.

4.6 Wyniki zasadniczych badań doświadczalnych

Ze względu na szeroki zakres pomiarów wykonanych na elementach badawczych, podzielono wyniki na sekcje tematyczne, w ramach których przeanalizowano wyniki związane z poszczególnymi właściwościami elementów. Poszczególne analizy przedstawiono w następnych punktach niniejszego podrozdziału.

4.6.1 Nośność elementów i mechanizmy zniszczenia

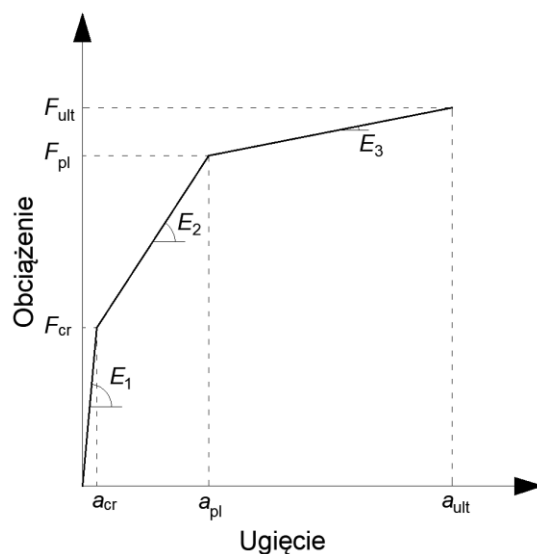
Podstawowym analizowanym efektem wzmocnienia, jednokierunkowo zginanych płyt żelbetowych, kompozytem PBO-FRCM była zmiana charakteru ich pracy oraz wzrost poziomu obciążeń, przy których dochodziło do zmiany fazy pracy płyty oraz wzrost obciążenia niszczącego. Wszelkie te wartości przeanalizowano w odniesieniu do ugięć płyt w charakterystycznych punktach na granicy faz pracy. Na rysunku 127 przedstawiono wykres zależności obciążenia od ugięcia dla wszystkich przebadanych elementów, na podstawie którego dokonano analiz.



Rys. 127. Wykres zależności siły od ugięcia dla wszystkich przebadanych elementów

Wszystkie przedstawione wykresy wskazują trójfazową pracę elementów płytowych. Pierwsza faza pracy rozpoczyna się w momencie obciążenia płyty i kończy się w momencie zarysowania. Bezpośrednio po zarysowaniu, krzywe zależności obciążenie-ugięcie zmniejszają kąt swojego nachylenia, by następnie aż do momentu uplastycznienia głównych prętów zbrojeniowych pracować w fazie drugiej. Kolejna, trzecia faza pracy, rozpoczyna się bezpośrednio po pełnym uplastycznieniu zbrojenia rozciąganego

i charakteryzuje się jeszcze mniejszym kątem nachylenia krzywej niż obserwuje się to w fazie drugiej. Trzecia faza kończy się zniszczeniem płyty oraz utratą możliwości przenoszenia dalszych obciążeń. W celu porównania zachowania się elementów w poszczególnych fazach stworzono trójliniowy model teoretyczny, w którym opisano charakterystyczne punkty oraz nachylenia krzywych w poszczególnych fazach pracy płyt. Wykorzystane oznaczenia oraz opisany model porównawczy przedstawiono na rysunku 128. W tabelach 25 - 27 zestawiono parametry opisane modelem oraz w przypadku wszystkich elementów wzmocnionych kompozytem PBO-FRCM przyrównano te wartości do ich odpowiedników w elemencie niewzmocnionym. Wartości ilorazu analizowanego parametru i odpowiadającego parametru w elemencie niewzmocnionym opisano jako Δx , gdzie „x” jest odpowiednim porównywanym parametrem.



Rys. 128. Porównawczy model teoretyczny zachowania płyt żelbetowych przy zginaniu

Tabela 25. Zestawienie sztywności płyt w poszczególnych fazach pracy

| Nazwa elementu | E_1 | ΔE_1 | E_2 | ΔE_2 | E_3 | ΔE_3 |
|----------------|---------|--------------|---------|--------------|---------|--------------|
| | [kN/mm] | [-] | [kN/mm] | [-] | [kN/mm] | [-] |
| P_0 | 96,3 | 1,00 | 9,6 | 1,00 | 0,7 | 1,00 |
| P_A_1 | 45,3 | 0,47 | 9,9 | 1,03 | 2,6 | 3,62 |
| P_A_2 | 44,6 | 0,46 | 10,3 | 1,07 | 2,6 | 3,60 |
| P_B_1 | 42,0 | 0,44 | 10,1 | 1,06 | 3,1 | 4,36 |
| P_B_2 | 40,9 | 0,42 | 11,7 | 1,22 | 2,8 | 3,95 |
| P_C_1 | 41,6 | 0,43 | 10,3 | 1,08 | 2,8 | 3,98 |
| P_C_2 | 47,2 | 0,49 | 12,7 | 1,33 | 3,2 | 4,53 |

Widoczne różnice w nachyleniu wykresów w pierwszej fazie pracy elementu wynikają w głównej mierze z niedokładności pomiarowych spowodowanych małymi wartościami ugięć w początkowej fazie obciążania elementu oraz adaptacją elementu badawczego do stanowiska i nie powinny być brane pod uwagę podczas analiz. Praca wszystkich elementów w fazie przed zarysowaniem jest podobna, ze względu na znikomą sztywność wzmocnienia w stosunku do sztywności elementu żelbetowego w stanie niezarysowanym. Istotne różnice w pracy elementów wzmocnionych i niewzmocnionych uwidaczniają się w drugiej i trzeciej fazie (po zarysowaniu). Różnica w sztywności elementów w fazie drugiej nie jest istotna, ponieważ w zależności od elementu wynosi 3-33%, jednak w fazie trzeciej sztywność elementów wzmocnionych jest większa o 262-353% w porównaniu z elementem niewzmocnionym kompozytem PBO-FRCM. Wskazuje to, że wzmocnienie zaczyna przynosić widoczne korzyści dopiero po zarysowaniu elementu, a największą efektywność pod względem zwiększania sztywności wykazuje po uplastycznieniu zbrojenia głównego. Ze względu na duże różnice pomiędzy sztywnościami dla poszczególnych elementów nie stwierdzono jednoznacznej zależności związanej z wpływem zakotwienia kompozytu na sztywność elementu, ale wykazano wpływ samego wzmocnienia.

Tabela 26. Zestawienie obciążeń w punktach przejściowych pomiędzy poszczególnymi fazami pracy płyt

| Nazwa elementu | F_{cr} | ΔF_{cr} | F_{pl} | ΔF_{pl} | F_{ult} | ΔF_{ult} |
|----------------|----------|-----------------|----------|-----------------|-----------|------------------|
| | [kN] | [-] | [kN] | [-] | [kN] | [-] |
| P_0 | 44,5 | 1,00 | 129,0 | 1,00 | 171,4 | 1,00 |
| P_A_1 | 52,6 | 1,18 | 150,8 | 1,17 | 210,1 | 1,23 |
| P_A_2 | 54,5 | 1,22 | 158,0 | 1,22 | 222,3 | 1,30 |
| P_B_1 | 54,2 | 1,22 | 154,0 | 1,19 | 206,5 | 1,20 |
| P_B_2 | 56,1 | 1,26 | 168,0 | 1,30 | 229,4 | 1,34 |
| P_C_1 | 55,0 | 1,24 | 150,5 | 1,17 | 202,2 | 1,18 |
| P_C_2 | 55,5 | 1,25 | 159,6 | 1,24 | 231,1 | 1,35 |

Już przy pierwszej zmianie fazy pracy płyt, związanej z chwilą zarysowania, widoczny jest ewidentny wpływ wzmocnienia PBO-FRCM. Z danych przedstawionych w tabeli 26 wynika, że elementy wzmocnione ulegały zarysowaniu przy obciążeniach większych o 18-26% niż element porównawczy. Podobny przyrost siły przy zmianie faz pracy zaobserwowano w przypadku uplastycznienia zbrojenia głównego, które w elementach wzmocnionych zachodziło przy obciążeniach o 17-30% większych niż w elemencie porównawczym. Maksymalna siła obciążająca płyty dla elementów wzmocnionych była większa o 18-35% niż w elemencie porównawczym. Podobne zakresy przyrostów sił w charakterystycznych fazach pracy pozwalają określić średnią efektywność jednej warstwy kompozytu PBO-FRCM we wzmacnianiu badanych płyt żelbetowych na poziomie około 27%. Ze względu na rozrzut poszczególnych wyników nie jest możliwe ściśle określenie

bezpośredniego wpływu zakotwienia kompozytu na przyrost nośności płyty w poszczególnych fazach pracy i należy uznać, że w tym aspekcie nie ma ono znaczącego wpływu na otrzymane wyniki.

Tabela 27. Zestawienie ugięć w punktach przejściowych pomiędzy poszczególnymi fazami pracy płyt

| Nazwa elementu | a_{cr} | Δa_{cr} | a_{pl} | Δa_{pl} | a_{ult} | Δa_{ult} |
|----------------|----------|-----------------|----------|-----------------|-----------|------------------|
| | [mm] | [-] | [mm] | [-] | [mm] | [-] |
| P_0 | 0,58 | 1,00 | 10,02 | 1,00 | 51,93 | 1,00 |
| P_A_1 | 1,34 | 2,30 | 12,59 | 1,26 | 39,25 | 0,76 |
| P_A_2 | 1,41 | 2,43 | 11,98 | 1,20 | 38,63 | 0,74 |
| P_B_1 | 1,35 | 2,32 | 11,79 | 1,18 | 30,22 | 0,58 |
| P_B_2 | 1,60 | 2,75 | 11,81 | 1,18 | 32,29 | 0,62 |
| P_C_1 | 1,37 | 2,36 | 11,56 | 1,15 | 26,73 | 0,51 |
| P_C_2 | 1,28 | 2,20 | 10,07 | 1,00 | 33,27 | 0,64 |

Podobnie, jak w przypadku analizy sztywności elementów w pierwszej fazie, wyniki związane z odczytem ugięcia przy zarysowaniu są obarczone błędem i nie będą poddawane analizie. Ugięcie odczytane w chwili uplastycznienia głównego zbrojenia dla płyt wzmocnionych było większe o 15-26% w porównaniu do elementu niewzmocnionego (z wyjątkiem płyty P_C_2, której zbrojenie uplastyczniło się przy niemalże identycznym ugięciu, jak w płycie niewzmocnionej). W przypadku ugięcia związanego z uplastycznieniem zbrojenia są widoczne jednak zdecydowanie bardziej jednoznaczne wyniki w kontekście konkretnych typów zakotwienia płyty. Uplastycznienie zbrojenia w przypadku elementów wzmocnionych bez zakotwienia (typ C) zachodziło przy ugięciu średnio 8% większym niż dla porównywalnego elementu niewzmocnionego. Analogiczny wskaźnik dla elementów ze wzmocnieniem zakotwionym z wykorzystaniem pręta (typ A) i sznura (typ B), wynosił średnio odpowiednio 23% i 18%. Wskazuje to na wydłużenie (w dziedzinie obciążeń) drugiej fazy pracy (w kontekście ugięć) dla elementów wzmocnionych kompozytem PBO-FRCM o 8% w stosunku do elementów niewzmocnionych. W zakresie płyt wzmocnionych oznacza to, że zakotwienie prętowe (typ A) oraz sznurowe (typ B) spowodowało odpowiednio 2,85-krotne i 2,24-krotne wydłużenie drugiej fazy pracy płyt. Odwrotną tendencję zaobserwowano w aspekcie ugięć związanych ze zniszczeniem płyt. Wszystkie płyty wzmocnione uległy zniszczeniu przy zdecydowanie mniejszym ugięciu niż płyta kontrolna. Podobnie, jak w przypadku ugięć związanych z uplastycznieniem zbrojenia głównego zaobserwowano w tym przypadku wyraźniejszą tendencję związaną z typem zastosowanego zakotwienia. Do zniszczenia płyt wzmocnionych zakotwieniem prętowym (typ A) dochodzi przy ugięciu o 25% mniejszym niż w elemencie porównawczym. Dla sznurowego zakotwienia wzmocnienia (typ B) oraz braku zakotwienia (typ C), wartości te wynoszą odpowiednio 40% i 42%.

Skrócenie trzeciej fazy pracy płyty wynikające z zastosowania wzmocnienia PBO-FRCM oraz zakotwienia kompozytu prowadzi do zmniejszenia ciągliwości płyt, co w rzeczywistych warunkach będzie prowadziło do ich bardziej kruchego mechanizmu zniszczenia, bez objawów w postaci zwiększonych ugięć konstrukcji, co nie jest efektem pożądanym. W celu ilościowego oznaczenia ciągliwości płyt przeanalizowano dodatkowo wskaźnik ciągliwości momentu zniszczenia płyt, będący ilorazem siły niszczącej oraz ugięcia przy zniszczeniu elementu (wzór 1) oraz energię zniszczenia elementów, którą oznaczono jako pole pod wykresem ugięcie-obciążenie od początku badania elementu aż do jego całkowitego zniszczenia (wzór 2). Wyniki obliczeń przedstawiono w tabeli 28.

$$I_{ult} = \frac{F_{ult}}{a_{ult}} \quad (1)$$

$$W_{ult} = \int_0^{a_{ult}} F da \quad (2)$$

Tabela 28. Zestawienie wskaźników ciągliwości płyt przy momencie zniszczenia oraz energii zniszczenia elementów

| Nazwa elementu | I_{ult} | ΔI_{ult} | W_{ult} | ΔW_{ult} |
|----------------|-----------|------------------|-----------|------------------|
| | [kN/mm] | [%] | [kN·mm] | [%] |
| P_0 | 3,30 | 1,00 | 7688 | 1,00 |
| P_A_1 | 5,35 | 1,62 | 6164 | 0,80 |
| P_A_2 | 5,75 | 1,74 | 6460 | 0,84 |
| P_B_1 | 6,83 | 2,07 | 4359 | 0,57 |
| P_B_2 | 7,10 | 2,15 | 3874 | 0,50 |
| P_C_1 | 7,56 | 2,29 | 5398 | 0,70 |
| P_C_2 | 6,95 | 2,10 | 5774 | 0,75 |

Wyznaczone wartości wskaźnika ciągliwości momentu zniszczenia dla płyt wzmocnionych są od 62% do 129% większe w porównaniu z elementem niewzmocnionym jednak widoczne jest duże zróżnicowanie w aspekcie sposobu zakotwienia wzmocnienia. Dla wzmocnienia z zakotwieniem typu A średni przyrost opisywanego wskaźnika ciągliwości w stosunku do elementu niewzmocnionego wynosił 68%, kiedy dla zakotwienia typu B i elementu bez zakotwienia (typ C) wynosił średnio odpowiednio 111% i 120%. Analiza energii zniszczenia elementów wskazuje, że całkowita praca przy zniszczeniu elementów ze wzmocnieniem jest mniejsza o 16-50% niż w dla elementu bez wzmocnienia. Największą redukcję energii zniszczenia, o średniej wartości 46% uzyskano do płyt wzmocnionych z zakotwieniem typu B. Drugą najbardziej zredukowaną energią zniszczenia charakteryzowały się płyty ze wzmocnieniem bez zakotwienia (typ C), a redukcja w ich przypadku wynosiła średnio 27%. Najmniejszą redukcją pracy

zniszczenia, na średnim poziomie 18% charakteryzowały się płyty wzmocnione z zakotwieniem prętowym typu A. Zwiększenie wskaźnika ciągliwości oraz zmniejszenie energii zniszczenia świadczy o zmniejszonej ciągliwości płyt wzmocnionych na zginanie kompozytami PBO-FRCM. Elementy z zakotwieniem prętowym (typ A) charakteryzowały się najmniejszym zwiększeniem wskaźnika ciągliwości oraz najmniejszą redukcją energii zniszczenia, przez co ten typ wzmocnienia oraz zakotwienia można uznać za najbardziej ciągliwy ze wszystkich przebadanych przypadków.

Istotnym aspektem z punktu widzenia projektowania konstrukcji jest spełnienie ich stanu granicznego użytkowności związanego z nieprzekroczeniem dopuszczalnych ugięć konstrukcji. Typowo dla elementów zbliżonych do elementów badawczych przyjmuje się ograniczenie ugięć równe $1/250$ rozpiętości przęsła. W analizowanym przypadku (rozpiętość przęsła 1700 mm) dopuszczalne ugięcie zgodne z ograniczeniem $1/250$ rozpiętości wynosi 6,8 mm. Przy ugięciach większych niż 6,8 mm uznaje się stan graniczny nośności konstrukcji ze względu na dopuszczalne ugięcia jako niespełniony. W tabeli 29 zestawiono obciążenia dla których w poszczególnych przypadkach przekroczony został stan graniczny ugięć oraz względne porównania tych wartości do elementu kontrolnego.

Tabela 29. Zestawienie obciążeń przekroczenia stanu granicznego użytkowności

| Nazwa elementu | F_{SLS} | ΔF_{SLS} |
|----------------|-----------|------------------|
| | [kN] | [%] |
| P_0 | 99,5 | 1,00 |
| P_A_1 | 94,8 | 0,95 |
| P_A_2 | 104,5 | 1,05 |
| P_B_1 | 101,9 | 1,02 |
| P_B_2 | 111,9 | 1,12 |
| P_C_1 | 103,9 | 1,04 |
| P_C_2 | 117,8 | 1,18 |

Wartości obciążeń, przy których dochodzi do przekroczenia stanu granicznego użytkowności ze względu na dopuszczalne ugięcia nie różnią się znacząco pomiędzy elementami wzmocnionymi i elementem porównawczym. Wyniki te charakteryzuje stosunkowo duża rozbieżność pomiędzy poszczególnymi seriami badawczymi, lecz przez niewielkie wartości obciążenia (w stosunku do obciążenia niszczącego elementu) powodującego przekroczenie tego stanu granicznego użytkowności, należy uznać, że na etapie tak niskich ugięć odkształcenia kompozytu nie są wystarczające do jego efektywnej pracy. Na tym etapie należy uznać, że tego typu wzmocnienia PBO-FRCM, niezależnie od sposobu zastosowanego zakotwienia siatki kompozytu, nie włączają się do współpracy przy niskich poziomach obciążeń, przez co nie są efektywne w ograniczaniu ugięć konstrukcji na poziomie $1/250$ rozpiętości elementu. Typowo, wpływ niesprężonych

wzmocnień kompozytowych na ugięcia zginanych elementów żelbetowych jest znikomy w projektowym zakresie obciążeń. Wpływ wzmocnień kompozytowych na sztywność elementu zauważalny jest dopiero przy obciążeniach zbliżonych do nośności elementu, do czego nie dopuszcza się przy normalnym użytkowaniu konstrukcji.

W każdym przebadanym elemencie mechanizm zniszczenia płyty był odpowiedni dla tego typu elementów i wynikał z utraty nośności przez wyczerpanie nośności zbrojenia głównego (stalowego). W przypadku elementów wzmocnionych, wyczerpanie nośności zbrojenia stalowego poprzedzone było wyczerpaniem nośności wzmocnienia kompozytowego PBO-FRCM. Spowodowało to przekazanie sił (przenoszonych wcześniej przez wzmocnienie) na wzmacniany element (w tym na jego zbrojenie). W przypadku elementów z zakotwionym zbrojeniem (typ A i B) zniszczenie kompozytu zostało poprzedzone przez utratę nośności zakotwienia. W przypadku zakotwienia prętowego (typ A) zniszczenie zakotwienia przebiegło w sposób nagły, poprzez wyrwanie końców pręta zakotwienia z bruzdy. Nagła utrata nośności w elementach wzmocnionych z prętowym zakotwieniem siatki kompozytu mogła wynikać również z utraty przytrzymania końców siatki, które powodowały ciągnowy mechanizm pracy wzmocnienia. W przypadku zakotwienia sznurowego (typ B) charakter zniszczenia zakotwienia był mniej widoczny i bardziej ciągły, ponieważ nie obserwowano nagłego zerwania sznura, lecz stopniowy poślizg włókien oraz powolne wrywanie sznura z pionowego otworu. Świadczy to również o tym, że sznurowe zakotwienie siatki kompozytu nie jest w stanie wytworzyć ciągnowego mechanizmu pracy wzmocnienia, który może zostać zaobserwowany w przypadku wzmocnienia z zakotwieniem prętowym. Typowe mechanizmy zniszczenia zakotwień dla typu A i B przedstawiono odpowiednio na rysunkach 129 i 130.



Rys. 129. Mechanizm zniszczenia zakotwienia prętowego (typ A)



Rys. 130. Mechanizm zniszczenia zakotwienia sznurowego (typ B)

Mechanizm zniszczenia płyty kontrolnej był typowy dla elementów płytowych (związany z uplastycznieniem głównego zbrojenia dolnego elementu). Na obszarze występowania stałego momentu zginającego pomiędzy osiami przyłożenia obciążenia powstało zarysowanie prostopadłe do kierunku zginania, co pokazano na rysunku 131.



Rys. 131. Obraz zniszczenia płyty P_0

W przypadku elementów wzmocnionych z zakotwieniem prętowym (typ A) zaobserwowano podobny mechanizm rozwoju zarysowania do mechanizmu występującego w elemencie kontrolnym. Na powierzchni kompozytu, w rejonie pomiędzy osiami przyłożonego obciążenia zaobserwowano zarysowanie w kierunku prostopadłym do kierunku zginania. W zniszczonych elementach zaobserwowano lokalne odspojenie siatki kompozytu w obszarze podporowym oraz przy krawędziach bocznych płyty. Odspojony kompozyt był zlokalizowany w obszarach występujących w pobliżu zniszczonych końców zakotwienia prętowego. Pozostała część kompozytu pozostała niemalże nienaruszona, poza lokalnymi obszarami w pobliżu rys, w których doszło do poślizgu siatki PBO wewnątrz zaprawy mineralnej lub częściowego złuszczenia zewnętrznej warstwy zaprawy. Mechanizm zniszczenia był spójny dla obu przebadanych elementów, co świadczy o dobrej powtarzalności pracy tego typu zakotwienia. Fotografie zniszczonych powierzchni dolnych płyt P_A_1 i P_A_2 przedstawiono odpowiednio na rysunkach 132 i 133.



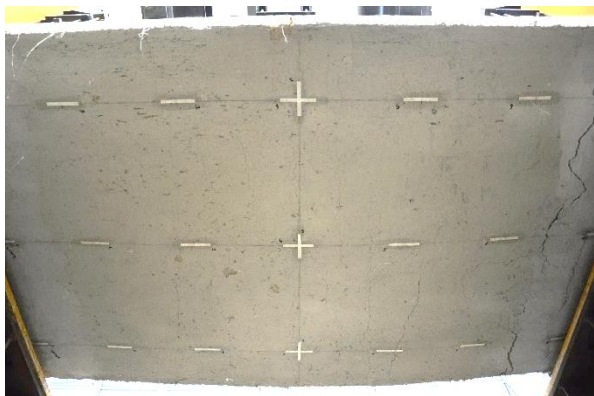
Rys. 132. Obraz zniszczenia płyty P_A_1



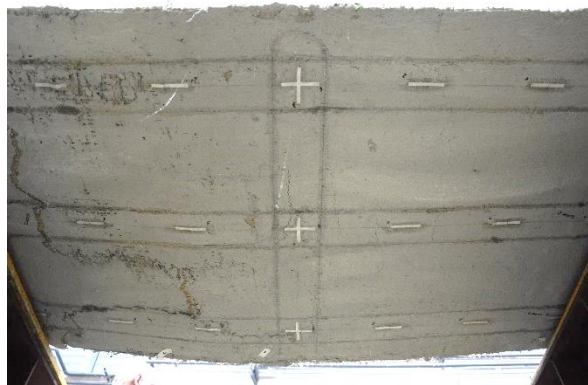
Rys. 133. Obraz zniszczenia płyty P_A_2

W obrębie dwóch elementów wzmocnionych z zakotwieniem sznurowym (typ B) zaobserwowano dwa nieznacznie różniące się od siebie mechanizmy zniszczenia kompozytu. W elemencie P_B_1 zaobserwowano spodziewany rozkład zarysowania, występujący w opisanych wcześniej elementach P_A_1 i P_A_2, który związany był z wystąpieniem poprzecznego zarysowania pomiędzy osiami przyłożenia sił. Zniszczone zakotwienie sznurowe spowodowało poślizg siatki PBO w zaprawie mineralnej,

co doprowadziło również do lokalnego odspojenia kompozytu w całej strefie przypodporowej. W przypadku elementu P_B_2 zauważono znacznie bardziej rozległe odspojenie kompozytu od powierzchni betonu, co upodobiło mechanizm zniszczenia tego elementu, do opisanego w następnym akapicie zniszczenia wzmocnienia bez zakotwienia. Zakotwienie sznurowe typu B nie wykazuje takiej powtarzalności efektu wzmocnienia jak zakotwienie prętowe typu A, co związane jest z jego mniejszą niezawodnością. Fotografie zniszczonych powierzchni dolnych płyt P_B_1 i P_B_2 przedstawiono odpowiednio na rysunkach 134 i 135.



Rys. 134. Obraz zniszczenia płyty P_B_1



Rys. 135. Obraz zniszczenia płyty P_B_2

Elementy wzmocnione bez zakotwienia (typ C) uległy innemu mechanizmowi zniszczenia niż opisane wcześniej elementy wzmocnione z zakotwieniem. W obu przypadkach zaobserwowano rozległe odspojenie kompozytu od powierzchni betonu połączone z lokalnym poślizgiem siatki względem zaprawy mineralnej w miejscu występowania największego zarysowania wzmocnianego elementu oraz lokalnym złuszczeniem zewnętrznej warstwy zaprawy mineralnej. Rozległe zniszczenia kompozytu pozwoliły na jego oderwanie od powierzchni elementu bez wykorzystania narzędzi na prawie całej powierzchni wzmocnianego elementu. Otrzymane mechanizmy zniszczenia były typowe dla elementów wzmocnionych kompozytem PBO-FRCM bez zakotwienia siatki. Fotografie zniszczonych powierzchni dolnych płyt P_C_1 i P_C_2 przedstawiono odpowiednio na rysunkach 136 i 137.



Rys. 136. Obraz zniszczenia płyty P_C_1



Rys. 137. Obraz zniszczenia płyty P_C_2

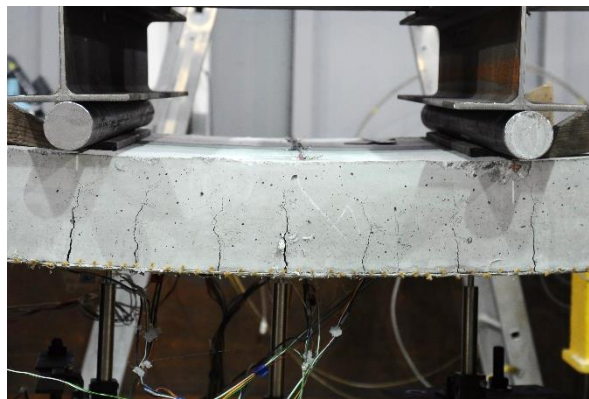
Analiza pokrytycznej fazy pracy elementów wzmocnionych wskazuje, że elementy P_A_1, P_A_2 oraz P_C_1 wykazują resztkową nośność po osiągnięciu maksymalnego obciążenia. Sugeruje to, że pomimo częściowego zniszczenia wzmocnienia pozostały rezerwy nośności w płycie i jej wzmocnieniu, przez co w przeciwieństwie do innych wzmocnionych elementów nie zaobserwowano nagłego spadku obciążeń po uzyskaniu siły niszczącej. W przypadku płyty bez zakotwienia P_C_1 było to spowodowane prawdopodobnie przedwczesnym odspojeniem kompozytu, co skutkowało sprowadzeniem ścieżki równowagi statycznej na ścieżkę zbliżoną do płyty niewzmocnionej. Drugi element wzmocniony bez zakotwienia (P_C_2) nagle utracił nośność po osiągnięciu maksymalnej siły obciążającej. Odmienne zachowanie kompozytów z zakotwieniem typu A może być spowodowane jedynie częściowym zniszczeniem zakotwienia prętowego. Pręt został wyrwany z bruzdy jedynie na jego końcach, przez co jego środkowa część w dalszym ciągu pełniła rolę zakotwienia kompozytu, co spowodowało znacznie mniejszy spadek nośności elementu po osiągnięciu maksymalnej wartości obciążenia.

4.6.2 Zarysowanie elementów

Podczas obserwacji mechanizmów zniszczenia elementów badawczych, poza mechanizmami zniszczenia wzmocnienia, zwrócono również uwagę na mechanizm zniszczenia wzmacnianego elementu, który objawiał się między innymi poprzez zmianę charakteru jego zarysowania. Opisany charakter zarysowania elementów zaprezentowano za pomocą reprezentatywnych przypadków dla każdej grupy przebadanych elementów, co przedstawiono na rysunkach 138 – 141.



Rys. 138. Zarysowanie bocznej powierzchni płyty P_0 (obraz po zniszczeniu)



Rys. 139. Zarysowanie bocznej powierzchni płyty P_A_1 (obraz po zniszczeniu)



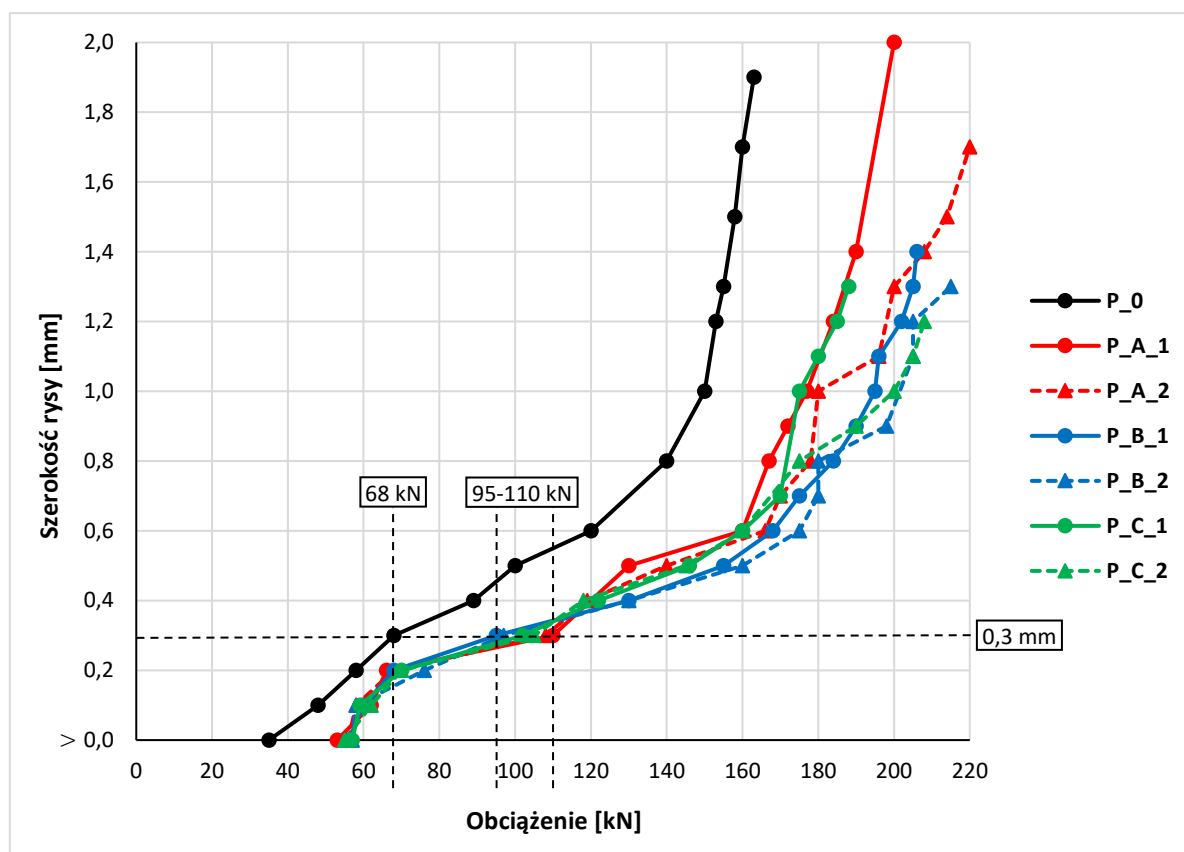
Rys. 140. Zarysowanie bocznej powierzchni płyty P_B_1 (obraz po zniszczeniu)



Rys. 141. Zarysowanie bocznej powierzchni płyty P_C_1 (obraz po zniszczeniu)

W płycie kontrolnej P_0 zaobserwowano 7 głównych pionowych rys, z których wszystkie rozwijały się podobnie. Przy zwiększaniu obciążenia środkowa rysa stała się rysą dominującą o zwiększonej szerokości i właśnie w tym miejscu doszło do zniszczenia elementu i załamania jego powierzchni. W przypadku elementów wzmocnionych z zakotwieniami (Typ A i B) obserwowano znacznie bardziej równomierny rozwój szerokości rysy do całkowitego zniszczenia elementu przy zachowaniu identycznej ich liczby, jak w przypadku elementu kontrolnego. Nie zaobserwowano tendencji do powstawania dominującego zarysowania w środku rozpiętości elementu. Widoczne na rysunku 140 duże zarysowanie elementu z lewej strony wynika z utraty równomierności obciążenia w końcowym etapie badania. W elementach wzmocnionych bez zakotwienia (Typ C) zaobserwowano podobny, jak opisywany wcześniej rozkład rys, jednak z powstaniem trzech rys dominujących – w środku rozpiętości oraz w miejscach przyłożenia obciążenia. Taki charakter zarysowania wskazuje, że kompozyt wzmacniający oraz jego zakotwienie wpływają pozytywnie na włączanie się do współpracy przyległych obszarów elementu, doprowadzając do redystrybucji i wyrównania lokalnych naprężeń.

Dodatkowo jako uzupełnienie obserwacji morfologii zarysowania przeprowadzono również monitoring rozwoju szerokości rys. Zostały one ocenione na powierzchni bocznej płyty, na podstawie wizualnej analizy porównawczej z wykorzystaniem lupy z podziałką. Wyniki pomiarów przedstawiono na rysunku 142 oraz tabeli 30. Jako szerokość rysy $> 0,0$ mm przyjęto moment pierwszego zaobserwowanego zarysowania widocznego na bocznej powierzchni płyty. Odczyt wykonywany był dla rysy o największej rozwarości, przy danym obciążeniu elementu. Pomiary wykonywano do momentu wyraźnego odkształcenia płyty, które powodowało, że dalsze przebywanie w obrębie stanowiska pomiarowego byłoby niebezpieczne.



Rys. 142. Wykres zależności szerokości rysy od obciążenia dla poszczególnych elementów

Przedstawiony wykres wskazuje znaczące obniżenie szerokości rysy w elementach wzmocnionych na zginanie kompozytem PBO-FRCM, niezależnie od obecności i sposobu zakotwienia. Wartość siły, przy której następuje zarysowanie elementu również jest znacznie większa we wszystkich elementach wzmocnionych na zginanie. Wartości obciążeń odczytane dla poszczególnych szerokości rys są zbliżone dla wszystkich elementów wzmocnionych, a widoczne różnice, szczególnie w końcowej fazie pracy elementu, wynikają z niedokładności metody i losowości zjawiska zarysowania. W tabeli 30 przedstawiono wartości sił obciążających płytę związane z podstawowymi progami stanu granicznego nośności dla elementów żelbetowych nawiązujące do wytycznych Eurokodu 2 [91] oraz ostatniej obowiązującej wersji Polskiej Normy dotyczącej obliczeń konstrukcji żelbetowych [92] – chwila zarysowania [91, 92], szerokość rysy 0,2 mm [92], 0,3 mm [91, 92] oraz 0,4 mm [91].

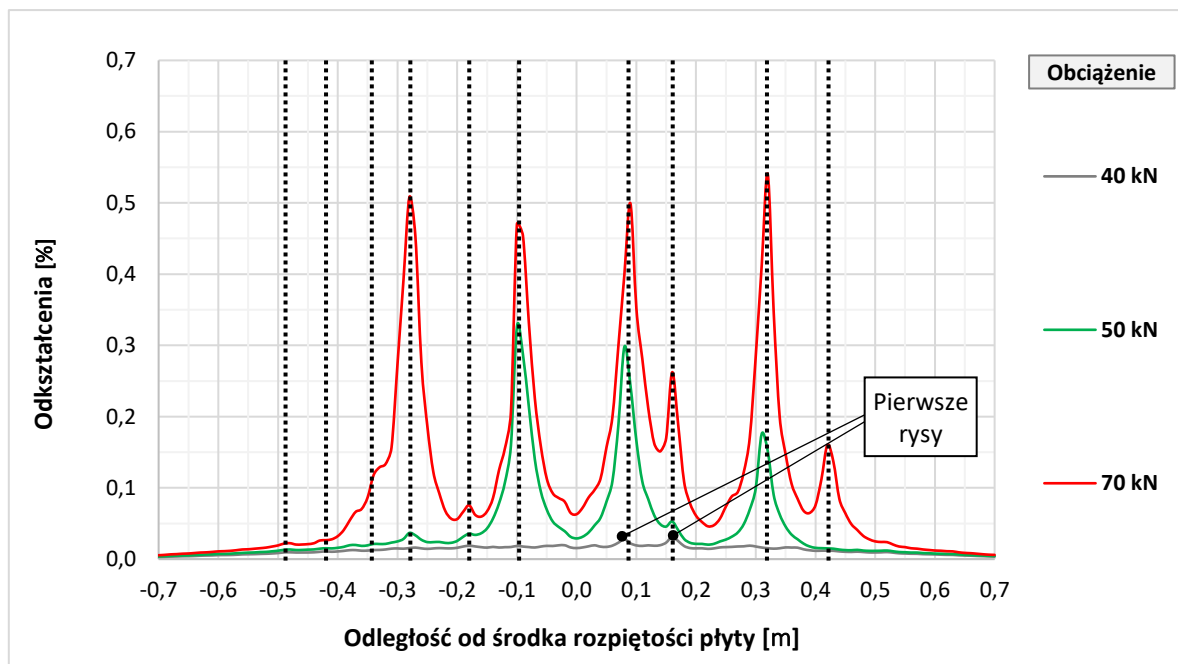
Tabela 30. Siły związane z osiaganiem stanów granicznych zarysowania w płytach

| Element | F_{cr} | ΔF_{cr} | $F_{cr0,2}$ | $\Delta F_{cr0,2}$ | $F_{cr0,3}$ | $\Delta F_{cr0,3}$ | $F_{cr0,4}$ | $\Delta F_{cr0,4}$ |
|---------|----------|-----------------|-------------|--------------------|-------------|--------------------|-------------|--------------------|
| | [kN] | [-] | [kN] | [-] | [kN] | [-] | [kN] | [-] |
| P_0 | 35 | 1,00 | 58 | 1,00 | 68 | 1,00 | 89 | 1,00 |
| P_A_1 | 53 | 1,51 | 66 | 1,14 | 110 | 1,62 | 120 | 1,35 |
| P_A_2 | 56 | 1,60 | 68 | 1,17 | 108 | 1,59 | 119 | 1,34 |
| P_B_1 | 56 | 1,60 | 68 | 1,17 | 95 | 1,40 | 130 | 1,46 |
| P_B_2 | 57 | 1,63 | 76 | 1,31 | 97 | 1,43 | 130 | 1,46 |
| P_C_1 | 57 | 1,63 | 70 | 1,21 | 102 | 1,50 | 122 | 1,37 |
| P_C_2 | 55 | 1,57 | 70 | 1,21 | 105 | 1,54 | 118 | 1,33 |

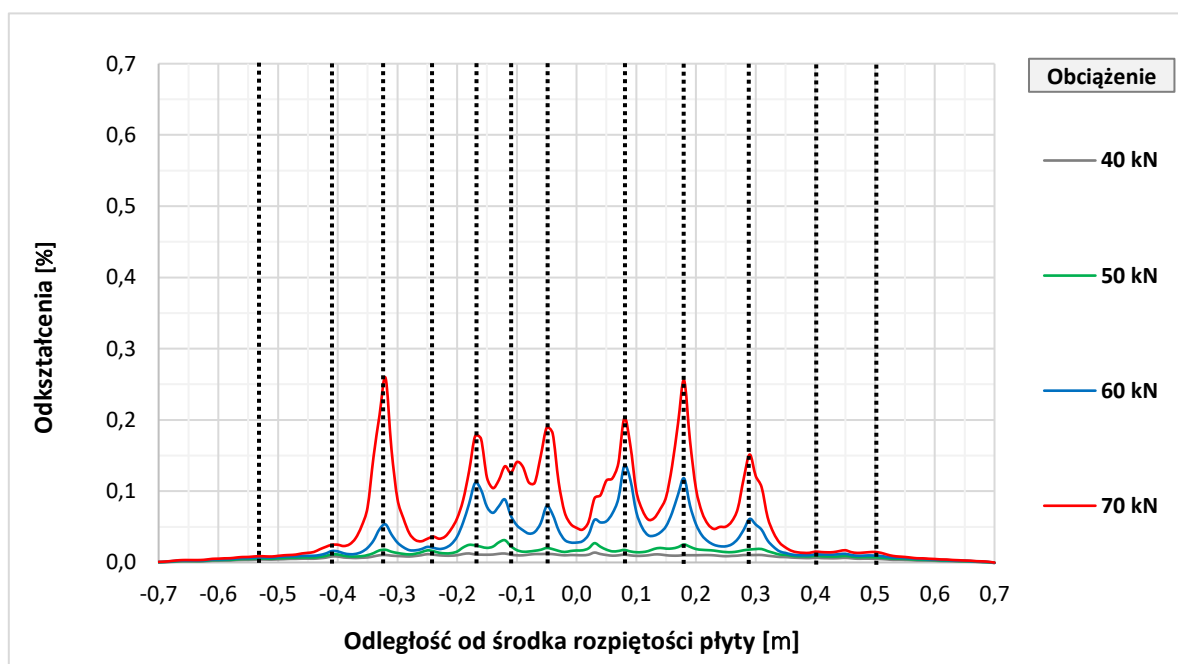
Siła związana z wystąpieniem pierwszego widocznego makroskopowo zarysowania uległa zwiększeniu średnio o 59% (51-63% w zależności od elementu badawczego). Mniejsze przyrosty sił widoczne są w przypadku ograniczenia szerokości rysy do 0,2 mm i wynoszą one średnio 20% (14-31%). Szerokość rysy 0,3 mm w elementach wzmocnionych była osiągnięta przy średnio o 51% większym obciążeniu (40-62%). W przypadku największej analizowanej szerokości rysy wynoszącej 0,4 mm przyrost siły dla elementów wzmocnionych wynosił średnio 39% (33-46%). Wysokie zróżnicowanie wyników pomiarów wykonywanych metodą porównawczą nie pozwala na wyciągnięcie dokładnych wniosków ilościowych, jednak wyraźna tendencja rozwoju zarysowania w płytach wzmocnionych i niewzmocnionych pozwala na wyciągnięcie jednoznacznego wniosku o pozytywnym wpływie wzmocnień kompozytowych PBO-FRCM na odporność na zarysowanie konstrukcji oraz ograniczenie szerokości rys przy dalszym zwiększaniu obciążenia. Różnice pomiędzy zachowaniem się poszczególnych płyt wzmocnionych z różnymi typami zakotwień są nieznaczne i uznane zostały za nieistotne, szczególnie w typowym projektowym zakresie odkształceń elementów żelbetowych.

Opisane obserwacje i pomiary pozwoliły na ocenę zarysowania jedynie na bocznej powierzchni badanych elementów. Zastosowanie pomiarów światłowodowych w wybranych elementach (P_0, P_A_2, P_B_2 i P_C_2) pozwoliło na analizę początkowej fazy zarysowania elementów i ocenę ich rozkładu. W tym celu przeanalizowano pomiary odkształceń podłużnych dolnej (rozciąganej) powierzchni betonu w zakresie obciążenia zbliżonego do siły rysującej (40-70 kN). Dobrany zakres przedstawionych poziomów obciążenia pozwolił na przekrojowe przedstawienie początkowego rozwoju zarysowania (poziom obciążenia 30 kN pominięto ze względu na brak jakichkolwiek objawów zarysowania we wszystkich analizowanych elementach badawczych). Ze względu na geometrycznie ciągły pomiar odkształceń oraz połączenie ze sobą poszczególnych odcinków światłowodów, jako współrzędną „0”, przyjęto geometryczny środek płyty wypadający w połowie odległości między miejscami przyłożenia siły oraz podporami. Wykresy odkształceń podłużnych dolnej powierzchni betonu dla poszczególnych elementów przedstawiono na rysunkach 143 – 146. W przypadku elementu P_B_2 ograniczono zakres serii przedstawionych na wykresie

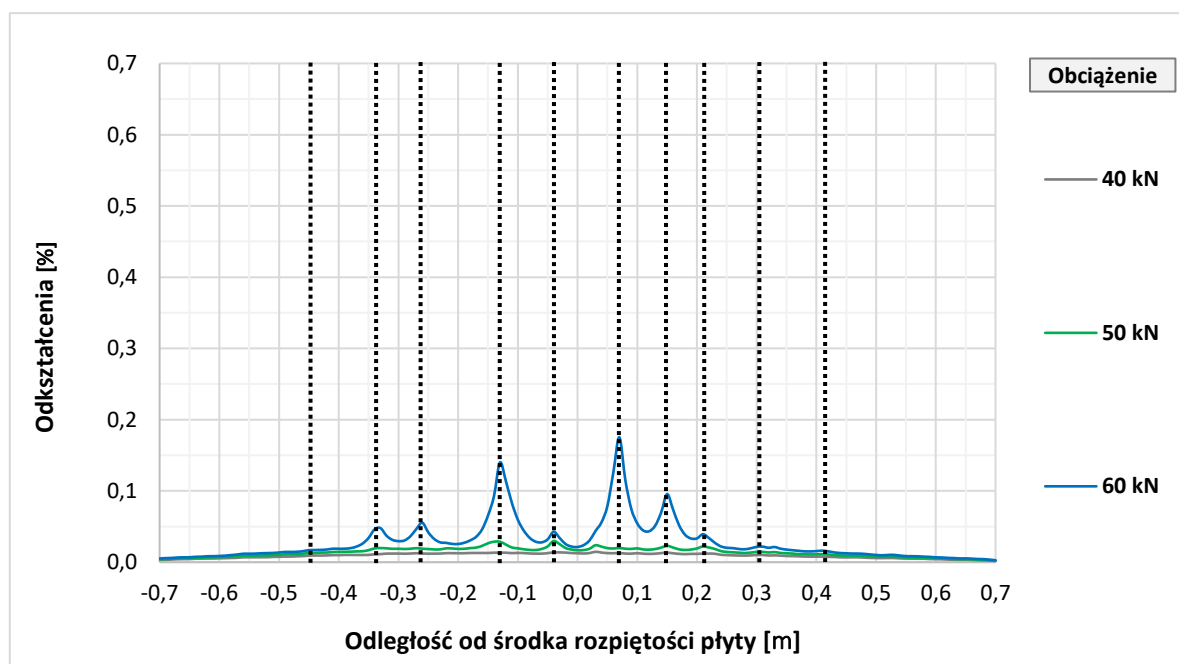
do obciążenia 60 kN ze względu na zniszczenie czujnika światłowodowego, które wystąpiło po ostatnim przedstawionym kroku obciążenia. Piki przedstawionych rozkładów odkształceń wskazują miejsca wystąpienia zarysowania elementu. Miejsca występowania rys w przedstawionym zakresie obciążeń oraz miejsca jednoznacznie wskazujące początkowe stadium rozwoju zarysowania oznaczono przerywaną pionową czarną linią.



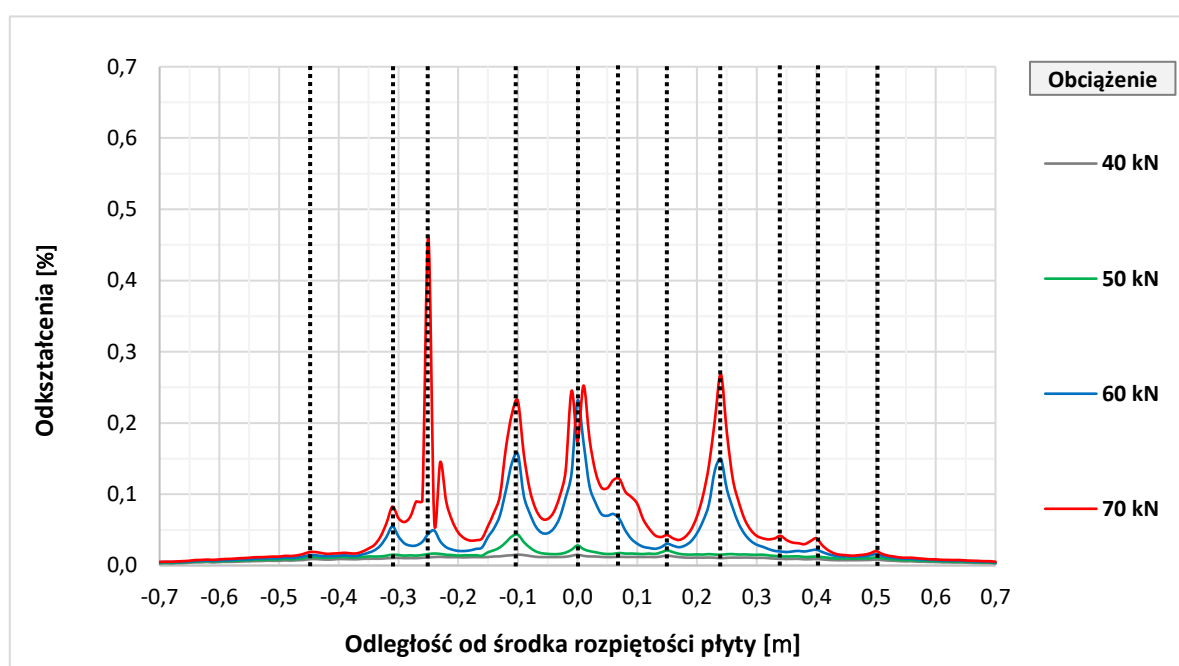
Rys. 143. Wykres odkształceń podłużnych dolnej powierzchni betonu płyty P_0



Rys. 144. Wykres odkształceń podłużnych dolnej powierzchni betonu płyty P_A_2



Rys. 145. Wykres odkształceń podłużnych dolnej powierzchni betonu płyty P_B_2



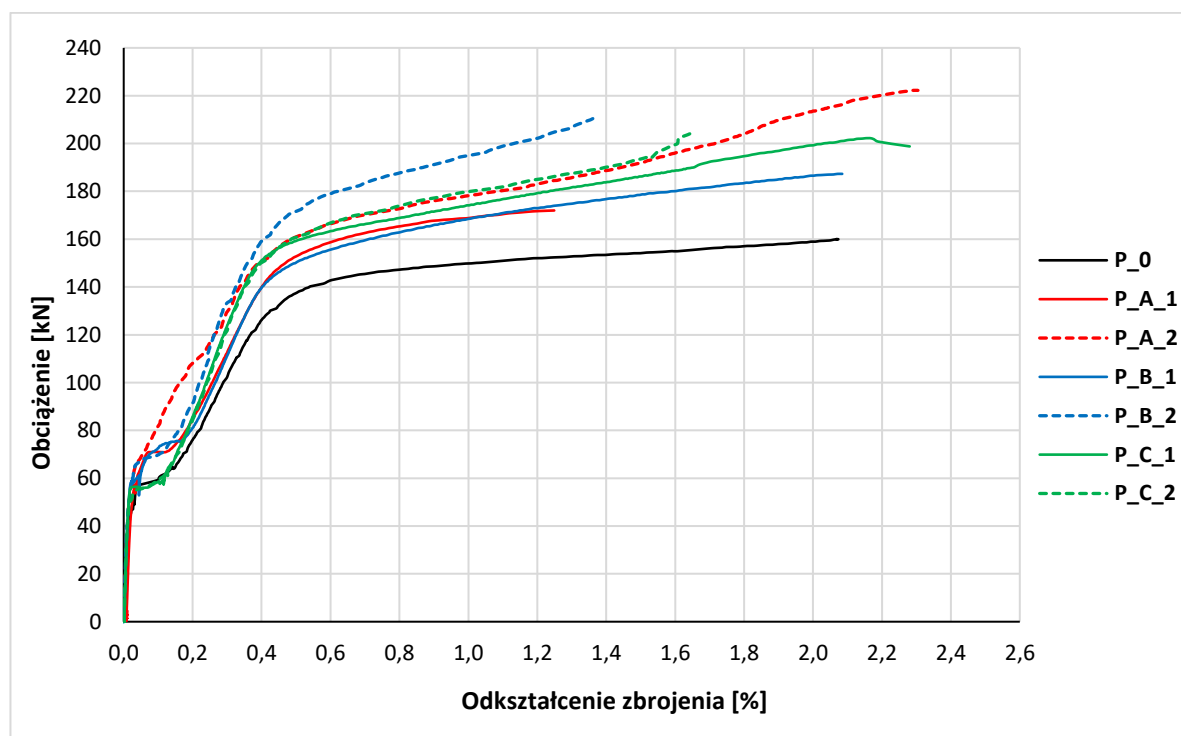
Rys. 146. Wykres odkształceń podłużnych dolnej powierzchni betonu płyty P_C_2

W każdym analizowanym przypadku w elementach badawczych w analizowanym zakresie powstała podobna liczba rys prostokątnych w liczbie od 10 do 12. We wszystkich przypadkach zarysowanie miało podobny równomierny rozkład z największą koncentracją w obrębie strefy stałego momentu zginającego pomiędzy punktami przyłożenia obciążenia. Dla wszystkich elementów wzmocnionych przy obciążeniu 40 kN nie obserwowano widocznych ognisk zarysowania, które uwidaczniają się poprzez lokalne zwiększenie odkształceń, zakłócające zbliżony do paraboli przebieg wykresu odkształceń (ze względu

na skalę osi pionowych i niskie wartości odkształceń zarejestrowane przed zarysowaniem betonu, wyniosłość paraboli jest niewielka). W przypadku elementu niewzmocnionego (P_0) już na tym poziomie obciążeń widoczne są pierwsze piki odkształceń wskazujące powstanie rysy, co oznaczono na rysunku 143. Przy dalszym zwiększaniu obciążeń do poziomu 50 kN zaobserwowano pierwsze wskaźniki zwiastujące powstanie zarysowania we wszystkich elementach wzmocnionych. Przy tym poziomie odkształceń w elemencie niewzmocnionym zauważalne były już 3 w pełni rozwinięte rysy. Dalsze zwiększanie obciążeń powodowało proporcjonalny rozwój zarysowania przy znacznym ograniczeniu odkształceń w elementach wzmocnionych w stosunku do elementu niewzmocnionego. Nie zaobserwowano znaczących różnic pomiędzy poszczególnymi typami zakotwienia w aspekcie rozwoju zarysowania wzmacnianego elementu. Niewielkie różnice w schemacie zarysowania elementów bazowych wskazują, że zróżnicowane mechanizmy zniszczenia wzmocnienia, które opisano w poprzedzającym podpunkcie wynikają z pracy samego kompozytu wzmacniającego i jego zakotwienia, a nie różnic w zachowaniu bazowych elementów wzmacnianych.

4.6.3 Odkształcenia podłużne zbrojenia

Istotnym parametrem związanym z nośnością płyt żelbetowych jest wyężenie ich głównego zbrojenia rozciągane. Podczas obciążania płyt monitorowano odkształcenie dolnych prętów zbrojeniowych na ich całej długości. Maksymalne wyężenie prętów zauważalne było w środkowym przekroju płyty w przecie znajdującym się najbliżej jej osi podłużnej. Na rysunku 147 przedstawiono zależność odkształcenia środkowego pręta podłużnego zbrojenia dolnego od przyłożonego obciążenia.



Rys. 147. Wykres zależności odkształceń głównych prętów zbrojeniowych od obciążenia

Wszystkie zależności obciążenie-odkształcenie przedstawione na wykresie charakteryzują się podobnym przebiegiem z różnicami wartości obciążeń przy poszczególnych poziomach odkształceń. Pierwsze załamanie wykresu, które związane jest zarysowaniem elementu, pojawia się znacznie szybciej w przypadku kontrolnego elementu niewzmocnionego. Zachodzi ono przy poziomie obciążeń około 55 kN, kiedy w pozostałych płytach występuje dopiero przy poziomie około 67 kN, co związane jest ze zwiększeniem sztywności przekroju niezarysowanego oraz częściowym przejściem obciążeń przez warstwę kompozytu. Dalsze obciążanie elementu niewzmocnionego powoduje znacznie większe odkształcenia głównych prętów zbrojeniowych w porównaniu z elementami wzmocnionymi. Podobne wczesne pierwsze załamanie wykresu (ok. 55 kN) widoczne jest w obu elementach wzmocnionych bez zakotwienia (P_C_1 oraz P_C_2), jednak przy dalszym obciążaniu charakter pracy zbrojenia tych płyt był bardziej zbliżony do innych płyt wzmocnionych. Załamanie wykresów dla płyt P_C_1 i P_C_2 przy niższych obciążeniach w porównaniu z innymi elementami wzmocnionymi oraz nietypowy wykres odkształceń zbrojenia dla elementu P_A_2 (w którym nie widać typowego załamania wykresu w początkowej fazie rozwoju zarysowania), były najprawdopodobniej wywołane czynnikami losowymi, wynikającymi z losowego rozkładu rys w elemencie. Losowa odległość miejsca pomiaru względem lokalizacji rysy miała znaczący wpływ na wartości odczytywanych odkształceń bezpośrednio po zarysowaniu elementu. Obniżenie odkształceń głównego zbrojenia rozciąganego przy podobnym poziomie obciążeń jest bardzo wyraźnym wskaźnikiem efektywności zastosowanego wzmocnienia. W tabeli 31 przedstawiono zestawienie obciążeń płyt, zarejestrowanych przy poziomie porównawczym odkształceń zbrojenia rozciąganego na poziomie 1%.

Tabela 31. Zestawienie obciążeń odpowiadających odkształceniom zbrojenia głównego równym 1%

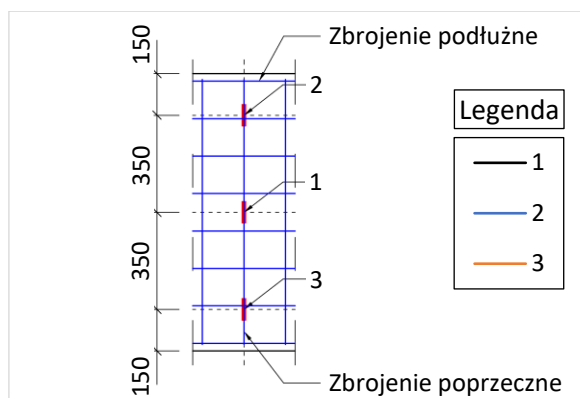
| Nazwa elementu | $F_{s,1\%}$ | $\Delta F_{s,1\%}$ |
|----------------|-------------|--------------------|
| | [kN] | [-] |
| P_0 | 149,9 | 1,00 |
| P_A_1 | 168,9 | 1,13 |
| P_A_2 | 178,2 | 1,19 |
| P_B_1 | 168,6 | 1,12 |
| P_B_2 | 195,1 | 1,30 |
| P_C_1 | 174,1 | 1,16 |
| P_C_2 | 180,1 | 1,20 |

Przy poziomie porównawczym odkształcenia zbrojenia głównego równym 1%, zarejestrowane poziomy obciążeń w elementach wzmocnionych są o 13-30% większe (średnio o 18%). W przypadku elementów wzmocnionych bez zakotwienia poziomy tych obciążeń są większe średnio o 18%, dla elementów z prętowym zakotwieniem siatki kompozytu o 16% większe, a dla elementów ze sznurowym zakotwieniem

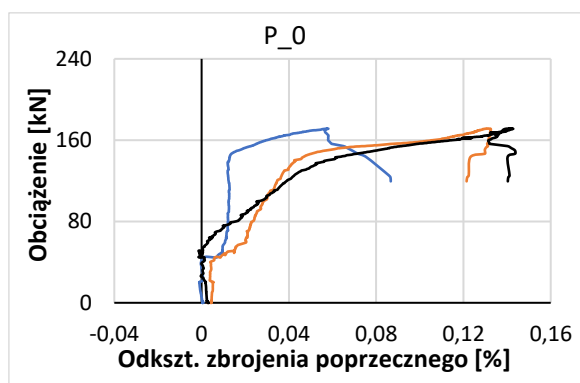
siatki kompozytu średnio o 21% większe. Wskazuje to na większą efektywność kompozytów PBO-FRCM z zakotwieniem sznurowym w odciążaniu zbrojenia głównego w porównaniu z elementami wzmocnionymi bez zakotwienia lub z zakotwieniem prętowym, jednak różnice pomiędzy tymi wartościami są niewielkie.

4.6.4 Odkształcania poprzeczne zbrojenia

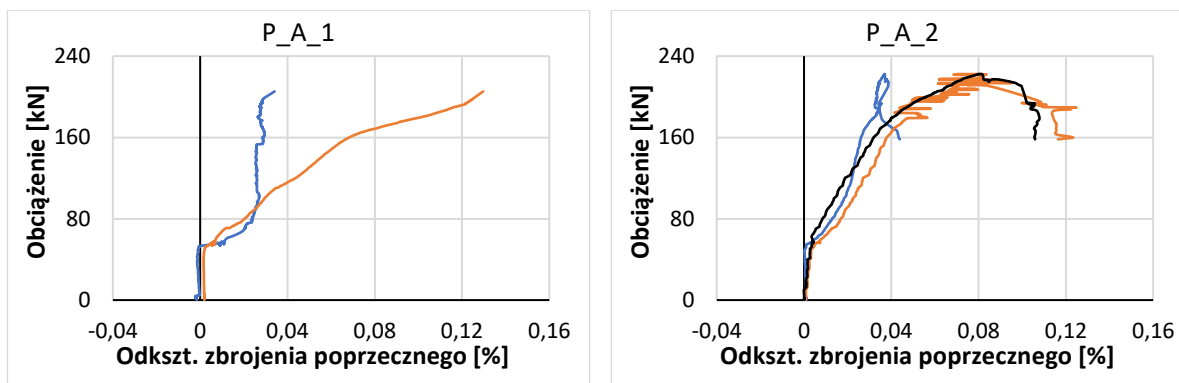
Poza odkształceniami podłużnymi zbrojenia dolnego monitorowano również odkształcenia poprzecznego zbrojenia rozdzielczego w płycie. Na rysunku 148 przedstawiono rozkład i opis tensometrów wykorzystany na wykresach wraz z legendą. Na rysunkach 149-152 przedstawiono wyniki pomiaru odkształceń dolnego rozdzielczego pręta zbrojeniowego, który zlokalizowany był najbliżej środka rozpiętości elementu badawczego. Brak wykresu środkowego tensometru w płycie P_A_1 spowodowany jest przez awarię tensometru w początkowym etapie badania.



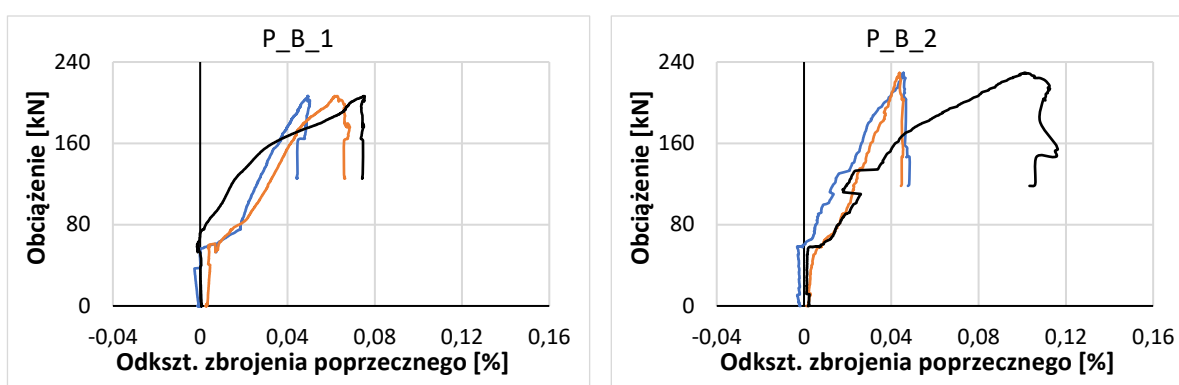
Rys. 148. Rozkład i opis tensometrów rozmieszczonych na zbrojeniu poprzecznym wraz z legendą



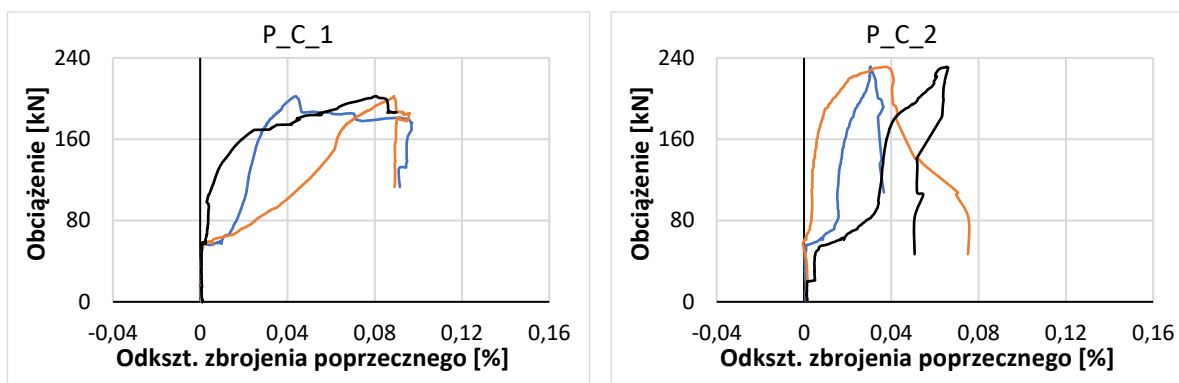
Rys. 149. Wykres zależności odkształceń poprzecznych prętów zbrojeniowych od obciążenia w płycie P_0



Rys. 150. Wykres zależności odkształceń poprzecznych prętów zbrojeniowych od obciążenia w płycie P_A_1 (po lewej) i P_A_2 (po prawej)



Rys. 151. Wykres zależności odkształceń poprzecznych prętów zbrojeniowych od obciążenia w płycie P_B_1 (po lewej) i P_B_2 (po prawej)



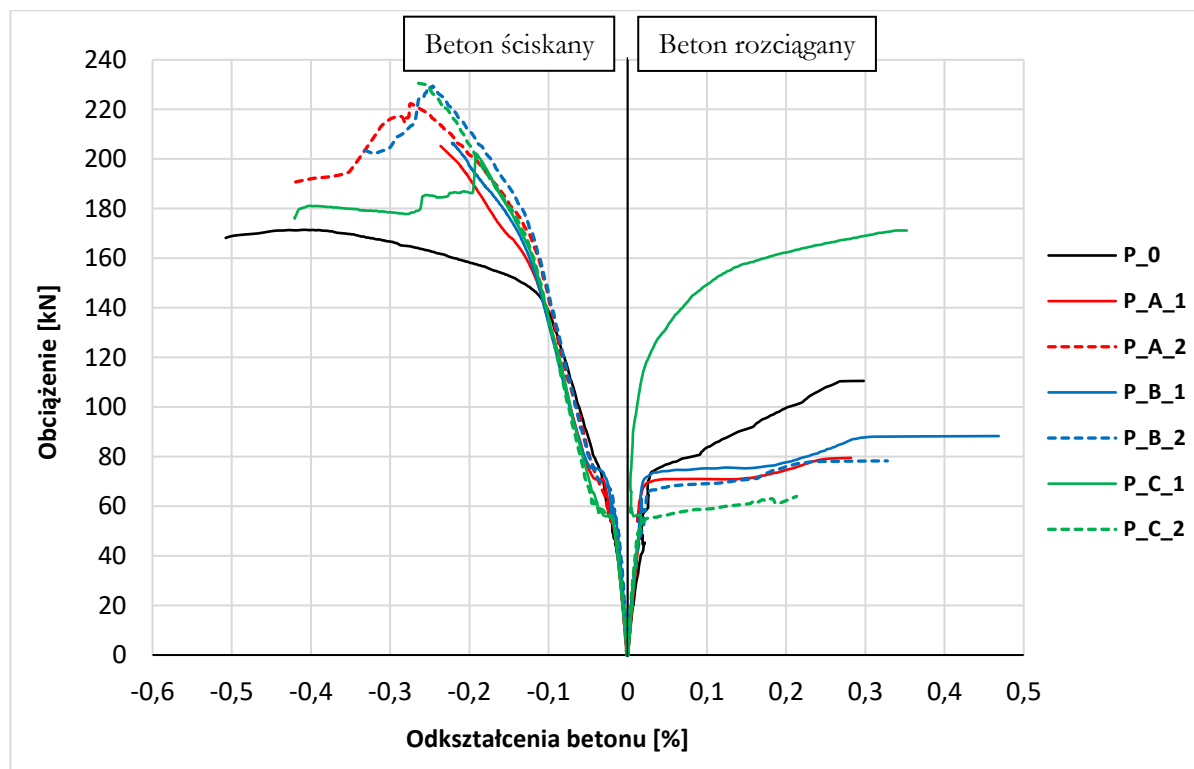
Rys. 152. Wykres zależności odkształceń poprzecznych prętów zbrojeniowych od obciążenia w płycie P_C_1 (po lewej) i P_C_2 (po prawej)

We wszystkich badanych elementach, zarówno wzmocnionych jak i niewzmocnionych, widać że zbrojenie poprzeczne ma znikome odkształcenia przed zarysowaniem się elementu. Odkształcenia rejestrowane dla zbrojenia rozdzielczego płyt po ich zarysowaniu nie różnią się znacząco pomiędzy poszczególnymi elementami badawczymi. Różnice pomiędzy pomiarami odkształceń zbrojenia rozdzielczego w środkowej osi płyty oraz przy jej krawędziach nie wskazują jednoznacznej tendencji. Jest to spowodowane

najprawdopodobniej losowym miejscem występowania zarysowania oraz redystrybucją naprężeń wewnątrz zarysowanej płyty wskutek utraty ciągłości betonu. Należy jednak zwrócić uwagę na nieco większe maksymalne odkształcenia zbrojenia rozdzielczego, które w przypadku elementu niewzmocnionego wynoszą około 0,14%, a w przypadku elementów wzmocnionych nie przekraczają one 0,12%, co stanowi około 15% różnicy w wartościach i świadczy o włączaniu się do współpracy siatki wzmocnienia na kierunku prostopadłym do głównego kierunku zginania elementu. Siatka PBO w badanym kompozycie wzmacniającym PBO-FRCM w kierunku prostopadłym do głównego kierunku zginania ma około czterokrotnie mniejszą ilość włókien niż w głównym kierunku zginania, co odzwierciedlone jest w stosunkowo niewielkim wpływie wzmocnienia na odkształcenia poprzeczne zbrojenia.

4.6.5 Odkształcenia podłużne betonu

Odkształcenia podłużne betonu w badanym elemencie, podobnie jak odkształcenia stali zbrojeniowej, pozwolić mogą na określenie zachowania wzmacnianego elementu. Wyniki pomiarów odkształcenia betonu ściskanego (górna powierzchnia płyty) oraz rozciąganego (dolna powierzchnia płyty) w środkowym przekroju płyty oraz w jej środkowej osi podłużnej dla wszystkich serii badawczych zostały przedstawione zbiorczo na rysunku 153. Na wykresie i w analizach pominięto dane związane z betonem rozciągany elementu badawczego P_A_2 ze względu na uszkodzenie tensometru we wczesnej fazie zarysowania.



Rys. 153. Wykres zależności odkształceń betonu od obciążenia

W przypadku betonu rozciąganego można zauważyć równy rozwój odkształceń wszystkich elementów, zarówno elementu niewzmocnionego, jak i elementów wzmocnionych. Tendencja ta utrzymuje się do momentu zarysowania elementu. Po zarysowaniu elementu, w zależności od dokładnego przebiegu rysy,

każdy z przebadanych elementów wykazuje różne zachowanie, jednak w większości przypadków należy uznać, że przebiegająca rysa doprowadziła do uszkodzenia tensometrów i porównywanie dalszych pomiarów uznano za niewiarygodne. Bardziej stabilne wyniki otrzymano dla ściskanej powierzchni betonu. Podobnie, jak w przypadku betonu rozciąganego, odkształcenia betonu ściskanego są niemalże identyczne dla wszystkich przebadanych elementów. Po zarysowaniu odkształcenia betonu ściskanego również przybierają bardzo podobne wartości dla wszystkich przebadanych elementów, a różnice zaczynają być widoczne przy obciążeniach, przy których dochodzi do uplastycznienia zbrojenia rozciąganej płyty. Ponadto kąt nachylenia wykresu zależności odkształceń podłużnych betonu ściskanego od obciążenia jest większy w przypadku elementów wzmocnionych i jest podobny dla każdego elementu wzmocnionego niezależnie od zastosowanego typu zakotwienia. W tabeli 32 zestawiono obciążenia przy których dochodzi do opisywanego powyżej załamania wykresów oraz tangensy kątów nachylenia wykresów w ostatniej fazie pracy płyt.

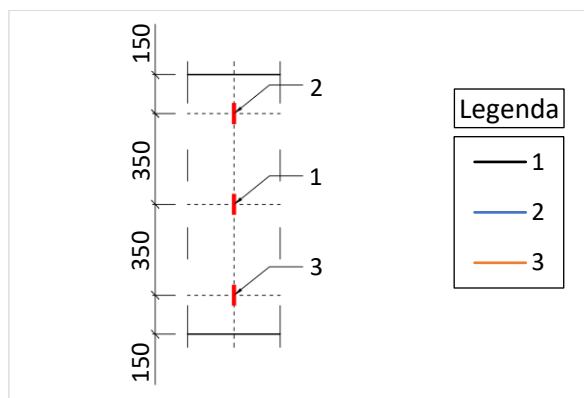
Tabela 32. Zestawienie obciążeń związanych z załamaniem wykresu odkształceń podłużnych betonu ściskanego oraz kąty nachylenia tych wykresów po załamaniu.

| Nazwa elementu | $F_{cc,pl}$ | $\Delta F_{cc,pl}$ | $\tan(\alpha_{cc,pl})$ | $\Delta \tan(\alpha_{cc,pl})$ |
|----------------|-------------|--------------------|----------------------------------|-------------------------------|
| | [kN] | [-] | [kN/% _{odkształcenia}] | [-] |
| P_0 | 141,4 | 1,00 | 100,5 | 1,00 |
| P_A_1 | 154,6 | 1,09 | 504,7 | 5,02 |
| P_A_2 | 159,4 | 1,13 | 418,4 | 4,16 |
| P_B_1 | 157,2 | 1,11 | 415,4 | 4,13 |
| P_B_2 | 170,4 | 1,21 | 489,7 | 4,87 |
| P_C_1 | 157,9 | 1,12 | 523,3 | 5,21 |
| P_C_2 | 157,0 | 1,11 | 499,0 | 4,97 |

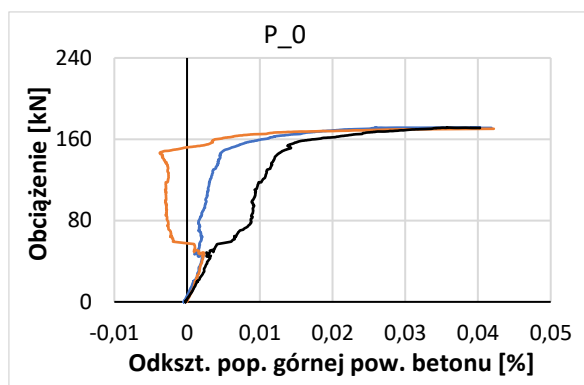
Zmiana nachylenia wykresu odkształceń podłużnych betonu ściskanego w elementach wzmocnionych zachodzi przy obciążeniu o 9-21% większym niż w przypadku elementu niewzmocnionego. Tangens kąta nachylenia wykresów, przy dalszym rozwoju odkształceń podłużnych betonu ściskanego po fazie związanej z uplastycznieniem zbrojenia rozciąganego w przypadkach elementów wzmocnionych, jest około 4-5-krotnie większy dla elementów wzmocnionych niż dla elementu niewzmocnionego. Świadczy to o tym, że w ostatniej fazie pracy płyty, wzmocnienie PBO-FRCM wpływa również na poziom wyłączenia betonu ściskanego w elemencie. Nie zaobserwowano jednak jednoznacznej tendencji, która mogłaby wskazać na różnice w tym aspekcie ze względu na zastosowany typ zakotwienia siatki kompozytu. Dodatkowo należy zwrócić uwagę na nieco bardziej plastyczny charakter przejścia między opisywanymi fazami pracy betonu ściskanego w przypadku elementów wzmocnionych, który objawia się znacznie bardziej wydłużoną fazą przejściową, którą zauważyć można w formie łuku pomiędzy dwoma prostoliniowymi fazami pracy.

4.6.6 Odształcenia poprzeczne betonu

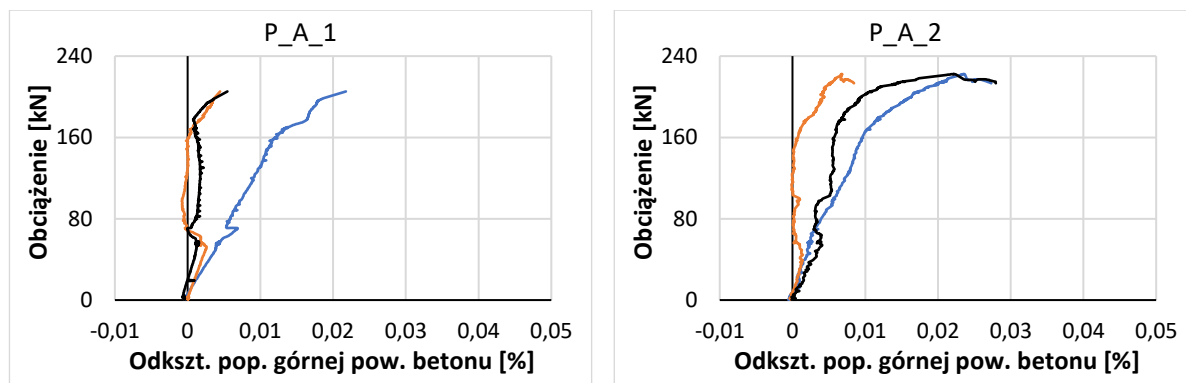
Podobnie, jak w przypadku odkształceń stali zbrojeniowej, zmierzono również odkształcenia betonu w kierunku prostopadłym do głównego kierunku zginania płyty w środku jej rozpiętości. Na rysunku 154 przedstawiono rozkład i opis tensometrów wykorzystany na wykresach wraz z legendą. Pomiary odkształceń przeprowadzono zarówno dla górnej, jak i dolnej powierzchni betonu przy zachowaniu jednakowego rozkładu tensometrów i ich oznaczeń. Wyniki pomiarów dla górnej powierzchni betonu przedstawiono na rysunkach 155-158, a dla dolnej powierzchni betonu na rysunkach 159-162.



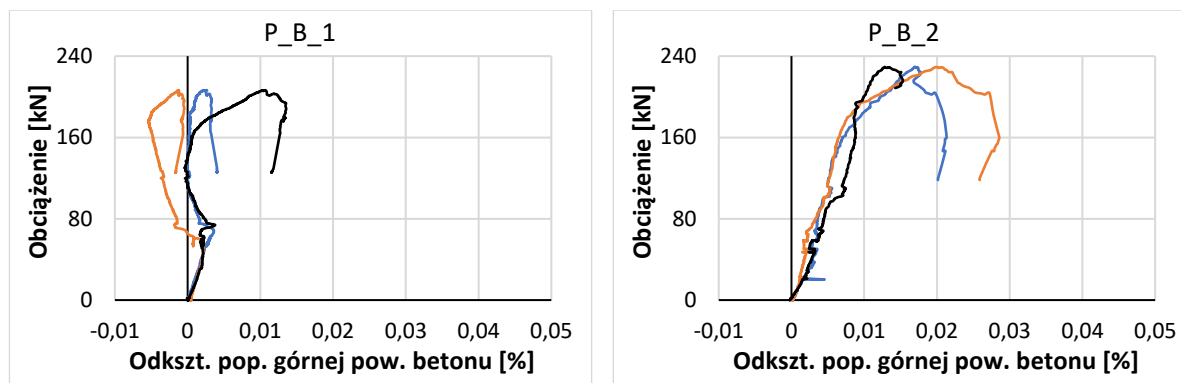
Rys. 154. Rozkład i opis tensometrów poprzecznych rozmieszczonych na górnej i dolnej powierzchni betonu wraz z legendą



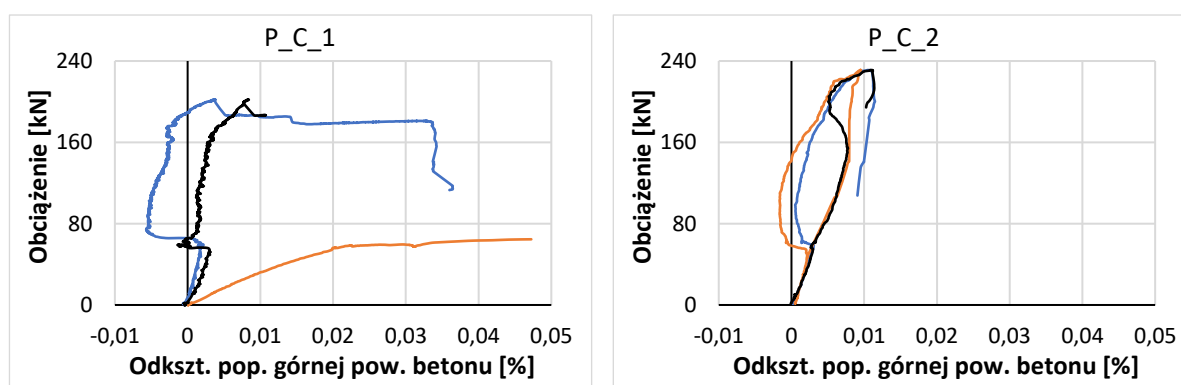
Rys. 155. Wykres zależności odkształceń poprzecznych górnej powierzchni betonu od obciążenia w płycie P_0



Rys. 156. Wykres zależności odkształceń poprzecznych górnej powierzchni betonu od obciążenia w płycie P_A_1 (po lewej) i P_A_2 (po prawej)

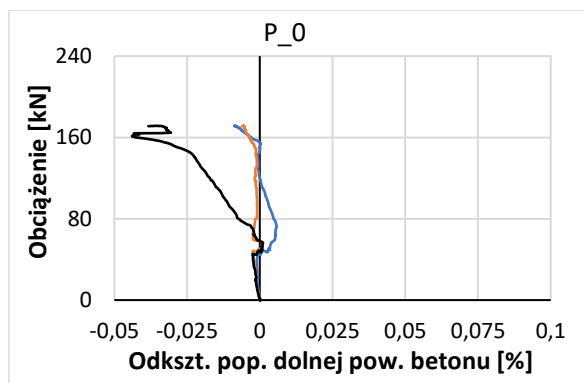


Rys. 157. Wykres zależności odkształceń poprzecznych górnej powierzchni betonu od obciążenia w płycie P_B_1 (po lewej) i P_B_2 (po prawej)

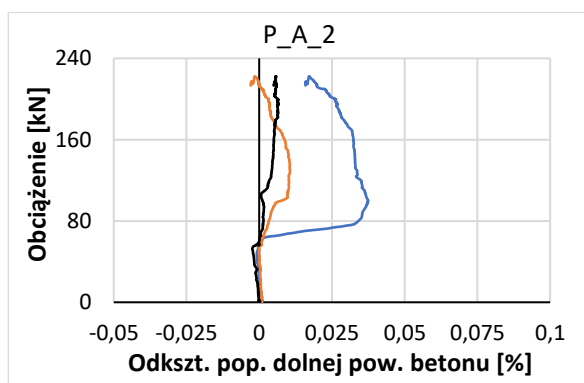
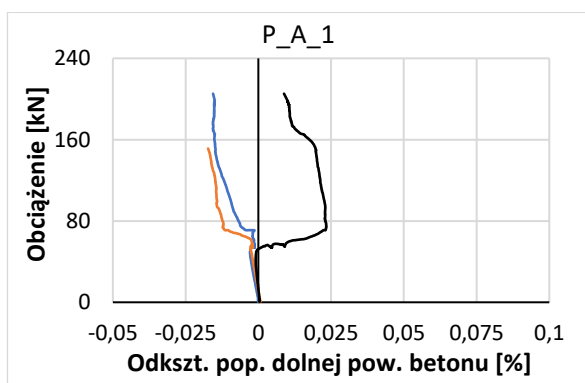


Rys. 158. Wykres zależności odkształceń poprzecznych górnej powierzchni betonu od obciążenia w płycie P_C_1 (po lewej) i P_C_2 (po prawej)

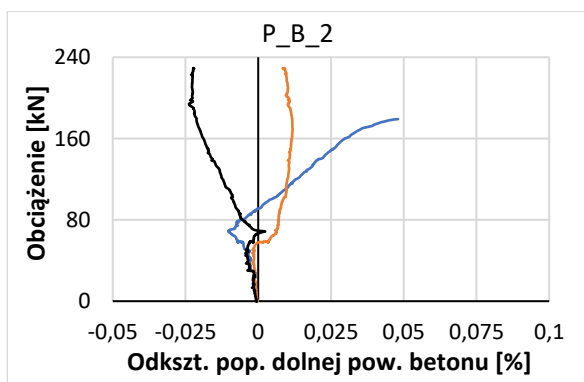
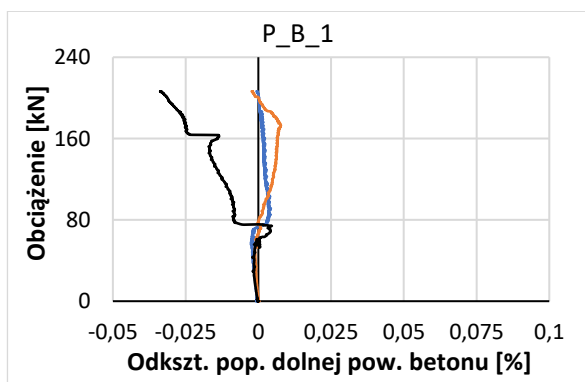
W początkowej fazie obciążania płyt, zgodnie z oczekiwaniami, górna powierzchnia betonu jest rozciągana. W większości przebadanych przypadków, poza lokalnymi anomaliami, odkształcenia rejestrowane przez tensometry w środkowej osi płyty oraz przy jej krawędziach wskazywały zbliżone wartości. Po zarysowaniu elementów widoczne są znaczne zmiany w charakterze rozwoju odkształceń poprzecznych górnej powierzchni betonu. W niektórych przypadkach widoczny jest dalszy rozwój odkształceń rozciągających, w innych przypadkach odkształcenia zmniejszają się po zarysowaniu, a często nawet dochodzi do zmiany odkształceń z rozciągających na ściskające. Charakter rozwoju odkształceń poprzecznych górnej powierzchni betonu po zarysowaniu elementów ma jednak charakter losowy i nie zauważono istotnego wpływu wzmocnienia PBO-FRCM oraz zakotwienia siatki kompozytu na ich przebieg.



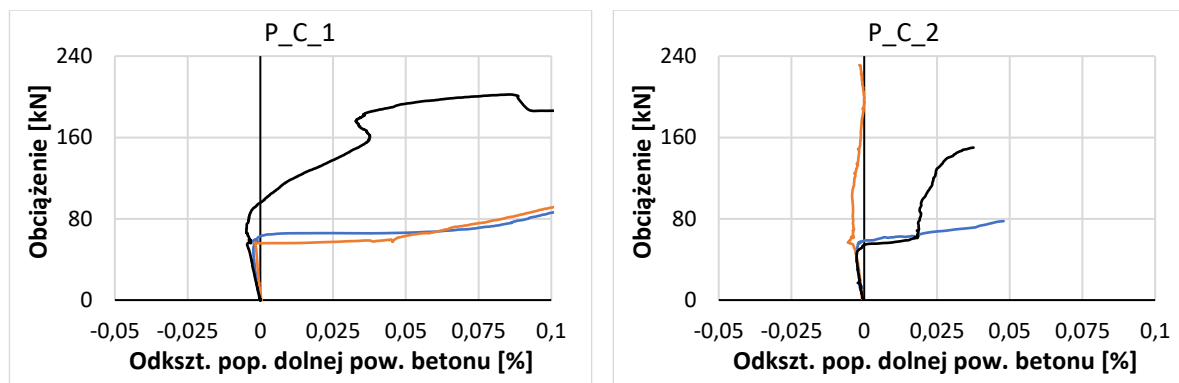
Rys. 159. Wykres zależności odkształceń poprzecznych dolnej powierzchni betonu od obciążenia w płycie P₀



Rys. 160. Wykres zależności odkształceń poprzecznych dolnej powierzchni betonu od obciążenia w płycie P_{A_1} (po lewej) i P_{A_2} (po prawej)



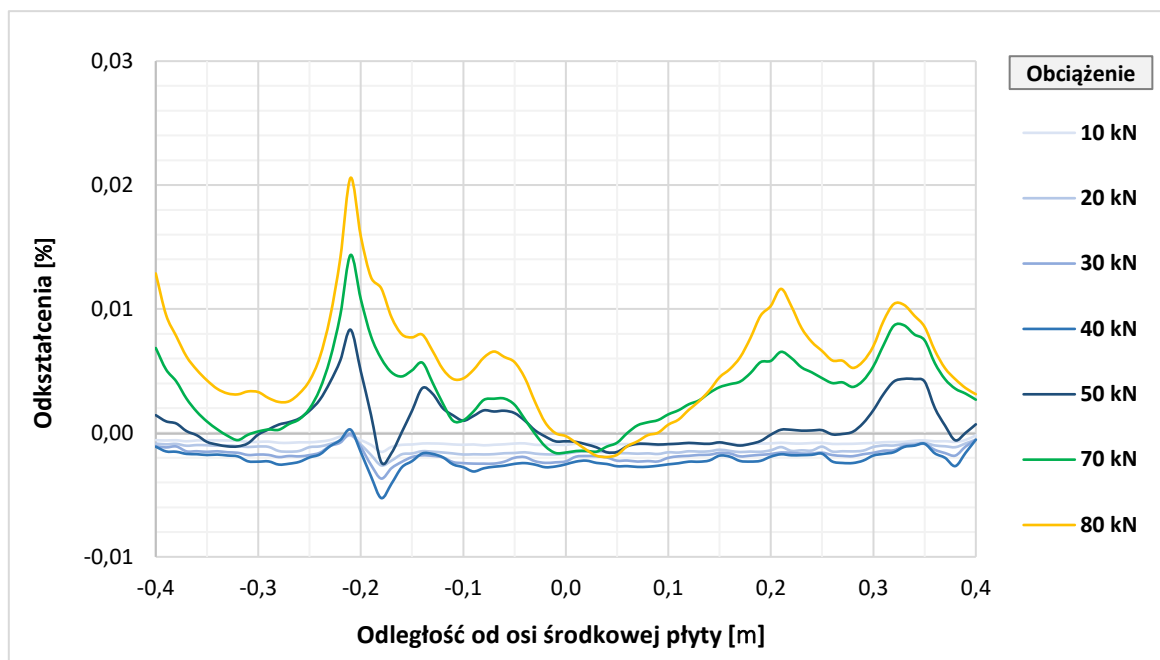
Rys. 161. Wykres zależności odkształceń poprzecznych dolnej powierzchni betonu od obciążenia w płycie P_{B_1} (po lewej) i P_{B_2} (po prawej)



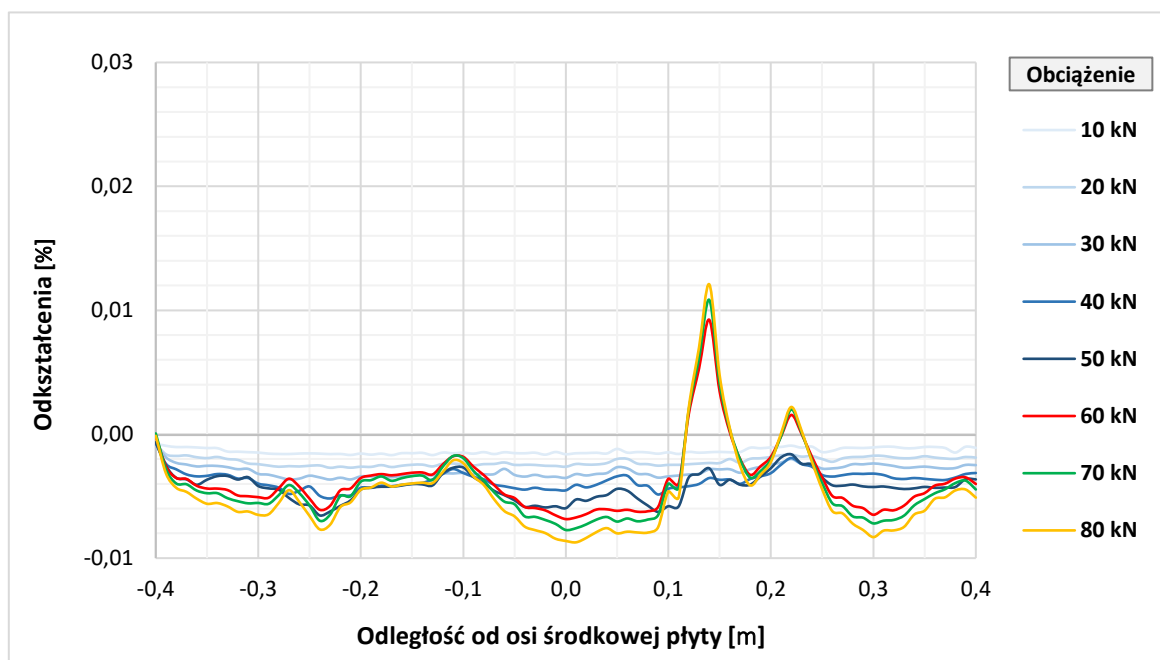
Rys. 162. Wykres zależności odkształceń poprzecznych dolnej powierzchni betonu od obciążenia w płycie P_C_1 (po lewej) i P_C_2 (po prawej)

Podobnie, jak w przypadku górnej powierzchni betonu, w początkowej fazie obciążania elementów zaobserwowano zgodne z oczekiwaniami przeciwne zwroty odkształceń poprzecznych względem odkształceń wzdłuż głównego kierunku zginania. Początkowy rozwój poprzecznych odkształceń ściskających jest zbliżony dla wszystkich przebadanych elementów zarówno dla punktu pomiarowego w osi środkowej płyty, jak i przy jej krawędziach. Rozwój odkształceń rozciągających w każdym przypadku został zakłócony przez zarysowanie powierzchni betonu, które doprowadziło do zmniejszenia odkształceń poprzecznych niemalże do zera lub zmiany zwrotu odkształceń na odkształcenia rozciągające. W niektórych przypadkach obserwowano jednak dalszy rozwój odkształceń ściskających. Zmiany te, podobnie jak w przypadku górnej powierzchni betonu, mają charakter losowy i nie zaobserwowano istotnego wpływu wzmocnienia PBO-FRCM oraz zakotwienia siatki kompozytu na ich przebieg.

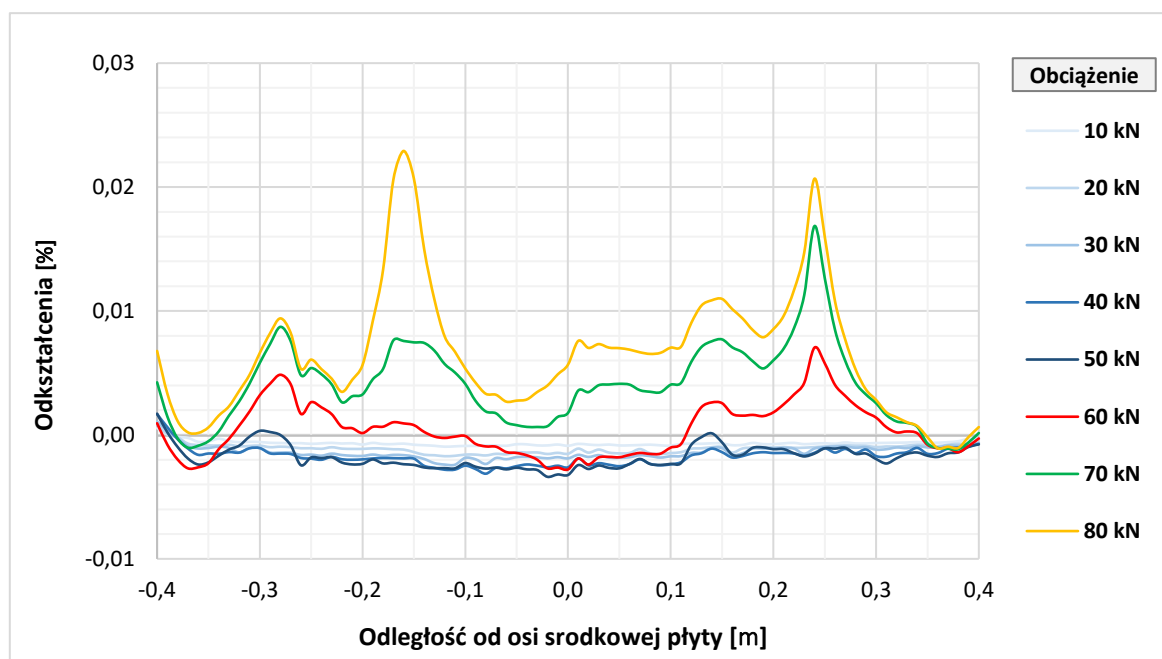
Odształcenia poprzeczne dolnej powierzchni betonu na wybranych elementach były dodatkowo monitorowane z wykorzystaniem czujników światłowodowych, co miało pozwolić na wychwycenie lokalnych ekstremów odkształceń oraz lokalnych zmian w ich rozkładzie. Wyniki tych pomiarów przedstawiono na rysunkach 163-166. W celu uczynienia wykresów, początkowe kroki obciążenia do 50 kN oznaczono odcieniami koloru niebieskiego, a późniejsze kroki obciążenia oznaczono kolorami kontrastowymi.



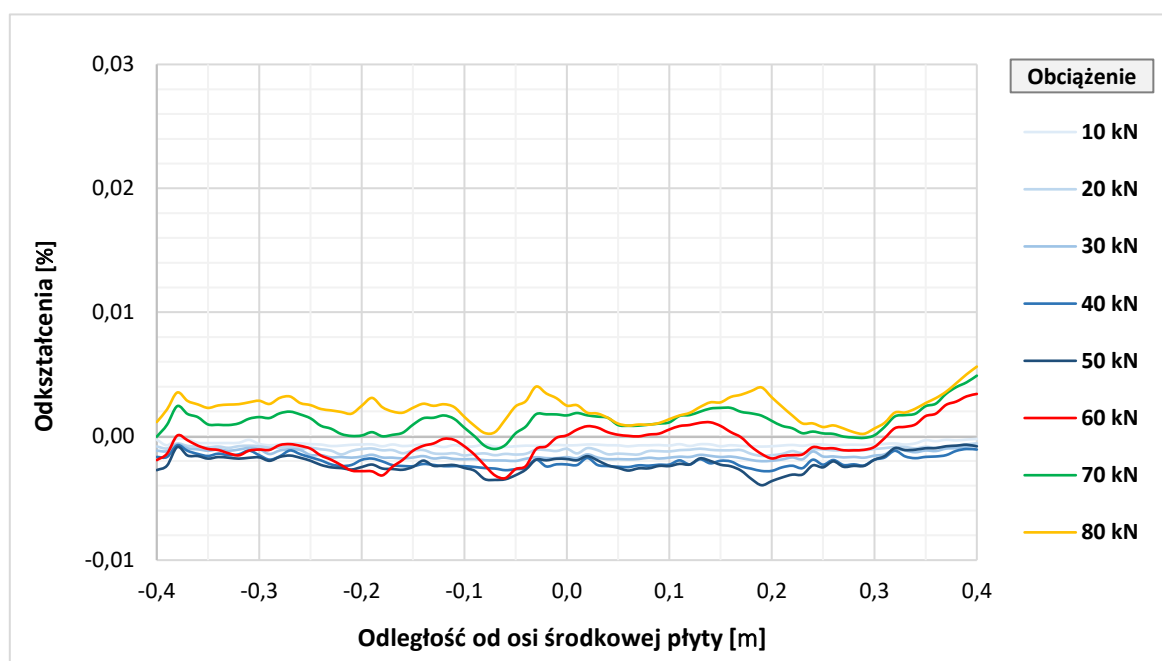
Rys. 163. Wykres odkształceń poprzecznych dolnej powierzchni betonu płyty P_0



Rys. 164. Wykres odkształceń poprzecznych dolnej powierzchni betonu płyty P_A_2



Rys. 165. Wykres odkształceń poprzecznych dolnej powierzchni betonu płyty P_B_2



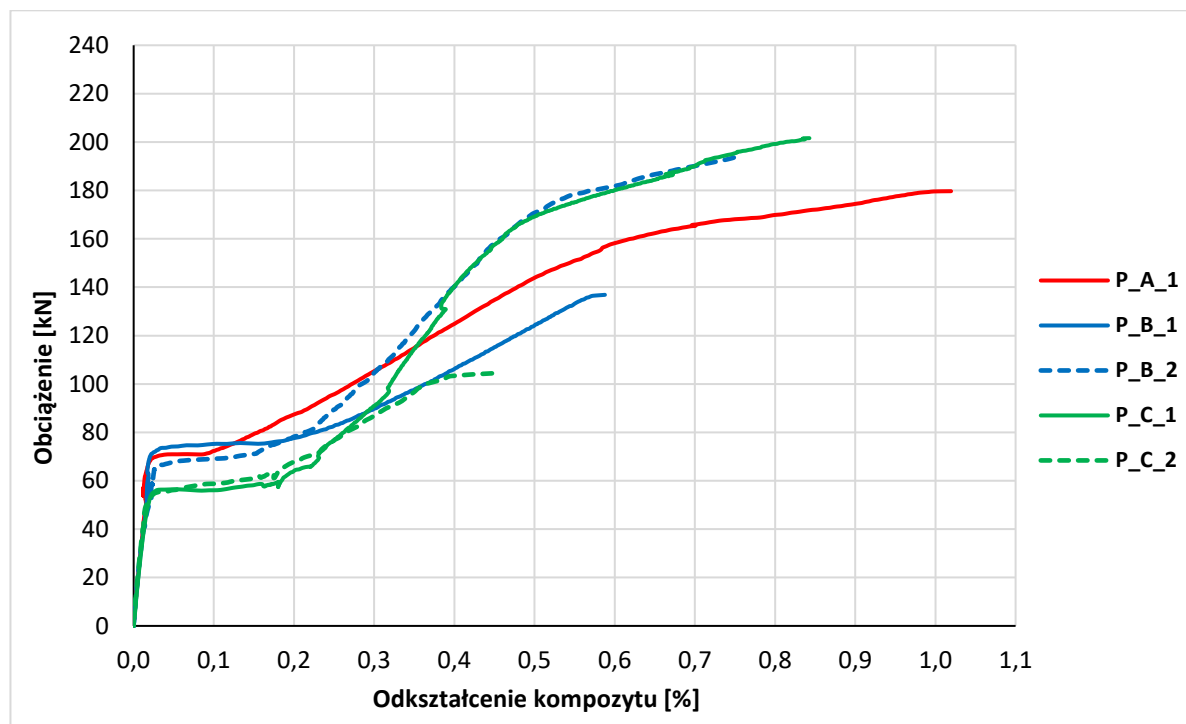
Rys. 166. Wykres odkształceń poprzecznych dolnej powierzchni betonu płyty P_C_2

W przypadku elementu niewzmocnionego (P_0) poprzeczne odkształcenia ściskające rozwijały się równomiernie na szerokości płyty do poziomu obciążeń 40 kN. Przy poziomie obciążeń 50 kN zauważalne było przejście odkształceń ściskających na rozciągające na znaczącej części elementu. Rozkład odkształceń został zachowany w późniejszych krokach obciążeń, jednak ze zwiększeniem ich bezwzględnej wartości. W elementach wzmocnionych poprzeczne odkształcenia ściskające przechodzą w rozciąganie dopiero przy poziomie obciążeń 60 kN, jednak charakter tych zmian jest inny w zależności od elementu badawczego.

W elemencie wzmocnionym z zakotwieniem prętowym (P_A_2) do przejścia odkształceń poprzecznych ze ściskania na rozciąganie doszło jedynie na krótkim odcinku o długości około 15 cm. Na pozostałej szerokości płyty odkształcenia poprzeczne pozostały odkształceniami ściskającymi i rozwijały się one dalej proporcjonalnie do obciążenia. Odmienne zachowanie zaobserwowano w przypadku płyty wzmocnionej ze sznurowym zakotwieniem siatki kompozytu (P_B_2). Po przekroczeniu poziomu obciążeń 60 kN do przejścia z poprzecznych odkształceń ściskających na rozciągające doszło na całej szerokości płyty, a wraz ze zwiększaniem poziomu obciążeń dochodziło do zwiększenia wartości poprzecznego rozciągania powierzchni dolnej betonu. Podobne zachowanie, jak w przypadku elementu P_B_2, zauważono w płycie wzmocnionej bez zakotwienia (P_C_2). Jedynie element z prętowym zakotwieniem siatki wzmocnienia wykazał inne zachowanie w stosunku do elementu niewzmocnionego. Na dużej części elementu do wysokiego poziomu obciążeń nadal obserwowano oczekiwane poprzeczne odkształcenia ściskające, co możliwe było do wychwycenia przez zastosowanie pomiarów światłowodowych, a w przypadku pomiarów tensometrycznych zostałoby pominięte przez lokalny charakter zmian. Takie zachowanie świadczyć może o włączaniu się wzmocnienia PBO-FRCM do współpracy na kierunku prostopadłym do kierunku wzmocnienia, co widoczne jest w elemencie z prętowym zakotwieniem siatki kompozytu.

4.6.7 Odkształcenia podłużne wzmocnienia

Najważniejszym parametrem określającym efektywność wykorzystania wzmocnień kompozytowych są odkształcenia podłużne osiągane przez ich włókna. Ze względu na brak kompozytu wzmacniającego na elemencie porównawczym P_0 nie był on poddawany tym analizom. Wyniki pomiarów odkształceń podłużnych kompozytu w środku rozpiętości płyty, w jej środkowej osi przedstawiono na rysunku 167.



Rys. 167. Wykres zależności odkształceń podłużnych wzmocnienia od obciążenia dla poszczególnych płyt

Zależność uzyskana w pomiarach wykonanych w elemencie P_A_2 znacząco odbiegała od wartości otrzymywanych w pozostałych seriach badawczych, co sugeruje awarię tensometru, dlatego pomiary te zostały odrzucone z dalszych analiz i nie przedstawiono ich na powyższym wykresie. W początkowej fazie rozwoju odkształceń rozciągających wszystkie uzyskane wykresy są niemalże współliniowe i nie zaobserwowano pomiędzy nimi znaczących różnic. Faza początkowego wzrostu odkształceń przerwana jest przez etap nagłego przyrostu odkształceń, który widoczny jest jako poziomy odcinek na wykresie, który pojawia się na różnym poziomie obciążeń w zależności od elementu badawczego. Dalszy rozwój odkształceń objawia się na wykresie w formie krzywoliniowego odcinka aż do zniszczenia tensometru. Zaobserwowano, że nagły przyrost odkształceń wzmocnienia elementów P_C_1 i P_C_2 zachodzi przy mniejszych obciążeniach niż w pozostałych elementach badawczych. Podobnie jak w przypadku odkształceń zbrojenia jest to spowodowane odległością punktu pomiarowego od miejsca wystąpienia zarysowania, co spowodowało lokalne przyspieszenie przyrostu odkształceń przy mniejszym obciążeniu. W tabeli 33 zestawiono charakterystyczne wartości związane z zależnością odkształceń podłużnych kompozytu od obciążenia – obciążenie związane z rozpoczęciem etapu nagłego przyrostu odkształceń, maksymalne zarejestrowane odkształcenie kompozytu oraz obciążenie z nim związane. Dodatkowo w tabeli przyrównano maksymalne zarejestrowane odkształcenia do maksymalnych odkształceń siatki PBO przy zniszczeniu (2,15%) oraz obciążenie związane z maksymalnym odkształceniem kompozytu do zbadanej nośności elementu. Na podstawie powyższych wartości wyznaczono wskaźnik wykorzystania siatki będący ilorazem stosunku maksymalnego zarejestrowanego odkształcenia siatki do odkształceń niszczących i stosunku maksymalnego zarejestrowanego obciążenia do nośności płyty do obciążenia, przy którym zarejestrowano ostatni pomiar. Wskaźnik wykorzystania siatki obliczono na podstawie wzoru (3).

$$I_{\text{frcm,max}} = \frac{\varepsilon_{\text{frcm,max}}/\varepsilon_{\text{frcm,ult}}}{F_{\text{frcm,max}}/F_{\text{ult}}} \quad (3)$$

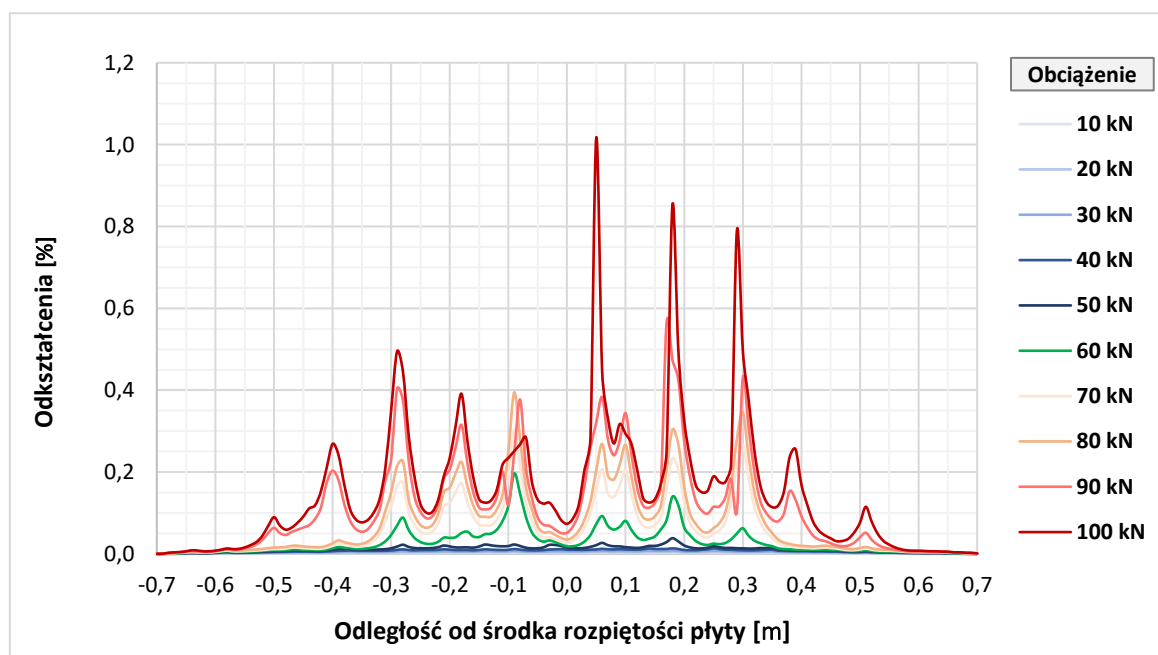
Tabela 33. Kluczowe parametry odczytane z wykresu zależności odkształcenia kompozytu FRCM od obciążenia dla poszczególnych serii oraz materiałowe dane odniesienia

| Nazwa elementu | $F_{\text{frcm, pl}}$ | $\varepsilon_{\text{frcm,max}}$ | $\varepsilon_{\text{frcm,ult}}$ | $\varepsilon_{\text{frcm,max}}/\varepsilon_{\text{frcm,ult}}$ | $F_{\text{frcm,max}}$ | F_{ult} | $F_{\text{frcm,max}}/F_{\text{ult}}$ | $I_{\text{frcm,max}}$ |
|----------------|-----------------------|---------------------------------|---------------------------------|---|-----------------------|------------------|--------------------------------------|-----------------------|
| | [kN] | [%] | [%] | [%] | [kN] | [kN] | [%] | [-] |
| P_A_1 | 71,0 | 1,02 | 2,15 | 47,4 | 179,7 | 210,1 | 85,5 | 0,55 |
| P_B_1 | 74,7 | 0,59 | 2,15 | 27,3 | 136,8 | 206,5 | 66,3 | 0,41 |
| P_B_2 | 67,5 | 0,76 | 2,15 | 35,3 | 194,4 | 229,4 | 84,7 | 0,42 |
| P_C_1 | 56,3 | 0,84 | 2,15 | 39,2 | 201,6 | 202,2 | 99,7 | 0,39 |
| P_C_2 | 55,6 | 0,46 | 2,15 | 21,2 | 104,5 | 231,1 | 45,2 | 0,47 |

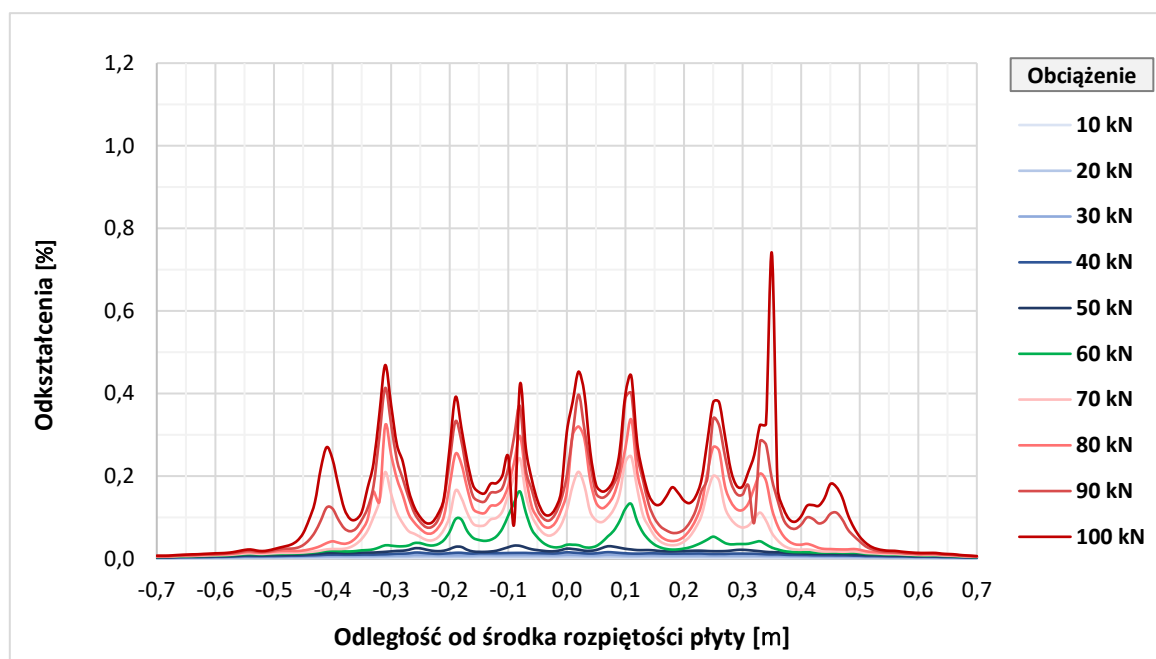
Największe odkształcenia wzmocnienia FRCM, odpowiadające niemalże 50% wykorzystaniu jego potencjału, zarejestrowano na elemencie P_A_1, w którym siatkę zakotwiono za pomocą pręta GFRP.

W pozostałych elementach zarejestrowano odkształcenia odpowiadające jedynie 20-40% potencjału wzmocnienia PBO-FRCM. Należy jednak zwrócić uwagę, że koniec odczytu odkształceń tensometru przytwierdzonego do wzmocnienia nie zawsze pokrywał się ze zniszczeniem elementu, a bardzo często występował znacznie wcześniej. Skorygowane wartości wykorzystania wzmocnienia, wyrażone za pomocą wskaźnika wykorzystania wskazują, że w przypadku zakotwienia typu A występował potencjał 55% wykorzystania wzmocnienia, w przypadku zakotwienia B wynosił on 41% i 42%, a w przypadku braku zakotwienia (typ C) 39% i 47%. Spośród wszystkich przebadanych elementów, na podstawie przeprowadzonych analiz widoczne jest, że zwiększenie potencjału za pomocą zakotwienia sznurowego (typ B) nie jest znaczące, a w przypadku zakotwienia prętowego (typ A) dochodzi do istotnego zwiększenia wykorzystania potencjału wzmocnienia. Przy założeniu średniej wartości wskaźnika wykorzystania dla elementów serii C równego około 0,43, zwiększenie wskaźnika wykorzystania za pomocą zakotwienia prętowego (typ A) do wartości 0,55 wiąże się z około 28% wzrostem efektywności wzmocnienia.

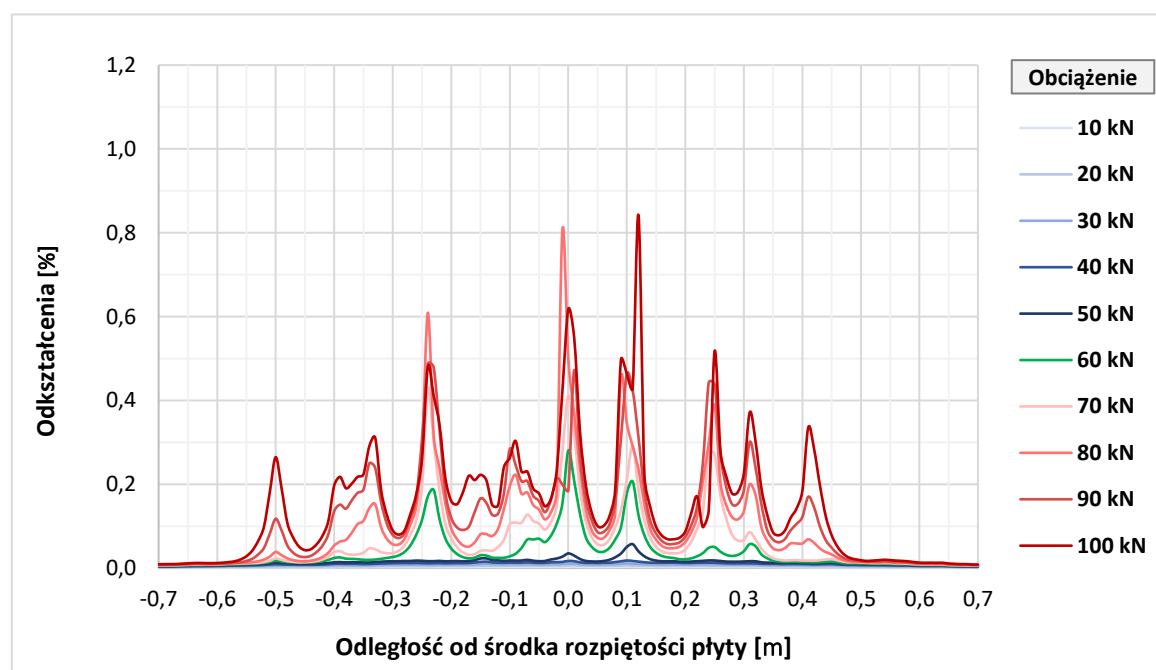
Pomiary światłowodowe wykonane na trzech wzmocnionych elementach (P_A_2, P_B_2 i P_C_2) pozwoliły na monitorowanie odkształceń wzmocnienia na całej jego długości. Na rysunkach 168-170 przedstawiono rozkłady odkształceń podłużnych wzmocnienia dla poszczególnych elementów w osi podłużnej płyty w zakresie obciążeń związanych z początkowym rozwojem odkształceń wzmocnienia (do 100 kN). Odcieniami koloru niebieskiego zaznaczono wczesną fazę rozwoju odkształceń, w której kompozyt pracuje w stanie niemalże niezarysowanym. Fazę przejściową, w której pojawiają się pierwsze wyraźne piki wskazujące zarysowanie, zaznaczono kolorem zielonym, a fazę intensywnego rozwoju zarysowania zaznaczono odcieniami koloru czerwonego.



Rys. 168. Wykres rozkładu odkształceń podłużnych wzmocnienia płyty P_A_2



Rys. 169. Wykres rozkładu odkształceń podłużnych wzmocnienia płyty P_B_2



Rys. 170. Wykres rozkładu odkształceń podłużnych wzmocnienia płyty P_C_2

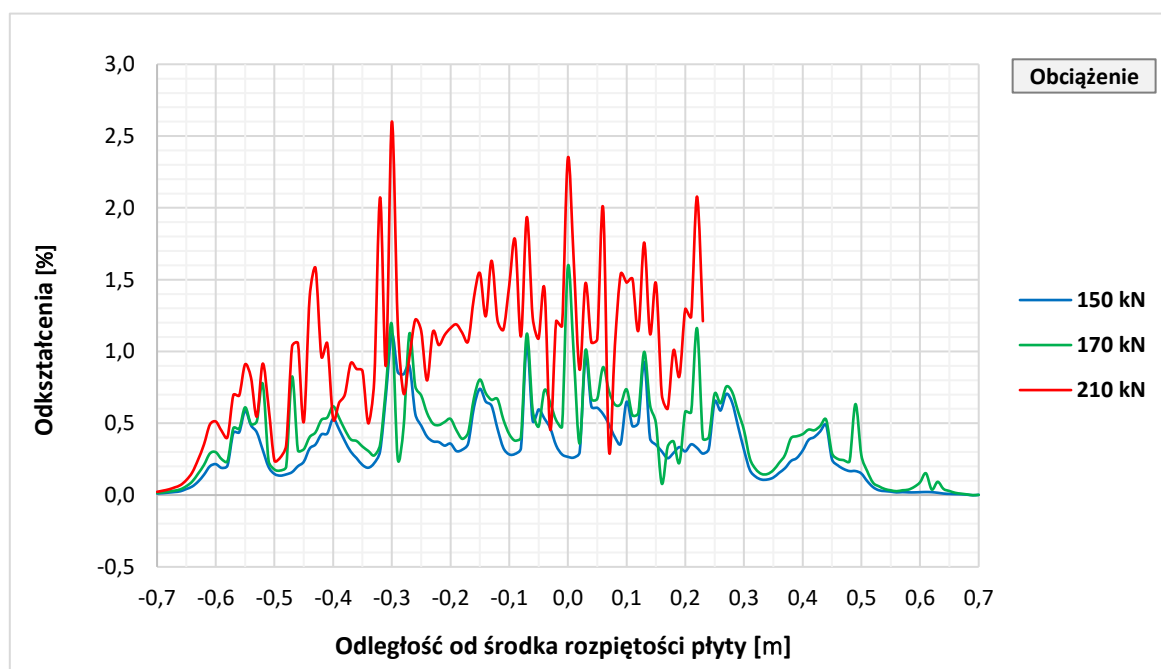
We wszystkich elementach, niezależnie od typu zakotwienia, wstępny rozwój zarysowania zauważono przy kroku obciążenia odpowiadającym wartości 60 kN. Na tym etapie we wszystkich przebadanych elementach maksymalne odkształcenia były na zbliżonym poziomie od około 0,15% do 0,25%, a w każdym elemencie zaobserwowano od około 7 do 9 pików sugerujących miejsce pojawienia się zarysowania. Przy dalszym zwiększaniu obciążeń do poziomu 100 kN zaobserwowano wzrost maksymalnych odkształceń w każdym elemencie do poziomu od około 0,7% do 0,8% oraz około 9-10 głównych pików wskazujących miejsce

powstania zarysowania. Przy tym poziomie obciążeń nie zaobserwowano znaczących różnic pomiędzy poszczególnymi seriami badawczymi, a ewentualne odchylenia pomiędzy seriami spowodowane są losowym charakterem zarysowania kompozytu FRCM. Liczba rys zaobserwowanych na długości wzmocnienia jest podobna do tej wyznaczonej dla dolnej powierzchni betonu, co sugeruje, że wzmocnienie FRCM największe odkształcenia przyjmuje w miejscu powstania rysy na konstrukcji betonowej. W tabeli 34 zestawiono uśrednione wartości odkształceń wzmocnienia na odcinku 1,4 m dla poziomów obciążeń 60 kN i 100 kN oraz maksymalne wartości pików odkształceń odczytane dla tych poziomów obciążeń.

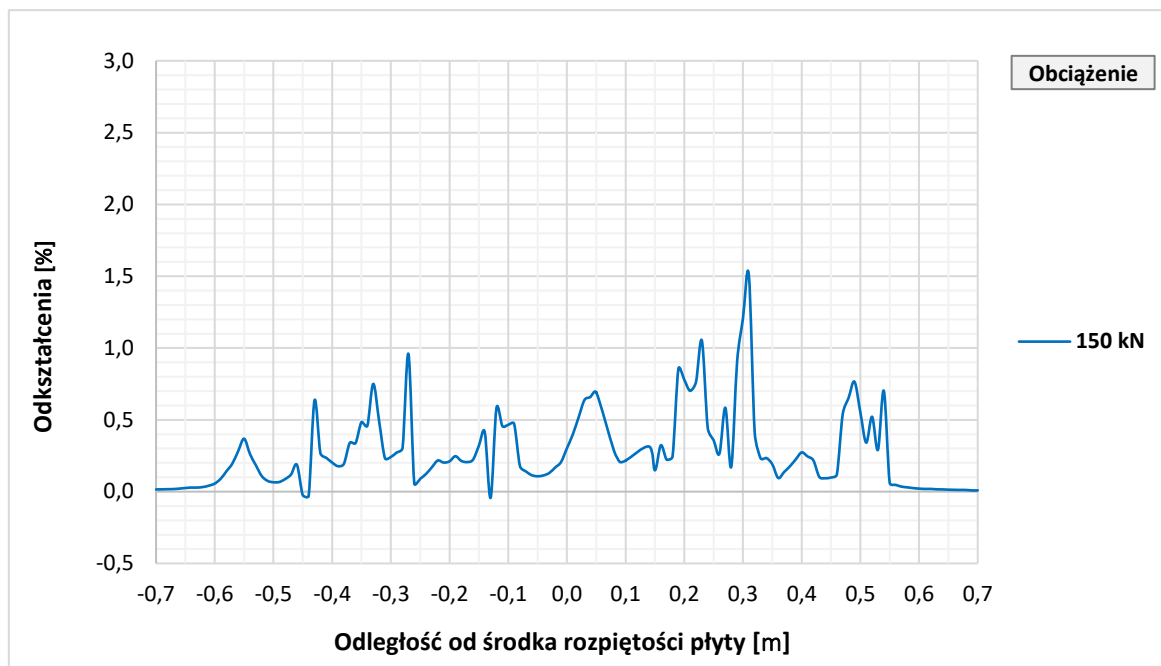
Tabela 34. Zestawienie uśrednionego odkształcenia podłużnego wzmocnienia na całej długości pomiarowej światłowodu oraz wartości maksymalnych odkształceń dla obciążenia 60 i 100 kN

| Nazwa elementu | $\varepsilon_{frcm,m,60}$ | $\varepsilon_{frcm,max,60}$ | $\varepsilon_{frcm,m,100}$ | $\varepsilon_{frcm,max,100}$ |
|----------------|---------------------------|-----------------------------|----------------------------|------------------------------|
| | [%] | [%] | [%] | [%] |
| P_A_2 | 0,029 | 0,196 | 0,152 | 1,02 |
| P_B_2 | 0,031 | 0,163 | 0,148 | 0,74 |
| P_C_2 | 0,037 | 0,280 | 0,150 | 0,84 |

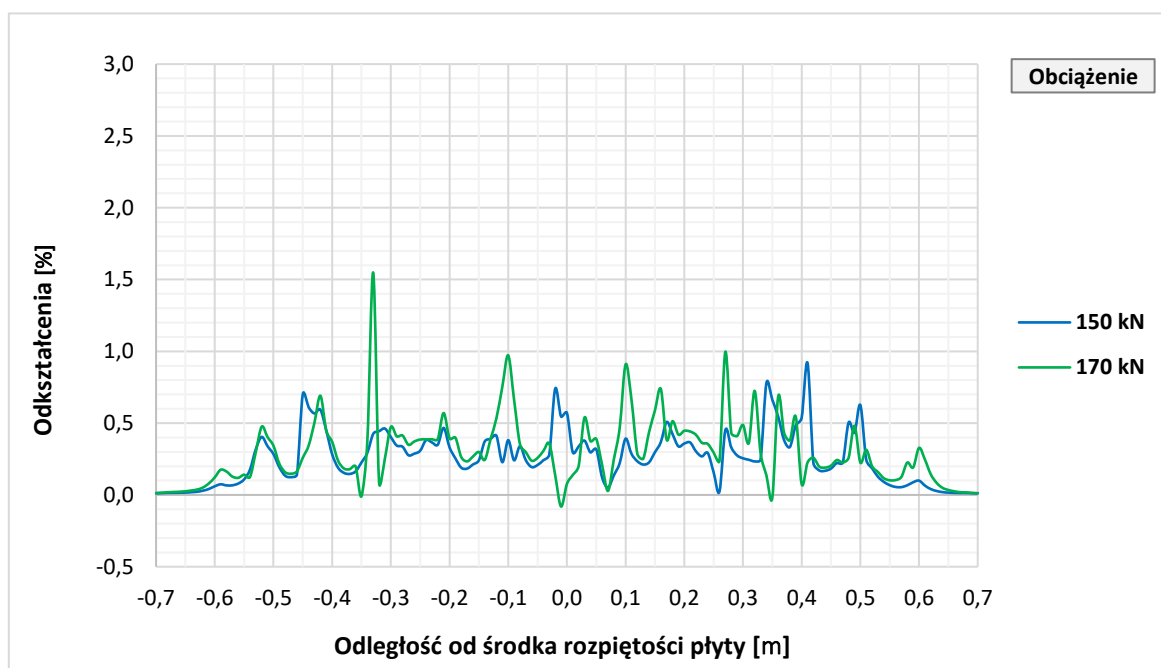
Ze względu na ograniczoną wytrzymałość czujników światłowodowych, nie we wszystkich przypadkach udało się wykonać pełne pomiary aż do zniszczenia elementu badawczego. W przypadku płyty P_A_2 do zniszczenia czujnika doszło przy obciążeniu 210 kN, w przypadku płyty P_B_2 przy obciążeniu 150 kN, a w przypadku płyty P_C_2 przy obciążeniu 170 kN. Na rysunkach 171-173 przedstawiono ostatnie zarejestrowane rozkłady odkształceń podłużnych wzmocnienia oraz (w zależności od możliwości) dane z poziomów obciążeń, przy których zniszczeniu uległy czujniki w innych płytach w celach porównawczych.



Rys. 171. Wykres maksymalnych zarejestrowanych odkształceń podłużnych wzmocnienia płyty P_A_2



Rys. 172. Wykres maksymalnych zarejestrowanych odkształceń podłużnych wzmocnienia płyty P_B_2



Rys. 173. Wykres maksymalnych zarejestrowanych odkształceń podłużnych wzmocnienia płyty P_C_2

Przy poziomach obciążeń 150 kN i 170 kN w każdym przebadanym elemencie zaobserwowano podobne rozkłady odkształceń podłużnych wzmocnienia PBO-FRCM, w kształcie zbliżonym do paraboli (przy pominięciu lokalnych zaburzeń związanych z występowaniem rys) z lokalnymi pikami odkształceń w miejscach zarysowania powierzchni wzmocnienia. Podobny trend zauważono również przy poziomie obciążeń 210 kN w jednym elemencie P_A_2, jednak został on zarejestrowany jedynie dla części długości

elementu ze względu na zniszczenie czujnika światłowodowego. W tabeli 35 zestawiono uśrednione wartości odkształceń wzmocnienia na odcinku 1,4 m dla poziomych obciążeń 150 kN, 170 kN oraz 210 kN (w przypadku zarejestrowania pomiaru dla konkretnego elementu badawczego) oraz maksymalne wartości pików odkształceń odczytane dla tych poziomów obciążenia. W przypadku niepełnego pomiaru dla poziomu obciążenia 210 kN w elemencie P_A_2 przeanalizowano połowę wykresu do środka rozpiętości płyty i założono symetryczny rozkład odkształceń na pozostałej części elementu badawczego.

Tabela 35. Zestawienie uśrednionego odkształcenia podłużnego wzmocnienia na całej długości pomiarowej światłowodu oraz wartości maksymalnych odkształceń dla obciążenia 150, 170 i 210 kN

| Nazwa elementu | $\varepsilon_{frcm,m,150}$ | $\varepsilon_{frcm,max,150}$ | $\varepsilon_{frcm,m,170}$ | $\varepsilon_{frcm,max,170}$ | $\varepsilon_{frcm,m,210}$ | $\varepsilon_{frcm,max,210}$ |
|----------------|----------------------------|------------------------------|----------------------------|------------------------------|----------------------------|------------------------------|
| | [%] | [%] | [%] | [%] | [%] | [%] |
| P_A_2 | 0,32 | 1,12 | 0,42 | 1,59 | 0,90 | 2,60 |
| P_B_2 | 0,27 | 1,51 | - | - | - | - |
| P_C_2 | 0,26 | 0,92 | 0,30 | 1,55 | - | - |

Przy poziomie obciążeń 150 kN największe uśrednione odkształcenia na poziomie 0,32% zarejestrowano w elemencie z zakotwieniem prętowym (P_A_2), kiedy dla elementu ze sznurowym zakotwieniem siatki kompozytu (P_B_2) oraz elementu ze wzmocnieniem bez zakotwienia (P_C_2) były one odpowiednio o 18 i 19% mniejsze. Przy wyższym poziomie obciążeń równym 170 kN ponownie największe uśrednione odkształcenia zarejestrowano w elemencie P_A_2 i wynosiły one 0,42%. Przy tym samym poziomie obciążeń w elemencie wzmocnionym bez zakotwienia (P_C_2) zarejestrowano odkształcenia mniejsze o 29%. Przy poziomie obciążeń 210 kN jedynym zarejestrowanym pomiarem były odkształcenia w elemencie P_A_2, które przyjmowały uśrednioną wartość równą 0,90%.

Maksymalne odkształcenia zarejestrowane przy poziomie obciążeń 150 kN największą wartość przybrały w elemencie z zakotwieniem sznurowym (P_B_2) i wynosiły 1,51%, w czasie gdy w elementach P_A_2 i P_C_2 porównywalne wartości (odpowiednio 1,59% i 1,55%) zostały osiągnięte dopiero przy obciążeniu 170 kN. Największe odkształcenia lokalne, równe 2,60%, zarejestrowano przy obciążeniu 210 kN w elemencie P_A_2. Ze względu na znaczne różnice w poziomach obciążeń w momencie zniszczenia czujnika światłowodowego przeprowadzono analogiczną do przedstawionej w tabeli 33 analizę, w której porównano maksymalne zarejestrowane odkształcenie kompozytu oraz obciążenie z nim związane. Przyrównano w niej maksymalne zarejestrowane odkształcenia do maksymalnych odkształceń siatki PBO przy zniszczeniu (2,15%) oraz obciążenie związane z maksymalnym odkształceniem kompozytu do zbadanej nośności elementu. Na podstawie powyższych wartości wyznaczono wskaźnik wykorzystania siatki będący ilorazem stosunku maksymalnego zarejestrowanego odkształcenia siatki do odkształceń niszczących i stosunku maksymalnego zarejestrowanego obciążenia do nośności płyty do obciążenia, przy którym zarejestrowano ostatni pomiar (według wzoru 3). Wyniki analizy przedstawiono w tabeli 36.

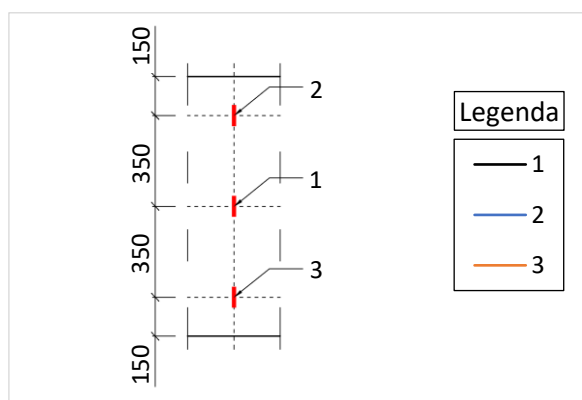
Tabela 36. Kluczowe parametry odczytane z wykresu zależności odkształcenia kompozytu FRCM od obciążenia dla poszczególnych serii

| Nazwa elementu | $\varepsilon_{frcm,max}$ | $\varepsilon_{frcm,ult}$ | $\varepsilon_{frcm,max}/\varepsilon_{frcm,ult}$ | $F_{frcm,max}$ | F_{ult} | $F_{frcm,max}/F_{ult}$ | $I_{frcm,max}$ |
|----------------|--------------------------|--------------------------|---|----------------|-----------|------------------------|----------------|
| | [%] | [%] | [%] | [kN] | [kN] | [%] | [-] |
| P_A_2 | 2,60 | 2,15 | 120,9 | 210 | 222,3 | 94,5 | 1,28 |
| P_B_2 | 1,51 | 2,15 | 70,2 | 150 | 229,4 | 65,4 | 1,07 |
| P_C_2 | 1,55 | 2,15 | 72,1 | 170 | 231,1 | 73,6 | 0,98 |

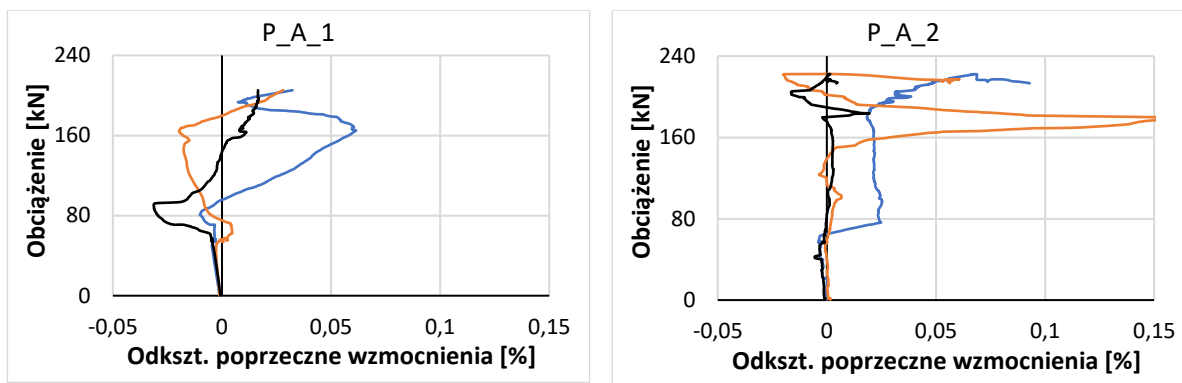
Z przeprowadzonych analiz wynika, że największe teoretyczne wykorzystanie kompozytu zostało uzyskane w elemencie z zakotwieniem prętowym (P_A_2). W porównaniu z elementem bez zakotwienia (P_C_2) wskaźnik wykorzystania siatki dla elementu z zakotwieniem prętowym (P_A_2) był o 31% większy, podczas gdy dla zakotwienia sznurowego (P_B_2) uzyskano wynik większy o 9%, co wskazuje większą efektywność zakotwienia prętowego. Proporcje między wartościami wskaźników wykorzystania siatki są zbliżone do tych, otrzymanych za pomocą tensometrów (opisane w tabeli 33), a różnice w wartościach związane są z lokalnym charakterem pomiaru tensometrycznego w porównaniu z globalnym maksimum analizowanym przy użyciu czujników światłowodowych.

4.6.8 Odkształcenia poprzeczne wzmocnienia

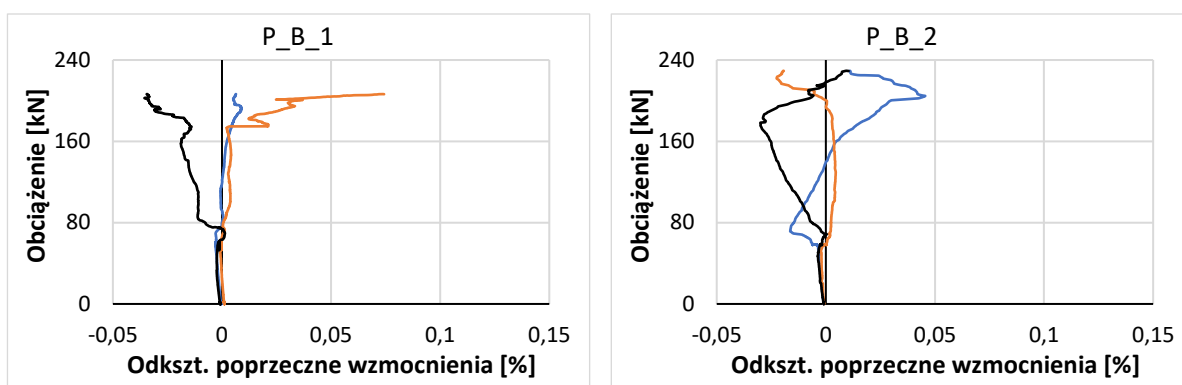
Podobnie jak w przypadku odkształceń zbrojenia i powierzchni rozciąganej i ściskanej betonu przeprowadzono pomiar odkształceń poprzecznych wzmocnienia w środku rozpiętości płyty w jej środkowej osi oraz przy krawędziach bocznych. Na rysunku 174 przedstawiono rozkład i opis tensometrów wykorzystany na wykresach wraz z legendą. Wykresy prezentujące wyniki tych pomiarów dla poszczególnych elementów badawczych przedstawiono na rysunkach 175-177.



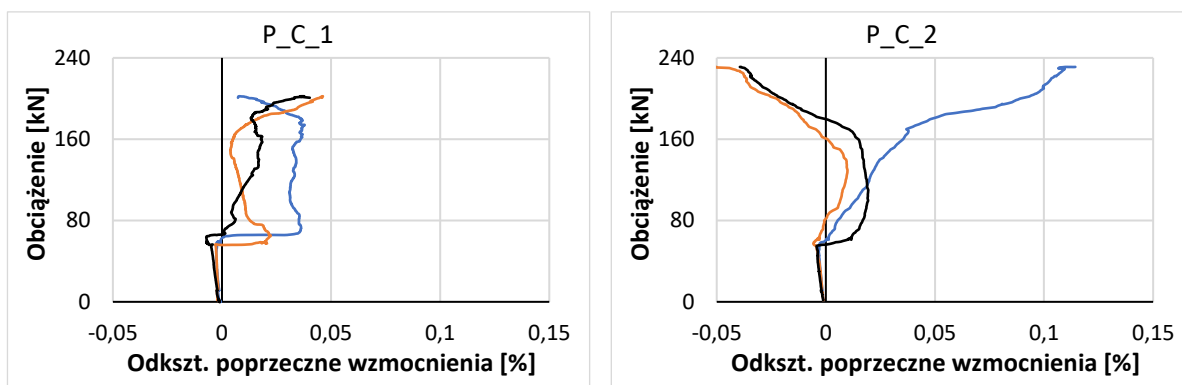
Rys. 174. Rozkład i opis tensometrów poprzecznych powierzchni wzmocnienia wraz z legendą



Rys. 175. Wykres zależności odkształceń poprzecznych wzmocnienia od obciążenia w płycie P_A_1 (po lewej) i P_A_2 (po prawej)



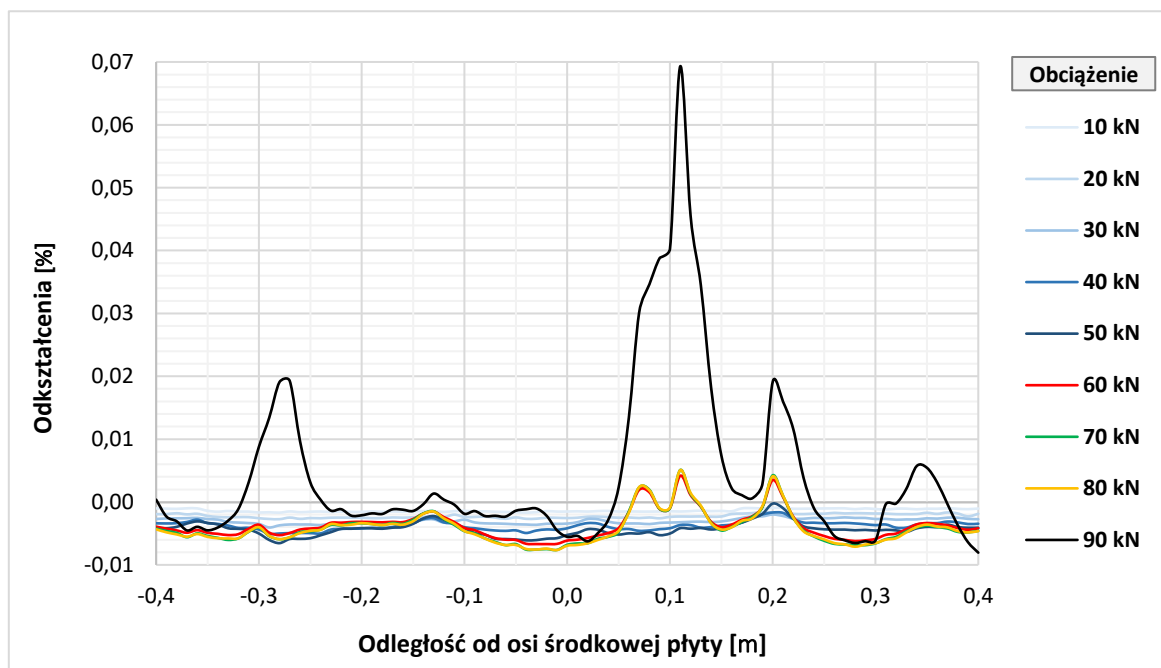
Rys. 176. Wykres zależności odkształceń poprzecznych wzmocnienia od obciążenia w płycie P_B_1 (po lewej) i P_B_2 (po prawej)



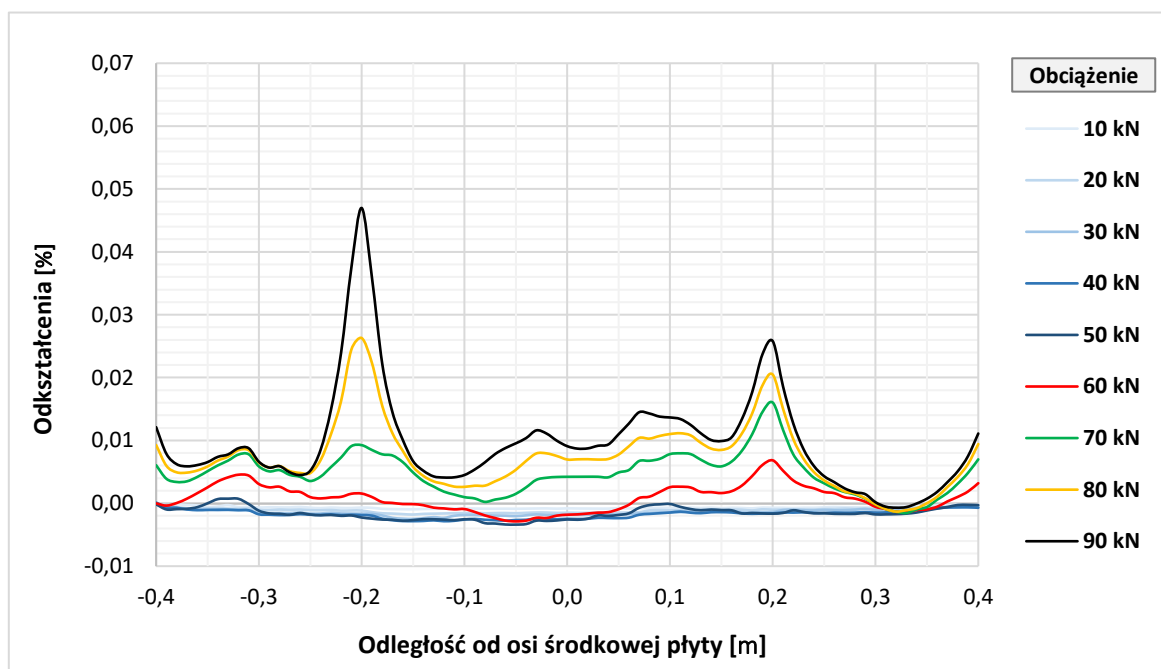
Rys. 177. Wykres zależności odkształceń poprzecznych wzmocnienia od obciążenia w płycie P_C_1 (po lewej) i P_C_2 (po prawej)

Odształcenia poprzeczne wzmocnienia, podobnie jak w przypadku odkształceń poprzecznych dolnej powierzchni betonu, w początkowej fazie obciążania elementu (przed zarysowaniem) mają charakter ściskania i rozwijają się proporcjonalnie do przyłożonego obciążenia. Po zarysowaniu odkształcenia w zależności od elementu badawczego oraz miejsca przytwierdzenia tensometru przyjmują zróżnicowany charakter, bez konkretnej zauważalnej zależności, co spowodowane jest losowym charakterem zarysowania powierzchni wzmocnienia względem punktu pomiarowego.

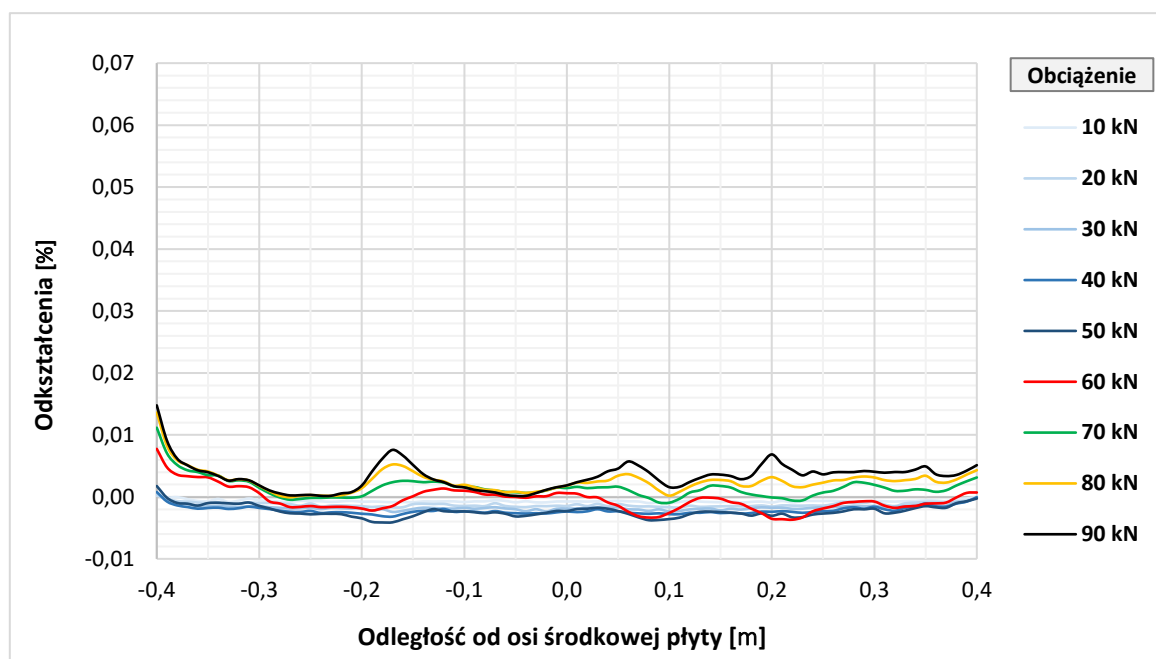
Poza tensometrycznym pomiarem odkształceń poprzecznych wzmocnienia przeprowadzono również światłowodowe pomiary rozkładu tych odkształceń. Wyniki pomiarów dla poszczególnych elementów przedstawiono na rysunkach 178-180. Odcieniami koloru niebieskiego zaznaczono poziomy odkształceń, przy których proporcjonalnie rozwijały się poprzeczne odkształcenia ściskające, pozostałe kolory wskazują poziomy obciążenia, przy których zaobserwowano znaczne załamanie trendu rozwoju odkształceń (np. powstanie odkształceń rozciągających).



Rys. 178. Wykres rozkładu odkształceń poprzecznych wzmocnienia płyty P_A_2



Rys. 179. Wykres rozkładu odkształceń poprzecznych wzmocnienia płyty P_B_2

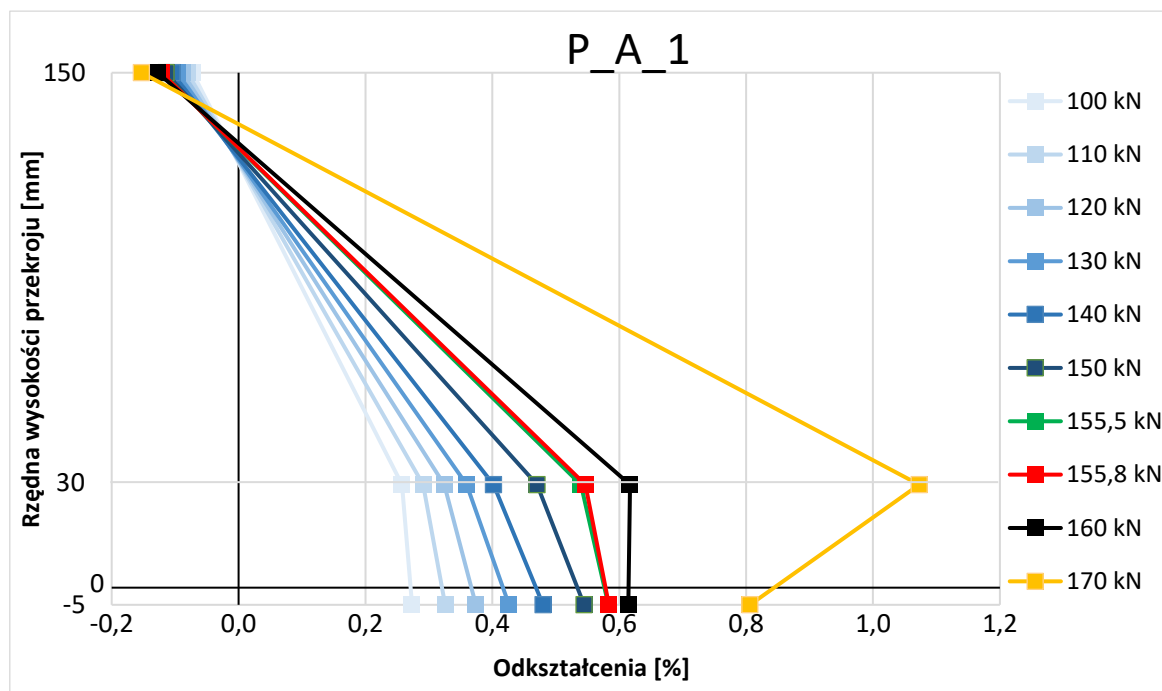


Rys. 180. Wykres rozkładu odkształceń poprzecznych wzmocnienia płyty P_C_2

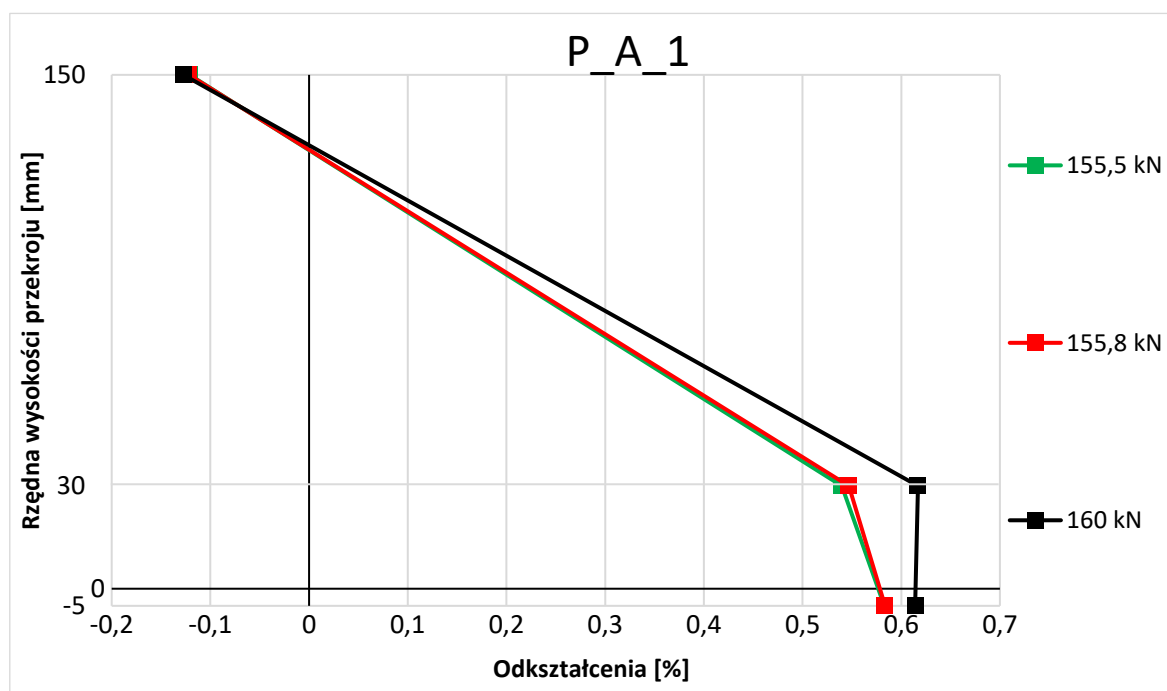
Rozkłady odkształceń poprzecznych wzmocnienia wykonane z użyciem czujników światłowodowych, ze względu na globalny charakter (w przeciwieństwie do pomiarów wykonanych za pomocą tensometrów), pozwoliły na szersze spojrzenie na to zagadnienie. W każdym przebadanym przypadku do poziomu obciążenia 50 kN widoczne są proporcjonalne do przyłożonej siły przyrosty ściskających odkształceń poprzecznych. Przy osiągnięciu poziomu obciążenia 60 kN zauważalne jest zaburzenie wcześniejszego trendu, ponieważ lokalnie pojawiają się poprzeczne odkształcenia rozciągające, które w dalszych krokach przybierają na wartości. W przypadku elementu ze wzmocnieniem z zakotwieniem prętowym (P_A_2) przejścia ściskania w rozciąganie mają charakter lokalny i osiągają stosunkowo wysokie wartości (do 0,07%) przy progu 90 kN. Odmienny charakter rozwoju poprzecznych odkształceń rozciągających zaobserwowano w elemencie wzmocnionym z zakotwieniem sznurowym (P_B_2) oraz bez zakotwienia (P_C_2). W tych przypadkach poprzeczne rozciąganie wzmocnienia pojawia się na całej lub niemalże całej szerokości płyty. W elemencie P_B_2 przy wyższych poziomach obciążeń (90 kN) zaobserwować można wyraźne piki odkształceń, o wartościach zbliżonych do tych widocznych w przypadku płyty P_A_2, podczas gdy w przypadku elementu wzmocnionego bez zakotwienia (P_C_2) odkształcenia poprzeczne rozciągające są na znacznie niższym, jednak bardziej wyrównanym poziomie. Należy zwrócić uwagę, że poziom odkształceń poprzecznych wzmocnienia jest wielokrotnie niższy niż jego odkształcenia podłużne, więc wykorzystanie siatki PBO w kierunku prostopadłym do kierunku zginania jest znikome (nie większe niż 5%).

4.6.9 Rozwój rozkładu odkształceń na wysokości elementu

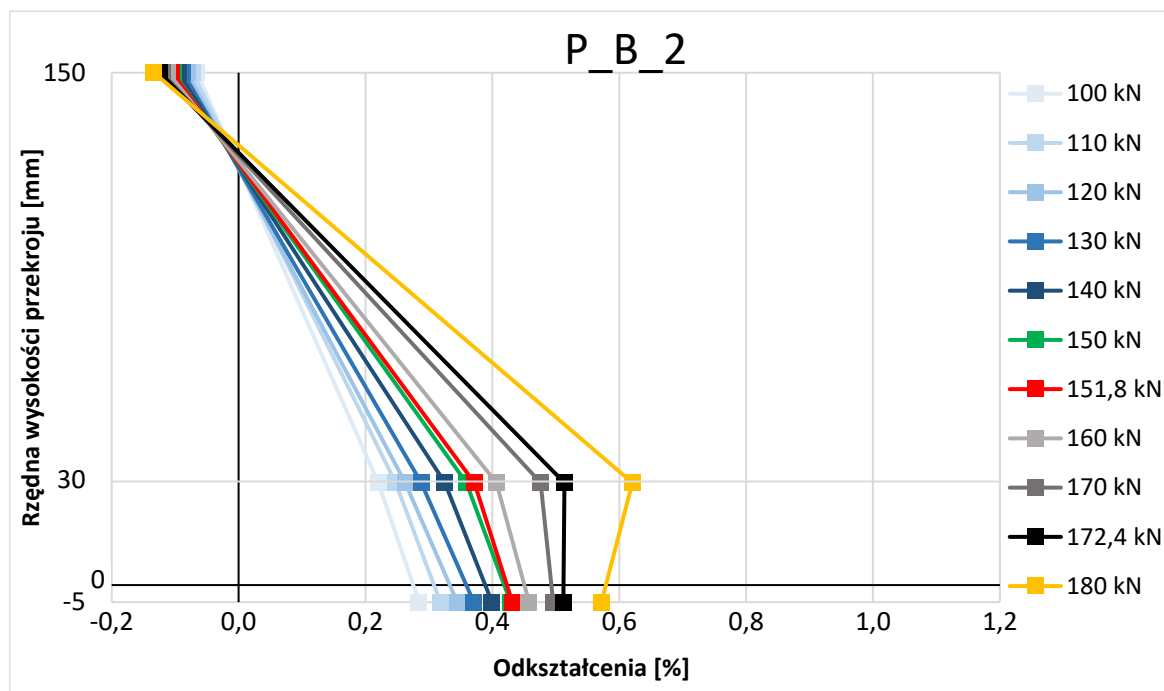
Ze względu na złożoność przeprowadzonych pomiarów i ilość uzyskanych wyników, jako ostatni element analiz badań doświadczalnych, zdecydowano się zestawić poszczególne odkształcenia podłużne (jako najbardziej znaczące) w ramach jednego elementu. W tym celu dla wybranych elementów wzmocnionych sporządzono wykresy przedstawiające rozwój odkształceń elementu po wysokości jego przekroju, w środku rozpiętości i w jego środkowej osi podłużnej. W tym celu wykorzystano przedstawione wcześniej wyniki pomiarów tensometrycznych i zestawiono je na rysunkach 181-186. Rzędna pionowa wykresów wskazuje na położenie punktów pomiarowych na wysokości elementów, gdzie wartość 150 to górna powierzchnia betonu, wartość 30 to oś głównego stalowego zbrojenia dolnego, wartość 0 to dolna powierzchnia betonu, a wartość -5 to zewnętrzna powierzchnia wzmocnienia. Na wykresach przedstawiono odczyty dla odkształceń podłużnych górnej powierzchni betonu, zbrojenia głównego oraz wzmocnienia. Odczyty pomiarów dolnej powierzchni betonu pominięto ze względu na dużą liczbę zaburzeń w pomiarach spowodowanych zarysowaniem. Zaprezentowano po jednym reprezentatywnym przykładzie dla każdego wzmocnionego typu elementu – z zakotwieniem prętowym, sznurowym oraz bez zakotwienia. Dobór reprezentatywnych przykładów był podyktowany przede wszystkim poprawnością działania wszystkich analizowanych tensometrów przez najistotniejsze fazy pracy elementów. Odcieniami koloru niebieskiego zaznaczono poziomy obciążenia, dla których rozwój odkształceń jest proporcjonalny lub zbliżony do proporcjonalnego dla wszystkich analizowanych punktów tensometrycznych. Ostatni odczyt proporcjonalnego rozwoju odkształceń został zaznaczony kolorem zielonym. Seria przedstawiająca moment załamania proporcjonalności rozkładu (kolejny krok obciążenia) została oznaczona kolorem czerwonym. Moment zrównania się odkształceń zbrojenia i wzmocnienia oznaczono kolorem czarnym, a w przypadku wystąpienia dużej liczby serii pomiędzy punktem załamania proporcjonalności a zrównaniem odkształceń wzmocnienia i zbrojenia przedstawiono wybrane serie w odcieniach szarości. Kolejne serie wskazujące dalszy rozwój rozkładu odkształceń przedstawiono w odcieniach koloru żółtego. Na rysunkach 181, 183 i 185 przedstawiono wszystkie opisane powyżej serie. Dla zwiększenia czytelności na wykresach 182, 184 i 186 przedstawiono jedynie kluczowe punkty rozwoju odkształceń – ostatnia seria proporcjonalnego rozwoju odkształceń, pierwsze załamanie rozwoju odkształceń oraz moment zrównania odkształceń podłużnych zbrojenia i wzmocnienia.



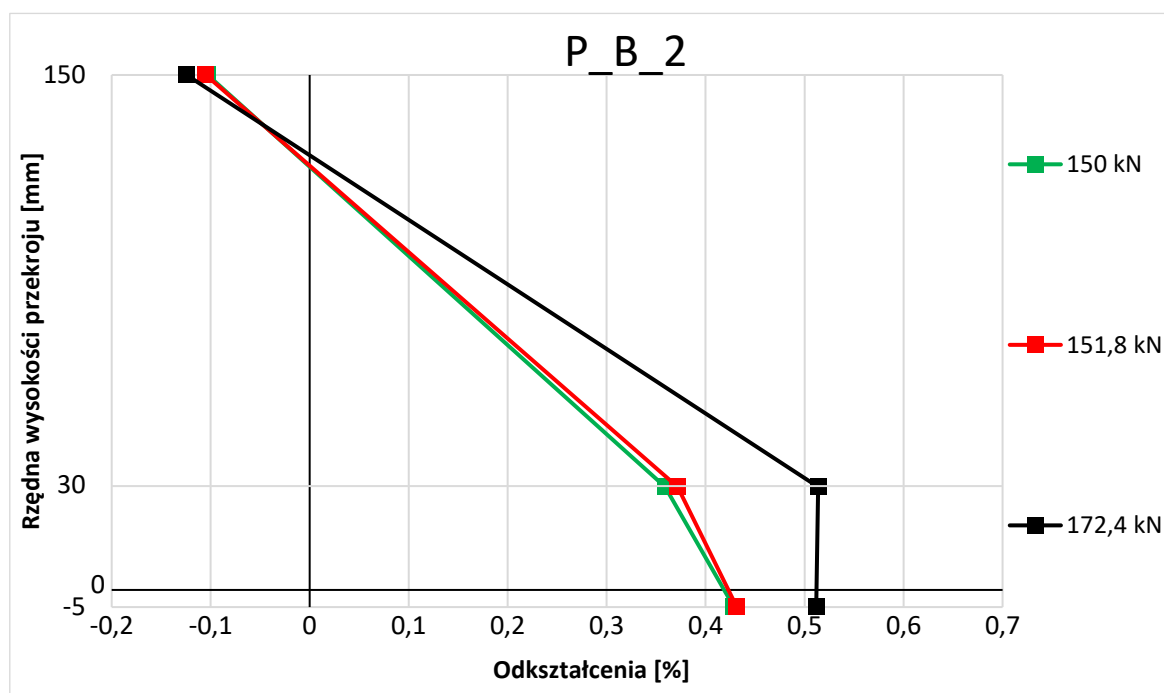
Rys. 181. Wykres rozkładu odkształceń podłużnych na wysokości płyty P_A_1



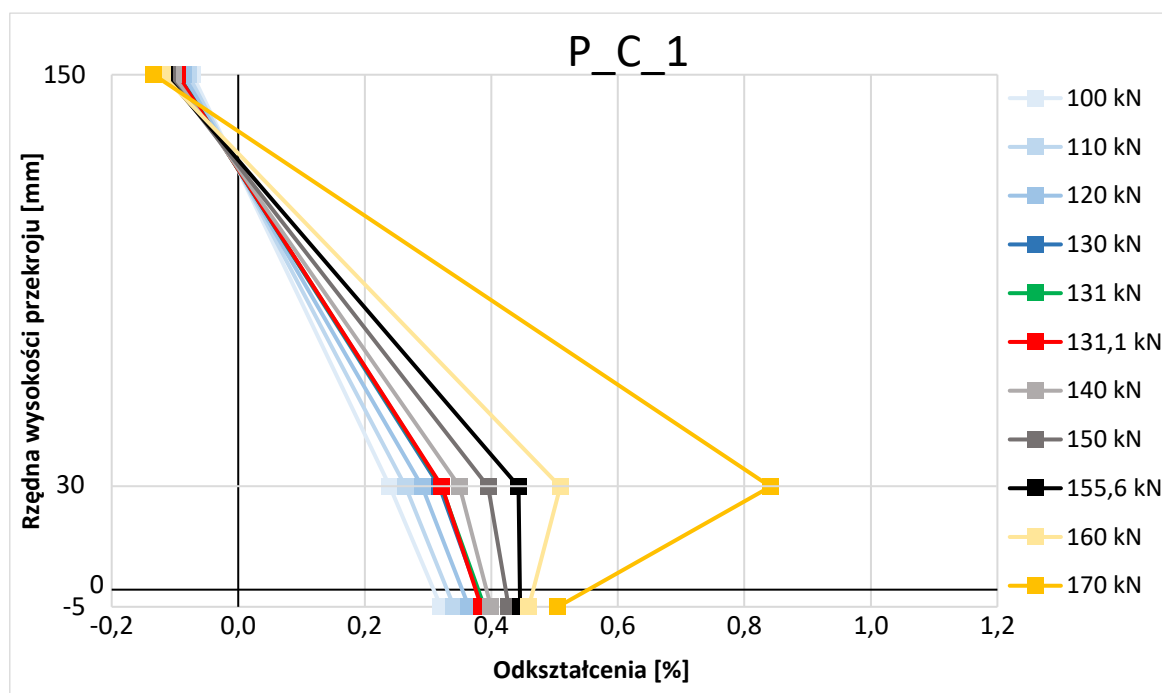
Rys. 182. Charakterystyczne serie rozkładu odkształceń podłużnych na wysokości płyty P_A_1



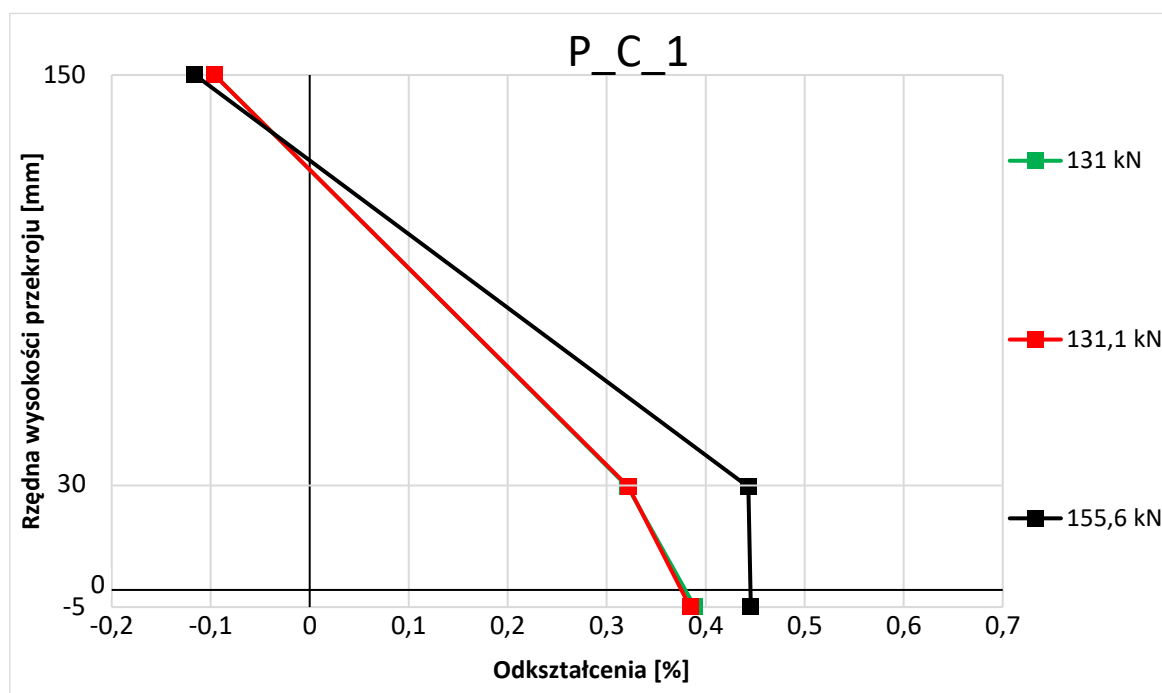
Rys. 183. Wykres rozkładu odkształceń podłużnych na wysokości płyty P_B_2



Rys. 184. Charakterystyczne serie rozkładu odkształceń podłużnych na wysokości płyty P_B_2



Rys. 185. Wykres rozkładu odkształceń podłużnych na wysokości płyty P_C_1



Rys. 186. Charakterystyczne serie rozkładu odkształceń podłużnych na wysokości płyty P_C_1

Opisany moment załamania proporcjonalności rozkładu odkształceń w przekroju związany jest z nieproporcjonalnie dużym przyrostem odkształceń podłużnych zbrojenia w stosunku do odkształceń podłużnych kompozytu. Zmniejszenie przyrostów odkształceń wzmocnienia związane jest ze stopniową utratą jego przyczepności do podłoża betonowego, czyli częściowym odspojeniem kompozytu. W każdym

przeanalizowanym przypadku odkształcenia kompozytu rosną po momencie częściowego odspojenia, jednak już nie tak dynamicznie jak przed pierwszymi oznakami utraty przyczepności kompozytu. Punkt załamania proporcjonalności rozkładu odkształceń, nazywany dalej punktem odspojenia wzmocnienia, wskazuje moment inicjacji zniszczenia wzmocnienia. Dodatkowo wyróżniony punkt zrównania się odkształceń wzmocnienia i zbrojenia wskazuje dynamikę postępowania dalszego odspajania kompozytu FRCM od powierzchni betonu. Istotne wartości związane z odspojeniem kompozytu FRCM od powierzchni przeanalizowanych elementów zestawiono w tabeli 37.

Tabela 37. Kluczowe parametry związane z odspojeniem kompozytu PBO-FRCM od powierzchni przebadanych płyt

| Nazwa elementu | $F_{\text{frcm,det}}$ | $F_{\text{frcm,eq}}$ | F_{ult} | $F_{\text{frcm,det}}/F_{\text{ult}}$ | $F_{\text{frcm,eq}}/F_{\text{ult}}$ |
|----------------|-----------------------|----------------------|------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|
| | [kN] | [kN] | [kN] | [%] | [%] |
| P_A_1 | 155,8 | 160,0 | 210,1 | 74,2 | 76,2 |
| P_B_2 | 151,8 | 172,4 | 229,4 | 66,2 | 75,2 |
| P_C_1 | 131,1 | 155,6 | 202,2 | 64,8 | 77,0 |

Odspojenie wzmocnienia w elemencie bez zakotwienia siatki kompozytu (P_C_1) rozpoczęło się przy obciążeniu 131,1 kN, a w przypadku elementów wzmocnionych z zakotwieniem przy obciążeniu 155,8 kN dla zakotwienia prętowego (P_A_1) i 151,8 kN dla zakotwienia sznurowego (P_B_2), co jest wynikiem odpowiednio 19% i 16% większym, co wskazuje na efektywność tych rozwiązań w opóźnianiu odspojenia wzmocnienia. Przy odniesieniu do względnego poziomu obciążeń (w stosunku do maksymalnej siły przenoszonej przez element) również najbardziej efektywnym typem zakotwienia jest zakotwienie prętowe, ponieważ do odspojenia zachodzi przy poziomie obciążeń równym 74,2% maksymalnej siły niszczącej, podczas gdy w elemencie bez zakotwienia wartość ta wynosi 64,8%, a przy zakotwieniu sznurowym 66,2%. Przy porównaniu tych względnych wartości, zwiększenie efektywności wzmocnienia ze względu na jego odspojenie równe jest 14% w przypadku zastosowania zakotwienia prętowego i jedynie 2% w przypadku zastosowania zakotwienia sznurowego. Dalszy rozwój rozkładu odkształceń jest zróżnicowany, ponieważ faza ta trwa stosunkowo krótko w przypadku elementu z zakotwieniem prętowym (około 4,2 kN różnicy w sile obciążeń, czyli 2% maksymalnego obciążenia), oraz zdecydowanie dłużej w przypadku elementu z zakotwieniem sznurowym (około 20,6 kN różnicy w sile obciążeń, czyli 9% maksymalnego obciążenia) i w elemencie wzmocnionym bez zakotwienia (około 24,5 kN różnicy w sile obciążeń, czyli 12% maksymalnego obciążenia). Wskazuje to, że rozwój odspojenia w przypadku prętowego zakotwienia siatki wzmocnienia jest znacznie skrócony, co powoduje bardziej kruchy charakter zniszczenia w późniejszej fazie niż ma to miejsce w przypadku elementu wzmocnionego bez zakotwienia oraz przy zakotwieniu sznurowym. Dodatkowo należy zwrócić uwagę, że przyrosty odkształceń kompozytu po momencie odspojenia dla elementów wzmocnionych bez zakotwienia siatki kompozytu (P_C_1) oraz ze sznurowym zakotwieniem siatki (P_B_2) są niewielkie i ostatecznie przy poziomie obciążeń 170/180 kN nie

przekraczają one poziomu 0,6%, a w przypadku elementu z prętowym zakotwieniem wzmocnienia rozwijają się one znacznie bardziej – nawet do poziomu około 0,8%. Zwiększony rozwój odkształceń podłużnych wzmocnienia po jego częściowym odspojeniu dodatkowo wskazuje na efektywność działania prętowego (typ A) zakotwienia siatki kompozytu FRCM.

4.7 Podsumowanie badań doświadczalnych

Przeprowadzono serię badań doświadczalnych, w której kompleksowo przeanalizowano pracę siedmiu jednokierunkowo zginanych płyt żelbetowych, wśród których wyróżniono jeden element niewzmocniony porównawczy oraz sześć elementów wzmocnionych jedną warstwą kompozytów PBO-FRCM: po dwa elementy bez zakotwienia siatki kompozytu, z prętowym zakotwieniem siatki kompozytu oraz sznurowym zakotwieniem siatki kompozytu. Przeprowadzone badania jednoznacznie wykazały, że wzmocnienia PBO-FRCM są efektywne w zakresie wzmacniania jednokierunkowo zginanych płyt żelbetowych na zginanie. Niezależnie od obecności lub braku dodatkowego zakotwienia siatki kompozytu zaobserwowano pozytywny wpływ wzmocnienia PBO-FRCM na nośność elementów badawczych, jak ich właściwości związane z użytkowalnością, takie jak ograniczenie ugięć czy szerokości rys. Wskazuje to, że system PBO-FRCM ma potencjał w tego typu zastosowaniach i jego wykorzystanie we wzmacnianiu płytowych elementów żelbetowych na zginanie jest uzasadnione z punktu widzenia mechaniki pracy płyty. Zakres przeprowadzonych badań pozwolił na ilościowe określenie wielu parametrów związanych z pracą elementów wzmocnionych oraz wpływem zakotwienia na efektywność wykorzystania kompozytu PBO-FRCM.

Jedna warstwa wzmocnienia PBO-FRCM pozwoliła na zwiększenie nośności płyt o 18-35% przy czym niezależnie od typu oraz obecności mechanicznego zakotwienia siatki kompozytu wynosił on średnio około 27%. Poza zwiększeniem nośności elementów zaobserwowano również zwiększenie sztywności elementów, szczególnie w ostatniej fazie pracy, po zarysowaniu betonu rozciąganego oraz po uplastycznieniu zbrojenia. Spowodowało to, że do zniszczenia elementów wzmocnionych dochodziło przy znacznie mniejszym (o 25-42%) ugięciu w stosunku do elementu porównawczego, pomimo większej wartości obciążenia niszczącego. Zmniejszenie ciągliwości płyt będące negatywnym efektem wzmacniania konstrukcji żelbetowych materiałami kompozytowymi jest efektem zmniejszającym ich bezpieczeństwo i zdolność do „ostrzegania” użytkowników przed nadchodzącym niebezpieczeństwem, jak np. w słupach wzmacnianych matą FRP. Należy jednak zauważyć, że z punktu widzenia konstrukcji efekty wzmocnienia jest pozytywny, ponieważ osiąga się zmniejszenie ugięć konstrukcji oraz zwiększenie jej nośności. Spośród wszystkich przebadanych elementów najbardziej ciągliwy mechanizm zniszczenia (redukcja całkowitej energii do momentu uzyskania siły niszczącej jedynie o 18%) zaobserwowano w elementach z prętowym zakotwieniem siatki kompozytu, podczas gdy dla elementów wzmocnionych bez zakotwienia i elementów ze wzmocnieniem ze sznurowym zakotwieniem siatki kompozytu zaobserwowano znacznie większy spadek ciągliwości w stosunku do elementu porównawczego (redukcja całkowitej energii zniszczenia odpowiednio o 27 i 46%).

Poza właściwościami związanymi z nośnością elementów oraz ich mechanizmami zniszczenia istotnym aspektem pracy każdego żelbetowego elementu konstrukcyjnego jest nieprzekroczenie warunków stanu granicznego użytkowości, a w szczególności ograniczenia ugięć i zarysowania. Pomimo znacznego zwiększenia sztywności elementów w końcowej fazie obciążania (ograniczenie ugięć w zakresie obciążenia niszczącego), wzmocnienia PBO-FRCM nie wpłynęły znacząco na sztywność elementów przy ugięciach w zakresie najczęściej stosowanego ograniczenia ugięć – $1/250$ rozpiętości (brak ograniczenia ugięć w zakresie obciążenia zbliżonego do typowego obciążenia użytkowego). Należy zatem uznać, że przebadane wzmocnienia PBO-FRCM nie są efektywne we wzmacnianiu konstrukcji ze względu na stan graniczny użytkowości ugięcia. Odmienne obserwacje poczyniono w przypadku zarysowania elementów, w którym zaobserwowano znaczący pozytywny wpływ wzmocnienia PBO-FRCM zarówno na siłę rysującą, jak i ograniczenie zarysowania w późniejszym etapie zwiększania obciążeń. Chwila powstania zarysowania zarejestrowany na wykresie zależności obciążenia od ugięcia w elementach wzmocnionych PBO-FRCM występował przy obciążeniu średnio o 23% większym niż w elemencie bez wzmocnienia. Średnia skuteczność zwiększania obciążenia rysującego wynosiła około 25% dla wzmocnienia bez zakotwienia, 24% dla wzmocnienia z zakotwieniem sznurowym i 20% dla wzmocnienia z zakotwieniem prętowym. Niewielkie różnice pomiędzy poszczególnymi seriami wskazują, że zakotwienie siatki kompozytu nie ma istotnego wpływu na wzrost obciążenia rysującego element wzmocniony kompozytem PBO-FRCM. Podobne wnioski wyciągnięto również z wizualnej oceny rozwoju zarysowania, w którym oceniono przyrosty siły rysującej związanej z obecnością wzmocnienia PBO-FRCM na średnią wartość 59% przy wynikach dla elementów bez zakotwienia, z zakotwieniem sznurowym i zakotwieniem prętowym równych odpowiednio 60%, 62% i 55%. Rozbieżności pomiędzy poszczególnymi wynikami są również niewielkie, co potwierdza, że zakotwienie siatki kompozytu nie ma wpływu na przyrost siły rysującej w żelbetowych elementach płytowych. Dalszy rozwój zarysowania w elementach wzmocnionych kompozytami PBO-FRCM również jest ograniczony w stosunku do elementu niewzmocnionego, ponieważ obciążenia związane z normowymi progami ograniczenia rozwarości rys (0,2 mm; 0,3 mm oraz 0,4 mm) były większe odpowiednio o 20%, 51% i 39%. Podobnie jak przy obciążeniu rysującym nie zaobserwowano zależności, która wskazywałaby jakikolwiek wpływ obecności zakotwienia siatki kompozytu na efektywność ograniczania szerokości rysy. Wnioski te potwierdzone zostały również jakościowymi oraz ilościowymi analizami przeprowadzonymi na podstawie wyników pomiarów światłowodowych na wybranych elementach badawczych z poszczególnych serii. Na podstawie tych analiz ustalono jednoznacznie, że w przeciwieństwie do ugięcia, wzmocnienie jedną warstwą kompozytu PBO-FRCM jest efektywne w zakresie opóźniania chwili zarysowania płyt żelbetowych oraz skutecznie hamuje rozwój zarysowania elementu przy dalszym zwiększaniu obciążeń, przez co wpływa pozytywnie na spełnienie stanu granicznego użytkowości ze względu na szerokość rys w jednokierunkowo zginanych elementach płytowych.

Pozytywny wpływ obecności wzmocnienia PBO-FRCM został zaobserwowany między innymi w zależności obciążenia płyt od odkształcenia głównego zbrojenia rozciąganego, w którym uwidacznia się obniżenie odkształceń zbrojenia w elementach wzmocnionych w stosunku do elementów niewzmocnionych przy

porównywalnych poziomach obciążeń. Analizy wskazały, że przy poziomie odkształceń zbrojenia głównego równym 1%, elementy wzmocnione kompozytami PBO-FRCM przenosiły obciążenia średnio o 18% większe w porównaniu z niewzmocnionym elementem porównawczym, co pokazuje, że część rozciągania przejmowana jest przez wzmocnienie PBO-FRCM, co odciąża główne zbrojenie rozciągane, będące krytycznym elementem w nośności żelbetowych elementów płytowych. Nie zauważono jednak znaczących wpływów obecności i typów zakotwienia na zmianę rozkładu odkształceń zbrojenia rozciąganego. W zakresie odkształceń poprzecznego zbrojenia dolnego zaobserwowano niewielkie różnice w maksymalnych odkształceniach pomiędzy elementami wzmocnionymi kompozytami PBO-FRCM i porównawczym elementem niewzmocnionym. Maksymalne odkształcenia dolnego zbrojenia rozdzielczego elementów wzmocnionych kompozytem PBO-FRCM osiągały wartości o około 15% mniejsze w porównaniu z elementem niewzmocnionym, co świadczyło o włączaniu się do współpracy wzmocnienia na kierunku prostopadłym do głównego kierunku zginania elementu. Podobnie jak w przypadku zbrojenia podłużnego nie zaobserwowano wpływu zakotwienia siatki kompozytu na odkształcenia zbrojenia poprzecznego.

W zakresie odkształceń podłużnych dolnej powierzchni betonu nie zarejestrowano znaczących i mierzalnych efektów wzmocnienia PBO-FRCM, niezależnie od zastosowanego zakotwienia. Spowodowane było to losowością miejsca występowania zarysowania, które wpływało na rozkład odkształceń. Istotne informacje związane z odkształceniami podłużnymi dolnej powierzchni betonu uzyskano na podstawie pomiarów światłowodowych, które wskazały różnice związane z zarysowaniem powierzchni betonu, co opisano wcześniej. Odkształcenia podłużne górnej powierzchni betonu wszystkich przebadanych elementów (wzmocnionych i niewzmocnionych) przebiegały w podobny sposób przez dwie pierwsze fazy rozwoju, jednak znacząco różniły się w trzeciej, ostatniej fazie. Załamanie rozkładu odkształceń podłużnych górnej powierzchni betonu, rozpoczynające trzecią fazę rozwoju, w przypadku elementów wzmocnionych kompozytem PBO-FRCM obserwowano przy obciążeniu średnio 13% większym niż w przypadku niewzmocnionego elementu kontrolnego. Bardziej znaczące różnice widoczne były jednak w kącie nachylenia wykresu zależności obciążenia od odkształceń, który w przypadku elementów wzmocnionych miał średnio 4,7 większy kąt nachylenia w porównaniu z elementem kontrolnym, co podobnie jak w przypadku zbrojenia rozciąganego wskazało, że zastosowane wzmocnienie PBO-FRCM wpłynęło na odciążenie betonu ściskanego, a co za tym idzie zwiększenie nośności elementu. Odkształcenia poprzeczne górnej i dolnej powierzchni betonu w każdym elemencie rozwijały się zgodnie z oczekiwaniami. Obserwowano typowe rozkłady odkształceń niezależnie od zastosowania wzmocnienia. Pomiary światłowodowe odkształceń poprzecznych dolnej powierzchni betonu pozwoliły zaobserwować, że przejście poprzecznych odkształceń ściskających w odkształcenia rozciągające w elementach wzmocnionych kompozytem PBO-FRCM zachodziło przy poziomie obciążeń o 10 kN większym (kolejny krok obciążenia) niż w przypadku elementów bez wzmocnienia. Jedynie element z prętowym zakotwieniem siatki kompozytu utrzymywał poprzeczne odkształcenia ściskające na znaczącej części szerokości przekroju przy dalszych poziomach obciążeń, co wskazuje, że wzmocnienie PBO-FRCM włącza się do współpracy

na kierunku prostopadłym do głównego kierunku zginania, a szczególnie efektywne w tym zakresie są elementy z prętowym zakotwieniem siatki kompozytu. Wśród wszystkich odkształceń betonu (poza opisanym wyżej wyjątkiem zaobserwowanym w pomiarach odkształceń poprzecznych dolnej powierzchni betonu z wykorzystaniem światłowodów), zarówno powierzchni dolnej, jak i górnej oraz odkształceń podłużnych i poprzecznych, nie zaobserwowano znaczącego wpływu zakotwienia siatki kompozytu na rozwój mierzonych parametrów, a ewentualne różnice mieściły się w zakresie błędu pomiarowego i nie zostały uznane za istotne.

Kluczowa, w ocenie efektywności wzmocnienia, była analiza odkształceń siatki kompozytu wzmocnienia PBO-FRCM, ponieważ stopień jej wykorzystania jest najważniejszym wskaźnikiem pozwalającym na ustalenie wpływu obecności i typu zastosowanego zakotwienia. Pomiary tensometryczne wykazały, że największy stopień wykorzystania potencjału siatki PBO w zastosowanym kompozycie FRCM wynoszący 47,4% osiągnięto w elemencie, w którym zastosowano prętowe zakotwienie siatki kompozytu. Mniejsze wartości wykorzystania siatki kompozytu odnotowano dla zakotwienia sznurowego – średnio 31,3% oraz przy braku zastosowania mechanicznego zakotwienia siatki kompozytu – średnio 30,2%. Ze względu na zniszczenie niektórych tensometrów przed końcem badania, zdefiniowano pojęcie wskaźnika wykorzystania siatki, który koryguje te rozbieżności. Na podstawie wskaźnika wykorzystania siatki ustalono, że w elementach wzmocnionych z prętowym zakotwieniem siatki kompozytu potencjalne odkształcenia wynosiły 55% maksymalnych odkształceń przenoszonych przez siatkę PBO, a w elementach z zakotwieniem sznurowym oraz bez zakotwienia wynosiły one średnio odpowiednio: 42% i 43%. Ustalono zatem, że w tym zakresie zakotwienie sznurowe nie jest efektywne (nie zwiększa potencjalnych maksymalnych odkształceń siatki), a zastosowanie prętowego zakotwienia siatki PBO kompozytu FRCM spowodowało 28% wzrost wskaźnika wykorzystania siatki. Analogiczne pomiary wykonane za pomocą czujników światłowodowych pozwoliły na zarejestrowanie lokalnych ekstremów odkształceń. Po przeprowadzeniu analiz związanych ze wskaźnikiem wykorzystania siatki wykazano, że potencjalne maksymalne lokalne odkształcenia siatki wzmocnienia PBO-FRCM dla elementu bez zakotwienia wynosiły 98%, kiedy w elemencie z zakotwieniem sznurowym wynosiły one 107%, a z zakotwieniem prętowym 128% (wartości powyżej 100% są spowodowane przez lokalny charakter odkształceń oraz liniową ekstrapolację wyników). Wyniki te wskazują, że zakotwienie sznurowe zwiększają efektywność wykorzystania siatki o 9% w stosunku do elementu wzmocnionego bez zakotwienia, a w przypadku elementów z zakotwieniem prętowym poprawa efektywności wynosi aż 31%. Odkształcenia poprzeczne wzmocnienia PBO-FRCM, podobnie jak odkształcenia poprzeczne dolnej powierzchni betonu nie dają jednoznacznych informacji, a ich wartości są mocno zróżnicowane po przekroczeniu obciążenia rysującego ze względu na losowy charakter zjawiska zarysowania, które ma istotny wpływ na rozwój odkształceń poprzecznych. W światłowodowych pomiarach odkształceń poprzecznych wzmocnień PBO-FRCM zauważalne były jednak znacznie większe wartości sił poprzecznie rozciągających wzmocnienie kompozytowe w elementach, w których zastosowano zakotwienie siatki kompozytu. Wnioski te mają charakter jakościowy, a nie ilościowy, jednak potwierdzają one uprzednio wskazane prawidłowości o zwiększaniu potencjału

wzmocnieniowego kompozytów PBO-FRCM poprzez mechaniczne zakotwienie ich siatki. Należy również zauważyć, że na kierunku poprzecznym w zastosowanej siatce PBO było około czterokrotnie mniej włókien niż na głównym kierunku zginania. Mogło to dodatkowo wpłynąć na znaczne zmniejszenie widoczności wpływu wzmocnienia PBO-FRCM na kierunku poprzecznym do głównego kierunku zginania płyty.

Ważne wnioski wyciągnięto również z połączonych analiz odkształceń betonu ściskanego, zbrojenia rozciąganego i wzmocnienia kompozytowego w środkowym przekroju elementów badawczych. Szczególnie istotnym momentem, który determinuje zniszczenie wzmocnienia, jest początek jego odspojenia od powierzchni betonu, po którym odkształcenia nie przyrastają tak dynamicznie, jak odkształca się wzmacniany element. Pierwsze objawy odspojenia w elemencie bez zakotwienia obserwowano przy obciążeniu na poziomie 131,1 kN, kiedy w elementach z zakotwieniem siatki kompozytu odspojenie obserwowano dopiero przy obciążeniu 151,8 kN i 155,8 kN odpowiednio dla zakotwienia sznurowego i prętowego. Wskazuje to, że zwiększenie odporności kompozytu PBO-FRCM na odspojenie jest zwiększone o 16% dzięki zastosowaniu zakotwienia sznurowego i aż o 19% dzięki zastosowaniu zakotwienia prętowego. Dodatkowo na podstawie rozkładu odkształceń zauważono, że przy dalszym obciążaniu płyty, nawet po odspojeniu, największe odkształcenia przyjmują elementy z prętowym zakotwieniem siatki kompozytu, co wskazuje, że dzięki zakotwieniu prętowemu nawet po częściowym odspojeniu wzmocnienia jest ono w stanie dalej przenosić coraz większe obciążenia, co może być spowodowane występowaniem efektu ciągnowego w kompozycie z odpowiednio zakotwionymi końcami siatki.

Przeprowadzone analizy potwierdziły efektywność kompozytów PBO-FRCM we wzmacnianiu jednokierunkowo zginanych płyt żelbetowych wskazując, że w przypadku analizowanych elementów stopień wzmocnienia jedną warstwą kompozytu może zawierać się pomiędzy 18% a 35% przy jednoczesnej redukcji ugięć elementu oraz szerokości rys przed momentem zniszczenia. Wprowadzenie mechanicznego zakotwienia siatki kompozytu zmienia mechanizm działania wzmocnienia PBO-FRCM sprawiając, że jego zniszczenie jest bardziej powtarzalne, a w przypadku zastosowania prętowego zakotwienia siatki kompozytu (które uznano za najlepsze z analizowanych rozwiązań) można zwiększyć efektywność jego wykorzystania nawet o około 30%. Płyta jest elementem z dużą powierzchnią wzmacnianą (w porównaniu do np. belek) przez co mechaniczne zakotwienie końców siatki ma ograniczony wpływ na nośność elementu przez dużą powierzchnię adhezyjnego przytwierdzenia kompozytu do siatki. Mechaniczne zakotwienie końca wzmocnienia redukuje negatywny wpływ „efektu końca”, który ze względu na dużą powierzchnię wzmocnienia płyt nie jest tak istotny. Prowadzi to do ograniczonej efektywności zakotwienia w elementach płytowych, ponieważ główny mechanizm, któremu przeciwdziała zakotwienie nie jest tak istotny ze względu na nośność, jak w innych typach elementów (np. przy wzmocnieniu belek na ścinanie, czy elementów ściskanych). W zakresie odkształceń poprzecznych elementu nie zaobserwowano znaczących różnic pomiędzy elementami wzmocnionymi i niewzmocnionymi, co mogło być spowodowane sposobem zaprojektowania stanowiska badawczego. Elementy trawersy oraz walce stalowe przekazujące siłę na element miały znaczącą sztywność, która mogła wpłynąć na odkształcenia płyty w kierunku

poprzecznym, przez co uzyskane wyniki są zafalszowane i wnioski wyciągnięte na ich podstawie nie mogą być wiążące. Sztywność elementów wykorzystanych do przykładania siły do płyty spowodowała, że znaczenie wzmocnienia na kierunku poprzecznym było pomijalnie małe. Dodatkowo poprzeczne wiązki włókien są rozciągane w kierunku głównego rozciągania elementu (poprzecznie do tych wiązek), co powoduje występowanie w nich złożonego stanu naprężeń, co wprowadza dodatkową trudność w analizie. W celu uzyskania wiarygodnych wyników w tym zakresie należałoby zaprojektować nowe badania, które skupiałyby się wyłącznie na tym zagadnieniu i wykorzystywałyby inny, lepszy rozkład czujników. Dodatkową istotną zmianą w takich badaniach powinna być zmiana sposobu przykładania obciążenia na taką, która nie będzie wprowadzała dodatkowej sztywności poprzecznej do elementu (np. poprzez obciążanie wiotkimi workami z piaskiem lub poprzez inny równoważny typ obciążenia).

5. Analizy teoretyczne

Przeprowadzone badania doświadczalne wskazują złożoność zagadnienia wzmacniania jednokierunkowo zginanych płyt żelbetowych kompozytami FRCM. Mechanizmy zniszczenia występujące w rzeczywistości różnią się od wyidealizowanych modeli, przez co szacowanie nośności tego typu wzmocnionych elementów jest skomplikowanym zagadnieniem. W niniejszym rozdziale podjęto próbę analizy istniejących metod szacowania nośności zginanych płyt żelbetowych wzmocnionych kompozytem FRCM oraz zaproponowania ich modyfikacji, w celu osiągnięcia lepszej zbieżności z wynikami badań doświadczalnych. W analizach skupiono się jedynie na doraźnej nośności elementu na zginanie, bez uwzględniania długotrwałości działania obciążenia, ograniczania odkształceń w stanie granicznym użyteczności oraz zniszczenia zmęczeniowego elementów, ponieważ zagadnienia te nie są przedmiotem niniejszej pracy.

5.1 Analityczny model obliczeniowy

Podstawowym analitycznym modelem obliczeniowym wykorzystywanym przy szacowaniu nośności zginanych elementów żelbetowych jest model zaproponowany w normie ACI 549.4R-13 [89], w którym nośność zginanego elementu żelbetowego wzmocnionego kompozytem FRCM obliczana jest wzorem (4). Wskazuje on, że całkowita nośność elementu wzmocnionego na zginanie (M_n) jest sumą składowych nośności na zginanie pochodzących od zbrojenia stalowego (M_s) oraz wzmocnienia FRCM (M_f).

$$M_n = M_s + M_f \quad (4)$$

Naprężenia we wzmocnieniu FRCM (f_{fe}) należy szacować na podstawie jego rzeczywistych odkształceń (ε_{fe}) oraz wartości modułu Younga kompozytu w stanie zarysowanym (E_f) według wzoru (5), jednak zaleca się odgórne ograniczenie odkształceń kompozytu do poziomu 1,2%, niezależnie od zastosowanego materiału wzmocnienia.

$$f_{fe} = E_f \varepsilon_{fe} \quad (5)$$

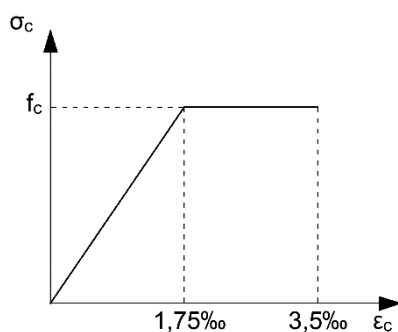
Dodatkowo zgodnie z zaleceniami [89] przyjmuje się, że stopień wzmocnienia elementu odniesiony do pierwotnej nośności elementu bez wzmocnienia nie powinien przekraczać 50%. Zalecenia ACI 549.4R-13 [89] pod względem określania nośności elementów żelbetowych odnoszą się do innych wytycznych ACI, które nie są w pełni kompatybilne ze stosowanymi obecnie w Polsce wytycznymi Eurokodu 2 [91]. Ze względu na brak konieczności stosowania współczynników obliczeniowych, w niniejszych analizach nośności, zdecydowano się na zaaplikowanie wyżej opisanych wytycznych związanych z kompozytami FRCM do modelu obliczeniowego dla konstrukcji żelbetowych według Eurokodu 2 [91]. W badaniach doświadczalnych ustalono stosunkowo niewielki wpływ zakotwienia na nośność wzmocnionych elementów oraz duży rozrzut wyników w poszczególnych seriach, dlatego zdecydowano się na pominięcie tego zagadnienia i przeanalizowanie wszystkich elementów wzmocnionych jako jedną grupę o uśrednionych

właściwościach. Przy obliczeniach nośności wyznaczano moment zginający powodujący zniszczenie elementu, a następnie przeliczano go na wartość obciążenia.

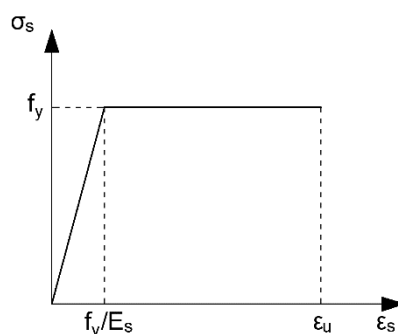
5.1.1 Nośność niewzmocnionego elementu żelbetowego

Przy wyznaczaniu nośności niewzmocnionego elementu zginanego posłużono się wytycznymi Eurokodu 2 [89]. Przy obliczeniach wykorzystano następujące założenia:

- rozkład odkształceń w przekroju zginanym jest liniowy,
- zależność naprężenie-odkształcenie dla betonu jest bilinearna (rys. 187),
- swoją wytrzymałość na ściskanie beton osiąga przy odkształceniu 1,75‰ (rys. 187),
- beton ulega zniszczeniu po osiągnięciu odkształcenia na poziomie 3,5‰ (rys. 187),
- zależność naprężenie-odkształcenie dla stali zbrojeniowej jest bilinearna (bez wzmocnienia) (rys. 188),
- zbrojenie stalowe osiąga granicę plastyczności przy odkształceniu na poziomie zgodnym z wyznaczonym w badaniach materiałowych dla poszczególnych prętów zbrojeniowych,
- zbrojenie stalowe ulega zniszczeniu przy odkształceniu na poziomie zgodnym z wyznaczonym w badaniach materiałowych dla poszczególnych prętów zbrojeniowych,
- wszelkie wartości parametrów wytrzymałościowych dla stali i betonu zostały przyjęte jako średnie wartości wyznaczone w badaniach materiałowych.

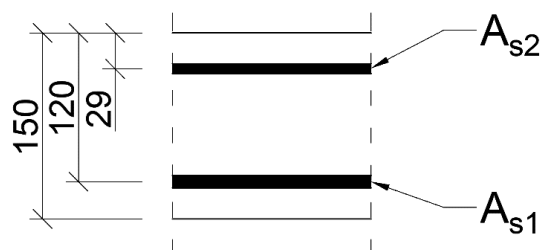


Rys. 187. Wykres zależności naprężenie-odkształcenie betonu przyjęty obliczeniach



Rys. 188. Wykres zależności naprężenie-odkształcenie przyjęty obliczeniach dla stali zbrojeniowej

Wyznaczanie nośności elementu niewzmocnionego przeprowadzono na podstawie analiz odkształceń przekroju oraz ustalenia równowagi sił w nim występujących. Decydującym kryterium zniszczenia było osiągnięcie granicznych odkształceń betonu w strefie ściskanej. Geometria przekroju przyjęta do analiz była zgodna z projektem elementu badawczego, co przedstawiono na rysunku 189. Najważniejsze parametry wykorzystane w obliczeniach, wraz z opisem wartości przedstawiono w tabeli 38.



Rys. 189. Geometria przekroju elementu niewzmocnionego przyjęta do analiz (widok od boku)

Tabela 38. Kluczowe parametry przyjęte przy obliczeniach nośności przekroju niewzmocnionego

| Właściwość | Symbol | Wartość |
|---|------------|-----------------------|
| Wysokość elementu | h | 150 mm |
| Szerokość elementu | b | 1000 mm |
| Pole przekroju zbrojenia dolnego | A_{s1} | 628,3 mm ² |
| Pole przekroju zbrojenia górnego | A_{s2} | 402,1 mm ² |
| Wytrzymałość betonu na ściskanie | f_c | 41,49 MPa |
| Moduł Younga betonu | E_c | 35,2 MPa |
| Granica plastyczności stali zbrojenia dolnego | $f_{y,s1}$ | 543 MPa |
| Granica plastyczności stali zbrojenia górnego | $f_{y,s2}$ | 553 MPa |
| Moduł Younga stali zbrojenia dolnego | $E_{s,s1}$ | 187 GPa |
| Moduł Younga stali zbrojenia górnego | $E_{s,s2}$ | 197 GPa |

Na podstawie równania równowagi sił w przekroju (6) ustalono wysokość strefy ściskanej. Jako siłę w elemencie składowym równania rozumie się iloczyn jego pola powierzchni i naprężeń w nim występujących (7).

$$\sum_{i=1}^n F_{x,i} = 0, \quad (6)$$

gdzie,

$F_{x,i}$ – siła podłużna w i -tym elemencie przekroju.

$$F_{x,i} = \sigma_{x,i} \cdot A_i, \quad (7)$$

gdzie,

$\sigma_{x,i}$ – naprężenia podłużne w i-tym elemencie przekroju,

A_i – pole przekroju i-tego elementu.

Naprężenia w poszczególnych elementach składowych przekroju wyznaczane były na podstawie ich odkształceń oraz modułu Younga (8). Zależności pomiędzy wartościami odkształceń dla poszczególnych odkształceń elementów wyznaczano proporcjonalnie do miejsca ich występowania na wysokości przekroju.

$$\sigma_{x,i} = \varepsilon_{x,i} \cdot E_i \leq f_{x,i}, \quad (8)$$

gdzie,

$\varepsilon_{x,i}$ – odkształcenia podłużne w i-tym elemencie przekroju,

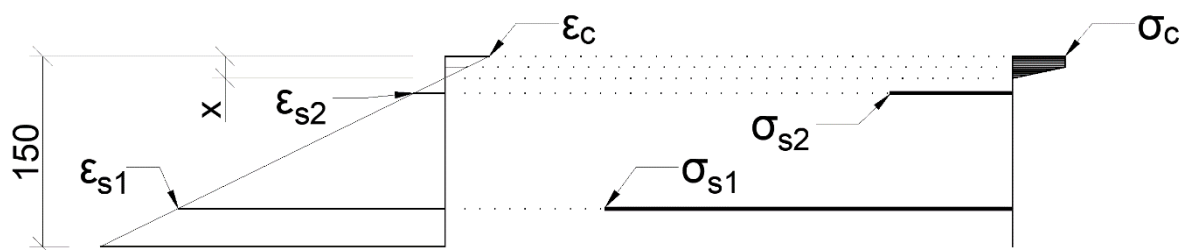
E_i – moduł Younga i-tego elementu przekroju,

$f_{x,i}$ – maksymalna wartość i-tego parametru wytrzymałościowego (np. wytrzymałość betonu na ściskanie, granica plastyczności stali).

Na podstawie równania równowagi sił w przekroju (6) ustalono, że wysokość strefy ściskanej (x) w momencie zniszczenia wynosi:

$$x = 17,13 \text{ mm.}$$

Ustalona na podstawie równania równowagi sił wysokość strefy ściskanej przyczyniła się do powstania układu odkształceń oraz naprężeń zaprezentowanego na rysunku 190. Obliczone kluczowe parametry związane z odkształceniami i naprężeniami zestawiono w tabeli 39.



Rys. 190. Rozkład odkształceń i naprężeń wyznaczony dla analizowanego przekroju niewzmocnionego

Tabela 39. Kluczowe parametry ustalone na podstawie równania równowagi sił w przekroju w elemencie niewzmocnionym

| Właściwość | Symbol | Wartość |
|---------------------------------|-----------------|------------|
| Wysokość strefy ściskanej | x | 17,13 mm |
| Maksymalne odkształcenia betonu | ϵ_c | 3,5‰ |
| Odkształcenia zbrojenia dolnego | ϵ_{s1} | 2,10‰ |
| Odkształcenia zbrojenia górnego | ϵ_{s2} | 0,24‰ |
| Naprężenia maksymalne w betonie | σ_c | 41,49 MPa |
| Naprężenia zbrojenia dolnego | σ_{s1} | 543 MPa |
| Naprężenia zbrojenia górnego | σ_{s2} | 477,48 MPa |

Kolejnym krokiem ustalania nośności elementu niewzmocnionego było ustalenie nośności na zginanie przekroju, na podstawie równania równowagi momentów względem górnej powierzchni płyty (9).

$$M_R = \sum_{i=1}^n F_{x,i} \cdot a_i, \quad (9)$$

gdzie,

M_R – nośność elementu na zginanie,

a_i – odległość środka ciężkości i-tego elementu przekroju od górnej powierzchni elementu.

Na podstawie obliczeń ustalono, że nośność przekroju na zginanie wynosi:

$$M_R = 42,96 \text{ kNm}.$$

Wyznaczona wartość przeliczona została na obciążenie korespondujące z wykorzystanym w badaniach schemacie statycznym (10).

$$F_{ult,an} = \frac{M_R \cdot 2}{0,566 \text{ m}}, \quad (10)$$

Ostatecznie na podstawie modelu analitycznego wyznaczono wartość obciążenia powodującego zniszczenie elementu na poziomie:

$$F_{ult,an} = 151,8 \text{ kN}.$$

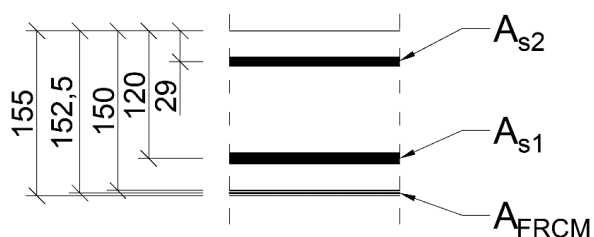
5.1.2 Nośność wzmocnionego elementu żelbetowego

Przy wyznaczaniu nośności elementu wzmocnionego przyjęto identyczne założenia, jak opisane wyżej, które uzupełniono następującymi założeniami związanymi z obecnością wzmocnienia FRCM:

- wzmocnienie zachowuje idealną współpracę z elementem aż do osiągnięcia odkształceń granicznych,
- graniczne odkształcenia kompozytu wynoszą 1,2‰ (zgodnie z zaleceniem [89]),
- zależność naprężenie-odkształcenie kompozytu jest bilinearna (rys. 14), jednak naprężenia w nim szacowane są jedynie na podstawie parametrów kompozytu w stanie zarysowanym (wzór 5),
- moduł Younga wzmocnienia PBO-FRCM w fazie zarysowanej wynosi 128 GPa (wg [5, 101]).

Przy obliczeniach rozpatrzono dwa podstawowe mechanizmy zniszczenia (przekroczenie odkształceń granicznych betonu i przekroczenie granicznych odkształceń kompozytu), a następnie ustalono nośność elementu wzmocnionego jako niższą z dwóch. Decydującym ograniczeniem przy rozpatrywanym elemencie wzmocnionym było przekroczenie odkształceń granicznych kompozytu.

Wyznaczenie nośności elementu wzmocnionego, podobnie jak w przypadku elementu niewzmocnionego, przeprowadzono na podstawie analiz odkształceń przekroju oraz ustalenia równowagi sił w nim występujących. Geometria przekroju przyjęta do analiz była zgodna z projektem elementu badawczego, co przedstawiono na rysunku 191. Najważniejsze parametry wykorzystane w obliczeniach, wraz z opisem wartości przedstawiono w tabeli 38, a parametry związane ze wzmocnieniem FRCM uzupełniono w tabeli 40.

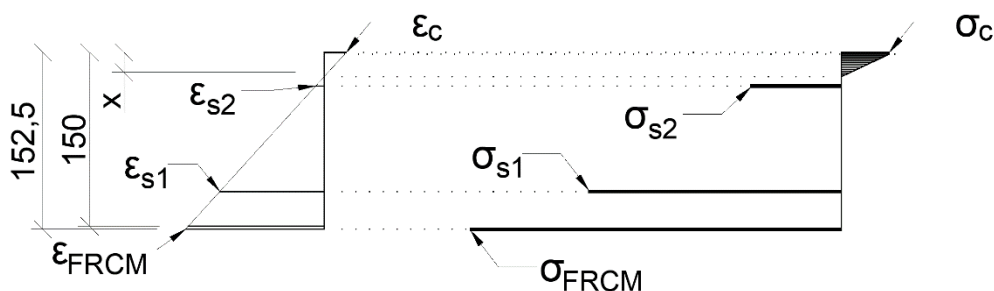


Rys. 191. Geometria przekroju elementu wzmocnionego przyjęta do analiz (widok od boku)

Tabela 40. Kluczowe parametry przyjęte przy obliczeniach nośności przekroju wzmocnionego

| Właściwość | Symbol | Wartość |
|---------------------------------------|---------------------------|---------------------|
| Grubość warstwy kompozytu | h_{FRCM} | 5 mm |
| Moduł Younga kompozytu | E_{FRCM} | 128 GPa |
| Obliczeniowa pole przekroju kompozytu | A_{FRCM} | 45 mm ² |
| Graniczne odkształcenia kompozytu | ε_{fe} | 1,2/1,63/1,65/1,76‰ |

Obliczenia przeprowadzono analogicznie do obliczeń nośności elementu niewzmocnionego. Ustalono równowagę sił w przekroju, na podstawie której wyznaczono wysokość strefy ściskanej (6 i 7). Obliczona wysokość strefy ściskanej przyczyniła się do powstania układu odkształceń oraz naprężeń zaprezentowanego na rysunku 192. W tabeli 41 zestawiono kluczowe parametry związane z odkształceniami i naprężeniami w przekroju.



Rys. 192. Rozkład odkształceń i naprężeń wyznaczony dla analizowanego przekroju niewzmocnionego z graniczną wartością odkształceń kompozytu równą 1,2‰

Tabela 41. Kluczowe parametry ustalone na podstawie równania równowagi sił w przekroju w elemencie wzmocnionym

| Właściwość | Symbol | Wartość dla $\epsilon_{fe}=1,20\%$ |
|---------------------------------|-------------------|------------------------------------|
| Wysokość strefy ściskanej | x | 20,90 mm |
| Maksymalne odkształcenia betonu | ϵ_c | 1,91‰ |
| Odkształcenia zbrojenia dolnego | ϵ_{s1} | 0,90‰ |
| Odkształcenia zbrojenia górnego | ϵ_{s2} | 0,07‰ |
| Odkształcenia kompozytu | ϵ_{FRCM} | 1,20‰ |
| Naprężenia maksymalne w betonie | σ_c | 41,49 MPa |
| Naprężenia zbrojenia dolnego | σ_{s1} | 543 MPa |
| Naprężenia zbrojenia górnego | σ_{s2} | 145,57 MPa |
| Naprężenia w kompozycie | σ_{FRCM} | 1536 MPa |

Nośność elementów ustalono na podstawie równania równowagi momentów względem górnej powierzchni betonu elementu (9), a wyniki obliczeń były następujące:

$$M_R = 49,89 \text{ kNm.}$$

Na podstawie obliczeń analitycznych wyznaczono obciążenie powodujące zniszczenie elementu (10), które przyjmowało wartość:

$$F_{ult,an} = 176,3 \text{ kN.}$$

5.2 Numeryczny model obliczeniowy

Drugą metodą szacowania nośności elementów wzmocnionych, zastosowaną w analizach, są obliczenia z wykorzystaniem metody elementów skończonych. W tym celu stworzono model o geometrii i parametrach materiałowych odpowiadających wykorzystanym elementom badawczym oraz stanowisku badawczemu. Podobnie jak w przypadku obliczeń analitycznych, w obliczeniach numerycznych pominięto element zakotwienia siatki kompozytu FRCM (element zamodelowano jako element wzmocniony bez zakotwienia). W ramach analizy wyznaczono zależność siły obciążającej od ugięcia elementu oraz kluczowe, z punktu widzenia oceny efektywności wzmocnienia, zależności odkształcenia zbrojenia oraz odkształcenia kompozytu od obciążenia (tylko w elemencie wzmocnionym). Odczyty odkształceń zostały wykonane w miejscu największych odkształceń zbrojenia, w jego osi podłużnej. Analizy przeprowadzono w programie Abaqus w analizie typu Explicit, w kroku obliczeniowym Dynamic, Explicit. W obliczeniach uwzględniono nieliniowość materiałową oraz geometryczną zadania. Model płyty zbudowano z następujących elementów:

- element bryłowy (Solid) – modelowanie płyty betonowej,
- elementy prętowe (Wire) – modelowanie prętów zbrojeniowych,
- element powłokowy (Shell) – modelowanie wzmocnienia kompozytowego.

Betonowe części płyty zamodelowano z wykorzystaniem modelu betonu plastycznego ze zniszczeniem (CDP – Concrete Damaged Plasticity). Przyjęto identyczny z obliczeniami analitycznymi bilinearny model zależności naprężenia od odkształcenia (rysunek 187), w którym zastosowano również takie same parametry, jak w obliczeniach analitycznych. Wartość współczynnika Poissona dla sprężystej pracy betonu przyjęto jako równą 0,2. Dla stali zbrojeniowej przyjęto model materiału sprężysto-plastycznego o wartościach modułu Younga oraz granicy plastyczności zgodnej z przeprowadzonymi badaniami materiałowymi. Dla wszystkich elementów stalowych przyjęto wartość współczynnika Poissona równą 0,3. Materiał kompozytu przyjęto jako liniowo-sprężysty materiał ortotropowy (Lamina), w którym przyjęto parametry zgodne z wytycznymi producenta [101]. Ze względu na różną grubość obliczeniową siatki kompozytu w dwóch kierunkach, zredukowano wartość modułu Younga na kierunku prostopadłym do głównego kierunku zginania ze 128 GPa na 34,5 GPa (zmniejszenie grubości obliczeniowej z 0,045 mm na 0,012 mm).

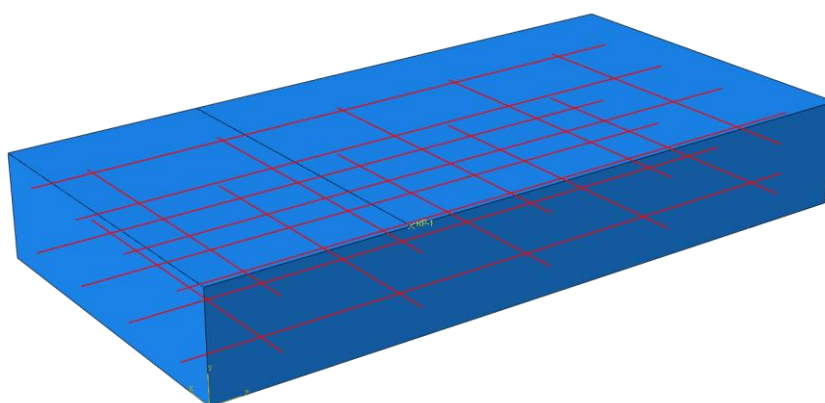
W zadaniu wykorzystano symetrię zadania, przez co zamodelowano $\frac{1}{4}$ płyty żelbetowej (symetria względem osi podłużnej płyty i względem osi poprzecznej w środku rozpiętości elementu). Poszczególne elementy składowe połączono ze sobą za pomocą następujących wiązań:

- połączenie prętów zbrojeniowych z płytą betonową – wiązanie typu Embedded region,
- połączenie wzmocnienia kompozytowego z płytą betonową – kontakt typu General contact (Explicit) (All with self). Globalne właściwości kontaktu przyjęto jako Normal Behavior typu „Hard” Contact. Indywidualnie, dla powierzchni kontaktowych płyty betonowej oraz kompozytu, przypisano zachowanie Normal Behavior („Hard” Contact) wraz z uwzględnieniem Cohesive

Behavior. Spód płyty betonowej przyjęto jako powierzchnię typu MASTER (rzadsze siatkowanie), z kolei dla powierzchni kompozytu, na styku beton-kompozyt, przyjęto typ SLAVE (gęstsze siatkowanie). Dla Cohesive Behavior przypisano następujące sztywności:

- Sztywność w kierunku normalnym do powierzchni - $K_{nn} = 5000 \text{ MPa/mm}$,
- Sztywności na kierunkach stycznym do powierzchni - $K_{ss} = 431 \text{ MPa/mm}$ oraz $K_{tt} = 431 \text{ MPa/mm}$.

Na rysunku 193 przedstawiono widok modelu płyty wraz ze zbrojeniem (1/4 całej płyty).



Rys. 193. Widok aksonometryczny modelu wykorzystanego w analizach

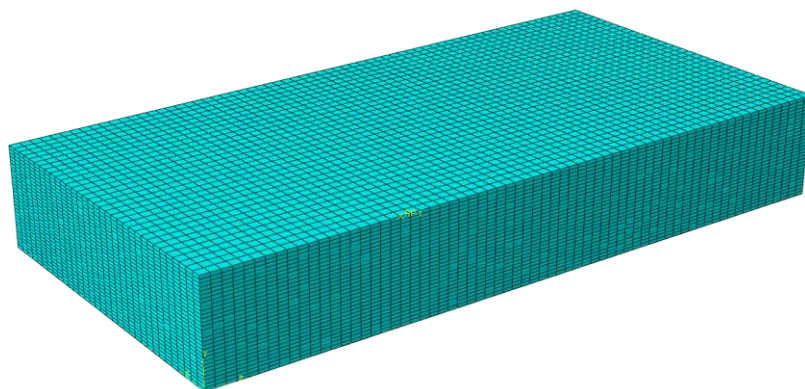
Dla poszczególnych elementów składowych zastosowano następujące typy elementów skończonych:

- płyta betonowa – elementy C3D8R,
- pręty zbrojeniowe – elementy T3D2,
- wzmocnienie kompozytowe – elementy S4R.

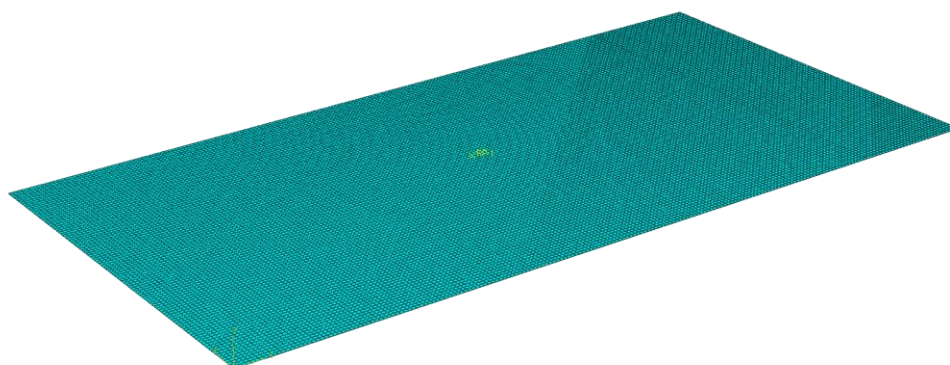
W analizowanym elemencie przyjęto siatkowanie zdefiniowane przez wielkość oczka siatki, które przyjęto na poziomie:

- dla płyty betonowej w poziomie – 15 mm,
- dla płyty betonowej w pionie – 5 mm,
- dla zbrojenia – 10 mm,
- dla wzmocnienia kompozytowego – 5 mm.

Siatkowanie modelu płyty żelbetowej oraz wzmocnienia kompozytowego przedstawiono na rysunkach 194 i 195.



Rys. 194. Widok aksonometryczny elementu płytowego z siatkowaniem

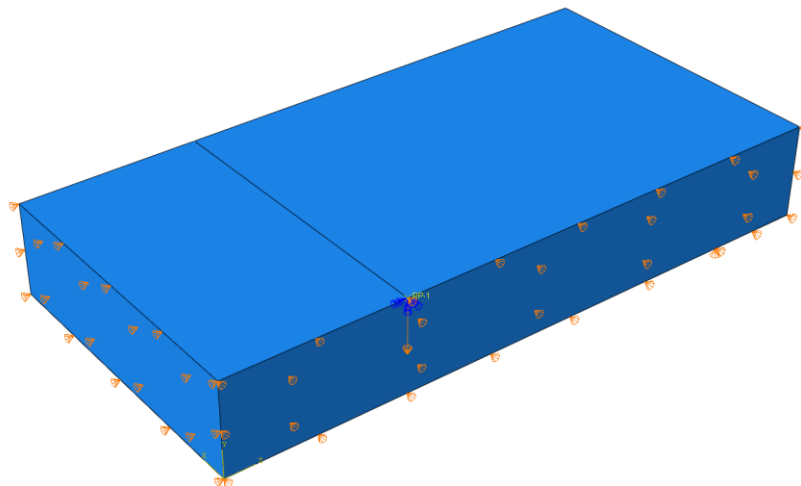


Rys. 195. Widok aksonometryczny wzmocnienia kompozytowego z siatkowaniem

W zadaniu obliczeniowym przyjęto następujące warunki brzegowe:

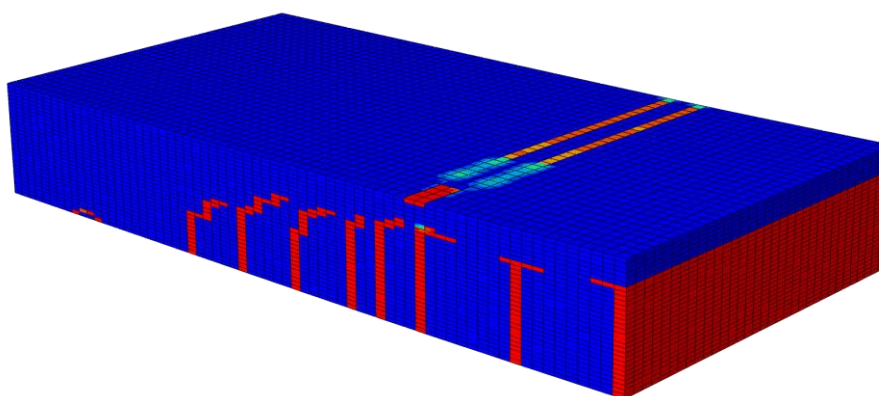
- w miejscu podparcia płyty przyjęto liniową blokadę translacji w pionie,
- symetrię zadania uwzględniono poprzez wprowadzenie blokad translacji na kierunkach normalnych do powierzchni pokrywających się z płaszczyznami symetrii,
- obciążenie do elementu przyłożono poprzez wymuszone przemieszczenie punktu referencyjnego, którego stopień swobody związany z translacją na kierunku pionowym, został powiązany z przemieszczeniami pionowymi na linii, wzdłuż której w badaniach przykładano obciążenie. Połączenie to zrealizowano za pomocą wiązania typu Coupling.

Zastosowane warunki brzegowe miały na celu wytworzenie odpowiedniej konfiguracji dla symetrii zadania oraz podparcia i obciążenia elementów. Element z nałożonymi warunkami brzegowymi przedstawiono na rysunku 196.



Rys. 196. Widok aksonometryczny elementu z warunkami brzegowymi

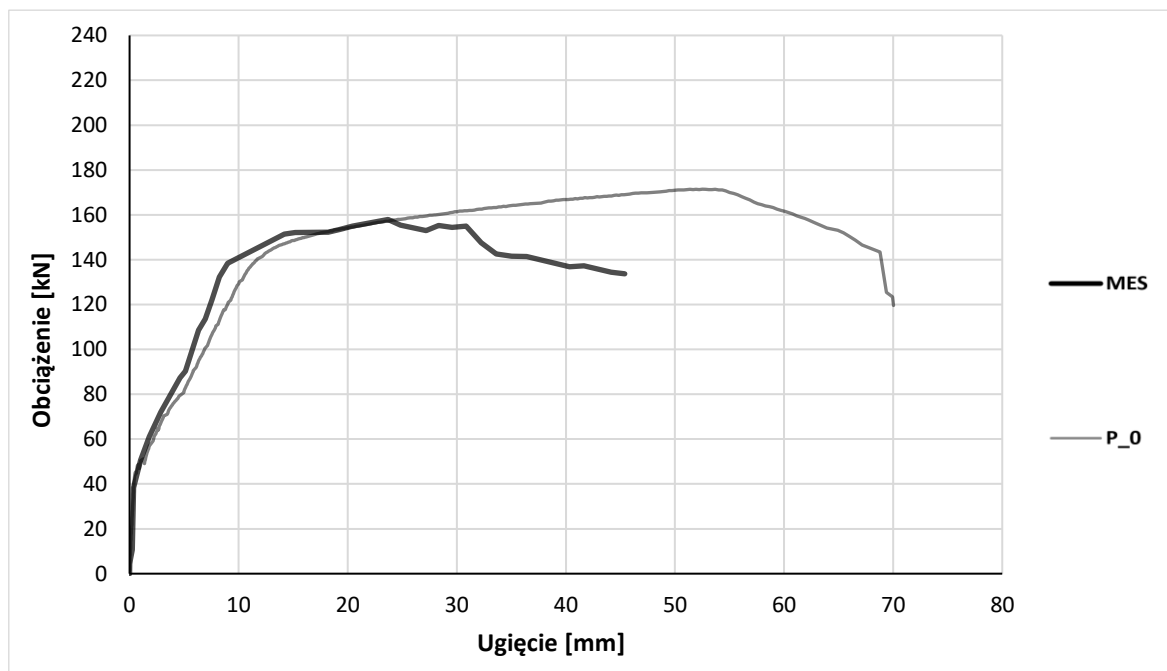
Przy potwierdzaniu poprawności wyników obliczeń numerycznych przeprowadzono jakościową ocenę zgodności z wynikami badań doświadczalnych, w zakresie której nie zaobserwowano znaczących różnic. Przykładowy wynik obliczeń związany z rozkładem zarysowania w elemencie niewzmocnionym przedstawiono na rysunku 197 (czerwone elementy skończone wskazują miejsce oraz zasięg zarysowania elementu).



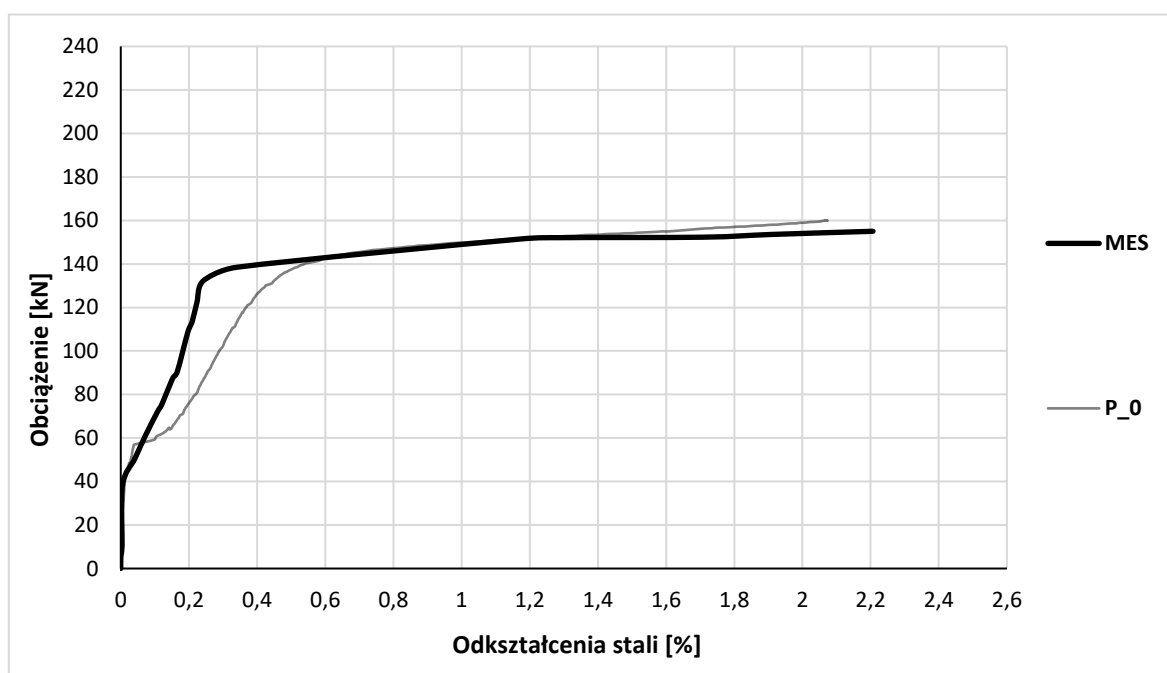
Rys. 197. Widok aksonometryczny elementu z rozkładem zarysowania

5.2.1 Nośność i odkształcalność niewzmocnionego elementu żelbetowego

W przeprowadzonych obliczeniach dla elementu niewzmocnionego wyznaczono zależność obciążenia od ugięcia, którą w formie wykresu zaprezentowano na rysunku 198. Zależność odkształceń głównego zbrojenia dolnego od obciążenia przedstawiono na rysunku 199. W celach porównawczych na obu wykresach przedstawiono także odpowiadające zależności uzyskane w badaniach doświadczalnych.



Rys. 198. Wykres zależności obciążenia od ugięcia elementu niewzmocnionego uzyskany w obliczeniach numerycznych i w badaniach



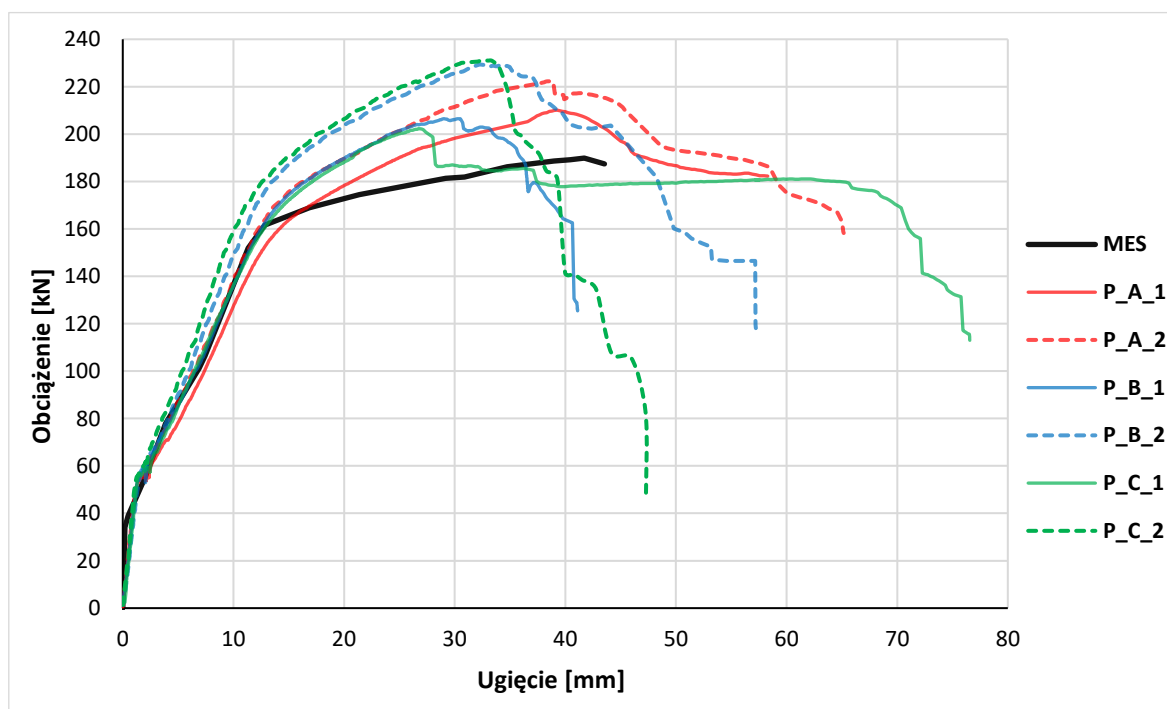
Rys. 199. Wykres zależności obciążenia od odkształcenia zbrojenia dolnego elementu niewzmocnionego uzyskany w obliczeniach numerycznych i w badaniach

Uzyskane w obliczeniach numerycznych przebiegi wykresów oraz wartości obciążeń wywołanych przemieszczeniem dla ugięć oraz odkształceń stali są zbliżone do odpowiadających wyników z badań doświadczalnych, co świadczy o dobrej zbieżności modelu obliczeniowego i rzeczywistego elementu badawczego. Mniejsza wartość nośności elementu żelbetowego w obliczeniach metodą elementów skończonych wynika z ukrytych zapasów nośności, które nie są uwzględniane w obliczeniach, takich jak na przykład efekt wzmocnienia stali zbrojeniowej. Uzyskana w obliczeniach numerycznych zależność obciążenia od odkształcenia zbrojenia rozciąganego jest również zbliżona do rzeczywistej, a niewielkie rozbieżności wynikać mogą m.in. z dokładnego umiejscowienia punktu odczytu danych względem miejsca zarysowania. W przypadku badań doświadczalnych przy odkształceniach na poziomie 2% doszło do zniszczenia tensometru, dlatego zdecydowano się porównać jedynie odkształcenia w zbliżonym zakresie. Na podstawie analiz numerycznych ustalono numeryczną nośność na zginanie elementu niewzmocnionego:

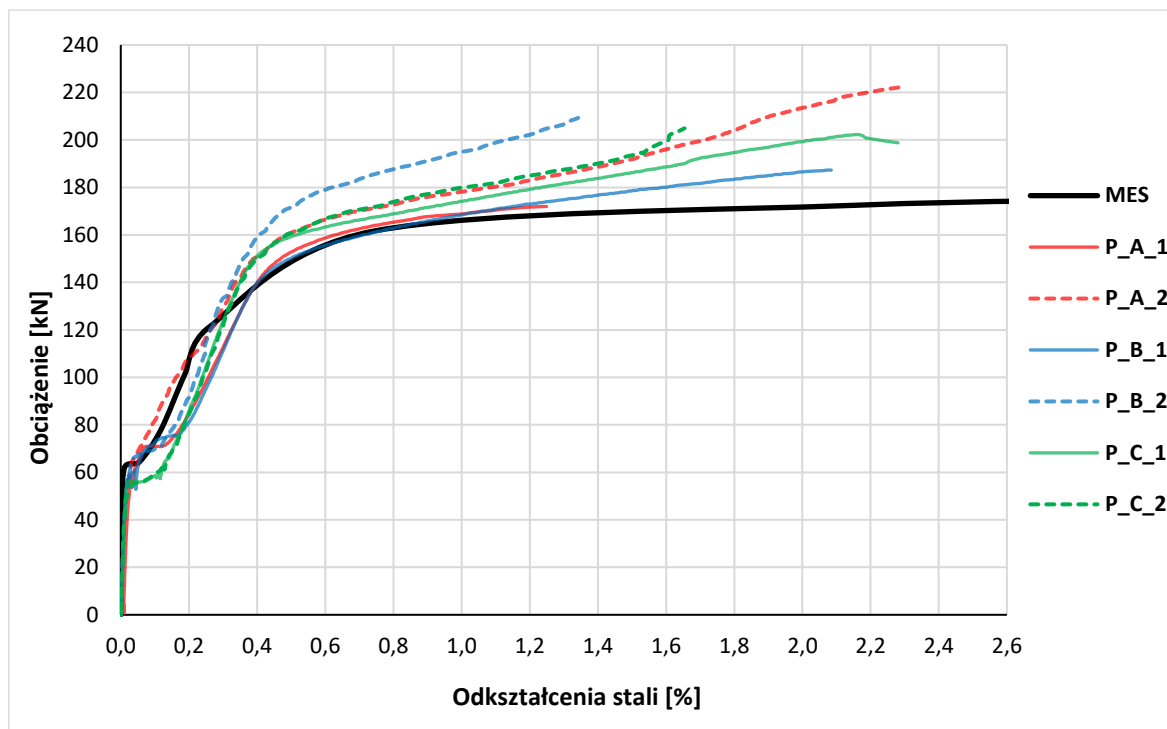
$$F_{ult,MES} = 157,9 \text{ kN.}$$

5.2.2 Nośność i odkształcalność wzmocnionego elementu żelbetowego

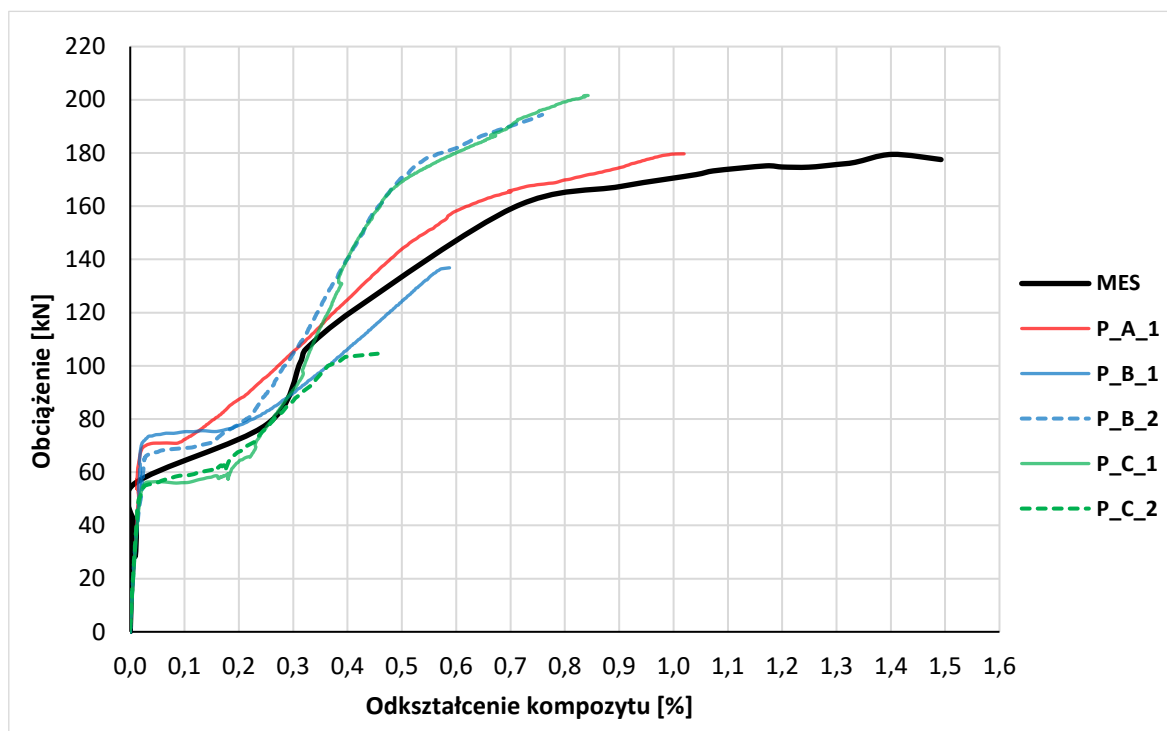
Podobnie, jak w przypadku elementu niewzmocnionego wyznaczono zależność obciążenia od ugięcia dla elementu wzmocnionego kompozytem PBO-FRCM, którą zaprezentowano na rysunku 200. Na rysunku 201 zaprezentowano zależność obciążenia od odkształcenia głównego zbrojenia dolnego, a na rysunku 202 zależność obciążenia od odkształcenia wzmocnienia. Na wszystkich wykresach przedstawiono, w celach porównawczych odpowiadające zależności uzyskane w badaniach doświadczalnych dla wszystkich elementów badawczych.



Rys. 200. Wykres zależności obciążenia od ugięcia elementu wzmocnionego uzyskany w obliczeniach numerycznych i w badaniach



Rys. 201. Wykres zależności obciążenia od odkształcenia zbrojenia dolnego elementu wzmocnionego uzyskany w obliczeniach numerycznych i w badaniach



Rys. 202. Wykres zależności obciążenia od odkształcenia kompozytu elementu wzmocnionego uzyskany w obliczeniach numerycznych i w badaniach

Podobnie, jak w przypadku elementu niewzmocnionego w obliczeniach numerycznych uzyskano zbliżony wykres zależności obciążenia od ugięcia elementu do wykresów uzyskanych w badaniach doświadczalnych. Główną różnicą pomiędzy wynikami obliczeń numerycznych, a badaniami doświadczalnymi, w zakresie zależności obciążenie-ugięcie, jest mniejsza sztywność elementu w ostatniej fazie pracy elementu, która uwidacznia się poprzez mniejszy kąt nachylenia wykresu dla tej fazy. W zależnościach obciążenia od odkształcenia zbrojenia i kompozytu zauważalna jest również duża zbieżność obliczeń numerycznych oraz badań doświadczalnych. Na podstawie analiz numerycznych ustalono numeryczną nośność na zginanie elementu wzmocnionego o wartości:

$$F_{ult,MES} = 189,9 \text{ kN.}$$

5.3 Porównanie nośności elementów z badań doświadczalnych i modeli obliczeniowych

Po przeprowadzeniu wszystkich założonych obliczeń przygotowano zestawienie nośności wzmocnionych i niewzmocnionych elementów, które przedstawiono w tabeli 42. Ze względu na rozbieżności w wartościach nośności elementów niewzmocnionych, które uzyskiwano w badaniach i obliczeniach teoretycznych zdecydowano się na ocenę zgodności na podstawie stopnia wzmocnienia (ΔF_{ult}), który w bezwzględny sposób wskazuje przyrost nośności elementu. Przy ocenie poprawności metod teoretycznych porównano wartości stopnia wzmocnienia uzyskane metodą teoretyczną do stopnia wzmocnienia uzyskanego w badaniach dla uśrednionej nośności wszystkich przebadanych elementów.

Tabela 42. Porównanie nośności oraz stopni wzmocnienia elementów uzyskanych różnymi metodami

| Rodzaj analizy | Rodzaj wzmocnienia | F_{ult} | ΔF_{ult} | $\frac{\Delta F_{ult,an}/MES}{\Delta F_{ult,exp}}$ |
|------------------------------|--------------------|-----------|------------------|--|
| | | [kN] | [-] | [-] |
| Badania | brak | 171,4 | - | - |
| | 1 warstwa PBO-FRCM | 216,9 | 1,265 | - |
| Obliczenia analityczne | brak | 151,8 | - | - |
| | 1 warstwa PBO-FRCM | 176,3 | 1,161 | 0,918 |
| Metoda elementów skończonych | brak | 157,9 | - | - |
| | 1 warstwa PBO-FRCM | 189,9 | 1,203 | 0,951 |

Porównanie wyników obliczeń wskazuje, że obliczenia z wykorzystaniem metody elementów skończonych przy przyjętych założeniach prowadzi do uzyskania stopnia wzmocnienia zaniżonego w stosunku do badań doświadczalnych o około 5%. Większą rozbieżność wyników na poziomie około 8% niedoszacowania stopnia wzmocnienia uzyskano w obliczeniach analitycznych. Ze względu na większe zaniżenia stopnia

wzmocnienia w obliczeniach analitycznych, podjęto próbę wprowadzenia zmian w tej metodzie obliczeniowej, która doprowadzić ma do jak najdokładniejszego oszacowania stopnia wzmocnienia dla analizowanego elementu.

5.4 Propozycja zmian dla modelu analitycznego

Obliczenia analityczne przeprowadzono z wykorzystaniem wytycznych ACI 549.4R-13 [89], w których odgórnie ograniczono maksymalne odkształcenia kompozytu do wartości 1,2%, niezależnie od zastosowanego typu kompozytu FRCM. Przy ustalaniu odkształceń przekroju i równowagi sił w nim występujących, warunek ograniczenia odkształceń kompozytu jest kluczowym mechanizmem zniszczenia, który determinuje nośność elementu. W badaniach doświadczalnych przy pomiarach światłowodowych rejestrowano znacznie większe odkształcenia wzmocnienia (na poziomie około 1,5%). W rzeczywistości przy zniszczeniu elementu mogły być one jeszcze wyższe, ponieważ ostatnie pomiary przy maksymalnych odkształceniach były rejestrowane przed zniszczeniem elementu (powodem zakończenia odczytów było zniszczenie czujnika). Stwierdzono zatem, że uzasadnione w zakresie badanych kompozytów PBO-FRCM jest podjęcie próby przeprowadzenia obliczeń bez redukcji maksymalnych odkształceń kompozytu do poziomu 1,2%. Przeprowadzono powtórne obliczenia, w których zamiast ograniczenia odkształceń kompozytu do 1,2% [89], wprowadzono ograniczenie odkształceń do wartości podawanej przez producenta – 1,63% [98] i wynikającą z niezależnych badań – 1,76% [5]. Obliczenia przeprowadzono zgodnie z procedurą przedstawioną w podrozdziale 5.1.2, a kluczowe parametry uzyskane na podstawie równania równowagi sił w przekroju zestawiono w tabeli 43.

Tabela 43. Kluczowe parametry ustalone na podstawie równania równowagi sił w przekroju w elemencie wzmocnionym

| Właściwość | Symbol | Wartość dla $\epsilon_{fe}=1,63\%$ | Wartość dla $\epsilon_{fe}=1,76\%$ |
|---------------------------------|-------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Wysokość strefy ściskanej | x | 19,77 mm | 19,64 mm |
| Maksymalne odkształcenia betonu | ϵ_c | 2,43‰ | 2,60‰ |
| Odkształcenia zbrojenia dolnego | ϵ_{s1} | 1,23% | 1,33% |
| Odkształcenia zbrojenia górnego | ϵ_{s2} | 0,11% | 0,12% |
| Odkształcenia kompozytu | ϵ_{FRCM} | 1,63% | 1,76% |
| Naprężenia maksymalne w betonie | σ_c | 41,49 MPa | 41,49 MPa |
| Naprężenia zbrojenia dolnego | σ_{s1} | 543 MPa | 543 MPa |
| Naprężenia zbrojenia górnego | σ_{s2} | 223,20 MPa | 243,65 MPa |
| Naprężenia w kompozycie | σ_{FRCM} | 2086,40 MPa | 2247,68 MPa |

Nośność elementów ustalono na podstawie równania równowagi momentów względem górnej powierzchni betonu elementu (9), a wyniki obliczeń były następujące:

$$\text{dla } \varepsilon_{fe} = 1,63\%; M_R = 54,19 \text{ kNm},$$

$$\text{dla } \varepsilon_{fe} = 1,76\%; M_R = 55,39 \text{ kNm}.$$

Na podstawie obliczeń analitycznych wyznaczono obciążenie powodujące zniszczenie elementu (10), które przyjmowało wartości:

$$\text{dla } \varepsilon_{fe} = 1,63\%; F_{ult,an} = 191,5 \text{ kN},$$

$$\text{dla } \varepsilon_{fe} = 1,76\%; F_{ult,an} = 195,7 \text{ kN}.$$

Porównanie nośności z ograniczeniami odkształceń kompozytu na bazie danych producenta [98] i niezależnych badań [5] przedstawiono odpowiednio w tabeli 44.

Tabela 44. Porównanie nośności oraz stopni wzmocnienia elementów wzmocnionych uzyskanych w badaniach oraz z wykorzystaniem zmodyfikowanej metody obliczeń analitycznych.

| Rodzaj analizy | Rodzaj wzmocnienia | F_{ult} | ΔF_{ult} | $\frac{\Delta F_{ult,an}}{\Delta F_{ult,exp}}$ |
|--|--------------------|-----------|------------------|--|
| | | [kN] | [-] | [-] |
| Badania | brak | 171,4 | - | - |
| | 1 warstwa PBO-FRCM | 216,9 | 1,265 | - |
| Obliczenia analityczne ($\varepsilon_{fe}=1,63\%$) | brak | 151,8 | - | - |
| | 1 warstwa PBO-FRCM | 191,5 | 1,261 | 0,997 |
| Obliczenia analityczne ($\varepsilon_{fe}=1,76\%$) | brak | 151,8 | - | - |
| | 1 warstwa PBO-FRCM | 195,7 | 1,289 | 1,018 |

Przeprowadzone obliczenia ze zmienioną wartością granicznych odkształceń kompozytu wskazują, że poprzez modyfikację tej wartości możliwe jest uzyskanie zbliżonego stopnia wzmocnienia analizowanego elementu, do stopnia wzmocnienia uzyskanego w badaniach. Przy ograniczeniu odkształceń kompozytu do wartości granicznej podanej przez producenta systemu (1,63%) [98] uzyskano bardzo dobrą zbieżność stopnia wzmocnienia z badaniem doświadczalnym. Niedoszacowanie stopnia wzmocnienia elementu wynosiło w tym przypadku około 0,3%. Ograniczenie odkształceń kompozytu do wartości wynikającej

z niezależnych badań (1,76%) [5] również pozwoliło na osiągnięcie bliższego rzeczywistości stopnia wzmocnienia, jednak jego wartość została przeszacowana o około 1,8%. Idealną zbieżność wyników obliczeń analitycznych i wyników badań w zakresie stopnia wzmocnienia elementu uzyskano przy ograniczeniu odkształceń kompozytu do wartości 1,65%. Kluczowe parametry uzyskane na podstawie równania równowagi sił w przekroju dla tej wartości ograniczenia odkształceń kompozytu zestawiono w tabeli 45. Porównanie nośności z ograniczeniami odkształceń kompozytu na bazie danych producenta [98] i niezależnych badań [5] przedstawiono odpowiednio w tabeli 46.

Tabela 45. Kluczowe parametry ustalone na podstawie równania równowagi sił w przekroju w elemencie wzmocnionym dla optymalnej wartości ograniczenia odkształceń kompozytu

| Właściwość | Symbol | Wartość dla $\epsilon_{fe}=1,65\%$ |
|---------------------------------|-------------------|------------------------------------|
| Wysokość strefy ściskanej | x | 19,75 mm |
| Maksymalne odkształcenia betonu | ϵ_c | 2,46‰ |
| Odształcenia zbrojenia dolnego | ϵ_{s1} | 1,25‰ |
| Odształcenia zbrojenia górnego | ϵ_{s2} | 0,12‰ |
| Odształcenia kompozytu | ϵ_{FRCM} | 1,65‰ |
| Naprężenia maksymalne w betonie | σ_c | 41,49 MPa |
| Naprężenia zbrojenia dolnego | σ_{s1} | 543 MPa |
| Naprężenia zbrojenia górnego | σ_{s2} | 226,52 MPa |
| Naprężenia w kompozycie | σ_{FRCM} | 2112 MPa |

Nośność elementów ustalono na podstawie równania równowagi momentów względem górnej powierzchni betonu elementu (9), a wyniki obliczeń były następujące:

$$M_R = 54,38 \text{ kNm.}$$

Ostatecznie na podstawie modelu analitycznego wyznaczono wartość obciążenia powodującego zniszczenie elementu na poziomie:

$$F_{ult,an} = 192,2 \text{ kN.}$$

Tabela 46. Porównanie nośności oraz stopni wzmocnienia elementów wzmocnionych uzyskanych w badaniach oraz z wykorzystaniem zmodyfikowanej metody obliczeń analitycznych (odkształcenia graniczne kompozytu 1,65%).

| Rodzaj analizy | Rodzaj wzmocnienia | F_{ult} | ΔF_{ult} | $\frac{\Delta F_{ult,an}}{\Delta F_{ult,exp}}$ |
|--|--------------------|-----------|------------------|--|
| | | [kN] | [-] | [-] |
| Badania | brak | 171,4 | - | - |
| | 1 warstwa PBO-FRCM | 216,9 | 1,265 | - |
| Obliczenia analityczne ($\varepsilon_{fe}=1,65\%$) | brak | 151,8 | - | - |
| | 1 warstwa PBO-FRCM | 192,2 | 1,265 | 1,000 |

Należy jednak zwrócić uwagę, że różnica pomiędzy odkształceniami granicznymi kompozytu podawanymi przez producenta, a odkształceniami granicznymi prowadzącymi do uzyskania całkowicie zgodnych wyników obliczeń analitycznych z badaniami doświadczalnymi jest bardzo mała, co prowadzi do niewielkiego zwiększenia nośności w obliczeniach. W związku z niewielką różnicą stopnia wzmocnienia uzyskaną przy obliczeniach z wykorzystaniem wartości granicznej odkształceń kompozytu podawanej przez producenta (1,63%) [98], w porównaniu z obliczeniami z wykorzystaniem wartości optymalnej wynikającej z przeprowadzonych analiz (1,65%), racjonalne z punktu widzenia projektowego w przedmiotowym zakresie byłoby przyjmowanie wartości granicznej odkształceń wynikającej z badań producenta systemu wzmocnienia kompozytowego. Należy również nadmienić, że takie ograniczenie wiąże się z przyjęciem wartości bezpiecznej, niepowodującej zawyżenia obliczeniowej nośności elementu.

5.5 Podsumowanie analiz teoretycznych

Przeprowadzono analizy teoretyczne, których celem było ustalenie modelu umożliwiającego szacowanie nośności zginanych płyt żelbetowych wzmocnionych kompozytem PBO-FRCM oraz kontrola ich zgodności za pomocą modelu numerycznego. Jako główne kryterium zgodności określono stopień wzmocnienia elementu, będący ilorazem nośności elementu wzmocnionego i porównawczego elementu bez wzmocnienia. Ustalono, że model numeryczny ze wszystkimi poczynionymi założeniami ma stosunkowo dobrą zbieżność wyników z badaniami doświadczalnymi (zaniżenie stopnia wzmocnienia o około 5%) i w przedmiotowym zakresie może być stosowany do szacowania stopnia wzmocnienia elementów w typie i geometrii zbliżonej do przedmiotu analiz. Bardzo dobrą zbieżność wyników dla modelu numerycznego uzyskano również dla przebiegów zależności obciążenia od odkształcenia kompozytu wzmacniającego oraz zbrojenia rozciąganego. Przeprowadzone obliczenia analityczne, na podstawie założeń Eurokodu 2 [91] i ACI 549.4R-13 [89] wykazały, że stopień wzmocnienia przedmiotowych elementów jest niedoszacowany o około 8%, co spowodowane jest narzuconym przez ACI 549.4R-13 [89] ograniczeniem odkształcenia kompozytu do 1,2%, niezależnie od zastosowanego typu kompozytu. Zaproponowano modyfikację metody polegającą na zwiększeniu tej wartości w celu uzyskania lepszej zbieżności z wynikami badań.

Analizy obliczeniowe wskazały, że najlepszą zbieżność z wynikami badań w zakresie stopnia wzmocnienia uzyskuje się przy ograniczeniu granicznego odkształcenia kompozytu do wartości 1,65%. Ustalono również, że przy ograniczeniu odkształceń granicznych kompozytu przy obliczeniach zgodnie z granicznymi odkształceniami kompozytu zgodnymi z badaniami producenta (1,63%) [98] i badaniami literaturowymi (1,76%) uzyskuje się stopień wzmocnienia odpowiednio nieznacznie zaniżony (0,3%) i zawyżony o 1,8%. Wyniki obliczeń stopnia wzmocnienia uzyskane dla optymalnej wartości ograniczenia odkształceń kompozytu i wartości wynikającej z badań producenta są bardzo zbliżone, przez co stopień wzmocnienia przy przyjęciu odkształceń wyników z badań producenta jest jedynie nieznacznie zaniżony. Ostatecznie ustalono, że w przypadku elementów w typie zbliżonym do analizowanych, do szacowania ich stopnia wzmocnienia kompozytem PBO-FRCM racjonalne jest zwiększenie ograniczenia maksymalnych odkształceń wzmocnienia do poziomu 1,63%, zgodnie z wynikami badań producenta systemu wzmocnienia kompozytowego [98].

Zakres kalibracji analiz teoretycznych nawiązywał do stopnia wzmocnienia analizowanych elementów. Wartości bezwzględne nośności uzyskiwane, zarówno w modelu numerycznym, jak i w obliczeniach analitycznych są niższe niż w badaniach doświadczalnych ze względu na nieuwzględnienie w obliczeniach niektórych mechanizmów wpływających pozytywnie na nośność konstrukcji żelbetowych. Należy jednak pamiętać, że niedoszacowanie nośności niewzmocnionego elementu żelbetowego w obliczeniach analitycznych i numerycznych powoduje również zaniżenie nośności elementu wzmocnionego. Zdaniem autora, dodatkowy zapas nośności należy traktować jako ukryty margines bezpieczeństwa, który występuje również przy tradycyjnym projektowaniu konstrukcji żelbetowych bez wzmocnienia kompozytowego. Dodatkowo przedstawione zalecenia zostały opracowane na podstawie stosunkowo wąskiej serii badań i ich uogólnienie na szerszą grupę elementów wymaga dalszych analiz.

6. Podsumowanie i wnioski końcowe

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań doświadczalnych i analiz teoretycznych związanych z badaniami jednokierunkowo zginanych płyt żelbetowych wzmocnionych na zginanie kompozytami PBO-FRCM z różnymi typami zakotwień. W niniejszym rozdziale przedstawiono wnioski ogólne, które odnoszą się bezpośrednio do celów naukowych opisanych w rozdziale trzecim. Wnioski szczegółowe odnoszące się do wyników badań i analiz oraz szczegółowe wyniki przedstawiono w treści pracy w odpowiednich rozdziałach. Wnioski ogólne są następujące:

- 1) Przeprowadzone badania wykazały, że zastosowanie kompozytu PBO-FRCM istotnie wpływa na nośność i odkształcalność jednokierunkowo zginanych płyt żelbetowych. Nośność badanych elementów przy wzmocnieniu jedną warstwą kompozytu była zwiększana średnio o 27%, przy czym obserwowano również dodatkowe zwiększenie sztywności elementów, szczególnie w ostatniej fazie pracy elementów, po zarysowaniu i uplastycznieniu zbrojenia. Wpłynęło to pozytywnie na ograniczenie ugięć elementów w całym zakresie ich pracy oraz pozwoliło na ograniczenie szerokości rys prostopadłych elementów. Zaobserwowano również, że zastosowanie wzmocnienia powoduje obniżenie odkształceń głównego zbrojenia rozciąganego elementu oraz górnej powierzchni betonu, co ma istotny wpływ i znajduje swoje odzwierciedlenie w finalnej nośności wzmocnionego elementu. Analizy odkształceń kompozytu oraz analizy mechanizmów zniszczenia wykazały jednak, że zastosowany materiał nie jest w pełni wykorzystany, a zniszczenie elementu zapoczątkowane jest zniszczeniem wzmocnienia na styku włókna-zaprawa, bez osiągnięcia granicznych odkształceń wysokowytrzymałych włókien PBO. W zakresie odkształceń poprzecznych nie zaobserwowano znaczących wpływów wzmocnienia PBO-FRCM na odkształcalność wzmacnianego elementu.
- 2) Zakotwienie siatki kompozytu PBO-FRCM wpływa na odkształcalność jednokierunkowo zginanych płyt żelbetowych, jednak nie wykazano znaczącego wpływu zakotwienia na nośność tego typu elementów. Ustalono, że mechaniczne zakotwienie siatki kompozytu FRCM niweluje negatywny wpływ „efektu końca”, który ze względu na dużą powierzchnię wzmocnienia płyt nie ma aż tak dużego wpływu na efektywność wzmocnienia w porównaniu z innymi typami elementów (np. elementami belkowymi). Prowadzi to do ograniczenia pozytywnego wpływu zakotwienia na nośność badanych elementów, w przeciwieństwie do elementów o innych proporcjach geometrycznych wzmocnienia, gdzie wpływ mechanicznego zakotwienia siatki na nośność jest bardziej zauważalny. Analizy odkształceń kompozytu wykazały jednak, że przy prętowym zakotwieniu siatki kompozytu obserwowano większe odkształcenia siatki, co wskazuje na większe wykorzystanie potencjału wzmocnienia o około 28-31%. Analizy odkształceń w środkowym przekroju elementów wskazały dodatkowo, że pierwsze objawy poślizgu siatki kompozytu w przypadku elementów z zakotwieniem pojawiają się przy większym obciążeniu niż w przypadku

elementu bez zakotwienia. Wpływ zakotwienia na nośność był jednak słabo zauważalny przez opisane wcześniej czynniki, jednak ustalono, że prętowe zakotwienie siatki kompozytu ma potencjał w zwiększaniu efektywności wzmocnienia PBO-FRCM ze względu na nośność i odkształcalność jednokierunkowo zginanych płyt żelbetowych, jednak jego uwydatnienie wymaga dalszych badań z wykorzystaniem elementów o innej geometrii, przede wszystkim o niższej bazowej nośności niewzmocnionego elementu porównawczego.

- 3) Powszechnie wykorzystywany model analityczny szacowania nośności zginanych elementów żelbetowych wzmocnionych kompozytami FRCM bazuje na wyznaczeniu rzeczywistych odkształceń wzmocnienia oraz włączenia go jako składowej równań równowagi sił w przekroju. W modelu zaproponowanym przez ACI 549.4R-13 [89] wprowadzono ograniczenie odkształceń kompozytu do 1,2% niezależnie od zastosowanego materiału włókien i matrycy kompozytu FRCM. Prowadzi to do niedoszacowania stopnia wzmocnienia, co prowadzi do zaniżenia nośności projektowanego wzmocnienia. Zaproponowano modyfikację wyżej opisanej metody szacowania nośności, w której uwzględniono wyższe odkształcenia kompozytu, które obserwowano w przeprowadzonych wcześniej badaniach. Określono optymalną wartość ograniczenia odkształceń kompozytu, która w opisywanym modelu prowadziła do otrzymania identycznego stopnia wzmocnienia, który wyznaczono w badaniach doświadczalnych. Ze względu na zbliżoną wartość wyznaczonego ograniczenia odkształceń do wyników badań granicznych odkształceń kompozytu przeprowadzonych przez producenta zasugerowano, aby to tę wartość stosować przy szacowaniu nośności żelbetowych elementów płytowych wzmocnionych kompozytem PBO-FRCM. Należy jednak nadmienić, iż analizy te przeprowadzono dla stosunkowo wąskiej liczby płyt i uogólnienie analiz na szerszą grupę elementów wymaga przeprowadzenia dalszych badań, obliczeń oraz analiz.
- 4) Stworzony na potrzeby analiz model numeryczny wykazuje dobrą zbieżność w zakresie wyznaczania przebiegów zależności obciążenia od ugięcia, odkształceń zbrojenia rozciąganego i odkształceń kompozytu w elemencie wzmocnionym kompozytem PBO-FRCM oraz w kontrolnym elemencie bez wzmocnienia (bez zależności obciążenia od odkształcenia kompozytu). Kształty przebiegu wykresów powyżej opisanych zależności są bardzo zbliżone, a niewielkie różnice w poziomach obciążenia występowania poszczególnych faz rozwoju odkształceń wynikają z wyidealizowanego charakteru zjawisk, takich jak zarysowanie, czy przyczepność pomiędzy elementem wzmacnianym a kompozytem w modelu numerycznym oraz uproszczonych mechanizmów pracy materiałów. Rozbieżności w wartościach nośności elementu wzmocnionego i niewzmocnionego pomiędzy badaniami doświadczalnymi i modelem numerycznym wynikają w znaczącej większości z niedoszacowania nośności bazowego wzmacnianego elementu żelbetowego spowodowanego nieuwzględnieniem w modelu

numerycznym zjawisk powodujących dodatkową ukrytą nośność w konstrukcjach żelbetowych. W zakresie szacowania stopnia wzmocnienia przedmiotowego elementu model numeryczny wykazał około 5% niedoszacowanie jego wartości dla przedmiotowych elementów. Podobnie jak w zakresie modelu analitycznego należy jednak pamiętać, że ze względu na stosunkowo wąski zakres analiz, w celu uogólnienia wniosków należy przeprowadzić podobne analizy porównawcze dla większej próby elementów, w tym elementów o innej geometrii.

Kierunki dalszych badań

Przeprowadzony przegląd literatury oraz analizy badań potwierdzają, że wzmacnianie płyt żelbetowych kompozytami FRCM jest bardzo szerokim i skomplikowanym zagadnieniem, które wymaga badań i analiz o szerokim zakresie. Na podstawie pozyskanego doświadczenia z przeprowadzonych badań i wyciągniętych z nich wniosków wskazano następujące potencjalne kierunki badań, które mogą być najbliższą kontynuacją lub rozszerzeniem analiz opisanych w niniejszej rozprawie:

- Rozszerzenie przeprowadzonych badań o elementy o innej (mniejszej) grubości i innym (mniejszym) stopniu zbrojenia stalą. Elementy o mniejszej wyjściowej nośności mogą uwydatnić efekt wzmacniający kompozytu PBO-FRCM, co może również wiązać się ze zwiększeniem wpływu zakotwienia siatki kompozytu. Dodatkowo poszerzenie bazy geometrii elementów badawczych pozwoliłoby na dokładniejsze wyskalowanie modeli teoretycznych szacowania nośności, co pozwoliłoby na ich uogólnienie.
- Rozszerzenie badań wpływu zakotwienia siatki kompozytu w elementach płytowych o kompozyty FRCM z innymi niż PBO włóknami (np. włóknami węglowymi) lub zwiększenie liczby warstw siatki w kompozytu FRCM. Badania takie pozwolą na ocenę wpływu zakotwienia na nośność i odkształcalność wzmocnionych elementów, w których bez zakotwienia obserwowane są inne mechanizmy zniszczenia wzmocnienia FRCM.
- Przeprowadzenie zbliżonych badań w innym schemacie statycznym, który umożliwiłby większą mobilizację siatki wzmocnienia na kierunku prostopadłym do głównego kierunku zginania. W opisanych w rozprawie badaniach wpływ kierunku prostopadłego do głównego kierunku zginania był pomijalnie mały ze względu na dużą sztywność wzmacnianego elementu oraz belek poprzecznych trawersy, przez którą przekazywano obciążenie. Badania te pozwoliłyby na szersze analizy wpływu wzmocnienia i zakotwienia siatki kompozytu na poprzeczne odkształcenia płyty.
- Badanie wpływu zakotwienia siatki kompozytu FRCM oraz samego wzmocnienia na inne właściwości płyt żelbetowych. Przykładowym zakresem takich badań może być badanie wpływów reologicznych i wpływu długotrwałego obciążenia, wpływów obciążeń cyklicznych, zachowania w warunkach wysokiej temperatury (występującej naturalnie lub od czynników technologicznych) lub w sytuacji pożarowej. Badania takie nawiązywać będą do rzeczywistej pracy elementów

płytowych ze wzmocnieniami FRCM i pozwolą na ocenę potencjału rzeczywistej pracy elementu poza jego doraźną nośnością i odkształcalnością.

- Przeprowadzenie zbliżonych do opisanych w rozprawie badań z wykorzystaniem innych metod pomiarowych, które umożliwią dokładniejszą analizę powierzchniowego rozkładu odkształceń kompozytu oraz nie będą podatne na zniszczenie w miejscu zarysowania, co pozwoli na śledzenie odkształceń elementu aż do momentu zniszczenia. Odpowiednim narzędziem w tym zakresie może być system cyfrowej korelacji obrazu, za pomocą którego określa się odkształcenia i przemieszczenia powierzchni na podstawie obrazu z cyfrowej kamery. Analizy takie pozwolą na lepsze zrozumienie mechaniki pracy kompozytu FRCM przy zniszczeniu,
- Badania nad innymi niż mechaniczne zakotwienie siatki kompozytu sposobów na zwiększenie efektywności wzmocnień FRCM, co może być uzyskane przez zmianę kompozycji matrycy mineralnej. Jako przykładowe modyfikacje matrycy można wskazać dodatki różnego rodzaju włókien powodujących redystrybucję wewnętrznych naprężeń lub dodanie modyfikatorów w formie mikro lub nanocząstek, które uszczelniają strukturę matrycy, poprawiając przy tym jej właściwości mechaniczne.
- Dalsza kalibracja modelu MES pozwalająca na szacowanie nośności elementów o odmiennej geometrii oraz konfiguracji wzmocnienia. Szczególną uwagę w zakresie modelu MES należy zwrócić również w zakresie optymalizacji parametrów połączenia pomiędzy wmacnianym elementem a kompozytem,
- Sformułowanie uproszczonych inżynierskich metod obliczeń nośności elementów płytowych wzmocnionych kompozytem PBO-FRCM, w postaci tabel, nomogramów lub arkuszy kalkulacyjnych.

7. Literatura

Publikacje oraz książki

- [1] H. Abbas, A. A. Abadel, T. Almusallam, Y. Al-Salloum, Effect of CFRP and TRM Strengthening of RC Slabs on Punching Shear Strength, *Latin American Journal of Solids and Structures*, 12, 2015, s. 1616-1640
- [2] Z. R. Aljazaeri, J. J. Myers, Strengthening of Reinforced Concrete One-way Slabs for Flexure using Composite Materials: Evaluation of Different Composite Materials, *Fourth International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies (SCMT4)*, Las Vegas, USA, 08.2016
- [3] Z. R. Aljazaeri, J. J. Myers, Flexure Performance of RC One-Way Slabs Strengthened with Composite Materials, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30, 2018, 04018120
- [4] L. Anania, A. Badalà, G. D'Agata, Numerical simulation of tests for the evaluation of the performance of the reinforced concrete slabs strengthening by FRCM, *Curved and Layered Structures*, 3(1), 2016, s. 63–73
- [5] D. Arboleda, Fabric Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) Composites for Infrastructure Strengthening and Rehabilitation: Characterization Methods. *Rozprawa doktorska*, University of Miami, USA, 2014
- [6] L. Ascione, G. de Felice, S. De Santis, A qualification method for externally bonded Fibre Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) strengthening systems, *Composites: Part B*, 78, 2015, s. 497-506
- [7] N. Attari, S. Amziane, M. Chemrouk, Flexural strengthening of concrete beams using CFRP, GFRP and hybrid FRP sheets, *Construction and Building Materials*, 37, 2012, s. 746-757
- [8] O. Awani, T. El-Maaddawy, N. Ismail, Fabric-reinforced cementitious matrix: A promising strengthening technique for concrete structures. *Construction and Building Materials*, 132, 2017, s. 94-111
- [9] D. Banu, N. Țăranu, Traditional solutions for strengthening reinforced concrete slabs, *Bulletin of the Polytechnic Institute of Jassy*, 2010, s. 53-62
- [10] B. Barton, E. Wobbe, L.R. Dharani, P. Silva, V. Birman, A. Nanni, T. Alkhrdaji, J. Thomas, G. Tunis, Characterization of reinforced concrete beams strengthened by steel reinforced polymer and grout (SRP and SRG) composites, *Materials Science and Engineering: A*, 412, 2005, s. 129-136
- [11] F. Bencardino, C. Carloni, A. Condello, F. Focacci, A. Napoli, R. Realfonzo, Flexural behaviour of RC members strengthened with FRCM: State-of-the-art and predictive formulas, *Composites Part B*, 148, 2018, s. 132 – 148

- [12] W. Brameshuber, Textile Reinforced Concrete - State-of-the-Art Report of RILEM TC 201-TRC, 2006, RILEM
- [13] A. S. Calabrese, P. Colombi, T. D'Antino, Analytical solution of the bond behavior of FRCM composites using a rigid-softening cohesive material law, *Composites Part B*, 174, 2019, 107051
- [14] C. Carloni, T. D'Antino, L. H. Sneed, C. Pellegrino, Role of the Matrix Layers in the Stress-Transfer Mechanism of FRCM Composites Bonded to a Concrete Substrate, *Journal of Engineering Mechanics*, 141, 2015, 04014165
- [15] F. G. Carozzi, C. Poggi, Mechanical properties and debonding strength of Fabric Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) systems for masonry strengthening, *Composites: Part B*, 70, 2015, s. 215–230
- [16] F. G. Carozzi, P. Poggi, G. Fava, C. Poggi, A cohesive interface crack model for the matrix–textile debonding in FRCM composites, *Composite Structures*, 143, 2016, s. 230–241
- [17] F. Ceroni, Experimental performances of RC beams strengthened with FRP materials, *Construction and Building Materials*, 24, 2010, s. 1547–1559
- [18] P. Colombi, T. D'Antino, Analytical assessment of the stress-transfer mechanism in FRCM composites, *Composite Structures*, 220, 2019, s. 961-970
- [19] I. Colombo, M. Colombo, A. Magri, G. Zani, M. di Prisco, Textile Reinforced Mortar at High Temperatures, *Applied Mechanics and Materials*, 82, 2011, s. 202-207
- [20] A. D'Ambrisi, L. Feo, F. Focacci, Bond-slip relations for PBO-FRCM materials externally bonded to concrete, *Composites: Part B*, 43, 2012, s. 2938–2949
- [21] A. D'Ambrisi, L. Feo, F. Focacci, Experimental analysis on bond between PBO-FRCM strengthening materials and concrete, *Composites: Part B*, 44, 2013, s. 524–532
- [22] T. D'Antino, C. Carloni, L.H. Sneed, C. Pellegrino, Matrix–fiber bond behavior in PBO FRCM composites: A fracture mechanics approach, *Engineering Fracture Mechanics*, 117, 2014, s. 94-111
- [23] T. D'Antino, C. Pellegrino, C. Carloni, L. H. Sneed, Giorgio Giacomini, Experimental analysis of the bond behavior of glass, carbon, and steel FRCM composites, *Key Engineering Materials*, 624, 2015, s. 371-378
- [24] T. D'Antino, L. H. Sneed, C. Carloni, C. Pellegrino, Influence of the substrate characteristics on the bond behavior of PBO FRCM-concrete joints, *Construction and Building Materials*, 101, 2015, s. 838–850
- [25] T. D'Antino, L. H. Sneed, C. Carloni, C. Pellegrino, Effect of the inherent eccentricity in single-lap direct-shear tests of PBO FRCM-concrete joints, *Composite Structures*, 142, 2016, s. 117–129

- [26] S. De Santis, F. G. Carozzi, G. de Felice, C. Poggi, Test methods for Textile Reinforced Mortar systems, *Composites: Part B*, 127, 2017, s. 121-132
- [27] J. Donnini, F. Bompadre, V. Corinaldesi, Tensile Behavior of a Glass FRCM System after Different Environmental Exposures, *Processes*, 8, 2020, 1074
- [28] J. Donnini, V. Corinaldesi, A. Nanni, Mechanical properties of FRCM using carbon fabrics with different coating treatments, *Composites Part B*, 88, 2016, s. 220-228
- [29] J. Donnini, F. De Caso y Basalo, V. Corinaldesi, G. Lancioni, A. Nanni, Fabric-reinforced cementitious matrix behavior at high-temperature: Experimental and numerical results, *Composites Part B*, 2017, 108, s. 108-121
- [30] J. Donnini, G. Lancioni, V. Corinaldesi, Failure modes in FRCM systems with dry and pre-impregnated carbon yarns: Experiments and modeling, *Composites Part B*, 140, 2018, s. 57-67
- [31] U. Ebead, H. Marzouk, Fiber-Reinforced Polymer Strengthening of Two-Way Slabs, *Aci Structural Journal*, 101(5), 2004, s. 650–659
- [32] U. Ebead, A. Younis, Pull-off characterization of FRCM/Concrete interface, *Composites Part B*, 165, 2019, s. 545–553
- [33] H. Fernandes, V. Lúcio, A. Ramos, Strengthening of RC slabs with reinforced concrete overlay on the tensile face, *Engineering Structures*, 132, 2017, s. 540-550
- [34] F. Focacci, T. D'Antino, C. Carloni, The role of the fiber–matrix interfacial properties on the tensile behavior of FRCM coupons, *Construction and Building Materials*, 265, 2020, 120263
- [35] F. Focacci, T. D'Antino, C. Carloni, L.H. Sneed, C. Pellegrino, An indirect method to calibrate the interfacial cohesive material law for FRCM-concrete joints, *Materials & Design*, 128, 2017, s. 206-217
- [36] W. -Y. Gao, K. -X. Hu, J. -G. Dai, K. Dong, K. -Q. Yu, L. -J. Fang, Repair of fire-damaged RC slabs with basalt fabric-reinforced shotcrete, *Construction and Building Materials*, 185, 2018, s. 79-92
- [37] E. Grande, M. Imbimbo, S. Marfia, E. Sacco, Numerical simulation of the de-bonding phenomenon of FRCM strengthening systems, *Procedia Structural Integrity*, 9, 2018, s. 257-264
- [38] J. Hartig, F. Jesse, K. Schickanz, U. Häußler-Combe, Influence of experimental setups on the apparent uniaxial tensile load-bearing capacity of Textile Reinforced Concrete specimens, *Materials and Structures*, 45, 2012, s. 433–446
- [39] O. Homoro, M. Michel, T. N. Baranger, Dry mineral pre-impregnation for enhancing the properties of glass FRCM composites, *Construction and Building Materials*, 263, 2020, 120597
- [40] A. Iorfida, S. Candamano, F. Crea, L. Ombres, S. Verre, P. De Fazio, Bond Behaviour of FRCM Composites: Effects of High Temperature, *Key Engineering Materials*, 817, 2019, s. 161-166

- [41] M.R. Islam, M.A. Mansur, M. Maalej, Shear strengthening of RC deep beams using externally bonded FRP systems, *Cement and Concrete Composites*, 27, 2005, s. 413-420
- [42] M. Kamiński, T. Trapko, C. Bywalski, Wzmacnianie konstrukcji żelbetowej przez konstrukcję żelbetową. Materiały XXI Ogólnopolskiej Konferencji „Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji”, 2006, s. 95-108
- [43] H.-Y. Kim, Y.-J. You, G.-S. Ryu, K.-T. Koh, G.-H. Ahn, S.-H. Kang, Flexural Strengthening of Concrete Slab-Type Elements with Textile Reinforced Concrete, *Materials*, 13, 2246
- [44] J. Kobiak, Błędy w konstrukcjach żelbetowych, Arkady, Warszawa 1971
- [45] L. N. Koutas, D. A. Bournas, Flexural strengthening of two-way RC slabs with Textile-Reinforced Mortar: experimental investigation and design equations, *Journal of Composites for Construction*, 21(1), 2017, 04016065
- [46] S. Lee, K. Hong, Y. Yeon, K. Jung, Flexural Behavior of RC Slabs Strengthened in Flexure with Basalt Fabric Reinforced Cementitious Matrix, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018, 2018, 2982784
- [47] F. Longo, A. Cascardi, P. Lassandro, A. Sannino, M. Antonietta Aiello, Mechanical and Thermal Characterization of FRCM-Matrices, *Key Engineering Materials*, 817, 2019, s. 189-194
- [48] G. Loreto, L. Leardini, D. Arboleda, A. Nanni, Performance of RC slab-type elements strengthened with fabric-reinforced Cementitious-Matrix composites, *Journal of Composites for Construction*, 18(3), 2014, A4013003
- [49] T. E. Maaddawy, S. Sherif, FRP composites for shear strengthening of reinforced concrete deep beams with openings, *Composite Structures*, 89, 2009, s. 60-69
- [50] D. Marcinczak, T. Trapko, Influence of the PBO-FRCM Composite Configuration on the Shear Capacity of RC Beams, *Journal of Composites for Construction*, 26(4), 2022, s. 1-19
- [51] D. Marcinczak, T. Trapko, M. Musiał, Shear strengthening of reinforced concrete beams with PBO-FRCM composites with anchorage, *Composites Part B*, 158, 2019, s. 149-161
- [52] E. Masłowski, D. Spizewska, Wzmacnianie konstrukcji budowlanych, Arkady, Warszawa, 2000
- [53] A. Mitzel, W. Stachurski, J. Suwalski, Awarie konstrukcji betonowych i murowych, Arkady, Warszawa, 1982
- [54] A. Napoli, R. Realfonzo, Reinforced concrete beams strengthened with SRP/SRG systems: Experimental investigation, *Construction and Building Materials*, 93, 2015, s. 654–677
- [55] L. Ombres, Analysis of the bond between Fabric Reinforced Cementitious Mortar (FRCM) strengthening systems and concrete, *Composites: Part B*, 69, 2015, s. 418–426

- [56] L. Ombres, A. Iorfida, S. Mazzuca, S. Verre, Bond analysis of thermally conditioned FRCM-masonry joints, *Measurement*, 125, 2018, s. 509-515
- [57] C. Pellegrino, C. Modena, Fiber-Reinforced Polymer Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams: Experimental Study and Analytical Modeling, *ACI Structural Journal*, 103, 2006, s. 720-728
- [58] C. Pellegrino, C. Modena, Flexural Strengthening of Real-Scale RC and PRC Beams with End-Anchored Pretensioned FRP Laminates, *ACI Structural Journal*, 106, 2009, s. 319-328
- [59] H. Rahimi, A. Hutchinson, Concrete Beams Strengthened with Externally Bonded FRP Plates, *Journal of Composites for Construction*, 5, 2001, s. 44-56
- [60] S. M. Raoof, D. A. Bournas, Bond between TRM versus FRP composites and concrete at high temperatures, *Composites Part B*, 127, 2017, s. 150-165
- [61] S. M. Raoof, L. N. Koutas, D. A. Bournas, Bond between textile-reinforced mortar (TRM) and concrete substrates: Experimental investigation, *Composites Part B*, 2016, 98, s. 350-361
- [62] L. Runkiewicz, Wzmacnianie konstrukcji żelbetowych, Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa, 2016
- [63] F. Schladitz, M. Frenzel, D. Ehlig, M. Curbach, Bending load capacity of reinforced concrete slabs strengthened with textile reinforced concrete, *Engineering Structures*, 40, 2012, s. 317-326
- [64] T. Simões, H. Costa, D. Dias-da-Costa, E. Júlio, Influence of fibres on the mechanical behaviour of fibre reinforced concrete matrixes, *Construction and Building Materials*, 137, 2017, s. 548-556
- [65] S. T. Smith, S. Hu, S. J. Kim, R. Seracino, FRP-strengthened RC slabs anchored with FRP anchors, *Engineering Structures*, 33, 2011, s. 1075-1087
- [66] S. T. Smith, J.G. Teng, FRP-strengthened RC beams. I: review of debonding strength models, *Engineering Structures*, 24, 2002, s. 385-395
- [67] S. T. Smith, H. Zhang, Z. Wang, Influence of FRP anchors on the strength and ductility of FRP-strengthened RC slabs, *Construction and Building Materials*, 49, 2013, s. 998-1012
- [68] L. H. Sneed, T. D'Antino, C. Carloni, Investigation of Bond Behavior of PBO Fiber-Reinforced Cementitious Matrix Composite-Concrete Interface, *ACI Materials Journal*, 111, 2014, s. 569-580
- [69] L.H. Sneed, T. D'Antino, C. Carloni, C. Pellegrino, A comparison of the bond behavior of PBO-FRCM composites determined by double-lap and single-lap shear tests, *Cement and Concrete Composites*, 64, 2015, s. 37-48
- [70] R. Sonnenschein, J. Bilcik K. Gajdosova, crack width control in concrete structures with frp reinforcement, 22nd International Conference ENGINEERING MECHANICS 2016, Svratka, Republika Czeska, 2016, s. 551-554

- [71] R. Sonnenschein, K. Gajdosova, I. Holly, FRP Composites and Their Using in the Construction of Bridges, *Procedia Engineering*, 161, 2016, s. 477 – 482
- [72] B. Täljsten, T. Blanksvärd, Mineral-Based Bonding of Carbon FRP to Strengthen Concrete Structures, *Journal of Composites for Construction*, 11(2), 2007, s. 120-128
- [73] Z. C. Tetta, L. N. Koutas, D. A. Bournas, Shear strengthening of full-scale RC T-beams using textile-reinforced mortar and textile-based anchors, *Composites Part B*, 95, 2016, s. 225-239
- [74] T. Trapko, Wpływ temperatury na trwałość i skuteczność wzmocnienia betonu kompozytami CFRP, *Inżynieria i Budownictwo*, 10, 2010, s. 561-564
- [75] T. Trapko, M. Musiał, The effectiveness of CFRP materials strengthening of eccentrically compressed reinforced concrete columns, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 11, 2011, s. 249-262
- [76] T. Trapko, The effect of high temperature on the performance of CFRP and FRCM confined concrete elements, *Composites Part B*, 54, 2013, s. 138 – 145
- [77] T. Trapko, Fibre Reinforced Cementitious Matrix confined concrete elements, *Materials and Design*, 44, 2013, s. 382-391
- [78] T. Trapko, M. Musiał, PBO mesh mobilization via different ways of anchoring PBO-FRCM reinforcements, *Composites Part B*, 118, 2017, s. 67-74
- [79] T. C. Triantafillou, Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using, Epoxy-Bonded FRP Composites, *ACI Structural Journal*, 95, 1998, s. 107-115
- [80] T. C. Triantafillou, Strengthening of Masonry Structures Using Epoxy-Bonded FRP Laminates, *Journal of Composites for Construction*, 2, 1998, s. 96-104
- [81] C. Tuakta, Use of fiber reinforced polymer composite in bridge structures, *Praca Magisterska*, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, USA, 2005
- [82] T. Urban, Wzmacnianie konstrukcji żelbetowych metodami tradycyjnymi, PWN, Warszawa, 2015
- [83] X. Wang, C. C. Lam, B. C. Sun, T. Noguchi, V. P. Iu, Effect of curing environment on the tensile behaviour of FRCM composites, *Construction and Building Materials*, Construction and Building Materials, 238, 2020, 117729
- [84] A. Younis, U. Ebead, K., A study on the bond behavior of different FRCM systems, *MATEC Web of Conferences*, 199, 2018, 09003
- [85] A. Younis, U. Ebead, K., Bond characteristics of different FRCM systems, *Construction and Building Materials*, 175, 2018, s. 610-620
- [86] A. Younis, U. Ebead, K. Shrestha, Tensile characterization of multi-ply fabric-reinforced cementitious matrix strengthening systems, *Structural Concrete*, 21, 2020, 713–723

- [87] D. Zhu, A. Peled, B. Mobasher, Dynamic tensile testing of fabric–cement composites, *Construction and Building Materials*, 25, 2011, s. 385–395
- [88] X. Zou, L. H. Sneed, T. D’Antino, C. Carloni, Analytical Bond-Slip Model for Fiber-Reinforced Cementitious Matrix-Concrete Joints Based on Strain Measurements, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31, 2019, 04019247

Wytyczne oraz normy

- [89] ACI 549.4R-13, Guide to Design and Construction of Externally Bonded Fabric Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) Systems for Repair and Strengthening Concrete and Masonry Structures, American Concrete Institute (ACI), 2013
- [90] AC434, Acceptance criteria for masonry and concrete strengthening using fiber-reinforced cementitious matrix (FRCM) composite systems, ICC Evaluation Service, 2013
- [91] PN-EN 1992-1-1:2008, Eurokod 2 -- Projektowanie konstrukcji z betonu - Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków
- [92] PN-B-03264:2002, Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone - Obliczenia statyczne i projektowanie

Materialy producentów

- [93] Instrukcja aplikacji S&P C-Laminates (aplikacja powierzchniowa), S&P, 2017
- [94] Zalecenia stosowania – System Sika CarboDur, Sika, 2020
- [95] Karta informacyjna produktu Sikadur -33, Sika, 2019
- [96] Karta informacyjna produktu Sikadur -30, Sika, 2019
- [97] Broszura informacyjna produktu Ruredil X Mesh Gold, Ruredil
- [98] Karta techniczna produktu Ruredil X Mesh Gold, Ruredil, 2009
- [99] Karta techniczna produktu Ruregold JX JOINT, 2015
- [100] Broszura informacyjna, Refurbishment structural strengthening with sika systems, Sika, 2014
- [101] Karta techniczna produktu Ruredil PBO-MESH 70/18, Ruredil, 2021
- [102] Karta techniczna produktu Ruredil C-MESH 182, Ruredil, 2021

8. Streszczenie/Summary

Tytuł:

Zakotwienie siatek kompozytów wzmacniających na zaprawie mineralnej w elementach płytowych

Streszczenie:

Kompozyty na bazie zaprawy mineralnej (FRCM - *Fabric Reinforced Cementitious Matrix*) są materiałem wykorzystywanym przy wzmacnianiu konstrukcji żelbetowych i murowych m.in. ze względu na zginanie, ścinanie lub ściskanie. Ich głównym składnikiem są wysokowytrzymałe włókna, które przytwierdzone są do konstrukcji za pomocą zaprawy mineralnej pełniące również funkcję matrycy kompozytu.

W rozprawie doktorskiej przedstawiono zagadnienie wpływu zakotwienia siatki kompozytu FRCM z włóknami PBO na nośność i odkształcalność jednokierunkowo zginanych żelbetowych elementów płytowych. Celem pracy była ocena wpływu wzmocnienia kompozytowego PBO-FRCM oraz sposobu ukształtowania zakotwienia siatki kompozytu, na efektywność wzmocnienia zginanych żelbetowych elementów płytowych. Podstawę analiz stanowią wyniki badań doświadczalnych, w ramach których zniszczono siedem elementów żelbetowych, z których sześć wzmocniono na zginanie kompozytem FRCM z różnymi typami zakotwienia. Badania poprzedzono szerokimi studiami literaturowymi w zakresie wzmacniania elementów żelbetowych, ze szczególnym uwzględnieniem zastosowania materiałów kompozytowych. W rozprawie przedstawiono szeroki zakres zagadnień dotyczących wzmocnień kompozytowych, w tym mechanizmów ich zniszczenia oraz sposobów zwiększania efektywności ich wykorzystania.

Przeprowadzone badania wykazały, że w elementach płytowych zakotwienie siatki kompozytu wpływa na poprawę nośności elementów w nieznacznym stopniu, jednak pozwala na poprawę wybranych parametrów odkształcalnościowych elementów. W żadnym z przypadków badawczych nie uzyskano pełnego wykorzystania możliwości wysokowytrzymałej siatki PBO, a do utraty nośności elementu dochodziło poprzez odspojenie się kompozytu na połączeniu włókno-matryca, co uniemożliwiało dalsze efektywne przenoszenie obciążeń.

W pracy przeprowadzono również analizy teoretyczne, w których porównano wyniki badań doświadczalnych z istniejącym modelem analitycznym szacowania nośności elementów wzmocnionych kompozytami FRCM i z wynikami obliczeń numerycznych. W ramach analiz zaproponowano modyfikację wytycznych szacowania nośności elementów wzmocnionych w oparciu o porównanie z przeprowadzonymi badaniami doświadczalnymi. Wskazano, że obowiązujące zalecenia prowadzą do niedoszacowania rzeczywistego stopnia wzmocnienia elementów i ustalono nową wartość krytycznego parametru obliczeniowego, co doprowadziło do optymalizacji szacowania nośności tego typu elementów.

Rozprawę podsumowano w formie wniosków potwierdzających osiągnięcie celów naukowych oraz wskazano dalsze potencjalne kierunki badań i analiz w zakresie zbliżonym do tematyki pracy.

Title:

Mesh anchorage of strengthening composites based on mineral mortar in slab-type elements

Summary:

Composites based on mineral mortar (FRCM - Fabric Reinforced Cementitious Matrix) are materials used to strengthen reinforced concrete and masonry structures, e.g. due to bending, shearing or compression. Their main component is high-strength fibers, which are attached to the structure with a mineral mortar, which also serves as a composite matrix.

In the dissertation, the problem of the anchorage impact of the FRCM composite mesh with PBO fibers on the load-bearing capacity and deformability of unidirectionally bent reinforced concrete plate elements was presented. The aim of the work was to assess the impact of the PBO-FRCM composite reinforcement and the method of shaping the composite mesh anchorage on the effectiveness of strengthening the reinforced concrete slab-type elements subjected to bending. The basis for the analyzes were the results of experimental tests, during which seven reinforced concrete elements were destroyed, six of which were reinforced with the FRCM composite with various types of anchorage. The research was preceded by extensive literature studies in the field of reinforcing reinforced concrete elements, with particular emphasis on the use of composite materials. The dissertation presents a wide range of issues related to composite reinforcements, including the mechanisms of their destruction and ways to increase the efficiency of their use.

The tests carried out showed that anchorage the composite mesh in plate elements improves the load capacity of the elements to a slight extent, however, it allows for the improvement of selected deformation parameters of the elements. In none of the test cases was the full use of the possibilities of the high-strength PBO mesh, and the load capacity of the element was lost due to the detachment of the composite at the fiber-matrix interface, which prevented further effective load transfer.

In the work, theoretical analyzes were also carried out, in which the results of experimental tests were compared with the existing theoretical model for estimating the load capacity of elements reinforced with FRCM composites and with the results of numerical calculations. As part of the analyses, it was proposed to modify the guidelines for estimating the load capacity of reinforced elements based on a comparison with the conducted experimental tests. It was indicated that the current recommendations lead to underestimation of the strengthening effect of elements. A new value of the critical calculation parameter was established, which led to the optimization of the estimation of the load capacity of this type of elements.

The dissertation was summarized in the form of conclusions confirming the achievement of scientific goals. Further potential directions of research and analysis were indicated in the field similar to the subject of the work.