

Prof. dr hab. inż. Renata Kotynia
Politechnika Łódzka
Katedra Budownictwa Betonowego
Al. Politechniki 6, 90-924 Łódź
e-mail: renata.kotynia@p.lodz.pl
tel. 501 282 893

Łódź, dn. 13 października 2023

Recenzja pracy doktorskiej

mgr inż. Filipa Grzymskiego

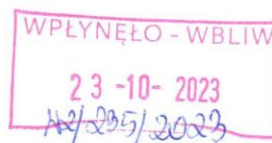
**pt. „ZAKOTWIENIE SIATEK KOMPOZYTÓW WZMACNIAJĄCYCH NA
ZAPRAWIE MINERALNEJ W ELEMENTACH PŁYTOWYCH”**

1. Podstawa formalna opracowania recenzji

Przedmiotem recenzji jest praca doktorska mgr inż. Rafała Grzymskiego z Politechniki Wrocławskiej pt. „Zakotwienie siatek kompozytów wzmacniających na zaprawie mineralnej w elementach płytowych”. Praca powstała pod kierunkiem promotorów z Katedry Konstrukcji Budowlanych, Wydziału Budownictwa Lądowego i Wodnego, Politechniki Wrocławskiej: dr hab. inż. Tomasza Trapko, prof. uczelni oraz dr inż. Michała Musiała.

Podstawę formalną recenzji stanowi:

- [1] Pismo Przewodniczącego Rady ds. Stopni Naukowych w dyscyplinach Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Wrocławskiej, prof. dr hab. inż. Wojciecha Puły, z dnia 28.06.2023 r.
- [2] Uchwała nr 317/51/RDND06/2021-2024 z dnia 07 czerwca 2023 r Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport.
- [3] Umowa o dzieło nr 02/07/PRR/2023 z dnia 03.07.2023 r. na opracowanie recenzji rozprawy doktorskiej pana mgr inż. Filipa Grzymskiego, zawarta pomiędzy Recenzentką, a Prorektorem ds. Nauki, prof. dr hab. inż. Andrzejem Ożyharą.
- [4] Rozprawa doktorska mgr inż. Filipa Grzymskiego pt. "Zakotwienie siatek kompozytów wzmacniających na zaprawie mineralnej w elementach płytowych", Politechnika Wrocławska, Wydziału Budownictwa Lądowego i Wodnego, Wrocław, maj 2023 (1 tom).
- [5] Ustawa z dnia 3 lipca 2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2018 r. poz. 1669).



[6] Ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2023 r. poz. 742, 1088, tekst ujednolicony).

[7] Recenzje w postępowaniach o awans naukowy. Poradnik. Rada Doskonałości Naukowej, Warszawa, 2022 r.

Zgodnie z art.187 ust. 1 i 2 ustawy [6] oraz poradnikiem RDN [7] niniejsza recenzja zawiera w szczególności następujące oceny:

- a) ocena wraz z uzasadnieniem, czy rozprawa doktorska prezentuje **ogólną wiedzę teoretyczną Kandydata** w dyscyplinie „inżynieria lądowa, geodezja i transport”;
- b) ocena wraz z uzasadnieniem, czy rozprawa doktorska wykazuje **umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej** przez Kandydata;
- c) ocena wraz z uzasadnieniem, czy rozprawa doktorska stanowi **oryginalne rozwiązanie problemu naukowego lub oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników badań naukowych** Kandydata w sferze gospodarczej.

Zgodnie z ustawą [6] oraz poradnikiem RDN [7] brak jest podstaw prawnych, by recenzentka wyraziła w recenzji opinie odnoszące się do innych kwestii niż te, które zostały przedstawione powyżej, które jednoznacznie wynikają z przepisów ustawy [6]. Jednocześnie recenzentka uwzględniła wszystkie wymagania sprecyzowane w wytycznych RDN [7], że pozytywna recenzja końcowa rozprawy doktorskiej musi być wynikiem **pozytywnej oceny wszystkich wyżej wymienionych zagadnień**, które podlegają ocenie recenzentki.

2. Charakterystyka ogólna rozprawy

Przedmiotem rozprawy doktorskiej Kandydata jest zgodnie z tytułem: „Zakotwienie siatek kompozytów wzmacniających na zaprawie mineralnej w elementach płytowych”. Rozprawa obejmuje 205 stron w postaci jednego tomu złożonego z 8 rozdziałów, streszczeń w języku polskim i angielskim oraz spisu skrótów, definicji symboli oraz znaczeń literowych przyjętych w pracy w postaci: dużych i małych liter łacińskich i greckich. Rozprawa zawiera 202 rysunki, 46 tabel, a piśmiennictwo 88 pozycji, 4 normy oraz 10 pozycji materiałów producentów.

Układ rozprawy: zgodnie z art.187 ust.3 ustawy [6] rozprawa ma charakter monografii naukowej, zawierającej obszerny przegląd stanu wiedzy w zakresie badań i precyzyjnie opisanych publikacji w zakresie wzmocnień płyt żelbetowych materiałami kompozytowymi z matrycą mineralną (rozdział 2.3.1), innymi materiałami kompozytowymi (rozdział 2.3.2) oraz kompozytami na bazie zaprawy mineralnej (rozdział 2.4). Podsumowanie (rozdział 2.5) stanowi integralną część pracy. W rozdziale 3 Kandydat precyzyjnie opisał naukowe cele pracy. W rozdziale 4 Kandydat przedstawił własne badania doświadczalne uwzględniając w nich: cel i zakres badań; przygotowanie elementów badawczych; badania materiałowe betonu, stali i materiałów kompozytowych PBO-FRCM; badania doświadczalne elementów badawczych; wyniki badań doświadczalnych elementów w kontekście nośności elementów i mechanizmów zniszczenia. To jest chyba najbardziej znaczący element rozprawy doktorskiej Kandydata. Biorąc pod uwagę

Rozdział 5 obejmujący Analizy teoretyczne, to kolejny dość istotny element pracy Kandydata, zwłaszcza w kontekście Modelu numerycznego opisanego w Rozdziale 5.2. W rozdziale 6 Kandydat opisał Podsumowanie i wnioski końcowe, a w rozdziale 7 Spis literaturowy. Oceniając ogólnie wykorzystane przez Kandydata piśmiennictwo, można stwierdzić, że zostało ono dobrane prawidłowo, w liczbie adekwatnej do celów naukowych i tezy rozprawy oraz zostało bardzo efektywnie wykorzystane, zwłaszcza w części rozprawy zawierającej przegląd stanu wiedzy, a także w rozdziale opisującym metody analityczne i numeryczne projektowania tego typu wzmocnień. Kandydat rzetelnie zebrał i przeanalizował wiedzę z większości zagranicznych publikacji w zakresie przedmiotu rozprawy oraz wybranych wytycznych, zawierających stosowne procedury obliczeniowe. O dziwo żadna z publikacji nie jest autorskim wydaniem Kandydata.

3. Ogólna ocena merytoryczna rozprawy

3.1. Geneza i zasadność podjęcia tematu

Genezę i uzasadnienie podjęcia tematu Kandydat opisał bardzo rzetelnie. Szczególnie w kontekście Rozdziału 2, pracy w którym doskonale ujął aspekty wcześniejszych badań opartych na bazie matrycy polimerowej i zaprawy mineralnej. Ten ostatni wydaje się być najbardziej precyzyjnym opisem, zasługującym na pochwałę w kontekście rzetelności opracowania i skrupulatnych opisów wyników badań. Nie ulega wątpliwości, że problem modernizacji opartej na wzmacnianiu istniejących konstrukcji budowlanych jest bardzo aktualny ze względu na starzenie się obiektów budowlanych i infrastrukturalnych, a biorąc pod uwagę aspekty odporności ogniowej siatek PBO szczególnie istotny. Ponieważ ze względów ekonomicznych nie jest możliwe zastąpienie wszystkich starszych obiektów nowymi, istnieje od wielu lat zapotrzebowanie na efektywne metody przywracania pełnej przydatności eksploatacyjnej funkcjonującym budynkom.

Praca dotyczy kompozytów na bazie zaprawy mineralnej (*FRCM - Fabric Reinforced Cementitious Matrix*), które są materiałem wykorzystywanym przy wzmacnianiu konstrukcji żelbetowych i murowych na zginanie, ścinanie lub ściskanie. Ich głównym składnikiem są wysokowytrzymałe włókna, które mocowane są do konstrukcji przy użyciu zaprawy mineralnej pełniącej funkcję matrycy kompozytowej. Rozprawa doktorska przedstawia zagadnienia wpływu zakotwienia siatki kompozytu FRCM z włóknami PBO na nośność i odkształcalność jednokierunkowo zginanych żelbetowych elementów płytowych. Celem pracy jest ocena wpływu wzmocnienia kompozytowego PBO-FRCM oraz sposobu ukształtowania zakotwienia siatki kompozytu, na efektywność wzmocnienia zginanych żelbetowych elementów płytowych. Za postawę analiz przyjęto wyniki badań doświadczalnych, w ramach których zbadano siedem elementów żelbetowych, z których sześć wzmocniono na zginanie kompozytami FRCM z różnymi typami zakotwienia. 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 odkształcalności elementów. W żadnym z elementów

badawczych nie uzyskano pełnego wykorzystania możliwości wysokowytrzymałej siatki PBO, a do utraty nośności elementu dochodziło na skutek odspojenia kompozytu na styku włókno-matryca, co uniemożliwiało dalsze efektywne przenoszenie obciążeń.

3.2. Przegląd stanu wiedzy

Przegląd stanu wiedzy w przedmiocie rozprawy zawarty w Rozdziale 2 (łącznie 82 strony), stanowi ok. 40% podstawowej treści pracy i obejmuje:

- przegląd literatury krajowej i zagranicznej pod kątem tematów związanych ze wzmacnianiem płyt żelbetowych oraz zastosowaniem nowoczesnych materiałów kompozytowych do wzmacniania konstrukcji żelbetowych (p. 2.2);
- ciekawie opisuje tradycyjne metody wzmacniania płyt żelbetowych ilustrujące przykłady wykonania różnego typu zespoleń: przez zwiększenie szorstkości podłoża wzmacnianej płyty oraz łączniki mechaniczne zespalające warstwy płyty;
- opis materiałów kompozytowych na bazie matrycy polimerowej oraz bazy zaprawy mineralnej - FRCM (ang. *Fabric Reinforced Cementitious Matrix*), gdzie najczęściej stosuje się dwukierunkowe lub jednokierunkowe siatki z rozdzielonymi wiązkami włókien, które zwiększają możliwości penetracji matrycy mineralnej oraz zapewniają lepsze 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 przyczepności kompozytu (p. 2.3).
- cechą nadrzędną są wykorzystywane w kompozytach FRCM włókna: szklane, węglowe, bazaltowe oraz nowoczesne włókna syntetyczne wykonane z materiału o nazwie PBO (*p-phenylene Benzobis Oxazole*).

Ponadto, częstym zamiennikiem kompozytów FRCM są materiały: TRM (ang. *Textile Reinforced Mortar*), TRC (ang. *Textile Reinforced Concrete*) oraz MBC (ang. *Mineral Based Composite*). Najczęściej stosowane kompozyty to TRM, TRC oraz SRG (ang. *Steel Reinforced Grout*) bazujące na siatkach stalowych z cienkiego drutu.

Mimo, że w normach bazujących na kompozytach FRCM (ACI 549.4R-13 oraz AC 343-13) przedstawiony wyidealizowany model kompozytu FRCM, przedstawia dwuliniowy charakter pracy, to pierwsza faza pracy kompozytu opisuje jego zachowanie przed zarysowaniem matrycy mineralnej, a druga fazę „T”, która opisuje nagłą zmianę sztywności kompozytu.

Interesujące są badania opisujące trzy fazy pracy konstrukcji, które uwzględniają występowanie dodatkowej pośredniej fazy rozwoju zarysowań zamiast punktu przejściowego „T” opisywanego w normach ACI 549.4R-13 oraz AC 343-13. Występowanie dodatkowej fazy pracy kompozytu FRCM związane jest z progresywnym powstawaniem rys w matrycy wraz ze zwiększaniem odkształceń kompozytu, co Kandydat opisał w rozdziale 2.2.2 (Rys. 15 i 16).

Pierwsza faza pracy kompozytu zależna jest od parametrów matrycy oraz włókien. Nachylenie wykresu w 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. Z tego względu celowe było podjęcie przez Kandydata innowacyjnych rozwiązań kotwienia siatek PBO-FRCM w celu zwiększania efektywności wzmocnienia jednokierunkowo zginanych płyt żelbetowych.

Na podstawie przeglądu literatury Kandydat bardzo skrupulatnie opisał sposoby zakotwienia kompozytów FRCM w zginanych żelbetowych elementach płytowych, które uzupełniają zagadnienia nauki i inżynierii. Ponadto zwrócił szczególną uwagę, na istotę zakotwienia wprowadzoną w badaniach porównawczego elementu wzmocnionego bez i z zakotwieniem. Bardzo cenny jest wniosek Kandydata, o wysokiej efektywności wzmocnienia tym wyższej im niższa jest pierwotna nośność wmacnianego elementu. Efekt ten byłby szczególnie widoczny w elementach o niskim stopniu zbrojenia oraz zastosowaniu betonu o lepszych parametrach wytrzymałościowych.

Z uwagi na bardzo dobre rozpoznanie pracy kompozytów FRCM i ich współpracy z powierzchnią betonu Kandydat zaproponował, aby bazowe elementy badawcze przeznaczone do wzmocnienia miały jak najlepiej odzwierciedlać rzeczywistą konstrukcję przez właściwy układ zbrojenia, co pozwoli na uzyskanie rzeczywistych parametrów związanych z pracą tego typu wzmocnień i będzie podstawą określenia celu i tezy rozprawy.

3.3. Cele i teza rozprawy

Podstawowym celem pracy doktorskiej mgr inż. Rafała Grzymskiego było:

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 odkształcalności elementów badawczych.

4. Opinia Recenzentki dotycząca rozprawy

4.1. Własne badania doświadczalne

Badania doświadczalne Kandydat opracował na Wydziale Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej w zakresie skuteczności zakotwienia siatek kompozytu PBO-FRCM w celu zwiększenia efektywności wzmocnienia jednokierunkowo zginanych płyt żelbetowych i opisał je szczegółowo w Rozdziale 4. Kandydat sprawdził zależność między wpływem zastosowanego zakotwienia siatki kompozytu na nośność i mechanizmy zniszczenia wzmocnionych elementów. Z badań wynika, że kompozytowe PBO-FRCM uległy

przedwczesnemu zniszczeniu wskutek poślizgu włókien w matrycy lub odspojenia kompozytu od wzmacnianego elementu.

Zaproponowane dwa typy zakotwienia siatek kompozytowych:

- a) **zakotwienie przez nawinięcie końców siatki PBO na pręt z włókien szklanych (GFRP), wklejony w bruzdę znajdującą się w strefie przypodporowej płyty – typ A,**
- b) **zakotwienie przez przewleczenie sznura PBO przez płytę i zintegrowanie go z siatką kompozytu i promieniste rozprowadzenie włókien sznura w formie wachlarza – typ B,**
- c) **PBO-FRCM bez dodatkowego zakotwienia – typ C.**

Elementy badawcze obejmowały płyty żelbetowe o długości 2000 mm, szerokości 1000 mm i grubości 150 mm. Zbrojenie dolne płyt wykonano z 8 prętów \varnothing 10 mm, a zbrojenie główne górne z 8 prętów \varnothing 8 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. Dodatkowo zbadano jeden element świadek identyczny z pozostałymi w celu porównania wyników badań. Badania wykonano z betonu klasy C20/25 i stali gatunku St3SY-b500. Przy tym badania kompozytów PBO-FRCM opracowano na siatkach PBO-FRCM Ruredil X Mesh Gold z włókien PBO i zaprawy mineralnej Ruredil X Mesh M750.

Płyty wzmocniono na dolnej powierzchni jedną warstwą kompozytu na całej szerokości płyt i na długości 1600 mm (bez wzmocnienia na 200 mm od końca płyty). Zatopioną w zaprawie siatkę PBO pokryto podwójną warstwą zaprawy, której zewnętrzną powierzchnię wyrównano przy użyciu gładkiej zaprawy murarskiej. Wzmocnienie wykonywano etapami w celu odpowiedniego połączenia obu warstw zaprawy, a następnie elementy pozostawiono do całkowitego związania zaprawy.

Trzy zaproponowane zakotwienia siatki obejmowały:

- Typ 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 kompozytowy pręt GFRP \varnothing 6 mm i długości 1000 mm wykonywane były w czasie opisanego wcześniej etapu wzmacniania elementów (Rys. 88).

- Typ B: sznur z włókien PBO RureGold JX JOINT o średnicy 6 mm połączono z dedykowaną zaprawą mineralną RureGold JM JOINT. 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 włożono zaprawę mineralną JM JOINT przy użyciu mechanicznego pistoletu do iniekcji, a potem przez otwory przewleczono zaimpregnowany wcześniej zaprawą mineralną sznur PBO o długości 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 również rozprowadzono promieniście i przytwierdzono do płyty przy użyciu dwóch warstw zaprawy mineralnej (Rys. 89).

- Typ C: nie zastosowano dodatkowego zakotwienia (Rys. 90).

Stanowisko badawcze stanowiło płytę jednokierunkowo zbrojoną w schemacie czteropunktowego zginania. Podpory umieszczono w rozstawie osiowym 1700 mm, z których jedna była podporą nieprzesuwną, a druga przesuwną. Obciążenie wykonano przy użyciu siłownika hydraulicznego Instron Dynacell o zakresie siły od 0 kN do 500 kN, przy czym rozłożono je na dwie siły za pomocą sztywnego stalowego trawersu, którym obciążono stalowe wałki ułożone na płycie. 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. Podczas badań elementów płytowych mierzono: 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 (Rys. 108 i 109). Dodatkowo w przypadku elementów wzmocnionych kompozytem PBO-FRCM rejestrowano: odkształcenia podłużne kompozytu oraz odkształcenia poprzeczne kompozytu przy użyciu tensometrów ułożonych na górnej powierzchni płyt.

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 5 cm marginesu od krawędzi bocznej elementu (Rys. 113).

Na dolnym zbrojeniu płyty umieszczono tensometry na trzech prętach głównego zbrojenia dolnego rozmieszczone równomiernie po 7 tensometrów w rozstawach co 250 mm. W dolnym zbrojeniu prostopadłym do głównego kierunku zginania na prętach najbliższych środkowego przekroju płyty zastosowano trzy punkty pomiarowe – na środku długości pręta oraz dwa punkty w odległości 150 mm od obu krawędzi bocznych płyty. 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. Ponadto podczas pomiarów wykonano analizę szerokości rys na bocznej powierzchni płyty przy użyciu lupy z podziałką, co umożliwiło dokładną analizę rys.

4.2. Wyniki badań doświadczalnych i ich analiza

Badania przeprowadzone przez Kandydata (opisane w rozdziale 4.6) jednoznacznie wykazały, że wzmocnienia PBO-FRCM są efektywne w zakresie wzmacniania jednokierunkowo zginanych płyt żelbetowych. Ponadto Kandydat w oczywisty sposób potwierdził, że brak dodatkowego zakotwienia siatki kompozytu PBO-FRCM pozytywnie wpływa zarówno na nośność elementów badawczych, jak i właściwości związane ze stanem użytkowalności w zakresie ugięć i szerokości rozwarcia rys. Potwierdza to jednoznacznie, że system PBO-FRCM ma znaczący wpływ na nośność i odkształcalność wzmocnianych płyt żelbetowych w zakresie zginania i mechaniki pracy płyt żelbetowych. Chociaż dla właściwej analizy tych badań należałoby poszerzyć ich zakres o drugi niewzmocniony element. Ponadto, w celu dokładnej analizy badań należałoby wprowadzić uzupełnienie dotyczące różnic w opisywanych elementach badawczych i wskazać przyczynę, różnic w elementach badawczych. Te aspekty zostaną omówione szerzej w punkcie 5 niniejszej recenzji.

4.3. Analizy teoretyczne

4.3.1. Analityczny model obliczeniowy (Rozdz. 5.1)

Przy wzmocnianiu Kandyd wykorzystał zalecenia dokładne obliczenia wynikające z wykonanych badań materiałowych (Tab. 38):

- zbrojenie dolne - $f_{y,s1} = 543$ MPa; $E_{y,s1} = 187$ GPa

- zbrojenie górne $f_{y,s2} = 553$ MPa; $E_{y,s2} = 197$ GPa

Odkształcenie dla obu poziomów zbrojenia rozciąganego są odpowiednio:

- zbrojenie dolne: $\varepsilon_{y,s1,10} = 2,9$ ‰; $\varepsilon_{y,s1,8} = 2,8$ ‰, a nie 2,10‰, jak pokazano w Tabeli 39.

Dane materiałowe dla elementów wzmocnionych kompozytami FRCM są następujące:

- $h_{FRCM} = 5$ mm; $E_{FRCM} = 128$ GPa; $A_{FRCM} = 45$ mm²; $\varepsilon_{fe} = 1,2$ ‰; $\sigma_{FRCM} = 153,6$ MPa

Nie wiadomo na podstawie jakich obliczeń Kandydat określił nośność elementu niewzmocnionego i wzmocnionego przy wysokościach strefy ściskanej: $x = 17,13$ mm i $x = 20,90$ mm, w postaci momentów: $M_R = 42,96$ kNm i $M_{R,FRCM} = 49,89$ kNm.

4.3.2. Numeryczny model obliczeniowy (Rozdz. 5.2)

Numeryczna analiza obliczeniowa oparta była na analizie metody elementów skończonych, dla której Kandydat opracował model o geometrii i parametrach materiałowych odpowiadających wykorzystanym elementom badawczym oraz stanowisku badawczemu. Analizę obliczeniową przeprowadzono w programie Abaqus. W obliczeniach Kandydat uwzględnił nieliniowość materiałową oraz geometryczną zadania, dla którego opracował trzy parametry numeryczne obejmujące: element bryłowy (*Solid*) – modelowanie płyty betonowej; element prętowy (*Wire*) – modelowanie prętów zbrojeniowych; element powłokowy (*Shell*) – modelowanie wzmocnienia

kompozytowego FRCC. Model obliczeniowy stanowił $\frac{1}{4}$ całej płyty (Rys. 193). Wszystkie wykresy ugięć, odkształceń stali i dla elementów niewzmocnionych są w miarę poprawne, ale zaskakujące są wykresy ugięć, odkształceń stali i kompozytu pokazane na rysunkach 200-203.

4.4. Podsumowanie rozprawy

Podsumowanie rozprawy zawiera zestawienie wniosków jakościowych i ilościowych, sformułowanych przez Kandydata w poszczególnych rozdziałach rozprawy (Rozdziałach 2.5, 4.7 oraz 5.5). Sugerowane przez Kandydata kierunki dalszych badań zostały opisane w Rozdziale 6, gdzie Kandydat przedstawił wyniki badań doświadczalnych i analiz teoretycznych związanych z badaniami jednokierunkowo zginanych płyt żelbetowych wzmocnionych na zginanie kompozytami PBO-FRCM z różnymi typami zakotwień oraz rzetelnie opracował kierunki dalszych badań poszerzone o następujące zagadnienia:

- poszerzenie badań o elementy o mniejszej grubości i mniejszym stopniu zbrojenia stałą, czego zaletą jest efekt wyższej nośności po wzmocnieniu;
- poszerzenie badań wpływu zakotwienia o kompozyty FRCM z włóknami węglowymi lub zwiększenie liczby warstw siatki FRCM;
- opracowanie badań o innym schemacie statycznym, który ułatwiłby większą mobilizację siatki na kierunku prostopadłym do głównego kierunku zginania;
- badanie wpływów reologicznych i wpływu długotrwałego obciążenia, wpływów obciążeń cyklicznych, zachowania w warunkach wysokiej temperatury lub w sytuacji pożarowej;
- badania innych mechanicznie kotwionych siatek kompozytu, co zwiększyłoby efektywność wzmocnień FRCM;
- sformułowanie uproszczonych metod obliczeń nośności elementów płytowych wzmocnionych kompozytami PBO-FRCM.

5. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

Mam szereg uwag i wątpliwości dotyczących wyników badań:

1. Dlaczego Kandydat nie wykonał własnych badań materiałowych włókien PBO i siatek z nich wykonanych, a tylko zaprezentował właściwości włókien rekomendowane przez producenta Ruredil X Mesh Gold [97, 98]; Ruregold JX JOINT [99]; Ruredil PBO-MESH 70/18 [101,102]. Przyjęcie danych producentów w analizach wyników badań doświadczalnych, numerycznych i analitycznych może negatywnie wpłynąć na wiarygodność wniosków z nich wyciągniętych. Czy Kandydat może oszacować ten wpływ?
2. Skąd pochodzą tak znaczące różnice wykresów obciążenie-ugięcie w płytach P_C_1 i P_C_2 oraz P_B_1 i P_B_2 (Rys. 127)? Czy jest to wynik niewłaściwego kotwienia?
3. Zaskakujące są duże dysproporcje w odkształceniach podłużnych zbrojenia dolnego między elementami o tym samym wzmocnieniu (Rys. 147)
4. Na wykresie (Rys. 153) są również bardzo duże różnice w odkształceniach betonu po stronie rozciąganej i ściskanej. W szczególności dotyczy to płyt wzmocnionych bezkotwowo P_C_1 i P_C_2. Czy nie jest to błąd pomiaru w płycie P_C_1?

5. Podobnie na wykresie (Rys. 167) występują ogromne rozbieżności odkształceń podłużnych bezkotwowych siatek w płytach P_C_1 i P_C_2 oraz płytach P_B_1 i P_B_2.
6. Skoro zasadniczym efektem wzmocnienia było prętowe kotwienie kompozytowej siatki PBO-FRCM wynoszące 47,4%, a w zakotwieniu sznurowym 31,3% oraz braku zakotwienia zaledwie 30,2%, to dlaczego Kandydat nie zdecydował się na badania o mniejszym zbrojeniu podłużnym. To z pewnością zwiększyłoby nośność wzmocnionych elementów.
7. Czemu na wykresach (Rys. 181 – 186) brakuje rozkładu odkształceń podłużnych na wysokości płyt P_A_2, P_B_1 oraz P_C_2? Czy Kandydat mógłby to wyjaśnić?
8. Czemu Kandydat opracował porównanie nośności z ograniczeniami odkształceń kompozytu jedynie bazie analizy normy ACI 549.4R-13 [8], bez dodatkowej analizy numerycznej w programie Abaqus?

5.1. Analizy redakcyjne

1. Dlaczego na wykresie (Rys. 21) brakuje wykresu dla temperatury 600°C, mimo, że na tym rysunku są zdjęcia odpowiednio dla temperatur 20°C, 200°C, 400°C i 600°C? Czy wykres dla temp. 20°C nie powinien być powyżej 200°C?
2. Definicja płyty jest następująca: $l/b > 3$; $l_{min}/h > 4$; $0,5 \leq l_y/l_x \leq 2,0$. Dlatego w żadnym z prezentowanych w rozdziale 2 przykładów nie powinno być słowa płyta, tylko belka.
3. W których belkach na Rys. 45 zastosowano strzemiona?
4. Na rysunku 47 brakuje przekroju ilustrującego schemat statyczny elementu oraz sposobu wzmocnienia.
5. Str. 60; linijka druga od góry: powinno być: *zmiażdżenie*, a nie *skruszenie*
6. Str. 103; linijka 3 od dołu: powinno być: 8 prętów o średnicy 8 mm, zamiast 8 prętów o średnicy 10 mm.

6. Ocena spełnienia przez rozprawę doktorską warunków określonych w art.187 ust.1 i 2 ustawy [6]

W recenzowanej pracy doktorskiej mgr inż. Filip Grzymski wykazał się bardzo dobrą znajomością aktualnego stanu wiedzy w zakresie objętym tematem pracy oraz umiejętnościami rozwiązywania problemów teoretycznych. Analiza treści rozprawy pozwala więc ocenić ogólną wiedzę teoretyczną Kandydata w przedmiotowej dyscyplinie, jako **wystarczającą i satysfakcjonującą w świetle wymagań ustawowych**. W szczególności Kandydat wykazał się **dobrą wiedzą ogólną w zakresie konstrukcji żelbetowych, metod ich projektowania oraz technologii wzmacniania**.

O ile stan wiedzy jest perfekcyjny, to zakres badań i ich analiza są dosyć ubogie w treści i opisach modelowania, w szczególności numerycznego przeprowadzonego w programie Abaqus.

Mimo, że rozprawa doktorska stanowi **oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników badań naukowych**, to Kandydat nie wykazał się żadnymi osiągnięciami w sferze gospodarczej.

Współczesna inżyniera lądowa jest od dawna nauką interdyscyplinarną, a rozprawa Kandydata dokładnie pokazuje zasadność tego stwierdzenia. Kandydat w rozprawie wykorzystał wiedzę ogólną z dwóch dyscyplin z dziedziny nauk inżynieryjno-technicznych, efektywnie i skutecznie połączył je dla realizacji głównych celów rozprawy. Dlatego jednoznacznie stwierdzam, że rozprawa doktorska **spełnia ogólną wiedzę teoretyczną** Kandydata w dyscyplinie „inżynieria lądowa, geodezja i transport”, przez co spełnia ona warunek określony w art.187 ust. 1 ustawy [6].

Podsumowując mogę jednoznacznie stwierdzić, że oczywiste walory poznawcze rozprawy, oryginalne rozwiązanie postawionego problemu metodami naukowymi, a także wykazana w pracy ogólna wiedza teoretyczna i umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez Kandydata, upoważniają mnie do stwierdzenia, że rozprawa doktorska mgr. Filipa Grzyskiego pt. „Zakotwienie siatek kompozytów wzmacniających na zaprawie mineralnej w elementach płytowych”, **spełnia wymogi stawiane rozprawom doktorskim w ustawie [6]** oraz skłania do postawienia wniosku **o przyjęcie rozprawy doktorskiej oraz o dopuszczenie jej do publicznej obrony.**

Renata Kotynia

Łódź, 13.10.2023