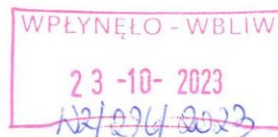


Prof. dr hab. inż. Łukasz Drobiec
Katedra Konstrukcji Budowlanych
Zespół Konstrukcji betonowych i murowych
Wydział Budownictwa
Politechnika Śląska
Ul. Akademicka 5, 44-100 Gliwice

Gliwice, 3.10.2023 r.



Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. Filipa Grzymskiego

pt. „Zakotwienie siatek kompozytów wzmacniających na zaprawie mineralnej w elementach płytowych”

1. Podstawa opracowania recenzji

Podstawą opracowania recenzji jest uchwała Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Wrocławskiej nr 316/251/RDND06/2021-2024 z dnia 7.06.2023 r. (zgodnie z pismem L.dz. W2/862/2023 otrzymanym od Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Wrocławskiej prof. dr hab. inż. Wojciecha Puły).

2. Charakterystyka rozprawy

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr inż. Filipa Grzymskiego pt. „Zakotwienie siatek kompozytów wzmacniających na zaprawie mineralnej w elementach płytowych”. Praca

ma charakter teoretyczno-badawczy i składa się z 8 rozdziałów. Bibliografia obejmuje 88 pozycji piśmiennictwa (brak pozycji autorskich i współautorskich Doktoranta), 4 pozycje zawierające normy i 10 materiałów producentów. Tekst rozprawy liczy 205 stron i zawiera 202 rysunki, 46 tabel oraz 10 wzorów. Na końcu pracy zamieszczono streszczenie pracy w języku polskim i angielskim.

W rozdziale 1, tj. w krótkim wstępie, Doktorant omówił genezę podjęcia przyjętego tematu rozprawy doktorskiej, przyjął, że przedmiotem pracy będą badania doświadczalne i analizy teoretyczne związane z jednokierunkowo zginanymi płytami żelbetowymi, wzmocnionymi na zginanie kompozytami PBO-FRCM (p-Phenylene BenzobisOxazole <syntetyczny polimer, z którego wykonuje się włókna o bardzo wysokiej wytrzymałości> – Fabric Reinforced Cementitious Matrix <materiał kompozytowy składający się z siatki wykonanej z wysokowytrzymałych włókien oraz matrycy mineralnej>), które składają się z syntetycznych włókien PBO zatopionych w matrycy mineralnej. Przyjął cel pracy, którym było określenie wpływu sposobu ukształtowania i zakotwienia siatki zewnętrznego kompozytowego wzmocnienia PBO-FRCM na efektywność wzmocnienia na zginanie płyt żelbetowych i sprawdzenie wpływu wzmocnienia PBO-FRCM oraz jego zakotwienia na odkształcenia płyty jednokierunkowo zginanej w kierunku prostopadłym do głównego kierunku zginania. W rozdziale tym Doktorant przyjął również zakres pracy, składający się z: przeglądu aktualnego stanu wiedzy, własnych badań doświadczalnych, analiz porównawczych z obliczeniami teoretycznymi i określenia kierunków dalszych badań. W rozdziale 1 opisano ponadto oznaczenia literowe przyjęte w pracy oraz podstawowe skróty i definicje.

Rozdział 2 zawiera przegląd literatury związanej z tematem rozprawy. Zamieszczono tu podstawowe informacje o tradycyjnych metodach wzmacniania płyt żelbetowych, ogólną charakterystykę materiałów kompozytowych wykonywanych na bazie matrycy polimerowej oraz na bazie zaprawy mineralnej oraz opisano wyniki badań wzmocnień płyt żelbetowych materiałami kompozytowymi. Przeprowadzony przegląd literatury wykazał między innymi, że aspekt zakotwienia kompozytów FRCM przy wzmacnianiu elementów płytowych nie został poruszony w żadnej publikacji naukowej. To skłoniło Doktoranta do podjęcia recenzowanej pracy doktorskiej i ukierunkowało program badawczy.



W rozdziale 3 zamieszczono cele naukowe pracy, przyjęte na podstawie przeprowadzonego przeglądu literatury oraz analizy obecnego stanu wiedzy w zakresie technologii wzmocnień FRCM. Za cele naukowe pracy przyjęto:

- wykazanie wpływu wzmocnień na zaprawie mineralnej (FRCM) na nośność i odkształcalność jednokierunkowo zginanych płyt żelbetowych,
- wykazanie wpływu zakotwienia siatek kompozytu wzmocnień na zaprawie mineralnej (FRCM) na nośność i odkształcalność jednokierunkowo zginanych płyt żelbetowych,
- stworzenie propozycji modelu analitycznego szacowania nośności jednokierunkowo zginanych płyt żelbetowych ze wzmocnieniem na zaprawie mineralnej (FRCM),
- weryfikacja modelu oraz badań doświadczalnych z wykorzystaniem modelu numerycznego.

Rozdział 4 dotyczy badań własnych. Opisano w nim przyjęty zakres badań oraz stanowisko badawcze, metodykę badań, uzyskane wyniki i ich analizę. Badania realizowano na 7 elementach płytowych o wymiarach 0,15x1,0x2,0 m, z czego 6 było wzmocnionych kompozytem PBO-FRCM. Z tych 6 elementów wyodrębniono 3 serie po dwa elementy. W serii I (oznaczonej P_A) zakotwienie wzmocnienia zrealizowano przez nawinięcie siatki na pręt GFRP i umieszczenie go na zaprawie systemowej w bruździe wykonanej przed podporą. W serii II (oznaczonej P_B) zakotwienie wzmocnienia wykonano w postaci sznura PBO przewleczonego przez nawiercone otwory w płycie i zintegrowanie go z siatką kompozytu poprzez promieniste rozprowadzenie włókien sznura i ukształtowanie zakotwienia w formie wachlarza. Seria III (oznaczonej P_C) nie miała zakotwienia – matrycę PBO-FRCM układano jednakowo na całej długości płyty między podporami.

Podczas badań rejestrowano ugięcia płyty, przemieszczenia podpór płyty, odkształcenia podłużne górnej i dolnej powierzchni betonu, odkształcenia poprzeczne górnej i dolnej powierzchni betonu, odkształcenia podłużne głównych dolnych prętów zbrojeniowych, odkształcenia podłużne drugorzędnych dolnych prętów zbrojeniowych oraz odkształcenia podłużne i poprzeczne kompozytu. W tym celu na zewnątrz i wewnątrz elementów badawczych zabudowano wiele elementów pomiarowych. Prowadzono pomiar transformatorowymi czujnikami przemieszczeń liniowych LVDT, pomiar tensometryczny na

betonie i zbrojeniu oraz pomiar światłowodowy. Recenzent musi tu pochwalić Doktoranta za dobre przygotowanie stanowiska badawczego. Wykorzystano prawie wszystkie dostępne metody pomiarowe – zabrało tylko pomiaru optycznego.

W rozdziale 4 zamieszczono obszerne analizy wyników wykonanych badań. Z uwagi na dużą liczbę pomiarów możliwe było przeanalizowanie wielu aspektów pracy wzmocnienia.

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 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 wmacnianego elementu, jednak nie wykazano znaczącego wpływu zakotwienia na nośność tego typu elementów.

W rozdziale 4 zamieszczono ponadto wyniki badań materiałowych.

W rozdziale 5 (analizy teoretyczne), zamieszczono analityczny model obliczeniowy oraz model zbudowany w programie bazującym na metodzie elementów skończonych (MES). Celem modelu analitycznego było określenie nośności zginanych płyt żelbetowych wzmocnionych kompozytem PBO-FRCM, a model MES posłużył do kontroli zgodności obliczeń. 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 i 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 i zaleceń amerykańskich ACI 549.4R-13 wykazały, że stopień wzmocnienia przedmiotowych elementów jest niedoszacowany o około 8%, co spowodowane jest narzuconym przez ACI 549.4R-13 ograniczeniem odkształcenia kompozytu do 1,2%, niezależnie od zastosowanego typu kompozytu. Zaproponowano zatem autorską modyfikację metody polegającą na zwiększeniu tego ograniczenia do 1,63% w celu uzyskania lepszej zbieżności z wynikami badań.

W rozdziale 6 zamieszczono podsumowanie, wnioski końcowe oraz program dalszych badań.

Rozdział 7 zawiera spis literatury, a rozdział 8 streszczenia w języku polskim i angielskim.

3. Ocena merytoryczna rozprawy

3.1. Ocena doboru tematu i postawionych celów rozprawy

Płytowe konstrukcje żelbetowe są wzmacniane w różny sposób. W ostatnim czasie popularność zdobyła metoda wzmocnień powierzchniowych systemami FRCM. Prowadzi się coraz więcej badań dotyczących tego typu wzmocnień. Nie został jednak podjęty temat zakotwień tych wzmocnień.

Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, że podjęty przez Doktoranta temat rozprawy jest oryginalny i aktualny, a zdefiniowany główny cel i zakres pracy są jasne, zasadne i ważne tak z naukowego jak i z praktycznego punktu widzenia.



3.2. Cele naukowe pracy

Cele naukowe pracy przyjęto poprawnie i wynikają one z przeprowadzonego przeglądu stanu wiedzy. Na bazie celów i zamierzeń pracy sformułowano program badawczy rozprawy. Program ten sformułowano poprawnie, a uzyskane wyniki mają znaczenie poznawcze oraz praktyczne i świadczą o oryginalności podjętego tematu.

3.3. Ocena naukowej wartości rozprawy

Za najważniejsze oryginalne osiągnięcia naukowe Autora uznaje:

- ▣ Przeprowadzenie badań laboratoryjnych 7 płyt, w tym 6 ze wzmocnieniami i różnymi zakotwieniami wzmocnień. Badania wykonano stosując różne techniki pomiarowe.
- ▣ Przeprowadzanie obszernej analizy wyników badań.
- ▣ Zaproponowanie modelu analitycznego i jego modyfikacji na podstawie analizy uzyskanych wyników badań.
- ▣ Wykonanie modelu w programie bazującym na MES i jego walidację.

4. Uwagi krytyczne

Jak każda praca, taki i recenzowana rozprawa nie jest wolna od drobnych błędów, niedopowiedzeń czy niedociągnięć. Uwagi do pracy recenzent podzielił na ogólne oraz na uwagi szczegółowe.

4.1. Uwagi ogólne

Uwaga dotycząca tytułu rozprawy

Recenzent uważa, że tytuł rozprawy jest zbyt ukierunkowany na zakotwienie wzmocnienia. Nie jest bowiem to jedyny aspekt analizowany w recenzowanej pracy. Przyjęte w rozdziale 5



rozwiązania analityczne i model numeryczny dotyczą nośności wzmocnienia na zginanie, a nie zakotwienia wzmocnienia. Zakotwienie ujęto tylko w jednym z czterech przyjętych celów naukowych pracy. Dlatego wydaje się, że lepszym tytułem pracy byłby: „Analiza pracy elementów płytowych ze wzmocnieniem kompozytami na zaprawie mineralnej z uwzględnieniem zakotwienia wzmocnienia”.

Uwaga dotycząca ilości badanych modeli

Łącznie przebadano 7 modeli, w tym 6 wzmocnionych. Nie jest to duża ilość. Recenzent zdaje jednak sobie sprawę z trudności technicznych i finansowych związanych z badaniem dużych modeli w laboratorium. Tym niemniej wydaje się, że dobrą praktyką jest przyjmowanie przynajmniej dwóch modeli w serii badawczej. W recenzowanej rozprawie przebadano tylko jeden model świadek (model bez wzmocnienia).

Uwaga wymiarów modeli badawczych i zastosowanych materiałów

Badane płyty miały wymiar 0,15x1,0x2,0 m. Nie są to elementy w skali naturalnej. Można było wykonać mniejszą grubość płyty, zastosować zbrojenia mniejszej średnicy i przeprowadzić badania np. w skali 1:2.

W badaniach wykorzystano zbrojenie ze stali klasy A-IIIIN, gatunku St3SY-b500. Jest to stal o najmniejszej ciągliwości - klasa A ($5,0\% > \epsilon_{uk} \geq 2,5\%$). Wydaje się, że ciekawsze wyniki w aspekcie zakotwienia wzmocnienia można było osiągnąć stosując stal o najwyższej klasie ciągliwości C ($\epsilon_{uk} \geq 7,5\%$). Uzyskano by wówczas większe ugięcia i większy wpływ na zakotwienie wzmocnienia.

Dlaczego zastosowano tak silne zbrojenie górne płyt?



Uwagi dotyczące modelu analitycznego

W modelu analitycznym jako wartość graniczną przyjęto ograniczenie odkształcenia kompozytu. Wydaje się, że oprócz tego ograniczenia wpływ na zachowanie się modelu będzie miała również krzywizna wzmocnionego elementu.

Model analityczny oparto na normie Eurokod 2 oraz wytycznych amerykańskich ACI 549.4R-13, które nie są zgodne z eurokodem. W pracy całkowicie pominięto włoską normę CNR-DT 215/2018, która dostępna jest też w języku angielskim. Norma ta jest zgodna z normami z pakietu eurokodów.

4.2. Uwagi szczegółowe

Uwagi szczegółowe dotyczą głównie znalezionych przez Recenzenta w tekście literówek, których jest jednak zaskakująco mało oraz drobnych błędów i niedopowiedzeń. Recenzent nie ma uwag do wyglądu i układu pracy, który ocenia bardzo wysoko.

Poniżej podano miejsca znalezionych błędów drukarskich:

Str. 12, sztywność płyty w różnych jej fazach pracy oznaczono przez $E_1 \div E_3$. Zwykle przez E oznacza się moduł sprężystości. Takie oznaczenie powoduje zakłopotanie czytelnika, który nagle w tablicy 25 na stronie 125 widzi E z jednostką kN/mm.

Str. 19, 11 wiersz od góry. „Istotnym jest fakt, iż wówczas przyczyna wzmocnienia konstrukcji bardzo często uwidacznia się przez zauważalne nawet dla niewprawnego obserwatora przekroczenia rozwarłości rys, widoczną korozję lub też rzadziej przez przekroczenia ugięć elementów.” Recenzent nie jest do końca może się z tym zgodzić. W elementach zginanych stan graniczny zarysowania i stan graniczny ugięć są ze sobą ściśle związane. Zwykle jednak występują równocześnie.

Str. 23, 11 wiersz od dołu. Zdanie: „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” jest za długie i nie jest do końca poprawne pod względem stylistycznym. Lepiej byłoby: „Kompozyty są szeroką grupą materiałów, w której skład wchodzi wszystkie materiały o niejednorodnej strukturze. Kompozyty złożone są zwykle z dwóch lub więcej faz o różnych właściwościach, a ich wynikowe parametry fizyczne i mechaniczne nie są sumą ani średnią właściwości poszczególnych jego składników”.

Str. 24, 1 wiersz od góry. Recenzent prosi o wyjaśnienie terminu stropy strukturalne.

Str. 28, 8 wiersz od dołu: jest „dwukierunkowa”, powinno być „dwukierunkową”,

Str. 29, 8 wiersz od dołu: Niefortunne zdanie: „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”. Lepiej byłoby: „Opisane właściwości włókien PBO, a w szczególności podwyższona odporność na wysokie temperatury powodują, że kompozyt FRCM z włóknami PBO ma lepsze właściwości w porównaniu do kompozytów FRP”.

Str. 39, 7 wiersz od góry: Zamiast: „rozwiązania numeryczne” lepiej byłoby: „analizy numeryczne”.

Str. 44, 15 wiersz od dołu: jest „poniżej”, powinno być „poniżej”,

Str. 75, 6 wiersz od góry: Niefortunne zdanie: „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”. Lepiej byłoby: „Rozkład odkształceń kompozytu z matrycą polimerową był bardziej równomierny – występowały mikro i makro spękania matrycy cementowej, co jest naturalnym mechanizmem jej pracy”.

Str. 113, tablica 18. Wynik próbki S1 odbiega znacznie od pozostałych. Jakiego było zniszczenie tej próbki? Może trzeba było odrzucić ten wynik.

Str. 130, 11 wiersz od dołu. Mniej spektakularny i bardziej ciągły sposób zniszczenia modeli z zakotwieniem sznurowym w porównaniu do zakotwienia prętowego świadczy, zadaniem recenzenta, o bezpieczniejszej pracy tego zakotwienia.

Str. 133, pkt 4.6.2. recenzent uważa, że powinno się pokazać zarysowania wszystkich badanych elementów a nie tylko elementów wybranych.

Str. 158, 2 wiersz od góry. Doktorant pisze: „*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% ...*”, tymczasem z powyższej tabeli 36 wynika, że było to odpowiednio 28% i 7%.

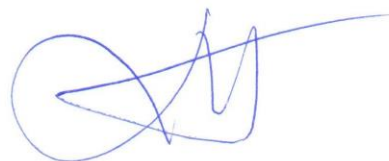
5. Wnioski końcowe

W recenzowanej pracy doktorskiej mgr inż. Filip Grzymski rozwiązał oryginalne zadanie naukowe, polegające na przeprowadzeniu badań doświadczalnych i przeprowadzaniu analizy wpływu zakotwienia wzmocnienia PBO-FRCM na nośność płyt żelbetowych. Stwierdzam, że główny cel rozprawy doktorskiej został osiągnięty. Doktorant wykazał się dobrą znajomością aktualnego stanu wiedzy w zakresie objętym tematem, umiejętnościami planowania i prowadzenia badań laboratoryjnych oraz rozwiązywania problemów teoretycznych. Przeprowadził badania doświadczalne, obliczenia analityczne oraz analizy numeryczne z wykorzystaniem oprogramowania MES, a do rozwiązania postawionego problemu zastosował poprawne metody badawcze. Uzyskał oryginalne wyniki oraz wykazał, że potrafi analizować i krytycznie oceniać uzyskane rezultaty oraz formułować poprawne wnioski poznawcze. Widzi również kierunki dalszych badań. Świadczy to o Jego odpowiednim przygotowaniu i predyspozycjach do samodzielnego prowadzenia prac naukowo-badawczych.

Uwagi krytyczne wymienione w punkcie 4 nie obniżają dobrego, moim zdaniem, poziomu merytorycznego i ogólnej wysokiej oceny dysertacji. Uwagi mają charakter porządkowy lub dyskusyjny i mam nadzieję, że przynajmniej w części będą pomocne Autorowi podczas przygotowywania artykułów do czasopism naukowych.

Oceniam, że rozprawa stanowi rozwiązanie oryginalnego zagadnienia naukowego oraz potwierdzam, że Doktorant posiada ogólną wiedzę teoretyczną i umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Rozprawa jest opracowana na dobrym poziomie naukowym i redakcyjnym oraz wnosi wkład w rozwój wiedzy w dyscyplinie Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport.

Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska autorstwa mgr inż. Filipa Grzymskiego pt. „Zakotwienie siatek kompozytów wzmacniających na zaprawie mineralnej w elementach płytowych” spełnia wymogi stawiane pracom doktorskim określone w Ustawie z dnia 14.03.2003 roku „O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki” (Dz. U. z 2003 r., Nr 65, poz. 595, z późniejszymi zmianami) oraz w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (Dz. U. z 2018 r. poz. 1668). W związku z tym stawiam wniosek o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie jej do publicznej obrony.



Prof. dr hab. inż. Łukasz Drobiec