



Warszawa dnia 11 sierpień 2023 r.

dr hab. inż. Paweł Ogrodnik prof. SGGW
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego
Instytut Inżynierii Lądowej
ul. Nowoursynowska 166
02-787 Warszawa

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Małgorzaty Wydry

pt. „FIRE RESISTANCE OF CONCRETE COLUMNS REINFORCED WITH BFRP BARS”
(Odporność ogniowa słupów betonowych zbrojonych prętami BFRP)

1. Podstawa formalna

Podstawę formalną do wykonania niniejszej recenzji stanowią:

- Uchwała nr 735/2023 Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Warszawskiej z dnia 06 czerwca 2023 r.,
- Pismo Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Warszawskiej z dnia 22 czerwca 2023 r., podpisane przez Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Pana dra hab. inż. Konrada Lewczuka, prof. uczelni.

2. Przedmiot recenzji

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska Pani mgr inż. Małgorzaty Wydry pt. „Odporność ogniowa słupów betonowych zbrojonych prętami BFRP”. Promotorem pracy doktorskiej jest Pani dr hab. inż. Jadwiga Fangrat, profesor Instytutu Techniki Budowlanej, a promotorem pomocniczym dr inż. Wojciech Kubissa. Dysertacja opublikowana została w formie dwustronicowego zadrukowanego opracowania w miękkiej oprawie i liczy 190 strony (293 strony łącznie ze wszystkimi załącznikami). Praca została napisana w języku angielskim, zawiera 7 rozdziałów, bibliografię uporządkowaną zgodnie z kolejnością cytowania, a także alfabetycznie. Dysertacja zaopatrzona została również w spis najważniejszych oznaczeń i symboli, streszczenie w języku polskim i angielskim, a także spis

tabel i rysunków. Rozprawa doktorska jest przygotowana w zakresie dyscypliny naukowej inżynieria lądowa, geodezja i transport należącej do dziedziny nauk inżynieryjno-technicznych.

3. Ogólny cel oraz problem badawczy

Przystępując do oceny tematyki i postawionych celów należy na wstępie podkreślić, że tematyka podjęta w recenzowanej rozprawie doktorskiej jest aktualna i wpisuje się w obserwowanych w ostatnich dwudziestu latach wzrost wykorzystania w budownictwie różnego typu zbrojenia kompozytowego. Właściwości mechaniczne i fizyczne prętów FRP różnią się znacznie od właściwości prętów stalowych i zależą głównie od typów matrycy i włókien, jak również ich udziału objętościowego. Powszechnie jednak wiadomo, że pręty kompozytowe charakteryzują się wysoką odpornością na korozję, dużą wytrzymałością na rozciąganie, oraz łatwość cięcia, a zatem są ciekawą alternatywą dla prętów stalowych. W ostatnich latach stosowanie prętów FRP staje się także coraz bardziej uzasadnione ekonomicznie. Badania dostępne w literaturze, które były prowadzone na przestrzeni ostatniej dekady koncentrowały się głównie na odporności ogniowej konstrukcji zginanych lub samych prętów poddanych rozciąganiu. Podjęta przez Doktorantkę tematyka jest zatem ważnym uzupełnieniem dotychczasowych prac badawczych szczególnie w kontekście efektywności tego typu zbrojenia w warunkach pożaru, jak i spadku wytrzymałości na ściskanie.

Problemem naukowym pracy doktorskiej było określenie wpływu prętów zbrojeniowych wykonanych z włókien bazaltowych (Basalt Fiber Reinforced Polymer - BFRP) na odporność ogniową słupa betonowego oraz porównanie uzyskanych wyników ze słupem zbrojonym prętami stalowymi przez wykonanie badań laboratoryjnych i symulacji numerycznych.

Jak napisano w pracy problem badawczy był analizowany poprzez następujące pytania badawcze:

1. Czy osiowo ściskany słup betonowy ze zbrojeniem BFRP może uzyskać odporność ogniową na poziomie umożliwiającym właściwe zaprojektowanie i zastosowanie tego typu zbrojenia prętami kompozytowymi jako alternatywy dla tradycyjnego zbrojenia prętami stalowymi?
2. Czy możliwe jest określenie powyżej wskazanej odporności ogniowej z wykorzystaniem dostępnych metod numerycznych na satysfakcjonującym poziomie zgodności z wynikami badań doświadczalnych?
3. Jakie czynniki mogą wpływać na odporność ogniową słupów betonowych ze zbrojeniem BFRP?



4. Charakterystyka i ocena poszczególnych rozdziałów dysertacji

Recenzowana rozprawa doktorska została podzielona na dwie główne części studialną i badawczą. Dysertację rozpoczyna wprowadzenie. Autorka pracy w kilku zdaniach opisała zastosowanie prętów kompozytowych, a także w syntetyczny sposób zaprezentowała strukturę pracy. Drugi rozdział pracy został zatytułowany „Przegląd literatury”. Już na wstępie tego rozdziału Doktorantka zwraca uwagę na problem odporności ogniowej samych prętów kompozytowych jak i konstrukcji betonowych zbrojonych przy ich wykorzystaniu. Następnie szczegółowo zaprezentowane zostały właściwości materiałowe zarówno włókien bazaltowych jak i polimerowych wzmacnianych włóknami bazaltowymi. Z przedstawionej analizy literatury wynika, że właściwości mechaniczne BFRP w temperaturach normalnych mogą się wzajemnie różnić między sobą z uwagi na rodzaj materiału osnowy oraz skał bazaltowych użytych do ich produkcji. Wyniki tych analiz Doktorantka przedstawiła w postaci tabeli, co w czytelny sposób podsumowuje przeprowadzone analizy. Niezmiernie istotnym elementem tego rozdziału jest część, w której dokonano analizy literaturowej w zakresie wpływu podwyższonych i wysokich temperatur na właściwości FRP. Wskazano, że zachowanie kompozytu w podwyższonych temperaturach w znacznym stopniu zależy od wartości temperatury zeszklenia (T_g), która jest typowa dla rodzaju osnowy polimerowej i może zostać wyznaczona doświadczalnie. Doktorantka w bardzo ciekawy sposób dokonała podsumowania tych analiz przedstawiając tabelę z odnośnikami do literatury tematu. W dalszej części analizowano zagadnienia dotyczące FRP do wzmacniania betonu omawiając metody stosowanych połączeń, a także wpływ podwyższonej temperatury na zachowanie wiązania. W kolejnych podrozdziałach skupiono się na omówieniu zachowania elementów konstrukcyjnych posiadających zbrojenie wewnętrzne FRP oraz elementy betonowe z FRP. Analiza prowadzona była zarówno w zakresie temperatury normalnej, podwyższonej i wysokiej, odnosząc się także do badania odporności ogniowej. Również w tym przypadku Doktorantka zdecydowała się na przygotowanie podsumowania w formie zestawień tabelarycznych zawierających odnośniki do literatury tematu. Takie podejście świadczy o bardzo dużej wnikliwości Autorki dysertacji szczególnie biorąc pod uwagę fakt, że przywoływana literatura w większości została opublikowana w czasie ostatniej dekady. Rozdział został zakończony bardzo ciekawymi wnioskami, w których zaprezentowano braki w dotychczas zrealizowanych badaniach. Podkreślić należy, że przedmiotowa analiza została przygotowana w sposób uporządkowany, jednocześnie Doktorant uzupełnia ją o cenne spostrzeżenia i uwagi zachowując jednocześnie sceptycyzm właściwy dla badacza. W mojej ocenie rozdział ten jest istotny także z punktu widzenia osadzania tematyki pracy w praktyce.

W kolejnym trzecim rozdziale pracy przedstawiony został problem naukowy. Już na wstępie podkreślono, że dostępne badania eksperymentalne i analityczne w zakresie wykorzystania prętów FRP w konstrukcjach betonowych w zakresie temperatur pożarowych koncentrują się głównie na badaniach elementów zginanych i rozciąganych co wskazuje na konieczność kontynuowania badań przez Autorkę. Następnie sformułowano trzy pytania badawcze,



opisano zakres pracy, a także przedstawiono cele szczegółowe. Enumeratywnie wskazany został rodzaj przeprowadzonych badań oraz liczba próbek badawczych, które wykorzystano do ich przeprowadzenia. Sam zakres zrealizowanych badań należy uznać za obszerny i dobrze ukierunkowany. Na koniec rozdziału wymienione zostały przez Doktorantkę elementy nowości, które jednoznacznie świadczą o oryginalności pracy.

W rozdziale czwartym przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych. Rozdział rozpoczyna szczegółowy opis próbek wykorzystanych w badaniach. Następnie wykonane zostały badania prętów BFRP w zakresie cech termomechanicznych. Autorka dużo uwagi poświęciła szczegółowemu opisowi metodyk badawczych oraz maszyn i urządzeń, które zostały wykorzystane do ich przeprowadzenia. Należy zwrócić również uwagę na fakt wzbogacenia tej części pracy o dużą ilość rycin, schematów i zdjęć. W ocenie recenzenta jest to podejście słuszne, gdyż w znaczący sposób poprawia odbiór pracy. Szczególnie ciekawe są badania wytrzymałości na ściskanie w podwyższonych temperaturach. Badania te realizowane były dwoma metodami (metoda A i B) dla których dobrano określone wartości temperatur. Wyniki tej części badań przedstawiono w postaci tabel oraz wykresów zawierających proste analizy statystyczne. Całość została uzupełniona opisami i komentarzami Autorki pracy. Kolejny podrozdział przedstawia badanie słupów. Przeprowadzone zostały dwa rodzaje badań doświadczalnych w pełnej skali lub 1/2 skali na słupach ze zbrojeniem BFRP. Badania w niepełnej skali wykonano w temperaturze normalnej na ośmiu słupach o wysokości 750 lub 1500 mm poddając je ściskaniu osiowemu i mimośrodowemu siłą do 290 kN. W dalszej części przeprowadzono badanie odporności ogniowej zgodnie z wymaganiami normowymi w pełnej skali. W celu zredukowania możliwości powstania zjawiska spallingu do mieszanki betonowej dodano włókna polipropylenowe w ilości 1,5 kg/m³. Należy zauważyć, że pomimo tego i tak podczas badania pomiędzy 10-15 minutą wygrzewania doszło do zjawiska odpryskiwania okładzin betonowych. Mogło być to również jedną z przyczyn zapalenia się pręta po 150 minucie ogrzewania. Pomimo tego badania zakończyło się po 240 minutach. Rozdział kończy podsumowanie, w którym spójnie zaprezentowane są wnioski z przeprowadzonych badań eksperymentalnych.

W kolejnym piątym rozdziale dysertacji Autorka przedstawia obliczenia numeryczne. Rozdział rozpoczyna prezentacja założeń numerycznego modelowania właściwości mechanicznych oraz cieplnych stali, betonu jak i BFRP. W kolejnym podrozdziale opisano model numeryczny słupa ściskanego osiowo i mimośrodowo w skali zredukowanej, który był przedmiotem programu badań eksperymentalnych Doktorantki. Niemal w identyczny sposób opisano model w zakresie badania odporności ogniowej. Same parametryczne analizy numeryczne zostały przygotowane w oparciu o oprogramowanie Abaqus. Rezultaty analiz numerycznych zostały podzielone na grupy. Pierwszą z nich stanowią osiowo i mimośrodowo ściskane słupy ze zbrojeniem wewnętrznym BFPR, które testowane były w temperaturze normalnej. Doktorantka podkreśla, że mapy uszkodzeń pochodzących z symulacji są zbliżone do odnotowanych w eksperymencie metodą DIC. Następnie przeprowadzono wstępną walidację modelu





z wykorzystaniem dostępnych w literaturze danych doświadczalnych odnoszących się do słupów ze zbrojeniem stalowym w badaniach odporności ogniowej. Uzupełnieniem całości są analizy numeryczne słupów ze zbrojeniem BFRP w zakresie badania odporności ogniowej. Rozdział zakończony został wnioskami. Wykazano w nich podobieństwa i różnice pomiędzy analizami MES, a badaniami eksperymentalnymi oraz kierunki planowanych przyszłych badań numerycznych.

Przedostatni rozdział pracy prezentuje omówienie wyników. Za pomocą wykresów Doktorantka porównała uzyskane wyniki badań własnych z dostępnymi w literaturze. Całość została opatrzona szczegółowym komentarzem. Pracę kończy rozdział siódmy, w którym przedstawione zostało podsumowanie i wnioski. Same wnioski zostały podzielone na szczegółowe i ogólne. Jest to podejście słuszne, gdyż podkreśla aplikacyjny charakter pracy doktorskiej. Konkludując Autorka podkreśliła, że dotychczas osiowo ściskane słupy betonowe zbrojone BFRP nie były badane w warunkach oddziaływania wysokich temperatur. Jednocześnie wykazano, że przy wyężeniu równym około 30% nośności w temperaturze pokojowej słupy takie mogą wykazywać odporność ogniową nawet R240 (co potwierdziły badania eksperymentalne. Niezwykle ciekawym jest także wniosek, który opisuje zapalenie się pręta FRP. Jest to prawdopodobnie wywołane zjawiskiem odpryskiwania otuliny betonowej i niesie za sobą szereg negatywnych zjawisk w tym wytwarzanie toksycznych gazów spalinowych. Rozdział kończy wskazanie przyszłych kierunków badań. Doktorantka podkreśla, że w pracy nie było możliwości odniesienia się do wszystkich aspektów problemu, co w mojej opinii świadczy o dużej dojrzałości naukowej Kandydatki.

Jednym z istotnych elementów charakteryzujących całą dysertację jest użyteczność przeprowadzonych badań, wymagającą od Autorki znajomości wielu zagadnień i metod badawczych. Przedstawione w pracy założenia, zaproponowana metodyka i zrealizowane na jej podstawie badania, a szczególnie ich skala i zakres należy ocenić bardzo wysoko. W ocenie recenzenta sam układ pracy jest poprawny, a język odpowiada standardom pracy naukowej. Autorka pracy wykazała się wysokimi kompetencjami przy tym należy pochwalić także jej warsztat naukowo-badawczy. Na pochwałę zasługuje również fakt biegłości posługiwania się przez Doktorantkę poprawną terminologią w zakresie pożarnictwa i budownictwa. Praca jest także bogato ilustrowana co znacząco poprawia jej odbiór. Na podkreślenie zasługuje fakt zebrania przez Doktorantkę aktualnej bibliografii co podkreśla innowacyjność podejmowanego problemu badawczego. W sumie przytoczonych zostało blisko dwieście czterdzieści pozycji literaturowych w tym osiem publikacji afiliowanych nazwiskiem Doktorantki. Odwołania do pozycji literaturowych są prawidłowe. Praca zawiera także spis tabel oraz spis wykresów co ułatwia możliwość ich odnalezienia, a także zestaw załączników prezentujących raporty z badań. Olbrzymią zaletą pracy doktorskiej jest to, że została ona napisana w języku angielski. Umożliwi to znacznie szerszy odbiór dysertacji również poza granicami kraju.

Podsumowując w pełni uzasadnionym jest zatem stwierdzenie, że Kandydatka wykazała się umiejętnością samodzielnego prowadzenia badań i rozwiązywania problemów naukowych, co potwierdzają Jej wysokie kompetencje i predyspozycje do prowadzenia prac naukowo-badawczych.

Ostatnim elementem oceny merytorycznej pracy jest jej przygotowanie pod względem edytorskim. W tym zakresie należy ocenić ją bardzo wysoko. Kandydatka dokonała poprawnego i logicznego podziału pracy na poszczególne rozdziały. Z edycyjnego punktu widzenia należy stwierdzić, że recenzowana praca została przygotowana w sposób bardzo estetyczny. Jak już wspomniano zarówno opisy, jak i wzory, a także ilustracje są przygotowane w sposób bardzo przejrzysty. Dotyczy to szczególnie wykresów jak i wyników symulacji numerycznych. Reasumując, należy pochwalić Panią mgr inż. Małgorzatę Wydrę za dbałość o formę, wygląd i czytelność recenzowanej rozprawy doktorskiej.

5. Uwagi ogólne i szczegółowe

Na wstępie należy podkreślić, że całościowa ocena pracy jest bardzo pozytywna. Oczywiście Autorka nie ustrzegła się drobnych błędów. W spisie symboli występują powtórzenia oznaczeń dotyczy to oznaczeń „m” oraz „d”. Mam także pewne wątpliwości, co do formy podrozdziałów 2.3.1 czy też 2.3.2 gdzie bezpośrednio po jednozdaniowym wstępie zaprezentowane zostały tabele. Podkreślić należy, że w sumie ilość błędów jest niewielka i nie wpływają one w żaden sposób negatywnie na wartość merytoryczną dysertacji. Podsumowując całą rozprawę doktorską Pani mgr inż. Małgorzaty Wydry należy uznać, że podjęta tematyka jest oryginalna i aktualna. Wiąże się ona bezpośrednio z bezpieczeństwem zarówno użytkowników obiektów budowlanych jak i ekip ratowniczych prowadzących działania gaśnicze podczas sytuacji wyjątkowych takich jak pożary. Recenzent szczególnie docenia praktyczny charakter dysertacji. Korzystając z okazji przekazania opinii jaką umożliwia proces oceny pracy doktorskiej recenzent chciałby zwrócić uwagę na kilka zagadnień do których Doktorantka może się odnieść. Mają one głównie charakter porządkowy przedstawionych treści i mogą zostać wykorzystane podczas opracowywania publikacji naukowych. I tak:

1. Jaką klasę dokładności posiadały maszyny wytrzymałościowe na których realizowane były badania?
2. Jaki rodzaj termoelementów został wykorzystany podczas badania odporności ogniowej?
3. Jak opisano w podrozdziale 4.2.1 do mieszanki betonowej Autorka użyła $1,5 \text{ kg/m}^3$ włókien PP w celu zminimalizowania prawdopodobieństwa wystąpienia zjawiska





- spallingu. Jakie były przyczyny przyjęcia konkretnie takiej ilości włókien PP. Jednocześnie bardzo proszę o informację jaki rodzaj włókien PP został wykorzystany?
4. Podczas badań opisanych w rozdziale 4.2.3 doszło, jak to opisuje Doktorantka do palenia się pręta (około 150 minuty badania). W związku z tym czy znane są jakiegokolwiek wyniki badań w zakresie toksyczności prętów BFRP
 5. Z porównania wyników badań eksperymentalnych i symulacji numerycznej wynika, że dla ściskanych słupów ze zbrojeniem BFRP można uzyskać odporność ogniową wyższą niż 180 minut (powyżej 240 minut – eksperyment i do 181 min – symulacja numeryczna) przy wyężeniu równym około 30% nośności w temperaturze pokojowej. Co zdaniem Doktorantki ma wpływ na różnicę wyników uzyskanych eksperymentalnie i w ramach symulacji numerycznej.

6. Wniosek końcowy

Podsumowując stwierdzam, że rozprawa doktorska Pani mgr inż. Małgorzaty Wydry pt. „Fire resistance of concrete columns reinforced with BFRP bars” (Odporność ogniowa słupów betonowych zbrojonych prętami BFRP) stanowi istotny wkład w rozwój dyscypliny naukowej inżynieria lądowa, geodezja i transport. Rozprawa świadczy o wysokim poziomie wiedzy Kandydatki, a także umiejętności prowadzenia pracy naukowej. Przedstawiona praca doktorska spełnia w pełni wymagania stawiane w Ustawie z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (z późniejszymi zmianami) oraz w Rozporządzeniu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z 19 stycznia 2018 r. Wnoszę o dopuszczenie pracy doktorskiej Pani mgr inż. Małgorzaty Wydry do publicznej obrony.

Janusz Opalski