

prof. Andrzej Ubysz
Politechnika Wrocławska
Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego
Katedra Konstrukcji Budowlanych

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Paweł Majkowski

***Badanie elementów betonowych z zbrojeniem stalowym i kompozytowym wysokich
wytrzymałości pod obciążeniem statycznym i dynamicznym***

1. Informacje wstępne

Recenzję rozprawy doktorskiej mgr inż. Pawła Majkowskiego pt.: *Badanie elementów betonowych z zbrojeniem stalowym i kompozytowym wysokich wytrzymałości pod obciążeniem statycznym i dynamicznym* opracowano na podstawie Uchwały Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Bydgoskiej im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich nr 97/2025 z dnia 05.11.2025 roku oraz w zw. z art. 187 Ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018 roku (Dz. U. z 2024 roku poz. 1571, z późniejszymi zmianami). Promotorem pracy doktorskiej jest profesor uczelni, Politechniki Bydgoskiej, dr hab. inż. Maciej Dutkiewicz, a Promotorem pomocniczym dr hab. inż. Jarosław Górecki.

Recenzja dotyczy merytorycznej oceny treści zawartej w wyżej wymienionej rozprawie doktorskiej.

2. Ogólna charakterystyka pracy

Praca dotyczy tematu w dziedzinie nauk technicznych: *budownictwo*, dyscyplinie naukowej: *inżynieria lądowa i transport* oraz specjalności: *konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone*. Eksperymentalne badania niszczące i nieniszczące elementów betonowych z zastosowaniem zbrojenia kompozytowego na bazie włókien szklanych – GFRP oraz stali konstrukcyjnej o wysokiej wytrzymałości B600B w istotnym stopniu uzupełniają stan wiedzy w zakresie zachowania elementów pod obciążeniem zginającym.

Zadanie badawcze, określone w ramach niniejszej rozprawy doktorskiej zostało sformułowane jako weryfikacja metod wymiarowania i modelowania elementów betonowych z

zastosowaniem zbrojenia wysokiej wytrzymałości, z wykorzystaniem wskazanych powyżej materiałów.

Część badań laboratoryjnych pracy wykonano na płytach o typowych w budownictwie wymiarach analizując stany graniczne nośności, użytkowania oraz współpracy betonu z przyjętym do badań zbrojeniem konstrukcyjnym. Uwzględniono również procesy technologiczne towarzyszące wykonaniu płyt z niniejszym zbrojeniem.

Pracy nadano też elementy pozwalające na aplikację otrzymanych wyników do zastosowań przemysłowych. Wybrane wyniki eksperymentalne porównano z wynikami obliczeń uzyskanymi według dostępnych norm i instrukcji, celem konfrontacji założeń teoretycznych z wynikami eksperymentów.

3. Ocena poszczególnych rozdziałów

W kolejnych rozdziałach przedstawiono w usystematyzowanej formie kolejne etapy pracy doktorskiej.

W rozdziale 1 scharakteryzowano zagadnienia będące przedmiotem niniejszej rozprawy. Uzasadnienie podjętego tematu: duży potencjał w zakresie konstruowania elementów żelbetowych z materiałów o wysokiej wytrzymałości, możliwość wykorzystania w konstrukcji materiałów charakteryzujących się innymi cechami fizycznymi od stali, a także prezentacja materiałów o małej popularności u projektantów, a pozwalających na dodatkowe możliwości inwestycyjne. Scharakteryzowano też krótko przedmiot niniejszej rozprawy doktorskiej

Rozdział 2 obejmuje analizę aktualnego stanu wiedzy w zakresie zagadnień dotyczących kierunku badań prowadzonych w zakresie zbrojeń stalą o wysokiej wytrzymałości i zbrojenia kompozytowego. Analiza literatury w zakresie badań wytrzymałościowych dotyczy zarówno samych prętów jak i pełnowymiarowych elementów betonowych, ze szczególnym uwzględnieniem elementów płytowych. Ważnym elementem są odniesienia do literatury dotyczącej obliczeń teoretycznych w oparciu o dostępne instrukcje i normy. Doktorant zwraca również uwagę na stałość właściwości zbrojenia kompozytowego w różnych zmiennych warunkach termicznych, jak i fizykochemicznych. (np. zmian temperatur lub starzenia) oraz dokonuje się przeglądu literatury w zakresie stosowania włókien w elementach betonowych i wpływu ich aplikacji na różne parametry konstrukcji.

Doktorant wyraźnie wydzielił trzy strefy badań : zbrojenia kompozytowe, stal zbrojeniowa o wysokiej wytrzymałości oraz płyty żelbetowe modyfikowane domieszkami poprawiającym parametry materiałowe.

W tym rozdziale na uwagę zasługuje obszerna prezentacja badań polskich naukowców z różnych ośrodków w Polsce, zarówno w zakresie badań fizykochemicznych cech materiałowych, jak i dotyczące zastosowań praktycznych, które są przedmiotem licznych publikacji w czasopismach z listy JCR.

W rozdziale 3 formułującym zadanie badawcze Autor wyraźnie wydzielił trzy zagadnienia – hipotezę badawczą, cel badań i ich zakres. W sformułowanej hipotezie Doktorant wyraża pogląd, że istniejące procedury obliczeniowe elementów z zastosowaniem zbrojenia wysokiej wytrzymałości są zbyt zachowawcze i przez wykorzystanie technologii „digital image correlation” w badaniach elementów betonowych ze zbrojeniem wysokiej wytrzymałości będzie możliwe dokładne mapowanie przemieszczeń i rozwoju rys co poprawia dokładność wyników eksperymentalnych.

Jeżeli chodzi o cel badań, to został on jasno sformułowany i wskazuje na:

Możliwości weryfikacji metod wymiarowania i modelowania elementów betonowych z zastosowaniem zbrojenia wysokiej wytrzymałości – B600B i GFRP.

Realizację niniejszego celu przedstawił Doktorant w 4 zadaniach pomocniczych polegających na określeniu:

- 1) wymaganego stopnia zbrojenia dla badanych typów elementów (płyty) ze zbrojeniem wysokiej wytrzymałości oraz zbrojeniem kompozytowym,
- 2) nośności i własności użytkowych zbrojenia wysokiej wytrzymałości w różnych warunkach eksploatacji,
- 3) zasad diagnostyki stanu naprężeń i odkształceń,
- 4) warunków pracy zbrojenia w betonie z włóknem polipropylenowym lub poliwinylowym, z punktu widzenia trwałości i nośności elementu.

Autor pracy przedstawił też w tym rozdziale zakres badań eksperymentalnych, które były podstawą do dalszych analiz i wniosków. W ramach rozdziału Doktorant określa zakres, w jakim przyjęte rozważania winny zostać uznane za oryginalne oraz podkreśla, w jakim zakresie niniejsza rozprawa stanowi wkład w rozwój dyscypliny naukowej.

Kolejne dwa rozdziały zawierają autorskie badania: analizy doświadczalne i obliczenia weryfikowane wynikami badań. Rozdział 4 dotyczy opisu części obliczeniowej i doświadczalnej przeprowadzonej w ramach badań. Doktorant omawia materiały i metody badań użyte w części

eksperymentalnej – ze szczególnym uwzględnieniem zbrojeń wysokiej wytrzymałości – odpowiednio stali B600B, zbrojenia kompozytowego GFRP oraz beton zbrojony włóknami polipropylenowe. Opis badań doświadczalnych uzupełniono o obliczenia nośności i momentów rysujących płyt w oparciu o dostępne normy i instrukcje, w zakresie nośności, ugięć i zarysowań.

W rozdziale przedstawiono konstrukcję stanowiska badawczego wykorzystanego w próbach wytrzymałościowych przy badaniu płyt betonowych, omawiając jednocześnie procedurę badawczą według której zrealizowano ten eksperyment.

W rozdziale 5 wykonano zestawienie i podsumowanie wyników badań przeprowadzonych w ramach niniejszej rozprawy doktorskiej. Jeżeli chodzi o płyty to przedstawiono wyniki eksperymentów, głównie w zakresie zależności moment – ugięcie oraz przeprowadzono krótką analizę doświadczalnych i obliczonych na podstawie normy wartości momentów rysujących. Wyniki przedstawiono w postaci tabel i wykresów obrazujących zależności pomiędzy pomierzonymi wielkościami. Ponieważ istotnym elementem pracy są również cechy fizyczne badanych materiałów, to przy kolejnych publikacjach wskazane byłoby uzupełnienie cech fizycznych o pełne ścieżki zależności $\sigma - \varepsilon$ materiałów wsadowych (stali wysokiej wytrzymałości B600B, zbrojenia GFRP, betonu).

Rozdział 6 przedstawiono jako dyskusję uzyskanych wyników w odniesieniu do postawionej hipotezy badawczej oraz przeprowadzonej analizy teoretycznej poszczególnych wariantów wykonania prefabrykowanych płyt żelbetowych. Porównano wyniki z doświadczeń i obliczeń, opisano wpływ cech fizycznych materiałów na ugięcia, zarysowania i nośność badanych elementów. Wskazano też kierunki dalszych badań w celu weryfikacji metod modelowania i obliczania elementów żelbetowych projektowanych i wykonywanych z zastosowaniem nowych materiałów budowlanych.

Rozdział 7 prezentuje podsumowanie rozważań objętych zakresem niniejszej pracy doktorskiej, łączące aspekty wynikające z dokonanego rozpoznania literaturowego, analizy teoretycznej oraz przeprowadzonych eksperymentów. Ostatecznie Doktorant formułuje końcowe wnioski poprzedzone syntetycznym podsumowaniem wyników badań. Oprócz wniosków dotyczących badań wykonanych na elementach zbrojonych stalą B600B i kompozytem GFRP, Autor potwierdził postawioną na wstępie rozprawy hipotezę badawczą oraz w punktach, *explicite* przedstawił swój wkład w rozwój dyscypliny.

Z uwagi na charakter pracy – doktorat wdrożeniowy – Doktorant zwrócił również uwagę na kierunki dalszych badań i ich potencjał wdrożeniowy.

4. Merytoryczna ocena pracy

Na wstępie należałoby zwrócić uwagę, że jest to tak zwany doktorat wdrożeniowy, którego głównym celem jest uzyskanie wymiernych efektów dla przemysłu i wskazanie ewentualnych dalszych kierunków badań. Uzasadnia to plan badań i sposób redakcji rozprawy. Przedmiotem dysertacji są dwa różne typy elementów żelbetowych, których wspólnym mianownikiem są:

- wprowadzanie na rynek zmodyfikowanych elementów konstrukcyjnych do specjalnych zastosowań
- optymalizacja kosztów przy szerszym wprowadzaniu tych elementów na rynek.

Ten cel został przez Doktoranta osiągnięty.

Oprócz rozbudowanej części badawczej, Autor wykonał szereg symulacji obliczeniowych opartych głównie na normach i wytycznych europejskich, ale uzupełnionych także normatywami z innych krajów. Ta różnorodność kryteriów wskazuje na nowatorstwo problemu i braku jednoznacznych aktów prawnych dla inżynierów budowlanych.

Jeżeli chodzi o innowacyjność badań, to zwraca uwagę obserwacja odpowiedzi dynamicznej płyty pod obciążeniem impulsowym, co wykorzystywane jest do monitorowania stanu technicznego budowli. Badania te wykonano za pomocą akcelerometru pracującego w zakresie niskich częstotliwości, a rejestrowano za pomocą systemu akwizycji danych Simcenter Scadas.

Wnioski końcowe nie są do końca sformułowane w postaci szczegółowych wytycznych, ale bardziej wskazują na skalę problemu i kierunki dalszych badań. Wydaje się, że jest to poprawne formułowanie wniosków, gdyż z reguły prace, które mają ograniczenia czasowe (i budżetowe), jak między innymi przewody doktorskie są realizowane w ograniczonym zakresie i dotyczą tylko pewnej klasy elementów lub konstrukcji.

Sposób sformułowania zadania badawczego, przeprowadzony eksperyment i analiza numeryczna, a także wnioski ujmujące zwięzłe osiągnięcia w pracy i przedstawione zamierzenia badawcze w tej tematyce dowodzą dobrego przygotowania doktoranta do pracy naukowej. Tematyka dotycząca nowych klas materiałów jest ciągle otwarta. Ma ona praktyczne zastosowanie w pracach projektowych i z pewnością należy do zagadnień kreujących dalsze kierunki dyscypliny naukowej. Autor pokazuje zaznajomienie się z tą tematyką na poziomie aktualnej bibliografii, w tym z publikacjami naukowymi i normatywami oraz – co najważniejsze – udowadnia, że potrafi samodzielnie przeprowadzać analizy badawcze i wyciągać

konstruktywne wnioski. Problematyka, podjęta przez Doktoranta, którą rozwija jako temat rozprawy doktorskiej, nie jest całkowicie nowa, ale sposób sformułowania zadania badawczego i wyciągnięte wnioski można uznać, jako merytorycznie nowy wkład do dyscypliny *Konstrukcje żelbetowe*.

Powiązany z merytoryczną oceną pracy jest dorobek naukowy prezentowany w zagranicznych czasopismach z IF oraz uznanych czasopismach krajowych.

5. Szczegółowe uwagi polemiczne do pracy

Elementem dysertacji powinny być pytania i uwagi polemiczne.

1. Czym wytłumaczyć, że w ramach jednej rozprawy doktorskiej podjęto tematykę różnych sposobów zbrojenia (zbrojenie płyt stalą o wysokiej wytrzymałości i zbrojeniem kompozytowym GFRP) ?
2. Dlaczego zmieniono średnicę zbrojenia GFRP z 8 na 7 mm przy badaniu w maszynie INSTRON ?
3. Ponieważ istotnym przedmiotem pracy są zastosowane materiały, to istotnie wzbogaciłoby pracę pokazanie ich pełnych ścieżek naprężenie – odkształcenie ($\sigma - \varepsilon$), a nie tylko podawanie końcowych wartości modułu sprężystości i wytrzymałości.

6. Uwagi końcowe

Mając na uwadze sformułowanie tematu i sposób jego przedstawienia w rozprawie doktorskiej, które wskazują na bardzo dobre merytoryczne przygotowanie Doktoranta, a także prezentowanie wyników badań w czasopismach naukowych i docelowe zastosowania praktyczne przedstawionych wniosków, wnoszę o dopuszczenie Pana mgr inż. Pawła Majkowskiego do publicznej obrony oraz stosownie do zasad przyjętych na Wydziale Budownictwa Architektury i Inżynierii Środowiska PBS o wyróżnienie pracy.

Praca spełnia wymagania prac doktorskich określone w art. 187 ustawy *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* z dnia 20 lipca 2018 r. (Dz.U. z 2024 r., poz. 1571).

Andrzej Ubysz