

Olsztyn, 12 lipca 2019 roku

Dr hab. inż. Leszek Małyszko, prof. UWM
Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie
Wydział Geodezji, Inżynierii Przestrzennej i Budownictwa
Instytut Budownictwa
Ul. J. Heweliusza 4
10-724 Olsztyn

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

magistra inż. ŁUKASZA RDUCHA

*Analiza nośności zginanych elementów betonowych
zbrojonych siatkami z prętów kompozytowych*

promotor: dr hab. inż. Ryszard Walentyński, prof. nzw. w Politechnice Śląskiej

promotor pomocniczy: dr inż. Ryszard Cybulski

1. Podstawa formalna

Recenzję opracowano na prośbę Dziekana z 21 maja 2019 r., zgodnie z uchwałą Rady Wydziału Budownictwa Politechniki Śląskiej oraz na podstawie aktualnych aktów prawnych:

- ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z 2003, nr 65, poz. 595, z późniejszymi zmianami – jednolity tekst Dz.U. z 2017, poz. 1789),
- rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 19 stycznia 2018 r. w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzenia czynności w przewodzie doktorskim, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora (Dz. U. z 2018 r. poz. 261).

2. Charakterystyka, uwagi krytyczne oraz ocena merytoryczna rozprawy

Opiniowana praca stanowi opracowanie na temat określony w tytule rozprawy, liczące 192 strony, w tym 71 stron załączników, w których zamieszczono wykresy otrzymane w laboratoryjnych testach rozciągania prętów i jednokierunkowego, czteropunktowego zginania płyt (odpowiednio 9 i 42 strony) oraz przykładowe skrypty komercyjnego programu obliczeń symbolicznych i numerycznych, wykorzystane w statystycznym opracowaniu wyników (16 stron). Składa się z 4 rozdziałów o zróżnicowanej objętości, bibliografii liczącej 88 pozycji, w tym 8 norm lub wytycznych nawiązujących do tematyki pracy oraz wykazu 9 publikacji Doktoranta, samodzielnych lub we współautorstwie (odpowiednio 2 i 7). Trzy publikacje współautorskie bezpośrednio nawiązują do tematyki rozprawy – dwie w języku

polskim w *Przeglądzie Budowlanym* (z 2017 i 2018 roku) oraz jedna w języku angielskim w monografii serii *Lightweight Structures in Civil Engineering* z 2018 roku.

Uwaga 1. **Cytowania**

Z bibliografii liczącej 88 pozycji Doktorant zacytował w tekście rozprawy jedynie normy i wytyczne oraz zaledwie 7 publikacji. W jakim celu zamieszczono pozostałe publikacje?

W rozdziale pierwszym (*Wstęp* – 2 strony) został sformułowany cel rozprawy jako: *określenie przydatności i nośności siatek zbrojeniowych z prętów kompozytowych wykonanych przez splot włókien przed utwardzeniem żywicy*. Cel wpisuje się w badania zginania płyt betonowych o dużej odkształcalności, w których decyduje stan graniczny użyteczności, ze zbrojeniem niemetalicznym w postaci prętów kompozytowych o małym module Younga. W dwuakapitowym podrozdziale *Motywacja do podjęcia działań* Doktorant sugeruje pośrednio, że u podstaw podjęcia badań jest opatentowany sposób produkcji siatek z takich prętów, jednak brak odesłania do przyznanego patentu czy choćby do zgłoszenia patentowego.

Uwaga 2. **Sformułowanie celu**

Treść rozprawy jest zasadniczo zgodna z tytułem, zawiera badania nośności na zginanie płyt betonowych zbrojonych wymienionymi siatkami, chociaż brakuje bezpośredniej analizy porównania eksperymentalnych wyników z normowymi analitycznymi modelami określania nośności, np. w postaci wykresów obciążenie - ugięcie. Badanie nośności siatek jest ograniczone do testu rozciągania wyciętego pręta i bez modelu obliczeniowego trudno jest określić ich przydatność. Ponadto, sam fakt opatentowania nie stanowi w mojej ocenie bezpośredniej przesłanki do podjęcia badań eksperymentalnych.

W rozdziale drugim (*Przegląd literatury* - 16 stron) Doktorant na podstawie literatury przedstawił podstawowe wzory do wymiarowania belek zginanych zbrojonych prętami kompozytowymi według wytycznych amerykańskich, kanadyjskich, japońskich i włoskich (tabela na rys. 7 - błędny numer pozycji w bibliografii) oraz według wytycznych krajowych ITB. Omówił dodatkowo właściwości prętów kompozytowych.

Uwaga 3. **Anizotropia prętów**

W podrozdziale *Właściwości mechaniczne prętów kompozytowych* Doktorant wspomina o ich anizotropii, przy czym nie jest jasne o jakie anizotropowe właściwości chodzi. Jakie i w sposób Doktorant chce określać anizotropowe właściwości mechaniczne prętów oraz co rozumie pod pojęciem wytrzymałość pręta na ścinanie i ściskanie?

Rozdział trzeci (*Badania laboratoryjne* - 73 strony), zasadniczy dla rozprawy, zawiera podstawowe wyniki wykonanych w laboratorium testów z obciążeniem statycznym. Poza standardowym testem określania wytrzymałości betonu na ściskanie zakres badań obejmował dwa rodzaje testów:

- testy rozciągania pojedynczego pręta głównego, długości 400 mm, wyciętego z dostarczonej przez producenta siatki kompozytowej, w której pręty o średnicy nominalnej 5 mm zostały wykonane na bazie skręconych włókien szklanych, utwardzonych w żywicy (9 próbek),
- test jednokierunkowego, czteropunktowego zginania płyt betonowych o wymiarach 2400 mm x 500 mm x 120 mm, zbrojonych siatkami kompozytowymi (14 próbek, w tym 4 z dodatkiem do betonu zbrojenia rozproszonego i zeolitu) oraz płyt betonowych zbrojonych dwukierunkowo prętami stalowymi (2 próbki).

Pręty siatki kompozytowej są ułożone w dwóch wzajemnie prostopadłych kierunkach z oczkiem 100 mm na 100 mm, a w miejscu styku standardowe pręty główne opleciono włóknami prętów bocznych przed ich utwardzeniem w żywicy.

Test rozciągania został wykonany pod obciążeniem statycznym w dwóch wariantach: z blokadą obrotu pręta pod cyklicznie narastającym obciążeniem (8 próbek) oraz bez blokady w ramach tzw. badań wstępnych (1 próbka), w których następował obrót pręta o ponad 360 stopni. Wartość siły zrywającej przy blokadzie obrotu była dwukrotnie wyższa niż bez niej. Do wykonania testu z blokadą obrotu Doktorant zaprojektował i wykonał uchwyt eliminujący obrót prętów prostopadłych do rozciąganego pręta głównego, co wprowadza moment skręcający, ale być może jest bliższe rzeczywistemu zachowaniu w zginanej płycie, choć nie tak jak rozciąganie zabetonowanej siatki. Wyniki w tym wariantcie testu wskazują, że miejsce splotu, tj. połączenia prętów obu kierunków, osłabia przekrój prętów głównych. Wydaje się także, że pręt skrępowany pracuje jako nieuszkodzony kompozyt prawie do zniszczenia i możliwe jest określenie efektywnego modułu Younga i wytrzymałości pręta na rozciąganie wraz z analizą statystyczną.

Uwaga 4. Interpretacja testu rozciągania

Z przedstawionych w podrozdziale *Badania wstępne* wykresów siła – wydłużenie (rys. 12) i naprężenie – odkształcenie (rys. 13) wynikają kolejne fazy zniszczenia w teście bez blokady obrotu, np.: pręt nieuszkodzony, potem plastyczne płynięcie żywicy, po których następuje obrót i wydłużenie pręta, tj. następuje skręcanie w obecności siły podłużnej. Czy w takiej sytuacji jest uprawnione określanie wytrzymałości na rozciąganie jako ilorazu siły zrywającej do początkowego pola przekroju? Ponadto, wydaje się, że interpretacja testu rozciągania sterowanego przemieszczeniem szczęk maszyny powinna być interpretowana w ramach teorii dużych deformacji, co może być wskazówką do budowy postulowanej przez Doktoranta *odrębnej mechaniki* do projektowania takich płyt.

Doktorant zaprojektował płyty betonowe, przyjmując stopień zbrojenia podłużnego na poziomie 0,2% i zakładając wyczerpanie nośności przez zerwanie prętów, chociaż można było się spodziewać, że decydować będą ugięcia i rozwarcie rys, które w płytach z prętami kompozytowymi będą zdecydowanie większe niż w płytach z prętami stalowymi, co zresztą potwierdziło się w badaniach. W trakcie badań Doktorant mierzył ugięcia płyty za pomocą czujników indukcyjnych (5 sztuk), siłę obciążającą za pomocą siłomierza elektrooporowego

oraz odkształcenia liniowe na dolnej i górnej powierzchni płyty za pomocą tensometrów (6 sztuk w 3 płytach), których czułość zezwalała jedynie na rejestrację momentu pojawienia się rys. Powierzchnia boczna wszystkich płyt była monitorowana za pomocą zdalnego systemu pomiarowego z cyfrową korelacją obrazów, który umożliwia ciągły pomiar wskazanego pola przemieszczeń, cyfrową archiwizację wyników oraz obliczanie odkształceń monitorowanej powierzchni, w tym dla wskazanych odcinków, pozwalając niejako zdefiniować wirtualny tensometr. Doktorant zamieścił w rozdziale przykładowe wykresy z badań w postaci zmiany siły i ugięcia w funkcji czasu oraz diagramów siła - ugięcie. Przedstawił zbiorcze zestawienie wyników dla wszystkich płyt po ich analizie statystycznej. Zaproponował również funkcje aproksymujące wykresy obciążenie – ugięcie dla każdej z trzech rodzajów płyt i porównał je na wspólnym poglądowym wykresie. W oddzielnym podrozdziale przedstawił wyniki uzyskane za pomocą systemu cyfrowej korelacji obrazów, które z pewnością mogą zostać wykorzystane później jako baza do analizy płyt metodą elementów skończonych w zakresie poza sprężystym. W podsumowaniu rozdziału Doktorant stwierdził na podstawie przeprowadzonych badań, że pręty kompozytowe mają zbliżoną wytrzymałość do stali klasy C (AIIIN). Nośności płyt betonowych zbrojonych prętami kompozytowymi i stalowymi są zbliżone, zwłaszcza w przypadku płyt betonowych z dodatkiem zbrojenia rozproszonego i zeolitu. Inny jest jednak charakter wykresu siła – ugięcie, w tym sygnalizowany akustycznie moment rozpoczęcia zniszczenia. Z uwagi na dziewięciokrotnie niższy moduł Younga ugięcia płyt ze zbrojeniem kompozytowym były dwukrotnie większe, a szerokości rozwarcia rys 10-krotnie większe niż dla płyt ze zbrojeniem stalowym.

Uwaga 5. **Nośność obliczeniowa a doświadczalna**

W podrozdziale 3.5.1. *Założenia* Doktorant zamieścił obliczenia nośności dla płyty zbrojonej prętami stalowymi (wg normy PN-B), przy czym nie jest do końca jasne czy obliczeniowa nośność przekroju na zginanie jest odniesiona do metra bieżącego, bo brakuje go w jednostkach. Z rys. 29 wynika, że doświadczalną siłę z maszyny należy porównać z teoretyczną siłą obliczeniową P , a teoretyczną nośność obliczeniową należy do porównania dzielić przez 2.

Uwaga 6. **Funkcje aproksymujące**

Doktorant zaproponował funkcje aproksymujące wykresy obciążenie – ugięcie dla jednego przedziału zmiany siły od zera do wartości niszczącej. Funkcje te nie są w rozprawie szerzej omawiane. Na wykresach dla płyt zbrojonych siatkami kompozytowymi widać wyraźnie dwa zakresy zmiany siły: pierwszy od zera do wartości rysującej oraz następujący po nim drugi do wartości niszczącej. Czy aproksymacja dwoma liniami prostymi nie byłaby w tym przypadku korzystniejsza, tym bardziej że może nawiązywać do modeli znanych w literaturze? Także w przypadku płyt z dodatkiem zbrojenia rozproszonego aproksymacja dwuliniowa wydaje się możliwa.

W ostatnim, czwartym rozdziale (*Podsumowanie i wnioski* – 3 strony) Doktorant stwierdził m.in., że badane siatki kompozytowe nadają się do zbrojenia betonowych elementów

zginanych, czyli cel badań został zrealizowany, chociaż wskazane by były dalsze badania pod kątem właściwości reologicznych. Wymienia również dodatkowe dwa warunki:

- projektowanie elementów tak, aby nośność wykorzystana była w połowie z uwagi na ograniczenia wynikające ze stanów granicznych użytkowalności (tj. wielkości ugięć i szerokość rozwarcia rys),
- projektowanie według *odrębnej mechaniki*, którą należy dopiero opracować.

Uwaga 7. Uwagi końcowe

Zalecenie projektowania z dużym zapasem nośności, czyli przezbrajanie elementów w wyniku niewykorzystania pełnej nośności prętów kompozytowych jest zaleceniem znanym i zgodnym z normami i wytycznymi projektowania. Zwiększenie wytrzymałości betonu na kruche pęknięcie jest jednym z możliwych kierunków badań, czego Doktorant był zapewne świadom, badając dodatkowo płyty z dodatkiem zbrojenia rozproszonego i zeolitu.

Moim zdaniem zamiast opracowania *odrębnej mechaniki* wystarczy zaadaptować istniejące modele projektowania. Zasadnicza różnica w zachowaniu elementów zginanych zbrojonych siatkami a pojedynczymi prętami wynika chyba z lepszego zakotwienia głównych prętów siatki w betonie z uwagi na ich splot z prętami prostopadłymi, co może warto sprawdzić w teście typu *pullout* ?

Podsumowując ocenę rozprawy należy stwierdzić, że podjęty przez Doktoranta temat jest jak najbardziej aktualny i oryginalny w zakresie wykorzystania siatek kompozytowych ze splotem prętów. Ma duże znaczenie praktyczne, zwłaszcza w kontekście wytycznych projektowania i norm. Próbę analizy niektórych zagadnień Doktorant podjął z powodzeniem w pracy, inne czekają na dalsze badania. Rozprawa ma charakter raportu z szerokich badań, gdzie poza dość skąpym tekstem zawarto wiele wykresów i zdjęć. Dodatkowe wyniki z badań wszystkich próbek zostały umieszczone w załącznikach. Całość stanowi wiarygodne źródło informacji, z którego będzie można później korzystać przy rozwiązywaniu nowych zagadnień związanych z tematem.

Oceniając pozytywnie całość rozprawy, nie można pominąć jej niedostatków. W rozprawie brakuje porównania eksperymentalnych wyników z normowymi analitycznymi modelami określania nośności, co wydaje się konieczne do poprawnej interpretacji testów doświadczalnych. Nie ma także prób symulacji numerycznej eksperymentów, np. za pomocą metody elementów skończonych. W tekście zdarzają także się błędy, zwłaszcza interpunkcyjne. Należy jednak podkreślić, że sformułowane uwagi krytyczne czy wątpliwości nie przeważają podstawowych wartości pracy.

Do najważniejszych osiągnięć Doktoranta należy zaliczyć następujące elementy:

- zaplanowanie i przeprowadzenie dość czasochłonnych badań eksperymentalnych wraz z analizą statystyczną uzyskanych wyników,

- wykorzystanie w badaniach systemu cyfrowej korelacji obrazów do analizy pola przemieszczeń w porównaniu z wynikami otrzymanymi z czujników przemieszczeń i odkształceń,
- opracowanie i wykonanie oryginalnego testu rozciągania pojedynczego pręta wyciętego ze siatki kompozytowej.

3. Wniosek końcowy

Reasumując istotniejsze oceny i uwagi zawarte w niniejszej recenzji należy stwierdzić co następuje:

- rozprawa zawiera oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, który ma istotne znaczenie badawcze poznawcze i aplikacyjne,
- Doktorant postawił sobie zagadnienie badawcze i rozwiązał je w sposób zadawalający, wykazując wystarczające umiejętności metod naukowego działania,
- do rozwiązania problemu naukowego zastosował współczesne metody i narzędzia badawcze, wykazując wystarczającą wiedzę z zakresu objętego tematem rozprawy.

W związku z powyższym uważam, że zgodnie z Ustawą z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym itd., a w szczególności z jej art. 13.1 oraz 13.2, rozprawa pt. *Analiza nośności zginanych elementów betonowych zbrojonych siatkami z prętów kompozytowych* stanowi oryginalne rozwiązanie przez Doktoranta problemu naukowego oraz wykazuje Jego ogólną wiedzę i umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Wnoszę zatem o jej przyjęcie jako rozprawy doktorskiej i dopuszczenie Pana mgra inż. Łukasza Rducha do jej publicznej obrony.

