

Poznań, dnia 18.07.2018 roku

Prof. dr hab. inż. Wiesław Buczkowski

RECENZJA PRACY DOKTORSKIEJ

mgr. inż. Marka Ziarkiewicza

z Wydziału Inżynierii Lądowej, Środowiska i Geodezji Politechniki Koszalińskiej

pt. „Doświadczalna ocena wybranych metod wymiarowania

belek z fibrokompozytu drobnokruszywowego”

1. Podstawa opracowania

Recenzja niniejsza opracowana została na zlecenie Dziekana Wydziału Inżynierii Lądowej, Środowiska i Geodezji Politechniki Koszalińskiej Pani dr hab. inż. Wiesławy Głodkowskiej, prof. nadzw., zgodnie z Uchwałą Rady Wydziału z dnia 19 czerwca 2018 roku.

2. Omówienie treści rozprawy

Promotorem recenzowanej rozprawy doktorskiej jest Pani dr hab. inż. Wiesława Głodkowska, profesor Politechniki Koszalińskiej.

Rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Marka Ziarkiewicza dotyczy wykazania możliwości zastosowania odpadowego kruszywa drobnego do produkcji konstrukcyjnych elementów zginanych, a także wykazania, że dodatek włókien stalowych wpływa na poprawę ich nośności i użyteczności. Efektem końcowym rozprawy miało być zweryfikowanie stosowanych metod wymiarowania fibrokompozytowych elementów zginanych zalecanych np. przez prenormę Model Code 2010 a także liczne grono badaczy zajmujących się tą tematyką. Przedłożona do oceny rozprawa doktorska obejmuje 237 stron maszynopisu, w tym 159 stron tekstu, 13 stron zawierających bibliografię oraz 65 stron załączników. W tekście rozprawy zamieszczono 88 rysunków oraz 37 tablic, a w załącznikach 18 rysunków oraz 51 tablic. Spis literatury obejmuje 226 pozycji, w tym 25 to normy, instrukcje i wytyczne. Wśród bibliografii 142 pozycje wydano w języku angielskim, 9 w niemieckim i 50 w języku polskim. Na 201 pozycji literatury 131 wydanych zostało w okresie od 2000 r do 2018 r. Całość pracy podzielona została na 8 rozdziałów, bibliografie oraz 6 załączników.

W rozdziale 1 (Wprowadzenie) opisano genezę powstawania znacznych ilości odpadowego kruszywa drobnego i zwrócono uwagę na pilny problem zagospodarowania tego odpadu. Kruszywo drobne pozostaje jako odpad po procesie hydroklasyfikacji, w którym pozyskuje się kruszywa grube niezbędne do wytwarzania betonu zwykłego. Przez dziesiątki lat trwającego procesu w rejonie Pomorza powstały hałdy odpadowego kruszywa drobnego. Na Politechnice Koszalińskiej od lat trwają prace nad wykorzystywaniem wspomnianego odpadowego kruszywa do produkcji pełnowartościowych elementów konstrukcyjnych. Recenzowana rozprawa doktorska stanowi kontynuację tych prac i zmierza do weryfikacji doświadczalnej metody wymiarowania elementów zginanych wykonanych z fibrokompozytu na bazie piasków odpadowych.

W rozdziale 2 zatytułowanym „Geneza, przedmiot, cel i tezy pracy” Autor jeszcze raz wskazuje na generalny problem pozyskiwania kruszyw mineralnych (żwirowo-piaskowych) zarówno w skali globalnej (europejskiej) jak i krajowej. Wskazuje na nierównomierny rozkład kruszyw grubych w Polsce (90% zasobów zlokalizowanych jest na południu kraju, a tylko 4% w regionie północnym). W rozdziale tym wskazano, że w ostatnich dziesięcioleciach wielu autorów na świecie zajmuje się technologią fibrobetonów. Opracowania obowiązujące w wielu krajach np. w Niemczech, Hiszpanii, we Włoszech prezentują odmienne (różniące się między sobą) podejścia do problemu oraz wykazują rozbieżności w opracowanych metodach wymiarowania fibrobetonowych elementów zginanych.

Zamiarem Doktoranta była między innymi ocena metod wymiarowania wspomnianych elementów wg RILEM TC-162-TDF oraz prenormy fib Model Code 2010 oraz dostosowania ich do wymiarowania elementów wykonanych z fibrokompozytu na bazie kruszywa drobnego. W rozdziale tym Doktorant wyraźnie sprecyzował tezy rozprawy doktorskiej, które dotyczyły wskazania, że dodatek włókien stalowych wpływa na poprawę cech wytrzymałościowych i użytkowych zginanych elementów wykonanych z drobnowymiarowych kruszyw odpadowych oraz, że na podstawie wyników badań doświadczalnych można skorygować metody wymiarowania zalecane dla fibrobetonów.

W rozdziale 3 pt. „Stan zagadnienia w zakresie przedmiotu pracy” obejmującym 67 stron Doktorant przedstawia ogólną charakterystykę fibrobetonów, rys historyczny,

metody szacowania wpływu włókien stalowych na cechy mechaniczne fibrobetonów stosowane przez badaczy na całym świecie, wskazuje również na badania z tego zakresu przeprowadzone w różnych ośrodkach naukowych. Opisuje badania jakie prowadzi się w celu określenia zdolności fibrobetonu do przenoszenia naprężeń rozciągających. Poruszył również problem wątpliwego wpływu włókien stalowych na wytrzymałość na ściskanie fibrobetonów. Omówił dotychczasowe badania prowadzone w Ośrodku Koszalińskim dotyczące kompozytu drobnokruszywowego.

Obszerną część rozdziału 3 Autor poświęcił zagadnieniu obliczania nośności na zginanie fibrobetonowych elementów konstrukcyjnych. Po szerokim przeglądzie literatury i krytycznej analizie rozwiązań proponowanych przez różnych badaczy, w tablicy 3.9. Doktorant zestawiał modele konstytutywne wg norm i rekomendacji europejskich (fib Model Code 2010, RILEM, Niemcy, Włochy, Hiszpania).

W rozdziale tym Doktorant analizował również wyniki badań różnych Autorów dotyczące zginanych belek zbrojonych tradycyjnie przy dodatku do mieszanki betonowej włókien stalowych. Wskazał, że istnieją duże rozbieżności w określaniu nośności takich elementów obliczanych wg zaleceń różnych Autorów, a wynikami badań doświadczalnych.

W końcowej części rozdziału Doktorant na bazie przeglądu literatury dokonał analizy proponowanych rozwiązań dotyczących stanów granicznych dla belek wykonanych z fibrobetonu (rozstawu i szerokości rys oraz ugięć).

W całym rozdziale 3 Doktorant przedstawił szeroki przegląd literatury dotyczącej tematu, powołał się na prace 154 Autorów.

W rozdziale 4 zatytułowanym „Program i zakres badań” Doktorant przedstawił program badań wiodących i uzupełniających. Badania wiodące obejmowały wykonanie i przebadanie 9 belek o wymiarach 15x20x330 cm zbrojonych tradycyjnie prętami o różnych średnicach, ze strzemionami i bez strzemion oraz z dodatkami włókien stalowych a także bez dodatku włókien. Program badań obejmował pomiar siły obciążającej, pomiar ugięć, odkształceń prętów zbrojeniowych oraz odkształceń powierzchni bocznych zginanych belek.

Badania uzupełniające obejmowały wyznaczenie wytrzymałości na ściskanie kompozytu użytego do wykonania belek, granicy proporcjonalności i wytrzymałości resztkowych. Zakres badań prętów zbrojeniowych obejmował wyznaczenie granicy plastyczności, modułu sprężystości oraz wytrzymałości na rozciąganie.

W rozdziale 5 pt. „Metodyka badań” Doktorant opisał szczegółowo sposób badania cech mechanicznych wykorzystywanych materiałów oraz sposób pomiarów i rejestracji charakterystycznych parametrów badanych belek.

Wytrzymałość na ściskanie fibrokompozytu badana była poprzez ściskanie próbek cylindrycznych w maszynach wytrzymałościowych D-4000 oraz DBZ-200 firmy Walter Bai Ag.

Wytrzymałości resztkowe oraz granicę proporcjonalności fibrokompozytu określono badając belkę przy rozpiętości podpór 500 mm, o przekroju 150x150 mm, ze szczeliną w środku rozpiętości, obciążonej siłą skupioną. Szerokość rozwarcia rysy, ugięcia oraz siłę obciążającą mierzono przy użyciu systemu akwizycji danych SAD256 z indukcyjnymi czujnikami przemieszczeń.

Badania granicy plastyczności, modułu sprężystości i wytrzymałości na rozciąganie prętów stalowych wykonano przy użyciu maszyny wytrzymałościowej INSPEKT 600 firmy HEGEWALD/PESCHKE, a pomiaru odkształceń dokonano przy zastosowaniu zewnętrznego ekstensometru. Badania wiodące przeprowadzono na wykonanych belkach umieszczonych w specjalnie przygotowanym stendzie. Belki obciążano za pomocą trawersu o rozpiętości 1 m obciążanego siłą skupioną przyrastającą ze stałą prędkością 0,25 kN/s. Belki obciążano aż do zniszczenia. Poszczególne parametry w trakcie badań rejestrowane były za pomocą systemu akwizycji danych SAD256 oraz systemu ARAMIS 4M.

Odształcenia zbrojenia rozciąganego mierzono przy użyciu tensometrów elektrooporowych przyklejonych do zbrojenia przed betonowaniem elementu. W trakcie badań dodatkowo kontrolnie mierzono ugięcia za pomocą 5 czujników zamontowanych na listwie aluminiowej przytwierdzonej do stendu.

W rozdziale 6 przedstawiono „Analizę wyników badań”.

Na podstawie analizy statystycznej wyników wytrzymałości na ściskanie fibrokompozytu oraz granicy proporcjonalności i wytrzymałości resztkowych stwierdzono, że różnice pomiędzy wartościami średnimi poszczególnych prób są statycznie nieistotne. Zatem wyniki można było połączyć w jedną populację.

W tabelicy 6.1. zestawiono średnie wytrzymałości na ściskanie dla kompozytu bez włókien stalowych (52,59 MPa) i z włóknami (64,37 MPa).

W tabelicy 6.2. podano otrzymane na podstawie badań fibrokompozytu wartości granicy proporcjonalności oraz wytrzymałości resztkowych wraz z wynikami analizy statystycznej.

W tabelicy 6.3. zamieszczono wyniki badań stali zbrojeniowej i stwierdzono, że spełnia ona wymagania normy Eurokod 2.

W dalszej kolejności przedstawiono wyniki badań wiodących, gdzie dla poszczególnych belek, różnie zbrojonych, przedstawiono zależności siła obciążająca – ugięcie i na tej podstawie opisano fazy pracy drobnokruszywowego elementu zginanego zbrojonego tradycyjnie i z dodatkiem włókien stalowych. Za pomocą badań tensometrycznych określono granicę plastyczności stali zbrojeniowej i porównując wyniki nośności obliczone dla granicy plastyczności stali z wynikami nośności wynikającymi z badań doświadczalnych określono różnicę wytrzymałości elementu zginanego wynikającą z zastosowania włókien stalowych.

W tabelicach 6.7. i 6.8. zestawiono wartości momentów uplastycznienia i doświadczalnych momentów zginających określających nośność badanych belek i porównano je z wartościami obliczonymi wg zaleceń podanych w RILEM TC 162-TDF, przez Barrosa oraz w Model Code 2010, a w tabelicy 6.9. zestawiono analogiczne wartości obliczone dla odkształceń granicznych.

W dalszej części rozdziału 6 przedstawiono wyniki pomiarów doświadczalnych i obliczeń momentu rysującego (tab. 6.10.), rozstawu rys (tab. 6.11.), szerokości rozwarcia rys (tab. 6.13.), ugięć (tab. 6.16.).

Na licznych wykresach pokazano przebieg zmian powyższych wartości w zależności od wielkości momentu zginającego występującego w badanych belkach.

Rozdział 7 zatytułowany został: „Propozycja wymiarowania zginanych elementów wykonanych z drobnokruszywowego fibrokompozytu”.

Na podstawie przeprowadzonych badań doświadczalnych i obliczeń teoretycznych Doktorant wykazał, że obliczeniowe nośności na zginanie (wg RILEM czy Model Code 2010) są zawyżone w stosunku do wartości doświadczalnych. Maksymalne szerokości rozwarcia rys obliczane wg wspomnianych metod są zaniżone w stosunku do wyników badań doświadczalnych. Wg Doktoranta przyczyną tego stanu jest niewłaściwe przyjmowanie wytrzymałości resztkowych – nie powinno się przyjmować średnich wytrzymałości resztkowych, gdyż z uwagi na losowy charakter rozkładu włókien w matrycy wytrzymałości resztkowe wykazują dużą zmienność nawet na długości badanej

belki. O nośności elementów decyduje wytrzymałość materiału w najsłabszym miejscu. Doktorant dysponując wynikami badań doświadczalnych oraz wynikami obliczeń teoretycznych zaproponował przyjęcie do obliczeń wytrzymałości resztkowych korygującego współczynnika K . Dla metody RILEM zaproponował współczynnik $K = 1,89$, a dla metod Model Code 2010 $K = 2,5$ (lub w modelu uproszczonym $K = 1,75$).

W dalszej części rozdziału Doktorant wykazał, że zastosowanie zaproponowanych współczynników K znacznie przybliży wartości obliczone do wartości uzyskanych z doświadczeń. Porównanie wyników skorygowanych metod obliczeniowych z doświadczalnymi przedstawiono na licznych wykresach.

Rozdział 8 „Podsumowanie i wnioski”.

W rozdziale tym Autor podał kilka istotnych stwierdzeń, a między innymi:

- przeprowadzona analiza literatury wykazała, że dodatek włókien stalowych w zginanych elementach konstrukcyjnych korzystnie wpływa na ich nośność i użytkowalność;
- metody obliczeniowe dotyczące projektowania fibrobetonowych elementów zginanych w zbyt małym stopniu zostały zweryfikowane doświadczalnie;
- fibrokompozyt użyty do wykonania belek poddanych badaniu spełnia wymagania prenormy Model Code 2010 i z uwagi na wysoką wytrzymałość resztkową można zbrojenie konwencjonalne zastępować częściowo włóknami stalowymi;
- przeprowadzone badania wykazały, że włókna stalowe mają znaczący wpływ na redukcję rozwarości rys;
- wykazano także, że maksymalne szerokości rozwarcia rys w belkach z włóknami obliczone wg rekomendacji RILEM oraz Model Code 2010, a także wg Domskiego i Kelpsya są zaniżone względem wielkości pomierzonych;
- w wyniku przeprowadzonej analizy stwierdzono, że metody wg RILEM i Model Code 2010 nie opisują poprawnie zarówno momentu uplastycznienia oraz nośności na zginanie;
- podjęta próba wyznaczenia wartości współczynnika K w celu redukcji wytrzymałości resztkowych dla badanego fibrokompozytu doprowadziła do dobrej zgodności wyników badań doświadczalnych w wynikami obliczonymi teoretycznie.

Powyższe stwierdzenia, uzyskane wyniki i wyciągnięte wnioski wskazują, że tezy postawione na początku pracy zostały udowodnione. Dodatek włókien stalowych do kompozytu wykonanego na bazie drobnowymiarowych kruszyw odpadowych w istotny sposób przyczynia się do zwiększenia nośności na zginanie elementów konstrukcyjnych, szerokości rozwarcia rys prostopadłych, zmniejszenia ugięć, a także umożliwia częściowe zastępowanie (redukcję) zbrojenia konwencjonalnego.

Metody wymiarowania zginanych elementów fibrobetonowych wg rekomendacji RILEM i Model Code 2010 mogą być stosowane pod warunkiem zastosowania w obliczeniach współczynników korygujących wytrzymałości resztkowe. Dla fibrokompozytów będących przedmiotem badań przedstawionych w mniejszej pracy można stosować współczynniki zaproponowane przez Autora, natomiast dla innych kompozycji należałoby współczynniki K określić na podstawie przeprowadzonych badań.

3. Ocena merytoryczna pracy

Cel pracy został jasno sprecyzowany. Chodziło o kontynuację prac realizowanych w Ośrodku Koszalińskim zmierzających do opracowania metod wymiarowania konstrukcyjnych elementów zginanych wytworzonych z kompozytu powstałego z drobnego kruszywa odpadowego zbrojonego włóknami stalowymi. W północnych regionach Polski zalegają olbrzymie hałdy drobnego kruszywa powstałego jako odpad po pozyskiwaniu kruszywa grubego metodą hydroklasyfikacji. Przeprowadzone badania miały wykazać, że elementy konstrukcyjne wytworzone z tego materiału mogą być traktowane na równi z elementami żelbetowymi wykonanymi z betonu zwykłego. Aby ten cel osiągnąć Doktorant zamierzał wykazać, że „dodatek włókien stalowych do kompozytu wykonanego na bazie kruszyw odpadowych w istotny sposób przyczynia się do zwiększenia nośności na zginanie elementów konstrukcyjnych, zmniejszenia szerokości rozwarcia rys prostopadłych i ugięć oraz umożliwia częściową redukcję zbrojenia konwencjonalnego”.

Chcąc bezpiecznie projektować tego typu elementy konstrukcyjne należy dysponować odpowiednimi, sprawdzonymi, zweryfikowanymi i dopuszczonymi do użytkowania metodami projektowania. Autor rozprawy doktorskiej zamierzał na podstawie weryfikacji doświadczalnej dostosować do wymiarowania metody rekomendowane wg. RILEM oraz Model Code 2010.

Pozytywne wyniki przedstawionych celów powinny stanowić istotny krok w kierunku wdrażania opracowanego fibrokompozytu do praktyki inżynierskiej – do praktycznego wykorzystania nagromadzonych hałd kruszywa odpadowego.

Postawione w recenzowanej pracy doktorskiej cele zostały osiągnięte.

Po szerokiej analizie literatury dotyczącej fibrobetonów Autor przystąpił do badań doświadczalnych elementów konstrukcyjnych – belek wykonanych z drobnego kruszywa odpadowego, zbrojonych tradycyjnie oraz włóknami stalowymi. Badania przeprowadził wykorzystując nowoczesną aparaturę między innymi:

- system ARAMIS 4M umożliwiający pomiar i rejestrację w czasie odkształceń, szerokości i rozstawu rys,
- system akwizycji danych SAD 256 rejestrujący odkształcenia powierzchni bocznej belki oraz ugięcia,
- tensometrię elektrooporową za pomocą której badano odkształcenia w stali zbrojeniowej,
- ekstensometr umożliwiający dokładny pomiar odkształceń stali poddanej rozciąganiu w celu wyznaczenia granicy plastyczności, wytrzymałości na rozciąganie oraz modułu sprężystości.

W trakcie badań Doktorant wykazał się dobrą umiejętnością prowadzenia badań naukowych przy wykorzystaniu odpowiednio dobranej, nowoczesnej aparatury pomiarowej. Analiza literatury oraz wyniki badań doświadczalnych dały podstawę Doktorantowi do opracowania współczynników korekcyjnych, które pozwoliły na dostosowanie zalecanych w literaturze metod wymiarowania fibrokompozytów do lepszej zgodności z wynikami badań doświadczalnych.

W podsumowaniu oceny merytorycznej pracy stwierdzam, że cele pracy zostały osiągnięte, a postawione tezy zostały udowodnione.

4. Uwagi ogólne i szczegółowe

Przy czytaniu recenzowanej rozprawy zauważyłem kilka drobnych usterek i nasunęło mi się kilka pytań, na które spodziewam się odpowiedzi od Doktoranta.

- Przy numeracji głównych punktów rozprawy brak kropki po numerze.
- Numeracja tablic i rysunków wykazuje pewne braki, i tak po rys. 3.8. kolejny rysunek ma numer 3.12., a przy numerowaniu tablic po tablicy 3.5. kolejna tablica ma numer 3.9.

- Czy $94,5\text{kg/m}^3$ zastosowanych włókien stalowych to dużo czy mało? Jak to można odnieść do min. i max. % zbrojenia w żelbetowych elementach zginanych? Ile wynosi min. i max. % zbrojenia w belkach?
- Co to jest otulina w elementach żelbetowych – definicja i wymagania. Co z zapewnieniem ochrony przed korozją włókien stalowych, gdzie nie ma zapewnionej wymaganej grubości otuliny? Może w elementach zbrojonych włóknami stalowymi trzeba przewidzieć zabezpieczenie powierzchniowe elementów tak jak np. w posadzkach betonowych zbrojonych włóknami stalowymi stosuje się wylewkę żywiczną?

Trzeba podjąć badania odnośnie trwałości fibrokompozytu, drobnokruszywowego.

- Badaniami w pracy objęto 9 belek, różnie zbrojonych. Dobrze byłoby kontynuować badania dla belek wykonanych z kompozytu drobnoziarnistego ale z różnymi dodatkami włókien stalowych. Wtedy zaproponowane przez Doktoranta współczynniki K można by rozszerzyć na większą grupę fibrokompozytów.
- O nośności elementu zginanego decyduje w głównej mierze nośność strefy ściskanej przekroju oraz nośność zbrojenia w strefie rozciąganej. Można również w jakimś stopniu uwzględnić nośność zbrojenia w strefie ściskanej oraz wytrzymałość betonu wzmocnionego włóknami stalowymi w strefie rozciąganej. Również powyższe elementy mają wpływ na stany graniczne użytkowości. Chciałbym prosić Doktoranta o odniesienie się do tych kwestii.
- Przed publikowaniem fragmentów pracy wskazane byłoby aby niektóre wykresy poprawić. Na wykresach, gdzie przedstawia się zmianę niektórych wielkości np. ugięć czy rozwarości rys w zależności od momentu zginającego, wartości momentów zginających powinny być odniesione na osi pionowej, a analizowana wielkość na osi poziomej.

5. Wnioski końcowe

Praca doktorska powinna być świadectwem opanowania przez Doktoranta wiedzy specjalistycznej oraz metod badawczych z zakresu tematyki doktoratu. Powinna stanowić samodzielne rozwiązanie przez Autora zagadnienia naukowego i wykazać Jego wiedzę teoretyczną w danej dyscyplinie naukowej. Musi też być wykonana metodami uznanymi za właściwe w danej dyscyplinie naukowej.

Rozprawa doktorska powinna stanowić oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Podjęty w recenzowanej pracy temat dotyczący elementów konstrukcyjnych wykonanych z drobnokruszywowego fibrokompozytu jest bardzo aktualny i nie do końca jeszcze rozwiązany. Wyniki zaprezentowane w pracy doktorskiej wnoszą duży wkład do lepszego rozpoznania problemu. O aktualności podjętego tematu świadczy chociażby liczba publikacji na powyższy temat, które ukazały się w ostatnich latach. Podjęte przez Doktoranta badania powinny być kontynuowane.

Na podstawie Ustawy z dnia 14.03.2003 roku „O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki” wraz z późniejszymi zmianami, stwierdzam, że recenzowana praca doktorska „Doświadczalna ocena wybranych metod wymiarowania belek z fibrokompozytu drobnokruszywowego” autorstwa mgr. inż. Marka Ziarkiewicza z Politechniki Koszalińskiej, stanowi oryginalne i samodzielne rozwiązanie zagadnienia naukowego oraz wykazuje ogólną wiedzę teoretyczną Autora i jego umiejętność samodzielnego prowadzenia badań naukowych.

Wnoszę zatem o przyjęcie recenzowanej pracy jako rozprawy doktorskiej i dopuszczenie mgr. inż. Marka Ziarkiewicza do publicznej obrony.

Wiesław Buczkowski
Wiesław Buczkowski

Poznań, 18 lipca 2018 roku