

Prof. dr hab. inż. Krystyna Nagrodzka-Godycka  
Politechnika Gdańska  
Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska  
Katedra Konstrukcji Betonowych

Gdańsk, 4 lipca 2020 r.

## RECENZJA

### ROZPRAWY DOKTORSKIEJ MGR INŻ. DOROTY MARCINCZAK

pt.: „WPLYW SPOSOBU KSZTAŁTOWANIA WZMOCNIENIA KOMPOZYTOWEGO PBO-FRCM NA NOŚNOŚĆ NA ŚCINANIE BELEK ŻELBETOWYCH ”

#### 1. Podstawa formalna recenzji

Podstawę opracowania niniejszej recenzji stanowi uchwała Rady Wydziału Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej nr KSN-ILT/4/3/2019-2010 z dnia 6 maja 2020 oraz pismo nr W2/615/2020 nawiązujące do tej uchwały Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Lądowa i Transport - prof. dr hab. inż. Dariusza Łydzba.

#### 2. Przedmiot, treść pracy i układ redakcyjny pracy doktorskiej

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr inż. Doroty Marcinczak pt. „*Wpływ sposobu kształtowania wzmocnienia kompozytowego PBO-FRCM na nośność na ścinanie belek żelbetowych*”. Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. Tomasz Trapko, prof. uczelni. Promotorem pomocniczym pracy jest dr inż. Michał Musiał.

Pracę doktorską stanowi opracowanie opublikowane jako Raport serii PRE nr 32/2020, liczące 255 stron. Treść rozprawy podzielono na 8 rozdziałów (o zróżnicowanej objętości), z których dwa końcowe dotyczą spisu wykorzystanej literatury oraz streszczenia w języku polskim i angielskim.

W rozdziale 1 zatytułowanym *Wstęp* (liczącym 10 stron), Autorka zwięźle uzasadnia potrzebę i zastosowanie różnorodnych materiałów kompozytowych do wzmocnień konstrukcji. Określa również przedmiot, cel i zakres pracy (p.1.2). Rozdział ten zawiera także spis ważniejszych oznaczeń przyjętych w pracy, oraz definicje skrótów i podstawową terminologię dotyczącą kompozytów, rodzajów wzmocnień stosowanych w tekście rozprawy doktorskiej. Zawarty spis zwiększa czytelność pracy.

W rozdziale 2 (liczącym 96 stron, 74 rysunki, 19 tabel) Autorka przedstawia stan wiedzy dotyczy badań i metod wzmocniania belek żelbetowych materiałami kompozytowymi, ze szczególnym uwzględnieniem wzmocnień w systemie FRCM, w tym z włóknami PBO, które zastosowała w badaniach własnych. Na początku rozdziału podaje klasyfikację i opis kruchych materiałów kompozytowych o matrycy cementowej i ceramicznej z różnorodnymi włóknami. W dalszej części przechodzi do opisu materiału PBO-FRCM będącego połączeniem matrycy mineralnej i włókien PBO (r.2.2). Kolejna część rozdziału drugiego (2.3) dotyczy wzmocniania belek za pomocą materiałów kompozytowych (rodzajów stosowanych włókien i metod wzmocniania). Przegląd badań eksperymentalnych belek żelbetowych wzmocnionych za pomocą materiałów kompozytowych zawarto w podrozdziale 2.4, z podziałem na materiały FRP i FRCM. Autorka w kolejnym punkcie (2.5) podsumowała

WPEŁNIŁO - WBLIW  
16-03-2020  
16/07/2020

zaobserwowane w badaniach mechanizmy zniszczenia oraz przeanalizowała wpływ najważniejszych parametrów takich jak: smukłość ścinania, stopień wzmocnienia, interakcje zbrojenia wewnętrznego i zewnętrznych wzmocnień, typ wzmocnienia na efektywność wzmocnień. Rozdział zakończono krótkimi wnioskami.

W punkcie 3 rozprawy doktorskiej (1/3 strony) mgr inż. Dorota Marcinczak sformułowała dwa główne cele swojej pracy, które można by nazwać tezami naukowymi rozprawy doktorskiej.

Rozdział 4 (89 stron, 96 rysunków, 19 tabel) zawiera opis przeprowadzonych przez Autorkę badań eksperymentalnych dotyczących efektywności wzmocnienia na ścinanie kompozytem PBO-FRCM w aspekcie jego ukształtowania. Opisane zostały program badań wraz z uzasadnieniem, przeprowadzone badania materiałowe, sposób wykonania elementów, wzmocnienia oraz wyniki eksperymentalnych badań belek do zniszczenia. Zbadane zostały 22 belki o przekroju teowym, podzielone na dwie serie. W każdej z obu serii była jedna belka tzw. kontrolna, bez wzmocnienia. Wszystkie badane belki wykonane były z jednakowych materiałów, miały identyczny przekrój poprzeczny i rozpiętość oraz jednakowe zbrojenie wewnętrzne. Wzmocnienia realizowane były jako nieciągłe w postaci pionowych strzemion, o zróżnicowanej szerokości pasm kompozytu oraz rozstawie. Badane belki były jednoprzęsłowe, swobodnie podparte, obciążane jedną siłą pionową w środku rozpiętości. Smukłość ścinania belek wynosiła ok. 2,3. W pierwszej serii obejmującej 10 belek, z których 9 wzmocniono strzemionami kompozytowymi PBO o szerokości 150 mm i rozstawie 100 mm w świetle pasm. Parametrem zmiennym w tej serii był sposób zakotwienia kompozytu. Badano trzy rodzaje zakotwienia: poprzez nawinięcie strzemienia na pręt kompozytowy z włókien szklanych umieszczony w półce przekroju teowego w sąsiedztwie środka, za pomocą sznura z włókien PBO usytuowanego poprzez środek i zakotwionego na powierzchni siatki z PBO w formie wachlarza oraz tzw. zakotwienie ciągłe, pasmowe (z siatki PBO usytuowanej poniżej półki przekroju teowego).

Druga seria badań (12 belek) była kontynuacją poprzedniej a program badań uwzględnił wyniki z serii I. Głównymi parametrami zmiennymi były: szerokość strzemion PBO (100, 150 i 200 mm), rozstaw w świetle (100 i 50 mm), oraz obecność (lub nie) zakotwienia strzemion PBO. Autorka po doświadczeniach serii I, zdecydowała się na pierwszy rodzaj zakotwienia badany w serii I - za pomocą nawijania strzemienia na pręt z włókien szklanych. Do pomiaru odkształceń (przemieszczeń) zbrojenia wewnętrznego i zewnętrznych wzmocnień, poza tensometrią elektrooporową, do badań jednej z belek serii II (B\_P150) zastosowano metodę Cyfrowej Korelacji Obrazu (DIC). Umożliwiło to na ciągły, bezstykowy pomiar przemieszczeń na płaszczyźnie i w wymiarze 3D.

Uzyskane wyniki eksperymentalne zostały w czytelny sposób zestawione w tabelach i na licznych wykresach oraz fotografiach. Wyniki badań belek obejmowały wartości sił rysujących, niszczących, odkształcenia zbrojenie wewnętrzne oraz kompozytowych wzmocnień PBO, ugięcia i morfologię rys. Każda szczegółowo opisana seria badań została zakończona wnioskami.

Rozdział 5 rozprawy doktorskiej (38 stron, 15 rysunków, 10 tabel) składa się z trzech części. W części pierwszej (5.1) Autorka omawia istniejące w literaturze modele do obliczeń udziału wzmocnienia FRCM w nośności belek na ścinanie. Opisane zostały: procedura obliczeniowa według normy amerykańskiej ACI 549.4R-13, model A. Younis i in., model Z. Tetta i in., oraz model T.G. Wakjira i U. Ebead. Ten ostatni model umożliwia określenie zarówno udziału kompozytu w nośności na ścinanie jak i obliczenie całkowitej nośności ścinania wzmacnianym belek. W drugiej części rozdziału (5.2) Autorka przedstawia



obliczenia według uprzednio opisanych procedur i modeli dla badanych przez siebie belek. Przykładowe obliczenia opisano dla belki ze strzemionami PBO o szerokości 150 mm z I serii badań...Całość teoretycznych wyników zestawiono w tabelach 5.1 i 5.2. Wykonane obliczenia zostały podsumowane w podrozdziale 5.3.

W dalszej części rozdziału piątego (p. 5.4), na podstawie uzyskanych wyników eksperymentalnych i teoretycznych oraz ich analizy Autorka przedstawia własne propozycje modyfikacji dwóch modeli obliczeniowych: Tetta i Wakjira. W modelu Tetta zaproponowała zmiany w określeniu efektywnej wysokości kompozytu w przypadku zakotwienia wzmocnień za pomocą nawijanego strzemienia na pręt w półce oraz zakotwienia wachlarzowego. W przypadku zakotwienia pasmowego modyfikacja dodatkowo polegała na uwzględnieniu w nośności paska podłużnego z włókien PBO na długości odcinka ścinania w obliczaniu udziału kompozytu w nośności na ścinanie wzmocnionych belek.

W odniesieniu do modelu Wakjira zaproponowała uwzględnienie w szacowaniu nośności części półek przekroju teowego, modyfikując w tym celu wzór z normy RILEM. Kolejna zaproponowana zmiana tej metody dotyczyła modyfikacji przyjmowania naprężeń w kompozycie. Dla zakotwienia pasmowego Autorka zaproponowała modyfikację ekwiwalentnej powierzchni kompozytu poprzez uwzględnienie w niej powierzchni zakotwienia strzemienia.

Zmodyfikowane przez Autorkę modele Tetta i Wakjira zweryfikowane zostały z wykorzystaniem wyników doświadczalnych z badań własnych i badań przeprowadzonych przez Z.C. Tetta. W odniesieniu do zmodyfikowanego modelu Wakjira porównanie wyników eksperymentalnych i obliczonych obejmowało zarówno udział kompozytu w nośności na ścinanie jak i całkowitą nośność belek na ścinanie. Rozdział piąty Autorka zakończyła posumowaniem przeprowadzonych przez siebie analiz i propozycji obliczeniowych.

W rozdziale 6 dokonano podsumowania (4 strony) wyników eksperymentalnych i teoretycznych w aspekcie sformułowanych na początku rozprawy celów naukowych pracy oraz nakreślono kierunki dalszych badań.

Rozdział 7 podano spis wykorzystanej w tekście rozprawy doktorskiej literatury obejmujący łącznie 108 pozycji. Autorka podzieliła je na literaturę naukową (88 pozycji) i spis wykorzystanych norm i aprobat (20 pozycji).

Pracę doktorską kończy rozdział 8, w którym zawarto streszczenia w języku polskim i angielskim.

### **3. Ocena merytoryczna pracy**

Recenzowana praca doktorska ma charakter eksperymentalno-teoretyczny. Treść pracy ściśle odpowiada jej tytułowi.

Podjęty przez Doktorantkę temat pracy dotyczący wzmocniania na ścinanie i wpływu strzemion PBO-FRCM, ich ukształtowania na nośność wzmocnionych w strefie przypodporowej belek uważam za aktualny i ważny. Szczególnie, że obecnie są opracowywane europejskie zalecenia normowe w tym zakresie. Ponadto badań i analiz dotyczących wykorzystania włókien PBO w literaturze dotychczas było niewiele. Ukierunkowanie problemu dysertacji na nowoczesną, mało rozpoznaną tematykę wzmocnień belek żelbetowych na ścinanie materiałem kompozytowym złożonym z matrycy mineralnej i siatek z włókien PBO, ma znaczenie poznawcze i przyczynia się do rozwoju wiedzy z



zakresu inżynierii lądowej. Należy pokreślić, że przyjęta tematyka badawcza ma nie tylko znaczenie naukowe, ale jest również istotna dla praktyki inżynierskiej.

Jedną z zalet systemu FRCCM zastosowanego do wzmocnień w porównaniu do innych kompozytów np. dość już popularnych mat, taśm z włókien węglowych (CFRP) czy ogólnie materiałów z matrycą polimerową jest jego trwałość w agresywnym środowisku oraz odporność ogniowa. Włókna PBO - najmniej od strony badawczej rozpoznane - w systemie FRCCM-PBO czynią ten materiał odporny na wilgoć i wysokie temperatury.

Ważnym problemem w projektowaniu wzmocnień jest odpowiednio wczesne włączenie się wzmocnień do przejmowania obciążeń i współpraca ze wzmacnianym elementem. Ma to podstawowe znaczenie w rzeczywistej skuteczności wzmocnienia. Przykładowo, właśnie powyższy problem oraz konieczność zapewnienia dokładnego przygotowania podłoża w połączeniu z brakiem odporności ogniowej istotnie zmniejszył początkowy entuzjazm w stosowaniu taśm z włókien węglowych jako wzmocnień. Okazało się, że pomimo wysokich wytrzymałości ich wykorzystanie maksymalnie sięga maksymalnie 20-30%. Ta efektywność może być zwiększona dopiero poprzez sprzężenie, które jednak nie niweluje pozostałych mankamentów tego typu wzmocnienia.

Problemy rzeczywistej skuteczności wzmocnień i parametrów, które na nią wpływają zostały wyeksponowane dopiero w wyniku podjęcia badań eksperymentalnych różnorodnych wzmocnień elementów konstrukcji przez różnych badaczy.

Autorka w swojej pracy doktorskiej podjęła się dotychczas mało rozpoznanego eksperymentalnie zagadnienia określenia efektywności wzmocnień belek żelbetowych na ścinanie w postaci strzemion wykonanych z PBO-FRCCM przeprowadzając w tym celu własne badania eksperymentalne i analizy teoretyczne.

Podstawowym warunkiem poznawczego charakteru badań naukowych jest poprawnie przyjęty program badawczy. Autorka po przeanalizowaniu stanu wiedzy na temat badań opracowała program badawczy obejmujący 22 żelbetowe belki, który całkowicie spełnił ten warunek. Program uwzględnił najważniejsze parametry wpływających na nośność wzmacnianych belek – rodzaj zakotwienia wzmacnianych strzemion, ich ukształtowanie (szerokość strzemion z PBO i rozstaw). Dużą zaletą przyjętego programu badawczego jest podział badań na dwie serie badawcze oraz wykorzystanie wniosków z serii I do zaplanowania kolejnej drugiej serii badań. Poprawnie - w aspekcie badań na ścinanie - przyjęto geometrię elementu (przekrój teowy) oraz smukłość ścinania (ok. 2.3) jak również wewnętrzne zbrojenie belek zarówno podłużne i poprzeczne. Zastosowanie w badaniu jednej z belek serii II nowoczesnego optycznego systemu bezstykowej rejestracji odkształcenia i zarysowania *DIC* dodatkowo umożliwiło wnikliwą analizę procesu zarysowania.

Z tematem pracy doktorskiej są ściśle skorelowane przyjęte ogólne cele naukowe i te dotyczące każdej serii badawczej oraz przeprowadzonych analiz obliczeniowych. Wszystkie części rozprawy doktorskiej są merytorycznie spójne. Badania zostały przeprowadzone bardzo starannie. Wyniki badań zostały szczegółowo i wyczerpująco udokumentowane na licznych wykresach, fotografiach i tabelach. Wyniki analiz teoretycznych i przeprowadzonych obliczeń również zestawiono w stabelaryzowanej formie.

Układ pracy jest merytorycznie poprawny. Wszystkie sformułowane przez Doktorantkę cele badawcze zostały zrealizowane.

Jednoznacznie stwierdzam, że opiniowaną rozprawę doktorską mgr inż. Doroty Marcinczak oceniam jako bardzo dobrą, o dużym znaczeniu poznawczym i praktycznym. Poniżej wymienione argumenty stanowią uzasadnienie tej oceny.



## Główne osiągnięcia pracy

Za najważniejszy oryginalny dorobek poznawczy Autorki uważam:

- Przeprowadzenie doświadczalnych badań 22 belek o przekroju teowym i wymiarach zbliżonych do skali naturalnej według autorskiego programu badawczego. Autorka do realizacji tematu trafnie z merytorycznego punktu widzenia przyjęła parametry zmienne rodzaj zakotwienia strzemion i ich ukształtowanie. Tak zaplanowany program badań umożliwił rozpoznanie wpływu tych czynników na zarysowanie i nośność ścinania strefy przypodporowej belek wzmacnianych strzemionami nieciąglymi PBO-FRCM, wyłączenie zbrojenia wewnętrznego oraz efektywność tego rodzaju wzmocnień.
- Zastosowanie w badaniach doświadczalnych nowoczesnej metody badawczej polegającej na rejestracji deformacji powierzchni betonu wzmocnionej belki w strefie przypodporowej (odkształcenia i zarysowania) za pomocą bezstykowego optycznego systemu pomiarowego cyfrowej korelacji obrazu DIC. Umożliwiło to Autorce uzyskanie doświadczalnych precyzyjnych map odkształceń wraz z ich kumulacją obrazującą powstawanie i rozwój zarysowania w kontekście usytuowania strzemion PBO. Pomimo iż badanie dotyczyło jednej belki, poszerzyło możliwości wyjaśnienia mechanizmu niszczenia wzmocnionych belek.
- Dokonanie oceny wpływu przyjętych w programie eksperymentalnych badań poszczególnych parametrów zmiennych na zarysowanie i nośność ścinania wzmocnionych belek.
- Analizę proponowanych w literaturze światowej obliczeniowych modeli, umożliwiających określenie udziału wzmocnienia PBO-FRCM w nośności belek na ścinanie i weryfikację doświadczalnych wyników teoretycznych.
  - Opracowanie własnych propozycji modyfikujących dwa istniejące modele obliczeniowe Tetta oraz Wakjira i Ebead'a, szczególnie tych odnoszących się do uwzględniania zakotwienia strzemion PBO oraz modyfikacji naprężeń w kompozycie przy określaniu udziału kompozytu w nośności belek na ścinanie. Zmodyfikowane modele obliczeniowe zweryfikowano na badaniach własnych i badaniach Tetta. Autorskie propozycje zmian są rezultatem przeprowadzonych własnych badań i analiz obliczeniowych.

Na wyróżnienie zasługuje również wnikliwie przeprowadzony przez Autorkę przegląd stanu wiedzy dotyczący wzmocnień belek na ścinanie za pomocą materiałów kompozytowych ze szczególnym uwzględnieniem kompozytu PBO-FRCM. Usystematyzowanie przeprowadzonych wcześniej badań i opis metod obliczeniowych jest cenne, ponieważ technologia tego typu wzmocnień jest stosunkowo nowa a literatura mało rozpowszechniona.

## Uwagi krytyczne i o charakterze dyskusyjnym

Cele naukowe pracy podane w rozdziale 3 (s.113) można nazwać tezami. Tym bardziej, że Autorka cel pracy podaje w p. 1.2 (s.9) oraz podaje cele i program badawczy na początku każdej serii badań (p. 4.2.1. s.116 oraz p. 4.5.1. s. 161).

Stosunek  $a/d$ , określa bezwymiarową wartość zwaną *smukłością ścinania* (w przypadku obciążenia skupionego). Autorka w tekście pracy w kilku miejscach błędnie określa ten bezwymiarowy stosunek  $a/d$  jako długość odcinka ścinania (przykładowo s. 64: *długość odcinka ścinania  $a/d$  wynosiła 2,85*, to samo sformułowanie jest na s. 66, s. 70: *mała wartość odcinka ścinania  $a/d=0,4$* , s. 96: *długość odcinka ścinania  $a/d$  nie ma wpływu na mechanizm niszczenia*, s. 107- podpisy pod rysunkami 2.69 i 2.70: *długość odcinka ścinania  $a/d$* )

W rozdziale 2.5 poświęconym analizie wyników badań (s.100), poruszając problem zmiany charakteru pracy belki w zależności od smukłości ścinania ( $a/d=2,5$ ) należałoby przytoczyć przede wszystkim prace Leonhardta ( i Kani). Podana pozycja literatury [62] jedynie powiela te wnioski.

W rozdziale 4 opisując badania własne Autorka nie precyzuje czy podane wytrzymałości betonu z którego wykonano belki dotyczą wytrzymałości w dniu badania belek czy są to wytrzymałości betonu 28 dniowe? Średnie wartości na kostkach i walcach są bardzo do siebie zbliżone, co przeczy ogólnym zależnościom pomiędzy wytrzymałością a wielkością i rodzajem próbki dla betonu zwykłego konstrukcyjnego (zależność pomiędzy kostkową i walcową wytrzymałością na ściskanie). Czy odkształcalność betonu badana była na tych samych walcach co wytrzymałość betonu?

Na rysunku 4.4. przedstawiającym zbrojenie belki podana rozpiętość belki w osi podpór wynosi 200 cm. Podany rozstaw strzemion wewnętrznych i ich usytuowanie potwierdzają tą rozpiętość. Na rysunku 4.20 przedstawiającym schemat obciążeń (trypunktowe zginanie) i stanowiska badawczego rozpiętość belki w osiach podpór wynosi 160 cm, co z kolei potwierdzałyby obliczenia w r.5. Takie rozbieżności w opisie badań są niedopuszczalne (odległość siły od podpory w analizie ścinania jest kluczowa).

Z opisu elementów belki serii I BP\_1,2,3, oraz belka z serii II oznaczona symbolem BP\_150 mają ten sam kształt, rozpiętość i tak samo ukształtowane strzemiona wzmacniające oraz zakotwienie. Siły niszczące te belki w serii I i II są zróżnicowane, efektywność wzmocnienia również a jeszcze większe różnice (prawie dwukrotne) dotyczą odkształceń kompozytu i ugięć, większe dla belek serii I. Jak Autorka może wyjaśnić te różnice?

Belka BP\_150 badana była z wykorzystaniem dodatkowej metody DIC. Wyniki wnoszą sporo cennych spostrzeżeń. Zrozumiałe są różnice wyników odkształceń pomiędzy metodami pomiaru (tensometry i DIC). Jednakże informacje dotyczące odkształceń kompozytu uzyskane z tensometrii nie są spójne. W tab. 4.18  $\epsilon_{max}$  dla tej belki (BP\_150) wynosi 3,33 ‰, na s. 2,45 ‰ jak na wykresie z rys. 4.93. Skąd te różnice?

Rozdział piąty opisujący modele obliczeniowe, własne analizy nośności na ich podstawie i propozycje modyfikacji dwóch z opisywanych modeli (Tetta i Wakjira) został opracowany w nieuporządkowany sposób. Brakuje przejrzystości i logicznego układu treści, jakim charakteryzują się poprzednie rozdziały rozprawy doktorskiej (rozdziały 2 i 4). Szczególnie dotyczy to obliczeniowych procedur, przytaczanych wzorów i wyjaśnień poszczególnych symboli.

Te same wielkości czasem oznaczane są różnymi symbolami.

Przykładowo:

Długość odcinaka ścinania (w poprawnym znaczeniu użyta jest w r. 5), na stronie 203, s. 215 Autorka oznacza jako  $L_{cr}$ , natomiast na innych stronach ta sama długość jest oznaczana jako



$L_{CSS}$  (np. s. 212, 219, 231,232). Co jest powodem stosowanie różnych symboli na tą sama wielkość?

Efektywne odkształcenie kompozytu wg ACI 549.4R-13 raz oznaczane jest jako  $\epsilon_{fv}$  (wzór 5.10, s. 203) a raz, powołując się na tę normę  $\epsilon_f$  (wzór 5.35 s.211)

Na s. 208 po wzorze 5.29 następuje wzór 5.20, który jest podany na s. 206 i dotyczy tak naprawę 5.21 (dotyczy  $L_e$ ), natomiast (5.20) opisuje  $L_{max}$

Przywoływanie ponownie wzorów z wcześniejszą numeracją (s.208, 209) wprowadza chaos. Znacznie czytelniej byłoby podawać wzór i opisać w nim wszystkie oznaczenia po kolei (a nie w tekście, często kilka wierszy dalej). Mało przejrzysty sposób przedstawiania obliczeń i przyjętych danych danych też budzi wątpliwości co utrudnia ich śledzenie.

Przykładowo:

Na stronie 211 zdefiniowano  $a_f$  pole siatki z włókien kompozytowych jako iloraz  $A_f$  i wielkości  $s_v$  – niesprecyzowanej (rozstaw strzemion stalowych wewnętrznych? Tak by wynikało z opisu ze s. 211?, czyli 250 mm?  $A_f$  opisano wzorem (5.50) i dla obliczanej belki jest o wartość 0,0546, Na s. 220 (górną wiersz) we wzorze podstawiono za wartość  $a_f$  podstawiono: 2·0,0455 mm?

Na stronie 219 Autorka przyjmuje wartość odkształcenia  $\epsilon_x$  do obliczenia współczynnika naprężenia rozciągającego  $\beta$ , odkształcenie  $\epsilon_x$  obliczone jest dopiero na następnej stronie 220.

W tabelach 5.1 czy 5.2 należałoby obok obliczeniowej siły niszczącej podać numer wzoru z którego została obliczona (jednostkę można określić w tytule tabel).

Proponowane przez Autorkę zmiany w dwóch modelach obliczeniowych dotyczące uwzględnienia zakotwienia wzmacniających strzemion kompozytowych oraz redukcja efektywnych naprężeń z uwagi na nieciągłość wzmocnienia są uzasadnione merytorycznie wynikami badań Doktorantki i badań obcych.

Natomiast trudno jest mi zaakceptować krytykę Autorki dotyczącą braku uwzględniania półek przekroju teowego w obliczaniu nośności na ścinanie (s. 201, s. 225, s.237). A już zupełnie nieuzasadniona jest opinia jakoby metoda Boriszańskiego poprawniej określała realną nośność na ścinanie w przypadku przekroju teowego.

Należy mieć na uwadze fakt, że półka może ulec zarysowaniu (często już pod obciążeniem użytkowym, które szacunkowo można przyjąć jako 50-60% nośności granicznej). W badanych przez Autorkę belkach takie zarysowanie się pojawiało. Ponadto rozważając ścinanie przekroju teowego należy mieć na uwadze działanie również naprężeń stycznych na styku półki i żebra, które może także doprowadzić do zarysowania i zniszczenia. Zjawisko to sygnalizowane w badaniach eksperymentalnych jeszcze przez Mörscha, w przepisach normowych uwzględniono dopiero w MC1990. Obecna norma europejska (i MC2010) również przy sprawdzaniu ścinania przyjmuje dwa modele: kratownicę pionową (odniesioną do osi żebra) i poziomą w płaszczyźnie środkowej płyty – do określenia ścinania pomiędzy półką a żebrą. Autorka do tego problemu w swoich rozważaniach się nie odnosi.

Jedną z propozycji Autorki modyfikacji modelu obliczeniowego Wakjira jest uwzględnienie części półki przekroju teowego przy obliczaniu ścinania żebra. Weryfikację eksperymentalną tej modyfikacji przeprowadzono na badaniach własnych i belkach z badań Tetta. Bezpieczne wartości (poniżej jedności) stosunku siły obliczonej do eksperymentalnej uzyskano dla 8 belek serii II badań Autorki. Jak wykazują badania Leonhardta udział pasa górnego w nośności zależy od poziomu obciążenia (zmniejsza się przy obciążeniu niszczącym) i stosunku  $b_{eff}/b_w$ , który w badanych przez Autorkę belkach był stały (wynosił 2,3).

Reasumując uważam, że propozycja uwzględniania pól w ścinaniu środka belki jest zbyt ryzykowna i nieco przedwczesna.

Przyjmowanie stałego kąta nachylenia krzyżulców betonowych jako  $45^\circ$  wg założenia Mörscha rzeczywiście często nie jest zgodne z wynikami badań eksperymentalnych wzmocnionych belek. Na ten kąt wpływa oddziaływanie strzemion kompozytowych. Czy zatem nie należałoby wprowadzić modyfikacji w tych metodach obliczeń (wzorem obecnej europejskiej procedury ścinania dla belek żelbetowych) i wprowadzić możliwość zmiennego kąta  $\theta$  w pewnym, uzasadnionym eksperymentalnie, zakresie. Badania Autorki mogłyby być przydatne, szczególnie, że częściowo wykorzystywała w nich również metodę pomiaru za pomocą DIC. (kąt  $\theta$  wg Wakjira - wzór 5.46 - jest uzależniony od odkształceń podłużnego zbrojenia wewnętrznego).

Autorka w podsumowaniu podnosi problem ograniczenia odkształceń kompozytu do 4‰ w normie amerykańskiej w obliczeniach udziału kompozytu w nośności na ścinanie, co jej zdaniem niedoszacowuje tej nośności. Rzeczywiście w badaniach uzyskiwano znacznie większe odkształcenia - wg tabel 4.10 i 4.18 od 4,3 do 12,9‰ (głównie dzięki zakotwieniu). Należy mieć na uwadze fakt, że przepis normowy podaje procedurę bezpieczną do projektowania. Czy zdaniem Autorki nie należałoby w praktyce jako zalecenia przy projektowaniu wprowadzić pewnego ograniczenia tych odkształceń - chociażby z uwagi na stan graniczny użytkowalności?

#### **Uwagi szczegółowe**

Cytowanie w tekście jedynie nr pozycji ze spisu literatury jest dość uciążliwe w odbiorze, czytelniej jest opatrywać cytata nazwiskiem i nr pozycji literatury (przykładowo jak na s. 56).

Na wielu rysunkach i wykresach opisy są nieczytelne i bardzo zmniejszają czytelność pracy. Przykładowo są to rysunki na stronach: 42, 71, 81, 150, 153, 178, 179, 181, 182, 184, 185, 204.

s. 81- błędny opis numeru serii belek w podpisie pod rys. 2.50

ogólnikowe sformułowania np. s. 47 – wrażliwe na zaginanie, s. 48 – wrażliwe na obciążenia ściskające,

s. 178/179 podpisy pod rysunkami zbyt ogólne – odkształcenia prętów zbrojeniowych – przy czym każdy rysunek składa się z 4 wykresów, dotyczących strzemion i prętów podłużnych. Przy nieczytelnych opisach taki podpis jest zbyt ogólnikowy

W opisie badań własnych (p. 4.2.2, s. 118) powinny być podane istotne parametry takie jak smukłość ścinania belek, stopień zbrojenia podłużnego i poprzecznego odniesiony do wewnętrznego zbrojenia, wysokość użyteczna. Te ważne dane czytelnik musi sobie obliczyć albo odszukać dopiero w rozdziale 5 w obliczeniach. Ta uwaga nie ma charakteru merytorycznego zarzutu, jedynie porządkowy, bowiem wspomniane wielkości (stopnie zbrojenia i smukłość ścinania) zostały przyjęte w badaniach Autorki poprawnie w aspekcie badań problemu ścinania.

s. 209 – teorię MCFT w języku polskim tłumaczymy, jako Zmodyfikowaną teorię pól ściskanych a nie pasm.

s. 219 – w obliczeniu udziału stali zbrojeniowej stopień zbrojenia błędnie opatrzone jednostką  $m^2$ ,



W rozdziale 7 – w spisie literatury, w części dotyczącej Norm i aprobat w niektórych pozycjach brakuje roku wydania: [89], [91], [92], [95], [96], [97], [105]

Drobne usterki edytorskie są na stronach: 8,10,17, 33, 49, 55, 61, 75, 78, 86, 87, 95, 115, 161, 207, 220, 236

#### 4. Wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa doktorska jest wartościową pracą eksperymentalno- teoretyczną o ważnym znaczeniu poznawczym i praktycznym dotyczącą tematyki ścinania belek wzmocnionych za pomocą strzemion PBO-FRCM. Podjęta przez Doktorantkę tematyka jest - w odniesieniu do zbrojenia kompozytowego wykorzystującego włókna PBO – nowa. System FRCM stanowi innowacyjną technologię wzmocniania, a w odniesieniu do PBO jest bardzo mało badań w tym zakresie.

Autorka przeprowadziła własne badania eksperymentalne na 22 belkach teowych, o smukłości ścinania 2,34. Przyjęte parametry zmienne (rodzaj zakotwienia, wpływ szerokości i rozstawu) pozwoliły nie tylko poszerzyć wiedzę na temat zachowania się efektywności wzmocnień belek na ścinanie za pomocą systemu PBO-FRCM, współpracy strzemion kompozytowych PBO ze zbrojeniem wewnętrznym belki oraz wpływu zakotwienia na nośność na ścinanie. Należy podkreślić również zastosowanie do badania jednej z belek nowoczesnej, ciągłej i bezstykowej metody pomiaru deformacji (Cyfrowej Korelacji Obrazu) DIC (*Digital Image Correlation*). Uzyskane obrazy z kamer pozwalają obserwować narastające deformacje i rozwój morfologii rys w wymiarze 3D. Wnoszą informacje, których nie sposób uzyskać np. z pomiarów tensometrycznych.

Badania Autorki są starannie opracowane, program badań czytelnie przedstawiony, uzyskane wyniki są udokumentowane licznymi wykresami, tablicami i zdjęciami. Sformułowane przez Autorkę cele pracy zostały w pełni osiągnięte.

Zasygnalizowane uwagi w niczym nie umniejszają merytorycznej wartości pracy i bardzo dobrej oceny rozprawy doktorskiej przedłożonej do recenzji.

Podsumowując niniejszą opinię stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Doroty Marcinczak pt. „*Wpływ sposobu kształtowania wzmocnienia kompozytowego PBO-FRCM na nośność na ścinanie belek żelbetowych*” spełnia wszystkie warunki merytoryczne i formalne, którym powinna odpowiadać rozprawa doktorska, określone w Ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 – oraz w Rozporządzeniu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dn. 3.10.2014 w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodach doktorskich, w postępowaniu habilitacyjnym oraz postępowaniu o nadanie tytułu profesora wraz z późniejszymi zmianami.

Na podstawie powyższego wnioskuję o dopuszczenie mgr inż. Dorotę Marcinczak do publicznej obrony pracy doktorskiej.

Po zapoznaniu się z publikacjami Doktorantki (z 35 pozycji, dwie z nich są publikowane w czasopiśmie indeksowanych w bazie JCR.) oraz biorąc pod uwagę starannie przeprowadzone badania eksperymentalne i ogólny poziom pracy doktorskiej wnioskuję o wyróżnienie recenzowanej pracy doktorskiej mgr inż. Doroty Marcinczak.

Krzysztof Nagrodzko - Godycki