



Kielce, dnia 20 maja 2023 r.

Prof. dr hab. inż. Barbara Goszczyńska
Politechnika Świętokrzyska
Wydział Budownictwa i Architektury
Katedra Wytrzymałości Materiałów i Konstrukcji Budowlanych

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Grzegorza SADOWSKIEGO

pt.: „Wpływ parametrów geometrycznych i fizycznych profilowanej powierzchni styku na pracę statyczną żelbetowych belek zespolonych”

1. Podstawa formalna recenzji

Podstawę opracowania niniejszej recenzji stanowi uchwała Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Warszawskiej z dnia 6 grudnia 2022r. oraz pismo z dnia 6 marca 2023r nawiązujące do tej uchwały podpisane przez Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Pana dr hab. inż. Konrada Lewczuka, prof. uczelni.

2. Przedmiot oceny

Przedmiotem oceny jest rozprawa doktorska opracowana przez mgr inż. Grzegorza Sadowskiego na temat:

„Wpływ parametrów geometrycznych i fizycznych profilowanej powierzchni styku na pracę statyczną żelbetowych belek zespolonych”

Promotorem pracy jest Pani prof. dr hab. inż. Anna Halicka z Politechniki Lubelskiej, a promotorem pomocniczym Pan dr inż. Piotr Wiliński. Praca opracowana w formie monografii w dziedzinie nauk należących do Nauk Inżynieryjno-Technicznych i Dziedzinie Naukowej Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport, wydana została przez Politechnikę Warszawską, Płock 2022. Rozprawa doktorska liczy ogólnie 183 strony, w tym 154 strony tekstu plus 29 stron spisów: treści, ważniejszych oznaczeń i zestawienie bibliografii zawierającej 136 pozycje plus 6 norm oraz streszczenia w języku polskim i angielskim. Praca zawiera 28 tablic i 134 rysunki.

3. Charakterystyka rozprawy

Przedmiotowa praca ma charakter teoretyczno-badawczy, treść pracy ściśle odpowiada jej tytułowi i składa się z 7 rozdziałów, w których:

— W rozdziale 1 Wstęp

Doktorant przedstawił podjęty przez niego problem naukowy dotyczący pracy styku betonów w konstrukcjach zespolonych typu „beton-beton” mającego zapewnić osiągnięcie pełnego połączenia prefabrykatu ukształtowanego z wrębami z nowym betonem, z uwzględnieniem geometrii i rozstawu wrębów oraz szorstkości powierzchni betonu w obrębie wrębów. Stwierdzając, że procedury obliczeniowe konstrukcji zespolonych, w których powierzchnia prefabrykatu została ukształtowana z wrębami nie uwzględniają geometrii tych wrębów Doktorant podjął realizację problemu

badawczego prowadzącego do uszczegółowienia zaleceń normowych i procedury obliczeniowej, która będzie uwzględniała wpływ rozstawu wrębów na nośność połączenia. Przyjęcie, że rozważania dotyczące nośności styku oraz opracowanie propozycji modyfikacji procedury obliczeniowej zostaną oparte na badaniach doświadczalnych żelbetowych belek zespolonych oraz na analizie numerycznej pracy statycznej betonowych elementów zespolonych należy uznać za bardzo słuszne.

W rozdziale tym podano także zakres rozprawy, który będzie przedstawiany w kolejnych rozdziałach.

— **Rozdział 2** Aktualny stan wiedzy o nośności styku pomiędzy betonami wykonanymi w różnych terminach.

Poświęcony został studiom literatury, których przedmiotem są:

- **zjawiska fizykochemiczne na styku łączonych betonów wykonanych w różnych terminach** (p. 2.1.1), istota zjawiska adhezji (2.1.1.1) z podziałem na mechaniczną i specyficzną wraz z zestawieniem czynników wpływających na adhezję mechaniczną w tym chropowatość powierzchni prefabrykatu i jej rodzaje według wytycznych normowych (bardzo gładka, gładka, szorstka z wrębami) oraz pomiar szorstkości (próba piaskowa) z określeniem parametrów szorstkości, a także adhezja specyficzna z podziałem na dyfuzyjną, elektrostatyczną i adsorpcyjną; istota zjawiska tarcia pomiędzy betonami zależnego od adhezji i tarcia właściwego (2.1.1.2); zjawisko zazębienia kruszywa („*aggregate interlock*”) będącego fizycznym zazębieniem ziaren kruszywa lub otaczającego je zaczynu (2.1.1.3); zbrojenie przecinające płaszczyznę zespolenia na tle przebiegu siły poprzecznej (2.1.1.4); zjawisko „*shear-friction*” zakładające, że głównym czynnikiem oddziałującym na nośność styku łączonych betonów jest rodzaj powierzchni prefabrykatu z udziałem adhezji (2.1.1.5); zjawisko „*dowel action*”, które odnosi się do nośności łączników przecinających styk pomiędzy dwoma materiałami z możliwością wystąpienia poślizgu warstw.
- **modele do wyznaczania nośności styku pomiędzy betonami** (2.1.2), które mogą podlegać ściskaniu, rozciąganiu, ścinaniu, skręcaniu lub kombinacji naprężeń normalnych i stycznych są najczęściej powieleniem istniejących sposobów badania próbek monolitycznych, stąd przedstawiono: modele styków poddanych rozciąganiu (2.1.2.2), modele styków poddanych ścinaniu (2.1.2.3), modele styków poddanych ściskaniu ze ścinaniem (2.1.2.4), modele styków podlegających ścinaniu z rozciąganiem (2.1.2.5); modele pełnowymiarowe – belki zespolone pozwalające na najdokładniejsze określenie nośności styku uwzględniające położenie styku względem osi obojętnej belki, rodzaj powierzchni prefabrykatu, zastosowanie zbrojenia zszywającego na długości belki.
- **modele obliczeniowe nośności styku pomiędzy betonami** (2.1.3) w stanie granicznym nośności styku oparte na aktualnej normie PN-EN 1992-1-1:2008 i normie już wycofanej PN-B-03264:2002 wraz z porównaniem sposobów obliczania nośności na ścinanie w płaszczyźnie zespolenia wg tych norm (2.1.3.2) oraz wytycznych *fib* Model Code 2010 w podziale na połączenia „*sztywne*”, w których adhezja jest głównym mechanizmem nośności na ścinanie styku i połączenia „*niesztywne*”, w których dominującym mechanizmem nośności na ścinanie są siły tarcia i działanie trzpieniowe (2.1.3.3), a także modele nośności styku według normy ACI 318-14 i AASHTO LRFD wraz z porównaniem sposobów obliczania nośności na ścinanie w płaszczyźnie zespolenia.
- **charakterystyka ogólna konstrukcji zespolonych z udziałem betonu** (2.2) z przykładami konstrukcji zespolonych (2.2.1); zasady pracy statycznej konstrukcji zespolonych

uwzględniającej wpływ na stan naprężeniowo-odkształceniowy takich czynników jak: różnice materiałowe, istnienie styku, podatność styku, skurcz lub ekspansja betonu(2.2.2).

- **styki ukształtowane z wrębami na przykładach konstrukcji zespolonych** z takimi stykami, w tym typy połączeń z wrębami ścian prefabrykowanych i zasady tworzenia złączy oraz obrazy ich zniszczenia (2.3.1); wpływ geometrii wrębów na nośność połączenia między betonami (2.3.2) na tle badań opisanych w literaturze(2.3.2.1) podsumowane analizą wyników (2.3.2.2), w której dla wszystkich zbadanych przez różnych autorów próbek obliczono współczynnik efektywności zespolenia α , wykorzystany także do zilustrowania zespolenia w zależności od geometrii wrębów i rodzaju betonu stosowanych w badaniach (2.3.3); wpływ udziału wrębów na nośność połączenia między betonami próbek zespolonych w złożonym stanie naprężenia w styku, których udział (naprężenia normalne i styczne) uzależniony jest od kąta nachylenia styku do poziomu, zilustrowany zestawieniem wyników badań nośności styku na ścinanie podanych w literaturze z analizą na bazie współczynnika efektywności zespolenia; badania próbek poddanych ścinaniu w jednej płaszczyźnie; porównanie wyników badań nośności styku na ścinanie podanych w literaturze z wynikami obliczeń nośności styku według EC2 i Model Code wskazuje rzeczywiście na dużą ich różnicę, obliczona wg EC2 nośność we wszystkich analizowanych przypadkach jest większa od wyników badań, a wg obliczeń opartych na Model Code – w jednym przypadku prawie równa, a w pozostałych mniejsza niż wyniki uzyskane z badań; wpływ liczby wrębów oraz docisku bocznego na nośność połączenia między betonami (2.3.4) poddany analizie na bazie wyników badania próbek wykonanych metodą „push-off” przedstawionych w literaturze z uwzględnieniem wielkości wrębów, sposobu wykonania połączenia między betonami, temperatury dojrzewania próbek, docisku bocznego podczas badania oraz rodzaju mieszanki betonowej – nośność styku na ścinanie z uwzględnieniem analizowanych czynników szeroko zilustrowana w zestawieniu.

Rozdział kończą dobrze sformułowane wnioski oraz problemy naukowo-badawcze wynikające z przeglądu literatury, których podsumowanie jest podstawą określenia problemów do rozwiązania w ramach rozprawy doktorskiej i ustalenia zadań, które umożliwią ich realizację, a mianowicie:

- wykonanie badań belek zespolonych z powierzchnią prefabrykatu ukształtowaną z wrębami, z uwzględnieniem rozstawu wrębów oraz zbrojenia zsiwywającego,
- wykonanie analiz numerycznych przedstawiających siły wewnętrzne działające na styku warstw oraz proces odspojenia betonu uzupełniającego od prefabrykatu,
- wykonanie analiz porównawczych wyników badań belek zespolonych z powierzchnią prefabrykatu ukształtowaną z wrębami z procedurami obliczeniowymi podanymi w obowiązującej normie i wytycznych Model Code2010 z uwzględnieniem wpływu rozstawu wrębów ich geometrii i gładkości powierzchni na nośność styku.

Określone zadania Doktorant konsekwentnie realizował.

— **Rozdział 3** Podstawy i założenia programu własnych badań i analiz oraz cząstkowe cele pracy.

Bardzo wnikliwie przeprowadzony w rozdziale 2 przegląd dotychczasowego stanu wiedzy był podstawą do ustalenia programu badań oraz sformułowania przez mgr inż. Grzegorza Sadowskiego głównych celów badań oraz podstawowych tez pracy.

Przedstawione cele rozprawy, to:

1. uzupełnienie i poszerzenie wiedzy dotyczącej zginanych elementów zespolonych typu „beton-beton” z powierzchnią prefabrykatu ukształtowaną z wrębami.

2. wykazanie, że założenia zawarte w normie EC2 i wytycznych Model Code2010 nie są precyzyjne w przypadku styków z wrębami o różnych rozstawach.
3. wykazanie, że zalecenia opisane w Model Code2010 przypisujące parametry szorstkości styku z wrębami tak jak do powierzchni bardzo szorstkiej budzą uzasadnione wątpliwości.
4. zaproponowanie zmian sposobu obliczania nośności styku dla powierzchni prefabrykatów z wrębami uwzględniające fakt, że połączenie z wrębami pracuje w złożonym stanie naprężeń i może wystąpić lokalne zarysowanie styku.

których realizacja będzie podstawą udowodnienia sformułowanych przez Doktoranta podstawowych tez pracy:

1. Nośność styku z wrębami zależy od geometrii wrębów i ich udziału w powierzchni styku, a także gładkości powierzchni połączenia.
2. Na nośność styku z wrębami wpływają zjawiska „shear-friction” i „dowel action”, które w znacznym stopniu uaktywniają się w chwili zerwania adhezji, co w konsekwencji prowadzi do tego, że zniszczenie ma charakter postępujący.

— **Rozdział 4** zatytułowany „Własne badania laboratoryjne”, poświęcono przedstawieniu zaplanowanych i zrealizowanych badań doświadczalnych obejmujących badania wpływu wrębów ukształtowanych na prefabrykacie bez zbrojenia zszywającego w belkach zespolonych oraz badania wpływu zbrojenia zszywającego belek zespolonych z powierzchnią prefabrykatu ukształtowaną z wrębami. W pracy podano wyniki wykonanych także badań w zakresie cech mechanicznych zastosowanych betonów do wykonania prefabrykatów i nadbetonu oraz prętów stalowych zbrojenia głównego i strzemion prefabrykatu serii I badań, a także serii II badań dla której badane były dodatkowo pręty zbrojenia zszywającego. W rozdziale tym dokonano także porównania belek zespolonych ze zbrojeniem zszywającym i bez zbrojenia zszywającego.

- Badania wpływu wrębów ukształtowanych na prefabrykatkach bez zbrojenia zszywającego (4.1) przeprowadzono na czterech belkach o wymiarach 150x250x3000mm, w tym dwóch z wrębami co 80mm („wąskimi”) i dwóch z wrębami co 120mm („szerokimi”) i betonem uzupełniającym o grubości 70 mm, i jednej belce referencyjnej z monolitycznym połączeniem nadbetonu. Belki o rozpiętości w osiach podpór 2800mm obciążane były symetrycznie rozstawionymi dwoma siłami przyłożonymi w odległości 1100mm od podpór. Podczas badania mierzono za pomocą elektronicznych czujników zegarowych ugięcia pod siłami, przemieszczenia podpór, odkształcenia betonu na pięciu poziomach w środku rozpiętości belki (baza pomiarowa 200 mm – właściwie przyjęta) oraz przemieszczenia betonu uzupełniającego względem prefabrykatu w funkcji rosnącego monotonicznie obciążenia. Analizie poddano obraz zarysowania styku i zniszczenia elementów oraz ugięcia i przemieszczenia, a także porównano teoretyczne siły rysujące wyznaczone na podstawie normy PN-EN 1992-1-1-2008 oraz wytycznych *fib* Model Code2010 w ujęciu połączenia „sztywnego” i „niesztywnego” z wynikami zarysowania styku uzyskanymi z badań. Wyniki obliczeń i badań przedstawiono na wykresach oraz zestawiono z dużą starannością w tabeli wraz z krótkim komentarzem uzyskanych wartości. Wnioski z badań potwierdziły przyjęte tezy rozprawy dotyczące wpływu rozstawu oraz szorstkości wrębów ukształtowanych na powierzchni prefabrykatu na obciążenie przy którym nastąpiło zniszczenie belek zespolonych.
- Badania wpływu zbrojenia zszywającego belek zespolonych (4.2) z powierzchnią prefabrykatu ukształtowaną z wrębami wykonano w sposób analogiczny na dwóch elementach zespolonych z wrębami „wąskimi” co 80mm i betonem uzupełniającym o grubości 70mm ze zbrojeniem

zszywającym w postaci strzemionek na odcinkach przypodporowych belek i jednej belce referencyjnej z monolitycznym połączeniem betonu uzupełniającego. Podczas badania pomiary były wykonywane tak jak w serii I badań oraz dodatkowo, w celu śledzenia procesu zarysowania powierzchni bocznej belek w funkcji obciążenia, zastosowano metodę cyfrowej korelacji obrazu 2D w 3 strefach rejestracji zdjęć o wymiarach 320x600 mm każda, fotografowanych jednym aparatem cyfrowym automatycznie co 20 sekund. Analizie poddano wyniki ugięć belek i przemieszczeń między betonami w funkcji zadawanego obciążenia oraz obraz zarysowania powierzchni bocznej belek zespolonych na różnych poziomach obciążenia obserwując szczególnie zmianę kierunku rysy z prostopadłej do ukośnej świadczącej o zwiększającym się udziale siły poprzecznej w stosunku do momentu zginającego. Analizie poddano także obraz zarysowania styku pomiędzy prefabrykatem a betonem uzupełniającym. Obliczenia naprężeń w styku i odpowiadających im sił poprzecznych/rysujących na podstawie normy PN-EN-1992-1-1 2008 oraz wytycznych *fib* Model Code 2010 wykonano przy uwzględnieniu zbrojenia zszywającego na poziomie 15% i 30% granicy plastyczności stali. Wyniki obliczeń i badań przedstawiono na wykresach oraz zestawiono z dużą starannością w tabeli wraz z krótkim komentarzem uzyskanych wartości. Podrozdział zakończony został wnioskami dotyczącymi głównie obliczonej siły poprzecznej, przy której powstaje zarysowanie styku.

- W ramach analizy porównawczej belek zespolonych ze zbrojeniem zszywającym i bez tego zbrojenia (4.3) przeanalizowano zależność ugięcia w funkcji rosnącego obciążenia dla wszystkich badanych belek oraz siły poprzecznej przy której nastąpiło lokalne zarysowanie oraz nośności na ścinanie odpowiadającej powstaniu pierwszej rysy ukośnej obliczonej zgodnie z normą PN-EN 1992-1-1 2008, a także porównano obliczone według wybranych procedur obliczeniowych wartości nośności na ścinanie belek bez zbrojenia zszywającego oraz belek ze zbrojeniem zszywającym z rozstawem wrębów 80 mm. W podsumowaniu wniosków analizy porównawczej stwierdzono, że na lokalne zarysowanie styku w belkach zespolonych ma wpływ rozstaw wrębów prefabrykatów oraz zbrojenie zszywające, a także, że procedury obliczeniowe zawarte w EC2 oraz wytycznych *fib* Model Code 2010 nie odzwierciedlają w pełni pracy styku z powierzchnią ukształtowaną z wrębami. Przytoczone wnioski z badań potwierdzają słuszność przyjętych tez rozprawy.
- **W rozdziale 5** zatytułowanym „Analiza numeryczna belek zespolonych z powierzchnią prefabrykatu z wrębami” przedstawiono modele numeryczne opracowane dla badanych belek serii I – bez zbrojenia zszywającego oraz belek serii II – ze zbrojeniem zszywającym, a także dla belki zespolonej z wrębami o szerokości 120mm, ze zbrojeniem zszywającym, która nie była przedmiotem badań. Modele numeryczne zostały opracowane w programie ABAQUS 2019 i w celu uzyskania zbieżności wyników pomiędzy badaniami a obliczeniami numerycznymi poddano je kalibracji. Modele konstytutywne betonu i stali przyjęto z wykorzystaniem zapisów normy PN-EN 1992-1-1:2008 oraz wykonanych badań cech wytrzymałościowych zastosowanych materiałów. W analizie numerycznej elementów zespolonych z wrębami o szerokości 120mm i ze zbrojeniem zszywającym, których badań nie wykonano, wytrzymałość betonu prefabrykatu i betonu uzupełniającego przyjęto słusznie taką jak dla belek zespolonych z wrębami o szerokości 80mm i ze zbrojeniem zszywającym. Wykorzystując symetrię, belki zostały zamodelowane do połowy rozpiętości. Analizy numeryczne belek zespolonych zostały wykonane w zakresie: ugięć, zarysowania powierzchni bocznej i zarysowania styku prefabrykatu i betonu uzupełniającego oraz

naprężeń działających prostopadle do styku. Porównanie wyników otrzymanych z badań laboratoryjnych i analizy MES przedstawiono dla wszystkich belek w tablicy (zarysowanie styku blisko miejsca przyłożenia obciążenia i bliżej podpory) oraz na wykresach zależności siła-ugięcie osobno dla elementów zespolonych ze zbrojeniem zszywającym i bez tego zbrojenia wraz z krótkim komentarzem uzyskanych wyników. Rozdział zakończono właściwymi wnioskami z przeprowadzonych symulacji numerycznych.

- W **Rozdziale 6** przedstawiono propozycję autorskiej modyfikacji procedury podanej w wytycznych *fib* Model Code 2010 dotyczącej obliczania nośności styku pomiędzy betonami. Modyfikacja autorska zakłada możliwość uwzględnienia różnych rozstawów wrębów na prefabrykacie poprzez współczynnik udziału poszczególnych wrębów w styku „u” – wyrażający stosunek szerokości wrębu do jego rozstawu. W modyfikacji dodatkowo uwzględniono zmianę współczynników zależnych od szorstkości. Zaproponowaną modyfikację procedury Model Code czytelnie przedstawiono w tabeli dla połączeń „sztywnych” – bez zbrojenia zszywającego i połączeń „niesztywnych” – ze zbrojeniem zszywającym oraz w tabeli przedstawiającej współczynniki uwzględniania szorstkości przy obliczaniu nośności styku z wrębami. Rezultat zastosowania modyfikacji autorskiej przedstawiono na porównaniu wyników siły rysującej styk belek zespolonych, bez zbrojenia zszywającego, z wąskimi i szerokimi wrębami uzyskanych z badań oraz obliczeń wykonanych zgodnie z procedurą Model Code i jej autorską modyfikacją. Widoczna różnica siły rysującej w elementach zespolonych ze stykiem z wrębami szerokimi i wąskimi w badaniach nie ma odzwierciedlenia w obliczeniach zgodnie z Model Code i dodatkowo wyniki obliczeń sił rysujących belek zespolonych z szerokimi wrębami dają wartości wyższe niż uzyskane w badaniach. Siły rysujące styk obliczone zgodnie z zaproponowaną autorską modyfikacją są co do wartości zgodne z wynikami uzyskanymi w badaniach, po stronie bezpiecznej. Analiza porównawcza wyników obliczeń siły rysującej dla belek zespolonych ze zbrojeniem zszywającym wykonanych zgodnie z zapisami: obowiązującej normy, zaleceniami *fib* MC i autorskiej modyfikacji z wynikami uzyskanymi z badań przedstawiona w tabeli oraz na wykresie wskazuje na bardziej precyzyjne odwzorowanie rzeczywistego zachowania styku przy zastosowaniu autorskiej modyfikacji. W rozdziale tym przedstawiono także wyniki porównania obliczeń wykonanych według autorskiej modyfikacji z wynikami badań wykonanych przez innych autorów w zakresie nośności styku (tabela) i niszczących naprężeń ścinających (wykres słupkowy). Na podstawie analizy porównawczej sformułowano wnioski, które podkreślają zasadność i skuteczność opracowania modyfikacji.
- W **rozdziale 7** zamieszczono podsumowanie i wnioski końcowe dotyczące wpływu rozstawu wrębów na prefabrykacie oraz zastosowania zbrojenia zszywającego na nośność styku żelbetowych elementów zespolonych, a także przedstawiono proponowane kierunki dalszych badań, które przyczyniłyby się do dalszego uzupełnienia i poszerzenia wiedzy z zakresu zachowania się elementów zespolonych typu „beton-beton” pod obciążeniem. Można więc stwierdzić, że postawione cele rozprawy zostały w pełni osiągnięte, a postawione tezy udowodnione.

4. Ocena merytoryczna rozprawy

4.1. Ocena doboru tematu i postawionych celów

W pracy podjęta została bardzo istotna i aktualna, zarówno pod kątem naukowym jak i aplikacyjnym tematyka związana z oceną wpływu ukształtowania i szorstkości powierzchni styku

oraz zbrojenia zszywającego na nośność zespolonych konstrukcji betonowych. W żelbetowych konstrukcjach zespolonych jednym ze specyficznych zagadnień jest prawidłowa ocena nośności i odkształcalności styku pomiędzy elementem prefabrykowanym a betonem uzupełniającym. Zarysowanie styku wpływa na zdecydowanie na stan naprężeń, przemieszczeń i odkształceń elementu zespolonego, stąd zagadnienie to jest bardzo interesujące zarówno pod kątem rozszerzenia wiedzy dotyczącej zachowania zginanych elementów zespolonych typu „beton-beton” pod obciążeniem, jak również oceny procedur obliczeniowych podanych w normach. Zaletą konstrukcji zespolonych jest między innymi skrócenie czasu budowy przez użycie prefabrykatów, które mogą być wykonane z większą precyzją i z betonów wysokich klas, możliwość zwiększenia nośności na zginanie, a także możliwość uzyskania oszczędności. Zalety te spowodowały szersze stosowanie w budownictwie elementów prefabrykowanych, a kierowanie się zasadami zrównoważonego rozwoju promujące działania zmierzające do utrzymania i naprawiania obiektów już istniejących, zamiast ich wyburzania i wznoszenia nowych wpływają na szersze zastosowanie betonu uzupełniającego do istniejących elementów, przy konieczności ich wzmocnienia lub zmiany sposobu użytkowania.

Bardzo cennym jest więc poszukiwanie przez Doktoranta metody zapewniającej wiarygodną ocenę zespolenia powierzchni prefabrykatu ukształtowanej z wrębami z betonem uzupełniającym, a także weryfikacja procedur obliczeniowych podanych w normach i wytycznych *fib* przedstawionych w dokumencie Model Code2010. Opracowanie oryginalnej modyfikacji procedury obliczeniowej podanej w wytycznych *fib* dedykowanej do zastosowań w praktyce inżynierskiej stanowi niewątpliwie o walorze aplikacyjnym rozprawy. Stanowią bowiem narzędzie wskazujące inżynierom kierunki procedury prowadzenia obliczeń statyczno-wytrzymałościowych konstrukcji zespolonych typu beton-beton oraz ich projektowania.

4.2. Cele i tezy rozprawy

Wnikliwie przeprowadzony przegląd literatury w zakresie konstrukcji zespolonych typu „beton-beton” był podstawą do sformułowania przez mgr inż. Grzegorza Sadowskiego głównych celów oraz podstawowych tez pracy, które zostały podane w rozdziale 3 dysertacji, i tak jako cele wymieniono:

1. uzupełnienie i poszerzenie wiedzy dotyczącej zginanych elementów zespolonych typu „beton-beton” z powierzchnią prefabrykatu ukształtowaną z wrębami.
2. wykazanie, że założenia zawarte w normie EC2 i wytycznych Model Code2010 nie są precyzyjne w przypadku styków z wrębami o różnych rozstawach.
3. wykazanie, że zalecenia opisane w Model Code2010 przypisujące parametry szorstkości styku z wrębami tak jak do powierzchni bardzo szorstkiej budzą uzasadnione wątpliwości.
4. zaproponowanie zmian sposobu obliczania nośności styku dla powierzchni prefabrykatów z wrębami uwzględniające fakt, że połączenie z wrębami pracuje w złożonym stanie naprężeń i może wystąpić lokalne zarysowanie styku.

których realizacja będzie podstawą udowodnienia podstawowych sformułowanych przez Doktoranta tez pracy:

1. Nośność styku z wrębami zależy od geometrii wrębów i ich udziału w powierzchni styku, a także gładkości powierzchni połączenia.
2. Na nośność styku z wrębami wpływają zjawiska „shear-friction” i „dowel action”, które w znacznym stopniu uaktywniają się w chwili zerwania adhezji, co w konsekwencji prowadzi do tego, że zniszczenie ma charakter postępujący.

Tezy te mają charakter naukowy i są w pracy konsekwentnie udowodniane. Do tego celu służyła Doktorantowi naukowa metodyka oparta na studiach literatury, norm i wytycznych, szeroko zakrojona analiza wyników wykonanych badań własnych oraz analiza numeryczna oparta na opracowanych przez Doktoranta modelach. Osiągnięte wyniki analiz umożliwiły Doktorantowi zaproponowanie zaleceń do projektowania żelbetowych belek zespolonych uwzględniające autorską modyfikację podanej w wytycznych *fib* Model Code 2010 procedury służącej do obliczania nośności styku pomiędzy betonami, która uwzględnia udział wrębów w powierzchni styku oraz gładkości powierzchni połączenia. Można więc stwierdzić, że Doktorant podjął się ambitnego zadania, które w konsekwencji rozwiązał proponując autorską modyfikację procedury obliczeniowej.

4.3. Ocena wartości naukowej rozprawy

Wszystkie części rozprawy doktorskiej są merytorycznie spójne. Przegląd literatury, opis wykonanych badań i analiz, w tym numerycznych został szeroko udokumentowany w postaci tabel i wykresów. Tym samym główne cele pracy i sformułowane tezy zostały w pełni udowodnione. Jednocześnie stwierdzam, że opiniowaną rozprawę doktorską mgr inż. Grzegorza Sadowskiego oceniam jako bardzo dobrą o dużym znaczeniu poznawczym, twórczo powiększającą dotychczasowy stan wiedzy na temat wpływu parametrów geometrycznych i fizycznych powierzchni styku ukształtowanej z wrębami na pracę statyczną żelbetowych belek zespolonych.

Poniżej wymienione argumenty stanowią uzasadnienie tej oceny. Recenzowana rozprawa wskazuje na kompetencję Doktoranta i umiejętność twórczego rozwijania wiedzy, a także prowadzenia badań doświadczalnych. Za najważniejsze oryginalne osiągnięcia naukowe Autora uznaję:

- Dokonanie przeglądu literatury, norm i wytycznych wraz z interpretacją własną pod kątem określenia celu i sformułowania tez pracy i programu badań opartych na analizie wyników badań przedstawionych w literatury w oparciu o obliczony dla tych badań współczynnik efektywności zespolenia oraz zestawienie wyników badań nośności styku na ścinanie w porównaniu z przeliczoną nośnością według normy EC2 i *fib* Model Code 2010,
- Opracowanie programu badań doświadczalnych i metodyki ich wykonania wymagającej zsynchronizowania obciążenia ze sprzętem pomiarowym, w tym zastosowanie nowoczesnego narzędzia jakim jest metoda cyfrowej korelacji obrazu 2D, pozwalająca na rejestrację obrazu zarysowania podczas obciążania i późniejszą jego analizę,
- Przeprowadzenie analiz w aspekcie przyjęcia modeli konstytutywnych materiałów oraz opracowanie modeli numerycznych belek zespolonych przy pomocy programu ABAQUS oraz ich kalibracja,
- Przeprowadzenie szerokiej analizy uzyskanych rezultatów przeprowadzonych badań belek zespolonych w aspekcie wpływu rozstawu wrębów prefabrykatu, szorstkości powierzchni wrębów oraz zbrojenia zszywającego na wielkość obciążenia, przy którym nastąpiło zniszczenie belek zespolonych, wraz z analizą udziału w nośności styku adhezji/zazębienia i zjawisk identyfikowanych jako „dowel action” i „shear-friction”.
- Opracowanie zmodyfikowanej procedury MC2010 obliczania nośności styku w belkach zespolonych z powierzchnią prefabrykatu ukształtowaną z wrębami uwzględniającej wpływ różnego rodzaju wrębów oraz parametrów szorstkości betonu na powierzchni wrębów.

5. Uwagi o pracy

Uwagi o pracy można podzielić na:

5.1. Uwagi formalne

Praca napisana jest niezwykle zwięźle i wydana w formacie A5, co niestety wpływa na czytelność rysunków i zdjęć, a zwłaszcza na czytelność opisów umieszczonych na rysunkach. Należy jednak zwrócić uwagę na dużą staranność opracowania obszernych tablic.

Z dostrzeżonych usterek formalnych rozprawy przykładowo należy wymienić:

- str. 28 przy opisie parametru szorstkości, po gdzie: powinno być dodane: l – długość odcinka oceny oraz drugi wiersz od dołu „dla określonej liczby przedziałów n” dopisane – „np. 5 przedziałów”
- stosowanie w całej pracy określenia „modele badawcze”, „elementy badawcze” wg recenzenta jest nieprawidłowe, bo jest stanowisko badawcze, a modele czy elementy są badane – badane elementy
- str. 69 pierwsza linijka po rysunku 45 „w zależności kąta nachylenia” – w zależności od kąta nachylenia
- str. 71 – „ścięcie wrębu części wykonanej zaprawy” – chyba ścięcie wrębu w części wykonanej zaprawy
- str. 78 – rys. 55 nieczytelne na wykresie oznaczenia wyników uzyskanych przez cytowanych badaczy,
- str. 84 – pierwsza linijka tekstu 7 cm – powinno być jednolite stosowanie jednostek 70mm,
- str. 168 – strona pusta.

5.2. Uwagi krytyczne merytoryczne

- Szkoda, że przeprowadzona szeroka analiza wykonanych badań słabo odnosi się do belek porównawczych ze stykiem monolitycznym. Ciekawe byłoby porównanie obliczonej nośności tych belek z wynikami uzyskanymi z ich badań, a także do nośności belek ze stykiem betonu prefabrykatu i betonu uzupełniającego.

5.3. Pytania i uwagi dyskusyjne

- Pytania dotyczą głównie realizacji badań doświadczalnych:
 - wyjaśnienie przyjęcia schematu działania obciążania, głównie pod kątem przyjęcia odległości między siłami równej 600 mm,
 - wyjaśnienie w jaki sposób było realizowane podparcie belek – podpory przesuwne i nieprzesuwne?
 - wyjaśnienie po której stronie występowało odspojenie betonu uzupełniającego od prefabrykatu (rys. 59), tzn. czy od strony podpory przesuwniej, czy od strony podpory nieprzesuwnej,
 - jaka była dokładność zastosowanych elektronicznych czujników zegarowych,
 - jaka była technologia wykonania belek BII-W ze zbrojeniem zszywającym (czy strzemiona betonu uzupełniającego były umieszczone w prefabrykacie)?
 - w jaki sposób uzyskano pełny obraz zarysowania połowy belki przy użyciu cyfrowej korelacji obrazu DIC (czy strefy rejestracji zdjęć nakładały się)?
- Porównanie szczególnie obrazów zarysowania badanych belek i modeli numerycznych utrudnione ze względu na skalę wygenerowanych obrazów modeli numerycznych – proszę o przedstawienie porównania podczas prezentacji na obronie pracy,
- Prośba o wyjaśnienie uwzględnienia zbrojenia zszywającego na poziomie 15% i 30% granicy plastyczności stali.

6. Wniosek końcowy

Na podstawie przeprowadzonej analizy recenzowanej rozprawy doktorskiej mgr inż. Grzegorza Sadowskiego pt. „Wpływ parametrów geometrycznych i fizycznych profilowanej powierzchni styku na pracę statyczną żelbetowych belek zespolonych”, stwierdzam, że:

- praca ma charakter naukowy, teoretyczno-badawczo-aplikacyjny. Zarówno postawione cele i tezy pracy, wykonane badania doświadczalne i szerokie analizy, w tym analizy numeryczne, jak i autorskie opracowanie modyfikacji procedury MC2010 obliczania nośności styku w belkach zespolonych z powierzchnią prefabrykatu ukształtowaną z wrębami uwzględniającą zjawiska „shear-friction” i „dowel action”, a także wpływ różnego rozstawu wrębów oraz parametrów szorstkości betonu na powierzchni wrębów zawierają elementy naukowe i twórcze.
- Doktorant wykazał się dużą wiedzą z zakresu podjętej tematyki i umiejętnością twórczego podejścia do zastanej wiedzy, a także udowodnił umiejętność prowadzenia badań i analizowania wyników oraz formułowania istotnych wniosków.

Moim zdaniem, przedstawiona rozprawa doktorska mgr inż. Grzegorza Sadowskiego stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, potwierdza ogólną wiedzę kandydata w dyscyplinie Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport, a także wskazuje na umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez jej Autora. Zasygnalizowane w recenzji uwagi nie umniejszają merytorycznej wartości pracy i nie mają wpływu na ogólną bardzo dobrą ocenę rozprawy doktorskiej przedłożonej do recenzji.

W podsumowaniu stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska Pana mgr inż. Grzegorza Sadowskiego spełnia wymagania Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” – Dz. U. 2018 poz. 1668 z p.zm. zgodnie z art. 187 i stawiam wniosek o jej przyjęcie i dopuszczenie do publicznej obrony.

Biorąc pod uwagę:

- widoczną bardzo dobrą konsekwencję działań Doktoranta (szeroko opisana w recenzji treść poszczególnych rozdziałów pracy) od literaturowego rozpoznania tematu, poprzez analizę opisanych w publikacjach badań, sformułowanie celów i tez pracy, opracowanie programu badań własnych i ich realizacja po opracowanie autorskiej modyfikacji procedury obliczeniowej,
 - bardzo wnikliwie przeprowadzony przegląd dotychczasowego stanu wiedzy wraz z autorską interpretacją prezentowanych w literaturze wyników badań,
 - szeroki zakres wykonanych badań doświadczalnych obejmujących sześć belek zespolonych plus dwóch belek porównawczych z zastosowaniem nowoczesnego sprzętu pomiarowego,
 - opracowanie modeli numerycznych belek zespolonych przy pomocy programu ABAQUS,
 - szeroki zakres wykonanych analiz porównawczych wraz z umiejętnością formułowania wniosków będących podstawą opracowania modyfikacji procedury MC2010,
- a także dużą wartość poznawczą i aplikacyjną pracy, **wnioskuję o wyróżnienie recenzowanej rozprawy doktorskiej.**

Barbara Gonczyńska