

Prof. dr hab. inż. Andrzej Winnicki
Wydział Inżynierii Lądowej
Politechnika Krakowska
Kraków 31-155, ul. Warszawska 24
andrzej.winnicki@pk.edu.pl



Kraków, 9 V 2023

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Grzegorza Sadowskiego

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

1. Podstawa formalna recenzji

Podstawą formalną recenzji jest pismo przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Warszawskiej, Pana dr hab. inż. Konrada Lewczuka, prof. uczelni z dnia 6 marca 2023 o powołaniu przez Radę Naukową Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Warszawskiej jako recenzenta rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Grzegorza Sadowskiego.

2. Ocena tematu pracy

Praca jest poświęcona badaniom eksperymentalnym i analizie numerycznej belek żelbetowych zespolonych ze stykami ukształtowanymi w formie wrębów. Temat jest praktycznie ważny z uwagi na brak uwzględnienia w obecnie stosowanych sposobach obliczeń styku rozstawu wrębów. Mechanizmy fizyczne nośności i zarysowania styków z wrębami w belkach są niedostatecznie rozpoznane i opisane w literaturze przedmiotu - temat jest więc także ważny i interesujący od strony teoretycznej. Podjęcie tematu należy ocenić pozytywnie, poruszone w pracy problemy stanowią istotny problem naukowy. Tematyka i cel pracy (omówiony w punkcie 3. recenzji) odpowiadają wymaganiom stawianym pracom doktorskim.

3. Ogólna charakterystyka pracy

Recenzowana praca doktorska liczy 183 strony. Składa się z 7 rozdziałów, zawiera streszczenia w języku polskim i angielskim. Spis literatury liczy 136 pozycji plus 6 norm. Praca jest w formacie A 5 w formie książkowej (bez numeru ISBN).

Rozdział pierwszy to wstęp zawierający wprowadzenie, problem badawczy i cel pracy, przedmiot i zakres pracy. Cel pracy przedstawiono następująco: „Badania doświadczalne i analiza numeryczna pracy statycznej elementów zespolonych, w których powierzchnia prefabrykatu została ukształtowana

z wrębami, mające na celu uszczegółowienie zaleceń normowych i procedury obliczeniowej Model Code 2010 dotyczącej obliczania styków z wrębami pracującymi w złożonym stanie naprężenia". W szczególności Autor zauważa brak uwzględnienia różnorodnej geometrii wrębów i ich rozstawu w Eurokodzie 2 i Model Code 2010.

Rozdział 2 przedstawia stan wiedzy o nośności styku pomiędzy betonami wykonywanymi w różnych terminach. Autor przedstawia podstawowe mechanizmy przyczepności w niezbrojonych i zbrojonych złączach: adhezję, w tym adhezję mechaniczną spowodowaną istnieniem wrębów i zazębianiem się kruszywa w złączach szorstkich („aggregate interlock”), zjawisko „shear-friction” w zbrojeniu zszywającym, oddziaływanie kołkowe („dowel action”) występujące także w zbrojeniu zszywającym. Następnie omówione są podstawowe techniki badawcze dla styków poddanych rozciąganiu i ścinaniu. Dalej Autor przedstawia opisy nośności styków występujące w normach: PN-B-03264, Eurokod 2, Model Code 2010, ACI 318 i AASHTO LRFD. Następnie omówione są ogólne charakterystyki konstrukcji zespolonych z udziałem betonu – Autor przedstawia tu między innymi typowe stropy gęstożebrowe. Rozdział zamyka przegląd badań doświadczalnych dla styków ukształtowanych z wrębami. W szczególności opisano badania ze zmienną liczbą styków oraz dociskiem bocznym. W podsumowaniu rozdziału Autor identyfikuje braki istniejących badań: brak badań belek zespolonych ze stykami uwzględniających rozstaw wrębów i zbrojenia zszywającego, brak zaawansowanych analiz numerycznych, brak analiz porównawczych z procedurami normowymi.

Rozdział 3 przedstawia program badań własnych i szczegółowe tezy pracy. Autor zbadał doświadczalnie belki w skali półtechnicznej – długość 300 cm, przekrój poprzeczny prefabrykatu 15 x 25 cm, przekrój poprzeczny nadbetonu 15 x 7 cm. Pierwsza seria obejmowała belki bez zbrojenia zszywającego z rozstawem wrębów 8 i 12 cm (cztery elementy badawcze, po dwa dla każdego rozstawu wrębów). Seria druga to dwie belki z rozstawem wrębów 8 cm i zbrojeniem zszywającym. Dodatkowo dla obu serii wykonano badania belek monolitycznych referencyjnych. W sumie badania obejmowały osiem belek. Na zakończenie rozdziału sformułowano szczegółowe cele pracy: poszerzenie wiedzy dotyczącej elementów zespolonych zginanych z powierzchnią prefabrykatu w formie wrębów, wykazanie, że Eurokod 2 i Model Code 2010 nie opisują precyzyjnie wyników badań doświadczalnych w przypadku styków z wrębami o różnym rozstawie, opracowanie autorskiej propozycji zmiany obliczania nośności styku z wrębami. Poprzez realizację celów pracy Autor zamierzał udowodnić następujące dwie tezy pracy:

1. Nośność styku z wrębami zależy od geometrii wrębów i ich udziału w powierzchni styku, a także od 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 zawiera szczegółowy opis badań własnych. Autor przedstawia wyniki badań materiałowych, szczegółowo opisuje geometrię badanych belek i stanowisko badawcze wraz z rozmieszczeniem czujników pomiarowych. Belki serii pierwszej (bez zbrojenia zszywającego) niszczyły się poprzez ścięcie wrębów w styku, zniszczenie miało charakter postępujący i prowadziło do odspojenia nadbetonu od betonu na znacznej długości. Nośność belek z mniejszym rozstawem wrębów (8 cm) była mniejsza niż nośność referencyjnej belki monolitycznej. Belki z większym rozstawem wrębów (12 cm) miały zdecydowanie mniejszą nośność niż belki z mniejszym rozstawem wrębów. Autor przeprowadził obliczenia porównawcze nośności styku wg Eurokodu 2 i Model Code 2010 (to ostatnie w dwóch wariantach, tzw. połączenie sztywne i nieszttywne). Nie uzyskano dobrej zgodności między wynikami eksperymentu, a wartościami normowymi. Belki serii drugiej (ze zbrojeniem zszywającym) niszczyły się lokalnie tylko w wybranych stykach, zniszczenie było inicjowane przez rysy ukośne dochodzące do płaszczyzny zespolenia. Autor poprzez zastosowanie techniki DIC był w stanie śledzić szczegółowo rozwój rys i rozwarstwienie w stykach. Autor porównał naprężenia rysujące styk z wartościami teoretycznymi wg Eurokodu 2 i Model Code 2010. Wartości wg Eurokodu 2 były bardziej zbliżone do wartości eksperymentalnych. Zastosowanie zbrojenia zszywającego doprowadziło do wzrostu nośności względem serii pierwszej, wartości nośności dla serii drugiej są porównywalne z referencyjną belką monolityczną.

Rozdział 5 jest poświęcony symulacjom numerycznym przeprowadzonym przy użyciu modelu betonu Concrete Damaged Plasticity (CDP) w programie Abaqus. Autor stworzył trójwymiarowy model belki żelbetowej ze zbrojeniem zszywającym odwzorowujący wiernie belki serii drugiej. Powierzchnia styku została zamodelowana za pomocą dyskretnego interfejsu opisującą lokalną kohezję. Autor szczegółowo opisuje zastosowane modele materiału i ich kalibrację. Przeprowadzone analizy numeryczne wykazały bardzo dobrą zgodność pomiędzy symulacjami numerycznymi a wynikami eksperymentu dla obu serii. W symulacjach numerycznych można było zaobserwować lokalny charakter zniszczenia w wybranych stykach i naprężenia w zbrojeniu zszywającym (efekt „shear-friction” i oddziaływania kołkowego dla serii drugiej, dla serii pierwszej model poprawnie odtworzył postępujący charakter odspojenia nadbetonu. Dodatkowo wykonano symulacje numeryczne dla belki ze zbrojeniem zszywającym i rozstawem wrębów 12 cm (takie belki nie były badane eksperymentalnie). Belka ta zniszczyła się w sposób właściwy dla belek serii drugiej, ale przy mniejszym poziomie obciążenia.

Rozdział 6 przedstawia autorską modyfikację wzorów z Model Code 2010. Zmodyfikowana wersja uwzględnia rozstaw wrębów i zróżnicowanie szorstkości powierzchni wrębów dla złączy bez zbrojenia zszywającego, dla złączy ze zbrojeniem zszywającym dodatkowo zjawisko „shear-friction” i oddziaływanie kołkowe. Zdaniem Autora dla obu typów złączy złożony stan naprężenia w styku prowadzi do jego zarysowania, należy więc w obliczeniach posługiwać się siłą związaną z ząębaniem wrębów a nie początkową wartością adhezji. Autor porównał obliczeniowe wartości naprężeń rysujących styk wg własnej procedury z wartościami otrzymanymi przy użyciu oryginalnych wzorów z Eurokodu 2 i Model Code 2010. Jego propozycja daje wartości bardziej zbliżone do eksperymentu. Dodatkowo Autor przeprowadził obliczenia wg własnej propozycji dla dwóch badań opisanych w rozdziale 3 (Mohamad et al. i Sorensen) otrzymując dobrą zgodność z eksperymentem w przypadku braku docisku bocznego. W pozostałych przypadkach procedura Autora dała wyniki po stronie bezpiecznej.

Rozdział 7 to podsumowanie i wnioski końcowe. Autor rekapitułuje wnioski częściowe podawane na końcach poszczególnych rozdziałów podnosząc nacisk na fizyczną interpretację zjawisk towarzyszących zniszczeniu styków z wrębami (ząębienie, tarcie w styku, zjawisko „shear-friction”, oddziaływanie kołkowe). Na końcu Autor przedstawia możliwe kierunki dalszych badań, między innymi wskazując badanie wpływu szorstkości betonu na powierzchni wrębów, badanie wpływu skurczu i pęcznienia, badania przy obciążeniu cyklicznym i zmęczeniowym.

4. Ocena pracy

Autor sformułował szczegółowe cele i tezy pracy dopiero na końcu rozdziału 3 po całościowym przeglądzie literatury co wydaje być się dobrym działaniem. Autor na zakończenie pracy w rozdziale 7 nie wypowiada się jawnie czy postawione tezy zostały udowodnione. Jednakże całość wniosków przedstawiona w tym rozdziale prowadzi do wniosku, że weryfikacja tez przebiegła pozytywnie.

Do wyróżniających aspektów pracy należy bardzo dobrze opracowany program i realizacja badań eksperymentalnych. Zastosowanie techniki DIC pozwoliło na szczegółową analizę morfologii rys ukośnych, rozwarstwień w stykach i ich wzajemnego powiązania.

Na szczególne podkreślenie zasługuje analiza numeryczna. Autor wykazał się bardzo dobrym opanowaniem warsztatu – zbudował złożone modele MES belek, w sposób szczegółowy dobrał i opisał w pracy parametry materiałowe modelu betonu CDP i dyskretnego interfejsu. Kalibracja parametrów materiałowych pozwoliła na otrzymanie wyników o dużej zgodności z eksperymentem. Dla tak skalibrowanego modelu Autor przeprowadził obliczenia dla belki o geometrii nie analizowanej eksperymentalnie (belka o rozstawie wrębów 12 cm ze zbrojeniem zszywającym). Otrzymane wyniki są dowodem na to, że symulacja numeryczna może zastąpić eksperyment.

Praktycznym rezultatem pracy jest autorska modyfikacja wzoru na nośność styku podanego w Model Code 2010. Wersja zmodyfikowana jest lepiej umotywowana fizycznie: adhezję zastąpiono poprzez siłę zazębiania w styku, ta z kolei uzależniona jest od geometrii (rozstawu) wrębu, zmodyfikowano współczynniki opisujące tarcie, zjawisko „shear-friction” i oddziaływanie kołkowe w zależności od szorstkości betonu we wrębie.

Reasumując praca łączy aspekty analizy eksperymentalnej i numerycznej zjawiska fizycznego ważnego w analizie konstrukcji zespolonych z wnioskami przydatnymi w praktyce projektowej.

5. Uwagi krytyczne

Rozdział 2 jest napisany nieco chaotycznie. Autor nazywa „modelami” techniki badawcze służące do badania nośności styków. Punkty 2.2.1 i 2.2.2 mają charakter podręcznikowy i bez szkody dla całości mogłyby być usunięte.

Autor przy porównywaniu wyników badań eksperymentalnych ze wzorami normowymi (Eurokod 2, Model Code 2010, modyfikacja własna) używa wzorów normowych tak jak występują one bezpośrednio w normach, tzn. przy wykorzystaniu wartości obliczeniowych. W celu poprawnego porównania z eksperymentem należało podjąć próbę zastosowania we wzorach normowych wartości średnich.

Przy obliczaniu naprężeń rysujących styk (Tabl. 17 i następne) zjawisko „shear-friction” i oddziaływanie kołkowe obliczono dla poziomu naprężeń w stali zszywającej 15 lub 30% wartości obliczeniowej granicy plastyczności. Brak jest wyjaśnienia (poza zacytowaniem literatury) tak przyjętych wartości, a także dyskusji, która z tych dwóch wartości bliższa jest eksperymentowi.

Rys. 91 jest niezrozumiały, brak jest dokładniejszego opisu. Na rysunku występuje obciążenie ciągłe – inaczej niż w opisywanym eksperymencie.

6. Wniosek końcowy

Przytoczone uwagi krytycznie nie umniejszają wartości merytorycznej pracy. Zgodnie z oceną pracy sformułowaną w punkcie 4 recenzji recenzent stwierdza, że praca mgr inż. Grzegorza Sadowskiego „Wpływ parametrów geometrycznych i fizycznych profilowanej powierzchni styku na pracę statyczną żelbetowych belek zespolonych” stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego z zakresu dyscypliny naukowej Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport i w pełni spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim sformułowane w Ustawie Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce z dnia 20 lipca 2018 (Dz. U. z 2018 r., poz. 1668, z późniejszymi zmianami). W związku z powyższym recenzent wnioskuję o dopuszczenie pracy do publicznej obrony.