

Andrzej Ubysz, dr hab. inż., prof. nadzw. PWr.
Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego
Politechnika Wrocławska
Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-3,70 Wrocław

Wrocław, dnia 8 listopada 2018 roku

Recenzja rozprawy doktorskiej
mgr inż. Magdy Kijania - Kontak
pt. „Badania przyczepności między betonem wysokowartościowym
a stałą wysokiej wytrzymałości”

1. Podstawa formalna opracowania recenzji

Podstawę formalną opracowania recenzji stanowi uchwała Rady Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej z dnia 12 września 2018 roku oraz Umowa o dzieło z dnia 17 września 2018 roku zawarta w Krakowie pomiędzy Politechniką Krakowską im. Tadeusza Kościuszki z siedzibą przy ul. Warszawskiej 24, 31-155 Kraków, reprezentowaną przez dr hab. inż. Andrzeja Szarotę, profesora Politechniki Krakowskiej – Dziekana Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej działającym w tym zakresie na podstawie pełnomocnictwa Rektora Politechniki Krakowskiej, a autorem niniejszej recenzji – dr hab. inż. Andrzejem Ubyszem z Politechniki Wrocławskiej.

2. Informacje ogólne

Praca dotyczy tematu w dziedzinie nauk technicznych: *budownictwo*, dyscyplinie naukowej: *inżynieria lądowa i transport* oraz specjalności: *konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone*. Autorka podjęła się rozwinięcia tematyki dotyczącej współpracy betonu i zbrojenia, koncentrując się w szczególności na betonach wysokowartościowych i stali o wysokiej wytrzymałości. Praca nawiązuje do istniejących teorii opisujących tę współpracę na poziomie modeli fenomenologicznych i obliczeniowych oraz badań doświadczalnych. Autorska część pracy, to przede wszystkim część eksperymentalna zawierająca elementarne badania materiałowe betonu i stali o wysokich wytrzymałościach oraz interakcja między nimi w realnych stanach naprężeń i odkształceń. Dalsza część pracy to analizy numeryczne oparte na modelach materiałowych i dążące do sformułowania własnego modelu obliczeniowego pozwalającego na analizę złożonego stanu naprężeń i odkształceń.

3. Krótka charakterystyka pracy

Praca została opracowana w następujących etapach:

- Po wprowadzeniu przedstawiającym genezę problemu oraz temat, cel i zakres pracy, Autorka sformułowała 3 tezy pracy, będące równocześnie zadaniami naukowymi analizowanymi i rozwiązywanymi w dalszej jej części zarówno na płaszczyźnie analitycznej, jak i empirycznej.
- Przegląd literatury, wąsko ukierunkowany na zagadnienia współpracy betonu i stali, pokazuje wybrane, historyczne opisy zjawiska, zależności analityczne, zależności doświadczalne oraz najnowsze analizy oparte na numerycznych modelach.

- Własne badania doświadczalne dotyczące wybranych cech fizycznych betonu i stali oraz wzajemnej współpracy betonu i zbrojenia.
- Analiza zjawiska oparta na modelach numerycznych.
- Konkluzje z własnych badań doświadczalnych i obliczeń numerycznych, weryfikacja tezy pracy i rekomendacje do dalszych badań.
- Bibliografia
- Wykaz rysunków.
- Spis tablic
- Streszczenia w języku polskim i angielskim.

Dysertacja sformułowana jest w sposób pozwalający zakwalifikować ją jako pracę o charakterze naukowym. Cele pracy są jasno sformułowane:

- część badawcza – zarówno empiryczna, jak i numeryczna – zawiera przejrzystą sekwencję badań laboratoryjnych;
- analiza numeryczna oparta jest na powszechnie uznanych teoriach i modelach obliczeniowych oraz na dyskusji otrzymanych wyników;
- wnioski podsumowujące kolejne etapy pracy są sformułowane w taki sposób, aby widoczne były również realne problemy i dalsze zamierzenia badawcze.

Celem pracy jest udowodnienie tezy obejmujących następujące zagadnienia:

- Wskazanie czynników odgrywających najważniejszą rolę na wzajemną współpracę badanych materiałów (teza 1);
- Wpływ sposobu uźebrowania na analizowane w pracy zagadnienie wzajemnej współpracy tych materiałów (teza 2);
- Odpowiedź na pytanie, na ile przyjęte modele numeryczne wpływają na realność opisu badanego zjawiska (teza 3).

Jeżeli chodzi o zakres pracy, to w niniejszej rozprawie Autorka:

- zebrała wyniki badań doświadczalnych prowadzonych w różnych ośrodkach naukowych w kraju i zagranicą, zarówno pod kątem bezpośredniego zakresu tematycznego pracy, jak i w szerszym kontekście mechaniki betonu;
- dokonała dyskursu naukowego zestawiając wyniki badań i aktualnych zaleceń normowych,
- przedstawiła wnioski wynikające z własnych badań oraz propozycje numerycznych modeli do symulacji współpracy betonu ze zbrojeniem dla wysokich klas betonu i prętów zbrojeniowych.

Zdaniem recenzenta zawarte w pracy wyniki badań doświadczalnych i numerycznych dają satysfakcjonującą odpowiedź na postawione na wstępie cele pracy.

4. Uwagi szczegółowe

W tej części recenzji zamieszczono uwagi wskazujące na oryginalność i wartość pracy, jak i uwagi krytyczne.

4.1. Tezy pracy

Teza I i teza II.

Dwie pierwsze tezy oparto na analogii do zagadnień współpracy betonu i zbrojenia dla betonów i stali zbrojeniowej. Ta wstępna intuicja jakościowa ukierunkowała dalsze badania, które pozwoliły w dalszej części pracy ustalić niektóre wartości i zależności funkcyjno-ilościowe.

Teza III.

Trzecia teza porusza ważne, trudne i wciąż aktualne zagadnienie dotyczące numerycznego modelowania współpracy betonu i zbrojenia. W pełni uzasadniona praktycznymi względami przy projektowaniu jest analiza porównująca modele globalne i uproszczone. Modele uproszczone pozwalają bowiem na szybką weryfikację poprawności obliczeń, w szczególności do eliminacji błędów nazywanych „grubymi”, a także stanowią niezależną metodę do kontroli wykonanych obliczeń.

Tak sformułowane tezy implikowały kierunki badań, a nawet pozwalały przewidywać niektóre wyniki.

4.2. Przyczepność

Ten rozdział rozpoczyna się od fenomenologicznego opisu współpracy betonu i zbrojenia opartego na studiach literaturowych, w tym także na biuletynach FIB. Następnie Doktorntka pokazała podstawowe zależności wynikające z równowagi sił wewnętrznych w jednostkowym elemencie, a następnie za Tepfersem i Gromyszem pokazuje zależności do obliczenia *naprężenia przyczepności* dla modelu betonu sprężystego, sprężysto – kruchego i plastycznego.

W przeglądach literaturowych częstym problemem jest dobór najbardziej reprezentatywnych Autorów i teorii. Można powiedzieć, że przegląd ten pokazuje ogólnie rzeczywisty stan wiedzy w tym obszarze. W kolejnych publikacjach proponowałbym jednak uzupełnienie tego przeglądu o nieco obszerniejsze przedstawienie wyników badań Eligehausena z zespołem (Kreller, Popov, Bertero), których badania wykorzystywano między innymi przy redagowaniu Eurokodu 2 (może także Eibla i Leonhardta) oraz opracowań krajowych – Godycki-Ćwirko, Łapko, czy badania prowadzone między innymi na Politechnikach Krakowskiej i Wrocławskiej.

W części poświęconej metodom badań przedstawiono w pierwszej kolejności rekomendacje RILEM, słusznie poddając ją zarówno pozytywnej, jak i krytycznej ocenie. Bardzo pozytywną cechą przeglądu przeprowadzonych badań jest przedstawienie wybranych, najnowszych wyników w tej dziedzinie z okresu ostatnich 10 lat.

Przy przedstawianiu analitycznych metod wyznaczania naprężenia przyczepności w pierwszej kolejności pokazano te, które rekomenduje Eurokod 2 i ModelCode uwzględniając pewną ewolucję tych zależności w czasie. Dla porównania pokazano również wybrane wyniki badań publikowanych przez zagranicznych naukowców (Tepfers, Esfahani, Rangan, Al-Jahadi, Oragun, Champan, Shah i Harajali, Kemp). W pracy nie pokazano klucza doboru tych

wydawałoby się przypadkowo dobranych autorów. Przypuszczam, że wyłączając Profesora Ralejsa Tepfersa, Autorce chodziło o porównanie opisów zagadnienia przyczepności prezentowanych w Eurokodzie 2, i ModelCode z tymi, które proponowane są w American Concrete Institute (ACI). Jedyną uwagę, jaką można mieć do tego porównania to różne okresy prac badawczych, z których pochodzą – opracowania ModelCode można uznać za najnowsze (sprzed kilku lat), badania z ACI pochodzą w większości z końca ubiegłego wieku.

Ciekawą z punktu widzenia badań nieniszczących są badania numeryczne, a ściślej modele bazujące najczęściej na Metodzie Elementów Skończonych i pochodnych (Metoda Elementów Brzegowych, Metoda Szytych Elementów Skończonych), prezentujące mapy naprężeń i odkształceń elementów (1D, 2D, 3D, 3D + time) oraz współpracę materiałów opisywanych przez różne związki konstytutywne. W tym podrozdziale nawiązano do plastycznego modelu betonu sformułowanego w oparciu o kryteria von Misesa i Druckera – Pragera oraz do najnowszego modelu Pereiry opracowanego w Abaqusie opisującego numerycznie kształt pręta. Oryginalny nurt w analizach numerycznych przedstawił również wspomniany w podrozdziale Dyba w dysertacji dotyczącej przyczepności betonu wysokowartościowego do stalowych splotów sprężających.

4.3. Badanie właściwości stali i betonu

Ten rozdział rozpoczyna autorską część pracy doktorskiej. Doktorantka wyznaczyła podstawowe cechy fizyczne materiałów wykorzystywanych do badań :

- dla stali:
 - o moduł sprężystości,
 - o umowna granica plastyczności,
 - o wytrzymałość na rozciąganie,
 - o maksymalna siła rozciągająca,
 - o wydłużenie przy maksymalnej sile rozciągającej;
- dla betonu:
 - o wytrzymałość na ściskanie na walcach;
 - o wytrzymałość na ściskanie na kostkach;
 - o moduł sprężystości wg PN i Eurocodu 2;
 - o wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu na walcach;
 - o wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu na kostkach;
 - o wytrzymałość na rozciąganie osiowe na walcach;
 - o wytrzymałość na zginanie;
 - o skurcz.

W przypadku betonu badania poprzedziło opracowanie (częściowo doświadczalne) receptury mieszanek betonowych. W tym podrozdziale zawarto szczegółowe raporty z badań. Analiza wyników (określenie współczynnika zmienności i odchylenie standardowe) ma, ze względu na małą liczbę próbek, charakter szacunkowy.

Oryginalności pracy od strony metrologicznej dodaje wykorzystanie, wprowadzanej coraz częściej do badań materiałowych, metody optycznej. Ze specyfiki tej metody wynika, że umożliwia ona szerszy zakres badań, powtarzalność odczytów, ale również wymaga odmiennego reżimu technologicznego podczas ich realizacji – głównie luminacji badanego obszaru. Wykorzystanie tej metody do badań podstawowych – szczególnie dla materiałów niejednorodnych, a takim jest beton – pozwala na zdobycie kolejnych doświadczeń do stosowania jej w przypadku bardziej zaawansowanych konstrukcji.

4.4. Badanie przyczepności

Ten rozdział dotyczy najważniejszych zagadnień dla niniejszej dysertacji. Doktorantka przeprowadza w nim szerokie spektrum empiryczne, łącznie na 138 próbkach. Koncepcja badań zakłada porównanie współpracy „klasycznych” materiałów – betonu i stali – z materiałami o wysokich parametrach wytrzymałościowych.

Na wstępie rozdziału Autorka przekazuje informacje dotyczące przygotowania próbek, stanowiska badawczego i organizacji badań. Badania zrealizowano za pomocą najpopularniejszej metody pull-out rekomendowanej jako jedną z dwóch przez RILEM. Metoda ta – jak słusznie zauważyła Autorka w przeglądzie literatury – nie odzwierciedla w pełni rzeczywistej pracy konstrukcji. W badaniu tym beton jest ściskany, natomiast pręt rozciągany. Rzeczywisty obraz w elementach zginanych jest natomiast taki, że i pręt i beton są rozciągane. Prostota badań i relatywnie zadowalające wyniki sprawiły jednak, że metoda ta zyskała dużą popularność przy badaniach laboratoryjnych. Duża ilość badań wykonanych tą samą metodą ma jeszcze jeden pozytywny aspekt – porównywalność wyników według wspólnego kryterium. W rozdziale zamieszczono rzetelne wyniki badań dla dwóch zmiennych – klasa betonu i średnica pręta.

Interesującym podrozdziałem jest porównanie wyników badań z metodami analitycznymi, proponowanymi przez różnych Autorów oraz pokazanie na tym tle wyników z własnych badań doświadczalnych. Zestawienie to pozwoliło na własne obserwacje procesów utraty współpracy betonu i stali bądź przez rozłupanie (odspojenie, rozwarstwienie ?), bądź przez wyrwanie. Zwrócono również uwagę na istotną rolę klasy betonu, która szczególnie w przypadku stosowania stali o wysokiej wytrzymałości jest wyraźnie zauważalna. Wnioski ogólnie można uznać jako poprawne i interesujące, chociaż niektóre z końcowych uznałbym bardziej jako obserwacje z badań.

4.5. Analiza numeryczna

Modelowanie współpracy betonu i zbrojenia nie należy do najłatwiejszych, co wynika ze specyfiki metody elementów skończonych. Program Abaqus daje takie możliwości przez wprowadzenie elementów interfejsowych. Uzasadnioną wydaje się propozycja wprowadzenia uproszczonego modelu odzwierciedlającego współpracę pomiędzy betonem i zbrojeniem. W modelu tym połączenie zostało wykalibrowane w ten sposób, aby model numeryczny był zgodny z wynikami eksperymentalnymi. Przedstawiono również alternatywny model dokładny, który odzwierciedla rzeczywisty kształt pręta. Weryfikacja doświadczalna pokazała, że ten model daje większą zgodność z eksperymentem.

Model betonu przyjęto w oparciu o hipotezę wytrzymałościową Druckera-Pragera, w którym powierzchnia graniczna ma kształt stożka. W programie Abaqus bliską symulacją tej hipotezy jest model CDP. Słusznie Doktorantka zwraca tutaj uwagę na rozróżnienie pojęć kąta tarcia wewnętrznego i kąta dylatacji, które to pojęcia są przez niektórych Autorów utożsamiane. Przy modelowaniu betonu pozostaje jeszcze (ważny) parametr lepkości, który przy modelowaniu został przyjęty zgodnie z modelem CDP w programie Abaqus. Model stali przyjęto odwzorowując wyniki badań doświadczalnych.

W kolejnym podrozdziale pokazano jak model kontynualnej mechaniki uszkodzeń opisuje połączenie między dwoma powierzchniami. Model interfejsu przedstawiono bardzo poglądowo, co pozwala łatwo zrozumieć jego ideę także Czytelnikowi nie mającego doświadczenia z programem Abaqus.

Model do obliczeń numerycznych jest zasadniczo zaawansowanym narzędziem do wykonywania mniej lub bardziej dokładnych analiz numerycznych. Nie oznacza to jednak, że nie wymaga on szerokiej wiedzy i umiejętności analitycznego myślenia, a wnioski – pomimo, że koncentrują się na ustaleniu przyczyn braku zgodności obliczeń z doświadczeniem – stanowią zbiór cennych spostrzeżeń do prowadzenia analiz teoretycznych w tej tematyce.

4.6. Wnioski

Wnioski przedstawione na zakończenie pracy stanowią podsumowanie i uogólnienie wniosków z poszczególnych części pracy. Tezy pracy zostały sformułowane w taki sposób, że w pewnym stopniu sugerowały wnioski końcowe, co potwierdza ostatni rozdział pracy doktorskiej. Najcenniejszym osiągnięciem jest duża ilość badań doświadczalnych i wnioski wyciągnięte na poszczególnych etapach tych badań. Wyniki te wskazują na niejednoznaczność zagadnienia i możliwość otrzymania różnych wyników przy innych założeniach przyjętych do badań, na co zresztą Doktorantka zwraca uwagę w rozdziale dotyczącym weryfikacji tez pracy.

Przykładem może być wniosek w zakresie badań materiałowych, w którym stwierdzono, że wartości wytrzymałości na ściskanie w betonach BWW wykonywanych na kostce i na walcu różnią się znacznie mniej niż 20%, jak to zakładają normy. W przypadku badań Doktorantki znacznie mniejsza różnica jest także dla betonu klasycznego, gdzie różnica ta wynosi około 5% (tab.3.13 str.63). Różne od oczekiwanych (normowych) były także wartości współczynnika sprężystości.

Te obserwacje nakazują zarówno krytyczny stosunek do otrzymanych wyników jak i skłaniają do pytań, na ile dotychczasowa wiedza jest wystarczająca do poprawnego projektowania konstrukcji. Na te rozbieżności wyników może mieć wpływ zarówno receptura betonu, jak błędy podczas eksperymentu. Wierne przedstawienie otrzymanych wyników świadczy jednak o rzetelnym podejściu do prac naukowych o charakterze badawczym. W końcowym podrozdziale wyraźnie zostały wyartykułowane zagadnienia, które wynikają z dotychczasowych badań, a które wymagają dalszych analiz.

4.7. Szczegółowe uwagi polemiczne i krytyczne do pracy

1. Uważam, że termin *przyczepność* lepiej byłoby zamienić na sformułowanie *współpraca betonu i zbrojenia*. Słowo *przyczepność* ma szerszy pojęciowo zakres - np. warstw izolacyjnych do betonu, czy kleju do podłoża oraz może mieć również potoczne znaczenie.
2. W rozdziale *Przegląd literatury* zabrakło według mnie nawiązania do modelu przedstawionego przez Godyckiego-Ćwirko w monografii *Mechanika betonu* oraz nieco szerszego nawiązania do badań Eligehausena i zespołu.
3. W tabeli 2.8 występują formuły niezgodne wymiarowo bez komentarza dotyczącego wymaganych jednostek.
4. We wzorach 2.10, 2.11, 2.14 nie podano jednostek, w których należy wstawiać wartości wytrzymałości betonu.
5. Rys. 4.55. Brak szczegółowego opisu dotyczącego charakteru przebiegu naprężeń stycznych na długości zakotwienia.
6. Modele w Abaqusie nie uwzględniają odciążenia i obciążeń wtórnych.

7. Pisownia nazwisk Mises, Drucker-Prager w dopełniaczu. Ogólna zasada jest taka, że przy odmianach nazwisk obcych apostrofu używamy wówczas, gdy końcowe litery danego nazwiska (w mianowniku), które są niezbędne w pisowni, w naszym języku nie są wymawiane.
8. Drobną uwagę językową do tezy 2. Spośród trzech – uznawanych za poprawne – form stopnia wyższego przymiotnika *gęsty* (*gęstszy*, *gęściejszy*, *bardziej gęsty*), Słownik Języka Polskiego wyżej ocenia 2 ostatnie.

5. Uwagi końcowe

W większości prac technicznych najmocniejszym argumentem do udowodnienia tezy jest doświadczalne potwierdzenie oczekiwanych wyników. W opracowaniach naukowych często równie trudne jest precyzyjnie sformułowanie zagadnienia i opracowanie modelu, który mógłby zostać weryfikowany doświadczalnie. Uważam, że Doktorantce udało się bardzo dobrze wykonać oba te zadania. Doświadczenia innych Autorów oraz własne, na których oparto analizę a także sformułowanie własnego modelu obliczeniowego stanowią przekonującą podstawę zarówno dowodzącą tezy, jak i pozwalającą sformułować końcowe wnioski przedstawione w niniejszej pracy. Do najważniejszych z nich należą te, które zawarto w podsumowaniu:

- Wyznaczenie wartości naprężenia przyczepności prętów żebrowanych SAS670/800 ze stali SWW do betonu wysokiej wytrzymałości (BWW);
- W zakresie badań materiałowych stwierdzenie, że wartości wytrzymałości na ścislenie betonu wykonywane na próbkach kostkowych i walcowych mogą różnić się od normowych;
- Opracowanie i doświadczalne zweryfikowanie modeli numerycznych do opisu współpracy betonu i stali w obszarze przed- i pokrytycznym;

Temat dotyczący współpracy betonu i stali dla nowych klas materiałów ma praktyczne zastosowanie w pracach projektowych i z pewnością należy do zagadnień kreujących dalsze kierunki dyscypliny naukowej. Autorka pokazuje zaznajomienie się z tematyką na poziomie studium literaturowego, w tym z publikacjami naukowymi i normatywami oraz co najważniejsze udowadnia, że potrafi samodzielnie przeprowadzać analizy badawcze i wyciągać konstruktywne wnioski. Problematyka, którą Autorka rozwija jako temat rozprawy doktorskiej, jest relatywnie nowa. Będzie zatem kolejnym wkładem polskich inżynierów do rozwijanych w świecie technologii badań modelowych.

Mając na uwadze rangę tematu, sposób jego przedstawienia w rozprawie doktorskiej, która wskazuje na bardzo dobre przygotowanie Autorki, możliwość prezentowania tych wyników zarówno na konferencjach jak i w czasopismach naukowych, a także docelowe zastosowania praktyczne, wnoszę o dopuszczenie Pani mgr inż. Magdy Kijani-Kontak do publicznej obrony oraz stosownie do zasad przyjętych przez Radę Wydziału ewentualne wyróżnienie pracy.

Praca spełnia wymagania odnośnie prac doktorskich zawarte w „Ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki” z dnia 14.03.2003 roku, Nr 65 poz. 595, z późn. zm.) oraz Rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego (Dz. U., z 2017 roku, poz. 1789).


Andrzej Ubysz