

Prof. dr hab. inż. Anna Halicka

wpłynęło
do Biura Wydawnictw
dn. 19.02.2026
L.dz. 121 podpis Cypurka



RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr inż. Marcina Burdzińskiego

pt.

DOŚWIADCZALNO-NUMERYCZNA ANALIZA WPŁYWU SKRĘPOWANIA PRĘTA ZBROJENIOWEGO W BETONIE NA ZACHOWANIE PRZYPĘCNOŚCI W TEŚCIE PULL-OUT

przygotowanej pod kierunkiem dr hab. inż. Macieja Niedostatkiwicz, prof. PG

Podstawa opracowania: uchwała nr 97/2025 Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Gdańskiej z dnia 5 listopada 2025 r.

1. Problem naukowy, przedmiot i charakter rozprawy

Szczególnym zagadnieniem podczas projektowania konstrukcji żelbetowych jest zapewnienie współpracy między betonem a zbrojeniem, która realizowana jest dzięki zjawisku przypiętności. Aby współpraca była efektywna wymagane jest zapewnienie niezbędnej długości zakotwienia prętów zbrojeniowych. Długość ta warunkowana jest wartością granicznych naprężeń przypiętności, które są jednym z parametrów zależności „średnie naprężenia przypiętności – poślizg” uzyskiwanej w testach *pull-out*. Pomimo wielu lat powszechnego stosowania tego testu, wciąż szukane są precyzyjne interpretacje jego wyników. W ten nurt wpisuje się recenzowana rozprawa doktorska.

Podjęty problem naukowy uważam za ważny i wart badań, bowiem wyniki zrealizowanych badań prowadzą do uzupełnienia wiedzy na temat przypiętności betonu do zbrojenia i oceny kotwienia prętów zbrojeniowych w betonie.

Szczególnym przedmiotem badań Doktoranta są testy *pull-out* z tzw. krótkim zakotwieniem (długość zakotwienia mniejsza niż 5 średnic pręta i stała wartość naprężeń przypiętności na tej długości) jako te, na podstawie których ocenia się przypiętność. Wybór przedmiotu badań uznaję za racjonalny ze względu na możliwość uzyskania wielu parametrów przypiętności i przebadanie wpływu kilku czynników przy prostocie samego modelu badawczego. Model ma swoje ograniczenia, ale tych Doktorant jest świadomy, co widać w studiach literaturowych i analizach wyników badań.

Praca ma charakter analityczno-doświadczalny – jej istotą są zarówno badania laboratoryjne jak i analizy numeryczne. Wyniki badań i analiz mogą być uogólnione i mogą być adaptowane do innych sytuacji analityczno-projektowych.

2. Zawartość i układ dysertacji

Rozprawa liczy 214 stron tekstu podstawowego, do którego dołączono na początku oświadczenie autora, streszczenia w języku polskim i angielskim, spis treści oraz spis wybranych skrótów i symboli, a na końcu - spis rysunków, spis tabel, bibliografię oraz spis norm.

Bibliografia zawiera 254 pozycje literaturowe, a spis norm zawiera 23 pozycje. Cytowane prace są w większości angielskojęzyczne, choć jest tu także 34 prace polskojęzyczne i cztery niemieckojęzyczne. Bibliografia zawiera 3 współautorskie publikacje Doktoranta.

W rozprawie najogólniej wyróżnić można następujące części:

1. Część wstępną (rozdział 1) stanowiący wprowadzenie i prezentujący cele, tezy i strukturę pracy oraz informacje na temat wykorzystania sztucznej inteligencji;
2. Studia literaturowe dotyczące zjawiska przyczepności i jej modeli (rozdział 2);
3. Rozdział 3, w którym zaprezentowano plan badawczy;
4. Opis i analizę wyników badań doświadczalnych (rozdział 4);
5. Opis i analizę wyników badań numerycznych (rozdział 5);
6. Wnioski końcowe wraz z prezentacją kierunków dalszych badań (rozdziały 6 i 7).

3. Merytoryczna ocena pracy

3.1 Ocena ogólna rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska ma charakter doświadczalno-analityczny. Stwierdzam, że jest ona pracą oryginalną. Jej realizacja wskazuje na kompetencję Doktoranta, w szczególności w zakresie pracy w laboratorium i analiz numerycznych. Widoczna jest konsekwencja działań, przemyślenie ich kierunku i twórcza realizacja, a także krytyczny stosunek do uzyskanych wyników. Przeprowadzone prace pozwoliły na osiągnięcie celów rozprawy.

Szczegółowa ocena merytoryczna rozprawy zostanie przedstawiona poniżej poprzez oceny poszczególnych jej części. Sformułowane uwagi, wiele z nich o charakterze dyskusyjnym, mają na celu wskazanie zagadnień, na które należałoby zwrócić uwagę w dalszych badaniach i publikacjach.

3.2 Ocena tytułu, celu i tezy pracy

Ogólnie, merytorycznie tytuł rozprawy jest poprawny i odzwierciedla treść. Pewną nieścisłością jest jednak, w mojej opinii, użyte w tytule, jak i używane w całej pracy, pojęcie „zachowanie przyczepności w teście *pull-out*” czy też „składowe zachowania przyczepności”. Po pierwsze - nie wiadomo czy chodzi o „zachowanie przyczepności” w rozumieniu „braku zerwania przyczepności” czy też w rozumieniu „zachowania się przyczepności” (raczej „działania przyczepności”). Precyzyjnie mówiąc, wynikiem testu *pull-out* są zależności „średnie naprężenia przyczepności – poślizg” i jej parametry. Takie ujęcie tematu byłoby lepsze.

Doktorant sformułował następujące cele szczegółowe dysertacji:

- identyfikacja potencjalnych błędów, które mogą zostać popełnione podczas przygotowania próbek do testu *pull-out*,
- ustalenie sprzężonego wpływu parametrów skrepowania pręta (grubość otuliny, średnica pręta, długość zakotwienia) na wyniki testu *pull-out*,
- ustalenie wpływu uproszczeń w modelowaniu pręta żebrowanego na wiarygodność wyników modelu numerycznego testu *pull-out*.

Cele te uznaję za zasadne a badania ukierunkowane na ich osiągnięcie za warte podjęcia.

Doktorant sformułował cztery tezy:

- eliminacja potencjalnych błędów związanych z budową próbek i stanowiska badawczego oraz sposobu prowadzenia badań wpływa na poprawność wykonania i wiarygodność wyników testu *pull-out*,
- sprzężenie czynników związanych ze skrepowaniem pręta w betonie, występujących zawsze i jednocześnie podczas testu *pull-out*, istotnie wpływa na zachowanie przyczepności w tym badaniu,
- kalibracja modelu numerycznego z prętem gładkim w celu najwierniejszego odwzorowania zachowania przyczepności w teście *pull-out* determinuje poprawne odwzorowanie przeprowadzonych eksperymentów w zakresie współpracy pręta i betonu,

- wykorzystanie modelu pręta żebrowanego w symulacji MES testu *pull-out* daje możliwość obserwacji zachowania przyczepności zbliżonego do tego podczas doświadczenia.

Zakres i tematyka sformułowanych tez pokrywa się w dużej mierze z celami pracy. Jednak do tez mam uwagi. W mojej opinii teza pierwsza jest oczywista w przypadku wszelkich badań. Uwaga do tezy drugiej związana jest z komentowanym wyżej pojęciem „zachowanie przyczepności”. Teza trzecia jest sformułowana nieco enigmatycznie (przyznam, że stała się dla mnie w pełni jasna dopiero po przeczytaniu tekstu) i w mojej opinii lepiej brzmiałaby: „test *pull-out* pręta żebrowanego może być wiarygodnie symulowany testem pręta gładkiego pod warunkiem wprowadzenia adekwatnego modelu kontaktu pręta z betonem”. Dość oczywista jest również teza czwarta – wyniki testu *pull-out* najlepiej odzwierciedlone zostaną, jeśli model pręta żebrowanego użyty w modelu jest bliski rzeczywistości (czyli też żebrowany).

Tu uwaga ogólniejsza - zważywszy na obserwowane często trudności w precyzyjnym sformułowaniu tez, jestem zwolenniczką formułowania problemu badawczego, a niekoniecznie stosowania sztywnej zasady redagowania tez. Sformułowanie i opis problemu badawczego pozwala, w mojej opinii, lepiej opisać istotę badań.

3.3 Ocena studiów literatury

Studia literaturowe obejmują zagadnienia, które uznają za właściwe. Wybrane źródła są niewątpliwie związane z tematem i ważne. W ramach studiów literaturowych analizowane były następujące zagadnienia:

- pojęcia związane z przyczepnością (p. 2.1.1 i 2.1.2),
- skale obserwacji zjawiska i stosowane analizy (p. 2.1.3 i 2.1.4),
- czynniki wpływające na przyczepność (p.2.2),
- mechanizm przyczepności (p. 2.3),
- modele przyczepności (p.2.4),
- rys historyczny metody *pull-out* (p.4.2.1).

Studia literaturowe generalnie przeprowadzone są starannie, mocną ich stroną są precyzyjne opisy zjawisk występujących w otoczeniu wyrywanego z betonu pręta żebrowanego wraz tabelarycznym zestawieniem modeli (porównania liczbowe z wynikami własnych badań Doktorant zamieścił w p. 4.4.2.4) i ze staranną ilustracją rysunkową. Ważna także, w kontekście planowania badań własnych jest Tablica 3.1, w której zestawiono parametry geometryczne próbek *pull-out* opisane w normach i publikacjach.

Do tej części mam niewielkie uwagi:

Str. 23²⁸ i 23¹² oraz inne miejsca – Czym jest *długość przyczepności* oraz *wydajność przyczepności*?

Str. 23¹⁰ oraz inne miejsca – Używane pojęcie *wytrzymałość przyczepność* jest „kalką” z języka angielskiego, w języku polskim lepiej byłoby używać pojęcia *graniczne naprężenia przyczepności*.

Str. 20¹⁴⁻¹⁰ – Napisano, że polskie pręty zbrojeniowe charakteryzują się współczynnikiem $f_R=0,06-0,12$ i że jest to wartość mniejsza od uznawanej za optymalną przez wielu badaczy wartości 0,20. Nie podano jednak źródeł, które podają tę optymalną wartość. Jak ma się ta informacja do str. 28²³⁻²⁵, gdzie poddano, że biuletyn *fib* zaleca 0,05-0,10?

Str. 30¹⁵⁻¹⁰ – Doktorant operuje pojęciem „wzorku”, które nie jest nigdzie sprecyzowane.

Odczuwam brak zakończenia studiów literaturowych wyspecyfikowaniem braków i nieścisłości w zaprezentowanych danych, które miałyby zostać uzupełnione i wyjaśnione w podjętych badaniach własnych. Pewne dane ku temu są pokazane w p. 3.2.1, ale nie zostały zestawione jawnie.

3.4 Ocena badań doświadczalnych

Program badań laboratoryjnych obejmował:

- badania wstępne *pull-out*, mające na celu eliminację błędów metodycznych i stwierdzenie czy na wyniki badań ma wpływ: niekontrolowane wydłużenie odcinka zakotwienia (seria *W-zakotwienie*), nierównomierne przyłożenie obciążenia (seria *W-kształt*) oraz sposób pomiaru poślizgu (seria *W-poślizg*),
- główne testy *pull-out* – z trzema zmiennymi parametrami (skrępowanie pręta determinowane jego lokalizacją, średnica pręta, długość zakotwienia); zbadano 3 serie: *C* z prętem usytuowanym centrycznie, *M40* – z otuliną pręta 40 mm, *M20* – z otuliną pręta 20 mm, a w każdej serii badano pręty o średnicy 10, 12 i 16 mm przy długości zakotwienia równej 2,5 i 5 średnic, w każdej z podserii przebadano po 6 próbek.

Program badań przygotowany i przedstawiony został kompleksowo i z dbałością o szczegóły. Doceniam zaplanowanie badań wstępnych, które pozwoliły uniknąć błędów w badaniach głównych i dopracować procedurę przygotowania próbek. Starannie uzasadnione zostały przyjęte parametry geometryczne próbek i parametry zmienne w badaniach. Warto podkreślić jest to, że dla realizacji testu *pull-out* zaprojektowano specjalne oprzyrządowanie pozwalające na precyzyjny przebieg badania. Opis procesu przygotowania próbek i stanowiska badawczego pozwala na stwierdzenie, że prace przygotowawcze prowadzone były z dbałością o uzyskanie jak największej precyzji co do długości zakotwienia i położenia pręta, a opis przebiegu badań pozwala uznać ich wyniki za wiarygodne.

Badanie prowadzono przy stałym przyroście przemieszczenia do 30 mm w seriach badań głównych i 20 mm lub do zniszczenia próbki w seriach wstępnych.

Próbki wykonano z betonu C35/45, doświadczalnie określając parametry materiałowe (wytrzymałość na ściskanie i rozciąganie oraz moduł sprężystości) niezależnie dla każdej serii. Użyto prętów zbrojeniowych klasy B500SP, wyznaczając doświadczalnie parametry wytrzymałościowe dla każdej ze średnic $\phi 10$, 12 i 16 mm. Metodą skanowania 3D oraz mikrofotografii ustalone zostały parametry geometryczne uźebrowania, a także korzystając z różnych wzorów normowych określono współczynnik uźebrowania. Zaskakuje znaczny rozrzut uzyskanych wyników (tablica 4.17 - największy jest niemal dwukrotnie większy od najmniejszego).

Wyniki testów *pull-out* zostały przedstawione klarownie i wieloaspektowo w formie wykresów zależności „naprężenia przyczepności – poślizg”, w formie tabel zawierających parametry tych wykresów i identyfikację typu zniszczenia, w formie tabel zestawiających sztywności kontaktu pręta i betonu odpowiadające poślizgowi 10 mm, naprężenia resztkowe oraz naprężenia w pręcie, a także w formie wykresu słupkowego maksymalnych naprężeń przyczepności.

Analiza wyników badań polegała na porównaniu zależności „średnich” z każdej serii:

- w trzech grupach położenia pręta (położenie centralne, położenie mimośrodowe 40 mm i mimośrodowe 20 mm),
- w trzech grupach średnicy pręta (10, 12 i 16 mm),
- przy dwóch długościach odcinka zakotwienia (2,5 ϕ oraz 5 ϕ).

Każda z tych analiz jest bardzo szczegółowa i, co bardzo istotne, odnosi się do mechanizmów zniszczenia próbek. Doktorant dostrzegł i opisał starannie i trafnie, wpływ sposobu zniszczenia na uzyskane wyniki z jednej strony, ale także wpływ typu próbki na sposób zniszczenia, z drugiej strony. Bardzo cenne jest, że dokonując analiz odnosił się do danych literaturowych, które potwierdzają obserwacje lub różnią się od nich. Oszacował też zgodność wzorów literaturowych i normowych z wartościami naprężeń szczytowych uzyskanych w badaniach własnych.

Na zakończenie tej części pracy wnioski badawcze zostały zestawione kompleksowo w oddzielnym podrozdziale. Ogólnie można stwierdzić, że Doktorant udowodnił, że dobrze czuje się w laboratorium badawczym i panuje nad wynikami badań.

Moje uwagi do części badań laboratoryjnych są następujące:

1. Wytrzymałość na rozciąganie betonu badano przez rozłupywanie, jednak uzyskanych wartości nie przeliczono rozciąganie osiowe, utożsamiając $f_{ct,sp}$ z f_{ct} , a to właśnie f_{ct} jest podstawą określania przyczepności.
2. W tablicy 4.24 zestawiono parametr $K_{b,0}$. Nigdzie wcześniej nie zdefiniowano go jawnie (taka definicja powinna być w p. 4.2.5). Parametr ten nazwano „sztywność przyczepności”. To nie jest prawidłowe określenie – bowiem to nie zjawisko przyczepności charakteryzowane jest sztywnością, tylko sztywność jest parametrem opisującym kontakt (styk, interface) między betonem i prętem.
3. W wyniku analizy sztywności początkowej kontaktu w p. 4.4.2.1 stwierdzono, że największą jej wartością charakteryzowały się próbki mimośrodowe M40. Fakt, że nie były to próbki centryczne Doktorant tłumaczy faktem nieco niższej wytrzymałości betonu. Nie jest to dla mnie tłumaczenie przekonujące. Od wytrzymałości zależą bardziej graniczne naprężenia przyczepności niż sztywność początkowa. Zwróciłabym raczej uwagę na to, że sztywności próbek centrycznych miały większe rozrzuty (tablica 4.24 – np. C10-2.5 – 67,2%, C12-2,5 – 82,7%, podczas gdy w przypadku próbek M40 rozrzuty nie przekroczyły 45%, a w przypadku próbek M20 – 56%). Zatem wartości średnie sztywności kontaktu w próbkach centrycznych mogą bardziej odbiegać od wartości „rzeczywistych” (charakteryzujących większą populację próbek) niż średnie sztywności kontaktu w próbkach mimośrodowych. Patrząc na wyniki sztywności wszystkich próbek (tablica 4.24) widoczne jest, że są tam wartości wyraźnie odbiegające od pozostałych – te powinny być przy obliczaniu wartości średniej odrzucone. Szczególnym przykładem są wyniki próbek C12-2.5, gdzie niemal wszystkie wyniki zawierają się w przedziale 30-80 MPa/mm, a jeden wynosi 210 MPa/mm. On rzutuje istotnie na średnią, a następnie zaburza całą analizę sztywności w p. 4.4.2.1 i kalibrację modelu numerycznego. Podobna sytuacja jest w przypadku próbek C10-2.5 oraz M20-10-2.5. Uwaga powyższa dotyczy także analiz sztywności przedstawionych w p. 4.4.2.2 oraz 4.4.2.3.
Jako pozytyw odnotować trzeba, że Doktorant krytycznie odniósł się do wyników swej analizy i zauważył problem pisząc na str. 136¹¹⁻¹² *wobec niejednoznacznych wyników nie można sformułować jednoznacznego wniosku odnośnie ... wpływu średnicy pręta na sztywność*. Jednak nie znalazł trafnego wytłumaczenia. W mojej opinii, jeśli wszelkie analizy miały być prowadzone na wartościach średnich, wiele pomogłaby pogłębiona analiza statystyczna wskazująca na miarodajność przyjętej wartości średniej.
Analogiczna uwaga dotyczy wartości naprężeń resztkowych. Tu rozrzuty nie były aż tak duże jak opisane powyżej, ale też znaczne i z pewnością rzutowały na wartości średnie. Dlatego tu również wnioskowanie na podstawie wartości średniej jest obarczone niepewnością.
4. Jeśli „zaburzenia” w wynikach analiz przypisywano różnym wytrzymałościom na ściskanie w różnych seriach to dobrze byłoby wartości naprężeń szczytowych analizować z uwzględnieniem zależności (2.9).
5. Jak rozumiem, w tablicach 4.43 i 4.44 znajdują się średnie wartości sił F_{max} . Napisano na str. 138¹⁴, że w przypadku zniszczenia przez wyrywanie, dwukrotne zwiększenie pola pobocznicy skutkuje *około dwukrotnym* przyrostem siły wyrywającej. Jak Doktorant

interpretuje „około”? Czy nie jest to znów efekt nieprecyzyjnej wartości średniej, czy też mogą być inne czynniki?

Nieprecyzyjnym i nieco mylącym jest też zdanie na str. 139¹⁻⁴. Napisano tu, że *przyrost poboczniczy pręta jest wprost proporcjonalny do siły, jaka jest potrzebna, aby doszło do zniszczenia przyczepności*. Tymczasem *przyrost poboczniczy* nie miał miejsca – wykonano jedynie badania przy mniejszym i dwukrotnie większym polu poboczniczy zakotwionego fragmentu pręta. Pomieszany został skutek z przyczyną – to siła zależy od pola poboczniczy, a więc jest do niego proporcjonalna, a nie pole poboczniczy jest proporcjonalne do siły. Również podpisy tablic 4.43 i 4.44 „*przyrosty siły... i poboczniczy*” nie są w tym kontekście precyzyjne.

6. Przy jakim obciążeniu występują rozkłady pokazane na rys. 4.36?

3.5 Ocena analiz numerycznych

Program analiz numerycznych obejmował symulacje zbadanych próbek *pull-out* przy użyciu programu ABAQUS. Dla betonu zastosowano model *Concrete Damage Plasticity* z stowarzyszonym prawem płynięcia i powierzchnią potencjału plastycznego Druckera-Pragera oraz powierzchnią plastyczności Lubliner z modyfikacją Lee i Fenvesa, a także liniowo-sprężysty model stali zbrojeniowej.

Dokonano trzech serii analiz, przyjmując różny poziom dokładności odwzorowania parametrów kontaktu pręta z betonem.

Analizy próbek z prętem umieszczonym symetrycznie (C - 9 symulacji) i próbek z prętem umieszczonym mimośrodowo (M20 - 3 symulacje) wykonywano w sposób najbardziej uproszczony, zastępując pręt żebrowany stosowany w eksperymencie prętem gładkim (serie „1” i „2”). Jako modele kontaktu między prętem a betonem przyjęto modele *powierzchni kohezyjnej* w formie funkcji „*traction-separation*”, zgodnej z MC2010, co oznacza, że funkcje „1” i „2” są zależnościami w skali „makro” (zawierają „w sobie” wpływ żeberek). W serii „1” parametry kontaktu przyjmowano po wstępnym założeniu klasy betonu na podstawie zaleceń MC2010 dla danej klasy, w serii „2” parametry kontaktu przyjmowano na podstawie wyrażenia MC2010 wprowadzając do niego zbadane f_{cm} , f_{ctm} ,

Następnie wykonano serię „3”, składającą się z 3 modeli numerycznych (wyłącznie z prętem umieszczonym centrycznie), do których wprowadzono najpierw model pręta żebrowanego o rzeczywistej geometrii uzyskanej dzięki skanowi 3D, a następnie wprowadzono dwa poziomy uproszczeń do tego żebrowania. W modelach tych charakterystykę powierzchni kontaktu przyjmowano w formie indywidualnie kalibrowanej funkcji „*traction-separation*”. Trochę nieszczęśliwie nazwano te modele, jako obliczane „metodą geometryczną” w kontrze do modeli obliczanych „metodą powierzchni kohezyjnej” (np. tytuł rozdziału 5.4.2.2) – to są co prawda modele dokładniej odwzorowujące geometrię, ale operujące również charakterystyką powierzchni kontaktu (co zostało opisane na str. 161²² i jest widoczne na rys. 5.9).

Wybór modeli konstytutywnych materiałów oraz modelu kontaktu stal-beton nie budzą zastrzeżeń. Prosiłabym jedynie o doprecyzowanie sposobu identyfikacji parametrów krzywych powierzchni kohezyjnych. Na str. 161⁷ napisano, że w seriach „1” i „2” parametry te są zgodne z tablicą 2.4. Tymczasem tablica 5.7 prezentująca serię „1” jest zgodna z tablicą 2.4, natomiast tablica 5.8 sporządzona dla serii „2” różni się od niej wartościami s_1 , s_2 , s_3 , α . Jeśli $s_3 = c_{clean}$ (odstęp w świetle między żebrami poprzecznymi pręta) to powinna być to wartość stała dla danej średnicy, jednakowa dla serii „1” i „2” – dlaczego nie jest?

W serii „3” zaimplementowano geometrię prętów i krzywa powierzchni kohezyjnej powinna opisywać bardziej „dyskretny” kontakt powierzchni stali i betonu, a więc oczywiście musi różnić się od krzywych „1” i „2”. Jak wytłumaczyć fakt, że naprężenia szczytowe krzywych

„3” są największe, a współczynnik tarcia równy 0,075 jest znacznie mniejszy niż standardowe wartości (str. 173¹⁵ i rys. 5.9)?

Pewną moją wątpliwość budzi uproszczenie geometrii żeberek. Po pierwsze nie podano, z którego wzoru obliczono f_R (na str. 30 podano aż 8 różnych wzorów). Rozumiem chęć uproszczenia geometrii pręta i zgadzam się, że uproszczenia powinny następować tak, aby parametr f_R pozostał stały. Jednak, jak rozumiem, żeberka ukośne (rys. 5.19) zastąpiono żeberkami prostopadłymi do długości pręta (rys. 5.20). Czy w świetle tego, że siła przykładowa jest wzdłuż osi pręta taka zmiana nie skutkowała istotną zmianą rozkładu naprężeń na poboczniczy? Jaki był cel tych uproszczeń skoro i tak jednym z modelowanych był układ rzeczywisty (model RzG)?

W analizach ograniczono, w stosunku do badań doświadczalnych, zakres poślizgu do 10 mm, co nie budzi zastrzeżeń, bowiem w tym zakresie występują zjawiska decydujące o naprężeniach szczytowych).

Wyniki analiz numerycznych przedstawiono i przeanalizowano bardzo starannie. Mocną stroną tych analiz jest krytyczna ocena i interpretacja uzyskanych wyników w kontekście wyników badań doświadczalnych. Pewną niedogodnością w odbiorze tego fragmentu tekstu jest to, że takim samym symbolem „ $\tau - s$ ” opisywano zarówno model przyczepności na styku pręta i betonu (rysunki 5.9. 5.10) jak i wyniki analiz (rysunki 5.24, 5.25, 5.26). To trochę dezorientuje przy pierwszym czytaniu.

Czytając tę część rozprawy, odczułam też brak jasnego wyartykułowania na początku rozdziału 5 celu analiz numerycznych. Celem jest oczywiście wykonanie takich modeli, które w najlepszy sposób odzwierciedlą wyniki eksperymentu, ale dopiero z dalszej lektury wynika, że zaprezentowane w tablicach 5.12 i 5.13 są wartościami średnimi wartościami naprężeń szczytowych w rozumieniu wyrażenia (4.1). Doceniam poszukiwanie precyzyjnego zdefiniowania odcinka, na którym określany jest poślizg oraz analizę wpływu odkształceń betonu na ten odcinek. Doktorant analizując mapy naprężeń zauważa bowiem, że część strefy betonu jest nieaktywna i koryguje długość odcinka zakotwienia i w efekcie proponuje kalibrację krzywej kohezyjnej. Tu w stosunku do modeli uproszczonych „1” i „2” nie mam zastrzeżeń. Jednak od modeli serii „3” oczekiwałabym również postawienia za cel bardziej fizykalnego opisu zjawiska (np. lepiej może byłoby operować naprężeniami nie średnimi, a maksymalnymi, bo one lepiej odzwierciedlą mechanizm zjawiska, pokazać rozkład naprężeń wzdłuż pręta i na powierzchni kolejnych żeberek i przede wszystkim podać informację o tym, jak propagowało zniszczenie (bo degradacja następuje stopniowo i włączane są kolejne żeberka). Elementy takich analiz zostały zrealizowane, ale pewną wątpliwość budzi „ręczna” kalibracja powierzchni kohezyjnej w tej serii.

3.6. Ocena wniosków pracy i kierunków dalszych badań

Na zakończenie pracy sformułowanych zostało 7 wniosków (z tym, że dwa są tożsame – wniosek 2 i 3), będących właściwie podsumowaniem pracy. Trzy z nich dotyczą wyników badań laboratoryjnych a trzy – analiz numerycznych. Wnioski są dobrze zredagowane, odpowiadają wynikom badań i analiz. Brakuje mi wniosków opisujących propagację zniszczenia na podstawie analiz numerycznych. Pewnym niedociągnięciem jest też brak odniesienia się do tez (za wyjątkiem pierwszej, którą we wniosku (1) uznano za udowodnioną i tezy trzeciej, do której odniesiono się we wniosku (6)).

W ostatnim rozdziale Doktorant sformułował kierunki dalszych badań, które obejmują zarówno prace laboratoryjne jak i analizy numeryczne. W ramach analiz doświadczalnych doktorant chce poszerzać zrealizowane już badania *pull-out* (badania przy kolejnych średnicach, długościach zakotwienia i wielkości próbki) jak i badania na próbkach z dłuższym odcinkiem zakotwienia, wreszcie badania na elementach belkowych. Doradzałabym przed rozpoczęciem badań jasne sformułowanie celu, w szczególności celu użytecznego (np.

opracowanie nowego modelu badawczego, opracowanie wiarygodnych „przejęć” między wartościami naprężeń przyczepności badanymi na różnych próbkach, skorygowanie normowego wzoru na obliczenie długości zakotwienia itp.). W zakresie analiz numerycznych Doktorant planuje kolejne symulacje mające na celu odzwierciedlenie geometrii pręta (przyznam, że ja widziałbym jedynie symulacje z dokładnie odwzorowaną geometrią pręta – nie bardzo widzę celu szukania uproszczeń w sytuacji, gdy chcemy wiernie odwzorować mechanizm zniszczenia), a także zastosowanie innych materiałowych modeli konstytutywnych i poszukiwanie możliwości przewidywania mechanizmu zniszczenia.

4. Ocena strony redakcyjnej pracy

Układ pracy jest prawidłowy i czytelny. Ogólnie praca jest napisana jest poprawnym, jasnym, dobrym językiem. Rysunki są bardzo staranne.

Uwagi redakcyjne nie mają wpływu na merytoryczną ocenę pracy. Uwagi te dotyczą nieścisłości w nazewnictwie, opisach i przywołaniach, np.

- Str. 9¹⁵ – czym jest „rozkład kruszywa”?
- Str. 17⁷ – nie należy używać pojęcia „szerokość rozwarcia rys” a „szerokość rys” lub „rozwarcie rys”,
- Str. 25²⁷⁻²⁴ – nie podano źródła przedstawionych proporcji, ponadto nie sprecyzowano w stosunku do czego wystąpił spadek przyczepności.
- Str. 28⁹ - napisano *kierunek prostopadły do osi pręta do pobocznic pręta* – czy te dwa kierunki są tożsame?
- Str. 38²⁵ – przywołano pracę *Bednarka i innych*, tymczasem jest to Pani Prof. Zoja Bednarek (kobieta),
- Str. 53 – tytuł rozdziału 2.4.2 nie odpowiada zawartości – w treści są prezentowane modele zależności granicznych naprężeń przyczepności od modelu zachowania się rozciąganego betonu wokół pręta, a tytuł sugeruje ogólne opisy rozciąganego betonu.
- Str. 109¹² – czym jest *sztynność sztywności*?
- Str. 149¹⁵ i w kilku innych miejscach używano pojęcia *krótsza długość zakotwienia* – to trochę niezgrabne, lepiej *krótsze zakotwienie* lub *krótszy odcinek zakotwienia*.
- Rys. 5.40 – brakuje skali kolorów.
- Z rzadka występują literówki np. str. 34³ – jest z *najważniejszą* winno być z *najważniejszych*, 35²³ – jest *wpływającym*, winno być *wpływającymi*, str. 41⁴ jest *prętowy* winno być *prętowi*, 112¹⁰ – jest *zakresem* winno być *zakresie*, str. 133⁸ – jest *zakres* winno być *zakresem*.

5. Wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa doktorska jest niewątpliwie dziełem oryginalnym i samodzielnym. Doktorant podjął ważne zagadnienie, które konsekwentnie rozwiązywał. Wykazał się wiedzą teoretyczną z zakresu podjętej tematyki, umiejętnością modelowania numerycznego i realizacji eksperymentów oraz twórczej analizy wyników obliczeń i badań. Dysertacja świadczy o opanowaniu przez Doktoranta warsztatu badań naukowych.

Ostatecznie stwierdzam, że przedłożona rozprawa mgr inż. Marcina Burdzińskiego pt. DOŚWIADCZALNO-NUMERYCZNA ANALIZA WPŁYWU SKRĘPOWANIA PRĘTA ZBROJENIOWEGO W BETONIE NA ZACHOWANIE PRZYCZEPNOŚCI W TEŚCIE PULL-OUT spełnia wymagania Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (Dz.U. z 2024 r. poz. 1571, z późn. zmianami). Wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Lublin dn. 12.02.2026

