

Wrocław, 08.10.2022

Prof. dr hab. inż. Dariusz Łydzba
Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego
Politechnika Wroclawska

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Michała Demby „Modelling and experimental research of polypropylene fibre reinforced high performance concrete regarding ductility”

Podstawa opracowania recenzji: pismo prof. dr hab. inż. Jacka Pielechy, Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa i Transport Politechniki Poznańskiej, z dnia 27.05.2022 r.; otrzymane 06.06.2022 r.

1. Uwagi ogólne

Recenzowana rozprawa dotyczy zagadnienia oceny wpływu zbrojenia rozproszonego, w postaci włókien polipropylenowych, na zachowanie i właściwości mechaniczne betonu wysokowartościowego, ze szczególnym uwzględnieniem zjawiska „ciągłości” materiału. Oceny dokonano realizując program badań laboratoryjnych, w którym oznaczano, dla badanego materiału, jego wartości stałych materiałowych: sprężystości, wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie, wytrzymałości na zginanie oraz funkcję obciążenie-przemieszczenie procesu deformacji belki swobodnie podpartej. Badania realizowano na próbkach sześciennych (10x10x10 [cm]) – wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie, walcowych (10/20 [cm]) – wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie oraz wartości stałych sprężystości, belkach laboratoryjnych (10x10x50 [cm]) – wytrzymałość na rozciąganie oraz miary „ciągłości”, belkach pełnowymiarowych (12x24x260 [cm]) – miary „ciągłości” oraz funkcja obciążenie-przemieszczenie belki swobodnie podpartej poddanej obciążeniom cyklicznym. Badania różnicowano ze względu na wykorzystywany materiał betonowy, tj. wykorzystano do jego wytworzenia dwa rodzaje: kruszywa, pyłu krzemionkowego oraz włókien polipropylenowych jak również różnicowano ze względu na miejsce wytworzenia próbek do badań, tj. w warunkach laboratoryjnych oraz w warunkach przemysłowych. Łącznie zrealizowano, dla wysokowartościowego betonu z polipropylenowym zbrojeniem rozproszonym, ponad 130 różnych typów badań: jednoosiowego ściskania oraz procesu zginania. Program badań laboratoryjnych został dobrze zaplanowany, zrealizowany a uzyskane wyniki otrzymała analizą ilościową i jakościową.

W pracy podjęto się również modelowania i symulacji numerycznej procesu zginania belek wykonanych z tego typu materiału. W symulacji numerycznej procesu deformacji wolnopodpartej belki żelbetowej, wykonanej z betonu wysokowartościowego z polipropylenowym zbrojeniem rozproszonym, wykorzystano model matematyczny opisujący plastyczno-degradacyjne zachowanie materiału,

zapropozowany w literaturze przedmiotu w ostatniej dekadzie XX wieku. W modelu tym uwzględnia się sprzężenie, zachodzących w mikrostrukturze materiału, procesów: deformacji plastycznej oraz rozwoju mikrouszkodzeń. Makroskopową manifestacją tych procesów są odpowiednio odkształcenie trwałe oraz utrata sztywności sprężystej materiału natomiast fenomenologicznymi miarami tych procesów, wykorzystywanymi w modelu, są tensor odkształcenia plastycznego oraz skalar reprezentujący gęstość mikro-defektów.

Analizowany w dysertacji doktorskiej problem jest interesujący, ważny i aktualny. Ujęcie zagadnienia przedstawiono w siedmiu rozdziałach. Pierwsze dwa rozdziały mają charakter wprowadzający: w pierwszym dokonano uzasadnienia podjęcia się tematyki a w drugim sformułowano cel i zakres rozprawy. W rozdziale trzecim omówiono aktualny stan wiedzy dotyczący wysokowartościowych betonów zbrojonych włóknami polipropylenowymi. Kolejne trzy rozdziały prezentują oryginalne badania i wyniki autora recenzowanej dysertacji, tj.: w rozdziale czwartym przedstawiono i omówiono cały program zrealizowanych przez autora badań laboratoryjnych wysokowartościowych betonów wraz z analizą ich wyników, w kolejnym rozdziale zaprezentowano i przedyskutowano wyniki symulacji numerycznych procesu monotonicznego zginania wolnopodpartej belki żelbetowej a w rozdziale szóstym dokonano, z wykorzystaniem uzyskanych wyników laboratoryjnych, oceny jakościowej i ilościowej miary „ciągłości” analizowanego materiału. Pracę podsumowują wnioski autora zamieszczone w rozdziale siódmym.

Cała praca wraz ze spisem treści, wykazem symboli i oznaczeń, streszczeniami w języku polskim i angielskim, załącznikami oraz spisem literatury (212 pozycji) liczy łącznie 159 stron. Praca napisana jest w języku angielskim.

2. Treść pracy

Obecnie omówię krytycznie treść pracy.

Rozdział 1 W tym krótkim rozdziale, liczącym 2 strony, autor uzasadnia celowość podjęcia się tematyki rozprawy. Przywołuje dwie charakterystyczne cechy betonu wysokowartościowego, tzn. jego wysoką wytrzymałość na jednoosiowe ścislenie oraz jego „kruche” zachowanie przy obciążeniach granicznych. Ta druga cecha implikuje gwałtowne zniszczenie materiału, bez wcześniej manifestacji w postaci procesu zaawansowanego plastycznego płynięcia i jest szczególnie niekorzystna dla pracy statycznej konstrukcji inżynierskiej. „Kruchość” jest przeciwieństwem właściwości materiałowej zwanej „ciągłością” która implikuje duże deformacje plastyczne materiału przed jego zniszczeniem. Zastosowanie zbrojenia rozproszonego potrafi transformować zachowanie betonu z kruchego do ciągłego. Uzasadnienie podjęcia się tematyki jest klarowne. Nie mam uwag krytycznych.

Rozdział 2 W tym rozdziale autor formułuje tezę i zakres rozprawy. Zamierza potwierdzić, na drodze badań laboratoryjnych oraz symulacji numerycznych, że polipropylenowe zbrojenie rozproszone w betonie wysokowartościowym znacząco poprawia jego zachowanie przy zginaniu oraz ciągłość.

Trzon rozprawy stanowią badania laboratoryjne realizowane na: próbkach sześciennych, walcowych oraz na belkach „laboratoryjnych i „przemysłowych”. Celem tych badań laboratoryjnych będzie identyfikacja jakościowa i ilościowa efektu polipropylenowego zbrojenia rozproszonego na właściwości mechaniczne betonu

wysokowartościowego podczas gdy symulacji numerycznych – opracowanie efektywnego modelu obliczeniowego zachowania się betonu wysokowartościowego przy zginaniu. Do oceny ciągliwości betonu wysokowartościowego z polipropylenowym zbrojeniem rozproszonym wykorzystanych zostanie kilka jej opcjonalnych miar, tj.: energia pęknięcia, długość charakterystyczna czy długość ciągliwości oraz wyniki badań laboratoryjnych zginania belek.

Rozdział napisany jest zwięźle i jasno. Nie mam uwag krytycznych.

Rozdział 3 to autorski przegląd tematyki betonów wysokowartościowych oraz betonów ze zbrojeniem rozproszonym. Rozpoczyna go autor od przytoczenia, wg. Eurocodu 2, klasyfikacji betonu według której betonem wysokowartościowym jest ten charakteryzujący się wytrzymałością na jednoosiowe ściskanie nie mniejszą niż 55 [MPa]. Następnie przywołuje 4 podstawowe zasady otrzymania betonu wysokowartościowego, tj.: bardzo mała wartość w/c, wykorzystanie większej ilości super-plastyfikatora, wysoka gęstość upakowania dzięki zastosowaniu pyłu krzemionkowego oraz zastosowanie zbrojenia rozproszonego. Każda z tych czterech zasad jest dalej szczegółowo dyskutowana. Następnie autor przedstawia, na podstawie przeglądu literatury, wpływ zastosowania różnych typów zbrojenia rozproszonego (włókna stalowe, szklane, polimerowe) na charakterystykę mechaniczną betonów wysokowartościowych. Szczególną uwagę poświęca również właściwościom mechanicznym pojedynczego włókna polipropylenowego, gdyż ten typ zbrojenia jest wykorzystywany w badaniach autora jak również zjawisku ciągliwości betonu przytaczając, za literaturą przedmiotu, jej różne miary matematyczne.

Przegląd autor kończy ogólną dyskusją opisu matematycznego zachowania się mechanicznego betonu. Przytacza dwie szczególne cechy charakterystyki deformacyjnej betonu, tj.: deformacje trwałe (plastyczne) oraz utrata sztywności sprężystej jako konsekwencja rozwoju mikrouszkodzeń w matrycy betonowej. Deformacje plastyczne klasycznie uwzględniane są w ramach matematycznej teorii plastyczności natomiast utrata sztywności – w ramach tzw. ciągłej mechaniki rozwoju mikrouszkodzeń. W przypadku betonów konieczne jest użycie, w sposób sprzężony, tych dwóch podejść równocześnie. Autor przywołuje, zaproponowany w 1989 roku, model zwany CDP (Concrete Damage Plasticity).

Przegląd ma wyraźną myśl przewodnią – jest „autorski”. Zaprezentowane są wszystkie istotne dla tematyki pracy zagadnienia. Nie mam uwag krytycznych.

Rozdział 4 Jest to, zdaniem recenzenta, kluczowy dla pracy rozdział. Prezentuje oryginalne wyniki autora ze zrealizowanych badań laboratoryjnych. W pierwszej części tego rozdziału, 4 podrozdziały, przedstawiane są informacje wstępne, tj.: rodzaj stosowanych w badaniach próbek (sześciennie, walcowe, belkowe „laboratoryjne” oraz belkowe „przemysłowe”) oraz zastosowane warianty badawcze będące konsekwencją różnicowania próbek ze względu na: rodzaj zastosowanego kruszywa, rodzaj pyłu krzemionkowego, zastosowanie zbrojenia rozproszonego lub jego brak oraz ze względu na miejsce przygotowania próby (w laboratorium Politechniki Poznańskiej lub w zakładzie PEKABEX). Szczególnie przydatnym, ze względu na dużą liczbę wariantów badawczych, jest wprowadzony przez autora opis identyfikacji próby który ilustruje w pracy rysunek 4.2 i dokumentuje tabela 4.2. Zrealizowane przez autora badania to łącznie 132 testy laboratoryjne, w tym 83 testy

jednoosiowego ściskania oraz 49 badań trójpunktowego zginania (tabela 4.1). To niezwykle czasochłonny program badawczy biorąc pod uwagę, poza łącznym czasem wszystkich testów laboratoryjnych, również czas konieczny na przygotowanie elementów/prób do badań oraz czas dojrzewania betonów. Autor zrealizował ponadto, nie uwzględnionych w liczbie 132 badań, wiele dodatkowych testów laboratoryjnych (podrozdział 4.2) mających na celu, między innymi, potwierdzenie klasy cementu wykorzystywanego do przygotowania próbek betonu wysokowartościowego oraz „dobranie” odpowiedniej proporcji pyłu krzemionkowego do cementu w cel zapewnienia odpowiedniego „upakowania” składników w mikrostrukturze betonu wysokowartościowego. Tych dodatkowych badań autor zrealizował łącznie 36. W tej części pracy, podrozdział 4.3, autor charakteryzuje również aparaturę badawczą zastosowaną w badaniach. Warty podkreślenia jest fakt, że w badaniach trójpunktowego zginania belek pełnowymiarowych („przemysłowych”) autor równocześnie zastosował trzy systemy pomiarowe, tj.: system własny prasy INSTRON, liniowy czujnik przemieszczeń LVDT oraz bezdotykowy system pomiarowy ARAMIS wykorzystujący cyfrową korelację obrazu. Pierwszą część tego rozdziału kończy podrozdział 4.4 który przedstawia, w sposób skondensowany, informacje o przeprowadzonych badaniach wstępnych zrealizowanych w celu „dobrania” odpowiedniego składu mieszanki betonowej. Autor informuje, że ponad 50 różnych próbek poddanych zostało testom laboratoryjnym, jednakże w pracy nie dokumentuje tych wyników ograniczając się do podania ostatecznego wypracowanego składu mieszanki betonowej (tabela 4.18) który wykorzystywany będzie we właściwych badaniach laboratoryjnych prezentowanych w drugiej części tego rozdziału.

Oryginalne wyniki, kluczowe dla dysertacji, przedstawiają kolejne cztery podrozdziały, tj. 4.5-4.8. W podrozdziale 4.5 autor prezentuje wyniki badań wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie (na próbkach sześciennych oraz walcowych) analizowanych betonów wysokowartościowych, ze zbrojeniem rozproszonym lub bez tego zbrojenia, oraz dokonuje oceny jakościowej i ilościowej otrzymanych wyników. Ilościowy i jakościowy charakter uzyskanych wyników, dla próbek przygotowanych w laboratorium akademickim oraz tych przygotowanych w laboratorium przemysłowym jest podobny. Różnicuje je jednak, znacząco, wartość odchylenia standardowego – dla próbek przygotowywanych w warunkach przemysłowych wartość odchylenia standardowego jest ponad dwukrotnie większa niż dla próbek przygotowanych w laboratorium akademickim. Próbkę bez zbrojenia rozproszonego wykazały dużo wyższą wartość wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie niż próbki z polipropylenowym zbrojeniem rozproszonym. Wynik ten wydaje się uzasadniony uwzględniając wysoki udział frakcyjny zbrojenia rozproszonego, jego izotropowy rozkład przestrzenny w próbkach i równocześnie jego brak nośności, mikrowyboczenie, przy ściskaniu. Uzyskane wyniki jednoznacznie wskazują również na zmianę mechanizmu zniszczenia jako konsekwencję zastosowania polipropylenowego zbrojenia rozproszonego (Rys.4.24 i Rys.4.26).

W podrozdziale 4.6 przedstawiono wyniki laboratoryjne stałych materiałowych sprężystości, tj. modułu Younga oraz współczynnika Poissona. Badania zrealizowano stosując metodę A normy PN-EN 12390-13. Podobnie jak w poprzedzającym podrozdziale dokonano w pracy oceny jakościowej i ilościowej uzyskanych wyników. Próbkę bez polipropylenowego zbrojenia rozproszonego charakteryzuje wyższa wartość modułu Younga – wynik wydaje się oczywisty biorąc pod uwagę zdecydowanie niższą wartość modułu Younga włókien polipropylenowych oraz ich

zerową sztywność przy ściskaniu (mikrowyboczenie). W zasadzie ta sama wartość współczynnika Poissona, około 0.2, charakteryzuje wszystkie przebadane próbki, niezależnie czy wykonano je w laboratorium akademickim czy w laboratorium przemysłowym oraz czy są zbrojone polipropylenowym zbrojeniem rozproszonym czy nie (Rys.4.32). W kolejnym podrozdziale, tj. 4.7, przedstawiono otrzymane przez autora wyniki badań laboratoryjnych trójpunktowego zginania belek laboratoryjnych (10x10x50 cm). Uzyskane wyniki jednoznacznie wskazują na poprawę pracy statycznej belek zbrojonych włóknami polipropylenowymi w sensie, że wykazują one charakter pracy „ciągliwej” – w przypadku belek zbrojonych włóknami polipropylenowymi test zginania kontynuowano aż wartość ugięcia w połowie rozpiętości belki osiągała wartość 15 mm podczas gdy w przypadku belek bez zbrojenia rozproszonego zniszczenie następowało gwałtownie już przy wartościach ugięcia poniżej 1 mm (Rys. 4.38).

W podrozdziale 4.8 przedstawiono i poddano analizie jakościowej i ilościowej wyniki badań zginania belek pełnowymiarowych (120x240x2600 mm). Elementy te poddane były cyklicznemu testowi trójpunktowego zginania, tzn. każdy kolejny cykl obciążenie-odciążenie był modyfikowany tak aby uzyskać o 1 mm większą wartość ugięcia w środku rozpiętości belki niż w cyklu bezpośrednio poprzedzającym. W wyniku przeprowadzonego testu uzyskiwane są pętle histerezy na wykresie: siła – przemieszczenie środka rozpiętości. Ten rodzaj testu pozwala również, w sposób ilościowy, ocenić sukcesywną utratę sztywności belki w procesie zginania w każdym cyklu obciążenie-odciążenie oraz wartość trwałej/nieodwracalnej części przemieszczenia stowarzyszoną z danym cyklem. W pracy przedstawiono również mapy pola normalnego odkształcenia poziomego uzyskane dzięki wykorzystaniu systemu ARAMIS bazującego na cyfrowej korelacji obrazu.

Otrzymane wyniki jednoznacznie wskazują na pozytywny efekt polipropylenowego zbrojenia rozproszonego w belkach z betonu wysokowartościowego: indukują przejście z zachowania kruchego na ciągliwy (belki bez zbrojenia rozproszonego vs. belki ze zbrojeniem rozproszonym), podwyższają ścieżkę siła-przemieszczenie (belki z klasycznym zbrojeniem vs. belki z klasycznym zbrojeniem i polipropylenowym zbrojeniem rozproszonym).

Rozdział napisany przejrzyście. Merytoryczna uwaga krytyczna dotyczy liczebności próby: autor wprowadził wiele wariantów badawczych elementów jako konsekwencja różnicowania próbek ze względu na stosowane materiały oraz miejsce wykonania elementów, co w konsekwencji, mimo dużej liczby wykonanych testów, zredukowało liczebność próby do trzech elementów w obrębie danej próby. Uzyskane miary statystyczne mogą więc być interpretowane raczej w sensie jakościowym niż ilościowym.

Poniżej wymieniamy dodatkowo dostrzeżone błędy edycyjne, tj.:

- str. 16 wiersz 3 od dołu: jest „subsection 5.4” – powinno być „subsection 4.4”
- str. 22 wiersz 11 od góry: jest „very low density 2.20 g/cm³” – powinno być „very low density 0.220 g/cm³”
- str. 34 wiersz 4 od góry: jest „The pixel blocks, which should be unique and random” – takie sformułowanie jest niezrozumiałe
- str. 44: na Rys. 4.30 oś pozioma reprezentuje odkształcenie i ma jednostkę [mm] – powinno być jako odkształcenie bezwymiarowe
- str. 68, Rys. 4.57-4.58 oraz 4.59-4.60 – trudno porównać mapy, skoro przyporządkowano te same kolory do innych skali wartości.

Rozdział 5 to prezentacja modelu matematycznego zachowania mechanicznego wysokowartościowego betonu, zbrojonego bądź nie polipropylenowym zbrojeniem rozproszonym, który autor wykorzystał do symulacji numerycznej trójpunktowego zginania belki pełnowymiarowej. Symulacje zostały zrealizowane w środowisku ABAQUS. Autor skorzystał, z zaproponowanego w 1989 roku, opisu znanego jako Concrete Damage Plasticity. Otrzymane wyniki symulacji: w postaci wykresów siła-przemieszczenie środka rozpiętości belki, tak dla wariantu ze zbrojeniem rozproszonym oraz bez zbrojenia rozproszonego wydają się poprawne. Autor również zrealizował test wrażliwości modelu obliczeniowego ze względu na wielkość pojedynczego elementu siatki elementów skończonych – wykonano go dla czterech wielkości pojedynczego elementu skończonego.

Uwagi krytyczne dotyczą prezentacji tego rozdziału – jest ona zbyt skonsolidowana, skrótowa, co czyni ją trudną do śledzenia oraz weryfikacji poprawności uzyskanych przez autora wyników obliczeń numerycznych. W szczególności:

- przy stosowaniu sprzężonego opisu plastyczności i rozwoju mikrouszkodzeń występuje para dwóch zmiennych „ukrytych”, tj. tensor odkształceń plastycznych oraz zmienna skalarna reprezentująca „gęstość” defektów w mikrostrukturze. Obie zmienne muszą mieć zdefiniowane prawa ich ewolucji. W przypadku plastyczności autor podaje formę niestowarzyszonego prawa plastycznego płynięcia natomiast, w prezentacji, pomija prawo ewolucji drugiej zmiennej „ukrytej”, czyli skalarnej miary gęstości mikrouszkodzeń.
- Str. 75, rys.5.3 – rysunek jest niezrozumiały; nie wiadomo co za krzywe przedstawia wykres; nie wiadomo, czy osie reprezentują zmienne efektywne czy nie?
- Str. 79 wiersz 9 od dołu: jest „In order to get the full definition of Concrete Damage Plasticity model the stress-strain relations as a set of points for compression as well as for tension should be input” – jest to zbyt lakoniczne stwierdzenie, powinno to być w rozdziale szerzej skomentowane/opisane przez autora.

Rozdział 6 Autor formułuje/prezentuje w nim miary matematyczne ciągliwości. W szczególności wykorzystywane będą takie miary jak: energia pęknięcia, długość charakterystyczna oraz długość ciągliwości. Następnie, wykorzystując wyniki badań laboratoryjnych dla belek przemysłowych, dla różnych wariantów, ocenił ilościowo wartości tych miar ciągliwości. Pozwoliło to autorowi, w sposób ilościowy, ocenić efektywność zbrojenia rozproszonego na wartość zastosowanych miar ciągliwości. Jest to wartościowy rozdział ocenianej pracy wskazujący w sposób jednoznaczny na efektywność stosowania w betonach wysokowartościowych polipropylenowego zbrojenia rozproszonego. Napisany jest jasno, nie mam uwag krytycznych.

Rozdział 7 to podsumowanie dysertacji, w której autor przedstawił wnioski końcowe oraz plany swoich dalszych prac. Te zasadnicze wnioski autora dotyczą tezy rozprawy – przywołując wybrane wyniki badań laboratoryjnych autor potwierdził, że zastosowanie polipropylenowego zbrojenia rozproszonego znacząco poprawia charakterystykę „giętną” oraz ciągliwość belek wykonanych z betonu wysokowartościowego. Autor sformułował również wiele dodatkowych/szczegółowych wniosków, w konsekwencji zrealizowanych badań doświadczalnych. Rozdział napisany wzorowo, nie mam uwag krytycznych.

3. Ocena pracy

Recenzowana praca dotyczy zagadnienia ważnego, aktualnego, trudnego i niezwykle interesującego, tj.: oceny efektywności polipropylenowego zbrojenia rozproszonego w poprawie zachowania się mechanicznego betonu wysokowartościowego. W badaniach ograniczono się do weryfikacji parametrów wytrzymałościowych, charakterystyki deformacyjnej przy zginaniu oraz ciągliwości wysokowartościowych betonów z polipropylenowym zbrojeniem rozproszonym. Rozwiązywane w pracy zagadnienia, ze względu na konieczność wykonania bardzo dużej liczby pracochłonnych badań laboratoryjnych należą do tych najtrudniejszych w mechanice konstrukcji betonowych.

Przedstawione badania laboratoryjne i ich wyniki, symulacje numeryczne oraz wykonane analizy porównawcze są oryginalnym osiągnięciem Autora. Zastosowanie konsekwentnego podejścia laboratoryjnego, z wykorzystaniem testów jednoosiowego ściskania na próbkach sześciennych oraz walcowych jak również testów trójpunktowego zginania na belkach „laboratoryjnych” oraz „przemysłowych” pozwoliło autorowi w sposób obiektywny, zidentyfikować tak jakościowo jak i ilościowo efekt polipropylenowego zbrojenia rozproszonego w odpowiedzi mechanicznej, zbrojonego nim, betonu wysokowartościowego.

Prezentowane w pracy wyniki i stwierdzenia stanowią oryginalne rozwiązania problemu naukowego w dyscyplinie inżynieria lądowa i transport. Recenzowana praca doktorska potwierdza również ogólną wiedzę autora w dyscyplinie inżynieria lądowa i transport oraz Jego gotowość do prowadzenia samodzielnych badań naukowych.

Wyszczególnione przez recenzenta, przy omawianiu treści rozprawy, uwagi krytyczne czynią jedynie pewien „niedosyt” co do prezentacji, ale nie mają wpływu na jakość sformułowanych w dysertacji wniosków końcowych oraz na ostateczną pozytywną ocenę recenzowanej pracy.

4. Wniosek końcowy

Uważam, że oceniana rozprawa doktorska spełnia wymogi Ustawy (Dz.U. z 2018 r., poz. 1668) i wnioskuję o dopuszczenie mgr inż. Michała Demby do publicznej obrony rozprawy doktorskiej pt. ” Modelling and experimental research of polypropylene fibre reinforced high performance concrete regarding ductility”.

