

Szczecin, 09.09.2021 r.

dr hab. inż. Tomasz Wróblewski, prof. ZUT
Katedra Teorii Konstrukcji
Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie
Tel.: +48 91 449 4625, e-mail: Tomasz.Wroblewski@zut.edu.pl

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr. inż. Łukasza Polusa

pt. „*An Analysis of Load Bearing Capacity and Stiffness of Aluminium-Concrete Composite Elements Subjected to Bending*”

Promotor pracy: dr hab. inż. Maciej Szumigała, prof. PP

SPIS TREŚCI

1. PODSTAWA OPRACOWANIA RECENZJI.....	2
2. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA ROZPRAWY	2
3. OCENA ROZPRAWY	5
3.1. OCENA DOBORU TEMATU I NAUKOWEJ WARTOŚCI ROZPRAWY	5
3.2. PYTANIA I UWAGI KRYTYCZNE	8
3.3. UWAGI SZCZEGÓŁOWE, W TYM REDAKCYJNE	10
4. PODSUMOWANIE I WNIOSEK KOŃCOWY	11

1. Podstawa opracowania recenzji

Podstawę formalną opracowania recenzji stanowi pismo z dnia 9 lipca 2021 r. skierowane do mnie przez Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa i Transport Politechniki Poznańskiej Pana prof. dr hab. inż. Jacka Pielecha zawierające prośbę o ocenę rozprawy. Pismo przygotowano na podstawie uchwały Rady Dyscypliny z dnia 6 lipca 2021 r.

Podstawę prawną opracowania recenzji stanowią:

- Ustawa z dnia 3 lipca 2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. poz. 1669),
- Ustawa z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 z późniejszymi zmianami),
- Rozporządzenie Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 19 stycznia 2018 r. w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodzie doktorskim, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora (Dz. U. poz. 261).

2. Ogólna charakterystyka rozprawy

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska Pana mgra inż. Łukasza Polusa pt. „*An Analysis of Load Bearing Capacity and Stiffness of Aluminium-Concrete Composite Elements Subjected to Bending*” (pol. *Analiza nośności i sztywności aluminiowo-betonowych zespolonych elementów poddanych zginaniu*) przygotowana w Zakładzie Konstrukcji Budowlanych Instytutu Budownictwa na Wydziale Inżynierii Lądowej i Transportu Politechniki Poznańskiej. Promotorem pracy jest Pan dr hab. inż. Maciej Szumigała, prof. PP.

Oceniana praca została napisana w całości w języku angielskim i przedstawiona w wersji drukowanej. Opracowanie liczy łącznie 177 stron z czego na pierwszych 12 stronach z niezależną numeracją rzymską zamieszczono spis treści, przedmowę, streszczenie, wykaz publikacji Doktoranta oraz wykaz symboli i skrótów, na kolejnych 156 stronach przedstawiono główną część pracy składającą się z 7 numerowanych rozdziałów a pozostałe 9 stron stanowią trzy krótkie załączniki. Bibliografia opracowania obejmuje łącznie 306 pozycji z czego 18 pozycji stanowią normy, specyfikacje oraz wytyczne projektowania a 8 pozycji to strony internetowe. Część główna pracy zawiera 91 rysunków, 23 tabele oraz 53 wzory.

Rozdział 1 liczący 22 strony zawiera wprowadzenie w tematykę poruszaną w opracowaniu. Na początku rozdziału przedstawiono uzasadnienie podjęcia się analizy nośności i sztywności aluminiowo-betonowych zginanych elementów zespolonych.

Szczegółowo omówiono zalety i wady takich konstrukcji. Przedstawiono rys historyczny konstrukcji aluminiowych oraz zespolonych aluminiowo-betonowych. W przeglądzie literatury na przykładzie zrealizowanych konstrukcji wykazano możliwość zastosowania aluminiowo-betonowych konstrukcji zespolonych w budownictwie mostowym. Podkreślono możliwość zastosowania demontowalnych łączników stalowych zapewniających współpracę profili aluminiowych z płytą betonową. Pod koniec rozdziału przedstawiono cele pracy określono jej zakres oraz zdefiniowano jej główną tezę.

Ośmiostronicowy rozdział 2 poświęcony został na omówienie ścinanych łączników stosowanych w konstrukcjach zespolonych. W pierwszej kolejności podano informacje dot. łączników stosowanych w konstrukcjach zespolonych stalowo-betonowych. Dalej omówiono nielicznie spotykane w literaturze przykłady łączników stosowanych w konstrukcjach aluminiowo-betonowych. Na zakończenie przedstawiono autorską, chronioną patentem, propozycję stalowego, demontowalnego łącznika stanowiącego połączenie klasycznego w konstrukcjach zespolonych sworznia z łbem oraz śruby.

Na dwunastu stronach rozdziału 3 przedstawiono teoretyczne podstawy współpracy aluminium i betonu w konstrukcjach zespolonych. Rozpoczęto od omówienia sposobu wyznaczania teoretycznej nośności i sztywności pojedynczego stalowego, demontowalnego łącznika sworzniowo-śrubowego przedstawionego w poprzednim rozdziale. Dalej analizie poddano sztywność i nośność belek zespolonych aluminiowo-betonowych. W trakcie analiz zakładano, że płyta betonowa wykonana zostanie z wykorzystaniem szalunku traconego w postaci blach profilowanych. Uwzględniono również możliwość wystąpienia niepełnego zespolenia podatnego wykonanego z zastosowaniem demontowalnych łączników sworzniowo-śrubowych.

Kolejny rozdział 4 na 38 stronach przedstawia zrealizowany w ramach rozprawy zakres badań doświadczalnych i numerycznych. Doświadczalne badania materiałowe przeprowadzono na wszystkich wykorzystywanych materiałach tj. betonie (płyta), aluminium (profil belki) oraz stali (blacha profilowana, łączniki sworzniowo-śrubowe, siatki zbrojeniowe). Podczas badań dokonywano pomiarów pozwalających na określenie parametrów wytrzymałościowych i sztywnościowych. Dalej Doktorant przedstawił doświadczalne badania mające na celu określenie właściwości prototypowych łączników sworzniowo-śrubowych. Badania prowadzono na klasycznych dwuciętych próbkach analizując sztywność, wytrzymałość oraz ciągliwość łączników. Przebadano łącznie cztery próbki. Ostatnim etapem badań doświadczalnych były niszczące testy prowadzone na swobodnie podpartych belkach zespolonych o rozpiętości 2,7 m poddanych czteropunktowemu zginaniu. Belki wykonano na

bazie bisymetrycznego dwuteownika aluminiowego o wysokości 140 mm i szerokości 90 mm. Profil zespolono za pomocą demontowalnych łączników sworzniowo-śrubowych z płytą betonową o szerokości 370 mm i grubości 125 mm. Płytę wykonano z wykorzystaniem szalunku w postaci stalowej blachy profilowanej o wysokości fałdy 55 mm i rozstawie 235 mm. Zastosowano blachę gładką o grubości 0,7 mm. Przebadano cztery belki. Dalszy program badań zakładał wykorzystanie technik numerycznych. Zastosowano metodę elementów skończonych a jako narzędzie wybrano system ABAQUS, który jest programem ogólnego przeznaczenia o modularnej budowie. Do analiz wykorzystywano moduł ABAQUS/CAE w zakresie modelowania oraz moduł ABAQUS/Standard pozwalający na przeprowadzenie analiz statycznych z uwzględnieniem nieliniowości materiałowej, brzegowej oraz geometrycznej. Szukając optymalnej techniki modelowania Doktorant opracował 16 modeli dwuciętej próbki z łącznikami demontowalnymi oraz 10 modeli belki zespolonej.

Rezultaty oraz dyskusja przeprowadzonych badań doświadczalnych oraz eksperymentów numerycznych przedstawione zostały w 44 stronicowym rozdziale 5. Wyniki badań materiałowych poddane zostały obróbce statystycznej. Dalej zaprezentowano wyniki badań doświadczalnych przeprowadzonych na dwuciętych próbkach z demontowalnymi łącznikami sworzniowo-śrubowymi oraz na belkach zespolonych. Rezultaty przedstawiano w formie graficznej w postaci wykresów pokazujących zmienność ugięcia lub poślizgu na styku aluminium-beton w zależności od przyłożonego obciążenia. Dalszą część rozdziału Doktorant poświęcił na zaprezentowanie wyników symulacji numerycznych. Jak wykazał, kluczowym do zapewnienia wysokiej zgodności wyników analiz numerycznych i badań doświadczalnych okazało się właściwe określenie charakterystyki sztywnościowej sprężystych elementów modelujących demontowalne łączniki sworzniowo-śrubowe.

Ostatnie dwa dwustronicowe rozdziały 6 i 7 przedstawiają podsumowanie przeprowadzonych analiz oraz plan dalszych badań. Wykazano główne zalety zastosowanych łączników sworzniowo-śrubowych oraz omówiono wpływ ich sztywności na właściwości belek zespolonych. Plan dalszych badań Doktoranta zakłada przeprowadzenie kolejnych badań doświadczalnych koncentrujących się na opracowaniu sposobu zwiększenia sztywności zespolenia w zespolonych konstrukcjach aluminiowo-betonowych. Oprócz weryfikacji doświadczalnej planowane są również kolejne eksperymenty numeryczne, które docelowo mogą umożliwić opracowanie wytycznych do projektowania aluminiowo-betonowych konstrukcji zespolonych z niepełnym zespoleniem podatnym.

Rozprawę uzupełniono o dwa załączniki oznaczone jako A i B zawierające odpowiednio obliczenia charakterystycznej nośności połączeń wg metody składnikowej oraz uzupełniające wyniki badań materiałowych.

3. Ocena rozprawy

3.1. Ocena doboru tematu i naukowej wartości rozprawy

Wymagania stawiane projektowanym współcześnie konstrukcjom budowlanym są bardzo szerokie. Oprócz odpowiedniej wytrzymałości muszą cechować się również odpowiednią sztywnością, odpornością ogniową, izolacyjnością termiczną, trwałością oraz szeregiem innych pożądaných właściwości. Zrównoważone budownictwo mające ograniczyć negatywny wpływ budynku na środowisko naturalne wymaga, aby projektować i wznosić obiekty, które cechowały się będą wysoką trwałością w całym okresie eksploatacji, nie będą doprowadzały do dewastacji środowiska naturalnego a jednocześnie wykonane będą z materiałów oraz przy użyciu technologii ograniczających w jak największym stopniu zużycie zasobów naturalnych. W związku z powyższym tematykę rozprawy podjętą przez Doktoranta tj. analizę nośności i sztywności zespolonych belek aluminiowo-betonowych wykonywanych z zastosowaniem łączników demontowalnych uważam za trafną oraz istotną zarówno z naukowego jak i aplikacyjnego punktu widzenia.

Na uwagę zasługuje fakt opracowania i opatentowania demontowalnego łącznika pozwalającego na skuteczne i trwałe połączenie dwóch wspomnianych materiałów. Prototypy łącznika został wykonany poprzez odpowiednią modyfikację komercyjnie dostępnych stalowych łączników sworzniowych z łbem. Moim zdaniem Dysertacja stanowi cenne rozszerzenie i uzupełnienie stanu wiedzy w dziedzinie nauk technicznych w dyscyplinie inżynieria lądowa i transport.

Jako główny cel pracy Doktorant przyjął rozpoznanie zachowania się aluminiowo-betonowych belek zespolonych pod wpływem obciążeń krótkotrwałych. Analizie poddał belki współpracujące z ortotropowymi płytami betonowymi wykonanymi z zastosowaniem szalunku traconego w postaci gładkich stalowych blach profilowanych. W dysertacji postawione zostały dwie tezy. Pierwsza dotyczy możliwości zastosowania demontowalnych łączników ścinanych do łączenia aluminiowych dwuteowników z betonowymi płytami. Druga dotyczy możliwości modelowania ww. łączników w konwencji MES za pomocą bezwymiarowych elementów sprężystych. Zakres przyjętych badań doświadczalnych i analiz numerycznych uważam za wystarczający do osiągnięcia założonego celu pracy jak również do udowodnienia

postawionych tez. Przyjęta metodyka pracy zakładająca przeprowadzenie serii badań doświadczalnych a następnie prowadzenie dalszych analiz z wykorzystaniem MES jest właściwa i dostosowana do charakteru rozprawy.

Wyniki przeprowadzonych badań doświadczalnych nie budzą wątpliwości. Zaprezentowano je w postaci graficznej, tabelarycznej i uzupełniono dokumentacją fotograficzną. Sposób prezentacji rezultatów świadczy o dojrzałości i sumienności Doktoranta.

Analiza wykresów pokazujących zależność poślizgu na styku dwuteownika i płyty w zależności od przyłożonego obciążenia wykazała, że połączenie nie zachowuje się w sposób ciągły. Jest to cenny wniosek. Utrata nośności połączenia następowała w wyniku zniszczenia płyty betonowej wykonanej z wykorzystaniem szalunku w postaci blach profilowanych. Zgromadzone dane pozwoliły na wyznaczenie siecznych modułów podatności (poślizgu) złącza przy obciążeniu równym 40, 60 i 80 % nośności. Wykorzystując zgromadzone dane oraz wyniki analiz teoretycznych Doktorant opracował kilka modeli połączenia w postaci zależności siła-poślizg, które dalej wykorzystywał podczas analiz numerycznych.

W trakcie prac modelowych przygotowane zostały numeryczne modele ściskanego walca betonowego, dwuciętej próbki z badanymi łącznikami demontowanymi oraz aluminiowo-betonowej belki zespolonej. W przypadku modelu próbki dwuciętej oraz belki zespolonej wykorzystywano symetrię układu co pozwoliło ograniczyć wielkość modelu numerycznego. Do modelowania betonu stosowane były głównie ośmiowęzłowe, sześciennie elementy bryłowe z liniową funkcją kształtu i zredukowanym całkowaniem oznaczone w systemie symbolem C3D8R. Rozważano również zastosowanie innych typów elementów objętościowych. Wyboru optymalnego rodzaju elementu skończonego oraz gęstości dyskretyzacji modelu dokonywano na podstawie stosownych analiz. W większości modeli stosowany był model betonu oparty na sprzężonej teorii plastyczności i uszkodzenia materiału oznaczony w systemie ABAQUS jako CDP (*ang. concrete damaged plasticity*). Modelując profilowaną blachę szalunku oraz dwuteownik aluminiowy wykorzystano czterowęzłowe elementy powłokowe S4R tj. z liniową funkcją kształtu i zredukowanym całkowaniem. Siatki zbrojeniowe modelowano jednowymiarowymi, dwuwęzłowymi elementami kratowymi T3D2. Do modelowania łączników sworzniowych wykorzystano 10-węzłowe elementy objętościowe C3D10 o nieliniowych funkcjach kształtu. Model połączenia pomiędzy łącznikami sworzniowymi i pasem dwuteownika aluminiowego wykonano z wykorzystaniem bezmasowych, bezwymiarowych sprężyn o nieliniowej charakterystyce sztywnościowej. Na styku modeli płyty betonowej z poszyciem w postaci blachy oraz aluminiowego dwuteownika uwzględniano

możliwość wystąpienia kontaktu wraz z tarciem. Opracowanie tak złożonych modeli obliczeniowych wymagało od Doktoranta opanowania szeregu umiejętności.

Znaczny nakład pracy włożony w opracowanie modeli numerycznych zaowocował uzyskaniem rezultatów wysoce zgodnych z wynikami przeprowadzonych badań doświadczalnych. Było to możliwe po wnikliwej analizie i poszukiwaniu optymalnego sposobu modelowania zarówno dwuciętej próbki z łącznikami demontowanymi jak również belki zespolonej. Szczególny nacisk położony został na odpowiednie zamodelowanie połączenia na styku aluminium-beton. Model belki oznaczony jako FEA 5 zapewnił wysoką zgodność wyników doświadczalnych i numerycznych w zakresie pracy sprężystej jak i plastycznej.

Należy podkreślić, że oprócz badań doświadczalnych i analiz MES, Doktorant przeprowadził również analityczną ocenę sztywności i nośności łączników demontowalnych. Sztywność łącznika zaproponował określać na podstawie uproszczonego liniowego modelu stalowej belki wspornikowej obciążonej równomiernie w sposób ciągły. Zwrócił uwagę na fakt, że zaproponowany model jest niedoskonały i wymaga rozwinięcia na co zwracali uwagę również inni cytowani przez niego badacze. Przewidywaną nośność łącznika określał wykorzystując zmodyfikowane zależności zaczerpnięte z zestawu norm europejskich.

Ze względu na duże podobieństwo do stalowo-betonowych belek zespolonych, Doktorant przeprowadził dyskusję na temat możliwości zastosowania znanych z norm oraz literatury zależności pozwalających na określenie sztywności i nośności ww. w odniesieniu do analizowanych belek aluminiowo-betonowych. W analizach uwzględniał możliwość wystąpienia niepełnego zespolenia podatnego. Obliczenia prowadził zarówno w zakresie sprężystym jak i plastycznym. Określoną podczas badań nośność i sztywność belek porównywał z wynikami analiz teoretycznych. Uzyskał dobrą zgodność wyników.

Analiza przedstawionych rezultatów pozwala jednoznacznie stwierdzić, że cel pracy został osiągnięty. Doktorantowi udało się dość precyzyjnie określić zachowanie aluminiowo-betonowych belek zespolonych pod wpływem obciążeń krótkotrwałych oraz zidentyfikować mechanizmy doprowadzające do utraty nośności konstrukcji. Dwie postawione tezy zostały udowodnione. Demontowalny łącznik sworzniowo-śrubowy jest zdolny do trwałego połączenia aluminiowego dwuteownika z betonową płytą. Przyjętą technikę modelowania połączenia z zastosowaniem bezwymiarowych elementów sprężystych należy uznać za skuteczną. Może ona zostać dalej wykorzystana do rozszerzenia programu badań.

Wartość naukową opiniowanej rozprawy doktorskiej mgra inż. Łukasza Polusa oceniam zdecydowanie pozytywnie. Podsumowanie pracy jest zgodne z rezultatami przeprowadzonych badań i analiz. Wyznaczone kierunki dalszych prac i rozwoju pozwalają stwierdzić, że tematyka

poruszana w rozprawie może być z powodzeniem kontynuowana zarówno na drodze eksperymentu fizycznego jak i numerycznego. Założone cele zostały osiągnięte a tezy pracy skutecznie udowodnione. Pewne uwagi krytyczne i dyskusyjne, które nasunęły się podczas lektury przedstawiam w kolejnym punkcie recenzji.

3.2. Pytania i uwagi krytyczne

Jednym z ważniejszych elementów pracy była weryfikacja nośności i sztywności demontowalnych łączników sworzniowo-śrubowych. Opis procesu wykonania i montażu prototypowych łączników jest nieprecyzyjny. Brakuje informacji do jakiej średnicy rozwiercono nakrętki nakładane na sworznię? Czy pomiędzy sworzniem a nakrętką występował luz? Jego obecność może mieć wpływ na sztywność łącznika. Brakuje również informacji na temat stosowanego momentu dokręcenia łączników? Czy stopień dokręcenia był kontrolowany i taki sam dla wszystkich stosowanych łączników?

Wyniki badań przeprowadzonych na dwuciętych próbkach ścinanych zaprezentowane na rys. od 5.3 do 5.7 pozwoliły na określenie sztywności łączników (inna nazwa stosowana w pracy to sieczny moduł podatności) przy obciążeniu równym 40, 60 i 80% nośności połączenia. Wyniki zestawiono w postaci tabelarycznej – patrz tab. 5.4. Z tabeli wynika, że wraz ze wzrostem poziomu obciążenia rośnie również sztywność łączników co jest rezultatem zaskakującym. Zdaniem Recenzenta może to być efekt początkowego spadku sztywności łączników spowodowanego wybieraniem luzów w połączeniu sworznia z aluminiowym dwuteownikiem co jest wyraźnie widoczne na rys 5.7 przy obciążeniu wynoszącym około 40 kN. Należy zakładać, że kontrolowany moment dokręcenia łączników zapewniający odpowiednio duże siły tarcia byłby w stanie zniwelować to zjawisko.

Zaproponowany na str. 32 (rysunek 3.2) belkowy, wspornikowy model łącznika służący określeniu jego sztywności wydaje się być zbyt uproszczony. Uwzględnia on wyłącznie sztywność samego łącznika pomijając udział betonu oraz wpływ sztywności połączenia z pasem dwuteownika aluminiowego. Czy ze względu na obecność łba sworznia model belkowy nie powinien zostać uzupełniony o blokadę obrotu swobodnego końca wspornika? Biorąc pod uwagę fakt, że łącznik współpracuje z płytą betonową o zmiennej grubości założenie równomiernego rozkładu obciążenia na łączniku wydaje się niezasadne.

Teoretyczna sztywność łącznika sworzniowego o stałej średnicy 16 mm i wysokości 99 mm (patrz rys. 4.7) wyznaczona przez Doktoranta na podstawie zależności (3.5) wynosi 5.5 kN/mm (patrz str. 93). W rzeczywistości średnica łączników jest zmienna, powiększona w rejonie łba oraz połączenia z dwuteownikiem. Doktorant podjął próbę uwzględnienia

wpływu zwiększonej średnicy łącznika na wzrost sztywności łącznika. W tym celu określił średnią średnicę łącznika na poziomie 19.7 mm i dla takiej średnicy wyznaczył nową sztywność równą 12,5 kN/mm. Niestety w trakcie analizy nie wziął pod uwagę położenia obszarów o zwiększonej średnicy. O ile zwiększenie średnicy u podstawy może mieć znaczny wpływ na sztywność o tyle zwiększona średnia łba sworznia (swobodny koniec wspornika) nie będzie miała wpływu na sztywność, przynajmniej podczas analizy na podstawie tak uproszczonego modelu.

Wykonując elementy badawcze zastosowano szalunek w postaci gładkiej blachy profilowanej o wysokości 55 mm i grubości 0,7 mm. Brak przetłoczeń na powierzchni blachy powoduje, że możliwości jej współpracy z betonem są mocno ograniczone. Wydaje się, że lepszym rozwiązaniem byłoby zastosowanie profilowanych blach z przetłoczeniami służących do wykonywania stalowo-betonowych płyt zespolonych. Oczywiście obecność blach oraz ich rodzaj nie ma większego wpływu na nośność oraz sztywność analizowanej belki. Tu pojawia się kolejne pytanie o sposób modelowania blach oraz ich połączenia z betonem. W modelu MES blachy połączone są z betonem w sposób uniemożliwiający odseparowanie obserwowane w trakcie badań doświadczalnych. Jaki miało to wpływ na rezultaty analiz numerycznych? Inną kwestią jest grubość powłoki w modelu MES. W miejscu, gdzie dwa arkusze blachy nakładają się na siebie przyjęto podwojoną grubość blachy, czyli 1,4 mm zakładając tym samym pełną współpracę pomiędzy arkuszami. Założenie to wydaje się nieuzasadnione.

Inne pytanie odnośnie do techniki modelowania dotyczy modelu łączników sworzniowych. Czy zastosowanie elementów objętościowych było konieczne? Czy nie można było wykorzystać jednowymiarowych elementów belkowych? Połączenie modelu łącznika sworzniowego (elementy objętościowe) z modelem dwuteownika aluminiowego (elementy powłokowe) wykonano z wykorzystaniem bezwymiarowych elementów sprężystych o nieliniowej charakterystyce. Elementy te określały sztywność translacyjną połączenia na kierunku równoległym do osi belki. W pracy zabrakło informacji na temat sztywności połączenia na pozostałych pięciu kierunkach (dwie sztywności translacje i trzy rotacyjne).

W modelu MES, na styku pomiędzy aluminiowym pasem górnym dwuteownika a dolną krawędzią płyty betonowej pokrytą arkuszem blachy stalowej przyjęto możliwość wystąpienia tzw. twardego kontaktu. Założono obecność sił tarcia ze współczynnikiem równym 0,3 powołując się na pracę innych badaczy, która dotyczyła styku stalowo-betonowego. Tymczasem w analizowanej belce mamy do czynienia ze stykiem aluminium i stali. W pracy zabrakło również informacji na temat odległości jaką przyjęto pomiędzy płaszczyzną

definiującą dolną krawędź płyty betonowej a płaszczyzną definiującą środkową płaszczyznę pasa górnego dwuteownika aluminiowego.

Szerokość płyty żelbetowej współpracującej z dwuteownikiem jest stosunkowo niewielka w porównaniu do rozpiętości belki i znacznie mniejsza niż maksymalna szerokość jaką wg Eurokodu 4 można włączyć do współpracy z dwuteownikiem. Czy jest to efekt ograniczeń logistycznych wynikających z maksymalnego rozmiaru elementu mieszczącego się na stanowisku badawczym? Z jakich powodów do wykonania belek zespolonych zastosowano beton innej klasy niż do wykonania dwuciętych próbek służących określeniu nośności i sztywności łączników?

3.3. Uwagi szczegółowe, w tym redakcyjne

Zdaniem Recenzenta praca napisana jest poprawną, zrozumiałą angielszczyzną. Formatowanie tekstu jest staranne, widać dbałość o szczegóły.

W rozprawie zamieszczono wiele rysunków, łącznie ponad 90 szt. Większość z nich nie budzi zastrzeżeń, są wartościowe i bardzo szczegółowe. Docenić należy fakt wypracowania jednolitego standardu wykonywania rysunków obejmującego wielkość i krój czcionki, grubości linii a w przypadku wykresów sposobu opisu osi czy legendy. W przypadku wykresów z dużą liczbą krzywych np. 5.27 do 5.30 stosowano ich rozróżnienie wyłącznie za pomocą kolorów. W skrajnych przypadkach było to siedem ciągłych linii nakładających się na siebie. Czytelność tych wykresów można było poprawić. Podpis pod rys. 3.3 jest mało precyzyjny.

Podobnie jak w przypadku rysunków, również w przypadku tabel wypracowany został jeden spójny graficznie standard przedstawiania danych. Bardzo ułatwia to analizę treści opracowania. Dokładność prezentacji danych jest miejscami trochę za duża – patrz np. Tab. 4.2 lub 4.3.

Spis bibliografii jest bardzo obszerny. Liczy łącznie ponad 300 pozycji. Niestety nie jest on numerowany i nie został podzielony na oddzielne sekcje wyróżniające np. strony internetowe czy opracowania normowe. W pewnym stopniu utrudnia to jego analizę.

4. Podsumowanie i wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa doktorska Pana mgr inż. Łukasza Polusa pt. „*An Analysis of Load Bearing Capacity and Stiffness of Aluminium-Concrete Composite Elements Subjected to Bending*” stanowi moim zdaniem, wartościowe osiągnięcie naukowe w dziedzinie nauk technicznych w dyscyplinie inżynieria lądowa i transport. Należy podkreślić istotne znaczenie praktyczne rozprawy. Pozytywne rezultaty przeprowadzonych badań doświadczalnych oraz numerycznych mają znaczący wpływ na rozwój innowacyjnych konstrukcji zespolonych możliwych do zastosowania w budownictwie. Autor wykazał się sumiennością, pracowitością i precyzją w planowaniu oraz realizacji badań. Wykazał się umiejętnością łączenia praktycznej wiedzy inżynierskiej z wiedzą teoretyczną wymaganą podczas prowadzenia zaawansowanych analiz numerycznych. Ponadto Doktorant wykazał się bardzo dobrą znajomością aktualnego stanu wiedzy w zakresie podjętej tematyki badawczej. Powyższe świadczy o odpowiednim przygotowaniu do samodzielnego prowadzenia dalszych prac naukowo-badawczych.

Uwagi krytyczne przedstawione w recenzji nie obniżają wartości merytorycznej rozprawy, którą oceniam bardzo wysoko. Rozprawę uważam za interesującą zarówno z naukowego jak i aplikacyjnego punktu widzenia. **Stwierdzam, że główny cel rozprawy został osiągnięty a postawione tezy udowodnione.**

Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, że **recenzowana rozprawa doktorska spełnia wszystkie wymagania** przewidziane przez Ustawę o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14.03.2003 r. oraz Rozporządzenie Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 19 stycznia 2018 r. w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodzie doktorskim, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora.

Wnoszę do Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa i Transport Politechniki Poznańskiej o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie jej do publicznej obrony.

