

Gdańsk, dn. 2016-06-12

Dr hab. inż. Piotr Korzeniowski
Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska
Politechnika Gdańska

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Elżbiety Habiera –Waśniewskiej
pt. „Redystrybucja sił wewnętrznych w podwójnie zespolonych belkach dwuprzęsłowych”,
napisanej pod kierunkiem Pana prof. dr hab. inż. Artema Czkwianianca

opracowana stosownie do uchwały Rady Wydziału Budownictwa, Architektury i Inżynierii
Środowiska Politechniki Łódzkiej z dnia 24.03.2016 oraz pisma Pana Dziekana prof. dra
hab. inż. Dariusza Gawina z dnia 12.04.2016r.

1. Tematyka rozprawy

Przedłożona mi do recenzji rozprawa Pani mgr inż. Elżbiety Habiera - Waśniewskiej pt. „Redystrybucja sił wewnętrznych w podwójnie zespolonych belkach dwuprzęsłowych”, napisana pod kierunkiem Pana prof. dr hab. inż. Artema Czkwianianca dotyczy, jak pisze Autorka, problemu redystrybucji sił wewnętrznych w podwójnie zespolonych belkach dwuprzęsłowych. Tematyka badawcza podjęta przez Autorkę stanowi, w zakresie badań eksperymentalnych nad konstrukcjami zespolonymi, kontynuację prac realizowanych przez zespół łódzki kierowany przez prof. A. Czkwianianca, natomiast w zakresie rozważań teoretycznych wykorzystuje wspólne prace prof. Marii Kamińskiej i prof. Artema Czkwianianca i opracowaną przez nich metodę nieliniowej analizy żelbetowych elementów prętowych.

We wstępie Autorka pisze, że o ile obecne normy formułują metody obliczeniowe oraz precyzują zalecenia wykonawcze w odniesieniu do elementów zespolonych to w naszym kraju w stosunku do pewnej grupy elementów ich projektowanie nie jest uregulowane żadnymi przepisami normowymi. Grupę taką stanowią belki zbrojone kształtownikami całkowicie obetonowanymi. Przedstawiona wyżej uwaga mogłaby wskazywać, że Autorka w swej pracy zajmie się właśnie problemem projektowania elementów tej grupy zmierzając tym samym do wypełnienia luki w przepisach normowych, poszła ona jednak dalej. Mając na względzie, że w literaturze dominują prace dotyczące jednoprzęsłowych elementów statycznie wyznaczalnych, brakuje natomiast informacji na temat zachowania się pod wzrastającym obciążeniem zespolonych elementów wieloprzęsłowych statycznie niewyznaczalnych postanowiła zająć się głównie właśnie tym

problemem. Szczególnie zainteresował ją problem redystrybucji sił wewnętrznych w strefie podpór środkowych. W swoich badaniach skoncentrowała się na zespolonych belkach dwuprzęsłowych, statycznie niewyznaczalnych, składających się z dwóch jednoprzęsłowych zespolonych belek uciągonych na podporze środkowej po ich ułożeniu. Uciąglenie to polegało na zastosowaniu dodatkowego zbrojenia w postaci stalowych prętów przenoszących ujemny moment podporowy w płaszczyźnie styku prefabrykatów, w których przerwane było zbrojenie sztywne.

2. Treść rozprawy

Recenzowana praca liczy 112 stron tekstu podstawowego, bibliografii zawierającej 55 pozycji literaturowych oraz 6 norm, spisu rysunków i tablic, wykazu oznaczeń oraz załącznika liczącego 61 stron, zawierającego szczegółowe wyniki badań właściwości mechanicznych zastosowanych materiałów oraz szczegółowe wyniki pomiarów rejestrowanych podczas prowadzonych badań elementów zespolonych.

Praca ma charakter eksperymentalny i teoretyczny.

Treść merytoryczną pracy zawarto w siedmiu rozdziałach.

W rozdziale pierwszym (*Wprowadzenie*) Autorka naszkicowała istotę zespolonych elementów stalowo – betonowych, złożonych ze stalowych walcowanych, spawanych lub giętych na zimno kształtowników połączonych w szkielet i następnie odpowiednio połączonych z betonem zbrojonym lub sprężonym w jeden ustrój. Podkreśliła zalety tych ustrojów i omówiła problemy związane z ich projektowaniem, szczególnie w przypadku belek zbrojonych kształtownikami całkowicie obetonowanymi, z powodu braku odpowiednich przepisów normowych. W rozdziale tym przedstawiono też cel i zakres pracy a także sformułowano dwie przestawione wyżej tezy pracy. Ocena tego rozdziału jest jednoznacznie pozytywna. Autorka jasno precyzuje tezy pracy i cel pracy co świadczy o jej dojrzałości.

Rozdział drugi (*Zarys historyczny konstrukcji zespolonych*) przedstawia krótką historię konstrukcji zespolonych, których początek Autorka wskazuje na rok 1893, w którym austriacki inżynier Jozef Melan uzyskał patent na zbrojenie stropów i łukowych konstrukcji mostowych za pomocą stalowych kształtowników. Podkreśliła wkład polskich inżynierów w rozwój tych konstrukcji, których prekursorami byli St. Bryła, A. Chmielowiec i C. Lubieński. Wspomniała także o ciekawym rozwiązaniu zespołu W. Zalewskiego, Z. Zielińskiego, S. Kusia i A. Włodarza jakim były kablobetonowe dźwigary oszczędnościowe. Omówiła niezwykle interesujące rozwiązanie inżynierów belgijskich pod nazwą Preflex, w którym zastosowano oryginalną metodę sprężenia dolnego pasa betonowego zespolonego z kształtownikiem stalowym. W

dalszej części rozdziału przedstawiła modyfikacje i udoskonalenia systemu Preflex, m.in. system Flexstress. Podkreśliła, że stosowane w praktyce elementy zespolone wzorowane na technologiach Preflex oraz Flexstress stały się inspiracją dla zespołu łódzkiego i autorki do podjęcia badań eksperymentalnych elementów zespolonych. Oceniając ten rozdział należy podkreślić umiejętność doktorantki w zwięzłym logicznym i interesującym sposobie przedstawienia historii konstrukcji zespolonych z podkreśleniem tej grupy, która stanie się przedmiotem jej badań.

W obszernym, liczącym 47 stron rozdziale trzecim (*Badania eksperymentalne elementów jednoprzęsłowych*) Autorka bardzo szczegółowo omówiła najważniejsze badania eksperymentalne zespolonych elementów jednoprzęsłowych prowadzone w Polsce i Belgii. Na początku przedstawiła badania prowadzone w latach 50 dwudziestego wieku w Instytucie Techniki Budowlanej, na podstawie których zostały opracowane przez Danileckiego i Mayzla wytyczne projektowania elementów żelbetowych ze zbrojeniem sztywnym. Następnie przedstawiła badania prowadzone w latach 1988 – 1990, w ramach Resortowego Programu Badawczo – Rozwojowego przez zespoły z Centralnego Ośrodka Badawczo – Projektowego Konstrukcji Metalowych „Mostostal”, Politechniki Częstochowskiej i Politechniki Białostockiej. Na podstawie tych badań zostały zweryfikowane doświadczalnie rozwiązania teoretyczne zaproponowane przez W. Kucharczuka z Politechniki Częstochowskiej. Badania te potwierdziły zasadność stosowania konstrukcji zespolonych, potwierdziły także wnioski wyciągnięte na podstawie wcześniejszych badań odnośnie celowości obetonowywania kształtowników stalowych, dzięki czemu zwiększa się sztywność i nośność elementu. Badania te jednocześnie wykazały, że w celu zapewnienia odpowiedniej współpracy między betonem a wkładem stalowym konieczne jest stosowanie dodatkowego zbrojenia w postaci prętów podłużnych i strzemion. W dalszej części rozdziału Doktorantka przedstawiła prowadzone na początku lat dziewięćdziesiątych XX wieku badania teoretyczne i doświadczalne badaczy belgijskich, Staquet, Espion, Rigeta i Detanda. Zaprojektowali oni prefabrykowany pomost sprężony w kształcie litery U, zbrojony wygiętymi dźwigarami stalowymi o rozpiętości 28m, Proces produkcji tego dźwigara wykorzystywał technologię Flexstress. W pierwszej kolejności przeprowadzone zostały przeprowadzone rozważania teoretyczne, w których analizowano różne typy pomostów w kształcie litery U, na podstawie których wybrano jeden, na którym przeprowadzono badania eksperymentalne. Belgijscy badacze skupili się głównie na zachowaniu się wybranego pomostu zespolonego pod działaniem obciążeń długotrwałych. Rozpiętość badanego pomostu wynosiła 26m. Przeprowadzone badania pozwoliły im zweryfikować metody analityczne uwzględniające skurcz i pełzanie oraz wyciągnąć wnioski odnośnie ich modyfikacji.

Obszerną część rozdziału 3 stanowi omówienie badań Czkwianianca, Bodzaka i Pawlicy, przeprowadzonych w Katedrze Budownictwa Betonowego Politechniki Łódzkiej. Inspiracją tych badań były rozwiązania belgijskie, w tym technologia Preflex i Flexstress. W elementach badanych przez zespół łódzki zrezygnowano z wstępnego wygięcia kształtowników stalowych ograniczając się do sprężenia betonu za pomocą cięgien. Zamiast dźwigara pełnego wprowadzono profil ażurowy. Zespół prof. Czkwianianca przeanalizował ponadto różne warianty usytuowania szkieletu stalowego względem betonu a także różny poziom cięgien sprężających względem dolnego kształtownika stalowego. Badania wykazały ekonomiczność zastąpienia kształtownika pełnego szkieletem ażurowym składającym się z pasa górnego i dolnego powiązanych wzajemnie za pomocą pionowych płaskowników stalowych pod warunkiem dobrego zakotwienia kształtownika stanowiącego pas dolny szkieletu i usytuowania go poniżej cięgien sprężających. W dalszych badaniach (seria II) zespół wprowadził pewne modyfikacje wyciągając wnioski z wyników uzyskanych w I serii. Ponieważ w badaniach tych belki niszczyły się głównie na ścinanie (co było zgodne z przyjętymi przez zespół założeniami), zaobserwowano także rozwarstwienie betonu prefabrykatu i nadbetonu w strefach podpór, tym razem płaskowniki łączące pasy dolny i górny dobrano tak aby zapewnić pełną nośność na zginanie, dodano także zbrojenie pionowe w postaci nagwintowanych prętów żebrowanych w strefach podparcia. Miało ono zapewnić pełne zespolenie betonu i nadbetonu. Poczynione modyfikacje przyniosły nie do końca oczekiwany efekt. Belki nadal niszczyły się przez przekroczenie naprężeń rozciągających w strefach podporowych, chociaż siły niszczące były tym razem bliskie tym wynikającym z nośności na zginanie. Powodem zniszczenia była niedostateczna nośność spoin czołowych łączących płaskowniki z pasami szkieletu. Uznano, że należy zmienić charakter połączenia przez obustronne nałożenie pionowych płaskowników na środki pasów szkieletu i przymocowanie ich za pomocą spoin pachwinowych. Badania Czkwianianca, Bodzaka i Pawlicy zostały zwieńczone zgłoszeniem patentowym. Ogłoszenie o zgłoszeniu ich wynalazku ukazało się w Biuletynie Urzędu Patentowego w 2014r.

W rozdziale 4 (*O redystrybucji sił w belkach wieloprzęsłowych*) Doktorantka przypominała ogólnie znaną specyfikę tworzenia się przegubu plastycznego, dalej opisuje sam proces redystrybucji, warianty redystrybucji oraz metody analizy konstrukcji, w szczególności analizie liniowo – sprężystej oraz analizie nieliniowej. Dalej omawia dopuszczalne kąty obrotu w przegubie plastycznym w ujęciach normowych. Rozdział kończy omówieniem lokalnej postaci redystrybucji sił wypadkowych. Autorka zauważa, że w sytuacji gdy w konstrukcjach żelbetowych w miejsce przegubu punktowego wprowadza się przegub obejmujący pewien odcinek można uwzględniać redystrybucję sił wewnętrznych nawet wtedy gdy zbrojenie

wykazuje lokalną nieciągłość i w miejscu tej nieciągłości jego rolę pełni dodatkowe zbrojenie pod warunkiem, że jest dobrze zakotwione. Temu zagadnieniu Autorka postanowiła poświęcić swoje badania zakładając, że podobne zjawisko zachodzi w dwuprzęsłowych elementach zespolonych utworzonych przez uciąglenie na podporze wewnętrznej za pomocą dodatkowego zbrojenia jednoprzęsłowych elementów zespolonych.

W rozdziale 5 (*Program badań własnych*) Autorka przedstawiła schemat statyczny badanych elementów, przyjęte w badaniach parametry zmienne, charakterystykę i sposób wykonania elementów badawczych, wyniki badań właściwości mechanicznej materiałów użytych do produkcji elementów, opisała przygotowanie elementów do badań, stanowisko badawcze oraz uzyskane wyniki badań poszczególnych elementów. Szersze informacje o programie badań i uzyskanych wynikach zostaną przedstawione w punkcie 3.3 recenzji.

Rozdział 6 (*Analiza wyników*) poświęcony jest interpretacji uzyskanych wyników. Dokonano tu także analizy porównawczej uzyskanych wyników z obliczeniami uzyskanymi za pomocą autorskiego modelu obliczeniowego wzorowanego na modelu Czkwianianca i Kamińskiej. Szerzej recenzent odniesie się do tego rozdziału w punkcie 3.4 niniejszej recenzji.

Rozdział 7 (*Podsumowanie i wnioski*) przedstawia wnioski Autorki wyprowadzone na podstawie wyników badań i ich analizy.

Obszerny załącznik zawiera prawdopodobnie wszystkie informacje uzyskane podczas badań. Przedstawione są one w sposób bardzo czytelny w postaci tabel, wykresów i rysunków.

Oceniając zawartość merytoryczną pracy wydaje się, że Autorka zbyt szczegółowo omówiła program badań poszczególnych badaczy, uzyskane wyniki i ich interpretację a sam rozdział jest zbyt obszerny (stanowi ponad 40% całej treści pracy). Informacje na temat redystrybucji sił wewnętrznych i metod analizy są na ogół znane i autorka mogła się tu ograniczyć do redystrybucji w warunkach lokalnej nieciągłości zbrojenia. Uwagi recenzenta mają tu oczywiście charakter subiektywny i mogą być dyskusyjne, skądinąd bowiem recenzent z lektury tego rozdziału dużo się dowiedział. Bardzo szczegółowe przedstawienie badań ośrodka łódzkiego znajduje z kolei swoje wytłumaczenie w tym, że badania Autorki są niejako rozwinięciem opisywanych badań w tym rozdziale badań, kierowanych przez prof. Czkwianianca.

3. Ocena rozprawy

3.1. Temat pracy

Tematem pracy doktorantki jest problem wpływu lokalnej nieciągłości zbrojenia w przekroju podporowym dwuprzęsłowych belek zespolonych na redystrybucję sił wewnętrznych. Temat podjęty w rozprawie należy uznać za ambitny i starannie przemyślany. Należy także z uznaniem

podkreślić aktualność podjętej tematyki i wyrazić zadowolenie, że dzięki badaniom eksperymentalnym Autorki, z ich solidnością typową dla „szkoły łódzkiej”, do problematyki elementów zespolonych wnoszone są nowe wartości poznawcze wzbogacające wiedzę w zakresie statycznie niewyznaczalnych belek zespolonych.

3.2. Tezy pracy

Autorka pracy postawiła tezę, że mimo lokalnej nieciągłości zbrojenia sztywnego możliwa jest, dzięki zastosowaniu zbrojenia podporowego w postaci prętów stalowych nad podporą środkową, redystrybucja sił wewnętrznych nad podporą i w przęsłach tak uciąglonej belki zespolonej.

Drugą tezę postawioną przez Autorkę jest to, że mimo rozwarstwienia styku między betonami różnych faz, przy prawidłowo zaprojektowanym i zbrojonym połączeniu tych betonów możliwa jest redystrybucja sił w przekroju podporowym i myślę w przęsłowym, chociaż autorka tego wyraźnie nie sprecyzowała. Obie tezy są interesujące i mające, w przypadku ich potwierdzenia, dużą wartość poznawczą. Są przy tym jasno i jednoznacznie sformułowane.

3.3. Program badań i warsztat badawczy

Doktorantka zbadała 6 belek dwuprzęsłowych utworzonych przez uciąglenie nad podporą środkową zespolonych belek jednoprzęsłowych. Wszystkie belki miały przekrój 0,29mx0,38m i długość 4,0m. Zbrojenie tych belek zrealizowano zgodnie z wytycznymi opracowanymi przez Czkwianianca, Bodzaka i Pawlicę. Górny pas szkieletu zbrojeniowego składał się z ½ HEB 120, zaś pas dolny stanowił teownik 60x60x7. Pas dolny i górny zostały połączone płaskownikami 6mmx25mm przymocowanymi obustronnie do środników za pomocą spoin pachwinowych (wykorzystano tu wnioski zespołu Czkwianianca odnośnie niepewnej nośności połączenia za pomocą spoiny czołowej) w rozstawie 164mm, równym na całej długości belki. Beton prefabrykatu był sprężony za pomocą 8 cięgien. Wszystkie elementy prefabrykowane wykonano z betonu o wytrzymałości kostkowej wynoszącej 50,5MPa w chwili sprężenia i 84,5MPa w chwili badania. Wytrzymałość kostkowa nadbetonu wahała się między 64,5MPa a 70MPa. Parametrami zmiennymi w badaniach były: stopień zbrojenia uciągającego nad podporą wynoszący 1,3%, 2,0% i 2,6%, wysokość części prefabrykowanej belki wynosząca 0,15m i 0,25m oraz liczba prętów pionowego zbrojenia gwintowanego w strefach podparcia. Belki w obu przęsłach obciążane były dwiema siłami, z których bliższe podpory skrajnej były położone w odległości 1,85m od podpory, zaś siły położone bliżej podpory środkowej były od niej oddalone o 1,75m. Obciążenie przykładano za pomocą czterech siłowników hydraulicznych w sposób narastający, z przerwami na wykonanie pomiarów tensometrami mechanicznymi oraz

obserwacje, rejestrację i pomiar szerokości rys. W czasie badań rejestrowano także za pomocą siłomierzy tensometrycznych wartości reakcji na podporach skrajnych. Wzajemne przemieszczenia betonów różnych faz rejestrowano za pomocą zamocowanych przed badaniem czujników indukcyjnych. Pomiary sił oraz przemieszczeń rejestrowano za pomocą uniwersalnego miernika pomiarowego umożliwiającego komputerową rejestrację wyników uzyskanych na określonym poziomie obciążenia. Wyniki pomiarów odkształceń i ugięć zostały przedstawione w formie tabel oraz wykresów i zestawione w załączniku.

Zarówno program badań jak i warsztat badawczy zasługują na wysoką ocenę. Program badań został starannie przemyślany. Autorka wykorzystała bogate doświadczenia zdobyte przez zespół prof. Czkwianianca także w zakresie konstrukcji zbrojenia ażurowego badanych przez nią belek zespolonych. Jeśli chodzi o warsztat badawczy jest on najwyższej klasy, typowy dla wiodącego w Polsce w zakresie badań eksperymentalnych konstrukcji z betonu ośrodka łódzkiego.

3.4. Poprawność interpretacji wyników badań oraz trafność wniosków

W rozdziale 5.7 swojej pracy Doktorantka precyzyjnie opisała zachowanie każdego elementu w miarę wzrostu obciążenia. Przedstawiła rozwój rys w poszczególnych fazach obciążenia. Opięta poparła fotografiami. W przejrzysty sposób przedstawiła wartości momentów rysujących oraz momentów zginających w przęśle i na podporze środkowej. W przypadku podpory środkowej dla poszczególnych belek przedstawiła ich nośność teoretyczną wyznaczoną na podstawie analizy liniowo – sprężystej dla belki dwuprzęsłowej. Z porównania momentów rysujących w przęśle i nad podporą środkową wynika, że te ostatnie były kilkakrotnie mniejsze. Porównując wartości eksperymentalne momentów zginających w chwili zniszczenia z nośnością teoretyczną można zauważyć, że w żadnej belce nie została osiągnięta nośność na zginanie. Doktorantka stwierdza, że wszystkie belki zniszczyły się przez ścinanie wskutek zerwania spoin pachwinowych. Okazało się, że podobnie jak we wcześniejszych badaniach zespołu Czkwianianca słabym ogniwem okazało się połączenie spawane mimo jego modyfikacji (zmiana połączenia na spoinę czołową na połączenie na spoinę pachwinową). Poza mechanizmem zniszczenia Doktorantkę frapował także problem redystrybucji momentów zginających na podporze i w przęśle. Doktorantka obrazowo przedstawiła w sposób pośredni redystrybucję momentów zginających na podporze i w przęśle dzięki inteligentnemu porównaniu pomierzonych reakcji podporowych na podporach skrajnych i środkowej z reakcjami sprężystymi. Na załączonych w pracy wykresach łatwo można zauważyć wzrost, w stosunku do reakcji sprężystych, pomierzonych eksperymentalnie reakcji na podporach skrajnych i ich spadek na podporze środkowej. Świadczy to o zmniejszaniu się momentu podporowego w

stosunku do momentu sprężystego i odpowiednim wzroście momentu przeszłego. Doktorantka zauważa ponadto, że redystrybucja następowała po pojawieniu się intensywnego zarysowania w obszarze podpory środkowej. Należało się tego spodziewać. Według obliczeń Doktorantki współczynnik redystrybucji momentów zginających na podporze środkowej wyniósł od 0,61 do 0,92. Jak zauważa Autorka, redystrybucja momentów zależała od stopnia zbrojenia uciągającego nad podporą środkową. Im mniejszy był stopień zbrojenia tym można było zaobserwować większy spadek momentu podporowego w stosunku do momentu obliczonego na podstawie analizy liniowo sprężystej. Uzyskane z badań wyniki autorka porównała z wynikami uzyskanymi drogą teoretyczną wykorzystując autorski program obliczeniowy stworzony do analizy elementów zespolonych, wykorzystujący program autorstwa Czkwianianca i Kamińskiej opracowany dla elementów żelbetowych. Jeżeli recenzent wyciąga prawidłowe wnioski, program Doktorantki oparty został na identycznych założeniach (m. in. Efekt zarysowania przekroju został uwzględniony za pomocą modelu tzw. „ryz rozmytych”). Istotną nowością w programie Doktorantki, jak sądzi recenzent, była analiza dwuetapowa elementu. W pierwszym etapie analizowano prefabrykat pod obciążeniem własnym, z uwzględnieniem siły sprężającej. W wyniku tej analizy otrzymywano odkształcenia na górnej powierzchni prefabrykatu, które następnie uwzględniano w drugim etapie analizy gdzie rozpatrywano już przekrój zespolony. Wyniki obliczeń numerycznych posłużyły Autorce do porównania teoretycznych i doświadczalnych relacji *moment – odkształcenie* i *moment – krzywizna*. Zgodność wyników uzyskanych na drodze eksperymentalnej i obliczeniowej była bardzo dobra lub co najmniej satysfakcjonująca, co bardzo dobrze świadczy o poprawności stworzonego przez autorkę programu obliczeniowego do analizy elementów zespolonych.

Analizując przekrój podporowy Autorka stwierdza, że mimo nieciągłości części zbrojenia nośnego sztywne profile mogą się włączyć do współpracy w przenoszeniu sił wewnętrznych w obszarze podpory środkowej. Warunkiem, zdaniem Autorki jest odpowiednie zakotwienie kształtowników w strefach podparcia oraz odpowiednia przyczepność między zbrojeniem i betonem. Doktorantka słusznie zauważyła, że w strefie podpory środkowej wobec jej silnego zarysowania konieczne jest uwzględnienie w analizie teoretycznej sił tnących. Zwróciła słusznie uwagę na fakt, że w przekroju nad podporą środkową wobec silnego udziału sił tnących przekrój po odkształceniu przestaje być płaski. Analizując przekrój środkowy dokonała modyfikacji modelu obliczeniowego przez uwzględnienie w nim sił tnących, wykorzystując przy tym metodę Czkwianianca i Kamińskiej. W dalszej części analizy Doktorantka ocenia wpływ rozwarstwienia na styku betonów wykonanych w różnym czasie. Rozwarstwienie styku powoduje przekształcenie złącza niepodatnego w podatne, co ze względu na występujące w nim naprężenia

styczne powoduje zmniejszenie nośności strefy przypodporowej elementu. Na podstawie obserwacji podczas badań elementów oraz na podstawie uzyskanych pomiarów Autorka stwierdza, że w prowadzonych przez nią badaniach nie doszło w żadnym wypadku do rozwarstwienia betonu prefabrykatu i nadbetonu bezpośrednio nad podporami, Zapobiegła temu, zdaniem Doktorantki, obecność pionowego zbrojenia w postaci nagwintowanych prętów uźebrowanych, które zastosowano skutecznie zgodnie z wytycznymi zespołu prof. Czkwianianca. Z badań Autorki wynika, że do lokalnego rozwarstwienia na styku betonów dochodziło w obszarze przypodporowym podpory środkowej, poza obszarem stosowania pionowych prętów nagwintowanych, przy czym bardziej zauważalny był on w elementach z wyższą częścią prefabrykowaną. Te lokalne rozwarstwienia nie miały większego wpływu na dalszy charakter zachowania się elementu.

Ocena interpretacji uzyskanych wyników jest bardzo wysoka. Doktorantka w sposób logiczny i dojrzały interpretuje uzyskane z badań wyniki, poddając je dodatkowo analizie teoretycznej i porównaniu z wynikami uzyskanymi tą drogą. Na duże uznanie zasługuje jej autorski program numeryczny do analizy elementów zespolonych. Weryfikacja tego programu wypadła bardzo dobrze. Doktorantka udowodniła tezy postawione w pracy. Stwierdziła, że możliwa jest redystrybucja sił między zbrojeniem nośnym w przekroju podwójnie zespolonym zbrojonym profilami sztywnymi, mimo lokalnej nieciągłości tego zbrojenia, Określiła jednak także ograniczenia jeżeli chodzi o słuszność tej tezy. Wykazała również, że rozwarstwienie styku nie wpływa na proces redystrybucji sił pomiędzy zbrojeniem nośnym w przekroju podporowym pod warunkiem prawidłowo zaprojektowanego i wykonanego zbrojenia w połączeniu dwóch różnych betonów. Wnioski Autorki należy uznać za trafne.

4. Główne osiągnięcia pracy

- Osiągnięciem Autorki jest sam wybór tematu pracy i opracowany program badań a także jego realizacja i wysoki poziom warsztatu badawczego
- Podstawowym osiągnięciem mgr inż. Elżbiety Habiera – Waśniewskiej jest uzyskanie szeregu ważnych informacji dotyczących zachowania się jednoprzęsłowych zespolonych elementów zbrojonych kształtownikami stalowymi połączonych na podporze środkowej w belkę dwuprzęsłową w warunkach lokalnej nieciągłości zbrojenia. Na podkreślenie zasługuje analiza poprawności przyjętych w modelu teoretycznym założeń.
- Znaczącym osiągnięciem jest stworzenie autorskiego programu obliczeniowego do analizy elementów zespolonych nawet w sytuacji, gdy niektóre jego elementy były

zaczepnięte z metody Czkwianianca i Kamińskiej. Na uznanie zasługuje uwzględnienie sił tnących w przypadku analizy zarysowanych przekrojów podporowych.

- Na podkreślenie zasługuje też komunikatywność pracy. Autorka formułuje swoje myśli w sposób jasny i jednoznaczny, co świadczy o dużej znajomości dziedziny, w której się porusza. Pracę czyta się z przyjemnością.

5. Uwagi recenzenta

Są to właściwie pytania mające na celu lepsze zrozumienie pracy

- Czym kierowano się projektując zbrojenie sprężające, a ściśle poziom sprężenia. Czy miał on zabezpieczyć element przed zarysowaniem prefabrykatu jedynie w fazie bezużytkowej czy też także eksploatacyjnej? Na zamieszczonym w załączniku rysunku Z6.7b, obrazującym układ rys prefabrykat belki w strefie środkowej belki jest dość intensywnie zarysowany. Dlaczego 6 z ośmiu cięgien było naciągnięte siłą 138kN, zaś dwa siłą zaledwie 20kN?
- Czym tłumaczy Autorka fakt przedwczesnego zniszczenia przez ścinanie badanych belek, a szczególnie jego charakter przez zniszczenie spoin pachwinowych. W badanych elementach stosowano się do zaleceń zespołu prof. Czkwianianca zmieniając połączenie czołowe między pasami a pionowymi płaskownikami na połączenie za pomocą spoiny pachwinowej w celu zwiększenia nośności tego połączenia. W badaniach prof. Czkwianianca z zespołem zniszczenie przez ścinanie można było tłumaczyć przyjętą smukłością ścinania, około 2,9. W badaniach Doktorantki smukłość ta wynosiła ponad 5.
- Jak zdaniem doktorantki przebiegałby proces redystrybucji w wypadku gdyby na przykład obciążane było na przemian raz jedno, raz drugie przęsło przy wzrastającej wartości obciążenia.
- W sytuacji gdzie zniszczenie badanych belek następowało przez ścinanie powstaje pytanie o ile uciążłone w ustrój dwuprzęsłowy belki zespolone przeniosły większe obciążenie niż jednoprzęsłowe belki ze zbrojeniem w postaci kształtowników gdyby nie zostały uciążłone?
- Czym różni się autorski program do analizy elementów zespolonych od programu opracowanego przez Czkwianianca i Kamińską, poza dwuetapowością analizy?
- Jakie zmiany w ugięciach obserwowano w wyniku redystrybucji momentów w porównaniu do ugięć gdyby redystrybucji nie było? Analizy takiej brakuje w pracy,

podczas gdy ugięcia były mierzone a ich wyniki w formie wykresów zamieszczono w załączniku.

6. Podsumowanie recenzji

Mgr inż. Elżbieta Habiera – Waśniewska podjęła w swej rozprawie trudny i nowy problem jakim jest zachowanie się jednoprzęsłowych elementów zespolonych, zbrojonych za pomocą kształtowników stalowych, po ich zespoleniu w ustrój dwuprzęsłowy.

Na podstawie lektury przesłanej mi do recenzji pracy doktorskiej mgr inż. Elżbiety Habiera – Waśniewskiej stwierdzam, że Autorka wykazała się:

- umiejętnością stawiania problemów naukowych i samodzielnego ich rozwiązywania,
- umiejętnością prowadzenia analiz naukowych,
- dobrą znajomością warsztatu matematycznego i umiejętnością tworzenia nowego i modyfikacji istniejącego oprogramowania komputerowego,
- umiejętnością jasnego wyrażania własnych poglądów i formułowania wniosków.

7. Wnioski

Przedstawiona mi do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Elżbiety Habiera – Waśniewskiej pt. *„Redystrybucja sił wewnętrznych w podwójnie zespolonych belkach dwuprzęsłowych”*, napisana pod kierunkiem Pana prof. dr hab. inż. Artema Czkwianianca wnosi nowe, istotne dla nauki elementy i rozszerza wiedzę dotyczącą zachowania się elementów zespolonych z obetonowanymi kształtownikami. Rozprawa udowadnia jednocześnie dobre przygotowanie Autorki do prowadzenia samodzielnych badań naukowych.

Pozytywnie oceniając rozprawę doktorską mgr inż. Elżbiety Habiera – Waśniewskiej stwierdzam, że spełnia ona wymagania ustawy o tytule naukowym i stopniach naukowych. I wnoszę o dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony.


Piotr Korzeniowski