

Dr hab. inż. Adam Glema, prof. PP  
Politechnika Poznańska  
Instytut Konstrukcji Budowlanych  
ul. Piotrowo 5, 60-965 Poznań  
e: [adam.glema@put.poznan.pl](mailto:adam.glema@put.poznan.pl)

Poznań, 14 stycznia 2019 r.

**Recenzja**  
**rozprawy doktorskiej mgr inż. Łukasza Jabłońskiego**  
**„Wpływ parametrów styku na pracę statyczną żelbetowych belek zespolonych**  
**o przekroju teowym”**

**1. Podstawa opracowania i przedmiot recenzji**

Podstawą niniejszej recenzji jest pismo Dziekana Wydziału Budownictwa i Architektury Politechniki Lubelskiej prof. dr hab. inż. Bogusława Szmigina z dnia 6 grudnia 2018 roku.

Przedmiotem oceny jest rozprawa doktorska mgr inż. Łukasza Jabłońskiego, o podanym powyżej tytule, wykonana pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Anny Halickiej.

**2. Tematyka i treść rozprawy**

Rozprawa doktorska mgr inż. Łukasza Jabłońskiego pt. „Wpływ parametrów styku na pracę statyczną żelbetowych belek zespolonych o przekroju teowym” liczy 186 stron i napisana jest w języku polskim. Na początku pracy przedstawiony jest spis treści oraz wykaz stosowanych w pracy najważniejszych oznaczeń i symboli. Recenzowana rozprawa składa się z siedmiu rozdziałów, po których zamieszczone jest zestawienie pozycji literaturowych. Na końcu pracy znajduje się streszczenie w języku polskim oraz streszczenie w języku angielskim. Rozprawa zawiera 111 rysunków i 27 tabel.

Celem rozprawy jest badanie zachowania mechanicznego żelbetowych belek zespolonych. Badania dotyczą belek o przekroju teowym. Rozpatrywane są belki, które wykonuje się w dwóch etapach. W pierwszym etapie wykonywana jest żelbetowa belka jako prefabrykowana lub monolityczna, której prostokątny przekrój stanowi część lub całość środnika przekroju teowego. Następnie w drugim etapie układana jest monolityczna górna część przekroju teowego, płyta zawierająca półkę teownika, ewentualnie z fragmentem środnika, jeżeli w pierwszym etapie nie miało miejsca wytworzenie całości środnika. Zespolenie polega na połączeniu elementów składowych wykonanych w obydwóch etapach. Pomimo technologicznej konieczności rozdzielenia belki i współpracującej z nią płyty, postawione jest zadanie zaprojektowania i wykonania ich połączenia zapewniającego pracę statyczną jednolitej belki żelbetowej o przekroju teowym. Styk między betonami utworzonymi w różnych terminach jest głównym przedmiotem badań. Autor w swojej rozprawie zajął się oceną zachowania i określeniem kryteriów nośności oraz użyteczności styku oraz ich wpływu na zachowanie żelbetowych belek zespolonych. Badanie i wyznaczanie nośności belki dokonywane jest metodami eksperymentalnymi z wykonywaniem pomiarów wielkości fizycznych i metodami analizy numerycznej z modelowaniem komputerowym i wykonywaniem obliczeń stanu mechanicznego belki zespolonej. Stany zarysowania i zniszczenia badane są przez realizację prób laboratoryjnych oraz symulacji komputerowych. Badania eksperymentalne i numeryczne obejmują różne warianty połączenia w styku beton-beton pozwalające na rozpoznanie i sklasyfikowanie przypadków mechanizmu zniszczenia analizowanej belki zespolonej.



Rozpatrywanie właściwości połączenia w zespolonej belce żelbetowej jest istotnym zagadnieniem współczesnego budownictwa betonowego. Właściwości styku wpływają na możliwość konstruowania bardziej wytrzymałego, wynikającego z zespolenia, rozwiązania dającego korzyści zapasu nośności, wykorzystania materiału do powiększenia efektywnego przekroju w górnej jego części, zmniejszenia ciężaru i kosztów. Znajomość charakterystyk strukturalnych styku jest niezbędna do właściwej oceny warunków stanów granicznych. Problematyka rozprawy należy do zagadnień znaczących z punktu widzenia zastosowania i wykorzystania w praktyce inżynierskiej zarówno w czasie projektowania i wykonawstwa konstrukcji budowlanej.

We wstępie Autor przedstawia tematykę rozprawy omawiając rodzaj konstrukcji zespolonych i związane z nim zagadnienia, podkreślając zwłaszcza mało rozpoznane mechaniczne charakterystyki styku pomiędzy dwoma zespolonymi elementami żelbetowymi oraz charakterystyki rozkładu naprężeń. Na tle wielu czynników decydujących o nośności strefy przypodporowej belki zespolonej i wpływających na nośność i zniszczenie badanego elementu konstrukcyjnego w rozprawie ograniczono się do parametrycznego badania położenia, przyczepności oraz zbrojenia styku. Dla założonego zakresu podany został plan pracy i wyszczególnione zostały zadania składowe przedstawiające plan realizacji badań i rozwiązania podjętego problemu naukowego. Rozdział liczy 4 strony.

Rozdział 2 jest obszernym opisem stanu wiedzy i przeglądem literatury badanego zagadnienia. Przegląd rozpoczyna się od przedstawienia charakterystycznych cech zespolonych elementów żelbetowych. Następnie zaprezentowane są występujące w styku zjawiska adhezji, ząbienia kruszywa, tarcia przy ścinaniu bez zbrojenia oraz tarcia ze złożonym mechanizmem w styku ze zbrojeniem zszywającym, a także występujące w styku ze zbrojeniem poprzeczym zjawisko klockowania zbrojenia. Analizie zjawisk występujących w zespoleniu dwóch betonowych części elementu towarzyszy rozróżnienie rodzajów powierzchni w styku na bardzo gładką, gładką szorstką i z wrębami, w zależności od stopnia chropowatości mającej zasadniczy wpływ na przyczepność. Przyczepność oraz czynniki jej efektywności stanu styku określają zdolność przenoszenia naprężeń i zachowania ciągłości w styku dwóch betonów. Kolejnym przedstawionym elementem stanu wiedzy są modele obliczania nośności styku na ścinanie w zespolonej konstrukcji żelbetowej według warunków norm polskich i zagranicznych. W drugim podrozdziale zebrano przykłady stosowania rozwiązań konstrukcyjnych, w których elementy żelbetowe o przekroju teowym stanowią połączenie prefabrykowanych belek i monolitycznej płyty betonowej. Na różnorodnych przypadkach, zwłaszcza stropów gęstożebrowych, omawiane są parametry przekroju oraz efektywna praca monolitycznej belki. Wyodrębnioną częścią rozdziału 2 jest przegląd opublikowanych badań eksperymentalnych żelbetowych belek zespolonych z podziałem na rodzaje badanych elementów, sposoby badania styku zespolenia dwóch betonów, położenie styku w badanych elementach, sposoby przygotowania powierzchni styku oraz występowania zbrojenia w styku. W przeglądzie badań wpływu zbrojenia w styku zamieszczone są również wyniki analiz numerycznych dotyczące zwłaszcza stopnia zbrojenia i jego zakotwienia. Rozdział dotyczący stanu wiedzy i przeglądu literatury jest zakończony podsumowaniem, które na tle dotychczasowych wyników badań zestawia cztery zagadnienia naukowe istotne dla dalszego rozpoznania przedmiotu rozprawy i osiągnięcia oryginalnych własnych rezultatów. Program badawczy oraz cele częściowe pracy zostały podane w dwustronicowym rozdziale 3.

W rozdziale 4 Autor rozprawy opisuje przeprowadzone badania laboratoryjne. Badania eksperymentalne podzielone są na dwie grupy testów. Pierwsza grupa eksperymentów dotyczy badania wpływu miejsca występowania styku na przebieg zarysowania styku i zarysowania belki zespolonej oraz jej nośność. W drugiej grupie testów badaniom poddano zespolone belki żelbetowe z połączeniem między betonami wykonanymi w różnych terminach usytuowanym pomiędzy półką a środkiem przekroju teowego. Badania zostały wykonane na 24 belkach, w 3 seriach po 3 belki

w pierwszej grupie testów i w 5 seriach po 3 belki w drugiej grupie eksperymentów. Wszystkie belki miały wspólne wymiary: długość belki 1,8 m, średnik przekroju teowego o wysokości 15 cm i szerokości 8 cm, a półka przekroju teowego miała szerokość 64 cm i grubość 5 cm. Zbrojenie podłużne dolne i górne belki oraz płyty były równe dla wszystkich belek zespolonych poddanych testom laboratoryjnym. W większości badań, w 6 seriach czyli 18 belkach zbrojenie poprzeczne było wykonane w ten sam sposób, przez zastosowanie naprzemiennie dwóch rodzajów strzemion o wysokości dostosowanej do wymiarów średnika i całej belki zespolonej. W jednej serii przy zbrojeniu strzemionami o wysokości dostosowanej do wysokości średnika badano przypadek styku położonego między między półką i średnikiem bez zbrojenia zszywającego, a ostatnia seria to przypadek, gdy zbrojenie zszywające ten styk składało się z samych strzemion o wysokości dostosowanej do wysokości całego przekroju teowego, a w płaszczyźnie styku występowały wszystkie strzemiona. Autor przedstawia sposób przygotowania belek zespolonych do przeprowadzenia badań laboratoryjnych, a zwłaszcza czynności mające wpływ na stan powierzchni styku betonów układanych w różnych terminach. Sposób obciążenia i podparcia belki był we wszystkich testach taki sam. Belki poddano próbie czteropunktowego zginania, z umieszczeniem belek w pozycji odwróconej. Siły przyłożone do średnika przekazywane były przez podpory w rozstawie 1,4 m, a pozostałe dwie siły przykładane były do półki przekroju teowego w rozstawie 0,7 m. Obciążenia z tłoka prasy hydraulicznej przekazywane były na belkę przez rozbudowany trawers.

Oprócz testów belek zespolonych, badania laboratoryjne obejmowały wyznaczenie właściwości materiałów przez wykonanie prób ściskania i rozciągania betonu na próbkach sześciennych i walcowych oraz prób rozciągania stali zbrojeniowej.

W pierwszym podrozdziale przedstawione są badania belek zespolonych, w których miejsce połączenia dwóch części betonowych występuje w 3 różnych położeniach na wysokości przekroju teowego, w 1/4, 2/4 i 3/4 jej wymiaru. Dla każdego testu jako wyniki zamieszczone są w rozprawie wartości sił maksymalnego obciążenia, sił przy których występowała rysa ukośna oraz sił przy których występowało zarysowanie styku. Następnie przeanalizowano powstanie i proces rozwoju rys oraz zobrazowano zarysowanie belek w wyniku osiągnięcia maksymalnego obciążenia. Podczas wykonywania eksperymentu rejestrowane były wartości przemieszczeń pionowych trzech punktów na długości belki za pomocą czujników elektronicznych oraz na obu końcach belki wartości przemieszczenia wzajemnego obu betonów w miejscu styku za pomocą czujników analogowych. Za pomocą tensometrów elektrooporowych mierzono odkształcenia w jednym miejscu dla dolnego zbrojenia podłużnego oraz pięciu miejsc dla strzemion. Wyniki przedstawiono w rozprawie na wykresach zmienności siły od odkształcenia dla wszystkich serii testów przeprowadzonych dla trzech położeni styku na wysokości przekroju. Opis etapu badania dotyczącego wpływu położenia styku betonów zakończono podaniem obliczania wartości sił według cytowanych pozycji bibliograficznych i zestawieniem ich z własnymi. Podobnie, dokonano przedstawienia i porównania mechanizmów powstawania zarysowania. Uzupełniono klasyfikacje mechanizmów zniszczenia żelbetowych belek zespolonych i zwrócono uwagę na znaczenie lokalnego zarysowania w styku. Badania wpływu położenia styku na wysokości przekroju zostały podsumowane oceną przypadków ze względu na największe wyłężenie.

W drugim etapie badań laboratoryjnych wykonano testy dla belek, w których styk łączący dwa betony jest położony pomiędzy średnikiem i półką przekroju teowego, lecz jest w różny sposób ukształtowany. Autor przyjmuje wykonanie styku w pięciu różnych rozwiązaniach: przyczepność między betonami bez zbrojenia w styku, przyczepność między betonami wraz ze zbrojeniem w styku, przyczepność betonów zmniejszona przez zastosowanie środka chemicznego wraz ze zbrojeniem w styku, przyczepność betonów zmniejszona przez umieszczenie folii PCV wraz ze zbrojeniem w styku oraz przyczepność betonów zmniejszona przez umieszczenie folii PCV wraz ze zbrojeniem o podwojonej liczbie strzemion w styku.

Badaniu podlegają belki zespolone dla których pozostałe parametry, stanowisko badawcze i sposób przeprowadzenia eksperymentu i rejestrowania pomiarów są zachowane jak w pierwszym etapie badań laboratoryjnych. Wyniki prezentują siły maksymalnego obciążenia, powstania zarysowania ukośnego i zarysowania w styku, powstanie i proces rozwoju rys, przemieszczenia punktów, przemieszczenia wzajemne i odkształcenia w zbrojeniu głównym oraz strzemion i zostały zamieszczone w rozprawie w formie takiej samej jak poprzednio dla belek z różnie usytuowanym stykiem. Dodatkowy rezultat wartości przemieszczeń wzajemnych półki i środника, odzwierciedlający utratę ciągłości połączenia, obecnie jawnie reprezentuje charakterystykę zachowania belki i styku. O dodatkowy model rozszerzona jest także analiza nośności i zarysowania styku w zestawieniu z własnymi wynikami. Przedstawione są cztery przypadki uzupełniające klasyfikację mechanizmów zniszczenia żelbetowych belek zespolonych. Na końcu podrozdziału zamieszczone jest podsumowanie badań laboratoryjnych i analiz oraz podane są osiągnięte rezultaty.

Rozdział 5 zawiera opis analiz numerycznych rozpatrywanej zespolonej belki żelbetowej. Analizy numeryczne odnoszą się do części badań laboratoryjnych przedstawionych w poprzednim rozdziale. Analizy prowadzone są przez wykorzystanie metody elementów skończonych, w systemie oprogramowania Abaqus. Przygotowanie modelu obliczeniowego oraz przeprowadzenie symulacji komputerowej dotyczy belki ze stykiem łączącym betony usytuowanym pomiędzy środnikiem i półką przekroju teowego. Badane laboratoryjnie różne warunki przyczepności zespalanych części przekroju belki stanowią przedmiot zainteresowania w poszczególnych zadaniach obliczeniowych. Modelowano styk niezbrojony z przyczepnością, styk zbrojony z przyczepnością, styk zbrojony ze zmniejszoną przyczepnością oraz styk z przyczepnością i ze zbrojeniem o podwojonej liczbie strzemion. Autor przedstawia kolejno modele konstytutywne betonu i stali, następnie przyjmowane wartości danych materiałowych oraz stosowane w obliczeniach zależności naprężenie-odkształcenie. Prezentacja modelu numerycznego obejmuje geometrię belki, siatkę elementów skończonych, warunki podparcia i obciążenia. Kontakt pomiędzy powierzchniami wraz z dyskretną definicją prętów zbrojeniowych został zastosowany do określenia styku połączenia zespolonego pomiędzy środnikiem a półką. Główną częścią rozdziału 5 jest przedstawienie wyników obliczeń. Prezentowane są stany przemieszczenia, deformacji, zarysowania belki oraz stany odkształcenia zbrojenia i stany naprężenia w styku. Na końcu rozdziału Autor formułuje wnioski z analizy numerycznej, które w większości dotyczą charakterystyki zachowania się styku.

W kolejnym rozdziale Autor formułuje zalecenia do projektowania dla żelbetowych belek zespolonych rozważając znaczenie zachowania się styku pomiędzy betonami oraz zachowania się strefy przypodporowej belki. Przedstawiana jest klasyfikacja mechanizmów zniszczenia belek oraz kryteria nośności i zarysowania, które były przyjęte do dalszego zaproponowania algorytmu obliczania nośności stref przypodporowych belek zespolonych. Weryfikacja algorytmu jest pokazana dla pojedynczej serii badań styku niezbrojonego i zbrojonego.

W rozdziale 7 przedstawiono podsumowanie badań i wnioski końcowe. Potwierdzono realizację założonych celów rozprawy. Wyodrębniono wnioski z pierwszego etapu badań laboratoryjnych nad wpływem położenia styku na wysokości elementu na jego pracę statyczną, następnie wnioski z drugiego etapu badań laboratoryjnych nad wpływem różnej przyczepności styku oraz wnioski z badań z analizą numeryczną przy wykorzystaniu metody elementów skończonych. Podkreślono przydatność wyników badań laboratoryjnych i analiz numerycznych. Zastosowane metody i uzyskane wyniki stanowiły podstawę do sformułowania zaleceń do projektowania żelbetowych elementów zespolonych. W zakończeniu rozdziału 7 przedstawione są kierunki dalszych badań.

Spis literatury liczy 86 pozycje bibliograficznych, w tym 4 pozycje, w których Autor rozprawy jest samodzielnym autorem oraz 5 pozycje, w których jest współautorem.

### 3. Uwagi ogólne i ocena rozprawy

W rozprawie doktorskiej przedstawiony jest aktualny problem naukowy w obszarze badań prowadzonych dla konstrukcji budowlanych. Konstrukcje zespolone znajdują coraz szersze zastosowanie w budownictwie, przynoszą możliwość uwzględnienia współpracy elementów i materiałów konstrukcyjnych dla kształtowania rozwiązań konstrukcyjnych o zwiększonej wytrzymałości i sztywności. Uzyskanie korzyści wynikających z zespolenia różnych materiałów lub elementów jest ściśle powiązane z funkcjonowaniem łącznika. Badanie i projektowanie konstrukcji zawiera analizy dotyczące całego układu, poszczególnych jego elementów oraz miejsc połączenia pomiędzy elementami. W żelbetowych konstrukcjach zespolonych, kiedy wykonywane jest połączenie betonu z betonem i brak jest wyodrębnionego łącznika, tym istotniejsze jest poznanie zachowania materiałów i konstrukcji na styku betonów wykonanych w różnych terminach.

Wpływ charakterystyki styku na zachowanie samego styku, jak również na zachowanie całego zespolonego elementu żelbetowego stanowi temat problemu naukowego rozprawy.

Tytuł rozprawy jest szczegółowy i dobrze opisuje jej zawartość.

Przegląd literatury odnosi się do współczesnych badań naukowych, obejmuje istotne aspekty, świadczy o wielostronnym rozpoznaniu analizowanego zagadnienia i opanowaniu przez Autora wiedzy z zakresu tematyki rozprawy.

Autor dokonuje wyboru i przedstawia uzasadnienie dla podjęcia postawionego do rozwiązania zagadnienia. Określa cel oraz własny, oryginalny zakres badań. Wyznacza działania dostosowane do osiągnięcia wyznaczonego celu i wykonania zadań składowych. Układ rozprawy odzwierciedla poszczególne, szczegółowe prace badawcze. Każdy z zasadniczych rozdziałów zakończony jest przedstawieniem podsumowania i wypunktowaniem wniosków, co przyczynia się do przejrzystości i lepszego odbioru pracy.

W ocenie należy podkreślić, iż rozprawa jest napisana starannie. Opracowanie jest obszerne. Jego forma techniczna ma wysoką jakość. Autor precyzyjnie formułuje założenia i jasno charakteryzuje wykonywane zadania badawcze, ze stosowaniem poprawnej terminologii. Zagadnienia i wyniki są odpowiednio zilustrowane na rysunkach. Występujące niedociągnięcia czy też powtórzenia nie naruszają ogólnie czytelności.

Badanie pracy statycznej zespolonej belki żelbetowej zostało przeprowadzone za pomocą trzech grup metod: prób laboratoryjnych, symulacji numerycznych oraz analiz teoretycznych dotyczących kryteriów sprawdzania warunków nośności i użyteczności.

Dla przeprowadzenia poszczególnych serii testów obciążenia belek za pomocą maszyny wytrzymałościowej i uzyskania wyników pomiarów istotne było przygotowanie i wykonanie każdego z obiektów badań. Wykonywanie elementu z betonu, formowanie elementu z podziałem na dwa jego etapy, przygotowanie i wyposażenie prętów zbrojeniowych w tensometry, czynności dotyczące ukształtowania styku zespolenia obydwóch betonowych części, a także badanie charakterystyk materiałowych betonu i stali zbrojenia podłużnego i poprzecznego stanowiły każde z osobna i łącznie rezultat rozstrzygający o możliwości dokonania badania laboratoryjnego. Przedstawiony w rozprawie opis przeprowadzonych w laboratorium eksperymentów i uzyskanych wyników pomiarowych pokazuje osiągnięcie przez Autora bardzo dobrego poziomu przygotowania belek do badań i skuteczność wykonanych na nich testów.

W badaniach laboratoryjnych analizowano w pierwszej kolejności wpływ położenia styku na różnej wysokości przekroju teowego na zachowanie belki zespolonej. Obciążenie elementu realizowane za pomocą maszyny wytrzymałościowej oddziaływało na belkę siłami skupionymi, które narastały w sposób ciągły lub przyrostowy do uzyskania zniszczenia belki. Wraz z rejestracją wartości siły wymuszającej oraz ugięć i odkształceń w prętach zbrojenia podłużnego

i poprzecznego, przedmiotem zainteresowania było zachowanie styku między dwoma betonami. Wykonanie trzech serii testów belek o przekroju teowym doprowadziło do określenia mechanizmów zniszczenia belki. Mechanizm zniszczenia stwierdzono na podstawie obserwacji powstania i rozwoju zarysowania. W rozprawie Autor udokumentował występowanie rys poprzecznych w środku długości belki, rys ukośnych w strefie podporowej i rys w styku zespalanych betonów. W wyniku analizy rezultatów Autor wykazał, że w seriach testów przy trzech usytuowaniach styku na wysokości przekroju teowego zniszczenie następuje w wyniku ścinania w strefie podporowej dla rys ukośnych i stwierdza, iż nie następuje rozwarstwienie belki w miejscu styku, natomiast rysa w styku powstaje lokalnie na odcinku pomiędzy rysami ukośnymi. Styk belki zespolonej wpływa na jej zachowanie, a jego położenie zmienia obraz zarysowania i poziom obciążenia powstania rysy w styku. Do kolejnych badań przyjęte jest położenie styku w górnej części przekroju pomiędzy półką a środkiem jako najbardziej niekorzystne.

W dalszych badaniach laboratoryjnych przedmiotem rozważań były belki ze stykiem pomiędzy półką a środkiem. W pięciu seriach testów zostały wybrane różne przypadki ukształtowania styku. W badanych elementach zrealizowano styki zmieniając przyczepności i zbrojenie. W trzech przypadkach powierzchnia styku miała coraz mniejszą przyczepność, a w innych modyfikując wysokość strzemion usunięto lub podwojono liczbę prętów zbrojeniowych w styku. W przeprowadzonych testach Autor rozprawy uzyskał założone warunki i określił pracę żelbetowej belki zespolonej w zależności od wpływu ukształtowania styku pomiędzy półką i środkiem. Mechanizm zniszczenia również wynikał głównie ze ścinania strefy przypodporowej oraz powstania i rozwoju rys ukośnych, natomiast zasadniczo zmieniło się zachowanie styku. W szeregu przypadków Autor przedstawia zniszczenie styku, delaminacje w miejscu zespolenia betonów. Udokumentowane jest w rozprawie rozpoczęcie powstania rysy w styku na końcu belki i jej propagacja w kierunku środka belki. Świadczą o tym również wyniki pomiaru względnego przemieszczenia punktów powyżej i poniżej styku na końcach belki.

Autor przygotował i przeprowadził próby obciążenia belek zespolonych. Dla każdego przypadku położenia i ukształtowania styku dokonał pomiarów siły i przemieszczeń punktów belki i odkształceń zbrojenia dla trzech niezależnych prób, a specjalna uwaga dotyczyła rejestracji szczegółowego obrazu zarysowania betonu. Eksperymenty zostały zrealizowane według programu badawczego i dostarczyły wyników dla doświadczalnych podstaw opisu na temat wpływu parametrów styku na pracę żelbetowych belek zespolonych.

W badaniach na drodze eksperymentów komputerowych Autor zrealizował symulacje numeryczne odpowiadające próbom laboratoryjnym. Przygotowane zostały modele belki zespolonej dla części testów, w których styk położony był pomiędzy półką i środkiem, a które różniły się pomiędzy sobą właściwościami styku.

Model opracowany do przeprowadzenia obliczeń za pomocą metody elementów skończonych przedstawiony jest w wyodrębnionych częściach. W pierwszej kolejności określone są modele materiałów. Autor w sposób wyczerpujący określa model konstytutywny betonu i stali. Dla zaawansowanego modelu betonu podaje charakterystykę parametrów określających uplastycznienie i zniszczenie materiału, przywiązuje wagę do osłabienia po przekroczeniu wytrzymałości materiału. Na podstawie wyników wykonanych laboratoryjnie badań rozciągania i ściskania próbek betonowych i stalowych wyznacza wykresy naprężenie-odkształcenie, wraz z podaniem danych liczbowych definiujących model betonu ściskanego i rozciąganego, a także charakterystykę stali dla zbrojenia podłużnego i poprzecznego. Definicja modelu materiałów pokazana dla wartości pomiarowych betonu jednej serii testów jest opracowana dla pozostałych przypadków. W dalszej kolejności opisywana jest trójwymiarowa geometria, siatka elementów skończonych, warunki podparcia i obciążenia oraz definiowanie połączenia i kontaktu pomiędzy elementami półki i środka. Prezentacja modelu zakończona jest podaniem nieliniowej charakterystyki analizy, z typem i parametrami analizy numerycznej. Podkreślić należy, iż Autor

rozprawy eksponuje w zaawansowanym ze względu na nieliniowy charakter modelu aspekty numeryczne związane z poprawnością, stabilnością i zbieżnością rozwiązania. Na podstawie studiów literaturowych przyjmuje parametry modelu materiału i kontaktu, wymiaru siatki elementów oraz procedury numerycznej. Autor wykazuje znajomość i umiejętnie posługuje się analizą komputerową materiału i konstrukcji.

Autor rozprawy opracował model obliczeniowy metody elementów skończonych właściwy dla belki żelbetowej i rozszerzył go, stosownie do specyfiki badanego problemu, o elementy definiujące zespolenie półki i środnika. Zastosowany został model w którym beton, stal zbrojeniowa, sposób obciążenia i podparcia oraz styk zespolenia reprezentowane są przez odpowiadające ich geometrii elementy skończone: beton odrębnie dla środnika i półki przez trójwymiarowe elementy bryłowe, stal zbrojeniowa przez elementy prętowe, obciążenie i podparcie przez elementy zapewniające przestrzenne przekazywanie oddziaływań, a styk zespolenia przez zdefiniowane powierzchnie kontaktowe. Poza ogólną zgodnością dla poszczególnych elementów modelu, została zapewniona zgodność geometryczna pozwalająca na obliczanie i odczytywanie wartości zmiennych mechanicznych przemieszczeń, odkształceń i naprężeń, odpowiadająca ich występowaniu w punktach i na powierzchniach, co zwłaszcza jest przydatne wobec przeprowadzania testów i dokonywania interpretacji pomiarów laboratoryjnych. Autor przedstawia w rozprawie obliczone rezultaty symulacji numerycznej obrazujące stan deformacji, zarysowania belki, odkształcenia w zbrojeniu głównym i w strzemionach oraz naprężenia na powierzchni styku zespalającego. Zmiana charakterystyki powierzchni kontaktowych w styku sterowana jest parametrami przemieszczenia i naprężenia wywołujących separację powierzchni styku, a drugim przypadkiem współczynnikiem tarcia dociskanych powierzchni. Parametry charakteryzujące styk to dane o wartościach nieznanach. Trzecim czynnikiem wpływającym na zachowanie styku jest zbrojenie definiowane w modelu obliczeniowym przez dyskretną liczbę strzemion. Analiza numeryczna jest ukierunkowana na zgodność wyników uzyskanych metodami komputerowymi z pomiarami podczas własnych testów laboratoryjnych. Autor dokonuje wyznaczenia wartości powyższych parametrów powierzchni kontaktowych przez porównanie zależności siły obciążającej i ugięcia środka belki uzyskanych w badaniach laboratoryjnych i symulacjach numerycznych. Badając zniszczenie belki żelbetowej rozróżnia w wynikach rozwiązania numerycznego ciągłą i dyskretną postać zarysowania strefy podporowej belki i na powierzchni styku. Dokonuje analizy parametrycznej w celu obserwacji luzów i poślizgów oraz określenia znaczenia oddziaływania pomiędzy płaszczyznami w styku. Wykazał, że zachowanie belki różni się w zależności od charakteru styku, co może stanowić zagrożenie zniszczenia połączenia i zniszczenia belki. Przygotowane modele obliczeniowe i uzyskane rezultaty analizy numerycznej stanowią podstawę do wykonania symulacji numerycznych zachowania innych styków oraz różnych belek.

Analiza warunków nośności i zarysowania wraz z rozważeniem mechanizmów zniszczenia żelbetowych belek zespolonych przeprowadzona przez Autora podaje rozszerzoną klasyfikację mechanizmów zniszczenia. Autor wykonał badania i potwierdził zgodność powyższych rezultatów uzyskanych w badaniach laboratoryjnych i analizach numerycznych. Dalej skupia uwagę na kryterium zarysowania styku i zarysowania strefy przypodporowej belki i wyznaczaniu naprężeń stycznych powodujących powstanie rysy w styku. Parametry w trzech składnikach wyrażenia określającego zarysowanie styku odnoszące się do przyczepności naturalnej, tarcia powierzchni oraz zbrojenia zszywającego traktowane są przez Autora analogicznie do czynników modelujących zachowanie powierzchni kontaktowych w analizach numerycznych.

Przyjęta przez Autora metodologia badania belki ze stykiem doprowadziła do wykazania wpływu położenia, przyczepności i zbrojenia styku na jej zachowanie.

Poniżej podano kilka uwag dotyczących merytorycznej zawartości rozprawy:

- W rozprawie dokonano przedstawienia wartości obciążenia oddziałującego na belkę w postaci zależności „siła-ugięcie” i wyznaczenia wartości siły odpowiadającej zarysowaniu lub zniszczeniu belki. Do oznaczenia tej siły przyjęto  $F$ . W zestawieniu oznaczeń na początku rozprawy  $F$  nie jest podane. W badaniach laboratoryjnych według przedstawionego opisu, schematów belki i fotografii stanowiska badawczego siła  $F$  jest oddziaływaniem maszyny wytrzymałościowej na trawers, a dwie siły działające na belkę mają wartości  $P/2$  (Rys. 4.7)  $F/2$  (Rys. 4.14). W symulacjach numerycznych przyjęty jest model symetrycznej części na długości i szerokości belki, przedstawianie wyników dokonane jest jako „odpowiedź modelu MES belek” z stosowaniem poprzedniego oznaczenia i wartości. Różnica odnośnie wyznaczenia wartości obciążenia  $F$  dotyczy drugiego elementu. W obliczeniach numerycznych podano, iż uwzględniony jest ciężar własny belki. W stanowisku laboratoryjnym obciążenie przekazywane jest na odwróconą belkę przez trawers, którego ciężar można oceniać jedynie ze zdjęcia. Jaką siłą jest  $F$  ?
- Autor rozprawy uznał zachowanie styku zespolenia za istotne, a wpływ parametrów styku za znaczący dla pracy zespolonej belki żelbetowej. Ocena wpływu styku dokonywana jest przez przedstawienie wartości siły obciążenia belki i ugięcia punktu w środku jej rozpiętości. Zachowanie belki i zachowanie styku jest analizowane pod kątem ich zależności od rodzaju połączenia dwóch betonów w styku zespalającym. Styk jest scharakteryzowany przez przyczepność adhezyjną powierzchni i zbrojenie zszywające. Zmieniając przyczepność i zbrojenie styku dokonywano oceny wpływu styku. Każda z wymienionych modyfikacji związana jest z różnym stanem powierzchni kontaktowych styku. Wśród wyników numerycznych przedstawianych w rozprawie są naprężenia normalne i styczne na powierzchniach styku, natomiast brak jest rezultatów charakteryzujących wzajemne ich przemieszczenia, otwarcie albo aktywny kontakt, poślizg. Dla poznania właściwości styku, przebiegu zniszczenia w wyniku poślizgu albo rozwarcia zarysowania znaczące są przemieszczenia w płaszczyźnie styku w stosunku do zachowania w kierunku normalnym. Wstawienie do programu badań eksperymentalnych pomiaru wzajemnych przemieszczeń w styku i uzyskane rezultaty (Rys. 4.19) uwypuklają brak wartości liczbowych z symulacji numerycznych. Rozpoznanie lokalnej charakterystyki styku nie jest dopełnione.
- Wynikiem badań jest określenie wartości kilku parametrów charakteryzujących styk. Autor wyznacza liczbowe wartości parametrów, które w sposób jednoznaczny uznaje za reprezentatywne dla styku zespolonych belek żelbetowych. Z jednej strony stanowi to osiągnięcie i podstawę do dalszych badań, do stosowania w projektowaniu elementów zespolonych, jako duża pomoc dla zainteresowanych jakie wartości parametrów przyjmować. Jednak przeprowadzenie badań dla kilku przypadków styku jednej belki, wykonanie porównania wyników laboratoryjnych i numerycznych według relacji siła-ugięcie, które to wielkości stanowią pojedynczy wynik globalny dla całego układu oraz dokonanie na ich podstawie weryfikacji modelu obliczeniowego przez testy eksperymentalne pozostawiają potrzebę przyjmowania podanych wartości jako podstawy rozpoznania styku belek zespolonych i badania próbki wyodrębnionego fragmentu ze stykiem.
- Wielkości określające właściwości materiałów występują pod kilkoma nazwami, np. granica wytrzymałości betonu ogólnie, średnia, charakterystyczna, obliczeniowa. Wielkość średnia wytrzymałości betonu na ściskanie występuje jednolicie w opisie wielkości pomiarowych podczas badań laboratoryjnych, a także do definiowania modelu materiału w symulacjach numerycznych. Wartości średniej wytrzymałości przedstawiane są dla obydwóch zespalanych betonów, dla każdej z serii testów i wykazują zróżnicowanie, bez odniesienia do określenia klasy betonu. W analizie kryteriów zarysowania i nośności w stosowanych



zależnościach brak jest jednolitości, co zwłaszcza w sąsiednich składnikach i z występowaniem współczynników przy wielkości parametru materiałowego. Także przy dokonywaniu porównania wartości uzyskanych z warunków normowych, obliczeń numerycznych i pomiarów laboratoryjnych przyjąć należy jednolite wielkości do wnioskowania o zgodności i proponowania nowych wartości parametrów.

Prace naukowe zrealizowane przez Autora obejmują trzy zakresy badawcze. Każdy z nich, a zwłaszcza badania laboratoryjne i symulacje numeryczne wnoszą udział do poznania zachowania żelbetowych belek zespolonych. Autor rozprawy wykazał znajomość metod laboratoryjnych i metod numerycznych zastosowanych do analizy nośności elementu konstrukcyjnego. W sposób swobodny interpretuje zarówno obserwacje eksperymentalne jak i numeryczne. Chociaż każda z obu metod byłaby wystarczająca, aby na jej bazie sformułować program badawczy wypełniający rozprawę doktorską, w ocenianej pracy oba rodzaje metod badawczych są stosowane. W rozdziale na temat badań laboratoryjnych nie są podawane, ani wykorzystywane dane i wyniki z symulacji komputerowych. Część dotycząca analiz numerycznych nie korzysta wprost z danych testów laboratoryjnych, ale z prób ściskania i rozciągania próbek dla materiałów konstrukcyjnych, natomiast wyniki eksperymentów dla belek są potrzebne i na ich podstawie Autor prowadzi kalibrację modelu obliczeniowego. Rezultaty każdej części osobno nie są wystarczające do samodzielnego rozwiązania problemu. Stosowanie obydwóch rodzajów metod badawczych i właściwa proporcja ich udziału w badaniach zasługuje na podkreślenie, gdyż metody badań zastosowane i opisane przez Autora w rozprawie wzajemnie uzupełniają osiągnięcie postawionego celu teoretyczno-doświadczalnego opisu belek zespolonych.

Do oryginalnych osiągnięć Autora można zaliczyć następujące rezultaty pracy:

- przygotowanie belek zespolonych o przekroju teowym z różnymi wariantami styku pomiędzy betonami do przeprowadzenia eksperymentów laboratoryjnych,
- rozpoznanie i udokumentowanie zniszczenia belki ze stykiem, powstania i rozwoju zarysowania podczas obciążenia i uzyskanie charakterystyk strukturalnych w postaci relacji siła-ugięcie belek zespolonych,
- zbadanie wpływu przyczepności adhezyjnej oraz zbrojenia zszywającego styku na pracę belki zespolonej,
- określenie mechanizmów zniszczenia belki oraz ich klasyfikacji wyróżniającej kolejność powstania rys ukośnych i rys w styku oraz przyczyny utraty nośności,
- przedstawienie parametrów powierzchni styku do obliczania stanu jego zarysowania,
- opracowanie i weryfikacja autorskiego algorytmu obliczania nośności belek zespolonych w strefie przypodporowej uwzględniającego nośność styku ścinanego.

Rezultaty badania wpływu właściwości styku na zachowanie całego zespolonego elementu żelbetowego ma wymiar poznawczy i aplikacyjny dla projektowania oraz wykonywania elementów i konstrukcji budowlanych. Opracowana metodologia i uzyskane rezultaty mogą zostać wykorzystane do określania wymagań bezpieczeństwa oraz w dalszych badaniach.

#### 4. Wniosek końcowy

Rozprawa doktorska pana mgr inż. Łukasza Jabłońskiego stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego dotyczące zachowania zespolonych belek żelbetowych i wpływu styku łączącego dwa betony na jej pracę statyczną. Temat rozprawy wypływa ze współczesnej praktyki inżynierskiej. Autor dokonał przeglądu stanu zagadnienia, przeprowadził program badań doświadczalnych, wykonał analizy wpływu styku na zachowanie belki zespolonej tworząc zaawansowane modele obliczeniowe metody elementów skończonych, przeanalizował kryteria nośności i zarysowania dla projektowania zespolonych belek żelbetowych. Opracowane wnioski wynikają z przeprowadzonych badań. Osiągnięte w pracy wyniki uważam za ważne w dziedzinie budownictwa, w zakresie konstrukcji żelbetowych. Założony w rozprawie cel został osiągnięty.

Mgr inż. Łukasz Jabłoński wykazał się ogólną wiedzą teoretyczną z zakresu konstrukcji żelbetowych, wykorzystaniem publikowanego dorobku naukowego, samodzielnością w rozwiązywaniu problemu naukowego, umiejętnością prowadzenia badań doświadczalnych i analizy komputerowej konstrukcji oraz redagowania rozprawy doktorskiej.

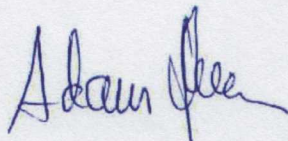
Wobec powyższego wystawiam wniosek:

Rozprawa mgr inż. Łukasza Jabłońskiego

*„Wpływ parametrów styku na pracę statyczną żelbetowych belek zespolonych o przekroju teowym”*

spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim.

Proszę Dziekana i Radę Wydziału Budownictwa i Architektury Politechniki Lubelskiej w Lublinie o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie jej do publicznej obrony.



Adam Glema