

Zielona Góra, 15 stycznia 2025 r.

dr hab. inż. Jacek Korentz, prof. uczelni  
Uniwersytet Zielonogórski  
Instytut Budownictwa  
65-417 Zielona Góra, ul. Licealna 9  
e-mail: j.korentz@ib.uz.zgora.pl

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Jakuba Zająca  
pt. „THE BEHAVIOUR OF COMPOSITE CONCRETE ELEMENTS  
WITH UNREINFORCED MULTIPLANAR INTERFACE”

### 1. Podstawa opracowania recenzji

Recenzja została opracowana na prośbę Pana dr hab. inż. Piotra Folegi prof. PŚ, Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Śląskiej zawartą w piśmie RDILGT.512. z dnia 30 października 2024 r. Podstawę formalną recenzji stanowi Uchwała Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport nr dnia 24 października 2024 r. o powołaniu mnie na recenzenta rozprawy doktorskiej mgr inż. Jakuba Zająca pt. „The behaviour of composite concrete elements with unreinforced multiplanar interface”.

### 2. Przedmiot recenzji

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr inż. Jakuba Zająca pt. „The behaviour of composite concrete elements with unreinforced multiplanar interface”. Pracę przygotowano na Politechnice Śląskiej pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Łukasza Drobca, pełniącego funkcję promotora.

### 3. Układ i treść rozprawy

Opiniowana rozprawa jest napisana w języku angielskim, liczy 299 stron maszynopisu łącznie ze spisem treści, streszczeniem w języku polskim i w języku angielskim, rozszerzonym streszczeniem w języku polskim, wykazem ważniejszych oznaczeń i bibliografią.

Rozprawa jest podzielona na dziesięć rozdziałów.

Rozdział pierwszy jest wprowadzeniem w tematykę rozprawy, która poświęcona jest kompleksowej analizie pracy wielopłaszczyznowej powierzchni zespolenia beton - beton bez łączników w sprężonych belkach o przekroju dwuteowym współpracujących z nadbetonem.

W rozdziale drugim przedstawiono motywację pracy, zdefiniowano problemy badawcze i przedstawiono cele i zakres dysertacji. Jako główne zagadnienie badawcze wskazano zachowanie się betonowych belek zespolonych z wielopłaszczyznowym stykiem, którego celem jest

rozpoznanie i opis zjawiska, charakterystyka pracy złącza, opracowanie modeli numerycznych, a jako efekt tych badań wskazano określenie zaleceń projektowych i wskazanie dalszych kierunków badań.

Rozdział trzeci będący obszernym przeglądem literatury zawiera opis aktualnego stanu wiedzy z zakresu badań i analiz zespolenia beton - beton, który pozwolił na wskazanie luk badawczych i kierunków badań w rozprawie doktorskiej.

Rozdział czwarty zawiera główne i szczegółowe cele pracy, którymi są badania zachowania się belek o złożonej płaszczyźnie zespolenia z nadbetonem poddanej wpływom zginania i ścinania. Zawiera również tezy pracy.

Rozdział piąty jest opisem przeprowadzonych badań wstępnych wykonanych na zespolonych prostokątnych belkach sprężonych, badań bezpośredniego ścinania powierzchni zespolenia nadbetonu z belką o przekroju dwuteowym i badań czteropunktowego i trzypunktowego zginania dwuteowych belek sprężonych połączonych z nadbetonem.

W rozdziale szóstym zamieszczone są wyniki badań materiałów, badań wstępnych, badań bezpośredniego ścinania i czteropunktowego i trzypunktowego zginania wraz z ich analizą. Przedstawiono analizy wyników badań wpływu zaprogramowanych warunków zespolenia na zachowanie się belek.

Rozdział siódmy poświęcony jest analizom numerycznym, w których symulowano zachowanie się belek z badań doświadczalnych pod kątem różnych parametrów zespolenia.

W rozdziale ósmym zamieszczona jest analiza i podsumowanie wyników przeprowadzonych badań eksperymentalnych i numerycznych zakończona wnioskami dotyczącymi oceny skuteczności różnych wariantów zespolenia.

Rozdział dziewiąty zawiera rekomendacje dotyczące korekt w postanowieniach normowych do projektowania konstrukcji zespolonych.

W rozdziale dziesiątym zamieszczone są wnioski końcowe i proponowane kierunki dalszych badań,

Zamieszczona w rozprawie bibliografia zawiera 166 pozycji, w tym dwanaście pozycji współautorskich Doktoranta.

Struktura rozprawy doktorskiej jest poprawna. Układ, kolejność i zakres poszczególnych części rozprawy są odpowiednie. Przedstawiono stan zagadnienia z uzasadnieniem podjęcia tematu pracy i na tej podstawie określono cele i zakres pracy i sformułowano tezy pracy. Następnie opisano metodykę planowanych badań doświadczalnych, przedstawiono wyniki przeprowadzonych badań i ich analizę. Rozprawa kończy się posumowaniem z wnioskami, rekomendacją korekt postanowień normowych i wskazaniem kierunków dalszych badań.

Strona techniczna rozprawy nie jest najlepsza. Rozprawa jest zredagowana w sposób, który wymaga od czytelnika dużego wysiłku i cierpliwości: znajduje się w niej bardzo dużo odwołań w przód i porównań z informacjami zawartymi w dalszych częściach pracy, oznaczenia serii badawczych przy ich dużej liczbie nie ułatwiają analizy użytych wyników badań, szczegółowe opisy zachowania się belek w zdecydowanej większości odnoszą się do ich symboli a nie sposobu zespolenia, na zakończeniu sekcji zawarte są liczne zbyt szczegółowe konkluzje głównie o charakterze technicznym, które nie zawsze odnoszą się do istoty problemu.

## 4. Ocena merytoryczna rozprawy

### 4.1. Ocena doboru tematyki rozprawy

Pan mgr inż. Jakub Zając w rozprawie doktorskiej podjął temat pracy statycznej belek o złożonym kształcie przekroju poprzecznego zespolonych z nadbetonem bez udziału zbrojenia poprzecznego przechodzącego przez płaszczyznę zespolenia. Belkę sprężoną o przekroju dwuteowym otulono 'nowym' betonem na górnej płaszczyźnie półki dolnej, wysokości środka i całym obwodzie półki górnej. W badaniach skoncentrowano się na kilku wariantach zespolenia, rozważano zespolenie na 'całym obwodzie belki' (górną płaszczyznę pasa dolnego, środek i pas górny), zespolenie na całym obwodzie belki bez adhezji oraz bez adhezji i chropowatości i siedem kombinacji odcinkowego zespolenia na obwodzie. Zespolenie o złożonej powierzchni styku jest rzadko spotykane, brakuje badań tego typu połączenia dwóch betonów. Z tego względu wybór tej tematyki jest właściwy i celowy. Prace badawcze z tego zakresu mają duże znaczenie poznawcze

Aby osiągnąć ten cel, przeprowadzono obszerny przegląd aktualnego stanu wiedzy na temat wytrzymałości na ścinanie dla stropów gęstożebrowych, stropów belkowo-blokowych oraz belek zespolonych o przekroju teowym. Rozważany problem badawczy jest ogólnie znany, ale nie do końca zbadany i rozpoznany, nadal jest istotny; praca wypełnia luki w badaniach i stanowi próbę oceny skuteczności wielopłaszczyznowego zespolenia typu beton - beton w konstrukcjach zespolonych. Oceniam temat podjęty w pracy doktorskiej jako bardzo istotny do rozważań naukowych, a uzyskane wyniki badań i wynikające z nich wnioski bardzo użyteczne w praktyce budowlanej.

### 4.2. Ocena merytoryczna

Głównym celem rozprawy jest ocena wpływu wielopłaszczyznowej powierzchni zespolenia bez zbrojenia poprzecznego na pracę statyczną belek zespolonych. Aby zrealizować ten cel wykonano badania doświadczalne bezpośredniego ścinania powierzchni zespolenia, czteropunktowego i trzypunktowego zginania belki zespolonej, a także opracowano modele numeryczne odzwierciedlające warunki badania, które pozwoliły na bardzo dokładną ocenę pracy płaszczyzn zespolenia i belek, a także na modyfikację różnych właściwości powierzchni prefabrykatu.

Realizacja celu badawczego rozprawy wymagała od Doktoranta przeglądu aktualnego stanu wiedzy i dostępnych wyników badań. Dokonał obszernego przeglądu literatury przedmiotu. Bazował na najnowszych publikacjach z ostatnich lat dotyczących: mechanizmów i poziomów zespolenia, modeli ich zniszczenia, przenoszenia ścinania, mechanizmów ścinanie - poślizg, wpływu różnych czynników na skuteczność zespolenia tj. chropowatości powierzchni, wytrzymałości betonu, czasu montażu, skurczu betonu, sztywność warstw betonu, a także metod badania sił spójności, badań doświadczalnych belek zespolonych o różnych płaszczyznach zespolenia i modelowania numerycznego konstrukcji zespolonych. Zamieszczony jest też przegląd postanowień normowych dotyczących obliczeń nośności na ścinanie styku między betonami ułożonymi w różnych terminach.

W analizie stanu wiedzy zwrócono uwagę na rozbieżności wyników badań doświadczalnych naprężeń przyczepności na styku beton - beton spowodowane między innymi rodzajami zastosowanych próbek, chropowatości powierzchni, czasu między betonowaniem, skurczu betonu i właściwości betonu. Doktorant zwrócił także uwagę na postanowienia norm, które w niewystarczającym stopniu uwzględniają pracę konstrukcji zespolonych o złożonym kształcie powierzchni kontaktu. Brakuje dodatkowych wytycznych dla takich powierzchni zespolenia;

istniejące postanowienia ograniczają się do ogólnych zasad określania szerokości złącza, bez uwzględnienia różnych rozkładów naprężeń ścinających na wysokości przekroju. Normy nie uwzględniają także redystrybucji naprężeń i lokalnego pęknięcia. Brakuje także badań elementów zginanych o wielopłaszczyznowej geometrii powierzchni zespolenia. Większość dostępnych badań nie wykazała rozwarstwienia styków, w niektórych zanotowano lokalny poślizg, a do tego wykazały, że styki pionowe mają znaczną nośność. Zwrócono także uwagę na duże znaczenie złożonych modeli FEM pozwalających na kompleksową analizę pracy elementów zespolonych. Efektem przeprowadzonej analizy stanu wiedzy było wskazanie luk badawczych i na tej podstawie kierunków badań podjętych w rozprawie doktorskiej.

Na podstawie wniosków z analizy stanu wiedzy zastały postawione następujące tezy: 1) Współpraca pomiędzy płaszczyznami styku zmienia się na wysokości przekroju, 2) Związki między naprężeniami przyczepności a poślizgiem są nieliniowe, 3) Zwiększona wytrzymałość na ścinanie pionowych płaszczyzn styku wynika z efektu utwierdzenia, 4) Wydłużenie belki kompozytowej poza oś podparcia pozwala na zachowanie quasi-monolityczne pomimo poślizgu w płaszczyźnie zespolenia do osi podparcia.

Aby zrealizować cele badawcze pracy i zweryfikować tezy rozprawy mgr inż. Jakub Zając podzielił przeprowadzone badania na pięć etapów: badania wstępne sprężonej belki zespolonej o przekroju prostokątnym, badania bezpośredniego ścinania zespolenia wielopłaszczyznowego styku, badania sprężonej belki dwuteowej zespolonej poddanej czteropunktowemu oraz trzypunktowemu zginaniu i symulacje numeryczne.

#### a) Przeprowadzone badania

**Program badań** zawiera szczegółowy opis modeli badawczych, stanowisk badawczych i metod pomiarów i zbierania danych z badań. Wykonano modele badawcze na bazie prefabrykowanych sprężonych belek do badań bezpośredniego ścinania oraz cztero- i trzy punktowego zginania, które wykonano na specjalnie wykonanych stanowiskach badawczych.

- (1) Brakuje opisu pochodzenia sprężonych belek prefabrykowanych użytych w badaniach, w tym opisu systemu, w którego skład wchodzi, jakie są ich długość i sposób oparcia i innych.

Brakuje uzasadnienia, dlaczego w badaniach przyjęto podparcie belek tak daleko od ich końca?

Obciążanie belki jedną siłą blisko jednej z podpór jest typowym badaniem nośności na ścinanie min. sprężonych płyt kanałowych wg EN-PN 1168 i z pewnością taki był cel tych badań. Dlatego lepszą nazwą tych badań byłoby odniesienie do 'nośność na ścinanie', a w przypadku zginania czteropunktowego odniesienie do 'nośność na zginanie'.

Dlaczego w badaniach czteropunktowego i trzypunktowego zginania a także w badaniach wstępnych belki miały różne rozpiętości?

Brakuje wyjaśnienia jaką siłą analizuje się na wykresach, czy jest to siła przekazująca się na trawers  $F$ , czy jest to siła przekazująca się na belkę  $F/2$ ? Brakuje oznaczeń siły  $F$  na Rys.5.2, 5.9 i 5.10.

Na podstawie wzoru (5.11) można obliczyć sumaryczne ugięcie belki na kierunkach działania sił, nie jest to strzałka ugięcia  $f$  jak zaznaczono na Rys.5.18; strzałka ugięcia jest większa niż ta obliczona ze wzoru (5.11). Jeżeli na Rys.5.18b na belkę działają siły  $F/2$  to w liczniku wzoru (5.11) też powinno być  $F/2$ .

**Badania materiałów** obejmują oznaczenie podstawowych właściwości mechanicznych betonu

prefabrykatu i nadbetonu, a także chropowatości powierzchni prefabrykatu.

(2) Nie przeprowadzono badań stali zbrojenia sprężającego i pasywnego, dlaczego?

**Badania wstępne** przeprowadzono na sprężonych belkach o przekroju prostokątnym 120x120mm zespolonych z nadbetonem o grubości 40mm w czterech wariantach (dwie belki na jeden wariant). Głównym celem tych badań, którym było właściwe zaprogramowanie zasadniczych badań belek dwuteowych. Wszystkie najważniejsze informacje dotyczące zachowania się poszczególnych belek są zilustrowane na Rys.6.5.

(3) Zastrzeżenia budzi przeprowadzona analiza statystyczna, którą przeprowadzono dla trzech (seria B1, B2 i B3) i dwóch (seria B2-F i B3-P) różnych wariantów zespolenia.

Na wykresach zależności sztywność - siła (Rys.6.6) początkowa sztywność na zginanie części belek wynosi około 2500 kNm<sup>2</sup>. Obliczona sztywność na zginanie niezarysowanej belki zespolonej  $EI$  to 1517 kNm<sup>2</sup>. Skąd tak duża różnica?

**Badania bezpośredniego ścinania** przeprowadzono dla trzech wariantów zespolenia: pełnego (seria C), bez adhezji (seria AB) i z wyłączeniem adhezji i chropowatości (seria BC). Zwrócono uwagę na rozbieżności wyników uzyskanych z pomiarów LDS i DCI (Rys.6.20) i wskazano na dwa tryby zniszczenia płaszczyzny zespolenia, które były uzależnione od sposobu zespolenia. Średnia nośność na ścinanie styku bez adhezji jest niższa o 48%, a nośność styku bez adhezji i chropowatości jest niższa aż o 82% od nośności styku referencyjnego.

Na podstawie zależności siła - poślizg stwierdzono występowanie trzech faz pracy styku dwóch betonów wyznaczonych przez poślizg, a także zwrócono uwagę na duży wpływ chropowatości prefabrykatu na nośność styku na ścinanie.

(4) Oznaczenia elementów systemu pomiarowego na Rys.6.15 są inne niż ich opis na Rys.5.6. Dokładny opis i rysunki ilustrujące mierzone przemieszczenia byłyby na miejscu.

Na wszystkich wykresach na osiach odciętych powinny być naprężenia styczne (dla pełnego obwodu zespolenia zmieniają się w granicach 0,24 - 1,46 MPa), które są podstawą zależności 'bond - slip', a do tego można je odnieść do wytrzymałości na rozciąganie zespolonych betonów.

Brakuje szerszej dyskusji bardzo ciekawych wyników przedstawionych na Rys.6.16, na podstawie których można określić ilościowo wpływ adhezji, chropowatości powierzchni i tarcia na naprężenia przyczepności.

**Badania czteropunktowego zginania** belek zespolonych były najważniejszym elementem rozprawy. Zaprogramowano dziesięć serii belek o różnych wariantach zespolenia. W nadbetonie umieszczono cztery pręty zbrojenia podłużnego  $\phi 10$  i zbrojenie poprzeczne  $\phi 6$ . Zidentyfikowano cztery fazy pracy belek: do zarysowania w wyniku zginania, od poślizgu w styku, do osiągnięcia nośności i faza zniszczenia oraz trzy tryby zniszczenia: zginanie (kruszenie betonu), ścinanie, kombinacja zginania i ścinania.

Wyniki badań zestawiono i omówiono w trzech grupach. W grupie I były to trzy belki o skrajnych warunkach zespolenia, zespolona: z nadbetonem na całym obwodzie, bez adhezji na całym obwodzie i bez adhezji i zazębienia na całym obwodzie. Brak adhezji powoduje bardzo mały spadek nośności o około 5%, a brak adhezji i zazębienia spadek o około 25%. W podobnych granicach zmienia się sztywność na zginanie po zarysowaniu. Wyniki zachowania się pozostałych belek o pośrednich warunkach zespolenia zawierały się w przedziale wyznaczonym przez belki typu C i BC.

W grupie II (Rys.6.32, 6.33) analizowano belki pozbawione adhezji i zazębienia na płaszczyznach poziomych.

- (5) Zaskakujące jest porównanie zachowania się belki bez adhezji i zazębienia na górnej i dolnych płaszczyznach (Z5.1\_S) z belką pozbawiona adhezji i zazębienia tylko na górnej płaszczyźnie (Z9.1\_SB). Nośność tej pierwszej jest większa od tej drugiej, a do tego jest taka sama jak belki z zespolonej na całym obwodzie (Z1.1\_C). To wymaga wyjaśnienia.

Belki grupy III charakteryzują się brakiem adhezji i zazębienia na płaszczyznach pionowych. Brak adhezji i zazębienia na płaszczyznach pionowych i górnej płaszczyźnie poziomej powoduje spadek nośności o około 10%, a brak adhezji i zazębienia na płaszczyznach pionowych i dolnych płaszczyznach poziomych skutkuje spadkiem nośności o około 25%.

Na podstawie tych badań Doktorant przedstawił interesujące wnioski dotyczące trybów zniszczenia belek, sztywności belek, zarysowania belek i poślizgu w strefach zespolenia.

- (6) Brakuje dyskusji wyników. Najczęściej są to porównania - większe, mniejsze, nastąpił poślizg, pojawiła się rysa - brakuje uzasadnienia zachodzących zjawisk w kontekście poszczególnych wariantów zespolenia. Brakuje odniesienia do wyników bezpośredniego ścinania o takich samych warunkach zespolenia.

Nie wyjaśniono kryterium podziału badanych belek na trzy grupy. W opisie belek grupy I i II jest mowa o sztywności belek. Kryterium podziału powinny być warunki zespolenia belki z nadbetonem efektem których jest taka czy inna sztywność na zginanie.

Czy badano prefabrykat? To mógłby być bardzo ciekawy punkt odniesienia do oceny zachowania się poszczególnych belek.

Wykresy na Rys.6.25 i 6.26 w przedstawionej formie są zbędne. Należało dobrać odpowiednią skalę i legendę oznaczeń.

**Badania trzypunktowego zginania** przeprowadzono na belkach obciążonych niesymetrycznie o mniejszej rozpiętości niż w badaniach czteropunktowego zginania. Wykonano dziesięć serii belek o różnych wariantach zespolenia tak jak w poprzednim badaniu.

Tak jak dla czteropunktowego zginania wyniki badań podzielono na trzy takie same grupy. W grupie I porównano trzy belki połączone z nadbetonem na całym obwodzie o skrajnych warunkach zespolenia (Rys.6.28): zespolenie pełne, zespolenie bez adhezji i zespolenie bez adhezji i zazębienia. Brak adhezji powoduje spadek nośności o około 24%, a brak adhezji i zazębienia spadek nośności o około 37% i co bardzo ciekawe wzrost ciągliwości. Jest to efekt różnych trybów zniszczenia. Interesujące są też tryby zniszczenia tych belek (Tab.6.11): zespolona na całym obwodzie - zginanie, zespolona bez adhezji - ścinanie, zespolona bez adhezji i chropowatości - zginanie ze ścinaniem.

Belki pozbawione adhezji i zazębienia na płaszczyznach poziomych z grupy II (pięć belek) charakteryzowały się mniejszą sztywnością i nośnością niż belka referencyjna tj. zespolona z nadbetonem na całym obwodzie. W grupie tej występował II tryb zniszczenia w wyniku ścinania. Nośność tych belek była znacznie mniejsza od nośności belki referencyjnej i jednocześnie większa od nośności belki zespolonej bez adhezji.

Grupa III to dwie belki z brakiem adhezji i zazębienia na płaszczyznach pionowych, których sztywności na zginanie były najmniejsze i zbliżone do belki zespolonej z nadbetonem bez adhezji i zazębienia na całym obwodzie. Była to belka z adhezją i zazębieniem tylko na styku z półką dolną i belka z adhezją i zazębieniem na górnej płaszczyźnie półki górnej. Obie belki uległy zniszczeniu w wyniku ścinania i charakteryzowały się nośnością zbliżoną do belki zespolonej bez adhezji i zazębienia.

Omówienie wyników kończy się wnioskami, które w większości są zbieżne z wnioskami z badań czteropunktowego zginania. Ponadto jedynie belka referencyjna uległa zniszczeniu

przez zginanie, a w pozostałych przypadkach zniszczenie nastąpiło przez ścinanie w wyniku poślizgu w płaszczyznach zespolenia. Należało spodziewać się tego przy przyjętym schemacie statycznym belek.

**Analizy numeryczne** wykonano w celu poszerzenia oceny wpływu dodatkowych parametrów zespolenia na bezpośrednie ścinanie i pracę statyczną belek w warunkach czteropunktowego zginania. Obliczenia zostały wykonane przy użyciu oprogramowania ATENA Studio V5.9.1.21 (Cervenka Consulting). Po określeniu parametrów wytrzymałościowych materiałów zbudowano modele numeryczne dla bezpośredniego ścinania i czteropunktowego zginania. Wyniki analiz numerycznych wykazały bardzo dobrą zgodność z badaniami doświadczalnymi bezpośredniego ścinania w zakresie nośności zespolenia, a także sztywności przed zniszczeniem. Bardzo interesującym efektem analiz numerycznych są mapy naprężeń oraz poślizgów na całej powierzchni ścinania dla różnych warunków zespolenia, a także modele zniszczenia połączenia. Na podstawie modeli MES możliwe było wyróżnienie tylko dwóch faz pracy co było spowodowane zniszczeniem przez poślizg na całej długości zespolenia.

Analizy numeryczne przeprowadzono dla pięciu belek: grupa I - trzech zespolonych na całym obwodzie: z adhezją, bez adhezji i bez adhezji i chropowatości, grupa II - jednej zespolonej tylko na powierzchniach bocznych i jednej zespolonej na powierzchniach poziomych. Numeryczna nośność i tryby zniszczenia belek grupy I były zgodne z wynikami badań doświadczalnych, natomiast pojawiły się różnice w sztywności na zginanie.

W przypadku belek grupy II wstępują duże rozbieżności pomiędzy analizami numerycznymi a eksperymentem dotyczących zależności siła - ugięcie. Z badań doświadczalnych (Rys.7.26) wynika, że nośność belki z przyczepnością na powierzchniach pionowych jest znacznie większa (ponad 60%) od nośności belki z przyczepnością na powierzchniach poziomych. Natomiast analizy numeryczne wykazują odwrotną tendencję, nośność belki z przyczepnością na powierzchniach pionowych jest mniejsza o około 17%. Ponadto duże różnice występują w oszacowaniu nośności i sztywności na zginanie. Należało belkę Z6.1\_TB wyłączyć z tych porównań. Z wyników analizy MES (Rys.7.27) wynika, że z punktu widzenia nośności zespolenie poziomych płaszczyzn belki (TB) jest bardziej skuteczne niż zespolenie pionowych płaszczyzn belki (S) -  $(157,1\text{kN}/132,3\text{kN} = 1,19)$ .

(7) Nasuwa się pytanie, czy to jest tylko efekt długości obwodu zespolenia ( $200\text{mm}/167\text{mm} = 1,20$ )?

Zastanawiające jest identyczne zachowanie się belki zespolonej na całym obwodzie (C) i zespolonej tylko na poziomych płaszczyznach (TB) - wymaga to komentarza (Rys.7.27).

Mapy naprężeń i poślizgu w płaszczyznach zespolenia na całej długości belek o pełnym zespoleniu i zespoleniu bez adhezji, wskazały na włączenie do pracy fragmentów belki poza podporami, co wcześniej wykazał eksperyment. Analizy MES potwierdziły mechanizmy zniszczenia z badań doświadczalnych.

(8) Jak już wspomniano badano belki w warunkach podparcia odbiegających od rzeczywistych warunków. Dla rzeczywistych warunkach podparcia praca płaszczyzn zespolenia byłaby inna, a tym samym poślizg nastąpił by wcześniej.

Dlaczego sztywność na zginanie analizuje się w  $\text{kN}/\text{mm}$ , a nie w  $\text{kNm}^2$  jak miało to miejsce w badaniach doświadczalnych (Rys.7.21b)?

Wykonano także dodatkowe analizy numeryczne zachowania się belki o pełnym zespoleniu w celu sprawdzenia wpływu przyłożonego obciążenia (lokalnego nacisku) na zachowanie się zespolenia i wpływu głębokości oparcia na przenoszenie naprężeń ścinających w płaszczyznach zespolenia w strefie podparcia. Zachowanie wszystkich belek było niemal identyczne



do chwili poślizgu na płaszczyznach zespolenia. Najwcześniej poślizg nastąpił w belce bez adhezji na całym obwodzie (około 13 mm), a następnie w belce bez nadbetonu poza strefą podparcia (17 mm), w belce bez adhezji poza strefa podparcia (19 mm) i belce zespolonej na całym obwodzie (27,5mm).

Jeden z modeli (SC) zbudowano z uwzględnieniem jego pracy w płycie zespolonej przez wprowadzenie dodatkowego zespolenia na płaszczyznach bocznych. W rzeczywistym stropie nie ma takiego połączenia. Raczej beton jest wylewany między sąsiednimi belkami.

(9) Jak wcześniej już wspomniano brakuje opisu systemu, którego elementem jest belka sprężona. Brakuje informacji o zalecanych głębokościach oparcia tego typu belek.

W kolejnym etapie Doktorant zbudował uproszczone modele belek dla czteropunktowego zginania w celu określeniu wpływu poszczególnych parametrów zespolenia na zachowanie się belek. Uproszczenie polegało na przyjęciu liniowo - sprężystych modeli materiałów dla ściskania i rozciągania. Belki podzielono na cztery grupy.

Grupa I - trzy belki z pełnym zespoleniem i różną geometrią. Analizy wykazały istotny wpływ długość belki poza podporami na nośność i poślizg w płaszczyźnie zespolenia. Grupa II - siedem belek o zróżnicowanych parametrach zespolenia. Według przeprowadzonych analiz współczynnik tarcia nie ma istotnego wpływu na pierwszy poślizg styku i nośność belki, ponadto wbrew oczekiwaniom w dalszym etapie obciążeń nośność rośnie ze zmniejszaniem współczynnika tarcia. Natomiast sztywność normalna styku i sztywność styczna styku mają nieznaczny wpływ na nośność styku i sztywność na zginanie belki. Grupa III - cztery belki o zróżnicowanych wariantach zespolenia. W tym przypadku stwierdzono znacznie większą skuteczność zespolenia na płaszczyznach poziomych w porównaniu z zespoleniem na płaszczyznach pionowych (patrz uwaga (5)). Stwierdzono także dużo większy wpływ chropowatości niż adhezji na nośność złącza. Grupa IV - belka o zmodyfikowanych parametrach nadbetonu. Wykazano, że miażdżenie nadbetonu (a nie zarysowanie) skutkuje spadkiem nośności złącza o 30%.

Analizy numeryczne wykazały dobrą zgodność z wynikami badań doświadczalnych.

(10) Brakuje wyjaśnienia skokowych zmian sił przenoszonych przez belki zilustrowanych na wszystkich wykresach zależności siła - przemieszczenie. Czy nie powinien być to jeden skok po zniszczeniu płaszczyzn zespolenia będący przejściem z belki zespolonej do prefabrykatu?

Dlaczego sztywność na zginanie na Rys.7.49b jest w kN/mm?

W przypadku modeli grupy III brakuje odniesienia do wyników badań wpływu adhezji i chropowatości na nośność złącza dla czystego ścinania, czteropunktowego i trzypunktowego zginania.

**Analiza wyników i wnioski** zaczynają się od propozycji korekty obliczania nośności na ścianie płaszczyzn zespolenia dwóch betonów współczynnikami uwzględniającymi sposób podparcia belek zespolonych i kształt powierzchni styku prefabrykatu z nadbetonem. Są to współczynnik głębokości oparcia  $r_{bsi}$  wynoszący 0,92 i współczynnik geometrii styku wyrażony sprawnością powierzchni pionowych względem powierzchni poziomych  $s_{red}$ , który wynosi 0,68 dla modeli MES i waha się od 0,70 do 0,81 dla badań eksperymentalnych.

(11) Brakuje dokładniejszej informacji dotyczącej pochodzenia naprężeń stycznych w płaszczyznach zespolenia ( $\tau_{R,cr,FEM}$ ) tj. które i z jakiego fragmentu map naprężeń w stykach były one przyjmowane?

Współczynnik długości podpory powinien być współczynnikiem zwiększającym, a nie zmniejszającym, po spełnieniu określonych warunków. W rzeczywistych warunkach głębokość oparcie belek jest zdeterminowana przez szerokość podpór i rzadko

kiedy przekracza wysokość przekroju belek. W przypadku stropów gęstożebrowych i płyt głębokość oparcia zazwyczaj przekracza wysokość ich przekroju. W przeprowadzonych badaniach iloraz głębokości oparcia  $c$  i wysokości przekroju belki  $h$  to  $500/165 = 3$ . Dlatego wprowadzanie współczynnika zmniejszającego dla „gorszych” warunków podparcie jest błędne. Wniosek mógłby być następujący np. jeżeli  $c/h = 3$  to stosujemy współczynnik 1,088, dla zalecanej głębokości oparcia (np.  $c/h = 1$ ) stosujemy współczynnik 1,00, a dla wartości pośrednich interpolujemy i ewentualnie dla  $c/h < 1$  stosujemy współczynnik zmniejszający.

W dalszej części Doktorant przedstawił porównania wyników uzyskanych z badań doświadczalnych, analiz MES i obliczeń według wybranych norm PN-EN 1992-1-1:2008, PN-EN 1992-1-1:2024 i PN-EN 15037-1:2011 dotyczących nośności płaszczyzn zespolenia, zarysowanie od ścinania, a także momentu rysującego i nośności na zginanie. Analizy wykazały bardzo dużą różnicę, nawet siedmiokrotną, pomiędzy nośnością styku uzyskaną w badaniach i analizach MES a obliczoną na podstawie norm. Pozostałe analizowane wielkości miały zbliżone wartości.

Kolejny element rozważań to analiza sztywności płaszczyzny zespolenia, których miara może być różnie zdefiniowana, efektem której jest konkluzja, że sztywność styczną styku można pominąć w obliczeniach elementów zginanych

Rozdział zakończony jest posumowaniem rezultatów badań i analiz.

**Zalecenia projektowe** zawierają propozycje zmian do postanowień nowej wersji PN-EN 1992-1-1:2024 i normy PN-EN 15037-1:2011, a także ogólne zalecenia projektowe. Dotyczą one reguł projektowania elementów zespolonych z wieloma płaszczyznami zespolenia.

W nowej wersji Eurokodu 2 zaproponowano modyfikację wzoru (8.75) na naprężenia styczne w płaszczyźnie zespolenia od działających obciążeń przez wprowadzenie efektywnej szerokości zespolenia uwzględniającej pionowe płaszczyzny zespolenia w przypadku braku naprężeń normalnych i wszystkie płaszczyzny poziome w przypadku działania naprężeń normalnych.

Proponowane zmiany techniczne w normie PN-EN 15037-1:2011 opisane na str.261 rozprawy nie są zrozumiałe dla Recenzenta. Propozycja zmian merytorycznych polega na przedstawieniu koncepcji określania powierzchni zespolenia w stropach gęstożebrowych i stropach bez pustakowych dla różnych wariantów wypełnienia pełnego i lekkiego.

W rekomendacjach do projektowania konstrukcji zespolonych Doktorant wskazał na konieczność wykonywania analiz MES w odniesieniu do nowych kształtów elementów prefabrykowanych i wykonania badań chropowatości prefabrykatów z zaleceniem dążenia do ich naturalnej szorstkości.

(12) W tej części rozprawy stosowne jest pojęcie kohezja, a nie jak wcześniej adhezja, dlaczego?

Na Rys.9.1 brakuje oznaczeń szerokości zespolenia  $b_{i,a}$  i  $b_{i,b}$  ze wzoru (9.1). Można domyślać się, że jest to efektywna długość obwodu zespolenia.

**Wnioski końcowe** zawierają posumowanie efektów przeprowadzonych badań wielopłaszczyznowej powierzchni zespolenia w zakresie bezpośredniego ścinania, w belkach zespolonych poddanych cztero- i trzypunktowemu zginaniu, a także przeprowadzonych analiz MES, co pozwoliło na zaproponowanie modyfikacji i zmian w postanowieniach w normie projektowania konstrukcji z betonu i normie belkowo-pustakowych systemów stropowych. Doktorant zwrócił uwagę na potrzebę szerokiej dyskusji na temat charakterystyk mechanicznych płaszczyzn zespolenia i wytycznych do obliczania elementów z pionowymi płaszczyznami zespolenia i zakończył rozprawę stwierdzeniem, że tezy postawione w rozprawie zostały

potwierdzone.

## b) Pozostałe uwagi

Rozprawa zawiera inne usterki o charakterze technicznym, do których zaliczam:

1. Str.13. „... *sub-objectives and thesis have been determined in the further part ...*”, Str.22. „*In numerical modeling, as detailed in Section 7.2 ...*”, Str.93. „*The results of the concrete and steel tests are presented in section 6.1*”, Str.96. „*test results in Section 6.1*”. „*described in subsection*” 5.1.3, Str.114. „*This discrepancy will be discussed later ...*”. Str.139 „*The analysis ... of further analyses*”, a także Str. 134, 139, 154, 171. Organizacja (układ) pracy powinna być taka, aby nie zachodziła konieczność odwołań w przód, mogą być odwołania wstecz. Wymaga to dużej cierpliwości czytelnika. Autor każe domyślać się co będzie dalej.
2. Str.93. Z jakiego betonu wykonano nadbeton belek do badań wstępnych?
3. Str.94. „*In addition, B4.X-AB elements ...*” Nie ma takich belek na rysunkach i w wcześniejszym opisie.
4. Str.99. Z jakiego betonu wykonano belki i nadbeton?
5. Str.111, wzór (5.11) - na Rys.5.8 i Rys.5.16a nie ma oznaczeń *a*, *b* i *c*. Wzór (5.13) - na Rys.5.9 i 5.16b nie ma oznaczeń *a* i *b*.
6. Str.115, Tabela 6.4. Co to jest „*T/P*”?
7. Str.181. Skąd są właściwości zbrojenia sprężającego i pasywnego zamieszczone w tabeli 7.3? W sekcji 6.1 nie ma wyników badań tych materiałów.
8. Str.227,235,236. W opisie modelu 15 powinno być ‘*crushing*’ a nie „*cracking*”. Chodzi o kruszenie nadbetonu a nie zarysowanie.

## c) Uwagi końcowe

Wymienione uwagi krytyczne w niczym nie umniejszają wartości merytorycznej rozprawy, którą oceniam bardzo wysoko. Doktorant powinien traktować uwagi Recenzenta jako pewne wskazówki i wytyczne w dalszej działalności badawczej, a przede wszystkim w aktywności publikacyjnej.

Mgr inż. Jakub Zająć przedstawił bardzo ciekawe rozwiązanie problemu naukowego wykazując się ogólną wiedzą teoretyczną i umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Na podstawie obszernego przeglądu stanu wiedzy wyznaczył cel naukowy rozprawy i jej tezy. Opracował bardzo szeroki program badań doświadczalnych i numerycznych, których zakres pozwolił na realizację wyznaczonych celów rozprawy i weryfikację postawionych tez.

Podsumowując ocenę merytoryczną rozprawy do istotnych osiągnięć naukowych Doktoranta zaliczam: (1) trafnie dobrany temat rozprawy doktorskiej, (2) zaprogramowanie i zrealizowanie kompleksowego i bardzo szerokiego programu badań, (3) wykorzystanie nowoczesnych technik i metod badawczych, (4) gruntowną analizę wyników badań pozwalającą na właściwe wnioskowanie, (5) oryginalne wyniki badań, (6) aplikacyjny charakter wyników badań.

## 5. Podsumowanie i wnioski końcowe

Recenzowana rozprawa doktorska dotyczy istotnych i bardzo aktualnych dla budownictwa zagadnień związanych z analizą konstrukcji zespolonych typu beton - beton, w których coraz częściej pojawiają się nowe rozwiązania materiałowe i techniczne. Oprócz wartości poznawczych dysertacja ma duże znaczenie praktyczne w projektowaniu konstrukcji zespolonych o

wielopłaszczyznowym zespoleniu. Praca zawiera bardzo interesujące badania, analizy i ustalenia dotyczące oceny skuteczności zespolenia tego typu zespolenia. Oryginalny problem naukowy przedstawiony w rozprawie został rozpoznany, właściwie zdefiniowany i rozwiązany. Poziom merytoryczny rozprawy oceniam bardzo wysoko.

Recenzowana rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie postawionego problemu naukowego w dyscyplinie Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport. Doktorant wykazał się ogólną wiedzą teoretyczną w dyscyplinie naukowej i umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Przedłożona do recenzji rozprawa mgr inż. Jakuba Zajęca pt. „The behaviour of composite concrete elements with unreinforced multiplanar interface”, opracowana pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Łukasza Drobca, pełniącego funkcję promotora spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim określone w Ustawie Prawo o szkolnictwie wyższym z dnia 20 lipca 2018 r. (tekst jednolity DzU z 2022 r., poz.574 z późniejszymi zmianami).

W związku z powyższym stawiam wniosek o przyjęcie rozprawy doktorskiej i wnoszę o dopuszczenie mgr inż. Jakuba Zajęca do publicznej obrony recenzowanej rozprawy doktorskiej.

Recenzję podpisał  
Jacek Korentz