

Krzysztof Gromysz,
dr hab. inż. prof. Politechniki Śląskiej
Wydział Budownictwa,
Politechnika Śląska

Gliwice, 25 stycznia 2019 r.

Recenzja

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

1 Podstawa wykonania recenzji

Podstawą opracowania recenzji jest pismo Dziekana Wydziału Budownictwa i Architektury Politechniki Lubelskiej, prof. dr hab. inż. Bogusława Szmygina, nr WB-2586/2018 z dnia 6.12.2018 r. Promotorem rozprawy jest prof. dr hab. inż. Anna Halicka.

2 Krótka charakterystyka rozprawy

Rozprawa dotyczy szczególnego rozwiązania wykorzystywanego w konstrukcjach budowlanych – zespolenia dwóch warstw betonowych układanych w różnych terminach. W rozwiązaniach praktycznych najczęściej jedna z warstw stanowi element prefabrykowany, a druga jest betonem układanym na budowie. Dzięki wzajemnemu oddziaływaniu na siebie warstwy te wspólnie przenoszą obciążenia. Tego typu konstrukcje mają bardzo szerokie zastosowanie w budownictwie ogólnym, przemysłowym, mostowym, budownictwie drogowym i kolejowym. Z pomocą prefabrykatów współpracujących z betonem układanym na budowie można uzyskać bardzo atrakcyjne architektoniczne formy całego obiektu. Ponadto zastosowanie elementów prefabrykowanych znacznie skraca czas prowadzenia robót budowlanych. Analizy podjęte w ocenianej rozprawie są zatem bardzo aktualne w czasie, gdy częściowa prefabrykacja konstrukcji i elementów budowlanych stała się wymogiem czasu. Należy tu dodać, że prace własne Autora ograniczają się do zespolonych elementów teowych.

Oceniana rozprawa liczy 184 numerowane strony i składa się na nią 7 numerowanych rozdziałów oraz poprzedzający te rozdziały „spis oznaczeń” a także „literatura” i streszczenia w językach polskim i angielskim zamieszczone na końcu pracy.

W rozdziale pierwszym („Wstęp” - liczy 4 strony) uzasadniono podjęcie tematyki badań. W szczególności stwierdzono, że brak jest precyzyjnego opisu czynników wpływających na pracę statyczną żelbetowych elementów zespolonych. W punkcie 1.2 rozdziału jest napisane, że *podjęto problem naukowy, jakim jest stworzenie doświadczalno-teoretycznych podstaw opisu pracy żelbetowych elementów zespolonych o przekroju teowym, a w szczególności precyzujących i dopełniających wiedzę na temat wpływu parametrów styku na pracę takich elementów*. Nasuwa się pytanie w odniesieniu do powyższego zdania, czy podstawy opisu problemu, którymi autor zamierza się zająć mogą być jednocześnie dopełnieniem istniejącego opisu? W podpunkcie 1.2 rozdziału zdefiniowano zakres pracy ograniczając go do elementów teowych poddanych obciążeniom statycznym.

W rozdziale drugim („Aktualny stan wiedzy o żelbetowych elementach zespolonych” - liczy 39 strony) dokonano przeglądu aktualnych zagadnień odnoszących się do żelbetowych konstrukcji zespolonych. Najpierw przedstawione zostały fizyczne zjawiska występujące na styku dwóch betonów, do których należą: adhezja, „aggregate interlock”, tarcie, „shear-freiction”, „dowel action”, a także oddziaływanie zbrojenia pionowego przechodzącego przez styk (zespolenie). Następnie opisano metody obliczeniowe służące do wyznaczania nośności styku. Metody te starano się odnieść do opisanych uprzednio zjawisk fizycznych. W ostatniej części rozdziału dokonano przeglądu badań betonowych konstrukcji zespolonych.

W rozdziale trzecim („Podstawy, założenia programu własnych badań i analiz oraz cząstkowe cele pracy” - liczy zaledwie 2 strony) zdefiniowano cel i zakres pracy. Na stronie 60-tej można wyróżnić trzy cele, które Autor zamierza osiągnąć. Pierwszym jest sprawdzenie, czy prawa rządzące stykiem dwóch betonów w elementach o przekroju prostokątnym są także aktualne w elementach o przekroju teowym. Drugim jest doprecyzowanie wpływu poszczególnych zjawisk zachodzących w styku (adhezja, tarcie, oddziaływanie zbrojenia pionowego) na nośność styku. Trzecim celem jest wyznaczenie parametrów opisujących własności zespolenia i zastosowanie ich do budowy numerycznego modelu zespolenia warstw betonu.

Rozdział czwarty („Własne badania laboratoryjne” - liczy 40 stron) jest zdaniem recenzenta najistotniejszą częścią pracy. Składa się on z dwóch punktów (4.1 i 4.2), w których opisano własne badania laboratoryjne przeprowadzone na elementach w skali półtechnicznej. W rozdziale tym przedstawiono badania dwóch dużych serii elementów. Co więcej w każdym z punktów tego rozdziału, znalazły się informacje dotyczące jednej serii obejmujące: program badań, przebieg badań, wyniki badań, interpretację wyników badań oraz wnioski. Zatem w każdym z punktów omawianego rozdziału Autor zamieścił wręcz gigantyczną ilość informacji. Należy zwrócić uwagę, że w innych pracach, gdzie prezentowane są autorskie badania, informacje te zamieszcza się w osobnych rozdziałach. I tak w jednym rozdziale znajduje się wówczas program badań, w kolejnym przebieg badań a w następnych wyniki i interpretacja badań. W ocenianej pracy jest zupełnie inaczej. W jednym punkcie (a nawet nie rozdziale) znajdują się wszystkie informacje o całej serii badań. Rozprawa powinna być syntetycznym podsumowaniem pracy doktoranta, ale czy w takich rozmiarach? Czytając pracę zabrakło w szczególności systematycznego zestawienia elementów badawczych z ich jasnym opisem. W celu prześledzenia pracy i zliczenia przebadanych elementów sporządziłem we własnym zakresie dwie tablice opisujące tylko cechy styków badanych elementów. Było to niezbędne w celu prześledzenia planu badań i prezentowanych wyników. Tablice te zamieszczam poniżej.

Tablica 1. Cechy styków elementów opisanych w punkcie 4.1 rozprawy – seria BT

Położenie styku na wysokości h elementu (względem środka) (względem środka)	Oznaczenie serii (elementów w serii)	Zbrojenie pionowe w styku	Opis zabiegów zrealizowanych na powierzchni styku	Liczba przebadanych elementów
$\frac{3}{4} h$ (połączenie środka z półką)	BT-1 (BT-1/1, BT-1/2, BT-1/3)	$\rho_t = 0,21 \%$	czyszczenie z mleczka cementowego szczotką drucianą	3
$\frac{1}{2} h$ (w środku)	BT-2 (BT-2/1, BT-2/2, BT-2/3)	$\rho_t = 0,42 \%$	- -	3
$\frac{1}{4} h$ (w środku)	BT-3 (BT-3/1, BT-3/2, BT-3/3)	$\rho_t = 0,42 \%$	- -	3
liczba przebadanych elementów				9

Tablica 2. Cechy styków elementów opisanych w punkcie 4.2 rozprawy – seria BZ

Opis styku	Oznaczenie serii (elementu)	Zbrojenie pionowe w styku	Opis zabiegów zrealizowanych na powierzchni styku	Liczba przebadanych elementów
Styk z pełną przyczepnością bez zbrojenia	BZ/P (BZ/P/1, BZ/P/2, BZ/P/3)	$\rho_i = 0$	czyszczenie z mlecza cementowego szczotką drucianą	3
Styk z pełną przyczepnością i zbrojeniem	BZ/P+S (BZ/P+S/1, BZ/P+S/2, BZ/P+S/3)	$\rho_i = 0,21 \%$	czyszczenie z mlecza cementowego szczotką drucianą	3
Styk z przyczepnością mechaniczną i zbrojeniem	BZ/S1 (BZ/S1/1, BZ/S1/2, BZ/S1/3)	$\rho_i = 0,21 \%$	powlekanie środkiem antyadhezyjnym	3
Styk bez przyczepności lecz ze zbrojeniem	BZ/S2/A (BZ/S2/A1, BZ/S2/A2, BZ/S2/A3)	$\rho_i = 0,21 \%$	ułożenie membrany PVE	3
Styk bez przyczepności lecz ze zbrojeniem	BZ/S2/B (BZ/S2/B1, BZ/S2/B2, BZ/S2/B3)	$\rho_i = 0,42 \%$	ułożenie membrany PVE	3
liczba przebadanych elementów				15

Z zestawienia zamieszczonego w tablicy 1 wynika, że w punkcie 4.1 opisano badania dziewięciu elementów zespolonych. Każdy z nich cechował się rozpiętością 1800 mm oraz teowym przekrojem składającym się z płyty ($b \times h$) 640 mm \times 50 mm i średnika 80 mm \times 150. W elementach różnicowano wysokość położenia zespolenia. Zespolenie znajdowało się w środku - w 1/4 wysokości elementu albo w 1/2 wysokości elementu albo w 3/4 wysokości elementu w miejscu, w którym średnik przechodził w płytę. Ponadto różnicowano oraz ilość zbrojenia w zespoleniu ($\rho_i = 0,21 \%$ albo $\rho_i = 0,42 \%$). We wszystkich elementach stosowano takie same zabiegi dotyczące powierzchni zespolenia. Polegały one na czyszczeniu jej z mlecza cementowego za pomocą szczotki drucianej przed ułożeniem drugiej warstwy betonu. Elementy badano w schemacie belki dwuopornikowej w pozycji odwróconej.

Z kolei w punkcie 4.2 przedstawiono badania piętnastu elementów o takich samych wymiarach jak opisane w punkcie 4.1, z tym, że zespolenie w tych elementach znajdowało się w miejscu połączenia średnika z płytą. W przypadku elementów opisanych w punkcie 4.2 różnicowano zabiegi przeprowadzone na powierzchni styku. Wśród przebadanych elementów były takie, w których: całkowicie usunięto możliwość przenoszenia naprężeń stycznych przez beton albo usunięto „przyczepność chemiczną” albo czyszczono zespolenie z mlecza cementowego za pomocą szczotki drucianej.

Rozdział piąty („Analiza numeryczna żelbetowych belek zespolonych o przekroju teowym” - liczy 53 strony) zawiera systematyczny opis przeprowadzonych obliczeń. I tak w punkcie 5.1 omówiono konstytutywne modele materiałów, w punkcie 5.2 przedstawiono model numeryczny, w punkcie 5.3 zamieszczono wyniki analiz numerycznych, a w punkcie 5.4. podsumowano wyniki obliczeń.

Rozdział szósty („Zalecenia do projektowania żelbetowych belek zespolonych, w szczególności o przekroju teowym” - liczy 10 stron) podkreśla użyteczny charakter pracy. Zamieszczone zostały w nim wskazówki dla projektanta konstrukcji dotyczące sprawdzania nośności zespolenia. Zwieńczenie rozdziału stanowi *Algorytm sprawdzania nośności stref przypodporowych belek zespolonych*.

Rozdział siódmy („Podsumowanie i wnioski końcowe” - liczy 4 strony) podzielony jest na pięć punktów. Dwa pierwsze odnoszą się do wyników badań doświadczalnych (7.1 „Wpływ położenia styku na wysokość” i 7.2 „Wpływ różnie kreowanego styku”) a trzeci do wyników analiz numerycznych. Przedostatni dotyczy zaleceń do projektowania żelbetowych elementów zespolonych. W ostatnim przedstawiono kierunki dalszych badań.

3 Ogólna ocena rozprawy

Pracę należy uznać za dzieło kompletne, ponieważ w sposób jednoznaczny zdefiniowano problem badawczy, postawiono tezy, rozwinięto je i przeanalizowano oraz wyciągnięto wnioski naukowe, a także wnioski ważne z punktu widzenia praktyki. W pracy zrelacjonowano zarówno wyniki badań doświadczalnych jak i wyniki obliczeń. Kolejne rozdziały pracy wynikają z poprzednich, a wszystkie razem stanowią spójny opis podjętych problemów.

Przed przystąpieniem do własnych analiz dokonano przeglądu literatury, który zrelacjonowano w rozdziale drugim. Układ tego rozdziału zasługuje na wysoką ocenę, ponieważ Autor najpierw w sposób systematyczny opisał zjawiska zachodzące w zespoleniu dwóch warstw betonu od strony fizycznej. Opis został wzbogacony trafnie dobranymi rysunkami, które w sposób pełny opisują mechanizm generowania odpowiedzi zespolenia na obciążenia. Następnie Autor przeszedł do matematycznego opisu przedstawionych zjawisk. W opisie tym w sposób krytyczny odniósł się do ustaleń normowych, które często nie odwzorowują wystarczająco dokładnie zjawisk zachodzących w zespoleniu. Z kolei dokonując przeglądu badań doświadczalnych wyczerpująco przedstawił osiągnięcia badawcze ostatnich dziesięciu lat. Do starszych wyników Autor słusznie odsyła czytelnika do bogatej literatury przedmiotu. Jednocześnie z tekstu wynika, że osiągnięcia badaczy są znane Autorowi. Należy podkreślić, że wynikiem tego przeglądu jest wskazanie dotychczasowych osiągnięć badaczy oraz zaprezentowanie problemów do rozwiązania. Na to pytanie odpowiada rozdział trzeci. Rozdział ten liczy tylko dwie strony, co stanowi pewien dysonans do objętości rozdziałów sąsiednich (39 stron i 40 stron). Zawiera jednak najważniejsze dla tej części pracy akapity, w tym te odnoszące się do prac Pani Promotor. Autor słusznie zauważa konieczność kontynuacji dzieła, które jest już specjalnością Ośrodka Lubelskiego. W każdym razie dokonany przegląd pozwolił na zaplanowanie własnych badań i w znacznym stopniu, dzięki przeprowadzeniu studiów literatury, zbudowanie własnego warsztatu badawczego. W tym miejscu Autor zapowiada, że będzie prezentował tylko wyniki ostateczne bez opisu prób, które podejmował, na przykład związanych z wykorzystaniem systemu pomiarów optycznych.

Opis badań zamieszczony w rozdziale czwartym jest ekstremalnie syntetyczny, do tego stopnia, że aby móc prześledzić badania musiałem zbudować swoje pomocnicze zestawia charakterystyk przebadanych styków, które zamieściłem w punkcie 2 recenzji (tablica 1 i tablica 2). Program i przebieg badań mógł zostać szerzej opisany. Jest to przecież część pracy, która jest ponadczasowa. Do interpretacji wyników zawsze można wrócić a do relacji z badań już nie. Same badania, które w sposób czytelny zostały podzielone na dwie części, oceniam wysoko.

W pierwszej części, która została opisana w punkcie 4.1, Autor przedstawia badanie wpływu położenia styku na wartość obciążenia wywołującego zarysowanie styku. Następnie w tym samym punkcie analizuje zachowanie belki i styku po wystąpieniu zarysowania. Wyniki badań elementów belkowych są dobrze

udokumentowane (w odróżnieniu od gorzej ocenionego sposobu prezentacji programu badań). Na szczególne uznanie zasługują tensometryczne pomiary odkształcenia zbrojenia pionowego. Pomiary tensometryczne są jednymi z trudniejszych, co wynika w wielu czynników takich jak: trafny dobór miejsca umieszczenia tensometrów na zbrojeniu, dokładność montażu tensometrów, konieczność zachowania precyzji przy układaniu mieszanki betonowej i w końcu staranności w prowadzeniu samych pomiarów. Z tym wszystkim Autor uporał się doskonale, co świadczy o opanowaniu przez niego warsztatu badawczego. Same wyniki odkształceń zbrojenia są dobrze udokumentowane i pozwalają na wyciągnięcie wniosków, a nawet uogólnień. Pewne zastrzeżenia mam do zbyt skrótowej dokumentacji wyników badań uzupełniających betonu i stali, o czym więcej kolejnym punkcie recenzji.

W drugim cyklu badań (punkt 4.2), również w sposób syntetyczny, w jednym punkcie przedstawiono: program, wyniki oraz wnioski z badań dotyczących wpływu różnie ukształtowanego styku na możliwości przenoszenia przez styk obciążeń. Tu również na wyróżnienie zasługują precyzyjne pomiary tensometryczne, na podstawie których możemy wnioskować nie tylko o roli zbrojenia pionowego w zapewnieniu przenoszenia obciążeń w zespoleniu ale również o istotnym znaczeniu przyczepności chemicznej i mechanicznej.

Każdy z cykli badawczych zawiera syntetyczne podsumowanie, które okazują się bardzo przydatne w lekturze pracy. W podsumowaniach tych Autor krytycznie odnosi się do opisanych w normach metod obliczania nośności zespolenia dwóch warstw betonu, w szczególności *do fib Model Code 2010*. A krytyczne podejście, nawet to opracowań szacownych instytucji, jest oczywiście wskazane.

Modelowanie konstrukcji żelbetowych za pomocą naukowych programów, do których należy ABACUS jest bardzo trudnym zadaniem. W szczególności jeżeli mamy do czynienia z dodatkowym utrudnieniem jakim jest występowanie zespolenia dwóch betonów. Mała zmiana jednego parametru powoduje jakościową zmianę otrzymywanych wyników a często brak zbieżności. Stąd uzyskanie wyników opisanych w rozdziale piątym uważam za znaczne osiągnięcie Doktoranta. Wysoko oceniam także rozplanowanie rozdziału piątego. Najpierw w sposób systematyczny zostały opisane modele materiałowe betonu i stali, następnie przedstawiono możliwości modelowania trudnych zagadnień w systemie ABACUS, a w końcu zrelacjonowano obliczenia własne. Dokumentacja wyników analiz numerycznych zamieszczona w punkcie 5.3 jest kompletna i spójna. Co istotne, wyniki obliczeń odnoszą się w sposób systematyczny do wielkości mierzonych w czasie badań: zarysowania, ugięcia oraz zmiany odkształceń (sił) w zbrojeniu. Takie zestawienie wyników pomiarów z wynikami obliczeń pozwoliło ustalić parametry styku. Co istotne, wyznaczone parametry Autor odnosi do ustaleń normowych i jednocześnie przedstawia swoje propozycje.

Z utylitarne punktu widzenia zwieńczeniem pracy jest rozdział szósty, gdzie Autor prezentuje swój własny algorytm obliczania nośności stref przypodporowych belek zespolonych.

4 Uwagi merytoryczne do rozprawy

Rozprawa obejmuje bardzo obszerne badania żelbetowych elementów zespolonych. Dokumentuje także ogrom wykonanej pracy. Przeprowadzone badania dostarczyły wyniki, które zostały w sposób prawidłowy zinterpretowane. Niniejszy punkt odnosi się głównie do projektu badań. Uwagi w nim zawarte traktować należy zatem jako przyczynek do dyskusji podczas publicznej obrony pracy.

Projektując badania autor zdecydował się prowadzić je tylko na elementach zespolonych o przekroju teowym. Tymczasem praca ma w pewnym sensie charakter porównawczy. Jej celem jest bowiem sprawdzenie wpływu występowania zespolenia w przekroju teowym na odkształcenia takiego elementu. Co więcej Autor chce zweryfikować czy to co wiemy o zespolonym przekroju prostokątnym jest również

aktualne w przekroju teowym. Dlaczego tego po prostu nie sprawdzić w sposób eksperymentalny? Zdaniem recenzenta wśród elementów badawczych winien znaleźć się element monolityczny o przekroju i rozpiętości takich samych jak elementy zespolone. Wyniki badań takiego elementu byłyby punktem odniesienia dla wszystkich elementów zespolonych. Ze względu na brak wyników badań takiego elementu Autor był zmuszony porównywać między sobą tylko elementy, w których występowało zespolenie. Po przebadaniu elementu monolitycznego można by w sposób pełniejszy zinterpretować rolę zbrojenia pionowego w elementach zespolonych. Być może udałoby się ustalić za jaką część odkształceń zbrojenia pionowego odpowiada ścinanie w kierunku pionowym, a za jaką ścinanie w kierunku poziomym w zespoleniu. Takie spostrzeżenia mogłyby prowadzić do użytecznych wniosków mówiących jak traktować przechodzące przez zespolenie zbrojenie pionowe przyjęte z warunku przeniesienia ścinania pionowego. Poza tym niezwykle cenne byłoby porównanie ugięć elementów zespolonych z ugięciem elementu monolitycznego. Brak rysy w zespoleniu (jak na przykład w mechanizmie zniszczenia B.2.1 wg tablicy 6.1) nie jest równoznaczne z tym, że sztywność elementu zespolonego odpowiada sztywności elementu monolitycznego. To samo dotyczy wyężenia zbrojenia głównego.

Wydaje się, choć jest to wyrażone w pracy tylko w sposób pośredni w punkcie 2.4, że projektując badania serii BT Autor oczekiwał, że położenie styku na różnej wysokości w przekroju teowym będzie wpływało bardzo istotnie na wartość naprężeń stycznych wywołanych w zespoleniu (sił ścinania poziomego). Oczywiście przed wydzieleniem się rys ukośnych wywołanych łącznym działaniem momentu zginającego i sił poprzecznych tak jest, co wynika wprost z zależności

$$\tau_{Ed} = \frac{V_{Ed} S_x}{b_i I_x}. \quad (4.4 - \text{wg pracy})$$

Jednak po stosunkowo szybkim wydzieleniu się rys pionowych i ukośnych oraz ich propagacji do zespolenia powyższa zależność traci swoją aktualność. W omawianym tu zarysowanym stanie wartość naprężeń stycznych zależy już tylko od różnicy siły w zbrojeniu podłużnym między rysami. Zatem wartość naprężeń stycznych nie zależy wówczas od wysokości położenia zespolenia, co wynika wprost z zależności

$$\tau_{sdi} = \beta \frac{V_{Sd}}{z \cdot b_i}. \quad (2.6 - \text{wg pracy})$$

Zdaniem recenzenta tym należy tłumaczyć podobieństwo wykresów zamieszczone na rys. 4.10 – 4.12 już po wystąpieniu zarysowania (na rysunkach tych zaprezentowano wyniki badań elementów, w których zespolenie występuje na różnej wysokości w przekroju). Tak więc przyjęty program badań dotyczący elementów BT-1, BT-2 i BT-3 pozwolił powiedzieć dużo o momencie zarysowania styku tych elementów. Jednak już po dojściu rys ukośnych do zespolenia, zachowanie elementów tej pierwszej serii badawczej nie różniło się istotnie. Przenosząc powyższe na koncepcję stanów granicznych, a więc na zastosowania praktyczne, między elementami BT-1, BT-2 i BT-3 występują różnice w zakresie SGU, ale w odniesieniu do SGN już nie.

W tym miejscu cofnijmy się do punktu 2.4 recenzowanej pracy. Autor traktuje przekrój teowy jako zjawisko, które zmienia charakterystykę naprężeniowo-odkształceniową w zespoleniu. Stwierdza, że nie ma potwierdzenia, że zespolenie wykonane w przekroju teowym będzie miało podobny wpływ na element jak w przypadku zespolenia wykonanego w przekroju prostokątnym. Jest to oczywiście uzasadniona obawa, ale w pracy, projektując badania nie przedyskutowano tego problemu wystarczająco dokładnie. Pomińmy stan przed zarysowaniem, gdzie sprawa, ze względu na wzór (4.4), jest oczywista i skupmy się na sytuacji po zarysowaniu. Jeżeli analizować stan graniczny według zależności (2.6) to okaże się, że wartości sił ścinania poziomego wywołane w zespoleniu w przekroju teowym są takie same jak w przekroju prostokątnym. Wydaje się, że planując eksperyment inaczej należało postawić tezę. Uważam, że istotna może okazać się różnica w wywołanych naprężeniach normalnych w zespoleniu. Ze względu na większą

sztynność niezarysowanej strefy ściskanej w przekroju teowym (większa powierzchnia), w stosunku do sztywności strefy ściskanej przekroju prostokątnego, w przekroju teowym wystąpią większe naprężenia normalne w zespoleniu. Dodatkowo naprężenia normalne (rozciąganie) w zespoleniu ograniczają możliwość generowania wewnętrznych sił tarcia, które mają równoważyć naprężenia rozwarstwiające. To z kolei może pociągać za sobą mniejszą nośność zespolenia. Gdyby tak postawić tezę, to być może program badań uwzględniłby także badania elementu o przekroju prostokątnym a następnie porównywanie wyników badań przekroju prostokątnego z wynikami badań odpowiadającego elementu o przekroju teowym. Wówczas mogłoby się okazać, że aby czerpać korzyści z zespolonego przekroju teowego musimy przyjąć w nim więcej zbrojenia pionowego niż w analogicznym przekroju prostokątnym. Zadaniem dodatkowej ilości zbrojenia pionowego miałyby być ograniczenie szerokości rysy w zespoleniu wywołanej nie tyle naprężeniem stycznym występującym w zespoleniu ale naprężeniami normalnymi do powierzchni styku.

Prezentując wyniki badań uzupełniających (betonu i stali) Autor zaniechał przedstawienia pełnych wyników badań wytrzymałościowych. Na przykład w tablicach 4.1 i 4.5 nie podano rozrzutu wyników badań wytrzymałości betonu, na przykład przez podanie odchylenia kwadratowego względem średniej. Z kolei na stronie 64 zapisano, że przeprowadzono badania stali zbrojeniowej dla jednego pręta zbrojenia głównego średnicy 14 mm i dla tego jednego badania wyznaczono średnią granicę plastyczności. Rodzi się pytanie jak z jednej wartości wyznaczyć wartość średnią? Podobnie zbyt oszczędny jest opis sposobu pomiaru. Na stronie 68 podano, że pomiar ugięć przeprowadzono za pomocą czujników elektronicznych LVTD. Nie przedstawiono jednak informacji o dokładności wskazań samego czujnika (zwykle podaje się błąd w procentach), realizowanej dokładności zapisu przy zamienianiu sygnału analogowego na cyfrowy (wynika z parametrów kwantyzacji sygnału) oraz częstotliwości próbkowania mierzonej wielkości (liczba zapisów na sekundę).

Jak wspomniano w poprzednim punkcie, modelowanie konstrukcji żelbetowych za pomocą naukowych programów, do których należy ABACUS jest bardzo trudnym zadaniem. Stąd uzyskanie wyników opisanych w rozdziale piątym uważam za znaczne osiągnięcie Doktoranta. Wydaje się jednak, że w opisie modelu zbyt mało informacji podano na temat funkcji „*Embedded*” wykorzystanej do modelowania przyczepności zbrojenia do betonu. Z parametrów tej funkcji wynika w szczególności na jakiej długości w otoczeniu zespolenia zbrojenie pionowe doznaje odkształceń. Długość ta z kolei decyduje o wartości naprężeń normalnych utrzymywanych przez to zbrojenie w zespoleniu. Opisując wyniki badań Autor dobrał w szczególności wartość współczynnika tarcia $\mu = 0,4$ w serii BZ badań. Wydaje się, że dobrana wartość współczynnika μ daje zgodność wyników obliczeń numerycznych z wynikami badań doświadczalnych dla ściśle określonych parametrów funkcji „*Embedded*”. Gdyby tylko sam współczynnik tarcia w zespoleniu decydował o odpowiedzi modelu numerycznego na obciążanie, wykresy z rynku 5.17 miałyby inny kształt.

5 Inne uwagi do rozprawy

Jak przedstawiono w charakterystyce rozprawy (punkt 2 niniejszej recenzji) Autor dążył do maksymalnie syntetycznego przedstawienia efektów swojej pracy. Syntetyczne wyrażanie się jest oczywiście wielką zaletą naukowca – inżyniera. Jednak w ocenianej pracy prowadzi to w paru miejscach do niepotrzebnego ograniczenia prezentowanych wyników. Poniżej przywołano niepotrzebne, zdaniem recenzenta skróty, których Autor dokonał:

Na stronie 14 stwierdzono, że „*najistotniejszy jest swoisty stan graniczny zarysowania styku*”. Pojęcie swoistego stanu granicznego zarysowania pojawia się tu po raz pierwszy - nie zostało wcześniej zdefiniowane. Aby czytelnik mógł poprawnie zrozumieć to pojęcie musiałby sięgnąć do wcześniejszych publikacji Autora.

Na stronie 15 znajduje się stwierdzenie „*przedmiotem rozprawy są zagadnienia pracy statycznej żelbetowych elementów zespolonych w strefach przypodporowych oraz w styku pod obciążeniem doraźnym*”. Sformułowanie to nie jest precyzyjne. Rozumiem, że Autor bada konstrukcje poddane doraźnym obciążeniom quasi-statycznym (statycznym). Jednak opisanie całego zagadnienia jako praca statyczna uważam za zbyt uproszczone z dwóch powodów. Po pierwsze praca to wielkość fizyczna wyrażona w dżulach. Po drugie stwierdzenie to odczytuję, jako założenie poczynione już na samym początku rozprawy (punkt 1.3), że obciążeniom quasi-statycznym odpowiadają zjawiska zachodzące wewnątrz elementów żelbetowych o tym samym charakterze. To założenie okazuje się jednak niespełnione przy większych wartościach obciążeń, ponieważ w czasie obciążenia występuje wiele zjawisk dynamicznych, takich jak rozwój zarysowania w zespoleniu, włączanie się zbrojenia pionowego w przenoszenie obciążeń i z pewnością wiele innych. Są to zjawiska zależne od czasu, nie tylko od obciążenia, a więc dynamiczne.

Na stronie 18 znajduje się stwierdzenie, że styki mogą znajdować się „*w prostym stanie naprężenia jak rozciąganie, ścinanie, jak również w stanie złożonym (ściananie z rozciąganiem, ścinanie ze ściskaniem lub skręcanie)*”. Z tego zdania, zawierającego szereg myśli można wyciągnąć nieprawdziwy wniosek, że występują styki ścinanie, bez towarzyszących im naprężeń normalnych. Tymczasem każdemu naprężeniu stycznemu musi towarzyszyć naprężenie normalne.

Na stronie 15 znajduje się pojęcie „*hipoteza materiałowa*”, które, jak wynika z kontekstu ma w sobie łączyć pojęcia hipotezy wyężeniowej i własności materiału (model konstytutywny).

Celem dokonania skrótów w opisach Doktorant w pracy często posługuje się rzeczownikiem „autor”. Czasami trudno jest jednak zidentyfikować kim jest „autor”. Na przykład na stronie 53 znajduje się zdanie „*Autor przedstawił również cenne uwagi praktyczne, pomocne przy modelowaniu numerycznym betonowych elementów zespolonych*”. Wspominanym w tekście „Autorem” jest chyba Doktorant, ale czemu w takim razie już w punkcie 2.3 sam ocenia wyniki swojej pracy?

Na stronie 66 znajduje się stwierdzenie, że „*przyrost obciążenia w prasie stawał się nieliniowy*” jest zbyt skrótowe a przez to niezrozumiałe. Obciążeniem steruje człowiek i o ile istnieje możliwość to można je dowolnie zwiększać. Myślę, że Autor ma na myśli fakt, że związek między obciążeniem a przemieszczeniem punktu, w którym te obciążenie przyłożono jest nieliniowy.

Podobnie na stronie 66 Autor pisze, że o *siłach niszczących, przy których pojawiły się pierwsze rysy ukośne i rysy w styku*. Jeżeli były to pierwsze rysy, to pewnie pojawiły się i kolejne. A jeżeli tak to siły nie mogły być niszczące.

Na stronie 68 napisano „*Pojawienie się rys ukośnych we wszystkich belkach dowodzi, że została osiągnięta wytrzymałość na rozciąganie betonu w krzyżulcach betonowych*”. Wydaje się, że ponownie Autor w jednym zdaniu chce ująć kilka myśli. Uważam, że poprawniej byłoby stwierdzić, że główne naprężenia σ (lub inne według zastosowanej hipotezy wyężeniowej) osiągnęły wytrzymałość betonu na rozciąganie. Krzyżulce betonowe odnoszą się do pewnej teorii projektowania zbrojenia poprzecznego. W tym kontekście raczej mówi się o nośności tych krzyżulców na ściskanie.

W przyszłości, w publikacjach opracowywanych na podstawie rezezwanej rozprawy, Autor będzie musiał ujednolicić nazewnictwo. Obecnie do określenia górnej warstwy betonu, tylko „*Spisie oznaczeń*” stosuje kilka określeń: nadbeton (przy definicji h_n – wysokość przekroju nadbetonu), beton uzupełniający (przy definicji A_n – pole przekroju betonu uzupełniającego), a w jeszcze innym miejscu, przy definicji wielkości β , pojęcie nowego betonu. Ponadto na stronie 17, w odniesieniu do jednej z warstw betonu, pojawia się określenie „*komponent*”.

Przedstawione powyżej uwagi nie są istotne z punktu widzenia merytorycznej zawartości pracy i w żaden sposób nie wpływają na jej bardzo wysoką ocenę. Są one jak wspominałem wyżej konsekwencją dążenia Autora do zbyt syntetycznego formułowania myśli.

6 Podsumowanie

Recenzowana praca została poświęcona problemowi ważnemu dla praktyki inżynierskiej – analizie wpływu parametrów styku na odkształcalność i nośność żelbetowych belek o przekroju teowym.

Autor przed przystąpieniem do badań własnych gruntownie przanalizował istniejące opracowania literaturowe oraz przeprowadził obliczenia wstępne dostępnymi metodami. Na tej podstawie postawił tezy a następnie zaprojektował i przeprowadził badania doświadczalne. Bazując na wnioskach z badań rozbudował metodę nieliniowej analizy żelbetowych elementów o przekroju teowym z wykorzystaniem systemu do obliczeń numerycznych. Wyniki tych badań i analiz znacznie poszerzyły wiedzę o rozważanym problemie oraz doprowadziły do zaproponowania własnych metod sprawdzania zespolenia w żelbetowych elementach zespolonych.

Przedstawiona rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego a doktorant udowodnił, że ma wiedzę i posiada umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska autorstwa mgr inż. Łukasza Jabłońskiego pt. „*Wpływ parametrów styku na pracę statyczną żelbetowych belek zespolonych o przekroju teowym*” spełnia wymogi stawiane pracom doktorskim określone w Ustawie z dnia 14.03.2003 roku „O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki” (tekst jednolity Dz. U. z 2014 r. poz. 1852, z późniejszymi zmianami).

Jednocześnie wnioskuję o wyróżnienie przedstawionej pracy doktorskiej.