

Krzysztof Gromysz,
dr hab. inż. prof. PŚ.
Wydział Budownictwa,
Politechnika Śląska
Ul. Akademicka 5,
44-100 Gliwice



Gliwice, 8 maj 2023 r.

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. Grzegorza Sadowskiego pt. „Wpływ parametrów geometrycznych i fizycznych profilowanej powierzchni styku na pracę statyczną żelbetowych belek zespolonych”.

1 Podstawa wykonania recenzji

Podstawę opracowania recenzji stanowią:

Pismo Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Warszawskiej z dnia 06.03.2023 r. (WTBD.521.DR.12.2023), w którym Przewodniczący Rady Dyscypliny dr hab. inż. Konrad Lewczuk prof. uczelni zwraca się z prośbą o opracowanie recenzji rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Grzegorza Sadowskiego pt. „Wpływ parametrów geometrycznych i fizycznych profilowanej powierzchni styku na pracę statyczną żelbetowych belek zespolonych”, której promotorem jest prof. dr hab. inż. Anna Halicka, a promotorem pomocniczym jest dr inż. Piotr Wiliński.

Uchwała nr 595/2022 Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Lądowa i Transport Politechniki Warszawskiej z dnia 06.12.2022 r. w sprawie wyznaczenia recenzentów rozprawy doktorskiej w postępowaniu w sprawie nadania stopnia doktora Panu mgr inż. Grzegorzowi Sadowskiemu. W § 1 uchwały Rada Naukowa Dyscypliny Inżynieria Lądowa i Transport wyznaczyła moją osobę na recenzenta w tym postępowaniu.

2 Krótka charakterystyka rozprawy

Rozprawa dotyczy szczególnego rozwiązania znajdującego zastosowanie 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 sytuacji, gdy częściowa prefabrykacja konstrukcji i elementów budowlanych stała się wymogiem czasu. Należy tu dodać, że prace własne Autora ograniczają się do zespolonych belek o przekroju prostokątnym.

Oceniana rozprawa liczy 183 numerowane strony i składa się na nią 7 numerowanych rozdziałów oraz poprzedzające te rozdziały streszczenia w językach polskim angielskim oraz „spis oznaczeń”. Na końcu

rozprawy znajduje się spis 136 powołanych publikacji („Literatura”) oraz spis dokumentów normowych („Normy”) zawierający 6 pozycji.

W rozdziale pierwszym („Wstęp” - liczy 5 stron) zamieszczono krótkie wprowadzenie do żelbetowych konstrukcji zespolonych. W szczególności w punkcie 1.1 („Wprowadzenie”) zwrócono uwagę na występowanie złożonego stanu naprężeń w zespoleniu, który wynika w szczególności z obecności wrębów. W punkcie 1.2 stwierdzono, że podstawą podjęcia prac własnych jest spostrzeżenie, iż procedury obliczeniowe dotyczące konstrukcji zespolonych, w których powierzchnię prefabrykatu ukształtowano z wrębami są nieprecyzyjne oraz nie uwzględniają parametrów geometrycznych wrębów. W szczególności zagadnienia tego nie podejmują: norma PN-EN 1992-1-1:2008 (EC2-1-1) oraz wytyczne fib Model Code 2010 (MC2010). W związku z tym zdefiniowano i podjęto problem naukowy stwierdzając, że są nim „*badania doświadczalne i analiza numeryczna pracy statycznej elementów zespolonych, w których powierzchnia prefabrykatu została ukształtowana z wrębami, mające na celu uszczegółowienie zaleceń normowych i procedury obliczeniowej MC2010 dotyczącej obliczania styków z wrębami pracującymi w złożonym stanie naprężenia*”. Zatem już we wstępie określono, że przestrzenią analiz a także i późniejszych syntez są normy. Z kolei celem badań, analiz i wnioskowania jest zaproponowanie uszczegółowień zapisów norm. Jest to istotne, ponieważ większość rozważań dotyczących wyników badań własnych jest rzeczywiście prowadzona w odniesieniu do stanów granicznych nośności zdefiniowanych przez normy.

W rozdziale drugim („Aktualny stan wiedzy o nośności styku pomiędzy betonami wykonywanymi w różnych terminach” - liczy 56 stron) dokonano przeglądu aktualnych zagadnień odnoszących się do żelbetowych konstrukcji zespolonych. Najpierw przedstawione zostały fizyczne zjawiska występujące na styku dwóch betonów, do których należą: różne typy adhezji, tarcie pomiędzy betonami, „*aggregate interlock*”, „*shear-friction*”, „*dowel action*”, a także oddziaływanie zbrojenia pionowego przechodzącego przez zespolenie. Następnie opisano modele badawcze do wyznaczania nośności styku pomiędzy betonami. Ponadto w rozdziale drugim omówiono modele styku pomiędzy betonami według norm: EC2-1-1, PN-B-03264:2002, MC2010, ACI 318-14 oraz AASHTO LRFD. W punkcie 2.2 zatytułowanym „*Charakterystyka ogólna konstrukcji zespolonych z udziałem betonu*” przedstawiono przykłady konstrukcji zespolonych. Zatem po znacznej dawce szczegółowych informacji o fizycznych i chemicznych zjawiskach zachodzących w zespoleniu zamieszczono informacje dające ogólny pogląd na temat stosowania żelbetowych konstrukcji zespolonych. W punkcie 2.3 („*Styki ukształtowane z wrębami*”) zamieszczono przegląd badań konstrukcji z wrębami. W przeglądzie opisano zarówno styki pionowe w ścianach jak i rozwiązania znajdujące zastosowanie w elementach poddanych zginaniu i ścinaniu. Na wielu rysunkach zaczerpniętych z literatury występują opisy w języku angielskim (np. 13). Część rysunków starano się uczynić uzupełniając rysunki opisami w języku polskim (np. rys. 39, rys. 41b), a w niektórych zastąpiono opisy w języku angielskim na opis w języku polskim. W części przypadków Autor wykonał własne rysunki (np. rys. 42, rys. 43, rys 44), co zasługuje na uznanie.

W rozdziale trzecim („*Podstawy i założenia programu własnych badań i analiz oraz cząstkowe cele pracy*”) wskazano na trzy cele rozprawy: (1) poszerzenie wiedzy dotyczącej elementów zespolonych z wrębami, (2) wykazanie, że założenia norm EC2-1-1 oraz MC2010 odnośnie zespolenia z wrębami są nieprecyzyjne, (3) zaproponowanie zmian sposobu obliczania nośności styku z wrębami. W punkcie 3.3 przedstawiono ponadto dwie tezy: (1) nośność styku z wrębami zależy od geometrii wrębów i ich udziału w powierzchni styku, a także od gładkości powierzchni połączenia, (2) na nośność styku z wrębami wpływają zjawiska „*shear-friction*” i „*dowel action*”. Po zapoznaniu się z treścią rozprawy już na tym etapie recenzji można przypuszczać, że teza dotycząca gładkości powierzchni pojawiła się już po przeprowadzeniu badań i jest de facto wnioskiem z badań tłumaczącym większą nośności elementu

zespoleonego w serii I, który został wykonany jako drugi odlew z formy wcześniej już używanej. Należy zwrócić uwagę, że rozdział trzeci liczy tylko dwie strony i jego zawartość znacznie odbiega od zawartości rozdziałów sąsiednich (rozdział 2 liczy 56 stron, rozdział 4 – 38 stron).

Zawartość rozdziału czwartego („*Własne badania laboratoryjne*”), liczącego 38 stron, jest według recenzenta najistotniejszą częścią rozprawy. W rozdziale opisano bowiem autorskie badania dotyczące wpływu rozstawu wrębów w prefabrykacie i obecności zbrojenia pionowego w zespoleniu na odkształcenia i nośność belek zespolonych. Merytoryczna zawartość tego rozdziału jest imponująca, bowiem mieszczą się w nim treści odpowiadające: planowi badań, opisowi techniki badawczej, przebiegowi badań, prezentacji wyników badań, analizie wyników oraz wnioskowaniu. Jednocześnie struktura tego rozdziału nie odpowiada powyższemu wyszczególnieniu. Rozdział podzielono na dwa podrozdziały. W podrozdziale 4.1 zamieszczono informacje dotyczące elementów bez zbrojenia pionowego, w podrozdziale 4.2 znajdują się wszystkie dane dotyczące elementów ze zbrojeniem w zespoleniu, w podrozdziale 4.3 zrelacjonowano analizę porównawczą dotyczącą wpływu zbrojenia w zespoleniu na odkształcenia i nośność belek, a w dwuakapitowym podrozdziale 4.4 (0,5 strony) zamieszczono „*podsumowanie wniosków analizy porównawczej ...*”. Tak przyjęta struktura rozdziału nie dała Autorowi możliwości przedstawienia programu badań w ujednoczony sposób. W szczególności brakuje zestawienia elementów badawczych. W celu przesłania badań opisanych w rozdziale 4 i zliczenia przebadanych elementów sporządziłem we własnym zakresie tablicę z zestawieniem elementów i przypisaniem tym elementom cech zespolenia.

seria	Nazwa elementu	Rozstaw wrębów	Zbrojenie w styku
I	BI-W1	80 mm	brak
	BI-W2	80 mm	- -
	BI-S1	120 mm	- -
	BI-S2	120 mm	- -
	BI-M*	---	- -
II	BII-W1	80 mm	2 ϕ 6 co 160
	BII-W2	80 mm	2 ϕ 6 co 160
	BII-M*	---	brak

* element monolityczny

W omawianym rozdziale czwartym opisano zatem przebieg i wyniki badań ośmiu belek. Wydaje się, że Doktorant rozwijał warsztat badawczy w trakcie prowadzenia badań. Seria II badań jest znacznie lepiej udokumentowana niż seria I. W szczególności w serii II zastosowano zaawansowany system cyfrowej korelacji obrazu, który dał możliwość szczegółowego śledzenia rozwoju rys i podstawę do analizy sposobu niszczenia elementów.

Rozdział piąty („*Analiza numeryczna żelbetowych belek zespolonych z powierzchnią prefabrykatu ukształtowaną z wrębami*”) podzielony został przez Autora na 5 podrozdziałów. Na 34 stronach tego rozdziału przedstawiono program badań, modele konstytutywne materiałów i połączeń między materiałami, opisano model numeryczny, przedstawiono wyniki obliczeń numerycznych i wyciągnięto wnioski.

Rozdział szósty zatytułowano „*Zalecenia do projektowania żelbetowych belek zespolonych z powierzchnią prefabrykatu ukształtowaną z wrębami*”. W rozdziale skupiono się przede wszystkim nad zinterpretowaniem wyników badań przy przyjęciu normowego podejścia do obliczania zespolenia w stanie granicznym. Rozdział liczący 12 stron zawiera także propozycję modyfikacji procedury MC2020 do obliczania nośności styku.

Ostatni numerowany rozdział (siódmy – 4 strony) to „*Podsumowanie i wnioski końcowe*”.

19.

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. Rozprawa wymaga jednak znacznego skupienia od czytelnika podczas jej studiowania. Choć w rozprawie znajdują się wszystkie niezbędne elementy oraz informacje, to nie są one umiejscowione w sposób ułatwiający dokładne studiowanie. W szczególności brakuje zestawienia przebadanych elementów czy tabelarycznego zestawienia nośności elementów. Jednocześnie należy podkreślić, że w odniesieniu do wyników prac innych badaczy, Autor sporządził wyczerpujące zestawienia wyników badań (np. tablice 8, 9, 11).

Pracę za pierwszym razem czyta się płynnie, mimo, że dotyczy trudnych zagadnień naukowo-technicznych. Autor swobodnie posługuje się językiem, co świadczy o jego dojrzałości. Wydaje się, że w sposób świadomy zastosowane zostały również dwa zabiegi przy redakcji tekstu. Pierwszym z nich jest stosowanie pewnej, dobrze dobranej liczby pojęć wziętych w cudzysłów. Wnosi to do technicznych opisów pewną plastyczność. Nie zawsze zabieg ten można ocenić pozytywnie. Jak rozumieć w sposób ścisły minimalizację cech „ujemnych” (s. 19). Z kolei cechy „dodatnie” (również s. 19) wydają się pojęciami nieprecyzyjnymi. Podobnie nadmierna personifikacja badanego elementu „styk wyobcowany” (s. 20) nie jest pojęciem technicznym, choć jak podkreślono wzbudza pozytywne emocje u czytelnika.

Drugim zabiegiem jest konstruowanie zdań i zestawianie ich w taki sposób, aby uniknąć sytuacji, w której w niewielkiej odległości od siebie występują takie same określenia techniczne. Język jest zatem bardzo bogaty i czytający czuje lekkość pióra. Jednakże czytelnik jest zmuszony do ogromnej czujności przy dogłębnym studiowaniu rozprawy. Przykładowo zbrojenie wyprowadzone z betonu dolnego (prefabrykat) i zakotwione w betonie górnym (beton uzupełniający) ma w spisie oznaczeń dwie nazwy. Są to: „zbrojenie poprzeczne w złączeniu” (pojawia się przy definicji f_{ywd} oraz ρ) i „zbrojenie przecinające powierzchnię zespolenia” (przy definicji A_{vf}). Jednak już w tekście rozprawy pojawia się cała paleta określeń tego zbrojenia. Na przykład w podpunkcie 2.1.1.4. w podpisie rysunku 7 zastosowano pojęcie „zbrojenie w płaszczyźnie zespolenia” w opisie do tego rysunku zbrojenie to przedstawiono jako „zbrojenie zszywające” a tytuł tegoż podpunktu 2.1.1.4. brzmi „zbrojenie przecinające płaszczyznę zespolenia”. Występują jeszcze pewne wariacje opisujące to zbrojenie, na przykład „zbrojenie zszywające pomiędzy betonami” (s. 38). Należy tu jeszcze wspomnieć, że w tytule rozprawy znajduje się pojęcie „powierzchnia styku”, a w tytułach rozdziałów (np. 2.3.4) występuje „połączenie między betonami”. Z kolei badana konstrukcja w tytule rozprawy została nazwana „zespoloną”. Uważam, że należałoby trzymać się jednego pojęcia i logicznym jest, że winno ono odnosić się do tytułu. Skoro już w tytule rozprawy wprowadzono pojęcie „konstrukcja zespolona” to termin „zbrojenie w zespoleniu” byłby konsekwencją tak sformułowanego tytułu. Stąd w recenzji będę używał pojęcia: zespolenie i zbrojenie w zespoleniu.

Ogromnej uwagi od czytelnika wymaga także śledzenie oznaczeń. Jako przykład niech posłuży tu problem indeksów odnoszących się do betonu uzupełniającego. W przypadku obliczeniowej wytrzymałości tego betonu na rozciąganie zastosowano indeks „bu” ($f_{ctd,bu}$), w odniesieniu do pola przekroju tej warstwy i modułu sprężystości przyjęto indeks „n” (A_n, E_n), a w odniesieniu do szerokości wrębu w betonie uzupełniającym jest to indeks „l” (p_l). Z kolei wysokość wrębu oznaczona jest przez „d” (bez indeksu). Oznaczenie „d” zwykle jest zarezerwowane dla wysokości użytecznej przekroju, w związku z tym chcąc zachować oznaczenie „d” jako wysokość wrębu należałoby dodać tu literkę kojarzoną z betonem uzupełniającym (lub elementem prefabrykowanym). Jednocześnie na s. 71 pojawia się w tekście wielkość d_k jako wysokość wrębu. To oznaczenie z kolei nie jest zgodne z żadnym z innych oznaczeń przywołanych powyżej.

Zdefiniowane na początku rozprawy oznaczenia nie są konsekwentnie stosowane. Na przykład punkcie „*Spis oznaczeń*” naprężenia prostopadle do powierzchni zespolenia oznaczone są przez P_c . Na rys. 2 wielkość ta jest oznaczona przez N_{Ed} , na rys. 91 przez σ_M , we wzorze (2.4) przez σ_N , na rys. 6 przez f_{ci} , na rys. 8 przez σ , na rys. 12 przez P_H , z kolei na rys. 55 wielkość ta określana jest jako „*docisk boczny*”, a przy opisie badań obcych na stronie 35 jest to „*sila normalna*”. W obliczeniach numerycznych naprężenia normalne działające prostopadle do styku zostały utożsamione z parametrem CNORMF2.

Pojęcia wytrzymałości i nośności nie zawsze są poprawnie stosowane. Wytrzymałość jest cechą materiału zwykle w jednoosiowym stanie naprężenia, a nośność w stanach granicznych utożsamiamy z maksymalną siłą, którą można przyłożyć do konstrukcji. W związku z tym wyrażenie „... *wytrzymałość na ścinanie styku „beton-beton” ze zbrojeniem zszywającym podlega równoczesnemu ścinaniu i ściskaniu*” (s. 31) jest niezręczne. Podobnie przewijające się w rozprawie pojęcie „*wytrzymałości betonu na ścinanie*” jest zdaniem recenzenta nieścisłe (występuje nawet pojęcie „*funkcji do określania wytrzymałości betonu na ścinanie*” s. 32). Nie istnieje bowiem możliwość wywołania w materiale tylko naprężeń ścinających. Można zdefiniować natomiast nośność elementu na ścinanie, to znaczy określić wartość maksymalnej siły, która może działać w kierunku prostopadłym do osi elementu, na przykład prętowego.

Odbieram jako mało czytelne fragmenty tekstu, w których występują ciągi nagłówków rozdziałów, podrozdziałów, punktów i podpunktów bez żadnego akapitu tekstu między nimi. Taka sytuacja występuje już na początku rozdziału 2, gdzie występują cztery nagłówki 2, 2.1, 2.1.1, 2.1.1.1 (s. 25), w pierwszym merytorycznym rozdziale rozprawy. Podobna sytuacja występuje w przypadku ciągu nagłówków 4, 4.1, 4.1.1 (s. 83). W przypadku rozdziałów 5 i 6 występują po dwa ciągi dwóch nagłówków. W pozostałych rozdziałach taka sytuacja już nie zachodzi.

Powyższe uwagi dotyczące pojęć i oznaczeń nie są uwagami merytorycznymi. Mają tylko wytłumaczyć pewien fenomen. Rozprawę czyta się z przyjemnością. U uważnego czytelnika przy powtórnej lekturze pojawiają się spostrzeżenia, o których powyżej. Rozprawę oceniam jednak bardzo wysoko. Autor wykazał się doskonałą znajomością norm i ugruntowaną wiedzą z zakresu konstrukcji żelbetowych i zespolonych. Udowodnił, że potrafi zaplanować badania, przeprowadzić i co najważniejsze wyciągnąć wnioski. Na szczególne uznanie zasługuje umiejętność określenia wpływów poszczególnych zjawisk zachodzących w zespoleniu (Adhezja/zazębienie, „*shear friction*”, „*dowel action*”) na jego nośność. Recenzja ma być jednak również krytyczną oceną rozprawy, w związku z tym w dwóch kolejnych rozdziałach zamieszczam uwagi merytoryczne oraz pozostałe uwagi do rozprawy.

4 Uwagi merytoryczne do rozprawy

Jak wspomniałem plan badań, sposób ich prowadzenia oraz same wnioski oceniam wysoko. Uwagi merytoryczne dotyczą głównie interpretacji zjawisk obserwowanych podczas badań laboratoryjnych (przywołanych z literatury jak i własnych) oraz interpretacji wyników obliczeń numerycznych.

W rozprawie nie stwierdzono w sposób jawny, że w żadnym przekroju nie mogą występować tylko naprężenia styczne. Dotyczy to w szczególności zespolenia. Wynika z tego wspólny mianownik uwag merytorycznych, jakim jest przemilczanie faktu występowania naprężeń normalnych w formułowaniu spostrzeżeń i wyciągnięciu wniosków.

Na początku rozprawy, w rozdziale drugim występuje podpunkt 2.1.2.3 zatytułowany „*Modele badawcze styków poddanych ścinaniu*”. Mam zastrzeżenia do brzmienia tego podpunktu. Zespolenie (styk) nie może być poddane tylko ścinaniu, jak wskazuje na to tytuł tego podpunktu. Co najwyżej próbka badawcza może być obciążona siłami poprzecznymi (model ścinany). Opis badań przedstawionych w tym

punkcie (np. z rys. 11), gdzie pokazano techniczne przypadki ścinania nie uwzględnia faktu, że naprężenia normalne w elementach betonowych występują zawsze, nawet gdy element jest obciążony tylko siłami poprzecznymi. Za powstanie naprężeń normalnych w konstrukcjach wykonanych z materiału sprężystego odpowiada liczba Poissona i moduł sprężystości materiału. Fakt mimośrodkowo przyłożonego obciążenia poprzecznego może oczywiście mieć wpływ na nośność elementu, nie jest to jednak wpływ decydujący o sposobie zniszczenia elementu. Bliższe prawdy było stwierdzenie, że o sposobie zniszczenia betonu decyduje kierunek naprężeń głównych (σ_1). Naprężenia ścinające mają oczywiście wpływ na kierunek naprężeń σ_1 . Analogicznie za niefortunne uważam stwierdzenie, że zespolenie jest skręcane (s. 34), choć to zdanie nie jest z definicji nieprawdziwe.

Na s. 79, już we wnioskach z dokonanego przeglądu literatury, znajduje się stwierdzenie nieco przybliżające prawdę: „*W opisanych procedurach badawczych ciężko jest uzyskać zniszczenie próbki przez działanie tylko sił ścinających*” (s. 79). Trzeba stwierdzić, że uzyskanie zniszczenia próbki przez działanie sił ścinających jest niemożliwe i wynika z faktu, że naprężeniom stycznym zawsze towarzyszą naprężenia normalne.

W rozprawie w wielu miejscach występuje stwierdzenie, że w strefie przypodporowej występuje większy docisk dwóch betonów wywołany bezpośrednim oddziaływaniem obciążenia zewnętrznego (s. 35). Jest to stwierdzenie w pełni uzasadnione, jeżeli siła na podporze działa na konstrukcję zespoloną równocześnie od dołu i od góry, co jest jednak sytuacją szczególną. W ogólności takie stwierdzenie jest zbyt dużym uproszczeniem. Rozważmy koniec belki swobodnie podpartej – takiej jakie opisano w rozdziale 4. Na beton uzupełniający nie oddziałuje bezpośrednio reakcja podporowa, więc o „docisku” betonu uzupełniającego nie można mówić. Występują natomiast więzy podporowe, które uniemożliwiają ugięcia, a więc ograniczają odkształcenia materiału belki w sąsiedztwie przekroju podporowego. Odpowiedzią konstrukcji na te więzy jest wystąpienie złożonego układu naprężeń w zespoleniu cechującego się tym, że oprócz naprężeń stycznych występują naprężenia normalne. Naprężenia te umożliwiają równoważenie naprężeń stycznych. Podobny mechanizm dotyczy rejonu przekazywania obciążenia na beton uzupełniający. Analizując dolną warstwę betonu nie możemy mówić o zewnętrznej sile dociskającej ten element. Tu również wywoływany jest stan odkształceń wynikający z charakterystyk materiałowych i odpowiedzią na te odkształcenia są naprężenia normalne w zespoleniu. W elementach poddanych czteropunktowemu zginaniu mniejsza wartość naprężeń normalnych w zespoleniu jest generowana między podporą a miejscem przyłożenia siły. Wynika to z większej swobody odkształceń tego fragmentu belki, stąd na tym odcinku w pierwszej kolejności, podczas monotonicznego wzrostu obciążenia, obserwuje się rysy w zespoleniu. Uważam, że wyjaśnienia roli naprężeń normalnych w możliwości wywoływania naprężeń stycznych w zespoleniu oraz w obserwowanym rozwoju rys został dostatecznie podkreślony.

W rozdziale „*Aktualny stan wiedzy o nośności styku pomiędzy betonami wykonywanymi w różnych terminach*” znajduje się podpunkt 2.3.4, w tytule którego wyróżniono wpływ docisku bocznego na nośność połączenia między betonami. Intencją Autora, o czym świadczą podsumowujące ten rozdział rys. 55 i tab. 11., było przeanalizowanie wpływu naprężeń normalnych w zespoleniu na nośność. Docisk boczny jest jednym z możliwych więzów zapewniających występowanie naprężeń normalnych do zespolenia. Występowanie tych naprężeń może być zapewnione również przez wewnętrzne zbrojenie w zespoleniu, zbrojenie zewnętrzne, wręby lub inne więzy. Zatem w tytule i następnie w treści tego punktu wyróżniono tak naprawdę jedną z metod badań, a nie stan naprężeń w zespoleniu w chwili utraty nośności.

W rozprawie ujęto w sposób jakościowy i ilościowy wpływ wrębów na nośność zespolenia, co zostało już wysoko ocenione. Są to wnioski, które po opublikowaniu z pewnością wpłyną na bezpieczeństwo projektowania konstrukcji zespolonych. Wydaje się, że odbiorca tych badań oczekuje również fizycznej interpretacji wpływu rozstawu wrębów na nośność zespolenia. Jaka jest istota działania wrębów? Zdaniem

Kg

recenzenta, wręby na swojej powierzchni prostopadłej do zespolenia, doznają docisku (naprężenia normalne do wrębów). Docisk ten powstaje wskutek odkształceń normalnych warstw betonu elementu prefabrykowanego i betonu uzupełniającego poddanych zginaniu. Docisk wrębów umożliwia wywołanie naprężeń stycznych na powierzchni wrębów, które są prostopadłe do zespolenia. Naprężenia te z kolei równoważą naprężenia normalne do zespolenia. Dzięki temu istnieje możliwość wywoływania naprężeń stycznych w zespoleniu, które nie dopuszczają lub istotnie ograniczają wzajemny przesuw betonów. Patrząc na mechanizm w ten sposób można by próbować ująć ilościowo wpływ wrębów na wartości naprężeń normalnych w zespoleniu.

W elementach ze zbrojeniem w zespoleniu zauważono, że zarysowanie styku między prefabrykatem a betonem uzupełniającym belki BII-W1 zaobserwowano przy obciążeniu 100 KN, gdzie propagowała pierwsza rysa od ścinania. Dalej pojawia się stwierdzenie „*Prawdopodobnie rysa ukośna osłabiła dany przekrój i zdeterminowało to lokalne odspojenie*” (s. 103). Wydaje się, że możliwe jest pełniejsze zinterpretowanie tego faktu. Na powierzchni betonu w rysie ukośnej (tj. rysie wywołanej siłą poprzeczną), co oczywiście, nie występują naprężenia. Rozwarstwienie zespolenia bierze początek w tej rysie ukośnej, w związku z tym, z warunku zachowania równości naprężeń, w zespoleniu u zbiegu rys również nie występują naprężenia styczne. Stąd nośność zespolenia w rejonie rysy ukośnej jest mniejsza niż w obszarze między rysami ukośnymi. Należy jeszcze dodać, że rozwarstwienie występuje w zespoleniu ze względu na przekroczenie w tej płaszczyźnie przez naprężenia σ_1 wytrzymałości betonu na rozciąganie.

Stwierdzenie „*we wszystkich przypadkach zarysowanie styku pojawiło się z jednej strony wrębu, tam gdzie nie występowało zbrojenie zszywające*” (s. 103) także wymaga komentarza. W zbrojeniu przechodzącym przez zespolenie wywoływane są siły rozciągające, które, w przypadku występowania kontaktu między elementem prefabrykowanym a betonem uzupełniającym są równoważone przez naprężenia normalne do zespolenia. Te naprężenia umożliwiają wywołanie naprężeń stycznych w zespoleniu. Zatem brak zbrojenia nie zapewnia występowania naprężeń normalnych, czego konsekwencją jest powstanie rysy.

Przy interpretacji wyników obliczeń zamieszczonych w punkcie 5.4.4, zdaniem recenzenta, opis nie jest jednoznaczny. Dotyczy on parametru CNORMF2. Z jednego fragmentu opisu wynika, że parametr CNORMF2 określa naprężenia równoległe do osi Y (oś w kierunku pionowym, to jest w kierunku wysokości belki). Z innego, że parametr ten opisuje naprężenia prostopadłe do zespolenia. Z kolei zespolenie w miejscu wrębów ma kierunek pionowy (tzn. kierunek Y), a poza wrębami poziomy (tzn. kierunek Z). W związku z tym należy wyjaśnić czy parametr CNORMF2 odnosi się do globalnego układu współrzędnych czy jest związany z lokalnym układem współrzędnych zespolenia.

Przedstawione zależności „*sila-wzajemne przemieszczenie poziome w styku*” na rys. 68 dotyczą obserwacji na końcu belki. Z analiz prowadzonych przez autora niniejszej recenzji wynika, że rozkład tych przemieszczeń na długości zespolenia jest funkcją harmoniczną (Gromysz K.: *Badania żelbetowych płyt warstwowych obciążonych doraźnie, cyklicznie i kinematycznie*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2023 s. 51). Okres tej funkcji i amplituda zależą od sztywności zespolenia. Największe przemieszczenia na końcu belki występują w przypadku małej sztywności zespolenia. Wraz ze wzrostem tej sztywności wartości przemieszczeń na końcu maleją. Stąd obserwacje poczynione w tym przekroju niekoniecznie są miarodajne. W zależności od sztywności zespolenia mogą jakościowo pokazywać różne wielkości (strzałka funkcji harmonicznego, węzeł funkcji harmonicznego).

Powyższe uwagi nie podważają poprawności zrealizowanych badań ani trafności wniosków wyciągniętych przez Autora. Wyrażają one, brakujący zdaniem recenzenta, fragment analizy odkształceń konstrukcji zespolonych pod narastającym obciążeniem. W pewnym sensie ten brak jest usprawiedliwiony.

Już w rozdziale pierwszym rozprawy zaznaczono, że wyniki badań zostaną odniesione do norm. Właśnie w kategoriach zapisów normowych Autor prowadził swoje analizy. A normy, jak wiemy odnoszą się do stanów granicznych i nie znajdziemy w nich opisu dochodzenia konstrukcji do tych stanów ani zależności na tak istotne naprężenia normalne do zespolenia.

5 Inne uwagi do rozprawy

Podrozdział 2.2 zatytułowany „Charakterystyka ogólna konstrukcji zespolonych z udziałem betonu” znajduje się na 46 stronie rozprawy, już po szczegółowych informacjach o zjawiskach zachodzących w zespoleniu. Punkt ten niejako wprowadza czytelnika w problematykę konstrukcji zespolonych pokazując przykłady zespolonych płyt i belek (podpunkt 2.2.1) oraz omawia podstawowe zasady statycznej pracy konstrukcji zespolonych. Zdaniem recenzenta treści te, jako wstępne informacje, powinny znaleźć się na początku rozdziału 2. Wówczas w sposób bardziej przystępny wprowadzono by czytelnika w problematykę konstrukcji zespolonych. Przy okazji zachodziła możliwość uniknięcia na zaawansowanych już stronach rozprawy powtórzeń i oczywistości: „*Betonowe konstrukcje zespolone składają się z części prefabrykowanej, która najczęściej wykonana jest w zakładzie prefabrykacji oraz betonu uzupełniającego wykonanego na budowie*” (s. 46); ta sama informacja znajduje się na s. 52. Informacje te są niezbędne, lecz zdaniem recenzenta powinny pojawić się zaraz na początku rozdziału 2 przed otrzymaniem szczegółowych informacji o rodzajach adhezji.

Wydaje się, że program zrealizowanych badań jest obszerniejszy niż przedstawiono to w rozprawie. W opisie II serii badań (elementy ze zbrojeniem pionowym) stwierdzono, że analizowano wyniki badań dla jednego rozstawu zbrojenia wynoszącego 160 mm. W rzeczywistości był też drugi rozstaw zbrojenia w zespoleniu wynoszący 80 mm. W rozprawie stwierdzono, że nie jest on przedmiotem analiz. Wydaje się, że rysy i przemieszczenia w rejonie rozstawu zbrojenia o wartości 80 mm również były przedmiotem obserwacji. Być może tak gęsty rozstaw zbrojenia zespolenia zapewnił brak występowania rys i przemieszczeń w zespoleniu i z tego powodu wyniki pozornie wydawały się nieciekawe. Zdaniem recenzenta, ujawnienie tych wyników wniosłoby sporo do wiedzy o zespoleniu z wrębami. W związku z tym namawiam Autora, aby w przyszłych publikacjach przedstawił wyniki tych badań i odpowiednio skomentował, co podniesie wartość prac.

Współczynnik efektywności zespolenia a_z zdefiniowano jako stosunek naprężeń w styku powierzchni zespolonej do naprężeń występujących w analogicznej próbce monolitycznej (s. 64). Jest to bardzo nieprecyzyjna definicja, ponieważ nie określa zarówno o jakie naprężenia chodzi jak i nie definiuje stanu, do którego się odnosi. Domyślać się należy, że Autor ma na myśli wartości naprężeń stycznych w zespoleniu występujących pod obciążeniem niszczącym. Zresztą taka w przybliżeniu definicja pojawia się parę stron dalej (s. 70). Nie jest ona jednak jednoznaczna, ponieważ możliwość wywoływania naprężeń stycznych zależy od wartości naprężeń normalnych do zespolenia. W klasycznej wytrzymałości materiałów operuje się pojęciem naprężeń zredukowanych, to jest normalnych naprężeń zastępczych, które mogą być porównywane z wytrzymałością materiału w stanie jednoosiowym. Naprężenie zredukowane zależy od wszystkich składowych tensora naprężeń. Na etapie doktoratu nie oczekuje się budowy nowych hipotez wytrzymałościowych, jednak wydaje się, że podając maksymalne wartości naprężeń stycznych powinny być podane także wartości towarzyszących im naprężeń normalnych.

Literatura przedmiotu dotycząca żelbetowych konstrukcji zespolonych jest bardzo obszerna. W rozprawie powołano 136 pozycji, co jest znaczną liczbą. Dobór jest trafny, choć można by na przykład zrezygnować z dość obszernie potraktowanego zagadnienia złączy pionowych w ścianach prefabrykowanych (s. 55 – 57), a przywołać w to miejsce ciekawe normy dotyczące zespolonych konstrukcji

żelbetowych. Do takich norm należą na przykład PN-EN 13747. „Prefabrykaty z betonu. Płyty stropowe do zespolonych systemów stropowych” oraz PN-EN 13224. „Prefabrykaty z betonu. Żebrowe płyty stropowe”. Znajdują się tam w szczególności zalecenia dotyczące ilości i kształtu zbrojenia w zespoleniu. Wówczas Autor mógłby odnieść przyjęte w swoich badaniach intensywności zbrojenia do zalecanego w normach konstrukcyjnych. Takie odniesienie na pewno pojawi się w przyszłych publikacjach autora.

Rozprawa jest bardzo zwięzła, w takiej formie prezentowane są również wyniki. Na przykład w tablicach 14 i 17, wszystkie wielkości graniczne wyrażone są przez obciążenie pionowe. W konsekwencji „teoretyczna nośność na zginanie” jest wyrażona w kN. Nie jest to sprzeczność, bowiem wartość ta odnosi się do konkretnego schematu statycznego. Jednak jest to bardzo duży skrót myślowy i w przyszłych publikacjach taki sposób prezentowania wyników może być mylący.

W konsekwencji Autor często nie wspomina o liczbie elementów. Na przykład na stronie 98 opisywane są elementy badawcze ze zbrojeniem w zespoleniu i nie wspomina, że wykonane są po dwa elementy. Dopiero na stronie 102 ta informacja jest uściślona.

W rozprawie często pojawia się stwierdzenie, że od pewnego poziomu obciążenia sztywność belek zespolonych jest mniejsza niż sztywność odpowiednich belek monolitycznych (np. s. 90, s. 110). Jest to oczywiście zjawisko zgodne z oczekiwaniami, jednak nie zostało zinterpretowane w rozprawie. Stąd moja prośba o wypowiedź odnośnie tych stwierdzeń oraz o uwzględnienie dwóch koncepcji, o których poniżej. Normy, których zapisy są podstawą do prowadzenia analiz podpowiadają, że w miejscach powstania zarysowań nie występuje możliwość przenoszenia naprężeń stycznych w zespoleniu. Te odcinki belek cechują się w związku z tym przekrojami o sztywności odpowiadającej dwóm niezależnie zginanym warstwom betonów (rys. 28c wg rozprawy). Poza rysami sztywność przekroju belki żelbetowej odpowiada sztywności elementu monolitycznego (rys. 28a wg rozprawy). Stąd według tej pierwszej koncepcji sztywność belki zespolonej, rozumiana jako iloraz obciążenia do przemieszczenia jest mniejsza niż belki monolitycznej. Jeżeli nawet występuje możliwość przenoszenia naprężeń stycznych na całej długości, to ich wartość jest mniejsza od tych, które występują w przekroju monolitycznym. Alternatywna druga interpretacja może wskazywać na występowanie warstwy kontaktowej w otoczeniu zespolenia. Warstwa ta cechuje się mniejszą sztywnością niż beton elementu prefabrykowanego i beton uzupełniający. W konsekwencji pod wpływem obciążenia następują jej odkształcenia, które prowadzą do większych ugięć belki. Odkształcenia te związane są między innymi z opisanymi w rozprawie zjawiskami „*dowel action*” czy „*shear-friction*”. Występowanie zbrojenia w zespoleniu (rys. 9) zapewnia ciągłość odkształceń takiej warstwy. Sytuacja ta odpowiadałaby rysunkowi 28b według rozprawy.

Ostatnia uwaga dotyczy przyjmowania charakterystyk materiałowych w rozdziale 5. Dla przeprowadzenia obliczeniowej analizy belek poddanych obciążeniu monotonicznemu niezbędne jest zdefiniowanie dla betonu zależności „naprężenie-odkształcenie” a następnie wprowadzenie jej do programu obliczeniowego. Wszystkie charakterystyki dotyczące odkształcenia betonu wyznaczano na podstawie normowych zależności wiążących je z wytrzymałością. W ten sposób Autor utrzymał żelazną konsekwencję stosowania zapisów normowych nie podejmując laboratoryjnego wyznaczania zależności $\sigma-\epsilon$.

6 Podsumowanie

Recenzowana rozprawa została poświęcona problemowi ważnemu dla praktyki inżynierskiej – wpływowi rozstawu wrębów i obecności zbrojenia pionowego na odkształcenia i nośność żelbetowych belek pod obciążeniem monotonicznie rosnącym.

Autor przed przystąpieniem do badań własnych gruntownie przanalizował istniejące opracowania literaturowe. Na tej podstawie postawił tezy a następnie zaprojektował i przeprowadził badania doświadczalne. Bazując na wnioskach z badań zaproponował metodę nieliniowej analizy żelbetowych elementów i wdrożył ją do obliczeń numerycznych. Wyniki tych badań i analiz znacznie poszerzyły wiedzę o rozważanym problemie oraz doprowadziły do sformułowania zaleceń do projektowania żelbetowych belek zespolonych z powierzchnią prefabrykatu ukształtowaną z wrębami.

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

Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska autorstwa mgr inż. Grzegorza Sadowskiego pt. „*Wpływ parametrów geometrycznych i fizycznych profilowanej powierzchni styku na pracę statyczną żelbetowych belek zespolonych*” 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 2017 r. poz. 1789).

