

Lublin, 17 kwiecień 2023 r.

dr hab. inż. Marta Słowik, prof. uczelni
Wydział Budownictwa i Architektury
Politechnika Lubelska

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Rafała Walczaka

pt.: **Nośność na ścinanie betonowych belek podsuwnicowych w przedłużonym okresie trwałości, w warunkach niepewności zakotwienia kabli sprężających**

1. Podstawa formalna opracowania

Formalną podstawą opracowania recenzji stanowi pismo L0.510.1.2.2023 z dnia 23.02.2023 Dziekana Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej profesora dra hab. inż. Andrzeja Szaraty, w którym Pan Dziekan informuje o powołaniu mnie na recenzenta w przewodzie doktorskim mgr inż. Rafała Walczaka zgodnie z uchwałą Rady Naukowej Wydziału z dnia 15 lutego 2023 roku.

Podstawę merytoryczną przygotowania recenzji stanowi praca doktorska mgr inż. Rafała Walczaka pt. „Nośność na ścinanie betonowych belek podsuwnicowych w przedłużonym okresie trwałości, w warunkach niepewności zakotwienia kabli sprężających”, którą otrzymałam wraz z pismem.

2. Charakterystyka pracy

Praca ma charakter teoretyczno-doświadczalny i dotyczy ważnego zagadnienia oceny nośności na ścinanie kablobetonowych belek podsuwnicowych po przedłużonym okresie eksploatacji powyżej projektowanego okresu użytkowania. W szczególności, w badanych belkach poddano analizie wpływ niepełnego zakotwienia kabli sprężających na nośność belek i na możliwy sposób ich zniszczenia przy różnym położeniu obciążenia.

WYDZIAŁ INŻYNIERII LĄDOWEJ	
Wydziału Inżynierii Lądowej	
Wpłynęło dnia	20.04.2023
L. dz.	L0.510.10.3.2023
podpis	Góralczyk

Praca liczy 221 stron i składa się ze strony tytułowej, strony z podziękowaniami, wykazu najważniejszych oznaczeń, spisu treści, streszczenia w języku polskim i języku angielskim, dziewięciu głównych rozdziałów, bibliografii oraz spisu rysunków, fotografii i tablic. Bibliografia zawiera w sumie 206 pozycji, w tym 189 to pozycje literaturowe a 17 to normy i instrukcje. Praca jest bogato ilustrowana i zawiera 129 rysunków, 61 fotografii oraz 58 tablic.

3. Ocena merytoryczna

3.1. Ocena tematyki

W pracy Doktorant analizuje nośność prefabrykowanych, kablobetonowych belek podsuwnicowych o niskim stopniu zbrojenia poprzecznego. Belki podsuwnicowe, ze względu na specyfikę pracy, powinny wykazywać oprócz odpowiedniej nośności również odporność na obciążenia dynamiczne wielokrotnie powtarzalne, dostateczną sztywność zapewniającą zwiększone wymagania co do stanu granicznego ugięć. Ze względu na fakt, że belki podsuwnicowe pracują w różnych warunkach, mogą być poddane niekorzystnemu a wręcz agresywnemu oddziaływaniu środowiska. Ważnym aspektem przy analizie belek podsuwnicowych jest zatem zapewnienie odpowiedniej trwałości zarówno samego elementu konstrukcyjnego jak i połączeń oraz mocowań elementu jezdnego. Belki podsuwnicowe są zaliczane do wymienialnych części konstrukcji i klasyfikowane do 2-giej kategorii projektowanego okresu użytkowania, dla której orientacyjny projektowany okres użytkowania elementu wynosi wg normy EC2 od 15 do 25 lat. Doktorant w pracy podjął się analizy zagadnienia nośności na ścinanie w odniesieniu do belek pracujących po przedłużonym okresie eksploatacji powyżej projektowanego okresu użytkowania. W przypadku takich belek istotnym problemem jest ocena jakości zakotwienia kabli sprężających. Doktorant słusznie poddał analizie wpływ niepełnego zakotwienia kabli sprężających na nośność belek i na mechanizm zniszczenia belek przy różnym położeniu obciążenia.

Kablobetonowe belki podsuwnicowe były na szeroką skalę produkowane w Polsce w połowie XX wieku i są nadal eksploatowane w wielu obiektach budowlanych. Zachodzi zatem potrzeba oceny ich stanu technicznego, w szczególności ich nośności. Dlatego uważam, że **podjęta w pracy doktorskiej tematyka badań jest trafna, a jej efekty mają ważny wymiar praktyczny.**

3.2. Ocena celu i zakresu pracy

Po zapoznaniu się z treścią pracy można wnioskować, że jej głównym celem była analiza pracy kablobetonowych belek w sytuacji niepełnego zakotwienia kabli sprężających prowadząca do opracowania obliczeniowej metody szacowania długości transmisji siły sprężającej na element w sytuacji utraty zakotwienia kabla sprężającego oraz metody wyznaczania nośności belki na ścinanie w warunkach niepewności zakotwienia kabli sprężających.

W pracy należałoby sformułować tezy pracy, do których zaliczyć można:

- możliwe jest przekazywanie siły sprężającej z kabla wielodrutowego na element w sytuacji utraty zakotwienia mechanicznego,
- minimalny stopień zbrojenia poprzecznego w kablobetonowych belkach podsuwnicowych umożliwia bezpieczne przeniesienie siły poprzecznej, nawet w sytuacji utraty zakotwienia wybranych kabli sprężających.

W recenzowanej rozprawie tezy pracy nie zostały wyodrębnione, a wymienione w podrozdziale 2.2 rozprawy cele pracy są pomieszaniem celu i tezy pracy.

Gdyby cel i tezy pracy wyodrębnić tak jak to zostało przedstawione powyżej można stwierdzić, że **cel pracy został osiągnięty i słuszność postawionych tez została udowodniona na podstawie wyników przeprowadzonych badań naukowych.**

Zakres pracy obejmuje analizę pracy belek kablobetonowych pod obciążeniem statycznym przy różnym umiejscowieniu obciążenia skupionego. W zakres pracy nie wliczono zagadnień związanych z analizą wpływu obciążeń dynamicznych i wielokrotnie zmiennych na charakter zniszczenia i nośność belek. Nie rozpatrywano też wpływu zmęczenia materiałów oraz interakcji ścinania, skręcania i dwukierunkowego zginania, o czym informuje Doktorant w podrozdziale 2.4 pracy. Zagadnienia te są przewidziane jako ewentualne dalsze etapy badań naukowych.

3.3. Ocena wartości naukowej pracy

Ocena badań literaturowych

W pracy, w rozdziale trzecim, zamieszczony został obszerny opis stanu wiedzy z zakresu pracy strefy zakotwienia cięgien sprężających i możliwych sposobów zniszczenia elementów żelbetowych i sprężonych w strefach przypodporowych, w elementach o niskim stopniu zbrojenia poprzecznego. Autor dużo miejsca poświęcił wskazaniu znaczącego wpływu smukłości ścinania na charakter pracy elementu. Zagadnienie to było szeroko prezentowane w literaturze ale głównie w odniesieniu do

badań belek o przekroju prostokątnym. Doktorantowi udało się dotrzeć do wyników badań na belkach o przekroju teowym i po porównaniu ich z wynikami badań dla belek prostokątnych pozwoliło mu wnioskować o ich możliwej wyższej nośności na ścinanie. Potwierdzenie tej sugestii można znaleźć w artykule Słowik M., Skrzypczak I., Kotynia R., Kaszubska M.: The application of a probabilistic method to the reliability analysis of longitudinally reinforced concrete beams. *Procedia Engineering*. Vol. 193, 2017, str. 273-280 (nie cytowanym w pracy), w którym na podstawie analizy niezawodnościowej udowodniono, że współpraca betonu ściskanego na szerokości półek skutkuje wzrostem wskaźnika niezawodności, a tym samym wskazuje na wyższą nośność na ścinanie belki o przekroju teowym w porównaniu do nośności belki prostokątnej.

W rozdziale trzecim Autor omówił także metody obliczeniowe wyznaczania transmisji siły sprężającej na element. W tym celu zestawił normowe przepisy w tym zakresie podane w Eurokodzie 2, zaleceniach Model Code, w normie amerykańskiej ACI 318 i normie do projektowania mostów AASHTO. Również w odniesieniu do wyznaczania nośności na ścinanie Doktorant szeroko przedstawił procedury i modele obliczeniowe zarówno zawarte w przepisach normowych (EC2, MC2010, ACI 318), jak i zaproponowane w literaturze przez różnych badaczy, np. Zsutty wzory (24) i (25), Muttoni wzór (40). Bardzo istotne jest zdefiniowanie parametrów występujących we wzorach wraz z podaniem jednostek, ponieważ często wzory te były wyprowadzone na podstawie wyników badań i mają charakter empiryczny. Niestety w pracy większość wzorów nie została w pełni opisana. Przykładem są wzory (38) i (39) zaczerpnięte z przepisów amerykańskich, które dodatkowo nie zostały zacytowane w wersji oryginalnej ale podane w formie po przeliczeniu z jednostek imperialnych na jednostki układu SI, jednak również tej informacji nie podano w pracy.

W omawianym rozdziale trzecim przedstawione zostały także wybrane badania prefabrykowanych elementów kablobetonowych dostępne w literaturze. Szkoda, że przed przystąpieniem do opisanja własnych badań naukowych w kolejnych rozdziałach pracy Doktorant nie podsumował stanu wiedzy z rozdziału trzeciego.

Ocena badań doświadczalnych

W rozdziale czwartym Doktorant opisał własne badania doświadczalne, które przeprowadził na prefabrykowanych, kablobetonowych belkach podsuwnicowych zdemontowanych z rzeczywistej konstrukcji. Badane elementy były eksploatowane przez ponad 50 lat w zakładzie przemysłowym w Nowym Sączu. Belki były sprężone

5 kablami 12 ϕ 5 mm, w tym jeden kabel przebiegał górą a cztery dołem. W belkach zastosowane zbrojenie poprzeczne charakteryzowało się niskim stopniem zbrojenia zbliżonym do minimalnego, a kable sprężające nie były dostatecznie zabezpieczone antykorozyjnie. Można stwierdzić, że elementy poddane badaniom ściśle odpowiadały elementom założonym w temacie pracy. Zatem Doktorant dysponował odpowiednim materiałem do badań.

Doktorant przeprowadził badania niszczące 9 belek przy czym trzy elementy były badane przy zachowaniu pełnego zakotwienia kabli jako belki referencyjne, cztery z odciętym zakotwieniem górnego kabla i dwa z odciętymi zakotwieniami dwóch kabli dolnych. Wykonane badania miały symulować sytuację utraty przyczepności kabli na skutek korozji zakotwienia. Doktorant poprawnie określił nośność belek na ścinanie oraz opisał sposób ich zniszczenia przy trzech wybranych wartościach smukłości ścinania $a/d = 1,57; 2,61; 3,66$. Na podstawie uzyskanych wyników badań przeanalizował wpływ niepełnego zakotwienia kabli sprężających na mechanizm zniszczenia i nośność belek. Należy podkreślić, że badania zostały przeprowadzone w sposób kompleksowy za pomocą poprawnie dobranych technik pomiarowych, między innymi ugięcia rejestrowano indukcyjnymi przetwornikami przemieszczenia, do pomiaru odkształceń użyto tensometrów oporowych oraz system cyfrowej korelacji obrazu (Digital Image Correlation DIC).

W kolejnym kroku Doktorant opisał przeprowadzone badania długości transmisji siły sprężającej w przypadku utraty zakotwienia mechanicznego. Badania zostały przeprowadzone na siedmiu belkach kablobetonowych, w tym na pięciu bez zakotwionego kabla górnego i dwóch bez zakotwionych dwóch kabli dolnych. Na podstawie uzyskanych wyników Doktorant ocenił możliwość przekazania siły sprężającej na element poprzez przyczepność po utracie zakotwienia mechanicznego kabli sprężających. Na jednym z elementów przetestowane zostały cztery niezależne metody pomiarowe: tensometryczna, optyczna (DIC) i z wykorzystaniem pomiarów światłowodowych metodą statyczną i dynamiczną (Distributed Fibre Optic Sensing DFOS i HF DFOS). W kolejnych badaniach zrezygnowano z metody optycznej. Na podkreślenie zasługuje fakt umiejętnego przeprowadzenia nowatorskich pomiarów czujnikami światłowodowymi, na podstawie których Doktorant uzyskał dokładne wyniki odkształceń podłużnych, które szeroko zaprezentował w pracy. Belki z odciętymi dolnymi kablami były badane w ustawieniu odwróconym przy obciążeniu zadawanym od dołu. Zachodzi pytanie jaki wpływ na wyniki badań miał ciężar własny

przy odwróconym schemacie obciążania, który to schemat był również zastosowany przy pomiarze siły sprężającej. Do pomiaru siły sprężającej Doktorant zastosował dwie metody, metodę cięcia otuliny betonowej i metodę cięcia kabla. Zarówno przeprowadzenie pomiarów siły sprężającej jak i uzyskane wyniki zostały przedstawione w pracy w sposób wyczerpujący. Doktorant wykonał również badania nieniszczące na belkach metodą sklerometryczną i przy użyciu betonoskopu w celu sprawdzenia jakości iniekcji w kanale poprzez ocenę wypełnienia kanału kablowego. W podrozdziale 4.4.3 zabrakło szerszych wniosków dotyczących samej jakości iniekcji, a Doktorant skoncentrował się na porównaniu obu metod badawczych.

Rozdział czwarty zamyka przedstawienie wyników badań materiałowych, w tym cech wytrzymałościowych betonu, stali zbrojeniowej i sprężającej, właściwości chemicznych betonu i zaczynu iniekcyjnego oraz wyników analizy składu pierwiastkowego iniekcji cementowej. Próbkę do badań materiałowych zostały pobrane z elementu konstrukcyjnego. Przeprowadzone badania pozwoliły zatem Doktorantowi w sposób kompletny ocenić jakość materiałów, z których zostały wykonane belki kablobetonowe, po ponad 50-cio letnim okresie ich eksploatacji. W przypadku badania wytrzymałości betonu na ściskanie na próbkach rdzeniowych pobranych z konstrukcji należy przeprowadzić test Grubbsa do oceny wyników statystycznie odstających (zgodnie z zaleceniem normy PN-EN 13791:2008P). Ponadto wytrzymałość na ściskanie była określona na podstawie wyników badania na 13 próbkach, w tym 9 próbkach użytych po badaniu modułu sprężystości. W takim przypadku należało sprawdzić jednorodność wyników, np. na podstawie testu F porównania wariancji dwóch serii. W pracy zabrakło informacji, czy te procedury statystyczne były wdrożone przy opracowaniu wyników badania wytrzymałości betonu na ściskanie.

Podsumowując ocenę przeprowadzonych badań doświadczalnych stwierdzam, że zostały one starannie przeprowadzone i opracowane, stanowią wartościowy materiał do oceny stanu technicznego prefabrykowanych belek kablobetonowych po przedłużonym okresie eksploatacji powyżej projektowanego okresu użytkowania, a w szczególności do oceny ich nośności na ścinanie.

Ocena analizy numerycznej

W rozdziale piątym Doktorant zamieścił opis przeprowadzonych obliczeń numerycznych i zestawiał uzyskane wyniki. Celem obliczeń numerycznych było rozszerzenie wiedzy ponad tą uzyskaną podczas badań doświadczalnych w zakresie pracy kablobetonowych belek, w szczególności umożliwienie wnioskowania o wpływie

stopnia zbrojenia poprzecznego oraz wpływie stopnia efektywnego sprężenia na nośność belek. Doktorant zbudował odpowiednie modele obliczeniowe, a obliczenia numeryczne przeprowadził w kolejnych wydzielonych fazach (5 faz), które poprawnie odzwierciedliły etapy pracy elementu sprężonego. Dodatkowo Doktorant podczas modelowania wyodrębnił dwa osobne przypadki związane z jakością iniekcji cementowej kanałów kablowych, dla których przeprowadził kalibrację parametrów przyczepności kontaktowej kabli sprężających.

Na podstawie analizy wyników obliczeń numerycznych Autor wykazał, że stopień zbrojenia strzemionami nie ma znaczącego wpływu na nośność elementu, natomiast możliwa jest redukcja nośności belek wywołana spadkiem efektywnego stopnia sprężenia, a ewentualny spadek nośności uzależniony jest o usytuowania kabla (kabli) z uszkodzonym zakotwieniem i od jakości iniekcji kanału kablowego.

Mimo, że na potrzeby przeprowadzenia obliczeń za pomocą MES był zastosowany stosunkowo prosty model (model płaski) uważam, że **na podstawie przeprowadzonej analizy wyników obliczeń numerycznych Doktorantowi udało się wyciągnąć interesujące wnioski. Są one potwierdzeniem słuszności postawionych tez i wnoszą znaczny wkład Autora do pogłębienia wiedzy w zakresie oceny możliwości przekazywania siły sprężającej z kabla wielodrutowego na element i wpływu stopnia zbrojenia poprzecznego na pracę kablobetonowych belek podsuwnicowych w sytuacji utraty zakotwienia kabli sprężających.**

Ocena analizy danych

Zbiorną analizę wyników badań doświadczalnych i obliczeń numerycznych zamieścił Doktorant w rozdziale szóstym pracy. Godne uwagi są rozważania autora dotyczące długości transmisji siły sprężającej prowadzące do podziału elementów ze względu na jakość iniekcji kanałów kablowych. Zestawienie porównawcze wyników przeprowadzonych badań i obliczeń numerycznych oraz wyników nośności na ścinanie obliczonej na podstawie procedur normowych dało podstawę do opracowania przez Doktoranta własnych modeli obliczeniowych pozwalających wyznaczyć długość transmisji siły sprężającej i nośność belki na ścinanie w sytuacji utraty zakotwienia kabla. Proponowane modele analityczne zostały opisane w rozdziale siódmym.

Szczegółowe wnioski z przeprowadzonych badań naukowych zostały szeroko omówione i uzasadnione właściwą analizą danych. Zostały one zamieszczone zarówno w rozdziale ósmym zatytułowanym „Wnioski wynikające z analizy zagadnienia” jak i we wcześniejszych rozdziałach szóstym i siódmym. Wydaje się, że

niepotrzebnie rozbił Doktorant analizę danych i wnioskowanie w trzech osobnych rozdziałach (6, 7, 8), co w niektórych przypadkach doprowadziło do powtórzeń.

Również końcowe wnioski zawarte w rozdziale dziewiątym zatytułowanym „Posumowanie” w mojej ocenie zostały zredagowane zbyt obszernie. Biorąc pod uwagę bogaty materiał badawczy zrealizowany przez Doktoranta, w podsumowaniu powinny być sformułowane wnioski końcowe w sposób zwarty, w odniesieniu do założonego celu pracy bez zbędnego ponownego przytaczania wyników badań.

Podsumowując ocenę poziomu naukowego pracy stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Rafała Walczaka została opracowana na właściwym poziomie naukowym. Doktorant wykazał umiejętność stawiania i rozwiązywania problemów naukowych przy prawidłowym wykorzystaniu literatury naukowej. Przy realizacji podjętej tematyki naukowej przeprowadził kompleksowe badania doświadczalne w połączeniu z modelowaniem numerycznym. Doktorant poprawnie przeanalizował wyniki badań i sformułował wnioski.

4. Uwagi polemiczne i krytyczne oraz elementy dyskusyjne

Przyjęcie wartości wytrzymałości betonu w obliczeniach numerycznych

Doktorant określił doświadczalnie cechy betonu na podstawie badań próbek rdzeniowych o wymiarach $\phi 100/200$ mm, które zostały pobrane z elementu konstrukcyjnego. W pracy podał wartość minimalną, średnią i odchylenie standardowe w przypadku każdej cechy. Wyniki badania wytrzymałości na ściskanie na rdzeniach o stosunku wysokości do średnicy wynoszącym 2 można uznać za odpowiadające wytrzymałości na osiowe ściskanie badanej na standardowych walcach $\phi 150/300$ mm. Również wyniki badań wytrzymałości betonu na rozciąganie osiowe i wyniki badań modułu sprężystości betonu otrzymane na próbkach rdzeniowych mogą być uznane za odpowiadające osiowej wytrzymałości betonu na rozciąganie i siecznemu modułowi sprężystości betonu w konstrukcji. Wartości średnie z badań zostały następnie wykorzystane jako dane materiałowe przy weryfikacji procedur normowych i przy modelowaniu numerycznym (wyjątek stanowi tu wytrzymałość betonu na rozciąganie). Zachodzi pytanie dlaczego Doktorant podjął decyzję by w obliczeniach numerycznych zastosować minimalną wartość wytrzymałości betonu na rozciąganie (zamiast konsekwentnie wartości średniej) i dlaczego przyjął wartość 2,0 MPa skoro minimalna wytrzymałość betonu na rozciąganie w badaniach wyniosła 2,94 MPa (wartość średnia = 4,0 MPa, współczynnik zmienności = 14,4%).

Modele obliczeniowe

Doktorant zaproponował dwa modele obliczeniowe: pierwszy do wyznaczania transmisji siły sprężającej, drugi do wyznaczania nośności na ścinanie belki kablobetonowej w sytuacji utraty zakotwienia kabli sprężających.

Pierwszy model został opracowany przy przyjęciu wzoru wyjściowego na długość transmisji z normy EC2 i wyznaczaniu średnicy zastępczej kabla sprężającego według zasad zaczerpniętych z normy MC2010. Model został przez Doktoranta zmodyfikowany w celu uwzględnienia utraty zakotwienia kabla sprężającego. Doktorant zaproponował sposób przejścia z wartości podstawowej naprężenia przyczepności (w pracy wartość podstawowa była zaczerpnięta z badań Jamróžego) na wartość efektywną i wprowadził dodatkowy współczynnik zależny od jakości iniekcji.

W przypadku drugiego modelu za podstawę jego opracowania przyjął Autor procedurę obliczeniową z normy amerykańskiej ACI 318. Wpływ niepewności zakotwienia kabli sprężających uwzględnił Doktorant poprzez wprowadzenie naprężenia ścinającego od sprężenia wyznaczanego na podstawie procedury obliczeniowej podanej w modelu pierwszym. Włączenie procedury obliczeniowej długości transmisji siły sprężającej z modelu pierwszego pozwoliło uwzględnić wpływ utraty zakotwienia kabli sprężających przy szacowaniu nośności belek na ścinanie.

Koncepcja połączenia obu modeli jest słuszna. Jednak analiza powstania obu modeli pokazuje, że połączone zostały w nich procedury obliczeniowe zaczerpnięte z trzech różnych norm do projektowaniu konstrukcji z betonu. Należy zaznaczyć, że procedury te zostały wyprowadzone przy przyjęciu innych założeń modelowych. Nośność na ścinanie według EC2 została wyprowadzona na podstawie modelu kratownicowego, w zaleceniach Model Code 2010 uwzględniono zmodyfikowaną teorię pola naprężeń ściskających (MCFT) a wzór w normie ACI 318 jest wzorem empirycznym wyprowadzonym na podstawie doświadczeń.

Co zadecydowało, że Autor zbudował model drugi biorąc za podstawę wzór empiryczny z przepisów amerykańskich?

Po pierwsze, wzory empiryczne najlepiej sprawdzają się w przypadku ich stosowania w elementach podobnych do tych, na podstawie których zostały wyprowadzone. Wykorzystana w modelu drugim procedura obliczeniowa funkcjonuje w normie amerykańskiej bez zmian od 1963 roku i była ostatnio szeroko krytykowana w literaturze (np. Paczkowski P., Nowak A. Shear resistance of reinforced concrete beams without web reinforcement. ACEE, no. 1/2008, str. 99-112, Collins M.P.

Improving analytical models for shear design and evaluation of reinforced concrete structures. *fib Bulletin* 57, 2010, str. 77-92).

Po drugie, w pracy Doktorant przy weryfikacji zaleceń normowych w większym stopniu skupił się na normach EC2 i MC2010, dla których sprawdził dopasowanie normowych wartości nośności na ścinanie do wyników badań dla belek badanych przy smukłości ścinania 1,57 i 2,61. Analizę dopasowania wartości obliczonych na podstawie ACI 318 przeprowadził Doktorant tylko dla belek badanych przy smukłości ścinania 2,61. Brak jest natomiast analizy dopasowania wartości normowych w przypadku belek przy smukłości ścinania 3,66. Autor na podstawie przeprowadzonej analizy porównawczej dochodzi do wniosku (str. 181): „... że najdokładniejsze przybliżenie eksperymentalnej nośności na ścinanie (dla schematu statycznego B2), uzyskano stosując modele bazujące na ograniczeniu wartości naprężeń na głównych kierunkach $V_{Rd,ct}$ (30) (EC2), (31) oraz (32) (MC2010)”. Zaskakuje zatem fakt przyjęcia wzoru na nośność na ścinanie z normy ACI 318 jako podstawy przy opracowywaniu własnego modelu.

Ponadto, w odniesieniu do proponowanego modelu drugiego Doktorant podał (str. 192), że: „... model analityczny określa nośność na ścinanie, z uwzględnieniem efektu zazębienia kruszywa, pracy kołkowej zakotwionego zbrojenia podłużnego, smukłości ścinania oraz wpływu sprężenia, zależnego od utraty zakotwienia mechanicznego wybranych kabli sprężających zgodnie z modelem długości transmisji.” Efekt zazębienia kruszywa jest uwzględniony przy wymiarowaniu na ścinanie wg zaleceń MC2010 (opartych na uproszczonej teorii pola naprężeń ściskających SMCFT), w przypadku elementów bez zbrojenia poprzecznego $\rho_w = 0$. W obliczeniach nośności na ścinanie na drugim poziomie aproksymacji uwzględnia się wówczas udział betonu w przenoszeniu siły poprzecznej stosując współczynnik k_v zależny od uziarnienia kruszywa. W proponowanym przez Doktoranta modelu wyznaczania nośności na ścinanie opartym na procedurze z normy amerykańskiej efekt zazębienia kruszywa nie jest uwzględniony.

Końcowa analiza nośności belki kablobetonowej

W pracy zabrakło próby całościowego podejścia do oceny sposobu zniszczenia belki podsuwnicowej i do wskazania najbardziej niekorzystnych mechanizmów mających wpływ na nośność na ścinanie belki kablobetonowej. Doktorant słusznie przeprowadził badania przy różnym umiejscowieniu obciążenia opisanym trzema wartościami smukłości ścinania. Sposób użytkowania belek podsuwnicowych powoduje, że

obciążenie zadawane na belkę przemieszcza się. Zatem charakter pracy elementu podczas jego eksploatacji zmienia się od „rozporowo-ściągowego” przy usytuowaniu obciążenia w strefie przypodporowej (smukłość ścinania $a/d < 2,0$) do „belkowego” przy usytuowaniu obciążenia w środkowym obszarze przęsła ($a/d > 3,0$). Wskazane byłoby wyłonienie najbardziej niekorzystnej sytuacji przyłożenia obciążenia prowadzącej do zniszczenia i skutkującej największą redukcją nośności belki w zależności od danej konfiguracji kabli sprężających z utratą zakotwienia i przy uwzględnieniu jakości wypełnienia kabli. W tak przeprowadzonej analizie smukłość ścinania nie powinna być stawiana na pierwszym miejscu.

5. Uwagi edytorskie

Praca zredagowana jest poprawnie i napisana dobrą polszczyzną. W tekście natrafiono na drobne usterki, a najważniejsze z nich wymieniono poniżej.

5.1. Terminologia

Smukłość ścinania jest jednoznacznie zdefiniowana w pracy jako iloraz ramienia siły do wysokości użytecznej przekroju (a/d). Nie należy zatem smukłością ścinania zamiennie określać ilorazu ramienia siły do całkowitej wysokości przekroju (a/h), jak to ma miejsce w kilku miejscach pracy, np. na str. 50, 62, 88. Jeżeli iloraz a/d został określony jako smukłość ścinania to nie powinien być nazywany wskaźnikiem a/d np. na rys. 106, 107, 120, 121 i w tekście np. na str. 170.

Niektóre terminy użyte w rozprawie powinno być uściślone lub zmienione:

Str. 16 i dalej - okres projektowanej trwałości → projektowany okres użytkowania

Str. 16 - Specyficzny charakter pracy belek podsuwnicowych sprawia, że oprócz wymagań wytrzymałościowych powinny one spełniać wiele wymagań użytkowych. → Specyficzny charakter pracy belek podsuwnicowych sprawia, że oprócz wymagań związanych z nośnością powinny one spełniać wiele wymagań użytkowych. (wytrzymałość odnosi się do materiału a nie do elementu konstrukcyjnego)

Str. 14 - nośność graniczna belek → nośność belek

Str. 14 - shear slenderness ratio → shear span-to-depth ratio

Str. 36 i dalej - efekt kołkowej pracy zbrojenia → efekt klockujący prętów zbrojeniowych lub efekt siły klockującej zbrojenia podłużnego

Str. 43 – wytrzymałość betonu na ukośne ściskanie → wytrzymałość betonu na ściskanie w złożonym stanie naprężenia

Str. 51 - Jak należy rozumieć schemat statyczny typowego zginania i klasyczny schemat statyczny ścinania. Charakter zniszczeni elementu nie jest zdeterminowany schematem statycznym.

Str. 62 tytuł rozdziału 4.1 i dalej w tekście - badania ścinania → badanie nośności belek na ścinanie

Str. 180 - wraz z wzrastającą mocą zbrojenia → wraz ze wzrostem stopnia zbrojenia

5.2. Uwagi redakcyjne

Str. 23 - dopiero *po* osiągnięciu

Str. 24 - powstanie mechanizmu klinowania się ... czego?

Str. 26 - Naprężenia przyczepności betonu do ... czego?

Str. 27 i dalej w odniesieniu do różnych norm - Model Code 2010 [N2] zawiera → W Model Code 2010 [N2] zawarto

Str. 46 - ograniczenie smukłości ścinania $V_u d_p / M_u$ → ograniczenie odwrotności smukłości ścinania $1/\delta = V_u d_p / M_u$

Str. 70 - doszło *do* uwolnienia

Str. 181 podpis pod rys. 119 - Dokładność nośności na ścinanie obliczonych według podstawowych modeli analitycznych → Dopasowanie wartości nośności na ścinanie obliczonych według procedur normowych do wartości eksperymentalnych

Str. 193 - Wykorzystanie ... według hipotezy ... jakiej?

Str. 187 - W oparciu o wyniki → Biorąc pod uwagę wyniki

Str. 198 - W oparciu o studia → Na podstawie studiów

5.3. Bibliografia

Bibliografia obejmuje w sumie 206 pozycji w tym 17 pozycji to normy i instrukcje.

Opis pozycji literaturowych jest ujednolicony i przeprowadzony zgodnie z zaleceniami norm ISO 690:1987 Information and documentation – Bibliographic references – Content, form and structure, ISO 690-2 Information and documentation – Bibliographic references – Part 2: Electronic documents or parts thereof.

W spisie literatury zabrakło norm, na które jest powołanie w tekście: PN-EN 12390-3, PN-EN 12390-6, PN-EN 12390-13, PN-EN ISO 6892-1. Ponadto, ze względu na badanie wytrzymałości betonu na próbkach rdzeniowych pobranych z elementu konstrukcyjnego, powinna być zacytowana norma PN-EN 13791:2008P: Ocena wytrzymałości betonu na ściskanie w konstrukcjach i prefabrykowanych wyrobach betonowych.

5.4. Rysunki i tablice

Oprawa graficzna pracy została przez doktoranta starannie opracowana. Materiał graficzny zaprezentowany w pracy jest obszerny (129 rysunków i 61 fotografii) i dobrze ilustruje tematykę zarówno w odniesieniu do opisu badań jak i prezentacji wyników.

W większości rysunki są czytelne i prawidłowo opisane. Wyjątek stanowią rysunki w rozdziale 6.2 (rys. 115-119) zawierające analizę wyników, które powinny być większe a przez to przedstawione wyniki bardziej czytelne.

W pracy zamieszczonych jest 58 tablic, w których Doktorant zestawiał przede wszystkim wyniki badań. W opracowaniach tekstów technicznych (również w normach) używa się raczej terminu tablica zamiast tabela jak to ma miejsce w pracy.

6. Wniosek końcowy

Uważam, że praca doktorska mgra inż. Rafała Walczaka zawiera wartościowe badania naukowe i poprawną analizę zagadnienia nośności na ścinanie sprężonych belek podsuwnicowych z niepewnym zakotwieniem kabli sprężających. Na uwagę zasługuje trafność doboru tematyki dysertacji, która ma duże znaczenie dla praktyki inżynierskiej. Główny cel badań naukowych został zrealizowany. Doktorant wykazał się znajomością różnych metod badawczych, w tym nowoczesnych technik pomiarowych, modelowania numerycznego, analizy danych. Wszechstronne doświadczenie zdobyte przy realizacji badań związanych z tematyką rozprawy doktorskiej umożliwi Doktorantowi dalszą samodzielną pracę naukową. Uwagi zawarte w recenzji nie pomniejszają pozytywnej oceny merytorycznej pracy.

Na podstawie oceny rozprawy doktorskiej mgra inż. Rafała Walczaka pt. „Nośność na ścinanie betonowych belek podsuwnicowych w przedłużonym okresie trwałości, w warunkach niepewności zakotwienia kabli sprężających” stwierdzam, że spełnia ona wymagania określone w Ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 roku oraz wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Społik Manta