

Prof. dr hab. inż. Henryk Zobel

Warszawa, dn. 28.12.2023 r.

Politechnika Warszawska
Wydział Inżynierii Lądowej
Instytut Dróg i Mostów

WPŁYNEŁO - WBLIW

04-01-2024

N2/5/2024

Recenzja

pracy doktorskiej mgr inż. Błażeja Bartoszka Bartoszka

pt. „Stany graniczne konstrukcji hybrydowych stalowo – betonowych ze zbrojeniem zewnętrznym”

Recenzję opracowano zgodnie z Uchwałą nr 378/62/RDND06/2021-2024 z dnia 18 października 2023 roku Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Wrocławskiej, na zlecenie Przewodniczącego prof. dr hab. inż. Wojciecha Puły – umowa z dnia ... listopada 2023 roku.

1. Charakterystyka i tematyka pracy

Opiniowana praca doktorska składa się z dziewięciu rozdziałów, dwóch załączników, streszczeń oraz wykazu literatury. Zestawienie zawiera 92 pozycje (w tym 21 to normy, jedno rozporządzenie Ministra Infrastruktury i dwa podręczniki oprogramowania), z czego w pięciu z nich Doktorant jest współautorem. Całkowita objętość rozprawy wynosi 225 stron części głównej oraz 66 stron załączników.

Rozprawa ma charakter analityczno – doświadczalny oraz zawiera dużą część monograficzną, która sama w sobie mogłaby stanowić osobne opracowanie. Weryfikacja uzyskanych wyników nastąpiła w ramach projektowania i realizacji obiektów rzeczywistych.

Praca dotyczy bardzo ważnego, o charakterze innowacyjnym, zagadnienia, a mianowicie określenia wymagań dotyczących spełnienia stanów granicznych nośności oraz użyteczności. To prowadzi do opracowania zasad projektowania konstrukcji hybrydowych stalowo – betonowych ze zbrojeniem zewnętrznym.

Poszczególne rozdziały rozprawy zawierają:

- wstęp,
- motywację podjęcia tematyki,
- cel i zakres pracy,
- przedstawienie aktualnego stanu wiedzy, w tym tezy pracy,
- analizy numeryczne,
- opis i analizę wyników badań niszczących,
- analizę interakcji mechanizmu rozwarstwienia pionowego i mechanizmu przenoszenia siły poprzecznej pod kątem wymiarowania strzemion,
- wymiarowanie przekrojów hybrydowych na przykładzie rzeczywistych obiektów mostowych,
- podsumowanie i wnioski końcowe wraz z opisem potencjalnych kierunków przyszłych badań.

2. Ocena merytoryczna pracy

Zagadnienie będące przedmiotem dysertacji czyli spełnienie wymagań stanów granicznych nośności i użytkowalności (w szczególności na ścinanie) belek o przekrojach hybrydowych stalowo – betonowych jest przedmiotem badań i analiz od kilkunastu lat. Podstawowym czynnikiem niejako wymuszającym takie działania jest poszukiwanie nowych, bardziej efektywnych kosztowo i technologicznie rozwiązań konstrukcyjnych mostów. Do takich należy niewątpliwie konstrukcja belki hybrydowej, w strefach podporowych – żelbetowej, a strefie przęsłowej – zespolonej.

Kluczowym zagadnieniem w projektowaniu takich konstrukcjach jest ukształtowanie strefy przejściowej, czyli tej części, w której stal konstrukcyjna (z „zębami” i otworami) przekazuje siły na stal zbrojeniową i beton oraz zidentyfikowanie i określenie mechanizmów zniszczenia. Jest kilka czynników wpływających na kształt strefy przejściowej. Są to jej długość, a w tym rozstaw i sztywność łączników oraz wysokość środników belek z podziałem na środnik stalowy i betonowy. Ponadto istotne jest określenie stopnia udziału zbrojenia miękkiego w postaci prętów podłużnych i poprzecznych oraz różnego rodzaju strzemion i ich lokalizacji w przekroju.

Postanowił osiągnąć następujące cele naukowe:

- *analizę wpływu stosunku wysokości części stalowej i żelbetowej na ramię sił wewnętrznych (Z).*
- *określenie mechanizmu przenoszenia siły poprzecznej przez belkę o przekroju hybrydowym z dominującym udziałem z dominującym udziałem środnika stalowego w strefie rozciąganej przekroju.*
- *sformułowanie założeń dotyczących kąta nachylenia krzyżulców betonowych (Θ) i określenie wpływu wysokości środnika części żelbetowej w całkowitej wysokości przekroju hybrydowego na wartości ww. kąta.*
- *określenie wpływu grubości środnika betonowego na sposób zniszczenia elementu oraz wykształcenie się mechanizmu ST- „strut and tie model”.*
- *weryfikację współpracy różnych typów stosowanych strzemion w globalnym modelu ST.*
- *poszerzenie wiedzy umożliwiającej (w przyszłości) wyciągnięcie wniosków na temat interakcji mechanizmu ST z lokalnymi efektami połączenia ścinanego.*

Biorąc pod uwagę charakter wdrożeniowy przewidzianych do realizacji prac Doktorant postanowił zrealizować także następujące cele o charakterze użytkowym:

- *optymalizację układu zbrojenia na ścinanie środnika żelbetowego w połączeniu ze zbrojeniem w obrębie łącznika.*
- *kształtowanie „confinement reinforcement” (w praktyce strzemion”) w środnikach przekrojów hybrydowych.*
- *analizę czynników mających wpływ na sztywność elementu hybrydowego (sztywność postaciowa, „tension stiffening”, sztywność zespolenia).*
- *wykonanie modeli numerycznych poprawnie oddających zachowanie ścinanego elementu hybrydowego pod obciążeniem (zarysowanie środnika, deformacje, mechanizmy zniszczenia).*
- *weryfikację zależności pomiędzy rozwarciem zespolenia (odspojeniem części żelbetowej od środnika stalowego w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny środnika), a jego nośnością i sztywnością na ścinanie podłużne.*

Przedstawiony powyżej zakres rozprawy i założone cele bazujące na bardzo szerokim i szczegółowym przeglądzie literatury (aż 63 strony) miały służyć udowodnieniu następujących tez:

- Mechanizm przenoszenia siły poprzecznej przez belkę o przekroju hybrydowym stalowo – betonowym oraz wynikająca z niego metoda projektowania stanowi nowy problem naukowy. Metoda ta definiuje przekrój hybrydowy. (Mechanizm przenoszenia momentu zginającego jest poznany, a dostępne koncepcje wyczerpująco opisują to zjawisko).
- W przenoszeniu siły poprzecznej, w przekroju hybrydowym bierze udział część stalowa (belka Timoshenki) i żelbetowa (mechanizm ST), co opisuje model mechaniczny metody ogólnej. Na podstawie metody ogólnej obliczania nośności na ścinanie bazującej na ramieniu sił (Z) wewnętrznych możliwe jest wymiarowanie dowolnego przekroju w szczególności hybrydowego. Dotyczy to zarówno żelbetowej jak i stalowej części przekroju hybrydowego.
- Kąt nachylenia krzyżulców (Θ) w przekroju hybrydowym jest zależny od rozkładu odkształceń w części żelbetowej. Jego wartość ma zatem związek z udziałem części stalowej i żelbetowej w całkowitej wysokości przekroju. Wartość kąta będzie maleć wraz z zmniejszaniem się udziału betonu w części rozciąganej.
- Wyznaczając nośność krzyżulca betonowego należy brać pod uwagę mechanizmy zniszczenia opisane w EN 1992. Wobec tego trzeba uwzględnić zmniejszenie wytrzymałości spowodowane zarysowaniem na ścinanie (concrete softening). Z uwagi na dowolność kształtowania geometrii naturalną konsekwencją stosowania przekrojów hybrydowych będzie zmniejszanie udziału w strefie rozciąganej. To z kolei będzie prowadziło do zwiększenia średnich naprężeń ściskających w części betonowej. W przeciwieństwie do typowych zginanych elementów żelbetowych należy zatem uwzględnić potencjalną redukcję nośności z uwagi na złożony stan naprężeń pomiędzy krzyżulcem i strefą ściskaną.
- W obliczeniach nośności środnika żelbetowego można uwzględnić zarówno strzemiona, których poziome ramię stanowi zbrojenie doweli („zębów”), jak i strzemiona właściwie zakotwiczone w betonie poniżej podstawy łącznika.

Założone cele i postawione tezy do udowodnienia pokazują kompleksowe podejście Doktoranta do zagadnienia określenia zasad pracy belek o przekroju hybrydowym oraz do stworzenia racjonalnych procedur projektowych.

Reasumując, przedmiotem rozprawy jest analiza mechanizmu pracy belek o przekrojach hybrydowych stalowo – betonowych ze szczególnym uwzględnieniem ścinania, a Doktorant zamierzał to osiągnąć stosując tzw. metodę ogólną wymiarowania ww konstrukcji niezależnie od geometrii przekroju.

Należy dodać, że wymiarowanie przekrojów hybrydowych na zginanie odbywa się tak jak dla klasycznych przekrojów zespolonych. Natomiast w przypadku przejmowania siły poprzecznej tak nie jest, choćby z uwagi na różnie położenie części stalowej o części betonowej. W zależności od geometrii przekroju hybrydowego przyjmowano założenie, że ścinanie jest przenoszone wyłącznie przez część stalową (środnik belki teowej lub środniki belki korytkowej) lub że jest przejmowane wyłącznie przez część betonową (środnik „obetonowujący” do różnej wysokości środnik stalowy lub beton wypełniający stalowy przekrój korytkowy). Już sama intuicja projektantów wskazywała, że powyższe założenia odbiegają od rzeczywistości. Stało się jasne, że należy opracować spójną metodę pozwalającą na uwzględnienie współdziałania części betonowej i stalowej przekroju hybrydowego w przenoszeniu siły poprzecznej. Problem ten rozwiązał Doktorant stosując zaproponowaną wcześniej przez promotora tzw. metodę ogólną. Bazuje ona na modelu kratownicy wielokrotnej (ST – „strut and ties”), która składa się z betonowych krzyżulców ściskanych oraz wieszaków/słupków rozciąganych. Parametrami determinującymi geometrię modelu ST są wysokość (Z), czyli ramię sił wewnętrznych oraz kąt nachylenia krzyżulców (Θ). Dokonany przez Doktoranta przegląd literatury, a w tym i norm projektowania (PN EN 1992, PN EN 1993

oraz PN EN 1994) pozwolił stwierdzić, że model ST, który można zastosować do dowolnego kształtu przekroju, stanowi uniwersalne podejście do obliczeń nośności na ścinanie.

Metoda ogólna bazuje na założeniu, że suma naprężeń stycznych na całej wysokości przekroju, a co za tym idzie suma siły rozwarstwiającej odpowiada sumie naprężeń o stałej wartości pomiędzy wypadkową w części ściskanej i rozciąganej przekroju zginanego. Wartość ww naprężeń jest równa maksymalnym naprężeniom stycznym obliczonym z uwzględnieniem ich rozkładu na wysokości przekroju.

Można powiedzieć, że realizacja wszystkich wymienionych wyżej celów i też służy udowodnieniu przydatności tej metody do projektowania przekrojów hybrydowych lub innymi słowy do weryfikacji poprawności założeń tej metody obliczania dźwigarów o przekrojach hybrydowych na ścinanie.

Już w tym miejscu recenzji można stwierdzić, że Doktorant potrafił rozwiązać ten złożony problem najpierw na drodze numerycznej, a potem zweryfikował go przeprowadzając szeroko zakrojone badania doświadczalne. Osiągnął zatem cele naukowe i użytkowe oraz udowodnił postawione sobie tezy.

Reasumując, Doktorant zrealizował bardzo obszerny program własnych badań i analiz studialnych, laboratoryjnych i obliczeniowych zarówno teoretycznych jak i numerycznych (z wykorzystaniem oprogramowania Sofistik i Midas). Nawiasem mówiąc, zarówno założenia do zbudowania jak i jakość modeli numerycznych są na wysokim poziomie. Widoczna jest biegłość w tworzeniu modeli, stosowanie różnych „chwytów”, a także umiejętność wyciągania wniosków z poprzednich analiz. Innymi słowy, Doktorant wykazał duży profesjonalizm.

Uzyskał dobrą zgodność wyników badań laboratoryjnych i obliczeniowych, a także określonych podczas badań odbiorczych na obiektach rzeczywistych.

Również obserwacja zachowania się już eksploatowanych konstrukcji mostowych dowodzi poprawności rozwiązań zastosowanych w prototypie.

Zaprezentowany poziom merytoryczny rozprawy, a także sposób i logika wnioskowania są na bardzo dobrym poziomie. Na każdym etapie prac badawczych Doktorant prawidłowo zaplanował procedury przeprowadzania eksperymentu, przeprowadził go i wyciągnął wnioski.

W rozprawie nie stwierdzono błędów merytorycznych, a pojawiające się niekiedy nieścisłości czy wątpliwości nie wpływają ujemnie na odbiór i jakość rozprawy.

Można zatem stwierdzić, że mgr inż. Błażej Bartoszek wnosi oryginalny wkład w rozwój mostownictwa.

3. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

Jak to wynika z powyżej przedstawionej oceny poziom merytoryczny rozprawy doktorskiej mgr inż. Błażeja Bartoszka jest wysoki. Tym niemniej recenzentowi nasunęły się następujące pytania i uwagi:

- Jak zaproponowane przez Doktoranta rozwiązania wpłyną na trwałość dźwigarów hybrydowych. Czy jest jakaś „kontrola obliczeniowa” zjawiska powstawania i propagacji rys w betonie? Czy karb geometryczny jakim jest „przejście” od średnika betonowego do stalowego nie ma wpływu na wytrzymałość zmęczeniową?
- Czy znane są Doktorantowi wyniki badań zmęczeniowych konstrukcji będących przedmiotem rozprawy lub podobnych? Czy wiadomo coś na temat nośności zmęczeniowej zespolenia?
- Jakimi kryteriami kierowano się stosując jako model obliczeniowy raz belkę Bernoulliego a innym razem belkę Timoshenki?

- Skoro udział zbrojenia podłużnego w przenoszeniu sił ścinających jest relatywnie mały to jakie są wskazania odnośnie zalecanych średnic tych prętów, ich rozstawu czy ciągliwości stali, z której je wykonano?
- Na str. 202 zaproponowano podział przekrojów hybrydowych na proste i złożone z uwagi na przenoszenie ścinania. Czy takie kryterium podziału nie jest zbyt subiektywne?
- Czy będąca przedmiotem rozprawy konstrukcja hybrydowa jest rzeczywiście oszczędniejsza (kosztowo, technologicznie) niż klasyczna zespolona typu stal-beton? Liczba rodzajów strzemion w przekrojach złożonych według recenzenta poddaje to stwierdzenie w wątpliwość.
- Doktorant brał udział w opracowywaniu prenormy CEN/TS 1994-1-102. Może potrafi uzasadnić zapis „zbrojenie współpracujące środnika powinno zapewniać nośność odpowiadającą 30% nośności zespolenia”?
- Na czym polega zasada „brzytwy Ockhama”?

4. Ocena strony formalnej pracy

- Treść rozprawy jest zgodna z tytułem, choć sformułowanie „zbrojenie zewnętrzne” może budzić wątpliwość. Układ rozprawy jest logiczny i uporządkowany. Także opracowanie graficzne jest na bardzo dobrym poziomie. Rozprawa jest napisana dobrą polszczyzną, aczkolwiek można znaleźć sformułowania slangowe. Zdarzają się także lapsusy językowe.
- Narracja jest płynna, choć czasami zbyt rozbudowana. Niestety, zdarzają się powtórzenia tekstu w różnych rozdziałach.
- Na str. 12 są podane skróty stosowane w opracowaniu. Ich umiejscowienie w tekście rozprawy nie jest zbyt szczęśliwe. Według recenzenta powinny znaleźć się one zaraz za Spisem Literatury. Ponadto, mimo trudności w tłumaczeniu „inżynierskim” należałoby jednak zaproponować tłumaczenie na język polski.
- W wykazie brak jest niektórych skrótów (np. WZZ, PZZ ULT1), szczególnie stosowanych w rozdziale dotyczącym analiz numerycznych (są one zapewne stosowane w oprogramowaniu).
- Brakuje definicji wielu sformułowań co w połączeniu z często stosowanymi skrótami stwarza kłopot czytelnikowi np. „offset przekroju”, „poziom zespolenia”, „sztywność postaciowa” itd.
- W Spisie Literatury brakuje w niektórych pozycjach np. nazwy czasopisma czy nazwy wydawnictwa.
- Czytanie rozprawy utrudnia zbyt mała odległość między podpisem pod rysunkiem i tekstem.
- Podpis pod rys. 6.20 jest nieadekwatny do treści rysunku.

Dostrzeżone w tekście usterki redakcyjne nie obniżają poziomu merytorycznego rozprawy. Generalnie, odbiór opracowania jest dobry.

5. Wnioski końcowe

Rozwój konstrukcji mostowych jest bardzo ważnym zagadnieniem zarówno z technicznego jak i ekonomicznego punktu widzenia. Doktorant przeprowadził przemyślany cykl badań i analiz, poprzedzony imponującą szczegółowością oceną stanu wiedzy, udowadniając, że zrealizowana konstrukcja hybrydowa poprawia szeroko rozumianą jakość konstrukcji mostowych.

Autor rozprawy wykazał się umiejętnością rozwiązywania zagadnień teoretycznych, korzystania z istniejących programów komputerowych, przygotowania i realizacji badań laboratoryjnych i w końcu logicznym wnioskowaniem.

Opiniowana rozprawa stanowi udane rozwiązanie postawionego zadania naukowego i praktycznego, czego najlepszym dowodem jest wdrożenia wyników rozprawy w czterech wybudowanych obiektach mostowych.

Całość opracowania pokazuje również, że Doktorant oprócz umiejętności analizy zagadnienia wykazał także zdolność syntetyzowania wiedzy. Wyniki przedstawionych prac zostały wykorzystane przy sformułowaniu interesujących wniosków. Wskazane zostały także obszary do dalszych badań naukowych.

Biorąc pod uwagę przedstawione wyżej oceny stwierdzam, że przedłożona przez **mgr inż. Błażeja Bartoszkę** praca doktorska pod tytułem „**Stany graniczne konstrukcji hybrydowych stalowo – betonowych ze zbrojeniem zewnętrznym**” stanowi twórczy wkład do nauki w zakresie mostownictwa i spełnia wymogi stawiane pracom doktorskim określone w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 roku Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce (Dz. U. z 2022 roku, poz. 574 z póź. zm.).

Mając powyższe na uwadze, stawiam wniosek o przyjęcie opiniowanej rozprawy jako spełniającej wymagania ustawowe i dopuszczenie do publicznej obrony.

Wnoszę o nadanie stopnia doktora nauk technicznych w obszarze wiedzy nauki techniczne, dziedzinie nauki techniczne, w dyscyplinie naukowej Budownictwo.

Stawiam również wniosek o wyróżnienie rozprawy.



prof. dr hab. inż. Henryk Zobel