

Prof. dr hab. inż. Henryk Zobel
Politechnika Warszawska
Wydział Inżynierii Lądowej
Instytut Dróg i Mostów

Warszawa, dn. 12.11.2020 r.

R e c e n z j a

pracy doktorskiej mgr inż. Marco Teichgraebra

pt. „Ocena trwałości ciągów w mostach podwieszonych na podstawie danych z systemu monitorowania”

Recenzję opracowano na zlecenie Prorektora ds. Nauki Politechniki Wrocławskiej prof. dr hab. inż. Andrzeja Ożyhara – umowa o dzieło nr 12/10/PRR/2020 z dnia 12 października 2020 roku oraz decyzji Komisji ds. stopni naukowych w Dyscyplinie Naukowej Inżynieria Lądowa i Transport w Politechnice Wrocławskiej, która podjęła uchwałę nr 20/01/KSND06/2020-2024 z dnia 7 października 2020 roku.

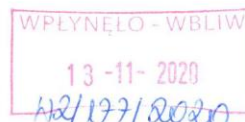
1. Charakterystyka i tematyka pracy

Opiniowana praca doktorska składa się z 9-ciu rozdziałów oraz wykazu literatury. Zestawienie zawiera cytowane 108 pozycji. W 10-ciu z nich doktorant jest współautorem. 5 to opracowania mające charakter wytycznych do projektowania i wykonania, 9 to normy oraz 4 to instrukcje korzystania z oprogramowania. Całkowita objętość rozprawy wynosi 162 strony.

Rozprawa ma charakter analityczny, choć Doktorant korzysta z danych uzyskanych drogą pomiarów na obiekcie rzeczywistym. Opracowanie dotyczy bardzo ważnego choć ciągle nie do końca sprecyzowanego zagadnienia oceny bezpieczeństwa użytkowania obiektów mostowych oraz ich trwałości. Wiąże się to z określeniem nośności konstrukcji (w tym przypadku mostu podwieszono o dużej rozpiętości przęsła) poddanej działaniu obciążeń stałych i ruchomych, naturalnym oddziaływaniom termicznym oraz osiadaniu podpór, w tym pylonu. W odróżnieniu od klasycznych procedur projektowych bazujących na podejściu deterministycznym w rozprawie wzięto pod uwagę zmienny w czasie i losowy charakter obciążeń oraz oddziaływań. W celu określenia trwałości ciągów w moście podwieszonym zastosowano zarówno analizę wytrzymałościową jak i niezawodnościową.

Poszczególne rozdziały rozprawy zawierają:

- We Wstępie zamieszczono skondensowane informacje dotyczące rozwoju konstrukcji mostowych, w których zastosowano ciągną. Omówiono rodzaje ciągów, ich budowę oraz właściwości materiałowe i wytrzymałościowe. Przedstawiono także w skrócie zjawisko zmęczenia w konstrukcjach mostowych wraz ze sposobami jego oceny w ujęciu probabilistycznym. Przekazano również wybrane informacje odnoszące się do tworzenia obliczeniowych modeli konstrukcji i modeli obciążeniowych. Opiszano również systemy monitorowania konstrukcji mostowych (SHM) na przykładach polskich i zagranicznych. We Wstępie sformułowano również cel pracy, a mianowicie:



„Niniejsza rozprawa będzie dlatego próbą opracowania wstępnych zasad oceny trwałości zmęczeniowej ciągów w mostach podwieszonych na podstawie danych uzyskanych z systemu monitorowania rzeczywistej konstrukcji mostowej”.

- W rozdziale 2 uszczegółowiono wyżej wymieniony cel formułując cele szczegółowe tj.:
 - Opracowanie algorytmu pozwalającego na weryfikację i analizę danych gromadzonych przez SHM zainstalowany w konstrukcji mostu Rędziańskiego we Wrocławiu,
 - Ustalenie wpływu poszczególnych rodzajów obciążeń na wyężenie i wytrzymałość zmęczeniową ciągów,
 - Przeprowadzenie symulacji i prognozy obciążeń i sił mogących wystąpić w konstrukcji mostu Rędziańskiego w kolejnych latach eksploatacji.
 - Obliczenie momentu zginającego w strefie zakotwienia ciągów dla jego różnych modeli.

Reasumując, końcowym efektem rozprawy będzie *„uniwersalny algorytm pozwalający oszacować trwałość elementów ciągowych na podstawie danych z systemu monitorowania konstrukcji”.*

- W rozdziale 3 opisano konstrukcję mostu Rędziańskiego we Wrocławiu, system monitoringu jego monitoringu oraz skrótowy opis pracy tego obiektu na podstawie 7-mio letnich pomiarów różnych parametrów.
- Rozdział 4 poświęcono opisowi metodyki postępowania z danymi uzyskiwanymi z SHM, wykorzystywanemu oprogramowaniu i opisowi modelu MES mostu Rędziańskiego ze szczególnym uwzględnieniem wybranych want.
- W rozdziale 5 przedstawiono problem weryfikacji i uporządkowania danych uzyskiwanych z systemu monitoringu czyli ich analizę jakościową i ilościową. Pokazano zmienność wartości sił w ciągach w czasie rozdziałając efekty wywoływane przez różne obciążenia i oddziaływania.
- Rozdział 6 jest rozwinięciem informacji przedstawionych we Wstępie na temat zmęczenia konstrukcji, przy czym szczególny nacisk położono na problem kumulacji uszkodzeń, a w tym na zliczanie cykli i dopasowywanie rozkładów prawdopodobieństwa oraz ich wykorzystanie do obliczeń zmęczeniowych.
- Rozdział 7, kluczowy dla oceny wartości rozprawy, to autorskie opracowanie algorytmu dotyczącego oceny trwałości ciągów i zakotwień. Obliczono naprężenia zarówno w ciągach jak i w blokach kotwiących oraz przeprowadzono odpowiednie obliczenia niezawodnościowe. Modyfikowano także różne charakterystyki geometryczne i obciążeniowe oraz uwzględniono wpływ tłumików drgań. W ograniczony sposób zbadano również wpływ wzbudzenia ciągów wiatrem.
- W rozdziale 8 i 9 przedstawiono podsumowanie i wnioski końcowe wraz z opisem potencjalnych kierunków przyszłych badań.
- Rozdział 10 zawiera streszczenia w języku polskim i angielskim.

2. Ocena merytoryczna pracy

Zagadnienie będące przedmiotem dysertacji tj. trwałość konstrukcji mostowej jest przedmiotem badań i analiz odkąd budowane są mosty. Przez setki lat oceniano bezpieczeństwo na podstawie oceny stopnia „szkodliwości” uszkodzeń pojawiających się w trakcie eksploatacji, a także polegano na wiedzy i doświadczeniu budowniczego. W XX wieku stworzono system okresowych przeglądów obiektów mostowych, w trakcie których opisywano

mniej lub bardziej usystematyzowany sposób stan techniczny konstrukcji i jej wyposażenia. Takie działanie miało niewątpliwie charakter subiektywny – zależny od wiedzy i doświadczenia oceniającego.

Rozwój technik pomiarowych oraz urządzeń do rejestracji i analizy pozyskiwanych danych pozwolił na stworzenie systemów ciągłego monitoringu konstrukcji. W konsekwencji pojawił się problem „obróbki” danych (wyselekcjonowania tych rzeczywiście potrzebnych) oraz wykorzystania ich do oceny bezpieczeństwa użytkowania mostów i idąc dalej do oceny ich trwałości. Jest oczywiste, że bezpośrednio przekłada się to na skutki ekonomiczne dla gospodarki.

Rozprawa jest poświęcona ocenie trwałości tylko pewnego aczkolwiek bardzo ważnego składnika konstrukcji mostu podwieszonoego, a mianowicie ciągien. Zawartość pracy przedstawiono powyżej.

Doktorant zrealizował obszerny program własnych analiz i symulacji komputerowych bazujących na wynikach pomiarów z systemu monitoringu. Pokazał jak umiejętnie spożytkować wyniki monitoringu rzeczywistego obiektu mostowego. Przedstawiony tryb postępowania wykorzystuje znane metody oceny zmęczenia bazujące na teorii prawdopodobieństwa i teorii niezawodności. Opracowany przez Doktoranta algorytm oceny trwałości bazuje na ww teoriach.

Uzyskane wyniki analiz pokazują, że wartości wskaźników niezawodności są znacznie wyższe niż przyjmowane obecnie dla obiektów mostowych. Oznacza to, że most Rędziński i inne podobne do niego obiekty są zaprojektowane i wykonane w sposób bardzo bezpieczny. Oczywiście pojawia się pytanie czy tak wysoki poziom niezawodności jest potrzebny, czy obiekt nie został „przeprojektowany” czy zużycie materiału nie jest zbyt duże? Odpowiedź na te pytania wykracza poza zakres opiniowanej rozprawy.

Oprócz osiągnięcia założonych celów dotyczących oceny trwałości mostu Doktorant, niejako przy okazji, uzyskał także ściśle konstrukcyjne wnioski dotyczące wpływu zjawisk rezonansowych generowanych przez różnego rodzaju obciążenia i oddziaływania na pracę konstrukcji mostu. Opracował również wskazania do wprowadzenia zmian w konstrukcji bloków kotwiących ciągna w mostach podwieszonych, ale również w mostach extra-dosed i łukowych.

Uzyskał ciekawe wyniki czasami odbiegające od intuicyjnego rozumienia pracy konstrukcji mostowej np. że „amplitudy zmian naprężeń od różnicy temperatur są dużo większe niż od obciążeń pojazdami” (str 34) czy „... zmiany naprężeń są mniejsze, ale za to średnia wartość naprężeń od zginania jest dużo większa, zatem w tym wypadku trwałość takiego zakotwienia splotu (wanta W-20) nie jest determinowana przez wytrzymałość zmęczeniową” (str 123).

Zaprezentowany poziom merytoryczny rozprawy, a także sposób i logika wnioskowania są na bardzo dobrym poziomie. W ocenie recenzenta Doktorant zrealizował wszystkie założone sobie cele.

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

Uzyskane wyniki potwierdzają nie tylko słuszność zaproponowanych procedur. Choć dotyczą one bardzo specyficznego elementu konstrukcyjnego jakim jest ciągno to opracowane algorytmy obliczeniowe i procedury postępowania mogą i powinny być wykorzystane do oceny trwałości innych elementów konstrukcyjnych mostów. Czyli mogą one być bezpośrednio wykorzystane w praktyce inżynierskiej, w szczególności w procesie optymalizacji procesów decyzyjnych w zarządzaniu infrastrukturą mostową. W szczególności dotyczy to ujednoczenia i zobiektywizowania oceny stanu technicznego oraz przydatności użytkowej poszczególnych obiektów i w konsekwencji racjonalizacji rozdziału środków finansowych na ich utrzymanie. Stąd też praca oprócz naukowego ma bardzo pożądaną charakter aplikacyjny.

Można zatem stwierdzić, że mgr inż. Marco Teichgraeber wnosi oryginalny wkład w rozwój mostownictwa.

3. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

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

- O ile w jasny sposób Doktorant zadeklarował, że jest autorem rozdziałów 7, 8 i 9 to trudno jest wywnioskować z rozprawy jaki jest jego udział w pracach przedstawionych w innych rozdziałach.
- Dlaczego pominięto problem losowości właściwości materiału konstrukcyjnego, w szczególności betonu?
- Czy jest możliwe wyodrębnienie wpływu zjawisk reologicznych w betonie i stali (ciągną) na wartość sił naciągu?
- Na czy polega „metoda montażu Isotension” (str 56)?
- O co chodzi w stwierdzeniu (str 47) „...zostaną przeprowadzone symulacje danych w obszarze lat 2011-2018”?
- Mając świadomość „ułamności” bądź po prostu braku wiarygodnych danych na temat obciążeń ruchomych przejeżdżających przez most Rędziński, powstaje pytanie: na ile wiarygodne są modele obciążeń ruchomych przyjętych do analiz przedstawionych w rozprawie. Czy uwzględniano strukturę ruchu na moście?
- Czy rzeczywiście w Moście Rędzińskim do projektowania przyjęto 55% wytrzymałości stali wciągach?
- Choć wykracza to poza tematykę rozprawy to interesujące byłoby przedstawienie opinii Doktoranta na temat efektywności systemu monitoringu np. stwierdzeniu czy czujniki zostały zamontowane w prawidłowych miejscach na konstrukcji? Czy przyjęte zakresy pomiarów są wystarczające? Jaka jest ich techniczna niezawodność działania? Czy sposób zbierania danych pomiarowych jest prawidłowy?

4. Ocena strony formalnej pracy

Treść rozprawy jest zgodna z tytułem. Układ opracowania jest logiczny i uporządkowany. Rozprawa jest napisana dobrą polszczyzną. Narracja jest płynna, choć czasami zbyt skondensowana. Zdarzają się powtórzenia tekstu w różnych rozdziałach. Nieliczne, dostrzeżone w tekście usterki redakcyjne nie obniżają jej poziomu merytorycznego.

Niewłaściwie brzmią takie sformułowania jak: pomost poprzeczny czy dół oraz góra przekroju pomostu. Na rys. 7.20 brak jest krzywej odnoszącej się do wanty W-20.

Zauważono również, że nieprawdziwa jest informacja, że Wiadukt Millau jest najwyższym położony na świecie (str 42).

Generalnie, odbiór rozprawy jest dobry. Opracowanie graficzne jest również na bardzo dobrym poziomie.

5. Wnioski końcowe

Rozwój konstrukcji mostowych i nierozzerwalnie z tym związane zagadnienie określania poziomu bezpieczeństwa ich użytkowania, jest bardzo ważnym zagadnieniem zarówno z technicznego jak i ekonomicznego punktu widzenia. Doktorant przeprowadził przemyślane

cykl analiz udowadniając, że zaproponowane rozwiązania nie dość, że poprawią szeroko rozumianą jakość konstrukcji mostowych to jeszcze wpłyną pozytywnie na ich trwałość.

Opiniowana praca stanowi udane rozwiązanie postawionego zadania naukowego. Autor rozprawy wykazał się umiejętnością rozwiązywania zagadnień teoretycznych, tworzenia algorytmów, korzystania z istniejących programów komputerowych i w końcu logicznym wnioskowaniem. Wyniki przedstawionych analiz 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. Marco Teichgraebera praca doktorska pod tytułem „Ocena trwałości cięgien w mostach podwieszonych na podstawie danych z systemu monitorowania” stanowi twórczy wkład do nauki w zakresie mostownictwa i spełnia wymogi stawiane pracom doktorskim określone w Ustawie z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65 z dnia 14 marca 2003 roku, poz. 595 ze zmianami tj. Dz.U. poz. 249 i 1767) oraz § 6 ust. 1 i ust. 2 Rozporządzenia Ministra NiSzw z dnia 30 października 2015 roku (Dz. U. poz. 1842) oraz zgodnie z art. 179 ust. 1 i art. 174 ust. 2 Ustawy z dnia 3 lipca 2018 roku „przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (Dz. U. 2018 poz. 1669 z późniejszymi zmianami) i art. 178 ust. 1 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku „Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce” tj. (Dz. U. 2020 poz. 85).

Mając powyższe na uwadze, stawiam wniosek o przyjęcie opiniowanej rozprawy jako spełniającej wymagania ustawowe i dopuszczenie do publicznej obrony. Wnoszę o nadanie mgr inż. Marco Teichgraeberowi stopnia doktora nauk technicznych w dziedzinie nauki inżynierijno - techniczne, w dyscyplinie naukowej Inżynieria Lądowa i Transport.

Henryk Zobel