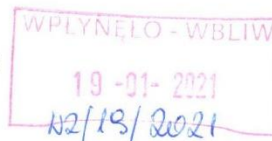


Dr hab. inż. Krzysztof Żółtowski prof. uczelni
Politechnika Gdańska
Katedra Transportu Szynowego i Mostów



Gdańsk, 28.12.2020

**Opinia o rozprawie doktorskiej mgr inż. Marco Teichgraeber`a
„Ocena trwałości cięgien w mostach podwieszonych na podstawie danych z
systemu monitorowania”**

1. Podstawa formalna opracowania

Opinię opracowano na wniosek Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Lądowa i Transport Politechniki Wrocławskiej, przesłany w piśmie z dnia 12.10.2020r.

2. Charakterystyka rozprawy

Rozprawa dotyczy problematyki trwałości cięgien w mostach podwieszonych. Rozważania szczegółowe dotyczą nośności zmęczeniowej, trwałości i niezawodności cięgien wielosplotowych na przykładzie konstrukcji Mostu Rędzińskiego we Wrocławiu. Praca łączy elementy modelowania teoretycznego, z wynikami monitoringu mostu. Całość spina złożona analiza statystyczna. Celem pracy jest określenie żywotności i niezawodności konstrukcji podwieszenia mostu. Autor rozprawy postanowił szereg celów do zrealizowania:

- Opracowanie algorytmu pozwalającego na weryfikację i analizę danych gromadzonych przez SHM.
- Ustalenie wpływu poszczególnych rodzajów obciążeń na wyężenie i wytrzymałość zmęczeniową cięgien w mostach podwieszonych.
- Wykonanie prognozy obciążeń i sił w cięgnach na przyszłe lata eksploatacji.
- Obliczenie momentu zginającego w strefie zakotwienia.
- Stworzenie uniwersalnego algorytmu pozwalającego oszacować trwałość elementów cięgnowych na podstawie danych z systemu monitorowania konstrukcji.

Praca liczy 162 strony, zawiera 92 rysunki i 53 tabele. Całość składa się z 9 rozdziałów poprzedzonych spisem treści, opisem symboli i oznaczeń oraz przyjętej w pracy terminologii. Na końcu pracy zamieszczono spis literatury (105 pozycji) oraz streszczenie w języku polskim i angielskim. i

Uwagi ogólne.

Obecnie przeżywamy w Polsce kolejny okres dużej aktywności budowlanej w obszarze infrastruktury drogowej. W ciągu ostatnich kilkunastu lat w sposób bezprecedensowy pomnożyliśmy wielokrotnie długość nowych i zmodernizowanych dróg. Wiąże się to z dużą ilością nowych obiektów inżynierskich. Ekonomia i trend w budownictwie infrastrukturalnym pokazują dominację obiektów betonowych z dużym udziałem cięgien o wysokiej wytrzymałości. Sprężenie i podwieszanie przęseł stało się niemal standardem w polskim mostownictwie. Obok typowych mostów podwieszonych o dużej jak

na polskie warunki rozpiętości powstało szereg obiektów mniejszych, w których ciężna wielosplotowe pełnią rolę powieszenia lub sprężenia zewnętrznego (systemy extradosed). Jest przy tym oczywiste, że ciężna te są wrażliwym elementem konstrukcji, decydującym o jej nośności i żywotności. Przed administracją drogową pojawia się więc nowy jakościowo problem utrzymania wybudowanych obiektów. Jednym z kluczowych aspektów problematyki utrzymania jest właściwa diagnostyka konstrukcji pozwalająca działać wyprzedzająco a nie objawowo. Dodatkowo trzeba mieć na uwadze ostatnie spektakularne katastrofy mostów, w których zawiodły ciężna (Wiadukt w Genui, most na Tajwanie).

Z tego punktu widzenia pracę należy uznać za niezwykle aktualną, przydatną dla administracji drogowej i również dla środowiska akademickiego oraz projektantów zajmujących się problematyką mostową.

Należy podkreślić, że montaż nawet bardzo złożonego systemu monitoringu jest mało przydatny, jeżeli nie idzie za tym zaawansowana teoretycznie interpretacja wyników obserwacji prowadząca do konkretnych wniosków. Oceniana praca jest takim podsumowaniem i interpretacją ośmioletniej obserwacji Mostu Rędziańskiego prowadzonej za pomocą automatycznego systemu SHM. Znaczenie praktyczne pracy jest zatem znaczne i moim zdaniem mocno podnosi jej ocenę.

Pracę podzielono na szereg tematycznie sprecyzowanych rozdziałów. Można jednak wydzielić w niej trzy zasadnicze części. Część pierwsza zawiera dość swobodny przegląd wiedzy na temat mostów, obciążeń i oddziaływań oraz zagadnień dotyczących oceny nośności. Część druga to raport z prac związany z pozyskaniem i opracowaniem danych z systemu SHM, opis badanego mostu oraz modele teoretyczne całej konstrukcji oraz ciężna. Część trzecia to wykonanie analiz określających nośność zmęczeniową, trwałość i niezawodność konstrukcji want w moście Rędziańskim.

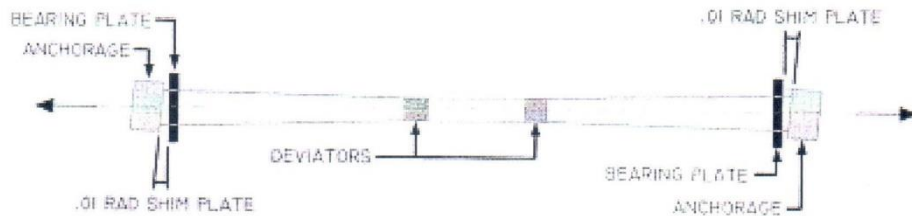
Uwagi szczegółowe.

We wstępie zamieszczono szereg wybranych zdarzeń lub faktów historycznych, które nie reprezentują w pełni omawianej historii ciężien w mostach. Jednak, ponieważ historia nie jest głównym tematem pracy pozwolę sobie pominąć szereg uwag szczegółowych.

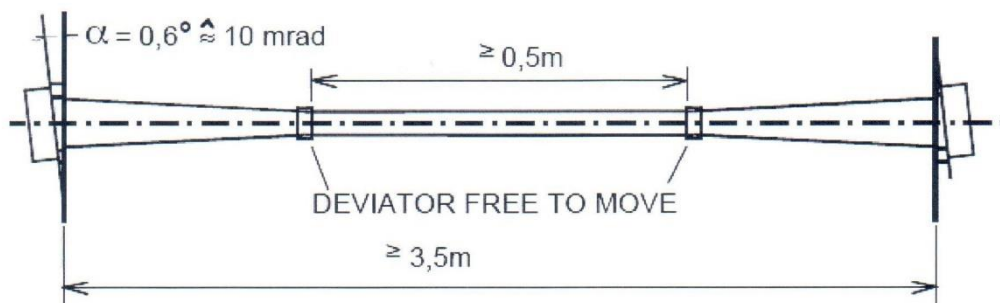
Str. 12, drugi akapit. Duża sztywność podłużna pręta litego wynika głównie z niskich naprężeń dopuszczalnych i tym samym ok. 3-krotnie większego przekroju nominalnego w stosunku do ciężien linowych lub wielosplotowych.

Str.14-16. Opis zakotwień want wielosplotowych ograniczono jedynie do systemu HD2000 firmy Freyssinet. Nie zwrócono uwagi na kluczowe w ocenie wytrzymałości elementy zakotwienia. Należy do nich „niwelator zginania” w zakotwieniu czynnym i dewiator w zakotwieniu biernym. Oba te urządzenia sprawiają, że splot w sąsiedztwie kotwy szcegłkowej nie powinien być zginany (przynajmniej w wyniku zmiany siły w wancie). Dzięki temu można wyróżnić dwie strefy, w których splot jest szczególnie narażony. Jest to strefa zakotwienia i strefa odgięcia na dewiatorze. Dzięki konstrukcji zakotwienia strefy te są rozłączne. Sprawą fundamentalną dla oceny wpływu zagięcia splotu jest zatem promień zagięcia na dewiatorze a nie przyrost kąta wejścia w zakotwienie wynikający ze zmiany napięcia ciężna lub imperfekcji montażowych. Pomimo takich rozwiązań konstrukcyjnych procedury badawcze określające nośność zmęczeniową wymagają uwzględnienia odchyłek i zagięć (patrz rys. poniżej).

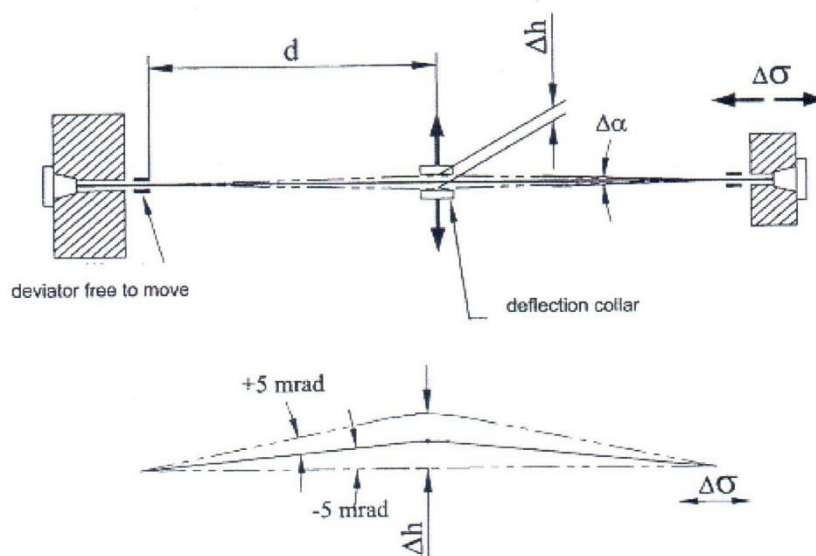
Procedura badania wytrzymałości zmęczeniowej wg PTI:



Procedura badania wytrzymałości zmęczeniowej wg FIB:



Procedura badania wytrzymałości zmęczeniowej wg CIP:



Z trzech przedstawionych procedur najbardziej rygorystyczna wydaje się być procedura CIP – French Interministerial Commission on Prestressing.

Str. 20, pierwszy akapit. Opisano nieprecyzyjnie lub niefortunnie przebieg testu zmęczeniowego. Jest: „Każda próbka jest rozciągana do pewnego stałego poziomu, a

następnie na przemian ściskana i rozciągana”. Powinno być: Każda próbka jest rozciągana do pewnego stałego poziomu, a następnie wprowadzona w pulsacyjnie zmienny stan naprężeń wokół ustalonego poziomu.

Str. 41, akapit 2. W tekście dotyczącym monitoringu mostów autor przytacza spektakularną katastrofę mostu Tacoma wskazując za przyczynę „złe ukształtowanie pomostu poprzecznego, gdzie dolne pasy blachownic nie zostały ze sobą połączone, co sprawiło, że most był niezwykle wrażliwy na podmuchy wiatru”. Ten syntetyczny opis przyczyn katastrofy jest za daleko idącym uproszczeniem opisany językiem potocznym. Tego typu opisy nie wnoszą niczego do tematyki rozprawy i niepotrzebnie pozostawiają niekorzystne wrażenie.

Pierwszy w Polsce monitoring mostu wantowego był zainstalowany na moście III tysiąclecia im. Jana Pawła II na Martwej Wiśle w Gdańsku (rok 2001). System działał przez 5 lat do zakończenia okresu gwarancyjnego (Żółtowski K., Malinowski M., Hildebrand M.: Monitoring mostów podwieszonych. Mosty. - 2009, nr 3, s. 16-24).

Zdaniem recenzenta nie trzeba dzisiaj udowadniać potrzeby monitorowania konstrukcji. Należy natomiast szukać skutecznych metod określających istotne dla użytkownika informacje wcześniej przetworzone przez system SHM.

Str. 52, akapit 1. Autor pisze: „trzy najdłuższe pary want zostały zabezpieczone tłumikami radialnymi IRD”. W rzeczywistości 8 najdłuższych liny z każdej płaszczyzny (razem 32 liny) są zabezpieczone tłumikami radialnymi.

Str. 52. Akapit 2. Opis montażu wanty jest nieprecyzyjny i dla czytelnika nieznanego tematu prawdopodobnie niezrozumiały. Istota procesu napinania – metoda ISOTENSION nie została skomentowana. Nie zamieszczono kluczowej informacji dotyczącej ostatecznych wartości sił w linach po zakończeniu napinania.

Str. 53. Nie wynika z opisu systemu SHM gdzie były instalowane czujniki temperatury. Istotne jest, czy znajdowały się one na powierzchni elementu, na rurze HDPE czy też wewnątrz, na powierzchniach betonowych czy zabetonowane w masie.

Tabela 3.2 str. 54. Nie opisano zasady działania układu pomiaru siły w wancie. Jest to kluczowy dla pracy pomiar. Nie natrafiono w pracy na krytyczną ocenę metody pomiaru i ocenę wiarygodności wyników.

Rozdział 4 p.4.4. Oszacowanie parametrów geometrycznych przekroju splotu. Jest to zdaniem recenzenta najważniejszy element na drodze oszacowania złożonego stanu naprężeń w ciągnie zwitym, siedmiodrutowym. Zagadnienie współpracy poszczególnych drutów w przenoszeniu sił osiowych i momentów jest kluczowe. Można zadać następujące pytania:

Jaka jest różnica naprężeń w drutach spiralnych i drucie prostym w wiązce przy rozciąganiu?

Jaki jest wpływ napięcia osiowego ciągnia na współpracę drutów przy zginaniu? Druty spiralne na skutek napięcia zaciskają się na drucie prostym.

Jaki jest i czy jest wpływ konserwującej substancji woskowej wypełniającej przestrzeń w wiązce na współpracę przy zginaniu? Przecież zginanie może wystąpić na dewiatorze daleko poza strefą zakotwienia w szczęcie.

Autor przytacza bibliografię zapewne poruszającą te tematy, ale nie omówił dotychczasowych dokonań w tej sprawie i nie przedstawił wynikających z tego wniosków.

Badanie testowe zginania splotu zostało opisane nieprecyzyjnie. Nasuwają się następujące pytania:

Jak zamocowano splot w szczęcie?

Jak wygląda szczętka?

Jak uwzględniono wpływ substancji woskowej na współpracę drutów?

Czy pomierzono krzywiznę ugięcia po długości splotu?

Czy można założyć, że zastępcze EJ splotu jest stałe na długości badanego wspornika?

Te pytania są kluczowe dla prawidłowego określenia pracy splotu w zakotwieniu i dalej na dewiatorze.

Rozdział 7. Ocena trwałości cięgien zakotwienia

Ocena stanu naprężeń w strefach zakotwień w cięgnach w funkcji ich napięcia została opracowana przy założeniu pełnego utwierdzenia jednolitego przekroju cięgna. W rzeczywistości w zakotwieniach występują strefy przejściowe redukujące ten efekt. Dodatkowo jak autor sam zauważył cięgno nie jest materiałem, w którym obowiązuje założenie o płaskich przekrojach.

Rysunek na stronie 116 nie ma podpisu.

P.7.5 Uwzględnienie tłumików drgań.

Autor wprowadził podporę sprężystą o konkretnej, wyliczonej wartości twierdząc, że w ten sposób odwzorowuje działanie tłumika. Intencja takiego postępowania jest niejasna. Tłumiki w obliczeniach statycznych nie powinny mieć żadnego znaczenia. W obliczeniach dynamicznych są oczywiście bardzo istotne, gdyż generują siły w miejscu działania. Trzeba więc zapytać w tym miejscu o intencję wykorzystania takiego modelu.

Ocena ogólna pracy.

Praca jest ważnym przyczynkiem do technicznego wdrożenia metod oceny trwałości i niezawodności kluczowych elementów konstrukcji mostu podwieszoności. Należy mocno podkreślić, że na ogół skupiano się głównie na modelach teoretycznych. Przeprowadzono ich dyskusję i pokazano skuteczność metod oceny wytrzymałości zmęczeniowej cięgna siedmiodrutowego będącego elementem wanty mostu.

Metodyka zastosowanych analiz jest rozległa. Dokonano przeglądu oraz obróbki danych z monitoringu Mostu Rędzińskiego. Dane te zostały przyjęte jako dane wyjściowe do analiz statystycznych. Przeprowadzono obliczenia statystyczne dla wielu wariantów pracy cięgna w wielu złożonych stanach naprężeń. Wykonano obliczenia MES konstrukcji mostu i wyseparowanych cięgien.

W efekcie zestawiono wyniki i przeprowadzono dyskusję skuteczności oceny trwałości określonej na podstawie analiz zmęczeniowych i teorii niezawodności.

Pokazanie skuteczności różnych modeli analizy trwałości i uwypuklenie różnic w wynikach jest cennym i oryginalnym osiągnięciem Autora.

Uwagi krytyczne.

Struktura pracy, układ rozdziałów zamieszczone rysunki i schematy mogłyby być lepiej opracowane. Niektóre oznaczenia i symbole na rysunkach są mało czytelne. W tekście występują opinie lub stwierdzenia określające potocznie i nieprecyzyjnie myśli, które autor chciał przekazać. Występują też drobne przekłamania, które zmieniają czasami sens przekazu.

Autor zamieścił bogatą literaturę związaną z pracą, ale poza cytowaniem nie przeprowadził dyskusji lub podsumowania cytowanej wiedzy. Szczególnie istotny dla problemu element dotyczący stanów wyężenia splotu siedmiodrutowego został potraktowany w sposób bardzo uproszczony. Przyjęcie przekroju litégo splotu do analizy stanów naprężeń lokalnych jest z pewnością prawidłowe z punktu widzenia projektanta analizującego nośność zmęczeniową konkretnej konstrukcji. Jednak w pracy doktorskiej element ten powinien być bardziej szczegółowo zbadany. Tym bardziej, że jest

podstawowym czynnikiem wsadowym do przeprowadzonych przez autora analiz.

W pracy zabrakło również krytycznej oceny systemu monitoringu Mostu Rędzińskiego i wniosków dotyczących możliwości jego modernizacji. Byłby to wartościowy element pracy, niezwykle istotny dla potencjalnych twórców i użytkowników innych systemów typu SHM.

Przedstawione uwagi krytyczne i wątpliwości oraz pytania szczegółowe zawarte powyżej stanowią pretekst do dyskusji w czasie obrony pracy doktorskiej oraz są w intencji recenzenta zachętą do dalszych badań związanych z tematyką poruszoną w pracy.

5. Ocena końcowa pracy

Przedstawiona do recenzji praca doktorska mgr inż. Marco Teichgraeber`a pod tytułem: „Ocena trwałości ciągien w mostach podwieszonych na podstawie danych z systemu monitorowania” ma wartość pracy naukowej i spełnia wymagania stawiane rozprawie doktorskiej. Dotyka bardzo aktualnych problemów współczesnego projektowania i utrzymania mostów oraz wskazuje konkretne rozwiązania i wytyczne.

Autor przeanalizował i zweryfikował dane pochodzące z monitoringu Mostu Rędzińskiego i wykorzystał je we własnych oryginalnych procedurach badawczych dotyczących oceny nośności i trwałości konstrukcji podwieszenia mostu. Praca ma duże znaczenie praktyczne i jest przykładem dobrego wykorzystania nauki we współpracy z administracją drogową i przemysłem budowlanym.

Oryginalnym elementem pracy jest krytyczne zestawienie metod prognozowania żywotności i określenia niezawodności elementów konstrukcji mostowych na przykładzie konstrukcji ciągna wanty Mostu Rędzińskiego we Wrocławiu.

Na podstawie przedłożonej rozprawy stwierdzam, iż praca doktorska Pana mgr inż. Marco Teichgraeber`a spełnia wymagania Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz tytule w zakresie sztuki z dnia 14.03.2003 roku (art. 13 ust.1, Dz.U.65 poz.595 z późniejszymi zmianami) i może stanowić podstawę do ubiegania się o nadanie stopnia naukowego doktora.

W związku z powyższym składam przed Wysoką Radą wniosek o dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony.



Dr hab. inż. Krzysztof Żółtowski, prof. uczelni