

Wrocław, dnia 27 sierpnia 2020 roku

prof. dr hab. inż. Czesław Machelski  
 Katedra Mostów i Kolei  
 Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego  
 Politechnika Wrocławska  
 Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław  
 E-mail.: czeslaw.machelski@pwr.edu.pl

08.08.2020  
 505 2020

## RECENZJA

DZIEKAN  
 Wydziału Inżynierii Lądowej  
 prof. dr hab. inż. Andrzej Garbacz

rozprawy doktorskiej mgra inż. Radosława OLESZKA  
 pt „Rezerwy nośności betonowych obiektów mostowych i ich modele obliczeniowe”

## 1. Informacje ogólne

Recenzję opracowano na zlecenie prof. dr hab. inż. Andrzeja Garbacza, Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Lądowa i Transport, Politechniki Warszawskiej, pismo RNDILIT/102/2020 z dnia 15 lipca 2020 roku. Do pisma dołączono monografię wydawnictwa Politechniki Warszawskiej Wydziału Inżynierii Lądowej. Recenzowana rozprawa doktorska zawiera 5 rozdziałów, spis literatury obejmujący 120 + 15 + 31 = 166 pozycji oraz załącznik - w sumie 345 stron. Promotorem pracy jest prof. dr hab. inż. Wojciech Radomski.

## 2. Tematyka rozprawy doktorskiej

Istotnym w temacie rozprawy doktorskiej jest sformułowanie pojęcia : **nośność obiektu mostowego**. W rozprawie wymieniono wiele definicji i problemów z jej określeniem. Najbliższą definicją ujmującą tematykę pracy jest **nośność projektowa** traktowana jako obciążenie normowe przyjęte w projekcie obiektu. Według tej definicji umieszczany jest przed obiektem mostowym znak drogowy np. nośność 15 ton. Problem jednak jest w tym, że obciążenie normowe nie ma odpowiednika w rzeczywistych pojazdach samochodowych. Jedną z prób odwzorowania **obciążeń użytkowych** przyjęto w postaci pojazdów modelowych, jak na rys. 2.4. Wykorzystano sposób przeszacowania nośności mostów w oparciu o zasadę zgodności sił wewnętrznych powstałych od obciążenia normowego (przyjętego w projekcie mostu) i schematu pojazdów modelowych. W tej sytuacji pojawia się problem **rozdziału poprzecznego obciążenia** (RPO) omawiany we wstępie rozprawy doktorskiej. Bowiern analizowane siły wewnętrzne obliczone od obciążenia normowego podlegały w projekcie mostu **modelowi RPO** innemu niż w obecnych modelach numerycznych, jak w przykładach przedstawionych w pracy. Zatem istotnym problemem w takim przeszacowaniu nośności stają się **rezerwy nośności** wynikające ze stosowania różnych **modeli obiektu mostowego**.

Konstrukcje mostów są poddane obciążeniom użytkowym zmieniającym położenie. Stąd w obliczeniach statycznych poszukuje się takich położzeń obciążeń ruchomych, przy których powstają największe siły wewnętrzne. Do tego celu stosuje się funkcje wpływu. W zależności od geometrii analizowanego obiektu są to: przestrzenie, powierzchnie i linie wpływu. W przypadku drogowych mostów betonowych, analizowanych w pracy doktorskiej są to powierzchnie wpływu, gdyż obciążenie porusza się w tych modelach po płaskiej jezdni przęsła.

W przeszłości, z wagi na ograniczone możliwości obliczeniowe powierzchniowy model obiektu rozdzielano na dwa schematy. W pierwszym stosowano rozdział poprzeczny obciążenia (RPO), w którym odwzorowano geometrię przekroju poprzecznego konstrukcji przęsła zaś w drugim linie wpływu sił wewnętrznych, w którym uwzględniano schemat statyczny mostu. Obecnie taki podział obliczeń na dwa etapy nie jest konieczny stąd w pracy doktorskiej porównuje się efekty obciążeń z zastosowaniem modeli i programów MES. Zatem problemem jest więc porównanie RPO w odniesieniu do współczesnych modeli przęsła.

Z definicji stosowanej w mechanice budowli funkcja wpływu jest wynikiem poruszania się siły jednostkowej po wyznaczonym obszarze ruchu. Zatem w przypadku mostów drogowych tworzone są powierzchnie wpływu od obciążenia w postaci siły prostopadłej do jezdni mostu. Jej

Czesław Machelski

efektem są ugięcia elementów konstrukcji przęsła. Z tego powodu stosowany w mostownictwie RPO utworzony jest na podstawie znormalizowanego profilu powierzchni wpływu ugięcia wyznaczanego w linii środkowej (rozpiętości) przęsła. W pracy ujęto to we wzorze (3.67), jak w przypadku płyty ortotropowej

$$K(f, y) = \frac{w(f, y)}{w_0(f)} \quad (1)$$

Zatem  $K(f, y)$  jest linią wpływu RPO jako funkcja współrzędnej  $y$  określającej położenie siły jednostkowej w przekroju poprzecznym przęsła oraz  $f$  jako oznaczenie analizowanego pasma płyty. W przypadku rusztów przyjęto określanie rzędnych funkcji (1) w ujęciu wzoru (3.53) jako

$$\eta_{fi} = \frac{w_{fi}}{w_0(f)} \quad (2)$$

gdzie  $f$  jest analizowanym dźwigarem a obciążenie siłą jednostkową jest nad dźwigarem  $i$ .

Zaletą przyjęcia takiej definicji RPO jest możliwość korzystania z zasady wzajemności przemieszczeń *Maxwella*. Wobec tego powierzchnia wpływu ugięcia jest równocześnie powierzchnią ugięcia od siły skupionej ustawionej w punkcie  $f$ . Daje to możliwości wyznaczania RPO również jako wynik pomiarów ugięcia podczas badania odbiorczego obiektu mostowego. Ze wzoru (2) wynika ogólna zasada wzajemności współczynników RPO:  $\eta_{fi} = \eta_{if}$ . Występuje ona jednak w przypadku regularnej budowy przęsła, jak na rys. 3.12. Nie zachodzi ona gdy układ jest dowolny, jak na rys. 3.9 nawet w sytuacji prostego modelu wykorzystywanego w metodzie sztywnej poprzeczniczy. Wynika to z zapisu równania (3.44).

Problem określania RPO, w rozprawie doktorskiej zastąpiono analizą ugięć dźwigarów w przekroju poprzecznym od obciążenia samochodami użytymi w badaniach odbiorczych. Metodyka badań oparta jest w pracy na porównaniu wyników obliczeń przy przyjęciu różnych modeli przęsła. W tym przypadku uwzględnia się równocześnie budowę konstrukcji przęsła i jej schemat statyczny ale również układ obciążenia. Na tej podstawie wnioskuje się o **zapasie bezpieczeństwa** mostu. Z takich modeli numerycznych, przy przyjęciu jako obciążenie siłą skupioną można było otrzymać z obliczeń również RPO jak we wzorach (1) lub (2). RPO jest charakterystyką geometrii konstrukcji przęsła. Wyróżnia się w tym względzie :

- płyty pełne i drażone (wielokomorowe) również o zmiennej grubości;
- układy płytowo-belkowe z poprzecznicami i bezpoprzecznicowe;
- konstrukcje z belek prefabrykowanych.

Są one reprezentowane w siedmiu przykładach mostów w rozprawie doktorskiej.

### 3. Zawartość rozprawy

Układ treści rozprawy jest właściwy i czytelny z małą liczbą usterek redakcyjnych.

W rozdziale 1 omówiono w skrócie budowę analizowanych konstrukcji przęsła. Jako główny cel rozprawy przyjęto: *zbadanie czy istnieje wpływ i jeśli tak – to w jakim stopniu – przyjętej klasy modelu numerycznego obiektu mostowego (stopień skomplikowania, dyskretyzacji, dokładność modelu) na poziom bezpieczeństwa, określony na podstawie współczynnika globalnej rezerwy nośności projektowej konstrukcji mostowej*. Przedstawione analizy mają charakter eksperymentu numerycznego a celem nie jest walidacja modeli numerycznych rzeczywistych obiektów z wynikami ich badań odbiorczych. W uzasadnieniu wyboru problematyki rozprawy podano, że: *obszerna literatura ujmująca metody komputerowe, głównie MES koncentruje się na teoretycznych, matematycznych oraz programistycznych aspektach metody natomiast nie wypowiada się w kwestii relacji rzeczywistej konstrukcji i jej modelu numerycznego*. Przy omawianiu dotychczasowego stanu wiedzy związanej z podjętą problematyką wyróżniono dwa nurty: teoretyczny i aplikacyjny. Przedstawiono obszernie dokonania w tej dziedzinie. W kolejnym punkcie przedstawiono charakterystyki techniczne analizowanych obiektów. Rozdział zakończono тезami pracy: *Istnieje jakościowy i ilościowy wpływ przyjętej klasy modelu numerycznego konstrukcji mostowej na możliwość zaprojektowania obiektu z globalnym współczynnikiem rezerwy bezpieczeństwa odbiegającym dodatnio lub ujemnie od wartości postulowanej w normach i przepisach projektowania*.

W rozdziale 2 sformułowano pojęcie nośności. Zwrócono uwagę na to, że jest to pojęcie wieloznaczne i można je rozpatrywać w aspektach: technicznym, administracyjnym (prawnym), projektowym, mechaniki budowli czy też potocznym jako możliwości użytkowania obiektu. Omówiono różnice pomiędzy nośnością: rzeczywistą, graniczną, projektową i użytkową. W p. 2.3 przedsta-

*Cleebels*

wiono algorytm oceny rezerwy nośności z uwagi na model konstrukcji. Zwrócono uwagę na to, że: *wpływ modelowania komputerowego na rezerwy nośności jest wieloaspektowy. Z tego względu w niniejszej pracy zbadano wpływ niektórych czynników.* W uzasadnieniu badań odbiorczych mostów pod próbnym obciążeniem podano że: *nie sposób dokonać ilościowego określenia rezerw bezpieczeństwa ...można co najwyżej sztywność przęsła i rozdział obciążenia na szerokości a przez to współpracę elementów nośnych.*

W **Rozdziale 3** zawarto informacje dotyczące metod obliczeń obecnie eksploatowanych (starych) mostów. Takie mosty projektowano z wykorzystaniem rozdziału poprzecznego obciążenia RPO stąd wiele miejsca poświęcono omówieniu założeń obliczeniowych. Rozdział ten jest podstawowy gdyż w analizie porównawczej klasycznych modeli w odniesieniu do współczesnych modeli MES można dopatrywać się rezerw nośności, poszukiwanych w pracy doktorskiej. Uzupełnieniem tej tematyki jest przedstawienie współczesnych modeli obliczeniowych. Szkoda, że pominięto rozwiązania półanalityczne w MES w postaci pasm i pryzm skończonych – stosowanych w przeszłości głównie w mostownictwie. Miały one wiele zastosowań w sytuacji ograniczonej możliwości obliczeniowych stacjonarnych komputerów.

W **rozdziale 4** przedstawiono i omówiono wyniki analiz porównawczych a w **rozdziale 5** podsumowano tych wyników. Wykonano 49 odwzorowań numerycznych, różniących się klasą modeli. Wstępną ocenę modeli odniesiono do wyników pomiarów ugięć uzyskanych w badaniach odbiorczych.

#### 4. Uwagi do rozprawy

##### 4.1. Uwagi merytoryczne

- A. Obszerny wywód podany w p. 2 recenzji jest uzasadnieniem wniosku o stosowanie jednolitej zasady wyznaczania RPO zarówno w przypadku modeli rusztów jak i płyt ortotropowych. W przypadku płyt, gdy korzysta się z rozwiązania *Levi'ego* obciążenie siłą skupioną  $P$ , jaką stosuje się w funkcjach wpływu, jest rozkładane w szereg *Fouriera* o postaci

$$p_n = \frac{2P}{L} \sin\left(n\pi \frac{x}{L}\right) \quad (3)$$

W wielu pracach wykazano, że gdy  $x/L = 1/2$  wystarczającym jest przyjęcie jednego wyrazu szeregu do uzyskania wystarczającej dokładności ugięcia (kilka procent) w porównaniu do wyniku uzyskanego z modelu MES. Rozwiązanie z użyciem szeregów *Fouriera* jest również skuteczne w przypadku płyt o zmiennej grubości jak w przykładzie analizowanym w p. 4.2.

- B. Wobec uwagi podanej w p. 4.1A proponuje się stosowanie jednolitej (zgodnej z zasadami mechaniki budowli) metodyki tworzenia rozdział poprzeczny obciążenia (RPO), ujętej we wzorze (1). Do wyznaczania rzędnych linii wpływu RPO można stosować obciążenie w postaci pionowej siły jednostkowej poruszającej się po jezdni mostu. Inne uzasadnienie zastosowano w [102] - wynikało ono z tablicowego ujęcia RPO, niezależnego od geometrii przekroju poprzecznego mostu. Wobec powyższego niewłaściwa jest druga częśći wzoru (3.67). Wynika z niego, że powierzchnia wpływu momentu zginającego i powierzchnia wpływu ugięcia różnią się jedynie o stały współczynnik  $m_0(f)/w_0(f)$  występujący we wzorach (1) i (4)

$$K_m(f, y') = \frac{m(f, y')}{m_0(f)} \quad (4)$$

Tak sytuacja nie występuje w modelach płyt (również ortotropowych). Memenet zginający w kierunku podłużnym obliczony jest ze wzoru

$$m_x(f, y') = D_x \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu_x \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \quad (5)$$

Nawet po pominięciu drugiego składnika wzoru (5) nie przyjmuje postaci podanej we wzorach (4) i (3.67). W przypadku zastosowania rozwiązania *Levi'ego* moment zginający jest związany z harmoniczną rozwinięcia w szereg *Fouriera*  $n$  jak we wzorze ogólnym o postaci

$$m_x(f, y') = D_x \sum_{n=1}^N w(n) \cdot \left( \frac{n\pi}{2} \right)^2 \sin \frac{n\pi}{2} \quad (6)$$

*cleochełst*

gdy  $x = L/2$ . Oczywiście wynik uzyskany z (6) przy dostatecznie dużej liczbie wyrazów szeregu  $N$  jest zgodny z rezultatem obliczonym z użyciem modelu MES również w przypadku złożonego układu sił, jakie występują w rozprawie doktorskiej.

- C. Zgodnie z uwagą podaną w p. 4.1A, można traktować jednakowo klasyczne modele służące do obliczeń RPO: *Leonhardta i Massonnet'a*. Z porównania parametrów charakterystycznych tych dwóch modeli można uzyskać rozwiązanie ogólne parametru  $z$  [\*] ze wzoru (3.56) a stąd współczynnik korekcyjny *Leonhardta i*. Zgodnie ze wzorem

$$z = \frac{2(m+1)}{n^4} \left( \frac{2L}{b} \right)^3 \frac{J_Q}{J_x}, \quad (7)$$

zależy on od liczby podłużnic  $m$  i dźwigarów głównych  $n$ . Gdy  $m=1$  oraz  $n=4$  wzór (7) przyjmuje postać równania (3.59).

- D. Ograniczenia wartości parametru  $\alpha$  w metodzie G-M-B podane na str. 95-101 zostały uzupełnione w metodzie C-P [25]. Takie rozwiązanie może być przydatne w przypadku małych wartości  $D_y$  np. do analizy przęsła z prefabrykatów *Płońsk* rozpatrywanego w p. 4.1.
- E. Uwagi podane w tym punkcie dotyczą RPO a nie metodyki badań realizowanych w pracy.

[\*] Machelski C.: *Obciążenia ruchome obiektów mostowych*. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 2015.

#### 4.2. Uwagi redakcyjne

- A. Układ tematyczny pracy jest właściwy. Praca jest obszerna ale jej objętość jest uzasadniona. Niezbędny dla młodego Czytelnika jest wstęp zajmujący połowę treści rozprawy. Druga połowa pracy dotyczy opisów modeli geometrii badanych obiektów i interpretacji wyników obliczeń. Są one niezbędne do uzasadnienia powstałych w modelach rozbieżności sił wewnętrznych i przemieszczeń. Praca jest napisana w sposób jasny, czytelny z niewielką liczbą błędów redakcyjnych np. wzór (3.44) bez siły  $P$ .
- B. Autor w wielu miejscach przejął nazewnictwo z pracy [102]. W szczególności nadużywane jest słowo *ustrój* w określeniach: ustroje mostowe, ustroje betonowe, ustroje nośne. Słowo *ustrój* w znaczeniu ogólnym ma mocno ugruntowaną pozycję w dziedzinie politycznej.
- C. W kilku miejscach pojawia się *analiza przestrzenna* a przecież rozpatrywane są przęsła płaskie a nie mosty podwieszane.

#### 5. Ocena pracy

Spośród wielu definicji **nośności mostu** rozpatrywanych w rozprawie doktorskiej najlepszą jest **nośność projektowa**, określona precyzyjnie w normie obciążeń. Zgodnie z projektem bezpieczne przenoszenie obciążenia normowego ma być zapewnione po spełnieniu wytycznych wymiarowania zbrojenia i sprężenia w betonowej konstrukcji mostu. Informacja o nośności projektowej mostu ma znaczenie administracyjne (jako metryka), podawana jest w znaku drogowym np. nośność 15 ton. Podczas eksploatacji obiektu istotne znaczenie ma **nośność użytkowa**. Można ją określić z obliczeń porównywanych przy użyciu **modelu geometrii mostu**, bowiem naciski kół obciążenia samochodowego nie odpowiadają geometrii i siłom ruchomego obciążenia projektowego.

**Rezerwę nośności** nowo wybudowanego mostu określa się w projekcie badania odbiorczego z użyciem układu pojazdów rozmieszczonych niekorzystnie na jezdni mostu. Innym przypadkiem sprawdzenia rezerwy nośności jest ekspertyza dotycząca możliwości przejazdu przez most pojazdu nie normatywnego (wyjątkowo ciężkiego). W obydwu przypadkach obciążeń stosuje się ten sam **model geometrii mostu**. Zapasy bezpieczeństwa są zwykle większe w mostach dużych rozpiętości i w obiektach wyższych klas. W mostach małych rozpiętości często ważnym jest rozstaw i naciski na osie a nie ciężar całego pojazdu, jak w znaku drogowym dotyczącym nośności mostu.

O istnieniu rezerwy nośności można się przekonać z analizy porównawczej analizowanego elementu mostu np. dźwigara głównego w oparciu o obliczenia z użyciem **modeli geometrii mostu**. W przypadku gdy do oceny rezerwy nośności stosuje się obciążenia rzeczywiste a rezultaty obliczeń porównuje się z wynikami pomiarów na badanym obiekcie powodów powstania rezerwy nośności jest wiele. Zatem obszar ich poszukiwania jest rozległy, co omawiano w wstępie rozprawy doktorskiej. Jednym z nich jest wyposażenie mostu, np. kapy chodnikowe, pomijane w obliczeniach jako element niekonstrukcyjny.

*C. Machelski*

W rozprawie doktorskiej wybrano do analizy jeden z powodów powstania rezerw nośności jako różnice wyników obliczeń powstałych w różnych modelach geometrii mostu. Ocenę skuteczności rozpatrywanych modeli szacowano na podstawie porównywania: ugięć, sił wewnętrznych i reakcji podporowych. Dzięki takiemu ujęciu rozwiązania można było uwolnić się od uwzględniania obciążenia projektowego a skupić wyłącznie na ukształtowaniu konstrukcji mostu. Do oceny rezerwy nośności wykorzystano w pracy jako obciążenia pojazdy samochodowe użyte w badaniach odbiorczych analizowanych obiektów. Takie ujęcie rozwiązania oceniam pozytywnie. Wyniki analiz podane w pracy są rozwiązaniem jednego z problemów naukowych – zasad doboru modelu mostu, odpowiedniego do jego konstrukcji.

Trudności w odwzorowaniu konstrukcji w jej modelu bardzo dobrze zilustrowano na przykładzie przęsła z prefabrykowanych belek typu *Płońsk*, omawianym w p. 4.1. Po przyjęciu trzynastu (i siedmiu) modeli geometrii wykazano bardzo duże rozbieżności pomiędzy zaproponowanymi modelami obliczeniowymi a przewidywanym wynikiem z projektu próbnego obciążenia. W tym przypadku istotne znaczenie miało modelowanie styków pomiędzy prefabrykatami. Uzasadnione jest bardzo dokładne omówienie specyficznych cech modeli tego przęsła (46 stron). Ten przykład jest dobrym uzasadnieniem tezy rozprawy doktorskiej: *Istnieje jakościowy i ilościowy wpływ przyjętej klasy modelu numerycznego konstrukcji mostowej, na możliwość zaprojektowania obiektu z globalnym współczynnikiem rezerwy bezpieczeństwa odbiegającym dodatnio lub ujemnie od wartości postulowanej w normach i przepisach projektowania.*

Wartościowym i równocześnie użytecznym elementem rozprawy jest analiza statyczna występujących w mostownictwie grup konstrukcji. Wysoko oceniam dorobek Doktoranta w zakresie opracowanie różnorodnych modeli. Wymagają one dużej wiedzy z zakresu pracy przęseł mostowych oraz bogatego doświadczenia projektowego. Ważnym osiągnięciem analiz porównawczych jest wykazanie, że model obiektu mostowego jest ściśle związany z jego konstrukcją. Zatem przyjęcie jednolitego RPO w postaci metody sztywnej poprzecznicy do analizy statycznej wszystkich mostów jak w programie RYM-IBDIM, wspomniane w pracy jest niewłaściwe. Świadczą o tym bardzo duże zapasy nośności przedstawione w wynikach rozprawy doktorskiej.

Użyteczne mogą być wyniki analiz do ustalania współczynnika bezpieczeństwa modelu numerycznego w przypadku obecnie wprowadzanego układu Eurokodu 1: Oddziaływania na konstrukcje. Część 2. Obciążenia ruchome mostów. Wyniki podane na rys. 5.1 wskazują na ich duże rozbieżności w przypadku niewłaściwych modeli obiektów. Interesujące w tym względzie są propozycje Autora analiz. Podsumowanie tych analiz zestawione są po omówieniu rezultatów obliczeń w punktach: *Ocena wyników i wnioski.*

Niestety nośność użytkowa mostu nie jest wielkością stałą, podlega ona zmianie w trakcie eksploatacji obiektu. Projektowa nośność jest redukowana w wyniku degradacji zbrojenia i struktury betonu w sytuacji niewłaściwej konserwacji np. wadliwego odwodnienia. Na redukcję nośności wpłynie również modyfikacja wyposażenia jako zwiększenie ciężaru stałego. Zatem zapasy nośności mostu wykazywane w obliczeniach są niezbędne do zachowania wartości projektowej. Z wielu powodów kierunki dalszych badań podane w p. 5.4 w zakresie poszukiwania rezerw nośności mostów wydają się nieograniczone. Jedym z rozległych obszarów jest aspekt losowy cech: materiału, geometrii konstrukcji a szczególnie efekt obciążeń. Te elementy trzeba uwzględnić w kalibracji częściowych współczynników bezpieczeństwa.

Recenzowana praca dotyczy zagadnienia ważnego z punktu widzenia eksploatacji konstrukcji mostowych, również aktualnego z uwagi na brak analiz porównawczych klasycznych modeli starych mostów w odniesieniu do analiz statycznych współcześnie projektowanych obiektów. Temat recenzowanej dysertacji doktorskiej jest aktualny, interesujący i trudny. Wyszczególnione przez recenzenta, przy omawianiu treści rozprawy uwagi dotyczą jedynie prezentacji prowadzonych rozważań i nie mają wpływu na jakość sformułowanych w dysertacji wniosków końcowych i stwierdzeń. Niektóre uwagi podane w recenzji mogą być polemiczne.

## 6. Wniosek końcowy

Uważam, że oceniana rozprawa doktorska mgra inż. Radosława Oleszka pt. *"Rezerwy nośności betonowych obiektów mostowych i ich modele obliczeniowe"* jest samodzielnym rozwiązaniem zadania naukowego i odpowiada wymaganiom stawianym pracom doktorskim, co zgodnie z Ustawą „O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki” z dnia 14 marca 2003 roku z późniejszymi zmianami upoważnia mnie do postawienia wniosku o przyjęcie recenzowanej pracy doktorskiej i dopuszczenie jej do publicznej obrony.