

Aktualizacja modelu teoretycznego Mostu Rędzińskiego na podstawie pomiarów konstrukcji, po 10 latach eksploatacji

dr hab. inż. Krzysztof Żółtowski, mgr inż. Mikołaj Binczyk, mgr inż. Przemysław Kalitowski, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Politechnika Gdańska

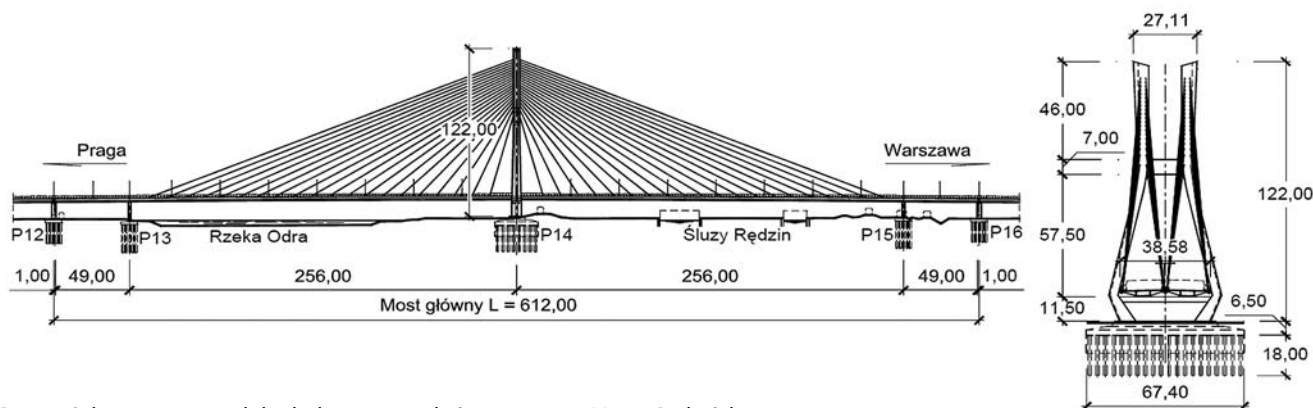
1. Wprowadzenie

Most Rędziński w ciągu Autostradowej Obwodnicy Wrocławia jest najdłuższym w Polsce mostem podwieszonym z całkowicie betonowymi przęsłami sprężonymi [1]. Po 10 latach eksploatacji Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad postanowiła w sposób kompleksowy sprawdzić konstrukcję mostu, mając na uwadze dalszą, bezpieczną eksploatację. W ramach przeprowadzonych prac eksperckich dokonano przeglądu konstrukcji [1], pomiarów geodezyjnych niwelety i pylonu oraz dokonano identyfikacji sił w wantach metodą wibracyjną [2, 3, 4]. Z powodu ujawnionych w trakcie przeglądu zarysowań na ryglu dolnym zamontowano na nim światłowodowe czujniki odkształceń [6]. Wykonano również szereg obliczeń z wykorzystaniem modeli teoretycznych. W trakcie analizy konstrukcji podwieszonych bardzo ważnym aspektem jest prawidłowe określenie ciężarów własnych przęseł oraz sił napinających wanty. Miarą oceny prawidłowości przyjęcia tych parametrów jest geometria przęseł (niweleta). Analiza stanu konstrukcji z wykorzystaniem modelu numerycznego wymaga, aby zdefiniowane ciężary przęseł oraz siły napinające wanty odpowiadały rzeczywistym wartościom jakie charakteryzują konstrukcję. Jedynie prawidłowe ich określenie i zaimplementowanie do modelu numerycznego pozwala na przeprowadzenie miarodajnych obliczeń i analiz MES. W artykule przedstawiono sposób wykonanej

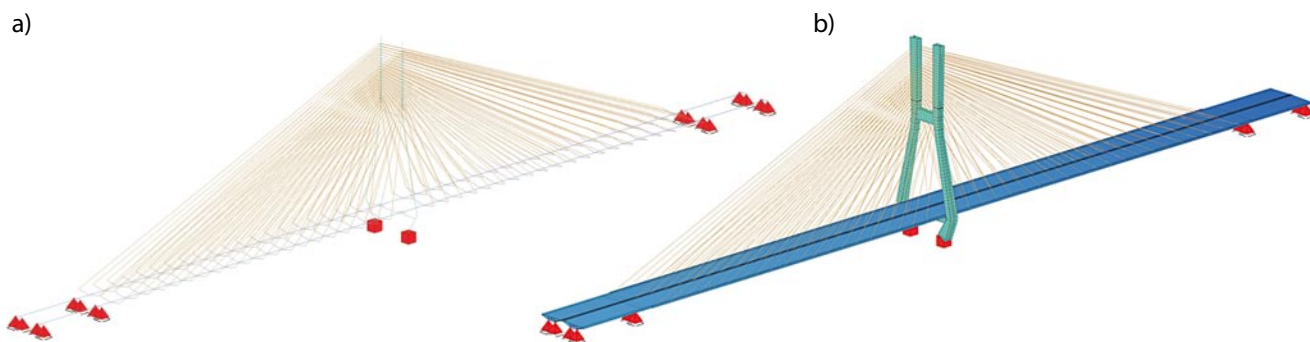
aktualizacji modelu numerycznego konstrukcji mostu Rędzińskiego na podstawie pomiarów konstrukcji wykonanych bezpośrednio po zakończeniu i w trakcie budowy, jak i pomiarów wykonanych po 10 latach eksploatacji obiektu. W trakcie prac eksperckich prowadzono również szereg szczegółowych analiz próbujących zidentyfikować przyczyny i ocenić skutki zaistniałych zarysowań rygla dolnego pylonu. Są one opisane w odrębnym artykule, który zamieszczono w materiałach konferencji KS2021.

2. Opis konstrukcji

Konstrukcję Mostu Rędzińskiego stanowi betonowy most wantowy o rozpiętościach przęseł 50+256+256+50 m (rys. 1) w ciągu Autostradowej Obwodnicy Wrocławia (A8). W ramach przeprawy poza mostem głównym istnieją również lewobrzeżne i prawobrzeżne estakady o długościach odpowiednio 610 i 520 m. Przęsła środkowe mostu są podwieszane do pylonu w kształcie litery H, którego wysokość wynosi 122 m. Przekrój drogowy składa się z 3 pasów ruchu oraz pasa awaryjnego w każdym kierunku. Każda nitka autostrady posiada odrębny pomost skrzynkowy podwieszony do pylonu za pomocą dwóch płaszczyzn want w układzie wachlarzowym. Łącznie do pylonu zbiega się 160 lin w 4 płaszczyznach. Producentem want była Firma Freyssinet, liny składają się ze splotów typu 15.7 [3,7] w liczbie od 24 do 48.



Rys. 1. Schematyczny widok z boku oraz przekrój poprzeczny Mostu Rędzińskiego



Rys. 2. Model przestrzenny Mostu Rędzińskiego: a) schemat statyczny, b) wizualizacja

3. Przestrzenny model numeryczny konstrukcji mostu Rędzińskiego

W celu przeanalizowania globalnej pracy konstrukcji mostu wykonano model numeryczny MES w środowisku SOFiSTiK. Wszystkie elementy konstrukcyjne odwzorowano za pomocą dwuwęzłowych elementów skończonych o odpowiednio zdefiniowanym przekroju poprzecznym. Wanty mostu zdefiniowano jako elementy ciągnowe, natomiast geometrię przęsła i pylonu odwzorowano za pomocą elementów belkowych. Schemat statyczny modelu zaprezentowano na rysunku 2a, a jego wizualizację na rysunku 2b.

Model globalny analizowano w kilku wariantach w zależności od wielkości sił napinających w wantach. W celu dalszego odwoływania się do wyników z tych analiz, wariantom tym nadano następujące nazwy:

- **model MES_FREY_2011** – model globalny konstrukcji, w którym zdefiniowano siły napinające wanty uzyskane w fazie 3 naciągu want, zgodnie z raportem z 2011 roku przekazanym przez firmę Freyssinet. W modelu tym dodatkowo uwzględniono przyrost sił pochodzący od wykonanego po naciągu want wyposażenia;
- **model MES_FREY_2020** – wynik analiz modelu MES_FREY_2011, w którym zawarto teoretyczne siły w wantach obliczone z uwzględnieniem reologii betonu oraz osiadań fundamentu pylonu po 10 latach, w roku 2020. Przyjęto standardowe parametry reologiczne;
- **model MES_KBP_2011** – model globalny konstrukcji, w którym poprzez symulację odwrotną uzyskano siły teoretyczne w wantach w roku 2011, bazując na siłach pomierzonych metodą dynamiczną przez zespół ekspercki w 2020 r. oraz na pomiarach określających postępujące w czasie deformacje;
- **model MES_KBP_2020** – wynik analiz modelu MES_KBP_2011, w którym zawarto teoretyczne siły w wantach obliczone z uwzględnieniem reologii betonu oraz osiadań fundamentu pylonu po 10 latach, w roku 2020. Przyjęto standardowe parametry reologiczne.

Dodatkowo przeprowadzono walidację modelu numerycznego poprzez porównanie obliczeń ugięć od obciążenia próbnego z wartościami w czasie prób. Zgodnie z [8] próbne obciążenia statyczne polegało na realizacji 3 ustawień,

w których udział brało od 12 do 40 pojazdów ciężarowych o jednostkowej masie 40 ton każdy. Wartości obliczonych ugięć (tab. 1) w porównaniu do wartości pomierzonych podczas próbnego obciążenia stanowiły od 87 do 102%, a więc uzyskano bardzo dużą zgodność wyników. Dodatkowo stwierdzono zgodność częstotliwości drgań swobodnych konstrukcji (tab. 2), uzyskanych na podstawie badań doświadczalnych [8] oraz analiz teoretycznych (rozwiązania problemu własnego modelu MES_KBP). Wykonane sprawdzenia potwierdzają słuszność przyjętych sztywności poszczególnych elementów modelu numerycznego. Ponadto w ogólności analiza modalna uwzględnia zarówno masę, jak i sztywność konstrukcji, a więc zgodność częstotliwości własnych z analizą MES waliduje również wartości i rozkład mas w konstrukcji. W przypadku analizowanego mostu podwieszono zmiana masy o ok. 5% nie wpływa istotnie na częstotliwości drgań własnych. Dlatego dla uszczegółowienia analizy konieczne było określenie rzeczywistych sił napinających w wantach mostu.

Tabela 1. Porównanie pomierzonych przemieszczeń Mostu Rędzińskiego podczas próbnego obciążenia z wynikami obliczeń numerycznych

| Schemat próbnego obciążenia | Punkt pomiarowy | Próbne obciążenie [mm] | Model globalny MES_KBP [mm] | Zgodność MES_KBP z pomiarami |
|-----------------------------|-----------------|------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| S1 | 0 | 52,94 | 58,26 | 91% |
| | 1 | 52,17 | 57,92 | 90% |
| | 2 | -129,27 | -135,90 | 95% |
| | 3 | -124,25 | -130,70 | 95% |
| S2 | 0 | -293,65 | -287,14 | 102% |
| | 1 | -294,37 | -288,60 | 102% |
| | 2 | 155,05 | 151,33 | 102% |
| | 3 | 152,52 | 151,41 | 101% |
| S3 | 0 | -206,73 | -207,59 | 100% |
| | 1 | -206,71 | -207,56 | 100% |
| | 2 | 72,83 | 82,35 | 88% |
| | 3 | 70,35 | 81,02 | 87% |

Tabela 2. Porównanie pomierzonych częstotliwości drgań Mostu Rędziańskiego podczas próbnego obciążenia z wynikami obliczeń numerycznych

| Nr formy drgań | Badania doświadczalne [Hz] | Model globalny MES_KBP [Hz] |
|----------------|----------------------------|-----------------------------|
| 1 | 0,25 | 0,25 |
| 2 | 0,31 | 0,30 |
| 3 | 0,48 | 0,48 |
| 4 | 0,48 | 0,49 |
| 5 | 0,62 | 0,61 |
| 6 | 0,65 | 0,64 |

4. Pomiary wykonane w celu aktualizacji modelu MES mostu

W ramach prac eksperckich przeprowadzono pomiary geodezyjne oraz pomiary wartości sił w wantach. Pomiary geodezyjne obejmowały geometrię przęseł oraz pylonu. Wykonano pomiar niwelety (przy wewnętrznym krawężniku) oraz linii pomiarowej „1 m od krawężnika zewnętrznego” dla obu nitek. Pomiary geometrii pylonu polegały na sprawdzeniu współrzędnych geodezyjnych 12 punktów pomiarowych znajdujących się na pylonie. Następnie wykonano porównanie otrzymanych wyników z geometrią przęseł i pylonu pomierzoną w 2011 roku. Po analizie wyników otrzymano kształt i wartości deformacji przęseł oraz skrócenia pylonu na odcinkach pomiędzy punktami pomiarowymi. Dodatkowo przeprowadzono analizę osiadania płyty fundamentowej pylonu na podstawie [9] w okresie od 06.07.2011 r. do 12.01.2019 r. Sumaryczne osiadania fundamentu w tym okresie, w zależności od punktu pomiarowego, wyniosły od 52 do 62 mm.

W celu identyfikacji sił w wantach posłużono się metodą pośrednią poprzez analizę charakterystyk dynamicznych

ciągną (metoda wibracyjna). Metoda ta polega na pomiarze dynamicznej odpowiedzi ciągu po wzbudzeniu. Następnie na podstawie odpowiedzi swobodnej punktu na wancie wyznaczane są parametry modalne (częstotliwości drgań własnych). Znając długość ciągu, jego masę oraz częstotliwość drgań własnych, za pomocą formuł teoretycznych, możliwe jest zidentyfikowanie siły napinającej ciągną [4, 5]. Badania dynamiczne wykonano na obiekcie w godzinach nocnych pod koniec 2020 roku. W trakcie pomiarów zaobserwowano bardzo mały ruch na obiekcie i stabilne warunki atmosferyczne. Temperatura powietrza wahała się od -4 do +3°C. Wykorzystano zestaw składający się z czujnika akcelometrycznego podłączonego do wzmacniacza pomiarowego. Zidentyfikowane na podstawie pomiarów siły przedstawiono na rysunku 3.

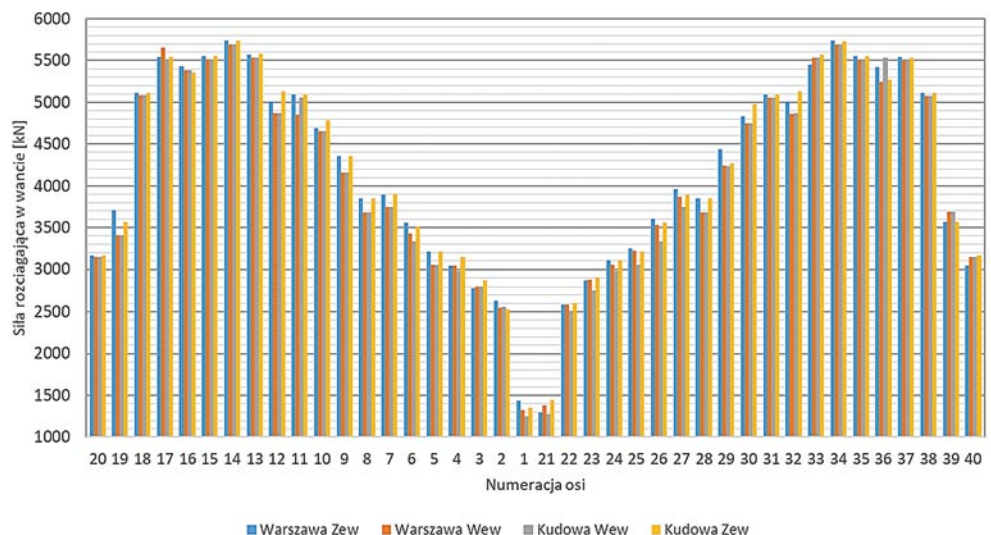
5. Aktualizacja modelu MES

W celu aktualizacji modelu MES wykonano numeryczną symulację uwzględniającą etapy budowy oraz procesy reologiczne. Analizowano następujące fazy pracy konstrukcji:

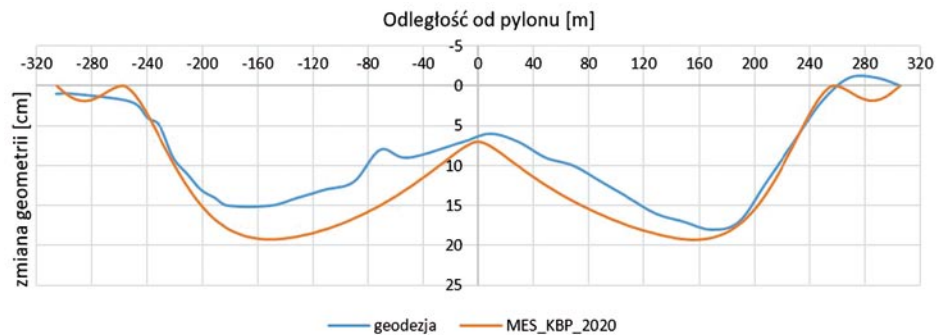
- Faza 0 – przęsła spoczywają na podporach tymczasowych, pylon wykonany jest w całości, wyposażenie wykonane jest w całości poza warstwą ścieralną nawierzchni;
- Faza 1 – naciąg want (wszystkie 160 want w jednym kroku obliczeniowym);
- Faza 2 – pełzanie betonu – 2 miesiące;
- Faza 3 – wykonanie warstwy ścieralnej, osiadanie pylonu (w okresie od 06.07.2011 do 03.09.2011);
- Fazy 4 -14 – efekty reologiczne i osiadanie w 10 przyrostach czasowych;
- Faza użytkowa – obciążenia ruchome mostu.

Po przeprowadzeniu obliczeń we wszystkich wyżej wymienionych fazach pracy uzyskano wartości sił wewnętrznych oraz naprężeń w elementach konstrukcyjnych. Dodatkowo otrzymano również deformacje niwelety, skrócenie pylonu oraz siły w wantach. Aktualny stan konstrukcji, odpowiadający

Rys. 3. Wykres obliczonych wartości sił w wantach na podstawie pomiarów metodą wibracyjną; w legendzie zaznaczono kierunek drogi na danej nitce mostu oraz płaszczyznę want



Rys. 4. Porównanie zmiany niwelety przy wewnętrznym krawężniku nitki prawej Mostu Rędzińskiego w okresie od 2011 do 2020 r.



Rys. 5. Porównanie zmian niwelety – 1 m od krawężnika zewnętrznego nitki prawej Mostu Rędzińskiego w okresie od 2011 do 2020 r.

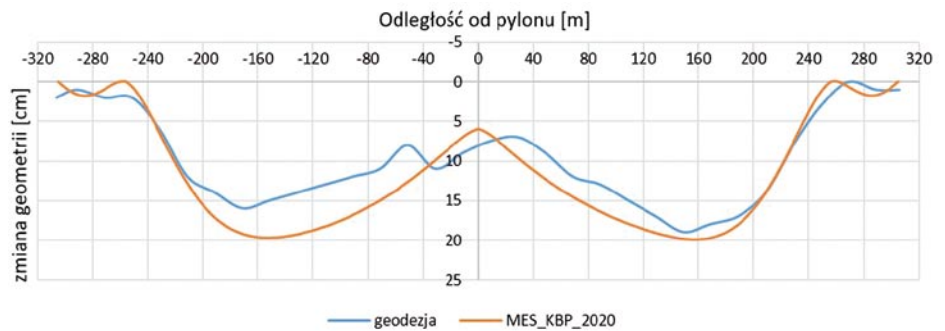


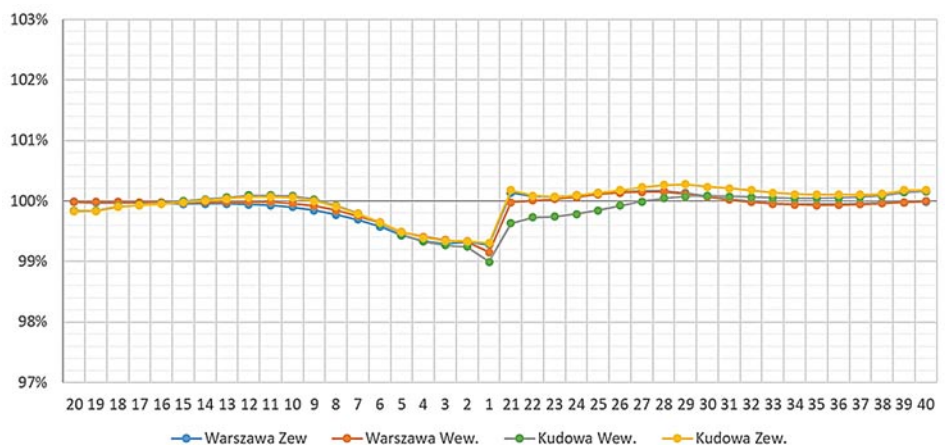
Tabela 3. Porównanie skróceń pylonu Mostu Rędzińskiego w okresie od 2011 do 2020 r.

| Odcinek pylonu | | $\Delta dH_{\text{Geodezja}}$ [m] | $\Delta dH_{\text{MES_FREY}}$ [m] | $\Delta dH_{\text{MES_KBP}}$ [m] | $\Delta dH_{\text{Geodezja}}/\Delta dH_{\text{MES_FREY}}$ | $\Delta dH_{\text{Geodezja}}/\Delta dH_{\text{MES_KBP}}$ |
|----------------|---------------|-----------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|--|---|
| Noga lewa | odcinek górny | 0,0130 | 0,0118 | 0,0119 | 91% | 92% |
| | odcinek dolny | 0,0310 | 0,0313 | 0,0318 | 101% | 103% |
| Noga prawa | odcinek górny | 0,0125 | 0,0119 | 0,0120 | 95% | 96% |
| | odcinek dolny | 0,0330 | 0,0335 | 0,0340 | 102% | 103% |

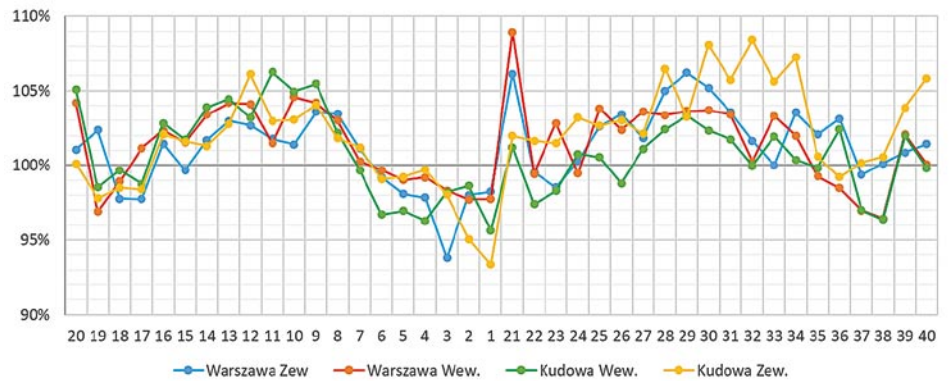
pomiarom wykonanym pod koniec 2019 r. otrzymano jako wynik analizy numerycznej dla fazy nr 14. W procesie kalibracji modelu MES_KBP_2020 wykonywano niewielkie modyfikacje w zakresie ciężaru własnego przęseł podwieszonych oraz współczynnika pełzania betonu. Po każdej modyfikacji dokonywano sprawdzenia obliczonych deformacji przęseł oraz skróceń pylonu z wynikami uzyskanymi z pomiarów w 2020 roku i wprowadzano poprawki. Iteracyjny

proces pozwolił na uzyskanie zadowalających wyników. Porównanie zmian niwelety pomierzonej i obliczonej za pomocą modelu MES_KBP przedstawiono na rysunkach 4 oraz 5. Porównanie skróceń elementów konstrukcyjnych pylonu wynikających z pełzania betonu zamieszczono w tabeli 3. Zgodność pomierzonych geodezyjnie skróceń pylonu z obliczonymi za pomocą modeli numerycznych wynosiła od 91 do 103%.

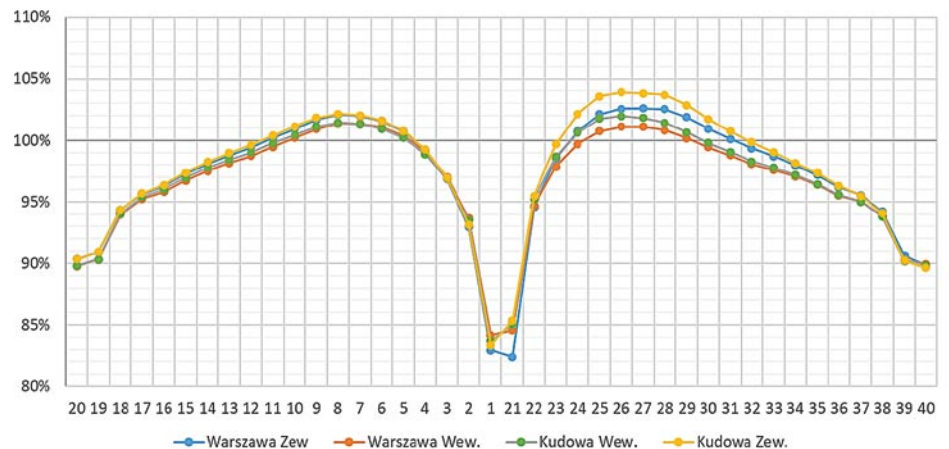
Rys. 6. Porównanie sił z pomiarów dokonanych w 2020 r. do sił uzyskanych w modelu MES_KBP_2020



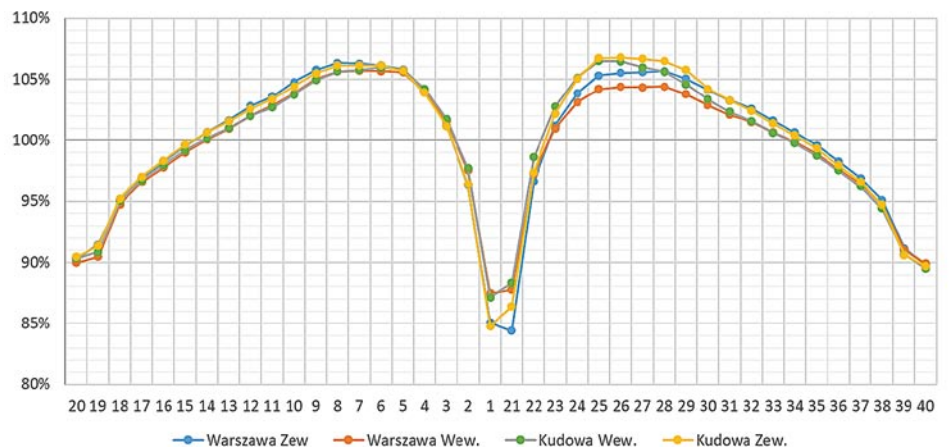
Rys. 7. Porównanie sił z pomiarów dokonanych w 2020 r. do sił uzyskanych w modelu MES_FREY_2020



Rys. 8. Zmiana sił w wantach jako stosunek sił z modelu MES_FREY_2020 do sił z modelu MES_FREY_2011



Rys. 9. Zmiana sił w wantach jako stosunek sił z modelu MES_KBP_2020 do sił z modelu MES_KBP_2011



Dokonano również porównania sił w wantach z danych pochodzących z różnych okresów i różnych źródeł. Na wstępie, aby sprawdzić poprawność obliczonych sił z modelu numerycznego, porównano siły pomierzone dynamicznie w 2020 r. z siłami w wantach z modelu (MES_KBP_2020). Porównanie przedstawiono na rysunku 6. Wskazuje ono, że siły w modelu MES_KBP_2020 są praktycznie tożsame siłom pomierzonym dynamicznie w 2020 r., tj. różnice są mniejsze niż 1%. Podobne porównanie przeprowadzono dla sił uzyskanych w modelu MES_FREY_2020 (rys. 7). Maksymalne różnice w tym przypadku są mniejsze niż 10%. Przedstawione porównania pozwalają na stwierdzenie, iż siły w modelach numerycznych w fazie nr 14 odpowiadają siłom panującym w wantach w realnej konstrukcji.

Wykonana kalibracja i sprawdzenie poprawności jej wykonania poprzez przedstawione porównania pozwoliły na uzyskanie modeli numerycznych konstrukcji Mostu Rędziańskiego, które w precyzyjny sposób odzwierciedlają rzeczywistą konstrukcję. Analiza skalibrowanych modeli MES pozwoliła na uzyskanie wartości zmian sił w wantach w trakcie 10-letniego okresu eksploatacji. Zmiany sił dla dwóch rozpatrywanych modeli zaprezentowano na rysunkach 8 i 9. Niezależnie od modelu największe spadki sił napinających zaobserwowano w wantach znajdujących się najbliżej pylonu (najkrótsze wanty). Zmniejszenie siły w tych wantach wynosiło od 16 do 17%. Jest to znacząca wartość, która zdecydowanie wpływa na wartość reakcji podporowych przekazywanych z przęsła na rygiel dolny pylonu.

6. Podsumowanie

Przedstawiony proces kalibracji modeli numerycznych Mostu Rędziańskiego pozwolił na uzyskanie modeli, w których wartości sił w wantach oraz deformacje przęsła i pylonu są zgodne z wartościami pomierzonymi na rzeczywistej konstrukcji. Można stwierdzić, że otrzymano „wirtualnego bliźniaka” Mostu Rędziańskiego. Modele posłużyły do późniejszej analizy dotyczącej sprawdzenia wyłączenia głównych elementów konstrukcyjnych. Dzięki sporządzonym modelom MES możliwe było także określenie sił przekazywanych przez wanty na pylon oraz przez przęsła na rygiel dolny pylonu. Walidacja modeli MES znacząco zwiększyła wiarygodność otrzymanych wyników.

Wykonane pomiary mostu będą stanowiły również podstawę do oceny konstrukcji w przyszłości. W szczególności pomierzone charakterystyki dynamiczne want mogą stanowić wartości porównawcze do identyfikacji zmian sił napinających. Przy wykorzystaniu zastosowanych danych wyjściowych w obliczeniach, takich jak długość wanty i jej masa, błędy powstałe przy ich określeniu nie będą miały wpływu na rejestrację zmian sił w wantach.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Most Rędziański. Raport z przeglądu rozszerzonego (pięcioletniego) obiektu mostowego, PBW Inżynieria, 2020
- [2] Żółtowski K., Binczyk M., Kalitowski P., Ekspertyza techniczna konstrukcji Mostu Rędziańskiego części podwieszanej. Bilans po 10 latach eksploatacji. KBP Żółtowski, Gdańsk, 2021
- [3] Biliszczuk J., Onysyk J., Most Rędziański w ciągu autostradowej obwodnicy Wrocławia, Przegląd Komunikacyjny 5–6/2012, str. 30–37
- [4] Żółtowski, K., Binczyk M., Kalitowski P., Pomiar sił w wantach mostu podwieszanego, Materiały Budowlane 9/2021, str. 68–72
- [5] Żółtowski K., Binczyk M., Kalitowski P., Identyfikacja własności dynamicznych cięgien jako element diagnostyki wybranych konstrukcji mostowych, Archiwum Instytutu Inżynierii Lądowej 26/2018, str. 219–227
- [6] Sieńko R., Bednarski Ł., Howiacki T., Koryciński J., Pomiary deformacji mostu podwieszanego z wykorzystaniem światłowodowych czujników geometrycznie ciągłych DFOS, Wrocławskie Dni Mostowe Mosty Hybrydowe, Wrocław 29–30.11.2018
- [7] Dokumentacja kolaudacyjna po oddaniu Mostu Rędziańskiego, Materiały GDDKiA, Wrocław
- [8] Badania pod próbnym obciążeniem prawego mostu głównego MA-21/II przez rzekę Odrę w ciągu Autostradowej Obwodnicy Wrocławia A-8, Raport serii SPR nr 14/2011, Instytut Inżynierii Lądowej Politechniki Wrocławskiej, październik 2011
- [9] Analiza danych gromadzonych przez system monitoringu Mostu Rędziańskiego we Wrocławiu. Raporty za rok: 2011, 2011–2016, 2016, 2017 oraz 2018, Zespół Badawczo-Projektowy Mosty – Wrocław

XXI KONFERENCJA NAUKOWO-TECHNICZNA

KONTRA' 2022

TRWAŁOŚĆ BUDOWLI I OCHRONA PRZED KOROZJĄ

Warszawa-Cedzyna 13-14 października 2022 r.



TEMATYKA KONFERENCJI

- odporność materiałów budowlanych na działanie agresywnych czynników zewnętrznych,
- trwałość i ochrona przed korozją konstrukcji żelbetonowych, stalowych, drewnianych i murowych,
- trwałość nawierzchni drogowych i mostów,
- modelowanie procesów degradacji materiału i konstrukcji, badania laboratoryjne,
- metody diagnostyki korozyjnej konstrukcji,
- wyroby antykorozyjne, systemy naprawcze, technologie prac antykorozyjnych i metody napraw,
- inne, związane z trwałością materiałów i konstrukcji.

WAŻNE DATY

31.03.2022 r. Zgłoszenie uczestnictwa, tematu artykułu lub informacji o wystąpieniu promocyjnym
 01.06.2022 r. Przesłanie pełnych tekstów artykułów i wniesienie opłaty konferencyjnej
 15.09.2022 r. Przesłanie uczestnikom Komunikatu nr 2 z programem konferencji oraz informacji o akceptacji referatów

ORGANIZATOR:

Komitet Trwałości Budowli Zarządu Głównego Polskiego Związku Inżynierów i Techników Budownictwa

WSPÓLORGANIZATOR:

Wydział Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej

KONTAKT:

e-mail: kontra@il.pw.edu.pl, www.kontra.il.pw.edu.pl

Wydział
Inżynierii Lądowej

