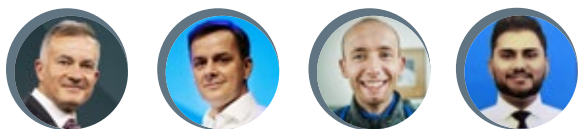


# Badania mostu Uniwersyteckiego w Bydgoszczy pod próbnym obciążeniem



tekst: dr hab. inż. MAREK SALAMAK, prof. PŚ, dr inż. PIOTR ŁAZIŃSKI, dr inż. GRZEGORZ POPRAWA, mgr inż. MUHAMMAD FAWAD, Politechnika Śląska

Most Uniwersytecki w Bydgoszczy został oddany do użytku pod koniec 2013 r. Stanowi kluczowy element Trasy Uniwersyteckiej, która ma ogromne znaczenie komunikacyjne dla mieszkańców Bydgoszczy. Ta przeprawa przez Brdę wydatnie usprawniła ruch w Śródmieściu, redukując uciążliwe dla kierowców zatory. Niestety już po siedmiu latach eksploatacji podczas systemowej inspekcji stanu technicznego stwierdzono niepokojące odkształcenia blach mocujących zakotwienia cięgien podwieszenia do konstrukcji przęsła.

Prof. Krzysztof Żółtowski przeprowadził szczegółową inwentaryzację uszkodzeń [1]. Na tej podstawie i po wnikliwej analizie wskazał na zbyt małą nośność tych połączeń, która może stanowić zagrożenie dla bezpieczeństwa konstrukcji. Swoją analizę przeprowadził również zespół z Politechniki Gdańskiej [2]. W efekcie zarządca podjął decyzję o zamknięciu mostu i jego tymczasowym podparciu. Przez rok trwały prace nad programem naprawczym i wzmocnieniem obiektu, za które odpowiadał Zespół Badawczo-Projektowy Mosty-Wrocław [3]. Rozbudowano także system monitoringu stanu technicznego, który w poprzedniej wersji okazał się niewystarczająco skuteczny. W styczniu 2022 r. firma Kormost zakończyła usuwanie awarii, a wzmocniona konstrukcja została poddana kolejnemu próbnemu obciążeniu, które przeprowadziło akredytowane laboratorium Politechniki Śląskiej we współpracy z podobnym laboratorium Politechniki Rzeszowskiej i z firmą CADmost.

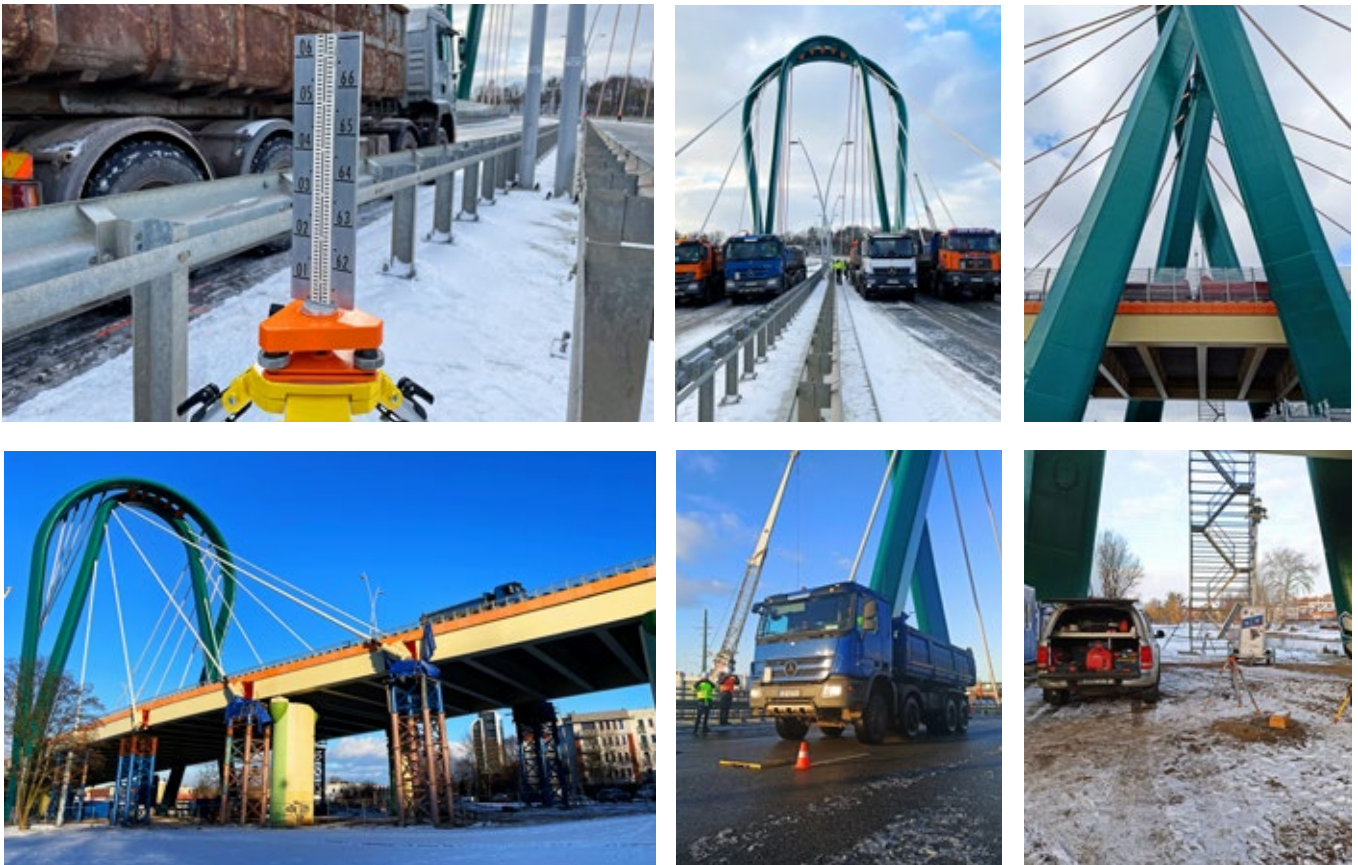
## Wprowadzenie

Most Uniwersytecki to dwuprzęsłowa, ciągła konstrukcja podwieszona o długości 200 m, z nietypowym pylonem w formie przenikających się podków w kształcie greckich liter alfa i omega. Rozpiętości teoretyczne przęsła wynoszą 110 i 90 m. Trasa na obiekcie przebiega częściowo w łuku poziomym. Całkowita szerokość jest zmienna i wynosi od 20 do ponad 31 m. Przez obiekt poprowadzone są dwie jezdnie, oddzielone od siebie pasem rozdziału z barierami energochłonnymi. Pozostałą część zajmują wyniesione pasma płyty chodnikowych z barieroporęczkami. Most został zaprojektowany na klasę A według normy PN-85/S-10030. Ustrój nośny stanowią dwa stalowe dźwigary skrzynkowe, połączone ze sobą sztywnymi poprzecznikami i zespolone na kierunku podłużnym i poprzecznym z żelbetową płytą. Przęsła powieszono do pylonu za pomocą 16 lin w osłonach PE-HD o zróżnicowanym przekroju od 72 do 109 równoległych splotów. Połączenie want z pomostem zaprojektowano w postaci stalowych bloków kotwiących, wystających z obu stron poza obrys pomostu. Kotwienie bierne przewidziano w konstrukcji pylonu, natomiast czynne w pomoście. Filary mostu to masywne słupy żelbetowe i podobnie jak pylon, posadowione zostały na wielkośrednicowych palach wierconych.

Zgodnie z krajowymi wymaganiami badania obiektów mostowych pod próbnym obciążeniem wykonuje się zwykle w odniesieniu do nowych konstrukcji i stanowią one wówczas jeden z elementów kompleksowych badań odbiorczych. Most Uniwersytecki w Bydgoszczy również takim badaniom podlegał. Przeprowadzono je w listopadzie 2013 r. i wszystkie próby przeszedł pozytywnie. Dlaczego więc po kilku latach okazało się, że most jednak uległ awarii, a działający system monitoringu nie sygnalizował zagrożeń? Otóż trzeba wiedzieć, że tego typu badania wcale nie służą do bezpośredniego określenia nośności konstrukcji. Nie są to bowiem próby zniszczeniowe, a jedynie pośrednie wnioskowanie o spełnieniu założeń projektowych dotyczących nośności. Wykonuje się je na podstawie odpowiedzi konstrukcji na pewne zadane wymuszenie, np. w postaci kontrolowanego obciążenia. Ponieważ nie jest możliwe mierzenie wewnętrznych naprężeń czy sił w konstrukcji, a tym bardziej abstrakcyjnego pojęcia nośności, to odpowiedź na wymuszenie podczas próbnego obciążenia rejestrowana jest przez pomiar przemieszczenia lub odkształcenia jakiegoś wybranego elementu konstrukcyjnego, który został obciążony. Trudną decyzją jest też sam wybór elementu konstrukcyjnego do badania. Najczęściej wskazuje się do tego główne elementy nośne w postaci dźwigarów. Natomiast bardzo rzadko mierzy się odpowiedzi w elementach drugorzędnych lub w połączeniach. Chyba że z jakiegoś powodu oczekuje tego zamawiający lub projektant. Wynika to ze zbyt dużej złożoności technicznej takiego przedsięwzięcia.

## Program i przebieg badań statycznych

Zaplanowane badania mostu pod próbnym obciążeniem miały na celu przede wszystkim weryfikację skuteczności zrealizowanego programu naprawczego, który polegał na wzmocnieniu węzłów zakotwienia want w pomoście. Przyjęty program badań zakładał powtórzenie dwóch schematów (S1 i S2) z pierwotnego próbnego obciążenia odbiorczego. Oprócz tego zdecydowano się zrealizować dodatkowy schemat obciążenia (S3), który miał na celu uzyskanie jak największego wyłężenia jednego ze wzmacnianych węzłów. Taką decyzję podjęli autorzy programu naprawczego [3]. W ten sposób w dwóch pierwszych schematach można było porównać odpowiedzi konstrukcji sprzed i po wzmocnieniu. Bezpośrednia



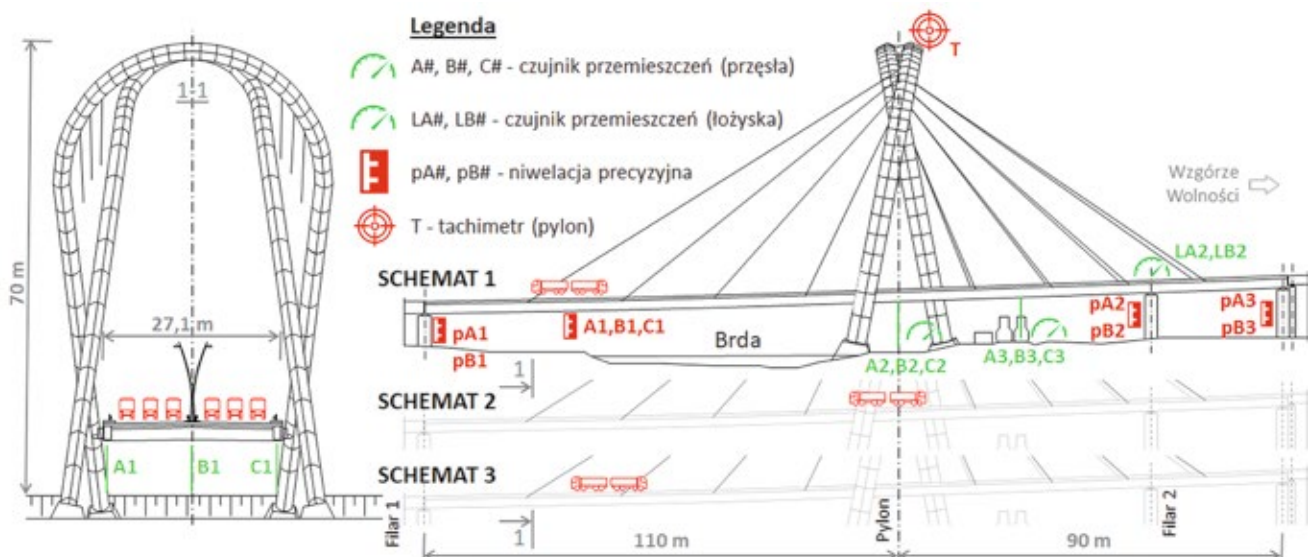
Ryc. 1. Fotografie dokumentujące przeprowadzone badania mostu

skuteczność lokalnego wzmocnienia bloków kotwiących miała być zweryfikowana na podstawie wyników rejestrowanych przez system monitoringu stanu technicznego, który został w ramach programu naprawczego rozbudowany. Wyposażono go w specjalne rozety pomiarowe mierzące odkształcenia blach w rejonie wzmocnianych zakotwień cięgien. Niezależnie od tego zespół profesora Żółtowskiego przeprowadził eksperymentalny pomiar sił we wszystkich cięgnach metodą wibracyjną przez ich ręczne wzbudzenie i rejestrację drgań.

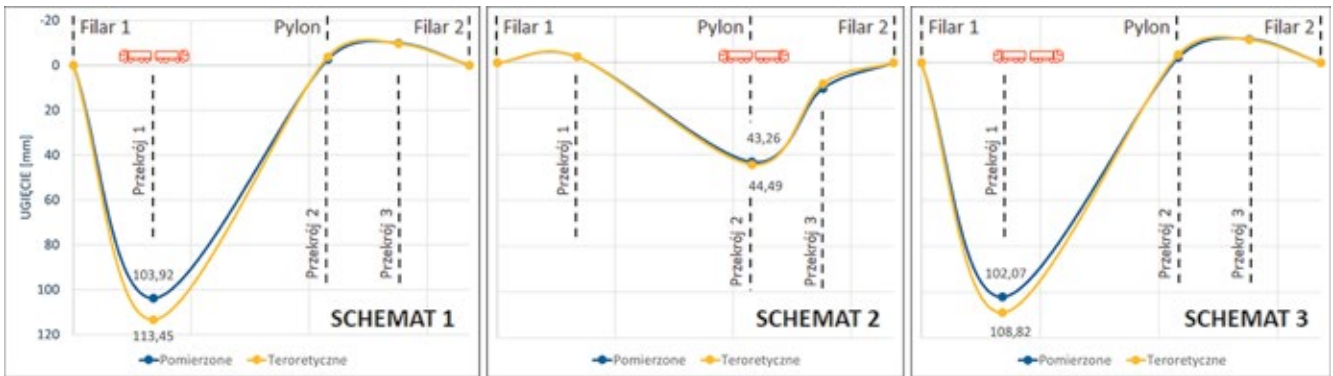
Badania przeprowadzono 21 stycznia 2022 r., a fotografie dokumentujące przeprowadzone pomiary pokazano na rycinie 1.

W próbach statycznych jako obciążenie wykorzystano 12 czteroosiowych samochodów ciężarowych o całkowitej masie ok. 33,6 t każdy. Takie wyniki uzyskano podczas kontroli masy. Zrealizowane zostały trzy schematy obciążenia oznaczone jako S1, S2 i S3. Położenie pojazdów w kolejnych schematach widoczne jest na rycinie 2.

Do pomiaru przemieszczeń i ugięć pod tym obciążeniem statycznym zastosowano czujniki mechaniczne, tachimetr elektroniczny i niwelację precyzyjną. Przemieszczenia pionowe przęsła poza nurtem rzeki mierzono czujnikami mechanicznymi z wyświetlaczem elektronicznym w zakresie do 150 mm i dokładności odczytu do 0,01 mm. Osiadania podpór i przemieszczenia przęsła



Ryc. 2. Ustawienie pojazdów próbnych i oznaczenia punktów pomiarowych w badaniach statycznych



Ryc. 3. Ugięcia w przekrojach pomiarowych na długości przęsła

w części nurtowej obserwowane były za pomocą optycznych niwelatorów precyzyjnych o dokładności odczytu do 0,1 mm. Natomiast do obserwacji wychylenia pylonu zastosowano automatyczny tachimetr elektroniczny. Przeszacowania pionowe wybranych łożysk mierzono czujnikami przemieszczeń z dokładnością odczytu do 0,001 mm. Lokalizację i oznaczenia punktów pomiarowych w próbach statycznych pokazano na rycinie 2.

Drgania want i zmiany odkształceń blach w ich zakotwieniach do pomostu mierzone były z wykorzystaniem zabudowanych w konstrukcji czujników odkształceń i akcelerometrów. Rejestracja tych danych odbywała się w ramach działającego już w nowym układzie systemu monitoringu. Kontrolowane wymuszenie deformacji przęseł posłużyło do oceny poprawności działania całego systemu monitorującego i kalibracji stanów alarmujących o przekroczeniu poziomów bezpieczeństwa. Analiza wyników wykazała, że maksymalna zmiana lokalnych naprężeń nie przekraczała 21 MPa podczas realizacji obciążenia w schemacie S3. Pomiary te potwierdziły sprężystą pracę blach w zakotwieniach want oraz brak odkształceń trwałych.

Pomiarzone ugięcia sprężyste podwieszonościowego ustroju nośnego we wszystkich schematach (ryc. 3) były nieznacznie mniejsze od obliczonych teoretycznie i stanowiły średnio ok. 94% wartości teoretycznych. Choć nie ma obiektywnych kryteriów, to polegając na doświadczeniu autorów, można powiedzieć, że takie wyniki świadczą o poprawności modelu obliczeniowego. Największe zmierzone ugięcie sprężyste wystąpiło w schemacie S1 w środkowym punkcie B1 i wyniosło 107,80 mm (ryc. 4). Ugięcia trwałe stanowiły od 0 do 2% ugięć całkowitych i spełniły warunek nieprzekroczenia poziomu 20%. Oznacza to, że przęsła pracują w zakresie sprężystym.

Podczas badania pojazdy wprowadzane były na przęsło w sposób niesymetryczny. W pierwszej fazie ustawiane były pojazdy tylko na lewej jezdni (50% całego obciążenia), a po wykonaniu

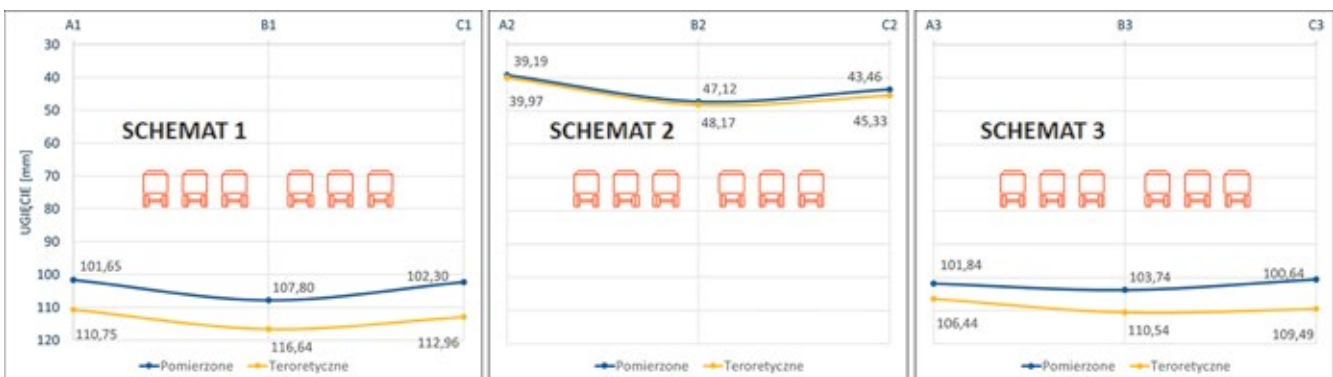
odczytów na prawą jezdnię wjeżdżały pozostałe pojazdy. W ten sposób możliwa była ocena współpracy poprzecznej elementów pomostu. Uzyskane rezultaty wskazują na dużą zgodność z wynikami obliczeń teoretycznych, choć stopień rzeczywistej współpracy poprzecznej okazał się nieco mniejszy od przyjętego w modelu.

We wszystkich schematach kontrolowano wychylenia pylonu wzdłuż osi mostu i przemieszczenia poziome płyty górnej łożysk na wybranych filarach. Maksymalna wartość wychylenia pylonu wyniosła 30,10 mm i była zbliżona do wartości obliczeniowych przy różnicach ok. 3%. Przeszacowania pionowe płyt górnych łożysk wyniosły maksymalnie 1,24 mm (ku górze). Największe były na podporze nr 2, co wynikało ze wzrostu siły rozciągającej w wantach podczas obciążenia w schemacie S3. Badania statyczne potwierdziły zarówno sprężystą pracę pylonu, jak i brak zjawiska odrywania przęsła w osi podpory nr 2. Natomiast obserwacja niwelacyjna podpór w trakcie całego obciążenia statycznego potwierdziła stabilność posadowienia mostu. Zmierzone we wszystkich schematach przemieszczenia nie przekraczały 0,1 mm. Były więc mniejsze od niepewności pomiarowej, co pozwala stwierdzić, że osiadania podpór nie wystąpiły.

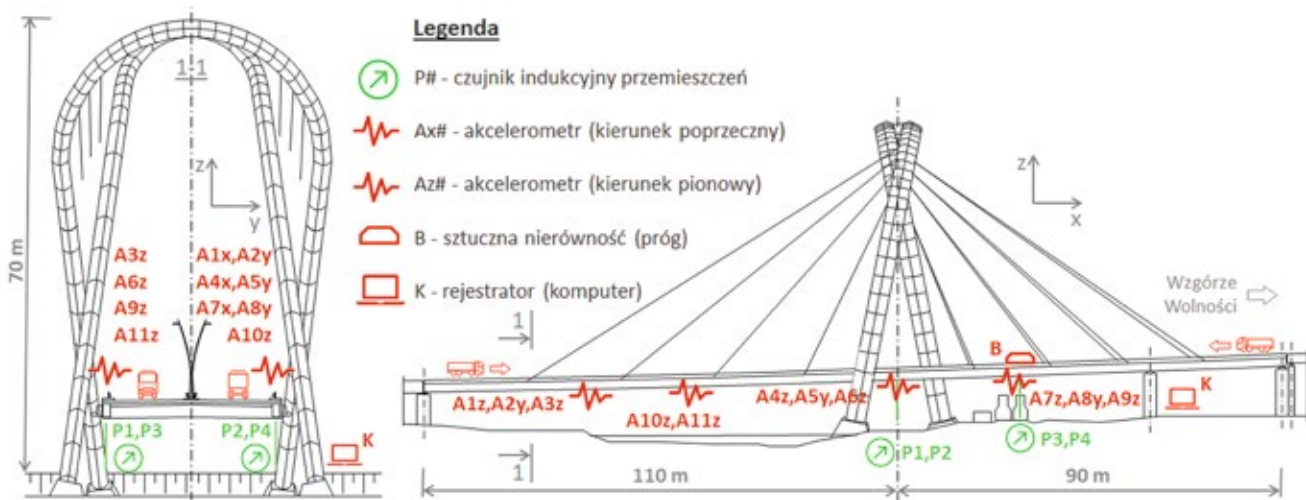
Wyniki opisywanych tu badań statycznych porównano też z wynikami, jakie uzyskano podczas pierwotnych badań odbiorczych w 2013 r. W tym celu wartości ugięć sprężystych skorygowano przez użycie współczynnika odniesienia, który uwzględnił inną masę pojazdów użytych w obu badaniach. Różnice w ugięciach nie przekraczały 4%, co świadczy o tym, że ani kilkuletni czas eksploatacji, ani awaria i zrealizowany program naprawczy nie miały wpływu na zmiany globalnej sztywności giętej i skrętej pomostu.

### Przebieg i wyniki badań dynamicznych

Badania dynamiczne mostu przeprowadzone zostały bezpośrednio po próbnym obciążeniu statycznym. Wyniki podczas



Ryc. 4. Ugięcia w punktach pomiarowych na przekroju poprzecznym przęsła



Ryc. 5. Rozmieszczenie punktów pomiarowych w badaniach dynamicznych

próbnym przejazdów zarejestrowane zostały elektronicznie w postaci przebiegów czasowych: przemieszczeń pionowych oraz przyspieszeń pionowych i poziomych. Zestaw pomiarowy składał się z komputera przenośnego, wielokanałowego rejestratora, indukcyjnych czujników przemieszczeń oraz akcelerometrów piezoelektrycznych. Miejsca usytuowania i oznaczenia punktów pomiarowych pokazano na rycinie 5. Próg do symulacji wymuszenia impulsowego umieszczony był nad czujnikami P3 i P4.

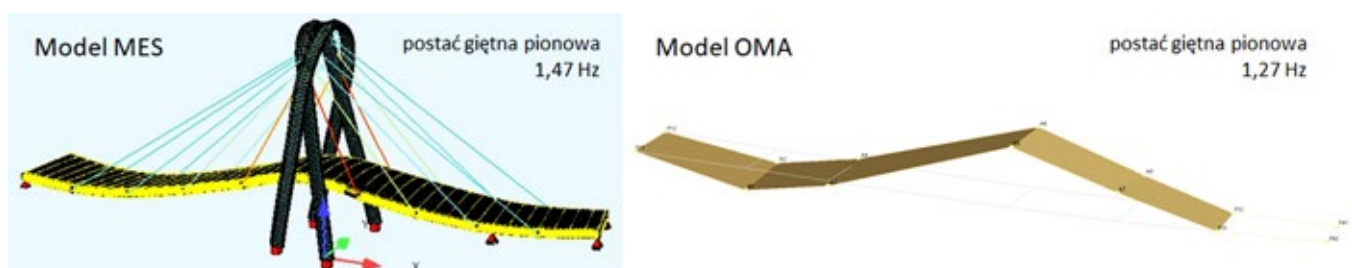
Przebieg prób dynamicznych był bardzo podobny do sposobu postępowania przy badaniach dynamicznych innych drogowych obiektów mostowych [4]. Pojedynczy pojazd próbny o masie zbliżonej do 33,6 t przejeżdżał przez most w obu kierunkach po tej samej trasie ze zmieniającymi się prędkościami od 10 do 70 km/h. Trasa przejazdu była stała, dzięki czemu możliwe było obserwowanie związku drgań konstrukcji z prędkością przejazdu pojazdu próbnego. Dodatkowo zrealizowano przejazd przez sztuczną nierówność (drewniany próg). Przejazd ten powoduje wzbudzenie drgań konstrukcji o większych amplitudach i jest bardzo przydatny w trakcie identyfikacji. Dodatkowo na potrzeby OMA zarejestrowano tzw. szum otoczenia lub oddziaływanie środowiska, czyli drgania konstrukcji wywołane głównie przez oddziaływanie wiatru oraz ruch pieszych na pomoście i pojazdów przejeżdżających w pobliżu konstrukcji. Dwa sygnały o długości ok. 20 min zawierające wzbudzenie szumem zostały następnie wykorzystane w procesie identyfikacji.

Zasadniczo badania dynamiczne przeprowadzono w sposób zbliżony do pierwotnego próbnego obciążenia dynamicznego z roku 2013. Istotną zmianą było zwiększenie liczby zastosowanych akcelerometrów (z trzech do jedenastu) oraz wykorzystanie sygnału z tych akcelerometrów do identyfikacji parametrów modalnych metodą operacyjnej analizy modalnej (*operational modal analysis* – OMA). Zarejestrowane przebiegi czasowe zostały wstępnie przetworzone

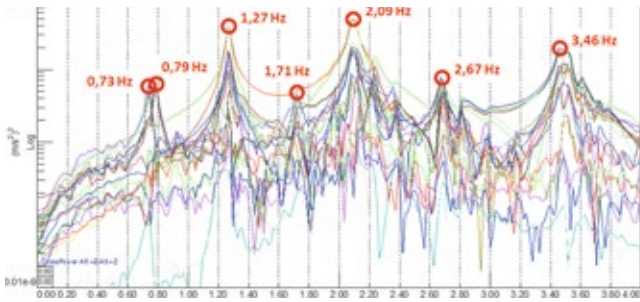
za pomocą cyfrowego dolnoprzepustowego filtra Bessela z pasmem przenoszenia do 20 Hz. W analizach stosowano standardowe podejście z szybką transformacją Fouriera (FFT) oraz metodę OMA.

Metoda OMA pozwala na określenie parametrów dynamicznych konstrukcji na podstawie pomiaru odpowiedzi dynamicznej wywołanej normalną eksploatacją obiektu lub innymi oddziaływaniami środowiskowymi (np. w postaci wiatru lub innego niekontrolowanego wzbudzenia) [5]. Na parametry modalne składają się najczęściej trzy elementy: częstotliwość drgań własnych, postać drgań własnych oraz tłumienie związane z daną postacią. Wszystkie trzy są przedmiotem identyfikacji w metodzie OMA. Z kolei model MES odwzorowujący masę i sztywność konstrukcji pozwala na wyznaczenie jedynie dwóch z trzech parametrów modalnych, czyli częstotliwości drgań własnych i postaci drgań własnych. Porównanie wielkości zidentyfikowanych i wyliczonych jest, podobnie jak w badaniach statycznych, miarą zgodności modelu z rzeczywistym obiektem. Pokazano to obrazowo na rycinie 6.

Zarejestrowana odpowiedź konstrukcji na losowe wymuszenia (sygnały z akcelerometrów) została przetworzona z zastosowaniem algorytmu identyfikacyjnego SSI-COR. Dała ona wystarczające i jednoznaczne efekty identyfikacyjne. Należy podkreślić, że zastosowanie OMA nie jest niestety typowym podejściem w badaniach dynamicznych obiektów mostowych. Zazwyczaj bazuje się tylko na podstawowej analizie sygnału (np. klasyczną metodą FFT) i na założeniu, że zachowanie dynamiczne konstrukcji zbliżone jest do zaobserwowanego w modelu. To założenie sprawia, że analityk usilnie poszukuje pomierzonych częstotliwości i postaci drgań własnych w pobliżu częstotliwości, na którą wskazuje model. Założenie to nie zawsze musi być prawdziwe, a zwłaszcza w przypadku tak złożonych konstrukcji, jaką jest most Uniwersytecki w Bydgoszczy.



Ryc. 6. Porównanie kształtów wyliczonej i zidentyfikowanej postaci drgań własnych z modelu MES i metody OMA



Ryc. 7. Spektrum drgań uzyskane w analizie OMA

Założona w projekcie lokalizacja czujników pozwoliła określić dziewięć częstotliwości drgań własnych. Na wykresie pokazującym spektrum drgań (ryc. 7) widać piki ujawniające podstawowe częstotliwości drgań. Pochodzą one z prób z użyciem progów, które dawały uzyskać mocniejsze wymuszenie quasi-impulsowe. Pomierzone wartości częstotliwości drgań własnych zweryfikowano, filtrując dodatkowo wybrane przebiegi w przedziałach wokół częstotliwości zidentyfikowanych z zastosowaniem OMA. Najniższa zidentyfikowana częstość drgań własnych wynosi 0,73 Hz i jest nieznacznie mniejsza od obliczonej teoretycznie – 0,76 Hz.

Identyfikacja właściwości tłumiących metodą uśrednionego logarytmicznego dekrementu możliwa była głównie przy przejazdach z progiem, w których uzyskiwano wyższe amplitudy drgań. LDT określono tylko dla częstotliwości wystarczająco odseparowanych od pozostałych. Wartości ułamka tłumienia krytycznego zidentyfikowane z zastosowaniem OMA są zbliżone do tych wyznaczonych metodą LDT. Ułamek tłumienia krytycznego w zidentyfikowanych częstotliwościach drgań własnych przyjmuje wartości w zakresie od 0,11 do 0,77%. Największe różnice występują w przypadku pierwszej częstotliwości drgań własnych i związane są z faktem słabego wzbudzenia tej częstotliwości w trakcie rejestracji sygnałów na potrzeby OMA.

Wszystkie akcelerometry zamocowane zostały do pomostu. Oprócz akcelerometrów w badaniach dynamicznych rejestrowano również przemieszczenia pionowe pomostu z zastosowaniem indukcyjnych czujników przemieszczeń liniowych. Posłużyły one do określenia kontrowersyjnego [4] współczynnika przewyższenia dynamicznego (WPD), który błędnie jest utożsamiany i porównywany ze współczynnikiem dynamicznym z nieobowiązującej już normy PN-85/S-10030. Ten współczynnik WPD zdefiniowano tutaj jako stosunek maksymalnego ugięcia w określonym przekroju od jednego pojazdu poruszającego się z określoną prędkością do maksymalnego ugięcia od tego samego pojazdu, ale jadącego z małą prędkością, do 10 km/h (przejazd quasi-statyczny po tej samej trasie). WPD wyznaczano każdorazowo dla całego przekroju, uśredniając ugięcia z wszystkich punktów w przekroju pomiarowym. Pominięto w ten sposób wpływ rozdziału poprzecznego obciążenia spowodowany przypadkowymi przesunięciami poprzecznymi trasy pojazdu. Ogólnie obiekt charakteryzuje się umiarkowaną podatnością na wpływy dynamiczne. Współczynnik WPD w normalnych warunkach (bez progów) osiągnął maksymalną wartość 1,15 przy prędkości 50 km/h.

## Podsumowanie

Na podstawie analizy wyników badań statycznych i dynamicznych wykonanych po wzmocnieniu węzłów zakotwienia want

w pomoście konstrukcji mostu Uniwersyteckiego w Bydgoszczy można wyciągnąć następujące wnioski:

1. Posadowienie podpór jest stabilne. Pomierzone podczas obciążenia maksymalne przemieszczenia pionowe ich fundamentów nie przekroczyły 0,10 mm.

2. Ugięcia sprężyste podwieszonościowego ustroju nośnego wywołane próbnym obciążeniem statycznym były zbliżone do obliczonych teoretycznie. Wynosiły one średnio 94% wartości teoretycznych, co świadczy o dużej zgodności modelu z rzeczywistą konstrukcją i potwierdza też zakładaną przez projektanta nośność obiektu. Porównanie wyników opisywanych tu badań weryfikujących program naprawczy z wynikami pierwotnych badań odbiorczych potwierdziły zachowanie stabilnej globalnej sztywności giętej i skrętnej pomostu.

3. Ugięcia trwałe w badanym przęśle wynoszą od 0 do 2% ugięć całkowitych, a zatem potwierdzają sprężystą pracę wzmocnionej konstrukcji. Dotyczy to również wychyleń pylonu z pionu i przemieszczeń pionowych górnych płyt łożysk.

4. Ogólny wynik próby dynamicznej jest pozytywny. Współczynnik przewyższenia dynamicznego przęsła jest nieco większy od normowego współczynnika dynamicznego, przy umiarkowanych właściwościach tłumiących.

5. Analiza zmian naprężeń na blachach węzłowych zakotwień want, które zostały zarejestrowane przez system monitoringu, potwierdza skuteczność zrealizowanego programu naprawczego. Nie stwierdzono trwałych odkształceń we wzmocnianych elementach, a oględziny mostu przed i po wykonaniu próbnego obciążenia nie wykazały żadnych niepokojących zmian.

## Literatura

- [1] Żółtowski K., Bińczyk M., Kalitowski P.: *Most Uniwersytecki w Bydgoszczy. Teoretyczne podstawy decyzji o wyłączeniu obiektu z ruchu*. W: *Bezpieczeństwo budowy mostowych*. Materiały Seminarium Naukowo-Technicznego Wrocławskie Dni Mostowe, Wrocław, 25–26 listopada 2021. Wrocław 2021, s. 71–83.
- [2] Wilde K., Chróścielewski J., Miśkiewicz M., Pyrzowski Ł., Sobczyk B.: *Most Uniwersytecki w Bydgoszczy – zaawansowane studium stref zakotwienia systemu podwieszenia w pomoście*. W: *Bezpieczeństwo budowy mostowych*. Materiały Seminarium Naukowo-Technicznego Wrocławskie Dni Mostowe, Wrocław, 25–26 listopada 2021. Wrocław 2021, s. 85–95.
- [3] Biliszczuk J., Kożuch M., Lorenc W., Onysyk J., Skrętowicz Ł., Sułkowski M., Teichgraeber M.: *Projekt wzmocnienia węzłów zakotwienia want w Moście Uniwersyteckim w Bydgoszczy*. W: *Bezpieczeństwo budowy mostowych*. Materiały Seminarium Naukowo-Technicznego Wrocławskie Dni Mostowe, Wrocław, 25–26 listopada 2021. Wrocław 2021, s. 97–108.
- [4] Łaziński P., Salamak M.: *Działalność Katedry Dróg i Mostów w badaniach mostów pod próbnym obciążeniem*. „Inżynieria i Budownictwo” 2010, nr 5–6, s. 300–303.
- [5] Poprawa G., Salamak M., Pradelok S.: *Operational modal analysis in commissioning dynamic tests of different types of footbridges. Experiences and conclusions*. 8<sup>th</sup> IOMAC – International Operational Modal Analysis Conference, Proceedings, Copenhagen, 2019, pp. 79–92.
- [6] Weseli J.: *O właściwe rozumienie roli i wyników badań dynamicznych w czasie obciążeń próbnych*. „Inżynieria i Budownictwo” 2014, nr 7, s. 372–376.



Czytaj więcej