

Ocena nośności konstrukcji pylonu Mostu Rędzińskiego po 10 latach eksploatacji. Propozycje działań utrzymaniowych

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

1. Wprowadzenie

Most Rędziński we Wrocławiu jest mostem podwieszonym o najdłuższym w Polsce w pełni betonowym przęśle. Po kilku latach eksploatacji zauważono szereg zarysowań na ryglu (rys. 1).

Była to bezpośrednia przyczyna wykonania przeglądu i szeregu badań eksperckich konstrukcji po 10 latach eksploatacji [1]. Kluczowym elementem każdego mostu podwieszono jest pylon. Niemal wszystkie obciążenia pojawiające się

na pomoście są przekazywane na niego za pośrednictwem lin podwieszenia. Konstrukcja pylonu Mostu Rędzińskiego złożona jest z dwóch nóg pochylonych do środka i załamanych w dolnej części ku środkowi. Rygiel łączący punkty załamania nóg pylonu jest silnie sprężonym elementem betonowym, który przenosi siłę rozporową z nóg oraz obciążenia z opartego na nim pomostu. W trakcie ekspertyzy potwierdzono istnienie zarysowań na tym elemencie konstrukcyjnym. Z uwagi na zasadniczą rolę ryglu w konstrukcji mostu (jego rozerwanie nieodwrotnie prowadziłoby do katastrofy budowlanej) przeprowadzono szereg szczegółowych analiz próbujących zidentyfikować przyczyny i ocenić skutki zaistniałych zarysowań. W pracy zaprezentowano wyniki analizy tego elementu konstrukcyjnego. Analiza globalna przęsła mostu, związana z identyfikacją sił w wantach i z określeniem wpływu czynników reologicznych, jest przedmiotem innego artykułu, również przedstawionego na konferencji Konstrukcje Sprężone 2022.

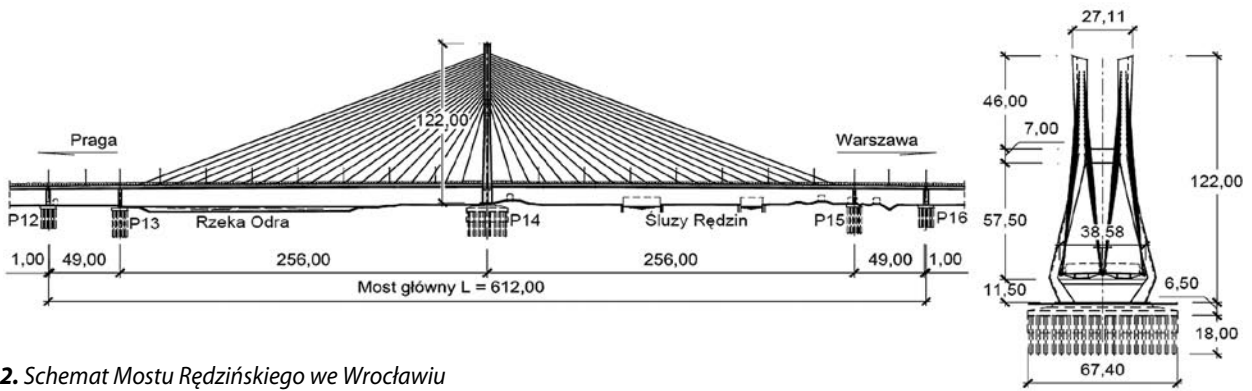
2. Opis konstrukcji

Rozważana struktura to całkowicie betonowy most wantowy o konstrukcji symetrycznej i rozpiętościach przęseł 50+256+256+50 m (rys. 2). Całość jest podwieszona do pylonu w kształcie litery H o wysokości 122 m. W przekroju poprzecznym most składa się z dwóch rozdzielonych pomostów o konstrukcji skrzynkowej. Pomosty podwieszono są do pylonu za pomocą w sumie 160 lin firmy Freyssinet, składających się z 24 do 48 splotów typu 15.7 [2, 3]. Pylon wykonano z betonu klasy B60.

W ramach prac eksperckich dokonano przeglądu konstrukcji, pomiarów geodezyjnych niwelety oraz identyfikacji sił w wantach metodą wibracyjną [4, 5]. Na ryglu dolnym zamontowano światłowodowe czujniki odkształceń [6]. Na podstawie otrzymanych danych wykonano także szereg obliczeń na modelach teoretycznych. Pierwszym z modeli był globalny model prętowy konstrukcji przęsła i pylonu (przedstawiony w innym artykule). Drugi model, ograniczony wyłącznie do pylonu, w szczególności sposób opisywał pracę dolnej części, obejmującej okolice rygla.



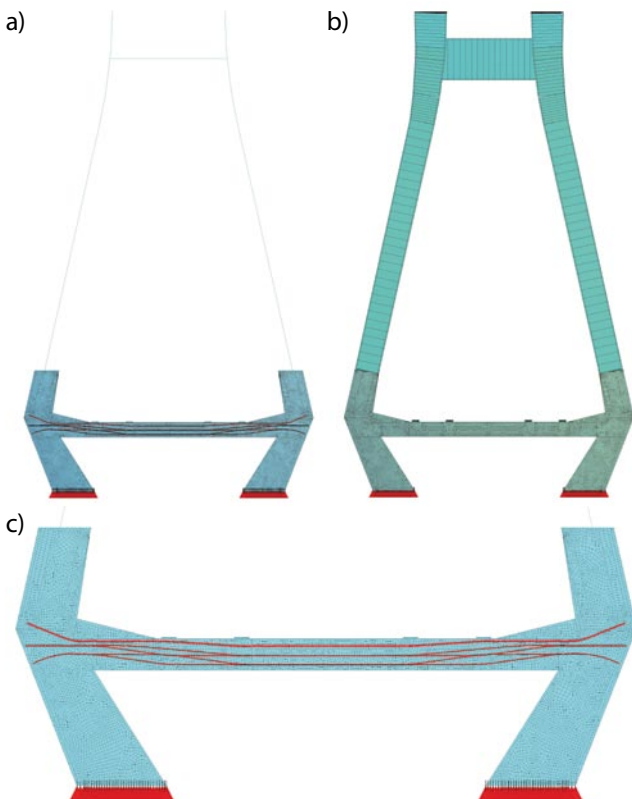
Rys. 1. Fragment pylonu Mostu Rędzińskiego w obrębie połączenia z dolnym rygłem; stan z 11.08.2011 (a) i 07.07.2020 (b)



Rys. 2. Schemat Mostu Rędzńskiego we Wrocławiu

3. Model numeryczny pylonu

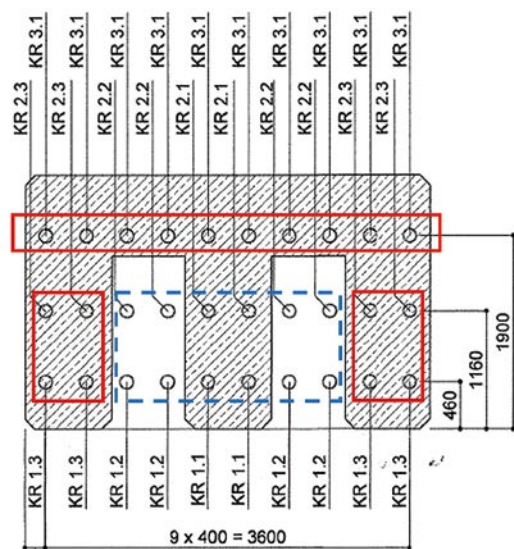
Model globalny przęseł i pylonu (model prętowy) niewystarczająco dokładnie odzwierciedlał zachowanie się rygła pylonu. Wynika to ze zróżnicowanej geometrii rygła, sposobu połączenia z pylonem oraz obiektywnych ograniczeń modelu belkowego. Z tego względu na potrzeby wyznaczenia miarodajnych naprężeń w obrębie rygła dolnego pylonu stworzono szczegółowy model numeryczny MES. Wizualizację i schemat statyczny modelu przedstawiono na rysunku 3. Od płyty fundamentu do poziomu 8 m powyżej załamania nóg pylonu model wykonano z czterowęzłowych elementów tarczowych. Pozostałą część pylonu odwzorowano za pomocą elementów belkowych, przystających do modelu globalnego mostu. Dopełniony w ten sposób model pozwala zachować



Rys. 3. Model płaski pylonu Mostu Rędzńskiego: a) schemat statyczny i wizualizacja, b) model rygła dolnego z pokazaną trasą kabli sprężających

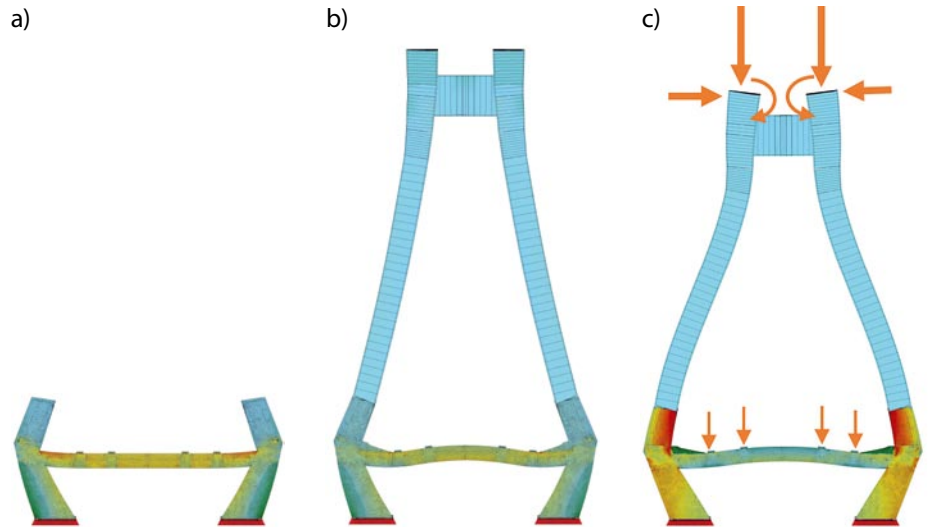
sztynność konstrukcji pylonu jako całości i jednocześnie uproszcza obciążanie modelu wycinkowego. Model posłużył zbadaniu zachowania konstrukcji jedynie w płaszczyźnie pylonu. Model szczegółowy został obciążony siłami w miejscach zamocowania want i reakcjami z przęseł pozyskanymi z modelu globalnego konstrukcji. Dodano sprężenie rygła w postaci obciążenia (czerwone linie na rysunku 3) zgodnie z dokumentacją [3]. Przekrój rygła w pobliżu jego środka rozpiętości oraz oznaczenia kabli sprężających pokazano na rysunku 4. W przypadku konstrukcji mostowej wykonywanej etapami obliczenia statyczne muszą uwzględniać istotne fazy montażowe. W ten sposób sumowane są przyrosty naprężeń dodawane na kolejnych etapach budowy. Obliczenia podzielono na następujące 4 główne fazy obliczeniowe:

- faza 1: Budowa konstrukcji pylonu do rzędnej ok. 20 m powyżej płyty fundamentowej i sprężenie kabli KR3.1, KR 2.3 i KR 1.3 (czerwone linie ciągłe na rys. 4),
- faza 2: Budowa konstrukcji pylonu do poziomu najkrótszych want w pylonie i sprężenie kabli KR1.1, KR 1.2 i KR 2.1 i KR 2.2 (niebieskie linie przerywane na rys. 4),
- faza 3: Obciążenie modelu siłami pochodzącymi od następujących, pozostałych obciążeń stałych: ciężaru przęseł



Rys. 4. Rozmieszczenie kabli sprężających w przekroju poprzecznym rygła dolnego pylonu; czerwone, ciągłe prostokąty: napięte w fazie 1; niebieski, przerywany prostokąt: napięte w fazie 2

Rys. 5. Rozpatrywane fazy pracy konstrukcji pylonu: a) faza 1, b) faza 2, c) faza 3 wraz z zaznaczonymi siłami zewnętrznymi uzyskanymi z modelu globalnego; skala deformacji: 200:1



i wyposażenia, budowy pozostałej części pylonu (uwzględniono jako obciążenie), osiadania podpór, reologii betonu,

- faza 4: Obciążenia ruchome.

Deformację i stan konstrukcji w poszczególnych fazach 1, 2 i 3 pokazano na rysunku 5.

Faza 3 odpowiada stanowi beżużytkowemu pracy konstrukcji. Obciążenia w tej fazie przyjęto w 4 wariantach. Warianty różnią się przede wszystkim rozkładem reakcji podporowych działających na rygiel dolny. Istnieje szereg niepewności, które wpływają na brak możliwości dokładnego określenia rozkładu reakcji na wewnętrzne i zewnętrzne łożysko danego dźwigara mostu podwieszono. Związane są one m.in. z kolejnością wykonywanych prac, etapowaniem sprężenia rygla, podparciem technologicznym rygla w trakcie prac czy lewarowaniem przęseł przy montażu docelowych łożysk. Na podstawie analiz modelu globalnego uzyskano 4 rozkłady obejmujące możliwe stany: od maksymalnego obciążenia na łożyskach zewnętrznych, przez równe siły reakcji, po maksymalne dociążenie łożysk wewnętrznych.

W fazie 4 dodano obciążenia ruchome odwzorowujące stan użytkowy. Obciążenie ruchome przyjęto zgodnie z PN-85/S-10030 jak dla klasy A, o wartościach charakterystycznych. Pojazd K przyjęto po jednym na każdej z dwóch nitek obiektu. Lokalizację obciążenia ruchomego dobrano tak, żeby uzyskać maksymalną sumaryczną reakcję na rygiel. Siły od obciążenia ruchomego dodano do czterech wspomnianych wariantów reakcji stanu beżużytkowego.

Uznano, że dodatkowym niekorzystnym czynnikiem, który miał szansę wystąpić, jest utrata lub zniżenie wstępnej siły sprężającej. W normie PN-EN 1992-1-1 [7,8] p. 5.10.9 dla wyznaczenia efektów sprężenia w stanie granicznym użytkowalności przyjęto współczynnik zmniejszający charakterystyczną siłę sprężającą. Zmniejsza on wartość siły sprężającej w kablobetonie do 90% dla kabli z przyczepnością i 95% dla kabli bez przyczepności. Zarówno dla stanu beżużytkowego, jak i użytkowego, w czterech wariantach każdy, wyznaczono naprężenia również przy obniżonej o 10% całkowitej sile sprężającej we wszystkich kablach.

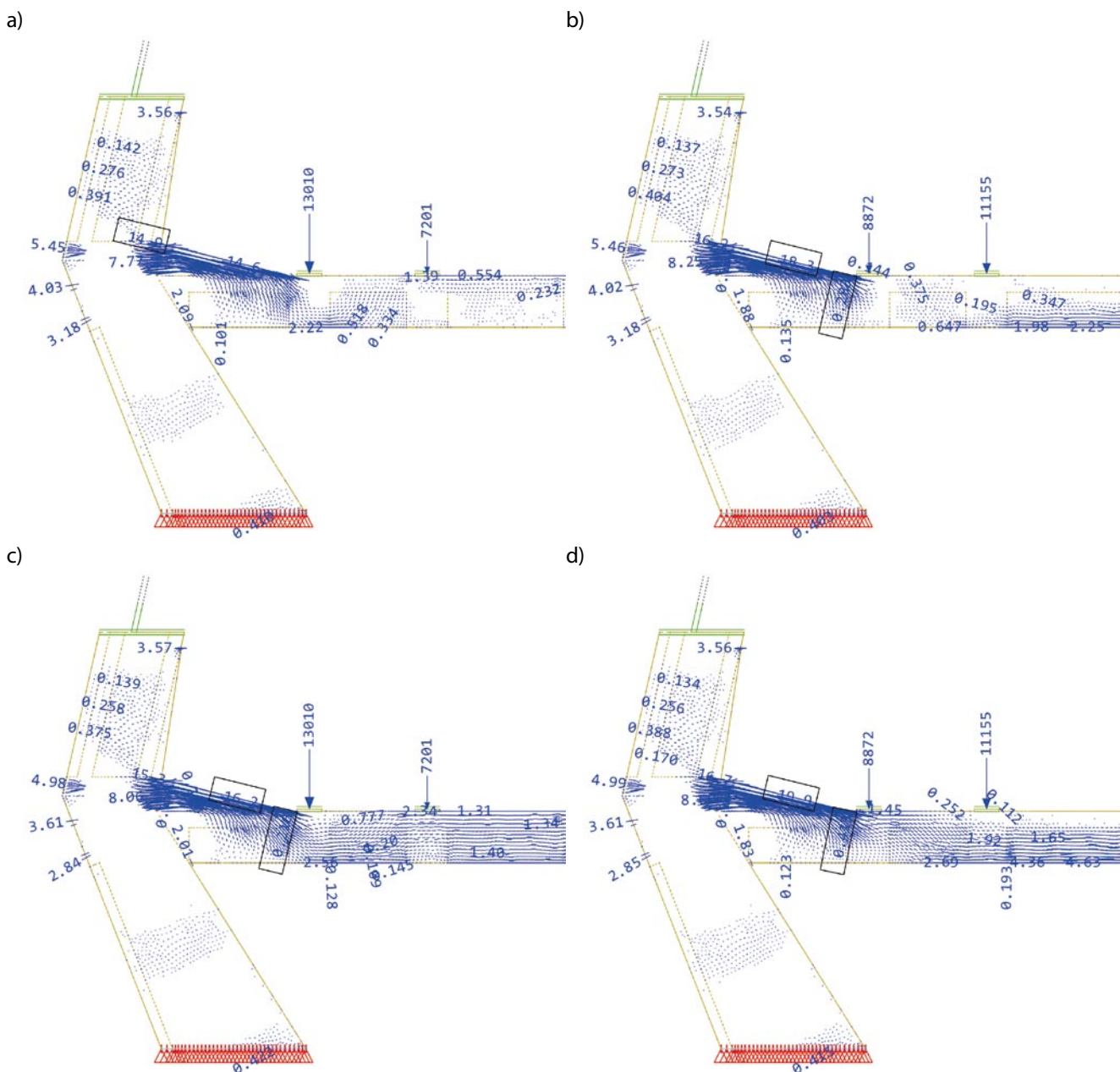
4. Rezultaty analiz numerycznych

Wybrane rezultaty w postaci krzyży naprężeń głównych dla ekstremalnych rozkładów reakcji z przęśla w fazie użytkowej

oraz dla wartości 100% i 90% projektowanej siły sprężającej przedstawiono na rysunku 6. Rezultaty pokazano dla połowy rygla z uwagi na niemal symetryczny charakter pracy pylonu. Wartości odfiltrowano, pozostawiając jedynie miejsca rozciągane w betonie o naprężeniach większych niż 0,1 MPa. Na ryglu zaznaczono również reakcje przekazywane na łożyska (w kN) w danej fazie i wariantcie rozkładu reakcji. Wyniki wskazują na znaczną różnicę w rozkładach naprężeń w zależności od przyjętego rozkładu reakcji. W wariantcie 1 (ekstremalne reakcje zewnętrzne) wskutek obciążeń i sprężenia, rygiel jest rozciągany niemal równomiernie, z tendencją do rozciągania we włóknach górnych. Z kolei w wariantcie 4 (ekstremalne reakcje wewnętrzne) głównie rozciągane są włókna dolne. We wszystkich wariantach obciążenia rygla z przęseł analiza wskazuje na rozciągania w betonie. Niestety zgodnie z dokumentacją budowy beton rygla uległ porysowaniu skurczowemu po zabetonowaniu. Tym samym stracił swoje własności wytrzymałościowe przy rozciąganiu.

5. Propozycja działań utrzymaniowych

Rygiel pylonu jest bardzo odpowiedzialnym elementem konstrukcji. Jego potencjalne uszkodzenie zagraża wprost bezpieczeństwu całej konstrukcji podwieszonoj. W trakcie przeglądu zauważono liczne zarysowania sprężonoj konstrukcji rygla. Rozpatrując projektowane działania utrzymaniowe, na wstępie zdefiniowano dwie funkcje pełnione przez rygiel. Funkcja pierwsza to przejmowanie rozporu z nóg pylonu. Funkcja druga to podparcie przęseł w strefie pylonu. Obie funkcje generują naprężenia rozciągające w ryglu i narzucają wymóg jego sprężenia. Obecnie po 10 latach i uwzględnieniu reologii oraz osiadania podpór zauważono, że sprężenie wprowadzone w rygiel nie spełnia w 100% swojej funkcji. Należy podkreślić, że nie stwierdzono obecnie zagrożenia bezpieczeństwa konstrukcji. Niemniej jednak ze względu na występujące zarysowanie konstrukcji sprężonoj stwierdzono, że zagrożona jest trwałość obiektu, z uwagi na potencjalną korozję kabli sprężających.

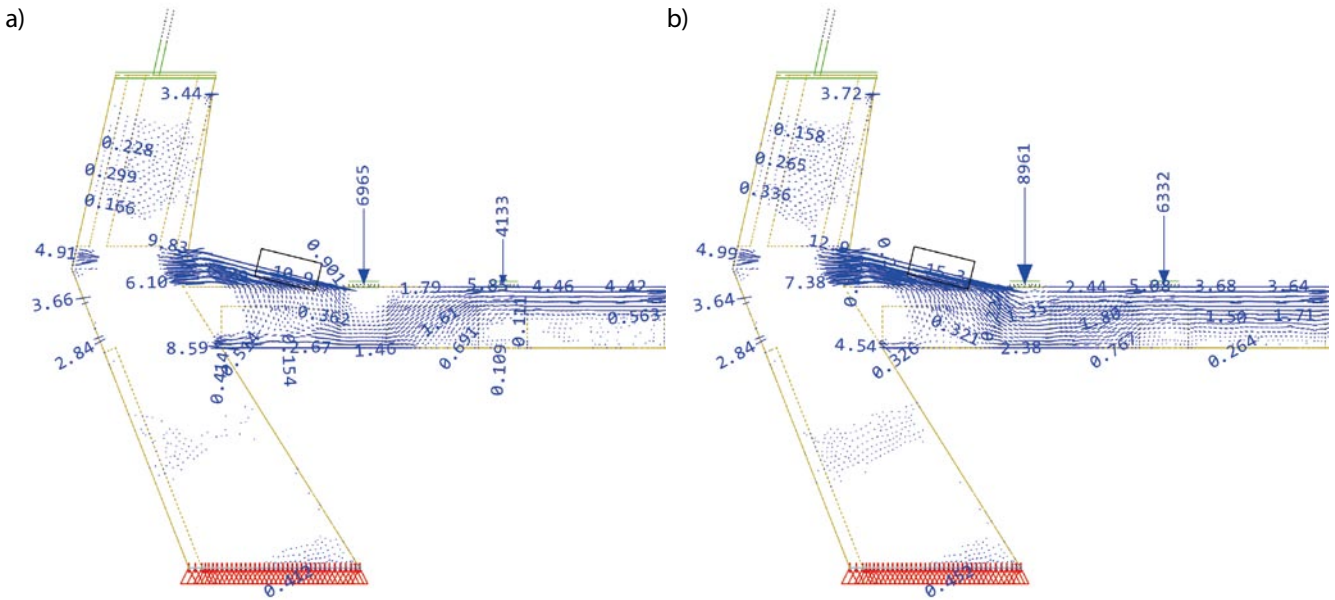


Rys. 6. Naprężenia główne na kierunku I i II – tylko rozciąganie – stan użytkowy: a) wariant 1 rozkładu reakcji – sprężenie 100%, b) wariant 4 rozkładu reakcji – sprężenie 100%, c) wariant 1 rozkładu reakcji – sprężenie 90%, d) wariant 4 rozkładu reakcji – sprężenie 90% [MPa]

W istniejących warunkach zagrożenie jest realne, a degradacja całkiem prawdopodobna przy braku działań naprawczych. Rygiel pylonu znajduje się w klasie ekspozycji XF4 według PN-EN 206:2014. Założono więc, że działania naprawcze powinny być ukierunkowane na zapewnienie pełnego sprężenia rygla i zabezpieczenie jego powierzchni przed działaniem wody deszczowej i wody z jezdni.

Na początku rozważono poprawę pracy rygla poprzez zwiększenie siły naciągu w najkrótszych wantach przy pylonie. Takie działanie zmniejsza obciążenia pionowe rygla pochodzące od przęseł, co intuicyjnie powinno obniżyć wyężenie rygla. Jednakże rygiel jest elementem, który pracuje w złożonym stanie obciążeń: rozciąganie i zginanie od nóg pylonu, zginanie od reakcji z przęseł oraz zginanie i ściskanie

od sprężenia. Z tego względu wykonano analizę wpływu naciągu want na naprężenia w ryglu. Po pierwsze określono, że na wartość obciążenia pionowego rygla mają istotny wpływ jedynie siły naciągu w trzech pierwszych zestawach want od strony pylonu, z czego wanty najbliższe rygla mają znaczenie decydujące. W modelu globalnym przyjęto naciąg 8 najkrótszych want do wartości ok. 50% siły zrywającej w fazie użytkowej mostu, dla obciążeń charakterystycznych. Siły wynikowe wprowadzono do modelu rygla, a przykładowe wyniki obliczeń pokazano na rysunku 7. Rezultaty (rys. 7) pozwoliły stwierdzić, że samodzielne naciągnięcie want nie rozwiązuje problemu występowania naprężeń rozciągających w ryglu dolnym. W zasadzie niezależnie od wariantu rozkładu reakcji, ich sumaryczne zmniejszenie



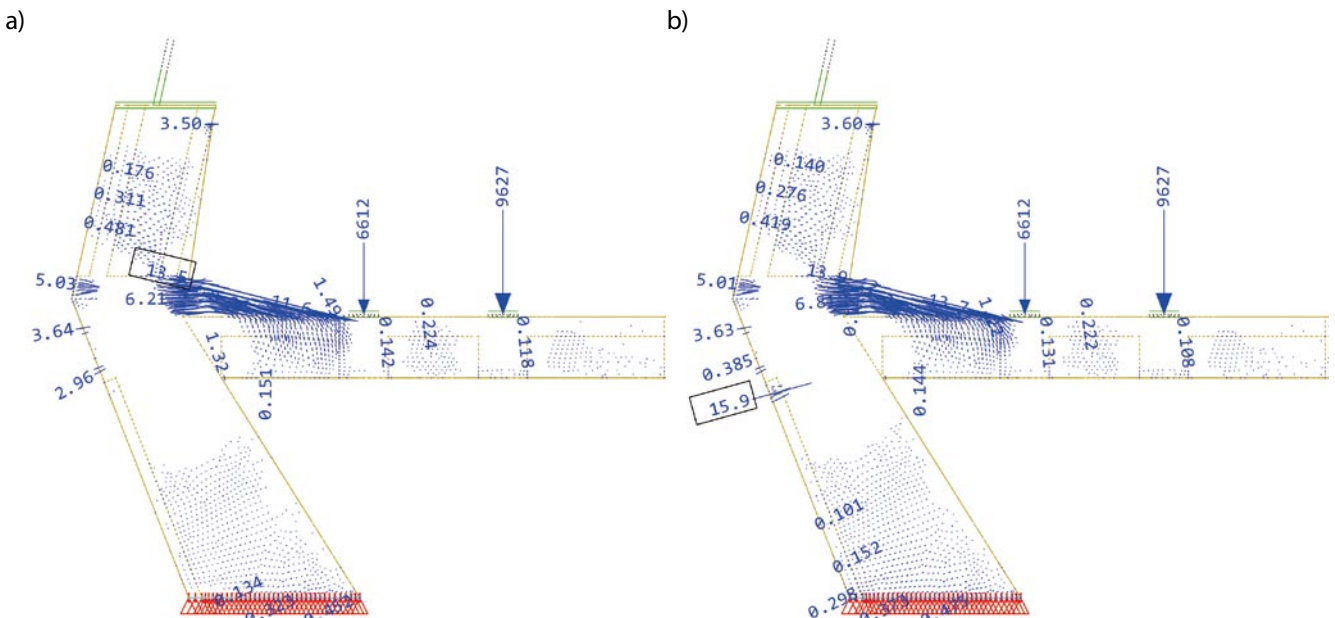
Rys. 7. Stan naprężeń w ryglu po zwiększeniu naciągu najkrótszych want. Naprężenia główne kierunek I i II – wariant rozkładu reakcji pośredni – tylko rozciąganie – sprężenie 90%: a) stan bezużytkowy, b) stan użytkowy [MPa]

wskutek naciągu want powoduje rozciąganie ryglu po jego górnej stronie. Obliczenia wskazały, że w wielu wariantach ogólny stan wyężenia ryglu pogorszy się przy samodzielnym napięciu want.

Wnioski wynikające z analizy rezultatów pracy ryglu po samodzielnym, dodatkowym naciągnięciu want nasunęły drugą koncepcję poprawy sytuacji w postaci zwiększenia siły naciągu w wantach i jednoczesnego doprężenia ryglu. Założono sprężenie prostoliniowe o całkowitej sile naciągu odpowiadającej 10 kablom 31-splotowym – takim samym, jakie zastosowano w istniejącym sprężeniu ryglu.

Sumaryczna siła nominalna dodatkowego naciągu wyniosła $\Delta F = 10 \cdot 6487 = 64870$ kN. Założono sprężenie kablami prostymi, bezprzyczepnościowymi. W analizach numerycznych sprawdzono dwa warianty dodatkowego sprężenia różniące się lokalizacją jego zakotwień. W pierwszym wariantcie kabel wypadkowy dodatkowego sprężenia pokrywa się z osią geometryczną ryglu (1,25 m od spodu ryglu). W drugim wariantcie kabel wypadkowy dodatkowego sprężenia znajduje się 0,5 m poniżej poziomu ryglu.

W toku obliczeń iteracyjnych dobrano siłę napinającą w wantach, która dla różnych wariantów rozkładu reakcji gwarantuje



Rys. 8. Stan naprężeń w ryglu po zwiększeniu naciągu najkrótszych want i doprężeniu ryglu. Naprężenia główne na kierunku I i II – tylko rozciąganie – stan użytkowy – sprężenie bazowe 90%: a) sprężenie w osi ryglu, wariant reakcji 4, b) sprężenie poniżej ryglu, wariant reakcji 4 [MPa]

najbardziej równy rozkład naprężeń ściskających w przekroju środkowym rygla. Zgodnie z wcześniejszymi wnioskami zauważono, że napięcie najkrótszych want nie powoduje dużej zmiany sił w wantach sąsiednich. Podwojenie siły naciągu w najkrótszych wantach zmniejszyło naciąg kolejnych want o mniej niż 5%. Wybrane rezultaty w fazie użytkowej dla naciągu najkrótszych want i dwóch wariantów dodatkowego sprężenia przedstawiono na rysunku 8. Analiza wyników po jednoczesnym naciągu najkrótszych want i sprężeniu dodatkowym pozwala wyciągnąć następujące wnioski:

- oba warianty sprężenia siłą $\Delta F = 64\,870$ kN, połączone z naciągiem najkrótszych want pozwoliły na uzyskanie pełnego sprężenia rygla, niezależnie od wariantu rozkładu reakcji;
- niestety nie udało się wyeliminować rozciągania z trójkątnych obszarów w połączeniu rygla z nogami pylonu. Są to elementy dobetonowane po pierwotnym sprężeniu i pracują w II fazie żelbetu;
- sprężenie usytuowane w osi rygla jest efektywniejsze od sprężenia poniżej rygla. Dodatkowa siła normalna w ryglu przy sprężeniu wariantem osiowym wynosi ok. 42 400 kN, a w wariantcie poniżej rygla 31 500 kN. Większa efektywność sprężenia w osi objawia się większym i bardziej równomiernym ściskaniem rygla;
- sprężenie prostoliniowe rygla niezależnie od położenia względem rygla (w racjonalnych granicach) powoduje większe ściskanie górnych włókien rygla niż dolnych. Z tego względu odciążenie rygla przez naciąg najkrótszych want (zwiększa naprężenia rozciągające górą), przy jednoczesnym doprężeniu rygla, pozwala uzyskać najlepszy rezultat.

5. Podsumowanie

W trakcie badań po 10 latach eksploatacji Mostu Rędzińskiego stwierdzono, że jedynym budzącym niepokój elementem konstrukcji obiektu jest rygiel dolny pylonu. Jego rola dla bezpieczeństwa i trwałości konstrukcji jest fundamentalna. Każde zagrożenie związane z nośnością i stanem technicznym tego elementu powinno być gruntownie analizowane, ponieważ potencjalna awaria rygla przekreśla funkcjonalność całego mostu.

Obecnie występujące zarysowania betonu na konstrukcji rygla świadczą o lokalnie niewystarczającej sile sprężającej. Autorom nie udało się ustalić, kiedy pojawiły się rysy. Fakt ich wystąpienia można łączyć z efektami reologicznymi konstrukcji. Trudno też jest obiektywnie określić wpływ fazowania sprężania rygla na stan obecny. Dodatkowym niekorzystnym elementem są informacje dotyczące wielu rys skurczowych ujawnionych tuż po zabetonowaniu. Niezależnie od występujących niewiadomych zarysowanie rygla ujawniło się w analizach teoretycznych, pomiarach światłowodowych i oględzinach konstrukcji. Jak widać, geneza rys jest trudna do określenia, można przypuszczać,

że rysy wywołane są głównie interakcją rozciągania pochodzącego od rozporu pylonu, krzywoliniowego sprężenia i ciężaru opierających się na ryglu przęsła. Ta interakcja nie pozwala na proste działanie utrzymaniowe przez zmniejszenie reakcji od przęsła (mocniejsze napięcie najkrótszych want), ponieważ efektem jest zarysowanie rygla górą w wyniku działania istniejącego sprężenia. Z kolei pozostawienie obecnych obciążeń na ryglu może generować zarysowania dołem.

Biorąc jednak pod uwagę znaczenie konstrukcji rygla w pracy całego mostu, nie można zostawić problemu bez działań naprawczych. Rygiel pracuje w agresywnym środowisku wodnym szczególnie w okresach zimowych. W takim wypadku rysy wywołują realne zagrożenie korozyjne dla stali splotów sprężających. Ponadto stwierdzono, że rysy nie pojawiły się w początkowym okresie życia mostu. Dlatego fakt ich wystąpienia można tłumaczyć spadkiem/redystrybucją siły sprężającej w czasie. Takie zjawiska są opisane w literaturze i dają się w prosty sposób przewidzieć dla standardowych konstrukcji zginanych [9, 10]. W przypadku pylonu Mostu Rędzińskiego problem jest bardzo trudny do oszacowania z uwagi na złożone i zmienne w czasie stany naprężeń w konstrukcji, która jednocześnie podlega rozciąganiu i znakozmiennemu zginaniu. Wykazano, że połączenie odciążenia rygla z jednoczesnym jego doprężeniem pozwala na redukcję naprężeń rozciągających do zera. Takie działanie naprawcze byłoby wysoce korzystne dla trwałości rygla.

Należy nadmienić, że pomimo zarysowań konstrukcja rygla spełnia swoją funkcję. Poziom sprężenia jest globalnie wystarczający i obecny stan techniczny nie zagraża bezpieczeństwu mostu.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Żółtowski K., Binczyk M., Kalitowski P., Ekspertyza techniczna konstrukcji Mostu Rędzińskiego części podwieszanej. Bilans po 10 latach eksploatacji, KBP Żółtowski, Gdańsk, 2021
- [2] Biliszczuk J., Onysyk J., Most Rędziński w ciągu autostradowej obwodnicy Wrocławia, Przegląd Komunikacyjny 5–6/2012, str. 30–37
- [3] Dokumentacja kolaudacyjna po oddaniu Mostu Rędzińskiego, Materiały GDDKiA, Wrocław
- [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 ciągów jako element diagnostyki wybranych konstrukcji mostowych, Archiwum Instytutu Inżynierii Lądowej 26/2018, str. 219–227, <https://doi.org/10.21008/j.1897-4007.2018.26.17>
- [6] Sieńko R., Bednarski Ł., Howiacki T., Koryciński J., Pomiar deformacji mostu podwieszanego z wykorzystaniem światłowodowych czujników geometrycznie ciągłych DFOS, Wrocławskie Dni Mostowe Mosty Hybrydowe Wrocław 29–30.11.2018
- [7] PN-EN 1992-1 Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków
- [8] PN-EN 1992-2 Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 2: Mosty z betonu. Obliczenia i reguły konstrukcyjne
- [9] Oleszek R., Projektowanie mostowych konstrukcji sprężonych – wybrane zagadnienia – cz. II. Mosty, 3/2016, str. 30–36
- [10] Gwoździwicz P., Konstrukcje sprężone Cz. 2. Siła sprężająca. Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne, 6/2014, str. 90–95