

dr hab. inż. Krzysztof Żółtowski, prof. PG*

Nadzór naukowy nad projektowaniem i budową mostu przez Wisłę pod Kwidzynem

Bridge over Vistula river near city of Kwidzyn. Scientific supervision on designing and constructing process

Realizacja przeprawy mostowej pod Kwidzynem (więcej na str. 45 – 47) jest jedną z największych inwestycji infrastrukturalnych Pomorza w XXI w. Ranga obiektu i wielkość zaangażowanych środków skłoniły inwestora: Generalną Dyрекcję Dróg Krajowych i Autostrad, Oddział w Gdańsku do powołania Nadzoru Naukowego, którego zadaniem była niezależna weryfikacja założeń projektowych obiektu, wymiarowania oraz wykonanie modeli statycznych i bieżące konsultacje podczas projektowania i realizacji. Zwieńczeniem prac nadzoru naukowego było opracowanie projektu próbnego obciążenia przęseł nurtowych i udział w badaniach odbiorczych. Zadanie to powierzono zespołowi Katedry Mechaniki Budowli i Mostów Wydziału Inżynierii Lądowej i Środowiska Politechniki Gdańskiej.

Most pod Kwidzynem (M4) można zaliczyć do najnowocześniejszych na świecie. Rozpiętość przęseł nurtowych (204 m) przy wysokości konstrukcji 3,5 m, w połączeniu z nowoczesnym układem sprężenia zewnętrznego na dużym mimośrodzie (system extradosed) sprawia, że budowa mostu stała się zadaniem pionierskim. Firma Budimex – będąca wykonawcą – po zapoznaniu się z dokumentacją postanowiła przeprojektować most, aby mogła optymalnie wykorzystać swoje możliwości technologiczne. Zmiany dotyczyły głównie konstrukcji przekroju poprzecznego.

Zadanie nadzoru naukowego

Zadaniem nadzoru naukowego było porównanie pierwotnie zaprojektowanego i zamiennego przekroju poprzecznego (ry-

sunek 1) w kontekście globalnej zgodności. Analizowano charakterystyki geometryczne (tabela), wykonano modele numeryczne obydwu wersji i przeanalizowano ich cechy statyczne. Zmiana przekrojów poprzecznych pomostu, ze względu na zbliżone parametry, miała znikomy wpływ na ugięcie od obciążenia ruchomego i temperatury.

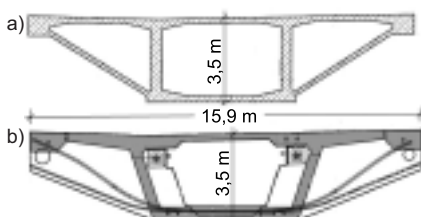
Wprowadzenie zamiennego przekroju poprzecznego przęseł mostu przez rzekę Wisłę pod Kwidzynem nie skutkowało zmianą właściwości użytkowych związanych ze stanem granicznym użytkowania konstrukcji. Wymagało opracowania całkowicie nowej dokumentacji wykonawczej, w której kluczowym elementem były zakotwienia want w pomoście. Nadzór naukowy przeprowadził wiele analiz wyko-

rzystanych w procesie projektowania i budowy poprzecznic wantowych oraz bieżąco kontrolował proces projektowania.

Analiza konstrukcji

Na potrzeby analiz opracowano model numeryczny w systemie SOFiSTiK wygenerowany na podstawie dokumentacji wykonawczej. Kable sprężenia centrycznego i kable zewnętrzne prowadzone wewnątrz skrzyni przekroju modelowano jako obciążenia o właściwościach sprężonych z odkształceniami przęśla, wykorzystując możliwości oprogramowania SOFiSTiK. Sprężenie wantami zrealizowano klasycznie z wykorzystaniem elementów ciągnowych z zadaniem wstępnym odkształceniem. Trasę kabli generowano zgodnie z danymi projektu wykonawczego.

W wyniku analiz uwzględniających etapowanie budowy i reologię otrzymano stany naprężeń w żelbetowych przekrojach przęseł. Przeprowadzono również ocenę układu wantowego i stopnia wyęźnienia lin, którego wartość maksymalną określono na 53% siły zrywającej (ostatecznie siły w linach nieznacznie wzrosły ze względu na większy niż przewidywano ciężar własny betonu). Zmienność sił w linach pod obciąż-



Rys. 1. Przekrój poprzeczny przęśla: pierwotnie zaprojektowany (a) i wersja zrealizowana (b)

Charakterystyka geometryczna przekrojów przęseł pierwotnie zaprojektowanych i zamiennych

Charakterystyka	Przekroje pierwotne [mm]		Przekroje zamienne [mm]		
	podporowy (grubość średnika 800)	przęsłowy (grubość średnika 450)	podporowy (grubość średnika 600)	przęsłowy (grubość średnika 400)	pylonowy (grubość średnika 800)
E [MPa]	39941	39941	39941	39941	39941
A [m ²]	14,436	11,216	13,93	12,11	16,21
J [m ⁴]	22,82	18,11	23,24	19,12	26,75
EA [MN]	576588	447978	556338	483686	647244
EJ [MNm ²]	911454	723332	928229	763672	1068422

* Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska

zeniem ruchomym określono na $5 \div 16\%$ (średnio 9,4%).

W wyniku kompleksowej analizy statyczno-wytrzymałościowej sformułowano następujące wnioski:

- w świetle norm krajowych analizowany most jest konstrukcją podatną. Odnotowano duże deformacje w czasie sprężania zewnętrznego i duży wpływ reologii na kształt niwelety, co jest niekorzystne z uwagi na trudny do przewidzenia proces pełzania i skurczu oraz trudne do określenia na etapie projektowania parametry betonu (głównie moduł Younga);

- dopuszczalne wartości wytrzymałości betonu na ściskanie nie zostały przekroczone, natomiast wartości dopuszczalnego wytrzymałości na rozciąganie zostały miejscowo przekroczone nad podporą w osi 24. Było to związane z trudnościami dotyczącymi obiektywnego określenia ciężaru objętościowego betonu. Ostatecznie problem przestał istnieć, gdy okazało się, że beton jest cięższy, niż przewidywano w obliczeniach;

- z uwagi na duży wpływ procesów reologicznych na kształt niwelety drogi zalecono rozważenie korekty siły sprężającej po zakończeniu procesu pełzania. W rzeczywistości, ze względu na opóźnienia w budowie, moment sprężenia konstrukcji wantami nastąpił, gdy wiek betonu znacznie ograniczył procesy reologiczne. Zalecono również opracowanie wstępnych strzałek montażowych i uzgodnienie z projektantem drogi dopuszczalnych odchyłek niwelety jezdni.

W ramach dalszych prac studyjnych zbadano potencjalne efekty niekorzystnych zjawisk związanych z dynamiczną pracą przęsła i możliwość parametrycznego wzbudzenia want oraz efekty utraty dowolnej wanty lub pary want. Analizy wykazały możliwość parametrycznego wzbudzenia want jako odpowiedzi na drgania przęsła.

Okazało się też, że brak dowolnej pary want nie powoduje przekroczenia naprężeń granicznych w pomoście i pylonach zarówno od obciążeń długotrwałych, jak i długotrwałych oraz ruchomych. W najbardziej niekorzystnym przypadku naprężenia rozciągające w pomoście wynoszą 1,06 MPa, a w najbardziej wyężonym pylonie 2,72 MPa. Inaczej jest w przypadku braku pojedynczej wanty. Taka sytuacja może zaistnieć, jeżeli system kotwienia splotów na siodle okaże się skuteczniejszy, niż przewidywano. Wtedy brak dowolnej pojedynczej liny powoduje znaczne przekroczenia naprężeń granicznych w pylonie

zarówno od obciążeń długotrwałych, jak i długotrwałych oraz ruchomych. W najbardziej niekorzystnym przypadku, a więc awarii najdłuższej liny, naprężenia rozciągające w pylonie wynoszą 10,90 MPa w przypadku obciążeń długotrwałych i 14,0 MPa w przypadku obciążeń długotrwałych i ruchomych. Utrata wanty lub pary want nie zagraża stanom naprężeń w przęsłach. Wartości sił ekstremalnych w olinowaniu po utracie wanty lub pary want mieszczą się w granicach $39 \div 61\%$ siły zrywającej.

Badania odbiorcze

Badania odbiorcze prowadziły zespoły Politechniki Śląskiej (lider zespołu), Politechniki Gdańskiej i Akademii Górniczo-Hutniczej z Krakowa. Wiadukty i estakady objęto standardową procedurą badawczą. Do obciążenia statycznego wykorzystano samochody ciężarowe o średnim ciężarze ~320 kN i testy dynamiczne. Próbnego obciążenia estakad E2 i E3 potwierdziło prawidłowość projektu i wykonania. W przekroju środkowym przęsła estakady E1 zaobserwowano zarysowanie na całej wysokości belki (do spodu płyty). W efekcie przeprowadzonych badań stwierdzono brak projektowanej siły sprężającej w przęsle. Zalecono wzmocnienie przez dodanie biernego zbrojenia w postaci blachy stalowej. Powtórzone po naprawie obciążenie próbne wykazało prawidłową pracę przęsła.

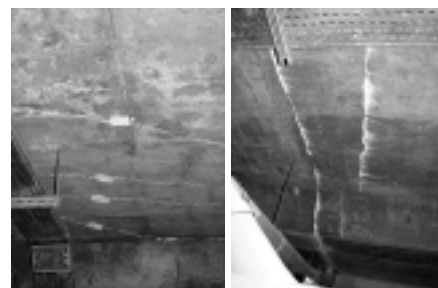
Badania odbiorcze mostu M4 podzielono na kilka etapów:

- oględziny konstrukcji, identyfikacja potencjalnych miejsc groźących zarysowaniem, montaż plomb gipsowych;
- badania statyczne konstrukcji obiektu pod obciążeniem próbnym;
- badania statyczne konstrukcji obiektu pod obciążeniem próbnym – pomiar naprężeń (odkształceń) konstrukcji;
- badania dynamiczne;
- badania dynamiczne – pomiar częstotliwości drgań własnych oraz identyfikacja dekrementów tłumienia lin systemu sprężenia na dużym mimośrodku konstrukcji przęsła (want);
- analiza wyników pomiarów ugięć przęsła oraz osiadań podpór wywołanych obciążeniami statycznymi wraz z oceną sztywności;
- analiza wyników pomiarów drgań z określeniem podstawowych charakterystyk dynamicznych konstrukcji.

Oględziny spodu konstrukcji wykazały, że płyta jezdni miała wiele wcześniej zidentyfikowanych rys powstałych w pierwszej

fazie budowy, gdy działało tylko sprężenie „osiowe”. Po wprowadzeniu ostatecznego sprężenia rysy powinny ulec zamknięciu i pozostać w tym stanie w fazie eksploatacji. Celem oględzin konstrukcji wewnątrz skrzynki przęsła była identyfikacja miejsc zarysowań i montaż plomb gipsowych (fotografia). Nie zauważono innych rys oraz objawów mogących świadczyć o złym lub niepokojącym stanie technicznym. Lokalne usterki wskazano wykonawcy.

Próbne obciążenie statyczne wiaduktu rozpoczęto 12 lipca 2013 r. Wykorzystano 28 czteroosiowych samochodów ciężarowych, o całkowitej masie załadowanego pojazdu ~32,0 t. Łączna masa wszystkich samochodów była o 0,84% większa od przyjętej w projekcie.



Przykładowe zarysowania płyty górnej wewnątrz przekroju i kontrolne plomby gipsowe
[Fot. A. Kozakiewicz]

Pomierzono przemieszczenia i ugięcia pod próbnym obciążeniem statycznym, a dodatkowo wykonano badania uzupełniające polegające na pomiarze naprężeń w wyznaczonych punktach konstrukcji (przekroje przęsłowe i podporowe głównych przęsła) przy użyciu tensometrów strunowych i aparatury rejestrującej firmy GEOKON. Natomiast do pomiaru przyspieszeń w czasie badań dynamicznych wykorzystano czujniki akcelerometryczne o dokładności pomiaru $\pm 0,01 \text{ m/s}^2$ wraz z aparaturą rejestrującą firmy APEK. Zespół badawczy z AGH w Krakowie prowadził też pomiary doświadczalne za pomocą georadaru.

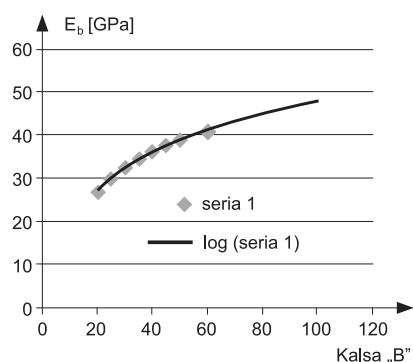
Podczas próbnego obciążenia konstrukcja była poddana ciągłej obserwacji. Zwracano szczególną uwagę na ewentualne rysy i deformacje albo inne widoczne uszkodzenia. Zrealizowano wszystkie zaplanowane ustawienia pojazdów. W celu wykluczenia ewentualnych zarysowań badania rozszerzono o dwa dodatkowe schematy. Wyniki ugięć i odkształceń porównano z wielkościami teoretycznymi. W tym celu zaktualizowano model numeryczny mostu opracowany w projekcie próbnego ob-



ciażenia. Wprowadzono nieznaczną korektę obciążenia (0,84%) oraz wykonano obliczenia dla dwóch granicznych wielkości modułu Younga betonu:

- moduł sprężystości zgodny z danymi projektu wykonawczego $E_b = 45,0$ GPa (model A);
- moduł sprężystości określony na podstawie wytrzymałości próbek betonu pobranych podczas betonowania $E_b = \sim 59,0$ GPa (model B).

Wyznaczono ugięcia od obciążenia pojazdami rzeczywistymi i porównano z teoretycznymi w przypadku poszczególnych ustawień obciążenia próbnego dla obu modeli. Model B został wykonany zgodnie z sugestią projektanta. Nie ma jednak technicznych podstaw do przyjęcia $E_b = 59,0$ GPa jako wartości uśrednionej dla analiz teoretycznych. Aproksymacja danych dotyczących E_b wg PN-91/S-10042 (rysunek 2) wskazuje na dużo mniejsze wartości. Zgodnie z DIN 1045-1 beton klasy C100/115 ma $E_b = 45,2$ GPa.



Rys. 2. Prognoza dla E_b wyznaczonego wg PN-91/S-10042

Uzyskane wyniki badań w przypadku $E_b = 45$ GPa należy uznać za miarodajne, chociaż na zgodność teorii z praktyką rzutuje problem uwzględnienia współpracy kap chodnikowych i nawierzchni. Wyniki badań świadczą o dobrej sztywności prześseł i prawidłowo przyjętym do wymiarowania modelu obliczeniowym. Uzyskane maksymalne ugięcia sprężyste stanowią 90% wartości teoretycznych. Ugięcia trwałe wynoszą od 0% do 8% ugięć całkowitych, a zatem również spełniają warunek normowy nieprzekroczenia poziomu 10%.

Wyniki pomiarów odkształceń wskazują na poprawną pracę konstrukcji. Porównano pomierzone i teoretyczne naprężenia (odkształcenia) w poszczególnych przekrojach i punktach pomiarowych dla poszczególnych ustawień pojazdów. W analizie

wyników uzyskanych z pomiarów i teoretycznych uwzględniono model A oraz model B.

Badania dynamiczne estakady przeprowadzono 13 lipca 2013 r. po próbnym obciążeniu statycznym. Pomiarami objęto prześseł nr 2 i 3. Pomierzone wielkości przyspieszeń okazały się relatywnie małe i dlatego tylko w przypadku niektórych zidentyfikowanych częstości drgań własnych udało się określić tłumienie. Program badań dynamicznych został w pełni zrealizowany i był zgodny z projektem próbnego obciążenia. **Prześseł mostu głównego są niepodatne na wpływy dynamiczne. Zakwalifikowanie mostu do konstrukcji niepodatnych dynamicznie jest ważnym wnioskiem w kontekście niespełnienia przez most kryterium SGU (przekroczone ugięcia od obciążeń ruchomych) wg PN-91/S-10042.**

W ramach badań odbiorczych wykonano również pomiar drgań lin podwieszenia w stanie bezużytkowym celem określenia ich częstotliwości drgań własnych oraz logarytmicznych dekrementów tłumienia (LDT). Wymuszenia wiatru wykonywano z użyciem liny syntetycznej. Czujniki akcelerometryczne montowano możliwie blisko środka długości lin podwieszenia. Wiatr wzbudzano zgodnie z przewidywaną pierwszą częstotliwością drgań własnych. Swobodna odpowiedź drgań pozwoliła określić szukane parametry dynamiczne poszczególnych lin. Ze względu na zbyt małą długość (wymagana zbyt duża siła wzbudzenia) nie można było wzbudzić wiatru najkrótszych (najbliżej pylonu). Wszystkie badane wiatry, w przypadku dominującej częstości drgań własnych, charakteryzują się wartością LDT większą lub równą 2,0 i spełniają wymagania projektowe.

Podsumowanie

Most pod Kwidzynie to niewątpliwie pionierska konstrukcja, która obok mostu Rędziańskiego i kilku innych obiektów stawia polski dorobek ostatnich lat bardzo wysoko w Europie i świecie.

Projektowanie i budowa mostu przez Wisłę pod Kwidzynie zakończyły się spektakularnym sukcesem. Wykorzystując najnowsze technologie i materiały, wzniesiono unikatowy obiekt w skali światowej.

W świetle Eurokodów mosty należą do najbardziej odpowiedzialnych konstrukcji i są zaliczane do klasy konsekwencji zniszczenia CC3 i klasy niezawodności RC3, ze względu na specjalne wymagania dotyczące współczynników bezpieczeń-

stwa oraz warunków projektowania i wykonania budowli. W projektowaniu wymagany jest audyt dokumentacji przez tzw. trzecią stronę, a więc jednostkę konsultingową całkowicie niezależną od inwestora i projektanta. Pomimo opóźnień w implementacji jednolitych norm europejskich do projektowania mostów w przypadku wielu odpowiedzialnych inwestycji polski inwestor publiczny realizuje wymaganie niezależnego audytu dokumentacji przez nieformalną instytucję nadzoru naukowego.

Należy podkreślić, że most pod Kwidzynie to niewątpliwie pionierska konstrukcja, która obok mostu Rędziańskiego i kilku innych obiektów stawia polski dorobek ostatnich lat bardzo wysoko w Europie i świecie. Niestety, pionierskie działania zawsze są obciążone zwiększonym ryzykiem, a w następstwie nieprzewidywanymi kosztami. Błędy i potknięcia towarzyszą działalności twórczej szczególnie w realizacji oryginalnych przedsięwzięć. Dlatego środowisko inwestorów, projektantów i wykonawców powinno wypracować mechanizm realizacji projektów uznający błąd za rzeczywiste zjawisko.

Streszczenie

W artykule przedstawiono rezultaty prac niezależnej grupy konsultingowej związanych z projektowaniem i budową mostu przez Wisłę pod Kwidzynie. Autor przedstawił syntetyczne wyniki analiz oryginalnych dokumentacji projektowych i zamiennych rozwiązań podyktowanych aspektami technologicznymi. Proces projektowy i budowa zakończyły się sukcesem uwieńczonym badaniem pod próbnym obciążeniem i przekazaniem mostu do użytkowania. Most przez rzekę Wisłę pod Kwidzynie jest przedsięwzięciem pionierskim na skalę europejską i pomimo wielu trudności projektowych i wykonawczych stanowi jakościowy wkład w rozwój teorii konstrukcji technologii i zarządzania spektakularnym procesem inwestycyjnym.

Słowa kluczowe: most, extradosed, sprężenie, kablobeton, technologia, budowa, próbne obciążenie.

Abstract

The paper presents a report from consulting work as independent supervisor during designing and constructing one of the biggest extradosed bridges in the world. Synthetic results of several analyses are presented. Side load test is described. Final conclusions are included.

Keywords: bridge, extradosed, post tension, technology, bridge load test.