

dr hab. inż. Krzysztof Żółtowski, prof. PG^{1*)}
dr inż. Tomasz Romaszkiwicz¹⁾

Nośność konstrukcji gruntowo-łukowej prefabrykowanego wiaduktu w świetle obliczeń numerycznych i badań „in situ”

Capacity of soil-concrete arch construction of prefabricated viaduct in relation to numerical analysis and test load

DOI: 10.15199/33.2015.02.01

Streszczenie. W artykule przedstawiono analizy przeprowadzone dla wiaduktu WK-15 Pomorskiej Kolei Metropolitalnej wykonanego w technologii łuków prefabrykowanych przykrytych gruntem (system TechSpan). W celu weryfikacji obliczeń numerycznych wykonano próbne obciążenie konstrukcji. Przedstawiono wyniki pomiarów naprężeń i przemieszczeń konstrukcji. Odniesiono się krytycznie do zastosowanego modelu obliczeniowego.

Słowa kluczowe: wiadukt kolejowy, betonowo-gruntowa konstrukcja łukowa.

Abstract. The paper presents analysis made for viaduct WK-15 of Pomeranian Metropolitan Railway line. Viaduct was designed as precast concrete arch sunk in the ground (TechSpan system). To verify numerical calculations, the test load was realized. The results of stress and displacements measurements are presented in relation to theoretical analysis.

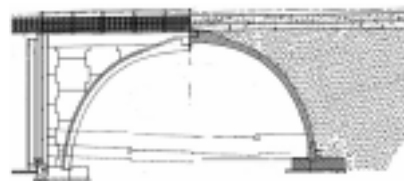
Keywords: railway viaduct, soil-concrete arch construction.

Obiekty mostowe typu TechSpan należą do sklepionych mostów łukowych całkowicie zaszypanych gruntem. Ich głównymi elementami są sztywne prefabrykaty żelbetowe oparte na niezależnych ławach bądź wspólnej płycie fundamentowej, połączone ze sobą w kluczu, odzwierciedlające schemat statyczny łuku dwu- lub trójprzegubowego. Kształt sklepienia może być kołowy lub paraboliczny i każdorazowo jest optymalizowany w zakresie skrajni ruchu, rozpiętości, wyniosłości oraz wymaganych obciążeń (fotografia 1). Idea rozwiązania na-

wiązuje do powszechnie stosowanych na świecie i w Polsce obiektów w konstrukcji gruntowo-powłokowej z blach falistych [1, 2], ale ze względu na znacznie większą sztywność charakteryzują się one mniejszą podatnością. W związku z tym, że z natury łuki są wrażliwe na zmienne obciążenia ruchome, istotna jest zgodność krzywizny łuku z tzw. linią ciśnienia w rdzeniu przekroju. Taki układ powoduje, iż w przekroju dominują siły osiowe. Osiągnięcie takiego efektu jest oczywiście możliwe pod ściśle zdefiniowanym ciężarem stałym. Obiekty mostowe podlegają zmiennym obciążeniom ruchomym i dlatego wystąpienie zginięcia jest nieuniknione.

Charakterystyka obiektu

W ciągu linii kolejowej Pomorskiej Kolei Metropolitalnej w Gdańsku zrealizowano cztery obiekty typu TechSpan [3, 4]. Z uwagi na pierwsze w Polsce zastosowanie systemu i jego wbudowanie na linii kolejowej, przeprowadzono badania połowe weryfikujące założenia projektowe i jakość wykonania. Wytypowano obiekt WK-15 z niewielką warstwą zasypki nad kluczem konstrukcji (rysunek 1), długości całkowitej $L = 13,0$ m, rozpiętości w świetle $B = 11,7$ m, wyniosłości w świetle $H = 5,7$ m i grubości płyty $e = 0,3$ m.



Rys. 1. Wiadukt WK-15 – widok i przekrój podłużny [3]

Fig. 1. Viaduct WK-15 – side and cross-sectional view [3]

Materiały konstrukcyjne zastosowane w obiekcie: beton konstrukcyjny prefabrykatów łukowych C35/45; beton układany podczas montażu C30/37; podlewka z zaprawy niskoskurczowej o wytrzymałości min. 40 MPa do wypełnienia wnęki prowadzącej; stal BSt 500S.

W przypadku obiektu WK-15 przyjęto II kategorię geotechniczną. W badanym podłożu, poniżej powierzchniowej warstwy nasypów, rozpoznano grunty spoiste, tj. pyły, gliny piaszczyste, gliny pylaste, piaski gliniaste, pyły burowęgłowe i burowęgle (kra mioceniańska) a także niespoiste, tj. piaski drobne średnie, a więc grunty nośne. Zlokalizowano wodę gruntową w postaci zwierciadła swobodnego i napiętego w gruntach piaszczystych zalegających na stropie gruntów spoistych oraz przewarstwiałających te grunty. Zwierciadło napięte stabilizowało się w poziomie zwierciadła swobodnego na średniej głębokości ok. 18,0 m ppt.



[Fot. T. Romaszkiwicz]

Fot. 1. Wiadukt WK-15 w ciągu Pomorskiej Kolei Metropolitalnej

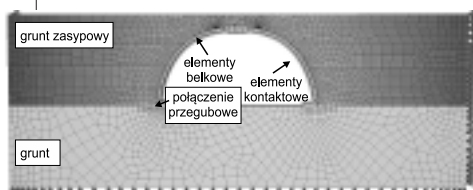
Photo. 1. Viaduct WK-15 – Pomeranian Metropolitan Railway line

¹⁾ Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska

^{*)} Autor do korespondencji:
e-mail: k.zoltowski@bridges.pl

Obliczenia

Na podstawie dokumentacji wykonawczej [3] przygotowano model numeryczny wiaduktu (rysunek 2). Analizę wykonano jako nieliniową w płaskim stanie odkształceń (PSO), uwzględniając fazy budowy. Konstrukcję nośną opisano elementami belkowymi o wymiarach 30 x 100 cm, opartymi przegubowo lub utwierdzonymi w fundamencie, a materiał zasypowy i rodzimy modelem Mohra. Grunt zasypowy podzielono na warstwy ($h = 1,5$ m) umożliwiające analizę stopniowego zasypywania obiektu. Konstrukcję z gruntem połączono za pomocą elementów kontaktowych. Model obciążono k^2 wg PN i dodatkowo trójosiowym samochodem ciężarowym o ciężarze całkowitym 270 kN.



Rys. 2. Wizualizacja modelu numerycznego wiaduktu WK-15 w środowisku SOFiSTiK [5]

Fig. 2. Visualization of numerical model of WK-15 viaduct in SOFiSTiK software [5]

W wyniku przeprowadzonych analiz otrzymano ekstremalne wartości sił wewnętrznych i naprężeń w żelbetowych prefabrykatach łukowych. Charakterystyczne naprężenia rozciągające w betonie osiągnęły $\sim 7,6$ MPa. Wartość ta jest większa od charakterystycznej wytrzymałości betonu (C35/45) na rozciąganie $R_{btk0,05} = 2,3$ MPa. Przekrój żelbetowy będzie zatem pracował w drugiej fazie. Wyliczone naprężenia rozciągające w zaprojektowanym zbrojeniu ($\varnothing 16$ co ~ 10 cm) wyniosły 186 MPa.

Sformułowano następujące wnioski z analiz:

- w przypadku obciążenia kolejowego k^2 obiekty będą pracować w drugiej fazie;
- wystarczająca jest ilość zbrojenia podłużnego potrzebna do zapewnienia warunków nośności;
- przyczyną zarysowania prefabrykatów może być ciężki transport poruszający się po obiekcie podczas budowy.

Badania polowe

Przed oddaniem obiektu do użytkowania przeprowadzono sprawdzające badania pod obciążeniem próbnym

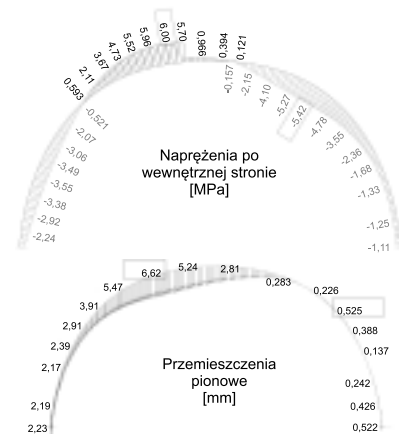
w postaci płyt drogowych (fotografia 2) o ciężarze całkowitym ~ 750 kN, przykładanym na powierzchni 3 x 4,7 m. Przed badaniami wykonano obliczenia statyczne, wykorzystując wcześniej opisany model. Z analiz teoretycznych otrzymano wielkości sił wewnętrznych i przemieszczenia pokazane na rysunku 3.

Zamontowano 9 luster do pomiaru geodezyjnego przemieszczeń i 6 ekstensometrów strunowych na kierunku obwodowym. Ekstensometry umieszczono w miejscach zidentyfikowanych rys. Pomiaru odkształceń rejestrowano w odstępie 15 s, natomiast pomiary geodezyjne wykonywano odpowiednio dla 30, 50, 66, 83 i 100% docelowego obciążenia. Sposób ułożenia obciążenia dobrano tak, aby uzyskać najbardziej niekorzystny schemat (asymetryczne) powodujący 76% normowego momentu zginającego i 74% siły normalnej. Należy podkreślić, że badanie nie było próbą nośności, lecz elementem weryfikującym model obliczeniowy. Wyniki pomiaru przemieszczeń luster 2 – 6 poka-



Fot. 2. Wiadukt WK-15 pod obciążeniem próbnym

Photo. 2. Viaduct WK-15 under the test load



Rys. 3. Obliczone naprężenia obwodowe po wewnętrznej stronie konstrukcji pod obciążeniem próbnym; rozciąganie – $S_{max} = 6$ MPa; ściskanie – $S_{max} = 5,4$ MPa; przemieszczenia pionowe $y_{max} = 6,62$ mm [5]

Fig. 3. Calculated stresses at inner side of the construction under the test load. Tension – $S_{max} = 6,0$ MPa, Compression – $S_{max} = 5,4$ MPa. Calculated vertical displacement $y_{max} = 6,62$ mm [5]

zowano w tabeli. Największe ugięcia zanotowano na lustrze nr 4 znajdującym się bezpośrednio pod obciążeniem (wartość 0,5 mm) oraz lustrze nr 5 umiejscowionym w środku rozpiętości (wartość 0,48 mm). Należy zwrócić uwagę, że po odciążeniu konstrukcja wróciła do stanu „przed obciążeniem”.

Wyniki pomiaru przemieszczeń luster 2 – 6 w czasie badania

Measured displacement of geodetic mirrors 2 – 6

Poziom obciążenie [%]	L2 y [mm]	L3 y [mm]	L4 y [mm]	L5 y [mm]	L6 y [mm]
33	-0,12	-0,06	-0,20	-0,18	0,06
50	-0,12	-0,16	-0,30	-0,28	-0,14
66	-0,12	-0,16	-0,40	-0,28	-0,04
83	-0,12	-0,16	-0,50	-0,48	-0,04
100	-0,22	-0,26	-0,50	-0,48	-0,04
66	-0,12	-0,16	-0,40	-0,28	-0,04
33	-0,02	-0,06	-0,20	-0,18	-0,06
Brak	-0,02	0,04	0,10	0,02	0,06

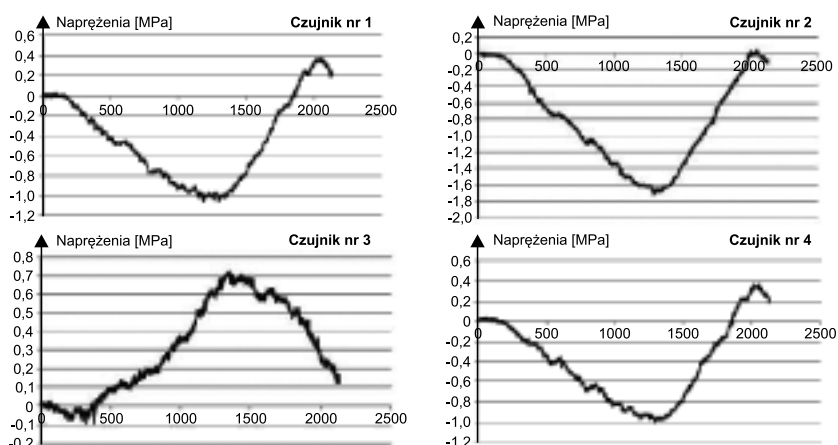
Pozostałe wartości przemieszczeń pionowych wynikają z osiadań trwałych, pracy termicznej oraz dokładności instrumentu. Jednocześnie prowadzono pomiar odkształceń na kierunku obwodowym we wcześniej określonych miejscach. Naprężenia w betonie odpowiadające zmierzonym odkształceniom przedstawiono na rysunku 4. Określono je na podstawie przeprowadzonych badań wcześniej pobranych próbek betonu, uwzględniając moduł Younga $E = 36,4$ GPa dla betonu klasy B40.

Pomierzone naprężenia rozciągające świadczą o pracy konstrukcji w I fazie. Otrzymane mniejsze wartości przemieszczeń i naprężeń od wcześniej wyliczonych wartości teoretycznych (rysunek 5) pokazują niedoskonałość modelowania MES PSO. Należy jednak podkreślić, że zastosowany model PSO pozwolił uzyskać wyniki zbliżone z wcześniejszymi analizami przeprowadzonymi przez projektantów [4] i określa stan konstrukcji jako bezpieczny.

Podsumowanie

Przeprowadzone badania potwierdziły po raz kolejny niedoskonałość modeli teoretycznych opisujących konstrukcje, w których istotnym elementem jest zasyпка gruntowa. Na szczęście zastosowane w analizie modele teoretyczne opisują zachodzące zjawiska dużo bardziej niekorzystnie niż badania próbne rzeczywistego obiektu. Powodem takiej

[Fot. T. Romaszkiwicz]



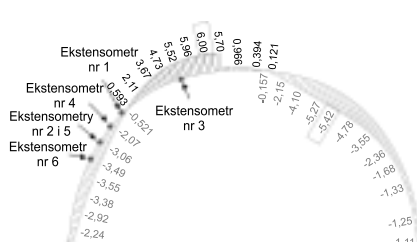
Rys. 4. Napężenia w betonie w miejscu montażu ekstensometrów [5]

Fig. 4. Stresses of concrete at the place of strain gage installation [5]

sytuacji może być modelowanie zagadnienia w obszarze 2D lub nieprecyzyjny opis parametrów kontaktu pomiędzy powierzchnią betonową prefabrykatu i zasypką gruntową.

Zagadnienia te są przedmiotem rozważań i badań prowadzonych przez autorów. Wnioski z przeprowadzonej analizy:

- pod badanym obciążeniem obiekt pracował prawidłowo i nie stwierdzono żadnych oznak jego przeciążenia;
- zarejestrowane napężenia są mniejsze niż wyznaczone teoretycznie,



Rys. 5. Położenie ekstensometrów w przekroju w nawiązaniu do rezultatów obliczeń statycznych [5]

Fig. 5. The place of strain gage installation according to numerical analysis results [5]

co świadczy o lepszej (niż założona w PSO) współpracy grunt-konstrukcja;

- zarejestrowano bardzo małe przemieszczenia pionowe łuku, znacznie mniejsze od wartości wyliczonych w modelu numerycznym, co również potwierdza lepsze warunki pracy niż w założeniach teoretycznych.

W świetle przeprowadzonych obliczeń i badań próbnych stwierdzono, że łukowe wiadukty prefabrykowane zasypane gruntem mają duże rezerwy nośności i tym samym są atrakcyjną alternatywą dla innych klasycznych rozwiązań małych obiektów mostowych. Systemy łukowych obiektów inżynierskich z prefabrykatów żelbetowych mogą służyć m.in. do przeprowadzenia drogi, szlaku kolejowego, pieszo-rowerowego lub dzikich zwierząt.

Literatura

- [1] Janusz L., Madaj A.; Obiekty inżynierskie z blach falistych. Projektowanie i Wykonawstwo. WKiŁ, Warszawa 2007.
- [2] Machelski C.; Modelowanie obiektów mostowych gruntowo-powłokowych. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne. Wrocław 2008.
- [3] Wiadukt WK-15 Projekt wykonawczy – Transprojekt Gdański 2014.
- [4] Wiadukt WK-15 Projekt Technologiczny – Freyssinet Polska.
- [5] Raport z próbnego obciążenia badawczego wiaduktu kolejowego WK-15 Pomorskiej Kolei Metropolitalnej – KBP Żółtowski 2014.



Freysinet Polska Sp. z o.o.

ul. Szyszkowa 20, 02-285 Warszawa
tel.: +48 22 203 17 00, fax: +48 22 203 17 22
e-mail: biuro@freysinet.pl <http://www.freysinet.pl>



Freysinet Polska sp. z o.o. jest Wykonawcą Specjalistycznych Prac Budowlanych w dziedzinach:

TECHNOLOGIE BUDOWY

- nasuwanie podłużne
- betonowanie metodą wspornikową
- montaż segmentów
- podnoszenie ciężkich elementów

GEOTECHNIKA

- grunt zbrojony
- łukowe obiekty inżynierskie z prefabrykatów żelbetowych typu TechSpan

NAPRAWA KONSTRUKCJI INŻYNIERSKICH

- kompleksowa naprawa konstrukcji inżynierskich z zastosowaniem najnowszych technologii
- wzmocnienie konstrukcji inżynierskich
- sprężanie zewnętrzne – Niskotarciowy System Sprężania NSS
- pręty sprężające

NOWE KONSTRUKCJE

- dostawa i montaż: tożysk mostowych, dylatacji mostowych, kotew talerzowych i przyłączyeniowych oraz taśm uszczelniających typu FreyTech
- sprężanie monolitycznych konstrukcji żelbetowych
- projektowanie i sprężanie stropów
- wykonywanie sprężanych płyt na gruncie
- podwieszanie konstrukcji mostowych

