



ANALIZA NOŚNOŚCI BLACHOWNICOWEJ KONSTRUKCJI DŹWIGARA SKRZYNKOWEGO MOSTU W CZASIE NASUWANIA PODŁUŻNEGO

KRZYSZTOF ŻÓŁTOWSKI, *kszysztof.zoltowski@wilis.pg.gda.pl*

MICHAŁ DRAWC

MIKOŁAJ BINCZYK

Politechnika Gdańska

Streszczenie: W referacie opisano konstrukcję prześel mostu drogowego przez Wisłę w Kamieniu (woj. Lubelskie). Wykonawca przewidział montaż konstrukcji przez nasunięcie podłużne ze wspornikiem o rekordowej długości 108 m. W wyniku niedopracowanej technologii nasuwki już w początkowej fazie montażu dźwigary uległy uszkodzeniom polegającym na plastycznym wyboczeniu środników. W referacie opisano alternatywny projekt nasuwki, który został szczęśliwie zrealizowany. W podsumowaniu zebrano ogólne wnioski dotyczące przyczyn pierwotnych niepowodzeń i przemyslenia związane ze zrealizowanym projektem nasuwki.

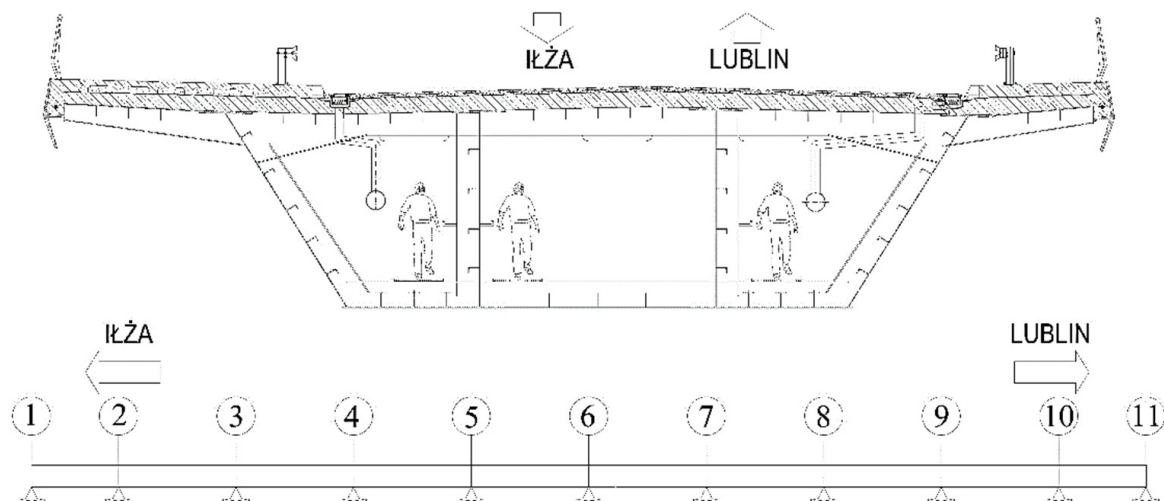
Słowa kluczowe: most, nasuwanie podłużne, wyboczenie, nośność środników, blachownica, wspornik.

1. Wstęp

Technologie budowy mostów są opracowywane głównie pod kątem oceny kosztów realizacji budowy. Większość dużych obiektów mostowych w Polsce realizowano w całości lub w części przez nasunięcie podłużne [1]. Metodę tą charakteryzuje skupienie większości prac związanych z montażem na stanowisku montażowym ułożonym za przyczółkami. Dzięki temu możliwe jest znaczne obniżenie kosztów budowy w szczególności jeżeli budowany obiekt posiada znaczną długość i pokonuje tereny trudno dostępne dla sprzętu budowlanego (bagna, rzeki). Nasuwanie podłużne wymaga jednak uwzględnienia stanów montażowych w projekcie konstrukcji. Zbagatelizowanie lub niedoszacowanie zjawisk towarzyszących nasuwce może znacznie utrudnić lub nawet zniweczyć całe przedsięwzięcie.

2. Charakterystyka konstrukcji obiektu

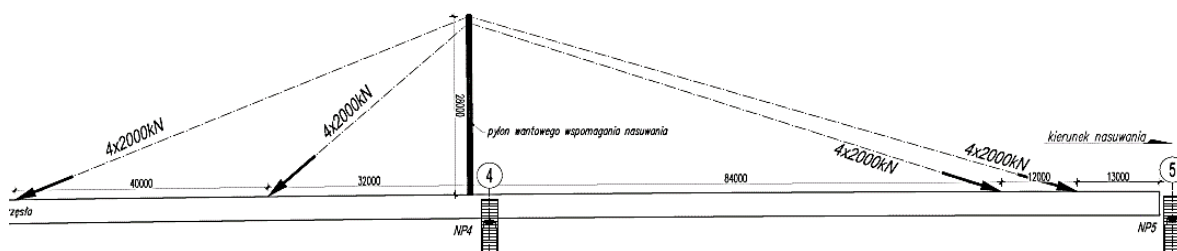
Most przez Wisłę w Kamieniu [2] (woj. lubelskie) to obiekt drogowy o schemacie statycznym belki ciągłej dziesięcioprzęsłowej ($80,00 + 8 \times 108,00 + 80,00$ m). Całkowita długość obiektu wynosi 1024,00 m. Konstrukcję nośną stanowi stalowa skrzynka trapezowa, trzykomorowa o stałej wysokości maksymalnej 3,75 m (rys. 1). Środniki pionowe i ukośne skrzynki wykonane z blach o grubościach 10, 16, 20 lub 24 mm posiadają żebra z kątowników walcowanych $200 \times 100 \times 12$ mm. Skrzynka zespolona jest z żelbetową płytą pomostu grubości 0,28 m za pomocą zgrzewanych kołków stalowych. Całkowita szerokość pomostu obiektu wynosi 19,94 m. Most został zaprojektowany na klasę obciążenia A, oraz STANAG 2021 klasy 150 według PN-85-S-10030.



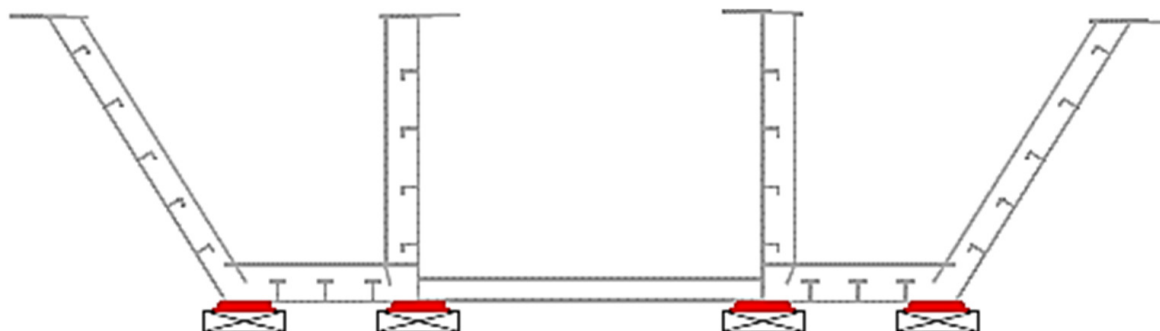
Rys. 1. Schematyczny widok z boku i typowy przekrój poprzeczny dźwigara skrzynkowego [2]

3. Uszkodzenia konstrukcji podczas realizacji nasuwania

Zaplanowano montaż stalowej konstrukcji nośnej poprzez nasuwanie podłużne scalonych elementów konstrukcji z brzegów Wisły (od strony Iłży i Lublina). Maksymalna długość nasuwanej konstrukcji od strony Iłży miała wynosić 536,80 m, natomiast od strony Lublina 487,20 m. Aby uniezależnić się od wysokiej wody lub kry w korycie rzeki i na terenach zalewowych zaplanowano nasuwkę bez dodatkowych podpór montażowych. Przęsła będące w fazach montażu wspornikami wzmocniono układem wantowym (rys. 2). Nasuwanie konstrukcji po obu stronach Wisły wykonywano przy użyciu 2 pras przelotowych, wielosplotowych umieszczonych na korpusach przyczółków. Na przyczółkach oraz filarach zamontowano po 4 łożyska ślizgowe (rys. 3). Wspomaganie nasuwania miały zapewnić ruchome dzioby montażowe zlokalizowane na czołach obu nasuwanych sekcji.



Rys. 2. Układ podwieszenia wspomagający nasuwanie



Rys. 3. Schemat podparcia skrzynki łożyskami ślizgowymi



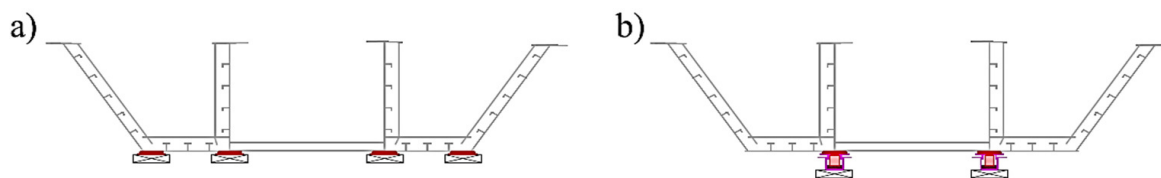
Rys. 4. Plastyczne wyboczenie środników stalowej skrzynki mostu w Kamieniu podczas nasuwania od strony Iłży

Po scaleniu pierwszych elementów wysyłkowych na placu montażowym rozpoczęto nasuwanie konstrukcji. Po wysunięciu około 36 m konstrukcji od strony Iłży nastąpiło plastyczne wyboczenie środników stalowej skrzynki (rys. 4).

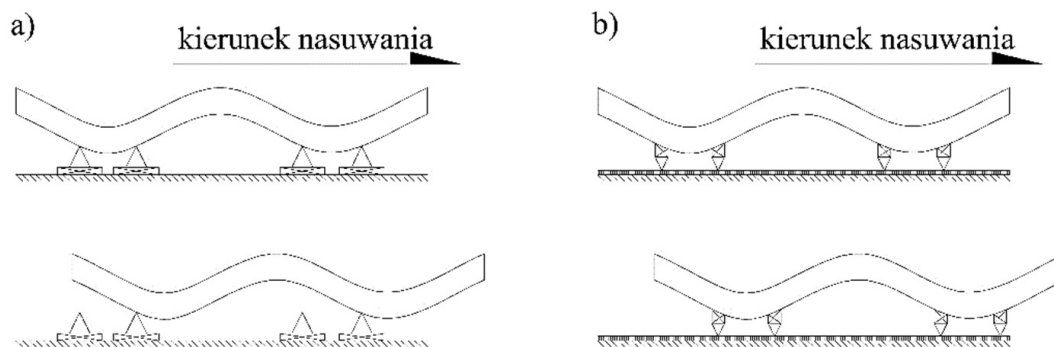
4. Przyczyny awarii i alternatywny projekt nasuwania podłużnego

W wyniku niepowodzenia realizacji nasuwania przeprowadzono szczegółową analizę projektu. Zidentyfikowano w nim kilka mankamentów, których wyeliminowanie wymagało wprowadzenie następujących zmian w projekcie:

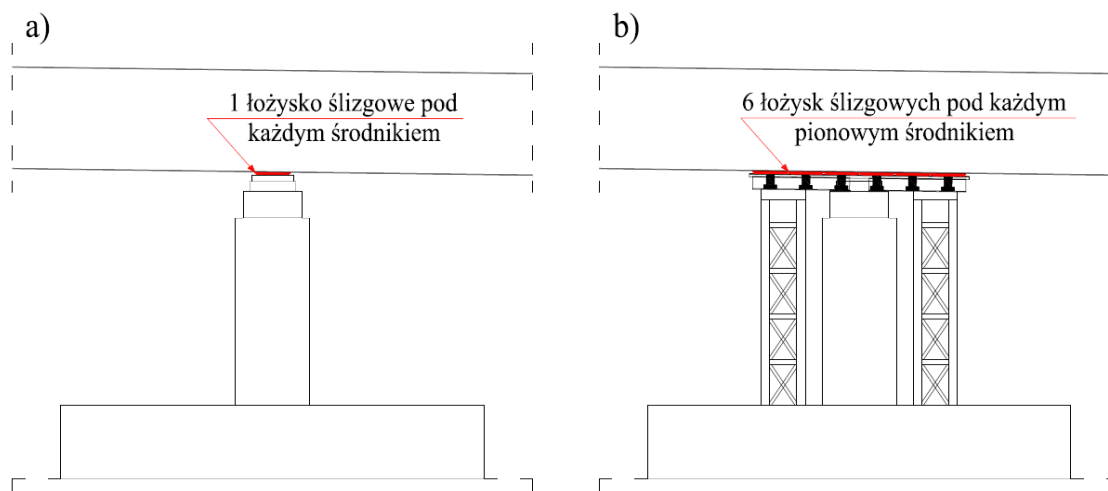
- a) Pierwotna wersja projektu zakładała nasuwanie konstrukcji w obszarze scalania na łożyskach ślizgowych pod każdym z środników (rys. 5a). Łożyska te zamontowane na stałe na stolikach, istniejące strzałki montażowe, imperfekcje w wykonaniu konstrukcji oraz różne podatności punktów podparcia w przekroju powodowały brak oparcia konstrukcji na niektórych łożyskach ślizgowych w przekroju poprzecznym jak i po długości konstrukcji w obszarze „leżni”.



Rys. 5. Przekrój poprzeczny skrzynki nad filarem a) projekt pierwotny nasuwania
b) projekt alternatywny [3]



Rys. 6. Ideowy schemat podparcia konstrukcji na „leżni” a) projekt pierwotny nasuwania b) projekt alternatywny [3]

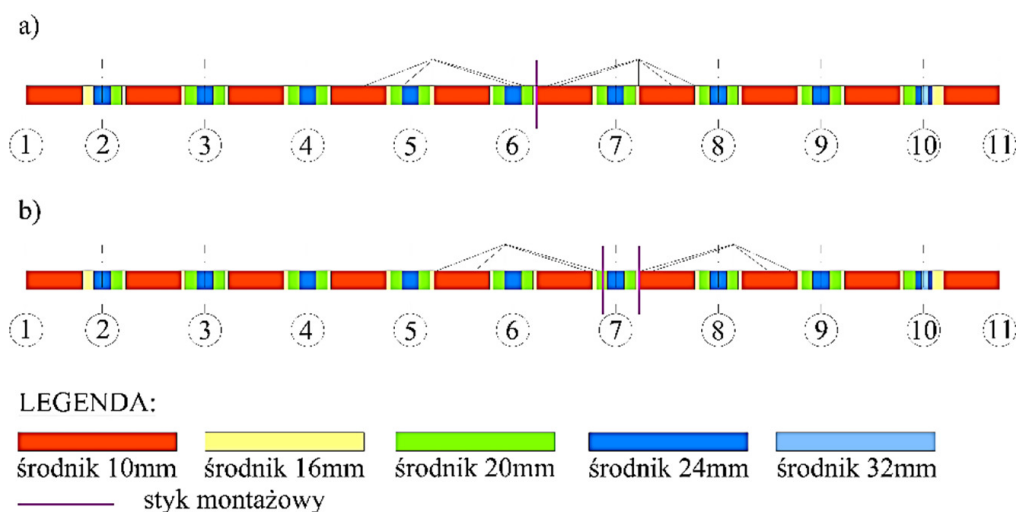


Rys. 7. Widok z boku na filar a) projekt pierwotny nasuwania b) projekt alternatywny [3]

W konsekwencji podczas nasuwania zmieniał się schemat statyczny (rys. 6a), przez co reakcje na łożyskach które pozostawały w kontakcie z konstrukcją radykalnie wzrastały, doprowadzając do plastycznego wyboczenia się średników. Operację nasuwania postanowiono wykonywać podpierając konstrukcję tylko pod średnikami pionowymi (rys. 5b). Wykonano betonowy tor nasuwczy wyłącznie pod pionowymi średnikami skrzynek. Łożyska ślizgowe przymocowano trwale do konstrukcji nasuwanej w konkretnych („mocnych”) miejscach (rys. 6b). Tym samym zlikwidowano problem imperfekcji podłużnych, strzałek montażowych i „słabych” obszarów podparcia. Nasuwanie na dwóch łożyskach w przekroju zamiast czterech (rys. 4a i b) rozwiązało problem imperfekcji i zmiennej podatności średników. Podpieranie skrzynki w dwóch miejscach na podporach poza torem nasuwczym wymagało rozbudowania strefy docisku. Ostatecznie zastosowano po 6 łożysk na średnik nad filarami oraz po 2 na średnik nad przyczółkami (rys. 7a i b). Równomierny rozkład obciążenia i możliwość obrotów zapewniono dzięki ustawieniu łożysk ślizgowych na baterii dźwigników hydraulicznych połączonej w jeden obwód pod każdym średnikiem. Dodatkową funkcją przewidzianą dla wspomnianego systemu była regulacja wysokościowej podpory podczas nasuwania. Pozwoliło to na zmianę rozkładu reakcji między podporami (globalnie) w trakcie nasuwania i niwelowanie wpływu strzałki montażowej.

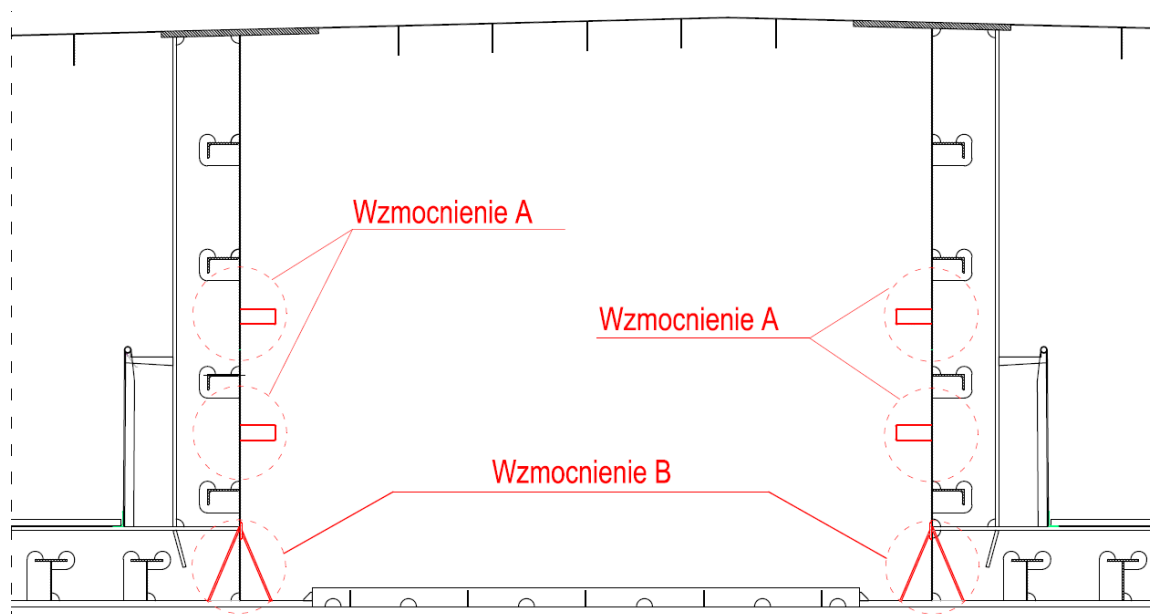
- b) Kolejność montowanych segmentów również została zamieniona. Zmieniono układ w taki sposób, aby największe siły tnące w czasie nasuwki działały na grube średniki (rys. 8). W rezultacie długość konstrukcji nasuwanej od strony Iłży wyniosła 606,65 m zamiast 536,80 m natomiast od strony Lublina 379,20 m zamiast 487,20 m. Dodatkowo nad podporą

7 w pozycji docelowej zamontowano odcinek konstrukcji o długości 38,15 m, do którego nasuwano pozostałe wspomniane dwie części. Dodatkowo przy nasuwaniu zastosowano lekkie avanbeki o długości 8,0 m.



Rys. 8. Schematyczny widok z boku na most z oznaczonymi grubościami środników i stykami montażowymi a) projekt pierwotny nasuwania b) projekt alternatywny [3]

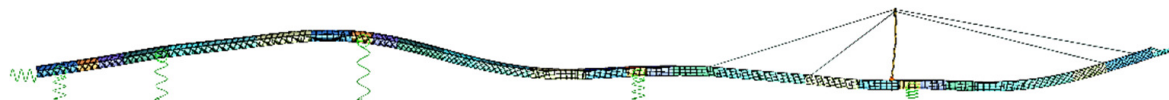
- c) Zaprojektowano wzmocnienie przekroju skrzynkowego pod pylonami w postaci kratowej poprzecznicy, ponieważ przewidziane wzmocnienie przekroju w projekcie pierwotnym było niewystarczające.
- d) Zweryfikowano liczbę cięgien w splotach oraz siły naciągu lin.
- e) zaprojektowano wzmocnienie środników:
 - środniki z blach 10 i 16 mm wzmocnione zostały dodatkowymi żebrami podłużnymi (wzmocnienie typu A – rys. 8) wykonanymi jako U 225×100×5,
 - środniki z blach 10, 16 i 20 mm wzmocnione zostały blachami ukośnymi o grubości 10 mm pomiędzy środnikami a pasem dolnym (wzmocnienie typu B – rys. 9).



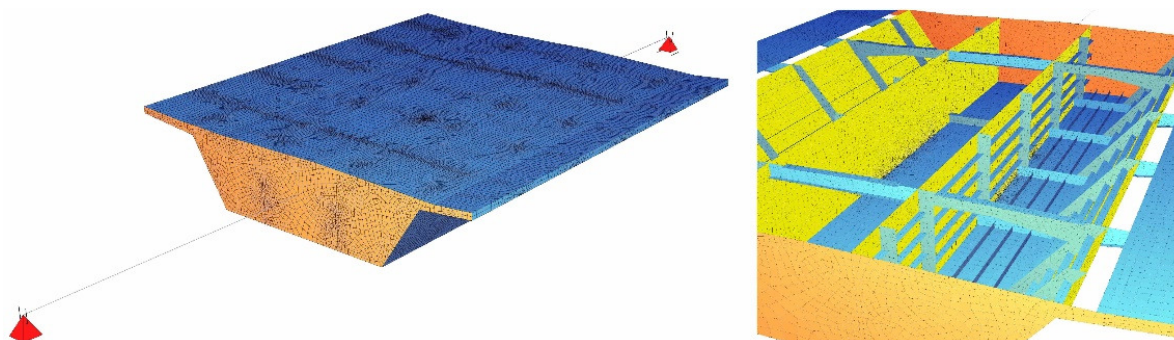
Rys. 9. Wzmocnienie środników żebrami podłużnymi (typ A) i blachami ukośnymi (typ B) [4]

5. Numeryczna analiza nośności dźwigara

Dla nowej wersji projektu wykonano modele numeryczne mostu w środowisku MES SOFiSTiK. Zgodnie ze wcześniejszymi doświadczeniami [4] [5] zastosowano dwuetapową procedurę postępowania. Do analizy etapów nasuwania mostu wykorzystywano belkowy model globalny (rys. 10). W modelu tym analizowano etapy nasuwania konstrukcji z maksymalnym krokiem co 2 metry. Uwzględniano możliwość regulacji wysokościowej podpór oraz wspomaganie nasuwania układem wawowym.



Rys. 10. Globalny, belkowy model obliczeniowy MES w środowisku SOFiSTiK

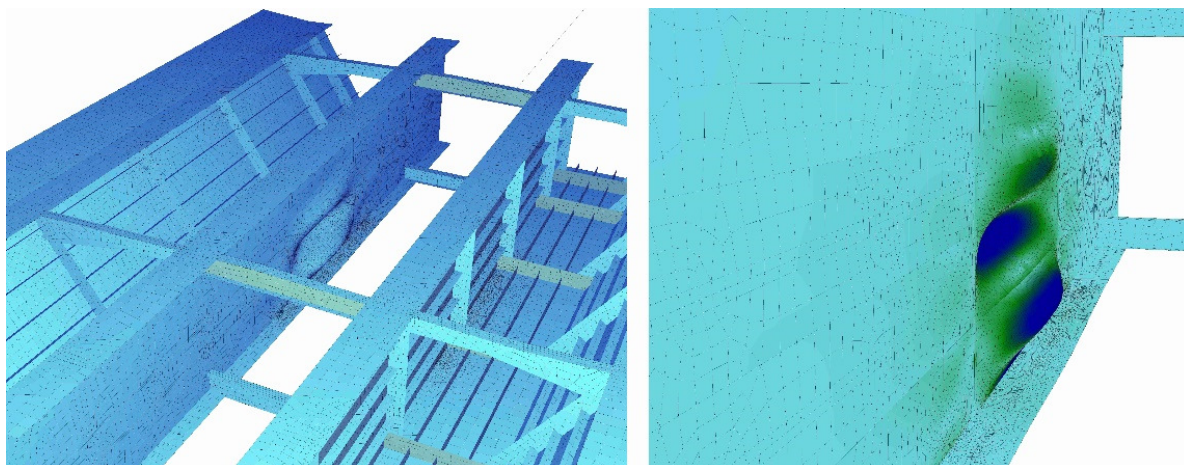


Rys. 11. Szczegółowy, belkowo powłokowy model obliczeniowy MES w środowisku SOFiSTiK

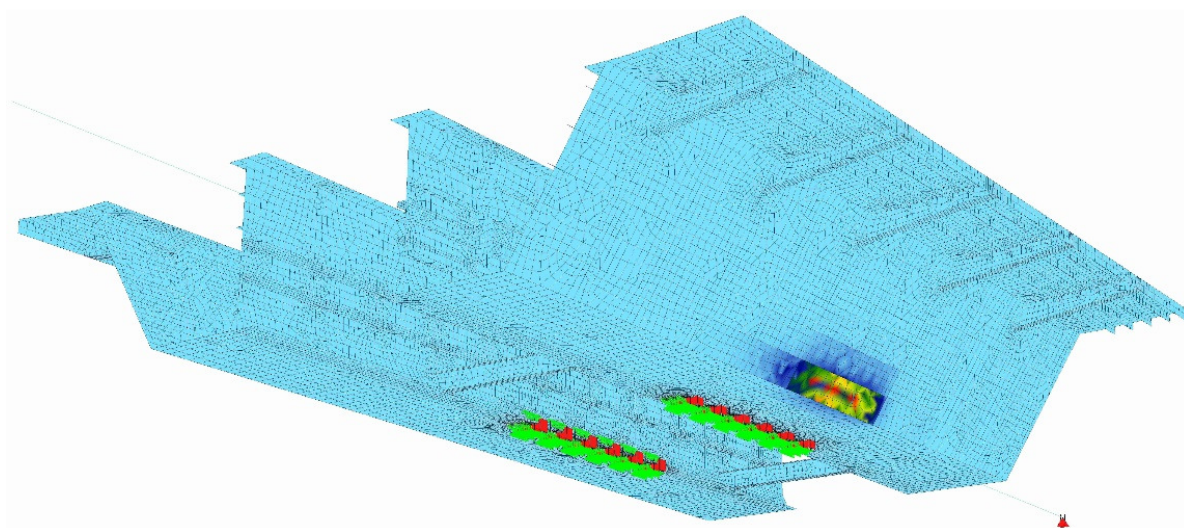
W rezultacie uzyskano wartości maksymalnych reakcji przypadających na poszczególne grubości środników oraz potrzebne przemieszczenia pionowe na każdym filarze w poszczególnych etapach nasuwania. Dla środników o grubości 10 mm maksymalna reakcja przypadająca na jeden środnik wyniosła 4200 kN.

W dalszej kolejności analizowano szczegółowy model powłokowy MES stalowego przekroju skrzynkowego mostu (rys. 11). Schematem statycznym była belka wolnopodparta obciążona w środku rozpiętości reakcjami z łożysk ślizgowych (po 6 na każdy środnik pionowy). Długość belki wolnopodpartej była dobierana tak, aby zapewnić powstawanie momentu zginającego w przekroju środkowym o wartości takiej jaka została uzyskana z modelu globalnego. W modelu szczegółowym badano możliwość plastycznego wyboczenia środników podczas realizacji nasuwania obiektu. Pierwszy model szczegółowy nie uwzględniał jeszcze wzmocnienia (rys. 9), które zaprojektowano dopiero po wykonanych analizach.

Na rys. 12 zaprezentowano postać wyboczeniową środnika pionowego dla obciążenia reakcjami z modelu globalnego 2×4200 kN. Współczynnik wyboczeniowy wyniósł jedynie 1,05 w związku z czym zaistniała potrzeba zaprojektowania wzmocnienia środników. Analiza modelu ze wzmocnionymi środnikami wykazała słuszność wprowadzonych zmian. Współczynnik wyboczeniowy wyniósł 3,03, a wyboczenie następuje w środniku zewnętrznym zgodnie z postacią wyboczenia (rys. 13). Wyniki obliczeń jednoznacznie wskazują, iż zaprojektowane wzmocnienie jest wystarczające do przeprowadzenia operacji nasuwania konstrukcji.



Rys. 12. Model szczegółowy, środniki bez wzmocnienia – postać wyboczeniowa środnika wewnętrznego (współczynnik wyboczeniowy 1,01)



Rys. 13. Model szczegółowy, środniki ze wzmocnieniem – postać wyboczeniowa środnika zewnętrznego (współczynnik wyboczeniowy 3,03)

6. Podsumowanie i wnioski

Projektowanie mostu stalowego nie może być oderwane od przewidywanej technologii montażu. Nasuwanie podłużne stalowej konstrukcji mostu wymaga uwzględnienia szeregu aspektów, które mogą mieć wpływ na bezpieczną realizację przedsięwzięcia. Konieczne jest uwzględnienie strzałek podniesienia wykonawczego oraz prawidłowe zaprojektowanie podparć szczególnie w miejscach docelowo nieprzystosowanych do przenoszenia sił skupionych. Nieuwzględnienie powyższych uwarunkowań może doprowadzić do lokalnych uszkodzeń i w konsekwencji nawet do katastrof o trudno wyobrażalnych skutkach. Dzięki wprowadzeniu modyfikacji do projektu bazującym na dobrej praktyce inżynierskiej połączonej z zaawansowaną techniką obliczeniową MES operacja nasuwki została zakończona pełnym sukcesem.

Literatura

1. Rymśa J., Biliszczuk J., Siwowski T., Zobel H., Żółtowski K.; Dzieła polskich inżynierów, Mosty III RP. ISBN 978-83-919972-1-5, Polska Izba Inżynierów Budownictwa. 2014.

2. Projekt budowlany (Aktualizacja technologiczna konstrukcji przeszłowej) mostu przez rzekę Wisłę w km 39+819,60 drogi wojewódzkiej 747 w miejscowości Kamień, Halcrow Group Sp. z o.o. Oddział w Polsce z siedzibą w Warszawie, luty 2013.
3. Alternatywna technologia montażu przęsła mostu przez Wisłę w Kamieniu. Prace projektowe zrealizowane na zlecenie Energopol – Szczecin S.A. KBP Żółtowski, 2014.
4. Żółtowski K.: Bridge over Vistula river in Kieźmark. Practical application of nonlinear shell FEM system. Shell structures: Theory and applications / eds. Wojciech Pietraszkiewicz, Czesław Szymczak. London: Taylor & Francis/Balkema, 2005.
5. Żółtowski K. Współczesne możliwości analizy statycznej i dynamicznej mostów stalowych. Mosty stalowe. Projektowanie, technologie budowy, badania, utrzymanie: seminarium, Wrocław: Dolnośl. Wydaw. Eduk., 2008. Wrocławskie Dni Mostowe, Wrocław, 27–28 listopada 2008.

STEEL BOX GIRDERS BRIDGE. CAPACITY ANALYSIS DURING INCREMENTAL LAUNCHING

Abstract: The paper describes the structure of a road bridge over the Vistula River in the Kamien (Lublin province). The Contractor planned the erection using the incremental launching method with the record cantilever of 108 meters. Because of incorrect actions in the first phase several plastic buckling damages of web plate occurred. Authors describes alternative erection design, which has been successfully completed. Basic steps of designing process and final conclusions are presented.

Keywords: bridge, incremental launching method, buckling, web plate capacity, plain girder, bracket.