XXIV awarie budowlane
XXIV Konferencja Naukowo-Techniczna
Szczecin-Międzyzdroje, 26-29 maja 2009

Dr hab. inż. KRZYSZTOF ŻÓŁTOWSKI, *zoltowk@pg.gda.pl*
Mgr inż. MAREK SZAFRAŃSKI, *mszafran@pg.gda.pl*
Katedra Mechaniki Budowli i Mostów Politechniki Gdańskiej

USZKODZENIE WIADUKTU KOLEJOWEGO NAD DROGĄ KRAJOWĄ NR 7. ANALIZA NOŚNOŚCI I SPOSÓB NAPRAWY

DAMAGES OF RAILWAY VIADUCT OVER ROAD 7. CARRYING CAPACITY ANALISYS AND METHOD OF REPERATION

Streszczenie Przegląd wiaduktu kolejowego nad drogą krajową nr 7 w Pasłęku ujawnił znaczne deformacje i uszkodzenia w dźwigarach głównych przęsła powstałe na skutek uderzeń pojazdów ponadgabarytowych. W referacie przedstawiono analizę nośności oraz przyjęty sposób naprawy wspomnianego obiektu. Przedstawiono rezultaty analizy statyczno-wytrzymałościowej konstrukcji przęsła oraz nieliniowej analizy sprężysto-plastycznej MES z uwzględnieniem istniejących deformacji. Analiza wykazała brak doraźnych zagrożeń dla konstrukcji. Zalecono prace naprawcze z uwagi na efekty zmęczeniowe i ochronę korozyjną.

Abstract During inspection of railway viaduct over national road no. 7 in Paslek large deformations and damages of bottom part of main span were observed. They were identified as an action of over size vehicles. The paper describes carrying capacity analysis and proposed method of reparation of this viaduct. Numerical evaluation was made. The results of linear and non-linear, elasto-plastic FEM analysis of damage mechanism are presented. The analysis proved that global safety factors for damaged structure are reached under the life load. However renovation of the steel structure has to be done to eliminate plastic deformation in flange and reduce fatigue degradation of steel.

1. Wstęp

Uszkodzenia przęseł wiaduktów na skutek uderzeń pojazdów są zjawiskiem powszechnie spotykanym. Częstą przyczyną jest zaniżona skrajnia drogowa pod obiektem i ignorowanie jej oznakowań przez użytkowników dróg. W wielu przypadkach, pomimo przepisowej skrajni, dochodzi do uszkodzeń przęseł w wyniku uderzeń pojazdów ponadgabarytowych. Szczególnie niebezpiecznym zjawiskiem jest uszkodzenie pasów dolnych przęseł wiaduktów kolejowych. W takim wypadku awaria przęsła może wywołać poważną katastrofę komunikacyjną.

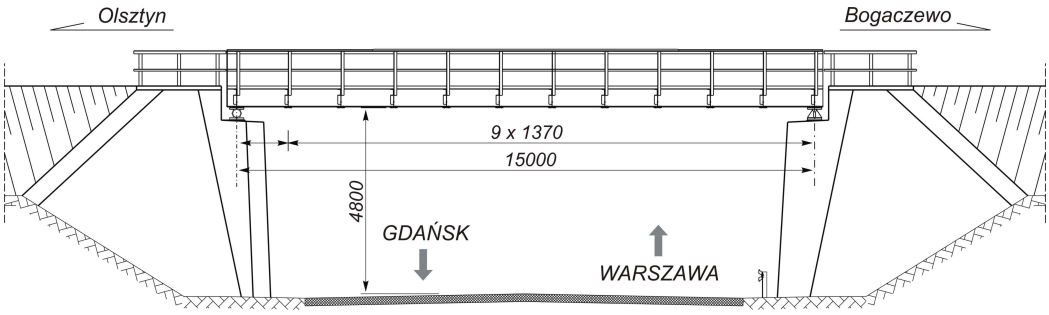
Opisywany obiekt kolejowy zlokalizowany jest w ciągu linii kolejowej Olsztyn – Bogaczewo w km. kol. 74+970 nad drogą krajową nr 7 Warszawa – Gdańsk w Pasłęku. Ustrój nośny przęsła stanowią dźwigary blachownicowe, współpracujące z ortotropową płytą jezdni. Dźwigary odchylone są pod kątem 20° od pionu. Dźwigar składa się ze środnika 1500×12, pasa górnego 400×30 w strefie przypodporowej i 400×40 w strefie przęsłowej oraz pasa dolnego 310×20 na całej długości przęsła.

Konstrukcją jezdni jest płyta ortotropowa z poprzecznicami teowymi w rozstawie 1.37 m oraz blachą pomostu, wzmocnioną podłużnymi żebrami teowymi.

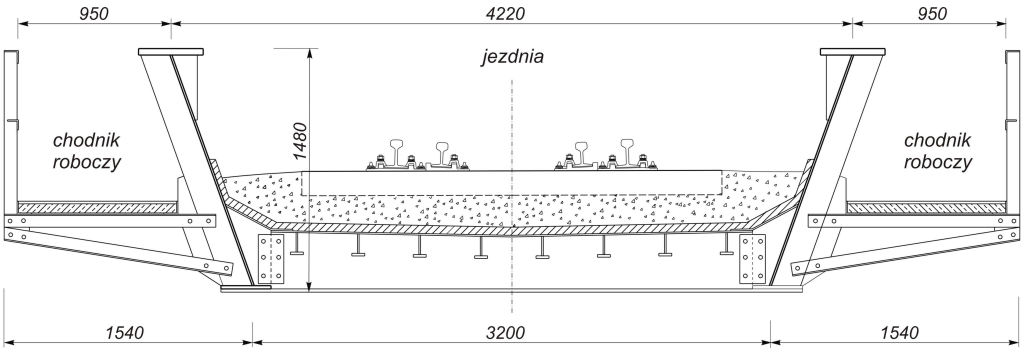
Rys. 1. Widok ogólny wiaduktu od strony Warszawy

Rys. 2. Widok jezdni kolejowej wiaduktu

Nawierzchnię na wiadukcie stanowią szyny S-49 wraz z odbojnicami, ułożone na podkładach drewnianych typu II/B i podsypce. Podsypkę ułożono na warstwie betonu ochronnego gr. 4 cm wylanego na izolacji z papy asfaltowej. Tor na obiekcie usytuowany jest w łuku poziomym R = 960 m na krzywej przejściowej i w przechyłce. Po zewnętrznych stronach dźwigarów głównych wykonano chodniki robocze z kątowników L80×80×8 oraz prefabrykowanych płyt żelbetowych gr. 6 cm. Konstrukcja przęsła opiera się na masywnych, betonowych przyczółkach posadowionych bezpośrednio. Maksymalna prędkość eksploatacyjna wg projektu wynosi 100 km/h. Schemat ogólny i przekrój poprzeczny wiaduktu pokazano na rys. 3 i 4.



Rys. 3. Schemat ogólny wiaduktu



Rys. 4. Przekrój poprzeczny wiaduktu

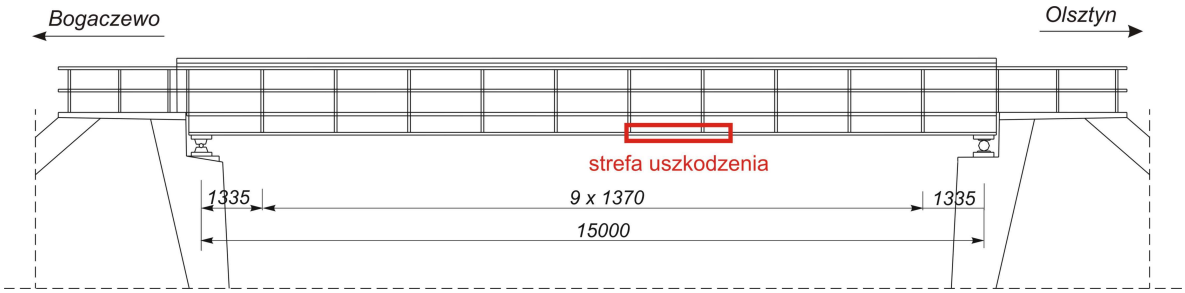
Podstawowe parametry geometryczne i materiałowe konstrukcji przęsła:

- materiał konstrukcyjny dźwigarów i jezdni — stal St3M
- materiał konstrukcyjny elementów chodnika — stal St3Sx
- rozpiętość przęsła — L_t = 15.00 m
- szerokość całkowita — B_c = 6.28 m
- szerokość użytkowa chodników roboczych — B_{ch} = 2×0.75 m
- spadek poprzeczny torowiska — dwustronny 2%.

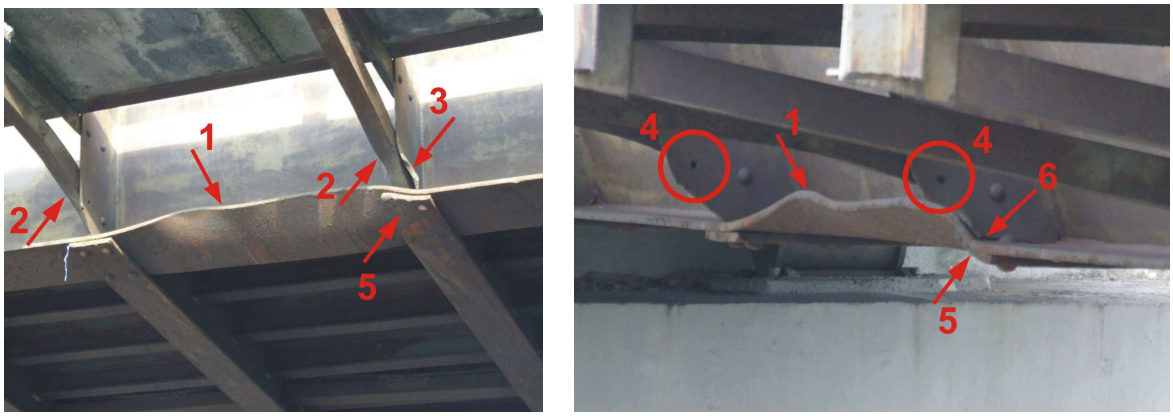
2. Inwentaryzacja uszkodzeń

Wizja lokalna na wiadukcie ujawniła znaczne miejscowe deformacje plastyczne i uszkodzenia konstrukcji przęsła powstałe w wyniku uderzeń pojazdów ponadgabarytowych. W przypadku dźwigara od strony Warszawy stwierdzono:

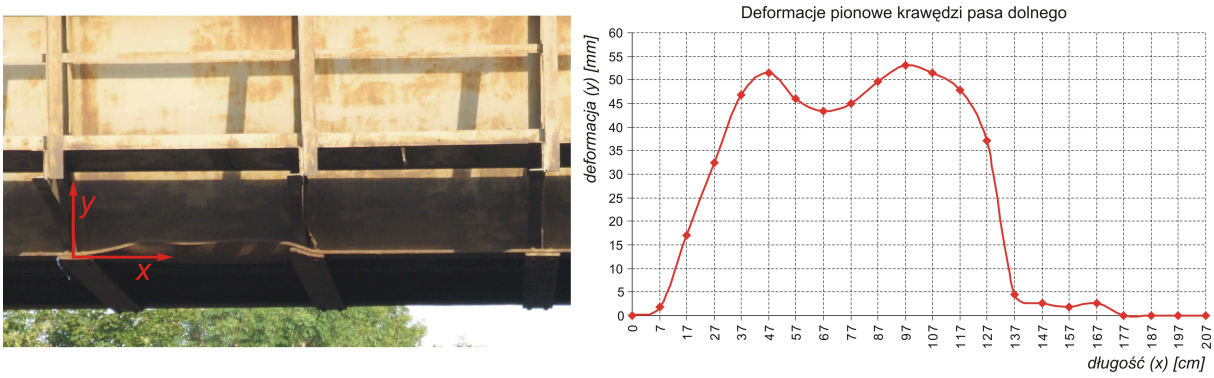
- lokalną deformację pasa dolnego dźwigara głównego i poprzecznicy,
- lokalną deformację żebra zewnętrznego dźwigara głównego,
- wygięcie krzyżulców dwóch wsporników chodnikowych,
- zniszczenie połączenia dwóch krzyżulców wsporników chodnikowych z przęsłem (ścięcie nitów).
- zniszczenie połączenia żebra z pasem dolnym dźwigara (ścięcie spoiny).



Rys. 5. Schemat ogólny przęsła z zaznaczeniem strefy uszkodzenia dźwigara od strony Warszawy



Rys. 6. Uszkodzenia dźwigara od strony Warszawy: 1) zdeformowany pas, 2) wygięte krzyżulce wsporników chodnikowych, 3) zdeformowane żebro dźwigara, 4) ścięte nity łączące krzyżulce wsporników chodnikowych z przęsłem, 5) deformacja pasa dolnego poprzecznicy, 6) ścięta spoina łącząca żebro z pasem dolnym dźwigara

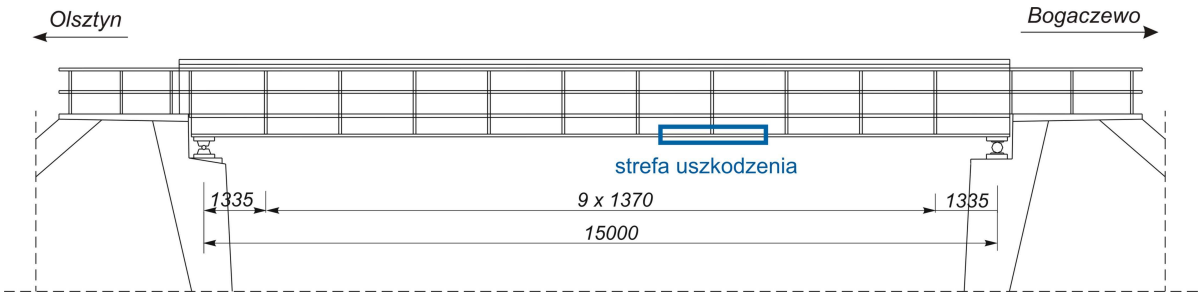


Rys. 7. Pomierzone deformacje pionowe krawędzi pasa dolnego dźwigara od strony Warszawy

Lokalizację oraz stwierdzone uszkodzenia dźwigara od strony Warszawy pokazano odpowiednio na rysunkach 5 i 6. Pomierzone deformacje pionowe zewnętrznej krawędzi pasa dolnego w strefie uszkodzenia pokazano na rysunku 7.

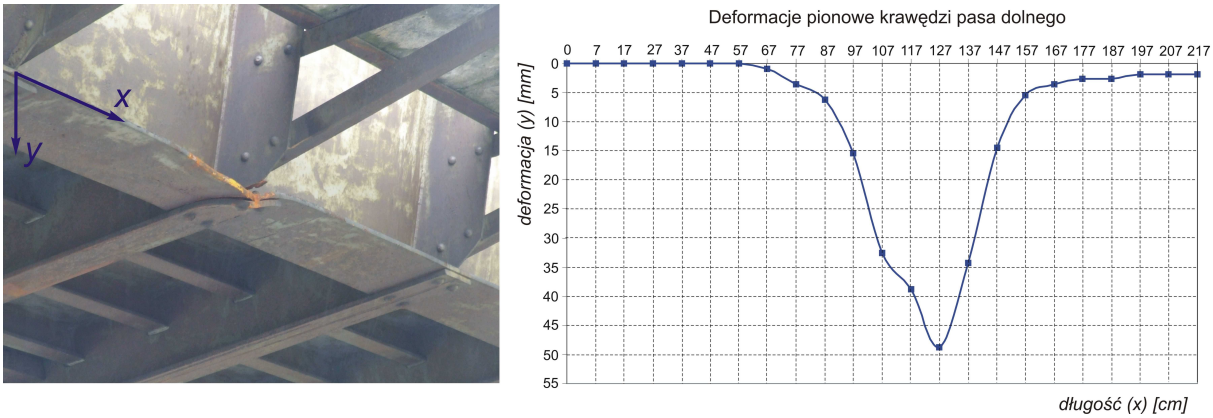
W przypadku dźwigara od strony Warszawy stwierdzono:

- lokalną deformację pasa dolnego dźwigara głównego i poprzecznicy,
- lokalną deformację żebra zewnętrznego dźwigara głównego,
- zniszczenie połączenia pasa dolnego poprzecznicy z dźwigarem głównym (ścięty nit),
- zniszczenie połączenia żebra z pasem dolnym dźwigara (ścięcie spoiny).



Rys. 8. Schemat ogólny przęsła z zaznaczeniem strefy uszkodzenia dźwigara od strony Gdańska

Rys. 9. Uszkodzenia dźwigara od strony Gdańska: 1) deformacja pasa dolnego dźwigara głównego, 2) deformacja pasa dolnego poprzecznicy, 3) zniszczone połączenie spawane żebra z pasem dolnym dźwigara, 4) ścięty nit połączenia pasa poprzecznicy z dźwigarem



Rys. 10. Pomierzone deformacje pionowe krawędzi pasa dolnego dźwigara od strony Gdańska

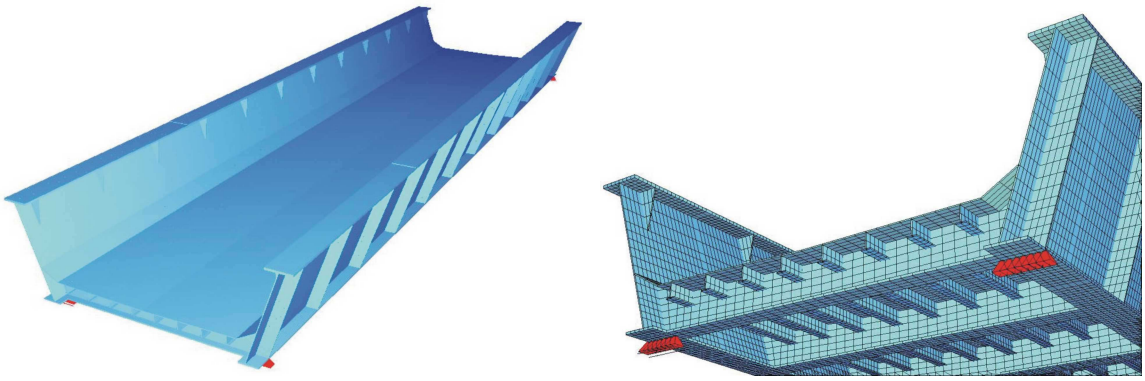
Lokalizację oraz stwierdzone uszkodzenia dźwigara od strony Gdańska pokazano odpowiednio na rysunkach 8 i 9. Pomierzone deformacje pionowe zewnętrznej krawędzi pasa dolnego dźwigara od strony Warszawy w strefie uszkodzenia pokazano na rysunku 10.

3. Analiza nośności przęsła z uwzględnieniem istniejących deformacji

Obliczenia nośności wykonano metodą elementów skończonych (MES) przy wykorzystaniu programu SOFiSTiK [1]. W analizie nośności przyjęto charakterystyki materiału wg projektu wiaduktu [2] odpowiadające stali St3M:

$\rho_s = 78{,}5\ kN/m^3$ – ciężar objętościowy
$E = 205000\ MPa$ – współczynnik sprężystości podłużnej (moduł Young'a)
$G = 80000\ MPa$ – współczynnik sprężystości poprzecznej
$\nu = 0.3$ – współczynnik Poissona
$R_e = 225\ MPa$ – charakterystyczna, gwarantowana granica plastyczności
$R_m = 375\ MPa$ – wytrzymałość na rozciąganie
$R = 195\ MPa$ – wytrzymałość obliczeniowa

Projektant wykonał obliczenia nośności przyjmując założenie o pełnej współpracy blachy koryta jezdni z dźwigarem głównym w przenoszeniu obciążeń. Aby zweryfikować to założenie wykonano przestrzenny belkowo-powłokowy model przęsła. Parametry geometryczne i materiałowe przyjęto zgodnie z projektem wiaduktu. Dźwigary główne, poprzecznice, żebra pionowe, blachę poszycia oraz środniki żeberek podłużnych płyty pomostowej wymodelowano cztero i trójwęzłowymi elementami powłokowymi. Elementami belkowymi wymodelowano pasy żeberek podłużnych płyty pomostowej. Warunki brzegowe (podpory) przyjęto jako liniowe na szerokości pasa dolnego, zgodnie z założeniem układu swobodnie podpartego. W modelu numerycznym pominięto elementy chodników roboczych. Ciężar chodników uwzględniono w postaci liniowego obciążenia, przyłożonego do pasów dolnych dźwigarów w osi środników. Ciężar własny elementów konstrukcyjnych przęsła uwzględniono bezpośrednio w modelu numerycznym, natomiast ciężar nawierzchni przyjęto jako obciążenie powierzchniowe na całej długości przęsła. Obciążenie użytkowe przyjęto zgodnie z PN-85/S-10030 dla klasy k+1. Na rysunku 11 pokazano wizualizację modelu numerycznego przęsła wiaduktu.

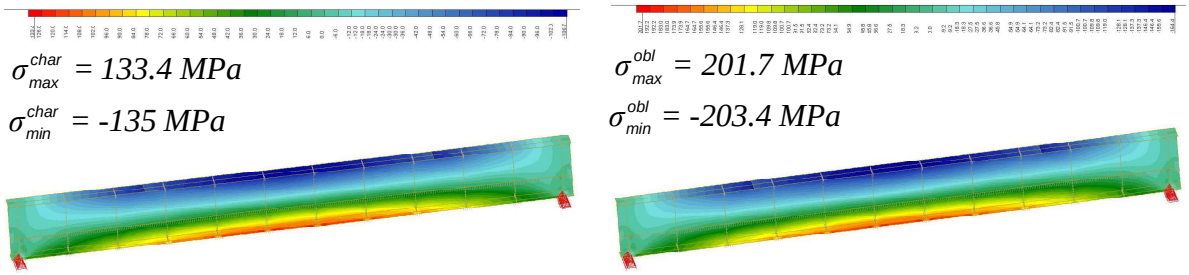


Rys. 11. Wizualizacja modelu obliczeniowego oraz szczegół przypodporowy (SOFiSTiK)

Ogółem układ zdyskretyzowano na 42168 elementów, w tym 42000 elementów powłokowych klasy C^0 i 168 elementów belkowych.

W ramach obliczeń statyczno – wytrzymałościowych wyznaczono obwiednie naprężeń od obciążeń charakterystycznych i obliczeniowych we wszystkich modelowanych elementach konstrukcji dla układu bez deformacji. Uwzględniono obciążenia stałe i zmienne dla klasy k+1

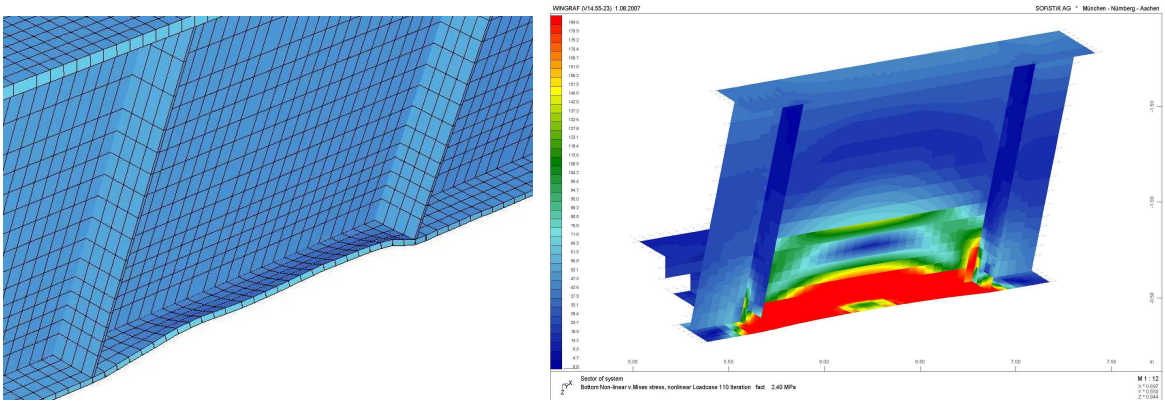
zgodnie z PN-85/S-10030. Nośność oceniono wg hipotezy HMH. Na rysunku 12 przedstawiono reprezentatywne wyniki naprężeń w elementach dźwigara głównego. Ekstremalne obliczeniowe naprężenia normalne w elementach poprzecznic wyniosły 115,7 MPa, natomiast maksymalne naprężenia zastępcze (HMH) w płycie pomostowej osiągnęły wartość 165,2 MPa. Szczegółowe zestawienie wyników dla poszczególnych elementów konstrukcyjnych podano w [3].



Rys. 12. Ekstremalne naprężenia normalne w powierzchni środkowej elementów dźwigara głównego

Przeprowadzone obliczenia pozwalają na zakwalifikowane przęsła do klasy obciążeń k +1 wg PN-85/S-10030 (zlokalizowano przekroczenia naprężeń granicznych w pasie górnym dźwigara głównego na poziomie 4% i pasie dolnym na poziomie 3%).

Na bazie wcześniejszych doświadczeń [4, 5], przeprowadzono również nieliniową, sprężysto-plastyczną analizę MES, symulującą efekt zdeformowania pasa. Przykładano w procesie przyrostowym obciążenie do pasa dolnego w postaci ciśnienia do momentu uzyskania rzeczywistych deformacji pasa. Na rysunku 13 pokazano wprowadzone deformacje oraz otrzymany w rezultacie zakres stref plastycznych w obszarze uszkodzenia dźwigara od strony Warszawy. Analiza potwierdziła zdolność do przenoszenia obciążeń przez przęsło i określiła zakres uplastycznienia pasa dolnego.



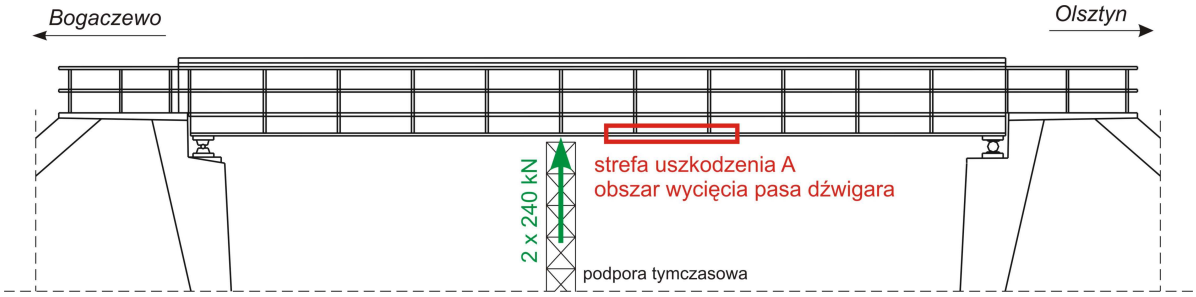
Rys. 13. Deformacje pasa dolnego dźwigara od strony Warszawy wprowadzone do modelu numerycznego oraz zakres stref plastycznych w obszarze uszkodzenia pasa (strefę uplastycznienia oznaczono intensywnym czerwonym kolorem)

4. Działania naprawcze

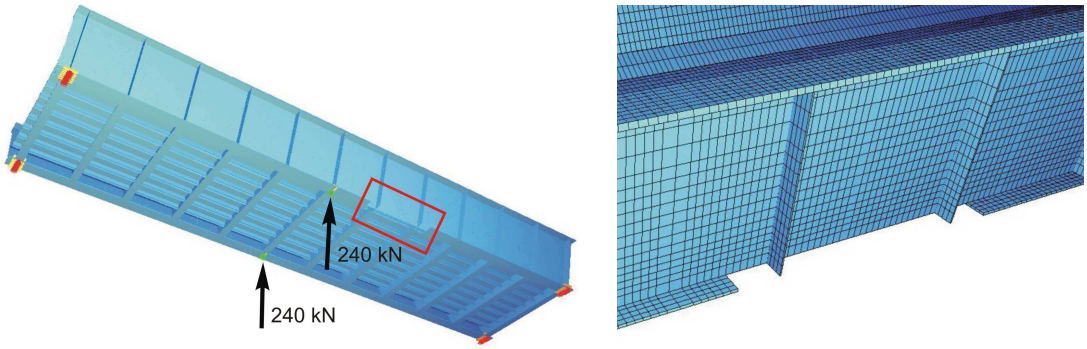
Pomimo znacznych deformacji plastycznych pasów, nośność doraźna przęsła nie jest zagrożona. Istnieje jednak uzasadniona obawa o wytrzymałość zmęczeniową. Tak dużych deformacji pasów oraz towarzyszących im uszkodzeń pozostałych elementów nie można pozostawić bez naprawy.

Zaproponowano rozwiązanie, w którym kluczowa część działań naprawczych polega na wymianie uszkodzonych elementów pasów dźwigarów [6]. Przed przystąpieniem do naprawy

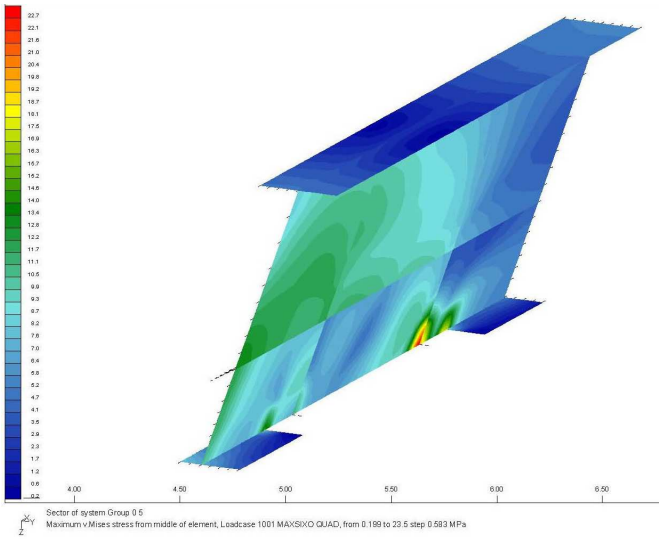
należy odciążyć konstrukcję w strefie uszkodzeń i tym samym zredukować tam naprężenia. W wyniku przeprowadzonych analiz wybrano wariant polegający na aktywnym podparciu konstrukcji w przęśle (rys. 14). Po wprowadzeniu siły 2×240 kN w przęsło, uzyskano skuteczne odciążenie stref uszkodzonych. Dzięki takiemu podejściu możliwe jest utrzymanie ruchu wahadłowego pojazdów pod obiektem przy zachowaniu odpowiednich środków bezpieczeństwa. Na rysunku 15 pokazano zastosowany model MES, natomiast na rysunku 16 rozkład naprężeń w strefie uszkodzenia po wycięciu fragmentu pasa.



Rys. 14. Idea wyparcia przęsła podczas naprawy



Rys. 15. Model MES do symulacji procesu naprawy. Widok ogólny i szczegół wyciętego pasa



Rys. 16. Wytężenie w rejonie wyciętego pasa przy zastosowaniu aktywnej podpory tymczasowej pod obciążeniem ciężarem własnym (wartości charakterystyczne). Intensywnym czerwonym kolorem oznaczono wytężenie (G = 23 MPa wg hipotezy HMH)

Zakres naprawy obejmuje wymianę uszkodzonych elementów chodników roboczych, naprawę styków pasów dolnych poprzecznic (styki sprężone) oraz wspawanie nowych blach

pasów dolnych dźwigarów w miejsce uprzednio wyciętych fragmentów zdeformowanych. Szczegółowy zakres oraz procedurę naprawy wiaduktu przedstawiono w [6].

5. Podsumowanie

W referacie przestawiono problem uszkodzeń wiaduktu kolejowego na skutek uderzeń pojazdów ponadgabarytowych.

Rosnące potrzeby i możliwości transportowe powodują często szereg nadużyć i próby przewozu ładunków znacznie przekraczających dozwolone gabaryty. Efektem tego są częste kolizje z przęsłami wiaduktów usytuowanych nad drogami samochodowymi. Powoduje to ich degradację, a w skrajnych przypadkach prowadzić może do poważnego wypadku lub nawet katastrofy. Istotnym, niebezpiecznym elementem takich zdarzeń jest przeważnie chęć ukrycia kolizji lub jej zbagatelizowanie przez sprawcę. Prowadzi to do sytuacji skrajnie niebezpiecznych, szczególnie w przypadku wiaduktów kolejowych. Nie ma wówczas praktycznie żadnej szansy na wyeliminowanie uszkodzonego przęsła z eksploatacji. Uszkodzenia opisywanego wiaduktu wykryto przez przypadek przy okazji oględzin sąsiedniego obiektu w Zielonce Pasłęckiej [7]. Na skutek zderzenia, znacznej deformacji uległ tam środnik dźwigara oraz zniszczone zostały wsporniki chodnikowe. Wypadek ten został zauważony, ponieważ sprawca kolizji uszkodził swój ładunek (koparka) i nie mógł odjechać niezauważony. Podkreślić należy, że oba wiadukty nie ograniczają normowej skrajni drogowej i przeprowadzają ruch kolejowy nad drogą krajową nr 7, a więc jedną z głównych tras komunikacyjnych kraju.

W najbliższym czasie będą prowadzone poważne przebudowy sieci drogowej kraju. Istnieje więc realne zagrożenie uszkodzenia przęseł wiaduktów przez ponadnormatywne pojazdy przewożące sprzęt budowlany. Fakt ten z pewnością podniesie zagrożenie katastrofą komunikacyjną. W tym wypadku standardowe działania prewencyjne mogą okazać się nieskuteczne i zdaniem autorów, należy zastanowić się nad systemem monitorowania narażonych konstrukcji.

Literatura

1. SOFiSTiK GmbH, Monachium. *System analizy konstrukcji*. www.sofistik.com.
2. Filipiuk S., Pietruszczyk, Szatkowski F.: Projekt wiaduktu kolejowego linii Olsztyn – Bogaczewo km. kol. 74+970 nad drogą Warszawa – Gdańsk w Pasłęku.
3. Kozakiewicz A., Szafrański M., Żółtowski K.: Ekspertyza naukowo techniczna dotycząca oceny nośności i sposobu naprawy wiaduktu kolejowego linii Olsztyn – Bogaczewo km 74+970 w Pasłęku, lipiec 2007.
4. Chróścielewski J., Żółtowski K., Kozakiewicz A., Malinowski M., Szafrański M.: „Ocena wpływu „deformacji pierwotnych" środników na nośność przęseł mostu przez rzekę Wisłę w Kiezmarku", Ekspertyza naukowo–badawcza, Politechnika Gdańska, 2003.
5. Siwowski T., Sobala D., Żółtowski K.: Ocena nośności uszkodzonego kratownicowego dźwigara mostu kolejowego, XXII Konferencja Naukowo – Techniczna „Awarie Budowlane", Szczecin – Międzyzdroje, 2006.
6. Kozakiewicz A., Szafrański M., Żółtowski K.: Projekt naprawy wiaduktu kolejowego linii Olsztyn – Bogaczewo km 74+970 w Pasłęku, grudzień 2008.
7. Kozakiewicz A., Szafrański M., Żółtowski K.: Ekspertyza naukowo techniczna dotycząca oceny nośności i sposobu naprawy wiaduktu kolejowego linii Olsztyn – Bogaczewo km 70+305 w Zielonce Pasłęckiej, lipiec 2007.