

Jakub ZEMBRZUSKI¹
Bartosz SOBCZYK²
Mikołaj MIŚKIEWICZ³

DIAGNOSTYKA I WYJAŚNIENIE AKTUALNEGO STANU 40-LETNIEGO WIADUKTU KOLEJOWEGO

1. Wprowadzenie

Utrzymanie konstrukcji inżynierskich, jakimi są mosty, w należyтым stanie jest szczególnie istotnym wyzwaniem postawionym współczesnemu mostownictwu. Wszelkiego rodzaju badania NDT (ang. Non Destructive Testing) w połączeniu z wykorzystaniem symulacji numerycznych MES umożliwiają precyzyjną ocenę stanu technicznego konstrukcji, wyteżenia jej elementów czy też określenia wpływu danego uszkodzenia na pracę całej konstrukcji. Rola badań nieniszczących oraz wszelkich narzędzi numerycznych, służących do oceny stanu technicznego mostów wydaje się jeszcze większa, kiedy przeanalizujemy strukturę wieku obiektów mostowych w Polsce. Według danych z 2007 roku bardzo liczną grupę stanowią konstrukcje, mające więcej niż 50 lat – w przypadku mostów drogowych jest to około 30%, natomiast kolejowych około 75% [1]. Tak więc nadal w eksploatacji jest duża liczba obiektów powstałych po wojnie i przed rokiem 1989, czyli w czasach gdy rynek Polski był zamknięty na nowe technologie, a jakość materiałów czy wykonania konstrukcji często była niska. Wiadukt, którego analizę przedstawiono w niniejszym referacie, jest przykładem takiego właśnie obiektu, a przeprowadzone badania i symulacje numeryczne dostarczyły bardzo ciekawych wniosków, mogących okazać się przydatnymi w przypadku badań innych konstrukcji tego typu.

2. Charakterystyka wiaduktu

Wiadukt kolejowy WK-05 jest konstrukcją belkową, ciągłą, czteroprzęsłową, z jądą pośrednią, zlokalizowaną w km 207+506,516 toru nr 39 linii 724 Gdynia Port GPD – Gdynia Port GPO na terenie stacji kolejowej Gdynia Port [2]. Obiekt został wykonany prawdopodobnie w latach 80 XX wieku i od tamtego czasu w trybie ciągłym jest użytkowany [2]. Ustrój nośny konstrukcji stanowią stalowe dźwigary blachownicowe, stężone pomostem w formie płyty ototropowej, wzmocnionej żebrami podłużnymi oraz poprzecznymi. Wspomniana płyta wraz z ukośnymi blachami formującymi stanowi koryto balastowe, wypełnione podsypką kolejową, na której ułożona została nawierzchnia kolejowa. Obiekt został wyposażony w chodniki rewizyjne znajdujące się po obu jego stronach oraz

¹ mgr inż., Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska Politechniki Gdańskiej

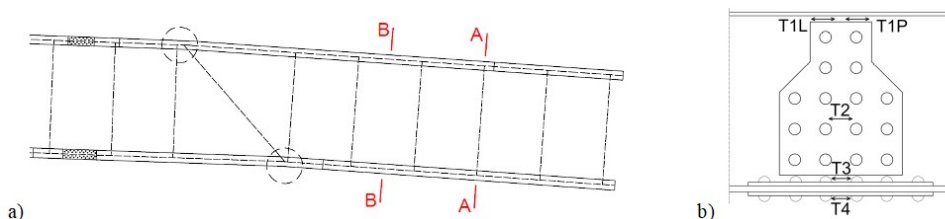
² dr inż., Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska Politechniki Gdańskiej

³ dr hab. inż., prof. PG, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska Politechniki Gdańskiej

Podejrzenia te stały się przyczynkiem do sformułowania pierwszego problemu badawczego, tj. potrzeby wyjaśnienia schematu pracy styku, znalezienia jednoznacznej odpowiedzi na pytanie: dlaczego konstrukcja do tej pory spełnia swoją rolę, nie uległa awarii, mimo tak poważnego błędu wykonawczego.

4. Opis przeprowadzonych pomiarów

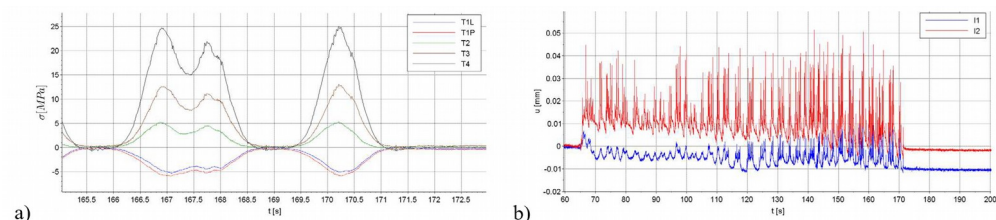
Pierwszym działaniem podjętym w celu wyjaśnienia schematu pracy badanego styku było wykonanie przeglądu rozszerzonego wiaduktu i przeprowadzenie badań terenowych, w których skład wchodziły pomiary przemieszczeń oraz odkształceń w obrębie nitowanego styku montażowego poprzecznic i styku blachy płyty ortotropowej. Badania zostały wykonane przy współpracy Zespołu Mostów Katedry Wytrzymałości Materiałów z Politechniki Gdańskiej z Lentas sp. z o.o. Przemieszczenia pomierzono przy pomocy indukcyjnych przetworników przemieszczenia HBM WA 50 mm, odkształcenia przy pomocy tensometrów elektrooporowych HBM 6/120, natomiast do gromadzenia danych użyto systemu składającego się z dwóch mostków pomiarowych MX840B, MX1615B oraz komputera z oprogramowaniem QuantumX. Punkty pomiarowe zostały zaprezentowane na rys. 3. W przekroju A-A mierzone były odkształcenia w punktach znajdujących się na nakładkach styku poprzecznic (lokalizacja punktów na rys. 3. b) oraz przemieszczenia dwóch części blach płyty ortotropowej względem siebie, natomiast w przekroju B-B mierzone były tylko przemieszczenia blach względem siebie.



Rys. 3. Lokalizacja punktów pomiarowych: a) przekroje, w których zlokalizowano punkty pomiarowe, b) na nakładkach styku montażowego poprzecznic

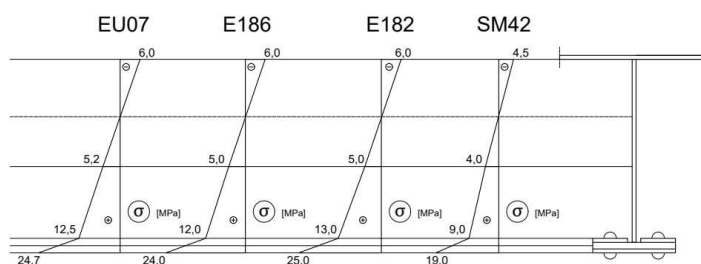
Podczas badań zarejestrowano zmiany odkształceń oraz przemieszczenia części blach względem siebie pod obciążeniem rzeczywistym, jakim były poruszające się po obiekcie w czasie badań tabory kolejowe. Tabory te składały się kolejno z: lokomotywy EU07 i platform do przewozu kontenerów, lokomotywy E186 i platform do przewozu kontenerów, tandemu lokomotyw E182 oraz lokomotywy SM42 i węglarek. Wyniki zostały zilustrowane w formie wykresów odkształceń (naprężeń) i przemieszczeń w dziedzinie czasu. W celu oceny pracy wiaduktu szczegółowej ocenie poddano wartości ekstremalne, wywołane zidentyfikowanymi naciskami osi poszczególnych lokomotyw. Przykładowe wyniki dla przejazdu taboru z lokomotywą EU07 zaprezentowano na rys. 4.





Rys. 4. Wyniki pomiarów dla lokomotywy EU07: a) Zmiany naprężeń w dziedzinie czasu – zbliżenie na wartości maksymalne, b) wykres przemieszczeń w dziedzinie czasu

W celu interpretacji wyników, pomierzone ekstremalne wartości przyrostów naprężeń pod obciążeniem rzeczywistym zilustrowano w postaci wykresów naprężeń normalnych w przekroju poprzecznym poprzecznic (rys. 5).



Rys. 5. Wykresy przyrostów naprężeń normalnych w przekroju poprzecznicy wywołanych przejazdami poszczególnych taborów kolejowych

Zastosowany sposób ilustracji wyników pomiarów umożliwił identyfikację rozkładu naprężeń w przekroju od wszystkich obciążeń rzeczywistych innego od spodziewanego. Dla czystego zginania kształt wykresu powinien być liniowy, natomiast w przypadku wykresów utworzonych na podstawie zarejestrowanych wyników zaobserwować można nieoczekiwany, gwałtowny przyrost naprężeń w dolnej nakładce styku. Tak sformułowany został drugi problem badawczy, polegający na określeniu przyczyny powstania nieoczekiwanego „skoku” zaobserwowanego na wykresie naprężeń w przekroju.

5. Opis globalny

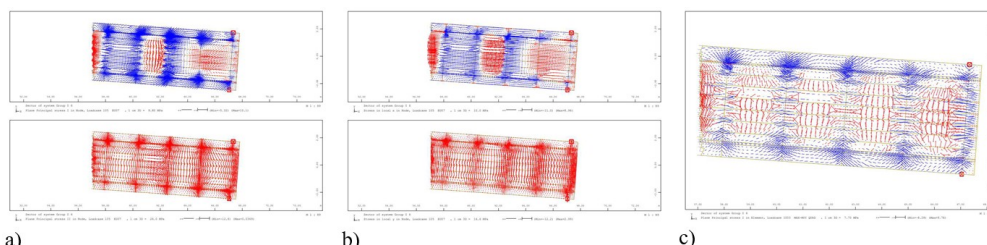
W celu rozwiązania postawionych problemów badawczych wykonano kilka modeli obliczeniowych w środowisku MES o różnym poziomie szczegółowości. Wykorzystano różne programy oraz techniki modelowania numerycznego.

5.1. Założenia

Pierwszym modelem jaki wykonano na potrzeby badań był tzw. „globalny” model obejmujący całą konstrukcję (rys. 5a), wykonany przy użyciu programu SOFiSTiK. Wymiary poszczególnych elementów wiaduktu oraz schemat łożyskowania zostały przyjęte zgodnie z danymi zgromadzonymi podczas inwentaryzacji w 2020 roku [3]. Ruszt belkowy składający się z dźwigarów głównych, poprzecznic oraz żeber podłużnych płyty ortotropowej wymodelowano przy użyciu belkowych elementów skończonych typu Timoszenki. Blacha płyty ortotropowej została wymodelowana przy pomocy powłokowych



przedstawiono na rys. 7. a) oraz b). Ponadto wyznaczono obwiednię maksymalnych naprężeń głównych w środku grubości blachy dla przejazdu jednej z lokomotyw (EU07), została ona przedstawiona na rys. 7 c).



Rys. 7. Wektory naprężeń: a) głównych, b) w kierunkach lokalnej osi x i y, c) obwiednia naprężeń

Po przeprowadzonej analizie udało się sformułować wnioski i odpowiedzieć na pytanie dlaczego konstrukcja nie uległa poważnej awarii, pomimo rażącego błędu wykonawczego. Otóż jak przedstawiono na rys. 7 b), naprężenia rozciągające w płycie pojawiają się jedynie w kierunku równoległym do spoiny, znajdującej się w osi przęsła. Naprężenia rozciągające w tym kierunku nie zagrażają konstrukcji, ponieważ nie powodują rozwarcia styku. W kierunku prostopadłym do osi przęsła (a więc i do styku) występują jedynie naprężenia ściskające, które powodują „zakleszczenie” dwóch części blach, dlatego też **styk pozostaje w równowadze, pomimo braku spoiny czołowej**. Aby wykluczyć ewentualność, że inne ustawienie lokomotywy na obiekcie wywoła niepożądane naprężenia, wykonano obwiednię maksymalnych naprężeń głównych w blasze (rys. 7 c). Uzyskane wyniki wykazały, że ryzyko awarii obiektu będące wynikiem braku spoiny czołowej pomiędzy blachami pomostu otrotropowego jest, od strony teoretycznej, niewielkie. Oczywiście w ocenie stanu konstrukcji dodatkowo należałoby wziąć pod uwagę względy użytkowe i aktualny stan wiaduktu.

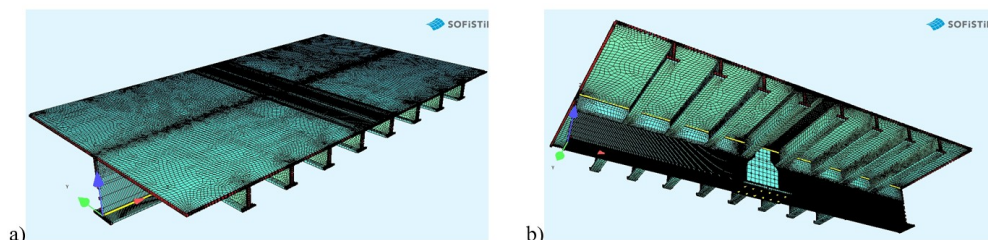
6. Opis lokalny

6.1. Modele obliczeniowe

W celu wyjaśnienia schematu pracy nitowanego styku montażowego poprzecznic konieczne było wykonanie wycinkowego modelu obliczeniowego fragmentu konstrukcji obejmującego badaną strefę (rys. 8). Wykorzystano do tego w pierwszym etapie program SOFiSTiK. Warunki brzegowe zostały przyjęte w uproszczony sposób, na brzegach modelu w miejscu połączenia z dźwigarem głównym zastosowano utwierdzenie, natomiast na brzegach płyty w kierunku poprzecznym do osi mostu skorzystano z zasady symetrii. Model ten uwzględniał występowanie w poprzecznic styku montażowego. Nity wymodelowano przy użyciu elementów belkowych, natomiast nakładki styku, podobnie jak wszystkie pozostałe elementy modelu, przy pomocy elementów powłokowych. Sposób przyłożenia obciążenia odpowiadał przejazdowi rzeczywistej lokomotywy, jednak jego wartość została skorygowana tak, aby wywołać w pasie dolnym poprzecznic naprężenie równe średniej arytmetycznej wartości naprężeń na nakładce górnej i dolnej styku otrzymanych w wyniku pomiarów. Było to konieczne przez zastosowanie uproszczonych warunków brzegowych, oraz umożliwiło odwzorowanie rzeczywistego stanu wyężenia połączenia nitowanego. Takie działanie znacznie zmniejszyło ryzyko wpływu uproszczeń zastosowanych podczas

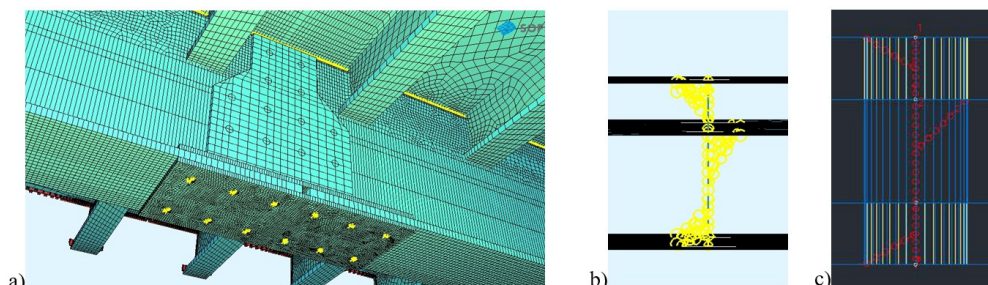


budowy modelu na samo połączenie nitowane będące głównym przedmiotem badań i pozwoliło na obiektywną ocenę poprawności przyjętego sposobu modelowania styku.



Rys. 8. Lokalny model numeryczny badanej poprzecznicy: a) widok z góry, b) widok z dołu

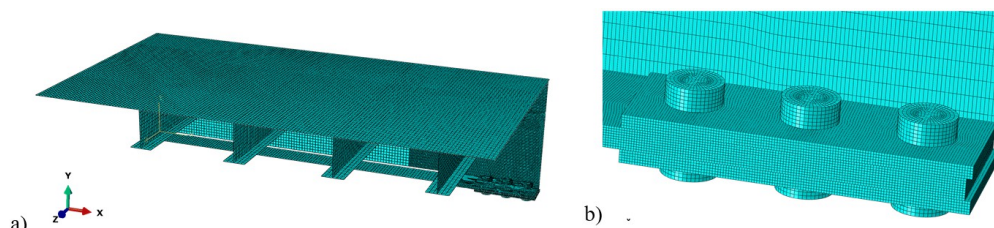
Na potrzeby analizy opracowano uproszczony sposób modelowania połączeń nitowanych, przy użyciu narzędzi wykorzystywanych zwykle do analiz na poziomie „globalnym”. W odróżnieniu od powszechnie stosowanej metody modelowania tego typu połączeń ([8],[9]), polegał on na podzieleniu nita po wysokości na trzy odcinki o długościach odpowiadającym grubościom łączonych elementów. Następnie wykonano sprzężenie kinematyczne pomiędzy fragmentem nita, a połową obwodu otworu w tej blasze, od strony, z której nit „napiera” na powierzchnię boczną otworu w czasie pracy połączenia. Wizualizację wymodelowanego połączenia nitowanego oraz sposobu połączenia nita z blachami nakładek i pasa poprzecznicy zaprezentowano na rys. 9.



Rys. 9. Wizualizacja wymodelowanego połączenia nitowanego: a) widok ogólny, b) c) sposób połączenia nita z blachami

W celu poprawy dokładności opisu analizowanego zagadnienia wykonano kolejny, „lokalny” model numeryczny, lecz tym razem w środowisku zaawansowanego programu MES, ABAQUS. Model ten (rys. 10), podobnie jak poprzedni, obejmował fragment konstrukcji zawierający poprzecnicę objętą monitoringiem podczas badań in-situ oraz fragment płyty ortotropowej. Warunki brzegowe oraz obciążenia zostały zadane analogicznie. W celu ograniczenia rozmiaru modelu podczas jego budowy zdecydowano się na skorzystanie z zasady symetrii w kierunku podłużnym i poprzecznym (wzdłuż globalnych osi X i Z). Fragment płyty ortotropowej, środek i pas dolny poprzecznicy wymodelowano przy użyciu powłokowych elementów typu S4. Nity, blachy nakładek styku oraz pas dolny poprzecznicy w obrębie styku wymodelowano przy użyciu elementów bryłowych typu C3D8i. Obydwa wyżej wymienione elementy skończone są elementami o pełnym całkowaniu, do którego program wykorzystuje kwadraturę Gaussa. Ponownie zastosowano uproszczony sposób wymodelowania połączenia nitowanego z tą różnicą, że tym razem połączone zostały powierzchnie boczne elementów bryłowych.

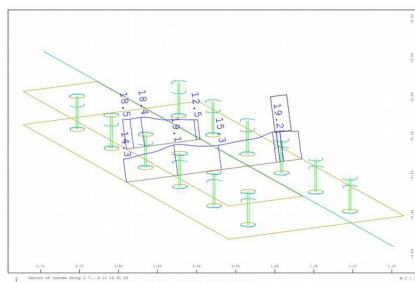




Rys. 10. Wizualizacja modelu lokalnego wykonanego przy pomocy programu ABAQUS: a) widok ogólny, b) zbliżenie na połączenie nitowane

6.2. Wyniki

Jako wyniki analizy przeprowadzonej na pierwszym modelu lokalnym, wykonanym przy pomocy programu SOFiSTiK, przedstawiono wykresy naprężeń normalnych w nakładkach styku montażowego. Przykładowy wykres przyrostu naprężeń wywołanego najbardziej niekorzystnym ustawieniem lokomotywy EU07 zaprezentowano na rys. 11. Wyniki dla pozostałych lokomotyw zostały opracowane w analogiczny sposób.

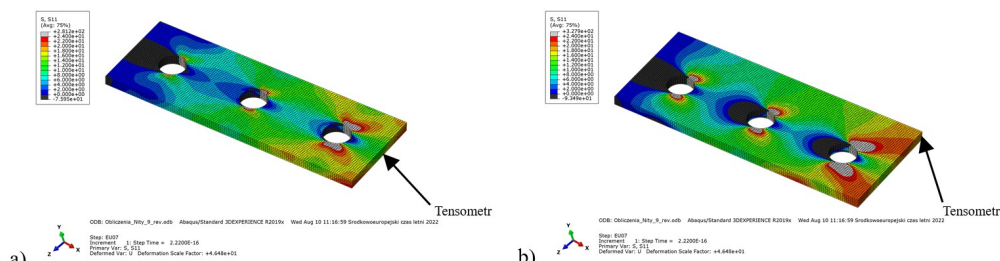


Rys. 11. Wykresy przyrostów naprężeń normalnych [MPa] w nakładkach styku od ustawienia lokomotywy EU07

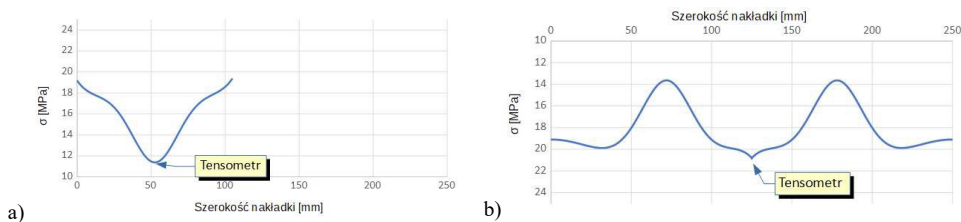
Wyniki jakie otrzymano nie pozwoliły na jednoznaczne rozwiązanie problemu badawczego polegającego na wyjaśnieniu przyczyny wystąpienia nieoczywistego rozkładu naprężeń w przekroju poprzecznym poprzecznicy, jednak stały się niejako potwierdzeniem słuszności uproszczonego sposobu modelowania połączenia nitowanego. Świadczą o tym wartości naprężeń w osi otworów – wartości na nakładce górnej (18,4 MPa) są mniejsze od wartości na nakładce dolnej (19,1 MPa), co poprawnie wpisałoby się w wykres naprężeń normalnych przekroju poddanego zginaniu. Dowiedziono w ten sposób, że taka uproszczona metoda modelowania połączenia nitowanego może być z powodzeniem stosowana w przyszłości, w przypadku modeli, w których bardzo wysoki poziom dokładności wyników nie jest wymagany. Tym niemniej w przypadku analizowanego tu zagadnienia konieczne było otrzymanie wyników na wyższym poziomie dokładności.

Z tego względu jako wyniki analiz z programu ABAQUS, zaprezentowano mapy przyrostów naprężeń normalnych w nakładkach styku oraz wykresy przyrostów naprężeń na powierzchniach nakładek w osi styku, powstałe w wyniku najbardziej niekorzystnego ustawienia każdej z lokomotyw. Wyniki dla lokomotywy EU07 zostały one zaprezentowane odpowiednio na rys. 12. oraz rys. 13, wyniki dla pozostałych lokomotyw opracowano w analogiczny sposób.





Rys. 12. Mapy przyrostów naprężeń normalnych od najbardziej niekorzystnego ustawienia lokomotywy EU07 w nakładce: a) górnej, b) dolnej



Rys. 13. Zmiany naprężeń normalnych w nakładce: a) górnej, b) dolnej

Dzięki zastosowaniu bryłowych elementów skończonych do budowy połączenia, możliwe było odwzorowanie rzeczywistego schematu pracy połączenia. Uzyskano zgodność wyników teoretycznych z wartościami pomierzonymi na poziomie 82%-91%, co jest wynikiem bardzo zadowalającym. Tensometr na górnej nakładce styku przymocowany był w obszarze, w którym panowały najmniejsze naprężenia w przekroju, podczas gdy tensometr na dolnej nakładce przymocowano w miejscu wyraźnej koncentracji naprężeń. Wynika z tego, że **przyczyną wystąpienia „skoku” na wykresie naprężeń w przekroju nie była usterka połączenia**, jak pierwotnie podejrzewano, a jedynie miejsce lokalizacji punktów pomiarowych, które znalazły się w obszarach o największych i najmniejszych naprężeniach. Wyjaśnienie zarejestrowanego zjawiska, polegającego na nieoczywistym rozkładzie naprężeń w nakładkach styku, może posłużyć w przyszłości do udoskonalenia metod prowadzenia badań tego typu styków.

7. Podsumowanie

Praca zawiera krótką ocenę stanu technicznego, opis przeprowadzonych badań nieniszczących in-situ oraz wykonanych modeli MES, służących do przeprowadzenia analiz na poziomie globalnym jak i lokalnym. Przedstawiono i omówiono wyniki analiz numerycznych, wykorzystanych do oceny stanu konstrukcji i mających na celu rozwiązanie sformułowanych problemów badawczych. Wykonane obliczenia na poziomie globalnym z uszczegółowieniem w obrębie fragmentu skrajnego przęsła dostarczyły wyjaśnienia przyczyny nie wystąpienia awarii, która miałaby być spowodowana brakami w spoinie czołowej blach płyty ortotropowej. Wykazano, że styk pozostaje w równowadze i nie ulega rozwarciu, ponieważ występują w nim jedynie naprężenia ściskające i blachy „zakleszczają” się wzajemnie. Znalaziono również przyczynę powstania gwałtownego przyrostu wartości na wykresie naprężeń w przekroju poprzecznym. W wyniku analizy przeprowadzonej na modelu lokalnym, wykonanym w programie ABAQUS wykazano, że przyczyną wystąpienia „skoku” wartości był fakt lokalizacji punktów pomiarowych odkształceń (naprężeń) w strefie silnej koncentracji naprężeń.



Co istotne, podczas analizy zagadnienia [10] i wprowadzanych do modeli numerycznych modyfikacji, zaaplikowano z sukcesem uproszczony sposób modelowania połączenia nitowanego, wykorzystujący częściowo techniki modelowania numerycznego stosowane zwykle w analizach na poziomie globalnym, a pozwalający uzyskiwać zadowalające wyniki w analizach lokalnych.

Uzyskane wyniki mają duże znaczenie na polu możliwości oceny pracy konstrukcji mostowych z płytą ortotropową. Etapowe dochodzenie do rozwiązania problemu od modelu numerycznego globalnego do szczegółowego, co więcej z wykorzystaniem wyników badań in-situ, mogą stanowić wytyczne do oceny stanu analogicznych do badanego obiektów mostowych.

Literatura

- [1] Bień J.: Uszkodzenia i diagnostyka obiektów mostowych. Warszawa: Wydawnictwa komunikacji i łączności, 2010.
- [2] Rybka J., Stana M., Kanawka S., Kolenkiewicz L., Paliński P.: Prace projektowe wraz z pełnieniem nadzoru autorskiego w ramach projektu pn „Poprawa dostępu kolejowego do portu morskiego w Gdyni”, Warszawa, 2019.
- [3] Galewski T., Deptuła T., Stasiak B., Szafrąński M. Ekspertyza stanu technicznego konstrukcji stalowej wiaduktu WK-05. Gdańsk, 2021
- [4] PN-EN 1990:2004. Eurokod. Podstawy projektowania konstrukcji, Warszawa: PKN, 2004.
- [5] PN-EN 1991-2:2007. Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje. Część 2: Obciążenia ruchome mostów, Warszawa: PKN, 2007.
- [6] PN-EN 1991-1-4:2008. Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-4: Oddziaływania ogólne. Oddziaływania wiatru, Warszawa: PKN 2008.
- [7] PN-EN 1991-1-5:2008. Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-5: Oddziaływania ogólne. Oddziaływania termiczne, Warszawa: PKN 2005.
- [8] Liu J., Zhao A., Liu Y., Dong H., Bi Y.: Numerical and experimental investigation on the rivet head flushness in automatic countersunk riveting, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Taylor & Francis, 2020.
- [9] M. Gopal, Ashutosh, R. Mishra: Static and dynamic analysis of riveted joint considering different materials, Materials Today: Proceedings 49, Elsevier, 2021.
- [10] Zembruski J. Badania doświadczalne, ocena stanu technicznego oraz nośności wiaduktu kolejowego WK-05 w Gdyni. Praca dyplomowa mgr. Politechnika Gdańska, 2022.

DIAGNOSTICS AND EXPLANATION OF THE CURRENT STATUS OF THE 40-YEAR RAILWAY VIADUCT

Summary

The paper includes a brief assessment of the technical condition, a description of the in situ non-destructive testing carried out and the FEM models created for global and local analysis. The results of the numerical analyses to solve the formulated research problems were presented and discussed.

It is clearly explained why the structure did not fail, despite the fact that the weld of the deck plate completely failed. A further research problem that was solved was to determine the cause of the rapid increase in values on the stress diagram in the cross-section



of the transverse section. The obtained results are of great importance in the field of assessing the operation of bridge structures with an orthotropic plate.