

Modelowanie inżynierskie szczegółów konstrukcyjnych mostu

Stefan Pradelok¹, Piotr Bętkowski², Adam Rudzik³, Piotr Łaziński⁴

¹ e-mail: stefan.pradelok@polsl.pl

² e-mail: piotr.betkowski@polsl.pl

³ e-mail: adam.rudzik@polsl.pl

⁴ *Katedra Dróg i Mostów, Wydział Budownictwa, Politechnika Śląska,
e-mail: piotr.lazinski@polsl.pl*

Streszczenie: W referacie przedstawiono sposób inżynierskiego modelowania szczegółów konstrukcyjnych, który umożliwia analizowanie lokalnych wpływów statycznych i dynamicznych w złożonej konstrukcji przy wykorzystaniu komputera osobistego. Analizowany szczegół konstrukcyjny, wymodelowany z użyciem powłokowych elementów skończonych, jest mocowany w przestrzennym ustroju prętowym. Następnie, na tak przygotowanym modelu obliczeniowym, przeprowadza się analizę statyczną lub dynamiczną. Zaproponowany sposób modelowania pozwala na wykrycie teoretyczne lokalnych wpływów. Przeprowadzone analizy potwierdziły poprawne zachowanie się tak zbudowanego modelu obliczeniowego. Przedstawiony w referacie sposób modelowania pozwala więc analizować lokalne wpływy na zwykłym komputerze osobistym, a wyniki takich obliczeń są dostępne w stosunkowo krótkim czasie. Przykładowe obliczenia przeprowadzono analizując lokalne wpływy w węźle stalowego, kolejowego mostu kratowego.

Słowa kluczowe: most, model obliczeniowy, modelowanie inżynierskie, szczegół konstrukcyjny, wpływy lokalne.

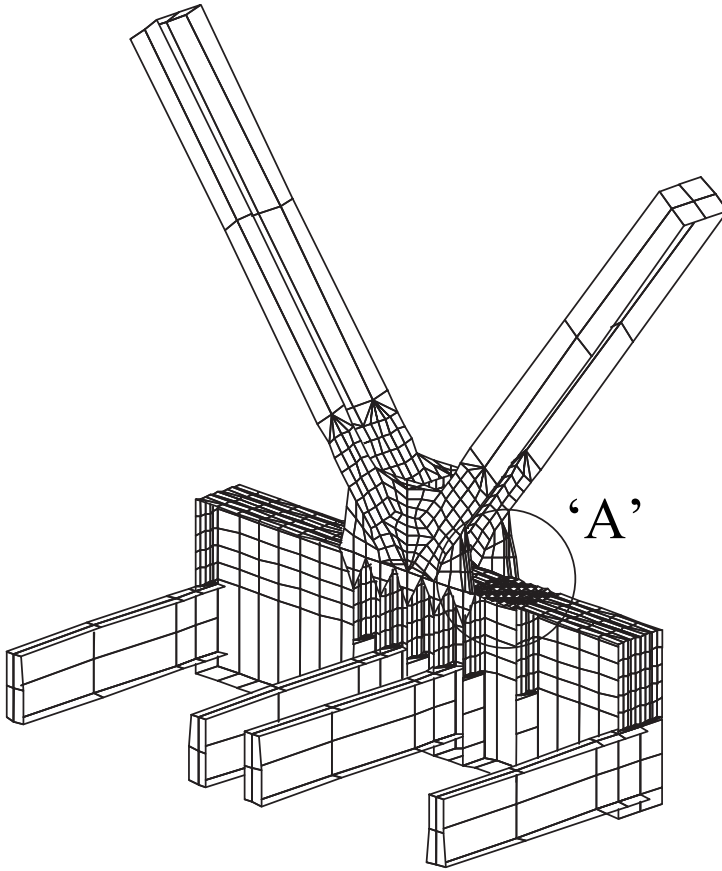
1. Wprowadzenie

W niektórych zagadnieniach praktycznych zachodzi potrzeba analizy statycznego lub dynamicznego poziomu naprężenia w szczególe konstrukcyjnym. Jest to szczególnie ważne w odniesieniu do nietypowych rozwiązań konstrukcyjnych. Lokalne wpływy, zarówno statyczne jak i dynamiczne, możliwe są do wykrycia teoretycznego jedynie przy wiernym ich modelowaniu. Najczęściej, szczegółowe modele obliczeniowe buduje się z wykorzystaniem metody elementów skończonych (MES). Jednak budowa z użyciem MES szczegółowego modelu całej konstrukcji o skomplikowanej geometrii zazwyczaj prowadzi do powstania dużego zadania obliczeniowego. Zadania takie często przekraczają możliwości obliczeniowe współczesnych komputerów osobistych. Rozwiązaniem tego problemu jest budowa szczegółowego modelu analizowanego fragmentu konstrukcji, który następnie zostanie zamocowany w przestrzennym ustroju prętowym. Tak przygotowany model obliczeniowy umożliwia przeprowadzenie zarówno standardowych jak i zaawansowanych analiz teoretycznych. Wszystkie analizy zamieszczone w tym referacie dotyczą stalowego mostu kolejowego w którym powstały duże pęknięcia zmęczeniowe. Wyjaśnienie teoretyczne tych przyczyn można znaleźć w [1], [3] i [4], a badania terenowe, potwierdzające uzyskane teoretycznie wyniki, omówiono w [2] i [5].

2. Budowa modelu obliczeniowego

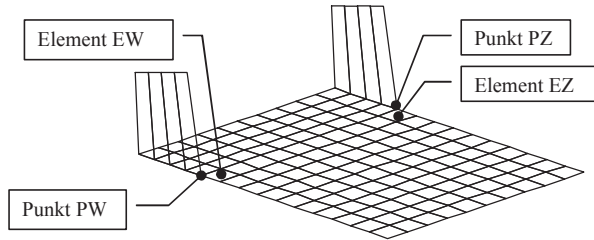
W celu przeprowadzenia wspomnianych analiz zbudowano z powłokowych elementów skończonych (MES) szczegółowy model obliczeniowy węzła kratownicy. Węzeł ten obejmował swoim zasięgiem fragment pasa dolnego kratowego dźwigara głównego (dwie połówki długości wraz z blachą węzłową) oraz połowy długości czterech poprzecznic i dwóch krzyżulców. Starano się wiernie wymodelować układ pasa, blach węzłowych,

żeberek, krzyżulców i poprzecznic (rys. 1). Szczegółowy model obliczeniowy analizowanego węzła kratownicy składa się z ponad 1700 trójkątnych lub czworokątnych, skończonych elementów powłokowych. Na obszarach, gdzie będzie analizowane zachowanie się szczegółowego modelu obliczeniowego, siatka elementów skończonych została zagęszczona. Dotyczy to fragmentu położonego w pobliżu miejsc styku blach węzłowych i półki górnej blachownicy pasa dolnego dźwigara kratowego. Są to miejsca zagrożone pęknięciem. Przedstawia to rys. 2, gdzie widać w powiększeniu szczegół 'A'. W celu łatwej lokalizacji miejsc uszkodzeń, na rys. 2 pozostawiono niewielkie fragmenty blach węzłowych.



Rys. 1. Szczegółowy model obliczeniowy węzła kratownicy z powłokowych elementów skończonych

Bardzo ważne jest właściwe podparcie tak zbudowanego modelu obliczeniowego węzła. W przypadku przeprowadzania analizy statycznej wystarczające jest podparcie na fikcyjnych, stałych lub sprężystych podporach umieszczonych w odpowiednich węzłach siatki MES. Jednak i tu już występują znaczne trudności w takim podparciu węzła, aby z jednej strony stabilizował ustrój dla potrzeb obliczeniowych, a z drugiej nie odbiegał od rzeczywistych warunków pracy węzła. Wprowadzenie samych podparć sztywnych lub sprężystych wręcz uniemożliwia poprawne przeprowadzenie jakiegokolwiek analizy dynamicznej. Taki sposób podparcia musiałby być uzależniony od postaci, a więc i częstotliwości drgań tak całej konstrukcji, jak i w szczególności drgań węzła jako jej fragmentu.



Rys. 2. Szczegół 'A'. Fragment półki górnej pasa dolnego kratownicy

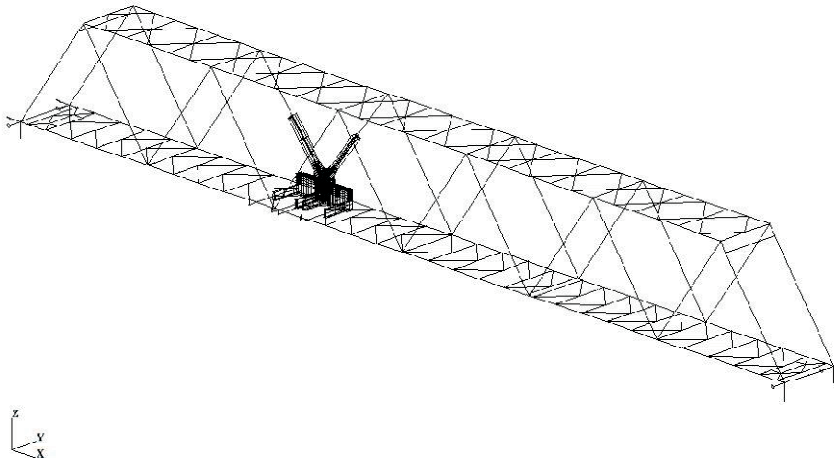
W analizie dynamicznej istotna jest sztywność i masa całej konstrukcji. Oba te parametry decydują o kształcie poszczególnych postaci drgań własnych. Zbudowany model obliczeniowy węzła jest tylko fragmentem większego ustroju rzeczywistego (prześla kratowego). Z tym fragmentem związana jest jego masa, która również stanowi tylko część masy całego ustroju. Natomiast o kształcie kolejnych postaci drgań własnych decyduje rozkład sztywności i mas (sił bezwładności) w całym ustroju rzeczywistym.

Pojawiają się więc dwa problemy. Pierwszy jak podeprzeć obliczeniowy model węzła, aby zapewnić mu odpowiednią sztywność i bezwładność (masę) w kolejnych postaciach drgań. Innymi słowy jak zapewnić swobodę ruchów, którą węzeł ten ma w układzie rzeczywistym. Drugi problem dotyczy wprowadzenia do analizowanego modelu obliczeniowego brakującej części sztywności i masy odrzuconej części układu.

Rozwiązaniem tych problemów jest zamocowanie szczegółowego modelu obliczeniowego analizowanego węzła kratownicy w przestrzennym ustroju prętowym (rys. 3). Z kolei ustrój prętowy (kratownicę) należy podeprzeć na sztywnych podporach, które odbierają mu te same stopnie swobody co łożyska w ustroju rzeczywistym. Te ostatnie przyjęto jako idealne (bez uwzględniania tarcia). Ten sposób podparcia szczegółowego modelu obliczeniowego węzła zapewnia mu właściwą sztywność (swobodę ruchów) oraz odpowiedni rozkład masy. Umożliwia to tym samym określenie charakteru postaci drgań własnych analizowanej konstrukcji.

W celu zapewnienia właściwej sztywności połączeń w węzłach pomiędzy ustrojem prętowym, a dyskretnym modelem obliczeniowym węzła wprowadzono nieważkie, bardzo sztywne przepony.

Modelowi obliczeniowemu nadano cechy fizyczne przez wprowadzenie charakterystyk (gęstości, modułu sprężystości, współczynnika Poissona) odpowiednich materiałów użytych do budowy analizowanej konstrukcji. Wszystkie analizy zostały wykonane w zakresie liniowej teorii sprężystości. Ponadto założono, że przemieszczenia dynamiczne są małe w porównaniu z wymiarami konstrukcji.



Rys. 3. Zamocowanie szczegółowego modelu obliczeniowego węzła kratownicy w ustroju prętowym

3. Analiza statyczna modelu

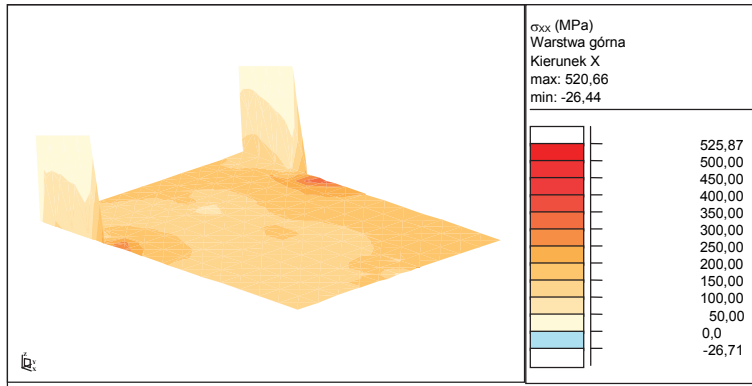
W celu określenia rzeczywistych poziomów naprężeń, w środkach elementów EZ i EW (rys. 2), zbudowany model obliczeniowy obciążono:

- ciężarem własnym;
- żelbetowym korytem wraz z torem ułożonym na podsypce tłuczniowej;
- wpływem zinventaryzowanych różnic przemieszczeń podpór;
- taborem kolejowym w rzeczywistości kursującym na tej linii.

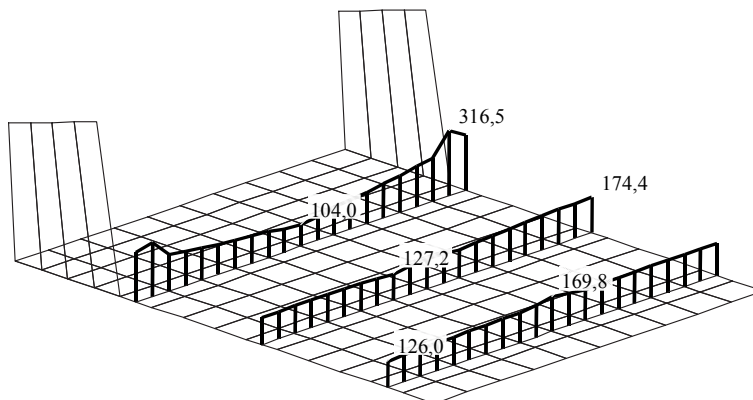
Zadano rzeczywiste wartości tych obciążeń.

Kierunek 1 naprężeń głównych w analizowanym miejscu praktycznie pokrywa się osią X globalnego układu współrzędnych (tj. podłużną osią przęsła). W związku z tym określono naprężenia normalne σ_{xx} (naprężenia odniesione do osi X) w środkach analizowanych elementów skończonych EZ i EW. Następnie naprężenia te zsumowano.

Na rys. 4 przedstawiono mapę naprężeń σ_{xx} w półce górnej blachownicy pasa dolnego dźwigara kratowego, wywołanych sumą w/w obciążeń. Dotyczy ona warstwy górnej półki. Można łatwo zauważyć wyraźne miejsca koncentracji naprężeń w pobliżu punktów styku blach węzłowych (PW i PZ) z półką górną blachownicy. W miejscach tych, w rzeczywistej konstrukcji, powstały poważne pęknięcia.



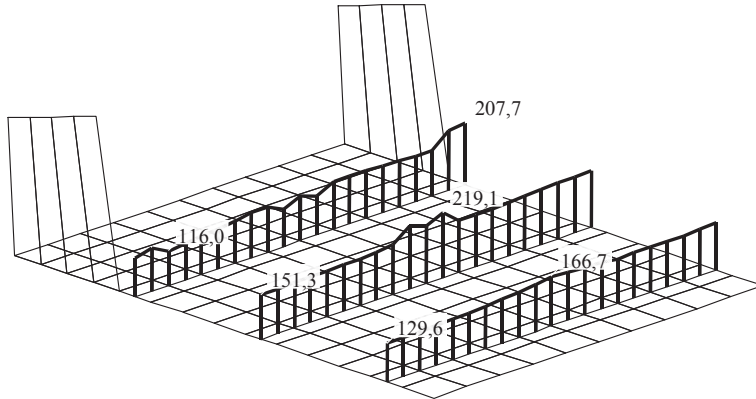
Rys. 4. Mapa naprężeń σ_{xx} w warstwie górnej [MPa]



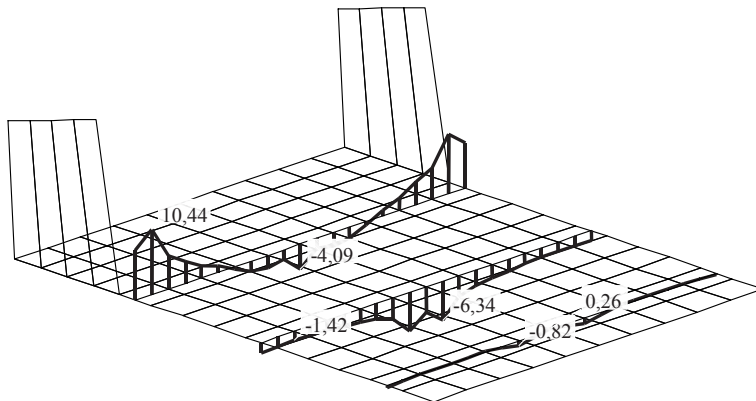
Rys. 5. Zmiana naprężeń σ_{xx} w warstwie górnej [MPa]

Pierwszorzędny wpływ lokalnego zginania półki górnej na poziome naprężenia przedstawiono na rysunkach (rys. 5 i rys. 6). Na rys. 5 widać zmiany naprężeń σ_{xx} w środkach elementów skończonych w warstwie górnej, a na rys. 6 w warstwie dolnej. Wykresy te potwierdzają tendencje do koncentracji naprężeń w pobliżu punktów styku blach węzł-

wych z półką górną blachownicy. Naprężenia w warstwie górnej σ_{xx} w środku elementu EZ osiągają 316,5 MPa (rys. 5), a w środku elementu EW 266,8 MPa. Odpowiednie wartości naprężeń σ_{xx} w warstwie dolnej to 207,7 MPa w elemencie EZ (rys. 6) i 144,5 MPa w elemencie EW.



Rys. 6. Zmiana naprężeń σ_{xx} w warstwie dolnej [MPa]



Rys. 7. Zmiana momentu zginającego M_{xx} [kNm/m]

W miarę oddalania się od miejsca uszkodzenia różnice naprężeń σ_{xx} pomiędzy warstwą górną a dolną zanikają. W trzecim z przedstawionych przekrojów, który jest najbardziej oddalony od miejsca uszkodzenia, odpowiednie wartości naprężeń σ_{xx} w warstwie górnej i dolnej są praktycznie sobie równe.

Główną przyczyną koncentracji naprężeń w elementach EZ i EW jest lokalne zginanie półki górnej blachownicy pasa dolnego dźwigara kratowego. Na rys. 7 przedstawiono wykresy zmian momentu zginającego M_{xx} w trzech przekrojach. W przekroju położonym najbliżej blach węzłowych (przez środki elementów EZ i EW) moment zginający dochodzi do 10,44 kNm/m (rys. 7). W miarę oddalania się od miejsca uszkodzenia wartości momentów zginających szybko maleją.

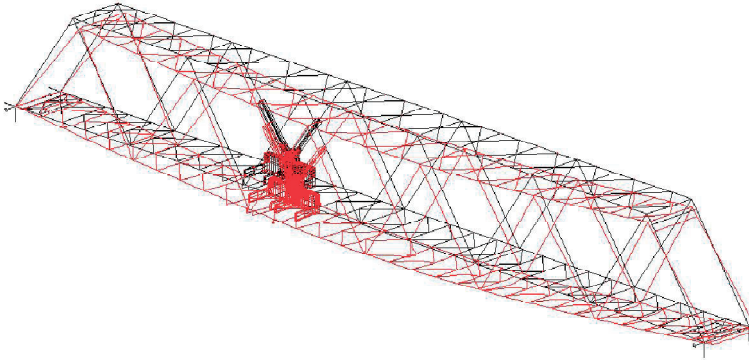
4. Analiza modalna

Analiza modalna (drgań własnych) jest najczęściej używaną metodą analizy własności dynamicznych konstrukcji. Konstrukcja mostu to przestrzenny układ ciągły, zbudowany z materiałów odkształcalnych, o nieskończonej liczbie stopni swobody. W zastosowanej metodzie obliczeń (MES), układ ciągły jest zastępowany układem dyskretnym o skończonej

liczbie stopni swobody. Wówczas analiza drgań własnych jest wykonywana na dyskretnym modelu obliczeniowym. Podstawy teoretyczne drgań układów dyskretnych są powszechnie znane i tutaj zostaną pominięte.

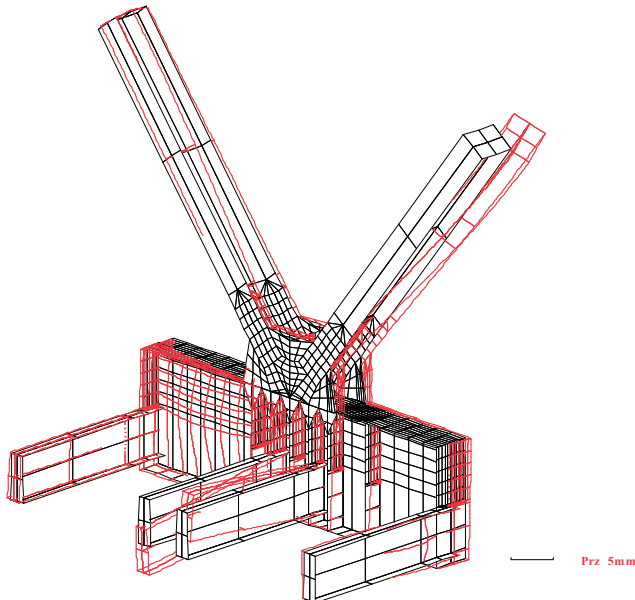
W analizie modalnej szczególną uwagę zwrócono na poszukiwanie postaci drgań własnych w których poprzecznicę przydylatacyjną poruszają się przeciwnie. Takie postacie powinny generować dodatkowe naprężenia w miejscu powstania uszkodzeń w trakcie przejazdu obciążenia przez dylatację. Masy nie wprowadzonych do modelu obliczeniowego elementów ustroju rzeczywistego (żelbetowe koryto balastowe, podsypka tłuczniowa oraz tor kolejowy) dodano w odpowiednich węzłach pomostu. Masy pozostałych elementów konstrukcyjnych program uwzględnił na podstawie danych wymiarów geometrycznych i gęstości materiału.

Na rys. 8 przedstawiono obraz przemieszczeń drugiej postaci drgań własnych o okresie $T=0,592s$.



Rys. 8. Druga postać własna. Okres $T=0,592s$

Na rys. 9 przedstawiono przykład obrazu postaci z przeciwnymi drganiami poprzecznic przydylatacyjnych.



Rys. 9. Postać własna 184. Okres $T=0,060s$

5. Podsumowanie

Przykładowe analizy zamieszczone w niniejszym referacie, zostały przeprowadzone z wykorzystaniem inżynierskiego sposobu modelowania szczegółu konstrukcyjnego. Obliczenia przeprowadzono analizując lokalne wpływy w węźle stalowego, kolejowego mostu kratowego. W węźle tym w trakcie eksploatacji mostu powstały duże pęknięcia zmęczeniowe.

Model obliczeniowy zbudowany w sposób opisany w referacie został obciążony symetrycznie charakterystycznymi wartościami rzeczywistych obciążeń pionowych. Ze względu na specyficzną konstrukcję węzła kratownicy, ujawniło się istotne dla poziomu naprężenia w konstrukcji, zjawisko lokalnego zginania. Dotyczy ono półki górnej blachownicy pasa dolnego dźwigara kratowego w miejscu połączenia z blachami węzłowymi. Lokalne zginanie, wspomnianej półki górnej blachownicy, w płaszczyźnie pionowej powoduje bardzo duże przyrosty naprężeń rozciągających górną warstwę w środku elementu EZ. Dodatkowo w elemencie EZ pojawiają się naprężenia rozciągające od zginania w płaszczyźnie poziomej. W efekcie końcowym naprężenia rozciągające σ_{xx} osiągają w miejscu pojawienia się pęknięcia 316,5 MPa.

Jest to wysoki poziomy naprężen, zwłaszcza w odniesieniu do wytrzymałości obliczeniowej elementów o grubości powyżej 30mm wykonanych ze stali 18G2A, która wynosi $R=270$ MPa. Jednak minimalna charakterystyczna granica plastyczności $R_c=333$ MPa nie została przekroczona. Nie jest to więc poziom wyężenia, który mógłby być jedyną przyczyną powstania pęknięcia. Natomiast daje bardzo wysokie tło naprężeń dla ewentualnych wpływów zmęczeniowych.

Rzeczywiste obciążenia ruchome (tabor kolejowy) poruszające się po analizowanej konstrukcji działają głównie w kierunku pionowym. W tym samym kierunku odbywają się ruchy wykrytych, przeciwbieżnych postaci drgań własnych poprzecznic przydylatacyjnych. W związku z tym takie postaci drgań są niebezpieczne. Wynika to z potencjalnej możliwości ich wzbudzenia i występowania znaczącej składowej w odpowiedzi konstrukcji na przejazd taboru.

6. Wnioski

Należy zauważyć, że znalezienie dodatkowych wpływów (lokalnych momentów zginających oraz przeciwbieżnych postaci drgań własnych poprzecznic przydylatacyjnych) stało się możliwe dzięki zbudowaniu metodą inżynierską szczegółowego modelu obliczeniowego analizowanego węzła. Jest to model o bardzo wysokim poziomie wierności w stosunku do obiektu rzeczywistego.

Zaproponowany w referacie inżynierski sposób modelowania szczegółu konstrukcyjnego umożliwia analizowanie lokalnych wpływów statycznych i dynamicznych w złożonej konstrukcji przy wykorzystaniu komputera osobistego. W przedstawionym przykładzie pozwolił na wykrycie teoretyczne lokalnych wpływów statycznych i dynamicznych. Tak zbudowany model obliczeniowy zachowywał wszystkie cechy globalne modelu prętowego, a z drugiej strony pozwolił ujawnić miejscowy obraz zachowania się szczegółu konstrukcyjnego. Poprawność analiz teoretycznych została potwierdzona wystąpieniem rzeczywistych uszkodzeń w analizowanym ustroju. Można więc w ten sposób analizować lokalne wpływy na zwykłym komputerze osobistym, a wyniki takich obliczeń będą dostępne w stosunkowo krótkim czasie.

Literatura

- 1 Pradelok S. Przyczyny pękania węzłów kratowego ustroju nośnego pewnego typu mostu kolejowego. Rozprawa doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice 2004. Dostępne w Internecie: <http://delibra.bg.polsl.pl>
- 2 Pradelok S. Dynamic tests of certain lattice girder railway bridge type nodes. Proceedings of EVACES'09. International Conference on Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures, Wrocław, 14-16 October 2009, s. 221-222.

- 3 Pradelok S. Analiza dynamiczna lokalnych wpływów w szczególe konstrukcyjnym. VI Ogólnopolska Konferencja Mostowców, Wisła, 2012, s. 199-208. Dostępne w Internecie: <http://www.mostyslaskie.pl/-referaty-w-formacie-pdf>
- 4 Pradelok S. The Influence of Higher Modes Vibrations on Local Cracks in Node of Lattice Girders Bridges. Archives of Civil Engineering, LVIII, 2, 2012, Warszawa 2012, s. 209-221. Dostępne w Internecie: <http://ace.czasopisma.pan.pl/18-archives-of-civil-engineering/wydania/411-no-2--2012>
- 5 Pradelok S. Tests of local vibration in the node of a truss bridge. Journal Architecture Civil Engineering Environment, 2012 vol. 5 no. 4, s. 55-62. Dostępne w Internecie: <http://www.acee-journal.pl/1,7,25,Issues.html>

Engineering modelling of structural details of a bridge

Stefan Pradelok⁻¹, Piotr Bętkowski⁻², Adam Rudzik⁻³,
Piotr Łaziński⁻⁴

¹ e-mail: stefan.pradelok@polsl.pl

² e-mail: piotr.betkowski@polsl.pl

³ e-mail: adam.rudzik@polsl.pl

⁴ Department of Roads and Bridges, Faculty of Civil Engineering, Silesian University of Technology,
e-mail: piotr.lazinski@polsl.pl

Abstract: This paper presents a method of engineering modelling of structural details, which enables the analysis of local static and dynamic effects in a complex structure with the use of a personal computer. An analysed structural detail, modelled with the use of shell finite elements, is mounted to a spatial truss member system. Then, on the basis of prepared computational model, a static or dynamic analysis is carried out. The proposed model allows to detect the local effects in a theoretical. Conducted analyses confirmed the correct operation of such a computational model. Hence, the method of modelling presented in this paper allows to analyse the local effects on ordinary personal computer and more importantly, the results of such calculations are available within a relatively short period of time. The calculations are carried out by analysing the local effects in a steel node of the truss railway bridge.

Keywords: bridge, computational model, engineering modelling, structural detail, local effects.