

Modelowanie oddziaływań dynamicznych pociągu typu Pendolino na konstrukcje zabytkowych mostów kolejowych w Polsce

Mgr inż. Karol Grębowski, mgr inż. Monika Zielińska,
Katedra Mechaniki Budowli i Mostów, Politechnika Gdańska

1. Wprowadzenie

Przez pojęcie kolei dużych prędkości należy rozumieć wykonywanie przewozów pasażerskich z prędkościami wynoszącymi powyżej 200 km/h. W Polsce na temat budowy linii kolejowych dużych prędkości mówi się od wielu lat. Głównym celem jest modernizacja Centralnej Magistrali Kolejowej łączącej północ z południem kraju. W 1998 Polskie Koleje Państwowe wybrały na podstawie przeprowadzonego przetargu firmę Fiat Ferroviaria oferującą superszybkie pociągi Pendolino. Niestety podczas ogłaszania i realizacji przetargu nie uwzględniono stanu polskiej infrastruktury kolejowej, która nie jest gotowa na obsługę pociągów tego typu. W szczególności nie wzięto pod uwagę tego, że w Polsce większość mostów kolejowych posiada starą, nitowaną konstrukcję, która może nie sprostać obciążeniu dynamicznemu wywołanemu przez przejeżdżające pociągi z dużymi prędkościami.

Obiekt mostowy dopuszczony do użytkowania i eksploatacji przy przejazdach taboru kolejowego z dużymi prędkościami zgodnie z wymogami musi spełniać wymagania stanu granicznego nośności z uwzględnieniem dodatkowych efektów dynamicznych i zmęczenia wywołanych zwiększoną prędkością, wymagania stanu granicznego użyteczności, które zapewnia bezpieczeństwo ruchu i odpowiedni komfort jazdy pasażerom, wymagania żywotności i trwałości oraz wymagania odpowiedniego wyposażenia i poprawności rozwiązań konstrukcyjnych [5].

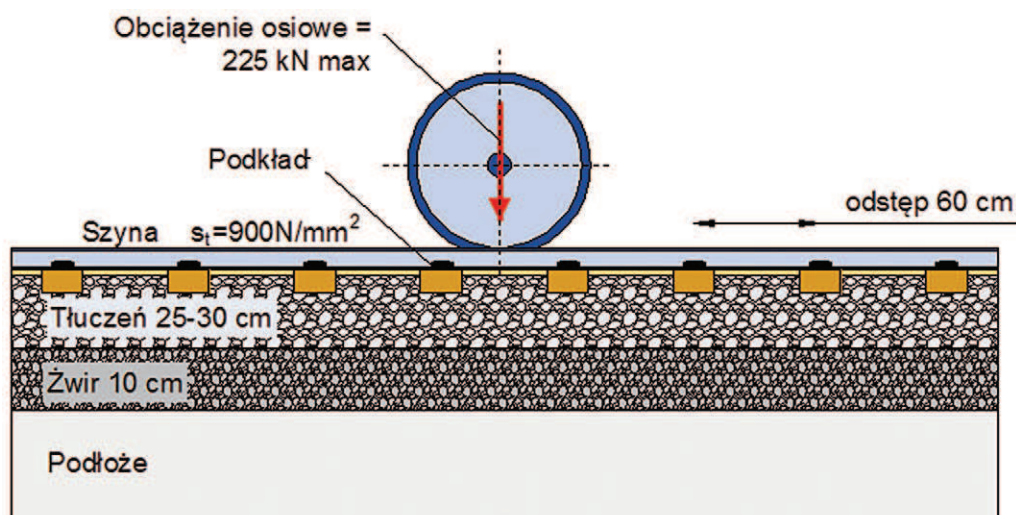
Drgania wywołane przez poruszający się z dużą prędkością pociąg mogą wywołać w zabytkowym obiekcie mostowym powstanie bardzo niekorzystnych czynników, np. drgań i przyspieszeń. Amplitudy drgań przęsta mogą być duże, gdy częstotliwości drgań własnych są bliskie częstościom spowodowanym przez poruszający się pociąg. Wywołane w ustroju nośnym przez przejeżdżający tabor ugięcia, naprężenia i związane z nimi przyspieszenia zmieniają się w wyniku szybkiego przyrostu obciążenia i reakcji bezwładnościowej (wzbudzenia)

następujących po sobie obciążań w przybliżeniu równym rozstawowi wagonów. W związku z tym w wyniku zmienności nacisków kół będącej następstwem niedoskonałości toru lub pojazdu obciążenia dynamiczne mogą w bardzo łatwy sposób wzbudzić konstrukcję i w pewnych warunkach wywołać niebezpieczny dla niej rezonans [3]. Zgodnie z tymi założeniami bardzo trudno jest wykonać model dokładnie odzwierciedlający zależność współpracy między mostem, torem i taborem (model RBT). Dlatego głównym celem pracy jest wykonanie takiego modelu oraz wykorzystanie go do zbadania zabytkowych mostów kolejowych w Polsce pod kątem przydatności i możliwości przejazdu pociągów dużych prędkości. Dzięki badaniom i wykonanym symulacjom numerycznym będzie można określić, czy zabytkowy obiekt przeniesie obciążenia od poruszającego się taboru oraz czy może być włączony w system modernizacji linii kolejowych bez konieczności wzmocnienia obiektu lub w najgorszym przypadku niespełnienia tych wymagań, budowania obok niego nowego mostu – co wiązałoby się z ogromnymi kosztami ekonomicznymi [1, 5].

W pracy przedstawiono metodę modelowania oddziaływań dynamicznych pociągu Pendolino na konstrukcję zabytkowych mostów w Polsce. Badania doświadczalne przeprowadzone na moście kolejowym w Tczewie posłużyły do rozwiązania problemu dotyczącego poprawnego rozwiązania funkcji dynamicznej uwzględniającej model zależności między mostem, torem i poruszającym się po nim taborem. Symulacje numeryczne porównano z wynikami uzyskanymi w terenie oraz sformułowano wnioski będące wskazówkami dla projektantów.

2. Model dynamiczny przejazdu pociągu – układ RBT (most-tor-tabor)

Tor kolejowy musi być zbudowany tak, aby pociągi poruszające się po nim nie wywoływały nadmiernego zanieczyszczenia środowiska, hałasu i wielkości drgań, które mają bardzo duży wpływ na komfort podróżujących



Rys. 1.
Schemat i budowa toru kolejowego

osób. Koszty całkowitego okresu eksploatacji i konserwacji toru muszą być również maksymalnie niskie. To są najważniejsze czynniki brane pod uwagę podczas projektowania, jak i wykonawstwa szlaku kolejowego. Podczas projektowania infrastruktury kolejowej, np. mostów czy wiaduktów, nie wykonuje się obliczeń dynamicznych obiektów obsługujących bezpieczne przejazdu pociągów.

W torach szyny połączone są za pomocą przegubów w celu umożliwienia zmiany długości spowodowanej przez zmiany temperatury w ciągu roku. Dzięki temu połączeniu zapobiega się rozwojowi sił osiowych oraz wynikającemu stąd ryzyku wyboczenia toru w wysokich temperaturach. Natomiast jeśli chodzi o wady takiego typu połączenia, to można z całą pewnością stwierdzić, że generuje wysokie obciążenia dynamiczne podczas przejazdu pociągu. Obciążenia te odpowiedzialne są za wiele problemów takich, jak szybkie pogorszenie pionowej geometrii toru, uplastycznienie główki szyny, niebezpiecznych pęknięć, jak również uszkodzenia podkładów i mocowań. Problemy te zwiększają się stopniowo wraz ze wzrostem prędkości. Im większa prędkość pociągu, tym szybciej dochodzi do powolnej degradacji toru.

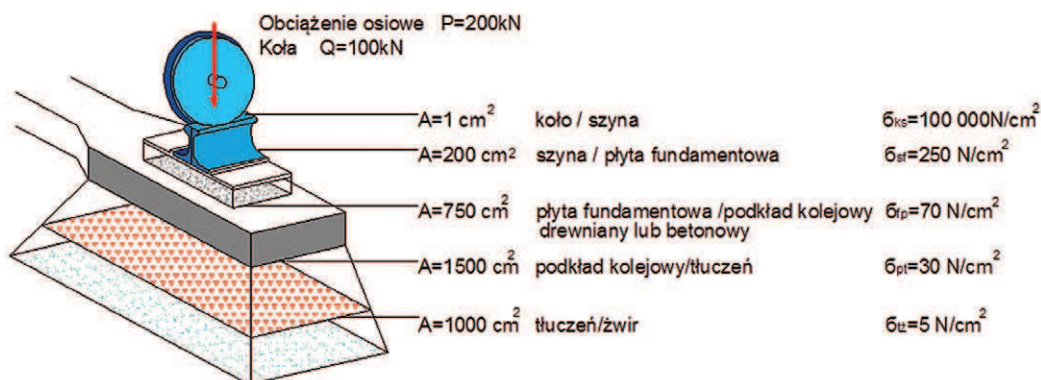
Aby poznać dokładnie pracę i rozkład naprężeń pod toriem kolejowym podczas przejazdu pociągu, należy

określić funkcję nośną poszczególnych elementów toru. Głównym zadaniem toru jest przeniesienie obciążenia taboru poprzez system dyskretny składający się z szyn, podkładów i balastów na grunt. Powyżej przedstawiono schemat usytuowania poszczególnych elementów toru względem siebie oraz główne ich wymiary (rys. 1).

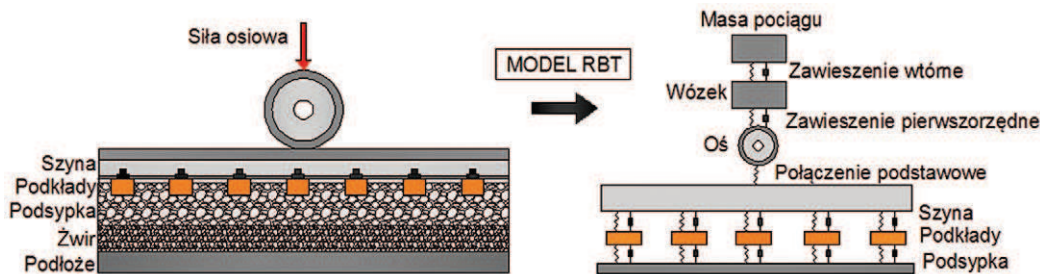
Przenoszenie obciążenia ze względu na statykę następuje na zasadzie zmniejszania naprężeń tzw. warstwa po warstwie. Największe naprężenia występują między kołem taboru, a szyną. Dalej pomiędzy kolejnymi elementami naprężenia się zmniejszają zgodnie ze wzrostem pola powierzchni kolejnych warstw. Najmniejsze naprężenia występują pomiędzy podsypką a gruntem (rys. 2).

Przejeżdżający po moście pociąg z dużą prędkością powoduje szybki przyrost sił, naprężeń, przyspieszeń oraz drgań, w związku z tym współczynnik dynamiczny może nie objąć całego przyrostu. Dlatego aby dokładnie odzwierciedlić poprawną odpowiedź konstrukcji na zmieniające się dynamicznie obciążenie, należy zbadać dynamikę toru.

Z uwagi na dynamikę model wyjściowy układu otrzymuje się poprzez pomnożenie widma wejściowego przez funkcję odpowiedzi układu. Przemieszczenia i obroty wywołane przez wagony na styku koła z szyną spowodowane brakiem idealnego wykonania toru oraz wywołane przyspieszenia, które decydują o komforcie



Rys. 2.
Schemat przenoszenia obciążenia przez tory kolejowe



Rys. 3.
Schemat zależności pomiędzy mostem-torem-tabor (pogląd empiryczny)

jazdy, są obliczane w dziedzinie czasu za pomocą odwrotnej transformaty Fouriera. Dynamiczną interakcję pomiędzy pociągiem i torem można opisać w sposób wystarczający w kierunku pionowym (bez bocznych uderzeń wagonów o główkę szyny) za pomocą modelu matematycznego. Model taki jest przedstawiony na rysunku 3.

Składa się on z dyskretnego układu działającego na zasadzie mas i sprężyn. System zawieszenia między kołem a wózkiem jest pierwszym połączeniem typu sprężyna. Tłumik pomiędzy tym połączeniem pozwala zmniejszyć wzajemne vibracje pochodzące ze wzajemnego oddziaływania koło – szyna. Dlatego zawieszenie to nazywamy połączeniem podstawowym. Redukcja drgań dla niższej częstotliwości jest rozpatrywana w drugim etapie między wózkiem resorowanym a masą taboru i nazywa się zawieszeniem wtórnym. Tor uznawany jest jako konstrukcja nieskończenie sztywna i razem z taborem jest traktowany jako jeden wspólny system [1, 2, 6].

W modelu tor-most-tabor (RBT) analizę dynamiczną przeprowadza się w płaszczyźnie quasi-symetrii, która pokrywa się z linią przechodzącą przez środek mostu. Obciążenie pochodzące od pociągu wymodelowano w postaci masy taboru przekazywanego na tor za pomocą zestawu wózków resorowanych (w modelu RBT – w postaci sprężyn o odpowiedniej sztywności) zastępujących obciążenie pionowe składu pociągu kolejno na szyny, podkłady, podsypkę i grunt. Modelowanie matematyczne i fizyczne układu tor-most-tabor podzielono na układy podrzędne, w skład których wchodzi konstrukcja mostu, obciążenia resorowane od taboru, szyny, podkłady oraz podsyпка. Równania ruchu przyjęte do obliczeń w programie SOFiSTiK uwzględniające wyżej wymienione układy podrzędne mają następującą postać (1) [3, 4]:

$$\begin{cases} B_0 \ddot{q}_0 = F_0 \\ B_1 \ddot{q}_1 + (\kappa K_1 + C_a) \dot{q}_1 + K_1 q_1 = F_1 \\ B_2 \ddot{q}_2 = F_2 \\ B_3 \ddot{q}_3 + \kappa K_3 \dot{q}_3 + K_3 q_3 = F_3 \end{cases} \quad (1)$$

gdzie:

q_0, q_1, q_2, q_3 – są to podwektory współrzędnych uogólnionych;

B_0 – macierz bezwładności podukładu mas resorowanych;

B_1 – macierz bezwładności podukładu szynowego;

K_1 – macierz sztywności podukładu szynowego;

C_a – macierz tłumienia;

κ – czas retardacji dla stali;

B_2 – macierz bezwładności podkładów;

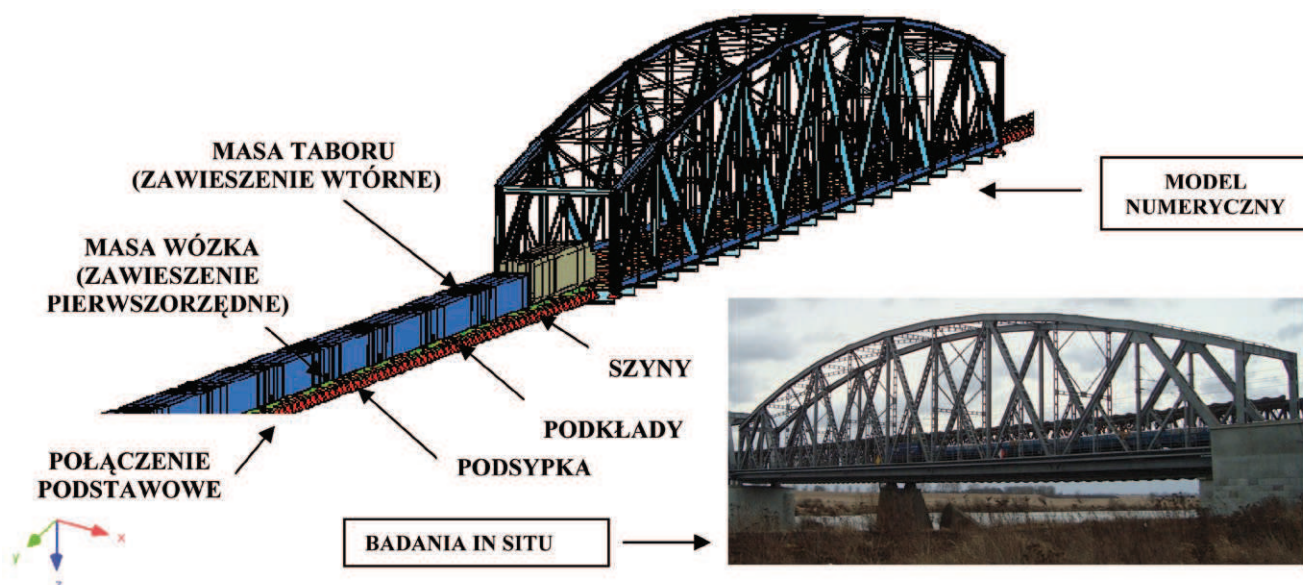
B_3, K_3 – macierz bezwładności i sztywności stalowej konstrukcji nośnej mostu;

F_0, F_1, F_2, F_3 – podwektory obciążeń uogólnionych.

Ta uproszczona funkcja wprowadzona do programu komputerowego pozwala na dokładne odzwierciedlenie oddziaływań dynamicznych przekazywanych z przejeżdżającego pociągu na tor, a potem most [3,5].

3. Weryfikacja modelu układu RBT

W celu określenia charakterystyk dynamicznych układu RBT oraz konstrukcji mostu przeprowadzono próby dynamiczne na moście kolejowym w Tczewie. Uzyskane wyniki miały umożliwić określenie pobudliwości dynamicznej przęsła oraz weryfikację przyjętego do analiz modelu obliczeniowego. Poprawność wykonanego modelu układu most-tor-tabor została zweryfikowana poprzez porównanie wyników zmierzonych w terenie na obiekcie podczas rzeczywistego przejazdu lokomotywy typu ET-22 i dwudziestu wagonów typu węglarka z wynikami uzyskanymi na podstawie modelu mostu i taboru wykonanego w programie SOFiSTiK. Pomiary przeprowadzono w 2013 roku [8]. Lokomotywa i wagony zostały stworzone jako element belkowy, któremu został nadany odpowiedni przekrój o określonym ciężarze i kształcie. Każda oś została zastąpiona przez zespół sprężyn o określonej sztywności, które przenoszą ciężar całego przekroju pociągu na most. Wagony zostały połączone między sobą i lokomotywą elementem kratowym, dzięki czemu mogą pracować niezależnie. Rozstaw sprężyn jest równy rozstawowi normalnemu szyn i wynosi 1435 mm. Po obu stronach przęsła mostu została wymodelowana dodatkowa konstrukcja płytowa o długości odpowiadającej 300 m, szerokości 2,5 m i grubości 0,3 m. Konstrukcja



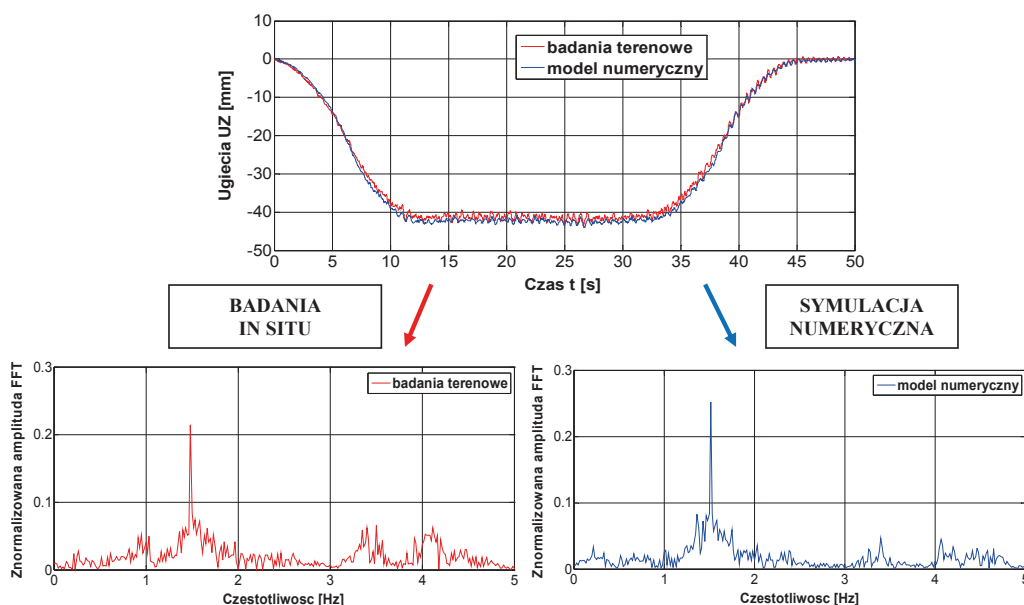
Rys. 4. Weryfikacja modelu RBT

ta jest podparta w każdym punkcie elementu płytowego i nie jest podatna na przejazd składu pociągu, a także nie jest rozpatrywana przy analizie wyników.

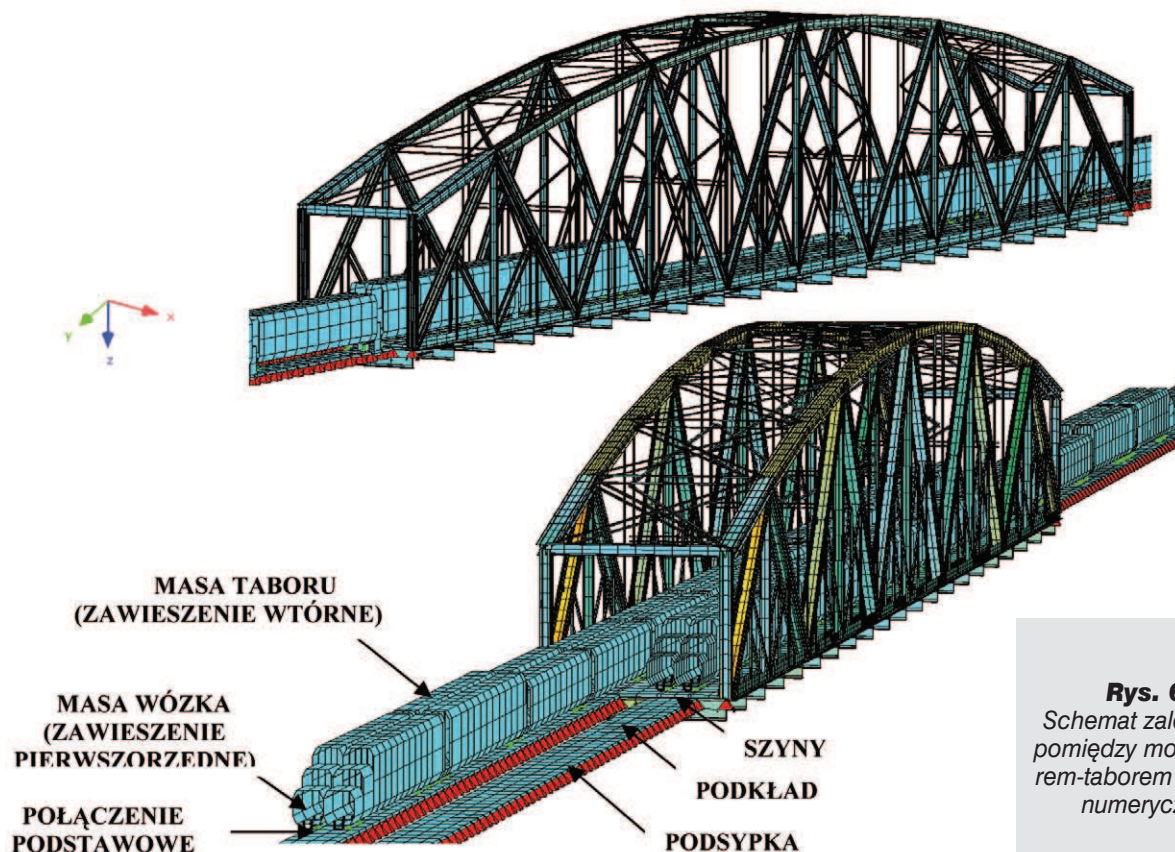
Powyżej przedstawiono model numeryczny lokomotywy wraz z wagonami przyjęty do określenia poprawności przejazdu oraz pracy całej konstrukcji przęsła kratowego. Kierunek przejazdu został zdefiniowany ze stacji Tczew do stacji Lisewo, czyli w taki sam sposób, w jaki poruszał się skład towarowy podczas przeprowadzania pomiarów in situ (rys. 4).

Całkowity ciężar składu wyniósł około 1560 ton, a całkowita długość 300 m. Prędkość przejazdu wyniosła ok. 30 km/h, ponieważ taka maksymalna prędkość obowiązuje na badanym moście. Obliczenia zostały wykonane dla czasu przejazdu równego 50 s z krokiem całkowania co 0,01 s (rys. 5).

Na podstawie wyników uzyskanych w terenie i wyników otrzymanych w programie SOFiSTiK można stwierdzić, że model numeryczny mostu i taboru kolejowego został wykonany poprawnie. Maksymalne ugięcie w 1/2 rozpiętości przęsła pomierzone w terenie wynosi 41,8 mm, natomiast ugięcie otrzymane podczas obliczeń wynosi 43,87 mm. Wynika z tego, że różnica pomiędzy obydwooma ekstremalnymi ugięciami wynosi 4,96%, co jest równoważne temu, że model przęsła mostu jak i taboru poprawnie odzwierciedla przejazd oraz pracę całej konstrukcji. Tak samo można stwierdzić, że częstotliwość wymuszenia siły dynamicznej przez przejeżdżający pociąg wynosząca w badaniach in situ 1,48 Hz jest zgodna z częstotliwością uzyskaną podczas symulacji numerycznych 1,50 Hz, co dowodzi poprawności przyjętego modelu obciążenia.



Rys. 5. Porównanie wyników ugięć w dziedzinie czasu i częstotliwości badań terenowych oraz symulacji numerycznych modelu RBT



Rys. 6.
Schemat zależności pomiędzy mostem-torem-tabor (pogląd numeryczny)

Za pomocą analizy modalnej zostały wyznaczone częstotliwości drgań własnych i odpowiadające im postacie drgań mostu. Analiza dynamiczna pokazała, że w przedziale od 1,17 Hz do 3,88 Hz znajduje się co najmniej 10 częstotliwości drgań własnych. Tak duża liczba częstotliwości drgań własnych jest naturalna dla przestrzennej konstrukcji wykonanej z powtarzających się elementów. Na podstawie obliczeń wykazano, że pierwsza postać giętna pozioma występuje dla częstotliwości drgań własnych 1,17 Hz, natomiast pierwsza postać giętna pionowa dla częstotliwości 2,07 Hz.

Na podstawie wyników częstotliwości drgań własnych mostu można również stwierdzić, że model obliczeniowy mostu i taboru kolejowego został wykonany poprawnie, gdyż w ciągu 5 s okres drgań własnych mostu wyniósł 10, co równa się częstotliwości 2 Hz. Zarejestrowane drgania własne konstrukcji o częstotliwości 2 Hz odpowiadają obliczeniowej częstotliwości drgań własnych równej 2,07 Hz, zarówno dla wyników uzyskanych w terenie, jak i dla wyników otrzymanych w programie.

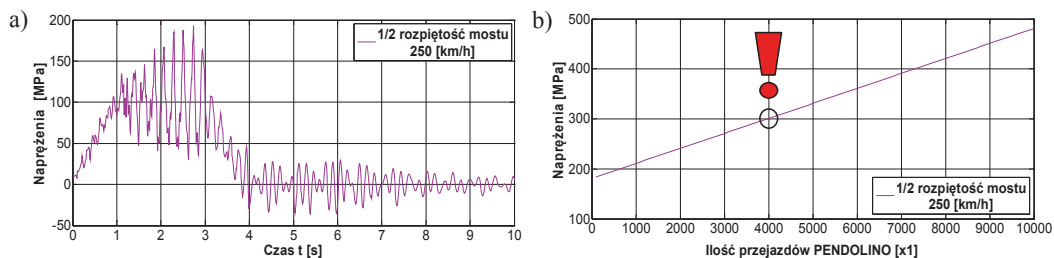
4. Model dynamiczny pociągu Pendolino na przykładzie zabytkowego mostu kolejowego w Tczewie

Na podstawie pozytywnej weryfikacji modelu zależności układu most-tor-tabor stworzono dynamiczny model numeryczny pociągu PENDOLINO. Do poprawnego

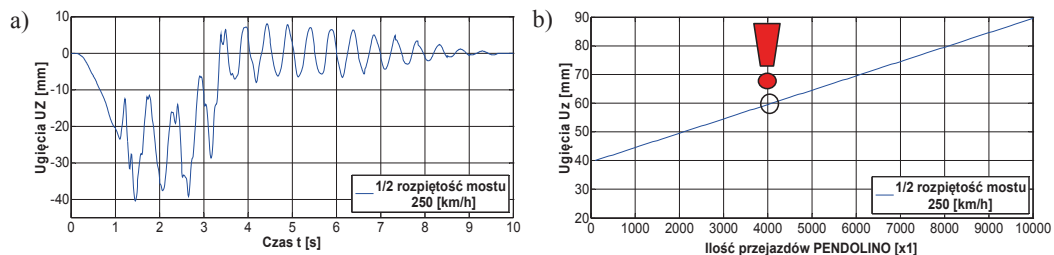
odzwierciedlenia pracy samego pociągu użyto rzeczywistych parametrów budowy i charakterystyk dynamicznych włoskiego taboru zakupionego przez Polskie Koleje Państwowe.

Połączenie między masą składu a wózkiem wymodelowano jako zawieszenie wtórne w postaci sprężyn i tłumika o odpowiedniej sztywności, które przekazuje obciążenia na wózek. W modelu uwzględniono standardowy wózek bez wychylnego pudła. Połączenie między wózkiem a osią kół pociągu zostało stworzone jak zawieszenie pierwotne również za pomocą sprężyn o odpowiedniej sztywności i tłumika. Głównym zadaniem tego połączenia jest przeniesienie obciążeń dynamicznych z połączenia wtórnego na oś pociągu. Całość obciążenia dynamicznego przekazywanego przez połączenia wtórne (drugorzędne) i pierwotne (pierwszorzędne) jest przekazywane za pomocą połączenia podstawowego na szyny, a dalej na konstrukcję mostu (rys. 6).

Jednym z głównych problemów podczas analizy dynamicznej mostów od obciążenia pociągami dużych prędkości nie jest symulacja pojedynczego przejazdu, ale cykliczność przejazdów powodująca zmęczenie konstrukcji. Przy analizowaniu tylko pojedynczego przejazdu możemy otrzymać mylne wyniki, ponieważ w starych mostach ważne jest to, czy konstrukcja jest w stanie przenieść szybki przyrost obciążeń, przyspieszeń i ugięć następujących po sobie [4, 6, 7]. Na rysunkach 7 i 8 przedstawiono wyniki symulacji od obciążenia



Rys. 7.
Wykresy naprężeń σ [MPa] podczas: a) pojedynczego przejazdu, b) cyklicznego przejazdu



Rys. 8.
Wykresy ugięcia U_z [mm] podczas: a) pojedynczego przejazdu, b) cyklicznego przejazdu

pociągiem Pendolino mostu kolejowego w Tczewie od pojedynczego oraz cyklicznego przejazdu.

5. Podsumowanie

W przypadku mostów kolejowych jednym z najbardziej niekorzystnych form obciążeń są obciążenia od przejazdu pociągów dużych prędkości. Zgodnie z planami modernizacji Centralnej Magistrali Kolejowej przypadek taki może mieć miejsce na przykład na zabytkowym moście kolejowym w Tczewie. W artykule przeprowadzono identyfikację modelu RBT obciążenia pociągiem Pendolino oraz wykonano weryfikację uzyskanego modelu obciążenia na moście w Tczewie. Wykazano, że zidentyfikowany w symulacjach numerycznych model zależności most-tor-tabor poprawnie opisuje przejazd pociągu z dużą prędkością po moście.

Ważnym elementem podczas analizy numerycznej starych, nitowanych mostów jest uwzględnienie cykliczności przejazdów. Symulacje numeryczne wykazały, że w przypadku obciążenia mostu pojedynczym przejazdem możemy uzyskać błędne wyniki, ponieważ nie jest uwzględniony bardzo ważny czynnik, jakim jest zmęczenie konstrukcji. W analizowanym przypadku możemy zaobserwować, że most podczas pojedynczego przejazdu spełnia warunki stanu granicznego nośności ($\sigma_{real} 189,4 \text{ MPa} < \sigma_{limit} = 306 \text{ MPa}$) i użyteczności ($\delta_{real} 40,5 \text{ mm} < \delta_{limit} = 64,3 \text{ mm}$), natomiast w przypadku cyklicznych przejazdów występujących po sobie następuje powolne niszczenie przęsła. Przy około 4000 cykli następuje przekroczenie stanów ULS oraz SLS, co może prowadzić do katastrofy.

W procesie projektowania brakuje procedur uwzględniających dynamiczne obciążenia wywołane przejazdem pociągów z dużymi prędkościami. Zastosowanie zidentyfikowanego modelu obciążenia umożliwi już na etapie projektowania lub modernizacji zwiększenie bezpieczeństwa użytkowania mostów kolejowych.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Esveld Coenraad, Modern Railway Track Część 2. MRT – Productions, Delft 2001
- [2] Wyciąg ze szczegółowej dokumentacji projektowej. Remont mostu przez Wisłę w Tczewie km 294,625 Część 3DP/M, maj 2007
- [3] Kłasztorny M., Maślecki K., Machelski Cz., Podwórna M., Analiza dynamiczna typoszeregu mostów stalowych obciążonych pociągami poruszającymi się z dużymi prędkościami. PW, Wrocław 2002
- [4] Kłasztorny M., Dynamika mostów belkowych obciążonych pociągami szybkojeźdnymi. WNT, Warszawa 2005
- [5] Apans L., Sturzbecher K., Analiza dynamiczna kolejowego wiaduktu kratowego w związku z dostosowaniem do przejazdu pociągów z dużymi prędkościami, Politechnika Poznańska
- [6] PN-90/B-03200 Konstrukcje stalowe. Obliczenia statyczne i projektowanie
- [7] PN-EN 1991-2 (2007) EC1: Oddziaływania na konstrukcje. Część 2: Obciążenia ruchome mostów
- [8] Pyrzowski L., Skabara I.: Żywotność mostu w oparciu o badania obiektu in situ na przykładzie kolejowego mostu kratowego – Most przez rzekę Wisłę w Tczewie. PG 2003

Uwaga!

Członkowie PZITB i PIIB
prenumeratę na rok 2015
mogą zamówić także przez
Okręgowe Izby Inżynierów
Budownictwa.

Prenumerata
– 252 zł
Ulgowa
– 126 zł

Studencka
– 126 zł
Elektroniczna
– 75 zł

Zapraszamy do zakupu prenumeraty
„Przeglądu Budowlanego”