

Badanie skutków oddziaływań bocznych na wiadukcie kolejowym leżącym na łuku

Piotr Olaszek¹, Juliusz Cieśla², Waldemar Szaniec³

¹ Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Warszawa, e-mail: polaszek@ibdim.edu.pl

² Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Warszawa, e-mail: jciesla@ibdim.edu.pl

³ Katedra Mechaniki, Konstrukcji Metalowych i Metod Komputerowych, Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Świętokrzyska, e-mail: waldek.szaniec@tu.kielce.pl

Streszczenie: W referacie przedstawiono badania konstrukcji mostowej związane z dostosowywaniem linii kolejowej do dużych prędkości: $v_{max} \leq 200$ km/h dla taboru konwencjonalnego i $v_{max} \leq 250$ km/h dla taboru z wychylnym pudłem. Charakterystyczną cechą badanego obiektu jest tor kolejowy leżący na łuku o promieniu $R = 2\ 600$ m. Zbadanie obiektów wymagało sprawdzenia wpływu efektów dynamicznych na stany graniczne nośności – bezpieczeństwo konstrukcji oraz stany użyteczności związane z bezpieczeństwem jazdy i komfortem podróżnych. W ramach badań wykonano jazdy taborom próbnym (dwie lokomotywy i cztery wagony pasażerskie) z prędkościami dochodzącymi do 200 km/h. W referacie skoncentrowano się na zagadnieniach związanych ze skutkami oddziaływań bocznych, wywoływanych przez tabor kolejowy, wynikających z położenia obiektu na łuku. Prowadzono pomiary pionowych i poziomych przemieszczeń oraz przyspieszeń przęśla i prędkości przejeżdżającego taboru. Przedstawiono wybrane zmierzone i obliczone teoretycznie przebiegi przemieszczeń i przyspieszeń. Przeanalizowano stopień rozbieżności zmierzonych i obliczonych wartości przemieszczeń i przyspieszeń wynikający z występowania sił odśrodkowych.

Słowa kluczowe: badania pod obciążeniem dynamicznym, oddziaływania boczne, mostowe obiekty kolejowe.

1. Wprowadzenie

Modelowanie i badania kolejowych konstrukcji mostowych na liniach dużych prędkości wymaga uwzględnienia wielu oddziaływań. Praca konstrukcji mostowej na liniach dużej prędkości jest zagadnieniem złożonym. Istotnym elementem są oddziaływania boczne zestawów kołowych, które powinny być rozpatrywane jako przestrzenne i nieliniowe [1, 2].

Prezentowana praca została wykonana w ramach badań obiektów mostowych znajdujących się na Centralnej Magistrali Kolejowej (CMK) pod próbnym obciążeniem dynamicznym, których celem było dopuszczenie tych obiektów do eksploatacji do prędkości $v_{max} \leq 200$ km/h dla taboru konwencjonalnego i prędkości $v_{max} \leq 250$ km/h dla taboru z wychylnym pudłem. Badania zostały wykonane na zlecenie PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. – Centrum Realizacji Inwestycji Oddział w Lublinie przez Laboratorium Badań Konstrukcji Mostowych Zakładu Mostów we współpracy z Ośrodkiem Badań Mostów w Kielcach Instytutu Badawczego Dróg i Mostów oraz Katedrą Mechaniki, Konstrukcji Metalowych i Metod Komputerowych Politechniki Świętokrzyskiej. Dodatkowo Laboratorium Badań Taboru Instytutu Kolejnictwa prowadziło pomiary prędkości przejazdu pociągu badawczego oraz przyspieszeń oddziaływujących na pudło jednego z wagonów.

W referacie zaprezentowano wyniki badań obiektu, którego charakterystyczną cechą jest tor kolejowy leżący na łuku o promieniu $R = 2\ 600$ m.

Badania konstrukcji mostowych związane z dostosowywaniem linii kolejowych do dużych prędkości były wykonywane w Polsce [3, 4, 5, 6, 7] i na świecie [8, 9]. W Polsce warunki techniczne dla modernizacji lub budowy linii kolejowych do prędkości do 200/250

km/h określono w standardach technicznych [10] oraz normach [11, 12].

Zbadanie przydatności obiektów mostowych na liniach dużej prędkości wymaga sprawdzenia wpływu efektów dynamicznych na stany graniczne nośności określających bezpieczeństwo konstrukcji oraz stany graniczne użyteczności związane z bezpieczeństwem jazdy i komfortem podróżnych. W ramach badań ze względu na możliwości realizacji wykonano jazdy taborem próbnym (dwie lokomotywy i cztery wagony pasażerskie) z prędkościami dochodzącymi do 200 km/h. Prowadzono pomiary pionowych i poziomych przemieszczeń i przyspieszeń przęseł oraz prędkości przejeżdżającego taboru.

2. Badana konstrukcja

Badany wiadukt kolejowy znajduje się nad linią kolejową na szlaku Grodzisk Mazowiecki – Korytów w ciągu linii CMK. Składa się z dwóch oddzielnych dla każdego z torów konstrukcji nośnych. Każda z konstrukcji wykonana jest jako stalowe wolnopodparte przęsło, o konstrukcji kratownicowej o pasach równoległych, ze sztywnym pasem dolnym w postaci dwóch blachownic. Między blachownicami znajdują się poprzecznice. Z poprzecznicami zespolona jest żelbetowa płyta pomostu, która stanowi jednocześnie koryto balastowe. Poprzecznice łączone są ze środknikami za pomocą złącz nitowanych. Dla obu torów konstrukcje są identyczne. Krzyżulce kratownicy mają przekroje dwuteowe, a pasów górnych – skrzynkowe otwarte od dołu. Konstrukcja kratownicy jest spawano-nitowana. Rozpiętość teoretyczna przęsła wynosi 93,00 m. Widok wiaduktu w czasie badań przedstawiono na rys. 1.

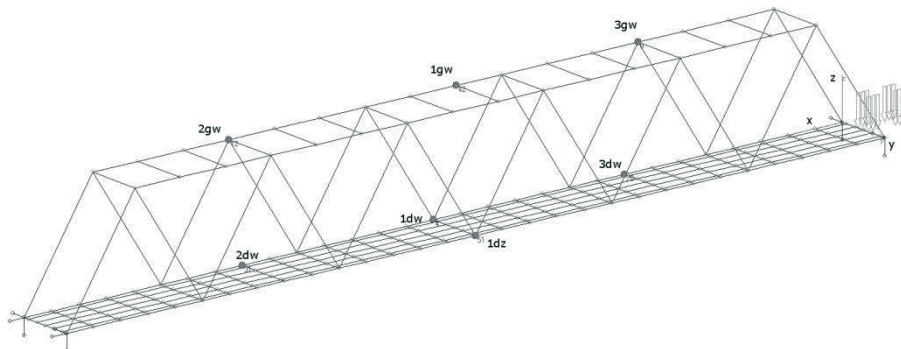


Rys. 1. Widok wiaduktu w czasie badań.

3. Model teoretyczny konstrukcji

Analizę numeryczną wykonano wykorzystując model przedstawiony na rys. 2. Wykorzystano w nim elementy ramy przestrzennej o 6 stopniach swobody w węzle. Uwzględniono współpracę koryta z częściami stalowymi. Zostało ono sprowadzone do elementów prętowych. Układ zawierał 249 węzłów i 526 elementów. Oszacowano masę składników dodatkowych (podsypki tłuczniowej, toru, balustrad) i rozdzielono na elementy modelujące pomost. Rzeczywiste obciążenie ruchome (inercyjne, resorowane) zostało zamodelowane strumieniami sił skupionych poruszającymi się po konstrukcji. Obciążenie to przekazywane jest na elementy nośne w sposób pośredni za pośrednictwem torowiska i

podsyпки. Zostało to uwzględnione przez zastąpienie pojedynczego nacisku (N) trzema siłami skupionymi w odstępach $\Delta x = 0,5$ m o wartościach $N/4$, $N/2$, $N/4$ działającymi w kierunku osi toru.



Rys. 2. Schemat modelu numerycznego; zaznaczono główne punkty, dla których prowadzono porównanie wartości obliczonych i zmierzonych.

Równanie równowagi dynamicznej układu ma postać

$$\mathbf{B}_s \ddot{\mathbf{q}}_s(t) + \mathbf{R}_s \dot{\mathbf{q}}_s(t) + \mathbf{K}_s \mathbf{q}_s(t) = \bar{\mathbf{F}}_s(t) \quad (1)$$

gdzie: \mathbf{B}_s , \mathbf{R}_s , \mathbf{K}_s - macierze bezwładności, tłumienia i sztywności konstrukcji, $\bar{\mathbf{F}}_s$ - wektor równoważników obciążeń będący funkcją położenia obciążenia, $\mathbf{q}_s(t)$, $\dot{\mathbf{q}}_s(t)$, $\ddot{\mathbf{q}}_s(t)$ - wektory współrzędnych, prędkości i przyspieszeń uogólnionych.

Równanie ruchu rozwiązywano metodą Newmarka, wykorzystując wariant bezwarunkowo stabilny. Przyjęto model tłumienia w postaci $\mathbf{R}_s = r_k \mathbf{K}_s + r_b \mathbf{B}_s$, gdzie r_k i r_b są współczynnikami tłumienia sztywnościowego i masowego [13].

Obliczenia dynamiczne wykonano za pomocą programu komputerowego MES3D (T. Borowicz, W. Szaniec, Politechnika Świętokrzyska) Program umożliwia analizę przestrzennych konstrukcji inżynierskich pod wpływem obciążeń ruchomych, w tym także inercyjnych [14, 15]. Właściwe analizy zostały poprzedzone weryfikacją poprawności modelu obliczeniowego. Porównano rozwiązania statyczne z wynikami uzyskanymi w programie Robot. W analizie dynamicznej uwzględniono przejazd składu z prędkościami $v = 10, 80, 120, 160, 180$ i 200 km/h. Przyjęto długość kroku zmiany położenia obciążenia $\Delta x = 0.02$ m, na tej podstawie ustalano krok czasowy $\Delta t = \Delta x/v$. Obliczenia zostały wykonane przy założeniu toru prostoliniowego z uwzględnieniem jazdy po łuku. W tym drugim przypadku do wektora obciążeń dodawano składniki związane z działaniem sił odśrodkowych. Były one generowane automatycznie przez program w trakcie wykonywania obliczeń na podstawie obciążeń statycznych i informacji o ruchu obciążenia.

4. Opis badań

4.1. Środki obciążające

Do obciążenia próbnego wykorzystano zestaw złożony z dwóch lokomotyw elektrycznych ES 64 U4, na początku i na końcu składu oraz czterech wagonów osobowych typu 154A. Zaplanowano przejazdy w obu kierunkach z prędkościami 10, 180, 120, 160, 180 i 200. Wartość maksymalnej prędkości wynikała z braku zgody Urzędu Transportu Kolejowego na jazdy z prędkościami większymi niż 200 km/h. Rzeczywiste prędkości jazdy były zgodne z programem w granicach $\pm 2,5$ km/h.

4.2. Metody pomiaru

W czasie badań prowadzono pomiary pionowych i poziomych przemieszczeń oraz

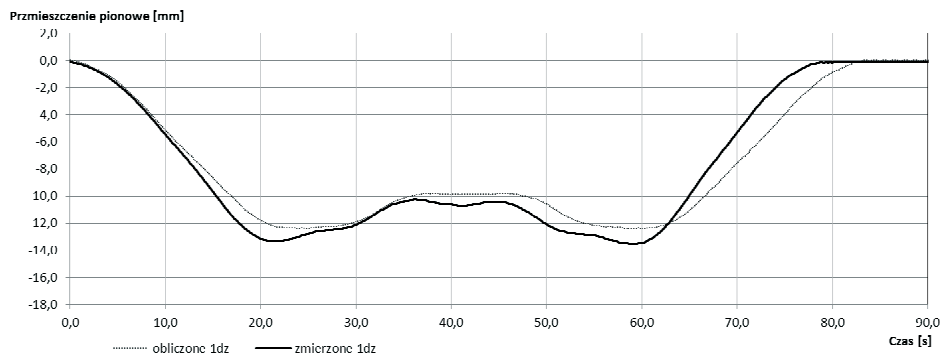
przyspieszeń pręśla i prędkości przejeżdżającego taboru. Do pomiaru przemieszczeń pręślei zastosowano przetworniki indukcyjne z rejestracją komputerową z wykorzystaniem systemu Spider8 firmy Hottinger Baldwin Messtechnik. W przypadku przemieszczeń pionowych przetworniki były zamocowane na ziemi, a przemieszczenia pręślei były przenoszone przez układ sprężyna-drut. W przypadku przemieszczeń poziomych pomostu przetworniki były zainstalowane pomiędzy wiaduktami i jeden z wiaduktów służył, jako odniesienie dla drugiego. Dodatkowo pomiary przemieszczeń pasa górnego kratownicy były prowadzone z zastosowaniem radaru interferencyjnego IBIS-S. Pomiary przyspieszeń prowadzono w kierunku pionowym z zastosowaniem indukcyjnych przetworników przyspieszeń z masą drgającą z rejestracją komputerową, również przy pomocy systemu Spider8. Pomiary przemieszczeń i przyspieszeń prowadzono w trzech przekrojach: w $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ i $\frac{3}{4}$ rozpiętości pręślei.

Pomiary prędkości przejazdu pociągu prowadzono z poziomu pociągu na podstawie zliczania impulsów fotokomórki związanej z kołem lokomotywy.

Dla wszystkich pomiarów prowadzonych z wykorzystaniem systemu Spider8 zastosowano częstotliwość próbkowania równą 200 Hz. Pomiary z zastosowaniem radaru interferencyjnego prowadzono z częstotliwością próbkowania 190 Hz.

4.3. Wyniki pomiarów

Wykonano szczegółową analizę zarejestrowanych przebiegów przemieszczeń i przyspieszeń oraz określono wartości ekstremalnych amplitud. Wartości te zestawiono z wartościami ugięć i przyspieszeń pręślei obliczonymi teoretycznie.

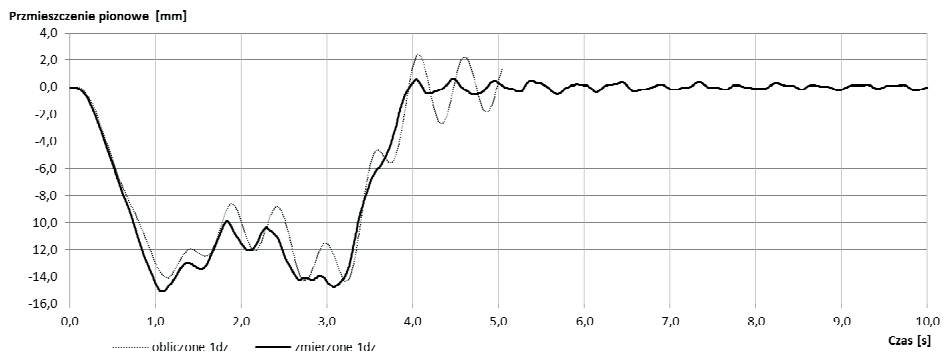


Rys. 3. Przykład przebiegu przemieszczeń pionowych zarejestrowany podczas przejazdu pociągu z prędkością 11,9 km/h i obliczony dla prędkości 10,0 km/h

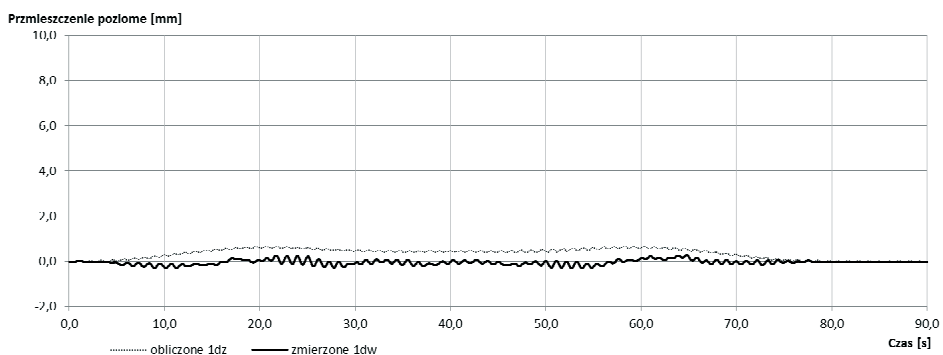
Przykładowe zestawienie przebiegów przemieszczeń pionowych zmierzonych i obliczonych dla przejazdów z prędkościami 10 i 200 km/h przedstawiono na rys. 3 i 4 a poziomych na rys 5 i 6. Dla zwiększenia czytelności na rysunkach dla prędkości 10 i 200 km/h zastosowano różne skale na osi czasu.

Częstotliwości drgań określono na podstawie analizy drgań wymuszonych podczas przejazdu pociągu i drgań swobodnych pręślei po zjeździe pociągu oraz obliczeń gęstości widmowej. Widma zostały sporządzone za pomocą oprogramowania Catman firmy HBM z wykorzystaniem szybkiej transformaty Fouriera (FFT).

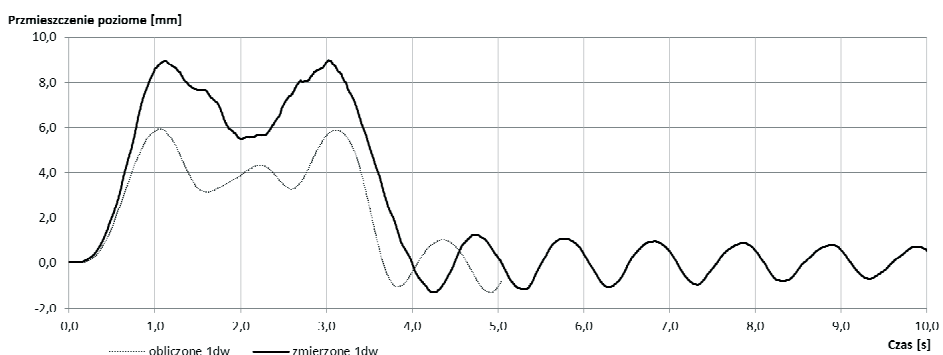
Na podstawie analizy wyznaczonych wartości można wnioskować, że w drganiach swobodnych konstrukcji pręślei występują składowe o najniższych częstotliwościach równych $f_j = 2,1$ Hz dla drgań w kierunku pionowym, co jest wartością dopuszczalną i $f_j = 1,0$ Hz dla drgań w kierunku poprzecznym, co jest poniżej wartości minimalnej 1,2 Hz zalecanej przez normę [11].



Rys. 4. Przykład przebiegu przemieszczeń pionowych zarejestrowany podczas przejazdu pociągu z prędkością 199,0 km/h i obliczony dla prędkości 200,0 km/h.



Rys. 5. Przykład przebiegu przemieszczeń poziomych zarejestrowany podczas przejazdu pociągu z prędkością 11,9 km/h i obliczony dla prędkości 10,0 km/h.



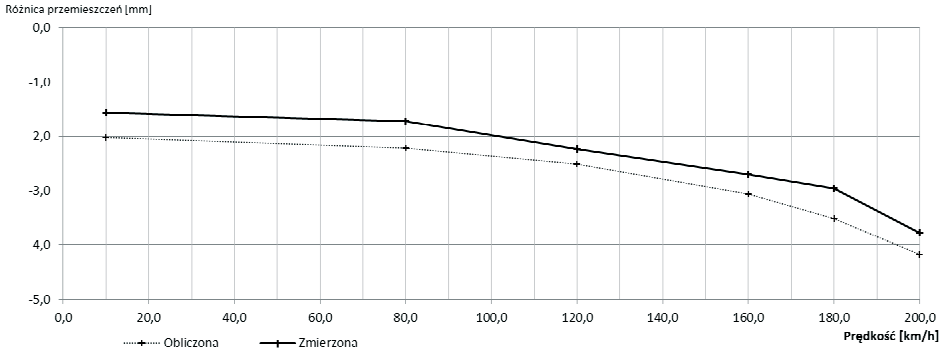
Rys. 6. Przykład przebiegu przemieszczeń poziomych zarejestrowany podczas przejazdu pociągu z prędkością 199,0 km/h i obliczony dla prędkości 200,0 km/h.

4.4. Analiza wyników pomiarów

Podstawą do analizy wyników pomiarów była analiza porównawcza wartości zmierzonych: pionowych przemieszczeń, częstotliwości drgań własnych i przyspieszeń z wartościami obliczonymi teoretycznie oraz ocena zgodności zmierzonych przemieszczeń

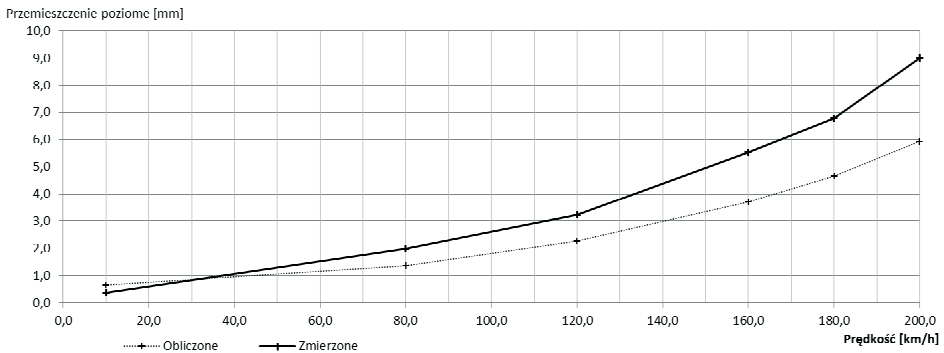
poprzecznych, częstotliwości drgań własnych i przyspieszeń z zakresem zalecanym przez normy [11, 12].

Charakterystyczną cechą badanego obiektu, występującą ze względu na położenie na łuku, było występowanie różnicy przemieszczeń pionowych dźwigarów od strony zewnętrznej i wewnętrznej łuku. Różnica ta wzrastała nieliniowo z prędkością przejazdu pociągu (rys. 7).



Rys. 7. Wykres zmierzonych i obliczonych maksymalnych wartości różnicy przemieszczeń pionowych obu dźwigarów; w funkcji prędkości przejazdu pociągu obciążającego; ujemna wartość różnicy przemieszczeń wynika z większego przemieszczenia występującego dla dźwigara od strony zewnętrznej łuku.

Podobny nieliniowy charakter ma zależność maksymalnych wartości poziomych przemieszczeń poprzecznych pasa dolnego kratownicy (znak + w kierunku na zewnątrz łuku) w funkcji prędkości przejazdu pociągu obciążającego, co ilustruje rys. 8.



Rys. 8. Wykres zmierzonych i obliczonych maksymalnych wartości poziomych przemieszczeń poprzecznych pasa dolnego kratownicy (znak + w kierunku na zewnątrz łuku) w funkcji prędkości przejazdu pociągu obciążającego.

W tabeli 1 przedstawiono zestawienie przemieszczeń zmierzonych i obliczonych dla prędkości przejazdu pociągu 10 i 200 km/h.

Tabela 1. Zestawienie wartości stosunków przemieszczeń zmierzonych do obliczonych dla prędkości przejazdu pociągu 10 i 200 km/h.

Wielkość	Prędkość przejazdu [km/h]	
	10	200
	Stosunki wartości zmierzonych do obliczonych [%]	
Przemieszczenie pionowe od wewnętrznej łuku	127%	104%
Przemieszczenie pionowe od zewnętrznej łuku	108%	107%
Różnica przemieszczeń pionowych	77%	90%
Przemieszczenie poziome	55%	151%

5. Podsumowanie

Na podstawie analizy wyników badań stwierdzono, że wiadukt można dopuścić do ruchu pociągów z maksymalną prędkością 200 km/h. Ze względu na nieliniowy charakter odpowiedzi dynamicznych konstrukcji oraz brak pełnej zgodności wyników badań z obliczeniami, nie było możliwe dopuszczenie wiaduktu do ruchu z prędkościami w zakresie od 200 do 250 km/h dla taboru z wychylnym pudłem, bez wykonania dodatkowych badań z taborem przejeżdżającym z prędkościami w zakresie od 200 do 250 km/h.

Niezgodności zmierzonych wartości przemieszczeń pionowych i poziomych z wartościami obliczonymi wynikają z niedoskonałości przyjętego modelu obliczeniowego. Model uwzględniał dominujące wartości oddziaływań w postaci sił pionowych i poziomych, wywoływanych przez masę poruszającego się z różnymi prędkościami pociągu na torze w łuku. Istnieją natomiast inne czynniki o charakterze losowym, wpływające na wielkość przemieszczeń, które zależą nie tylko od prędkości, krzywizny toru i parametrów taboru, ale i od miejscowych nierówności toru (uderzenia boczne) i sprężystej charakterystyki podtorza. Czynnikiem, który w sposób istotny wpływa na rozwiązania, zwłaszcza wartości przyspieszeń, jest tłumienie. Planowane jest prowadzenie dalszych prac związanych z kalibracją modelu obliczeniowego z uwzględnieniem tłumienia.

Uwagi dodatkowe

Autorzy artykułu dziękują personelowi Laboratorium Badań Konstrukcji Mostowych: mgr inż. Tomaszowi Biczelowi, inż. Robertowi Czachowskiemu, Lilianie Gąsiorek, mgr inż. Małgorzacie Mazanek mgr inż. Pawłowi Nurkowi i dr inż. Łukaszowi Topczewskiemu za zaangażowanie w czasie badań; mgr inż. Mirosławowi Biskupowi z Ośrodka Badań Mostów w Kielcach za przekazanie statycznego modelu konstrukcji oraz dr hab. inż. Tadeuszowi Borowiczowi prof. PŚk, dr hab. inż. Markowi Łagodzie prof. IBDiM i dr hab. inż. Barbarze Rymczy prof. IBDiM za konsultacje.

Literatura

- 1 M. Kłasztorny, Dynamika mostów belkowych obciążonych pociągami szybkojeźdnymi, WNT, Warszawa 2005.
- 2 A. Niemierko, Projektowanie mostów kolejowych na liniach dużej prędkości - cz. I i II, www.inzynierbudownictwa.pl.
- 3 Kłasztorny M.: Analiza dynamiczna belkowych mostów zespolonych na CMK w warunkach zwiększonych prędkości pociągów (160 ÷ 250) km/h”. Drogi i Mosty, 3, 2003.
- 4 Wołowicki, W., Sturzbecher, K. Apanas, L.: Badania dynamiczne pewnych typów mostów kolejowych związane z ich dostosowaniem do dużych prędkości taboru. Inżynieria i Budownictwo, nr 5/2005, s. 260-264.
- 5 Sturzbecher K.: Obliczenia dynamiczne zespolonego wiaduktu kolejowego w celu dostosowania do prędkości ruchu 250-350 km/h. XIX Seminarium Współczesne metody budowy, wzmocnienia i przebudowy mostów, Poznań-Rosnówko 2009.

- 6 Łaziński, P., Salamak, M.: O badaniach mostów pod próbnym obciążeniem. Inżynieria i Budownictwo, nr 5-6/2010, s. 300-303.
- 7 Cieśla J., Olaszek P., Biskup M., Mazanek M., Badania wybranych obiektów inżynierskich na linii CMK pod obciążeniem dynamicznym, Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej – Budownictwo i Inżynieria Środowiska, 2011 tom 3/11/III, nr 276; Z. 58, s.149-156.
- 8 M. Heiden M., Stadler C.: Vibration investigation of existing railway viaducts in Austria. Proc of the Conference: Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures EVACES'09, Wrocław 2009, s. 581-590.
- 9 Stampfer J., Janjic D., Handel C.: Standardized serviceability tests of railway bridges. Proc of the Conference: Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures EVACES'07, Porto 2007, s. 1271-1278.
- 10 Standardy techniczne - Szczegółowe warunki techniczne dla modernizacji lub budowy linii kolejowych do prędkości $V_{max} \leq 200$ km/h (dla taboru konwencjonalnego)/250 km/h (dla taboru z wychylnym pudłem) - Tom III Kolejowe obiekty inżynierskie - Wersja 1.1, PKP Polskie Linie Kolejowe S.A., Centrum Naukowo-Techniczne Kolejnictwa, Warszawa 2010 r.
- 11 Norma PN-EN1990:2004 Eurokod 0: Podstawy projektowania konstrukcji
- 12 Norma PN-EN 1991-2:2007 Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje - Część 2: Obciążenia ruchome mostów.
- 13 Borowicz T.: Metoda elementów skończonych w analizie drgań konstrukcji poddanych działaniu obciążeń ruchomych. ZN PŚk, Bud. 15, Kielce 1983.
- 14 Borowicz T.: Rozwiązywanie konstrukcji obciążonych ruchomymi oscylatorami z zastosowaniem iteracyjnego wyznaczania sił w więziach sprężysto-tłumiących. Prace Instytutu Badawczego Dróg i Mostów, 3-4, Warszawa 1996, s. 7-36.
- 15 Podworna M., Klasztorny M.: Wpływ cech pojazdów szynowych na odpowiedź dynamiczną mostu belkowego. Drogi i Mosty Nr 3/2011.

Investigation of horizontal forces result in railway viaduct with curved truck

Piotr Olaszek¹, Juliusz Cieśla², Waldemar Szaniec³

¹ Road and Bridge Research Institute, Warsaw, e-mail: polaszek@ibdim.edu.pl

² Road and Bridge Research Institute, Warsaw, e-mail: jciesla@ibdim.edu.pl

³ Department of Mechanics, Metal Structures and Computer Methods, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Kielce University of Technology, e-mail: waldek.szaniec@tu.kielce.pl

Abstract: In the report some investigations of bridge structure, connected with the adaptation of the railway line to speeds up to 200 km/h for conventional trains and up to 250 km/h for tilting trains were presented. A railway track is the characteristic feature of tested viaduct, because the truck is curved over the whole length of span with radius of $R = 2600$ m. The tests of the viaduct required the verification of influence of the dynamic effects on the ultimate limit states which corresponded to the safety of structure, as well as the serviceability limit states, related to the safety of driving and the travellers' comfort. In frames of investigations, a special train comprised of two locomotives and four passenger cars, was used with speeds in the range between 10 and 200 km/h. The report focuses on the problems addressing the influence of horizontal actions in the case of bridge with curved truck. The measurements of the horizontal and vertical displacements as well as the accelerations of span, and the speed of crossing test train were executed. The measured and theoretically calculated chosen courses of displacements and accelerations were introduced. The degree of divergence between measured and calculated values was analysed.

Keywords: dynamic load, testing, horizontal actions, railway bridges.