



dr inż. Tomasz Kamiński^{1)*}
prof. dr hab. inż. Jan Bien¹⁾

Obciążenie próbne kolejowego mostu małej rozpiętości – badania i analizy

Proof loading of a short-span bridge – testing and analysis

DOI: 10.15199/33.2015.10.10

(Studium przypadku)

Streszczenie. W artykule scharakteryzowano uwarunkowania i trudności w badaniach doświadczalnych i analizie teoretycznej obiektów mostowych o przęsłach małych rozpiętości, wynikające z niewielkich przemieszczeń konstrukcji oraz specyficznego sposobu oparcia przęsła na podporach za pośrednictwem pasm z tworzywa o stosunkowo znacznej odkształcalności. Przedstawiono wyniki badań terenowych i analizy obliczeniowej żelbetowego mostu kolejowego bardzo małej rozpiętości przeprowadzonych w ramach statycznego obciążenia próbnego konstrukcji. Zaprezentowano zakres prac obejmujący testy polowe i laboratoryjne, analizę numeryczną z wykorzystaniem modelu Metody Elementów Skończonych (MES) oraz porównanie uzyskanych wyników doświadczalnych i teoretycznych. Szczególną uwagę skupiono na sposobie modelowania bezpośredniego oparcia przęsła żelbetowego na przyczółkach z zastosowaniem ciągłej przekładki bitumicznej. Na podstawie wyników zaproponowano procedurę badań doświadczalnych oraz metodykę modelowania rozpatrywanego typu konstrukcji na potrzeby analiz teoretycznych.
Słowa kluczowe: most, obciążenie próbne, analiza, Metoda Elementów Skończonych.

Abstract. In the paper conditions and difficulties of experimental testing and theoretical analysis of bridge structures with short spans are described which are related to small displacements of such structures and specific type of span support by means of material with relatively high deformability. Results of field testing and analysis of a short-span railway bridge carried out within static proof loading test are presented. Scope of work, including experimental testing on site and additional investigations in laboratory, structural analysis by means of the Finite Element Method (FEM) as well as comparison of the results, is presented. Special attention is paid to modelling of specific support of the RC slab girder by means of bitumen sheets. On the basis of received results experimental testing procedure and modelling method are proposed to be applied on analysis of the considered types of structures.

Keywords: bridge, proof load test, analysis, Finite Element Method.

Zgodnie z wymaganiami normy [2], po zakończeniu budowy kolejowego obiektu mostowego, a przed oddaniem do eksploatacji, jest on poddawany statycznym obciążeniom próbnym umożliwiającym ocenę zgodności pracy konstrukcji z założeniami projektowymi. Wymaganie to dotyczy wszystkich rodzajów kolejowych obiektów mostowych, dlatego też czasem dochodzi do próbnego obciążenia nawet bardzo małego, kilkumetrowej rozpiętości przęsła mostu kolejowego, co opisano w artykule. To pozornie proste przedsięwzięcie może jednak wymagać specyficznych zadań, takich jak:

- dobór systemu pomiarowego umożliwiającego skuteczny pomiar małych przemieszczeń i odkształceń konstrukcji;
- przyjęcie efektywnego układu czujników pomiarowych, który zapewni pełny obraz przestrzennej pracy konstruk-

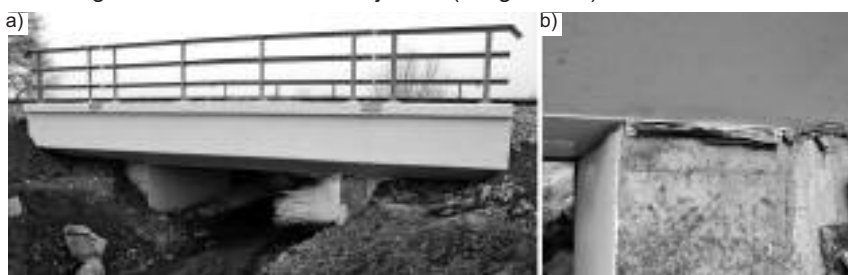
cji także w obszarze podporowym, co jest szczególnie ważne w przypadku oparcia przęsła na podporach za pośrednictwem pasm z tworzywa o znacznej odkształcalności;

- precyzyjne uwzględnienie podatności strefy podporowej w analizach teoretycznych wykorzystywanych w procesie oceny stanu obiektu.

Wymienione zagadnienia zilustrowano na przykładzie mostu kolejowego, którego badania i analizy teoretyczne przeprowadził w 2014 r. zespół Zakładu Mostów Wydziału Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej.

Charakterystyka obiektu i obciążenie próbne

Omawiany obiekt zlokalizowany jest w Polsce w ciągu linii kolejowej nr 272 [1]. Jego przęsło stanowi swobodnie podparty żelbetowy dźwigar płytowy o rozpiętości w świetle przyczółków 3,9 m (fotografia 1a). Grubość płyty jest zmienna od 50 cm nad podporami do 60 cm w środku rozpiętości. Skrajne odcinki płyty długości 60 cm są oparte na przyczółkach za pośrednictwem przekładek bitumicznych łącznej grubości ok. 8 mm (fotografia 1b).



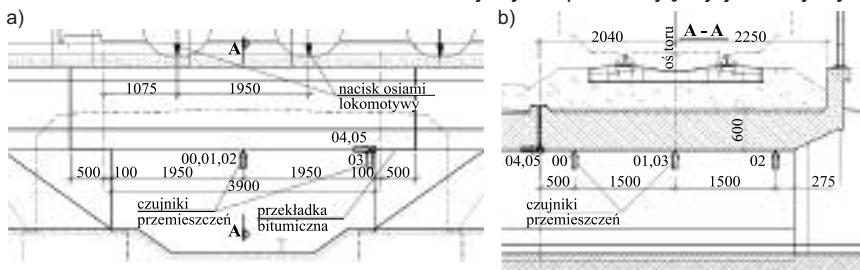
Fot. 1. Badany most: a) widok ogólny; b) szczegół podparcia przęsła na przyczółku
Photo. 1. Analysed bridge: a) general view; b) detail of the span support by means of a bitumen layers

¹⁾ Politechnika Wrocławska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego

^{*)} Autor do korespondencji:

e-mail: tomasz.kaminski@pwr.edu.pl

Obciążenie próbne mostu objęło jeden schemat statyczny zrealizowany za pomocą 115-tonowej lokomotywy spalinowej typu SM31 (rysunek 1a) o wózkach trójosiowych z rozstawem osi 1950 mm. W trakcie badań kontrolowano przemieszczenia przęsła płytowego w 6 punktach pomiarowych usytuowanych w środku rozpiętości przęsła oraz w strefie przypodporowej: przemieszczenia pionowe w 4 punktach (nr 00-03) oraz przemieszczenia poziome w 2 punktach (nr 04-05) zgodnie z rysunkiem 1.



Rys. 1. Rozmieszczenie punktów pomiarowych i ustawienie lokomotywy: a) widok z boku; b) przekrój poprzeczny (wymiar w mm)

Fig. 1. Location of measuring gauges and loading locomotive: a) the side view; b) the cross-section (dimensions in mm)

Ustawienie lokomotywy w schemacie statycznym zostało ustalone w ten sposób, aby uzyskać największe przemieszczenie w środku rozpiętości przęsła. Biorąc pod uwagę wymiary lokomotywy, jedynie dwie pierwsze osie jednego wózka zmieściły się na przęśle, natomiast trzecia oś znajdowała się poza przęsłem (rysunek 1a i fotografia 2). Przemieszczenia konstrukcji mierzono i rejestrowano za pomocą czujników indukcyjnych LVDT typu W50TS podłączonych do wzmacniacza Spider8 produkcji Hottinger Baldwin Messtechnik. Możliwa do uzyskania dokładność systemu wynosiła ok. 0,02 mm, co spełniło wymagania prowadzonych badań.

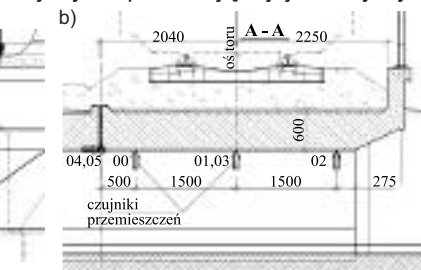
Odrębną część prac eksperymentalnych stanowiły laboratoryjne badania właściwości mechanicznych materiału



Fot. 2. Ustawienie lokomotywy w trakcie próbnego obciążenia statycznego przęsła

Photo 2. Position of the loading locomotive during the proof load test

pasm z tworzywa o znacznej odkształcalności (papa bitumiczna) zastosowanych do posadowienia przęsła na podporach przeprowadzone w pracowni Politechniki Wrocławskiej. Materiał do badań przygotowano w formie próbek o średnicy ok. 160 mm, składających się z dwóch warstw materiału łącznej grubości 8 mm, a następnie poddano go ścisłaniu w maszynie wytrzymałościowej w kierunku prostopadłym do płaszczyzny próbki. Podczas testu kontrolowano wartość przyłożonej siły i odpowiadające jej zmiany wy-



Rys. 2. Zależność σ - ϵ uzyskana w badaniu laboratoryjnym próbki papy

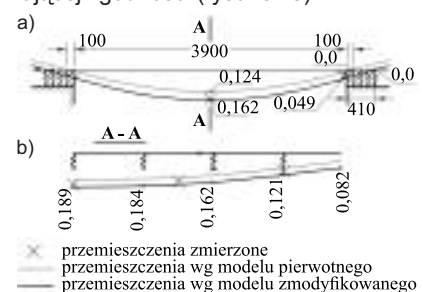
Fig. 2. σ - ϵ relationship obtained from laboratory test of the bitumen specimen

sokości badanej próbki. Druga wielkość mierzona była za pomocą dwóch niezależnych czujników zegarowych o rozdzielczości pomiarowej 0,01 mm. Wyniki testu w postaci zależności średnich naprężeń σ od średnich odkształceń ϵ , uzyskanych po wcześniejszym kilkukrotnym wstępnym obciążeniu próbki do poziomu zbliżonego do wyłączenia przekładki w moście pod ciężarem własnym przęsła, pokazano na rysunku 2. Na podstawie uzyskanej prawie liniowej zależności σ - ϵ uśredniony moduł sprężystości przy ścisłaniu prostopadłym do płaszczyzny przekładki określono jako równy 40 MPa.

Analiza numeryczna

W celu opracowania metodyki modelowania i teoretycznej analizy rozpatrywanego typu konstrukcji mostowych stworzono model numeryczny MES przęsła mostu. Ustrój nośny opisano modelem rusztowym złożonym z ortogonalnego układu elementów prętowych reprezentujących płytę żelbetową. Konstrukcję przęsła w przekroju poprzecznym zamodelowano za pomocą pięciu podłużnych elementów prętowych połączonych w kierunku poprzecznym elementami prętowymi rozstawionymi co ok. 50 cm. Zmienna grubość dźwigara płytowego została uwzględniona dzięki zastosowaniu niepryzmatycznych elementów prętowych różnej wysokości.

W pierwszym podejściu warunki brzegowe modelu przyjęto w postaci punktowych niepodatnych podparć skrajnych prętów podłużnych w miejscach wyznaczonych przez teoretyczne, zgodne z projektem mostu [1], osie podparcia oddalone o 10 cm od czołowych płaszczyzn przyczółków (rysunek 1a i rysunek 3). Porównanie wyników przemieszczeń obliczonych za pomocą pierwotnego modelu z odpowiadającymi wielkościami zmierzonymi podczas badań nie dało zadowalającej zgodności (rysunek 3).



Rys. 3. Zmierzone i obliczone pionowe przemieszczenia konstrukcji [mm] przedstawione na: a) profilu podłużnym w środku szerokości; b) przekroju poprzecznym A-A w środku rozpiętości przęsła

Fig. 3. Measured and calculated vertical displacements [mm] presented: a) along the central line of the span; b) in the mid-span cross-section A-A

Biorąc pod uwagę bardzo niski poziom występujących przemieszczeń konstrukcji (nieprzekraczających 0,2 mm), postanowiono uwzględnić bardziej szczegółowo rzeczywiste warunki podparcia przęsła za pośrednictwem przekładki bitumicznej. Zmodyfikowano pierwotny model MES przez odwzorowanie podatnego podparcia przęsła na przekładce za pomocą więzi sprężystych roz-



70 lat Wydziału Budownictwa Lądowego i Wodnego

mieszczonych wzdłuż skrajnych fragmentów prętów podłużnych na rzeczywistej długości podparcia przęsła na przyczółkach (rysunek 1a). Współczynnik sprężystości podłużnej k_x pojedynczej więzi sprężystej, odzwierciedlający sztywność przekładki bitumicznej (określony na podstawie badań laboratoryjnych opisanych w poprzednim rozdziale) obliczono wg wzoru:

$$k_x = EA/t$$

gdzie:

E – moduł sprężystości przy ścisnaniu prostopadłym papy (przyjęty jako równy 40 MPa);
A – pole części powierzchni papy reprezentowanej przez pojedynczą więź sprężystą;
t – łączna grubość warstw papy.

Za pomocą zmodyfikowanego modelu uzyskano przemieszczenia konstrukcji bardziej zgodne z wynikami pomiarów. Porównanie eksperymentalnie określonych wartości pionowych przemieszczeń przęsła z wartościami teoretycznymi (obliczonymi za pomocą modelu pierwotnego i zmodyfikowanego) przedstawiono na rysunku 3 dla punktów rozmieszczonych wzdłuż osi podłużnej konstrukcji, jak i w przekroju poprzecznym w środku rozpiętości przęsła. W zmodyfikowanym modelu zerowe przemieszczenia przęsła nad podporami występują w odległości 41 cm od płaszczyzny czołowej przyczółka, zamiast w odległości 10 cm przewidzianej w modelu pierwotnym. Przesunięcie tego teoretycznego punktu podparcia wpływa na zmianę rozkładu przemieszczeń w całym przęsle. Dokładne wartości zmierzonych i obliczonych pionowych przemieszczeń przęsła w punktach pomiarowych 00-03 zestawiono w tabeli. Podano w niej również względne różnice między wartościami obliczonymi a zmierzonymi.

Podsumowanie i wnioski

Przedstawione opracowanie pokazuje, że w przypadku badania i analizy mostów żelbetonowych o małej roz-

piętości, w których występujące przemieszczenia przęsła są w modelach obliczeniowych na poziomie 0,1 mm, powinny być brane pod uwagę nawet pozornie mniej istotne efekty, jak podatność przekładki bitumicznej stanowiącej podparcie przęsła. Po wszechnie przyjmowana w tego typu podparciu dźwigara rozpiętość teoretyczna przęsła równa 1,05 rozpiętości w świetle przyczółków, może być zbyt mało dokładna w pewnych obiektach (jak w pokazanym przypadku). Ponadto, można sformułować kilka wniosków odnoszących się bezpośrednio do analizowanej konstrukcji:

- zastosowany żelbetonowy dźwigar płytowy o stosunku wysokości przekroju do rozpiętości 0,6/4, 1 m = 0,146 powoduje dużą sztywność przęsła; maksymalne ugięcie wywołane przez typowe obciążenie eksploatacyjne nie przekracza 0,19 mm, co stanowi mniej niż 1/21000 rozpiętości przęsła;

- siły wewnętrzne wywołane obciążeniem próbnym były małe w porównaniu z wartościami z analiz teoretycznych wykorzystujących model obciążenia UIC 71 (stosowany w projektowaniu wg [3, 4]), co było spowodowane małą długością przęsła, na której zmieściły się tylko dwie osie użytej lokomotywy;

- pomimo niemal symetrycznej lokalizacji obciążenia kolejowego w przekroju poprzecznym przęsła (rysunek 1b), widoczna jest wyraźnie niesymetryczna deformacja przekroju przęsła A-A pokazana na rysunku 3; mniejsze przemieszczenia z prawej strony przekroju są związane z obecnością belki krawędziowej stanowiącej ścianę oporową podsypki toru, usztywniającej dźwigar płytowy w tej strefie;

- w przypadku krótkich przęseł dokładny model rozkładu obciążenia sku-

pionego przez warstwy nawierzchni (związanego np. z naciskiem pojedynczego koła lokomotywy) może być kluczowy dla dokładnego odwzorowania odpowiedzi konstrukcji na obciążenie; w przedstawionych modelach zastosowano rozkład obciążenia przez warstwy nawierzchni o odchyleniu od pionu 1 : 4.

Biorąc pod uwagę wyniki przeprowadzonych badań i analiz, sformułowano kilka zaleceń dotyczących procedury badania i analizy rozpatrywanego typu konstrukcji:

- wskazana jest kontrola pionowych przemieszczeń w strefach podparć w celu oceny podatności przekładki między przęsłem a podporą; w miarę dostępności czujniki należy rozmieszczać w co najmniej 2 różnych punktach na długości podparcia (wzdłuż jednego profilu podłużnego);

- dokładność pomiarowa systemu powinna być dostosowana do spodziewanych wartości przemieszczeń wynikających z odkształceń podatnej przekładki;

- podparcie analizowanego typu powinno być reprezentowane w modelach obliczeniowych jako więzi sprężyste rozłożone na faktycznej głębokości oparcia przęsła, o charakterystykach określonych z uwzględnieniem rzeczywistej sztywności przekładki;

- zaleca się precyzyjne uwzględnienie w modelach obliczeniowych najdrobniejszych szczegółów ukształtowania mostu (w tym elementów niekonstrukcyjnych wpływających na sztywność przęsła) oraz sposobów przyłożenia obciążenia (powierzchni jego nacisku i rozłożenia przez warstwy nawierzchni i konstrukcji nośnej).

Wszystkie fotografie – Autorzy

Literatura

[1] „Projekt wykonawczy 4.6. Most w km 68+469” w ramach zadania „Rewitalizacja linii kolejowej nr 272 na odcinku Ostrzeszów – Ostrów Wilk.”, Biuro Projektów Komunikacyjnych w Poznaniu Sp. z o.o., Poznań, wrzesień, 2014.

[2] PN-S-10040:1999. Obiekty mostowe. Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone – Wymagania i badania.

[3] PN-S-10030:1985. Obiekty mostowe. Obciążenia.

[4] PN-EN 1991-2:2007/AC:2010. Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcję – Część 2: Obciążenia ruchome mostów.

Przyjęto do druku: 17.08.2015 r.

Zmierzone i obliczone pionowe przemieszczenia przęsła w punktach pomiarowych 00-03

Measured and calculated displacements of the span in measurement points nos. 00-03

Punkt pomiarowy	Przemieszczenia zmierzone u_m [mm]	Przemieszczenia obliczone za pomocą modelu pierwotnego u_{c0} [mm]	$\frac{u_{c0} - u_m}{u_m}$ [%]	Przemieszczenia obliczone za pomocą modelu zmodyfikowanego u_{c1} [mm]	$\frac{u_{c1} - u_m}{u_m}$ [%]
00	0,177	0,149	-15,8	0,189	6,8
01	0,156	0,136	-12,8	0,175	12,2
02	0,100	0,084	-16,0	0,121	21,0
03	0,035	0,015	-57,1	0,049	40,0

Wartości dodatnie określają przemieszczenia w dół