

Robert TOCZKIEWICZ\*  
Politechnika Wrocławska

## ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ PODATNOŚCI ZESPOLENIA DŹWIGARÓW W MOŚCIE DROGOWYM

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono analizę i interpretację wyników badań drogowego stalowo-betonowego mostu zespolonego, które prowadzono pod obciążeniem samochodami o stałym oraz zmiennym położeniu. Zasadniczym celem badań była identyfikacja efektów podatności zespolenia dźwigarów mostowych przy wykorzystaniu własnych wskaźników, których wartości wyznaczano na podstawie rejestrowanych w trakcie badań odkształceń. Przeprowadzono również analizę wpływu czynników o charakterze losowym (współpraca elementów wyposażenia, tarcie na łożyskach, wartości charakterystyk geometrycznych i materiałowych) na otrzymane wyniki.

## IN SITU EVALUATION OF CONNECTION FLEXIBILITY IN A ROAD BRIDGE. ANALYSIS OF THE BEST RESULTS

**Summary.** In the paper the results of in-situ tests of a steel-concrete composite road bridge, under live static loads are presented. The principal aim of researches was checking the efficiency of interaction of steel beams and concrete deck slab in composite girders. Index used for identification of flexibility of connection, based on values of strains in steel beams is proposed. Influence of such factors, as friction on bearings and random values of geometrical characteristics and material properties, on the results is shown.

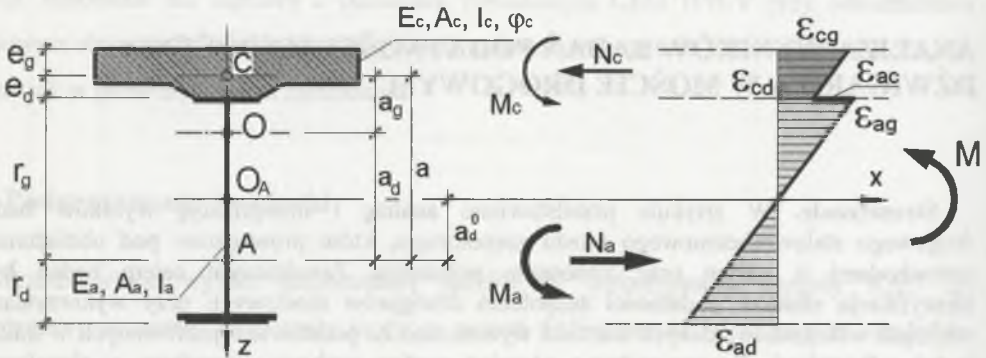
### 1. Wskaźnik podatności zespolenia

W badaniach in-situ mostowych konstrukcji zespolonych [1, 2, 3] podatność zespolenia można określać na podstawie pomiaru odkształceń jednostkowych. Wskaźnik podatności połączenia wyznaczyć można np. na podstawie różnicy odkształceń w styku belki stalowej i płyty betonowej  $\varepsilon_{ac} = \varepsilon_{ag} - \varepsilon_{cd}$  [2] (rys. 1). W praktyce trudne jest to jednak do realizacji

\* Opiekun naukowy: Dr hab. Czesław Machelski, prof. Uniwersytetu Zielonogórskiego.

z uwagi na niewielkie wartości  $\varepsilon_{cd}$ . Dogodne jest natomiast zdefiniowanie wskaźnika na podstawie składowych sił wewnętrznych w belce, siły osiowej  $N_a$  oraz momentu zginającego  $M_a$ , w postaci [2]:

$$\mu = \frac{aN_a}{M_a} \quad (1)$$



Rys. 1. Geometria, siły wewnętrzne i odkształcenia w przekroju zespolonym [2]

Fig. 1. Geometry, internal forces and strains in a composite cross-section [2]

Na jego podstawie można określić, korzystając z jednoznacznych związków pomiędzy charakterystykami geometrycznymi elementów składowych przekroju poprzecznego dźwigara, wartość różnicy odkształceń w styku  $\varepsilon_{ac}$  [2].

Istotne są charakterystyczne wartości, jakie przyjmuje rozpatrywany wskaźnik. W przypadku gdy brak jest zespolenia  $\mu = 0$ , natomiast w sytuacji odwrotnej, przy pełnej zgodności odkształceń w styku, czyli dla zespolenia pełnego, uzyskuje się [2]:

$$\mu_o = \frac{a \cdot a_d^0 A_a}{I_a} \quad (2)$$

Oznaczenia charakterystyk fizycznych i geometrycznych oraz wymiarów elementów odniesionych do ich środków ciężkości przedstawiono na rys. 1. W (2) parametry geometryczne przekroju poprzecznego oblicza się z zależności podanych w [2], zakładając doraźne (krótkotrwałe) działanie sił.

Efektom podatności zespolenia jest zmiana położenia osi obojętnej  $a_d^0$ . Wartość ta może być również podstawą do określenia wskaźnika  $\mu$  z zależności [2]:

$$\mu = \frac{a \cdot a_d^0 A_a}{I_a} \quad (3)$$

## 2. Badania in-situ

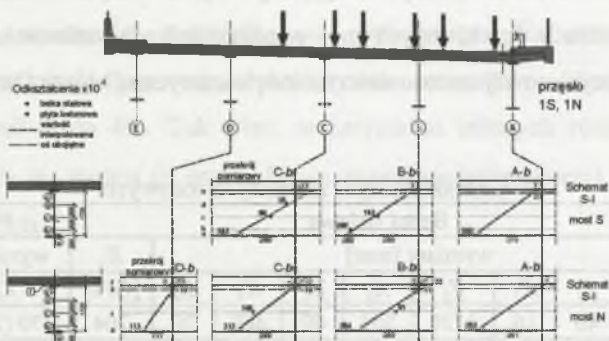
Wyniki badań dotyczą drogowego mostu przez rzekę Wartę, w ciągu autostrady A2, który stanowią dwa niezależne obiekty o bliźniaczej konstrukcji, oznaczone w pracy jako *S* (most w ciągu jezdni południowej) oraz *N* (most w ciągu jezdni północnej). W przekroju poprzecznym (rys. 2) każdy most tworzy pięć pełnościennych belek o wysokości średnika 1720 mm i rozstawie osiowym 3,70 m, współpracujących z żelbetową płytą pomostową o grubości 0,28 m, wykonaną z betonu klasy *B40*. Płyta pomostowa wykonywana była z elementów prefabrykowanych typu *filigran*, układanych na pasach belek stalowych, a następnie połączonych z warstwą betonu monolitycznego [4]. Rozpiętości przęseł każdego z mostów wynoszą:  $39,00 + 46,80 + 46,80 + 46,80 + 39,00 = 218,40$  m.

Pomiary prowadzono pod samochodowym obciążeniem o stałym położeniu, realizując cztery schematy obciążeń, m.in.: schemat *S-I* (samochody ustawione na przęśle 1 i 3) i *S-II* (samochody na przęśle 2 i 4) oraz ruchomym, gdy jeden z wcześniej użytych samochodów zmieniał swoje położenie przesuując się wzdłuż osi jezdni na przęśle skrajnym [5]. W artykule przedstawiono analizę wyników otrzymanych pod obciążeniem o stałym położeniu.

Celem badań było sprawdzenie efektywności współpracy belek stalowych z płytą pomostową. Bazę pomiarową utworzono w przęsłach skrajnych i przedskrajnych obu mostów [5]. Dokonywano pomiarów pionowych przemieszczeń przęseł oraz odkształceń w kierunku podłużnym dźwigarów, w wybranych przekrojach dźwigarów głównych [5].

### Wybrane wyniki odkształcenia

Na rys. 2 porównano wykresy odkształceń w dźwigarach, w przęsłach *1S* i *1N*, przy obciążeniu wg schematu *S-I*.



Rys. 2. Porównanie odkształceń w przęsłach *1S* i *1N* dla schematu obciążenia *S-I*

Fig. 2. Comparison of strains in spans *1S* and *1N* for load case *S-I*

Wykres odkształceń na wysokości belki stalowej określono na podstawie przeprowadzonej interpolacji, dopasowując linię prostą do otrzymanych z badań wartości odkształceń metodą najmniejszych kwadratów. Przekroje pomiarowe oznaczono według zasady: pierwsza litera oznacza dźwigar (jak na rys. 2), natomiast druga przekrój ( $b$  – przekrój w odległości  $x = 16,6$  m od skrajnej podpory,  $d$  – przekrój w środku rozpiętości przęseł  $2S$  i  $2N$ ). Rozkład odkształceń w przekroju  $B-b$  przęśla  $1S$  wskazuje na większą sztywność dźwigara (wyższe położenie osi obojętnej) w porównaniu z analogicznym przekrojem dźwigara przęśla  $1N$ . Odwrotnie jest w przypadku belki  $C$  w przęśle  $1S$  (przekrój  $C-b$ ), której rzeczywiste położenie osi obojętnej wskazuje na zredukowaną sztywność zespolenia dźwigara w przekroju, w porównaniu z dźwigarem mostu północnego.

W większości przypadków [5] zmierzone wartości odkształceń mogą świadczyć o pełnej współpracy obu części przekroju zespolonego. Niższe od geometrycznego położenie osi obojętnej, dla niektórych schematów obciążeń i punktów pomiarowych, świadczyć może o mniejszej od zakładanej sztywności przekroju, będącej lokalnym efektem podatności zespolenia.

### 3. Analiza wyników badań

#### 3.1. Losowość parametrów

W interpretacji otrzymanych wyników istotny może być wpływ uwzględnienia losowości własności fizycznych i charakterystyk geometrycznych. Jako wielkości losowe do analizy przyjęto wymiary dźwigara (przez  $X_1...X_5$  oraz  $Z_1...Z_5$  oznaczono wymiary poziome i pionowe blach i płyty) oraz wartości modułów sprężystości podłużnej materiałów ( $E_a$ ,  $E_c$ ). Założono takie same własności betonu płyty pomostowej wykonywanej w dwóch etapach (elementy prefabrykowane, beton monolityczny). Przyjęto [6, 7], że wszystkie cechy mają rozkłady normalne o wartościach oczekiwanych  $m$  i współczynnikach zmienności  $v$  zestawionych w tab. 1. W symulacji losowej zastosowano metodę numeryczną Monte Carlo.

Tabela 1

Charakterystyki zmiennych losowych

Parametry	Belka stalowa									Płyta żelbetowa			
	wymiary [mm]									$E_a$	wymiary [mm]		$E_c$
	$X_1$	$Z_1$	$X_2$	$Z_2$	$X_3$	$Z_3$	$X_4$	$Z_4$	[GPa]	$X_5$	$Z_5$	[GPa]	
$m$	400	40	16	1720	500	40	460	20	204	370 (280)	28	36,4	
$v$ [%]	1,0	2,0	2,0	0,5	1,0	2,0	1,0	2,0	1,5	0,5	3,0	10,0	

Na podstawie dokonanych pomiarów odkształceń w dźwigarach możliwe było określenie położenia osi obojętnej w analizowanych przekrojach konstrukcji. W tabelicy 2 zestawiono wartości wskaźników zespolenia  $\mu$ , obliczone dla wyznaczonej z badań wartości  $a_d^0$  ze wzoru (3), dla odpowiadających sobie przekrojów obu konstrukcji, schematów obciążeń *S-I* i *S-II* (pełne obciążenie pręseł). Odniesiono je do wartości wskaźnika  $\mu_0$  obliczonego z (2), dla którego podano, określone w wyniku przeprowadzonej symulacji, charakterystyki: wartość średnią  $m$ , współczynnik zmienności  $\nu$  oraz kwantyle rzędu  $p = 0,05, p = 0,95$ .

Tabela 2  
Porównanie wskaźników zespolenia  $\mu$  w obu badanych konstrukcjach

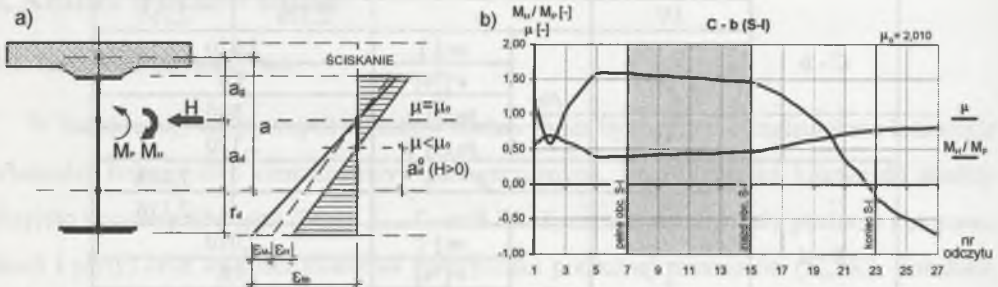
Przekrój	Pręseło	Wskaźnik		Schemat obciążenia		
				<i>S-I</i>	<i>S-II</i>	
<i>A - b</i>	<i>IS</i>	$\mu$ [-]		2,672	-	
	<i>IN</i>	$\mu$ [-]		2,283	2,562	
	<i>1</i>	$\mu_0$	$m$ [-]		1,910	
			$\nu$ [%]		3,9	
			$p_{0,05}$ [-]		1,788	
$p_{0,95}$ [-]			2,027			
<i>C - b</i>	<i>IS</i>	$\mu$		1,456	2,477	
	<i>IN</i>	$\mu$		2,326	2,759	
	<i>1</i>	$\mu_0$	$m$ [-]		2,010	
			$\nu$ [%]		3,6	
			$p_{0,05}$ [-]		1,886	
$p_{0,95}$ [-]			2,120			
<i>B - d</i>	<i>2S</i>	$\mu$		-	1,286	
	<i>2N</i>	$\mu$		-	2,116	
	<i>2</i>	$\mu_0$	$m$ [-]		2,010	
			$\nu$ [%]		3,6	
			$p_{0,05}$ [-]		1,886	
$p_{0,95}$ [-]			2,120			

Współczynnik zmienności wskaźnika  $\mu_0$ , obliczonego dla zespolenia idealnego, wynikający z przyjętych losowych charakterystyk parametrów geometrii i materiału konstrukcji, wynosi około 4%. Tak więc, w przypadku istotnych różnic wskaźników  $\mu$  względem wartości  $\mu_0$ , można (z dosyć dużym prawdopodobieństwem) mówić o efektach podatności połączenia.

### 3.2. Opory na łożyskach

Wartości wskaźnika obliczono także dla kolejnych etapów obciążania pręseł. Po rozpoczęciu odciążania następuje spadek wartości wskaźników  $\mu$  [5] i związana z nim wyraźna zmiana położenia osi obojętnej przekroju. Proces ten można wiązać z działaniem sił osiowych, powstałych w wyniku oporów na łożyskach przesuwnych. Powstanie dodatkowej, poziomej siły  $H$  oporu na łożysku powoduje zmianę wykresu odkształceń w przekroju poprzecznym blachownicy (rys. 3a) i może wpływać na otrzymywane wartości wskaźnika  $\mu$ .

Na rysunku 3b przedstawiono wykres zmienności momentu zginającego  $M_H$ , który musiałby powstać od mimośrodowego ściskania dźwigara siłą  $H$ , odniesionego do momentu  $M_P$  (od obciążenia samochodami), aby spowodować redukcję wskaźników  $\mu$  do wartości obliczonych na podstawie zmierzonych odkształceń. Przy pełnym obciążeniu konstrukcji stosunek  $M_H/M_P$  dla analizowanych przekrojów musiałby się wahać w granicach 0,3 – 0,5, a więc siła pozioma powodowałaby sprężenie konstrukcji znacznie redukując ugięcia, czego nie zaobserwowano w czasie badań. Efekt ten może być natomiast istotny w przypadku niewielkiego wyężenia konstrukcji i niektórych typów łożysk mostowych (np. neoprenowych).



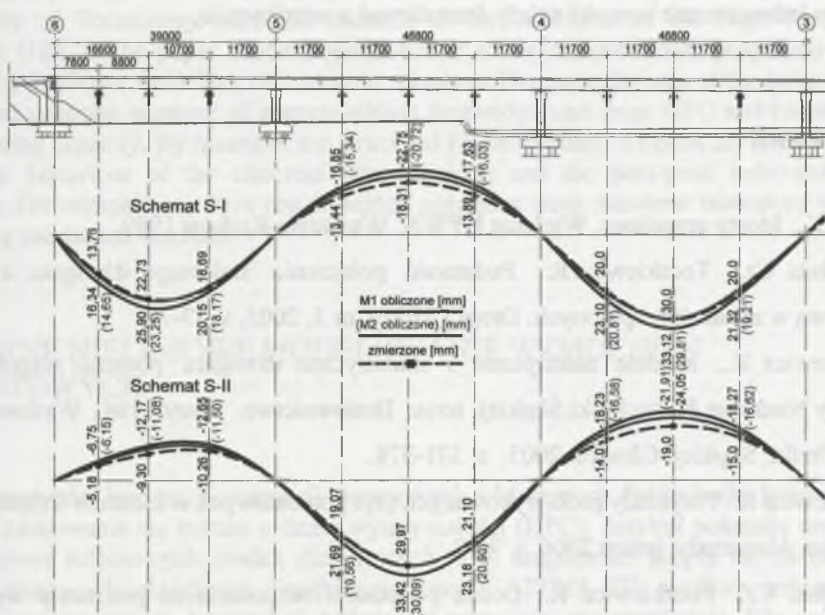
Rys. 3. Wpływ oporów na łożyskach  
Fig. 3. Influence of friction on bearings

### 3.3. Współpraca elementów wyposażenia

W analizie wyników badań konstrukcji mostowych często pomijany jest wpływ elementów wyposażenia na sztywność dźwigarów, a więc również na wartości ugięć czy rozkład odkształceń na wysokości przekroju. Dźwigar zespolony, współpracujący z elementami niekonstrukcyjnymi (nawierzchnia, betonowa kapa chodnikowa), tworzy przekrój warstwowy. Brak pełnej współpracy elementów, które go tworzą, będzie powodować powstanie nieciągłości odkształceń w stykach belka – płyta oraz płyta – wyposażenie. W niniejszym referacie, w odniesieniu do komentowanych wyników badań,

przyjęto dwa skrajne przypadki, zakładając pełne zespolenie wszystkich elementów przekroju lub brak współpracy płyty wtórnej. W rzeczywistych przypadkach należy spodziewać się sytuacji pośredniej, tzn. częściowej współpracy.

Na rysunku 4 przedstawiono wykresy ugięć zmierzonych oraz obliczonych dla dźwigara skrajnego *A* w przęsłach *1N*, *2N* i *3N*. Obliczone ugięcia uzyskano z modelu MES konstrukcji w postaci rusztu płaskiego, wzmocnionego płytą (model M1) oraz przy uwzględnieniu pełnej współpracy elementów wyposażenia (nawierzchnia, kapy chodnikowe) w modelu M2. W obu przypadkach założono brak zarysowania płyty pomostowej, co zostało potwierdzone w trakcie badań [5].



Rys. 4. Linia ugięcia dźwigara skrajnego *A*, most północny, schematy *S-I* i *S-II*  
 Fig. 4. Deflection of the exterior girder *A*, northern bridge, load cases *S-I* and *S-II*

Ocena podatności zespolenia, na podstawie ugięcia dźwigara zespolonego badanego obiektu, jest trudna. Podatność może bowiem pojawiać się tylko na pewnych odcinkach niektórych dźwigarów, będąc efektem lokalnym, na co wskazują zmierzone wartości odkształceń. Współdziałanie elementów niekonstrukcyjnych powoduje, iż zmierzone ugięcia są mniejsze niż obliczone przy założeniu pełnego zespolenia. Współpraca ta może „maskować” efekty podatności zespolenia, sprawiając, iż są one trudne do identyfikacji. Wykresy przedstawione na rys. 4 mogą sugerować, że w analizowanym obiekcie nie występuje podatność zespolenia, jako zjawisko globalne dla całej konstrukcji.

#### 4. Podsumowanie

Wyniki badań prowadzonych na rzeczywistych obiektach mostowych o konstrukcji zespolonej zwracają uwagę na występowanie podatności zespolenia. Do jej identyfikacji zaproponowano wskaźnik określany na podstawie odkształceń jednostkowych, zmierzonych w belkach stalowych. Przedstawione wyniki badań dają pogląd na zakres zmian podatności zespolenia w badanym moście drogowym, powstałych od obciążenia samochodami. Mnogość losowych czynników występujących w trakcie badań in-situ powodować może trudności w jednoznacznej interpretacji zjawiska. Komplikuje to znacznie stopień złożoności problemu i w skrajnych przypadkach może zniekształcać otrzymywane wyniki. Dlatego też w tym przypadku jednoznaczne wnioski należy formułować z ostrożnością.

#### LITERATURA

1. Furtak K.: Mosty zespolone. Wydanie I. PWN, Warszawa-Kraków 1999.
2. Machelski Cz., Toczkievicz R.: Podatność połączenia stalowego dźwigara z płytą betonową w mostach zespolonych. Drogi i Mosty, nr 3, 2005, s. 37-76.
3. Toczkievicz R.: Modele analityczne i numeryczne dźwigara podatnie zespolonego. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria: Budownictwo, zeszyt: 104, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2005, s. 371-378.
4. Toczkievicz R.: Przykłady prefabrykowanych płyt pomostowych w mostach zespolonych. Magazyn Autostrady, jesień 2006, s. 9-12.
5. Machelski Cz., Toczkievicz R.: Ocena podatności zespolenia na podstawie wyników badania mostu pod obciążeniem samochodami. Drogi i Mosty, nr 4, 2006, s. 5-33.
6. Biegus A.: Probabilistyczna analiza konstrukcji stalowych. PWN, Wrocław 1999.
7. Mirza S. A., Hatzinikolas M., MacGregor J. G.: Statistical descriptions of strength of concrete. Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 105, 1979, p. 921-937.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Kazimierz Furtak