

Izabela SKRZYPCZAK¹
Grzegorz OLENIACZ²

BADANIA ODBIORCZE I ICH WYKORZYSTANIE W DIAGNOSTYCE MOSTÓW

Streszczenie

W artykule przedstawiono problemy dotyczące badań statycznych oraz dynamicznych obiektów mostowych przeprowadzonych zgodnie z zaleceniami normy PN-85/S-10030 oraz Eurocodu 1. Wyniki tych pomiarów uzyskane z badań odbiorczych służą nie tylko do weryfikacji modelu obliczeniowego zastosowanego w fazie projektowania, ale stanowią również zbiór początkowych informacji o właściwościach dynamicznych obiektu mostowego. Badania odbiorcze stanowią część metryki obiektu.

1. Wprowadzenie

Badania odbiorcze mostów można zaliczyć do zadań rutynowych. Coraz częściej ma się do czynienia z realizacjami mostów nietypowych, wymagających poszerzenia programu badań odbiorczych. Wiąże się to nie tylko ze zwiększeniem wariantów obciążeń działających na konstrukcję podczas badań, ale również ze zwiększeniem liczby punktów pomiarowych.

W celu zwiększenia efektywności obserwacji należy uwzględnić dokładność pomiarów dla obciążeń statycznych i podstawowych kształtów drgań różnych mostów dla obciążeń dynamicznych oraz związane z tym zagadnienie rozmieszczenia znaków pomiarowych (czujników) wzdłuż przęsła mostu. Najczęściej wyznacza się parametry charakteryzujące zarejestrowany przebieg poprzez [1]:

- dla obciążeń statycznych
 - ugięć konstrukcji,
 - osiadania podpór,
 - przesunięć poziomych wzdłuż osi obiektu mostowego,
 - przesunięć poziomych prostopadłych do osi mostu,
- dla obciążeń dynamicznych
 - amplitudę drgań (służącą do określenia współczynników dynamicznych),
 - częstotliwość drgań własnych,
 - dekrement tłumienia, dający obraz sprężystości konstrukcji.

Wyznaczenie wymienionych parametrów charakteryzujących zachowanie się konstrukcji jest możliwe za pomocą pomiaru odkształceń jednostkowych lub przemieszczeń. Podstawowym parametrem charakteryzującym konstrukcję pod względem dynamicznym jest współczynnik dynamiczny. Charakteryzuje on dynamiczne obciążenie konstrukcji w porównaniu z obciążeniem statycznym. W normach współczynnik dynamiczny jest dodatkowym współczynnikiem bezpieczeństwa, w pewnym sensie sztucznie zwiększającym obciążenie statyczne.

Wyniki pomiarów statycznych i dynamicznych uzyskane z badań odbiorczych służą nie tylko do weryfikacji modelu obliczeniowego zastosowanego w fazie projektowania, ale stanowią również zbiór początkowych informacji o właściwościach dynamicznych obiektu mostowego. W ten sposób stają się one częścią tzw. metryki obiektu [1,2]. We wszystkich późniejszych opracowaniach diagnostycznych związanych z danym mostem będzie można właśnie do tego zbioru danych odnosić rezultaty następnych badań. Należy również zauważyć, że charakterystyki dynamiczne obiektu są nośnikiem

¹dr inż., Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Rzeszowska

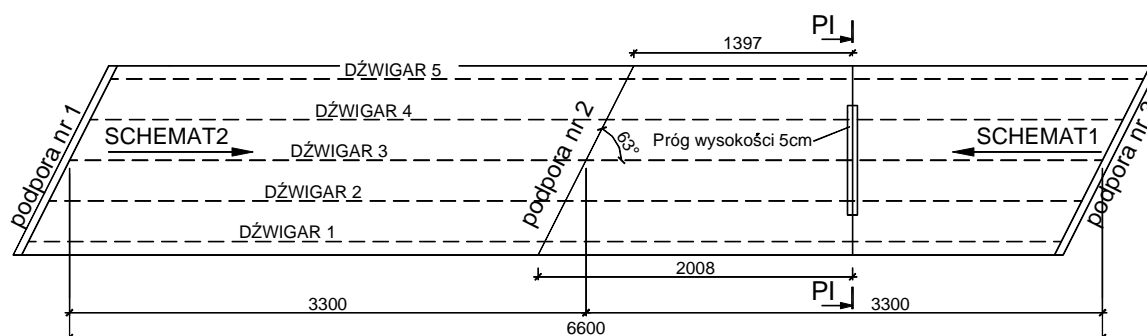
²mgr inż., Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Rzeszowska

wielu informacji o danym obiekcie, a informacje o zmianie charakterystyk w czasie eksploatacji obiektu mogą być przydatne w opracowaniach diagnostycznych.

W artykule przedstawiono problemy związane z wyznaczeniem przemieszczeń od obciążeń statycznych oraz określenia współczynnika dynamicznego na przykładzie mostu drogowego zespolonego stalowo-betonowego oraz odniesienie się do obowiązującej dotychczas w Polsce normy PN-85/S-10030 oraz Eurocodu 1 [3,4].

2. Obiekt badań

Analizę przeprowadzono dla nowo wybudowanego wiaduktu zespolonego stalowo-betonowego dwu przęsłowego o rozpiętości przęsła 33 m (rys.1). Badany obiekt to belkowy ruszt stalowy współpracujący z żelbetową płytą pomostu. Dźwigary główne to pięć blachownic o wysokości od 1055 do 1090 mm i rozstawie poprzecznym równym 2,60 m. Płyta żelbetowa pomostu wykonana z betonu ma między dźwigarami stałą grubość równą 0,21 m. Obiekt stężony jest poprzecznie stalowymi blachownicami o przekroju poprzecznym dwuteowym wysokości 500 mm. Przyczółki i filary są równoległe do osi przeskady. Układ rusztu stalowego jest ortogonalny – poprzecznice są prostopadłe do dźwigarów [5].



Rys. 1. Rzut badanego wiaduktu

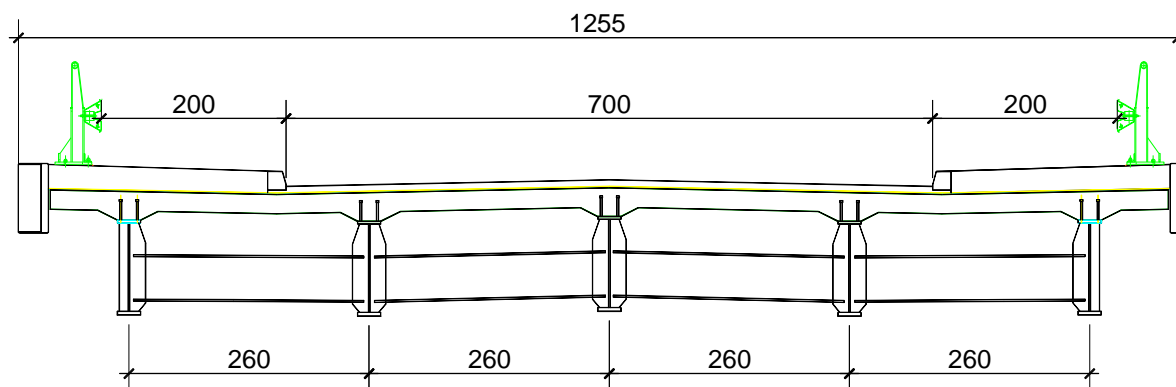
Pomiary ugięć wykonywano według ściśle ustalonego programu badań [5], z zachowaniem następujących wymagań czasowych kolejnych cykli pomiarów:

- przed wprowadzeniem obciążenia na wiadukt,
- po 15 i 30 min. obciążenia obiektu,
- bezpośrednio po odciążeniu wiaduktu,
- po 15 minutach od momentu odciążenia konstrukcji.

Zrealizowano dwa schematy obciążeń dynamicznych:

- schemat 1 wjazd samochodu od strony podpor nr 3,
- schemat 2 wjazd samochodu od strony podpor nr 1.

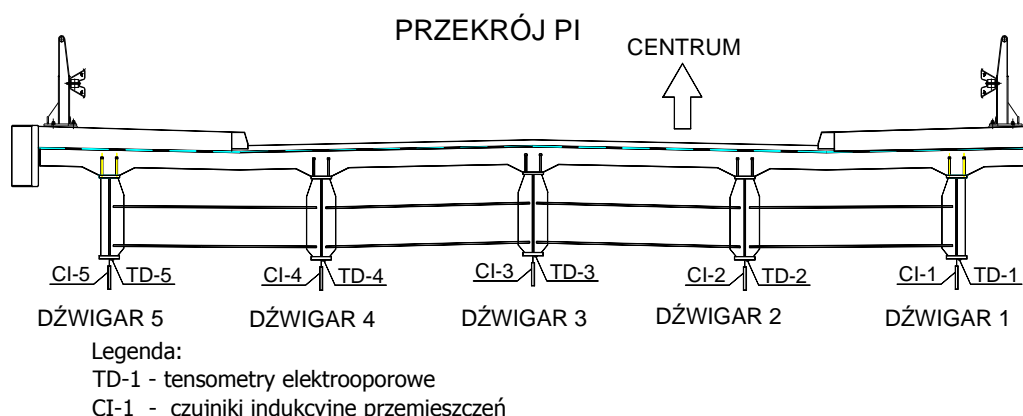
W obydwu schematach uwzględniono różne prędkości przejazdu samochodów oraz obecność progu w przekroju PI. Przekrój poprzeczny przęsła wiaduktu pokazano na rys.2.



Rys. 2. Typowy przekrój poprzeczny przęsła wiaduktu

Zgodnie z normą [3] zaprojektowano przeprowadzenie próbnego obciążenia w sposób statyczny i dynamiczny z wykonaniem pomiarów przemieszczeń metodą niwelacji precyzyjnej oraz czujnikami tensometrycznymi oraz indukcyjnymi. Składowe pionowe przemieszczenia płyty i osiadania podpór wyznaczono z pomiarów niwelatorami Ni 007.

Podczas badań dynamicznych mierzono ugięcie i odkształcenie jednostkowe w funkcji czasu w wybranych 5 punktach pasów dolnych dźwigarów w przekroju PI. Schemat rozmieszczenia czujników pomiarowych przedstawia rys.3 [5].



Rys. 3. Schemat rozmieszczenia czujników do pomiaru odkształceń i przemieszczeń w przekroju PI

Odształcenie w poszczególnych punktach pomiarowych mierzono za pomocą czujników tensometrycznych typ TFs-10/120 o bazie pomiarowej 10 mm. Natomiast ugięcia mierzono za pomocą indukcyjnych czujników przemieszczeń typ WA-50MM-T o bazie pomiarowej 50 mm. Do zbierania mierzonych odkształceń i ugięć zastosowano system pomiarowy SPIDER 8 firmy HOTTINGER. System dla potrzeb rejestracji wyników połączono z komputerem stosując oprogramowanie CATMAN. Schemat układów pomiarowych przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Schemat układu pomiarowego

Badany obiekt został poddany obciążeniom statycznym i dynamicznym, w niniejszym referacie przeprowadzono analizę określenia wartości przemieszczeń oraz oszacowania wyznaczenia współczynnika dynamicznego dla zrealizowanych obciążeń dynamicznych.

Dla przeprowadzenia próbnego obciążenia obiektu dobrano zestaw samochodów typu TATRA 815S o ciężarze całkowitym wraz z ładunkiem równym 270 kN.

3. Badania pod próbnym obciążeniem statycznym

Zgodnie z [3] zaprojektowano przeprowadzenie próbnego obciążenia w sposób statyczny z wykonaniem pomiarów przemieszczeń metodą niwelacji precyzyjnej na obu przęsłach wiaduktu.

Składowe pionowe przemieszczeń płyty i osiadania podpór wyznaczono z pomiarów niwelatorami Ni007, a ugięcia dźwigarów z obserwacji niwelatorami Ni002. Założona sieć pomiarowa do badań przemieszczeń konstrukcji składała się z 9 reperów, zastabilizowanych na podporach, do pomiaru osiadań, 8 punktów w środku rozpiętości przęsła do wyznaczania ugięcia płyty i 20 punktów na dźwigarach do określenia ich ugięcia. Dla każdego przęsła w obiekcie, w jego konstrukcji jezdnej przyjęto rozmieszczenie punktów kontrolowanych w trzech przekrojach podłużnych i w trzech przekrojach poprzecznych. Lokalne repy odniesienia do oceny stabilności stanowisk niwelatorów wybrano po obu stronach wiaduktu, poza strefa wpływu odkształceń dynamicznych i statycznych obiektu. Geodezyjne pomiary ugięć wykonywano według ściśle ustalonego programu badań [5]. Po każdym cyklu pomiarów wykonywano kontrolę stabilności stanowisk niwelatorów, dokonując pomiarów w odniesieniu do reperów odniesienia.

Zgodnie z [3] – nie podlegają interpretacji ugięcia mniejsze niż 1% ugięcia całkowitego.

$$0,01 \cdot w_c = 2 \cdot m_s \cdot \sqrt{2} \quad (1)$$

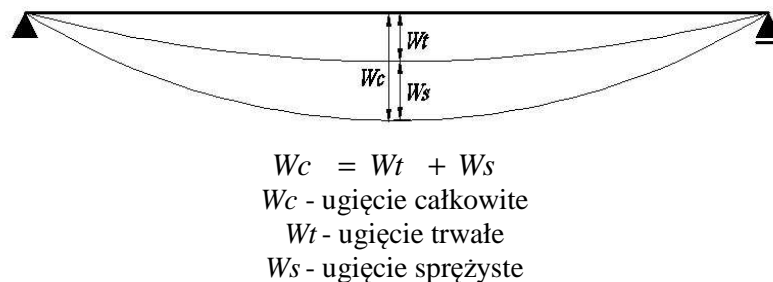
W rozważanym przykładzie ugięcie całkowite obliczeniowe wynosiło $w_c = 55\text{mm}$. Wymagany średni błąd pomiaru wyniósł $m_s = \pm 0,2\text{mm}$ [6].

Na podstawie danych technicznych niwelatora, dokładności poziomowania osi celowej, dokładności odczytu z łąty można stwierdzić, że dla celowych nie przekraczających 50m, dla niwelatora Ni 007 błąd średni pomiaru przemieszczenia nie przekracza $\pm 0,1\text{ mm}$. Natomiast w przypadku pomiaru ugięć za pomocą indukcyjnych czujników przemieszczeń typ WA-50MM-T o bazie pomiarowej 50 mm średni błąd pomiaru wynosi $\pm 0,01\text{ mm}$.

Ponadto kontrola stabilności stanowiska niwelatora nie wykazała zmian większych od błędów pomiaru.

Zmiany warunków pomiaru: stały przepływ powietrza z jego cyrkulacją, zmiany temperatury powietrza i obiektu, zmiennej wilgotności powietrza nad ciekami oraz drgań podłoża wywołanego ruchem kołowym powodują wzrost błędu pomiaru. Spełnienie wymagań normy przy tak założonym kryterium (1) stanowi poważny problem z punktu widzenia wyboru metody pomiaru [6].

O dopuszczeniu obiektu mostowego do użytkowania decydują ugięcia od obciążenia maksymalnego nie większe od 20% ugięcia całkowitego [3], tak więc istotna dla opiniodawcy jest całkowita wartość ugięcia jaka wystąpi od obciążenia maksymalnego, a nie cząstkowe przyrosty ugięć (rys. 5)



Rys. 5. Wyznaczenie ugięć z pomiaru przemieszczeń pionowych

4. Badania pod próbnym obciążeniem dynamicznym

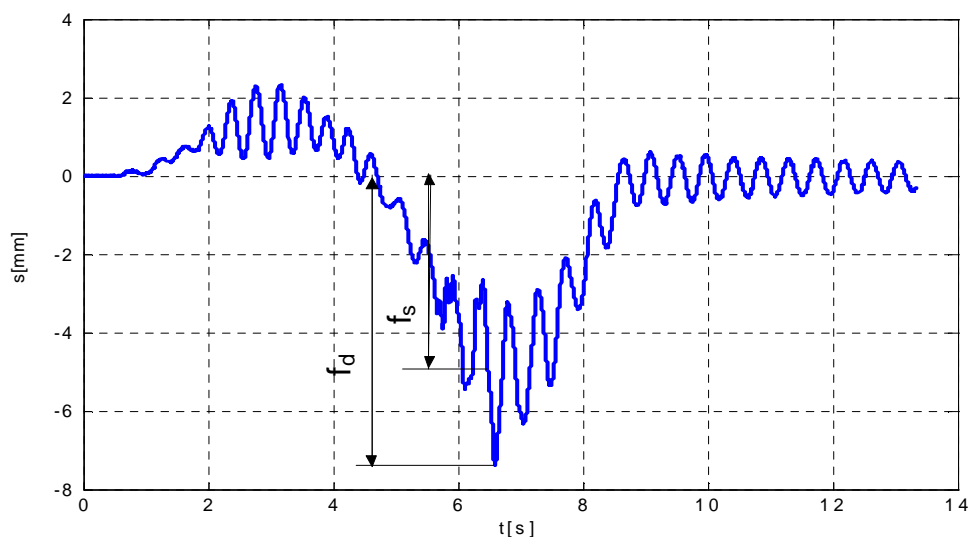
Podczas pomiarów dynamicznych rejestrowane były zmiany odkształcenia i ugięcia w wybranych punktach pomiarowych w zależności od czasu. Źródłem drgań były przejazdy pojazdów po moście:

- pojazdy poruszały się po moście z zadana prędkością,
- pojazdy po ustawieniu jednej osi kół na progu, zjeżdżały z tego progu i natychmiast zatrzymywały się.

Wibrogramy uzyskane podczas przejazdów pierwszego typu umożliwiały ocenę przyjętej w projekcie wartości współczynnika dynamicznego. Wyniki uzyskane podczas przejazdów drugiego typu były podstawą do wyznaczenia informacji o charakterystykach dynamicznych mostu.

Eksperymentalne wartości współczynnika dynamicznego określone są w oparciu o wyniki pomiaru drgań (z wykresu) lub z pomiaru ugięć. Przyjmując jako wielkość dynamiczną i statyczną odpowiednie strzałki ugięcia (lub odkształcenia ε) dźwigara.

Współczynnik dynamiczny charakteryzuje dynamiczne obciążenie konstrukcji w porównaniu z obciążeniem statycznym, a oblicza się go jako stosunek maksymalnego ugięcia dynamicznego f_d do maksymalnego ugięcia statycznego f_s (wzór 2). Ugięcie dynamiczne jest to największa wartość wychylenia na wykresie, natomiast ugięcie statyczne to średnia z minimalnego i maksymalnego wychylenia na wykresie (rys.6).

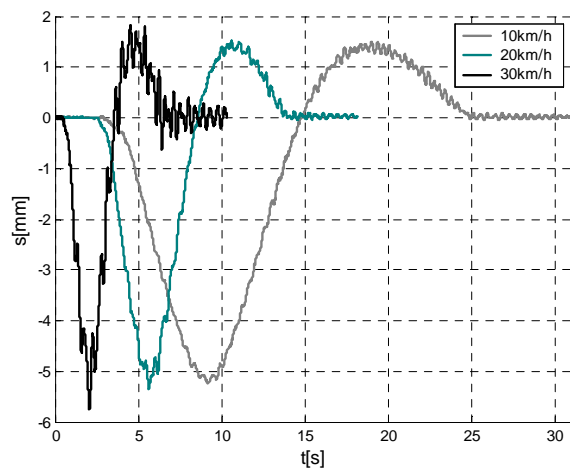


Rys. 6. Sposób wyznaczania współczynnika dynamicznego

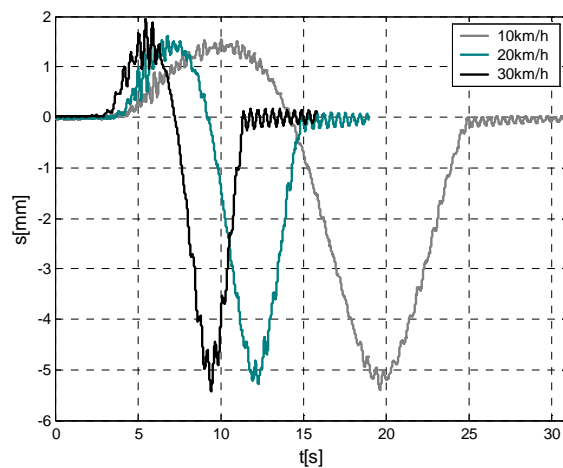
$$\varphi = \frac{f_d}{f_s} \quad (2)$$

f_s – maksymalne ugięcie statyczne
 f_d – maksymalne ugięcie dynamiczne

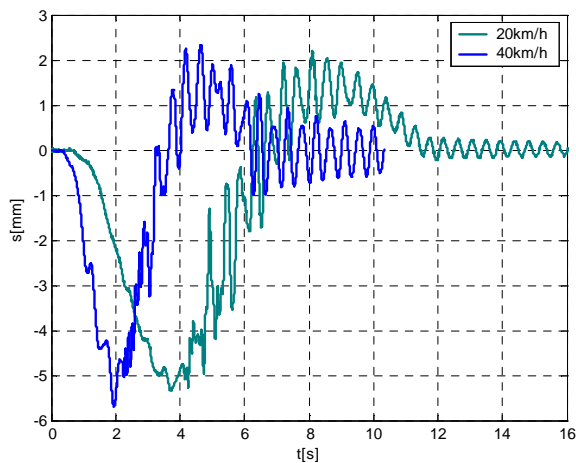
Wyniki badań ugięć i odkształceń przedstawiono na wykresach dla wybranych schematów obciążeń dynamicznych (rys.7 do 12) [6,7]. Dopuszczalne odchylenia prędkości nie przekroczyły 5 km/h.



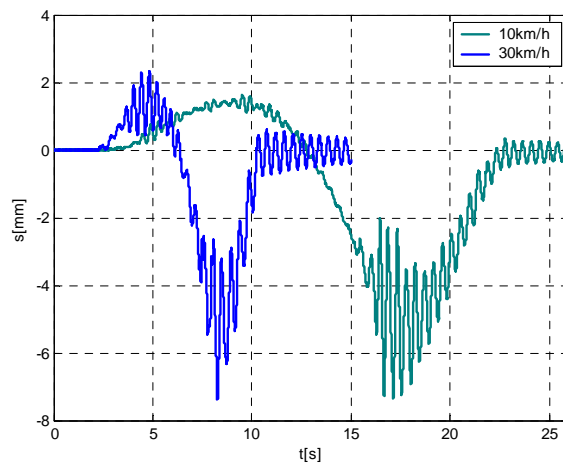
Rys. 7. Ugięcia dźwigara 3 - schemat 1



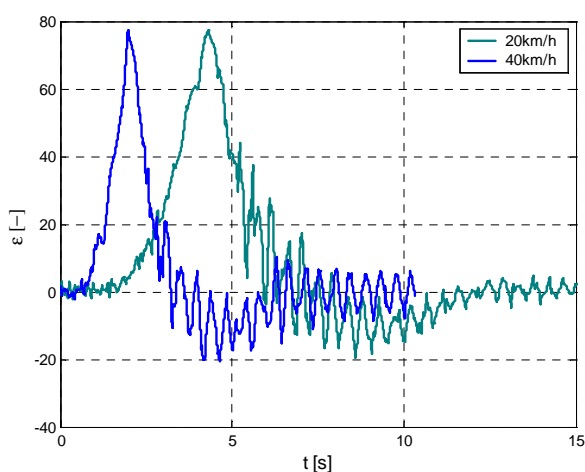
Rys. 8. Ugięcia dźwigara 3 - schemat 2



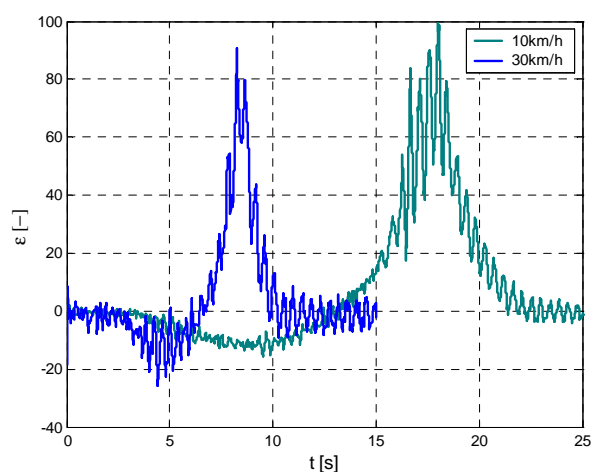
Rys. 9. Ugięcia dźwigara 3 - schemat 1



Rys. 10. Ugięcia dźwigara 3 - schemat 2



Rys. 11. Odształcenia dźwigara 3 - schemat 1



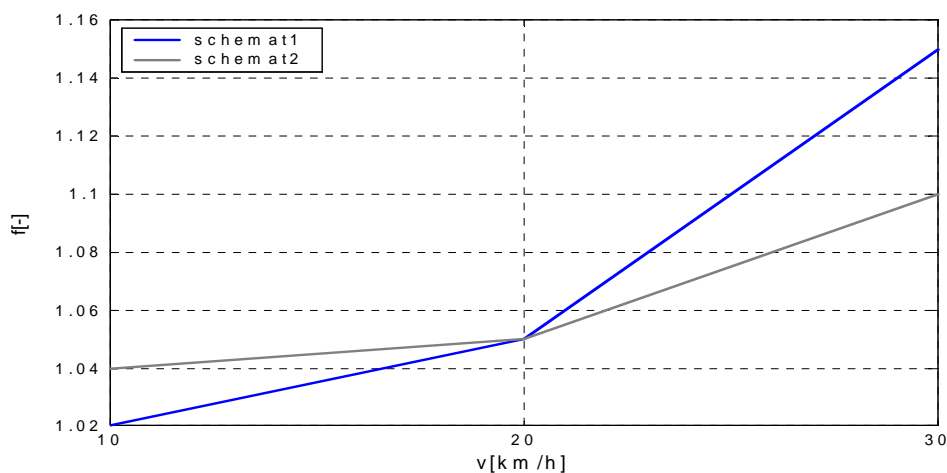
Rys. 12. Odształcenia dźwigara 3 - schemat 2

Tablica 1a. Wartości współczynnika dynamicznego od ugięć dla poszczególnych schematów obciążeń

		Wartości współczynnika dynamicznego od ugięć dla poszczególnych prędkości					
		SCHEMAT1			SCHEMAT2		
v		ϕ_{σ}	ϕ_{δ}	ϕ	ϕ_{σ}	ϕ_{δ}	ϕ
[km/h]		[mm]	[mm]	[-]	[mm]	[mm]	[-]
bez pręgu	10	5,16	5,25	1,02	5,18	5,39	1,04
	20	5,09	5,36	1,05	5,05	5,28	1,05
	30	5,01	5,76	1,15	4,94	5,43	1,10
	średnia wartość ϕ			1,07			
z progiem	10	-	-	-	4,83	7,35	1,52
	20	4,72	5,27	1,12	-	-	-
	30	-	-	-	5,03	7,39	1,47
	40	4,97	5,71	1,15			-
	średnia wartość ϕ			1,31			
$\phi_{\text{śr}}$	1,19						

Tablica 1b. Wartości współczynnika dynamicznego od odkształceń dla poszczególnych schematów obciążeń

		Wartości współczynnika dynamicznego od odkształceń					
v		SCHEMAT1			SCHEMAT1		
		ε _s	ε _d	φ	ε _s	ε _d	φ
		[km/h]	[–]	[–]	[–]	[–]	[–]
bez pręgu	10	73,5	75	1,02	79	83	1,05
	20	73	75	1,03	70	72	1,03
	30	65	76	1,17	75	82	1,09
	średnia wartość φ			1,06			
z progiem	10	-	-	-	73,5	100	1,36
	20	70,5	77	1,09	-	-	-
	30	-	-	-	64	90	1,41
	40	64,5	77	1,19	-	-	-
	średnia wartość φ			1,26			
φśr	1,16						



Rys. 13. Zależność współczynnika dynamicznego od prędkości.

Wartości współczynnika dynamicznego dla poszczególnych schematów obciążeń przedstawiono w tabelach 1a i 1b. Wartości współczynnika dynamicznego są różne, w zależności od prędkości i kierunku jazdy oraz obecności progu. Wraz ze wzrostem prędkości jazdy samochodu o tej samej masie współczynnik dynamiczny rośnie, nie jest to jednak zależność wprost proporcjonalna (rys.13). Średnia wartość współczynnika dynamicznego wyznaczona z ugięć wyniosła 1,19, a wyznaczona z odkształceń wyniosła 1,16. Należy pamiętać, że oszacowany współczynnik dynamiczny odnosi się ściśle do miejsca, w którym wykonano pomiar.

5. Porównanie wartości współczynnika dynamicznego według różnych zaleceń normowych

W tabeli 2 zestawiono wartości oraz formuły do wyznaczenia wartości współczynnika dynamicznego dla mostów drogowych według różnych norm i przepisów obowiązujących w naszym kraju, w ostatnich latach. Formuły proponowane według omówionych poniżej norm dają różne wyniki, co uwidaczniają zamieszczone w tabeli 2 wartości współczynników dynamicznych [3,4].

Współczynnik obciążenia dynamicznego według dotychczas obowiązującej polskiej normy PN-85/10030 *Obiekty mostowe. Obciążenia mostów* określony jest zależnością:

$$\varphi = 1,35 - 0,005 L \quad (3)$$

gdzie : L – długość przęsła [m]

Oznacza to, że współczynnik obciążeń dynamicznych dla ruchu pojazdów z normalnymi prędkościami, przy długości przęsła 20 m wynosi $\varphi = 1,25$ natomiast dla przęsła o długości 40 m wynosi $\varphi = 1,15$. Dla prędkości przejazdowych nie przekraczających 10 km/h dopuszcza się pominięcie obciążeń dynamicznych.

Tablica 2. Wartości współczynnika dynamicznego

Rodzaj opracowania (normy)	Wartość współczynnika dynamicznego φ	Obliczone wartości φ dla analizowanego obiektu mostowego
PN-85/10030 [3]	$1,35 - 0,005L \leq 1,325$ gdy $L > 70$ to $\varphi = 1,0$	1,185
Eurocod 1 [4]	$1,4 - L/500 \geq 1,0$	1,334

gdzie: L – teoretyczna rozpiętość przęsła

Postaci równań do wyznaczenia wartości współczynnika dynamicznego są bardzo zbliżone w poszczególnych normach i formuła uzależniona jest od rozpiętości przęsła. Jednak otrzymane wartości współczynników dynamicznych są różne od 1,185 do 1,334.

Wyznaczona wartość współczynnika dynamicznego na podstawie eksperymentu, którego średnia wartość wyniosła 1,19 przy pomiarze ugięć oraz 1,16 przy pomiarze odkształceń, najbardziej zbliżona jest do wartości obliczonej według zaleceń polskiej normy, według której wartość tego współczynnika dla tego obiektu wynosi 1,185. Większe różnice otrzymanych wartości współczynnika dynamicznego są zauważalne dla wartości otrzymanej według normy europejskiej.

6. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań doświadczalnych oraz teoretycznej analizy dokładności można sformułować następujące wnioski dotyczące:

- obciążenia statycznego:
 - Wymagany średni błąd pomiaru dla niwelacji wyniósł $m_s = \pm 0,2\text{mm}$,
 - Wartości zmierzonych ugięć belek głównych $w_c = 35\text{mm}$ były mniejsze niż wartości obliczone $w_{oc} = 55\text{mm}$, co świadczy o większej niż projektowana sztywności konstrukcji przęseł i o rezerwie jej nośności.
- obciążenia dynamicznego:

- Średnia wartość współczynnika od ugięć wyniosła 1,19 natomiast od odkształceń 1,16,
- Wyznaczona wartość współczynnika dynamicznego najbardziej zbliżona jest do wartości wyliczonej według zaleceń polskiej normy, dla której wartość tego współczynnika dla analizowanego obiektu wynosi 1,185, większe różnice otrzymanych wartości współczynnika dynamicznego są zauważalne dla wartości otrzymanej według normy,
- Ustalenie zakresu rzeczywistego przeciążenia konstrukcji od przejazdu mimośrodowego.

Niniejsze opracowanie uzasadnia więc potrzebę przeprowadzania pomiarów statycznych oraz dynamicznych mostów już w czasie badań odbiorczych. Badania odbiorcze mogą dostarczyć ważnych informacji o właściwościach obiektów mostowych. Wyniki te należy włączyć do metryki obiektu. Chcąc zapewnić odpowiednie wykorzystanie tych danych w diagnostyce mostu należy zadbać nie tylko o zestawienie wyników pomiarów odbiorczych, ale należy uzupełnić je opisem warunków, w których przeprowadzone były pomiary.

Decydując o zakresie badań odbiorczych, należy pamiętać, że im więcej zamierza się uzyskać informacji o charakterystykach mostu, tym obszerniejszy należy przewidzieć zakres badań nie tylko statycznych, ale i dynamicznych. Obejmuje on wtedy więcej punktów pomiarowych i większą liczbę przejazdów pojazdów, to natomiast wydłuża czas pomiarów i analizy wyników, zwiększa więc koszt badań. Należy w każdym konkretnym przypadku wybrać postępowanie racjonalne.

Literatura

- [1] RYŻYŃSKI A., Badania konstrukcji mostowych WKŁ, W-wa 1983
- [2] Materiały z I Sympozjum „Diagnostyka i badania mostów” Opole 2001r.
- [3] PN-85/S-10030 Obiekty mostowe. Obciążenia mostów
- [4] Eurocode 1: Actions on structures – Part 2: Traffic loads on bridges
- [5] Projekt próbnego obciążenia wiaduktu drogowego w ciągu ul. Ogrodowej nad ul. Podskarpową w Stalowej Woli
- [6] SKRZYPCZAK I., OLENIACZ G., Metodyka pomiarów statycznych i dynamicznych zespolonych obiektów mostowych, Monitoring i inżynierskie pomiary geodezyjne, Archiwum Geomatyki, Gdańsk 2010, str 7-22
- [7] SKRZYPCZAK I., KLICH R., Określenie dokładności wyznaczania współczynnika dynamicznego podczas próbnych obciążeń mostów, ZN PRz, 2007, str. 69-79

ACCEPTANCE TESTS AND THEIR USE IN THE DIAGNOSIS OF BRIDGES

Summary

The article presents the problems of static and dynamic testing of bridges carried out in accordance with the recommendations of standards PN-85/S-10030 and Eurocode 1. The results of the measurements obtained from the acceptance tests are used not only to verify the computational model used in the design phase, but are also a set of initial information on the dynamic properties of bridge structure. These tests are part of the object's specification.