

Damian BĘBEN*
Politechnika Krakowska

BADANIA DYNAMICZNE KONSTRUKCJI MOSTU DROGOWEGO WYKONANEGO ZE STAŁOWYCH BLACH FALISTYCH

Streszczenie. W pracy przedstawiono przebieg badań doświadczalnych oraz analizę wyników pod obciążeniem dynamicznym nowo wybudowanego mostu drogowego wykonanego ze stalowych blach falistych. Badany obiekt jest położony w Gimån w Szwecji. Wnioski z przeprowadzonych badań mogą być pomocne głównie przy projektowaniu i wykonywaniu innych badań dynamicznych mostów drogowych złożonych ze stalowych blach falistych. Ze względu na coraz częstsze stosowanie tego typu konstrukcji w przypadku mostów małych i średnich rozpiętości teoretycznych, wnioski z tych badań można uogólnić i odnieść do całej klasy tych rozwiązań (konstrukcje typu *box culvert*).

DYNAMIC TESTS OF ROAD BRIDGE STRUCTURE MADE OF STEEL CORRUGATED PLATES

Summary. The paper is was presented the results and analysis of dynamic load tests that were conducting on a new building road bridge in Gimån in Sweden made of steel corrugated plates. Conclusions were drawn from the conducted testing can be helpful mostly at the assessment of behaviour of such type of the bridge objects. In consideration of most often application of this type of structure in the case of small and middle effective span bridges, conclusions of conducted research will be to generalize to whole class of such solutions (*box culvert* type structure).

1. Wstęp

Przedmiotem pracy jest stalowo-gruntowy most drogowy wykonany z blach falistych o konstrukcji Super Cor typ SC-56B położony nad rzeką Gimån na drodze nr 716 Bråcke – Holm w Szwecji, poddany wszechstronnym badaniom doświadczalnym.

Dotychczasowe badania na tym obiekcie przeprowadzono w trzech etapach w okresie od 15 kwietnia do dnia 21 sierpnia 2002 roku, w których wykonano następujące prace [3]:

*Opiekun naukowy: Prof. dr hab. inż. Zbigniew Mańko.

- I etap – naklejenie i zabezpieczenie czujników tensometrycznych na stalowej powłoce bezpośrednio przed jej zasypaniem gruntem oraz sprawdzenie poprawności działania zainstalowanych czujników oraz aparatury przeznaczonej do badań statycznych i dynamicznych,
- II etap – pomiary przemieszczeń poziomych i pionowych oraz odkształceń jednostkowych w dwóch kierunkach w wybranych punktach i przekrojach stalowej powłoki mostu podczas zagęszczania gruntu wokół tej konstrukcji,
- III etap – pomiary przemieszczeń i odkształceń jednostkowych oraz prędkości drgań w wybranych punktach i przekrojach stalowej powłoki mostu podczas badań w zakresie obciążeń statycznych i dynamicznych.

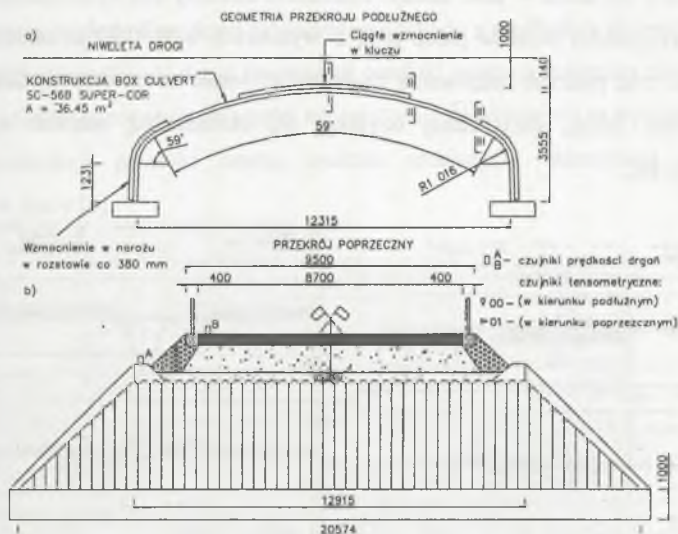
Celem pracy jest przedstawienie wyników badań doświadczalnych – w zakresie obciążeń dynamicznych w III etapie prac, jako podstawa określenia jakości, trwałości i możliwości dopuszczenia do normalnej eksploatacji mostu [6]. W niniejszej pracy przedstawiono również opis konstrukcji mostu i zakres przeprowadzonych badań dynamicznych oraz wyniki i analizę otrzymanych z pomiarów różnych wielkości oraz wnioski końcowe. Ze względu na dość duże znaczenie tego obiektu w tym rejonie sieci drogowej Szwecji (pierwszy tego typu obiekt w całej Skandynawii) oraz z uwagi na jego prototypowy charakter i wszechstronne przebadanie obiektu, wraz ze szczegółową analizą przemieszczeń, odkształceń jednostkowych oraz oddziaływań dynamicznych, wnioski z tych całościowych badań (trzy etapy) mogą być przydatne, zwłaszcza z tematyki badań kontrolnych i odbiorczych stalowych drogowych mostów złożonych ze stalowych blach falistych i płaskich (zwłaszcza gdy mamy do czynienia z podobnymi parametrami geometrycznymi konstrukcji i charakterystykami materiałowymi) [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7].



Rys. 1. Widok z boku na most bezpośrednio przed badaniami dynamicznymi
Fig. 1. Side view on the bridge immediately before dynamic measurements

2. Opis konstrukcji mostu

Badany most drogowy w przekroju podłużnym stanowi ustrój statyczny w postaci jednoprzęsłowej sztywno utwierdzonej powłoki (typu *box culverts* zgodnie z wytycznymi *Atlantic Industries Limited* – Kanada) o rozpiętości teoretycznej przęsła $l_t = 12,315$ m (rys. 1 i 2). Obiekt ma stalowy ustrój nośny wykonany z arkuszy blach falistych o wymiarach fali 140×380 mm i grubości blach $t = 7,1$ mm połączony między sobą na szerokości przęsła za pomocą śrub sprężających. Stalowe przęsło powłoki oparte jest za pomocą stalowych nierównoramiennych ceowników na dwóch żelbetowych ławach fundamentowych. Powłoka obiektu została wzmocniona w trzech miejscach, tj. w kluczu oraz w dwóch narożach konstrukcji przy ławach fundamentowych od strony gruntu z obu stron obiektu za pomocą dodatkowych arkuszy blachy falistej (w kluczu wzmocnienie ciągle, a w narożach w rozstawie co 380 mm), w celu zapewnienia większej sztywności powłoki i mostu. Powłokę stalową obsypano warstwami gruntu (o grubości po około 0,20 m) odpowiednio zagęszczonymi ($I_D = 0,95$ – według Proctora) umożliwiającymi ułożenie nawierzchni drogowej na podsypce z tłucznia. Szerokość powłoki górą wynosi $l_g = 12,915$ m, natomiast dołem $l_d = 20,574$ m. W planie obiekt usytuowany jest prostopadle w stosunku do nurtu rzeki. Światło pionowe obiektu wynosi 3,555 m.

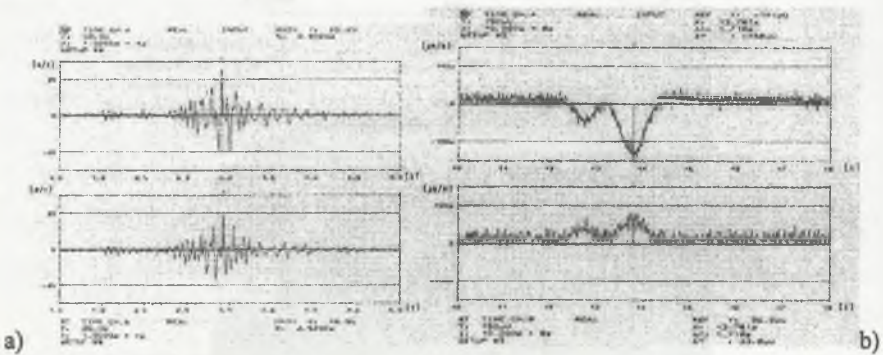


Rys. 2. Most drogowy w Gimån w Szwecji wykonany ze stalowych blach falistych: a) geometria przekroju podłużnego i b) przekrój poprzeczny z położeniem czujników do pomiarów dynamicznych

Fig. 2. The road bridge made of steel corrugated plates in Gimån in Sweden: a) geometry longitudinal section and b) cross section with spacing of gauges to the dynamic measurements

3. Zakres wykonanych badań

Do badań dynamicznych (efektów oddziaływań dynamicznych na wielkości przemieszczeń (ugięć) blach falistych i odkształceń jednostkowych w wybranych przekrojach poprzecznych) skorzystano z dwóch indukcyjnych czujników bezwładnościowych typu PEVA 7225, służących do pomiaru prędkości drgań (czujniki A i B) umieszczonych odpowiednio na skraju jezdni mostu i na wieńcu żelbetowym oraz z dwóch czujników tensometrycznych 00 i 01 służących do pomiaru odkształceń jednostkowych odpowiednio w kierunkach podłużnym i poprzecznym mostu, umieszczonych na górze fali blachy w środku rozpiętości teoretycznej przęsła (rys. 2), których przebiegi czasowe zarejestrowano na komputerze typu PC. W czasie realizacji badań pod obciążeniem dynamicznym podejmowano doraźne decyzje o zmianie mierzonych parametrów, schematach obciążeń dynamicznych, o skalowaniu przyrządów oraz o przeprowadzaniu dodatkowych serii obciążeń (powtórek). W czasie badań dynamicznych starano się, by trasa przejazdu samochodu za każdym razem była prawie identyczna, aby można było porównać otrzymane wyniki. W przeciwnym przypadku zmiany trasy w przekroju poprzecznym jezdni uniemożliwiałyby bezpośrednie porównywanie wyników. Prędkości poruszania się pojazdu po moście ustalono w programie badań na około 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60 i 70 km/h w obie strony. Pomiarów oddziaływań dynamicznych dokonano także przy przejazdach pojazdu przez próg o wymiarach $0,03 \times 0,20$ m umieszczonych na środku mostu oraz podczas hamowania na obiekcie. Miało to na celu ustalenie prędkości krytycznej, tzn. takiej, przy której uzyskuje się ekstremalną wartość współczynnika dynamicznego [6].



Rys. 3. Wykresy maksymalnych amplitud prędkości drgań otrzymanych z przejazdów samochodu, które pomierzono czujnikami: a) prędkości drgań (70 km/h) i b) tensometrycznymi (20 km/h)
 Fig. 3. Graphs of the maximum amplitudes of velocity of the vibrations during truck driving when measured gauges: a) velocity of the vibrations (70 km/h) and b) strain (20 km/h)

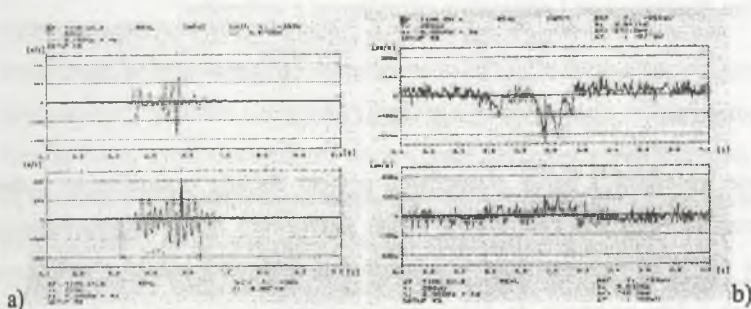
4. Wyniki badań dynamicznych oraz ich analiza

Na rysunkach 3, 4 i 5 przedstawiono wykresy maksymalnych przebiegów prędkości drgań w czasie i częstotliwości drgań pomierzone za pomocą indukcyjnych czujników prędkości drgań oraz przebiegi odkształceń jednostkowych w czasie pomierzone za pomocą czujników tensometrycznych podczas poszczególnych przejazdów samochodu [6].

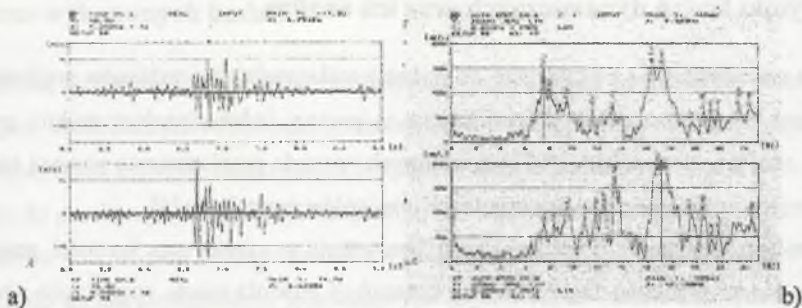
Analizując wykresy prędkości drgań konstrukcji w czasie oraz wartości amplitudy i częstotliwości prędkości drgań stalowej konstrukcji powłoki mostu pomierzone czujnikami prędkości drgań podczas przejazdów samochodu, stwierdzono, że:

1. Największa amplituda prędkości drgań pomierzona w punkcie pomiarowym A wynosiła 25,2 m/s przy częstotliwości drgań wynoszącej 7,312 Hz, którą otrzymano podczas przejazdu samochodu z prędkością około 70 km/h z kierunku Holm do Bräcke (rys. 3a).
2. Podczas przejazdu samochodu przez próg o wymiarach 0,03×0,20 m największą amplitudę prędkości drgań konstrukcji powłoki zaobserwowano w punkcie pomiarowym B i wynosiła ona 436,0 m/s przy częstotliwości drgań 11,375 Hz przy przejeździe z prędkością 40 km/h z kierunku Bräcke do Holm (rys. 4a).
3. Podczas przejazdu i hamowania samochodu na moście największa amplituda prędkości drgań wynosiła 14,10 m/s (rys. 5a) przy częstotliwości drgań równej 17,125 Hz (rys. 5b) i uzyskano ją w punkcie B podczas przejazdu samochodu z prędkością 60 km/h.

Amplitudę i częstotliwość drgań konstrukcji powłoki mostu pomierzono także przy użyciu tensometrów elektrooporowych. Wartości odkształceń jednostkowych w wybranych punktach stalowej konstrukcji powłoki mostu podczas przejazdów samochodu obciążającego zestawiono w pracy [6].



Rys. 4. Wykresy maksymalnych amplitud prędkości drgań podczas przejazdu samochodu przez próg pomierzone czujnikami: a) prędkości drgań (40 km/h) i b) tensometrycznymi (60 km/h)
 Fig. 4. Graphs of the maximum amplitudes of velocity of the vibrations during truck driving by the threshold measured gauges: a) velocity of the vibrations (40 km/h) and b) strain (60 km/h)



Rys. 5. Maksymalne wykresy otrzymane podczas jazdy samochodu z prędkością 60 km/h i hamowania na moście: a) amplitudy prędkości drgań (14,1 m/s) i b) częstotliwości drgań (17,125 Hz)

Fig. 5. Graphs of the maximum during truck driving with velocity 60 km/h and braking on the bridge: a) amplitudes of the vibrations (14,1 m/s) and b) frequency of the vibrations (17,125 Hz)

1. Największe odkształcenia jednostkowe konstrukcji pomierzono w punkcie pomiarowym 00 (w kierunku podłużnym mostu) i wynosiły one $Y = 141 \times 10^{-6}$ przy łącznym maksymalnym wychyleniu dodatnim i ujemnym równym $\Delta Y = 158 \times 10^{-6}$, które otrzymano podczas przejazdu samochodu z prędkością 20 km/h (rys. 3b).
2. Podczas przejazdu samochodu z prędkością 60 km/h przez próg $0,03 \times 0,20$ m ułożony poprzecznie na jezdni mostu zaobserwowano największe odkształcenia jednostkowe, które wynosiły $Y = 260 \times 10^{-6}$ przy łącznym maksymalnym wychyleniu dodatnim i ujemnym równym $\Delta Y = 277 \times 10^{-6}$ i odczytano je z czujnika 00 (rys. 4b).
3. Maksymalne wartości współczynników dynamicznych wynoszą odpowiednio 1,08 dla przejazdu z prędkością 20 km/h i 1,36 dla prędkości przejazdu 60 km/h przez próg, i obliczono je ze wzoru $\phi = \epsilon_{yD} / \epsilon_{yS}$, gdzie odpowiednio ϵ_{yD} i ϵ_{yS} są maksymalnym odkształceniem dynamicznym i statycznym odczytanym z wykresów.

5. Wnioski końcowe

Na podstawie wniosków z badań statycznych podjęto decyzję o możliwości podjęcia badań dynamicznych, będących kontynuacją badań statycznych mostu przeprowadzonych nieco wcześniej [6], z których niniejsze wnioski tworzą integralną całość z wnioskami z badań statycznych i dały podstawę do dopuszczenia obiektu do normalnego bezpiecznego użytkowania według norm szwedzkich i polskich.

Podczas badań dynamicznych nie stwierdzono żadnych nieprawidłowości w zachowaniu się stalowej konstrukcji przęśla mostu przy różnorodnych wariantach obciążenia. Jedynie

podczas przejazdów samochodu przez próg wyniki uzyskane z czujników prędkości drgań A i B (umieszczonych na skraju jezdni i na wieńcu żelbetowym) mogłyby się wydawać zbyt duże. Po uwzględnieniu pewnych nierówności na styku czujnik – nawierzchnia drogowa, typu badanej konstrukcji oraz bliskości przejeżdżającego pojazdu, wpływających na uzyskane wyniki, które porównano z wartościami obliczeniowymi, okazało się, że nie przekraczają ich. Szeroki zakres tych badań przyczynił się do wszechstronnego wyważenia elementów konstrukcji badanego przęsła, a po przeanalizowaniu ich wyników nie było przeciwwskazań w dopuszczeniu obiektu do normalnej eksploatacji. Efektem przeprowadzonych pomiarów dynamicznych i stosownych obliczeń były wartości współczynników dynamicznych ϕ wyznaczone dla wszystkich wariantów obciążenia I–XXV, które obliczono zarówno w oparciu o odkształcenia jednostkowe, otrzymane w wybranych punktach w charakterystycznych przekrojach poprzecznych przęsła, jak również uwzględniając ugięcia wybranych punktów konstrukcji powłoki. Wszystkie wielkości charakterystyczne dla tego przęsła zestawiono w pracy [6]. Wartości współczynników dynamicznych były różne w zależności od wariantu obciążenia dynamicznego, prędkości przejazdu samochodu oraz przede wszystkim od położenia punktu pomiarowego na konstrukcji. Doświadczenia praktyczne z przeprowadzonych badań, a także poczynione w trakcie tych badań obserwacje pracy konstrukcji przęsła, jak również wszechstronna analiza wyników uzyskanych z pomiarów i porównanie ich z obliczeniowymi pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

1. Po porównaniu wartości doświadczalnych współczynnika dynamicznego z wartościami normowymi obliczonymi według normy obciążeniowej PN-85/S-10030 stwierdzono, że wartości współczynnika dynamicznego otrzymane z pomiarów nie przekraczają wartości normowych, lecz są znacznie niższe, należy jednak zaznaczyć, że norma odnosi się do typowych mostów stalowych.
2. Stwierdzono, że współczynniki dynamiczne zależą od rodzaju elementu (położenia punktu pomiarowego), wariantu obciążenia i prędkości jazdy pojazdu.
3. Podczas badań dynamicznych nie stwierdzono żadnych nieprawidłowości w zachowaniu się konstrukcji badanego przęsła mostu przy różnorodnych wariantach obciążenia łącznie z uwzględnieniem gwałtownego hamowania i przejazdu przez próg.
4. Przeprowadzone badania dynamiczne potwierdziły wnioski z badań statycznych i w konsekwencji można było dopuścić most do normalnej bezpiecznej eksploatacji.

Powyższe podsumowanie i wnioski końcowe odnoszą się, w zasadzie, do konstrukcji badanego przęsła o zadanych charakterystykach geometrycznych i sztywnościach poszczególnych elementów, i o określonej rozpiętości teoretycznej.

Aby otrzymane wyniki z badań dynamicznych (współczynniki dynamiczne) można było wprost odnieść na inne tego typu konstrukcje, należy przeprowadzić dodatkowe badania (co było i jest czynione) na obiektach rzeczywistych, obejmujących przede wszystkim przeszła o różnych geometriach przekroju podłużnego, i gatunkach stali o różnych rozpiętościach przeszła oraz o różnych wzajemnych proporcjach sztywności poszczególnych elementów (różne rodzaje fal).

LITERATURA

1. Bęben D.: Badania mostu drogowego wykonanego ze stalowych blach falistych typu Super Cor. III Konferencja Doktorantów Wydziałów Budownictwa, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria Budownictwo z. 95, Gliwice–Wiśła, 21–22 listopada 2002, s. 65–74.
2. Bęben D., Mańko Z.: Badania mostu drogowego wykonanego ze stalowych blach falistych typu Super Cor. XLVIII Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN i Komitetu Nauki PZITB, Krynica 2002 „Problemy Naukowo-Badawcze Budownictwa”, Opole–Krynica, 15–20 września 2002, t. 4, s. 167–174.
3. Bęben D., Mańko Z., Janusz L., Vaslestad J.: Badania stalowej powłoki mostu drogowego w Gimån w Szwecji wykonanej z blach falistych typu Super Cor SC-56B podczas jej zasypywania. II Sympozjum Naukowo-Techniczne „Badania i Diagnostyka Mostów”, Opole, 9–11 kwietnia 2003, s. 31–67.
4. Madaj A., Vaslestad J., Janusz L.: Badania in situ przepustu stalowego z blach falistych użytego do przebudowy ramowego wiaduktu kolejowego. IX Seminarium „Współczesne Metody Wzmacniania i Przebudowy Mostów”, Poznań–Kiekrz, 8–9 czerwca 1999, s. 106–117.
5. Mańko Z., Bęben D.: O badaniach odbiorczych łukowego mostu drogowego z blachy stalowej. Inżynieria i Budownictwo, vol. LVIII, 2002, nr 9, s. 506–509.
6. Mańko Z., Bęben D.: Badania konstrukcji mostu wykonanego ze stalowych blach falistych typu Super Cor SC-56B pod obciążeniem statycznym i dynamicznym w miejscowości Gimån (Szwecja). Centrum Naukowo-Badawcze Rozwoju Budownictwa MOSTAR, Wrocław, październik 2002.
7. Vaslestad J.: Long-term Behaviour of Flexible Large-span Culverts. Transportation Research Record no. 1231, Transportation Research Board, Washington D.C., 1990, p. 14–24.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Kazimierz Furtak

Abstract

Conclusions with this research (dynamic measurements) will be useful for practice engineering chiefly with subject matter design and experimentation load testing of road bridges made of steel corrugated plates of Super Cor and Multiplate types.