

Marcin TEKIELI¹
Łukasz MICHALSKI²

BADANIA DYNAMICZNE OBIEKTÓW MOSTOWYCH NIEPODLEGAJĄCYCH OBCIĄŻENIOM PRÓBNYM W KONTEKŚCIE MONITORINGU STANU KONSTRUKCJI

W artykule przeanalizowano zasadność przeprowadzania badań obiektów mostowych, które zgodnie z obowiązującym prawem nie podlegają procedurze próbnych obciążeń dopuszczających obiekt do eksploatacji (długość przęsła nie przekracza 20m)[3]. Analiza polegała na porównaniu wyników badań statycznych i dynamicznych dla dwóch obiektów mostowych. Wyniki uzyskane w trakcie badań polowych porównano również z wynikami otrzymanymi z wykorzystaniem modeli numerycznych konstrukcji. Wskazano istotne rozbieżności dla rzeczywistych i otrzymanych z modelu wyników dla jednego z obiektów. Przedstawiono możliwe przyczyny pojawienia się rozbieżności i zaproponowano wykorzystanie badań dynamicznych jako elementu systemu do oceny i monitoringu stanu obiektu mostowego.

Słowa kluczowe: dynamika konstrukcji, obiekty mostowe, symulacja, obciążenia próbne, monitoring stanu konstrukcji (SHM), wykrywanie uszkodzeń konstrukcji

1. Wprowadzenie

Obiekty mostowe należą do grupy konstrukcji, których głównym przeznaczeniem jest funkcja komunikacyjna. Podnoszą jakość transportu przynosząc tym samym wymierne korzyści społeczne. Stanowią często strategiczne znaczenie dla gospodarki. Należą do grupy odpowiedzialnych obiektów budowlanych, które powinny spełniać wygórowane kryteria bezpieczeństwa.

¹ Autor do korespondencji/corresponding author: Marcin Tekieli, Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki, Instytut Technologii Informatycznych w Inżynierii Lądowej, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, tel. (12) 628 29 24, e-mail: mtekieli@15.pk.edu.pl

² Łukasz Michalski, Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, e-mail: lukaszmicchalskins@o2.pl

Przyjmowane na etapie projektowania założenia upraszczające modelowanie obiektów mostowych, tylko w pewnym stopniu odzwierciedlają ich pracę w warunkach eksploatacyjnych. Geometria konstrukcji, właściwości materiałowe, jak i oddziaływania są jedynie próbą opisanie rzeczywistej pracy obiektu. Potwierdzeniem tego są awarie, a co gorsza katastrofy budowlane, które pomimo gwałtownego rozwoju technik obliczeniowych wciąż jeszcze występują. W związku z powyższym coraz częściej na świecie wyposaża się obiekty mostowe (szczególnie o większych rozpiętościach) w systemy SHM – monitoringu stanu technicznego konstrukcji – mające na celu pozyskiwanie istotnych informacji dotyczących głównie parametrów stanu konstrukcji oraz nasilania oddziaływań środowiskowych, na bazie których identyfikowane są stany ostrzegawcze i alarmowe.

Pod pojęciem SHM (ang. SHM – Structural Health Monitoring) należy rozumieć system monitorowania stanu technicznego konstrukcji, którego idea jest wdrożenie strategii identyfikacji uszkodzenia w obiektach budowlanych. Uszkodzenie definiowane jest przez zmianę właściwości materiałowych lub geometrycznych układu konstrukcji, a także przez zmianę w strukturze i warunkach brzegowych układu. Uszkodzenia te wpływają na obecny albo przyszły stan techniczny konstrukcji. Proces identyfikacji uszkodzenia odbywa się zazwyczaj w czterech następujących po sobie etapach:

- detekcja uszkodzenia – etap, w którym wykrywana jest obecność uszkodzenia,
- lokalizacja uszkodzenia – etap, w którym podawane jest miejsce uszkodzenia,
- typizacja uszkodzenia – etap, w którym podawany jest rodzaj uszkodzenia,
- zakres uszkodzenia – etap, w którym następuje ocena wpływu uszkodzenia na konstrukcję [1, 2].

Istotną grupą obiektów mostowych, które powinny podlegać podstawowej formie kontroli ich stanu oraz monitoringowi w trakcie eksploatacji są obiekty, których długość nie przekracza 20 m. Obiekty takie - zgodnie z obowiązującym prawem, nie podlegają procedurze obciążen próbnych przed dopuszczeniem ich do eksploatacji [3, 4, 5]. W związku z tym, istnieje uzasadnione przypuszczenie, że niektóre z takich obiektów mogą nie spełniać założeń postawionych na etapie projektowania. Spowodowane może to być wykorzystaniem przez wykonawcę materiałów o jakości niższej od założonej przez projektanta lub brakiem staranności podczas prac wykonawczych. Tego typu działania skutkują w większości przypadków nieodpowiednim zachowaniem się obiektu pod wpływem standardowych obciążeń występujących w trakcie jego eksploatacji, a to z kolei w prosty sposób może prowadzić do istotnego skrócenia żywotności takiego obiektu, a w skrajnych przypadkach może też zwiększać prawdopodobieństwo pojawienia się uszkodzeń zagrażających bezpieczeństwu użytkowania obiektu.

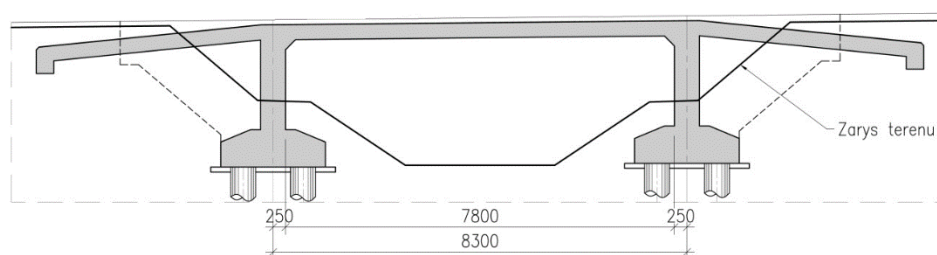
W dalszej części artykułu przedstawiono analizę odpowiedzi dwóch obiektów mostowych podczas obciążeniowych badań statycznych i dynamicznych. Otrzymane podczas rzeczywistych testów wyniki porównano z wynikami otrzymanymi z wykorzystaniem modeli numerycznych. Zauważono i wskazano istotne rozbieżności w przeanalizowanych wynikach oraz zaproponowano wykorzystanie badań dynamicznych konstrukcji mostowej do detekcji i wstępnej lokalizacji uszkodzenia w ramach dwóch pierwszych etapów identyfikacji uszkodzenia.

2. Opis badanych obiektów mostowych

W ramach jednego z prowadzonych przez Politechnikę Krakowską im. Tadeusza Kościuszki projektów wykonano badania na dwóch obiektach mostowych zlokalizowanych na terenie województwa małopolskiego w miejscowościach Libertów i Bodzanów.

2.1. Geometria badanych obiektów

Analizowany most w miejscowości Libertów, którego przekrój podłużny przedstawiono na rys. 1 jest budowlą o charakterze komunikacyjnym przeprowadzającym ruch samochodowy nad ciekim wodnym. Obiekt został zaprojektowany na klasę obciążenia taborem samochodowym „A” według normy PN-85/S-10030. Obiekty mostowe. Obciążenia. Konstrukcja mostu, to dwa układy ramowe, zintegrowane ze ścianami przednimi i skrzydłami przyczółków. Ustrój nośny to płyta żelbetowa, z monolitycznymi gzymsami, o grubości 30 cm z betonu B30 i zbrojona stalą BSt500 [6].

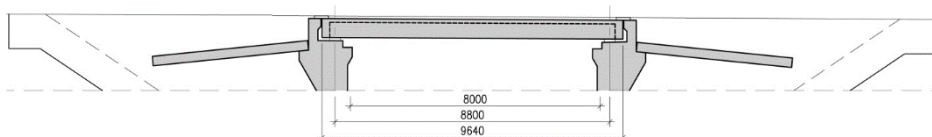


Rys. 1. Przekrój podłużny obiektu mostowego w miejscowości Libertów (na podstawie [6])

Fig. 1. Longitudinal section of the bridge structure in Libertów (based on [6])

Obiekt w miejscowości Bodzanów, którego przekrój podłużny przedstawiono na rys. 2, to wiadukt o charakterze komunikacyjnym przeprowadzający ruch samochodowy nad drogą lokalną. Konstrukcja wiaduktu to prefabrykowane belki typu Kujan w schemacie belki swobodnie podpartej wykonane z betonu B35. W przekroju poprzecznym występuje 21 belek, które zespolone są betonem „in-situ” klasy B30, Pracę poprzeczną zapewnia beton „in-situ” między belkami

oraz płyta o grubości 12 cm. Konstrukcja zbrojona jest prętami przepuszczonymi przez otwory w średnicach belek i dodatkowym zbrojeniem płyty i stref wspornikowych [7].



Rys. 2. Przekrój podłużny obiektu mostowego w miejscowości Bodzanów (na podstawie [7])

Fig. 2. Longitudinal section of the bridge structure in Bodzanów (based on [7])

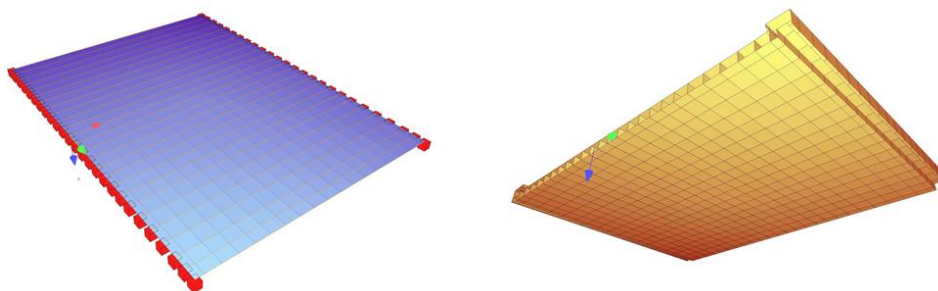
2.2. Modele numeryczne badanych obiektów

Analizę przeprowadzono przez zamodelowanie konstrukcji mostu z podziałem na elementy o określonych sztywnościach, parametrach geometrycznych odpowiadających rzeczywistym elementom konstrukcji w oparciu o dokumentację [6, 7]. Do obliczeń badanych konstrukcji wykonano przestrzenne, numeryczne modele obliczeniowe z wykorzystaniem metody elementów skończonych (MES) w środowisku obliczeniowym Sofistik v. 2012. Obie konstrukcje przybliżono modelami klasy e1+e2, p3, w których główny układ nośny został zbudowany w postaci rusztu, na którym rozpostarto elementy służące do rozkładu obciążeń. Siatka węzłów została zbudowana środkowej powierzchni płyty w celu odwzorowania rzeczywistego kształtu poprzecznego i lokalnego obrotu belek względem osi pionowej. Położenie dźwigarów, belek poprzecznych oraz płyty różnicowano za pomocą mimośrodków (offsetów). Płyty pomostowe wygenerowano za pomocą czterowęzłowych elementów powłokowych o zredukowanej sztywności, które służą do rozkładu obciążeń na belki. W przekroju poprzecznym ustrój konstrukcyjny obiektu w miejscowości Libertów został podzielony na 26 belek, a ustrój konstrukcyjny obiektu w miejscowości Bodzanów na 21 belek. Analogicznie, ustrój konstrukcyjny w przekroju podłużnym podzielono na 17 i 23 belki. Dla modelu obiektu w miejscowości Libertów przyjęto sztywność przekrojów tak, jakby były wykonane z betonu B30, a w przypadku obiektu w miejscowości Bodzanów odpowiednio z betonu B35. W obu przypadkach były to elementy nieważkie (bez założonej masy). Charakterystyki geometryczne przekrojów elementów belkowych zostały obliczone w programie do obliczeń statycznych.

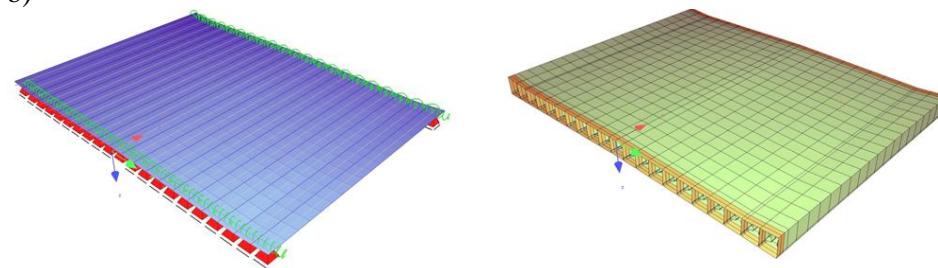
W tak przygotowanym modelu obliczono wartości sił wewnętrznych i ugięć od obciążeń normowych dla klasy obciążenia taborem samochodowym „A” według normy [4] – odpowiadającej faktycznej klasie obciążenia, na jaką został zaprojektowany obiekt. Analizy dokonano dla najbardziej niekorzystnego układu schematów obciążeń wywołującego ekstremalne wartości sił wewnętrznych w konstrukcji nośnej mostu. Obciążenie pojazdem K zamodelowano jako jeden przejazd zrealizowany zgodnie z normą [4]. W kombinacji z nimi uwzględniono

obciążenie taborem q . Wybrano ustawienia obciążenia wywołujące największe wartości sił wewnętrznych.

a)



b)



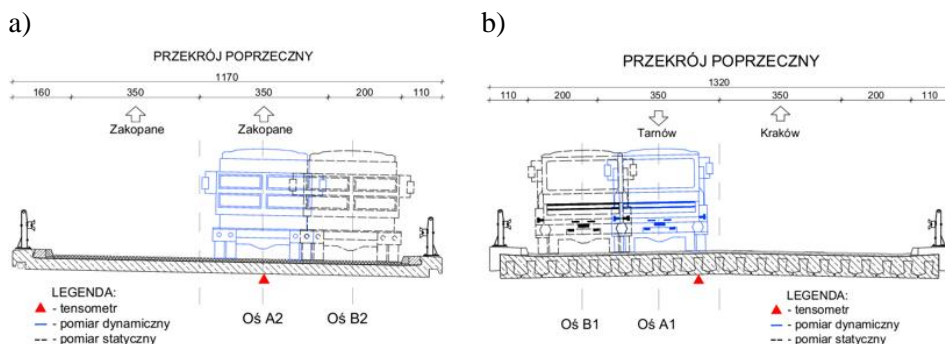
Rys. 3. Model numeryczny wraz z jego wizualizacją dla obiektu w miejscowości Libertów (a) oraz Bodzanów (b)

Fig. 3. Numerical model with visualization of bridge structure in Libertów (a) and Bodzanów (b)

3. Opis badań polowych

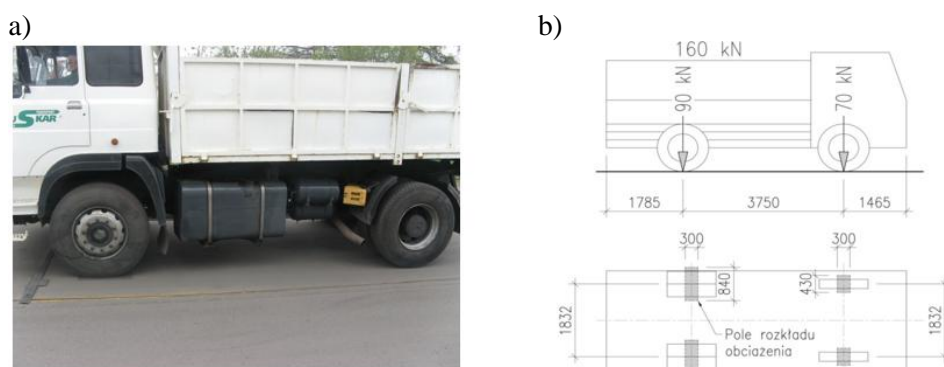
Przeprowadzone badania polowe polegały na pomiarze zmiany odkształcenia w wybranych punktach ustroju nośnego, spowodowanej kontrolowanymi przejazdami oraz postojem pojazdu testowego. Do pomiaru odkształcenia wykorzystano przetworniki elektrooporowe. Częstotliwość próbkowania wynosiła 1000Hz. Na rysunkach 4 a) i 1 b) przedstawiono rozmieszczenie tensometrów na przedmiotowych obiektach mostowych (tensometr w przekroju podłużnym zlokalizowano w środku rozpiętości przęsła) oraz położenie pojazdu w dwóch osiach pomiarowych.

Pod nazwą pojazdu testowego należy rozumieć samochód ciężarowy dwuosiowy o znanej masie. Firma transportowa, która była odpowiedzialna za dostarczenie pojazdu do badań, jest w posiadaniu certyfikowanej wagi samochodowej. Na rys. 5 przedstawiono procedurę związaną z ważeniem pojazdu i uzyskane wyniki.



Rys. 4. Rozmieszczenie czujników tensometrycznych oraz położenie pojazdu testowego na obiekcie w miejscowości Libertów (a) oraz Bodzanów (b)

Fig. 4. Location of strain gauges and position of the vehicle on the tested object in Libertów (a) and Bodzanów (b)



Rys. 5. Pomiar masy pojazdu (a) oraz przyjęty układ obciążenia (b)

Fig. 5. Measurements of the test vehicle weight (a) and load system (b)

W ramach badań przeprowadzono zarówno pomiary statyczne, jak i dynamiczne. Osie A1 i A2 stanowiły osie pomiaru dynamicznego, natomiast osie B1 i B2 pomiaru statycznego. W przypadku pomiaru dynamicznego wykonane zostały trzy przejazdy testowe opisanym wyżej pojazdem z prędkością 40 km/h, 60 km/h oraz 80 km/h. Pomiar statyczny odbył się poprzez ustawienie samochodu na pasie awaryjnym jak najbliżej krawężnika. W przekroju podłużnym środek rozstawu osi pojazdu pokrył się ze środkiem rozpiętości oprzyrządowanych przęseł obu badanych obiektów mostowych.

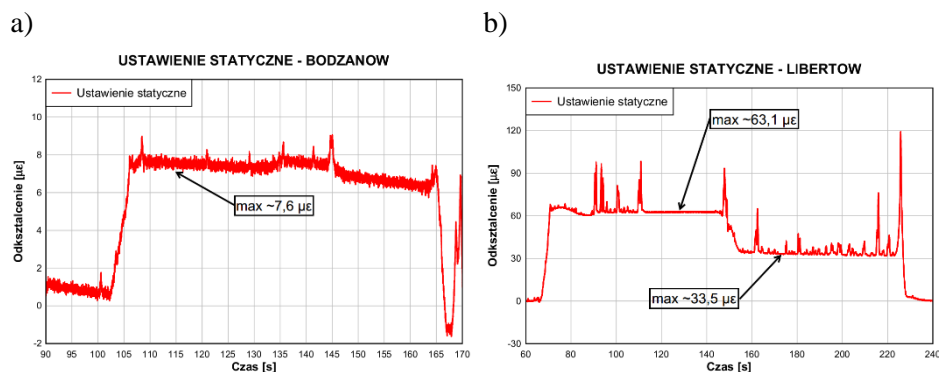
4. Porównanie wyników badań i symulacji numerycznych

W celu porównania danych uzyskanych z badań polowych z symulacjami numerycznymi założono sześć najbardziej reprezentatywnych schematów usta-

wienia pojazdu testowego wzdłuż obiektu mostowego: schemat a) przednia oś w 1/4 przęsła, b) przednia oś w 1/2 przęsła, c) tylna oś w 1/4 przęsła, d) przednia oś w 3/4 przęsła, e) tylna oś w 1/2 przęsła, f) tylna oś w 3/4 przęsła.

4.1. Wyniki badań statycznych i dynamicznych

Dla obu badanych obiektów mostowych wykonano podczas badań polowych pomiar odkształcenia przęsła dla 9 przejazdów kontrolnych (3x40km/h, 3x60km/h, 3x80km/h) oraz dla ustawienia pojazdu na pasie awaryjnym. Na rys. 6 przedstawiono wyniki z pomiaru statycznego, a na rys. 7 z pomiarów dynamicznych dla badanych obiektów.



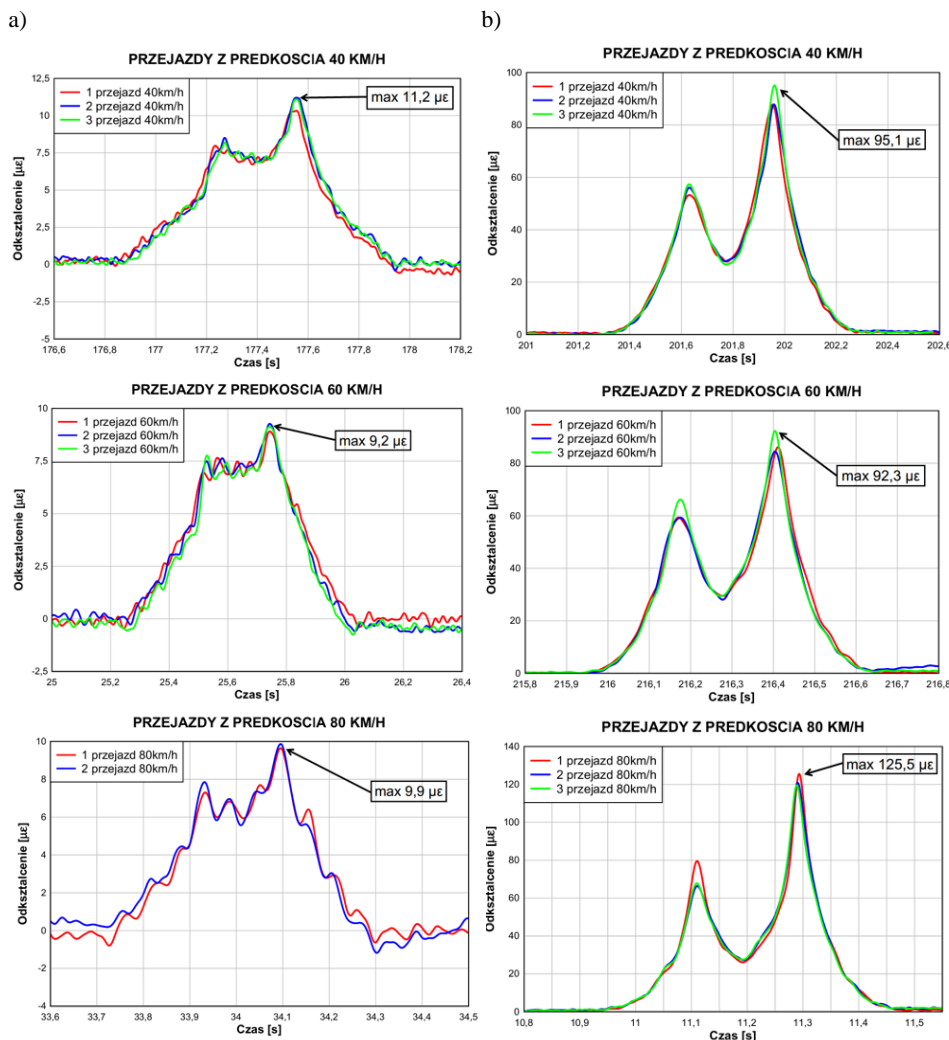
Rys. 6. Wyniki pomiaru statycznego dla obiektu w miejscowości Bodzanów (a) i Libertów (b)

Fig. 6. Results of static load test in Bodzanów (a) and Libertów (b)

4.2. Analiza wyników dla obiektu w miejscowości Bodzanów

Na rys. 8 przedstawiono dane z analizy numerycznej korespondujące z pomiarem statycznym, a na rys. 9 dane korespondujące z pomiarem dynamicznym dla modelu obiektu w miejscowości Bodzanów.

Porównując ze sobą pomiar statyczny i odpowiadające mu symulacje numeryczne można zauważyć, iż z badań otrzymano odkształcenie przęsła mostowego o wartości 7,6 $\mu\epsilon$, a z modelu MES 9,2 $\mu\epsilon$. Analogiczne porównanie pomiaru dynamicznego z rozwiązaniem numerycznym wskazuje, iż wyniki z badań, tj. maksymalne odkształcenie konstrukcji obiektu o wartości 11,2 $\mu\epsilon$ dla prędkości 40km/h, nie przekracza maksymalnego odkształcenia dla schematu e) tj. 13,3 $\mu\epsilon$.



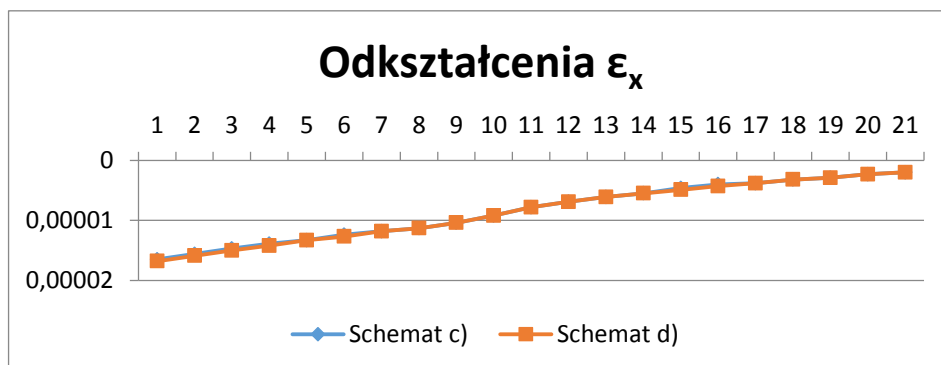
Rys. 7. Wyniki pomiaru dynamicznego dla obiektu w miejscowości Bodzanów (a) i Libertów (b)

Fig. 7. Results of dynamic load tests in Bodzanów (a) and Libertów (b)

4.3. Analiza wyników dla obiektu w miejscowości Libertów

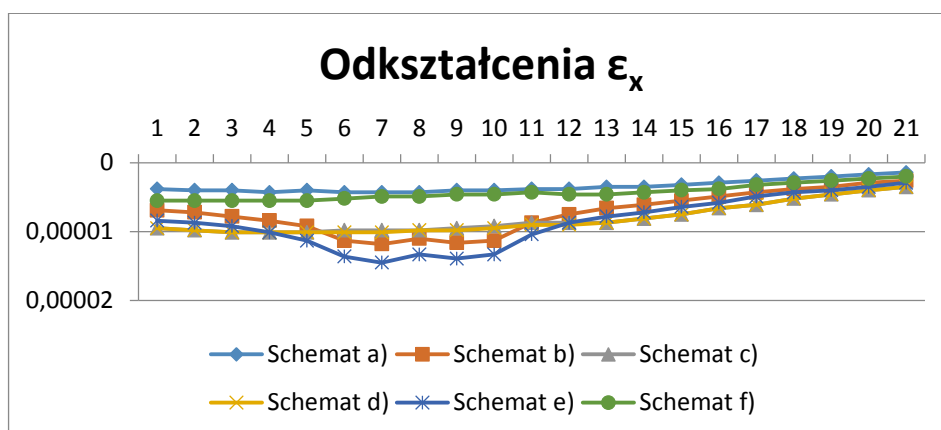
Na rys. 10 przedstawiono dane z analizy numerycznej korespondujące z pomiarem statycznym, a na rys. 11 dane korespondujące z pomiarem dynamicznym dla modelu obiektu w miejscowości Libertów.

W tym przypadku, porównując ze sobą pomiar statyczny i odpowiadające mu symulacje numeryczne można zauważyć, iż z badań otrzymano odkształcenie przęsła mostowego o wartości 33,5 $\mu\epsilon$, a z modelu MES 9,5 $\mu\epsilon$ (schemat c) i 9,8 $\mu\epsilon$ (schemat d)) co stanowi ponad trzykrotną różnicę. Analogiczne



Rys. 8. Wyniki ze statycznej analizy numerycznej, rozkład odkształceń dla osi B1 w środku rozpiętości przęsła dla obiektu w miejscowości Bodzanów

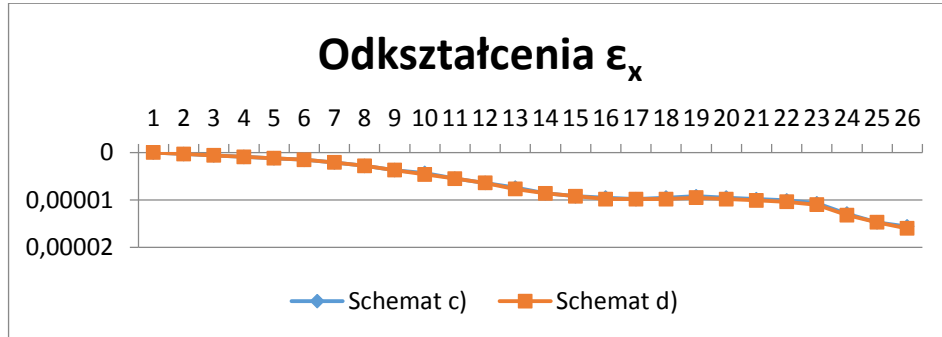
Fig. 8. Results of static numerical analysis, the strain distribution for the B1 axle in center of the bridge span in Bodzanów



Rys. 9. Wyniki z dynamicznej analizy numerycznej, rozkład odkształceń dla osi A1 w środku rozpiętości przęsła dla obiektu w miejscowości Bodzanów

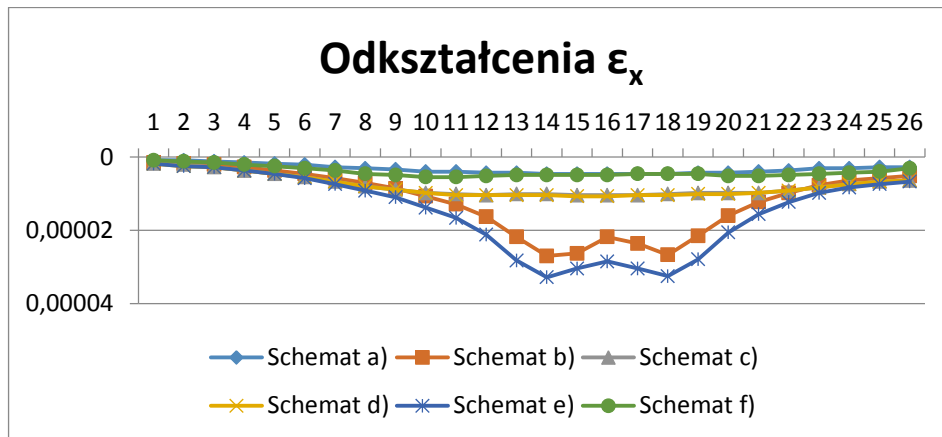
Fig. 9. Results of dynamic numerical analysis, the strain distribution for the A1 axle in center of the bridge span in Bodzanów

porównanie pomiaru dynamicznego z rozwiązaniem numerycznym wskazuje, iż wyniki z badań, tj. maksymalne odkształcenie konstrukcji obiektu o wartości 125,5 $\mu\epsilon$ dla prędkości 80km/h przekracza ponad czterokrotnie odkształcenie dla schematu e) tj. 28,5 $\mu\epsilon$.



Rys. 10. Wyniki ze statycznej analizy numerycznej, rozkład odkształceń dla osi B1 w środku rozpiętości przęsła dla obiektu w miejscowości Libertów

Fig. 10. Results of static numerical analysis, the strain distribution for the B1 axle in center of the bridge span in Libertów



Rys. 11. Wyniki z dynamicznej analizy numerycznej, rozkład odkształceń dla osi A1 w środku rozpiętości przęsła dla obiektu w miejscowości Libertów

Fig. 11. Results of dynamic numerical analysis, the strain distribution for the A1 axle in the center of the bridge span in Libertów

5. Podsumowanie i wnioski

W artykule opisano i przeanalizowano procedurę obciążeń testowych (statycznych i dynamicznych) dla dwóch obiektów mostowych, które przed oddaniem ich do eksploatacji nie zostały poddane obciążeniom próbnym. Wyniki uzyskane podczas badań polowych porównano z wynikami analizy numerycznych odpowiednich modeli obu konstrukcji.

Dla obiektu mostowego w miejscowości Bodzanów wyniki z badań polowych w zadawalającym stopniu zgadzają się z danymi z symulacji numerycznych. Atestowane prefabrykowane dźwigary mostowe typu Kujan posiadają od-

powiedni moduł sprężystości i są wykonane zgodnie ze sztuką inżynierską. Dla drugiego obiektu wyniki z badań polowych w znacznym stopniu odbiegają od danych z symulacji numerycznych. Dla pomiaru statycznego różnica jest ponad trzykrotna, a dla pomiaru dynamicznego ponad czterokrotna (na niekorzyść badań).

Prawdopodobna przyczyna tych różnic może tkwić w jakości zastosowanych materiałów – betonu i/lub stali. Moduł sprężystości zastosowanego betonu jest wyraźnie niższy od projektowanego. Mniejsza może być również ilość stali użytej do zbrojenia elementów obiektu w stosunku do ilości założonej przez projektanta. Ponadto należy zauważyć, iż analizowany obiekt jest stosunkowo nowy (2003 r.). W zaistniałej sytuacji, przyczyn zaobserwowanego zachowania się obiektu nie należy rozpatrywać w kontekście zjawisk reologicznych. Warto też zauważyć, że dla obiektu płytowego występuje znaczny wpływ efektów dynamicznych w porównaniu do obiektu belkowego sprężonego.

Przedmiotowe obiekty są konstrukcjami mostowymi, które nie podlegają próbnym badaniom obciążeniowym. Instalacja nawet szczątkowego systemu SHM, może pomóc w wyrugowaniu z rynku nierzetelnych i nieuczciwych wykonawców. Monitoring tego typu konstrukcji chociażby w podstawowym zakresie pozwala też lepiej zrozumieć wpływ efektów dynamicznych, przez co może dostarczyć istotnych informacji do normatywów projektowych. W obecnej normie mostowej wartość współczynnika dynamicznego nie przekracza 1,325 [4, 5]. Jak pokazała analiza przedstawiona w niniejszym artykule, w niektórych przypadkach nie koresponduje z rzeczywistą pracą obiektu mostowego.

Literatura

- [1] Wenzel H.: Health Monitoring for Bridges, Vienna, Austria, Wiley, 2009.
- [2] Boller C., Chang FK., Fujino Y.: Encyclopedia of Structural Health Monitoring, Wiley, 2009.
- [3] Rozporządzenia Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 30 maja 2000 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogowe obiekty inżynierskie i ich usytuowanie. (Dz. U. z dnia 3 sierpnia 2000 r.).
- [4] PN-85/S-10030 Obiekty mostowe. Obciążenia.
- [5] PN-S-10040:1999 Obiekty mostowe. Konstrukcje betonowe żelbetowe i sprężone. Wymagania i badania.
- [6] Projekt Wykonawczy. Przebudowa przepustu w km 674+504 w ciągu drogi krajowej nr 7 Gdańsk – Chyżne w miejscowości Libertów. Biuro Projektowo-Badawcze Promost, Wrocław, 2003.
- [7] Projekt Wykonawczy. Przebudowa wiaduktu km 443+050.39 drogi krajowej nr 4 wraz budową dróg dojazdowych i murów oporowych w rejonie obiektu. Transprojekt – Kraków Sp. z o. o., Kraków, 2004.

DYNAMIC LOAD TESTS OF SHORT BRIDGE STRUCTURES AS A PART OF STRUCTURAL HEALTH MONITORING SYSTEM

S u m m a r y

In Poland, in accordance with the law, it is not necessary to make load test for short bridge structures (if the span length is less than 20 meters). The analysis was based on a comparison of the results of static and dynamic tests for the two short bridge structures. The results obtained during the field trials was also compared with the results obtained from numerical models of both structures. Significant differences between these two type of results for one of the tested structure were identified. Possible causes of mentioned discrepancies were presented and the use of dynamic tests as an element of a system for bridge structure health monitoring was proposed.

Keywords: dynamics of structures, bridge structures, simulation, load test, structural health monitoring (SHM), structural failures detection

DOI:10.7862/rb.2014.41

Przesłano do redakcji: 08.06.2014 r.

Przyjęto do druku: 04.09.2014 r.