



DAMIAN BĘBEN<sup>1)</sup>  
ZBIGNIEW MAŃKO<sup>2)</sup>

## BADANIA DYNAMICZNE MOSTU POWŁOKOWO-GRUNTOWEGO Z BLACH FALISTYCH

**STRESZCZENIE.** W pracy przedstawiono wyniki i wnioski z badań doświadczalnych przeprowadzone pod obciążeniem dynamicznym mostu drogowego powłokowo-gruntowego położonego nad potokiem Mokrzyca we Wrocławiu, o konstrukcji ze stalowych blach falistych. Określono również prędkość krytyczną, współczynniki dynamiczne, prędkości drgań i częstotliwości drgań. Wnioski z przeprowadzonych badań mogą być pomocne w praktyce inżynierskiej, głównie przy projektowaniu i wykonywaniu badań pod obciążeniem dynamicznym mostów drogowych złożonych ze stalowych blach falistych. Pomimo coraz częstszego stosowania tego typu konstrukcji w przypadku mostów małych i średnich rozpiętości teoretycznych, wniosków z badań nie można jeszcze uogólnić do całej klasy tych rozwiązań.

### 1. WSTĘP

Przedmiotem pracy jest powłokowo-gruntowy most drogowy wykonany z blach falistych typu Super Cor położony nad rzeką Mokrzyca we Wrocławiu, który został poddany wszechstronnym badaniom doświadczalnym (rys. 1) [1 - 2]. Na obiekcie zrealizowano pomiary przemieszczeń poziomych i pionowych (ugięć) oraz odkształceń w wybranych punktach i przekrojach stalowej powłoki w dwóch kierunkach oraz w czterech zasadniczych etapach badań podczas m.in.:

- zagęszczania warstwami gruntu (łącznie 15 warstw) wokół konstrukcji stalowej powłoki – dokonano tego pięciokrotnie po różnych ilościach warstw (etap I),

<sup>1)</sup> dr inż. – Wydział Budownictwa Politechniki Opolskiej

<sup>2)</sup> dr hab. inż. – profesor PWr., Instytut Inżynierii Lądowej Politechniki Wrocławskiej

- obciążenia modelowego statycznego (etap II),
- obciążenia modelowego dynamicznego (etap III),
- obciążenia eksploatacyjnego (etap IV).

W pracach [1] i [3] przedstawiono szczegółowy opis konstrukcji mostu, aparaturę pomiarową, zakres badań pod obciążeniem statycznym oraz wyniki i analizę różnych wielkości otrzymanych z pomiarów i obliczeń, a także wnioski końcowe z badań. Stosowne badania pod obciążeniem kolejnymi warstwami zasypki gruntowej opisano w pracy [1].

Głównym celem niniejszej pracy jest przedstawienie i analiza wyników badań doświadczalnych nowego mostu przeprowadzonych w zakresie obciążeń dynamicznych (etap III), jako podstawy określenia jego jakości wykonania, trwałości, a także ustalenia wielkości prędkości krytycznej, współczynników dynamicznych, prędkości i częstotliwości drgań, i w konsekwencji oceny możliwości dopuszczenia go do normalnej eksploatacji na zaprojektowane obciążenia według klasy B [1]. Ze względu na duże znaczenie położenia tego obiektu w sieci drogowej miasta Wrocławia (położony jest on na głównej drodze prowadzącej do kopalni piasku) oraz z uwagi na jego prototypowy charakter, a także na wszechstronnie i kompleksowo przeprowadzone jego badania, wraz ze szczegółową analizą otrzymanych wyników z pomiarów i obliczeń, wnioski końcowe z tych badań mogą być bardzo przydatne dla praktyki inżynierskiej, m.in. z tematyki badań kontrolnych i odbiorczych powłokowo-gruntowych mostów drogowych złożonych z blach falistych (lub płaskich), szczególnie, w przypadku obiektów o podobnych parametrach geometrycznych i charakterystykach materiałowych [3 - 7].

## 2. SFORMUŁOWANIE PROBLEMU

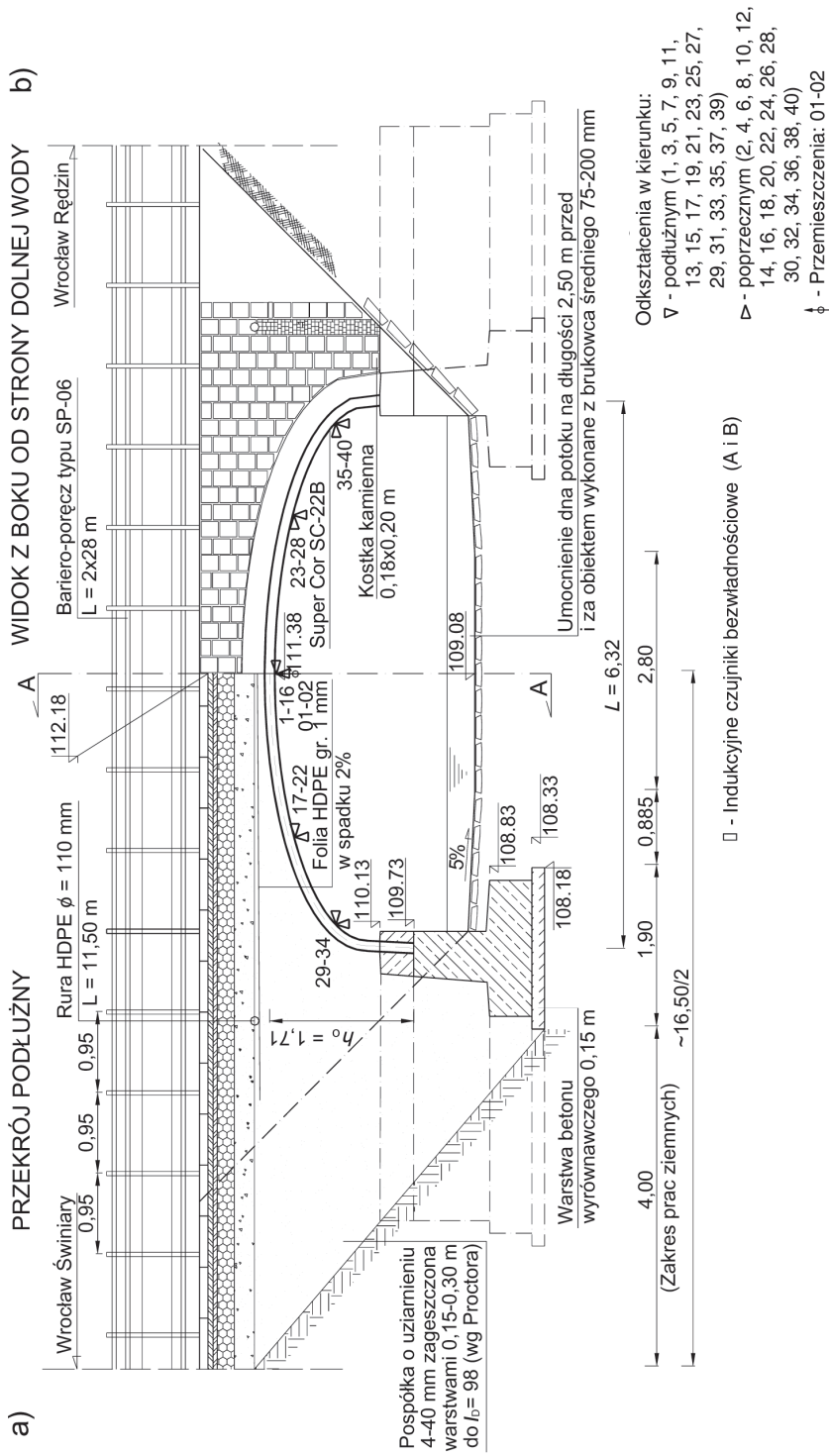
Obciążenie ruchome przejeżdżające z pewną, nieraz dużą, prędkością przez konstrukcję mostową, nagle uderzenia wskutek nierówności jezdni (toru) i niejednakowego ugięcia resorów pojazdów, itp. wywołują jej drgania. Oddziaływania dynamiczne sprawiają, że naprężenia w elementach konstrukcji mostowej, a także ich odkształcenia mogą być większe przy obciążeniu taborem będącym w ruchu, niż byłyby w przypadku takiego samego obciążenia statycznego, tj. bardzo powolnego wprowadzania i ustawienia na moście nieruchomo tego samego taboru. Sprawa obliczeń dynamiki mostu z uwzględnieniem wszystkich wymienionych czynników, drgań własnych konstrukcji mostowej oraz możliwości wystąpienia rezonansu jest zagadnieniem skomplikowanym obliczeniowo, które dotąd nie znalazło całkowicie zadawalającego rozwiązania. Dotychczasowe znane prace badawcze ograniczają się zwykle do pewnych uproszczonych, a więc teoretycznych przypadków, jak np. obciążenia tylko jedną siłą, założenia niewrażliwości przęsła mostowego (dla małych ich rozpiętości teoretycznych) lub pominięcia masy poruszającego się ciężaru wobec dużej masy przęsła (dla dużych ich rozpiętości teoretycznych). Prace te dają jednak pewne rozeznanie odnośnie zachowania się przęsła (lub przęseł) pod obciążeniem dynamicznym i wskazują kierunki nowych badań, lecz nie doprowadziły jak dotąd do zbudowania ogólnie dostępnego modelu obliczeń dynamiki

mostów powłokowo-gruntowych. W większości krajów celem uwzględnienia wpływów dynamicznych w obliczeniach mostów stosuje się tzw. współczynnik dynamiczny  $\varphi > 1$ , przez który mnoży się siły lub momenty występujące w elementach konstrukcyjnych mostu, obliczone dla statycznego ustawienia obciążenia ruchomego, w położeniu najbardziej niekorzystnym dla danego elementu.

Wartości współczynników dynamicznych podawane w przepisach i normach nie są przeważnie oparte na dokładniejszych badaniach, lecz przyjmowane tradycyjnie, często przez analogię do przepisów innych krajów, a jedynym uzasadnieniem ich jest zwykle fakt, że okazały się one wystarczające w wielkiej liczbie już zbudowanych mostów. Stąd wydaje się, że wobec pracy konstrukcji mostowej w obszarze odkształceń sprężystych, jako współczynnik dynamiczny można przyjąć stosunek strzałki ugięcia, np. w połowie przęsła pod obciążeniem taborem przejeżdżającym z żadaną prędkością do strzałki ugięcia pod takim samym obciążeniem statycznym. W odniesieniu do podanych powłokowo-gruntowych konstrukcji mostów brak odpowiednich norm i wytycznych do obliczania wartości oddziaływań dynamicznych (np. współczynnika dynamicznego, logarytmicznego dekrementu tłumienia, itp.) w jeszcze większym stopniu uwidacznia lukę, jaka istnieje w analizie takich obiektów mostowych poddanych wpływom obciążeń dynamicznych. Generalnie rzecz ujmując w dynamice budowli prędkość krytyczna jest zdefiniowana w relacji do okresu drgań własnych lub prędkości fali poprzecznej przęsła mostu, natomiast w tym przypadku prędkość krytyczna  $v_{kr}$  rozumiana jest w sensie inżynierskim, co oznacza prędkość samochodu  $v_s$  przy której występuje największa amplituda drgań przęsła tego mostu, a co za tym idzie największa wartość współczynnika dynamicznego  $\varphi_{max}$ . Prędkość tę można wyznaczyć na podstawie kilku prób (przejazdy tego samego obciążenia z różnymi prędkościami przez analizowany obiekt).

### 3. OPIS KONSTRUKCJI MOSTU

Badany most drogowy w przekroju podłużnym stanowi ustrój statyczny w postaci jednoprzęsłowej powłoki stalowej o rozpiętości teoretycznej  $L = 6,320$  m sztywno utwierdzonej, za pomocą stalowych nierównoramiennych ceowników, w dwóch żelbetowych ławach fundamentowych (rys. 1). Obiekt ten został zaprojektowany na obciążenia według klasy B, tj. 400 kN zgodnie z normą PN-85/S-10030. Ustrój niosący zbudowano w postaci powłoki złożonej z arkuszy blach falistych o grubości  $t = 7,10$  mm i wymiarach fal  $140 \times 380$  mm, połączonych między sobą na szerokości przęsła za pomocą śrub sprężających, obsypanej i odpowiednio zagęszczonej warstwami gruntu (o grubościach po około 0,20 - 0,30 m). Współczynnik zagęszczenia dla obszaru bezpośrednio stykającego się z konstrukcją stalową wynosił  $I_D = 0,95$  według skali Proctora Normalnego oraz  $I_D = 0,98$  – dla pozostałej części zasypki gruntowej, umożliwiającymi ułożenie stabilnej nawierzchni drogowej na podłożu z tłucznia. Szerokość powłoki mostu górą wynosi  $b_g = 11,95$  m, natomiast dołem –  $b_d = 17,00$  m. W planie obiekt usytuowany jest prostopadle w stosunku do nurtu rzeki, a jego światło pionowe wynosi  $h_0 = 1,71$  m. Szerokość jezdni na obiekcie jest równa 6,50 m, a szerokości obustronnych opasek bezpieczeństwa wynoszą po 0,75 m (rys. 1).





Pod łąwy fundamentowe zastosowano warstwy geosiatki typu Tenax LBO o wymiarach  $2,50 \times 20,00$  m – dwukierunkowo rozciągane w celu stabilizacji podłoża, gdyż w tym miejscu występują niekorzystne warunki gruntowe. Pod fundamentami przewidziano również ułożenie warstwy betonu wyrównawczego klasy B10 o grubości 0,15 m (rys. 1). Aby zapewnić stabilność łąw fundamentowych oraz zapobiec ich podmyciu przez przepływającą wodę, zwłaszcza podczas wiosennych roztopów, zastosowano od strony wlotu i wylotu do obiektu obustronne skrzydełka betonowe o długościach po 2,95 m (rys. 2). Umieszczenie przyczółków obiektu nie powoduje zawężenia, aktualnego czynnego przekroju, przepływu wód w potoku Mokrzyca.

a)



b)



Rys.2. Widok badanego mostu: a) z boku,

b) na przejazd samochodu marki Kamaz przez obiekt z prędkością 20 km/h

Fig.2. The bridge directly before beginning of dynamic tests: a) side view on object, b) passing the Kamaz vehicle on the bridge with speed of 20 km/h

Zasadnicza stalowa powłoka mostu została wzmocniona w trzech miejscach, tj. w kluczu (na całej jej szerokości) i w dwóch jej narożach przy ławach fundamentowych od strony gruntu z obu stron obiektu (w rozstawie co 380 mm), za pomocą dodatkowych arkuszy blachy falistej, tzw. żeber, w celu zapewnienia większej sztywności poprzecznej przęsła mostu.

#### 4. ZAKRES WYKONANYCH BADAŃ

Badania pod obciążeniem zmiennym przeprowadzono w celu oceny oddziaływań samochodu na odkształcenia blach falistych i ich ugięcia w wybranych przekrojach poprzecznych powłoki. Zastosowano dwa indukcyjne czujniki bezwładnościowe A i B typu PEVA 7225 służące do pomiaru prędkości drgań umieszczone na krawężnikach z obu stron jezdni oraz czujniki tensometryczne 1 – 40 służące do pomiaru odkształceń, odpowiednio w kierunku podłużnym i poprzecznym przęsła, usytuowane na górze wybranych fal blach w trzech przekrojach poprzecznych mostu (rys. 1), których przebiegi czasowe zarejestrowano na komputerze klasy PC. W czasie realizacji badań podejmowano doraźne decyzje o zmianie mierzonych parametrów, schematach obciążeń dynamicznych, o skalowaniu przyrządów oraz o przeprowadzaniu dodatkowych serii obciążeń. Podjęto starania, aby trasa przejazdu pojazdu za każdym razem była prawie identyczna, aby można było porównywać otrzymane wyniki. W przeciwnym bowiem wypadku, zmiany trasy przejazdu pojazdu w przekroju poprzecznym jezdni uniemożliwiałyby bezpośrednie porównywanie wyników. Miało to na celu m.in. ustalenie prędkości krytycznej, tzn. takiej, przy której uzyskuje się ekstremalną wartość współczynnika dynamicznego [1].

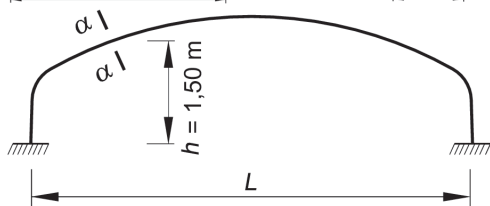
Schematy obciążeń dynamicznych przyjęto tak, aby zidentyfikować:

- wpływ inercji i prędkości taboru ruchomego,
- stany rezonansowe wywołane cyklicznymi obciążeniami ruchomymi,
- wpływ intensywnego hamowania samochodu ciężarowego,
- wpływ nierówności progowych i nierówności nawierzchni drogowej,
- częstotliwości własne i logarytmiczne dekrementy tłumienia przyporządkowane podstawowym formom drgań własnych badanej konstrukcji przęsła.

Podczas badań dynamicznych użyto dwóch pojazdów typu Kamaz. Pomierzone naciski na osie przednie i tylne znacząco przekraczały dopuszczalną ładowność pojazdu. Parametry techniczne samochodu obciążającego były następujące: maksymalny ciężar pojazdu z obciążeniem – 260,00 kN (i pusty – 100,00 kN), nacisk na przednią oś – 44,70 kN i na tylne osie –  $2 \times 73,40$  kN (rys. 3a).

Prędkości poruszania się pojazdu po moście (użytego wcześniej do badań statycznych [1]) ustalono w programie badań na około 10, 20 i 30 km/h w obu kierunkach drogi (schematy I – VI). Pomiarów oddziaływań dynamicznych nie dokonywano przy przejazdach pojazdu przez próg oraz przy hamowaniu, ponieważ warunki atmosferyczne były bardzo trudne (okres zimowy) i istniało niebezpieczeństwo wypadku.

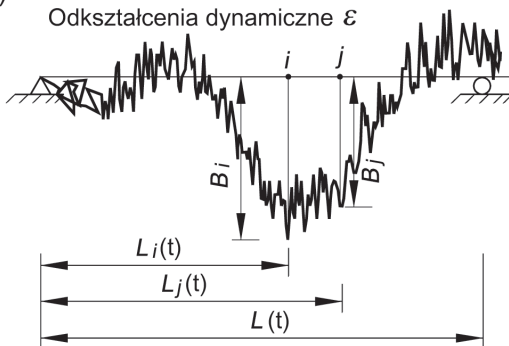
a) Kierunek jazdy pojazdu z prędkościami:



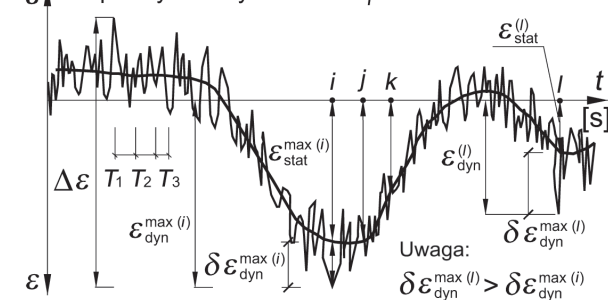
b) Lina wpływu  $M_{\alpha-\alpha}$



c) Odształcenia dynamiczne  $\varepsilon$



d) Współczynniki dynamiczne  $\varphi$



Rys.3. Przykładowe wykresy drgań w czasie dla wybranego przekroju poprzecznego  $\alpha-\alpha$  oraz interpretacja wyników:

a) schemat mostu oraz charakterystyki pojazdu użytego do badań,  
 b) linia wpływu momentu zginającego w  $h = 1,50$  m,  
 c) wykres odkształceń dynamicznych,  
 d) różne przypadki, mogące wystąpić podczas ustalania współczynnika dynamicznego

Fig.3. Example graphs of the vibration in time for the selected cross-section  $\alpha-\alpha$  and interpretation of results:

a) scheme of bridge and the truck dimensions and loads on wheels (axes),  
 b) influence line of bending moment at  $h = 1,50$  m,  
 c) graphs of dynamic strains,  
 d) various cases which can be occurred during determination of dynamic coefficient



## 5. SPOSÓB OPRACOWANIA WYNIKÓW BADAŃ

Charakterystycznym wynikiem pomiarów dynamicznych jest wspólny wykres drgań i przemieszczeń oraz/lub prędkości i częstotliwości drgań. Interpretacja wyników pomiarów jest trudna i niejednokrotnie może być niejednoznaczna. Podstawowymi poszukiwanymi parametrami są współczynnik dynamiczny i logarytmiczny dekrement tłumienia. Współczynnik dynamiczny charakteryzuje odpowiedź konstrukcji pod obciążeniem dynamicznym w porównaniu z obciążeniem statycznym. Oblicza się go jako stosunek maksymalnego odkształcenia (ugięcia) dynamicznego (określonego jako największa wartość wychylenia na wykresie) do maksymalnego odkształcenia (ugięcia) statycznego określonego jako średnia z minimalnego i maksymalnego wychylenia na wykresie.

Współczynnik dynamiczny ustalony na podstawie pomiarów można porównywać z odpowiednią wartością podaną przez normy obciążeń. W ujęciu normowym współczynnik dynamiczny jest dodatkowym mnożnikiem zwiększającym obciążenia statyczne, będące podstawą do wymiarowania konstrukcji mostu. Należy jednak zwrócić uwagę, że tak ustalony współczynnik dynamiczny odnosi się do miejsca, w którym wykonano pomiar. Dlatego do badań dynamicznych wybiera się z reguły miejsca krytyczne, którymi w przypadku mostów o konstrukcji powłokowo-gruntowej jest połowa jego rozpiętości teoretycznej, tj. klucz.

W zależności od zastosowanej aparatury pomiarowej i przyjętego programu badań uzyskuje się w wyniku końcowym:

- a) Maksymalne odkształcenia (lub ugięcia) całkowite  $\varepsilon_{dyn}^{\max}$  (lub  $u_{dyn}^{\max}$ ), maksymalne odkształcenia statyczne  $\varepsilon_{stat}^{\max}$  i maksymalne odkształcenia dynamiczne  $\delta\varepsilon_{dyn}^{\max}$ , które nie muszą występować jednocześnie. Wówczas powinno się określić odpowiadające sobie składowe statyczne i dynamiczne.
- b) Współczynniki dynamiczne obliczone na podstawie odkształceń, np. określone według wzorów (1 - 4), przy czym mogą zajść następujące charakterystyczne przypadki:

- dla tej samej chwili „i”  $\varepsilon_{dyn}^{\max(i)} = \varepsilon_{stat}^{\max(i)} + \delta\varepsilon_{dyn}^{\max(i)}$ ,
- dla chwili „j”  $\varepsilon_{dyn}^{\max(j)} = \varepsilon_{stat}^{\max(j)} + \delta\varepsilon_{dyn}^{\max(j)}$ ,
- w chwili „k”  $\varepsilon_{dyn}^{\max(k)} = \varepsilon_{stat}^{\max(k)} + \delta\varepsilon_{dyn}^{\max(k)}$ ,

$$\varphi_i = \frac{\varepsilon_{dyn}^{\max(i)}}{\varepsilon_{stat}^{\max(i)}} = \frac{\varepsilon_{stat}^{\max(i)} + \delta\varepsilon_{dyn}^{\max(i)}}{\varepsilon_{stat}^{\max(i)}} = 1 + \frac{\delta\varepsilon_{dyn}^{\max(i)}}{\varepsilon_{stat}^{\max(i)}}, \quad (1)$$

$$\varphi_j = \frac{\varepsilon_{dyn}^{\max(j)}}{\varepsilon_{stat}^{\max(j)}} = 1 + \frac{\delta\varepsilon_{dyn}^{\max(j)}}{\varepsilon_{stat}^{\max(j)}}, \quad (2)$$

$$\varphi_k = \frac{\varepsilon_{dyn}^{\max(k)}}{\varepsilon_{stat}^{\max(k)}} = 1 + \frac{\delta\varepsilon_{dyn}^{\max(k)}}{\varepsilon_{stat}^{\max(k)}} . \quad (3)$$

Ponadto, może wystąpić przypadek, że  $\delta\varepsilon_{dyn}^{\max}$  nie występuje w tej samej chwili, co  $\varepsilon_{dyn}^{\max}$ , i wówczas stosuje się  $\delta\varepsilon_{dyn}^{\max(l)}$ , a odpowiednie współczynniki dynamiczne wyznacza się z poniższego wzoru (4):

$$\varphi_l = \frac{\varepsilon_{dyn}^{\max(l)}}{\varepsilon_{stat}^{\max(l)}} = 1 + \frac{\delta\varepsilon_{dyn}^{\max(l)}}{\varepsilon_{stat}^{\max(l)}} . \quad (4)$$

Różne przypadki, które mogą wystąpić przy ustalaniu współczynnika dynamicznego zilustrowano na rysunku 3d.

W przypadku pomiaru wyłącznie składowej dynamicznej podaje się maksymalną wartość oraz, jeżeli to możliwe, wartość jej składowej w chwili przejazdu obciążenia przez przekrój, w którym usytuowany jest punkt pomiarowy.

- c) Częstotliwości drgań własnych mostu.
- d) Logarytmiczny dekrement tłumienia  $\Delta$ , który można obliczyć według wzoru:

$$\Delta = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r \ln \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{i+1}} , \quad (5)$$

w którym:

- $\varepsilon_i$  i  $\varepsilon_{i+1}$  – i-ta oraz (i+1) amplitudy odkształcenia,
- $r$  – liczba składników sumy.

W przypadku pomiaru przemieszczeń (ugięć) podane wyżej charakterystyki ustala się na podstawie ich wartości pomierzonych w czasie.

## 6. WYNIKI BADAŃ ORAZ ICH ANALIZA

Wykresy prędkości drgań w czasie  $v_A, v_B$  (dla punktów pomiarowych  $A$  i  $B$ ) i odpowiadające im częstotliwości drgań  $f_A, f_B$  przedstawiono na rys. 4. Na podstawie tych wielkości wyznaczono ugięcia dynamiczne  $u_A, u_B$ , natomiast przebiegi odkształceń w czasie  $\varepsilon_{dyn(x)}^{\max}, \varepsilon_{dyn(y)}^{\max}$  od wybranego schematu obciążenia dynamicznego przedstawiono na rysunkach 5 - 7. Analizując otrzymane wykresy prędkości drgań, wielkości amplitud, jak również częstotliwości drgań własnych stalowej powłoki mostu podczas przejazdów pojazdu (tabl. 1 i rys. 4) stwierdzono, że:

1. Największa amplituda prędkości drgań pomierzona w punkcie  $A$  wynosiła  $v_A = 0,078$  m/s przy częstotliwości drgań  $f_A = 28,562$  Hz i dynamicznym ugięciu  $u_A = 0,43 \times 10^{-3}$  m. W punkcie  $B$  amplituda prędkości drgań była równa  $v_B = 0,082$  m/s przy częstotliwości  $f_B = 24,25$  Hz i dynamicznym ugięciu  $u_B = 0,54 \times 10^{-3}$  m. Amplitudy zmierzono podczas przejazdu samochodu przez most z prędkością 30 km/h.

- Największa amplituda prędkości drgań pomierzona w punkcie  $A$  podczas przejazdu pojazdu z prędkością 20 km/h była równa  $v_A = 0,069$  m/s przy częstotliwości drgań  $f_A = 25,250$  Hz i dynamicznym ugięciu  $u_A = 0,44 \times 10^{-3}$  m. Natomiast w punkcie  $B$ , amplituda prędkości drgań wynosiła  $v_B = 0,071$  m/s przy częstotliwości  $f_B = 25,562$  Hz i dynamicznym ugięciu  $u_B = 0,44 \times 10^{-3}$  m.
- Z kolei największa amplituda prędkości drgań w punkcie  $A$  podczas przejazdu samochodu z prędkością około 10 km/h wynosiła  $v_A = 0,040$  m/s, przy częstotliwości drgań  $f_A = 15,500$  Hz i dynamicznym ugięciu  $u_A = 0,41 \times 10^{-3}$  m. Podczas gdy w punkcie  $B$ , amplituda prędkości drgań była równa  $v_B = 0,029$  m/s, a częstotliwość wynosiła  $f_B = 15,000$  Hz i dynamiczne ugięcie  $u_B = 0,31 \times 10^{-3}$  m.

Tablica 1. Charakterystyki dynamiczne mostu uzyskane z indukcyjnych czujników bezwładnościowych podczas przejazdu pojazdu z różnymi prędkościami

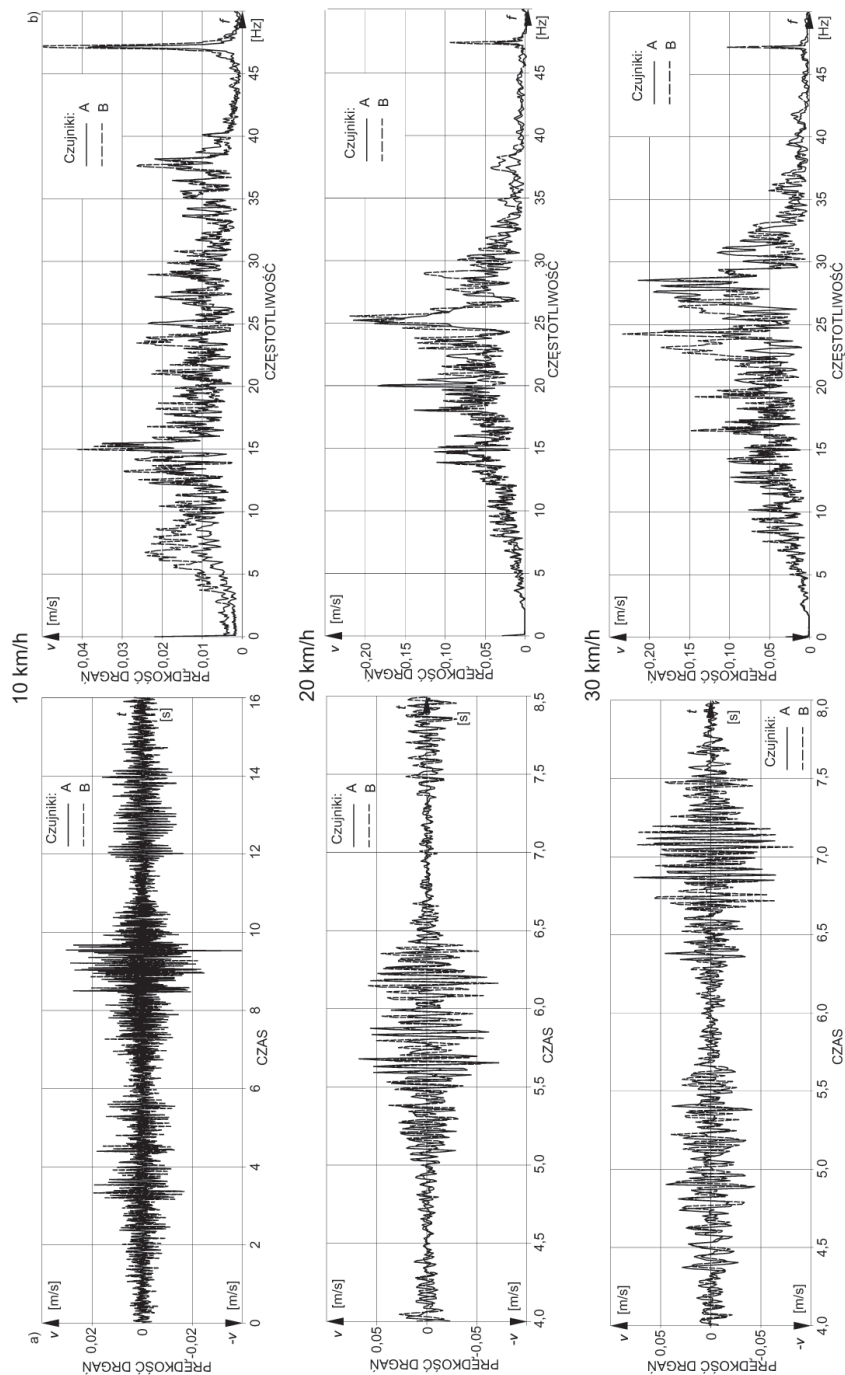
Table 1. Dynamic characteristic of bridge obtained from inertial inductive sensors during passing a vehicle with various speeds

Prędkość pojazdu $v_s$ w [km/h] oraz schematy obciążeń		Czujniki					
		$A$			$B$		
		$v_A$ [m/s]	$f_A$ [Hz]	$u_A$ [ $10^{-3}$ m]	$v_B$ [m/s]	$f_B$ [Hz]	$u_B$ [ $10^{-3}$ m]
10	I (II)	0,040	15,500	0,41	0,029	15,000	0,31
20	III (IV)	0,069	25,250	0,44	0,071	25,562	0,44
30	V (VI)	0,078	28,562	0,43	0,082	24,250	0,54

Uwagi:  
 $v_A, v_B$  - prędkości drgań,  $f_A, f_B$  - częstotliwości drgań,  $u_A, u_B$  - ugięcia dynamiczne

Analizując wykresy maksymalnych odkształceń stalowej powłoki mostu powłokowo-stalowego uzyskane podczas poszczególnych przejazdów pojazdu i oddziaływań dynamicznych (tabl. 2 i rys. 5 - 7) stwierdzono, że:

- Największe odkształcenie dynamiczne w powłoce mostu pomierzono w punkcie pomiarowym 22 (koniec wzmocnienia klucza) w kierunku poprzecznym  $\varepsilon_{dyn(x)}^{\max} = 34,50 \times 10^{-6}$  przy maksymalnym łącznym zakresie odkształceń  $\Delta\varepsilon_x = 39,50 \times 10^{-6}$  (naprężenia  $\delta_x = 8,90$  MPa), podczas gdy w kierunku podłużnym maksymalne odkształcenia uzyskano w punkcie pomiarowym 13 (klucz konstrukcji powłoki)  $\varepsilon_{dyn(y)}^{\max} = 18,00 \times 10^{-6}$ , a odpowiedni zakres wynosił  $\Delta\varepsilon_y = 20,50 \times 10^{-6}$  (naprężenia  $\delta_y = 4,20$  MPa). Powyższe wartości uzyskano podczas przejazdu samochodu z prędkością  $v_s = 10$  km/h (rys. 5).
- W kolejnych schematach obciążeń dynamicznych, tj. podczas przejazdu pojazdu z prędkościami  $v_s = 20$  i 30 km/h, wartości dynamicznych odkształceń były mniejsze od wartości uzyskanych przy przejazdach z prędkościami 10 km/h. Jednocześnie należy dodać, że otrzymano je również w punktach pomiarowych 22 i 13 (rys. 6 - 7 i tabl. 2).



Rys.4. Przebiegi: a) prędkości drgań w czasie i b) częstotliwości drgań konstrukcji w wybranych punktach A i B podczas przejazdu pojazdu z prędkościami  $v_s = 10, 20$  i  $30$  km/h

Fig.4. Recorded velocity of vibrations in time (a) and frequency of vibrations of the structure (b) in selected points (A and B) during passing a vehicle with the speeds  $v_s = 10, 20$  and  $30$  km/h

3. Na podstawie uzyskanych z pomiarów odkształceń w dwóch kierunkach  $\varepsilon_{dyn(x)}^{\max}$  i  $\varepsilon_{dyn(y)}^{\max}$  obliczono wielkości współczynników dynamicznych jako stosunek maksymalnych odkształceń dynamicznych  $\varepsilon_{dyn}^{\max}$  do statycznych  $\varepsilon_{stat}^{\max}$ , tj.  $\varphi_{I-VI} = \varepsilon_{dyn}^{\max} / \varepsilon_{stat}^{\max}$  w kierunku podłużnym lub poprzecznym, odczytanych z wykresów od wszystkich zrealizowanych schematów obciążeń, które zestawiono w tabelicy 2.

Maksymalna wartość współczynnika dynamicznego wynosi  $\varphi = 1,71$  i pochodzi od przejazdu samochodu z prędkością 30 km/h. Stąd można uznać, że w przypadku tego mostu podana prędkość samochodu była prędkością krytyczną  $v_{kr}$ . Uzyskane na podstawie badań wartości współczynników dynamicznych porównano z wielkością wyliczoną ze wzoru (6) według PN-85/S-10030, w którym  $L$  jest rozpiętością teoretyczną powłoki:

$$\varphi_{PN-85} = 1,35 - 0,005L = 1,35 - 0,005 \cdot 6,320 = 1,318 \leq \varphi_{\max} = 1,325 \quad (6)$$

Na podstawie badań dynamicznych oraz w oparciu o dodatkowe analizy teoretyczne [8 - 10] słuszne wydaje się stwierdzenie, że normowe wartości współczynnika dynamicznego dla tego typu powłokowo-gruntowych konstrukcji mostowych, powinny mieć nieco większe wartości, zwłaszcza, że są to konstrukcje podatne i dość wrażliwe na obciążenia dynamiczne i utratę stateczności, zwłaszcza podczas ich budowy oraz w pierwszym okresie eksploatacji, co również zaobserwowano w czasie I etapu badań tego mostu [2] pod obciążeniem zasypką gruntową.

W przypadku wielkości logarytmicznego dekrementu tłumienia obliczonych ze wzoru (5) w rozpatrywanych schematach obciążeń dynamicznych podczas badań doświadczalnych tego mostu, to mieściły się one w zakresie 0,057 - 1,299 dla prędkości przejazdu pojazdu  $v_s = 10$  km/h (schematy I - II), zaś w kolejnych schematach obciążeń III - IV ( $v_s = 20$  km/h) w przedziale 0,048 - 2,079, a dla  $v_s = 30$  km/h (schematy V - VI) w zakresie 0,057 - 1,519. Największą wartość  $\Delta = 2,079$  uzyskano podczas przejazdu pojazdu z prędkością  $v_s = 20$  km/h w schemacie III obciążenia (tabl. 2).

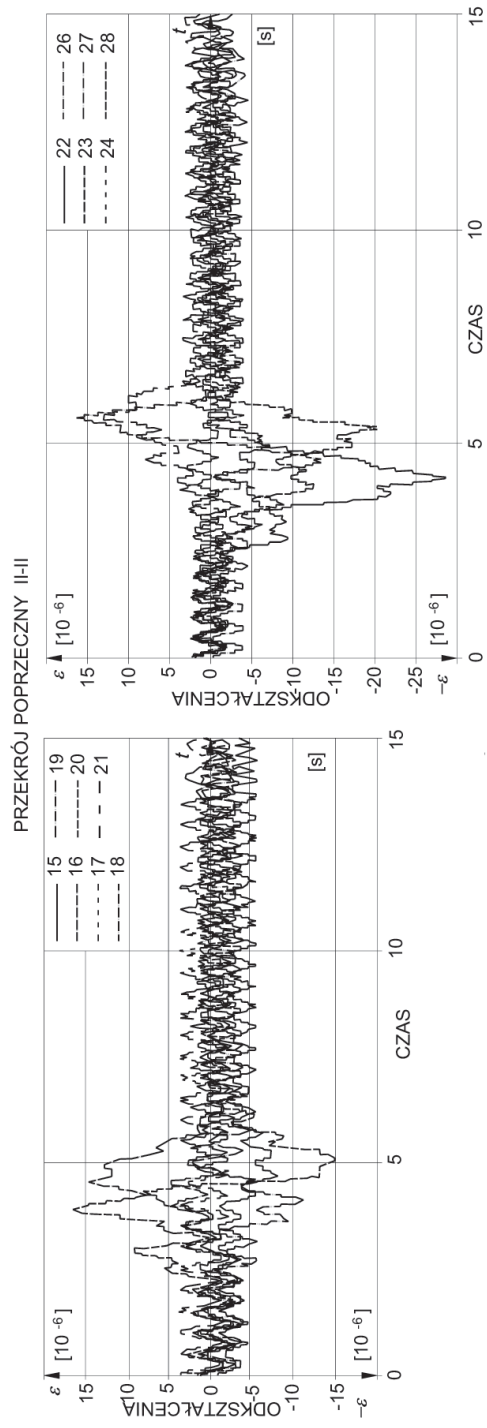
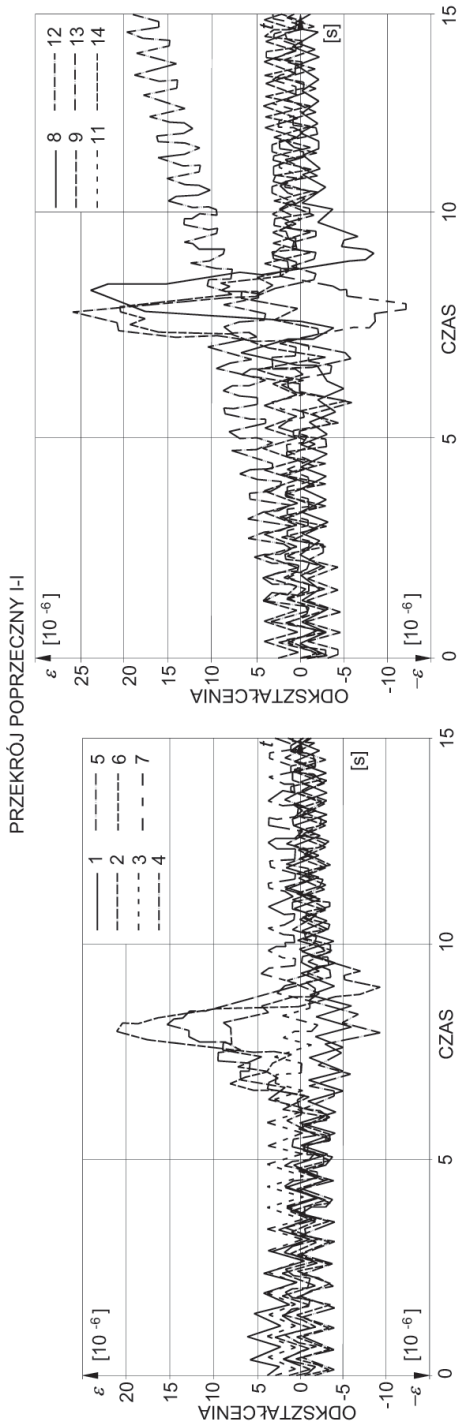
Z wykonanych obliczeń i analiz wynika, że wartości logarytmicznego dekrementu tłumienia dla mostów powłokowo-gruntowych wydają się być znacznie większe w porównaniu do wielkości uzyskiwanych w przypadku tradycyjnych mostów stalowych (np. belkowo-płytowych), jednakże mając na uwadze inne badania autorów przeprowadzone na tego typu mostach można uznać te wielkości za podobne [4].

Tablica 2. Charakterystyki dynamiczne mostu obliczone na podstawie odkształceń  $[10^{-6}]$  pomierzonych w wybranych punktach pomiarowych podczas przejazdu pojazdu przez most z różnymi prędkościami  $v_s$   
 Table 2. The dynamic characteristics value calculated on the basis of strains  $[10^{-6}]$  measured during passing the vehicle across a bridge with various speeds  $v_s$

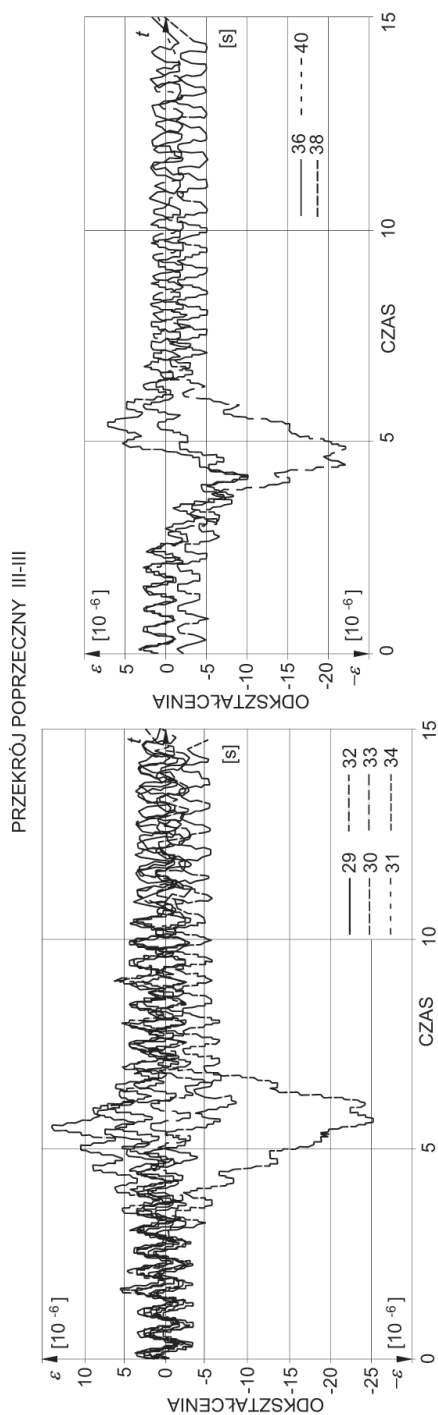
Wartości:	Numery czujników:																			
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40
$v_s = 10 \text{ km/h}$	13,00	20,00	32,00	31,00	-	34,50	27,00	19,00	10,10	32,00	39,50	14,50	31,50	21,50	16,00	22,00	28,00	13,50	18,50	27,00
$\Delta \varepsilon_x$	7,00	13,00	18,00	21,00	-	25,00	19,50	13,00	3,50	15,00	32,00	10,00	14,50	16,00	9,50	12,00	23,50	7,50	7,50	21,00
$\varepsilon_{\text{star}(x)}^{\text{max}}$	9,00	16,00	22,00	24,00	-	27,50	21,00	15,00	5,10	17,00	34,50	12,00	17,50	18,50	12,00	15,00	26,00	10,50	11,00	23,00
$\varepsilon_{\text{dym}(x)}^{\text{max}}$	1,28	1,23	1,22	1,14	-	1,10	1,08	1,15	1,26	1,13	1,08	1,20	1,21	1,16	1,26	1,25	1,11	1,20	1,26	1,09
$\varphi = \varepsilon_{\text{dym}(x)}^{\text{max}} / \varepsilon_{\text{star}(x)}^{\text{max}}$	0,182	0,207	1,011	1,098	-	1,299	1,252	0,143	0,071	0,693	0,245	0,405	0,259	0,114	0,233	0,310	0,080	0,336	0,318	0,362
$\Delta$	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	29	31	33	35	37	39
$v_s = 10 \text{ km/h}$	12,00	6,00	10,50	33,00	9,50	17,00	20,50	8,00	6,00	14,50	9,00	8,00	-	10,00	9,50	8,60	11,50	-	-	-
$\Delta \varepsilon_y$	4,75	3,50	7,00	11,00	5,50	10,00	16,00	6,00	3,00	9,50	7,50	3,00	-	5,00	5,00	4,00	6,50	-	-	-
$\varepsilon_{\text{star}(y)}^{\text{max}}$	6,00	4,00	9,00	12,00	7,00	13,00	18,00	8,00	4,00	12,00	9,00	4,00	-	7,50	7,50	5,10	8,50	-	-	-
$\varepsilon_{\text{dym}(y)}^{\text{max}}$	1,26	1,14	1,28	1,09	1,27	1,30	1,10	1,23	1,23	1,26	1,20	1,23	-	1,20	1,20	1,27	1,30	-	-	-
$\varphi = \varepsilon_{\text{dym}(y)}^{\text{max}} / \varepsilon_{\text{star}(y)}^{\text{max}}$	0,087	0,133	0,251	0,875	0,336	1,178	0,057	0,133	0,133	0,233	0,057	0,287	-	0,405	0,068	0,125	0,125	-	-	-
$\Delta$	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40
$v_s = 20 \text{ km/h}$	15,50	23,00	32,00	35,00	-	33,00	21,50	14,00	11,50	34,50	31,50	19,00	30,50	24,00	8,50	10,00	11,50	10,00	7,00	22,00
$\Delta \varepsilon_x$	9,50	17,00	23,00	24,00	-	21,00	16,00	10,00	4,50	15,50	25,00	14,00	14,50	20,00	3,50	5,00	8,00	4,50	4,00	18,00
$\varepsilon_{\text{star}(x)}^{\text{max}}$	12,00	19,00	24,50	26,50	-	23,00	18,00	12,00	6,50	18,00	28,00	17,00	16,50	23,00	4,50	6,50	9,50	7,00	4,50	21,00
$\varepsilon_{\text{dym}(x)}^{\text{max}}$	1,26	1,12	1,07	1,10	-	1,10	1,13	1,20	1,24	1,16	1,12	1,21	1,14	1,15	1,29	1,30	1,19	1,25	1,13	1,16
$\varphi = \varepsilon_{\text{dym}(x)}^{\text{max}} / \varepsilon_{\text{star}(x)}^{\text{max}}$	0,980	0,546	1,058	1,405	-	1,056	0,693	1,791	0,167	0,117	2,079	0,530	0,164	0,427	0,057	0,262	0,054	0,074	0,811	0,048

Wartości:	Numery czujników:																			
	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	29	31	33	35	37	39
$v_s = 20 \text{ km/h}$	9,00	5,00	12,00	7,00	6,50	11,00	22,50	7,50	6,50	15,50	9,00	7,50	-	8,50	7,00	8,50	5,50	-	-	-
$\Delta \epsilon_y$	6,00	2,00	5,00	5,00	4,00	5,50	14,00	4,50	3,00	10,00	4,50	3,50	-	4,00	5,00	3,50	2,00	-	-	-
$\epsilon_{stat(y)}^{\max}$	7,50	2,50	7,00	7,00	4,50	7,00	16,50	6,50	4,00	12,50	6,50	4,00	-	6,00	7,00	4,50	3,50	-	-	-
$\epsilon_{dyn(y)}^{\max}$	1,25	1,25	1,20	1,30	1,13	1,27	1,18	1,24	1,23	1,25	1,24	1,14	-	1,30	1,20	1,29	1,25	-	-	-
$\phi = \epsilon_{dyn(y)}^{\max} / \epsilon_{stat(y)}^{\max}$	0,068	0,223	0,441	0,336	0,117	0,559	0,062	0,485	0,133	0,916	0,080	0,133	-	0,405	0,074	0,405	0,174	-	-	-
$\Delta$	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40
$v_s = 30 \text{ km/h}$	13,50	20,00	28,50	30,00	-	35,00	30,00	17,00	10,50	30,00	36,00	14,00	34,00	32,00	14,50	18,50	23,00	15,50	12,50	26,50
$\Delta \epsilon_x$	8,00	14,00	17,00	20,00	-	20,00	19,00	14,00	5,00	13,00	26,00	11,00	17,00	15,00	7,50	11,00	17,50	11,00	6,00	20,50
$\epsilon_{stat(x)}^{\max}$	10,00	16,00	20,00	22,50	-	24,00	21,00	16,00	7,50	15,50	29,00	13,50	18,50	17,00	11,50	13,50	19,00	13,50	7,50	24,00
$\epsilon_{dyn(x)}^{\max}$	1,25	1,14	1,18	1,13	-	1,20	1,11	1,14	1,20	1,19	1,12	1,23	1,09	1,13	1,23	1,23	1,09	1,23	1,25	1,17
$\phi = \epsilon_{dyn(x)}^{\max} / \epsilon_{stat(x)}^{\max}$	0,693	1,519	0,916	1,098	-	1,306	1,435	1,386	0,511	0,101	0,960	0,523	0,720	1,329	0,650	0,656	0,998	0,587	0,405	0,182
$\Delta$	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	29	31	33	35	37	39
$v_s = 30 \text{ km/h}$	8,50	6,50	8,00	6,00	9,00	15,50	20,00	8,00	8,50	13,50	11,50	7,00	-	10,00	9,00	10,00	13,00	-	-	-
$\Delta \epsilon_y$	3,50	3,50	3,00	3,75	6,00	9,00	7,00	3,50	4,00	6,00	4,50	2,50	-	8,00	4,00	4,50	11,00	-	-	-
$\epsilon_{stat(y)}^{\max}$	5,00	4,00	4,00	4,00	8,00	10,50	12,00	4,00	6,50	8,50	6,50	3,50	-	9,00	6,00	6,00	13,00	-	-	-
$\epsilon_{dyn(y)}^{\max}$	1,43	1,14	1,33	1,06	1,33	1,16	1,71	1,14	1,62	1,42	1,44	1,40	-	1,13	1,50	1,33	1,18	-	-	-
$\phi = \epsilon_{dyn(y)}^{\max} / \epsilon_{stat(y)}^{\max}$	0,223	0,133	0,133	0,064	0,287	0,646	1,386	0,133	0,367	0,635	0,080	0,154	-	0,057	0,287	0,287	0,424	-	-	-
$\Delta$																				

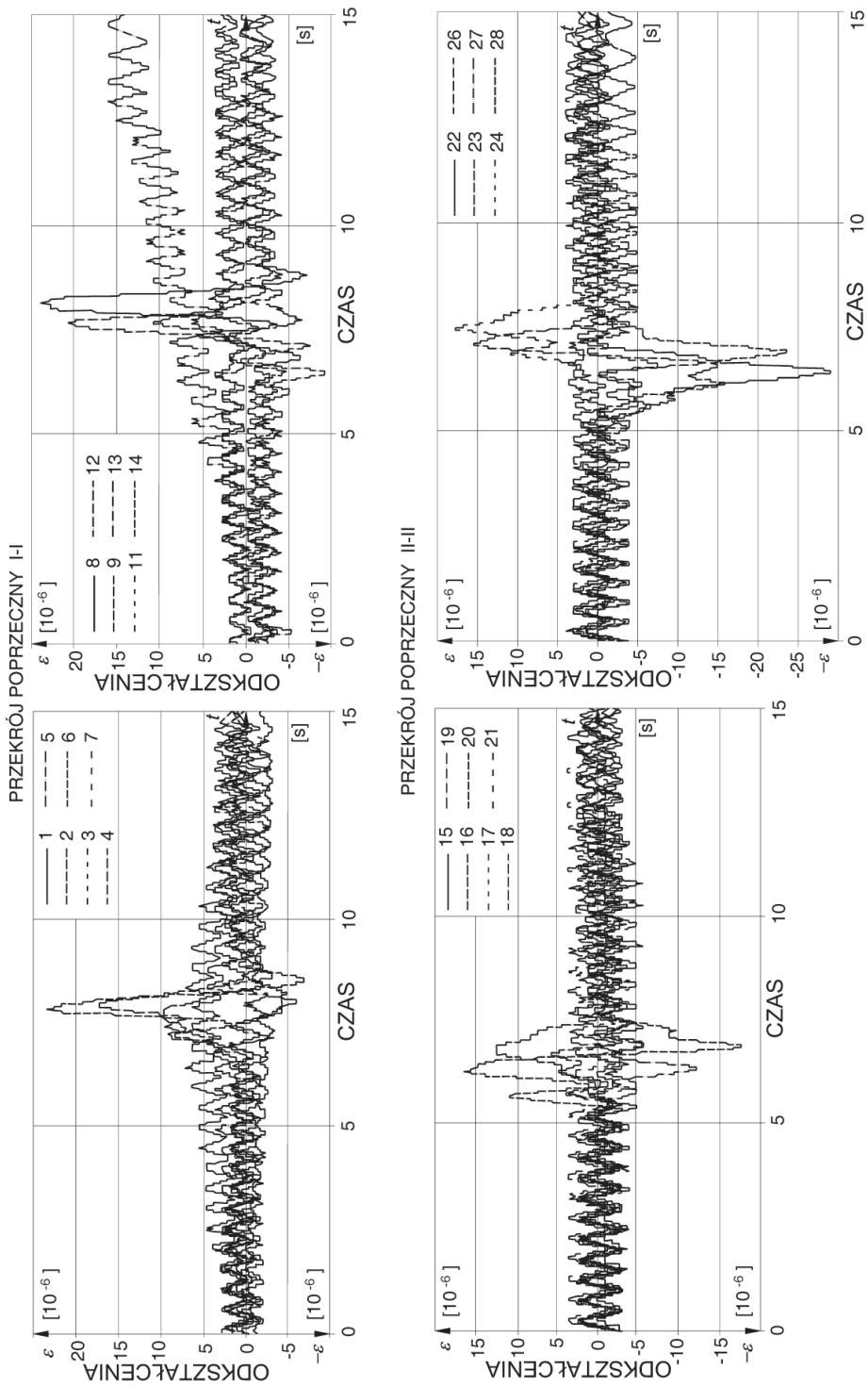
Uwaga: czujniki nr 10, 25, 35, 37 i 39 nie działały poprawnie w całym okresie badań

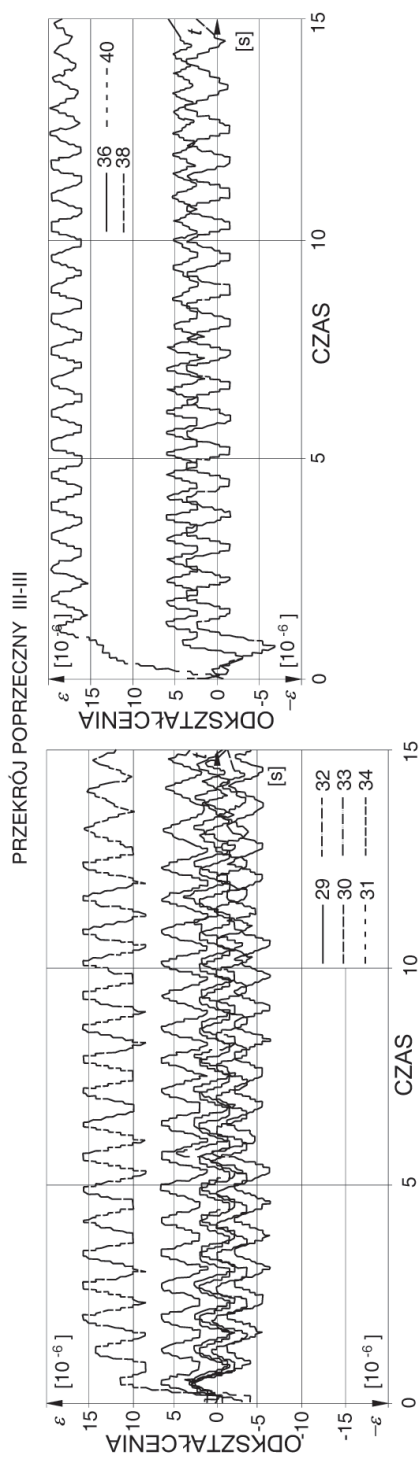






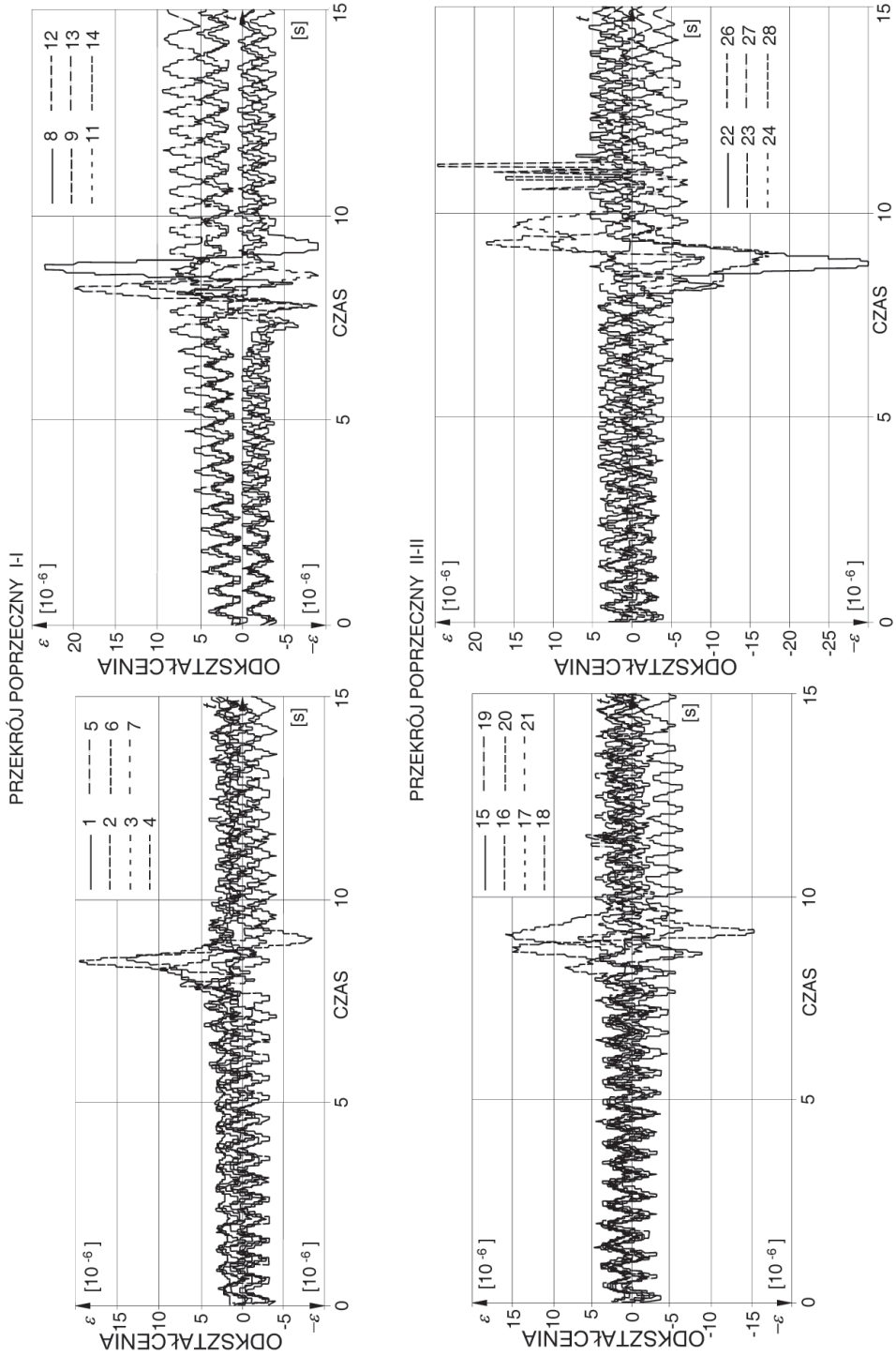
Rys.5. Przebiegi odkształceń w czasie w wybranych punktach (przekroje poprzeczne I-I, II-II, III-III) stalowej konstrukcji powłoki podczas przejazdu pojazdu z prędkością  $v_s = 10$  km/h  
 Fig.5. Recorded strains in time in selected points (the cross-sections I-I, II-II and III-III) of steel shell structure during passing a vehicle with a speed  $v_s = 10$  km/h

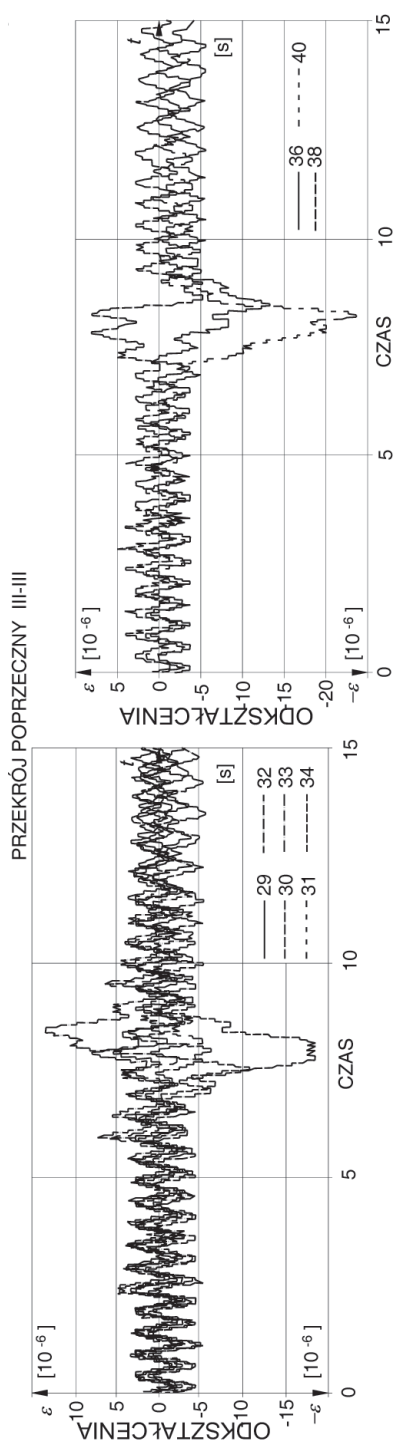




Rys.6. Przebiegi odkształceń w czasie w wybranych punktach (przekroje poprzeczne I-I, II-II, III-III) stalowej konstrukcji powłoki podczas przejazdu pojazdu z prędkością  $v_s = 20$  km/h

Fig.6. Recorded strains in time in selected points (the cross-sections I-I, II-II and III-III) of steel shell structure during passing a vehicle with a speed  $v_s = 20$  km/h





Rys.7. Przebiegi odkształceń w czasie w wybranych punktach (przekroje poprzeczne I-I, II-II, III-III) stalowej konstrukcji powłoki podczas przejazdu pojazdu z prędkością  $v_s = 30$  km/h

Fig.7. Recorded strains in time in selected points (the cross-sections I-I, II-II and III-III) of steel shell structure during passing a vehicle with a speed  $v_s = 30$  km/h

## 7. WNIOSKI

Wyniki przeprowadzonych badań dynamicznych mostu powłokowo-gruntowego, pozwalają na sformułowanie następujących wniosków końcowych:

1. Wartości współczynników dynamicznych  $\varphi_{I-VI}$  dla wszystkich zrealizowanych wariantów obciążeń I-VI wyznaczono zarówno na podstawie odkształceń, jak również na podstawie ugięć w trzech punktach konstrukcji powłoki. Na ich podstawie ustalono także prędkość krytyczną wynoszącą w tym przypadku  $v_{kr} = 30$  km/h, przy czym należy zwrócić uwagę na pewne jej ograniczenie ze względu na brak możliwości realizacji podczas badań doświadczalnych większych prędkości jazdy pojazdów.
2. Stwierdzono, że wartości współczynników dynamicznych są różne w zależności od rodzaju elementu, schematu obciążenia dynamicznego, prędkości przejazdu pojazdu obciążającego oraz przede wszystkim od lokalizacji punktu pomiarowego na konstrukcji stalowej powłoki mostu.
3. Normowe wartości współczynnika dynamicznego dla tego typu powłokowo-gruntowych konstrukcji mostowych, powinny mieć nieco większe wartości, gdyż są to konstrukcje podatne i dość wrażliwe na obciążenia dynamiczne i utratę stateczności, zwłaszcza podczas ich budowy oraz w pierwszym okresie eksploatacji.
4. Wartości logarytmicznego dekrementu tłumienia  $\Delta$  obliczone na podstawie odkształceń uzyskanych z badań doświadczalnych mostu dla zrealizowanych schematów obciążeń dynamicznych, wydają się być na odpowiednim poziomie jak dla tego typu obiektów, jednakże należałoby przeprowadzić kolejne badania tego mostu dla większych prędkości jazdy pojazdów samochodowych, co w tym przypadku było uniemożliwione ze względu na bezpieczeństwo obiektu i ludzi z uwagi na panujące podczas badań warunki atmosferyczne.
5. Podczas badań dynamicznych nie stwierdzono żadnych nieprawidłowości w zachowaniu się stalowej konstrukcji przęsła mostu przy różnorodnych wariantach obciążeń. W konsekwencji, po łącznym ich przeanalizowaniu, powstały podstawy do dopuszczenia obiektu do normalnej eksploatacji zgodnie z przepisami polskimi dla obciążeń według klasy B.

Powyższe podsumowanie i wnioski końcowe odnoszą się, w zasadzie, do konstrukcji badanego przęsła. Aby otrzymane wyniki z badań dynamicznych (m.in. współczynniki dynamiczne  $\varphi$ , prędkość krytyczna  $v_{kr}$ ) można było wprost przenieść na inne tego typu konstrukcje należy prowadzić dodatkowe badania na innych obiektach rzeczywistych.

**BIBLIOGRAFIA**

- [1] *Mańko Z., Bęben D.*: Badania doświadczalne drogowego mostu wykonanego ze stalowych blach falistych pod obciążeniem statycznym i dynamicznym. Centrum Naukowo-Badawcze Rozwoju Budownictwa MOSTAR, Wrocław 2004
- [2] *Bęben D., Mańko Z.*: Odbudowa mostu drogowego we Wrocławiu przy wykorzystaniu stalowych blach falistych. XV Seminarium pt. Współczesne Metody Wzmacniania i Przebudowy Mostów, Poznań-Rosnówko, 2005, 16-21
- [3] *Beben D., Manko Z.*: Experimental tests of behaviour of unconventional steel-soil structure. 3rd International Conference on Bridge Maintenance, Safety, Management, Life-Cycle Performance and Costs, Porto 2006, 777-778 (abstract) + CD-ROM.
- [4] *Bęben D.*: Współpraca gruntu i konstrukcji mostowych wykonanych ze stalowych blach falistych. Praca doktorska, Wydział Budownictwa Politechniki Opolskiej, Opole 2005
- [5] *Bęben D., Mańko Z.*: Badania mostu drogowego wykonanego ze stalowych blach falistych typu Super Cor. XLVIII Konferencja Naukowa KILiW i Komitetu Nauki PZITB „Problemy Naukowo-Badawcze Budownictwa”, Opole-Krynica 2002, t. 4, 167-174
- [6] *Bęben D., Mańko Z.*: Odbudowa mostu drogowego położonego na terenach pozamiejskich przez wykorzystanie stalowych blach falistych. Polskie Drogi, styczeń - luty 2006, XVI-XXI
- [7] *Manko Z., Beben D.*: Behaviour of steel-soil bridge structure made from corrugated plates under field load tests (Part II: Dynamic research). Engineering Transactions, Polish Academy of Science, **54**, 1, 2006, 71-86
- [8] *Vaslestad J.*: Long-term behavior of flexible large-span culverts. Transportation Research Record No. 1231, Transportation Research Board, Washington, D.C., 1990, 14-24
- [9] *Clough R.W., Penzien J.*: Dynamics of Structures. McGraw-Hill, New York 1975
- [10] *Kumarasena T., Scanlan R. H., Morris R.*: Deer Isle Bridge: Field and computed vibrations. Journal of Structural Engineering, ASCE, **115**, 9, 1989, 2313-2328

**DYNAMIC LOAD TESTS OF A SHELL-SOIL BRIDGE  
MADE FROM CORRUGATED PLATES****Abstract**

The paper presents results and conclusions of dynamic load tests that were conducted on the road bridge over the Mokrzyca stream in Wrocław made of galvanized corrugated steel plates. The critical speed magnitudes, the dynamic coefficients, the velocity of vibration, the vibration frequency were experimentally determined. Conclusions drawn from the tests can be helpful in engineering practice mainly during the assessment of behaviour and interaction of this type of corrugated plate bridge with soil. The conclusions can not be yet generalized to all types of such structures. The detailed reference to all type of such bridge structures requires additional analysis (field tests and calculations) on the other types of shell-soil bridges.

