

JAROSŁAW ZWOLSKI<sup>1)</sup>JAN BIEN<sup>2)</sup>MIESZKO KUŻAWA<sup>3)</sup>PAWEŁ RAWA<sup>4)</sup>

## DYNAMIC LOAD TESTS OF ACCESS RAMP TO RĘDZIŃSKI BRIDGE IN WROCŁAW

## DYNAMICZNE OBCIĄŻENIA PRÓBNE ESTAKADY DOJAZDOWEJ DO MOSTU RĘDZIŃSKIEGO WE WROCŁAWIU

**STRESZCZENIE.** Badania dynamiczne wykonywane przed oddaniem obiektu do eksploatacji mają z reguły trzy podstawowe cele: określenie odpowiedzi badanej konstrukcji na obciążenia dynamiczne, wyznaczenie dynamicznych charakterystyk obiektu wykorzystywanych w procesie oceny zmian jego kondycji w trakcie eksploatacji oraz optymalizację metod projektowania przy wykorzystaniu wyników badań doświadczalnych. W artykule główną uwagę skupiono na wykorzystaniu wyników badań doświadczalnych do określenia wartości współczynników przeciążeń dynamicznych (WPD) betonowych skrynkowych dźwigarów głównych oraz płyty pomostowej bezpośrednio obciążonej pojazdami drogowymi. Przedstawiono metodykę i zakres badań estakady dojazdowej do Mostu Rędzińskiego we Wrocławiu, a także zastosowaną procedurę wyznaczania współczynnika przeciążenia dynamicznego. Wyniki badań eksperymentalnych porównano z zaleceniami obowiązujących norm projektowania oraz zaproponowano uściślony sposób wyznaczania wartości współczynnika przeciążenia dynamicznego dla elementów betonowych mostów drogowych o dźwigarach skrynkowych.

**SŁOWA KLUCZOWE:** estakada dojazdowa, most, współczynnik przeciążeń dynamicznych (WPD).

**ABSTRACT.** Dynamic load tests performed before commissioning a bridge generally have three main goals: to determine the response of tested structures to dynamic loads, to define the dynamic characteristics of the bridge used in the assessment of its condition changes during the operation and to optimize design methods by using the results of experimental studies. In this paper the main attention was focused on the use of experimental data to determine the Dynamic Amplification Factors (DAF) for concrete box girders and deck directly loaded by road vehicles. Applied methodology of dynamic tests of the Rędziński Bridge access ramp as well as the procedure of DAF calculation are presented. Results of experimental tests are compared with recommendations of design codes and improved procedure of DAF calculation for concrete box girders of road bridges is proposed.

**KEYWORDS:** access ramp, bridge, Dynamic Amplification Factor (DAF).

DOI: 10.7409/rabdim.013.022

<sup>1)</sup> Instytut Inżynierii Lądowej Politechniki Wrocławskiej; jaroslaw.zwolski@pwr.wroc.pl (✉)

<sup>2)</sup> Instytut Inżynierii Lądowej Politechniki Wrocławskiej; jan.bien@pwr.wroc.pl

<sup>3)</sup> Instytut Inżynierii Lądowej Politechniki Wrocławskiej; mieszko.kuzawa@pwr.wroc.pl

<sup>4)</sup> Instytut Inżynierii Lądowej Politechniki Wrocławskiej; pawel.rawa@pwr.wroc.pl

## 1. PRZEPRAWA MOSTOWA AUTOSTRADOWEJ OBWODNICY WROCŁAWIA PRZEZ ODRE

W ciągu ostatnich kilku lat Wrocław doczekał się realizacji kilku kluczowych inwestycji drogowych planowanych od kilku dziesięcioleci. Autostradowa Obwodnica Wrocławia na odcinku od Magnic do Mirkowa jest jedną z najbardziej potrzebnych realizacji odciążających miasto od ruchu tranzytowego. Najbardziej spektakularnym elementem tej obwodnicy jest przeprawa mostowa przez Odrę [1-3] składająca się z 6 konstrukcji: 4 niezależnych estakad dojazdowych oraz 2 konstrukcji głównego mostu Rędzińskiego przez Odrę, o oddzielnym pomoście dla każdego kierunku ruchu.

Podpory wszystkich obiektów wykonano jako pełnościennie, posadowione na palach prefabrykowanych i wierconych. Pręsła obiektów mostowych zostały wykonane z betonu sprężonego w formie dźwigarów skrzynkowych. Dźwigary estakad dojazdowych mają schemat statyczny belki ciągłej, a rozpiętości przęseł estakad lewobrzeżnych wynoszą: 40 m + 2 × 52 m + 56 m + 6 × 60 m + 49 m, natomiast prawobrzeżnych: 49,06 m + 60,10 m + 60,13 m + 60,16 m + 4 × 60,18 m + 50,15 m (estakada zachodnia) oraz 48,94 m + 59,90 m + 59,87 m + 59,84 m + 4 × 59,82 m + 49,85 m (estakada wschodnia). Pręsła głównego mostu przez Odrę mają rozpiętości: 49 m + 256 m + 256 m + 49 m, a dwa środkowe pręsła są podwieszane do wspólnego pylonu. Całkowita długość przeprawy mierzona wzdłuż jej osi wynosi 1742 m (Rys. 1).

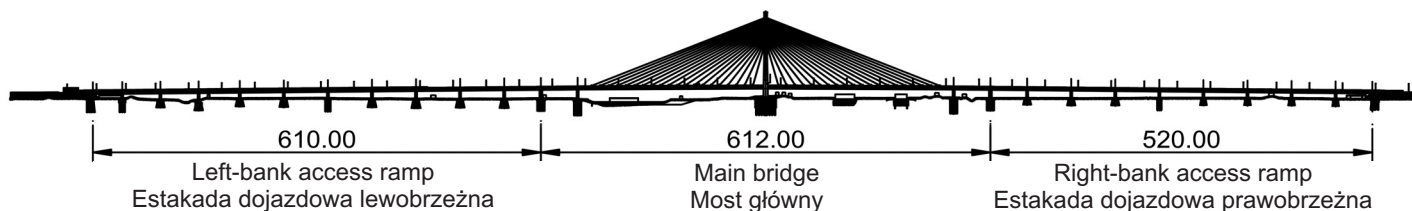


Fig. 1. Bridge structures of the Odra River at the Wrocław Motorway Ring [1]

Rys. 1. Obiekty mostowe przeprowadzające Autostradową Obwodnicę Wrocławia przez Odrę [1]

Ściany dźwigarów skrzynkowych rozpatrywanej w pracy zachodniej estakady prawobrzeżnej mają grubość 40 cm i są usytuowane w rozstawie osiowym równym 6 m. Płyta pomostowa ma grubość 25 cm w części środkowej, w strefach szerokości 1,50 m, natomiast wzdłuż ścian dźwigara skrzynkowego jej grubość wzrasta do 40 cm (Rys. 2). Na obiekcie znajdują się 3 pasy ruchu, pas awaryjny i chodnik

## 1. BRIDGE CROSSING OF THE ODRA RIVER AT THE WROCŁAW MOTORWAY RING

In the past few years Wrocław was the area of implementation of several key road investments planned for several decades. Wrocław Motorway Ring section from Magnice to Mirków is one of the most needed city projects that will solve the problem of through traffic. The most spectacular part of the ring road is the bridge crossing over Odra River [1-3] consisting of the following six structures: four independent access ramps and two main structures of the Rędziński Bridge over Odra River with the separate structure for each direction of traffic.

Supports of all objects are made as full sectional and are founded on precast and drilled piles. The spans of bridges were made of prestressed concrete in the form of box girders. Girders of the access ramps have the static scheme of a continuous beam and the spans of the left-bank ramps are: 40 m + 2 × 52 m + 56 m + 6 × 60 m + 49 m, while the right-bank ramps are: 49.06 m + 60.10 m + 60.13 m + 60.16 m + 4 × 60.18 m + 50.15 m (western access ramp) and 48.94 m + 59.90 m + 59.87 m + 59.84 m + 4 × 59.82 m + 49.85 m (eastern access ramp). The spans of the main bridge over Odra River have the length of 49 m + 256 m + 256 m + 49 m and the two middle spans are suspended from a common pylon. The total length of the bridge crossing measured along its axis is 1742 m (Fig. 1).

The webs of the box girders of the western right-bank ramp analysed in the paper have a thickness of 40 cm and are located in the axial spacing of 6 m. In the middle zones of 1.50 m width the slab is 25 cm thick, while along the webs of box girder its thickness increases to 40 cm (Fig. 2). Three lanes, an emergency lane and an inspection pavement are located along the object, which makes

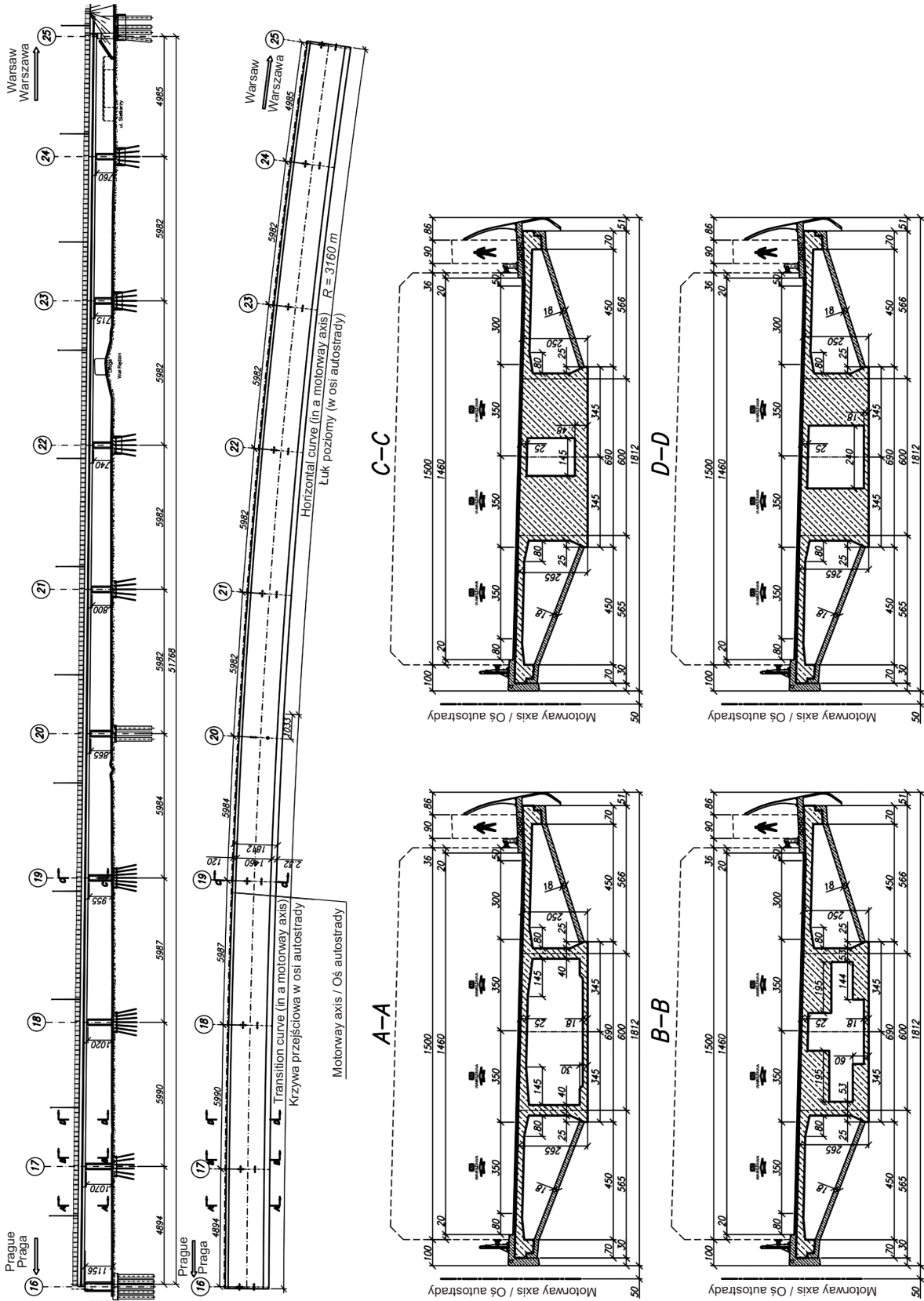


Fig. 2. Tested western bridge access ramp located on right-bank of Odra River  
 Rys. 2. Badana zachodnia estakada dojazdowa usytuowana na prawym brzegu Odry

inspekcyjny, co sprawia, że konstrukcja dźwigara jest szeroka (18,12 m). Znaczny wysięg mają też wsporniki płyty (6,17 m i 6,65 m), dlatego zastosowano ich podparcie w kierunku poprzecznym za pomocą zastrzałów z prefabrykowanych elementów żelbetowych.

Konstrukcje mostowe klasy Mostu Rędzińskiego wymagają szczegółowej analizy teoretycznej (w fazie projektowej) i doświadczalnej w zakresie odpowiedzi na obciążenia statyczne i dynamiczne. W Polsce, w zakresie badań doświadczalnych, konstrukcje mostowe podlegają warunkom określonym w normach [4-5] oraz zaleceniach [6]. W odniesieniu do obiektów mostowych o znacznych rozpiętościach prześel oraz dużym znaczeniu komunikacyjnym lub nowatorskiej konstrukcji, zarówno w naszym kraju, jak i na całym świecie [7-9], badania odbiorcze w formie próbnych obciążeń wykonuje się w indywidualnie określonym zakresie, umożliwiającym poznanie specyfiki pracy badanej konstrukcji. Próbne obciążenia wszystkich konstrukcji Mostu Rędzińskiego w zakresie statycznym oraz dynamicznym, na podstawie indywidualnych projektów badań, przeprowadził w lipcu i sierpniu 2011 roku zespół Zakładu Mostów Instytutu Inżynierii Lądowej Politechniki Wrocławskiej [1-2]. W niniejszym artykule zaprezentowano wybrane wyniki badań dynamicznych zachodniej estakady prawobrzeżnej.

## 2. PROGRAM BADAŃ ORAZ METODYKA ANALIZY WYNIKÓW POMIARÓW

Program próbnych obciążeń dynamicznych zachodniej prawobrzeżnej estakady dojazdowej opracowano i zrealizowano z uwzględnieniem obowiązujących przepisów [5-6], przy przyjęciu następujących zasad:

- badania dynamiczne zostały przeprowadzone po zakończeniu badań statycznych, z wykorzystaniem taboru użytego do wcześniejszych badań, czyli czterosiowych ciężarówek o całkowitej masie 40 ton,
- zakres badań obejmował trzy schematy obciążeń dynamicznych:
  - schemat D1, w którym wykorzystywane były przejazdy jednej ciężarówki po skrajnym pasie ruchu, po nawierzchni mostu bez sztucznych nierówności (Rys. 3a),
  - schemat D2 w postaci jednoczesnych przejazdów dwóch ciężarówek po nawierzchni mostu bez sztucznych nierówności, usytuowanych symetrycznie względem podłużnej osi konstrukcji (Rys. 3b),

the construction of the girder wide (18.12 m). The cantilevers of the deck have also a significant outreach (6.17 m and 6.65 m), hence their support is applied in the transverse direction by means of braces made of the precast reinforced concrete elements.

Bridge structures classified equally to Rędziński Bridge require detailed theoretical analysis (in both the design and the experimental phase) in terms of a response to static and dynamic loads. Regarding the experimental studies in Poland, bridge structures are subject to conditions specified in the standards [4-5] and the recommendations [6]. With regard to bridges with large span length and extensive communication importance or the innovative design, both in Poland and around the world [7-9], acceptance tests in the form of load tests are performed in individually specified range, enabling understanding a specific work of the tested structure. Load tests of all the Rędziński Bridge structures, in a static and dynamic range, on the basis of individual research projects, were conducted in July and August 2011 by the Bridge Division team of Wrocław University of Technology, Institute of Civil Engineering [1-2]. This article presents selected results of the dynamic tests of the western right-bank access ramp.

## 2. THE RESEARCH PROGRAMME AND ANALYSIS METHODOLOGY OF THE MEASUREMENT RESULTS

The dynamic load tests of the western right-bank access ramp were developed and implemented according to current regulations [5-6] and the following principles:

- dynamic tests were performed after the completion of static tests, by means of the vehicles used in the previous tests, i.e. four-axial trucks with a total weight of 40 tonnes,
- the research scope included three schemes of dynamic loads:
  - scheme D1, which employed one truck driving along outer lane of the bridge deck without an artificial unevenness (Fig. 3a),
  - scheme D2 in the form of simultaneous driving of two trucks on the bridge deck without an artificial unevenness, located symmetrically with respect to the longitudinal axis of the structure (Fig. 3b),
  - scheme D3 (Fig. 3c), according to which the truck moved along the longitudinal axis of the structure and passed across a bump of 3 cm located in the middle of the span 22-23 (Fig. 4), modeling damage (losses, unevenness) of the road surface,

- schemat D3 (Rys. 3c), w trakcie którego ciężarówka poruszała się wzdłuż podłużnej osi konstrukcji i przejeżdżała przez próg wysokości 3 cm umiejscowiony w środku rozpiętości przęsła 22-23 (Rys. 4), modelujący uszkodzenia (ubytki, nierówności) nawierzchni jezdni,
- przejazdy odpowiadające poszczególnym schematom obciążeń odbywały się kolejno z prędkościami: 5, 20, 40, 60 i 80 km/h; realizacja każdego kolejnego schematu była rozpoczynana po wygaśnięciu drgań spowodowanych poprzednim przejazdem,
- dla każdego ze schematów obciążeń (D1, D2 oraz D3) przejazdy z poszczególnymi prędkościami były powtarzane dwu- lub trzykrotnie w celu potwierdzenia powtarzalności uzyskiwanych wyników,
- podczas każdego przejazdu mierzone były pionowe przemieszczenia konstrukcji w środku rozpiętości przęsła 22-23 (czujniki nr 00 i 01) oraz 23-24 (czujniki nr 02 i 03), a także względne przemieszczenia płyty pomostowej i dolnej płyty dźwigara skrzynkowego w środku rozpiętości przęsła 22-23 (czujnik nr 20); rozmieszczenie czujników pomiarowych pokazano szczegółowo na Rys. 4,
- pomiar przyspieszeń pionowych drgań konstrukcji dokonywany był w środku rozpiętości przęsła 22-23 (czujnik nr 06 i 07) oraz 23-24 (czujniki nr 08 i 09),
- częstotliwość próbkowania w trakcie pomiarów przemieszczeń i przyspieszeń wynosiła 200 Hz.

- the passages corresponding to particular load schemes were held sequentially with the following speeds: 5, 20, 40, 60 and 80 km/h; the implementation of each subsequent scheme was launched after the fading down of vibrations caused by the previous crossing,
- for each load scheme (D1, D2 and D3) passages with particular speeds were repeated two or three times in order to confirm the repeatability of the results,
- during every passage vertical displacement of the middle of the span 22-23 (sensors 00 and 01) and the span 23-24 (sensors 02 and 03), were measured, and the relative displacements of the deck and the lower flange of the box girder in the middle of the span length 22-23 (sensor 20); the measuring sensor arrangement is illustrated in detail in Fig. 4,
- measurement of vertical accelerations of the structure were carried out in the middle of the span length 22-23 (sensor 06 and 07) and 23-24 (sensors 08 and 09),
- sampling frequency of displacements and accelerations measurement was 200 Hz.

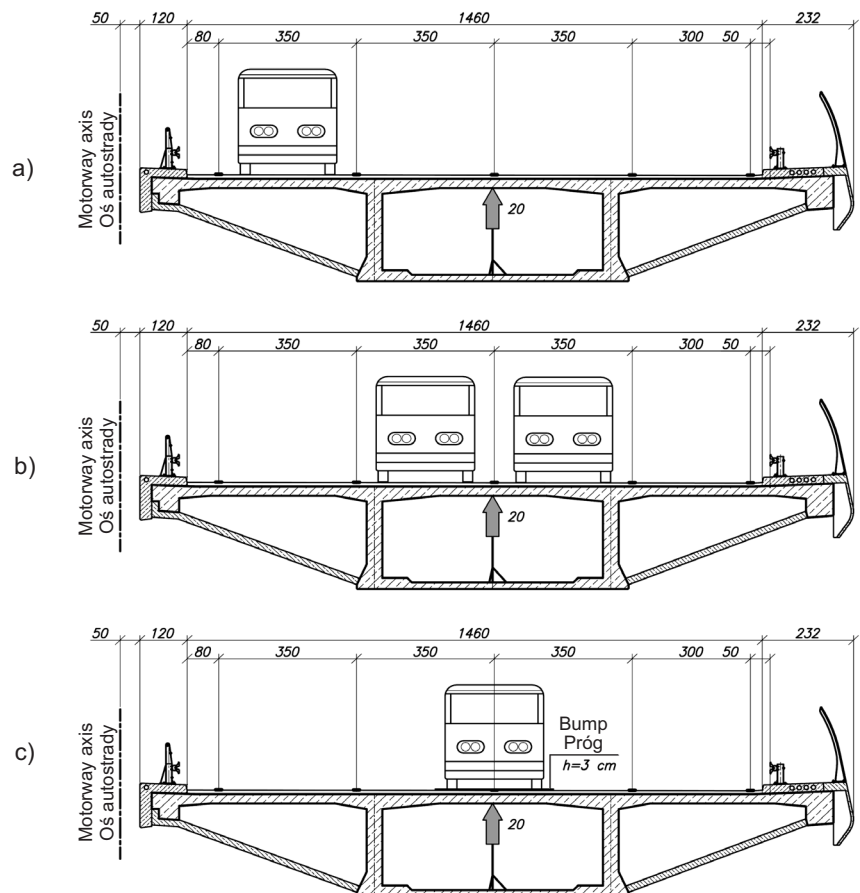


Fig. 3. Location of load vehicles in structure cross-section: a) scheme D1, b) scheme D2, c) scheme D3

Rys. 3. Usytuowanie pojazdów obciążających w przekroju poprzecznym konstrukcji: a) schemat D1, b) schemat D2, c) schemat D3

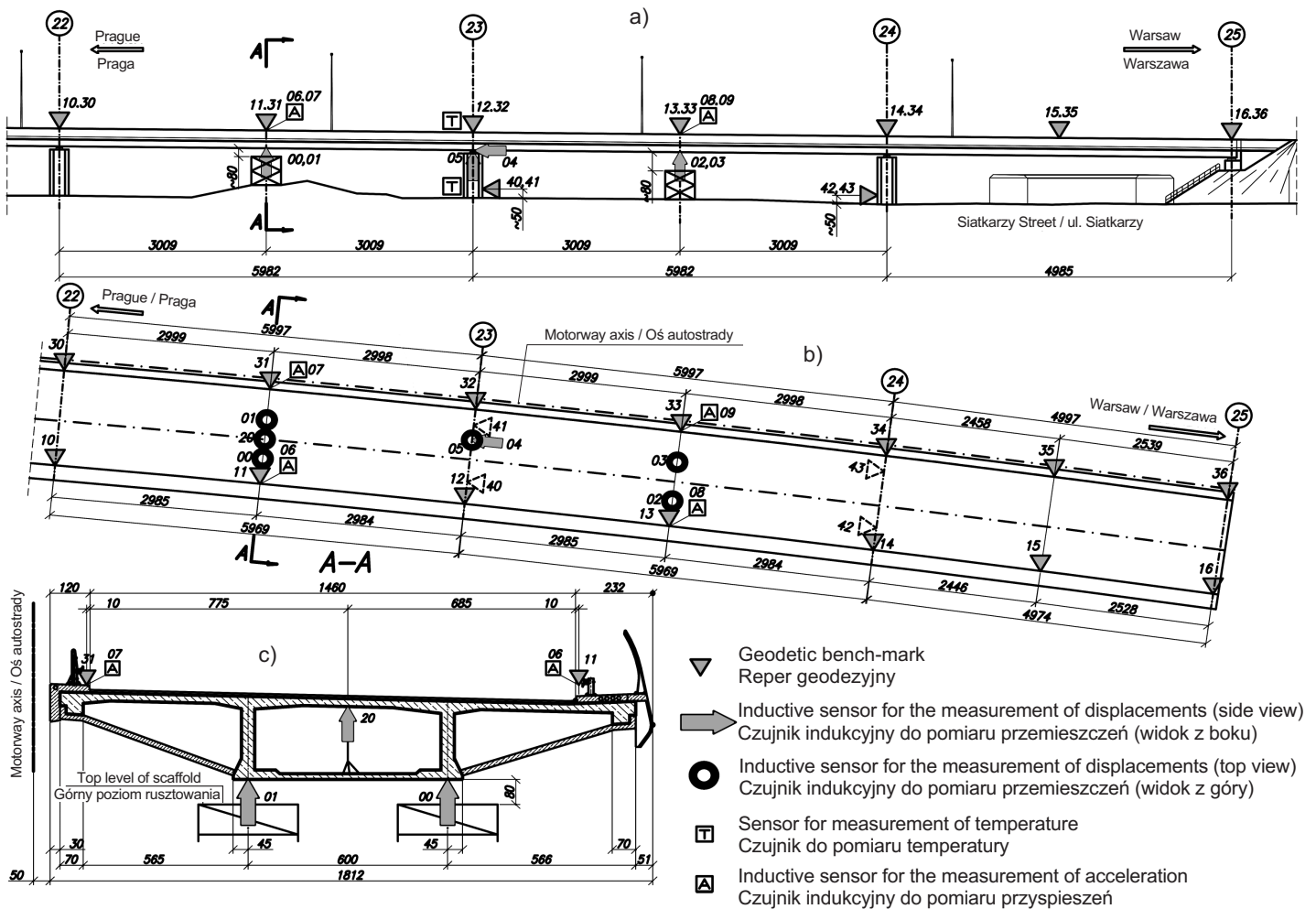


Fig. 4. Location of measuring points: a) side view, b) top view, c) cross-section in the middle of span 22-23  
 Rys. 4. Lokalizacja punktów pomiarowych: a) widok z boku, b) widok z góry, c) przekrój w środku rozpiętości przęsła 22-23

Zakres prowadzonych badań pod próbnymi obciążeniami dynamicznymi, zgodnie z wymaganiami [5] i [6], z reguły jest ograniczony do określenia charakterystyk dynamicznych głównych dźwigarów przęseł mostowych. W trakcie prezentowanych badań analizą objęto także efekty lokalne dotyczące odpowiedzi płyty pomostowej na próbne obciążenia dynamiczne. Umożliwia to oszacowanie poziomu przeciążeń dynamicznych w elementach konstrukcyjnych bezpośrednio obciążanych kołami taboru samochodowego poruszającego się po obiekcie.

W trakcie badań dynamicznych realizowanych przy wykorzystaniu pojazdów znaczącym problemem jest kontrola rzeczywistej prędkości pojazdów przy przejeździe przez obiekt. Zgodnie z założeniami w trakcie badań samochód powinien poruszać się z niezmienną, zaprojektowaną prędkością na całej długości obiektu. Niestety w niektórych

A range of studies conducted on the bridge under dynamic loads tests, in accordance with the requirements [5] and [6], is as a rule limited to the determination of the dynamic characteristics of main girders of bridge spans. In the course of the presented research, the analysis also covered the local effects regarding the response of the deck to dynamic load tests. This makes it possible to estimate the level of dynamic amplification in the construction elements directly loaded by the wheels of vehicle fleet moving on the object.

During the dynamic tests conducted with the use of vehicles, a major problem is keeping control of the actual speed of the vehicles driving on the object. According to the assumptions, in the course of the research a vehicle should move with a constant and designed speed along the entire length of the bridge. Unfortunately, in some cases, it

przypadkach jest to bardzo trudne lub wręcz niemożliwe ze względu na ograniczoną długość dróg dojazdowych przed lub za obiektem, trudność w rozpędzeniu pojazdu do wymaganej prędkości przy jeździe pod górę itp. W każdej sytuacji do analizy wyników pomiarów niezbędna jest znajomość rzeczywistej prędkości ruchu pojazdu, określana niezależnie od – często zawodnych – wskazań prędkościomierza samochodu.

W trakcie prezentowanych badań do precyzyjnego określania prędkości osiąganych przez pojazdy w czasie realizacji poszczególnych schematów obciążeń zastosowano własną procedurę przetwarzania danych napisaną w języku Matlab [10], polegającą na wyznaczeniu prędkości przejazdu na podstawie wyników pomiarów przemieszczeń. Założono, że w momencie przejazdu środka ciężkości ciężarówki nad osią podpory przemieszczenie wynosi 0 mm, co w ustroju wieloprzęsłowym o przęsłach znacznych rozpiętości i stosunkowo niewielkiej długości pojazdu jest bliskie prawdy. Przy znanych rozpiętościach przęseł wystarczy określić przedział czasu pomiędzy zerowymi wskazaniami czujnika przemieszczeń i wykonać proste obliczenie prędkości dzieląc rozpiętość przęsła przez czas przejazdu. Do wyznaczenia czasu przejazdu nad osiami podpór w opracowanej metodzie wykorzystano przebiegi przemieszczeń odfiltrowane za pomocą dolno-przepustowego filtra cyfrowego z częstotliwością odcięcia równą 0,5 Hz. W zastosowanej metodzie rozrzut wyników uzyskiwanych przy wykorzystaniu sygnałów pomiarowych zarejestrowanych poszczególnymi czujnikami nie przekracza 1 km/h, można zatem twierdzić, że metodyka ta jest dokładniejsza niż kontrola prędkości innymi sposobami. Przykład zastosowania opisanej procedury wyznaczania prędkości pokazano na Rys. 5 w odniesieniu do pomiaru przemieszczeń zarejestrowanych podczas przejazdu pojedynczej ciężarówki z nominalną prędkością 60 km/h po nawierzchni bez sztucznej przeszkody.

Jednym z wyników próbnych obciążeń dynamicznych jest wielkość nazywana współczynnikiem przeciążenia dynamicznego  $WPD$ , wyznaczana na podstawie zarejestrowanych przebiegów przemieszczeń konstrukcji za pomocą wzoru:

$$WPD = \frac{u_{dyn}}{u_{stat}}, \quad (1)$$

gdzie:

$u_{dyn}$  – maksymalne przemieszczenie dynamiczne zarejestrowane w punkcie pomiarowym podczas realizacji rozpatrywanego schematu obciążenia,

is very difficult or even impossible due to the limited length of the roads in the approaching zones of or behind the object and due to the difficulty to achieve the required speed when driving uphill, etc. In any case, the analysis of the measurement results requires a knowledge of the actual vehicle speed, determined independently from a vehicle speedometer which might often be unreliable.

In the course of this study, precise determination of speed achieved by vehicles during the execution of the individual load schemes was obtained by using own data processing procedures written in Matlab [10], consisting in determining of a speed on the basis of the displacement measurements. It was assumed that at the time of passing of the truck gravity centre above the support axis, the displacement is 0 mm, which in a multi-span system with large length spans and a relatively small length of the vehicle is close to the truth. For the known span lengths it is enough to determine a time interval of zero displacement points and perform a simple speed calculation by dividing the span length by the driving time. To calculate the time of passing the successive bridge support the method of filtering of displacements using a digital low-pass filter with the cut-off frequency of 0.5 Hz is used. In the method, the scatter of the results obtained from the measurement of signals registered by the individual sensors does not exceed 1 km/h. It can therefore be argued that this methodology is more accurate than the speed control by other methods. An example of the application of the described procedure for determining the speed is presented in Fig. 5 for the measurement of displacements recorded during the passage of a single truck with a nominal speed of 60 km/h on the road without artificial obstacles.

One of the results of the dynamic load tests is a value called the dynamic amplification factor  $DAF$ , determined on the basis of the recorded displacements of the structure using the following formula:

$$DAF = \frac{u_{dyn}}{u_{stat}}, \quad (1)$$

where:

$u_{dyn}$  – the maximum dynamic displacement recorded at the measuring point during the implementation of the investigated load scheme,

$u_{stat}$  – static displacement corresponding to the maximum dynamic displacement during the implementation of the investigated load scheme.

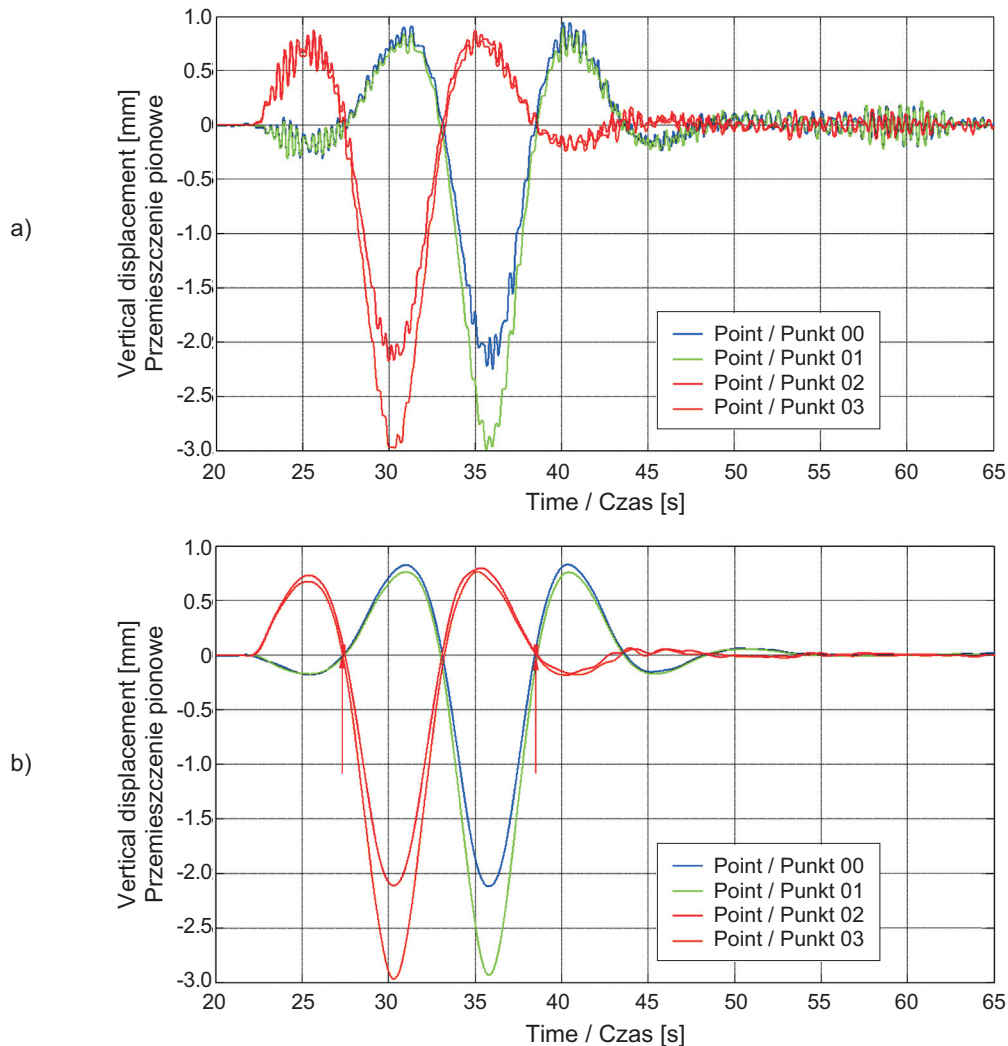


Fig. 5. Identification of vehicle speed based on analysis of structure vertical displacements (scheme D1, real speed 57.7 km/h): a) recorded displacements, b) filtered displacements with identified zero points

Rys. 5. Określanie prędkości przejazdu oparte na analizie pionowych przemieszczeń konstrukcji przęseł (schemat D1, rzeczywista prędkość 57,7 km/h): a) zarejestrowany przebieg przemieszczeń, b) odfiltrowany przebieg z wyznaczonymi miejscami zerowymi

$u_{stat}$  – przemieszczenie statyczne odpowiadające maksymalnemu przemieszczeniu dynamicznemu podczas realizacji rozpatrywanego schematu obciążenia.

Zasada wyznaczania przemieszczeń wykorzystywanych w definicji *WPD* na podstawie wyników badań doświadczalnych została zilustrowana na Rys. 6. Przemieszczenie statyczne  $u_{stat}$  jest wyznaczane dla momentu, w którym wystąpiło maksymalne przemieszczenie dynamiczne  $u_{dyn}$ , przy wykorzystaniu quasi-statycznego przebiegu przemieszczeń, uzyskanego przez filtrowanie zarejestrowanego sygnału za pomocą dolnoprzepustowego filtra cyfrowego z częstotliwością odcięcia niższą niż najniższa częstotliwość drgań swobodnych konstrukcji.

The principle of determining the displacements, used in the *DAF* definition, based on experimental results is illustrated in Fig. 6. Static displacement  $u_{stat}$  is determined at the moment of occurrence of the maximum dynamic displacement  $u_{dyn}$ , using the quasi-static displacement course obtained by filtering the signal recorded by means of a digital low-pass filter with cut-off frequency lower than the lowest frequency of the free vibration of the structure.



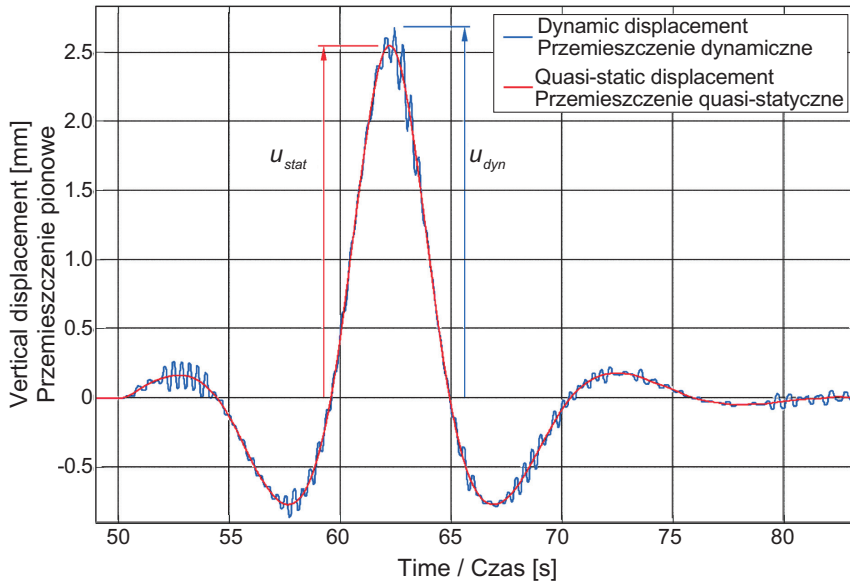


Fig. 6. Identification of displacements used in definition of  $DAF$  based on recorded dynamic displacements and filtered quasi-static displacements  
Rys. 6. Wyznaczanie przemieszczeń używanych w definicji  $WPD$  na podstawie zarejestrowanych przemieszczeń dynamicznych oraz odfiltrowanych przemieszczeń quasi-statycznych

### 3. PRZECIĄŻENIA DYNAMICZNE I PRZYSPIESZENIA DRGAŃ DŹWIGARÓW GŁÓWNYCH

Wybrane wyniki próbnych obciążeń dynamicznych estakady dojazdowej przedstawiono na Rys. 7 prezentującym wartości współczynnika przeciążenia dynamicznego dla dźwigarów głównych  $WPD_g$  oraz na Rys. 8, gdzie pokazano maksymalne wartości pionowych przyspieszeń drgań dźwigarów głównych. W obu przypadkach zaprezentowano rezultaty uzyskane przy przejazdach po równej nawierzchni i przez próg. Badania przy wykorzystaniu sztucznej nierówności zostały ograniczone do prędkości 40 km/h ze względu na możliwość uszkodzenia zawieszenia pojazdów obciążających. Zastosowanie progu w badaniach dynamicznych umożliwiło analizę wpływu ewentualnych uszkodzeń (ubytków, nierówności) nawierzchni na efekty dynamiczne.

Na wykresach przedstawiających  $WPD_g$  pokazano również wartość współczynnika dynamicznego  $\varphi_g$  wyznaczoną dla dźwigarów głównych na podstawie normy [11]. Wartość ta wynosi 1,062 i została określona według wzoru:

$$\varphi_g = 1,35 - 0,005 \cdot L_{sr} \quad (2)$$

na podstawie średniej długości przęseł pracujących w układzie statycznym belki ciągłej  $L_{sr} = 57,52$  m.

### 3. DYNAMIC AMPLIFICATION AND ACCELERATION OF THE MAIN GIRDERS

Selected results of the dynamic load tests of the bridge access ramp are shown in Fig. 7, which presents the dynamic factor for the main girders  $DAF_g$  and in Fig. 8 showing the maximum values of vertical accelerations of main girders. In both cases, the presented results were obtained during driving on an even road surface and across a speed bump. A research conducted by means of artificial unevenness was limited to a speed of 40 km/h due of the possibility of damage to the implemented vehicles suspension. The use of speed bumps in the dynamic tests enabled the analysis of the influence of possible damage (losses, irregularities) of the surface on the dynamic effects.

The diagrams presenting  $DAF_g$  also show the dynamic coefficient  $\varphi_g$  determined for the main girders, based on the standard [11]. This value of 1.062 is defined by the following formula:

$$\varphi_g = 1.35 - 0.005 \cdot L_{avg} \quad (2)$$

on the basis of an average length of spans working in the static system of continuous beam  $L_{avg} = 57.52$  m.

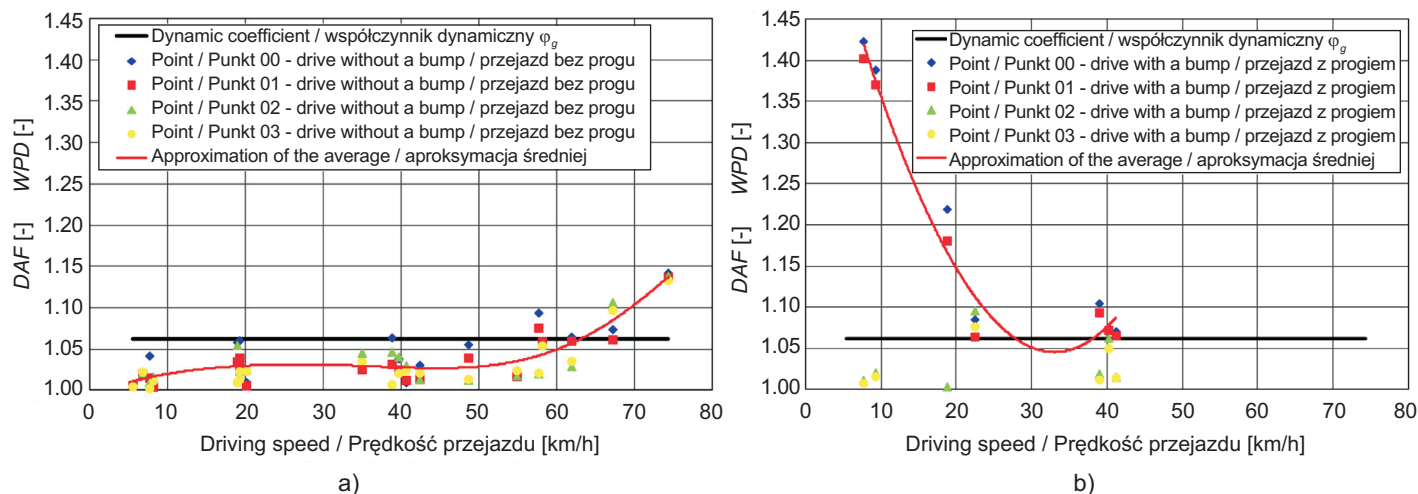


Fig. 7. Standard dynamic coefficient  $\varphi_g$  and  $DAF_g$  values for the main girders based on the results of: a) scheme D1 and D2 (drives without bump), b) scheme D3 (drives across 3 cm bump)

Rys. 7. Wartości normowego współczynnika dynamicznego  $\varphi_g$  oraz współczynnika przeciążenia dynamicznego  $WPD_g$  dźwigarów głównych na podstawie wyników: a) schematu D1 i D2 (przejazdy po równej nawierzchni), b) schematu D3 (przejazdy przez nierówność o wysokości 3 cm)

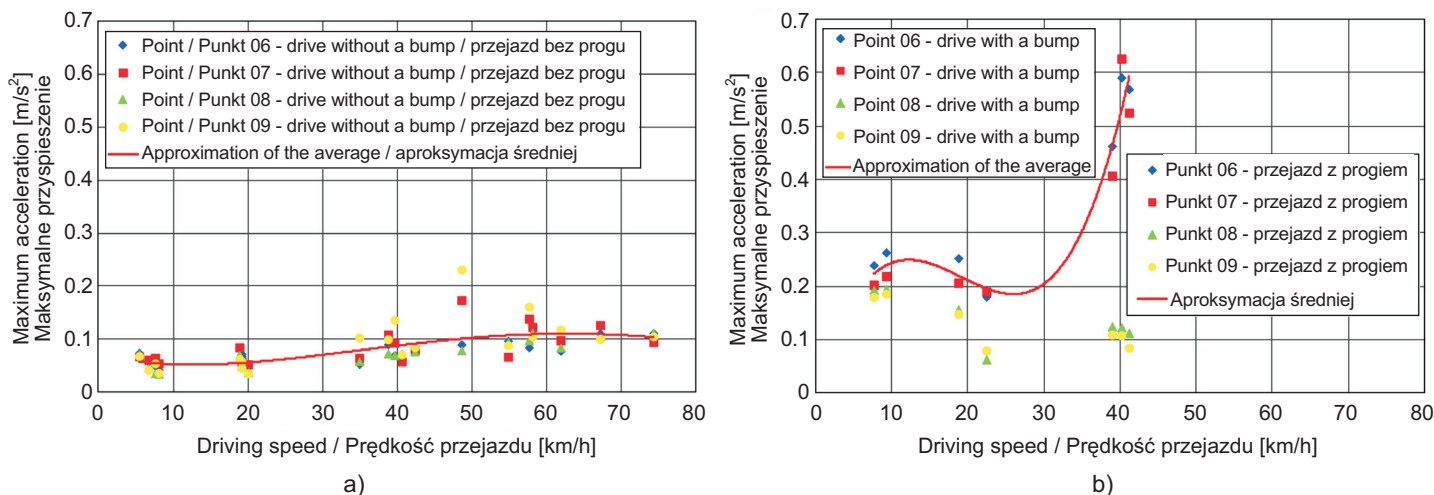


Fig. 8. Maximum vertical accelerations of the main girders recorded for: a) scheme D1 and D2 (drives without a bump), b) scheme D3 (drives across 3 cm bump)

Rys. 8. Maksymalne wartości przyspieszeń pionowych drgań dźwigarów głównych zarejestrowane w trakcie realizacji: a) schematu D1 i D2 (przejazdy po równej nawierzchni), b) schemat D3 (przejazdy przez nierówność o wysokości 3 cm)

Wyznaczone doświadczalnie wartości współczynnika przeciążenia dynamicznego dźwigarów głównych zostały aproksymowane za pomocą krzywych wielomianowych, przy czym przebiegi krzywych na Rys. 7a oraz Rys. 8a wyznaczono uwzględniając wyniki pomiarów przemieszczeń we wszystkich punktach pomiarowych usytuowanych w środkach rozpiętości przęseł (Rys. 4).

Przy przejazdach przez próg największe wartości przeciążeń dynamicznych zarejestrowały czujniki zlokalizowane

Experimental determined values of the dynamic amplification factor of the main girders were approximated by means of polynomial curves, wherein the curves in Fig. 7a and Fig. 8a were determined taking into account the results of the measurements in all points of displacement measurement located in the middle of spans (Fig. 4).

During the crossings over a speed bump the greatest values of dynamic overload were registered by sensors located near the bump, and therefore approximations in Fig. 7b

w pobliżu progu, dlatego aproksymacje na Rys. 7b (dla współczynników przeciążenia dynamicznego) i na Rys. 8b (dla maksymalnych przyspieszeń) zostały wyznaczone dla punktów pomiarowych zlokalizowanych w przekroju, gdzie znajdował się próg (punkty 00 i 01 oraz odpowiednio 06 i 07).

#### 4. PRZECIĄŻENIA DYNAMICZNE PŁYTY POMOSTOWEJ

Podczas próbnych obciążeń wykonano dodatkowe badania ukierunkowane na identyfikację przeciążeń dynamicznych płyty pomostowej. W tym celu przeprowadzono pomiary przemieszczeń płyty pomostowej względem dolnej płyty przekroju skrzynkowego rejestrowanych za pomocą czujnika nr 20, usytuowanego w osi dźwigara skrzynkowego, w środku rozpiętości przęsła 22-23 (Rys. 4). Wartości współczynnika przeciążenia dynamicznego płyty pomostowej  $WPD_p$ , wyznaczone na podstawie dokonanych pomiarów dynamicznych i odpowiadających im quasi-statycznych przemieszczeń płyty pomostowej (zgodnie z procedurą opisaną w punkcie 2), zaprezentowano na Rys. 9 w przypadku różnych prędkości realizacji każdego schematu próbnych obciążeń dynamicznych. Rezultaty badań doświadczalnych porównano z wartościami współczynnika przeciążenia dynamicznego wyznaczonymi według wzoru (2) przyjętego w normie [11].

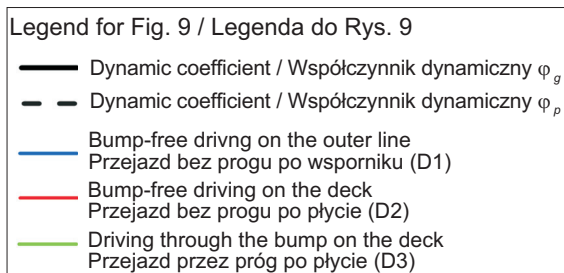
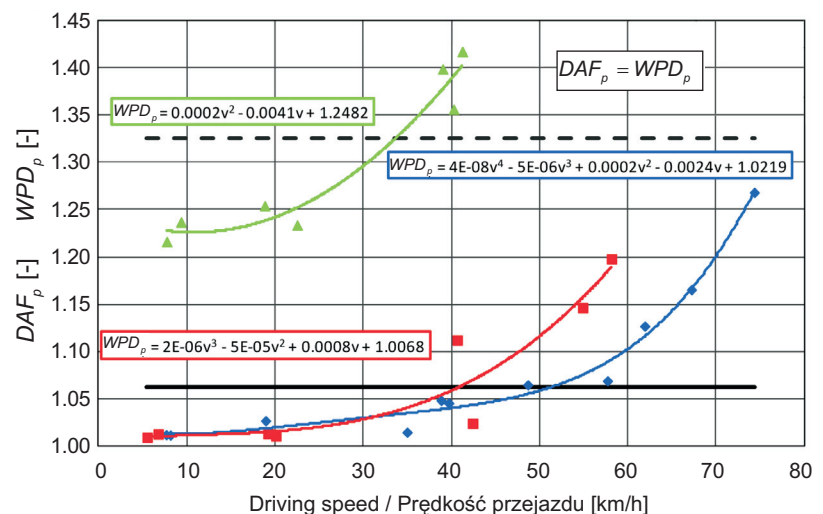


Fig. 9. Design dynamic factor  $\varphi_g$  and  $\varphi_p$  as well as values of dynamic amplification factor  $DAF_p$  for deck bridge of a box girder based on experimental data Rys. 9. Wartości normowego współczynnika dynamicznego  $\varphi_g$  oraz  $\varphi_p$ , a także współczynnika przeciążenia dynamicznego  $WPD_p$  dla płyty pomostowej wyznaczone na podstawie badań



Do sporządzenia wykresu zależności  $WPD_p$  od prędkości przejazdu wykorzystano metodykę szacowania prędkości opisaną w punkcie 2 i zaprezentowaną na Rys. 5. Najmniejsze wartości przeciążeń dynamicznych w rozpatrywanym punkcie pomiarowym stwierdzono przy obciążeniach

(for the dynamic amplification factors) and in Fig. 8b (for maximum accelerations) were determined for measurement points located in the cross-section with the bump (points 00 and 01 and 06 and 07 respectively).

#### 4. DYNAMIC AMPLIFICATIONS OF A DECK

Load tests involved additional research aimed at the identification of dynamic amplification of a deck. In order to achieve it, the measurements included the displacement of a deck in relation to a bottom flange of the box section were registered with the sensor 20, located at the axis of box girder, in the middle of the span 22-23 (Fig. 4). Values of the dynamic amplification factor of the deck  $DAF_p$ , determined on the basis of the dynamic measurements and the corresponding quasi-static displacements of the deck (following the procedure described in Section 2), is presented in Fig. 9 for various speeds of each dynamic load test scheme. The results of experimental tests were compared with the values of the dynamic amplification factor calculated according to the formula (2) adopted in the standard [11].

The speed estimation methodology described in Section 2 and presented in Fig. 5 was applied to draw the diagram of  $DAF_p$ 's dependency on the speed of driving. The lowest values of dynamic amplification in the considered measuring point were found at loads corresponding to scheme

według schematu D1 (przejazdy pojazdów po wsporniku płyty pomostowej, przy krawędzi jezdni), większe w przypadku schematu D2 (przejazdy po płycie pomostowej między ścianami dźwigara skrzynkowego, bezpośrednio nad miejscem pomiaru przemieszczeń) oraz zdecydowanie największe – w trakcie realizacji schematu D3 (jazda przez nierówność progową umieszczoną między środnikami, symulującą uszkodzenia nawierzchni). Największe wartości współczynnika przeciążenia dynamicznego płyty pomostowej osiągnięte w badaniach bez sztucznej nierówności wyniosły  $WPD_p = 1,27$  przy przejazdach z prędkością około 75 km/h, a w przypadku przejazdów przez próg uzyskano  $WPD_p = 1,41$  przy prędkości 40 km/h. Wyniki badań potwierdzają wyraźny monotoniczny wzrost wartości  $WPD_p$  wraz ze zwiększaniem się prędkości ruchu pojazdów.

Podstawiając w normowym [11] wzorze (2) średnią rozpiętość dźwigarów głównych  $L_{sr} = 57,52$  m współczynnik dynamiczny przyjmuje wartość  $\varphi_g = 1,062$  (linia ciągła na Rys. 9), zdecydowanie niższą od wartości uzyskanych na podstawie badań doświadczalnych. Oszacowanie bliższe wynikom eksperymentalnym uzyskuje się podstawiając we wzorze (2) średnią rozpiętość pasm płyty pomostowej, mierzoną prostopadle do osi przęsła:  $L_{sr} = 1/3 \cdot (4,35 \text{ m} + 6 \text{ m} + 4,35 \text{ m}) = 4,90$  m. Wtedy współczynnik przeciążenia dynamicznego płyty pomostowej wynosi  $\varphi_p = 1,3255$  (linia przerywana na Rys. 9). Przy przyjęciu  $L = 6$  m normowy współczynnik dynamiczny wynosi 1,32.

## 5. WNIOSKI

Wyniki badań dynamicznych konstrukcji potwierdziły zróżnicowany wpływ prędkości ruchu pojazdów na wartości współczynnika przeciążenia dynamicznego oraz przyspieszeń drgań w odniesieniu do dźwigarów głównych oraz płyty pomostowej przęsła obiektu. Przeprowadzone pomiary ujawniły także zróżnicowaną wrażliwość tych elementów konstrukcyjnych na nierówności nawierzchni i wywoływane nimi obciążenia impulsowe od przejeżdżających pojazdów. Analiza wyników przeprowadzonych badań pozwala na sformułowanie następujących wniosków:

1. Przejazdy po nawierzchni mostu bez przeszkody progowej wywołują w dźwigarach głównych badanej estakady efekty dynamiczne nieznacznie zwiększające się wraz ze wzrostem prędkości przejazdu. Zwiększenie to jest wyraźniej widoczne przy prędkościach przekraczających 50 km/h. Maksymalną wartość współczynnika przeciążenia dynamicznego uzyskano przy

D1 (vehicles driving along the outer lane of the deck), higher in case of scheme D2 (driving on the deck, between the webs of box girder, directly above the point of displacements measurement) and definitely the largest – during the D3 scheme implementation process (crossing over the speed bumps placed between the webs, simulating surface defects). The highest values of dynamic amplification factor of the deck, obtained in a test without an artificial unevenness, were  $DAF_p = 1.27$  at driving at a speed of about 75 km/h. In the case of crossings the speed bumps, the obtained  $DAF_p = 1.41$  at speed of 40 km/h. The results confirm a clear monotonic increase of the  $DAF_p$  value with increasing speed of the vehicles.

By substituting to the standard [11] formula (2) the average span of the main girders  $L_{avg} = 57.52$  m, the dynamic factor takes the value  $\varphi_g = 1.062$  (continuous line in Fig. 9), significantly lower than the values obtained on the basis of experimental research. An estimation closer to the experimental results is obtained by substituting to the formula (2) the average of the top slab strips, measured perpendicular to the axis of the span:  $L_{avg} = 1/3 \cdot (4.35 \text{ m} + 6 \text{ m} + 4.35 \text{ m}) = 4.90$  m. Then, the dynamic amplification factor of the deck is  $\varphi_p = 1.3255$  (dashed line in Fig. 9). Assuming  $L = 6$  m, a standard dynamic factor equals 1.32.

## 5. CONCLUSIONS

The dynamic tests results confirmed the diverse influence of the traffic speed on the value of the dynamic amplification factor and accelerations of the main girders and the deck of the bridge span. Moreover, the measurements also revealed a diverse sensitivity of these structural elements to the surface unevenness and to the impulse loads from passing vehicles, caused by these roughnesses. Analysis of the obtained results allows to formulate the following conclusions:

1. Passings on the surface of the bridge without obstacles in the form of speed bumps cause (in the main girders of the investigated access ramp) that the dynamic effects – increase slightly with the growth of running speed. This increase is more clearly visible at speeds above 50 km/h. The maximum value of the dynamic amplification factor was obtained at a speed of 74.3 km/h and it was  $DAF_g = 1.14$  (Fig. 7a). Dynamic factor  $\varphi_g$ , defined in the standard [11] and used in the design as a distributed safety coefficient in relation to the loads, was calculated for the average span lengths of the access ramp (57.52 m) and resulted to be 1.062.

- prędkości 74,3 km/h i wyniosła ona  $WPD_g = 1,14$  (Rys. 7a). Współczynnik dynamiczny  $\phi_g$  zdefiniowany w normie [11] i wykorzystywany w projektowaniu jako rozdzielony współczynnik bezpieczeństwa w stosunku do obciążeń, obliczony dla średniej rozpiętości przęsła estakady (57,52 m) wynosi 1,062. Wartość normowa współczynnika  $\phi_g$  była w trakcie badań nieznacznie przekraczana przy prędkościach przejazdów większych od 55 km/h.
2. Maksymalne pionowe przyspieszenia drgań dźwigarów głównych zarejestrowane podczas przejazdów po nawierzchni bez progu wykazują nieznaczny wzrost wraz ze zwiększaniem prędkości przejazdu. Maksymalne wartości przyspieszeń rzędu  $0,2 \text{ m/s}^2$ , zarejestrowane podczas przejazdów z prędkością od 50 do 70 km/h (Rys. 8), nie powodują u użytkowników obiektu dyskomfortu. Należy zaznaczyć, że badana konstrukcja mostu jest położona w ciągu autostrady, a więc drogi, na której nie dopuszcza się ruchu pieszych, co sprawia, że kwestię komfortu pieszych na moście praktycznie można pominąć.
  3. Wartości współczynnika przeciążenia dynamicznego dźwigarów głównych przy przejazdach przez próg wyraźnie zależą od prędkości przejazdu, przy czym maksymalne wartości  $WPD_g$  zarejestrowano przy niskich prędkościach (Rys. 7b), natomiast maksymalne przyspieszenia pionowe wykazują wyraźny wzrost wraz z prędkością przejazdu (Rys. 8b). Należy zauważyć, że przy prędkości 40 km/h przyspieszenia pionowe przy przejeździe przez próg wysokości 3 cm są prawie trzykrotnie większe niż przy przejeździe po równej nawierzchni. Potwierdza to bardzo istotny wpływ jakości nawierzchni drogi na obiekcie mostowym na wyłączenie jego elementów konstrukcyjnych.
  4. Współczynniki przeciążenia dynamicznego płyty pomostowej przy przejazdach z prędkościami do 50 km/h po równej nawierzchni przyjmują wartości zbliżone do obserwowanych w dźwigarach głównych (Rys. 7a oraz 9). Przy dalszym zwiększaniu prędkości ruchu pojazdów wartości  $WPD_p$  wyznaczone dla płyty pomostowej osiągają wartości wyraźnie większe od określonych dla dźwigarów głównych  $WPD_g$ , a dla prędkości 75 km/h przyjmują wartości sięgające 1,27.
  5. Szczególnie duże wartości współczynnika przeciążenia dynamicznego płyty pomostowej  $WPD_p$  monotonicznie zwiększające się wraz z prędkością ruchu pojazdów, stwierdzono przy przejazdach przez nierówność progową (Rys. 9). Już przy prędkości 40 km/godz., a więc
- The standard value of coefficient  $\phi_g$  during the study was slightly exceeded at speeds higher than 55 km/h.
2. The maximum vertical accelerations of main girders recorded during passing the surface without speed bumps show a slight growth with the increasing running speed. The maximum value of accelerations of  $0.2 \text{ m/s}^2$ , recorded during driving at speeds from 50 to 70 km/h (Fig. 8), does not cause any discomfort to the users of the object. It should be emphasized that the investigated construction of the bridge is located within the motorway, the road which does not allow the pedestrian traffic, which makes the issue of the pedestrian comfort on the bridge unimportant.
  3. Values of dynamic amplification factor of the main girders on the crossing over the speed bump clearly depend on a speed. The maximum value of  $DAF_g$  was recorded at low speeds (Fig. 7b), whereas the maximum vertical accelerations show a clear increase with the driving speed (Fig. 8b). It should be noted that at a speed of 40 km/h vertical accelerations during a crossing over the speed bump of 3 cm are almost three times higher than for a surface without bumps. This fact confirms a very significant influence of the bridge road surface quality on the effort of its structural elements.
  4. The dynamic amplification factors of the top slab for driving speeds of up to 50 km/h on road surface without bumps take the values similar to those observed in the main girders (Fig. 7a and Fig. 9). With further increasing of the vehicles speed, the values of  $DAF_p$  determined for the deck reach the values that are significantly higher than those specified for the main girders  $DAF_g$  and for the speed of 75 km/h take the values of up to 1.27.
  5. Particularly high values of dynamic amplification factors of the top slab  $DAF_p$ , monotonically increasing with the speed of traffic, were found for the crossings over bumps (Fig. 9). Already at a speed of 40 km/h, that is much less than the actual speed achieved by vehicles on the examined object, this coefficient determined from the measurement results reached  $DAF_p$  value = 1.41. It should be assumed that at typical speed of vehicles on the considered object (100-140 km/h) on the uneven surface (e.g. caused by material losses of the wearing course), the dynamic amplification factors of the top slab will take an even greater value.

- dużo poniżej rzeczywistej prędkości osiągniętej przez pojazdy na badanym obiekcie, współczynnik ten wyznaczony na podstawie wyników pomiarów osiągał wartość  $WPD_p = 1,41$ . Należy przypuszczać, że przy typowych prędkościach ruchu pojazdów na rozpatrywanym obiekcie (100-140 km/h), w warunkach istnienia nierówności nawierzchni (np. spowodowanych ubytkami materiału warstwy ścieralnej), współczynniki przeciążenia dynamicznego płyty pomostowej będą przyjmować jeszcze większe wartości.
6. Przedstawione wyniki badań doświadczalnych mogą być wykorzystywane w procesie oceny przydatności użytkowej, a w szczególności określania nośności elementów konstrukcyjnych, eksploatowanych obiektów mostowych rozpatrywanej klasy. Wydaje się to istotne, gdyż analizy tego typu – uwzględniające uszkodzenia obiektu, w tym uszkodzenia nawierzchni jezdni – nie są dotąd w naszym kraju objęte przepisami, a obowiązujący system norm jest ukierunkowany na projektowanie nowych obiektów.

6. Presented experimental results can be used for the assessment process of usability, particularly for determining the load capacity of structural elements of their-service bridges of the considered class. It seems important because this type of analysis – taking into account the damage of an object, including damage of the road surface – are not yet regulated in Poland and the current system of standards is aimed at designing new structural solutions.

## BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] Biliszczyk J. i in.: Most Rędziński w ciągu Autostradowej Obwodnicy Wrocławia. Inżynieria i Budownictwo, **68**, 2, 2012, 63-69
- [2] Bień J., Kuźawa M., Kamiński T., Rawa P., Zwolski J.: Badania podwieszoności mostu Rędzińskiego przez Odrę w ciągu Autostradowej Obwodnicy Wrocławia. Inżynieria i Budownictwo, **68**, 2, 2012, 80-84
- [3] Bień J., Kamiński T., Kuźawa M.: Doświadczalna weryfikacja modeli obliczeniowych estakad dojazdowych do mostu Rędzińskiego we Wrocławiu. Inżynieria i Budownictwo, **68**, 2, 2012, 107-111
- [4] PN-89/S-10050 Obiekty mostowe. Konstrukcje stalowe. Wymagania i badania
- [5] PN-S-10040 Obiekty mostowe. Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Wymagania i badania
- [6] Zalecenia dotyczące wykonywania badań pod próbnym obciążeniem drogowych obiektów mostowych. Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad, Zarządzenie Nr 35, Warszawa, 2008
- [7] Fryba L., Pirner M.: Load tests and modal analysis of bridges. Engineering Structures, **23**, 1, 2001, 102-109
- [8] Catbas F.N., Ciloglu S.K., Grimmelsman K., Pan Q., Pervizpour M., Aktan A.E.: Limitations in the Structural Identification of Long-Span Bridges. International Workshop on Structural Health Monitoring of Bridges and Colloquium on Bridge Vibration, Task Committee of Japan Society of Civil Engineers on Bridge Vibration Monitoring and its Standardization, Kitami, Japonia, 2003
- [9] Cunha A., Caetano E.: Dynamic Testing of Bridges in the Context of High Speed Railway Traffic. Workshop "Bridges for high-speed railways", FEUP, Porto, Portugalia, 2004, 265-287
- [10] MATLAB® The Language of Technical Computing. Podręcznik użytkownika, Mathworks, 2001
- [11] PN-85/S-10030. Obiekty mostowe. Obciążenia