

# O wpływach obciążeń ruchomych na przepusty ze stalowych blach falistych

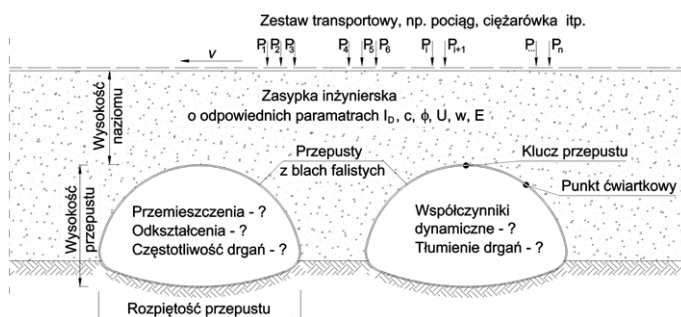
Obciążenia ruchome przejeżdżające z pewną, czasami dużą prędkością przez obiekt mostowy powodują drgania konstrukcji wywołane np. niejednakowymi ugięciami resorów pojazdów. Dodatkowo nierówności jezdni lub toru powodują zwiększenie oddziaływań dynamicznych na konstrukcję [12, 16]. Analiza tradycyjnych mostów stalowych lub betonowych pod obciążeniem ruchomym jest problemem znanym.

Konstrukcje ze stalowych blach falistych są stosowane od wielu lat do budowy przepustów i małych mostów, jak również innych konstrukcji inżynierskich [13, 14]. Duża popularność tych konstrukcji wynika z korzystnych właściwości technologicznych, tj. dużej nośności, krótkiego czasu budowy, możliwości prowadzenia prac w okresie zimowym, walorów ekonomicznych (w porównaniu z tradycyjnymi stalowymi lub betonowymi obiektami mostowymi) itp. Badania tych konstrukcji w różnych zakresach obciążeń są prowadzone od wielu lat [4, 5, 14, 17, 21]. Dotyczyły one przede wszystkim odpowiedzi konstrukcji przepustu na obciążenie gruntem podczas budowy, jak i obciążenie statyczne ustawione w różnych konfiguracjach na obiekcie. Na podstawie przeglądu literatury światowej stwierdzono, że rozpoznanie zachowania się tego rodzaju obiektów pod obciążeniem ruchomym, zwłaszcza eksploatacyjnym, nie zostało do tej pory szerzej podjęte. Kilka znanych prac z tego zakresu [9, 20] dotyczy badań stalowych przepustów z blach falistych pod kontrolowanym obciążeniem dynamicznym, czyli rejestracji odpowiedzi konstrukcji wywołanej przejazdem określonego pojazdu z zaplanowaną prędkością.

## Charakterystyka problemu

W dotychczasowych pracach badawczych [9, 20] nie analizowano szczegółowo wpływu masy, prędkości pojazdów, rozpiętości i kształtu powłok, wysokości naziomu na odpowiedź przepustów z blach falistych. Nie podejmowano również próby szczegółowego ustalenia przemieszczeń, odkształceń, częstotliwości drgań i współczynników dynamicznych w tych przepustach, a także wpływu zasyпки na tłumienie drgań (rys. 1). Analiza tych czynników może przyczynić się do optymalizacji doboru minimalnej wysokości naziomu i zwiększenia dopuszczalnych rozpiętości przepustów z blach falistych. Dodatkowym efektem może być zmniejszenie kosztów realizacji infrastruktury mostowej z wykorzystaniem tego rodzaju przepustów. W pracy [20] zasugerowano, że odpowiedź przepustów z blach falistych od obciążenia statycznego jest większa niż od obciążenia dynamicznego. Dodatkowo, niektórzy badacze podają [13, 15], że w przypadku przepustów z naziemem większym niż 1,0 m nie powinno się uwzględniać wpływów dynamicznych, co również ma odzwierciedlenie w odpowiednich normach [1, 19].

W artykule przeanalizowano wpływ obciążenia ruchomego, drogowego i kolejowego, na przepusty z blach falistych.



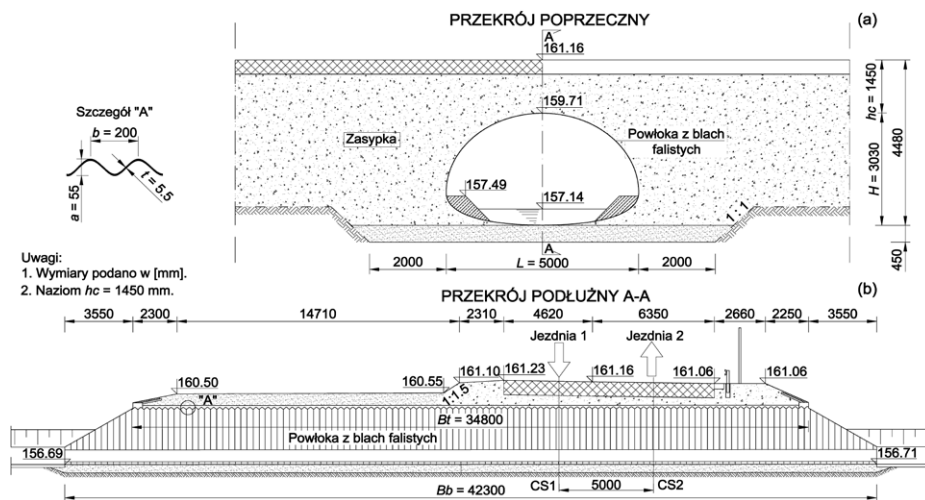
Rys. 1. Schematyczne przedstawienie problemu wpływu obciążeń ruchomych

stych. Ten problem został zweryfikowany doświadczalnie, a w szczególności:

- określono wpływ obciążenia eksploatacyjnego drogowego i kolejowego na tego rodzaju przepusty;
- ustalono współczynniki dynamiczne, a także porównano wpływ obciążenia ruchomego i analogicznego statycznego na wartości sił wewnętrznych w przepęście;
- zweryfikowano założenie dotyczące nieuwzględniania wpływów dynamicznych w przepęściach, w których grubość naziomu przekracza 1,0 m.

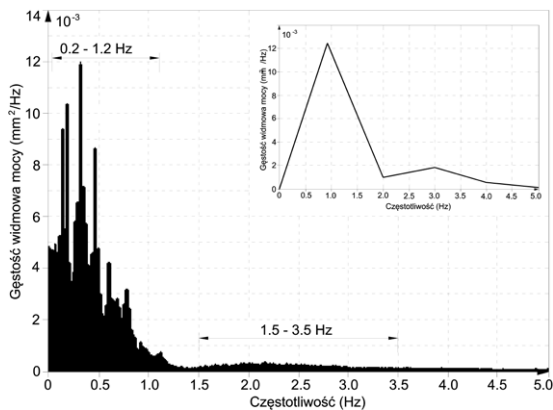
## Wpływ obciążenia eksploatacyjnego drogowego i kolejowego

• **Obciążenie drogowe.** Przeprowadzono badania przepustu drogowego pod obciążeniem eksploatacyjnym (rys. 2). Analizę wyników wykonano, wykorzystując dane dotyczące struktury ruchu pojazdów uzyskane z GDDKiA i GIRD oraz na podstawie własnej rejestracji wideo. Przeszaczenia i odkształcenia w wybranych przekrojach przepustu były rejestrowane w sposób interwałowy, tj. pomiar ciągły w ośmiu półgodzinnych przedziałach w różnych okresach doby. Pozwoliło to na uzyskanie rozkładu maksymalnych sił wewnętrznych na obwodzie przepustu od pojazdów poruszających się w ciągu doby.



Rys. 2. Przepust drogowy: a) przekrój poprzeczny, b) przekrój podłużny

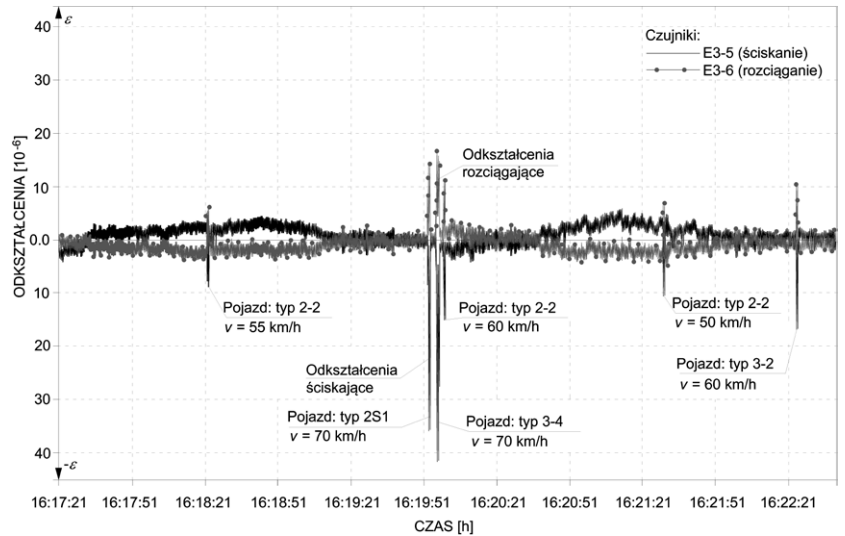
Największe deformacje, tj. przemieszczenia wynoszące  $0,74 \cdot 10^{-3}$  m i odkształcenia o wartości  $43 \cdot 10^{-6}$ , spowodował przejazd pojazdu ciężarowego o masie 46 t z prędkością 70 km/h. Wystąpiły one w kluczu przepustu i jego punktach ćwiartkowych. Rozkład obciążenia wzdłuż przepustu ustalono, stosując funkcję korelacji wzajemnej do analizy sygnałów z czujników. Zaobserwowano, że wpływ pojazdu jadącego nad przekrojem CS1 na przekrój badawczy CS2, usytuowany w odległości 5,0 m od pierwszego, był mniejszy o 40%. Stosunkowo małe wyężenie przepustu było spowodowane wysokością zasypki w kluczu  $h_c = 1450$  mm i krótkim czasem działania obciążenia wynoszącym 1 s. Stosując do analizy przemieszczeń metodę FFT (Fast Fourier Transform), wyznaczono dominujące częstotliwości przepustu (rys. 3) z zakresu  $0,2 \div 1,2$  Hz (częstotliwości kątowe  $\omega = 1,26 \div 7,54$  rad/s i okres drgań  $T = 0,83 \div 5,00$  s). Mniej dominujące częstotliwości zaobserwowano w przedziale  $1,5 \div$



Rys. 3. Wykres gęstości widmowej mocy pomierzonych przemieszczeń

$3,5$  Hz ( $\omega = 9,42 \div 21,99$  rad/s i  $T = 0,28 \div 0,66$  s). Małe wartości częstotliwości przepustu z blach falistych potwierdzają pozytywny wpływ zasypki na tłumienie drgań powodowane przez przejeżdżające ciężkie pojazdy.

Poddano również ocenie i analizie porównawczej metody analityczne [2, 11, 18] stosowane do obliczeń sił wewnętrznych w przepustach z wynikami badań doświadczalnych. Uzyskane wyniki wskazują na dużą ich rozbieżność, która jest związana z konserwatywnym podejściem w rozpatrywanych metodach do rozkładu obciążenia przez warstwy gruntowe. Konserwatyzm tych metod pochodzi również z różnych obciążeń oraz od dodatkowych współczynników bezpieczeństwa stosowanych w rozpatrywanych metodach projektowych. Zaobserwowano także, że większe wartości odkształceń (ściskanie, czujnik E3-5) występują na szczycie fali (rys. 4), a mniejsze w dole fali (rozciąganie, czujnik E3-6). Jest to związane z połączonym efektem sił osiowych i zginania, a także z nierównomiernym rozkładem obciążenia na obwodzie powłoki (oś obojętna powłoki nie znajduje się w środku fali). Fakt ten wpływa również na rozbieżności w wy-



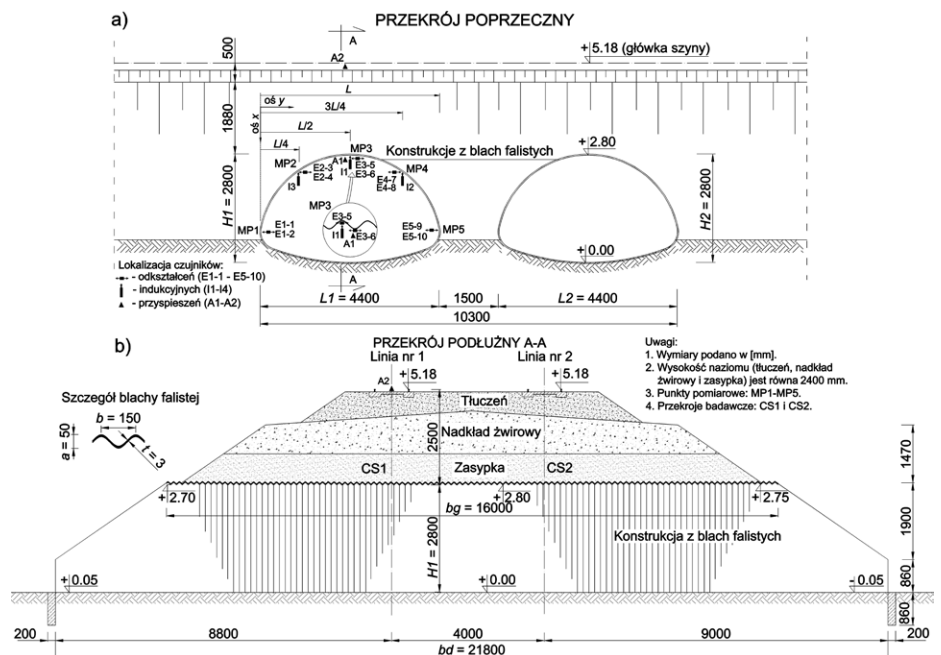
Rys. 4. Wykres odkształceń ściskających i rozciągających w przepuście z blach falistych

nikach uzyskiwanych według metod analitycznych i badań doświadczalnych.

W badaniach i obliczeniach od obciążenia eksploatacyjnego uzyskano stosunkowo duże wartości momentów zginających. Potwierdza to, że momenty zginające nie powinny być zaniebawane na etapie projektowania konstrukcji łukowo-kołowych, co jest sugerowane przez CHBDC [11] i AASHTO LRFD [2]. Na podstawie wyników badań obliczono współczynniki tłumienia  $\zeta = 8,26 \div 21,02\%$  i logarytmiczne współczynniki tłumienia LDD =  $0,521 \div 1,351$ . Ich wartości można uznać za duże w porównaniu z typowymi mostami drogowymi i kolejowymi. Jest to wynikiem dużej wysokości zasypki w kluczu, która w tym przypadku była tłumikiem drgań – następowała dyssypacja energii przez zasypkę. Szczegółowe wyniki przedstawiono w pracy [6].

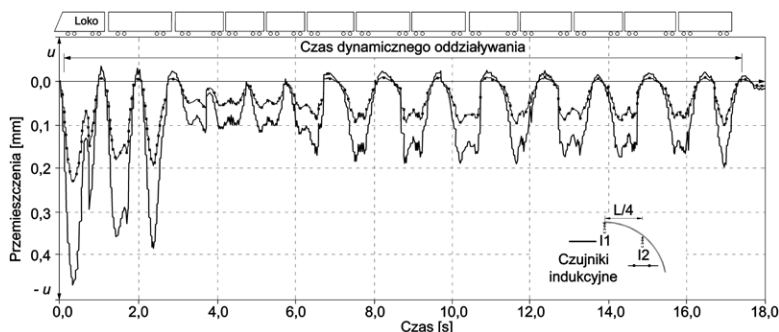
• **Obciążenie kolejowe.** Głównym celem badań kolejowego

przepustu z blach falistych (rys. 5) było uzyskanie odpowiedzi na eksploatacyjne obciążenie kolejowe. Przeszczenia i odkształcenia przepustu były mierzone w dwóch przekrojach zlokalizowanych pod każdą z linii kolejowych. Maksymalne



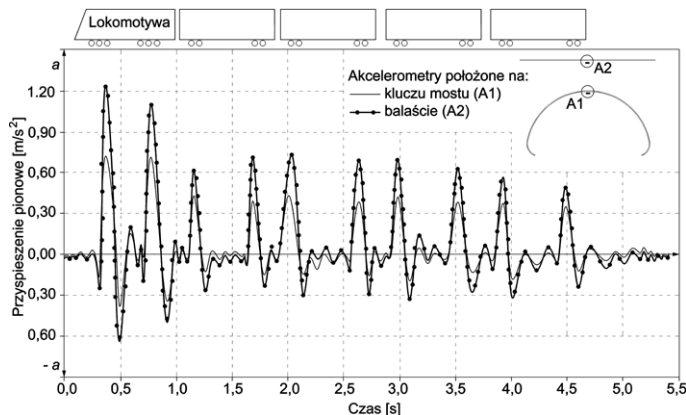
Rys. 5. Przepust kolejowy: a) przekrój poprzeczny, b) przekrój podłużny

przemieszczenia nie przekraczały  $0,61 \cdot 10^{-3}$  m, a odkształcenia  $54 \cdot 10^{-6}$ , przy zastosowanym obciążeniu wynoszącym około 1700 t i prędkości przejazdu pociągu 35 km/h. Przykład przebiegu przemieszczeń przepustu pokazano na rys. 6.



Rys. 6. Wykres przemieszczeń klucza i punktu ćwiartkowego mostu podczas przejazdu pociągu towarowego o masie 1186,6 t z prędkością 35 km/h

Stwierdzono pozytywny wpływ zasyпки na rozkład obciążenia wzdłuż przepustu, tj. zmniejszenie przemieszczeń i odkształceń o około 80%. Jest to związane z tłumieniem drgań przez warstwy znajdujące się nad przepustem, tj. warstwy zasyпки, nadkładu żwirowego, balastu, jak również ze zmniejszeniem prędkości fal w tych warstwach. Oznacza to, że obciążenia działają tylko na przepust w pobliżu torowiska, po którym przejeżdża pociąg. Największe przemieszczenia i odkształcenia uzyskano odpowiednio w kluczu i punktach ćwiartkowych przepustu. Większe odkształcenia – ściskanie zaobserwowano na górze fali, a mniejsze na dole – rozciąganie. Te efekty opisano także w pracy [6]. Dostępne australijskie i amerykańskie normy kolejowe do tego rodzaju przepustów zalecają, że obciążenie kolejowe powinno być przyjmowane jako jednostkowy nacisk na poziomie klucza przepustu, co jest sprzeczne z uzyskanymi wynikami badań. Przyspieszenia stalowego przepustu i balastu kolejowego były mniejsze od wartości dopuszczalnej wynoszącej według Eurokodu [10]  $3,5 \text{ m/s}^2$ . Przyspieszenie w kluczu przepustu (rys. 7) było w każdym przypadku obciążenia mniejsze od przyspieszenia balastu o około 45%. Zmniejszona wartość energii w kluczu przepustu jest spowodowana przez redukcję prędkości fali w zasyponce i znaczącą wysokość gruntu w kluczu. Wyniki tych badań wskazują też, że jeżeli prędkość pociągu zwiększa się, to przyspieszenie przepustu i balastu również się zwiększa.

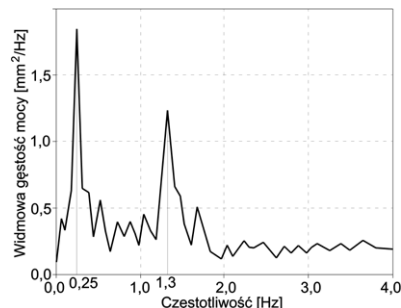


Rys. 7. Wykres pionowych przyspieszeń klucza mostu i balastu podczas przejazdu pociągu ekspresowego z prędkością 120 km/h

Na podstawie pomierzonych przemieszczeń, stosując metodę DFT (Discrete Fourier Transform), określono dominujące częstotliwości przepustu, które wynosiły 0,1 bądź 0,2 i 1,2 Hz, co odpowiada odpowiednio częstotliwościom koło-

wym  $\omega = 0,63$  bądź 1,26 i 7,54 rad/s oraz okresem drgań  $T = 0,83$  i 10 bądź 5 s. Największe częstotliwości drgań przepustu były spowodowane przez przejazd pociągów z prędkością od 70 do 120 km/h (niezależnie od ich masy), a w przypadku małych prędkości pociągów,  $v < 40$  km/h, ich masa miała większy wpływ na wartości częstotliwości przepustu. Można stwierdzić, że częstotliwości przepustu są związane z masą przejeżdżających pociągów. W przypadku małych prędkości ( $v < 40$  km/h) następuje zwiększenie częstotliwości o około 69%, natomiast w odniesieniu do większych prędkości masa pociągów ma mniejsze znaczenie. Nawet pociągi o masie 135,3 t przejeżdżające z prędkością 60÷75 km/h powodowały takie same lub większe częstotliwości niż przejazdy ciężkich pociągów towarowych, ale z mniejszą prędkością.

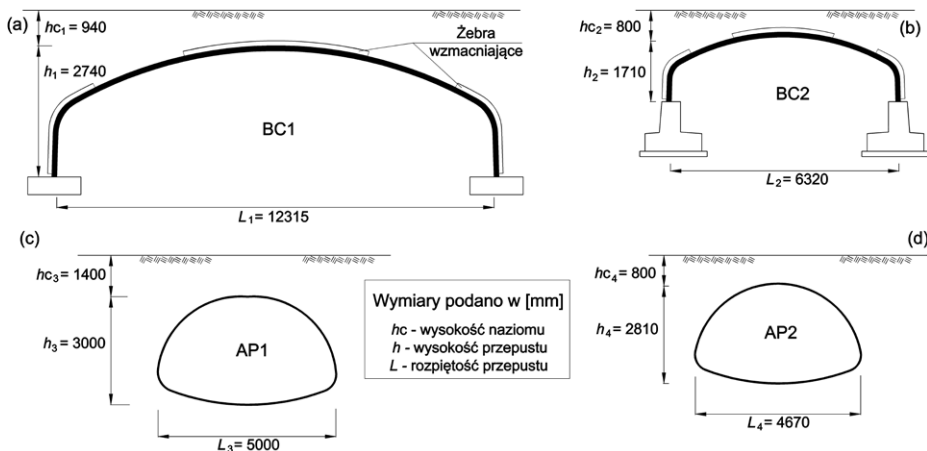
Drgania własne przepustu zostały również zidentyfikowane z wykorzystaniem widmowej gęstości mocy do analizy przemieszczeń uzyskanych z tzw. ambient vibration test. Dwie pierwsze częstotliwości własne przepustu wynosiły odpowiednio 0,25 i 1,3 Hz (rys. 8), co w przybliżeniu odpowiadało dominującym częstotliwościom uzyskanym z zasadniczych badań pod obciążeniem ruchomym (forced vibration test). Współczynnik tłumienia ustalony metodą Half Power Bandwidth wynosił około 9% w badaniach bez obciążenia i 50% w przypadku badań z wykorzystaniem przejeżdżających pociągów. Tak duże różnice są spowodowane wpływem aktywacji interakcji między stalową powłoką i gruntem, gdy przepust był obciążony. Siły wewnętrzne w przepuście obliczone według metody podanej w [18] były znacząco większe od wartości uzyskanych z badań doświadczalnych. Szczegółowe wyniki przedstawiono w pracy [7].



Rys. 8. Wykres widmowej gęstości mocy przemieszczeń klucza mostu po przejeździe pociągu

### Współczynniki dynamiczne w przepustach z blach falistych

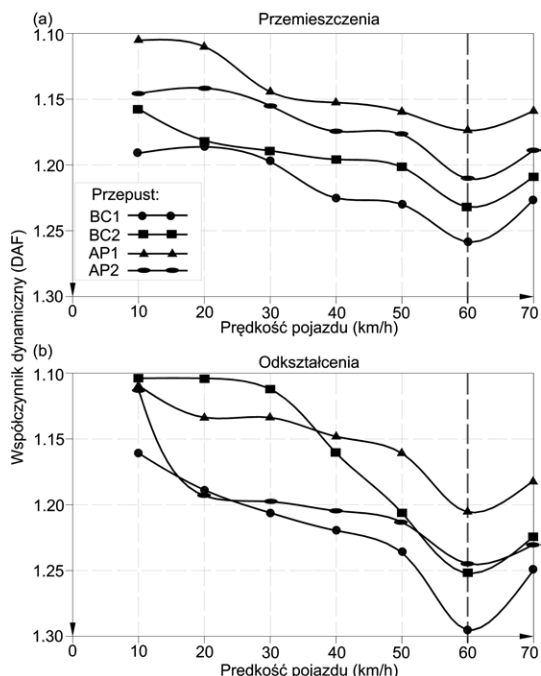
Wartości współczynników dynamicznych (ang. Dynamic Amplification Factor – DAF) w przepustach z blach falistych przeanalizowano na czterech obiektach o różnych rozpiętościach i wysokościach naziomu (rys. 9). Przedstawiono wpływ obciążenia ruchomego w porównaniu z sytuacją, kiedy takie samo obciążenie jest usytuowane statycznie na przepuście, a ponadto ustalono czynniki wpływające na DAF. Zgodnie z [3] realne współczynniki dynamiczne powinny się ustalać na podstawie badań pod rzeczywistym obciążeniem ruchem pojazdów występującym na danym obiekcie, czyli obciążeniem eksploatacyjnym. W takim jednak przypadku trudno jest wyznaczyć odpowiedź konstrukcji od obciążenia statycznego każdego przejeżdżającego pojazdu. Wartość statyczną można uzyskać przez filtrację odpowiedzi dynamicznej konstrukcji lub obliczyć np. z wykorzystaniem MES. W przypadku typowych mostów stalowych lub betonowych sytuacja jest o tyle korzystna, że istnieją metody obliczeniowe umożliwiające uzyskanie odpowiedzi konstrukcji na odpowiednim poziomie dokładności. Natomiast w przypadku przepustów z blach falistych zasto-



Rys. 9. Przekroje poprzeczne badanych przepustów

sowanie dostępnych metod obliczeniowych prowadzi do zbyt dużych różnic w wynikach w porównaniu z badaniami doświadczalnymi. Jednak dotychczas nie zbudowano w pełni odpowiedniego modelu obliczeniowego przepustu z blach falistych. Z tych względów w celu uzyskania odpowiedzi statycznej postanowiono zastosować filtrację odpowiedzi dynamicznej rozpatrywanych przepustów. Należy jednak zaznaczyć, że w przypadku tradycyjnych mostów stalowych lub betonowych o rozpiętości przęsła do 15 m zastosowanie filtracji odpowiedzi dynamicznej prowadzi do powstania błędów we współczynnikach dynamicznych [16]. Zatem pośrednim efektem przeprowadzonych prac badawczych było ustalenie, czy w przypadku przepustów z blach falistych istnieje niebezpieczeństwo pojawienia się błędów przy wyznaczaniu współczynników dynamicznych z zastosowaniem filtracji odpowiedzi dynamicznej.

Ustalono, że wpływy dynamiczne w przepustach powinny być brane pod uwagę w ich projektowaniu, gdyż wartości współczynników dynamicznych (DAFs) obliczone na podstawie pomierzonych przemieszczeń były w zakresie  $1,116 \div 1,260$ , a odkształceń  $1,105 \div 1,293$  (rys. 10). W przepuscie AP1 o naziomie wynoszącym ponad 1,0 m współczynniki dynamiczne w odniesieniu do przemieszczeń wynosiły  $1,116 \div 1,175$ , a w przypadku odkształceń  $1,121 \div 1,205$ .



Rys. 10. Współczynniki dynamiczne ustalane na podstawie: a) przemieszczeń, b) odkształceń

W tych przepustach współczynniki dynamiczne można także stosować do oceny ich rzeczywistej nośności – nośności użytkowej przez szacowanie dynamicznych wpływów obciążenia ruchomego. W wyniku badań ustalono, że głównym czynnikiem wpływającym na wartość współczynników dynamicznych jest rozpiętość przepustu. Wraz ze zwiększeniem rozpiętości zwiększają się również współczynniki dynamiczne. Innymi ważnymi czynnikami wpływającymi na te współczynniki są: wysokość gruntu w kluczu przepustów – gdy wysokość zwiększa się, to współczynniki dynamiczne zmniejszają się; stosunek wysokości zasypki do rozpiętości przepustu – jeżeli ten stosunek się zwiększa,

to współczynniki dynamiczne się zmniejszają; stosunek promienia w kluczu przepustu do promienia bocznego – jeżeli ten stosunek zwiększa się, to współczynniki dynamiczne także się zwiększają. Zwiększenie prędkości pojazdów powoduje również zwiększenie współczynników dynamicznych (por. rys. 10). Maksymalne współczynniki dynamiczne uzyskano w przypadku prędkości 60 km/h. Dotyczyło to wszystkich rozpatrywanych przepustów. Przy większych prędkościach współczynniki dynamiczne miały mniejsze wartości, co było związane z bardzo krótkim czasem oddziaływania obciążenia na przepust. Szczegółowe wyniki przedstawiono w pracy [8].

W przypadku przepustu kolejowego [7] współczynniki dynamiczne DAF uzyskane z pomiarów przemieszczeń wynosiły  $1,11 \div 1,39$ , a odkształceń  $1,03 \div 1,54$ , co także potwierdza konieczność ich uwzględniania w przypadku naziomów większych niż 1,0 m.

W odniesieniu do tradycyjnych mostów stalowych i betonowych o małych i średnich rozpiętościach teoretycznych współczynniki dynamiczne DAFs zwiększają się wraz ze zmniejszaniem się masy pojazdu. Z tych względów wyniki uzyskane podczas przejazdu lekkich pojazdów nie powinny być brane pod uwagę do ustalania wartości tych współczynników. W przepustach z blach falistych takiej zależności nie stwierdzono. W przypadku małych prędkości pociągów,  $v < 45$  km/h, współczynniki DAFs są bardziej zależne od masy niż od prędkości, podczas gdy w przypadku większych prędkości jazdy pociągów, tj.  $v > 60$  km/h, masa ma wpływ mniejszy. W tych przypadkach DAF bardziej zależy od prędkości, co jest związane z większym oddziaływaniem obciążeń spowodowanych przez pociągi poruszające się z dużymi prędkościami, czyli emitowaniem większej energii. Szczegółowa analiza wyników została przedstawiona w pracy [7].

## Wnioski

Do najważniejszych efektów wykonanych badań przepustów z blach falistych pod obciążeniem ruchomym można zaliczyć:

- wykazanie konieczności uwzględniania współczynników dynamicznych DAF przy projektowaniu przepustów z blach falistych, nawet o naziomie większym niż 1,0 m;
- ustalenie wpływu prędkości i masy pojazdów drogowych i kolejowych na zachowanie się przepustów z blach falistych, a w tym określenie poziomu deformacji i częstotliwości drgań stalowych powłok;
- wykazanie możliwości stosowania filtracji odpowiedzi dynamicznej przepustów w celu uzyskania wartości statycznej do ustalania współczynników dynamicznych;
- weryfikację obecnych metod i norm projektowych dotyczących przepustów z blach falistych, które nie pozwalają na ich prawidłową ocenę nośności, chociaż uzyskiwane wartości są bezpieczne w odniesieniu do konstrukcji.

Istnieje potrzeba prowadzenia dalszych badań przepustów z blach falistych, którym wynikiem byłoby:

- opracowanie bądź modyfikacja wytycznych projektowych i norm;
- ustalenie rzeczywistej dopuszczalnej nośności użytkowej przepustów jako relacji nośności aktualnej do projektowanej;
- wyznaczenie wytrzymałości eksploatacyjnej;
- zoptymalizowanie doboru parametrów, tj. wysokości naziomu, grubości blach falistych, rozpiętości powłoki.

#### PIŚMIENNICTWO I WYKORZYSTANE MATERIAŁY

- [1] AASHTO. Standard Specifications for Highway Bridges. American Association of State Highway and Transportation Officials. 17th Ed., Washington D.C. 2002.
- [2] AASHTO LRFD. LRFD Bridge Design Specifications. American Association of State Highway and Transportation Officials. 5th Ed., Washington D.C. 2010.
- [3] Bakht B., Pinjarkar S.G.: Review of dynamic testing of highway bridges. Structural Research Report SRR-89-01. Ministry of Transportation of Ontario, Downsview, Ontario 1989.
- [4] Bayoglu Flener E.: Static and dynamic behaviour of soil-steel composite bridges obtained by field testing. Ph.D. thesis, Royal Institute of Technology, Sweden, Stockholm 2009.
- [5] Bęben D.: Współpraca gruntu i konstrukcji mostowych wykonywanych z blach falistych. Praca doktorska. Wydział Budownictwa Politechniki Opolskiej, Opole 2005.
- [6] Bęben D.: Field performance of corrugated steel plate road culvert under normal live load conditions. "Journal of Performance of Constructed Facilities", no 27(6)/2013.
- [7] Bęben D.: Corrugated steel plate (CSP) culvert response to service train loads. "Journal of Performance of Constructed Facilities", no 28(2)/2014.
- [8] Bęben D.: Dynamic amplification factors of corrugated steel plate culverts. "Engineering Structures", no 46 (January)/2013.
- [9] Bęben D., Mańko Z.: Dynamic testing of a soil-steel bridge. „Structural Engineering and Mechanics”, no 35(3)/2010.
- [10] CEN, EN 1991-2 Eurocode 1: Actions on Structures – Part 2: Traffic Loads on Bridges. European Committee for Standardization, Brussels 2002.
- [11] CHBDC Canadian Highway Bridge Design Code. CAN/CSA-S6-06, Canadian Standards Association International, Mississauga, Ontario 2006.
- [12] Fryba L.: Vibrations of solids and structures under moving loads. Thomas Telford House, London 1999.
- [13] Janusz L., Madaj A.: Obiekty inżynierskie z blach falistych. Projektowanie i wykonawstwo. WKŁ, Warszawa 2009.
- [14] Machelski Cz.: Modelowanie mostowych konstrukcji gruntowo-powłokowych. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 2008.
- [15] McGrath T.J., Moore I.D., Selig E.T., Webb M.C., Taleb B.: Recommended specifications for large-span culverts. National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, Report 473. Washington D.C. 2002.
- [16] Paultre P., Chaallal O., Proulx J.: Bridge dynamics and dynamics amplification factors – a review of analytical and experimental findings. „Canadian Journal of Civil Engineering”, no 19(2)/1992.
- [17] Pettersson L.: Full scale tests and structural evaluation of soil-steel flexible culverts with low height of cover. Ph.D. thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden 2007.
- [18] Pettersson L., Sundquist H.: Design of soil-steel composite bridges. TRITA-BKN Rep. No. 112, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden 2007.
- [19] PN-85/S-10030. Obiekty mostowe. Obciążenia.
- [20] Sezen H., Yeau K.Y., Fox P.J.: In-situ load testing of corrugated steel pipe-arch culverts. "Journal of Performance of Constructed Facilities", no 22(4)/2008.
- [21] Vaslestad J.: Soil structures interaction of buried culverts. Ph.D. thesis. Norwegian Institute of Technology, 1990.