

prof. dr hab. inż. Adam Wysokowski^{1)*}

ORCID: 0000-0002-4547-2453

mgr inż. Waldemar Szulc²⁾

ORCID: 0000-0002-2151-1083

Wpływ oddziaływań dynamicznych taboru kolejowego na elementy konstrukcyjne wiaduktów drogowych zlokalizowanych nad kolejowym torem doświadczalnym w Żmigrodzie

Effect of dynamic impacts of rolling stock on the structural elements of the road viaducts located above the railway experimental track in Zmigrod

DOI: 10.15199/33.2023.10.10

Streszczenie. W przypadku obiektów mostowych szczególnie ważny jest wpływ oddziaływań dynamicznych na ich poszczególne elementy konstrukcyjne. Artykuł ma na celu przedstawienie skali tego wpływu na przykładzie wiaduktów drogowych zlokalizowanych nad torem doświadczalnym Instytutu Kolejnictwa w Żmigrodzie. W szczególności opisano wpływ oddziaływań dynamicznych na poszczególne elementy strukturalne obiektów mostowych i zakres uszkodzeń stwierdzonych podczas przeprowadzonych przeglądów szczegółowych tych obiektów w trakcie 30-letniego okresu eksploatacji. Na podstawie analiz rodzaju i zakresu uszkodzeń wykazano, że wpływ ten jest znaczny i dotyczy głównie korpusów nasypów wiaduktów ziemnych w bezpośrednim obrębie toru kolejowego.

Słowa kluczowe: oddziaływania dynamiczne taboru kolejowego; uszkodzenia strukturalne; drogowe obiekty mostowe; trwałość eksploatacyjna.

Abstract. In the case of bridges, the impact of dynamic influences on their individual structural components is particularly important. The article aims to present the scale of this impact on the example of road viaducts located over the Experimental Track of the Railway Institute in Zmigrod. In particular, the impact of dynamic impacts on individual structural elements of the bridges and the extent of damage found during detailed inspections of these structures during their 30-year service life are described. Based on their analysis of the type and extent of damage, they showed that the impact is significant and mainly affects the bodies of viaduct embankments due to the gradual deconsolidation of soil structures in the immediate vicinity of the railroad track.

Keywords: dynamic impacts of rolling stock; structural damage; road bridges; service life.

Rozwój sieci kolejowych na świecie, w tym linii kolei dużych prędkości, przyczynił się do zwiększenia zainteresowania zagadnieniami mającymi wpływ na poprawę efektywności realizacji ruchu kolejowego, przy jednoczesnej minimalizacji jego oddziaływania na obiekty sąsiadujące z liniami kolejowymi [1 ÷ 3]. Do zagadnień tych należy niewątpliwie wpływ oddziaływań dynamicznych, w tym drgań wywołanych ruchem taboru kolejowego, co ma szczególne znaczenie na terenach zabudowanych. Trasy kolejowe powodują fragmentaryzację terenów, na których są zlokalizowane, zaj-

mując przy tym stosunkowo znaczne powierchnie gruntów. Wywierają one niekorzystny wpływ na środowisko [4], głównie w wyniku generowania drgań oddziałujących m.in. na obiekty budowlane, nawet znacznie oddalone od linii kolejowej. Powstające drgania i deformacje podłoża gruntowego mają istotny wpływ na konstrukcję budynków, powodując ich uszkodzenia, co wymusza konieczność przeprowadzania częstych remontów [5]. W skrajnych przypadkach przy braku odpowiedniego utrzymania, powstałe uszkodzenia mogą stanowić przyczynę katastrofy budowlanej [6]. Drgania te należą do drgań wymuszonych, które powstają pod wpływem zewnętrznego źródła energii, tzw. siły wymuszającej i występują jedynie w czasie jej działania. Częstotliwość tego rodzaju drgań równa jest częstotliwości wymuszającej.

W przypadku ruchu kolejowego drgania generowane są przez różne czynniki wzbudzające, m.in. powstawanie sił o charakterze dynamicznym na styku koło – szyna, a także przenoszenie sił dynamicznych z pojazdu i generowanie drgań konstrukcji podtorza, które jednocześnie wpływają na drgania pojazdu oraz przekazywanie drgań do gruntu. Drgania wzbudzone są również w wyniku uderzeń spowodowanych zerwaniem kontaktu kół w miejscu nierówności szyn toru kolejowego, a także działania fali powietrznej powstającej w czasie przejazdu pociągu oraz infradźwięków [7]. W trakcie analizy drgań wywołanych przez ruch pociągów szczególnie istotne są: sposób rozchodzenia się drgań w podłożu gruntowym; zjawisko przenoszenia się drgań z gruntu na obiekty zlokalizowane w otoczeniu podtorza,

¹⁾ Uniwersytet Zielonogórski, Instytut Budownictwa

²⁾ Instytut Kolejnictwa

^{*)} Adres do korespondencji: awysokowski@infra-kom.eu

które pozostają w zasięgu propagowania drgań oraz dynamiczne odpowiedzi obiektów na przekazywane drgania [7]. Drgania wywołane ruchem kolejowym mieszczą się w zakresie 10 – 500 Hz, a większość generowanej energii jest przekazywana przez fale Rayleigha, które rozchodzą się blisko powierzchni gruntu i przenoszą drgania na konstrukcje przez ich fundamenty [8, 9]. Zjawisko rozchodzenia się drgań wymuszonych w gruncie jest skomplikowane m.in. ze względu na jego niejednorodność, cechy wytrzymałościowe oraz zmienność warunków hydrogeologicznych i atmosferycznych. Tworzenie modeli rozchodzenia się fal w gruncie jest złożone i wymaga wielu danych otrzymanych z badań doświadczalnych i opracowanych statystycznie, a pełna analiza propagacji fali drganiowej w gruncie jest czasochłonna. Z tego względu w praktyce wykorzystuje się przybliżone metody prognozowania rozprzestrzeniania się zjawisk dynamicznych w gruncie, co znacznie obniża dokładność uzyskanych wyników. Istnieje więc potrzeba rozwoju nowych metod analitycznych z wykorzystaniem dostępnych narzędzi pomiarowych i komputerowych, które zostaną poddane weryfikacji eksperymentalnej.

Obiekty budowlane zlokalizowane w pobliżu ciągów komunikacyjnych są narażone na negatywne oddziaływanie drgań wywołanych ruchem pojazdów, w tym taboru kolejowego. W przypadku obiektów kubaturowych, oprócz negatywnego wpływu na zwiększenie osiadania fundamentów oraz na powstawanie uszkodzeń konstrukcji w postaci pęknięć, problematyczne jest obniżenie komfortu życia człowieka w wyniku odczuwalnych wibracji i słyszalnego hałasu w budynkach mieszkalnych i biurowych, a także obsługa urządzeń wrażliwych na wibracje i stosowanie nowoczesnych technologii w laboratoriach oraz zakładach produkcji precyzyjnej [9]. Z tego względu istnieje potrzeba redukcji wibracji powstających wewnątrz budynków do akceptowalnego poziomu, z wykorzystaniem wydajnego systemu łagodzenia drgań. W przypadku obiektów mostowych szczególnie istotny jest wpływ powstających oddziaływań dynamicznych na elementy konstrukcyjne.

Niekorzystne oddziaływanie dynamiczne ruchu kolejowego na środowisko, wywołujące drgania obiektów budowlanych, powoduje konieczność dążenia do minimalizacji jego szkodliwego wpływu. W konsekwencji powinno to prowadzić do opracowywania nowych rozwiązań elementów tras kolejowych ograniczających emisję sygnałów wibroakustycznych [7], m.in. systemów wibroizolacji, stanowiących przeszkodę w rozprzestrzenianiu się drgań do otoczenia, a także sposobów konstruowania obiektów inżynierskich niewrażliwych na działanie drgań.

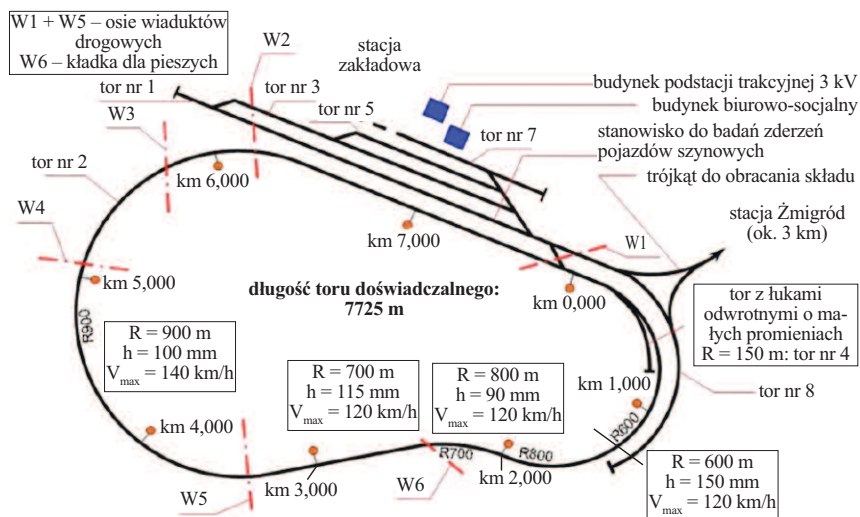
W celu zwiększenia efektywności ochrony wibroizolacyjnej, już na etapie projektowania konstrukcji zlokalizowanych na terenie oddziaływania ruchu kolejowego, powinna istnieć możliwość wyboru metody ochrony aktywnej lub pasywnej oraz oceny skuteczności działania przyjętego rozwiązania [7]. Ochrona wibroizolacyjna ma szczególne znaczenie w przypadku linii kolei dużych prędkości, które generują większe oddziaływania dynamiczne niż pozostałe linie. Konieczne jest więc opracowanie metod oceny wpływu drgań wymuszonych na istniejące i nowo projektowane obiekty budowlane, umożliwiając rozwój konstrukcji podtorzy oraz układów izolacyjnych zabezpieczających te obiekty. W tym celu niezbędne jest prowadzenie zarówno prac o charakterze teoretycznym, jak i badawczym.

Rozwój trójwymiarowych modeli numerycznych służących do predykcji drgań wywołanych ruchem drogowym oraz kolejowym jest tematem wielu publikacji [10 ÷ 14].

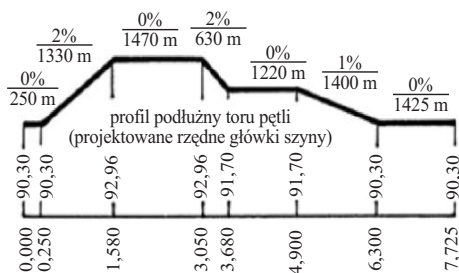
Tworzone modele niejednokrotnie weryfikowane są w badaniach in situ [1, 15, 16], co pozwala na zwiększenie dokładności prowadzonych analiz. Badania doświadczalne są nieodłącznym elementem zdobywania wiedzy, weryfikacji teorii, czy też określania zależności korelacyjnych w celu ugruntowania istniejących teorii. Szczególne znaczenie mają one w przypadku analizy oddziaływań dynamicznych wywołanych ruchem kolejowym, gdyż ze względu na specyfikę rozchodzenia się drgań na styku warstw podtorza i gruntu, stanowią najbardziej dokładne narzędzie do określania tych zjawisk [7], a w efekcie do badania skuteczności zastosowanej ochrony wibroizolacyjnej.

Opis toru doświadczalnego Instytutu Kolejnictwa

Tor doświadczalny Instytutu Kolejnictwa (dalej TD) jest zlokalizowany w województwie dolnośląskim, powiecie trzebnickim, gminie Żmigród, w odległości 40 km od Wrocławia i 5 km od Żmigrodu. Główny tor pętli doświadczalnej ma długość 7725 m i składa się z odcinków prostych o długości: 1313,90; 54,20; 27,40 i 534,90 m oraz łuków o promieniu 600, 700, 800 i 900 m. Szerokość torowiska w łuku wynosi 6,12 m, a na prostej 6,02 m. W profilu podłużnym tor podstawowy składa się z odcinków poziomych oraz wzniesień i spadków o pochyleniu: $i = 0$; $i = 1$; $i = 2\%$. Schemat układu toru doświadczalnego przedstawiono na rysunku 1, a jego profil podłużny na rysunku 2.



Rys. 1. Schemat toru doświadczalnego Instytutu Kolejnictwa [17]
Fig. 1. Scheme of the experimental track of the Railway Institute [17]



Rys. 2. Profil podłużny toru doświadczalnego Instytutu Kolejnictwa [18]

Fig. 2. Longitudinal profile of the experimental track Railroad Institute [18]

Tor pętli podzielono na 26 sekcji: 25 długości 300 m oraz sekcję rozjazdową długości 225 m. Każda z nich może stanowić wyodrębniony odcinek doświadczalny. Do realizacji toru wykorzystano szyny UIC 60, podkłady z drewna twardego i miękkiego, różne typy podkładów betonowych, przytwierdzenia szyn do podkładów typu K i SB-3 oraz różne rodzaje podkładek podszytowych. Od 2016 r. tor pętli jest bezstykowy na całej długości. Podtorze stanowi nasyp z gruntu przepuszczalnego, tj. piasku i żwiru, zabezpieczony od góry warstwą odsączającą z kłińca i warstwą szczelną z zagęszczonego niesortu kamiennego, a od dołu warstwą odcinającą od podłoża gruntu rodzimego ze żwiru, pospółki i niesortu kamiennego [18]. Wszystkie skrzyżowania z istniejącymi drogami kołowymi są dwupoziomowe. Nad trasą pętli doświadczalnej znajduje się 5 wiaduktów drogowych oraz kładka dla pieszych. Od września 1996 r. do 2022 r. na TD przeprowadzono łącznie ok. 630 projektów badawczych dotyczących pojazdów szynowych. Tor umożliwia prowadzenie badań trwałości, niezawodności, wytrzymałości, dynamiki, urządzeń i systemów kolejowych, obejmujących m.in. następujące obszary [17]:

- a) tabor (wagony i pojazdy trakcyjne, hamulce, wózki i elementy konstrukcji, urządzenia ciągnowo-zderzne, urządzenia trakcyjne);
- b) trakcję (sieć trakcyjna, osprzęt, konstrukcje wsporcze, systemy zasilania, zakłócenia elektromagnetyczne);
- c) sterowanie ruchem kolejowym (urządzenia srk i radiołącności);
- d) drogi kolejowe (nawierzchnia i jej części składowe).

Ze względu na zróżnicowanie elementów konstrukcyjnych toru, rodzaju ruchu pociągów, prędkości jazdy, obciążenia przewozami oraz fakt podziału toru na sekcje badawcze, może on stanowić także skuteczny poligon doświadczalny do badań w zakresie ochrony środowiska przed szkodliwym oddziaływaniem kolei.

Do głównych parametrów eksploatacyjnych toru należą dopuszczalna prędkość taboru kolejowego w zależności od geometrii toru oraz dopuszczalny nacisk na oś. Dopuszczalna prędkość na odcinkach prostych TD wynosi 160 km/h; a w przypadku odcinków usytuowanych w łukach:

- $R = 600 \text{ m} - V_{\text{max}} = 120 \text{ km/h}$ (przy przechyłce toru $\Delta h = 150 \text{ mm}$);
- $R = 700 \text{ m} - V_{\text{max}} = 120 \text{ km/h}$ (przy przechyłce toru $\Delta h = 115 \text{ mm}$);
- $R = 800 \text{ m} - V_{\text{max}} = 120 \text{ km/h}$ (przy przechyłce toru $\Delta h = 90 \text{ mm}$);
- $R = 900 \text{ m} - V_{\text{max}} = 140 \text{ km/h}$ (przy przechyłce toru $\Delta h = 100 \text{ mm}$).

Wartości dopuszczalnych nacisków na oś wynoszą $225 \div 250 \text{ kN}$ [20].

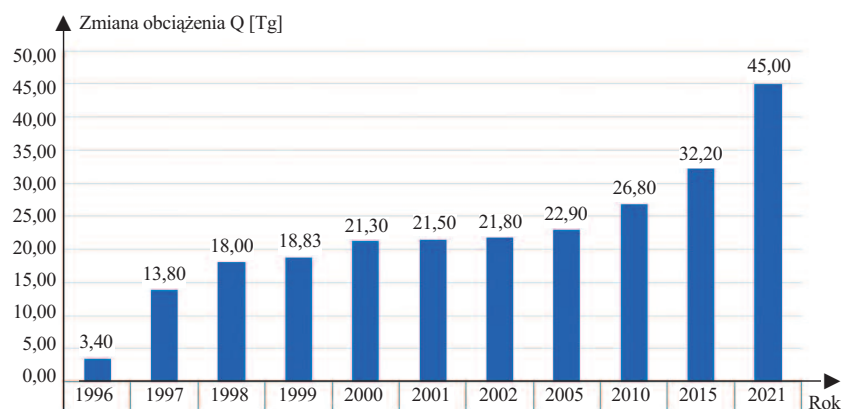
W trakcie prowadzonych badań, TD eksploatowany był przez różne typy pojazdów kolejowych: wagony towarowe dwu-, cztero- i sześciosiowe; czterosiowe wagony pasażerskie; cztero- i sześciosiowe lokomotywy spalinowe i elektryczne; spalinowe autobusy szynowe oraz elektryczne zespoły trakcyjne. Generowały one obciążenia dynamiczne toru oraz stanowiły siłę wzbudzącą powstających drgań wymuszonych działających na obiekty budowlane sąsiadujące z torem. Największy przyrost obciążenia odnotowano od października

1996 r. do 1997 r. i wyniósł on $14 \times 10^6 \text{ t}$. W tym czasie po torze poruszały się tzw. ciężki pociąg próbny o masie 5 tys. t, dwie lokomotywy i wagony towarowe. Maksymalny nacisk pojazdu na oś wynosi 22,5 t. Z kolei maksymalna prędkość przejazdu taboru kolejowego pod wiaduktami drogowymi zlokalizowanymi nad TD – 140 km/h. Na rysunku 3 przedstawiono zmianę obciążenia eksploatacyjnego TD w funkcji czasu.

Opis konstrukcji wiaduktów nad TD

Przedmiotem analizy jest pięć wiaduktów drogowych zlokalizowanych nad TD Instytutu Kolejnictwa (rysunek 4, tabela 1). Wybrane dane dotyczące ich usytuowania przedstawiono w tabeli 2. Wiadukty zostały wybudowane w 1988 r. Ich konstrukcję nośną stanowią żelbetowe przęsła w układzie swobodnie podpartym, wykonane z prefabrykowanych dźwigarów zespolonych z płytą pomostu. Podpory skrajne i pośrednie wiaduktów zrealizowano jako monolityczne konstrukcje żelbetowe w postaci dwóch słupów zwieńczonych masywnym oczępem. W obrębie przyczółków nie występują skrzydła. Skarpy wzdłuż przyczółków umocniono za pomocą kostki betonowej. Wiadukty posadowiono na palach żelbetowych o przekroju 35 cm x 35 cm lub 30 cm x 30 cm, w zależności od obiektu (tabela 1).

Obiekty są eksploatowane 30 lat. W tym czasie nie były wykonywane żadne prace remontowe ani modernizacyjne. Poszczególne typy konstrukcji mostów wytypowanych do badań nie różnią



Rys. 3. Zmiana obciążenia eksploatacyjnego toru doświadczalnego w funkcji czasu

Fig. 3. Change in operating load of the experimental track as a function of time



Rys. 4. Lokalizacja wiaduktów drogowych W1-W5

Fig. 4. Location of road viaducts W1-W5

nych zagrożeń infrastruktury kolejowej. Z badań i doświadczeń innych [19] wynika, że graniczną strefą wpływu oddziaływań dynamicznych, szczególnie w przypadku konstrukcji ziemnych, jest odległość 11,75 m od osi toru kolejowego. Jednocześnie wg obowiązujących przepisów krajowych [20], budowle i budynki powinny być usytuowane w odległości nie mniejszej niż 10,0 m od granicy obszaru kolejowego, z tym że odległość od osi toru skrajnego nie może być mniejsza niż 20,0 m. Jednocześnie przepisu tego nie stosuje się

Tabela 1. Wybrane parametry konstrukcji wiaduktów W1-W5

Table 1. Selected structural parameters of the W1-W5 viaducts

Numer obiektu	Liczba przęseł	Rodzaj dźwigara głównego	Liczba dźwigarów głównych w przęśle	Długość całkowita ustroju nośnego [m]	Długość obiektu łącznie z podjazdami [m]	Posadowienie obiektu [cm]
W1	5	belki prefabrykowane typu WBS	9	102,50	704	pale żelbetowe o przekroju 35 x 35
W2	5	belki prefabrykowane typu Wągrowiec	16	70,58	664	pale żelbetowe o przekroju 35 x 35
W3	3	belki prefabrykowane typu Gromnik	17	36,32	543	pale żelbetowe o przekroju 30 x 30
W4	3	belki prefabrykowane typu Wągrowiec	18	30,46	645	pale żelbetowe o przekroju 30 x 30
W5	3	belki prefabrykowane typu Gromnik	16	30,22	511	pale żelbetowe o przekroju 35 x 35

Tabela 2. Dane dotyczące lokalizacji wiaduktów W1-W5

Table 2. Details of the location of the W1-W5 viaducts

Numer obiektu	Lokalizacja	Lokalizacja w odniesieniu do toru pętli doświadczalnej	Liczba przekraczanych torów kolejowych	Kąt skrzyżowania z przeszkodą
W1	DP nr 1247D, km 9 + 429 miejscowość Węglewo	km 7 + 616	3	~ 45°
W2	DP nr 1323D, km 7 + 835 miejscowość Bychowo	km 6 + 402	2	~ 60°
W3	DP nr 1288D, km 0 + 950 miejscowość Karnice	km 5 + 688	1	~ 80°
W4	DP nr 1247D, km 7 + 124 miejscowość Barkówko	km 5 + 055	1	~ 50°
W5	DP nr 1326D, km 1+310 miejscowość Łapczyce	km 3 + 323	1	~ 80°

się zasadniczo pod względem konstrukcji przęsła, sposobu podparcia oraz materiałów użytych do budowy. W związku z tym stanowią cenny materiał badawczy dotyczący wpływu opisywanych zjawisk dynamicznych – szczególnie w aspekcie intensywnej eksploatacji toru doświadczalnego.

Badania uszkodzeń wiaduktów na skutek oddziaływań dynamicznych

Celem badań było określenie wpływu oddziaływań dynamicznych taboru kolejowego na stan techniczny wiaduktów oraz identyfikacja ewentualnych uszkodzeń strukturalnych i potencjal-

do budynków i budowli przeznaczonych do prowadzenia ruchu kolejowego i utrzymania linii kolejowej – w tym przypadku obiektów mostowych.

W analizowanym przypadku pomierzono odległości skrajnych głównych elementów konstrukcyjnych wiaduktów od osi TD. Wyniki zestawiono w tabeli 3.

Metodyka badań propagacji uszkodzeń wiaduktów na skutek oddziaływań dynamicznych obejmowała analizę zmian strukturalnych oraz innych oznak, które mogły sugerować potrzebę wzmocnienia obiektów lub zastosowania dodatkowej ochrony antywibracyjnej. Badania przeprowadzono w ramach

Tabela 3. Odległość podstawy nasypów i filarów wiaduktów W1-W5 od osi toru kolejowego

Table 3. Distance of the base of the embankments and pillars of the W1-W5 viaducts from the axis of the railroad track

Numer obiektu	Odległość podstawy nasypu od osi toru [m]		Odległość filarów od osi toru [m]	
	strona prawa	strona lewa	strona prawa	strona lewa
W1	38,40	30,60	6,80	15,60
W2	13,60	11,70	7,90	6,10
W3	6,40	6,80	6,00	6,30
W4	6,45	6,80	6,05	6,50
W5	6,90	6,00	6,50	5,20

monitorowania stanu technicznego obiektów mostowych oraz okresowych przeglądów podtorza kolejowego na torze doświadczalnym.

Wyniki badań i obserwacji

Główne uszkodzenia opisywanych obiektów w aspekcie oddziaływania drgań taboru kolejowego stwierdzono w obrębie konstrukcji ziemnych stożków skarpowych – głównie ścian czołowych od strony TD. Zidentyfikowano liczne ubytki w umocnieniu skarp, na skutek deformacji górnych stref nasypu przez dekonsolidację mas ziemnych, skutkującą deformacją poszczególnych warstw nośnych nawierzchni na dojazdach do wiaduktów – w strefie połączenia konstrukcji nasypów z konstrukcją wiaduktów. W tabeli 4 zestawiono główne uszkodzenia wiaduktów powstałe na skutek oddziaływania TD w funkcji czasu. Analizowane konstrukcje nośne przęseł wiaduktów nie wykazują uszkodzeń o charakterze strukturalnym oraz takich, które mogłyby świadczyć o ich przeciążeniu po ponad trzydziestu latach eksploatacji. W przypadku podpór skrajnych i pośrednich obiektów nie stwierdzono występowania rys i spękań, które mogłyby świadczyć o ich przeciążeniu oraz uszkodzeń wynikających z odkształceń wywołanych osiadaniami.

Porównując wartości przedstawione w tabeli 3, z granicznymi odległościami tłumienia na podstawie badań modelowych [19] można jednoznacznie stwierdzić, że charakter uszkodzeń wskazuje na stopniowe odkształcenia podstawy nasypów analizowanych wiaduktów w zależności od odległości od źródła drgań.

Tabela 4. Zestawienie głównych stwierdzonych uszkodzeń wiaduktów W1-W5 na skutek obciążeń dynamicznych taboru kolejowego

Table 4. Summary of the main damage identified on the W1-W5 viaducts due to dynamic loads from rolling stock

Widok ogólny	Skala deformacji nawierzchni jezdni	Skala uszkodzeń nasypu
W1		
		
W2		
		
W3		
		
W4		
		
W5		
		

Analiza wpływu obciążeń dynamicznych taboru kolejowego na uszkodzenia obiektów mostowych w funkcji czasu

Analizowane wiadukty W1, W2, W3, W4 i W5 wykazują różne stopnie uszkodzeń, w zależności od odległości od źródła drgań. Uszkodzenia obiektów W1 i W2 są najmniejsze w porównaniu z pozostałymi obiektami. Oznacza to, że podstawa nasypów tych wiaduktów uległa mniejszym odkształceniom w wyniku drgań. W przypadku obiektów W3, W4 i W5 można zaobserwować większy obszar deformacji konstrukcji ziemnych. Uszkodzenia są znacznie większe niż na obiektach W1 i W2. Sugeruje to, że odległość od źródła drgań miała wpływ na stopień odkształceń podstawy nasypów i uszkodzenia konstrukcji. Warto zaznaczyć, że analizy te wynikają z porównania wartości przedstawionych w tabeli 3 z granicznymi odległościami tłumienia z badań modelowych wynoszącymi 11,75 m. Dalsza analiza i interpretacja tych wyników mogą być niezbędne do pełnego i dokładniejszego określenia wpływu odległości od źródła drgań na konstrukcje obiektów mostowych. Obciążenia dynamiczne taboru kolejowego są istotnym czynnikiem wpływającym na stan techniczny obiektów mostowych. W związku z tym, że analizowane mosty nie były remontowane ani przebudowywane od momentu ich budowy, mogą być bardziej podatne na tego rodzaju uszkodzenia w trakcie ich dalszej eksploatacji.

Dyskusja i wnioski

Analiza wpływu obciążeń dynamicznych taboru kolejowego na obiekty mostowe jest złożonym zadaniem, które wymaga współpracy między inżynierami kolejowymi a specjalistami ds. konstrukcji mostowych i gruntów. Zapobieganie uszkodzeniom i utrzymanie obiektów infrastruktury komunikacyjnej w obrębie torów kolejowych w dobrym stanie technicznym jest kluczowe dla bezpieczeństwa i niezawodności systemu kolejowego.

Badania potwierdziły wpływ oddziaływań dynamicznych taboru kolejowego na obiekty mostowe, szczególnie

na podstawie nasypów. Analiza zakresu i propagacji stwierdzonych uszkodzeń konstrukcji ziemnych wykazała ścisłe skorelowanie tych deformacji z odległością podstawy nasypów od toru kolejowego – jako źródła emisji drgań.

Nasypy ziemne, które stanowią dojazdy do wiaduktów, są narażone na działanie dynamicznych obciążeń taboru kolejowego. Drgania te mogą prowadzić do degradacji nasypów, w tym deformacji skarp, osiadania, erozji i zmiany ich kształtu. To z kolei może wpłynąć na stabilność i bezpieczeństwo całego obiektu mostowego.

Wykryte uszkodzenia strukturalne i odkształcenia wymagają dalszej analizy i prac naprawczych, aby zapobiec pogorszeniu się stanu technicznego wiaduktów. Konieczne może być podjęcie działań mających na celu ograniczenie wpływu drgań taboru kolejowego na wiadukty. Przeprowadzone analizy propagacji uszkodzeń potwierdzają naszym zdaniem graniczną odległość tłumienia na podstawie badań modelowych [19] wynoszącą 11,75 m. Tor doświadczalny Instytutu Kolejnictwa zapewni odpowiednie warunki do prowadzenia badań w zakresie ochrony środowiska przed szkodliwym oddziaływaniem kolei, zarówno pod kątem emisji hałasu, badań różnych konstrukcji ekranów akustycznych, jak i wpływu drgań na obiekty budowlane [18]. Z tego względu może stanowić doskonałą bazę badawczą do testów materiałów wibroizolacyjnych stosowanych w budownictwie infrastrukturalnym.

Literatura

- [1] Colaço A, Castanheira-Pinto A, Alves Costa P, Fernández Ruiz J. Combination of experimental measurements and numerical modelling for prediction of ground-borne vibrations induced by railway traffic. *Construction and Building Materials*. 2022; t. 343.
- [2] Li X, Chen Y, Zou C, Wu J, Shen Z. Building coupling loss measurement and prediction due to train-induced vertical vibrations. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2023; t. 164.
- [3] Manso J, Gomes J, Marcelino J. Prediction of ground vibrations induced by rail traffic in Lisbon urban area. *Heliyon*. 2022; 8 (7).
- [4] Nader M, Purta E. Badanie wpływu drgań wybranych pojazdów na człowieka w otoczeniu bliższym i dalszym, *Prace Naukowe „Transport”*, Nr 1/24/2006, ISSN 1230-7823, Wyd. PR. Radom, 2006.

[5] Rosikon A. Budownictwo komunikacyjne na terenach objętych szkodami górnictwami. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1979.

[6] Ciesielski R, Maciąg E. Drgania drogowe i ich wpływ na budynki. WKiŁ, Warszawa, 1990.

[7] Bednarz J. Drgania gruntu wywołane przejazdami pojazdów szynowych. *TTS Technika Transportu Szynowego*. 2012; 19 (9): 2205 – 2214.

[8] Adam M, von Estorff O. Reduction of train-induced building vibrations by using open and filled trenches. *Computers & Structures*. 2005; t. 83, wyd. 1, ss. 11-24.

[9] Sanayei M, Maurya P, Moore JA. Measurement of building foundation and ground-borne vibrations due to surface trains and subways. *Engineering Structures*. 2013; t. 53: 102 – 111.

[10] Bednarz J, Brożek G, Targosz J. Application of finite elements method in the design of road located in the densely built-up residential area. *Journal of KONES*. 2012; 19 (4).

[11] Bondarenko I, Lukoševičius V, Keršys R, Neduzha L. Investigation of Dynamic Processes of Rolling Stock–Track Interaction: Experimental Realization. *Sustainability*. 2023; 15 (6).

[12] Germonpré M, Degrande G, Lombaert G. Periodic track model for the prediction of railway induced vibration due to parametric excitation. *Transportation Geotechnics*. 2018; t. 17: 98 – 108.

[13] Kouroussis G, Connolly DP, Vogiatzis K, Verlinden O. Modelling the environmental effects of railway vibrations from different types of rolling stock: a numerical study. *Shock and Vibrations*, 2015.

[14] Lombaert G, Degrande G, Kogut J, François S. The experimental validation of a numerical model for the prediction of railway induced vibrations. *Journal of Sound and Vibration*. 2006; t. 297, wyd. 3–5, ss. 512 – 535.

[15] Colaço A, Castanheira-Pinto A, Costa PA, Calçada R. Railway ground-borne vibrations: Comprehensive field test development and experimental validation of prediction tools. *Rail Infrastructure Resilience. A Best-Practices Handbook*. Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering. 2022; ss. 209 – 241.

[16] Sheng X, Jones CJC, Thompson DJ. A comparison of a theoretical model for quasi-statically and dynamically induced environmental vibration from trains with measurements. *Journal of Sound and Vibration*. 2003; 267 (3): 621 – 635.

[17] <http://www.ikolej.pl/zaklady-laboratoria-i-osrodki/osrodek-eksploatacji-toru-doswiadczalnego/> dostęp: 21.08.2023 r.

[18] Fijałek M. 20-lecie toru doświadczalnego w Żmigrodzie. *Geneza – przebieg budowy – charakterystyka techniczna*. TTS Technika Transportu Szynowego. 2016; 23 (4): 11 – 29.

[19] Kovalchuk V, Sysyn M, Nabochenko O, Pentsak A, Voznyak O, Kinter S. Stability of the railway subgrade under condition of its elements damage and severe environment. *MATEC Web of Conferences*. 2019; <https://doi.org/10.1051/mateconf/201929403017>.

[20] Ustawa z 28 marca 2003 r. o transporcie kolejowym.

Przyjęto do druku: 28.09.2023 r.