

mgr inż. Michał Jukowski^{1)*}

ORCID: 0000-0003-3750-8281

mgr inż. Bartosz Skulski²⁾

ORCID: 0000-0002-7043-0052

Ocena właściwości dynamicznych kładki dla pieszych po zamontowaniu tłumików masowych

Evaluation of dynamic properties of a footbridge after installation of mass dampers

DOI: 10.15199/33.2022.04.15

Streszczenie. W artykule opisano przykład kładki dla pieszych, w przypadku której konieczne było zastosowanie dodatkowych rozwiązań zwiększających komfort użytkowania przez pieszych. Zabudowa dwóch tłumików drgań (o charakterystyce częstotliwości pokrywającej się z drugą postacią drgań) znacznie poprawiła zachowanie konstrukcji pod obciążeniem dynamicznym w zakresie odpowiedzi dynamicznej konstrukcji nośnej kładki. Ograniczono amplitudę przyspieszeń i przemieszczeń pomostu drugiej postaci drgań (giętno-skrętnej) oraz znacznie zwiększono poziom tłumienia drgań. Analiza przebiegu czasowego przemieszczeń pomostu potwierdziła pracę konstrukcji w zakresie sprężystym.

Słowa kluczowe: analiza dynamiczna; tłumik drgań; współczynnik tłumienia; logarytmiczny dekrement tłumienia.

Abstract. This paper describes an example of the footbridge construction, where it was necessary to apply additional solutions increasing the comfort of the object use for pedestrians. The installation of two vibration dampers (with frequency characteristics coinciding with the second form of vibration) significantly improved the behavior of the structure under the dynamic load in terms of the dynamic response of the footbridge load-bearing structure. The amplitudes of accelerations and displacements of the deck of the second form of vibrations (bending-torsional) were reduced and the vibration damping level was significantly increased. Analysis of the time courses of the bridge deck displacements confirmed the operation of the structure in the elastic range.

Keywords: dynamic analysis; vibration damper; damping factor; logarithmic damping decrement.

Konstrukcje wiszące, o nieproporcjonalnym stosunku szerokości do rozpiętości oraz niewielkiej masie i sztywności wymagają szczegółowej analizy już na etapie projektowania. W [1] opisano procedury projektowania oraz analizy mostów podwieszonych, natomiast w [2] wyniki analizy statycznej i modalnej jednego z najdłuższych w Polsce mostów z przęsłem podwieszonym. W literaturze światowej można znaleźć publikacje prezentujące zagadnienia dotyczące pracy konstrukcji pod obciążeniem dynamicznym [3]. Obecnie opracowano wiele sposobów modelowania obciążenia konstrukcji, które są niezwykle istotne na etapie prac projektowych. W literaturze polskiej dostępne są publikacje dotyczące kładek dla pieszych, m.in. [4].

Kluczowe czynniki decydujące o prawidłowej pracy konstrukcji to duża prędkość i mała masa obiektu. Autorzy [5] podkreślają, iż w przypadku projektowania nowoczesnych kładek dla pieszych konieczna jest analiza dynamiczna. Analiza statyczna jest niewystarczająca. W [6] dowiedziono, iż zmiana sposobu obciążenia może intensywnie wpłynąć na zmianę postaci drgań własnych, zwłaszcza w przypadku konstrukcji wiotkich. Obciążenia dynamiczne wywołane ruchem ludzi zostały szczegółowo opisane w [6]. W przypadku kładek dla pieszych prowadzone są zaawansowane analizy, umożliwiające zbliżony do rzeczywistości sposób odwzorowania obciążeń ruchem pieszych. W [7] opisano w matematyczny sposób siły boczne powstające na skutek ruchu pie-

szych po konstrukcji, a w [8] – interakcję człowiek – konstrukcja oraz jej wpływ na wyniki współczynników tłumienia i częstotliwość drgań swobodnych konstrukcji. W [9] przedstawiono model HiDAC uważany za jeden z najbardziej rozbudowanych i najchętniej stosowanych opisów modelowania interakcji pomiędzy pieszym a konstrukcją oraz równania opisujące interakcję pomiędzy konstrukcją a pieszym, tłumem czy rowerzystą. **Prawidłowa prognoza pracy obiektu pod zadaniem obciążeniem dynamicznym jest kluczowa, ponieważ projektując, można przewidzieć zachowanie konstrukcji i już na wczesnym etapie zaproponować rozwiązania naprawcze.** W lekkich, smukłych kładkach dla pieszych stosowane są tłumiki masowe redukujące amplitudę drgań, co w sposób bezpośredni zwiększa komfort użytkowania obiektu mostowego.

Cel badań i opis konstrukcji

Celem badań przeprowadzonych przez Politechnikę Lubelską wraz z firmą ATEST SP. J. Akredytowane Laboratorium Badawcze była weryfikacja skuteczności zastosowania tłumików masowych TMD na rzeczywistej kładce dla pieszych w Radomiu pod kątem redukcji amplitudy drgań pionowych i poziomych od obciążenia ruchem pieszych. Analizowana konstrukcja to jednoprzęsłowa, wisząca kładka o rozpiętości teoretycznej przęsła 40,20 m i szerokości płyty pomostu 4,50 m (fotografia). Zespoloną płytę pomostu wykonano jako ruszt stalowy z trzema dźwigarami głównymi HEB500 ze stali S355J, poprzecznikami wysokości 0,36 m i wspornikami rozmieszczonymi co 6,70 m oraz

¹⁾ Politechnika Lubelska; Wydział Budownictwa i Architektury

²⁾ ATEST SP.J. Akredytowane Laboratorium Badawcze

^{*)} Adres do korespondencji: m.jukowski@pollub.pl



Analizowana kładka dla pieszych w Rzeszowie
The analyzed footbridge localized in Rzeszów

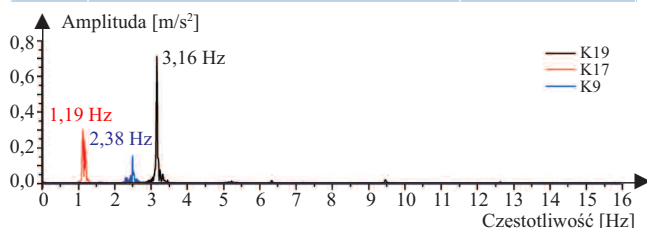
plytą z betonu C30/37 zmiennej grubości $0,16 \div 0,20$ m. Obiekt posadowiono na palach.

W analizie dynamicznej wykorzystano sprzęt umożliwiający rejestrację czasową przebiegu przyspieszenia z częstotliwością próbkowania 5000 Hz wraz z piezoelektrycznymi czujnikami przyspieszeń oraz aparaturę pomiarową wyposażoną w czujniki pojemnościowe przemieszczeń liniowych o rozdzielczości 0,01 mm. Wytypowano sześć punktów do pomiaru przyspieszenia, zlokalizowanych w odległości $0,25L_t$, $0,50L_t$ i $0,75L_t$, gdzie L_t – rozpiętość teoretyczna przęsła (zastosowano po dwa czujniki dwukierunkowe w przekroju poprzecznym i wykonano pomiar przyspieszenia na kierunku pionowym i poprzecznym) oraz cztery punkty do pomiaru przemieszczenia pionowego (w odległości $0,25L_t$ i $0,50L_t$). Dodatkowo analizie poddano wartość przyspieszenia liny nośnej. Wykonano dwadzieścia pięć prób dynamicznych z udziałem dwunastoosobowej grupy pieszych, poruszających się w różnej konfiguracji po obiekcie. Realizowano marsze i biegi swobodne, marsze i biegi synchronizowane, przysiady, podskoki i półprzysiady oraz wymuszenia poprzeczne do osi konstrukcji. Do synchronizacji grupy pieszych użyto taktomierza. Przyjęto takie schematy próbnych obciążeń dynamicznych, aby zidentyfikować częstotliwość drgań swobodnych konstrukcji przęsła kładki, maksymalną amplitudę przemieszczenia, przyspieszenie drgań konstrukcji oraz rzeczywiste współczynniki tłumienia. W tabeli opisano reprezentatywne kombinacje dynamiczne, które zostały wytypowane do analizy.

Na podstawie pomierzonego przebiegu przyspieszenia dokonano analizy widmowej z wykorzystaniem Szybkiej Transformy Fouriera (FFT), co umożliwiło określenie wartości częstotliwości drgań swobodnych konstrukcji przęsła w zależności od kombinacji obciążenia. Na rysunku 1 przedstawiono wybrane widma amplitudowe. Zidentyfikowano trzy dominujące częstotliwości drgań swobodnych konstrukcji. Pierwsza postać drgań, giętna pionowa o wartości 1,19 Hz została wykryta na podstawie kombinacji dynamicznych nr 17 i 18, druga postać giętno-skrotna o wartości 2,38 Hz – na podstawie kombinacji 9, 10 i 12, a trzecia giętna pionowa z przełamaniem w połowie rozpiętości przęsła o wartości 3,16 Hz – na podstawie kombinacji 19. W trakcie badań dynamicznych mierzono przemieszczenia pionowe przęsła (rysunek 2). Niebieskie i zielone

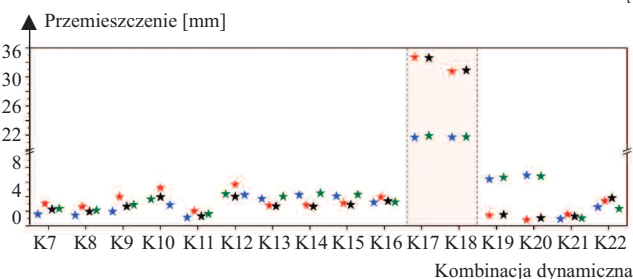
Reprezentatywne kombinacje obciążeń dynamicznych w trakcie badań
Representative combinations of dynamic loads during the tests

Numer kombinacji	Opis kombinacji dynamicznej	Liczba osób (lokalizacja)
7, 8	półprzysiady w $0,50L_t$ z częstotliwością 2,5 Hz	5 (niesymetrycznie)
9, 10	półprzysiady w $0,50L_t$ z częstotliwością 2,5 Hz	12 (niesymetrycznie)
11	półprzysiady w $0,50L_t$ z częstotliwością 2,5 Hz	12 (symetrycznie)
12	półprzysiady w $0,50L_t$ z częstotliwością 2,5 Hz	12 (niesymetrycznie)
13, 14	biegi niesynchroniczne	12
15, 16	biegi synchroniczne	12
17, 18	przysiady synchroniczne w $0,50L_t$ z częstotliwością 1,1 Hz	5 (symetrycznie)
19	półprzysiady w $0,25L_t$ z częstotliwością 3,0 Hz	12 (symetrycznie)
20	półprzysiady w $0,25L_t$ z częstotliwością 3,0 Hz	12 (niesymetrycznie)
21	wchylenia boczne przy balustradzie w $0,25L_t$ synchronicznie z częstotliwością 2,5 Hz	12 (niesymetrycznie)
22	wchylenia boczne przy balustradzie w $0,50L_t$ synchronicznie z częstotliwością 2,5 Hz	12 (niesymetrycznie)

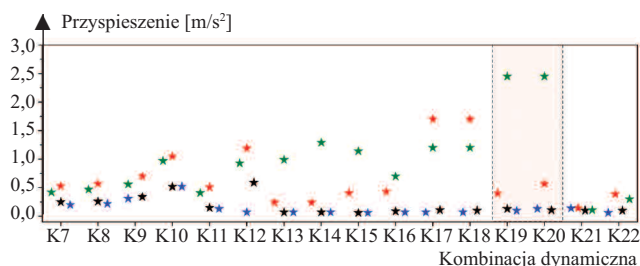


Rys. 1. Widma amplitudowe od kombinacji obciążenia K9, K17 i K19
The spectra of an amplitude for the K9, K17 and K19 load combinations

gwiazdki oznaczają wartości przemieszczeń pomierzonych za pomocą czujników zlokalizowanych w odległości $0,25$ rozpiętości kładki (po jednym czujniku na stronę w przekroju poprzecznym), a czerwone i czarne w odległości $0,50L_t$. **Maksymalne przemieszczenie pionowe w połowie rozpiętości kładki wyniosło 34,7 mm** podczas próby polegającej na synchronicznych przysiadach pięciu osób znajdujących się w połowie rozpiętości kładki. W przypadku kładek, w których dominującym obciążeniem użytkowym w obliczeniach statycznych jest tłum, norma [10] nie narzuca stosowania żadnego współczynnika dynamicznego. Maksymalne przemieszczenie pionowe badanej kładki nie przekracza wartości dopuszczalnej $u_{max} = 174$ mm. Pomierzone wartości szczytowe przyspieszenia, przefiltrowane filtrem dolnoprzepustowym o wartości do 30 Hz, pokazano na rysunku 3. Gwiazdki oznaczają wartości pomierzonych przyspieszeń przęsła: niebieska – na kierunku poprzecznym, a zielona na kierunku pionowym dla czujnika zlokalizowanego w $0,25$ rozpiętości kładki, natomiast czarne na kierunku poprzecznym, a czerwone na kierunku pionowym dla czujnika zlokalizowanego w $0,50L_t$.



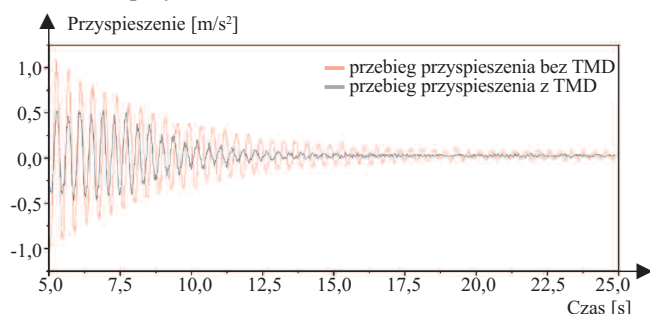
Rys. 2. Wartości przemieszczenia od wybranych kombinacji obciążeń
Fig. 2. Displacement values for selected load combinations



Rys. 3. Wartości przyspieszenia od wybranych kombinacji obciążeń
Fig. 3. Acceleration values for selected load combinations

Maksymalne przyspieszenie pionowe pomostu w punkcie znajdującym się w 0,50L_k kładki wyniosło 1,7 m/s² (w przypadku pasma częstotliwości do 30 Hz) podczas próby polegającej na synchronicznych półprzysiadach z częstotliwością 1,1 Hz grupy pięciu osób znajdujących się przy balustradzie w środku rozpiętości kładki. Natomiast maksymalne przyspieszenie pionowe pomostu w punkcie znajdującym się w 0,25L_k kładki wyniosło 2,45 m/s² podczas próby polegającej na synchronicznych półprzysiadach z częstotliwością 3,0 Hz. W przypadku przyspieszenia poziomego pomostu ekstremum odnotowano w punkcie znajdującym się w 0,50L_k kładki i wyniosło 0,52 m/s² podczas próby polegającej na synchronicznych półprzysiadach z częstotliwością 2,5 Hz grupy dwunastu osób znajdujących się przy balustradzie w środku rozpiętości kładki.

Od spodu płyty pomostu kładki zamontowano dwa tłumiki masowe o wadze 175 kg każdy, sztywności sprężyn odpowiednio 42,8 kN/m i 52,8 kN/m, o częstotliwości własnej 2,49 Hz i 2,76 Hz oraz tłumieniu 10 – 12%. Tłumiki zostały dobrane dla drugiej częstotliwości drgań swobodnych kładki. W celu zwizualizowania skuteczności zastosowanych tłumików na rysunku 4 przedstawiono czasowy przebieg przyspieszenia pionowego pomostu w 0,50L_k po zakończeniu wymuszenia w postaci podskoków z częstotliwością 2,5 Hz dwunastu osób przy balustradzie.



Rys. 4. Przebieg przyspieszenia bez i z zamontowanymi tłumikami
Fig. 4. Acceleration course without and with dampers

Zarejestrowane wartości przyspieszenia oraz przemieszczenia pionowego badanych punktów konstrukcji podczas realizowanych kombinacji dynamicznych posłużyły do wyznaczenia parametrów tłumienia. Wprowadzenie krzywej wykładniczej do przefiltrowanych przebiegów przyspieszenia w przypadku określonej wartości częstotliwości drgań swobodnych konstrukcji pozwoliło na wyznaczenie logarytmicznego dekrementu tłumienia (LDT) oraz współczynnika tłumienia (ζ). Wyniosły one odpowiednio LDT = 0,06, ζ = 0,96% dla pierwszej częstotliwości, LDT = 0,15, ζ = 2,40% dla dru-

giej oraz LDT = 0,08, ζ = 1,30% dla trzeciej. Podczas badania konstrukcji bez zamontowanych tłumików największa wartość tłumienia wyniosła 0,54% zgodnie z [11]. Zastosowanie tłumików zredukowało również znacznie wartość amplitudy drgań. Maksymalna wartość przyspieszenia pionowego kładki bez tłumików wyniosła 4,51 m/s², a poziomego 2,30 m/s² [11].

Podsumowanie

Wyniki badań terenowych wykazały, że w normalnych warunkach użytkowania, a więc podczas chodu i biegu niezsynchronizowanego, piesi nie będą odczuwać drgań konstrukcji. W przypadku wyjątkowych warunków użytkowania, do których zaliczono wymuszenia rytmiczne, poziom komfortu ulegnie obniżeniu. Zarejestrowane maksymalne przyspieszenie drgań pionowych osiągnęło 2,45 m/s² podczas próby wymuszenia trzeciej postaci drgań. Jest ono większe od 0,70 m/s², czyli kryteriów komfortu pieszych wg PN-EN 1990/A1, ale spełnia minimalny poziom komfortu użytkowników kładki wg [12] jako nie większe niż 2,50 m/s². Natomiast zarejestrowane maksymalne przyspieszenie drgań poziomych wyniosło 0,52 m/s² podczas próby wymuszenia drugiej postaci drgań przez skoki synchroniczne dwunastoosobowej grupy osób w 0,50L_k rozpiętości kładki. W tym przypadku jest ono również większe od kryteriów komfortu pieszych wg PN-EN 1990/A1, czyli 0,2 m/s², ale nie przekracza wartości maksymalnej równej 0,8 m/s² wg [12]. Zastosowanie tłumików drgań wyraźnie zredukowało wartości szczytowe amplitud pionowych i poziomych. Zwiększył się również poziom tłumienia drgań, co w sposób odczuwalny pozytywnie wpływa na proces eksploatacji obiektu. W efekcie konstrukcja została oddana do użytkowania.

Literatura

- [1] Biliszczuk J. *Mosty Podwieszone Projektowanie i Realizacja*. Warszawa. Arkady. 2005.
- [2] Bęć J, Jukowski M. Analiza statyczna i modalna Mostu Solidarności w Płocku. *Budownictwo i Architektura*. 2016; vol. 15 nr 1, s. 177 – 189.
- [3] Fryba L. *Vibration of solids and structures under moving loads*. London, UK: Thomas Telford. 1999.
- [4] Flaga A. *Mosty dla pieszych*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności WKŁ 2011.
- [5] Flaga A, Pańtak M, Michałowski T. Examination of own human comfort criteria for footbridges in case of wind-induced vibrations, rozdział w monografii *Environmental effects on buildings, structures and people – investigations, studies, applications*. Politechnika Krakowska, Kraków 2016; 271 ÷ 284.
- [6] Flaga A, Flaga K. Obciążenia dynamiczne kładek dla pieszych spowodowane ludźmi w różnych warunkach ich aktywności. *Monografia Projektowanie, budowa i estetyka kładek dla pieszych*. Politechnika Krakowska; 2003; 29 ÷ 50.
- [7] Racic V, Brownjohn J. Mathematical modelling of random narrow band lateral excitation of footbridges due to pedestrians walking. *Computers and Structures*. 2012. doi: 10.1016/j.compstruc.2011.10.002.
- [8] Erfan Shahabpoor, Pavic A, Racic V, Zivanovic S. Effect of group walking traffic on dynamic properties of pedestrian structures. *Journal of Sound and Vibration*. 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsv.2016.10.017>.
- [9] Ciurej H. Interakcja inercyjnych obciążeń ruchomych i kładki dla pieszych. *Czasopismo Techniczne*. 2012; Z. 1-B/2012.
- [10] PN-85/S-10030 Obiekty mostowe – Obciążenia.
- [11] Sprawozdanie z próbnego obciążenia statycznego i dynamicznego kładki dla pieszych nad ul. Szarych Szeregów w Radomiu (16-020-W). Opracowanie: Politechnika Gdańska, Wilde Engineering Sp. z o.o. Aspekt Laboratorium Sp. z o.o., listopad 2016 r.
- [12] Design of Lightweight Footbridges for Human Induced Vibrations, JCR, 2009. ISBN: 978-92-79-13387-9. doi: 10.2788/33846.

Przyjęto do druku: 25.03.2022 r.