

odpowiednia grubość i parametry materiałowe), dlatego dla uzyskania właściwego (złożonego) efektu minimalizacji lub całkowitej likwidacji mostka cieplnego konieczne jest dokładne wykonanie ocieplenia poszczególnych złączy. Niestety założenia te nie zawsze bywają spełniane, co pokazują przytoczone poniżej przykłady (rys. 6).

BIBLIOGRAFIA

- [1] Ligęza W., Dębowski J., Nowak-Dziesko K., Rojewska-Warchał M., Zagadnienia remontowe i modernizacyjne w budynkach z „Wielkiej Płyty”, w: Naprawy i wzmocnienia konstrukcji budowlanych. Konstrukcje żelbetowe, t. II., Wyd. PZITB Oddział w Gliwicach, 2014, 341-441
- [2] Dębowski J., Wpływ ukrytych wad wykonawczych na trwałość budynków wielkopłytowych, Praca doktorska, Politechnika Krakowska, Kraków 2008
- [3] Adamczyk J., Analiza mostków termicznych w systemowym budownictwie mieszkaniowym z elementów wielkopłytowych – praca dyplomowa pod kierunkiem Jacka Dębowskiego, Politechnika Krakowska, Kraków 2013 r.

WYKORZYSTANE MATERIAŁY

- [1] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz.U. nr 75, poz. 690 z późn. zm. ogłoszonymi w Dz.U. z 2003 r. Nr 33, poz. 270, z 2004 r. Nr 109, poz. 1156, z 2008 r. Nr 201, poz. 1238, z 2009 r. Nr 56, poz. 461, z 2010 r. Nr 239, poz. 1597, z 2012 r. poz. 1289 oraz z 2013 r., poz. 926
- [2] PN-EN6946, Komponenty budowlane i elementy budynku. Opór cieplny i współczynnik przenikania ciepła. Metoda obliczania
- [3] Aprobata Techniczna ITB AT-15-6173/2010, Łączniki klejane HWB do wzmocnienia betonowych ścian warstwowych
- [4] Koelner SA, AT –15 –3248/98 + ANEKS
- [5] PN-EN ISO 13788:2003, Ciepłno-wilgotnościowe właściwości komponentów budowlanych i elementów budynku – Temperatura powierzchni wewnętrznej konieczna do uniknięcia krytycznej wilgotności powierzchni i kondensacja międzywarstwowa – Metody obliczania
- [6] PN-EN ISO 10211:2008, Mostki cieplne w budynkach
- [7] Materiały pomocnicze do PN-91/B-02020, Ochrona cieplna budynków, ITB, Warszawa 1991
- [8] PN-91/B-02020, Ochrona cieplna budynków – Wymagania i obliczenia

Analizy dynamiczne w projektowaniu kładek dla pieszych

Dr inż. Marek Pańtak, Politechnika Krakowska

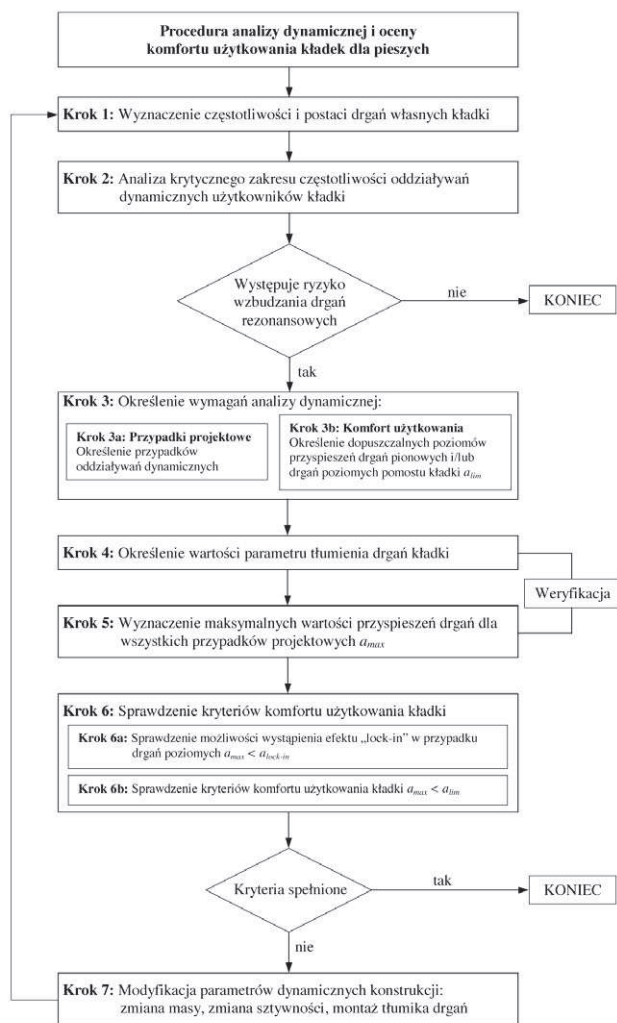
1. Analizy dynamiczne kładek dla pieszych

Kładki dla pieszych o średniej i dużej rozpiętości przęseł często charakteryzują się zwiększoną podatnością dynamiczną na oddziaływania dynamiczne pochodzące od ich użytkowników, powstające w normalnych warunkach użytkowania podczas chodu i biegu lub w warunkach oddziaływań wyjątkowych (akty wandalizmu) w postaci skoków i przysiadów. Duże znaczenia na etapie projektowania konstrukcji odgrywają analizy dynamiczne prowadzące do wyznaczenia poziomu drgań konstrukcji i oceny komfortu jej użytkowania. Analizy te stają się szczególnie istotne w przypadku projektowania smukłych i lekkich stalowych kładek dla pieszych charakteryzujących się małą masą, małą sztywnością oraz niskim poziomem tłumienia drgań. Na etapie projektowania konstrukcji tego typu istotne jest wykonywanie wstępnej analizy dynamicznej konstrukcji obejmującej wyznaczenie jej częstotliwości i postaci drgań własnych oraz analiza krytycznego zakresu częstotliwości związanych z ryzykiem wystąpienia drgań rezonansowych. W przypadku występowania ryzyka rezonansu konieczne jest wykonanie dalszych obliczeń dynamicznych (analiza drgań wzbudzonych) uwzględniających dynamiczne oddziaływania pieszych o naturze codziennej, takich

jak chód i bieg pojedynczych pieszych oraz ich większych grup. W przypadku kładek dla pieszych zlokalizowanych w ciągu tras o dużym natężeniu ruchu pieszych, kładek w centrach miast, kładek w sąsiedztwie dworców, obiektów sportowych oraz obiektów i terenów rekreacyjnych, a także kładek o dużych rozpiętościach przęseł i/lub nowoczesnej (prototypowej, nietypowej) formie konstrukcyjnej, w celu zapewnienia komfortu użytkowania konstrukcji wskazane jest uwzględnianie w analizach dynamicznych, oprócz oddziaływań o naturze codziennej, również oddziaływań rzadkich. Na rysunku 1 przedstawiono ogólny schemat blokowy procedury analizy dynamicznej i oceny komfortu użytkowania kładek dla pieszych. Kolejne kroki analizy pozwalają ustalić podstawowe parametry dynamiczne analizowanej konstrukcji, parametry obciążeń dynamicznych i w efekcie prowadzą do określenia maksymalnej wartości przyspieszeń drgań pomostu kładki i ocenę komfortu jej użytkowania.

1.1. Krytyczny zakres częstotliwości i modele dynamicznych oddziaływań użytkowników

Ważnym wstępnym etapem analizy są kroki nr 1 i 2 dotyczące określenia częstotliwości i postaci drgań własnych analizowanej konstrukcji oraz krytycznego zakresu



Rys. 1. Schemat blokowy procedury analizy dynamicznej i komfortu użytkownika kładek dla pieszych [1]

częstotliwości podstawowych typów dynamicznych oddziaływań użytkowników kładki.

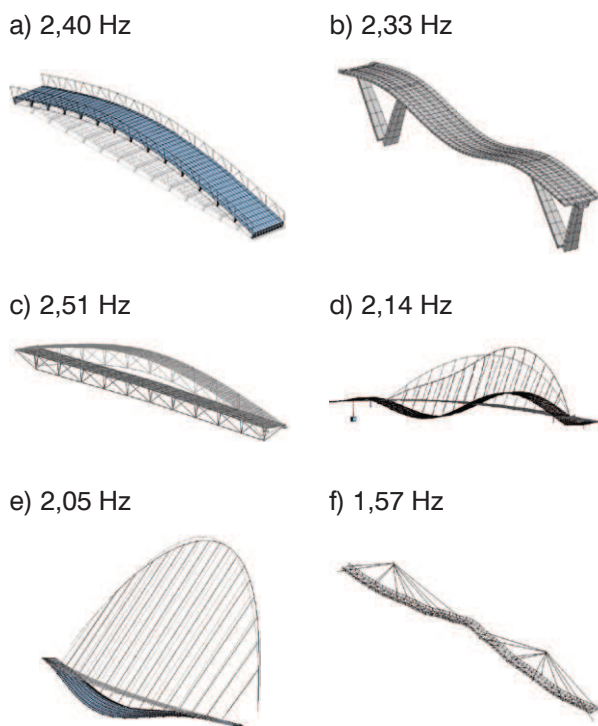
Przedziały częstotliwości charakteryzujące podstawowe typy dynamicznych oddziaływań użytkowników na konstrukcję określono m.in. w [2]:

- chód (zakres całkowity – 1,4–2,4 Hz):
 - wolno – 1,4–1,7 Hz,
 - normalnie – 1,7–2,2 Hz,
 - szybko – 2,2–2,4 Hz,
- bieg (zakres całkowity – 1,9–3,3 Hz):
 - wolno – 1,9–2,2 Hz,
 - normalnie – 2,2–2,7 Hz,
 - szybko – 2,7–3,3 Hz,
- skoki, przysiady (zakres całkowity: 1,3–3,4 Hz):
 - wolno – 1,3–1,9 Hz,
 - normalnie – 1,9–3,0 Hz,
 - szybko – 3,0–3,4 Hz.

Jak wskazują na to liczne przykłady wynikające z analiz dynamicznych oraz dynamicznych badań terenowych różnych typów kładek dla pieszych, konstrukcje o rozpiętościach przęseł przekraczających 30,0 m często charakteryzują się częstotliwościami drgań własnych

mieszczącymi się w przedziałach częstotliwości oddziaływań pieszych (rys. 2).

Stwierdzenie na podstawie pierwszego i drugiego kroku analizy możliwości występowania drgań rezonansowych konstrukcji nie dyskwalifikuje jeszcze projektu i nie oznacza konieczności wprowadzania zmian konstrukcyjnych. W sytuacji tej wymagane jest jednak wykonanie analizy drgań wymuszonych konstrukcji w celu określenia maksymalnych wartości przyspieszeń drgań pomostu. Analizy takie wykonać można np. poprzez numeryczne całkowanie dynamicznego równania ruchu z użyciem zastępczego modelu dynamicznego konstrukcji o jednym stopniu swobody bądź złożonego modelu MES projektowanej konstrukcji obciążonego oddziaływaniami dynamicznymi w postaci sił generowanych przez użytkowników w różnych formach ich aktywności (chód, bieg, skoki). Oddziaływania te, określane terminem sił reakcji podłoża, są funkcjami okresowymi opisywanymi często, lecz nie wyłącznie, za pomocą szeregu Fouriera jako suma składowych harmonicznych o przebiegu sinusoidalnym. Do poprawnego zamodelowania oddziaływań wymagana jest znajomość szeregu parametrów wykorzystywanych w ich



Rys. 2. Przykłady podstawowych postaci i częstotliwości drgań własnych wybranych kładek dla pieszych: a) kładka stalowa o konstrukcji kratownicowej $L_t = 35,0$ m, b) kładka betonowa sprężona o konstrukcji ramowej $L_t = 14,0 + 34,0 + 14,0$ m, c) kładka stalowa o konstrukcji w formie kratownicy przestrzennej $L_t = 45,0$ m, d) kładka stalowa o konstrukcji łukowej $L_t = 45,0$ m, e) kładka o konstrukcji łukowej z pomostem betonowym $L_t = 100,0$ m, f) kładka podwieszona z pomostem zespolonym stalowo-betonowym $L_t = 25,5 + 60,0 + 25,5$ m

opisie np.: długość kroku, prędkość ruchu, czas kontaktu z podłożem, współczynniki wzmocnienia dynamicznego, przesunięcia fazowe składowych harmonicznego oddziaływania itp.

Poniższy szereg Fouriera, przy przyjęciu odpowiednich parametrów, pozwala na określenie siły reakcji podłoża generowanej podczas chodu, biegu oraz skoków.

$$F_p(t) = G + \sum_{i=1}^n G\alpha_i \sin(2\pi f_s t + \varphi_i) \quad (1)$$

gdzie: G – ciężar osoby idącej, biegnącej lub skaczącej ($G \approx 700-800$ N), f_s – częstotliwość chodu, biegu lub skoków przyjmowana za równą częstotliwości drgań własnych analizowanej konstrukcji w celu modelowania oddziaływania o charakterze rezonansowym, t – krok czasowy, α_i – współczynniki Fouriera (współczynniki wzmocnienia dynamicznego) dla poszczególnych składowych harmonicznego, φ_i – przesunięcie fazowe i -tej składowej harmonicznego względem pierwszej składowej harmonicznego, i – numer składowej harmonicznego, n – liczba składowych harmonicznego uwzględnionych w analizie (w przypadku modelowania oddziaływań w postaci chodu i biegu najczęściej uwzględniane

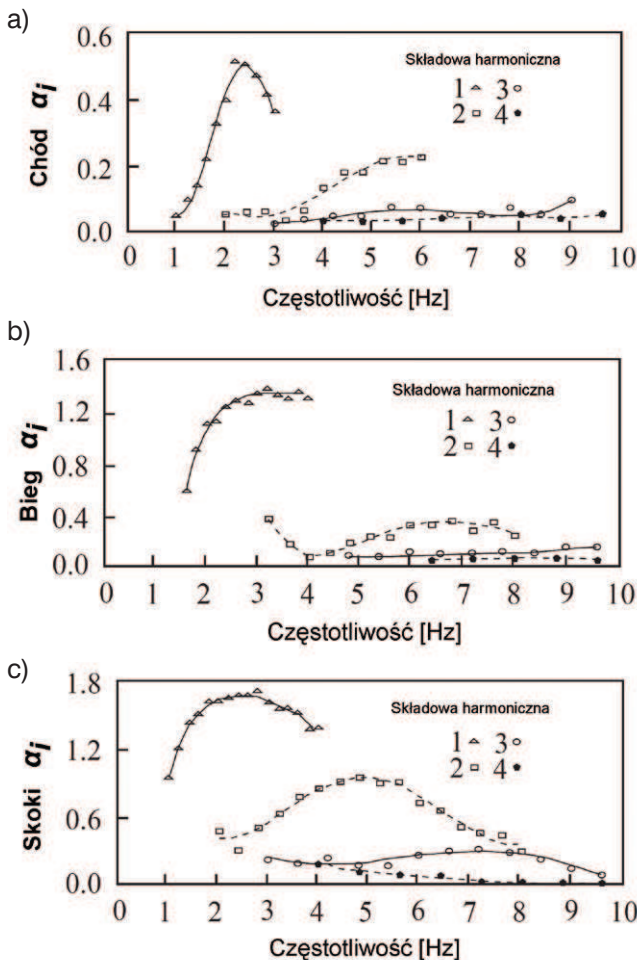
są trzy składowe harmonicznego, w przypadku modelowania oddziaływań w postaci skoków konieczne może być uwzględnienie czterech lub pięciu składowych harmonicznego [2]).

Bez znajomości parametrów α_i oraz φ_i praktyczne wykorzystanie równania (1) jest niemożliwe. W [2] i [3] zalecane jest przyjęcie $\varphi_2 = \varphi_3 = \pi/2$. W literaturze odnalezć można również zalecenia dotyczące przyjmowania wartości α_i . Wartości współczynników α_i dla chodu, biegu i skoków przedstawiono za [4, 5] na rysunku 3.

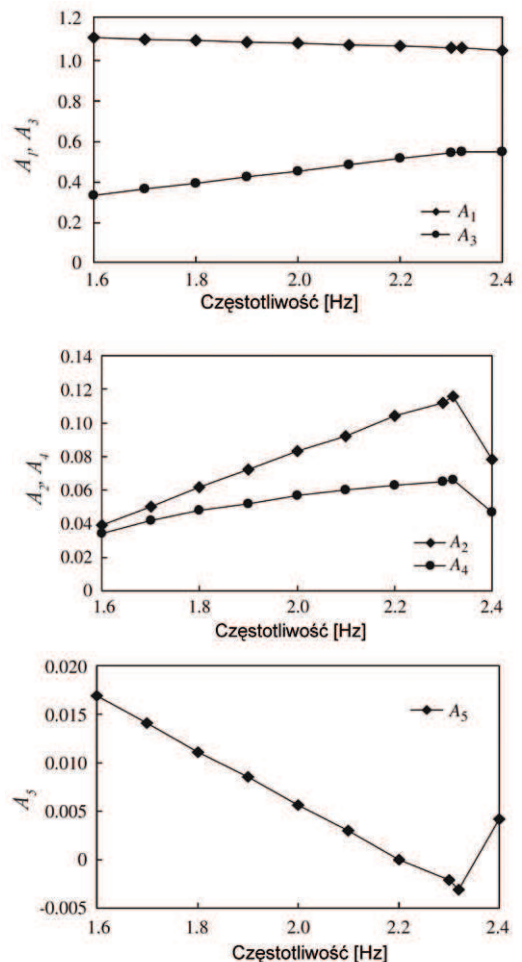
Równanie (1) w przypadku chodu opisuje ciągłą funkcję będącą sumą siły reakcji podłoża od prawej i lewej stopy. W celach analizy niekiedy bardziej przydatny może być opis siły reakcji podłoża generowanej przez jedną stopę. Pozwala na to wykorzystanie równania (2) [6].

$$F_e(t) = G \sum_{i=1}^5 A_i \sin\left[\frac{\pi n}{t_c} t\right], \quad 0 \leq t \leq t_c \quad (2)$$

gdzie: G – ciężar osoby idącej ($G \approx 700-800$ N), t_c – czas kontaktu stopy z podłożem podczas chodu ($t_c \approx 1.32T_p$), T_p – okres chodu (okres stawiania kroków), A_i – amplituda i -tej składowej harmonicznego (rys. 4), t – krok czasowy, i – numer składowej harmonicznego.



Rys. 3. Współczynniki dynamiczne składowych harmonicznego α_i dla: a) chodu, b) biegu, c) skoków [4, 5]

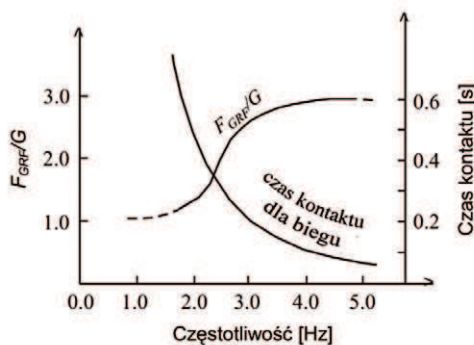
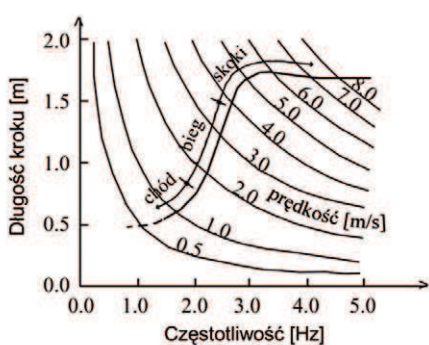


Rys. 4. Amplitudy składowych harmonicznego a) A_1, A_3 , b) A_2 , c) A_5 w przedziale częstotliwości 1.60 Hz - 2.40 Hz [6].

W celu modelowania oddziaływań w postaci biegu, oprócz równania (1), wykorzystać można również równanie (3) [7].

$$F(t) = \begin{cases} Amg \cdot \sin\left[\frac{\pi f_s}{k} \cdot t\right] & \text{dla } i \cdot T < t \leq (i + k) \cdot T \\ 0 & \text{dla } (i + k) \cdot T < t \leq (i + 1) \cdot T \end{cases} \quad (3)$$

gdzie: $A = \Pi/2k$ – współczynnik wzmocnienia dynamicznego, $k = t_c/T$ – współczynnik czasu kontaktu (t_c – czas kontaktu dla biegu – rys. 5), $T = 1/f_s$ – okres biegu, f_s – częstotliwość biegu, m – ciężar osoby biegnącej w [kg], g – przyspieszenie ziemskie w [m/s^2], t – krok czasowy, $i = 1, 2, 3, \dots$



Rys. 5. Zależność długości kroku, prędkości ruchu, maksymalnej amplitudy siły oraz czasu kontaktu z podłożem dla biegu od częstotliwości kroków [8, 9]

Oddziaływania w postaci skoków opisane mogą być także równaniem (4) [10].

$$F(t) = \begin{cases} A \cdot G \cdot \left[0,5 - 0,5 \cos\left(\frac{2\pi \cdot t}{t_c}\right)\right] & \text{dla } t \leq t_c \\ 0 & \text{dla } t_c < t \leq T \end{cases} \quad (4)$$

gdzie: $A = 2T/t_c$ – współczynnik wzmocnienia dynamicznego podczas skoków, G – ciężar osoby skaczącej ($G \approx 700-800$ N), T – okres skoków, t_c – czas kontaktu z podłożem podczas skoków (tab. 1), t – krok czasowy.

Tabela 1. Czas kontaktu z podłożem dla różnych częstotliwości skoków

Typ oddziaływania	Częstotliwość [Hz]	Czas kontaktu t_c [s]	Źródło
Skoki	1.46	0.59	[11]
	1.71	0.51	
	1.90	0.43	
	1.95	0.39	
	2.49	0.25	
	2.69	0.25	
	2.00	0.36±0.04	[10]
	2.50	0.28±0.03	
	3.00	0.24±0.02	
	2.00	0.33	
	2.50	0.25	Badania własne autora
	2.75	0.23	

1.2. Tłumienie drgań

Ważnym zagadnieniem, wywierającym duży wpływ na końcowy wynik obliczeń, jest poprawne określenie parametru tłumienia drgań konstrukcji. Krok nr 4 w powyższym schemacie blokowym wymaga odpowiedniego przyjęcia wartości parametru tłumienia drgań występującego w analizowanej konstrukcji. Często wykorzystuje się w tym celu zalecenia literatury określające przedziały parametru tłumienia drgań np. ułamka tłumienia krytycznego $\xi \approx \delta/2\pi$ (δ – logarytmiczny dekrement tłumienia) dla różnych typów konstrukcji (stalowe, betonowe, zespolone, sprężone) (tab. 2) bądź własne bazy danych parametrów tłumienia. Ustalając wartość parametru tłumienia drgań, pamiętać należy, iż

jego wartość zależna jest m.in. od częstotliwości oraz od poziomu amplitud drgań. Podczas drgań o dużych amplitudach dochodzi do szybszej dyssypacji energii na skutek tarcia między elementami konstrukcji, co przekłada się na szybsze tłumienie drgań (wyższą wartość ułamka tłumienia krytycznego). Po wstępnym oszacowaniu wartości amplitud drgań w przypadku występowania drgań o dużych amplitudach konieczne

Tabela 2. Ułamek tłumienia krytycznego dla różnych typów kładek dla pieszych w przypadku małych amplitud drgań [1]

Typ konstrukcji	Ułamek tłumienia krytycznego ξ		
	Wartość minimalna	Wartość średnia	Wartość maksymalna
Żelbetowa	0,8%	1,3%	1,8%
Sprężona	0,5%	1,0%	1,5%
Zespolona (stal-beton)	0,3%	0,6%	0,9%
Stalowa	0,2%	0,4%	0,6%
Drewniana	1,0%	1,5%	2,0%
Wstęgowa	0,7%	1,0%	1,3%

Tabela 3. Ułamek tłumienia krytycznego dla różnych typów kładek dla pieszych w przypadku dużych amplitud drgań wzbudzanyc celowo (wandalizm) [1]

Typ konstrukcji	Ułamek tłumienia krytycznego ξ
Żelbetowa	5,0%
Sprężona	2,0%
Stalowa – połączenia spawane	2,0%
Stalowa – połączenia śrubowe	4,0%

może okazać się zweryfikowanie przyjętej wartości tłumienia drgań (tab. 3).

W celu ustalenia ekstremalnych wartości przyspieszeń drgań konstrukcji w analizie wykorzystać można wartości minimalne i maksymalne parametru tłumienia drgań dla danego typu konstrukcji.

1.3. Kryteria komfortu użytkowania kładek dla pieszych

Wykonanie oceny komfortu użytkowania kładki wymaga odniesienia wyznaczonych poziomów przyspieszeń drgań do wymogów kryteriów komfortu użytkowania. W tym celu wykorzystać można zalecenia przedstawione w wytycznych [12] (tab. 3), które znacznie dokładniej niż podano to w rozdziale A2.4.3 załącznika A2 normy PN-EN 1990 określają poziomy dopuszczalnych przyspieszeń drgań pionowych i poziomych pomostów kładek dla pieszych. Zapewnienie w konstrukcji wartości przyspieszeń drgań nie przekraczających przyspieszeń zalecanych w [12] dla najwyższej klasy komfortu (klasa 1) pozwalają na zachowanie maksymalnego komfortu użytkowania konstrukcji i całkowite uniknięcie odczuwania drgań przez osoby idące. Klasa komfortu nr 3 znacznie łagodzi wymagania klasy 1, dopuszczając odczuwanie drgań przez pieszych pod warunkiem ich rzadkiego występowania. W przypadku dążenia do uniknięcia odczuwania drgań kładki przez osoby stojące (nie przemieszczające się) wymagania kryteriów komfortu muszą zostać zaostrzone. Dopuszczalne poziomy

Tabela 4. Klasy komfortu użytkowania kładek dla pieszych [12]

Klasa komfortu	Ocena komfortu	Przyspieszenia drgań		Opis
		a_{max} [m/s ²]		
		pion	poziom*	
Klasa 1	Komfort maksymalny	0,0-0,5	0,0-0,15	Drgania nieodczuwalne przez użytkowników kładki będących w ruchu.
Klasa 2	Komfort średni	0,5-1,0	0,15-0,3	Drgania słabo odczuwane przez użytkowników kładki będących w ruchu.
Klasa 3	Komfort minimalny	1,0-2,5	0,3-0,8	Drgania odczuwane lecz nadal tolerowane przez użytkowników kładki będących w ruchu (dopuszczone pod warunkiem rzadkiego występowania).
Klasa 4	Brak komfortu	>2,5	>0,8	Drgania wyraźnie odczuwane, powodujące utrudnienie chodu, nie tolerowane przez użytkowników kładki będących w ruchu.
*) W przypadku drgań poziomych, w celu uniknięcia synchronizacji pieszych z częstotliwością i fazą drgań konstrukcji (efekt sprzężenia zwrotnego, efekt „lock-in”), przyspieszenie we wszystkich klasach komfortu zaleca się ograniczyć do wartości 0,10 m/s ²				

drgań są w takim przypadku dwu-, trzykrotnie mniejsze od określonych w (tab. 4).

2. Podsumowanie

W sytuacji przekroczenia dopuszczalnych poziomów drgań konstrukcji konieczne jest wprowadzenie modyfikacji projektu mających na celu zmianę parametrów dynamicznych konstrukcji. Osiągnąć to można przez modyfikację masy lub sztywności nadmiernie drgającego przęsła bądź przez zwiększenie poziomu tłumienia drgań konstrukcji (montaż tłumika lub zestawu tłumików drgań). W przypadku drgań rezonansowych najbardziej efektywnym sposobem redukcji amplitud drgań jest zwiększenie tłumienia drgań. Amplitudy drgań w rezonansie zależą bowiem odwrotnie proporcjonalnie od współczynnika tłumienia drgań [13]. Analizy teoretyczne dowodzą, iż zmiana masy lub sztywności konstrukcji w celu redukcji amplitud drgań rezonansowych (w granicach możliwych do realizacji w rzeczywistej konstrukcji) nie zapewniażążądanego efektu.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Heinemeyer Ch., Butz Ch. i inni, Design of lightweight footbridges for human induced vibrations. JRC Scientific and Technical Reports, Luxembourg, JRC-ECCS, 2009
- [2] Bachmann H., „Lively” Footbridges – a real challenge. Proc. of the 1st International Conference on Design and Dynamic Behavior of Footbridges – „Footbridge 2002”, OTUA, Paris, 2002, s. 18–30
- [3] Bachmann H., Amman W., Deischl F., et al., Vibration problems in structures – practical guidelines, 2nd edition, Birkhäuser Verlag, Basel Berlin Boston, 1997 (CEB Bulletin d’information No.209: „Vibration problems in structures – practical guidelines”, 1st edition 1991)
- [4] Rainer J. H., Pernica G., Allen D. E., Dynamic loading and response of footbridges, Canadian Journal of Civil Engineering vol. 15, No. 1, 1988, s. 66-71
- [5] Rainer J. H., Pernica G., Vertical Dynamic Forces from Footsteps, Research Paper National Research Council Canada, Institute for Research in Construction, Vol. 1371, 1985
- [6] Li Q., Fan J. et al., Crowd-induced random vibration of footbridge and vibration control using multiple tuned mass dampers, Journal of Sound and Vibration, Vol. 329, 2010, s. 4068-4092.
- [7] Occhiuzzi A., Spizzuoco M.: Running pedestrian dynamic load model for footbridges, Proc. of the 3rd International Conference on Design and Dynamic Behavior of Footbridges – “Footbridge 2008 – Footbridge for urban renewal”, Porto, 2008, s. 259-269
- [8] Wheeler J. E., Prediction and control of pedestrian induced vibration in footbridges. ASCE Journal of the Structural Division, 1982, Vol. 108, No. 9, s. 2045-2065
- [9] Živanović, S., Pavić, A., Reynolds, P., Vibration serviceability of footbridges under human-induced excitation: a literature review. Journal of Sound and Vibration, 2005, Vol. 279, No. 1-2, s. 1-74
- [10] Faisca, R. G., Characterization of dynamic loads associated with human activities, (Caracterização de cargas dinâmicas geradas por atividades humanas), PhD. Thesis, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil, 2003
- [11] Caetano E., Cunha A., Moutinho C., Vandal loads and induced vibrations on a footbridge, Journal of Bridge Engineering, Vol. 16, Iss. 3, 2011, s. 375–382
- [12] SÉTRA, Footbridges – Assessment of vibrational behavior of footbridges under pedestrian loading. Service d’études techniques des routes et autoroutes – SÉTRA, October, 2006
- [13] Lewandowski R., Dynamika konstrukcji budowlanych. Poznań, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2006