

Numeryczne modelowanie oddziaływań wandalistycznych na kładce pieszo-rowerowej

Krzysztof Nepelski ¹, Tomasz Lipecki ²

¹ *Katedra Geotechniki, Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Lubelska,
e-mail: k.nepelski@pollub.pl*

² *Katedra Mechaniki Budowli, Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Lubelska,
e-mail: t.lipecki@pollub.pl*

Streszczenie: W pracy przedstawiono sposób modelowania obciążeń dynamicznych działających na most przeznaczony dla ruchu pieszych i rowerów. Rozważono dwa rodzaje obciążeń dynamicznych wywołanych przez przechodzących przez most ludzi - obciążenie tłumem pieszych oraz potokiem pieszych. Ponadto, uwzględniono dwa rodzaje oddziaływań wandalistycznych, czyli celowej działalności człowieka mającej na celu uszkodzenie lub zniszczenie obiektu. Analizy numeryczne wykonano dla istniejącego mostu pieszo-rowerowego przez Wisłę w Krakowie. W ramach obliczeń numerycznych wyznaczono charakterystyki dynamiczne mostu na podstawie, których przyjęto różne warianty obciążeń dynamicznych. Wszystkie obliczenia wykonano w systemie MES - ALGOR.

Słowa kluczowe: most dla pieszych, oddziaływania dynamiczne, oddziaływania wandalistyczne, Metoda Elementów Skończonych.

1. Wprowadzenie

Kładki dla pieszych są konstrukcjami mostowymi, przenoszącymi niewielkie obciążenia. Stosowanie stosunkowo niewielkich przekrojów poprzecznych oraz niecodzienne kształty całego obiektu sprawiają, iż konstrukcje te stają się bardzo podatne na oddziaływania dynamiczne. Szczególnym problemem pojawiającym się przy projektowaniu mostu dla pieszych są drgania konstrukcji wywołujące dyskomfort pieszego. Problem bardzo często ujawnia się już po oddaniu obiektu do użytku. Usunięcie usterki w tej fazie budowy możliwe jest jedynie poprzez zmiany konstrukcyjne obiektu lub zastosowanie tłumików drgań. Rozwiązania te bywają bardzo kosztowne i mogą stanowić nawet ponad 25% wartości całego obiektu, czego przykładem jest Millenium Bridge w Londynie. Aby zapobiec takim sytuacjom należy już na etapie projektowania wziąć pod uwagę możliwość wystąpienia problemu drgań konstrukcji. Pomocne przy projektowaniu może być między innymi: wykonanie badań na zeskalowanym modelu, analiza numeryczna przy pomocy programu korzystającego z metody elementów skończonych lub doświadczenie projektantów zdobyte przy budowie obiektów o podobnej konstrukcji.

W pracy został przedstawiony sposób numerycznego modelowania dynamicznych oddziaływań wandalistycznych na kładkę dla pieszych z wykorzystaniem programu MES - ALGOR.

2. Opis konstrukcji i modelu MES

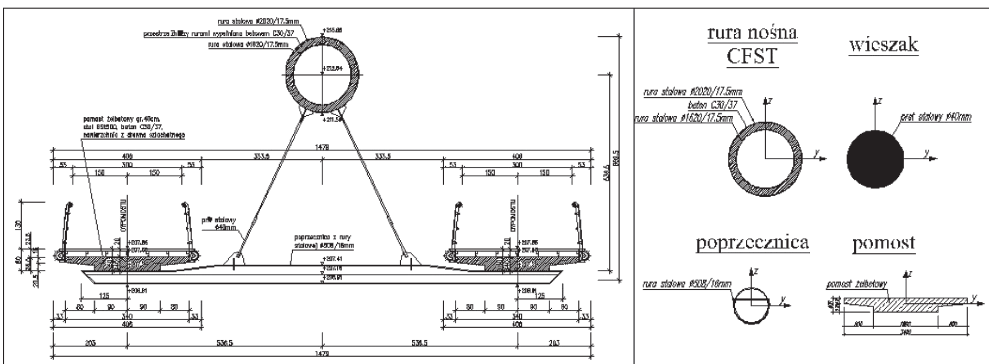
2.1. Konstrukcja kładki

Analizowana kładka pieszo-rowerowa znajduje się w Krakowie w ciągu ulic Mostowej i Brodzińskiego. Podstawą modelu była wersja projektu wykonawczego z 2008 roku [1]. Ostateczna wersja konstrukcji obiektu nieznacznie różni się od modelu przyjętego do obliczeń. W kładce możemy wyróżnić trzy podstawowe elementy: rurę nośną oraz dwa pomosty pieszo-jezdne, które są oparte na poprzecznicach stalowych, podwieszonych do rury za pomocą prętów. Przekrój poprzeczny mostu wraz z zastępczymi przekrojami obliczeniowymi poszczególnych elementów został przedstawiony na Rys. 1.

Głównym elementem nośnym jest zespolona rura stalowo-betonowa o przekroju pierścieniowym, wykonana w technologii CFST (Concrete Filled Steel Tube). Dwie rury stalowe (stal 18G2) o średnicy 2020 mm oraz 1620 mm i grubości ścianki 17,5 mm ustawione są współśrodkowo, a przestrzeń między nimi wypełnia beton C30/37.

Pomosty pieszo-jezdne zaprojektowano jako żelbetowe z betonu C30/37 zbrojonego stalą BSt500. Przekrój płyty teowej, o szerokości 340 cm i grubości 40 cm jest stały wzdłuż całej długości mostu. Pomosty usytuowano symetrycznie względem rury nośnej, nadając im kształt łuku w przekroju poziomym i pionowym. Poprzecznice zaprojektowano z rur stalowych, o średnicy 508 mm i grubości ścianki 17,5 mm. Aby połączyć poprzecznice z płytą żelbetową, ścięto rurę na wysokości 334 mm w części pod pomostem i przyspawano do niej blachę grubości 20 mm z bolcami o długości 200 mm i średnicy 20 mm, Mocowanie poprzecnic do łuku nośnego wykonano za pomocą wieszaków z prętów stalowych (stal 18G2) o średnicy 40 mm.

Konstrukcję analizowanej kładki oparto na przyczółkach żelbetowych z betonu C30/37 zbrojonych stalą BSt500. Obciążenia z przyczółków przekazano na grunt za pomocą pali wierconych o średnicy 100 cm i długości 9-20 m nachylonych pod różnym kątem.



Rys. 1. Rzeczywisty przekrój poprzeczny mostu oraz zastępcze, obliczeniowe przekroje poprzeczne elementów.

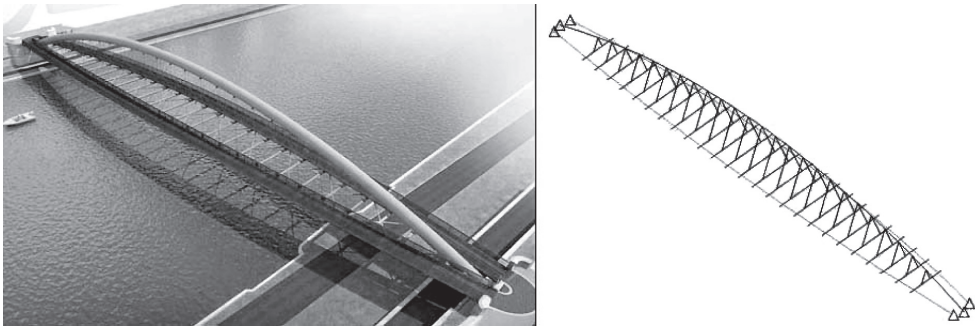
Fig. 1. Real cross-section of the footbridge and equivalent for calculations cross-sections of particular elements.

2.2. Model MES

W celu wykonania analizy stworzono trójwymiarowy model konstrukcji (Rys. 2). Rzeczywistą geometrię zastąpiono układem prętowym o sześciu stopniach swobody w każdym węźle. Każdemu prętowi przypisano ponadto charakterystyki materiałowe przyjęte według norm Eurokod oraz geometryczne wyznaczone na podstawie przekrojów (Rys. 1). Zastępczy moduł sprężystości dla elementu zespolonego wyznaczono z zależności:

$$EI = E_a I_a + 0,6 E_{cm} I_c \quad (1)$$

gdzie: EI – sztywność giętna przekroju zespolonego, E_a – moduł sprężystości stali, I_a – moment bezwładności stalowej części przekroju, E_{cm} – moduł sprężystości betonu, I_c – moment bezwładności betonowej części przekroju. Ten sposób określania sztywności jest stosowany przy analizach programami metody elementów skończonych i został wykorzystany między innymi w badaniach mostów łukowych opisanych w publikacjach [2] i [3].



Rys. 2. Wizualizacja kładki oraz jej model numeryczny.

Fig. 2. Visualization and numerical model of the footbridge.

Charakterystyki geometryczne obliczono dla części nośnych elementów konstrukcyjnych, natomiast wyposażenie mostu jak np. podłoga pomostu, balustrady, łączniki wliczono do ciężaru konstrukcji. Elementy te mają znikomy wpływ na sztywność całej konstrukcji.

Konstrukcję podzielono na cztery zasadnicze grupy elementów: rura nośna, wieżaki, poprzecznice oraz pomosty.

Podczas tworzenia modelu przyjęto, że pręty łączą się w węzłach wyznaczonych przez przecięcie się osi poszczególnych przekroi. W połączeniu pomostu z poprzecznicami ze względu na rzeczywiste położenie węzłów wykorzystano dostępną w programie opcję OFFSET. Oś pomostu w miejscu połączenia z osią poprzecznic w rzeczywistości znajduje się 33 cm wyżej. W modelu numerycznym obydwie osie przyjęto na poziomie poprzecznic, a rzeczywistą geometrię konstrukcji odwzorowano wprowadzając w węzłach pomostu wartość mimośrodru 33 cm za pomocą funkcji OFFSET. Rozwiązanie takie stosowane było również przy analizie numerycznej łukowej kładki dla pieszych przez rzekę Odrę we Wrocławiu [4].

Podpory kładki blokujące wszystkie sześć stopni swobody usytuowano w miejscu przecięcia osi elementów mostu z zakotwieniem w fundamencie. Wizualizacje kładki i przyjęty model numeryczny pokazano na Rys. 2.

2.3. Modele obciążeń

Obciążenia pochodzące od pieszych przyłożono w odpowiednich węzłach modelu za pomocą wyliczonych sił równoważnych. Do ich wyznaczenia użyto modeli obciążeń przyjętych na podstawie dostępnych norm oraz zaproponowano własne. Dążono do tego, by numeryczne modele w jak największym stopniu odpowiadały prawdopodobnym sytuacjom rzeczywistym. Założono możliwość wystąpienia czterech rodzajów oddziaływań, których opis podano w kolejnych podpunktach.

2.3.1. Obciążenie pionowe wywołane wandalem

Założono obciążenie osobą dorosłą wykonującą celowe ruchy w kierunku pionowym (np. przysiady, podskoki) o częstotliwości pokrywającej się z częstotliwością drgań własnych konstrukcji. Za wartość obciążenia przyjęto 1,5 kN.

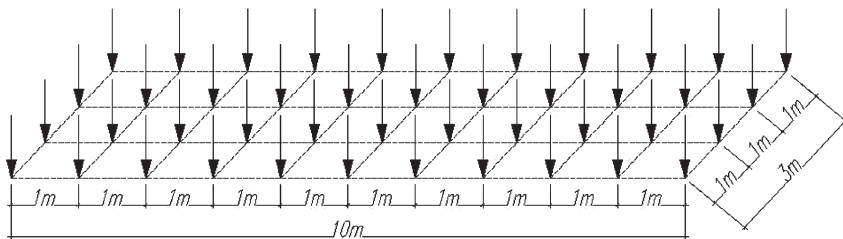
2.3.2. Obciążenie poziome wywołane wandalem

Założono obciążenie osobą dorosłą wykonującą celowe działania w kierunku poziomym (np. potrząśnięcie barierką) o częstotliwości pokrywającej się z częstotliwością drgań własnych konstrukcji. Za wartość obciążenia przyjęto 1,0 kN.

2.3.3. Obciążenie tłumem pieszych

Obciążenie normowe 5 kN/m^2 zaproponowane w pracy [5], służy do obliczeń statycznych mostów i kładek dla pieszych, z uwzględnieniem działania dynamicznego pieszych. Wartość tego obciążenia zastępuje ciężar pieszych wraz z siłą wywołaną dynamiką ruchu przechodnia. Ponieważ obliczenia przeprowadzone zostały za pomocą programu generującego harmoniczne obciążenie, należało stworzyć model, zawierający tylko ciężar pieszych. Efekt działania dynamicznego przechodnia został uwzględniony przez program w trakcie obliczeń.

Stworzono własny model (Rys. 3), symulujący tłum pieszych o zsynchronizowanych ruchach (np. wycieczka, przemarsz grupy żołnierzy), złożony z 44 osób o średnim ciężarze $0,8 \text{ kN}$, ustawionych w odstępach 1 m .

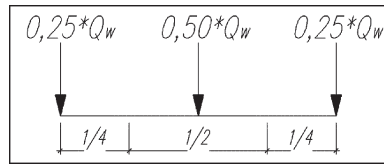


Rys. 3. Model obciążenia tłumem pieszych do analizy dynamicznej.

Fig. 3. Model of the load caused by people crowd used in dynamic analysis.

Jako całkowitą siłę działającą pionowo, pochodzącą od ciężaru tłumy pieszych przyjęto $Q_z = 44 \cdot 0,8 \text{ kN} = 35,2 \text{ kN}$. Natomiast siłę poziomą wywołaną chodem, a więc zmianą środka ciężkości pieszego przyjęto $Q_y = 10\% \cdot Q_z = 3,52 \text{ kN}$.

Ze względu na długość obciążenia 10 m , oraz rozstaw węzłów 5 m w obliczeniach przyjęto, że siła Q_z oraz Q_y rozkłada się na trzy kolejne węzły (Rys. 4) w proporcjach kolejno $25\% - 50\% - 25\%$.



Rys. 4. Rozkład obciążenia tłumem pieszych na węzły.
 Fig. 4. Nodal distribution of the load caused by crowd.

2.3.4. Obciążenie potokiem pieszych

Model stworzono na podstawie pracy [5], przyjmując równomierne obciążenie pieszymi na całej długości pomostu (np. przejście pieszych po zakończeniu masowej imprezy) o wartości wyliczonej ze wzoru:

$$q_{fk} = 2,0 + 120/(L + 30) \tag{1}$$

gdzie L – długość pomostu. Otrzymano wartość równomiernie rozłożonego na pomoście obciążenia potokiem pieszych $q_{fk} = 2,68 \text{ kN/m}^2$, którą zamieniono na siły skupione działające w węzłach modelu. Powierzchnia, z której zebrano obciążenie na węzeł wyniosła $A_t = 5 \text{ m} \cdot 3 \text{ m} = 15 \text{ m}^2$. Wyznaczono wartości siły pionowej $Q_{pz} = q_{fk} \cdot A_t = 40,2 \text{ kN}$ oraz poziomej $Q_{pzt} = 10\% \cdot Q_{pz} = 4,02 \text{ kN}$.

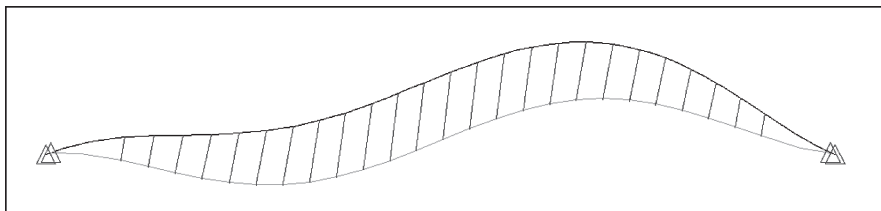
3. Analiza numeryczna

Stworzony model MES oraz modele obciążenia zostały wykorzystane do analizy numerycznej kładki. Wyznaczono przemieszczenia, a następnie naprężenia w elementach konstrukcji. Obliczenia przeprowadzono za pomocą modułów programu ALGOR: Ssap1 – liniowa analiza modalna; Timeload – generowanie obciążenia harmonicznego, Ssap4 – analiza dynamiczna.

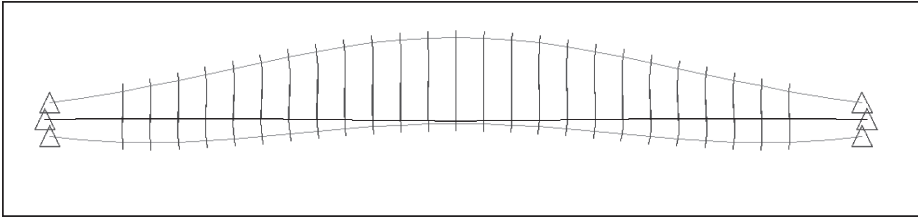
3.1. Analiza modalna

Wyznaczono dziesięć pierwszych postaci drgań własnych oraz określono formy tych drgań. Opis postaci drgań wraz z wartościami zestawiono w Tabeli 1. Rys. 5-10 przedstawiają najistotniejsze postaci drgań w widokach, które najbardziej odzwierciedlają ich formę. Oś konstrukcji przyjęto następująco: X – wzdłuż konstrukcji, Y – w poprzek konstrukcji, Z – wzdłuż wysokości konstrukcji.

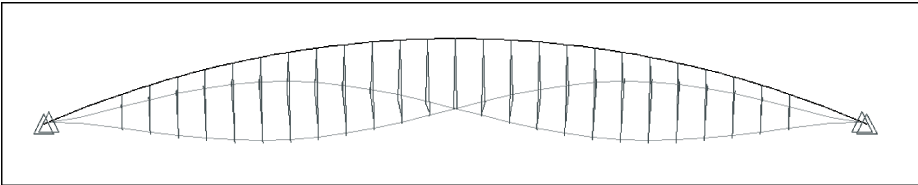
Wyniki uzyskane w analizie modalnej zostały wykorzystane do przyjęcia obciążeń przy obliczeniach dynamicznych.



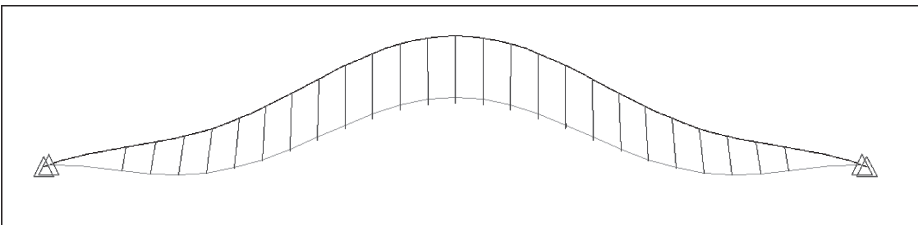
Rys. 5. Druga forma drgań własnych – widok z boku, płaszczyzna XZ.
 Fig. 5. Second mode of natural vibrations – side view, XZ plane.



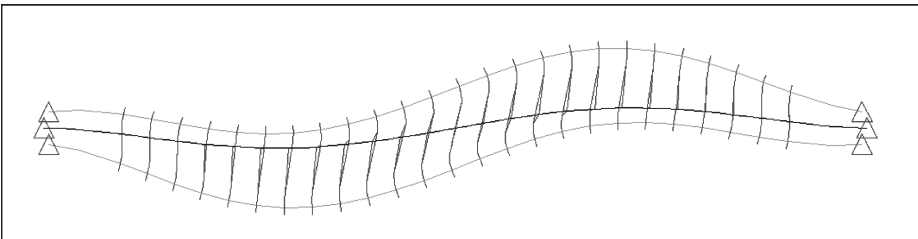
Rys. 6. Trzecia forma drgań własnych – widok z góry, płaszczyzna XY.
 Fig. 6. Third mode of natural vibrations – top view, XY plane.



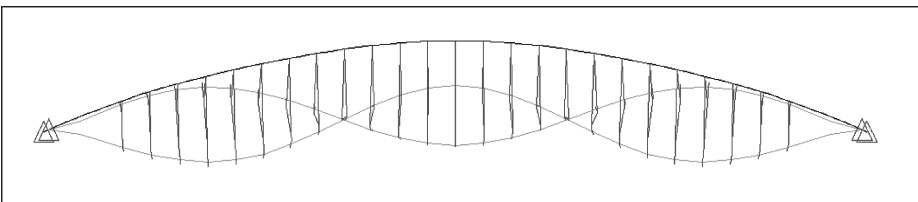
Rys. 7. Czwarta forma drgań własnych – widok z boku, płaszczyzna XZ.
 Fig. 7. Fourth mode of natural vibrations – side view, XZ plane.



Rys. 8. Piąta forma drgań własnych – widok z boku, płaszczyzna XZ.
 Fig. 8. Fifth mode of natural vibrations – side view, XZ plane.



Rys. 9. Szósta forma drgań własnych – widok z góry, płaszczyzna XY.
 Fig. 9. Sixth mode of natural vibrations – top view, XY plane.



Rys. 10. Ósma forma drgań własnych – widok z boku, płaszczyzna XZ.
 Fig. 10. Eighth mode of natural vibrations – side view, XZ plane.

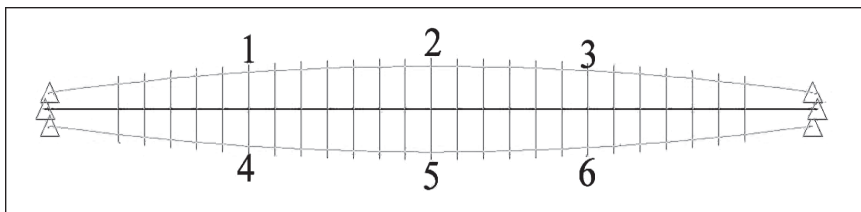
Tabela 1. Wartości częstości drgań własnych.

Table 1. Values of natural frequencies.

Numer	ω	f	T	Forma	
	[rad/s]	[Hz]	[s]	Łuk	Pomosty
1	2,876	0,457	2,184	Giętna pozioma	Giętna pionowa
2	4,570	0,727	1,374	Giętna pionowa	Giętna pionowa
3	6,020	0,958	1,043	-	Giętno-skrętna
4	7,011	1,115	0,896	Giętna pozioma	Giętna pionowa
5	7,480	1,190	0,840	Giętna pionowa	Giętna pionowa
6	8,095	1,288	0,776	-	Giętno(pozioma)-skrętna
7	11,920	1,897	0,527	Giętna pionowa	Giętna pionowa
8	11,936	1,899	0,526	Skrętna	Skrętna
9	13,670	2,175	0,459	Giętna pionowa	Giętna pionowa
10	15,355	2,443	0,409	Giętna pozioma	Giętna pozioma

3.2. Analiza dynamiczna

Siły od obciążenia wandalistycznego założono jako wymuszenia harmoniczne, działające z częstotliwością równą rozpatrywanej częstości drgań własnych o wartościach odpowiednich dla symulowanego obciążenia. Zwroty sił ustalano zgodnie z kierunkiem przemieszczeń danych postaci drgań. Po wstępnej analizie przemieszczeń w poszczególnych postaciach drgań wyodrębniono sześć niebezpiecznych miejsc na moście (Rys. 11), w których działania wandalistyczne mogą spowodować znaczne drgania mostu. Tworząc sytuacje obliczeniowe przykładano siły w wyznaczonych miejscach zależnych od postaci drgań. W obliczeniach, w ramach pojedynczej kombinacji przyjęto jako maksymalną liczbę: czterech wandalii, jeden tłum pieszych oraz potok pieszych na obydwu pomostach. W celu wyeliminowania nierealnych sytuacji przyjęto kryteria doboru obciążeń do częstotliwości drgań własnych konstrukcji według Tabeli 2, w której: f_{min} – minimalna realna częstotliwość wytwarzanego oddziaływania, f_{max} – maksymalna realna częstotliwość wytwarzanego oddziaływania.



Rys. 11. Najniebezpieczniejsze miejsca działań wandalistycznych.

Fig. 11. The most dangerous places of vandalistic actions.

Tabela 2. Kryteria doboru obciążenia do sytuacji obliczeniowych.

Table 2. Criteria of the load selection for computations.

Nazwa wymuszenia	Skrót	Kierunek pionowy		Kierunek poziomy	
		f_{min} [Hz]	f_{max} [Hz]	f_{min} [Hz]	f_{max} [Hz]
Wandal	W	0	1,8	0	1,7
Tłum pieszych	q	1	3	0,5	1,5
Potok pieszych	p	1	2	0,5	1

Kryterium dotyczące tłumy pieszych określono na podstawie pracy [5], natomiast pozostałe na podstawie własnych ustaleń. Stwierdzono, że potok pieszych, a więc gęsty tłum ludzi na całej długości mostu nie jest w stanie poruszać się wykonując więcej niż 2 kroki na sekundę, natomiast ruch poniżej jednego kroku na sekundę będzie niemożliwy do zsynchronizowania przez tak dużą grupę osób. Wandal skacząc na moście jest w stanie wytwarzać obciążenie o maksymalnej częstotliwości 1,8 Hz, natomiast trzęsąc barierką 1,7 Hz. Osiągnięcie wyższych częstotliwości przy przyjętej wartości siły staje się niemożliwe.

Na podstawie wartości częstotliwości i postaci drgań oraz założonych kryteriów, do dalszych obliczeń wybrano częstotliwości: drugą, trzecią, czwartą, piątą, szóstą, ósmą oraz dziewiątą (Tabela 3). Stworzono 23 kombinacje symulujące obciążenia wandalistyczne w wyznaczonych miejscach na moście (Tabela 4). Przykładowe sytuacje obliczeniowe zobrazowano na Rys. 12.

Tabela 3. Zestawienie możliwych wymuszeń, w zależności od częstotliwości i postaci drgań.
Table 3. Possible cases of forced load in dependence on frequency and mode shape of natural vibrations.

Numer częstości	Wartość	Kierunek wymuszenia	Możliwe wymuszenie
	[Hz]		
1	0,457	-	-
2	0,727	pion	W
3	0,958	poziom	W, q, p
4	1,115	pion	W, q, p
5	1,190	pion	W, q, p
6	1,288	poziom	W, q
7	1,897	-	-
8	1,899	pion	q, p
9	2,175	pion	q
10	2,443	-	-

Tabela 4. Zestawienie kombinacji obliczeniowych.
Table 4. The list of load combinations.

Nazwa	Częstość drgań	Wartość częstości	Obciążenie			Opis
			Nr	[Hz]	[kN]	
H1	2	0,727	1,50	W1	pion	2 x dwaj wandy na dwóch pomostach
				W4	pion	
H2	2	0,727	1,50	W1	pion	2 x dwaj wandy na jednym pomoście
				W3	pion	
H3	3	0,958	1,00	W2	poziom	czterej wandy na jednym pomoście
				W5	poziom	
H4	3	0,958	1,00	W2	poziom	czterej wandy na jednym pomoście + potok pieszych
				W5	poziom	
				4,02	p2	

H5	3	0,958	1,00	W2 W5	poziom poziom	2 x dwaj wandalę na dwóch pomostach
H6	3	0,958	1,00 3,52	W2 W5 q5	poziom poziom poziom	2 x dwaj wandalę na dwóch pomostach + tłum pieszych na drugim pomoście
H7	4	1,115	1,50	W1 W3 W4 W6	pion pion pion pion	czterej wandalę na jednym pomoście
H8	4	1,115	1,50	W1 W3 W4 W6	pion pion pion pion	czterej wandalę na dwóch pomostach w różnych miejscach, działają w przeciwfazach
H9	4	1,115	1,50	W1 W3 W4 W6	pion pion pion pion	2 x dwaj wandalę na dwóch pomostach po przekątnej
H10	4	1,115	1,50	W1 W3 W4 W6	pion pion pion pion	2x dwaj wandalę na dwóch pomostach na tej samej długości, działają w przeciwfazach
H11	4	1,115	1,50	W1 W3 W4 W6	pion pion pion pion	czterej wandalę na jednym pomoście w dwóch miejscach, działają w przeciwfazach
H12	4	1,115	1,50 35,2	W1 W6 q4	pion pion pion pion	2 x dwaj wandalę na dwóch pomostach po przekątnej + tłum pieszych na długości jednego z nich
H13	4	1,115	1,50 35,2	W1 W6 q1	pion pion pion	czterej wandalę w jednym miejscu + tłum pieszych w tym samym miejscu
H14	5	1,190	1,50	W2 W5	pion pion	czterej wandalę na jednym pomoście
H15	5	1,190	1,50	W2 W5	pion pion	2 x dwaj wandalę na dwóch pomostach
H16	5	1,190	1,50 40,2	W2 W5 p2	pion pion pion	czterej wandalę na jednym pomoście w jednym miejscu + potok na tym samym pomoście
H17	5	1,190	1,50 35,2	W2 W5 q5	pion pion pion	czterej wandalę na jednym pomoście w jednym miejscu + tłum pieszych na drugim pomoście

H18	6	1,288	1,00	W1	poziom	czterej wandalę na jednym pomoście w jednym miejscu
				W3	poziom	
				W4	poziom	
				W6	poziom	
H19	6	1,288	1,00	W1	poziom	2 x dwaj wandalę na dwóch pomostach na tej samej długości
				W3	poziom	
				W4	poziom	
				W6	poziom	
H20	6	1,288	1,00	W1	poziom	4 wandalę na dwóch pomostach, działają z przesunięciem fazowym
				W3	poziom	
				W4	poziom	
				W6	poziom	
H21	6	1,288	1,00	W1	poziom	2x dwaj wandalę na jednym pomoście, działają w przeciwfazach
				W3	poziom	
				W4	poziom	
				W6	poziom	
H22	6	1,288	1,00	W1	poziom	2x dwaj wandalę na jednym pomoście + tłum pieszych na drugim na długości jednego z nich
			3,52	W3	poziom	
				q4	poziom	
H23	8	1,897	40,2	p1	pion	Potok pieszych na dwóch pomostach
				p2	pion	

Objaśnienia do tabeli:

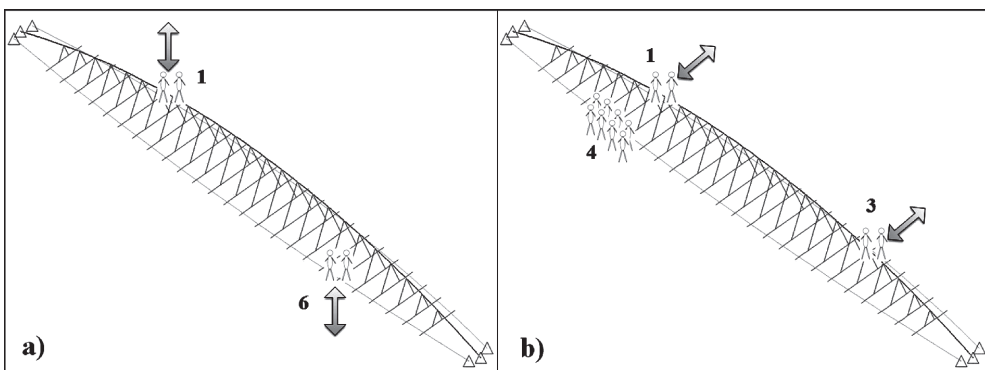
H[*numer*] – Nazwa kombinacji

W[*numer*] – Obciążenie wandalę w miejscu [*numer*]

q[*numer*] – Obciążenie tłumem pieszych w miejscu [*numer*]

p[*numer*] – Obciążenie potokiem pieszych na pomoście [*numer*]

pion, poziom – Kierunek działania obciążenia



Rys. 12. Przykładowe kombinacje obliczeniowe: a) sytuacja H9, b) sytuacja H22.

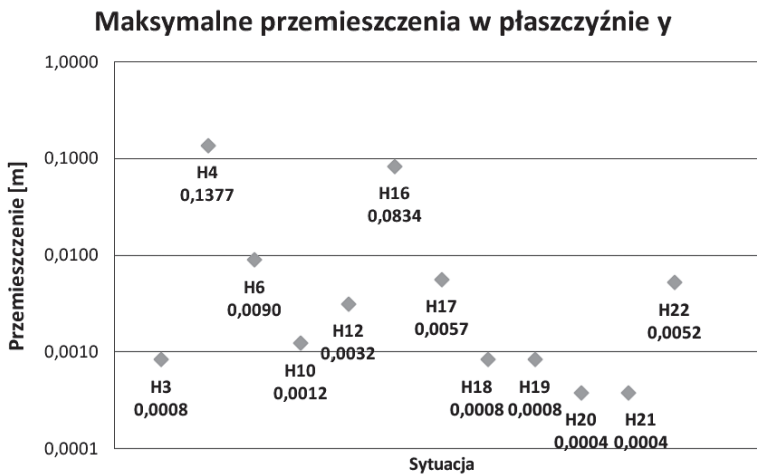
Fig. 12. Exemplary combinations of load: a) case H9, b) case H22.

4. Analiza wyników

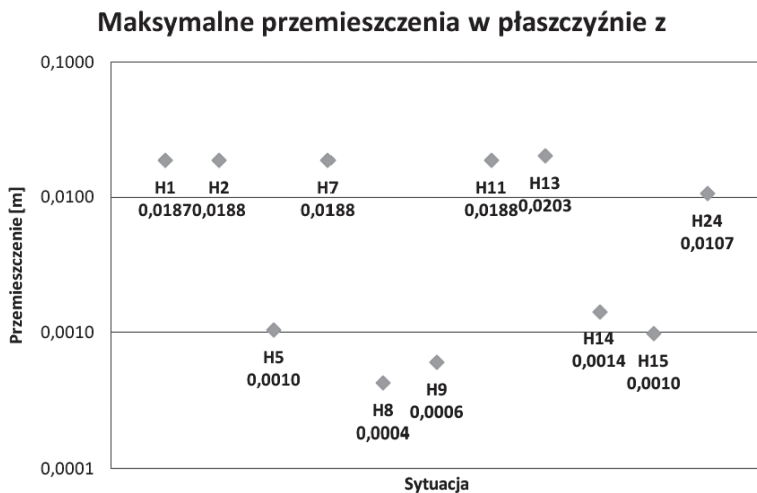
W wyniku analiz kolejnych sytuacji obliczeniowych otrzymano wartości przemieszczeń w czasie. W obliczeniach przyjęto 8192 kroki czasowe o założonej wartości pojedynczego kroku 0,01 s. Z kolejnych sytuacji obliczeniowych wybrano wartości maksymalne i zestawiono je na wykresach w zależności od kierunku maksymalnego przemieszczenia (Rys. 13-14). Ponadto, na podstawie wartości przemieszczeń oraz częstotliwości obciążeń wymuszających, wyznaczono przyspieszenia pręęła według zależności:

$$a = (2 \cdot \pi \cdot f)^2 \cdot u_{ef} \tag{2}$$

gdzie: f – częstość drgań kładki, u_{ef} – wartość efektywna przemieszczenia. Wartości przemieszczeń zestawiono w Tabeli 5.



Rys. 13. Maksymalne przemieszczenie w kierunku y.
 Fig. 13. Maximum displacement in y direction.



Rys. 14. Maksymalne przemieszczenie w kierunku z.
 Fig. 14. Maximum displacement in z direction.

Tabela 5. Wartości przemieszczeń i przyspieszeń kładki w analizowanych przypadkach obciążenia.

Table 5. Values of displacements and accelerations of the footbridge in analysed cases of load.

Sytuacja obliczeniowa	Numer postaci	Częstość drgań [Hz]	Płaszczyzna	Wartość przemieszczenia [m]	Przyspieszenie przęsła [m/s ²]
H1	2	0,727	pion	1,87E-02	0,39
H2	2	0,727	pion	-1,88E-02	-0,39
H3	3	0,958	poziom	8,40E-04	0,03
H4	3	0,958	poziom	1,38E-01	4,99
H5	3	0,958	pion	-1,04E-03	-0,04
H6	3	0,958	poziom	8,95E-03	0,32
H7	4	1,115	pion	1,88E-02	0,92
H8	4	1,115	pion	-4,22E-04	-0,02
H9	4	1,115	pion	-6,03E-04	-0,03
H10	4	1,115	poziom	1,23E-03	0,06
H11	4	1,115	pion	1,88E-02	0,92
H12	4	1,115	poziom	-3,16E-03	-0,16
H13	4	1,115	pion	-2,03E-02	-1,00
H14	5	1,190	pion	1,43E-03	0,08
H15	5	1,190	pion	-9,82E-04	-0,05
H16	5	1,190	poziom	-8,34E-02	-4,67
H17	5	1,190	poziom	-5,65E-03	-0,32
H18	6	1,288	poziom	-8,40E-04	-0,06
H19	6	1,288	poziom	-8,40E-04	-0,06
H20	6	1,288	poziom	3,80E-04	0,02
H21	6	1,288	poziom	3,81E-04	0,02
H22	6	1,288	poziom	5,22E-03	0,34
H23	8	1,899	pion	-1,07E-02	-1,52

Na podstawie wartości maksymalnych przemieszczeń można stwierdzić, że do najniebezpieczniejszych sytuacji dochodzi, gdy na moście znajduje się duża grupa ludzi, a więc tłum lub potok pieszych. Ponadto, przy określaniu stopnia niebezpieczeństwa danej sytuacji należy wziąć pod uwagę wartość przyspieszenia przęsła.

Maksymalne przemieszczenie przęsła 0,138 m otrzymano w sytuacji obliczeniowej H4 (częstość trzecia). W sytuacji tej na moście znajduje się potok pieszych oraz czterech wandalów oddziałujących siłami poziomymi. Podobna sytuacja H16, gdzie te same oddziaływania wykonywane były z częstością piątą w kierunku pionowym, wywołała przemieszczenia 0,083 m. Należy dodać, że w sytuacjach tych otrzymano również znaczne wartości przyspieszeń pomostów. Sytuacje te wraz z sytuacją H23, gdzie otrzymano także znaczące przyspieszenie pomostu połączone z przemieszczeniem pionowym 0,011 m, należy zaliczyć do najbardziej niebezpiecznych na moście.

Pomijając sytuacje, w której uczestniczyła większa liczba przechodniów, najbardziej niebezpieczne okazały się kombinacje, gdy na moście znajdowało się czterech wandalów działających w jednym miejscu lub rozdzielonych na dwie dwuosobowe grupy.

W sytuacjach H1, H2, H7 oraz H11 wystąpiły podobne przemieszczenia pomostu w kierunku pionowym o wartości 0,019 m. W każdym z tych przypadków występowało czterech wandalów oddziaływujących na obiekt w kierunku pionowym. Należy zaznaczyć, iż przyspieszenia pomostu, przy tych samych przemieszczeniach, były ponad dwukrotnie wyższe w sytuacjach H7 oraz H11. Wynika to z oddziaływania przez wandalów z wyższą częstotliwością i będzie miało wpływ na odczucia przechodniów. Większe przyspieszenie powoduje wzrost dyskomfortu pieszego.

Sytuacje H5, H10, H14 oraz H15 wywołały przemieszczenia w przedziale $9,8 \cdot 10^{-4}$ m do $14,3 \cdot 10^{-4}$ m w kierunku poziomym. Znaczne przemieszczenia spowodowane były również działaniem czterech wandalów razem lub w dwuosobowych grupach. Wartości przyspieszeń w tych sytuacjach są niskie i zbliżone do siebie.

5. Wnioski

Wykonana analiza zachowania się mostu dla pieszych pod wpływem oddziaływań wandalistycznych pozwala na przewidzenie reakcji konstrukcji w warunkach rzeczywistych. Analiza taka jest szczególnie istotna dla smukłych obiektów mostowych podatnych na oddziaływania dynamiczne, gdyż ich głównym problemem projektowym jest spełnienie warunków stanu granicznego użyteczności.

Obliczenia dynamiczne rozważanego obiektu wskazują na to, iż drgania kładki mogą wywoływać dyskomfort pieszego tylko w przypadku obciążeń wywołanych dużą liczbą przechodniów. Działania wandalistyczne pojedynczych osób nie powinny wywoływać dyskomfortu u pozostałych użytkowników obiektu.

Rozważając komfort pieszych na kładce, należy zwrócić uwagę nie tylko na maksymalne przemieszczenia konstrukcji, lecz również na ich częstotliwość. Dlatego też kryteria komfortu uwarunkowane są najczęściej przyspieszeniem przęsła. W pracy [6] przedstawiono porównanie otrzymanych w opisywanej analizie wartości przyspieszeń przęsła do trzech niezależnie ustalonych kryteriów komfortu.

Interpretując wyniki należy zwrócić uwagę na założenia przyjęte do obliczeń. Model kładki został sprowadzony do konstrukcji prętowej, a analizę przeprowadzono z założeniem liniowej zależności naprężenia – odkształcenia. W przeprowadzonych badaniach nie uwzględniono sprzężenia zwrotnego pomiędzy drganiami mostu, a jego użytkownikami. Maksymalną ilość pojedynczych wandalów przyjęto równą czterem.

Literatura

- [1] Getter A., Wojciechowski T., *Projekt wykonawczy kładki pieszo-rowerowej w ciągu ulic Mostowa-Brodzińskiego*, Kraków, 2008.
- [2] Chen B., Peng G., *Design and construction of Hechang Bridge, Quanzhou, China*, ARCH'07 – 5th International Conference on Arch Bridges, 2007, 891-896.
- [3] Chen B., Peng G., *Numerical Analysis on construction of Dongguan Shuidao Bridge by cantilever cable stayed method*, Chinese-Croatian Joint Colloquium Construction of Arch Bridges, 2009, 369-376.

- [4] Biliszczyk J., Barcik W., Prabucki P., Rudze J., Woźniak A., *Budowa kładki Słodowej przez Odrę we Wrocławiu*, Inżynieria i Budownictwo 9 (2003) 475-480.
- [5] PN-EN 1991-2 Eurokod 1: *Oddziaływania na konstrukcje. Część 2: Obciążenia ruchome mostów*.
- [6] Nepelski K.: *Analiza statyczna i dynamiczna łukowej kładki pieszo-rowerowej*, Praca magisterska, Wydział Budownictwa i Architektury Politechniki Lubelskiej, Lublin, 2010.

Numerical modelling of vandalistic actions on footbridge for pedestrians and bicycles

Krzysztof Nepelski ¹, Tomasz Lipecki ²

¹ *Department of Geotechnics, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Lublin University of Technology, e-mail: k.nepelski@pollub.pl*

² *Department of Structural Mechanics, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Lublin University of Technology e-mail: t.lipecki@pollub.pl*

Abstract: The paper deals with numerical modelling of dynamic load acting on a footbridge. Two cases of loads caused by passing people have been considered: the load caused by crowd of people and by random stream of people. Moreover, two cases of vandalistic actions have been taken into account. Vandalistic action is such purposeful human action which leads to damage or destruction of an object. Numerical analyses have been carried out for the real footbridge for pedestrians and bicycles traffic over Vistula River in Cracow. Modal analysis was the first step of calculations and on this basis various variants of dynamic actions have been assumed. All computations have been performed with use of FEM system - ALGOR.

Keywords: footbridge, dynamic action, vandalistic action, Finite Element Method.