

**Jarosław BĘC, Andrzej FLAGA, Tomasz MICHAŁOWSKI,  
Jerzy PODGÓRSKI**

## **CHARAKTERYSTYKI DYNAMICZNE LEKKICH KŁADEK WISZĄCYCH I PODWIESZONYCH**

### **ABSTRACT**

In the paper interesting structural solutions of different typer of suspended and cable-stayed footbridges are presented. For these structures experimental investigations of dynamical characteristics were performed in situ. Basic characteristic results, concerning natural frequencies and damping parameters are given.

### **WSTĘP**

W Polsce zbudowano wiele lekkich kładek dla pieszych, podatnych na dynamiczne działanie wiatru, w tym i na niestateczność aerodynamiczną. Zachowanie się lekkiej kładki zależy w dużej mierze od sposobu zapewnienia odpowiedniej sztywności przestrzennej przęsła. W pracy dokonano przeglądu rozwiązań konstrukcyjnych lekkich kładek wiszących i podwieszonych, oraz przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych, dotyczących charakterystyk dynamicznych tych kładek.

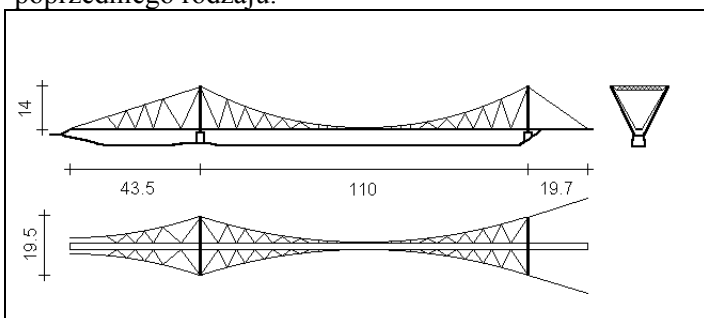
Praca realizowana jest w ramach grantu KBN nr 7 T07E 012 12 pt. "Analiza dynamicznego oddziaływania wiatru na wybrane konstrukcje wiszące w warunkach sprzężeń aerodynamicznych".

### **PRZEGLĄD ROZWIĄZAŃ KONSTRUKCYJNYCH**

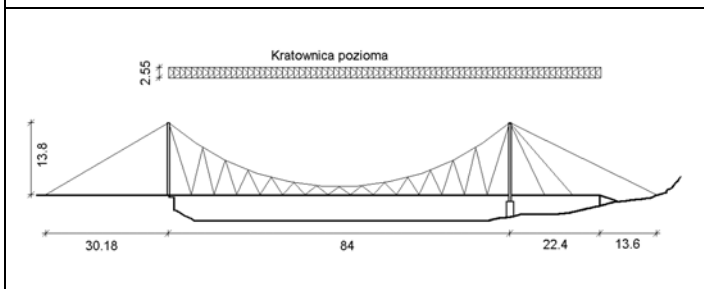
Pochylony układ lin zastosowany jest np. w kładkach wiszących w Tropiu (rys. 1) i w Rożnowie. W takiej konstrukcji liny przenoszą zarówno ciężar własny mostu, jak i siły poziome od wiatru, oraz siły powodujące skręcanie przęsła. Kładka taka jest

bardzo lekka, lecz jednocześnie jej sztywność przestrzenna z uwagi na przemieszczenia pionowe, poziome i kąt skręcenia jest mała.

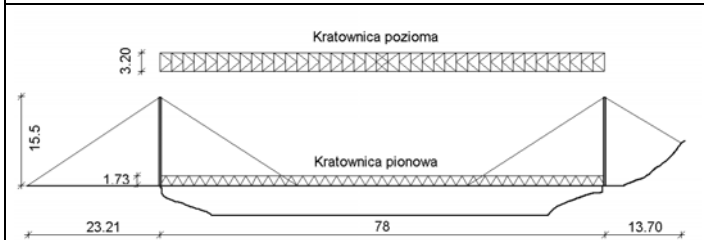
Przęsło kratowe to najczęściej chyba spotykany typ stężenia poziomego kładki. Zastosowany np. w kładkach dla pieszych lub pieszo-jezdnym w Nowym Sączu, Ustroniu-Polanie, Tylmanowej (rys. 2 i 3) i Rzeszowie. Kładka tego typu jest konstrukcją bardzo sztywną przestrzennie, ale jednocześnie około czterokrotnie cięższą od poprzedniego rodzaju.



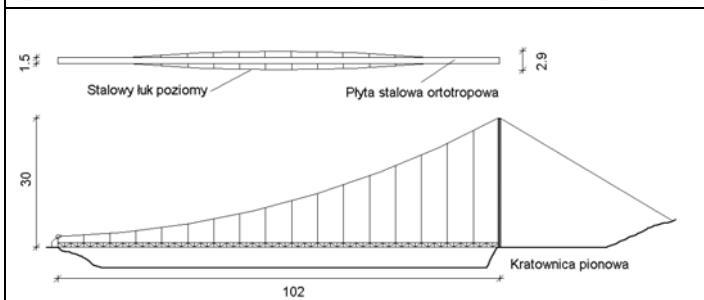
Rys. 1. Kładka dla pieszych w Tropiu



Rys. 2. Kładka dla pieszych w Tylmanowej



Rys. 3. Kładka pieszo-jezdna w Tylmanowej



Rys. 4. Kładka dla pieszych w Piwnicznej

Spośród innych typów kładek wymienić warto kładki w Myślenicach i w Piwnicznej. W przypadku kładki w Myślenicach zastosowano dwie pary dodatkowych lin

poziomych, usztywniających przede wszystkim poziomo, ale także skrętnie, przeszło kładki. Stężenie tego typu zastosowano po kilkakrotnej dywergencji kładki, która pod wpływem wiatru odwróciła się o 180° wokół osi podłużnej. Innym typem rozwiązania problemu jest zastosowanie poziomych łuków stalowych, jak w przypadku kładki w Piwnicznej (rys. 4). Widok wszystkich kładek od strony górnej wody.

## POMIARY DRGAŃ WŁASNYCH I PRZYKŁADOWE WYNIKI

Na opisanych kładkach dokonano pomiarów dynamicznych, głównie drgań własnych, czujnikami drogi i akcelerometrami, założonymi w połowie i w jednej czwartej rozpiętości przęsła. Wzbudzane były kolejno drgania giętne pionowe, poziome i skrętne przęsła, zarówno symetryczne, jak i antysymetryczne. Drgania wzbudzane były przez balansowanie ciałem wielu osób, znajdujących się na kładce. Każdy z zarejestrowanych sygnałów pomiarowych poddano analizie spektralnej, wykonując dla nich szybką transformację Fouriera (tzw. FFT). Następnie, wokół odnalezionych lokalnych ekstremów spektrum, odpowiadających częstotliwościom drgań własnych konstrukcji, zastosowano filtry wąskopasmowe. Otrzymano w ten sposób gasnące drgania sinusoidalne o znanej częstotliwości, w postaci  $A_i e^{-\beta i t} \sin(\omega^* i t)$ ,

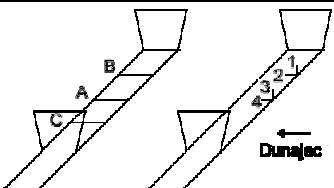
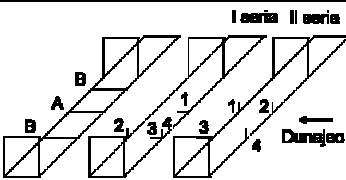
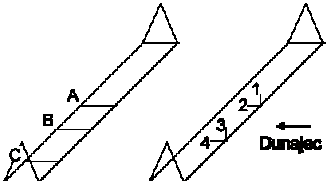
Kładka dla pieszych w Tropiu				
	Pomiary	Wymuszenie	Uwagi	
	Jedna seria pomiarów, 4 czujniki	A	V, H, T	A- połowa rozpiętości, B, C 1/4 rozpiętości, raz z jednej, raz z drugiej strony
		B	V, H, T	
C		V <sub>1</sub> , V <sub>2</sub> , H, T		
Kładka dla pieszych w Tylmanowej				
	Pomiary	Wymuszenie	Uwagi	
	I seria, 4 czujniki	A	V, H, T	A – w połowie rozpiętości, B – równocześnie z obu stron w 1/4 rozpiętości
		B	V, H, T	
	II seria, 4 czujniki	A	V, H, T	
B		V, H, T		
Kładka pieszo-jezdna w Tylmanowej				
	Pomiary	Wymuszenie	Uwagi	
	Jedna seria pomiarów, 4 czujniki	A	V <sub>1</sub> , S <sub>1</sub> , V <sub>2</sub> , T, S <sub>2</sub> , H	A - w połowie rozpiętości, B – przy zakotwieniu lin (ok. 1/3 rozp.), C - w 1/8 rozp., S <sub>1</sub> – przejazd traktora z przyczepą, S <sub>2</sub> – uderzenie poziome, S – wymuszenie liny
		B	H, V, T	
		C	V <sub>1</sub> , V <sub>2</sub>	
S				

Tabela 1 – ciąg dalszy					
Kładka dla pieszych w Piwnicznej					
	Pomiary	Wymuszenie		Uwagi	
	Jedna seria pomiarów, 4 czujniki	A	V <sub>1</sub> , V <sub>2</sub> , H, T		A, C – w ¼ rozpiętości, raz z jednej, raz z drugiej strony, B – w połowie rozp., S – przejście ludzi przez kładkę w obie strony
		B	V, H, T		
		C	V, H, T		
		S			

gdzie  $(\omega_i^*)^2 = (\omega_i)^2 - (\beta_i)^2$ ,  $\omega_i$  – i-ta częstość kołowych drgań własnych nietłumionych,  $A_i$  – ich amplituda,  $\beta_i$  – parametr tłumienia, odpowiadający i-tej częstości. Po aproksymacji tak otrzymanych przebiegów drgań, metodą najmniejszych kwadratów, wyznaczono logarytmiczne dekrementy tłumienia, wg wzoru  $\Delta = (\beta_i \omega_i) / \sqrt{1 - (\beta_i / \omega_i)^2}$ . Przykładowe wyniki przedstawiono w tabelach 1, 2 i 3.

Tab. 2. Częstości drgań własnych kładek przy różnych wymuszeniach						
Częstotliwości drgań własnych [Hz]						Wymuszenie
f <sub>1</sub>	f <sub>2</sub>	f <sub>3</sub>	f <sub>4</sub>	f <sub>5</sub>	f <sub>6</sub>	
Kładka dla pieszych w Tropiu						
2,39258	4,39453	4,78516				A V
1,17188	2,34375					A H
1,2207	2,39258					A T
1,85547	2,05078	2,24609	2,49023	4,49219		B V
0,73242						B H
1,17188	2,24609					B T
2,05078	4,24805					C V <sub>1</sub>
2,73438	3,125	5,56641	6,15234			C V <sub>2</sub>
1,17188	2,29492					C H
1,17188	2,29492					C T
Kładka dla pieszych w Tylmanowej						
1,36719						I A V
0,87891	1,75781					I A H
1,36719						I A T
1,36719						I B V
0,87891	1,36719	2,00195				I B H
1,41602	2,14844					I B T
0,87891	1,26953	2,58789	5,95703			II A V
0,83008	1,70898	2,53906	5,07813	5,95703		II A H
1,31836	2,44141	5,41992				II A T
1,2207	2,44141	3,56445				II B V
1,36719	1,5625					II B H
0,87891	1,75781	5,41992				II B T
Kładka pieszo-jezdna w Tylmanowej						
1,17188	2,29492	4,05273	6,93359			A V <sub>1</sub>

Tabela 2 – ciąg dalszy						
1,2207	2,14844	3,22266	4,05273	9,27734		A S <sub>1</sub>
1,26953	2,24609	4,05273	5,56641			A V <sub>2</sub>
2,34375	4,6875	9,32617				A T
1,36719	2,39258	4,05273	5,61523			A S <sub>2</sub>
1,17188	2,39258					A H
1,17188	2,39258					B H
1,17188	2,34375					B V
2,24609	6,68945	8,88672				B T
3,22266	4,00391	5,61523				C V <sub>1</sub>
1,17188	2,29492	2,92969	3,22266	4,05273	5,61523	C V <sub>2</sub>
1,17188	2,97852	5,95703				S
Kładka dla pieszych w Piwnicznej						
1,07422	2,00195	2,19727	4,24805	5,17578		A V <sub>1</sub>
1,07422	2,19727	2,39258				A V <sub>2</sub>
0,78125	2,19727					A H
0,78125						A T
1,07422	2,19727					B V
0,78125	1,5625	3,90625				B H
0,78125	1,5625	3,85742				B T
0,97656	2,00195	3,90625				C V
0,97656	2,00195	3,90625				C H
0,78125	1,5625	3,90625				C T
0,63477	0,83008	2,05078	2,19727			S

Tab. 3. Wybrane wartości logarytmicznych dekrementów tłumienia drgań dla podstawowej dla danego przebiegu częstotliwości drgań własnych				
Czujnik numer				Wymuszenie
1	2	3	4	
Kładka dla pieszych w Tropiu				
0,0967	0,1051		0,0967	A H
0,1173	0,1770			A T
0,2192	0,1807	0,1351		C H
	0,0979	0,1548	0,1287	C T
Kładka dla pieszych w Tylmanowej				
0,1237	0,0946			I A V
	0,0967			I A T
	0,1564			I B V
	0,2343			II A V
0,2020		0,1243		II A H
	0,1545			II A T
Kładka pieszo-jezdna w Tylmanowej				
0,0555				A V <sub>1</sub>
		0,0945		A S <sub>1</sub>
0,1746		0,1774		A V <sub>2</sub>
0,0369				A T

Tabela 3 – ciąg dalszy				
0,0714				A S <sub>2</sub>
0,0658	0,2668			A H
	0,1876			B H
0,0429		0,0352		B V
			0,0133	S
Kładka dla pieszych w Piwnicznej				
0,0219				A V <sub>2</sub>
0,1142	0,1024			A H
0,1541	0,1146			A T
0,0298	0,0342			B V
0,1257	0,0825	0,0536	0,0563	B H
0,1066	0,0852	0,0547		B T
0,0579		0,0391		C V
	0,0251	0,0428	0,0696	C H
0,1428	0,0697	0,0542	0,0529	C T
0,1115		0,1117		S

## WNIOSKI OGÓLNE

Tematyka i zakres przeprowadzonych badań eksperymentalnych, jak i otrzymane wyniki mają duży walor poznawczy i praktyczny. Mogą być one wykorzystane do identyfikacji dynamicznej analizowanych obiektów, oraz wyznaczenia ich odpowiedzi na dynamiczne działanie wiatru. Prezentowane tu wyniki pomiarów stanowią tylko fragment całości wyników, których obszerna analiza będzie przedmiotem oddzielnej publikacji.

## LITERATURA

- Flaga A., „Analiza usztywnień poziomych lekkich mostów wiszących”, *Materiały XXXI Konferencji KILiW PAN i KN PZITB*, Krynica 1985, t. I 59-65
- Flaga A., Michałowski T., „Aerodynamic stability analysis of footbridge of inclined cable system”, *Proc. of the 2nd EECWE*, Prague 1998, 97-104
- Flaga A., Flaga K., Michałowski T., „Problemy aerodynamiki mostów podwieszonych i wiszących”, *Inżynieria i Budownictwo*, 9/1996, 508-516

Jarosław Bęc, M.Sc. Eng., Lublin Technical University, Department of Structural Mechanics, ul Nadbystrzycka 40, 20-618 Lublin, Poland, e-mail : JBKMB@akropolis

Andrzej Flaga, Prof. Dr. Sc. Eng. Lublin Technical University, Department of Structural Mechanics, ul Nadbystrzycka 40, 20-618 Lublin, Poland; and Cracow University of Technology, Institute of Structural Mechanics, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, Poland, e-mail : AFKMB@akropolis

Tomasz Michałowski, M.Sc. Eng., Cracow University of Technology, Institute of Structural Mechanics, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, Poland, e-mail : tmichal@usk.pk.edu.pl

Jerzy Podgórski Ph. D. Eng., Lublin Technical University, Department of Structural Mechanics, ul Nadbystrzycka 40, 20-618 Lublin, Poland, e-mail : JPKMB@akropolis