ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2005
Seria: BUDOWNICTWO z. 104 Nr kol. 1695

Marek PAŃTAK*
Politechnika Krakowska

KATEGORIE RUCHU PIESZYCH NA KŁADKACH I PRAWDOPODOBIEŃSTWA ICH WYSTĘPOWANIA

Streszczenie. Praca niniejsza stanowi wprowadzenie w zagadnienia warunków użytkowalności dynamicznej kładek dla pieszych. Poruszono w niej zagadnienia ruchu pieszych w środowisku miejskim, przedstawiono propozycje kategorii ruchu pieszych na kładkach oraz określono prawdopodobieństwa ich występowania.

CATEGORIES OF A PEDESTRIAN FLOW ON FOOTBRIDGES AND A PROBABILITY OF THEIRS OCCURRENCE

Summary. The paper introduces to a problem of dynamic serviceability requirements of footbridges. The pedestrian flow categories in cities are characterized and classification of pedestrian traffic on footbridges is proposed. Finally, probabilities of representative traffic category occurrence are specified.

1. Warunki użytkowalności dynamicznej kładek dla pieszych

Spotykane dotychczas w literaturze warunki użytkowalności dynamicznej kładek dla pieszych (kryteria komfortu użytkowania kładek) [1, 2, 3] mają odniesienie przede wszystkim do drgań natury codziennej, tj. drgań występujących co najmniej raz na dobę.

Najczęściej przytaczany za normą brytyjską BS 5400 [1] wymóg ograniczenia drgań konstrukcji do wartości:

$$a_{max} = 0{,}5\sqrt{f_a} \tag{1}$$

gdzie: f_a - podstawowa częstotliwość drgań własnych konstrukcji,

dotyczy wyłącznie przypadku drgań wywołanych przez pojedynczego pieszego [4].

* Opiekun naukowy: Prof. dr hab. inż. Andrzej Flaga

Błędem jest porównywanie z tym zapisem wyników analiz uzyskanych dla większej liczby użytkowników. W takich przypadkach wymóg powyższy jest wymogiem zbyt ostrym.

Bez wątpienia w ruchu na kładkach, poza przypadkiem pojedynczego pieszego, wskazać można także przypadki, w których uczestniczy większa liczba użytkowników. Zauważyć należy również, że nie wszystkie z tych przypadków odznaczać się będą naturą codzienną, a jeszcze rzadziej będą to przypadki rezonansowe związane z dostosowaniem częstości stawiania kroków do częstotliwości drgań konstrukcji.

W istniejących kryteriach użytkowalności dynamicznej kładek uwzględnienia wymagają zatem różne przypadki ruchu pieszych (kategorie ruchu pieszych) oraz prawdopodobieństwa ich występowania. Propozycje kryteriów użytkowalności dynamicznej kładek dla pieszych, autorstwa A. Flaga i M. Pańtak, uwzględniające powyższe uwagi, przedstawione zostały szerzej w pracach [5, 6]. W niniejszym artykule przybliżone zostaną wyniki obserwacji ruchu pieszych na kładkach, propozycje kategorii ruchu pieszych na kładkach (za pracą [5]) oraz prawdopodobieństwa występowania poszczególnych kategorii ruchu uwzględnione w opracowanych kryteriach użytkowalności dynamicznej kładek.

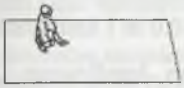
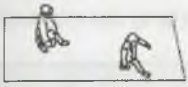
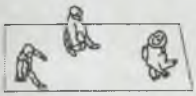
2. Ruch pieszych wg HCM 2000 [7]

Przytoczone poniżej informacje (tabl. 1) zaczerpnięte zostały z przepisów Highway Capacity Manual 2000 [7], zawierających wytyczne projektowania dróg, ulic, chodników dla pieszych oraz ścieżek rowerowych. Przedstawione tam kryteria oceny zagęszczenia i swobody ruchu pieszych oparte zostały na obserwacjach ruchu pieszych na chodnikach i przejściach dla pieszych w obszarach miejskich oraz na uśrednionych wartościach natężeń ruchu. Kryteria te dobrze opisują także sytuacje obserwowane na kładkach dla pieszych. Podobne zalecenia znaleźć można również w pracach [8, 9].

Swoboda ruchu pieszych staje się ograniczona, gdy przestrzeń s, jaką dysponuje pojedynczy pieszy, jest mniejsza od 3,5 m^2/os. (tabl. 1 przypadek C). W przypadku gdy $s < 1{,}5$ m^2/os. (tabl. 1 dolna granica przypadku D), silnie ograniczona staje się prędkość ruchu i gwałtownie wzrasta prawdopodobieństwo konfliktów między pieszymi. Wzajemne wyprzedzanie się pieszych jest niemożliwe już przy $s < 1{,}8$ m^2/os.

Tablica 1

Kryteria oceny swobody ruchu pieszych wg HCM 2000 [7]

Przypadek		Gęstość tłumu d_u [os./m^2] / Przestrzeń przypadająca pojedynczemu pieszemu s [m^2/os.]	Uwagi
A		$d_u \leq 0{,}18$ $s \geq 5{,}6$	Natężenie ruchu ≤ 16 os./min/m. Piesi przemieszczają się swobodnie z dowolną prędkością po dowolnie wybranym torze bez konieczności unikania konfliktu z innymi pieszymi i modyfikacji parametrów ruchu.
B		$0{,}18 < d_u < 0{,}27$ $3{,}7 < s < 5{,}6$	Natężenie ruchu 16 ÷ 23 os./min/m. Piesi zauważają obecność innych przechodniów i dostosowują tor ruchu do występujących warunków. Przestrzeń między pieszymi jest wystarczająca do poruszania się z dowolną prędkością i omijania napotkanych osób.
C		$0{,}27 < d_u < 0{,}45$ $2{,}2 < s < 3{,}7$	Natężenie ruchu 23 ÷ 33 os./min/m. Przestrzeń między pieszymi jest wystarczająca do poruszania się ze średnią prędkością chodu (ok. 1,5 m/s) i omijania innych przechodniów poruszających się w tym samym kierunku. Zmiana kierunku ruchu przez pieszego oraz ruch poprzeczny do kierunku głównego może wywoływać niewielkie konflikty między pieszymi.
D		$0{,}45 < d_u < 0{,}71$ $1{,}4 < s < 2{,}2$	Natężenie ruchu 33 ÷ 49 os./min/m. Prędkość ruchu i swoboda omijania innych przechodniów są ograniczone. Ruch w kierunku przeciwnym lub poprzecznym do kierunku głównego wymaga częstych zmian pozycji oraz prędkości i odznacza się dużym prawdopodobieństwem konfliktu z innymi przechodniami. Przemieszczanie się pieszych jest płynne. Piesi wzajemnie oddziałują na siebie i ocierają się.
E		$0{,}71 < d_u < 1{,}33$ $0{,}75 < s < 1{,}4$	Natężenie ruchu 49 ÷ 75 os./min/m. Wszyscy piesi ograniczają prędkość ruchu i często modyfikują sposób chodzenia. Przestrzeń między pieszymi jest niewystarczająca do omijania innych przechodniów. Ruch w kierunku przeciwnym lub poprzecznym do kierunku głównego jest silnie utrudniony – prawie niemożliwy. Przy zagęszczeniu ruchu bliskim górnej granicy przypadku przemieszczanie się przechodniów jest możliwe tylko z jednoczesnym szuraniem stopami po podłożu.
F		$d_u \geq 1{,}33$ $s \leq 0{,}75$	Natężenie ruchu: zmienne. Prędkość chodu pieszych jest poważnie ograniczona. Ruch przechodniów jest sporadyczny i nieustalony. Przemieszczanie się pieszych jest możliwe tylko z jednoczesnym szuraniem stopami po podłożu. Ruch w kierunku przeciwnym lub poprzecznym do kierunku głównego jest niemożliwy. Strumień pieszych przypomina wolno posuwającą się kolejkę.

3. Obserwacje ruchu pieszych na kładkach

Obserwacje ruchu pieszych na kładkach przeprowadzono na trzech obiektach usytuowanych w różnych częściach miast. Pierwszy z obiektów (rys. 1a) to kładka w miejscowości Andrychów o rozpiętości 35,0 m i szerokości 3,0 m, prowadząca do centrum miasta oraz pobliskich zakładów pracy. Obiekt drugi o rozpiętości 30,0 m i szerokości 3,0 m (rys. 1b) to dojście z przystanków tramwajowych do centrum handlowego „Plaza" w Krakowie. Obiekt trzeci (rys. 1c) o rozpiętości 17,0 m i szerokości 3,0 m to dojście do dworca PKP w Krakowie.

a) b) c)

Rys. 1. Widoki ogólne obserwowanych kładek
Fig. 1. General view of observed footbridges

Na podstawie obserwacji wyodrębniono w ruchu na kładkach następujące sytuacje:

1. Pojedynczy pieszy

Rys. 2. Pojedynczy pieszy
Fig. 2. Single pedestrian

2. Pojedyncze zorganizowane grupy osób

Rys. 3. Pojedyncze zorganizowane grupy osób
Fig. 3. Single groups of pedestrian who know each other

3. Swobodne strumienie pieszych o gęstości $d_u \in (0{,}10 \div 1{,}0)$ os./m^2

Rys. 4. Swobodne strumienie pieszych o różnych gęstościach
Fig. 4. Free pedestrian flows with various density

4. Zorganizowane grupy osób w swobodnych strumieniach pieszych

Rys. 5. Zorganizowane grupy osób w swobodnych strumieniach pieszych
Fig. 5. Platoon flows in free pedestrian flows

5. Osoby biegnące

Rys. 6. Osoby biegnące
Fig. 6. Running users

4. Kategorie ruchu pieszych na kładkach

W zgodzie z przedstawionymi powyżej wynikami obserwacji ruchu pieszych na kładkach są zaproponowane w pracy [5] kategorie ruchu pieszych na kładkach, które przytoczono poniżej:

1. n_1 – pojedynczy pieszy – podstawowa sytuacja projektowa.
2. n_g – pojedyncza grupa osób zsynchronizowanych między sobą – $n_g = n_1, n_2, \ldots n_{10}$ – odpowiednio dla grup dwu-, trój- i dziesięcioosobowych.

3. n_d – swobodny strumień pieszych o średniej gęstości przechodniów $d_u \leq 0{,}35$ os./m^2. Synchronizacja między przechodniami ma wtedy charakter całkowicie przypadkowy.

$$d_u = \frac{N_u}{B \cdot \Delta L} \tag{2}$$

gdzie: N_u – liczba osób na pomoście o polu $\Delta A = B \cdot \Delta L$, B – szerokość pomostu, ΔL – obszar na pomoście, dla którego rzędne odpowiedniej unormowanej do jedynki postaci drgań własnych $\Phi_\alpha(x)$ są bliskie jedności.

4. Strumień pieszych częściowo zsynchronizowanych między sobą $d_u \ni (0{,}35 \div 1{,}0)$ os./m^2. Możliwe jest wystąpienie podgrup użytkowników zsynchronizowanych między sobą.

5. Tłum pieszych o gęstości $d_u \in (1{,}0 \div 1{,}5)$ os./m^2 – przypadek wolnego chodu do braku ruchu. Obciążenie ma charakter obciążenia quasi-statycznego o intensywności rzędu 1 kN/m^2.

6. Zwarty tłum $d_u > 1{,}5$ os./m^2. Całkowity brak ruchu. Obciążenie od tłumu jest obciążeniem statycznym o intensywności <4 kN/m^2.

W analizach uwzględnienia wymagają ponadto przypadki osób biegnących oraz oddziaływania wandali. W drugim przypadku ograniczenie odpowiedzi konstrukcji jest konieczne, głównie z powodu możliwości przekroczenia stanów granicznych nośności konstrukcji.

5. Prawdopodobieństwa występowania wyodrębnionych przypadków ruchu pieszych na kładkach

Poniżej w tabl. 2, przedstawiono prawdopodobieństwa występowania, wyodrębnionych w punkcie 3 i 4 pracy, kategorii ruchu pieszych na kładkach, ustalone dla przedziału w środku rozpiętości kładki $\Delta L \approx \frac{1}{3} L$ (patrz równanie (2)). Przy przyjęciu dłuższego przedziału ΔL ustalone wartości prawdopodobieństw ulegają zmianie. Przykładowo, w przypadku tłumu obniżeniu ulega prawdopodobieństwo pojawienia się tłumu o gęstości $d_u > 0{,}3$ os./m^2, wzrasta natomiast prawdopodobieństwo pojawienia się tłumu o gęstości $d_u \ni (0{,}1 - 0{,}2)$ os./m^2. Przy dłuższym przedziale ΔL obniża się również prawdopodobieństwo występowania pojedynczego pieszego na obiekcie.

Niezależne od długości przedziału ΔL są przedstawione w tabl. 2 wartości prawdopodobieństw występowania zorganizowanych grup pieszych w tłumie oraz prawdopodobieństwa występowania osób biegnących.

Tablica 2

Prawdopodobieństwa występowania wyodrębnionych przypadków ruchu pieszych na kładkach w normalnych warunkach użytkowania

Przypadek	Prawdopodobieństwo występowania przypadku w obszarze ΔL – P_{n_i}	Wartość średnia prawdopodobieństwa $\overline{P}_{n_i}$
Przejścia swobodne		
1 osoba	0.27 – 0,33	0,30
2 osoby	0,23 – 0,27	0,25
Pojedyncze grupy zorganizowane (osoby znające się)		
Dwuosobowe (pary)	0,19 – 0,25	0,22
Dwuosobowe zsynchronizowane	0,09 – 0,15	0,12
Trzyosobowe	0,03 – 0,08	0,06
Trzyosobowe zsynchronizowane	0,003 – 0,02	0,012
Czteroosobowe	0,003 – 0,009	0,006
Czteroosobowe zsynchronizowane	–	–
Tłum (swobodne strumienie pieszych)		
0,1 – 0,2 os/m^2	0,23 – 0,33	0,28
0,2 – 0,3 os/m^2	0,085 – 0,120	0,10
0,3 – 0,4 os/m^2	0,015 – 0,086	0,05
>0,4 os/m^2	0,004 – 0,020	0,012
Zorganizowane grupy w tłumie (swobodne strumienie pieszych)		
Dwuosobowe (pary)	0,40 – 0,77	0,58
Dwuosobowe zsynchronizowane	0,20 – 0,28	0,24
Trzyosobowe	0,05 – 0,11	0,08
Trzyosobowe zsynchronizowane	0,009 – 0,015	0,012
Czteroosobowe	0,005 – 0,011	0,008
Czteroosobowe zsynchronizowane	–	–
Bieg		
1 osoba	0,004 – 0,012	0,008
Inne (2, 3 osoby)	0,003 – 0,008	0,006

Zauważyć można, że bardzo dużym prawdopodobieństwem występowania odznaczają się, pojawiające się w tłumie pieszych, przypadki grup dwuosobowych oraz grup dwuosobowych zsynchronizowanych. W tłumie o gęstości $d_u \leq 0{,}4$ os/m^2 (zachowana jest swoboda ruchu pieszych) prawdopodobieństwo synchronizacji użytkowników w parze nie zależało od gęstości tłumu i wynosiło ~ 0,24. W tłumie o większej gęstości ulegało ono znacznemu obniżeniu średnio do wartości ~ 0,07.

Uwzględnienie przedstawionych powyżej prawdopodobieństw w wymogach warunków użytkowalności dynamicznej kładek pozwala na złagodzenie ich zapisów i lepsze odzwierciedlenie rzeczywistości.

Przedstawione zagadnienia wymagają dalszych prac z tego zakresu.

Praca naukowa finansowana ze środków budżetowych na naukę w latach 2005-2006 jako projekt badawczy.

LITERATURA

1. BS 5400 PART 2 Appendix C: Vibration Serviceability Requirements for Foot and Cycle Track Bridges., British Standards Institution, 1978.
2. Bachmann H., Ammann W.: Vibration in structures induced by man and machine, IABSE,1987.
3. Flaga A., Pańtak M.: Kryteria komfortu w projektowaniu kładek dla pieszych, Inżynieria i Budownictwo, Nr 5/2004, s. 253–258.
4. Živanović S., Pavic A., Reynolds P.: Vibration serviceability under human induced excitation: a literature review, Journal of Sound and Vibration 279, 2005, s.1–74.
5. Flaga A.: Mosty dla pieszych. Współczesne rozwiązania konstrukcyjne, dynamika, aerodynamika, wymagania użytkowalności dynamicznej, tłumiki drgań, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Monografia, Kraków 2005 (w druku).
6. Flaga A., Pańtak M.: Warunki użytkowalności dynamicznej mostów dla pieszych z uwzględnieniem prawdopodobieństwa generowania drgań, Pięćdziesiąta Pierwsza Konferencja Naukowa „Krynica 2005", wrzesień, 2005 (w druku).
7. Highway Capacity Manual HCM – 2000, Chapter 11 – Pedestrians and Bicycle Concepts, Washington, National Research Council, D.C. 2000.
8. Datka S., Suchorzewski W., Tracz M.: Inżynieria ruchu, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Wydanie III, Warszawa 1999.
9. Żółtowski K.: Cechy użytkowe kładek dla pieszych, Międzynarodowa Konferencja „Mosty", Kielce, maj 2005, s.75–92.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Jan Biliszczuk