

Badania pod ekstremalnymi obciążeniami statycznymi i dynamicznymi konstrukcji schodów na stadionie

XXVI Konferencja Naukowo-Techniczna awarie budowlane 2013

Dr inż. Piotr Olaszek, mgr inż. Artur Sakowski, mgr inż. Paweł Nurek,
Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Warszawa

ARTYKUŁY PROBLEMOWE

1. Wprowadzenie

Stadiony, a w szczególności stadiony piłkarskie są miejscem występowania znacznych obciążeń tłumem o charakterze statycznym i dynamicznym. Na schodach prowadzących na stadion stosunkowo często może dochodzić do powstawiania zagęszczeń tłumy, szczególnie w czasie wychodzenia ludzi po zakończeniu imprezy lub w czasie wchodzenia na imprezę i powstawiania zatorów na bramkach wejściowych. Tłum może generować poważne obciążenia dynamiczne, szczególnie w przypadku rytmicznych podskoków [1, 2, 3]. W przypadku konstrukcji, które charakteryzują się częstotliwością drgań własnych mniejszą niż 3 Hz, może wystąpić zagrożenie drganiami rezonansowymi [3] szczególnie, gdy mamy do czynienia z grupą ludzi, której podskoki są synchronizowane przez muzykę lub nieformalnie poprzez komendy przywódców tłumy.

2. Badana konstrukcja

Badana konstrukcja to jedna z 14 zewnętrznych klatek schodowych prowadzących na górne sektory dużego stadionu piłkarskiego (ponad 50 tysięcy widzów). Konstrukcję schodów stanowi układ ramowy, o słupach sztywno zamocowanych w fundamentach, ukośnych ryglach i zamocowanych w nich spocznikach rozpartych biegami schodowymi. Górny spocznik schodów jest oparty na wsporniku i krawędzi elementu konstrukcji stadionu. Gabaryty klatki schodowej to: wysokość – 14,8 m, szerokość schodów – 5,2 m, całkowita długość schodów: 9 sztuk biegów schodowych i 8 pośrednich spoczników – ok. 37,0 m, wymiary górnego spocznika – 11,4 x 6,5 m.

Żelbetowe schody pierwotnie miały być wykonane jako monolityczne, jednak w celu skrócenia czasu budowy zmieniono technologię ich wykonania na prefabrykowaną. Połączenia prefabrykatów zaprojektowano na śruby i kotwy, co pozwoliło na szybki montaż konstrukcji. W czasie budowy, przed betonowaniem płyt górnego

spocznika na prawie wszystkich 14 ciągach schodowych stwierdzono występowanie imperfekcji montażowych oraz rys i uszkodzeń na konstrukcji żelbetowej.



Rys. 1. Widok ogólny schodów żelbetowych w czasie budowy

Z tego względu nadzór, dla wybranego ciągu schodowego, zlecił monitorowanie górnego spocznika w czasie betonowania jego płyty oraz wykonanie próbnego obciążenia po dwóch tygodniach od betonowania. Przeprowadzona próba statyczna nie wykazała nieprawidłowości w pracy konstrukcji górnego spocznika. Budzące wątpliwości wyniki otrzymano za to podczas próby dynamicznej górnego spocznika [4]. Ze względu na przeznaczenie konstrukcji, skoncentrowano się na obciążeniu polegającym na synchronizowanych podskokach grupy ludzi, które mogą prowadzić do obciążeń zwanych „vandal loading” [3]. Ze względów niezależnych od autorów badania, miały ograniczenia związane z czasem trwania i liczbą ludzi użytych do próbnego obciążenia dynamicznego. Po okresie zimowym wykryto znaczny przyrost uszkodzeń i wykonawca stadionu wraz z nadzorem podjął decyzję o gruntownej naprawie konstrukcji schodów. Wzmocnienie schodów polegało na obudowaniu dźwigarów żelbetowych oraz słupów stalowymi skrzynkami (rys. 2). Przestrzenie pomiędzy stalową skrzynką a dźwigarami oraz słupami wypełniono specjalną zaprawą na bazie cemen-

tu. Po wzmocnieniu schodów na wybranych klatkach schodowych wykonano badania statyczne i dynamiczne w pełnym zakresie. W artykule zostały przedstawione badania wykonane po wzmocnieniu konstrukcji klatki schodowej, dla której wykonano również badania przed wzmocnieniem.



Rys. 2. Widok ogólny schodów po obudowaniu konstrukcją stalową

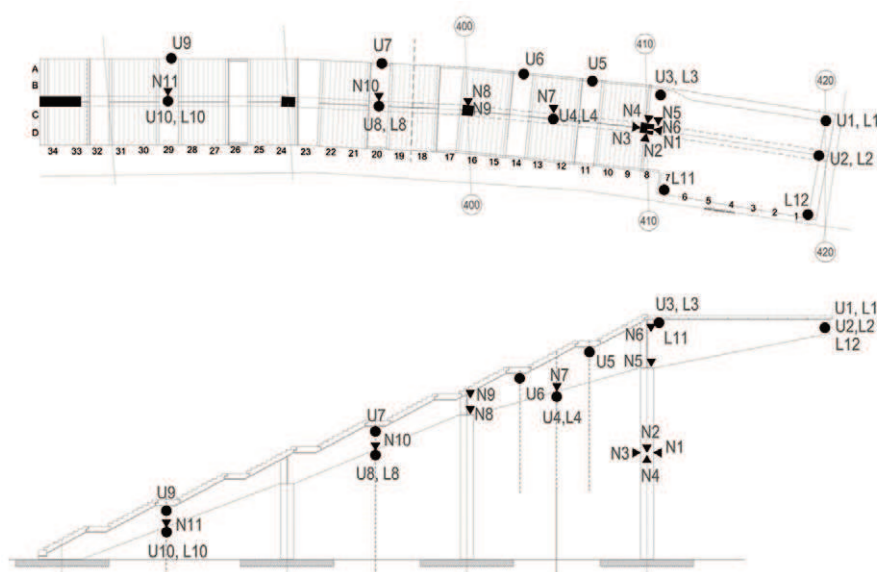
3. Zakres pomiarów

Podczas badań pod obciążeniem statycznym pomiar dotyczył przemieszczeń w kierunku pionowym wybranych punktów na: wsporniku, płycie górnego spocznika, rygla schodów, spocznikach pośrednich i dolnej części słupów oraz odkształceń w wybranych punktach na pasie górnym i dolnym wspornika i rygla, a także na środku wysokości najwyższego słupa. Pod obciążeniem dynamicznym mierzono przemieszczenia w kierunku pionowym wybranych punktów: wspornika, płyty górnego spocznika, rygla schodów, spoczników oraz przyspieszenia w kierunku pionowym na płycie górnego spocznika i spoczników pośrednich. Mierzono również siłę oddziaływań jednej ze skaczących osób na płytę górnego spocznika. Rozmieszczenie punktów pomiarowych pokazano na rysunku 3.

Podczas obciążenia statycznego i dynamicznego pomiar przemieszczeń pionowych wspornika, płyty górnego spocznika, rygla schodów oraz spoczników pośrednich wykonano z zastosowaniem przetworników przemieszczeń z rejestracją cyfrową, za pomocą systemu Spider8 firmy Hottinger Baldwin Messtechnik. W wybranych punktach górnego spocznika i rygla podczas obciążenia statycznego prowadzono dodatkowe, kontrolne pomiary przemieszczeń (w trzech kierunkach: pionowym, poziomym wzdłuż i w poprzek schodów) z zastosowaniem automatycznego tachimetru elektronicznego firmy Leica (model TDA 5005 i TM30) z funkcją automatycznego znajdowania celu, wykorzystując rozmieszczone na konstrukcji reflektory pryzmatyczne. Pomiar odkształceń (po przeliczeniu naprężeń) wykonano z zastosowaniem elektrycznej tensometrii oporowej z rejestracją cyfrową, za pomocą systemu Spider8. Podczas obciążenia dynamicznego pomiary przyspieszeń w kierunku pionowym prowadzono z wykorzystaniem przetworników przyspieszeń z rejestracją cyfrową. Do pomiaru siły oddziaływań kończyn dolnych skaczących osób na płytę górnego spocznika wykorzystano platformę pomiarową PLA5-1D firmy „JBA” Zbigniew Staniak z cyfrową rejestracją wyników.

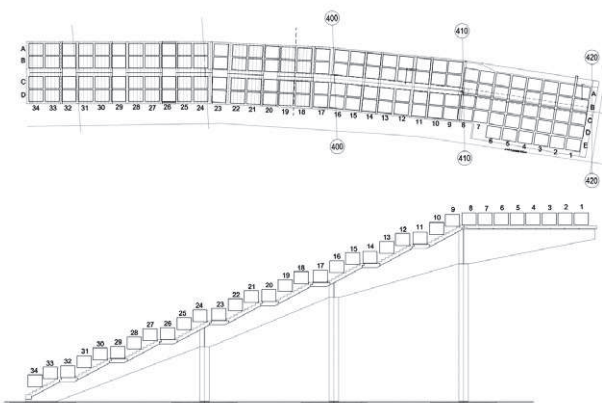
4. Próbné obciążenie statyczne

Obciążenie statyczne realizowano w formie wariantów obciążenia odwzorowującego obciążenie tłumem o wartości 5 kN/m². Użyto zbiorników napełnianych wodą do odpowiedniej wysokości. Na górnym spoczniku ustawiono 38 zbiorników oraz 72 (9 x 8) zbiorniki na biegach schodowych i 32 (8 x 4) zbiorniki na spocznikach pośrednich (rys. 4 i 5). Zrealizowano 7 wariantów obciążenia (napełnienia zbiorników wodą) odwzorowujących symetryczne i niesymetryczne obciążenie górnego spocznika i schodów. Najważniejsze warianty obciążenia to:



Rys. 3. Rozmieszczenie punktów pomiarowych: U – punkty pomiaru przemieszczeń pionowych z zastosowaniem przetworników indukcyjnych, L – punkty pomiaru przemieszczeń z zastosowaniem tachimetrii, N – punkty pomiaru odkształceń/naprężeń

- obciążenie niesymetryczne na płycie górnego spocznika (rys. 4 – napełnione zbiorniki nr od 1 do 8, A i B),
- obciążenie niesymetryczne na płycie górnego spocznika oraz niesymetryczne na schodach i spocznikach pośrednich (rys. 4 – napełnione zbiorniki nr od 1 do 34, A i B),
- obciążenie symetryczne na płycie górnego spocznika oraz symetryczne na schodach i spocznikach pośrednich (rys. 4 – napełnione wszystkie zbiorniki).



Rys. 4. Rozmieszczenie zbiorników podczas obciążenia statycznego

5. Próbné obciążenie dynamiczne

Podczas badań kolejno realizowane były następujące schematy obciążenia dynamicznego:

- serie podskoków grup 1, 5, 10, 20 i 40 osób na górnym spoczniku (rys. 6),
- serie podskoków grupy 16 osób na górnym spoczniku i 24 osób na ośmiu spocznikach pośrednich,
- serie podskoków grupy 22 osób na górnym spoczniku i 18 osób na trzech spocznikach pośrednich.
- wbieganie i zbieganie grupy 40 osób po schodach.

W przypadku skoków grupowych, starano się zapewnić jednoczesność podskoków poprzez komendy głosowe. Zawsze jedna osoba skakała na platformie pomiarowej. Platforma umożliwiła pomiar oddziaływania sił kończyn człowieka na spocznik oraz rozróżnienie okresów występowania drgań wymuszonych i swobodnych.

6. Model numeryczny konstrukcji schodów

Do modelowania komputerowego wykorzystano program SOFISIK. Model został zbudowany z wykorzystaniem elementów powłokowych. Połączenia słupów z dźwigarami, dźwigara z podłożem oraz górnego spocznika z belką stropową stadionu zamodelowano jako przegubowe. Połączenia górnego spocznika do wspornika oraz słupów do podłoża zamodelowano jako sztywne. Przyjęto również utwierdzenie spoczników pośrednich w dźwigarze. Ze względu na dużą powierzchnię styku



Rys. 5. Widok schodów w czasie próbnego obciążenia statycznego (fot. T. Wierzbicki)



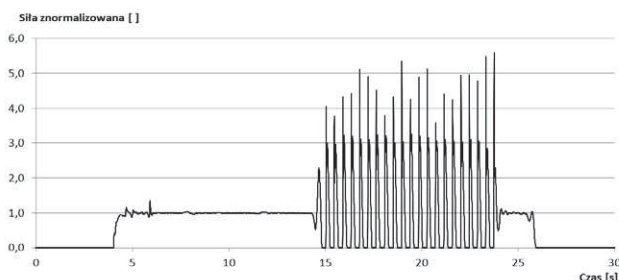
Rys. 6. Widok górnego spocznika w czasie próbnego obciążenia dynamicznego: podskoki 1 osoby na górnym spoczniku (fot. R. Czachowski)

obudowy stalowej oraz materiał wypełnienia, do analizy przyjęto pełne zespolenie konstrukcji stalowej i żelbetowej.

7. Wyniki badań

Wyniki pomiarów pod obciążeniem statycznym zostały zestawione z wynikami obliczeń. Zmierzone wartości ugięć w punkcie nr 1 (swobodne naroże płyty) i punkcie nr 2 (koniec dźwigara wspornika) zawierały się w zakresie od 75% do 90% ugięć obliczonych podczas wariantów maksymalnych obciążeń. Przy zestawieniu z analogicznym wariantem obciążenia przeprowadzonego

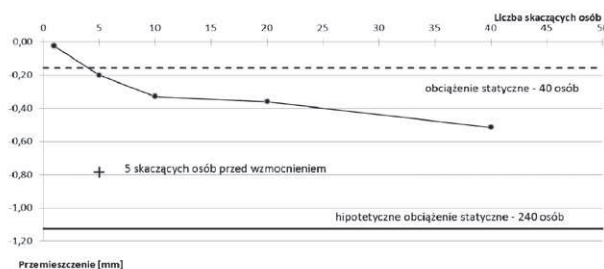
przed obudowaniem konstrukcją stalową, zarejestrowano wartości ugięć punktów dźwigara wspornika równe ok. 25%, a płyty górnego spocznika względem dźwigara równe ok. 50% wartości przed wzmocnieniem. Podczas badań dynamicznych zarejestrowano ekstremalne wartości sił oddziaływania kończyn człowieka (dla różnych osób) podczas podskakiwania na spoczniku od 4 do 6 razy większe od oddziaływania statycznego. Przykładowy przebieg siły pionowej podczas podskakiwania jednej osoby przedstawiono na rysunku 7. Zarejestrowane wartości ekstremalne siły znormalizowanej są zgodne z wartością ekstremalną (równą 4,0) podaną w normie [5] i dotyczącą ciągłego skakania jednej osoby.



Rys. 7. Przebieg znormalizowanej (w stosunku do wartości statycznej) siły pionowej podczas podskakiwania jednej osoby

Zarejestrowane podczas obciążeń dynamicznych (podskoków grupy 5 osób) ekstremalne wartości ugięć punktów dźwigara wspornika były równe ok. 25%, a płyty górnego spocznika względem dźwigara równe ok. 70% wartości przed wzmocnieniem. Na podstawie analizy widmowej stwierdzono, że w drganiach konstrukcji wyróżnia się składowa o częstotliwości: $f_1 = 9,4$ Hz, co jest bardzo znaczną poprawą w stosunku do częstotliwości zarejestrowanych podczas badań konstrukcji przed wzmocnieniem. Stwierdzono wtedy, że w wymuszonych i swobodnych drganiach konstrukcji wyróżniają się składowe o częstotliwościach z zakresu 1,8÷5,5 Hz [4].

Znaczenie obciążeń dynamicznych, w wypadku takich konstrukcji jak prezentowane schody, zostało zilustrowane na rysunku 8, na którym porównano skutki obciążenia dynamicznego od grupy skaczących osób (do 40 osób) z obciążeniem statycznym odpowiadającym ustawieniu grupy 240 osób. Zarejestrowane wartości ekstremalne ugięć wywołane przez 5 podskakujących ludzi osiągały dla punktu końca płyty wartości ok. 26% i dla punktu końca dźwigara 18% ugięć sprężystych zarejestrowanych podczas niesymetrycznego wariantu obciążenia statycznego (odpowiadającego ciężarowi ok. 240 osób). Dla grupy 20 skaczących osób wartości te wynoszą odpowiednio ok. 40% i 32% ugięć odpowiadających oddziaływaniu statycznemu ok. 240 osób. Zastosowane kolejne podwojenia liczby skaczących osób wykazały coraz mniejszy wpływ na rejestrowane efekty dynamiczne. Nieliniowość zależności między liczbą



Rys. 8. Porównanie przemieszczeń pionowych końca dźwigara (punkt nr 2) wywołanych obciążeniem dynamicznym grupy skaczących osób (1, 5, 10, 20 i 40 osób) z przemieszczeniami wywołanymi obciążeniem statycznym odpowiadającym ustawieniu grupy 240 osób; dodatkowo zaznaczono wartość przemieszczeń wywołanych obciążeniem 5 skaczących osób przed wzmocnieniem konstrukcji

skaczących osób a skutecznością ich oddziaływania na konstrukcję wynika z praktycznej niemożliwości uzyskania pełnej synchronizacji wszystkich skaczących [2] i stopnia ich rozstawienia na spoczniku.

8. Podsumowanie

Podsumowując badania stwierdzono, że konstrukcja schodów po obudowaniu konstrukcją stalową charakteryzuje się znacznie większą sztywnością pod obciążeniem statycznym. Stwierdzono mniejszą wrażliwością na oddziaływania dynamiczne. Szczególnie istotna jest znaczne podwyższenie częstotliwości drgań własnych. Przedstawione badania pokazują, jak ważne jest sprawdzanie konstrukcji stadionu piłkarskiego na obciążenia dynamiczne. Należy dodać, że nowoczesne konstrukcje sportowe mają najczęściej konstrukcję wspornikową (brak dodatkowych podpór ograniczających widoczność) i są przez to szczególnie wrażliwe na oddziaływania dynamiczne.

Informacje dodatkowe

Autorzy dziękują pani prof. Barbarze Rymszy za pomoc w organizacji badań oraz kolegom z Laboratorium Badań Konstrukcji Mostowych za aktywny udział w pracach badawczych.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Ellis, B., Ji, T., & Littler, J., The response of grandstands to dynamic crowd loads. Proceedings of the ICE – Structures and Buildings, Volume 140, 2000, s. 355–365
- [2] Jones C. A., Reynolds P., Pavic A., Vibration serviceability of stadium structures subjected to dynamic crowd loads: A literature review. Journal of Sound and Vibration. 2011, Tom 330, 8, s. 1531–1566
- [3] Dougill, J. i inni, Dynamic performance requirements for permanent grandstands subject to crowd action. Interim guidance on assessment and design. London: The Institution of Structural Engineers, 2001
- [4] Olaszek P., Dynamic research on stadium entrance stairs. Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures (EVACES 2011), Varenna, Włochy, 02–05.10.2011, s. 365–372
- [5] ISO 10137:2007 Bases for design of structures – Serviceability of buildings and walkways against vibrations