

# Kaskada błędów wiodąca do awarii – schody kaskadowe Stadionu Narodowego.

## Część 1. Błędy koncepcji i projektu pierwotnego

Prof. dr inż. Andrzej Ajdukiewicz, dr inż. Janusz Broł, dr inż. Marek Węglorz,  
Katedra Inżynierii Budowlanej, Politechnika Śląska, Gliwice

### 1. Wprowadzenie

Szeroko nagłośniona medialnie w latach 2011–2012 sprawa schodów kaskadowych Stadionu Narodowego, przedstawiana jako główny powód około półrocznego opóźnienia tej wielkiej inwestycji, była przedmiotem kompleksowej oceny przyczyn zaistniałego problemu. Ocena dokonana została na potrzeby Konsorcjum Ubezpieczycieli, z wykorzystaniem dostarczonej przez zleceniodawcę dokumentacji oraz obserwacji i badań na obiekcie.

Usytuowane na zewnątrz obudowy stadionu podstawowe schody ewakuacyjne (nieruchome) to 15 klatek o kaskadowej konstrukcji i o podobnym, jednak nieco zróżnicowanym układzie geometrycznym, dostosowanym do owalnego obrysu stadionu. Uzupelnienie tych klatek schodów nieruchomych stanowią trzy biegi schodów ruchomych.

Pierwotne rozwiązanie projektowe, przewidujące monolityczne biegi z jedną centralną belką ciągłą, podpartą na trzech słupach, zawierało istotne usterki koncepcyjne i błędy projektowe, wskazane dalej w artykule. Było to również rozwiązanie trudne technologicznie i bardzo czasochłonne. Ta ostatnia cecha była powodem odstąpienia – na wniosek wykonawcy – od realizacji konstrukcji monolitycznej.

Opracowano zamienny projekt konstrukcji w wersji prefabrykowanej. Projekt ten powtarzał część błędów projektu pierwotnego i wprowadzał dalsze błędy w koncepcji, obliczeniach i konstrukcji. Znacząco zmieniono ustrój konstrukcyjny, co prowadziło do dalszego obniżenia sztywności. Ten projekt został zrealizowany.

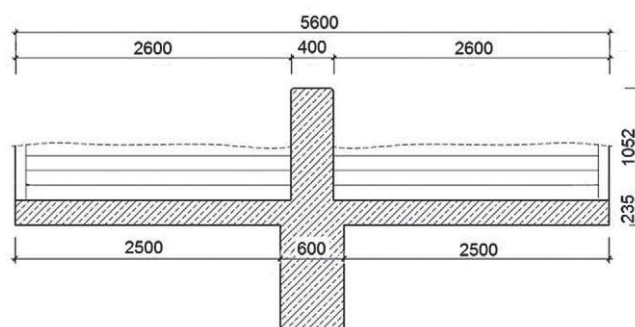
Po stwierdzeniu wad wykonanej konstrukcji podjęto najpierw decyzję o rozbiórce schodów, a następnie – z uwagi na drastyczne opóźnienie realizacji obiektu – zaprojektowano i wykonano kosztowne wzmocnienie stalowe. W wyniku naprawy usunięto część usterek, ale pod względem odporności na wpływy dynamiczne schody pozostawiają nadal wątpliwości nie tyle w zakresie nośności, co użytkowości.

Artykuł przedstawia wyniki analiz oraz obliczeń sprawdzających, statycznych i dynamicznych projektu pierwotnego, wraz z ogólnymi wnioskami.

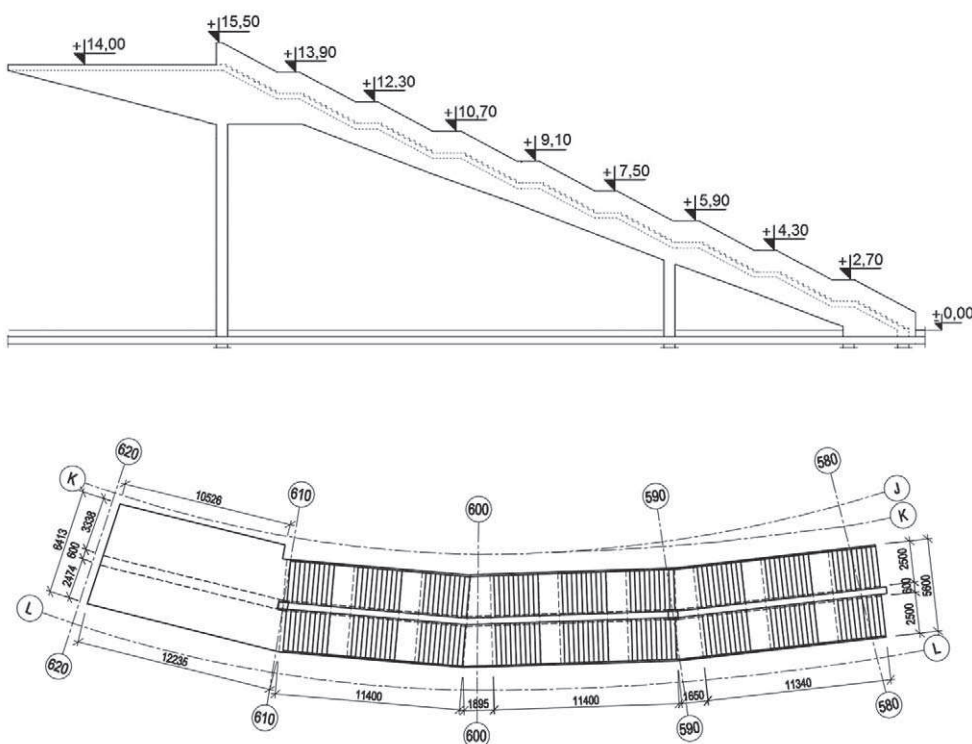
### 2. Opis konstrukcji monolitycznej – niezrealizowanej

Schody kaskadowe w wersji pierwotnej zostały zaprojektowane jako żelbetowe, monolityczne, dwuwspornikowe – zlokalizowane wokół owalnej niecki Stadionu Narodowego. Łączna liczba klatek schodów kaskadowych wynosi 15.

Główną konstrukcją nośną nieruchomych schodów kaskadowych w wersji monolitycznej stanowiła żelbetowa centralna dwuprzęsłowa belka ze wspornikiem, oparta dołem na konstrukcji stadionu (na poziomie – 0,41 m) i na dwóch słupach żelbetowych monolitycznych o przekroju 0,6 m × 0,6 m o różnej wysokości, dostosowanej do lokalizacji na obwodzie stadionu. Belka żelbetowa miała zmienną wysokość i wystawała (za wyjątkiem wspornika) powyżej biegów i spoczników na wysokość 1,16 m (wystająca część belki stanowiła balustradę środkową). Szerokość belek poniżej płyty biegów wynosiła 0,6 m, natomiast powyżej: 0,4 m. Wspornikowe płyty biegów i spoczników, o grubości 0,235 m tworzyły z belką przekrój krzyżowy. Przekrój schodów monolitycznych przedstawia rysunek 1.



Rys. 1. Przekrój poprzeczny przez belkę centralną i biegi schodowe, [1]



**Rys. 2.**  
Przekrój – rozwinięcie w osi belek oraz widok z góry przykładowego biegu schodów kaskadowych w konstrukcji monolitycznej, wg [1]

Belki w rzucie zaprojektowano w linii łamanej. Kształt linii jest różny i zależy od lokalizacji schodów względem owalnego obrysu stadionu. Schody zaczynają się od poziomu +0,16 m, a najwyższy spocznik schodów kaskadowych znajduje się na poziomie +14,18 m i jest połączony z konstrukcją stadionu. Łączna szerokość biegów schodowych wynosi 5,2 m.

Widok schodów w rzucie oraz w rozwinięciu pokazano schematycznie na rysunku 2.

### 3. Historia projektu i realizacji

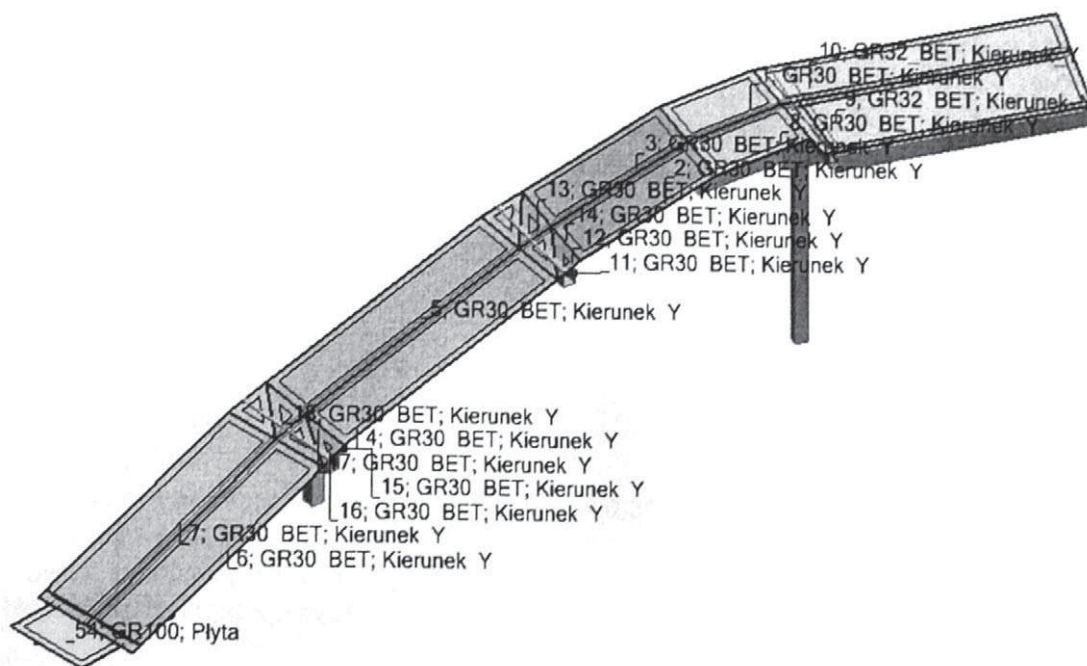
Projekt budowlany przedmiotowych schodów został opracowany w 2009 roku i zatwierdzony do realizacji decyzją pozwolenia na budowę. Przewidywał on wykonanie wszystkich klatek schodów kaskadowych w technologii monolitycznej z betonu architektonicznego. Wykonawca uzyskał do realizacji projekt we wrześniu 2009 r. i obawiając się braku możliwości uzyskania betonu architektonicznego odpowiedniej jakości w warunkach jesienno-zimowych zaproponował Inwestorowi zmianę technologii wykonania schodów kaskadowych. Zaproponowano, aby konstrukcję monolityczną zastąpić prefabrykowaną. Zmiana technologii wykonania wiązała się z koniecznością zmiany odpowiednich rozwiązań konstrukcyjnych (polegających np. na wprowadzeniu dodatkowego słupa) oraz opracowania nowego projektu konstrukcji schodów, co oceniono jako odstępstwo nieistotne (!) w stosunku do pierwotnie przyjętych rozwiązań projektowych zatwierdzonych w pozwoleniu na budowę. Po uzyskaniu przez Wykonawcę zgody Pro-

jektanta i akceptacji Inwestora, opracowano projekt zamienny w technologii prefabrykowanej.

Zgodnie z wpisami do Dziennika Montażu prefabrykowanych schodów kaskadowych montaż schodów rozpoczęto w połowie kwietnia 2010 r. i kontynuowano do połowy września 2010 r., kiedy to prace zostały przerwane. Powodem przerwania montażu było stwierdzenie nadmiernych przemieszczeń przy obciążeniach dynamicznych [3].

Prace wznowiono w pierwszej połowie stycznia 2011 r. W lutym 2011 r. stwierdzono pierwsze zarysowania na głowicy jednego słupa oraz rysy i odspojenia betonu w jednej z belek. Zdaniem dostawcy prefabrykatów uszkodzenia nastąpiły w wyniku zamrożenia wody we wbudowanych rurach karbowanych typu Robusta, służących do połączenia elementów. Zalecono wygrozdzenie stref wokół uszkodzonych elementów i wydanie zakazu poruszania się po schodach kaskadowych, w których wystąpiły uszkodzenia. Stwierdzono dalsze uszkodzenia słupów i belek na 9 klatkach – przystąpiono do pobierania próbek betonu i wykonania badań, podejmując także badania pod obciążeniami próbnymi, które dały wynik negatywny. Dnia 23 maja 2011 r. Główny Inspektor Nadzoru wpisał do Dziennika Budowy: „... polecam, w powołaniu na art. 26, p. 2 Prawa budowlanego, rozebranie wszystkich 15 konstrukcji schodów oraz ponowne ich wykonanie wg pierwotnego projektu, tj. w konstrukcji monolitycznej...”. Polecenia tego po dalszych uzgodnieniach nie wykonano.

Na zlecenie Głównego Wykonawcy Ośrodek Rzeczoznawstwa i Techniki Budowlanej OW PZITB opracował



**Rys. 3.**  
Schemat schodów monolitycznych przedstawiony w dokumentacji do pozwolenia na budowę [2]

„Opinię o stanie zagrożenia katastrofą budowlaną schodów zewnętrznych Stadionu Narodowego przy obecnym stanie obciążeń”, którą przedstawiono na zebraniu koordynacyjnym 1 czerwca 2011 r. Opinia ta wykluczyła zagrożenie schodów katastrofą budowlaną i zakwalifikowała je do naprawy według wariantowo przedstawionych rozwiązań.

Na tej podstawie w czerwcu 2011 r. zawarto ugodę dotyczącą naprawy schodów kaskadowych i spośród wariantów naprawy:

- wzmocnienie konstrukcji poprzez zastosowanie taśm węglowych i żywic oraz pomocniczych elementów stalowych,
- naprawa polegająca na częściowym demontażu konstrukcji, reprofiliacji uszkodzonych elementów i ich ponownym montażu,
- wykonanie dodatkowej, niezależnej konstrukcji stalowej, która spełnia funkcje konstrukcyjne i wymagania architektoniczne (estetyczne obudowanie elementów żelbetowych), wybrano do realizacji wariant ostatni (c).

Jednocześnie, z uwagi na montaż fasady stadionu, Główny Inspektor Nadzoru dopuścił możliwość prowadzenia prac w obrębie uszkodzonych elementów schodów, m.in. pod warunkiem doraźnego wzmocnienia głowic słupów. Opracowano projekt wzmocnienia sześciu uszkodzonych głowic słupów. Dotyczyło to słupów najwyższych, z osadzonymi w głowicy słupa rurami Robusta. Zgodnie z projektem wzmocnienie polegało na wykonaniu opaski z laminatów FRP, powstałych z mat z włókien węglowych i żywicy epoksydowej.

W lipcu 2011 r. przystąpiono do realizacji projektu ostatecznego wzmocnienia, polegającego na obudowaniu istniejących prefabrykatów blachami stalowymi, połączonymi z betonem za pomocą zapraw mineralno-polymerowych.

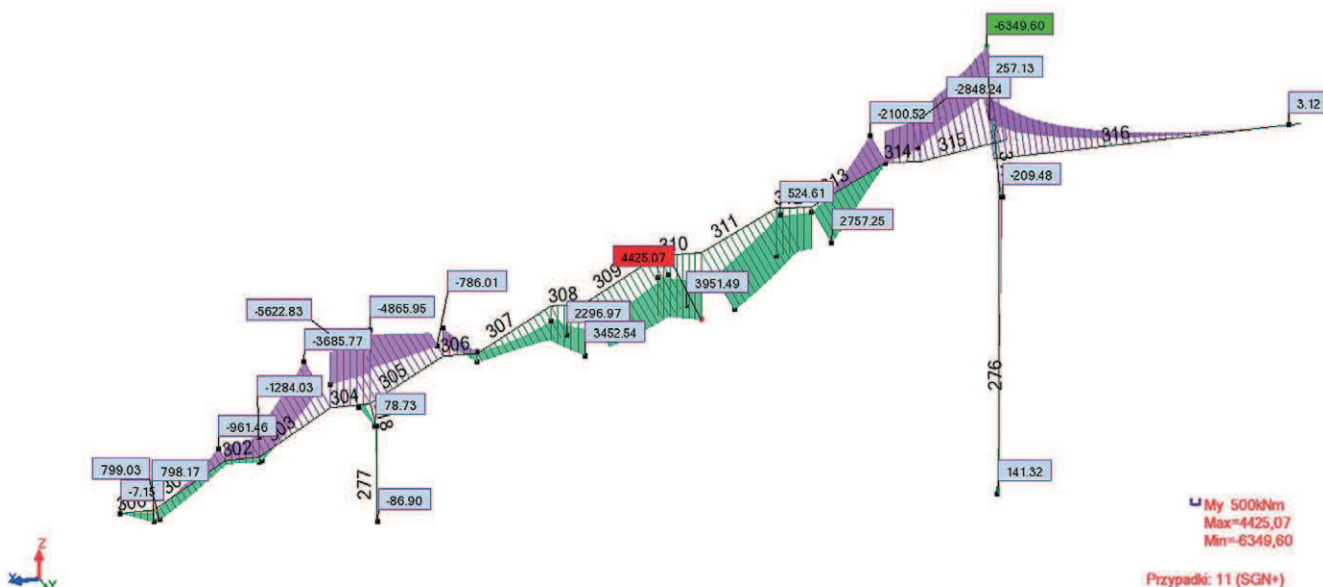
Szerzej aspekty wykonawstwa zostaną przedstawione w części 2 artykułu, pt. „Błędy projektu zamienne-go i realizacji”.

#### 4. Opis i błędy projektu pierwotnego

Obliczenia statyczno-wytrzymałościowe schodów w wersji monolitycznej (niezrealizowanej) zamieszczono łącznie na 6 stronach z 646-stronicowej dokumentacji obliczeń statyczno-wytrzymałościowych konstrukcji żelbetowej stadionu. Na podstawie zamieszczonych rysunków na stronach obliczeń można domniemywać, że modele obliczeniowe przygotowano w programie obliczeniowym Robot Millennium, za pomocą modelu przestrzennego, prętowo-powłokowego. Główne belki nośne i słupy, tworzące pojedynczą ramę ze wspornikiem, zamodelowano wykorzystując elementy prętowe, sztywno ze sobą połączone, jak również sztywno połączone z konstrukcją wsporcą. Płyty spoczników i biegów schodowych zamodelowano jako płaskie powłoki wspornikowo dwustronnie połączone sztywno z pojedynczą belką główną, zlokalizowaną w osi podłużnej schodów, tworząc w ten sposób przekrój krzyżowy. Schemat przyjętego do obliczeń modelu przedstawionego w dokumentacji obliczeń pokazano na rysunku 3.

Dolny bieg zaprojektowano najprawdopodobniej jako sztywno połączony z konstrukcją stadionu poniżej poziomu posadowienia schodów, natomiast połączenie górnego wspornikowego spocznika z konstrukcją stadionu przewidziano w projekcie schodów monolitycznych z wykorzystaniem koszyków izolacyjnych typu ISOPRO typ PI-IPT 14/10. Tak rozwiązane połączenie, w podejściu obliczeniowym, można interpretować jako liniowo przegubowe, nieprzesuwne.





**Rys. 6.** Wykres obwiedni momentów zginających w płaszczyźnie pionowej ( $M_y$ ) [kNm], bez uwzględnienia oddziaływań termicznych i skurczowych, wg obliczeń sprawdzających

wań termicznych i skurczowych, wyznaczono potrzebne zbrojenie główne i stwierdzono:

a) W przypadku ekstremalnego momentu zginającego i towarzyszącej siły osiowej (rozciąganie), występujących nad słupem wysokim (rys. 5), według obliczeń wymagana powierzchnia zbrojenia w górnej części belki wynosi 193,67 cm<sup>2</sup>, co odpowiada 32 prętom  $\varnothing 28$ , a zgodnie z rysunkami wykonawczymi w tym przekroju zaprojektowano 16 prętów  $\varnothing 28$  – podobna sytuacja występuje w kolejnym przekroju krytycznym – przesłowym; wymagane obliczeniowo pole zbrojenia wynosi 156,29 cm<sup>2</sup>, co odpowiada 26 prętom  $\varnothing 28$ , a zgodnie z rysunkami wykonawczymi w tym przekroju zaprojektowano także tylko 16 prętów  $\varnothing 28$ . Zaprojektowane zbrojenie przedstawione na rysunkach wykonawczych w projekcie schodów monolitycznych jest zatem zdecydowanie niewystarczające, jeżeli w obliczeniach uwzględnia się oprócz obciążeń stałych i użytkowych, także wpływy termiczne i skurczowe. W przypadku zaistnienia oddziaływań termicznych i skurczowych nastąpiłyby lokalne uszkodzenia konstrukcji.

b) W przypadku, gdyby konstrukcja mogła się swobodnie odkształcać, czyli bez potrzeby uwzględniania wpływów termicznych, stwierdzono na podstawie obliczeń praktycznie wystarczającą ilość zbrojenia przewidzianą w rysunkach zarówno w belkach, jak i w słupach.

c) Analogiczna sytuacja występuje w ilości zbrojenia w płytach biegów i spoczników. W przypadku uwzględnienia oddziaływań termicznych i skurczowych – zbrojenie jest niewystarczające, natomiast bez uwzględnienia oddziaływań termicznych i skurczowych – stwierdzono praktycznie wystarczające ilości zbrojenia konstrukcji, za wyjątkiem zbrojenia górnego podłużnego (równoległego do belek) spoczników pośrednich. Uwidocz-

niło się tu również zbyt duże uproszczenie obliczeniowe zastosowane w pierwotnym modelu numerycznym, polegające na modelowaniu płyt spoczników i biegów jako uśrednionych powierzchni płaskich (rys. 3), zamiast uwzględnienia rzeczywistego kształtu płyty łamanej w miejscu połączenia płyty spocznika z płytą biegu (rys. 5).

W projekcie pierwotnym brak jest śladów obliczeń dynamicznych, co dziwi przy tego rodzaju konstrukcji. Wykonano zatem sprawdzające obliczenia dynamiczne i stwierdzono, że pierwsza postać drgań własnych jest postacią giętną, przy częstotliwości drgań własnych  $f = 3,90$  Hz, natomiast druga jest postacią skrętną, dla częstotliwości drgań własnych wynoszących  $f = 4,77$  Hz. Przyjmując za [5], [6] częstotliwości chodu ludzkiego po schodach w zakresie od około 3 do 4 Hz, z zastrzeżeniem możliwości wzrostu częstotliwości wzbudzenia do 4,5 Hz, należy stwierdzić, na podstawie analizy modalnej, że konstrukcja schodów w wersji monolitycznej stanowiła układ niskostrojony, a zakres częstości wymuszającej obejmuje pierwszą postać drgań własnych (swobodnych) konstrukcji schodów, co oznacza, że może dojść do zjawiska rezonansu. W związku z tym, drgania ustalone wzbudzone poruszającym się tłumem po analizowanych schodach, mogły powodować znaczący wzrost sił wewnętrznych, w konsekwencji doprowadzając do lokalnych uszkodzeń. Analizując wyniki przyrostu sił wewnętrznych w charakterystycznych przekrojach należy stwierdzić, że nośność konstrukcji schodów przy częstości wymuszenia w zakresie rezonansowym, to znaczy w zakresie 0,8–1,2 częstości drgań swobodnych w pierwszej postaci, co odpowiada częstościom 3,12 do 4,6 Hz, była w pierwotnej wersji (monolitycznej) zdecydowanie niewystarczająca.

#### 4. Wnioski dotyczące założeń i obliczeń sprawdzających konstrukcji monolitycznej

Koncepcja bardzo podatnego ustroju jednobelkowego przyjętego dla schodów podlegających obciążeniom tłumem ludzi przy ewakuacji widowni jest błędna i dowodzi braku wyobraźni projektantów. Do tego doszły błędy założeń do obliczeń.

Podsumowując analizę projektu monolitycznego można stwierdzić, że projekt został wykonany bez uwzględnienia oddziaływań termicznych i skurczowych oraz bez uwzględnienia wpływów dynamicznych. W otrzymanej do sprawdzenia dokumentacji nie znaleziono informacji o analizowaniu tych wpływów w trakcie opracowania projektu wykonawczego schodów.

Zaprojektowane zbrojenie przedstawione na rysunkach wykonawczych w projekcie schodów monolitycznych jest zdecydowanie niewystarczające, jeżeli w obliczeniach uwzględni się wpływy termiczne i skurczowe.

W wyniku przeprowadzonych obliczeń sprawdzających – z pominięciem wpływu temperatury i skurczu, a także wpływów dynamicznych – stwierdzono praktycznie wystarczające ilości zbrojenia konstrukcji zarówno w ryglach, jak i w słupach. Natomiast w przypadku zaistnienia oddziaływań termicznych i skurczowych oraz dynamicznych nastąpiłyby lokalne uszkodzenia konstrukcji. Przekroczenia dotyczą zarówno stanu granicznego nośności, jak też stanu granicznego użyteczności (ugięcia, zarysowania).

W zakresie obliczeń dynamicznych stwierdzono, że konstrukcja schodów w wersji monolitycznej jest układem niskostrojonym, a zakres częstości wymuszającej obejmuje pierwszą postać drgań własnych (swobodnych) konstrukcji schodów. Analizując wyniki przyrostu sił wewnętrznych w charakterystycznych przekrojach stwierdzono, że nośność konstrukcji schodów przy częstości wymuszenia w zakresie rezonansowym, jest zdecydowanie niewystarczająca.

Część 2. artykułu będzie zawierać omówienie błędów projektu zamiennego (zrealizowanego), stanów awaryjnych i przedstawienie realizacji wzmocnienia.

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] Rysunki projektu wykonawczego schodów kaskadowych w wersji pierwotnej, monolitycznej, Wrocław, grudzień 2008
- [2] Fragmenty pierwotnych obliczeń statyczno-wytrzymałościowych konstrukcji żelbetowej stadionu dotyczące schodów zewnętrznych w wersji monolitycznej (źródło: Mazowiecki Urząd Wojewódzki) 2008
- [3] „Sprawozdanie z wykonania badań: 1) pod obciążeniem od ciężaru własnego betonowej płyty spocznika, 2) pod obciążeniem próbnym płyty spocznika, ciągu schodowego w osi 410 Stadionu Narodowego w Warszawie” wykonane przez Instytut Budowy Dróg i Mostów w Warszawie, sierpień–wrzesień 2010
- [4] PN-EN 206-1: 2003/A2:2006; Beton. Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność
- [5] P354: Design of Floors for Vibration: A New Approach (Revised Edition, February 2009)
- [6] ISO 10137: Bases for design of structures – Serviceability of buildings against vibration. International Organisation for Standardization (ISO), 2007

# Wzmacnianie sklepień murowych materiałami kompozytowymi



Dr inż. Łukasz Hojdis, dr hab. inż. Zbigniew Janowski, dr inż. Piotr Krajewski, Politechnika Krakowska

## 1. Wprowadzenie

Użytkowane obecnie sklepienia, kopuły i łuki to głównie konstrukcje zabytkowe często narażone na bardziej niekorzystne oddziaływanie niż przewidziane przez ich budowniczych. Wiele sklepień zostało uszkodzonych w wyniku zmiany sposobu użytkowania obiektu lub na skutek dodatkowych oddziaływań. Konstrukcje te wymagają napraw, rekonstrukcji bądź wzmocnienia, aby mogły być nadal bezpiecznie eksploatowane. Naprawa lub wzmocnianie sklepień murowych jest zagadnie-

niem trudnym i wymagającym każdorazowo indywidualnego rozwiązania. Wynika to z trudności modelowania sklepionych konstrukcji murowych, ograniczonej wiedzy o właściwościach mechanicznych materiałów zastosowanych do ich wykonania, a także złożonej geometrii sklepień.

Współcześnie przy wzmocnianiu konstrukcji murowych coraz częściej stosowane są materiały z kompozytów zbrojonych włóknami. Materiały te zapewniają wykonanie wzmocnienia w sposób mało inwazyjny. Mogą być stosowane w wielu miejscach, gdzie dostęp