

Kaskada błędów wiodąca do awarii – schody kaskadowe Stadionu Narodowego. Część II – Błędy projektu zamiennego i realizacji

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

1. Wprowadzenie

Schody kaskadowe (nieruchome) na Stadionie Narodowym to 15 konstrukcji o podobnym układzie geometrycznym, stanowiących główną drogę ewakuacyjną z trybun. Realizacja konstrukcji schodów przebiegała z dużymi trudnościami, co stanowiło istotny powód opóźnienia zakończenia całej inwestycji. Pierwotne rozwiązanie projektowe, przewidujące monolityczne biegi z jedną centralną belką ciągłą, podpartą na trzech słupach, zawierało istotne usterki koncepcyjne i błędy projektowe. W dodatku, było to rozwiązanie trudne technologicznie i bardzo czasochłonne. Opracowano zamienny projekt konstrukcji w wersji prefabrykowanej. Projekt ten powtarzał usterki projektu pierwotnego i wprowadzał dalsze błędy w koncepcji, obliczeniach i szczegółach. Ten projekt został zrealizowany. Stwierdzone stany awaryjne doprowadziły do konieczności radykalnego wzmocnienia. W artykule przedstawiono, na podstawie obserwacji, analiz i obliczeń sprawdzających, wykonanych na zlecenie ubezpieczycieli, historię

i główne przyczyny zaistniałej sytuacji. W części I artykułu przedstawiono błędy koncepcji i projektu pierwotnego, a w tej przedstawiono błędy projektu zamiennego i realizacji.

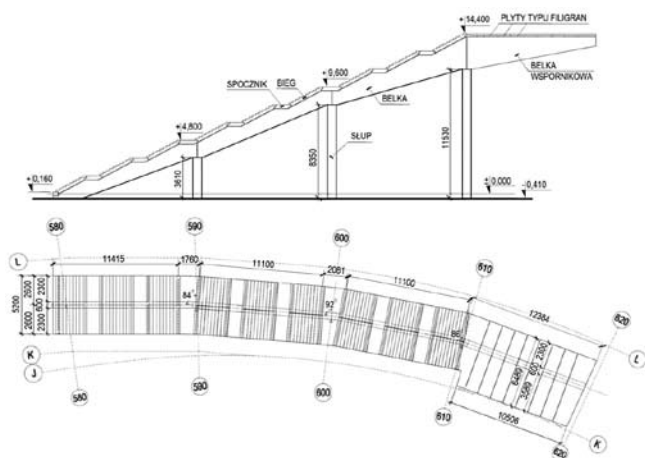
2. Opis konstrukcji prefabrykowanej – zrealizowanej

Schody zaprojektowane pierwotnie jako monolityczne, przeprojektowano w celu skrócenia czasu budowy i zmieniono technologię ich wykonania z monolitycznej na prefabrykowaną. Projekt zamienny powstał na wniosek Generalnego Wykonawcy, po uzyskaniu zgody Projektanta oraz akceptacji Inwestora. Starano się zachować przy tym ogólną koncepcję konstrukcji schodów monolitycznych.

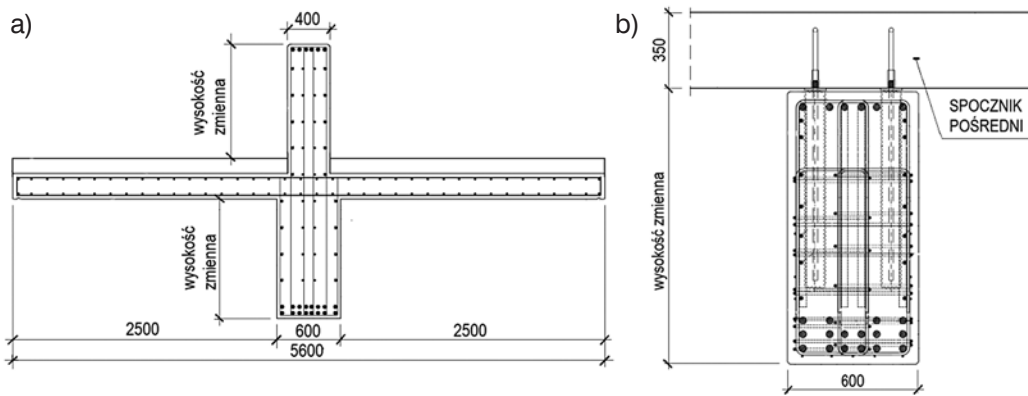
Schody zaczynają się od poziomu +0,16 m, a najwyższy spocznik schodów kaskadowych znajduje się na poziomie +14,18 m i jest połączony z konstrukcją Stadionu. Łączna szerokość biegów schodowych wynosi 5,2 m. Schematyczny rysunek schodów przedstawiono na rysunku 1.

Główną konstrukcję nośną schodów kaskadowych według projektu zamiennego stanowią cztery prefabrykowane belki żelbetowe o szerokości 0,6 m i zmiennej wysokości, wsparte na trzech prefabrykowanych słupach żelbetowych o przekroju 0,6 m × 0,8 m i różnej wysokości, dostosowanej do lokalizacji na obwodzie Stadionu. Dolną belkę oparto bezpośrednio na podłożu (w poziomie -0,41 m). Belkę górną wykonano jako wspornikową. Na wsporniku oraz na belce stropowej Stadionu oparto płyty typu Filigran zbrojone prętami $\varnothing 12$ mm i wzmocnione stalowymi dwuteownikami HEB160 w zmiennym rozstawie – od 0,6 m do 1,0 m (średnio 0,75 m). Na płytach typu Filigran wybetonowana została płyta żelbetowa o grubości 0,16 m.

Prefabrykowane belki ułożone są w rzucie w linii łamanej (rys. 1). Kształt linii jest różny i zależy od lokalizacji schodów względem obrysu Stadionu. Belki usytuowane są w osi biegu, w związku z czym spoczniki sta-



Rys. 1. Przekrój – rozwinięcie w osi belek i widok z góry przykładowych schodów kaskadowych w konstrukcji prefabrykowanej – zrealizowanej, wg [2]



Rys. 2.
Przekroje poprzeczne
belek: a) w wersji
pierwotnej – monoli-
tycznej, b) w zamien-
nej wersji prefabryko-
wanej – zrealizowanej,
wg [1], [2]

nowią płyty dwustronnie wspornikowe, zamocowane w belkach za pomocą śrub osadzonych w gniazdach z rur karbowanych typu Robusta o wymiarach $\text{Ø}80 \times 900 \text{ mm}$ (rys. 2b).

Prefabrykowane belki ułożone są w rzucie w linii łamanej (rys. 1). Kształt linii jest różny i zależy od lokalizacji schodów względem obrysu Stadionu. Belki usytuowane są w osi biegu, w związku z czym spoczniki stanowią płyty dwustronnie wspornikowe, zamocowane w belkach za pomocą śrub osadzonych w gniazdach z rur karbowanych typu Robusta o wymiarach $\text{Ø}80 \times 900 \text{ mm}$ (rys. 2b i dalej rys. 9a).

Na spocznikach oparto prefabrykowane biegi schodowe o szerokości 2,59 m, niepołączone bezpośrednio z belkami. Biegi schodowe połączono ze spocznikami 3 prętami $\text{Ø}16 \text{ mm}$ (rozmieszczonymi wzdłuż krawędzi górnej biegu) i 3 prętami $\text{Ø}12 \text{ mm}$ (rozmieszczonymi wzdłuż krawędzi dolnej biegu). Na spocznikach pręty biegów schodowych osadzono w gniazdach o średnicy $\text{Ø}60 \text{ mm}$ formowanych rurami Robusta.

W celu zapewnienia połączenia słupów z belkami, w słupie niskim i pośrednim wykonano wystające ze słupów pręty $\text{Ø}32 \text{ mm}$ z nagwintowanymi końcami, trafiające w otwory w belkach, natomiast w słupie najwyższym pozostawiono gniazda o średnicy $\text{Ø}100 \text{ mm}$ i głębokości 1650 mm formowane rurami Robusta.

W trakcie montażu, w gniazdach, po usunięciu z nich wody, osadzano pręty i następnie wypełniano je modyfikowaną zaprawą cementową w celu zapewnienia zakotwienia prętów.

3. Opis i błędy projektu zamiennego

Konsekwencją zmiany technologii wykonania schodów (z monolitycznej na prefabrykowaną) były zmiany rozwiązań projektowych, które zostały wprowadzone przez Projektanta. Uznano je jako odstępstwa nieistotne od pierwotnych rozwiązań projektowych zatwierdzonych decyzją pozwolenia na budowę zgodnie z art. 36a ust. 5 i 6 Prawa budowlanego.

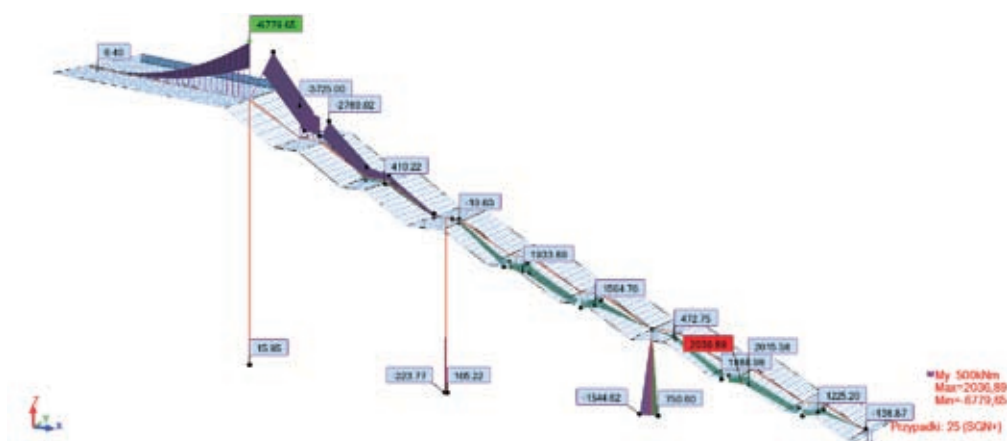
Należy zaznaczyć, że zmiany konstrukcji w stosunku do projektu pierwotnego były zasadnicze z punktu widzenia statyki (oraz dynamiki) konstrukcji i obejmowały m.in.:

- zmianę przekroju głównych belek nośnych schodów (z krzyżowego na prostokątny, rys. 2),
- przyjęcie rozwiązania z pominięciem współpracy biegów schodowych z belkami,
- zmianę schematu statycznego ustroju nośnego przez wprowadzenie dodatkowego słupa podpierającego belki i swobodne oparcie dwóch dolnych segmentów belkowych na słupach (zmiana w stosunku do schematu belki ciągłej w wersji pierwotnej),
- wprowadzenie kluczowych i zarazem kłopotliwych – z punktu widzenia wykonawstwa – połączeń między elementami prefabrykowanymi.

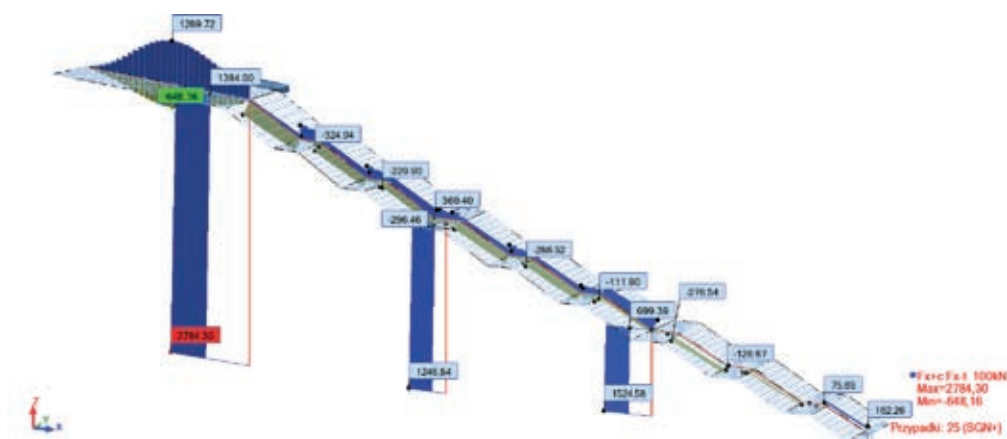
Projekt konstrukcji schodów kaskadowych w wersji prefabrykowanej należy oceniać w dwóch aspektach: 1) poprawności obliczeń statyczno-wytrzymałościowych i 2) poprawności rozwiązań przyjętych ostatecznie w dokumentacji wykonawczej, rysunkowej.

W obliczeniach statycznych stwierdzono następujące błędy w założeniach obliczeniowych, mające różne znaczenie:

- założenie podparcia przegubowo-nieprzesuwnego ustroju nośnego bezpośrednio na fundamencie; jest to niezgodne z rozwiązaniem tego połączenia na rysunkach wykonawczych, gdzie zaprojektowano połączenie dolnej belki nośnej z fundamentem z zapewnieniem przesuwu poziomego,
- błąd w definicji elementów prętowych dwóch belek nośnych, tj. pierwszej i drugiej, polegający na przyjęciu do obliczeń zaniżonego przekroju o wymiarach $60 \times 90 \text{ cm}$, zamiast $60 \times 120 \text{ cm}$,
- w pierwszym wariantcie obliczeń uwzględnienie dodatkowego obciążenia o wartości $16,88 \text{ kN/m}$ wewnętrznym murkiem rozdzielającym z betonu (niezrealizowanym),
- przyjęcie obciążenia wszystkich spoczników ciężarem najkrótszego, dolnego biegu, z niedoszacowaniem tym samym obciążenia przy pozostałych, dłuższych biegach,
- pominięcie obciążenia poziomego poręczy, o normalnej wartości charakterystycznej $1,5 \text{ kN/m}$,
- przyjęcie obciążenia wiatrem w płaszczyźnie układu jako liniowo rozłożonego na krawędzi spoczników, zamiast parcia prostopadłego do biegów i spoczników.



Rys. 3.
Obwiednia momentów zginających M_y [kNm] z uwzględnieniem obciążenia termicznego



Rys. 4.
Obwiednia sił osiowych F_x [kN] z uwzględnieniem obciążenia termicznego

W projekcie zamiennym zupełnie pominięto w obliczeniach dwa istotne wpływy: obciążenia termiczne (nagrzanie i ochłodzenie) oraz obciążenia dynamiczne schodów.

Z kolei w dostępnej dokumentacji technicznej projektu wykonawczego nie stwierdzono większych usterek. Wątpliwość budzi jedynie sposób wykonstruowania zbrojenia poprzecznego w belkach. Z uwagi na sposób betonowania w zakładzie prefabrykacji (w pozycji odwróconej) zbrojenie to zostało zaprojektowane na pełen zakład dołem, co w przypadku belek dolnych – pierwszej i drugiej – powoduje zakład w strefie rozciąganej. W konsekwencji, w tych belkach istnieje zagrożenie prostowaniem haków i odpadaniem otuliny w skręcanych belkach.

Należy również zaznaczyć, że na rysunkach wykonawczych przyjęto dla otulenia klasę ekspozycji XC3, podczas gdy w projekcie pierwotnym (w technologii monolitycznej) przyjęto klasę XC4. Według normy [11] klasę ekspozycji XC3 odnosić należy do środowiska o umiarkowanej wilgotności (w tym powierzchni betonowych na zewnątrz, osłoniętych przed deszczem); z kolei XC4 do środowiska „cyklicznie mokrego i suchego” (do powierzchni betonowych narażonych na kontakt z wodą).

Tymczasem dla schodów na zewnątrz, z uwagi na możliwość cyklicznego zamrażania/rozmarzania betonu

w stanie mokrym, właściwą klasą ekspozycji jest klasa XF3. To pominięcie powtórzono za wersją monolityczną projektu.

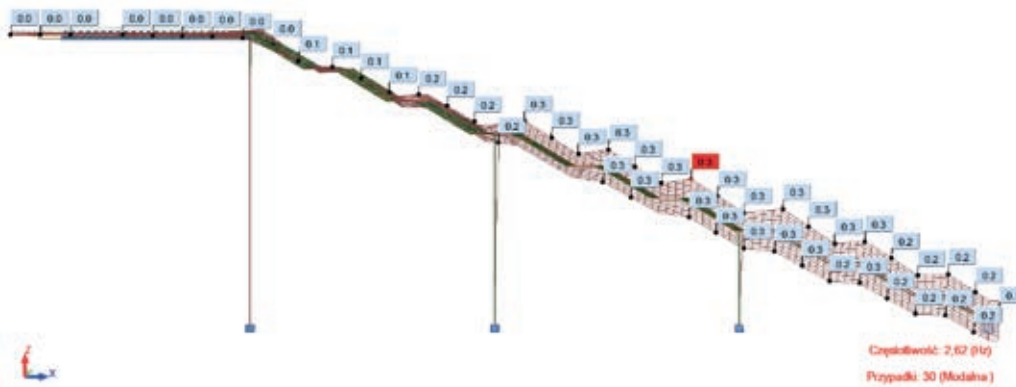
Niezależnie jednak od tej formalnej niezgodności założeń, warunki minimalnego otulenia przyjęte na rysunkach wykonawczych elementów prefabrykowanych zostały spełnione w każdym przypadku (tj. dla klas ekspozycji XC3, XC4 i XF3).

W celu weryfikacji obliczeń, do projektu zamiennego schodów przeprowadzono własne analizy statyczne i dynamiczne konstrukcji schodów prefabrykowanych, w tym z uwzględnieniem oddziaływań temperaturowych i wpływów dynamicznych.

Obliczenia sprawdzające wykonano dla tej klatki schodowej, dla której wcześniej wykonano obciążenie próbne [6].

W modelu przyjęto następujące założenia obliczeniowe: beton B60; główne belki nośne zamodelowano jako elementy prętowe o przekrojach prostokątnych stałych lub zmiennych, uśrednionych na długości; belki nośne zamodelowano w osi układu konstrukcji, z korektą momentów bezwładności względem osi głównych przekroju, spoczniki oraz biegi schodowe zamodelowano jako elementy powłokowe; płyty prefabrykowane biegów rozdzielono w osi belki, traktując je jako pracujące niezależnie; biegi schodowe oddylatowano od belek.

Przyjęto sztywne zamocowanie spoczników w belkach



Rys. 5.
Pierwsza forma
drgań swobodnych
(własnych)

i przegubowe połączenia biegów schodowych wzdłuż krawędzi spoczników. Spocznik łączący wspornik belki z płytą Stadionu przyjęto jako panel z przewieszeniem, oparty liniowo, przegubowo nieprzesuwnie na konstrukcji Stadionu oraz przegubowo na wsporniku belki. Połączenia słupów z belkami przyjęto jako przegubowe w płaszczyźnie układu konstrukcji schodów. Słupy sztywno zamocowano w fundamencie, a belkę dolną schodów oparto bezpośrednio na fundamencie, przegubowo-przesuwnie w płaszczyźnie układu.

Wykonano następujące obliczenia: w ramach statyki liniowej – kombinacje pełne wszystkich obciążeń, w ramach analizy dynamicznej – wyznaczono parametry drgań własnych konstrukcji oraz odpowiedź konstrukcji na drgania wymuszające.

Zestawienie obciążeń wykonano na podstawie polskich norm (poprzedzających Eurokody), co było zgodne z założeniami przyjętymi w projekcie zamiennym konstrukcji.

Obciążenie ciężarem własnym przyjęto w programie obliczeniowym na podstawie wymiarów geometrycznych przekrojów i gęstości materiału, z uwzględnieniem rozbieżności pomiędzy rzeczywistą geometrią elementów konstrukcyjnych a modelem obliczeniowym.

Na spoczniku górnym uwzględniono warstwę wyrównawczą 40 mm. Obciążenie ciężarem barierki przyłożono do krawędzi spoczników i biegów schodowych jako liniowo rozłożone. W obliczeniach sprawdzających ostatecznie pominięto obciążenie ciężarem wewnętrznego murka betonowego, które pierwotnie zadano w obliczeniach [3], po czym wycofano w [4].

Obciążenie zmienne tłumem o wartości $q_k = 5,0 \text{ kN/m}^2$ przyłożono do spoczników i biegów schodowych jako równomiernie rozłożone, rzutowane na płaszczyznę poziomą. Obciążenie poziome poręczy o wartości $q_k = 1,5 \text{ kN/m}$ przyłożono do krawędzi spoczników i biegów schodowych jako układ obciążeń liniowo rozłożonych i momentów skręcających.

Obciążenie wiatrem zdefiniowano w dwóch schematach, jako: 1) obciążenie prostopadłe do układu belek: obciążenie przyłożono jako liniowe, rozłożone na jednostkę długości belek i słupów, zebrane z odpowiednich po-

wierzchni przypadających na poszczególne elementy; w zestawieniu pominięto niewielki moment skręcający, wynikający z mimośrodowego oddziaływania wiatru oraz 2) obciążenie równoległe do układu (belek nośnych) oddziałujące od strony wejścia na schody; przyłożono je jako obciążenie powierzchniowe prostopadłe (parcie) do powierzchni biegów i spoczników.

Oddziaływania wiatru równoległego do układu belek nośnych, od strony wejścia na schody jako ssania, nie rozważano z uwagi na wpływ korzystny. Nie rozważono również kierunku wiatru równoległego do układu belek nośnych oddziałującego od strony podniebienia schodów z uwagi na korzystny wpływ.

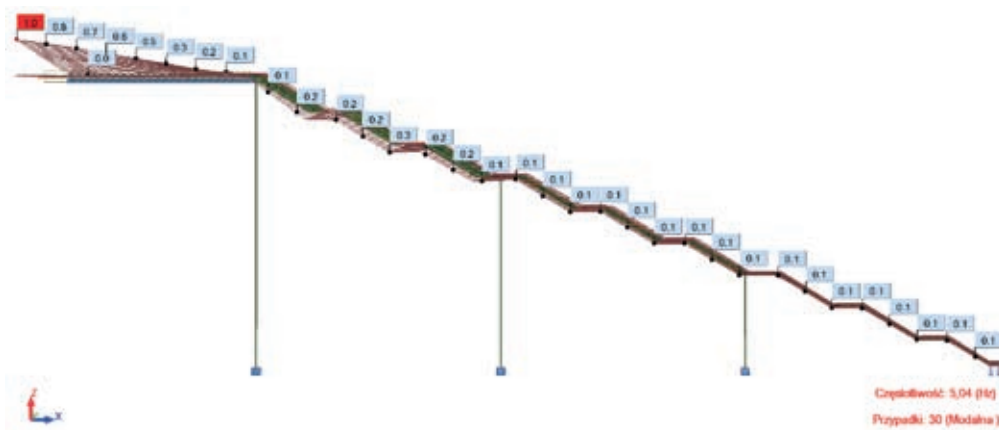
Oddziaływanie temperatury w porze letniej o wartości $+32^\circ\text{C}$ i w porze zimowej o wartości -20°C przyjęto jako różnicę $\Delta t^\circ\text{C}$, między średnią temperaturą konstrukcji t w porze letniej i zimowej, a jej temperaturą scalenia t_0 .

Obliczenia sprawdzające wykonano dla dwóch równie prawdopodobnych sytuacji obliczeniowych. W pierwszej sytuacji obliczeniowej analizę statyczną prowadzono z uwzględnieniem wszystkich możliwych przypadków obciążeń, w tym biorąc pod uwagę oddziaływania temperaturowe. W drugiej sytuacji obliczeniowej wykonano analizę statyczną dla wszystkich przypadków obciążeń, jednak z pominięciem oddziaływań termicznych.

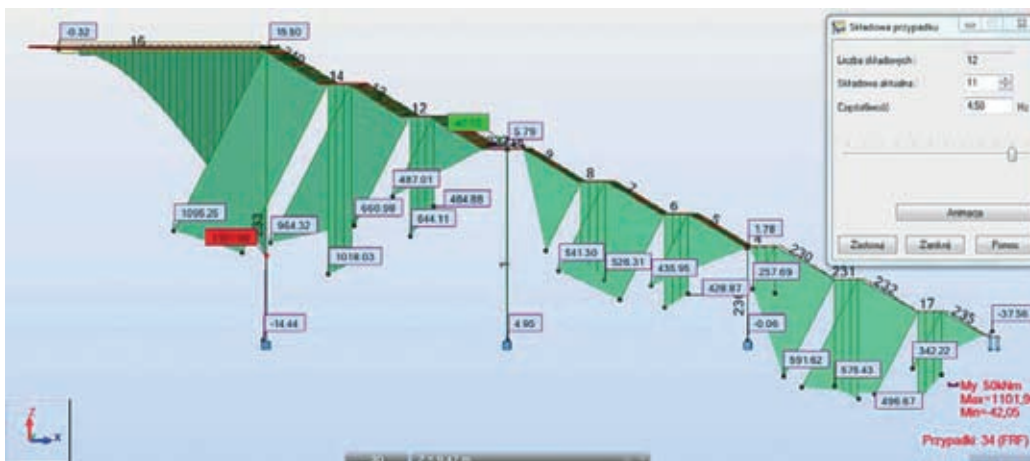
Uwzględnienie obciążenia temperaturą (nagrzania albo ochłodzenia) konstrukcji schodów spowodowało istotny wzrost sił w konstrukcji, a w szczególności: w najniższym słupie (momentów zginających M_y w płaszczyźnie układu i sił poprzecznych F_y – rys. 3) oraz we wsporniku belki (rozciągających sił osiowych F_x – rys. 4).

Model numeryczny wykonany na potrzeby analizy statycznej wykorzystano do numerycznej analizy dynamicznej w zakresie częstotliwości i drgań swobodnych (analizy modalnej).

Na podstawie analizy modalnej do dalszych analiz wybrano dwie pierwsze postaci drgań własnych modelu konstrukcji schodów prefabrykowanych, tj.: skrętną, dla częstotliwości drgań własnych $f_1 = 2,62 \text{ Hz}$ (rys. 5) oraz giętno-skrętną dla $f_2 = 5,04 \text{ Hz}$ (rys. 6).



Rys. 6.
Druga forma drgań swobodnych (własnych)



Rys. 7.
Wykres momentów zginających M_v [kNm] dla częstotliwości wymuszenia $f = 4,50$ Hz

W celu oceny podatności konstrukcji na drgania wykonano analizę harmoniczną w dziedzinie częstotliwości. Celem tej analizy było uzyskanie wartości tzw. funkcji odpowiedzi częstotliwości FRF (ang. *Frequency Response Function*) dla węzłów modelu. Przebieg funkcji odpowiedzi częstotliwości pozwolił na oszacowanie wpływu drgań na konstrukcję schodów w założonej dziedzinie częstotliwości.

W celu analizy wpływu wzbudzenia w trakcie schodzenia tłum po schodach, do wszystkich biegów schodowych oraz spoczników przyłożono równomiernie rozłożone obciążenie tłumem o wartości $5,0 \text{ kN/m}^2$.

Przyjęto zakres częstotliwości wzbudzenia schodów od $0,01$ do $4,5 \text{ Hz}$, obejmujący zakres częstotliwości chodu ludzkiego po schodach, zgodnie z [13], [14].

Przyjmując za [12], [13] częstotliwości chodu ludzkiego po schodach w zakresie: od około 3 do 4 Hz , z zastrzeżeniem możliwości wzrostu częstotliwości wzbudzenia do $4,5 \text{ Hz}$, należy stwierdzić, że obliczone wartości dwóch pierwszych częstotliwości drgań własnych ($f_1 = 2,62 \text{ Hz}$ oraz $f_2 = 5,04 \text{ Hz}$) są bliskie częstotliwościom chodu ludzkiego po schodach. Stąd, istnieje prawdopodobieństwo wystąpienia w konstrukcji schodów drgań o charakterze rezonansowym. W analizie harmonicznnej wpływ drgań rezonansowych uwidocznił się przede wszystkim w zakresie wymuszenia bliskiego drugiej postaci drgań własnych ($4,50 \text{ Hz} \approx f_2 = 5,04 \text{ Hz}$).

W wyniku rezonansu nastąpiło odwrócenie znaku momentów zginających – w stosunku do wartości projektowanych – w belce wspornikowej oraz w trzeciej (górnej) belce – rys. 7.

W projekcie zamiennym schodów, w belce wspornikowej przyjęto dołem $4\text{Ø}32 \text{ mm}$ (stąd: $A_{s1} = 32,17 \text{ cm}^2$) i $12\text{Ø}32 \text{ mm}$ górą ($A_{s2} = 96,51 \text{ cm}^2$), ze stali RB500W (A-IIIIN). Uwzględniając to zbrojenie, nośność na zginanie (dołem) przekroju nadstłupowego oszacowano na: $M_{Rd} \approx 3700 \text{ kNm}$, czyli znacząco więcej od momentu wyznaczonego w analizie harmonicznnej (rys. 7). Co ważne, również połączenie belki wspornikowej z górną belką schodów, dzięki ciągłości dolnych prętów, pozwoliłoby przenieść momenty rozciągające dolną krawędź wspornika – rys. 9b.

Pomimo zauważonych błędów w pierwotnych obliczeniach statycznych (obliczeń dynamicznych nie wykonano) do projektu zamiennego schodów, w obliczeniach sprawdzających (z uwzględnieniem dynamiki schodów) nie stwierdzono przekroczenia stanów granicznych nośności w przekrojach krytycznych głównych elementów nośnych schodów i uzyskano potrzebne ilości zbrojenia co najwyżej równe zawartym na rysunkach wykonawczych.

Wynika to z przewymiarowania przekrojów na rysunkach wykonawczych elementów prefabrykowanych schodów i przyjęcia ilości zbrojenia większej od ustalonej na podstawie wyników obliczeń wytrzymałości-

wych. Również uzyskany w obliczeniach dynamicznych wzrost sił w schematach, które nie były brane pod uwagę w projektowaniu, i w zakresie częstotliwości wymuszenia $0 \div 4,5$ Hz, nie prowadzi do przekroczenia warunków stanu granicznego nośności. Wykazano, że nośność przewymiarowanych przekrojów podporowych (dzięki zbrojeniu dołem) jest wystarczająca do przeniesienia tych dodatkowych sił.

4. Wady realizacji pierwszego etapu

Niezależnie od błędów projektowych w wersji monolitycznej (niezrealizowanej) i w wersji prefabrykowanej (zrealizowanej) wystąpiły w tej ostatniej znaczące wady wykonawcze. Wady te wystąpiły we wszystkich fazach realizacji konstrukcji prefabrykowanej, a mianowicie:

- przy wykonywaniu elementów w zakładzie prefabrykacji,
- w trakcie transportu i składowania elementów na budowie,
- w trakcie montażu konstrukcji schodów.

W trakcie wykonawstwa elementów (w zakładzie prefabrykacji) popełniono błędy polegające przede wszystkim na:

- niedokładności geometrycznej prefabrykatów, co ujawniło się w trakcie montażu schodów przez wystąpienie licznych imperfekcji w stykach pomiędzy poszczególnymi prefabrykatami wszystkich 15 biegów schodów kaskadowych nieruchomych,
- uchybieniach w usytuowaniu otworów i wkładek do połączeń prefabrykatów.

W „Protokołach konieczności montażu schodów kaskadowych”, dołączonych do pism Kierownika Montażu schodów prefabrykowanych (przytoczonych w ekspertyzie [9]) zwrócono m.in. uwagę na fakt, że: „otwory w ryglu dolnym – w miejscu montowania pierwszych rygli na stropie – wykonano o średnicy 35 mm – niezgodnie z projektem (powinny być gniazda w postaci rury stalowej 80 mm × 40 mm × 2 mm)”,



Rys. 8. Odspojenie betonu w połączeniu belki ze spocznikiem (zdjęcie autorów)

- niewłaściwej pielęgnacji elementów schodów, której skutkiem były liczne rysy skurczowe wszystkich elementów prefabrykowanych zabudowanych w konstrukcji schodów kaskadowych, w założeniu mających mieć wykończenie w standardzie betonu architektonicznego (czego nie udało się zachować),

- wadliwej strukturze betonu (stwierdzonej w toku badań próbek pobranych ze słupów i belek przez renomowane laboratoria), skutkującej porowatością i obniżoną mrozoodpornością betonu.

W trakcie transportu i składowania elementów wystąpiły uszkodzenia naroży prefabrykatów, mogące wynikać z niedbalstwa w trakcie prowadzenia rozładunku elementów i ich składowania.

W trakcie montażu konstrukcji schodów prefabrykowanych popełniono przede wszystkim następujące błędy:

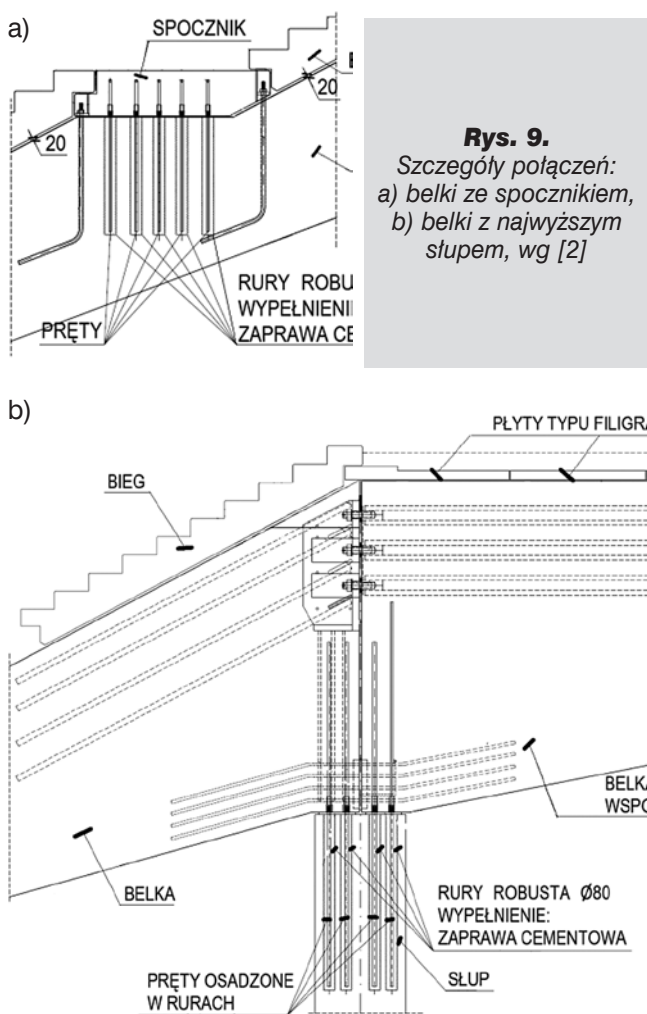
- niewłaściwe wypełnienie otworów połączeniowych (rury typu Robusta) zaprawą, co spowodowało pozostawienie wody wolnej (niezwiązanej) w połączeniu i, w okresie zimowym, jej zamarznięcie prowadzące do rozsadzenia rur Robusta przez lód; powstały uszkodzenia belek i słupów (spęknięcia betonu głowic najwyższych słupów oraz odspojenia otuliny bocznych ścian belek, rys. 8). Stwierdzono w [9] występowanie miejscowych braków wypełnienia rur Robusta i tym samym: „brak trwałego i niezawodnego zakotwienia trzpieni stalowych w rurach Robusta”. Skutki uszkodzeń wynikające z działania mrozu, polegające m.in. na spękaniach głowic słupów były doraźnie usuwane przez powierzchniowe naprawy za pomocą laminatu,

- montaż i własne przeróbki niewłaściwie wykonanych prefabrykatów [9]: 1) ze względu na niezgodne z projektem umieszczenie haków zawiesi kulowych w słupach, słupy obracano, a nie podnoszono, rozkuwano i czyszczono gniazda u podstawy słupów – były to skutki niedokładnego ich wykonania w stosunku do projektu, 2) w celu umożliwienia zamontowania belek powiększono otwory w belkach w miejscach oparcia na słupach.

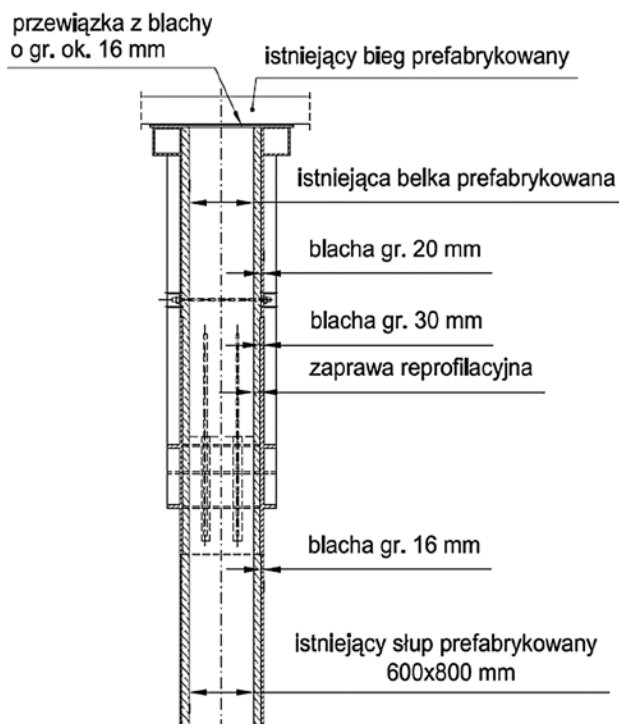
Należy zaznaczyć, że w Dzienniku Montażu [5] nie podano żadnych informacji o ewentualnych wadach prefabrykatów i błędach montażowych. Do lutego 2011 r. Wykonawca nie zgłaszał żadnych uszkodzeń montowanych elementów prefabrykowanych konstrukcji schodów. Podstawowym problemem, który uwidocznił się już w trakcie wykonawstwa (i został szeroko opisany w wielu opracowaniach, w tym np. [9]), była słaba jakość wykonania połączeń belki nośnej ze spocznikiem oraz belki nośnej z najwyższym słupem (rys. 9).

5. Wzmocnienie

Wzmocnienie prefabrykowanych schodów kaskadowych wykonano w postaci dodatkowej konstrukcji stalowej. Z uwagi na stan awaryjny konstrukcji prefabryko-



Rys. 9.
Szczegóły połączeń:
a) belki ze spocznikiem,
b) belki z najwyższym
słupem, wg [2]



Rys. 10. Przykładowy przekrój wzmocnienia, wg [8]

wanej schodów przyjęto, że wzmocniająca konstrukcja stalowa ma docelowo przenieść wszystkie obciążenia pochodzące z biegów i spoczników oraz przejąć ciężar prefabrykowanych belek. Zadaniem konstrukcji stalowej było również wyłączenie z pracy uszkodzonych węzłów prefabrykowanych schodów (uciąglenie węzłów) i przekazanie sił przekrojowych poprzez stalową obudowę słupów na fundamenty Stadionu. Oprócz spełnienia funkcji konstrukcyjnych (polegających między innymi na zwiększeniu sztywności skrętnej układu) postawiono wymagania architektoniczne – estetycznego wyglądu powierzchni.

Prefabrykowane belki obudowano blachownicą w kształcie litery „U” z uformowanymi w postaci zamkniętych skrzynek górnymi i dolnymi pasami. Docelowo pasy górne zostały połączone ze sobą przewiązkami, umieszczonymi w przestrzeni pod prefabrykowanymi płytami biegowymi i spawanymi do pasów na montażu. Widoki oraz przykładowy przekrój wzmocnienia pokazano na rysunkach 10 i 11.

Ze względu na odchyłki montażowe i geometryczne istniejącej konstrukcji oraz konieczność zwiększenia tolerancji wykonawczych dla stalowej obudowy, płaszcz stalowy nie przylegał bezpośrednio do prefabrykatów. Założono wypełnienie tej przestrzeni ok. 8 cm (lokal-

nie innej – mniejszej lub większej) między powierzchniami prefabrykatów a stalą, za pomocą zaprawy reprofilacyjnej, zapewniającej powiązanie prefabrykowanej konstrukcji z obudową stalową. W celu właściwego zespolenia prefabrykatów żelbetonowych z obudową stalową, na powierzchniach słupów i belek osadzono na żywicy łączniki w postaci nagwintowanych prętów stalowych. Łączniki naspawano również od wewnątrz płaszcza stalowego. Zaprawę reprofilacyjną zazbrojono siatką z prętów stalowych o średnicy $\varnothing 3$ mm w rozstawie co ok. 120 mm. Stalowy płaszcz został zaprojektowany z blach trzech grubości: w przypadku belek pośrednich i słupów przyjęto grubość blach 16 mm, a w obrębie węzłów i przełamania płaszczyzn obudowy zostały przyjęte wstawki wzmocniające z blach o grubości 20 mm i 30 mm. Dla przewiązek łączących górne pasy pod biegami prefabrykowanymi przyjęto grubość 16 mm, dopasowaną do rozmiaru wolnej przestrzeni pomiędzy biegami a belką. Koncepcja montażu zakładała podział konstrukcji na elementy wysyłkowe i łączenie ich przez spawanie w poszczególnych fazach bezpośrednio na budowie. W pierwszej kolejności wykonywano obudowę słupów, do której montowano prowadnice umożliwiające podniesienie konstrukcji stalowej obudowy belek. Po wzmocnieniu wykonano kontrolne badania, głównie pod kątem zachowania się konstrukcji schodów pod obciążeniem dynamicznym. Wyniki – według opinii IBDIM [10] były pozytywne. Stwierdzono zwiększenie sztywności konstrukcji pod obciążeniem statycznym



Rys. 11. Stalowe wzmocnienia schodów w trakcie realizacji (zdjęcia autorów)

i mniejszą wrażliwość na oddziaływania dynamiczne. Podkreślono zwłaszcza znaczne podwyższenie częstotliwości drgań własnych (do wartości $f_1 = 9,4$ Hz). Jednocześnie jednak zwrócono uwagę na podatność konstrukcji na oddziaływania termiczne. Stwierdzenie to jest tym bardziej zasadne, że po wykonaniu wzmocnienia obudową stalową, odtworzono w dużej mierze pierwotną koncepcję schematu statycznego schodów, zakładającą pełną współpracę wszystkich elementów. Po uciąganiu węzłów, konstrukcja stała się jeszcze bardziej wrażliwa na wpływy wahań temperatur.

6. Podsumowanie

Wielka i śledzona przez miliony realizacja, jaką był Stadion Narodowy w Warszawie, stała się przedmiotem krytyki ze względu na opóźnienia w stosunku do założeń terminowych, sięgające ponad pół roku. Jednym z najistotniejszych powodów tego opóźnienia było 15 zewnętrznych klatek schodów kaskadowych. Przedstawiono główne przyczyny projektowe i wykonawcze przedłużenia realizacji tych schodów. Nie są znane powody wielu zaniedbań w projektowaniu, w tym pominięcia oddziaływań dynamicznych na konstrukcję. Przytoczone wnioski oparto na obszernych obliczeniach statycznych i dynamicznych, obserwacjach na obiekcie oraz na analizie fragmentów dokumentacji projektowej i wykonawczej oraz opinii i ekspertyz dotyczących schodów.

Należy na koniec podkreślić, że u podstaw całej tej sytuacji leżał „grzech pierworodny”, jakim było przyjęcie jednobelkowej konstrukcji podpierającej biegi schodowe. Jest oczywiste, że autorzy pierwotnego projektu musieli sobie zdawać sprawę, że nie są to zwykłe schody, np. w reprezentacyjnym wnętrzu, ale szerokie schody, po których może zbiegać tłum podnieconych, nie za-

wsze zadowolonych kibiców. Przyjęcie wspornikowych biegów schodowych na jednej centralnej belce, w tej sytuacji jest przykładem „triumfu architektury nad zdrowym rozsądkiem”. Nie pierwszy to był przykład, ale wyjątkowo znaczące były jego skutki.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Rysunki projektu wykonawczego schodów kaskadowych w wersji pierwotnej, monolitycznej, Wrocław, grudzień 2008
- [2] Rysunki projektu wykonawczego schodów kaskadowych w wersji prefabrykowanej, styczeń–luty 2010
- [3] Fragmenty obliczeń statycznych w wersji zamiennej, prefabrykowanej, Wrocław, listopad 2009
- [4] Fragmenty obliczeń wytrzymałościowych w wersji zamiennej, prefabrykowanej, Gdańsk, styczeń 2010
- [5] Dziennik montażu schodów kaskadowych, prefabrykowanych, Warszawa, data wydania: kwiecień 2010
- [6] „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
- [7] Ekspertyza techniczna konstrukcji żelbetonowych prefabrykowanych schodów zewnętrznych Stadionu Narodowego w Warszawie, Instytut Budowy Dróg i Mostów w Warszawie, sierpień 2010
- [8] Rysunki montażowe wzmocnień schodów, lipiec–sierpień 2011
- [9] Ekspertyza techniczna dotycząca kompleksowej oceny konstrukcji schodów kaskadowych Stadionu Narodowego, bez schodów ruchomych, w oparciu o analizę rozwiązań i stanu wytypowanych elementów w ciągach schodów przy stanie zaawansowania ich budowy na dzień 1 lipca 2011 r., Ośrodek Rzeczoznawstwa i Techniki Budowlanej Oddziału Warszawskiego PZITB, Warszawa, lipiec-listopad 2011
- [10] „Sprawozdanie z wykonania badań podczas próbnego obciążenia kaskadowych schodów w osi 560 i w osi 600, Stadionu Narodowego w Warszawie, po ich obudowaniu konstrukcją stalową” wykonane przez Instytut Budowy Dróg i Mostów w Warszawie, wrzesień–październik 2011
- [11] PN-EN 206-1: 2003/A2:2006; Beton. Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność
- [12] P354: Design of Floors for Vibration: A New Approach (Revised Edition, February 2009)
- [13] ISO 10137: Bases for design of structures – Serviceability of buildings against vibration. International Organisation for Standardization, 2007