

dr hab. inż. Krzysztof Żółtowski, prof. PG¹⁾
 dr inż. Tomasz Romaszkiwicz¹⁾
 mgr inż. Michał Drawe¹⁾

Analiza statyczna i wytrzymałościowa konstrukcji wiszącej zadaszenia Stadionu Śląskiego

Static and carrying capacity analysis of suspension roof structure Śląski Stadium

DOI: 10.15199/33.2015.06.02

Streszczenie. W artykule scharakteryzowano konstrukcję nośną zadaszenia Stadionu Śląskiego w Chorzowie, system statyczny i przyjęte rozwiązania konstrukcyjne. Przedstawiono poziom wytrzymałościowych elementów oraz wytyczne dotyczące wzmocnienia. Analizy przeprowadzono w ramach audytu dokumentacji projektowej wykonanego na zlecenie inwestora.

Słowa kluczowe: zadaszenie stadionu, model MES, konstrukcje ciągnowe, imperfekcje, wzmocnienie.

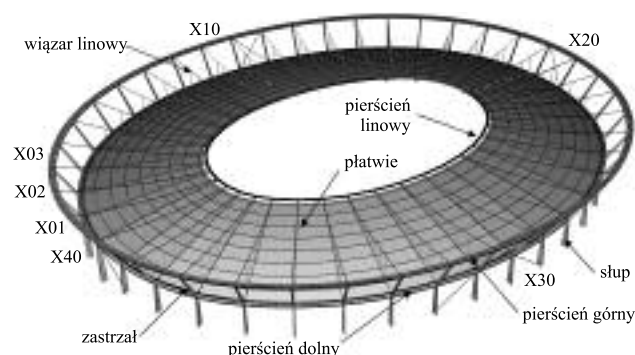
Abstract. The paper describes the roof supporting structure of the Silesian Stadium in Chorzow, static system and adapted structural solutions. The paper presents critical stress-strain state of key elements of structure and guidelines concerning the strengthening of structure. Analyses were carried out as a part of the audit of project at the request of the investor.

Keywords: roof over stadium, FEM model, cable structure, imperfections, strengthening.

Stadion Śląski w Chorzowie to wielofunkcyjny obiekt sportowy nieużytkowany od 2009 r. ze względu na prowadzone prace modernizacyjne [1], które wstrzymano w lipcu 2011 r. z powodu awarii [2]. W trakcie podnoszenia linowej konstrukcji dachu pękły dwa z 40 zastosowanych „krokodyli”, tzw. łączników lin promieniowych dachu z wewnętrznym pierścieniem. W konsekwencji przeprowadzono wiele analiz dotyczących bezpieczeństwa konstrukcji zadaszenia. W artykule zaprezentowaliśmy trzy rodzaje analiz, jakie przeprowadziliśmy w ramach audytu dokumentacji projektowej Stadionu Śląskiego w Chorzowie [3 ÷ 6]. Pierwsza dotyczy obliczeń statyczno-wytrzymałościowych konstrukcji oraz stanów wyjątkowych związanych z błędami montażu czy napinania lin mogącymi wystąpić podczas wznoszenia, a druga to analizy dotyczące uszkodzenia kluczowych elementów konstrukcji zadaszenia, jakimi są lina nośna, lina napinająca czy cały wiązark linowy. Natomiast trzecia analiza dotyczyła nośności najważniejszych blachownicowych detali konstrukcyjnych, do których należą pierścienie ściskane, łączniki lin radialnych i obwodowych oraz uszy mocujące ciągną główne.

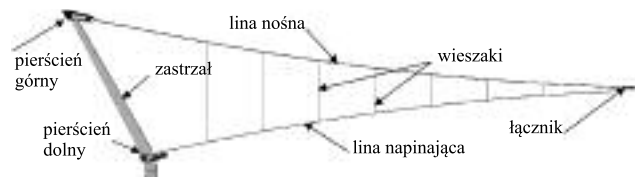
Konstrukcja zadaszenia

Zadaszenie Stadionu Śląskiego nawiązuje ideowo do konstrukcji koła rowerowego [1]. Składa się z dwóch zewnętrznych pierścieni ściskanych (górny i dolny), radialnych wiązarek linowych i rozciąganego linowego pierścienia wewnętrznego (rysunek 1). Geometria pierścieni w rzucie oparta jest na łuku o trzech promieniach, przy czym promienie pierścienia górnego są większe od promieni pierścienia dolnego. Na pierścieniach połączonych ze sobą słupkami zaznaczono osie radialne, w których znajdują się wiązarki linowe składające się z górnej liny nośnej, dolnej liny napinającej oraz pionowych wieszaków łączących obie liny (rysunek 2). Lina górna i dolna spięte są na końcu łącznikiem, do którego przytwierdzono wewnętrzny pierścień rozciągnięty, składający się z 6 lin obwodowych. Cała konstrukcja opiera się na żelbetowych słupkach za pośrednictwem pierścienia dolnego. Oparcie jest przegubowe



Rys. 1. Wizualizacja modelu numerycznego i główne elementy konstrukcji

Fig. 1. Visualization of numerical FEM model and main elements of structure



Rys. 2. Elementy wiązarki linowej

Fig. 2. Elements of single cable girder

we i promieniowo przesuwne z uwagi na wpływ zmiennej temperatury. Pokrycie z płyt poliwęglanowych ułożono na płatwiach i szczeblinach, które przymocowano do lin napinających w miejscach mocowania wieszaków. Stalowy pierścień górny i dolny stężono linami w układzie krzyżowym, które ułożono symetrycznie w obydwu osiach głównych zadaszenia. Stężenia kontynuowane są w dół do podstaw słupów żelbetowych. Jako ciągną nośne, napinające, pierścieniowe i stężenia zastosowano spiralne liny zamknięte o wytrzymałości $f_{u,k} = 1579$ MPa. Liny nośne i napinające mają ϕ 100 mm, ϕ 115 mm i ϕ 130 mm, natomiast stężenia ϕ 120 mm. Wieszaki zaprojektowano jako otwarte liny spiralne o średnicy 25 mm. Liny pierścieniowe mają ϕ 120 mm. Rozciągnięty pierścień wewnętrzny tworzy pakiet sześciu lin.

¹⁾ Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska
^{*)} Autor do korespondencji: e-mail: krzysztof.zoltowski@bridges.pl

Modele numeryczne

Globalny model MES konstrukcji opracowano na podstawie modelu wykonanego przez projektanta [1]. Obliczenia przeprowadzono w środowisku MES SOFiSTiK. Pierścienie zewnętrzne, łączące je zastrzały i żelbetowe słupy wymodelowano z dwuwzłowych elementów belkowych o odpowiednio zadanych przekrojach. Dodatkowo z elementów belkowych wymodelowano płatwie i szczebliny, głowice lin nośnych i napinających oraz łącznik lin radialnych z pierścieniem linowym. Na płatwiach oraz szczeblinach opisano membranę dachową z czterowzłowych elementów powłokowych o odpowiednio zadanej sztywności. Wszystkie elementy linowe konstrukcji odwzorowano za pomocą elementów cięgnowych. Analizy prowadzono z uwzględnieniem wpływu przemieszczeń na siły wewnętrzne.

Wytyczenie lin konstrukcji zadaszenia

W analizie uwzględniono wartości charakterystyczne i obliczeniowe. Współczynniki obciążeń dla kombinacji obliczeniowych dobierano tak, aby uzyskać najwyższe wartości sił w linach. Wytyczenie lin konstrukcji zadaszenia od obciążeń charakterystycznych i obliczeniowych przedstawiono w tabeli 1. Duże różnice między wartościami maksymalnymi i minimalnymi w przypadku poszczególnych stanów nie wynikają bezpośrednio z rozkładu sił w linach, ale z wariantów obciążeń uwzględniających 13 różnych rozkładów śniegu i 24 różne warianty obciążenia wiatrem.

Za pomocą globalnego modelu numerycznego zadaszenia stadionu wyznaczono maksymalne naprężenia wg HMM w pierścieniach zewnętrznych konstrukcji od różnych kombinacji obciążeń (tabela 2). Maksymalne wartości sił od obciążeń charakterystycznych w linach nośnych i napinających nieznacznie przekroczyły 50% siły zrywającej, natomiast wytyczenie lin pierścieniowych w przypadku najbardziej niekorzystnej kombinacji obciążeń charakterystycznych wyniosło aż ~60%. Siły w linach od kombinacji obciążeń obliczeniowych przekroczyły również o 7,4% kryterium naprężeniowe.

Tabela 1. Wytyczenie lin konstrukcji zadaszenia – wartości charakterystyczne i obliczeniowe

Table 1. Effort of the cables of the roof structure - characteristic and design values

Wariant obciążenia	Wytyczenie lin [%]						
	charakterystyczne			obliczeniowe			
	nośnych	napinających	obwodowych	nośnych	napinających	obwodowych	
CW + NAP – BEZ MEMB	max.:	32,38	53,28	53,29	55,04	84,12	88,39
	min.:	27,31	44,08	52,87	47,19	66,87	87,69
CW + całkowity + NAP	max.:	38,79	40,75	54,90	69,76	58,34	92,21
	min.:	32,98	28,56	54,40	60,01	33,52	91,48
CW + NAP + WYP	max.:	39,25	39,73	55,06	71,52	55,71	92,68
	min.:	33,48	27,35	54,56	61,38	30,49	91,98
CW + NAP + WYP + śnieg	max.:	51,00	40,50	59,10	103,91	58,03	106,26
	min.:	34,50	7,33	55,96	64,53	0,00	96,41
CW + NAP + WYP + śnieg + temperatura	max.:	51,05	40,68	59,09	103,96	58,46	106,35
	min.:	34,44	6,68	55,95	64,41	0,00	96,38
CW + NAP + wiatr	max.:	41,00	52,92	56,28	75,71	104,49	96,34
	min.:	28,19	22,61	53,20	47,96	20,37	88,22
CW + NAP + wiatr + temperatura	max.:	41,19	53,28	56,27	76,06	105,36	96,26
	min.:	28,01	22,45	53,21	47,60	20,07	88,24
CW + NAP + WYP + śnieg + 0,6 wiatr	max.:	51,87	44,16	59,77	106,55	66,84	107,40
	min.:	33,96	4,86	56,58	62,89	0,00	98,49
CW + NAP + WYP + śnieg + 0,6 wiatr + temperatura	max.:	51,91	44,23	59,76	106,62	67,13	107,38
	min.:	33,90	4,26	56,56	62,97	0,00	98,43
	max.:	51,91	53,28	59,77	106,62	105,36	107,40
	min.:	27,31	4,26	52,87	47,19	0,00	87,69

Tabela 2. Maksymalne naprężenia wg HMM w pierścieniu górnym i dolnym

Table 2. Max HMM Stress in upper and lower ring

Wariant obciążenia	Pierścień górny [MPa]		Pierścień dolny [MPa]	
	naprężenia od obciążeń charakterystycznych	obliczeniowych	naprężenia od obciążeń charakterystycznych	obliczeniowych
CW + NAP – BEZ MEMB	117,00	120	131,00	138
CW + NAP	128,00	134	109,00	109
CW + NAP + WYP	130,00	139	108,00	105
CW + NAP + WYP + śnieg	173,00	215	150,00	171
CW + NAP + WYP + śnieg + temperatura	175,00	219	151,00	173
CW + NAP + WYP + wiatr	173,00	202	183,00	225
CW + NAP + WYP + wiatr + temperatura	174,00	205	192,00	243
CW + NAP + WYP + śnieg + 0,6 wiatr	204,00	261	201,00	242
CW + NAP + WYP + śnieg + 0,6 wiatr + temperatura	204,00	261	197,00	228

Imperfekcje w konstrukcji linowej [5]

Zaprojektowana i wykonana konstrukcja zadaszenia składa się z wielu cięgien pozbawionych regulacji długości [1]. Oznacza to, że nie ma pełnej kontroli sprężenia konstrukcji i zakłada się, że potencjalne błędy nie będą miały istotnego wpływu na nośność. Założenie to poddano weryfikacji, ponieważ sprężenie powoduje w niektórych linach ponad 70% maksymalnych sił wewnętrznych. W przypadku obciążenia sprężeniem projektant przyjął współczynnik bezpieczeństwa $\gamma = 1$. Przeanalizowano, jaki wpływ na konstrukcję dachu mają imperfekcje układu linowego. Rozważono następujące przypadki: zbyt mocno napięta lina górna/dolna/pierścieniowa; błąd w mocowaniu lin pierścieniowych w łącznikach. Analizy przeprowadzono na wartościach charakterystycznych obciążeń i wykorzystano wcześniej opracowany model numeryczny (rysunek 1).

Imperfekcja – błąd długości liny nośnej. Przeanalizowano sytuację, w której siła w jednej albo w kilku linach nośnych (maksymalnie pięć) przekracza o 10% wartość siły projektowej. Analizowano najbardziej wytyżoną linę nośną w tym stanie (lina w osi X04). W rezultacie stwierdzono, że zwiększenie napięcia w linie nośnej powoduje zmniejszenie siły w odpowiadającej linie napinającej i wzrost w sąsiednich linach napinających. Maksymalny wzrost tej siły określono na ~5%. Zwiększenie siły o 10% w jednej linie nośnej powoduje pomijalny wzrost naprężeń w ściskanym pierścieniu górnym. W przypadku kombinacji 5 sąsiednich lin wzrost ten może wynieść do 30 MPa. W przypadku gdy o 10% zwiększono siły we wszystkich linach nośnych, maksymalny przyrost naprężeń w pierścieniu górnym wyniósł 8 MPa.

Imperfekcja – błąd długości liny napinającej. Obliczenia przeprowadzono również dla kombinacji 5 sąsiadujących lin. Okazało się, iż zwiększenie napięcia w linie napinającej powoduje zmniejszenie siły w odpowiadającej linie nośnej, ale wzrost w sąsiednich linach nośnych maksymalnie o ok. 2,3%. Podobnie jak w przypadku lin nośnych, zmiana naprężeń w pierścieniu ściskanym od imperfekcji w jednej linie była minimalna. W przypadku kombinacji 5 lin mogła się zwiększyć nawet do ~20 MPa.

Imperfekcja – błąd długości wszystkich lin pierścienia wewnętrznego. Sytuacja, w której siły we wszystkich linach pierścienia linowego przekraczają o 10% wartość siły projektowej, powoduje znaczną zmianę sił w pozostałych linach. Siła w linach nośnych zwiększyła się średnio o ~10%, a w napinających o ~12%. Maksymalne naprężenia wg HMM w ściskanym pierścieniu górnym wzrosły o ~7 MPa.

Imperfekcja – błąd długości jednej z lin pierścienia wewnętrznego. Pierścień linowy składa się z sześciu lin zamocowanych na

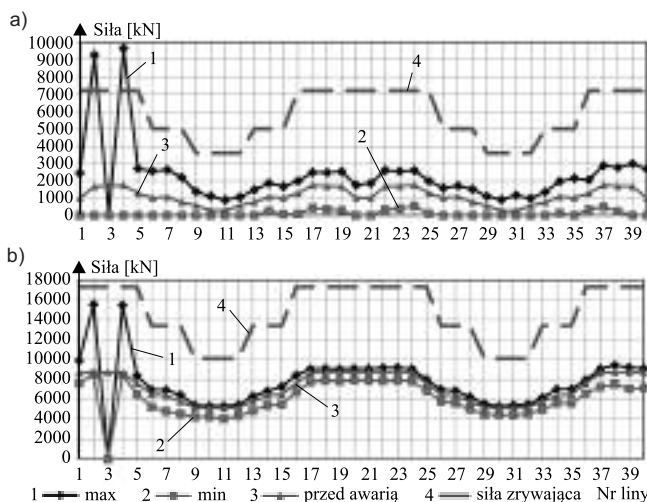
stalowych łącznikach. Możliwe jest niedokładne osadzenie lin na łącznikach skutkujące różnicą długości w ramach jednego segmentu pomiędzy wiązarami lub też możliwy jest błąd w długości jednej liny. W analizie badano błąd zamocowania wybranych lin pierścieniowych w łączniku przez skrócenie/rozciągnięcie ich w badanym polu o wartość -10 mm/+10 mm. Do analizy wybrano pole między osiami X40 i X01. Wykazano, że wskutek rozpatrywanego błędu może dojść do znacznego zwiększenia siły w jednej z lin pierścieniowych. W każdym z przeanalizowanych przypadków zaobserwowano wzrost siły w krótszej linie o $20 \div 29\%$ w zależności od przypadku, co przełożyło się na wzrost wyężenia z 53% na $63 \div 69\%$ w stanie „ciężar własny + napięcie”. **Zaistnienie tego typu imperfekcji może spowodować powstanie znacznej siły tnącej w łączniku.**

Imperfekcja – różnice w module Younga lin pierścieniowych. W projektowaniu lin przyjęto stałą wartość E-160 GPa. W analizie jednej z 6 lin pierścienia zwiększono moduł o 5 GPa. Wykazano, że taka zmiana nie powoduje istotnej różnicy w rozkładzie sił pomiędzy linami.

Analiza skutków zerwania wybranych cięgien [5]

Celem analizy było określenie stopnia zniszczenia konstrukcji zadaszona w przypadku zerwania liny radialnej i rozpoznanie ryzyka wystąpienia „katastrofy postępującej”. Rozpatrzenie takiego scenariusza wskazane jest normą PN-EN 1991-1-7 dla obiektów klasy konsekwencji CC3 (stadiony, amfiteatry, mosty), do której zaliczono rozpatrywane zadaszenie [4]. Na potrzeby analizy zmodyfikowano model numeryczny. Usunięto takie elementy, jak: pokrycie dachu; telebimy; płatwie i szczebliny oraz elementy podwieszające je do wiązarów. Obciążenia od ciężaru własnego głowic, płatwi, szczeblin i membrany oraz wyposażenia zamieniono na masę. Jako układ mas przyjęto również pełne obciążenie śniegiem. Przeprowadzono obliczenia dynamiczne. Zastosowano procedurę Newmarka z uwzględnieniem nieliniowości geometrycznej i materiałowej. Efekt zerwania modelowano przez usunięcie całego przecięzonego elementu z systemu po osiągnięciu siły zrywającej, uzyskując tym samym lepszą stabilność rozwiązania numerycznego. Badano konstrukcję pod obciążeniem ciężarem własnym i sprężeniem lub ciężarem własnym, sprężeniem i obciążeniem śniegiem. Zaczęto od scenariusza, w którym zasymulowano zerwanie dowolnego, pojedynczego „wiązara” w stanie pełnego obciążenia śniegiem. Przez jeden wiązarek rozumie się linę nośną i napinającą leżącą w danej osi oraz wszystkie wieszaki łączące te liny (rysunki 1, 3). W związku z tym, że konstrukcja jest bismetryczna, przeanalizowano 10 przypadków (zerwanie wiązarów w osiach od X01 do X10 – rysunek 1). W analizie uwzględniono wartości charakterystyczne obciążeń. Użyto metody „time step” z krokiem 0,01 s. Czas analizy w każdym przypadku wynosił 5 s. Przyjęto tłumienie konstrukcji na poziomie 10% (LDT).

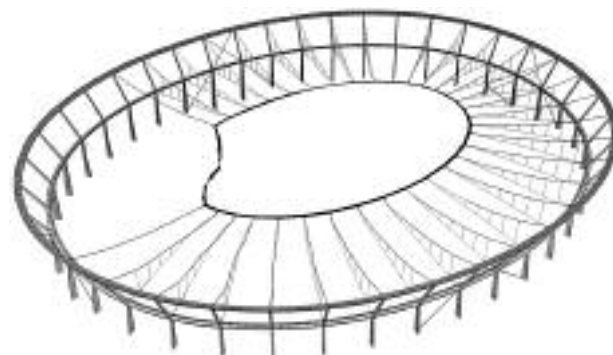
Analiza wykazała, że zerwanie dowolnego wiązara powoduje chwilowy, ale znaczny wzrost maksymalnej siły w linach nośnych i napinających. Duży wpływ na wartości sił w linach ma efekt dynamiczny związany z awarią. W przypadku lin napinających dochodziło do przekroczenia minimalnej siły zrywającej. Największe siły w linach nośnych i napinających otrzymano w przypadku awarii wiązara w osi X03 (rysunek 3), natomiast największe wyężenie w linach nośnych w przypadku awarii wiązara w osi X08, a w przypadku lin napinających w wyniku zerwania wiązara w osi X06. Przypadki odpowiadające maksymalnej sile i wyężeniu nie pokrywają się, ponieważ o ile awaria X03 dotyczy jednego z najbardziej obciążonych „wiązarów” w konstrukcji (liny typu 1 – największe przekroje), to awarie X08 i X06 bezpośrednio sąsiadują z linami o małym przekroju. Globalnie największy przyrost sił w linach powoduje zerwanie wiązara



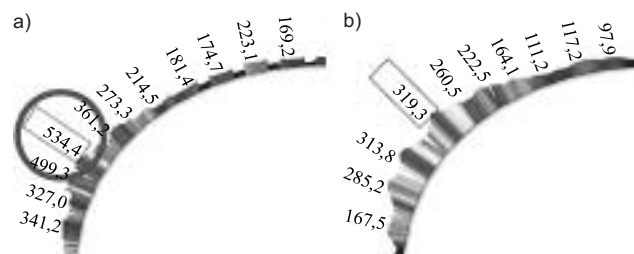
Rys. 3. Siły w linach napinających w trakcie awarii wiązara X03 (a) oraz siły w linach nośnych w trakcie awarii wiązara X03 (b)
 Fig. 3. Forces in tensioning cables during failure of girder X03 (a) and forces in carrying cables during failure of girder X03 (b)

X03. Na rysunku 3 przedstawiono maksymalne siły w linach od awarii wiązara w osi X03.

W związku z tym, że zerwanie dowolnego pojedynczego wiązara spowoduje zerwanie co najmniej dwóch sąsiadujących lin napinających, przeprowadzono kolejną analizę uwzględniającą możliwość zerwania się kolejnych lin. W rezultacie po zerwaniu „wiązara” X03 doszło do zerwania jeszcze sześciu „wiązarów” (rysunek 4). Najpierw zerwały się sąsiadujące liny napinające po obu stronach zerwanego „wiązara”, następnie liny nośne należące do tych samych osi, potem kolejne liny napinające i nośne. Maksymalne naprężenia w pierścieniu górnym w trakcie awarii osiągnęły lokalnie wartość 535 MPa (rysunek 5).



Rys. 4. Wizualizacja konstrukcji po zerwaniu wiązara X03 (przemieszczenia w skali 1/1)
 Fig. 4. Visualization of structure after failure of girder X03 (displacement scale 1:1)



Rys. 5. Maksymalne naprężenia wg HMH w: a) pierścieniu górnym; b) pierścieniu dolnym – zerwanie wiązara X03
 Fig. 5. Max HMH Stress in: a) upper ring; b) lower ring – failure of girder X03

Przeprowadzono wiele analiz, na podstawie których stwierdzono, że:

- zerwanie pojedynczej liny nośnej spowoduje natychmiastowe zerwanie odpowiadającej liny napinającej. Wynika z tego, że zerwanie pojedynczej liny nośnej w stanie „ciężar własny + ciężar wyposażenia + pełne obciążenie śniegiem” powoduje sytuację podobną do tej, jaką otrzymano w analizie zerwania całego wiązara;

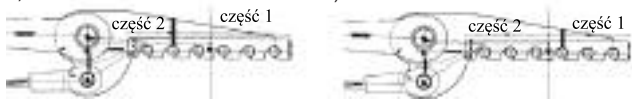
- ewentualne zerwanie liny napinającej przez podmuch wiatru (obciążenie śniegiem zmniejsza siły w linach napinających) nie skutkuje zerwaniem innych lin w stanie obciążenia ciężarem własnym i wyposażeniem.

Analizy nie przedstawiają rzeczywistych scenariuszy awarii, ponieważ zastosowany model obliczeniowy posiada znaczne uproszczenia, ale są one bezpieczne. Pominięto podkonstrukcję poszycia i zastąpiono ją masą skupioną w węzłach systemu linowego. W ten sposób pozabawiono model tłumienia wynikającego z pracy konstrukcji stalowych płatwi w stanie awaryjnym. Obserwując zmienność siły w linach nośnych sąsiadujących z liną zerwaną, można przypuszczać, że dodatkowe tłumienie może istotnie zredukować osiągnięte w analizie siły maksymalne. Ten sam efekt oraz dodatkowe tłumienie wynikające z plastycznej pracy stali konstrukcyjnej może zredukować maksimum naprężeń zastępczych wg HMH w pierścieniu górnym. Istnieją zatem istotne przesłanki świadczące o korzystniejszym zachowaniu się konstrukcji w rzeczywistości.

Błędy wykonawcze dotyczące długości liny radialnej nie są groźne dla konstrukcji w fazie budowy. Projektowany stan napięcia można przywrócić przez regulację długości wieszaków między kablem nośnym i napinającym. Analizy wpływu błędnej długości lin na siły w linach pokazują, że w przypadku grupy lin o wspólnych zakończeniach należy wziąć pod uwagę dodatkowy współczynnik bezpieczeństwa, uwzględniający pracę w grupie (brak identyczności). W przypadku zerwania jednej liny nośnej nie da się wykluczyć katastrofy o zakresie obejmującym cztery do sześciu lin nośnych. Analiza pokazała, że po zerwaniu czterech lin nośnych następuje znaczna redukcja sił w linach pierścienia rozciąganego, a zatem również redukcja sił w całym systemie. W przypadku zerwania liny napinającej nie zaobserwowano dalszych następstw awarii dla globalnej stabilności konstrukcji. Na podstawie wykonanych analiz można powiedzieć, że zakres ewentualnej katastrofy jest rozległy, ale ograniczony.

Łącznik lin radialnych i pierścieniowych [6]

Jednym z głównych elementów nośnych konstrukcji zadania stadionu w Chorzowie jest 40 szt. łączników między linami radialnymi i obwodowymi (rysunek 3). Pierwotnie łączniki zaprojektowano i wykonano w formie tzw. krokodyli jako odlewy stalowe (rysunek 6). W trakcie naciągania lin konstrukcji doszło do rozerwania łączników (fotografia) w dwóch osiach konstrukcji. Awaria przerwała proces budowy i stała się przyczyną prac studyjnych dotyczących konstrukcji zadania. Opracowano m.in. wytyczne do projektowania i wykonania nowych łączników. Przyjęto, że nowy łącznik ma być konstrukcją symetryczną, wykonaną ze stali walcowanej klasy S460Q. Korytka na liny pierścieniowe przewidziano jako odlewy



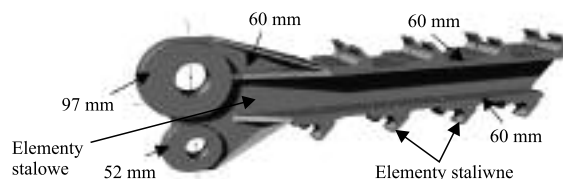
Rys. 6. Pierwotne, stalowe łączniki. Miejsce rozerwania elementów: a) łącznik w osi X37; b) łącznik w osi X38 [1]

Fig. 6. The original, cast steel connectors. Locations of cracks in elements: connector at axis X37; b) connector at axis X38 [1]

staliwne. W rezultacie powstał nowy projekt łączników (rysunek 7). Każde korytko przytwierdzono do pasów blachownicy za pomocą 4 śrub M27 klasy 8.8. Ze względu na charakter elementu i jednocześnie realizując wymagania EC dotyczące konstrukcji typu CC3, przeprowadzono niezależne obliczenia sprawdzające detalu. Wyodrębniono dwa modele: miejsca mocowania korytka w blachownicy oraz mocowania lin radialnych. W pierwszym modelu sprawdzono najbardziej newralgiczny punkt – miejsce docisku stalowego korytka do blachy. Analizy wykonano w środowisku MES SOFiStiK. Wykonano model złożony z elementów bryłowych. Ze względu na rozmiar modelu i związaną z tym czasochłonność obliczeń, wykorzystano symetrię konstrukcji oraz ograniczono się do jednego korytka. Model zagęszczono w pobliżu styku projektowanych elementów walcowanych i stalowych. Interakcję części walcowanej i stalowej zrealizowano za pomocą nieliniowych elementów kontaktowych. Analizę prowadzono jako nieliniową materiałowo z wykorzystaniem kryterium HMH. Do modelu przyłożono obciążenie charakterystyczne, obliczeniowe i graniczne (zerwanie liny) uzyskane z globalnego modelu MES konstrukcji. Schemat obciążenia charakterystycznego przedstawiono na rysunku 8.

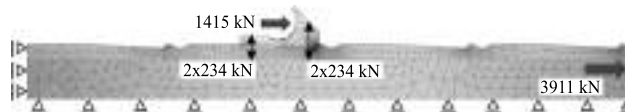


Fragments elementu po awarii [2]
Fragments of element after accident [2]



Rys. 7. Wizualizacja nowego łącznika z zaznaczonymi grubościami blach oraz podziałem na materiały [7]

Fig. 7. Visualization of the new connector with marked thicknesses of metal plates and shown different materials [7]



Rys. 8. Przykładowy schemat obciążenia od wartości charakterystycznych

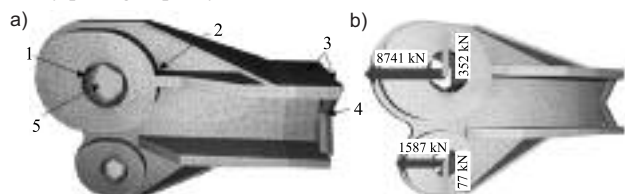
Fig. 8. An exemplary load scheme – characteristic values

Łącznie wprowadzono trzy typy obciążeń (rysunek 8): obciążenie przekazywane przez linę jako rozłożone do powierzchni stalowego korytka, sprężenie śrubami (sprężono elementy belkowe modelujące śruby) oraz wprowadzono w blachę siłę rozciągającą zgodnie z całościowym modelem obliczeniowym. Nieliniowa materiałowo analiza wykazała, że w stalowej blachownicy, w przypadku obciążeń charakterystycznych, dochodzi do punktowego uplastycznienia jedynie w miejscu styku korytka z blachą. Z mapy wytyczenia wynika, że naprężenia w blachownicy są na poziomie 200 MPa, natomiast w korytku w granicach 50 – 100 MPa. Ponadto stwierdzono, że blachownica ulega uplastycznieniu dopiero w przypadku wystąpienia siły zrywającej w linach, ale nie dochodzi do utraty nośności. Dopiero w przypadku współczynnika 1,4 dla obciążeń zrywających cały element traci nośność. W świetle wykonanych analiz zalecono przyjęcie do realizacji nowego projektu łącznika, ale zalecono sformułowanie i przeprowadzenie pro-

cedury badawczej (laboratoryjnej) potwierdzającej założenia teoretyczne przyjęte w projekcie.

Drugi model wykonano również z elementów bryłowych, a mocowanie lin opisano za pomocą elementów belkowych (sworzni) oraz nieliniowych elementów sprężystych nieprzenoszących rozciągania (rysunek 9a). Mocowanie pomiędzy krążkami wzmacniającymi a blachą główną opisano elementami sprężystymi o dużej sztywności po stronie wewnętrznej i zewnętrznej krążków. Uzyskano w ten sposób symulację połączenia spawanego po obwodzie krążków. W celu umożliwienia swobodnego obrotu elementu, tak jak jest w rzeczywistej konstrukcji, mocowanie zrealizowano za pomocą przegubu umożliwiającego obrót wokół wektora normalnego do powierzchni bocznej największej blachy. Obciążenie przykładowo w postaci sił skupionych na końcach „belkowych” sworzni (rysunek 9b). Rozpatrzono wiele przypadków obciążeń, łącznie z zerwaniem lin.

Model zakotwienia kabli radialnych uwzględnia zróżnicowane obciążenie kabla nośnego i napinającego oraz dostosowuje się jako bryła sztywna do układu obciążeń przyłożonych w sworzniach. Analizę przeprowadzono metodą quasi-dynamiczną (time step). Po każdym kroku czasowym zapisywano nową geometrię elementu, w ten sposób uwzględniając obrót bryły sztywnej i zmiany kierunku działających sił. Obliczenia prowadzono również z zastosowaniem nieliniowego modelu materiału wg HMMH z przyjętą granicą plastyczności 440 MPa i wzmocnieniem o module 81 MPa. Analizy wykazały, że nawet w przypadku uwzględnienia sił zrywających liny, element nie ulega zniszczeniu pomimo dużej strefy pełnego uplastycznienia.



Rys. 9. Wizualizacja modelu numerycznego miejsca wpięcia liny nośnej i napinającej (a) oraz analizowane obciążenie konstrukcji pod pełnym śniegiem – wartości charakterystyczne (b): 1 – sworzni liny; 2 – elementy sprężyste mocujące krążki i blachy; 3 – elementy sztywne mocowania; 4 – mocowanie przegubowe; 5 – elementy sprężyste mocujące sworzni i blachy

Fig. 9. Numerical model of carrying and tensioning cable mounting place (a) and analyzed load under full snow - characteristic values (b): 1 – bolt; 2 – elastic elements connecting rings with plates; 3 – rigid fixing elements; 4 – articulated fixing; 5 – elastic elements connecting bolt with plates

Analizy detali pierścieni ściskanych [6]

Analizie numerycznej poddano ściskane pierścienie konstrukcji stadionu oraz miejsca mocowania w nich lin radialnych. Projektant ukształtował elementy ściskane pierścieni zewnętrznych, aby wizualnie były zakrzywione i jednocześnie matematycznie proste. Efekt ten otrzymano, stosując w przecie zakrzywionym zmienne przekroje poprzeczne na długości (środky ciężkości przekrojów zawsze leżały na linii prostej). W przypadku ściskanych pierścieni model złożono z elementów powłokowych zróżnicowanej grubości, natomiast modele mocowania lin w pierścieniach zbudowano w oparciu o elementy bryłowe. Obliczenia przeprowadzono jako nieliniowe geometrycznie i materiałowo, co pozwoliło na ocenę pracy elementów pod kątem utraty stateczności lokalnej i globalnej. Z uwagi na niewielką grubość blach wypełniających zaobserwowano w analizie

ich lokalne wyboczenia – w przypadku pierścienia górnego przy obciążeniu stanowiącym 38% wartości obciążenia obliczeniowego, a w pierścieniu dolnym przy 147% obciążenia obliczeniowego.

Pomimo zjawiska lokalnego wyboczenia, w obu elementach nie doszło do uplastycznienia materiału w głównych blachach nośnych od obciążeń obliczeniowych. W przypadku pierścienia górnego maksymalne naprężenia zastępcze w stanie obliczeniowym (HMH) wyniosły 292 MPa, a w pierścieniu dolnym 160 MPa. Nie zaobserwowano niebezpieczeństwa utraty stateczności globalnej badanych elementów.

Analizy zamocowań lin nośnych w pierścieniu wykazały, że do ich pełnego uplastycznienia dochodzi przy obciążeniu stanowiącym 87% siły zrywającej w kotwionej linie. W związku z niewystarczającą rezerwą nośności zalecono wzmocnienie badanych detali.

Podsumowanie

Złożone analizy konstrukcji zadaszenia Stadionu Śląskiego pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków i zaleceń:

- wykazano, że konstrukcja została zaprojektowana prawidłowo, ale poziom bezpieczeństwa konstrukcji klasy niezawodności CC3 nie do końca został spełniony. W związku z tym wykonano wiele obliczeń kontrolnych i zalecono modyfikację projektu;
- opracowano kartę niezawodności konstrukcji jako podstawowy dokument wyjściowy do projektowania [4];
- zidentyfikowano największe naprężenia w układzie linowym i wyeliminowano je. Ze względu na wysoki procent wykorzystania przekroju lin pierścienia i możliwe dodatkowe skoki naprężeń wynikające z błędów montażowych zalecono zwiększenie liczby lin pierścieniowych do ośmiu i sprawdzenie nowego łącznika lin radialnych oraz obwodowych na wypadek wystąpienia dużej siły tnącej w kierunku poprzecznym. Dopuszczono wprowadzenie poślizgu lin w celu wyrównania naprężeń;
- dokonano niezależnej weryfikacji zmodyfikowanego projektu, spełniając wymagania EC dla klasy niezawodności CC3.

Analizy przeprowadził zespół w składzie: dr hab. inż. Krzysztof Żółtowski, prof. PG – kierownik zespołu; prof. dr hab. inż. Marian Gwóźdź; prof. dr hab. inż. Henryk Zobel; dr inż. Krzysztof Kuchta; dr inż. Tomasz Romaszekiewicz; mgr inż. Michał Drawc.

Literatura

- [1] Zadaszenie Stadionu w Chorzowie. Schlaich Bergemann und Partner (SBP GmbH): Dokumentacja projektowa 2009.
- [2] Instytut Techniki Budowlanej: Ekspertyza techniczna dotycząca przyczyn awarii zadaszenia widowni Stadionu Śląskiego w Chorzowie, Nr pracy: 2614/IW/2011 (2151/11/Z00NK), Warszawa 2011.
- [3] Żółtowski K., Gwóźdź M., Zobel H. i inni: Ekspertyza dokumentacji projektowej i stanu technicznego elementów zadaszenia Stadionu Śląskiego w Chorzowie w ramach zadania inwestycyjnego pn.: „Zadaszenie widowni oraz niezbędna infrastruktura techniczna Stadionu Śląskiego w Chorzowie”, Politechnika Gdańska, 2013.
- [4] Gwóźdź M.; Specyfikacja elementów niezawodności zadaszenia Stadionu Śląskiego w Chorzowie. XXVII Konferencja Naukowo-Techniczna „Awarie Budowlane”. Szczecin – Międzyzdroje. 20 – 23.05.2015 r.
- [5] Żółtowski K., Drawc M.; Stadion Śląski. Analiza wpływu wybranych imperfekcji i uszkodzeń na nośność konstrukcji zadaszenia. XXVII Konferencja Naukowo-Techniczna „Awarie Budowlane”. Szczecin – Międzyzdroje. 20 – 23.05.2015 r.
- [6] Żółtowski K., Romaszekiewicz T.; Stadion Śląski. Analiza wytrzymałościowa nowego łącznika lin radialnych i obwodowych w konstrukcji zadaszenia i innych kluczowych detali konstrukcyjnych. XXVII Konferencja Naukowo-Techniczna „Awarie Budowlane”. Szczecin – Międzyzdroje. 20 – 23.05.2015 r.
- [7] Zadaszenie Stadionu w Chorzowie. Schlaich Bergemann und Partner (SBP GmbH): Aktualizacja dokumentacji projektowej. 2013.

Otrzymano 12.05.2015 r.