



MAREK LECHMAN, *m.lechman@itb.pl*
Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa

AWARIA KONSTRUKCJI PRĘTOWO-CIĘGNOWO-MEMBRA- NOWEJ DACHU NAD LODOWISKIEM

FAILURE OF A ROD-CABLE-MEMBRANE ROOF OVER THE SKATING RINK

Streszczenie W artykule opisano i przeanalizowano przypadek awarii zadaszenia lodowiska, jaki miał miejsce w lutym 2009 roku, w wyniku czego obiekt został wyłączony z użytkowania. Konstrukcję przekrycia lodowiska stanowi układ prętowo-ciężnowy pokryty membraną. Głównymi elementami konstrukcyjnymi przekrycia jest dziewięć poprzecznych dźwigarów kratowych w kształcie łuków eliptycznych ze ściągami. Według dokonanych ustaleń awaria nastąpiła na skutek lokalnego wyboczenia prętów pasa górnego oraz globalnej utraty stateczności skrajnego dźwigara, co było wynikiem niewystarczającego stężenia jego pasa górnego i dolnego. Fakt ten potwierdzono wynikami wykonanych obliczeń sprawdzających. Zalecono zdjęcie membrany dachowej, zdemontowanie obu skrajnych dźwigarów oraz przeprojektowanie konstrukcji dachu z uwzględnieniem dodatkowego stężenia pasów dźwigarów i zwiększenia obciążenia śniegiem.

Abstract The paper describes and analyzes the failure of a roof over the skating rink that occurred in February 2009. As a result, the object was shut down. The structure of the roof consists of a system of rods and cables covered by a membrane. The main structural elements of the roof constitute nine truss girders in the form of elliptic arches with ties. Based on investigations conducted it was established that the failure of the structure was caused by the local and global buckling of the external truss girder. This fact was also confirmed by the results of calculations. As a solution of the problem, dismantling of the membrane and the damaged girders are recommended as well as redesigning the indicated elements of the roof structure.

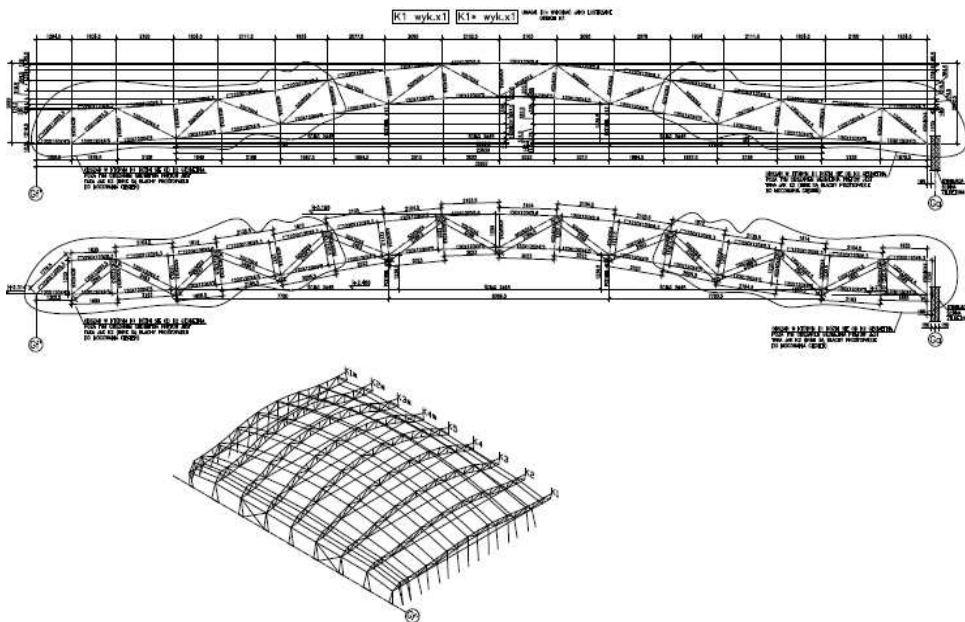
1. Wprowadzenie

Przedmiotem rozważań jest konstrukcja dachu nad lodowiskiem. Montaż konstrukcji dachu wykonano w grudniu 2007 r. Podczas prac montażowych wystąpiło odkształcenie elementów pasa górnego skrajnego dźwigara od strony północnej (rys. 2). Wymiany uszkodzonych elementów dokonano w czerwcu 2008 r. po zakończeniu sezonu użytkowania lodowiska. W dniu 19 lutego 2009 r. w godzinach rannych użytkownik obiektu stwierdził wystąpienie deformacji elementów pasa górnego w tym samym miejscu co w 2007 r. oraz wyboczenie całego pasa skrajnego dźwigara z płaszczyzny od strony północnej, w wyniku czego podjęto decyzję o wyłączeniu obiektu z eksploatacji. W dniu poprzedzającym o godzinie 14.00 rozpoczęto usuwanie śniegu z powierzchni membrany dachowej. Prace te zakończono do godziny 16.00 w dniu 19.02.2009.

2. Opis konstrukcji i sposobu montażu dachu

Konstrukcja przekrycia lodowiska stanowi układ prętowo-ciężnowy pokryty membraną wykonaną z tkaniny. Wymiary obiektu w planie wynoszą 32,9×44,0 m. Głównymi elementami konstrukcyjnymi przekrycia jest dziewięć poprzecznych dźwigarów kratowych w kształcie łuków eliptycznych ze ściągami, o rozpiętości 32,9 m i wysokości 1,2 m (rys. 1, 2, 3). Strzałka najwyższego łuku wynosi 8,5 m. Dźwigary usytuowane są co około 5,5 m i pochyłone od osi obiektu ku ścianom szczytowym, co umożliwia napięcie pokrycia pod własnym ciężarem konstrukcji. Dźwigary zabezpieczono przed wyboczeniem przez zastosowanie cięgien prętowych prostopadłych, przebiegających przez węzły kratownic pasa górnego i dolnego. Dźwigary kratowe wykonano z profili stalowych w postaci rur kwadratowych i prostokątnych ze stali 18G2 oraz z blach ze stali 18G2 i St3S. Ściąg łuków kratowych wykonano z prętów $\phi 36$ i $\phi 45$ mm ze stali 18G2. Cięgna prostopadłe do układów poprzecznych zaprojektowano z prętów stalowych ze stali 18G2 średnicy 16 i 20 mm. Pokrycie dachowe stanowi membrana Naizil Litle A.D.R., o gramaturze 650 g/m², wytrzymałości 48 kN/m i światłoprzepuszczalności 50%. Całą konstrukcję, zaprojektowaną w klasie 1, zabezpieczono przed korozją przez cynkowanie ogniowe grubości 150 μ m. Konstrukcja stalowa przekrycia opiera się na żelbetowych ścianach garażu podziemnego grubości 30 cm.

Pierwszy etap montażu konstrukcji stalowej dachu przewidywał zamocowanie poprzecznych dźwigarów kratowych do zakotwionych marek stalowych w ścianie żelbetowej istniejącego zaplecza od strony zachodniej. Od strony wschodniej dźwigary oparto na podporach osadzonych w stopach fundamentowych. W ścianie i stropie garażu podziemnego zakotwiono marki stalowe służące do mocowania cięgien napinających dach. Montaż konstrukcji przekrycia rozpoczął od scalenia środkowego dźwigara ze ściągiem i jego pionowego ustawienia. Tymczasowo zabezpieczono go przed przewróceniem za pomocą odciągów zakotwionych prostopadłe do niego. Następnie po obu stronach dźwigara środkowego dostawiono kolejne dźwigary kratowe i połączono je ze sobą cięgami.



Rys. 1. Przekroje skrajnych dźwigarów kratowych i schemat konstrukcji przekrycia według projektu



Rys. 2. Widok ogólny konstrukcji i skrajnego dźwigara przekrycia lodowiska od strony północnej po wystąpieniu awarii



Rys. 3. Widok ogólny dźwigarów kratowych konstrukcji

Podczas całego etapu dostawiania kolejnych dźwigarów, konstrukcję zabezpieczono przed przewróceniem za pomocą tymczasowych odciągów w kierunku osi podłużnej obiektu. Po ustawieniu wszystkich dźwigarów i powiązaniu ich między sobą ściągami prętowymi, zakotwiono skrajne dźwigary. Następnie przystąpiono do odpowiedniego napięcia ściągnięć poszczególnych dźwigarów oraz ściągnięć między podłożem i dźwigarami skrajnymi, które zrealizowano za pomocą śrub rzymskich. Membrana dachowa składa się z ośmiu osobnych płatów. Napinanie membrany z siłą około 2 kN na pas szerokości 1 m przeprowadzono przez ciągnięcie profili aluminiowych linociągami i poprzez przykręcanie taśm aluminiowych po uzyskaniu odpowiedniego napięcia. Napięcie membrany na krótszych bokach realizowano poprzez naciągnięcie brzegowych linek stalowych.



Rys. 4. Utrata stateczności skrajnego dźwigara kratowego konstrukcji od strony północnej

3. Badania stanu technicznego obiektu

W związku z opisaną w punkcie 2 sytuacją przeprowadzono wizje lokalne i badania techniczne konstrukcji dachu. Bezpośrednie oględziny obiektu wykazały, że wystąpiło lokalne wyboczenie dwóch prętów pasa górnego, wykonanych z rur 220×120×6,3 mm i 120×120×5,6 mm, oraz utrata stateczności globalnej skrajnego dźwigara kratowego (rys. 4, 5, 6). Konstrukcja zadaszenia utraciła założoną w projekcie geometrię, poluzowaniu i wyłączeniu z pracy uległy ciężkie pręty, powyginane zostały korytka podtrzymujące przewody elektryczne. Na podstawie wykonanych przymiarów ustalono, że wskazane pręty uległy wyboczeniu z płaszczyzny kraty w kierunku kraty sąsiedniej o 25 cm. Największe deformacje prętów wystąpiły w miejscu skokowej zmiany przekroju elementów (rys. 5 i 6).



Rys. 5. Postać lokalnego wyboczenia pasa górnego skrajnego dźwigara od strony północnej



Rys. 6. Szczegół deformacji prętów pasa górnego skrajnego dźwigara od strony północnej



Rys. 7. Skrajne pole przekrycia od strony północnej w trakcie demontażu membrany

4. Obliczenia sprawdzające

W obliczeniach sprawdzających wykorzystano wyniki obliczeń projektowych, wykonanych za pomocą programu komputerowego ROBOT v. 16.1.0 zgodnie z normami [1, 2, 3, 4, 5]. Stateczność prętów pasa górnego skrajnego dźwigara, pokazanych na rys. 6, sprawdzono według normy PN-90/B-03200 [6].

Charakterystyka prętów:

– pręt wykonany z kształtownika 220×120×6,3 mm ze stali 18G2, długość 1,105 m;

$$A_x = 40,2 \text{ cm}^2; I_x = 2277,5 \text{ cm}^4;$$

– pręt wykonany z kształtownika 120×120×5,6 mm ze stali 18G2, długość 1,105 m;

$$A_x = 25,1 \text{ cm}^2; I_x = 841,11 \text{ cm}^4; A_{xsr} = 32,65 \text{ cm}^2; I_{xsr} = 1559,32 \text{ cm}^4;$$

$$i = \sqrt{\frac{1559,32}{32,65}} = 6,91 \text{ cm}$$

Stateczność elementów ściskanych należy sprawdzać według wzoru

$$\frac{N}{\varphi N_{Rc}} \leq 1 \quad (1)$$

gdzie:

N_{Rc} – nośność obliczeniowa przekroju,

φ – współczynnik wyoboczeniowy,

N – siła podłużna w przęcie.

Długość wyboczeniową l_e elementu pasa konstrukcji kratowej przyjmuje się przy wyboczeniu pasa z płaszczyzny kratownicy następująco

$$l_e = l_0, \quad (2)$$

gdzie $l_0 \cong 420$ cm – osiowy rozstaw stężeń bocznych.

Smukłość pręta λ jest wyrażona zależnością:

$$\lambda = \sqrt{\frac{l_e}{i}} \quad (3)$$

na podstawie której otrzymuje się $\lambda = 60,78$.

Smukłość porównawczą wyznacza się ze wzoru:

$$\lambda = 84 \sqrt{\frac{215}{f_d}} \quad (4)$$

gdzie f_d – wytrzymałość obliczeniowa stali.

Ze wzoru (4) otrzymuje się $\lambda_p = 70,53$, a następnie z tablicy 11 normy PN-90/B-03200 określa się wartość współczynnika wyboczeniowego φ .

$\lambda/\lambda_p = 60,78/70,53 = 0,8618 \rightarrow \varphi = 0,803$.

Według obliczeń projektowych siła N w rozpatrywanym pręcie wynosi:

$$N = 0,9 f_d A, \quad (5)$$

gdzie A – pole przekroju poprzecznego.

Nośność obliczeniowa przekroju jest wyznaczona ze wzoru ($\psi = 1$):

$$N_{Rc} = f_d A, \quad (6)$$

Na podstawie wzoru (1) otrzymuje się:

$$\frac{0,9 \cdot 355 \cdot A}{0,803 \cdot 305 \cdot A} = 1,12 > 1$$

co uzasadnia wystąpienie miejscowego wyboczenia pręta.

5. Określenie przyczyn awarii i sposobu jej usunięcia

Odształcenia elementów skrajnego dźwigara konstrukcji dachu wystąpiły zarówno w stadium montażu, jak i eksploatacji obiektu. Nasuwa to przypuszczenie, że analiza statyczna konstrukcji została przeprowadzona w niewystarczającym zakresie, bez sprawdzenia stateczności łuków i uwzględnienia geometrycznej nieliniowości ustroju. Na podstawie analizy obliczeń projektowych stwierdzono, że obciążenia konstrukcji zestawiono zgodnie z obowiązującymi w Polsce normami obciążeń. Z danych meteorologicznych IMGW wynikało, że obciążenie śniegiem gruntu w dniach 18 i 19 lutego w miejscu lokalizacji obiektu (wysokość

pokrywy śnieżnej 19÷20 cm) nie przekraczało charakterystycznego obciążenia śniegiem gruntu według normy PN-80/B-02010 (0,71 kN/m²). Oznacza to, że awaria konstrukcji dachu nie była bezpośrednio skutkiem przekroczenia normowego obciążenia śniegiem. Według dokonanych ustaleń awaria konstrukcji przekrycia lodowiska wystąpiła na skutek lokalnego wybożenia prętów oraz globalnej utraty stateczności skrajnego dźwigara, co było wynikiem niedostatecznego stężenia jego pasa górnego i dolnego [6, 8, 9]. Rozstaw stężeń bocznych ma bowiem bezpośredni wpływ na długość wybożeniową elementu pasa dźwigara kratowego przy wybożeniu pasa z płaszczyzny. Potwierdzeniem tej tezy są wyniki obliczeń sprawdzających, przytoczone w p. 4. Zgodnie z założeniami projektu konstrukcję stalową zadaszenia wykonano w klasie 1, tymczasem zachowanie rozpatrywanej konstrukcji wskazuje na klasę 4. Przywrócenie stanu użytkowania konstrukcji dachu nad lodowiskiem wymagało zdjęcia membrany dachowej, zdemontowania obu dźwigarów skrajnych oraz wymiany uszkodzonych elementów. Dla zapewnienia stateczności globalnej konstrukcji podczas wykonywania powyższych prac, wymagane było zamontowanie odpowiednich stężeń. Zalecono ponadto przeprojektowanie konstrukcji zadaszenia z uwzględnieniem:

- zastosowania w pasie górnym skrajnych dźwigarów rur o stałym przekroju 220×120×6,3 mm, przy rezygnacji ze skokowej zmiany przekroju
- dodatkowego stężenia pasów górnych i dolnych dźwigarów kratowych
- zwiększenia obliczeniowego obciążenia śniegiem według normy PN-EN 1991-1-3 [7].

6. Podsumowanie

Opisany przypadek ukazuje, iż stan awaryjny konstrukcji zadaszenia lodowiska powstał jako skutek popełnionych błędów projektowych. Pociągnęło to za sobą konieczność wyłączenia obiektu z użytkowania na dłuższy okres czasu. Poawaryjna naprawa lub wzmocnienie konstrukcji dachu jest zadaniem trudnym i technicznie odpowiedzialnym, ponieważ wymaga przeprowadzenia dokładnej oceny wszystkich elementów istniejącej konstrukcji przekrycia pod kątem ich dalszej przydatności eksploatacyjnej. Skutkiem opisanej awarii były znaczne straty materialne oraz wysokie koszty jej usunięcia.

Literatura

1. PN-82/B-02000. Obciążenia budowli. Zasady ustalania wartości.
2. PN-82/B-02001. Obciążenia budowli. Obciążenia stałe.
3. PN-80/B-02010. Obciążenia w obliczeniach statycznych. Obciążenie śniegiem.
4. PN-77/B-02011. Obciążenia w obliczeniach statycznych. Obciążenie wiatrem.
5. PN-86/B-02015. Obciążenia budowli. Obciążenia zmienne środowiskowe. Obciążenie temperaturą.
6. PN-90/B-03200 „Konstrukcje stalowe. Obliczenia statyczne i projektowanie.
7. PN-EN 1991-1-3 październik 2005, Eurokod 1 Oddziaływania na konstrukcje Część 1-3: Oddziaływania ogólne – Obciążenie śniegiem.
8. PN-EN 1993-1-3: listopad 2006 Eurokod 3 – Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 1-3: Reguły ogólne – Reguły uzupełniające dla konstrukcji z kształtowników i blach profilowanych na zimno.
9. Pałkowski S.: Konstrukcje stalowe. Wybrane zagadnienia obliczania i projektowania, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2009.