



CEZARY AJDUKIEWICZ, *c.ajdukiewicz@il.pw.edu.pl*

FRANCISZEK SAWCZUK, *f.sawczuk@il.pw.edu.pl*

Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Łądowej

ANALIZA PRZYCZYŃ ZAGROŻENIA BEZPIECZEŃSTWA DACHU NAD WIELKOPOWIERZCHNIOWYM OBIEKTEM HANDLOWYM

ANALYSIS OF THE CAUSES OF SAFETY RISK ON THE ROOF ABOVE LARGE COMMERCIAL OBJECT

Streszczenie W trakcie wykonywania prac wykończeniowych konstrukcji stalowej dachu nad wielkopowierzchniowym obiektem handlowym, zauważono znaczne wygięcia wielu prętów pasów dolnych płatwi kratowych. W pracy przedstawiono analizę przyczyn powstania wygięć oraz opisano podjęte działania naprawcze.

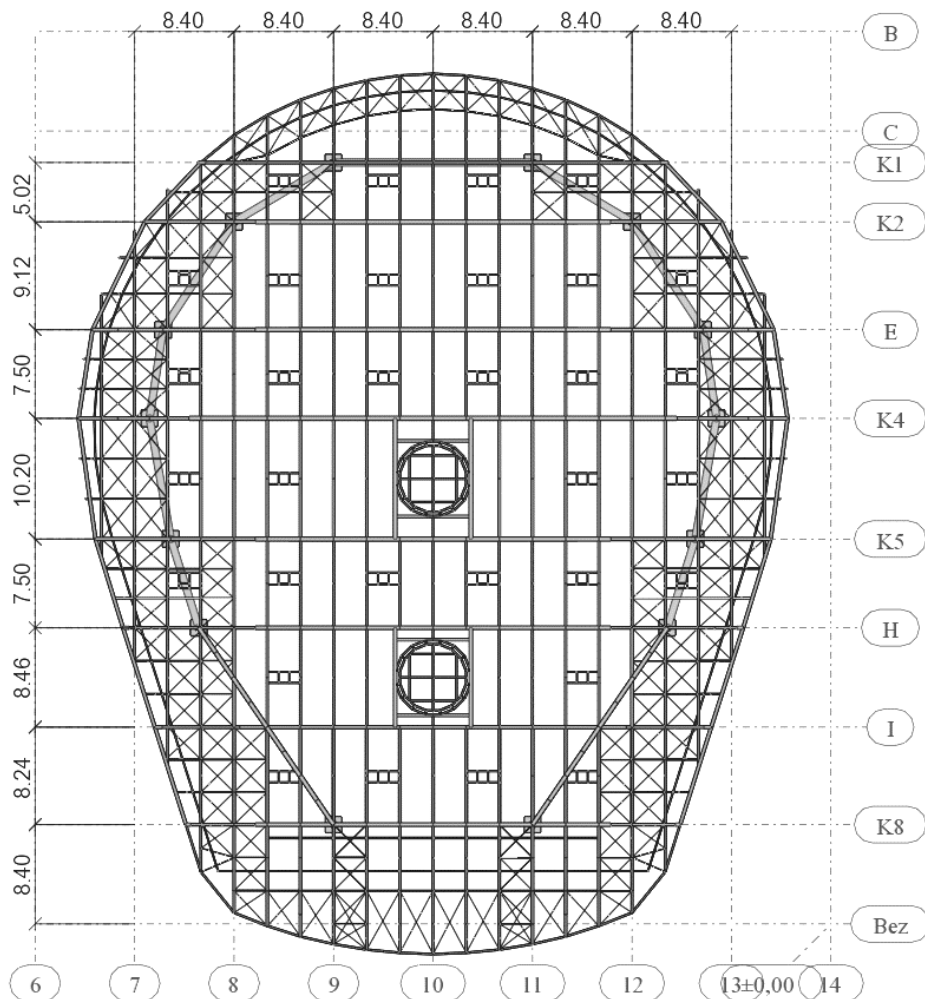
Abstract In the course of the finishing of a steel roof over a large commercial object, a considerable bending of many rods of bottom spare flange of steel truss purlins was noted. The work shows the analysis of the causes and describes the corrective actions taken.

1. Wprowadzenie

W lutym 2010 r., w trakcie wykonywania prac wykończeniowych, w konstrukcji stalowej dachu nad obiektem wielkopowierzchniowym zauważono znaczne wygięcia wielu prętów pasów dolnych płatwi kratowych. W związku z tym, że powstały one w trakcie budowy powstał spór pomiędzy wykonawcą i projektantem co do przyczyn powstania wygięć. W wyniku sporu wykonano projekt wzmocnienia konstrukcji. Po wykonaniu wzmocnień Właściciel obiektu zwrócił się do nas o wydanie opinii, czy wykonane wzmocnienia są wystarczające do bezpiecznej eksploatacji konstrukcji. W dalszej części pracy przedstawiono wyniki tej opinii, podano przyczyny powstałych ugięć oraz zalecenia naprawcze.

2. Charakterystyka obiektu

Obiekt opisany w niniejszej pracy to fragment konstrukcji dachu centrum handlowego o powierzchni zabudowy około 15 000 m² i kubaturze około 260 000 m³ wybudowanego w ubiegłym roku w jednym z miast w Polsce. Obiekt wykonano w konstrukcji mieszanej, ze zdecydowaną większością elementów żelbetowych i murowanych, tylko analizowany w niniejszej pracy fragment przekrycia dachowego nad powierzchnią około 3000 m² to konstrukcja stalowa o nieregularnym kształcie, zbliżonym do elipsy o rozpiętości w osiach 60,3÷74,4 m. Konstrukcja wsparta jest na 14 słupach żelbetowych o wysokości 15,5 m i średnicy ϕ 60 cm. Schematyczny rzut tego fragmentu dachu przedstawiono na rys. 1. Konstrukcję dachu stanowi układ dźwigarów głównych o osiach oznaczonych literami na rys. 1, stężonych prostopadłymi do nich płatwiami kratowymi rozmieszczonymi co 2,8 m. Dodatkowo pomiędzy osiami H i K8 poprowadzone są dwa dźwigary ukośne stanowiące podparcie dla dźwigara w osi I-I.

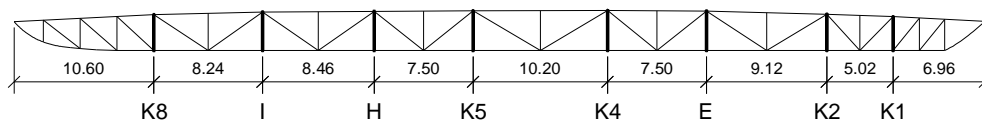


Rys. 1. Rzut z góry na konstrukcję dachu wg pierwotnego projektu

Pasy głównych dźwigarów kratowych wykonano z profili walcowanych HEB lub HEA o wysokościach od 220 do 320 ze stali S355, krzyżulce zaś wykonano z rur kwadratowych zamkniętych ze stali S235. Każdy z dźwigarów połączono w miejscu oparcia ze słupem czterema śrubami M24 tak, że połączenie można traktować jako przegubowo-nieprzesuwne. Pomiędzy dźwigarami głównymi w rozstawie 2,8 m zostały wykonane płatwie kratowe. Przykład położenia płatwi względem dźwigarów głównych pokazano na rys. 2. Pasy górne płatwi wykonano z profili walcowanych HEA od 100 do 160, a pasy dolne z profili IPE 140, IPE 160. W części wspornikowej tj. powyżej osi K2 i poniżej osi I pasy dolne wykonano z profili HEA 140 i 200. Krzyżulce i słupki wykonano z rur kwadratowych 70×4, 80×5 i 90×5 mm.

Po obwodzie dachu, w strefie okapowej zaprojektowano rygle z rur kwadratowych 100×4 mm oraz z profili walcowanych HEA 200 ze wzmocnieniem blachami równoległymi do średnicy przyspawanymi do krawędzi półek. Obszary obwodowe to obszary wspornikowe, gdzie następuje zmiana sił w pasach dolnych z rozciąganych na ściskane i odwrotnie

w pasach górnych ze ściskanych w rozciągane. Wobec tego w pasach dolnych w celu zmniejszenia długości wybocheniowych zastosowano płaskie stężenia z prętów okrągłych ułożonych krzyżowo i ściągniętych śrubami rzymskimi (rys. 1). Wykonane stężenia po obwodzie konstrukcji były jedynymi stężeniami pasów dolnych płatwi w konstrukcji wykonanej wg projektu pierwotnego.

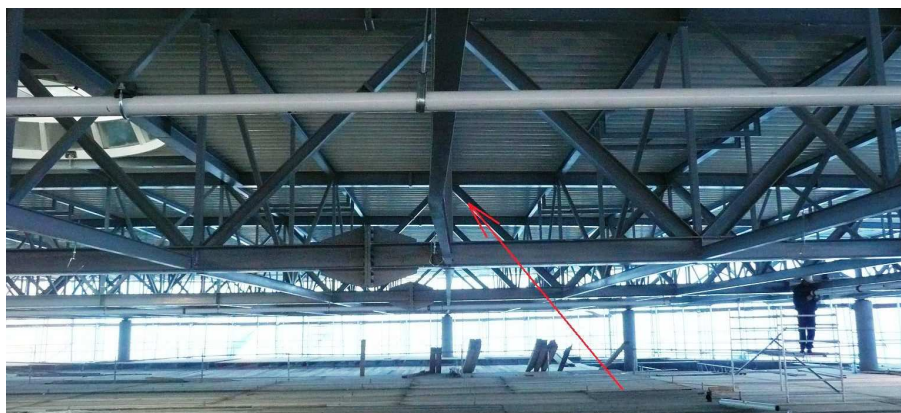


Rys. 2. Schemat rozstawienia płatwi pomiędzy dźwigarami K8, I, H, K5, K4, E, K2, K1

Pokrycie dachu stanowi blacha trapezowa T 92/305 o grubościach 1,00 lub 1,25 mm mocowano do płatwi za pomocą kołków wstrzeliwanych lub blachowkrętów. Dzięki takiemu zamocowaniu blachy do płatwi, pełni ona rolę stężenia pasów górnych płatwi. Stężenia pasów dolnych płatwi nie zaprojektowano, gdyż jak wynikało z obliczeń projektantów pasy te są co najwyżej rozciągane, z wyjątkiem pasów w przęsłach wspornikowych i do nich przyległych. Warto podkreślić, że pasy dolne płatwi od osi I do K2 (por. rys. 2), tj. poza obszarami wspornikowymi, wykonano z dwuteowników IPE 140 i 160 bez stężeń w węzłach dolnych w kierunku prostopadłym do płaszczyzny płatwi tak, że smukłość ich była w granicach 450÷550.

3. Opis zaobserwowanych uszkodzeń elementów konstrukcji

Budowę dachu, który jest przedmiotem niniejszego opracowania, prowadzono w listopadzie i grudniu 2009 r. W lutym 2010 r., w trakcie wykonywania stropu podwieszanego i montowania różnych instalacji pod dachem, zauważono różnej wielkości odkształcenia w kilku elementach konstrukcji stalowej dachu. Znaczna część odkształconych elementów została utrwalona na zdjęciach wykonanych przez inspektora nadzoru. Wybrane dwa zdjęcia przykładowo przedstawiono na rys. 3 i 4. Na zdjęciach widoczne są odkształcenia pasów dolnych płatwi kratowych w postaci wyraźnych wygięć w kierunku prostopadłym do płaszczyzny płatwi. Poza odkształceniami pasów dolnych zauważono kilka wad wykonawczych polegających na niezbyt starannym wykonywaniu połączeń.



Rys. 3. Widok środkowej części konstrukcji z odkształceniem pasa dolnego płatwi kratowej w osi 11 pola G-H



Rys. 4. Środkowa część konstrukcji z widocznymi odkształceniami pasów dolnych płatwi kratowej pomiędzy osiami 8 i 9 oraz E i F

4. Działania podjęte po zaobserwowaniu uszkodzeń konstrukcji

W związku z zaobserwowaniem uszkodzeń konstrukcji stalowej dachu Wykonawca obiektu zlecił opracowanie ekspertyzy mającej na celu poznanie przyczyn zaistniałej sytuacji. Autorzy ekspertyzy [2] wykonali przestrzenny model konstrukcji przy pomocy programu Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2010 i stwierdzili między innymi, że w wielu elementach nie są spełnione warunki stanu granicznego nośności i elementy te wymagają wzmocnienia lub usztywnienia. W ekspertyzie, stwierdzono między innymi, że słupy żelbetowe pomimo wystarczającej nośności mają za dużą smukłość w stosunku do zalecanej w normie [4]. Ponadto stwierdzono, że niektóre elementy stalowe dźwigarów głównych w miejscu ich przecinania się na słupach w osi H są za słabe. Najwięcej zastrzeżeń mieli jednak do pasów dolnych płatwi kratowych stężających, które z powodu zbyt dużej smukłości nie spełniały w wielu miejscach warunku wytrzymałości, a współczynnik wyężenia znacznie przekraczał zalecaną w normie [5] wartość 1. Autorzy ekspertyzy stwierdzili, że przeciążenie pasów dolnych płatwi i ich wyginanie związane jest z przekazywaniem sił ściskających ze wsporników. Naszym zdaniem może to być przyczyną wyginania się pasów tylko w obszarach sąsiadujących ze wspornikiem (tj. między osiami K8-I i K2-K1 – rys. 1 i 2), ale nie może być w pozostałych przęsłach. Do problemu tego wrócono w dalszej części pracy.

W związku z zastrzeżeniami przedstawionymi w ekspertyzie autorzy projektu konstrukcji stalowej dachu przeprowadzili ponowną analizę statyczno-wytrzymałościową. Warto nadmienić, że pierwotną analizę konstrukcji stalowej dachu [1] projektanci wykonali w rozbiciu na układy płaskie. Wskutek tego pasy dolne płatwi przyjęli jako pręty zerowe lub rozciągane niewielkimi siłami i wobec tego zaprojektowali je o małym przekroju i o bardzo dużej smukłości ($\lambda = 450 \div 550$) względem osi pionowej tj. o mniejszej sztywności.

Ponowną analizę statyczno-wytrzymałościową, projektanci wykonali przy wykorzystaniu programu Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2010. Zbudowali niezależny od autorów ekspertyzy [2] model konstrukcji, który poddali analizie. W wyniku tej analizy przygotowali projekt zamienny [3], na podstawie którego wykonano niżej omówione zmiany i wzmocnienia.

Wzmocniono i usztywniono słupy w osi K8 przez zespolenie ich na całej wysokości z dodatkowym słupem stalowym HEB 450 za pomocą stalowych obejm. Następnie słupy

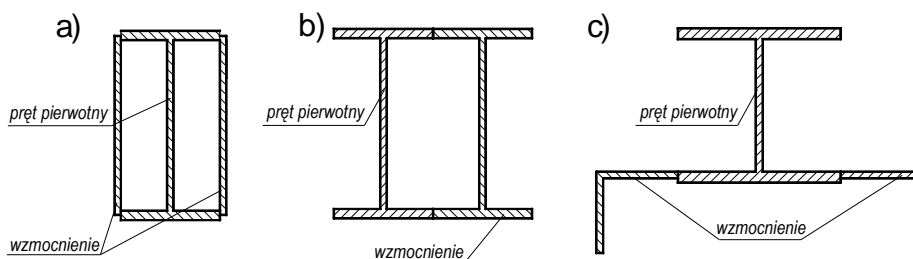
w przekrojach H i K2 dodatkowo usztywniono w części górnej przez połączenie ich za pomocą sztywnych kotew stalowych z żelbetową ścianą części handlowej obiektu. Należy nadmienić, że wszystkie słupy z wyjątkiem tych w osi K8 są dodatkowo usztywnione na wysokości 4,5 m żelbetową płytą galerii położoną wzdłuż obwodu obiektu handlowego.

W dalszej kolejności wzmocniono elementy dźwigara głównego w okolicy słupów K8 i połączenia go z dźwigarem ukośnym przez przyspawanie do pólki wzmocnianego dwuteownika z dwóch stron blach pionowych równoległych do środniczki w sposób pokazany na rys. 5a. Wzmocniono też słupki w dźwigarach ukośnych i głównych w miejscu ich przecięcia tj. nad słupami w osi K8. Były to jedyne wzmocnienia dotyczące głównych elementów nośnych konstrukcji. Pozostałe wzmocnienia dotyczyły płatek kratowych, które jak wspomniano wcześniej oprócz zadania przenoszenia obciążeń na dźwigary główne dodatkowo je usztywniają.

Wzmocnieniu poddano wybrane nieuszkodzone elementy płatek, a uszkodzone wymieniono na nowe. Wzmocnienie płatek polegało głównie na zwiększeniu przekroju części pasów dolnych, krzyżulców i pasów górnych oraz na dodatkowym stężeniu pasów dolnych. Wzmocnianie pasów dolnych wykonywano zwykle przez dospawanie drugiego dwuteownika w sposób przedstawiony na rys. 5b. Krzyżulce wzmocniano zwykle przez dospawanie do istniejącego profilu wykonanego z rury kwadratowej drugiej takiej rury lub też w wypadku, gdy przekrój był dwuteowy dospawano parami blachy do pólki równoległe do środniczki w sposób pokazany na rys. 5a. Pasy górne zwykle wzmocniano przez dospawanie pary kątowników w sposób przedstawiony na rys. 5c. oraz dodatkowo wzmocniono węzły.

Poza wymienionymi wyżej wzmocnieniami przekroju całe ciągi pasów dolnych płatek kratowych wzmocniono parami zmniejszając ich smukłość stężąc za pomocą pręta rozporowego i krzyżowego skratowania wykonanego z prętów okrągłych w postaci śrub rzymskich. Na rys. 7. schematycznie przedstawiono układ nowych stężeń. Warto nadmienić, że dodatkowe stężenie zdecydowanie usztywniło również całą konstrukcję dachu. (Dodatkowe oznaczenia kolorem przyjęte na rys. 7. opisano w punkcie 5).

Po zakończeniu prac związanych ze wzmocnianiem konstrukcji dachu Właściciel obiektu zwrócił się do autorów tej pracy o opinię na temat nośności dachu po wykonanych wzmocnieniach. Wyniki naszych analiz przedstawiono w następnym punkcie.



Rys. 5. Przykłady zastosowanych wzmocnień prętów

5. Ocena nośności konstrukcji na podstawie analiz własnych

Podstawowym celem wykonania przez autorów tej pracy analiz własnych była odpowiedź na pytanie postawione przez Właściciela obiektu, tj. czy dach po wykonanych wzmocnieniach będzie w stanie przetrzymać obciążenie przewidziane polskimi normami. Ponadto postawiono zadanie wyjaśnienia przyczyn wygięć pasów dolnych płatek pokazanych między innymi na rys. 3 i 4 oraz wyjaśnienia przyczyn tak dużych rozbieżności w ocenie stopnia

wyświetlenia poszczególnych elementów konstrukcji wyznaczonych przez autorów projektu [1] jak i autorów ekspertyzy [2] wspomnianej w poprzednim punkcie.

W analizie powyższych zagadnień wykorzystano materiały dostarczone przez Właściciela obiektu, które będą dalej krótko rozróżniane jako: projekt pierwotny [1], ekspertyza [2] i projekt wzmocnienia [3]. Projekt pierwotny i wzmocnienia wykonał jeden zespół w różnym czasie, ekspertyzę zespół niezależny po realizacji projektu pierwotnego. Do ekspertyzy i projektu wzmocnienia dołączono obliczenia statyczno-wytrzymałościowe wraz z zapisaną w formacie programu Robot 2010 geometrią całej konstrukcji wykonaną niezależnie przez autorów ekspertyzy i autorów projektu wzmocnienia. W analizach własnych korzystano z plików w formacie programu Robot z geometrią zapisaną przez autorów projektu wzmocnienia za ich zgodą.

Autorzy ekspertyzy [2] jak i projektu wzmocnienia [3] analizując konstrukcję przy wykorzystaniu programu Robot traktowali ją jako przestrzenną. Autorzy projektu pierwotnego [1] obliczenia wykonali rozkładając myślowo całą przestrzenną konstrukcję na płaskie elementy kratowe i analizowali każdą kratownicę oddzielnie.

Niezależnie od stosowanego narzędzia i sposobu postępowania przy prawidłowej analizie zarówno autorzy projektu jak i ekspertyzy powinni otrzymać zbliżone wartości współczynników wyświetlenia poszczególnych elementów konstrukcji. Tak się jednak nie stało i autorzy ekspertyzy wskazali kilka prętów dźwigarów głównych i bardzo dużo prętów płatwi jako źle zaprojektowanych. Wg autorów ekspertyzy w kilku prętach dźwigarów głównych współczynnik wyświetlenia przekroczył wartość 1, a w wypadku płatwi współczynnik ten w wielu prętach pasów dolnych i górnych osiągał wartość 2 i więcej.

Z analizy zestawienia obciążeń wynika, że zarówno autorzy projektu jak i ekspertyzy obciążenia zestawili zgodnie z aktualnymi polskimi normami, a zwłaszcza zgodnie z normą dotyczącą obciążenia śniegiem [6]. Różna ocena stopnia wyświetlenia w poszczególnych prętach ma źródło w sposobie obliczania sił przekrojowych oraz w sposobie wymiarowania.

Klasyczny sposób analizy przestrzennych układów kratowych polega na ich rozbiciu na płaskie kratownice i przy założeniu, że siły w prętach kratownicy mogą być tylko podłużne, pręty ściskane wymiaruje się korzystając ze znanego z normy [5] wzoru:

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

W powyższy sposób można wymiarować pręty kratownicy zarówno „ręcznie” jak i przy wykorzystaniu dowolnego programu komputerowego. Sprawa się trochę komplikuje, gdy poddajemy analizie układ kratowy przestrzenny to jest układ prętów połączonych ze sobą przegubowo i obciążony tylko siłami przyłożonymi w węzłach. Przy tych założeniach w prętach powstają tylko siły podłużne i wymiarowanie prętów ściskanych też można prowadzić przy wykorzystaniu wzoru (1). Jednak problemem wtedy staje się zapewnienie geometrycznej niezmienności układu.

Obecnie, korzystając z programów komputerowych często zamiast kratownicy przestrzennej przyjmuje się model obliczeniowy układu ramowego ze wszystkimi idącymi za tym konsekwencjami. Zwykle zakłada się, że pasy są prętami ciągłymi a słupki i krzyżulce połączone z nimi przegubowo. Przyjmując model obliczeniowy w postaci układu ramowego, w większości prętów występują wszystkie składowe siły przekrojowych i np. pręty ściskane wymiarowane są wtedy wg [5] ze wzoru:

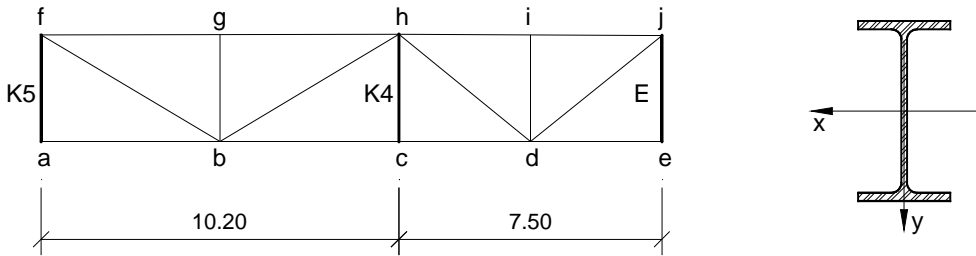
$$\frac{N}{\varphi_i N_{Rc}} + \frac{\beta_x M_{x \max}}{\varphi_L M_{Rx}} + \frac{\beta_y M_{y \max}}{M_{Ry}} \leq 1 - \Delta_i \quad (2)$$

Tak też przeprowadzili analizę autorzy ekspertyzy jak i projektu wzmocnienia na niezależnych od siebie modelach obliczeniowych przestrzennych układów kratowych traktowanych jako układy ramowe. Skutkiem tego w wielu prętach ściskanych uzyskali współczynnik wyęczenia przekraczający 1. Warto przy tym nadmienić, że czynnik z M_y we wzorze (2) miał tutaj decydujące znaczenie. Dlatego też zastosowane wzmocnienia przedstawione na rys. 5 miały za zadanie zwiększenie sztywności przekroju względem osi pionowej i zmniejszenie wartości czynnika z M_y we wzorze (2), czego w wypadku klasycznego podejścia do kratownicy na pewno by nie wykonano.

Obliczenia do projekt pierwotnego jak wspomniano wcześniej autorzy wykonali klasycznie tj. w rozbięciu na płaskie układy kratowe i zwymiarowali korzystając ze wzoru (1). Popełnili jednak następujące błędy. Niezbyt starannie wykonali redystrybucję sił między dźwigarami ukośnymi H-K8 a dźwigarami H-H i K8-K8 (por. rys. 1) oraz w bardzo dużej liczbie prętów nie zapewnili wystarczającej sztywności w kierunku prostopadłym do płaszczyzny kratownic, a zwłaszcza w prętach pasów dolnych płatwi kratowych. Zaniedbanie stężenia pasów dolnych płatwi kratowych skutkowało powstaniem uszkodzeń opisanych w punkcie 3, przedstawionym na rys. 3 i 4 oraz skutkowało dalszymi działaniami w postaci opracowania ekspertyzy i dalej projektu wzmocnienia.

Autorzy ekspertyzy [2] obliczenia przeprowadzili wykonując przestrzenny model konstrukcji w programie Robot 2010. Wykonali model w postaci układu ramowego i starali się jak najbardziej zbliżyć go do rzeczywistej konstrukcji przez zastosowanie zwolnień obrotów w końcach wielu prętów. Szczególną uwagę zwrócili na pręty dochodzące do dźwigarów głównych, jak i na pręty stanowiące tylko stężenia. Jednak dźwigary główne zostawili jako układy ramowe oraz połączenia wewnątrz płatwi pozostawili jako sztywne. Skutkiem tego wymiarowanie prowadzone przez program Robot automatycznie zostało wykonane zgodnie ze wzorem (2). Autorzy ekspertyzy [2] rozwiązali zatem inny układ niż autorzy projektu pierwotnego [1]. Podchodząc do zagadnienia w ten sposób wyraźnie pokazali efekty wspomnianych wyżej błędów w projekcie pierwotnym tj. niewystarczającą sztywność bardzo wielu prętów w kierunku prostopadłym do płaszczyzny dźwigarów i płatwi. Autorzy ekspertyzy [2] nie podali jednak trafnie przyczyny wygięć pasów dolnych sugerując, że przeciążenie pasów dolnych płatwi i ich wyginanie związane jest z przekazywaniem sił ściskających ze wsporników.

W celu odpowiedzi na pytanie o przyczyny wygięć prętów rozważmy wybrany fragment przedstawionej na rys. 2 płatwi. Fragment ten pokazano na rys. 6. W celu ułatwienia wyjaśnień przyjęto oprócz oznaczeń dźwigarów głównych literowe oznaczenia węzłów. Pasy dolne na odcinku a-c wykonano z dwuteownika IPE 160 a na odcinku c-e z IPE 140 (por. rys. 6). Węzłów b i d nie stężono w kierunku prostopadłym do płatwi. Stężenie pasa górnego zapewnia blacha trapezowa mocowana do niego stalowymi kołkami co 30 cm. Smukłość pręta pasa dolnego a-c w kierunku prostopadłym do płaszczyzny płatwi kratowej wynosi $\lambda_y = 550$, a pręta c-e $\lambda_y = 450$. Tak wysokie smukłości w literaturze technicznej i normach przedmiotowych nie są zalecane ani stosowane. Tradycyjnie zaleca się aby smukłość konstrukcyjnych prętów ściskanych nie przekraczała 120, a rozciąganych 250. W normach dopuszcza się stosowanie większych smukłości.



Rys. 6. Fragment płatwi z rys. 2 pomiędzy dźwigarami głównymi K5, K4 i E oraz przykładowy przekrój pasa dolnego

Przy tak dużej smukłości prętów nawet niewielkie siły skupione (rzędu 1 kN) przyłożone na dość dużym ramieniu lub mimośrodzie mogą spowodować wygięcie prętów. Siły takie mogą być wywołane bardzo łatwo w czasie montażu lub być wynikiem niewielkich bocznych sił powstałych w czasie normalnej eksploatacji konstrukcji.

W analizowanym fragmencie płatwi (rys. 6) słupki g-b i i-d są ściskane. W węzłach górnych każdy słupek jest stężony pasem górnym przez blachę trapezową. W węzłach dolnych słupki nie są stężone w kierunku prostopadłym do płaszczyzny płatwi i mogą się w czasie ściskania w tym kierunku przemieścić chyba, że pas dolny będzie miał wystarczającą sztywność. Wg normy [5] punkt 5.2a pas dolny będzie miał wystarczającą sztywność jeśli będzie w stanie przenieść umowną siłę o wartości:

$$F_0 = 0,01 N_c \text{ lecz } F_0 \geq 0,005 A_c f_d \quad (3)$$

gdzie: N_c , A_c i f_d są: siłą, polem przekroju i wytrzymałością obliczeniową w słupku.

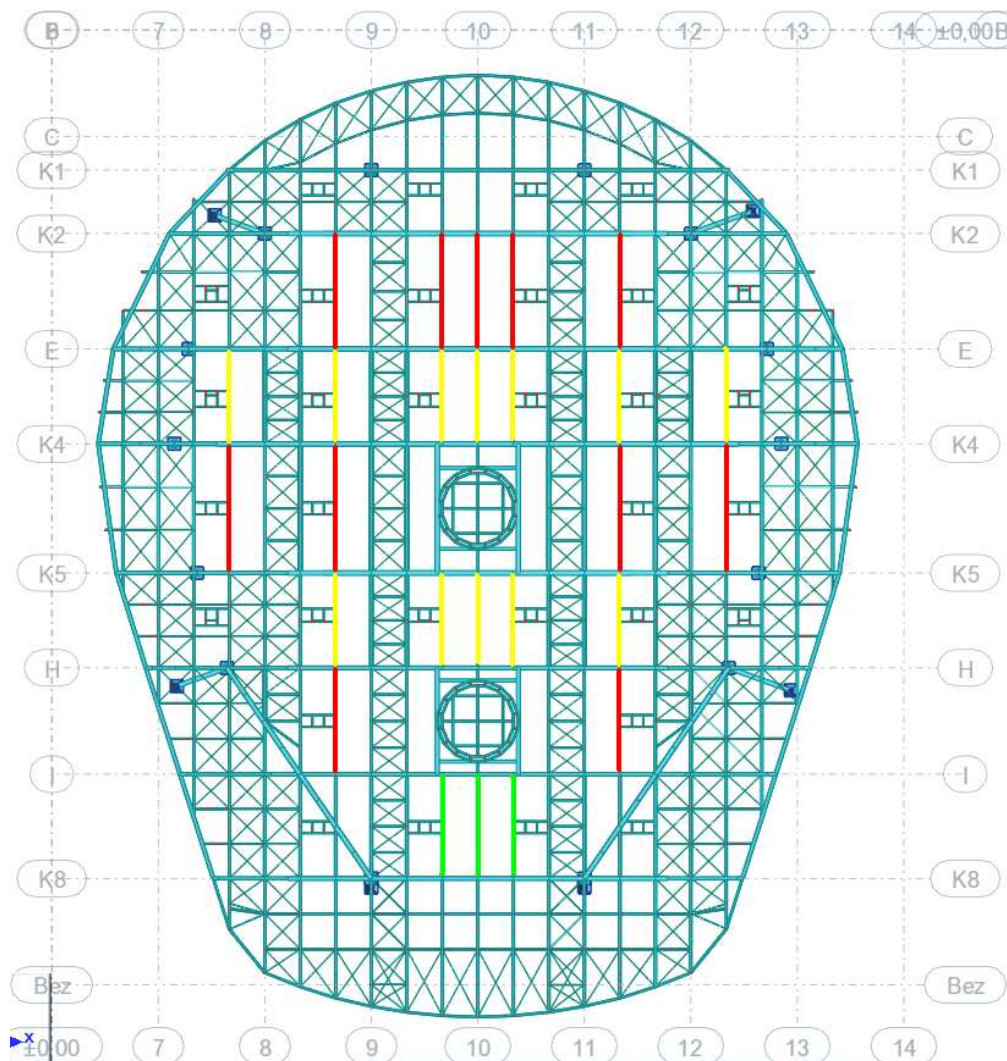
Wyznaczona z części lewej tego wzoru dla obu rozważanych słupków siła F_0 wynosi około 0,5 kN. Wyznaczona zaś z prawej części tego wzoru kolejno dla prętów i-d i g-d wynosi 1 i 1,5 kN. Siła 1,5 kN przyłożona w węzle b do pręta a-c prostopadle do płaszczyzny płatwi spowoduje przemieszczenie w kierunku działania siły równe 25 cm i współczynnik wyężenia w tym pręcie równy 1. Podobnie siła równa 1 kN w węzle d spowoduje przemieszczenie równe 10 cm i współczynnik wyężenia równy 0,77. W wypadku gdyby smukłość prętów zmniejszyć dwukrotnie ugięcie zmniejszyłoby się czterokrotnie, a współczynnik wyężenia zmniejszyłby się dwukrotnie i można by uznać, że sztywność prętów pasów dolnych jest wystarczająca do przeniesienia bocznego obciążenia od ściskania słupka. Gdyby zatem smukłość prętów pasów dolnych nie przekraczała 250 żadnych wygięć by nie zaobserwowano.

Podsumowując można powiedzieć, że jeśli wygięcie powstało w okolicy węzła (np. b lub d z rys. 6) to jego przyczyną była duża siła ściskająca w słupku, jeśli w innym miejscu to wygięcie powstało wskutek niestarannego montażu.

Wracając do celu postawionego na początku tego punktu odnośnie nośności dachu autorzy tej pracy wykonali obliczenia własne przy wykorzystaniu programu Robot 2010 z geometrią wprowadzoną przez autorów projektu wzmocnienia [3]. Obliczenia wykonano w kilku wariantach, w tym również z wariantem jednoczesnego działania wszystkich obciążeń na konstrukcję dachu i dodatkowo obciążenia umownego o wartościach 1 i 1,5 kN działającego w środkach nie stężonych węzłów pasów dolnych płatwi kratowych.

W wyniku przeprowadzonych analiz stwierdzono, że po wykonaniu projektowanych prac wzmacniających [3] podstawowe elementy konstrukcji takie jak: słupy, dźwigary główne

i wszystkie wzmocnione płatwie są w stanie przenieść pełne obciążenie przewidziane polskimi normami. Jednak kilka nie wzmocnionych bardzo smukłych prętów pasów dolnych płatwi przy maksymalnych obciążeniach śniegiem może się wygiąć w środku rozpiętości. Pręty te oznaczono na rys. 7 kolorem czerwonym i zalecono wzmocnić lub stężyć. Pozostałe pręty oznaczono kolorem żółtym i zielonym w zależności od współczynnika wyężenia, który otrzymano z obliczeń. Kolorem żółtym zaznaczono pręty o współczynniku zawartym w granicach $0,9 \div 0,98$, a zielonym pozostałe.



Rys. 7. Rzut dachu z układem wszystkich stężeń pasów dolnych i ze wskazaniem prętów wymagających interwencji (objaśnienie w tekście)

6. Podsumowanie i wnioski

Podstawową przyczyną znacznych wygięć prętów pasów dolnych płatwi kratowych była ich duża smukłość ($\lambda = 450 \div 550$). Wygięcie tak smukłych prętów jest możliwe zarówno

w trakcie montażu jak i na skutek działania dużej siły ściskającej w słupku dochodzącym do pasa dolnego płatwi. Siła ściskająca w słupku generuje siłę prostopadłą do płaszczyzny bocznej płatwi i wypadku małej sztywności pasa powoduje jego wygięcie. Jeśli zatem wygięcie powstało w pobliżu węzła, czyli w środku rozpiętości pasa to przyczyną jest znaczna siła w tym słupku. Jeśli powstało gdzie indziej to jego przyczyną był najprawdopodobniej niestaranny montaż.

W wyniku przeprowadzonych badań wizualnych, obliczeń statyczno-wytrzymałościowych i przeprowadzonych analiz stwierdzono, że po wykonaniu w bieżącym roku prac wzmacniających wg projektu wzmocnienia [3] podstawowe elementy konstrukcji takie jak: słupy, dźwigary główne i wszystkie wzmocnione płatwie są w stanie przenieść pełne obciążenie przewidziane polskimi normami. Jednak kilka niewzmocnionych bardzo smukłych elementów pasów dolnych płatwi przy maksymalnych obciążeniach śniegiem może się wygiąć w środku rozpiętości z płaszczyzny mniejszej sztywności. W celu niedopuszczenia do tych ugięć zalecono stężenie oznaczonych na czerwono na rys. 7 elementów pasów dolnych. Stężenie powinno być wykonane zgodnie z oddzielnie przygotowanym projektem i zgodnie ze sztuką budowlaną pod ścisłym nadzorem technicznym.

Literatura

1. Projekt budowlany obiektu (pierwotny).
2. Ekspertyza techniczna dotycząca dachu stalowego w osiach B-J, 6÷14.
3. Projekt budowlany zamienny obiektu (projekt wzmocnienia).
4. PN-B-03264:2002 Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Obliczenia statyczne i projektowanie.
5. PN-B-03200:1990 Konstrukcje stalowe. Obliczenia statyczne i projektowanie.
6. PN-B-02010:1980/Az1:2006 Obciążenia w obliczeniach statycznych. Obciążenia śniegiem.