Dr inż. Szczepan LUTOMIRSKI, s.lutomirski@il.pw.edu.pl
Dr inż. Lesław KWAŚNIEWSKI, l.kwasniewski@il.pw.edu.pl
Mgr inż. Zofia KOZYRA, z.kozyra@il.pw.edu.pl
Mgr inż. Artur WINNICKI, a.winnicki@il.pw.edu.pl
Politechnika Warszawska, Wydz. Inżynierii Lądowej
Al. Armii Ludowej 16, 00-637 Warszawa.

ANALIZA MECHANIZMÓW ZNISZCZENIA KONSTRUKCJI PAWILONU WYSTAWIENNICZEGO W CHORZOWIE

FAILURE ANALYSIS OF CHORZÓW TRADE HALL ROOF COLLAPSE

Streszczenie W referacie przedstawiono wyniki analizy numerycznej mechanizmów zniszczenia hali wystawowej w Chorzowie. Obliczenia wykonano z wykorzystaniem programu metody elementów skończonych ABAQUS, dla modelu trójwymiarowego zbudowanego na podstawie uzyskanych danych technicznych hali. W modelu uwzględniono nieliniowe, sprężysto-plastyczne modele materiałowe, duże deformacje i efekt stężający ortotropwej powłoki stanowiącej poszycie dachu blachą trapezową. Na podstawie przeprowadzonych analiz statycznych i dynamicznych otrzymano hipotetyczne mechanizmy zniszczenia hali.

Abstract The paper presents results of finite element analysis of Chorzów Trade Hall roof collapse. A three dimensional FE model was developed based on obtained technical specification. The elastic – plastic material models, large deformations and stiffening effect of orthotropic roof plating was included. Possible failure mechanisms are investigated through the static and dynamic analyses carried out using program ABAQUS.

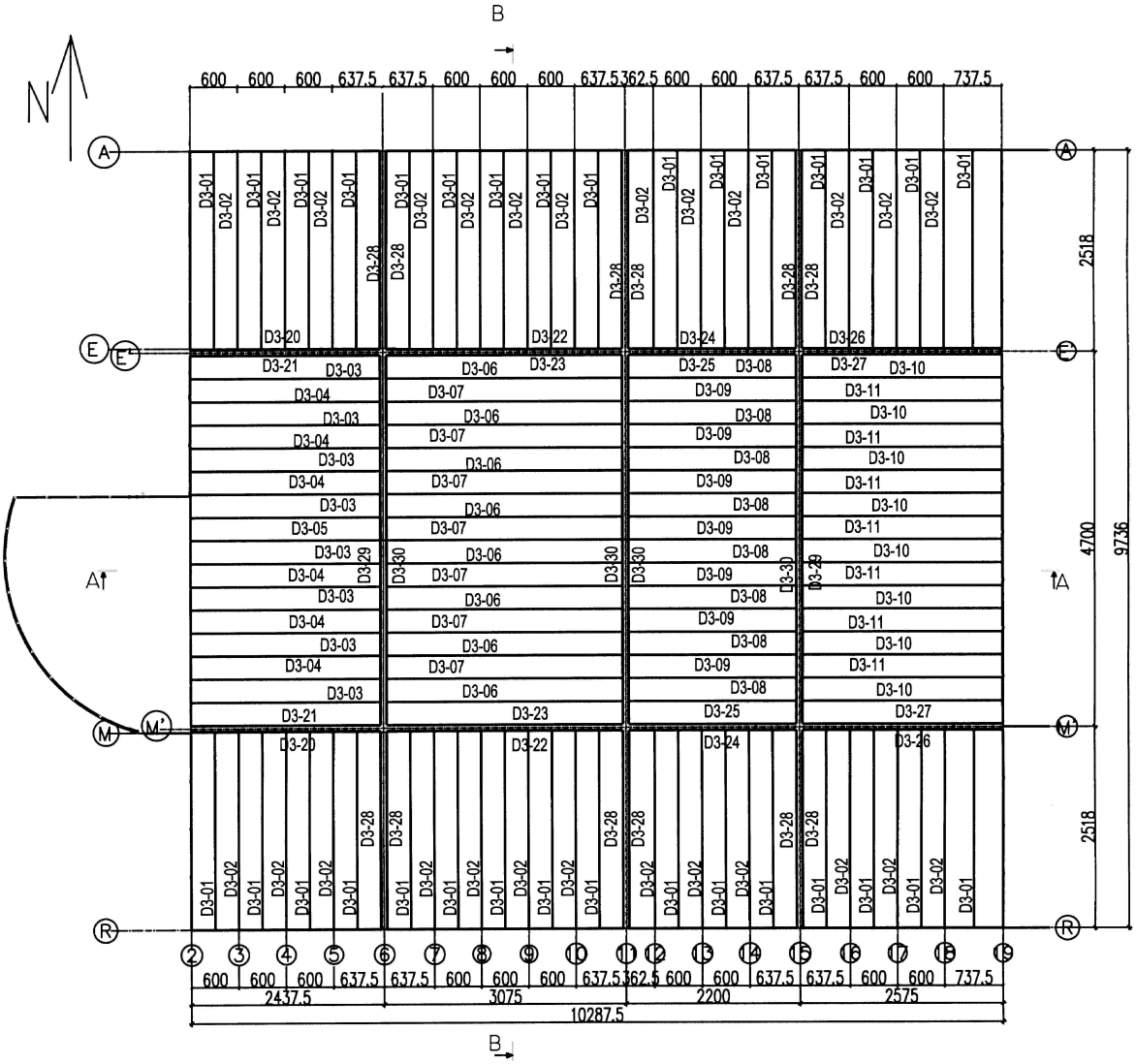
1. Wprowadzenie

Przedmiotem analizy jest katastrofa budowlana pawilonu wystawienniczego przy ul. Bytkowskiej 1 w Chorzowie na terenie Międzynarodowych Targów Katowickich. Celem opracowania jest syntetyczne wyjaśnienie przyczyn katastrofy oraz przedstawienie możliwych mechanizmów zniszczenia pawilonu. Opis konstrukcji pawilonu, przebieg katastrofy i jej następstwa, zostały opisane w szeregu publikacjach por. np. [3], [4]. W niniejszym referacie podano tylko wybrane fragmenty opracowanego przez autorów raportu [5], niezbędne do zrozumienia treści merytorycznej.

2. Opis konstrukcji pawilonu

Omawiany pawilon wystawienniczy został wybudowany w 2000 roku, w konstrukcji stalowej z lekką obudową. Obudowę lekką stanowiły: ściany zewnętrzne wykonane z gotowych kaset mocowanych do konstrukcji stalowej oraz dach, w którym jako element nośny wykorzystano blachę fałdową. Hala wystawiennicza jednokondygnacyjna miała kształt

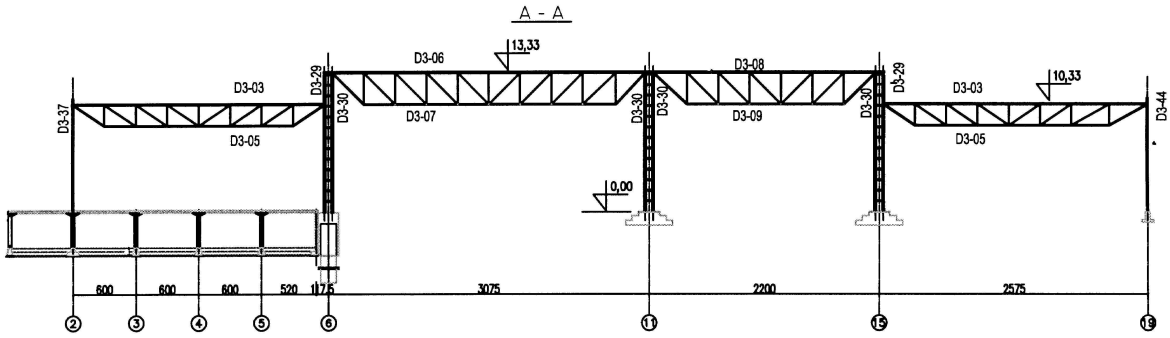
dwóch prostopadłościanów „położonych” jeden na drugim. Naświetla hali były zlokalizowane w ścianach bocznych górnego prostopadłościanu oraz na dachu dolnego prostopadłościanu, w ośmiu świetlikach punktowych. W osiach ścian zewnętrznych wymiary niższej części hali wynosiły: długość 102,875 m, szerokość 97,36 m, wysokość (od posadzki hali) 10,33 m, wyższej zaś odpowiednio 52,75, 47,00 i 13,33 m (rys. 1 i 2). Na dachu hali ustawionych było dziewiętnaście centrali klimatyzacyjnych oraz sześć wentylatorów, stanowiących istotne obciążenia skupione. Konstrukcję wsporczą dachu stanowiło sześć czterogałęziowych słupów wewnętrznych o rozstawie 30,75 m pomiędzy osiami 6, 11 i 22,00 m pomiędzy osiami 11, 15. W kierunku szerokości hali rozstaw osiowy słupów (osie E’ i M’) wynosił 47,00 m.



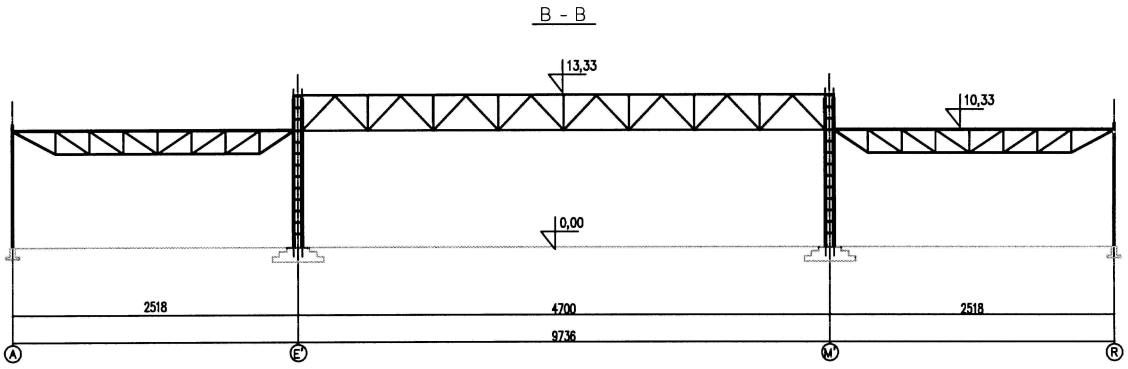
Rys. 1. Schemat konstrukcji dachu

Na dwóch gałęziach, każdego ze słupów wewnętrznych w osiach 6, 11 i 15, oparto trzy główne podciągi kratowe, ze skratowaniem typu N (rys. 3). Podciągi składały się z dwóch równoległych kratownic, ustawionych w odległości osiowej 750 mm. Wymiary konstrukcyjne kratownic wynosiły: rozpiętość 46,25 m, wysokość 3,00 m. Pasy górne i dolne oraz krzyżulce podporowe głównych podciągów kratowych wykonano o przekroju skrzynkowym z dwóch ceowników walcowanych 220. Słupki i krzyżulce przyspawane były bezpośrednio do pasów (bez blach węzłowych). Ponadto obie kratownice podciągów głównych były połączone ze sobą w płaszczyźnie słupków za pomocą przepon wykonanych z blachy o grubości 8 mm i

szerokości 100 mm. Przepony były przyspawane do obu stron słupka kratownicy i do poziomych poprzeczek z profili HEB 100 łączących pasy obu kratownic.



Rys. 2. Przekrój A-A przez halę



Rys. 3. Przekrój B-B przez halę

Na głównych podciągach kratowych co 6 m, ułożone były płatwie kratowe o długości 31134 mm (D3-07 - w polu miedzy osiami 6 i 11) oraz o długości 22384 mm (D3-09 - w polu między osiami 11 i 15). Pomiędzy płatwiami kratowymi D3-07 ułożone były belkowe płatwie pośrednie D3-06, a pomiędzy D3-09 płatwie pośrednie D3-08. Osiowa wysokość i długość przedziału płatwi kratowych wynosiła 3 m.

Podobną budowę jak główne podciągi, miały drugorzędne podciągi kratowe (D3-22+D3-23 i D3-24+D3-25), które znajdowały się w osiach E' i M'. Pasy górne i dolne oraz krzyżulce podporowe tych kratownic wykonane były o przekroju skrzynkowym z dwóch ceowników walcowanych 160.

Podciągi pomocnicze niższej części hali wsparte były na sześciu słupach wewnętrznych hali oraz na słupach zewnętrznych. Cztery podciągi pomocnicze znajdujące się w osi E' i M' (D3-20+D3-21 i D3-26+D3-27), były obciążone reakcjami od płatwi kratowych i belkowych. Pozostałe sześć podciągów pomocniczych spełniało rolę płatwi i stanowiło usztywnienie hali. Wszystkie podciągi pomocnicze składały się z dwóch równoległych kratownic połączonych ze sobą przegubowo w węzłach pasów. Odległość pomiędzy osiami płaszczyzn kratownic wynosiła 750 mm, a ich wysokość i długości przedziałów odpowiednio 2000 i 3000 mm.

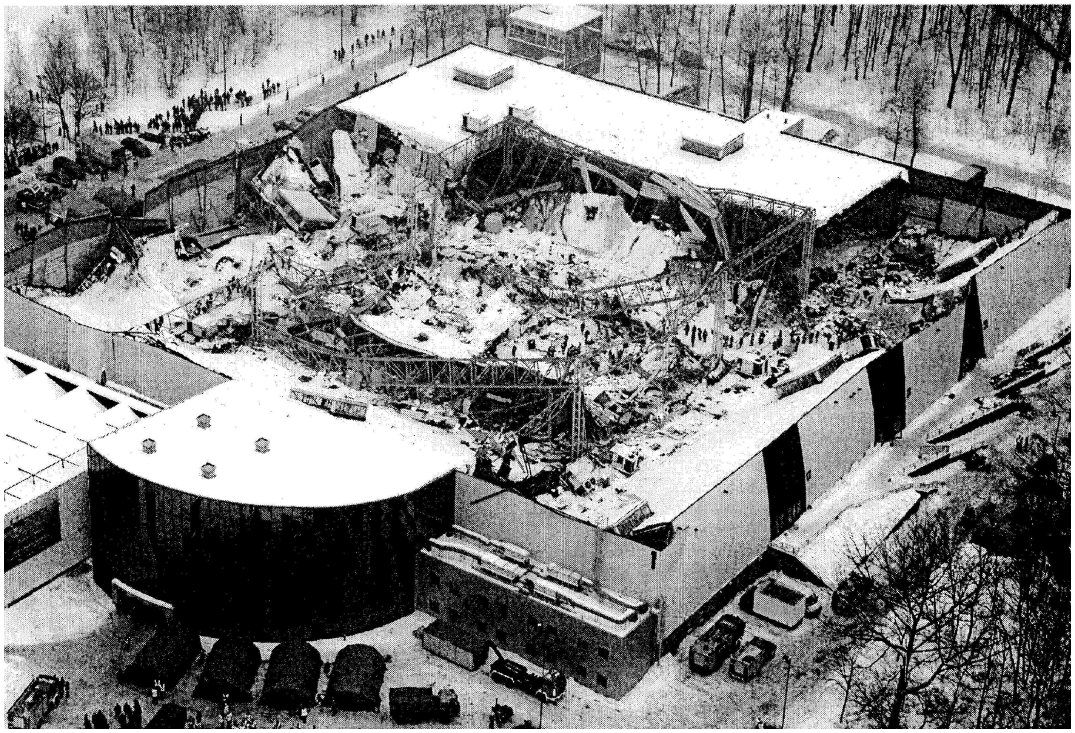
Płatwie kratowe i płatwie belkowe niższego dachu hali miały wysokość konstrukcyjną 2000 mm i wykonane były z rur kwadratowych o przekrojach identycznych jak płatwie wyższego poziomu dachu. Płatwie te opierały się na dolnych pasach podciągów: głównych,

drugorzędnych, na górnych pasach podciągów pomocniczych oraz na sześćdziesięciu sześciu wahadłowych słupach zewnętrznych, rozmieszczonych wzdłuż ścian zewnętrznych w przybliżeniu co sześć metrów. Na wysokości oparcia płatwi kratowych i belkowych na słupach zewnętrznych, występowała belka oczepowa z pionowym tężnikiem ściennym.

Pokrycie dachu i ścian hali wykonano w postaci lekkiej obudowy stalowej. Dach zaprojektowany był bez płatwi, w związku z czym, blachy fałdowe ułożone były prostopadle do szkieletu nośnego hali. Zastosowano blachy fałdowe PAB 77/301/903 w położeniu pozytywowym. Blachy mocowano do konstrukcji dachu wkrętami, w każdej fałdzie, a co drugą fałdę łączono ze sobą styki arkuszy blach. W projekcie przewidziano wkręty JT3-6-5,5*25 a na obiekcie zastosowano wkręty o średnicy 4,8 mm. W ten sposób utworzyła się dachowa przepona tarczowa, której właściwości w opracowanym modelu numerycznym uwzględniono przez przyjęcie ortotropowego modelu materiałowego [6].

3. Opis hali po katastrofie

Widok hali po katastrofie, w czasie prowadzenia akcji ratunkowej podano na rys. 4. Zawaleniu uległo ok. 80% powierzchni dachu hali. Dachy nad przybudówkami i rotundą pozostały niezniszczone. Całkowitemu zawaleniu uległa najwyższa, środkowa część hali.



Rys.4. Widok pawilonu wystawienniczego po katastrofie budowlanej

Nad częścią niższą hali od jej strony wschodniej pozostał fragment dachu o pow. ok. 1760 m^2. Dach ten spoczywał na płatwiach kratowych i płatwiach belkowych, które opierały się na podciągu głównym w osi 15, podciągu pomocniczym w osi E' i na słupach zewnętrznych. Od strony południowej i zachodniej (rotunda) „podpory" płatwi spadły z podciągów a drugie ich końce opierały się na belkach oczepowych i słupach zewnętrznych. Słupy wewnętrzne doznały uszkodzeń w górnych częściach, nastąpiło oderwanie przewiązek od gałęzi słupa. Uszkodzenia te są prawdopodobnie wtórnym efektem zawalenia się pociągów

głównych i drugorzędnych. Podciągi główne w osi M' po katastrofie pozostały połączone z gałęziami słupów, natomiast w osi E spadły na posadzkę, a gałęzie słupów rozdzieliły się.

4. Analiza numeryczna konstrukcji

Dobór programu numerycznego, sposób zdefiniowania modelu, oraz przyjęte założenia pozwoliły na przeprowadzenie nieliniowej analizy numerycznej, aż do momentu uplastycznienia niektórych elementów konstrukcji i wystąpienia znacznych ugięć. Obliczenia dla analizy statycznej i dynamicznej, ukazującej zniszczenie konstrukcji, wykonano przy pomocy opartego na metodzie elementów skończonych (MES) programu komercyjnego ABAQUS/Standard [7], [8]. Trójwymiarową geometrię konstrukcji hali opracowano na podstawie dokumentacji projektowej i inwentaryzacji dotyczącej elementów konstrukcyjnych takich jak podciągi, płatwie, słupy, stężenia i lekka obudowa. Siatkę elementów skończonych wygenerowano przy pomocy specjalistycznego programu, tzw. preprocesora graficznego.

Model MES zbudowano przy pomocy: dwuwymiarowych elementów powłokowych, reprezentujących poszycie dachu i jednowymiarowych elementów strukturalnych typu ramowego i kratownicowego, zastosowanych dla reszty konstrukcji hali. Blacha trapezowa, stanowiąca poszycie dachu, została zamodelowana elementami dwuwymiarowymi jako powłoka ortotropowa. W modelu uwzględniono dodatkową funkcję strukturalną blachy, która działa jako przepona usztywniająca. Przy analizowaniu pracy blachy jako tarczy istotny jest sposób i jakość jej połączenia z konstrukcją. Założono trzy warianty:

- wariant W1 – blacha nie została uwzględniona w modelu,
- wariant W2 – blacha jest zginana i pracuje jako przepona z pełnym wykorzystaniem nośności łączników,
- wariant W3 – blacha pracuje wyłącznie jako przepona (nie jest zginana).

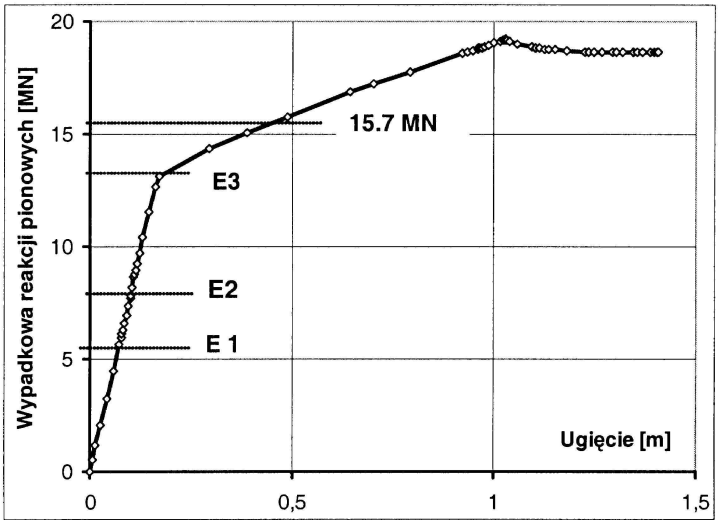
Stale zastosowane w konstrukcji hali są reprezentowane przez model materiału sprężysto-plastycznego ze wzmocnieniem, o zróżnicowanych wielkościach granicy plastyczności i wytrzymałości doraźnej. Zależność pomiędzy naprężeniem zastępczym a efektywnym odkształceniem plastycznym jest aproksymowana funkcją odcinkowo liniową. W momencie osiągnięcia wytrzymałości doraźnej przyjęto fazę plastycznego płynięcia, w której odkształcenia mogą narastać bez przyrostu naprężeń. W analizie numerycznej poczyniono konserwatywne założenie o braku zniszczenia materiału i przyjęto nieodkształcalne połączenia elementów hali. Obciążenie ciężarem własnym uwzględniono wykorzystując opcję grawitacja, która pozwala na przyłożenie równomiernie rozłożonego obciążenia wynikającego z ciężaru pojedynczego elementu skończonego. Zebrane z odpowiednich obszarów obciążenia od śniegu oraz niektóre obciążenia technologiczne uwzględniono w postaci liniowych obciążeń, przyłożonych do elementów skończonych reprezentujących podciągi i płatwie. Obciążenia od świetlików, klimatyzatorów i wentylatorów uwzględnione zostały w postaci sił skupionych. Słupy zewnętrzne zamocowano do podłoża przegubowo – nieprzesuwnie, a słupy wewnętrzne utwierdzono.

Analiza statyczna była prowadzona dla następujących sześciu etapów obciążenia:

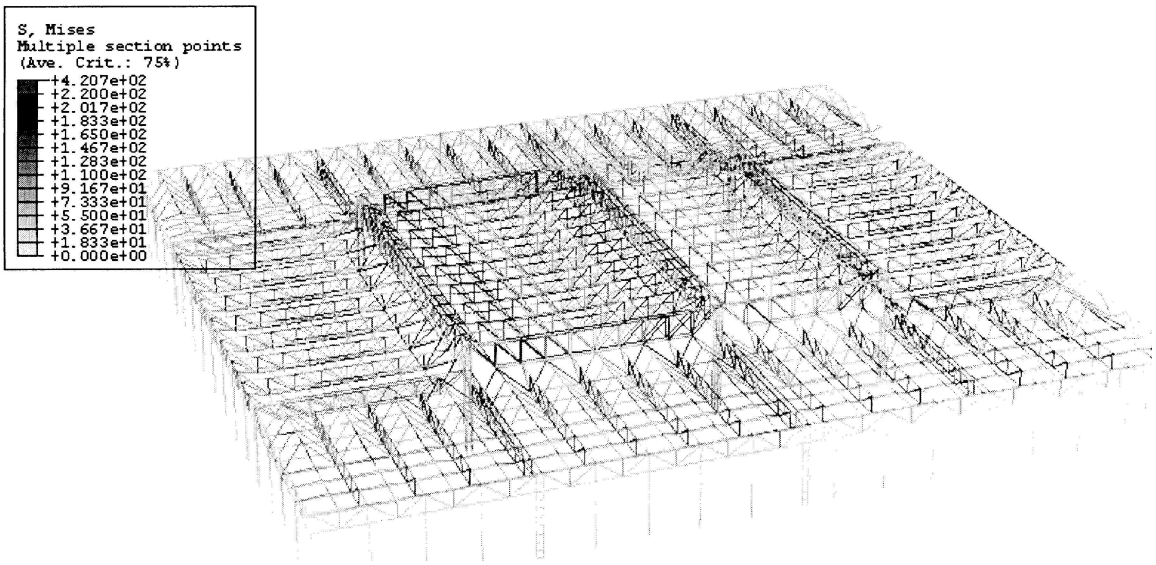
- etap E1 – obciążenia stałe,
- etap E2 – obciążenia stałe i technologiczne,
- etap E3 – obciążenia stałe, technologiczne i śnieg bez zasp,
- etap E4 – obciążenia stałe, technologiczne, śnieg i zaspy śniegowe,
- etap ET – obciążenia termiczne,
- etap EW – obciążenie wiatrem.

W etapie E4 obciążenie od zasp śniegowych i zalegającego lodu uwzględniano jako równomiernie rozłożone obciążenie o wartości wzrastającej od wartości obciążenia śniegiem

bez zasp do wartości granicznej. W statycznych obliczeniach numerycznych obciążenie w poszczególnych etapach narastało przyrostowo, proporcjonalnie do parametru obciążenia. Rys. 5. przedstawia ścieżkę równowagi w postaci zależności wypadkowej wszystkich reakcji pionowych od maksymalnego przemieszczenia, występującego w górnej połaci dachu (rys. 8). Rys. 6 i 8 odnoszą się do obliczeń dla wariantu W2, gdzie blacha jest zginana i pracuje jako przepona z pełnym wykorzystaniem nośności łączników.



Rys.5. Zależność wypadkowej obciążeń od maksymalnego ugięcia w 4 etapach

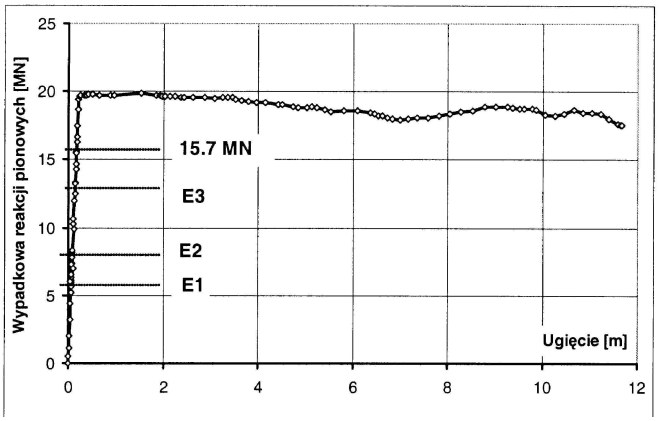


Rys. 6. Wyróżnione (ciemniejsze) pręty, w których naprężenia przekraczają $\sigma_z = 220\text{MPa}$ dla etapu E4 przy poziomie obciążenia 15,7 MN

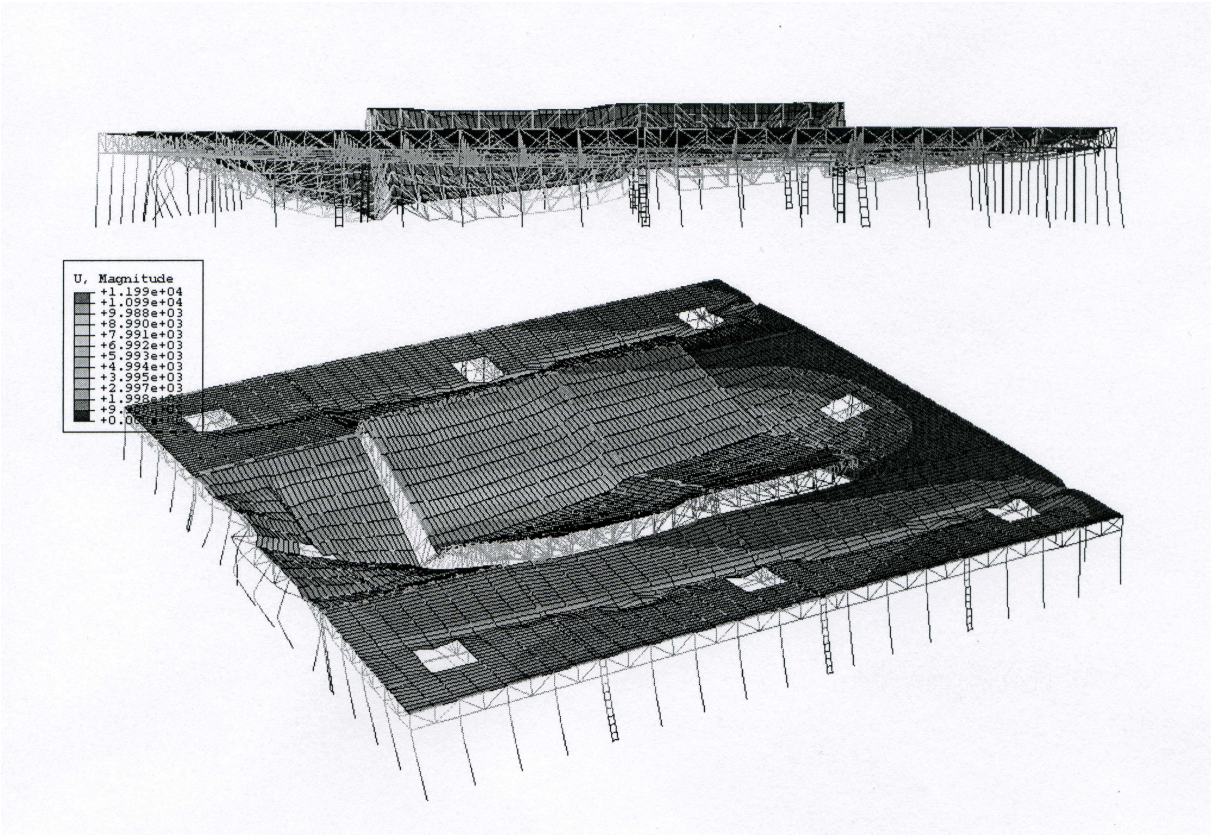
Obliczenia statyczne (rys. 5) zostały przerwane w etapie E4, z powodu braku zbieżności rozwiązania. Świadczy to o obniżeniu sztywności konstrukcji (lub jej fragmentu) i niezdolności do przenoszenia większego obciążenia. Wcześniej, po osiągnięciu poziomu obciążenia dla etapu E3, konstrukcja wchodzi w fazę pracy sprężysto – plastyczną. Na rys. 6, dla etapu E4 i poziomu obciążenia 15,7 MN, wyróżniono grupy prętów w strukturze dachowej, w których naprężenia zastępcze przekraczają 220 MPa, tj. najwyższą wartość naprężenia granicznego dla zastosowanych stali.

W celu rozpoznania mechanizmu zniszczenia konstrukcji, przeprowadzono również analizę dynamiczną dla zmodyfikowanego etapu E3 (Dynamic Implicit [7], [8]), w którym

obciążenie śniegiem narastało w czasie w sposób ciągły (rys. 7). W analizie dynamicznej pominięto wrażliwość materiału na prędkości odkształcenia. Zawalenie się konstrukcji hali następuje przy wypadkowej obciążenia 20 MN, nieco wyższej niż wartość maksymalna przy analizie statycznej (rys. 5). Większa wartość obciążenia granicznego jest spowodowana udziałem sił bezwładności, uwzględnionych w analizie dynamicznej. Przykładową postać zniszczenia konstrukcji hali, przy idealnych, niezniszczalnych węzłach, pokazano na rys. 8. Uzyskane numerycznie oszacowanie maksymalnego obciążenia jest tutaj zawyżone z powodu przyjęcia idealnych więzów między elementami konstrukcji i braku kryterium zniszczenia materiałowego (elementy uplastyczniają się, ale nie rozdzielają się). Mechanizm zniszczenia hali dotyczy prawie całej połaci dachowej. Najmniejsze deformacje występują w obszarze przylegającym do ściany wschodniej, zlokalizowanej wzdłuż osi 19.



Rys. 7. Zależność wypadkowej reakcji od maksymalnego ugięcia dla narastającego obciążenia śniegiem



Rys. 8. Mechanizm zniszczenia konstrukcji hali uzyskany w analizie dynamicznej. Kontury wypadkowego przemieszczenia.

5. Wnioski końcowe

Współczesne tendencje w projektowaniu obiektów budowlanych o dużych przestrzeniach i niesymetrycznej geometrii wymuszają stosowanie złożonych konstrukcji. W rozpatrywanym przypadku zaprojektowana konstrukcja przestrzenna wymagała zaawansowanej, trójwymiarowej analizy statycznej. Naszym zdaniem, w procesie projektowania wskazane było przyjęcie dodatkowego współczynnika bezpieczeństwa dotyczącego konsekwencji zniszczenia hali. Zaprojektowana konstrukcja bez podniesienia wykonawczego i dach wykonany bez spadków przy znacznych powierzchniach prowadzą do tworzenia się zastoisk wody lub lodu, a w konsekwencji do znacznego przekraczania normowych obciążeń środowiskowych.

Złożoność konstrukcji i zastosowanie zróżnicowanych rozwiązań sprawia, że analiza konstrukcji lub jej fragmentów jako dwuwymiarowych jest niereprezentatywna, gdyż stateczność większości elementów miała być zapewniana tylko przez przeponę (blachę trapezową) w płaszczyźnie połaci. W przypadku pominięcia współpracy blachy (wariant W1) konstrukcja traci stateczność już przy obciążeniu w etapie E2.

Na podstawie przeprowadzonej analizy numerycznej konstrukcji przestrzennej z idealnymi połączeniami w węzłach, stwierdzono występowanie znacznego przekroczenia stanu granicznego nośności i użytkowalności [1], [2] dla wielu elementów już przy obciążeniu śniegiem bez zasp. Uzyskany w analizie mechanizm zniszczenia konstrukcji jest zbliżony do postaci zniszczenia zaistniałej w czasie katastrofy.

Stwierdzono również, że nawet przy obciążeniach stałych i technologicznych naprężenia w przeponie przekraczają 20MPa, co może prowadzić do owalizacji otworów w miejscu połączenia blachy i ścinania łączników. Spadek sił stężających podciągi w płaszczyźnie pasów górnych prowadzi do zmniejszenia stateczności konstrukcji, zmiany charakteru deformacji oraz niekorzystnego rozkładu sił, a w konsekwencji do nagłej katastrofy.

Literatura

1. ENV 1993 1-1. Eurocode 3. Design of Steel Structures. General Rules for buildings. Annex K - Hollow Section lattice girder Connections. Brussels, 1994.
2. PN – 90 / B-03200 Konstrukcje stalowe. Obliczenia statyczne i projektowanie.
3. Biegus A., Rykaluk K.: Katastrofa hali Międzynarodowych Targów Katowickich, Inżynieria i Budownictwo nr 4/2006.
4. Mendera Z., Niewiadomski J., Zamorowski J., Kazek M., Kowalik B., Kucz P., Wuwer. W.: Podsumowanie wyników badań nad przyczynami zawalenia się hali wystawienniczej w Katowicach, www.muratorplus.pl.
5. Lutomirski Sz., Kwaśniewski L., Kozyra Z., Winnicki A.: Raport na temat przyczyn katastrofy budowlanej pawilonu wystawienniczego przy ul. Bytkowskiej 1 w Chorzowie na terenie Międzynarodowych Targów Katowickich, Raport opracowany na zlecenie firmy Eksperci Nemu Sp. z o.o., 2006.
6. Bródka J., Garncarek R., Miłaczewski K.: Blacha fałdowa w budownictwie stalowym, Arkady, 1999.
7. ABAQUS THEORY MANUAL, Version 6.1, Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc. 2000.
8. ABAQUS/Explicite. Users Manual, Version 6.1, Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc. 2000.