



ARTUR PIEKARCZUK, *a.piekarczuk@itb.pl*
Instytut Techniki Budowlanej

OBLICZENIOWA I LABORATORYJNA DIAGNOSTYKA AWARII SAMONOŚNYCH ELEMENTÓW BUDOWLANYCH

ANALYTICAL AND EXPERIMENTAL DIAGNOSTIC OF SELF SUPPORTING STRUCTURAL ELEMENTS

Streszczenie Referat dotyczy wykorzystania badań laboratoryjnych oraz numerycznych metod obliczeń w procesie diagnostyki obiektów budowlanych. W referacie przedstawiono przykłady zastosowania obliczeń numerycznych do oceny przyczyn awarii przekrycia hali magazynowej.

Abstract The paper addresses the use of experimental and numerical methods in the condition assessment of built facilities. Examples of use of numerical calculations to estimate the cause of collapse of warehouse covering are shown in the report.

1. Samonośne przekrycia łukowe z blach profilowanych

Współczesne obiekty budowlane wznoszone są z wykorzystaniem nowych, oszczędnych technologii przy minimalizacji nakładów finansowych. Szczególnie niebezpieczna jest adaptacja pewnych rozwiązań konstrukcyjnych do innych zastosowań, niezgodnych z pierwotnym przeznaczeniem. Przykładem takiej konstrukcji jest samonośne łukowe przykrycie hali. (fot. 1). Obiekty tego typu o rozpiętości do 18 m miały charakter budowli tymczasowych do zastosowań wojskowych w jednorodnych warunkach klimatycznych na okres kilku (rzadziej kilkunastu) miesięcy. Łatwa i szybka technologia wytwarzania oraz montażu zainteresowała odbiorców cywilnych, którzy adoptowali tę technologię do budowy obiektów o większych gabarytach (do rozpiętości 30 m) z przeznaczeniem na budynki gospodarcze i użyteczności publicznej z wieloletnim okresem użytkowania.

Przykrycie łukowe nie ma żadnej podkonstrukcji wsporczej a wykonane jest jedynie z segmentów profilowanej blachy stalowej o grubości od 0,7 do 1,5 mm z modułem szerokości 60 cm i wysokości od 12 do 24 cm. Poszczególne segmenty łączone są ze sobą przez zagniatanie swobodnych krawędzi lub skręcanie śrubami tworząc tym samym zakrzywioną powierzchnię o długości odpowiadającej wielokrotności modułu. Technologia kształtowania blachy powoduje powstawanie charakterystycznego karbowania na powierzchni profilu. Karbowanie to umożliwia uzyskanie łukowego zakrzywienia blachy o odpowiednim promieniu.



Fot. 1. Hala o przekryciu z samonośnej blachy łukowej

Prosta adaptacja technologii przy zmianie parametrów i przeznaczenia obiektu stwarza pewne problemy konstrukcyjne zwłaszcza przy obliczaniu nośności i stateczności samonośnych profilowanych przeryć łukowych [3]. Podstawową trudnością w analizie takich przeryć jest lokalna utrata stateczności blachy zwłaszcza w profilu o nieregularnej i trudnej do opisu matematycznego powierzchni. Dodatkowo brak jest formalnych uregulowań (normy, wytyczne, instrukcje) dotyczących sposobów obliczania takich konstrukcji. W takich przypadkach uproszczone metody projektowania mogą prowadzić do zaniedbywania istotnych parametrów w analizie nośności i stateczności konstrukcji. Przykładem nieodpowiedniego projektowania jest uszkodzenie hal magazynowych fot. 2.

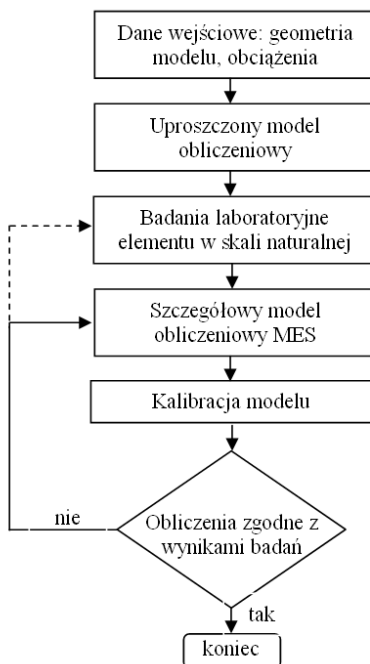


Fot. 2 Uszkodzenie przekrycia łukowego z blachy profilowanej

Uszkodzenie powstało w okresie zimowym po obfitych opadach śniegu. Przyczyną uszkodzenia była utrata nośności blachy w skutek nadmiernego obciążenia śniegiem. To nie było pierwsze uszkodzenie tego typu konstrukcji, stąd konieczne było prawidłowe rozpoznanie powodów utraty nośności po to, aby można było uzupełnić sposób projektowania i zapobiegać kolejnym uszkodzeniom.

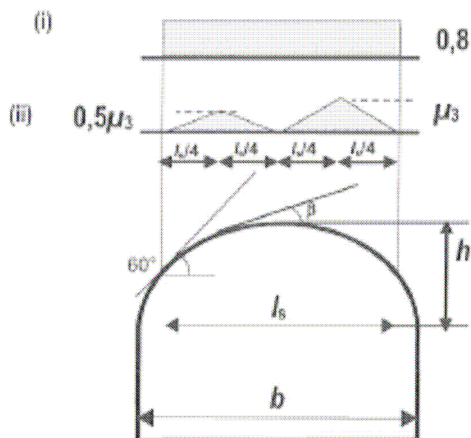
2. Metoda diagnostyki

Diagnostyka mechanizmu uszkodzenia była skomplikowana z uwagi na trudności w opisie matematycznym karbowanej powierzchni blachy. Dlatego obliczenia na zastępczym modelu prętowym z uwzględnieniem wytycznych projektowania dotyczących profili cienkościennych [1], [5] mogły być niewystarczające do uwzględnienia istotnych parametrów konstrukcyjnych. Numeryczny model powłokowy zbudowany w metodzie elementów skończonych również mógł być obciążony błędem związanym właśnie z geometrią profilu blachy. Aby prawidłowo rozpoznać specyfikę konstrukcji, w procesie diagnostyki zdecydowano się na wprowadzenie hybrydowego modelu analizy. Model hybrydowy zawiera w sobie etapy analizy obliczeniowej i badawczej. Blokowy wykres procesu analizy takiego modelu przedstawia wykres 1.



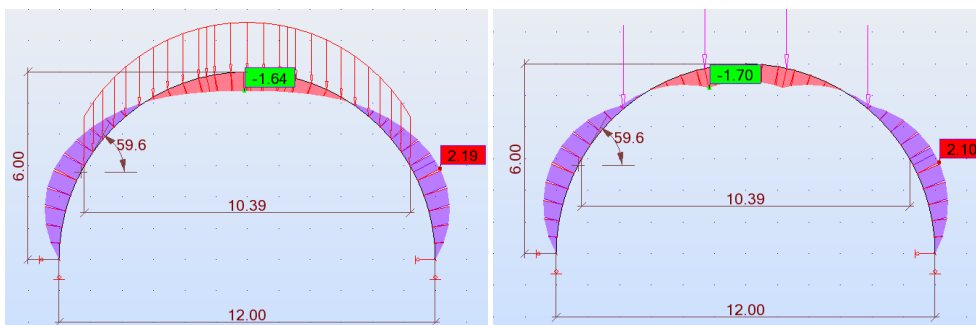
Wykres 1. Blokowy wykres procesu analizy hybrydowej

Uproszczony model obliczeniowy potrzebny był do ustalenia obciążenia zastępczego, które odwzorowywały w badaniach laboratoryjnych obciążenia śniegiem oraz do ustalenia miejsc największych deformacji gdzie zostaną umieszczone czujniki przemieszczeń. Przyjęto, że obciążenie liniowe (wariant (i) rys. 1) zastąpione jest przez cztery siły skupione przypadające na pojedynczy moduł blachy. Założono, że obciążenie równoważne jest zamodelowane poprawnie wtedy, gdy siły wewnętrzne i deformacje przy działaniu obciążenia zastępczego są zbliżone do sił wewnętrznych wywołanych działaniem obciążenia liniowego. W tym przypadku porównywano rozkład wartości sił wewnętrznych oraz deformację łuku. Wartość obciążenia liniowego i sumaryczna wartości obciążenia skupionego są równoważne. Do rozważań przyjęto analizę wg teorii II rzędu uwzględniającą dodatkowe zjawiska związane ze zmianą geometrii konstrukcji po wpływie obciążenia [4]. W tym przypadku zarówno wartość obciążeń jak i sił wewnętrznych nie mają znaczenia w wymiarowaniu konstrukcji natomiast służą jedynie do porównania skutków ich działania.



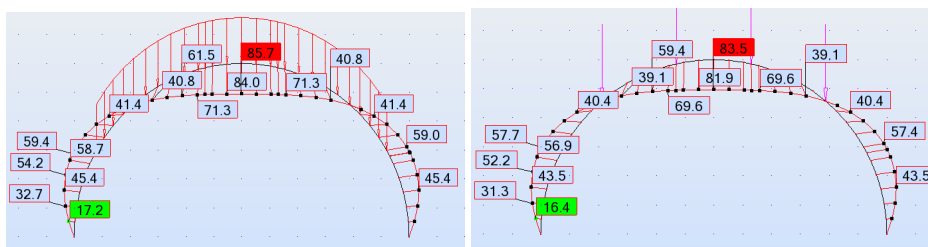
Rys. 1 Rozkład obciążenia śniegiem [2]

Przykład porównania rozkładu momentów zginających przy obciążeniu liniowym i zastępczym w postaci sił skupionych przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Rozkład momentów zginających a) momenty od obciążenia liniowego
b) momenty od obciążenia zastępczego

Deformacja i wartości przemieszczeń przy oddziaływaniu obciążenia liniowego i zastępczego przedstawia rys. 3.



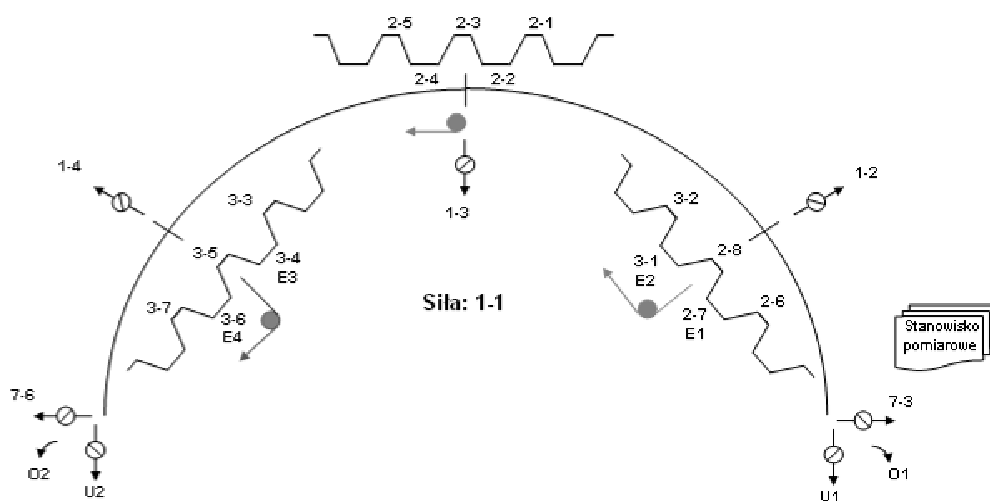
Rys. 3. Deformacje a) od obciążenia liniowego b) od obciążenia zastępczego

Działanie obciążenia liniowego i zastępczego wywołuje porównywalne skutki w związku z tym przyjęto, że obciążenie zastępcze jest dobrane prawidłowo. Deformacja łuku wskazuje miejsca maksymalnych przemieszczeń, które występują w połowie rozpiętości i w połowie

wysokości po obu stronach łuku analogicznie do miejsc występowania maksymalnych momentów zginających. Te miejsca zostały wybrane do umieszczenia czujników.

Po przeprowadzeniu analizy modelu uproszczonego uzyskano dane niezbędne do zaplanowania eksperymentu.

Ponieważ nie dysponowano elementem, który bezpośrednio uległ awarii, do badań przyjęto fragment przykrycia łukowego o podobnych parametrach pod względem geometrii profilu. Do badań przyjęto fragment hali z samonośnej blachy łukowej o rozpiętości 12 m i wysokości 6 m, która składała się z 4 profili skrzyślonych ze sobą profili o łącznej szerokości 2,4 m. Obciążenie realizowane było przez zestaw belek i cięgien, które umożliwiało sprzężenie 16 sił skupionych po 4 na każdy profil łuku. Każda z sił zaczepiona jest do dolnej półki segmentu blachy za pośrednictwem blachy węzłowej, która zapobiega nadmiernej koncentracji naprężeń w miejscu punktowego przyłożenia siły. Cały układ obciążenia skonstruowany był tak, aby dostosowywał się do zmiennej deformacji blachy podczas badania bez utraty wartości sił. Całkowite obciążenie mierzone było jednym siłomierzem. Rozkład sił był zgodny z wcześniej dobranym rozkładem obciążenia zastępczego. Obciążenie było realizowane przez siłownik hydrauliczny sterowany automatycznie. W miejscach wytypowanych na podstawie analizy modelu uproszczonego zainstalowano czujniki przemieszczeń oraz tensometry do pomiaru odkształceń. Rozmieszczenie tych czujników przedstawia rys. 4



Przypisanie kanałów do poszczególnych czujników

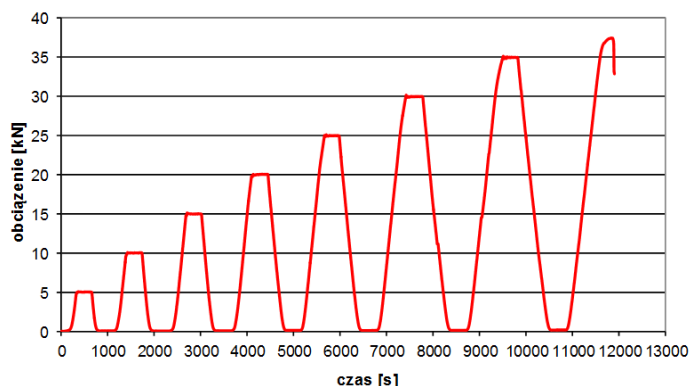
Rys. 4. Schemat rozmieszczenia czujników

Łącznie zainstalowano trzy czujniki indukcyjne do pomiaru przemieszczeń na powierzchni blachy, cztery (po dwa z każdej strony) czujniki indukcyjne do pomiaru kątów obrotu podpór oraz piętnaście tensometrów. Wszystkie czujniki wraz z siłomierzem były sprzężone w jednym systemie pomiarowym. Element badawczy z podczepionym obciążeniem i z czujnikami przedstawia fot. 3.



Fot. 3. Element badawczy

Obciążenie przykładane było stopniowo w cyklach zwiększanych co 5 kN aż do zniszczenia konstrukcji. Program obciążenia przedstawia wykres 2.



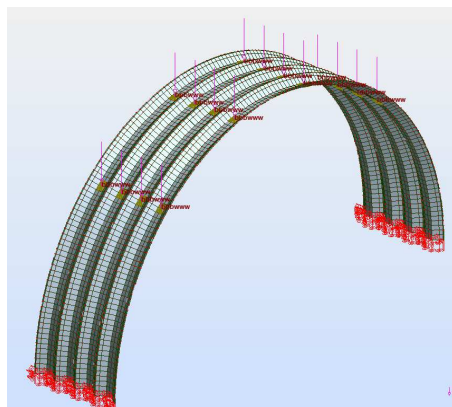
Wykres. 2. Program obciążenia

Na podstawie badań ustalono przemieszczenia i odkształcenia w punktach pomiarowych w funkcji obciążenia. Przykładowe wyniki pomiaru odkształceń z jednego miejsca pomiarowego przedstawiają wykres 3. Podobne wyniki uzyskano z pozostałych punktów pomiarowych. Ostatecznie element badawczy uległ uszkodzeniu przy obciążeniu sumarycznym 37,4 kN.

Wszystkie badania laboratoryjne zostały wykonane w Zakładzie Konstrukcji i Elementów Budowlanych ITB przy współpracy zatrudnionego w nim personelu m.in.: dr inż. Przemysław Więch, mgr inż. Zbigniew Fedorczyk, inż. Jacek Głodkiewicz.

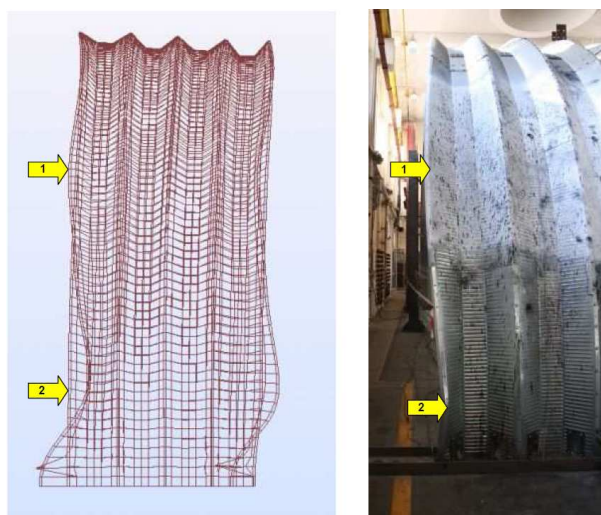
Kolejnym etapem analizy jest budowa szczegółowego numerycznego modelu. W tym celu posłużono się metodą elementów skończonych (MES). Zbudowano powłokowy model przykrycia łukowego, który odwzorowuje element badawczy rys. 5. Model ten został skalibrowany. Kalibracja polega na uwzględnieniu w modelu MES dodatkowych parametrów, które zostały uzyskane na podstawie badań. W szczególności uwzględniono sprężystość podpór oraz ortotropię powierzchni blachy spowodowaną karbowaniem powierzchni. W miejscu przyłożenia obciążeń zamodelowano obiekty typu diafragma, które odwzorowują blachy

węzłowe zastosowane w elemencie badawczym. Przygotowany model poddano analizie obliczeniowej. Wynikiem analizy są: obciążenie krytyczne, postać wybočenja oraz przemieszczenia i mapy naprężeń.



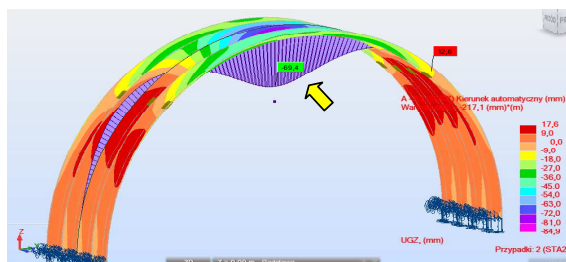
Rys. 5. Model MES blachy łukowej

W analizie wykorzystywano nieliniowe metody obliczeń. Obciążenie krytyczne wyznaczone na podstawie obliczeń wynosiło 36,6 kN. Obciążenie, przy którym element badawczy stracił stateczność wynosiło 37 kN. Porównanie postaci wybočenja modelu MES oraz elementu badawczego przedstawia rys. 6.

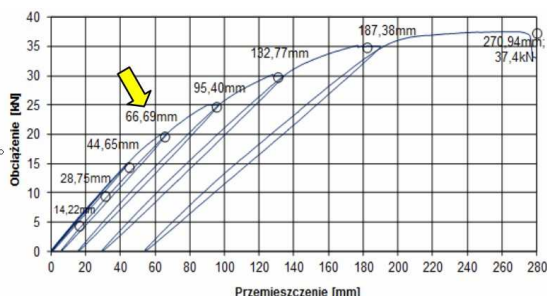


Rys. 6. Porównanie postaci modelu MES i elementu badawczego

Miejsca oznaczone strzałkami o numerach 1 i 2 – rys. 6. wskazują obszary największej deformacji i lokalnej utraty stateczności. Dobra zbieżność wartości obciążenia krytycznego i postaci wybočenja wskazują na prawidłową kalibrację modelu. Dodatkowo można porównać wyniki uzyskane z punktów pomiarowych z wynikami obliczeń modelu MES, na przykład przemieszczenia środka łuku z badań (wykres 3) z mapą ugięć dla przyjętego poziomu obciążeń z obliczeń mes (rys. 7) dla poziomu obciążeń 20 kN.



Rys. 7. Porównanie przemieszczeń w przekroju z wynikami badań przemieszczeń przy obciążeniu 20 kN



Wykres. 3. Przemieszczenia środka łuku

Dla takich wyników hybrydowy proces analizy można uznać za zakończony. Jeśli nie można wykonać prawidłowej kalibracji modelu wówczas należy powtórzyć badania (linia przerywana wykres 1).

3. Podsumowanie

Dobrze skalibrowany model gwarantuje poprawność analizy podobnych modeli ze zróżnicowanymi parametrami geometrycznymi. Dalsze obliczenia są już konsekwencją przyjętych założeń. Posługując się skalibrowanym modelem wyznaczonym na podstawie analizy hybrydowej można wyznaczać ugięcia w stanach granicznych użyteczności i wyczerpania przekroju w stanach granicznych nośności w warunkach zbliżonych do rzeczywistych z uwagi na geometrię i obciążenia środowiskowe. Skuteczność takiej diagnostyki jest wysoka z uwagi na możliwość zastosowania raz skalibrowanych modeli do konstrukcji zróżnicowanych wymiarach w różnych warunkach środowiskowych.

Literatura

1. PN-EN 1993-1-3:2008 Eurokod 3 – Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 1-3: Reguły ogólne – Reguły uzupełniające dla konstrukcji z kształtowników i blach profilowanych na zimno.
2. PN-EN 1991-1-3:2005 Eurokod 1 – Oddziaływania na konstrukcje – Część 1-3: Oddziaływania ogólne. Obciążenie śniegiem.
3. Biegus A.: „Nośność graniczna ściskanych blach fałdowych” Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej 1983 r.
4. Biegus A.: „Analiza statyczno-wytrzymałościowa łukowych blach fałdowych”. Konstrukcje stalowe nr 7/2003.
5. J. Bródka, M. Broniewicz, M. Giżejowski. „Kształtowniki gięte. Poradnik projektanta”. PWN 2006 r.