ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2005
Seria: BUDOWNICTWO z. 104 Nr kol. 1695

Maciej SUCHODOŁA*
Politechnika Krakowska

WPŁYW IMPERFEKCJI GOEMETRYCZNYCH NA NOŚNOŚĆ STALOWYCH BLACH ŁUKOWYCH

Streszczenie. W referacie przedstawiono porównanie wyników badań eksperymentalnych łukowej blachy fałdowej przeprowadzonych na modelach w skali naturalnej z obliczeniami numerycznym i powłoki z pomierzoną imperfekcją, która we wszystkich modelach miała postać asymetryczną. Otrzymane w ten sposób ścieżki równowagi statycznej dały dobrą zgodność ze ścieżkami pochodzącymi z badań eksperymentalnych łukowych blach fałdowych. W przypadku braku danych o rzeczywistym kształcie powłoki zaproponowano zastępczą postać imperfekcji, będącą wynikiem analizy statystycznej.

THE INFLUENCE OF GEOMETRIC IMPERFECTIONS FOR LOAD CAPACITY OF CURVE STEEL SHEETS

Summary. Results of laboratory tests of corrugated arch sheets have been compared with another one coming from numerical calculations. Analysis have been carried out for the shell with imerfections, measured before test. According to this measurements geometrical imperfections shape are asymmetrical in all sheets. Experimental equilibrium paths have been compatible with another one obtained as a result of numerical investingations. In the case of lack of information concernig a real shape of corrugated arch sheet, equivalent shape of imprefection derive from statistical analysis has been proposed.

1. Wprowadzenie

Podjęta w artykule tematyka nośności łukowych blach jest częścią szerszego programu badawczego, realizowanego w Polsce zaledwie od kilku lat [1]. Zainteresowanie powłokami z blach łukowych jest uzasadnione stosunkowo nową na krajowym rynku materiałów i wyrobów budowlanych ofertą handlową z tego zakresu, która wymaga weryfikacji przez ośrodki naukowo-badawcze. Przedstawione w artykule obliczenia numeryczne powłoki

* Opiekun naukowy: Dr hab. inż. Marian Gwóźdź, prof. Politechniki Krakowskiej

zestawiono z rezultatami badań własnych, przeprowadzonych w całości na siedmiu modelach wykonanych z blach łukowych LT 40/160 [2]. Widok stanowiska badawczego z modelem wykonanym z pojedynczego arkusza blachy łukowej LT 40/160 pokazano na rys.1.

Rys. 1. Widok ogólny stanowiska badawczego
Fig. 1. View of the test stand

Stanowisko badawcze przygotowano w sposób umożliwiający powtarzalne badania niszczące paneli pojedynczych lub podwójnych. Krawędzie czołowe blach łukowych oparto na ceownikach walcowanych CPN 280, nachylonych do poziomu pod kątem 21°. Połączenia główne blach na podporach stanowią śruby M 6 klasy 5.8 zlokalizowane w półce dolnej każdej fałdy. Połączenia uszczelniające pomiędzy panelami wykonano za pomocą śrub HILTI o średnicy 4,8 mm w rozstawie co 330 mm, zgodnie z zaleceniami [3]. Podpory z ceowników wyposażono od czoła w przepony z blach o grubości 10 mm. Przepony te stanowią elementy mocowania ściągów ϕ 16 mm oraz równocześnie umożliwiają przegubowo-przesuwne oparcie stendu. Obciążenia liniowo skupione zrealizowano poprzez klocki drewniane dopasowane do półki dolnej każdej fałdy. Siłę skupioną z prasy hydraulicznej przekazywano poprzez siłomierz na układ dwóch poprzecznic i trawersy jak na rys. 1. Pomiary przemieszczeń w charakterystycznych punktach przekrojów pod siłą skupioną oraz w przekrojach ¼ i ¾ rozpiętości łuku umożliwiały czujniki elektroniczne CYLVAC CS MPFPC 25 zamocowane do kształtowników pomocniczych, opartych poza stendem, por. rys. 1.

Już pierwsze pomiary przemieszczeń ujawniły, że blachy łukowe są obarczone imperfekcjami geometrycznymi. W referacie przedstawiono wyniki pomiarów rzeczywistych odchyłek modeli od kształtu idealnego oraz oszacowanie numeryczne ich wpływu na nośność badanych modeli.

2. Imperfekcje geometryczne łuków z blach trapezowych

Pomiaru rzeczywistej geometrii dokonano na łukowych blachach fałdowych, których rozpiętość L wahała się w przedziale od 6200 do 10575 mm, o nominalnych promieniach gięcia R_{nom} od 8000 do 15175 mm. Charakterystyki geometryczne mierzonych łuków wraz z wyznaczonymi maksymalnymi odchyłkami od łuku kołowego zestawiono w tablicy 1.

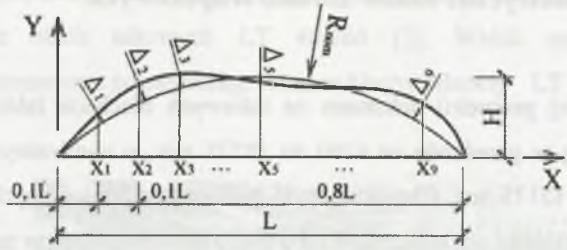
Wyznaczenie rzeczywistej geometrii odbyło się na wcześniej przygotowanym stanowisku. Aby uniemożliwić zmianę geometrii łuku podczas pomiaru, w miejscu jego podparcia zablokowano możliwość przesuwu poziomego (rozjeżdżania się łuku) lub podparto łuk w trzech punktach: na końcach arkusza blachy oraz w środku rozpiętości. W celu jednoznacznego określenia położenia osi środkowej przekroju dokonano pomiaru współrzędnej rzędnej półki górnej i półki dolnej w fałdach skrajnych. Rzędną osi środkowej łuku obliczono jako średnią arytmetyczną tych dwóch współrzędnych. Odciętą X przyjęto co 1/10 L jak przedstawiono na rys. 2. Pomiaru współrzędnych dokonano za pomocą dalmierza laserowego PD22 HILTI.

Tablica 1

Maksymalne odchyłki osi blach łukowych od łuku kołowego

Lp.	L [mm]	H [mm]	Rnom [mm]	Δi [mm]	Δi/Rnom
1	6200	625	8000	19	0,0024
2	6200	625	8000	11	0,0014
3	6200	625	8000	14	0,0017
4	7420	460	15175	8	0,0005
5	7840	688	11518	7	0,0006
6	8278	1154	8000	23	**0,0028**
7	8368	1181	8000	10	0,0012
8	8734	1226	8390	14	0,0017
9	10575	1300	11400	13	0,0011

L, H, R, Δ wg rysunku 2



Rys. 2. Pomiar imperfekcji łuku, określenie odchyłek od łuku kołowego
Fig. 2. Measurement of arch imperfections, determining of deviation from cricle arch

Dla pomierzonej, rzeczywistej geometrii łuku obliczono odchyłki Δ_i zgodnie z rys. 2. Stosunek odchyłki do nominalnego promienia potraktowano jako zmienną losową $\delta_i = \Delta_i / R_{nom}$, dla której wyznaczono kwantyle $\delta_{0,98}$ rozkładu Laplace'a [4]. Funkcja gęstości rozkładu Laplace'a zmiennej losowej δ jest opisana wzorem:

$$f(\delta) = \frac{1}{\sqrt{2}\sigma_\delta} \exp\left(-\frac{|\delta|}{\sigma_\delta}\sqrt{2} \right) \tag{1}$$

gdzie:

σ_δ - odchylenie standardowe zmiennej losowej δ,

δ - bezwymiarowa odchyłka od łuku kołowego.

Obliczenia powtórzono, przyjmując rozkład Gaussa, a wyniki obliczeń podano w tablicy 2.

Tablica 2

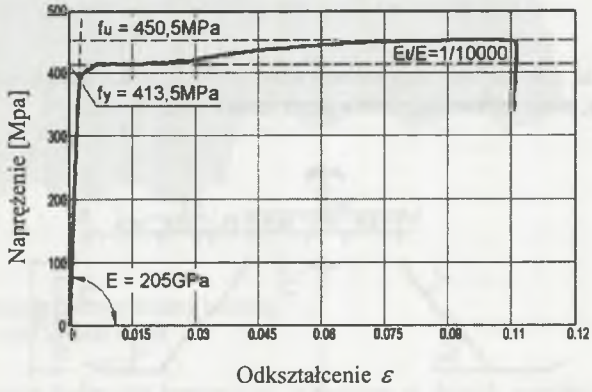
Kwantyle rozkładu Laplace'a i Gaussa zmiennej losowej δ

odcięta punktu osi środkwej łuku	rzędna punktu osi środkowej łuku		
	odchylenie standardowe	kwantyl δ0,98 rozkładu Laplace'a	kwantyl δ0,98 rozkładu Normalnego
0,0L	0	0	0
0,1L	1,09E-03	2,48E-03	2,24E-03
0,2L	1,15E-03	2,61E-03	2,35E-03
0,3L	1,16E-03	2,63E-03	2,37E-03
0,4L	1,14E-03	2,59E-03	2,34E-03
0,5L	8,98E-04	2,04E-03	1,84E-03
0,6L	1,25E-03	-2,85E-03	-2,57E-03
0,7L	1,35E-03	-3,07E-03	-2,77E-03
0,8L	1,30E-03	-2,96E-03	-2,67E-03
0,9L	7,85E-04	-1,78E-03	-1,61E-03
1,0L	0	0	0

W kolumnie 3 i 4 tablicy 2 zestawiono kwantyle zmiennej losowej δ odpowiednio rozkładu Laplace'a i Gaussa na poziomie prawdopodobieństwa $\alpha = 0{,}98$.

3. Analiza numeryczna łukowych blach trapezowych w świetle badań eksperymentalnych

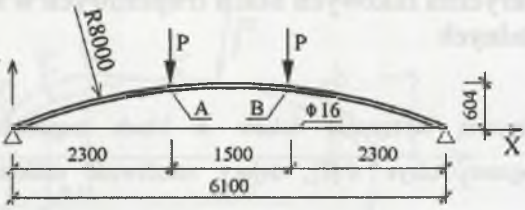
Analizę numeryczną wytężenia łuków z blach trapezowych przeprowadzono, wykorzystując program Ansys 7.0 [8], dający możliwość obliczeń z uwzględnieniem



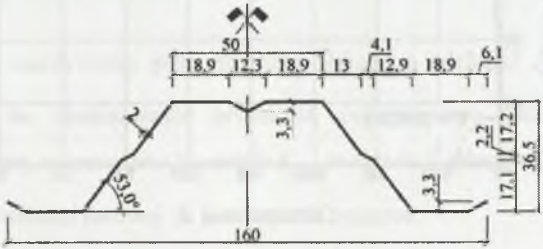
Rys. 3. Zależność $\sigma - \varepsilon$ stali łukowych blach fałdowych
Fig. 3. Relation between σ and ε for steel of arch sheets

nieliniowości fizycznych i geometrycznych. W obliczeniach przyjęto sprężysto-plastyczny model materiału ze wzmocnieniem kinematycznym dla stosunku modułu stycznego do modułu Younga $E_t/E = 1/10000$, por. rys. 3. Średnie parametry właściwości mechanicznych stali: $f_y = 413{,}5MPa$, $f_u = 450{,}5MPa$, wykorzystane w analizie numerycznej określono na podstawie badań eksperymentalnych przeprowadzonych na dziesięciu próbkach wyciętych z łukowych blach fałdowych. W obliczeniach przyjęto moduł Younga $E = 205$ GPa.

Analizę numeryczną przeprowadzono dla powłoki obciążonej dwoma siłami liniowymi rozstawionymi na odległość 1,5 m. Schemat statyczny, układ obciążenia oraz nominalną geometrię przekroju blachy fałdowej podano na rysunkach 4 i 5. Przekrój poprzeczny fałdy blachy LT40 ma usztywnienia pośrednie zarówno półek górnych, dolnych, jak i środników. W obliczeniach uwzględniono całkowitą geometrię przekroju poprzecznego, dla którego wymiary przyjęto według danych producenta (rys. 5). Wartość średnią grubości blachy $\bar{t} = 0{,}766$ mm (obliczoną na podstawie stu pomiarów) uwzględniono w analizie numerycznej.

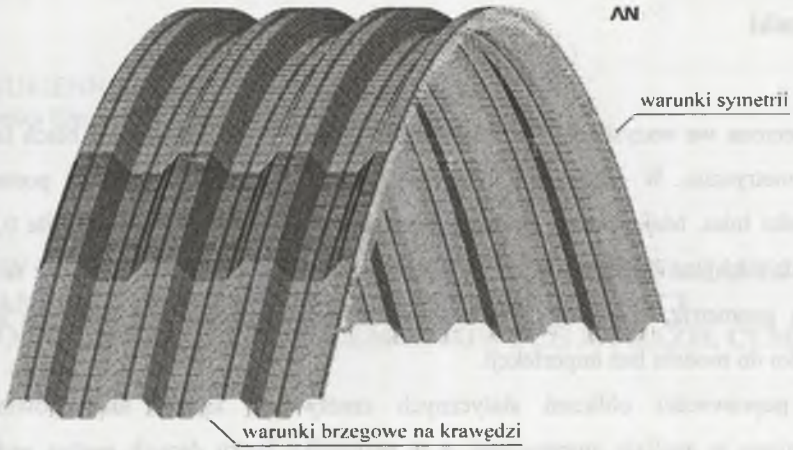


Rys. 4. Geometria, schemat statyczny modelu z podwójnym obciążeniem liniowym
Fig. 4. Geometry, static scheme for double foced model



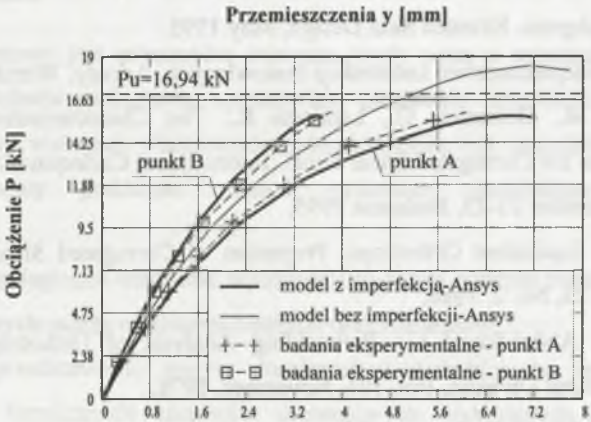
Rys. 5. Geometria przekroju pojedynczej fałdy
Fig. 5. Geometry of one fold coross section

Blachy fałdowe profilowane jednokierunkowo wykazują cechy ortotropowości, dlatego analizę numeryczną w stanie dokrytycznym można prowadzić jak dla powłoki ortotropowej, rozważając tylko makroskopowe zachowanie się blachy, pomijając efekty lokalne. Takie obliczenia tarcz, płyt i powłok z blachy fałdowej traktowanej jako powłoka ortotropowa były przedmiotem zainteresowania wielu badaczy [5-7]. Bardziej kompleksowa analiza numeryczna z uwzględnieniem efektów lokalnych (dystorsyjna utrata stateczności, lokalna utrata stateczności itd.) wymaga modelowania rzeczywistego kształtu blachy (łącznie z usztywnieniami pośrednimi) elementami powłokowymi. W tym celu obliczenia programem Ansys przeprowadzono przy użyciu sprężysto-plastycznych elementów powłokowych shell43 [8] z uwzględnieniem dużych przemieszczeń, dużych odkształceń, dużych obrotów. Analizę numeryczną wykonano dla ½ arkusza blachy, wprowadzając wzdłuż, w połowie szerokości arkusza warunki symetrii, por. rys. 6. Warunki brzegowe na krawędziach łuku w miejscach styku z belką podporową - uwzględniające podatność ściągu - wprowadzono w połowie wysokości przekroju blachy.



Rys. 6. Dyskretyzacja połowy blachy łukowej
Fig. 6. Mesh for half of arch sheet

Analizę wytężenia badanych konstrukcji wykonano w dwóch wariantach. W pierwszym wariancie obliczeń arkusz blachy potraktowano jako powłokę o geometrii rzeczywistej osi podłużnej, zmierzonej przed badaniami eksperymentalnymi nośności łuku. W drugim wariancie analiz wykonano obliczenia dla modelu bez imperfekcji geometrycznych. W celu porównania wpływu imperfekcji na przemieszczenia poszczególnych punktów powłoki oraz na nośność ustroju zestawiono na jednym wykresie (rys. 7) ścieżki równowagi statycznej w punktach A i B dla modelu z imperfekcją i modelu bez imperfekcji.



Rys. 7. Ścieżki równowagi statycznej
Fig. 7. Load – displacement curie

4. Wnioski

Pomierzona we wszystkich modelach postać imperfekcji osi łukowych blach fałdowych była asymetryczna. W większości była ona zbliżona do antysymetrycznej postaci utraty stateczności łuku. Maksymalna wielkość bezwymiarowej odchyłki δ wynosiła 0,0028, co odpowiada odchyłce rzeczywistej Δ = 23 mm. Numeryczne obliczenia powłoki z rzeczywistą i idealną geometrią, wykazały 20% redukcje nośności modelu z pomierzoną geometrią w stosunku do modelu bez imperfekcji.

Dla poprawności obliczeń statycznych rzeczywisty kształt łuku powinien być uwzględniony w analizie numerycznej, a w przypadku braku danych można wykorzystać wielkości statystyczne podane w tablicy 2.

Wyniki obliczeń numerycznych łuku z rzeczywistym kształtem, przy analizie fizycznie i geometrycznie nieliniowej, wykazały dobrą zgodność z rezultatami badań eksperymentalnych.

LITERATURA

1. Biegus A.: Analiza statyczno – wytrzymałościowa łukowych blach fałdowych. Konstrukcje Stalowe, 7(65), grudzień 2003.
2. Florprofile: Blachy łukowe. Materiały techniczne, Świętochłowice 2001.
3. ECCS-TWG J.: 5 European Recommendations for the Application of Metal Sheeting Seting as a Diaphgram. Stressed Skin Design, May 1995.
4. Murzewski J.: Bezpieczeństwo konstrukcji budowlanych. Arkady, Warszawa 1970.
5. Mazzolani F. M., Dematteis G., Landolfo R.: The Characterisation of Equivalent Orthotropic plate for Corrugated Shear Panel. International Colloquium: Stability of Steel Structures, September 21-23, Budapest 1995.
6. Briassoulis D.: Equivalent Orthotropic Properties of Corrugated Sheets. Computers & Structures, Vol. 23, No. 2, 1986.
7. El-Atrouzy N., Abdel-Sayed G.: Prebuckling Analysis of Orthotropic Barrel-shells. Journal of Structural Division, Vol. 104, November, 1978.
8. Ansys – User's Manual for Revision 7.0.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Antoni Biegus