



ANDRZEJ KOWAL, andrzej.kowal@pwr.wroc.pl
Politechnika Wrocławska, Instytut Budownictwa

AWARIA SILOSU Z UŻEBROWANYCH BLACH GŁADKICH

FAILURE OF THE SILO MADE OF RIBBED PLATES

Streszczenie W pracy przedstawiono awarię stalowego silosu wykonanego z uźebrowanych blach gładkich. Awarii uległ silos o średnicy 18 metrów i wysokości 23 m z dnem płaskim. Awaria powstała wyniku oddziaływania wiatru na pusty silos. Ściany silosu wykonane są z żeber pionowych i wręg poziomych oraz blachy gładkiej. W pracy przedstawiono wyniki analizy wytrzymałościowej silosu przeprowadzonej na pełnym modelu MES, zgodnie z wytycznymi normy PN-EN-1993-1-6 oraz PN-EN-1993-5-2. Wykazano, że nośność silosu nie jest przekroczona dla obciążeń przyjmowanych zgodnie z normą PN 1977 B 02011 [1] i jest przekroczona gdy obciążenia wiatrem przyjmuje się zgodnie z nową normą europejską PN-EN 1991-1-4 [2].

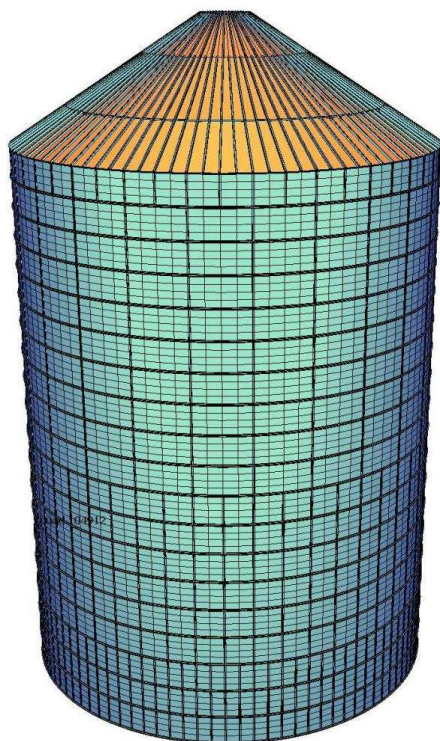
Abstract The paper describes failure of an empty big steel silo under wind load. The 18 m diameter and 23 m high is erected on concrete foundation. The walls are made of vertical stays, horizontal ribs and of steel plate. Ultimate strength analysis in accordance with PN EN 1993-1-6 is presented. It is found, that assuming load in accordance with EC1, condition of ultimate limit load are not met, while meeting other, older codes.

1. Wstęp

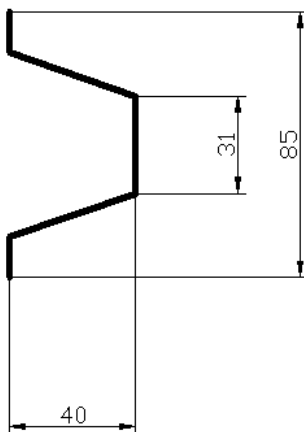
Ostatnich piętnaście lat przyniosło istną eksplozję realizacji silosów z cienkich blach gładkich uźebrowanych w kierunku radialnym i południkowym. Silosy z śrubowanych blach cienkich są zdecydowanie tańsze od tradycyjnych silosów z blach spawanych. Grubość blach w silosach spawanych wynosi co najmniej 4-6 mm. W nowych konstrukcjach śrubowanych, grubości blach wynoszą od 1 do 3 mm. Dodatkowym atutem silosów z blach cienkich jest niezwykła prostota montażu. Nawet ogromne konstrukcje o średnicach 20 metrów i podobnej wysokości można zmontować bez użycia ciężkiego sprzętu i bez spawania na budowie.

2. Opis konstrukcji

Opisywane silosy o największych gabarytach mają zazwyczaj płaskie dno w postaci płyty żelbetowej. Średnice silosów mogą wynosić nawet 30 m. Ściany silosu składają się ze zmiennej na obwodzie ilości żeber pionowych i rozłożonych równomiernie na wysokości wręg poziomych. Żebra pionowe przenoszą w całości obciążenia pionowe pochodzące od naporów pionowych, ciężaru konstrukcji i (pośrednio) wiatru. Wręgi poziome (rys. 2) przenoszą obciążenie od naporu poziomego i wiatru oraz gwarantują sztywność obwodową konstrukcji.



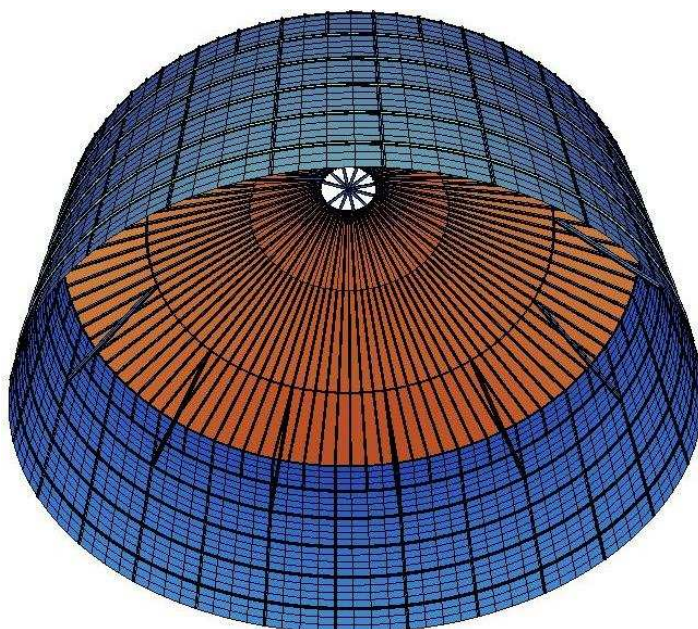
Rys. 1. Schemat konstrukcji silosu z uźebrowanych blach  adkich (model obliczeniowy)



Rys. 2. Wręga pozioma, grubość blachy 1 mm

Żebra pionowe umieszczone są w górnej części silosu z jednej strony blachy, a w dolnej części silosu z dwóch stron. Zastosowanie zeber z dwóch stron pozwala na uciąglenie zeber oraz na zwiększenie ich nośności. Rozstaw zeber uzależniony jest od wielkości obciążenia pionowego. Jak pokazano na rys. 1, żebra są gęściej rozmieszczone na dole i znacznie rzadziej idąc ku górze. Wręgi poziome rozmieszczone są równomiernie co około 125 cm,

zależnie od stosowanych arkuszy blach. Wręgi poziome wykonane są zazwyczaj z profilu kapeluszowego (rys. 2). Żebra pionowe i wręgi poziome wykonane są z profili giętych z blachy o grubości 1÷2 mm. Ostatni element nośny to blacha gładka, śrubowana do żeber. Blacha ma grubość zmienną na wysokości, największa grubość blachy występuje na dole i zazwyczaj nie przekracza 3 mm, u góry grubość blachy wynosi 1÷1.5 mm. Konstrukcja dachu wykonana jest również z uźebrowanych paneli blaszanych. Przy dużych rozpiętościach stosowane są podpory z dźwigarów kratowych. W wypadku analizowanego silosu o średnicy 18 m zastosowano dodatkowe zastrzały jak pokazano na rys. 3.



Rys. 3. Widok konstrukcji silosu (model obliczeniowy) od wewnątrz

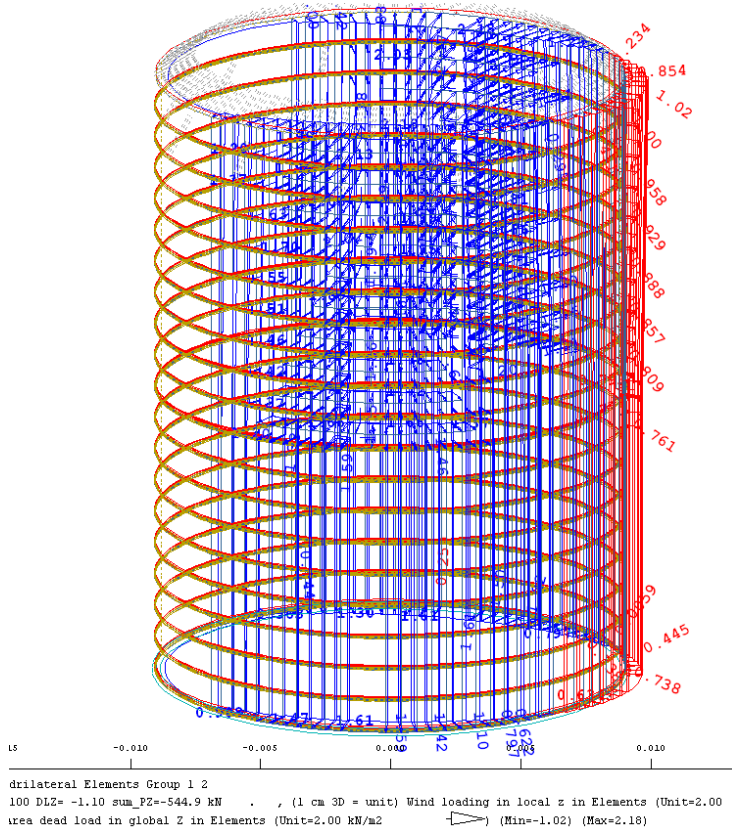
4. Obciążenie wiatrem

Zgodnie z normą PNB/77 02011 [1], jeszcze przed wprowadzeniem poprawki z roku 2009, maksymalne parcie charakterystyczne na górze silosu wyniesie, w drugiej strefie klimatycznej:

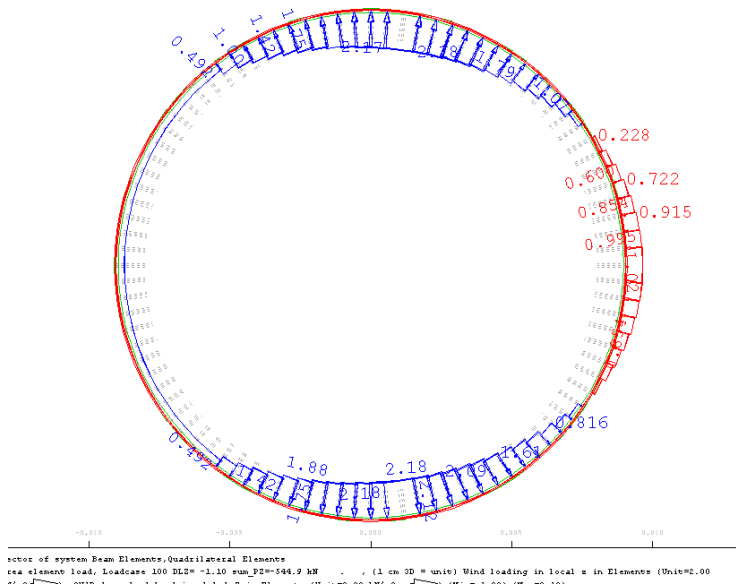
$$p_k = q_k \times \beta \times C_e \times C_x - 0,35 \times 1,8 \times 1 \times 1,2451 = 0,79 \text{ kPa} \quad (1)$$

Norma [1] jest na tyle dobrze znana, że nie opisuje się w szczegółach powyższych symboli. Parcie obliczeniowe na górnej krawędzi silosu wynosi: $0,79 \times 1,3 = 1,02 \text{ kPa}$.

Obciążenie wiatrem przyjmowane wg normy Eurokod EC1 [2] w dużym stopniu zależy od kategorii terenu. W przypadku otwartych terenów wiejskich należy przyjmować kategorię terenu II. Charakterystyczne największe ciśnienie prędkości wiatru, przy przyjęciu II-giej kategorii terenu, na wysokości 23 m wyniesie: $0,42 \times 2,95 = 1,24 \text{ kPa}$. Jak widać wartość charakterystyczna maksymalnego parcia, ustalona wg EC 1 [2] przewyższa o 58% wartość obciążenia ustaloną wg normy z roku 1977 [1]. Różnica wartości obliczeniowych jest jeszcze większa i wynosi aż 84%. Zauważmy, że norma obciążeń wiatrem z roku 1977 obowiązywała aż do roku 2009.



Rys. 4. Obciążenie silosu wiatrem – widok



Rys. 5. Obciążenie silosu wiatrem – przekrój w górnej części

5. Opis awarii

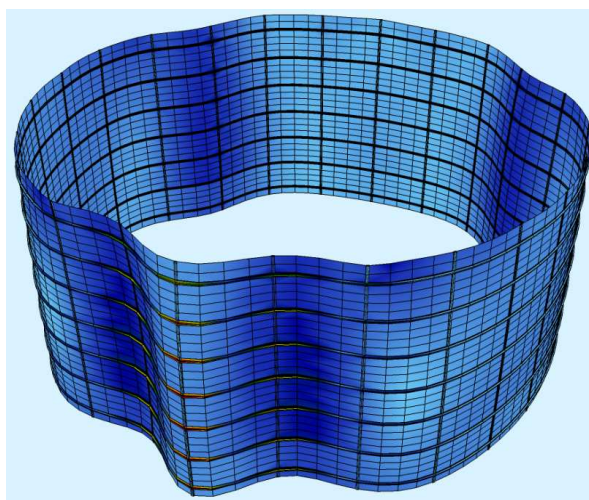
Silos o przedstawionej powyżej konstrukcji uległ awarii w czasie wyjątkowo silnej wichury. Wręgi poziome uległy załamaniu niemal na całej wysokości silosu. Największe poziome odkształcenia silosu występują w górnej części na wysokości od czwartej do szóstej wręgi.



Fot. 1. Uszkodzona górna część silosu

6. Analiza nośności

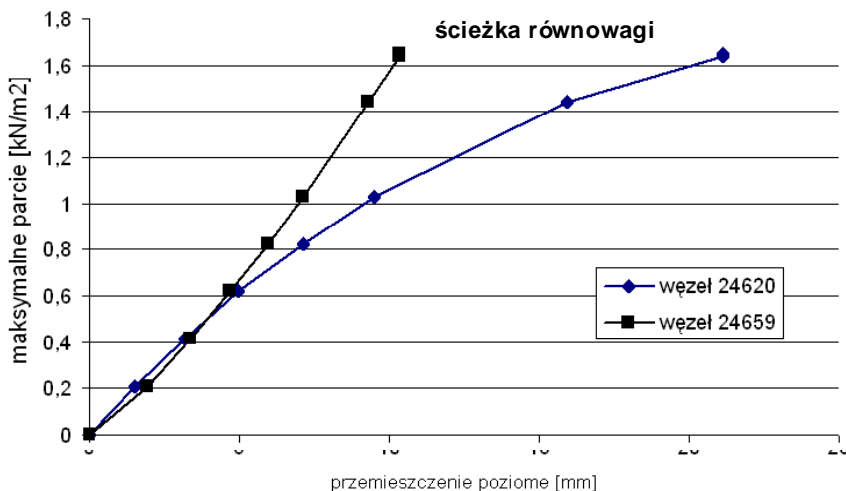
Przeprowadzono analizę nośności przedstawionej konstrukcji przy wykorzystaniu metody elementów skończonych (program Sofistik) i procedury obliczeniowej opisanej w normie PN EN 1993-1-6. Poszycie oraz wręgi poziome modelowano elementami powłokowymi. Elementy pionowe modelowano elementami belkowymi.



Rys. 6. Deformacje silosu

Zastosowano analizę geometrycznie nieliniową (GNA). Przeprowadzona analiza wykazuje, że konstrukcja silosu ma wystarczającą nośność dla obciążeń ustalonych wg normy [1] i przekroczenie warunków nośności, przy przyjęciu obciążeń wg normy Eurokod [2] dla kategorii terenu II. Na wykresie (rys. 7) przedstawiono ścieżkę równowagi konstrukcji dla dwóch wybranych węzłów konstrukcji. Granica stabilności wyniosła 1.7 kPa, podczas gdy obciążenie obliczeniowe ustalone wg normy EC 1 [2] wynosi 1.85 kPa. Na rys. 6 pokazano deformacje i naprężenia w konstrukcji silosu dla obciążenia 1.7 kPa. Największe naprężenie zastępcze Hubera Misesa wyniosło 196 MPa.

Analiza nośności konstrukcji wskazuje, że podstawową przyczyną awarii opisywanego silosu była niedostateczna sztywność i nośność wręg poziomych.



Rys. 7. Ścieżka równowagi konstrukcji silosu

6. Konkluzje

Nowa norma Eurokod [2] wprowadza znaczne zróżnicowanie wielkości obciążenia zależnie od kategorii terenu. W wypadku terenów odkrytych, wiejskich czy położonych nad jeziorami zmiana obciążeń w stosunku do normy z roku 1977 [1], znacznie przekracza 38% i może wynieść jak to pokazano powyżej nawet 85%. Opisana powyżej awaria silosu potwierdza zasadność przyjmowania zwiększonych obciążeń. Należy także postawić pytanie, czy nie należałoby przeprowadzić inspekcji zrealizowany wcześniej obiektów pod kątem ich bezpieczeństwa przy obciążeniu wiatrem.

Literatura

1. PN-77/B-02011 Obciążenie wiatrem.
2. PN-EN 1991-1-4 Oddziaływania wiatru.
3. PN-EN 1993-1-6 Wytrzymałość i stateczność konstrukcji powłokowych.
4. Greiner R., Taras A.: Zylindrische Behälter aus Stahl – Bemessungskonzept und statische Tragwirkung, Stahlbau Kalender 2006.