


 Andrzej SERUGA¹, Rafał SZYDŁOWSKI²

Analiza rozkładów parcia i sił wewnętrznych w powłoce walcowej silosu na rzepak przy opróżnianiu

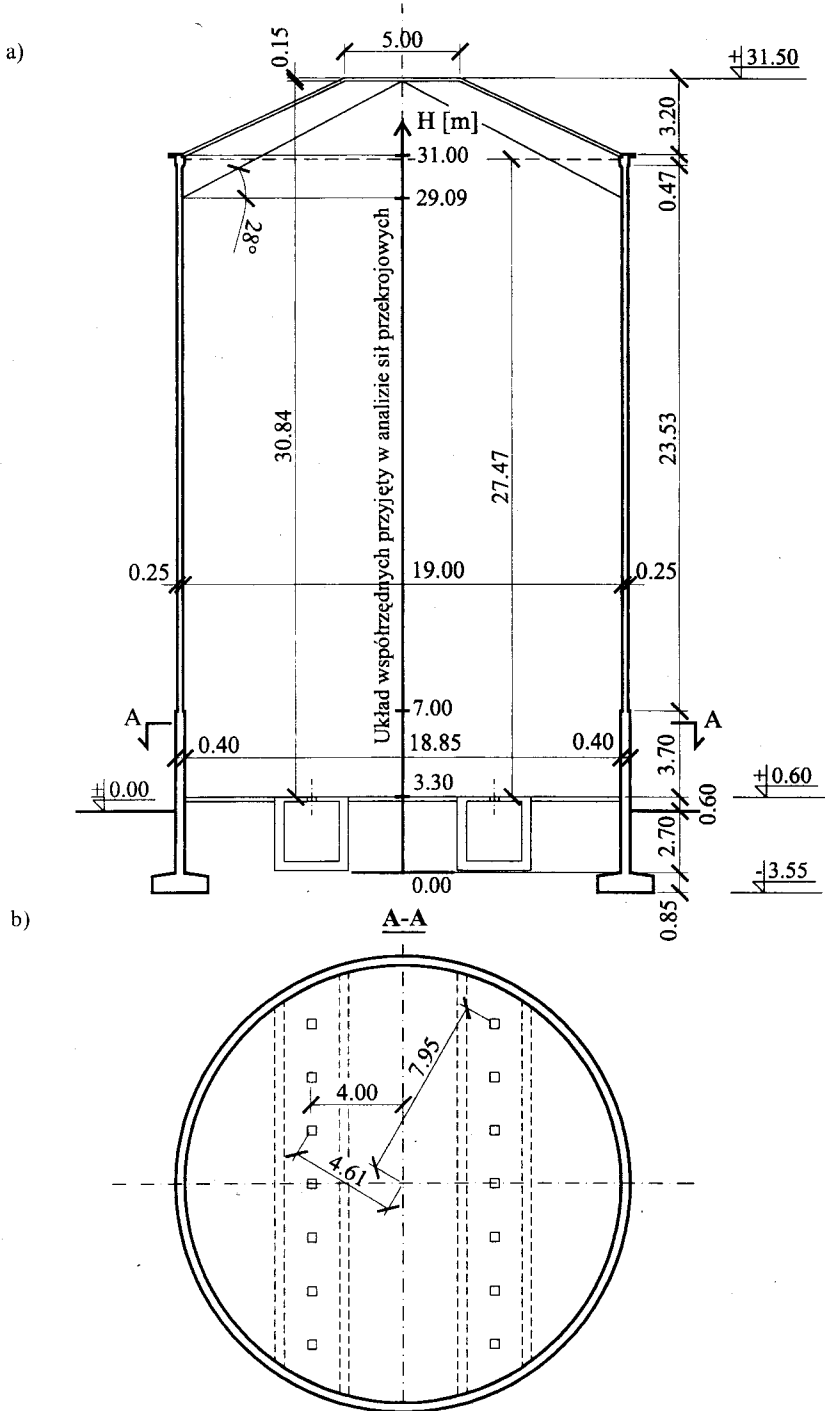
W pracy przeanalizowano rozkłady parcia rzepaku w żelbetowym silosie przy niecentrycznym opróżnianiu, dla przypadku całkowitego wypełnienia komory. Rozkłady parcia obliczono wg normy PN-B-03262:2003 i normy europejskiej EN-1991- 4:2002. Dla celów porównawczych uwzględniono wytyczne polskiej normy PN-89/B-03262. Na podstawie analizy sił wewnętrznych określono stan wyężenia w powłoce walcowej silosu na rzepak w Bodaczowie, który był wzmacniany z uwagi na stwierdzone rysy pionowe w powłoce walcowej.

1. Geometria silosu

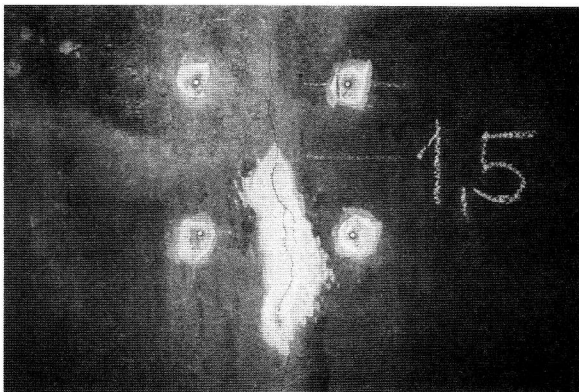
Analiza rozkładu parcia i sił wewnętrznych w powłoce walcowej została przeprowadzona na przykładzie żelbetowego silosu o konstrukcji monolitycznej na rzepak zlokalizowanego w Zakładach Tłuszczowych „BOLMAR” s.a. w Bodaczowie. Silos wykonany został w latach 60-tych ubiegłego stulecia. Średnica wewnętrzna komory zasypowej wynosi 19.0 m a jej największa wysokość 30.84 m (rys. 1). Silos posadowiony jest na poziomie - 3.55 m (w odniesieniu do poziomu terenu) na żelbetowej, pierścieniowej ławie fundamentowej o przekroju 2.40×0.85 m. Dno komory położone jest na wysokości +0.60 m. Ściana zbiornika wykonana została o skokowo zmiennej grubości. Dolna część ściany długości 7.0 m mierzonej od poziomu ławy fundamentowej ma grubość 0.4 m, a pozostała 0.25 m. Wzajemne połączenie ścian na wysokości silosu zrealizowano zapewniając ciągłość osi symetrii przekroju ściany. Średnica wewnętrzna dolnej części zbiornika (odpowiadająca grubości ściany 0.4 m) jest zatem mniejsza i wynosi 18.85 m. Od góry powłoka walcowa zakończona jest wieńcem o grubości 0.4 m i wysokości 0.5 m. Przekrycie zbiornika stanowi żelbetowa powłoka o kształcie ściętego stożka grubości 0.15 m i wysokości 3.2 m, zamknięta płytą o tej samej grubości i średnicy 5.0 m. Opróżnianie silosu może odbywać się poprzez 14 otworów usytuowanych w dwóch rzędach rozmieszczonych centrycznie względem środka symetrii zbiornika w rozstawie osiowym 8.0 m (rys. 1b). W zależności od położenia otworu wysypowego można wyróżnić trzy wartości mimośrodów opróżniania: 4.0, 4.61 i 7.95 m. W wyniku eksploatacji obiektu powstały uszkodzenia silosu, a przy wykonywaniu ekspertyzy stwierdzono występowanie pionowych rys na powierzchniach powłoki (rys. 2).

¹ Dr inż. Politechnika Krakowska, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków

² Mgr inż. Politechnika Krakowska, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków



Rys. 1. Geometria silosu: a) przekrój pionowy, b) przekrój poziomy



Rys. 2. Fragment rysy pionowej na wewnętrznej powierzchni powłoki na wysokości 1.5 m mierzonej od poziomu dna silosu.

2. Obciążenie od składowanego materiału

Napór materiału sypkiego na ściany pionowe silosu wyznaczono według trzech norm:

- dotychczas obowiązującej polskiej normy: PN-89/B-03262 [1],
- aktualnej polskiej normy: PN-B-03262:2002 [2],
- normy europejskiej: prEN 1991- 4:2003 [3].

2.1. Napór materiału sypkiego wg PN-89/B-03262

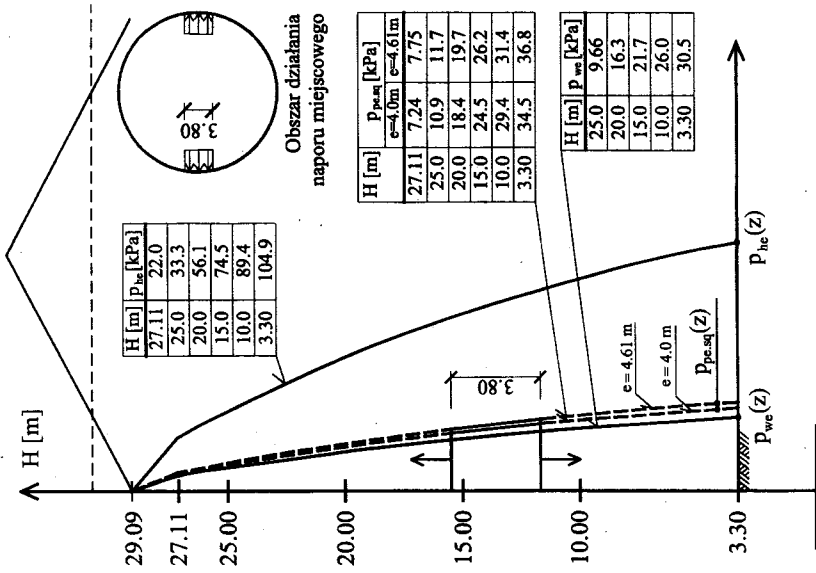
Norma [1] definiuje obciążenie na ściany pionowe silosów w stanie napełnienia oraz podczas opróżniania. W pracy przyjęto, że decydujący wpływ będzie miało obciążenie przy opróżnianiu składające się z naporów ciągłych (poziomego p_{ho} i stycznego p_{to}) wyznaczonych w stanie napełnienia i zwiększonych ze względu na opróżnianie oraz dodatkowych poziomych naporów przy opróżnianiu: miejscowego p_{hl} i pierścieniowego p_{hr} . Zestawienie obliczonych naporów z podaniem wartości oraz ich rozkłady na wysokości powłoki pokazano na rysunku 3.

2.2. Napór materiału sypkiego wg PN-B-03262:2002

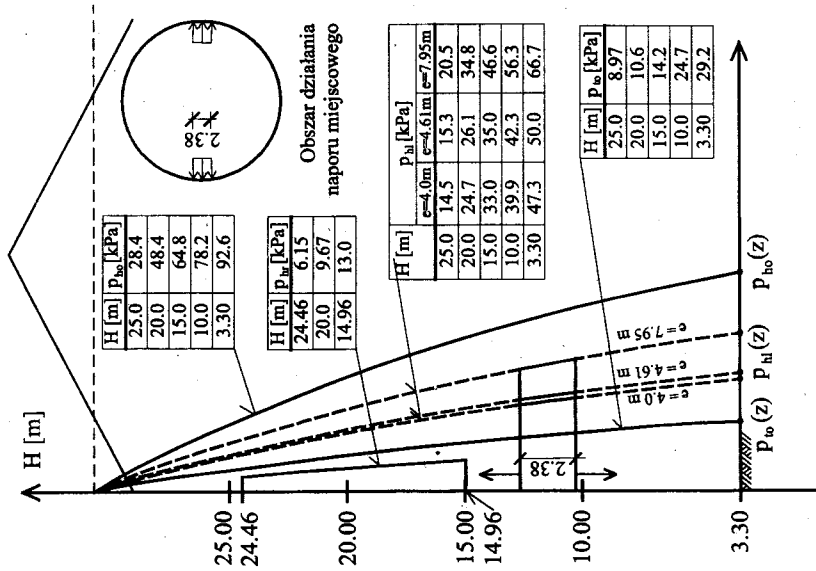
Ponieważ norma [2] ograniczona została do silosów opróżnianych z mimośrodem nie większym niż połowa promienia komory zasypowej ($0.25 d_c$), w niniejszej pracy rozważono tylko dwa mimośrodowo opróżniania o wartości 4.00 i 4.61 m. Norma [2] definiuje wartości obciążenia materiałem sypkim w stanie spoczynku i podczas opróżniania silosu. Przyjęto, że decydujący wpływ będzie miało obciążenie podczas opróżniania, definiowane poprzez zwiększenie obciążenia po napełnieniu przez odpowiednie współczynniki zwiększające. Według [2] silos sklasyfikowany został jako krępy ($h/d_c = 1.45 < 1.5$). Wyznaczono zatem napór poziomy przy opróżnianiu (złożony z naporu rozłożonego wg funkcji ciągłej p_{he} i naporu miejscowego $p_{pe,sq}$) oraz napór styczny przy opróżnianiu p_{we} .

Zgodnie z wymaganiami normowymi dla silosów krępych, poszczególne napory zmodyfikowano redukując wartość naporów ciągłych powyżej linii styku materiału sypkiego ze ścianą pionową do zera. Poniżej tego poziomu napory zmieniają się w sposób liniowy, zakładając stosunek naporu poziomego do pionowego równy 1.0.

Zestawienie obliczonych naporów z podaniem wartości oraz ich rozkłady na wysokości powłoki pokazano na rysunku 4.



Rys. 4. Napór rzepaku na ściany pionowe silosu wyznaczony wg [2]



Rys. 3. Napór rzepaku na ściany pionowe silosu wyznaczony wg [1]

2.3. Napór materiału sypkiego wg prEN 1991-4:2003

Wprowadzony przez normę [3] sposób wyznaczania parć w silosach w zależności od ich klasy niezawodności wymaga przyporządkowania analizowanego obiektu do odpowiedniej klasy. Silos niniejszy o obliczeniowej objętości $V = 8100 \text{ m}^3$ zaliczyć można do 2 klasy nie-zawodności przy opróżnianiu z mimośrodem 4.00 i 4.61 m oraz do 3 klasy przy mimo-środku opróżniania 7.95 m ($e_0 \geq 0.25d_c$). Ze względu na smukłość komory zasypowej silos zaliczyć można do grupy silosów o średniej smukłości. Dla silosów 2 klasy niezawodności o średniej smukłości, norma [3] dopuszcza możliwość uwzględnienia lokalnego wzrostu obciążenia przy opróżnianiu poprzez zwiększenie poziomego symetrycznego naporu przy opróżnianiu przez współczynnik zwiększający zależny od wielkości mimośrodu. Rozpatrzono zatem dwa schematy obciążenia silosu uwzględniając następujące parcia:

- w przypadku opróżniania z mimośrodem 4.0 i 4.61 m:
 - parcie materiału na ściany pionowe po napełnieniu silosu, złożone z symetrycznych naporów ciągłych poziomego p_{hf} i stycznego p_{wf} oraz lokalnego naporu poziomego p_{pf} ,
 - parcie materiału na ściany silosu przy opróżnianiu, złożone z zastępczego symetrycznego naporu poziomego $p_{he,u}$ obliczonego z uwzględnieniem wielkości mimo-środu opróżniania i symetrycznego naporu stycznego przy opróżnianiu p_{we} .
- w przypadku opróżniania z mimośrodem wynoszącym 7.95 m uwzględniono:
 - symetryczne napory przy opróżnianiu: poziomy p_{he} i styczny p_{we} ,
 - miejscowy napór poziomy przy opróżnianiu p_{pe} ,
 - dodatkowe niesymetryczne parcie poziome ($p_{hae}, p_{hse}, p_{hce}$) i styczne ($p_{wae}, p_{wse}, p_{wce}$) przy opróżnianiu z dużym mimośrodem ($e_0 \geq 0.25d_c$).

Rozkłady i wartości poszczególnych naporów przedstawiono szczegółowo na rys. 5. Dodatkowy niesymetryczny napór przy opróżnianiu z dużym mimośrodem uzależniony jest od kształtu leja wypływu tworzącego się w masie składowanego materiału podczas opróżniania. Wobec nieznamości szczegółowej geometrii wypływu, zgodnie z zaleceniami [3] rozpatrzono trzy możliwe wartości promienia leja wypływu: $r_c = 0.2r_l$, $r_c = 0.35r_l$ oraz $r_c = 0.5r_l$.

3. Analiza statyczno-wyrzymałościowa

Obliczenia uogólnionych sił wewnętrznych wykonano przy użyciu programu Robot Millennium (MES). Model zbiornika zbudowany został z powłoki walcowej o zmiennej grubości (0.40 m w dolnej strefie i 0.25 m na pozostałej wysokości) i górnej powłoki w kształcie ściętego stożka o grubości 0.15 m zwieńczonej płaską płytą tej samej grubości. Na dolnej krawędzi powłokę walcową zamocowano w ławie fundamentowej posadowionej na sprężystym podłożu. Powłoki zbudowane zostały z 11388 płaskich czterowęzłowych elementów powłokowych połączonych w 11454 węzłach.

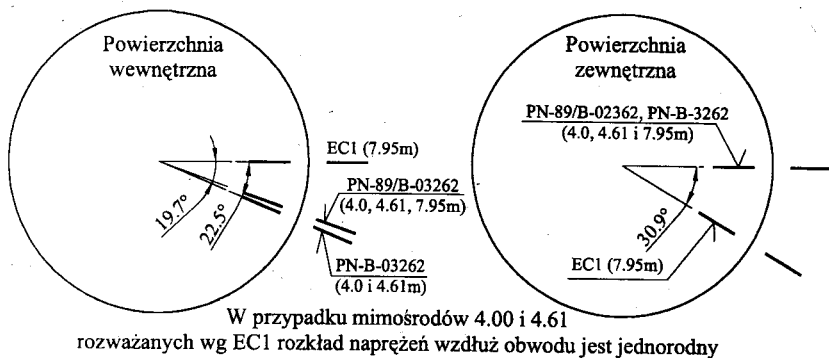
W rozważaniach uwzględniono następujące oddziaływania:

- ciężar własny konstrukcji,
- napór materiału sypkiego na ściany silosu wyznaczony zgodnie z p. 2,
- oddziaływanie temperatury w sytuacji „lato”: temperatura powietrza zewnętrznego + 27 °C, temperatura rzepaku + 4°C,
- oddziaływanie temperatury w sytuacji „zima”: temperatura powietrza zewnętrznego - 24 °C, temperatura rzepaku + 7.5°C,

Obciążenia przyłożono do modelu konstrukcji w grupach umożliwiającym dowolność w tworzeniu kombinacji i obwiedni uogólnionych sił przekrojowych.

4. Analiza i interpretacja otrzymanych wyników

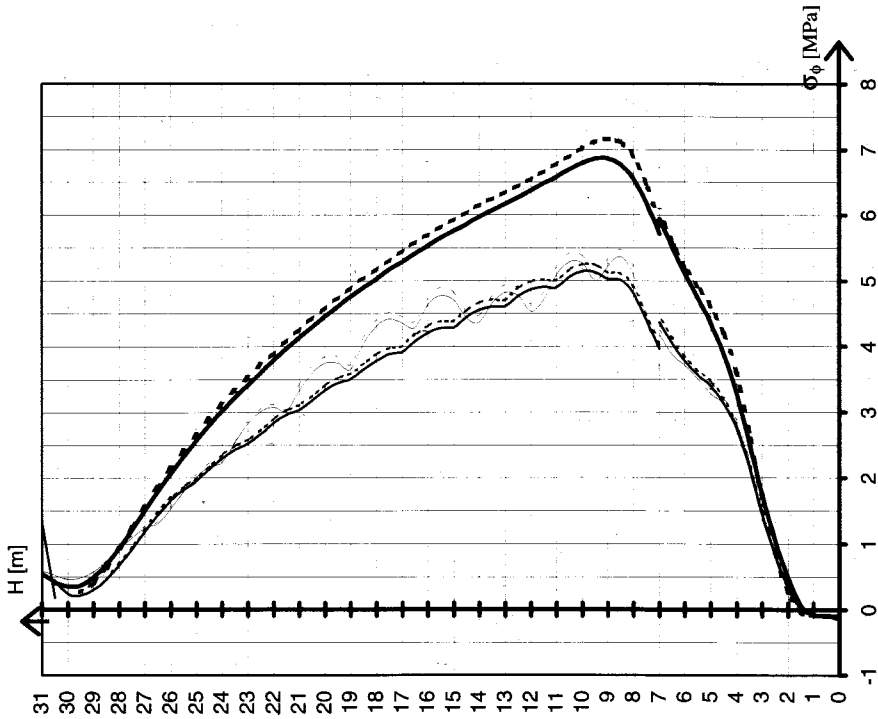
Podstawowym parametrem przekrojowym decydującym o stanie zarysowania konstrukcji są naprężenia normalne w przekroju betonowym. Wykonano zatem obwiednie naprężeń normalnych w kierunkach obwodowym i pionowym, dobierając różne kombinacje obciążeń z uwagi na wartość naprężeń, a następnie wybrano najbardziej niekorzystne przekroje na obu powierzchniach. Otrzymano w ten sposób po dwa charakterystyczne przekroje dla każdej z norm. W pracy zamieszczono tylko rozkład i wartości naprężeń obwodowych. Przekroje występowania największych naprężeń rozciągających zaznaczono na rys. 6. Rozmieszczenie ewentualnych rys pionowych w powłoce jest zatem związane z lokalizacją maksymalnych obwodowych naprężeń rozciągających σ_{ϕ} . Wykresy maksymalnych naprężeń w betonie w kierunku obwodowym na powierzchniach wewnętrznej i zewnętrznej przedstawiono na rys. 7 i 8 dla przypadku opróżniania z mimośrodem 4.00 i 4.61 m oraz na rys. 9 dla mimośrodu opróżniania 7.95 m.



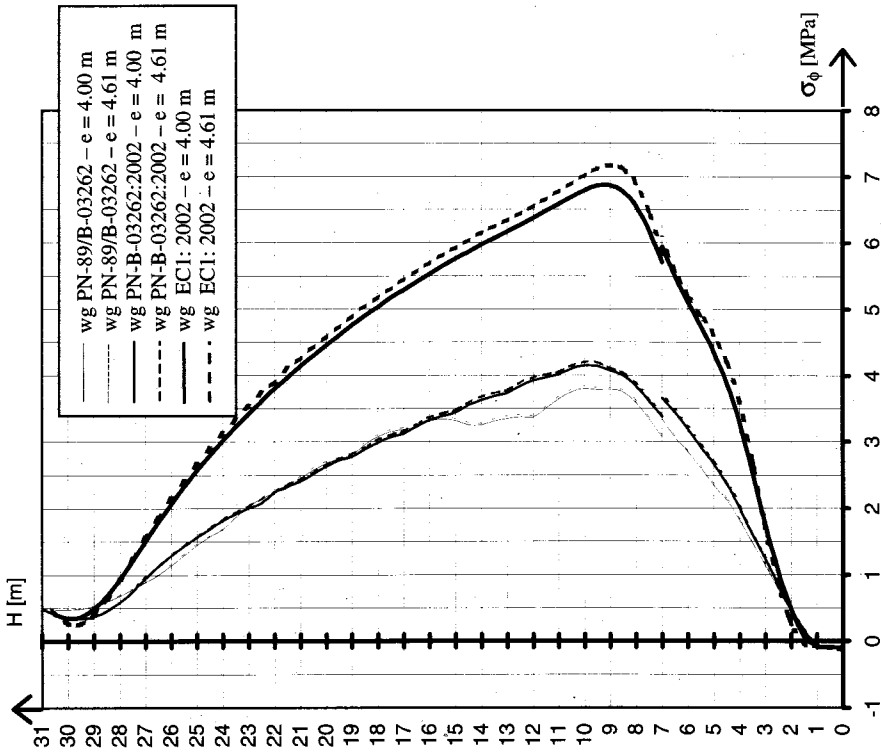
Rys. 6. Przekroje występowania największych naprężeń rozciągających.

Na podstawie przedstawionych wykresów można wysunąć następujące wnioski:

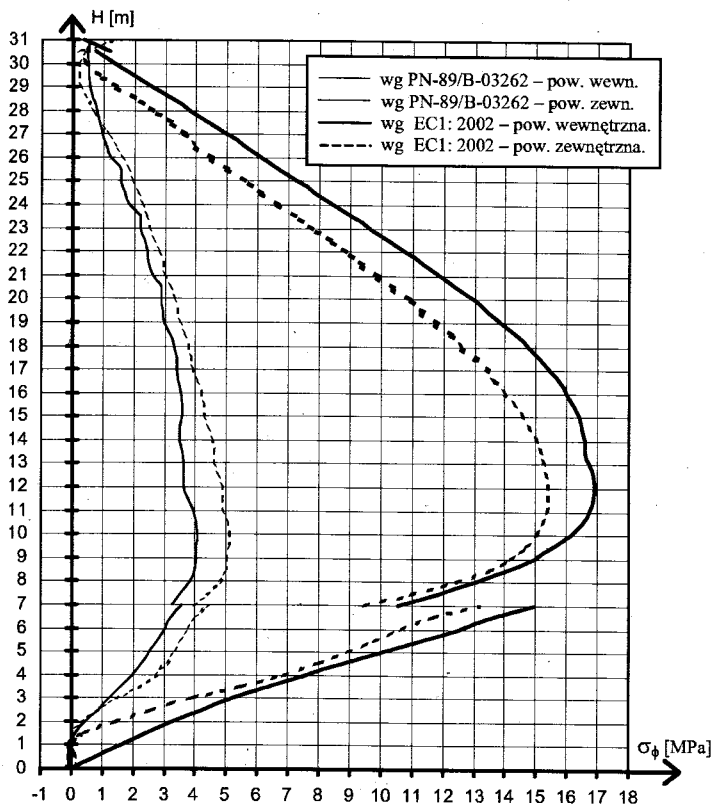
- Analizowane normy w różny sposób ujmują problem parcia materiałów sypkich w silosach i podają odmienne wartości oraz kombinacje obciążeń, co wywołuje w przypadku analizowanej konstrukcji rozbieżności otrzymanych naprężeń w betonie.
- Polskie normy (poprzednia i obowiązująca) w podobny sposób opisują zjawisko oddziaływania materiału sypkiego na ściany pionowe silosu dając zbliżone rozkłady i wartości sił przekrojowych. Różnica pomiędzy największymi wartościami obwodowych naprężeń rozciągających σ_{ϕ} wynosi 9 % na powierzchni wewnętrznej i 4 % na powierzchni zewnętrznej. Różnice pomiędzy maksymalnymi i minimalnymi wartościami naprężeń σ_{ϕ} obliczonymi wg polskich norm na wysokości silosu $x = 10.0$ m wynoszą na powierzchni wewnętrznej 23 i 21 % odpowiednio dla normy [1] i [2], a na powierzchni zewnętrznej 69 i 50 %.
- Maksymalne wartości obwodowych naprężeń rozciągających σ_{ϕ} obliczonych wg polskich norm [1] i [2] na powierzchniach powłoki są zlokalizowane w różnych przekrojach pionowych (rys. 6). Naprężenia σ_{ϕ} obliczone dla obu norm na zewnętrznej powierzchni są większe od analogicznych naprężeń obliczonych na wewnętrznej powierzchni. W przypadku opróżniania z mimośrodem 4.61 m różnica maksymalnych naprężeń wyznaczonych wg [1] dochodzi do 44 %, natomiast wg [2] do 25 %. Naprężenia σ_{ϕ} obliczone wg Eurokodu 1 [3] dla tego samego mimośrodu, przyjmują stałą wartość wzdłuż obwodu i na grubości ściany, z uwagi na zastosowanie zastępczego naporu przy opróżnianiu, uwzględniającego lokalny wzrost obciążenia.



Rys. 8. Naprężenia obwodowe na powierzchni zewnętrznej przy mimośrodkach opróżniania 4.0 i 4.61 m.



Rys. 7. Naprężenia obwodowe na powierzchni wewnętrznej przy mimośrodkach opróżniania 4.0 i 4.61 m.



Rys. 9. Naprężenia obwodowe przy mimośrodku opróżniania 7.95 m.

- Przy opróżnianiu z dużym mimośrodem ($e = 7.95$ m), naprężenia rozciągające obliczone wg polskiej normy [1] są większe na zewnętrznej powierzchni powłoki, natomiast wg EC-1 [3] są większe na wewnętrznej powierzchni. Otrzymane różnice naprężeń na grubości powłoki (w różnych przekrojach) wynoszą odpowiednio 26 % i 10 %.
- Wprowadzenie w EC-1 klas niezawodności konstrukcji oraz charakterystycznych dolnych i górnych wartości parametrów materiałowych, spowodowało znaczną różnicę pomiędzy największymi naprężeniami obwodowymi wyznaczonymi wg normy EC-1 i PN. Wartości największych naprężeń rozciągających σ_ϕ na wewnętrznej powierzchni powłoki, otrzymanych według [3] dla mimośrodków opróżniania 4.0 i 4.61 m, są większe odpowiednio o 65% i 70% od analogicznych naprężeń wyznaczonych wg [2]. W przypadku opróżniania z mimośrodem 7.95 m, naprężenia wyznaczone wg EC-1 są większe blisko czterokrotnie od naprężeń wyznaczonych wg PN [1].
- Należy podkreślić, że wartości naprężeń obliczonych przy uwzględnieniu parcia rzepaku zgodnie z EC-1 wyznaczone zostały przyjmując graniczną wartość współczynników charakterystycznych wartości parametrów materiałowych, równą 1.28. W przypadku przeprowadzenia szczegółowych badań własności materiałowych i przyjęcia współczynników o wartościach wyznaczonych w sposób doświadczalny, naprężenia te mogłyby być mniejsze.

5. Wnioski końcowe

Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, że:

- Z bezpośredniego porównania wartości naprężeń obliczonych wg różnych norm nie można wnioskować o stanie bezpieczeństwa konstrukcji silosu. Otrzymane znaczne różnice wartości σ_ϕ są wynikiem odmiennego ujęcia obciążenia powłoki składowanym materiałem sypkim w polskiej normie i Eurokodzie 1.
- Wydana w 2002 roku polska norma [2] nie obejmuje przypadku opróżniania silosów z mimośrodem większym niż połowa promienia komory zasypowej ($e \geq 0.25d_c$), a zatem powstaje pytanie jak traktować przypadek dużego mimośrodowi opróżniania (7.95 m). Proponuje się wprowadzić pewne ograniczenia dotyczące warunków projektowania nowych obiektów, natomiast w stosunku do obiektów istniejących wydaje się jedynie słuszne sprecyzowanie warunków ich eksploatacji.
- W analizowanym przypadku nieuzasadnione było zaprojektowanie otworu wysypowego o mimośrodku 7.95 m. Jego bezpieczna eksploatacja może odbywać się przy niewielkim stanie napełnienia silosu, którego poziom należy wyznaczyć przeprowadzając szczegółową analizę sił przekrojowych dla różnych stanów napełnienia.
- Wartości obwodowych naprężeń rozciągających σ_ϕ od parcia rzepaku obliczone dla silosu w Bodaczowie wg polskich norm, są większe od wytrzymałości betonu na rozciąganie f_{ctm} . W przypadku uwzględnienia oddziaływań termicznych przekroczenie to jest dużo większe, a zatem zarysowanie powłoki walcowej było nieuniknione.
- Wzmocnienie konstrukcji za pomocą bezprzyczepnościowych cięgien zewnętrznych przywróciło zdolność eksploatacyjną obiektu.
- W przyszłości silosy wolnostojące o analizowanej pojemności powinny być projektowane z betonu sprężonego, co zapewni wymaganą jakość i trwałość obiektu.

Literatura

- [1] PN-89/B-03262. Zbiorniki żelbetowe na materiały sypkie i kieszonki. Obliczenia statyczne i projektowanie.
- [2] PN-B - 03262; maj 2002. Silosy żelbetowe na materiały sypkie. Obliczenia statyczne, projektowanie, wykonawstwo i eksploatacja. PKN, Warszawa, 2002.
- [3] pr EN 1001-4; 2002. Eurocode 1 – Actions on structures. Part 4: Actions on silos and tanks. Version K.

ANALYSIS OF PRESSURE AND INTERNAL FORCES DISTRIBUTIONS IN CYLINDRICAL SHELL OF SILO FOR RAPE DURING UNSYMMETRICAL DISCHARGE

Summary

In this paper there is presented an analysis of pressure and internal forces distributions in cylindrical shell of reinforced concrete silo for rape during unsymmetrical discharge. It has been done the calculations of pressure distributions according to Polish Code PN-B-03262:2002 and Eurocode EN-1991- 4:2002. For comparative purpose the recommendations of previous Polish Code PN-89/B-03262 has been considered.

Internal forces and stresses in horizontal and vertical directions have been calculated with computer FEM system software Robot Millennium. Different localizations of discharge opening have been taken in static calculations. Based on the obtained results it has been stated that designing of great eccentric discharge openings, should be supported by precise analysis of stress states in cylindrical shell for each case.