

ANALIZA WPŁYWU NIECENTRYCZNEGO OPRÓŻNIANIA NA NAPRĘŻENIA W CYLINDRYCZNYM SILOSIE NA ZBOŻE*

Andrzej Łapko, Rafał Wójcik

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Białostocka
ul. Wiejska 45, 15-351 Białystok
e-mail: lapko@pb.bialystok.pl

Streszczenie. W pracy rozpatrzono przypadek niecentrycznego opróżniania cylindrycznego silosu przez otwory usytuowane na dużym mimośrodku względem osi pionowej komory. Opisano badania doświadczalne wykonane na obiekcie cylindrycznego silosu zbożowego w skali naturalnej, które wykazały znaczącą redystrybucję rozkładu naprężeń na obwodzie ścianie komory w wyniku niecentrycznego opróżniania, w porównaniu z opróżnianiem centrycznym. Wykorzystując postanowienia najnowszego projektu normy europejskiej prEN-1991-4 określono teoretyczne rozkłady parcia poziomego w rozpatrywanej komorze i wykonano analizę numeryczną MES przypadku niesymetrycznego obciążenia ściany silosu. Wyniki badań doświadczalnych i analiz numerycznych wykazały, że niesymetryczne obciążenia silosu dużej pojemności, wywołane mimośrodowym opróżnianiem są przyczyną występowania silnie zróżnicowanych na obwodzie ściany momentów zginających równoleżnikowych, co ma duży wpływ na niezawodność konstrukcji silosu.

Słowa kluczowe: silos, opróżnianie mimośrodowe, badania „in situ”, analiza statyczna

WSTĘP

Silosy zaliczane są do konstrukcji inżynierskich o dużym zagrożeniu bezpieczeństwa konstrukcyjnego i ryzyku awarii. Metody projektowania tych konstrukcji jednak są ciągle doskonalone, dzięki prowadzonym na dużą skalę badaniom doświadczalnym i studiom teoretycznym. W wielu krajach aktualizowane są także normy i przepisy projektowania w tym zakresie.

Problem mimośrodowego opróżniania w znowelizowanej polskiej normie PN-B-03262:2002 [1] został ograniczony do przypadku usytuowania otworu na

* Pracę wykonano na Politechnice Białostockiej w ramach badań własnych w projekcie W/IIB/2/04. Praca prezentowana i opublikowana w ramach aktywności Centrum Doskonałości AGROPHYSICS (Contract No.: QLAM-2001-00428) 5 Programu Ramowego UE.

małym mimośrodzie, a stan obciążenia komór cylindrycznych potraktowano jako osiowo symetryczny. Z doniesień literaturowych wynika jednak, że niecentryczne opróżnianie może być przyczyną silnego zróżnicowania parcia na obwodzie i wysokości komory silosu [3, 4], a nawet w niekorzystnych przypadkach może być przyczyną awarii silosu.

W finalnym projekcie normy europejskiej prEN 1991-4:2003 [2] po raz pierwszy wprowadzono zasady określania obciążeń zmiennych na obwodzie silosu na skutek mimośrodowego opróżniania, co wynikało z obszernych badań doświadczalnych prowadzonych głównie na modelach.

Autorzy niniejszej pracy przeprowadzili analizę efektów statycznych wywołanych niecentrycznym opróżnianiem komory żelbetowego silosu na zboże, prezentując wyniki badań doświadczalnych wykonanych na obiekcie w skali naturalnej oraz wybrane wyniki analizy numerycznej komory silosu w skali naturalnej, poddane niesymetrycznym obciążeniom ustalonym według normy europejskiej.

REDYSTRYBUCJA OBCIĄŻEŃ W SILOSIE OPRÓŻNIANYM MIMOŚRODOWO

Nierównomierne rozkłady obciążeń na obwodzie komór silosów cylindrycznych napełnianych bądź opróżnianych niecentrycznie zostały usankcjonowane w finalnej wersji normy europejskiej [2] w odniesieniu do silosów zaliczanych do grupy konstrukcji o zwiększonym ryzyku katastrofy. W normie tej po raz pierwszy wprowadzono klasyfikację silosów w trzech kategoriach niezawodności, w zależności od smukłości komór, ich pojemności i wielkości mimośrodu usytuowania otworu napełniania lub opróżniania. Klasyfikację tę podano w tablicy 1.

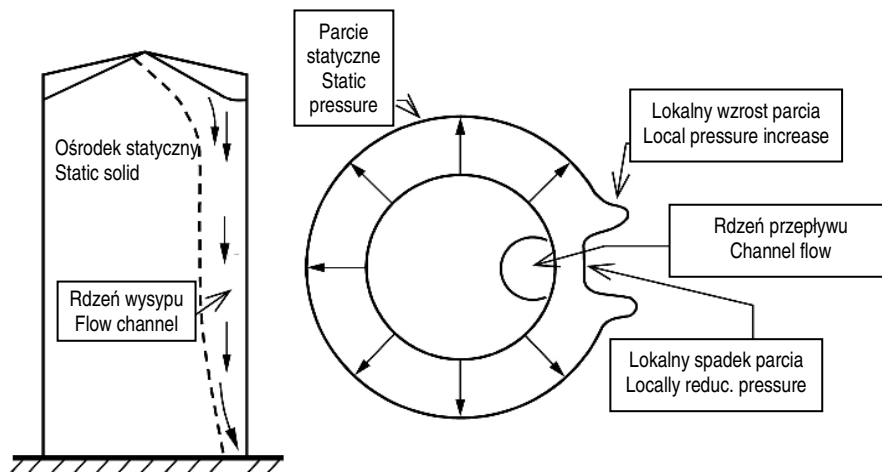
Każdej z kategorii niezawodności silosu przypisane zostały określone procedury obejmujące zróżnicowane przypadki projektowania. Procedury te dotyczą m.in. wyznaczania obciążeń ścian silosów wywołanych napełnianiem bądź opróżnianiem komór poprzez otwory usytuowane na mimośrodkach e_0 o dużej wartości względem wymiaru poprzecznego d_c .

$$e_0 > 0,25 d_c.$$

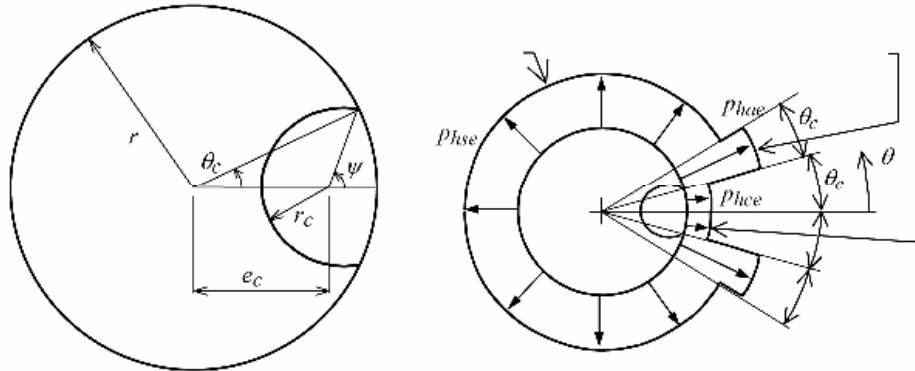
W silosach zaliczonych w Eurokodzie 1 cz. 4 do III kategorii niezawodności obciążenie poziome ściany wywołane opróżnianiem niecentrycznym charakteryzuje się silną nierównomiernością na obwodzie komory. Obciążenie to zawiera składową symetryczną parcia poziomego, określoną po napełnianiu silosu oraz lokalnie zmienne składowe parcia miejscowego skoncentrowane w strefie przyległej do ruchomego kanału przepływu materiału sypkiego w kontakcie z cylindryczną ścianą komory. Rozkład parcia poziomego przy niecentrycznym opróżnianiu pokazano schematycznie na rysunku 1, a charakterystykę geometryczną tego rozkładu – na rysunku 2.

Tablica 1. Klasyfikacja silosów ze względu na niezawodność wg prEN-1991-4:2003
Table 1. Classification of silo design situations according to prEN 2003

Klasa niezawodności Reliability class	Charakterystyka przypadku klasyfikacji Description of classification cases
Klasa 3 niezawodności Reliability class 3	<ul style="list-style-type: none"> • Silosy o pojemności powyżej 10 000 ton, • Silos with capacity in excess of 10 000 tonnes • Silosy o pojemności powyżej 1000 ton, w których występuje jedna z niżej wymienionych sytuacji: - opróżnianie niecentryczne silosów, jeśli $e_o > 0,25d_c$, - napełnianie niecentryczne bunkrów, jeśli $e_i > 0,25d_c$ • Silos with capacity with excess of 1000 tonnes in which any of the following design situations occur: <ul style="list-style-type: none"> - eccentric discharging with $e_o > 0,25d_c$, - filling of squat silos with top surface eccentricity with $e_i / d_c > 0,25d_c$
Klasa 2 niezawodności Reliability class 2	Pozostałe silosy uwzględnione w normie prEN 1991-4:2003, nie zaliczone do żadnej z pozostałych klas All silos covered by prEN-1991-4:2003, not placed in another class
Klasa 1 niezawodności Reliability class 1	Silosy o pojemności poniżej 100 ton Silos with capacity below 100 tonnes



Rys. 1. Rdzeń wysypu i rozkład parcia przy mimośrodowym opróżnianiu wg Eurokodu 1, cz.4 [2]
Fig. 1. Flow channel and pressure distribution during eccentric discharging of silo bin according to Eurocode 1, part 4 [2]



Rys. 2. Rdzeń przepływu materiału sypkiego przy mimośrodkowym opróżnianiu silosu i rozkład parcia bocznego na obwodzie komory cylindrycznej wg EC-1 cz.4 [2]

Fig. 2. Flow channel during eccentric discharging of silo bin and pressure distribution on silo bin perimeter according to EC 1, part 4 [2]

Z dostępnych źródeł literaturowych [4] wynika, że w przypadku opróżniania mimośrodkowego z reguły występuje przepływ o charakterze rdzeniowym. Parcie poziome na obwodzie komory ulega silnemu zaburzeniu w tej strefie ściany, która jest położona najbliżej rdzenia wysypu. Występują tam zróżnicowane składowe lokalnego parcia wywołanego opróżnianiem niecentrycznym, które są wielkościami zależnymi od kształtu geometrycznego ruchomego rdzenia kanału wysypowego, utworzonego wewnątrz masy sypkiej składowanej w silosie. Rdzeń cylindrycznego kanału wysypu, w którym materiał sypki pozostaje w ruchu ma średnicę zróżnicowaną na wysokości ściany silosu (rys. 1). Promień rdzenia wysypu r_c zależy od promienia cylindrycznej komory silosu r i mieści się w przedziale:

$$r_c = 0,2r \div 0,5r \quad (1)$$

Niesymetrycznie położony rdzeń kanału przepływu ośrodka sypkiego usytuowany jest na mimośrodku e_c względem osi geometrycznej komory (rys. 3). Mimośrodek ten można wyznaczyć z zależności podanej w Eurokodzie 1 cz.4 [2]:

$$e_c = r[\eta(1-G) + (1-\eta)\sqrt{1-G}] \quad (2)$$

gdzie:
$$G = \frac{r_c}{r}, \quad \eta = \frac{\mu_m}{\tan \phi_{im}} \quad (3)$$

μ_m – wartość średnia współczynnika tarcia ośrodka sypkiego o ścianę komory,
 ϕ_{im} – wartość średnia kąta tarcia wewnętrznego składowanego materiału sypkiego,

Jak wynika ze wzorów (2) i (3) mimośród e_c ruchomego rdzenia wysypu nie zależy od mimośrodu e_0 usytuowania niecentrycznego otworu wysypowego. Efekt ten stwierdzony został w badaniach doświadczalnych przepływów ośrodka sypkiego w silosie. Wykazały one, że przy dużych wartościach mimośrodu $e_0 > 0,25d_c$ zmiana mimośrodu e_c położenia rdzenia wysypu nie ma praktycznie wpływu na wielkość rdzenia kanału przepływowego. O lokalizacji rdzenia kanału przepływu decydują natomiast parametry materiału sypkiego, tj. kąt tarcia wewnętrznego oraz współczynnik tarcia materiału o ścianę pionową silosu. Kątowa długość odcinka ściany, stykającej się z rdzeniem kanału wysypowego (rys. 2) jest ograniczona przez współrzędną kątową $\theta = \pm \theta_c$. Zasięg kątowy tego odcinka łuku wynosi

$$\cos \theta_c = \frac{r^2 + e_c^2 - r_c^2}{2re_c} \rightarrow \theta_c \quad (4)$$

Długość łukowego odcinka ściany silosu w kontakcie z rdzeniem wysypu zapiszemy jako:

$$U_{wc} = 2\theta_c \cdot r \quad (5)$$

Natomiast długość odcinka łuku poza rdzeniem wysypu (w tzw. strefie martwej, gdzie ośrodek sypki nie znajduje się w ruchu) wyznaczamy ze wzoru:

$$U_{sc} = 2r_c \cdot (\pi - \psi) \quad (6)$$

gdzie:

$$\sin \psi = \frac{r}{r_c} \sin \theta_c \quad (7)$$

Kąty θ_c i ψ (zaznaczone na rys. 2) wyrażone są w radianach.

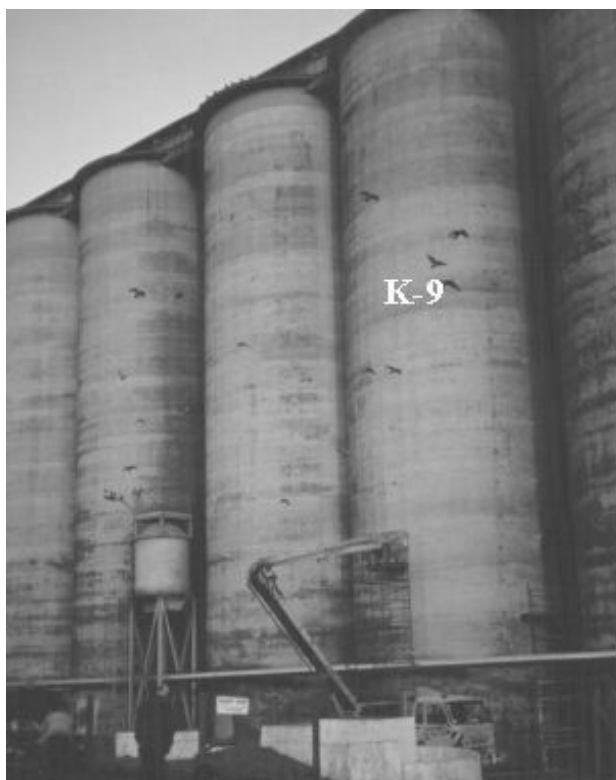
Na tej podstawie można wyznaczyć pole przekroju poprzecznego niesymetrycznego rdzenia ruchomego kanału wysypowego

$$A_c = (\pi - \psi)r_c^2 + \theta_c r^2 - r \cdot r_c \sin(\psi - \theta_c) \quad (8)$$

W strefie kontaktu niesymetrycznego ruchomego rdzenia ze ścianą silosu (na odcinku obwodu U_{wc}) parcie poziome ośrodka sypkiego jest silnie zredukowane, a przekrojach sąsiednich odwrotnie, jest znacząco większe. Można oczekiwać, że taki rozkład obciążenia żelbetowej ściany cylindrycznego silosu wywoła znakozmienne rozkłady momentów zginających równoleżnikowych, a w konsekwencji efekty rozciągania mimośrodowego, takie jak widoczne makroskopowo rysy pionowe w tym obszarze.

BADANIA DOŚWIADCZALNE NA SILOSIE RZECZYWISTYM

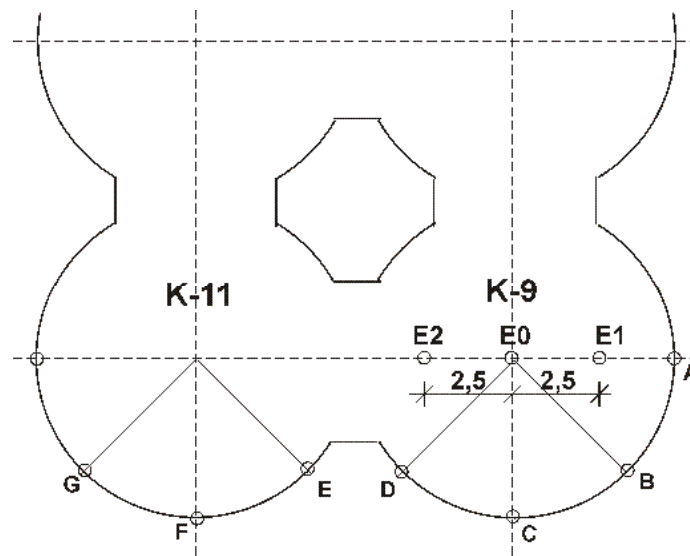
Badania doświadczalne przeprowadzono w celu wyjaśnienia wpływu niecentrycznego opróżniania na rozkład naprężeń w żelbetowej komorze cylindrycznego silosu zbożowego. Do badań wytypowano komorę K-9 elewatora Podlaskich Zakładów Zbożowych (PZZ) w Białymstoku. Komora znajdowała się w zespole baterii grupującej cztery komory cylindryczne. Widok badanej komory o numerze K-9 pokazano na rysunku 3, a sytuację komory w układzie baterijnym wraz z lokalizacją otworów wysypowych w dnie silosu zamieszczono na rysunku 4.



Rys. 3. Widok baterii silosowej z badaną komorą K-9 elewatora zbożowego PZZ w Białymstoku
Fig. 3. General view of grouped silos and tested silo bin K-9 in Białystok grain elevator

Komora była wyposażona w trzy otwory wysypowe: E-0 – otwór centryczny i dwa otwory niecentryczne E-1 i E-2 umieszczone wzdłuż średnicy na mimośrodkach $e_0 = 2,50$ m względem osi geometrycznej.

Ściany komory żelbetowej cechował zły stan techniczny konstrukcji objawiający się słabą jakością betonu, miejscową korozją zbrojenia i widocznym makroskopowo układem rys pionowych w dolnej i środkowej strefie ścian. Komora miała promień wewnętrzny $r = 4$ m, wysokość całkowitą $H = 29,5$ m. oraz grubość ściany równą $d_s = 0,18$ m (ustaloną w odkrywkach wykonanych podczas inwentaryzacji przed badaniami).



Rys. 4. Przekrój przez baterię silosu z komorą K-9. Usytuowanie otworów wysypowych i linii pomiaru (punkty A i C – wyznaczają linie pomiaru odkształceń zbrojenia ściany)

Fig. 4. Silo bin section with location of silo bin K – 9. Location of discharging outlets and measuring lines (points A and C indicate measuring lines for evaluation of stresses in wall reinforcement)

W celu określenia efektów niecentrycznego opróżniania przeprowadzono badania odkształceń zbrojenia obwodowego ściany komory K-9 w trakcie napełniania i opróżniania ziarnem żyta. Do badań zastosowano oryginalny prototypowy system pomiarowy oparty na technice telemetrii radiowej [5,6].

Punkty pomiaru odkształceń zbrojenia równoleżnikowego komory przygotowano na odsłoniętych zewnętrznych prętach ze stali klasy A-III (o średnicy 12 mm), dostosowując układ do techniki tensometrii elektrooporowej. Punkty te usytuowano w dolnej i środkowej strefie wysokości komory na dwu pionowych liniach pomiaru „A” i „C”, przy czym linia „A” leżała w obszarze prawdopodobnego kontaktu z rdzeniem przepływu przy opróżnianiu niecentrycznym.

Na każdej z linii pomiarowych przygotowano miejsca pomiaru na poziomach 6, 8, 10 i 12 m (powyżej terenu), wzdłuż zaobserwowanych rys pionowych widocznych na zewnętrznej powierzchni ściany. Linie pomiaru były usytuowane na obwodzie ścian od strony zachodniej bloku elewatora w równych odległościach wyznaczonych przez kąt środkowy wynoszący 45° (rys. 4).

Równoległe z pomiarem odkształceń zbrojenia komory rejestrowano temperaturę ściany żelbetowej w kilku punktach obwodu na powierzchni betonu i na odsłoniętych prętach zbrojenia. Wszystkie wyniki pomiarów odkształceń i temperatury były rejestrowane komputerowo w pamięci 5 telemetrycznych modułów pełniących w systemie pomiarowym rolę stacji pomiarowo-nadawczych.

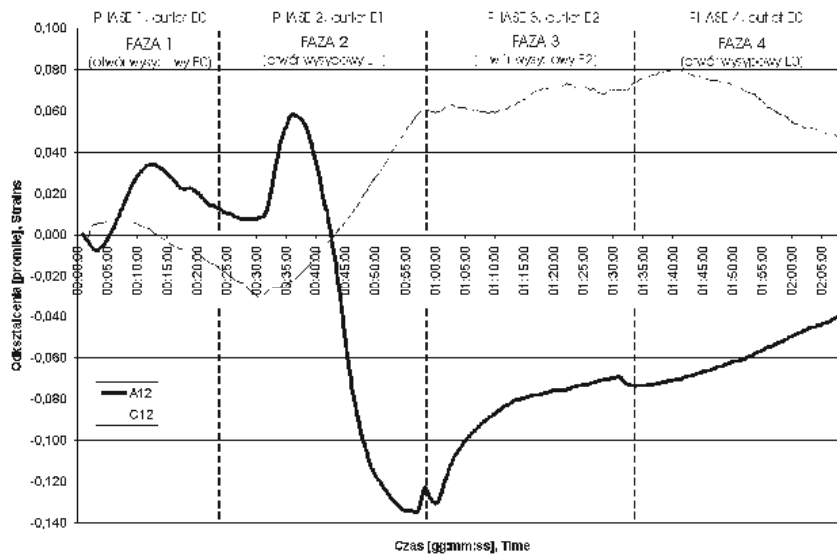
Cały proces napełniania i opróżniania komory był rejestrowany z założoną częstotliwością próbkowania przez system telemetryczny. Szczególnie interesujące wyniki uzyskano z badań we wstępnej fazie opróżniania. W trwającym 2 godziny etapie badań dynamicznych dokonywano sukcesywnie operacji przełączania otworów wysypowych. Badania rozpoczęto po napełnieniu komory uruchamiając wysyp centryczny (poprzez otwór E-0), następnie uruchamiano przemiennie otwory wysypowe usytuowane mimośrodowo o symbolach E-1 i E-2. Kolejność zastosowanych faz opróżniania wstępnej była następująca:

1. Otwarcie otworu wysypowego centrycznego (otwór E-0).
2. Zamknięcie otworu centrycznego E-0 i przełączenie opróżniania na otwór E-1.
3. Zamknięcie otworu mimośrodowego E-1 i przełączenie opróżniania na otwór E-2.
4. Zamknięcie otworu E-2 i przełączenie opróżniania ponownie na otwór centryczny E-0.

Efekty jakościowe niecentrycznego opróżniania komory silosu zbożowego w punktach pomiaru odkształceń zbrojenia można prześledzić na zmiennych w funkcji czasu wykresach odkształceń w zbrojeniu równoleżnikowym komory K-9, podanych na rysunku 5, (w punktach pomiaru usytuowanych na poziomie 12,0 m na liniach A i C – w obszarze rdzenia wysypu przy otworze niecentrycznym E-1) i na rysunku 6 (w punktach usytuowanych na poziomie 10,0 m na liniach A i C).

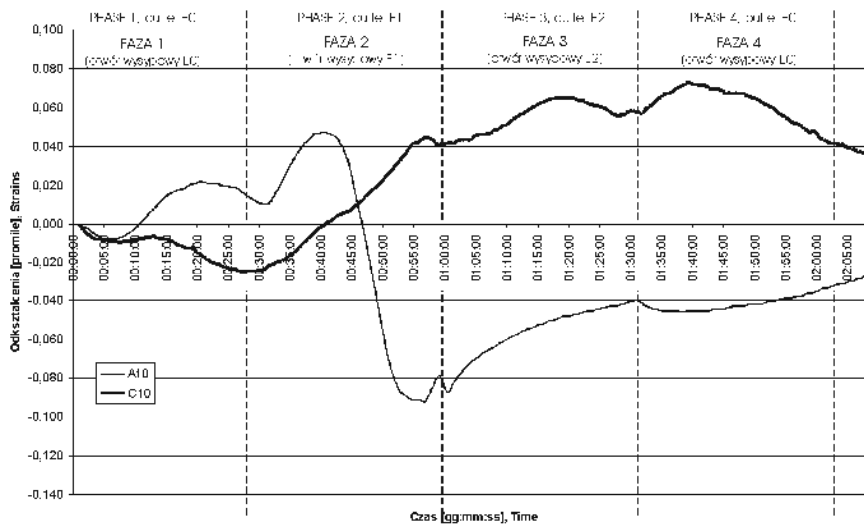
Podane na rysunkach 5 i 6 wykresy zmian naprężeń obwodowych w zbrojeniu zewnętrznym ściany dotyczą pomiarów rozpoczętych przy całkowicie napełnionej komorze, stąd też zaobserwowane zmiany stanu odkształcenia – naprężenia w ścianie są wyłącznie efektem opróżniania mimośrodowego silosu.

Otwarcie wysypu centrycznego E-0 (faza 1) spowodowało niewielkie zmiany naprężeń rozciągających ścianę na obu liniach A i C, natomiast przełączenie wysypu na otwór niecentryczny E-1 (faza 2) była przyczyną wyraźnego przegrupowania odkształceń i naprężeń na obwodzie ściany.



Rys. 5. Zmiany odkształceń zbrojenia równoleżnikowego podczas kolejnych faz opróżniania komory K-9 (linia A i C – na poziomie 12 m)

Fig. 5. Strain changes in hoop silo wall reinforcement during successive phases of discharging of silo K-9 (line A and C – on the level 12 m)



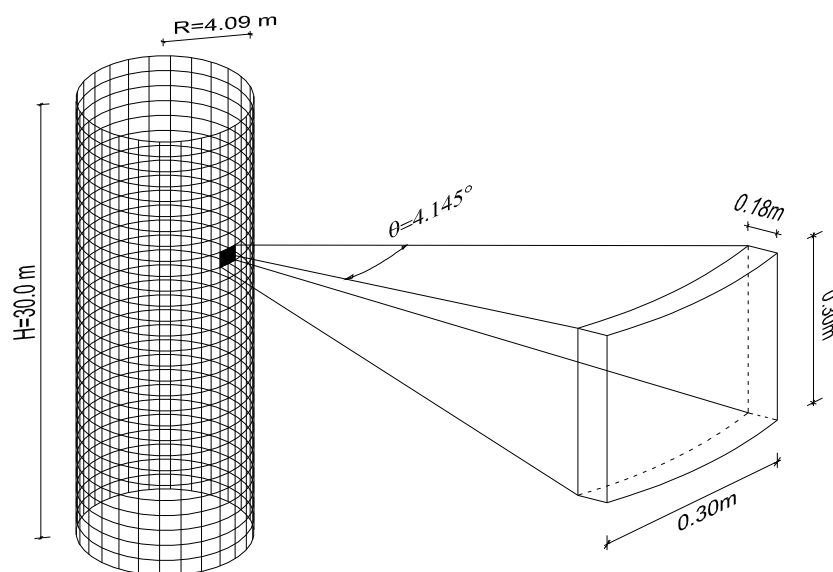
Rys. 6. Zmiany odkształceń zbrojenia równoleżnikowego podczas kolejnych faz opróżniania komory K-9 (linia A i C – na poziomie 10 m)

Fig. 6. Strain changes in hoop silo wall reinforcement during successive phases of discharging of silo K-9 (lines A and C – on the level 10 m)

W punktach na linii pomiaru A (w kontakcie z rdzeniem wysypu) widoczny był silny spadek odkształceń rozciągających zbrojenia. Spadek ten można łatwo objaśnić efektem wystąpienia w tej strefie ściany silnie zredukowanej składowej parcia, jako konsekwencji kontaktu z niecentrycznym kanałem przepływu. W tym samym czasie, w punktach pomiaru na linii C, wystąpiła zależność odwrotna – czyli miały miejsce znaczące wzrosty odkształceń zbrojenia rozciąganego ściany jako efekt wystąpienia zwiększonej składowej parcia, w strefie bocznej do niecentrycznego kanału wysypu. Takie rozkłady odkształceń na obwodzie komory mogą być wywołane wyłącznie wystąpieniem znakozmiennych momentów zginających w płaszczyźnie równoleżnikowej ściany silosu pod wpływem opróżniania niecentrycznego. Stan zginania ściany cylindrycznego silosu wywołany mimośrodowym opróżnianiem rozpatrzono przeprowadzając analizę numeryczną MES [7].

ANALIZA NUMERYCZNA EFEKTÓW MIMOŚRODOWEGO OPRÓŻNIANIA

Komora cylindrycznego silosu o wymiarach odpowiadających obiektowi badań w PZZ w Białymstoku została podzielona siatką elementów skończonych o wymiarach $30\text{ cm} \times 30\text{ cm} \times 18\text{ cm}$. Układ komory po dyskretyzacji pokazano na rysunku 7.



Rys. 7. Siatka dyskretyzacji modelu obliczeniowego komory silosu opróżnianego niecentrycznie
Fig. 7. FEM model of silo structure under eccentric discharging

Dobór siatki elementów został przyjęty w taki sposób, aby odpowiadały ona rozkładowi nierównomiernego parcia poziomego na obwodzie komory (według zasad pokazanych na rysunku 2). W obliczeniach wykorzystano pakiet programu numerycznego SAP IV, który umożliwia analizę statycznych i dynamicznych zadań trójwymiarowych modeli liniowych. Cylindryczną powłokę silosu zdyskretyzowano 8600 elementami skończonymi przyjmując 100 pasm poziomych i 86 pasm pionowych.

Powłokę w obliczeniach numerycznych traktowano jako wolnostojącą o krawędzi zamocowanej w płycie dennej, natomiast górny brzeg miał swobodną krawędź. Jako obciążenie statyczne komory przyjęto składowe parcia poziomego, wyznaczone przy niecentrycznym opróżnianiu, według wymagań projektu prEN-1991-4:2003 (rys. 2).

Zredukowaną składową parcia poziomego materiału sypkiego p_{hce} w strefie kontaktu z rdzeniem przepływu wyznaczono jako zmienną określaną w funkcji głębokości z ustalonej od tzw. efektywnego poziomu powierzchni górnej składowanego materiału sypkiego

$$p_{hce} = p_{hco} \cdot (1 - e^{-z/z_{oc}}) \quad (9)$$

Wielkości występujące we wzorze (9) wyrażane są następująco

$$p_{hco} = \gamma \cdot K \cdot z_{oc} \quad (10)$$

$$z_{oc} = \frac{1}{K} \cdot \left(\frac{A_c}{U_{wc} \mu + U_{sc} \operatorname{tg} \phi_i} \right) \quad (11)$$

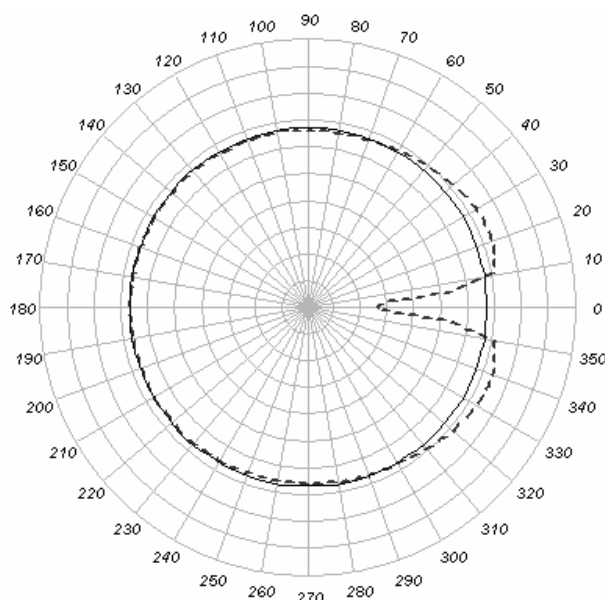
gdzie: γ – gęstość objętościowa ośrodka sypkiego, μ – współczynnik tarcia składowanego materiału o ścianę, K – iloraz parcia poziomego i pionowego w silosie, U_{wc} i U_{sc} – odcinki obwodów zmienności parcia poziomego wg wzorów (5) i (6).

Silnie zwiększona składowa parcia bocznego p_{hae} na granicy styku ruchomego rdzenia i strefy martwej ośrodka sypkiego (rys.2) jest wielkością maksymalną parcia na obwodzie komory:

$$p_{hae} = 2p_{hf} - p_{hce} \quad (12)$$

gdzie: p_{hf} – składowa symetryczna parcia wyznaczana z klasycznych wzorów teorii Janssena.

Na podstawie obliczonych w analizie MES wielkości naprężeń σ_{xx} i σ_{yy} wyznaczono równoleżnikowe N_{xx} i południkowe N_{yy} siły podłużne w przekrojach cylindrycznej ściany silosu oraz odpowiednie momenty zginające. Przykładowy wykres momentów zginających równoleżnikowych określonych dla niecentrycznego opróżniania silosu na poziomie odpowiadającym położeniu punktów pomiaru odkształceń A-6 i C-6 pokazano na rysunku 8.



Rys. 8. Wykres momentów równoleżnikowych M_{xx} na obwodzie ściany silosu opróżnianego niecentrycznie na poziomie 6 m – analiza MES badanego silosu zbożowego

Fig. 8. Hoop bending moment M_{xx} diagrams on the silo wall perimeter at the level 6 m during eccentric discharging – FEM analysis of examined silo bin

Wykres wskazuje na silną redystrybucję naprężeń rozciągających na obwodzie ściany w sąsiedztwie rdzenia wysypu mimośrodowego.

Określone w analizie MES rozkłady sił wewnętrznych w silosie opróżnianym niecentrycznie potwierdzają uzyskane z badań doświadczalnych zmienności naprężeń na obwodzie silosu. Jest to jednocześnie potwierdzenie poprawności koncepcji obliczeniowej dla ścian silosów opróżnianych mimośrodowo, przyjętych w finalnej wersji normy europejskiej prEN-1991-4 [2].

WNIOSKI

1. Badania doświadczalne przeprowadzone na komorze cylindrycznego silosu zbożowego w skali naturalnej wykazały, że opróżnianie niecentryczne powoduje wyraźną redystrybucję naprężeń w ścianie silosu w strefie zbliżonej do rdzenia wysypowego. W pierwszych minutach opróżniania niecentrycznego osiowo symetryczny rozkład naprężeń rozciągających ulega przegrupowaniu, co potwierdza charakter zmiany obciążeń wywołanych zmiennym na obwodzie rozkładem parcia bocznego. Naprężenia przy opróżnianiu mają charakter dynamiczny, a stwierdzone pulsacje są wywołane zmiennością parcia materiału ziarnistego w fazie opróżniania.

2. Stwierdzono wyraźne różnice w rozkładzie naprężeń w ścianie silosu na liniach pomiarowych w sąsiedztwie otworu wysypowego, zwłaszcza w początkowej fazie niecentrycznego opróżniania. Spadkom odkształceń rozciągających widocznym w punktach pomiaru naprężeń na linii A towarzyszą w tym samym czasie znaczące wzrosty odkształceń w punktach pomiaru na linii C.

3. Wyniki przeprowadzonych badań doświadczalnych i analiz numerycznych MES dla silosu rzeczywistego opróżnianego mimośrodowo udowadniają występowanie w ścianie cylindrycznego silosu znakozmiennych momentów zginających. Pośrednio potwierdza to przyjęty w finalnej wersji projektu Eurokodu 1 cz.4 nierównomierny rozkład parcia na obwodzie wywołany opróżnianiem mimośrodowym.

PIŚMIENNICTWO

1. PN-B-03262:2002. Silosy żelbetowe na materiały sypkie. Obliczenia statyczne i projektowanie. Wydawnictwo Alfa. Warszawa, maj 2002.
2. European Standard prEN 1991- 4:2003. Eurocode 1: Actions on Structures. Part 4: Actions on silos and tanks. Version L, April 2003.
3. **Safarian S.S.:** Empirical method for computing bending moments in circular silo walls due to asymmetric flow considering flow channel concept. *Bulk Solid Handling*, 21, 3/4, 153-155, 2001.
4. **Martens P.:** Silo Handbuch. Wilhelm Ernst & Sohn Verlag. Berlin, 1988.
5. **Łapko A., Kołtątaj J.:** Monitoring stanów naprężeń w bateriach silosów w systemie telemetrii radiowej. Materiały XXI Konferencji Naukowo Technicznej KILiW PAN „Awarie Budowlane”, Szczecin-Międzyzdroje, 689-696, 20-23.05.2003.
6. **Łapko A., Kołtątaj J.:** The wireless technique of examination of silo wall structures during operation. The 4th International Conference for Conveying and Handling of Particulate Solids. Budapeszt, Vol. 1, s. 6.77-6.82, 2003.
7. **Wójcik R.:** Analiza wpływu sposobu opróżniania na stan naprężeń w ścianie komory silosu cylindrycznego. Praca magisterska wykonana na Politechnice Białostockiej, Białystok 2003.

ANALYSIS OF ECCENTRIC DISCHARGING EFFECTS ON STRESS STATES IN CYLINDRICAL SILO BINS FOR GRAIN

Andrzej Łapko, Rafał Wójcik

Faculty of Civil and Environmental Engineering, Białystok Technical University
ul. Wiejska 45, 15-351 Białystok
e-mail: lapko@pb.bialystok.pl

Abstract. The case of eccentric discharging through an opening located with a large eccentricity in cylindrical silo for grain has been considered in this paper. The experimental studies on distribution of hoop stresses in silo bin due to eccentric discharging conducted in reinforced concrete silo “in situ” have been presented and discussed. Also, selected results of numerical FEM analysis of considered silo bin subjected to eccentric loads have been presented, showing similar qualitative characteristics to results obtained from silo examination. The studies indicate that during eccentric discharging hoop bending moments appear in the zone adjacent to funnel flow of grain during eccentric discharging.

Key words: silo, eccentric discharging, „in situ” investigations, structural analysis