

Elżbieta PAWLIK^{*}
Politechnika Wroclawska

ANALIZA BADAŃ MODELOWYCH WPLYWU NIERÓWNOMIERNEGO ROZKŁADU POZIOMEGO NAPORU NA UOGÓLNIONE SIŁY WEWNĘTRZNE W CYLINDRYCZNYCH SILOSACH ŻELBETOWYCH

Streszczenie. W referacie zaprezentowano wyniki badań doświadczalnych pomiarów poziomego naporu zboża z uwzględnieniem nierównomierności jego rozkładu na pobocznicę płaszczu silosu. Omówiono również zastępcze schematy odzwierciedlające nierównomierność tego rozkładu ujęte w polskiej normie i eurokodzie. Wykorzystując wyniki doświadczalnych badań, wykonano wstępne analizy rozkładu naprężeń oraz sił wewnętrznych w badanym silosie, opróżnianym przy różnym usytuowaniu otworów wysypowych. Uzyskane wyniki obliczeń skonfrontowano z propozycjami obciążeń ujętych w przepisach normowych.

THE MODEL TESTS ANALYSIS OF INFLUENCE OF UNEQUAL HORIZONTAL PRESSURE DISTRIBUTION IN CYLINDRICAL CONCRETE SILO

Summary. Results of experimental horizontal pressure distribution measurements, taking into consideration unequal distribution in a silo bin, were presented in the paper. Design discharge pressure accounting for unsymmetrical pressure presented in a Polish Standard and in the Eurocode was discussed. Using experimental test results, preliminary pressure distribution analysis was made of silo bins emptied with different eccentricity. Obtained results were compared to standard regulations.

1. Wstęp

Wyniki badań doświadczalnych wskazują na duże nierównomierności rozkładu naporu poziomego, zależne głównie od sposobu opróżniania. Źródła literaturowe podają różne wartości od kilkunastu do kilkuset procent. Większe nierównomierności zarejestrowano w trakcie badań silosów w sali naturalnej niż w badaniach modelowych [2].

^{*} Opiekun naukowy: Prof. dr hab. inż. Mieczysław Kamiński

Prezentowana analiza oparta jest na założeniach teorii sprężystości i nie uwzględnia szeregu zjawisk, które będą tematem przyszłych analiz, np.: zarysowanie i współpraca materiału składowanego ze ścianą silosu.

2. Nierównomierność rozkładu naporu poziomego w świetle wyników wybranych badań doświadczalnych i propozycji normowych

Wyniki badań doświadczalnych modeli silosów opróżnianych niesymetrycznie pozwalają stwierdzić, że wartości i rozkład naporu poziomego podczas opróżniania zależą od wartości mimośrodowo opróżniania, smukłości komory, kształtu dna i rodzaju materiału.

W skrajnym przypadku, otworu wysypowego umieszczonego przy ścianie komory, można zaobserwować w przekroju pionowym charakterystyczny rozkład naporu poziomego: w części dolnej napór spada, a w górnej znacząco rośnie. W niektórych badaniach zaobserwowano również wzrost naporu w tym samym przekroju po stronie przeciwległej do otworu wysypowego. W pozostałych przekrojach pionowych wartości naporu wzrastają na całej wysokości ściany komory. Większe wartości mimośrodu powodują wzrost nierównomierności rozkładu naporu. Podobnie wzrasta pulsacja powodowana warstwowym usuwaniem się materiału sypkiego w kierunku otworu. W komorach zaopatrzonych w płaskie dno zaobserwowano mniejszy wzrost naporu w porównaniu do komór wyposażonych w lej.

W wynikach badań modelowych silosów w skali naturalnej istnieje zasadnicza różnica. Nierównomierność naporów poziomych pomierzonych w modelach jest rzędu kilkunastu – kilkudziesięciu procent, podczas gdy w silosach w skali naturalnej odnotowuje się nierównomierności rzędu stu kilkudziesięciu procent, a nawet do czterystu procent.

W prezentowanej poniżej analizie wykorzystano dostępne w literaturze wyniki badań doświadczalnych naporu w wielkowymiarowym modelu silosu. Pomiary wykonano na całym obwodzie i różnych wysokościach. Duża liczba punktów pomiarowych pozwala wiernie odwzorować rzeczywisty napór i ustalić stan naprężeń w ścianie.

Zarówno polska norma [13], jak i EC-2 [14] zaleca przyjmowanie dodatkowych naporów miejscowych, działających w dowolnym miejscu ściany silosu, na dwu kwadratowych polach o boku $s=0,2d_c$, gdzie d_c jest średnicą wewnętrzną przekroju. Wartość naporu $p_p=0,2(1+4e_i/d_c)p_{hf}$ jest funkcją naporu poziomego wg Janssena p_{hf} średnicy wewnętrznej d_c i mimośrodu otworu wysypowego e_i . Za najbardziej niekorzystne usytuowanie naporu przyjmuje się połowę wysokości silosu.

3. Analiza rozkładu naprężeń w cylindrycznej ścianie silosu podczas niesymetrycznego opróżniania

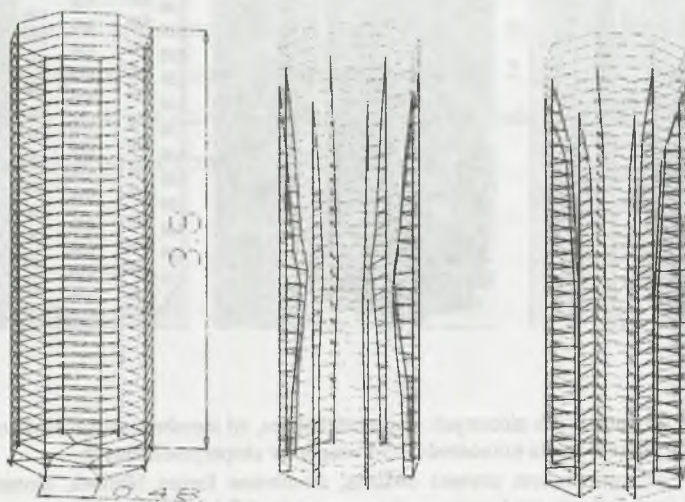
3.1. Założenia do analizy numerycznej

Analizę wykonano w programie Robot- zintegrowanym programie graficznym służącym do modelowania, analizowania i wymiarowania różnych rodzajów konstrukcji. Przeprowadzono analizę opierając się na założeniach teorii sprężystości, metodzie elementów skończonych. Program zawiera kilka typów metod rozwiązywania układu równań poddanych linearyzacji lub liniowych, w tym wypadku wykorzystano solver bezpośredni SparseM, który dokonuje rozkładu macierzy przy wykorzystaniu pewnej metody eliminacji Gaussa. Podręcznik użytkownika nie podaje bardziej szczegółowych informacji.

Dane doświadczalne pochodzą z badań wykonanych na modelu monolitycznym silosu żelbetowego o wysokości 3,775 m i średnicy 1,25 m, grubości ścianki 2,5 cm.

Badano między innymi wpływ usytuowania mimośrodowo opróżniania na rozkład naprężeń w ścianie silosu. Napór mierzono bezpośrednio, błąd pomiaru oszacowano w granicach $\pm 5\%$.

Silos zamodelowano w module przeznaczonym do projektowania powłok. Dno sztywno połączono ze ścianą, a na obwodzie z podłożem, model mes tworzą elementy skończone powierzchniowe czworokątne czterowęzłowe; sumarycznie: 313 elementów i 316 węzłów.



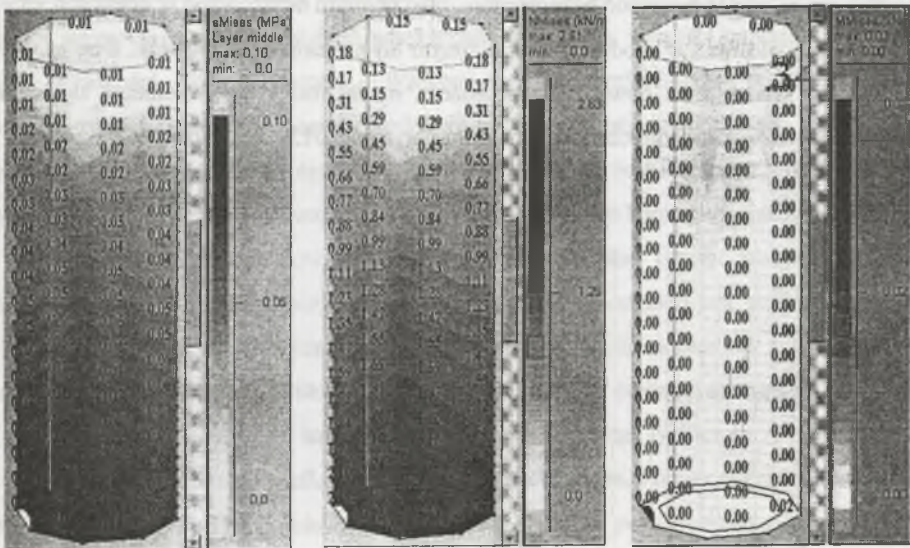
Rys. 1. Model mes oraz przykład rozkładu naporów eksperymentalnych i normowych
Fig. 1. FEM model and pressure distribution example according to the experiment and to the standard

Obliczenia wykonano czterokrotnie, dla wartości mimośrodów 1/3 i 1/6 średnicy, odpowiednio wg danych doświadczalnych i polskiej normy. Dane doświadczalne reprezentowała średnia z trzech pomiarów, a wartości normowe przyjęto charakterystyczne.

3.2. Wyniki analiz

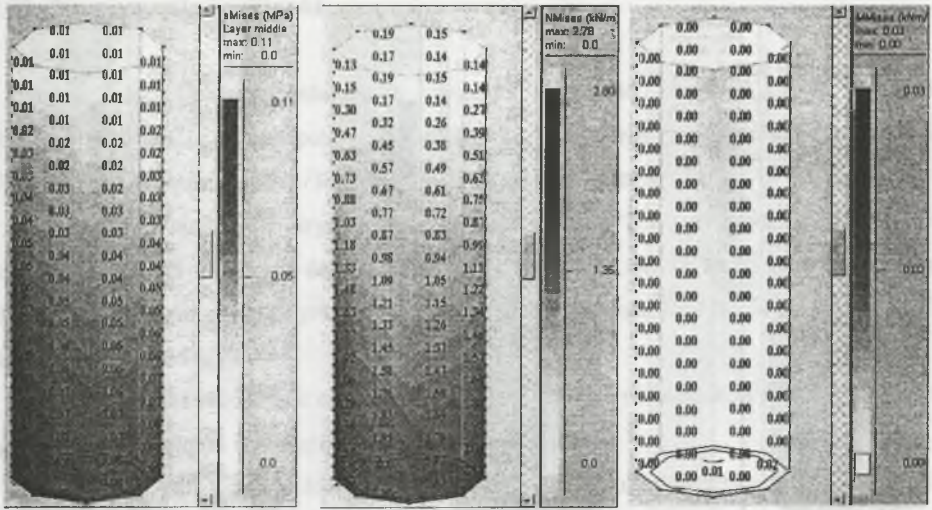
Dla mimośrodów 1/6d

Przemieszczenia wywołane przez napór wyznaczone wg normy są równe lub większe od tych wyznaczonych wg naporów eksperymentalnych $\Delta = |\delta_n| - \delta_{ex}$. Różnice są niewielkie, przy maksymalnej wartości przemieszczenia 0.5 mm sięgają +0.3 mm i -0.1 mm. Ujemne różnice wystąpiły na wysokości 1,5-1,6 m i 3,3-3,5 m na połowie obwodu oraz 2,3-2,4 m na całym obwodzie. Dodatnie różnice wystąpiły od wysokości 0,8 m w rozrzuconych węzłach, powyżej 2,0 m w większości węzłów. Wartości sił wewnętrznych są zbliżone.



Rys. 2. Mapy sił wewnętrznych złożonych: naprężeń $sMises$, sił membranowych $NMises$, momentów $MMises$ wyznaczone dla mimośrodów 1/3d i naporów eksperymentalnych

Fig. 2. Maps of internal forces: stresses $sMises$, membrane forces $NMises$, moments $MMises$; obtained from experimental pressure, the eccentricity 1/3d

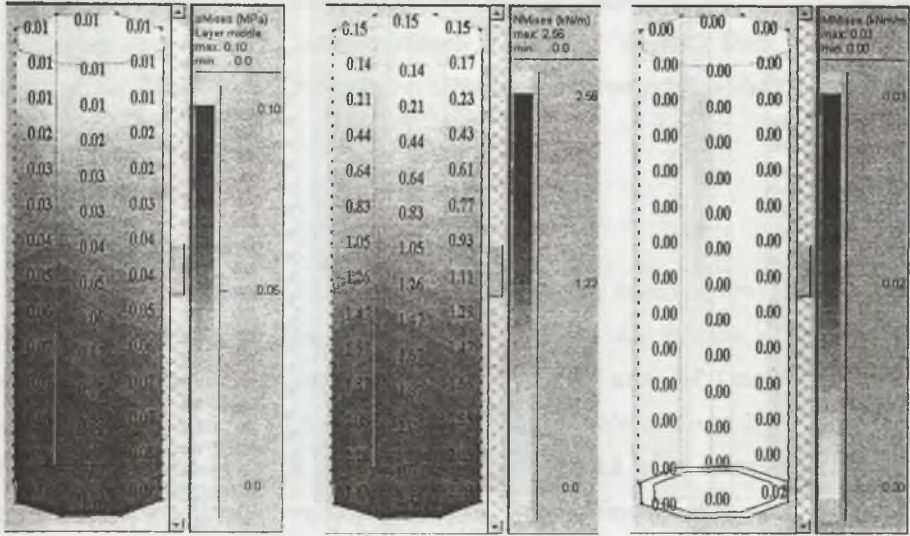


Rys. 3. Mapy sił wewnętrznych złożonych: naprężeń $sMises$, sił membranowych $NMises$, momentów $MMises$ wyznaczone dla mimośrodowo 1/3d i naporów normowych

Fig. 3. Maps of internal forces: stresses $sMises$, membrane forces $NMises$, moments $MMises$; obtained from standard pressure, the eccentricity 1/3d

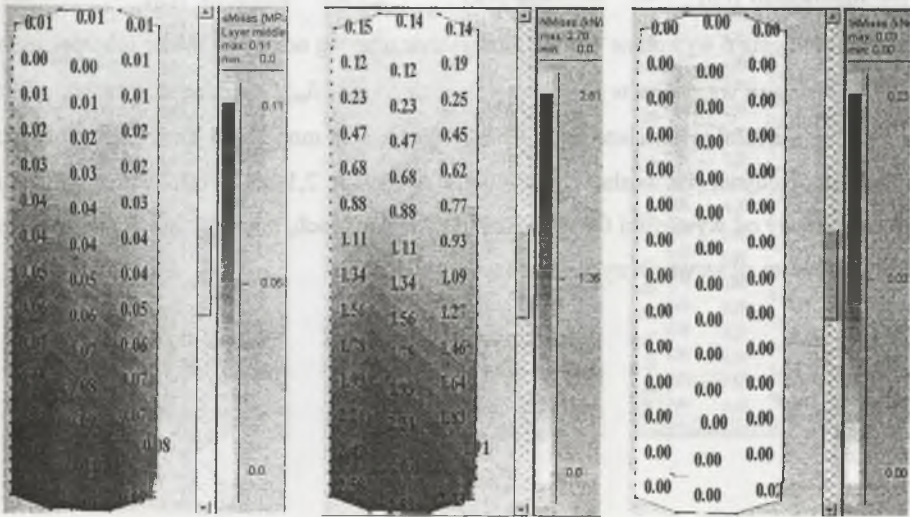
Dla mimośrodowo 1/3d

Przemieszczenia δ wywołane przez napór wyznaczone wg normy są równe lub większe od tych wyznaczonych wg naporów eksperymentalnych $\Delta = |\delta_n| - |\delta_{ex}|$. Różnice są niewielkie, przy maksymalnej wartości przemieszczenia 0.9 mm sięgają +0.3 mm i -0.1 mm. Ujemne różnice wystąpiły w pojedynczych węzłach na wysokościach 1,0 m 2,1-2,4 m i 3,2-3,8 m. Dodatnie różnice wystąpiły od wysokości 0,8 m w rozrzuczonych węzłach, powyżej 2,0 m w większości węzłów. Wartości sił wewnętrznych są zbliżone.



Rys. 4. Mapy sił wewnętrznych złożonych: naprężeń sMises, sił membranowych NMises, momentów MMises wyznaczone dla mimośrodru 1/6d i naporów eksperymentalnych

Fig. 4. Maps of internal forces: stresses sMises, membrane forces NMises, moments MMises; obtained from experimental pressure, the eccentricity 1/6d



Rys. 5. Mapy sił wewnętrznych złożonych: naprężeń sMises, sił membranowych NMises, momentów MMises wyznaczone dla mimośrodru 1/6d i naporów normowych

Fig. 5. Maps of internal forces: stresses sMises, membrane forces NMises, moments MMises; obtained from standard pressure, the eccentricity 1/6d

4. Podsumowanie i wnioski

W badaniach doświadczalnych w połowie wysokości modelu silosu wystąpiły maksymalne wartości naporu poziomego, odpowiednio podczas opróżniania dla mimośrodów $1/6d$ o 67%, a dla mimośrodu $1/3d$ o 95% większe od naporu statycznego.

Z obliczeń statycznych wynika, że przyjęcie założeń PN przy wyznaczaniu naporu materiału sypkiego w silosie daje stan naprężeń bardzo bliski (z zapasem w bezpieczną stronę) danym eksperymentalnym. Również dla porównania poza ścisłym zakresem normy, tj. dla mimośrodu $1/3d > 1/4d$.

Zbliżone wyniki w zakresie obciążeń przedstawionych w obliczeniach świadczą o dobrej zgodności PN z danymi doświadczalnymi.

Prowadzone badania modelowe spełniły większość warunków z punktu widzenia analizy wymiarowej. Porównanie wyników otrzymanych z badań w skali naturalnej i modelowej wykazało dużą zbieżność.

W analizie nie uwzględniono wpływu temperatury zarówno materiału składowanego, jak i warunków atmosferycznych, zjawisk reologicznych, osiadania fundamentów, niedoskonałości wykonania, które mogą znacząco oddziaływać na stan naprężeń.

Uwzględnienie współpracy materiału składowanego i ściany silosu oraz zarysowania w analizie numerycznej będzie kolejnym krokiem w celu sprecyzowania tezy pracy doktorskiej. Uważam, że najlepiej rzeczywistości odpowiadałaby metoda iteracyjna obliczeń: w pierwszym kroku w oparciu o analizę liniową należałoby wyznaczyć miejsca maksymalnych naprężeń rozciągających, w kolejnym kroku przyjęć te partie płaszcza silosu jako zarysowane, obciążyć i obliczyć konstrukcję ponownie. Jeśli w tym kroku naprężenia przekroczą wartości rysujące, to do kolejnych obliczeń przyjęć partie płaszcza jako zarysowane. Podparcie ściany przez materiał składowany można przedstawić jako więzi podatne.

Różnica między wynikami w badaniach doświadczalnych naporu poziomego w modelach silosów i silosach w skali naturalnej nasuwa interesujące pola do rozważań, co powoduje większe nierównomierności naporu w silosach w skali naturalnej.

LITERATURA

1. Kobiak J., Stachurski W.: Konstrukcje żelbetowe, część II, Arkady, Warszawa 1969.

2. Kamiński M.: Badania naporu bezkohezyjnych materiałów sypkich w silosach. Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1986.
3. Kamiński M., Zubrzycki M.: Żelbetowe silosy na zboże. Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1985.
4. Podręcznik użytkownika, RoboBAT, Kraków.
5. Kamiński M., Zubrzycki M.: Badania wpływu sposobów opróżniania na napór poziomy w cylindrycznych komorach żelbetowych na zboże. Komunikat Nr J-2/K-38/77, Wrocław 1977.
6. Wróblewski R.: Stan naprężeń w ścianach silosów częściowo sprężonych. Raport Serii PRE nr 16/94, Wrocław 1994.
7. Łapko A., Piwnik J.: Statyka walcowej komory silosu współpracującej z materiałem sypkim. Żelbetowe i sprężone zbiorniki na materiały sypkie i ciecze, Wrocław – Szklarska Poręba, grudzień 1992, 45-52.
8. Holenda M., Horabik J., Thompson S. A., Ross I. J.: Asymetria naporu wywołana niesymetrycznym napełnianiem i opróżnianiem silosu zbożowego. Żelbetowe i sprężone zbiorniki na materiały sypkie i ciecze, Świeradów Zdrój, październik 2000, 143-150.
9. Kobiela S., Tatko R.: The Influence of External Impulsive Loads on Horizontal Pressure Distribution in Silo. Challenges to Civil and Mechanical Engineering in 2000 and Beyond, Wrocław, June 2000, 93-102.
10. Maj M.: Characteristic Pressure of Bulk Material against Silo Wall. Research Methodology of Concrete Structures Organized by Polish Academy of Sciences Branch, Wrocław, 59-71.
11. Ooi J. Y., She K. M.: Finite Element Analysis of Wall Pressure in Imperfect Silos. International Journal Solids Structures, Vol. 34 No. 16, 2061-2072, Pergamon 1997, 2061-2072.
12. Godoy L. A.: Stresses and pressures in thin-walled structures with damage and imperfection. Thin-Walled Structures 32 (1998) 181-206, Elsevier 1998, 181-206.
13. PN-B-03262:2002 Silosy na materiały sypkie. Obliczenia statyczne, projektowe wykonawstwo i eksploatacja.
14. ENV1992-4:1998 Eurocode 2 : Design of concrete structures.