



MACIEJ MAŚLAKOWSKI, *m.maslakowski@il.pw.edu.pl*

GRZEGORZ BARTNIK, *g.bartnik@il.pw.edu.pl*

MIROSŁAW BUKOWSKI

Zakład Geotechniki i Budowli Podziemnych

Politechnika Warszawska

AWARIA SILOSU ZBOŻOWEGO

FAILURE OF STEEL GRAIN SILOS

Streszczenie Silos zbożowy – stalowy posadowiony na fundamencie żelbetowym – pierścieniowym przy pierwszym zasypie uległ nadmiernemu przechyleniu. Awaria wystąpiła w jednym z czterech silosów zlokalizowanych w bliskim sąsiedztwie komory technologicznej. Komorę technologiczną wykonano wcześniej z uwagi, że jest posadowiona 2,5 m głębiej w stosunku do silosu. Badania kontrolne podłoża gruntowego oraz obliczenia potwierdziły, że przyczyną nadmiernego przechylenia silosu było częściowe jego posadowienie na nasypie gliniastym wykonanym w rozkopie pod komorę technologiczną.

Abstract Steel grain silos – founded on reinforced concrete ring foundation tilted excessively after being filled for the first time. Failure occurred in one of the four silos located in the vicinity of technology chamber. The technology chamber was erected earlier, because it was founded 2.5 m deeper in relation to the silo. In situ tests and calculations confirmed that the reason for the excessive inclination of the silo was partial foundation on clayey man-made fill in the excavation area of technology chamber.

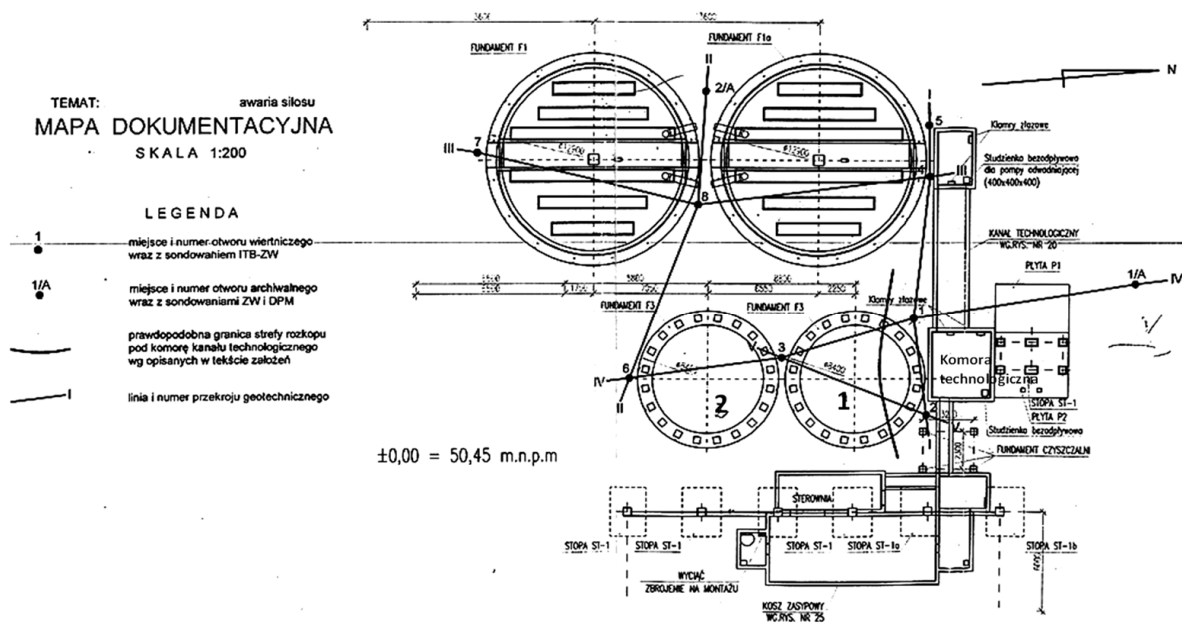
1. Wstęp

W referacie przeanalizowano przyczyny nadmiernego przechylenia silosu zbożowego o konstrukcji stalowej posadowionego na żelbetowym fundamencie pierścieniowym. Widok ogólny analizowanego silosu nr 1 wraz z urządzeniami zasypowymi i obudową suszarni ilustruje fot. 1, lokalizację w planie rys. 1.

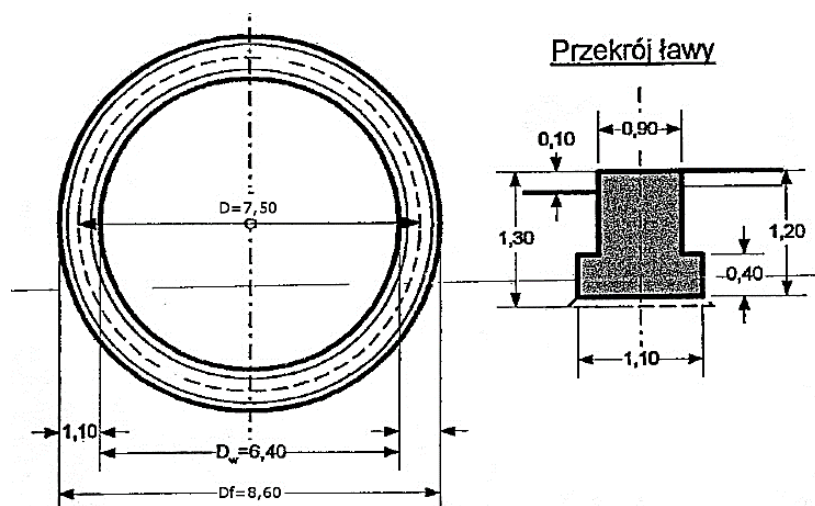
Rzut fundamentu pierścieniowego F3 silosu nr 1 pokazano na rys. 2. Po napełnieniu silosu nr 2 zbożem przystąpiono do napełniania silosu nr 1 (rys. 1). Przy napełnieniu silosu nr 1 do wartości ~4000 kN (~0,85 ładowności wynoszącej 4700 kN) wystąpiło jego przechylenie w kierunku komory technologicznej (rys. 3). Maksymalna różnica osiadań fundamentu na osi stalowych stóp silosu wynosiła ~5,0 cm (rys. 3). W wyniku nadmiernego przechylenia silosu nr 1 wystąpiło wygięcie pionowej obudowy podnośników kubełkowych (fot. 1).



Fot. 1. Widok ogólny silosu nr 1



Rys. 1. Lokalizacja silosów oraz badań kontrolnych



Rys. 2. Rzut fundamentu pierścieniowego F3 silosu nr 1

2. Analiza przyczyn

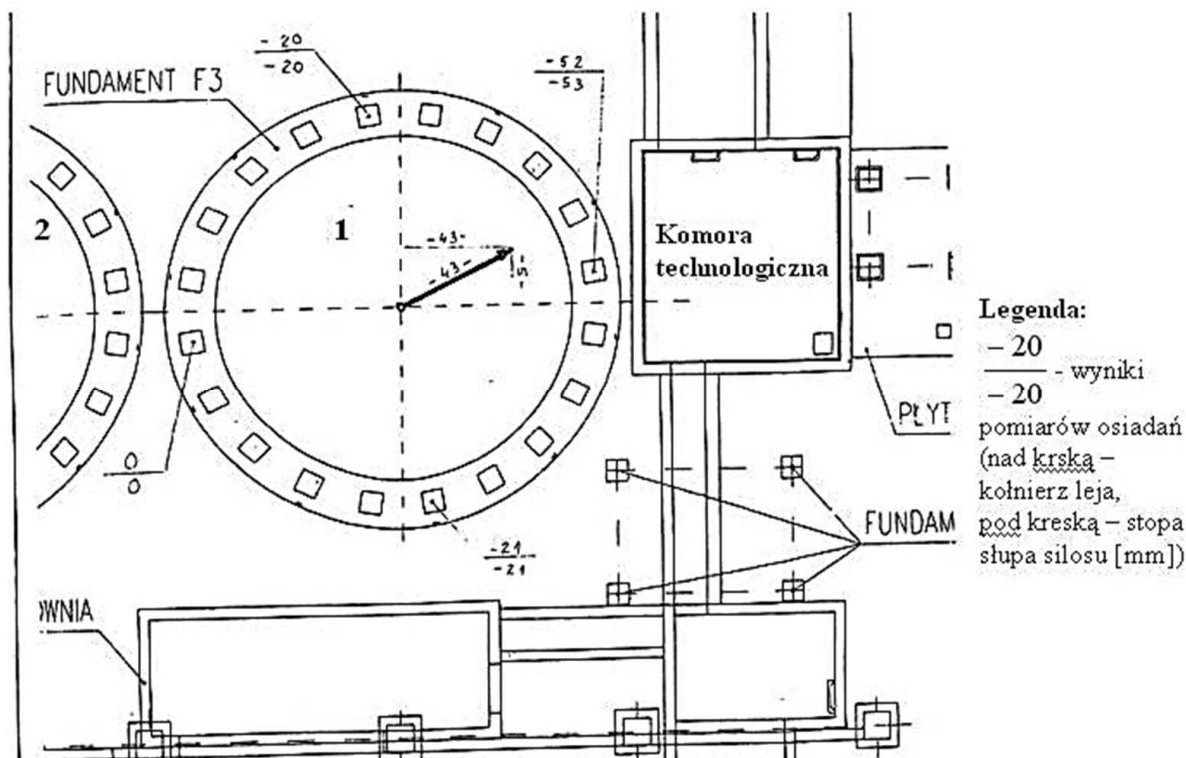
Komora technologiczna (rys. 1) posadowiona jest $\sim 2,55$ m głębiej w stosunku do sąsiedniego fundamentu F3 silosu nr 1. W pierwszej kolejności wykonano wykop pod komorę technologiczną. Z dokumentacji fotograficznej budowy (fot. 2) wynika, że wokół wcześniej wykonanych wykopów istniały rozkopy obejmujące obszar posadowienia fundamentu F3. Prawdopodobna granica rozkopu została zaznaczona na rys. 1.



Fot. 2. Widok rozkopów wokół komór technologicznych

Badania kontrolne podłoża silosów po awarii sondą ITB-ZW z końcówką krzyżakową przy otworach 1,2 (rys. 4) wskazują na zaleganie pod częścią fundamentu F3 od strony komory technologicznej gliniastych gruntów o strukturze naruszonej (rys. 4).

Najmniejsza odległość w świetle pomiędzy ścianą boczną komory a fundamentem F3 wynosi ~ 25 cm (rys. 3).



Rys. 3. Wyniki pomiarów geodezyjnych fundamentu silosu nr 1

Przy pełnym zasypie silosów obciążenie charakterystyczne gruntu pod ławą fundamentu F3 osiąga wartość $Q_n = 239,78$ kN/m, obliczeniowe (współczynniki obciążenia γ_f równe 1,1 i 1,25) $Q_r = 293,68$ kN/m. Obciążenie gruntu w okresie awarii wynosiło $\sim Q_n = 210,06$ kN/m. Bezpośrednio pod fundamentem F3 zalegają gliny piaszczyste. Na podstawie badań sondą ITB-ZW oraz normy [1] obliczeniowe wartości parametrów gruntów rodzimych występujących we wzorze Z1-10 (norma [1]) ustalono: $\gamma_D^r = \gamma_B^r = 19,80$ kN/m³, $\phi_u = 14^\circ$, $c_u^r = 60,75$ kPa.

Jednostkowy nacisk graniczny wynosi (rys. 2)

$$q_f = 60,75 \cdot 10,37 + 1,2 \cdot 19,80 \cdot 3,59 + 1,1 \cdot 19,80 \cdot 0,48 = 664,52 \text{ kPa.}$$

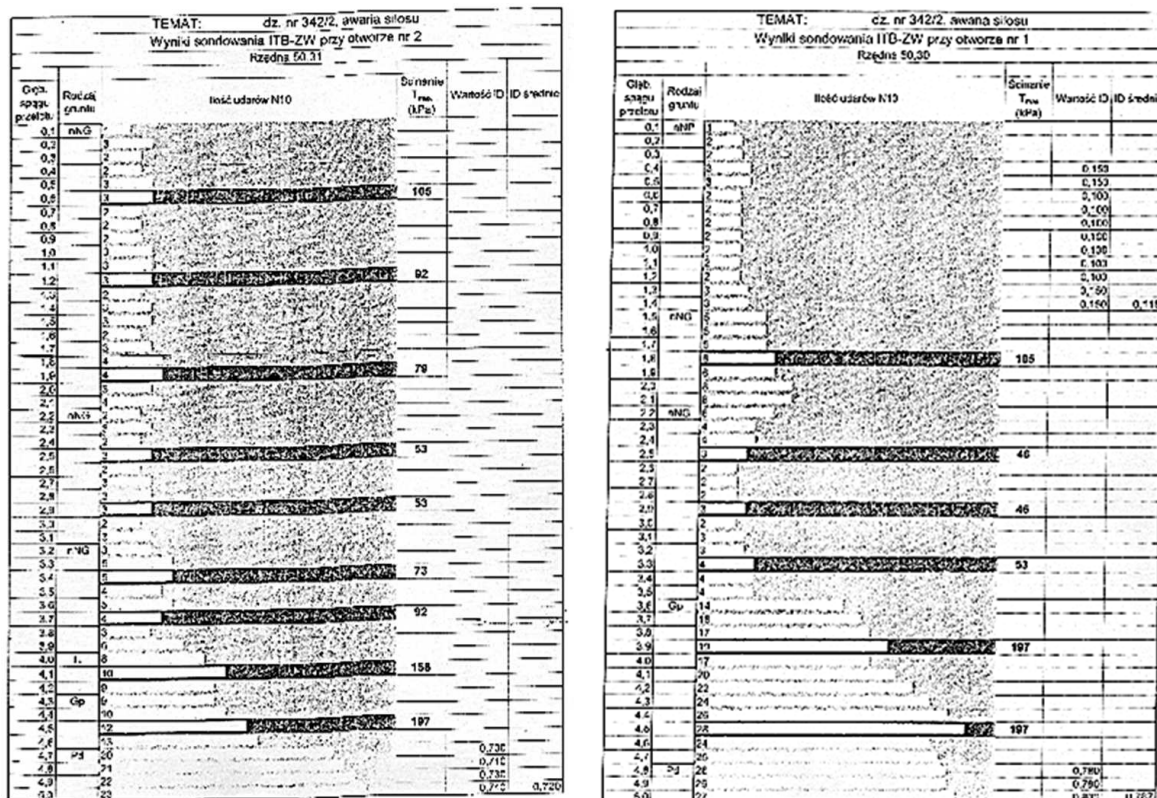
Nacisk dopuszczalny według [1] przy dominującej metodzie A ustalania parametrów

$$q_{dop} = 0,90 \cdot 664,52 = 598,0 \text{ kPa.}$$

Nacisk obliczeniowy fundamentów przy pełnym zasypie

$$q_r = 293,68 / 1,1 = 267,0 \text{ kPa,}$$

co wskazuje na zachowanie warunku I stanu granicznego ($267,0 < 598,0$).



Rys. 4 Wyniki sondowań sondą ITB-ZW przy otworach 1 i 2

Analizowano również nośność podłoża nasykowego fundamentu F3 od strony komory technologicznej. Biorąc pod uwagę wyniki badań kontrolnych (rys. 4) obliczeniowe parametry podłoża ustalono: $\phi'_u = 14^\circ$, $c'_u = 30$, kPa, $\gamma'_D = \gamma'_B = 19,80$ kN/m³.

Nacisk graniczny na podłożę według wzoru Z1-10 [1] wyniesie:

$$q_f = 30 \cdot 10,37 + 1,2 \cdot 19,8 \cdot 3,59 + 1,1 \cdot 19,80 \cdot 0,48 = 406,83 \text{ kPa}$$

dopuszczalny $q_{dop} = 0,9 \cdot 406,84 = 366,15 \text{ kPa} > 267,0 \text{ kPa}$.

Wynik powyższy wskazuje, że od strony komory został zachowany warunek I stanu granicznego. Sprawdzone również warunek nośności od strony komory technologicznej według Eurokodu 7 [4], [2].

Obliczeniowy nacisk na grunt pod ławę pierścieniową (współczynnik obciążenia γ_f równe 1,35, 1,5) wynosi $q_r = 321,5$ kPa. Wartość charakterystyczna parametrów wytrzymałościowych $\phi'^n_u = 15,5^\circ$, $c'^n_u = 33,3$ kPa, a zatem:

$$q_f = 33 \cdot 11 + 1,2 \cdot 19,8 \cdot 4,0 + 1,1 \cdot 19,80 \cdot 1,73 = 495,72 \text{ kPa}$$

nacisk dopuszczalny $q_{dop} = 495,72 / 1,4 = 354,07 > 321,5 \text{ kPa}$

Można przyjąć, że oszacowanie nośności według Eurokodu 7 należy zaliczyć do oszacowania ostrożnego. Tak więc przyczyną nadmiernego przechylenia silosu są różnice osiadań w warunkach zachowania I stanu granicznego.

Osiadanie fundamentu F3 od strony silosu nr 2 (rys. 1) jest sumą osiadań samego silosu (na gruntach rodzimych) oraz wpływu silosu nr 2. Podstawą analizy osiadań sztywnego fundamentu pierścieniowego był wzór Fiedotowa:

$$s = \frac{Q_{ng}}{8R_0E_0} \ln\left(1 + \frac{z_{max}}{\Delta R}\right), \quad (1)$$

gdzie:

Q_{ng} – globalne charakterystyczne obciążenie podłoża,

E_0 – pierwotny moduł odkształcenia gruntu,

$R_0 = 0,5 (R_z + R_w) - R_z$ i R_w odpowiednio oznaczają promień zewnętrzny i wewnętrzny fundamentu,

z_{max} – miąższość strefy aktywnej fundamentu,

$\Delta R = 0,5 (R_z - R_w)$.

W okresie awarii obciążenie $Q_n = 210,06 \cdot 3,14 \cdot 7,50 = 4946,91$ kN: pozostałe parametry fundamentu (rys. 2): $R_0 = 3,85$ m, $\Delta R = 0,45$ m, $z_{max} = 3,0$ m. Dla rodzimych glin piaszczystych moduł E_0 według [1] przy $c_u^n = 67,5$ kPa wynosi co najmniej $E_0 \cong 50000$ kPa.

Podstawiając dane do wzoru (1) uzyskuje się osiadanie fundamentu F3 silosu 1 od strony silosu 2 $s_1 = 0,64$ cm. Osiadanie silosu 2 posadowionego na gruntach rodzimych można wyniesie $s_2 = 0,64 \cdot 239,78 / 210,06 = 0,73$ cm. Odległość pomiędzy fundamentami silosów nr 1 i 2 (rys. 3) wynosi $\sim 0,4$ m. Równanie niecki osiadań poza obszarem obciążonym można ustalić na podstawie modelu osiadań jednoosiowych [3]. Ogólna postać równania zapisuje się:

$$a \frac{d^2 s}{dx^2} - bs = 0, \quad (2)$$

gdzie: a i b są stałymi współczynnikami zależnymi od współczynnika Poissona ν gruntu [3].

Uwzględniając warunek brzegowy $\alpha \rightarrow \infty$, $s \rightarrow 0$, ostateczne równanie niecki osiadań opisuje wzór przy $\nu = 0$

$$s = s_2 \exp\left(-\frac{2,45x}{z_{max}}\right), \quad (3)$$

gdzie: s_2 jest osiadań fundamentu silosu 2 od strony silosu 1 (rys. 3).

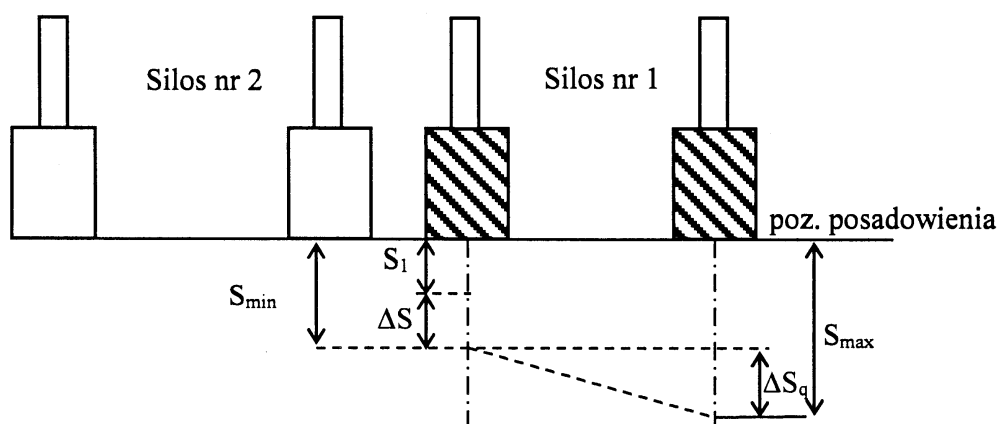
Wpływ osiadań silosu 2 na osiadanie najbliższej krawędzi fundamentu silosu 1 wyniesie $\Delta s = 0,73 \exp(-2,45 \cdot 0,40 / 3,0) = 0,52$ cm. Osiadanie minimalne krawędzi silosu 1 wyniesie od strony silosu 2 (rys. 5) jest sumą $s_{min} = 0,64 + 0,52 = 1,16$ cm. Osiadanie maksymalne przeciwległej krawędzi fundamentu (od strony komory technologicznej) jest sumą s_{min} i zmierzonej geodezyjnie różnicy osiadań (rys. 5) $\Delta s = 5,0$ cm a zatem $s_{max} = 1,16 + 5,0 = 6,16$ cm. Strukturę wewnętrzną współczynnika materiałowego γ_m według [1] określa się

$$\gamma_m = (1 \pm \nu) \quad (4)$$

gdzie: ν jest współczynnikiem zmienności według rozkładu normalnego. Uwzględniając wzór (1) i (4) można ustalić wartość ν dla E_0 podłoża przechylonego silosu, wynosi on $\nu = 0,68$.

Poziom $\nu = 0,68$ wskazuje jednoznacznie na ingerencję człowieka w formie wbudowanej części nasypowej podłoża fundamentu F3. Obliczona wartość modułu podłoża pod fundamentu silosu 1 od strony komory technologicznej (rys. 5) wyniosła $E_{min} = 95424,0$ kPa co odpowiada gruntom słabym.

Praktyka geotechniczna wskazuje, że wartość v dla modułu ścisłości pakietu gruntowego na obszarze obiektu budowlanego nie przekracza 0,30.



Rys. 5. Schemat maksymalnych różnic osiadań pod fundamentem silosu nr 1.

Grunty spoiste w nasypowej strefie podłoża prawdopodobnie pochodziły z wcześniej wykonanych rozkopów pod komorę technologiczną w okresie zimowym (fot. 2). Okres wykonywania wykopu pod fundament F3 również nie był korzystny ze względu na opady deszczowe (marzec).

W celu usunięcia awarii opróżniono silos nr 1. Wewnątrz pierścieniowej przestrzeni wykonano płytę żelbetową zmonolityzowaną z istniejącą ławą pierścieniową (zbrojenie wklejono w nawiercone otwory w pierścieniu). Zbrojenie zastosowano obustronnie przy grubości płyty ~0,40 m. Silos wypionowano przy pomocy podkładek stalowych pod stopami silosu.

3. Wnioski

Przyczyną nadmiernego przechylenia silosu nr 1 było częściowe posadowienie fundamentu pierścieniowego na niewłaściwie wykonanym nasypie w strefie rozkopów.

W przypadku obiektów blisko zlokalizowanych w strefie o skokowo zróżnicowanej głębokości posadowienia naturalną rzeczą jest obecność rozkopów w strefie posadowienia obiektu sąsiedniego. W fazie projektowej należy ustalić technologię robót ziemnych w strefie rozkopu podłoża (grunty sypkie lub stabilizowane cementem).

Zdefiniowanie w Eurokodzie 7 [2] współczynników częściowych do parametrów geotechnicznych γ_m tylko w odniesieniu do wartości jest mniej korzystne w stosunku do normy PN-81/B-03020 [1]

Literatura

1. Polska Norma PN-81/B-03020, Posadowienie bezpośrednie budowli.
2. Polska Norma PN-EN 1997-1, Eurokod 7, Projektowanie geotechniczne, Część 1, Zasady Ogólne.
3. Własow W.Z., Leontiev N.N., Baki, plity i obołocki na uprugom osnovanii; Gosudarstvennoje Izdatielstvo Fizyko-Matematičeskoj Literatury, Moskwa, 1960.
4. Wysokiński L., Kotlicki W., Godlewski T., Projektowanie geotechniczne według Eurokodu 7, ITB, Warszawa, 2011.