

Niektóre aspekty bezpiecznego użytkowania silosów

Dr inż. Marek Maj, Politechnika Wroclawska

1. Wprowadzenie

Jednym ze wskaźników niezawodności działania konstrukcji jest prawdopodobieństwo przetrwania P_B

$$P_B = \int_{\Omega} f_X(X) dx \quad (1)$$

gdzie $f_X(X)$, jest funkcją gęstości zmiennej X , $X = (X_i) = (\Delta T, p_h, T, w, a_{ct}, \dots, D, h, \alpha, „EJ”, A_s, f_{cd}, f_{yd}, e_{s1}, a_{th})$ a Ω jest obszarem bezpieczeństwa konstrukcji (rys.1). Zmienne X_i to parametry związane z obciążeniami „S” (oddziaływania), jak p_h (napór poziomy, aeracja i homogenizacja, obciążenia skupione itp.), T i ΔT (pole i gradient temperatury materiału oraz następczynienie i zmiany dobowe), w (wiatr), a_{ct} (inne obciążenia np. od przemieszczeń spowodowanych np. skurczem, obciążenia wyjątkowe) etc, oraz parametry związane z wytrzymałością konstrukcji „R” (odporność) – D – średnica silosu, h – wysokość silosu, α – współczynnik temperatury, „EJ” – sztywność ściany, f_{yd} – wytrzymałość stali, f_{cd} – wytrzymałość betonu, A_s – powierzchnia stali zbrojeniowej, e_{s1} – mimośrody, jakość betonu i stali, oraz inne wpływy a_{th} (imperfekcje, rysy etc). Zmienne X_i są transponowane do wspólnego mianownika, np. sprowadzone do naprężeń lub powierzchni zbrojenia. Ogólnie w metodzie tej konieczna jest znajomość funkcji gęstości $f_X(X_i)$ poszczególnych parametrów oraz funkcja rozkładu łącznego wszystkich parametrów funkcji. Jest to metoda Poziomu 3 obliczania niezawodności konstrukcji. Prawdopodobieństwo nieawaryjności może być zapisane jako zapas bezpieczeństwa:

$$D = R - S \geq 0 \quad (2)$$

Niezawodność opisuje przez indeks niezawodności β_B :

$$P_B = P(\Delta > 0), \beta_B = \Phi^{-1}(P_B) = -\Phi^{-1}(P_F) \quad (3)$$

gdzie $P_F = 1 - P_B = \int_F f_X(x) dx$ jest prawdopodobieństwem awarii i F jest obszarem awarii, obszar na zewnątrz Ω . Wskaźnik β interpretowany jest jako minimum odległości pomiędzy punktem centralnym a powierzchnią stanu granicznego (rys.1). Rozwiązanie równania (1) jest skomplikowane. W [1, 2, 3, 4] podano kilka uproszczonych metod i założeń dla rozwiązania tego zagadnienia. Uproszczenie może po-

legać na założeniu łącznych rozkładów prawdopodobieństwa typu Gausa i wtedy powierzchnia stanu awarii jest hiperpłaszczyzną i prawdopodobieństwo awarii jest prostym wyrażeniem:

$$P_F = \Phi(-\beta_C) \quad (4)$$

gdzie β_C to moment drugiego rzędu, który jest wskaźnikiem niezawodności dla zagadnienia niezawodności. W miejsce wskaźnika β_C możemy postużyć się indeksem globalnym β_G lub wskaźnikiem niezawodności β_{HL} [2]. Innymi słowy, postępujemy się metodami Poziomu 2 (SORM) i Poziomu 1 (FORM) dla oceny niezawodności. W szczególności gdy równanie (2) może być opisane w formie liniowej:

$$\Delta = a_0 + \sum_i (a_i x_i) \geq 0 \quad (5)$$

wtedy dwa pierwsze momenty przybierają postać:

$$a_{sr} = a_0 + \sum_i (a_i x_{mi}); \mu_d^2 = \sum_i (a_i^2 x_i^2) \quad (6)$$

Stan graniczny $\Delta^* = 0$ daje następujący wskaźnik bezpieczeństwa:

$$\beta \leq \Delta_m^- / \mu_d \text{ i } \Delta = (R_m - S_m) / ((\mu_R^2 + \mu_S^2)^{1/2}) \quad (7)$$

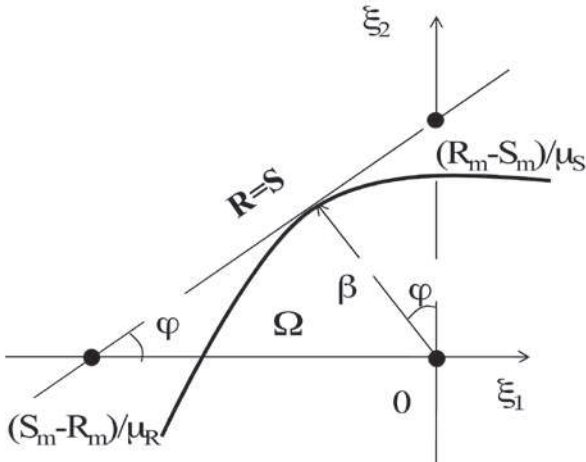
gdzie R_m i S_m to wartości średnie, a μ_R^2 i μ_S^2 to wariancje.

$$\beta = (R_m - S_m) / \sqrt{(\mu_R^2 + \mu_S^2)} \quad (8)$$

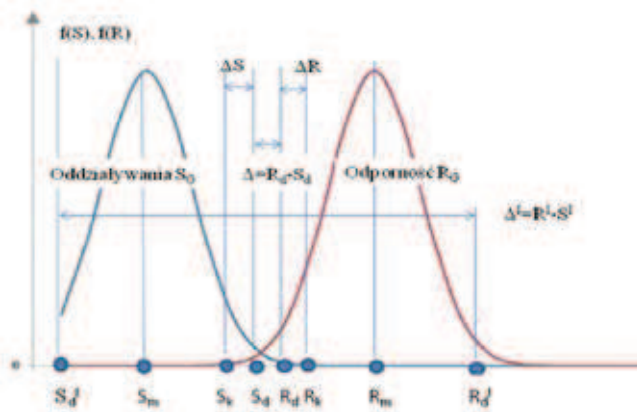
W przestrzeni zmiennych standaryzowanych $\xi_i = (x_i - x_{im}) / \mu_i$ β jest najkrótszą odległością od powierzchni granicznej (rys.1). Jeżeli R i S są wydzielone wtedy wskaźnik β wg SORM jest podzielony na dwa wskaźniki składowe [7]

$$(S - S_m) / \mu_S \geq \beta_S \text{ oraz } (R - R_m) / \mu_R \geq \beta_R \quad (9)$$

Upraszczając zagadnienie bezpieczeństwa $\Delta = R - S$ do jednowymiarowego zagadnienia bezpieczeństwa, współczynnik Δ jest pokazany na rysunku 2, gdzie $\Delta S = S_d - S_k$, $\Delta R = R_d - R_k$. Rozpatrując szerzej zagadnienie bezpieczeństwa można też postużyć się współczynnikiem opisującym „pewność” destrukcji $\Delta' = S_d' - R_d'$, gdzie parametry S_d' i R_d' są wartościami



Rys. 1. Wskaźnik β jako minimum odległości pomiędzy powierzchnią graniczną i punktem centralnym



Rys. 2. Δ jako minimum zapasu bezpieczeństwa, a Δ' jako „pewność” zniszczenia

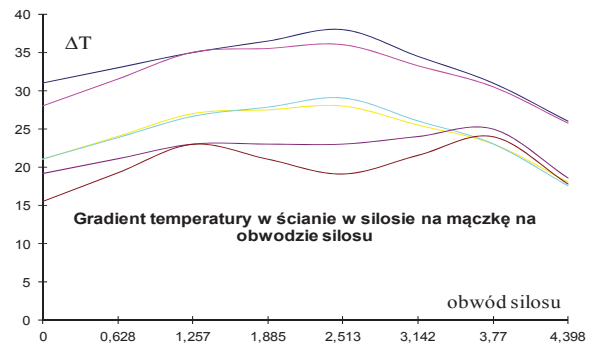
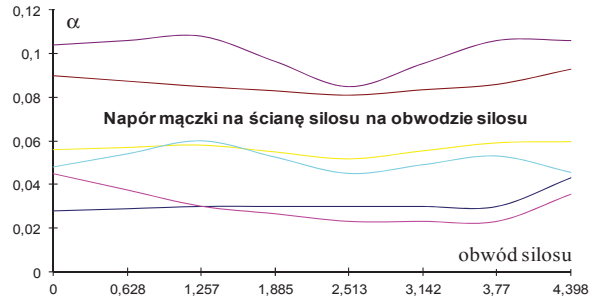
obliczeniowymi po przeciwnej stronie rozkładów S i R. Można zauważyć, że dla idealnej kontroli wielkości Δ i Δ' są blisko siebie.

Mamy dwa przypadki oceny bezpieczeństwa konstrukcji: pierwszy „a posteriori” budowli istniejących i wyeksploatowanych, drugi „a priori” obiektów projektowanych. W pracy skoncentrowano się na pierwszym przypadku oceny konstrukcji.

2. Czynniki zwiększające wartość wariancji μ_a zmiennych parametrów związanych z oceną bezpieczeństwa

Rozkłady naporu i temperatury stosowane w normatywach są weryfikowane przez badania eksperymentalne. Wartości charakterystyczne i obliczeniowe otrzymywane z badań zależą od jakości liczebności zbioru zgromadzonych danych. Wartości te są jednak obciążone błędami, które trzeba wziąć pod uwagę podczas szacowania wartości obliczeniowych parametrów. Błędy mogą mieć źródło w rodzaju i czułości czujników, ich wielkości, sposobie pomiaru i ingerencji w materiał składowany w silosie, w przekazie da-

nych do bazy wyników i w ich sposobie gromadzenia, czyli sprawności tzw. interfejsów. W [5] szacuje się błędy „powodowane” przez interfejsy nawet na 10%. Dobór odpowiedniej funkcji gęstości (rozkłady Gausa, Gumbela, Rayleigh’a, empiryczne, ekstremalne etc) dla opisywanych parametrów oraz sama natura rozkładu jak skośność, dwumodalność etc mają także wpływ na wielkości charakterystyczne parametrów.



Rys. 3. Napór i pole temperatury w silosach na mączkę wapienną w ścianie silosu [6]

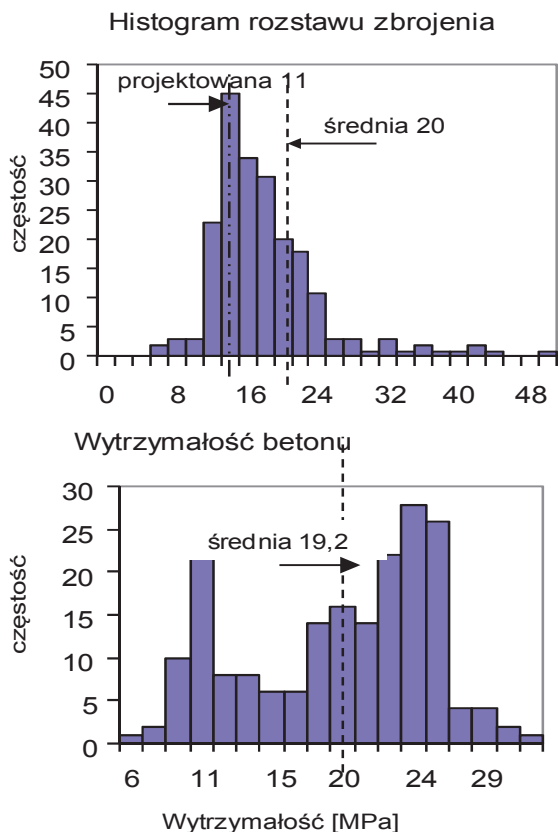
Zmienności naporu wzdłuż obwodu silosu wg badań [6] są pokazane na rysunku 3. Zmienność parametrów wytrzymałościowych pokazano na rysunku 4. Wartości obliczeniowe R_{di} , S_{di} charakterystyczne R_{ki} , S_{ki} są liczone wg formuł liniowych (9) za pomocą częściowych współczynników niezawodności β_{Si} , β_{Ri} [1]. Według tego rozdzielenia zmiennych parametrów na „oddziaływania” i „odporność” obliczamy częściowe współczynniki bezpieczeństwa γ_{fi} , γ_{mi} :

$$\begin{aligned} \gamma_{fi} &= S_{mi} / S_{ki} * (1 + \beta_{Si} * v_{Si}); \\ \gamma_{fi} &= (1 + \beta_{Si} * v_{Si}') / (1 + t_S * v_i); \\ \gamma_{mi} &= (1 + \beta_{Ri} * v_{Ri}') / (1 + t_R * v_i) \end{aligned} \quad (10)$$

gdzie S_m , R_m – wartości średnie, v_i – współczynnik zmienności, v_i' – współczynnik zmienności wrażliwy na zmienność wariancji μ_a^2 :

$$\mu_i' = (\mu_i^2 + \mu_a^2)^{1/2} / (S_{mi}) \quad (11)$$

μ_a – odchylenie standardowe, t_S – współczynnik kalibracji, tj. kwanty prawdopodobieństwa.



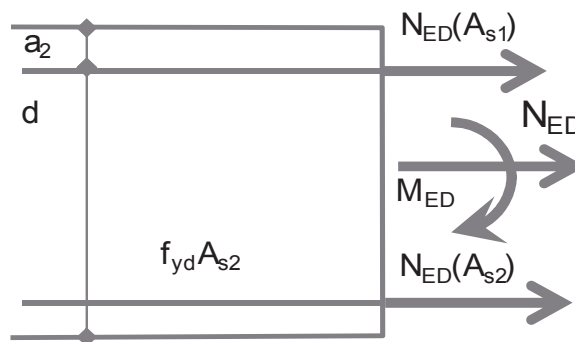
Rys. 4. Histogram parametrów wytrzymałościowych dla ściany silosu

Zmienność v_i ma decydujący wpływ na wartość wskaźnika β i częściowych współczynników γ_{fi} , γ_{mi} . Zmienność ta ma swoje odzwierciedlenie w wartości współczynnika k powiększającego lub zmniejszającego wartość charakterystyczną parametrów $(R_{ki}; S_{ki}) = k_i * (R_{ki}; S_{ki})$ [7]. Przykładowo, dla obciążeń dynamicznych, $k_{QA} = 1,0-2$; jednoczesność obciążeń $k_{Acfi} = 0,6-1,0$; współczynniki materiałowe $k_{mat} = 1,1-1,5$; zmiana geometrii konstrukcji $k_{ccs1} = 1,0-1,3$; konsekwencje zniszczenia $k_{ccc} = 1,0-1,5$; współczynnik przetrwania konstrukcji $k_{wc} = 1,0-1,4$; zmęczenie materiału $k_{mf} = 1,1-1,5$; ważność konstrukcji $k_{cim} = 1,0-1,3$; sposób zniszczenia konstrukcji $k_{cc} = 1,0-1,3$; okresowe kontrole $k_{ccon} = 1,0-1,3$; imperfekcje $k_{cim} = 1,0-1,4$; odpowiedniość zastosowanych schematów statycznych $k_{mis} = 1,0-1,5$.

3. Współczynniki bezpieczeństwa obliczane dla silosów

Biorąc pod uwagę warunek równowagi w przekroju ściany silosu możemy napisać następującą formułę liniową (12):

$$\begin{aligned} N_{ED} e_{s1} &\leq N_{Rd} e_{s1} = f_{yd} A_{s2} (d - a_2); \\ N_{Sd} &\leq N_{Rd} = f_{yd} A_{s1} - f_{yd} A_{s2} \end{aligned} \quad (12)$$

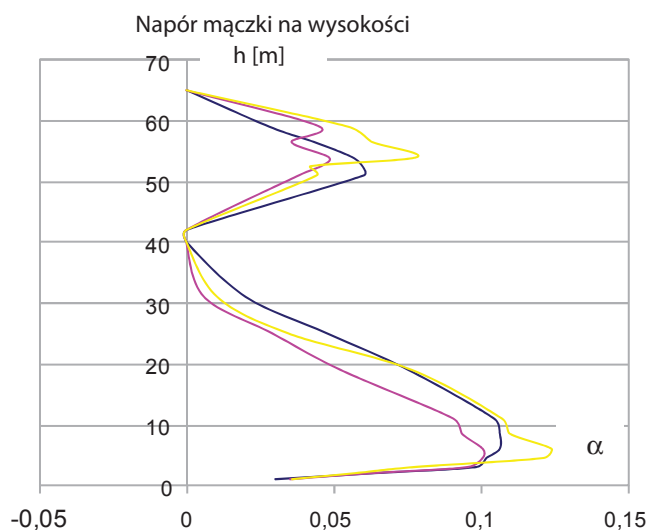


Rys. 5. Stan równowagi w przekroju ściany silosu

Dodatkowo N_{ED} i M_{ED} są spowodowane gradientem temperatury ΔT , $N_{ED} = \rho_h D/2$, $M_{ED} = \alpha \Delta T E J/h$. Zastępując wartości graniczne naprężeń f_{yd} naprężeniami σ_{s1} , σ_{s2} możemy napisać

$$\begin{aligned} N_{ED} e_{s1} &\leq N_{Rd} e_{s1} = \sigma_{s1} A_{s2} (d - a_2); \\ N_{Sd} &\leq N_{Rd} = \sigma_{s1} A_{s1} - \sigma_{s2} A_{s2} \end{aligned} \quad (13)$$

gdzie $e_{s2} = e_0 + d/2$; $e_M = \eta M_{ED}/N_{ED}$; gdzie e_{s2} , e_M są mimośrodkami, η – współczynnik wpływu przemieszczeń II rzędu. W równaniu (12) występuje zbyt duża ilość zmiennych parametrów, aby zagadnienie było prosto rozwiązywalne. Dlatego niektóre wartości trzeba uznać za deterministyczne i zastosować proste metody Poziomu 1 i 2 niezawodności, czyli dla każdej zmiennej obliczamy średnią, współczynnik zmienności oraz jej wartość charakterystyczną, co w rezultacie daje oddzielane częściowe współczynniki bezpieczeństwa dla każdego parametru. Innym sposobem



Rys. 6. Typowy diagram naporu mączki na ściany silosu podczas napełniania i opróżniania



Rys. 7. Typowe nieprzewidziane projektem usterki elementu prefabrykowanego silosu na gips

oceny bezpieczeństwa (2) pozostaje globalny współczynnik ω opisany równaniem:

$$R_k \geq \omega S_k \quad (14)$$

Obliczając wartości częściowych współczynników metodą FORM przenosimy je do metody SORM obliczając wartości graniczne (obliczeniowe). Wartości współczynnika ω zaprezentowane w pracy [8, 9] zawierają się w przedziale od 0,4 do 1,4. Następnym współczynnikiem bezpieczeństwa jest β opisany równaniem: $\beta = z_m / \sigma_z$ i skojarzony z nim wskaźnik niezawodności ryzyka awarii $p_f = \Phi(-\beta)$, a transponowanym jako prawdopodobieństwo ryzyka awarii, gdzie z_m i σ_z są średnią i odchyleniem standardowym funkcji Δ z równania (2) a Φ jest funkcją Laplace'a. Dla $\Delta_m \geq \beta \sigma_z$ konstrukcja pracuje w obszarze bezpiecznym. Wartość współczynnika β w normach europejskich waha się w zakresie 3,7 ÷ 6,7, a $p_f = 10^{-3} \div 3 \cdot 10^{-8}$. Współczynnik β bywa rozdzielony na dwa współczynniki β_R i β_S związane z obciążeniami i wytrzymałością. Zgodnie z [11], wyróżniamy 4 klasy niezawodności RC1, RC2, RC3 oraz proponowaną klasę RCO. Dla konstrukcji ścian silosów w warunku $p(R \leq R_d; S \geq S_d) = \max$, gdzie R i S są niezależne $\beta = 3,7$ ($p_f = 10^{-4}$), $\beta_S = 2,59$ ($p_f = 0,005$), $\beta_R = 2,96$ ($p_f = 0,0015$). Zgodnie z [10] współczynnik γ_f jest równy 1,1 (dla temperatury), 1,2 ÷ 1,5 (dla naporu), a dla składowanego materiału przy idealnej kontroli sposobu użytkowania silo-

su γ_f wynosi 1,2 ÷ 1,35. Współczynnik koincydencji obciążeń jest równy 0,9. Zgodnie z [12], współczynnik γ_f może mieć wartość mniejszą niż 1,2 dla klasy RCO.

W przypadku silosów, gdzie obciążenie ścian od naporu jest większe niż obciążenie termiczne współczynnik γ_f może mieć wartość 1,3 dla klasy RCO. Współczynnik zmienności ma wartość w zakresie od 0,8 do 0,9 dla silosów, gdzie wpływ termiki jest porównywalny z wpływem naporu na wyężdzenie ściany.

4. Wnioski

Wartość globalnego współczynnika bezpieczeństwa obliczonego dla istniejących już oraz nowo projektowanych silosów waha się w szerokich granicach od 0,9 do 7 i zależy od sposobu eksploatacji i kondycji konstrukcji. Przy tak dużym rozproszeniu wartości współczynnika bezpieczeństwa, wskazane jest dla każdego wybudowanego silosu osobno i szczegółowo go oszacować. Pomocne dla oceny bezpieczeństwa jest obliczenie rozdzielonych współczynników β_R i β_S .

BIBLIOGRAFIA

- [1] Madsen H. O., 1986 Methods of structural safety, Prentice Hall
- [2] Hasofer, Lind '74," Exact and Invariant Second-moment Code Format, JEMD, ASCE
- [3] Faber M. H., 2006, Risk and safety in civil, surveying and enviro. engineer. Lecture Notes
- [4] Borges F., Castanheta. J. '71 Structural Safety. Laboratorio Nacional de Engenharia Civil
- [5] Leciejewski S., 2006, "The influence of culture differences on interfejs in computer application., Instytut Filozofii UAM. Sympozja Nr 20 (315)
- [6] Borcz A., Maj M., Trochanowski A., 1995, Guiding principles of silo designing, construction and operating, Prace Naukowe I-2, PWr 1991,
- [7] Murzewski J., Bezpieczeństwo Niezawodność konstrukcji inżynierskich, „Arkady”, 1989
- [8] Borcz A., Maj M., 2002, Intern. Conf. „Reinforced and Postten. concrete silos.”, Kraków
- [9] Kaminski M., Maj M., 2006 .Experimental and design loads of pressure of bulk materials against silo wall, Bulk Europe 2, Spain, Barcelona
- [10] Kaminski M., Maj M., 2000 Reliability analysis of the global safety index design for concrete silo., The 3d Israeli Conference for Conveying and Handling of Part.Sol., Israel
- [11] Pawlikowski J., Jaskulski R., Wiliński P., 2004, Oszacowanie Akceptowalnej Miary Zapasu Bezpieczeństwa Istniejących Konstrukcji z Betonu, Konferencje ITB Wwa Cedyna
- [12] Maj M., 2003 The, Statistical Estimation Of Loads Coincidence Factor For Silo For Hot Materials, Conference for Conveying and Handling of Particulate Solids, Budapeszt

Prenumerata 214,20 zł
ulgowa tylko 107,10 zł

www.przegladbudowlany.pl