

prof. dr hab. inż. Andrzej Łapko*

Procedury określania modułu sprężystości ośrodków sypkich składowanych w silosach

Testing procedures of modulus of elasticity of bulk solids stored in silo bins

Parametry odkształcalności ośrodków sypkich składowanych w silosach są konieczne do prawidłowego zaprojektowania ich konstrukcji, m.in. na dodatkowe obciążenie wywołane spadkiem temperatury otoczenia silosów. Obciążenie to, nazywane parciem termicznym, w ścianach silosów cylindrycznych wywołane jest obniżeniem się średniej temperatury ściany, z uwagi na opór, jaki stawia materiał sypki. W Eurokodzie 1 część 4 [1] podano wzór na wyznaczenie parcia termicznego p_{hT} opracowany wiele lat temu przez Theimera [2] dla cylindrycznych komór silosów stalowych. Wzór ten został wyprowadzony na podstawie definicji podatności ośrodka sypkiego i termicznych odkształceń ściany silosu

$$p_{hT} = \alpha_w \Delta T \frac{E_w}{t + (1 - \nu_s) \frac{E_w}{E_{sU}}}$$

gdzie:

 α_w – współczynnik rozszerzalności termicznej ściany silosu; ΔT – równomierne ochłodzenie ściany; r – promień cylindrycznej komory; t – grubość ściany; E_w – moduł sprężystości materiału ściany; ν_s – współczynnik Poissona ośrodka sypkiego; E_{sU} – efektywny moduł sprężystości ośrodka, wyznaczany na podstawie procedury podanej w Załączniku C [1].

W pracach badawczych kierowane przeze mnie zespołu wykazano, że parcie termiczne może wywołać istotne przeciążenie ścian silosów [3], [4], [5]. Podstawowym problemem obliczeniowym, z którym styka się projektant silosu, jest przyjęcie odpowiednich parametrów charakteryzujących podat-

ność składowanego ośrodka sypkiego, w tym modułu sprężystości E_s i współczynnika Poissona ν_s . Wartości tych parametrów w dużym stopniu zależą od stanu naprężenia w rozważanym materiale sypkim, nie mogą być więc przyjmowane jako wielkości stałe [7]. Konieczne jest doświadczalne wyznaczanie ich wartości w warunkach zbliżonych do rzeczywistych.

W artykule opisano i przedyskutowano procedury badawcze zamieszczone w Eurokodzie 1 część 4 [1] do wyznaczania modułu sprężystości ośrodków sypkich w aparacie pomiarowym, a także na przykładzie dużego modelu silosu przedstawiono własną koncepcję badania tego parametru, która zapewnia realistyczną ocenę uzyskanych wyników.

Normowe procedury wyznaczania modułu sprężystości ośrodka sypkiego

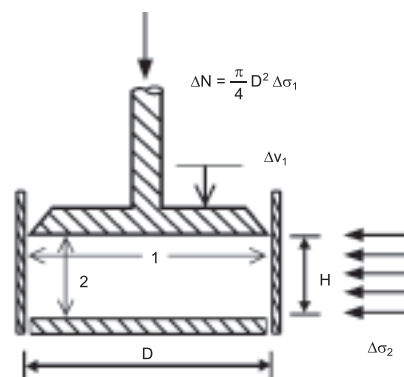
Urządzenie pomiarowe. Schemat geometryczny cylindrycznego aparatu, którego należy użyć do badań wg Eurokodu część 4 [1], pokazano na rysunku 1. Średnica D naczynia aparatu powinna być co najmniej 5-krotnie większa niż maksymalny wymiar cząstki ośrodka sypkiego i nie mniejsza niż 10-krotny wymiar średni cząstek. Wysokość próbki po zagęszczeniu musi wynosić $0,3D \div 0,4D$. Konstrukcja aparatu powinna spełniać następujące wymagania:

- kolistą płytą denną musi być odseparowana i niezależna od ścian;
- musi być zapewniona możliwość pomiaru odkształceń cylindrycznej ścianki zarówno poziomych, jak i pionowych;

- miejsca pomiaru odkształceń muszą być zlokalizowane w pewnej odległości od końców próbki;

- zmierzone odkształcenia muszą być proporcjonalne do naprężeń poziomych.

Określenie modułu sprężystości wymaga wyznaczenia poziomych naprężeń w ścianie aparatu. Należy je określić z odkształceń zmierzonych na zewnętrznej powierzchni przekroju pionowego ścianki, przyjmując, że ściana jest cienka. Zazwyczaj wymaga się, aby dolna płytka aparatu była oddzielona od ścian, co umożliwia pomiar naprężeń poziomych i pionowych oraz usytuowanie czujników pomiaru odkształceń w pewnej odległości od końców próbki.



Rys. 1. Schemat aparatu pomiarowego do określania modułu sprężystości ośrodka sypkiego wg PN-EN 1991-4 [1]: 1 – powierzchnie gładkie; 2 – powierzchnie szorstkie

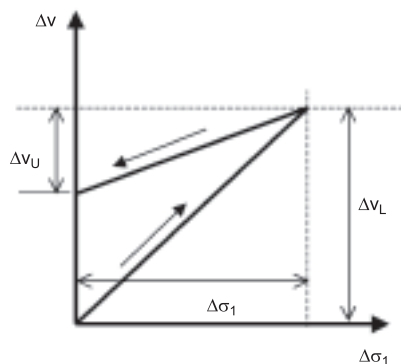
Procedura badawcza. Podstawowym wymaganiem w teście badawczym jest obciążenie próbki ośrodka sypkiego pionowym naprężeniem wzorcowym σ_r , które należy przyjmować jako równe maksymalnemu ciśnieniu pionowemu w składowanym

* Politechnika Białostocka

ośrodka sypkim w silosie rzeczywistym. Próbkę należy umieścić w celi aparatu bez wstrząsania i użycia innych sposobów zagęszczania, a następnie górną płytkę aparatu kilkakrotnie obrócić względem osi pionowej o kąt równy minimum 10° , zgodnie z ruchem wskazówki zegara oraz przeciwnie do tego ruchu, w celu konsolidacji próbki ośrodka. Liczba niezbędnych obrotów pokryw aparatu zależy od rodzaju badanego ośrodka. Następnie na górną powierzchnię próbki należy przyłożyć pionowe naprężenie wzorcowe σ_r .

Precyzyjne określenie naprężenia wzorcowego wymagałoby znajomości wyników testów wykonanych, zanim zostaną one przeprowadzone. Dokładne określenie wartości naprężenia wzorcowego nie ma jednak podstawowego znaczenia w badaniach, testy te należy wykonać z zastosowaniem poziomów naprężeń, które odpowiadają celom zaplanowanych badań.

Na podstawie odkształceń zmierzonych na zewnętrznej powierzchni przekroju pionowego ściany należy określić naprężenia poziome. W związku z tym, że wymaga się, aby dolna płytka aparatu była oddzielona od ścian, możliwy jest pomiar naprężeń poziomych i pionowych (rysunek 2).



Rys. 2. Schemat przemieszczeń pionowych Δv próbki ośrodka sypkiego przy obciążeniu i odciążeniu wywołanych przyrostem naprężeń pionowych $\Delta\sigma_1$

Przebieg badania jest następujący:

- po przyłożeniu naprężenia pionowego σ_1 równego naprężeniu wzorcowemu σ_r , rozpoczyna się rejestrację pomiarów występujących naprężeń poziomych i pionowego przemieszczenia. Należy także dokładnie zmierzyć wysokość H skompresowanej próbki ośrodka sypkiego;

- następnie wywołuje się niewielki przyrost naprężenia pionowego $\Delta\sigma_1$ i ponownie mierzy poziome naprężenie i przemieszczenie pionowe próbki. Przyrost naprężenia pionowego $\Delta\sigma_1$ powinien wynosić ok. 10 % normalnego naprężenia wzorcowego σ_1 .

- przyrostowi naprężeń poziomych $\Delta\sigma_2$ (wywołanemu przyrostem naprężeń pionowych $\Delta\sigma_1$) towarzyszy zmierzona zmiana pionowego przemieszczenia próbki – Δv . Na tej podstawie należy określić przyrost proporcji naprężeń K_L

$$K_L = \frac{\Delta\sigma_2}{\Delta\sigma_1}$$

Efektywny moduł sprężystości ośrodka sypkiego przy obciążeniu E_{sL} wyznacza się ze wzoru:

$$E_{sL} = H \frac{\Delta\sigma_1}{\Delta v} \left(1 - \frac{2K_L^2}{1 + K_L} \right)$$

W celu określenia wartości modułu sprężystości ośrodka przy odciążeniu należy:

- wywołać niewielką redukcję naprężenia pionowego $\Delta\sigma_1$ (przyrost ze znakiem minus) i ponownie zmierzyć naprężenie poziome oraz przemieszczenie pionowe. Spadek naprężenia pionowego $\Delta\sigma_1$ powinien wynosić ok. 10% naprężenia wzorcowego σ_r ;

- określić ujemny przyrost naprężenia poziomego $\Delta\sigma_2$ (wywołany przez ujemny przyrost pionowego naprężenia $\Delta\sigma_1$), a także zmianę przemieszczenia pionowego próbki po odciążeniu Δv (obie wartości są ujemne). Następnie należy określić wartość przyrostową ilorazu K_U , w postaci:

$$K_U = \frac{\Delta\sigma_2}{\Delta\sigma_1}$$

Efektywny moduł sprężystości przy odciążeniu E_{sU} należy wyznaczyć ze wzoru:

$$E_{sU} = H \frac{\Delta\sigma_1}{\Delta v} \left(1 - \frac{2K_U^2}{1 + K_U} \right)$$

Moduł sprężystości ośrodków rozdzielonych przy odciążeniu jest zwykle wyższy niż moduł sprężystości przy obciążeniu. W tych przypadkach, gdy wyższy moduł sprężystości może być niekorzystny dla konstrukcji, np. przy wyznaczaniu parcia termicznego p_{ht} ze wzoru podanego w artykule, na-

leży posłużyć się modułem sprężystości przy odciążeniu. Gdy moduł sprężystości ośrodka ma korzystny wpływ na konstrukcję, należy przyjąć moduł sprężystości przy obciążeniu (np. w cienkościennych silosach prostopadłościennych).

Normowy sposób uproszczony.

W szczególnych przypadkach pomocne może być uproszczone wyznaczenie przybliżonej wartości E_{sU} ze wzoru:

$$E_{sU} = \chi p_{vft}$$

gdzie:

p_{vft} – składowa pionowa parcia u podstawy pionowego fragmentu ściany silosu po napełnianiu komory [1];

χ – współczynnik kalibracyjny modułu, który może być określony z zależności:

$$\chi = 7\gamma^{3/2}$$

Alternatywnie można przyjąć: $\chi = 70$ – w przypadku suchych ziarnistych materiałów zbożowych; $\chi = 100$ – drobnopięknych cząstek mineralnych oraz $\chi = 150$ – materiałów o dużych i twardych cząstkach mineralnych.

Własna koncepcja stanowiska badawczego

Do przeprowadzenia badań zgodnych z podanymi założeniami, w Katedrze Konstrukcji Budowlanych Politechniki Białostockiej skonstruowano duży model cylindrycznej komory silosowej (rysunek 3). Konstrukcję modelu średnicy 800 mm i wysokości 2000 mm o ściankach wykonanych z siatkoconu grubości 14 mm opisał m.in. w pracy [6]. Model zapewnia możliwość chłodzenia ścianki, z uwagi na wmontowany w nią wewnętrzny system hydrauliczny, złożony z układu rurek stalowych umożliwiających obieg wody chłodzącej.

Procedura pomiaru modułu sprężystości ośrodka sypkiego przy użyciu wymienionego modelu silosu była następująca:

- komorę modelu napełniono ośrodkiem sypkim o temperaturze otoczenia – ok. 20°C , i zamocowano sondy termoparowe (8) w masie sypkiej;

- po wypoziomowaniu powierzchni górnej ośrodka sypkiego, za pomocą stalowej płyty dociskowej (5) dociężono masę sypką w modelu silosu, aby uzyskać poziom ciśnienia pionowego w silosie rzeczywistym;