

5. Podsumowanie

Wyniki badań potwierdzają, że urządzenia odciążające o małej wysokości, tzw. króćce zmniejszają przyrost parcia poziomego podczas opróżniania tylko w ograniczonym paśmie wysokości silosu. Z analizy wyników pomiarów wynika, że wartości parcia na ściany w silosie wyposażonym w niskie urządzenie odciążające są zmniejszone względem silosu opróżnianego tradycyjnie tylko w dolnej części (do wysokości odpowiadającej w przybliżeniu wysokości króćca). Wartość tej redukcji waha się w zakresie 20–50%. Dla wyższych partii silosu otrzymywano w pewnych warunkach wzrost wartości parcia (maksymalnie o 25% względem tradycyjnego opróżniania). Występuje tu zatem swoiste przegrupowanie rozkładu parcia z pasma niższego do wyższego. Należy zaznaczyć, że wzrost parcia nie występował przy opróżnianiu urządzeniem z optymalnie dobranymi parametra-

mi (średnica, położenie otworów). Stwierdzono również, że optymalne parametry przewodów zapewniają poprawne ich działanie tylko w wąskim zakresie geometrii silosu. Zauważono, że średnica otworu perforacyjnego dobrana dla jednego typu przewodu jako optymalna, nie jest optymalna dla przewodu innej średnicy. Nie można zatem stosować identycznej perforacji dla mniejszych i większych średnic rur, a co z tego wynika – również mniejszych i większych silosów. Zauważono też, że wydatek opróżniania silosu wyposażonego w urządzenie redukujące parcie zależy od powierzchni otworów perforacyjnych. Stwierdzono, że istnieje graniczna wartość powierzchni otworów perforacyjnych, powyżej której urządzenie jest nieskuteczne, ponieważ występuje nieprawidłowy przepływ materiału sypkiego.

BIBLIOGRAFIA

[1] Reimbert M. L., Reimbert A.M., Silos-theory and practice, Lavoisier Publishing Inc. New York 1987

[2] Ooms M., Roberts A. W., The reduction and control of flow pressures in cracked grain silos. Bulk Solids handling Vol. 5, No. 3, 1985, s. 1009–1016

[3] Kamiński M., Zubrzycki M., Żelbetowe silosy na zboże. Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1985

[4] Safarian S. S., Harris E.C., Loads for design of stacking tubes for granular materials. Bulk Solids Handling, Vol. 5, No. 2, 1985, s. 349–356

[5] Safarian S. S., Harris E. C., Loads for design of stacking tubes for granular materials, Part II, Bulk Solids Handling, Vol. 5, No. 2, 1985, s. 845–857

[6] Kozicki J., Teichman J., Application of a cellular automata model to granular flow, Task Quarterly, Scientific Bulletin of Academic Computer Centre in Gdansk, vol. 6 (2002) s. 429

[7] Beverloo W. A., Leniger H.A., Van de Velde J.: Chemical Engineering Science, 15 (1961), s. 260–269.

[8] Kozicki, J., Teichman, J., Application of a cellular automaton to simulations of a granular flow in Silos. Granular Matter, 7, 1, 45–54, 2005

[9] Kozicki J., Donzé F. V., Yade–open DEM: an open–source software using a discrete element method to simulate granular material Engineering Computations, Vol. 26 Issue 7, pages 786–805, 2009

Wybrane problemy projektowe i wykonawcze modułowych, prefabrykowanych zbiorników na ciecze

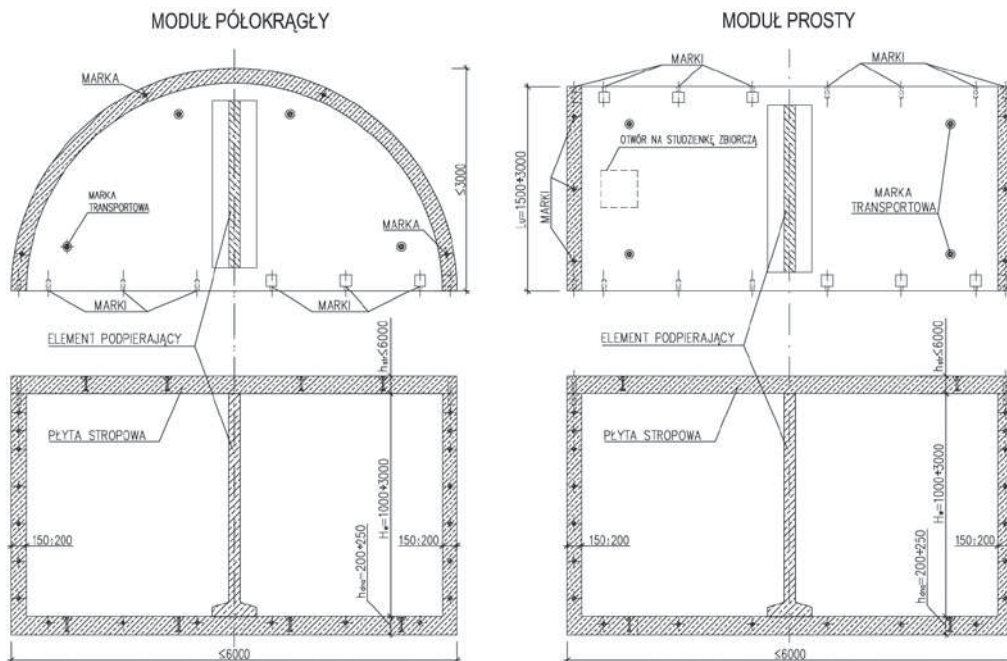
Dr inż. Czesław Bywalski, prof. dr hab. inż. Mieczysław Kamiński,
Politechnika Wrocławska

1. Wprowadzenie

Żelbetowe zbiorniki na ciecze zalicza się do konstrukcji specjalnych. Właściwe zaprojektowanie tego typu obiektów budowlanych jest bardzo złożone i skomplikowane, wymagające od projektanta

umiejętności rozwiązywania wielu problemów. Zadaniem projektanta jest takie zaprojektowanie zbiornika, by zapewnić bezpieczeństwo konstrukcji podczas jej realizacji i eksploatacji oraz odpowiednią trwałość z uwzględnieniem wymagań w zakresie szczelności. Z ko-

lei z wykonawczego punktu widzenia konieczne jest – na etapie projektowania – dostrzeżenie i rozwiązanie problemów związanych z realizacją zbiorników. W przypadku zbiorników prefabrykowanych należy ponadto uwzględnić ograniczenia związane z transpor-



Rys. 1.
Geometria modułów
półokrągłych
i prostych – rysunek
poglądowy

tem prefabrykatów i uszczelnieniem ich styków.

Obecnie, kiedy odchodzi się od projektowania wg polskich norm, pojawił się kolejny problem „projektowy”, tzn. niewystarczająca znajomość reguł zawartych w eurokodach dotyczących projektowania zbiorników żelbetonowych na ciecze. Problem ten w dużej mierze rozwiązuje już praca [1], w której zebrano zasady projektowania takich zbiorników z uwzględnieniem wymagań Eurokodu 2.

Zbiorniki analizowane w niniejszej pracy są konstrukcjami wymagającymi szczególnego potraktowania na etapie projektowania. Są to zbiorniki prefabrykowane, składające się z modułów skręcanych za pomocą śrub ze stali nierdzewnej. W każdym zbiorniku można wyróżnić moduły skrajne – półokrągłe oraz środkowe – proste (rys. 1). Każdy moduł składa się z elementu dennego, obejmującego płytę denną i ściany oraz z płyty stropowej, ewentualnie z elementu podpierającego w kształcie odwróconej litery T. Znajdują one obecnie szerokie zastosowanie m.in. jako zbiorniki wody opadowej w ciągu dróg i auto-

strad. Zabudowywane są również na terenach eksploatacji górniczej. Projektowanie takich konstrukcji nastęrcza pewne trudności, z których wybrane opisano w dalszej części pracy.

2. Problem szczelności

Omówienie problemu szczelności konstrukcyjnej zbiorników, uzyskiwanej poprzez ograniczenie szerokości rozwarcia rys do wartości odpowiadającej konkretnej klasie szczelności wg [2], omówiono m.in. w pracach [1] i [3]. W związku z tym odstępiono tutaj od dokładnej analizy tej części problemu. Ogólnie można stwierdzić, że w zależności od zakwalifikowania konstrukcji zbiornika do danej klasy szczelności należy spełnić odpowiednie warunki ograniczające szeroko rozumiany stan zarysowania – w tym konieczne jest ograniczenie szerokości rozwarcia rys do wartości w_{k1} (gdzie w_{k1} – dopuszczalna szerokość rozwarcia rys). W przeciwnym wypadku należy zaprojektować i wykonać odpowiednią izolację wodoszczelną. W zbiornikach prefabrykowanych, w których występują znaczące obciąże-

nia inne niż parcie hydrostatyczne, nie jest to sytuacja rzadka. Zalecane wartości w_{k1} dla konstrukcji zbiorników na wodę określono w funkcji ilorazu parcia hydrostatycznego h_D na ścianę i grubości h konstrukcji ściany zbiornika. Dla $h_D/h \leq 5$ dopuszczalna szerokość rozwarcia rysy $w_{k1} = 0,2$ mm, natomiast dla $h_D/h \geq 35$, $w_{k1} = 0,05$ mm. Dla wartości pośrednich h_D/h dopuszczalną szerokość rysy w_{k1} można interpolować liniowo. W praktyce oznacza to, że maksymalna szerokość rysy przelotowej nie powinna przekroczyć wartości 0,1 mm. W normie [4] przyjęto, że ograniczenie szerokości rozwarcia rysy do 0,1 mm gwarantuje elementowi szczelność.

Jednak w zbiornikach prefabrykowanych zagadnienie szczelności jest bardziej złożone niż w zbiornikach monolitycznych – konieczne jest również zapewnienie szczelności połączeń elementów prefabrykowanych (modułów). Uszczelnienie połączenia może zapewnić taśma trwale elastyczna ściśnięta pomiędzy czotowymi powierzchniami prefabrykatów do około 5 mm. Połączenie nie jest wypełniane sztywną zaprawą, w związku z tym zachowu-

je minimalną elastyczność, co nie pozostaje bez znaczenia w aspekcie analizy odkształceń wymuszonych.

3. Ograniczenia i problemy wynikające z transportu i procesu prefabrykacji

Projektując zbiorniki prefabrykowane należy pamiętać o ograniczeniach wynikających z transportu, szczególnie w przypadku pełnościennych prefabrykatów zbiornika. W praktyce sprowadza się to do ograniczenia masy najcięższego prefabrykatu do 24 ton, ze względu na ładowność samochodów ciężarowych. Jednocześnie wytwórca prefabrykatów chciałby, aby jeden moduł obejmował możliwie dużą objętość zbiornika. Nie pozostaje to bez wpływu na założenia do obliczeń statyczno-wytrzymałościowych. W skrajnych przypadkach (zbiorniki silnie obciążone np. ruchem samochodów) dochodzi do sytuacji, w której z obliczeń statyczno-wytrzymałościowych wynika, że najefektywniej byłoby zwiększyć grubość ściany czy płyty dennej, a nie jest to możliwe z uwagi na masę prefabrykatu. W takich sytuacjach dość często stopień zbrojenia ścian i płyt dennych jest bliski maksymalnemu. Wówczas powstaje kolejny problem natury wykonawczej, polegający na trudnościach z właściwym zagęszczeniem mieszanki betonowej. Nie wszystkie zakłady prefabrykacji stosują bowiem wibratory przyczepne, czy stoły wibracyjne, lecz tradycyjne wibratory wgłębne. Jest to poddyktowane różnymi względami. Wszystkie one zebrane w całość, w ujęciu ekonomicznym, wskazują na przewagę wibratorów buławowych. Powszechnie stosowane średnice buław wynoszą 50 mm, rzadziej 40 mm. Powstaje więc problem z zapewnieniem miejsca na włożenie buławy między siatki zbrojenia wewnętrznego i zewnętrznego ścian modu-

łów. Ze względów technologicznych, minimalna odległość pomiędzy prętami siatek wewnętrznych i zewnętrznych wynosi 50 mm, zaś zalecana minimalna 60 mm. Aby spełnić ten warunek konieczne jest, w niektórych sytuacjach, odstępianie od tradycyjnych zasad konstruowania zbrojenia. Odstępstwo polega na zamianie miejscami prętów siatki zbrojenia wewnętrznego, tzn. pręty głównego wewnętrznego zbrojenia pionowego w takich przypadkach nie są prętami skrajnymi, a takimi stają się pręty zbrojenia poziomego. Ma to wpływ na wyniki obliczeń – w ten sposób uzyskuje się większą masę stali zbrojeniowej, ale dzięki temu możliwe jest właściwe zagęszczenie mieszanki betonowej. Kiedy powyższy zabieg nie wystarcza i nie ma możliwości zwiększenia grubości elementu, to ewentualne możliwości zwiększenia nośności ściany mogą wynikać ze zmniejszenia grubości otuliny. Ale wówczas trwałość elementu, w aspekcie klasy ekspozycji środowiska, należy zapewnić poprzez powierzchniową ochronę betonu dostosowaną do stopnia agresywności medium oddziałującego na beton. Rozwiązaniem pożądanym jest wprowadzenie skosów na połączeniach ścian i dna, zwłaszcza w zbiornikach silnie obciążonych. Zwiększa to wysokość użyteczną w przekrojach najbardziej wyciężonych oraz pozwala na prawidłowe skonstruowanie zbrojenia. W analizowanych zbiornikach nie zaleca się stosowania prętów o średnicy większej od 14 mm. Nie chodzi tylko o względy wykonawcze, ale również o zarysowanie [5] i [6]. Wyjątkowo konieczne jest stosowanie prętów o średnicy 16 mm jako zbrojenie płyty dennej (zbiorniki silnie obciążone). Wówczas należy uwzględnić wpływ średnicy zbrojenia na propagację rys, zwłaszcza w zbiornikach, w których szczelność jest zapewniana wyłącznie poprzez

ograniczenie szerokości rozwarcia rysy.

Konstruując zbrojenie modułów należy ponadto uwzględnić technologię prefabrykacji. Trzeba przy tym pamiętać, że nie wszystkie figury można uzyskać stosując automaty do gięcia prętów zbrojeniowych. Ponadto trzeba mieć świadomość, iż bardzo często zbrojenie płyty dennej i poszczególnych ścian jest wiązane oddzielnie w półprefabrykaty, a następnie zestawiane na formie. Ma to wpływ na kształty figur zbrojeniowych.

4. Obciążenia zbiorników lokalizowanych w ciągach dróg i autostrad

Na zbiorniki lokalizowane w ciągach dróg i autostrad oddziałują obciążenia związane z ruchem samochodów. W takiej sytuacji obciążenia zestawia się jak dla obiektów mostowych. Wykorzystuje się zapisy różnych norm. W Polsce najchętniej stosowaną jest nadal polska norma [7], zdecydowanie rzadziej jeszcze norma [8]. W normie [7] wyróżniono 5 klas obciążeń (od A do E) dla obiektów mostowych w ciągu dróg samochodowych. Obiekty zaprojektowane na obciążenia wg konkretnej klasy mogą być obciążane przez pojazdy o ciężarach całkowitych przypisanych tej klasie. Przykładowo największe obciążenia przypisane są klasie A, dla której ciężar pojazdów wynosi maksymalnie 50 ton. Bardzo często zdarza się, że firmy realizujące inwestycje drogowe, zamawiając zbiornik w klasie obciążenia A wg [7] wymagają, by jednocześnie spełniał on wymogi normy niemieckiej [9] dla zdefiniowanej tam klasy obciążenia SLW60. Dopuszczalny ciężar pojazdu dla tej klasy wg [9] wynosi 60 ton. Nie oznacza to, że można bezkrytycznie przyjąć, iż norma [9] jest bardziej niekorzystna w aspekcie wartości wymiarujących sił wewnętrznych. Wynika to z różnic w schematach

obciążenia przyjętych w [7] i [9]. W takich przypadkach konieczne jest więc uwzględnienie w obliczeniach zapisów obydwu norm. W zależności od głębokości posadowienia względem poziomu drogi, siły wymiarujące uzyskuje się dla obciążeń wynikających z normy [7] lub [9].

5. Zbiorniki modułowe na terenach eksploatacji górniczej

Wytwórcy prefabrykatów bardzo często posiadają w swojej ofercie również typoszeregi zbiorników, które – przy spełnieniu pewnych warunków – można zabudować na terenach eksploatacji górniczej. Na terenach takich w wyniku podziemnej eksploatacji górniczej występują przemieszczenia elementów górotworu. Mogą ponadto wystąpić zjawiska sejsmiczne w postaci wstrząsów górotworu. Rodzaje wpływów eksploatacji górniczej i ich charakterystyka przedstawione są w pracach [10] i [11]. Typoszeregi zbiorników są z reguły tak projektowane, by możliwe było zabudowanie zbiorników na terenach górniczych, na których występują ciągłe deformacje powierzchni o granicznych wartościach wskaźników deformacji terenu zdefiniowanych dla tzw. II kategorii deformacji terenu górniczego wg [10]. W przypadku występowania na danym terenie innych oddziaływań górniczych niż objęte II kategorią „szkod górniczych”, są one z reguły pozostawiane do indywidualnej analizy na etapie projektu budowlanego konkretnego zbiornika. Wspomniana II kategoria deformacji terenu górniczego charakteryzowana jest następującymi granicznymi wartościami wskaźników deformacji terenu [10]:

- nachylenie T w mm/m: $2,5 < T \leq 5,0$,
- promień krzywizny R w km: $20 > |R| \geq 12$,
- odkształcenie poziome ε w mm/m: $1,5 < |\varepsilon| \leq 3,0$.

W przypadku przedmiotowych zbiorników, konieczna jest analiza wpływu odkształcenia poziomego ε i promienia krzywizny R . W obliczeniach zalecane jest łączne uwzględnianie tych dwóch wpływów. Poziome odkształcenia powierzchni wywołują dwójakie oddziaływanie na konstrukcję zbiornika: ściskanie lub rozciąganie płyty fundamentowej i dodatkowy napór gruntu na ściany zbiornika. W przypadku pierwszym istotne są poziome odkształcenia powierzchni powodujące rozluźnienie gruntu ($\varepsilon > 0$). Wywołują one naprężenia styczne w płaszczyznach styku płyty dennej z podłożem górniczym. Na skutek tych naprężeń płyta jest narażona na dodatkowe obciążenia siłami rozciągającymi. Siły ściskające płytę denną są pomijane w analizie wytrzymałościowej. Z kolei siły rozciągające wg [11] można wyznaczyć wykorzystując następującą zależność:

$$Z_{\max} = \left(1 - \frac{0,3}{\varepsilon}\right) 0,25b_f L q t g \Phi \quad (1)$$

gdzie: $\varepsilon = 3$ mm/m dla kategorii II, b_f – szerokość fundamentu w m, L – długość płyty dennej w m, q – obciążenie fundamentu w kN/m², Φ – kąt tarcia wewnętrznego gruntu. Drugi rodzaj oddziaływania poziomych odkształceń powierzchni sprowadza się do wyznaczenia dodatkowego naporu gruntu na ściany pionowe. Procedura wyznaczenia tego naporu przedstawiona jest m.in. w instrukcji [10].

Na oddziaływania powodowane krzywizną powierzchni zbiornik oblicza się przy założeniu, że w obrębie jego rzutu poziomego profil wygięcia niecki górniczej ma kształt powierzchni walcowej o przekroju paraboli i minimalnym promieniu krzywizny R . Różnicę obniżeń między położonym na osi symetrii najwyższym lub najniższym punktem krzywizny a jej punktem o współrzędnej x liczonej od osi symetrii aproksymuje się równaniem:

$$\Delta y = \frac{x^2}{2R} \quad (2)$$

W praktyce sprowadza się to do uwzględnienia przyrostu obciążenia płyty dennej. Dość często jednak projektanci typoszeregów zbiorników prefabrykowanych ograniczają długość zbiornika, przy której nie są wymagane obliczenia na wpływy krzywizny terenu. Dopuszczalne długości segmentów są podane w [10].

Projektowanie zbiorników na terenach eksploatacji górniczej jest złożone i wymaga umiejętności rozwiązywania problemów z zakresu mechaniki górotworu. Wiele zasad i wskazówek w tym zakresie zawarto w pracach [10] i [11].

6. Podsumowanie

Poruszone w pracy wybrane problemy projektowe i wykonawcze prefabrykowanych, modułowych zbiorników na cieczę wskazują na konieczność uwzględnienia w założeniach projektowych dodatkowych aspektów w porównaniu ze zbiornikami monolitycznymi. Są nimi m.in.: szczelność złączy prefabrykatów, ograniczenia wynikające z transportu i ich konsekwencje wpływające z kolei na założenia obliczeniowe i rozwiązania konstrukcyjne, projektowanie na terenach eksploatacji górniczej czy obciążenia zbiorników lokalizowanych w ciągach dróg samochodowych. Wszystkie te aspekty przysparzają projektantom wielu trudności. Wskazano więc pozycje literaturowe, normy i instrukcje niezwykle pomocne w projektowaniu. W przypadku niektórych problemów zaproponowano sposób ich uwzględnienia w projektowaniu.