

5. Wybudowanie nowego płaszcza żelbetowego od strony wewnętrznej.
 6. Odcinkowe sprężenie ścian wzdłuż poziomych żeber.
 7. Wzmocnienie ścian w kierunku poziomym poprzez założenie na wysokości komór silosów opasek stalowych.
 8. Dla materiałów sypkich, zgranulowanych możliwe jest zastosowanie urządzeń odciążających, dostosowanych do rodzaju materiału.
 9. Zmniejszenie wartości obciążeń naporem poprzez wybudowanie wewnątrz komór nowych żelbetowych ścian prostopadłych do siebie, dzielących komory na cztery mniejsze, co w efekcie dałoby kilkukrotne zmniejszenie wartości naporu materiału.
- Wszystkie te rozwiązania były stosowane z sukcesem w różnych modernizowanych bądź remontowanych bateriach silosów. Warianty rozwiązań od 3 do 9 pozwalają na pełną eksploatację komór. Problemem dodatkowym staje się w tym przypadku powiększenie ciężaru konstrukcji i konieczność wzmocnienia rusztu dna baterii, a także słupów je wspierających oraz fundamentów. Ostatecznie zdecydowano się ze względów ekonomicznych na wariant 2 naprawy. Po inwentaryzacji uszkodzeń usunięto mechanicznie odspojoną otulinę i rdzę ze stali zbrojeniowej. Uzupełniono brakujące odcinki zbrojenia łącząc nowe poprzez spawanie ze zbrojeniem istniejącym. Tak przygotowaną powierzchnię pokryto warstwą szcpełą i na nią ręcz-

nie nałożono właściwą warstwę betonową. Całość pokryto farbami elewacyjnymi. W omawianym wariantcie właściciel baterii zgodził się na ograniczenie zasypania komór silosów do połowy ich wysokości.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Kamiński M., Mrozowicz J., Maj M., Podolski B., Wróblewski R., Gawron K., Stan awaryjny baterii zablokowanych silosów na nasiona oleiste. XIX Konferencja Naukowo-Techniczna „Awary budowlane”. Szczecin – Międzyzdroje 1999, s. 821–828
- [2] Kamiński M., Mrozowicz J., Maj M., Podolski B., Gawron K., Zagrożenia bezpieczeństwa podczas eksploatacji baterii zablokowanych, prefabrykowanych silosów na rzepak. XX Konferencja Naukowo-Techniczna „Awary budowlane”. Szczecin – Międzyzdroje, 2001, s. 183–190
- [3] Łapko A., Prusiel J. A., Obliczeniowa kontrola zarysowania ścian żelbetowych silosów na podstawie Eurokodów, „Przegląd Budowlany” nr 1/2010
- [4] BS EN 1991-4:2006 BS EN Oddziaływania na konstrukcje – Część 4: Silosy i zbiorniki
- [5] Kaminski M., Maj M., Reliability analysis of the global safety index design for concrete silo, The Third Israeli Conference for Conveying and Handling of Particulate Solids, Dead Sea, Israel, May 2004
- [6] Runkiewicz L., Diagnostyka konstrukcyjna obiektów budowlanych. „Przegląd Budowlany” 3/2006, s. 16–18
- [7] Niedostatki M., Tejchman J., Nowe bezinwazyjne metody pomiarowe zmian porowatości w materiałach sypkich. „Przegląd Budowlany” nr 5/2007
- [8] Kawecki J., Rawicki Z., Uszkodzenia konstrukcji silosów na mąkę i stropu silosowni wywołane pracą wibratorów, „Przegląd Budowlany”, nr 11/1986
- [9] Czarnecki L., Emmons P. H. Naprawa i ochrona konstrukcji betonowych. „Polski Cement” 2002, s. 47

Wybrane problemy projektowe i wykonawcze prefabrykowanych zbiorników cylindrycznych sprężonych zewnętrznymi ciągniami bez przyczepności

Prof. dr hab. inż. Mieczysław Kamiński, dr inż. Czesław Bywalski,
Politechnika Wrocławska

1. Wprowadzenie

Żelbetowe i sprężone zbiorniki na ciecze muszą spełniać określone kryteria szczelności oraz odpowiednie warunki konstrukcyjno-wytrzymałościowe w fazie realizacji i eksploatacji [1]. Różnorodne kryteria i warunki ich projektowania i realizacji podawane są m.in. w normach [2, 3, 4] i wytycznych [5]. Spełnienie stosownych

warunków decyduje o trwałości zbiornika i o opłacalności inwestycji. Jak słusznie zauważył Seruga w pracy [1], na etapie projektowania wykonawstwa oraz eksploatacji zbiorników popełniane są liczne błędy. Ich skutkiem może być konieczność naprawy lub wzmocnienia konstrukcji już w fazie realizacji. Innym skutkiem takich błędów może być awaria budowlana, która może mieć miejsce pod-

czas sprężania prefabrykowanych zbiorników zewnętrznymi ciągniami bez przyczepności. Do ewentualnej awarii może doprowadzić np. źle dobrana kolejność sprężania, niewłaściwe poziomy siły sprężającej w poszczególnych etapach sprężania, odchyłki montażowe i wykonawcze prefabrykatów lub brak właściwego podparcia prefabrykatów w procesie sprężania. Zadaniem projektanta

jest takie zaprojektowanie zbiornika, aby zapewnić bezpieczeństwo konstrukcji podczas jej realizacji i eksploatacji oraz odpowiednią trwałość z uwzględnieniem wymagań w zakresie szczelności. Właściwe zaprojektowanie tego typu zbiorników jest bardzo złożone i skomplikowane, wymagające od projektanta umiejętności rozwiązywania wielu problemów (nie tylko obliczeniowych), z których tylko wybrane poruszono w niniejszym artykule.

Analizie poddano zbiorniki na cieczę, których ściany stanowią prefabrykowane elementy żelbetowe uźebrowane wzdłuż zewnętrznych pionowych krawędzi (rys. 1). W rozwiązaniu takim niezbrojone styki pionowe prefabrykatów wypełniane są betonem ekspansywnym lub materiałami żywicznymi. Całą równoleżnikową siłą rozciągającą w stykach przenoszą zewnętrzne, bezprzyczepnościowe cięgna sprężające typu 1L15,7. Ich liczba i rozmieszczenie jest tak dobierana, aby zapewnić bezpieczeństwo konstrukcji i umożliwić spełnienie zdefiniowanych kryteriów szczelności.

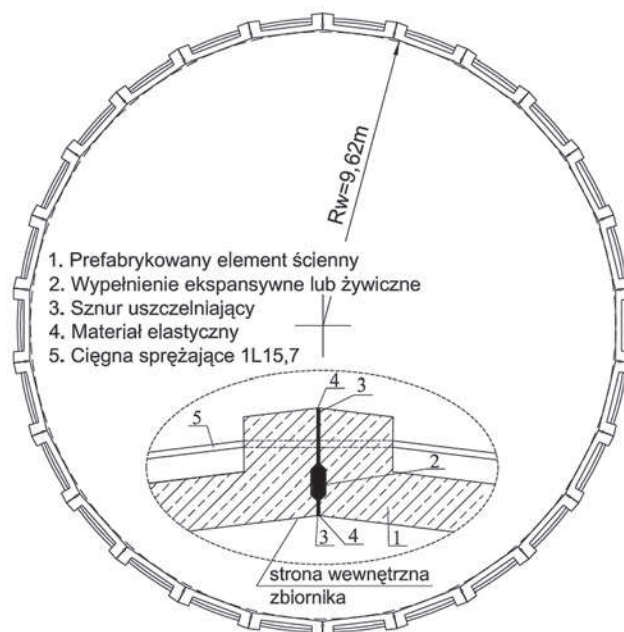
2. Problem szczelności

Zgodnie z aktualnymi przepisami normowymi [3], rozróżnia się następujące klasy szczelności zbiorników:

- klasa 0 – dopuszcza się pewien stopień przecieków lub przecieki cieczy nie mają znaczenia,
- klasa 1 – przecieki dopuszcza się do pewnej niewielkiej ilości; powierzchniowe przemakanie lub miejsca zawilgocenia są dopuszczalne,
- klasa 2 – przecieki powinny być minimalne; przemakanie nie powinno pogarszać wyglądu powierzchni,
- klasa 3 – przecieki są niedopuszczalne.

W zależności od zakwalifikowania konstrukcji zbiornika do danej klasy, należy spełnić odpowied-

Rys. 1.
Układ prefabrykatów ściennych w rzucie poziomym dla przykładowego zbiornika



nie warunki ograniczające szeroko rozumiany stan zarysowania – w tym konieczne jest ograniczenie szerokości rozwarcia rys do wartości w_{k1} . 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 wynosi $w_{k1} = 0,2$ 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 [6]. W normie [2] przyjęto, że ograniczenie szerokości rozwarcia rysy do 0,1 mm gwarantuje elementowi szczelność. Aby zapewnić klasę szczelności 3 według [3], konieczny jest dobór odpowiedniego rozstawu cięgien sprężających gwarantującego wystąpienie w betonie trwałych naprężeń ściskających w stadium użytkowania zbiornika. Istnieją różne poglądy w zakresie minimalnego poziomu tych naprężeń. W Stanach Zjednoczonych przyjmowano wartość 1,40 MPa [4], która jest prawie 3-krotnie większa od zwyczajowo przyjmowa-

nej w Polsce wartości 0,50 MPa. Z kolei Seruga [1] uważa, że przy stopniu zbrojenia zwykłego wynoszącym $0,5 \div 1,0\%$ poziom ten powinien wynosić $1,0 \div 1,5$ MPa. W przypadku zbiorników prefabrykowanych sprężonych bezprzyczepnościowymi cięgnami zewnętrznymi, w których pionowe styki prefabrykatów nie są zbrojone, wskazane jest obliczeniowe określenie potrzebnego poziomu obwodowego trwałego naprężenia ściskającego. Ustalając ten poziom należy mieć na względzie odkształcalność materiału wypełniającego styki. Obecnie jako materiał wypełniający, powszechnie wykorzystuje się betony lub zaprawy ekspansywne, a ostatnio próbuje się wykorzystywać również materiały żywiczne. Jeśli na wysokości zbiornika planowany jest poziomy styk prefabrykatów, konieczne jest wówczas sprężenie zbiornika w kierunku pionowym. W zależności od rozwiązania konstrukcyjnego styków prefabrykatów, czasami pojawia się konieczność dodatkowego ich uszczelnienia niezależnie od zastosowanego wypełnienia ekspansywnego i zapewnienia trwałych obwodowych naprężeń ściskających. Wykorzystuje się w tym celu rozwiązania systemo-

we proponowane przez różnych producentów chemii budowlanej.

3. Połączenie prefabrykatów ściennych z dnem

W praktyce projektowej wyróżnia się następujące rodzaje połączeń ściany zbiornika z dnem [1]:

- a) „swobodne” (na „śliskiej” podkładce minimalizującej siłę tarcia),
- b) „przegubowo-przesuwne” (z siłą tarcia),
- c) przegubowo-nieprzesuwne,
- d) sztywne.

W zbiornikach sprężonych warunki w połączeniu elementów ściennych z dnem mogą zmieniać się w kolejnych etapach realizacji.

Połączenie swobodne wymaga zastosowania stosunkowo drogich podkładek elastomerowych oraz trwale elastycznych materiałów uszczelniających po obu stronach ściany zbiornika w rowku płyty lub w pierścieniu fundamentowym. Do wyznaczania sił wewnętrznych przyjmuje się wówczas, że ściana pracuje w stanie bezmomentowym podczas sprężania i w stadium eksploatacji.

W połączeniu przegubowo-przesuwnym stosowana jest warstwa poślizgowa o niskim współczynniku tarcia. Do chwili pokonania siły tarcia na dolnej krawędzi, powłoka pracuje jako przegubowo-połączona z dnem. Minimalizacji wartości południkowych momentów zginających powstających podczas sprężania dokonuje się poprzez dobór odpowiedniej kolejności naciągu cięgien sprężających, umożliwiając szybkie pokonanie siły tarcia w połączeniu. Istotną rolę w połączeniu odgrywają materiały uszczelniające, które w przypadku ich małej podatności mogą spowodować znaczny wzrost południkowych momentów zginających, wywołując poziome zarysowanie betonu. Dobierając materiały wypełniające należy uwzględnić także ich właściwości reologiczne. Połączenie przegubowo-nieprzesuwne ścian z płytą denną pod-

czas eksploatacji zbiornika uzyskuje się przez zastosowanie w styku materiałów wypełniających i uszczelniających o małej podatności. Zakłada się, że w miejscu połączenia ściany z dnem wystąpi czysty przegub (teoretycznie siły rozciągające od parcia cieczy są w tym przekroju równe zero), czyli siły równoleżnikowe w ścianie maleją od wartości maksymalnej powyżej dna do zera w połączeniu z dnem. Powinno to skutkować zmniejszeniem liczby cięgien na odcinku dolnym ściany.

Przy projektowaniu sprężenia należy jednak wziąć pod uwagę także odkształcenia sprężyste i reologiczne betonu w połączeniu ściany z płytą denną (betonu wieńca i płyty fundamentowej oraz materiału wypełniającego styk). Takie założenia uwzględniają możliwość powstania pewnej siły rozciągającej w części dolnej ściany o wartości zależnej od poziomu wyżej wspomnianych odkształceń sprężystych i reologicznych. Z uwagi na brak możliwości obliczeniowego określenia wartości tych odkształceń, często przyjmuje się stały rozkład siły równoleżnikowej w strefie dolnej zbiornika, o wartości równej maksymalnej sile rozciągającej powyżej dna wyznaczonej dla schematu przegubowo-nieprzesuwne połączenia ściany z płytą denną. Jest to przypadek pośredni pomiędzy połączeniem przegubowo-przesuwne i przegubowo-nieprzesuwne. W związku z powyższym, zalecane jest zawsze wykonanie kontrolnych pomiarów odkształceń na obiekcie w celu weryfikacji przyjętego schematu połączenia ścian zbiornika z płytą denną, co z reguły pozwala ograniczyć liczbę cięgien w strefie dolnej zbiornika.

W przypadku połączenia sztywnego, w stadium eksploatacji przy pierścieniu fundamentowym występują momenty południkowe o znaczącej wartości. W takim przypadku wystąpi problem z poziomym zarysowaniem ścian,

a w konsekwencji ze szczelnością zbiornika.

W przypadku zbiorników prefabrykowanych sprężonych zewnętrznymi cięgnami bez przyczepności, optymalnym rozwiązaniem pod względem kosztowym i materiałowym jest zapewnienie przegubowo-przesuwne lub swobodnego połączenia prefabrykatów ściennych z płytą fundamentową podczas sprężania i przegubowo-nieprzesuwne w fazie eksploatacji.

4. Kolejność montażu ścian zbiorników i sprężania

W pracy [6] Seruga i Faustmann przedstawili optymalną kolejność montażu i sprężania ścian zbiorników prefabrykowanych z zewnętrznymi cięgnami bezpryczepnościowymi. Dla zbiorników o pojemności do 1000 m³ jest ona następująca:

- a) wytyczenie położenia elementów prefabrykowanych na obwodzie płyty dennej,
- b) montaż elementów prefabrykowanych na podkładkach poślizgowych oraz stabilizacja płyt za pomocą rozpór mocowanych do płyty dennej zbiornika,
- c) montaż cięgien sprężających i zakotwień,
- d) luzowanie rozpór podtrzymujących płyty po wstępnym napięciu cięgien,
- e) pierwszy etap sprężania (od 15 do 30% wartości docelowej siły sprężającej),
- f) zabetonowanie pierścienia fundamentowego,
- g) wypełnienie pionowych styków materiałem wypełniającym,
- h) demontaż rozpór,
- i) drugi etap sprężania (sprężenie do 100% wartości docelowej siły sprężającej w każdym cięgnię).

W przypadku zbiorników o pojemności większej niż 1000 m³, kolejność sprężania jest następująca:

- a) wytyczenie położenia elementów prefabrykowanych na obwodzie płyty dennej,

- b) montaż elementów prefabrykowanych na podkładkach poślizgowych oraz stabilizacja płyt za pomocą rozpór mocowanych do płyty dennej zbiornika,
- c) montaż cięgien sprężających i zakotwień,
- d) luzowanie rozpór podtrzymujących płyty po wstępnym napięciu cięgien,
- e) pierwszy (wstępny) etap sprężania (od 15 do 30% wartości siły docelowej),
- f) wypełnienie pionowych styków materiałem wypełniającym,
- g) demontaż rozpór,
- h) drugi etap sprężania (sprężenie do 60% wartości docelowej siły sprężającej w każdym ciągu),
- i) zabetonowanie pierścienia fundamentowego,
- j) trzeci etap sprężania (sprężenie do 100% wartości docelowej siły sprężającej w każdym ciągu).

Z punktu widzenia minimalizacji strat siły sprężającej, optymalny jest wariant drugi, zakładający trzy etapy sprężania. W takim podejściu straty doraźne i część strat reologicznych, powstałe w pierwszych dwóch etapach sprężania, można zniwelować w etapie trzecim. Dość często firmy wykonawcze dla przyspieszenia realizacji obiektu postulują jednak wariant pierwszy z modyfikacją poziomu siły sprężającej przyjmując po 50% jej wartości docelowej w każdym etapie. Wymaga to zachowania szczególnej ostrożności w trakcie sprężania i dużej dokładności montażowej z geodezyjną kontrolą położenia elementów ściennych podczas sprężania. W przeciwnym wypadku można doprowadzić do awarii budowlanej w pierwszym etapie sprężania polegającej na utracie stateczności elementów ściennych.

W celu ograniczenia południkowych momentów zginających podczas sprężania w schemacie przegubowo-przesuwnej połączenia powłoki z płytą denną, konieczne

jest jak najszybsze pokonanie siły tarcia występującej na dolnej krawędzi powłoki (prefabrykatu). Dla uzyskania tego celu naciąg cięgien należy realizować zaczynając od cięgien najniżej usytuowanych.

Warto również zwrócić uwagę na pożądane naprzemienne rozmieszczenie zakotwień cięgien sprężających. Biorąc pod uwagę rozkład siły sprężającej po stratach (szczególnie doraźnych wywołanych tarciami cięgien o osłonki w smarze na zagięciach przy naciągu dwustronnym) wskazane jest, aby zakotwienia te rozmieszczać naprzemienne z przesunięciem 180° na obwodzie zbiornika. Pozwala to na wyrównanie równoleżnikowych naprężeń ściskających na obwodzie ściany, co z kolei zapobiega owalizacji korony zbiornika.

5. Podsumowanie

Analiza poruszonych w pracy problemów projektowych i wykonawczych prefabrykowanych zbiorników cylindrycznych sprężonych zewnętrznymi cięgnami bezpryczepnościowymi pozwala sformułować następujące wnioski:

- Aby zapewnić klasę szczelności 3 wg [3] należy w betonie wywołać trwałe naprężenia ściskające w fazie eksploatacji w kierunku równoleżnikowym na poziomie 0,50÷1,50 MPa, w zależności od stopnia zbrojenia zwykłego.
- Optymalnym pod względem kosztowym i materiałowym jest „przegubo-przesuwne” lub „swobodne” połączenie prefabrykatów ściennych z płytą fundamentową podczas sprężania i przegubowo-nieprzesuwne w fazie eksploatacji.
- Wykorzystując nowe materiały do wypełniania styków prefabrykatów, należy zwrócić szczególną uwagę na ich odkształcalność sprężystą i reologiczną uwzględniając te cechy przy obliczaniu strat sprężania.
- Z punktu widzenia minimalizacji strat siły sprężającej, optymalne jest sprężenie 3-etapowe. Strat doraźne i część strat reologicznych

wywołanych pełzaniem betonu i relaksacją stali, powstałe w pierwszych dwóch etapach, można wówczas zniwelować w etapie trzecim.

- Sprężenie 2-etapowe, zakładające uzyskanie 50% siły sprężającej w każdym etapie, wymaga zawsze zachowania szczególnej ostrożności w procesie sprężania i dużej dokładności montażowej z geodezyjną kontrolą położenia elementów ściennych podczas sprężania. W przeciwnym wypadku można łatwo doprowadzić do awarii budowlanej w pierwszym etapie sprężania.
- W celu ograniczenia południkowych momentów zginających żebra prefabrykatów w schemacie przegubowo-przesuwnej połączenia powłoki z płytą denną, naciąg cięgien należy realizować zaczynając od cięgien najniżej położonych.
- Zakotwienia cięgien sprężających należy rozmieszczać naprzemienne z przesunięciem 180° na obwodzie zbiornika, co zapobiega owalizacji korony zbiornika.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Seruga A., Analiza stanów naprężenia i odkształcenia w powłokach zbiorników cylindrycznych z betonu sprężonego. Seria Inżynieria Lądowa, Kraków 2003
- [2] PN-B-03264:2002. Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Obliczenia statyczne i projektowanie
- [3] PN-EN 1992-3:2008. Eurokod 2. Projektowanie konstrukcji z betonu, część 3: Silosy i zbiorniki na ciecze
- [4] ACI Committee 344 Report. 1988. Design and construction of circular prestressed concrete structures with circumferential tendons
- [5] Oleszkiewicz S., Ziobroń W., Seruga A., Instrukcja projektowania i wykonawstwa sprężonych betonowych zbiorników walcowych. BPBK, Warszawa 1973
- [6] Seruga A., Faustmann D., Wpływ betonu ekspansywnego na stan odkształcenia ścian zbiorników, wykonywanych z elementów prefabrykowanych, Materiały konferencyjne Konferencji Dni Betonu 2010, Stowarzyszenie Producentów Cementu, Kraków 2010, s. 589–599