BUDOWNICTWO		2-B/2011
CZASOPISMO TECHNICZNE	WYDAWNICTWO	ZESZYT 18
TECHNICAL TRANSACTIONS	POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ	ROK 108 ISSUE 18
CIVIL ENGINEERING		YEAR 108

ANDRZEJ SERUGA, CEZARY TOŚ, LESZEK ZIELINA, DARIUSZ FAUSTMANN

DOŚWIADCZALNA OCENA DOKŁADNOŚCI MONTAŻU PREFABRYKOWANYCH ŚCIAN W ZBIORNIKACH SPRĘŻONYCH ZEWNĘTRZNYMI CIĘGNAMI BEZ PRZYCZEPNOŚCI

EXPERIMENTAL EVALUATION OF THE ASSEMBLY ACCURACY OF PRECAST WALL TANKS POST-TENSIONED WITH EXTERNAL UNBONDED TENDONS

Streszczenie

Artykuł przedstawia wyniki badań doświadczalnych przeprowadzonych podczas realizacji zbiorników cylindrycznych wykonanych z prefabrykowanych żelbetowych płyt użebrowanych, sprężonych zewnętrznymi cięgnami bez przyczepności. Celem pomiarów było określenie dokładności montażu ściany z elementów prefabrykowanych oraz przemieszczeń radialnych ściany w wyniku wstępnego i końcowego sprężenia. Przedstawiono również wyniki pomiarów geodezyjnych dotyczących przemieszczeń płyt prefabrykowanych przed i po wstępnym sprężeniu oraz dla całkowitego sprężenia ściany zbiornika.

Słowa kluczowe: zbiorniki z betonu sprężonego, cięgna bez przyczepności, płyty prefabrykowane użebrowane, wznoszenie ścian zbiorników prefabrykowanych, pomiary geodezyjne

Abstract

The paper presents the results of the experimental investigation conducted during the process of constructing the circular tanks made of precast reinorced concrete ribbed panels, prestressed with external unbonded tendons. The aim of experimental investigations were, the quality evaluation of precast tank wall erection as well as the effectivness of tank wall radial movement due to process of preliminary and finally post-tensioning. The results of geodesy measurements of precast panels displacement before and after the first stage as well as the finally stage of the tank's prestressing process are also presented.

Keywords: prestressed concrete tank, unbonded tendons, precast ribbed panels, erection of precast tank wall, geodesy measurement

Dr hab. inż. Andrzej Seruga, prof. PK, mgr inż. Dariusz Faustmann, Instytut Materiałów i Konstrukcji Budowlanych, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska.

Dr inż. Cezary Toś, dr inż. Leszek Zielina, Instytut Geotechniki, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Krakowska.

1. Wstep

W ostatnich latach w Polsce realizowany jest program budowy nowych oczyszczalni ścieków, jak również modernizacji i rozbudowy istniejących oczyszczalni ścieków. Obserwuje się również znaczne zapotrzebowanie na zbiorniki przeznaczone do magazynowania gnojowic w przedsiębiorstwach rolniczych i indywidualnych gospodarstwach rolnych. Ponadto coraz częściej realizowane są biogazownie, w których podstawowym obiektem infrastruktury są zbiorniki.

Wszystkie zbiorniki na ciecze muszą spełniać warunek trwałości. Przewiduje się ich pełną przydatność eksploatacyjną przez okres 50 lat. Podstawowym kryterium trwałości jest warunek wodoszczelności konstrukcji, sprawdzany podczas próby szczelności przed jej przekazaniem do eksploatacji. Drugim kryterium jest warunek rysoodporności, który musi być spełniony na etapie realizacji konstrukcji i w stadium eksploatacji z uwzględnieniem wszystkich możliwych przypadków obciążenia. Problematykę tę przedstawiono w pracach [1] i [2].

Zbiorniki żelbetowe i z betonu sprężonego mogą być wykonywane zarówno w wersji monolitycznej, jak i prefabrykowanej. W przypadku wersji monolitycznej należy stosować przegubowe połączenie ściany z dnem lub jej utwierdzenie w dnie, z uwagi na zapewnienie szczelności konstrukcji. Przyjęcie tego rozwiązania stwarza zagrożenie wystąpienia pionowych przelotowych (przez cała grubość ściany) rys we wczesnym okresie dojrzewania betonu. W celu uniknięcia tego problemu najbardziej właściwym rozwiązaniem jest wykonanie ściany monolitycznej, ale z betonu sprężonego lub zastosowanie środków wspomagających, których celem jest zminimalizowanie naprężeń rozciągających w betonie we wczesnym okresie dojrzewania betonu.

Alternatywnym rozwiązaniem są zbiorniki na ciecze o ścianach wykonanych z elementów prefabrykowanych sprężonych cięgnami bez przyczepności. Są one często stosowane również w Polsce ze względu na następujące zalety:

- szybkie tempo realizacji konstrukcji,
- możliwość wznoszenia zbiorników w okresie zimowym,
- możliwość zastosowania elementów prefabrykowanych z betonu o wysokiej wytrzymałości,
- eliminacja naprężeń rozciągających w ścianie zbiornika wynikających z powstania napreżeń termicznych, jak również ograniczenia swobodnych odkształceń we wczesnym okresie dojrzewania betonu w przypadku zbiorników monolitycznych,
- możliwość obniżenia kosztów produkcji przy stosowaniu tego samego elementu prefabrykowanego dla różnej objętości zbiorników.

Szczelność zbiorników prefabrykowanych zależy od kilku czynników:

- sposobu rozwiązania pionowego połączenia pomiędzy prefabrykatami i jakości jego wykonania,
- rodzaju połączenia ściany z płytą denną i jakości jego wykonania,
- dokładności montażu elementów prefabrykowanych,
- zachowania się ściany prefabrykowanej we wstępnym etapie sprężenia.

W Polsce realizowane są w kilku wariantach zbiorniki o ścianie wykonanej z elementów prefabrykowanych:

 – żelbetowych sprężonych w kierunku obwodowym wewnętrznymi cięgnami stalowymi bez przyczepności (styk wypełniony pod ciśnieniem zaczynem cementowym),

- strunobetonowych, sprężonych w kierunku obwodowym wewnętrznymi cięgnami stalowymi bez przyczepności (styk wypełniony pod ciśnieniem zaczynem cementowym),
- żelbetowych, pionowo i poziomo użebrowanych, sprężonych w kierunku obwodowym zewnętrznymi cięgnami stalowymi bez przyczepności (styk wypełniony drobnoziarnistym betonem ekspansywnym),
- żelbetowych, pionowo użebrowanych, sprężonych w kierunku obwodowym zewnętrznymi cięgnami stalowymi bez przyczepności (styk klejony podczas montażu).

W żadnym z tych systemów w pionowych połączeniach między prefabrykatami nie zastosowano zbrojenia stalą zwykłą w kierunku poziomym.

W niniejszej pracy przeanalizowano wpływ takich czynników jak: dokładność montażu elementów prefabrykowanych oraz zachowanie się ściany prefabrykowanej we wstępnym etapie sprężenia na przykładzie zbiorników prefabrykowanych o ścianie wykonanej z elementów dwukierunkowo użebrowanych ze stykiem wypełnionym betonem ekspansywnym, na wodoszczelność zbiorników prefabrykowanych.

2. Rozwiązanie konstrukcyjne analizowanych zbiorników

System zbiorników kołowych z prefabrykowanych elementów żelbetowych użebrowanych (pod nazwą Acontank T6) został opracowany w Szwecji i jest stosowany od ponad 30 lat w 12 krajach. W Polsce pierwszy tego rodzaju zbiornik, o pojemności 260 m³, został zrealizowany w 1996 roku w oczyszczalni ścieków w Stężycy. Dwa największe zbiorniki, o pojemności 6460 i 1310 m³, zostały wzniesione w 1998 roku w oczyszczalni ścieków w Redlicy. Dotychczas zrealizowano w Polsce ponad 400 tego rodzaju zbiorników. Zbiorniki te mogą być częściowo lub całkowicie zagłębione bądź obsypane, otwarte lub przykryte, wyposażone w bieżnie pod układ jezdny zgarniacza oraz wsporniki pod korytka przelewowe, marki, izolację cieplną, a także z przejściami szczelnymi różnych średnic i typów. Są stosowane jako zbiorniki na wodę pitną, na wodę przeciwpożarową, w oczyszczalni ścieków komunalnych i przemysłowych, do magazynowania gnojówki i gnojowicy, na wody odciekowe ze składowisk odpadów oraz jako filtry biologiczne.

Podstawowym elementem zbiornika jest żelbetowa monolityczna płyta denna zazwyczaj z betonu klasy C20/25, wykonywana na podbudowie składającej się z następujących warstw: dobrze zagęszczony piasek i żwir, beton podkładowy grubości około 100 mm (klasa C12/15), izolacja pozioma z dwóch warstw folii (warstwa poślizgowa). Płyta denna może być zbrojona siatkami. Na jej obwodzie wyprowadza się strzemiona po obu stronach rowka w pierścieniu fundamentowym, betonowanym po zmontowaniu prefabrykowanych elementów ściennych i wstępnym zaciśnięciu pionowych styków (pierwszy etap sprężenia).

Ściana zbiorników jest montowana z elementów prefabrykowanych typu: Standard, Mega i Flexi, o podstawowej wysokości równej 6 m, wytwarzanych z użyciem betonu klasy C35/45, o stopniu wodoszczelności W12 i stopniu mrozoodporności F100. Z prefabrykatów Standard (rys. 1a) wykonuje się zbiorniki o pojemności od 122 do 6861 m³ oraz średnicy od 7,2 do 44,7 m, z prefabrykatów Mega (rys. 1b) zbiorniki o pojemności od 122 do 7640 m³ i średnicy od 11 do 44,7 m, a z prefabrykatów Flexi (rys. 1c) – zbiorniki o pojemności od 38 do 718 m³ i średnicy od 4,1 do 12,4 m.



Rys. 1. Elementy ścienne: a) Standard, b) Mega, c) Flexi

Fig. 1. Wall panels: a) Standard, b)Mega, c) Flexi

Kolejność wykonania ścian zbiorników jest następująca:

- wytyczenie położenia elementów na obwodzie płyty dennej,
- montaż elementów prefabrykowanych na podkładkach stalowych lub z tworzyw sztucz-_ nych oraz stabilizacja płyt za pomocą rozpór mocowanych do dna zbiornika,
- wciąganie cięgien sprężających oraz montaż zakotwień,
- _ wstępny etap sprężenia (20% wartości siły docelowej w cięgnie),
- zdjęcie rozpór,
- zabetonowanie pierścienia fundamentowego,
- wypełnienie pionowych styków,
- sprężenie docelowe (sprężenie uzupełniające do 100% wartości siły docelowej w cięgnie).

Celem pierwszego etapu sprężenia jest stabilizacja elementów ściennych, właściwe ustawienie prefabrykatów i zaciśnięcie styków między nimi. W etapie tym naciąga się 3 cięgna sprężające (środkowe, dolne, i górne) z siłą równą 20% wartości siły docelowej (P_0). W tym etapie realizacji pionowe styki nie są jeszcze wypełnione betonem. Przed przystąpieniem do naciągu trzeba zluzować podpory montażowe. Podpory te można zdemontować po wykonaniu wstępnego sprężenia.

W przypadku zbiorników o większej pojemności sprężenie docelowe realizowane jest w dwóch etapach. W pierwszym etapie sprężenia w każdym cięgnie wprowadzana jest siła naciągowa o wartości 0,6 Po, po uprzednim wypełnieniu pionowych styków mieszanką betonową na cemencie ekspansywnym. Z uwagi na niewielki przekrój poprzeczny styku, mieszanka betonowa wykonywana jest na kruszywie żwirowym o uziarnieniu do 2-8 mm. Mieszanka podawana jest od górnej krawędzi ściany i zagęszczana mechanicznie. Warunkiem przystąpienia do sprężenia ściany zbiornika jest uzyskanie przez beton wypełniający styki wytrzymałości na ściskanie większej niż 20 MPa. W tym etapie sprężenia mamy do czynienia z przegubowo przesuwnym połączeniem ściany z dnem zbiornika. Drugi etap sprężenia, czyli wprowadzenie całkowitej siły sprężającej P_0 , realizowany jest po zabetonowaniu pierścienia fundamentowego i osiągnięciu przez beton wytrzymałości na ściskanie powyżej 20 MPa.

Montaż elementów prefabrykowanych i wstępny etap sprężenia mają znaczący wpływ na pracę statyczną ściany zbiornika. Duże przemieszczenia lokalne oraz wychylenia elementów z pionu mogą wywołać dodatkowe momenty zginające oddziałujące na ścianę zbiornika. W celu rozeznania ww. zjawiska uznano za konieczne przeprowadzenie stosownych badań doświadczalnych podczas realizacji dwóch zbiorników na terenie oczyszczalni ścieków w Krempnej (2008) oraz trzech zbiorników na terenie oczyszczalni ścieków w Gdowie (2009). Niektóre wyniki uzyskane z pierwszych badań doświadczalnych przeprowadzonych na tego typu obiektach przedstawiono w pracach [3], [4] i [5].

3. Badania doświadczalne przeprowadzone na zbiornikach w Krempnej

3.1. Opis zbiorników w Krempnej

Dwa zbiorniki o pojemności jednostkowej 300 m³ zostały posadowione na wspólnej płycie fundamentowej na terenie pomiędzy lokalną drogą i rzeką Wisłoką. Wzajemne usytuowanie dwóch zbiorników i rozmieszczenie elementów prefabrykowanych przedstawiono na rys. 2. Przekrój pionowy zbiornika oraz szczegóły konstrukcyjne połączenia prefabrykatu ściennego z dnem zbiornika i płyt między sobą przedstawiono na rys. 3. Ściana każdego zbiornika wykonana jest z 12 elementów prefabrykowanych typu Standard o szerokości 2,34 m i długości 4,97 m. Każdy element posiada 8 żeber poziomych o zmiennej szerokości na wysokości płyty i dwa żebra pionowe. Grubość płyty w przekroju przez żebro wynosi 0,22 m, natomiast w przekroju przez płytę między żebrami 0,08 m.

Zaprojektowano sprężenie ściany zbiornika za pomocą 8 pojedynczych stalowych cięgien bez przyczepności łączonych w jednym punkcie na obwodzie zbiornika. Wszystkie punkty połączeń zostały zlokalizowane w jednym przekroju pionowym na wysokości płyty nr 12 (rys. 2). Oznacza to, że łączniki typu Dywidag miały być schowane pomiędzy poziomymi i pionowymi żebrami, na zewnętrznej powierzchni płyty prefabrykowanej. Rozmieszczenie żeber poziomych i pionowych na elemencie prefabrykowanym, przekrój poprzeczny płyty oraz rozmieszczenie cięgien sprężających na wysokości płyty prefabrykowanej przedstawiono na rys. 4. Rzędne cięgien podano, przyjmując początek układu współrzędnych na dolnej krawędzi elementu prefabrykowanego.

Oba zbiorniki należało sprężyć 8 cięgnami wykonanymi ze stali Bridon – Dyform L-R o średnicy 12,7 mm z docelową wartością siły naciągu 145 kN. Przewidziano następującą kolejność naciągu, 6, 8, 1, 3, 5, 7, 2 i 4. We wstępnym sprężaniu, zgodnie z projektem należało zrealizować naciąg trzech cięgien w kolejności 6, 1 i 8 z siłą 30 kN po zakończeniu montażu elementów prefabrykowanych. Do docelowego etapu sprężania można było przystąpić po wykonaniu pierścienia fundamentowego z betonu klasy C20/25, wodoszczelności W6 i stosunku w/c < 0,5. Do mieszanki betonowej zastosowano kruszywo o maksymalnym uziarnieniu 16 mm. Styki pionowe wypełniono betonem ekspansywnym klasy C25/30 na kruszywie o maksymalnym uziarnieniu 8 mm i stosunku w/c \leq 0,55.

Widok zmontowanych zbiorników przedstawiono na rys. 5. Widoczne na tym rysunku są elementy prefabrykowane bez wciągniętych cięgien sprężających, zbrojenie pierścienia fundamentowego oraz punkty pomiarów geodezyjnych na wewnętrznej powierzchni ściany zbiornika przy górnej krawędzi.



Rys. 2. Przekrój poziomy zbiorników i wzajemne ich usytuowanie oraz numeracja prefabrykowanych elementów użebrowanych

Fig. 2. Horizontal cross section and arrangement of the tanks also numeration of ribbed precast panels



Rys. 3. Przekrój pionowy zbiornika oraz szczegóły połączeń płyty z fundamentem i płyt między sobą

Fig. 3. Vertical tank cross section and joint's details of precast wall to the foundation slab also between elements

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ



Rys. 4. Widok prefabrykatu, przekrój pionowy i poziomy oraz rozmieszczenie cięgien sprężających Fig. 4. View of precast panel, vertical and horizontal cross-section, arrangement of unbonded tendons



Rys. 5. Widok zmontowanych zbiorników Fig. 5. View of tanks after erection

3.2. Program i przebieg geodezyjnych pomiarów geometrii zbiorników

Przewidziano następujący program badań:

- pomiar dokładności montażu elementów prefabrykowanych, tj. wyznaczenie odległości dolnej i górnej krawędzi każdego elementu prefabrykowanego od środka zbiornika,
- określenie ewentualnego wychylenia każdego elementu prefabrykowanego z pionu,
- pomiar zmiany geometrycznego usytuowania poszczególnych płyt ściennych w wyniku wstępnego sprężenia, któremu towarzyszy zaciskanie pionowych styków. Uformowanie obwodu zbiornika o ścianie łamanej może mieć istotny wpływ na stan naprężenia w elementach prefabrykowanych w kolejnych etapach realizacji.

W celu przeprowadzenia pomiarów geodezyjnych na każdym prefabrykowanym elemencie oznaczono 6 punktów odniesienia, w każdym narożu płyty oraz dwa w środkowej części na wysokości 3 żebra, tj. 1,58 m od dolnej krawędzi płyty. Pomiary przeprowadzono trzykrotnie tachimetrem laserowym typu Topcon GPT 9003A w dniach 4 i 19 grudnia 2008 oraz 28 stycznia 2009 roku.

Tachimetrem skanującym nazywamy zrobotyzowaną stację pomiarową wyposażoną w dalmierz bezzwierciadlany, która ma możliwość programowania obserwacji kątów i odległości. Tachimetr Topcon 9003A wyposażony jest w serwomotory, działa pod systemem MS-DOS. Funkcję skanowania realizuje zespół bezlustrowego dalmierza, serwomotoru i komputera polowego z programem sterującym. Impulsowy dalmierz wyznacza odległość do każdej powierzchni, pod warunkiem że powierzchnia nie jest błyszcząca, a kąt między celową a powierzchnią jest większy niż 15°. Odległość do 1200 m dalmierz mierzy bez użycia lustra z dokładnością do 3 mm + 2 mm/km. Serwomotor o siedmiu stopniach prędkości pozwala na obrót z prędkością 85°/s i przesuwa automatycznie oś celową lunety w płaszczyźnie poziomej i pionowej z minimalną rozdzielczością 1". Gęstość siatki skanowania sterowana jest przez zadanie skoku obrotu alidady i skoku ruchu pionowego lunety. Z tachimetrem współpracuje komputer polowy FC-100 ze specjalistycznym oprogramowaniem Filed Scan. Umożliwia to sterowanie pomiarem, przechowywanie danych i wstępne opracowanie wyników. W komputerze polowym działającym pod systemem Windows zastosowano kolorowy

dotykowy wyświetlacz o rozdzielczości 240×320 punktów. Wyposażony jest w: złącza kart CF i SD, porty RS 232 i USB. Pole skanowania w postaci wieloboku o dowolnym kształcie można wskazać na wyświetlaczu na cyfrowym zdjęciu obiektu. Zdjęcie musi być wykonane aparatem skalibrowanym w programie Pi-Calib.

Pomiar odległości bez pryzmatu odbywa się w dwóch trybach: standard od 1,5 do 250 m z dokładnością ± 5 mm i long od 5 do 2000 m z dokładnością ± 10 mm + 10 mm/km. Pomiar odległości z zastosowaniem 1 pryzmatu do 4000 m z dokładnością ± 2 mm + 2 mm / km. Zastosowana luneta pozwala na powiększenie 30-krotne, pole widzenia 1°30', zdolność rozdzielcza 3" i minimalna celowa 1,3 m. Maksymalna szybkość śledzenia to 15°/s, zakres wyszukiwania celu $\pm 5^{\circ}$, zasięg śledzenia dla 1 pryzmatu od 8 do 1000 m, dla pryzmatu 360° od 10 do 600 m. Średni czas pracy urządzenia to 6 godzin przy zastosowaniu dwóch baterii (2×3 h). Więcej informacji, testy urządzenia oraz przykłady skanowania obiektów inżynierskich podano w pracy [6].

3.3. Wyniki pomiarów geodezyjnych

Po opracowaniu wyników otrzymanych z pomiarów geodezyjnych zestawiono w tab. 1 i 2 dla górnej i dolnej krawędzi ściany wyliczone różnice odległości punktów pomiarowych od środka zbiornika w kolejnych etapach sprężania ściany zbiornika nr 1 i nr 2. Określenie "1" oznacza etap montażu – 8 XII 2008, "2" – etap wstępnego sprężenia – 19 XII 2008 i "3" – drugi pomiar po etapie wstępnego sprężenia – 28 I 2009 r. W kolumnach oznaczonych jako "L-P" podano różnice pomiarów dokonanych na lewej i prawej krawędzi każdej płyty po zmontowaniu ściany zbiornika (etap 1). Z porównania zestawionych wartości wynika, że mimo prowadzenia starannego montażu wiele elementów jest obróconych. W zbiorniku nr 1 na górnej krawędzi w przypadku 9 elementów skręcenie wynosi 10 i więcej milimetrów (wartość maksymalna 46 mm), na dolnej krawędzi w przypadku 5 elementów skręcenie wynosi 10 i więcej milimetrów (wartość maksymalna 56 mm). W zbiorniku nr 2 na górnej krawędzi w przypadku 11 elementów skręcenie wynosi 10 i więcej milimetrów (wartość maksymalna 76 mm), na dolnej krawędzi w przypadku 10 elementów skręcenie wynosi 10 i więcej milimetrów (wartość maksymalna 74 mm).

Bardzo istotnym elementem w ocenie poprawności montażu i w ocenie wpływu kolejności naciągu cięgien sprężających w fazie montażowej na geometrię ściany zbiornika, jest utrzymanie elementów prefabrykowanych w pozycji pionowej. W tabeli 3 przedstawiono różnice odległości punktów pomiarowych od środka zbiorników nr 1 i nr 2 pomierzonych na górnej i dolnej krawędzi elementów prefabrykowanych. Z porównania zestawionych wartości wynika, że po zakończeniu montażu elementów prefabrykowanych na zbiorniku nr 1 ich średnie wychylenie z pionu do środka zbiornika wynosiło -4,33 mm na górnej krawędzi ściany. Po wstępnym sprężeniu ściany trzema cięgnami z siłą 30 kN, średnie wychylenie ściany z pionu do środka zbiornika wynosiło -3,71 mm na górnej krawędzi ściany. Oznacza to, że we wstępnym sprężeniu trzema cięgnami dolna krawędź ściany zbiornika przesunęła się średnio o 0,63 mm do środka zbiornika w stosunku do górnej krawędzi. W wyniku oddziaływania pierścienia fundamentowego oraz ekspansji betonu wypełniającego styki dolna krawędź ściany zbiornika przesunęła sie do środka o dalsze 3.08 mm w stosunku do krawedzi górnej. Drugi etap pomiarowy został wykonany po zabetonowaniu pierścienia fundamentowego i wypełnieniu pionowych styków betonem ekspansywnym. Średnie wychylenie ściany zbiornika z pionu do środka zbiornika w tym etapie wynosiło -0.63 mm na górnej krawedzi ściany.

			Krawęd	lź górna		Krawędź dolna						
element	krawedź		Δ	R _i			Δ	R _i				
	ki u v qu2	"2–1"	"3–1"	"3–2"	Etap ,,1" ,,L-P"	"2–1"	"3–1"	"3–2"	Etap ,,1" ,,L-P"			
1	L	-1	0	1	22	-33	-37	-4	6			
	Р	0	3	3	-33	-2	-8	-6	-0			
2	L	-2	-2	0	16	-2	-4	-2	56			
2	Р	-1	2	3	-40	-3	-9	-6	-30			
2	L	1	1	0	14	1	-3	-4	15			
5	Р	-2	0	2	-14	-3	-6	-3	-13			
4	L	-1	1	2	10	-4	-6	-2	7			
4	Р	-4	-5	-1	10	-8	-11	-3				
5	L	-8	-4	4	0	-7	-10	-3	2			
5	Р	-5	-3	2	0	-7	-9	-2	-3			
6	L	-4	-6	-2	18	-3	-7	-4	17			
0	Р	-11	-16	-5	10	-10	-6	4	17			
7	L	-15	-16	-1	12	-8	-10	-2	9			
	Р	-4	-5	-1	-12	0	-2	-2	-9			
۰ ۵	L	-2	-2	0	10	-4	-6	-2	1			
0	Р	-1	1	2	-10	4	0	-4	-1			
0	L	-4	-5	-1	1	-1	0	1	1			
,	Р	-6	0	6	1	3	4	1	4			
10	L	-5	-3	2	26	-1	1	2	26			
10	Р	-5	-4	1	20	4	1	-3	20			
11	L	0	4	4	7	3	5	2	6			
	Р	-3	-6	-3	/	-16	-20	-4				
12	L	0	4	4	18	-1	0	1	17			
12	Р	-3	-2	1	10	-3	-9	-6	1/			
śrec	dnio	-3.58	-2.63	0.96		-4.21	-6.33	-2.13				

Zmiana odległości punktów pomiarowych ΔR_i od środka zbiornika nr 1, na górnej i dolnej krawędzi elementów prefabrykowanych w wyniku wstępnego sprężenia

169 Tabela 2

			Krawęd	ź górna		Krawędź dolna					
element	krawędź	"2–1"	"3–1"	"3–2"	Etap ,,1" ,,L-P"	"2–1"	"3–1"	"3–2"	Etap ,,1" ,,L-P"		
1	L	-3	-3	0	27	-4	-3	1	41		
1	Р	-5	-3	2	-3/	-5	-5	0	-41		
2	L	-4	-4	0	15	-5	-5	0	0		
2	Р	-5	-6	-1	-15	-2	-3	-1	-8		
2	L	-4	-2	2	15	-6	-1	5	12		
3	Р	-9	-11	-2	-13	-7	-7	0	-13		
4	L	-3	-6	-3	76	-5	-7	-2	74		
4	Р	0	-1	-1	/0	-2	-3	-1	/4		
5	L	0	-1	-1	26	2	0	-2	26		
3	Р	0	-7	-7	-20	1	-1	-2	-20		
6	L	13	13	0	20	1	1	0	7		
0	Р	-10	-9	1	-20	-7	-5	2	/		
7	L	-9	-8	1	16	-10	-12	-2	24		
/	Р	0	4	4	10	3	0	-3	24		
0	L	4	6	2	24	4	2	-2	21		
8	Р	5	3	-2	4	7	4	-3	-31		
0	L	1	-2	-3	20	2	0	-2	22		
9	Р	4	3	-1	-30	4	1	-3	-33		
10	L	3	1	-2	22	-62	-4	-2	20		
10	Р	-54	-58	-4	23	4	-66	-2	30		
11	L	-2	-3	-1	61	-2	-5	-3	56		
11	Р	-3	-5	-2	-01	-3	-5	-2	-30		
12	L	3	3	0	(-5	-8	-3	11		
12	Р	-1	0	1	0	-4	-3	1	11		
śrec	dnio	-3.29	-4	-0.71		-4.54	-5.63	-1.08			

Zmiana odległości punktów pomiarowych △*R*, od środka zbiornika nr 2, na górnej i dolnej krawędzi elementów prefabrykowanych w wyniku wstępnego sprężenia

			Zbiornik nr	1		Zbiornik nr 2	
element	krawędź		"Góra-Dół"			"Góra-Dół"	
		,,1"	,,,2"	,,3"	,,1"	,,2"	,,3"
1	L	-26	6	11	-1	0	-1
	Р	1	3	12	-5	-5	-3
2	L	8	8	10	-4	-3	-3
2	Р	-2	0	9	3	0	0
2	L	-2	-2	2	-3	-1	-4
3	Р	-3	-2	3	-1	-3	-5
4	L	-10	-7	-3	-3	-1	-2
4	Р	-13	-9	-7	-5	-3	-3
5	L	-7	-8	-1	-1	-3	-2
5	Р	-10	-8	-4	-1	-2	-7
6	L	-9	-10	-8	-11	1	1
0	Р	-10	-11	-20	2	-1	-2
7	L	-13	-20	-19	-1	0	3
	Р	-10	-14	-13	7	4	11
0	L	-15	-13	-11	0	0	4
°	Р	-6	-11	-5	-7	-9	-8
0	L	-3	-6	-8	-10	-11	-12
9	Р	0	-9	-4	-13	-13	-11
10	L	4	0	0	-18	-13	-13
10	Р	4	-5	-1	-11	-1	-3
11	L	5	2	4	-1	-1	1
	Р	-8	5	6	4	4	4
12	L	11	12	15	-8	0	3
12	Р	10	10	17	-3	0	0
śre	średnio		-3.71	-0.63	-3.79	-2.54	-2.17

Różnice odległości punktów pomiarowych od środka zbiorników nr 1 i nr 2 pomierzonych na górnej i dolnej krawędzi elementów prefabrykowanych

W przypadku zbiornika nr 2 średnie wychylenie elementów prefabrykowanych z pionu wynosiło –3,79 mm na górnej krawędzi ściany. Po wstępnym sprężeniu ściany średnie wychylenie z pionu do środka zbiornika wynosiło –2,54 mm na górnej krawędzi ściany. Oznacza to, że we wstępnym sprężeniu trzema cięgnami dolna krawędź ściany zbiornika przesunęła się średnio o 1,25 mm do środka zbiornika w stosunku do górnej krawędzi. W wyniku oddziaływania pierścienia fundamentowego oraz ekspansji betonu wypełniającego styki dolna krawędź ściany zbiornika przesunęła się do środka o dalsze 0,38 mm w stosunku do krawędzi górnej. W etapie pomiarowym "3" średnie wychylenie ściany z pionu do środka zbiornika wynosiło –2,17 mm na górnej krawędzi ściany.

Rozkłady przemieszczeń radialnych wyznaczonych na górnych i dolnych punktach pomiarowych po wstępnym etapie sprężenia (3 cięgna obwodowe oznaczone numerami: 6, 8, 1) i zabetonowaniu pierścienia fundamentowego oraz pionowych styków, przedstawiono na rys. 6. Znakiem (–) minus oznaczono przemieszczenia elementów prefabrykowanych do środka zbiornika. Z rozkładu przemieszczeń wynika, że na zbiorniku nr 1 elementy 9, 11 i 12 nieznacznie przemieściły się na zewnętrz zbiornika. Największe przemieszczenia odnotowano na pionowych stykach między elementami 6–7 do 16 mm, 11–12 do 20 mm i 12–1 do 37 mm. Należy zauważyć, że jako ostatni został zamontowany element nr 12 i na nim też zostały umieszczone zakotwienia cięgien sprężających. Średnie przemieszczenie radialne elementów prefabrykowanych we wstępnym etapie sprężenia wynosiło 3,58 mm i 4,21 mm odpowiednio na górnej i dolnej krawędzi ściany zbiornika nr 1.

Z rozkładu przemieszczeń dla zbiornika nr 2 (rys. 6) wynika, że elementy 6, 7, 8, 9 i 12 nieznacznie przemieściły się na zewnętrz zbiornika. Największe przemieszczenia odnotowano na pionowych stykach między elementami 3–4 do 11 mm, 5–6 do 13 mm, 6–7 do 12 mm i 10–11 do 66 mm. Jako ostatni został zamontowany element nr 11, zakotwienia cięgien sprężających zostały rozmieszczone na elemencie nr 12. Średnie przemieszczenie radialne elementów prefabrykowanych we wstępnym etapie sprężenia wynosiło 3,29 mm i 4,54 mm odpowiednio na górnej i dolnej krawędzi ściany zbiornika nr 2.

Istotnym problemem jest geometria zbiornika w przekroju poziomym, zmieniająca się w kolejnych etapach realizacji konstrukcji. W tabeli nr 4 zestawiono różnice ΔR odległości punktów pomierzonych na górnej i dolnej krawędzi elementów prefabrykowanych od średniego promienia R_{sr} zbiornika nr 1 i nr 2. Rozkłady tych odchyleń na obwodzie zbiornika w kolejnych etapach "1" i "3" na górnym i dolnym poziomie pomiarowym przedstawiono na rys. 7 i 8. Znak (–) minus oznacza, że dany element jest wewnątrz promienia średniego. Maksymalne odchylenie punktu pomiarowego w zbiorniku nr 1 wynosi 66 mm, a punkt jest zlokalizowany na elemencie nr 1, przy styku pionowym z elementem nr 12, który jak wspomniano był montowany jako ostatni. Dla zbiornika nr 2 rozkłady tych odchyleń przedstawiono też na rys. 7 i 8. Maksymalne odchylenie punktu pomiarowego dla tego zbiornika wynosi 61 mm, a punkt jest zlokalizowany na elemencie nr 11, przy styku pionowym z elementem nr 10.

				Zbiorn	ik nr 1		Zbiornik nr 2						
element	krawędź	krav	wędź gó	órna	kra	wędź do	olna	krav	wędź go	órna	kra	wędź do	olna
		"1"	"2"	,,3"	,,1"	,,2"	,,3"	"1"	,,2"	,,3"	"1"	,,2"	"3"
1	L	-56	-54	-54	-33	-64	-66	-9	-9	-8	-12	-11	-9
	Р	-23	-20	-18	-27	-27	-31	28	26	29	29	29	30
2	L	-18	-17	-18	-29	-29	-29	28	27	28	28	28	29
2	Р	28	30	32	27	26	22	43	41	41	36	39	39
2	L	25	29	28	24	27	25	39	38	41	38	37	43
3	Р	39	40	41	39	38	37	54	48	47	51	49	50
4	L	34	36	37	41	39	39	42	42	40	41	41	40
4	Р	24	23	21	34	28	27	-34	-31	-31	-33	-30	-30
5	L	22	17	20	26	21	20	-38	-35	-35	-41	-34	-35
5	Р	22	20	21	29	24	24	-12	-9	-15	-15	-9	-10
	L	15	14	11	21	20	18	-25	-9	-8	-18	-12	-11
0	Р	-3	-11	-17	4	-4	2	-5	-12	-10	-11	-13	-10
7	L	-8	-20	-22	2	-4	-4	-9	-15	-13	-12	-17	-18
/	Р	4	3	1	11	13	13	-25	-22	-17	-36	-28	-30
0	L	1	2	1	13	11	11	-31	-24	-21	-35	-26	-27
8	Р	11	13	14	14	20	18	-7	1	0	-4	8	6
0	L	14	13	11	14	15	18	-6	-2	-4	0	7	6
9	Р	13	10	15	10	15	18	24	31	31	33	42	40
10	L	13	11	12	6	7	11	20	26	25	34	37	36
10	Р	-13	-15	-15	-20	-14	-15	-3	-54	-57	4	-55	-56
11	L	-20	-17	-14	-28	-23	-19	-58	-57	-57	-61	-58	-60
	Р	-27	-27	-31	-22	-36	-38	3	3	2	-5	-3	-4
12	L	-31	-28	-25	-45	-44	-41	-4	2	3	0	0	-2
12	Р	-49	-49	-49	-62	-63	-67	-10	-8	-6	-11	-10	-8

Odchylenia ΔR [mm] punktów pomiarowych zbiornika nr 1 i nr 2, na górnej i dolnej krawędzi od promienia średniego R_{sr}



- Rys. 6. Rozkłady przemieszczeń radialnych pomierzonych na górnej i dolnej krawędzi ściany we wstępnym etapie sprężenia zbiornika nr 1 i zbiornika nr 2 (3 cięgna 6, 8, 1)
- Fig. 6. Distributions of radial dispalcements measured on top and bottom wall edge in preliminary stage of post-tensioning tank no. 1 and no. 2 (3 tendons no. 6, 8, 1)



- Rys. 7. Rozkłady odchyleń kolejnych punktów pomiarowych na obwodzie zbiornika od promienia średniego po montażu ściany zbiornika nr 1 oraz zbiornika nr 2
- Fig. 7. Distributions of radial deviations of sequence measuring points at circumference tank from average radius after erection of tank wall no. 1 and no. 2





Fig. 8. Distributions of radial deviations of sequence measuring points at circumference tank from average radius after preliminary post-tensioning of tank wall no. 1 and no. 2

4. Badania doświadczalne przeprowadzone na zbiornikach w Gdowie

4.1. Opis zbiorników w Gdowie

W ramach prowadzonej rozbudowy oczyszczalni ścieków przewidziano wykonanie 3 zbiorników. Zbiornik nr 1 o pojemności $V = 400 \text{ m}^3$ oraz identyczne dwa zbiorniki nr 2 i nr 3 o pojemności jednostkowej $V = 1200 \text{ m}^3$ zostały zaprojektowane z zastosowaniem identycznego typowego elementu prefabrykowanego. Oznacza to, że wymiary geometryczne, takie jak: wysokość elementów, szerokość, grubość pionowych i poziomych żeber oraz ich wzajemne odległości, są takie same bez względu na wielkość zbiornika. Rozwiązania konstrukcyjne ścian zbiorników różniły się liczbą obwodowych cięgien bez przyczepności (odmienne usytuowanie otworów w żebrach pionowych) oraz wartością siły naciągowej. Poszczególne zbiorniki zostały posadowione na niezależnych fundamentach w postaci kołowych płyt żelbetowych.

Ściana zbiornika nr 1 jest wykonana z 13 elementów prefabrykowanych typu standard o szerokości 2,34 m i długości 5,97 m. Każdy element posiada 11 żeber poziomych o zmiennej szerokości na wysokości płyty i dwa żebra pionowe. Grubość elementu w przekroju przez żebro wynosi 0,22 m, natomiast w przekroju przez płytę między żebrami 0,08 m. Górna krawędź elementu zakończona jest żebrem poziomym o szerokości 0,19 m, natomiast na dolnej krawędzi prefabrykat kończy się płytą. Ta część elementu prefabrykowanego na wysokości do 0,15 m jest chropowata w celu zapewnienia lepszej przyczepności z betonem pierścienia fundamentowego, wylewanego po zakończeniu montażu elementów prefabrykowanych i zrealizowaniu wstępnego naciągu w 3 cięgnach. Forma do produkcji elementu prefabrykowanego na tej wysokości, jak również na całej powierzchni pionowego styku, została pokryta środkiem

opóźniającym wiązanie betonu. Po wyjęciu elementu z formy zewnętrzna warstwa zaczynu została spłukana silnym strumieniem wody, pozostawiając chropowatą powierzchnię. Teoretyczna odległość wewnętrznej powierzchni prefabrykatu od środka zbiornika, mierzona w osi prefabrykatów wynosi 4,641 m, natomiast mierzona w linii pionowego styku wynosi 4,780 m. Elementy ścienne zaprojektowano z betonu klasy C35/45 (mieszanka betonowa o stosunku w/c < 0,45). Przekrój poziomy i pionowy zbiornika przedstawiono na rys. 9.



Rys. 9. Przekrój poziomy i pionowy zbiornika nr 1

Fig. 9. Horizontal and vertical cross section of tank no. 1

Zbiornik nr 1 należało sprężyć 12 cięgnami wykonanymi ze stali Bridon-Dyform L-R o średnicy 12,7 mm z docelową wartością siły naciągowej 145 kN. Projektowane wydłużenie cięgna wynosiło 139 mm. We wstępnym etapie sprężenia zrealizowano naciąg trzech cięgien w kolejności 8, 1, 12 z siłą 30 kN, po zakończeniu montażu elementów prefabrykowanych. Do docelowego etapu sprężania można było przystąpić po wykonaniu pierścienia fundamentowego z betonu klasy C20/25, wodoszczelności W 6 i stosunku w/c < 0,5. Do mieszanki betonowej zastosowano kruszywo o maksymalnym uziarnieniu 16 mm. Ponadto styki pionowe między elementami prefabrykowanymi należało wypełnić betonem ekspansywnym klasy C25/30 na kruszywie otoczakowym o maksymalnym uziarnieniu 8 mm oraz stosunku w/c < 0,55. Warunkiem przystąpienia do sprężania docelowego było osiągnięcie przez beton wypełniający styki wytrzymałości na ściskanie powyżej 20 MPa. Przewidziano następującą kolejność naciągu cięgien: 8, 1, 12, 4, 11, 10, 9, 7, 6, 5, 3, i 2.

Ściany zbiorników nr 2 i nr 3 wykonano z 22 elementów prefabrykowanych typu standard o szerokości 2,34 m i długości 5,97 m. Każdy element posiada 11 żeber poziomych. Teoretyczna odległość wewnętrznej powierzchni prefabrykatu od środka zbiornika, mierzona w osi prefabrykatów wynosi 7,973 m, natomiast mierzona w linii pionowego styku jest równa 8,055 m. Przekrój poziomy zbiornika przedstawiono odpowiednio na rys. 10. We wnękach elementu oznaczonego liczbą 19 rozmieszczone zostały zakotwienia cięgien sprężających na zbiorniku nr 2, natomiast we wnękach elementu 21 rozmieszczone zostały zakotwienia cięgien sprężających na zbiorniku nr 3.



Rys. 10. Przekrój poziomy zbiornika nr 2 i nr 3 Fig. 10. Horizontal cross section of tank no. 2 and no. 3

Zbiorniki nr 2 i nr 3 należało sprężyć 13 cięgnami wykonanymi ze stali Bridon-Dyform L-R o średnicy 15,2 mm z docelową wartością siły naciągowej 200 kN. We wstępnym etapie sprężenia zrealizowano naciąg trzech cięgien w kolejności 10, 1, 13 z siłą 30 kN po zakończeniu montażu elementów prefabrykowanych. Następnie należało wypełnić pionowe styki betonem ekspansywnym klasy C25/30 i po osiągnięciu przez niego odpowiedniej wytrzymałości na ści-skanie osiowe wykonać I etap sprężenia. Siłę naciągową o wartości 120 kN wprowadzono do każdego cięgna w kolejności: 10, 1, 13, 4, 5, 12, 11, 9, 8, 7, 6, 3 i 2. Zgodnie z projektem, po I etapie sprężenia należało wykonać pierścień fundamentowy z betonu klasy C20/25 i po osiągnięciu wytrzymałości na ściskanie > 20 MPa wykonać drugi etap sprężenia, wprowadzając do każdego cięgna pozostałą różnicę wartości siły naciągowej do projektowanej wartości 200 kN, zachowując tę samą kolejność naciągu cięgien. Projektowane wydłużenie cięgna w I etapie sprężenia wynosiło 130 mm, w drugim etapie sprężenia 115 mm.



4.2. Program i przebieg geodezyjnych pomiarów geometrii zbiorników

Uformowanie obwodu zbiornika o ścianie łamanej może mieć istotny wpływ na stan naprężenia w elementach prefabrykowanych, dlatego też w ramach podjętego tematu przewidziano następujący program badań doświadczalnych:

- pomiar dokładności montażu elementów prefabrykowanych, tj. geodezyjne wyznaczenie odległości dolnej i górnej krawędzi każdego elementu prefabrykowanego od środka zbiornika. Ponadto celem pomiarów geodezyjnych było określenie ewentualnego wychylenia każdego elementu prefabrykowanego z pionu, jak również możliwego obrócenia płaszczyzny prefabrykatu w stosunku do średniego promienia ściany zbiornika,
- pomiar zmiany geometrycznego usytuowania poszczególnych elementów prefabrykowanych w wyniku wstępnego etapu spreżenia, któremu towarzyszy zaciskanie się pionowych styków. Skutkuje to jednoczesnym przemieszczeniem się płyt wzdłuż promienia z możliwym obróceniem się płyt po obwodzie zbiornika.

4.3. Wyniki pomiarów geodezyjnych

Zbiornik nr 1

Po opracowaniu wyników otrzymanych z pomiarów geodezyjnych zestawiono w tabeli 5 odpowiednio dla górnej i dolnej krawędzi ściany, wyliczone różnice odległości punktów pomiarowych od środka zbiornika w kolejnych etapach sprężania ściany zbiornika nr 1. Cyfry "1", "2" i "3" oznaczają odpowiednio: etap montażu elementów prefabrykowanych, etap wstępnego sprężenia i etap końcowego sprężenia. W ostatniej kolumnie oznaczonej jako "L-P", podano różnice pomiarów dokonanych na lewej i prawej krawędzi każdej płyty po zmontowaniu ściany zbiornika (etap "1"). Z porównania zestawionych wartości wynika, że mimo prowadzenia starannego montażu wiele elementów jest obróconych. Na górnej krawedzi w przypadku 6 elementów skręcenie wynosi 10 i więcej milimetrów (wartość maksymalna 18 mm). Na dolnej krawędzi w przypadku 4 elementów skręcenie wynosi 10 i więcej mm (wartość maksymalna 16 mm).

Bardzo istotnym elementem w ocenie poprawności montażu i w ocenie wpływu kolejności naciągu cięgien w fazie montażowej na geometrię ściany zbiornika jest utrzymanie elementów prefabrykowanych w pozycji pionowej. W tabeli 6 zestawiono różnice odległości punktów pomiarowych od środka zbiornika pomierzonych na górnej i dolnej krawędzi elementów prefabrykowanych. Z porównania zestawionych wartości wynika, że po zakończeniu montażu elementów prefabrykowanych ich średnie wychylenie z pionu do środka zbiornika wynosiło -0,04 mm na górnej krawędzi ściany. Po wstępnym sprężeniu ściany zbiornika trzema cięgnami z siłą 30 kN, średnie wychylenie ściany z pionu do środka zbiornika wynosiło -3 mm na górnej krawędzi ściany. W wyniku całkowitego sprężenia średnie wychylenie ściany z pionu do środka zbiornika wynosiło -2,88 mm na górnej krawędzi ściany (w tym etapie sprężenia ściana zbiornika była skrępowana obecnością pierścienia fundamentowego). Oznacza to, że we wstępnym sprężeniu trzema cięgnami górna krawędź ściany zbiornika przesunęła się średnio o 2,96 mm do środka zbiornika w stosunku do dolnej krawędzi. W docelowym etapie sprężenia krawędź górna cofnęła się o dalsze 0,12 mm w stosunku do krawędzi dolnej.

			Krawęd	lź górna		Krawędź dolna					
element	krawędź	"2–1"	"3–1"	"3–1" "3–2" Etap "1" "L–P"		"2–1"	"3–1"	"3–2"	Etap ,,1" ,,L–P"		
1	L	-6	-5	1	2	-6	-6	0	5		
1	Р	-6	-7	-1	2	-3	4	-1	5		
2	L	-6	-8	-2	10	-3	-5	-2	6		
2	Р	-6	-8	-2	-10	-1	0	1	-0		
2	L	-4	-3	1	16	-3	-4	-1	7		
5	Р	-8	-8	0	-10	-5	-5	0	_/		
4	L	-9	-11	-2	0	-6	-7	-1	4		
4	Р	-9	-10	-1	-9	-5	-6	-1	-4		
5	L	-8	-8	0	0	-2	-7	-5	10		
5	Р	-7	-8	-1	9	-3	-3	0	10		
6	L	-4	-6	-2	15	-7	-8	-1	16		
0	Р	-2	-4	-2	15	1	1	0	10		
7	L	-2	-3	-1	1.4	-2	-3	-1	10		
/	Р	-14	-16	-2	-14	-8	-9	-1	-10		
0	L	-14	-15	-1	12	-13	-13	0	0		
0	Р	-7	-8	-1	-12	-2	-3	-1	-9		
0	L	-3	-4	-1	1	-1	-3	-2	1		
9	Р	-5	-5	0	1	-1	-3	-2			
10	L	-7	-7	0	10	-1	-2	-1	12		
10	Р	-8	-11	-3	-18	-4	-5	-1	-12		
11	L	-9	-10	-1	2	-5	-8	-3	6		
	Р	-7	-6	1	5	-4	-5	-1	0		
12	L	-4	-2	2	2	-2	-1	1	0		
12	Р	-7	-10	-3	-5	-3	-6	-3			
12	L	-9	-11	-2	0	-10	-11	-1	2		
15	Р	-10	-12	-2	0	-5	-6	-1	3		
śre	dnio	-6,96	-7,92	-0,96		-4,00	-5,08	-1,08			

Zmiana odległości punktów pomiarowych △*R*, od środka zbiornika nr 1, na górnej i dolnej krawędzi elementów prefabrykowanych w wyniku wstępnego sprężenia

alamant	krowodź		"Góra–Dół"			ΔR_i	
element	KIAWĘUZ	"1"	"Góra-Dól" ""Góra-Dól" 6 -6 3 -6 6 -9 2 -7 6 -9 2 -7 6 -9 2 -7 6 -7 3 0 1 -2 5 1 2 1 1 -4 2 -2 5 1 2 -2 2 -2 2 -4 4 -5 1 -6 4 -6 4 -6 4 -8 3 -9 3 -9 3 -1 4 0 7 4 3 1 5 2 2 -1 4 -4	,,3"	"2–1"	"3–1"	"3–2"
1	L	-6	-6	-5	0	1	1
1	Р	-3	-6	-6	-3	-3	0
2	L	-6	-9	-9	-3	-3	0
2	Р	-2	-7	-10	-5	-8	-3
2	L	-6	-7	-5	-1	1	2
3	Р	3	0	0	-3	-3	0
4	L	1	-2	-3	-3	-4	-1
4	Р	6	2	2	-4	-4	0
5	L	4	-2	3	-6	-1	5
3	Р	5	1	0	-4	-5	-1
6	L	-2	1	0	3	2	-1
0	Р	-1	-4	-6	-3	-5	-2
7	L	-2	-2	-2	0	0	0
/	Р	2	-4	-5	-6	-7	-1
0	L	-4	-5	-6	-1	-2	-1
0	Р	-1	-6	-6	-5	-5	0
0	L	-4	-6	-5	-2	-1	1
9	Р	-4	-8	-6	-4	-2	2
10	L	-3	-9	-8	-6	-5	1
10	Р	3	-1	-3	-4	-6	-2
11	L	4	0	2	-4	-2	2
11	Р	7	4	6	-3	-1	2
12	L	3	1	2	-2	-1	1
12	Р	6	2	2	-4	-4	0
12	L	-2	-1	-2	1	0	-1
15	Р	1	-4	-5	-5	-6	-1
śre	dnio	-0,04	-3,00	-2,88	-2,96	-2,85	0,12

Różnice odległości punktów pomiarowych od środka zbiornika nr 1 pomierzonych na górnej i dolnej krawędzi elementów prefabrykowanych.

		I	Krawędź górna	a	K	rawędź doln	a
element	krawędź	"1"	"2"	"3"	"1"	"2"	,,3"
		montaż	wstępne sprężenie	całkowite sprężenie	montaż	wstępne sprężenie	całkowite sprężenie
1	L	-12	-11	-9	-6	-8	-7
	Р	-14	-13	-13	-11	-10	-10
	L	-14	-13	-14	-8	-7	-8
2	Р	-4	-3	-4	-2	1	3
2	L	-7	-4	-2	-1	0	0
5	Р	9	8	9	6	5	6
4	L	10	8	7	9	7	7
4	Р	19	17	17	13	12	12
5	L	14	13	14	10	12	8
5	Р	5	5	5	0	1	2
6	L	1	4	3	3	0	0
0	Р	-14	-9	-10	-13	-8	-7
7	L	-18	-13	-13	-16	-14	-14
/	Р	-4	-11	-12	-6	-10	-10
0	L	-6	-13	-13	-2	-11	-10
°	Р	6	6	6	7	9	9
0	L	-3	1	1	1	4	3
9	Р	-4	-2	-1	0	3	2
10	L	-5	-5	-4	-2	1	1
10	Р	13	12	10	10	10	10
11	L	12	10	10	8	7	5
	Р	9	9	11	2	2	2
12	L	1	4	7	-2	0	2
12	Р	4	4	2	-2	-1	-3
12	L	1	-1	-2	3	-3	-3
15	Р	1	-2	-3	0	-1	-1

Rozkłady przemieszczeń radialnych wyznaczonych na górnych i dolnych punktach pomiarowych po wstępnym etapie sprężenia (3 cięgna obwodowe oznaczone numerami 8, 1, 12) "2–1" oraz dla całkowitego sprężenia "3–1" ściany zbiornika przedstawiono na rys. 11. Z porównania podanych na rysunkach wartości widać, że większe przemieszczenia odnotowano na górnej krawędzi elementów prefabrykowanych. Znakiem (–) minus oznaczono przemieszczenia płyt do środka zbiornika. Z rozkładu przemieszczeń wynika, że tylko element nr 6 nieznacznie przemieścił się na dolnej krawędzi na zewnątrz, w końcowym etapie sprężenia. Największe przemieszczenia odnotowano na pionowych stykach między elementami 3–4 (do 11 mm), 4–5 (do 10 mm), 7–8 (do 16 mm), 10–11 (do 11 mm) i 12–13 (do 11 mm). Należy zauważyć, że jako ostatni został zamontowany element prefabrykowany oznaczony cyfrą 6. Zakotwienia obwodowych cięgien sprężających usytuowane zostały we wnękach elementu prefabrykowanego nr 6.



Rys. 11. Rozkłady przemieszczeń radialnych pomierzonych na górnej i dolnej krawędzi ściany we wstępnym etapie sprężenia zbiornika nr 1 (3 cięgna 8, 1, 12) i po całkowitym sprężeniu ściany (cięgna nr 8, 1, 12, 4, 11, 10, 9, 7, 6, 5, 3 i 2)

Fig. 11. Distributions of radial dispalcements measured on top and bottom wall edge in preliminary stage of post-tensioning tank no. 1 (3 tendons: 8, 1, 12) and after finally post-tensioning of tank wall (tendons no. 8, 1, 12, 4, 11, 10, 9, 7, 6, 5, 3 i 2)

Z przytoczonych danych w tabeli 6 wynika, że 87,9% i 78,2% przemieszczeń całkowitych odpowiednio na górnej i dolnej krawędzi elementów prefabrykowanych miało miejsce podczas wstępnego sprężenia ściany zbiornika. Średnie przemieszczenie radialne elementów prefabrykowanych w tym etapie sprężania wynosiło –6,96 mm i –4,00 mm odpowiednio dla górnej i dolnej krawędzi ściany zbiornika. W końcowym etapie sprężenia przemieszczenia te wynosiły odpowiednio –0,96 mm i –1,08 mm. Oznacza to, że w końcowym etapie sprężenia powinna być zamknięta rysa skurczowa pomiędzy elementami prefabrykowanymi a wewnętrzną powierzchnią pierścienia fundamentowego. Nie mniej istotnym problemem jest geometria zbiornika w przekroju poziomym, zmieniająca się w kolejnych etapach realizacji konstrukcji. W tabeli 7 zestawiono różnice ΔR odległości punktów pomierzonych na górnej i dolnej krawędzi elementów prefabrykowanych od średniego promienia zbiornika R_{sr} . Rozkłady tych odchyleń na obwodzie zbiornika w kolejnych etapach "1" i "3", na górnym i dolnym poziomie pomiarowym, przedstawiono rys. 12. Znak (–) oznacza, że dany element jest wewnątrz promienia średniego. Maksymalne odchylenie punktu pomiarowego wynosi 19 mm.



Rys. 12. Rozkłady odchyleń kolejnych punktów pomiarowych na obwodzie zbiornika od promienia średniego w fazie montażu elementów prefabrykowanych i po całkowitym sprężeniu ściany zbiornika nr 1

Fig. 12. Distributions of radial deviations of sequence measuring points at circumference tank from average radius at assembly stage and after finally post-tensioning of tank wall no. 1

Zbiorniki nr 2 i nr 3

W tabeli 8 zestawiono odpowiednio dla górnej i dolnej krawędzi ściany zbiornika nr 2 wyliczone różnice odległości odpowiednich punktów pomiarowych w kolejnych etapach sprężania. Określenia "1", "2", "3", i "4" oznaczają odpowiednio: etap montażu elementów prefabrykowanych, etap wstępnego sprężania (3 cięgna z siłą 30 kN), I etap sprężania (wszystkie cięgna z siłą 120 kN) i II etap sprężania (wszystkie cięgna z siłą 200 kN). W ostatniej kolumnie oznaczonej jako "L–P", podano różnicę pomiarów dokonanych na lewej i prawej krawędzi każdej płyty po zmontowaniu ściany zbiornika (etap "1"). Na górnej krawędzi w przypadku 10 płyt obrót wynosił 10 i więcej milimetrów (wartość maksymalna 24 mm). Na dolnej krawędzi w przypadku 11 płyt obrót wynosił 10 i więcej milimetrów (wartość maksymalna 28 mm). Podobnie w tabeli 9 dla górnej i dolnej krawędzi ściany zbiornika nr 3 zestawiono wyliczone różnice odległości odpowiednich punktów pomiarowych w kolejnych etapach sprężania. Dla zbiornika nr 3 na górnej krawędzi w przypadku 10 płyt obrót wynosił 10 i więcej milimetrów (wartość maksymalna 24 mm). Na dolnej krawędzi w przypadku 9 płyt obrót wynosił 10 i więcej milimetrów (wartość maksymalna 24 mm).

Rozkłady przemieszczeń radialnych wyznaczonych na górnych i dolnych punktach pomiarowych po wstępnym etapie sprężenia (etap "2–1"), po I etapie sprężenia (etap "3–1") i po II etapie sprężenia (etap "4–1") przedstawiono odpowiednio dla zbiornika nr 2 na rys. 13, dla

zbiornika nr 3 na rys. 14. Znakiem (-) minus oznaczono przemieszczenia płyt do środka zbiornika. Największe przemieszczenia na zbiorniku nr 2 odnotowano na pionowych stykach między elementami 5–6 (do 32 mm), 11–12 (do 36 mm), 18–19 (do 16 mm) i 22–1 (do 33 mm). Podobnie dla zbiornika nr 3 największe przemieszczenia odnotowano na pionowych stykach między elementami 4–5 (do 28 mm), 12–13 (do 14 mm), 15–16 (do 17 mm) i 18–19 (do 22 mm).

Z przytoczonych danych w tabeli 8 wynika, że 80,1% i 62,3% przemieszczeń całkowitych odpowiednio na górnej i dolnej krawędzi elementów prefabrykowanych miało miejsce podczas wstępnego sprężenia ściany zbiornika nr 2. Średnie przemieszczenie radialne elementów prefabrykowanych w tym etapie spreżania wynosiło -8,07 mm i -5 mm odpowiednio dla górnej i dolnej krawędzi ściany zbiornika. Łączne przemieszczenie ściany po I etapie sprężania wynosiło 90,3% i 87,3% przemieszczeń całkowitych odpowiednio na górnej i dolnej krawędzi elementów prefabrykowanych. Średnie przemieszczenia radialne po I etapie sprężania wynosiły -9,09 mm i -7,00 mm odpowiednio dla górnej i dolnej krawędzi ściany zbiornika nr 2. Po całkowitym sprężeniu (II etap) przemieszczenia te wynosiły odpowiednio -10,07 mm i -8,02 mm.

Z danych przedstawionych w tabeli 9 wynika, że 62,3% i 49,5% przemieszczeń całkowitych odpowiednio na górnej i dolnej krawędzi elementów prefabrykowanych miało miejsce podczas wstępnego sprężenia ściany zbiornika nr 3. Średnie przemieszczenie radialne elementów prefabrykowanych w tym etapie sprężania wynosiło -4,95 mm i -3,95 mm odpowiednio dla górnej i dolnej krawędzi ściany zbiornika. Łaczne przemieszczenie ściany po I etapie sprężania wynosiło 62,6% i 74,3% przemieszczeń całkowitych odpowiednio na górnej i dolnej krawędzi elementów prefabrykowanych. Średnie przemieszczenia radialne po I etapie sprężania wynosiły -4,98 mm i -5,93 mm odpowiednio dla górnej i dolnej krawędzi ściany zbiornika nr 3. Po całkowitym sprężeniu (II etap sprężenia) przemieszczenia te wynosiły odpowiednio -7,95 mm i -7,98 mm.

W tabeli 10 zestawiono różnice odległości punktów pomiarowych od środka zbiorników nr 2 i nr 3 pomierzonych na górnej i dolnej krawędzi elementów prefabrykowanych. Z porównania zestawionych wartości wynika, że po zakończeniu montażu elementów prefabrykowanych ich średnie wychylenie z pionu na zewnątrz zbiornika nr 2 wynosiło 2,05 mm na górnej krawędzi ściany. Po wstępnym sprężeniu ściany trzema cięgnami z siłą 30 kN, średnie wychylenie ściany z pionu, ale do środka zbiornika nr 2, wynosiło –1,02 mm na górnej krawędzi. Po II etapie sprężania (całkowite sprężenie) średnie wychylenie ściany z pionu wynosiło 0 mm. Oznacza to, że we wstępnym etapie sprężenia zbiornika nr 2 górna krawędź ściany przesunęła się średnio o 3,7 mm do środka zbiornika w stosunku do dolnej krawędzi. W I etapie sprężenia (styki pionowe zabetonowane, dolna krawędź ściany oparta na podkładkach montażowych) górna krawędź ściany przesunęła się średnio o 0,98 mm na zewnątrz w stosunku do dolnej krawędzi. Inaczej mówiąc, dolna krawędź ściany zbiornika przesunęła się do środka zbiornika nr 2 średnio o 0,98 mm w stosunku do górnej krawędzi. W II etapie sprężenia (dolna krawędź ściany zabetonowana w pierścieniu fundamentowym) górna krawędź ściany zbiornika nr 2 przesunęła się średnio o 0,05 mm na zewnątrz w stosunku do dolnej krawędzi. Podobnie po zakończeniu montażu elementów prefabrykowanych zbiornika nr 3 ich średnie wychylenie z pionu na zewnątrz wynosiło 1,00 mm na górnej krawędzi ściany. Po wstępnym sprężeniu ściany średnie wychylenie elementów z pionu zbiornika nr 3 wynosiło 0 mm na górnej krawędzi. Po I etapie sprężenia średnie wychylenie ściany z pionu ponownie na zewnątrz zbiornika wynosiło 1,95 mm na górnej krawędzi ściany. Po II etapie sprężania średnie wychylenie ściany z pionu na zewnątrz zbiornika nr 3 wynosiło

1,02 mm. Oznacza to, że we wstępnym etapie sprężenia zbiornika nr 2 górna krawędź ściany przesunęła się średnio o 1 mm do środka zbiornika w stosunku do dolnej krawędzi. W I etapie sprężenia dolna krawędź ściany przesunęła się średnio o 1,95 mm w stosunku do dolnej krawędzi. W II etapie sprężenia górna krawędź ściany zbiornika nr 3 przesunęła się do środka zbiornika o 0,93 mm w stosunku do dolnej krawędzi.



Rys. 13. Rozkłady przemieszczeń radialnych pomierzonych na górnej i dolnej krawędzi ściany po wstępnym etapie sprężenia (etap "2-1"), po I etapie sprężenia (etap "3-1") i po II etapie sprężenia (etap "4-1") zbiornika nr 2

Fig. 13. Distributions of radial dispalcements measured on top and bottom wall edge after preliminary stage of post-tensioning ("2-1"), after I ("3-1) and II ("4-1") stages of post-tensioning tank no. 2



Rys. 14. Rozkłady przemieszczeń radialnych pomierzonych na górnej i dolnej krawędzi ściany po wstępnym etapie sprężenia (etap "2-1"), po I etapie sprężenia (etap "3-1") i po II etapie sprężenia (etap "4-1") zbiornika nr 3

Fig. 14. Distributions of radial dispalcements measured on top and bottom wall edge after preliminary stage of post-tensioning ("2-1"), after I ("3-1) and II ("4-1") stages of post-tensioning tank no. 3

W tabeli 11 zestawiono różnice ΔR odległości punktów pomiarowych na górnej i dolnej krawędzi elementów prefabrykowanych od średniego promienia zbiorników nr 2 i nr 3 R_{st} . Rozkłady tych odchyleń na obwodzie zbiornika nr 2 i nr 3 w kolejnych etapach "1", "2", "3" i "4" na górnym i dolnym poziomie pomiarowym przedstawiono odpowiednio na rys. 15 i rys 16. Znak (–) minus oznacza, że dany element jest wewnątrz promienia średniego. Maksymalne odchylenie punktu pomiarowego dla zbiornika nr 2 wynosi 38 mm, a dla zbiornika nr 3 wynosi 21 mm.



Rys. 15. Rozkłady odchyleń kolejnych punktów pomiarowych na obwodzie zbiornika od promienia średniego w kolejnych etapach "1", "2", "3" i "4" na górnym i dolnym poziomie pomiarowym zbiornika nr 2

Fig. 15. Distributions of radial deviations of sequence measuring points at circumference tank from average radius in sequence stages "1", "2", "3" i "4" on top and bottom measuring levels tank no. 2



Rys. 16. Rozkłady odchyleń kolejnych punktów pomiarowych na obwodzie zbiornika od promienia średniego w kolejnych etapach "1", "2", "3" i "4" na górnym i dolnym poziomie pomiarowym zbiornika nr 3

Fig. 16. Distributions of radial deviations of sequence measuring points at circumference tank from average radius in sequence stages "1", "2", "3" i "4" on top and bottom measuring levels tank no. 3

				Kra	wędź g	órna		Krawędź dolna							
element	krawędź	"2–1"	"3–1"	"4–1"	"3–2"	"4–2"	"4–3"	Etap "1" "L–P"	"2–1"	"3–1"	"4–1"	"3–2"	"4–2"	"4–3"	Etap "1" "L–P"
1	L	-24	-26	-25	-2	-1	1	-16	-28	-27	-28	1	0	-1	-15
	P I	-5	-/	-8	-2	-5	-1		-5	-4	-0	0	-1	-2	
2	P L	-4	-4	-7	0	-1	-1	10	-2	-2	-3	_2	-1	-5	10
	L	-5	-4	-7	1	-2	-3		-3	-4	-3	-1	0	1	
3	Р	-4	-3	-4	1	0	-1	2	-1	-2	-5	-1	-4	-3	0
4	L	-5	-4	-6	1	-1	-2	22	1	1	-4	0	-5	-5	16
4	Р	-6	-8	-8	-2	-2	0	-22	0	-2	-3	-2	-3	-1	-10
5	L	-7	-10	-10	-3	-3	0	16	0	-5	-3	-5	-3	2	13
	Р	-17	-22	-23	-5	-6	-1	10	-12	-18	-19	-6	-7	-1	15
6	L	-16	-21	-23	-5	-7	-2	2	-14	-20	-21	-6	-7	-1	-2
	Р	-6	-7	-8	-1	-2	-1	_	0	-2	-3	-2	-3	-1	
7	L	-6	-6	-7	0	-1	-1	0	-3	-3	-3	0	0	0	-4
	Р	-11	-10	-12	1	-l	-2		-5	-5	-6	0	-1	-1	
8		-9	-8	-8	1	1	0	6	-4	-6	-8	-2	-4	-2	8
	P I	-8 0	-0	-9	2	-1	-3		-2	-3	-0	-3	-4	-1	
9	D D	-0	-10	-10	-2	-2	2	-15	-4	-4	-4	2	1	1	-14
	r I	-0	-0	-0	0	-2	-2		-2	-4	-5	-2	-1	1	
10	P L	-0 -2	-0	-9	0	-1	-1	12	-3	-3	-4	0	-1	-1	12
	L	-2	-4	-5	-2	-3	-1		-1	-4	-3	-3	-2	1	
11	P	1	1	0	0	-1	-1	5	-2	-3	-6	-1	-4	-3	2
	L	2	1	2	-1	0	1		-1	-3	-3	-2	-2	0	
12	Р	-27	-31	-33	-4	-6	-2	-2	-27	-36	-36	-9	-9	0	-1
12	L	-25	-32	-32	-7	-7	0	24	-27	-32	-33	-5	-6	-1	20
13	Р	-5	-4	-4	1	1	0	-24	-1	-2	-3	-1	-2	-1	-28
14	L	-3	-3	-6	0	-3	-3	16	-2	-1	-4	1	-2	-3	12
14	Р	-6	-8	-6	-2	0	2	10	-2	-1	-5	1	-3	-4	12
15	L	-7	-7	-8	0	-1	-1	8	-4	-6	-8	-2	-4	-2	9
	Р	-8	-11	-11	-3	-3	0	-	-5	-7	-6	-2	-1	1	
16	L	-9	-9	-10	0	-1	-1	-10	-2	-3	-2	-1	0	1	-11
	P	-8	-8	-10	0	-2	-2		-2	-3	-4	-l	-2	-1	
17	L	-10	-10	-10	0	0	0	5	-1	-4	-6	-3	-5	-2	7
	Р	-9	-9	-11	0	-2	-2		-1	-4	-5	-5	-4	-1	
18	D D	-10	-10	-11	3	-1	-1	-2	-1	-5	-3	-2	-2	2	0
	I	-12	-16	-16	_2	-4	0		_12	-14	-16	_2	_4	_2	
19	P D	_4	_4	-5	0	_1	_1	0	_2	_4	-6	-2	_4	_2	-6
	L	0	-1	-5	-1	-5	-4		2	-2	-3	-4	-5	-1	
20	Р	0	-1	-4	-1	-4	-3	-3	-3	-3	-5	0	-2	-2	-3
	L	-4	-4	-4	0	0	0		0	1	-1	1	-1	-2	
21	Р	-2	-6	-7	-4	-5	-1	-8	-5	-10	-8	-5	-3	2	-16
22	L	-2	-3	-3	-1	-1	0	14	0	-4	-4	-4	-4	0	15
22	Р	-26	-26	-28	0	-2	-2	14	-26	-29	-33	-3	-7	-4	15
śre	dnio	-8,07	-9,09	-10,07	-1,02	-2,00	-0,98		-5,00	-7,00	-8,02	-2,00	-3,02	-1,02	

Zmiana odległości punktów pomiarowych ∆R, od środka zbiornika nr 2, na górnej i dolnej krawędzi elementów prefabrykowanych w wyniku wstępnego sprężenia



189 Tabela 9

Krawędź dolna Krawędź górna element krawędź Etap Etap ,2-1" "3–1" ,,4–1" "3–2" ,,4–2' ,,4–3' ,,1" ,2-1" "3–1" "4–1" ,,3-2" ,,4-2" ,,4–3' ,,1 "L–P ,L-P L -4 -3 -7 1 -3 -4 -2 -5 -3 -4 -1 1 -16 -22 1 Р 2 -5 0 -5 -3 -4 -1 -5 -4 1 -1 1 L 0 -1 -2 -1 -2 -1 -3 -3 -5 0 -2 -2 2 3 3 _7 -5 Р -3 -1 2 -4 -6 -5 -10-10-5 0 -4 -7 -9 -5 -2 -2 -3 -2 -4 L -6 -8 -10 3 5 6 Р 2 2 0 0 -2 -2 0 -2 -3 -3 -1 -2 L 1 1 -2 0 -3 -3 1 -3 -5 -4 -6 -2 4 -12 -13 Р -20 -20 -23 0 -3 -3 -20 -24 -28 -4 -8 -4 L -21 -20 -24 -3 -4 -17 -19 -23 -2 -4 1 -6 7 5 5 Р -9 -9 -11 -2 -2 -5 -3 0 -2 -4 1 -6 -3 -3 -2 -2 -5 -7 -2 L 0 -1 -1 -3 -5 6 -10 -5 Р -4 -4 -6 0 -2 -2 -4 -6 -9 -2 -5 -3 L -6 -5 -8 -2 -3 -4 -4 -5 0 -1 -1 1 7 -2 -1 Р -5 -4 -8 -3 -4 -2 -5 -4 -3 1 -1 -1 -3 -3 0 -3 -3 -5 -6 $^{-1}$ $^{-1}$ L -6 -5 0 8 2 1 Р -7 -9 -2 -4 -5 -8 -1 -4 -3 -5 -2 -4 L -5 -7 -8 -2 -3 -1 -4 -9 -11 -5 -7 -2 9 -4 -12 -4 -2 -7 -1 Р -2 -4 -6 -2 -3 -6 -3 -4 -2 L -2 -2 -4 0 -2 8 3 6 -5 -2 3 1019 8 2 р -3 -1 -3 -3 0 -1 2 -1 -1 -4 0 2 -2 -4 2 -5 1 -3 _3 -1 -6 _3 L 1 11 -21 -13 Р -7 -7 -11 0 -4 -4 -6 -9 -10 -3 -4 -1 L -8 -8 -12 0 -4 -4 -4 -6 -10-2 -6 -4 12 7 10 Р -8 -9 -14 -6 -5 -6 -8 -11 -2 -5 -3 -1 L -8 -10 -11 -2 -3 -1 -10 -12 -14 -2 -4 -2 13 -7 $^{-1}$ -2 -2 -2 Р -4 -4 -2 -4 0 -4 -6 0 -6 L -6 -10 0 -4 -4 0 -1 -4 -1 -4 -3 -6 14 -7 -9 Р -6 -5 -8 -2 -3 -3 -6 -7 -3 -4 -1 1 -5 -2 -8 -2 -5 -7 L -5 -3 2 -3 -3 -5 15 7 3 Р -10 -10 -11 -1 0 $^{-1}$ -10 -17 -15 -7 -5 2 -2 -4 L -10 -10 -12 0 -2 -10-11 -15 $^{-1}$ -5 8 4 16 Р -2 -2 -3 -2 0 1 1 -1 -1 0 -1 -1 -3 -4 0 -1 -3 -4 -4 L -3 -1 1 1 0 17 -16 -17Р -2 -5 -4 -3 -5 -5 -3 0 $^{-1}$ $^{-1}$ -2 -3 L 3 2 -2 -4 -2 -2 -4 0 -2 -2 5 1 -7 18-7 Р -6 -8 -12 -2 -6 -4 -14 -19 -20 -5 -6 -1 -20 -22 -2 -2 -16 -4 -6 -13 -17 -19 _4 -6 L 19 13 7 Р -3 -3 -6 0 -3 -3 $^{-1}$ -3 -6 -2 -5 -3 L -4 -4 -8 0 -4 -4 -2 -5 -9 -3 -7 -4 21 20 24 Р -9 -9 0 -7 -2 -2 -4 -4 -4 0 0 0 -8 -3 -2 -5 -2 -5 -3 L -6 -5 1 -2 0 21 -24 -29 Р -9 -3 -4 0 -5 -5 -5 -6 -5 1 0 0 L -5 -4 -7 1 -2 -3 -2 -2 -3 0 -1 -1 22 23 25 Р -5 _3 -8 2 -3 -5 -1 -3 -5 -2 -4 -2 -7,98 -2,05 4,95 -4,98 -7,95 -0,02 -3,00 -2,98 -3,95 -5,93 -1,98 -4,02 średnio

Zmiana odległości punktów pomiarowych ΔR_i od środka zbiornika nr 3, na górnej i dolnej krawędzi elementów prefabrykowanych w wyniku wstępnego sprężenia

			Zbiorn	ik nr 2		Zbiornik nr 3						
element	krawędź		"Góra	–Dół"			"Góra–	-Dół"				
		"1"	"2"	"3"	"4"	"1"	"2"	"3"	"4"			
1	L	3	7	4	6	4	2	2	2			
1	Р	4	4	1	2	-2	-1	1	0			
2	L	0	-2	-2	0	-1	2	1	2			
2	Р	0	-6	-4	-4	-1	1	8	2			
2	L	-2	-4	-2	-6	-1	1	0	0			
5	Р	-4	-7	-5	-3	0	2	4	3			
4	L	-2	-8	-7	-4	0	0	4	3			
4	Р	4	-2	-2	-1	-1	-1	3	4			
5	L	7	0	2	0	6	2	5	5			
5	Р	4	-1	0	0	4	-3	1	-2			
6	L	5	3	4	3	-3	-1	1	1			
0	Р	1	-5	-4	-4	2	2	4	5			
7	L	3	0	0	-1	7	5	6	4			
/	Р	-1	-7	-6	-7	8	4	6	5			
0	L	-1	-6	-3	-1	6	8	8	6			
8	Р	1	-5	0	-2	5	6	7	6			
	L	2	-2	-4	-4	4	3	6	7			
9	Р	3	-1	1	-2	-4	-3	-2	-3			
10	L	4	-1	-1	-1	4	-6	-1	-6			
10	Р	4	4	4	6	-7	-6	-4	-4			
	L	4	3	4	2	-7	-3	-4	-3			
11	Р	1	4	5	7	1	0	3	0			
	L	4	7	8	9	0	-4	-2	-2			
12	Р	5	5	10	8	3	1	2	0			
	L	10	12	10	11	-5	-3	-3	-2			
13	Р	6	2	4	5	1	1	1	1			
	L	0	-1	-2	-2	3	-3	-2	-3			
14	Р	-4	-8	-11	-5	1	-2	2	0			
	L	-5	-8	-6	-5	0	-3	2	-1			
15	Р	-4	-7	-8	-9	-4	-4	3	0			
16	L	-2	-9	-8	-10	-3	-3	-2	0			
16	Р	-3	-9	-8	-9	1	2	3	1			
17	L	1	-8	-5	-3	6	2	2	5			
17	Р	3	-5	-2	-3	5	6	8	5			
10	L	7	-2	0	-1	4	9	11	9			
18	Р	9	1	4	1	4	12	15	12			
10	L	7	5	5	7	10	7	7	7			
19	Р	1	-1	1	2	4	2	4	4			
20	L	0	-2	1	-2	5	3	6	6			
20	Р	0	3	2	1	2	-1	-3	-3			
	L	7	3	2	4	-2	-8	-5	-5			
21	Р	-1	2	3	0	-7	-13	-12	-11			
22	L	4	2	5	5	-5	-8	-7	-9			
22	Р	5	5	8	10	-3	-7	-3	-6			
śre	dnio	2,05	-1,02	-0,05	0,00	1,00	0,00	1,95	1.02			

Różnice odległości punktów pomiarowych od środka zbiorników nr 2 i nr 3 pomierzonych na górnej i dolnej krawędzi elementów prefabrykowanych



Tabela 11

			Zbiornik nr 2							Zbiornik nr 3							
element	krawędź	k	crawęd	ź górn	a	1	krawęd	ź doln	a	ŀ	krawęd	lź górn	a	k	rawęd	ź dolna	ı
		"1"	"2"	,,3"	,,4"	"1"	,,2"	,,3"	,,4"	"1"	,,2"	,,3"	,,4"	"1"	,,2"	,,3"	"4"
1	L	-8	-24	-25	-23	-9	-32	-29	-29	-14	-13	-12	-13	-17	-15	-12	-14
	Р	8	11	10	10	6	6	9	8	2	8	9	7	5	9	10	8
2	L	5	9	10	10	7	10	12	10	3	8	7	9	5	6	8	8
	Р	-5	-5	-4	-2	-3	0	0	2	0	2	4	1	2	1	-2	0
3	L	-8	-5	-3	-5	-4	-2	-1	1	1	2	-1	0	3	1	1	1
	Р	-10	-6	-4	-4	-4	0	1	-1	-4	3	3	4	-3	1	1	2
4	L	-10	-7	-5	-6	-6	0	2	-2	-2	4	4	4	-1	4	2	2
	Р	12	14	13	14	10	15	15	15	10	-5	-5	-5	12	-4	-6	-8
5	L	15	16	14	15	10	15	12	15	9	-7	-6	-7	4	-9	-9	-11
	Р	-1	-10	-14	-14	-3	-10	-14	-14	2	-2	-2	-1	-1	1	-1	2
6	L	-1	-9	-13	-14	-4	-13	-17	-17	-9	-4	-5	-4	-5	-3	-4	-4
	Р	-3	-1	-1	-1	-2	3	3	3	1	2	2	3	0	0	0	-1
7	L	-1	1	2	2	-2	0	2	3	3	2	3	3	-3	-3	-1	0
	Р	-1	-4	-2	-3	2	2	4	4	5	5	6	5	-2	1	2	1
8		-2	-3	-1	0	1	2	2	I r	4	6	6	6	-1	-2	0	1
	P	-8	-8	-5	-7	-7	-4	-5	-5	2	3	2	2	-2	-3	-3	-3
9		-5	-5	-6	-5	-5	-4	-2	-1	3	3	1	3	0	0	-3	-3
	Р	10	12	13	12	9	12	12	14	7	10	8	9	12	13	12	13
10	L	11	11	12	12	9	11	13	13	3	0	6	/	0	12	9	14
	P I	-1	5	0	0	-3	2	2		-10	-11	-9	-9	-8	-3	-3	-4
11	D L	5	0	5	5	-2	2	1	2	-13	-9	-0	-9	-/	-0	-2	-3
	r I	-5	4	3	5	-4	-1	0	-2	2	4	4	2	2	4	2	4
12	D D	-0	23	26	27	-0	20	-4	-5	5	-1	-1	-2	7	0	0	1
	I	-4	23	28	27	-/	35	-30	-35	-5	12	14	12	-/	-)	->	-10
13	P L	19	22	24	25	15	19	20	20	_2	_12	_14	0	_2	_2	->	->
	L	15	20	24	19	17	20	20	20	1	0	0	_1	_1	3	4	3
14	p	-1	1	0	3	5	8	11	8	8	7	8	8	8	9	8	9
	L	-1	0	1	1	6	7	7	6	7	7	9	7	8	10	9	9
15	Р	-9	_9	-11	-10	-3	-3	-3	-1	0	-5	-5	_3	5	-1	-6	-2
	L	-11	-12	-11	-11	-7	-4	-3	-1	-5	-10	-10	_9	-1	-7	-6	-8
16	Р	-1	-1	0	-1	4	7	8	8	-9	-4	-3	-3	-9	-6	-4	-3
L	L	3	1	2	3	4	8	7	6	-8	-6	-6	-4	-13	-8	-6	-8
17	Р	-2	-3	-2	-3	-3	1	0	0	8	12	11	11	4	6	5	7
10	L	-3	-5	-4	-4	-8	-4	-4	-3	4	12	14	13	1	3	5	5
18	Р	-1	-5	-7	-7	-8	-7	-11	-8	11	10	8	7	8	-2	-5	-4
10	L	0	-6	-7	-6	-5	-12	-12	-13	19	8	4	5	10	1	-1	-1
19	Р	0	4	5	5	1	4	4	3	6	8	8	8	3	6	6	5
20	L	-3	5	5	2	-1	6	4	4	7	8	8	7	3	5	4	2
20	Р	0	8	8	6	2	4	6	5	-17	-19	-21	-18	-18	-18	-16	-14
21	L	4	8	9	10	-1	4	7	6	-17	-18	-17	-17	-14	-10	-10	-11
	Р	12	18	15	15	15	15	12	15	7	6	7	6	15	19	21	18
22	L	9	15	15	16	7	12	10	11	6	6	7	7	12	14	16	17
	Р	-5	-23	-22	-23	-8	-29	-30	-33	-17	-17	-15	-17	-13	-10	-10	-10

Odchylenia ΔR [mm] punktów pomiarowych zbiornika nr 2 i nr 3, na górnej i dolnej krawędzi od promienia średniego R_{sr}

5. Wnioski

Przeprowadzone badania doświadczalne wykazały, iż kluczowe znaczenie na równomierne zaciskanie pionowych styków i przemieszczenie radialne elementów prefabrykowanych ma wytyczenie montażowego obwodu zbiornika, na którym stabilizowane są elementy prefabrykowane. W przypadku zbiorników o mniejszej liczbie elementów prefabrykowanych (12 elementów) występują wyraźnie mniejsze kąty załamania pomiędzy elementami w porównaniu z badanymi zbiornikami o 22 elementach.

Niniejsza publikacja przedstawia fragment programu i wyników badań przeprowadzonych na ww. obiektach. Kompleksowe badania przeprowadzono w ramach projektu badawczego NR 04-0009-04 pt. "Zastosowanie cięgien bezprzyczepnościowych do realizacji prefabrykowanych zbiorników cylindrycznych na ciecze i nawierzchni lotniskowych z betonu sprężonego", finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju. Oprócz pomiarów geodezyjnych badane były odkształcenia i przemieszczenie elementów prefabrykowanych w wyniku wszystkich etapów sprężenia oraz w trakcie próby szczelności zbiorników. Ponadto badany był wpływ betonu ekspansywnego wypełniającego styki między elementami prefabrykowanymi na odkształcenia tych elementów. Wyniki tych badań były prezentowane w pracach [7–8].

Literatura

- [1] PN-EN 1992-3:2006 Projektowanie konstrukcji betonowych. Część 3. Silosy i zbiorniki.
- [2] Seruga A., Analiza stanów naprężenia i odkształcenia w powłokach zbiorników cylindrycznych z betonu sprężonego, Monografia nr 289, Kraków 2003, 1-200.
- [3] S e r u g a A., *Kolowe zbiorniki prefabrykowane na wodę sprężone cięgnami zewnętrznymi*, Inżynieria i Budownictwo nr 12/2008, 662-665.
- [4] F a u s t m a n n D., Odkształcenia i przemieszczenia ścian podczas montażu żelbetowych prefabrykowanych zbiorników na ciecze, sprężonych cięgnami zewnętrznymi, X Konferencja Naukowa Doktorantów i Młodych Doktorów Wydziałów Budownictwa – Szczyrk 2009, Monografia "Wybrane zagadnienia z dziedziny budownictwa" pod redakcją A. Wawrzynka, Gliwice 2009, 13-22.
- [5] F a u s t m a n n D., Structure and investigation of precast concrete water tanks wall prestressed with the external unbonded tendons, The 12th International Professional Conference of Postgraduate Students "JUNIORSTAV 2010", 24th February 2010.
- [6] Toś C., Wolski B., Zielina L., Tachimetry skanujące. Aplikacje technologii skanowania w budowie szczegółowych modeli obiektów inżynierskich, Monografia Politechniki Krakowskiej nr 374, Kraków 2010.
- [7] Seruga A., Faustmann D., *Experimental investigation of precast concrete ribbed* wall water tanks prestressed with the external unbonded tendons, The Third International Congress and Exhibition FIB, Washington, May 29 June 2, 2010.
- [8] Seruga A., Faustmann D., Wpływ betonu ekspansywnego na stan odkształcenia ścian zbiorników, wykonanych z elementów prefabrykowanych, Konferencja "Dni Betonu – Tradycja i Nowoczesność", Wisła 11–13.10.2010, 589-599.