

Szymon KAŹMIERCZAK*
Politechnika Krakowska

ZBIORNIKI PREFABRYKOWANE SPRĘŻONE CIĘGNAMI BEZPRZYCZEPNOŚCIOWYMI

Streszczenie. Referat przedstawia wybrane problemy projektowania i realizacji nowoczesnych zbiorników prefabrykowanych sprężonych cięgnami bezprzyczepnościowymi. Przeanalizowano wpływ nieciągłości zbrojenia obwodowego oraz realizacji przesuwnego połączenia na dolnej krawędzi powłoki na stan naprężenia w pionowych złączach elementów prefabrykowanych.

PRECAST TANKS PRESTRESSED WITH UNBONDED TENDONS

Summary. In the paper selected problems dealing with design and technology of the new type of precast concrete tanks prestressed with unbonded tendons are presented. The influence of the horizontal reinforcement discontinuity and execution of the sliding connection at the bottom edge of the tank shell on the vertical joints stress state was analysed.

1. Wprowadzenie

Wypełnienie zobowiązań przyjętych w Traktacie Akcesyjnym Polski do Unii Europejskiej, ratyfikowanym przez Polskę 23 lipca 2003 r., który w części dotyczącej wyposażenia aglomeracji w systemy kanalizacji zbiorczej i oczyszczalnie ścieków odwołuje się do dyrektywy 91/271/EWG, wymagać będzie w horyzoncie czasowym do 2015 r. budowy, rozbudowy i/lub modernizacji oczyszczalni ścieków komunalnych i systemów kanalizacji zbiorczej [1]. Inwestycje te zostały przewidziane do realizacji głównie w latach 2003–05 oraz 2006–10 (tabl. 1). Etap realizacji konstrukcji budowlanej jest jedynie fragmentem całego procesu budowlanego. W związku z ograniczeniami czasowymi, jakie zostały postawione przed wykonawcami, należy zastanowić się nad rozwiązaniami technologicznymi, które znacznie skróciłyby etap wznoszenia konstrukcji, a ściślej etap

* Opiekun naukowy: Dr hab. inż. Andrzej Seruga

budowy zbiorników dla oczyszczalni ścieków. Jednym z rozwiązań jest zastosowanie technologii prefabrykacji oraz sprężania przy budowie zbiorników z betonu.

Tablica 1

Program wyposażenia aglomeracji w oczyszczalnię ścieków w dostosowaniu do wymogów ustawy z dnia 18 lipca 2001r. - Prawo wodne i Traktatu Akcesyjnego [1]

Okres realizacji Programu	Grupa wielkości aglomeracji (RLM *)	Liczba aglomeracji objętych Programem w zakresie modernizacji, rozbudowy i budowy oczyszczalni	Liczba oczyszczalni do realizacji					Nakłady finansowe [mln zł]
			Ogółem	Modernizacja	Rozbudowa	Rozbudowa + modernizacja	Budowa	
2003 – 2005	> 100 tys.	43	65	58	-	3	4	2205
	15 – 100 tys.	198	205	178	3	16	8	2017
	2 – 15 tys.	168	172	19	52	45	56	812
	Razem	409	442	255	55	64	68	5034
2006 – 2010	> 100 tys.	21	32	11	-	18	3	2585
	15 – 100 tys.	99	99	4	19	39	24	867
	2 – 15 tys.	133	170	4	38	26	74	590
	Razem	253	301	19	57	83	101	4042
2011 – 2013	> 100 tys.							
	15 – 100 tys.							
	2 – 15 tys.	28	30	1	18	3	8	60
2014 – 2015	> 100 tys.							
	15 – 100 tys.							
	2 – 15 tys.	378	390	53	153	102	82	2156

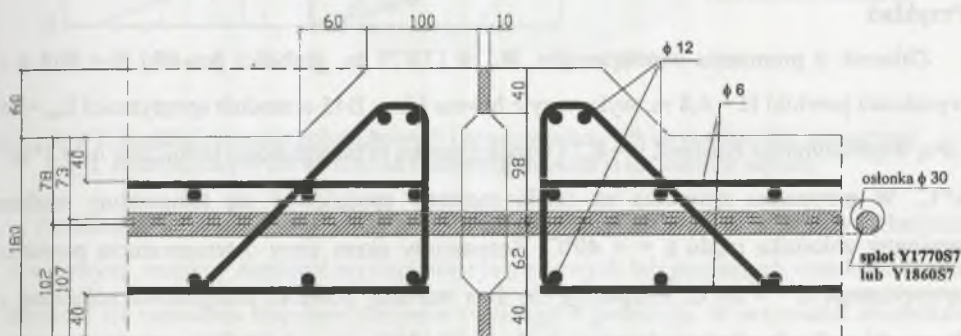
* RLM – równoważna liczba mieszkańców (1 RLM oznacza ładunek organiczny ulegający rozkładowi biologicznemu wyrażony pięciodniowym biochemicznym zapotrzebowaniem na tlen (BZT 5), w ilości 60 g tlenu na dzień.

2. Charakterystyka konstrukcji

Podstawowym elementem konstrukcyjnym powłoki walcowej jest prefabrykat o określonym profilu poprzecznym, szerokości 2,36 m. Grubość elementu może wynosić 0,16, 0,18 i 0,20 m. Wysokość elementu może dochodzić do kilkunastu metrów. Średnica zbiornika do około 60 m. Na zewnętrznej powierzchni elementu wzdłuż obu krawędzi bocznych wyprofilowane jest pionowe żeberko, w wyniku czego grubość prefabrykatu w obrębie styku jest większa o 0,06 m (rys.1). W pionowym styku konstrukcyjnym nie przewiduje się zbrojenia zwykłego. Pojedyncze cięgna sprężające typu 7 ϕ 5 mm kotwione są w jednym lub dwóch pilastrach. Prefabrykowane elementy ustawiane są na wielowarstwowych podkładkach

z teflonu, umożliwiającą przesunięcie elementu oraz stalowym klinie usytuowanym w osi elementu. Na jednej powierzchni bocznej prefabrykatu, wzdłuż obu krawędzi, przyklejone są uszczelki neoprenowe.

W przypadku zbiorników nieobsypanych [3], aby spełnić kryteria naprężeniowe w powłoce należy zastosować przesuwne ($\mu = 0,2$) połączenie ściany z dnem na etapie sprężania oraz przegubowe w stadium eksploatacji, przy naciągu w kolejności co drugie ciągną od dolnej krawędzi powłoki. W przypadku obsypania zbiornika gruntem alternatywnym rozwiązaniem jest sztywne połączenie powłoki z płytą denną w stadium eksploatacji. Technologia realizacji połączenia przesuwnego na etapie sprężania wymaga, aby cała płyta denną bądź obwodowe pasmo szerokości 0,5 – 1,0 m, było wykonywane po sprężeniu powłoki. Dokładny opis konstrukcji oraz technologii realizacji zbiornika zamieszczono w pracy [4].



Rys.1. Przekrój przez pionowe złącze elementów prefabrykowanych
Fig.1. Cross section through vertical joint of precast elements

3. Wpływ obciążenia temperaturą na wartość projektowanej siły sprężającej

Liczba obwodów cięgien sprężających wynika z warunku eliminacji obwodowych naprężeń rozciągających powiększonych o tzw. rezerwę trwałych naprężeń ściskających i jest funkcją założonego schematu statycznego powłoki (warunków brzegowych), parametrów materiałowych oraz działających obciążeń.

$$\frac{N_{\phi,w}}{A_c} + \sigma_T \leq \frac{N_{pd}}{A_c} \quad (1)$$

gdzie:

$N_{\phi,w}$ – obwodowa siła rozciągająca od parcia hydrostatycznego cieczy,

σ_T – naprężenia wywołane różnicą temperatur na wewnętrznej i zewnętrznej powierzchni powłoki w odniesieniu do temperatury scalenia zbiornika,

N_{pd} – osiowa siła podłużna od sprężenia, $N_{pd} = P_{k,sup}$ lub $P_{k,inf}$ w SGU.

W dotychczasowej praktyce inżynierskiej bardzo często przy projektowaniu siły sprężającej traktowano obciążenie temperaturą jako drugorzędne. Jak wykazały liczne prace [3,6,7], projektowanie sprężenia zbiornika jedynie dla przeniesienia obciążenia od parcia hydrostatycznego cieczy i zakładanie, iż wprowadzenie trwałych naprężeń ściskających rzędu 1,0 – 2,0 MPa jest wystarczające do przeniesienia naprężeń rozciągających wywołanych obciążeniem temperaturą – jest błędem.

Przykład

Zbiornik o promieniu wewnętrznym $R_w = 13,175$ m, grubości powłoki $h = 0,18$ m i wysokości powłoki $H = 6,8$ m, wykonany z betonu klasy B45 o module sprężystości $E_{cm} = 34$ GPa, współczynnika Poissona $\nu = 0,2$ i współczynnika rozszerzalności termicznej $\alpha_T = 1 \cdot 10^{-5}$ $1/^\circ\text{C}$. W przypadku zbiornika na ścieki możemy spodziewać się temperatury medium wewnątrz zbiornika rzędu $t_i = + 40^\circ\text{C}$. Rozpatrzmy okres zimy o temperaturze powietrza zewnętrznego $t_e = - 24^\circ\text{C}$. Rozpatruje się dwa warianty powłoki przegubowo połączonej z dnem: zbiornik nieocieplony (wariant A; $\vartheta_i = +38,09^\circ\text{C}$, $\vartheta_e = -1,12^\circ\text{C}$) i ocieplony warstwą wełny mineralnej grubości 50 mm (wariant B; $\vartheta_i = +39,7^\circ\text{C}$, $\vartheta_e = +33,59^\circ\text{C}$).

W przypadku zbiornika nieocieplonego (wariant A) poziom naprężeń rozciągających na zewnętrznej powierzchni powłoki zarówno w kierunku południkowym, jak i równoleżnikowym znacznie przekracza poziom naprężeń rysujących:

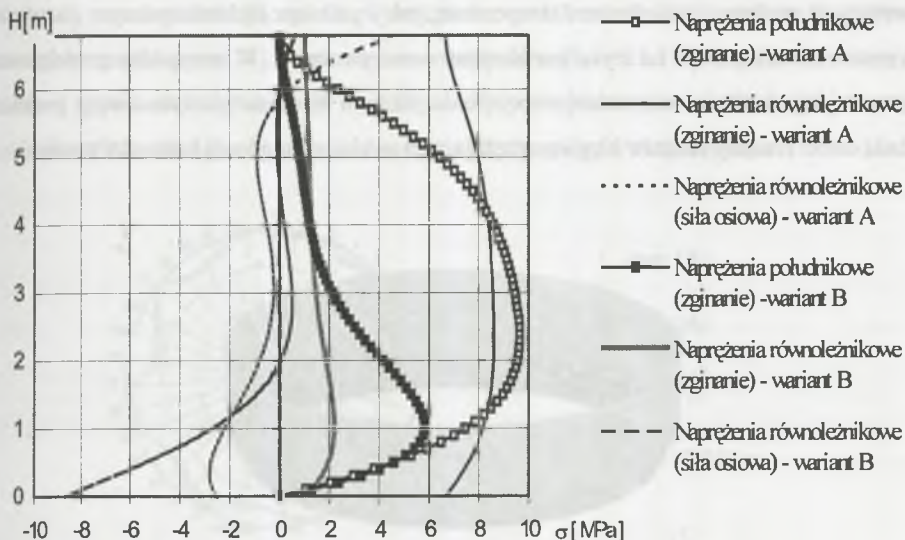
- kierunek południkowy $f_{ctm} = 3,2$ MPa < 9,65 MPa ($x = 2,4$ m),
- kierunek równoleżnikowy $f_{ct} + \sigma_{\phi,p} = 0,7$ MPa + 2,0 MPa < 11,37 MPa ($x = 6,8$ m).

W przypadku zbiornika ocieplonego warstwą wełny mineralnej o grubości 5 cm (wariant B) naprężenia te wynoszą odpowiednio:

- kierunek południkowy $f_{ctm} = 3,2$ MPa < 5,83 MPa (na wysokości $x = 1,0$ m),
- kierunek równoleżnikowy $f_{ct} + \sigma_{\phi,p} = 0,7$ MPa + 2,0 MPa > 2,09 MPa ($x = 2,5$ m).

Dopiero w przypadku wariantu B naprężenia rozciągające w kierunku równoleżnikowym nie spowodują zarysowania pionowych styków konstrukcyjnych przy założeniu rezerwy

naprężeń ściskających od sprężenia rzędu $\sigma_{\phi,p} = 2,0$ MPa i wytrzymałości styku na rozciąganie równej $f_{ct} = 0,7$ MPa (założenie zalecane przez twórców opisywanej technologii).



Rys. 2. Rozkład naprężeń południkowych i równoleżnikowych na powierzchni zewnętrznej
Fig. 2. Distributions of the vertical and horizontal stresses at the external surface

Projektując zbiorniki monolityczne lub prefabrykowane o ciągłym zbrojeniu obwodowym, możemy dopuścić wystąpienie rys pionowych lub poziomych oraz kontrolować szerokość ich rozwarcia stopniem zbrojenia zwykłego w przekroju. W przypadku zbiorników o nieciągłym zbrojeniu obwodowym najsłabszym ogniwem konstrukcji jest złącze między elementami prefabrykowanymi. Przekroczenie poziomu równoleżnikowych naprężeń rysujących w złączu spowodowane obciążeniem temperaturą wywoła niekontrolowany rozwój rysy oraz redystrybucję naprężeń wywołanych znaczną lokalną utratą sztywności przekroju. Wyjściowy schemat statyczny powłoki osiowo symetrycznej ciągłej przechodzi w układ płyt połączonych quasi-przegubami. Obciążenie temperaturą wywołuje określony poziom naprężeń na skutek ograniczenia odkształceń konstrukcji. W momencie zarysowania pionowych złączy następuje zwiększenie swobody odkształceń i równoczesne zmniejszenie naprężeń wywołanych obciążeniem temperaturą.

Na rysunkach 3 i 4 przedstawiono deformację zbiornika wywołaną obciążeniem różnicą temperatur na powierzchniach zewnętrznych ($t_i = +40^\circ\text{C}$, $\Delta t = -20^\circ\text{C}$), w przypadku powłoki ciągłej (rys. 3) i układu płyt o zerowej sztywności złączy (rys. 4). Jak widać na rysunkach, dopuszczenie do zarysowania niezbrojonych złączy elementów płytowych w zbiornikach

prefabrykowanych może całkowicie zmienić charakter pracy takiej konstrukcji. Należy spodziewać się znacznego przyrostu przemieszczeń radialnych górnej krawędzi zbiornika wywołanych zarówno obciążeniem temperaturą, jak i parciem hydrostatycznym cieczy oraz przyrostu rozwartości rys na styku prefabrykat – zaczyn złącza. W przypadku projektowania sprężenia jedynie dla równoważenia obciążenia parciem hydrostatycznym cieczy projektant zakłada coraz rzadszy rozstaw cięgien sprężających w kierunku górnej krawędzi powłoki.



Rys. 3. Deformacja powłoki ciągłej od obciążenia temperaturą

Fig. 3. View of the continuous shell deformation under thermal loading



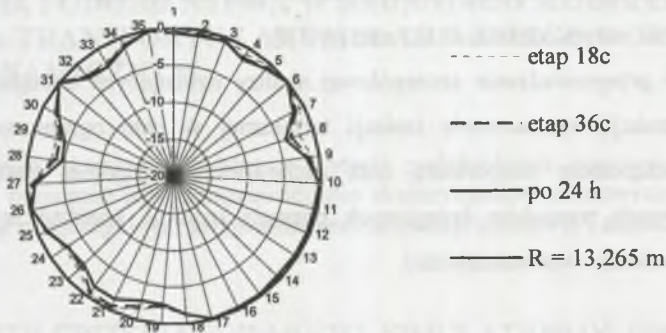
Rys. 4. Deformacja układu płyt od obciążenia temperaturą

Fig. 4. View of the system of panels deformation under thermal loading

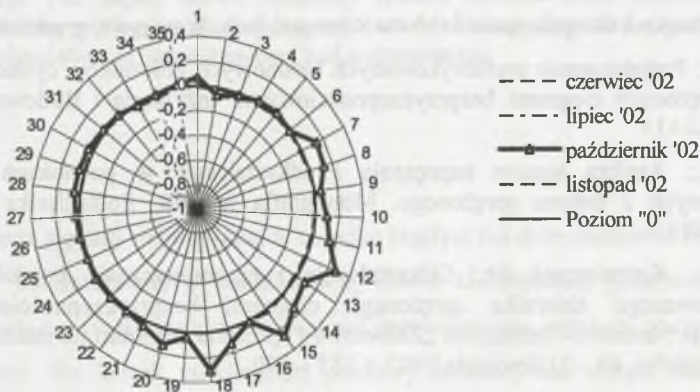
4. Realizacja połączenia przegubowo – przesuwnego

Decydujący wpływ na opisany mechanizm pracy powłoki ma poziom wprowadzonych naprężeń ściskających w przekroju złącza, który wprost zależy między innymi od przyjętego schematu statycznego powłoki na etapie sprężania zbiornika. Na rys. 5 przedstawiono

pomierzone przemieszczenia dolnej krawędzi zbiornika podczas sprężania [4]. Rysunek 6 pokazuje przyrost rozwartości styków [w mm] w kierunku obwodowym pomierzony na zewnętrznej powierzchni złączy dla wysokości $x = 1,8$ m. Badania dotyczyły zbiornika opisanego szczegółowo w [4] o promieniu wewnętrznym $R_w = 13,175$ m, grubości ściany $h = 0,18$ cm i wysokości zbiornika $H = 6,85$ m. Etap eksploatacji – okres badań czerwiec-październik 2002. Obciążenie temperatura: $t_i = +40^\circ\text{C}$, $t_e = +10^\circ\text{C}$ (listopad).



Rys. 5. Rozkład przemieszczeń radialnych powłoki w_p [mm] na wysokości $x = 0,05$ m
Fig. 5. Distributions of the radial displacements the shell w_p [mm] at the level $x = 0,05$ m



Rys. 6. Rozkład przyrostu rozwartości pionowych styków [mm] na wysokości $x = 1,80$ m
Fig. 6. Distribution of the vertical joints' width increase [mm] at the level $x = 1,80$ m

5. Wnioski

W przypadku projektowania zbiorników o nieciągłym zbrojeniu obwodowym nie należy dopuszczać do pionowego zarysowania złączy między elementami prefabrykowanymi.

Ograniczenie równoleżnikowych naprężeń rozciągających wywołanych obciążeniem temperaturą, poniżej poziomu naprężeń rysujących uzyskamy stosując ocieplenie ściany zbiornika (np. dla ww. przypadku warstwą wełny mineralnej gr. 50 mm). Nawet w przypadku ocieplenia ściany zbiornika należy liczyć się z możliwością poziomego zarysowania powłoki na skutek naprężeń południkowych wywołanych obciążeniem temperaturą. Nieprawidłowa realizacja połączenia przesuwne na etapie sprężania (rys. 5), utwierdzenie płyt nr 10-18, spowodowała zmniejszenie naprężeń ściskających od sprężenia zbiornika i w efekcie przyrost rozwartości styków na tym odcinku do 0,3 mm (rys. 6).

Każdorazowe przeprowadzenie szczegółowej analizy działających obciążeń oraz pracy statycznej konstrukcji, zastosowanie izolacji termicznej w celu ograniczenia naprężeń wywołanych obciążeniem temperaturą oraz zachowanie szczególnej staranności przy realizacji założonych warunków brzegowych pozwala uzyskać konstrukcję zbiornika o odpowiedniej trwałości i wodoszczelności.

LITERATURA

1. Krajowy Program Oczyszczania Ścieków Komunalnych, Warszawa, grudzień 2003.
2. Seruga A.: Projektowanie prefabrykowanych betonowych zbiorników cylindrycznych na cieczy sprężonych cięgnami bezprzyczepnościowymi. Inżynieria i Budownictwo, nr 2, 2001, s.112-117.
3. Seruga A.: Analiza stanów naprężenia i odkształcenia w powłokach zbiorników cylindrycznych z betonu sprężonego. Monografia nr 289, Politechnika Krakowska, Kraków 2003.
4. Seruga A., Kaźmierczak Sz.: Odkształcenia i przemieszczenia powłoki walcowej prefabrykowanego zbiornika sprężonego cięgnami bezprzyczepnościowymi, XIII Konferencja Naukowo-Techniczna „Żelbetowe i sprężone zbiorniki na materiały sypkie i cieczy”, Kraków, 19 – 21 listopada 2003, s.183 – 190.
5. Seruga A., Kaźmierczak Sz.: Wpływ pilastra na stan naprężenia sprężonej powłoki walcowej Czasopismo Techniczne Z. 7-Ś/2004 (ROK 100) ISDN 0011-4561 Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, 2004.
6. Melerski E.S.: Numerical analysis for environmental effects in circular tanks, Thin Walled Structures 40 (2002), 703-727.
7. Priestley M.J.N, Vitharana N.D.: Significance of temperature-induced loadings on concrete cylindrical reservoir walls, ACI Structural Journal/ Sept.-Oct. 1999, 737 – 747.