ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ Seria: BUDOWNICTWO z. 113

Szymon KAŹMIERCZAK* Politechnika Krakowska

NIELINIOWA ANALIZA WPŁYWU LOKALNYCH IMPERFEKCJI NA STAN NAPRĘŻENIA W PIONOWYM ZŁĄCZU PREFABRYKOWANEJ POWŁOKI ZBIORNIKA

Streszczenie. Podczas wykonywania prefabrykowanej powłoki zbiornika cylindrycznego odchyłki średniego promienia powłoki są trudne do wyeliminowania. W artykule przedstawiono propozycję dwóch prostych funkcji: e(x) – opisującej zmianę trasy cięgna sprężającego i $q_{imp}(x)$ – uwzględniającej zmianę wartości parcia cięgna sprężającego na konstrukcję. Wykonano nieliniową analizę MES w celu pokazania wpływu lokalnych imperfekcji na stan naprężenia w pionowym złączu prefabrykowanej powłoki zbiornika, po fazie jej sprężenia.

NONLINEAR ANALYSIS OF THE INFLUENCE LOCAL IMPERFECTIONS ON THE STRESS STATE IN THE PRECAST TANK SHELL VERTICAL JOINT

Summary. Deviations from the specified tank radius during the erection stage of precast cylindrical tank shell are hard to eliminate. In this paper a proposition of simple functions: e(x) – describing the change of tendon location inside the tank wall and $q_{imp}(x)$ – describing variation of prestressing load were given. The article presents nonlinear FE analysis of the influence local deviations from the specified tendon radius on the stress state in the vertical joint of the precast tank shell after the prestressing stage.

1. Wprowadzenie

Imperfekcjami nazywamy odstępstwa od założeń układu idealnego. W przypadku powłoki walcowej o imperfekcji będziemy mówili w przypadku niespełnienia warunku osiowej symetrii ścian zbiornika. Odchyłki średniego promienia powłoki zbiornika kołowo-symetrycznego możemy rozpatrywać na dwóch poziomach: globalnym i lokalnym. Jako poziom globalny traktujemy tzw. owalizację ściany

Opiekun naukowy: Dr hab. inż. Andrzej Seruga, prof. Politechniki Krakowskiej.

(1)

zbiornika, czyli maksymalną dopuszczalną zmianę wartości promienia zbiornika zmierzoną w przekrojach oddalonych od siebie o kilka (kilkanaście) metrów obwodu. Lokalna imperfekcja w przypadku zbiorników prefabrykowanych może być opisana jako dopuszczalna odchyłka promienia zbiornika pomierzona między dwoma sąsiednimi pionowymi złączami elementu ściennego (~ 2,40 m).

Wytyczne PCI Committete on Precast Prestressed Concrete Storage Tanks [2] zalecają przyjęcie maksymalnych wartości dopuszczalnych odchyłek od projektowanej wartości promienia ściany zbiornika jako \pm 12,5 mm na każde 15 m obwodu, lecz nie więcej niż \pm 25 mm. W przypadku imperfekcji lokalnych PCI [2] zaleca ograniczenie maksymalnej odchyłki promienia do \pm 10 mm na każde 3 m obwodu.

2. Model imperfekcji

Oddziaływanie cięgna sprężającego na konstrukcję można przedstawić za pomocą równoważnego obciążenia zastępczego. Dla krzywoliniowej trasy cięgna obciążenie to składa się z sił skupionych przyłożonych w miejscach zakotwienia cięgna oraz liniowego parcia w kierunku prostopadłym do jego trasy (rys. 1). Wartość i zwrot parcia liniowego zależą od lokalnego promienia krzywizny trasy cięgna. Związek między lokalnym promieniem krzywizny trasy cięgna $\rho(x)$, wartością parcia na konstrukcję p(x)i wartością siły w cięgnie sprężającym P możemy zapisać w postaci ogólnego równania [2]:

$$p_1(x) = \frac{p}{\rho(x)}$$



Rys. 1. Oddziaływanie siły sprężającej na beton przy krzywoliniowej trasie kabla Fig. 1. Prestressing tendon-concrete interaction in case of curvilinear tendon profile W przypadku konstrukcji kołowo-symetrycznej o stałej wartości promienia krzywizny $\rho(x) = R_c$ (rys. 2) wartość parcia wyrażamy wzorem:

$$p_2(x) = \frac{P}{R_e}$$



Rys. 2. Działanie siły sprężającej na beton przy kołowo-symetrycznej trasie kabla Fig. 2. Prestressing tendon-concrete interaction in case of circular tendon profile

Podstawowym założeniem do prezentowanego modelu lokalnej imperfekcji jest przyjęcie, że wpływ lokalnych imperfekcji powłoki na wartość sił statycznych od sprężenia możemy uwzględnić przez lokalną zmianę wartości obciążenia. Funkcję $q_{imp}(x)$, opisującą zmianę wartości parcia na ścianę związaną z lokalną zmianą krzywizny (rys. 3), zapisano równaniem:

$$q_{imp}(x) = \frac{p_1(x)}{p_2(x)} = \frac{R_c}{\rho(x)}$$
(3)

W przypadku zbiorników cylindrycznych trasę cięgna opisujemy za pomocą równania okręgu:

$$x^{2} + y^{2} = R^{2}$$
 lub $y(x) = \sqrt{R^{2} - x^{2}}$ (4)

Krzywiznę dowolnej krzywej płaskiej, zapisanej w postaci wyraźnej, zdefiniujmy jako K (5). Po obliczeniu pierwszej i drugiej pochodnej funkcji y(x) otrzymujemy wyrażenie na krzywiznę okręgu K_o wyrażoną wzorem:

$$K = \frac{\frac{d^2 y}{dx^2}}{\left[1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}} \to K_o(x) = \frac{\frac{K^2}{\left(R^2 - x^2\right)^{\frac{3}{2}}}}{\left[1 + \frac{x^2}{R^2 - x^2}\right]^{\frac{3}{2}}} = \frac{1}{R}$$
(5)

W opracowanym modelu lokalnej imperfekcji przyjęto następujące założenia:

 Lokalna imperfekcja trasy cięgna jest opisana jako odchyłka jego promienia pomierzona między dwoma sąsiednimi pionowymi złączami elementu ściennego.

(2)

Sz. Kaźmierczak

- Imperfekcje trasy kabla są wynikiem błędnego wykonania kanałów kablowych lub nieprawidłowego montażu elementów prefabrykowanych i powstają bez udziału dodatkowych sił zewnętrznych.
- Imperfekcja ujemna oznacza przemieszczenie złącza środkowego do wnętrza zbiornika, dodatnia oznacza przemieszczenie o zwrocie przeciwnym (rys. 3).
- Funkcja e(x), opisująca odchyłkę promienia trasy kabla musi spełniać tzw. warunki "zszycia" na krańcach przedziału <-L, L>, (L ≈ szerokość prefabrykatu):

$$e(-L) = 0 \tag{6}$$

$$\frac{de}{dx}(-L) = 0\tag{7}$$

$$e(L) = 0 \tag{8}$$

$$\frac{de}{dx}(L) = 0 \tag{9}$$

oraz dodatkowe warunki w punkcie początku lokalnego układu współrzędnych:

dx

$$e(0) = e_i \tag{10}$$

$$\frac{de}{de}(0) = 0 \tag{11}$$



Rys. 3. Dwa typy lokalnych imperfekcji trasy kabla sprężającego Fig. 3. Two types of local imperfections tendon profile

W niniejszej pracy lokalną zmianę trasy cięgna na skutek imperfekcji geometrycznych opisano za pomocą funkcji e(x):

$$e(x) = e_i \cdot \cos\left(\frac{2}{\pi} \cdot x\right)^2 \tag{12}$$

gdzie: e_i – założony mimośród cięgna w przekroju przez złącze.

110

Przechodząc z układu lokalnego funkcji e(x) do globalnego układu odniesienia, którego początek jest przyjęty w punkcie symetrii zbiornika cylindrycznego, otrzymujemy równanie trasy cięgna sprężającego y(x) w przedziale <-L, L>, z uwzględnieniem lokalnej odchyłki promienia:

$$y(x) = \sqrt{R_0^2 - x^2} + e_i \cdot \left[\cos\left(\frac{2}{\pi} \cdot x\right)^2 \right]$$
(13)

Promień krzywizny $\rho(x)$ dowolnej krzywej płaskiej zapisanej w postaci wyraźnej możemy wyrazić wzorem:

$$\rho(x) = \frac{1}{K} = \frac{\left[1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}}{\frac{d^2 y}{dx^2}}$$
(14)

3. Analiza numeryczna MES

Model MES przedstawia poziomy przekrój konstrukcji zbiornika o promieniu średnim R_{śr} = 13,265 m, obejmujący wycinek 5 złączy między prefabrykatami ściennymi o szerokości L = 2,40 m. Przeprowadzono analizę zmiany krzywizny trasy kabla, wynikającą z odchyłki jego promienia w złączu centralnym (nr 1 na rys. 4), o wartości od ± 10 mm do ± 90 mm, (0,5 h = 90 mm). Jako dodatkowe zmienne przyjęto parametry mechaniczne styku beton-zaczyn cementowy oraz gęstość siatki elementów MES. W niniejszym artykule, z uwagi na jego ograniczoną objętość, przedstawiono jedynie wyniki obliczeń dla imperfekcji ujemnych, przy założeniu wytrzymałości styku na rozciąganie f_{ctm} = 1,2 MPa, modułu sprężystości zaczynu cementowego w złączu E_{cm} = 18 GPa, modułu sprężystości betonu prefabrykatów $E_{cm} = 34$ GPa (B45) oraz rzadkiej siatki elementów skończonych (rys. 4a). W analizie MES przyjęto liniowo-spreżysty model betonu i zaczynu cementowego oraz model sprężysty z pekaniem dla styku beton-zaczyn. W obliczeniach przyjęto parcie wynikające z obciążenia pierścienia o wysokości 140 mm pojedynczym splotem 7 ϕ 5 mm naciągniętym z siłą $P_{k,sup}$ = 186 kN. Na podstawie lokalnego kąta zakrzywienia wyznaczono funkcję $q_{imp}(x)$, określającą zmianę wartości i zwrotu parcia krzywoliniowego cięgna na ścianę zbiornika w porównaniu do trasy opisanej równaniem okręgu (rys. 5).





Rys. 4. Poziomy przekrój przez złącze i dwa rodzaje siatki MES Fig. 4. Horizontal cross-section by the joint and two types of FE meshing



Rys. 5. Wykres funkcji qimp(x) Fig. 5. Diagram of the function qimp(x)

4. Wyniki i wnioski

Na rysunkach 6 i 7 przedstawiono kolejno szerokość rysy na styku beton-zaczyn cementowy oraz naprężenia w kierunku prostopadłym do przekroju styku w zależności od wartości uwzględnionej w obliczeniach imperfekcji. Opis krzywych na rysunkach 6 i 7 składa się z trzech symboli literowo-liczbowych: m101, gdzie: m – odchyłka ujemna, 10 – wartość odchyłki wynosząca 10 mm, 1 – rzadka siatka MES.











Na podstawie przeprowadzonej analizy można zauważyć, że lokalna zmiana geometrii powłoki w obrębie złącza (zastosowanie żeberek zwiększających szerokość przekroju i elastycznych uszczelek z neoprenu redukujących szerokość przekroju) powoduje, że ostatecznie otrzymujemy przekrój przez złącze o szerokości zbliżonej do grubości prefabrykatu, lecz przemieszczony na zewnątrz w stosunku do osi obojętnej elementów ściennych zbiornika. W rezultacie takiego rozwiązania mimośród siły sprężającej w przekroju przez złącze ma wartość zbliżoną do mimośrodu tej siły

w przekroju przez prefabrykat, lecz znak przeciwny (rys. 4). Takie usytuowanie cięgna sprężającego w przekroju przez złącze wywołuje, oprócz siły osiowej, moment zginający, rozciągający włókna zewnętrzne (oczywiście w przypadku obciążenia o przeciwnym zwrocie, np. parcia hydrostatycznego cieczy sytuacja jest odwrotna). Podsumowując, niekorzystne usytuowanie siły sprężającej w przekroju przez styk oraz zjawisko koncentracji naprężeń, wynikające ze skokowej zmiany szerokości przekroju, powodują, że niewielkie wartości odchyłek trasy cięgna sprężającego mogą wywoływać naprężenia rozciągające, a następnie zarysowanie styku (rys. 8) już w trakcie sprężania prefabrykowanej ściany zbiornika.



Rys. 8. Widok modelu złącza Fig. 8. The view of the joint model

BIBLIOGRAFIA

- 1. PCI Committee on Precast, Prestressed Concrete Storage Tanks: Recommended Practice for Precast Prestressed Concrete Circular Storage Tanks, 1985.
- Naaman A.E.: Prestressed concrete analysis and design. Fundamentals. 2nd edition, Techno Press 3000, Michigan 2004.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Włodzimierz Starosolski

promieri powłość w obrętne starza (zastorowana telenek zwiętazowe, drazowa od przektoju telestycznych trwienie w walektor weśli upolifik kaza ale przewigi powadalą za wiliterznie odry distarzy przewiejstwie wieże wieże wiele za dobieci przedująci de z przewiejstwie w Stalijski w Unicipi kato z rodnie wiejstwie domielski w dzienajstwiej kar przewiejstwie w Stalijski w Unicipi kato z rodnie obieci w predująci zbietnik w rodnie wiejstwie wiejstwiejstwie wiejstwie obieci w predująci w predujące bał wiejstwiej w wiejstwiej w terminie z wiejstwie przebującej w predujące wiejstwiej w wiejstwiej wiejstwiej w terminie z wiejstwiej wiejstwiego w predujące wiejstwiejstwiejstwiejstwiejstwiej wiejstw