ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ Seria: BUDOWNICTWO z. 113

Mariusz ZYCH^{*} Politechnika Krakowska

FAZOWA ANALIZA MES ZARYSOWANIA MŁODEGO BETONU NA PRZYKŁADZIE ŻELBETOWEGO ZBIORNIKA PROSTOKĄTNEGO

Streszczenie. Przedmiotem artykułu jest fazowa analiza numeryczna zarysowania młodego betonu w okresie wykonywania zbiornika prostokątnego o jednostkowej pojemności 30000 m³. Obliczenia numeryczne oparte są na modelu uwzględniającym między innymi: rozwój temperatury od ciepła hydratacji, z uwzględnieniem warunków zewnętrznych, rozwój skurczu i właściwości mechanicznych w czasie. Model materiału przyjęty jest jako dojrzewający sprężysto-lepki z zarysowaniem. Ponadto, przedstawiono rzeczywisty stan zarysowania powłoki, konfrontując go z wynikami obliczeń numerycznych.

PHASE ANALYSIS OF YOUNG CONCRETE CRACKING IN FEM BASED ON AN EXAMPLE OF RECTANGULAR RC TANK

Summary. In the paper it is presented phases numerical analysis of cracking in young concrete during construction of RC tank with nominal volume equal to 30000 cu.m. Numerical analysis is based on the model in that the development of hydration temperature, the development of shrinkage and the other concrete properties in time dependent are taken into consideration. The material model is assumed as a hardening viscoelastic with cracking. Moreover the real state of wall cracking and comparison to the numerical calculation have been done.

1. Wstęp

Wykonywanie dużych zbiorników żelbetowych o znacznych pojemnościach niesie ze sobą ryzyko nadmiernego zarysowania powłoki na etapie ich wykonywania. Problem związany jest oczywiście z negatywnym wpływem procesu wydzielania ciepła podczas procesu hydratacji w okresie jeszcze bardzo niskiej wytrzymałości betonu. Zagadnienie to dotyczy nie tylko dużych zbiorników, ale w mniejszym bądź większym stopniu każdej konstrukcji masywnej, bądź średnio masywnej, której

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

M. Zych

Nr kol. 1799

technologia wykonania wymaga betonowania kolejnych elementów konstrukcji w taki sposób, że istniejące już jej fragmenty (zabetonowane wcześniej o znacznie większej już wytrzymałości i sztywności) krępują swobodę odkształcenia nowo zabetonowanego elementu [3]. W przypadku zbiorników zjawiskom tym podlegają ściany zabetonowane na sztywnym fundamencie bądź ściany betonowane pomiędzy istniejącymi ścianami i połączone z nimi przerwami konstrukcyjnymi. Nie znaczy to, iż wszystkie ściany zbiorników ulegają zarysowaniu. Aby tego uniknąć lub ograniczyć zarysowania do 0,1 mm, należy kontrolować jakość stosowanej mieszanki betonowej, sposób wykonania zbiornika (tj. przerwy konstrukcyjne, pielęgnacja) oraz właściwie go zaprojektować (np. moc zbrojenia, geometria). Analiza numeryczna przedstawiana w niniejszej pracy jest próbą stworzenia wciąż rozwijanego i testowanego na różnych obiektach modelu, pozwalającego analize na pracy takich konstrukcji, z uwzględnieniem między innymi: rodzaju stosowanego materiału, geometrii zbiornika, etapów jego wykonywania oraz wpływów warunków zewnętrznych. W pracy przedstawiono pokrótce model stosowanego materiału oraz analizę numeryczną na przykładzie zbiornika żelbetowego zrealizowanego na jednej z krajowych oczyszczalni.

2. Opis konstrukcji

W niniejszym artykule przedmiotem analizy zarysowania w okresie dojrzewania betonu jest fragment żelbetowego prostokątnego zbiornika o jednostkowej pojemności 30000 m³. Zbiornik o wymiarach rzutu w świetle 98,35x38,0 m i wysokości ściany 8,1 m został zdylatowany na całej wysokości łącznie z płytą denną grubości 0,75 m w dwóch przekrojach (rys. 1). Przedmiotem analizy jest jedna ze ścian wewnętrznych o stałej grubości 0,35 m, oznaczonej symbolem SW8b. Aby nie dopuścić do zarysowania ściany, zaprojektowano poziome przerwy konstrukcyjne na wysokościach 0,0; 0,4; 4,4 i 7,1 m (rys. 2).

Analizowana ściana podzielona jest jedną pionową przerwą konstrukcyjną w odległości 14 m od przerwy dylatacyjnej (rys. 2), natomiast skrajne krawędzie pionowe są swobodne. Mimo takiego zabiegu, podczas dojrzewania betonu zarejestrowano wiele pionowych rys. Na innych ścianach tego zbiornika rysy rozwinęły się również na wyższych partiach ścian, jednak te przypadki będą analizowane w późniejszym okresie ze względu na bardziej złożoną pracę konstrukcji oraz znacznie bardziej czasochłonne obliczenia numeryczne. Obydwa segmenty

wykonano z betonu klasy B-25 na cemencie CEM II/B-S32.5R. Pierwszy z nich, o wysokości 4,4 m (do poziomej przerwy konstrukcyjnej), wykonano 26 marca, a drugi 31 marca. W obu kierunkach ścianę zazbrojono obustronnie prętami o średnicy 20 mm co 150 mm.



Rys. 1. Geometria części zbiornika wraz z układem przerw dylatacyjnych Fig. 1. Rectangular reinforced concrete reservoir geometry and expansion joints layout



Rys. 2. Rozmieszczenie przerw konstrukcyjnych oraz układ rys po obydwu stronach ściany Fig. 2. Location of the construction and expansion joints as well as layout of vertical cracks

3. Rozwój temperatury, model materialu

W celu określenia zmian średniej temperatury dojrzewającego betonu, wykorzystano pracę [2], w której znajduje się szerszy opis przytoczonych wzorów. W obliczeniach przyjęto następujące wartości współczynników termofizycznych określonych na podstawie składu mieszanki [2]: $\lambda_b - 3,11$ W/mK, $c_b - 0,772$ kJ/kgK. Współczynnik α przyjęto jak dla zerowej prędkości wiatru, równy 5,8 W/m²K. W przypadku ściany w szalunku wprowadzono zastępczy współczynnik przyjmowania ciepła α_w , określony równaniem:

$$\alpha_w = \frac{\alpha}{R\alpha + 1} \tag{1}$$

w którym: $R = \frac{d}{\lambda}$ gdzie: d – grubość płyty szalunkowej, λ – współczynnik przewodzenia ciepła szalunku.

Rozwiązanie równania niestacjonarnego przepływu ciepła (3) dla przypadku jednokierunkowego przewodzenia ciepła, przy przyjęciu funkcji Q w postaci (4), podał K. Hirschfeld [2]. Przy założeniu jednakowych warunków wymiany ciepła na obydwu powierzchniach ściany, temperaturę średnią w przekroju ściany opisuje równanie:

$$\overline{T}(t) = \left[\frac{2\alpha(1-k) + dc_b\gamma_bK_{Tp}}{2\alpha k - dc_b\gamma_bK_{Tp}}\right] \cdot \frac{qC}{c_b\gamma_b} \exp\left(-K_{Tp}t\right) + \dots + \left[T_p - T_o - \frac{qCdK_{Tp}}{2\alpha_o^n - dK_{Tp}c_b\gamma_b}\right] \cdot f(\varphi_1)\exp\left(-\frac{\alpha_o}{c_b\gamma_bd}\right)t + T_o \qquad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a_b \cdot \nabla^2 T + \frac{\partial Q}{\partial \tau} \cdot \frac{1}{c_b \cdot \gamma_b} \qquad (3)$$

$$Q_{(\tau)} = C \cdot q \cdot \left[1 - \exp\left(-K_{Tp} \cdot t\right)\right]$$

gdzie: T_o i T_p – odpowiednio temperatura otoczenia i początkowa temperatura mieszanki.

Podane rozwiązania są jednak przybliżeniem rzeczywistej zmiany temperatury w przekroju, gdyż nie uwzględniają one efektu napromieniowania słonecznego oraz niejednorodnego rozkładu temperatury w przekroju. Z uwagi na okres betonowania (marzec), wpływ promieniowania słonecznego jest niewielki i został pominięty w obliczeniach.

Skurcz zamodelowano wg CEB-FIP Model Code 1990 [1]. Efekt działania skurczu jest drugorzędny, ale uwzględniono tu jego wpływ ze względu na dłuższy okres obliczeniowy w stosunku do niektórych elementów. Początek skurczu i jego rozwój definiowane są indywidualnie dla każdego elementu konstrukcji, uwzględniając między innymi różny wymiar miarodajny przekroju. Wpływ wilgotności otoczenia uwzględnia współczynnik β_{RH} i został on policzony w uproszczeniu dla RH = 80%. Całkowite odkształcenie od skurczu w czasie *t* obliczone jest ze wzoru:

$$\varepsilon_s(t, t_s) = \varepsilon_{so} \times \beta_s(t - t_s) \tag{5}$$

gdzie: ε_{so} – całkowite odkształcenie skurczowe, $\beta_s(t-t_s)$ – funkcja opisującą rozwój skurczu w czasie.

W obliczeniach uwzględnia się zmienny w czasie moduł sprężystości betonu na ściskanie, określony na podstawie badań. Model materiału przyjęto jako dojrzewający sprężystolepki, wg Baźanta [5, 6, 7], z uwzględnieniem zarysowania [4] (przyjęto parametry $\alpha = 3$, d = 0.28, p = 0.12).

4. Metodyka obliczeń, wyniki

Na rys. 3 przedstawiono siatkę MES, na którą składają się 4-metrowa warstwa gruntu, płyta fundamentowa oraz skos. Elementy te występują w pierwszej fazie obliczeń.



Rys. 3. Siatka MES oraz fazy pracy konstrukcji Fig. 3. Mesh in finite element model and phases of the modeling

Płyta, dojrzewając, stopniowo kurczy się i ulega wpływom zmiennej temperatury otoczenia. W fazie 2 obliczeń dobetonowany jest segment I ($l_1 = 14,00$ m) na już dojrzałą, jednak kurczącą się nadal płytę fundamentową. Pole temperatury oraz skurcz

liczone są w funkcji czasu i od nich wygenerowana jest zmiana naprężeń. W fazie 3 dobetonowany jest segment 2 (sąsiedni, $l_2 = 16,60$ m). Zachowana jest ciągłość obliczeń rozkładu temperatury (rys. 4, 5), skurczu oraz naprężeń dla segmentu 1 i płyty oraz następuje początek rozwoju temperatury i naprężeń dla segmentu 2.



- Rys. 4. Rozkład temperatury w wybranych krokach obliczeniowych dla poszczególnych faz: a) grunt, płyta i skos, b) dobetonowany segment 1, c) dobetonowany segment 2
- Fig. 4. The distribution of the temperature in selected steps of calculation for individual phases: a) soil, slab and slant, b) added segment number 1, c) added segment number 2



- Rys. 5. Rozwój temperatury średniej w segmencie 1 i 2 podczas dojrzewania betonu
- Fig. 5. The development of the average temperature in the wall segment 1 and 2 during hardening of concrete

Na rys. 5 przedstawione zostały przebiegi średniej temperatury w przekroju ściany (dla segmentu 1 i 2), z uwzględnieniem zmiany temperatury otoczenia i

wpływu rozdeskowania. Obliczone średnie temperatury w przekroju ściany uwzględniają temperaturę początkową mieszanki betonowej mierzonej podczas betonowania: 26.03.04 (9°C) i 31.03.04 (13°C).

Na rys. 6a przedstawiono odkształcenia rysujące w ostatnim kroku obliczeniowym fazy 2. Segment 1 ulega zarysowaniu dopiero po dostawieniu segmentu sąsiedniego i dalszym obniżeniu się temperatury oraz w wyniku skurczu (rys. 6b). Rysunek 6c przedstawia rozkład naprężeń równoleżnikowych w betonie w fazie ustabilizowanego zarysowania fazy 3. W środkowej, niezarysowanej części ściany beton jest najbardziej wytężony i dalsze obniżenie się temperatury spowodowałoby zarysowanie tej części oraz powiększenie się rys istniejących. Rysunek 6d przedstawia odpowiadające temu stanowi naprężenia w zbrojeniu poziomym.



- Rys. 6. Stan wytężenia konstrukcji: a) odkształcenia rysujące przed dobetonowaniem segmentu 2,
 b) naprężenia równoleżnikowe w betonie w fazie ustabilizowanego zarysowania,
 c) odkształcenia rysujące, odpowiadające fazie ustabilizowanego zarysowania, d) naprężenia w poziomych prętach zbrojeniowych w fazie ustabilizowanego zarysowania
- Fig. 6. The state of the strain: a) crack strains before pouring segment 2, b) horizontal stresses in concrete in the phase of stabilized cracks layout, c) crack strains in the phase of stabilized cracks layout, d) stresses in horizontal reinforcement in the phase of stabilized cracks layout

Na rys. 7a przedstawiono w sposób ogólny etapy powstawania rys oraz zmiany ich rozwartości w fazie dojrzewania betonu i wpływu temperatury otoczenia. Rysunek 7b przedstawia zmiany naprężeń w poziomych prętach zbrojeniowych przechodzących

przez rysę. Pierwszy ulega zarysowaniu segment 1. Rysy rozwijają się głównie w części środkowej segmentu, jak zaobserwowano w rzeczywistości. Segment 2 ulega zarysowaniu później i rysy w pierwszej kolejności rozwijają się w lewym narożu ściany, z czasem przechodząc do części środkowej. Takie zarysowanie wynika z usytuowania masywnej płyty, która wypuszczona jest 3 m poza segment. Policzony rozstaw rys i ich rozmieszczenie zbliżone są do zaobserwowanego. Według obliczeń dla większości przypadków w_{max}<0,1 mm. Mniejsza rozwartość rys policzonych w stosunku do zaobserwowanych wynika z kilku faktów. Przede wszystkim przedstawione szerokości rys są z okresu około 2 miesięcy od zabetonowania segmentu 1 (już po wykonaniu nadbudowy), natomiast obliczenia, ze względu na dużą czasochłonność, obejmują okres zaledwie 2,5 tygodnia.





Z obserwacji obiektów rzeczywistych wynika, iż w miarę dojrzewania betonu (jego wzrostu wytrzymałości) dodatkowe odkształcenia, np. od skurczu czy wysychania, z reguły kumulują się w istniejących rysach, powodując znaczne ich poszerzenie.

Ponadto, w obliczeniach nieuwzględniono wpływu pielegnacji, którą było polewanie ściany wodą. Przyczynia się to do powstania niejednorodnego pola temperatury na grubości ściany, powodując naprężenia rozciągające przy jej powierzchni. Świadczy o tym fakt, że tylko część z przedstawionych rys jest przelotowa, natomiast pozostałe są rysami powierzchniowymi. W modelu 2D możliwe było policzenie jedynie rys przelotowych o średniej rozwartości w_n na grubości ściany. Mała rozwartość rys wynika z silnego stopnia zbrojenia, którego poziom wyteżenia, ze wzgledu na niewielki rozstaw rys jest niewielki. O zarysowaniu decyduje nie tylko max. ΔT . ale i szybkość zmian, która w okresie ujemnych temperatur otoczenia może być gwałtowna. Ponadto, działa jeszcze skurcz, który często modelowany jest jako zastępcze $+\Delta T$. W przypadku konstrukcji silnie zbrojonych może przyczynić się to do powstania dodatkowych naprężeń rozciagających (gdyż zbrojenie stanowi więzy wewnętrzne) i decyduje o zarysowaniu, które z natury nie jest tak groźne jak zarysowanie od zmian temperatury, gdyż powstające rysy wstępują gęściej, przez co są węższe. W praktyce mamy jednak do czynienia z materiałem niejednorodnym, którego efektywna wytrzymałość, chociażby ze względu na obecność zbrojenia pionowego, jest zróżnicowana, co w sposób istotny wpływa na rozmieszczenie rys, podobnie jak strzemiona w elementach zginanych.

5. Wnioski

Mimo mocnego stopnia zbrojenia i stosunkowo cienkiej ściany zbiornika może nastąpić zarysowanie w okresie dojrzewania betonu, zwłaszcza w przypadku zastosowania niewłaściwej mieszanki betonowej, złego usytuowania przerw konstrukcyjnych bądź negatywnego wpływu segmentów sąsiednich.

Pomimo zastosowania uproszczonego modelu 2D, uzyskany obraz zarysowania wydaje się być wystarczający do celów inżynierskich, pozwalających na kalibrację i optymalizację rozwiązań w przypadku nowo projektowanego obiektu.

Kurczenie się sąsiedniego, świeżego segmentu może zwiększać ryzyko zarysowania segmentu istniejącego, ale jeszcze młodego (słabego).

Niniejszy model daje zbliżone wyniki obliczeniowe w stosunku do obserwowanych w rzeczywistości, jednak potwierdzenie przydatności modelu musi być dokonane na większej liczbie analizowanych przypadków.

BIBLIOGRAFIA

- 1. CEB-FIP Model Code 1990. Comite Euro-International du Beton, 1993.
- 2. Kiernożycki W.: Betonowe konstrukcje masywne. Polski Cement, Kraków 2003.
- 3. Springenschmid R. (ed.): Prevention of Thermal Cracking in Concrete at Early Ages. Rilem raport, No. 15, London 1998.
- 4. Szarliński J., Winnicki A., Podleś K.: Konstrukcje z betonu w płaskich stanach. Kraków 2002.
- 5. Bazant Z.P., Panula L.: Basic creep. Part II. Materiaux et Constructions. ACI Journal, Vol. 11, No. 65.
- 6. Witasse R, Hendriks M.A.N.: Finite Element Modeling of Early Age Concrete Behavior using Diana. TNO Building and Construction Research, Delft, The Netherlands.
- Zych M.: Naprężenia termiczne w dojrzewającym betonie ściany zbiornika żelbetowego. XIX Konferencja Naukowa pt. "Metody komputerowe w projektowaniu i analizie konstrukcji hydrotechnicznych", Korbielów, 5-8 marca 2007.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Michał Knauff