ZESZYTY NAUKOWE POITECHNIKI ŚLASKIEJ 2006
Seria: BUDOWNICTWO z. 109 Nr kol. 1735

Mariusz ZYCH *
Politechnika Krakowska

ANALIZA NUMERYCZNA NAPRĘŻEŃ TERMICZNYCH W SEGMENCIE ŚCIANY ZBIORNIKA ŻELBETOWEGO

Streszczenie. W artykule przedstawiono model MES wykonany w programie DIANA 3D i 2D do analizy rozwoju naprężeń termicznych w młodym betonie. Przedstawiono przykład ściany cylindrycznego zbiornika żelbetowego zrealizowanego podczas rozbudowy oczyszczalni ścieków. Model uwzględnia rozwój ciepła hydratacji i wpływ temperatury słonecznej powietrza na rozwój niejednorodnego pola temperatury. Zastosowano sprężysto-lepki model materiału. Przedstawiono rozwój efektywnej wytrzymałości betonu na rozciąganie, koniecznej do uwzględnienia przy analizie zarysowania powłoki w młodym wieku betonu.

THERMAL STRESSES IN THE WALL OF THE RC TANK

Summary. In the paper it was presented FEM model which has been made in program DIANA 3D and 2D to an analysis of the development of a thermal stresses at early age concrete. It was presented an example of the cylindrical RC tank wall which was realized during the extension of the sewage treatment plant. The influence of the heat of the hydration and solar temperature of the air on the development of the non-uniform temperature area are included in the proposed model. Viscoelastic material was used in the calculation. The development of the effective tensile strength of concrete which is necessary to perform the crack analysis at early age concrete is allso presented.

1. Wstęp

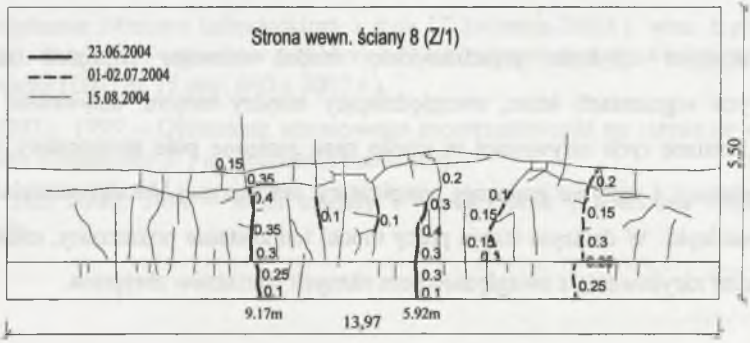
W niniejszym artykule przedstawiono model rozwoju naprężeń termicznych w żelbetowych segmentach ścian, uwzględniający między innymi: sztywności łączonych elementów, zmianę tych sztywności w czasie oraz zmienne pole temperatury wynikające z ciepła hydratacji i wpływu zmiennej temperatury zewnętrznej. Model materiału przyjęto jako sprężystolepki. W dalszym etapie pracy model ten zostanie poszerzony, między innymi o analizę stanu zarysowania z uwzględnieniem różnych wariantów zbrojenia.

---

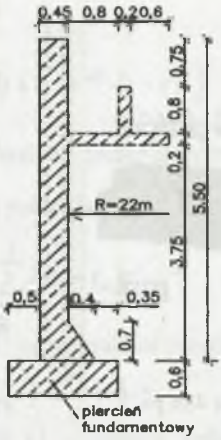
* Opiekun naukowy: Dr hab. inż. Andrzej Seruga, prof. Politechniki Krakowskiej

Artykuł został przygotowany na podstawie badań doświadczalnych wykonanych na terenie oczyszczalni ścieków, podczas realizacji dziesięciu żelbetowych jednakowych zbiorników o nominalnej pojemności jednostkowej 8300 m^3. Ściany analizowanych zbiorników żelbetowych zalicza się do konstrukcji średniomasywnych [3]. Ściany te, monolitycznie połączone z dnem, betonowane są systemem odcinkowym, w wyniku czego poszczególne segmenty ścian różnią się między sobą warunkami brzegowymi występującymi wzdłuż ich krawędzi pionowych w okresie dojrzewania betonu oraz wykonane są w różnych warunkach atmosferycznych (pora dnia i roku), co będzie skutkować odmienną zmianą temperatury w segmencie ściany. Konsekwencją różnych temperatur będą odmienne przebiegi rozkładu naprężeń termicznych, które mogą doprowadzić do wystąpienia pionowych rys przelotowych, które po osiągnięciu szerokości większej niż 0.1mm powodują nieszczelność zbiornika. Zachodzi zatem konieczność odpowiedniego zazbrojenia stref segmentów ścian na kierunku poziomym. Opis układu zbrojenia i składu betonu B25 podano w [10].

Na rys. 1 przedstawiono etapy powstawania rys po wewnętrznej stronie ściany. Segment ściany został zabetonowany 18-06-2004 jako pierwszy, zatem jego odkształcenia były ograniczone jedynie przez pierścień fundamentowy (brak ścian sąsiednich). Strona wewnętrzna została rozdeskowana 22-06, strona zewnętrzna dzień później. Po pięciu dniach od zabetonowania stwierdzono obecność dwóch rys po stronie wewnętrznej. Po dobetonowaniu 24-06 segmentów sąsiednich o takiej samej długości (zamknięcie obwodu zbiornika) rysy z wewnętrznej strony 27-06 rozwinęły się do rys przelotowych, powodujących nieszczelność zbiornika. W okresach późniejszych odnotowano powstanie rys po stronie wewnętrznej o rozwarciu od 0.05 mm do 0.20 mm oraz po stronie zewnętrznej o rozwarciu od 0.05 mm do 0.15 mm, niemających wpływu na szczelność zbiornika. Na rys.1 szerokości rys przedstawiono z dnia 05-08 (przed próbą szczelności).



Rys. 1. Etapy powstawania rys po stronie wewnętrznej
Fig. 1. The stages of the cracking on the internal surface



Rys. 2. Przekrój poprzeczny przez ścianę i pierścień fundamentowy
Fig. 2. The cross section of the wall and the ring foundation

2. Temperatura twardniejącego betonu

W analizie pól termicznych zakłada się, że beton jest ośrodkiem izotropowym, jednorodnym. Do opisu zmiany temperatury dojrzewającego betonu z uwzględnieniem temperatury otoczenia przyjęto równanie Fouriera [3] (liniowe prawo przewodzenia ciepła). Zmienne tego równania zostały opisane w pracy [10].

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a_b\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) + \frac{1}{c_b \cdot \gamma_b} C \frac{\partial Q}{\partial t} \tag{1}$$

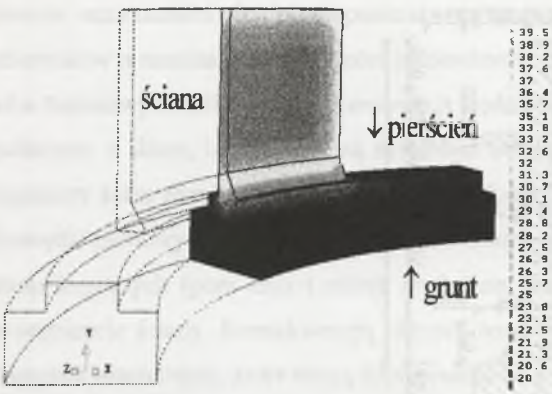
- warunek początkowy $T(x,0) = T_p$ - warunek brzegowy $\left.\frac{\partial T(x)}{\partial n}\right|_k = -\frac{\alpha}{\lambda_b}(T_k - T_o)$

Proces hydratacji cementu opisano stopniem hydratacji, który najczęściej określany jest jako ilość wydzielonego ciepła w danym okresie czasu do całkowitego ciepła hydratacji [2]:

$$r = \frac{\int_0 qv_{,hy}(r,\tau)d\tau}{\int_0^\infty qv_{,hy}(r,\tau)d\tau} \tag{2}$$

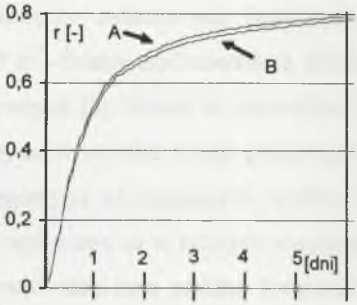
Ilość produkowanego ciepła jest funkcją historii temperatury. Chwilowa wartość szybkości wydzielania ciepła q jest opisana wg [9]:

$$qv_{,hy}(r,\tau) = \alpha \cdot q_r(r) \cdot q_T(T) \tag{3}$$



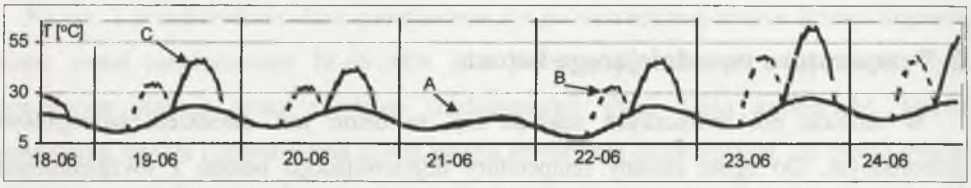
Rys. 3a. Rozkład temperatury w ścianie 48h po zabetonowaniu (3D)

Fig. 3a. The distribution of the temperature in the wall 48h hours after casting (3D)



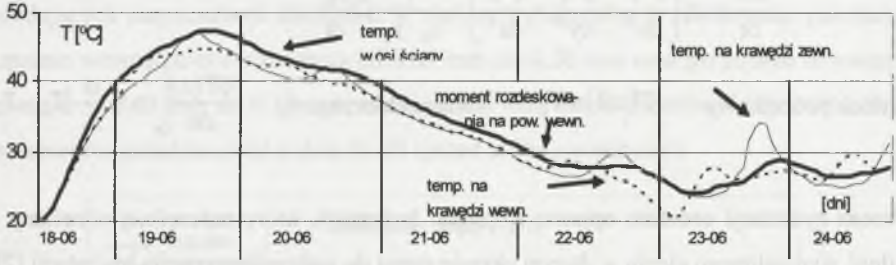
Rys. 3b. Zmiana stopnia hydratacji A–w osi ściany, B – na krawędzi ściany

Fig. 3b. The deve-lopment of the degree of hydration A – in the middle of the wall, B – at the surface of the wall



Rys. 4. Temperatura powietrza w cieniu (A), (C) temperatura słoneczne powietrza dla zewnętrznej i wewnętrznej (B) powierzchni ściany [4,10]

Fig. 4. The temp. of the air (A)and solar temp. for internal (B)and outside (C)surface of the wall [4,10]



Rys. 5. Rozwój temperatury w przekroju ściany

Fig. 5. The development of the temperature in the cross section of the wall

3. Model sprężystolepki materiału

Model sprężystolepki jest rodzajem materiału z pamięcią, co znaczy, że historia odkształceń wpływa na obecne naprężenia. Właściwość ta jest niezbędna przy analizie naprężeń termicznych w dojrzewającym betonie. Sprężystolepkie zachowanie może być

opisywane funkcją pełzania $J(t,\tau)$. W programie zastosowano funkcję pełzania Double Power Law [8,9]:

$$J(t,\tau)=\frac{1}{E(\tau)}\cdot\left(1+\alpha\cdot\tau^{-d}\cdot(t-\tau)^{p}\right) \tag{4}$$

gdzie: $\alpha=3$, d = 0,28; p=0,12 są stałymi materiałowymi określonymi na podstawie składu mieszanki betonowej. Część funkcji pełzania $f(t)=(t-\tau)^{p}$ jest rozwinięta w szereg Taylora:

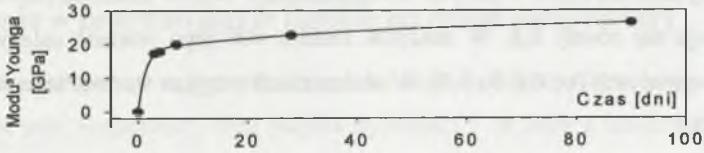
$$f(t-\tau)=\sum_{r=0}^{5}h_r(t-t_d)\tau^{\gamma} \tag{5}$$

Związek pomiędzy odkształceniami i naprężeniami przedstawia się następująco:

$$\varepsilon(t)=\int_0^t J(t,\tau)\cdot\bar{C}\cdot\sigma(\tau)d\tau \tag{6}$$

gdzie σ - macierz naprężeń, $J(t,\tau)$ - funkcja pełzania, C - bezwymiarowa macierz współczynnika Poissona ν.

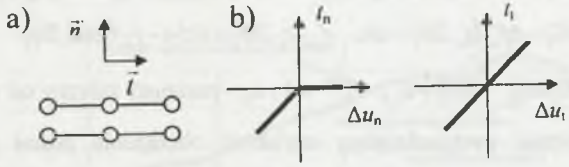
W analizie młodego twardniejącego betonu rozwój modułu Younga stosowany w Double Power Law został opisany wg funkcji rozwoju modułu sprężystości uzyskanej z badań.



Rys. 6. Rozwój modułu Younga
Fig. 6. The development of the Young modulus

4. Modelowanie połączenia grunt-fundament

Modelując powierzchnię kontaktową pomiędzy gruntem a fundamentem, zastosowano elementy kontaktowe przedstawione na rys.7a. Danej powierzchni kontaktowej nadano właściwości opisujące związki przedstawione na rys. 7b.



Rys. 7a, 7b. Elementy kontaktowe oraz związki opisujące ich właściwości [6]
Fig. 7a, 7b. Contact elements and relationship describing their property [6]

Dla sił pionowych (od konstrukcji) powodujących ściskanie przyjęto liniową zależność pomiędzy naprężeniem normalnym t_n a przemieszczeniem w następującej postaci:

$$t_n = k_n \Delta u_n \tag{7}$$

gdzie: k_n jest sztywnością w kierunku normalnym do powierzchni kontaktowej (przy ściskaniu). Gdy fundament jest odrywany od gruntu, to wartość k_n przyjmuje wartość = 0 (brak rozciągania). Poziome ograniczenia od gruntu powodowane są tarciem.

5. Efektywna wytrzymałość betonu na rozciąganie

Wytrzymałość betonu na rozciąganie określona na próbkach w porównaniu do wytrzymałości betonu w konstrukcji jest znacznie zawyżona. Na podstawie studiów literaturowych przyjęto określenie efektywnej wytrzymałości na rozciąganie wg wzoru (8). Bazuje on na wzorze zaproponowanym przez Rostasy [5]. Na podstawie badań Rostasy wykazał zależności wytrzymałości na rozciąganie od czasu, wpływów termicznych, szybkości obciążenia i naprężeń własnych.

$$f_{ctef}(t) = k_E \cdot k_T \cdot k_D \cdot f_{ctm}(t) \tag{8}$$

k_E – współczynnik naprężeń własnych uwzględniający wpływ mikrozarysowania wg DIN 1045 przyjmuje się równy 0,8. W zeszycie DafStb 400 jego wartość zależy od grubości konstrukcji w granicach (od 0,6 do 0,8). W obliczeniach przyjęto wartość tego współczynnika za [5] równą 0,8.

k_T – współczynnik określający wpływ temperatury na proces hydratacji został opisany poprzez funkcję wieku ekwiwalentnego Arrheniusa [1, 7]. Opisuje ona zmianę wytrzymałości z dostateczną dokładnością do 50% wytrzymałości 28-dniowej (tj. do około dwóch dni wieku ekwiwalentnego). W okresie późniejszym wyższa temperatura (30°C-35°C) powoduje już obniżenie wytrzymałości. W przypadku konstrukcji średniomasywnych wartość 30°C niemal zawsze jest przekroczona. Zatem, uwzględnienie w projektowaniu konstrukcji średniomasywnych wpływu temperatury na obniżenie wytrzymałości jest konieczne. Wpływ wysokiej temperatury na obniżenie wytrzymałości przyjęto wg Emborga [7]:

$$\Delta f_{cc}{}^*(t_e, T) = G_C \cdot \Delta f_{cc}(t_e, 20) \quad \text{dla} \quad f_{cc}(t_e, 20) \geq 0.54 \cdot f_{cc}(28d, 20) \tag{9}$$

gdzie: $G_C = \exp[-0.08(T-20)] + a_c$, $G_C^{\max} = 1$, a_c - parametr zależny od wskaźnika w/c.

k_D – współczynnik uwzględniający szybkość obciążenia został przyjęty wg badań Wittmana [11]. Zależność wytrzymałości od prędkości obciążenia została przez niego aproksymowana w następujący sposób:

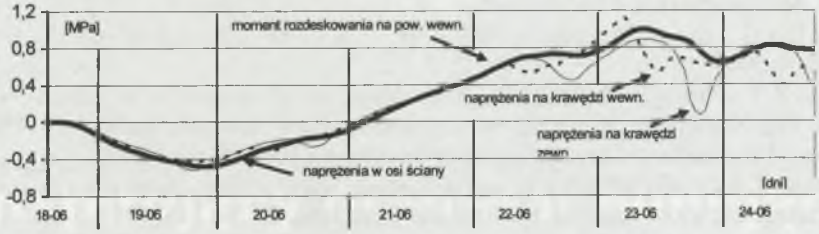
$$f_{ct} = d_1 \cdot \dot{\delta}_2^{\,d} \tag{10}$$

gdzie: d_1, d_2 stałe zależne od w/c. $\dot{\delta}$ (mm/min) jest szybkością ugięcia zginanej belki. Jeśli przyjmiemy, że wytrzymałość doraźna wyznaczona jest przy prędkości 0.1 mm/min, to możemy w stosunku do niej określić wytrzymałości przy innych prędkościach. W przypadku odkształceń powstałych w fazie stygnięcia konstrukcji możemy powiedzieć, że wytrzymałość na rozciąganie jest redukowana o 30%. Ten poziom redukcji daje dobrą zgodność z doświadczeniami.

Pręty poprzeczne, ziarna kruszywa i inne czynniki mogą prowadzić do dalszej redukcji wytrzymałości betonu na rozciąganie. Przy naprężeniach rozciągających dochodzi do spiętrzenia naprężeń, które powodują inicjację rysy. Jednak dotychczasowe badanie nie sparametryzowały tych wpływów. Według powyższego podejścia wytrzymałość efektywna badanego betonu w momencie zarysowania (tj. 5 dni po zabetonowaniu) wynosi 0,82 MPa, wg zaleceń DIN 1045-1 można przyjąć, że f_{cteff}=0,5 f_{ctm28}=0,93 MPa, co daje również wartości zbliżone do policzonych naprężeń rozciągających.

6. Naprężenia w twardniejącym betonie od zmian temperatury

Obliczenia wykonywane są w następującym schemacie. W pierwszym etapie wykonywane są obliczenia pola temperatury oraz stopnia hydratacji i te dane z analizy potencjałów są stosowane do obliczenia naprężeń. W przypadku konstrukcji, która powstaje etapami, obliczenia należy wykonać z podziałem na fazy. W pierwszej fazie wykonano obliczenia dla pierścienia fundamentowego (analiza potencjałów i analiza naprężeń z uwzględnieniem zależnych od czasu właściwości materiału), następnie „dostawienie" ściany (faza 2) i wykonanie ciągłości obliczeń dla pierścienia oraz obliczeń dla nowo dostawionej ściany (ponownie analiza potencjałów i analiza naprężeń). Na rys. 8 przedstawiono naprężenia w przekroju ściany, będące efektem niejednorodnego pola temperatury oraz więzów zewnętrznych, jakim jest pierścień fundamentowy.



Rys. 8. Rozwój naprężeń w przekroju ściany na wysokości 1,23 m (2D)
Fig. 8. The development of the stresess in the cross section of the wall at the height 1,23m (2D)

7. Wnioski

Powyższe obliczenia należy traktować jako przybliżone, gdyż model nie uwzględnia jeszcze między innymi: wpływu dobetonowania sąsiednich segmentów ściany na naprężenia i zarysowanie (wtedy rysy rozwinęły się do rys przelotowych), dystrybucji naprężeń po zarysowaniu.

Do czasu utrzymywania segmentu w szalunku wpływ naprężeń samorównoważących się jest znikomy, bezpośrednio po rozdeskowaniu występuje wzrost naprężeń na powierzchni chłodniejszej, co zwiększa prawdopodobieństwo powstania rys powierzchniowych, które w późniejszym okresie mogą rozwinąć się do rys przelotowych, decydujących o szczelności zbiornika.

Różnica w rozwoju stopnia hydratacji, wynikająca z różnic temperatur dla różnych punktów ściany, jest pomijalnie mała. Wystarczające jest zatem przyjęcie średniej funkcji stopnia hydratacji do opisu własności betonu. Konieczne jest jednak porównywanie stosunkowo niskich naprężeń z wytrzymałością efektywną, czyli wytrzymałością betonu w elemencie konstrukcyjnym.

LITERATURA

1. Byfors: Plain concrete at early ages. Swedish Cement and concrete Institute, Fo 3:80, Stockholm 1980.
2. De Schutter G.: Hydration and temperature development of concrete made with blast-furnace slag cement. Cement and Concrete Research 29 (1999) 143-149.
3. Kiernożycki W.: Betonowe konstrukcje masywne, Polski Cement, Kraków 2003.
4. Paas U.: Mindestbewehrung fur verformungsbehinderte Betonbauteile im jungen Alter. Berlin, Deutscher Ausschuss fur stahlbeton, Heft 489, Berlin 1998.
5. Onken P., Rostasy Ferdinand S.: Wirksame Betonzugfestigkeit im Bauwerk bei fruh einsetzendem Temperaturzwang, Deutscher Ausschuss fur stahlbeton, Heft 449, Berlin 195.
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.
7. RILEM RAPORT 15. Prevention of Thermal Cracking in Concrete at Early Ages. Edited by R. Springenschmid. London 1998.
8. TNO Diana Analysis Procedures. Edited by: Frits C. de Witte and Wijtze Pieter Kikstra March 8, 2005.
9. Bazant Z. P., Panula L. Part II: Basic creep. Materiaux et constructions. Vol. 11- No 65.
10. Zych M.: Naprężenia termiczne w segmencie ściany zbiornika żelbetowego. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria Budownictwo z.104, Gliwice 2005.
11. Wittman F.H., et al.: Influence of age at loading, water-cement ration and rate of loading on fracture energy of concrete. Material and Structures, 20, No 116, 1987, p. 103-110.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Włodzimierz Kiernożycki