

Mariusz ZYCH^{*}
Politechnika Krakowska

ANALIZA WYTĘŻENIA ZBROJENIA ŚCIANY ZBIORNIKA ZARYSOWANEGO W OKRESIE DOJRZEWANIA BETONU

Streszczenie. W artykule przedstawiono analizę pracy zbrojenia w powłoce zbiornika żelbetowego zarysowanej w fazie jej wykonywania, tj. podczas dojrzewania betonu. W obliczeniach pola temperatury model uwzględnia rodzaj stosowanego materiału, wpływ temperatury zewnętrznej oraz promieniowania słonecznego. Model materiału został przyjęty jako sprężysto-lepki, uwzględniający m.in. historię obciążenia. Rozwój parametrów materiałowych w okresie dojrzewania betonu oparty został na zmiennym w czasie stopniu hydratacji. Do analizy zarysowania przyjęto model rysy rozmytej. Zbrojenie modelowane zostało jako materiał sprężysty, uwzględniający fakt braku przyczepności zbrojenia do betonu we wczesnym okresie jego dojrzewania. W artykule przedstawiono przykład obliczeniowy poparty konkretnym obiektem w skali naturalnej. Podano stan wyjątkowy zbrojenia w fazie dojrzewania betonu (również podczas zarysowania).

ANALYSIS OF REINFORCEMENT STRESSES IN CONCRETE TANK'S WALL CRACKING AT EARLY AGE CONCRETE

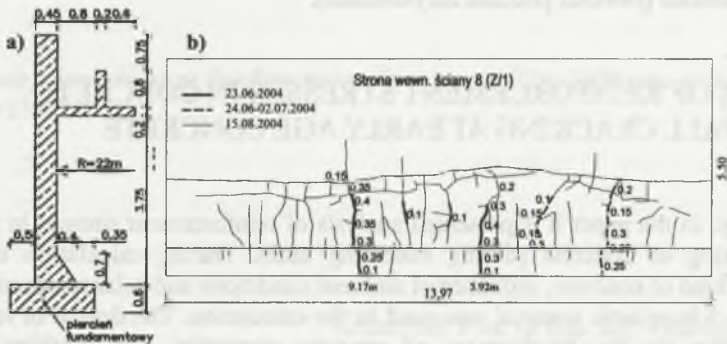
Summary. In the paper it is presented analysis of reinforcement stresses in a tank's wall during hardening of concrete (during executing tank). During calculation the effect of temperature, kind of concrete, influence of ambient conditions and solar temperature is taking into account. Viscoelastic material was used in the calculation. The degree of reaction is the main parameter for the development of concrete properties. The cracking behavior is described using a smeared cracking approach with aging and non-linear softening behavior. Reinforcement behavior is modeled as a linear elasticity and with thermal expansion coefficient. For the first hours the reinforcement is not bonded. It was presented an example of the cylindrical RC tank wall which was realized during the extension of the sewage treatment plant. The development of the stresses in a bar reinforcement will be also presented.

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

1. Wstęp

Niniejszy artykuł jest kontynuacją pracy [7] i dotyczy tej samej analizowanej ściany (przedstawionej na rys. 1a,b) oraz zjawisk w niej zachodzących podczas dojrzewania betonu [4]. Model do opisu pola temperatury i termiczne warunki brzegowe pozostawiono bez zmian, natomiast poszerzono model o możliwość analizy zarysowania dojrzewającego betonu z uwzględnieniem wpływu zbrojenia.

Zbrojenie poziome (RB500W) po stronie wewnętrznej wykonano z ϕ 16 co 125 mm do poziomu 2,7 m, natomiast po stronie zewnętrznej do wysokości 1,2 m jako ϕ 20 co 100 mm, a powyżej jako ϕ 16 co 100 mm. Na pozostałych wysokościach średnica i rozstaw prętów były zróżnicowane, co jednak nie ma większego znaczenia w analizowanym przypadku obliczeniowym. Ścianę zabetonowano 16 dni po pierścieniu. Do realizacji zbiornika zastosowano beton B-25 o następującym składzie: cement 330 kg (CEM II/B-S 32,5R), woda 132 kg, piasek 583 kg, żwir 1197 kg. Przedstawione na rys. 1b szerokości rys pomierzono przed próbą szczelności, tj. około 2 miesiące po zabetonowaniu. W okresie formowania się rys ich rozwarłośc początkowe były zdecydowanie mniejsze.



Rys. 1 a) Przekrój poprzeczny przez ścianę i pierścien fundamentowy, b) etapy powstawania rys po wewnętrznej stronie ściany [7]

Fig. 1 a) The cross section of the wall and the ring foundation, b) The stages of the cracking on the internal surface [7]

2. Temperatura twardniejącego betonu

W obliczeniach pól termicznych z uwzględnieniem zmiennego w czasie promieniowania słonecznego przyjęto założenia i zmienne poniższych równań, jak w pracy [7]. Do opisu zmiany temperatury dojrzewającego betonu z uwzględnieniem temperatury otoczenia przyjęto równanie Fouriera [3, 4].

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

gdzie:

T – temperatura betonu [°C],

Q – ciepło twardnienia cementu odniesione do jednostki masy materiału [kJ/kg],

a_b – współczynnik dyfuzji temperatury w betonie [m²/s],

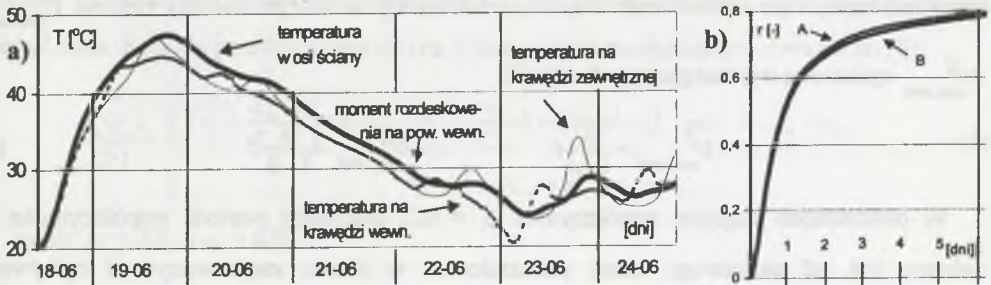
c_b – ciepło właściwe [kJ/kgK],

γ_b – gęstość pozorna betonu [kg/m³],

C – ilość cementu [kg/m³].

Stopień hydratacji określaný jest jako ilość wydzielonego ciepła w danym okresie czasu do całkowitego ciepła hydratacji [1]:

$$r = \frac{\int_0^t q_{v,hy}(r, \tau) d\tau}{\int_0^\infty q_{v,hy}(r, \tau) d\tau} \quad (2)$$



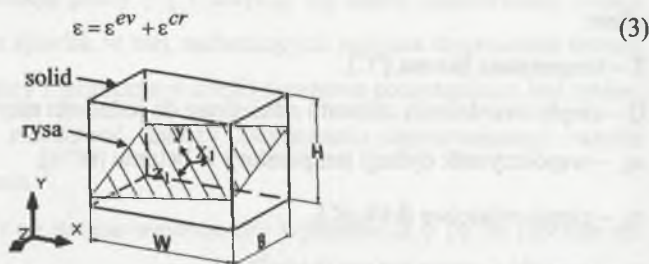
Rys. 2 a) Policzony rozwój temperatury w przekroju ściany, b) Policzona zmiana stopnia Hydratacji: A – w osi ściany, B – na krawędzi ściany [7]

Fig. 2 a) The development of the temperature in the cross section of the wall. b) The development of the degree of hydration: A – in the middle of the wall, B – at the surface of the wall [7]

3. Model materiału

W obliczeniach zastosowano sprężysto-lepki model materiału z zarysowaniem. Model sprężysto-lepki jest rodzajem materiału z pamięcią, co oznacza, że historia odkształceń wpływa na obecne naprężenia. Sprężysto-lepkie zachowanie opisano funkcją pełzania Double Power Law [8]. Do opisu zarysowania konstrukcji przyjęto model rysy rozmytej (rys. 3). Podstawowym założeniem modelu jest rozdzielenie odkształceń całkowitych na odkształcenie

sprężysto-lepkie ε^{ev} i odkształcenie rysujące ε^{cr} , wg (3), a opis i zastosowania tego modelu zostały przedstawione między innymi w pracach [5, 6].



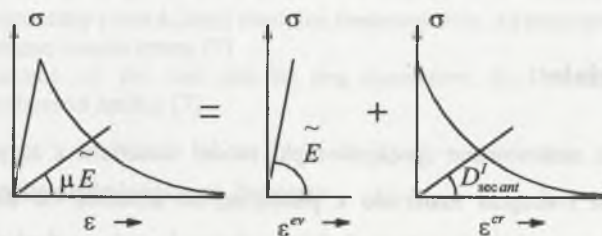
Rys. 3. Model rysy rozmytej w 3D
Fig. 3. Smeared crack model in 3D space

W przyjętym modelu zakłada się, że zarysowanie nastąpi w chwili, gdy naprężenie główne opisywane w układzie lokalnym $x_i-y_i-z_i$ osiągnie $f_t(r)$ ($f_t(r)$ jest tu funkcją efektywnej wytrzymałości zależnej od stopnia hydratacji charakterystycznego dla każdego punktu konstrukcji). Do czasu zarysowania materiał jest izotropowy i opisywany jako sprężysto-lepki, a po zarysowaniu staje się ortotropowy, w którym moduły sieczne $D_{sec\ ant}^I$ i

$D_{sec\ ant}^{II}$ opisane są wg następujących relacji:

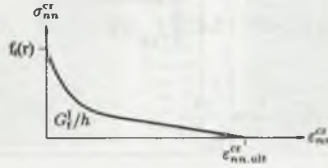
$$D_{sec\ ant}^I = \frac{\mu}{1-\mu} \bar{E} \quad D_{sec\ ant}^{II} = \frac{\beta}{1-\beta} G \quad (4)$$

W obliczeniach przyjęto współczynnik $\beta = 0,2$, natomiast wartość współczynnika μ zależna jest od aktualnego stanu odkształcenia w stanie zarysowanym i opisywana w zależności od relacji naprężenie-odkształcenie, czyli przyjętej krzywej mięknienia. Interpretacja graficzna współczynnika μ została przedstawiona na rys. 4.



Rys. 4. Interpretacja graficzna współczynnika μ
Fig. 4. The graphic interpretation of μ coefficient

Początkowo zakładano w modelu kruche pęknięcie, jednak ze względu na to, że proces zbieżności był trudny do osiągnięcia, a czasem wręcz niemożliwy, zastosowano krzywą mięknięcia wg Hordijk [6] (rys. 5), zakładając energię pęknięcia bliską zeru, dzięki czemu możemy powiedzieć, że jest to quazi-kruche pęknięcie, przy którym staje się realne przeprowadzenie większości obliczeń.



Rys. 5. Funkcja nieliniowego mięknięcia wg Hordijka, Cornelissena oraz Reinhardta [6]
 Fig. 5. Nonlinear tension softening according to Hordijk, Cornelissen and Reinhardt [6]

Dzięki przyjęciu wytrzymałości na rozciąganie jako funkcji stopnia hydratacji, w modelu uzyskujemy zmienne w czasie kryterium powstania rys w dojrzewającym betonie, przez co zmienia się w czasie również krzywa mięknięcia (ze względu na $f_i(r)$), ale wartość energii pęknięcia na podstawie badań przedstawionych [2] w przedziale czasu od 3 do 28 dni jest niemal stała. Funkcja przedstawiona na rys. 5 jest opisana następującym równaniem [6]:

$$\frac{\sigma_{nn}^{cr}(\epsilon_{nn}^{cr})}{f_i(r)} = \begin{cases} \left(1 + \left(c_1 \frac{\epsilon_{nn}^{cr}}{\epsilon_{nn,ult}^{cr}} \right)^3 \right) \exp \left(-c_2 \frac{\epsilon_{nn}^{cr}}{\epsilon_{nn,ult}^{cr}} \right) - \frac{\epsilon_{nn}^{cr}}{\epsilon_{nn,ult}^{cr}} (1 + c_1^3) \exp(-c_2) & \text{gdy } 0 < \epsilon_{nn}^{cr} < \epsilon_{nn,ult}^{cr} \\ 0 & \text{gdy } \epsilon_{nn,ult}^{cr} < \epsilon_{nn}^{cr} < \infty \end{cases} \quad (5)$$

gdzie: $c_1 = 3,0$, a $c_2 = 6,93$.

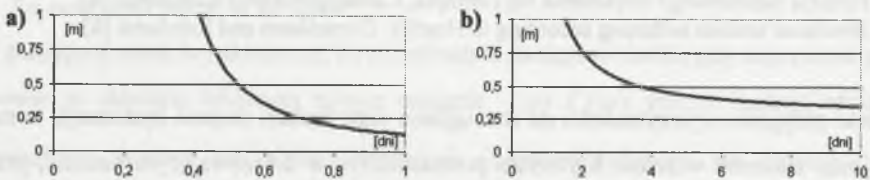
4. Modelowanie zbrojenia

Zbrojenie modelowane jest jako materiał liniowo-sprężysty o współczynniku rozszerzalności termicznej $\alpha_s = 1 \cdot 10^{-5}$ i module Younga $E = 210$ GPa. Ważnym problemem jest współpraca, a raczej przyczepność stali do betonu, zwłaszcza w przypadku młodego betonu. W początkowych godzinach zakres odkształceń betonu (ze względu na duże pęcznienie) jest stosunkowo niewielki, a naprężenia jakie mogłyby powstać w stali są dla analizowanego przypadku w zakresie około $f_{ys} = 10$ MPa. Jeśli zatem policzymy długość zakotwienia wg (6) [9] przy poziomie naprężeń 10 MPa w funkcji wytrzymałości przyczepnościowej (rys. 6a), to w początkowych godzinach wynosi ona kilkanaście metrów. Stąd też podczas modelowania uzasadnione jest nieuwzględnianie wpływu zbrojenia na stan naprężeń, tj. uwzględnienie zerowej przyczepności stali do betonu (zerowe naprężenia w zbrojeniu). W niniejszym

przykładzie obliczeniowym założono, że początek współpracy stali z betonem jest po 12 godzinach od początku wiązania. W tym okresie stal zaczyna przenosić jeszcze stosunkowo niewielkie naprężenia. W okresie późniejszym, tj. podczas zarysowania (okres około 4,5 dnia) podstawowa długość zakotwienia przy ekstremalnym dla tego przypadku poziomie naprężeń 130 MPa wynosi już tylko 0,45 m (rys. 6b).

$$f_{bk}(t) = 0.7 \cdot 0.473 \sqrt[3]{f_{ck}(t)^2} \quad (6)$$

$$l_b(t) = \frac{\phi}{4} \cdot \frac{f_{ys}}{f_{bk}(t)} \quad (7)$$



Rys. 6. Zmiana długości zakotwienia $l_b(t)$ w funkcji czasu podczas dojrzewania betonu przy naprężeniach w zbrojeniu: a) 10 MPa, b) 130 MPa

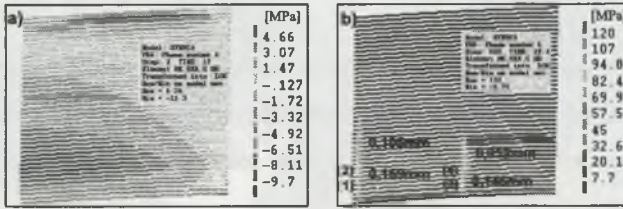
Fig. 6. The development of bonded length $l_b(t)$ as a function of time during hardening of concrete (at the stresses in reinforcement at the level: a) 10 MPa, b) 130 MPa

5. Schemat obliczeniowy oraz wybrane wyniki obliczeń

W niniejszym przykładzie zamodelowano połowę ściany z warunkami symetrii w jej osi, a obliczenia podzielono na następujące fazy. Faza pierwsza obliczeń obejmuje sam pierścień fundamentowy (z gruntem) i jest ona podzielona na fazę 1A – z uwzględnieniem zamocowania w kierunku normalnym do powierzchni bocznych celem zamodelowania deskowania niepozwalającego na deformację świeżej mieszanki betonowej pod wpływem ciężaru własnego przez pierwsze 24 godziny i fazę 1B – bez podpór symulujących deskowanie. Podobnie faza druga z dostawioną ścianą jest podzielona na fazę 2A – z podporami symulującymi deskowanie na ścianie przez pierwsze 24 godziny i fazę 2B – brak deskowania. W przypadku braku deskowania otrzymamy deformację podczas pierwszych kroków obliczeniowych w dolnej części ściany oraz nadmierne przechylenie się na zewnątrz podczas wzrostu temperatury.

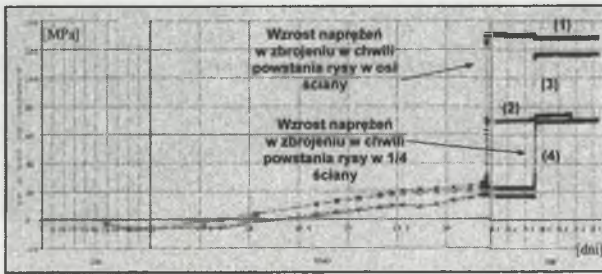
Na rys. 7a przedstawiono naprężenia średnie dla elementów zbrojenia poziomego po stronie wewnętrznej ściany podczas wzrostu temperatury. W dolnej części występują niewielkie naprężenia ściskające, a w górnej rozciągające. Podczas fazy studzenia powstają naprężenia rozciągające, wynikające z kurczenia się betonu (rys. 7b). W tej fazie zostaje

przekroczona efektywna wytrzymałość na rozciąganie betonu, co skutkuje pojawieniem się pierwszej rysy w osi ściany, spadkiem naprężeń rozciągających w betonie i wzrostem naprężeń w zbrojeniu (rys. 8). Druga rysa pojawia się mniej więcej w 1/4 długości ściany (rys. 7b).



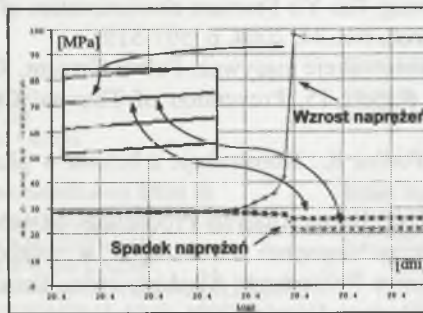
Rys. 7. Naprężenia średnie w zbrojeniu poziomym po stronie wewnętrznej: a) podczas wzrostu temperatury, b) podczas spadku temperatury (po zarysowaniu)

Fig. 7. Mean stresses in internal horizontal reinforcement during: a) heating phase, b) cooling phase (after cracking)



Rys. 8. Rozwój naprężeń maksymalnych w zbrojeniu (w punktach jak na rys. 7)

Fig. 8. The development of maximum stresses in horizontal reinforcement (in points according to Fig. 7)



Rys. 9. Naprężenia maksymalne w zbrojeniu przed i po zarysowaniu

Fig. 9. Maximum stresses in reinforcement before and after cracking

Pojawienie się drugiej rysy powoduje również spadek naprężeń w ścianie widoczny nieznacznie w oddalonym zbrojeniu przechodzącym przez pierwszą rysę (rys. 8). Wpływ powstania rysy na naprężenia w zbrojeniu przechodzącym przez tę rysę i w sąsiadujących elementach zbrojenia przedstawiono na rys. 9. Naprężenia w elementach przechodzących

bezpośrednio przez rysę gwałtownie wzrastają, a sąsiadujące elementy zbrojenia zostają częściowo odciążone.

6. Wnioski

Obliczenia przeprowadzono dla krótkiego okresu czasu po zabetonowaniu. Później mogą pojawić się kolejne rysy lub powiększyć istniejące w wyniku np. obniżenia temperatury, dobetonowania sąsiedniego segmentu (wtedy rysy rozwinęły się do rys przelotowych) oraz początku wpływu skurczu od wysychania.

W przedstawionym przykładzie naprężenia w obszarze otaczającym rysę po zarysowaniu spadają (ściana ulega odprężeniu), a kolejna rysa może pojawić się w innym obszarze.

W przypadku modelowania pracy zbrojenia ważne jest nieuwzględnianie jego udziału w początkowym okresie dojrzewania betonu.

Dalsze badania i obliczenia są potrzebne, aby uzyskać zgodność z rzeczywistym zachowaniem się tego typu konstrukcji.

LITERATURA

1. De Schutter G.: Hydration and temperature development of concrete made with blast-furnace slag cement. *Cement and Concrete Research*, No. 29, 1999, p. 143-149.
2. Jin-Keun Kim, Yun Lee, Seong-Tae Yi: Fracture characteristics of concrete at early ages. *Cement and Concrete Research*, No. 34, 2004, p. 507-519.
3. Kiernozycycki W: *Betonowe konstrukcje masywne*. Polski Cement, Kraków 2003.
4. Springenschmid R.: *Rilem Raport 15. Prevention of Thermal Cracking in Concrete at Early Ages*. London 1998.
5. Szarliński J., Winnicki A., Podleś K.: *Konstrukcje z betonu w płaskich stanach*. Kraków 2002.
6. Witte F. C., Kikstra W. P.: *TNO Diana Analysis Procedures*. March 2005.
7. Zych M.: *Analiza numeryczna naprężeń termicznych w segmencie ściany zbiornika żelbetowego*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria: Budownictwo, zeszyt: 109, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2006.
8. Bazant Z. P., Panula L.: *Basic creep. Part II: Materiaux et constructions*. Vol. 11, No. 65.
9. PN-B-03264:2002 „Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Obliczenia statyczne i projektowanie”.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Stanisław Majewski