

Andrzej AJDUKIEWICZ, Barbara GŁUSZAK, Stanisław MAJEWSKI

Katedra Inżynierii Budowlanej

Politechnika Śląska

MODELOWANIE ZACHOWANIA SIĘ "MŁODEJ" ŚCIANY ŻELBETOWEJ W NAWIĄZANIU DO OBSERWACJI W NATURZE

Streszczenie. Analiza numeryczna oparta na sprężysto-plastycznym modelu materiałowym została zastosowana do oceny zachowania się młodego betonu w konstrukcji szczególnego typu.

MODEL OF BEHAVIOUR OF "YOUNG" REINFORCED CONCRETE WALL AND ITS COMPARISON WITH OBSERVATIONS IN NATURE

Summary. Numerical analysis based on elasto-plastic material model has been applied to evaluate behaviour of young concrete in the particular structure.

MODELIERUNG DER ERHALTUNG "JUNGE" STAHLBETONWAND IN VERBINDUNG ZU OBSERVATION IN NATUR

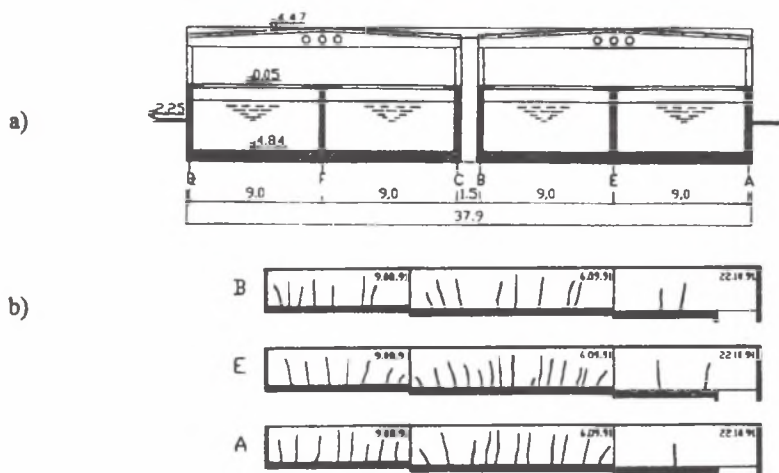
Zusammenfassung. Die numerische Analyse ist auf elastisch-plastische Stoffmodell gestützt. Sie ist zu Anwendung für Erkennung von Wirkungen der Erscheinung in "frische" Beton eingetreten.

1. WSTĘP

Wymagania eksploatacyjno-użytkowe wielu obiektów inżynierskich stwarzają konieczność uwzględnienia przy ich projektowaniu i wykonawstwie wpływu naprężeń wywołanych następstwami zmian objętościowych twardniejącego betonu. Zmiany te, spowodowane głównie procesami transportu ciepła i wilgoci pomiędzy twardniejącym betonem i otoczeniem, są przyczyną tworzenia się pierwszych rys i pęknięć konstrukcji, jeszcze w fazie jej realizacji. Mysząc popularnymi kategoriami jednoosiowego stanu naprężenia do zarysowania świeżego betonu dochodzi wówczas, gdy naprężenia rozciągające powstałe w wyniku ochłodzenia elementu, wcześniej podgrzanego wskutek egzotermicznych procesów hydratacji cementu, przewyższą wytrzymałość betonu w danej fazie rozwoju jego struktury. Jak wykazują doświadczenia, maksymalne temperatury samoociepnięcia betonu wywołane egzotermicznymi

procesami hydratacji cementu mogą osiągnąć 25+50°C. W tym samym czasie zachodzi intensywny skurcz świeżego betonu. Równoczesne oddziaływanie tych dwóch wpływów powoduje w świeżym betonie stan odkształcenia i naprężenia, wpływając w istotny sposób na jego strukturę i właściwości mechaniczne.

Obiektem, w którym ujawniły się skutki opisanych zjawisk były zbiorniki koagulacji wstępnej Stacji Uzdatniania Wody w Będzinie. Przekroje tych zbiorników przedstawia rysunek 1a.



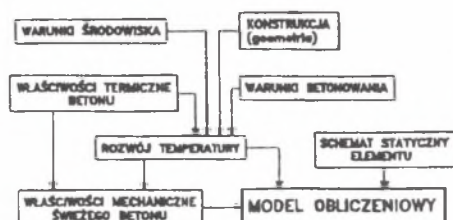
Rys. 1. a) Przekrój poprzeczny zbiorników; b) Zarysowanie podłużnych ścian zbiornika
Fig. 1. a) Cross-section of tanks; b) Cracking of longitudinal walls

Ściany podłużne zbiorników stanowiły 24 odcinki skrajne o długości 16,5m, połączone ze ścianami poprzecznymi oraz 12 odcinków pośrednich o długości 22,2m. Odcinki ścian miały jednakową grubość 0,4m i były monolitycznie połączone z wcześniej wykonaną płytą denną. Na rysunku 1b przedstawiono zinventaryzowany obraz zarysowań ścian. Rysy zaobserwowano już po kilkunastu godzinach od betonowania, gdy ściany były jeszcze całkowicie wilgotne. To spostrzeżenie było podstawą stwierdzenia, że przyczynę uszkodzeń stanowiły wpływy termiczne, a konkretnie proces stygnięcia ściany nagrzanej wskutek egzotermicznych procesów hydratacji i sumujących się zewnętrznych zmian temperatury oraz skurczu betonu [1].

2. MODEL OBLICZENIOWY

Pomimo że problem wpływów termiczno-skurczowych, wzrostu naprężeń i tworzenia się rys w pierwszym okresie dojrzewania betonu jest znany od dawna, w projektowaniu jest on często pomijany bądź też obliczenia prowadzone są na mocno uproszczonych modelach.

Istotną przyczyną utrudniającą ocenę stanu zagrożenia konstrukcji w tej fazie jest niedostateczna znajomość właściwości fizyko-mechanicznych świeżego betonu, zmieniających się w czasie od chwili wymieszania jego składników. Trudna do oszacowania jest także amplituda temperatur nagrzanie/stygnięcie, która uzależniona jest od wielu czynników związanych z warunkami betonowania oraz warunkami środowiska (rys.2).



Rys.2. Czynniki wpływające na analizę naprężeń termiczno-skurczowych
Fig.2. Factors influencing the analysis of thermal-shrinkage stresses

Jedyną praktycznie szansę rozpoznania tak złożonego zjawiska z różnorodnymi wpływami i zmieniającymi się cechami materiału stwarza metoda elementów skończonych. W metodzie tej możliwa jest budowa numerycznego modelu ustroju oraz przyjęcie modelu materiałowego, pozwalającego możliwie wiernie aproksymować zachowanie się świeżego betonu.

3. MODEL MATERIAŁOWY

W analizie wykorzystano sprężysto-plastyczny model materiałowy, którego ogólny opis został przedstawiony w pracy [2], a szczegółowa aplikacja do betonu i żelbetu w pracy [3]. W tym miejscu przedstawimy jedynie skrótową charakterystykę tego modelu, ze szczególnym uwzględnieniem tych elementów, których wprowadzenie było konieczne dla realistycznego opisu zjawisk zachodzących we wczesnej fazie dojrzewania betonu.

Model należy do grupy tzw. "modeli nasadkowych" (cap-model) z obrotową powierzchnią plastyczności, której główną część tworzy stożkowa powierzchnia Druckera-Pragera, zamknięta od strony rozciąganej kulistą, a od strony ściskanej elipsoidalną nasadką. Obydwie nasadki są styczne do powierzchni stożkowej. Powierzchnię plastyczności sformułowano w przestrzeni naprężeń określonej przez naprężenie średnie σ_m oraz intensywność naprężenia $\bar{\sigma}$ uzależnione od niezmienników stanu naprężenia wzorami:

$$\sigma_m = \frac{J_1}{3} = \frac{\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z}{3}, \quad (1)$$

$$\bar{\sigma} = \sqrt{J_2^D} = \sqrt{\frac{1}{2} \left[(\sigma_x - \sigma_m)^2 + (\sigma_y - \sigma_m)^2 + (\sigma_z - \sigma_m)^2 \right] + \tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2}$$

Stożkową część tej powierzchni opisuje równanie:

$$F_1 = \bar{\sigma} + (3\alpha\sigma_m - \beta) \cdot Y(\kappa) = 0, \quad (2)$$

w którym:

$$\alpha = \frac{f_c - f_t}{f_c + f_t} \cdot \frac{\sqrt{3}}{3}, \quad \beta = \frac{2f_c f_t}{\sqrt{3}(f_c + f_t)}, \quad (3)$$

gdzie f_c i f_t oznaczają wytrzymałości betonu na ściskanie i rozciąganie w jednoosiowym stanie naprężenia. Ogólne równanie funkcji wzmocnienia/osłabienia Y_κ określono w pracy [3].

Równanie kulistej nasadki o promieniu R ze środkiem w początku układu współrzędnych określa wzór:

$$F_2 = \bar{\sigma}^2 + \sigma_m^2 - R^2 = 0, \quad R = \frac{\beta Y_\kappa}{\sqrt{1 + 9\alpha^2 Y_\kappa^2}} \quad (4)$$

Pominiemy opis nasadki elipsoidalnej w strefie dużych naprężeń średnich σ_m , która nie odgrywa istotnej roli w analizowanym tu zagadnieniu.

Zasadniczymi parametrami funkcji określających powierzchnię plastyczności a zarazem powierzchnię graniczną, a więc również kryterium zniszczenia materiału są wytrzymałości f_c i f_t . Dla betonu są one funkcją czasu, a ich zmiany we wczesnej fazie dojrzewania są szczególnie szybkie. W opisywanym tu modelu przyjęto:

$$E_c(t) = \beta_E(t) E_c, \quad f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) f_{cm}, \quad f_{ctm}(t) = \beta_{cc}(t) f_{ctm},$$

gdzie:

$$\beta_E(t) = \sqrt{\beta_{cc}(t)}, \quad \beta_{cc}(t) = \exp\left[0,25\left(1 - \frac{5,3}{\sqrt{t}}\right)\right],$$

E_b , f_{cm} , f_{ctm} - odpowiednio współczynnik sprężystości, wytrzymałość na ściskanie i rozciąganie dla betonu 28-dniowego.

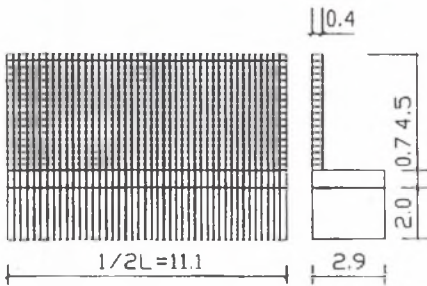
Równie istotne są zmiany parametrów decydujących o odkształcalności betonu we wczesnej fazie jego dojrzewania. Wobec braku wiarygodnych badań na ten temat uzależniono moduł sprężystości betonu od jego wytrzymałości na ściskanie f_c według zasad przyjmowanych dla dojrzałego betonu [2]. Dopóki ścieżka naprężeń pozostaje wewnątrz obszaru ograniczonego powierzchnią plastyczności, materiał zachowuje się w sposób sprężysty. Przyjęte w tym obszarze nieliniowe związki konstytutywne podano w pracy [2].

Zachodzące we wczesnej fazie dojrzewania ujemne (ściskające) odkształcenia termiczne i skurczowe powodują powstanie w zbrojonej i połączonej ze znacznie mniej odkształcalnym dnem zbiornika ścianie naprężeń rozciągających. Wyznaczona w przestrzeni $\sigma_m \leftrightarrow \bar{\sigma}$ ścieżka naprężeń przebija powierzchnię graniczną w obrębie jej kulistej nasadki lub w początkowym obszarze stożka Druckera-Pragera. Powoduje to osłabienie materiału, który jednak w dalszym ciągu doznaje wzmocnienia na skutek zachodzących procesów dojrzewania betonu. Ponieważ jednak osłabienie wynikające z zarysowania ma charakter trwały, powierzchnia graniczna w

zarysowanych elementach konstrukcji nigdy nie osiągnie takiego położenia, jak w obszarach, które w początkowym okresie dojrzewania zarysowaniu nie uległy. Tak przyjęty model materiałowy zdaje się realistycznie opisywać zachowanie ustroju. Problemem pozostaje określenie parametrów modelu decydujących o osłabieniu i wzmocnieniu "młodego" betonu.

4. WYNIKI OBLICZEŃ

Opisany model dla świeżego betonu zastosowano w analizie numerycznej ściany żelbetowej, której geometrię, zbrojenie oraz parametry wytrzymałościowe betonu i stali przyjęto zgodnie z posiadanym materiałem doświadczalnym (rys.3).



Rys. 3. Podział ściany na elementy skończone

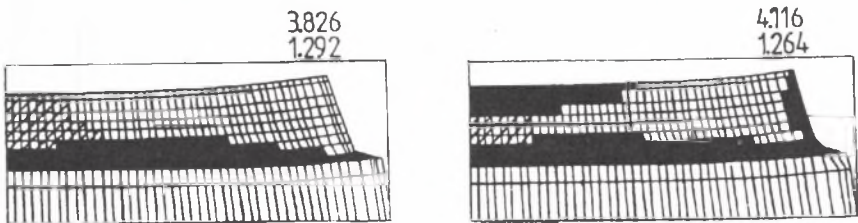
Fig.3. Finite element network

Podział ściany na elementy skończone został dostosowany do rzeczywistego rozkładu zbrojenia ściany. Elementy betonowe modelowane są jako elementy tarczowe, zbrojenie jako elementy prętowe usytuowane w osiach siatki.

Rozkład temperatury, wartości odkształceń skurczowych oraz zmieniających się parametrów mechanicznych świeżego betonu przyjęto zgodnie z pracą [4]. W każdym kroku przyrostowo-iteracyjnego algorytmu obliczeń

uwzględniono zmianę odkształceń termicznych i skurczowych, jak również zmieniające się w czasie parametry mechaniczne świeżego betonu, decydujące o kryteriach zniszczenia.

Na rysunku 4a przedstawiono widok zdeformowanej ściany z zaznaczonymi elementami, w których naruszone zostało kryterium zniszczenia oraz podaną wielkością przemieszczenia poziomego i pionowego narożnika po 8 dniach od momentu betonowania. Porównanie wyników analizy numerycznej z rzeczywistym obrazem zarysowania nie wypadło najgorzej.



Rys.4. Obraz deformacji ściany

Fig.4. Illustration of the deformation of the wall

W obliczeniach zbrojenia elementów betonowych na wpływy termiczno-skurczowe we wczesnej fazie dojrzewania (o ile takie są wykonywane) stosuje się zwykle mocno uproszczony model zakładający liniowo-sprężystą pracę materiałów. Rysunek 4b przedstawia deformację ściany przy zmianie rzeczywistego zbrojenia poziomego (obustronnie $\Phi 12\text{mm}$ co 200mm) na znacznie silniejsze zbrojenie $\Phi 16\text{mm}$ co 150mm , wynikające z analizy sprężystej [4]. Nietrudno zauważyć niekorzystny wpływ silnego zbrojenia na pracę ściany, gdy zmiany temperatury oraz skurcz oddziałują na bardzo młody jeszcze beton.

5. WNIOSKI

Przedstawiony w referacie sprężysto-plastyczny model świeżego betonu jest próbą opisu złożonych zjawisk zachodzących w okresie wiązania i twardnienia betonu. Pomimo, iż od podjęcia pierwszych prac teoretycznych i eksperymentalnych w tym kierunku minęło już prawie 60 lat, nie opracowano dotychczas jednolitych zasad projektowania konstrukcji z uwzględnieniem tych zjawisk.

Jeszcze do niedawna uważano, że rozwiązanie problemu naprężeń termiczno-skurczowych w elementach żelbetowych jest praktycznie niemożliwe z uwagi na trudności natury matematycznej i skomplikowane zależności cech fizyko-mechanicznych betonu od czasu i temperatury. Znaczny postęp w dziedzinie modelowania betonu oraz rozwój metod numerycznych zachęcają do podejmowania prób symulacji komputerowej złożonych zjawisk zachodzących w młodym betonie. Można uznać, że przeprowadzona weryfikacja przyjętego modelu dała pozytywny wynik, a pewne różnice mogą być wyeliminowane poprzez skorygowanie przyjętych do obliczeń stałych materiałowych. Niestety, przyjęcie tych stałych dla świeżego betonu pozostaje wciąż dyskusyjne. Konieczne są więc dalsze prace badawcze w tym zakresie, jak również udoskonalenie modelu sprężysto-plastycznego dla świeżego betonu.

LITERATURA

- [1] Ajdukiewicz A., Kliszczewicz A., Głuszak B.: Destrukcja termiczna żelbetowych ścian zbiorników we wczesnym okresie dojrzewania. XXXIX Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB, Warszawa-Krynica-Rzeszów, 1993, t.5, ss.5-12
- [2] Majewski S.: Elasto-Plastic Double-Cap-Model for Structure-Interaction Problems. Archiwum Inżynierii Lądowej, nr 4/1994
- [3] Majewski S.: Sprężysto-Plastyczny Model Betonu. XL Konferencja Naukowa KIL PAN i KN PZITB, Rzeszów-Krynica-Warszawa, 1994, t.3, ss.129-136
- [4] Majewski S., Głuszak B.: Analiza numeryczna naprężeń termiczno-skurczowych we wczesnej fazie dojrzewania ściany żelbetowej. XL Konferencja Naukowa KIL PAN i KN PZITB, Rzeszów-Krynica-Warszawa 1994, t.3, ss.138-144

Recenzent: prof. dr hab. inż. W. Gutkowski

Wpłynęło do Redakcji w grudniu 1994r.