

Piotr ROMANOWSKI\*  
Politechnika Krakowska

## ZMIANA WŁASNOŚCI MECHANICZNYCH BETONU POD WPLYWEM CHEMICZNIE AGRESYWNEGO ŚRODOWISKA

**Streszczenie.** W pracy został zaprezentowany model skończenie elementowy zachowania się i trwałości konstrukcji obciążonej chemicznie i mechanicznie. Na chemiczną część problemu składa się migracja jonów chlorku i wymywanie jonów wapnia. Została zaproponowana formuła opisująca chemiczną degradację progowych odkształceń sprężystych i energii pęknięcia. Przydatność modelu została zweryfikowana na przykładzie betonowej konstrukcji pod stałym obciążeniem mechanicznym i długotrwałym obciążeniem chemicznym.

## THE CHANGE IN MECHANICAL PROPERTIES OF CONCRETE IN AN AGGRESSIVE ENVIRONMENT

**Summary.** A coupled chemo-mechanical FE model for the evaluation of behaviour and life span of concrete structures is presented in the paper. The chemical part of the problem consists of chloride ions migration and calcium ions leaching. Moreover, an equation is proposed to describe chemical degradation of the mechanical damage threshold and fracture energy. The performance of the model has been verified using the example of mechanical behaviour of a concrete structure under constant mechanical loading and long-term chemical action.

### 1. Wstęp

Badania stanu technicznego wielu konstrukcji betonowych uwidaczniają znaczenie degradującego oddziaływania środowiska na własności mechaniczne betonu. Ze względu na powszechność występowania i skutki działania za najistotniejsze z czynników środowiska, między innymi, uważa się oddziaływanie chlorków, miękkiej wody, dwutlenku węgla, kwaśnych deszczów, zamrażania i rozmrażania cieczy wypełniającej pory.

W pracy opisano metodami mechaniki zniszczenia destrukcyjne działanie chlorków i wymywanie jonów wapnia spowodowane przez działanie miękkiej wody ze statycznym obciążeniem mechanicznym konstrukcji betonowych, spełniających warunki płaskiego stanu

\* Opiekun naukowy: Prof. dr hab. inż. Czesław Cichoń

odkształcenia. Ze względu na „rozmiar” zagadnienia ograniczono się do materiału „dojrzałego”, w pełni nasyconego wilgocią, o zerowym gradiencie ciśnienia, co umożliwia zaniechanie opisu przemieszczania się cieczy w porach. Zaproponowano równania uzależniające wartości progu zniszczenia i energii pęknięcia od stopnia degradacji chemicznej betonu. Występujące w tych wzorach parametry są pewnymi stałymi, które powinny być wyznaczone eksperymentalnie. Opracowany model matematyczny został rozwiązany numerycznie metodą elementów skończonych [1]. W tym celu zbudowano własne procedury, które zostały włączone do otwartego systemu FEAP (Finite Elements Analysis Program [5]).

## 2. Równanie fizyczne

Równanie fizyczne dla betonu obciążonego mechanicznie i poddanego degradującym wpływem czynników chemicznych ma postać [4]:

$$\sigma = (1 - \omega_c) \cdot (1 - \omega_m) \cdot D \cdot \varepsilon \quad (1)$$

gdzie:

- $\sigma, \varepsilon$  - wektory naprężenia i odkształcenia,
- $D$  - macierz sztywności sprężystej materiału,
- $\omega_c, \omega_m$  - parametry skalarne zniszczenia chemicznego i mechanicznego.

Dla wyrażenia zniszczenia mechanicznego  $\omega_m$  zastosowane zostanie równanie cytowane w pracy [2]:

$$\omega_m = 1 - \frac{\kappa_0}{\kappa} \exp \left[ B \left( 1 - \frac{\kappa}{\kappa_0} \right) \right] \quad (2)$$

gdzie:

- $\kappa$  - odkształcenie ekwiwalentne,
- $\kappa_0$  - graniczne sprężyste odkształcenie ekwiwalentne,

$$B = \left[ \frac{G_f E}{l_e (f')^2} - \frac{1}{2} \right]^{-1} \quad (3)$$

gdzie:

$G_f$  - energia pęknięcia,

$E$  - moduł sprężystości,

$f_t$  - wytrzymałość materiału,

$l_e$  - wymiar charakterystyczny elementu skończonego.

Parametr zniszczenia chemicznego  $\omega_c$  uwzględnia działanie chlorków i ubytek wapnia według zależności:

$$\omega_c = \omega_{Cl} + \omega_{Ca} - \omega_{Cl} \cdot \omega_{Ca}, \quad (4)$$

$\omega_{Ca}$  jest parametrem zniszczenia związanym z ubytkiem jonów wapnia opisanym w [3],  $\omega_{Cl}$  jest parametrem opisującym stopień degradacji chemicznej szkieletu spowodowanej chlorkami. Parametr ten został wprowadzony w pracy [4], gdzie także opisano odpowiedni eksperyment, obrazujący destrukcyjne działanie chlorków.

Przyjęcie równania (1) oznacza uwzględnienie chemicznej degradacji w formie obniżenia wartości modułu sprężystości. Porównanie zachowania się materiału chemicznie zniszczonego i niezniszczonego, przy zastosowaniu równania (1), ilustruje rys. 1. gdzie przyjęto:

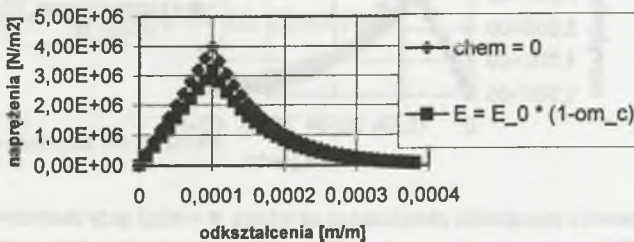
$G_f$  - 50 Nm

$l_e$  - 0,01 m

$E$  - 4e10 N/m<sup>2</sup>

$\omega_c$  - 0,2

$\kappa_{00}$  - 1e-4



Rys. 1. Wpływ parametru zniszczenia chemicznego na zależność  $\sigma = \sigma(\varepsilon)$  w klasycznym zastosowaniu (równanie (1))

Fig. 1. The influence of the interaction parameter of the chemical degradation on relation  $\sigma = \sigma(\varepsilon)$  according to the classical model (equation (1))

W pracy zaproponowano modyfikację modelu fizycznego betonu przez uwzględnienie wpływu parametru zniszczenia  $\omega_c$  na aktualne wartości granicznych odkształceń sprężystych betonu  $\kappa_0$  i energii pękania  $G_f$ . Ogólnie, zależności takie można przedstawić w formie:

$$\kappa_0 = \kappa_{00} \cdot f_1(\omega_c) \quad (5)$$

$$G_f = G_{f0} \cdot f_2(\omega_c) \quad (6)$$

gdzie:

$\kappa_{00}$  - wartość granicznych odkształceń sprężystych niezniszczonego chemicznie betonu,

$G_{f0}$  - energia pękania niezniszczonego chemicznie betonu.

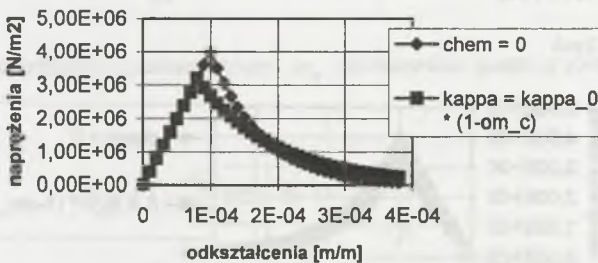
Funkcje  $f_1(\omega_c)$ ,  $f_2(\omega_c)$  powinny być wyznaczone na drodze doświadczalnej. W pracy wybrana została zależność liniowa.

$$\kappa_0 = \kappa_{00} \cdot (1 - \alpha \cdot \omega_c) \quad (7)$$

$$G_f = G_{f0} \cdot (1 - \beta \cdot \omega_c) \quad (8)$$

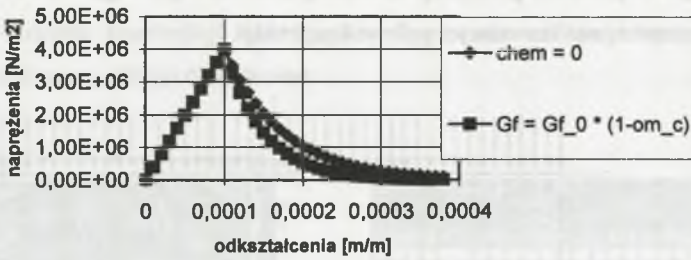
gdzie parametry  $\alpha$ ,  $\beta$  są miarami wpływu  $\omega_c$  na  $\kappa_0$  i  $G_f$ .

Rysunki 2, 3 ilustrują wyniki obliczeń z zastosowaniem związków (7), (8) dla  $\alpha = \beta = 1$ .



Rys.2. Wpływ parametru zniszczenia chemicznego na relację  $\sigma = \sigma(\varepsilon)$  przy zastosowaniu równania (7)

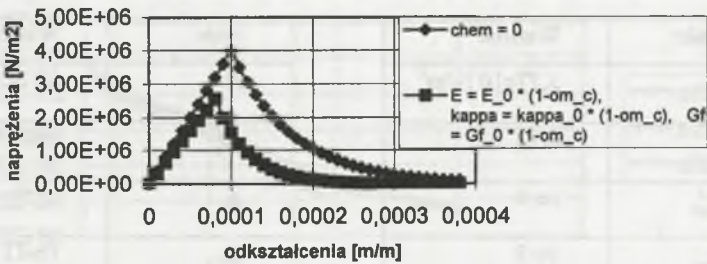
Fig. 2. The influence of the interaction parameter of the chemical degradation on relation  $\sigma = \sigma(\varepsilon)$  according to the equation (7)



Rys. 3. Wpływ parametru zniszczenia chemicznego na relację  $\sigma = \sigma(\epsilon)$  przy zastosowaniu równania (8)

Fig. 3. The influence of the interaction parameter of the chemical degradation on relation  $\sigma = \sigma(\epsilon)$  according to the equation (8)

Najbliższy rzeczywistości wydaje się model uwzględniający wielowymiarowe działanie  $\omega_c$  (to jest:  $E = E(\omega_c)$ ,  $\kappa_0 = \kappa_0(\omega_c)$ ,  $G_f = G_f(\omega_c)$ ). Takie wielowymiarowe działanie  $\omega_c$  ilustruje rys. 4.



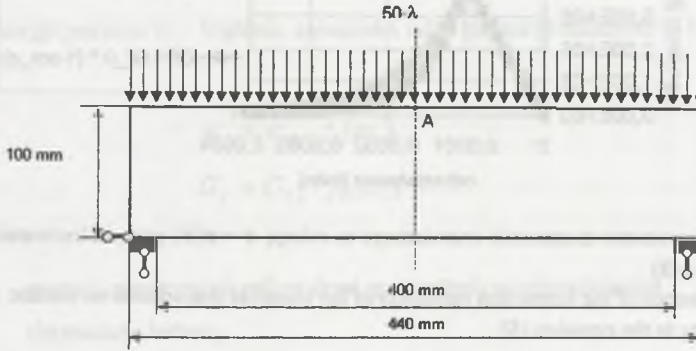
Rys. 4. Wielowymiarowy wpływ parametru zniszczenia chemicznego na relację  $\sigma = \sigma(\epsilon)$  (równania (1), (7) i (8))

Fig. 4. The multidimensional influence of the interaction parameter of the chemical degradation on the relation  $\sigma = \sigma(\epsilon)$  (equations (1), (7) and (8))

### 3. Przykład – tarcza betonowa

Związek (7) został wykorzystany do analizy tarczy betonowej pokazanej na rys. 5. W dyskretyzacji zastosowano czterowzłowe, czworokątne elementy skończone. Obliczenia zostały zrealizowane przy użyciu zmodyfikowanego programu FEAP (Finite Elements Analysis Program), gdzie zniszczenia chemiczne i mechaniczne zostały zaimplementowane

i dołączone jako dodatkowe procedury. Potrzebne dane materiałowe zestawiono w tab. 1. Ze względu na symetrię analizowana jest połowa konstrukcji.



Rys. 5. Tarcza betonowa „jednostkowej” grubości. Geometria i obciążenie konstrukcji

Fig. 5. Plane stress, one unit thick, concrete structure. Geometry and loading

Tabela 1

Własności materiału

Stałe	Wartość
$E$	$3,77e10 \text{ N/m}^2$
$\nu$	0,18
$\kappa_{00}^+$	$1e-4$
$\kappa_{00}^-$	$1e-3$
$f_t$	$E \cdot \kappa_{00}^+ \text{ N/m}^2$
$f_c$	$E \cdot \kappa_{00}^- \text{ N/m}^2$

Stałe	Wartość
$G_f^+$	50 N/m
$G_f^-$	3500 N/m
$\phi_0$	0,05
$D_{Ca}$	$1e-11 \text{ m}^2/\text{s}$
$D_{Cl}$	$1e-10 \text{ m}^2/\text{s}$

$\kappa_{00}^+, \kappa_{00}^-$  - wartość granicznych odkształceń sprężystych niezniszczonego chemicznie betonu dla rozciągania i ściskania.

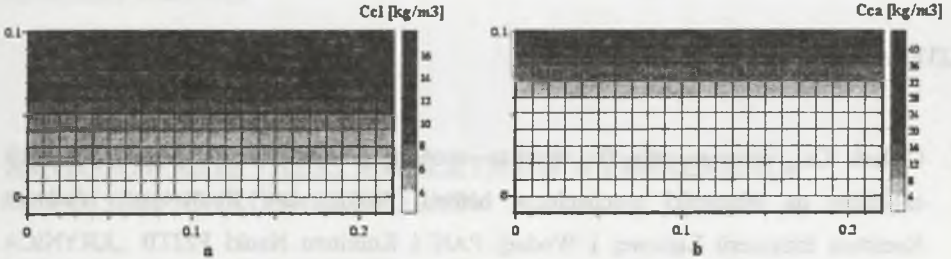
$G_f^+, G_f^-$  - energia pęknięcia niezniszczonego chemicznie betonu dla rozciągania i ściskania.

$\phi_0$  - porowatość niezniszczonego chemicznie betonu.

$D_{Ca}, D_{Cl}$  - dyfuzyjność przepływu jonów wapnia i chlorków.

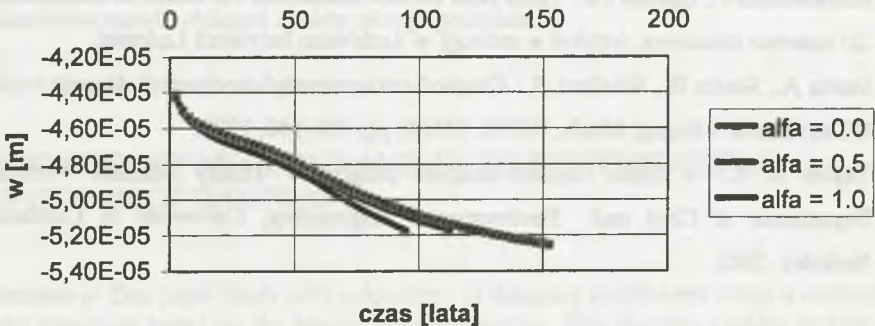
W obliczeniach przyjęto stałe obciążenie mechaniczne o wartości parametru obciążenia  $\lambda = 5400 \text{ N}$ , nie przekraczającego nośności niezniszczonej chemicznie konstrukcji. Na górnej powierzchni konstrukcji zadana została koncentracja jonów chlorku  $17,0 \text{ kg/m}^3$  i zerowa koncentracja jonów wapnia powodująca ich wymywanie. W rezultacie takiego obciążenia

chemicznego obszar degradacji chemicznej materiału rozprzestrzenia się w czasie (rys. 6), sztywność i nośność konstrukcji obniżają się i wreszcie nie jest wystarczająca do przeniesienia zadanego, stałego obciążenia.



Rys. 6. Rozkład koncentracji chlorków (a) i ubytku jonów wapnia (b) po 70 latach

Fig. 6. Fields of chlorides concentration (a) and decrease in calcium ions concentration (b) after 70 years



Rys. 7. Przemieszczenia pionowe "w" punktu A w osi symetrii tarczy na jej górnej powierzchni w czasie, przy różnych wartościach parametru  $\alpha$  w równaniu (7)

Fig. 7. Vertical displacement "w" of point A on the symmetry axis, on the upper surface of the structure in time, for different values of parameter  $\alpha$  in equation (7)

Wykres na rys. 7. ilustruje zachowanie się konstrukcji, gdy w obliczeniach zastosowane zostało równanie (7), opisujące zależność progu zniszczenia mechanicznego od parametru  $\omega_c$ . Zadane zostały kolejno wartości parametru  $\alpha$  równe odpowiednio: { 0.0, 0.5, 1.0 }. Wartość 0.0 odpowiada nieuwzględnieniu zależności progu zniszczenia mechanicznego od zniszczenia chemicznego. Uzyskano kolejno wartości czasu do utraty nośności niezbędnej do przeniesienia zadanego obciążenia: {150, 112, 96} (wartości w latach).

Na podstawie przedstawionego przykładu i innych nie zamieszczonych w pracy można wysunąć wniosek, że zaproponowany w artykule model numeryczny analizy konstrukcji

betonowych poddanych obciążeniom chemiczno – mechanicznym jest efektywny. Przyjęta hipoteza zależności progu zniszczenia mechanicznego od zniszczenia chemicznego jest fizycznie uzasadniona, wymaga jednak eksperymentalnego potwierdzenia.

## LITERATURA

1. Cichoń Cz., Romanowski P.: Analiza skończenie-elementowa wpływu penetracji chlorków na własności mechaniczne betonu. Pięćdziesiąta Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN i Komitetu Nauki PZITB „KRYNICA 2004”, Warszawa – Krynica 12–17 września 2004.
2. Oliver J., M. Cervera, Oller S. and Lubliner L.: Isotropic damage models and smeared crack analysis of concrete structures. N. Bicanic and H. Mang, eds. Vol. 2, 945-957, 1990.
3. Romanowski P., Cichoń Cz.: Three field chemo-mechanical FE model of deterioration of 2D concrete structures. Artykuł w recenzji w Archiwum Inżynierii Lądowej.
4. Saetta A., Scotta R., Vitaliani R.: Coupled environmental-mechanical damage model of RC structures. J.Engng. Mech., ASCE, 125(8), pp. 930-940, 1999.
5. Taylor R. L.: A finite element analysis program - Theory Manual. Version 7.4 Department of Civil and Environmental Engineering, University of California at Berkeley. 2002.

Recenzent: Dr hab. inż. Adam Zybyra, prof. Pol. Śląskiej