

Zmiany nośności przekroju żelbetowego wynikające z postępującej degradacji chemiczno-mechanicznej betonu

Dr inż. Adam Zaborski, Zakład Wytrzymałości Materiałów, Politechnika Krakowska

1. Wprowadzenie

Postępująca degradacja konstrukcji budowlanych w warunkach środowiska agresywnego stanowi poważny problem. Jedną z przyczyn jest korozja chemiczna samego betonu. Związki, jak np. siarczan czy azotan amonu, powodują zmianę właściwości mechanicznych i wytrzymałościowych matrycy betonowej, co objawia się obniżającą się stopniowo nośnością przekroju, stwarzającą groźbę awarii konstrukcji. Dodatkowo, malejąca nośność elementu powoduje, że obciążenie staje się coraz istotniejszym czynnikiem oddziałującym na materiał. Niniejszy artykuł poświęcony jest numerycznej symulacji spadku nośności przekroju, zachodzącej w wyniku degradacji mechanicznej i chemicznej betonu.

Badania doświadczalne w tym zakresie z reguły odnoszą się do małogabarytowych próbek, dla których czasy badania są wielokrotnie krótsze niż procesy w naturalnej skali [1]. Wyniki takich badań za pomocą symulacji numerycznych procesu mogą być ekstrapolowane na elementy o rzeczywistych rozmiarach. Ograniczenia czasowe w obliczeniach numerycznych są z reguły nieistotne. Modelowanie numeryczne degradacji betonu, z uwagi na złożoność, jak i różnorodność procesów zachodzących w materiale, sprowadza się do arbitralnego wyboru najistotniejszych czynników i parametrów.

W niniejszym artykule takimi zjawiskami są dyfuzja czynnika korozyjnego w głąb materiału, degradacja materiału wskutek reakcji oraz współobecność stanu naprężenia (odkształcenia) materiału. Skalarny parametr uszkodzenia, którego równania ewolucji opisują degradację mechaniczną i chemiczną materiału, pozwala na oszacowanie sprzężenia tych zjawisk. Uzyskane tą drogą naprężenia efektywne w betonie determinują nośność rezydualną przekroju. Pełniejszy obraz utraty nośności przekroju przedstawiają krzywe interakcji sił przekrojowych, modyfikowane w czasie trwania procesu.

2. Modelowanie procesów destrukcji betonu

Użytecznym formalizmem modelowania wielu współoddziałujących zjawisk jest teoria mieszanin, która dla ośrodka porowatego z dyfundującymi wewnątrz składnikami nazy-

wana jest teorią ośrodka wieloskładnikowego z wyróżnionym składnikiem [2]. Sprzężone równania dyfuzji n ruchomych składników po wstawieniu do równań bilansu masy i pominięciu członu konwekcyjnego i dyfuzji ciśnieniowej, można zapisać w postaci II równania Ficka:

$$\rho \frac{\partial c^\alpha}{\partial t} = \text{div} \sum_{k=1}^{n-1} D_{ck} \text{grad} c^k + r^\alpha \quad (1)$$

gdzie człony po prawej opisują dyfuzję i źródła masy. Współczynniki dyfuzji, występujące w równaniu (1) zależą od wielu innych parametrów procesu czy materiału, jak np. saturacji, temperatury, stężenia czy postępu reakcji chemicznych [3]. Uwzględniając zależność dyfuzyjności od odkształceń typu dylatacyjnego przyjęto najprostszą empiryczną zależność od efektywnego współczynnika dyfuzji w postaci:

$$D_{ck} = D_{ef} k_{rc} I_{1\varepsilon} \quad (2)$$

gdzie k_{rc} jest współczynnikiem uwzględniającym nieizotomiczność materiału (różne właściwości materiału przy ściskaniu/rozciąganiu).

Historię procesu opisują zmienne wewnętrzne stanu. Są to: definiowana rekurencyjnie zmienna odkształceń pełzania betonu jako materiału reologicznego [4],

$$Y_0^{(k)} = 0, \quad Y_i^{(k)} = Y_{i-1}^{(k)} + \int_{t_i}^{t_{i+1}} \sigma(\tau) g_k(\tau) d\tau \quad (3)$$

wynikająca z dyskretyzacji równań konstytutywnych oraz opisujące nieodwracalność procesów: skalarny parametr uszkodzenia d oraz stała postępu reakcji K . Równania ewolucji tych zmiennych przyjmujemy w postaci dekompozycji na część mechaniczną i chemiczną [5, 6]:

$$\sigma_{ef} = \frac{\sigma}{1-d} = \frac{\sigma}{(1-d_{ch})(1-d_m)},$$

$$d_m = 1 - \frac{\eta_0}{\eta} \{1 - \beta_m + \beta_m \exp[\gamma_m(\eta_0 - \eta)]\},$$

$$\eta(\varepsilon) = \sqrt{\frac{1}{E_0} \varepsilon : C_0 : \varepsilon} \quad (4)$$

i uproszczonej, zlinearyzowanej zależności dla kinetyki reakcji chemicznej [3, 6, 4]:

$$d_{ch} = \xi K, \quad \xi \in (0,1), \quad \frac{dK}{dt} = \chi \left(c^\alpha - c^{\alpha 0} \right)_+ \quad (5)$$

3. Oszacowanie parametrów sprzężenia mechaniczno-chemicznego

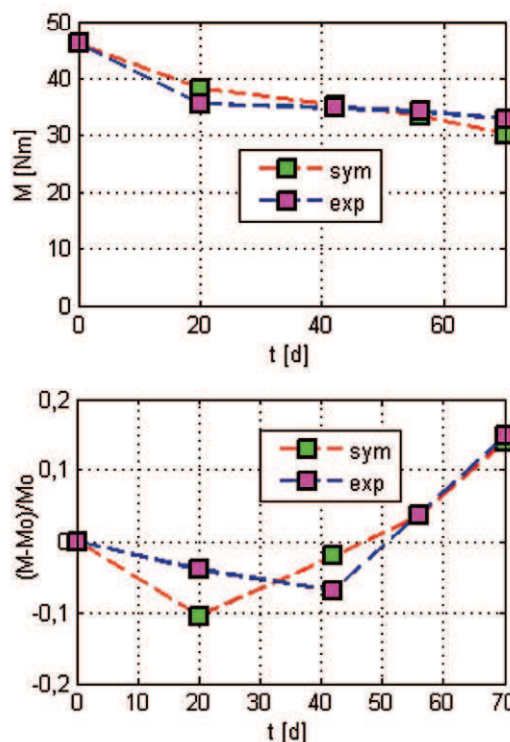
W pracy [1] przedstawiono wyniki kompleksowych badań doświadczalnych nad efektami sprzężenia obciążenia i korozji chemicznej. Wykonane testy dotyczą roztworu wodnego azotanu amonu (V) o różnym stężeniu (0,1 ÷ 10%, klasa ekspozycji XA [7]) betonowych beleczek nieobciążonych i obciążonych na poziomie 30% nośności (ściskanie i zginanie). Przedstawione w [1] wyniki wykorzystano do oszacowania parametrów sprzężenia mechaniczno-chemicznego. Porównanie wyników symulacji z danymi z testów przedstawiają rysunki 1a i 1b. Widoczna jest dobra zbieżność symulacji z danymi doświadczalnymi, z wyjątkiem okresu dla świeżego betonu. Różnice te wynikają z braku danych reologicznych i nie mają zbyt dużego znaczenia, ponieważ dotyczą krótkich czasów niestosowanych w niniejszej pracy.

4. Symulacja numeryczna procesu degradacji

Do obliczeń numerycznych przepływów dyfuzyjnych zastosowano metodę automatów komórkowych. Symulacja polega na podaniu reguły automatu, identycznej dla wszystkich komórek, a uwzględniającej stan najbliższego otoczenia, zdefiniowanego typem automatu. Dla automatu Neumanna „sąsiedzi” centralnej komórki są komórki bezpośrednio przyległe w pionie i w poziomie:

$$\begin{aligned} c_{m,n}^{\alpha(1)} &= c_{m,n}^{\alpha(0)} (1 - a^\alpha) + \\ &+ \frac{a^\alpha}{4} (c_{m+1,n}^{\alpha(0)} + c_{m,n+1}^{\alpha(0)} + c_{m-1,n}^{\alpha(0)} + c_{m,n-1}^{\alpha(0)}) - \\ &- \sum_{\beta \neq \alpha} a^{\alpha\beta} c_{m,n}^\beta + \\ &+ \sum_{\beta \neq \alpha} \frac{a^{\alpha\beta}}{4} (c_{m+1,n}^{\beta(0)} + c_{m,n+1}^{\beta(0)} + c_{m-1,n}^{\beta(0)} + c_{m,n-1}^{\beta(0)}) , \\ a^{\alpha\beta} &= \frac{4D_{\alpha\beta}\Delta t}{h^2} \end{aligned} \quad (6)$$

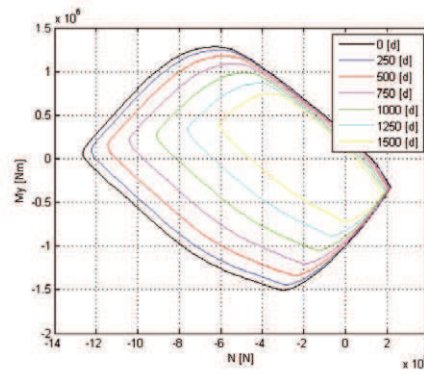
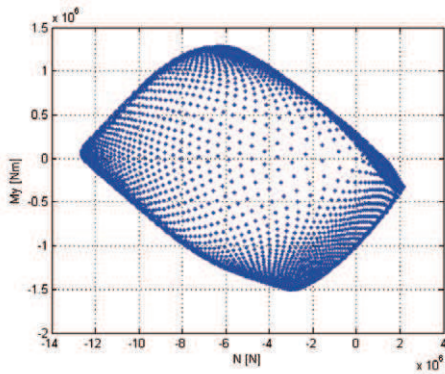
gdzie indeks α odnosi się do przepływów skoniugowanych, indeks β do przepływów sprzężonych, a równanie (6b) określa odpowiednie skalowanie czasu. Dokonując serii uaktualnień na podstawie podanej reguły otrzymuje się wartości zmiennych pól stężeń składników, czyli wyjściowych danych do równania ewolucji stałej postępu reakcji chemicznej i ponownego oszacowania członów źródłowych.



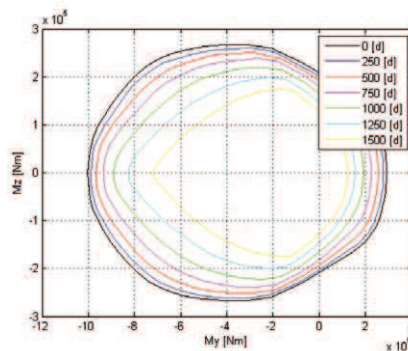
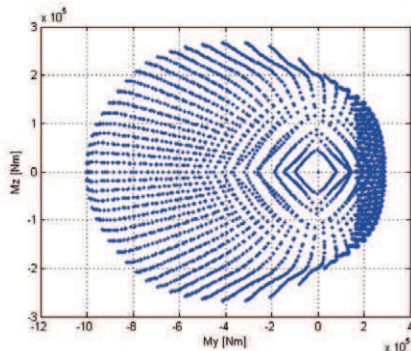
Rys. 1. Zmiany nośności przekroju zginanego w czasie

Otrzymane profile parametru uszkodzenia stanowią podstawę do określenia naprężeń efektywnych. W tym celu, zamiast obliczać odkształcenia dla zadanego układu sił przekrojowych, rozpatruje się zadanie odwrotne: dla zadanego rozkładu odkształcenia w przekroju poprzecznym obliczane są naprężenia nominalne. Po przeliczeniu naprężeń nominalnych na efektywne i odpowiednim ich scałkowaniu po przekroju otrzymuje się siły przekrojowe, odpowiadające przyjętemu rozkładowi odkształcenia. Spadek nośności przekroju w wyniku postępującej degradacji materiału obrazowo przedstawiają powierzchnie interakcji sił przekrojowych. Są to graficznie przedstawione zależności pomiędzy siłami przekrojowymi (siłą podłużną N i momentami gnącymi M_y oraz M_z) w stanie granicznym nośności, zgodnie z EC2. Zamiast jednak parabolicznej krzywej teoretycznej przyjęto w obliczeniach postać rozkładu naprężeń w betonie wg [6], uwzględniający plastyczno-kruchy charakter ściskania oraz osłabienie przy rozciąganiu. Dla otrzymania powierzchni interakcji należy wygenerować w miarę „gęsty” zbiór możliwych rozkładów odkształcenia generujących ekstremalne siły przekrojowe.

Nie zawsze ekstremalne odkształcenia we włóknach skrajnych generują ekstremalne siły przekrojowe. Dzieje się tak z powodu opadającej części paraboli opisującej naprężenia przy ściskaniu/rozciąganiu. Z uwagi na mniejszą czytelność wykresów przestrzennych na płaszczyźnie, zamiast powierzchni interakcji najczęściej określa się ich przekroje płaszczyznami prostopadłymi do osi sił przekrojowych, będące krzywymi interakcji $N - M_y$ oraz $M_y - M_z$.



Rys. 2.
Siły przekrojowe
i ich obwiednie dla
różnych czasów



Rys. 3. Momenty
zginające
i ich obwiednie dla
różnych czasów

Przedstawione poniżej wyniki odnoszą się do prostokątnego przekroju żelbetowego dwustronnie zbrojonego. Generowanie krzywych $N - M_y$ w przypadku pionowej symetrii zadania jest uproszczone, gdyż kierunek osi obojętnej jest znany i każdy odpowiadający jemu rozkład odkształceń spełnia warunek $M_z = 0$. Rysunek 2a przedstawia punkty odpowiadające wygenerowanym rozkładom odkształceń (5041 rozkładów), a rysunek 2b tzw. wypukłą otoczkę tego zbioru punktów, stanowiącą właściwą krzywą interakcji siła – moment gnący. Do konstrukcji wypukłej otoczki użyto algorytmu Graham-Andrew z Computational Geometry Algorithms Library (Open Source Project). Z rysunków wynika, że największe spadki nośności obserwuje się w wyniku procesów degradacji w strefie ściskanej przekroju. Z uwagi na brak symetrii poziomej przekroju niesymetrycznie zbrojonego i przesunięcie jego ważonego środka, ekstremalne wartości siły podłużnej i momentu gnącego osiągnięte są przy niezerowych wartościach momentu gnącego i siły podłużnej.

Określenie krzywych interakcji $M_y - M_z$ wymaga więcej zachodu. Dla każdego kąta obrotu osi obojętnej (przyjęto skok co 5 stopni) należy wygenerować, podobnie jak poprzednio, możliwie „gęsty” zbiór dopuszczalnych odkształceń. Dla każdego z przyjętych skrajnych odkształceń granicznych należy znaleźć iteracyjnie takie odkształcenie w przeciwległych skrajnych włóknach, aby spełniony był warunek $N = 0$. Rysunek 3a przedstawia punkty odpowiadające wygenerowanym rozkładom odkształceń na początku procesu, a rysunek 3b obwiednie będące właściwymi krzywymi interakcji dla czasów z krokiem 250 dni. Kurczące się obwiednie oznaczają, że obciążenie dopuszczalne (punkt wewnątrz obwied-

ni) z czasem może znaleźć się na obwiedni, co oznacza wyczerpanie nośności przekroju.

5. Podsumowanie

Przedstawiony model fenomenologiczny korozji betonu wydaje się dobrze oddawać zasadnicze właściwości procesów korozyjnych betonu zachodzących w przekroju żelbetowym. Pewnym niedostatkiem jest hipotetyczność stałych materiałowych i parametrów procesów. Powodem jest konieczność przyjęcia danych z kilku różnych źródeł. Przedstawione krzywe interakcji wykazują cechy adekwatne do rozpatrywanego problemu: zachowaną symetrię rozwiązania, istotny udział strefy ściskanej betonu w nośności przekroju oraz efekt skali objawiający się szybszymi procesami degradacji dla mniejszych przekrojów albo w wyniku kurczenia się strefy nieuszkodzonej. Mimo podobieństwa krzywych interakcji widoczne jest przyspieszenie procesów degradacji przekroju. Krzywe interakcji nie są jedynym zastosowaniem przedstawionej metodologii. W podobny sposób można otrzymać zależności moment zginający – krzywizna czy też siła – przemieszczenie.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Schneider U., Chen S.-W., Cem. and Concr. Res. 35 (2005), p. 1705
- [2] Kubik J., Przepływy wilgoci w materiałach budowlanych, Oficyna Wyd. Pol. Opol., Opole 2000
- [3] Saetta A. V., Vitaliani R., Cem. and Concr. Res., 34 (2004), p. 571
- [4] Zaborski A., Czas. Tech., 9, 107 (2010), p. 147
- [5] Kattan P. I., Voyiadis G.Z., J. Engng. Mech., 129 (2001), 9, p. 940
- [6] Kuhl D., Bangert F., Meschke G., Int. J. of Sol. and Struct., 41 (2004), p. 15
- [7] Zybura A., Jaśniok M., Jaśniok T., Diagnostyka konstrukcji żelbetowych, PWN, Warszawa 2011
- [8] Fafitis A., J. of Struct. Engng., 127, 7 (2001), p. 840