



DARIUSZ GAWIN, *dariusz.gawin@p.lodz.pl*
MARCIN KONIORCZYK, *marcin.koniorczyk@p.lodz.pl*
WITOLD GRYMIN, *witold.grymin@p.lodz.pl*
Politechnika Łódzka
FRANCESCO PESAVENTO, *pesa@dic.unipd.it*
Università Degli Studi di Padova

KOMPUTEROWE SYMULACJE PROCESÓW DEGRADACJI CHEMICZNEJ KONSTRUKCJI BETONOWYCH

COMPUTER SIMULATIONS OF CHEMICAL DEGRADATION OF CONCRETE STRUCTURES

Streszczenie Krótko omówiono procesy degradacji chemicznej kompozytów cementowych oraz model matematyczny tych procesów w konstrukcjach betonowych, poddanych jednoczesnemu działaniu obciążeń ciepło-wilgotnościowych, chemicznych i mechanicznych. Podano ogólną postać równań opisujących ewolucję tych procesów chemicznych. Omówiono rozwiązanie numeryczne równań modelu matematycznego za pomocą metody elementu skończonego. Przedstawiono przykłady zastosowania tego modelu do analizy procesów degradacji chemicznej elementów betonowych wskutek: korozji lużącej, reakcji alkalia-krzemionka oraz transportu i krystalizacji soli rozpuszczonej w cieczy porowej.

Abstract Processes of chemical degradation in cement based materials and mathematical model of these processes in concrete structures, due to combined action of hygro-thermal, chemical and mechanical loads, are presented. A general form of equations describing evolution of the chemical processes briefly is given. Numerical solution of the mathematical model equations with the finite element method is described. Some examples of the model application for analysing chemical degradation processes of concrete elements due to: chemical attack of pure water causing calcium leaching, alkali-silica reaction, as well as salt crystallisation and ions transport, are presented.

1. Chemiczna degradacja betonu

Podczas normalnej eksploatacji elementy betonowe narażone są na działanie nie tylko zmiennych w czasie warunków ciepło-wilgotnościowych i obciążeń mechanicznych, ale często także agresywnego środowiska, mogącego powodować degradację lub nawet całkowitą utratę cech użytkowych konstrukcji. Zagadnienia trwałości konstrukcji budowlanej stanowią aktualnie jeden z ważniejszych obszarów zainteresowań zarówno praktyków, jak i naukowców. Odzwierciedleniem tego faktu było wprowadzenie w normie PN-EN 206-1 [1] osiemnastu klas ekspozycji, uwzględniających: korozję wywołaną karbonatyzacją, kontakt z wodą morską, chlorki nie pochodzące z wody morskiej, zamrażanie/odmrażanie oraz środowiska agresywne chemicznie. Poszczególnym klasom przyporządkowane są wymagania dotyczące składu mieszanki betonowej, obejmujące: maksymalny wskaźnik wodno-cementowy, minimalną wytrzymałość betonu na ściskanie, minimalną zawartość cementu oraz dla betonów narażonych na agresję mrozową minimalny stopień napowietrzenia 4%, a dla klas ekspozycji XA2 i XA3 zalecenie stosowania cementu odpornego na siarczany HSR.

Obecnie prowadzone są intensywne badania eksperymentalne i teoretyczne, poświęcone lepszemu zrozumieniu mechanizmu degradacji elementów budowlanych w środowiskach agresywnych oraz jego modelowaniu numerycznego. Beton jest materiałem wielofazowym, zbudowanym ze szkieletu oraz porów wypełnionych gazem i fazą ciekłą, będącą roztworem o złożonym składzie chemicznym. Zniszczenie betonu i jego zarysowanie często jest spowodowane przez tworzenie się faz ekspansywnych wskutek działania agresywnego środowiska (korozja zbrojenia, krystalizacja soli, zamarzanie wody, reakcja alkalia-krzemionka).

Obniżenie wskaźnika pH otuliny betonowej lub obecność chlorków w porach może spowodować powstanie mikroogniwa. W obszarze katodowym zachodzą następujące reakcje chemiczne: $2\text{Fe}^{2+} + 4\text{OH}^- \rightarrow 2\text{Fe}(\text{OH})_2$; $4\text{Fe}(\text{OH})_2 + \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{Fe}(\text{OH})_3$. W przypadku obecności chlorków inicjujących powstanie mikroogniwa na powierzchni stali zbrojeniowej, zachodzą następujące reakcje: $\text{Fe}^{2+} + 2\text{Cl}^- \rightarrow \text{FeCl}_2$; $\text{FeCl}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_2 + 2\text{HCl}$. Wyżej wymienione reakcje prowadzą do zmniejszenia efektywnego przekroju stali zbrojeniowej. Ponadto produkty reakcji mogą mieć nawet 3-krotnie większą objętość niż jej substraty, co prowadzi do pojawienia się dodatkowych naprężeń rozciągających w otulinie betonowej i w konsekwencji do jej zarysowania i zniszczenia. Do korozji stali zbrojeniowej niezbędna jest obecność tlenu, zatem nie może ona przebiegać, gdy beton jest w pełni nasycony wodą. Reakcje korozji zachodzą najszybciej, gdy wilgotność względna otaczającego powietrza wynosi ok. 70÷80% [2]. Przy wyższej wilgotności dyfuzja tlenu jest znacznie mniejsza. Chlorki w betonie występują w dwóch fazach: zaadsorbowane (fizycznie i chemicznie) na powierzchni szkieletu oraz rozpuszczone w cieczy porowej. Powszechnie uważa się, że za korozję odpowiedzialne są te ostatnie. Dlatego istotne jest poznanie mechanizmów odpowiedzialnych za adsorpcję chlorków i prawidłowy opis matematyczny tego zjawiska (ang. chloride binding isotherms). Ponadto wyróżnić można następujące mechanizmy korozji chlorkowej [3]: rozpuszczanie wodorotlenku wapnia w wyniku obniżenia się pH roztworu, tworzenie się ekspansywnych chlorków wapnia i magnezu, powstanie wysokiego ciśnienia osmotycznego.

Lód zajmuje objętość o 9% większą niż woda, która może zamarzać nawet 100-krotnie podczas jednej zimy w elementach budowlanych o ekspozycji południowej. Prowadzi to do cyklicznego powstawania dodatkowych naprężeń rozciągających w elementach budowlanych, a w konsekwencji do ich zarysowań. Dodatkowo betony narażone na działanie soli, np. stosowanej zimą do odmrażania dróg, ulegają powierzchniowemu złuszczeniu (ang. scaling).

Korozji alkalicznej towarzyszy tworzenie się faz ekspansywnych, powodujących zarysowania w elementach betonowych. Jest ona następstwem oddziaływania reaktywnej krzemionki w kruszywie z alkaliami zawartymi w mieszance betonowej. Na poziom alkaliów w betonie duży wpływ ma zawartość tlenków sodu i potasu w cemencie oraz powszechne stosowanie domieszek. W wyniku reakcji alkaliów z reaktywną krzemionką na powierzchni ziaren kruszywa powstaje ekspansywny żel, który w obecności wody wypełnia mikropory wokół ziaren, a następnie rozszerzając się, wywiera dodatkowe ciśnienie na zaczyn cementowy, wywołując w nim dodatkowe naprężenia rozciągające, a w konsekwencji powstanie rys.

Beton ma niezwykle złożoną strukturę wewnętrzną (powierzchnia właściwa ok. $10 \text{ m}^2/\text{g}$), która wpływa na przebieg procesów transportowych, a w konsekwencji na degradację chemiczną betonów. Znalazło to swoje odzwierciedlenie w przepisach normowych, w których betonom narażonym na działanie wyższych klas środowiska agresywnego stawia się wyższe wymagania co do wytrzymałości na ściskanie, a zatem powinny one charakteryzować się niższą porowatością i przepuszczalnością. Warunki higrotermiczne, w jakich użytkuje się element budowlany, determinują szybkość migracji jonów w betonie. Dlatego dopiero pełne uwzględnienie sprzężeń pomiędzy transportem ciepła, wilgoci oraz substancji rozpuszczonych w cieczy porowej i ich wpływ na stan odkształceń betonu pozwala prawidłowo modelować degradację chemiczną betonu. Niniejszy artykuł przedstawia skrótowy opis modelu

numerycznego opracowanego przez autorów [4÷8] wraz z przykładami jego praktycznego zastosowania. Model ten jest próbą matematycznego opisu tych niezwykle złożonych procesów, determinujących trwałość konstrukcji betonowych. Uwzględnia on kinetykę przemian fazowych i reakcji chemicznych, co pozwala opisać, wywoływane nimi, dodatkowe odkształcenia i naprężenia w elementach konstrukcji, mogące spowodować ich zniszczenie.

2. Model matematyczny i jego rozwiązanie numeryczne

Równania bilansu sformułowano modelując kompozyt cementowy jako wielofazowy materiał porowaty. Jego pory są wypełnione przez wodny roztwór soli, wilgotne powietrze i wykryształizowaną sól, będące w stanie lokalnej równowagi higrotermicznej. W pracach [4, 6] przedstawiono pełne wyprowadzenie równań modelu matematycznego, poczynając od lokalnych równań bilansu masy, pędu i energii dla poszczególnych składników ośrodka, które po uśrednieniu objętościowym przekształcają się w makroskopowe równania rządzące modelem. Są one wyrażone w funkcji zmiennych stanu ośrodka: ciśnienia gazu – p^g , ciśnienia kapilarnego – p^c , temperatury – T , koncentracji soli w wodzie – C_x oraz wektora przemieszczenia – u . Model matematyczny tworzą następujące równania bilansu:

- Równanie bilansu masy suchego powietrza, uwzględniające adwekcyjny i dyfuzyjny przepływ powietrza oraz zmiany porowatości, wskutek reakcji soli zawartych w szkielecie, ich krystalizacją oraz odkształceniami szkieletu wskutek zmian temperatury i naprężeń;
- Równanie bilansu masy wody (w fazie ciekłej i gazowej), uwzględniające dyfuzyjny i adwekcyjny przepływ pary wodnej, adwekcyjny przepływ ciekłej wody, źródła masy wody związane z jej przemianami fazowymi (parowanie/skraplanie lub fizyczna adsorpcja/desorpcja), a także zmiany porowatości;
- Równanie bilansu masy soli, uwzględniające dyfuzję i adwekcję jonów oraz reakcje chemiczne i źródła masy związane z reakcjami soli zawartych w szkielecie i ich krystalizacją, a także zmiany porowatości szkieletu materiału.
- Równanie bilansu energii wewnętrznej ośrodka porowatego, uwzględniające przewodzenie i konwekcyjny przepływ ciepła, a także źródła ciepła towarzyszące zmianom fazowym i procesom rozpuszczania lub wytrącania soli.
- Równanie bilansu momentu pędu (równowagi mechanicznej) ośrodka, w którym naprężenia kompozytów cementowych modelowane są za pomocą tzw. zasady naprężeń efektywnych [4]. Kompozyty cementowe są wielofazowymi ośrodkami porowatymi, więc podczas analizy stanu ich naprężenia i odkształcenia należy uwzględnić nie tylko wpływ obciążenia zewnętrznego, ale także ciśnienie wywierane na szkielek przez płyny obecne w jego porach.

Postęp procesów degradacji chemicznej, np. wylugowywania wapnia [6], krystalizacji soli [7÷9] lub reakcji alkalia-krzemionka [10÷12], opisany jest przez odpowiednie równania ewolucji, wyrażone w funkcji zmiennych wewnętrznych modelu: stopnia wylugowywania wapnia – Γ_{leach} , stopnia wypełnienia porów skryształizowaną solą – S_p oraz postępu reakcji alkalia-krzemionka – Γ_{ASR} . Równania te opisują szybkość poszczególnych procesów chemicznych, dzięki czemu możliwe jest uwzględnienie wpływu temperatury i zawartości wilgoci na tempo ich postępu w zmiennych warunkach higrotermicznych.

- Równanie ewolucji procesu wylugowywania wapnia można wyrazić następująco [6]:

$$\frac{\partial \Gamma_{leach}}{\partial t} = \frac{A_s}{s_{Ca}^0 R T_{ref} \tau_{leach}^\pi (T_{ref}) \times \exp[A_T (T - T_{ref})]}, \quad (1)$$

gdzie: A_s oznacza efektywne powinowactwo chemiczne procesu wylugowywania,

s_{Ca}^0 – zawartość wapnia w niezdegradowanym chemicznie szkielecie,

R – uniwersalną stałą gazową,

τ_{leach}^π – charakterystyczny czas wylugowywania ze szkieletu poszczególnych faz wapnia: portlandytu, etryngitu i CSH ($\pi = por, etr, CSH$), $T_{ref} = 298,15$ K, $A_T = -0,0239$ K⁻¹.

Należy podkreślić, że niezotermiczne wylugowywanie wapnia jest procesem nieodwracalnym i opisano je tutaj za pomocą nierównowagowego modelu kinetycznego [6].

Równanie ewolucji krystalizacji/rozpuszczania roztworu soli, wyrażone w funkcji stopnia przesylenia roztworu S , zdefiniowanego jako iloraz aktualnego i maksymalnego w danej temperaturze stężenia soli w roztworze (dla wapnia: $S = C_{Ca} / C_{Ca}^{max}$), przyjmuje postać [8, 9]:

$$\frac{\partial S_p}{\partial t} = \begin{cases} S_w K (C_{Ca} - A' C_{Ca}^{max})^p, & C_{Ca} \geq A' C_{Ca}^{max}, \\ -S_w K |C_{Ca} - A' C_{Ca}^{max}|^p, & C_{Ca} < A' C_{Ca}^{max} \text{ i } 0 < S_p < 1 \end{cases} \quad (2)$$

gdzie: $S_p = 1 - S_w - S_g$ oznacza stopień napełnienia porów wykryształizowaną solą,

K – stała kinetyczna procesu,

p – rząd procesu.

Dla początkowej krystalizacji parametr przesylenia $A' \geq 1$, zaś po pojawieniu się w porach pierwszych kryształów soli dalsza jej krystalizacja postępuje przy założeniu $A' = 1$. W przypadku $S < 1$ równanie (2) opisuje proces rozpuszczania się kryształów soli w roztworze.

– Równanie ewolucji dla reakcji alkalia-krzemionka (ASR) w warunkach niezotermicznych przyjmuje następującą postać [10, 11]:

$$\frac{\partial -\Gamma_{ASR}}{\partial t} = \frac{1 - \Gamma_{ASR}}{\tau_r(T, S_w) \cdot \lambda(T, S_w, \Gamma_{ASR})}, \quad (3)$$

gdzie: $\tau_r(T, S_w)$ charakterystyczny czas reakcji ASR w temperaturze T przy stopniu zasycenia porów wodą S_w ,

zaś $\lambda(T, S_w, \Gamma_{ASR})$ ustalana eksperymentalnie funkcja materiałowa, określona za pomocą zależności [10÷12]:

$$\lambda(T, S_w, \Gamma_{ASR}) = \frac{1 + \exp(-\tau_L / \tau_r)}{\Gamma_{ASR} + \exp(-\tau_L / \tau_r)} \quad (4)$$

gdzie: τ_L – czas utajenia reakcji.

Wzory (3) i (4) łączą w sobie dwa istniejące modele reakcji ASR [10, 11], aby uwzględnić wpływ na jej kinetykę: temperatury, zawartości wilgoci (stałej bądź zmiennej w czasie) oraz zjawisk utajenia reakcji i „starzenia się” reaktantów [11].

Równania modelu matematycznego, opisanego w rozdziale drugim, zostały zdyskretyzowane w przestrzeni za pomocą metody elementu skończonego. W tym celu wartości zmiennych stanu w dowolnych punkcie \mathbf{x} wyrażono jako iloczyn funkcji kształtu $\mathbf{N}_\pi(\mathbf{x})$ ($\pi = p, t, C, u$) i $\bar{\mathbf{X}} = \left\{ \bar{p}^g, \bar{p}^c, \bar{T}, \bar{C}_x, \bar{u} \right\}^T$ – wektora wartości węzłowych zmiennych stanu, za pomocą następujących równań [4÷7]:

$$\begin{aligned}
 p^g(x,t) &\equiv N_p(x) \bar{p}^g(t), & p^c(x,t) &\equiv N_p(x) \bar{p}^c(t), & T(x,t) &\equiv N_t(x) \bar{T}(t) \\
 C_x(x,t) &\equiv N_C(x) \bar{C}_x(t), & u(x,t) &\equiv N_u(x) \bar{u}(t)
 \end{aligned}
 \quad (5)$$

Zdiskretyzowaną w przestrzeni za pomocą metody Galerkina i scałkowaną po czasie przy użyciu w pełni niejawnego schematu metody różnic skończonych, postać równań modelu można zapisać w zwężłej formie macierzowej następująco [4-7]:

$$\Psi^i(\bar{X}_{n+1}) = C_{ij}(\bar{X}_{n+1}) \frac{\bar{X}_{n+1} + \bar{X}_n}{\Delta t} + K_{ij}(\bar{X}_{n+1}) \bar{X}_{n+1} - f_i(\bar{X}_{n+1}) = 0, \quad (6)$$

gdzie: indeksy i, j ($i, j = g, c, t, C, u$) – zmienne stanu modelu,

n – numer kroku czasowego,

Δt – długość kroku czasowego,

zaś szczegółową postać macierzowych współczynników: $C_{ij}(\bar{X})$, $K_{ij}(\bar{X})$ i $f_i(\bar{X})$ podano w [6].

Układ równań (6) rozwiązywano za pomocą monolitycznej procedury Newtona-Raphsona przy użyciu metody frontalnej [4, 6].

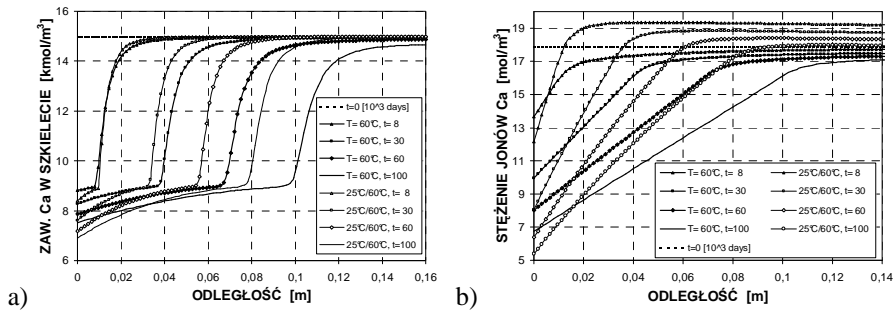
3. Wyniki symulacji komputerowych procesów degradacji kompozytów cementowych

W celu zilustrowania możliwości opisanego w poprzednim rozdziale modelu matematycznego i bazującego na nim autorskiego programu komputerowego HMTRA, przedstawiono trzy przykłady jego zastosowania do analizy różnych procesów degradacji chemicznej elementów betonowych w zmiennych warunkach cieplno-wilgotnościowych.

Pierwszy przykład dotyczy 16 centymetrowej płyty, wykonanej z zaczynu cementowego, podlegającej korozji ługującej wskutek oddziaływania miękkiej wody. Wymiana jonów wapnia na powierzchni płyty jest modelowana za pomocą konwekcyjnych warunków brzegowych. Podobne zagadnienie, ale dla przypadku izotermicznego ($T = 25^\circ\text{C}$) rozwiązano w [6]. Stężenie wapnia w roztworze przy powierzchni ściany zmniejszało się ze stałą szybkością przez 1000 dni, od początkowej wartości $17,885 \text{ mola/m}^3$, odpowiadającej równowadze chemicznej w temperaturze $T = 60^\circ\text{C}$, do 1 mola/m^3 , po czym pozostaje niezmienna. Zagadnienie rozwiązano dla dwóch przypadków: 1) izotermicznego dla temperatury $T = 60^\circ\text{C}$, 2) nieizotermicznego przy różnej temperaturze powierzchni ścian (na wykresie oznaczone jako $25^\circ\text{C}/60^\circ\text{C}$), które otrzymano przez ochłodzenie powierzchni będącej w kontakcie z wodą od wartości początkowej $T_0 = 60^\circ\text{C}$ do $T = 25^\circ\text{C}$ w ciągu 1000 dni. W obu przypadkach przyjęto współczynnik wymiany masy wapnia równy $10^{-5} \text{ kg/(m}^2\text{s)}$. Symulacje wykonywano dla okresu czasu 100 tysięcy dni, stosując krok czasowy $\Delta t = 0,1$ dnia i właściwości materiału takie same jak w pracy [6]. Rysunek 1a przedstawia porównanie wyników dotyczących stężenia jonów w cieczy porowej, zaś rys. 1b – zawartości wapnia w szkielecie, dla dwóch rozważanych przypadków pola temperatury. W warunkach izotermicznych stężenie jonów wapnia w roztworze jest niższe, co powoduje szybsze wylugowywanie wapnia ze szkieletu materiału oraz szybszy postęp procesu degradacji chemicznej materiału, co ilustruje rys. 1a. Jak można zauważyć, przestrzenny rozkład i wartość temperatury ma istotny wpływ na szybkość postępu degradacji chemicznej analizowanego elementu, która jest wyraźnie wyższa dla przypadku pierwszego ($T = 25^\circ\text{C}$).

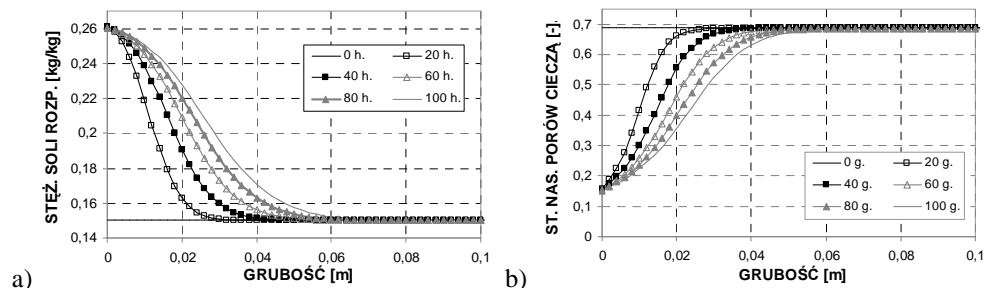
Drugie analizowane zagadnienie dotyczy procesu krystalizacji soli podczas wysychania ściany, w porach której znajduje się wodny roztwór NaCl. Ściana o grubości 20 cm, wykonana jest z zaprawy cementowej, której przepuszczalność właściwa wynosi $3,0 \cdot 10^{-21} \text{ m}^2$, zaś

porowatość 12%. Pozostałe parametry materiału podano w [5, 6]. Założono następujące warunki początkowe: $p^s = 101325$ Pa, $T = 20^\circ\text{C}$, stopień nasycenia porów cieczą $S_w = 69\%$, zaś masowe stężenie soli $C_{NaCl} = 15\%$ M. W równaniu ewolucji (2) przyjęto stałą $K = 0,05$, zaś rząd procesu p był równy 1, 2 lub 4.

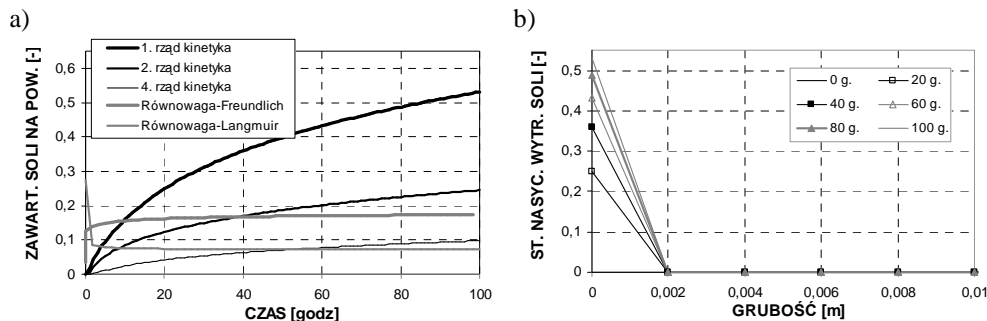


Rys. 1. Porównanie rozkładu stężenia wapnia (a) i zawartości wapnia w szkielecie (b) podczas wyługowywania wapnia z płyty przez miękką wodę dla dwóch różnych przypadków rozkładu temperatury

Wysychanie materiału jest wywołane nagłym spadkiem wilgotności powietrza w otoczeniu do $3,5$ g/m³, podczas gdy jego temperatura była stała. Na powierzchni ściany założono konwekcyjne warunki brzegowe ze współczynnikiem wymiany ciepła równym 23 W/m²K i współczynnikiem wymiany masy wynoszącym $0,023$ m/s. Na rys. 2a, przedstawiającym wyniki symulacji dla przypadku $p = 2$, widoczny jest nagły spadek stopnia nasycenia wodą przy powierzchni. Zmiana profilu stężenia rozpuszczonej soli dla tego przypadku, pokazana na rys. 2b, wykazuje charakterystyczny wzrost stężenia soli w pobliżu powierzchni. Najniższe wartości na powierzchni przyjmuje ono dla przypadku $p = 1$ ($C_{NaCl} = 0,26$ kg/kg), zaś najwyższe dla $p = 4$ ($C_{NaCl} = 0,31$ kg/kg). Dla porównania przeprowadzono symulacje tego samego doświadczenia zakładając, że równowaga termodynamiczna między rozpuszczoną i wytrąconą solą opisana jest izotermą typu Freundlicha lub Langmuira [7]. Wyniki obliczeń porównano na rys. 3a, uzyskując dla kinetycznego opisu procesu krystalizacji (2) zmiany masy wytrąconej na powierzchni soli o charakterze zgodnym z eksperymentem, czego nie można powiedzieć o powszechnie stosowanym opisie równowagowym. Na rys. 3b pokazano profile rozkładu zawartości wytrąconej soli (stopnia wypełnienia porów solą) dla przypadku procesu drugiego rzędu ($p = 2$). Jak widać, sól krystalizuje jedynie przy powierzchni wysychającej próbki, co jest zgodne z obserwacjami doświadczalnymi.



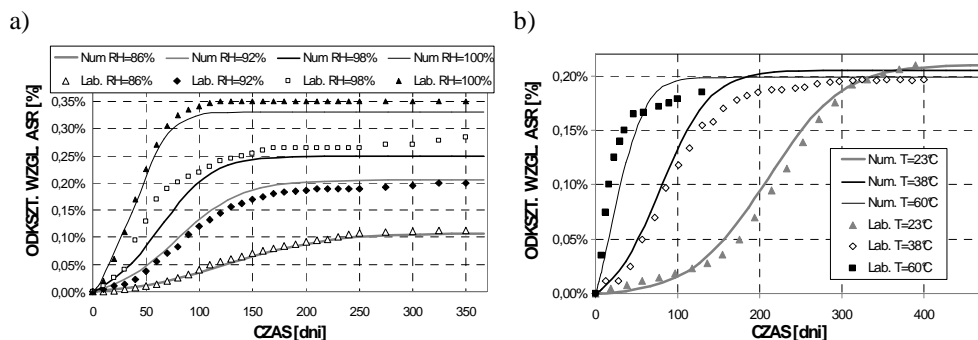
Rys. 2. Profile stopnia nasycenia porów cieczą (a) stężenia soli rozpuszczonej (b) na początku oraz po 20, 40, 60, 80 i 100 godzinach, przyjmując równanie kinetyczne (2) rzędu drugiego ($p = 2$)



Rys. 3. Wyniki symulacji komputerowych: a) porównanie zmian stopnia wypełnienia porów wytrąconą solą na powierzchni, otrzymane przy kinetycznym i równowagowym opisie procesu; b) profile stopnia wypełnienia porów wytrąconą solą, otrzymane przy założeniu kinetycznego opisu krystalizacji ($p = 2$)

Trzecie analizowane zagadnienie oparte jest na wynikach badań doświadczalnych Larive [10] i dotyczy próbek, wykonanych z zaprawy cementowej, umieszczonych w środowisku o różnych warunkach higrotermicznych. Materiał zawierał kruszywo reaktywne, stąd wystąpiły znaczne odkształcenia wywołane postępującą ekspansywną reakcją alkalia-krzemionka. Symulacje wykonano dla trzech różnych, stałych wartości temperatury otoczenia: 23°C, 38°C i 60°C, przy ustalonej wilgotności względnej równej 92%, oraz dla czterech różnych wartości wilgotności środowiska: 100% (w wodzie), 98%, 92% oraz 86%, przy stałej temperaturze wynoszącej 38°C. We wszystkich analizowanych przypadkach przyjęto takie same parametry materiałowe, korzystając z danych literaturowych [10, 11].

Na rys. 4 porównano wyniki symulacji z danymi doświadczalnymi, uzyskując dobrą ich zgodność. Pokazuje to, że przyjęty model matematyczny poprawnie opisuje wpływ różnych warunków higrotermicznych na postęp reakcji ASR i wywołane nią ekspansywne odkształcenia kompozytu cementowego. Porównanie z wynikami innych badań przedstawiono w [12].



Rys. 4. Porównanie odkształceń wywołanych ekspansywną reakcją ASR, w różnych warunkach higrotermicznych, otrzymanych w wyniku symulacji numerycznych z danymi doświadczalnymi [6]:

a) wpływ wilgotności względnej przy $T = 38^\circ\text{C}$; b) wpływ temperatury przy wilgotności $\varphi = 92\%$

4. Wnioski i uwagi końcowe

Krótko przedstawiono, opracowany przez autorów referatu, model matematyczny zjawisk chemo-higro-termo-mechanicznych w kompozytach cementowych, bazujący na mechanice wielofazowych ośrodków porowatych. Może być on stosowany do opisu kinetyki różnych

procesów chemicznych, powodujących degradację chemiczną materiału w zmiennych warunkach higrotermicznych. Model ten jest spójny termodynamicznie oraz uwzględnia najważniejsze sprzężenia występujące między procesami cieplnymi, wilgotnościowymi i chemicznymi. Przedstawione przykłady jego zastosowania do analizy postępu procesu korozji ługującej betonu, transportu i krystalizacji soli w kompozycie cementowym, oraz odkształceń wywołanych ekspansywną reakcją alkalia-krzemionka, pokazują możliwości tego modelu. Może on być wykorzystywany do prognozowania trwałości konstrukcji betonowych w zmiennych warunkach środowiskowych. Jego praktyczne zastosowanie powinno być jednak poprzedzone wyznaczeniem stosownych parametrów modelu dla analizowanego materiału oraz dalszą weryfikacją eksperymentalną.

Podziękowania

Niniejsza praca została częściowo wykonana w ramach realizacji projektu „Innowacyjne środki i efektywne metody poprawy bezpieczeństwa i trwałości obiektów budowlanych i infrastruktury transportowej w strategii zrównoważonego rozwoju” współfinansowanego przez Unię Europejską z Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka.

Literatura

1. PN-EN 206-1, Beton Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność, 2003.
2. Neville A., Chloride attack of reinforced concrete: an overview, *Materials and Structures*, 28, 63÷70, 1995.
3. Kurdowski W.: Korozja chlorkowa betonu, *Cement-Wapno-Beton*, 2, 56÷60, 2002.
4. Pesavento F., Gawin D., Schrefler B.A.: Modeling cementitious materials as multiphase porous media: theoretical framework and applications, *Acta Mechanica*, 201, 313÷339, 2008.
5. Gawin D., Wykrzykowski M., Pesavento F.: Modeling hygro-thermal performance and strains of cementitious building materials maturing in variable conditions, *Journal of Building Physics*, 31, 301÷318, 2008.
6. Gawin D., Pesavento F., Schrefler B.A.: Modelling deterioration of cementitious materials exposed to calcium leaching in non-isothermal conditions, *Computer Methods In Applied Mechanics and Engineering*, 198, 3051÷3083, 2009.
7. Koniorczyk M., Gawin D.: Heat and moisture transport in porous building materials containing salt, *Journal of Building Physics*, 31, 279÷300, 2008.
8. Koniorczyk M.: Modelling the phase change of salt dissolved in pore water – equilibrium and non-equilibrium approach, *Construction and Building Materials*, 24, 1119÷1128, 2010.
9. Koniorczyk M., Gawin D.: Numerical modeling of salt transport and precipitation in non-isothermal partially saturated porous media considering kinetics of salt phase changes, *Transport in Porous Media*, 87, 57÷76, 2011.
10. Ulm F.-J., Coussy O., Li K., Larive C.: Thermo-chemo-mechanics of ASR expansion in concrete structures, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 126, 233÷242, 2000.
11. Steffens A., Li K., Coussy O.: Aging approach to water effect on alkali-silica reaction degradation of structures, *Journal of Engineering Mechanics* ASCE, 129, 50÷59, 2003.
12. Grymin W., Modelling alkali-silica reaction of cementitious materials in variable temperature and relative humidity, praca magisterska (promotor D. Gawin), Politechnika Łódzka, 2010.