

MODELOWANIE ODKSZTAŁCEŃ BETONU WSKUTEK REAKCJI ALKALIA- KRZEMIONKA W ZMIENNYCH WARUNKACH HIGROTERMICZNYCH

Witold GRYMIN^{*}, Dariusz GAWIN^{*}, Francesco PESAVENTO^{**}, Mateusz WYRZYKOWSKI^{*}

^{*} Politechnika Łódzka, Katedra Fizyki Budowli i Materiałów Budowlanych, Al. Politechniki 6, 90-924 Łódź
e-mail: witold.grymin@p.lodz.pl,
dariusz.gawin@p.lodz.pl,
mateusz.wyrzykowski@p.lodz.pl

^{**} Università di Padova, Dipartimento di Costruzioni e Trasporti, Via Marzolo 9,35-131 Padova
e-mail: pesa@dic.unipd.it

Streszczenie: Przedstawiono model matematyczny procesu degradacji chemicznej w elementach betonowych wskutek reakcji alkalia-krzemionka, a także odkształceń przez nią spowodowanych. Model uwzględnia sprzężenie zjawisk ciepno-wilgotnościowych, chemicznych i ewolucji właściwości materiału wskutek zachodzącej reakcji. Oparty jest on na mechanice wielofazowych ośrodków porowatych. Krótko omówiono równania bilansu masy, pędu i energii, równanie kinetyczne reakcji alkalia-krzemionka oraz związki konstytutywne i fizyczne wykorzystywane do modelowania reakcji w zmiennych warunkach klimatycznych. Pokróćce przedstawiono rozwiązanie numeryczne układu równań za pomocą metody elementów skończonych. Zaprezentowano przykłady walidacji eksperymentalnej modelu na podstawie opublikowanych wyników badań doświadczalnych.

Słowa kluczowe: reakcja alkalia-krzemionka, beton, mechanika ośrodków porowatych, degradacja chemiczna, symulacje numeryczne.

1. WPROWADZENIE

Reakcja alkalia-krzemionka (ASR - *ang. alkali-silica reaction*) jest procesem zachodzącym w porach betonu między cząsteczkami nieskrystalizowanego (bądź słabo skryształizowanego) dwutlenku krzemu a jonami roztworu alkalicznego. Wskutek niej powstaje ekspansywny żel, który powodować może, po wypełnieniu istniejących porów, deformacje, dodatkowe naprężenia, pęknięcia, znaczny spadek właściwości mechanicznych materiału, a nawet zniszczenie elementu. Ze względu na ilość konstrukcji inżynierskich, w których reakcja ta ma miejsce, oraz znaczne koszty zapobiegania i powstrzymywania postępu tej reakcji, od

wielu lat trwają prace nad stworzeniem modelu umożliwiającego prognozowanie jej rozwoju oraz oddziaływania na elementy betonowe. Większość modeli ją opisujących oparta jest na podejściu fenomenologicznym; prezentowany model, bazujący na mechanice ośrodków porowatych, uwzględnia wiele elementów podejścia mechanistycznego. Bierze on pod uwagę wpływ temperatury oraz wilgotności, a także przebieg ich zmian, na rozwój reakcji oraz odkształceń nią spowodowanych.

2. MODEL MATEMATYCZNY I JEGO ROZWIĄZANIE NUMERYCZNE

Przedstawiony model jest rozszerzeniem istniejącego modelu matematycznego zjawisk ciepno-wilgotnościowych w kompozytach cementowych [2-4]. Ośrodek ten rozważany jest jako wielofazowy materiał porowaty, będący w stanie równowagi higro-termicznej. Zmiennymi stanu ośrodka są: ciśnienie gazu (p^g), ciśnienie kapilarne (p^c), temperatura (T) oraz wektor przemieszczeń (\mathbf{u}); postęp reakcji ASR (Γ_{ASR}) jest zmienną wewnętrzną modelu. Bierze on pod uwagę sprzężenie między zjawiskami cieplnymi, wilgotnościowymi, chemicznymi oraz wywołanymi nimi zmianami parametrów określających właściwości struktury wewnętrznej materiału (np. gęstość, przepuszczalność). Pory materiału wypełnione są przez fazę ciekłą (wodę związaną fizycznie i kapilarną), fazę gazową (mieszanka suchego powietrza i pary wodnej) oraz żel powstały w wyniku reakcji ASR. W poniższych równaniach indeksy s , w , l , g , gw i ga oznaczają odpowiednio: szkielet, czystą wodę, fazę ciekłą, fazę

gazową, parę wodną oraz suche powietrze. Wielkości fizyczne uśrednione w całej objętości ośrodka oznaczone są indeksem dolnym, uśrednione zaś w danej fazie lub składniku o jednolitym składzie chemicznym - indeksem górnym.

2.1. Równania rządzące modelu

Równania bilansu masy, pędu oraz energii zapisane są w mikroskali, następnie zaś uśrednione w reprezentatywnym elemencie objętościowym, w efekcie czego otrzymywane są makroskopowe równania rządzące modelu.

Równanie bilansu masy suchego powietrza, zawierające równanie równowagi masy szkieletu, uwzględniające adwekcyjny i dyfuzyjny przepływ powietrza, odkształcenia szkieletu oraz wpływ reakcji ASR na porowatość, ma postać [2]:

$$\begin{aligned} & -n \frac{\partial S_w}{\partial t} - \beta_s (1-n) S_g \frac{\partial T}{\partial t} + S_g \operatorname{div} \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \frac{S_g n}{\rho^{ga}} \frac{\partial \rho^{ga}}{\partial t} + \\ & + \frac{1}{\rho^{ga}} \operatorname{div} \mathbf{J}_g^{ga} + \frac{1}{\rho^{ga}} \operatorname{div} (n S_g \rho^{ga} \mathbf{v}^{gs}) + \\ & - \rho^{ga} S_g \frac{(1-n)}{\rho^s} \left[\frac{\partial \rho^s}{\partial \Gamma_{ASR}} \frac{\partial \Gamma_{ASR}}{\partial t} \right] = 0, \end{aligned} \quad (1)$$

gdzie n oznacza porowatość, S_w i S_g - stopień nasycenia porów wodą i gazem, β_s - współczynnik rozszerzalności termicznej fazy stałej, \mathbf{v}^{gs} - względną prędkość fazy gazowej względem szkieletu, ρ^{ga} i ρ^s - gęstość suchego powietrza oraz szkieletu materiału, Γ_{ASR} - postęp reakcji ASR, \mathbf{J}_g^{ga} - dyfuzyjny strumień masy suchego powietrza.

Równanie bilansu masy wody w fazie ciekłej i gazowej, zawierające równanie równowagi masy szkieletu, uwzględniające adwekcyjny i dyfuzyjny przepływ pary wodnej, odkształcenia szkieletu, wpływ reakcji ASR na porowatość i przemiany fazowe - parowanie/skraplanie lub fizyczną adsorpcję/desorpcję - zapisano następująco [2]:

$$\begin{aligned} & n(\rho^w - \rho^{gw}) \frac{\partial S_w}{\partial t} + (\rho^w S_w + \rho^{gw} S_g) \alpha \operatorname{div} \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \\ & - \beta_{swg}^* \frac{\partial T}{\partial t} + S_g n \frac{\partial \rho^{gw}}{\partial t} + \operatorname{div} \mathbf{J}_g^{gw} + \operatorname{div} (n S_w \rho^w \mathbf{v}^{ws}) + \\ & + \operatorname{div} (n S_g \rho^{gw} \mathbf{v}^{gs}) + \\ & - (\rho^w S_w + \rho^{gw} S_g) \frac{(1-n)}{\rho^s} \left[\frac{\partial \rho^s}{\partial \Gamma_{ASR}} \frac{\partial \Gamma_{ASR}}{\partial t} \right] = 0, \end{aligned} \quad (2)$$

gdzie ρ^w i ρ^{gw} oznaczają gęstość wody i pary wodnej, T - temperaturę, \mathbf{v}^{ws} - prędkość względną wody względem szkieletu, \mathbf{J}_g^{gw} - strumień dyfuzyjny masy pary wodnej, β_{swg}^* zaś - współczynnik rozszerzalności termicznej ośrodka wielofazowego, określony wzorem:

$$\beta_{swg}^* = \beta_s (1-n) (S_g \rho^{gw} + \rho^w S_w) + n \beta_w \rho^w S_w, \quad (3)$$

gdzie β_w jest współczynnikiem rozszerzalności termicznej fazy ciekłej.

Równanie bilansu energii dla całego ośrodka, uwzględniające kondukcyjny oraz konwekcyjny przepływ ciepła, a także źródła ciepła towarzyszące zmianom fazowym, przyjmuje postać [2]:

$$\begin{aligned} & (\rho C_p)_{eff} \frac{\partial T}{\partial t} + (\rho_w C_p^w \mathbf{v}^{ws} + \rho_g C_p^g \mathbf{v}^{gs}) \cdot \operatorname{grad} T + \\ & - \operatorname{div} (\chi_{eff} \operatorname{grad} T) = -\dot{m}_{vap} \Delta H_{vap}, \end{aligned} \quad (4)$$

gdzie χ_{eff} oznacza efektywne współczynniki przewodzenia ciepła wilgotnego materiału, $\rho_w C_p^w, \rho_g C_p^g$ - pojemność cieplną fazy ciekłej i gazowej, $(\rho C_p)_{eff}$ - pojemność cieplną ośrodka wielofazowego, ΔH_{vap} zaś - entalpię parowania wody.

Równanie bilansu momentu pędu ośrodka wielofazowego przyjęto w formie przyrostowej [2]:

$$\operatorname{div} \left(\frac{\partial \mathbf{t}^{tot}}{\partial t} \right) + \frac{\partial \rho}{\partial t} \mathbf{g} = 0, \quad (5)$$

gdzie \mathbf{t}^{total} jest całkowitym tensorem naprężenia, ρ - gęstością pozorną zawilgoconego ośrodka, \mathbf{g} - wektorem przyspieszenia grawitacyjnego.

Naprężenia kompozytów cementowych modelowane są za pomocą tzw. zasady naprężeń efektywnych [4]:

$$\mathbf{t}^{tot} = \mathbf{t}^{ef} - \alpha P^s \mathbf{I} = \mathbf{t}^{ef} - (\rho^g - \chi_s^{ws} \rho^c) \mathbf{I}, \quad (6)$$

gdzie \mathbf{t}^{tot} i \mathbf{t}^{ef} są tensorami odkształceń całkowitych i efektywnych, α - współczynnikiem Biota, P^s - ciśnieniem fazy stałej, \mathbf{I} - jednostkowym tensorem drugiego rzędu, zaś χ_s^{ws} oznacza ułamek powierzchni szkieletu będącego w kontakcie z wodą porową.

2.2. Postęp reakcji ASR

Większość istniejących modeli reakcji ASR bierze pod uwagę wpływ temperatury na przebieg reakcji, pomijając wpływ wilgotności. Jak jednak wykazały badania doświadczalne przeprowadzone przez Larive [6] oraz Poyet [8], nawet niewielkie zmiany wilgotności mogą oddziaływać w znaczącym stopniu na odkształcenia spowodowane reakcją ASR. Ponadto, w większych konstrukcjach, ze względu na odmienny rozwój wilgotności, reakcja ASR przebiega z inną szybkością w warstwie zewnętrznej oraz wewnątrz konstrukcji, co prowadzi do powstawania dodatkowych naprężeń. Poniższe wzory są połączeniem istniejących modeli [1,9,11] uwzględniającym wpływ temperatury, wilgotności, okresu utajenia reakcji oraz zjawiska „starzenia się” alkaliów. Równanie ewolucji dla reakcji ASR w warunkach nieizotermicznych wyrażone jest wzorem [11]:

$$\frac{\partial \Gamma_{ASR}}{\partial t} = \frac{1 - \Gamma_{ASR}}{t_r}, \quad (7)$$

gdzie t_r jest charakterystycznym czasem reakcji, którego wartość wyrażona jest następująco [9,11]:

$$t_r = \tau_r(T) \frac{1 + \exp(-\tau_L(T) / \tau_r(T))}{\Gamma_{ASR} + \exp(-\tau_L(T) / \tau_r(T))}, \quad (8)$$

gdzie τ_L oznacza czas utajenia reakcji, związany z rozpadem wiązań w cząsteczkach dwutlenku krzemu, natomiast τ_r - czas reakcji prowadzący do powstania żelu. Ich wartości zależne są od temperatury oraz wilgotności w sposób opisany równaniem [9]:

$$\tau_r(T, S_w) = \tau_{r0} \cdot \exp[U_r \cdot (\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0})] \cdot (A_r \cdot S_w + B_r), \quad (9a)$$

$$\tau_L(T, S_w) = \tau_{L0} \cdot \exp[U_L \cdot (\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0})] \cdot (A_L \cdot S_w + B_L), \quad (9b)$$

gdzie τ_{r0} i τ_{L0} są wartościami τ_r i τ_L w temperaturze referencyjnej T_0 oraz $S_w = 1$, A_r , B_r , A_L i B_L - parametrami materiałowymi otrzymywanymi eksperymentalnie, U_L i U_r natomiast są energiami aktywacji utajenia i reakcji.

2.3. Odształcenia spowodowane reakcją ASR

Odształcenia spowodowane reakcją ASR, opisane za pomocą modelu fenomenologicznego, zdefiniowane są w formie przyrostowej przy założeniu niemającego postępu reakcji ($\dot{\Gamma}_{ASR} \geq 0$). Odształcenia żelu już uformowanego modelowane są jako spowodowane zjawiskiem skurczu lub pęcznienia (tj. za pomocą odształceń wywołanych ciśnieniem kapilarnym) [5]:

$$\frac{\partial \boldsymbol{\varepsilon}_{ASR}}{\partial t} = \tilde{\beta}_{ASR}(S_w) \cdot (1 - \Gamma_{ASR})^{\tau_{r0}/\tau_{A0}} \cdot \frac{\partial \Gamma_{ASR}}{\partial t} \mathbf{I}, \quad (10)$$

gdzie $\tilde{\beta}_{ASR}(S_w)$ jest parametrem materiałowym otrzymywanym za pomocą równania [9]:

$$\tilde{\beta}_{ASR}(S_w) = \tilde{\beta}_{ASR0}(S_w)^{\tilde{C}_{ASR}}, \quad (11)$$

gdzie \tilde{C}_{ASR} jest parametrem materiałowym, natomiast $\tilde{\beta}_{ASR0}$ jest wartością $\tilde{\beta}_{ASR}$ w $S_w = 1$.

2.4. Związki konstytutywne

Wraz z postępowaniem reakcji ASR oraz formowaniem się ekspansywnego żelu modyfikowana jest struktura wewnętrzna materiału w porach kompozytu cementowego. Gęstość materiału w danej chwili czasu określona jest wzorem [5]:

$$\rho^s = \frac{\rho^{s0}}{1 + \boldsymbol{\varepsilon}_{ASR,\infty}^{vol}(t)}, \quad (12)$$

gdzie ρ^{s0} oznacza gęstość nieprzereagowanego materiału, natomiast $\boldsymbol{\varepsilon}_{ASR,\infty}^{vol}(t) = \text{tr } \boldsymbol{\varepsilon}_{ASR}(t)$ jest chwilową wartością odształceń objętościowych spowodowanych reakcją ASR. Jako że objętość zarówno porów, jak i szkieletu, w homogenicznych, stałych w czasie, higrotermicznych warunkach

bez obciążenia zewnętrznego zmienia się pod wpływem reakcji ASR w zbliżony sposób, przyjęto, że porowatość pozostaje niezmienna - $n = \text{const}$.

Zwiększająca się objętość żelu w porach i powstające w efekcie mikropęknięcia powodują zmiany przepuszczalności materiału [10]. W prezentowanym modelu przepuszczalność materiału określona jest jako zależna od stosunku odształceń spowodowanych przez reakcję w danej chwili $\boldsymbol{\varepsilon}_{ASR}^{vol}$ do wartości tych odształceń w całkowicie przereagowanym materiale $\boldsymbol{\varepsilon}_{ASR,\infty}^{vol}$ [5]:

$$k = k_{fin} \cdot 10^{A_k (1 - \boldsymbol{\varepsilon}_{ASR}^{vol} / \boldsymbol{\varepsilon}_{ASR,\infty}^{vol})}, \quad (13)$$

gdzie k_{fin} oznacza przepuszczalność w pełni przereagowanego materiału, zaś $A_k > 0$ jest parametrem materiałowym otrzymywanym eksperymentalnie.

2.5. Rozwiązanie numeryczne

Równania modelu zdyskretyzowano w przestrzeni za pomocą metody elementów skończonych. Zmienne stanu w danym punkcie \mathbf{r} wyrażone są poprzez funkcję kształtu $\mathbf{N}_\pi(\mathbf{r})$ ($\pi = g, c, t, u$) oraz wektor zależnych od czasu wartości węzłowych zmiennych stanu [3]:

$$\begin{aligned} p^g(\mathbf{r}, t) &\cong \mathbf{N}_p(\mathbf{r}) \bar{\mathbf{p}}^g(t), \quad p^c(\mathbf{r}, t) \cong \mathbf{N}_p(\mathbf{r}) \bar{\mathbf{p}}^c(t), \\ T(\mathbf{r}, t) &\cong \mathbf{N}_t(\mathbf{r}) \bar{\mathbf{T}}(t), \quad \mathbf{u}(\mathbf{r}, t) \cong \mathbf{N}_u(\mathbf{r}) \bar{\mathbf{u}}(t). \end{aligned} \quad (14)$$

Zdyskretyzowaną za pomocą metody Galerkinia postać równań można zapisać w formie macierzowej jako [3]:

$$\mathbf{C}_{ij}(\bar{\mathbf{x}}) \frac{\partial \bar{\mathbf{x}}}{\partial t} + \mathbf{K}_{ij}(\bar{\mathbf{x}}) \bar{\mathbf{x}} = \mathbf{f}_i(\bar{\mathbf{x}}), \quad \bar{\mathbf{x}} = \{\bar{\mathbf{p}}^g, \bar{\mathbf{p}}^c, \bar{\mathbf{T}}, \bar{\mathbf{u}}\}^T. \quad (15)$$

Szczegółową postać współczynników: $\mathbf{C}_{ij}(\bar{\mathbf{x}})$, $\mathbf{K}_{ij}(\bar{\mathbf{x}})$ i $\mathbf{f}_i(\bar{\mathbf{x}})$ podano w [3]. Dyskretyzację w czasie przeprowadzono za pomocą w pełni niejawnego schematu metody różnic skończonych [3]:

$$\begin{aligned} \Psi^i(\bar{\mathbf{x}}_{n+1}) &= \mathbf{C}_{ij}(\bar{\mathbf{x}}_{n+1}) \frac{\bar{\mathbf{x}}_{n+1} - \bar{\mathbf{x}}_n}{\Delta t} + \mathbf{K}_{ij}(\bar{\mathbf{x}}_{n+1}) \bar{\mathbf{x}}_{n+1} + \\ &- \mathbf{f}_i(\bar{\mathbf{x}}_{n+1}) = \mathbf{0}, \quad (i = g, c, t, u), \end{aligned} \quad (16)$$

gdzie indeksy i, j ($i, j = g, c, t, u$) oznaczają zmienne stanu, n jest numerem kroku czasowego, Δt zaś - jego długością. Układ równań (16) rozwiązywany jest za pomocą monolitycznej procedury Newtona-Raphsona przy użyciu metody frontalnej [3].

Postęp reakcji w korku czasowym ($n+1$) w k -tym punkcie Gaussa $(\Gamma_{ASR})_{n+1}^k$ obliczany jest za pomocą metody Eulera [4]:

$$(\Gamma_{ASR})_{n+1}^k = (\Gamma_{ASR})_n^k + \frac{1 - (\Gamma_{ASR})_n^k}{(t_R)_n^k} \Delta t. \quad (17)$$

3. WYNIKI SYMULACJI NUMERYCZNYCH

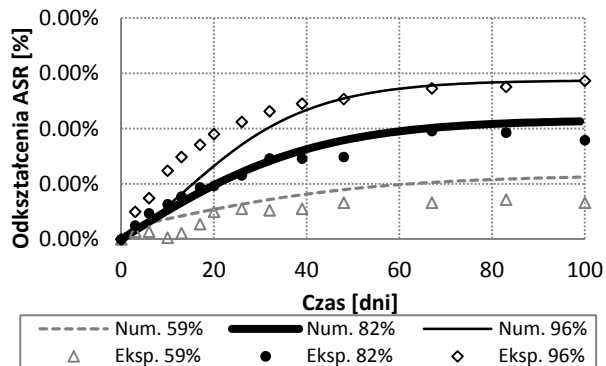
Przeprowadzono symulacje numeryczne dla dwóch eksperymentów wykonanych przez Poyet [8] oraz Multona i in. [7]. Obliczenia wykonane zostały przy użyciu programu komputerowego HMTRA_ASR, będącego rozszerzeniem programu HMTRA [3] o równania (7) oraz (17).

Celem eksperymentu Poyet [8] była analiza wpływu wilgotności na odkształcenia spowodowane reakcją ASR w cylindrycznych próbkach (średnica 2cm, 16cm wysokości). Przeprowadzono dwie serie pomiarów. W pierwszej z nich wilgotność względna była utrzymywana na stałym poziomie. W kolejnej serii próbki betonowe były poddawane zmiennym warunkom wilgotnościowym (na przemian 59% i 96% w cyklach 14- albo 28-dniowych). Parametry materiałowe przyjęte w obliczeniach podano w Tabeli 1.

Tabela 1. Zestawienie parametrów materiałowych przyjętych w symulacjach poszczególnych eksperymentów.

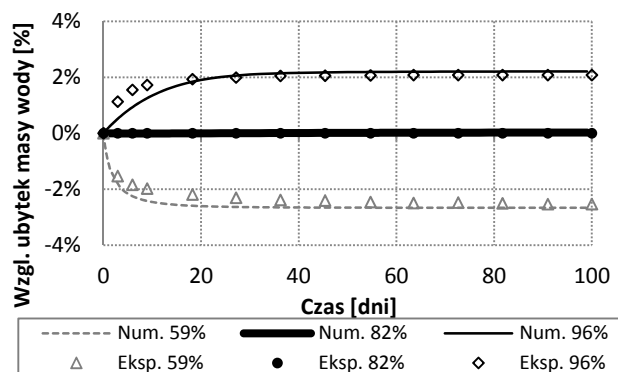
Table 1. Set of parameters assumed in the simulations of the experiments.

Parametr	Poyet	Multon
Stosunek wodno-cementowy, w/c [-]	0,5	0,5
Pocz. wartość czasu utajenia, τ_{L0} [dni]	37	90
Pocz. wartość czasu reakcji, τ_{r0} [dni]	67	55
Energia aktywacji utajenia, U_L [K]	10000	6000
Energia aktywacji utajenia, U_R [K]	6000	2500
Parametry materiałowe, A_L [-], B_L [-]	-1 2	-8,687 9,687
Parametry materiałowe, A_r [-], B_r [-]	-1 2	-6,944 7,944
Czas starzenia, τ_A [dni]	200	145,27
Parametr materiałowy, β_{ASR0} [-]	0,0043	0,0024
Parametr materiałowy, C_{ASR} [-]	1,1	3,5654
Porowatość, n [-]	0,17	0,17
Przepuszczalność w pełni przereagowanego materiału k_{fin} [m^2]	$5 \cdot 10^{-22}$	$5 \cdot 10^{-22}$



Rys. 1. Porównanie odkształceń spowodowanych reakcją ASR, otrzymanych w wyniku symulacji numerycznych, z danymi doświadczalnymi [8] dla stałych warunków wilgotnościowych.

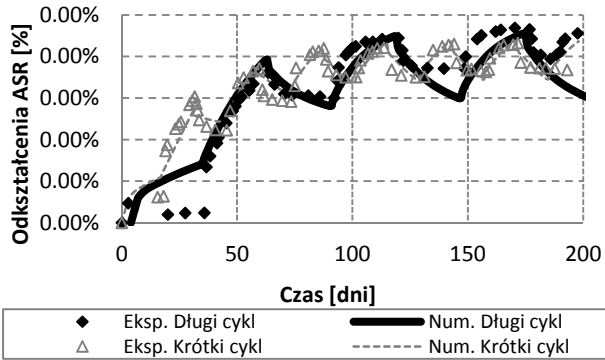
Fig. 1. Comparison of the experimental [8] and numerical results of mass variations of the specimens for constant hygral conditions.



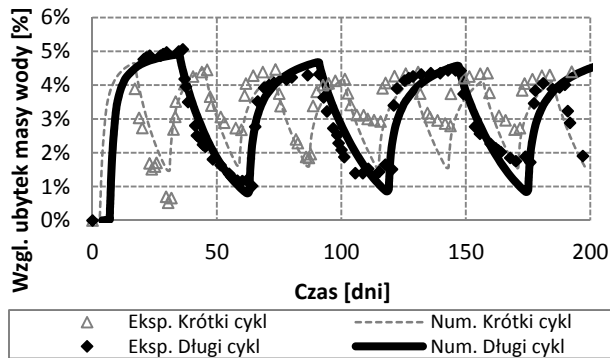
Rys. 2. Porównanie względnego ubytku masy wody, otrzymanego w wyniku symulacji numerycznych, z danymi doświadczalnymi [8] dla stałych warunków wilgotnościowych.

Fig. 2. Comparison of the experimental [8] and numerical results of mass variations of the specimens for constant hygral conditions.

Uzyskano dobrą zgodność wyników symulacji z pomiarami eksperymentalnymi (rys. 1-4). Na wykresach (rys.1,3) widać efekt opisany w [8], tj., zgodnie z wynikami badań laboratoryjnych, końcowe wartości odkształceń spowodowanych reakcją ASR dla niezmiennej w czasie wilgotności wynoszą 0,28% dla wilgotności 96% oraz 0,07% dla wilgotności 59% (rys.1). W przypadku zmiennych warunków wilgotnościowych wartości te wynoszą odpowiednio około 0,22% oraz 0,19% (rys. 3). Jak widać, zjawisko to zostało zamodelowane w zadowalającym stopniu.

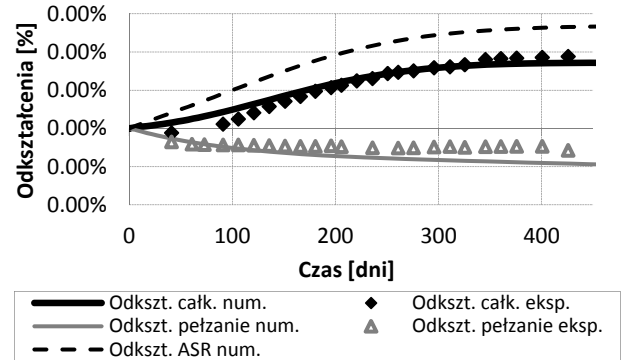


Rys. 3. Porównanie odkształceń spowodowanych reakcją ASR, otrzymanych w wyniku symulacji numerycznych, z danymi doświadczalnymi [8] dla zmiennych warunków wilgotnościowych. Fig. 3. Comparison of the experimental [8] and numerical results of mass variations of the specimens for variable hygral conditions.

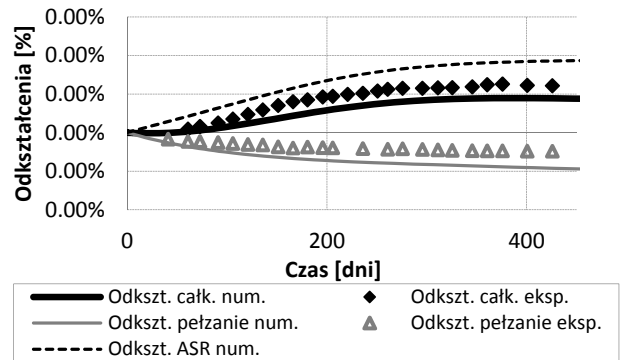


Rys. 4. Porównanie względnego ubytku masy wody, otrzymanego w wyniku symulacji numerycznych, z danymi doświadczalnymi [8] dla zmiennych warunków wilgotnościowych. Fig. 4. Comparison of the experimental [8] and numerical results of mass variations of the specimens for variable hygral conditions.

Kolejne symulacje numeryczne dotyczyły wyników pomiarów wykonanych przez Multona i in. [7]. Eksperyment ten polegał na badaniu odkształceń próbek cylindrycznych w dwóch kierunkach (wzdłuż osi próbki oraz w kierunku promieniowym) poddawanych różnym wartościom obciążeń zewnętrznych. Wykorzystano pomiary uzyskane dla serii pomiarów bez obciążeń. Uzyskano dobrą zgodność zarówno dla odkształceń podłużnych, jak i promieniowych (rys. 5, 6).



Rys. 5. Porównanie odkształceń, otrzymanych w wyniku symulacji numerycznych, z danymi doświadczalnymi [7] dla kierunku równoległego do osi próbki. Fig. 5. Comparison of the experimental [7] and numerical results of expansions for longitudinal direction.



Rys. 6. Porównanie odkształceń, otrzymanych w wyniku symulacji numerycznych, z danymi doświadczalnymi [7] dla kierunku promieniowego. Fig. 6. Comparison of the experimental [7] and numerical results of expansions for radial direction.

4. WNIOSKI

Przedstawiono opis reakcji ASR, bazujący na modelu matematycznym zjawisk chemo-higro-termo-mechanicznych w kompozytach cementowych. Przedstawiono walidację modelu do analizy ewolucji odkształceń. Może być on wykorzystywany do prognozowania rozwoju reakcji ASR w zmiennych warunkach higro-termicznych. Przed praktycznym zastosowaniem modelu uwzględnić należy jednak wpływ obciążeń zewnętrznych na rozwój reakcji. Trwają prace nad uwzględnieniem w modelu wpływu naprężeń i anizotropii odkształceń.

PODZIĘKOWANIA

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.

MODELLING OF CONCRETE EXPANSION DUE TO ASR REACTION IN VARIABLE HYGRO-THERMAL CONDITIONS

Summary: A mathematical model of degradation process of concrete structures due to alkali-silica reaction is presented. The model takes into account variable hygral, thermal, chemical and mechanical loads. Some examples of the model application for analyzing development of the alkali-silica reaction are presented.

Literatura

- [1] Bangert F., Kuhl D., Meschke G. *Chemo-hygro-mechanical modeling and numerical simulation of concrete deterioration caused by alkali-silica reaction*. Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech. 28 (2004) 689-714.
- [2] Gawin D., Pesavento F., Schrefler B.A. *Hygro-thermo-chemo-mechanical modelling of concrete at early ages and beyond. Part I: hydration and hygro-thermal phenomena*. Int. J. Numer. Meth. Engng. 67 (2006) 299-331.
- [3] Gawin D., Pesavento F., Schrefler B.A. *Hygro-thermo-chemo-mechanical modelling of concrete at early ages and beyond. Part II: Shrinkage and creep of concrete*. Int. J. Num. Meth. Engng. 67(2006) 332-363.
- [4] Gawin D., Pesavento F., Schrefler B.A., *Modelling creep and shrinkage of concrete by means of effective stresses*, *Materials and Structures*, 6 (2007), 579-591.
- [5] Gawin D., Pesavento F., Wyrzykowski M., Simoni L. *Modelling alkali-silica reaction in non-isothermal, partially saturated cement based materials* (w przygotowaniu).
- [6] Larive C. *Apports combinés de l'expérimentation et la modélisation à la compréhension de l'alcali-réaction et de ses effets mécaniques*. Monograph LPC, 0A28, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris 1998.
- [7] Multon S., Toutlemonde F. *Effect of applied stresses on alkali-silica reaction-induced expansions*. Cement and Concrete Research 36 (2006) 912-920.
- [8] Poyet S. *Etude de la dégradation des ouvrages en béton atteints de la réaction alcali-silice: approche expérimentale et modélisation numérique multiéchelle des dégradations dans un environnement hydrochemo-mécanique variable*. Ph.D. thesis. University of Marne la Vallée, France 2003.
- [9] Steffens A., Li K., Coussy O. *Ageing approach to water effect on alkali-silica reaction. Degradation of structures*. J. of Engng. Mechanics 129 (2003) 50-59.

[10] Torrijos M. C., Giaccio G., Zerbino R. *Internal cracking and transport properties in damaged concretes*. Materials and Structures 43 (2010) 109-121.

[11] Ulm F.-J., Coussy O., Kefei L., Larive C. *Thermo-chemo-mechanics of ASR expansion in concrete structures*. J. of Engng. Mechanics 126 (2000) 233-242.