

Makroskopowy model zamarzania i rozmrażania konstrukcji betonowych

Dr inż. Abdrahman Alsabry, Uniwersytet Zielonogórski

1. Wprowadzenie

W skali makroskopowej nie ma równowagi termodynamicznej podczas cykli zamarzania i odmrażania, jak to stwierdzono dla systemów mikroskopowych [7].

Trwałość konstrukcji betonowych eksploatowanych w warunkach zimowych może być bardzo wysoka lub bardzo niska, przy tych samych lub zbliżonych parametrach jakościowych poszczególnych składników mieszanki betonowej [1].

Konstrukcja betonowa narażona na oddziaływania wilgoci i mrozu, ulega uszkodzeniom. Trudne warunki eksploatacji występują w konstrukcjach narażonych na ciągły kontakt z wodą, takich jak zapory, przelewy, falochrony, filary mostowe itp. [1]. Oddziaływania niskich temperatur na beton niestety nie da się uniknąć. W wielu strefach klimatycznych konstrukcja betonowa jest na przemian zamrażana i odmrażana w rytm cykli temperaturowych występujących w naturze [2]. W 1945 roku Powers [13] przedstawiła swoją teorię, która umożliwiła rozwinięcie techniki w zabezpieczeniu betonów przed mrozem i solami rozmrażającymi.

2. Mechanizmy niszczenia betonu

Istnieją dwa mechanizmy niszczenia betonu, które występują niekiedy oddzielnie, a czasem towarzyszą sobie wzajemnie [2].

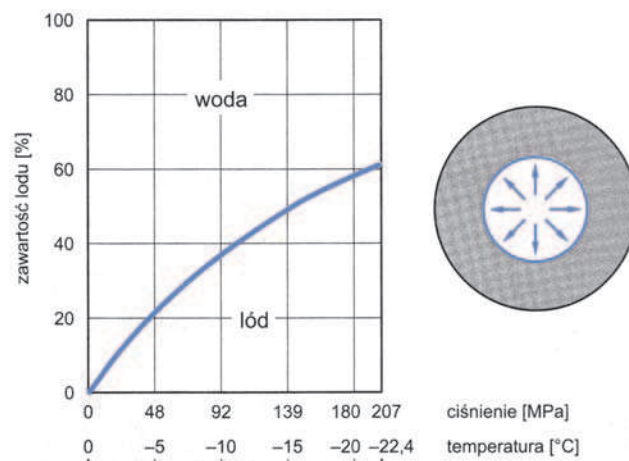
Przedstawiony obraz mechanizmu niszczącego jest w rzeczywistości znacznie bardziej skomplikowany [1]. Po pierwsze, model na rysunku 1 dotyczy wody swobodnej [1].

Zasadnicze znaczenie ma charakterystyka geometryczna porów. Na rysunku 2 przedstawiono tę zależność.

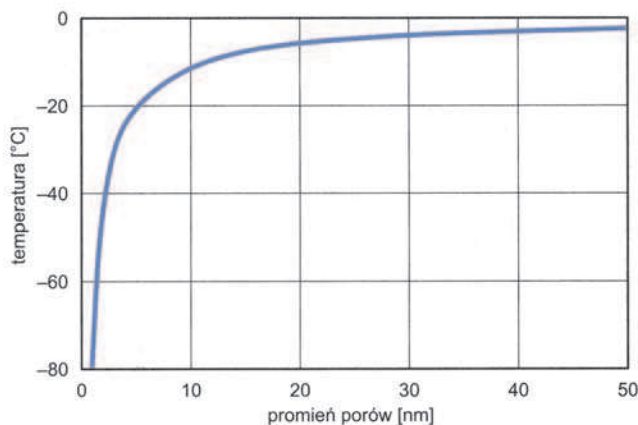
Po drugie, początkowi zamarzania wody towarzyszy zjawisko przechłodzenia. Po trzecie, w wodzie zawartej w porach betonu są obecne składniki mineralne zmieniające właściwości wody [1].

Setzer [5] badał mechanizmy kondensacji i podciągania kapilarnego w różnych typach porów. Dokonał on klasyfikacji porów z uwagi na ich rozmiary i zidentyfikował typy wody występujące w każdym z nich. Zaprezentowano to w tabeli 1.

Według profesora J. Kubika [12] klasyfikację porów wprowadził także Dubinin w 1960 roku i jest ona powszechnie przyjęta w chemii fizycznej oraz zaleca-



Rys. 1. Przyrost masy lodu i ciśnienia w wodzie zamrażanej w stałej objętości [1]



Rys. 2. Hipotetyczna zależność pomiędzy temperaturą zamarzania wody a wymiarami porów według [3]

na przez I.U.P.A.C. W klasyfikacji tej umowne przedziały geometryczne rozmiarów porów są następujące: mikropory, mezopory i makropory.

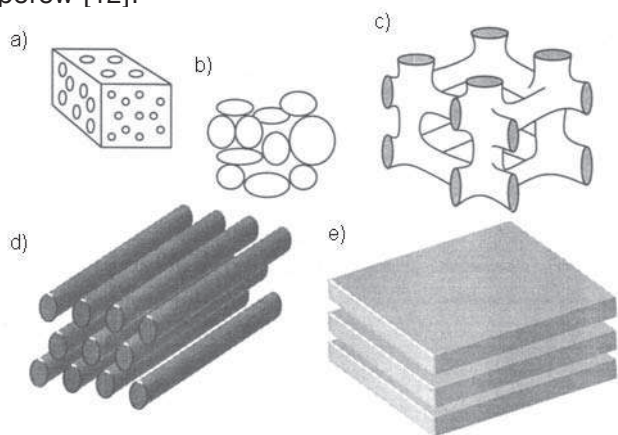
W mikroporach z uwagi na bliskość ścianek pora występuje bardzo duży potencjał oddziaływania między zaadsorbowaną molekułą a ścianką. Jest to cecha wyróżniająca mikropory od mezoporów i makroporów [12].

W mezoporach występuje kondensacja kapilarna, a na izotermach sorpcji zauważamy charakterystyczną pętlę histerezy kondensacji.

Tabela 1. Rozmiary porów, ich klasyfikacja oraz woda w porach [5]

Klasa porów	Średnica maksymalna	Rodzaj wody	Sposób nasycenia
Pory mikrożelowe	1 nm (0,04 x 10 ⁻⁶ in)	woda związana	sorpcja (< 50% wilgotności względnej)
Pory mezożelowe	30 nm (1,2 x 10 ⁻⁶ in)	woda zaabsorbowana	kondensacja pary (od 50 do 90% wilgotności względnej)
Pory mikrokapilarne	1 μm (39,4 x 10 ⁻⁶ in)	woda swobodna	podciąganie kapilarne (do maksymalnej wysokości)
Pory mezokapilarne	30 μm (12 x 10 ⁻⁴ in)	woda swobodna	podciąganie kapilarne (maksymalna wysokość osiągnięta po minucie)
Pory makrokapilarne	(0,04 in)	woda swobodna	podciąganie kapilarne (maksymalna wysokość osiągnięta przed upływem minuty)

Należy podkreślić, że granice między poszczególnymi typami porów nie są sztywne i zależą nie tylko od geometrycznej formy porów, ale również od polarności zaabsorbowanej substancji i powierzchni pora. Na rysunku 3 przedstawiono charakterystyczne typy porów [12].

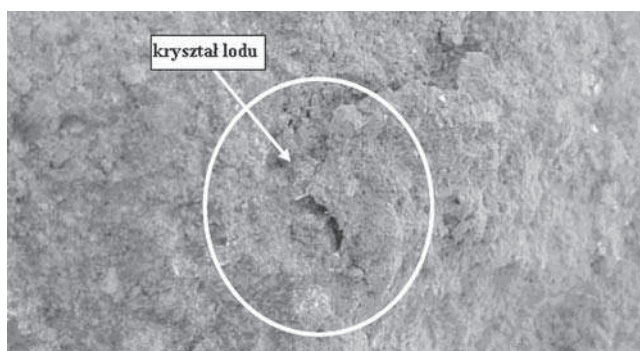


Rys. 3. Charakterystyczne typy porów: a) materiał z losowym rozkładem porów, b) materiał granulowany, c) regularna struktura przestrzenna, d) i e) materiały o strukturze dwuwymiarowej [12]

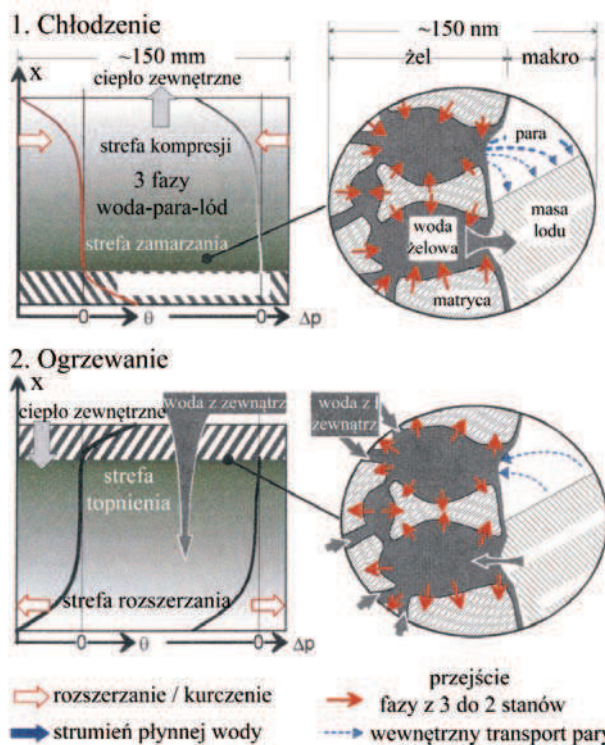
Gdy temperatura stwardniałego, nasyconego wodą betonu ulega obniżeniu, woda w porach kapilarnych stwardniałego zaczynu cementowego zamara w sposób podobny do zamarzania wody w kapilarach skał, powodując pęcznienie betonu. Jeśli po późniejszym stopieniu lodu nastąpi ponowne zamarznięcie, zaznaczy się dalsze rozszerzanie. Powtarzające się cykle zamrażania i odmrażania dają efekt kumulacyjny, który prowadzi do makrospełkań materiału (rys. 4) [6].

Istnieją dwa źródła ciśnienia powodującego pęcznienie betonu. Po pierwsze w wyniku zamarzania wody następuje wzrost objętości o około 9%. Szybkość zamarzania określa szybkość, z jaką musi wypływać woda, a wartość wytworzonego ciśnienia hydraulicznego jest zależna od oporów przepływu, tj. od długości drogi przepływu oraz od przepuszczalności zaczynu. Drugą przyczyną pęcznienia betonu jest zjawisko dyfuzji wody (rys. 5).

Każdy cykl zamarzania powoduje migrację wody do miejsc, w których może ona zamarać. Obszary te zawierają drobne rysy, które ulegają rozszerzeniu



Rys. 4. Pęknięcie betonu na powierzchni ściany oporowej z powodu krystalizacji lodu [6]



Rys. 5. Porównanie sytuacji makroskopowej i mikroskopowej w modelu soczewki mikrołodowej [7, 8]

skutkiem ciśnienia lodu i które pozostają rozszerzone podczas odmrażania, gdy wypełniają się wodą. Kolejne zamarzanie powoduje powtórny wzrost ciśnienia i wynikające z tego konsekwencje [2].

Zróznicowanie warunków eksploatacyjnych, klimat, nasłonecznienie oraz budowa wewnętrzna betonu decydują o szybkości i rodzaju zachodzących procesów niszczących. Klasyfikacja uszkodzeń mrozowych betonu obejmuje wg [1] pięć typowych form zniszczeń:

- pęknięcia powierzchniowe betonu (rys. 6, 7);
- odpryski fragmentów betonu (rys. 8, 9);
- złuszczenie się betonu (rys. 10, 11);
- głębokie, wewnętrzne pęknięcia betonu;
- całkowita lub częściowa dezintegracja betonu.

Niezależnie od formy i intensywności zniszczenia, zjawisko braku mrozoodporności zawsze jest pochodną porowatości betonu.

Pory wpływają na zdolność betonu do retencji wody, jej przemieszczania i możliwości zamarzania, a w efekcie kształtują warunki, w których mechanizm lub mechanizmy niszczące są w stanie wywołać uszkodzenia istotne dla trwałości użytkowej wielu konstrukcji budowlanych [1].

3. Równania bilansu

Artykuł zawiera makroskopowy opis procesów zachodzących w betonie na przykładzie dwuskładnikowego materiału porowatego nasyconego wodą [9].

Taki model jest konstruowany za pomocą termodynamiki ośrodka ciągłego, według profesora Krzysztofa Wilmańskiego [10].

To oznacza, że równania pola bazują na prawach bilansu dla dwuskładnikowego materiału porowatego i równań ewolucji dla wewnętrznych zmiennych (w naszym przypadku – porowatość i parametr uszkodzenia). Prawa bilansu mają następującą formę:

$$\frac{\partial \rho^S}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho^S \mathbf{V}^S) = \hat{\rho}^S \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho^F}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho^F \mathbf{V}^F) = \hat{\rho}^F \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho^S \mathbf{V}^S}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho^S \mathbf{V}^S \otimes \mathbf{V}^S - \mathbf{T}^S) = \mathbf{D}(\mathbf{V}^S - \mathbf{V}^F) \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho^F \mathbf{V}^F}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho^F \mathbf{V}^F \otimes \mathbf{V}^F - \mathbf{T}^F) = \mathbf{D}(\mathbf{V}^S - \mathbf{V}^F) \quad (4)$$

4. Liniowe związki konstytutywne

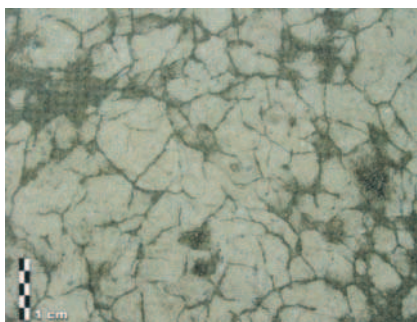
Podczas gdy liniowe związki konstytutywne są następujące [10]

$$\mathbf{T}^S = \mathbf{T}_0^S + \lambda^S \operatorname{tr} \boldsymbol{\varepsilon}^S \mathbf{1} + 2 \mu \boldsymbol{\varepsilon}^S + Q \left(\frac{\rho_0^F - \rho^F}{\rho_0^F} \right) \mathbf{1} \quad (5)$$

$$\mathbf{T}^F = -p^F \mathbf{1}, \quad p^F = p_0^F + K_w \frac{\rho_0^F - \rho^F}{\rho_0^F} + Q \operatorname{tr} \boldsymbol{\varepsilon}^S \quad (6)$$



Rys. 6. Pęknięcia na czołowej części ściany z powodu propagacji mikro-pęknięć podczas zamarzania i odmarzania [4]



Rys. 7. Siatka pęknięć na powierzchni betonu [1]



Rys. 8. Łuszczenie się krawędzi w bloku [4]



Rys. 9. Oderwane rozwarstwienie pęknięcia pod wpływem mrozu [4]



Rys. 10. Złuszczająca się powierzchnia betonu [1]



Rys. 11. Powierzchnia betonu po złuszczeniu [1]

$$\frac{\partial \varepsilon^S}{\partial t} = \frac{1}{2} (\text{grad } \mathbf{V}^S + (\text{grad } \mathbf{V}^S)^T) \quad (7)$$

w którym:

$\dot{\rho}$ – źródło masy (związane) z zamrażaniem, topnieniem (wielkość konstytutywna);

V^S – prędkość szkieletu (x, t);

V^F – prędkość wody (x, t);

ρ^S – gęstość masy szkieletu (parcjalne);

ρ^F – gęstość masy wody (parcjalne);

ρ_0^F – początkowa gęstość masy parcjalnej cieczy;

ε^S – deformacja szkieletu.

Q – stała sprzęgająca odkształcenia objętościowe składników;

K_w – średni współczynnik ściśliwości wody;

μ – stałe Lamé;

T – transpozycja, tzn. $(\text{grad } \mathbf{V}^S)^T = \frac{\partial V_k^S}{\partial X_i} \mathbf{e}_i \otimes \mathbf{e}_k$

$\mathbf{e}_r, \mathbf{e}_k$ – wektory bazy układu kartezjańskiego

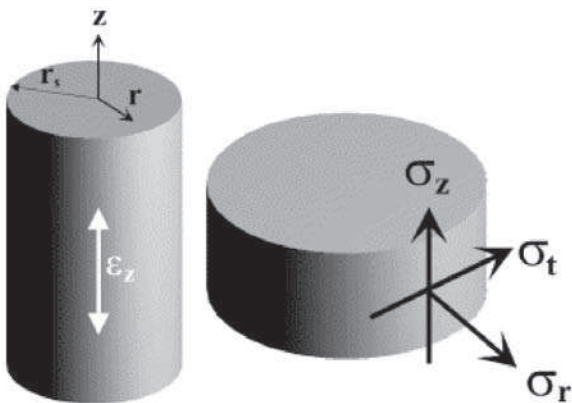
W prezentowanym artykule przedstawiam pierwszy liniowy krok w budowie takiego modelu, w którym zawarte są tylko: zależność parametrów materiałowych od parametru uszkodzenia oraz ich rozwój. Te rezultaty są porównane z odpowiadającymi wynikami dla mezoskopowego modelu V. Penttala [10].

Stan naprężenia przed i po zamrażaniu spowodowany obciążeniem ciśnieniem wody w porach, można obliczyć wykorzystując równania według Penttala [11].

$$\sigma_r = \frac{E}{1+\nu} \left(\varepsilon_r + \frac{\nu}{1-2\nu} e \right) + p(r) \frac{V_{evap}}{V_{con}} \quad (8)$$

$$\sigma_t = \frac{E}{1+\nu} \left(\varepsilon_t + \frac{\nu}{1-2\nu} e \right) + p(r) \frac{V_{evap}}{V_{con}} \quad (9)$$

$$\sigma_z = \frac{E}{1+\nu} \left(\varepsilon_z + \frac{\nu}{1-2\nu} e \right) + p(r) \frac{V_{evap}}{V_{con}} \quad (10)$$



Rys. 12. Układ współrzędnych, naprężenia i odkształcenia w cylindrze testowym [11]

$$e = \varepsilon_r + \varepsilon_t + \varepsilon_z, \quad \varepsilon_z = const \quad (11)$$

gdzie:

wartość współczynnika Poissona ν ; E – moduł Younga;

5. Podsumowanie

W tym artykule zakładam, że parametry materiałowe występujące w powyższych zależnościach są zależne od parametru uszkodzenia „ d ”, które spełnia równanie ewolucji odnoszące się do powstawań mikropęknięć w betonie. To oznacza, iż składniki tensora naprężenia Cauchy’ego w szkielecie są podane przez zależności konstytutywne według Penttala i Al-Neshawy [11]

$$\sigma_{ij} = 2\mu(d)\varepsilon_{ij} + \lambda(d)e\delta_{ij} + p(r)\frac{V_{evap}}{V_{con}}\delta_{ij} \quad (12)$$

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)}; \quad \lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (13)$$

gdzie:

$\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}$ – tensor naprężenia; odkształcenia (notacja wskaźnikowa);

d – parametr uszkodzenia;

μ, λ – stałe Lamé’go.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Rusin Z., Technologia betonów mrozoodpornych. Polski Cement Sp. Zo.o. Kraków 2002
- [2] Neville A. M., Właściwości betonu, Polski Cement Sp. z o.o. Kraków 2000
- [3] Koh Y., Kamada E., The Influence of pore structure of concrete made with absorptive aggregates on the frost durability of concrete, Rilem symposium, Prague 1973, F45-F65
- [4] Hoelscher A. K., Test method development for evaluating the freeze – thaw performance of segmental retaining wall. Blocks, December 2006
- [5] Setzer, M. J., Action of frost and deicing chemicals – basic phenomena and testing, Rilem, London, 1997
- [6] Cesar Chan, Kenneth C. Hover, Kevin J. Folliard, Randall M. Hance, and David Trejo, Durability of Segmental Retaining Wall Blocks: Final Report, FHWA HRT-07-021, April 2007
- [7] Setzer M. J., Micro-ice-lens formation in porous solid. Journal of Colloid and Interface Science 243, 193–201, 2001
- [8] Setzer M. J., Modeling and testing the freeze-thaw attack by micro-ice-lens model and CDF/CIF-Test. University Duisburg, Essen, IBPM – Institute of Building Physics and Materials Science, 45117 Essen, Germany
- [9] Alsabry A. (dawny A. R. Ali), Macroscopic modeling of freezing and thawing of concrete structures. Modelling of microstructured media. Abstracts, Łódź, 22–23, June 2006
- [10] Wilmański K., Albers B., Influence of coupling through porosity changes on the propagation of acoustic waves in linear poroelastic materials. Arch. Mech., 58, 4–5, p. 313–325, Warszawa 2006
- [11] Penttala V., Al-Neshawy F., Stress and strain of concrete during freezing and thawing cycles, Cement and Concrete Research, 32, 2002, 1407–1420
- [12] Kubik J., Przepływ wilgoci w materiałach budowlanych, politechnika o polskiej, Opole 2000
- [13] Powers T. C., A working hypothesis for further studies of frost resistance. Journal of the American concrete Institute, 16 (4), 1945, p. 245–272