

**Michał BOLTRYK**  
**Małgorzata LELUSZ**

## **ANALIZA POROWATOŚCI BETONU NA BAZIE KINETYKI KAPILARNEGO NASĄCZANIA WODĄ**

### **1. Wprowadzenie**

Destrukcja betonu przy kolejnym zamrażaniu i odmrażaniu zachodzi w wyniku nagromadzenia uszkodzeń, powstających w jego strukturze w każdym cyklu. Kinetyka tego zjawiska uwarunkowana jest intensywnością oddziaływań zewnętrznych wywołujących powstanie mikrodefektów w strukturze betonu oraz jego jakością i strukturą porowatości.

Celowym wydaje się jest opracowanie metody doświadczalnej określania poszczególnych grup porowatości mających bezpośredni wpływ na mrozoodporność betonu. Przy czym zgodnie z [1,2] pory dzieli się na trzy grupy: mikrokapilary, kapilary i pory powietrzne oraz pory kompensacyjne. Wszystkie te trzy grupy porów można określić poprzez kolejne nasączenie betonu wodą.

Pierwsza grupa ( $P_1$ ) - mikrokapilary o średnicy do  $15\mu\text{m}$ , określa się w wyniku wchłaniania przez nie wilgoci z powietrza. Objętość tych porów uzależniona jest od masy wody wchłoniętej przez suchy beton w warunkach naturalnych.

Drugą grupę ( $P_2$ ), obniżających mrozoodporność, stanowią pory, które zapełniają się wodą podczas nasączenia próbek betonowych w wodzie.

Trzecia grupa ( $P_3$ ) - to pory kompensacyjne, które określa się w wyniku dodatkowego nasączenia betonu w wodzie pod określonym podciśnieniem.

Wpływ poszczególnych rodzajów porów można ująć w następujące kryterium:

$$K_{MM} = \frac{C + P_3}{P_2} \frac{R_b^{28}}{R_k} \quad (1.1)$$

gdzie: C - objętościowa koncentracja kamienia cementowego w betonie, [ $\text{m}^3/\text{m}^3$ ]  
 $R_b^{28}$  - wytrzymałość normowa betonu na ściskanie, [MPa],  
 $R_k$  - wytrzymałość normowa kruszywa, [MPa].

Michał BOLTRYK

Małgorzata LELUSZ

Prof. dr hab. inż. , Kierownik Katedry  
Budownictwa Ogólnego Politechniki Białostockiej  
Mgr inż. asystent w Instytucie Inżynierii Budowlanej  
Politechniki Białostockiej

## 2. Badania własne

Autorzy pracują nad metodą, która pozwoli ocenić jaki jest wpływ porowatej struktury betonu (w szczególności porów kompensacyjnych) na jego trwałość. Jest to zmodyfikowana metoda określania mrozoodporności betonu na bazie kinetyki kapilarnego podciągania wody [3,4,5].

W pracy przeprowadzono analizę zależności "wskaźnik wodno-cementowy - czas przebywania próbek w podciśnieniu - wielkość podciśnienia". Wykonano ją na podstawie wyników badań struktury porowatości betonu na bazie kinetyki kapilarnego podciągania wody. Określono całkowitą porowatość kapilarną i kompensacyjną, a także stopień nasycenia po zakończeniu nasycania kapilarnego.

Przebadano 13 rodzajów składów betonu o różnym stosunku wodno-cementowym, które poddawano różnym podciśnieniom w różnych przedziałach czasu. Do betonów zastosowano cement portlandzki P35 z dodatkami z Cementowni "Chełm". Jako kruszywo grube stosowano żwir, a jako drobne piasek normowy. Badania laboratoryjne przeprowadzono według teorii planowania eksperymentu, tj. opracowano program badań, wykonano badania zgodnie z danym programem i przeanalizowano uzyskane wyniki za pomocą programów komputerowych.

### 2.1. Dziedzina, plan i wyniki badań.

Tablica 1. Dziedzina eksperymentu

Czynniki zmienne	Oznaczenie kodowe	Jednostki miary	Poziom zmienności				
			-2	-1	0	1	2
Stosunek wodno-cementowy (W/C)	X <sub>1</sub>	-	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60
Czas przebywania próbki w podciśnieniu (t <sub>n</sub> )	X <sub>2</sub>	h	2	4	6	8	10
Podciśnienie (P)	X <sub>3</sub>	MPa	0,01	0,03	0,05	0,07	0,09

### 2.2. Badanie struktury porowatości betonu na bazie kinetyki kapilarnego podciągania wody.

#### Procedura badań.

- ważenie próbek - M<sub>A</sub>
- suszenie w temperaturze 50° C przez 2 dni - M<sub>50</sub>
- kapilarne nasycanie próbek poprzez zalanie ich wodą do wysokości 3 mm,
- ważenie po 3, 24, 48h ... - M<sub>t</sub>
- ważenie w momencie zwilgotnienia górnej powierzchni próbek - M<sub>f</sub>
- zalanie próbek całkowicie wodą na 2 dni,
- ważenie nad i pod wodą - M<sub>E</sub>,
- suszenie próbki w temperaturze 50° C przez 24h,
- umieszczenie próbek w komorze i utrzymywanie podciśnienia w określonym czasie,

- ważenie próbek nad i pod wodą -  $M_{TOT}$ ,
- suszenie w temperaturze 105<sup>o</sup> C przez 3 dni i chłodzenie w eksykatorze,
- ważenie próbek -  $M_{105}$ .

**Tablica 2. Plan badań**

Nr serii	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	Podciśnienie [MPa]	Czas przebywania [h]
1	0	0	0	0,05	6
2	0	2	0	0,05	10
3	1	-1	0	0,05	4
4	2	-1	-1	0,03	4
5	2	2	1	0,07	10
6	2	0	-2	0,01	6
7	1	-2	2	0,09	2
8	0	1	-2	0,01	8
9	-1	1	2	0,09	8
10	-2	-2	-2	0,01	2
11	-2	0	2	0,09	6
12	-2	2	-1	0,03	10
13	-1	-2	1	0,07	2

Całkowita porowatość:

$$y_1 = n = \frac{M_{TOT} - M_{105}}{\rho_w V_E} \cdot 100, [\%] \quad (2.1)$$

gdzie:

- $M_{TOT}$  - masa próbki po nasyceniu próżniowym,
- $M_{105}$  - masa próbki po 3 dniach suszenia w 105<sup>o</sup> C,
- $\rho_w$  - gęstość wody,
- $V_E$  - objętość próbki po nasycaniu kapilarnym.

$$V_E = \frac{M_{E(nad\ wod\ a)} - M_{E(pod\ wod\ a)}}{\rho_w}, [m^3] \quad (2.2)$$

Stopień nasycenia po dwóch dniach suszenia w temperaturze 50<sup>o</sup> C:

$$y_2 = S_{50} = \frac{M_{50} - M_{105}}{M_{TOT} - M_{105}}, [-] \quad (2.3)$$

gdzie:

- $M_{50}$  - masa próbki po 2 dniach suszenia w temperaturze 50<sup>o</sup> C.

Stopień nasycenia po zwilgotnieniu górnej powierzchni (zwilgotnie nastąpiło po 24h):

$$y_3 = S_{R(24)} = \frac{M_f - M_{105}}{M_{TOT} - M_{105}}, [-] \quad (2.4)$$

gdzie:

$M_f$  - masa próbki po zwilgotnieniu górnej powierzchni.

Stopień nasycenia po zakończeniu podciągania kapilarnego:

$$y_4 = S_{E(kap)} = \frac{M_E - M_{105}}{M_{TOT} - M_{105}}, [-] \quad (2.5)$$

gdzie:

$M_E$  - masa próbki po zakończeniu nasycania kapilarnego.

Porowatość kapilarna:

$$y_5 = n_{kap} = \frac{M_E - M_{105}}{\rho_w V_E} \cdot 100, [\%] \quad (2.6)$$

Porowatość kompensacyjna

$$y_6 = n_{komp} = \frac{M_{TOT} - M_E}{\rho_w V_E} \cdot 100, [\%] \quad (2.7)$$

Gęstość:

$$y_7 = \rho_{105} = \frac{M_{105}}{V_E} \cdot \frac{100}{100-n}, [\text{kg/m}^3] \quad (2.8)$$

**Tablica 3. Wyniki badań**

Nr serii	$y_1$ [%]	$y_2$ [-]	$y_3$ [-]	$y_4$ [-]	$y_5$ [%]	$y_6$ [%]	$y_7$ [kg/m <sup>3</sup> ]
1	10,766	0,073	1,032	1,073	11,540	-0,772	2558,83
2	13,522	0,072	0,959	0,987	13,392	0,230	2631,51
3	19,857	0,094	1,142	1,179	11,577	-1,720	2472,10
4	10,780	0,064	1,033	1,079	11,559	-0,816	2520,63

5	17,332	0,041	0,921	0,963	16,690	0,632	2666,48
6	10,969	0,056	1,152	1,177	12,845	-1,905	2486,86
7	11,831	0,048	0,984	1,027	12,668	-0,310	2518,41
8	12,732	0,055	0,993	1,023	13,022	-0,528	2576,94
9	12,415	0,065	0,951	0,976	12,093	0,686	2614,56
10	11,279	0,049	1,126	1,164	13,282	-1,841	2428,64
11	19,199	0,077	1,112	1,147	10,562	-1,481	2500,30
12	11,744	0,071	1,021	1,041	12,777	-0,740	2577,06
13	8,936	0,077	1,171	1,204	10,701	-1,793	2432,66

### 3. Analiza wyników badań

W wyniku obróbki komputerowej uzyskanych wyników z badań (tabl. 3) otrzymano wielomiany stopnia drugiego i trzeciego przedstawione w tablicy 4.

**Tablica 4**

	Postać wielomianu
$y_1$ , [%]	$10,6051 + 1,0597X_2 + 0,7650X_1 + 0,4002X_1X_3 + 0,3342X_3^2 + 0,2668X_3 + 0,1713 X_1X_2 + 0,1951X_2^2 + 0,1261 X_2X_3$
$y_2$ , [-]	$- 0,0758X_2 + 0,0731 + 0,0406X_3 - 0,0349X_1 + 0,0212X_2^3 + - 0,0108X_1^3 + 0,0088X_3^2 - 0,0076X_1^2 + 0,0067X_1^3 + - 0,0071X_1X_2 - 0,0049X_2^2 + 0,0027X_1X_3$
$y_3$ , [-]	$1,0211 - 0,2451X_2 + 0,2261X_3 - 0,0899X_1 - 0,0675X_3^3 + + 0,0595X_2^3 - 0,0317X_1X_2 + 0,0261X_3^2 - 0,0146X_2^2 + + 0,0126X_1^3$
$y_4$ , [-]	$1,0604 - 0,2339X_2 + 0,1339X_3 + 0,0576X_2^3 - 0,0350X_3^3 + + 0,0373X_3^2 - 0,0175X_2^2 - 0,0168X_1X_2 - 0,01372X_1^2 + + 0,0089X_1X_2X_3$

$y_5$ , [%]	$11,5098 + 0,6418X_2 + 0,5406X_1 + 0,3148X_1X_3 + 0,2351X_3^2 + 0,2169X_1X_2 + 0,1486X_2^2 + 0,1173X_1X_2$
$y_6$ , [%]	$-11,0535X_2 - 5,3881X_1 + 3,2593X_2^2 + 2,1934X_3^2 + 4,4938X_3 + 1,3437X_1^3 - 1,2300X_1^2 + 1,1992X_1X_3 + -0,7435X_2^2 - 0,7288 - 1,1073X_3^3 - 0,6722X_1X_2$
$y_7$ , [kg/m <sup>3</sup> ]	$2562,30 + 152,33X_2 - 106,26X_3 + 46,62X_1 + 33,00X_3^3 + -31,28X_2^3 - 16,57X_3^2 + 17,13X_1X_2 - 5,61X_1^3 + 4,96X_2^2$

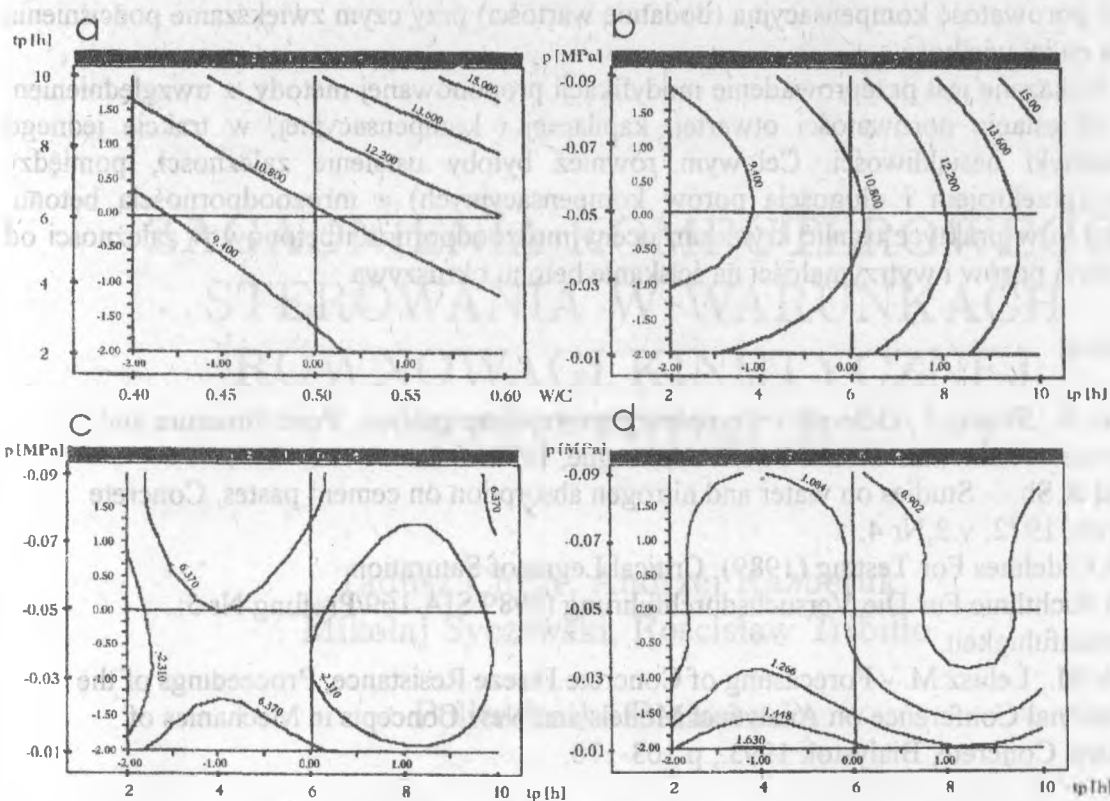
Oszacowanie wielomianów oraz analizę wpływu  $X_i$  na  $y_i$  zestawiono w tabelicy 5.

**Tabela 5. Wyniki aproksymacji danych doświadczalnych i wpływ  $X_i$  na  $y_i$ .**

Oszacowanie	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_4$	$y_5$	$y_6$	$y_7$
Stopień wielomianu, [-]	2	3	3	3	2	3	3
Błąd aproksymacji, [-]	0,4486	0,0542	2,0263	1,5909	0,1594	16,139	0,0704
Wariancja, [%]	3,853	0,842	1,937	1,473	1,274	15,595	0,278
Wskaźnik korelacji, [-]	0,9783	0,9994	0,9712	0,9824	0,9948	0,9894	0,9955
Wpływ poszczególnych paramertów:							
$X_1$ , [%]	21,198	9,832	19,443	17,077	1,431	19,987	18,026
$X_2$ , [%]	77,266	10,507	75,146	78,896	34,669	36,917	77,150
$X_3$ , [%]	1,536	79,661	5,411	4,082	63,900	43,096	48,250

Z przedstawionych na rys. 1a. zależności, wynika, że wraz ze wzrostem W/C zwiększa się wielkość całkowitej porowatości. W istotnym stopniu na jej wartość wpływa czas przebywania próbek w podciśnieniu (im jest on dłuższy, tym większą wartość całkowitej porowatości można uzyskać).

Niewielkie podciśnienie (od 0,00 do -0,05 MPa) praktycznie nie wpływa na zwiększenie ilości wody wchłoniętej przez beton (dla  $t_p < 10h$ ). Dopiero przy wartości poniżej -0,05 MPa daje się zauważyć wzrost wartości całkowitej porowatości przy takim samym  $t_p$  (rys. 1 b.).



Rys. 1. Wykres funkcji: a)  $n = f(W/C, t_p)$ ; b)  $n = f(t_p, P)$ ; c)  $M_{kap} = f(t_p, P)$ ; d)  $S_{E(kap)} = f(t_p, P)$

Analiza wykresu przedstawionego na rys. 1c. jednoznacznie wskazuje, że na wartość porowatości kompensacyjnej w największym stopniu wpływa czas przechowywania próbek w komorze próżniowej. Poddawanie próbek działaniu podciśnienia w bardzo krótkim czasie (do 3h) nie daje żadnych efektów, ponieważ ilość wody wchłonięta przez próbkę jest niższa niż podciągnięta kapilarnie. Najkorzystniejsze wyniki uzyskano przy wartości podciśnienia poniżej  $-0,05$  MPa, przy której udało się wyodrębnić porowatość kompensacyjną.

Najbardziej istotny wpływ na wielkość stopnia nasycenia  $S_{E(kap)}$  (Tabl. 1 d.) ma czas przebywania próbek w podciśnieniu (78,896%). Wcześniejsza analiza pozwoliła ustalić minimalne podciśnienie ( $-0,05$ MPa) oraz minimalny czas poddawania próbek działaniu próżni (3h). Po uwzględnieniu tych wartości, można zauważyć (rys. 1d.) przedział (od 7,5 do 9,5h), w którym stopień nasycenia po zakończeniu podciągania kapilarnego jest niewielki (około 0,9).

#### 4. Wnioski .

A. W oparciu o przeprowadzone badania na betonach o różnych składach ustalono optymalne wartości podciśnienia i czas jego działania do określania porowatości kompensacyjnej:

- wartość podciśnienia  $p = -0,05$  MPa,
- czas utrzymania podciśnienia  $t_p = 4$ h

B. Przechowywanie próbek betonowych w podciśnieniu, w czasie od 0 do 3 h powoduje, że ilość wchłoniętej wody przez próbkę jest mniejsza niż podciągnięta kapilarnie.

C. Poddawanie próbek działaniu podciśnienia w czasie do 3h, powoduje uzyskanie ujemnych wartości porowatości kompensacyjnej. Jest to związane z tym, że wysuszone w temperaturze  $50^{\circ}C$  próbki nie są w stanie wchłoniąć nawet takiej ilości wody, jaką podciągnęły kapilarnie. Natomiast przechowywanie próbek od 3 do 5h w podciśnieniu  $p = -0,05$ MPa pozwala

wyodrębnić porowatość kompensacyjną (dodatnie wartości) przy czym zwiększanie podciśnienia nie wpływa na jej wielkość.

D. Wskazane jest przeprowadzenie modyfikacji proponowanej metody, z uwzględnieniem kolejnego określania porowatości otwartej, kapilarnej i kompensacyjnej, w trakcie jednego badania kinetyki nasiąkliwości. Celowym również byłoby ustalenie zależności, pomiędzy gabarytami (przekrojem i długością porów kompensacyjnych) a mrozoodpornością betonu. Pozwoliłoby to w praktyce ustalić kryterium oceny mrozoodporności betonów w zależności od charakterystyki porów i wytrzymałości na ściskanie betonu i kruszywa .

#### Literatura:

- [1]. Brauner S., Skalny J., Odler J. - Complete porestructure analysis, Pore Structure and Properties of Materials. RILEM-JUPAC, Prague, 1973.
- [2]. Mikhail R.Sh. - Studies on water and nitrogen absorption on cement pastes. Concrete Research, 1972, v.2,Nr 4.
- [3]. EMPA Gidelines For Testing (1989): Critical Legreeof Saturation.
- [4]. EMPA Richtlinie Fur Die Versuchsdurchfuhrung (1989 SIA 169/Prufung Nr 5: Wasserleitfuhigkeit.
- [5]. Bołtryk M., Lelusz M. - Forecasting of Concrete Freeze Resistance, Proceedings of the International Conference on Analytical Models and New Concepts in Mechanics of Structural Concrete, Białystok 1993., p.163-170.

## AN ANALYSIS OF CONCRETE POROSITY BASED ON KINETICS OF CAPILLARY WATER ABSORBING

### SUMMARY

Presented method enables to evaluate the influence of concrete porous structure on concrete durability. This is a modified method of defining frost resistance based on kinetics of capillary water absorbing. Analysis of relation "camant-water ratio - time in which samples are under underpressure - size of underpressure".