

dr inż. Zofia Szweda<sup>1)</sup>  
ORCID: 0000-0001-5543-7494

# Analiza wartości współczynników dyfuzji i migracji w betonie prefabrykowanych płyt stropowych typu HC-500

## *Analysis of diffusion and migration coefficient values in prefabricated floor HC-500 slabs*

DOI: 10.15199/33.2019.07.05

**Streszczenie.** Celem pracy była analiza wyznaczonych wartości współczynnika dyfuzji i migracji chlorków z betonu pobranego bezpośrednio z prefabrykowanych płyt strunobetonowych typu HC-500. Do analizy wykorzystano wartości współczynników dyfuzji i migracji wyznaczone metodami normowymi oraz wg termodynamicznego modelu migracji. Rozważane współczynniki dyfuzji i migracji bardzo istotnie różnią się od siebie. Porównano wartości błędu średniokwadratowego między wartościami stężenia jonów chlorkowych wyznaczonymi na podstawie rozwiązania równania dyfuzji z zastosowaniem współczynników dyfuzji określonych różnymi metodami a wartościami pomierzonymi w badaniach dyfuzyjnych.

**Słowa kluczowe:** współczynnik dyfuzji; migracja chlorków; prefabrykowane płyty strunobetonowe.

**Abstract.** The aim of the work was analysis of the determined diffusion coefficient values and chlorides migration in concrete which was taken directly from prefabricated prestressed HC-500 slabs. Diffusion coefficient and migration values used in the analysis were determined in accordance with the norm and thermodynamic migration model. Said diffusion coefficient and migration coefficient are significantly different. Values of mean square error between values of chloride ions concentration and values determined by the diffusion research were compared. Chloride ions concentrations were determined based on the solution of diffusion equation with the use of diffusion coefficients determined with various methods.

**Keywords:** diffusion coefficient; chlorides migration; prefabricated prestressed slabs.

Obecnie istnieje wiele normowych metod wyznaczania zarówno współczynnika dyfuzji, jak i migracji [1, 3, 6, 7]. Różnice wartości współczynników i wynikają z niejednorodnych warunków badawczych i różnych rozwiązań teoretycznych opisujących procesy dyfuzji swobodnej i w polu elektrycznym – migracji. Niedoszacowane wartości współczynnika dyfuzji zastosowane w prognozowaniu numerycznym trwałości konstrukcji prowadzić mogą do błędnego określenia projektowanego czasu, w jakim może być bezpiecznie eksploatowana. Zagadnienie to jest bardzo istotne w przypadku obiektów wykonanych ze sprężonych płyt strunobetonowych [4].

W artykule skupiono się na analizie przydatności wartości współczynników dyfuzji i migracji wyznaczonych różnymi metodami opisanymi w [8, 9] oraz dodatkowo wg normy ASTM C 1760 [4] i korzystając z równania Nernsta-Einsteina [5] na podstawie wartości ładunku Q pomierzonego wg normy ASTM C 1202-97. Analizowano płyty HC-500 wykonane z betonu C50/60 o w/c = 0,31 z wyko-

rzystaniem cementu portlandzkiego CEM II 52,5 R, ze względu na możliwość zastosowania ich (odpowiednia nośność i rozpiętość 21 m) w obiektach narażonych na działanie jonów chlorkowych, takich jak garaże i parkingi. Płyty tego typu mają szerokość 1200 mm oraz długość 6,0 ÷ 21,0 m.

### Wyznaczanie współczynników dyfuzji i migracji różnymi metodami

Wszystkie elementy badawcze wycięto bezpośrednio z górnej powierzchni prefabrykowanych płyt strunobetonowych typu HC-500 za pomocą wiertnicy o ostrzu diamentowym. Otrzymano próbki walcowe średnicy 80 mm i wysokości 50 mm.

W artykule [9] opisano badania przeprowadzone wg norm NT BUILD 443 [6] i ASTM C 1556-03 [2]. Otrzymano wartość współczynnika  $D = 1,43 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ , dopasowując wykres stężenia chlorków otrzymany z obliczenia rozkładu stężenia jonów chlorkowych wg rozwiązania równania dyfuzji z wyznaczonymi w badaniach stężeniami tych jonów przy najmniejszej wartości błędu średniokwadratowego. Przedstawiono także badania wg normy ASTM C 1202-97 [1].

Określono wartość ładunku przepływającego przez próbkę  $Q = 361 \text{ C}$  i sklasyfikowano badany beton, jako odznaczający się bardzo małą przepuszczalnością. Na podstawie wyznaczonego ładunku można obliczyć wartość współczynnika dyfuzji, korzystając z równania Nernsta-Einsteina [5].

$$D = \frac{RT}{z^2 F^2} \frac{t_i}{C_i \gamma_i \rho_{BR}}, \quad \rho_{BR} = 100/\sigma, \quad \sigma = QL/VtA \quad (1)$$

gdzie:

$D$  – współczynnik dyfuzji [ $\text{m}^2/\text{s}$ ];  $R$  – uniwersalna stała gazowa [ $\text{J}/\text{Kmol}$ ];  $T$  – temperatura absolutna [ $\text{K}$ ];  $z$  – wartościowość jonu [-];  $t$  – czas [ $\text{s}$ ];  $F$  – stała Faradaya [ $\text{C}/\text{mol}$ ];  $t_i$  – liczba transportowa jonów chlorkowych [-];  $\gamma_i$  – aktywność jonów [-];  $C_i$  – stężenie jonów chlorkowych [ $\text{mol}/\text{m}^3$ ];  $\rho_{BR}$  – oporność objętościowa [ $\Omega\text{m}$ ];  $\sigma$  – przewodność [ $\Omega\text{m}^{-1}$ ];  $L$  – grubość próbki betonowej [ $\text{m}$ ];  $V$  – potencjał elektryczny [ $\text{V}$ ];  $A$  – pole przekroju poprzecznego próbki [ $\text{m}^2$ ].

Na podstawie wzoru (1) obliczono wartość współczynnika dyfuzji  $D = 20,7 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ . Kolejne badanie przeprowadzono wg normy NT BUILD 492 [7] i na podstawie określonej metodą kolorymetryczną głębokości wnicania jonów chlorkowych  $x_d = 10 \text{ mm}$  obliczono wartość współczynnika migracji (nazewnictwo normowe)  $D = 0,6 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ .

<sup>1)</sup> Politechnika Śląska; Wydział Budownictwa; zofia.szweda@polsl.pl

Zgodnie z zaleceniami normy ASTM C 1760 [3] zmierzono oporność betonu  $\rho_{BR} = 63,6 \text{ K}\Omega\text{cm}$  w próbce przechowywanej przed badaniami w nasyconej wodzie wapiennej. Wartość współczynnika migracji obliczonego wg wzoru (1) wynosi  $D = 8,12 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ .

Badania odporności betonu na wnikanie chlorków przeprowadzone wg termodynamicznego modelu migracji przedstawiono w [8, 9]. Na podstawie pomiarów rozkładu gęstości masy  $\rho^1$  jonów chlorkowych migrujących w betonie pod wpływem pola elektrycznego wyznaczono wartość współczynnika dyfuzji  $D = 0,72 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  [9].

### Analiza wyników i wnioski

Otrzymane wartości współczynników dyfuzji i migracji chlorków bardzo się różnią. W celu wyboru najbardziej właściwej wartości zamodelowano profile stężeniowe jonów chlorkowych z uwzględnieniem analizowanych współczynników i dopasowano je do wartości stężeń jonów chlorkowych na grubości badanych elementów (rysunek), otrzymanych w badaniach dyfuzyjnych trwających 60 i 120 dni. Określono błąd średniokwadratowy między stężeniami obliczonymi na podstawie rozwiązania równania dyfuzji z zastosowaniem analizowanych współczynników i wyznaczonymi doświadczalnie w badaniach naturalnej dyfuzji (tabela). Wartości doświadczalne stężenia jonów chlorkowych wyznaczono na podstawie badania trzech próbek jednocześnie po połączeniu materiału

badawczego z odpowiadających sobie warstw w celu uzyskania odpowiedniej ilości materiału do analizy chemicznej, a także uśrednienia badanego betonu.

Najmniejszą wartość błędu średniokwadratowego otrzymano, stosując współczynnik dyfuzji wyznaczony na podstawie termodynamicznego modelu migracji chlorków w przypadku badań dyfuzyjnych trwających 60 dni oraz wg normy NT BUILD 492 [7] przy badaniach trwających 120 dni. Następna w kolejności jest wartość obliczona z zastosowaniem współczynnika określonego wg normy NT BUILD 443 [6], która właściwie znajduje się w zakresie wartości ustalonych na podstawie modelu termodynamicznego z uwzględnieniem wpływu niestacjonarności procesu dyfuzji [8, 9]. W związku z tym, że badania prowadzone wg NT BUILD 443 [6] są najbardziej zbliżone do warunków rzeczywistych, metoda ta jest zalecana jako referencyjna. Przewagą metody wg termodynamicznego modelu migracji jest krótszy czas badania i możliwość zastosowania jej w różnego rodzaju betonach. Największy błąd otrzymuje się w przypadku zastosowania metody pomiaru rezystywności betonu oraz wg normy ASTM C 1760 [3], co można przypisać temu, że obie zostały opracowane na podstawie równania Nernsta-Einsteina, właściwego w roztworach elektrolitów. Natomiast dyfuzja jonów chlorkowych w betonie nie jest czystym

### Wartości błędu średniokwadratowego między stężeniem obliczonym i wyznaczonym doświadczalnie w badaniach naturalnej dyfuzji

Values of mean square error between calculated concentrations and experimentally determined in research on natural diffusion concentrations

Błąd średniokwadratowy	Współczynnik dyfuzji $D \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$				
	0,72 D(term)	0,6 D(NT492)	1,43 D(NT443)	8,12 D(Resist)	20,7 D(Q)
Błąd średniokwadratowy $s \cdot 10^{-2}$ , $t = 60$ dni	3,61	3,40	3,67	9,62	14,1
Błąd średniokwadratowy $s \cdot 10^{-2}$ , $t = 120$ dni	1,15	1,16	1,24	1,83	2,19

procesem ze względu na elektrostatyczne oddziaływanie z innymi jonami zawartymi w cieczy porowej, adsorpcję na powierzchni uwodnionych minerałów stwardniałego zaczynu cementowego oraz reakcję ze składnikami betonu.

### Literatura

[1] ASTM C 1202-97. Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration. American Society for Testing and Material, Philadelphia 1997.

[2] ASTM C 1556-03. Standard test method for determining the apparent chloride diffusion coefficient of cementitious mixtures by bulk diffusion, 2003.

[3] ASTM C 1760 Standard Test Method for Bulk Electrical Conductivity of Hardened Concrete.

[4] Czarnecki Lech, Piotr Woyciechowski. 2013. „Prediction of the reinforced concrete structure durability under the risk of carbonation and chloride aggression”. *Bulletin Of The Polish Academy of Sciences Technical Sciences*, Vol. 61, No. 1, DOI: 10.2478/bpasts-2013-0016.

[5] Konečný Petr, Petr Lehner, Tomasz Ponikiewski, Patrycja Miera. 2017. „Comparison of Chloride Diffusion Coefficient Evaluation Based on Electrochemical Methods”. *Procedia Eng.*, 190, pp. 193 – 198. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.326.

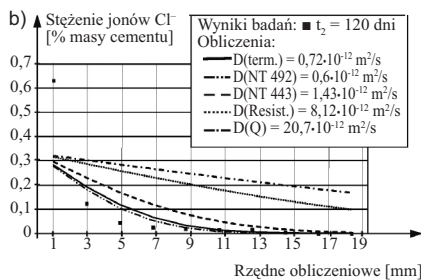
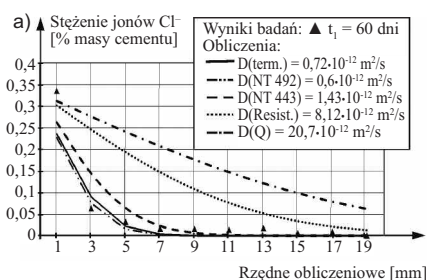
[6] NT BUILD 443. Concrete, hardened: Accelerated chloride penetration. Approved 1995–11.

[7] NT BUILD 492. Concrete, mortar and cement-based repair materials, chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments. Nordtest Method 492; 1999.

[8] Szweđa Zofia. 2018. „The analysis of the protective features of the concrete used in prefabricated prestressed concrete slabs (type HC) for the chlorides penetration”. *MATEC Web of Conf.*, vol. 163 2261-236X. DOI: 10.1051/mateconf/201816305006.

[9] Szweđa Zofia. 2018. „Comparison of diffusion and migration coefficients determined from tests on concrete in prestressed floor slabs HC-500”. 2019. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering* 471: 052034. DOI: 10.1088/1757-899X/471/5/0520341757-8981.

Przyjęto do druku: 30.05.2019 r.



Wartości stężenia jonów chlorkowych określone po badaniach dyfuzyjnych trwających: a) 2 miesiące; b) 4 miesiące oraz zamodelowane numerycznie z zastosowaniem współczynników dyfuzji wyznaczonych różnymi metodami

Values of chloride ions solution determined after diffusion research ongoing: a) two; b) four months and modeled numerically with use of diffusion coefficient values determined with different methods

Partner działu:

Stowarzyszenie Producentów Betonów

