

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

# Ocena metody prognozowania trwałości płyt stropowych typu HC-500 w warunkach zagrożenia agresją chlorkową

## *The evaluation of forecasting method concerning the durability of prefabricated floor HC-500 slabs in conditions of danger of chloride ions aggression*

DOI: 10.15199/33.2019.08.08

**Streszczenie.** Artykuł dotyczy oceny metody prognozowania trwałości płyt stropowych typu HC-500 w warunkach zagrożenia agresją chlorkową z uwzględnieniem wartości współczynnika dyfuzji chlorków z betonu pobranego bezpośrednio z płyt prefabrykowanych. Wykorzystano współczynnik dyfuzji wyznaczony na podstawie termodynamicznego modelu migracji i badań własnych oraz wartość współczynnika zalecaną wg norm wzorcowych fib Model-Code 2006 i fib Model-Code 2010 wyznaczoną na podstawie badania własnego wg normy NT BUILD 492.

**Słowa kluczowe:** współczynnik dyfuzji chlorków; prognozowanie trwałości płyt typu C-500.

**Abstract.** The article focus on the evaluation of forecasting method concerning the durability of prefabricated floor HC-500 slabs in conditions of danger of chloride ions aggression taking into consideration values of diffusion coefficient of concrete taken directly from prefabricated slabs. Diffusion coefficient obtained on the basis of thermodynamic migration model and own research and recommended by draft of norms fib Model-Code 2006 and fib Model-Code 2010 coefficient value obtained on the basis of own research in accordance with NT BUILD 492 were used.

**Keywords:** chloride diffusion coefficient; forecasting the durability of HC-500.

Wymagania dotyczące wytrzymałości i składu podane w normach PN-EN 206-1 [9], PN-EN 1992-1-1:2004 [8] oraz normach wzorcowych Model-Code [5, 6] odnoszą się do betonów zwykłych, betonów do elementów prefabrykowanych oraz wysokiej wytrzymałości. Do produkcji prefabrykowanych strunobetonowych płyt stropowych typu HC-500 stosowany jest beton o dużej wytrzymałości i małej dyfuzji chlorków [10, 11]. Wydaje się więc uzasadnione stosowanie tych samych wymagań, dotyczących grubości otuliny betonowej, przedstawionych w normie PN-EN 206-1 [9], które są słuszne w przypadku betonów zwykłych.

W artykule przeprowadzono próbę oceny metody prognozowania trwałości płyt stropowych typu HC-500 w warunkach zagrożenia agresją chlorkową wykonanych z betonu o nominalnej klasie C50/60 na cemencie CEM II 52,5 R o zawartości cementu 280 kg/m<sup>3</sup> i stosunku w/c = 0,31. Do prognozowania zastosowano współczynnik wyznaczony wg termodynamicznego modelu migracji oraz zalecaną przez Model-Code [5, 6] wyznaczoną wg normy NT BUILD 492 [7] wartość współczynnika migracji [10, 11].

### Prognozowanie trwałości strunobetonowej konstrukcji sprężonej

Zastosowano przedstawioną w normach wzorcowych Model-Code [5, 6] probabilistyczną metodę stanów granicznych prognozowania trwałości w betonie niezarysowanym wg zależności:

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

$$C_{\text{crit}} = C(x = a; t) = C_0 + (C_{S,\Delta x} - C_0) \cdot \left( 1 - \operatorname{erf} \frac{a - \Delta x}{2\sqrt{D_{\text{app},ct}}} \right) \quad (1)$$

gdzie:

$C_{\text{crit}}$  – stężenie krytyczne jonów  $\text{Cl}^-$ ;  $C(a, t)$  – stężenie jonów  $\text{Cl}^-$  w odległości  $x$  od krawędzi elementu;  $C_0$  – początkowe stężenie jonów  $\text{Cl}^-$  w betonie wynikające z zawartości jonów  $\text{Cl}^-$  w wodzie zarobowej i innych składnikach betonu;  $C_{S,\Delta x}$  – stężenie jonów  $\text{Cl}^-$  w odległości  $\Delta x$  od krawędzi elementu w pewnym czasie;  $a$  – grubość otulenia betonowego [mm];  $\Delta x$  – odległość od krawędzi betonu, do której wnikanie chlorków opisuje się prawem konwekcji;  $D_{\text{app},c}$  – pozorny współczynnik dyfuzji chlorków [mm<sup>2</sup>/rok].

Zazwyczaj współczynnik dyfuzji jest wyznaczany metodą „dopasowania krzywej” i jest uśrednioną wartością określoną w czasie wyznaczenia profilu stężenia chlorków w betonie w rzeczywistej konstrukcji lub w próbkach umieszczonych w warunkach zbliżonych do rzeczywistych. Metoda ta jest jednak bardzo czasochłonna. Z tego względu przeprowadzono setki badań próbek, pogrupowanych ze względu na skład, umieszczonych w różnych warunkach środowiskowych. Wyznaczono wartość współczynnika  $D_{\text{app},c}$  z wielu profili stężeniowych z uwzględnieniem wpływu temperatury otoczenia w badanym środowisku i odnosząc je do profili wyznaczanych w warunkach laboratoryjnych przy temperaturze  $T = 20^\circ\text{C}$ . W próbkach o tym samym składzie wyznaczono także wartość współczynnika  $D_{\text{RCM},0}$  na podstawie normy NT BUILD 492 [7].

Pozorny współczynnik dyfuzji  $D_{\text{app},c}$  wyznacza się na podstawie wzoru:

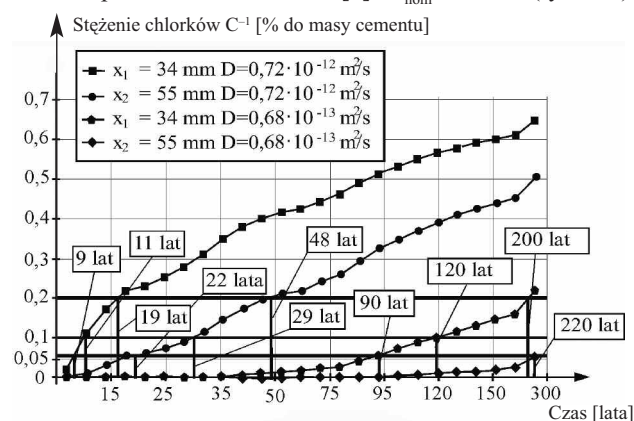
$$D_{\text{app},c} = k_e \cdot D_{\text{RCM},0} \cdot k_t \cdot A(t), \quad k_e = \exp[b_e(1/T_{\text{ref}} - 1/T_{\text{real}})], \quad A(t) = (t_0/t)^a \quad (2)$$

gdzie:

$k_s = -0,449$  współczynnik środowiskowy;  $b_1 = 5500$  – współczynnik regresji [K];  $T_{ref}$  – temperatura stosowana w warunkach laboratoryjnych [K];  $T_{real}$  – temperatura otoczenia eksploatowanej konstrukcji (w Polsce średnia roczna temperatura powietrza ok. 8°C) [K];  $D_{RCM,0}$  – współczynnik migracji chlorków wyznaczony na podstawie normy NT BUILD 492;  $k_1 = 1$  – współczynnik przeniesienia;  $A(t)$  – funkcja uwzględniająca efekt „starzenia”;  $a = 0,6$  – wykładnik starzenia;  $t_0$  – czas odniesienia (1 rok: próbki poddano badaniom po roku od wykonania płyt);  $t$  – czas trwałości projektowanej konstrukcji; przyjęto 10 lat z tego względu, że jak wykazano w [4], wartość współczynnika dyfuzji maleje z czasem najwałtowniej w początkowym czasie eksploatacji konstrukcji, natomiast po ok. 10 latach przyjmuje wartość stałą.

W [11] opisano badania przeprowadzone wg normy NT BUILD 492 na próbkach wyciętych bezpośrednio z płyt typu HC-500 i na podstawie głębokości wnikania jonów chlorkowych, określonej metodą kolorymetryczną, obliczono wartość współczynnika migracji  $D_{RCM,0} = 0,6 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ . Uwzględniając tę wartość i wzory (2), przeliczono go na pozorny współczynnik dyfuzji  $D_{app,C} = 0,68 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ . Natomiast w [10] przedstawiono badania własne i wyznaczono wartość współczynnika dyfuzji  $D = 0,7 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ , a w [12] przeanalizowano otrzymane różnymi metodami wartości współczynników dyfuzji.

Krytyczne stężenie jonów chlorkowych przyjęto wg normy PN-EN 1992-1-1:2004 [8] i BS 8110: Part 1: 1997 [3] oraz wg ACI 318M-02/318RM02 [1]. W obliczeniach założono zastosowane w płytach otulenie betonowe  $c_{nom} = 34 \text{ mm}$  cięgien dolnych  $\varnothing 12,5$  wykonanych ze stali Y1860 oraz zalecane przez PN-EN 1992-1-1 [8] –  $c_{nom} = 55 \text{ mm}$  (rysunek).



**Przyrost stężenia jonów chlorkowych przy powierzchni strun sprężających (otulina 34 i 55 mm)**

*Time – dependent changes of chloride concentration in concrete-steel contact zone for three different thicknesses (35, 55 mm) of concrete coatings of steel prestressing tendons*

Obliczenia zmiany stężenia chlorków w miejscu styku zbrojenia z betonem otuliny wykonano wg równania (1), przyjmując zgodnie z Model-Code 2006 [5]  $\Delta x = 0$ . Stężenie na brzegu elementu rośnie w pierwszych 10 latach eksploatacji konstrukcji do pewnej wartości, a następnie pozostaje stałe [2, 4]. Do obliczeń przyjęto uśrednione stężenie chlorków  $C_{s,\Delta x} = (0+1,8)/2 = 0,9\%$  masy cementu (1,8%: maksymalna wartość uzyskana w badaniach przeprowadzonych wg normy

NT BUILD 492 [4]). Przyrównując stężenie do wartości krytycznej, wyznaczono czas, po upływie którego występuje zagrożenie korozją cięgien sprężających (rysunek).

## Wnioski

Stosując w równaniu (1) współczynnik dyfuzji  $D = 0,7 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  można stwierdzić, że do zagrożenia korozyjnego cięgien dolnych dojdzie po 19 latach eksploatacji konstrukcji w przypadku grubości otulenia 34 mm. Zastosowanie wymaganej przez PN-EN 1992-1-1 [8] minimalnej grubości otulenia cięgien dolnych, w klasie konstrukcji S4 i klasie ekspozycji XD3, wynoszącej 55 mm pozwoliłoby na uniknięcie zagrożenia korozyjnego przez 48 lat. W przypadku zastosowania w równaniu (1) współczynnika  $D_{app,C} = 0,68 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$  otrzymujemy skrajnie odmienny wynik. Zakładając wartość graniczną stężenia chlorków  $C_{crit} = 0,06$  przy otuleniu 34 mm, do zagrożenia korozją może dojść dopiero po dziewięćdziesięciu latach eksploatacji konstrukcji (rysunek). Tak duża rozbieżność wyników sugeruje, że metody zalecane przez Model-Code 2006 [5] wymagają dopracowania na podstawie wielu badań szczególnie przy prognozowaniu konstrukcji strunobetonowych.

## Literatura

- [1] ACI 318M-02/318RM02 (Metric Version) Building code requirements for structural concrete (ACI 318M-02) and commentary (ACI 318RM-02) American Concrete Institute, Farmington Hills. (2002).
- [2] Aruz Petcherdchoo. 2013. „Time dependent models of apparent diffusion coefficient and surface chloride for chloride transport in fly ash concrete.”, *Construction and Building Materials* 38, 497 – 507 10.1016/j.conbuildmat.2012.08.041.
- [3] BS 8110: Part 1: 1997 (Amendment No. 1: 1998) Structural use of concrete. British Standard Institution, September (1998).
- [4] Lingjie Wu, Wei Li, Xiaoniu Yu 2017. „Time-dependent chloride penetration in concrete in marine environments”. *Construction and Building Materials* 152 (2017) 406–413. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.016.
- [5] Model Code for Service Life Design, CEB FIB, February 2006 (fib – Bulletin 34).
- [6] Model Code, CEB FIB, February 2010 (fib – Bulletin 56).
- [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] PN-EN 1992-1-1 Eurokod 2 – Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings.
- [9] PN-EN 206-1:2014 Beton. Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.
- [10] Szweda Zofia. 2018. „The analysis of the protective features of the concrete used in prefabricated prestressed concrete slabs (type HC) for the chloride penetration.” *MATEC Web of Conf.*, vol. 163 2261-236X. doi.org/10.1051/mateconf/201816305006.
- [11] Szweda 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/471/5/052034/1757-8981.
- [12] Szweda Zofia. 2019. „Analiza wartości współczynników dyfuzji w betonie płyt stropowych typu HC-500”. *Materiały Budowlane* 563 (7): 34 ÷ 35. DOI: 10.15199/33.2019.07.05.

Przyjęto do druku: 24.07.2019 r.

Partner działu:

Stowarzyszenie Producentów Betonów

