

dr inż. Zofia Szweda<sup>1)\*</sup>  
dr hab. inż. Radosław Jasiński, prof. PŚ<sup>1)</sup>

# Propozycja predykcji czasu użytkowania płyt stropowych typu HC-500 narażonych na działanie jonów chlorkowych

*The proposal prediction time use of floor HC-500 slabs exposed to chloride ions*

DOI: 10.15199/33.2019.11.02

**Streszczenie.** W artykule zaprezentowano analizę statyczną płyt stropowych typu HC-500 w warunkach zagrożenia agresją chlorkową z uwzględnieniem utraty przyczepności i zmniejszenia przekroju czynnego cięgien spowodowanych postępującą korozją wżerową. Wykorzystano współczynnik dyfuzji wyznaczony na podstawie termodynamicznego modelu migracji i badań własnych. Wpływ agresji chlorkowej uwzględniono, dokonując adaptacji znanych z konstrukcji żelbetowych zależności opisujących ubytek średnicy zbrojenia. Wykorzystując zalecenia EC-2, uwzględniono zmianę przyczepności cięgien, a w efekcie zmianę siły sprężającej w przekroju. Obliczono czas, po którym można spodziewać się całkowitej utraty przyczepności oraz wzrostu naprężeń spowodowanego zmniejszeniem pola przekroju.

**Słowa kluczowe:** konstrukcje sprężone; płyty stropowe HC; oddziaływanie jonów chlorkowych.

**Abstract.** The aim of the work was 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. The influence of chloride aggression was taken into account when making adaptations known from reinforced concrete structures describing the reinforcement diameter loss, using EC-2 recommendations, changes in the adhesion of the tendons and, as a result, changes in the prestressing force in the cross-section were taken into account. The time after which total loss of adhesion and an increase in stress due to a decrease in cross-sectional area can be expected was calculated.

**Keywords:** prestressed structures; floor slabs HC type; influence of chloride ions.

Na podstawie wyników badań przedstawionych w pracach [7, 8, 9, 10] dotyczących płyt HC nie ma możliwości nawet orientacyjnej predykcji czasu bezpiecznego użytkowania. Z tego powodu przeprowadzono analizę statyczną z uwzględnieniem zmiany przyczepności cięgien do betonu oraz przekroju czynnego cięgien pod wpływem korozji wżerowej wywołanej przez jony chlorkowe. Ze względu na brak badań dokonano adaptacji znanych w literaturze empirycznych zależności opisujących zmianę pola powierzchni zbrojenia w konstrukcjach żelbetowych oraz naprężeń przyczepności. Wykorzystując zapisy EC-2 [4], dokonano stosowanej modyfikacji wykorzystanych zależności. W konstrukcjach strunobetonowych przyczep-

ność cięgien do betonu ma szczególne znaczenie [1]. Podczas projektowania zakłada się, że obliczeniowe naprężenia na pobocznicę cięgien sprężających są mniejsze od obliczeniowej wytrzymałości  $\tau_p \leq f_{bpt}$ . Z oczywistych względów sprawdzeniu podlega strefa zakotwienia cięgien sprężających, ale w przekrojach miarodajnych z uwagi na zginanie zakłada się, że przyczepność będzie zapewniona [1]. Chcąc wyjaśnić wpływ zmiany naprężeń przyczepności, przeprowadzono symulację obliczeniową płyty HC-500 o konstrukcji pokazanej na rysunku 1.

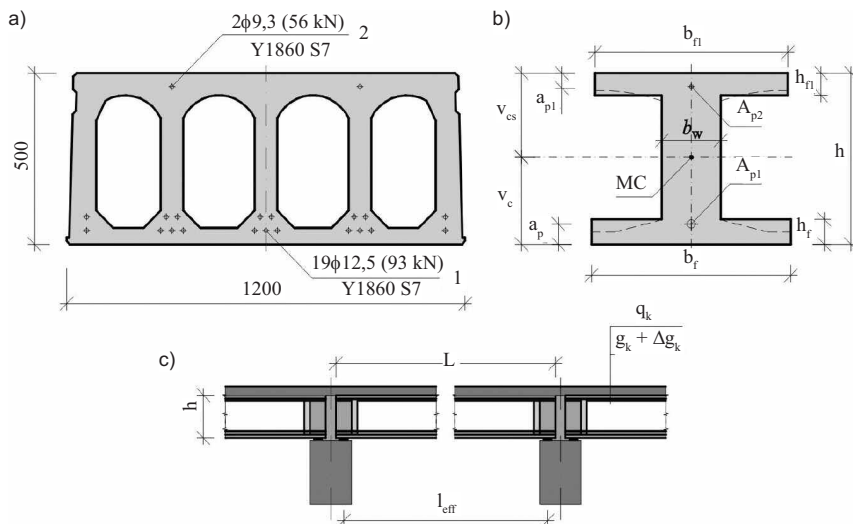
## Analiza statyczna płyty stropowej HC-500

Przyjęto w obliczeniach, że całkowita długość płyty wynosi  $L = 13$  m, a rozpiętość teoretyczna  $l_{eff} = 12,85$  m. Oprócz ciężaru własnego płyty ( $g_k = 7,34$  kN/m) założono dodatkowe obciążenie stałe

wynikające z ciężaru nadbetonu oraz warstw podłogi ( $\Delta g_k = 5,11$  kN/m), a także obciążenie zmienne w typowym obiekcie parkingowym ( $q_k = 6,00$  kN/m). W środkowych żebrach płyty zastosowano 19 siedmiosplotowych cięgien sprężających o nominalnej średnicy 12,5 mm ze stali Y 1860, 2 klasy relaksacji. Z kolei w górnych częściach żeber, zbrojenie sprężające składało się z dwóch siedmiosplotowych cięgien o nominalnej średnicy 9,3 mm ze stali tego samego znaku. Płyty wykonano na torze naciągowym o długości 100 m i pielęgnowano przez 2 dni. Sprężenie sumaryczną siłą w cięgnach dolnych  $P1 = 19 \times 93 = 1767$  kN i górnych  $P2 = 2 \times 51 = 102$  kN nastąpiło po siedmiu dniach. Na właściwości użytkowe sprężonych elementów mają wpływ właściwości betonu oraz zmiana wartości siły sprężającej w czasie i ewentualne ubytki korozyjne stali.

<sup>1)</sup> Politechnika Śląska; Wydział Budownictwa

<sup>\*</sup> Adres do korespondencji:  
zofia.szweda@polsl.pl



Rys. 1. Geometria płyty przyjęta w obliczeniach: a) przekrój poprzeczny; b) przekrój obliczeniowy; c) przekrój podłużny

Fig. 1. Geometry of the slab applied in the calculations: a) cross section; b) design section; c) longitudinal section

Na podstawie badań własnych oddziaływania jonów Cl<sup>-</sup>, przedstawionych w pracach [7, 8, 9, 10], wykazano punktowe i wżerowe efekty korozji w strunach, a w badaniach [2] potwierdzono wyraźny wpływ oddziaływania środowiska agresywnego na naprężenia przyczepności strun do betonu. W celu oszacowania wpływu oddziaływania jonów Cl<sup>-</sup> przyjęto następujące założenia:

a) wpływ działania środowiska agresywnego nastąpi po czasie t<sub>ini.cor</sub>, który spowoduje, że głębokość wnikania jonów chlorkowych obejmie swoim zasięgiem otulinę cięgień sprężających, a następnie całą grupę cięgień po czasie t<sub>n</sub>;

b) naprężenia przyczepności (analogicznie jak w konstrukcjach żelbetowych [6]) ulegną zmianie w czasie zgodnie z równaniem (1):

$$f_{bpt} = \left( 0,75 - 5,4 \frac{\Delta\phi_n}{\phi_0} \right) \sqrt{f_c'} \quad (1)$$

gdzie:

$\Delta\phi_n$  – ubytek zastępczej średnicy pręta wywołany korozją wżerową;  
 $\phi_0$  – początkowa średnica pręta (ciągną);  
 $f_c'$  – wytrzymałość na ściskanie betonu określana na walcach 150 x 300 mm po 28 dniach dojrzewania.

c) zmniejszenie przyczepności betonu do cięgień spowoduje zmniejszenie siły w cięgnach, co uwzględnione zostanie jako dodatkowa strata opóźniona  $\Delta P_{cor}$  (rysunek 2);

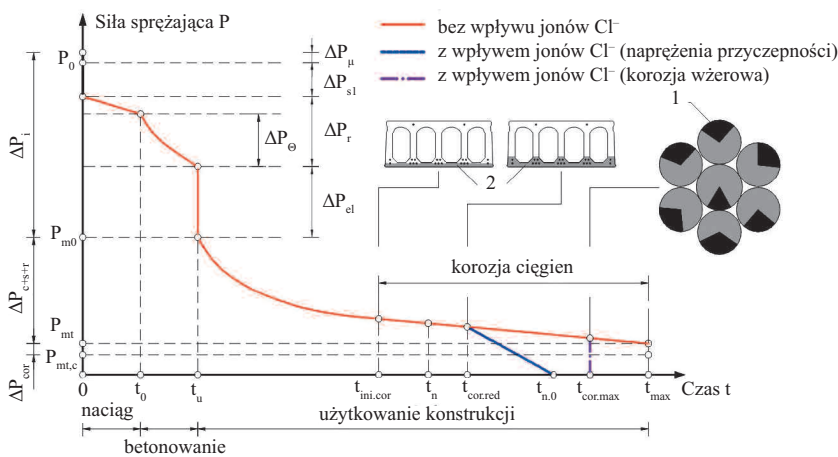
d) na skutek korozji ulegnie zmniejszeniu pole powierzchni cięgień sprężających (rysunek 3). W efekcie nie zmniejszy się siła sprężająca, ale wzrosną naprężenia rozciągające w przekrojach osłabionych wżerami.

Do obliczania składnika strat siły sprężającej  $\Delta P_{cor}$  przyjęto czas inicjacji korozji t<sub>ini.cor</sub> = 22 lata [5]. Naprężenia przyczepności po czasie t < t<sub>ini.cor</sub> są równe (wg wzoru 8.15 w EC-2 [4]):

$$f_{bpt}(t \leq t_{ini.cor}) = \eta_{p1} \eta_1 f_{ctd}(t) \quad (2)$$

z kolei po czasie inicjacji korozji wyraża je wzór:

$$f_{bpt}(t > t_{ini.cor}) = \sqrt{f_c'} \left( 0,75 - 5,4 \frac{\alpha \eta V_{corr}(t)}{100 \phi_0} \right) \quad (3)$$



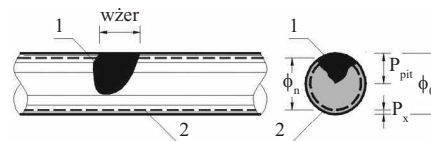
Rys. 2. Straty sprężania w elementach strunobetonowych z uwzględnieniem efektów korozji: 1 – wżer korozyjny w pojedynczej strunie; 2 – zasięg wnikania jonów chlorkowych

Fig. 2. Compression force losses in prestressed concrete elements, including corrosion effects: 1 – corrosion pitting in a single string; 2 – chloride ion penetration range

gdzie:

$\eta_{p1} = 3,2$  – sploty siedmiodrutowe;  
 $\eta_1 = 1,0$  – dobre warunki przyczepności;  
 $\phi_0$  – początkowa średnica ciągną [mm];  
 t – czas [lata];  
 $\alpha = 3 \div 15$  (przyjęto  $\alpha = 3$ ) związek między korozją jednorodną P<sub>0</sub> a maksymalną głębokością wżeru P<sub>pit</sub>;  
 $\eta = 1,73 \div 2,87$  (przyjęto  $\eta = 1,73$ ) współczynnik zależny od intensywności korozji;  
 $V_{corr}$  – ubytek średnicy pręta na rok (30 μm/rok w przypadku klas ekspozycji XD2 i XD3 wg PN-EN 206 [5]).

Spadek siły sprężającej wystąpi dopiero wtedy, gdy naprężenia styczne na pobocznicach cięgień sprężających będą większe od naprężeń przyczepności określonych równaniem (2), co nastąpi po czasie t<sub>cor,red</sub>. Czas ten powinien być większy od czasu t<sub>n</sub>, w którym jony chlorkowe obejmą całą grupę cięgień. Ze względu na brak stosownych badań domniemywać można, że spadek siły sprężającej może odbywać się wg dwóch mechanizmów. Pierwszy – gwałtowny będzie miał miejsce, jeżeli utrata przyczepności wystąpi na całej pobocznicie wszystkich cięgień jednocześnie. Drugi bardziej prawdopodobny wystąpi, jeżeli



Rys. 3. Punktowa i równoważna korozja równomierna pręta stalowego spowodowana wżerem o głębokości P<sub>pit</sub> [3]: 1 – miejsce korozji wżerowej; 2 – równoważna korozja równomierna

Fig. 3. Localized or uniform corrosion equivalent to a localized corrosion showing a single pit with a corrosion depth of P<sub>pit</sub> [3]: 1 – localized corrosion; 2 – equivalent uniform corrosion

korozja obejmować będzie swoim zasięgiem kolejne ciągną. Wtedy spadek siły sprężającej, spowodowany utratą przyczepności, można uzależnić od czasu, w którym następuje degradacja naprężeń przyczepności wg wzoru:

$$\Delta P_{cor}(t > t_{cor,red}) = 4\tau_p(t) \sum_i \frac{A_{\phi 0i}}{\phi_{0i}} \cdot L \quad (4)$$

Spadek naprężeń przyczepności  $\tau_p$  wystąpi w czasie od  $t_{cor,red}$  do  $t_{n,0}$ . Składnik związany ze zmniejszeniem pola powierzchni cięgien sprężających wywołanym korozją wżerową można zastąpić równomierną zmianą średnicy pręta stosowaną w stali zwykłej. W tym wypadku zmianę pola powierzchni cięgną można zapisać w postaci:

$$\Delta A_{p,cor}(t > t_{ini,cor}) = \frac{\pi \phi_0^2 (1 - 8,61 \cdot 10^{-3} t)^2}{4} \quad (5)$$

Po pewnym czasie  $t > t_{cor,max}$  naprężenia w cięgnach mogą osiągnąć obliczeniową granicę plastyczności  $f_{pd}$ . Po przekształceniu ogólnej zależności podanej w pkt 5.10.3 normy [4] można zapisać wzór:

$$\frac{P_{m0} - \Delta P_{c+s+r}(t > t_{ini,cor}) - \Delta P_{cor}(t > t_{cor,red})}{A_p - \Delta A_{p,cor}(t > t_{ini,cor})} = f_{pd} \quad (6)$$

gdzie:

$P_{m0}$  – początkowa siła sprężająca przyłożona do betonu po naciągu i zakotwieniu;  
 $\Delta P_{c+s+r}(t > t_{ini,cor})$  – opóźnione straty siły sprężającej;  
 $A_p$  – pole powierzchni cięgien sprężających.

W tym przypadku zmiana pola powierzchni cięgną nie powoduje spadku sił przyczepności, lecz wzrost naprężeń w cięgnach. Mając to na uwadze, wykonano symulację zmiany wartości sił sprężających w czasie z pominięciem i z uwzględnieniem wpływu wnikania jonów  $Cl^-$  (tabela). Jako porównawczy czas przyjęto planowany okres użytkowania konstrukcji  $t_{cor,red}$  obliczony wg wzoru (6). Standardowy czas użytkowania płyt wynosi 50 lat.

Czas, po którym następowala inicjacja korozji w cięgnach, był równy  $t_{ini,cor}$  i wyniósł 22 lata, a czas, po którym cała grupa dolnych cięgien została objęta

## Wyniki obliczeń

### Calculated results

| Warunki środowiska | $P_0$ [kN] | $t_0$ [dzień] | $t_{n,0}$ [dzień] | $P_{m0}$ [kN] | $t_{ini,cor}$ [rok] | $t_n$ [rok] | $t_{cor,red}$ [rok] | $t_{n,0}$ [rok] | $t_{cor,max}$ [rok] | $\Delta P_{cor}$ [kN/r] | $P_{mt}$ [kN]          |
|--------------------|------------|---------------|-------------------|---------------|---------------------|-------------|---------------------|-----------------|---------------------|-------------------------|------------------------|
| Bez wpływu $Cl^-$  | 1879       | 2             | 7                 | 1685          | –                   | –           | –                   | –               | –                   | –                       | 1544,1<br>$t = 50$ lat |
| Z wpływem $Cl^-$   |            |               |                   |               | 22                  | 28          | 38,8                | 39,2            | 90                  | 139,5                   | –                      |

jonami chlorkowymi  $t_n = 28$  lat. Od tej chwili redukcji ulegały naprężenia przyczepności  $\tau_p$ . W czasie  $t_{cor,red} = 38,8$  lat naprężenia przyczepności osiągnęły wartość obliczeniowych naprężeń przyczepności  $f_{bpt}$ , co zainicjowało powstanie straty siły sprężającej  $\Delta P_{cor} = 139,5$  kN/r. Czas, po którym siła sprężająca spadła do zera, powodując zniszczenie elementu (nawet od ciężaru własnego), wyniósł  $t_{n,0} = 39,2$  lat. Trwająca od czasu  $t_{ini,cor}$  korozja zbrojenia wywołała zmniejszenie pola powierzchni cięgien sprężających, a siła sprężająca – osiągnięcie obliczeniowej granicy plastyczności cięgien  $f_{pd}$ , które wystąpiło w czasie  $t_{cor,max} = 90$  lat.

## Wnioski

Analiza statyczna wpływu działania jonów chlorkowych wykazała, że może nastąpić utrata siły sprężającej, a w konsekwencji powstanie zwiększone ugięcie i zarysowanie. Drugi, mniej przewidywalny mechanizm, spowodowany korozją wżerową, może powodować gwałtowny wzrost naprężeń w cięgnach, prowadząc do złamania płyty bez uprzedniego ostrzeżenia.

Na podstawie empirycznych zależności, wyrażających relację między naprężeniami przyczepności a ubytkiem pola powierzchni cięgien, ustalono bezpieczny czas pracy  $t_{cor,red} = 38,8$  lat. Wyznaczony czas pracy, uwzględniający działanie jonów chlorkowych, był znacznie krótszy niż pięćdziesięcioletni okres użytkowania przyjęty w założeniach projektowych. Wstępna analiza wykazała, że znane empiryczne zależności, bezpośrednio adaptowane do konstrukcji sprężonych, muszą zostać zweryfikowane. Konieczne jest przede wszystkim znalezienie wiarygodnej za-

leżności między siłami przyczepności cięgien do betonu a stężeniem jonów  $Cl^-$ . Niezbędne jest także sformułowanie szczegółowego opisu strat sprężania, nie tylko wymienioną utratą siły przyczepności, ale także zmianą modułu sprężystości i pęczania betonu oraz powstawaniem produktów korozji.

## Literatura

- [1] Ajdukiewicz A., J. Mames. 2004. *Konstrukcje z betonu sprężonego*. Polski Cement.
- [2] Fumin Li, Y. Yuan, Ch. Q. Li. 2011. „Corrosion propagation of prestressing steel strands in concrete subject to chloride attack”. *Constr. Build. Mater.* 25: 3878 – 3885. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.08.008.
- [3] Martinez I., C. Andrade. 2009. „Examples of reinforcement corrosion monitoring by embedded sensors in concrete structures”. *Cement & Concrete Composites*, 31: 545 – 554.
- [4] PN-EN 1992-1-1:2010 Eurokod 2. Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.
- [5] PN-EN 206+A1:2016-12 Beton. Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.
- [6] Stanish K., R. D. Hooton, S. J. Pantazopoulou. 1999. „Corrosion Effects on Bond Strength in Reinforced Concrete”. *ACI Structural Journal*: 915 – 922.
- [7] Szweida 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.org/10.1051/mateconf/201816305006.
- [8] Szweida 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.
- [9] Szweida Zofia. 2019. „Analiza wartości współczynników dyfuzji w betonie płyt stropowych typu HC-500”. *Materiały Budowlane* 7 (563): 34 ÷ 35. DOI: 10.15199/33.2019.07.05.
- [10] Szweida Zofia. 2019. „Ocena metody prognozowania trwałości płyt stropowych typu HC-500 w warunkach zagrożenia agresją chlorkową”. *Materiały Budowlane* 8 (564): 56 ÷ 57. DOI: 10.15199/33.2019.08.08. *Autorzy dziękują firmie Fabud S.A. za udostępnienie modeli płyt oraz pomoc merytoryczną w realizacji badań.*  
*Przyjęto do druku: 03.10.2019 r.*

Partner działu:

Stowarzyszenie Producentów Betonów

