

STANOVENÍ POVRCHOVÉ KONCENTRACE CHLORIDŮ SPOJENÍM LABORATORNÍCH ZKOUŠEK A ANALYTICKÉHO MODELU ■ SURFACE CHLORIDE CONCENTRATION ASSESSMENT BY JOINT LABORATORY TESTING AND ANALYTICAL MODEL

Pavla Rovnaníková, Břetislav Teplý

Vzhledem k obtížím při přímém měření koncentrace chloridů působících na povrchu betonové konstrukce vystavené působení posypových solí je navrženo náhradní řešení pro stanovení povrchové koncentrace chloridů kombinací jednorázových laboratorních zkoušek a výpočtového modelu 1D. ■ Due to difficulties in direct measuring of the chloride surface concentration on concrete structures exposed to de-icing salts combination of the inverse 1D model and laboratory testing is suggested.

KOROZE VÝZTUŽE A PŮSOBENÍ CHLORIDŮ

Za nejčastější příčinu degradace železobetonových konstrukcí je považována koroze ocelové výztuže. Za běžných podmínek se v pórovém roztočku v betonu vytváří zásadité prostředí, kdy vzniká na povrchu výztuže tenká a dobře přilnavá vrstvička oxidů železa (tloušťky asi 10 nm), která působí jako ochranná (pasivační vrstva), zabraňující přímému kontaktu kyslíku, vody i jiných agresivních látek s povrchem výztuže, tj. brání vzniku koroze – viz např. [1].

K narušení této pasivační vrstvy, k tzv. depasivaci výztuže, dochází vlivem reakce agresivních látek z okolí s hydroxidem vápenatým, zejména karbonátací betonu. Výrazné poškození ochranné vrstvy na výztuži v betonu způsobují také chloridy. Difúze chloridových iontů v betonu je obvykle výrazně rychlejší než postup karbonatice; v dalším bude proto věnována pozornost jen sledování vlivu chloridů. Přítomnost chloridů v betonové konstrukci je způsobena:

- chemickými rozmrazovacími látkami (údržba komunikací),
- mořskou vodou (přímé působení či aerosolové působení v pobřežních či přímořských lokalitách),
- v záměsové vodě při výrobě betonu (přípustné množství chloridů je uvedeno v ČSN EN 1008),
- chloridy v některých chemických provezech.

V našich podmínkách je běžný první případ, vyskytující se u dopravních staveb, resp. parkovišť, garáží a podob-

ných objektů, kam se sůl může dostat na pneumatikách vozidel.

Chloridové ionty difundují do pórového systému betonu, s časem jsou chloridy ve větší hloubce a postupně se jejich koncentrace zvyšuje. Dosáhne-li koncentrace chloridů v okolí výztuže kritické hodnoty C_{cr} , následkem je výše zmíněná depasivace ocelové výztuže. Tento děj je tzv. **iniciační stadium**. V dalším období, za přítomnosti kyslíku a vlhkosti začne docházet ke korozi ocelové výztuže. Vznikající korozní produkty mají několikanásobně větší objem než původní kov, a to způsobuje vznik trhlin v betonu, ke změnám v soudržnosti oceli s betonem a současně i k zmenšení efektivní plochy výztuže s možnými důsledky pro tuhost, únosnost a životnost konstrukce.

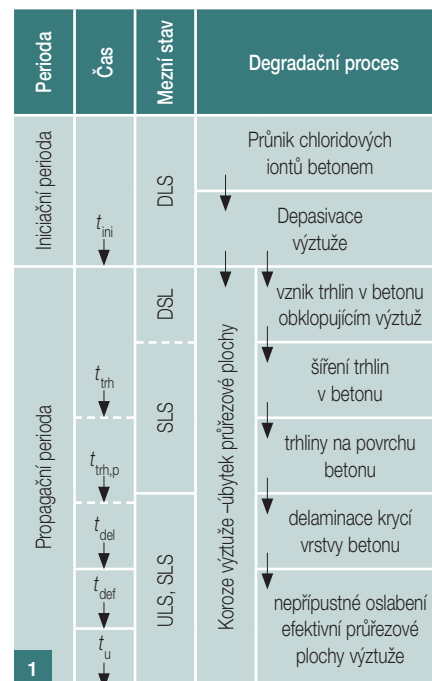
Pravděpodobnostní hodnocení iniciačního stadia může být popsáno podmínkou ve tvaru

$$P_f(t_D) = P\{C_{cr} - C_a(t_D) < 0\} < P_d, \quad (1)$$

kde P_f je pravděpodobnost poruchy ve smyslu dosažení kritické koncentrace chloridů C_{cr} v místě výztuže. Ve vztahu (1) je C_a koncentrace chloridů v hloubce krycí vrstvy a , dosažená v čase t_D .

Existuje řada druhů koroze kovů, na výztuži obecně rozeznáváme korozi rovnoměrnou a důlkovou. U rovnoměrné koroze se předpokládá, že dochází k rotačně symetrickému úbytku ocelové výztuže. V případě důlkové koroze je ovlivněna sice jen malá plocha povrchu výztuže, ale dochází během ní k podstatnému snížení efektivní plochy výztuže v zasaženém místě. Průřez má pak spíše křehké chování, což může vést k náhlému porušení konstrukce [2]. Tato koroze probíhá zejména v přítomnosti chloridů a náhylná k ní jsou místa lokálních poškození povrchu výztuže (poškození transportem, montáží apod.).

Období, během kterého probíhá koroze výztuže, se nazývá **propagační periodou**; její pravděpodobnostní hodnocení může být popsáno několika typy podmínek podle toho, zda posuzujeme vznik trhlin, šířku trhlin, úbytek efektivní plochy výztuže, nebo spolupůsobení oceli s betonem.



Obr. 1 Působení chloridů (posypových solí) na železobetonovou konstrukci

■ Fig. 1 Effect of chlorides (de-icing salts) on concrete structure

Působení chloridů na železobetonovou konstrukci je znázorněno na obr. 1. Na časové ose jsou vyznačeny jednotlivé fáze včetně příslušných mezních stavů, kde DLS (Durability Limit State) značí mezní stav trvanlivosti, SLS (Serviceability LS) mezní stav použitelnosti a ULS (Ultimate LS) mezní stav únosnosti (DLS formálně spadají do kategorie SLS). Přitom t_{ini} je iniciační čas, t_{trh} čas do vzniku trhlin, $t_{trh,p}$ čas do vzniku nepřijatelné trhliny na povrchu betonu, t_{del} čas do delaminace (odpadávání částí krycí vrstvy), t_{def} čas do dosažení mezních deformací (např. průhybů) a t_u čas do dosažení meze únosnosti (průřezu, prvku, konstrukce).

Ke schématu na obr. 1 se váží následující inženýrské činnosti:

- 1 Prohlídka, inspekce konstrukce.
- 2 Sběr dat, předběžná měření.
- 3 Odběr vzorků.
- 4 Laboratorní rozbor analyza koncentrace chloridů, stanovení pH.
- 5 Stanovení oblastí s dosažením kritické hodnoty koncentrace chloridů (depasivace výztuže).



2



3



4

Literatura:

[1] Vořechovská D., Chromá M., Podroužek J., Rovnaníková P. and Teplý B.: Modelling of Chloride Concentration Effect on Reinforcement Corrosion, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 24, 2009, 446–458

[2] Duprat F.: Reliability of RC beams under chloride-ingress. *Construction and Building Materials*, 21, 2007, 1605–1616

[3] Collepardi M., Marcialis A., Turriziani R.: Penetration of chloride ions into cement pastes and concrete. *J. Am. Ceram. Soc.*, 1972, 55, 10, 534–535

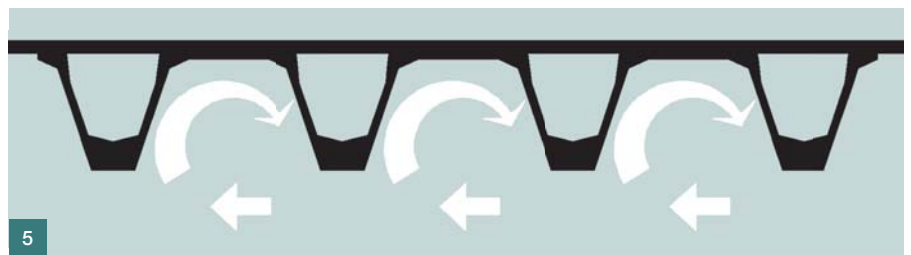
[4] Podroužek J., Teplý B.: Modelling of chloride transport in concrete by cellular automata. *Engineering Mechanics*, 15, 3, 2008, 1–10

[5] Song H., Pack S., Ann K.: Probabilistic assessment to predict the time to corrosion of steel in reinforced concrete tunnel box exposed to sea water. *Construction and Building Materials*, 23, 2009, 3270–3278

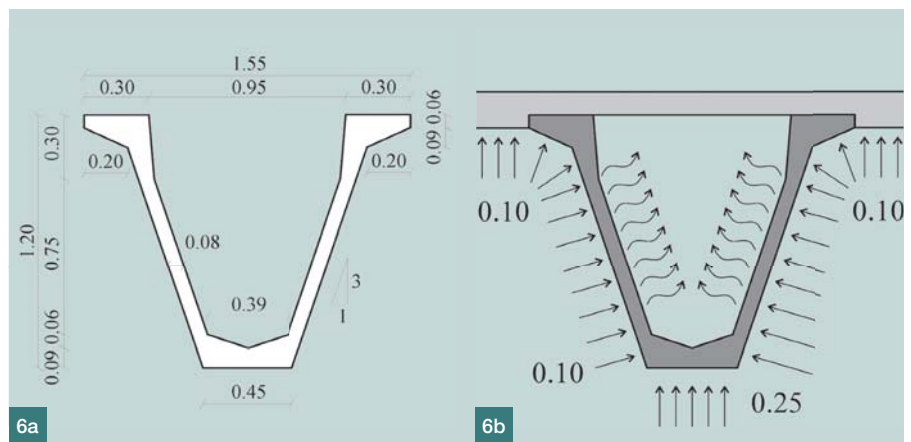
[6] Oslakovič I., Serdar M., Bjegović D., Mikulič D.: Modeling of time dependent changes of chloride diffusion coefficient. *DBMC11*, Istanbul, Turkey, Vol. 1, 2008, 203–211

[7] Teplý B., Novák D., Pukl R.: Modelování a prognóza degradace betonových konstrukcí. Sb. konf. Sanace 2008, Brno: SSBK, 241–249

[8] Teplý B., Podroužek J., Rovnaníková P., Bergmeister K., Strauss A., Wendner R., Costa R., Santa U.: Chloride induced Deterioration on Reinforced Structures, verified by a Cellular Automata Simulation. The 5th Central European Congress on Concrete Engineering, Baden 2009, 267–270



5



6a

6b

Obr. 2 Podhled mostu s V-segmeny
 Fig. 2 Soffit of the bridge with V-segments
 Obr. 3 Odběr vzorků betonu
 Fig. 3 Taking of concrete samples
 Obr. 4 Doprava pod mostem
 Fig. 4 Traffic under the bridge
 Obr. 5 Schéma předpokládané turbulence
 Fig. 5 Scheme of assumed turbulence
 Obr. 6 a) Vyšetřovaný konstrukční prvek; b) koncentrace chloridů v povrchu konstrukčního prvku
 Fig. 6 a) Assessed structural member; b) chlorides concentration in the member surface

- 6 Určení zbytkové životnosti degradované konstrukce limitované iniciační periodou, tj. časem do vzniku koroze.
- 7 Určení doby vzniku trhlin v okolí výztuže.
- 8 Určení doby do vzniku trhliny o limitní šířce na povrchu betonu.
- 9 Analýza úbytku efektivní průřezové plochy výztuže korozi.
- 10 Posouzení deformací degradované konstrukce.
- 11 Posouzení únosnosti degradované konstrukce.
- 12 Určení zbytkové životnosti degradované konstrukce limitované součtem iniciační periody a periody propagační – dle typu omezujících podmínek.

Všechny uvedené činnosti nejsou vždy vykonávány, např. je-li za rozhodující kritérium přijata iniciační perioda, pak se jedná jen o prvních šest kroků, nebo naopak, když je sledován průnik chloridů i v průběhu dalšího času (propagační perioda), může postupně docházet k depasivaci dalších (hlouběji uložených) vrstev oceli, k jejich korozi a následně také k dalšímu šíření trhlin v betonu. V takovém případě se kroky 8 až 12 mohou provádět opakovaně (pro různé časové stupně). Navíc, v souvislosti s již existujícími trhlinkami v krycí vrstvě může být průnik chloridů urychlen. Znalost koncentrace chloridů v betonu (dle místa i času) je tedy nutná a je

výhodné, jsou-li k dispozici nástroje pro její prognózování.

MODELOVÁNÍ PROSTUPU CHLORIDŮ BETONEM

Pro popis časově závislého procesu průniku chloridů existuje několik odlišných přístupů. Velké množství modelů využívá Crankova řešení 2. Fickova zákona, který popisuje proces difúze. Toto řešení pravděpodobně poprvé aplikoval Collepardi a kol. [3] a bylo odvozeno za následujících předpokladů: beton je homogenní materiál, počáteční koncentrace chloridů v betonu je nulová, adsorpce chloridů je lineární a vliv okolních iontů je neměnný v čase. Model popisuje následující vztah:

$$C(x,t) = C_{S,0} \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_a t}} \right) \right], \quad (2)$$

kde C je koncentrace chloridových iontů v hloubce x pro časový úsek t (obvykle $x = a$, kde a je krycí vrstva), D_a je difúzní koeficient, tj. veličina závislá na kvalitě a druhu betonu, obecně proměnná v čase, a $C_{S,0}$ je koncentrace chloridů na povrchu betonu (lze chápat jako jakési „zatížení“).

Vztah (2) popisuje průnik chloridů jen v určitém místě a jedná se tedy o 1D model. Vzhledem k tvaru zkoumané konstrukce (průřezu či prvku) a rozmístění výztuže je obvykle vhodnější 2D modelování, které umožňuje např. technika celulárních automat [4]. Vždy je však jako nutný vstupní údaj potřeba znát mj. $C_{S,0}$. Tato hodnota však není běžně známa z několika důvodů:

- posuzování degradace betonových konstrukcí výpočetním modelováním je zatím v praxi výjimečné;
- hodnoty $C_{S,0}$ se nepochybně liší s ohledem na zdroj (posypové soli a sníh/voda; aerosol v okolí solených silnic způsobený dopravou nebo větrem; koncentrace roztoků chloridů a množství pevných solí ve styku s betonem v chemických provozech), s ohledem na lokalitu (geograficky a/ nebo místo na konstrukci), u komunikací a mostů s ohledem na roční období, počasí apod.
- měření povrchové koncentrace je technicky, organizačně, časově i ekonomicky náročné.

Proto pro existující, degradací již postižené konstrukce je navrženo v dalším textu náhradní řešení pro stanovení povrchové koncentrace chloridů kombinací jednorázových laboratorních zkoušek a modelu 1D.

METODIKA NÁHRADNÍHO STANOVENÍ POVRCHOVÉ KONCENTRACE CHLORIDŮ

Pro stanovení povrchové koncentrace chloridů byl autory navržen následující postup (některé jeho kroky jsou shodné s položkami ve výčtu inženýrských činností uvedených výše):

- Inspekce konstrukce za účelem rozhodnutí o místech, kde bude nutné nebo vhodné degradaci posoudit.
- Odběr vzorků betonu konstrukce – jádrové vývrty, resp. práškové vzorky (s odběrem materiálu po hloubce vrtu).
- Laboratorní rozbor odebraných vzorků – stanovuje se koncentrace Cl^- a OH^- iontů (hodnota pH), a to v různých hloubkách od povrchu až po výztuž (tzv. chloridový profil).
- Opakovaným (pro všechny vzorky) zpětným výpočtem modelu 1D – vztah (2), tj. dosazením hodnot $C(x,t)$ získaných na odebraných vzorcích se vypočtou hodnoty $C_{S,0}$.
- Tyto hodnoty pak lze využít pro podrobnější analýzu rozložení koncentrace chloridů ve zkoumané konstrukci a jejich prognózu v čase, např. zmíněnou technikou celulárních automat. Určí se tak oblasti, kde je již dosažena hodnota C_{crit} a kde tedy lze očekávat korozi výztuže. Tu lze pak prognózovat pomocí příslušného modelu a posoudit tak relevantní mezní stav, resp. posoudit zbytkovou životnost.

Jestliže byl odebrán a laboratorním rozborům podroben dostatečný počet vzorků (v dostatečné škále vzdáleností od povrchu), je možné také získat odpovídající $C_{S,0}$ extrapolací chloridových profilů na povrch [5].

Pro případy, kdy byl pomocí odebraných vzorků stanoven chloridový profil a kdy je známa povrchová koncentrace chloridů $C_{S,0}$ (např. při působení mořské vody), je možné zpětným výpočtem modelu dle (2) vypočítat odpovídající hodnoty difúzního součinitele betonu D_a [6].

APLIKACE

Popsaná metodika byla aplikována na příkladu mostu v severní Itálii, přecházejícího nad dálnicí. Přitom byla posuzována degradace spodní části vodorovných prvků mostu (obr. 2), způsobená vlivem solení dálnice a turbulencí aerosolu, vzniklého ze solného roztoku přejezdem automobilů, který pak působí na konstrukci mostu nad dálnicí. Přímé a dlouhodobé měření povrchové koncentrace chloridů na spodní stra-

ně V-segmentů bylo neschůdné a bylo proto využito výše naznačeného postupu. Obr. 3 a 4 ilustrují stav mostu, odběr vzorků i probíhající dopravu.

Ze vzorků, které byly odebrány odvrtem elektrickou vrtačkou do hloubky 0 až 10 mm, 10 až 20 mm a 20 až 30 mm, byly vylouženy vodou rozpustné chloridy. Ve vyluhu byla potenciometricky stanovena hodnota pH, která informuje o koncentraci hydroxidových iontů v betonu. Dále byl stanoven obsah chloridů zákalovou metodou titrací odměrným roztokem dusičnanu rtuťnatého. Chloridy lze také stanovit jinými metodami, např. iontově selektivní elektrodou nebo iontovou chromatografií.

Laboratorní vyšetřování potvrdilo předpoklad vyššího „namáhání“ solným aerosolem těch stěn V-segmentů, které byly orientovány ve směru jízdy na dálničním pruhu pod tímto mostním nosníkem (obr. 5). Stanovené hodnoty $C_{S,0}$ [hm. %/hm. beton], které mohly být dále využity pro posuzování degradace (tj. v činnostech 5 až 12), jsou na obrázku 6. Byla tak posouzena řada mezních stavů mostu pro různé varianty možných postupů oprav (ve spolupráci s BOKU Wien, Autobrennero Trento a s využitím programového systému SARA [7]); částečně o tom bylo referováno již v [8], kompletněji to bude publikováno v připravovaném článku. Ukázalo se, že při uvážlivém plánování provozu mostu a jeho údržby s včasným využitím výše zmíněných možností analýzy degradačních procesů, by bylo možno prodloužit provozování mostu bez zvýšení nákladů asi o dvacet let.

Tento výsledek byl získán v rámci činnosti projektu 1M0579 – výzkumné centrum CIDEAS.

Prof. RNDr. Pavla Rovnaníková, CSc.
Ústav chemie
Fakulta stavební VUT v Brně
Žitkova 17, 602 00 Brno
tel.: 541 147 633
e-mail: rovnanikova.p@fce.vutbr.cz



Prof. Ing. Břetislav Teplý, CSc.
Centrum CIDEAS
Fakulta stavební VUT v Brně
Veveří 331/95. 602 00 Brno
tel.: 541 147 642
e-mail: teply@fce.vutbr.cz



Text článku byl posouzen odborným lektorem.