

Vliv chloridů na trvanlivost železobetonových mostních konstrukcí

Působení posypových solí, které pronikají skrz krytí k ocelové výztuži, vyvolává korozi výztuže a je jedním z nejdůležitějších faktorů snižujících životnost mostovek. Chloridy vyvolaná koroze může způsobit pokles užitnosti konstrukce nejen s ohledem na použitelnost, ale i na únosnost, a ve svém důsledku tak může vést ke zvýšeným nákladům životního cyklu mostů. Článek se zabývá pravděpodobnostním přístupem k posudku trvanlivosti ŽB konstrukcí s ohledem na korozní působení vlivu posypových solí, a to zejména u mostních konstrukcí.

Pravděpodobnostním přístupem je možno vyjádřit úroveň spolehlivosti ve vztahu ke věku modelované konstrukce při zohlednění náhodně proměnných vstupních parametrů. Modelování trvanlivosti železobetonových konstrukcí ve vztahu k chloridy vyvolané korozi výztuže je komplexní problém, kterému je u nás i ve světě věnována intenzivní pozornost (viz [2], [3], [5], [6], [8], [13], [15], [17] a [18]). Existuje široké spektrum modelů, o různém stupni komplexnosti. Výběr vhodného modelu záleží na konkrétních podmínkách.

DEFINICE REFERENČNÍ ÚROVNĚ

Působení chloridových iontů vyvolává korozi výztuže, přičemž dle [16] je možno uvažovat následující referenční úroveň:

- Initiace koroze (depasivace výztuže) v důsledku proniknutí chloridů na úroveň výztuže.
- Vznik trhlin.
- Oprýskávání krytí.
- Úbytek průřezové plochy ocelové výztuže (vede k nadměrným napětím, deformacím a kolapsu).

Referenční úroveň a) a b) je dle [16] možno zařadit do mezního stavu použitelnosti. Referenční úroveň c) může spadat do obou kategorií mezních stavů, zatímco úroveň d) odpovídá meznímu stavu únosnosti.

Poznámka: Návrhová pravděpodobnost P_d odpovídá zvolené referenční úrovni (tab. 2).

TRANSFORMAČNÍ MODEL

Je-li koroze vyvolaná vnikáním chloridů k ocelové výztuži uvažována jako dominantní parametr ovlivňující degradaci a pokles užitnosti, pak lze životnost zapsat dle [18] jako:

$$t_{service} = t_{initiation} + t_{propagation} \quad (1)$$

kde čas do vzniku koroze (depasivace výztuže) je $t_{initiation}$. Čas do dosažení neúnosného stupně koroze železobetonové výztuže odpovídá $t_{service}$.

V další části textu je analýza konzervativně zaměřena na referenční úroveň odpovídající depasivaci výztuže.

Model transportu chloridů

Pro popis pronikání chloridů k ocelové výztuži v čase je odvozeno mnoho rozličných modelů, ze kterých je nutno vybrat model dle konkrétních podmínek dostupných dat. Koroze ocelové výztuže u ŽB mostovek je primárně řízena difuzí chloridů. Vliv hydraulického tlaku

a kapilární sorpce není nutno zohlednit, neboť jej lze ve většině případů na mostovce zanedbat. Postup pronikání chloridů betonem jako funkce hloubky a času lze modelovat za pomoci 2. Fickova zákona difuze, jak je běžně akceptováno [8]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (2)$$

Řešení příslušné diferenciální rovnice pro jednorozměrný problém, obvykle popisované jako Crankovo, je uvedeno v následujícím vztahu [3]. Koncentrace chloridů $C_{x,t}$ představuje svébytný účinek zatížení:

$$C_{x,t} = C_0 \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{\sqrt{4Dt}} \right) \right] \quad (3)$$

kde je $C_{x,t}$ koncentrace chloridů (jako procento hmotnosti materiálů s cementačními schopnostmi) v čase t (roky) a hloubce x (metry). C_0 je koncentrace chloridů (obvykle 0,6 % hmotnosti cementu atd.) v povrchové vrstvě betonu a D je tzv. „zjevný“ koeficient difuze (m^2/rok). Vztah (2) je široce užívaným pro 1D modelování pronikání chloridů i přesto, že neumožňuje popisovat časově závislé změny materiálových vlastností či okrajových podmínek. Pro 2D a 3D analýzu se doporučuje použít vhodnou numerickou analýzu na bázi MKP (viz např. [11]).

Limitní koncentrace chloridů

Ocelová výztuž je depasivována, když je koncentrace chloridových iontů na jejím povrchu větší než hodnota limitní tzv. chloridový práh C_{th} . Limitní koncentrace chloridů C_{th} závisí zejména na druhu a přípravě výztužných vložek a na složkách betonu. Chloridový práh představuje odolnost konstrukce vůči působení agresivních látek.

Model koroze výztuže

Ke korozi výztuže nastává, dojde-li k její depasivaci. Modelování procesu koroze zde nebude rozebíráno neboť jako referenční úroveň byla zvolena iniciace koroze. Souhrn modelů lze nalézt v [15] a [5], pro bližší podrobnosti viz např. [7], [19].

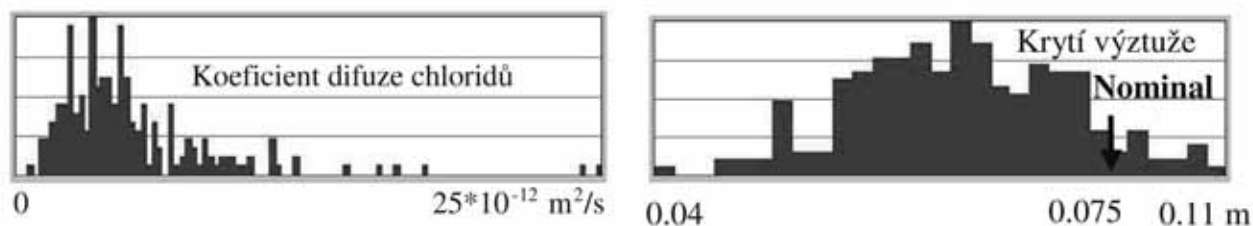
NÁHODNĚ PROMĚNNÉ

Veličiny vstupující do analýzy je vhodné vyjádřit za pomoci náhodně proměnných popsanych histogramem [12] nebo jiným vhodným pravděpodobnostním rozdělením. Pravděpodobnostní rozdělení je možno získat z laboratorních měření, z literatury, či inženýrským odhadem.

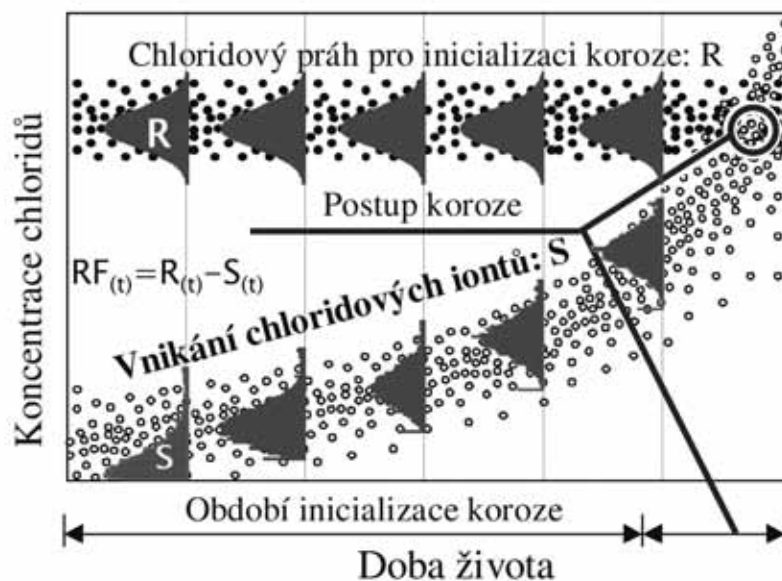
Nutno podotknout, že dlouhodobá měření prostupu chloridů jsou finančně a materiálově náročná, a těžko předpokládat, že budou pro-

Tabulka 1 – Náhodně proměnné vstupy

	Rozsah	Popis
Difuzní koeficient D_c [10 ⁻¹² m ² /s]	0–25	Histogram (obr. 1 vlevo), [14]
Hloubka výztuže (krytí) R_{ebd} [m]	0,04–0,11	Histogram (obr. 1 vpravo), [14]
Chloridový práh C_{th} [%]	0,2–0,4	Normální rozdělení $N(0,3, 1/30)^*$ odhad mezi [1] a [2]
* Normální rozdělení je useknuto na $\mu \pm 3\sigma$.		



Obr. 1 - Histogramy difuzního koeficientu (vlevo), hloubka výztuže (vpravo)



Obr. 2 - Idea pravděpodobnostní analýzy trvanlivosti s ohledem na chloridy vyvolanou korozi

váděna pro každou jednotlivou úlohu. Z hlediska praktického inženýra by byla vhodná možnost vyhledat příslušné modely náhodně proměnných v dostupné internetové databázi. Zde by bylo možno získat doporučené parametry náhodných veličin dle řešeného problému.

Tabulka 1 nabízí vstupní parametry, nebudou-li dostupné vhodnější.

POSUDEK TRVANLIVOSTI

Odhad rizika vzniku koroze a analýzu spolehlivosti je vhodné provádět pro zvolená stáří konstrukce. Návrhová pravděpodobnost $P_{d,t}$ musí být menší než pravděpodobnost vypočtená $P_{f,t}$:

$$P_{f,t} < P_{d,t} \quad (4)$$

Tabulka 2 - Návrhové pravděpodobnosti $P_{d,t}$ pro životnost 50 let

Mezní stav	Jev	$P_{d,t}$
Performance/použitelnost	Iniciace koroze	25×10^{-2}
Použitelnost	Vznik trhlin	7×10^{-2}
Použitelnost/únosnost	Oprýskávání krytí	7×10^{-3}
Únosnost	Úbytek průřezové plochy ocelové výztuže	7×10^{-5}

Idea pravděpodobnostního přístupu k posudku je uvedena na obr. 2.

Funkce spolehlivosti

Iniciace koroze výztuže ŽB konstrukce se popisuje s využitím funkce spolehlivosti RF_t :

$$RF_t = R - S = C_{th} - C_{xy,t} \quad (5)$$

Indikátor spolehlivosti RF_t je závislý na časově závislém překročení korozního prahu C_{th} (odolnosti R) koncentrací chloridů $C_{xy,t}$ (účinkem zatížení S).

Pravděpodobnost překročení referenční úrovně

Úroveň spolehlivosti ocelové výztuže s ohledem na překročení zvolené referenční úrovně je vyjádřena za pomoci pravděpodobnosti iniciace koroze $P_{f,t}$. Ta vyjadřuje pravděpodobnost započítí koroze ocelové ŽB výztuže ve zvoleném stáří konstrukce.

Stochastická analýza funkce spolehlivosti RF_t vypočtené ve zvolených časových intervalech (pro různé stáří konstrukce) vede k odhadu pravděpodobnosti iniciace koroze $P_{f,t}$ (pravděpodobnosti překročení zvoleného mezního stavu):

$$P_{f,t} = P(RF_t < 0) = P(C_{th} - C_{xy,t} < 0) \quad (6)$$

Návrhová pravděpodobnost

Možné hodnoty návrhových pravděpodobností jsou nejen otázkou vědeckých diskuzí, ale i požadavků investora. Možný nástin těchto pravděpodobností s ohledem na uvažované referenční úrovně uvádí tabulka 2 vycházející z [4].

Návrhové pravděpodobnosti pro stáří menší než deklarovaných 50 let uvádí např. [10]

$$P_{dt} = 1 - (1 - P_{dt})_{T_0}^{\frac{t}{T}} \text{ pro } t < T \quad (7),$$

kde návrhová pravděpodobnost P_{dt} pro stáří t závisí na referenční pravděpodobnosti P_{dt} definovaného stáří T .

ZÁVĚR

Článek je součástí záměru směřujícího k vytvoření směrnice pro pravděpodobnostní posuzování spolehlivosti stavebních konstrukcí. Konkrétně je zaměřen na posudek trvanlivosti ŽB mostních konstrukcí s ohledem na chloridy vyvolanou korozi výztuže, přičemž směrnice pro pravděpodobnostní posuzování by měla být připravena v závěru letošního roku. Článek uvádí doporučení pro modelování vnikání chloridů pomocí druhého Fickova difúzního zákona. Iniciační koroze je doporučena jako referenční úroveň. Spolehlivost je vyšetřována porovnáním pravděpodobnosti iniciační koroze (depasivace výztuže) s pravděpodobností návrhovou. Článek obsahuje nástin návrhových pravděpodobností s ohledem na vybrané referenční úrovně. Vývoj norem by měl směřovat k využití možností informačního světa. K zapojení databází a nástrojů umělé inteligence do posudku spolehlivosti.

Projekt byl realizován za finanční podpory ze státních prostředků prostřednictvím Grantové agentury České republiky. Registrační číslo projektu je GA ČR 103/07/0557.

Ing. Petr Konečný, Ph.D.,
petr.konecny@vsb.cz,
Katedra stavební mechaniky,
Fakulta stavební,
VŠB – TU Ostrava

LITERATURA:

- [1] ACI Committee 222 (2001): *Protection of Metals in Concrete Against Corrosion*, ACI 222R01, American Concrete Institute, Detroit, MI, pp. 41
- [2] CEB (2004), *Design Guide for Durable Concrete Structures*, Thomas Telford Publishers, 2004, ISBN 0-7277-1620-4
- [3] Collepardi, M., Marcialis, A., and Turriziani, R. (1972): "Penetration of Chloride Ions into Cement Pastes and Concretes," *Journal of American Ceramic Research Society*, V55, No. 10, pp. 534-535



Ing. Petr Konečný, Ph.D.
Od roku 2005 působí na Katedře stavební mechaniky Fakulty stavební VŠB-TU Ostrava, a to jako vědecký pracovník a následně jako odborný asistent. Ve druhé polovině roku 2005 absolvoval stáž na Pennsylvania State University zaměřenou na trvanlivost železobetonových mostů s ohledem na působení chloridů.

- [4] EN 1990 (2003), *Eurocode: Zásady navrhování konstrukcí (Basis of structural design)*, ČNI
- [5] FREET-D PROGRAM DOCUMENTATION, Červenka consulting <http://www.freet.cz>
- [6] Glass, G. K. and Buenfeld, N.R. (1997): "Chloride Threshold Levels for Corrosion Induced Deterioration of Steel in Concrete", In "Chloride Penetration into Concrete": St-Remy-les-Chevreuses, France, October 15-18, 1995, Proc. of the RILEM Intl. Workshop, pp. 429-452
- [7] Gonzales, J. A., Andrade, C., Alonso, C. And Feliu, S. (1995): Comparison of rates of general corrosion and maximum pitting penetration on concrete embedded steel reinforcement, *Cement and Concrete Research*, 25(2), pp. 257-264
- [8] Hooton, R. D., Thomas, M. D. A., Stanish, K. (2001): *Prediction of Chloride Penetration in Concrete*, Federal Highway Administration Publication, FHWARD-00-142, October 2001
- [9] Hooton, R. D., Thomas, M. D. A. and STANDISH, K. (2001): "Prediction of Chloride Penetration in Concrete, Federal Highway Administration, Washington, D. C., No. FHWA-RD-00-142, pp. 405
- [10] Kmeť, S. (2005): "Hodnoty návrhové pravděpodobnosti P_{dt} (Values of the Design Probability of Failure P_{dt})", In proceedings of VI.th national conference Spolehlivost konstrukcí, 6. 4. 2005, Ostrava, DT Ostrava, ISBN 80-02-01708-0, (In Slovak)
- [11] Konečný, P., Tikalsky, P. J., Tepke, D. G. (2007): Performance Evaluation of a Concrete Bridge Deck Affected by Chloride Ingress by Using Simulation-Based Reliability Assessment and Finite Element Modeling, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2028, pp. 3-8, Washington, DC, USA, ISSN: 0361-1981, ISBN: 978-0-309-10455-5
- [12] Marek, P., Guštar, M. and Anagnos, T. (1995): *Simulation-Based Reliability Assessment for Structural Engineers*. CRC Press, Inc., Boca Raton, Florida, ISBN: 0-8493-8286-6
- [13] Matesová, D., Pernica, F., Teplý, B. (2006): Limit States for Durability Design – Modelling and the Time Format, In: *Sborník konference Modelování v Mechanice*, Ostrava
- [14] Sohanguhpurwala and Scannell, W. T. (1994): "Verification of Effectiveness of Epoxy-Coated Rebars", *Final Report to Pennsylvania Department of Transportation*, Project No. 94005, 1994, pp. 97
- [15] Šmerda, Z., Adámek, J., Keršner, Z., Meloun, V., Mencl, V., Novák, D., Rovnaníková, P. and Teplý, B. (1999): *Trvanlivost betonových konstrukcí (Durability of Concrete Structures)*, Informační centrum ČKAIT, Prague, ISBN-8090269788, (in Czech)
- [16] Teplý, B., Keršner, Z., Rovnaník, P. A. and Chromá, M. (2005): "Durability vs. Reliability of RC structures", In proceedings of 10DBMC International Conference on Durability of Building Materials and Components, Lyon, France, 17-20 April 2005
- [17] Thomas, M. D. A., Matthews, J. D. (1996): "Chloride Penetration and Reinforcement Corrosion in Fly Ash Concrete Exposed to a Marine Environment (SP 163-15)", *Third CANMET/ACI International Conference: Performance of Concrete in Marine Environment (SP-163)*, Canada, 1996, pp. 317-338
- [18] Tuutti, K. (1982): "Corrosion of steel in concrete", *CBI Research Report 4:82*, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, Sweden
- [19] Val, D. & Melchers, R. E. (1998): Reliability analysis of deteriorating reinforced concrete frame structures, *Structural Safety and Reliability*, Balkema, Rotterdam, pp. 105-112

Impact of Chlorides on Life of Concrete Bridge Structures with steel reinforcement

This paper is focused on the preparation of probabilistic codified design of the reinforced concrete bridge structures with respect to chloride ingress induced corrosion of the reinforcing steel. The 2ND Fick's Law is suggested in order to model the penetration of chlorides. Corrosion initiation is indicated as the reference level. Reliability is studied using comparison of the probability of corrosion initiation and design probability. Design probabilities are recommended at the end of the paper depending on the specified reference level.