

MODELOVÁNÍ ŽIVOTNOSTI A SPOLEHLIVOSTI BETONOVÝCH KONSTRUKCÍ PŘI KOMBINACI MECHANICKÉHO A ENVIRONMENTÁLNÍHO ZATÍŽENÍ ■ MODELLING LIFE-TIME AND RELIABILITY OF CONCRETE STRUCTURES UNDER COMBINED MECHANICAL AND ENVIRONMENTAL LOAD

Břetislav Teplý, Dita Vořechovská,
Martina Šomodíková, David Lehký

Trvanlivost a spolehlivost konstrukcí patří k základním vlastnostem, které mohou mít výrazné ekonomické dopady. Článek se zaměřuje na poměrně novou tematiku – kombinaci účinku mechanického a environmentálního zatížení železobetonových konstrukcí a její vliv na trvanlivost a spolehlivost. ■ *Durability and reliability of structures belong to the basic structure properties, which can have significant economic consequences. The paper focuses on a relatively new topic – a combination of mechanical and environmental load of concrete structures and its effect on durability and reliability.*

Problematika trvanlivosti betonových konstrukcí v poslední době nabývá na významu, a to v souvislosti s trvale udržitelným stavěním, s otázkami nákladů životního cyklu staveb [1] a s tzv. performance-based postupy navrhování konstrukcí [2]. Je to již reflektováno také v nových mezinárodních dokumentech [3], [4], kde je mj. zvýrazněn pravděpodobnostní přístup, tj. vliv přirozeného rozptylu většiny souvisejících jevů a veličin při modelování a také hodnocení životnosti a úrovně spolehlivosti stavebních konstrukcí. U nás je tento přístup v praxi uplatňován jen výjimečně, a to zejména proto, že tyto postupy nejsou v inženýrské komunitě příliš známy, a také proto, že optimalizaci životnosti a nákladů investor obvykle – k obecné škodě – nepožaduje. Kromě toho nejsou příliš rozšířeny vhodné softwarové nástroje; o jednom z nich bylo v časopise Beton TKS nedávno referováno [5] a předkládaný článek je aktuálním doplněním.

S hodnocením životnosti a spolehlivosti se úzce pojí posuzování a prognózy degradace materiálů a konstrukcí [6]. Působení mechanického zatížení bylo dosud nejčastěji studováno odděleně od působení environmentálních degradačních vlivů, tj. u betonových konstrukcí např. karbonatace či průniku chloridů a následné koroze výztuže. Také v novém *fib* Model Code 2010 (*fib* Bulletin 65 a 66 [4]), což je souhrn nejnovějších poznatků, který předsta-

vuje jakousi budoucí aktualizaci Eurokódů, se připouští, že při verifikaci životnosti se vliv degradačních a časově závislých efektů zatím nemůže posuzovat zcela chronologicky a je nutné jakési postupné řešení. Řada zahraničních prací z nedávné doby (např. komentovaný přehled [7] nebo [8]) však upozorňuje na skutečnost, že působením mechanického zatížení dochází ke změně pórové struktury betonu a ke vzniku či změně systému trhlinek, což potom ovlivňuje v čase probíhající průnik škodlivých substancí (např. CO₂ nebo chloridových iontů), tj. postup a míru degradace betonu. Uvažování synergie mechanického a environmentálního zatížení při modelování životnosti a spolehlivosti betonových konstrukcí je tedy potřebné v zájmu dosažení reálně odpovídajících výsledků. Za tímto účelem byl již dříve referovaný softwarový nástroj FReET-D [5] doplněn o několik modelů, které zmíněnou kombinaci namáhání u betonových konstrukcí respektují.

V následujících odstavcích je problematika synergie mechanického a environmentálního zatížení stručně popsána spolu s ukázkami a srovnáním výsledků modelování s měřeními na reálných konstrukcích; některé další informace jsou v [9].

SOUČASNÉ PŮSOBNÍ MECHANICKÉHO ZATÍŽENÍ A KARBONATACE BETONU

Při hodnocení životnosti železobetonové konstrukce bývá nejčastěji jako limitní stav uvažováno dosažení tzv. iniciačního času, tj. okamžiku, kdy by již mohlo docházet ke korozi výztuže. V souvislosti s karbonatací jde o stav, kdy karbonatační fronta již pronikla přes krycí vrstvu betonu a dosáhla výztuže, čímž mohlo dojít k její depasivaci. Vliv napětí na rychlost karbonatace byl ukázán např. v [7] a bylo navrženo, aby tento vliv byl jednoduše zohledněn pomocí korekčního součinitele k_{σ} . Pro tahové napětí σ_t lze využít vztah (1) a pro tlakové napětí σ_c vztah (2). Tyto vztahy byly odvozeny na základě zkoušek nosníků namáhaných čtyř-

bodovým ohybem a současně karbonatací (zrychlená zkouška). Přitom $\sigma_{u,t}$ a $\sigma_{u,c}$ jsou mezní napětí betonu v tahu a tlaku:

$$k_{\sigma} \left(\frac{\sigma_t}{\sigma_{u,t}} \right) = 1 + 1,41 \left(\frac{\sigma_t}{\sigma_{u,t}} \right) + 0,82 \left(\frac{\sigma_t}{\sigma_{u,t}} \right)^2, \quad (1)$$

$$k_{\sigma} \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_{u,c}} \right) = 1 - 2,27 \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_{u,c}} \right) + 4,86 \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_{u,c}} \right)^2. \quad (2)$$

Hloubka karbonatace tak může být i s ohledem na stav napětí prognózována dle vztahu:

$$x_c(t) = k_{\sigma} A \sqrt{t}, \quad (3)$$

kde konstantu A je nutno vypočítat pomocí vhodného modelu karbonatace v závislosti na složení a ošetřování betonu, typu cementu, vlhkosti prostředí, obsahu CO₂, příp. na dalších parametrech. Pravděpodobnost dosažení životnosti (iniciačního stavu) lze pak hodnotit pomocí podmínky:

$$P_f(t_D) = P \left\{ a - x_c(t_D) \leq 0 \right\} \leq P_d. \quad (4)$$

V tomto vztahu je tloušťka krycí vrstvy označena symbolem a , návrhová životnost t_D a P_d je mezní (přípustná) pravděpodobnost dosažení depasivace výztuže; pravděpodobnost poruchy se obvykle převádí na index spolehlivosti β , resp. β_d .

Aplikace vztahů (1 až 4) a srovnání výsledků s měřeními na reálné konstrukci je ukázáno na příkladu betonové 206 m vysoké chladicí věže. V jejím stáří 19,1 let bylo provedeno měření hloubky karbonatace (fenolftaleinové testy) v 75 místech na vnitřním i vnějším povrchu, což poskytl statisticky dostatečně významné množství výsledků [10]. Pro pravděpodobnostní modelování hloubky karbonatace v čase byl použit mezinárodně uznávaný model *fib* dle [4]; střední hodnoty, variační koeficienty a typy rozdělení pravděpodobnosti vstupních veličin (náhodné veličiny) zde pro stručnost uvedeny nejsou (jsou dostupné v [9]). V tab. 1 jsou ukázány střední hodnoty vypočtené hloubky karbonatace pro stáří 19,1 let, bez uvažování vlivu mechanického namáhání i s použitím součinitele k_{σ} , který

Tab. 1 Hloubka karbonatace – model vs. měření ■ Tab. 1 Carbonation depth – model vs. on-site measurements

Hloubka karbonatace [mm]	fib model	fib model včetně k_a	Měření
Vnější povrch	10,8	15	14,9
Vnitřní povrch	4,4	6,1	8

Obr. 1 Závislost indexu spolehlivosti na čase ■ Fig. 1 Development of reliability level over time

Obr. 2 Množství chloridů v různých hloubkách betonu při stáří nosníků 6 let ■ Fig. 2 Chloride content in different depths of concrete beams after 6 years of exposition

byl aplikován pro tlakové napětí úrovně 60 % mezního napětí, tj. při působení stálého zatížení. Je zřejmé, že zahrnutí vlivu mechanického zatížení přibližuje výsledky modelu realitě.

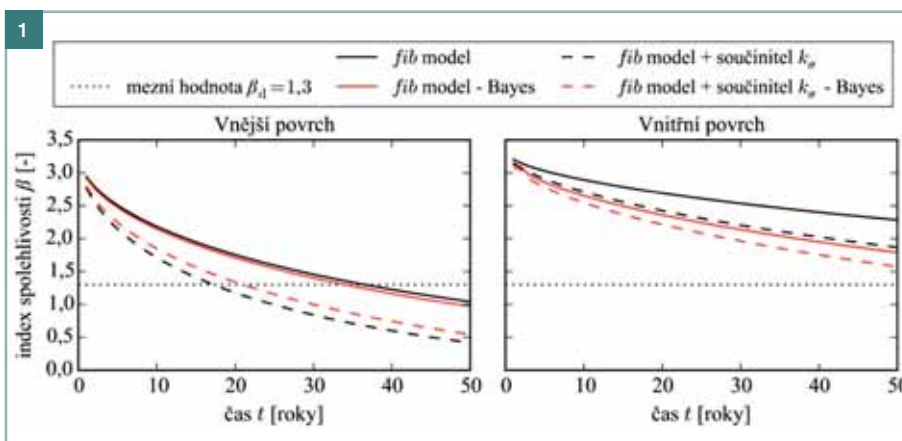
Na obr. 1 jsou znázorněny výsledky pravděpodobnostního výpočtu pro oba povrchy věže, tj. prognóza hodnot indexu spolehlivosti stanoveného pro podmínku (4) v časové řadě až do stáří konstrukce 50 let. Přitom byly použity výsledky měření tloušťky a krycí vrstvy na konstrukci: střední hodnota při vnějším povrchu věže 28,4 mm, při vnitřním 23,6 mm, obě s koeficientem variace 30 %. Současně jsou znázorněny i průběhy upravené pomocí tzv. Bayesovského zlepšení opřené o výsledky měření pro 19,1 let (tato varianta výpočtu je také zahrnuta v programu FReET-D). Je vykreslena též směrná hodnota $\beta_d = 1,3$ doporučená pro tento typ mezního stavu [4]. Odtud vyplývá, že vznik koroze výztuže při vnějším povrchu lze s přípustnou pravděpodobností očekávat asi ve stáří 18 let, u vnitřního povrchu pak ve stáří výrazně převyšujícím 50 let. Vztah (4) definuje konzervativním způsobem životnost železobetonové konstrukce, tj. konstrukce bez nebezpečí nákladných oprav způsobených korozí výztuže.

SOUČASNÉ PŮSOBENÍ MECHANICKÉHO ZATÍŽENÍ A CHLORIDŮ

Iničiální stadium může být také dosaženo při průniku chloridových iontů do betonu z jeho povrchu (v našem prostředí v důsledku posypových solí), tj. při dosažení kritické koncentrace v úrovni výztuže. Mezní podmínka pro posouzení této situace má tvar:

$$P_f(t_D) = P\{C_{cr} - C_a(t_D) \leq 0\} \leq P_d, \quad (5)$$

kde C_{cr} je hodnota kritické koncentrace chloridů způsobující depasivaci výztuže

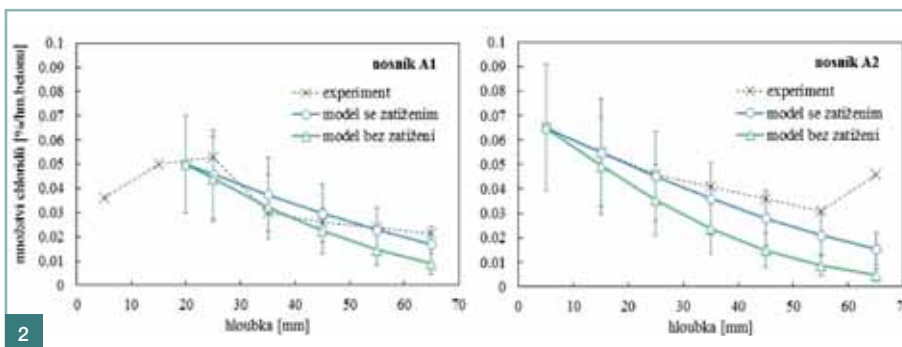


a C_a je aktuální koncentrace v hloubce betonové krycí vrstvy v čase t_D . Průnik chloridových iontů betonem je komplexní proces závislý zejména na složení betonu, vlastnostech jeho složek, ošetřování betonu, jeho stáří, působení prostředí a také na pórové struktuře a systému trhlin. Ve zjednodušené podobě se tento proces nejčastěji modeluje jako difuzní s využitím Fickova druhého zákona, přičemž se řešení této diferenciální rovnice hledá pomocí Crankova postupu s tzv. chybovou funkcí. V tenké vrstvě u povrchu toto řešení ale nevyhovuje – maximální koncentrace chloridů bývá detekována obvykle až ve vzdálenosti od povrchu $x = \Delta x$ (tzv. konvekční zóna; 5 až 15 mm). Podrobně je to popsáno v práci [11] a koncentrace C je pak dle [4] popsána vztahem:

$$C(x - \Delta x, t) = C_{S,\Delta x} \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x - \Delta x}{\sqrt{tD}} \right), \quad (6)$$

kde $C_{S,\Delta x}$ je koncentrace v hloubce Δx , ovlivněná koncentrací na povrchu C_S a erf je Gaussova chybová funkce. Podle zahraničních studií a experimentů (např. [7]) lze všechny výše zmíněné vlivy zohlednit ve funkci (resp. hodnotě) difuzního součinitele betonu D ; opět v zájmu stručnosti zde jednotlivé vztahy spolu s jejich zdroji neuvádíme – některé jsou popsány v [9] spolu se vstupními údaji pro dále ukázaný příklad (náhodné veličiny). Vliv mechanického zatížení se zahrnuje jednak součinitelem dle druhu napětí (tahové či tlakové), dále dle šířky i vzdálenosti trhlin; jejich hodnoty lze získat a zadat pomocí měření na konstrukci, výpočtem metodou konečných prvků nebo dle příslušných vztahů dle Eurokódu EN 1992-1, resp. fib Model Code 2010.

Existuje velmi málo měření důsledků současného působení chloridů a mechanického zatížení na reálných konstrukcích; zde využíváme práce [12], kde jsou publikovány výsledky laboratorních zkoušek železobetonových nosníků (3 000 × 280 × 150 mm), které byly namáhány třibodovým ohybem a současně vystaveny působení solné mlhy s koncentrací 35 g/l NaCl po dobu šesti let. Zatížení bylo aplikováno pro dvě sady nosníků s různými intenzitami zatížení – podle tehdejších francouzských norem jednak jako návrhové zatížení pro odpovídající trvanlivost v agresivním prostředí (nosník A1) a maximální přípustné zatížení pro konstrukci v neagresivním prostředí (nosník A2). Potom byly laboratorně stanoveny koncentrace chloridů do hloubky 65 mm ve středu nosníků. Výsledné chloridové profily jsou znázorněny na obr. 2 spolu s naším řešením, jednak bez uvažování vlivu ohybového namáhání a jednak se započtením zatížení. Poznamenejme, že i zde bylo řešení pomocí FReET-D provedeno pravděpodobnostně. Při výpočtu se náhodnost zohledni-



Literatura:

- [1] JEŘÁBEK, Z., TEPLÝ, B. Veřejné zakázky – nové směrnice EU – úloha inženýra. *Beton TKS*. 2015, roč. 15, č. 1, s. 3–6.
- [2] TEPLÝ, B. Seznámení s Performance-Based. *Materiály pro stavbu*. 2007, č. 8, s. 16–18.
- [3] ISO 16204:2012 Durability – Service life design of concrete structures.
- [4] *fib* Bulletin No. 65 and 66, *fib* Draft Model Code 2010. Lausanne, Switzerland: International Federation for Structural Concrete (*fib*), 2012.
- [5] TEPLÝ, B., NOVÁK, D. Predikce degradace betonových konstrukcí výpočtním modelováním. *Beton TKS*. 2014, roč. 14, č. 2, s. 56–57.
- [6] MATESOVÁ, D., VESELÝ, V., CHROMÁ, M., ROVNANÍK, P., TEPLÝ, B. Mezní stavy trvanlivosti a jejich posuzování. In: *Sborník 13. Betonářských dnů*. Hradec Králové, 2006, s. 288–294.
- [7] RILEM. Publications on Durability of Reinforced Concrete Structures under Combined Mechanical Loads and Environmental Actions: An Annotated Bibliography. In: YAO, Y., WANG, L., WITTMANN, F. H. *Report rep043*. 2013.
- [8] TANG, S. W., YAO, Y., ANDRADE, C., LI, Z. J. Recent durability studies on concrete structures. *Cement and Concrete Research*. 2015, č. 78, s. 143–154.
- [9] VOŘECHOVSKÁ, D., TEPLÝ, B., ŠOMODÍKOVÁ, M., LEHKÝ, D. Modelling of service life of concrete structures under combined mechanical and environmental actions. In: *Proceedings of scientific conference „Modelling in mechanics 2015“*. VŠB-TU Ostrava, Faculty of Civil Engineering, Czech Republic, 2015, s. 145–146.
- [10] KERŠNER, Z., NOVÁK, D., TEPLÝ, B., BOHDANECKÝ, V. Karbonatace betonu, koroze výztuže a životnost chladicí věže. *Sanace*. 1996, č. 4, 21–23.
- [11] ANDRADE, C., CLIMENT, M. A., DE VERA, G. Procedure for calculating the chloride diffusion coefficient and surface concentration from a profile having a maximum beyond the concrete surface. *Materials and Structures*. 2015, č. 48, s. 863–869.
- [12] FRANCOIS, R., ARLIGUE, H. Effect of microcracking and cracking on the development of corrosion in reinforced concrete members. *Magazine of Concrete Research*. 1999, č. 51, s. 143–150.
- [13] PODROUŽEK, J., TEPLÝ, B. Modelling of Chloride Transport in Concrete by Cellular Automata. *Engineering Mechanics*. 2008, č. 15, s. 213–222.

la u třech vstupních parametrů: u $C_{S,\Delta x}$, D a u vzdálenosti trhlin bylo použito normální pravděpodobnostní rozdělení s variačními koeficienty 40, 20 a 5 %. Na obr. 2 jsou pro nosníky A1 a A2 vyneseny výsledné střední hodnoty numerických výpočtů spolu se směrodatnými odchylkami a experimentálními měřeními. Je nutno též poznamenat, že práce [12] neposkytuje informaci o poloze vývrtů pro stanovení chloridových profilů vzhledem k poloze ohybových trhlin; také chybí výsledky na srovnávacích nosnících bez vlivu zatížení. Naše 1D řešení také nemůže postihnout vliv působení chloridové zátěže na bočních stranách – to by bylo možno řešit např. s využitím 2D techniky celulárních automat [13].

I tak je ale patrné, že modelování kombinovaného působení mechanického zatížení a environmentálního zatížení vede k výsledkům více se blížícím realitě a případné odchylky středních hodnot od experimentálních výsledků jsou velmi dobře pokryty směrodatnými odchylkami právě pro případ výpočtu s uvažováním vlivu zatížení a trhlin.

ZÁVĚR

Je zřejmé, že téma kombinovaného účinku mechanického zatížení a environmentálních zatížení železobetonových konstrukcí na jejich posuzování či navrhování je důležité. Ostatně i v nedávné souhrnné práci [8] je konstatováno, že by příslušné betonářské normy měly být v tomto smyslu pozměněny.

Výzkum a vývoj relevantních modelů a návrhových postupů však není doposud ukončen; přitom se samozřejmě nejedná jen o kombinaci účinků zatížení s procesem karbonatace či prostupu chloridových iontů, nýbrž i o kombinace dalších degradačních účinků s mechanickým zatížením a také současného působení více degradačních procesů. Náhodný charakter zúčastněných veličin bude nutno vždy zohlednit a pravděpodobnostní přístup a simulační techniky budou nepochybně užitečné.

Příspěvek vznikl v rámci řešení projektu č. LO1408 „AdMaS UP – Pokročilé stavební materiály, konstrukce a technologie“ podporovaného Ministerstvem školství, mládeže

a tělovýchovy v rámci účelové podpory programu „Národní program udržitelnosti I“ a projektu č. 14-10930S (SPADD) Grantové agentury České republiky (GAČR).

prof. Ing. Břetislav Teplý, CSc.
Fakulta stavební VUT v Brně
Ústav chemie
e-mail: teplý.b@fce.vutbr.cz



Ing. Dita Vořechovská, Ph.D.
Fakulta stavební VUT v Brně
Ústav stavební mechaniky
e-mail: vorechovska.d@fce.vutbr.cz



Ing. Martina Šomodíková
Fakulta stavební VUT v Brně
Ústav stavební mechaniky
e-mail: somodikova.m@fce.vutbr.cz



Ing. David Lehký, Ph.D.
Fakulta stavební VUT v Brně
Ústav stavební mechaniky
e-mail: lehky.d@fce.vutbr.cz



Text článku byl posouzen odborným lektorem.
The text was reviewed.

KOTEVNÍ KOLEJNICE JORDAHL®
JTA CE

Kotevní kolejnice JORDAHL® tvoří spolu s odpovídajícími T šrouby všestranný a osvědčený systém upevnování. Díky širokému sortimentu naleznete vždy vhodné a správné řešení. S bezpečným návrhem vám pomůže návrhový software.



JORDAHL & PFEIFER Stavební technika, s.r.o.

www.jpcz.cz