

Úvodník o povinnosti myslet, kterým jsme zahajovali třetí letošní číslo našeho časopisu, vzbudil jisté množství ohlasů. Dokonce i negativních. Dokonce i pozitivních. Záleží na tom, co kdo považuje za negativní či pozitivní. Mě osobně těší každý ohlas.

Protože téma přemýšlení je nepochybně aktuální, zastavíme se u něj i tentokrát. Nadpis úvodníku je ovšem podivný (stoprocentní většina čtenářů poznala, že jde o slovo německé) a nezvyklý. Označuje však něco, co se nám nepodařilo česky jednoslovně vyjádřit – shrnuje výstižně jistou psychologickou kategorii: umění myslet jinak. Totiž jinak než ti druzí, jinak než se od nás očekává, jinak než jak jsme si zvykli nebo byli zvyknuti. Myslet nikoliv jen v prostoru vlastních zkušeností, ale myslet i mimo tento prostor, podívat se na věc z jiného úhlu, třebaš napříč. No prostě – querdenken.

Příroda náš mozek kupodivu dobře vybavila, ale život naše myšlení obyčejně různě usměřňuje a – pomůžeme si opět německým, starší generaci dobře známým slůvkem – glajchšaltuje. Usměrnování obvykle nepocítujeme anebo ani pocítovat nechceme; je přece daleko pohodlnější přenechat myšlení, odpovědnost a rizika druhým. Pro projektanta je mnohdy jednodušší navrhnout, aby se ten či onen objekt zboural, místo aby se opravil, a pro dodavatele je výhodné na takové zakázce pracovat. Zda to je výhodné pro ten objekt a pro jeho vlastníka, nebo dokonce pro ochranu životního prostředí, se ani projektant ani dodavatel – až na ojedinělé výjimky – zatím příliš nestarají. A přece často stačí jen trochu zauvažovat, podívat se na úlohu v jiném světle a jinýma očima. Výsledek se rychle dostaví, doprovázen pocitem dobře odvedené práce. Budova, na které spolupracovali querdenkři, slouží nepochybně lépe, než to co vznikne z jednorozměrného myšlení. Zabudujme querdenken do svých systémů jakosti.

MILK TIETŮ

Kdy je nutné opravovat železobetonové konstrukce?

Zbyněk Keršner, Pavla Rovnaníková, Igor Suza,
Drahomír Novák, Břetislav Teplý

Rozhodnutí o opravě železobetonové konstrukce může být podloženo zlepšením odhadu postupu karbonatační fronty a počátku koroze výztuže. Je použit Bayesův teorém, podle kterého jsou kombinovány simulované a experimentálně zjištěné hodnoty.

An estimation of the carbonation depth and initial time of reinforcement corrosion can serve for a better and more rational decision concerning repair planning of a reinforced concrete structure. A Bayesian approach is used: The outputs of the numerical simulation are combined with the results of in situ measurements.

Úvod

V poslední době se dostávají do popředí úvahy o strategii údržby a opravách železobetonových (ŽB) konstrukcí, vycházející především z ekonomického hodnocení prováděných prací. Při zjišťování původu poruch ŽB konstrukcí se pozornost zaměřuje jak na mechanické vlastnosti, tak na vlastnosti fyzikálně-chemické a chemické. Chemické vlastnosti betonu, přesněji cementového tmelu, se hodnotí z hlediska korozního napadení.

Při těchto úvahách se uplatňují matematické modely, popisující také výsledek působení korozních činitelů na cementový tmel a výztuž v betonu, viz např. [1], [2], [3]. Modely umožňují předpo-

věd dalšího postupu korozního poškození konstrukce. Takové modely bývají deterministické, tzn. že jejich vstupní parametry jsou charakterizovány jen jedinými, zpravidla svými středními hodnotami.

Jedním z důležitých korozních dějů cementového tmelu je jeho karbonatace. Je známo, že efektivní ochrana výztuže v betonu se vlivem karbonatace snižuje, neboť působením CO_2 klesá hodnota pH v pórovém roztoku betonu, a může dojít k depasivaci výztuže. Vyjděme z představy tzv. *iniciačního času*, který vyjadřuje okamžik dosažení karbonatační fronty do úrovně krytí výztuže betonem, tedy okamžik teoretického započetí koroze výztuže. Odhad tohoto iniciačního času pak může sloužit jako podklad pro rozhodování o strategii údržby či oprav ŽB konstrukcí. V tomto článku je popsána aplikace uvedeného přístupu pro konkrétní konstrukci, a to pro *mostní objekt* přes řeku Svitavu na silnici II/426 v Brně (mezi ulicemi Křenová a Olomoucká, objekt č. 0426-003).

Existuje řada matematických modelů hloubky karbonatace, jejichž popis a hodnocení je shrnut v podrobné zprávě autorů. Pro naši aplikaci se jeví jako nejvhodnější model podle Boba [4], neboť průzkum mostního objektu poskytl s jistou statistickou významností jen pevnost betonu v tlaku.

Přiblížení výsledků matematického modelu reálnému chování konstrukce se provedlo s použitím *pravděpodobnostního přístupu*, kdy jednotlivé vstupní veličiny modelu jsou uvažovány jako náhodné, tedy popisované nikoliv pouze středními hodnotami, nýbrž distribučními funkcemi [5], [6]. Odhad iniciačního času byl dále

zlepšen využitím tzv. *Bayesova teorému*, který kombinuje výsledky numerické simulace se skutečně zjištěnými hodnotami jednorázových měření.

Popis mostu

Most tvoří trémová konstrukce o jednom poli. Spodní stavba je situována v korytě o velmi strmých svazích. Nosná konstrukce (trámy a příčníky) vytváří rošt prostě uložený na úložných prazích opěr. Některé pohledové části objektu jsou opatřeny omítkou z umělého pemrlovaného kamene.

Mostní list, uložený v archivu Brněnských komunikací, uvádí rok postavení mostu 1942. Hlavní prohlídka mostu se uskutečnila v roce 1980. V roce 1995 se provedl kompletní průzkum mostního objektu, sestávající z podrobné vizuální prohlídky a mechanického a chemického zkoumání betonu konstrukce.

Vizuální hodnocení současného stavu mostního objektu

Základy mostního objektu nejsou podemleté a nesedají. Mostní opěry jsou z masivního betonu, v dolní části obložené kamenem, spárováním maltou. Spárování není poškozeno trhlkami, malta není vyloužena nebo vydrolena.

Opěry jsou zbudovány ve formě betonových, částečně obložených zdí s vyznačeným úložným prahem, který nese mostní ložiska. Opěry jsou potečeny vodou z horní plochy úložného prahu, kam přitéká přes netěsný povrchový mostní závěr. Mostní závěry jsou poškozeny v oblasti vozovky a tramvajového tělesa. Na olomoucké opěře je zřetelný průsak z rubu opěry ve svislé střední spáře. V těchto místech je viditelné vyluhování betonu a usazování výluhu na površích opěr.

Hlavní nosná konstrukce je tvořena deseti betonovými trámy příčných rozměrů 0,49 x 1,64 m a sedmi mezilehlými příčníky rozměru 0,20 x 1,50 m. Trámy jsou osově vzdáleny 2,00 m. Nosná konstrukce se jeví při vizuálním posouzení v dobrém stavu. Podrobnějším ohledáním bylo zjištěno větší množství trhlin, které pravděpodobně vznikly smršťováním betonu. Na nosné konstrukci nejsou viditelné známky koroze ocelové výztuže.

Mostovka je pod tramvajovým tělesem celoplošně zasažena průsakem, jehož příčinou je poškození mostní izolace při výměně kolejového svršku a opravách automobilových pruhů. Na spodní straně mostovky jsou zřetelné vlhké skvrny, bílé výkvěty a krusty.

Římsy mostu jsou monolitické, místy silně zkorodované. Beton je natolik poškozen, že neplní ochrannou funkci pro výztuž. Na některých místech je výztuž zkorodována v celém průřezu.

Hodnocení mechanických vlastností

Mechanické vlastnosti betonu mostního objektu byly stanoveny tvrdoměrnou zkouškou Schmidovým kladívkem a lisováním jádrových vývrtů. Vzorky nosné konstrukce (38 hodnot) vykazují průměrnou hodnotu pevnosti v tlaku 32,3 MPa a směrodatnou odchylku 2,1 MPa. Tomu odpovídající nízký variační koeficient 0,065 svědčí o homogenitě betonu konstrukce i průkaznosti zkoušek.

Chemické hodnocení stavu betonu mostu

Kvalitativní hodnocení stavu betonu se provedlo na vývrtech. Aplikací acidobazického indikátoru na beton byla zjištěna hloubka napadení betonu kyselými plyny. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tabulce 1.

Výsledky informují o tom, do jaké hloubky od povrchu betonu je hydroxid vápenatý neutralizován kyselými plyny, tj. oxidem

uhličitým, siřičitým a oxidy dusíku. Nízká koncentrace hydroxidových iontů v cementovém tmelu nezaručuje ochranu ocelové výztuže před korozi do průměrné hloubky asi 28 mm. Beton opěr je z tohoto hlediska kvalitnější, průměrná hloubka chemického poškození je kolem 20 mm.

Orientačně zjištěné poškození betonu informuje pouze o hranici pH 9,5. Pro přesné zjištění koncentrace hydroxidových iontů byla stanovena hodnota pH potenciometricky ve výluhu z betonu. Vzorky byly odvrtány do hloubky 10, 20, 30 a 40 mm. Výsledky stanovení jsou v tabulce 2.

Tab. 1 – Zjištění hloubky karbonatace fenolftaleinem / Carbonation depth by phenolphthalein tests

Vyšetřená část objektu		Zjištěná hloubka karbonatace fenolftaleinem (mm)						Průměr (MPa)	Směrodatná odchylka (MPa)
Trémová konstrukce	trám T4	30	26	24	32	28	28	2,8	
	trám T5	20	25	33	34	30	27	6,3	
Opěry	brněnská I	18	24	22	17	22	21	2,7	
	brněnská II	16	18	16	20	20	18	1,8	

Hodnocení stavu mostu a experimentálních dat

Hlavní závadou objektu je poškození nebo zničení hydroizolace pod tramvajovými a pravděpodobně i automobilovými pruhy a mostních závěrů. Stav nosné konstrukce je vzhledem k závadám hodnocen podle ČSN 73 6221 jako „špatný“ (V), stav spodní stavby jako uspokojivý (IV). Mechanické pevnosti jsou pro mostní objekt vyhovující. Vzhledem k prosakování vody a roztoků NaCl mostovkovou deskou a mostními závěry na úložné prahy dochází k narušení ochranné vrstvy na ocelové výztuži a k její korozi. V povrchových vrstvách betonu, tj. v krycí vrstvě ocelové výztuže, je vlivem působení kyselých plynů v ovzduší snížena koncentrace hydroxidových iontů, a tím i jeho ochranná funkce. Hranice pH 9,5 je v oblasti 10 až 30 mm pod povrchem.

Tab. 2 – Stanovení pH výluhů z betonu / Concrete pH - values

Hloubka odběru (mm)	Místo odběru				
	trám T1 návodní strana	trám T1 povodní strana	trám T3 návodní strana	trám T3 povodní strana	opěra Křenová 1 m od návodní
	Stanovená hodnota pH				
10	9,48	9,09	9,22	9,47	9,10
20	9,93	9,27	9,32	9,69	10,49
30	10,36	9,53	9,77	10,24	11,05
40	11,32	–	11,36	11,04	11,59

Model hloubky karbonatace

C. Bob navrhl vztah pro určení průměrné hodnoty hloubky karbonatace x_c (v mm) v závislosti na čase t (v rocích) ve tvaru

$$x_c(X, t) = \frac{150 \cdot C \cdot k \cdot d}{f_c} \sqrt{t}$$

Vektor X vstupních veličin shrnuje tabulka 3. Vedle součinitelů empirické povahy ve vztahu vystupuje pevnost betonu v tlaku f_c (v MPa), která zahrnuje vliv obsahu cementu, vodního součinitele, druhu a množství kameniva a vliv zpracování betonu. Jde o běžně používanou veličinu, kterou lze relativně snadno určovat u všech druhů betonu a v mnoha situacích.

Parametry vektoru X zmíněného matematického modelu lze stěží považovat za pevné. Jejich náhodná proměnlivost může být značná, je tedy na místě použití pravděpodobnostního přístupu a popis parametrů jako náhodných veličin s jejich distribuční funkcí. Hloubka karbonatace $x_c(X,t)$ je pak funkcí náhodných vstupních veličin a pomocí statistické analýzy lze odhadnout statistické parametry x_c , např. střední hodnotu a směrodatnou odchylku. S výhodou můžeme provést simulaci typu Monte Carlo, opakovanými výpočty podle uvedeného vztahu. Speciální variantou představuje numerická simulace Latin Hypercube Sampling (LHS), jejíž předností je malý počet simulací (řádově desítky) pro získání dobrého odhadu statistických parametrů.

Tab. 3 – Vstupní veličiny / Input variables

Veličina	Jednotka	Popis	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Rozdělení pravděpodobnosti
C	–	součinitel typu cementu	1,2	0,12	normální
d	–	součinitel podle úrovně CO ₂	1,5	0,15	normální
f _c	MPa	pevnost betonu v tlaku	32,3	2,1	dvouparametrické log-normální
k	–	součinitel vlhkosti prostředí	0,6	0,06	normální
Φ	–	faktor neurčitosti modelu	1,0	0,1	normální

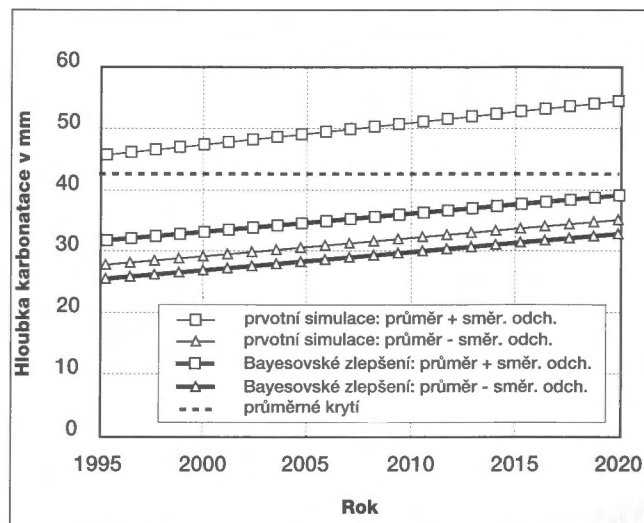
Bayesovská předpověď hloubky karbonatace

Pravděpodobnostní simulace používá na vstupu veličiny se statistikami, získanými dřívějšími měřeními, z literatury nebo inženýrským odhadem, a nemusí být tudíž dostatečně adekvátní. Také matematický model postupu karbonatační fronty nelze považovat za exaktní. Výsledky výpočtu jsou potom tzv. *prvotními informacemi*, které závisí na dostupných vstupních datech a použitím modelu. Numerickou simulací lze takové informace obdržet pro libovolný zvolený časový okamžik.

Předpověď hloubky karbonatace lze ovšem *zlepšit* spojením *prvotních statistik* (střední hodnoty, směrodatné odchylky, získané numerickou simulací) a *statistik měření* této hloubky na konstrukci. Tato předpověď využívá zmíněný Bayesův teorém a může být vhodně kombinována s metodou LHS. Výsledky jsou zřejmé z obr. 1. Takovýmto zlepšením odhadu statistik hloubky karbonatace, resp. iniciačního času můžeme zdokonalit také odhad (zbytkové) životnosti ŽB konstrukce, o čemž budeme odbornou veřejnost informovat.

Oprava ano či ne?

Použitý matematický model karbonatace a jeho kombinace se simulační technikou a Bayesovým teorémem, poskytuje zlepšený, tj. zpřesněný pohled na průběh koroze cementového tmelu působením kyselých plynů. Umožňuje snazší orientaci a rozhodování při strategii oprav. Výsledky simulací pomocí Bayesovského zlepšení odhadu dalšího postupu karbonatační fronty nejsou jistě jediným kritériem pro určení data opravy ŽB konstrukce, ale mohou být podle našeho názoru významnou součástí souboru dat, na jejichž základě se o opravě rozhoduje. Zdůrazňujeme také, že použitý model nezohledňuje tzv. důlkovou (lokální) korozi. Také proto snad čtenář autorům promine, že v rámci tohoto výkladu nezodpověděli zcela jasně na obecnou otázku, položenou v názvu příspěvku.



Obr. 1 – Změna hloubky karbonatace v čase / Carbonation depth vs. time

Praktický příklad mostního objektu č. 0426-003 ukazuje, že konstrukce z hlediska mechanického je zcela vyhovující. Také výsledky simulací jsou poměrně optimistické, postupná neutralizace hydroxidových iontů v cementovém tmelu kyselými plyny nedosáhne průměrného krytí výztuže do roku 2020, ovšem za předpokladu shodných agresivních podmínek. V posledních letech kolísá (a zřejmě narůstá) úroveň CO₂ v ovzduší, což karbonataci betonu může urychlit. Autoři v současné době pracují na probabilizaci výpočetního postupu, který proměnlivost CO₂ v čase respektuje.

Práce na tomto příspěvku byla podporována z prostředků projektu GA 103/95/0781 „Predikce karbonatace betonu“.

Literatura

- [1] Schiessl, P.: Zur Frage der zulässiger Rissbreite und der erforderlichen Betondeckung im Stahlbetonbau unter besonderer Berücksichtigung der Karbonatisierung des Betons. *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton*, Heft 255 (1976), s. 175.
- [2] Papadakis, V. G., Fardis, M. N., Vayenas, G. G.: Effect of composition, environmental factors and cement-lime mortar coating on concrete carbonation. *Materials and Structures*, roč. 25 (1992), s. 293-304.
- [3] Siemes, A. J. M., Vrouwendvender, A. C. W. M., Beukel, V. D.: Durability of buildings: A reliability analysis. *Heron*, roč. 30 (1985), č. 3, s. 48.
- [4] Bob, C., Afana, E.: On-site assessment of concrete carbonation. Sborník *Failure of concrete structures (1993)*, Štrbské Pleso, s. 84-87.
- [5] Keršner, Z., Rovnaníková, P., Teplý, B.: Modelling of Concrete Carbonation in Presence of Mortar Coating – A Probabilistic Approach. Sborník *Concrete in the Service of Mankind (1996)*, E & FN SPON, Dundee, Skotsko, s. 747-756.
- [6] Novák, D., Keršner, Z., Teplý, B.: Prediction of structure deterioration based on the Bayesian updating. Sborník *Natural-draught cooling towers (1996)*, Kaiserslautern, SRN, s. 417-421.

Ing. Zbyněk Keršner, CSc., Prof. Ing. Břetislav Teplý, CSc., Ing. Drahomír Novák, CSc., Ústav stavební mechaniky FAST VUT, Veveří 95, 662 37 Brno
 Doc. RNDr. Pavla Rovnaníková, CSc., Ústav chemie FAST VUT, Žižkova 17, 662 37 Brno
 Ing. Igor Suza, Mostní a silniční vývoj, s. r. o., Havlíčkova 79, 602 00 Brno