

NĚKTERÉ ASPEKTY ZÁVISLOSTI ŽIVOTNOSTI, SPOLEHLIVOSTI A CENY BETONOVÉ KONSTRUKCE: PŘÍKLAD DEGRADACE PŮSOBENÍM CHLORIDŮ ■ SOME ASPECTS OF DEPENDENCY OF SERVICE-LIFE, RELIABILITY AND PRICE OF A CONCRETE STRUCTURE: EXAMPLE OF DEGRADATION DUE TO CHLORIDE INGRESS

Břetislav Teplý, Markéta Chromá

V příspěvku je připomenuta závislost ceny betonové konstrukce na její životnosti a úrovni spolehlivosti. Je uvedena metodika a nástroje umožňující studovat tyto souvislosti, které mohou mít nejenom ekonomické, ale též environmentální dopady (spotřeba a druh materiálů či technologií), což je základem pro pokročilé navrhování konstrukcí s hodnocením či výběrem optimální varianty. Je to ukázáno na příkladech betonových konstrukcí vystavených působení posypových solí obsahujících chloridové ionty, a tím vyvolané degradaci betonu. ■ In this paper dependence of costs on service-life and reliability level for concretes structures is mentioned. We show methodology and tools suitable for studying these dependencies with possible financial and environmental impacts; it may be viewed as a base for advanced design of structures and assessment or choice of an optimum variant. Examples of concrete structures exposed to deicing salts and consequential concrete degradation are presented.

V souvislosti s otázkami ceny konstrukcí a jejich životnosti připomeňme, že k potřebě hodnocení nákladů za celý životní cyklus stavby [1] vede mj. první ze základních hodnotících kritérií pro zadání zakázek dle zákona 137/2006 Sb. o veřejných zakázkách, tj. kritérium ekonomické výhodnosti nabídky [2]. Také v tomto smyslu, tj. při přípravě a hodnocení zakázek a při vypracovávání nabídek může být dále popsána metodika užitečná.

ŽIVOTNOST A ÚROVEŇ SPOLEHLIVOSTI

Při navrhování konstrukcí se uvažuje hodnota životnosti specifikovaná investorem v součinnosti s dalšími zainteresovanými stranami. Při posuzování stávající konstrukce se hodnotí zbytková životnost – návrh rekonstrukce má zabezpečit požadovanou (prodlouženou) životnost. Současné normy (Eurokódy) obvykle nevedou k přímému řešení takových úloh, připomínáme proto novou modelovou normu *fib-Model Code*

2010 [3], [4] (dále jen NMC), která tuto problematiku zohledňuje.

Verifikace životnosti musí být provedena s ohledem na možné změny užitelnosti konstrukce během času, tj. v důsledku degradace materiálu apod. Formálně se za ukončení životnosti považuje okamžik, kdy konstrukce již nesplňuje požadavky na spolehlivost; odtud plyne vazba v posuzování životnosti na mezní stavy použitelnosti (SLS) či únosnosti (ULS) a úlohy degradace materiálů.

Při verifikaci mezních stavů specificky vázaných na životnost se v NMC pochopitelně uvažuje faktor času – mezní stavy jsou závislé na degradaci materiálů probíhající v čase a mohou tedy omezovat životnost konstrukce dříve, než by byla vyčerpána její únosnost. Jde např. o depasivaci výztuže karbonatácí betonu, resp. působením chloridů, případně o takové důsledky koroze výztuže, které sice ještě nemají rozhodující vliv na únosnost či tuhost konstrukce, ale jsou limitující s ohledem na vzhled konstrukce, nebo by vedly k příliš nákladným opravám v budoucnu. Takové stavy jsou někdy označovány jako mezní stavy trvanlivosti (DLS), resp. iniciační mezní stavy.

Pro posuzování DLS se v NMC mj. jako základní uvádí **pravděpodobnostní formát**, který jediný dává projektantovi možnost stanovení míry spolehlivosti daného návrhu či řešení s ohledem na požadovanou životnost. V NMC jsou proto také uvedeny podmínky omezující pravděpodobnost dosažení následujících degradačních procesů, např. koroze výztuže vlivem průniku chloridů do betonu. Dosáhne-li totiž koncentrace chloridů v okolí výztuže kritické hodnoty C_{cr} , následkem je depasivace ocelové výztuže, která pak v přítomnosti kyslíku a vody může začít korodovat. Pravděpodobnostní hodnocení tohoto stádia je popsáno podmínkou ve tvaru

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

kde P_f je pravděpodobnost poruchy ve smyslu dosažení kritické koncentrace chloridů C_{cr} v místě výztuže s li-

mitní hodnotou P_d ; z praktických důvodů je pravděpodobnost poruchy obvykle transformována na hodnotu indexu spolehlivosti β s limitní hodnotou β_d .

Ve vztahu (1) je C_a koncentrace chloridů v hloubce krycí vrstvy a , dosažená v čase t_D (tj. čase, v kterém je konstrukce vyšetřována, obvykle tedy je to očekávaná nebo limitní životnost vzhledem k depasivaci výztuže). Hodnota C_a může být stanovena laboratorně na odebraných vzorcích, operativnější a obecnější způsob je využití vhodného výpočetního modelu pro prognózu průniku chloridů betonem. V tomto příspěvku je aplikován model zařazený do *fib-Model Code* 2010 [3]. Tento postup byl mj. uplatněn při posuzování mostu v práci [5]; blíže o modelování degradace betonu působením chloridů viz [6].

CENA BETONOVÉ KONSTRUKCE VE VZTAHU K ŽIVOTNOSTI A SPOLEHLIVOSTI

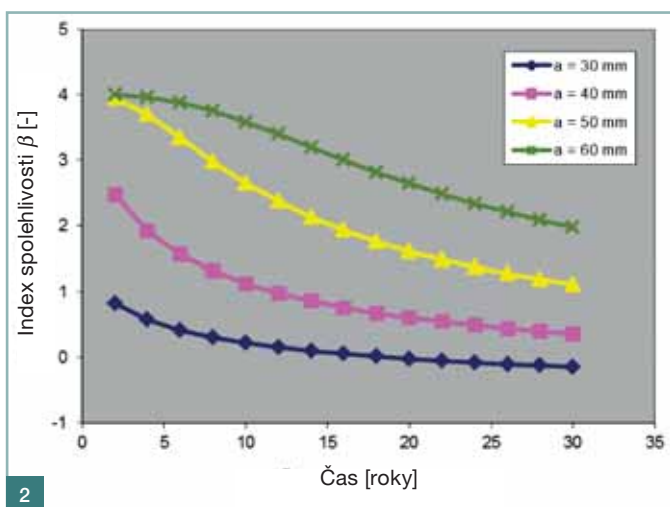
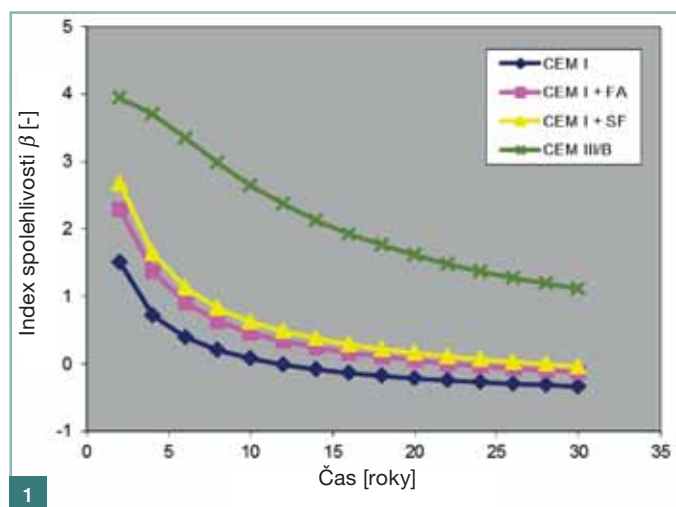
Jak je patrné ze vztahu (1), spolehlivost, životnost, krytí výztuže a expoziční charakteristiky jsou navzájem provázány, přičemž výraznou roli hrají také vlastnosti použitého betonu – především jeho difúzní charakteristiky. Jinak řečeno, jedná se o závislosti ceny, typu betonu a jeho objemu. To se pochopitelně promítá též do ceny stavebního díla.

Připomeňme, že z pohledu celkových nákladů (tj. nákladů za celý životní cyklus stavby) se jedná mj. o náklady na projekt a výstavbu, náklady na údržbu, náklady na kontrolu či prohlídky a náklady na opravy (po celou dobu předpokládané životnosti t_L roků) – blíže viz např. [1].

Je ovšem nutno podotknout, že zde jsou další závažné souvislosti: u nových konstrukcí jsou totiž druh betonu a rozměry průřezů (tj. se zahrnutím krycí tloušťky) generovány nejenom požadavky trvanlivosti, ale zejména požadavky na únosnost. Tato skutečnost brání tomu, aby bylo možno nějak zobecnit závislost typu betonu a jeho spotřeby na cenu.

Obr. 1 Závislost úrovně spolehlivosti na životnosti pro betony s různou odolností proti průniku chloridů (krytí výztuže $a = 50$ mm a $w/c = 0,40$) ■ Fig. 1 The dependency of reliability index on service-life for concretes with different chloride resistance (concrete cover $a = 50$ mm and $w/c = 0.4$)

Obr. 2 Závislost úrovně spolehlivosti na životnosti pro různá krytí výztuže (použit CEM III/B, $w/c = 0,4$) ■ Fig. 2 The dependency of reliability index on service-life for different concrete covers (for CEM III/B, $w/c = 0.40$)



Tento příspěvek je proto zpracován jako ukázka dílčích vazeb životnosti a spolehlivosti jen na relativní ceně s uvažováním trvanlivosti a nejistot, nevynutelně se v realitě vyskytujících (a tudíž vstupujících např. do vyhodnocení podmínky (1)).

PARAMETRICKÉ STUDIE

Pro ilustraci uvedených závislostí je zde studován čas do inicializace koroze výztuže s uvažováním nejistot, tj. s aplikací pravděpodobnostního přístupu, s využitím výpočetního modelu degradace betonu působením chloridů. Jsou tak hodnoceny závislosti mezi životností, úrovní spolehlivosti, druhu betonové směsi, tloušťky krytí a poměrné ceny při uvažování postupu degradace betonové konstrukce v čase.

Poznamenejme ještě, že v případech posuzování spolehlivosti ve smyslu mezních stavů trvanlivosti není hodnota β_d předepsána jako pro požadavky únosnosti, nýbrž může být určena projektantem po dohodě se zainteresovanými stranami, které takto mohou ovlivnit celkové náklady. Obvykle jde o interval $0,8 < \beta_d < 1,8$; např. dle [3] je

Tab. 1 Vstupní hodnoty pro uváděné studie ■ Tab. 1 Input values for parametric studies

Proměnná	Střední hodnota	COV [%]	PDF
Krycí vrstva [mm]	30 až 60	12,5	Lognormální (2par)
Tloušťka konvekční zóny [mm]	8,9	6,3	Beta ($a = 0$, $b = 50$)
Čas [roky]	2 až 30	–	Deterministické
Počáteční koncentrace chloridů [%/cement]	0	–	Deterministické
Koncentrace chloridů v konvekční zóně v čase t [%/cement]	2	75	Normální – jednostranně ohraničené
Migrační koeficient chloridů [m^2/s]	a) $8,9 \cdot 10^{-12}$ b) $5,6 \cdot 10^{-12}$ c) $4,8 \cdot 10^{-12}$ d) $1,4 \cdot 10^{-12}$	20	Normální
Exponent funkce vlivu doby ošetřování [-]	0,3	40	Beta ($a = 0$, $b = 1$)
Regresní proměnná vlivu okolního prostředí [$^{\circ}C$]	4526,9	15,5	Normální
Teplota okolního vzduchu [$^{\circ}C$]	20	5	Normální
Faktor neurčitosti modelu [-]	1	–	Deterministické

doporučeno $\beta_d = 1,3$. V následující studii důsledky této volby ukážeme.

Pro pravděpodobnostní analýzu dle vztahu (1) byl použit softwarový nástroj FReET-D (<http://www.freet.cz>), který zahrnuje více než třicet modelů pro pravděpodobnostní odhady degradace železobetonových konstrukcí.

Ve studii byl použit model, který byl vytvořen a kalibrován v rámci evropského projektu EURAM a poté začleněn do modelové normy fib [3]. Byly řešeny/srovnány příklady čtyř betonových směsí s rozdílnou odolností proti průniku chloridových iontů. K přípravě betonových směsí byl použit:

- a) pouze CEM I;
- b) CEM I s příměsí 22 % popílku (FA);
- c) CEM I s příměsí 5 % křemičitého úletu (SF);
- d) pouze cement CEM III/B.

Dále byla studována závislost úrovně spolehlivosti na životnosti pro různá krytí výztuže pro betonovou směs připravenou z CEM III/B. Výsledky těchto analýz jsou shrnuty na obr. 1 a 2. Vstupní údaje předložených ilustrativních příkladů obsahuje tab. 1.

Na obr. 1 je znázorněna závislost

úrovně spolehlivosti na životnosti stanovené vyhodnocením podmínky (1) pro krytí výztuže $a = 50$ mm. Je patrné, že požadujeme-li např. spolehlivost odpovídající indexu spolehlivosti $\beta_d = 1,5$, životnost se pohybuje v intervalu od 3 let (CEM I) až do 22 let (CEM III/B). K cenovému srovnání těchto variant betonu lze využít např. *Ceník produktů a služeb 2012* TBG Metrostav, kde uváděná cena pro beton třídy C25/30 i C30/37 (při stupni vlivu prostředí XD) vyrobený s použitím pouze CEM I, resp. CEM III/B je dražší jen asi o 5 %; rozdíl v předpokládané životnosti je ale mnohanásobný. Cenová srovnání pro ostatní dva betony s příměsí [varianta b) a c)] neuvádíme z důvodu velké variability jejich cen (závislejších mj. na výrobci i druhu zakázky).

Pomocí výsledků studie můžeme např. také odhadovat, jaký vliv by měl druh betonu na míru spolehlivosti pro nějakou danou životnost ve smyslu depasivace výztuže.

Poznamenejme, že volbou sníženého požadavku na úroveň spolehlivosti, např. $\beta_d = 0,8$, bychom dospěli k prognóze životnosti v ještě větším intervalu.

Literatura:

- [1] Teplý B.: Trvanlivost – náklady – spolehlivost konstrukcí, BetonTKS 3/2005, s. 3–5
- [2] Teplý B.: Jak lze chápat ekonomickou výhodnost u veřejné zakázky? Stavebnictví 6-7/2012, s. 48–50
- [3] fib Draft Model Code 2010, fib Bulletins 55, 56, Fédération internationale du béton, Lausanne, 2010
- [4] Červenka V., Teplý B., Vítek L. J.: Nová modelová norma fib 2010, Beton TKS 2/2010, s. 3–7
- [5] Wendner R., Strauss A., Guggenberger T., Bergmeister K., Teplý B.: Ansatz zur Beurteilung von chloridebelasteten Stahlbetonbauwerken mit Bewertung der Restlebensdauer. Beton- und Stahlbetonbau 2010, Vol. 105, Heft 12, pp. 778–786
- [6] Vořechovská D., Chromá M., Podroužek J., Rovnaníková P., Teplý B.: Modelling of Chloride Concentration Effect on Reinforcement Corrosion. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering 2009, Vol. 24, pp. 446–458
- [7] Enevoldsen I.: Practical implementation of probability based assessment methods for bridges, Structure and Infrastructure Engineering 2011, Vol. 7 (7–8), pp. 535–549

lu: asi od 4 let pro beton připravený z CEM I do cca 40 let pro beton z CEM III/B. Přitom by to byl vlastně racionální požadavek, jelikož $\beta_d = 1,5$ se obvykle používá pro mezní stavy použitelnosti ve smyslu omezení deformací konstrukce (průhyby apod.), zatímco podmínka (1) se vztahuje pouze k jednomu místu na konstrukci (např. nejvíce ohroženému degradaci – kde by pravděpodobně došlo k depasivaci výztuže nejdříve) a je tedy pro konstrukci „méně nebezpečná“.

V praxi se ale za rozhodující pro zahájení opravy obvykle považuje až stav, kdy je depasivována výztuž na jistém rozsahu konstrukce či prvku, např. na 15 %. Analyzovat takový stav je náročnější a pro běžnou praxi asi málo schůdné, i když teorie i potřebné nástroje již existují – vyžadují mj. údaje o 2D či 3D variabilitě vlastností materiálu, konstrukce a působení prostředí. Zjednodušeně ale k takovému efektu můžeme přihlídnout také tak, že snížíme požadavek na limitní hodnotu indexu spolehlivosti, tedy uvážíme např. $\beta_d = 0,8$.

Obr. 2 znázorňuje závislost úrov-

ně spolehlivosti na životnosti pro různá krytí výztuže a je odtud patrné, že rozhodnutí projektanta o tloušťce betonové krycí vrstvy je v těchto souvislostech zásadní. Nepochybně se to odrazí i v ceně – s potřebnou tloušťkou betonové krycí vrstvy se zvětšuje či zmenšuje potřebný objem betonu, mění se výška průřezu a u nosných konstrukcí to tedy může zasahovat i do návrhu/posouzení únosnosti s dopadem na návrh výztuže. Z těchto důvodů nelze přímo ukázat cenové srovnání, projektant to však v konkrétním případě může provést a i takto návrh optimalizovat.

ZÁVĚRY

V příspěvku je popsána a na příkladech betonové konstrukce vystavené působení posypových solí ukázána závislost životnosti, úrovně spolehlivosti a ceny betonové konstrukce. Nastíněným postupem a pomocí obdobných nástrojů lze samozřejmě hodnotit i důsledky jiných možných způsobů degradace, např. karbonatace betonu, koroze výztuže, působení kyselin na beton a další. Cílem příspěvku bylo dokumentovat metodiku a nástroje umožňující rozhodovat pokročilým způsobem při projektování rozsáhlých železobetonových konstrukcí též s ohledem na ekonomické či environmentální důsledky, tj. s vyhledáním optimální varianty.

Obecněji podobná situace nastává při ověřování úrovně spolehlivosti konstrukcí a prognóz jejich životnosti vzhledem k únosnosti a dalším funkcím, kdy je nezbytné uvážit nejistoty, plynoucí z materiálových vlastností, zatížení a působení prostředí. Projektanti ale (až na vzácné výjimky) nejsou zvyklí takto postupovat. Zajímavý je v tomto ohledu nedávno publikovaný článek [7], který poukázal na možné úspory celkem 30 milionů € u dvanácti mostů při důsledném pravděpodobnostním hodnocení jejich stavu.

Příspěvek byl finančně podpořen grantem P104/12/0308 Grantové Agentury ČR.

Prof. Ing. Břetislav Teplý, CSc.

e-mail: teplý.b@fce.vutbr.cz

RNDr. Markéta Chromá, Ph.D.

e-mail: chroma.m@fce.vutbr.cz

oba: Fakulta stavební VUT v Brně
Veveří 95, 602 00 Brno



Text článku byl posouzen odbornými lektory.



ČVUT v Praze
Fakulta stavební

Katedra betonových a zděných konstrukcí

7. mezinárodní konference

FIBRE CONCRETE 2013

12. - 13.9. 2013
Hotel DAP
Praha



FIBRE CONCRETE 2013
je mezinárodní konferencí
zaměřenou na
VLÁKNOBETONY.

Prezentuje nové poznatky
v oblasti výzkumu, vývoje
a jejich zavádění
do projekční praxe. Součástí
konference jsou ukázky
úspěšných aplikací
vláknobetonu.

Konference je určena
širokému okruhu odborníků
z oblasti výroby betonu,
projektantům a ostatním
podnikatelům
ve stavebnictví.

Informace:

Ing. Vladimíra Vytlačilová, Ph.D.
e-mail: fc2013@fsv.cvut.cz

<http://concrete.fsv.cvut.cz/fc2013>