

Výpočetní metody prognózy životnosti betonových konstrukcí

Břetislav Teplý, Zdeněk Šmerda, Zbyněk Keršner

Železobetonové konstrukce – životnost – mezní stavy – výpočetní metody – koroze výtluže – karbonatace betonu – pravděpodobnost poruchy – náhodné vlastnosti

Stavebně-inženýrská praxe by se nikdy neměla vyhnout velmi důležitému problému, kterým je *odhad životnosti konstrukce*. Při projekci stavby nové jde přitom o cílovou (návrhovou) životnost, uvažovanou od jejího postavení; u konstrukcí, které jsou již po jistou dobu v provozu pak jde o životnost zbytkovou. V obou případech je však třeba se při odhadování životnosti také zaměřit na způsob údržby a u staveb již provozovaných i na prodloužení životnosti opravami, příp. i rekonstrukcemi.

Je zřejmé, že životnost konstrukce souvisí s hospodárností, a tedy s náklady, které se musí vynaložit na stavbu, její údržbu a případné opravy, a je také zřejmé, že jde o základní problém, jehož podstatou jsou celkové náklady, které se musí pro dosažení její požadované životnosti vložit. Odhadnout tyto finanční náklady je jistě velmi obtížné a je otázka, zda je to vůbec možné vzhledem k tak nejistým faktorům, jako jsou změny účinků prostředí a agresivity provozů, možné degradace navrhovaných anebo použitých stavebních materiálů, změny v působení zatížení a zejména nárůst cen ve stavebnictví. Je však nepochybné, že přes uvedené obtíže je nutné se odhadem životnosti zabývat.

Spolehlivost prvků stavební konstrukce a také konstrukce jako celku, která musí být splněna po celou dobu životnosti, se hodnotí ve dvou mezních stavech, a to únosnosti a použitelnosti. V nich se porovnávají účinky *zatížení* s účinky *odporu konstrukce* s ohledem na *vliv prostředí*. Všechny tyto akce mohou mít mnoho parametrů, které mají náhodný charakter a obecně vzato lze je vyšetřovat pravděpodobnostními metodami.

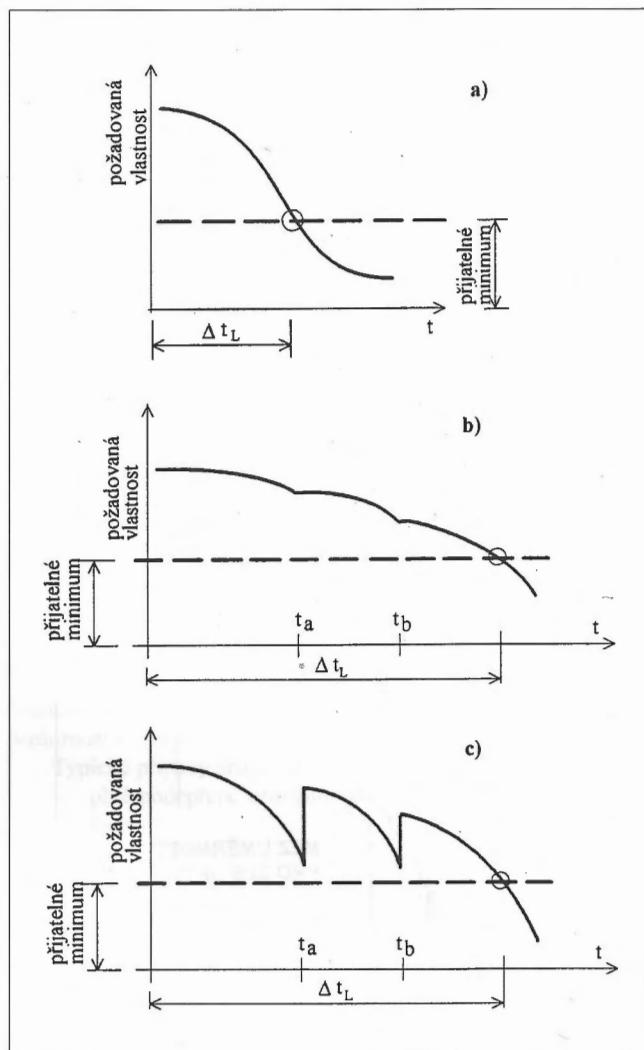
Má-li se však taktó odhadnout životnost konstrukce, musíme znát změny zatížení, odporu konstrukce i prostředí, ke kterým dojde během budoucího období a ovšem také statistiky zúčastněných náhodných proměnných. Obtížnost řešení tohoto problému je možno ukázat na vlivu prostředí na vyztužený beton, kdy velkou degradaci tohoto stavebního materiálu způsobuje karbonatace (účinky CO_2) a ta vede ke ztrátě schopnosti krycích vrstev chránit výtluž proti korozi. Rychlost karbonatace však závisí na několika náhodných parametrech (vodním součiniteli aj.) a doposud nebyl pro ni ani nalezen zcela spolehlivý model. Podobně je tomu i v jiných případech agresivních prostředí.

Zdrojem nepřesnosti je také nedostatek experimentálních důkazů o vlivu degradace stavebních materiálů v průběhu dalších let, který zpravidla není možno objektivně posoudit jen ze zrychlených zkoušek. Nedostatkem současných postupů při studiu degračních vlivů je často i oddělený pohled na každý jev bez uvážení jejich vzájemné souvislosti.

Definice životnosti

Životností (resp. zbytkovou životností) konstrukce anebo konstrukčního prvku se rozumí časový úsek Δt_L od uvedení do provozu (resp. od posuzovaného okamžiku), po který *požadované vlastnosti* neklesnou pod své *přijatelné minimum*. Zde je možno též citovat čl. 1.1.2 ČSN 730031 [1]: "Základní vlastností definující spolehlivost konstrukce je bezporuchovost jejího obvyklého

užívání, spočívající ve schopnosti zachovat požadované užité vlastnosti během doby životnosti objektu". Je to znázorněno schematicky na *obr. 1a*, význam údržby a opravy je ukázán na *obr. 1b a 1c*.



Obr. 1 – Chování konstrukce v čase (a – konstrukce bez údržby, b – konstrukce s údržbou v časech t_a a t_b , c – konstrukce s opravami v časech t_a a t_b)

Poruchou se zde rozumí nesplnění podmínek spolehlivosti pro bezporuchový provoz, vyjádřených mezními stavy.

Teoreticky vzato, taktó by bylo třeba hodnotit všechny varianty mezních stavů; obvykle však postačí zaměřit se jen na ty, které budou v daném případě rozhodující.

V zásadě je tedy nutno prokázat, který z mezních stavů povede u hodnocené konstrukce k minimálnímu Δt_L . Každý z možných mezních stavů se projevuje jinými příznaky a důsledky, vzniká za rozdílných okolností, může být ovlivněn různými vnějšími faktory a záviset na jiných vlastnostech konstrukce. Přitom je "přijatelná" hladina pravděpodobnosti vzniku mezních

stavů různá. Pro 1. skupinu je to pravděpodobnost cca 10^{-5} až 10^{-7} , zatímco u mezních stavů 2. skupiny je to asi 10^{-2} až 10^{-3} .

Optimalizace nákladů

Z hlediska volby nejlepší varianty materiálu, konstrukce a jejího uspořádání a strategie údržby či oprav jde o složitý optimalizační problém, v němž primární roli hraje celková cena konstrukce a míra přijatého rizika. V jednoduchém tvaru lze celkovou cenu C_T objektu vyjádřit součtem

$$C_T = C_I + C_M + p_f C_F$$

kde C_I je cena původní (projekt + stavba), C_M cena oprav a údržby, C_F náklady vyvolané poruchou (náklady na zásadní rekonstrukci, případně na odstranění stavby aj.) a p_f je teoretická pravděpodobnost poruchy.

Optimalizační problém ve vztahu k životnosti lze definovat deterministicky jako minimalizaci C_T za omezující podmínky

$$\Delta t_L > \Delta t_{L,d}$$

anebo pravděpodobnostně

$$P(\Delta t_L \leq \Delta t_{L,d}) \leq p_{f,d}$$

kde Δt_L , d je návrhová životnost, p_f , d návrhová pravděpodobnost poruchy.

Taková formulace naráží na řadu problémů – odhady cen a míry rizika vyjádřené pomocí p_f jsou obtížně realizovatelné.

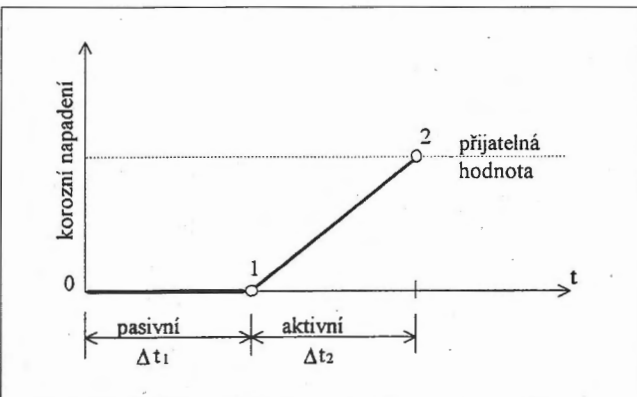
Poznamenejme ještě, že v souvislosti s problematikou životnosti konstrukcí se někdy uvádí obecný vztah – viz např. [2].

$$R(t) = R_0 g_{deg}(t)$$

kde $R(t)$ je na čase t závislá kapacita konstrukce (může to být "kapacita" ve smyslu únosnosti, deformovatelnosti aj.), R_0 počáteční hodnota této kapacity, tj. v čase $t = t_0$ a $g_{deg}(t)$ je tzv. degradační funkce. V jejím nalezení u komplexních úloh však právě spočívá obtížnost aplikace takovéto formulace.

Železobetonové konstrukce

U železobetonových konstrukcí je velmi častou příčinou vyčerpání životnosti *korozí výztuže*. Obr. 2 (v obdobné formě často v literatuře uváděný) ukazuje na časové ose dělení na *pasivní stadium* výztuže (úsek 0–1, výztuž je proti korozi dostatečně chráněna) a *aktivní stadium* (korozí probíhá – úsek 1–2). Bod 2 může ohraničovat životnost. Přitom přijatelnou hladinu korozního napadení (bod 2) na obr. 2 lze stanovit na základě takového korozního úbytku, pro který ještě bude splněna podmínka, že zmenšená prů-



Obr. 2 – Stadia vlivu koroze výztuže

řezová plocha výztuže bude větší nebo rovna ploše projektem požadované. To tedy může být pouze případ výztuže předimenzované. Jinak nemůžeme korozi vůbec připustit (přijatelná hodnota korozního napadení je nula) a mezi životnosti je již konec pasivního stadia, tj. bod 1 na obr. 2.

Délka pasivního stadia Δt_1 závisí na ochraně výztuže nezkarbonatovanou krycí vrstvou betonu a na agresivitě prostředí; hloubku karbonatace lze odhadnout pomocí modelů popsanych v [3], [4]. Narušení pasivní ochrany výztuže může být ovšem způsobeno i jinými zdroji, jako pronikáním iontů chloridu (např. působením posypových solí).

Délku Δt_2 aktivního stadia a průběh koroze (spojnice bodů 1 a 2 na obr. 2 není ve skutečnosti přímková) lze modelovat způsobem uvedenými např. v [5].

Metody pro odhad životnosti

Dále se zmíníme o dvou možných cestách, jak určit životnost Δt_L :

- 1) časový úsek Δt_L se stanoví prostřednictvím jiné veličiny (pravděpodobnosti poruchy p_f),
- 2) časový úsek Δt_L je určen přímo.

Formální dělení výpočetních metod odhadu Δt_L může být ale také provedeno např. z hlediska *charakteru vstupních dat*:

- metody deterministické (pracuje se s deterministickými údaji);
- pravděpodobnostní (uvažují se náhodné vlastnosti vstupních údajů).

Nepřímé vyjádření Δt_L

Využití pravděpodobnosti poruchy

Dostatečně obecnou veličinou je pravděpodobnost poruchy p_f (resp. pravděpodobnost dosažení jistého stavu konstrukce). Při jejím určování se uvažují *náhodné vlastnosti* participujících veličin – viz např. [6], [7].

Pravděpodobnost poruchy p_f definujeme obvykle jako

$$p_f = P(A \geq B)$$

kde A je příslušná akce zatěžovacích účinků na konstrukci a B je bariéra, tj. odpor, kterým je konstrukce schopna této akci vzdorovat.

Běžnými příklady mohou být tedy

$$p_f = P(M \geq M_U)$$

kde M je moment v daném průřezu vyvolaný zatížením a M_U je mezní moment únosnosti tohoto průřezu.

Nebo

$$p_f = P(\omega \geq \omega_{lim})$$

kde ω je přetvoření vyvolané zatížením a ω_{lim} je přetvoření mezní (připustné).

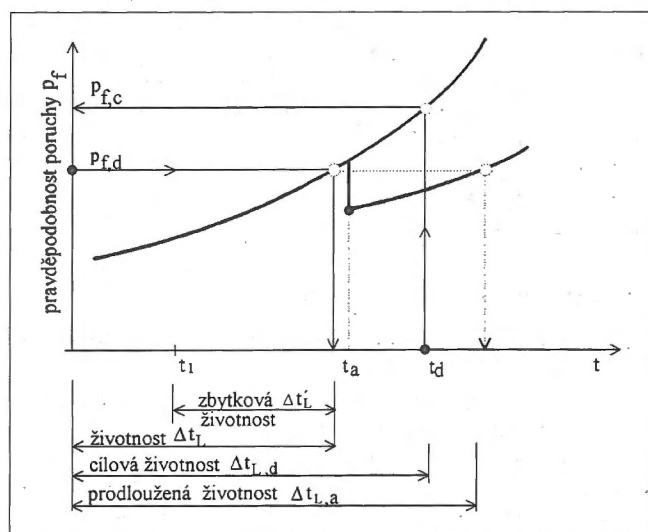
S využitím veličiny p_f jsme navrhli následovný postup určování životnosti konstrukcí, který splňuje uvedené podmínky obecnosti (viz též [8], [9]):

Nejprve se provede opakovaný výpočet pravděpodobnosti poruchy v několika časových okamžicích za účelem získání odhadu závislosti p_f vs. t . Přitom se započítává vliv degradačních procesů, takže závislost má vzestupný trend. Na obr. 3 je též naznačeno, jak by se tato závislost mohla měnit skokem při uvažování důsledků opravy konstrukce, provedené např. v časovém okamžiku t_a .

Průsečík hladiny návrhové (připustné) pravděpodobnosti $p_{f,d}$ s křivkou p_f vs. t pak určuje životnost konstrukce Δt_L , případně prodlouženou životnost $\Delta t_{L,a}$. Vztáhneme-li čas k nějakému aktu-

álnímu okamžiku pozorování, např. t_1 , pak můžeme jednoduše určit zbytkovou životnost Δt_L .

Schema umožňuje též opačný postup: známe-li časový bod t_d , popisující nějakou cílovou životnost $\Delta t_{L,d}$, můžeme nalézt tomu odpovídající pravděpodobnost $p_{f,c}$.



Obr. 3 - Časová závislost pravděpodobnosti poruchy

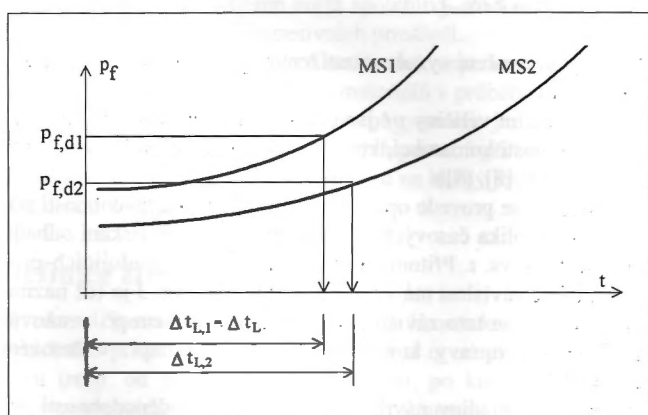
Poznamenejme, že metody výpočtu p_f v tomto příspěvku nepopisujeme; čtenáři odkazujeme např. na [10] nebo [11]. Přitom zmínku zasluhují zejména tyto metody: *FORM*, *SORM*, *curve fitting*, *importance sampling*, *response surface* aj. (české ekvivalenty názvů nejsou dosud běžně užívány).

Uvažme nyní, že obvykle nevíme předem, který mezní stav či který jev bude rozhodující pro stanovení životnosti. Kromě toho mezní stavy 1. a 2. skupiny mohou mít rozdílnou hladinu návrhové pravděpodobnosti poruchy, řekněme $p_{f,d1}$ a $p_{f,d2}$. Pak výše popsaný postup musíme doplnit tak, jak je znázorněno na obr. 4: závislosti p_f vs. t sestrojíme pro oba mezní stavy (resp. pro více stavů) a nalezneme Δt_L jako menší z hodnot Δt_{L1} a Δt_{L2} , resp. jako $\min(\Delta t_{Li})$.

Využití distribuční funkce doby životnosti

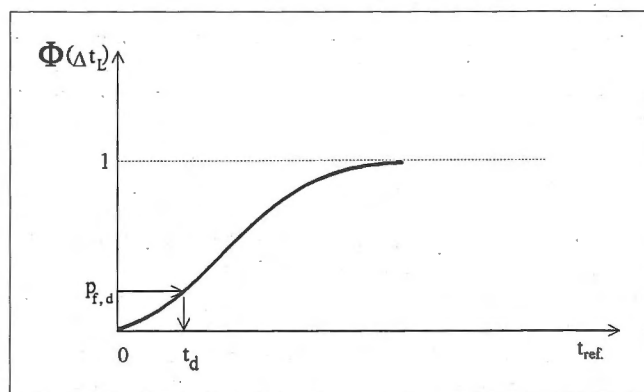
Nepřímé vyjádření doby životnosti Δt_L je možné interpretovat i jiným způsobem: uvažováním životnosti Δt_L jako náhodné veličiny. Odhady statistických parametrů této veličiny lze získat aplikací numerických simulačních metod [10]. Odhad distribuční funkce pak získáme opakovaným výpočtem pravděpodobnosti

$$P(\Delta t_L \leq \Delta t_{ref})$$



Obr. 4 - Schéma nalezení životnosti při dvou mezních stavech

pro zvolenou množinu referenční doby životnosti Δt_{ref} . Takto lze získat empirickou distribuční funkci životnosti $\Phi(\Delta t_L)$, viz obr. 5. Nepřímé stanovení Δt_L se v tomto případě realizuje volbou přijatelné míry rizika vyjádřené pravděpodobností $p_{f,d}$ a životnost se odvodí jako příslušný kvantil t_d distribuční funkce.



Obr. 5 - Distribuční funkce doby životnosti

Poznamenejme, že u této metody jde o naprosto jinou informaci než v předchozím případě, neboť životnost je zde popsána distribuční funkcí, vztahenou k určitému meznímu stavu. Obr. 3 resp. 4 zobrazují zvyšování pravděpodobnosti, že dojde k meznímu stavu (v čase), kdežto obr. 5 ukazuje pravděpodobnost, že životnost je menší nebo rovna určité hodnotě.

Metody pro přímé vyjádření Δt_L

V případech, kdy je rozhodující korozí výztuže (viz též obr. 2 a související text), lze odhad životnosti stanovit pomocí součtu (viz např. [12])

$$\Delta t_L = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_{ct}$$

Přitom Δt_1 je časový úsek, po který je výztuž chráněna – pasivní stadium. Je-li karbonatice betonu jediným důvodem pro postupnou depasivaci výztuže, pak odhad Δt_1 lze uskutečnit pomocí některého modelu dle [3], [4].

Je-li povrch betonu opatřen ochrannou vrstvou, pak se použije model popsaný též ve [4]. Při působení chloridů je nutno vzít pro odhad Δt_1 v úvahu např. model uvedený v [13], příp. je možné započítat působení dalších vlivů.

Člen Δt_2 odpovídá aktivnímu stadiu koroze výztuže, která je již tzv. depasivována. Toto stadium je ohraničeno okamžikem, kdy je dosažena přijatelná mez koroze; lze použít např. model dle [5].

Časový úsek Δt_{ct} je doba, o kterou se oddálí dosažení meze životnosti díky ochrannému nátěru výztuže, příp. jiným opatřením.

Při výše popsaném postupu určení Δt_L mohou být použity zmíněné modely s *deterministicky* uvažovanými vstupními parametry. Protože řada vstupních veličin má náhodný charakter, je vhodnější – jsou-li k dispozici potřebné statistické charakteristiky – postupovat *pravděpodobnostně*, přitom se získají též statistické charakteristiky jevu Δt_L . Obě tyto varianty jsou ukázány na příkladu vazníku – viz [14].

Jisté zlepšení uvedeného přístupu je doporučeno v [12]: v členu Δt_1 se místo průměrné tloušťky krycí vrstvy c dosadí $c - \delta$, kde korekční vzdálenost δ má zohlednit přirozenou fluktuaci délky c , resp. fluktuaci hloubky zkarbonatování vrstvy. V pravděpodobnostních metodách se ovšem i c považuje za náhodnou veličinu. Tento postup je však možný jen pro zjištění zbytkové životnosti.

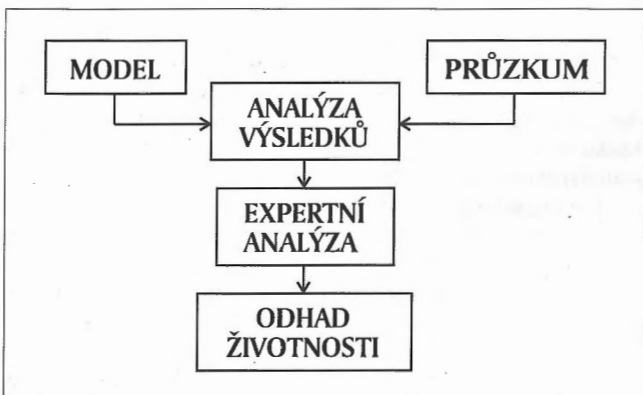
Právě popsané metody pro přímé vyjádření Δt_L nejsou univerzální ve smyslu různých mezních stavů, různých definic ohraničení životnosti, různých typů konstrukcí z různých materiálů.

Závěr

V předchozím byly uvedeny některé hlavní činitele, s nimiž je třeba počítat při odhadu životnosti nosného prvku nebo celé konstrukce. Je zřejmé, že odhad životnosti nově projektované konstrukce bude vycházet pouze z předpokladů o odporu konstrukce včetně jeho postupné degradace.

U konstrukce provozované budou již naproti tomu k dispozici výsledky průzkumu jejího stavu, a jen v případě, kdy bude třeba rozhodnout o způsobu další údržby anebo opravy, bude třeba mít k dispozici informace o materiálech a technologiích, které k tomu budou zapotřebí. Pro odhad životnosti takové konstrukce je již možný podrobný rozbor stavu konstrukce, pro který se využijí všechny adekvátní prostředky (průzkum, statistická, citlivostní a pravděpodobnostní analýza), který může o ní podávat již dosti objektivní obraz. Protože však teoretické frekvenční rozdělení náhodných veličin nemusí vždy zcela odrážet skutečnost, může v důsledku toho vést jak pravděpodobnostní, tak zejména deterministické hodnocení životnosti k ne zcela reálným závěrům a proto je třeba výsledky posoudit expertní analýzou, která vlastně představuje syntézu teoretických závěrů se zkušenostmi z podobných staveb.

Pro takové posuzování by bylo pak možno sestavit toto obecné schéma postupu:



Obr. 6 – Schéma postupu posuzování životnosti

MODEL zahrnuje statistické postupy, funkcionální závislosti pro stanovení životnosti a postupy pro vyřešení životnosti v závislosti na pravděpodobnosti, PRŮZKUM metodiku průzkumu a vlastní průzkum, EXPERTNÍ ANALÝZA přisouzení váhy výsledkům bloku ANALÝZA VÝLEDKŮ a ODHAD ŽIVOTNOSTI úsudek na základě bloku EXPERTNÍ ANALÝZA.

Praktické použití výpočetních metod pro odhad životnosti betonové konstrukce u nás zatím nebylo aplikováno (pokud je autorem známo) – kromě práce [14], která jistým způsobem navazuje na tento článek a [9], kde je metoda s využitím pravděpodobnosti poruchy aplikována na problému předpjatého nosníku. Domníváme se však, že zejména při rozhodování o dalším osudu některých významných betonových staveb bude nutné takové metody používat. Kladou sice značné nároky na získání potřebných dat, ale tam,

kde omezení provozu, odstavení stavby z provozu či její demolice přináší vysoké ztráty, se bez takového nástroje inženýr neobejde.

Poděkování

Tento příspěvek vznikl v rámci projektu 103/93/2037, financovaného grantovou agenturou ČR.

Literatura

- [1] ČSN 73 0031 Spolehlivost stavebních konstrukcí a základových púd, 1988.
- [2] Mori Y., Ellingwood B. R.: Reliability-based service-life assesment of aging concrete structures. *J. Struct. Engrg.*, 1993, č.119 (5), s. 1600–1621.
- [3] Schiessi P.: Zur Frage der zulässigen Rissbreite und der erforderlichen Betondeckung im Stahlbetonbau unter besonderer Berücksichtigung der Karbonatisierung des Betons. *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton*, Heft 255, Berlin, 1976.
- [4] Papadakis V. G., Fardis M. N., Vayenas G. G.: Effect of composition, environmental factors and cementlime mortar coating on concrete carbonation. *Mater. Struct.*, 1992/25, s. 293–304.
- [5] Smejkal P.: Výsledky dlouhodobého sledování koroze betonářských ocelí. *Pozemní stavby*, 1987/9, s. 424–428.
- [6] Tichý M.: *Pravděpodobnostní optimalizace dimenzování stavebních konstrukcí*, Academia, Praha, 1986.
- [7] Teplý B.: Spolehlivostní analýza – možnosti její aplikace. *Stavební obzor*, 1994/6, s. 178–182.
- [8] Teplý B., Keršner Z., Rovnaníková P.: Estimation of remaining service life of PC beams. *Sborník konference CONCREEP'93*, Barcelona, 1993, s. 629–633.
- [9] Novák D., Keršner Z., Teplý, B.: Probabilistic modelling of deterioration of PC beams. *Sborník konference Durability and Service Life of Bridge Structures*, Poznaň, 1994, s. 211–215.
- [10] Schuëller G. I., Stix R.: A critical appraisal of methods to determine failure probabilities. *Structural Safety*, 1987/4, s. 293–309.
- [11] Schuëller G. I., Bucher C. G., Bourgund U., Ouyypornprasert, W.: On efficient computational schemes to calculate structural failure probabilities. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 1989/1, s. 10–18.
- [12] Siemes A. J. M., Vrouwendvender A. C. W. M., Beukel V. D.: Durability of buildings: A reliability analysis. *Heron*, 1985/3.
- [13] Clifton J. R.: Predicting the service life of concrete. *ACI Materials Journal*, 1993, s. 611–617.
- [14] Novák D., Šmerda Z.: Pravděpodobnostní prognóza životnosti železobetonového vazníku, *Beton a zdivo*, 1995/1, s. 18–20.

Doc. Ing. Břetislav Teplý, CSc., vedoucí Ústavu stavební mechaniky FAST VUT v Brně, Veveří 95, 662 37 Brno, tel. 05–7261 360
Prof. Ing. Dr. Zdeněk Šmerda, CSc., Cihlářská 30, Brno
Ing. Zbyněk Keršner, CSc., odborný asistent Ústavu stavební mechaniky FAST VUT v Brně, Veveří 95, 662 37 Brno, tel. 05–7261 367

Houževnatost betonu

Stále rostoucí zájem o seismickou odolnost betonových konstrukcí a odolnost proti výbuchům a jiným mimořádným zatížením se projevuje ve výzkumných laboratořích. Jedním z parametrů, který se sleduje, je houževnatost, vyjádřená obvykle mechanickou energií nutnou k porušení zkušební vzorku. Protože je známo, že pevnost betonu a jeho modul pružnosti s časem rostou, zatímco jeho duktilita se zmenšuje, vznikla otázka, jaký má tato protichůdnost vliv na houževnatost. Podrobný výzkum provedený na Vysoké škole technické v Miláně Albertem Castellanim ukázal, že houževnatost betonu se u vzorků starých dvacet let nijak významně nezměnila. Stárnutí betonu nemá proto podstatný vliv na spolehlivost konstrukcí. – Pokud jde o duktilitu betonu, je nutné jí věnovat při řešení konstrukcí vystavených otřesům pozornost, a to zejména u prostého betonu. (*Journal of Structural Engineering*, 1993/5, s. 1402–1412)

Tirelia