

Pravděpodobnostní prognóza životnosti železobetonového vazníku

Drahomír Novák, Zdeněk Šmerda

Životnost – železobetonové konstrukce – karbonatace betonu – koroze výztuže – náhodné veličiny – pravděpodobnost poruchy – citlivostní analýza

Subjektivita pojmu *životnost* je všeobecně přijímána jak laiky tak odborníky v různých oblastech technické praxe. Společným rysem pro různé obory je vyjádření životnosti ve formě času: životnost výrobku je skončena, když přestane v určitém okamžiku plnit požadované funkce. Je možné jistě tvrdit, že pojem životnosti je pojem *smluvní* a bude se lišit případ od případu.

Ve stavebním inženýrství se tento pojem úzce váže na koncepci bezpečnosti a použitelnosti, tedy na první a druhou skupinu mezních stavů. Subjektivita pojmu životnost vzrůstá zvláště ve vztahu k mezním stavům použitelnosti a odhadem míry zhoršování (porušování) stavebních konstrukcí pro určité prostředí. Jednou z možností jak hodnotit životnost železobetonových konstrukcí je zaměřit se na vliv *karbonatace betonu a koroze výztuže*.

Při modelování těchto jevů je nutno pracovat s parametry, jejichž hodnoty jsou často značně nejisté. Pak je namísto uvažovat tyto parametry jako náhodné veličiny a použít k numerickému modelování spolehlivostních metod. Životnost lze potom chápat pravděpodobnostně, což může subjektivní realitu tohoto pojmu vyjádřit výstižněji.

Předmětem této práce je *pravděpodobnostní prognóza* životnosti železobetonového prefabrikovaného střešního vazníku. Prognóza je založena na experimentálním průzkumu a pravděpodobnostním analytickém přístupu k řešení. Příspěvek představuje praktickou aplikaci jednoho z výpočetních postupů pro prognózu životnosti betonových konstrukcí a navazuje tak na článek [1].

Analyzovaná konstrukce

Experimentální průzkum se realizoval na *železobetonových prefabrikovaných vaznicích* – nosné konstrukci střešního pláště skladu brambor ve Studenci [2]. Budova se stavěla v roce 1982, jedná se tedy o konstrukci z hlediska sledování karbonatace poměrně mladou. Vzhledem k funkci budovy je dostatečně známa teplota a vlhkost prostředí, což bylo významné pro odhad životnosti. Ze sledovaných parametrů dále popíšeme jen ty, které se uplatní pro hodnocení životnosti: Krytí podélné výztuže c , průměr výztuže Φ , k (relativní vlhkost prostředí/100) a tloušťku δ zkarbonatované vrstvy.

Model pro vyjádření životnosti

Posuzuje-li se životnost pouze na základě koroze betonu a výztuže, lze použít matematický model dle [3]. Model zde uvažujeme bez vlivu údržby, pak se tedy výraz pro životnost skládá ze dvou členů: času potřebného k tomu, aby hloubka zkarbonatovaného betonu byla rovna krytí výztuže Δt_{L1} , a času koroze výztuže Δt_{L2} . Hlavní příspěvek k životnosti je z prvního členu. Výraz pro zjednodušený odhad životnosti má tvar

$$\Delta t_L = \Delta t_{L1} + \Delta t_{L2} = \left(\frac{c - \delta}{Rk} \frac{2,7}{46w - 17,6} \right)^2 + \frac{0,08c}{\Phi v_c}$$

kde jsou c – tloušťka krytí výztuže betonem, δ – průměrná tloušťka zkarbonatované vrstvy, R – součinitel vyjadřující druh

cementu, k – relativní vlhkost vzduchu / 100, w – vodní součinitel, Φ – průměr výztuže, v_c – rychlost koroze výztuže.

Podrobnější popis tohoto modelu lze nalézt v práci [3], kde autoři provádějí spolehlivostní analýzu tak, že uvažují parametry modelu jako náhodné proměnné.

Deterministický přístup

Neuvažuje-li se životnost v závislosti na pravděpodobnosti výskytu náhodných veličin, lze mluvit o deterministickém odhadu. Ten je možno získat dosazením určitých hodnot proměnných parametrů, které jsou ve výše uvedeném výrazu pro odhad životnosti. V dalším textu vezmeme v úvahu střední hodnoty těchto parametrů, tj. $c = 20,2$ mm, $R = 2$, $\Phi = 22$ mm a $v_c = 0,04$ mm/rok; ostatní parametry se uvažují v několika variantách, a to: $\delta = 1,2$ a 3 mm, $k = 0,85$ a 0,90 a $w = 0,5$ a 0,6.

Vyčíslení první části (Δt_{L1}) výrazu pro odhad životnosti je uvedeno v *tab. 1*.

Tab. 1 – Hodnoty Δt_{L1} (v rocích)

| k | W | δ [mm] | | |
|------|-----|-----------------|-------|-------|
| | | 1 | 2 | 3 |
| 0,85 | 0,5 | 31,89 | 28,65 | 25,29 |
| | 0,6 | 9,3 | 8,36 | 7,46 |
| 0,9 | 0,5 | 28,44 | 25,56 | 22,83 |
| | 0,6 | 8,29 | 7,45 | 6,66 |

Druhá část (Δt_{L2}) již závisí jen na velikosti krytí c , na průměru výztuže Φ a na rychlosti postupu koroze v_c ; a po vyčíslení má hodnotu $\Delta t_{L2} = 1,84$ roků.

Z výsledků plyne vliv jednotlivých parametrů na životnost prvků neboť:

- zvýšení vodního součinitele w z 0,5 na 0,6 vede ke snížení Δt_{L1} na cca 30% hodnoty vypočtené z $w = 0,5$ a
- zvýšení relativní vlhkosti vzduchu z 85% na 90% sníží Δt_{L1} o cca 10% hodnoty vypočtené pro $k = 0,85$.

Rovněž větší zkarbonatovaná vrstva má za následek snížení životnosti Δt_{L1} . Je zřejmé, že vzhledem k vysoké citlivosti hodnoty životnosti na poměrně malé změny těchto parametrů, je žádoucí modelovat je jako náhodné veličiny a uplatnit tak spolehlivostní přístup k řešení této problematiky. Taktéž bude vhodné nalézt výstižnější modely postupu karbonatace.

Spolehlivostní přístup

Pravděpodobnostní modelování životnosti vazníku je zaměřeno na *vyšetřování času Δt_L jako náhodné veličiny*. Podobně jako v práci [3] nejsou na vstupu uvažovány náhodné procesy kvůli jednoduchosti a praktické nemožnosti určení parametrů. Statistické parametry náhodných veličin vycházejí z výsledků experimentálního vyšetřování [2] a z hodnot publikovaných v [3] a jsou souhrně

uvedeny v tab. 2. U všech uvedených veličin bylo předpokládáno lognormální rozdělení pravděpodobnosti.

Tab. 2 – Statistické parametry náhodných veličin

| Náhodná veličina | Jednotky | Střední hodnota | Variační koeficient | Zdroj údajů |
|------------------|----------|-----------------|---------------------|-------------|
| c | mm | 20,2 | 0,2 | [2] |
| δ | mm | 3 | 0,2 | [2] |
| R | - | 2 | 0,15 | [3] |
| k | - | 0,85 | 0,1 | [2] |
| w | - | 0,5 | 0,05 | [3] |
| Φ | mm | 22 | 0,05 | [2] |
| v_c | mm/rok | 0,04 | 0,5 | [3] |

Spolehlivostní přístup zde aplikovaný zahrnuje analýzu:

Statistickou – cílem je odhad statistických parametrů doby životnosti, tj. průměru, rozptylu, variačního koeficientu a šikmosti. S výhodou je použita metoda Latin Hypercube Sampling [4], [5].

Citlivostní – zjišťuje se míra vlivu jednotlivých náhodných veličin na dobu životnosti.

Zde byla použita citlivost ve formě variačních koeficientů – viz [6]. Tato citlivost ukazuje procentuální podíl jednotlivých náhodných veličin na výsledném variačním koeficientu doby životnosti.

Pravděpodobnostní – je zaměřena na ocenění míry rizika vyjádřené teoretickou pravděpodobností poruchy p_f . Zde je p_f definována jako pravděpodobnost, že doba životnosti bude menší nebo rovna době referenční:

$$p_f = P(\Delta t_L \leq \Delta t_{L,ref})$$

Pro soubor referenčních dob lze takto provést odhad distribuční funkce náhodné veličiny "životnost" (viz též [1]).

K numerickým výpočtům byl použit spolehlivostní software SAMPLE [4], [5], SENSI [7] a ISPUD [8]. Uvedme, že s problematikou odhadu životnosti velmi úzce souvisí modelování postupu karbonatace. Stochastickým modelováním hloubky karbonatace jako náhodné veličiny se zabývá článek [9]. Zde je hloubka karbonatace použita přímo na vstupu modelu pro predikci životnosti.

Výsledky řešení

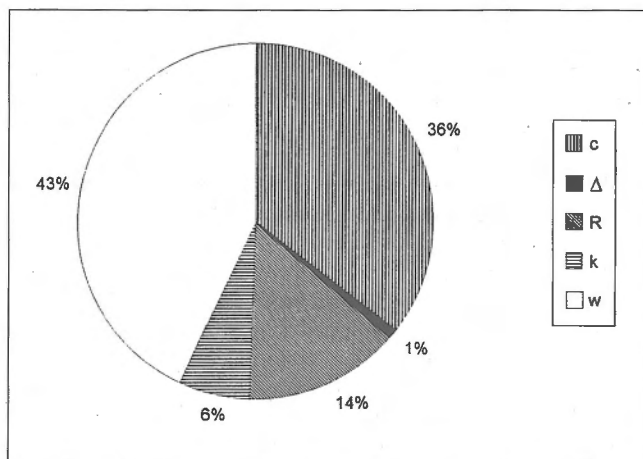
Po provedení numerické simulace doby životnosti (použito 100 simulací) byla určena střední hodnota doby životnosti 25,6 let. Proměnlivost doby životnosti je značná: 71,8 %. Hodnoty variačních koeficientů náhodných veličin v tab. 1 nejsou sice vysoké, nicméně nejistoty se "sčítají" a vedou k tak vysoké variabilitě.

Variační rozpětí, tj. střední hodnota plus/minus směrodatná odchylka je 7 až 44 roků. Koeficient šikmosti byl odhadnut 1,8, což naznačuje, že náhodná veličina doba životnosti má rozdělení pravděpodobnosti odchylovající se od normálního.

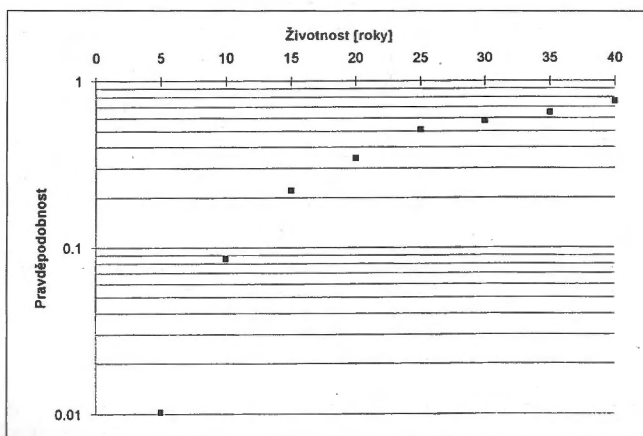
Kruhový diagram na obr. 1 ukazuje jakou měrou (v procentech) se jednotlivé náhodné veličiny podílejí na variačním koeficientu doby životnosti 0,718. Dominantní vliv mají dvě veličiny, a to vodní součinitel (43%) a tloušťka krytí podélné výztuže betonem (35,6%). Nulový vliv mají veličiny průměr výztuže Φ a rychlost koroze v_c , což je dáno skutečností, že z výpočetního modelu se prakticky uplatňuje pouze první člen. Malý vliv se projevil u tloušťky zkarbonatované vrstvy betonu (0,8%), což je zřejmě z její průměrné hodnoty 3 mm ve srovnání s hodnotou krytí výztu-

že. U analyzovaného vazníku, jak již bylo uvedeno, nebyla průzkumem prokázána významná karbonatace, tento výsledek je zde tedy přirozený.

Obr. 2 ukazuje výsledky pravděpodobnostní analýzy. Referenční doba životnosti byla volena v rozsahu do 40 let. Obr. 2 tedy představuje odhad distribuční funkce doby životnosti. Míra rizika je značná; např. pravděpodobnost, že doba životnosti bude kratší nebo rovna 10 rokům je $8,5 \cdot 10^{-2}$.



Obr. 1 – Vliv náhodných veličin na variabilitu doby životnosti v procentech



Obr. 2 – Odhad distribuční funkce doby životnosti

Závěr

Výsledky naznačují, že vzhledem k výrazným nejistotám parametrů matematického modelu pro predikci životnosti železobetonové konstrukce je použití klasického deterministického přístupu diskutabilní. Při pravděpodobnostním řešení obdržíme odhad celé distribuční funkce, což má jistě větší vypovídací schopnost.

Dalším kladem pravděpodobnostního řešení je hodnocení významu jednotlivých parametrů na základě citlivostního rozboru, které může vést k doporučení, na které parametry je třeba se při výrobě zaměřit.

Použití pravděpodobnostního přístupu k odhadu životnosti konstrukce však v sobě skrývá několik problematických otázek. Jednou z nich je skutečnost, že hustota pravděpodobnosti náhodně proměnných veličin je spolehlivěji určena měřením jen v některých užších oblastech (zpravidla kolem průměrných hodnot), zatímco v extrémnějších je značně neurčitá. Kromě toho nemohou ve skutečnosti hodnoty některých parametrů klesnout pod určitou mez. Problémem je určení statistických parametrů

vstupních náhodných veličin, které je nutno kvantifikovat experimentem či kvalifikovaným odhadem. Z tohoto pohledu je výběr nejvhodnějšího modelu rozdělení pravděpodobnosti pro jednotlivé náhodné veličiny krokem základním a velmi důležitým. Jinak mohou uvedené nedokonalosti vést ke zkráceným výsledkům.

Spolehlivostní přístup, zde naznačený, může poskytnout daleko cennější pohled na danou problematiku proto, že je to pohled realizovaný na pravděpodobnostním základě. Pravděpodobnostní postupy pro určení doby životnosti stavebních konstrukcí mohou sloužit jako užitečný podklad při odhadu životnosti expertní analýzou.

Poděkování

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

Literatura

- [1] Teplý B., Šmerda Z., Keršner Z.: Výpočetní metody prognózy životnosti betonových konstrukcí. *Beton a ždivo*, 1995/1, s. 14–17.
- [2] Šmerda Z.: Průzkum některých parametrů železobetonového prefabrikovaného vazníku, zpráva projektu GA/103/93/2037, Fakulta stavební VUT v Brně, 1993.

- [3] Siemes A. J. M., Vrouwendvender A. C. W. M., Beukel V. D.: Durability of buildings: A reliability analysis, *Heron*, 1985/3.
- [3] Teplý B., Novák D.: Consequence of uncertainty of input data on engineering software reliability, *Software for Engineering Workstations*, roč. 5 (1988), s. 33–34.
- [4] Teplý B., Novák D., Florian A.: Prostředky pro statistickou analýzu výpočetních modelů, *Stavebnický časopis*, 1988/4, s. 321–326.
- [5] Novák D., Teplý B., Shiraishi N.: Sensitivity analysis of structures: A review, *Sborník konference CIVIL COMP '93*, Edinburgh, August 1993, s. 201–207.
- [6] Novák D., Shiraishi N.: *Latin Hypercube Response Approximation and Sensitivity Analysis for Reliability Problems*. Research Report N° 93-ST-01, School of Civil Engineering, Kyoto University, Japan, March 1993.
- [7] Bourgund U., Bucher C. G.: *Importance Sampling Procedure Using Design Points – A User's Manual*. Internal Working Report, Institute of Engineering Mechanics, Innsbruck University, Austria, 1986.
- [8] Teplý B., Keršner Z., Novák D.: Stochastické modelování postupu karbonatice betonu. *Sborník konference Nové požadavky na stavby a jejich spolehlivost*, Praha, červen 1994, s. 170–173.

Prof. Ing. Dr. Zdeněk Šmerda, CSc., Cihlářská 30, 615 00 Brno
Ing. Drahomír Novák, CSc., Šaumannova 10, 615 00 Brno

Postgraduální betonářské kurzy v Miláně

Již více než patnáct roků probíhají na *Vysoké škole technické v Miláně* (Politecnico di Milano) postgraduální dvousemestrální kurzy, které mají prohloubit vzdělání inženýrů v oboru betonových konstrukcí. Kurzy jsou sponzorovány italským cementárenským a stavebním průmyslem a označují se jako "Scuola di specializzazione in costruzioni in cemento armato". Ředitelem školy je Prof. Antonio Migliacci, známý italský odborník, úzce spjatý se stavebně-inženýrskou praxí, a vědeckým redaktorem kurzů je jejich zakladatel Prof. Sandro Dei Poli. Přednášejí především učitelé Vysoké školy technické v Miláně, dále přední italské odborníci působící ve stavebním průmyslu a obvykle alespoň jeden zahraniční host. Posluchačů je velice málo, jde většinou o stipendisty italského Ministerstva vysokých škol a společnosti Italcementi S.a.P. v Bergamu.

Program kurzů je víceméně ustálený; je zaměřen na aktuální problémy betonového stavitelství, přičemž se klade důraz na praktické aplikace. Součástí kurzů jsou exkurze do výroben, stavenišť a výzkumných pracovišť. Kromě standardních předmětů se posluchačům poskytují informace o nejnovějších problémech teorie betonových konstrukcí. Tyto přednášky jsou pravidelně zveřejňovány ve svazcích "Studi e Ricerche", které vydává společnost Italcementi.

Kurzů se mohou zúčastnit také cizinci; je tu jistá příležitost pro mladé české inženýry, neboť v roce 1994 se nám nabízela stipendia. Podmínkou účasti je ovšem znalost italštiny a angličtiny.

Milík Tichý

Svisle vyztužené zdivo

Skutečnost, že vyztužení zdiva vodorovnou výztuží vkládanou do spár podstatně zvětšuje jeho únosnost, je všeobecně známa a využívá se již po desetiletí. V současné době se však věnuje pozornost i svislému vyztužení, a to především pro zvýšení únosnosti zdiva objektů stavených v seizmických oblastech. Překážkou svislého vyztužení je ovšem prastaré pravidlo (dnes bohužel někdy opomíjené), že zdivo má mít takovou vazbu, aby svislé spáry neprobíhaly spojitě. Přesto se již používá svisle vyztužené zdivo ve Spojených státech, v Japonsku a na Novém Zélandu. Ve výzkumném úkolu podporovaném Evropskou unií a probíhajícím současně v Německu, Itálii a Řecku se vyšetřují vlastnosti zdiva z děrovaných tvárnic, které mají nesymetricky umístěný zvětšený úchytný otvor. Otvor, popřípadě vybrání v cihle slouží k provlečení svislé výztuže. Otvor se zaplní cementovou maltou. Výzkum se zabývá nejen únosností zdiva, ale pochopitelně také technologií tohoto neobvyklého způsobu zdění. (Darmstadt Concrete, 1994, s. 109–116)

Tirelia