POKROKY V NAVRHOVÁNÍ MOSTŮ V USA S OHLEDEM NA ŽIVOTNOST ▮ DESIGN FOR LIFE

1

Don Bergman, Anne-Marie Langlois, Carola Edvardsen

V USA jsou některé velké inženýrské projekty mostních konstrukcí stále navrhovány bez patřičných ohledů na trvanlivost a náklady během životního cyklu. Vzhledem k absenci vlastní obecně uznávané normy pro návrh betonových konstrukcí s ohledem na jejich životnost je v USA používána metodika *fib*, která poskytuje racionální pravděpodobnostní přístup. V článku jsou popsány dvě strategie této metodiky, pravděpodobnostní modelování koroze způsobené chloridy a implementace požadavků na trvanlivost založených na vlastnostech a chování konstrukce. ▮ In the US, some major infrastructure projects are still being designed with no due consideration to their durability and life-cycle costs. As there is no widely recognized North American structural design code that would explicitly consider durability, a fib methodology that provides a rational probability-based approach is used. The paper discusses two strategies of the methodology, probabilistic modelling of chloride induced corrosion and implementation of durability requirements based on properties and performance of the structure.

Je všeobecně známo, že prodloužení životnosti konstrukce pomocí robusního počátečního návrhu s ohledem na trvanlivost může být mnohem ekonomičtější než budoucí rekonstrukce. Aby se majitelé mostů vypořádali s budoucími omezenými provozními rozpočty, soustředí se raději na náklady na celý životní cyklus stavby a na správu majetku než pouze na počáteční cenu výstavby. Ve snaze snížit náklady na životní cyklus jsou nové velké betonové konstrukce navrhovány na životnost 100 let nebo více, tedy na déle než na 75 let, což je doba, se kterou se obvykle počítá v normách pro navrhování mostů.

Most přes záliv Izmit v Turecku a mosty New NY (Tappan Zee) a Downtown Crossing přes řeku Ohio ve Spojených státech jsou tři velké inženýrské projekty ve výstavbě, které mají jeden společný návrhový požadavek: každý z nich měl být navržen tak, aby byla životnost jeho nevyměnitelných částí 100 let.

Společnost COWI, mezinárodní inženýrská a poradenská firma se sídlem v Dánsku, která má více než dvacet let zkušeností s poskytováním inovativních a nákladově efektivních řešení pro návrh velkých infrastrukturních projektů s ohledem na životnost po celém světě, provedla statický návrh mostní konstrukce přes záliv Izmit. Buckland & Taylor (B&T), severoamerický člen skupiny COWI, je autorem statického návrhu zavěšeného hlavního pole mostu Downtown Crossing přes řeku Ohio, kde byl rovněž kladen důraz na životnost. Statický návrh zavěšeného hlavního pole i předpolí mostu u mostu New NY (Tappan Zee) (obr. 1) provedla společnost B&T.

Don Bergman, viceprezident pro velké projekty a ředitel projektu v B&T, hovoří o důležitosti pokroku v navrhování, který má za úkol prodloužit životnost konstrukcí v Severní Americe: „*Zvýšené povědomí a porozumění mechanismům degradace je při optimalizaci životních nákladů konstrukcí velmi důležitým faktorem*," vysvětluje pan Bergman.

2

Severoamerické normy pro navrhování konstrukcí výslovně nezohledňují trvanlivost a životnost železobetonových konstrukcí. Předepisovaná pravidla typu „musí vyhovět“ v těchto normách jsou příliš zjednodušená a nekvantifikují životnost konstrukce z daných materiálů v daném prostředí. Např. „vyhovující“ předepsané krytí výztuže nezohledňuje skutečnou odolnost betonu proti vnikání chloridů ani konkrétní míru expozice prvku chloridům. V mnoha případech nebylo dosaženo spolehlivého dlouhodobého chování konstrukce v agresivním prostředí a před uplynutím zamýšlené životnosti došlo k selhání její provozuschopnosti (obr. 2).

„Samozřejmě, projektanti mohou v návrhu přijmout opatření a zhotovitelé mohou použít ty nejlepší postupy, které mají prodloužit životnost. Nicméně, tyto kroky samy o sobě nestačí,“ říká pan Bergman. V poslední době byly vyvinuty různé pokročilé metody, které řeší životnost betonových konstrukcí. V Severní Americe ale neexistuje žádná obecně uznávaná norma pro návrh na životnost.

Některé z těchto metod používají proprietární software, ve kterém jsou analýzy založeny na „uzavřených“ algoritmech a „firemních“ databázích, jejichž nezávislé ověření je obtížné nebo neproveditelné. Další vyžadují mnoho zdlouhavých a náročných zkoušek trvanlivosti, které komplikují již tak napjatý harmonogram výstavby. Tyto metody obvykle nejsou používány dost dlouho na to, aby bylo možné ověřit vstupní parametry a výsledné chování konstrukce během životnosti. Je proto potřeba mít lépe definované normy a metody pro ověřování životnosti, na které se mohou majitelé spolehnout.

Jednou zavedenou metodikou návrhu konstrukcí s ohledem na životnost, která je založena na rozsáhlých zkušenostech a která je veřejně přístupná, je **Model Code for Service Life Design** (*fib* Bulletin 34, 2006). Tato metodika byla nedávno implementována do normy ISO 16204:2012 **Service Life Design of Concrete structures**. Metodika byla vyvinuta v rámci veřejně financovaného výzkumného projektu Duracrete a její správnost byla potvrzena sdružením univerzit a konzultačních společností. Jejím hlavním cílem je poskytnout pravděpodobnostní přístup, který je v principu podobný navrhování na mezní stavy v moderních návrhových normách.

Metodika *fib* byla firmou COWI úspěšně použita v mnoha významných a velkých mezinárodních infrastrukturních projektech vystavených nepříznivému prostředí, jako např. most přes záliv Izmit v Turecku, projekt tunelů STEP ve Spojených arabských emirátech a projekt mostů a tunelů Busan Geoje v Jižní Korei. Tato nejnovější metoda návrhu s ohledem na životnost byla také použita společností B&T v Severní Americe u mostu New NY (Tappan Zee) v New Yorku a mostu Downtown Crossing přes řeku Ohio mezi Kentucky a Indianou.

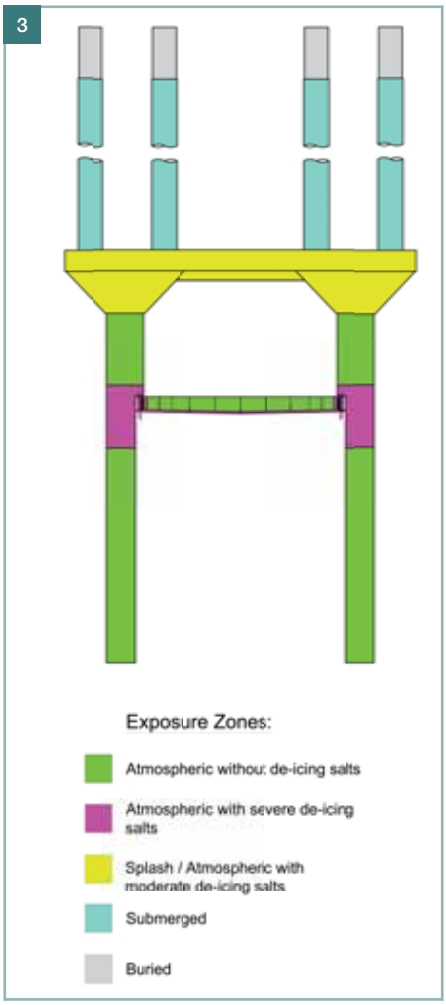
Obr. 1 Most New NY (Tappan Zee) v New Yorku byl navržen na životnost 100 let a je mezi prvními projekty v Severní Americe, které byly zpracovány podle modelové normy *fib* Bulletin 34 Model Code for Service Life Design (fotografie: New York State Thruway Authority) ▮ Fig.1 The New NY (Tappan Zee) Bridge in New York was designed for a 100 year service life and is among thefirst projects in North America where the *fib* Bulletin 34 Model Code for Service Life Design was implemented (Photo Credit: New York State Thruway Authority)

Obr. 2 Závažná koroze dodatečně předpjatého betonového nosníku. Návrh betonových konstrukcí s ohledem na životnost poskytuje příležitost optimalizovat náklady během životního cyklu konstrukce a vyhnout se situacím jako je tato ▮ Fig. 2 Severe corrosion of a post-tensioned concrete girder. Service life design of concrete structures gives the opportunity to optimize life-cycle costs and avoid situations like these

Obr. 3 Konstrukce je rozdělena na zóny expozice. Pro každou zónu jsou ohodnoceny trvanlivostní zatížení a odolnosti, aby byl návrh optimalizován ▮ Fig. 3 The structure is divided into exposure zones. For each zone, the durability loads and resistances are assessed to optimize the design

Obr. 4 Dvoufázový přístup k modelování degradace typické pro korozi způsobenou chloridy ▮ Fig. 4 Two-phase modelling approach of deterioration specific to chloride-induced corrosion

3



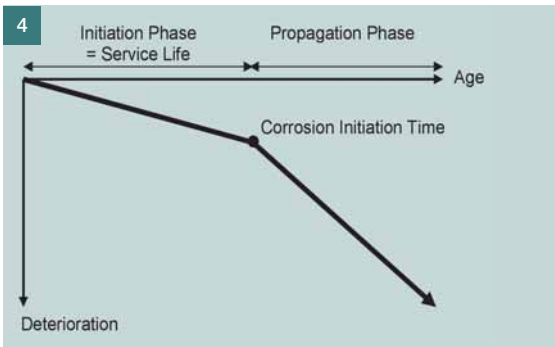
METODIKA NÁVRHU S OHLEDEM NA ŽIVOTNOST

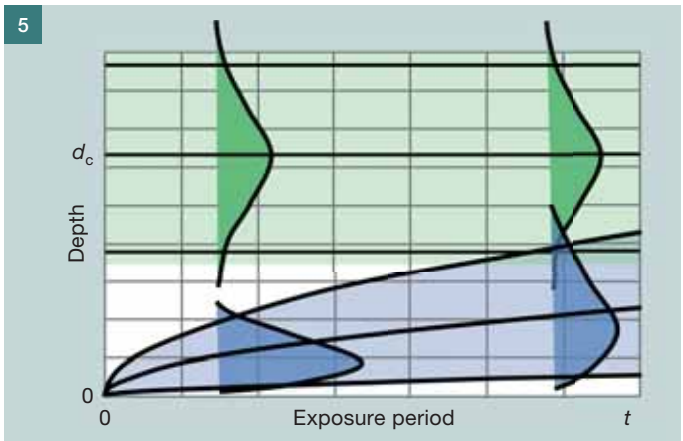
Metodika *fib* poskytuje racionální pravděpodobnostní přístup k návrhu betonových konstrukcí s ohledem na životnost a zahrnuje v sobě dvě trvanlivostní strategie (A a B) s ohledem na požadovanou úroveň spolehlivosti a proveditelnosti.

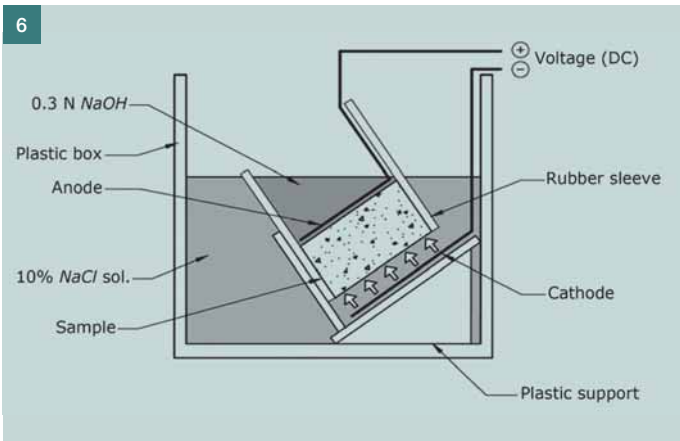
Strategie A spočívá v předcházení degradace konstrukčních prvků použitím nereaktivních materiálů nebo jiných prostředků, které výskytu degradace zabrání. Mezi příklady, jak se vyhnout korozi betonářské výztuže způsobené chloridy, patří použití nerezové oceli nebo výztužných ocelových vláken, katodické ochrany atd. Vzhledem k nákladům, údržbě a dalším hlediskům proveditelnosti se strategie A nepoužívá v případech, kde je koroze betonářské výztuže, vyvolaná chloridy, kritickým mechanismem degradace. Nicméně je možné si tímto přístupem (založeným na předcházení problémům) poradit s řadou potenciálních mechanismů degradace, např. s alkalickou reakcí kameniva, poškozením v důsledku zmrazovacích cyklů, opožděnou tvorbou etringitu a působením síranů.

Strategie B je analogická s návrhem konstrukce podle teorie mezních stavů pro pevnostní návrh konstrukce, která

4







Obr. 5 Schéma časově závislého pravděpodobnostního rozdělení prostupování chloridů (modrá) a kritické koncentrace chloridů v úrovni výztuže (zelená), podle *fib* ▮ Fig. 5 Schematic of time-dependent probabilistic distribution of chloride ingress (shown in blue) and the critical chloride threshold at the level of the reinforcement (shown in green), afterfib Bulletin 34, 2006

Obr. 6 Základní uspořádání zkoušky NTBuild 492 ▮
Fig. 6 Illustration of the basic setup for NTBuild 492 testing

Obr. 7 Zkouška NTBuild 492 může být snadno implementována do procesů kontroly a zajišťování kvality během výstavby ▮
Fig. 7 The NTBuild 492 test can be easily implemented in the quality control and assurance processes during construction

se v Severní Americe používá posledních třicet let. Zatížení a odolnosti spojené s trvanlivostí konstrukce jsou zhodnoceny a kvantifikovány pravděpodobnostně, s uvážením konkrétní expozice (míry působení, prostupu) a materiálových vlastností prvku. Strategii B lze použít pro řešení koroze výztuže způsobené chloridy, pro kterou je rozhodující koncentrace chloridů na povrchu a teplota prostředí. Trvanlivost ovliňuje betonová krycí vrstva a permeabilita betonu. Strategie B může být také použita k řešení koroze výztuže způsobené karbonatací, pokud je v dané lokalitě rozhodujícím mechanismem degradace. Postup tvorby návrhu založeného na splnění požadovaných vlastností a chování konstrukce v předpokládaném prostředí s ohledem na životnost je následující:

- Definice požadovaných kritérií, vlastností, chování a trvanlivosti, např. životnost 100 let pro nevyměnitelné části konstrukce.
- Definice podmínek expozice (zóny expozice) v daném prostředí pro každý prvek (obr. 3).
- Použití realistického modelování mechanismu degradace, např. expozic v prostředí a odolnosti materiálu. Stanovení dostatečného krytí výztuže a kvality materiálů, které odpovídá místnímu prostředí nebo mikroprostředí, které bylo definováno pro každý prvek.
- V závislosti na stanovených kritériích pro hodnocení chování a vlastností konstrukce vykonat zkoušky shody pro účely kontroly kvality, např. měření difuze chloridů v případě koroze výztuže vyvolané chloridy.

Rozhodujícím mechanismem degradace byla v případě třech zmíněných mostů koroze vyvolaná chloridy. Ke stanovení potřebného krytí výztuže a kvality betonu pro dosažení požadované životnosti byla použita plně pravděpodobnostní strategie B.

PRAVDĚPODOBNOSTNÍ MODELOVÁNÍ KOROZE ZPŮSOBENÉ CHLORIDY

Pravděpodobnostní modelování koroze způsobené chloridy se řídí dvoufázovým modelem (obr. 4).

Během iniciační fáze není patrné žádné oslabení materiálu nebo zhoršení chování konstrukce. Chloridy z okolního prostředí postupně prostupují betonem směrem k výztuži. Na počátku fáze propagace dojde k depasivaci ochranné pasivační vrstvy okolo výztužné oceli a je dosaženo kritické koncentrace chloridů. Během fáze propagace se poškození zhoršuje, a tím dojde ke ztrátě funkce. V řadě případů se rychlost koroze v čase zvyšuje.

Nominální životnost je rovna času iniciace koroze, který je definován jako konec iniciační fáze. Tato definice mezního stavu je konzistentní s cílem minimalizovat náklady na údržbu během životnosti konstrukce. Skutečná životnost bude prakticky delší, protože depasivace samotná nemusí mít za následek ztrátu funkce.

V metodice *fib* je k modelování prostupování chloridů a ke stanovení jejich koncentrace v úrovni výztuže použit druhý Fickův zákon. Pravděpodobnostní výpočty jsou založeny na vstupních parametrech, které jsou popsány funkcí hustoty pravděpodobnosti, střední hodnotou a variačním koeficientem. Stanovení střední hodnoty a variačního koeficientu pro každý parametr projektantovi umožní, aby zohlednil proměnlivost a nejistoty podmínek expozice, kvality betonu a krytí výztuže.

To je patrné z obr. 5. Modrou barvou je jako funkce pravděpodobnosti znázorněno prostupování chloridů v čase. Kritická koncentrace chloridů v úrovni výztuže d_c jako funkce pravděpodobnosti je zobrazena zeleně. Překryv zelených a modrých křivek ukazuje, že existuje pravděpodobnost překročení kritické koncentrace chloridů v úrovni výztuže, což může vést k depasivaci výztuže a k iniciaci koroze.

Při použití tohoto pravděpodobnostního přístupu je možné dosáhnout přijatelného indexu spolehlivosti nebo pravděpodobnosti poruchy během životnosti konstrukce. Metodika *fib* pro velké konstrukce doporučuje poměrně vysoký index spolehlivosti 1,3, což znamená, že pravděpodobnost iniciace degradace je během životnosti konstrukce 10 %. Tento index spolehlivosti byl použit u všech tří uvedených mostů.

IMPLEMENTACE POŽADAVKŮ ZALOŽENÝCH NA VLASTNOSTECH A CHOVÁNÍ KONSTRUKCE

Podle metodiky *fib* mohou být požadavky na trvanlivost kvantifikovány a měřeny tak, aby bylo možné potvrdit, že bylo dosaženo použití požadovaných materiálů a vlastností. Pevnost betonu v tlaku je měřena jako prostředek k ověření statické odolnosti konstrukce. Totéž

7

je možné nyní provést také v případě trvanlivostních vlastností betonu.

Permeabilita betonu je popsána koeficientem difuze chloridů a je stanovena pomocí zkoušky NTBuild 492 Chloride Migration Coefficient From Non-Steady State Migration Experiments. Na rozdíl od jiných zkoušek trvanlivosti betonu je možné ji efektivně provádět v rámci kontroly kvality konstrukce a procesů jejího zajišťování. Podobně jako u zkoušek pevnosti betonu v tlaku se zkouška NTBuild 492 provádí na standardních betonových válcích o stáří 28 dní. Vzorek je ponořen do solného roztoku po dobu obvykle 24 h (obr. 6). Po této době se už vzorek rozlomí na dva kusy v příčném řezu a hloubka prostupu chloridů se změří v sedmi bodech na povrchu lomu. Naměřené hodnoty se použijí pro výpočet rychlosti, kterou chloridy beton prostupují. Tato rychlost se nazývá koeficient difuze chloridů a je přímou vstupní veličinou pro trvanlivostní modelování podle *fib*.

Zkoušení betonových směsí před výrobou se obvykle provádí před výstavbou, aby bylo vyhodnoceno chování a vlastnosti hospodárně dostupných návrhů směsí. V laboratoři se provede série zkoušek, která ověří, že vstupní data použitá při modelování (např. koeficient difuze chloridů) a další požadavky spojené s trvanlivostí (např. odolnost proti opakovanému zmrazování a rozmrazování atd.) jsou oprávněná a spolehlivě dosažitelná. Výsledky zkoušek provedených před výrobou umožní navrhnout složení takové směsi, jejíž koeficient difuze chloridů odpovídá požadovaným hodnotám. Zkoušky provedené před vlastní výrobou také dávají určitý stupeň jistoty, že je během výroby možné konzistentně dosahovat předepsaných hodnot materiálových charakteristik způsobem, který je analogický s tím již používaným kvůli dalším důležitým vlastnostem materiálu, jako je např. pevnost v tlaku. Proces výběru receptury směsi a zkoušení před vlastní výrobou je obvykle společným úsilím dodavatele, který požaduje jisté vlastnosti betonu týkající se zpracovatelnosti, a projektanta / materiálového inženýra, který má na starost trvanlivost.

Získané požadavky na krytí výztuže jsou zapracovány do kritérií návrhu. Požadavky na kvalitu betonu, zkušební metody (včetně zkoušky NTBuild 492), kritéria přípustnosti a monitorování a četnost zkoušení před zahájením a během vlastní výroby jsou zahrnuty do specifikace betonu. Monitorováním koeficientu difuze chloridů na stavbě a hodnocením krytí výztuže před ukládáním betonu se potvrdí a zadokumentuje, že požadavky na trvanlivost jsou v budované konstrukci splněny. Koeficient difuze chloridů je měřen v pravidelných intervalech od zahájení výstavby, což umožňuje vypozorovat trendy ve výsledcích zkoušek, a pokud je to nutné, usnadnit pravidelné úpravy receptury směsi. Jakmile je ve výsledcích dosaženo uspokojivého trendu, je možné četnost zkoušek snížit.

ZÁVĚR

Metody pro navrhování konstrukcí s ohledem na životnost se během posledních deseti až dvaceti let velmi rozvinuly, ale severoamerické normy za tímto vývojem zaostávají. Velké severoamerické inženýrské projekty jsou stále navrhovány bez patřičných ohledů na trvanlivost a náklady během životního cyklu. Nové infrastrukturní projekty mohou a měly by být navrhovány a stavěny tak, aby byly minimalizovány náklady na budoucí opravy a rekonstrukce jejich majiteli i společností obecně.

Nicméně je prokazatelné, že v mnoha projektech jsou již požadavky na návrhovou životnost specifikovány na 100 nebo více let, tedy na mnohem déle, než s čím počítají návrhové normy v Severní Americe, a některé současné projekty si vyžádaly i pravděpodobnostní analýzu trvanlivosti. Bohužel ale v současné době v Severní Americe neexistuje pro majitele a projektanty žádná spolehlivá konkrétní návrhová norma, která by konzistentně a spolehlivě zajišťovala požadavky na prodlouženou životnost.

Pokud mají být požadavky na životnost splněny, projektantům nemohou stačit současné severoamerické normy. Jedním řešením je použití mezinárodní normy ISO 16204:2012 Service life design of Concrete Structures, v níž je implementován *fib* Bulletin 34 Model Code for Service Life Design, který byl během posledních dvaceti let používán v projektech po celém světě. Metodika s otevřeným zdrojem, kterou tyto normy poskytují, jde mnohem dál než obvyklá „vyhovující“ pravidla a subjektivní trvanlivostní požadavky, neboť umožňuje zdokumentovaný a potvrzený pravděpodobnostní přístup k návrhu podle mezních stavů trvanlivosti.

Do doby, než budou severoamerické normy připraveny, poskytuje ISO 16204 nástroj, který mohou projektanti a zhotovitelé používat, aby prokázali, že kritéria trvanlivosti jsou návrhem splněna a který majitelům zajistí dosažení zamýšlené životnosti.

Don Bergman, P.Eng.
Buckland & Taylor | COWI

Anne-Marie Langlois, P.Eng.
Buckland & Taylor | COWI

Carola Edvardsen, Dr-Ing.
COWI A/S.

Zkrácená verze článku byla uveřejněna v časopise Bridge Design and Engineering, 2014, č. 77, str. 40–42. Překlad článku zajistila společnost PROF-ENG, s. r. o.