TRVANLIVOST A PROVOZNÍ ŽIVOTNOST BETONOVÝCH MOSTŮ – INTELIGENTNÍ NÁVRH, REÁLNÁ VÝSTAVBA A PŘEDPOKLÁDANÁ ÚDRŽBA

DURABILITY AND SERVICE LIFE OF CONCRETE BRIDGES – INTELLIGENT DESIGN, REALISTIC CONSTRUCTION AND FORESEEN MAINTENANCE

STEEN ROSTAM

Pokračování článku ze 3. čísla časopisu

OCHRANA PROTI KOROZI JINÝMI PROSTŘEDKY

Odborníci, kteří se snaží zajistit dlouhou provozní životnost betonových konstrukcí, mají k dispozici celou řadu preventivních opatření bránících vzniku a šíření koroze. Tato opatření se nemusí nutně vztahovat k betonu či krycí vrstvě. Nejběžněji se používají tato opatření:

- nátěry s aplikací na beton nebo na výztuž
- inhibitory koroze
- katodová ochrana
- nekovové výztuže
- výztuže z nerez ocelí

První čtyři výše navržené, trvanlivost podporující opatření zhodnotíme v následujících kapitolách jen souhrnně. Aplikaci výztuže z nerez oceli, rozvedeme podrobněji vzhledem k tomu, že tato, v jiných souvislostech velice dobře známá technologie, se do stavebnictví zavádí nově.

Zabránění koroze po celou předpokládanou dobu provozní životnosti konstrukcí, vystavených agresívnímu prostředí, přinese podstatné výhody vlastníkům i celé společnosti. Agresívním prostředím zde rozumíme horké a vlhké oblasti s přítomností chloridů i území, kde se ve velkém měřítku užívají posypové rozmrazující soli.

K tomu, abychom vytvořili spolehlivou zábranu proti pronikání chloridů, vody a kyslíku, není nutné použít zvláště hutné a nepropustné betony a speciální směsné cementy, ani vysokohodnotné betony nejsou podmínkou, je však nezbytné vyhovět požadavku na zajištění pevnosti a zabránění degradace betonu samotného.

V půdách obsahujících sírany, ale též chloridy, musí být používán cement odolný proti síranům. Betonová směs by měla být odolná vůči místním přísadám a záměsové vodě, a to i obsahující malé množství chloridů.

Je možné vyrobit masívní beton, odolný proti prováděcím podmínkám v místě stavby, a zvýšit tak celkovou kvalitu a spolehlivost provozní životnosti konstrukce.

Jako obecnou poznámku uvádím pro zajímavost fakt viděný z pohledu konstrukčního stavebního inženýra. Výrobci často prosazují organické hmoty, které mají zajistit dlouhou a spolehlivou provozní životnost našich anorganických betonových konstrukcí. Organické hmoty nejsou vždy dlouhodobě stabilní v alkalickém prostředí – pH betonu je v rozmezí 12,5 až 13,5. Organické hmoty jsou také náchylné k degradaci, pokud jsou vystavené UV záření. Proto použijí-li se organické materiály prodlužující trvanlivost, ve většině případů lze očekávat údržbové práce nebo úpravu zpracování v dohledné budoucnosti, která bude kratší než předpokládaná provozní životnost.

Zajímavou zkušeností je, že vždy, když se stane nějaký nový odpadní materiál s deklarovanými pucolánovými vlastnostmi ekologickou zátěží, vyvolá to veřejný tlak, aby byl ukládán do našich betonových konstrukcí. Týká se to křemičitého úletu, popílku, strusky a síry. Další podobný odpad má organický původ (mrtvá zvířata apod.) a přidává se jako palivo do cementářských pecí. Skutečnost, že přidávání podobných materiálů do betonu vede ke zlepšení trvanlivosti a pravděpodobně i snížení ceny betonu, je dobře známá. Nejsilnějším argumentem je ale často ekologický přínos plynoucí z faktu, že se takové materiály neukládají v přírodě.

OCHRANNÉ POVRCHOVÉ ÚPRAVY

Nátěry betonu

Existuje mnoho typů povrchových úprav a nátěrů betonu v odstupňované kvalitě od neviditelných hydrofóbních silanových impregnací až po silně pigmentované polyuretanové nebo epoxidové nátěry.

Zkušenosti se silanovými impregnacemi jsou v různých zemích různé. V některých je podobná úprava povinná u mostů vystavených posypovým solím proti námraze, v jiných zemích není možné ověřit hydrofóbní účinek po několika málo měsících či letech a silany se obvykle neužívají.

Nátěry mohou podporovat trvanlivost tím, že zpomalují rychlost postupu karbonatizace nebo vnikání chloridů. Ale ověření pozitivního dopadu je v praxi značně obtížné. Již byl demonstrován fakt, že i malé dírky v silné vrstvě nátěru odolného proti karbonatizaci snižují jeho ochrannou schopnost na zlomek ochranné vlastnosti nátěru bez těchto defektů. Zhotovení nátěrů betonu bez těchto drobných dírek je však nerealistické, a to i v případě natření povrchu cementovým materiálem modifikovaným polymerem, který tvoří hladký povrch. Výrobci slibovaný účinek nátěrů odpovídající přídavku několikametrové krycí vrstvy betonu na konstrukci, je založen na výsledcích získaných v laboratoři, které nemají žádnou relevanci k reálné betonové konstrukci.

Navíc povrchová úprava betonu je vystavena škodlivým účinkům životního prostředí a ultrafialového záření. Tyto nátěry vyžadují údržbu nebo novou aplikaci po omezeném počtu let v závislosti na typu materiálu a osvitu.

Epoxidové nátěry výztuže

V polovině sedmdesátých let byl v Severní Americe zaveden epoxidový nátěr výztuže jako ochrana proti korozi způsobené chloridy. Od té doby se v Severní Americe a později i v dalších zemích hojně používá epoxidový nátěr pojený natavením. Nicméně od začátku devadesátých let se objevují zprávy o zjištění, že chloridy, které se dostanou do betonu, mohou rozvinout korozi přes místní dírky a poškození nátěru, aniž by nutně způsobila vznik trhlin a odprýskávání krycí vrstvy betonu. Taková koroze pouze pomalu poškozuje a rozkládá výztuž. První případy byly objeveny na mostech na Floridských útesech (obr. 14 a 15). Vůbec první zveřejněná zpráva pocházela z ledna 1992. Bylo v ní konstatováno, že „technologie

Obr. 14 Most na Floridských útesech, kritická koroze epoxidem natřené výztuže
Fig. 14 Bridge on the Florida Keys, critical corrosion of epoxy coated reinforcement

epoxidem natřených prutů je chybná". Zpráva způsobila, díky čistě komerčním a zkresleným reakcím výrobců epoxidem natřené výztuže a jejich organizacím, velké pozdvižení na severoamerickém kontinentu. V té době se daná technologie pomalu šířila do Evropy, na Střední východ a do některých částí Dálného východu.

V Evropě byla tato technologie užita poprvé v prefabrikovaných betonových segmentech dvojitého vrtaného východního tunelu Great Belt Link v Dánsku, navrženého v roce 1988. Již tehdy však byla tradiční technologie epoxidového nátěru zpochybňována, zvláště s ohledem na vliv vzájemné elektrické izolace prutů, která vylučovala použití katodové ochrany v budoucnu. Obavy způsobilo i vysoké množství drobných dírek v epoxidovém nátěru, které umožňovala původní specifikace, podobně jako nezbytnost záplatovacích správek veškerých odřízlých zakončení a prasklin na ostře ohnutých ošetřených prutech.

Použití epoxidem ošetřených jednotlivých prutů znamenalo spoléhat se na jediné řešení. Proto bylo po několika zkouškách ve skutečném měřítku rozhodnuto použít epoxidový nátěr pojený natavením za pomoci poprvé zaznamenané techniky smáčení 3D svařovaných výztužných klecí ve skutečné velikosti ve fluidním loži. Do výrobny betonových dílců bylo zabudováno speciální čistící, nahřívací, nátěrové a zkušební zařízení. Z celkového počtu 62 000 betonových segmentů jich 60 000 bylo vyrobeno bez drobných dírek, a zbytek měl pouze několik malých dírek detekovatelných jen metodou mokré houby.

Tak se stalo, že dříve než byly v Severní Americe zveřejněny obtíže s výztuží natřenou epoxidem, vyvíjela se v Evropě životaschopná a spolehlivá technologie pro výrobny prefabrikátů, která eliminovala řezání, ohýbání a záplatové správkování natřených prutů. Současně umožňovala provedení katodové ochrany, pokud by byly nastartovány korozní procesy. V souvislosti s výstavbou Great Belt Link byly také použity senzory koroze, které měly upozornit na nadcházející nebezpečí koroze výztuže sledováním průniku prahové koncentrace chloridů z obnaženého povrchu směrem k úrovni výztuže.

Severoamerické zkušenosti s tradiční technologií epoxidového nátěru, dodatečné testování a stavební průzkumy, např. v Ontáriu v Kanadě, zabránily jejímu rozšíření v Evropě. V současné době se tato technologie pomalu vytrácí i na Středním východě a v Perském zálivu, a to částečně i díky zkušenostem, které ilustrují obrázky 16 až 18.

Obr. 15 Most na Floridských útesech, kritická koroze epoxidem natřené výztuže způsobující praskání opěr ve tvaru V, nyní zpevněných předpjatými svorníky
Fig. 15 Bridge on the Florida Keys, critical corrosion of epoxy coated reinforcement leading to splitting of the V-formed supports now strenghtened by prestressed bolts

Žárové pozinkování výztuže

S chováním žárově pozinkované výztuže ve vysoce agresivním prostředí není mnoho praktických zkušeností. Nicméně zkoušky ukázaly, že pozinkované oceli mohou mít vyšší prahovou hodnotu pro chloridy inicující korozi ve srovnání s černou ocelí.

Obr. 16 Přístavní stěna zesílená epoxidovou výztuží, silně poškozená korozí výztuže po přibližně 12 letech
Fig. 16 Seawall reiforced with epoxy coated reinforcement heavily damaged by reinforcement corrosion after about 12 years

Obr. 17 Záběr zblízka na zkorodovanou výztuž natřenou epoxidem
Fig. 17 Close-up of the corroded epoxy coated reinforcement

Obr. 18 Detail zkorodované výztuže pokryté epoxidem
Fig. 18 Details of the corroded epoxy coated reinforcement

Ochranná schopnost závisí na reakcích probíhajících na styku železa se zinkem. Riziko důlkové koroze u takovéto pozinkované oceli roste, jestliže je vystavena vlivu chloridů.

Zhodnocení dostupných dat a praktických zkušeností ukazuje, že zinkování v dobře řízené kvalitě a tloušťce, aplikované na vhodnou vyztužnou ocelovou slitinu, poskytuje:

- spolehlivou antikorozní ochranu vyztužné oceli v betonu vystaveném karbonataci bez přítomnosti chloridů a síranů;
- zvýšenou prahovou úroveň pro chloridy způsobující korozi ve srovnání s neošetřenou ocelí.

Jakmile však koroze nastoupí, rychlost důlkové koroze může být vyšší, a s časem mnohem vyšší, než u neošetřené černé oceli. Pro konstrukce ponořené v mořské vodě může být ternto jev výraznější.

Inhibitory koroze

Nejnovější přísadou do betonové směsi jsou inhibitory koroze. Mohou být anodické, katodické nebo smíšené. Technologie inhibitorů koroze je dobře známá v chemických průmyslových odvětvích. Zprávy o přidávání inhibitorů do betonu se rozcházejí v názorech na jejich účinnost. Zdá se také, že přidávání inhibitoru v příliš malém množství ve srovnání s budoucí koncentrací chloridů může korozi urychlit. Nejběžnější inhibitory působí také jako urychlovače, což není vždy výhodou, a to především v horkém prostředí, kde vysoké teploty prostředí často komplikují provádění prací v důsledku rychlé ztráty zpracovatelnosti a předčasného tvrdnutí betonu.

Jinou diskutovanou otázkou je nebezpečí vyplavení inhibitoru z betonu vystavenému rozstřikující se vodě, protože inhibitory jsou patrně pohyblivější než chloridy. Některé laboratorní testy nepotvrdily vyplavování inhibitoru, ale ověření in situ po dlouhodobém vystavení betonu však chybí. V této souvislosti je třeba připomenout, že inhibitory v betonu zůstávají nečinné, dokud nepůsobí na povrchu ocelové výztuže současně s chloridy.

Inhibitor se musí z několika důvodů přidávat do veškerého betonu nechráněných dílů, ačkoli je nezbytný pouze v okolí výztuže. To má výrazný dopad na náklady.

Katodová ochrana

Katodová ochrana se stala zajímavou možností ochrany částí konstrukcí, vystavených vysokým koncentracím chloridů. Tento způsob katodové preventivní ochrany je již instalován v nových konstrukcích a je připraven sloužit ochraňovat výztuž proti chloridové korozi. Tato možnost slibuje optimální výsledky především v přímořských konstrukcích. Protikorozní systém obětované anody se může instalovat umístěním anod do vody v blízkosti konstrukce nebo přímo na ní a jejich připojením k výztuži. Preventivní katodová ochrana se užívá i ve zvláštních případech, kdy se sítě nebo pásy inertních anod zalijí do betonu nových konstrukcí. K jejich aktivizaci potom dochází dříve či později podle potřeby, aby se zabránilo vzniku koroze.

Nekovová výztuž

Byly vyvinuty pruty s vláknovou výztuží a zjistilo se, že korozi odolávají. V současné době se vyrábějí nekovové pruty na bázi skleněných, aramidových nebo uhlíkových vláken.

Odlišné mechanické charakteritiky vláknité a ocelové výztuže, a též rozdílné podmínky pro jejich praktické použití v místě stavby naznačují, že jejich využití v betonových konstrukcích bude poněkud omezené nebo speciální. Pruty vyztužené vlákny mají velice omezenou pevnost, pokud jsou zatěžovány příčně ke směru vláken. To se týká především spojení mezi hlavními pruty a sponami. Kromě toho jsou některé pruty velice citlivé na tvrdé nárazy. Uhlíkovými vlákny vyztužené pruty mohou prasknout, jestliže je udeří padající kladivo nebo pomorný vibrátor. Během lití betonu nemohou dělníci chodit po výztuži, musí být vybudovány provizorní pracovní lávky.

V současnosti nabízí prefabrikační průmysl bohaté možnosti využití prutů s vláknovou výztuží.

Výztuž z nerez oceli

Během několika posledních let začala být komerčně nabízena výztuž vyrobená z nerez oceli o rozměrech, pevnosti a v typech slitin, které plně vyhovují běžným konstrukčním požadavkům na železobetonové konstrukce, a to v podstatě za konkurenční ceny.

Výztuž z nerez oceli odolává korozi i v prostředí vysoce kontaminovaném chloridy. Pokud je aplikována výběrově v nejexponovanějších místech konstrukce, má ve srovnání s běžnou ocelí vyšší cena za kilogram oceli okrajový nebo zanedbatelný význam pro celkové počáteční náklady stavby. Navíc budou sníženy provozní náklady v důsledku úspor za budoucí opravy a údržbu.

Z praktického hlediska je tato technologie zvláště zajímavá, protože řeší „pouze" problém koroze. Všechny ostatní postupy a technologie v rámci navrhování, výroby a provádění zůstávají beze změny, což je velice přitažlivá skutečnost pro tradičně konzervativní stavební průmysl.

Výztuž z nerez oceli může být kombinována s černou ocelí zalévanou do betonu bez nebezpečí galvanické koroze následkem bimetalového nebo galvanického efektu, neboť tyto dva typy oceli, když jsou zalité do betonu, dosahují téměř stejného elektrochemického potenciálu. Toto pozorování má značný význam a je předpokladem obecného ekonomického využití výztuže z nerez oceli, aplikované výběrově v těch částech konstrukce, kde je taková ochrana nezbytná.

Výztuž vyráběná z nerez oceli může být obzvláště výhodně používána v konstrukcích umístěných v mimořádně agresivním prostředí. Jedná se např. o horké, suché a slané prostředí Středního východu, zvláště v oblasti Perského zálivu a Rudého moře, a o podobné podmínky na Dálném východě a ve Střední Americe.

Přesvědčivou dokumentaci o chování výztuže z nerez oceli v betonu vysoce kontaminovaném chloridy nabízí šedesát let staré, 2,2 km dlouhé betonové molo vyztužené nerez ocelí, vybíhající do Mexického zálivu u Progreso v Mexiku (obr. 19). Na konstrukci se dosud neobjevila žádná koroze i přes drsné podmínky a nevalnou kvalitu materiálů použitých v konstrukci. Hladina chloridů překračovala na povrchu výztuže více než dvacetkrát tradičně uvažovanou prahovou hladinu koroze.

Novější, pouze třicet let staré, souběžné molo (obr. 19 v popředí) se již rozpadlo následkem koroze výztuže z obyčejné uhlíkové oceli. Molo vydrželo od roku 1972 do 1983, poté muselo být zlikvidováno kvůli rozsáhlému poškození korozí (obr. 20).

Další dokumentaci o použití výztuže z nerez oceli poskytuje rozestavěný pohostinský palácový komplex Qasr Al Alam v sultanátu Oman. Nerezová ocelová výztuž se zde uplatnila od úrovní pod hladinou vody až po výšku +5m nad vodou v těch nejokrajovějších konstrukcích přímo vystavených slané podzemní vodě i rozstřiku mořské vody z Ománského zálivu. Veškeré zbývající části jsou vyztužené

Obr. 19 Mola u Progreso v Mexiku
Fig. 19 Piers at Progreso in Mexico

Obr. 20 Detailní záběr „nového" mola postaveného na souši, vyztuženého obyčejnou černou ocelí
Fig. 20 Close-up of the land based remains of the „new" pier

běžnou uhlíkovou ocelí (obr. 21 a 22), návrhová provozní životnost bez poškození korozí je 50 let, ale dá se předpokládat mnohem delší životnost. Současně je rekonstruován železobetonový vlnolam, který chrání Sultánův palác a přilehlý pohostinský palácový komplex, kde veškerá výztuž byla nahrazena nerez ocelí (obr. 23).

Nakonec je třeba poznamenat, že nerezová ocelová výztuž má ještě jednu výhodu. Je totiž horší katodou než uhlíková ocel. Proto může být zvláště užitečná při opravách, kde běžná uhlíková ocel zkorodovala natolik, že se musí místy provést její výměna, nebo kde je nezbytné přidat dodatečnou výztuž. Jako příklad tohoto postupu uvádíme výměnu korozí poškozených krajních mostních nosníků na dánských dálnicích a silnicích pomocí nerezavějící oceli vkládané do krajních nosníků a zídek (obr. 24).

Hybridní řešení

V nedávné době se na trhu objevila smíšená řešení, jakým je např. nerez ocelí oplášťovaná výztuž z uhlíkové oceli. Díky úsporám na nerezové oceli, ze které se vyrábí jen velice tenká trubička obklopující obyčejnou uhlíkovou ocel, a žebrovému profilu je možné udržet náklady na o něco nižší úrovni než v případě masívního nasazení výztuhy z nerez oceli. Avšak v této fázi se dají vyrábět jen poměrně krátké pruty, řekněme o délce 6 m, což vede k tvorbě odpadu v nemalém množství a dalších nesnází následkem velkého množství přesahů. V případě rozsáhlých stavenišť se opodstatnění a cenová efektivita výroby prutů, spojek a třmínků přímo z velkých rolí ztrácí, vybíráme-li nerezovou ocelí oplášťované pruty na základě současné technologie. I řezání těchto prutů může působit komplikace. A doporučení, abychom užívali speciální nerezový ocelový uzávěr na každém konci prutu, který se umísťuje v chloridy kontaminované oblasti, není reálně proveditelný u velkých konstrukcí. A konečně tyto pruty v dané době neodpovídají žádným národním či mezinárodním normám.

Kromě toho byly na trh uvedeny i speciální legované oceli. Nesplňují kritéria pro nerez ocel, ale mají mít vyšší odolnost proti chloridové korozi.

Zaměření dalšího vývoje na výztuž a její vliv na antikorozní ochranu bude velmi bedlivě sledováno. Stupeň spolehlivosti individuálně vybraných řešení bude hrát klíčovou úlohu, protože jediné velké selhání nové technologie dokáže zcela znemožnit její další užití, jako tomu bylo již v případě epoxidem chráněné výztuže.

To je také důvod, proč se nedoporučuje hnát vývoj násilím až na hranici technic-

Obr. 21 Pohled na staveniště přímořského paláce, vnější, obnažené konstrukce jsou vyztuženy nerez ocelí od úrovní pod hladinou vody až po výšku +5m nad vodou
Fig. 21 Overview of the construction site of a seaside Palace, stainless steel reinforcement is used in the outer exposed structures

Obr. 22 Detail obr. 21, zbylá výztuž je z běžné uhlíkové ocele
Fig. 22 Detail from fig. 21, the remaining reinforcement is ordinary carbon steel

Obr. 23 Nerezová ocelová výztuž v prefabrikovaných konstrukčních prvcích nového vlnolamu
Fig. 23 Stainless steel reinforcement used in the precast structural members of the new seawall

Obr. 24 Výměna krajních nosníků a zídek na dánských mostech vystavených působení rozmrazujících solí, použití nerez ocelové výztuže má snížit počet budoucích oprav, silně narušujících dopravu
Fig. 24 Replacing edge beams and parapets on Danish bridges exposed to deicing salt. Stainless steel reinforcement is introduced to avoid future repairs causing major treffic disturbances

kých možností a zvyšovat riziko, že tato mez bude překročena a dojde k neplánované korozi jen kvůli snížení počátečních stavebních nákladů. Pečlivé rozpočtování s ohledem na celkovou životnost stavby, včetně zajištění spolehlivosti (důvěryhodnosti) vybraných řešení, si zaslouží mnohem větší pozornost klienta, vlastníka i celé společnosti než současné trvání na „**syndromu nízké nabídky**".

STAVĚNÍ PŘIZPŮSOBENÉ NOVÝM POZNATKŮM

Období výstavby představuje nejkritičtější fázi v procesu zajišťování návrhové provozní životnosti betonových konstrukcí. To bylo vysvětleno již v první části článku otištěné ve 3. čísle časopisu t.r.

Proto se inženýři během návrhového období potýkají s jedním z nejdůležitějších úkolů, a to zjistit úroveň kvalifikace a praktické zkušenosti s prováděním vybraného typu konstrukce, kterou lze očekávat od dostupné pracovní síly s přihlédnutím k použitým materiálům a místnímu prostředí. Návrh a podrobná specifikace budou vytvořeny s ohledem na místní podmínky, pokud bude reálná naděje, že plánovaná nebo navrhovaná provozní životnost konstrukce bude splněna.

V tomto ohledu je připravenost firem prostředkem zajišťujícím tuto kvalifikaci a zkušenosti. Považovat firmu za připravenou však na podkladě pouhé předchozí dlouhodobé praktické zkušenosti nestačí. Připraveny musí být klíčové pracovní síly vyrábějící beton, ten co bude v hotové konstrukci, tj. tzv. modré límečky, neboli pracovníci u lopaty a mistr. Tato otázka je sice kontroverzní, nicméně velmi oprávněná.

Vložka do bednění s řízenou propustností

Inženýři si uvědomují dominantní vliv kvality vnější betonové vrstvy na ochranu betonu a výztuže proti pronikání agresivních látek. Proto vyvinuli speciální propustnou vložku do bednění, která může být buď pružná, podobná tkáni, nebo tuhá jako plastiková deska. Podobné vložky jsou schopné zlepšit kvalitu několika centimetrů nebo milimetrů vnější betonové vrstvy tak, že řídí obsah vody a cementu a podporují v této tenké vnější oblasti zrání.

Použití vložky do bednění s řízenou propustností má za následek dočasnou absorbci přebytečné vody v povrchové vrstvě vložkou, která tak snižuje poměr vody a cementu. Po nastartování procesu tvrdnutí cement hydratující v této vrstvě potřebuje další vodu, aby tvrdnutí bylo optimální. Potřebná voda je pohotově k dispozici právě ve vložce bednění. Optimální vytvrzování betonu vlhkostí nebo vodou probíhající v této vnější vrstvě vede ke zvýšení kvality krycí vrstvy.

Vložka zanechává na povrchu betonu charakteristický vzorek podobný pletivu, a proto kladení vložky do bednění vyžaduje opatrnou manipulaci. Obzvláštní opatrnost je třeba dodržovat u pružného typu vložky, protože má tendenci se svinout během lití a hutnění, není-li řádně upevněna. Vzniklé záhyby budou již stále znatelné na budoucím povrchu betonu.

Četné zkoušky a praktické zkušenosti prokázaly pozitivní účinky této technologie. Z technického pohledu je možné uvedenou technologii považovat za nejúčinnější vynález zvyšující trvanlivost, jakého bylo v posledních několika desetiletích dosaženo. Hlavním nedostatkem jsou naopak obtíže vznikající při upevňování vložky do bednění tak, aby byl zajištěn pěkný vzhled povrchu betonu po odstranění formy, a vysoká cena výrobků.

Vložka do bednění s řízenou propustností může zlepšit kvalitu vnější vrstvy betonové krycí vrstvy, ale nemůže vykompenzovat místní špatné zhutňování a voštinovou strukturu. Reálným řešením problému mohou být novinky v oblasti samozhutňujícího betonu. Zdá se tak, že kombinace vložky do bednění s řízenou propustností a samozhutňujícího betonu by mohla generovat hodnotný synergický účinek při zlepšování trvanlivosti betonových kontrukcí.

Samozhutňující beton (SSC)

Nezbytnost používat trvanlivý beton v agresívním prostředí ve svém důsledku automaticky vedla k návrhu betonu s optimalizovaným složením směsi a nízkým poměrem vody a cementu. Takový beton se obtížně zhutňuje a nebezpečí vzniku hnízd, především v betonové krycí vrstvě, je vážnější. Kvalita a účinnost zhutňování silně závisí na obsluze vibračního stroje. Proto čím lepší je z hlediska trvanlivosti betonová směs, tím větší je riziko méně kvalitního nebo nekvalitního provedení, a v konečném důsledku i hotové konstrukce. Tento rozpor je způsoben dominantním vlivem procesu provádění na kvalitu a funkčnost konstrukce bez ohledu na kvalitu počáteční betonové směsi.

Z toho vyplývá, že výroba betonové směsi, jejíž ukládání a zhutňování by bylo minimálně závislé na řemeslné zručnosti obsluhy na staveništi, by zvýšila skutečnou kvalitu betonu v hotové konstrukci. Tato skutečnost se stala hnací silou vývoje samozhutňujícího betonu v nedávné době. S pomocí řady chemických přísad a optimálního roztřídění kameniva se dá

vytvořit beton s nízkým poměrem vody a cementu, který proteče složitou geometrií bednění a komplikovaným půdorysem výztuže bez rozmísení. Bednění se dá naplnit a lze dosáhnout rovnoměrného zhutnění bez hnízd včetně krycí vrstvy výztuže, aniž by pracovní síly na staveništi musely do hutnění a vyrovnávání dodatečně zasahovat, eventuálně do nich vstupují jen minimálně. Tekoucí beton vyvíjí na bednění tlak, který se musí v návrhu bednění pečlivě zvážit.

Používání samozhutňujícího betonu je kromě jiného také ekologicky přijatelnou technologií, protože hluk působený vibračními stroji je takřka eliminován. Protože betonáři s nimi pracují jen velmi málo, je odstraněn neblahý vliv vibrací na celé tělo.

Nejvýznamnějším nedostatkem této technologie je citlivost SSC betonu na přesné dávkování, mísení a dopravování, a navíc jeho závislost na počasí při odlévání. Za nepříznivých podmínek se schopnost betonu téci může ztrácet. Navíc je tento beton výrazně dražší a veškeré nároky na zkušenost a profesionalitu se téměř úplně přesunou do betonárny.

Aktualizace spolehlivosti a „rodný list"

Cenným důsledkem přijetí probabilistické návrhové metody na provozní životnost v praxi je fakt, že nejistoty, se kterými je nutno počítat, jsou zvažovány v počáteční návrhové etapě, kdy ani beton, ani stavební podmínky a ani podmínky údržby nejsou ještě známy. Jakmile návrhář tyto důležité a zpočátku pouze uvažované hodnoty zná nebo je určí zkouškami, jsou připravené nástroje k aktualizaci předpokládané provozní životnosti a k včasným opatřením.

Z toho důvodu lze po proběhnutí kontrol a zpřístupnění dodatečných informací snadno aktualizovat provozní životnost i ekonomické dopady veškerých přijatých rozhodnutí (úspory nebo dodatečné náklady).

Když se po provedení a zatvrdnutí dosáhne skutečných vlastností betonu v konstrukcích, je možné přímo na staveništi určit parametry související s trvanlivostí. Při předávání konstrukce zákazníkovi je možné určit vstupní data a přepočítat předpokládanou provozní životnost. Tyto údaje by měl obsahovat „**rodný list**" konstrukce. Později, při pravidelných kontrolách, kdy se získají další data, se dá provozní životnost znovu spočítat. Tak se pravidelně aktualizuje předpověď provozní životnosti a stále se zvyšuje spolehlivost vypočítané zbývající provozní životnosti.

PŘEDPOKLÁDANÁ ÚDRŽBA

Zhoršování kvality silnic a konstrukcí způsobují především tři faktory: provoz, čas a podnebí. Aby vedoucí technik údržby mohl předpovídat rychlost degradace, potřebuje znát data související s těmito činiteli. Potom je schopen najít optimální dobu a opatření k zásahu.

Prohlídky

Hlavním cílem kontrol je zajistit provozní bezpečnost a pravidelnost. Dále mají prohlídky monitorovat změny stavu konstrukcí, zaznamenat poruchy a poskytovat technické a ekonomické informace pro plánování modernizace, čištění a údržby tak, aby se tyto zásahy mohly provádět optimálním způsobem během celé životnosti konstrukce.

Pravidelné prohlídky by měly být prováděny často. Mají zajistit, aby konstrukce plnily svou funkci, tj. aby nedošlo k žádnému poškození nebo okolnostem, které zvyšují nebezpečí a/nebo sníží pravidelnost.

Hlavní prohlídky mají umožnit činnost, která přispívá k udržení dopravní bezpečnosti. Hlavní prohlídka představuje důkladnou a systematickou vizuální kontrolu všech součástí silnic a konstrukcí. Má být prováděna v intervalu jednou za rok až šest let, aby umožnila monitorování a nápravu škod v optimálním čase.

Interval prohlídek je třeba přizpůsobit stavu a objemu provozu tak, aby byla zajištěna bezpečnost a minimalizován objem kontrolních prací.

Speciální prohlídky mají poskytnout přesnější základ pro rozhodování ohledně stanovení priorit hlavních modernizačních zásahů, včetně náhrad a prací nezbytných pro udržení úrovně bezpečnosti. Tyto prohlídky jsou běžně prováděny na doporučení hlavní prohlídky a občas po pravidelné prohlídce, pokud byly pozorovány neobvyklé jevy. Výstupem ze speciální prohlídky je podrobnější technická a ekonomická informace. Ekonomická součást speciální prohlídky obsahuje návrh veškerých závažných modernizačních kroků týkajících se silnice, konstrukce či montáže. Pro každý krok je stanovena metoda, časový harmonogram a cena. Před zahájením každé větší modernizační úpravy je vhodné předem získat ekonomické hodnocení. Technická pasáž speciální prohlídky obvykle zahrnuje průzkum, který má určit rozsah a příčinu pozorovaných škod.

Konstrukční degradace a opotřebení nemusí vždy probíhat rovnoměrnou rychlostí. Včasné objevení degradačních mechanismů a jejich rychlosti zásadně ovlivňuje účinnost plánování provozu a údržby. Sledování zdravotních aspektů a hodnotící systém je součástí manuálu údržby.

Údržbové práce

Práce na údržbě mají různou podobu od čištění až po přestavbu. Zde se budeme krátce zabývat různými druhy údržbových prací. Cílem prací je navrátit konstrukci nebo její část do přijatelného stavu, srovnatelného s původním. Dělí se do dvou tříd, na preventivní údržby a opravné údržby.

Preventivně údržbové práce jsou obyčejně menší zásahy prováděné za účelem udržení úrovně bezpečnosti, odstranění úlomků a směřují proti opotřebení. Jsou to méně závažné činnosti předpokládané již v návrhové fázi. Patří k nim dva druhy zásahů, a to občasná údržba a údržba stavu.

Realizace

Odborníci zabývající se údržbou se musejí zapojit do projektu od samého počátku plánování návrhu a setrvat až do konce výstavby mostu. Jedině tak je zajištěna správná budoucí údržba konstrukce.

V následujících kapitolách navrhuji aktivity, které by měly být součástí průběhu projektu.

Návrhová etapa: revize přístupnosti

Protože prvky mostní konstrukce jsou umístěné v uzavřených místech a nad vodou, je k nim obtížný přístup, jejich dosažitelnost je problematická a potřebné zařízení může být drahé a vzácné. Tyto skutečnosti je třeba uvažovat již při plánování návrhu.

Mimoto budou na mostě místa s uzavřenými prostorami, např. v oblasti opěr a styčníků bývá málo místa. Je důležité najít opatření, která umožní údržbu a opravy prvků v těchto zónách.

Důležitou otázkou je i udržení objemu provozu na mostě během oprav vozovky a závěrů.

Revize návrhu a materiálů

Je prováděna kontrola a připomínkování návrhu a výběru materiálů ve vztahu k budoucí údržbě a provozní životnosti určeného prvku celé konstrukce.

Výběr materiálů pro betonáže, ocelových dílů, vozovky, nátěrů apod., by měli posoudit odborníci s praxí v oboru údržby a na základě toho by měly být vzneseny připomínky k návrhu.

Během revize je třeba zvážit i případné náhrady. Zhoršování stavu obnaženého konstrukčního prvku může probíhat rychleji, než bylo očekáváno, a proto může nastat potřeba jeho výměny.

Je nezbytné shromáždit veškeré informace důležité pro provoz mostu, např. povolená napětí, omezení ve zvláštních situacích, jako jsou např. oblasti citlivé na únavu, apod.

Etapa výstavby

Během etapy výstavby by měla být prováděna inventarizace. Soupis inventáře by měl obsahovat dokumentaci a nákresy konstrukce, jak byla prováděna (stavební deník apod.).

Jsou shromážděny a kontrolovány údaje od dodavatele, např. specifikace materiálů a osvědčení, zprávy o nesouladu, výsledky zkoušek, zvláštní informace o údržbě a manuály, např. k dilatačním závěrům, opěrám a kabelům. Vybraná část z této dokumentace by se měla stát základem budoucí správy a údržby.

Čím je inventář lepší, tím lépe bude možné v budoucnu provádět údržbu. Dobrý inventář je předpokladem kvality manuálu údržby.

Seznam navržených postupů

Manuál údržby by měl obsahovat celou řadu postupů a pokynů. Následující text uvádí příklady nejdůležitějších postupů.

Plánování a rozpočtování

Plán úkolů
- rozpis úkolů
- výroční seznam priorit v rámci údržbových prací

Časový plán
- časový harmonogram úkolů
- plánování činností

Inventář

Hierarchie prvků
- seznam konstrukcí
- seznam montáží

Dokumentace
- základní údaje – hlavní konstrukce
- základní údaje – hlavní montážní systémy
- seznam konstrukcí
- seznam montáží – soubory v tabulkovém procesoru s řídícími pokyny
- archív dokumentů – obsah položky konstrukce
- archív dokumentů – obsah položky montáže

Provoz během provádění údržby

Řízení provozu
- hospodaření s dopravními omezeními
- hospodaření s lodním provozem během provádění údržby

Prohlídky a údržba

Kontrola instalovaných zařízení pro měření
- pravidelná prohlídka
- zařízení k prohlídce
- popis škod
- životnost prvků
- pokyny k podávání zpráv
- pokyny k prohlídce

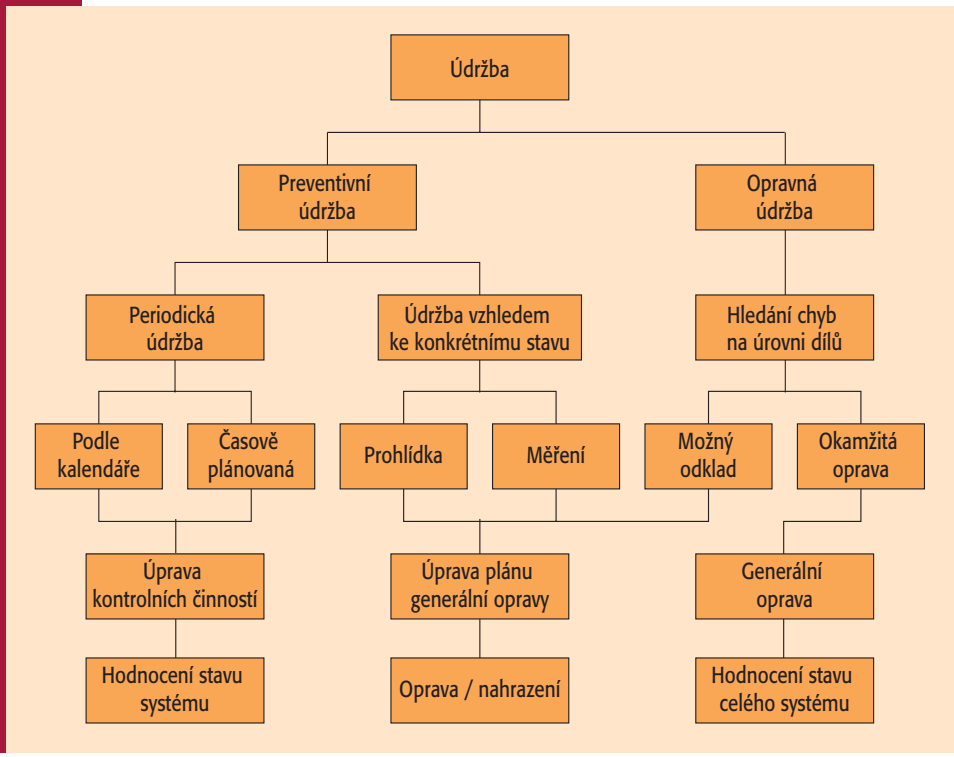
Technické provozní postupy a pokyny pro instalovaná zařízení
- provoz
- údržba

Kontroly konstrukčních prvků
- hlavní prohlídka
- zařízení k prohlídce
- popis škod
- životnost prvků
- pokyny k podávání zpráv

Pokyny k prohlídce
- speciální prohlídka včetně podrobného průzkumu konstrukčních prvků
- strategie údržby a ekonomické hodnocení
- omezení vyplývající pro uživatele
- metody zkoušek
- vybrané degradační mechanismy týkající se konstrukčních prvků
- praskliny v konstrukčních prvcích

Preventivní údržba konstrukčních prvků
- oprava silničního povrchu
- povrchová ochrana oceli
- povrchová ochrana betonu
- oprava betonu
- opěry
- dilatační zámky

Opravná údržba
- postupy oprav technických závad na instal. zařízeních
- postupy v rámci
  - opravy svodidel
  - opravy ochrany svahu



SLEDOVÁNÍ TRVANLIVOSTI

Skutečnost, že k minimalizaci nákladů na údržbu a opravy stávajících konstrukcí jsou nezbytné pravidelné a systematické prohlídky a záznamy chování konstrukcí, je běžně uznávána. V budoucnosti může být toto sledování buď zcela nebo částečně založeno na snímání na dálku, které

Obr. 25 a, b Upevnění patentovaných antikorozních čidel do stávajících přístavních hrází b) upevněný senzor, provizorní mikroampérmetr a titanový kolíček jako katoda

Fig. 25 a, b Mounting of proprietary corrosion sensors in existing quays, b) the mounted sensor, a temporary micro-amp meter and the small titanium pin as cathode placed just above the instrument

přinese značné hospodářské úspory.

Je také uznáván fakt, že rychlost pronikání chloridů (difúzní koeficient s faktorem stárnutí alfa) a místní prahová hodnota chloridové iniciace (C_{cr}) představují dva nejvýznamnější parametry předpovídání doby zbývající do nástupu koroze. Takové informace získané pomocí senzorů umožní spolehlivostní předpověď zbývající provozní životnosti. Tato prognóza bude díky dodatečné aktualizaci stále spolehlivější.

Tyto informace lze využít jako zpětnovazební údaje pro zlepšení návrhu provozní životnosti nových konstrukcí a k optimalizaci nákladů na provoz, údržbu a opravy v průběhu celé životnosti konstrukce pomocí racionální optimalizace nákladů na celý životní cyklus konstrukce.

Příklad z praxe

Jeden typ korozních čidel, která mají být instalována na stávající konstrukce, představuje šest oddělených tenkých ocelových kroužků vzdálených 10 mm od sebe a nasazených na ocelovém válci tak, aby od sebe byly elektricky izolované, ale připojené k elektrickému konektoru na povrchu (obr. 25). Systém je modernizací systému zalévaného do betonové krycí vrstvy nových konstrukcí (obr. 26).

Čidlo je uloženo do otvoru vyvrtaného v betonu na vybraném místě. Válec vodící ocelové kroužky se může podélně stlačit a přitisknout tak ocelové kroužky těsně k povrchu betonu. Beton prostý karbonzatace i chloridů pasivuje ocelové kroužky i ocelovou výztuž zalitou do betonu.

Nicméně pokud chloridy proniknou v dostatečném množství až na úroveň jednoho z kroužků, dojde k aktivaci a na kroužku může začít proces koroze (anodová reakce). V blízkosti čidla je do dírky vyvrtané do betonu vtisknut platinou pokrytý titanový kolíček (obr. 25), bezprostředně nad měřícím přístrojem. Po elektrickém propojení ocelových kroužků a ušlechtilého kovu vznikne silný korozní proud a dojde k depasivaci (katodová reakce). Když beton pasivuje ocel, žádný proud neprochází. Připojení různých kroužků čidla k povlakovanému titanovému kolíčku přes mikroampérmetr umožní měření korozního proudu. Kromě toho je možné určit hloubku, v níž dochází k depasivaci následkem průniku chloridů v kritickém množství nebo karbonatace okruhu 10 mm kolem kolíčků.

Tyto senzory představují modernizovaná čidla, podobná čidlům vyvinutým před deseti lety, ve formě šestistupňového žebříku anod ke sledování nových konstrukcí. Senzory budou umístěné v krycí vrstvě a zalité do konstrukce při ukládání betonu (obr. 26). Asi 480 podobných čidel bylo instalováno do Východního mostu, Západního mostu a Východního tunelu Great Belt Link v Dánsku (obr. 7 a 8 v první části článku).

ZÁVĚR

Závěrem si připomeňme v bodech to nejdůležitější *(podrobnější vyjádření jednotlivých bodů bylo otištěno v závěru první části článku v červnovém čísle časopisu)*:

- modelování mechanizmů narušování je klíčovou otázkou
- pravděpodobnostní zpracování nejistot je nezbytné
- návrh provozní životnosti se dotýká všech zúčastněných stran
- je nezbytné revidovat způsoby spolupráce a uzavírání smlouvy
- vlastník má klíčovou zodpovědnost.

Český překlad textu byl lektorován.

Steen Rostam, MSc PhD
hlavní inženýr COWI A/S
Parallelvej 2, DK – 2800 Kgs. Lyngby, Denmark
e-mail: sro@cowi.dk

Obr. 26 Antikorozní čidla zalitá do nové konstrukce ve formě žebříku o šesti izolovaných ocelových stupních (anodách) upevněného nerezovými ocelovými postranicemi, čidla jsou umístěna v krycí vrstvě v různých vzdálenostech od povrchu

Fig. 26 Corrosion sensors cast into new structures in the form of a ladder with six isolated steel „steps" (anodes) fixed by stainless steel sides, the sensor is palced in the concrete cover with different distance from the surface to each anode