

Vývoj aplikací vysokohodnotného betonu při stavbě mostů, zejména v USA

Úvod

Rozvoj využívání vysokopevnostních betonů označovaných jako HSC (High Strength Concrete) se v USA, stejně jako v celosvětovém měřítku, datuje od poloviny 70. let. Původně byly tyto vysokopevnostní betony využívány především při výstavbě výškových budov situovaných v husté zástavbě, kde umožňovaly zeštíhlením konstrukcí lepší využití stavebního prostoru. Důležitým zlomem v praktické aplikaci HSC bylo zjištění, že tyto betony mají kromě svých vysokých pevností ještě celou řadu dalších pozitivních vlastností. V mnohých případech byl některý z těchto parametrů pro danou konstrukci důležitější než vlastní vysoká pevnost materiálu, který proto začal být označován obecnějším názvem vysokohodnotný beton – HPC (High Performance Concrete). V současné době se můžeme v USA setkat s aplikací vysokohodnotného betonu prakticky ve všech stavebních odvětvích. Kromě již zmíněných konstrukcí výškových budov se tak v průběhu 80. a 90. let rozšířilo využívání HPC např. do oblasti staveb realizovaných v agresivním prostředí (stoky a speciální stavby prováděné v moři). Další oblastí využití HPC jsou opravy a sanace betonových konstrukcí a z tohoto materiálu byly realizovány i rozhodující části staveb spojené s rozvojem jaderné energetiky USA. V průběhu 80. let dochází postupně k vyššímu využívání HPC rovněž v konstrukcích pozemních komunikací. Tento vývojový trend je dále akcelerován v průběhu let devadesátých, kdy se jeho vrcholem stává snaha o využití HPC i v obrusných vrstvách cementobetonových vozovek.

Uplatnění HPC v konstrukcích pozemních komunikací

V současné době je dle údajů AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) ve Spojených státech amerických téměř celá jedna třetina z 582 tisíc federálních mostů konstrukčně a funkčně nedostačujících. Ačkoliv tyto mosty zatím nedospěly do havarijního stavu, neúprosný tlak dopravní intenzity a zátěže bude v dohledné době vyžadovat provedení nákladných oprav nebo i realizaci zcela nových konstrukcí s odpovídajícím řešením jejich únosnosti a šířkového uspořádání. Podle stejného pramene vynakládají dálniční organizace v USA každým rokem zhruba 3,2 miliardy USD na rekonstrukci a údržbu mostních objektů. Proto přirozeně vzniknul požadavek na výstavbu konstrukcí lépe vzdorujících účinkům prostředí a zatížení, s dlouhou až 100letou životností, současně s úkolem postavit tato díla ekonomicky, s pozdějšími minimálními náklady na údržbu [1].

Již koncem roku 1980 poukázal americký výzkumný program SHRP (Strategic Highway Research Program) na vysokohodnotný beton jako na jednu z klíčových technologií pro budoucí vývoj a použití v mostním stavitelství. V roce 1993 byl potom zahájen federální program realizace rozsáhlejší aplikace HPC v mostních konstrukcích pod záštitou FHWA (Federal Highway Administration). Tato aplikace zahrnovala mostní desky, prefabrikované nosníky, vnitřní podpěry a opěry. V rámci tohoto programu bylo do konce roku 1998 realizováno devět mostů s využitím HPC a závěrem roku 2001 bylo ve 30 státech USA v provozu již na 50 mostních objektů vybudovaných z vysokohodnotného betonu. Společná představa FHWA s AASHTO je, aby v roce 2002 byl v každém státě USA zhotoven nejméně jeden most z HPC [2].

Řadu těchto i dalších informací o HPC se podařilo získat díky navázané spolupráci Centra dopravního výzkumu s již zmíněným FHWA a některými dalšími organizacemi zabývajícími se v USA problematikou dopravní infrastruktury [3,4].

Požadavky na HPC

V průmyslově vyspělých zemích bývá většinou jako HPC označován beton s pevností 60-90 MPa a za supervysokopevnostní (Ultra High Performance Concrete) beton o pevnostní řadě 100-180 MPa, který je charakterizován vysokým obsahem velmi jemných částic a superplastifikátoru. Pohled na definici HPC je však v různých částech světa rozdílný, v některých státech bývá za HPC považován již beton s pevností v tlaku 30-50 MPa [5].

V USA definuje SHRP vysokohodnotný beton jako materiál s maximálním vodním součinitelem 0,35 a faktorem trvanlivosti 80 % (dle ASTM C666, zkušební metoda A). Podle požadavku na minimální pevnost v tlaku dělí dále HPC na Very Early Strength (VES, 21 MPa do 4 hodin po uložení betonové směsi), High Early Strength (HES, 34 MPa do 24 hodin) a na Very High Strength (VHS, 69 MPa do 28 dnů). ACI (American Concrete Institute) definuje HPC jako beton snadno zpracovatelný, s rychlým nárůstem počátečních pevností, vysokou odolností, objemovou stálostí a dlouhou trvanlivostí v agresivním prostředí. Třídění vysokohodnotných betonů dle dokumentů FHWA nabízí tabulka č. 1 [6,7].

Stupně HPC dle třídění FHWA a některé jeho vlastnosti

Tabulka č. 1

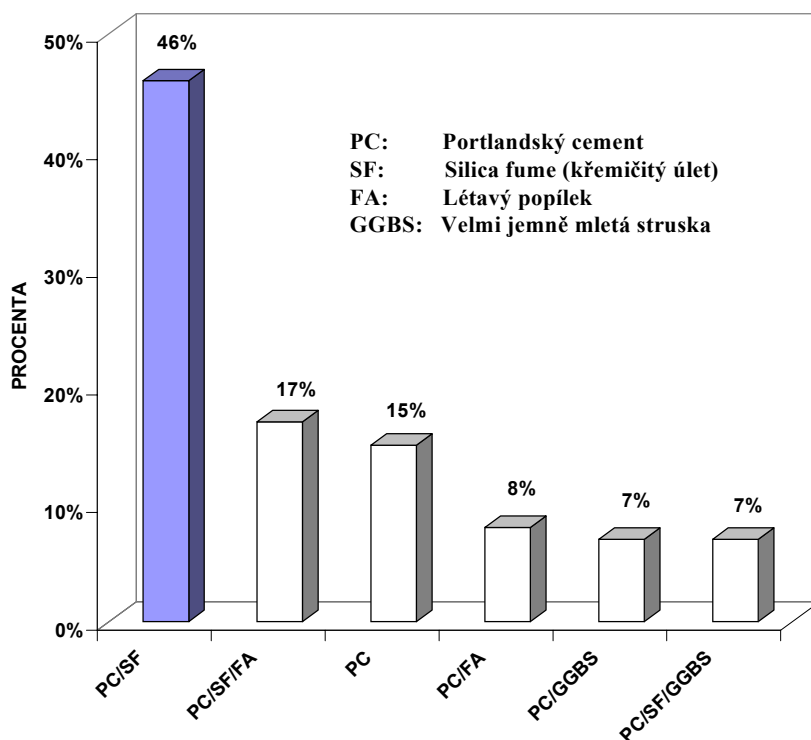
Vlastnosti	Zkušební metoda	Stupeň			
		1	2	3	4
Mrazuvzdornost (relativní dynamický modul pružnosti po 300 cyklech v %)	AASHTO T 161, ASTM C 666, Proc.A	$60 \leq x < 80$	$80 \leq x$		
Odolnost proti solím (vizuální ohodnocení povrchu po 50 cyklech)	ASTM C 672	$x = 4,5$	$x = 2,3$	$x = 0,1$	
Obrusuvzdornost (x – hloubka opotřebení v mm)	ASTM C 944	$2,0 > x \geq 1,0$	$1,0 > x \geq 0,5$	$0,5 > x$	
Chloridová propustnost (x - v Coloumbech)	AASHTO T 277, ASTM C 1202	$3000 \geq x > 2000$	$2000 \geq x > 800$	$800 \geq x$	
Pevnost v tlaku (x - v MPa)	AASHTO T 2 ASTM C 39	$41 \leq x < 55$	$55 \leq x < 69$	$69 \leq x < 97$	$x \geq 97$
Modul pružnosti (x - v GPa)	ASTM C 469	$28 \leq x < 40$	$40 \leq x < 50$	$x \geq 50$	
Smrštění x -v promile* 10^3	ASTM C 157	$800 > x \geq 600$	$600 > x \geq 400$	$400 > x$	
Dotvarování x -v promile* 10^3 /tlak	ASTM C 512	$75 \geq x > 60$ / MPa	$60 \geq x > 45$ / MPa	$45 \geq x > 30$ / MPa	$30/\text{MPa} \geq x$

Výše uvedené požadavky na HPC nemohou být beze zbytku splněny při použití běžných složek betonu, s využitím obvyklých receptur betonových směsí a pro nás obvyklým ošetřováním betonu. Pro ilustraci jsou na obrázku č. 1 uvedeny nejrozšířenější kombinace vazných komponent používané v USA pro HPC. (Uvedené procento odpovídá poměru zastoupení v celkovém objemu vyrobených HPC) [5].

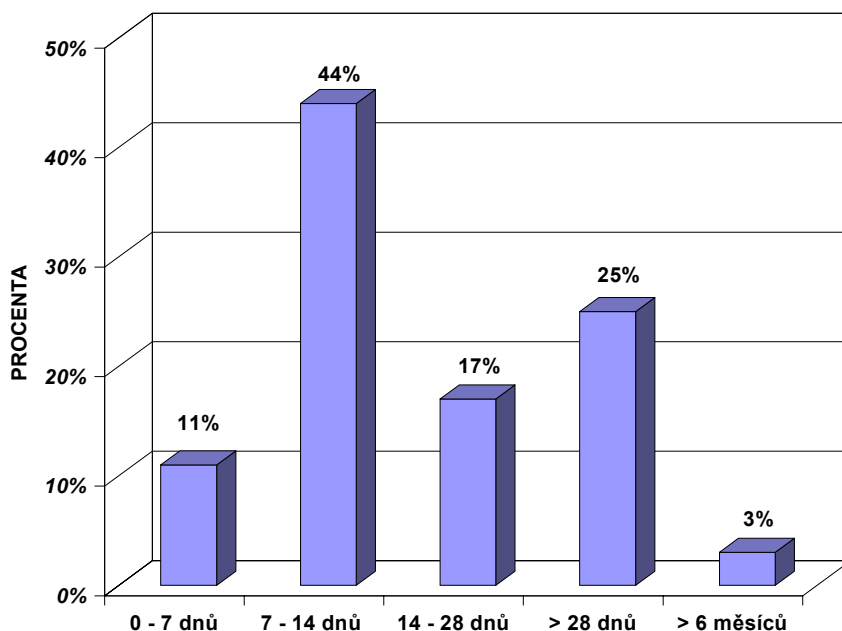
Zkušenosti s praktickou aplikací HPC v USA

Ve druhé polovině 90. let se v USA začal HPC používat také při betonáži mostovkových desek. V této souvislosti, při obrovském rozvoji přímo pojižděných mostovek v USA, nabývají zásadního významu otázky trvanlivosti HPC. Do hry zde mohou vstupovat negativní relativně velké objemové změny HPC v časném stadiu po uložení betonové směsi a s tím spojená vyšší pravděpodobnost výskytu trhlin. Dalším kritickým parametrem s ohledem na možnost využití HPC pro přímo pojižděné mostovky je odpor proti chloridovému vnikání (zimní údržba). Příkladem negativního vlivu smrštění HPC na užité vlastnosti stavebního díla, může být případ ze státu Idaho, který varuje před opomenutím včasného zahájení ošetřování uloženého betonu. Vlhká „geotextilie“ byla přiložena na povrch betonových desek 45 minut po ukončení betonáže. Po několika dnech vykazovaly desky trhliny takového rozsahu, že odborníci Idaho Transportation Department (ITD) zvažovali možnost úplného vyloučení křemičitých úlětů ze

seznamu příměsí vhodných do HPC. Při další aplikaci srovnatelné betonové směsi bylo ošetřování betonu vlhkou tkaninou zahájeno v rozmezí 10-15 minut a povrch konstrukce nevykazoval téměř žádné porušení. Je rovněž známo, že beton obsahující křemičité úlety tzv. nekrvácí a je více náchylný k autogennímu smršťování [2].



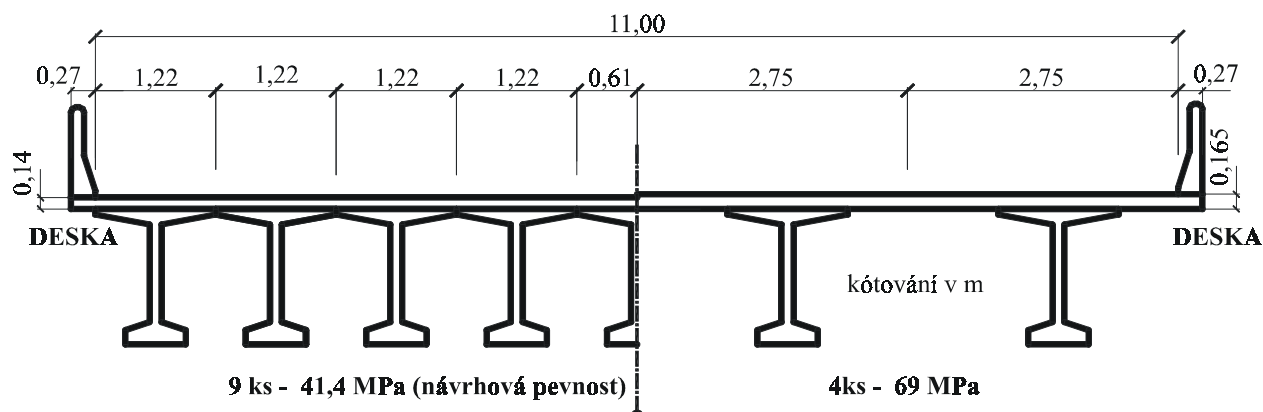
Obr.č.1: Poměrné zastoupení vazných komponent v HPC typické pro USA



Obr. č. 2: Vyhodnocení počátku vzniku trhlin po ukončení ošetřování betonu (celkový počet trhlin je 100 %)

The New York State Department of Transportation (NYSDOT) zpracoval zajímavou statistiku, kdy na 36 mostovkových deskách sledoval vývoj trhlin. Pozorování bylo zahájeno vždy ihned po ukončení ošetřování konstrukce vlhčením (desky byly kropeny 14 dnů). Výsledky jsou uvedeny na obrázku č.2 [8].

Přes tyto problémy se ukázalo, že užití HPC v mostním stavitelství poskytuje celou řadu atraktivních řešení, které byly dříve neuskutečnitelné. Na obr. č. 3 [2] je zcela zřetelné k čemu opravňuje zabudování HPC do projektu mostní konstrukce, tj. k redukci nosníků v příčném řezu, vypuštění vnitřních podpor spodní stavby, k zeštíhlení konstrukce nebo také ke zvýšení rozpětí nosníků. Dech téměř vyraží teoretická studie předpjatého nosníku NU 1800 z HPC zpracovaná týmem odborníků aljašské univerzity, která předpokládá délku prostého nosníku 76 až 91 metrů při váze 100-118 tun [5].



Obr. č. 3: Porovnání příčných řezů mostní konstrukce (klasický beton, HPC)

Statické využití vysokých pevností HPC umožňuje snížit vlastní hmotnost konstrukce navržením subtilnějších průřezů, což má kromě výhod prostorových a estetických i nezanedbatelný efekt ekonomický. Ve spojení s úspornějším řešením spodní stavby a zvýšenou životností konstrukce je tak nesporně HPC materiálem budoucnosti.

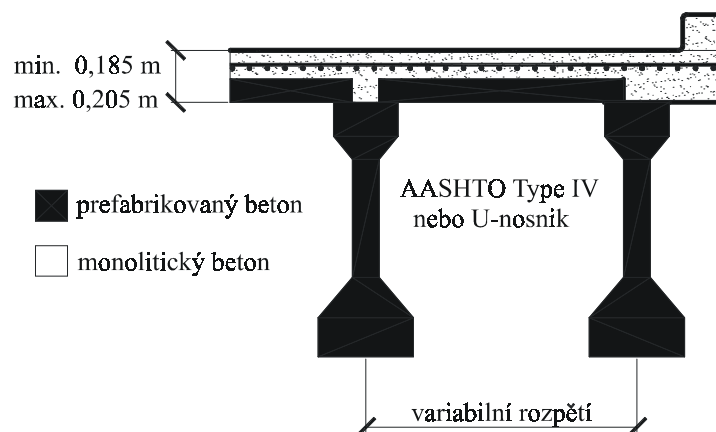
Příklady realizovaných staveb mostů

V 90. letech bylo ve Spojených státech dokončeno několik zajímavých mostních objektů z HPC, které svědčí o důvtipu amerických projektantů. Z těchto staveb je možno uvést nové přemostění Interstate 25 přes Yale Avenue v Denveru (Colorado) obr. č.4. Původní konstrukce délky 65,5 metrů se 3 vnitřními podporami a 45 sloupy měla šířku 33,5 metrů. Nový most šířky 42 metrů má pouze jednu podporu se čtyřmi sloupy (tj. 2 pole 34+30m) s výškou nosníků 0,90 metru! Prefabrikované nosníky byly navrženy s pevností 69 MPa. Předpětí konstrukce bylo realizováno předpínacími lany o průměru 15 mm [2].



Obr. č. 4: Přemostění Yale Avenue, Denver (Colorado)

Dalším reprezentantem možností konstrukcí vybudovaných s využitím HPC je most u San Angela v Texasu. Konstrukce je tvořena osmi poli o celkové délce 292 metrů. Pro první až páté pole byly použity typizované nosníky AASHTO IV v délce 39,9-47,9 metrů s výškou 1372 mm. (Předpínací síla přenášena opět lany o průměru 15 mm.) Návrhová pevnost použitého HPC činila až 96,5 MPa. Deskový systém tvoří (jak názorně předvádí obr. č. 5 [5]) prefabrikovaná deska tl. 89 mm a na ní provedený monolit tl. 102 mm. Most byl dokončen v lednu 1998 [2,5].



Obr. č.5: Konstrukční řešení mostu San Angelo, Texas

Obdobným řešením je most na Loueta Road Overpass blízko Houstonu (Texas). Tato konstrukce získala v roce 1998 prestižní cenu institutu PCI (Precast/Prestressed Institute) Bridge Design Award za rozpětí 41,3 m. Při vlastní realizaci byly na dvě pole délky 41,3 a 37,0 metrů osazeny U nosníky výšky 1,37 metru s návrhovou pevností 90,3 MPa. Šířka nosníků v tomto případě činila 3,57-4,82 metrů. Předpětí konstrukce bylo stejné jako v předcházejícím případě provedeno lany o průměru 15 mm. Deskový systém je tvořen 95 mm tlustou prefabrikovanou deskou, která byla v závěrečné fázi stavby překryta 89 milimetrovým monolitem. I zde je z příčného řezu na obr. č. 5 [5] zřejmé konstrukční uspořádání skladby nosných prvků. Most byl dokončen v květnu 1997 [2,5].

Vysokohodnotný beton byl užit v Americe také na dlouhá přemostění, příkladem může být The Confederation Bridge mezi ostrovem prince Edwarda a Novým Brunswickem o celkové

délce 13 km postavený za cenu 850 miliónů kanadských dolarů (otevřen 1. července 1997) nebo The Admiral Clarey Bridge v zálivu Pearl Harbor v délce 1 míle spojující havajské ostrovy Ford Island a Oahu [2,9].

Evropské zkušenosti

Rovněž v Evropě jsou vybudovány některé smělé konstrukce využívající předností HPC. Největší zkušenosti s vysokohodnotnými betony mají v evropském měřítku skandinávské státy, ve kterých byl rozvoj této technologie neodmyslitelně spojen především se zahájením těžby ropy v pobřežních šelfech. V tabulce č. 2 jsou uvedeny některé příklady vrtných plošin vybudovaných s použitím HPC [5].

Příklady vrtných plošin vybudované s použitím HPC

Tabulka č. 2

Vrtná plošina	Hloubka [m]	Objem použitého HPC [m ³]	28 denní pevnost [MPa]	Rok dokončení
BERYL A	118	52 000	45	1975
STATFJORD A	145	87 000	50	1977
STATFJORD C	145	130 000	55	1984
GULLFAKS C	216	240 000	65/70	1989
DRAUGEN	251	80 000	70/75	1993
TROLL A	303	235 000	75/80	1995
HEIDRUN TLP	345	66 000	LWAC 60	1995

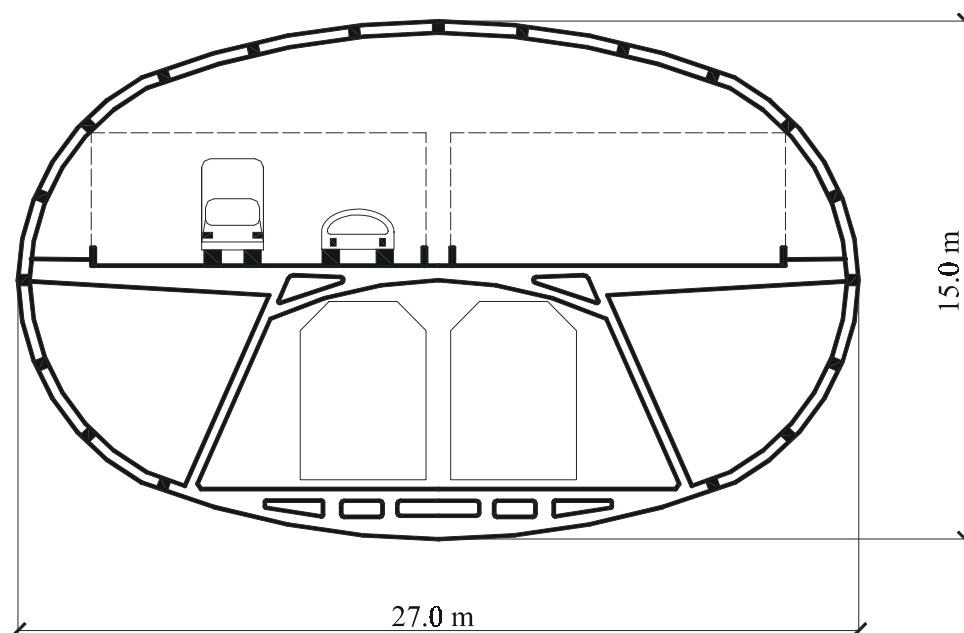
LWAC (Light Weight Aggregate Concrete) použitý na stavbě Heidrun TLP je materiálem vycházejícím z technologie HPC. Jako plnivo je v takto označovaných betonech použito lehké kamenivo, což reprezentuje možnost dalšího dramatického snížení vlastní hmotnosti konstrukce. Na vývoj LWAC bylo v 90. letech vynaloženo např. v Norsku 6 mil. eur a návratnost této investice byla odhadnuta na cca 200 mil. eur.

Najít materiál o vysoké pevnosti a nízké objemové hmotnosti bylo dlouhotrvajícím snem pro celé generace mostařů, neboť umožňuje realizovat smělejší mosty velkých rozpětí. V případě použití LWAC je pak dosaženo příznivějšího poměru mezi vlastní tíhou konstrukce a zatížením nahodilým. Odvážné a elegantní štíhlé konstrukce až donedávna pokládané za utopii se zásluhou vylehčeného vysokohodnotného betonu stávají realitou dnešního světa. Zdárnými příklady jsou letmo betonované norské mosty Stolma Bridge (s rozpětím hlavního pole 301 metrů) a Raftsund Bridge (298 metrů), jež svými rozměry drží světový primát [5].

Bez HPC by se neobešel ani monumentální projekt spojení mezi Dánskem a Švédskem, jenž se stal největší severní investicí v dopravní infrastruktuře. Tento projekt zahrnuje čtyřpruhovou dálnici a dvojkolejnou trať sestávající z ponořeného tunelu – 3,5 km dlouhého, umělého ostrova délky 4,1 km, západního příjezdového mostu délky 2,0 km, zavěšeného mostu o délce 1,1 km se třemi poli a východního příjezdového mostu délky 3,7 km. Ponořený tunel a zavěšená konstrukce jsou největšími stavebními díly svého typu na světě, převádějící zároveň silniční i železniční dopravu. Provoz byl zahájen v červenci 2000 [2].

Budoucnost

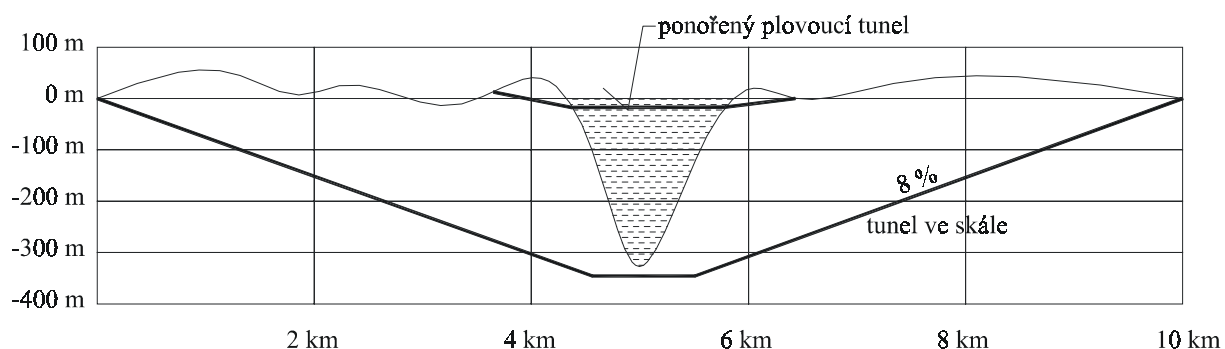
A jaké jsou představy architektů o budoucích stavbách? Na obr. 6 je návrh prostorového řešení tubusového mostu nazvaný „dálnice budoucnosti“, kde horní část tubusu slouží automobilové dopravě, spodní pak může být využita komerčně nebo může svým řešením poskytnout prostor kolejové přepravy. Realizace tohoto odvážného projektu není samozřejmě myslitelná bez využití možností poskytovaných HPC a LWAC.



Obr. č. 6: Studie řešení tubusového mostu

V drsných podmínkách Aljašky byl navržen tubusový most s využitím HPC projekční kanceláří T.Y. Linn International pro Truss Alaska Bridge z Prudhoe Bay do Valdez.

Dalším zajímavým projektem je podvodní tubusový most přes norský fjord u Hogsfjordu jehož poloha má být stabilizována lany zakotvenými v mořském dně. Jinou alternativou je fixace tubusu prostřednictvím pilířů z HPC provedených pod vodou. Toto řešení je navrhováno rovněž pro obdobnou stavbu plánovanou na jezeře Lugano ve Švýcarsku. Srovnání tras podmořského tunelu pod hladinou vody a trasy tunelu navrženého ve skále pod dnem norského fjordu nabízí obr.7 [5].



Obr. č. 7: Srovnání dopravních tras překonávajících norský fjord

Výzkumné laboratoře postupně nacházejí další možnosti zvýšení kvalitativních parametrů vysokohodnotných betonů. Výsledkem jejich práce jsou např. UHPC (Ultra High Performance Concrete), o kterých byla zmínka v úvodu. S využitím těchto materiálů se počítá při sanacích betonových konstrukcí, pro aplikaci na obrusné vrstvy vozovek i jako ochranných vrstev extrémně zatížených podlah apod. V experimentálním stadiu je ověřování chování UHPC ve vysoce agresivním prostředí kanalizačních stok a v prostředí primárních okruhů atomových elektráren [5].

V laboratorních podmínkách byla při experimentálních zkouškách UHPC dosažena pevnost až 690 MPa [5]! Příkladem materiálu typu UHPC je RPC (Reactive Powder Concrete) s pevnostní řadou 170-230 MPa v tlaku a 30-50 MPa v tahu za ohybu. RPC je charakteristický kromě speciální skladby komponentů i obsahem organických nebo ocelových vláken, jejichž

přítomnost ve směsi zajišťuje mimořádné tahové vlastnosti, kdy smrštění a dotvarování tohoto materiálu je prakticky nulové. Beton RPC je velmi trvanlivý, téměř nepodléhá korozi, vykazuje vysokou odolnost proti alkáliím a jeho ohrusuvzdornost bývá přirovnávána k zdravým skalním horninám. V roce 1997 byla s použitím materiálu RPC postavena lávka pro pěší v Sheerbrook, (Quebec – Kanada). Konstrukci tvoří šest prostorových příhradových segmentů délky 10 metrů, rozpětí prostého pole dosahuje 60 metrů a tloušťka mostovkové desky je 30 mm. Ve výstavbě je v současné době lávka pro pěší v Seoulu (Korea) s rozpětím prostého pole 120 metrů, která je tvořena dvěma modifikovanými T průřezy výšky 1,10 metrů s pochozí deskou taktéž 30 mm [2].

Je reálné předpokládat, že se v blízké budoucnosti dočkáme i v ČR dalších staveb využívajících přednosti HPC. V současnosti je řešitelským kolektivem vedeným pracovníky SSŽ a.s. rozpracován výzkumný úkol, který se zabývá možnostmi využití HPC v konstrukcích pozemních komunikací. Jeho součástí je i vybudování dvou mostních objektů z HPC, jejichž realizace má být dokončena v roce 2003. Jeden most bude zhotoven z prefabrikovaných podélných nosníků T93, druhý bude monolitický [10]. V této souvislosti nezbývá, než popřát realizátorům těchto experimentálních staveb mnoho zdaru.

Lektoroval: Ing. Karel Dahinter, CSc.

Literatura:

- [1] www.leadstates.tamu.edu
- [2] FHWA/NCBC: HPC Bridge Views, issue 1-18
- [3] Pospíšil, K.: Zpráva o pracovní cestě na studijní pobyt ve Federal Highway Administration, Virginia Transportation Research Council a Tennessee Department of Transportation, uskutečněný v USA v červnu 2001. Brno, Centrum dopravního výzkumu, 2001
- [4] Pospíšil, K.: Přímé pojižděné mostovky, ochrana výztuže a inhibitory koroze, str. 23 – 27, sborník z 9. celostátního semináře Hydroizolácie mostov a tunelov 2001, Podbanské, SR
- [5] PCI/FHWA/FIB: International Symposium on High Performance Concrete, 25.-27. září, 2000, Orlando – Florida, The economical solution for durable bridges and transportation structures
- [6] Goodspeed, Ch.H., Vanikar, S., Cook, R.A.: High-Performance Concrete Defined for Highway Structures, Committee Special Report No.4, US Department of Transport (Publication No. FHWA-SA-98-082), červenec 1998
- [7] www.hpc.fhwa.dot.gov
- [8] Fifth International Bridge Engineering Conference, National Academy Press, Washington, D.C., 3.-5. dubna, 2000, Tampa, Florida
- [9] www.pci.org
- [10] Hvízdal, V.: Využití vysokopevnostních betonů na mostních stavbách v SRN a současný stav v ČR, str. 410-415, sborník konference Betonářské dny 2001, Pardubice, ČR
- [11] www.silicafume.org
- [12] www.portcement.org
- [13] www.nationalconcretebridge.org

Ing. Aleš Kratochvíl, Centrum dopravního výzkumu, Líšeňská 33a, 613 00 Brno, tel.:

0504/415522, fax: 0504/412140, e-mail: kratochvil@cdv.cz, www.cdv.cz

Ing. Jaroslav Urban, Centrum dopravního výzkumu, Líšeňská 33a, 613 00 Brno, tel.:

05/48423768, fax: 05/48423712, e-mail: urban@cdv.cz, www.cdv.cz