

# MOSTY Z VYSOKOHODNOTNÝCH BETONŮ V SEVERNÍ AMERICE

**ALEŠ KRATOCHVÍL,  
JAROSLAV URBAN,  
KAREL POSPÍŠIL**

Článek popisuje vývoj aplikací vysokohodnotných betonů (HPC) u staveb dopravní infrastruktury na severoamerickém kontinentu. Poukazuje na výhody použití HPC v konkrétních konstrukčních řešeních se zřetelem na ekonomickou efektivitu realizovaných staveb.

Již počátkem osmdesátých let minulého století poukázal americký výzkumný program SHRP (Strategic Highway Research Program) na vysokohodnotné betony (High-Performance Concrete, HPC) jako na jednu z klíčových technologií, která v budoucnu umožní další kvalitativní posun při realizaci staveb dopravní infrastruktury. Program financovaný z federálních prostředků prostřednictvím FHWA (Federal Highway Administration) vycházel z tehdejších zkušeností s aplikacemi tohoto materiálu v pozemním stavitelství a počítal mimo jiné s masivním uplatněním vysokohodnotných betonů při výstavbě mostních objektů.

Tento strategický cíl začal být naplňován v poslední dekádě dvacátého století, kdy FHWA ve spolupráci s TEA-21 (Transportation Equity Act for the 21st Century) zahájily pod hlavičkou programu IBRC (The Innovative Bridge Research and Construction) financování výstavby řady

mostních objektů z HPC na celém území Spojených států amerických [1].

## UPLATNĚNÍ HPC U MOSTNÍCH OBJEKTŮ

Dle údajů AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) byla na konci minulého století ve Spojených státech amerických téměř jedna třetina z celkového počtu 582 tisíc mostů spravovaných FHWA konstrukčně nebo funkčně nedostačujících. Přestože tyto mosty nebyly v havarijním stavu, narůstající tlak dopravní intenzity i zátěže signalizoval nezbytnost provedení nákladných oprav, resp. realizaci zcela nových konstrukcí s odpovídajícím řešením jejich únosnosti i šířkového uspořádání. Podle stejného pramene vynakládají dálniční organizace v USA každým rokem zhruba 3,2 miliardy USD na rekonstrukci a údržbu mostních objektů. Proto investoři zcela přirozeně požadují konstrukce lépe vzdorující účinkům prostředí a zatížení od dopravy, s dlouhou, až stoletou životností, a staví projektanty i zhotovitele před úkol navrhnout a realizovat tato díla ekonomicky, s pozdějšími minimálními náklady na jejich údržbu [2].

V rámci vývojových programů bylo do konce roku 1998 realizováno v USA s využitím HPC devět mostů a závěrem roku 2001 bylo ve třiceti státech USA v provozu již na padesát mostních objektů vybudovaných z vysokohodnotného betonu. Společná představa FHWA a AASHTO je, aby v každém státě USA byl s podporou vědy a výzkumu zhotoven nejméně

jeden most z HPC [2]. Konkrétní navrhované aplikace přitom zahrnují mostní desky, prefabrikované nosníky, vnitřní podpěry a opěry i přímo pojižděné mostovky.

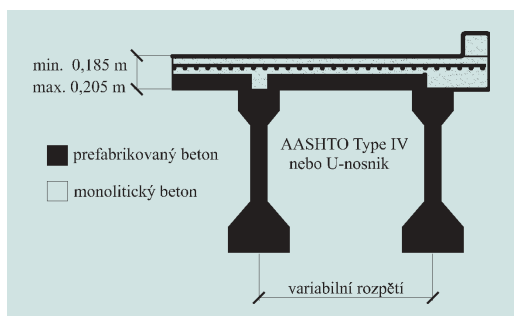
Většinu informací o praktických aplikacích vysokohodnotných betonů při výstavbě mostů v USA, které jsou publikovány v tomto článku, shromáždil kolektiv autorů díky spolupráci Centra dopravního výzkumu s již zmíněným FHWA a některými dalšími organizacemi zabývajícími se v USA problematikou výstavby a údržby dopravní infrastruktury [3].

## POŽADAVKY NA HPC PRO MOSTNÍ OBJEKTY

Výstupy programu SHRP definují vysokohodnotný beton určený pro mostní objekty jako materiál s maximálním vodním součinitelem 0,35 a faktorem trvanlivosti 80 % (dle ASTM C 666, zkušební metoda A). Podle požadavku na minimální pevnost v tlaku dělí SHRP vysokohodnotné betony dále na Very Early Strength (VES), s minimální pevností v tlaku 21 MPa dosaženou do čtyř hodin po uložení betonové směsi, High Early Strength (HES), s minimální pevností 34 MPa do dvaceti čtyř hodin a na Very High Strength (VHS) s minimální pevností 69 MPa do dvaceti osmi dnů po uložení betonové směsi. ACI (American Concrete Institute) definuje potom HPC jako beton snadno zpracovatelný, s rychlým nárůstem počátečních pevností, vysokou odolností, objemovou stálostí a dlouhou trvanlivostí v agresivním prostředí. Třídění vysokohodnot-

Tab. 1 Stupně HPC dle třídění FHWA a některé jeho vlastnosti

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



Obr. 1 Konstrukční řešení mostu San Angelo, Texas

ných betonů dle dokumentů FHWA je uvedeno v tab. 1 [4].

### ZKUŠENOSTI S PRAKTICKOU APLIKACÍ HPC V USA

I když je v současné době ve Spojených státech vybudována z HPC řada mostních objektů nejrůznějších konstrukčních systémů, zůstává nejběžnějším typem mostní konstrukce tvořená prefabrikovanými nosníky, které jsou spřaženy monolitickou železobetonovou deskou. Jsou však postaveny i mosty, kde byl HPC užit od základů až ke svodidlům. Lídr v začátcích HPC v USA, stát Virginia, má přes sto mostů z HPC buď již postaveno, ve výstavbě nebo v projektové fázi. Mimo jiné plánuje také v nejbližší době realizovat deskový most z LWAC (Light Weight Aggregate Concrete) a jeden most využívající HPC modifikovaný vlákny [1].

Příkladem konstrukce využívající prefabrikované nosníky spřažené deskou může být most na jehož realizaci se podílel i uznávaný americký odborník Celik Ozyildirim z VTRC (Virginia Transport Research Council). Jedná se o jednu z prvních staveb tohoto druhu na území USA, k jejíž výstavbě byl použit vysokohodnotný beton. Most nahradil nevyhovující stavbu

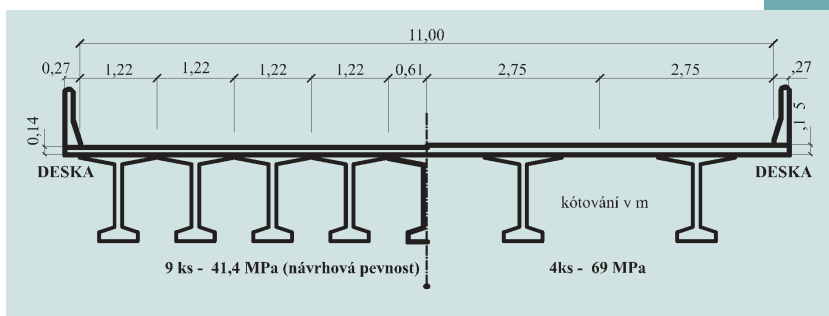
Tab. 2 Mosty z prefabrikovaných HPC nosníků

Poloha mostu	Délka [m]	Typ nosníku
Bow River, Alberta (Can)	64,3 m	NU 2800
Oldman River, Alberta (Can)	57,6 m	NU 2800
Tom Music, Washington (USA)	51,2 m	Deck BT-65
SR 840, Tennessee (USA)	47,5 m	BT-72
San Angelo, Texas (USA)	46,6 m	AASHTO IV

z roku 1932 ve městě Richlands, stát Virginia. Objekt byl uveden do provozu koncem roku 1997 a řeší dopravu na Virginia Avenue přes Clinch River. Tento most s volnou šířkou 13 metrů a se dvěma poli o rozpětí 22,6 metru dobře demonstruje výhody použití HPC oproti klasickému betonu. Zvýšení návrhové pevnosti nosníků na 69 MPa umožnilo zredukovat jejich počet ze sedmi na pouhých pět. Byly použity nosníky AASHTO III, přičemž každý obsahoval třicet předpínacích lan o průměru 15 mm, šestnáct přímých a čtrnáct zakřivených. Spřažená deska tloušťky 216 mm byla provedena z betonu o návrhové pevnosti 41 MPa. Cena jednoho m<sup>2</sup> půdorysné plochy nosné konstrukce se díky použití HPC snížila z původních 743 dolarů na 657 dolarů [5].

Dalším reprezentantem podobného typu mostní konstrukce vybudované s využitím HPC je most u San Angela v Texasu. Konstrukce je tvořena osmi poli o celkové délce 292 m. Pro první až páté pole byly použity typizované nosníky AASHTO IV v délkách 39,9 m až 47,9 m s konstrukční výškou 1372 mm. (Předpínací síla byla přenášena opět lany o průměru 15 mm.) Návrhová pevnost použitého HPC činila 96,5 MPa. Deskový systém tvoří prefabrikovaná deska tloušťky 89 mm a na ní provedený monolit tloušťky 102 mm (obr. 1). Most byl dokončen v lednu 1998 [6].

Předností užití HPC u tohoto typu mostní konstrukce jsou zcela zřejmé ze schématu na obr. 2 [1]. HPC umožňuje redukcí počtu nosníků v příčném řezu, vypuštěním vnitřních podpor spodní stavby, ztížení konstrukce nebo zvýšení rozpětí nosníků. Statické využití vysokých pevností HPC umožňuje rovněž snížit vlastní hmotnost konstrukce navržem 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 HPC nesporně materiálem budoucnosti.



Obr. 2 Porovnání příčných řezů mostní konstrukce (klasický beton x HPC)

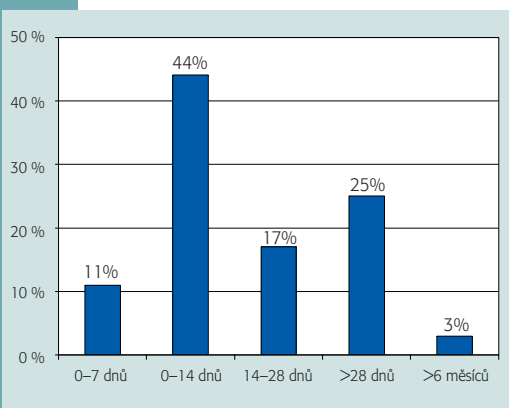
V této souvislosti stojí za zmínku teoretická studie předpjatého nosníku NU 1800 z HPC zpracovaná týmem odborníků aljašské univerzity, která předpokládá délku prostého nosníku 76 až 91 m při hmotnosti 100 až 118 t [6]. Toto staticky mimořádně odvážné řešení je umožněno využitím pevností HPC a vhodně navrženým předpětím průřezu.

Dokladem předcházejících tvrzení je i vývoj v oblasti prefabrikovaných mostních nosníků, a to nejen v USA, ale i v sousední Kanadě. Tab. 2 uvádí některé příklady mostů, jejichž hlavním nosným prvkem jsou prefabrikované nosníky vyrobené z vysokohodnotných betonů. Použití HPC vedlo v těchto případech k zásadní redukci počtu podpor v podélném směru a tím k významným úsporám ekonomickým. Například použití HPC na Bow River Bridge (Alberta, Kanada) snížilo, ve srovnání s původně uvažovaným řešením přemostění ocelovými nosníky, náklady na výstavbu mostu z 10,5 miliónu na 9,6 miliónů kanadských dolarů [1].

### ZKRÁCENÍ DOBY VÝSTAVBY

V současné době se vysokohodnotné betony využívají na severoamerickém kontinentě rovněž jako prostředek k významnému zkrácení termínů výstavby mostních objektů a k jejich rychlému uvedení do provozu. Zde se s výhodou využívá vysokých počátečních pevností HPC, zejména v případech, kdy je jako mikropřívlo v betonových směsích použito křemičitých úletů (mikrosiliky).

Pátého ledna roku 2002 došlo ve státě Alabama (USA) k havárii cisterny převážející pohonnou hmotu. Vozidlo narazilo do podpěry mostu na silnici I-65 v Birminghamu. Konstrukce mostu nárazu odolala, ale následný tepelný efekt požáru, který zuřil po několik hodin, poškodil původní ocelovou konstrukci mostu tak, že vykazoval



Obr. 3 *Vyhodnocení počátku vzniku trhlin po ukončení ošetřování betonu (celkový počet trhlin je 100 %)*

vala průhyb 2,44 m. Situace vyžadovala rychlé řešení, protože most leží na významné a dopravně vysoce zatížené komunikaci (přes most přejíždí denně okolo sto tisíc vozidel). Ze zvažovaných alternativ byl nakonec realizován návrh mostní konstrukce z HPC o třech polích s rozpětími 22,9; 42,7 a 22,9 m. Vlastní stavba nového mostu byla zahájena 21. ledna 2002 a doba výstavby byla smlouvou o dílo stanovena na devadesát dní. Původní návrh mostu počítal ve středním poli s patnácti nosníky AASHTO typu IV výšky 1,6 m. Po jednáních s projektantem bylo nakonec užito ve středním poli patnáct kusů modifikovaných nosníků BT-54 a v krajních polích osm kusů standardních nosníků BT-54, které měli v okamžiku vnesení předpětí pevnost 48 MPa. Očekávané dotvarování a smršťování konstrukce vyžadovalo při realizaci stavby citlivý přístup od všech účastníků výstavby. Dodavatel dokázal všechny nosníky vyrobit za rekordních patnáct dní. Spřažená 185 mm tlustá deska byla betonována v pěti částech a po čtrnácti dnech dosahovala pevnost 28 MPa. 27. února 2002, tj. padesát dva dní po nešťastné dopravní nehodě a pouhých třicet sedm dní od zahájení prací, byl nový most předán do užívání. Zhotovitel tak obdržel nabídkovou prémii, která činila 25 tis. amerických dolarů za každý den zkrácení výstavby. Celkem tedy úctyhodných 1 325 000 dolarů [1].

V extrémních případech je možno dosáhnout zkrácení doby výstavby konstrukcí využívajících HPC i dalšími technologickými opatřeními. Například pro most s osmnácti poli o celkové délce 811 m, ve státě Ohio nad údolím Cuyahoga River Valley, byly modifikované nosníky AASHTO pro-

pařovány a po osmnácti hodinách dosahovaly pevnosti použitého HPC v nosních hodnotách kolem 50 MPa [1].

### **Přímo pojižděné mostovky a mostovkové desky z HPC**

Značná část mostů ve Spojených státech amerických je budována s přímo pojižděnými cementobetonovými mostovkami nebo mostovkovými deskami [3]. Toto řešení je uplatňováno bez ohledu na to, jde-li o silnici nižší či vyšší třídy nebo o dálnici, a to dokonce i v případech, kdy je vozovka na komunikaci před a za mostem asfaltová. Přímo pojižděné mostovkové desky jsou z konstrukčního hlediska navrhovány jako křížem vyztužené. Vyztužení desky bývá provedeno při horním i dolním povrchu a výtuz je zpravidla chráněna proti korozi speciálními opatřeními (např. povlakování). Současný trend v USA je betonovat přímo pojižděné mostovkové desky beze spár, a to i u dlouhých spojitých mostních konstrukcí [3].

Příkladem využití HPC pro přímo pojižděnou deskovou mostovku může být most Wacker Drive v Chicagu (Illinois), přes který denně přejede více než 160 tisíc vozidel. Cílem užití HPC bylo v tomto případě vytvoření odolné a trvanlivé konstrukce současně se zvýšením průjezdné výšky pod mostem. Aplikace HPC umožnila snížit tloušťku desky ze 610 na 380 mm (při max. rozpětí pole cca 14 m). Deska byla jak příčně, tak podélně předepnuta. Ochrana výtuz byla zajištěna epoxidovým nátěrem. Povrch přímo pojižděné cementobetonové mostovky je modifikován speciálním latexovým nátěrem. Řešení umožnilo zvýšit volnou výšku pod mostem o 305 mm [7].

Při využití HPC jako materiálu pro přímo pojižděné mostovky a mostovkové desky nabývají zásadního významu otázky trvanlivosti použitého betonu. Problémy mohou způsobit relativně velké objemové změny HPC v časném stadiu po uložení betonové směsi do bednění (tzv. autogenní smršťování) a s tím spojená vyšší pravděpodobnost výskytu smršťovacích trhlin. Dalším kritickým parametrem s ohledem na možnost využití HPC pro přímo pojižděné mostovky nebo mostovkové desky je odpor materiálu proti vnikání chloridových iontů (zimní údržba). Příkladem negativního vlivu smrštění HPC na užité vlastnosti stavebního díla a nezbytnosti pečlivého ošetřování HPC betonů uložených v tomto typu konstrukce, může být případ ze státu Idaho. Ochrana přímo pojižděné desky proti úniku vlhkosti z povrchových vrstev použitého HPC (vlhčená „geotextilie“) byla provedena cca 45 minut po ukončení betonáže. Po několika dnech vykazovaly desky trhliny takového rozsahu, že odborníci Idaho Transportation Department (ITD) zvažovali možnost úplného vyloučení křemičitých úletů ze seznamu příměsí vhodných do HPC určených pro přímo pojižděné desky. Při další aplikaci srovnatelné betonové směsi bylo ošetřování betonu vlhkou tkaninou zahájeno v rozmezí 10–15 minut po ukončení betonáže. V tomto případě povrch konstrukce nevykazoval téměř žádné porušení [1].

V této souvislosti zpracoval zajímavou studii The New York State Department of Transportation (NYSDOT). Na 36 mostov-

Obr. 4 *Coronado Bridge, San Diego, Kalifornie, USA*





kových deskách nahodile vybraných na celém území státu New York byl sledován vývoj smršťovacích trhlin (obr. 3) [8]. Dokumentace poruch byla zahájena vždy ihned po ukončení ošetřování konstrukce vlhčením (desky byly kropeny čtrnáct dnů) a probíhala po dobu jednoho roku.

### MOSTNÍ KONSTRUKCE Z LWAC

Jak bylo uvedeno, je LWAC materiál, který vychází z technologie HPC. Plnivem jsou však v taktu označovaných betonů lehká kameniva, a to jak přirozeného, tak umělého původu. Nižší objemová hmotnost těchto betonů zajišťuje dosažení příznivějšího poměru mezi vlastní tíhou konstrukce a zatížením nahodilým. Tato skutečnost dovoluje projektantům, zejména u mostů velkých rozpětí, navrhovat odvážné a elegantní stavby, které by ještě nedávno byly pouhou utopií. Ty nejspolehlivější stavby z LWAC je možné spatřit v severských zemích starého kontinentu, ale také v severní Americe byla vybudována řada staveb, jejichž realizaci umožnilo využití vlastností tohoto materiálu.

Architektonicky příznivým dojmem působí např. American River Bridge v Kalifornii. Mostní konstrukce tvořená dvěma náběhovanými komorovými dodatečně předpínanými nosníky z LWAC spočívá na podporách založených na vrtaných pilotách. Tento most o celkové délce 690 m překračuje svými třemi poli o rozpětí 100 m a koncovým polem o rozpětí 55 m jezero Natoma. Nad přilehlým Negro Bar State Park pokračuje potom dalšími pěti poli o rozpětí 58 m. Tato pole jsou tvořena komorovými nosníky již bez náběhů. Šířka desky přechází od 33,6 do 41,2 m. Nad jezerem je most opatřen architektonicky zdařilými prefabrikovanými a dodatečně předpínanými oblouky z LWAC. Most je vybaven seismickými ložisky.

Na State Highway č. 75 přes San Diego Bay v Kalifornii se nachází Coronado Bridge (obr. 4). I když byl tento 61 m vysoký most uveden do provozu již v roce 1969, může být směle řazen mezi konstrukce využívající LWAC. Nosnou konstrukci tohoto mostu tvoří tři sta sedm prefabrikovaných, předpjatých nosníků vyrobených z lehčeného betonu. Dvě stě šest nosníků je vysokých 1,68 m a čtyřicet jeden má výšku 2,26 m. Nosníky byly vyráběny 100 mil od staveniště v Santa Fe Springs. Průměrná délka nižších nosníků se pohybuje v rozmezí 29 až 35,7 m, vyšší nosníky jsou 46 m dlouhé s horní přírubou

Obr. 5 Studie řešení tubusového mostu

200 mm silnou. Nosníky byly v průběhu výroby propařovány a velmi pečlivě byly sledovány jejich objemové změny i hodnoty modulů pružnosti. 3 407 m dlouhý most obsahuje 4 587 m<sup>3</sup> betonu v předpjatých nosnících a i přes své stáří je stále v dobrém technickém stavu. V současné době slouží most FHWA pro sledování dlouhodobých změn v chování konstrukcí vyrobených z tohoto materiálu [9].

### A JAKÁ JE BUDOUCNOST?

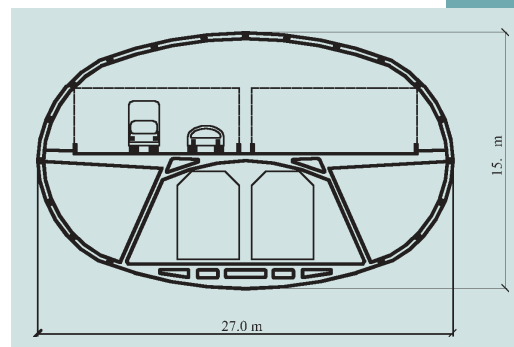
V představách amerických architektů se rodí nové smělé projekty. Na obr. 5 je návrh prostorového řešení tubusového mostu nazvaného „dálnice budoucnosti“, kde horní část tubusu slouží automobilové dopravě, spodní pak může být využita komerčně nebo může svým řešením poskytnout prostor kolejové přepravě. Realizace tohoto odvážného projektu není samozřejmě myslitelná bez využití možností poskytovaných HPC a LWAC.

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 [6].

Výzkumné laboratoře postupně nacházejí další možnosti zvýšení kvalitativních parametrů vysokohodnotných betonů. Výsledkem jejich práce jsou např. UHPC (Ultra High Performance Concrete). 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 [6].

V laboratorních podmínkách byly při experimentálních zkouškách UHPC dosaženy pevnosti pohybující se až v rozmezí 700 až 800 MPa [5]! Příkladem materiálu typu UHPC je RPC (Reactive Powder Concrete) s pevnostní řadou 170 až 230 MPa v tlaku a 30 až 50 MPa v tahu za ohybu. RPC je charakteristický kromě speciální skladby komponentů i obsahem organických nebo ocelových vláken, jejichž přítomnost ve směsi zajišťuje mimořádně příznivé tahové vlastnosti výsledného kompozitu, přičemž smrštění a dotvarování tohoto materiálu je prakticky nulové [1].

Je proto reálné předpokládat, že se na americkém kontinentě objeví v blízké bu-



doucnosti další mostní konstrukce využívající přednosti nových technologií betonového stavitelství.

Ing. Aleš Kratochvíl  
e-mail: kratochvil@cdv.cz

Ing. Jaroslav Urban  
e-mail: urban@cdv.cz

Ing. Karel Pospíšil, Ph.D.  
e-mail: pospisil@cdv.cz

všichni: Centrum dopravního výzkumu  
Líšeňská 33a, 636 00 Brno  
fax: 549429343, www.cdv.cz

### Literatura:

- [1] FHWA/NCBC: HPC Bridge Views, issue 1-27
- [2] www.leadstates.tamu.edu
- [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] 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), 7/1998
- [5] Ozyildirim C., Gomez J. P.: High-performance concrete in a bridge in Richlands, Virginia, 9/1999, Charlottesville, Virginia, VTRC 00-R6
- [6] PCI/FHWA/FIB: International Symposium on High Performance Concrete, září 2000, Orlando – Florida, The economical solution for durable bridges and transportation structures
- [7] www.lusas.com
- [8] Fifth International Bridge Engineering Conference, NAP, Washington, D.C., duben 2000, Tampa, Florida
- [9] www.escsi.org