

UPLATNĚNÍ UHPC PRO REKONSTRUKCE MOSTŮ

Lukáš Boháček, *

Katedra betonových a zděných konstrukcí, Fakulta stavební,
České vysoké učení technické v Praze, Thákurova 7/2077, 166 29 Praha 6, Česká republika.
Lukas.bohacek@fsv.cvut.cz

ABSTRAKT

Článek se zabývá různými možnostmi použití UHPC pro rekonstrukce mostních konstrukcí. Podkladem byly články z celého světa, které se zabývají rekonstrukcemi nosných konstrukcí, spodní stavby, ale také spoji mezi původní a novou konstrukcí. Nalezeny byly také způsoby, kdy byl pomocí UHPC změněn statický systém pro výhodnější působení konstrukcí.

Ukazuje se, že UHPC je poměrně vhodný materiál pro rekonstrukce, ať už díky své vysoké pevnosti, odolnosti, ale také trvanlivosti. Další výhodou je menší spotřeba materiálu a tedy menší dodatečné zatížení konstrukcí. Nevýhodou je vyšší cena UHPC, ale jak je z uvedených příkladů zřejmé, ostatní výhody vyváží finanční náklady. V některých případech se dokonce jedná o levnější variantu. Často bývá také rozhodující rychlost výstavby, kde má UHPC také své výhody.

KLÍČOVÁ SLOVA

UHPC • UHPFRC • Most • Zesílení • Rekonstrukce

ABSTRACT

The paper deals with different possibilities of using UHPC for retrofitting of bridges. It was based on articles from all over the world that deal with the retrofitting of superstructures, substructures, as well as the connections between the existing and new structures. Ways were also found in which the structural system was altered using UHPC for a more advantageous performance of the structures.

It turns out that UHPC is quite a suitable material for retrofitting due to its high strength, durability, but also endurance. Another advantage is less material consumption and smaller additional loading of structures. A disadvantage is the higher cost of UHPC, but as is clear from the examples given, the other advantages outweigh the financial costs. In some cases it is even the cheaper option. Often the time of construction is also decisive, where UHPC also has its advantages.

KEYWORDS

UHPC • UHPFRC • Bridge • Strengthening • Retrofitting

1. ÚVOD

Rekonstrukce jsou v mostním stavitelství zásadním tématem. Životnost mostu je sice uvažována na 100 let, nicméně je nutné provádět údržbu. Jedním z největších problémů je voda zatékající na nosnou konstrukci či spodní stavbu. Proto je nutné udržet v dobrém stavu izolaci a mostní závěry.

S ohledem na rozvoj dopravy mohou být i další důvody k rekonstrukci, např. nevyhovující šířka mostu, jelikož dochází ke zkapacitnění dálnic. Aktuálně se mj. z tohoto důvodu rekonstruuje most Šmejkalova na dálnici D1.

S rozvojem dopravy souvisí i zvýšení zatížení na mostní konstrukce. S tím souvisí také úpravy předpisů a norem. Starší mosty mají velmi často malou zatížitelnost. V těchto případech je tedy nutné provést rekonstrukci, která zvýší také zatížitelnost. Dost často je tedy nutné provést výměnu nosné konstrukce. Tento způsob rekonstrukce je velmi nákladný a ve většině případů znamená kompletní uzavírku mostu a objížďky.

V posledních letech se stále častěji pro rekonstrukce mostních konstrukcí používá ultravysoko-hodnotný beton (UHPC). Nejčastěji se UHPC použije ve formě přibetonávky na nosnou konstrukci, která má tloušťku v jednotkách centimetrů.

Jelikož je UHPC z praktického hlediska vodonepropustný materiál, plní funkci izolace původní nosné konstrukce. V některých případech se tedy vynechává běžná izolace asfaltovými pásy a skladba vozovky se ukládá přímo na UHPC. Někdy je také přibetonávka UHPC přímo pojížďená.

UHPC tedy může nahradit běžně používané přibetonávky z betonu. Jednou z výhod je, že není nutné používat spřahující prvky, případně jich stačí méně, jelikož má UHPC lepší soudržnost, než původní beton. Podmínkou je dostatečně kvalitní beton a povrch původní konstrukce. UHPC ve velmi trvanlivý materiál a dá se předpokládat, že tato přibetonávka vydrží déle, než z běžného betonu. UHPC se dá použít navíc v menších tloušťkách a bez konvenční výztuže i v případech, kdy by se namísto běžného betonu používaly sanační hmoty.

UHPC má vyšší pevnost než běžný beton. Pokud je tedy nutné zvýšit i zatížitelnost, je UHPC vhodnějším materiálem. Je však nutné podotknout, že u mostů větších rozpětí, například komorových, má UHPC omezený dopad do únosnosti v podélném směru. Často však může rozhodovat příčný směr, a v tomto případě se díky UHPC dá dosáhnout významně vyšších únosností.

* Školitel: prof. Ing. Jan L. Vitek, CSc., FEng

Použití UHPC má však i své nevýhody. Jednou z největších výhod je pořizovací cena., která může být až 10krát vyšší, než u běžného betonu. Další nevýhodou je také komplikovanější pokládka. Obecně, při ukládání UHPC přímo na stavbě je nutné dbát technologické kázně. Také, pokud se nepoužívají spráhující prvky, je nutné pečlivě připravit stávající povrch nosné konstrukce.

Při zvažování použití UHPC je tedy nutné zvážit všechny aspekty, zejména význam konstrukce, zbývající životnost konstrukce, rychlost výstavby. Výsledné náklady totiž zahrnují i další údržbu a rekonstrukce mostu, nejen okamžité náklady na rekonstrukci.

V článku jsou zastoupeny příklady různých způsobů rekonstrukce mostu pomocí UHPC. Největší rozsah je věnován přibetonávkám UHPC na mostovku, jelikož je to nejčastější způsob použití. Dále jsou zde uvedeny i méně typické způsoby použití, které jsou často dány specifickými okrajovými podmínkami.

2. PŘÍKLADY REKONSTRUKCÍ

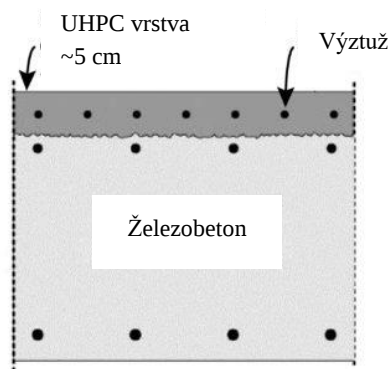
2.1. Mosty s betonovou nosnou konstrukcí

2.1.1. Dálniční mosty Chillon

Švýcarské dálniční mosty Chillon, které vedou podél východního břehu Ženevského jezera. Jsou to mosty na velmi vytížené Švýcarské dálnici, které byly uvedeny do provozu v roce 1969. Jde o dvojici komorových mostů, oba mají délku přes 2100 m. Pro výstavbu byly použity prefabrikované segmenty, což v tomto období byla poměrně nová technologie.

Během kontrol mostu byla zjištěna alkalická koroze horní povrchu nosné konstrukce (UHPC Solutions 2017). Alkalická koroze je velký problém, a bylo nutné ho řešit. S ohledem na vytížení dálnice musela být rekonstrukce velmi rychlá. Po zvážení různých variant rekonstrukce, zvýšení všech výhod a nevýhod, byla zvolena právě rekonstrukce pomocí přibetonávky UHPC.

Byla tedy odstraněna poškozená část mostovky, a na zdravý beton byla použita vrstva UHPC tl. 45 mm, do které byla zároveň umístěna betonářská výztuž, viz Obrázek 1. S ohledem na velkou plochu (53 000 m²) byl pro pokládání použitý speciální finišer (Obrázek 2). Díky tomu bylo možné položit UHPC na jeden most během měsíce. Omezení trvala tedy jen jednu stavební sezonu pro každý z mostů.



Obrázek 1: Způsob zesílení UHPC (UHPC Solutions 2017)

Rekonstrukce mostů se podařila ve velmi rychlém čase, a to zejména díky použití speciálního finišeru. Díky použití UHPC byla zvýšena únosnost, tuhost a zároveň byla ochráněna mostovka mostů.



Obrázek 2: Pokládka UHPC finišerem (Ductal 2016)

2.1.2. Barrandovský most

V současné době probíhá třetí etapa opravy Barrandovského mostu v Praze, kdy se opravuje severní most. V předešlých dvou letech byl rekonstruován jižní most a dvě navazující rampy.

Použití UHPC na mostě původně nebylo plánované. Po odfrézování asfaltových vrstev se ukázalo, že geometrie stávající konstrukce je odlišná od předpokladů při přípravě projektu. Příčné a podélné sklony vozovky na mostě jsou velmi proměnlivé a nosná konstrukce toto nekopírovala. Původně byly tyto rozdíly vyrovnány v asfaltových vrstvách, což je ale dnes nepřijatelné. Také na některých místech byla kvalita betonu nosné konstrukce horší, než se očekávalo. Proto bylo v průběhu první etapy rozhodnuto, že bude na původní mostovku přibetonována vrstva UHPC. Přibetonávka byla rozdělena do 3 typů: do 25 mm - použití sanačních hmot; od 25 do 40 mm - použití samotného UHPC; od 40 mm – použití UHPC s KARI sítí. Na přibetonávku se uložila izolace a poté vozovkové souvrství.



Obrázek 3: Pokládka UHPC na Barrandovském mostě (TBG Metrostav 2023)

V Česku se jednalo o první použití monolitického UHPC v takovém rozsahu, takže se realizace neobešla bez potíží. S ohledem na horší podklad a někdy ne úplně dokonalou při-

pravu povrchu a ukládání výztužných sítí došlo podél některých okrajů betonážních celků k oddělení UHPC od mostovky. Tato místa byla částečně odbourána a částečně injektována. Při kontrole těchto míst se ukázalo, že nedošlo k oddělení UHPC, ale k povrchové vrstvě původního betonu.

Při druhé etapě byl upraven postup přípravy povrchu – povrch byl frézován, a poté dvakrát tryskán tlakovou vodou a bylo již navrženo jen UHPC v tloušťce 40 mm a více s výztužnou sítí, bez kombinace se sanačními hmotami. V druhé etapě již nebyly zjištěny žádné poruchy. V tomto případě bylo UHPC pokládáno z automixu, bez použití speciálního finišeru. V následujících etapách (rekonstrukce severního mostu) bude již provedena rekonstrukce bez použití hydroizolace.

2.1.3. Most Guillermaux

Jedná se o silniční most přes řeku Broye ve městě Payerne (Švýcarsko) z roku 1921 (Brühwiler 2017). Most je tvořen trojkloubovým železobetonovým obloukem o rozpětí 27.6 m a vzepětí 2.8 m. Klouby v patách oblouku a ve vrcholu byly tvořeny žulovými bloky a plechy pro přenos sil. Střední část mostovky z prostého betonu leží přímo na oblouku a navazují na ní ŽB desky, které jsou tvarované do oblouků a jsou dále podepřeny stojkou z hlavního oblouku a opěrou (obr. 4).

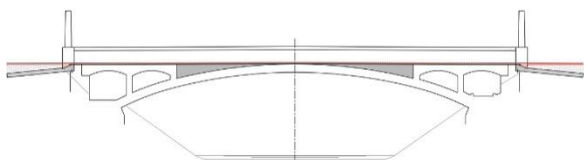


Obrázek 4: Most Guillermaux (Brühwiler 2017)

Rekonstrukce mostu byla nutná z důvodu jeho špatného stavu a zároveň byla převáděná komunikace zařazena do vyšší třídy zatížení, kterou tento most nesplňoval. Špatný stav byl z velké části způsoben tím, že nikdy neměl vodotěsnou izolaci a veškeré rozmrazovací prostředky působily na konstrukce. Komplikací také bylo, že most má historickou hodnotu a byla snaha ho zachovat.

Použití UHPC v tomto případě zahrnovala více úprav než jen přebetonování mostovky, např. změnu statického systému. Kloubové uložení desek ve vrcholu oblouku do prostého betonu bylo nahrazeno pomocí UHPC a desky byly fixovány do UHPC. Až následně byla vybetonována 50 mm vrstva UHPC s betonářskou výztuží, která je kotvená do přechodových desek. Přechodové desky jsou kotvené do terénu, přibetonávka slouží jako tažený prvek, který zvyšuje tuhost celého mostu. Zároveň jsou do oblouku vnášeny menší ohybové momenty a většina síly je přenášena tlakovým namáháním oblouku.

1:100



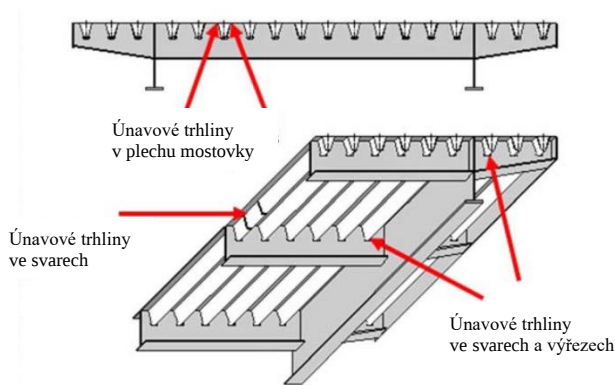
Obrázek 5: Oprava mostu Guillermaux (Brühwiler 2017)

Touto opravou se únosnost mostu zvýšila dvojnásobně, bez jakéhokoliv dopadu do vzhledu mostu. Zároveň, díky UHPC má nyní oblouk vodotěsnou izolaci a byla tím prodloužena jeho životnost.

2.2. Ocelové mosty s ortotropní mostovkou

Významný výzkumný program na rekonstrukce pomocí UHPC proběhl v Nizozemsku (Buitelaar 2010). Mezi šedesátými a osmdesátými lety zde bylo postaveno poměrně dost mostů s ocelovou ortotropní mostovkou. S nárůstem dopravy a také hmotnosti jednotlivých vozidel se však ukázalo, že některé detaily nevyhovují z hlediska namáhání a začalo docházet k únavovým trhlinám.

Kritérium únavového namáhání může být u ocelových mostních konstrukcí často rozhodujícím kritériem. V dnešní době je velká část používaných detailů typizovaných a má takzvanou třídu detailu, tedy počet cyklů, pro který může být detail použitý. Jedním z problematických míst jsou svary podélných výztuh, případně jejich spojení s příčníky (Obrázek 6). Hlavním důvodem tohoto problému je právě zvýšení zatížení od dopravy malá tloušťka plechu mostovky.



Obrázek 6: Místa častých únavových poruch (Buitelaar 2010)

Problémy se začaly objevovat v devadesátých letech a v počátcích se řešily lokálními opravami – vybroušení svarů a provedení nového svaru, případně nahrazení části mostovky novým plechem. Opravy však byly poměrně složité, vyžadovaly doprání omezení a velmi často docházelo i k poruchám v asfaltovém souvrství. V roce 1998 tedy začal výzkum s cílem navrhnout způsob rekonstrukce. Na základě výpočtu se ukázalo, že nejvhodnější je metoda přibetonování vrstvy ultravysoko hodnotného (případně jen vysoko hodnotného) betonu na mostovku. Napětí v ocelové mostovce v tomto případě pokleslo na 20 – 25 % v porovnání s pouze ortotropní mostovkou.

Významným problémem bylo řešení spojení ocelového plechu mostovky a betonu. To je významný rozdíl oproti betonové mostovce, kde ve většině případů stačí provést správnou přípravu povrchu. Dříve byly v jiných zemích použity dvě metody – přivaření ocelových sítí nebo spřahovacích trnů na mostovku. Toto řešení však bylo zavrhnuto, jelikož svařování do konstrukce vnáší lokální napětí a může způsobovat další problémy s únavovým namáháním. Na spojení byl nakonec použit dvousložkový epoxid s bauxitovým kamenivem.

Výsledkem výzkumu tedy bylo použití vrstvy 50 mm UHPC na mostovku s aplikovaným epoxidem. Při prvních rekonstrukcích byly použity 3 vrstvy výztuže (2 v podélném směru, 1 v příčném směru), následně však toto bylo upraveno pouze na dvě vrstvy výztuže o větších profilech. Zároveň bylo ustoupeno od použití KARI sítí, které byly nahrazeny běžnými profily. V průběhu výstavby docházelo k problémům, když se přesahovaly 3 KARI sítě.

Na obr. 7 je fotografie z výstavby. Pracovní prostor byl vždy zakrytý, aby se udržovalo stabilní prostředí, ať už při aplikaci spojovací vrstvy, tak při samotné betonáži UHPC. Při použití UHPC je totiž důležité dbát na ošetřování betonu, aby byly v maximální míře redukovány účinky smršťování. Pro ukládání byly použity automixy a následně byly použity vibrační latě pro uhlazení povrchu. Je také možné použít speciální finišery, je však nutné ověřit únosnost mostovky. Následně byl povrch zvlhčen a byl přikrytý fóliemi pro udržení vlhkosti.

Při prvním použití bylo plánu následně zdrsnit povrch UHPC, který by měl být přímo poježděn. Po několika letech se však ukázalo, že povrch byl provozem uhlazen. Byla tedy použita speciální 10-12 mm tenká obrušná vrstva.



Obrázek 7: Betonáž UHPC pod ochranou (Buitelaar 2010)

Při použití této metody je však nutné brát v potaz, že dochází ke zvýšení zatížení na most. Výjimkou jsou případy, kdy UHPC nahrazuje část skladby vozovky, pak není nárůst zásadní. Již v průběhu přípravy je tedy nutné myslet na statickou analýzu konstrukce a v některých případech je také nutné provádět zesílení ocelových částí. S ohledem na problémy v Nizozemí se však ukázalo, že přesto je toto vhodný způsob opravy. Od roku 2003 už bylo touto metodou opraveno více než 10 mostů v Nizozemsku (Calandbridge, most Moerdijk, most Hagenstein aj.) a v roce 2019 byla tato metoda použita i v Německu, na mostě Rheinbrücke Maxau.

V některých zemích byly použity modifikované postupy tohoto způsobu rekonstrukce. Zejména v asijských zemích se používají ke kotvení spřahující trny. Umísťují se však v poměrně velkých vzdálenostech a zejména v oblastech s menším lokálním namáháním – např. v místě dělicí čáry, nebo u krajnic. Ve Francii byla tato metoda také použita, ale s prefabrikovanými panely. Ty mohou být spojeny také epoxidovou pryskyřicí, nebo spřahujícími trny v méně exponovaných místech.

2.3. Opravy spodní stavby

Jsou i případy, kdy je pomocí UHPC vhodné provést opravu spodní stavby, zejména pilířů, jak ukazují příklady ze severoamerického kontinentu (Doiron 2019).

Prvním z příkladů je menší železniční most přes silniční komunikaci. Stávající pilíře byly ve špatném stavu, a bylo nutné je ochránit proti solím a rozmrazovacím prostředkům. Zde bylo vhodné využít UHPC, z důvodů trvanlivosti a odolnosti. Požadavkem totiž bylo co nejméně omezit světlou vzdálenost pilířů (jelikož omezují průjezdný profil pod mostem) a také vytvořit co nejlepší ochranu původního betonu a aby tato ochrana vydržela co nejdéle. Byl tedy odstraněn poškozený beton a bylo provedeno obetonování UHPC po celém obvodu pilíře.

Dalším příkladem je Mission Bridge v Britské Kolumbii. Jedná se o velmi významný most na čtyřproudové komunikaci přes řeku v seismické oblasti. Má železobetonové pilíře do tvaru písmene „V“. Jeden z pilířů je založen v horších geologických podmínkách a byla řešena jeho ochrana proti případným významnějším pohybům při zemětřesení. Z různých variant (zlepšování zemin, obetonování běžným betonem nebo zesílování ocelovými pláty) byla vybrána varianta obetonování paty pilíře pomocí UHPC (obr. 8). Již dříve bylo experimentálně ověřováno, že pilíře zesílené UHPC mají lepší seismickou odolnost (Tong et al. 2019) a navíc, tato varianta byla i finančně nejvýhodnější.



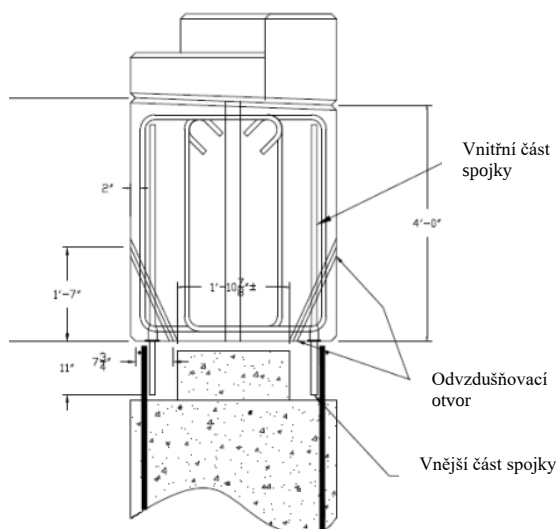
Obrázek 8: Pata pilíře po provedení zesílení (Doiron 2019)

Další zesílení v místě patek bylo provedeno opět v Britské Kolumbii. Jedná se o ocelový visutý most, který má sice jen jeden pruh, ale je prakticky jediným možným přístupem do blízké nemocnice. Je tedy snahou co nejvíce prodloužit životnost tohoto mostu. Navazující krajní pole jsou z ocelových sloupů kotvených do betonových patek. Na těchto patkách se však začínala projevovat koroze, cílem tedy bylo zesílit oslabená místa a zároveň ochránit ocelové patky před korozí. Řešením bylo vlepení výztuže do základu, zároveň její propojení s pilířem a obetonování pomocí UHPC. Toto řešení zvýšilo tuhost a únosnost poškozeného místa a zároveň poskytuje ochranu zkorodovaným částem (obr. 9).



Obrázek 9: Vývýšení základu a projení výztuží (Doiron 2019)

Posledním příkladem je použití UHPC pro propojení stávajícího pilíře s novou prefabrikovanou mostovkou. V rámci rekonstrukce staršího mostu byla navržena výměna mostovky za novou, prefabrikovanou s propojením výztuže. Původní návrh odbourání stávající nosné konstrukce, vlepnutí nové výztuže do vrcholu pilířů. Toto vlepnutí by bylo složitější, jelikož je nutné znát polohu původní výztuže a vyhnout se jí. Proto bylo ještě před výstavbou rozhodnuto o změně návrhu. Po odstranění původní nosné konstrukce došlo k částečnému odstranění betonu hlavy pilíře, cca na výšku 28 cm. Odstraněn byl pouze beton po obvodu pilíře, cca o tloušťce 20 cm. Tím došlo k odhalení stávající výztuže. Dále bylo ověřeno, že při použití UHPC bude přesahová délka 25 cm pro původní výztuž a novou výztuž z prefabrikátů dostačující. Po osazení nosné konstrukce byl tedy zabetonován odstraněný „límec“ a tím bylo zajištěno propojení výztuže (obr. 10).



Obrázek 10: Řez hlavou pilíře a prefabrikátem (Doiron 2019)

2.4. Nahrazení mostních závěrů UHPC spoji

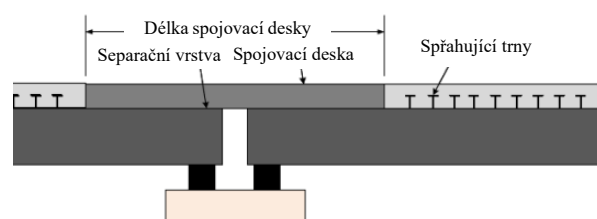
Mostní závěry jsou obecně slabé místo mostních konstrukcí. Často zde dochází k poruchám těsnosti a dochází k protékání na čela nosné konstrukce a spodní stavbu. Zároveň mostní závěry zvyšují dynamické účinky od dopravy na most.

V případně nosné konstrukce složené z prostých nosníků je možné mostní závěry nahradit kotvenou deskou z UHPC, která spojí jednotlivé konstrukce k sobě. Tímto dojde k odstranění problémům s mostními závěry a vytvoření konstrukčního

spojitého nosníku (staticky konstrukce funguje jako prosté nosníky).

Je však nutné uvažovat s tím, že deska je významně namáhána a může být například nutné provést výměnu některých ložisek, z důvodu přenášení větších vodorovných sil. Několik desítek mostů bylo již takto rekonstruováno v USA (Federal Highway Administration 2020). Ve většině případů se jedná o ocelové nosníkové mosty se spřaženou železobetonovou deskou.

Na místě styku nosníků byla vybourána spřažená deska, byly zde odstraněny spřahující trny a byla vybetonována deska z UHPC. Na koncích nosníků je použita separační vrstva pro oddělení spolupůsobení UHPC a ocelových nosníků, aby byla snížena tuhost a tím i ohybové namáhání.



Obrázek 11: Nahrazení mostního závěru UHPC deskou (Federal Highway Administration 2020)

Pro tento způsob rekonstrukce je však zásadní uspořádání ložisek. Pokud jsou ve dvojici sobě odpovídající ložiska, tedy posuvná - posuvná nebo pevná - pevná, je možné tyto ložiska ponechat, pokud splňují požadavky. Není možné použít dvojici ložisek pevná - posuvná na jednom pilíři. Některé státy umožňují použití elastomerových ložisek.

V USA se nyní tato metoda používá i u nových mostů, ať už ocelových či betonových nosníků. Výhodou je redukce počtu mostních závěrů, ale také urychlení výstavby.

3. ZÁVĚR

Dle uvedených příkladů je možné říct, že UHPC je vhodné pro rekonstrukci mostů v různých případech. Je však třeba vždy zvážit veškeré okrajové podmínky.

V případě betonáže UHPC na ocelové ortotropní mostovky je toto použití výsledkem víceletého výzkumu, který zahrnoval velké množství pokusů a experimentů. Toto použití se dá tedy považovat za vhodné. Také přibetonávky na betonové mostovky byly použity již mnohokrát použity a osvědčily se.

Naopak některé ze způsobů jsou spíše ojedinělé a dané specifickými podmínkami. Např. zesílení pilířů UHPC je za běžných podmínek poměrně finančně náročná volba. Ale v seismických oblastech je to naopak velmi vhodná varianta, jelikož UHPC má větší duktilitu a schopnost pohlcovat energii s menším poškozením.

ACKNOWLEDGEMENTS

Rešerše vznikla za podpory Ministerstva průmyslu a obchodu v rámci projektu ev. č. FV20472 „Aplikace vysokohodnotných cementových kompozitů na rekonstrukce betonových staveb“

Reference

- UHPC Solutions, 2017. The Chillon Viaduct. *UHPC Solutions*. Available at: <https://www.uhpcolutions.com/chillon-viaducts> [Accessed March 25, 2024].
- TBG Metrostav, 2023. Oprava Barrandovského mostu. *TBG Metrostav*. Available at: www.tbg-metrostav.cz/reference/oprava-barrandovskeho-mostu/ [Accessed March 25, 2024].
- Brühwiler, E., 2017. Hochfest weiter dank UHFB. *Espazium.ch - Onlineplattform für Baukultur*. Available at: <https://www.espazium.ch/de/aktuelles/hochfest-weiter-dank-uhfb> [Accessed March 25, 2024].
- Doiron, G., 2019. UHPC pier repair/retrofit - Examples of completed projects in North America. In *AFGC-ACI-fib-RILEM International Conference on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete (UHPFRC 2017)*. France: RILEM Publications, pp. 983-992.
- Buitelaar, P., 2010. *Heavy reinforced high performance concrete overlay on orthotropic steel bridges in the Netherlands*. Available at: <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.1.2088.8083> [Accessed March 25, 2024].
- Tong, T. et al., 2019. Seismic retrofitting of rectangular bridge piers using ultra-high performance fiber reinforced concrete jackets. *Composite Structures*, (vol. 228). Available at: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263822318332550> [Accessed March 15, 2024].
- Federal Highway Administration, 2020. Case Study: Eliminating Bridge Joints with Link Slabs – An Overview of State Practices 1st ed.,