

ZESILOVÁNÍ BETONOVÝCH MOSTŮ POMOCÍ ULTRA-VYSOKOHODNOTNÉHO VLÁKNOBETONU (UHPFRC)

Daniel Samek, *

Katedra betonových a zděných konstrukcí, Fakulta stavební,
České vysoké učení technické v Praze, Thákurova 7/2077, 166 29 Praha 6, Česká republika.
daniel.samek.1@fsv.cvut.cz

ABSTRAKT

V České republice je v současné době asi 17 500 mostů na dálnicích a silnicích, další mosty jsou ve vlastnictví obcí a na železničních tratích. Hospodaření s takovým množstvím mostů je technicky i finančně velmi náročné a je nutno používané postupy a prostředky neustále zdokonalovat. Navržené téma je zaměřeno na možnosti zesilování nosných konstrukcí, především s využitím dodatečné vrstvy z UHPFRC.

V zahraničí byl tento způsob opravy betonových i ocelových konstrukcí již několikrát použit, v České republice zatím nikoliv. Cílem práce je provést takové experimenty a ověření návrhových postupů, aby bylo možno formulovat doporučení pro praktické používání této technologie.

KLÍČOVÁ SLOVA

Betonové mosty • Zesilování • Obnova • Ultra-vysokohodnotný vláknobeton • UHPFRC nabetonávka

ABSTRACT

In the Czech Republic, there are currently about 17 500 bridges on roads and motorways, other bridges are on railways and in municipalities. Managing so many bridges is technically and financially very demanding and the procedures and means used must be continuously improved. The proposed project is focused on possibilities of strengthening of load-bearing structures, first of all with use of additional UHPFRC overlays.

This method of repairing of concrete and steel structures has been used several times abroad, not yet in the Czech Republic. The aim of this work is to carry out such experiments and validation of design processes to formulate recommendations for practical use of this technology.

KEYWORDS

Concrete bridges • Strengthening • Rehabilitation • Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete • UHPFRC overaly

1. ÚVOD

Vyztužené betonové konstrukce, jako jsou mosty, vykazují vynikající vlastnosti z hlediska konstrukčního chování. Pokud jsou tyto konstrukce vystaveny silným vlivům okolního prostředí a vysokému mechanickému namáhání, tak může docházet nejen ke snížení jejich konstrukčních odolností, ale i jejich životnosti. Obnova a rekonstrukce takto poškozených betonových konstrukcí je pro společnost velkou zátěží především z ekonomického hlediska. K významným nákladům pro správce těchto konstrukcí vede nejen výstavba nových, ale především velký počet existujících mostních konstrukcí. Aby bylo možné snižovat tuto zátěž na minimum a zároveň se efektivně starat o mostní konstrukce pro zajištění jejich spolehlivosti a provozuschopnosti, tak je zapotřebí zpřesňovat informace o jejich dlouhodobém působení a vlivu poruch na jejich působení. Dále je důležité rozvíjet možnosti jejich oprav, úprav a zesilování.

V posledních letech docházelo k značnému vývoji a zlepšování materiálů na bázi cementového pojiva s výjimečnými parametry v oblasti mechanických vlastností a trvanlivosti. Jedná se o ultra-vysokohodnotné betony (UHPC - Ultra High-Performance Concrete). UHPC betony jsou ve většině případů navrhovány a používány jako kompozitní materiály, které jsou vyztužené vlákny. Jedná se o vlákna z vysokopevnostních ocelí, popřípadě z různých plastů. Cementový kompozit vyztužený vlákny je pak nazýván jako ultra-vysokohodnotný vláknobeton (UHPFRC - Ultra High-Performance Fibre-Reinforced Concrete). Tyto nové stavební materiály poskytují skvělé kombinace vlastností pro navrhování a sanace mostních objektů. Jedná se především o vysokou pevnost v tlaku, která může být až 180 MPa. Dále pak o pevnost v tahu, jež může dosahovat 10-15 MPa. Tyto kompozitní materiály vykazují nízkou propustnost, která brání průniku škodlivých látek, jako je voda nebo chloridy.

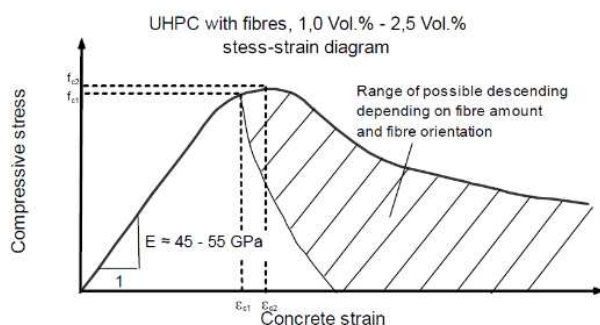
UHPFRC betony mají zvýšenou odolnost proti agresivním vlivům prostředí a vysokému mechanickému namáhání a jsou tak vhodným stavebním materiálem pro zvýšení životnosti a únosnosti nových i stávajících betonových mostních konstrukcí. Jednou z metod, jak tohoto docílit, je zesílení konstrukcí pomocí UHPFRC nabetonávky. Jedná se o nabetonování tenké spřažené vrstvy na stávající konstrukci. [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10]

* Školitel: doc. Ing. Roman Šafář, Ph.D.

2. ZESILOVÁNÍ

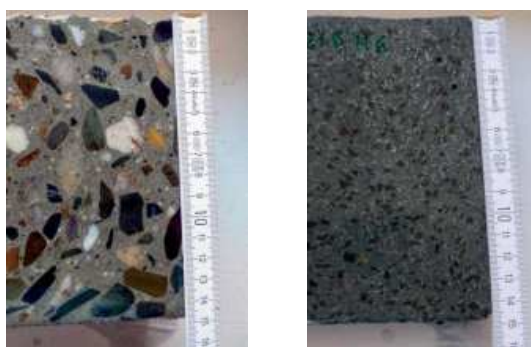
2.1. UHPFRC

Ultra-vysokohodnotný vláknobeton (UHPFRC) je poměrně moderní a perspektivní druh cementového kompozitu, který se především vyznačuje vysokou pevností v tlaku i tahu. Pevnost v tlaku může dosahovat až 180 MPa a pevnost v tahu za ohybu až 15 MPa. Jeho zpracovatelnost umožňuje navrhovat speciální konstrukce, a to včetně tenkostěnných. Vysoká trvanlivost tohoto kompozitu několikanásobně přesahuje betony běžných pevností. Nicméně jeho vysoká cena a nároky na výrobu nejsou příliš příznivé pro jeho rozšíření napříč komerčním využitím.



Obrázek 1: Pracovní digram UHPFRC – v tlaku [15]

V UHPFRC betonu se využívá nízkého vodního součinitele z důvodu dosažení vysoké pevnosti i trvanlivosti materiálu. Jako pojivo se používá běžný portlandský cement, který se také používá v betonech běžných pevností. Jemné kamenivo je zde využíváno jako plnivo. Kamenivo bývá co nejmenší, aby došlo k co nejlepšímu obalení jednotlivých zrn cementovým tmelem a zároveň k vyplnění i velmi malých dutin v betonu. Kamenivo bývá o vysoké pevnosti a kvalitě, aby bylo dosaženo vysoké pevnosti betonu. Jako nejčastější druh kameniva se využívá čedič. Dále se do UHPFRC betonu přidávají přísady, a to především plastifikátory, jež umožňují snížení vodního součinitele a dosažení vyšších pevností a zároveň přispívají k lepší tekutosti a zpracovatelnosti směsi. Pro zajištění co největší hutnosti a minimalizování mezerovitosti se používají příměsi, jemnozrnné materiály, které ovlivňují pevnostní vlastnosti a smršťování betonu. Často se jako příměs využívá popílek, mikrosilika nebo nanosilika.



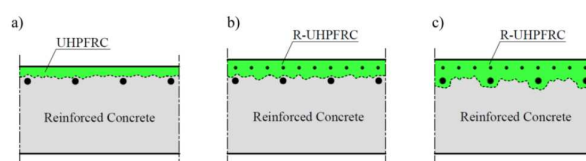
Obrázek 2: Srovnání vzhledu betonů: Běžný beton a UHPFRC [13]

Poslední složkou, která se přidává do směsi UHPFRC, je rozptýlená výztuž (vlákna), jež zajišťuje vysokou pevnost a duktilitu materiálu. Vlákna zabraňují vzniku mikrotrhlin na prvku. Dostatečné množství vláken zajišťuje únosnost zatíženého prvku i po vzniku trhlin, kdy dochází – v závislosti na složení materiálu (obsahu vláken) k tahovému změkčení nebo tahovému zpevnění, které je zapříčiněno přenášením tahového namáhání ocelovými vlákny. [11, 12, 13]

2.2. Aplikace nabetonávky

Principem zvýšení únosnosti a životnosti stávajících betonových mostů pomocí nabetonávky z UHPFRC je přidání vrstvy betonu na stávající poškozenou nebo málo únosnou konstrukci. Zesílení pomocí nabetonávky se využije tam, kde se nejlépe využijí vlastnosti UHPFRC, tedy na částech konstrukcí vystavených silným účinkům vnějšího prostředí (voda, rozmrazovací soli) a velkému mechanickému zatížení (včetně lokálních sil a nárazů). Způsob provedení a tloušťka nabetonávky závisí na rozsahu poškození stávající konstrukce a účelu použití UHPFRC nabetonávky, která bývá používána jak pro zvýšení únosnosti konstrukce, tak i jako vodotěsná vrstva na povrchu.

Pokud má nová vrstva nabetonávky z UHPFRC pouze chránit podkladový beton před vnikáním vody a chloridů, poté stačí vrstva o tloušťce 25 až 40 mm. Avšak pokud se jedná o zvýšení konstrukční odolnosti pomocí nabetonávky, do které je vložena ocelová výztuž, musí být její tloušťka min. 40 mm a zároveň musí být zaručeno krytí výztuže min. 15 mm. V případě, že je na konstrukci poškozena výztuž korozí nebo beton vysokou kontaminací chloridů, poté je možné takto poškozenou výztuž a beton odstranit do požadované hloubky a následně provést sanaci pomocí vrstvy UHPFRC a nové výztuže. Hloubka odstranění degradované vrstvy betonu závisí na rozsahu poškození a tloušťka nové vrstvy závisí na požadavku zesílení a je možné ji tak přizpůsobit dané situaci.



Obrázek 3: Nabetonávka z UHPFRC: a) Ochranná funkce b) Zesílení a ochranná funkce c) Zesílení a ochranná funkce s nově vloženou výztuží [1]

Pro zajištění spolupůsobení obou vrstev, starého betonu a nově nabetonované vrstvy z UHPFRC, je nutné zajistit správné propojení mezi těmito vrstvami. To se zajišťuje pískováním, vysokotlakým tryskáním vodou nebo broušením kontaktní plochy podkladového betonu. Drsnost takto upraveného povrchu by měla být 3 až 5 mm. Následně se musí odstranit veškeré uvolněné částice a látky, které oslabují spojení vrstev. Před samotnou betonáží nabetonávky by podkladní povrch měl být dostatečně vlhký, aby došlo ke správnému spojení obou vrstev. [1, 4, 5]

Styčné spáry by také měly obvykle být opatřeny sřahovací výztuží. V případě, že by tomu tak nebylo, mohlo by dojít

k oddělení nabetonávky od podkladu například účinky dynamických a opakovaných zatížení i vlivem rozdílných deformací původní konstrukce a nabetonávky. Ty následně mohou vést ke snaze nabetonávky o nadzdvihnutí od podkladu.



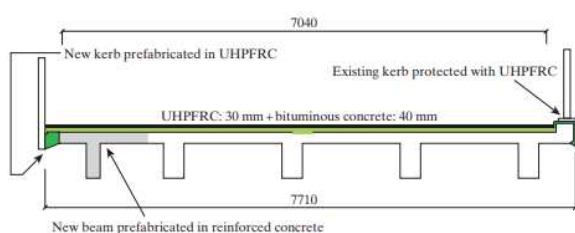
Obrázek 4: Zbroušený a očištěný povrch betonu pro správné propojení vrstev [4]

3. PŘÍKLADY POUŽITÍ

Technologie zesílení a zvýšení životnosti pomocí vrstvy UHPFRC byla poprvé použita v roce 2004 ve Švýcarsku na mostě přes řeku La Morge. Od té doby bylo pomocí nabetonávky zesíleno více než 50 konstrukcí. Touto metodou bylo zesíleno i několik mostů ve Slovinsku, ve Francii a v USA. Na území České republiky zatím nikoliv. [1, 10]

3.1. Most přes řeku La Morge

Ve Švýcarsku byla poprvé v roce 2004 využita vrstva nabetonávky z UHPFRC pro rehabilitaci a rozšíření silničního mostu dlouhého 10 m přes řeku La Morge. Most byl rozšířen pomocí prefabrikovaného železobetonového nosníku, který je spojen s prefabrikovaným římsovým nosníkem z UHPFRC. Horní povrch betonu, jenž byl znečištěný chloridy, byl odstraněn, následně upraven vysokotlakým tryskáním vodou a nahrazen vrstvou ultra-vysokohodnotného vláknobetonu tl. 30 mm. Celá rehabilitace trvala 1 měsíc a ochranná funkce nabetonávky byla ověřena pomocí zkoušek propustnosti vzduchu. [10]



Obrázek 5: Příčný řez mostem po sanaci pomocí UHPFRC [10]

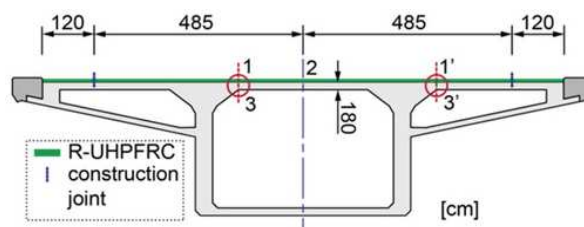
3.2. Chillon viadukt

Chillonské viadukty jsou dva paralelní předpjaté betonové dálniční mosty o délce 2120 m, které byly postaveny mezi roky 1966 a 1969. Betonové části konstrukce vykazují známky alkalické reakce kameniva, která vede k porušení struktury betonu a ke snížení pevnosti betonu v průběhu času. Aby byla zajištěna bezpečnost a spolehlivost konstrukce, byla

zvolena, na základě doby trvání zásahu a s ohledem na náklady, metoda posílení mostu pomocí přidání vrstvy UHPFRC.

Zesílení konstrukce se realizovalo v letech 2014 a 2015 a jeho cílem bylo zvýšit ohybovou a smykovou odolnost v příčném směru, zvýšit tuhost konstrukce, snížit napětí ve výztuži, zajistit vodotěsnost pro zlepšení trvanlivosti a snížit potřebný čas na zhotovení. Nabetonávka byla realizována pomocí jedné vrstvy o celkovému objemu 2350 m³, která byla uložena pomocí upraveného silničního finišeru. Před pokládáním betonu byla odstraněna vrstva krycího betonu tl. 10 mm a povrch otryskán vysokotlakým vodním paprskem.

Celková tloušťka horní desky komorového nosníku je 180 mm. Vrstva nabetonávky má tloušťku 40 mm, ve které je umístěna příčná ocelová výztuž průměru 12 mm. Nad pilíři byla tloušťka vrstvy zvětšena na 50 mm a byly přidány podélné ocelové pruty průměru 12 mm pro zvýšení momentové únosnosti.

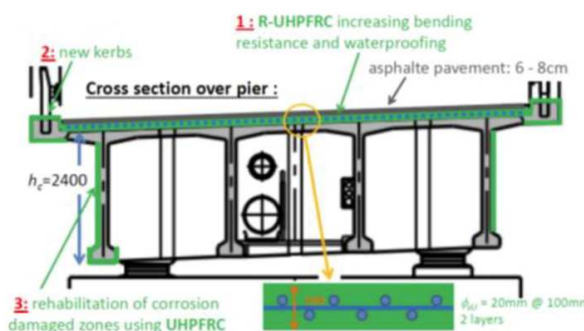


Obrázek 6: Příčný řez mostem po opravě s UHPFRC [1]

Touto úpravou bylo dosaženo zvětšení příčného momentu únosnosti v řezu 1 o 73 % a v řezu 2 o 33 %. Smyková únosnost byla zvětšena o 40 % a ohybová únosnost komorového nosníku byla větší o 20 %. [1, 2]

3.3. Dálniční mosty ve Švýcarsku

V letech 2017 až 2019 byly ve Švýcarsku rehabilitovány tři dálniční mosty, které byly vybudovány téměř před 50 lety, a jejichž celková délka činí 1050 m. Mosty jsou v příčném řezu vytvořeny ze čtyř prefabrikovaných předpjatých nosníků o délce 40 m a v podélném směru působí jako spojitý nosník. Mosty vykazovaly značné poškození výztuže a s ohledem na budoucí dopravní zatížení nesplňovaly požadavky na zatížitelnost.



Obrázek 7: Příčný řez nad pilířem - rozsah opravy [1]

Jednalo se o zvýšení únosnosti a torzní tuhosti přidáním větší vrstvy UHPFRC, jež zároveň slouží i jako hydroizolační vrstva. V polích byla provedena nabetonávka o tloušťce 45 mm s příčnou výztuží. Nad pilíři byla provedena v tl. 100 mm s vloženou příčnou a podélnou výztuží pro zvýšení momentu únosnosti. Tím je dovoleno plastické přerozdělení momentů z polí nad pilíře. UHPFRC bylo zároveň použito i pro opravu lokálních poškození nosníků. [1]

4. VÝZKUM

Cílem výzkumu je provést takové experimenty a ověření návrhových postupů, aby bylo možné formulovat doporučení pro praktické využití této technologie.

4.1. Zesílení napojení prefabrikované konzoly

V rámci výzkumu bylo navrženo zkušební těleso, reprezentující část horního povrchu nosné konstrukce železničního mostu spojeného s prefabrikovanou konzolou KO-01/02 a zesílení pomocí nabetonávky z UHPFRC. Tento způsob opravy železničních mostů může zvýšit únosnost konstrukce v podélném a v příčném směru i zároveň zesílit kotvení prefabrikovaných konzol. Na uvedených zkušebních tělesech bude v rámci navrhovaného výzkumu ověřena technologie betonáže UHPFRC nabetonávky, provedeno sledování vlivu objemových změn a následně budou podrobena statické zatěžovací zkoušky s cílem ověřit zesílení kotvení prefabrikovaných konzol pomocí UHPFRC nabetonávky.

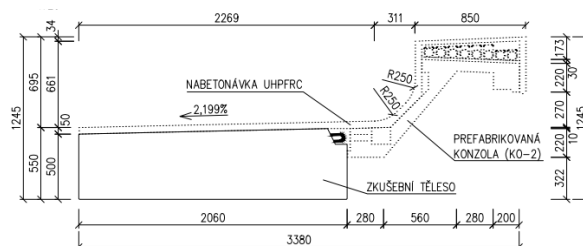
Prefabrikované konzoly jsou segmenty konstrukce o délce 1480 mm, které jsou pomocí kotevnicích ok a čepů ve vynechaných kapsách spojeny s prefabrikovaným nosníkem a následně jsou zality betonem. V této podélné spáře mezi konzolou a nosnou konstrukcí, a mezi příčnými spárami jednotlivých konzolových segmentů dochází k poškození hydroizolace a následnému zatékání vody. Porucha je často viditelná na vnějším povrchu konstrukce. Kromě vlhkosti a výkvětů se projevuje degradací betonu a korozi výztuže. Poškození říms může vést k poškození přilehlé části konstrukce, tedy k degradaci betonu nosné konstrukce a korozi výztuže. [14, 15]



Obrázek 8: Zatékání mezi spárami prefabrikovaných konzol a nosné konstrukce [14]

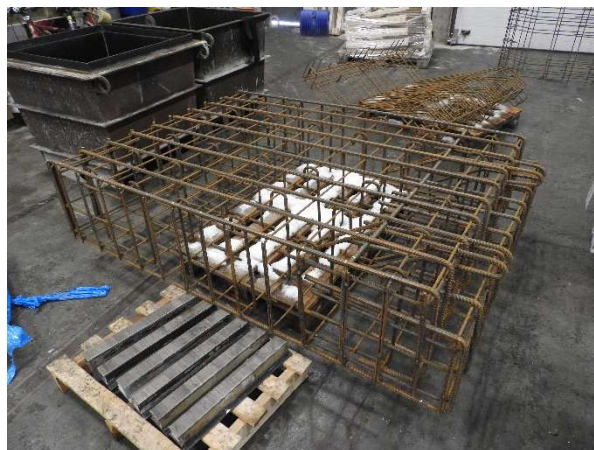
4.2. Výroba zkušebního tělesa

Pro zkoumání připojení prefabrikované konzoly k prefabrikovanému nosníku, pro jeho zesílení a pro ověření principů této technologie bylo navrženo a vyrobeno zkušební těleso („základní deska“) o rozměrech 1480 x 2060 mm, jež představuje část horního povrchu nosné konstrukce železničního mostu a které obsahuje rovněž kotevnicích oka pro připojení montovaných konzol. Zároveň byly vyrobeny díly podle původních výkresů tvaru a výztuže prefabrikované konzoly. Následně bude tato konzola spojena se zkušebním tělesem. Takto připravená konzola bude vystavena statické zatěžovací zkoušce. V dalším kroku bude na zkušebním tělese s konzolou provedena spřažená UHPFRC nabetonávka tl. 50 mm a těleso bude opět podrobena statické zatěžovací zkoušce.



Obrázek 9: Pohled na celou sestavu zkušebního tělesa [15]

Na těchto zkušebních tělesech budou rovněž ověřeny principy realizace použité technologie a zároveň budou sledovány projevy objemových změn UHPFRC (největší vliv lze očekávat u autogenního smršťování, jehož průběh je spojen s průběhem hydratace cementu a bude proto nejvýraznější v období po betonáži nabetonávky).



Obrázek 10: Vyzázaná výztuž zkušebního tělesa [15]

Dále se uvažuje s výrobou zkušebních předpjatých nosníků. Tyto nosníky budou opatřeny UHPFRC spřaženou nabetonávku a následně bude provedena statická i únavová zatěžovací zkouška. Rovněž bude provedeno ověření působení UHPFRC nabetonávky nad střední podélnou mezerou mezi nosníky železničního mostu. Aby se zajistil reálný rozdíl deformací mezi jednotlivými nosníky, bude pouze jeden z této dvojice nosníků zatěžován, druhý nikoliv.

Pro veškerá zkušební tělesa, zkoušky a měření budou provedeny porovnávací teoretické výpočty. V potřebném rozsahu bude provedeno ověření vlivu posuzovaných konstrukcí a řešení na životní prostředí. Dále bude proveden návrh konstrukčních úprav pro dosažení optimálního působení navrhovaných řešení. Zohledněny budou i celoživotní náklady uvažovaných konstrukcí a jejich úprav. [15]

5. ZÁVĚR

Zlepšení odolnosti a trvanlivosti mostů pomocí nabetonávky z UHPFRC je časově, ale i ekonomicky výhodná metoda. Tato technologie zajišťuje výrazné zlepšení vlastností konstrukce jak v tlačené, tak i v tažené oblasti, a to díky vysoké pevnosti UHPFRC v tlaku i v tahu, přičemž dalšího zvýšení únosnosti může být dosaženo vložением betonářské i předpínací výztuže. Zároveň dochází ke zvýšení tuhosti v příčném směru a tím k lepšímu roznosu zatížení po konstrukci. Další výhodou této metody je vytvoření hydroizolační vrstvy, která zabraňuje vnikání vody a chloridů do konstrukce a je možné ji použít i pro opravu lokálních poškození konstrukce a zabránit tak další degradaci mostu.

Metoda zesilování pomocí přidáním vrstvy na stávající konstrukci byla již v zahraničí mnohokrát využita. Poprvé v roce 2004 ve Švýcarsku a následně na více než 50 dalších konstrukcích. Zesilování bylo využito i v dalších zemích jako jsou Francie, Slovinsko či Spojené státy americké. Z toho lze usuzovat, že použití této technologie je efektivní i ve srovnání s tradičními metodami zesilování. V České republice prozatím tato metoda pro zvýšení trvanlivosti a zesílení mostů nebyla použita.

Konečným cílem výzkumu a návrhu UHPFRC nabetonávky na betonových mostech je optimalizace technologie provádění a ověření konstrukčního působení tak, aby bylo možno technologii prakticky využívat, následně by měly být konkrétní výsledky zahrnuty v normách pro projektování, ale i správu a údržbu mostních objektů. Cílem je rovněž dosáhnout realizace první aplikace v České republice pro zesílení nebo prodloužení životnosti stávající konstrukce.

PODĚKOVÁNÍ

Příspěvek vznikl za finanční podpory ČVUT v Praze v rámci projektu SGS20/108/OHK1/2T/11.

Dále patří poděkování mému školiteli panu doc. Ing. Romanu Šafářovi, Ph.D., a to nejen za odborné vedení a rady, ale i za ochotu při konzultacích, motivaci při psaní a za vždy optimistickou náladu.

Reference

- [1] BRÜHWILER, Eugen. UHPFRC technology to enhance the performance of existing concrete bridges. *Structure and Infrastructure Engineering*. 2020, vol. 16, no. 1, s. 94-105. ISSN 1573-2479.
- [2] BRÜHWILER, Eugen, Malena BASTIEN-MASSE, Hartmut MÜHLBERG, et al. Strengthening the Chillon viaducts deck slabs with reinforced UHPFRC. In:

- IABSE Conference, Geneva 2015: Structural Engineering: Providing Solutions to Global Challenges [online]. Zurich, Switzerland: International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE). 2015, s. 1171-1178. ISBN 978-3-85748-140-6.
- [3] CHAMPENOY, Damien et al. Illzach Bridge: Innovative Repair of Orthotropic Deck Using Ultra-High-Performance Fibre-Reinforced Concrete-Return After 5 Years. *Structural Engineering International: Journal of the International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE)*. 2020, vol. 30, no. 3, s. 387-392. ISSN 1016-8664.
- [4] HABER, Zachary B. et al. Bond characterization of UHPC overlays for concrete bridge decks: Laboratory and field testing. *Construction & Building Materials*. 2018, vol. 190, s. 1056-1068. ISSN 0950-0618.
- [5] BRÜHWILER, Eugen. Rehabilitation of bridges using Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete. *Safety and Reliability of Bridge Structures*. 2009, s. 185-194.
- [6] BRÜHWILER, Eugen a DENARIÉ, Emmanuel. Rehabilitation and Strengthening of Concrete Structures Using Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete. *Structural Engineering International: Journal of the International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE)*. 2013, vol. 23, no. 4, s. 450-457. ISSN 1016-8664.
- [7] DENARIÉ, Emmanuel a BRÜHWILER, Eugen. Structural Rehabilitations with Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concretes (UHPFRC). *Restoration of buildings and monuments : an international journal*. 2006, vol. 12, no. 5, s. 93-108.
- [8] BRÜHWILER, Eugen, DENARIÉ, Emmanuel a HABEL, Katrin. Ultra-high performance fibre reinforced concrete for advanced rehabilitation of bridges. In: *Proceedings, fib-Symposium, Budapest*. 2005, s. 951-956.
- [9] GRAYBEAL, Benjamin, et al. International Perspective on UHPC in Bridge Engineering. *Journal of Bridge Engineering*, 2020, 25.11: 04020094.
- [10] DENARIÉ, Emmanuel. SAMARIS D22-Full scale application of UHPFRC for the rehabilitation of bridges—from the lab to the field. *SAMARIS*, 2005.
- [11] KALNÝ, Milan; KOMANEC, Jan; KVASNIČKA, Václav. *Metodika pro navrhování prvků z UHPC*. Praha, 2015.
- [12] COUFAL Robert, VÍTEK Jan L., PROCHÁZKOVÁ Alena. Praktická zkušenost s výrobou a dopravou uhpc. In: *TBG Metrostav [online]*. 2015, č. 2, str. 28
- [13] FEHLING, Ekkehard; LEUTBECHER, Torsten; BUNJE, Kai. Design relevant properties of hardened ultra high performance concrete. In: *Int. Symp. on Ultra High Performance Concrete*. 2004. p. 327-338.
- [14] ŠAFÁŘ, Roman. *Hodnocení technického stavu železničních mostů z předpjatého betonu*. Praha, 2017. Habilitační práce. České vysoké učení technické.
- [15] SGS20/108/OHK1/2T/11: *Betonové mosty – zatížitelnost, únavová odolnost a zesilování pomocí UHPFRC nabetonávky*