

NÁVRH NABETONÁVKY Z 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

Zesílením pomocí nabetonávky z ultra vysokohodnotného betonu vyztuženého vlákny (UHPFRC) je možné u železničních mostů zvýšit zatížitelnost nosné konstrukce v podélném i v příčném směru, zesílit připojení bočních prefabrikovaných konzol k nosné konstrukci i využít vrstvu UHPFRC ke zvýšení ochrany povrchu nosné konstrukce proti vodě atd. Dosud byl proveden návrh a výroba zkušebních těles a ověření přípoje konzoly před realizací UHPFRC nabetonávky.

Tento článek představuje návrh UHPFRC nabetonávky včetně výztuže pro již dříve vyrobené zkušební těleso. Článek poskytuje přehled vlastností materiálu UHPFRC a jeho vhodnosti pro použití při navrhování nabetonávek. Podrobně se zabývá přístupem k navrhování nabetonávky UHPFRC, včetně výpočtu ohybových momentů a posouvajících sil. Rozhodujícím zatížením pro návrh nabetonávky zkušebního tělesa v příčném směru jsou účinky vykolejeného vlaku. Návrh nabetonávky je prováděn s odkazem na různé návrhové předpisy a normy, včetně francouzských norem NF P18-710, fib Model Code 2010 či Technických pravidel ČBS 07 Ultra vysokohodnotný beton (UHPC).

KLÍČOVÁ SLOVA

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

ABSTRACT

By strengthening railway bridges with ultra-high-performance fiber-reinforced concrete (UHPFRC) over-lay, it is possible to increase a load-bearing capacity of a superstructure both in the longitudinal and the transverse directions, to strengthen connections of lateral precast cantilevers to a superstructure. An UHPFRC layer can be also used to increase a protection of superstructure surface against water, etc. So far, a design and manufacture of test specimens and a verification of a cornice connection to a deck before casting of an UHPFRC over-lay have been carried out.

This article is focused on a design of an UHPFRC over-lay, including reinforcement, intended for a previously manufactured test specimen. The article provides an overview of the properties of UHPFRC material and its suitability for use in cast-in-situ over-lays. It describes the approach to a design of

an UHPFRC over-lay, including determination of bending moment and shear forces. The principal loads for a design of the over-lay in the transverse direction are actions due to a derailment of trains. The design of the over-lay is carried out with reference to various design codes and standards, including French standard NF P18-710, fib Model Code 2010 and Technical Regulations of the Czech Concrete Society ČBS 07 Ultra High Performance Concrete (UHPC).

KEYWORDS

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

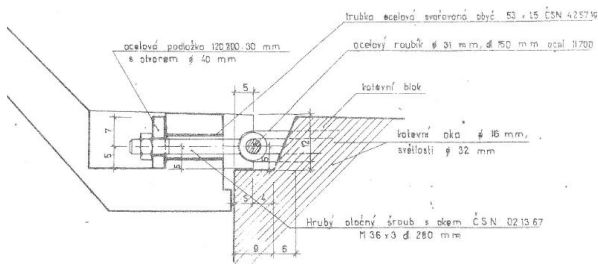
1. ÚVOD

Předmětem tohoto článku je návrh UHPFRC nabetonávky. Tímto způsobem je možno pomocí tenké (přibližně 50 mm silně) vrstvy UHPFRC zvýšit zatížitelnost mostu v podélném i v příčném směru z hlediska MSP – omezení napětí (především betonu v tlaku), MSÚ v ohybu, MSÚ při únavě betonu, je možno zesílit připojení konzol (například prefabrikovaných) k nosné konstrukci, využít vrstvu UHPFRC ke zvýšení ochrany povrchu nosné konstrukce proti vodě atd.

Pro ověření v laboratorních podmínkách byla zatím zvolena oblast okraje nosné konstrukce s boční prefabrikovanou konzolou KO-02 – k tomuto účelu byla vyrobena dvě zkušební tělesa. Cílem je ověřit technologii provádění nabetonávky a ověřit zesílení přípoje konzoly k nosné konstrukci. To je vhodné i proto, že v době návrhu těchto konzol se ještě nemuselo počítat s vykolejením vlaku a také proto, že někdy může docházet k zatékání a ke korozi ocelových prvků tohoto přípoje.

Prefabrikované konzoly byly použity na řadě železničních mostů jako římsy podél vnějších okrajů mostu. Jejich výrobní délka bývá 1480 mm (skladebná délka pak bývá 1500 mm). Každý díl prefabrikovaných konzol je k nosné konstrukci mostu přikotven ve dvou bodech (připojích). V každém kotvení místě je v konzole vynechána kapsa s ocelovou podložkou. V této kapse je maticí zajištěn ocelový šroub, který má na druhém konci oko. Tímto okem a současně i oky z betonářské výztuže vyčnívajícími z nosné konstrukce je následně prostrčen ocelový roubík a tím dochází k připojení konzoly k nosné konstrukci. Vynechané kapsy a spojovací prvky jsou následně zality jemnozrnným betonem.

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



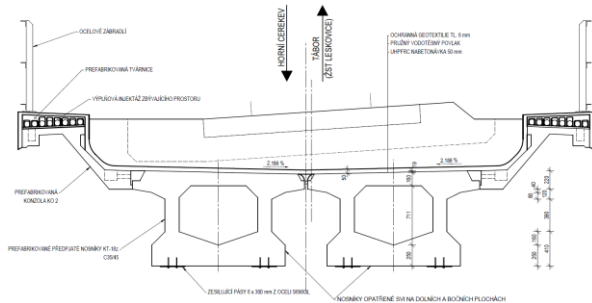
Obrázek 1: Detail napojení prefabrikované konzoly k nosné konstrukci – původní dokumentace prefabrikovaných konzol

V podélné spáře mezi konzolou a nosnou konstrukcí nebo v příčných spárách mezi jednotlivými díly prefabrikovaných konzol může časem někdy docházet k poškození hydroizolace a následnému zatékání vody. Projevy zatékání (mokrý povrch apod.) bývají pak viditelné na vnějším povrchu konstrukce. Kromě vlhkosti a výkvětů se zatékání může projevovat degradací betonu a korozi spojovacích prvků. Poškození říms může vést k poškození přilehlé části konstrukce, tedy k degradaci betonu nosné konstrukce a korozi výztuže. V rámci opravy mostu je nutno chránit důkladně mostní konstrukci proti vodě a mnohdy i zesílit připojení konzoly k nosné konstrukci.

2. ULTRA VYSOKOHODNOTNÝ VLÁKNOBETON

2.1. Vlastnosti materiálu

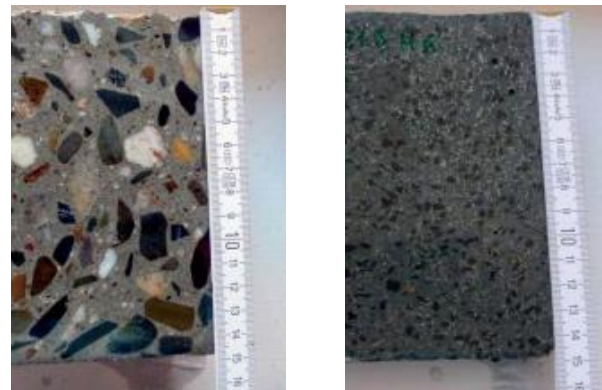
Ultra vysokohodnotný vláknobeton (UHPFRC) je poměrně moderní a perspektivní druh cementového kompozitu, který se především vyznačuje vysokou pevností v tlaku i tahu. Pevnost v tlaku může dosahovat až 180 MPa i více a pevnost v tahu za ohybu až okolo 15 MPa. Jeho zpracovatelnost umožňuje navrhovat speciální konstrukce, a to včetně tenkostěnných. Vysoká trvanlivost tohoto kompozitu několikanásobně přesahuje betony běžných pevností. Nevýhodami jsou vyšší nároky na technologii výroby a vyšší cena, z toho důvodu je třeba navrhovat tenkostěnné konstrukce a materiál efektivně využívat.



Obrázek 2: Příčný řez konstrukcí s nabetonávkou – Leskovice – Šafář, R.: Oprava mostu v km 31,877 na trati Horní Cerekev – Tábor (Leskovice) - projekt, 2017

V UHPFRC betonu se využívá nízkého vodního součinitele z důvodu dosažení vynikajících mechanických vlastností i trvanlivosti materiálu. Jako pojivo se používá běžný portlandský cement, který se také používá v betonech běžných pevností. 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 mikrosilika nebo nanosilika.



Obrázek 3: Srovnání vzhledu betonů: Běžný beton (vlevo) a UHPFRC (vpravo) – COUFAL Robert, VÍTEK Jan L., PROCHÁZKOVÁ Alena. Praktická zkušenost s výrobou a dopravou UHPC. In: TBG Metrostav [online]. 2015.

Poslední složkou, která se přidává do směsi UHPFRC, je rozptýlená výztuž (vlákna), jež zajišťuje vysokou pevnost a duktilitu materiálu. Vlákna zvyšují pevnost v tahu, duktilitu a odolnost proti rázům a štěpným silám i oddalují vznik mikrotrhlin a trhlin 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 přenesením tahového namáhání ocelovými vlákny.

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 namáhání (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, pak stačí vrstva o tloušťce asi 25 až 40 mm. Avšak pokud se jedná o zvýšení zatížitelnosti pomocí nabetonávky, do které je vlo-

žena i betonářská výztuž, musí být tloušťka min. 40 mm a zároveň musí být zaručeno krytí výztuže podle platných předpisů pro konstrukce z UHPFRC. V případě, že je na konstrukci poškozena výztuž korozí nebo beton vysokou kontaminací chloridy, pak 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 způsobit dané situaci.

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.

Styčné spáry by také měly obvykle být opatřeny spřahovací 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.

3. PŘÍPRAVA EXPERIMENTU

3.1. Výroba zkušební tělesa

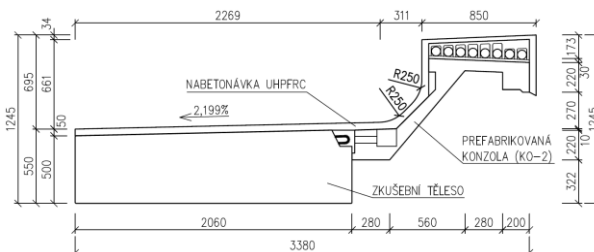
Pro ověření připoje prefabrikované konzoly k nosné konstrukci včetně jeho zesílení a pro ověření technologie provádění byla navržena a vyrobena zkušební tělesa, která se skládají ze „základní desky“ a z prefabrikované konzoly. Základní deska o rozměrech 1480 x 2060 mm představuje část horního povrchu nosné konstrukce železničního mostu a obsahuje rovněž kotevní oka pro připojení montovaných konzol.



Obrázek 4: Vyzvázaná výztuž zkušební tělesa (Betonové stavby – group, Klatovy)

Zároveň byly podle původních výkresů tvaru a výztuže vyrobeny prefabrikované konzoly. Konzoly odpovídají původní dokumentaci, pouze s drobnými odchylkami. Oproti původní dokumentaci, kde je uvedena výztuž s mezí kluzu cca

400 MPa, byla použita výztuž B500B (nepodařilo se získat výztuž s původní mezí kluzu, ani výztuž s menším průměrem, používanou například v Kari sítích). Z důvodu eliminace případných výrobních odchylek a aby byla zaručena smontovatelnost prefabrikátů, je průměr ocelového "roubíku", který spojuje konzolu s nosníkem, 28 mm místo 30 mm.



Obrázek 5: Pohled na celou sestavu zkušební tělesa včetně nabetonávky

Následně byla tato konzola spojena se základní deskou a kapsy byly zality. Celkem byla vyrobena dvě takováto zkušební tělesa, která byla následně vystavena statické zatěžovací zkoušce. Na tělesa byla aplikována síla reprezentující zatížení od vykolejení vlaku pro zjištění chování a únosnosti napojení prefabrikované konzoly ke konstrukci. Během zkoušky byly měřeny deformace tělesa a přetvoření výztuže. Zkoušky byly prováděny až do porušení spoje.



Obrázek 6: Uspořádání zatěžovací zkoušky (Experimentální centrum Fakulty stavební ČVUT v Praze)

3.2. Zesílení pomocí nabetonávky

V dalším kroku bude na zkušebním tělese s konzolou provedena navržená spřažená UHPFRC nabetonávka tl. 50 mm s vloženou betonářskou výztuží a těleso bude opět podrobena statické zatěžovací zkoušce.

Na těchto zkušebních tělesech budou rovněž ověřeny principy 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 krátce po betonáži nabetonávky).

4. POUŽITÉ NORMY

Pro návrh nabetonávky a pro výpočet vnitřních sil na zkušebním tělese byly použity různé normy, a to jak zahraniční, tak české.

4.1. Fib Model Code 2010

Fib Model Code 2010 představuje doporučení vydaná Mezinárodní federací pro konstrukční beton (*fib*), která poskytuje pokyny a doporučení pro navrhování a výstavbu betonových konstrukcí.

Co se týče ultra vysokohodnotného betonu vyztuženého vlákny, uznává *fib* Model Code 2010 UHPFRC jako samostatnou třídu betonu s jedinečnými vlastnostmi, jako je velmi vysoká pevnost v tlaku, vysoká tažnost a vysoká trvanlivost. Předpis doporučuje, aby se při navrhování konstrukcí z UHPFRC zohlednily jeho specifické vlastnosti a chování, jako je například chování při deformačním zpevnění, případně možnost křehkého porušení při vysokém namáhání.

fib Model Code 2010 stanovuje obecné zásady pro navrhování konstrukcí z UHPC, jako je použití vhodných materiálových modelů a zohlednění účinků smršťování a dotvarování. Součástí předpisu jsou také doporučení pro testování a charakterizaci UHPFRC, včetně metod pro stanovení jeho mechanických vlastností, trvanlivosti a udržitelnosti.

Celkově *fib* Model Code 2010 uznává potenciální přínosy UHPFRC při zlepšování vlastností a udržitelnosti betonových konstrukcí a poskytuje pokyny pro jejich bezpečné a efektivní použití při navrhování a výstavbě.

4.2. Francouzské normy NF P18-710

NF P18-710 je francouzská národní norma, která slouží jako doplněk k Eurokódu 2, což je evropská norma pro navrhování betonových konstrukcí. Poskytuje další pokyny a specifické požadavky pro navrhování železobetonových a předpjatých konstrukcí.

Pokud jde o UHPFRC, norma NF P18-710 poskytuje specifická doporučení pro jeho použití v konstrukčních aplikacích. UHPC je definován jako beton, který má pevnost v tlaku vyšší než 150 MPa, pevnost v tahu vyšší než 8 MPa a velmi nízkou pórovitost.

Norma doporučuje, aby se UHPFRC používal v situacích, kdy běžný beton nemůže splnit požadavky na vlastnosti. Stanovuje také požadavky na návrh UHPFRC, včetně požadavků na minimální pevnost, maximální poměr vody a cementu a maximální velikost kameniva.

Dále norma uvádí doporučení pro zkoušení a hodnocení vlastností UHPFRC, jako je pevnost v tlaku, pevnost v ohybu a trvanlivost. Poskytuje také pokyny pro navrhování konstrukčních prvků z UHPFRC, jako jsou nosníky, sloupy a desky.

Norma NF P18-710 poskytuje konkrétní pokyny pro použití UHPFRC v konstrukčních aplikacích a pomáhá zajistit bezpečné a efektivní použití tohoto moderního materiálu ve stavebních a infrastrukturních projektech.

4.3. Technická pravidla ČBS 07

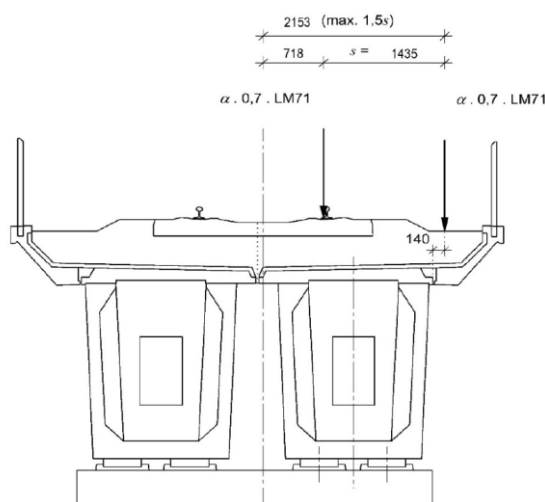
Technická pravidla ČBS 07 představují doporučení pro navrhování UHPFRC konstrukcí v České republice. Tato doporučení stanovují základní požadavky na návrh, výrobu a montáž betonových konstrukcí z UHPFRC.

Stanovují se zde rovněž požadavky na složení a vlastnosti UHPFRC, jako jsou minimální pevnost v tlaku a minimální pevnost v ohybu. Technická pravidla také stanovují požadavky na výrobu a zpracování UHPFRC. Všechny tyto požadavky mají za účel zajistit, aby UHPFRC dosáhl požadovaných vlastností a aby byl použitelný pro konstrukce s vysokými nároky na únosnost i trvanlivost.

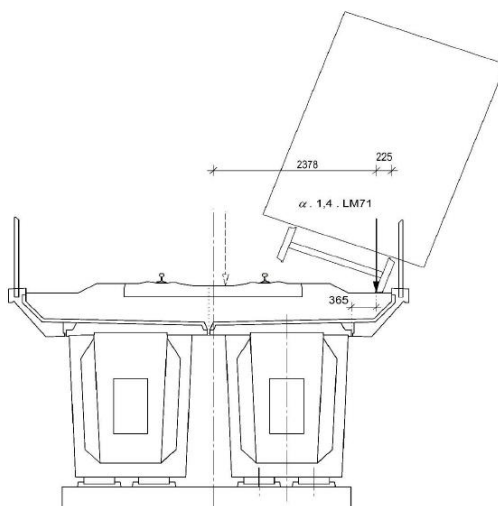
5. VÝPOČTY

V prvním kroku byla stanovena tloušťka nabetonávky na zkušebním tělese na základě předpokládaného průměru použité podélné a příčné betonářské výztuže a tloušťky krycí vrstvy z hlediska soudržnosti. Celková tloušťka nabetonávky byla zvolena 50 mm.

V dalším kroku byla navržena podélná výztuž průměru 8 mm po 150 mm. Ta byla vypočtena z mimořádného zatížení při vykolejení vlaku a bez započítání UHPFRC v tahu. Z hlediska zatížení při vykolejení podle normy vychází na každé jedno (z celkem dvou) kotvení konzoly posouvající síla (při provedeném posouzení) 90,0 kN a ohybový moment 33,4 kNm v návrhových mimořádných hodnotách.

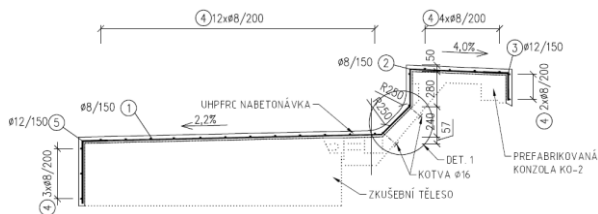


Obrázek 7: Schéma zatížení při vykolejení vlaku – situace I



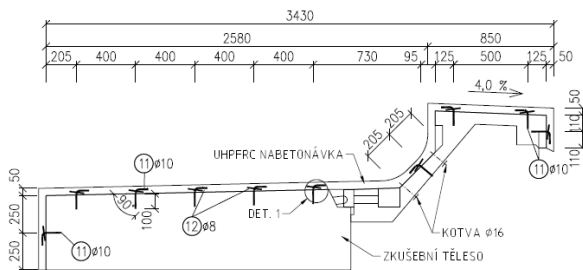
Obrázek 8: Schéma zatížení při vykolejení vlaku – situace II

Dále byly spočteny smykové únosnosti navržené nabetonávky podle použitých norem. Únosnost se skládala ze smykové únosnosti betonu, podélné betonářské výztuže a únosnosti rozptýlených vláken v betonu. Smyková únosnost byla rozhodující při výpočtech napojení prefabrikované konzoly k nosné konstrukci mostu. Smyková únosnost podle francouzských norem byla vyčíslena na 181 kN. Podle fib Model Code 2010 vyšla únosnost 159 kN a podle TP ČBS 07 byla výsledná smyková únosnost 199 kN.



Obrázek 9: Výztuž nabetonávky

Z vypočteného namáhání v nabetonávce od zatížení vykolejeným vlakem bylo spočteno smykové napětí ve spáře mezi stávajícím betonem a nabetonávku z UHPFRC o hodnotě 0,66 MPa. Na toto napětí byla navržena kolmá spřahovací výztuž průměru 10 mm v rastru 300 x 400 mm. Spřahovací výztuž byla posouzena i na protlačení deskou.



Obrázek 10: Spřahovací výztuž nabetonávky

V zalomení prefabrikované konzoly byla navržena dvojice ocelových kotev průměru 16 mm. Kotvy zabraňují oddělení nabetonávky od podkladu při působení zatížení.

Na základě výpočtu napětí v nabetonávce od smršťování byla upravena lemovací výztuž (výztuž pro zakotvení na svislých plochách zkušební tělesa) na průměr 12 mm.

6. ZÁVĚR

Návrh konstrukce s použitím UHPFRC a betonářské výztuže může být velmi efektivním řešením pro konstrukce s vysokými nároky na únosnost a trvanlivost. Výpočty pro návrh nabetonávky ukázaly, že taková konstrukce s UHPFRC by měla odolat účinkům vykolejeného vlaku. Experimentální testování takových konstrukcí na zkušebních tělesech může poskytnout cenné informace o chování materiálu a konstrukce, které mohou být využity pro optimalizaci návrhu a výroby.

Celkově lze tedy říci, že návrh UHPFRC nabetonávky je velmi zajímavý a inovativní přístup k řešení konstrukcí s vysokými nároky na únosnost a trvanlivost, který může mít široké uplatnění v praxi.

PODĚKOVÁNÍ

Příspěvek vznikl za finanční podpory ČVUT v Praze v rámci projektu SGS23/036/OHK1/1T/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

- SGS23/036/OHK1/1T/11: Únavová odolnost a zesilování betonových mostů UHPFRC nabetonávku.
- 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.
- COUFAL Robert, VÍTEK Jan L., PROCHÁZKOVÁ Alena. Praktická zkušenost s výrobou a dopravou uhpc. In: *TBG Metrostav* [online]. 2015
- 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.
- KALNÝ, Milan; KOMANEC, Jan; KVASNIČKA, Václav. Metodika pro navrhování prvků z UHPC. Praha, 2015.
- 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.
- BRÜHWILER, Eugen. Rehabilitation of bridges using Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete. *Safety and Reliability of Bridge Structures*. 2009, s. 185-194.
- COUFAL, Robert, Milan KALNÝ, Jiří KOLÍSKO a Jan L. VÍTEK. *Technická pravidla ČBS 07 Ultra vysokohodnotný beton (UHPC)*. [Praha]: Česká betonářská společnost ČSSI, 2022. ISBN 978-80-907611-7-9
- fib, fib Model Code for Concrete Structures 2010, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co.KGaA, Weinheim, Germany, 2013. <https://doi.org/10.1002/9783433604090>.
- NF P18-710 National addition to Eurocode 2 – Design of concrete structures: spécifique rules for ultra-high performance fibre-reinforced concrete (UHPFRC), Francie 04/2016
- NF P18-470 Concrete – Ultra-high performance fibre-reinforced concrete – Specifications, performance, production and conformity, Francie 07/2016
- Šafář, R.: *Oprava mostu v km 31,877 na trati Horní Cerekev – Tábor (Leskovice) - projekt*, 2017