

LÁVKA PŘÍBOR

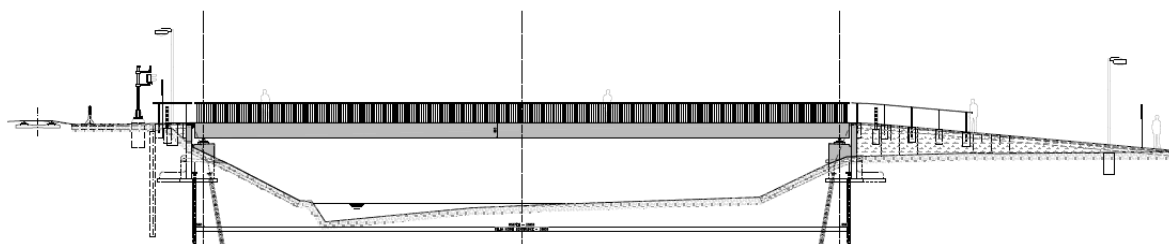
Jan Marek, David Čítek, Petr Tej, Lukáš Vráblík

1 Úvod

UHPFRC či UHPC je moderní perspektivní vysokohodnotný cementový materiál viz články [1], [2], [3], [4], [5], [6], [13]. Jeho mechanické vlastnosti (pevnost v tlaku 120-180 MPa, tahu za ohybu cca 20-40 MPa) a zpracovatelnost, umožňují navrhovat nově konstrukce specifických parametrů a tvarů. Současně je zásadní pro využití velmi vysoká trvanlivost násobně převyšující běžný beton. Pro větší rozšíření možností navrhování a aplikací UHPC a UHPFRC v ČR byly zpracovány pod vedením Kloknerova ústavu také metodiky [7], [8], [9]. Tento relativně novodobý cementový kompozit byl v popisovaném případě využit ke stavbě lávky projektované jako prostý nosník rozpětí 35 metru celkové délky 36 metru z UHPFRC C 110/130 s rozptýlenou ocelovou výztuží. Vizualizace vzhledu je patrná na obr. 1 a 2. Lávka je uložena pomocí dvojice ocelových válcových ložisek průměru 200 mm na železobetonovou spodní stavbu. Povrch konstrukce je přímo pochozí (bez dodatečných hydroizolací a krycí povrchů) s odvodněním spádem 1,0% do boční hrany konstrukce. Na mostě je osazeno zábradlí výšky 1,1 metru tvořené opticky subtilními kruhovými sloupky průměru 22 mm. Tyto sloupky jsou podélně spojeny masivním lakovaným akátovým madlem. Uvnitř tohoto madla je integrované osvětlení lávky, včetně nutného příslušenství.

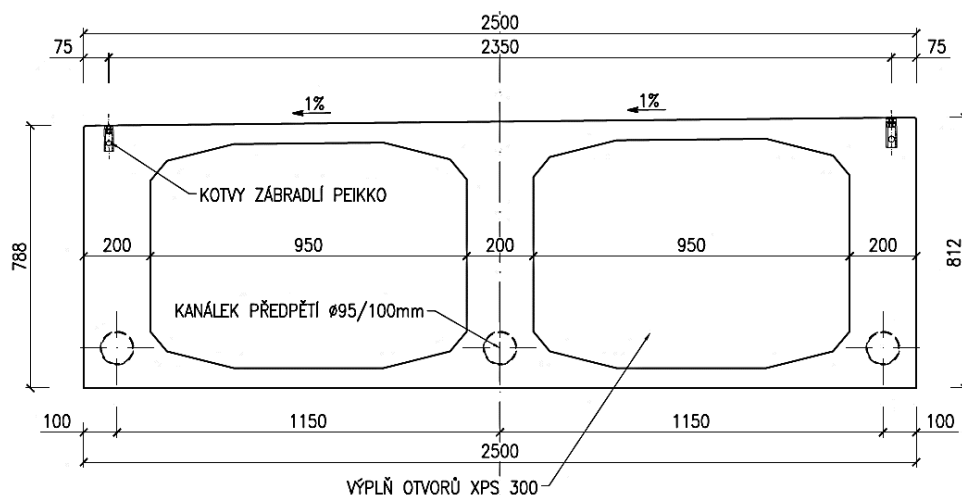


Obr. 1 Úvodní vizualizace architektonického návrhu spočívající v jednoduchém pojetí mostu jako přesného ušlechtilého kamene položeného přes vodu



Obr. 2 Konstruktivní řešení lávky

Nosná konstrukce výšky 800 mm je v podélném směru rozdělena do pětice segmentů délky 7,2 metru a profilu dle obr. 3. Štíhlostní poměr konstrukce je tedy 1:44. Celková šířka příčného řezu činí 2,5 metru. Objem lávky je vylehčen dvaceti rozměrnými polystyrenovými bloky, které omezují spotřebu relativně drahého (v porovnání se standardním betonem) konstrukčního materiálu UHPFRC. Jedná se tak o skrytou roštovou konstrukci nosníku tvořenou systémem vzájemně působících podélných a příčných žebër.



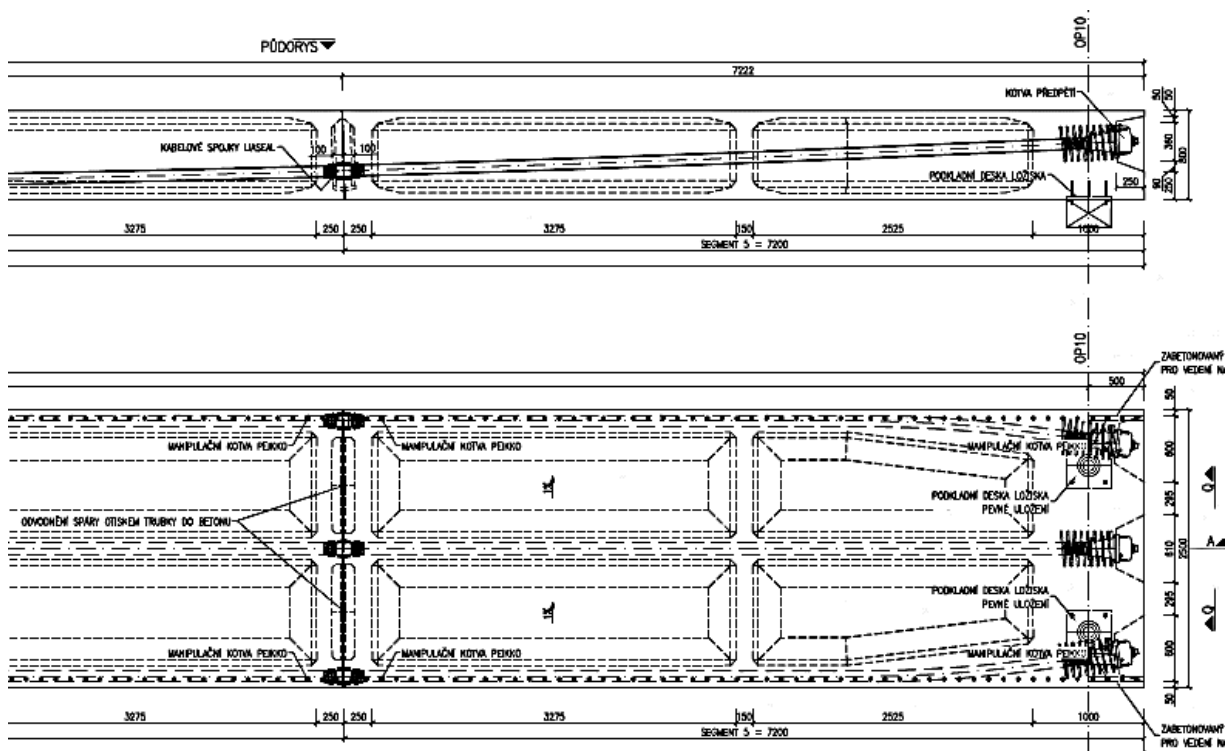
Obr. 3 Uspořádání komorového průřezu lávky

Segmenty lávky jsou podélně sepnuty předpínacími lany vedenými v podélných žebrech vnitřního roštu (viz obr. 4). Předpětí je, netradičně pro segmentové konstrukce, řešeno zvedanými kabely parabolického průběhu. Toto řešení má příznivý vliv na hodnoty normálových napětí po délce konstrukce, na vznik příčných vynášecích sil apod., nicméně má za následek různou polohu prostupu lan příčnými spárkami mezi segmenty. Pro návrh tak bylo (vzhledem k segmentové technologii výstavby) zásadní ochránit spolehlivě systém podélného předpětí proti poškození korozi. Na lávce je navržen unikátní vícenásobný systém ochrany předpínacích lan spočívající v těsnění spár epoxidovým tmelem, spojení kabelových kanálků ve spárách speciálními spojkami Liaseal (Freyssinet), injektáží kabelových kanálků a použití lan typu Monostrand (Freyssinet) dodávaných v ochranné bužírce

Tato ochrana zajistí bezproblémovou únosnost a použitelnost lávky po dobu návrhové životnosti 100 let. Impulzem pro zajištění maximálních opatření zabraňujících možné korozi předpínacích lan byl především pád trojské lávky koncem roku 2017.

Spodní stavba mostu je řešena standardními železobetonovými opěrami s kolmými křídly. Stavba je založena na mikropilotách.

Generálním dodavatelem stavby byla společnost Strabag a.s., výrobcem prefabrikátů z UHPC byla společnost KŠ PREFA s.r.o., vše dle návrhu zpracovaného architektky Markem Blankem a Petrem Tejem a společností Novák & Partner ve spolupráci s pracovníky Kloknerova ústavu ČVUT.



Obr. 4 Uspořádání předpínacích lan

Zábradlí mostu je tvořeno nerezovými sloupky osazenými do závitových pouzder zabetonovaných v horním povrchu lávky. Je tak docíleno absence patních desek zábradlí. V dřevěném madle jsou osazena bodová svítidla včetně jejich napájení, které je do madla vedeno dutými sloupky zábradlí na začátku mostu. Madlo zábradlí je tvořeno masivním akátovým dřevem s finální úpravou nátěru lodním lakem. Odvodnění mostu je řešeno přímým odtokem vody z jejího povrchu díky jednostrannému spádu 1,0% (viz obr. 3)

2 Výroba lávky

Výroba jednotlivých segmentů byla prováděna společností KŠ PREFA s.r.o., betonárna Štětí. Zde byly v předstihu zhotoveny zkušební segmenty poloviční délky pro ověření projekčních předpokladů. Následně byla v týdenních odstupech zhotovena pětice segmentů nosné konstrukce, které byly po 14-ti dnech po výrobě posledního segmentu dopraveny na stavbu. Celková hmotnost nosné konstrukce činí přibližně 88,5 tuny, přičemž krajní segmenty váží cca 19,5 tuny a střední segmenty 16,5 tuny.

2.1 Bednění a zabetonované prvky

Vzhledem k přímo pochozímu povrchu lávky bylo nutné provádět betonáž v obrácené poloze, aby byly finálně viditelné povrchy v kontaktu s bedněním. Bednění každého segmentu lze v zásadě rozdělit na bednění dna a boků, které bylo tvořeno betonářskou překližkou Phenox a bednění čel segmentů pomocí ocelových plechů.

Boční a spodní bednění je tvořeno jednoduchými velkoformátovými deskami Phenox, přičemž hrany jsou tvořeny oblými rohovými lištami poloměru 10 mm. Čelní ocelový plech je zásadně složitějším prvkem (obr. 5), který v sobě zahrnuje smykové zámky tvaru plochého

komolého kužele a trubkové centrovací nástavce pro klíčové vystředění vzájemně navazujících kabelových kanálků podélného předpětí.

Každá spára mezi segmenty je projektována jako normála průběhu osy předpínacího lana což má za následek, že každá spára mezi segmenty musí být vytvořena speciálním čelním bednicím plechem. Díky symetrii konstrukce je však možné minimalizovat celkový počet čelních bednicích plechů na 3 kusy. Smykové ozuby jsou v čelním plechu tvořeny frézovanou ocelovou deskou vloženou do plochy plechu. Jejím hlavním úkolem je přenos smykových sil mezi spárami, nicméně díky přesnosti odlití segmentů slouží i ke správném navedení segmentů při jejich vzájemném slepování.

Ačkoliv z vnějšího pohledu působí segmenty tvarově velmi jednoduše, elegantně a čistě, bylo do jejich útrob nutné zabudovat obrovské množství montážních, ochranných a manipulačních prvků.



Obr. 5 Pohled na protizávaží s kotvením vylehčovacích polystyrenů a další zabudované prvky jako ložiska a manipulační pouzdra.

2.2 Materiál UHPFRC

Použitá směs UHPFRC byla vyvinuta a optimalizována v Kloknerově ústavu. Pro výrobu segmentů byl použit UHPFRC třídy C110/130, XF4 s rozptýlenou ocelovou výztuží ve formě ocelových drátků. Finální směs se skládá z cementu, jemného kameniva s maximální velikostí 2 mm, strusky, mikrosiliky a ocelových mikrovláken délky 13 mm. Objemový podíl vláken byl 1,5%. Objem vody a superplastifikátoru byl optimalizován s ohledem na zpracovatelnost. Při výrobě jednotlivých segmentů nebyl použit dodatečný pigment. Vzhledem k betonáži masivních prvků a vývinu vysokých teplot během hydratace cementu bylo nutné chlazení směsi ledem (část záměsové vody nahrazena ledem), aby byla snížena počáteční teplota čerstvého betonu a tím došlo i ke snížení finálních maximálních teplot v betonu. Směs byla vyvinuta jako samozhutnitelná a samonivelační. Vzhledem k velmi dobré konzistenci směsi nebylo nutné žádného dodatečného hutnění a došlo k bezproblémovému zaplnění všech částí formy. Základní mechanické vlastnosti byly zkoušeny v laboratořích Kloknerova ústavu.

Tab. 1 Vyhodnocení fyzikálně materiálových vlastností použitého UHPC

| Zkouška\Sada | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | Jednotka |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|----------|
| statický modul pružnosti v tlaku na válcích 150x300mm | 49,3 | 49,1 | 49,6 | 47,5 | 47,8 | GPa |
| pevnost v tlaku na válcích 150x300mm | 140,2 | 139,1 | 145,3 | 140,5 | 137,6 | MPa |
| pevnost v tlaku na krychlích 100x100mm | 157,3 | 150,0 | 149,6 | 140,6 | 144,1 | MPa |
| pevnost v tlaku na krychlích 150x150mm | 144,5 | 146,8 | 139,2 | 139,1 | 141,9 | MPa |
| pevnost v tlaku na trámčích 40x40x160mm | 166,0 | 183,0 | 186,0 | 168,0 | 171,0 | MPa |
| napětí v tahu za ohybu při porušení trámec 100x100x400mm | 11,1 | 15,5 | 15,2 | 14,6 | 18,5 | MPa |
| napětí v tahu za ohybu při porušení trámec 40x40x160mm | 31,7 | 37,7 | 36,2 | 33,5 | 29,2 | MPa |

2.3 Betonáž

Betonáž byla prováděna kontinuálně v sérii za sebou. Předchozí betonovaný segment s osazeným čelním plechem tak tvořil stěnu bednění následujícího segmentu. Jednotlivé betonáže probíhaly na české poměry v rekordních objemech pohybujících se mezi 6,5m³ pro střední a 7,7m³ pro krajní segmenty.

Na zkušebních segmentech byl ověřován vývoj teploty při hydratačním procesu v krajním koncovém příčniku prvního a posledního segmentu. Jedná se o monoblok betonu o rozměrech 1,0x2,5x0,8 metru.

Betonáž segmentů nosné konstrukce probíhala v letních měsících brzy ráno, aby byl eliminován vliv vysokých teplot na odpařování vody ze směsi a celkově na vývoj hydratačního tepla. Po betonáži každého segmentu byl na volný povrch konstrukce aplikován dvojitým nástřikem ochranný film na bázi vosku.

Vzhledem k vývoji hydratačního tepla během tuhnutí směsi bylo nutné zabezpečit co nejrovnoměrnější a nejpomalejší ochlazování vybetonovaných prefabrikátů. Jen tímto postupem je možné zamezit vzniku trhlin od diferenčního smrštění mezi prvky různých tloušťek. V tomto ohledu lze postup ošetřování segmentů přirovnat k ošetřování výrobků zhotovených ze skla. Chladnutí celého prvku trvá vždy i několik dní a z toho důvodu byly po tuto dobu zhotovené segmenty zakryty polystyrenovými deskami.

3 Výstavba lávky

Výstavba lávky probíhala segmentovým způsobem během jednoho pracovního dne. Na místě stavby byla v předstihu montáže sestavena skruž typu Pižmo tvořená dvojicí prostých nosníků s montážní podporou v korytě řeky uprostřed rozpětí. Podlaha skruže byla tvořena celkem čtveřicí tuhých ocelových nosníků, které minimalizovali průhyb od zatížení vlastní tíhou prefabrikátů. Na horním povrch byly dále usazeny poklesové klíny, které umožnily jak nadvýšení konstrukce pro eliminaci průhybu skruže tak zároveň odskržení nosné konstrukce po jejím předepnutí.

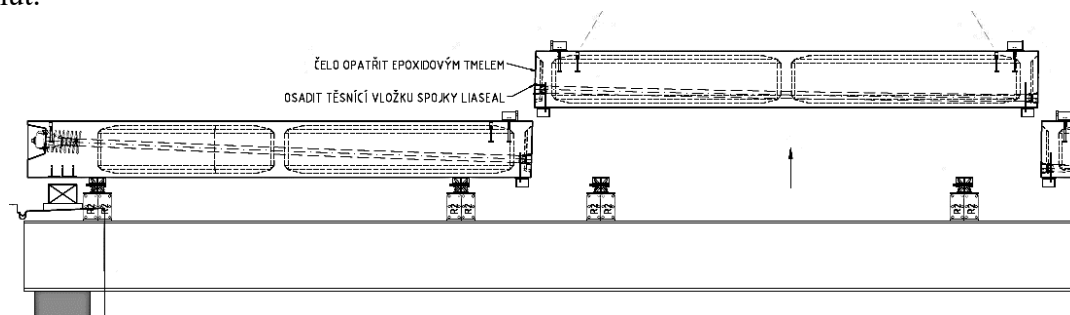
3.1 Doprava a montáž segmentů

Segmenty byly dopraveny na místo stavby celkem čtyřmi nákladními automobily. Nakládka probíhala portálovými jeřáby v KŠ PREFEA. Pro složení prefabrikátů byl v místě stavby v předstihu smontován masivní jeřáb s nosností 500 tun. Segmenty byly osazeny na podpůrnou skruž směrem od Nábřeží Rudoarmějců. Mezi segmenty byly vynechány rozestupy šířky cca 100 mm. Krajní segment S5 byl přikotven, aby bylo zabráněno jeho podélnému posunu, přičemž byl se spodní stavbou spojen také předem osazenými ložisky.



Obr. 6 Montáž segmentu S2 (čtvrtého v pořadí)

Jednotlivé segmenty bylo po montáži nutné vzájemně spojit utěsněním spár. Ke slepování segmentů byl použit epoxidový tmel s prodlouženou dobou zpracovatelnosti na cca 30 minut.



Obr. 7 Schéma postupu spínání

Pro zatěsnění spáry je během slepování segmentů nutné sledovat postupné vytlačení epoxidového tmelu po obvodu průřezu. Na obrázku je patrná úprava čel každého segmentu. Tato úprava má za účel minimalizovat plochu lepeného povrchu. Epoxidový tmel použitý pro lepení prefabrikátů je velice viskózní a při větších plochách má tendenci klást odpor spínací síle. Po zacištění spáry technickým líhem je pak možné pokračovat dalším připojovaným segmentem.



Obr. 8 Pohled na dokončenou montáž nosné konstrukce

3.2 Předepnutí a odskružení konstrukce

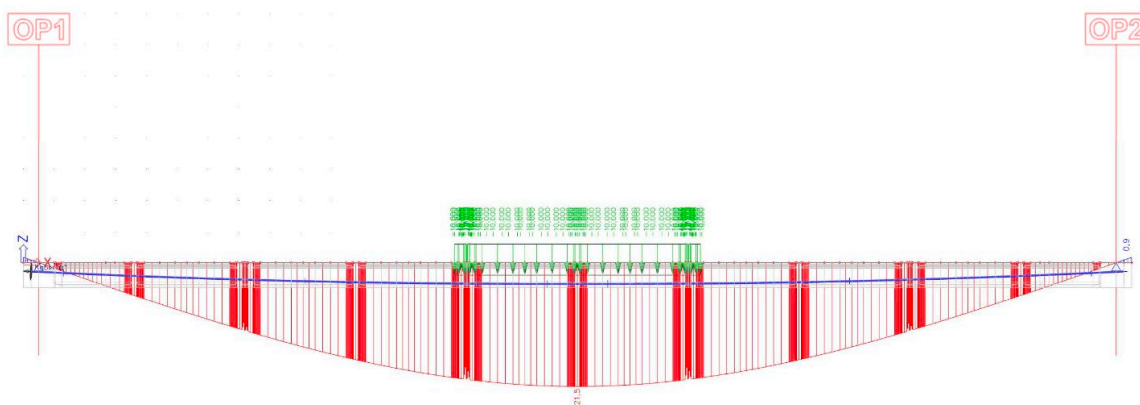
Dodavatelem výztuže se stala společnost Freyssinet. Předpínací výztuž lávky je tvořena trojicí kabelů vedených uvnitř mostu v parabolickém oblouku vzepětí 400 milimetrů. Každý kabel je složen ze 17-ti lan bez soudržnosti typu monostrand ($\text{Ø}15,7\text{mm}$ – St 1640/1860) s ochranou plastovou vrstvou zabraňující kontaktu lan s korozním médiem. Kabely jsou vedeny ve standardních ocelových kanálcích z vlnitého plechu průměru 95/100 mm. Tyto kanálky jsou v jednotlivých spárách vzájemně propojeny speciálními kabelovými spojkami LiaSeal 95/155 mm. Jedná se o plastový výrobek v nabídce společnosti Freyssinet složený ze tří základních částí – dvojice hrdel a vkládaného těsnění. Dvojice hrdel je před betonáží osazena na konce kabelových kanálků, které jsou před aplikací epoxidového tmelu doplněny vloženým těsněním. Ke spojení obou hrdel pak dochází při spojení segmentů vzájemným „zacvaknutím“, při kterém je nutné překonat lehký odpor spojky. Lana byla napínána jednostranně kotevním napětím 1440 MPa přibližně týden po slepení segmentů. Následující den po předepnutí lan byly kanálky zainjektovány cementovou maltou. Injektážní trubička byla umístěna v nejnižším místě paraboly předpětí s vyústěním do spodního povrchu mostu. Předpínací kotvy 19C15 jsou ponechány volně v koncových kapsách.

4 Statická a dynamická zatěžovací zkouška

V před předáním díla byla provedena statická a dynamická zatěžovací zkouška konstrukce. Výsledky potvrdily předpoklady návrhu.



Obr. 9 Lávka v Příboře před dokončením



Obr. 10 Výpočetní analýza konstrukce

Tab. 2 Vyhodnocení dynamické zatěžovací zkoušky

| Výpočet | | | Měření | Odchylky [%] Dle ČSN 73 6209 | |
|--------------------------|----------------|---------------------------------|-------------------|---------------------------------|-----------|
| Číslo vlastního tvaru | Frekvence [Hz] | Popis vlastního tvaru | Frekvence [Hz] | Stanovená | Mezní |
| 1 | 1,438 | Podélný ohyb mostovky 1 vlna | 1,54 | +7,09 | +10 / -15 |
| 2 | 4,147 | Příčný ohyb mostovky 1 vlna | 4,32 | +4,17 | ± 16,8 |
| 3 | 5,701 | Podélný ohyb mostovky 2 vlny | 6,15 | +7,88 | ± 18,0 |
| 4 | 12,598 | Podélný ohyb mostovky 3 vlny | 13,6 | +7,95 | ± 22,9 |
| 5 | 15,473 | Příčný ohyb mostovky 2 vlny | 16,0 | +3,41 | ± 24,4 |

Na lávce byla dokončena montáž zábradlí s integrovaným osvětlením a osazení mostních závěrů. Dokončuje se spodní stavba, zhotovení zbývajících zásypů, ramp a komunikací. Souběžně probíhá ověření stavu statickou i dynamickou zatěžovací zkouškou. Její dosavadní výsledky potvrzují předpoklady návrhu. Realizace lávky potvrzuje možnosti UHPFRC vytvářet unikátní esteticky zajímavé konstrukce.

5 Závěr

Na lávce byla dokončena montáž zábradlí s integrovaným osvětlením a osazení mostních závěrů. Byla dokončena spodní stavba a došlo ke zhotovení zbývajících zásypů, ramp a komunikací. Po dokončení proběhlo ověření stavu statickou i dynamickou zatěžovací zkouškou. Výsledky potvrdily předpoklady návrhu. Lávka byla zkolaudována a uvedena slavnostně do provozu 23. 11. 2019. Konečné provedení lávky je patrné z následujícího obr. 11.



Obr. 11 Lávka v Příboře po otevření

Dedikace:

Tato práce byla podpořena z programu Ministerstva kultury České republiky na podporu aplikovaného výzkumu a experimentálního vývoje národní a kulturní identity na léta 2016 až 2022 (NAKI II), projekt č. DG20P02OVV005.

Literatura

- [1] Kolísko, J., Tichý, J., Kalný, M., Huňka P., Hájek P. – Trefil, V.: Vývoj ultravysokohodnotného betonu (UHPC) na bázi surovin dostupných v ČR, BETON TKS samostatná příloha Betonové konstrukce 21. století betony s přidanou hodnotou, ročník 20. č. 6, s. 51-56, ISSN 1213-3116
- [2] Rydval, M., Kolísko, J. Huňka, P., Tichý, J.: Závislost únosnosti prvků vyrobených z UHPFRC na distribuci vláken. 20. Betonářské dny v Hradci králové, 27.-28.11.2013, SBN 978-80-87158-34-0/978-80-87158-35-7 (CD)
- [3] Kolísko J., Rydval M., and Huňka P. UHPC – Assessing the Distribution of the Steel Fibre and Homogeneity of the Matrix. Tel Aviv, Israel: fib Symposium Tel Aviv, 2013.
- [4] Vítek, J. L., Coufal, R., Čítek, D.: UHPC - Development and Testing on Structural Elements. Concrete and Concrete Structures 2013, Žilina, 2013, University of Žilina, pp. 218-223
- [5] Abbas, S., Nehdi, M.L., Saleem, M.A.: Ultra – High Performance Concrete: Mechanical Performance, Durability, Sustainability and Implementation Challenges, International Journal of Concrete Structures and Materials, Vol.10, No.3, pp. 271-295, September 2016
- [6] Duque, L.F.M, Varga,I., Graybeal, B.A.: Fiber Reinforcement Influence on the Tensile Response of UHPFRC, First International Interactive Symposium on UHPC - 2016, Des Moines, IOWA, Jul.18 – 20, 2016
- [7] Metodika 1–Metodika pro návrh UHPC a materiálové zkoušky, výstup projektu TAČR TA 010110269, Kloknerův ústav ČVUT v Praze 2014

- [8] Metodika 2–Metodika pro navrhování prvků z UHPC, výstup projektu TAČR TA 010110269, Kloknerův ústav ČVUT v Praze 2014
- [9] Metodika 3 - Metodika pro výrobu prvků z UHPC a pro kontrolu jejich provedení, výstup projektu TAČR TA 010110269, Kloknerův ústav ČVUT v Praze 2014
- [10] Kolisko, J.- Čítek, D.- Tej, P.: Technologie výroby tenkostěnné obloukové dvojité zakřivené lávky z UHPFRC - 14. konference TECHNOLOGIE 2017, Jihlava 6-7. Dubna 2017 Sborník přednášek Česká betonářská společnost ČSSI, ISBN 978-80-906097-9-2
- [11] Kolisko, J.; Čítek, D.; Tej, P.; Rydval, M. Production of Footbridge with Double Curvature Made of UHPC In: Fibre Concrete 2017., Bristol: IOP Publishing Ltd, 2017. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. vol. 246. ISSN 1757-899X.
- [12] Kněž, P.; Tej, P.; Čítek, D.; Kolisko, J. Design of Footbridge with Double Curvature Made of UHPC In: Fibre Concrete 2017. Bristol: IOP Publishing Ltd, 2017. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. vol. 246. ISSN 1757-899X.
- [13] Kabele, P.; Sajdlová, T.; Rydval, M.; Kolisko, J. Modeling of High-Strength FRC Structural Elements with Spatially Non-Uniform Fiber Volume Fraction Journal of Advanced Concrete Technology. 2015, 13(6), 311-324. ISSN 1346-8014.
- [14] Blank, M. - Tej, P. - Kolisko, J. - Vráblík, L. Design of Experimental Suspended Footbridge with Deck Made of UHPC, 3rd International Conference on Mechanics and Mechatronics Research, ICMR 2016; Chongqing; China; 15 June 2016 through 17 June 2016; ISSN: 2261236X MATEC Web of Conferences, Volume 77, 3 October 2016,

Ing. Jan Marek

✉ KŠ PREFA s.r.o.
Jinonická 805/57, 150 00 Praha 5
Czech Republic
☎ +420 606 609 274
😊 j.marek@ksprefa.cz
URL www.ksprefa.cz

Ing. David Čítek, Ph.D.

✉ Kloknerův ústav ČVUT
Šolínova 7
166 08 Praha 6
☎ 605 907 554
😊 david.citek@cvut.cz
URL www.cvut.cz

Doc. Ing. Lukáš Vráblík, Ph.D.

✉ VALBEK, spol. s r.o.
V Olšinách 2300/75
100 00, Praha 10
☎ 734 390 796
😊 lukas.vrablik@valbek.cz
URL www.valbek.cz

Ing. Petr Tej, Ph.D.

✉ Kloknerův ústav, ČVUT v Praze
Šolínova 7
166 08 Praha 6
☎ 224 353 512
😊 petr.tej@cvut.cz
URL www.klok.cvut.cz