

TECHNOLOGIE OŠETŘOVÁNÍ UHPC TEPLOTOU V RANÉM STÁŘÍ PRO PRODUKCI PREFABRIKOVANÝCH DÍLCŮ

Vladimír Příbramský, *

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

ABSTRAKT

V tomto příspěvku je uveden popis a vyhodnocení experimentálního ověření pevnostních a reologických vlastností patentované směsi ultra vysokohodnotného betonu (UHPC) ošetřované různými způsoby za zvýšené teploty a ve vodním prostředí. Pro vyhodnocení dlouhodobého chování je uveden možný přístup za použití modifikovaného modelu B4. Z hlediska použití pro predikci chování UHPC se jeví být model B4 nanejvýš vhodný, neboť popisuje dlouhodobé chování betonu na základě množství použitých přísad a dále také uvažuje s možností zahřívání čerstvého betonu pro urychlení hydratace v průběhu ošetřování. Na základě výsledků experimentu je navržena technologie ošetřování prefabrikátů z UHPC, která vede ke zvýšení efektivity produkce při zajištění vynikajících krátkodobých i dlouhodobých vlastností prefabrikovaných dílců.

KLÍČOVÁ SLOVA

UHPC • Dotvarování • Smršťování • Ošetřování teplotou

ABSTRACT

In this paper the description and evaluation of results of experimental verification of compressive strengths and rheological properties of a patented mixture of ultra-high-performance concrete (UHPC) is presented. The specimens were cured with various curing regimes including curing by increased temperature and in a water saturated environment. The model B4 seems to be viable for use for prediction of creep and shrinkage of UHPC as it predicts long-term strains by incorporating the effect of volume of additives and admixtures used in the fresh concrete. Model B4 also takes into effect the thermal treatment of fresh concrete, which accelerates cement hydration in early age. Based on results of the experiment a production technology is presented that leads to enhanced efficiency of production of precast UHPC members while ensuring excellent properties of the precast members both in short-term and long-term aspects.

KEYWORDS

UHPC • Creep • Shrinkage • Heat treatment

1. OŠETŘOVÁNÍ UHPC ZVÝŠENOU TEPLOTOU

Stejně jako u dotvarování a smršťování betonu běžné třídy je u UHPC významný vliv ošetřování betonu v raném stáří. Například povrchu betonu či umístění prvků do prostředí s relativní vlhkostí blízké 100 % snižuje až 4x celkovou míru zpožděné deformace od dotvarování ve srovnání s prvky vystavenými okolnímu prostředí již několik hodin po betonáži.

Novinkou a v současné době hojně zkoumanou a používanou metodou ošetřování prvků z UHPC je „*heat-treatment*“. Pro prostředí s teplotou mezi 60–90 °C a vysokou relativní vlhkostí je pro prvky z UHPC ideální pro rychlý postup hydratace a s tím spojeným zrychleným nárůstem pevnosti a přetvořením od autogenního smršťování. Ve studii (Graybeal et al. 2006) byl zkoumán vliv ošetřování betonu teplotou v různých stářích a bylo prokázáno, že nezávisle na času aplikace ošetřování teplotou se nárůst přetvoření od dotvarování zastavil po aplikaci ošetřování. Při teplotním ošetřování skokově vzrostla hodnota přetvoření na konečnou hodnotu a tam již dále nenarůstala na rozdíl od neošetřeného vzorku. Ošetřením se dosáhne dlouhodobé stálosti prvků pod provozním zatížením a pro předpjaté prvky nižších ztrát předpětí v důsledku nižší míry smršťování a dotvarování. Pro produkci předem předpjatých prvků je nezadatelný vliv možnosti odbednění a vnesení předpětí i 24 hodin po betonáži, což přináší efektivní využití zdrojů při produkci předem předpjatých prvků.

Ošetřování zvýšenou teplotou betonů běžné třídy je pečlivě kontrolováno a maximální dovolená teplota ošetřování standardně nepřesahuje teplotu 60 °C. Důvodem je často diskutovaný problém vznikajících druhotných formací ettringitu. Ettringit je minerál vznikající hydratací v časně fázi po betonáži, který je však citlivý na teploty vyšší než 70 °C. I při krátkodobém překročení této teploty (několik hodin) v raném stáří se ettringit rozloží na dílčí minerály a tyto zůstanou ve struktuře betonu. Při následném (zpožděném) vniku vody do struktury betonu dochází k druhotné krystalizaci ettringitu (DEF – „*delayed ettringite formation*“) za vzniku krystalické fáze ettringitu s větším objemem než původní ettringit. Tato vlastnost byla důsledkem hojně publikovaných poruch zejména železničních předem předpjatých praxů z betonu standardních pevností do 50 MPa.

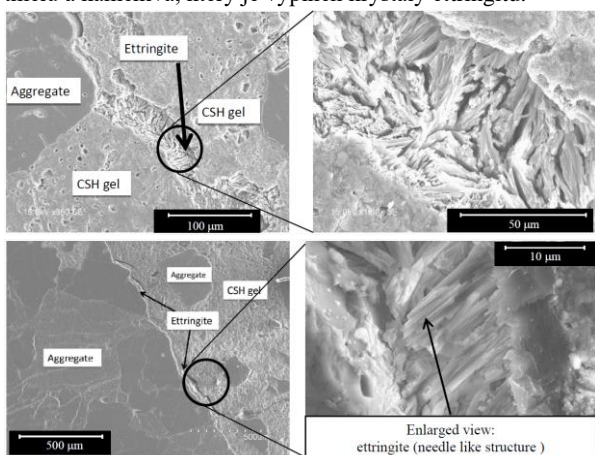
* Školitel: Doc. Ing. Lukáš Vráblík, Ph.D.

Nedávná studie (Awasthi et al. 2017) detailně popsala princip těchto objemových změn na železničních pražcích v Indii, kde po 6-9 letech po betonáži došlo k masivní degradaci velkého množství pražců, a to i těch, které nebyly zatížené dopravou (Obr. 1). Hlavním důvodem degradace byl zjištěn DEF.



Obr. 1: Pražce porušené formacemi ettringitu, (Awasthi et al. 2017)

Mikroskopické krystaly ettringitu byly zjištěny na výbrusech vzorků z porušených pražců, kde je patrně viditelná separace tmele a kameniva, který je vyplněn krystaly ettringitu.



Obr. 2: Formace ettringitu (DEF), (Awasthi et al. 2017)

Jelikož ošetřování zvýšenou teplotou je významným prostředkem urychlení zrání UHPC, bylo zkoumáno, zda DEF působí i na ošetřované vzorky z UHPC (Heinz et al. 2004). Bylo zjištěno, že k rozložení prvotního ettringitu dochází stejně jako v případě betonu běžné třídy, avšak vzhledem k přebytku cementu ve směsi UHPC k následné krystalizaci ettringitu již nedochází. Důvodem je, že voda, která je pro pozvolnou krystalizaci nezbytná a která se do struktury UHPC dostane buď mikrotřlinami nebo difúzí je vázána rychleji reagujícími minerály, než je krystalická fáze ettringitu. V UHPC ettringit zůstává amorfni i při ošetřování extrémními teplotami až 180 °C. V praktické prefabrikaci je teplota nad 100 °C jen těžko dosažitelná standardními technologiemi (propařování za atmosférického tlaku či umístění vzorků do vodního prostředí) a dá se tedy vyvodit, že problém DEF tedy prefabrikované prvky z UHPC nezasahuje.

2. EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ NA PATENTOVANÉ SMĚSI UHPC

Pro detailní analýzu parametrů, které mají vliv na nárůst pevnosti betonu a jeho reologické vlastnosti byl ve spolupráci s Kloknerovým ústavem připraven a proveden experiment na 4 sadách vzorků ze stejné směsi UHPC. Receptura směsi je patentována Kloknerovým ústavem a dosahuje charakteristické 28denní pevnosti 140 MPa. Sady vzorků byly ošetřovány různým způsobem a ve vodním prostředí. Ošetřování bylo zahájeno po odbednění vzorků ve stáří 24 hodin a bylo ukončeno po dalších 24 hodinách. Mechanické vlastnosti byly vyhodnocovány na válcových vzorcích průměru 150 mm (modul pružnosti a tlaková pevnost) a na krychlích o hraně 100 mm (tlaková pevnost). Mechanické vlastnosti byly vyhodnoceny v době po odbednění (1 den), po ukončení ošetřování (2 dny) a po 7 a 28 dnech od betonáže.

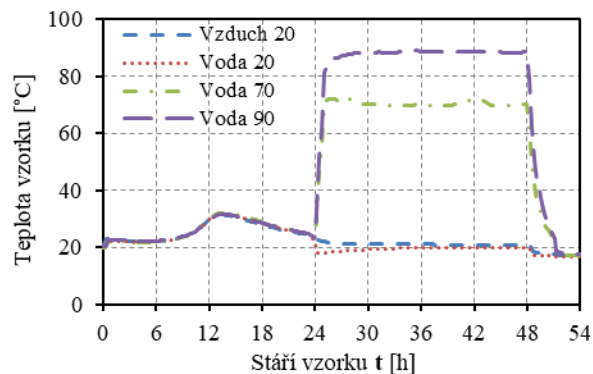
Ošetřování zvýšenou teplotou bylo prováděno ve vodním prostředí v kádích, kde byla udržována teplota pomocí ponorných ohřivačů spínaných automaticky teplotním čidlem umístěným v kádi.



Obr. 3: Sada vzorků v průběhu ošetřování.

Z hlediska způsobu ošetřování byly měřeny 4 sady vzorků:

- Neošetřované vzorky umístěné po odbednění na vzduchu při pokojové teplotě. Tyto vzorky jsou dále uváděny pod označením „Vzduch 20“.
- Vzorky ponořené do vodního prostředí o pokojové teplotě, 70 °C a 90 °C po dobu 24 hodin („Voda 20“, respektive „Voda 70“ a „Voda 90“).



Obr. 4: Průběh teploty vzorků při ošetřování.

Průběh teploty vzorků před a v průběhu ošetřování je patrný na grafu níže. Při ošetřování sady „Voda 70“ byla průměrná teplota 70,6 °C a sady „Voda 90“ 88,0 °C.

Pro měření smršťování a dotvarování byly v každé sadě 3 trámky o rozměrech 70x70x300 mm. Trámky byly opatřeny strunovými tenzometry, které umožnily měření hodnot přetvoření již od okamžiku betonáže. Smršťování bylo měřeno z každé sady na 1 trámku, dotvarování na 2 trámcích, které byly umístěny dohromady do standu a ihned po vychladnutí po ošetřování byly zatíženy hydraulickým lisem silou 150 kN, což představuje 37 % průměrné tlakové pevnosti neošetřovaného vzorku naměřené v době 2 dnů po betonáži. Ošetřování zvýšenou teplotou ve vodním prostředí výrazně podporuje hydrataci, což je zřejmé z rychlého nárůstu pevnosti vzorků a také z rychlosti náběhu autogenního smršťování, jak bude ukázáno dále.

3. PREDIKCE SMRŠŤOVÁNÍ A DOTVAROVÁNÍ

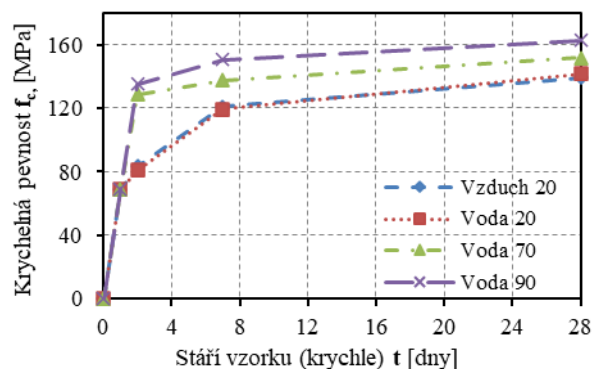
Nejmodernější a nejrozšířenější model pro popis reologického chování betonu je model B4 (Bažant et al. 2014). Model B4 je formulován na základě velkého množství měření a zkoušek, a to jak provedených v nedávné době, tak i publikovaných dříve. Model popisuje dotvarování a smršťování daleko komplexněji a se zahrnutím více vlivů; například uvažuje s vlivem složení betonové směsi, včetně uvažování efektů příměsí, a třídí betonové prvky do typů podle tvaru. Pro aplikaci na konstrukce z UHPC je nanejvýš výhodný i parametr zohledňující teplotu při hydrataci. Výhodou modelu je jeho neustálý vývoj na základě nových měření a zkoušek a relativně snadná možnost jeho adaptace pro popis chování betonu ze zkoušek provedených z konkrétního betonu (nebo parametrické studie), pro konkrétní projekt.

Pro vyhodnocení experimentálních dat byl model adaptován tak, aby jeho rozsah platnosti zahrnoval UHPC. Jednalo se zejména o kalibraci součinitelů příměsí, použití přesnějšího určení modulu pružnosti vysokopevnostních betonů a následně i úprava vodního součinitele a poměrů cementu a kameniva na základě předpokladu, že část cementu nehydratuje z důvodu nízkého obsahu vody ve směsi, a tedy má funkci jemnozrného plniva.

4. VÝSLEDKY

4.1. Nárůst pevnosti betonu

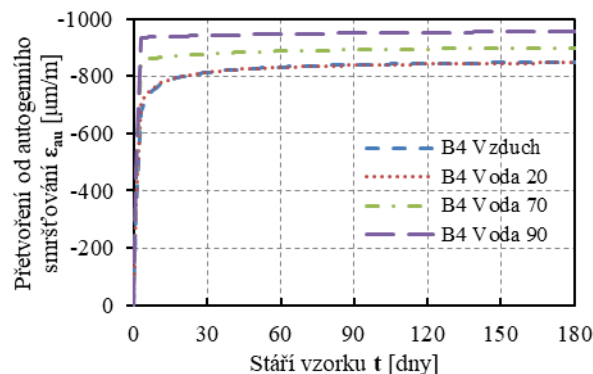
Průměrná tlaková pevnost měřená na krychlích ošetřovaných 90 °C byla 135,1 MPa. Tato hodnota je velmi blízko průměrné 28denní pevnosti neošetřovaného vzorku, která byla 139,2 MPa. Nárůst pevnosti jednotlivých sad je zobrazeno na grafu níže. Zároveň je z grafu patrné, že samotné ošetřování bez zvýšené teploty nemá na nárůst pevnosti téměř žádný vliv.



Obr. 5: Nárůst pevnosti vzorků v čase od betonáže

4.2. Autogenní smršťování

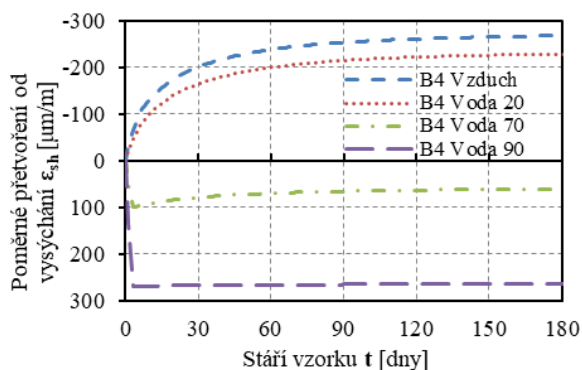
Průběh přetvoření od autogenního smršťování v čase odpovídá průběhu nárůstu pevností betonu při různém způsobu ošetřování. Nejvyšší hodnoty autogenního smršťování dosahují vzorky ošetřované 90°C. Hodnota dosažená po ukončení ošetřování je dále téměř konstantní.



Obr. 6: Nárůsty přetvoření od autogenního smršťování UHPC predikované modifikovaným modelem B4

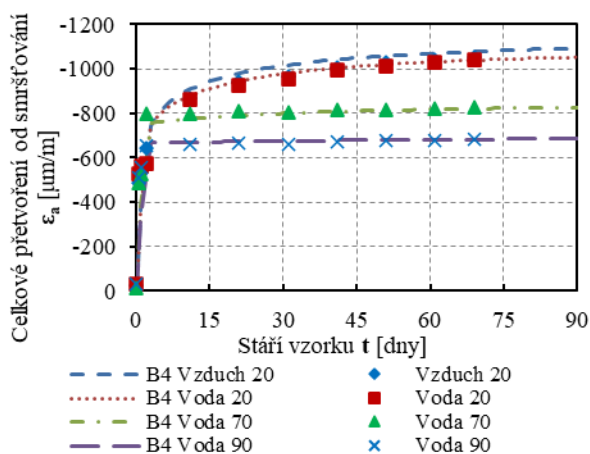
4.3. Smršťování vysycháním a celkové smršťování

Smršťování vysycháním dosahuje očekávaných výrazně nižších hodnot než autogenní smršťování, velmi výrazně se v případě smršťování vysycháním projevuje účinek ošetřování. Při ošetřování zvýšenou teplotou je významně urychleno zrání betonu a beton po tuto dobu je stále ve vodním prostředí. Dochází tedy k jeho bobtnání, které je ukončeno v době ukončení ošetřování. V tuto chvíli je však vzorek UHPC zralý a k difúzi vodních par nadále dochází jen ve velmi omezeném množství a vzorek zůstává dlouhodobě nabobtnán, neboť voda, která se dostala do struktury betonu v době ošetřování, je již uzamčena ve struktuře betonu.



Obr. 7: Nárůsty přetvoření od smršťování vysycháním UHPC predikované modifikovaným modelem B4

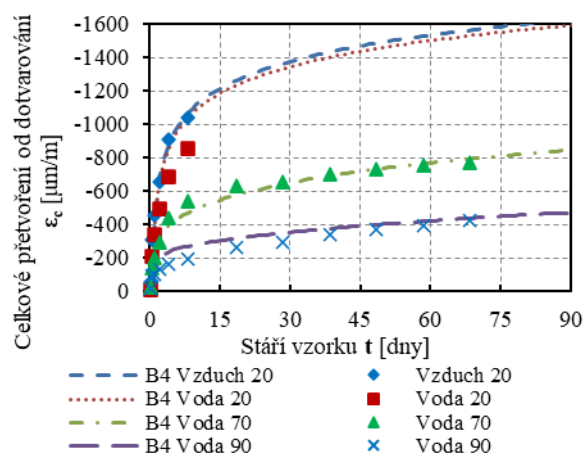
Výše popsaný princip smršťování vysycháním je potvrzen naměřenými daty, kdy měřená hodnota celkového přetvoření od smršťování je nižší pro vzorky ošetřované vyšší teplotou ve vodním prostředí. Tyto vzorky navíc vykazují jen malý nárůst přetvoření v měsících následujících po ošetřování, což dokazuje velmi nízkou úroveň difúze vodních par po ukončení ošetřování.



Obr. 8: Nárůst přetvoření od smršťování UHPC vzorků a porovnání s modifikovaným modelem B4

4.4. Dotvarování

V případě predikce přetvoření od dotvarování bylo dosaženo shody s experimenty při odhadnutí sady součinitelů příměsí odpovídající přibližně extrapolaci dostupných sad součinitelů vlivu množství příměsí, kterými byl model kalibrován. Adaptovaný a kalibrováný model B4 vykazuje velmi dobrou shodu s naměřenými hodnotami a také s měřeními z USA (Graybeal et al. 2006) a to z hlediska jak konečné hodnoty přetvoření od smršťování a dotvarování, tak rychlosti jejich nárůstu.



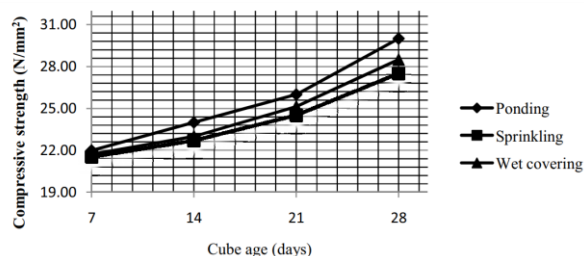
Obr. 9: Nárůst přetvoření od dotvarování UHPC vzorků a porovnání s modifikovaným modelem B4

5. PROCES PREFABRIKACE A OŠETŘOVÁNÍ

Standardní metody ošetřování ve výrobě betonových prefabrikovaných a předem předpjatých prvků můžeme rozdělit na pasivní (překrytí prvků PE fólií) a aktivní. Aktivní způsoby ošetřování jsou následující:

- překrytí propustnou tkaninou, která je periodicky zvlhčována
- zkrápění prvků vodou v kontrolovaném prostředí (stanu),
- propařování prvků v utěsněném prostředí (stan nebo propařovací komora),
- ponoření prvků do vodního prostředí

Pro předem předpjaté prvky je nejčastější metodou buď zakrytí (pro dlouhé prvky) anebo propařování ve speciálních stanech či izolovaných komorách (velmi časté pro drobné prvky – betonové potrubí, předpjaté železniční pražce), jak popisuje (Awasthi et al. 2017). Efekt různých způsobů ošetřování na nárůst pevnosti a omezení smršťování na ošetřovaném betonu běžných tříd je publikován v několika studiích, například (James et al. 2011) konstatuje, že nárůst pevnosti je nejvyšší při ponoření prvků do vody a to přibližně 8-10 % ve srovnání s prvky zakrytými vlhčenou tkaninou. Efekt zkrápění vodou je ještě o 3-5 % nižší než efekt zakrytí vlhčenou tkaninou, jak je patrné z obrázku níže.



Obr. 10: Efekt ošetřování různými metodami na pevnost betonu běžné třídy (James et al. 2011)

Experimentální výsledky uvedené v tomto příspěvku podporují i pro UHPC vliv ponoření vzorků do vodního prostředí, efekt je patrný zejména pro smršťování, kde podle jiných významných studií (Graybeal et al. 2006) pokud nebyly prvky

ošetřovány ponořením do vodního prostředí, pak přetvoření od smršťování bylo tím vyšší, čím byla vyšší teplota při ošetřování a u těchto prvků nedocházelo k bobtnání, i když byly umístěny do prostředí s relativní vlhkostí blízké 100 %. Při ponoření do vodního prostředí je efekt opačný a významný, jak je popsáno v předchozí kapitole – ponoření do vody o teplotě 90 °C redukuje celkové přetvoření od smršťování až o 50 %. Ošetřování zvýšenou teplotou je výhradně v praxi realizováno propařováním vzorků v utěsněném prostředí stanu nebo komory. Ošetřování ponořením do vody je spíše laboratorním způsobem a v praxi není možné ho použít pro velké předem předpjaté prvky (mostní nosníky a například stropní panely – ty je nutné ošetřovat zejména před vnesením předpětí na dlouhé dráze). Pro tyto prvky je však možné po částečném odbednění na předpínací dráze použít propařování jak za pomoci roztahovacích ošetřovacích stanů, případně vzorky překryté fólií propařovat přímo.

Ponoření do vodního prostředí je teoreticky realizovatelné pro prvky nepředpjaté nebo dodatečně předpjaté – z prostorově významných prvků například pro mostní segmenty nebo nosníky s dodatečně předpjatými kabely. Dle výsledků experimentu je realistické uvažovat o zkrácení betonážního cyklu až na 24 hodin (8 hodin je prvek ve formě, po této době je tlaková pevnost na úrovni cca 30 MPa a následně 16 hodin ošetřování) ze současně běžných 3 dnů, přičemž okamžité i dlouhodobé vlastnosti ošetřovaných prvků převyšují vlastnosti i neošetřovaných prvků vyššího stáří. Tímto lze významně navýšit kapacitu výroby prefabrikovaných prvků za využití stávajících výrobních kapacit. S pořízením a provozem systému na ošetřování prvků z UHPC je spojena nutnost investice do inovace produkce, ať už se jedná o pořízení parního generátoru a ošetřovacích stanů, vybudování ošetřovací komory, či prostoru pro ponoření UHPC prvků do vodního prostředí. Na ceně hotových vzorků se tato investice může podílet 5-10 % dle použité technologie ošetřování.

6. ZÁVĚR

V tomto článku bylo představeno a vyhodnoceno chování UHPC z hlediska tlakové pevnosti, smršťování a dotvarování. Ošetřováním je významně zvýšena okamžitá pevnost po ukončení ošetřování a menší měrou i dosažená 28denní pevnost (zvýšení pevnosti je přibližně 15 %). Ošetřované prvky vykazují významně redukovanou míru smršťování ve srovnání s neošetřovanými vzorky až 2x a dotvarování až 4x. Byl zdokumentován efekt ošetřování UHPC raného stáří zvýšenou teplotou ve vodním prostředí a byla ověřena vhodnost modelu B4 pro předpověď smršťování a dotvarování UHPC. Různé způsoby ošetřování UHPC vedou na zvýšení jakosti prefabrikovaných prvků za současného snížení doby betonážního cyklu při výrobě, a to až o polovinu.

PODĚKOVÁNÍ

Teoretické podklady pro prezentované výsledky byly získány za finanční podpory z prostředků studentské grantové soutěže v rámci projektu SGS21/043/OHK1/1T/11 „Analýza chování mostních konstrukcí s prvky z UHPC“. Experimenty byly připraveny a provedeny Kloknerovým ústavem v Praze.

Reference

- Burkart, I., Mueller, H. S. (2008), Creep and shrinkage characteristics of ultra high strength concrete (UHPC), *Proceedings of 2nd International Symposium on Ultra High Performance Concrete*
- Francisco, P., Benboudjema, F., Rougeau, P., Torrenti, J. M. (2012), Creep and shrinkage prediction for a heat-treated Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concrete, *Proceedings of 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction materials*, 3/2012
- Flietstra, J. C., Ahlborn, T. M., Harris, D. K., Silva, H. M. (2012), Creep Behavior of UHPC under Compressive Loading with Varying Curing Regimes, *Proceedings of 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction materials*
- Bažant, Z. P., RILEM Technical Committee TC-242-MDC (2014), Model B4 for creep, drying shrinkage and autogenous shrinkage of normal and high-strength concretes with multi-decade applicability, *Materials and Structures*,
- Graybeal, B. A. (2006), Material Property Characterization of Ultra-High Performance Concrete, *Final report*; Office of Infrastructure Research and Development, Federal Highway Administration
- Awasthi A., Matsumoto K., Nagai K., Asamoto S., Goto S. (2017), Investigation on possible causes of expansion damages in concrete – a case study of sleepers in Indian Railways; *Journal of Asian Concrete Federation* Vol. 3, No. 1, pp. 49-66, June 2017
- Heinz D., Ludwig H. M. (2004), Heat Treatment and the Risk of DEF Delayed Ettringite Formation in UHPC, *Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel, Germany September 13-15, 2004, pp. 717-730
- James T., Malachi A., Gadzama E.W., Anametemfiok V. (2011), *Nigerian Journal of Technology*, Vol. 30, No. 3., October 2011