

TRVANLIVOST LEHKÉHO KONSTRUKČNÍHO BETONU ■

DURABILITY OF LIGHTWEIGHT STRUCTURAL CONCRETE

Michala Hubertová

Trvanlivost je schopnost výrobku provozuschopnosti po stanovenou dobu v určeném prostředí. Může být také definována jako schopnost betonu odolávat vnějším vlivům, jako jsou klimatické podmínky, vliv životního prostředí, chemickým látkám a mechanickému poškození. Lehký beton stejně jako obyčejný beton podléhá normě ČSN EN 206-1/Z3 a musí být tedy klasifikován podle tříd agresivity prostředí. K trvanlivosti lehkého betonu se přistupuje shodně jako k trvanlivosti obyčejného betonu, která je závislá zejména na pórovitosti a vlhkosti ztvrdlého betonu a na okolních podmínkách prostředí. Cílem článku je upozornit na odlišnosti v chování betonu zejména díky přidání lehkého pórovitého kameniva, které mohou mít vliv na trvanlivost konstrukce vyrobené z tohoto typu betonu. ■ Durability is the capability of a product, component, assembly, or construction to maintain its serviceability over a specified period of time in a specified environment. The durability of concrete can be defined as its ability to resist external influences such as climatic conditions, environmental exposure, chemical attack and mechanical damage. Lightweight concrete as well as ordinary concrete belong to standard EN 206-1/Z3 and must therefore be classified according to classes of aggression environments. The issue of durability of lightweight concrete is the same as for normal concrete durability, which is particularly dependent on the porosity and moisture content of hardened concrete, and then to the surrounding environmental conditions. This article aims to highlight the differences in the behaviour of the concrete especially with the addition of lightweight porous aggregates, which can affect the durability of the construction made of this type of concrete.

Pantheon postavený kolem roku 126 stále zůstává nedotčen. Jeho kopule je postavena z lehkého betonu vyrobeného z přírodního lehkého kameniva z vulkanických zdrojů a objemová hmotnost tohoto betonu se od spodní části kopule směrem k vrcholu snižuje. Skutečnost, že mnoho betonových konstrukcí postavených v dnešní době má krátkou životnost, což vede k nákladným opravám, zdůrazňuje význam trvanlivosti.

U konstrukčního lehkého betonu se očekává, že poskytne stejnou pevnost a trvanlivost jako obyčejný beton. Lze uvést řadu příkladů odolných konstrukcí z lehkého betonu, přesto existují obavy o životnost konstrukcí z lehkého beto-

nu, zejména pokud jde o mrazuvzdornost, odolnost povrchu vůči CHRL a mechanickou odolnost.

Konstrukční lehké betony obvykle obsahují kamenivo vyrobené výpalem jílu či břidlic, expandovaného či sbalkovaného popílku nebo strusky nebo kamenivo z přírodních pórovitých vulkanických zdrojů. Protože se v České republice používá zejména lehké kamenivo na bázi expandovaného jílu, článěk bude zaměřen převážně na lehké betony vyrobené z tohoto kameniva.

Trvanlivost betonu je ovlivňována propustností (permeabilita) krycí vrstvy betonu. Základní podmínkou pro členění mechanismů v betonu je přístup k vodě a propustnost mikrostruktury určující, jak rychle jsou agresivní kapaliny nebo ionty dopravovány do struktury materiálu. Pronikání agresivních iontů a tekutin do a z betonu závisí na mikrostruktuře materiálu a povaze prostupující látky, stejně jako na vlhkosti, teplotě a tlaku.

V praxi je nejčastějším problémem životnosti železobetonové konstrukce koroze výztuže. Hlavním faktorem koroze je propustnost betonu, konkrétně propustnost krycí vrstvy betonu.

Trvanlivostní aspekty LWAC, které je vždy třeba zvážit podrobněji, jsou:

- propustnost (permeabilita),
- koroze výztuže,
- odolnost proti zmrazování a rozmrazování,
- mechanická odolnost (otěr),
- chemická odolnost,
- alkalicko-křemičitá reakce (ASR).

PROPUSTNOST (PERMEABILITA)

Vysoká pevnost a trvanlivost lehkého betonu je dána kvalitní (nepórovitou) cementovou maticí a kvalitním lehkým kamenivem jako plnivem. V důsledku absorpce vody lehkým kamenivem v průběhu zrání čerstvého betonu (zejména je-li použito suché lehké kamenivo) mají lehké betony velmi kvalitní kontaktní zónu (přechodové pásmo) mezi kamenivem a cementovým tmelem. Kvalitní hutná cementová pasta a kontaktní zóna zajišťují vysokou odolnost proti průniku agresivních látek, kyslíku a vody. Proto se u kontaktní zóny lehkých betonů často hovoří o další fázi kompozitu, které je třeba věnovat pozornost. Slabým článkem, pokud jde o propustnost, je samotné lehké kamenivo. Pórovitost i propustnost určují vlastnos-

ti cementové matrice, lehkého kameniva a kontaktní zóny kameniva a cementové pasty.

Voda hraje důležitou roli ve všech de-gradačních mechanismech v betonu a míra absorpce vody je proto dobrým ukazatelem potenciální trvanlivosti.

Je známo, že při vyšším vodním součiniteli vznikají v cementové matici mezi zrny hydratujícího cementu kapilární póry nepravidelného tvaru, jejichž velikost se pohybuje od 0,1 do 10 μm.

Množství těchto pórů lze technologicky ovlivnit snížením vodního součinitele a způsobem ošetřování zrajícího betonu. Stejně jako u obyčejného i u lehkého betonu platí, že čím nižší vodní součinitel cementová pasta má, tím méně obsahuje kapilárních pórů. Hutnou strukturou cementové pasty se omezí možnost lehkého pórovitého kameniva podílet se na transportu vody v kapilárním systému betonu. Opačně, zvýšení vodního součinitele způsobuje hrubší pórový systém, kapilární odpor v pastě se sníží, což teoreticky umožní pórovitému kamenivu podílet se na transportu vody uvnitř betonu.

Propustnost betonu také určuje dlouhodobý obsah vlhkosti lehkého betonu a lehkého kameniva při styku s vodou či ve vlhkém prostředí. Tento parametr je důležitý pro dlouhodobou objemovou hmotnost, ale i pro všechny trvanlivostní mechanismy spojené s přítomností vody. Podrobná studie zaměřená na vliv úrovně dlouhodobé vlhkosti lehkého betonu na trvanlivost dosud nebyla publikována. Lze konstatovat, že, stejně jako u obyčejného betonu, je vhodné zajistit opatření proti dlouhodobému působení vlhkosti na železobetonové konstrukce, a to konstrukčně i technologicky.

Vznik trhlin v krycí vrstvě betonu má místně vliv na propustnost a může způsobit vyšší nasákavost betonu vodou a vniknutí agresivních látek s následným vlivem na trvanlivost. Přírodní kamenivo je velmi pevné v porovnání s okolní maticí, což způsobuje místní koncentrace napětí a rozvoj trhlin. Na druhou stranu pro lehké betony je charakteristická rovnost modulu pružnosti kameniva a matrice, což umožňuje rovnoměrnější rozložení napětí a méně rozsáhlý vznik případných trhlin [10].

Vznik trhlin může způsobit smršťování. Lehký beton má v porovnání s nor-

málním betonem velmi nízké smršťování vysycháním i autogenní smršťování. To je způsobeno vodou obsaženou v jednotlivých zrnech lehkého kameniva, která plní úlohu vodního zdroje během zrání betonu, díky kterému dochází k lepší hydrataci cementu a redukcí smrštění samovysycháním ztvrdlého betonu zvláště u betonů s nízkým vodním součinitelem. Tento proces se často označuje jako „vnitřní samoošetřování“ betonu [11].

Vnitřní samoošetřování lehkého betonu nabízí výhody ve zlepšení hydratace, snížení průniku chloridů a nižším smršťování. To pomáhá betonu dosáhnout svého maximálního potenciálu jako udržitelného stavebního materiálu s dlouhou životností. Vnitřní samoošetřování není novým pojmem, v posledních letech probíhalo mnoho výzkumů na toto téma. Je už známo, jak tento proces funguje a dokonce i způsob, jak navrhnout řízený proces vnitřního samoošetřování.

V USA se při návrhu lehkého betonu začíná počítat s vnitřním ošetřováním k zvýšení odolnosti a životnosti budované konstrukce. Jde o nový přístup k návrhu lehkého betonu a dokonce obyčejného betonu s objemovou hmotností nad 2 000 kg/m³. Vnitřní samoošetřování nabízí možnosti, které klasické betony ani konvenční ošetřování betonu nemůže poskytnout. Potřeba vnitřního samoošetřování se zvyšuje při nižším vodním součiniteli. Výzkumy ukazují, že i u betonů s běžným v/c (0,4 až 0,46) nedojde k úplné hydrataci cementu, a to ani po mnoha měsících.

Ukazuje se, že vnitřního samoošetřování může být výhodně použito u betonů využívajících vyšší obsah příměsí (popílek, struska atd.), protože potřeba vody je během jejich reakce zvýšená. V těchto případech se objevuje myšlenka využití pórovitého kameniva v běžném betonu, tzn., že objemová hmotnost ztvrdlého betonu bude nad 2 000 kg/m³. Pouze část přírodního kameniva je nahrazena pórovitým, jehož hlavní úlohou je tzv. rezervoár vody během hydratace betonu. Je třeba zdůraznit, že vnitřní samoošetřování nenahrazuje konvenční ošetřování povrchu betonu [6].

Příručka ESCSI's „Guide for Concrete Mixture Designs using Prewetted ESCS Lightweight Aggregates for Internal Curing“ z roku 2011 udává doporučená množství přídavné vody [12]. Autor uvádí jako vhodnější stanovit toto množství vždy na základě druhu použitého póro-

vitého kameniva a použité technologie míchání a ukládání betonu.

První experimenty ukládání tohoto druhu betonu finišerem prokázaly podstatné snížení vzniku trhlin v betonu. Následovaly reálné aplikace, kterých v poslední době přibývá:

- The Union Pacific Intermodal Terminal (Hutchins, Texas 2005),
- Texas State Highway SH 121 (Dallas, Texas 2007),
- mostní desky (State of Indiana, USA 2010),
- atd., viz [6].

Na druhou stranu může být lehký beton, vzhledem k absorpci vody v případě použití suchého kameniva, v počáteční fázi zrání citlivější na plastické smršťování oproti obyčejnému betonu [13].

KOROZE VÝZTUŽE A KARBONATACE

Schopnost chránit betonářskou ocel před korozi je rozhodující pro trvanlivost konstrukčního lehkého betonu. Koroze výztuže má za následek snížení efektivního průřezu dané konstrukce a odlupování krycí vrstvy betonu. Ke korozi výztuže dochází po snížení pH krycí vrstvy betonu (tzv. depasivaci), které je převážně důsledkem karbonatace betonu, tedy pronikání iontů oxidu uhličitého do betonu za přítomnosti vlhkosti.

Je-li výztuž v kontaktu se zrnem lehkého kameniva, které se nachází v zóně napadené karbonatací, riziko koroze se zvyšuje. Aby bylo zajištěno, že zrno lehkého kameniva umístěné na povrchu betonu není v kontaktu s ocelovou výztuží, a bylo tak zabráněno, aby zrno plnilo funkci „difúzního mostu“, musí být krycí vrstva lehkého betonu alespoň o 5 mm silnější oproti obyčejnému betonu. Toto zohledňuje norma ČSN EN 1992-1-1 Navrhování betonových konstrukcí, kapitola 11 – Konstrukce z betonu s pórovitým kamenivem.

Kvalita krycí vrstvy betonu je stejně důležitá jako její tloušťka. Extrémní případy rychlé karbonatace jsou způsobeny spíše špatnou kvalitou betonu v krycí vrstvě. Pokud je použit kvalitní, dobře zhutněný beton, který měl možnost zrát za dobrých vlhkostních podmínek, potřeba silné krycí vrstvy je diskutabilní. Silná krycí vrstva může do jisté míry kompenzovat špatnou kvalitu betonu. Bylo prokázáno [14], že lehkému betonu s krycí vrstvou pouhých 30 mm, v mírně vlhkém prostředí (do 20 %), s v/c menším než 0,65, bude trvat více než 50 let, než se nasatí oxidem uhličitým

a karbonatace dosáhne výztuže. Podstatně důležitější je vliv okolního prostředí, a zejména obsah CO₂ ve spolupůsobení s vlhkostí.

Stejně tak, jako u karbonace, kde má větší vliv kvalita cementového tmele, je tomu u pronikání chloridů či dalších agresivních látek. Rozdíl oproti normálnímu betonu je pouze v zrnech lehkého kameniva, která jsou pórovitá a mohou urychlovat prostup agresivních médií strukturou betonu, což je ošetřeno již v návrhu větší minimální krycí vrstvou výztuže. Na druhou stranu je kontaktní zóna lehkého kameniva a cementového tmele v případě dobře zvoleného návrhu a výroby betonu mnohem kvalitnější.

Lehké betony s různými typy lehkých kameniv (expandované jíly a břidlice, popílkové kamenivo či přírodní pemza) nevykazují významný rozdíl v permeabilitě, avšak za předpokladu stejného složení cementové pasty s vysokou kvalitou. Mikrosilika a další pucolánové příměsi svým vlivem na zkvalitnění cementové matrice zvyšují odolnost lehkého betonu.

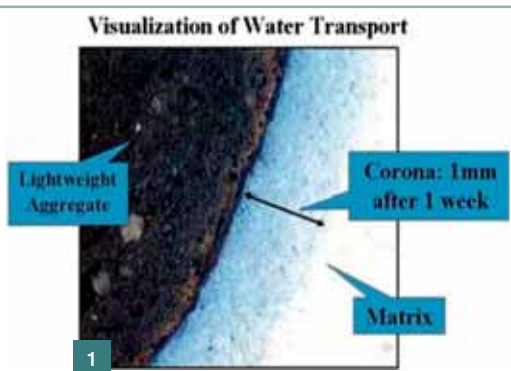
MECHANICKÁ ODOLNOST

Odolnost proti opotřebení betonu závisí na tvrdosti, pevnosti a houževnatosti ztvrdlé cementové pasty definované vodním součinitelem, druhem a množstvím cementu, kameniva, vazbou mezi jednotlivými složkami a konečnou úpravou povrchu betonu.

V dobrém povrchu betonové podlahy jsou hrubá zrna kameniva překryta cementovým tmelem, který má nízkou otěruvzdornost. I když lehké kamenivo může obsahovat relativně tvrdý materiál, jeho otěruvzdornost je relativně nízká a může být i nižší než u vytvrzené cementové pasty. Lehký beton je tedy méně otěruvzdorný oproti obyčejnému betonu, a to ve chvíli, kdy se mechanickým působením otevře jeho struktura až k zrnům lehkého kameniva.

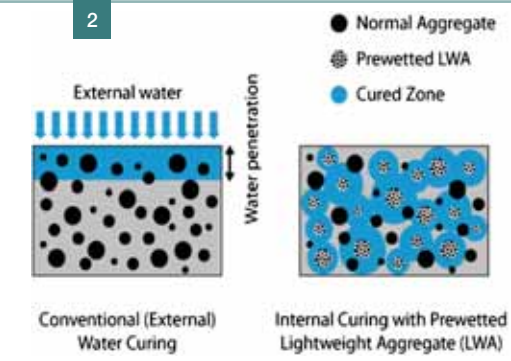
Provedené experimenty prokázaly, že opotřebení v důsledku otěru bylo dvakrát až pětkrát vyšší u lehkých betonů s použitím lehkého kameniva na bázi expandovaných jíků, s pevností v rozmezí mezi 25 a 55 MPa, oproti obyčejnému betonu s přírodním kamenivem [15]. Rozptyl výsledků závisí na objemové hmotnosti lehkého betonu a samotného lehkého kameniva a na vodním součiniteli cementového tmele.

Mechanická odolnost lehkého betonu může být zlepšena přidáním drobného přírodního kameniva – písku. Kombina-



1

Obr. 1 Schéma transportu vody v lehkém kamenivu během hydratace cementu [3] ■ Fig. 1 Scheme of water transport in lightweight aggregate during the hydration of cement [3]

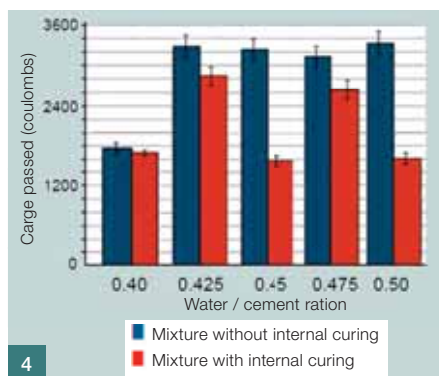


2

Obr. 2 Princip vnitřního samoošetřování betonu [2] ■ Fig. 2 Principle of internal curing [2]

Obr. 3 Schematické znázornění procesu vnitřního samoošetřování [4] ■ Fig. 3 Schematic illustration of the process of internal curing [4]

Obr. 4 Vliv vnitřního samoošetřování na propustnost (permeabilitu) betonu, zkušeno po 90 dnech, ošetřování 50% RH (Espinoza, Hajazin 2010) [5] ■ Fig. 4 Influence of internal curing on permeability of concrete; tested after 90 days; curing at 50% RH [5]



4

Obr. 5 Řez lehkým betonem – detail zrna lehkého kameniva na bázi expandovaného jílu, cementového tmele a jejich kontaktní zóny ■ Fig. 5 Section of lightweight concrete – lightweight expanded clay aggregate grain, cement paste and their contact zone



5

ce relativně měkkého lehkého kameniva s tvrdým drobným kamenivem zlepšuje kvalitu matrice. Dalším opatřením je použití povrchových úprav.

Vzhledem ke své nižší otěruvzdornosti by lehký beton měl být používán pro středně namáhané konstrukce. Je-li použití ve více namáhaných konstrukcích nutné, je vhodné opatřit povrch vsypem z otěruvzdorného materiálu.

MRAZUVZDORNOST

Mrazuvzdornost betonu se zvyšuje dodatečným provzdušněním betonu, kdy vzniklé drobné kulové póry v cementové matrici slouží pro vtláčování vody během vzniku ledových krystalů. Tím se snižuje hydrostatický tlak vznikající díky zvýšení objemu ledu. Stejně tak fungují póry v lehkém kamenivu.

Obecně lze konstatovat, že lehké betony jsou mrazuvzdorné. Norští vědci prokázali, že lehké betony s vyšší pevností vykazují stejnou nebo lepší mrazuvzdornost v porovnání s obyčejnými betony, a ve většině případů i bez dodatečného provzdušnění [11, 16].

Mrazuvzdornost lehkého betonu může být ale ovlivněna obsahem vody v lehkém kamenivu [17]. Neprovzdušněný lehký beton obsahující suché lehké kamenivo vykazuje vynikající mrazuvzdornost. Pokud lehký beton obsahuje v době zmrazování plně nasycené pórovité kamenivo, má to za následek velké trhliny uvnitř betonu, neboť vodou zaplněné póry neslouží jako volný prostor při tvorbě ledových krystalů. Na druhou stranu se plně nasycený beton neobjevuje v mnoha případech. Tato situace se např. řešila při výstavbě těžebních plošin na moři, které jsou navrženy z lehkého betonu. Při betonáži byl použit beton se suchým lehkým kamenivem a přidavkem mikrosiliky. Při zkoumání vlivu obsahu vlhkosti pórovitého kameniva na mrazuvzdornost bylo zjištěno, že pokud je stupeň nasycení vyšší než 90 %, má to za následek snížení mrazuvzdornosti [18].

Různé druhy lehkého kameniva se liší ve své kvalitě. Distribuce velikosti pórů a struktura pórů lehkého kameniva jsou důležité faktory ovlivňující schopnost jednotlivých zrn absorbovat vodu. Kamenivo s dostatečně velkými póry vyloučí snadno vodu během zmrazovacích cyklů, je tedy méně náchyl-

né k poškození oproti kamenivu s malými póry, které brání snadnému transportu vody.

CHEMICKÁ ODOLNOST – SULFATACE

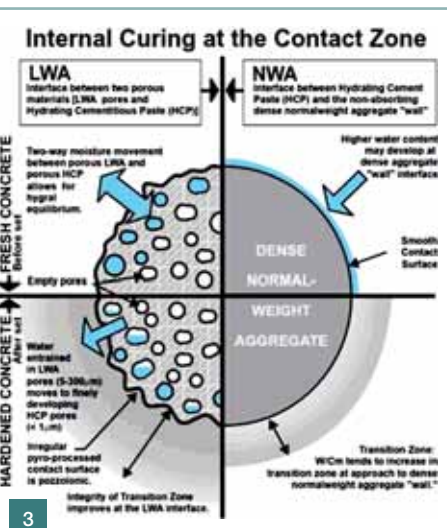
Chemická odolnost lehkého kameniva je obvykle stejně dobrá, ne-li lepší než přírodního kameniva. Zásadní je ovšem také kvalita cementové matrice.

Potencionální sírany se nejčastěji vyskytují v podzemních vodách. V minulosti existovaly některé technologické postupy při průmyslové výrobě lehkého kameniva, jejichž důsledkem byla přítomnost menšího množství síranů ve výsledném produktu. Síran reaguje s hydroxidem vápenatým v hydratované cementové pastě, což má za následek vznik trhlin v důsledku zvýšení objemu vzniklých novotvarů. Pokud by lehké kamenivo obsahovalo sírany, ty by mohly postupně pronikat do struktury cementové matrice a způsobit opožděný vznik ettringitu.

V posledních desetiletích se výrobní postupy zdokonalily tak, že lze konstatovat, že lehká kameniva v zásadě neobsahují sírany. Dlouhodobé experimenty prokazují, že lehký beton má v případě přítomnosti kvalitní cementové matrice dobrou odolnost proti pronikání síranových iontů. Problematika sulfatice je tedy shodná s obyčejnými betony.

ALKALICKO-KŘEMIČITÁ REAKCE

Podmínky nutné pro tvorbu ASR jsou: • vysoký obsah alkálií v betonu,



3

- množství oxidu křemičitého v kamenivu,
- dostupnost vody.

Kameniva na bázi expandovaného jílu a břidlice jsou nereaktivní. Např. lehké kamenivo na bázi expandovaného jílu vyráběné v ČR má následující odolnost vůči alkalicko-křemičité reakci: rozpínání po šesti měsících $\leq 0,02$ % (dilatometrická zkouška dle ČSN 721179).

Vzhledem k nedostatečné reaktivitě lehkého kameniva je nepravděpodobné, že by k ASR došlo i v případě, že by ostatní dva faktory byly přítomny. Samozřejmě v případě použití kombinace lehkého a přírodního kameniva se musí přihlídnout k případné reaktivnosti použitého přírodního kameniva.

ZÁVĚREČNÉ KOMENTÁŘE

Zvýšená odolnost a životnost lehkého betonu jsou dány zejména:

- vylepšenými vlastnostmi cementové matrice (propustnost) díky vnitřnímu samoošetřování,
- kvalitní kontaktní zónou mezi lehkým kamenivem a cementovou maticí,
- větší kompatibilitou modulu pružnosti lehkého kameniva a cementové matrice,
- sníženým rizikem vzniku trhlin v lehkém betonu díky omezenému smršťování.

Přestože je trvanlivost obyčejného betonu často korelována s pevností, u lehkého betonu tomu tak být nemusí, a to vzhledem k různým vlastnostem různých typů lehkých kameniv.

Nejzřetelnější rozdíl mezi lehkým a obyčejným betonem je v objemové hmotnosti. To je způsobeno tím, že při použití lehkého kameniva je obsah vzduchu v betonu výrazně vyšší.

Srovnává-li se životnost lehkého a obyčejného betonu o stejné pevnosti (či pevnostní třídě), je třeba mít na paměti, že se jedná o dvě různé směsi, které se budou pravděpodobně podstatně lišit v obsahu cementu a výši vodního součinitele. Navrhovat, vyrábět a ukládat lehký beton či obyčejný beton se stejnou pevností vyžaduje různé úrovně znalostí a dovedností.

U lehkého betonu se očekává nižší propustnost vzhledem ke kvalitní kontaktní zóně lehkého kameniva a cementového tmele, v důsledku vnitřního samoošetřování a díky pucolánovému charakteru materiálu lehkého kameniva, který umožňuje chemickou vazbu mezi kamenivem a cementovou pastou [19]. Lehký beton odolává chemické degradaci způsobené ASR či sulfa-

ci a vykazuje výbornou mrazuvzdornost.

Lehký beton vykazuje horší mechanickou odolnost danou měkkým lehkým kamenivem.

ZÁVĚR

Z uvedeného lze konstatovat, že u lehkého betonu je zásadní (stejně jako u obyčejného betonu) dosáhnout kvalitní hutné cementové matrice s minimem pórů, která zásadně ovlivňuje pronikání agresivních látek do betonu. Použitím lehkého pórovitého kameniva lze technologicky významně pozitivně ovlivnit hutnost cementové matrice a docílit tak vysoké trvanlivosti betonu. U betonu vyšších pevnostních tříd toho lze dosáhnout samozřejmě. V případě použití „méně hodnotných“ lehkých betonů (tj. betonů nízkých pevnostních tříd) to ale samozřejmě být nemusí.

Základní opatření, jak zabránit korozi výztuže v betonu, která udává nor-

ma ČSN EN 206-1/Z3, jsou více než dostatečná i pro lehké betony. V českých podmínkách (zejména vzhledem k surovinové základně lehkého kameniva) lze označit lehké betony od pevnostní třídy LC25/28 za lehké betony s velmi kvalitní cementovou maticí schopné odolávat vnějším agresivním činitelům. Toto tvrzení lze jednoduše podložit faktem: beton pevnosti 25 MPa a výš s použitím lehkého kameniva o pevnosti do 7 MPa s přidavkem drobného přírodního kameniva musí obsahovat velmi kvalitní cementovou maticí už jen z důvodu dosažení takového pevnosti.

Tento příspěvek vznikl v rámci řešení programu MPO TIP FR-T14/412.

Ing. Michala Hubertová, Ph.D., MBA

tel.: 777 740 014

e-mail: michala.hubertova

@gmail.com



Literatura:

- [1] Chandra S., Benstsson L.: *Lightweight Aggregate Concrete – Science, Technology and applications*, William Andrew Publishing/Noyes, 2002, p. 471, ISBN 978-0-8155-1486-2
- [2] Expanded Shale, Clay And Slate Institute (ESCSI) online na <http://www.escsi.org>
- [3] Lura P., Jensen O. M., Igarashi S. I.: *Experimental Observation of Internal Water Curing of Concrete*. Materials and Structures, 2007, 40, pp. 211–220
- [4] Weiss J., Bentz D., Schindler A., Lura P.: *Internal Curing – Constructing More Robust Concrete*, Structure Magazine, January 2012, pp. 10–14
- [5] Structural Engineer's Ass. of Kansas & Missouri, online na <http://www.seakm.com/>
- [6] EUROLIGHTCON – Economic design and construction with lightweight aggregate concrete. Online na <http://www.sintef.no>.
- [7] Henkensiefken R., Nantung T., Weiss J.: *Internal curing – from the laboratory to implementation*, LWC Bridges Workshop 2009 IBC 1, U.S. Concrete, San Jose, CA
- [8] www.liapor.com, www.liapor.cz
- [9] Hubertová M.: *Celosvětové trendy výzkumu a aplikací lehkého betonu s pórovitým kamenivem*, Sb. konf. Technologie betonu 2012, ČBS ČSSI, Praha, 2012
- [10] Smeplass S.: *Mechanical Properties – Lightweight Concrete*. Report 4.5, High Strength Concrete. SP4 – Materials Design, SINTEF 1992
- [11] Hammer T. A.: *High Strength Concrete Phase 3, SP4 Material Properties*, Rep. 4.1 Properties of Concrete with Solite and Lytag LWA, SINTEF Rep. STF70 A95020, Trondheim, Norway 1995
- [12] Příručka ESCSI's (Expanded Shale, Clay and Slate Institute; Chicago, USA) "Guide for Concrete Mixture Designs using Prewetted ESCS Lightweight Aggregates for Internal Curing", 2011
- [13] Smeplass S., Havdahl J.: *In Norwegian: Submerged Tube Bridge – Laboratory Investigation Permeability and Rebar Corrosion*, SINTEF Report STF65 A90004, Trondheim, Norway 1990
- [14] Schulze W., Günzler J.: *Corrosion protection of the reinforcement in lightweight concrete*. 1st Intern. Cong. on Lightweight Concrete, London 1968, Vol. 1, pp. 111–122
- [15] Wiegler H., Karl S.: *Creep of lightweight concrete on early loading*. Betonstein-Zeitung 35, No. 10/1969, pp. 584–592
- [16] Jacobsen S., Hammer T. A., Sellevold E. J.: *Frost testing high strength lightweight aggregate concrete: internal cracking vs scaling*. CEB/FIP Intern. Symp. on Structural Lightweight Aggregate Concrete, Sandefjord, Norway 1995, pp 541–554, (Editors: Holand I. et al.)
- [17] Osborne G. J.: *The durability of lightweight aggregate concretes after 10 years in marine and acid water environments*, CEB/FIP Intern. Symp. on Structural Lightweight Aggregate Concrete, Sandefjord, Norway 1995, pp. 590–603, Ed. Holand, I. et al.
- [18] Fujiki K., Kakizake M., Edahiro H., Unisuga Y., Yamamoto Y.: *Mixture proportions of high strength and high-fluidity lightweight concrete*, Proc. 4th. Int CANMET/ACI/JCI Symp. Advances in Concrete Technology, Tokushima 1998, Japan, pp. 407–420
- [19] Holm T. A., Ries J.: *Lightweight Concrete and Aggregates*. Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete Making Materials, STP 169D, ASTM Intern., West Conshohocken, PA, 2006, pp. 548–560