

LEHKÝ BETON Z PÓROVITÉHO KAMENIVA S ROZPTÝLENOU VYZTUŽÍ

Tereza Cibulka, *

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

ABSTRAKT

Betonové zdivo je poměrně levné díky široké dostupnosti kameniva používaného do výrobního procesu. Tato kameniva však nejsou vždy z hlediska materiálu vhodná pro použití do nosných konstrukcí. Obvyklým řešením problému křehké charakteristiky betonových prvků je přidání ocelové výztuže. Toto řešení však může být nákladné, velmi závislé na kvalitě provedení práce a zejména na kvalitě dostupné oceli. Možnou alternativou k betonářské výztuži se ukázalo přidání ocelových vláken do betonové směsi. Při přidání ocelových vláken do lehkého betonu s pórovitým kamenivem prokázaly výzkumy navýšení pevnosti v tahu, houževnatosti a duktility. Článek se věnuje problematice lehkého betonu s pórovitým kamenivem vyztuženého vlákny zejména z hlediska fyzikálních vlastností, se zvláštním zřetelem na vyztužení ocelovými drátky.

KLÍČOVÁ SLOVA

Lehký beton • Pórovité kamenivo • Vláknobeton • Vlákno • Drátky

ABSTRACT

Concrete masonry is relatively low in cost due to the wide availability of aggregates used in the production process. These aggregate materials are not always suitable for structural use. The common solution to the issue of brittle concrete element characteristics is addition of steel reinforcement. However, this solution can be expensive, highly dependent on the quality of the labour and especially on the quality of the available steel. A possible alternative to conventional steel reinforcement has proven to be the addition of steel fibres to the concrete mix. By adding steel fibres to lightweight aggregate concrete, research has shown an increase in flexural strength, toughness, and ductility. The paper deals with the topic of lightweight aggregate concrete reinforced with fibres, especially in terms of physical properties, with special regard to the reinforcement of steel fibres.

KEYWORDS

Lightweight concrete • Lightweight aggregate • Fibre reinforced concrete • Steel fibres

1. ÚVOD

Dnešní moderní lehký beton s pórovitým kamenivem je držen pohromadě pastou z portlandského cementu a vody [1]. Historicky bylo vlákno používáno jako vyztužný materiál zejména při výrobě cihel z bahna obsahujících slámu, žíně a další přírodní vlákna [2]. Lehký beton s pórovitým kamenivem vyztužený vlákny je relativně nový materiál [3]. Ačkoli lehký beton a vlákna byly již dříve používány ve stavebnictví, jejich použití v moderní době se datuje do druhé poloviny devatenáctého století. Avšak až později ve 20. století se používání a podrobné studium vlastností betonu s pórovitým kamenivem stalo významnějším. Toto nové pochopení chování vláknobetonu a rozvoje trhlin připravilo cestu pro vývoj nové technologie. Únosnější a lehčí betonové prvky umožňují snížení nákladů na výrobu, dopravu a zakládání staveb.

Po mnoho let byl lehký beton s pórovitým kamenivem (LWAC) používán pouze pro estetické nebo izolační účely. Důvodem byla jedna z hlavních nevýhod zjištěných u normálních i vysokopevnostních lehkých betonů: nízký poměr pevnosti v tahu k tlaku, nízká pevnost v ohybu, nízká lomová houževnatost, vysoká křehkost a velké smrštění [6]. Beton s lehkým kamenivem má navíc křehkou povahu a při působení vnějšího zatížení dochází k náhlému porušení při namáhání. Přidání vláken však umožní překonat problém spojený s křehkostí materiálu. Začlenění vláken do křehké cementové matrice slouží ke zvýšení lomové houževnatosti kompozitu procesem zachycení trhlin a ke zvýšení pevnosti v tahu a ohybu. Vláknobeton s pórovitým kamenivem (LWAFRC) selže pouze v případě, že se vlákna zpřetrhají nebo vytáhnou z cementové matrice v důsledku působení tahových sil. Pevnostní mechanika vláknobetonu, od stavu elastického před vznikem trhliny do stavu částečně plastického po jejím vzniku, je další zajímavou problematikou.

Obecně lze říci, že LWAFRC vzniká kombinací portlandského cementu, pórovitého kameniva, jako je pemza nebo expandované umělé jíly, ocelová vlákna, voda a další chemikálie používané ke zlepšení zpracovatelnosti a dalších mechanických vlastností. Přidání vláken do betonové směsi zlepšuje technické vlastnosti betonu: duktilitu, rázovou houževnatost a houževnatost [4, 5].

* Školitel: doc. Ing. Jan Vodička, CSc.

2. ROZDĚLENÍ

2.1. Pórovité kamenivo

Pórovité kamenivo je díky své struktuře nejdůležitější složkou při výrobě LWAC s relativně nízkou objemovou hmotností. Zahříváním určitých surovin, zejména jílu, se rozvíjí pórovitá struktura v částicích vznikajícím slynutím. Při této teplotě se uvnitř pyroklastické hmoty vyvíjejí plyny způsobující expanzi, která si po ochlazení zachovává určitý tvar. Toto rychlé chlazení vytváří dutiny nebo póry, které snižují objemovou hmotnost kameniva.

Pórovitá kameniva se dělí primárně na přírodní a vyráběné. Přírodní pórovitá kameniva, jako je pemza, pěnová vulkanická hornina, se vyskytují, když se láva vypuzovaná do vzduchu ze sopečného zdroje ochlazuje relativně rychle. Nejpoužívanější uměle vyrobené pórovité kamenivo se nazývá expandovaná hlína. Její výroba spočívá v ohřevu jílových částic v rotační peci.

Jednou z alternativ k těmto kamenivům z expandované hlíny je využití lehkých odpadních materiálů. Výsledkem je snížení celkových nákladů na stavbu i pevného odpadu. Jedním z takových materiálů jsou skořápky palmy olejná nebo skořápky palmových jader, materiál dostupný v obrovských množstvích v tropických oblastech.

2.2. Vlákna

Vyztužení vlákny může podstatně zvýšit absorpci energie a rázovou houževnatost betonu, což má za následek zlepšení duktility, poměru pevnosti v tahu a v tlaku, odolnosti proti popraskání a houževnatosti v lomu [6].

Ocelová vlákna lze definovat jako „krátkou nespojitou délku oceli s poměrem délka/průměr od přibližně 20 do 100, s jakýmkoli průřezem, a která je dostatečně malá a náhodně rozptýlená v nevytvrzené betonové směsi za použití obvyklých postupů míchání“ [7].

Klasifikace vláken [8]:

- Typ I – drát tažený za studena,
- Typ II – vlákna stříhaná z plechu,
- Typ III – vlákna oddělovaná z taveniny,
- Typ IV – vlákna protahovaná z drátu taženého za studena,
- Typ V – vlákna frézovaná z ocelových bloků.

V současné době existuje mnoho výztužných vláken z různých materiálů, která lze použít při výrobě LWAFRC včetně oceli, skla, polypropylenu, přírodního materiálu a dalších.

Přírodní vlákna vykazují mnoho výhodných vlastností jako výztuž pro kompozity, zejména významné snížení nákladů a tepelné vodivosti. Použití přírodních vláken by mohlo usnadnit při snižování a zachování energie, a tím chránit životní prostředí. Hlavní zdroje přírodních vláken pocházejí zejména z kokosových slupek, sisalu, vláknité dužiny z cukrové třtiny, bambusu, juty, dřeva, rákosu, banánu a celulózových vláken [9]. Nevýhodou přidávání přírodních vláken do betonové směsi je

snížení zpracovatelnosti kvůli vysokému množství vláken vedoucí k vysokému objemu zachyceného vzduchu. Podobně zahrnutí palmového vlákna vede k získání vyšší hustoty při 0,8% objemu vlákna. Tento přírůstek vláken poskytl optimální procento objemu vláken pro směs, ve které je přítomno malé množství vzduchových bublin. Nadměrné množství vlákna, 1% nebo více, vede ke snížení soudržnosti a rozpadu [9].

Stručně řečeno, vlákna zlepšují duktilitu betonu a zabraňují přetížení sekundární výztuže [10]. Zahrnutí vláken vyvíjí homogennější a izotropnější směs, která přeměňuje beton z křehkého na tvárnější materiál. Výzkumy ukázaly, že jednotková hmotnost betonu se ve skutečnosti zvyšuje se zvyšující se dávkou vláken [4].

3. FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI

Fyzikální vlastnosti LWAFRC závisí hlavně na vlastnostech kameniva, zejména na objemové hmotnosti, pevnosti vláken a vláknocementové vazbě. Jakékoli navýšení zmíněných komponent ovlivní konečnou pevnost produktu, zpracovatelnost, tažnost, objemovou hmotnost a fyzický vzhled. Lehký beton ve skutečnosti vyžaduje velké množství příčné výztužné oceli kvůli své křehké povaze [11]. Pevnost materiálu se zvyšuje s použitím expandovaných kamenných břidelic, zatímco přírodní kamenivo z pemzy nevykazovalo žádné podstatné zvýšení pevnosti.

3.1. Pevnost v tlaku

Způsob porušení LWAFRC matric závisí zejména na kamenivu, nikoli na cementovém pojivu. Mezi hlavní parametry experimentálního zkoušení pevnosti v tlaku patří objemové procento vláken, typ a objemový poměr příčné ocelové výztuže, tvar vzorku (hranol, krychle nebo válec) a délka vzorku. Kromě toho hlavní parametry ovlivňující výsledky zkoušky zahrnují omezení tření mezi zatěžovacími deskami, vzorky a přípustné pootočení zatěžovacích desek před a během zkoušky. Zatěžovací desky by měly být zafixovány proti otáčení, jakmile je aplikováno významné zatížení [11].

Přidání vláken zvyšuje maximální pevnost v tlaku LWAFRC s expandovaným jílem o 30 %. Beton vyrobený z pemzy se stejnými rozměry a velikostí nevykazoval žádné významné zvýšení pevnosti v tlaku. Zjištěná nízká pevnost byla výsledkem mechanismu vazby vlákna s matricí betonu a nízké pevnosti kameniva. Tato vazba závisí hlavně na kvalitě cementové malty a vlastnostech vláken. Beton s vyšší pevností poskytuje lepší spojení mezi vlákny a matricí. Ocelová vlákna se zahrnutým koncem navíc ovlivňují pevnost betonu v tlaku [12].

U vysokopevnostních LWAFRC vlákna významně nepřispívala k pevnosti v tlaku [13]. Dále nedochází k významnému zvýšení pevnosti v tlaku u samozhutitelného LWAFRC po přidání polypropylenových vláken [14]. Ocelová vlákna mají významný vliv na absorpci energie. Ve výsledku mají významný dopad na houževnatost v tlaku v LWAFRC, protože sestupná část křivky deformace závisí na přidání vláken [5].

3.2. Ohybová pevnost

Následující oblasti umožňují zlepšení díky přidání vláken do lehkého vysokopevnostního betonu [15]:

i) Pevnost v ohybu: proces lomu betonu vyztuženého ocelovými vlákny spočívá v postupném oddělování vláken, během kterého dochází k pomalému šíření trhlin. Ke konečnému selhání dochází v důsledku nestabilního šíření trhlin, když se vlákno vytáhne, a smykové napětí v místě porušení dosáhne konečné pevnosti spoje. Po vzniku trhlin bude vlákno nést zatížení, které beton nesl před popraskáním, prostřednictvím hraniční vazby mezi vláknem a matricí.

(ii) Ohybové zatížení: průhyb odpovídající výslednému zatížení se zvyšuje s nárůstem objemového podílu vláken a poměru stran, přičemž sestupná větev křivky pracovního diagramu se jemně snižuje po dosažení hodnot maximálního zatížení pro daný objemový podíl vláken a poměr stran.

(iii) Ohybová houževnatost: praskliny se nejprve vyskytují v lehkém kamenivu spíše než v cementovém tmelu při zatížení. Obecně lze říci, že vlákna sloužící k zachycení trhlin zvyšují klikatost vznikající trhliny. Proto přidání ocelových vláken do betonu účinně zlepšuje chování vysokopevnostního lehkého betonu vyztuženého ocelovými vlákny po vzniku trhliny.

U betonových směsí s vyšším poměrem ocelových vláken, v rozmezí 1 – 2 %, bylo pozorováno přetvárné zpevnění, čímž došlo ke zvýšení maximálního přetvoření odpovídajícímu okamžiku porušení. Při porušení zajišťují vlákna vysokou míru deformace bez výrazného snížení únosnosti. Pro pevnost v ohybu mělo přidání vláken za následek pomalé šíření trhlin a postupné oddělování vláken při vysokých úrovních napětí v čase po vzniku trhliny [12].

Navýšení pevnosti v ohybu v důsledku přidání vláken do lehkého betonu je poměrně ke zvětšením velikosti vzorku. Jak již bylo zmíněno, vláknová výztuž zvyšuje pevnost v tlaku a v tahu, stejně jako absorpci lomové energie, což do značné míry zlepšuje pevnost v ohybu LWAC [6].

3.3. Pevnost v příčném tahu

Mez pevnosti v příčném tahu válce se zvýšila u LWAC přidáním ocelových vláken. Mez pevnosti v příčném tahu u válců z LWAFRC je asi dvakrát vyšší než u prostého betonu a lehkého betonu. U vzorků s velikostí průměru od 76, 100, 150 a 200 mm se zvýšila mez pevnosti v příčném tahu o 134 %, 33 %, 12 % a 0 % u normálního betonu a 127 %, 165 %, 44 % a 29 % pro lehký beton [6]. Vyztužení vlákny významně zvyšuje pevnost v příčném tahu u LWAC [13].

3.4. Pevnost ve smyku

Přidání ocelového vlákna zlepšuje duktilitu a absorpci energie, která způsobuje tvárné porušení smykem. Přítomnost vláken snižuje veškeré deformace včetně průhybu, rotace desky, přetvoření betonu a přetvoření oceli ve všech fázích zatížení.

Účinky vláken jsou však patrné až po vzniku trhliny. Vlákna ku příkladu zpožďují rozvoj šikmého smykového popraskání v místě spojení sloupu s deskou. V důsledku toho se provozní zatížení lehké betonové desky vyztužené vlákny zvýší z 15 na 40 %, v závislosti na kritériu provozuschopnosti. Jedním z významných příspěvků vláken v deskách je eliminace křehké povahy desky. Tento proces vytváří plochu porušení, která je velmi nepravidelná. Lomové plochy ve vláknobetonu jsou podobné jako u spojů prostý beton - deska - sloup. [16].

Hlavní zvýšení pevnosti LWAC směsi je výsledkem kombinace vláken s betonářskou výztuží. Vlákna působí jako přemostovací prostředek mezi šikmými trhlinami vytvářenými místními tahovými silami v případě, že síla působící kolem tržmínků překročí pevnost betonu. Tento jev zvyšuje smykovou pevnost betonu mezi dvěma sousedními tržmínky [10].

3.5. Modul pružnosti

Pružné vlastnosti kameniva mají podstatný vliv na Youngův modul. Tento účinek nastává hlavně díky vazbě mezi částicemi kameniva a cementovým materiálem. Youngův modul pružnosti pro kompozitní materiály lze měřit několika modely [17].

Zvýšením poměru objemu vláken ve směsi se modul pružnosti zvýší přibližně o 30 %. Dále lze očekávat, že nahrazením pórovitého jemného kameniva pískem se zvýší modul pružnosti. Díky tomu vykazuje beton vyztužený vlákny tažnost po přidání hrubého pórovitého kameniva a vláken [18].

3.6. Hustota lehkého kameniva vyztuženého vlákny

Vzhledem ke křehké povaze LWAC závisí hustota lehkého betonu na množství a objemové hmotnosti použitého kameniva. Ukázalo se, že použití kameniva s vyšší objemovou hmotností významně zvyšuje pevnost betonu [12]. Konstrukční LWAFRC je o 20 – 30 % lehčí než běžný beton. V tomto ohledu je pojem „lehký“ relativní. Sypné hmotnosti LWAFRC se pohybují od 800 do 1400 kg / m³ [19]. Jednotková hmotnost betonu se snížila přidáním lehkých kameniv a zvýšila se přidáním vláken [4].

3.7. Zpracovatelnost

Lehké kamenivo vykazuje zvláštní vlastnosti díky své lehkosti a zahrnutí vnitřních dutin, které mohou zadržovat vodu a způsobit, že kamenivo během procesu míchání plave. Tyto jevy mají za následek pokles zpracovatelnosti betonové směsi. Podobně vlákna zapletená dohromady vytváří síťovou strukturu v betonové směsi, která brání segregaci lehkých agregátů. Kromě toho délka vláken vyžaduje k obalení vlákna více cementové pasty, což ovlivňuje viskozitu betonové směsi ovlivňující propad. Polypropylenová vlákna snížila propad asi o 20 %, zatímco ocelová vlákna snížila propad o 54 % [5, 20].

Charakteristiky zpracovatelnosti betonu vyztuženého ocelovými vlákny jsou složité; tvary vláken, poměr stran a objemový poměr jsou nejdůležitějšími faktory ovlivňujícími zpracovatelnost. Vlákno-betonové směsi byly hůře zpracovatelné než směsi bez vláken. Vlákno-betonové směsi s hladkými vlákny vykazují nejlepší kompatibilitu následovanou směsí s vlákny

s rozšířením na koncích. Směsi se zvlněnými a zahnutými vlákny vykazují menší kompatibilitu. Zahnutá vlákna ve skutečnosti vyžadují větší energii ke ztuhnutí. Ztuhitelnost LWAFRC směsí tedy závisí na tvaru a ploše povrchu vláken. Ztuhitelnost vláknobetonu klesá s rostoucí návrhovou pevností a klesá s rostoucím poměrem stran [21].

3.8. Smrštění vysycháním

Pokud má být použit predikční model pro konečné smrštění, je důležité vzít v úvahu vlastnosti pórovitého kameniva. Pórovité kamenivo ze slinutého popílku vykazuje dlouhodobé smrštění, které bylo téměř dvojnásobné oproti normálnímu betonu. Toto smrštění se zdá být výsledkem vysoké hodnoty objemu obsahu pasty z popílku. S poklesem modulu pružnosti betonu se zvyšuje hodnota smrštění [13].

Přidání vláken do betonové směsi nesnižilo smrštění v raném stádiu tuhnutí. Jak však beton tvrdne, s nárůstem stáří vykazuje, že vlákna omezují smršťování. Předpokládá se, že vyšší pevnost v tahu spolu s nízkým modulem pružnosti jsou účinné při redukci trhlin vzniklých v důsledku smršťování. U LWAFRC vykazují směsi obsahující uhlíková vlákna největší omezení smrštění [20]. Také použití kombinace uhlíkových a ocelových vláken v lehkých betonových směsích ukázalo nižší křehkost betonu a dále snížení smrštění [14].

3.9. Soudržnost vlákna s cementem

Když beton dosáhne svého maximálního zatížení a objeví se první porušení, vlákna překlenují šikmé trhliny, které se tvoří při překonání místní pevnosti betonu v tahu. Pevnost přemostovacího mechanismu bude záviset na síle vlákna nebo na kapacitě vazby mezi vláknem a betonovým tmelem. Vlákna zvyšují smykovou pevnost betonu. Výsledky ukázaly, že pokud se délka kotvení zvýší, zvýší se také extrakční síly podélných vláken. U cyklického zatížení experimentální výsledky ukazují, že k nejvyššímu znehodnocení dochází v prvním cyklu. Tento jev je částečně způsoben tím, že beton kolem výztuže je lokálně drcen tlakem, čímž se snižuje pevnost spoje [10].

Podstatné množství objemu vláken zaručuje správné překlenovací spojení mezi vlákny a betonovým tmelem. Požadované množství potřebných vláken se nazývá kritický objem vláken. Výše třetí soudržnosti a třetího povrchu závisí na množství a fyzikálních vlastnostech vláken.

3.10. Duktilita

Začlenění pórovitého kameniva do betonové směsi snižuje duktilitu betonu a současně zvyšuje křehkost materiálu. Zlepšení duktility je u LWAFRC výsledkem vynucené odolnosti proti popraskání díky překlenutí mezi jednotlivými betonovými vrstvami pomocí vláken. Zdánlivé přetvárné zpevnění, nebo vícenásobné popraskání v kompozitech vyztužených vlákny, nastává v následujícím pořadí: nejdříve se objeví mikrotrhliny a poté betonová matrice přenesení zatížení na vlákna. Vlákna vytvářejí přemostění a přenášejí zatížení zpět do betonu prostřednictvím vazby na rozhraní. Zatížení se v matici opět

hromadí a vytváří další paralelní trhlinu. Vlákna a betonová matrice tento proces opakují, dokud nedojde k vícenásobnému popraskání. Nakonec se vlákna vytáhnou nebo přetrhnou a způsobí kompletní selhání daného prvku. Objemový poměr vláken 1,5 % nebo vyšší dosáhl přetvárného zpevnění rychleji než frakce s nižším objemem vláken. Náhrada 10 – 20 % cementu popílkem a křemičitým úletem zlepšuje duktilitu a pevnost v ohybu lehkého vláknobetonu [22].

Přidání vláken do betonových směsí navyšuje u vzorků přetvoření a mez pevnosti. Stejným způsobem se značně zvyšuje kapacita přetvoření a deformační schopnost při navýšení objemu vláken z 0 % na 1,5 %. Toto zvýšení napětí definuje sestupnou část křivky pracovního diagramu [4].

Přidání vláken do křehkého lehkého betonu vede ke zvýšení tažnosti o 125% - 158% a ke zvýšení absorpce energie o 216% - 237% [16]. U vysokopevnostního LWAFRC je ohybová čára silně ovlivněna zavedením ocelových vláken; zvyšuje se s nárůstem objemového podílu vláken a poměru stran [15].

Duktilita LWAC při konstantním objemu vláken 1,5 % se zvyšuje, když je obsah pórovitého kameniva mezi 40 a 60 % ve směsi vzorků. Betonová směs s méně než 20% pórovitého kameniva však vykazovala taktéž dobrou duktilitu. Velké objemy pórovitého kameniva mezitím vedly ke slabé matici a nevhodnému rozložení vláken, což vedlo k předčasnému selhání vzorků [22].

3.11. Index houževnatosti

Houževnatost je důležitou charakteristikou vláknobetonu. Vlákna zvyšují svoji schopnost absorbovat energii a jsou vhodnější pro použití v konstrukcích vystavených nárazům a zemětřesení [20, 23].

Zvýšení obsahu vláken povede ke zvýšení indexu houževnatosti a odolnosti po vzniku trhlin. LWAFRC nosníky mohou vydržet velké zatížení a větší průhyby, což naznačuje přetvárné zpevnění. Vlákna o délce 50 mm vykazují největší nárůst houževnatosti. Velikost indexu houževnatosti u LWAFRC je velmi podobná hodnotě u normálního betonu shodné pevnosti [18].

Houževnatost LWAFRC nezávisí na velikosti vzorku. U vysokopevnostních LWAFRC klesá po dosažení meze pevnosti zatížení rychleji než u LWAFRC s normální pevností. Tato změna indexu houževnatosti naznačuje, že k dosažení podobné duktility pro vysokopevnostního a nízkopevnostního LWAFRC je potřeba zvýšení objemového podílu vláken nebo přidání vláken s vyšší pevností a zahnutými konci [6].

4. DISKUZE

Křehká povaha LWAC vede k náhlému a urychlenému selhání. Přidání vyztužujících vláken zlepšuje duktilitu lehkého betonu nebo normálního vysokopevnostního betonu. Kombinace lehkého betonu s betonářskou výztuží a ocelovými nebo polypropylenovými vlákny snižuje křehkost lehkého betonu. Přidání vláken do betonové směsi zlepšuje mechanické vlastnosti betonu, například duktilitu, rázovou houževnatost a

houževnatost. Dále zvyšuje maximální a zbytková třecí napětí. Jeho lehká charakteristika navíc činí tento beton užitečným při snižování stálého zatížení konstrukcí, což umožňuje přímé zmenšení velikosti základů, zejména v půdách s nízkou únosností. Díky nízké hmotnosti a vyšší duktilitě LWFRC jsou konstrukční prvky, jak žádoucí, tak nákladově efektivní. Dále LWFRC v prefabrikovaných betonových konstrukcích poskytuje prvky s vyšší pevností a usnadňuje přepravu. Správně navržený nenosný LWAC vyztužený vlákny lze pro dekorativní nebo izolační účely snadno řezat a připevňovat jako dřevo.

5. ZÁVĚR

Přidaná vlákna mohou být použita jako náhrada za požadovanou příčnou výztuž, kde je potřeba velké množství ocelové omezující výztuže. Použití vláken může snížit jak váhu, tak náklady na konstrukci. Použití LWFRC směsi se liší v závislosti na požadované pevnosti, zpracovatelnosti, ceně a proveditelnosti. Křehká povaha LWAC vede k náhlému porušení a přidání výztuže zvyšuje duktilitu LWFRC. Primárním využitím vláknobetonu je zlepšení tahové pevnosti, odolnosti proti popraskání a lomové houževnatosti.

PODĚKOVÁNÍ

Príspevek vznikl za finanční podpory ČVUT v Praze v rámci projektu SGS18/115/OHK1/2T/11. Tímto bych chtěla poděkovat svému školiteli panu doc. Ing. J. Vodičkovi, CSc.

Reference

[1] Furouhi, F., Tehrani, F. M. & Zand, A. (1996), Two macro-economic viewpoints on light concrete application effect on national economic development, in 'Ravesh (Industrial Engineering) Magazine', vol. 6, no. 35, pp. 9–11.

[2] Woody Ju, J. & Tehrani, F. M. (2008), Macro-element modeling of steel fiber-reinforced concrete, in 'ACI Spring 2008 Convention: Multi-Scale Descriptions of Concrete Performance', ACI Committee 236, Material Science of Concrete, USA.

[3] McComb, C. & Tehrani, F. M. (2015), Enhancement of shear transfer in composite deck with mechanical fasteners, in 'Engineering Structures', vol. 88, no. 1, pp. 251–261.

[4] Düzgün, O. A., Gül, R. & Aydın, A. C. (2005), Effect of steel fibers on the mechanical properties of natural lightweight aggregate concrete, in 'Materials Letters', vol. 59, no. 27, pp. 3357–3363.

[5] Libre, N. L., Shekarchi, M., Mahoutian, M. & Soroushian, P. (2011), Mechanical properties of hybrid fiber-reinforced lightweight aggregate concrete made with natural pumice, in 'Construction and Building Materials', vol. 25, no. 5, pp. 2458–2464.

[6] Belendran, R. V., Zhou, F. P., Nadeem, A. & Leung, A. Y. T. (2002), Influence of steel fibers on strength and ductility of normal and lightweight high strength concrete, in 'Building and Environment', vol. 37, no. 12, pp. 1361–1367.

[7] ACI Committee 554 (1973), State-of-the-art report on fiber reinforced concrete, in 'ACI Journal Proceedings', vol. 70, no. 11.

[8] Svaz výrobců betonu ČR (navštíveno 2020), Ocelová vlákna do betonu, dostupné: <http://www.ebeton.cz/pojmy/ocelova-vlakna-do-betonu>.

[9] Ramli, M. & Dawood, E. T., (2010), Effects of palm fiber on the mechanical properties of lightweight concrete crushed brick, in 'American Journal of Engineering and Applied Sciences', vol. 3, no. 2, pp. 489–493.

[10] Campione, G., Cucchiara, L., La Mendola, L. & Papia, M. (2005), Steel-concrete bond in lightweight fiber reinforced concrete under monotonic and cyclic actions, in 'Engineering Structures', vol. 27, no. 6, pp. 881–890.

[11] Campione, G. & La Mendola, L. (2004), Behavior of compression of lightweight fiber reinforced concrete with transverse steel reinforcement, in 'Cement and Concrete Composite', vol. 26,

no. 6, pp. 645–656.

[12] Campione, G., Miraglia, N. & Papia, M. (2001), Mechanical properties of steel fiber reinforced lightweight concrete with pumice stone or expanded clay aggregates, in 'Materials and Structures', vol. 34, no. 4, pp. 201–210.

[13] Kayali, O., Haque, M. N. & Zhu, B. (1999), Drying shrinkage of fiber-reinforced lightweight aggregate concrete containing fly ash, in 'Cement and Concrete Research', vol. 29, no. 11, pp. 1835–1840.

[14] Mazaheripour, H., Ghanbarpour, S., Mirmoradi, S. H. & Hosseinpour, I. (2011), The effect of polypropylene fibers on the properties of fresh and hardened lightweight self-compacting concrete, in 'Construction and Building Materials', vol. 25, no. 1,

pp. 351–358.

[15] Gao, J., Sun, W. & Morino, K. (1997), Mechanical properties of steel fiber-reinforced high-strength, lightweight concrete, in 'Cement and Concrete Composites', vol. 19, no. 4, pp. 307–313.

[16] Theodorakopoulos, D. D. & Swamy, N. (1993), Contribution of steel fibers to the strength characteristics of lightweight concrete slab-column connections failing in punching shear, in 'ACI Structural Journal', vol. 90, no. 4.

[17] Kurugol, S., Tanacan, L. & Ersoy, H. Y. (2008), Young's modulus of fiber-reinforced and polymer-modify lightweight concrete composites, in 'Construction and Building Materials', vol. 22, no. 6, pp. 1019–1028.

[18] Balaguru, P. & Foden, A. (1996), Properties of fiber reinforced structural lightweight concrete, in 'ACI Structural Journal', vol. 93, no. 1, pp. 62–78.

[19] Shi, C., Wu, Y. & Riefler, M. (2005), Properties of fiber-reinforced lightweight concrete, in 'ACI Special Publication', vol. 226, pp. 123–134.

[20] Chen, B. & Liu, J. (2004), Contribution of hybrid fibers on the properties of the high-strength lightweight concrete having good workability, in 'Cement and Concrete Research', vol. 35, no. 5, pp. 913–917.

[21] Swamy, R. N. & Jojagha, A. H. (1982), Workability of steel fiber reinforced lightweight aggregate concrete, in 'International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete', vol. 4, no. 2, pp. 103–109.

[22] Arisoy, B. & Wu, H.-C. (2008), Material characteristics of lightweight, high-performance concrete reinforced with PVA, in 'Construction and Building Materials', vol. 22, no. 4, pp. 635–645.

[23] Kim, Y.-J., Hu, J., Lee, S.-J. & You, B.-H. (2010), Mechanical properties of fiber reinforced lightweight concrete containing surfactant, in 'Advances in Civil Engineering', article ID 549642, 8 pages.