

VLIV MIKROSILIKY A POPÍLKU NA MIKROSTRUKTURU A MIKROMECHANICKÉ VLASTNOTI HPC ■ EFFECT OF MICROSILICA AND FLY ASH ON THE MICRO-STRUCTURE AND MICROMECHANICAL PROPERTIES OF HPC

Vladimír Hrbek, Zdenek Prošek,
Roman Chylík, Lukáš Vráblík

Príspevek se zabývá vlivem příměsí do betonu, jako jsou mikrosilika a popílek, na cementovou matici vyšetřením na mikroskopické úrovni materiálu. Zkoumán je především dopad příměsí na mikrostrukturu a mechanické vlastnosti jednotlivých fází cementové matrice a interakci matrice s kamenivem. Náhradou určitého množství cementu za příměsí ve směsích pro výrobu vysokohodnotného betonu je možné sledovat jejich efektivitu pro praktické použití. ■ The article deals with the influence of supplementary cementitious materials (SCM), such as microsilica and fly ash, on a cement matrix, via investigation of the material on microscopic level. The most important impact of the SCM on the microstructure and the mechanical properties of the individual phases of the cement matrix and the interaction of the matrix with the aggregate are investigated. By replacing a certain amount of cement with admixtures in high performance concrete mixtures, their effectiveness can be monitored for practical use.

S rostoucími požadavky na trvanlivost konstrukcí, trvale udržitelný rozvoj, redukci nákladů staveb a zlepšení vlastností stavebních materiálů se dostává do popředí využití vysokohodnotného betonu (HPC – high-performance concrete). Oproti běžnému betonu jsou ke standardním složkám do směsi zakomponovány příměsí, jako jsou mikrosilika a popílek, které zajišťují dosažení specifických vlastností betonu.

Mikrosilika je z chemického hlediska amorfni oxid křemičitý (SiO_2) kulovitého tvaru s průměrnou velikostí částic v řádech nanometrů (např. průměrná velikost částic cementu CEM 42,5 R – Mokrý je 34 μm). Vzniká jako vedlejší produkt výroby elementárního křemíku a slitin železa. Vzhledem ke své velikosti vyplňují částice mikrosiliky prostor mezi zrny cementu, což má za následek snížení potřeby vody a jejího odměšování. To vede ke snížení vodního součinitele směsi a zlepšení její zpracovatelnosti v čerstvém stavu. Na úrovni kompozitu pak mají zrna mikrosiliky funkci mikroskopického plniva v pórech C-S-H gelu. Z makroskopického hlediska tak

zvyšují pevnost a odolnost kompozitu, snižují pronikání iontů do matrice, zlepšují mrazuvzdornost apod. [1], [2], [3].

Termínem popílek se označují jemné sférické částice velikosti 0,5 až 300 μm , které vznikají jako vedlejší energetický produkt při spalování uhlí. Jejich chemické složení vykazuje značná množství amorfniho i krystalického oxidu křemičitého (SiO_2), oxidu hlinitého (Al_2O_3) a oxidu vápenatého (CaO). Obsah stopových množství dalších prvků (jako např. hořčík, kadmium, chrom, olovo, rtuť apod.) je závislý na typu spalovaného uhlí. Obecně se pak popílek rozděluje podle své pucolánové aktivity (dělení dle ASTM C618) nebo obsahu oxidu vápenatého – CaO (dělení dle EN 451-1). Národní ČSN EN 197-1 dělí popílek na základě chemického složení na křemičité (V) a vápenaté (W).

Křemičitý popílek obsahuje zejména aktivní oxid křemičitý (SiO_2) a oxid hlinitý (Al_2O_3), přičemž obsah aktivního SiO_2 musí být vyšší než 25 % hmotnosti. Dále obsahuje aktivní oxid vápenatý (< 10 % hmotnosti), přičemž obsah volného oxidu vápenatého nesmí být vyšší než 1 % hmotnosti. Popílek vykazuje pucolánovou aktivitu (reakcí s přítomným $\text{Ca}(\text{OH})_2$, vznikajícím hydratací cementu, vytváří hydratované křemičitany a hlinitané vápenaté) a v počáteční fázi hydratace jeho zrna slouží jako nukleační centra krystalizace hydratačních produktů. Náhradou části cementu popílkem dochází ke snížení množství hydratačního tepla při reakci cementu s vodou, pomalejší vývoj pevnosti v raném období betonu je způsoben pomalejší reakcí popílek (pucolánovou reakcí).

Vápenatý popílek obsahuje 10 až 15 % hm. aktivního oxidu vápenatého (CaO) a více než 25 % aktivního SiO_2 . Oproti křemičitému popílkou obsahuje vyšší koncentrace alkálií a síranů a má sám o sobě hydraulické nebo pucolánové vlastnosti (nebo oboje), tzn. k vytvoření hydratačních produktů využívá oxid vápenatý (po smísení s vodou hydroxid vápenatý) k vlastní hydraulické nebo pucolánové reakci. Z makroskopického hlediska se betonu s obsahem tohoto popílek vyznačují

pozvolným, dlouhodobým nárůstem pevnosti a zvýšenou chemickou odolností a mrazuvzdorností [4], [5].

SLOŽENÍ SMĚSÍ A PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ

Pro účely výzkumu byly zvoleny tři základní skupiny vzorků vysokohodnotného betonu. První, referenční směs byla složena z pojivové složky (CEM I 42,5 R – Mokrý), plniva (drcené neprané čedičové kamenivo zrnitosti 0–4, 4–8 a 8–16 mm), vody a plastifikátoru na bázi polykarbonátů (Stachement 508, Stachema). Konkrétní charakteristiky použitého cementu a přísad, jakož i složení směsí, lze najít v souvisejícím článku autorů Fládra a kol. na str. 44. Druhá a třetí skupina vzorků je alternativou referenční směsi s 10% náhradou cementu danou příměsí.

Vzorky (krychle o délce hrany 100 mm) byly uchovány po dobu 14 dní ve vodní lázni v laboratorních podmínkách (20 až 25 °C) pro zajištění adekvátní hydratace cementové matrice kompozitu a omezení reologických změn a degračních procesů materiálu. Následně byly vzorky připraveny pro účely elektronové mikroskopie a indentace pomocí brusných a leštících médií. Vzhledem k heterogenitě kompozitu a vlastnostem jednotlivých složek (odlišné tvrdosti a brusnosti) byla zvolena metoda s omezením selektivního odbrušování jednotlivých fází. Jejím použitím byla zajištěna nízká drsnost povrchu vzorků i kompaktní přechodová zóna mezi kamenivem a maticí vzorků [6], [7].

METODIKA MĚŘENÍ A ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ

Mikromechanické vlastnosti připravených vysokohodnotných betonových kompozitů a mikrostruktura byly zkoumány pomocí dvou vzájemně nezávislých metod, plošné nanoindentace a skenovací elektronové mikroskopie (SEM). Data z jednotlivých měření byla následně zpracována pomocí dvou numerických metod (metodika a zpracování jsou uvedeny dále v článku). Obě metody byly použity na dvou základních úrovních materiálu (obr. 1): – maticí (bez čedičového kameniva) a přechodové oblasti