

文章编号:1007-9629(2022)01-0024-07

矿渣粉对钢纤维自密实混凝土性能的影响

赵 云¹, 毕继红^{1,2,*}, 王照耀¹, 霍琳颖¹, 段逸辰¹

(1. 天津大学 建筑工程学院 天津 300072;

2. 天津大学 滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室 天津 300072)

摘要:研究了矿渣粉掺量对钢纤维自密实混凝土(SFRSCC)工作性能和力学性能的影响,并从微观层面阐释钢纤维和矿渣粉对混凝土基体的增强作用.结果表明:采用10%掺量的矿渣粉代替水泥能有效提高新拌混凝土的工作性能,增加钢纤维体积分数会减弱自密实混凝土的工作性能;矿渣粉与钢纤维的协同作用能够显著提高混凝土的抗压强度、劈裂抗拉强度和抗折强度;采用矿渣粉替代水泥有助于生成更致密的微观结构.

关键词:端钩钢纤维;自密实混凝土;工作性能;矿渣粉;微观结构

中图分类号:TU528.01

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2022.01.004

Influence of Granulated Blast Furnace Slag on the Properties of Steel Fiber Reinforced Self-compacting Concrete

ZHAO Yun¹, BI Jihong^{1,2,*}, WANG Zhaoyao¹, HUO Linying¹, DUAN Yichen¹

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Key Laboratory of Coast Civil Structure Safety of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The effect of the content of blast furnace slag on the workability and mechanical properties of steel fiber reinforced self-compacting concrete (SFRSCC) was studied. The strengthening effect of steel fiber and blast furnace slag on the concrete matrix was explained in a view of microstructure level. The results show that substituting 10% cement with blast furnace slag can effectively improve the workability of fresh concrete, while increasing fiber volume fraction can obviously weaken the workability of self-compacting concrete. The synergistic effect of blast furnace slag and steel fiber can significantly improve the compressive strength, splitting tensile strength and flexural strength of hardened concrete. Replacing cement with blast furnace slag is efficient to generate a denser microstructure.

Key words: hooked steel fiber; self-compacting concrete; workability; blast furnace slag; microstructure

与普通混凝土相比,自密实混凝土(SCC)的制备要消耗更多的粉体材料.为了满足混凝土的自密实要求,通常需要使用500~600 kg/m³的粉体材料^[1].若只将水泥作为粉体材料,势必会有大量的CO₂释放到大气中,加速温室效应,而使用矿物掺和料部分替代水泥^[2-5],可有效减少温室气体的排放,因此在SCC中添加矿物掺和料已成为当前混凝土领域的研究热

点之一.

SCC与普通混凝土相似,具有抗拉强度低的缺点,而纤维能显著限制混凝土微裂缝的形成与发展^[6-11],因此,研究人员尝试采用不同类型的纤维来提高SCC的力学性能.吴涛等^[10]研究发现钢纤维与聚丙烯纤维的协同效应能有效提高自密实轻骨料混凝土的劈裂抗拉强度和抗折强度.Mastali等^[11]研究

收稿日期:2020-09-21; 修订日期:2020-10-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51227006)

第一作者:赵 云(1994—),男,河北张家口人,天津大学博士生. E-mail:tjuzhao1994@163.com

通讯作者:毕继红(1965—),女,江苏宜兴人,天津大学教授,博士生导师,博士. E-mail:jihongbi@163.com

发现添加体积分数0.75%的再生钢纤维能显著提高SCC的力学性能,但也会明显降低SCC的工作性能。

目前,关于同时将矿物掺和料及纤维纳入影响因素的研究仍旧较少.因此,本文以矿渣粉掺量和钢纤维体积分数作为变量,通过开展工作性能、力学性能和微观结构分析等试验,研究矿渣粉对钢纤维自密实混凝土(SFRSCC)性能的影响,从而为含有矿物掺和料SFRSCC的研究和实际应用提供数据参考。

1 试验

1.1 原材料

水泥(C)为大同冀东水泥有限公司生产的P·O 42.5普通硅酸盐水泥,表观密度为3 150 kg/m³;粉煤灰(FA)为张家口电厂生产的二级粉煤灰(FA),表观密度为2 300 kg/m³;矿渣粉(SL)为张家口燎原水泥有限公司提供的磨碎粒状高炉矿渣粉,比表面积为4 300 cm²/g,活性指数为106;细骨料(FAG)为粒径小于2.35 mm的普通水洗河砂,细度模数为2.58,表观密度为2 612 g/cm³,含水率¹⁾为1.0%;粗骨料(CAG)为粒径4.75~10 mm的连续级配砾石,表观密度为2 609 g/cm³,含水率为0.3%;钢纤维(SF)为河北玉田县致泰钢纤维制造有限公司提供的端钩型钢纤维,长度为35 mm,直径为0.75 mm,横截面为圆形;外加剂(SP)为张家口海峰新型建材有限公司提供的高效聚羧酸减水剂,减水率为30%,在使用前对减水剂进行稀释;拌和水(W)为普通自来水。

1.2 配合比设计

为了体现矿渣粉对SCC性能的影响和防止SCC发生离析^[3],选取胶凝材料总质量的10%和30%这2种常用的矿渣粉掺量 w_{SL} .钢纤维的体积分数 φ_{SF} 为0.3%、0.6%和0.9%,水胶比固定为0.37, $m_w:m_{FAG}:m_{CAG}=198:783:784$,SFRSCC的配合比见表1.试件编号F0.9S10是指钢纤维体积分数为0.9%、矿渣粉掺量为10%的SFRSCC,其他类推;F0S0为对照组.SFRSCC的拌制流程见图1,其中0.5W为W用量的50%,其他类推。

表1 SFRSCC的配合比
Table 1 Mix proportions of SFRSCC

SFRSCC	Mix proportion/(kg·m ⁻³)				$\varphi_{SF}/\%$
	C	FA	SL	SP	
F0S0	428.00	107.00	0	11.77	0
F0.3S0	428.00	107.00	0	11.77	0.3
F0.6S0	428.00	107.00	0	11.77	0.6
F0.9S0	428.00	107.00	0	11.77	0.9
F0S10	374.00	107.00	54.00	11.24	0
F0.3S10	374.00	107.00	54.00	11.24	0.3
F0.6S10	374.00	107.00	54.00	11.24	0.6
F0.9S10	374.00	107.00	54.00	11.24	0.9
F0S30	267.00	107.00	161.00	9.63	0
F0.3S30	267.00	107.00	161.00	9.63	0.3
F0.6S30	267.00	107.00	161.00	9.63	0.6
F0.9S30	267.00	107.00	161.00	9.63	0.9

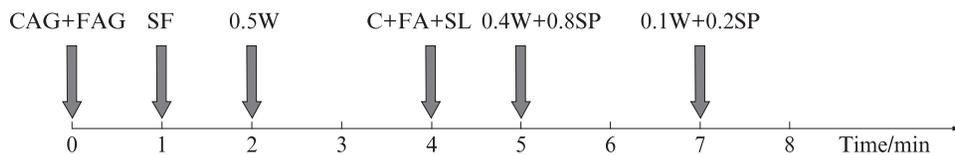


图1 SFRSCC的拌制流程
Fig. 1 Mix procedure of SFRSCC

1.3 试验方法

1.3.1 工作性能测试

根据JGJ/T 283—2012《自密实混凝土应用技术规程》的规定,分别用Abram型坍落度桶、V型漏斗和L型箱测试SFRSCC的工作性能.在测试过程中,记录SFRSCC停止流动时的坍落扩展度 D ,用于表征SFRSCC的流动性;记录SFRSCC扩展度达到500 mm时所需的坍落流动时间 T_{500} 和全部穿过V型

漏斗的流动时间 T_v ,用于表征SFRSCC的黏聚性;测量并计算L型箱的两末端混凝土的高度比 H_2/H_1 ,用于表征SFRSCC混合物的间隙穿过能力。

1.3.2 力学性能测试

根据GB/T 50081—2002《普通混凝土力学性能试验方法标准》,分别用100 mm×100 mm×100 mm、150 mm×150 mm×150 mm和100 mm×100 mm×400 mm的试件测试混凝土的抗压强度、劈裂抗拉强

1) 文中涉及的含水率、掺量、水胶比等除特殊说明外均为质量分数或质量比。

度和抗折强度.

1.3.3 微观结构测试

取28 d龄期F0.9S0和F0.9S30试件抗折断裂区域部位露出的纤维,对纤维进行相应的处理,并将其制成测试试样.采用配备EDS的JSM-7800型发射扫描电子显微镜(SEM)对纤维和附着在纤维上的混凝土基体进行微观结构测试.

2 结果与讨论

2.1 工作性能

2.1.1 坍落扩展度

SFRSCC的坍落扩展度见图2.由图2可见:SFRSCC的坍落扩展度为652~760 mm;当纤维体积分数不变时,SFRSCC的坍落扩展度随着矿渣粉掺量的增加呈先增大后减小的趋势;尽管F0S10中的减水剂用量略小于F0S0,但其扩展度仍大于F0S0,这主要是由于采用适量矿渣粉替代水泥能显著提高SCC的流动性;当矿渣粉掺量从10%增加到30%时,SFRSCC的扩展度骤减,引起这一变化的主要原因是F0S30的减水剂用量小于F0S0和F0S10,而降低F0S30中减水剂用量的主要目的是防止其发生泌水和离析;SFRSCC的扩展度随着纤维体积分数的增加而显著减小,这是由于纤维的加入会导致混凝土黏度显著增加;在SCC中添加矿渣粉能减弱由钢纤维导致的扩展度下降幅度,其原因

可能是矿渣粉替代水泥会增加浆体的体积,增加SCC的流动能力.

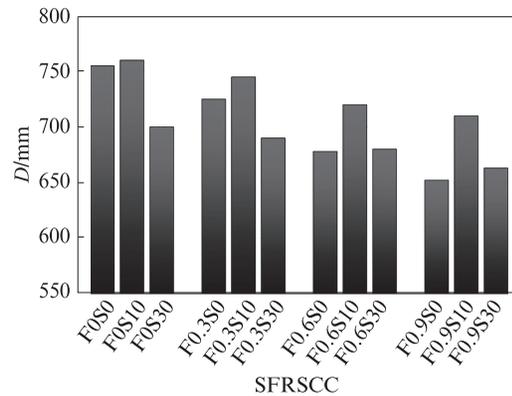


图2 SFRSCC的坍落扩展度

Fig. 2 Slump flow diameter of SFRSCC

2.1.2 流动时间

SFRSCC的坍落流动时间和V型漏斗流动时间见图3.由图3可见:SFRSCC的坍落流动时间 T_{500} 和V型漏斗流动时间 T_v 分别为3.0~6.5、7.3~17.4 s;与坍落扩展度的变化规律相反,当纤维体积分数保持恒定时, T_{500} 和 T_v 均呈先减小后增大的趋势; T_{500} 和 T_v 均随纤维体积分数的增加而增加,这是因为流动时间与混凝土的黏度有关,而钢纤维的掺入导致混凝土黏度显著上升;对F0.9S30,同时掺入30%的矿渣粉和体积分数0.9%的钢纤维,其 T_{500} 和 T_v 增幅最大,与对照组相比,其 T_{500} 、 T_v 分别增加了约97%、98%.

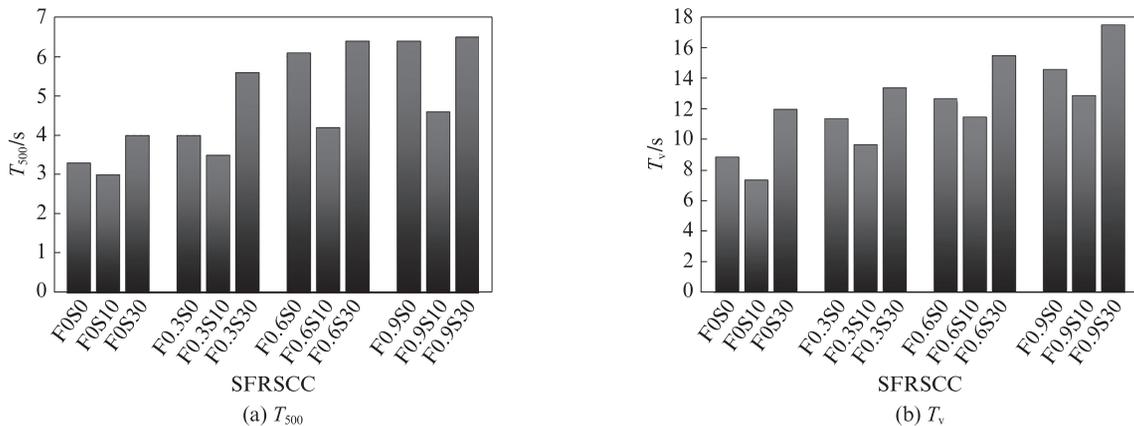


图3 SFRSCC的坍落流动时间和V型漏斗流动时间

Fig. 3 T_{500} and T_v of SFRSCC

2.1.3 高度比 H_2/H_1

SFRSCC的L型箱两末端混凝土的高度比(H_2/H_1)见图4.由图4可见:SFRSCC的 H_2/H_1 为0.50~0.94,只有一部分SFRSCC的 H_2/H_1 在EFNARC《Specification and guidelines for self-compacting concrete》建议的范

围内(0.8~1.0);当纤维体积分数保持不变时,随着矿渣粉掺量从0%增加到10%, H_2/H_1 略有增加,这表明使用少量矿渣粉替代水泥有助于提高SCC的间隙通过能力,当矿渣粉掺量从10%增加到30%, H_2/H_1 降低,SCC的间隙通过能力降低,其原因可能是较高的矿

渣粉掺量会导致SFRSCC的黏度升高;钢纤维体积分数的增加同样会导致 H_2/H_1 降低,这是因为SFRSCC的黏度以及纤维互相搭接的可能性随着纤维体积分数的增加而增加。

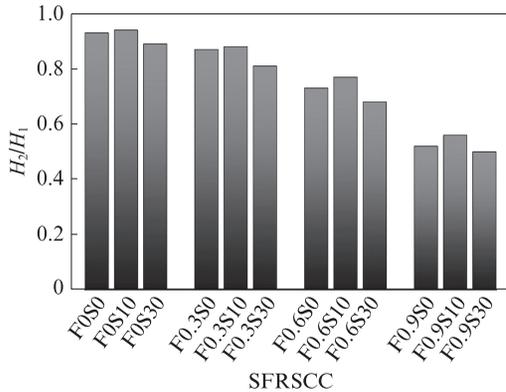


图4 SFRSCC的L型箱两末端混凝土的高度比
Fig. 4 H_2/H_1 of concrete at two ends of L-box of SFRSCC

2.2 力学性能

2.2.1 抗压强度

SFRSCC的抗压强度见图5。由图5可见:SFRSCC的7、28 d抗压强度分别为35.0~46.6、48.4~63.5 MPa;F0.9S0的7 d抗压强度最高,比F0S0高12.0%;F0.9S30的28 d抗压强度最高,比F0S0高31.2%;当纤维体积分数不变时,随着矿渣粉的掺量从0%增加到30%,SFRSCC的7 d抗压强度降低,28 d的抗压强度增大。抗压强度的提高可归结于2个主要因素:(1)矿渣粉的比表面积较大,它与水泥水化过程中产生的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应,生成更多的水化硅酸钙(C-S-H)凝胶,降低了混凝土基体的孔隙率,并增强了浆体与骨料之间的黏结,从而增加SCC的抗压强度;(2)矿渣粉中的 SiO_2 含量高于水泥,这也会提高SCC的抗压强度。Nazari等^[12]指出适量的纳米 SiO_2 可以改善SCC的力学性能(包括抗压强度

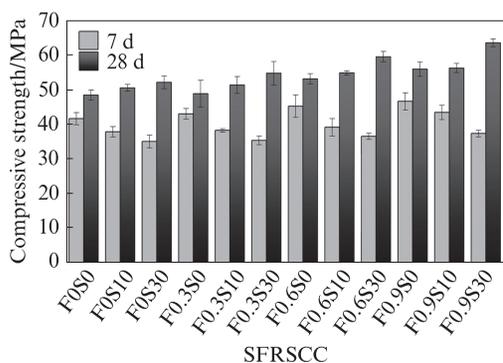


图5 SFRSCC的抗压强度
Fig. 5 Compressive strength of SFRSCC

和抗弯强度)。

由图5还可见:在SCC中添加端钩钢纤维可增加其7、28 d抗压强度;SFRSCC的抗压强度随着纤维体积分数的增大而增大,这主要是因为混凝土开裂过程中,钢纤维能够通过改变裂缝扩展方向的方式有效缓解裂缝顶端的应力集中程度,从而阻止裂缝的进一步发展,且钢纤维可通过与混凝土基体之间的界面黏结力共同承担施加的荷载,端钩钢纤维的弯钩更加提高了两者之间的黏结力;F0.9S30的28 d抗压强度比F0S30提高了约21.9%,而F0.9S0的28 d抗压强度比F0S0提高了约15.5%,表明矿渣粉能够增强钢纤维与混凝土之间的界面黏结性能。

2.2.2 劈裂抗拉强度和抗折强度

SFRSCC的28 d劈裂抗拉强度和抗折强度见图6。由图6可见:SFRSCC的28 d劈裂抗拉强度和抗折强度分别为4.2~6.4、3.3~7.8 MPa;与纤维体积分数和矿渣粉掺量对SCC抗压强度的影响类似,用矿渣粉替代水泥和添加端钩钢纤维都会增大SFRSCC的劈裂抗拉强度和抗折强度,这是因为在混凝土开始出现微裂缝时,跨裂缝的钢纤维会与混凝土基体共同承担拉力,钢纤维的掺入能有效提升SCC的劈裂抗拉强度和抗折强度;纤维体积分数的增加使穿过裂缝的纤维数量增加,从而进一步提升了SCC的强度;将矿渣粉添加到掺有钢纤维的SCC混合物中,矿渣粉能增强骨料与净浆、纤维与基体界面的黏结性能,从而提高其劈裂抗拉强度和抗折强度;同时掺入30%的矿渣粉和体积分数0.9%的钢纤维的F0.9S30表现出最高的劈裂抗拉强度和抗折强度,比对照组F0S0分别提高了约52.4%、136.4%,这也说明了钢纤维对SCC劈裂抗拉强度和抗折强度的提升作用明显强于其对抗压强度。从劈裂抗拉强度和抗折强度的结果来看,矿渣粉与纤维的协同作用在抗折试验中体现得更为明显。

2.3 SEM微观分析

28 d龄期时,钢纤维从F0.9S0和F0.9S30试件中拔出后的SEM照片见图7。由图7可见:从混凝土基体拔出后,钢纤维表面都附着了大量的水化物,表明钢纤维与基体之间具有良好的黏结性能;钢纤维表面存在许多拔出过程中与基体骨料摩擦而产生的划痕,这可能也增强了纤维与基体之间的黏结性能^[13],从而提高了钢纤维混凝土的劈裂抗拉强度和抗折强度。

F0.9S0和F0.9S30中附着在钢纤维表面基体的SEM照片和EDS分析见图8、9,其中图8(c)、图9(c)

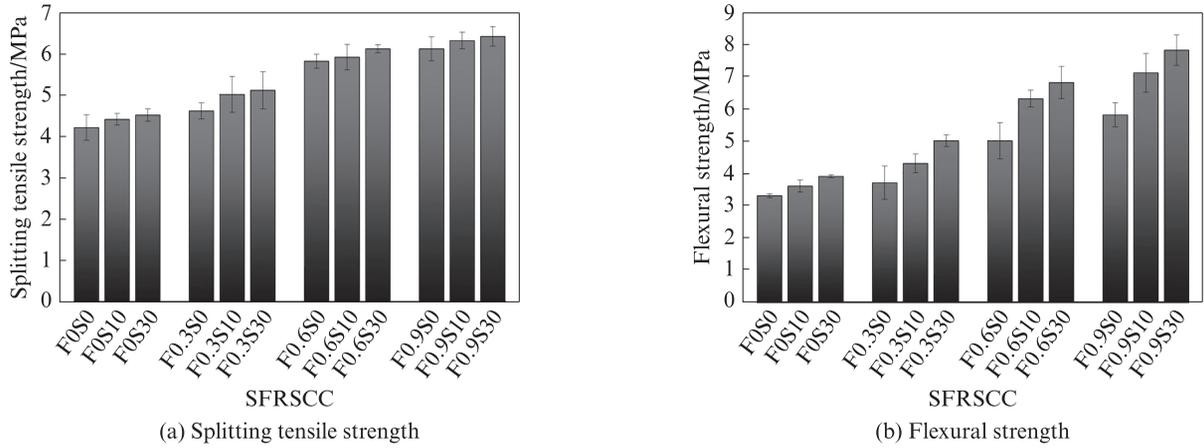


图6 SFRSCC的28d劈裂抗拉强度和抗折强度

Fig. 6 Splitting tensile strength and flexural strength of SFRSCC at 28 d

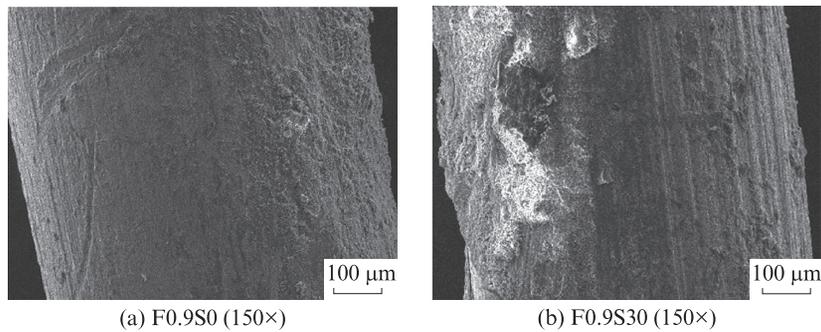


图7 钢纤维从F0.9S0和F0.9S30试件中拔出后的SEM照片

Fig. 7 SEM images of steel fiber pulled out from F0.9S0 and F0.9S30 specimens

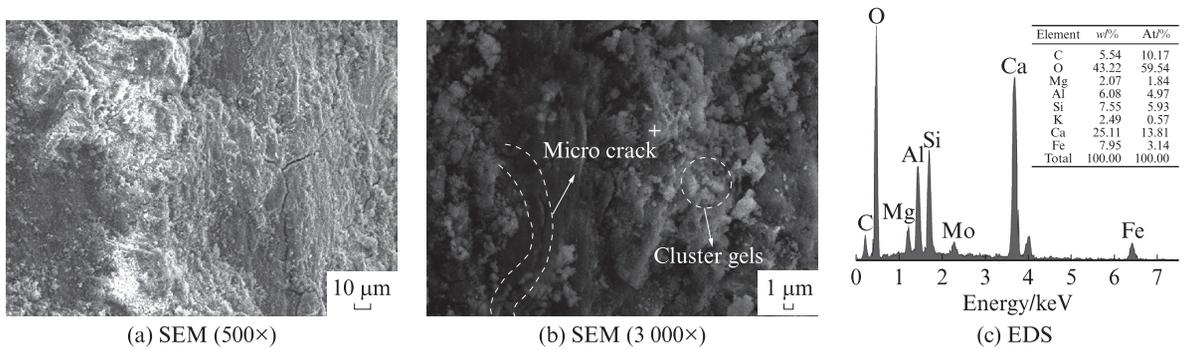


图8 F0.9S0中附着在钢纤维表面基体的SEM照片和EDS分析

Fig. 8 SEM images and EDS analysis of matrix attached to the surface of steel fiber in F0.9S0

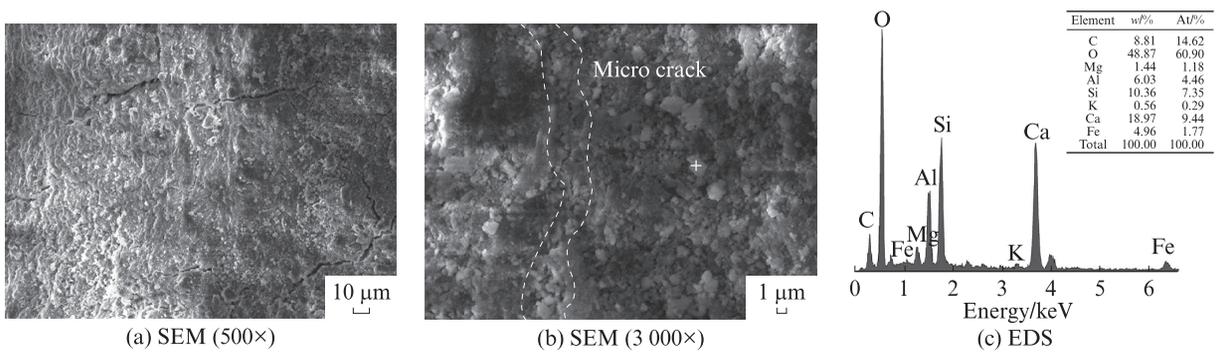


图9 F0.9S30中附着在钢纤维表面基体的SEM照片和EDS分析

Fig. 9 SEM images and EDS analysis of matrix attached to the surface of steel fiber in F0.9S30

分别为图8(b)、9(b)中“+”处的EDS分析.由图8、9可见:附着在钢纤维表面的物质主要为浆体和C-S-H凝胶,其中C-S-H凝胶以颗粒和团簇状出现;低倍率下,F0.9S0和F0.9S30形成的基体的微观结构均比较致密,且均存在交错相间的微小裂缝(源自抗折试件破坏过程中纤维与基体之间的相互作用),两者并无明显区别;高倍率下,F0.9S30裂缝区域中C-S-H凝胶分布更均匀,颗粒状的凝胶基本沿裂缝附近密集分布,而F0S0裂缝区域只有很少的C-S-H凝胶,说明适量矿渣粉的加入有利于生成更多更均匀的C-S-H凝胶,这可能是F0.9S30的力学性能优于F0.9S0的重要原因;钢纤维表面基体含有O、Al、Si和Ca,这几种元素是赋予混凝土基体强度的主要贡献者;F0.9S0中铝硅比和钙硅比(铝硅比和钙硅比均为原子比)分别为0.84、2.30(见图8(c));F0.9S30中铝硅比和钙硅比分别降低到0.45、1.45(图9(c)),其钙硅比相对较低,这可能与矿渣粉中CaO含量较低有关,但F0.9S30表现出更高的强度.Dadsetan等^[14]也得到了相似的结论,他们发现具有较低钙硅比的基体具有更高的抗压强度;Duan等^[15]研究发现较低的铝硅比有助于增大基体的抗压强度.

3 结论

(1)采用10%掺量的矿渣粉替代水泥可以有效提高自密实混凝土(SCC)的工作性能,增加钢纤维体积分数会显著降低SCC的工作性能.

(2)采用矿渣粉替代水泥和添加端钩钢纤维能有效提升SCC的抗压强度、劈裂抗拉强度和抗折强度.与对照组(未添加矿渣粉和钢纤维)相比,矿渣粉掺量为30%、钢纤维体积分数为0.9%的钢纤维自密实混凝土的抗压强度、劈裂抗拉强度和抗折强度分别提高了31.2%、52.4%和136.4%.

(3)钢纤维表面附着的水化物有助于提升纤维与基体之间的黏结性能;适量矿渣粉替代水泥能够生成更多的水化硅酸钙凝胶,形成更致密的微观结构,从而提升钢纤维自密实混凝土的力学性能.此外,具有较低的铝硅比和钙硅比的SCC表现出更高的强度.

参考文献:

[1] FERRARIS C F, BROWER L, DACZKO J, et al. Workability of self-compacting concrete[C]// Proceedings of the Economical

Solution for Durable Bridges and Transportation Structures, International Symposium on High Performance Concrete. Florida: Orlando, 2000:398-407.

- [2] 姚大立,迟金龙,余芳,等.粉煤灰与再生骨料对自密实再生混凝土的影响[J].沈阳工业大学学报,2020,42(2):236-240.
YAO Dali, CHI Jinlong, YU Fang, et al. Influence of fly ash and recycled aggregate on self-compacting recycled aggregate concrete [J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2020, 42(2): 236-240. (in Chinese)
- [3] BOUKENDAKDJI O, KENAI S, KADRI E H, et al. Effect of blast furnace slag on the rheology of fresh self-compacted concrete [J]. Construction and Building Materials, 2009, 23: 2593-2598.
- [4] SALEHI H, MAZLOOM M. Opposite effects of ground granulated blast-furnace blast furnace slag and silica fume on the fracture behavior of self-compacting lightweight concrete [J]. Construction and Building Materials, 2019, 222: 622-632.
- [5] BOUKENDAKDJI O, KADRI E H, KENAI S. Effects of granulated blast furnace blast furnace slag and superplasticizer type on the fresh properties and compressive strength of self-compacting concrete [J]. Cement and Concrete Composites, 2012, 34: 583-590.
- [6] ZHAO Y, BI J H, HUO L Y, et al. Development of a coupled numerical framework of steel fiber reinforced self-compacting concrete [J]. Construction and Building Materials, 2021, 303: 124582.
- [7] ATHIYAMAAN V, GANESH G M. Experimental, statistical and simulation analysis on impact of micro steel-fibres in reinforced SCC containing admixtures [J]. Construction and Building Materials, 2020, 246: 118450.
- [8] HUO L Y, BI J H, ZHAO Y, et al. Modified the smeared crack constitutive model of fiber reinforced concrete under uniaxial loading [J]. Construction and Building Materials, 2020, 250: 118916.
- [9] BARROS J A O, SALEHIAN H. Assessment of the performance of steel fibre reinforced self-compacting concrete in elevated slabs [J]. Cement and Concrete Composites, 2015, 55: 268-280.
- [10] 吴涛,杨雪,刘喜.钢-聚丙烯混杂纤维自密实轻骨料混凝土性能研究[J].建筑材料学报,2020,24(2):268-275,282.
WU Tao, YANG Xue, LIU Xi. Investigation on properties of self-compacting lightweight concrete reinforced with hybrid steel and polypropylene fibers [J]. Journal of Building Materials, 2020, 24(2): 268-275, 282. (in Chinese)
- [11] MASTALI M, DALVAND A. Use of silica fume and recycled steel fibers in self-compacting concrete (SCC) [J]. Construction and Building Materials, 2016, 125: 96-209.
- [12] NAZARI A, RIAHI S. The role of SiO₂ nanoparticles and ground granulated blast furnace blast furnace slag admixtures on physical, thermal and mechanical properties of self-compacting concrete [J]. Materials Science and Engineering: A, 2011, 528 (4-5) : 2149-2157.
- [13] LERCH J O, BESTER H L, ROOYEN A S V, et al. The effect of mixing on the performance of macro synthetic fiber reinforced concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2018, 103: 130-139.

-
- [14] DADSETAN S, BAI J P. Mechanical and microstructural properties of self-compacting concrete blended with metakaolin, ground granulated blast-furnace blast furnace slag and fly ash[J]. Construction and Building Materials, 2017, 146:658-667.
- [15] DUAN P, YAN C J, ZHOU W. Compressive strength and microstructure of fly ash based geopolymer blended with silica fume under thermal cycle[J]. Cement and Concrete Composite, 2017, 54:108-119.