

粉煤灰和矿渣对自密实混凝土 早龄期抗裂性的影响

王圣贤^{1,2},王雪芳¹,姜绍飞¹

(1. 福州大学土木工程学院,福建 福州 350108;2. 福建江夏学院工程学院,福建 福州 350108)

摘要 目的 揭示粉煤灰和矿渣对自密实混凝土(SCC)早龄期抗裂性影响的作用机理。方法 在矿物掺和料掺量占胶凝材料总质量分别为30%和50%下,结合同步砂浆的水化放热特性、SCC的抗压和劈拉强度及SCC水分蒸发量试验,开展了不同粉煤灰与矿渣复掺掺量的SCC早龄期抗裂性能试验研究。结果 粉煤灰复掺矿渣后会延迟胶结体系水化,并影响SCC在龄期1d时的抗压和劈拉强度;同时会延迟SCC开裂时间,但会增大SCC龄期12h时的水分蒸发量,增加SCC龄期24h时的开裂面积;在矿物掺和料掺量占胶凝材料总质量30%、且粉煤灰与矿渣复掺质量比为7:3时,SCC龄期1d时的抗压和劈拉强度最大,龄期24h时的开裂面积最小,仅为对比组的64%;此外,粉煤灰复掺矿渣后可提高SCC龄期3d后的抗压和劈拉强度。**结论** 粉煤灰复掺矿渣后会增加受约束结构混凝土的开裂风险,矿物掺和料掺量占胶凝材料总质量需控制在30%以内,且矿渣复掺掺量不宜超过粉煤灰掺量。

关键词 自密实混凝土;早龄期抗裂性;粉煤灰;矿渣;复掺

中图分类号 TU 528

文献标志码 A

Early-age Cracking Behavior of Self-compacting Concrete Mixed with Fly Ash and Slag

WANG Shengxian^{1,2}, WANG Xuefang¹, JIANG Shaofei¹

(1. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, China, 350108; 2. College of Engineering, Fujian Jiangxia University, Fuzhou, China, 350108)

Abstract: The early-age cracking behavior of self-compacting concrete (denoted as SCC) with different ratios of fly ash and slag at 30% and 50% total mineral admixtures was carried out; meanwhile, combined with the simultaneous mortar hydration heat test, compressive strength and splitting tensile strength of SCC and concrete moisture evaporation test, the mechanism and

收稿日期:2021-11-10

基金项目:“十三五”国家重点研究项目(2020YFD1100403);福建省自然科学基金项目(2022J01969);福建省教育厅中青年教师教育科研项目(JAT190463)

作者简介:王圣贤(1989—),男,博士研究生,主要从事高强与高性能混凝土及结构健康监测与加固等方面研究。

influence law of concrete were revealed. The results show that delay the hydration of the cementitious system is delayed and the formation of compressive and splitting strength of SCC at 1 d age are affected by mixing with slag. In addition, mixing with slag delays the cracking time of SCC, but increases the water evaporation capacity of SCC at 12 h and the cracking area of SCC at 24 h. It has the highest compressive strength and splitting tensile strength, and the least cracking area of SCC at 24 h age when the mineral admixtures content is 30% and the mixture ratio of fly ash and slag is 7:3, its cracking area within 24 h age is only 64% of the comparison group. Furthermore, the mechanical strength of SCC after 3 d age is enhanced. It can be seen that mixing with slag will increase the cracking risk of concrete of the constrained structural members, so the mineral admixtures content should be controlled within 30% and the proportion of slag should not exceed the proportion of the fly ash when fly ash is mixed with slag.

Key words: self-compacting concrete; early-age cracking behavior; fly ash; slag; compound mixing

自密实混凝土 (Self-Compacting Concrete, SCC) 以其优异的工作性能受到了混凝土界的广泛重视, 并大量应用于土木工程结构中。在应用过程中, SCC 主要采用大胶凝材料用量、低水胶比、高浆骨比等方式来实现其自密实性。但有学者研究表明^[1-3], 胶凝材料用量大及浆骨比高均会使 SCC 的收缩变形大于普通混凝土, 抗裂性能较普通混凝土低。为保证 SCC 施工质量、延长结构使用寿命及 SCC 的更广泛应用, 研究适合工程结构特点的高抗裂 SCC, 防止早期裂缝的产生, 具有重要的实际意义。

为了改善 SCC 的性能, 提升混凝土的强度和耐久性, 许多学者利用粉煤灰、矿渣作为硅酸盐水泥的替代品, 开展了试验研究。相关成果表明: 一方面, 粉煤灰或矿渣的单独掺入能够降低早期的水化热^[4], 且矿渣的掺入对混凝土的工作性能和早期强度有利^[5]; 但另一方面, 粉煤灰的掺入会降低混凝土的早期强度^[6], 而矿渣的保水性较弱, 在低湿环境下容易因水分蒸发而引起早期塑性收缩, 且矿渣具有的吸附外加剂效应^[7]能使混凝土早期抗拉强度发展缓慢。因此, 粉煤灰或矿渣的单独掺入及掺量的增加, 若控制不当, 容易增大混凝土的收缩^[8]及开裂风险。利用双掺技术^[9-11]可以克服粉煤灰和矿渣单掺时的缺陷和负面效应, 使得粉煤灰和矿渣的形态效应、活性效应和微集料填充效应互

补, 产生叠加效应^[12], 改善混凝土微观结构, 提高混凝土力学性能和耐久性^[13-14]。但不同来源的矿物掺和料其化学、物理性质存在明显差异, 其复掺的最佳质量比也将因矿物掺和料组分和掺量等配合比参数的不同而有显著差异^[15]。因此, 笔者通过分析不同矿物掺和料的化学成分, 针对不同矿物掺和料掺量下粉煤灰与矿渣复掺质量比对 SCC 早龄期抗裂性能的影响展开研究, 同时结合 SCC 的抗压和劈拉强度、同步砂浆水化放热特性及同步水分蒸发量试验研究分析其作用机理, 从而给出有利于提高 SCC 抗裂性能的粉煤灰与矿渣合理复掺掺量, 对有早期开裂风险混凝土的原材料选择及配合比设计具有指导和借鉴意义。

1 原材料及试验方法

1.1 原材料

试验采用福建通用顺昌水泥厂生产的炼石牌 P·O 42.5 级普通硅酸盐水泥, 密度为 $3\ 080\text{ kg/m}^3$; 粉煤灰为 II 级粉煤灰; 矿渣为 S95 级矿渣, 流动度比为 98%, 7 d 活性指数为 78%; 水泥、粉煤灰和矿渣的化学成分见表 1。细骨料采用闽江河砂, 细度模数为 2.23, 堆积密度为 $1\ 460\text{ kg/m}^3$; 粗骨料为 5~20 mm 的连续级配碎石, 堆积密度为 $1\ 460\text{ kg/m}^3$, 表观密度为 $2\ 660\text{ kg/m}^3$; 外加剂为福建省厦门科之杰建材有限公司生产的

聚羧酸系高效减水剂。以 C40 强度等级为设计指标,在矿物掺和料掺量占胶凝材料总质量分别为 30% 和 50% 下,SCC 配合比及新拌 SCC 流动性见表 2。

表 1 水泥、粉煤灰和矿渣的化学成分

Table 1 Oxide composition of cement and fly ash and slag									%
原材料	w(CaO)	w(SiO ₂)	w(Al ₂ O ₃)	w(Fe ₂ O ₃)	w(SO ₃)	w(MgO)	w(K ₂ O)	w(其他)	烧失量
水泥	59.45	17.64	4.89	3.83	2.99	2.41	0.44	8.35	—
粉煤灰	3.36	62.89	18.61	4.54	0.48	2.53	1.15	7.64	3.88
矿渣	45.17	39.44	8.70	0.96	0.31	2.78	0.42	2.22	1.62

表 2 SCC 配合比及新拌 SCC 流动性

Table 2 Mix proportions and fresh properties of SCC									
编号	SCC 各组分体积质量/(kg·m ⁻³)							坍落度/	扩展度/
	ρ(水泥)	ρ(粉煤灰)	ρ(矿渣)	ρ(砂)	ρ(石)	ρ(水)	ρ(减水剂)	mm	mm
B1	378.0	162.0	—	788.0	888.0	184.0	5.40	265	650
B2	378.0	113.4	48.6	788.0	888.0	184.0	5.13	260	600
B3	378.0	81.0	81.0	788.0	888.0	184.0	5.40	260	640
B4	378.0	48.6	113.4	788.0	888.0	184.0	5.40	260	610
B5	378.0	—	162.0	788.0	888.0	184.0	5.67	260	580
C1	270.0	270.0	—	788.0	888.0	184.0	4.86	265	670
C2	270.0	189.0	81.0	788.0	888.0	184.0	5.40	260	690
C3	270.0	135.0	135.0	788.0	888.0	184.0	5.40	260	670
C4	270.0	81.0	189.0	788.0	888.0	184.0	5.40	265	680
C5	270.0	—	270.0	788.0	888.0	184.0	5.67	265	640

注:编号 B1 ~ B5 的矿物掺和料掺量为胶凝材料总质量的 30%; 编号 C1 ~ C5 的矿物掺和料掺量为胶凝材料总质量的 50%。

1.2 试验方法

1.2.1 砂浆水化放热特性试验

将拌好的 SCC 过 2.36 mm 方孔筛获得的同步砂浆装入安培瓶内并用感量为 0.001 g 电子天平称量试样质量后,立即装入 TAM Air 微量热仪内,测量 72 h 内的水化放热速率和放热量。

1.2.2 抗压与劈拉强度试验

根据《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T50081—2002),分别对 SCC 在龄期 1 d、3 d、28 d 时的立方体抗压强度及立方体劈裂抗拉强度(简称“劈拉强度”)进行力学性能试验,立方体抗压强度试件和劈拉强度试件均采用 150 mm 立方体试模进行成型。

1.2.3 水分蒸发量试验

将拌好的 SCC 装入长 × 宽 × 高为 150 mm × 150 mm × 60 mm 的试验模具中(以 150 mm × 150 mm 面为水分蒸发面),成型后与 SCC 开裂行为试件同条件养护。起初,每 1 h 用感量为 0.1 g 的电子天平称量一次,直至 6 h;之后每 1.5 h 测量一次直至 12 h;最后测量 24 h 的 SCC 水分蒸发量。

1.2.4 开裂行为试验

测试采用福州大学发明专利“水泥基材料抗裂性能测试诱导开裂法及其装置”^[16]推荐方法,装置如图 1 所示。试件成型后置于环境温度为(22 ± 2)℃、湿度为(60 ± 5)% 的室内养护,裂缝观测从混凝土浇注 1 h 之后开始。起初,每隔 20 min 观测 1 次裂缝,直

复掺矿渣后促进砂浆胶结体系水化,增加水化放热速率峰值。这主要是因为矿渣具有较多潜在活性的氧化钙^[12],因此在水泥熟料水化产生的碱物质和硫酸盐物质的复合激发作用下具有良好的水化特性。此时,B3组具有最大水化放热速率峰值,与B1对照组相比,B3组的水化放热速率峰值增加了2.95 mW/g。因为在此复掺质量比下,粉煤灰的微珠效应能够与矿渣的潜在活性效应发挥叠加影响,粉煤灰的微珠效应增大了复合胶凝体系的有效水胶比,从而促进了水泥水化^[18],进而有利于矿渣潜在活性的发挥。

矿物掺和料掺量占胶凝材料总质量50%时,同步砂浆水化放热速率曲线如图3所示,其水化放热速率峰值及峰值点时间见表4。

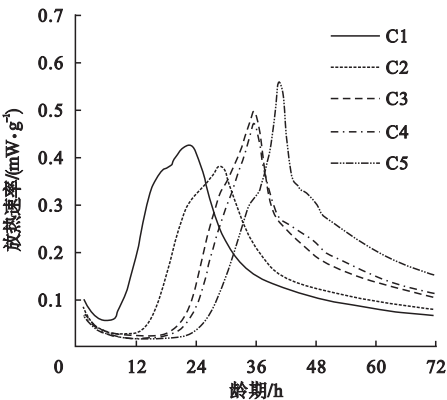


图3 矿物掺和料掺量50%下同步砂浆水化放热速率曲线

Fig. 3 Hydration heat release rate curves of mortar at 30% mineral admixtures content

表4 矿物掺和料总掺量50%下同步砂浆水化放热速率峰值及峰值点时间

Table 4 Peak time and value of hydration heat of mortar at 50% mineral admixtures content

编号	峰值点时间/h	水化放热速率峰值/(mW·g ⁻¹)
C1	22.50	4.27
C2	28.81	3.82
C3	34.62	4.96
C4	35.87	4.73
C5	41.40	5.60

从图3和表4可以看出,粉煤灰复掺矿渣后延迟了砂浆胶结体系水化放热速率峰值点时间,C2~C5组的水化放热速率峰值点时间分别比C1对照组的延迟了6.31 h、12.12 h、13.37 h、18.90 h。在同一粉煤灰与矿渣复掺质量比下,矿物掺和料掺量占胶凝材料总质量50%的SCC同步砂浆的水化放热速率峰值点延迟时间是矿物掺和料掺量占胶凝材料总质量30%时的两倍以上。这主要是因为,增加矿物掺和料掺量后,胶凝体系中的相对水泥掺量减少,矿物掺和料所需的碱性激发环境产物需要更长的时间积累,同时,增加矿物掺和料掺量也增加了胶凝体系中的矿渣掺量,而矿渣能够延迟水化放热速率峰值点时间。因此,复掺矿渣后对于在矿物掺和料掺量占胶凝材料总质量50%时的SCC同步砂浆的水化放热速率峰值点时间的延迟效果更显著。此外,从图3及表4也可以看出,在此矿物掺和料总掺量下,粉煤灰复掺矿渣后同样有利于促进砂浆胶凝体系水化,增加水化放热速率峰值。

2.1.2 砂浆龄期72 h水化放热量

同步砂浆龄期72 h水化放热总量结果如图4所示,图中括号内数值为不同粉煤灰与矿渣复掺质量比下的SCC同步砂浆水化总放热量与各对照组的数值增减。

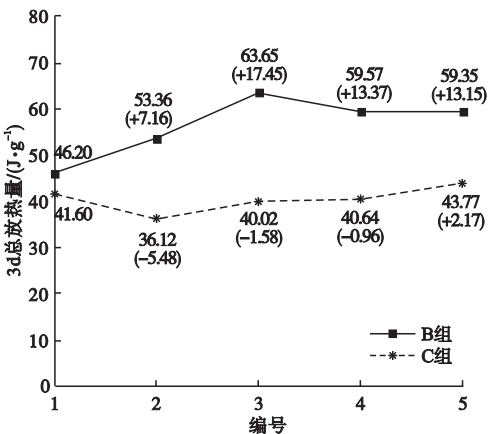


图4 同步砂浆的72 h水化放热总量

Fig. 4 Total hydration heat of mortar at the 72 h age

从图 4 可知,由于粉煤灰复掺矿渣后促进了砂浆胶凝体系水化,在矿物掺和料掺量占胶凝材料总质量 30% 下,粉煤灰复掺矿渣后增加了砂浆 72h 水化放热总量,且 B3 组具有最大水化放热总量,是 B1 对照组的 1.4 倍。但在矿物掺和料掺量占胶凝材料总质量 50% 时,由于粉煤灰复掺矿渣后延迟水化的效果显著,此时矿渣优于粉煤灰的活性效应还未完全发挥出来。与 C1 对照组相比,复掺矿渣后的 C2 ~ C5 组的 72h 水化放热总量并无明显增减。

2.2 力学性能

SCC 立方体抗压强度和劈拉强度试验结果见图 5 和图 6。可以看出,粉煤灰复掺矿渣后对龄期 1 d 的 SCC 抗压强度和劈拉强度的影响规律因矿物掺和料掺量的不同而不同。

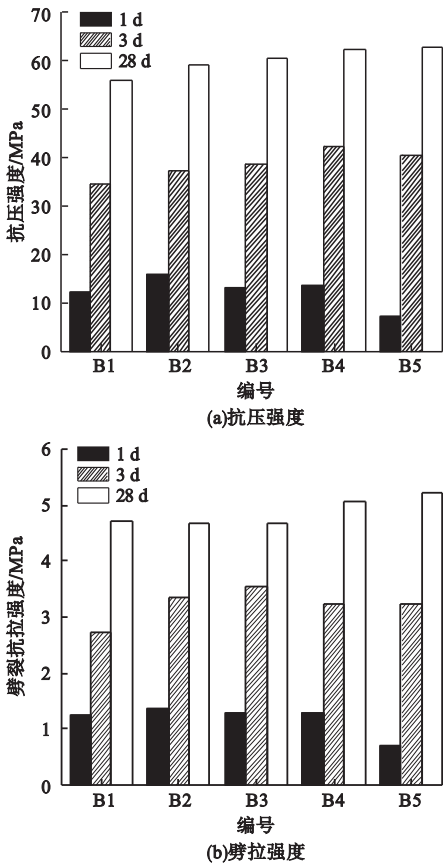


图 5 矿物掺和料掺量 30% 下 SCC 立方体强度
Fig. 5 Strength of SCC at 30% mineral admixtures content

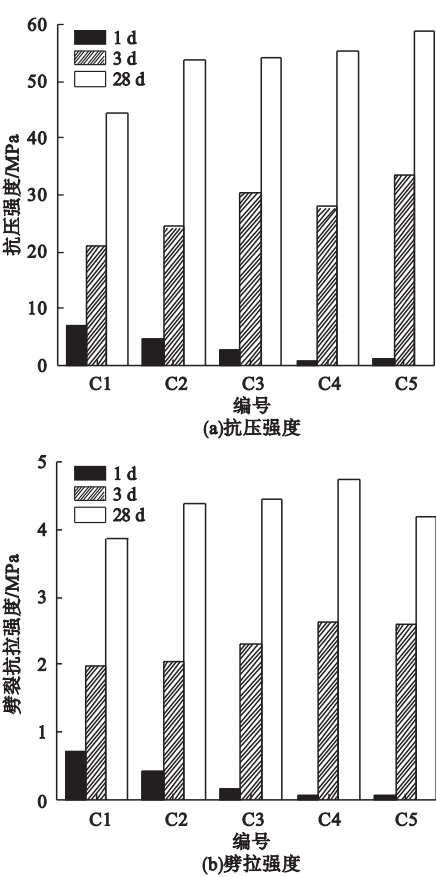


图 6 矿物掺和料掺量 50% 下 SCC 立方体强度
Fig. 6 Strength of SCC at 50% mineral admixtures content

从图 5 可以看出,在矿物掺和料掺量占胶凝材料总质量的 30% 时,尽管复掺矿渣后延迟了水化放热速率峰值点时间,但从水化放热试验结果看,B2 ~ B4 组的峰值点时间大都在龄期 1 d 左右,这也表明此时胶凝体系中除了水泥外已有部分的矿渣活性物质发生了反应,胶凝体系中的水化产物增加,因此复掺矿渣后的 B2 ~ B4 组的龄期 1 d 的 SCC 抗压强度和劈拉强度均比 B1 对照组有一定增加。但此时 SCC 强度还受矿物掺和料的微集料填充效应影响。粉煤灰与矿渣复掺质量比为 7:3 的 B2 组由于具有较好的微集料填充效应,其龄期 1d 时的抗压强度和抗拉强度分别比 B1 对照组的增大了 27% 和 8%。而复掺质量比为 0:1 的 B5 组由于水化放热速率峰值点时间延迟较多,此时胶凝体系中

的水化产物较低,而矿渣的微集料效应及颗粒形态又比粉煤灰的差,因此 B5 组龄期1 d 时的抗压强度和劈拉强度比 B1 对照组降低较多,仅为 B1 对照组的 57% 和 54%。

从图 6 可以看出,在矿物掺和料掺量占胶凝材料总质量的 50% 时,此时 SCC 中水泥量减少较多,同时随着复掺矿渣掺量增大,砂浆体系的水化放热速率峰值点时间逐渐延后,且都在龄期 1 d 以后,因此 SCC 中的水化产物较低,使得 SCC 龄期 1 d 时的抗压强度和劈拉强度随矿渣复掺掺量的增大而降低,C5 组抗压强度和劈拉强度降低最大,均仅为 C1 对照组的 10% 左右。

此外,从图 5 和图 6 还可以看出,复掺有矿渣的 B2 ~ B5 组及 C2 ~ C5 组的 SCC 在龄期 3 d 和 28 d 的抗压强度和劈拉强度均高于各自对照组。这主要是因为随着养护龄期的增加,水泥水化产物增多,体系的碱度增大,使得大量矿渣能够有效参与到水化反应中,生成大量的水化硅酸钙填充于水泥石的孔隙中,使 SCC 更加密实,从而提高其后期强度。而粉煤灰的活性效应则需要 60 d 后才能完全显现出来^[19]。

2.3 SCC 水分蒸发量

矿物掺和料掺量占胶凝材料总质量 30% 时,SCC 龄期 12 h 同步水分蒸发量试验结果如图 7 所示。

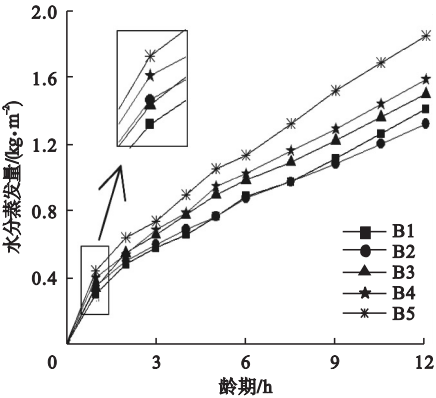


图 7 矿物掺和料掺量 30% 时 SCC 水分蒸发量随时间发展曲线

Fig. 7 Evaporation development of SCC at 30% mineral admixtures content

从图 7 可以看出,在龄期前 3 h 内,SCC 水分蒸发速率较大、水分蒸发量曲线上升较快,这主要是由于这一时期 SCC 内部固相结构体系尚未稳定,水分向外迁移阻力较小。此外,随矿渣复掺掺量增大,SCC 水分蒸发量增大,这主要是因为矿渣的颗粒形态比粉煤灰差,其颗粒主要为多角形玻璃体,且其粒级与水泥相差不大,在改善浆体的孔隙率和孔结构方面不如粉煤灰,同时矿渣的颗粒形态也使得其保水性比粉煤灰差,在吸附自由水方面要比粉煤灰弱得多,因此,会有更多的自由水析出和蒸发。3 h 以后,由于 SCC 内部结构体系逐渐建立,可迁移水分减少,水分蒸发速率下降并稳定,3 h 以后的 SCC 水分蒸发量呈线性增加。在龄期 12 h 时 SCC 水分蒸发量最大的 B5 组比 B1 对照组增加了 30%。

此外,从图 7 还可以看出,粉煤灰与矿渣复掺质量比为 7:3 的 B2 组在水分蒸发到一定量之后,由于浆体发挥出粉煤灰与矿渣复掺的叠加效应,两者复掺后能够较好地增加浆体的密实性,改善浆体的孔隙结构^[20],使得水分蒸发通道减少和受到阻碍,B2 组龄期 12 h 的水分蒸发量仅为 B1 对照组的 90%。

矿物掺和料掺量占胶凝材料总质量的 50% 时,SCC 龄期 12 h 时的水分蒸发量试验结果如图 8 所示。

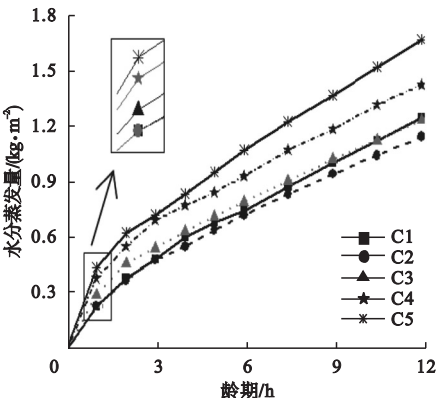


图 8 矿物掺和料总掺量 50% 时 SCC 水分蒸发量随时间发展曲线

Fig. 8 Evaporation development of SCC at 50% mineral admixtures content

从图 8 中可以看出,在矿物掺和料掺量占胶凝材料总质量 50% 时,矿渣复掺掺量对 SCC 龄期 12 h 水分蒸发量的影响规律与矿物掺和料掺量占胶凝材料总质量的 30% 时的影响规律一致,即随矿渣复掺掺量的增大,SCC 水分蒸发量增大,粉煤灰与矿渣复掺质量比为 7:3 的 C2 组达到一定龄期后,水分蒸发量开始小于 C1 对照组。

此外,从图 7 和图 8 的纵坐标对比来看,由于矿物掺和料的颗粒形态效应,掺入矿物掺和料会提高混凝土的保水性,从而使得水分不易蒸发,因此提高矿物掺和料掺量一定程度上可以减小 SCC 水分蒸发量。

2.4 SCC 早龄期抗裂性能

2.4.1 开裂时间

随矿渣复掺掺量增加,SCC 开裂时间的变化结果如图 9 所示。图中括号内数值为不同粉煤灰与矿渣复掺质量比下 SCC 开裂时间与各对照组的时间差异。

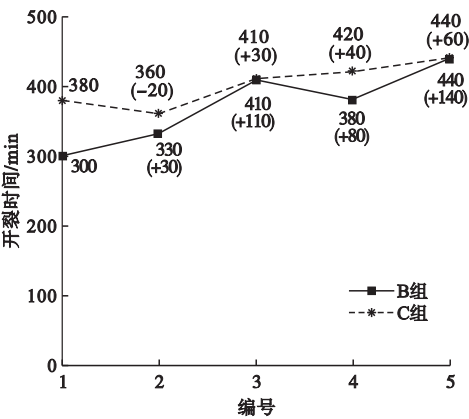


图 9 SCC 开裂时间
Fig. 9 Cracking time of SCC

根据文中水化热试验结果可知,粉煤灰复掺矿渣后延迟了砂浆胶结体系的水化,导致了 SCC 的弹性模量增长缓慢,因此由水分蒸发引起的 SCC 收缩变形在 SCC 受约束时所产生的拉应力发展缓慢。而矿渣活性高于粉煤灰的特性,使得复掺矿渣后有利于 SCC 的早期抗拉强度发展,进一步使得 SCC 的抗拉强度发展速度大于收缩产生的拉应力发展

速度。因此,从图 9 中可以看出,复掺矿渣有利于延迟 SCC 的开裂时间,与各自对照组相比,在矿物掺和料掺量占胶凝材料总质量分别为 30% 和 50% 时,复掺矿渣后的 SCC 开裂时间最长分别可延迟 140 min 和 60 min。

此外,对比图 9 中两条曲线可知,由于粉煤灰和矿渣等量替代水泥较多,而本身粉煤灰与矿渣的活性较低,早期基本不参与水化反应,使得混凝土中的自由水增加,从而混凝土的胶凝体系在水化过程中毛细孔中的负压增长较慢,因此提高矿物掺和料掺量,也有利于延迟 SCC 开裂时间。

2.4.2 开裂面积

矿物掺和料掺量占胶凝材料总质量 30% 时,龄期 12 h 和 24 h 的 SCC 开裂面积结果如图 10 所示。

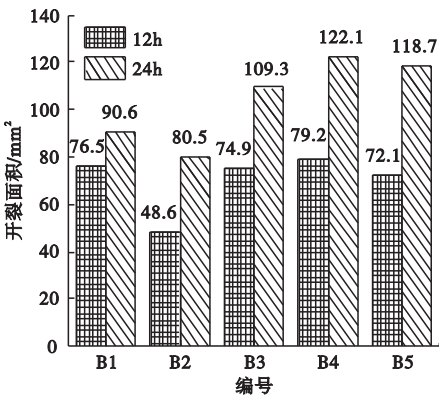


图 10 矿物掺和料总掺量 30% 时 SCC 开裂面积
Fig. 10 Cracking area of SCC at 30% mineral admixtures content

从图 10 可以看出,龄期 12 h 时,B3 组、B4 组、B5 组的 SCC 开裂面积与 B1 对照组的差异不大;但粉煤灰与矿渣复掺质量比为 7:3 的 B2 组则具有最小的开裂面积,仅为 B1 对照组的 64%。龄期 24 h 时,B3 组、B4 组、B5 组的 SCC 开裂面积均比 B1 对照组有明显增大,分别比 B1 对照组增大了 20.6%、34.8%、31.0%;而粉煤灰与矿渣复掺质量比为 7:3 的 B2 组依旧保持着最小的开裂面积,此时为 B1 对照组的 89%。

从 SCC 水分蒸发量试验结果看,粉煤灰

复掺矿渣后增加了 SCC 水分蒸发损失量,因此增加了 SCC 的收缩开裂风险,使得龄期 24 h 时,B3 组、B4 组、B5 组的 SCC 开裂面积均大于 B1 对照组。但在所受约束程度相同的情况下,SCC 的开裂与否以及开裂程度除与自身的收缩变形大小有关外,还与实时抗拉强度大小有关,结合 SCC 龄期 1 d 时的强度结果可知,B2 组具有最大的劈拉强度,因此 B2 组 SCC 的抗拉强度能够有效抵抗产生的拉应力,具有最小的开裂面积。

矿物掺和料掺量占胶凝材料总质量 50% 时,龄期 12 h 和 24 h 的 SCC 开裂面积结果如图 11 所示。

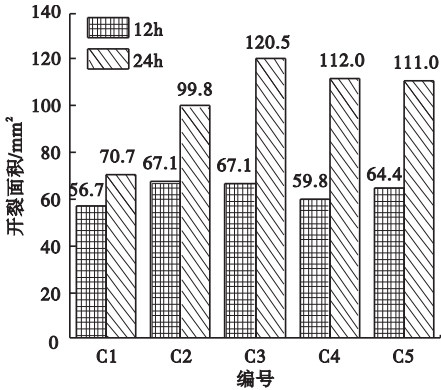


图 11 矿物掺和料总掺量 50% 时 SCC 开裂面积
Fig. 11 Cracking area of SCC at 50% mineral admixtures content

从图 11 可以看出,龄期 12 h 时,复掺有矿渣的 C2 ~ C5 组 SCC 开裂面积均比 C1 对照组有一定的增大,比 C1 对照组的开裂面积增大 5.5% ~ 18.3%;龄期 24 h 时,复掺有矿渣的 C2 ~ C5 组,SCC 开裂面积均比 C1 对照组的有显著增大,矿渣复掺掺量不超粉煤灰掺量时,比 C1 对照组的开裂面积增大 40%,而矿渣复掺掺量超过粉煤灰掺量时,则比 C1 对照组的开裂面积增大 60% ~ 70%。

结合同步砂浆的水化放热特性、SCC 龄期 1 d 时的劈拉强度及 SCC 水分蒸发量试验结果可知,此矿物掺和料掺量下,复掺矿渣后显著延长了 SCC 同步砂浆的水化放热速率峰值点时间,并且降低了 SCC 的龄期 1 d

的劈拉强度,但增加了 SCC 水分蒸发量,因水分蒸发所导致的收缩变形亦增加,因此受约束的 SCC 产生了更大的拉应力,而此时的 SCC 抗拉强度不足以抵抗。因此,矿物掺和料掺量占胶凝材料总质量 50% 时,复掺矿渣后将导致 SCC 抗裂性能降低。

3 结 论

(1)粉煤灰复掺矿渣后延迟了砂浆胶结体系水化,影响龄期 1 d 时 SCC 抗压强度和劈拉强度的发展。但粉煤灰复掺矿渣后促进胶结体系水化,增加了砂浆的水化放热速率峰值及龄期 72 h 水化放热总量,提高了龄期 3 d 后 SCC 抗压强度和劈拉强度。

(2)粉煤灰复掺矿渣后延迟了 SCC 开裂时间,但增加了 SCC 水分蒸发量,增大了 SCC 开裂面积;矿渣复掺掺量超过粉煤灰掺量后,复掺矿渣增大龄期 24 h 时的 SCC 开裂面积作用更显著。

(3)在矿物掺和料掺量占胶凝材料总质量 30% 时,粉煤灰和矿渣复掺质量比 7:3 的 B2 组龄期 1 d 时的 SCC 抗压强度和劈拉强度最大,12 h 水分蒸发量最小,龄期 24 h 时的开裂面积也最小,仅为对照组的 64%。

参考文献

[1] DEMIR İ,SEVİM Ö,TEKİN E. The effects of shrinkage-reducing admixtures used in self-compacting concrete on its strength and durability [J]. Construction and building materials,2018,172:153 – 165.

[2] NIKNEZHAD D, KAMALI-BERNARD S, MESBAH H A. Self-compacting concretes with supplementary cementitious materials: shrinkage and cracking tendency [J]. Journal of materials in civil engineering,2017,29(7): 04017033.

[3] 卜良桃,赵倚天. 高强自密实混凝土抗压强度现场检测方法试验研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2020,36(3):412 – 420.
(BU Liangtao, ZHAO Yitian. Experimental study on on-site detection method of compressive strength of high – strength self-compacting concrete [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2020, 36 (3):412 – 420.)

[4] DAVIDOVA V,REITERMAN P. Shrinkage of

- various types of Portland clinker-based cements with respect to their hydration degree [J]. *Acta polytechnica*, 2020, 60(2): 88 – 97.
- [5] BENTZ D P, FERRARIS C F, JONES S Z, et al. Limestone and silica powder replacements for cement: early-age performance [J]. *Cement and concrete composites*, 2017, 78: 43 – 56.
- [6] GUO Z, JIANG T, ZHANG J, et al. Mechanical and durability properties of sustainable self-compacting concrete with recycled concrete aggregate and fly ash, slag and silica fume [J]. *Construction and building materials*, 2020, 231: 117115.
- [7] 马保国, 王信刚, 梁文泉, 等. 掺高效减水剂水泥砂浆的早期开裂研究[J]. *建筑材料学报*, 2005, 8(6): 593 – 598.
(MA Baoguo, WANG Xingang, LIANG Wenquan, et al. Study on early-age cracking of cement mortar with high range water reducing admixtures [J]. *Journal of building materials*, 2005, 8(6): 593 – 598.)
- [8] LEE N K, JANG J G, LEE H K. Shrinkage characteristics of alkali-activated fly ash/slag paste and mortar at early ages [J]. *Cement & concrete composites*, 2014, 53: 239 – 248.
- [9] 王喆, 王栋民. 不同复合矿物掺合料对混凝土长期性能的影响差异[J]. *硅酸盐通报*, 2015, 34(8): 2392 – 2397.
(WANG Zhe, WANG Dongmin. Influence of different multi-mineral admixtures on long period performance of concrete [J]. *Silicate notification*, 2015, 34(8): 2392 – 2397.)
- [10] 高小建, 孙博超, 叶焕, 等. 矿物掺合料对自密实混凝土流变性能的影响[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2016, 46(2): 439 – 444.
(GAO Xiaojian, SUN Bochao, YE Huan, et al. Influence of mineral admixtures on the rheological behavior of self-compacting concrete [J]. *Journal of Jilin university (engineering and technology edition)*, 2016, 46(2): 439 – 444.)
- [11] KHODAIR Y, BOMMAREDDY B. Self-consolidating concrete using recycled concrete aggregate and high volume of fly ash, and slag [J]. *Construction and building materials*, 2017, 153: 307 – 316.
- [12] 颜帮川, 李中, 刘先杰, 等. 粉煤灰及矿渣对水泥浆体系早期水化热效应的控制研究[J]. *硅酸盐通报*, 2019, 38(1): 52 – 59.
(YAN Bangchuan, LI Zhong, LIU Xianjie, et al. Study on controlling effects of fly ash and slag on early hydration heat evaluation of cement slurry system [J]. *Bulletin of the Chinese ceramic society*, 2019, 38(1): 52 – 59.)
- [13] 孙伟华. 掺合料对机制砂自密实混凝土的性能影响研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2021.
(SUN Weihua. Research on the influence of mineral admixture on the performance of manufactured sand self-compacting concrete [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2021.)
- [14] 祝苗苗, 刘世明, 任治国, 等. 矿物掺合料提升高强混凝土抗硫酸盐侵蚀性能的试验研究[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2020, 41(06): 67 – 72.
(ZHU Miaomiao, LIU Shiming, REN Zhiguo, et al. Experimental study on the improvement of sulfate resistance of high-strength concrete with mineral admixtures [J]. *Journal of north China university of water resources and electric power (natural science edition)*, 2020, 41(6): 67 – 72.)
- [15] REITERMAN P, JASKULSKI R, KUBISSA W, et al. Assessment of rational design of self-compacting concrete incorporating fly ash and limestone powder in terms of long-term durability [J]. *Materials*, 2020, 13, 2863: 1 – 26.
- [16] 郑建岚, 罗素蓉, 王雪芳, 等. 水泥基材料抗裂性能测试诱导开裂法及其装置: 中国, 2004 1 0061492. 1 [P]. 2007 – 02 – 07.
(ZHENG Jianlan, LUO Surong, WANG Xuefang, et al. Induced cracking process for crack resistant performance test of cement base material and apparatus thereof: China, 2004 1 0061492. 1 [P]. 2007 – 02 – 07.)
- [17] 邓国颂, 杨东杰, 庞玉霞, 等. 减水剂对水泥水化过程的影响研究[J]. *新型建筑材料*, 2010, 3: 5 – 7.
(DENG Guosong, YANG Dongjie, PANG Yuxia, et al. Study of the influence of water reducer on the hydration process of cement [J]. *New building materials*, 2010, 3: 5 – 7.)
- [18] 韩静. 低水胶比多元复合胶凝体系水化特性研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2021.
(HAN Jing. Study on hydration properties of multicomponent composite cementitious system with low water-binder ratio [D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2021.)
- [19] 刘晓明. 掺合料对自密实混凝土性能影响试验研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2019.
(LIU Xiaoming. The influence of admixture on the performance of self compacting concrete [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2019.)
- [20] YANG Z, LIU S, YU L, et al. A comprehensive study on the hardening features and performance of self-compacting concrete with high-volume fly ash and slag [J]. *Materials*, 2021, 14(15): 4286.
(责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)