

低收缩早强超高性能混凝土制备与性能研究

Study on Preparation and Properties of Low-shrinkage and Early-strength Ultra-high Performance Concrete

刘勇强^{1,2}

(1. 华新水泥股份有限公司, 黄石 435004; 2. 华新水泥技术管理(武汉)有限公司, 武汉 430073)

摘要: 针对超高性能混凝土(UHPC)在桥梁接缝工程应用中存在的早期强度低、收缩大的问题,研究了硫铝酸盐水泥(SAC)、石膏、酒石酸、碳酸锂以及减缩剂对低收缩早强 UHPC 工作性能、力学性能以及体积稳定性能的影响规律。结果表明,掺加 30% SAC 和 6% 石膏的 UHPC 具有良好的力学性能和体积稳定性能,0.3% 的酒石酸和 0.02% 碳酸锂可以改善早强 UHPC 工作性能与力学性能,1% 减缩剂可以明显降低早强 UHPC 自收缩,制备的低收缩早强超高性能混凝土 4 h 抗压强度大于 40 MPa、28 d 抗压强度大于 120 MPa、72 h 自收缩小于 160×10^{-6} 、28 d 干燥收缩小于 110×10^{-6} 。研究结果可为相关应用提供参考。

关键词: 低收缩; 早强; 超高性能混凝土; 硫铝酸盐水泥; 干燥收缩; 自收缩

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249(2025)05-0014-06

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.05.003

LIU Yongqiang^{1,2}

(1. Huaxin Cement Co., Ltd., Huangshi 435004, China; 2. Huaxin Cement Technology Management (Wuhan) Co., Ltd., Wuhan 430073, China)

Abstract: Aiming at the problems of low early strength and large shrinkage in the application of ultra-high performance concrete (UHPC) in bridge joint engineering, the influence laws of sulpoaluminate cement (SAC), gypsum, tartaric acid, lithium carbonate and shrinkage reducing agent on the workability, mechanical properties and volume stability of low-shrinkage and early-strength UHPC were studied. The results show that UHPC with 30% SAC and 6% gypsum has good mechanical properties and volume stability; 0.3% tartaric acid and 0.02% lithium carbonate can improve the workability and mechanical properties of early-strength UHPC; adding 1% shrinkage reducing agent can significantly reduce the autogenous shrinkage of early-strength UHPC. The prepared low-shrinkage and early-strength ultra-high performance concrete has a compressive strength of more than 40 MPa at 4 h, more than 120 MPa at 28 d, autogenous shrinkage less than 160×10^{-6} at 72 h, and drying shrinkage less than 110×10^{-6} at 28 d. Research findings can provide references for related applications.

Key words: low-shrinkage; early-strength; ultra-high performance concrete; sulpoaluminate cement; drying shrinkage; self-shrinkage

0 引言

超高性能混凝土(UHPC)作为一种 21 世纪最具发展前景的新型绿色建筑材料,具有强度高、韧性好、耐久性能优异等特点,在桥梁领域具有广阔应用前景,特别是在湿接缝应用方面,可极大提高接缝质量。但是常规 UHPC 收缩普遍较大^[1-2],且早

期强度（4~6 h）发展慢，导致桥梁接缝处开裂风险大，同时影响交通开放时间。因此，有必要针对桥梁湿接缝应用场景开展新型低收缩早强 UHPC 相关研究。

目前，已有学者针对 UHPC 体积稳定性能以及早期力学性能进行了相关研究，任蒙恩等^[3]、侯智伟等^[4]研究了不同类型膨胀剂对 UHPC 自收缩的影响，结果表明膨胀剂在 UHPC 中具有明显补偿收缩作用；邹小童等^[5]、李飞等^[6]、张佶等^[7]、廖飞宇等^[8]研究了减缩剂对 UHPC 以及常规混凝土的影响，研究发现减缩剂可以明显降低材料的收缩率；邓宗才等^[9]研究发现，单掺膨胀剂和减缩剂均能有效抑制 UHPC 各阶段的收缩，两者复合使用未产生协同效应；顾炳伟等^[10]研究了不同组成、不同养护方式下 UHPC 的早期收缩情况；罗鸿魁^[11]针对桥梁接缝加固应用场景，确定了以减缩剂和膨胀剂复合使用的桥梁接缝加固用低收缩 UHPC 配合比；杨沫等^[12]研究了早强外加剂对常规 UHPC 12~24 h 早期强度的影响，但未进一步研究更早期强度；朱文忠等^[13]研究了缓凝剂对早强型 UHPC 性能的影响，发现掺加 0.12% 的硼酸最为适宜；李传习等^[14]、孙丹丹等^[15]基于硫铝酸盐-硅酸盐复合体系，分别制备出 3 h 抗压强度大于 30 MPa 的超早强 UHPC，以及 2 h 抗压强度 34.5 MPa、28d 抗压强度 124.7 MPa 的早强型 UHPC，但均未对早强 UHPC 的收缩性能进行相关研究。

综上，目前针对 UHPC 体积稳定性能和早期力学性能的研究多为单一方向，而对二者进行系统性研究较少。因此，试验针对 UHPC 开展 4 h 早期与后期力学性能、工作性能以及体积稳定性能等相关研究，为新建、加固等桥梁接缝工程提供材料技术支撑。

1 试验研究

1.1 原材料

水泥采用硅酸盐水泥（OPC）和硫铝酸盐水泥（SAC），其中硅酸盐水泥为 P·II52.5 普通硅酸盐水泥，比表面积 420 m²/kg，硫铝酸盐水泥强度等级 42.5，比表面积 480 m²/kg；矿粉（GGBS）为 S95 等级矿粉，比表面积 400 m²/kg，28 d 活性指数 96%；硅灰（SF）比表面积 23 000m²/kg，SiO₂ 含量

95%，烧失量 2.9%，28 d 活性指数 108%；石英粉（Q）粒径 45 μm，SiO₂ 含量 95%；石膏（GYP）为无水石膏；砂（S）为石英砂，粒径 200~850 μm 连续级配；减水剂为聚羧酸高效减水剂，固含量 40%，减水率 35%；缓凝剂为酒石酸分析纯；早强剂为碳酸锂分析纯；减缩剂为粉末状多元醇类；水为自来水；钢纤维为镀铜钢纤维，长度 13 mm，直径 0.2 mm，抗拉强度 2 500 MPa。

1.2 试验配合比设计

采用单因素试验法，探究硫铝水泥、石膏、缓凝剂、早强剂以及减缩剂对低收缩早强超高性能混凝土力学性能、工作性能、体积稳定性能的影响，固定各配比的水胶比为 0.17，减水剂掺量为胶凝材料的 1.8%，钢纤维体积掺量 2%，其中编号 A-1 为常规 UHPC 配合比（无酒石酸、碳酸锂），具体配合比设计见表 1。

表 1 低收缩早强超高性能混凝土配合比设计

Table 1 Mix proportion design of low-shrinkage and early-strength ultra-high performance concrete /%

编号	配合比设计							
	OPC	SAC	GGBS	SF	Q	GYP	酒石酸	碳酸锂
A-1	65		15	10	10	100		
A-2	55	10	15	10	10	100	0.1	0.010
A-3	45	20	15	10	10	100	0.1	0.010
A-4	35	30	15	10	10	100	0.1	0.010
A-5	25	40	15	10	10	100	0.1	0.010
B-1	35	30	15	10	8	2	100	0.1
B-2	35	30	15	10	6	4	100	0.1
B-3	35	30	15	10	4	6	100	0.1
B-4	35	30	15	10	2	8	100	0.1
B-5	35	30	15	10		10	100	0.1
C-1	35	30	15	10	4	6	100	0.1
C-2	35	30	15	10	4	6	100	0.1
C-3	35	30	15	10	4	6	100	0.1
C-4	35	30	15	10	4	6	100	0.2
C-5	35	30	15	10	4	6	100	0.3
C-6	35	30	15	10	4	6	100	0.4

1.3 试验方法

试验环境温度（20±2）℃，湿度（50±5）%，将粉料、骨料、外加剂于搅拌机中干混 2~3 min，加入水和减水剂，继续搅拌 8~10 min 至 UHPC 呈流态，最后加入钢纤维搅拌 2~3 min。参考 GB/T 2419—2005《水泥胶砂流动度测定方法》对拌合物初始流动度和 20 min 流动度进行静态测试；抗压强度参考 T/CECS 10107—2020《超高性能混凝土（UHPC）技

材料科学

术要求》进行,试块尺寸 100 mm×100 mm×100 mm;干燥收缩测试参考 GB/T 50082—2024《混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》中接触法收缩测试方法,试件尺寸 100 mm×100 mm×515 mm;自收缩采用波纹管测试方法,参考标准 TCBMF 96—2020 TCCPA 20—2020《超高性能混凝土预混料》。

2 结果与讨论

2.1 SAC 掺量对早强 UHPC 性能的影响

从图 1 可知,随着 SAC 掺量的增加,4 h 强度由 0 提高至 60.3 MPa,尤其是 SAC 掺量由 20% 提高至 30% 时,4 h 强度提高最明显,由 28.5 MPa 提高至 49.4 MPa,提高 73.3%,当 SAC 掺量提高至 40% 时,4 h 强度增幅减小,同时,SAC 对 UHPC 1 d 强度有一定提高,但提升效果不明显。从 3、7、28 d 龄期强度可以发现,随着 SAC 掺量的提高,各龄期的后期强度均低于未掺加 SAC 的对照组,且随着 SAC 掺量增加,后期强度降低。这是因为,UHPC 掺入 SAC 后,OPC 总量降低,一方面 SAC 主要在早期迅速发生水化反应,3 d 后水化反应速率大幅减缓,而 OPC 及矿物掺和料的水化反应时间主要集中在 1 d 以后,另一方面是由于 SAC 早期水化产物包裹在 OPC 颗粒表面,阻止了其后期水化进程^[16],因此导致后期强度随 SAC 掺量的提高而降低。

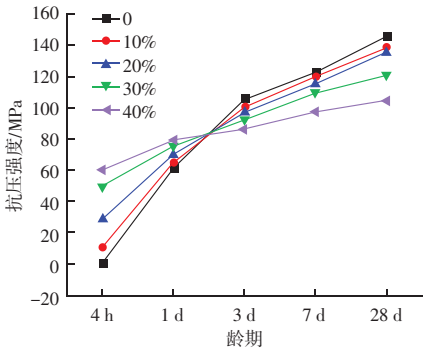


图 1 不同 SAC 掺量的 UHPC 力学性能

Fig. 1 Mechanical properties of UHPC with different SAC dosage

由图 2 可知,随着 SAC 掺量的提高,早强 UHPC 各龄期干燥收缩逐渐减小,30% 掺量时,1 d 干燥收缩只有 -58×10^{-6} ,28 d 干燥收缩为 -199×10^{-6} ,相比对照组,分别降低了 33.3% 和 32.5%。由此可知,采用 SAC-OPC 复合胶凝体系制备低收缩早强 UHPC 具备可行性,同时考虑 SAC 用量对 UHPC 力

学性能和干燥收缩的影响,SAC 适宜掺量为 30%。

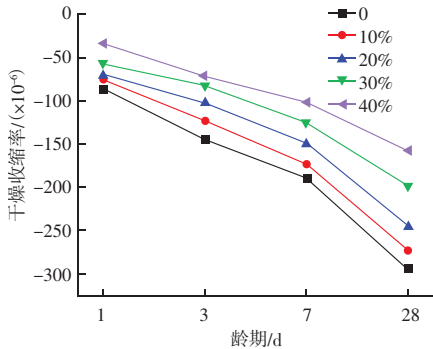


图 2 不同 SAC 掺量的 UHPC 干燥收缩

Fig. 2 Drying shrinkage of UHPC with different SAC dosage

2.2 石膏对早强 UHPC 性能的影响

由图 3 可知,随着石膏掺量由 2% 提高至 6% 时,早强 UHPC 的 4 h、1 d 以及后期强度均不断提高,石膏掺量 6% 时,相比未掺加石膏的配比 A-4,其 4 h 强度由 49.4 MPa 提高至 56.1 MPa,提高了 13.6%,28 d 强度由 120.5 MPa 提高至 135.6 MPa,提高了 12.5%,说明石膏的掺入可有效提高 UHPC 的早期强度,同时对后期强度也有一定促进作用。但是,当石膏掺量继续提高至 8% 和 10% 时,UHPC 各龄期强度出现了下降,特别是 10% 石膏掺量时,4 h 强度下降至 40.1 MPa,相比未掺石膏时,其强度仍下降明显,说明石膏掺量在该体系中不易过高,适当的石膏可以提升早强 UHPC 力学性能,但石膏掺量过高时,则对其力学性能产生负面影响。

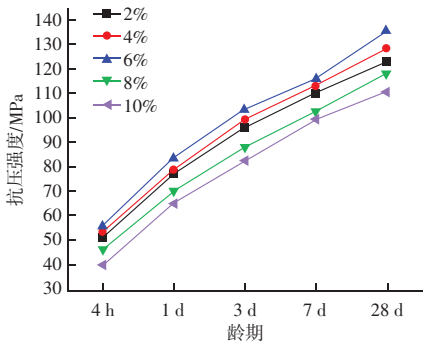


图 3 不同石膏掺量的 UHPC 力学性能

Fig. 3 Mechanical properties of UHPC with different gypsum dosage

由图 4 干燥收缩测试结果发现,随着石膏掺量的提高,早强 UHPC 不同龄期的干燥收缩均明显减小,当石膏掺量提高至 8% 以上时,1 d 干燥收缩出现微膨胀现象,后期表现为收缩。石膏的掺入可以促进硫铝酸盐水泥的反应,形成大量钙矾石为 UHPC 提

供早期强度，同时膨胀型钙矾石也进一步降低了 UHPC 的收缩。但是，由于 UHPC 水胶比极低，并掺入了大量混合材，使其内部致密程度相比常规混凝土较高，当石膏掺量过多时，UHPC 内部孔隙结构无法为钙矾石提供足够的生长空间，导致 UHPC 内部发生体积膨胀，产生微裂纹，使 UHPC 早期强度大幅降低。

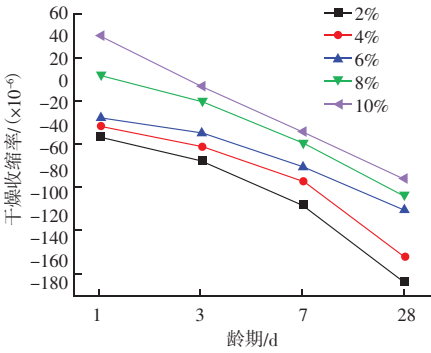
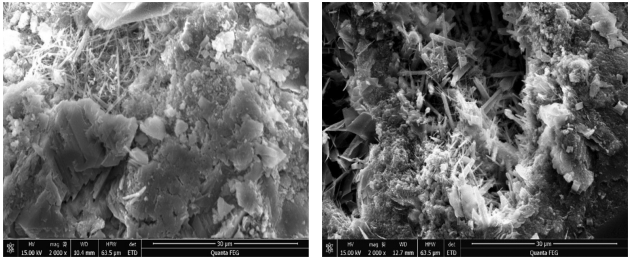
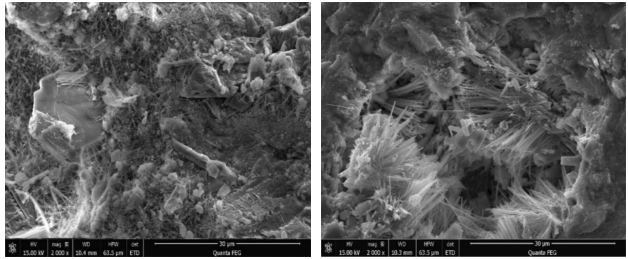


图 4 不同石膏掺量的 UHPC 干燥收缩
Fig. 4 Drying shrinkage of UHPC with different gypsum dosage

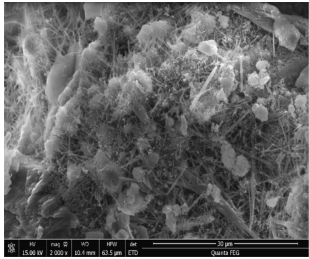
同时，从图 5 可知，随着石膏掺量提高，混凝土内部的钙矾石数量增加，2% 石膏掺量时，在混凝土内部发现有少量钙矾石晶体，当石膏掺量提高至 10% 时，可以发现水化产物表面附着大量针棒状钙矾石晶体，其包裹在未水化水泥颗粒和矿物掺和料表面，使硅酸盐水泥、硅灰等无法在后期发生水化反应和火山灰效应，导致后期强度增加受阻。因此，结合力学性能、收缩性能以及 SEM 图分析，石膏适宜掺量为 6%。



(a) 2% (b) 4%



(c) 6% (d) 8%



(e) 10%

图 5 不同石膏掺量的 UHPC SEM
Fig. 5 SEM image of UHPC with different gypsum content

2.3 缓凝剂、早强剂对早强 UHPC 性能的影响

由表 2 和图 6 可知，当酒石酸掺量为 0.1% 时，随着碳酸锂掺量由 0.005% 提高至 0.020%，早强 UHPC 早期强度提高，但初始流动度和 20 min 流动度均明显下降，特别是 0.020% 掺量时，20 min 基本失去流动度。同时，随碳酸锂掺量的提高，早强 UHPC 后期强度出现下降趋势，这是因为此时体系内酒石酸掺量相对较低，碳酸锂的掺量提高时，加快了 SAC 的反应速率^[17]，导致工作性能降低，4 h 强度提高，但是过快的反应速率导致大量铝胶、钙矾石等水化产物包裹在 OPC 颗粒表面，阻止了其后期水化反应，使 UHPC 后期强度无法提高。

试验在 0.020% 碳酸锂掺量基础上，通过调整酒石酸掺量，研究了其对早强 UHPC 工作性能和力学性能影响。从表 2 和图 6 可以发现，随着酒石酸掺量的提高，拌合物初始流动度得到改善，且 20 min 流动度提高，4 h 和 1 d 强度不断降低，酒石酸掺量达到 0.4% 以上时，4 h 强度只有 43.9 MPa，说明酒石酸延缓了 SAC 和 OPC 的反应速率。分析后期强度可知，酒石酸掺量由 0.1% 提高至 0.2% 时，3、28 d 强度均有所提升，但酒石酸掺量大于 0.2% 时，由于存在严重缓凝现象，导致后期强度也随之降低。综合考虑酒石酸和碳酸锂对早强 UHPC 工作性能以及

表 2 不同酒石酸、碳酸锂掺量的 UHPC 工作性能
Table 2 Working performance of UHPC with different dosage of tartaric acid and lithium carbonate

编号	初始流动度/mm	20 min 流动度/mm
C-1	265	224
C-2	240	185
C-3	225	130
C-4	246	185
C-5	258	240
C-6	266	256

材料科学

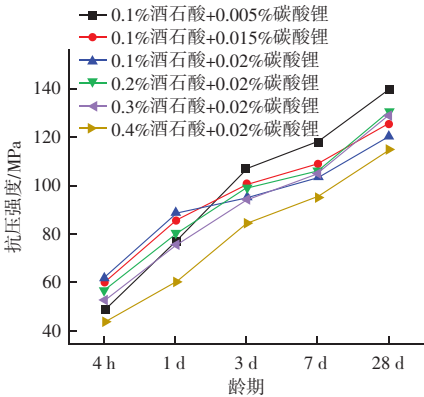


图6 不同酒石酸、碳酸锂掺量对 UHPC 力学性能的影响
Fig.6 Effect of different tartaric acid and lithium carbonate dosage on mechanical properties of UHPC

早、后期力学性能的影响规律，优选酒石酸和碳酸锂掺量分别为 0.3% 和 0.02%。

2.4 低收缩早强 UHPC 自收缩研究

由于干燥收缩测试参考标准为 GB/T 50082—2024《混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》，即在混凝土成型养护 3 d 后开始进行测试，而早强 UHPC 不同于常规混凝土，因其 4 h 强度已达到 40 MPa 以上，1~3 d 强度发展迅速，该阶段的收缩也易导致混凝土产生裂缝。研究表明，减缩剂对混凝土收缩有一定抑制作用，但未针对早强 UHPC 开展相关研究，因此在编号 C-5 配合比基础上，研究减缩剂对早强 UHPC 自收缩的影响规律。减缩剂掺量分别为胶凝材料总量的 0.5%、1.0%、2.0%，配合比编号分别为 D-1、D-2、D-3，工作性能测试结果见表 3，力学性能和收缩测试结果如图 7~图 9 所示。

由表 3 可知，随着减缩剂掺量的提高，早强 UHPC 初始流动度和 20 min 流动度均逐渐增加，说明减缩剂一方面有一定减水效果，可以提高早强 UHPC 工作性能，同时具有缓凝效果，延长其凝结时间。从力学性能结果也可以看出，4 h 强度随减缩剂掺量的提高逐渐降低，由 49.7 MPa 降低至 36.4 MPa，当减缩剂掺量达到 2% 时，4 h 强度下降明显，但后期强度表明，减缩剂对早强 UHPC 28 d 影响较小，均在 120 MPa 左右。采用波纹管测试早强 UHPC 自收缩时，从初凝开始至初凝后 72 h 计算其早期自收缩，从测试结果可以看出，随着减缩剂掺量的提高，早强 UHPC 初凝时间延长，这与工作性能测试结果一

表 3 不同减缩剂掺量的 UHPC 工作性能
Table 3 Working performance of UHPC with with different dosage of shrinkage reducing admixture

编号	初始流动度/mm	20 min 流动度/mm
D-1	262	245
D-2	270	255
D-3	278	267

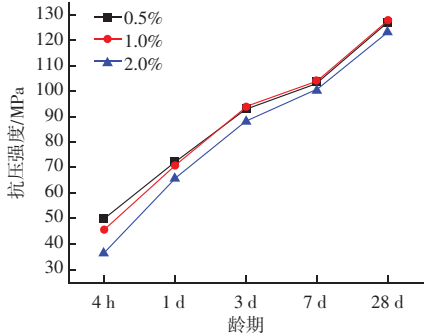


图7 不同减缩剂掺量的 UHPC 力学性能
Fig.7 Mechanical properties of UHPC with different dosage of shrinkage reducing admixture

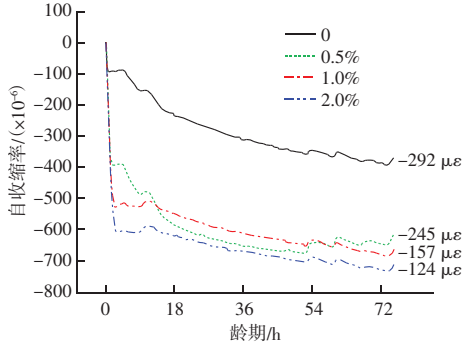


图8 不同减缩剂掺量的 UHPC 自收缩
Fig.8 Autogenous shrinkage of UHPC with different dosage of shrinkage reducing admixture

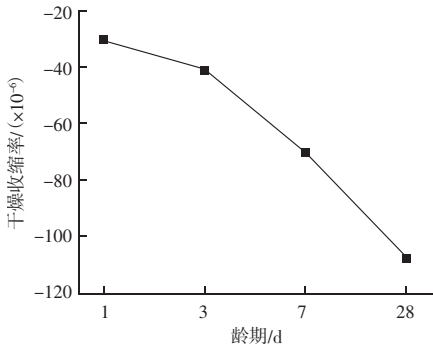


图9 1%减缩剂掺量的低收缩早强 UHPC 干燥收缩
Fig.9 Dry shrinkage of low shrinkage early strength UHPC with 1% shrinkage reducing admixture

致，未参加减缩剂时，72 h 的自收缩达到 292×10^{-9} ，0.5% 掺量时，自收缩为 245×10^{-9} ，降低了 16%，减缩剂掺量由 1.6% 提高至 2.0% 时，自收缩量分别

为 157×10^{-9} 和 124×10^{-9} , 虽然自收缩得到进一步降低, 但减缩效果相对减弱。结合减缩剂对早强 UHPC 力学性能和自收缩影响结果可知, 2.0% 减缩剂掺量下, 其 4 h 和后期强度明显下降, 同时减缩效果相比 1.0% 掺量时无明显提升, 因此在编号 C-5 的配合比基础上, 减缩剂掺量 1.0% 为宜, 制备的早强 UHPC 4 h 抗压强度达到 45.3 MPa, 28 d 抗压强度 125.4 MPa。同时, 试验针对 1.0% 减缩剂掺量的低收缩早强 UHPC 进行干燥收缩测试 (如图 9 所示), 结果表明, 掺入 1.0% 减缩剂后, 低收缩早强 UHPC 28 d 干燥收缩只有 108×10^{-9} , 说明减缩剂对其后期收缩也产生了一定抑制作用。

3 结论

通过单因素试验法, 采用硫铝酸盐水泥-普硅水泥复合体系, 开展低收缩早强超高性能混凝土配合比设计与性能研究, 得到以下结论:

(1) 随着 SAC 取代 OPC 量的增加, 早强 UHPC 4 h 和 1 d 抗压强度提高, 但由于 OPC 总量降低, 导致后期强度随 SAC 掺量的提高而逐渐减小。同时, 由于 SAC 水化产生膨胀型钙矾石, 使早强 UHPC 干燥收缩随 SAC 掺量的提高而降低。

(2) 石膏可进一步加快 SAC 的水化进程, 但过量的石膏导致大量钙矾石产生, 使 UHPC 内部产生微裂纹, 同时钙矾石包裹在未水化水泥颗粒表面, 导致 UHPC 力学性能降低。

(3) 酒石酸和碳酸锂对早强 UHPC 分别具有保坍和促凝作用, 两者适宜掺量分别为 0.3% 和 0.020%, 掺量过高或过低对早强 UHPC 工作性能和力学性能均产生不利影响。

(4) 减缩剂可以明显降低早强 UHPC 早期自收缩, 但其具有一定缓凝作用, 掺量过大时, 导致 4 h 强度下降明显, 结合力学性能和自收缩测试结果, 减缩剂适宜掺量为 1.0%。

(5) 制备的低收缩早强超高性能混凝土 4 h 抗压强度大于 40 MPa、28 d 抗压强度大于 120 MPa、72 h 自收缩小于 160×10^{-6} 、28 d 干燥收缩小于 110×10^{-6} 。

参 考 文 献

- [1] XIE T, FANG C, MOHAMAD ALI M S, et al. Characterizations of autogenous and drying shrinkage of ultra-high performance concrete (UHPC): an experimental study [J]. Cement and Concrete Composites, 2018, 91: 156-173.
- [2] WANG J Y, BIAN C, XIAO R C, et al. Restrained shrinkage mechanism of ultra high performance concrete [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2019, 23 (10): 4481-4492.
- [3] 任蒙恩, 宁利恒, 康海, 等. 膨胀剂掺量对机制砂 UHPC 工作性和自收缩性能的影响 [J]. 混凝土与水泥制品, 2024 (7): 29-32.
- [4] 侯智伟, 张文超. 微膨胀超高性能混凝土设计制备及过程控制研究 [J]. 中国建筑金属结构, 2024, 23 (6): 38-40.
- [5] 邹小童, 武建好, 李星辰, 等. 减缩剂对水泥砂浆及超高性能混凝土收缩性能的影响 [J]. 混凝土与水泥制品, 2024 (6): 18-21.
- [6] 李飞, 詹炳根. 内养护剂、膨胀剂、减缩剂对高强混凝土早期收缩的影响 [J]. 合肥工业大学学报 (自然科学版), 2016, 39 (9): 1254-1259.
- [7] 张估, 陈航宇, 王航, 等. 减缩剂在混凝土中的作用效果研究 [J]. 工业建筑, 2023, 53 (增刊2): 722-725.
- [8] 廖飞宇, 孙政和, 张思雅, 等. 新型减缩剂对 UHPC 自收缩性能试验研究 [J]. 福建建设科技, 2025 (1): 60-62.
- [9] 邓宗才, 连怡红, 赵连志. 膨胀剂、减缩剂对超高性能混凝土自收缩性能的影响 [J]. 北京工业大学学报, 2021, 47 (1): 61-69.
- [10] 顾炳伟, 王景正, 龚致远, 等. 超高性能混凝土早期收缩性能的研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2025, 39 (2): 11-17.
- [11] 罗鸿魁. 桥梁接缝加固用低收缩超高性能混凝土的性能研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2019.
- [12] 杨沫, 李宇鹏, 白静静, 等. 超早强外加剂在超高性能混凝土中的性能研究 [J]. 中国水泥, 2024 (增刊2): 254-256.
- [13] 朱文忠, 牛腾, 韩乐冰, 等. 缓凝剂对早强型超高性能混凝土性能的影响研究 [J]. 混凝土世界, 2024 (1): 46-50.
- [14] 李传习, 夏雨航, 王圣杰, 等. 初凝超 30 min 超早强 UHPC 制备及其机理 [J]. 硅酸盐通报, 2023, 42 (5): 1630-1639.
- [15] 孙丹丹, 樊俊江, 於林锋. 快硬型超高性能混凝土的制备及性能研究 [J]. 新型建筑材料, 2023, 50 (6): 14-16.
- [16] 王博, 闫铁成. 普通硅酸盐-硫铝酸盐水泥复合凝胶体系的制备及性能研究 [J]. 功能材料, 2021, 52 (7): 7079-7084.
- [17] CAU DIT COUMES C, DHOURY M, CHAMPENOIS J B, et al. Combined effects of lithium and borate ions on the hydration of calcium sulfoaluminate cement [J]. Cement and Concrete Research, 2017, 97: 50-60.