

## C70 高强混凝土基本性能优化试验研究

杨云龙<sup>1</sup>, 奚欢欢<sup>1</sup>, 范长利<sup>2</sup>, 汪林华<sup>1</sup>, 龚玉亮<sup>1</sup>

(1. 成都建工睿睿建材有限公司, 四川 成都 610000; 2. 江西省金盛高科技发展有限责任公司, 江西 南昌 330100)

**摘要:**为探究掺入低活性、高需水比的二级粉煤灰及硅灰的 C70 高强混凝土的工程应用性能,以花园城 C3 项目 C70 高强混凝土为研究对象,设计了不同掺量硅灰及粉煤灰的配合比,并进行了正交对比试验。同时,结合基准配比试验对其进行了优化试验设计,研究表明:1)当二级粉煤灰掺量为  $95 \text{ kg/m}^3$  时,C70 高强混凝土在基准配合比条件下的工程性能最佳,其混凝土坍落度最大可达 210 mm;与常规基准配合比相比,前期强度增幅提高了 69.6%,中期强度增幅提升了 91.5%,峰值强度达到 109.3 MPa;2)在此基础上,通过优化硅灰掺量,采用浓度为 35%、掺量为  $50 \text{ kg/m}^3$  的液体硅灰,可有效降低混凝土后期收缩开裂风险,且中期峰值强度能达到 110.2 MPa,相较于固体硅灰掺量为  $35 \text{ kg/m}^3$  时的峰值强度提高了 8.23%,经济指标每立方米降低了 3.2%,展现出显著的经济效益。本文研究成果可为高强混凝土的工程应用提供一定的参考价值,同时有助于提高工程项目的经济效益,具有重要的推广和指导意义。

**关键词:**C70 高强混凝土; 工作性能; 优化试验; 工程应用

**中图分类号:**TU528.31

**文献标志码:**A

**文章编号:**1673-8993(2025)07-0029-06

**doi:**10.13402/j.gcjs.2025.07.085

## Experimental study on optimization of basic properties of C70 high-strength concrete

YANG Yunlong<sup>1</sup>, XI Huanhuan<sup>1</sup>, FAN Changli<sup>2</sup>, WANG Linhua<sup>1</sup>, GONG Yuliang<sup>1</sup>

(1. Chengdu Construction Engineering Rong Rui Building Materials Co., Ltd., Chengdu 610000, Sichuan, China;

2. Jiangxi Jinsheng High-Tech Development Co., Ltd., Nanchang 330100, Jiangxi, China)

**Abstract:** In order to explore the engineering application performance of C70 high-strength concrete mixed with secondary flyash and silica fume with low activity and high water demand ratio, the mixing ratio of silica fume and flyash with different dosages is designed with C70 high-strength concrete of C3 project in Garden City as the research object, while an orthogonal comparison test is carried out. At the same time, the experimental design of C70 high-strength concrete is optimized according to the benchmark ratio test, and the results show that: 1) when the secondary flyash content is  $95 \text{ kg/m}^3$ , the engineering performance of C70 high-strength concrete is the best under the benchmark mixing ratio condition, and the concrete slump can reach up to 210 mm; Compared with the conventional benchmark mixing ratio, the strength increase in the early stage is increased by 69.6%, the increase in the medium strength is increased by 91.5%, and the peak intensity is reached by 109.3 MPa; 2) On this basis, by optimizing the silica fume content, using liquid silica fume with a concentration of 35% and a content of  $50 \text{ kg/m}^3$ , the risk of shrinkage and cracking of concrete in the later stage can be effectively reduced, and the peak strength in the medium term can reach 110.2 MPa, which is 8.23% higher than that when the solid silica fume content is  $35 \text{ kg/m}^3$ , and the economic index is reduced by 3.2% per cubic meter, showing

**收稿日期:** 2024-12-30

**作者简介:** 杨云龙(1988—),男,工程师,从事混凝土性能方面的研究工作。

**通信作者:** 奚欢欢(1995—),男,助理工程师,从事混凝土性能方面的研究工作。

significant economic benefits. The results can provide a certain reference value for the engineering application of high-strength concrete, while help to improve the economic benefits of engineering projects, which has important promotion and guiding significance.

**Key words:** C70 high-strength concrete; working performance; optimization experiment; engineering application

随着经济的快速发展和城市化进程的加速,超高层建筑如雨后春笋般涌现,这些建筑对建筑材料提出了更高要求。C70 及以上超高强混凝土因其卓越的力学性能、耐久性和工作性,逐渐成为超高层建筑中的核心材料。由于超高层建筑具有竖向荷载大、结构复杂的特点,需采用高强度、高耐久性的混凝土以确保安全性和稳定性。C70 及以上超高强混凝土能够满足这一需求,并广泛应用于核心筒、巨型柱等关键部位,如南京紫峰大厦和北京中国尊大厦等标志性建筑均大量采用该类混凝土。然而,随着混凝土标号的不断提高,其塑性黏度也明显增加,泵送压力也随之因建筑高度的攀升而增大<sup>[1-3]</sup>。为满足高强混凝土的使用性能要求,近年来对其性能试验的研究较为广泛。何毅等<sup>[4]</sup>通过正交试验探究了水胶比、砂率和胶凝材料对 C70 高强混凝土抗压强度与劈裂抗拉强度的影响,研究结果表明水胶比是其性力学性能的显著影响参数;杜凤阁等<sup>[5]</sup>针对 C20 ~ C70 混凝土开展了回弹与超声试验,研究成果建立了不同等级混凝土抗压强度曲线测定的技术方法;杨方等<sup>[6]</sup>在最优配合比条件下,研究了山砂粉质量分数对其和易性和抗压强度的影响,确定了最优机制山砂质量分数为 7% ~ 10%;李伟等<sup>[7]</sup>从材料组成出发,分析了国内外现有高强混凝土材料组成设计参数,为工程实际应用和相关规范的编写提供了参考。

基于上述研究成果,本文依托花园城 C3 项目展开研究,该项目的核心筒采用了标号为 C70 的混凝土。在工程建设过程中,混凝土强度和高黏度问题是施工的关键点,为此工程中采用了低活

性、高需水比的二级粉煤灰作为外掺剂。为探究掺入此类二级粉煤灰的 C70 高强混凝土的工程应用性能,设计了不同掺量硅灰及粉煤灰的高强混凝土正交对比试验,并结合基准配比试验进行了优化试验设计,以期为高强混凝土的工程应用提供一定的参考价值。

## 1 工程背景

高强混凝土 (high performance concrete, HPC) 是一种采用常规材料和工艺生产,但具有显著增强的力学性能、耐久性和工作性的新型高技术混凝土。其主要特点包括高强度、高工作性和高体积稳定性。通过采用低水胶比、优质原材料,并掺加矿物掺合料(如硅灰、粉煤灰)和高效外加剂(如减水剂),实现了性能上的突破。高强混凝土因其优异性能被广泛应用于各类关键工程:高层建筑中可减小梁柱截面,增加使用面积;在历史建筑修复中可提升结构安全性和耐久性;在大跨度桥梁建设中可提高承载力和抗裂性;在隧道工程中可抵御复杂地质条件,确保稳定性;在海洋平台中可抵抗海水侵蚀,延长使用寿命;在水坝堤防工程中,其高抗渗性可有效防止渗漏。

花园城 C3 项目结构高度为 193 m,高宽比为 7.49,长宽比为 1.97;总建筑面积为 86 493.41 m<sup>2</sup>,包含建筑工程、地坪和道路建设。工程结构形式为框架-核心筒体系,地下 4 层,地上 50 层,核心筒采用标号为 C70 的高强混凝土,其基准配合比材料参数如表 1~4 所示。

表 1 水泥物理性能分析

材料	比表面积/ (m <sup>2</sup> ·kg <sup>-1</sup> )	标准稠 度/%	时间/min		抗压强度/MPa	
			初凝	终凝	3 d	28 d
P·O 42.5R 水泥	370	27.5	153	216	28.5	50.3

表 2 粉煤灰检测数据

<0.045 mm 粒径占比	需水比	烧失量	28 d 活性指数	含水量
13.3	98.6	6.6	78	0.6

表 3 硅灰物理性能

比表面积/( $\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ )	$\text{SiO}_2$ 质量分数/%	烧失量/%	含水率/%	堆积密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )
28 000	93	1.8	0.2	520

表 4 减水剂匀质性报告

砂浆减水率/%	pH 值	含固量/%	密度/( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	水泥净浆流动度/mm
31.4	4.0	14.0	1.036	210

其他材料,如碎石,采用 5~20 mm 连续集配的碎石,其含泥量为 0.8%,不含泥块,压碎指标为 5.3%;砂采用机制砂,细度模数为 2.9,含泥量为 0.4%,泥块质量分数为 0.1%;水采用生活饮用水。上述各项材料的综合指标均符合《高强混凝土应用技术规程》(JGJ/T 281—2012)的规定。

## 2 基准配比设计试验

混凝土中水泥的水化是一个复杂且非均质的化学变化过程,主要产物包括水化硅酸钙(C-S-H)、氢氧化钙 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和钙矾石(Aft)等。掺入粉煤灰颗粒后,粉煤灰颗粒中的有效成分(玻璃微珠)被溶解出来,与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生二次水化反应,生成C-S-H凝胶结构。这不仅显著提升早期强度,同时在中期也能稳步提高抗压强度<sup>[8]</sup>。

在**高强混凝土**制备过程中,粉煤灰中的硅酸、铝酸和氧化铁等活性物质与水泥中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生化学反应,形成胶质体填充混凝土内部孔隙,从而增加混凝土的致密性和抗渗透能力。对于**高强混凝土**而言,除强度方面的要求外,粉煤灰掺量对混凝土强度劣化的影响较大,尤其是在循环条件下的强度劣化速度<sup>[8]</sup>。因此,有必要探究粉煤灰掺量对混凝土和易性评价及强度的影响<sup>[9]</sup>。

根据配比1(常规C70基准配合比,其各组分详见表5)前期的生产、试验和结构实体外观综合分析发现:硅灰掺量为8.6%(实际掺配为 $50 \text{ kg/m}^3$ )时,无法满足试块和构件的抗裂要求,结构实体存在较大的收缩开裂风险。基于此调整思路如下:首先将

硅灰掺量从8.6%降至6%(实际掺配为 $35 \text{ kg/m}^3$ ),并将二级粉煤灰从 $60 \text{ kg/m}^3$ 等量替换至 $75 \text{ kg/m}^3$ ,形成配比2;其次,根据商混站不同标号的强度分析判断,水泥用量并非越高越好,因此将水泥用量从 $470 \text{ kg/m}^3$ 降至 $450 \text{ kg/m}^3$ ,并将二级粉煤灰从 $75 \text{ kg/m}^3$ 等量替换至 $95 \text{ kg/m}^3$ ,形成配比3;最后通过阶梯设计,再将水泥用量从 $450 \text{ kg/m}^3$ 降至 $430 \text{ kg/m}^3$ ,并将二级粉煤灰从 $95 \text{ kg/m}^3$ 等量替换至 $115 \text{ kg/m}^3$ ,形成配比4。配比2、3、4的胶材总量保持580 kg不变,砂率38.4%不变,用水量 $145 \text{ kg/m}^3$ 不变。试验过程中通过调整外加剂用量来保证不同配比的初始状态一致,具体试验配合比设计如表5所示。

通过混凝土拌合物的坍落度试验、混凝土拌合物的拓展试验以及混凝土试块抗压强度试验,以配比1作为空白对照组,检测6%硅灰掺量的混凝土拌和物的坍落度,拓展度和抗压强度,综合评估后选择性能最佳的配比。各配比条件下的混凝土工程性能及强度对比如表6所示,其强度增幅曲线如图1、2所示。

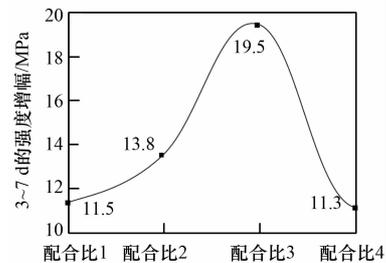


图 1 早期强度增幅曲线

表 5 配合比设计

试验配比编号	水泥	粉煤灰	硅灰	机制砂	碎石	水	减水剂
1	470	60	50	660	1 060	145	13.92
2	470	75	35	660	1 060	145	15.08
3	450	95	35	660	1 060	145	16.24
4	430	115	35	660	1 060	145	17.40

kg

表 6 和易性评价及强度分析

试验配比编号	状态描述	坍落度/ mm	强度/MPa			外观检测	经济指标/ (元·m <sup>-3</sup> )
			3 d	7 d	28 d		
1	混凝土黏度大,流速慢,状态较差	195	54.4	65.9	81.4	存在微观裂缝	448.1
2	混凝土黏度较大,流速较慢,状态一般	205	54.7	68.5	101.9	无裂缝	446.0
3	混凝土黏度较大,流速正常,状态正常	210	57.6	77.1	109.3	无裂缝	444.1
4	混凝土黏度较大,流速较慢,状态一般	200	56.8	68.1	101.2	无裂缝	442.3

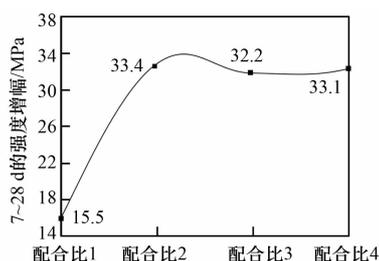


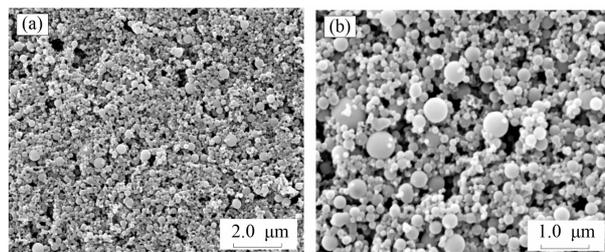
图 2 中期强度增幅曲线

由表 6 可知:配比 1 的混凝土坍落度较小,外观检测发现表面存在微观裂缝(裂缝宽度  $<0.2$  mm)。随着二级粉煤灰掺量的增加,混凝土的工作性能呈现增长趋势。在粉煤灰掺量为  $95 \text{ kg/m}^3$ (即配比 3)时,混凝土的坍落度及强度增长达到最大值,28 d 峰值强度为  $109.3 \text{ MPa}$ 。继续增大粉煤灰掺量至配比 4 时,混凝土流速变慢,坍落度降低,28 d 强度降至  $101.2 \text{ MPa}$ ,相较于配比 3 降低了  $7.4\%$ 。由图 1 可知:在基准配合比试验中,试件在  $3 \sim 7$  d 的强度增幅先增加后降低,配比 3 在此阶段的强度增幅最大,达到  $19.5 \text{ MPa}$ ,相较于常规基准配比 1 增加了  $69.6\%$ 。而在配比 4 中,由于粉煤灰掺量过大,混凝土和易性变差,其强度增幅反而较常规配比 1 降低了  $2\%$ 。由图 2 可知:在试件  $7 \sim 28$  d 的强度增幅曲线中,配比 2、3、4 的强度增幅相较于基准配比 1 均有较大幅度提升,提升比例范围为  $108\% \sim 115\%$ 。这表明,通过增大粉煤灰掺量并降低硅灰掺量,可以显著提高混凝土中期强度增幅。综合来看,混凝土在  $3 \sim 28$  d 的强度增幅最大为  $51.7 \text{ MPa}$ ,此时的最佳配合比为配比 3,相较于常规配比 1,其强度增幅提升了  $91.5\%$ 。结合经济性比选结果,各配比条件下的经济指标差异不大,但随着粉煤灰掺量的增加,

其经济指标呈降低趋势,降幅约为  $2 \text{ 元/m}^3$ 。基于上述实验结果,并根据不同龄期强度的增幅情况和经济性综合分析,拟选择配比 3 作为最佳基准配比。

### 3 优化配比筛选试验

硅灰具有独特的火山灰活性,但由于其颗粒极细,掺入混凝土后会导致拌合物用水量增加。为解决这一问题,通常使用的外加剂为高效减水剂(图 3)。高效减水剂能够有效降低硅灰引起的高用水量问题。硅灰与水接触后,其中的小颗粒会迅速溶解,形成富硅贫钙的溶液,并与  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  反应生成 C-S-H 凝胶。从化学反应角度来看,硅灰掺入降低了水泥石中的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  摩尔浓度。在水泥-硅灰复合胶凝材料体系的早期水化阶段,硅灰颗粒对水泥水化产物起到了“成核”作用,从而促进了水泥的水化过程<sup>[10-11]</sup>。



倍数/万倍:(a) 50;(b) 100

图 3 不同倍数下的硅灰微观形貌分析

硅灰颗粒可以填充在水泥颗粒的空隙中,从而显著提高浆体体系的堆积密实度。与粉煤灰相比,硅灰的填充效果更佳,这在宏观性能上表现为增强混凝土的强度和耐久性。硅灰掺入混凝土后,可提升混凝土的早期抗压强度、增强其抗弯

抗折能力和弹性模量,同时降低水和氯离子的渗透性,改善耐久性,并提高耐磨性和抗冲击荷载性能。在高强度混凝土结构中,硅灰的使用尤为广泛。为实现微硅粉的高值化利用,充分利用其中 Si、Mg、Ca 等微量元素的作用,可将硅灰与六偏磷酸钠混合制得液体硅灰。目前,液体硅灰在实际工程中的应用日益广泛。

通过强度和经济性分析,选择配比 3 作为基础配比。基于此配比,进一步对不同硅灰掺量进行优化分析。结合硅灰前期使用情况及原创性研发设计,采用浓度为 35%、用量为 50 kg/m<sup>3</sup> 的液体硅灰(配比 3-2)。由于该液体硅灰放置时间较长,存在一定程度的水分挥发,按照 60% 的水分含量进行扣除,此时默认经过工艺制备的液体硅灰仅形成了一种匀质性较好的分散体系。在此基础上,采用相同浓度和用量的液体硅灰(配比 3-3),但不扣除硅灰中的水分。此时默认经过工艺制备的液体硅灰中,水分子和硅灰发生了化学反应,形成了新的物质(水合二氧化硅),建立了新的化学键。水分子不再以常规的游离形态分布于液体硅灰中。具体优化配比筛分试验参数如表 7 所示。

通过混凝土拌合物的坍落度试验、拓展度试验以及混凝土试块抗压强度试验,对上述配合比条件下的混凝土和易性评价及强度进行评价与分析,结果如表 8 所示。

由表 8 可知:对比分析配比 3-1 及配比 3-3,其变量在于使用了 50 kg/m<sup>3</sup>,浓度为 35% 的液

体硅灰。结果显示,添加该液体硅灰后,混凝土坍落度更高,黏度减小,流速加快,和易性更佳。尽管其 28 d 强度较配比 3-1 仅增加约 0.8%,但整体经济指标降低了 14.1 元/m<sup>3</sup>,经济效益显著。配比 3-2 虽然强度比配比 3-3 高 4.6 MPa,但其用水量仅为 125 kg,水胶比为 0.216;而配比 3-3 用水量为 145 kg,水胶比为 0.25。配比 3-2 如此低的水胶比并未达到预期强度,并因减少了 20 kg 用水量,导致混凝土黏度增大,流动性差,难以满足生产上的和易性要求。相反,配比 3-3 由于增加了 20 kg 用水量,混凝土黏度减小,流速加快,和易性更好,两者的容重均为 2 490 kg/m<sup>3</sup>,完全符合生产和施工的要求。上述情况的原因在于:35% 质量浓度的液体硅灰在不损失容重的前提下形成了一种新的化学键,释放出 20 kg 用水量,改善了混凝土状态与和易性。优化后的混凝土黏度小,流速快,降黏成本几乎为 0,未加入任何降黏母液或引气组分,具有极大的推广价值。

通过分析各配合比条件下的强度增幅可知,配比 3-1 与配比 3-3 在养护期(3~28 d)内强度增幅基本相同,分别为 39.7、41.3 MPa;配比 3-2 强度增幅最高,达 46.3 MPa,较配比 3-1 和 3-3 分别提高 16.6%、12.1%,较基准配比 3 试验中的 28 d 强度提高 5%。然而,配比 3-2 的坍落度却降低了 20 mm,工程和易性变差,不利于工程施工。综合对比优化配比筛选结果可知,采用 35% 液体硅灰且无需扣除其中水分的配比方案(即配比 3-3),混凝土黏度最小,流速最快,坍

表 7 优化配比筛选试验

试验配比编号	水泥	粉煤灰	硅灰	机制砂	碎石	水	减水剂
3-1	450	95	35	660	1 060	145	16.24
3-2	450	95	50(35% 液体硅灰)	660	1 060	125	16.24
3-3	450	95	50(35% 液体硅灰)	660	1 060	145	16.24

表 8 和易性评价及强度分析

试验配比编号	状态描述	坍落度/mm	强度/MPa			经济指标/(元·m <sup>-3</sup> )
			3 d	7 d	28 d	
3-1	混凝土初始正常,和易性良好,容重为 2 495 kg/m <sup>3</sup>	200	57.6	77.1	109.3	444.1
3-2	混凝土黏度大,流速慢,容重为 2 490 kg/m <sup>3</sup>	190	59.5	78.2	114.8	429.9
3-3	混凝土黏度小,流速快,容重为 2 490 kg/m <sup>3</sup>	220	52.2	72.8	110.2	429.9

落度最大,工程和易性最佳,且相较于基准配比(配比3-1),每立方米经济性降低3.2%,具备良好的工程性能和经济性能。综上分析,最终确定配比3-3为最终优化配比结果,其工程性能最佳,经济性能最优。

#### 4 结 论

(1) 在基准配合比条件下,当二级粉煤灰掺量为 $95\text{ kg/m}^3$ 时,C70高强混凝土的工程性能最佳。此时,混凝土坍落度最大可达210 mm,相较于常规基准配合比,其前期强度增幅提高69.6%,中期强度增幅提升91.5%。

(2) 通过对基准配合比进行优化设计,调整硅灰类型及掺量后发现,采用 $50\text{ kg/m}^3$ 、质量分数为35%的液体硅灰可以有效降低混凝土后期收缩开裂风险。在此条件下,混凝土中期峰值强度可达110.2 MPa,相较于固体硅灰掺量为 $35\text{ kg/m}^3$ 时的峰值强度提高8.23%,经济指标每立方米降低3.2%。

#### 参考文献:

[1] 金立兵,段杰,吴强,等.高性能混凝土的配合比设计

研究综述[J].混凝土,2023(5):168-174.

- [2] 王金歌.高性能混凝土高温力学及热变形试验研究[J].科学技术创新,2024(9):194-199.
- [3] 赵耀华.高性能混凝土在路桥建设中的应用与优势.城市建设理论研究(电子版),2024(10):161-163.
- [4] 何毅,李晨瑶,甯佳明,等.C70高性能混凝土的正交试验设计与制备[J].武汉理工大学学报,2023,45(9):42-47.
- [5] 杜凤阁,王大勇.泵送混凝土无损测强曲线试验研究[J].工程建设,2023,55(1):19-24.
- [6] 杨方,申波,李友彬,等.基于正交试验C70山砂混凝土的配和比设计[J].贵州大学学报(自然科学版),2020,37(4):93-98.
- [7] 李伟,解传凯,姚林,等.材料组成对超高性能混凝土早期性能的影响[J].工程建设,2021,53(10):1-6.
- [8] 刘彦清,马亚利.掺粉煤灰混凝土强度劣化试验研究[J].科学技术与工程,2024,24(7):2863-2868.
- [9] 陈炜一,樊星,李嵩,等.基于正交试验设计的大掺量粉煤灰混凝土配合比[J].混凝土,2022(8):1-5.
- [10] 马佳庆,铁生年.不同交联方式对微硅粉液体地膜的土壤保水性影响[J].广州化工,2019,47(15):75-79.
- [11] 马佳庆,铁生年.微硅粉悬浮液体地膜制备及其稳定性研究[J].硅酸盐通报,2018,37(10):3248-3255.