

公路混凝土多元掺合料复掺力学性能与干缩率影响研究

谢梅良¹, 郑 权²

(1. 广西交通技师学院, 南宁 530001, 2. 河北省省直房地产服务中心, 石家庄 050000)

摘 要: 为研究公路混凝土多元掺合料复掺对力学性能和体积稳定性的影响机理, 开展硅灰 (SF)、矿渣粉 (SL) 和粉煤灰 (FA) 两两复掺及三元复掺试验, 测定各工况下混凝土的抗压强度、弹性模量和干燥收缩率, 并利用极差分析确定各个因素的影响程度。研究表明: 在多数二元体系中, 力学性能和干缩率随掺量增加呈先改善后回落的趋势, 其中 SF+SL 复掺在 4%SF 和 15%SL 时效果最好; SF+FA 复掺下干缩率随 FA 掺量的增加不断下降; 三元复掺体系中 SF 6%、SL 15%、FA 5% 时抗压强度达到峰值 (69.78 MPa); 极差和方差分析显示, SF 是影响抗压强度和干缩性能的最主要因素, SL 对收缩控制效果最好, FA 主要起调节工作性和长期性能的作用。研究结论可为公路工程中混凝土材料的设计提供参考。

关键词: 多元掺合料; 三元复掺; 抗压强度; 干燥收缩率; 极差分析

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2026) 04-0078-07

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.04.012

Research on the Mechanical Properties and Drying Shrinkage of Highway Concrete with Multi-component Blending of Admixtures

XIE Meiliang¹, ZHENG Quan²

(1. Guangxi Institute of Transportation Technicians, Nanning 530001, China;

2. Hebei Provincial Direct Real Estate Service Center, Shijiazhuang 050000, China)

Abstract: To investigate the mechanism of the combined use of multiple admixtures in highway concrete on its mechanical properties and volume stability, experiments were conducted on the two-component and three-component combined use of silica fume (SF), slag powder (SL), and fly ash (FA). The compressive strength, elastic modulus, and drying shrinkage rate of the concrete under various conditions were measured. The influence degree of each factor was determined using range analysis. The results show that in the binary combined system, the mechanical properties and drying shrinkage rate of the concrete both show a trend of improvement first and then decline with the increase of the dosage of each admixture. Among them, the SF + SL combination has the best effect at 4% SF and 15% SL; the drying shrinkage rate decreases continuously with the increase of FA dosage in the SF + FA combination; in the ternary combined system, the compressive strength reaches the peak (69.78 MPa) when SF is 6%, SL is 15%, and FA is 5%; range and variance analysis show that SF is the factor that most affects the compressive strength and drying shrinkage performance, SL has the best effect on shrinkage control, and FA mainly plays the role of adjusting workability and long-term performance. The research conclusions can provide a reference for the design of concrete

作者简介: 谢梅良 (1975—), 本科, 高级工程师, 研究方向: 建筑与土木工程。

通信作者: 郑 权 (1991—), 本科, 高级工程师, 研究方向: 土木工程。

收稿日期: 2026-02-07

materials in highway engineering.

Key words: multicomponent admixtures; ternary composite addition; compressive strength; drying shrinkage rate; range analysis

0 引言

多元矿物掺合料复掺技术是利用各种掺合料间的相互影响提高混凝土力学性能和耐久性, 调节体积稳定性, 从而满足复杂交通荷载及环境工程要求^[1-2]。探究多元掺合料复掺对公路混凝土性能的影响机理, 确定其优化配比和作用途径, 对于提高公路结构材料的服役性能、推广绿色高性能混凝土有重要的工程意义。

卢玲霞^[3]研究了粉煤灰、矿粉和硅灰单掺、双掺和三掺对高强机制砂混凝土工作性、力学性能和早期收缩开裂的影响, 结果表明三掺体系可有效降低早期收缩率和开裂面积; 白春等^[4]研究了煅烧煤矸石粉和矿粉或者粉煤灰复合掺量对混凝土性能的影响。结果表明: 与粉煤灰按 3: 7 复掺时的坍落度、强度和抗冻性均优于单独使用矿粉, 两者复合可共同改善工作性和强度; 胡红梅等^[5]研究了石灰石粉和粉煤灰、矿粉、硅灰的复掺对高强自密实混凝土性能的影响, 结果表明石灰石粉与高活性硅灰复掺可产生互补作用, 提高自密实性和强度; 张延年等^[6]采用机械活化激发铁尾矿的火山灰活性, 并将活化的铁尾矿和粉煤灰、矿渣粉混合制成复合掺合料, 证明活化可改善其物理及表面化学性质; 庞建勇等^[7]利用正交试验研究偏高岭土、超细粉煤灰和硅灰的掺量对掺合料混凝土力学性能的影响, 发现偏高岭土影响最大且呈正相关; 宋力等^[8]通过正交试验法研究磷渣、粉煤灰和硅灰对混凝土各个龄期强度的影响, 结果表明粉煤灰主要影响后期强度, 硅灰主要影响前期; 张奕等^[9]探究了矿粉和粉煤灰复合掺量以及总掺量对高性能混凝土收缩徐变的影响, 发现粉煤灰含量越大, 收缩越小, 徐变越大, 总掺量增大收缩先增后减; 董猛等^[10]研究了不同的水胶比、偏高岭土—矿渣—粉煤灰复掺对水泥胶砂强度的影响, 发现水胶比增大强度降低; 张立群等^[11]采用单掺和双掺的方式分析了引气剂以及矿物掺合料对抗盐冻性能影响, 结果发现引气剂改善抗盐冻性能的效果好于水灰比调节; 王鑫等^[12]分析了

单掺与复掺粉煤灰、钢渣粉对机制砂混凝土力学性能的影响, 结果表明复掺 5% 粉煤灰与 10% 钢渣粉可有效提升抗压及抗拉强度; 胡辉等^[13]比较了不同粒径的超细粉煤灰和超细矿粉单掺或复掺对高强混凝土的工作性和强度的影响, 结果表明复掺在适当的掺量下可以提高强度。

为了研究多元掺合料复掺对公路混凝土力学性能和体积稳定性的影响机理, 以某工程为例, 通过设计二元和三元多元矿物掺合料复掺试验, 研究硅灰、矿渣粉与粉煤灰在复掺体系中对混凝土力学性能和体积稳定性的影响规律以及协同作用机理, 揭示多元复掺对公路混凝土宏观性能的调节途径, 以期为公路工程中混凝土材料的设计提供理论依据和实践参考。

1 试验材料与方法

某扩建工程路段全长约 42 km, 桥梁结构所占比例超过 30%, 混凝土材料在干燥收缩明显的环境条件下以及冻融循环的作用下容易出现开裂损坏等现象, 严重影响结构的耐久性及安全性。传统的单一矿物掺合料混凝土在早期强度、长期耐久性和体积稳定性间难以兼顾。

1.1 原材料

多元矿物掺合料复掺试验方案中掺合料选择硅灰 (SF)、矿渣粉 (SL) 和粉煤灰 (FA)。固定胶凝材料总量为 420 kg/m^3 , 水胶比为 0.36, 单位用水量为 151 kg/m^3 , 砂率 38%。所有试验粗骨料为 5 ~ 25 mm 连续级配碎石, 细骨料为细度模数 2.7 的中砂, 统一使用聚羧酸系高性能减水剂来调节性能。

多元掺合料复掺采用二元和三元两种体系, 二元复掺将 SF、SL、FA 三种配合比两两混合, SF 的四个水平分别为 2%、4%、6%、8%, SL 的四个水平为 5%、10%、15%、20%, FA 的四个水平为 5%、10%、15%、20%。三元复掺在双掺的基础上再加入第三种掺合料, 用 $L_{16}(4^5)$ 正交表安排试验方案, 共得到 16 组具体的配比, 见表 1。所有试验采用内掺法, 且保持水胶比、骨料种类等基本参数不变,

材料科学

试件养护到规定龄期以后，分别测出其抗压强度、干缩率和弹性模量等主要性能指标，最后利用极差及方差分析确定各个因素的影响程度。

表 1 三元复掺试验方案
Table 1 Experimental scheme for ternary composite addition

试验号	SF 掺量/%	SL 掺量/%	FA 掺量/%
1	2	5	5
2	2	10	10
3	2	15	15
4	2	20	20
5	4	5	10
6	4	10	5
7	4	15	20
8	4	20	15
9	6	5	15
10	6	10	20
11	6	15	5
12	6	20	10
13	8	5	20
14	8	10	15
15	8	15	10
16	8	20	5

1.2 测试方法

抗压强度测定采用边长为 100 mm 的立方体试件，标准养护到 28 d 龄期后测定其抗压强度。弹性模量测定利用 150 mm×150 mm×300 mm 棱柱体试件，以相同加载速率将试件反复预压至预估极限荷载的 40%，共三次，以消除塑性变形。干燥收缩率测定用 100 mm×100 mm×515 mm 棱柱体试件，在标准养护 3 d 后立即移入温度控制在 20 ℃、相对湿度为 60% 的恒温恒湿室中，根据长度的变化计算各个龄期的干燥收缩值，以 28 d 的数据作为评价指标。所有试件均按照标准振动成型，一组性能测试平行制作三个试件，结果取算术平均值。

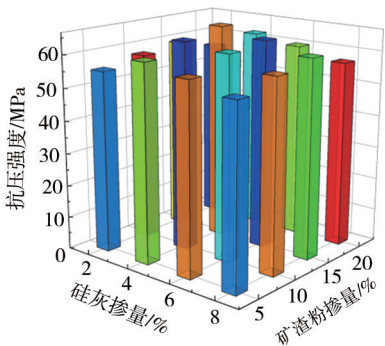
2 二元复掺试验结果分析

2.1 SF+SL 复掺下混凝土性能

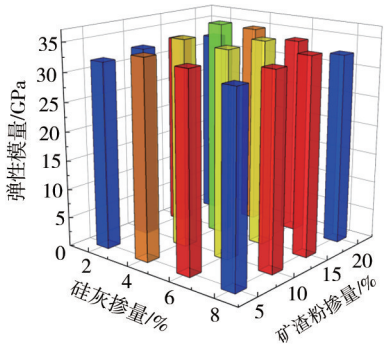
2.1.1 抗压强度及弹性模量变化

由图 1 可知，固定矿渣粉掺量为 15%，随着硅灰掺量由 2% 增加到 8%，混凝土 28 d 抗压强度分别为 59.4、66.4、64.0、61.0 MPa，弹性模量分别为 33.2、

36.8、35.1、33.9 GPa。固定硅灰掺量为 4% 时，矿渣粉掺量分别为 5%、10%、15%、20% 的抗压强度分别是 60.5、64.0、66.4、62.0 MPa，弹性模量分别为 34.0、35.5、36.8、34.8 GPa。这表明硅灰和矿渣粉均存在最佳的掺量范围，硅灰约为 4%，矿渣粉约为 15%，超过该范围强度、模量有所下降。这是因为硅灰有较高的火山灰活性和纳米填充作用，可改善早期的孔隙结构及界面过渡区，而矿渣粉依靠不断的二次水化来实现浆体后期结构的长期致密化。但是当硅灰掺量超过 6% 时，其巨大的比表面积会增大需水量，并且带来微小缺陷，造成性能增长回落；矿渣粉的掺量过高时（大于 15%），会过分稀释水泥熟料，延缓早期骨架的形成，从而影响宏观力学性能^[14-15]。



(a) SF+SL 二元复掺下抗压强度



(b) SF+SL 二元复掺下弹性模量

图 1 SF+SL 二元复掺下抗压强度及弹性模量

Fig. 1 Compressive strength and elastic modulus under the binary compounding of SF and SL

2.1.2 体积干缩率变化

由图 2 可知，矿渣粉的掺量为 15% 时，硅灰的掺量从 2% 增加到 8%，混凝土 28 d 的收缩值分别为 452×10^{-6} 、 436×10^{-6} 、 455×10^{-6} 、 468×10^{-6} ，4% 硅灰

掺量下得到最佳减缩效果。适量的硅灰依靠纳米填充效应和火山灰反应有效地细化了早期孔隙结构,降低了孔隙连通性;但是当硅灰的掺量达到6%以上时,由于高比表面积造成的需水量增大以及化学收缩加剧而产生的负面影响出现,使得收缩抑制的效果变弱。当硅灰的掺量为4%时,随着矿渣粉掺量由5%增加到20%,对应的28 d收缩值分别是 465×10^{-6} 、 448×10^{-6} 、 436×10^{-6} 、 455×10^{-6} ,最佳掺量在15%左右。这主要是由于矿渣粉二次水化产生的产物可持续填满毛细孔,降低孔隙率和毛细管张力;但是过高的掺量由于过早地阻止了早期结构的有效形成,反而会减弱体系对于收缩的约束作用。

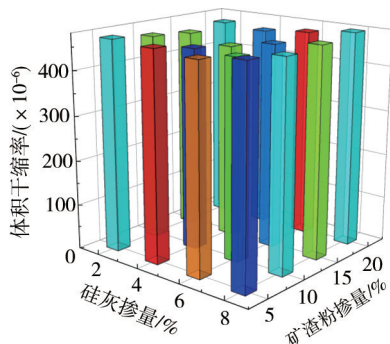


图2 SF+SL 二元复掺下体积干缩率变化

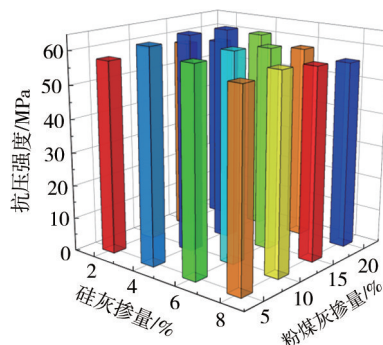
Fig. 2 Volume dry shrinkage rate variation under the binary compounding of SF and SL

2.2 SF+FA 复掺下混凝土性能

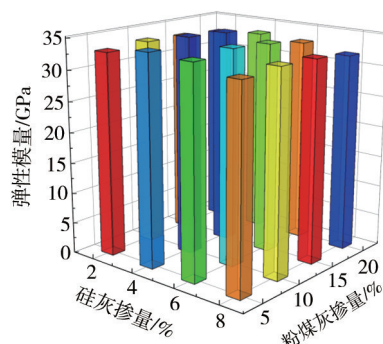
2.2.1 抗压强度及弹性模量变化

由图3可知,两者走势均为先增后减。粉煤灰掺量为10%时,随着硅灰掺量由2%增加到8%,28 d混凝土抗压强度依次为59.0、64.5、62.0和59.0 MPa,弹性模量分别为33.5、35.2、34.5和33.0 GPa,两者峰值都在硅灰掺量为4%的时候出现。当硅灰的掺量4%下,随着粉煤灰的掺量由5%逐渐增大到20%,对应的28 d抗压强度依次为63.5、64.5、64.0、60.5 MPa,弹性模量分别为34.1、35.2、34.8、33.5 GPa,说明最佳复掺范围大约为4%硅灰和10%~15%粉煤灰。这证明适量硅灰依靠其高火山灰活性和纳米填充效果,改善早期浆体的孔隙结构及界面性能;粉煤灰主要是依靠形态上的改变来改善工作性,同时随着后期持续的火山灰反应而得到补充强化。但是当硅灰掺量达到6%以上,巨大的比表面积会造成需水量的增加和颗粒团聚的风险,而粉煤灰掺量超过

15%后宏观力学性能有所降低。



(a) SF+FA 二元复掺下抗压强度



(b) SF+FA 二元复掺下弹性模量

图3 SF+FA 二元复掺下抗压强度及弹性模量

Fig. 3 Compressive strength and elastic modulus under binary compounding of SF and FA

2.2.2 体积干缩率变化

由图4可知,粉煤灰掺量为10%时,随着硅灰掺量由原来的2%增大到8%,混凝土28 d的收缩值分别是 458×10^{-6} 、 440×10^{-6} 、 468×10^{-6} 、 476×10^{-6} ,呈先降后升的趋势,在4%硅灰时最小。适量的硅灰可改善浆体结构,但是过多则会导致化学收缩增大从而造成不利影响。另一方面,当硅灰的掺量固定在4%时,粉煤灰的掺量由5%增大到20%,收缩值也逐渐降低,分别为 470×10^{-6} 、 462×10^{-6} 、 450×10^{-6} 、 440×10^{-6} ,说明粉煤灰有较好的减缩性,并且随掺量增加而增强,在20%掺量处减缩效果最好。SF+FA体系在4%硅灰、20%粉煤灰的配合比下对28 d收缩的抑制作用最大,说明硅灰在短时间内迅速形成致密的骨架,改善了早期的孔隙结构;粉煤灰依靠其形态效应以及持续的火山灰反应,将大量微小空隙填满并细化,二者共同降低了浆体的孔隙率和失水收缩性。

材料科学

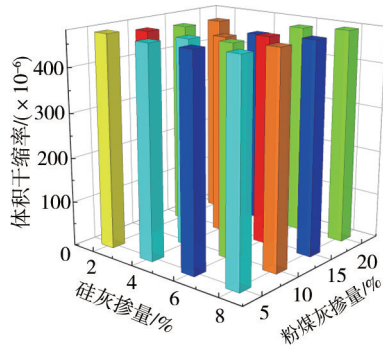
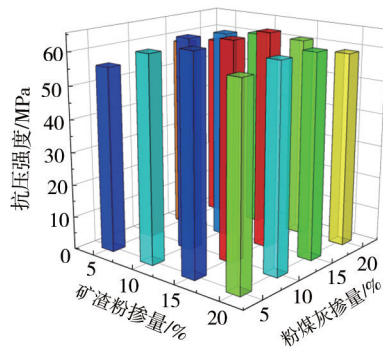


图4 SF+FA 二元复掺下体积干缩率变化
Fig. 4 Volume dry shrinkage rate variation under the binary co-doping of SF and FA

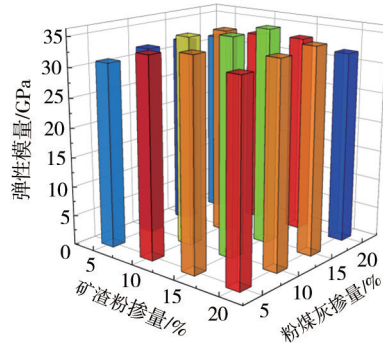
2.3 SL+FA 复掺下混凝土性能

2.3.1 抗压强度及弹性模量变化

由图5可知,粉煤灰掺量固定为15%时,矿渣粉掺量由5%增加到20%,混凝土抗压强度分别是58.7、63.2、65.4和61.8 MPa,弹性模量分别是32.1、34.8、36.1和34.5 GPa。当矿渣粉的掺量为15%时,随着粉煤灰掺量由5%增加到20%,抗压强



(a) SL+FA 二元复掺下抗压强度



(b) SL+FA 二元复掺下弹性模量

图5 SL+FA 二元复掺下抗压强度及弹性模量
Fig. 5 Compressive strength and elastic modulus under the binary compounding of SL and FA

度分别是64.8、65.4、65.4和60.9 MPa,弹性模量分别是34.7、36.1、36.1和33.3 GPa。矿渣粉和粉煤灰均有最佳的掺量范围,矿渣粉约为10~15%,粉煤灰为10~15%。当矿渣粉与粉煤灰的掺量为15%,其协同效果最好,此时抗压强度及弹性模量均达到最大值。粉煤灰掺量过高时,其稀释效果和较低的早期活性都会延迟胶凝体系的发展,从而导致宏观力学性能变差。

2.3.2 体积干缩率变化

由图6可知,粉煤灰的掺量为20%时,随着矿渣粉掺量由5%逐渐增大到20%,28 d混凝土干缩率呈现先波动下降然后略有上升的趋势,分别为 460×10^{-6} 、 448×10^{-6} 、 442×10^{-6} 和 450×10^{-6} ,最低值在矿渣粉掺量为15%时出现。另一方面,当矿渣粉掺量为15%时,随着粉煤灰的掺量由5%增加到20%,28 d混凝土干缩率分别是 455×10^{-6} 、 445×10^{-6} 、 438×10^{-6} 和 442×10^{-6} ,总体上呈降低趋势,在粉煤灰掺量为15%时达到最小值(438×10^{-6}),说明该配比(15%SL+15%FA)有最好的减缩效果。

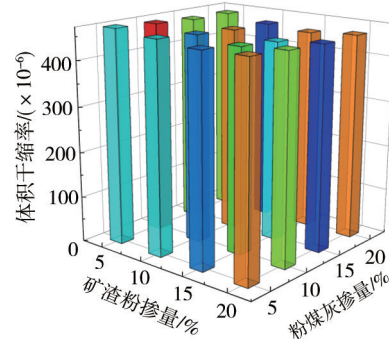


图6 SL+FA 二元复掺下体积干缩率变化
Fig. 6 Volume dry shrinkage rate variation under the binary compounding of SL and FA

2.4 三元复掺

2.4.1 三元复掺试验结果

由表2可知,抗压强度随着SF掺量的增大而呈先增后减的趋势,在SF掺量为6%、SL为15%、FA为5%时达到最大值69.78 MPa。干缩率总体上随着SF掺量的增大而上升,在SF为8%、SL为5%、FA为20%时达到最大值 440.18×10^{-6} ;SL和FA掺量的增加有利于降低干缩,特别是在SF为2%、SL为20%、FA为20%时达到最低值 340.67×10^{-6} 。弹性模

量变化和抗压强度趋势大致相同，最高值出现在 SF 为 6%、SL 为 15%、FA 为 5% 的配比处，约为 39.21 GPa。

表 2 三元复掺试验结果

Table 2 Results of tri-component reinforcement experiment						
试验号	掺合料掺量/%			抗压强度 /MPa	干缩率 / (×10 ⁻⁶)	弹性模量 /GPa
	SF	SL	FA			
1	2	5	5	52.37	385.24	33.85
2	2	10	10	50.12	370.58	33.12
3	2	15	15	48.76	355.43	32.48
4	2	20	20	46.33	340.67	31.75
5	4	5	10	60.48	400.35	36.24
6	4	10	5	62.19	385.76	36.82
7	4	15	20	56.43	370.94	35.15
8	4	20	15	54.76	360.28	34.64
9	6	5	15	66.53	420.37	38.52
10	6	10	20	64.35	405.25	37.83
11	6	15	5	69.78	390.46	39.21
12	6	20	10	63.14	375.39	37.04
13	8	5	20	62.62	440.18	37.55
14	8	10	15	60.25	425.37	36.94
15	8	15	10	64.48	410.29	38.12
16	8	20	5	58.73	395.42	36.36

2.4.2 各因素平均值分析

由图 7 可知，硅灰的平均值由掺量为 2% 时的 49.40 MPa 逐渐增大到 6% 时的 65.95 MPa，在 8% 时略微下降到 61.52 MPa，呈现出先升后降的趋势；矿渣粉在掺量为 15% 时达到最大值 59.61 MPa；粉煤灰随着掺量的增加而呈单调递减趋势，从 5% 时的 63.02 MPa 降低到 20% 时的 54.91 MPa。弹性模量和强度的发展规律相似（图 11），硅灰在 6% 掺量时达到最高的平均值为 38.40 GPa。由此可知硅灰对于提高混凝土力学性能的作用最大，但是其收缩影响也最大；矿渣粉在中等掺量时可在强度和收缩之间达到较好的平衡；粉煤灰主要起到早期强度降低的作用，对收缩控制作用较小。对于干缩性能，硅灰的平均干缩率为从 2% 掺量的 363.48×10^{-6} 到 8% 掺量的 417.82×10^{-6} ，矿渣粉和粉煤灰的干缩率则随着掺量的增加而下降，体现出对收缩变形的补偿作用。从整体上看，三元体系的协同作用表现为硅灰主导的早期增强和矿渣粉主导的体积稳定性的优化之间互相补充的关系，而粉煤灰起调节工作性和长期性能的作用。

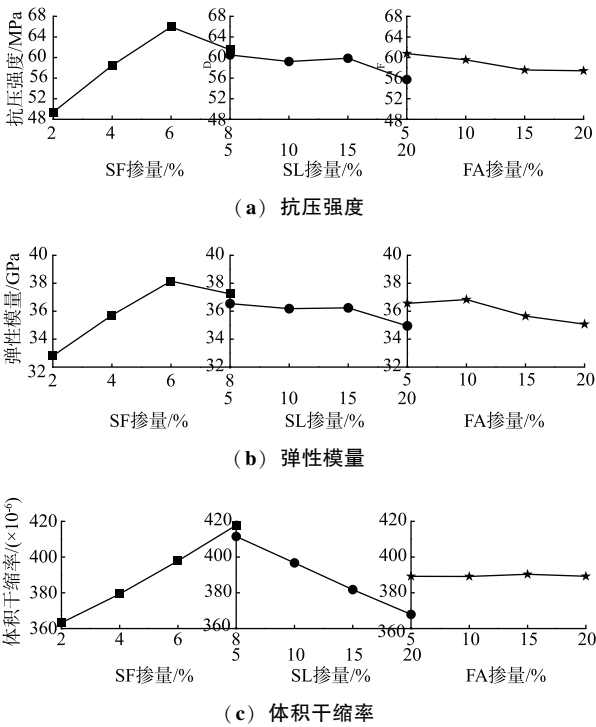


图 7 各因素平均值

Fig. 7 Average values of each factor

2.4.3 各因素极差分析

由表 3 可知，对于抗压强度，硅灰的极差为 16.55 MPa，远大于粉煤灰的 8.11 MPa、矿渣粉的 4.50 MPa，说明硅灰掺量是决定强度的关键因素。干缩率上，硅灰极差为 54.34×10^{-6} ，矿渣粉为 42.98×10^{-6} ，而粉煤灰极差仅有 1.21×10^{-6} ，说明收缩变形主要由硅灰和矿渣粉控制。弹性模量极差分析结果表明硅灰的弹性模量为 5.60 GPa，粉煤灰和矿渣粉的弹性模量分别为 1.36、1.35 GPa，再次证明了硅灰对刚度起决定性作用。这说明在三元复合胶凝体系中，硅灰是对所有性能影响最大的关键因素，掺量变化会引起混凝土力学性能和收缩特性的剧烈变动；矿渣粉对收缩控制有重要的作用，但是强度的影响比较小；粉煤灰对强度有中等程度的影响，但是对于收缩几乎没有影响。

表 3 各因素极差结果

Table 3 Variance analysis results of the tri-component repeated addition experiment

因素	抗压强度/MPa	干燥收缩率/ (×10 ⁻⁶)	弹性模量/GPa
SF	16.55	54.34	5.60
FA	8.11	42.98	1.36
SL	4.50	1.21	1.35

材料科学

2.4.4 各因素方差分析

由表 4 可知,对于 28 d 抗压强度, SF 的平方和与 F 值均远高于 SL 和 FA,其贡献率达 74.6%,在 $\alpha=0.05$ 水平上影响显著,证实 SF 是调控强度的最关键因素。对于干缩率, SF 与 SL 的影响均高度显著,而 FA 影响不显著,表明收缩变形主要由 SF 的正向驱动与 SL 的负向补偿共同控制。弹性模量的方差分析结果与抗压强度类似, SF 的平方和与 F 值显著主导。综上,三元复掺体系方差分析表明, SF 对所有性能均具有决定性影响; SL 是抑制干缩的关键补偿组分, FA 在给定的掺量范围内对力学与变形性能的直接影响均不显著。

表 4 三元复掺试验方差分析结果
Table 4 Variance analysis results of the tri-component repeated addition experiment

性能指标	方差	平方和 SS	自由度	均方 MS	F 值	贡献率/%
抗压强度	SF	587.68	3	195.89	10.25	74.6
	SL	54.39	3	18.13	0.95	6.9
	FA	31.48	3	10.49	0.55	4.0
	误差	114.63	6	19.11		14.5
干缩率	SF	7 295.2	3	2 431.7	45.3	55.2
	SL	4 630.5	3	1 543.5	28.8	35.0
	FA	3.5	3	1.2	0.02	<0.1
	误差	322.0	6	53.7		9.8
弹性模量	SF	63.11	3	21.04	22.1	78.5
	SL	2.92	3	0.97	1.0	3.6
	FA	3.73	3	1.24	1.3	4.6
	误差	5.72	6	0.95		13.3

3 结论

通过开展公路混凝土硅灰 (SF)、矿渣粉 (SL) 和粉煤灰 (FA) 两两复掺及三元复掺试验下掺合料复掺力学性能与干缩率,并利用极差分析确定各因素影响程度,得出以下结论:

(1) SF+SL 复掺时,抗压强度随着 SF 掺量的增大而呈现先升高再降低的趋势,在 4% 时达到峰值 66.4 MPa; SL 掺量为 15% 时强度最佳。干燥收缩率在 SF 掺量为 4%、SL 掺量为 15% 时得到最低值 (436×10^{-6})。其他组合也有类似的趋势,说明掺合料存在最佳掺量范围。

(2) 三元复掺体系中抗压强度最高值是 69.78 MPa,出现在 SF 6%、SL 15%、FA 5% 的配比

上,而干缩率最小为 SF 2%、SL 20%、FA 20% 的配比为 340.67×10^{-6} ,这表明通过改变比例可平衡强度和收缩控制。

(3) 极差与方差分析结果表明硅灰是调节所有性能的决定性因素 (贡献率 74.6%)。硅灰抗压强度极差为 16.55 MPa,大于粉煤灰、矿渣粉。对于干缩率,硅灰的极差 (54.34×10^{-6}) 最大,说明硅灰掺量是决定混凝土综合性能最重要的变量。

参 考 文 献

[1] 李崇智,王琬怡,梁志勇,等. 花岗岩石粉复合矿粉、粉煤灰对混凝土性能的影响 [J]. 粉煤灰综合利用, 2025, 39 (1): 24-28.

[2] 周爱军,周红. 掺合料复掺对化学法泡沫混凝土性能影响的试验研究 [J]. 新型建筑材料, 2016, 43 (12): 84-86.

[3] 卢玲霞. 矿物掺合料对高强机制砂混凝土早期收缩开裂性能的影响 [J]. 粉煤灰综合利用, 2024, 38 (2): 17-21, 30.

[4] 白春,麻凤海,刘书贤,等. 煅烧煤矸石粉掺合料制备及对混凝土性能影响 [J]. 非金属矿, 2017, 40 (2): 38-41.

[5] 胡红梅,罗德富,李巧,等. 石灰石粉与不同矿物掺合料复掺对高强自密实混凝土性能的影响 [J]. 混凝土, 2018 (12): 81-85.

[6] 张延年,刘柏男,顾晓薇,等. 铁尾矿多元掺合料机械活化机理 [J]. 沈阳工业大学学报, 2022, 44 (1): 95-101.

[7] 庞建勇,陈旭鹏. 高活性矿物掺合料混凝土力学性能试验 [J]. 硅酸盐通报, 2020, 39 (10): 3143-3151.

[8] 宋力,李林果,吴邦睿,等. 三元矿物掺合料对混凝土强度的影响 [J]. 混凝土, 2019 (2): 52-56.

[9] 张奕,陆飞,毛江鸿,等. 复掺矿物掺合料对混凝土收缩徐变的影响规律及应用 [J]. 混凝土, 2021 (3): 90-95.

[10] 董猛,马建栋,李云峰. 偏高岭土掺合料对水泥胶砂强度的影响 [J]. 材料科学与工程学报, 2020, 38 (2): 295-300.

[11] 张立群,贾辰辰,张晓冉,等. 矿物掺合料和引气剂对混凝土抗盐冻性能影响的研究 [J]. 新型建筑材料, 2018, 45 (12): 5-9.

[12] 王鑫,易越磊,孙茂山. 矿物掺合料对机制砂混凝土性能影响的研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2025, 39 (6): 23-28.

[13] 胡辉,王智,石从黎,等. 超细矿物掺合料高强混凝土性能研究 [J]. 混凝土, 2022 (1): 106-111.

[14] 庞建勇,陈旭鹏. 高活性矿物掺合料混凝土力学性能试验 [J]. 硅酸盐通报, 2020, 39 (10): 3143-3151.

[15] 宋力,李林果,吴邦睿,等. 三元矿物掺合料对混凝土强度的影响 [J]. 混凝土, 2019 (2): 52-56.