

硅灰掺量对混凝土性能的影响

Influence of Silica Fume Dosage on the Properties of Concrete

翁娅莲, 孙海燕, 梁荣创, 高愈昌

(云南农业大学 水利学院, 昆明 650201)

摘要: 为研究硅灰对混凝土工作性能、力学性能、干缩性能的影响, 本文在不同水胶比下, 探究了硅灰掺量对混凝土的流动性、抗压强度、劈裂抗拉强度和干缩率的影响。结果表明: 两种水胶比下, 混凝土的流动性均随硅灰掺量的增加逐渐下降, 其中水胶比 0.45 组对其流动性影响更显著; 硅灰的掺入对不同水胶比混凝土的抗压和劈裂抗拉强度均有提升, 其中, 相较于基准组, 水胶比为 0.45、0.60 时, 10% 硅灰掺量 28d 抗压和劈裂抗拉强度分别提高了 18.1% 和 14.8%、21.2% 和 20.4%; 随着硅灰掺量的增加, 两种水胶比下混凝土的干缩率均在增加, 相较于水胶比 0.45 组, 水胶比 0.60 时混凝土的干缩率更高, 在 90 d 干燥收缩率最高, 较基准组分别增加了 29.5% 和 25.1%。研究成果可为高性能硅灰混凝土的优化设计提供参考。

关键词: 硅灰; 掺量; 水胶比; 力学性能; 干燥收缩

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2025) 04-0024-06

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.04.005

WENG Yalian, SUN Haiyan, LIANG Rongchuang, GAO Yuchang

(College of Water Conservancy, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

Abstract: To study the influence of silica fume on the workability, mechanical properties and dry shrinkage of concrete, we investigated the effects of silica fume dosage on the fluidity, compressive strength, splitting tensile strength and dry shrinkage rate of concrete under different water-binder ratios. The research results show that the fluidity of concrete decreases gradually with the increase of silica fume dosage under both water-binder ratios, and the effect is more significant in the water-binder ratio of 0.45 group. The incorporation of silica fume enhances the compressive and splitting tensile strength of concrete with different water-binder ratios. Specifically, compared with the reference group, when the water-binder ratio is 0.45, the 28 days compressive and splitting tensile strength with 10% silica fume dosage increase by 18.1% and 14.8%, 21.2% and 20.4% respectively. With the increase of silica fume dosage, the dry shrinkage rate of concrete under both water-binder ratios increases. Compared with the water-binder ratio of 0.45 group, the dry shrinkage rate of concrete is higher when the water-binder ratio is 0.60. The highest drying shrinkage rate was observed at 90 days, with an increase of 29.5% and 25.1% compared to the baseline group, respectively. Provide a reference for the optimized design of high-performance silica fume concrete.

Key words: silica fume; dosage; water binder ratio; mechanical properties; drying shrinkage

基金项目: 云南省教育厅科学研究基金项目 (2024J0446)。

作者简介: 翁娅莲 (1999—), 女, 硕士研究生, 研究方向: 水工材料。

通信作者: 孙海燕 (1979—), 女, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向: 水工材料。

收稿日期: 2025-04-16

0 引言

混凝土是现代建筑工程中的核心材料，其性能的优劣直接影响到工程结构的安全性和耐久性^[1]。硅灰（SF）作为具有极高火山灰活性的矿物掺合料，因其极细的颗粒和较高的 SiO₂ 含量，拥有较大的比表面积，可以有效地填充到水泥颗粒的孔隙之间，增加浆体的密实程度，从而有效阻止了有害物质的进入与扩散，显著改善混凝土的微观结构，被广泛应用于改善混凝土性能的领域^[2-4]。近年来，随着对高性能混凝土需求的增加，硅灰在混凝土领域的研究和应用也逐渐深入。

在工作性能方面，硅灰的掺入通常会导致流动性下降。幸超群等^[5]通过使用硅灰等质量替代部分水泥研究发现，随着硅灰掺量的增加，对混凝土的早期工作性能有所改善；谢群等^[6]通过试验分析得出，硅灰的高比表面积会显著增加水泥浆体的需水量，从而降低流动度；卢玲霞^[7]通过研究矿物掺合料对高强机制砂混凝土的影响，得出硅灰的掺入会降低新拌混凝土的坍落度和扩展度。在力学性能方面，Tao 等^[8]对掺硅灰改性混凝土的早期水化反应作出研究，发现掺入 10% 硅灰的混凝土在 7 d 抗压强度增长最快，且孔结构最密实，抗压强度最大；苏胜威^[9]设计水胶比为 0.33 时，硅粉对面板混凝土的抗压强度有明显的提升作用；彭忠伟^[10]通过增加硅灰掺量，发现硅灰可以提升蒸养混凝土的性能，增加蒸养混凝土的抗折强度、抗压强度和劈裂抗拉强度；方小利等^[11]进一步指出，5%~8% 的硅灰掺量可使混凝土 28 d 强度提升 5%~35%，但高掺量（>10%）时强度增幅减缓；Singniao^[12]在超高性能混凝土（UHPC）中掺入硅灰发现，20% 的硅灰掺量可提供最优的残余强度。在干燥收缩性能方面，Rakesh 等^[13]指出，5% 硅灰掺量的自密实高强混凝土在 100 d 前的干缩值低于基准组，但后期（100~180 d）反而增大。黄正峰等^[14]则发现，10% 硅灰掺量会使混凝土自收缩增加 27.3%~28.8%。

综上所述，目前国内外学者针对硅灰混凝土已开展了较为广泛的研究，但针对其最佳掺量和不同水胶比对硅灰混凝土性能影响的研究较少，因此，文章研究不同水胶比条件下，不同硅灰掺量对凝

土流动性、抗压、劈裂抗拉及干缩性能的影响，揭示硅灰-水胶比协同作用下混凝土的影响规律，以期为高性能硅灰混凝土的优化设计提供技术参考。

1 试验材料与方法

1.1 原材料

水泥采用 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥，其主要相关性能见表 1；细骨料采用人工砂，细度模数为 2.7，饱和含水率为 1.02%，松散堆积密度为 1 690 kg/m³，紧密堆积密度 1 934 kg/m³；粗骨料采用 5~31.5 mm 连续级配的碎石；硅灰主要性能参数见表 2；减水剂为高性能聚羧酸减水剂，液体呈黄褐色且无沉淀，固含率为 20%，减水率 >25%，pH 值为 6~8；拌合用水为自来水。

表 1 水泥主要性能参数

Table 1 Main performance parameters of cement

凝结时间/min		抗压强度/MPa		抗折强度/MPa		比表面积	标准稠度
初凝	终凝	3 d	28 d	3 d	28 d	/(m ² /kg)	用水量/%
132	187	31.61	50.57	6.52	8.40	347	27

表 2 硅灰主要性能参数

Table 2 Main performance parameters of silica fume

烧失量	比表面积	氯离子含量	需水比量	28 d 活性指数
/%	/(m ² /kg)	/%	/%	/%
1.48	21 000	0.01	112	105

1.2 试验方案

依据 JGJ/T 55—2011《普通混凝土配合比设计规程》，试验分别设计了 C30 和 C45 两种强度等级的混凝土。初步设定 C30 组混凝土的坍落度在 55~70 mm 之间，C45 组混凝土的坍落度在 35~50 mm 之间。通过试拌确定两组混凝土的水胶比分别为 0.45 和 0.60，硅灰掺量分别为 5%、10%、15% 和 20%，试验配合比见表 3。A 为 0.45 水胶比试验组，B 为 0.60 水胶比试验组，A0、B0 分别为两种水胶比的基础组。

依据 GB/T 50080—2016《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》，采用混凝土坍落度分析掺入硅灰后对不同水胶比混凝土工作性能的影响规律。依据 GB/T 50081—2019《普通混凝土力学性能试验方法标准》，每一配比制作 100 mm×100 mm×100 mm 立方体试件 3 块，在标准条件下分别养护 7、28、60 和 90 d 后测定试件的抗压强度和劈裂抗拉强度。依据 GB/T 50082—2024《普通混凝土长期性能和耐久性能

表3 硅灰混凝土的试验配合比

编号	原材料/(kg/m ³)						硅灰掺量/%
	水泥	硅灰用量	砂	石	水	减水剂	
A0	411.0		595	1 209	185		
A5	390.4	20.6	595	1 209	185	0.82	5
A10	369.9	41.1	595	1 209	185	0.82	10
A15	349.3	61.7	595	1 209	185	2.06	15
A20	328.8	82.2	595	1 209	185	2.06	20
B0	325.0		677	1 203	195		
B5	308.7	16.3	677	1 203	195	0.65	5
B10	292.5	32.5	677	1 203	195	0.65	10
B15	276.2	48.8	677	1 203	195	1.63	15
B20	260.0	62.0	677	1 203	195	1.63	20

试验方法标准》，每一配比制作 100 mm × 100 mm × 515 mm 棱柱体试件 3 块。将其置于温度 (20 ± 2)℃、相对湿度为 60% ± 5% 的环境模拟箱中进行干缩试验，达到 1、3、7、14、28、45、60 和 90 d 试验龄期后，采用 HSP-540 型混凝土收缩膨胀仪配合防震千分表，测量各试验龄期下硅灰混凝土试件的干缩值。

2 试验结果与分析

2.1 硅灰掺量对混凝土流动性的影响

硅灰掺量对混凝土流动性能影响的试验结果如图 1 所示。两种水胶比下硅灰对混凝土坍落度的影响规律相似，混凝土的流动性均随硅灰掺量的增加而逐渐下降，掺入适量硅灰能够提高混凝土拌合物的保水性和黏聚性。分析认为，由于硅灰颗粒较细、比表面积较大，在混凝土中增大了其与水分子的接触面积，与水分子结合形成絮凝结构，在一定程度上降低浆体的流动性，减少胶凝体系中的自由水，宏观上表现为坍落度随着硅灰掺量的增加而逐渐下降。当硅灰掺量为 5%、10%、15% 和 20% 时，0.45 水胶比的混凝土坍落度较基准组分别下降了 6.5%、26.1%、54.3% 和 67.4%，0.60 水胶比的混凝土较基准组分别下降了 3.2%、9.7%、24.2% 和 29.3%。由此可见，相较于水胶比 0.60，水胶比 0.45 时，硅灰掺量对混凝土流动度的影响更为显著，尤其是当硅灰掺量超过 10% 后。分析认为，通常硅灰的细度约为水泥的 50~100 倍，硅灰颗粒能够吸附或者固定胶凝体系内部自由流动的水分子，在掺入混凝土后能够充分发挥其填充效应，而当硅灰掺量超过 10%

时，其填充效应和对水分子吸附作用的效果则更为明显，从而使混凝土流动性显著下降。

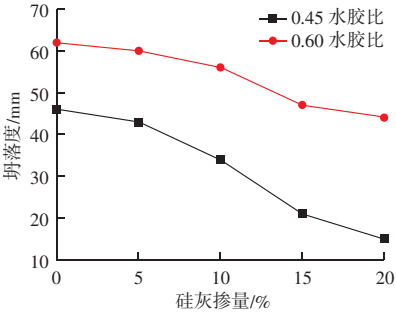


图1 硅灰掺量对混凝土流动性能的影响
Fig. 1 Effect of silica fume content on concrete fluidity

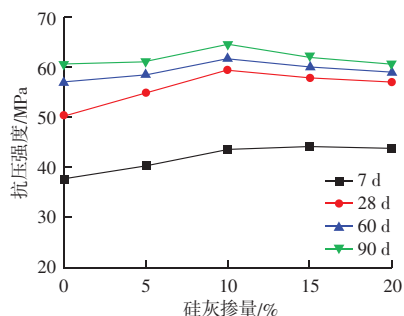
2.2 硅灰掺量对混凝土抗压强度的影响

由图 2 可以看出，在各养护龄期内，两种水胶比下混凝土的抗压强度均随硅灰掺量增加呈现出先增后减的变化趋势，其转折点为硅灰掺量为 10% 处。在水化前期 (7 和 28 d) 时，硅灰掺量为 10% 时，0.45 水胶比试验组抗压强度分别较基准组提高了 15.7% 和 18.1%，0.60 水胶比试验组抗压强度分别提升了 26.8% 和 21.2%。尤其是在龄期为 7 d，水胶比为 0.60，硅灰掺量提高到 20% 时，混凝土抗压强度较基准组提升了 33.5%。在水化后期 (60 和 90 d)，虽然两试验组的抗压强度都在过高的硅灰掺量下出现强度的回落，但仍然是 10% 的硅灰掺量对混凝土抗压强度的增幅最大，即为最优选择。

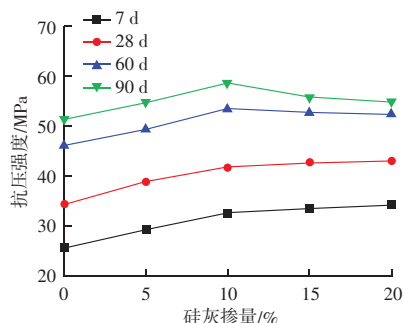
分析认为，在不同养护龄期内混凝土抗压强度增长率先增后减，是由于硅灰具有极高火山灰活性，以及硅灰材料本身含有大量无定型的 SiO₂，能够在早龄期内充分发挥其火山灰活性效应，其微小的颗粒能够填充水泥颗粒之间的空隙，起到微集料填充效应，使混凝土内部结构更加致密，从而提升混凝土的抗压强度。随着养护龄期延长，硅灰发生二次水化反应，与 Ca (OH)₂ 反应生成 C-S-H 胶凝产物且能发挥其物理填充效应，弥补水泥减少带来的影响。在水化早期，因为水泥水化速度较快，混凝土结构内部碱度较高，硅灰活性效应表现较充分，混凝土强度增长较快。但当硅灰掺量超过 10% 时，随着养护龄期的延长，水化后期，掺入过量的硅灰使混凝土内碱度下降，导致硅灰活性不能充分发挥，只能以微集料效应填充在硬化水泥浆体的孔隙当中，无法形成良好的骨架结构，对强度损失的弥补效应

相对较弱, 导致出现抗压强度下降的情况。

在相同硅灰掺量和养护龄期下, 水胶比 0.45 试验组混凝土抗压强度普遍高于水胶比 0.60 组。分析认为, 水胶比较小时, 一方面减少了因水分蒸发留下的孔隙, 使混凝土结构更加密实, 而较高水胶比会使混凝土内部孔隙增多, 降低了混凝土的密实度, 从而削弱了抗压强度; 另一方面, 单位用水量下, 水泥含量更高, 水泥水化反应更充分, 能够促进硅灰的火山灰活性发挥作用。



(a) 0.45 水胶比



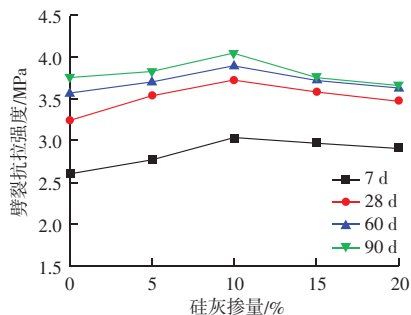
(b) 0.60 水胶比

图2 不同水胶比下硅灰掺量对混凝土抗压强度的影响
Fig. 2 Effect of silica fume dosage on compressive strength of concrete under different water binder ratio

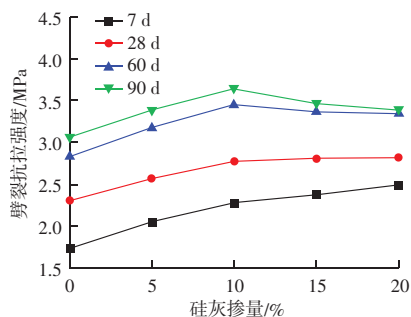
2.3 硅灰掺量对混凝土劈裂抗拉强度的影响

由图3可知, 水胶比为0.45的试验组在4个养护龄期内的劈裂抗拉强度变化趋势相近, 均随着硅灰掺量的增加呈现先上升后下降的趋势。对比基准组, 水胶比为0.45、硅灰掺量为10%时, 混凝土劈裂抗拉强度的增幅达到峰值, 在各养护龄期内分别增加了16.5%、14.8%、9.3%和7.7%, 即随着养护龄期的延长, 硅灰对混凝土劈裂抗拉强度的增强作用则逐渐减弱。当硅灰掺量超过10%时, 强度增幅出现回落, 甚至在水化90 d时, 硅灰掺量为20%的混凝土出现劈裂抗拉强度低于基准组的情况, 降低了2.7%。然而, 水胶比为0.60的试验组则在水

化7和28 d对劈裂抗拉强度的影响是随着硅灰掺量的提升而提升。相比与基准组, 硅灰掺量为10%时, 混凝土劈裂抗拉强度分别提高了32%和20.4%, 直到水化60 d时才出现强度回落趋势。



(a) 0.45 水胶比



(b) 0.60 水胶比

图3 不同水胶比下硅灰掺量对混凝土劈裂抗拉强度的影响
Fig. 3 Effect of silica fume content on splitting tensile strength of concrete under different water binder ratio

分析认为, 硅灰具有较大的比表面积和分散度, 掺入到混凝土中能够将各种掺合料充分分散并且在混凝土中处于均匀分布的状态, 以至于在水泥水化初期, 当水泥浆体逐渐硬化收缩时, 硅灰能够充当微集料填充到这些水泥颗粒的孔隙当中, 可以增加混凝土的密实度, 在水化前期为混凝土的劈裂抗拉强度提供一定的增强作用。而随着养护龄期的延长, 硅灰掺量过高时, 胶凝体系中生成 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的量不足以与硅灰发生二次水化反应, 强度的发展变得平缓甚至回落。同时, 过量硅灰由于其急剧增加的需水量, 会导致混凝土产生微裂缝, 在拉伸应力作用下微缝隙可能更容易扩展, 表现为在水化后期, 当硅灰过量取代水泥时会引起强度的损失。

在相同掺量硅灰和养护龄期下, 水胶比0.45组的混凝土劈裂抗拉强度普遍高于水胶比0.60试验组。分析认为, 低水胶比使混凝土中水分相对较少, 硬

材料科学

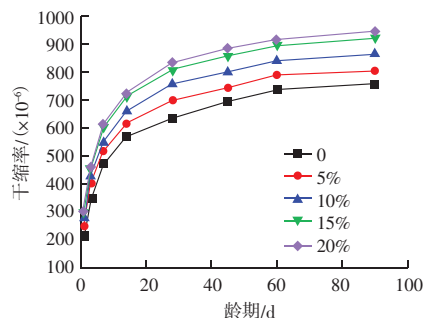
化后孔隙率低, 结构更密实。结构密实的混凝土能更有效地传递和抵抗拉力, 减少裂缝产生和扩展, 而高水胶比会使混凝土内部存在较多孔隙和薄弱区域, 降低混凝土的韧性。

2.4 硅灰掺量对混凝土干燥收缩的影响

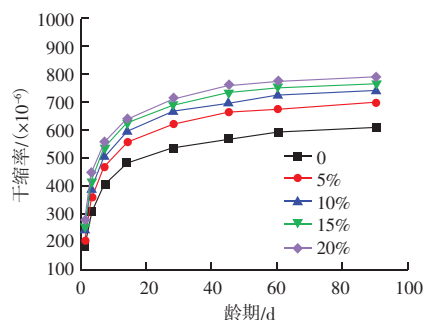
如图4所示, 相同水胶比下, 混凝土的干燥收缩率随硅灰掺量增加而增大, 随试验龄期的延长而增大。掺有硅灰试验组, 与基准组混凝土的干缩发展趋势相似, 均是在14 d前增长快, 14 d后至90 d时发展平缓。以90 d为例, 0.45水胶比试验组在硅灰掺量为5%、10%、15%和20%时, 干燥收缩率较基准组分别增加了14.4%、21.4%、25.6%和29.5%, 各试验组在28 d的干燥收缩率约占其90 d干燥收缩率的91%; 相同龄期下, 0.60水胶比试验组相应增加了6.4%、14.4%、22.1%和25.1%, 且各试验组在28 d的干燥收缩率约占其90 d干燥收缩率的87%。不同水胶比下, 0.60水胶比试验组的干燥收缩率较基准组增长幅度均高于同龄期下的0.45水胶比试验组, 7、28、60和90 d四个龄期内, 当硅灰掺量为10%时, 0.60水胶比试验组的干缩率较0.45水胶比试验组分别提高了 45×10^{-6} 、 90×10^{-6} 、 116×10^{-6} 和 125×10^{-6} 。

分析认为, 由于硅灰自身活性较高, 当混凝土中的自由水被硅灰吸附且发生二次水化反应时, 造成胶凝体系中的水分大量散失, 引起干燥收缩。随着硅灰掺量的增加, 硅灰的填充作用使总孔隙率降低, 但胶凝体系中的毛细孔则不断增多, 引起毛细管表面张力作用增强, 导致干缩率上升, 毛细孔失水而造成的干缩对混凝土干燥收缩占主导作用, 因此造成干燥收缩率增大。同一掺量下, 低水胶比组混凝土中水分相对较少, 干燥过程中体积变化相对较小, 干燥收缩率较低。水胶比较高组混凝土中水分含量相对较高, 硅灰有较好的水化环境发生二次水化反应, 生成具有较多细孔结构的C-S-H凝胶, 导致有过多孔通道向外界散失内部水分, 造成更明显的干燥收缩现象。在水化后期, 水泥水化逐渐充分且速率降低的情况下, 仍然有部分硅灰未能充分发挥其活性作用, 而这些硅灰颗粒以微集料效应填充在水泥颗粒之间, 将更多孔隙填充密实, 提升了混凝土的密实性, 减少毛细孔水分散失的通道, 从

而表现为水胶比为0.45试验组干缩性能较水胶比为0.60试验组好的现象。



(a) 0.45 水胶比



(b) 0.60 水胶比

图4 不同水胶比下硅灰掺量对混凝土干燥收缩率的影响
Fig. 4 Effect of silica fume content on drying shrinkage of concrete under different water binder ratio

3 结论

探究了0.45、0.60不同水胶比下, 硅灰掺量对混凝土工作性能、力学性能和干燥收缩性能的影响规律, 得到主要结论如下:

(1) 混凝土的流动性随着硅灰掺量的增加而下降, 尤其是当硅灰掺量超过10%后, 下降更为显著, 在0.45水胶比试验组影响更为明显, 掺入适量的硅灰对混凝土拌合物的保水性和黏聚性有一定的改善作用。

(2) 随着硅灰掺量的增加, 混凝土的抗压强度和劈裂抗拉强度均较基准组有明显提升, 最高分别可达33.5%和44.0%; 相比于基准组, 水胶比为0.45和0.60时, 10%硅灰掺量28 d抗压和劈裂抗拉强度分别提高了18.1%、14.8%和21.2%、20.4%; 0.45水胶比的混凝土抗压强度和劈裂抗拉强度普遍高于0.60水胶比的混凝土。

(3) 相同水胶比下, 混凝土的干燥收缩率随着硅灰掺量的增加而增加, 且均高于基准组, 在14 d内干燥收缩率增长速度较快, 而后 (下转第129页)

台阶开孔式缓冲结构的缓解效果随着车速的增加而降低。

参 考 文 献

- [1] 高波, 王英学. 高速铁路隧道设计 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2010.
- [2] 杨伟超, 李国志, 何洪, 等. 400 km/h 高铁隧道组合型式缓冲结构泄压孔优化 [J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20 (10): 3648–3661.
- [3] 蒯童童, 杨明智, 张雷, 等. 高速磁浮列车流线型头部拱形结构对列车与隧道耦合气动特性的影响 [J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19 (9): 2515–2523.
- [4] 骆建军, 吴尽, 陈鹏飞. 高速铁路并联隧道横通道对隧道内压力变化的影响 [J]. 北京交通大学学报, 2015, 39 (1): 8–13.
- [5] 王英学, 常乔磊, 任文强, 等. 间缝式开口隧道缓冲结构气动特性分析 [J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15 (1): 17–23.
- [6] 李文辉, 刘堂红, 周苗苗, 等. 变截面隧道与典型缓冲结构气动效应缓解效果对比分析 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2022, 53 (5): 1572–1581.
- [7] 闫亚光, 杨庆山, 骆建军. 缓冲结构对隧道气动效应减缓效果 [J]. 北京交通大学学报, 2013, 37 (4): 7–12.
- [8] 闫亚光, 杨庆山, 骆建军. 基于气动声学理论的喇叭型隧道缓冲

结构优化 [J]. 西南交通大学学报, 2016, 51 (5): 832–839.

- [9] 马智豪, 景雪蕾, 杜迎春, 等. 高速磁浮隧道扩大等截面斜切型缓冲结构减缓初始压缩波机理研究 [J]. 实验流体力学, 2023, 37 (1): 100–112.
- [10] 张童童, 闫亚光, 康天龙, 等. 联通式内缓冲结构对隧道气动效应减缓效果 [J]. 科学技术与工程, 2022, 22 (7): 2893–2900.
- [11] 任文强. 高铁隧道顶部开口缓冲结构微压波缓解规律分析及参数设计研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
- [12] 高利民, 闫亚光, 杨彬彬, 等. 高铁隧道间断型缓冲结构的气动效应分析 [J]. 粉煤灰综合利用, 2024, 38 (5): 97–102.
- [13] 那艳玲, 牟野, 叶天震, 等. 高速地铁隧道洞口及风井对压力波的影响研究 [J]. 铁道工程学报, 2024, 41 (4): 90–95, 101.
- [14] 张洁, 郭秉筠, 王崑宇, 等. 缓冲结构渐变开孔率对高速磁浮隧道出口微气压波影响 [J/OL]. 铁道科学与工程学报, 1–11 [2025–04–18].
- [15] 王田天, 冯朝阳, 陆意斌, 等. 400 km/h 高铁隧道联通式缓冲结构对微气压波的影响 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2024, 55 (4): 1618–1630.
- [16] MIYACHI T. Acoustic model of micro-pressure wave emission from a high-speed train tunnel [J]. Journal of Sound and Vibration, 2017, 391: 127–152.

(上接第 28 页)

期增幅趋于平缓; 不同水胶比、同一硅灰掺量下, 水胶比为 0.60 的试验组在相同试验龄期内的干燥收缩率均高于水胶比为 0.45 的试验组, 硅灰掺量为 20% 时, 在 90 d 干燥收缩率较基准组分别可增加 25.1% 和 29.5%。

参 考 文 献

- [1] 邢又家. 低温环境下桥梁结构高性能混凝土耐久性研究 [J]. 江西建材, 2022 (4): 25–27.
- [2] 王钦. 掺硅粉与粉煤灰水下不分散混凝土试验研究 [J]. 黑龙江水利科技, 2024, 52 (4): 30–32.
- [3] 陈勇. 粉煤灰及硅灰对再生粗骨料混凝土抗冲磨性能的影响研究 [J]. 江西建材, 2024 (3): 12–13.
- [4] 夏中升, 沙建芳, 郭飞, 等. 硅灰掺量及特性对极低水胶比体系水化产物及微结构影响 [J]. 混凝土, 2023 (12): 102–107.
- [5] 幸超群, 邓怡帆, 俊俊伟, 等. 硅灰-粉煤灰复合矿物掺合料对混凝土性能的影响研究 [J]. 新型建筑材料, 2022 (9): 049.
- [6] 谢群, 李海波, 王火明, 等. 矿物掺合料对水泥砂浆性能的影响 [J]. 中外公路, 2021, 41 (3): 291–294.
- [7] 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.

- [8] TAO L, CHENG H, QIANG S. Early-age hydration reaction and strength formation mechanism of solid waste silica fume modified concrete [J]. Molecules, 2021, 26 (18): 1–16.
- [9] 苏胜威. 抽水蓄能电站高性能抗裂面板混凝土力学性能试验研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2023, 37 (1): 102–107.
- [10] 彭忠伟. 不同硅灰掺量对桥面板蒸养混凝土强度影响试验研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2022, 38 (4): 48–53.
- [11] 方小利, 刘立明, 严继康, 等. 微硅粉掺量对混凝土性能的影响研究 [J]. 混凝土世界, 2021 (7): 62–65.
- [12] SINGNIAO P. Effect of silica fume and limestone powder on mechanical properties of ultra-high performance concrete [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 897 (1): 1–5.
- [13] RAKESH C, RAJESH G. Permeation, corrosion, and drying shrinkage assessment of self-compacting high strength concrete comprising waste marble slurry and fly ash, with silica fume [J]. Structures, 2021, 33: 971–985.
- [14] 黄正峰, 欧忠文, 罗伟, 等. 硅灰和减缩剂对混凝土自收缩和孔隙的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2022 (9): 3077–3083.