

高分散性硅灰对混凝土性能影响的研究

雷英强, 吴伟

(中国水利水电第七工程局有限公司, 四川 成都 610213)

摘要: 本文研究了预分散处理前后的硅灰分散性及其对混凝土性能的影响, 验证了提高硅灰分散性可以提高其填充性和火山灰活性, 进而提高混凝土性能的假设。通过偏光显微镜、悬浮液静置沉降高度测试, 证明了经分散处理的硅灰具有良好的分散性。混凝土性能测试的结果表明: 经预分散处理的对比未处理的硅灰能够降低混凝土孔隙率 10%, 减少渗水高度 56%, 提高混凝土 28 d 强度 26%, 说明预分散处理后可明显提升硅灰的填充能力及火山灰活性。阐述了对高分散性硅灰对混凝土性能影响的研究。

关键词: 高分散; 硅灰; 孔隙率; 渗水高度; 强度; 混凝土性能

中图分类号: TV7; TV52; TV43

文献标志码: B

文章编号: 1001-2184(2023)06-0063-05

Study on the Influence of Highly Dispersible Silica Fume on the Concrete Performance

LEI Yingqiang, WU Wei

(Sinohydro Bureau 7 Co., Ltd., Chengdu Sichuan 610213)

Abstract: The paper studied impact of the dispersibility of silica fume before and after pre-dispersion treatment on concrete performance, verified the hypothesis, which the filling ability and the pozzolanic activity of silica fume could be improved by dispersion of silica fume, consequently the performance of concrete could be promoted. The results indicated that the pre-dispersed silica fume had good dispersibility by polarizing microscope and settlement static settlement height test. The results of the concrete performance test showed that compared with the original silica fume, the pre-dispersed silica fume reduced concrete porosity by 10%, water seepage height by 56%, and increased the 28-day strength concrete by 26%, indicating that silica fume pretreatment significantly improved its filling capacity and pozzolanic activity. This paper describes the study on the influence of highly dispersible silica fume on the concrete performance.

Key words: Highly dispersible; Silica fume; Porosity; Water seepage height; Strength; Concrete performance

1 概述

对于细小的硅灰颗粒, 理论上可以发挥填充、火山灰以及晶种效应, 进而实现混凝土高性能化与绿色化, 因此, 近年来将硅灰作为绿色掺合料应用于现代混凝土成为研究的热点。有学者^[1]的研究结果表明, 硅灰替代水泥可以降低混凝土中的水泥用量并可提高其耐久性, 证明了硅灰是实现混凝土高性能化、绿色化的理想材料。

Ye^[2]和 Belkowitz^[3]对不同粒径的硅灰对水泥体系的影响进行了研究, 其微观测试结果表明硅灰降低空隙率及提高火山灰活性与其粒径相关。Thomas^[4]研究了硅灰对硅酸三钙和水泥水化的影响, 发现只有纳米级硅灰才存在晶核效应; 而不同形态的硅灰^[5](加密、半加密以及原灰)对混凝土的影响差异明显, 硅灰加密后对其强度的

促进效果明显降低。硅灰具有的极高比表面积和表面能会导致颗粒团聚, 其实际尺寸会发生明显增加, 有研究^[6]表明: 亚微米级硅灰团聚后其粒径会增加至 100 μm 。以上研究结果均说明硅灰作为粉体颗粒, 其粒径对其在水泥体系或混凝土中的应用效果具有重要影响。

笔者在文中提出了利用 HB-2D 分散剂以实现快速、简易的硅灰预分散方法, 利用有机总碳测试仪(TOC)和凝结时间评价了分散剂对早期水化的影响, 通过偏光显微镜、沉降高度评价了其分散效果。采用孔隙率、抗渗性表征了预分散硅灰的填充性, 利用强度发展表征了预分散硅灰的火山灰效应。

2 研究采用的原材料

水泥: 拉法基 P. O42.5 普通硅酸盐水泥, 其勃氏法比表面积为 355 m^2/kg , 密度为 3.08 $\text{g}/$

收稿日期: 2023-02-02

cm³,按照《通用硅酸盐水泥标准》GB175—2007 得到的水泥物理性能检测数据见表1。

表1 水泥物理性能检测数据表

安定性	初凝时间 /min	终凝时间 /min	3 d 抗折强度 /MPa	3 d 抗压强度 /MPa	28 d 抗折强度 /MPa	28 d 抗压强度 /MPa
合格	205	281	5.7	20.4	7	48.6

硅灰:成都东蓝星科技公司未加密硅灰,其平均粒径(激光粒度仪—湿法)为8 μm,按《砂浆和混凝土用硅灰》GB27690—2011得到的检测数据见表2。

表2 硅灰检测数据表

SiO ₂ 含量 /%	氯含量 /%	烧失量 /%	需水量比 /%	活性指数 / % (7 d 快速法)
92.3	0.04	2.8	118	108

细骨料为人工破碎骨料,细度模数为2.66,表观密度为2 710 kg/m³,堆积密度为1 610 kg/m³,吸水率为1.1%。粗骨料亦为人工破碎骨料,粒径为5~16 mm,骨料表观密度为2 720 kg/m³,堆积密度为1 580 kg/m³,吸水率为0.5%,针片状含量为5%;减水剂为石家庄市长安育才建材有限公司出品的GK-3000聚羧酸减水剂,其固含量为40%。消泡剂为日本东邦 Sorpol 5053出品的白色粉状消泡剂,推荐掺量为胶材质量的0.02%~0.2%,硅灰分散剂为中国水利水电第七工程局试验检测研究院基于磷酸基聚乙二醇开发的HB-2D硅灰专用分散剂,其固含量为60%。

试验用混凝土配合比见表3。

表3 混凝土配合比表 /kg·m⁻³

水	总胶材	硅灰掺量 / %	细骨料	粒径为5~16 mm 的粗骨料
167	450	0~10	892	891

3 试验方法

3.1 预分散方法

硅灰预分散的步骤为:(1)在德满亿JJ-1增力电动搅拌机75 rpm转速搅拌条件下称取600 g自来水中分4次(每次100 g)加入400 g硅灰,每次加入的硅灰只有被充分润湿后方可加入下批次;(2)加入4 g HB-2D分散剂,持续搅拌约30 min直至硅灰分散均匀且pH值>9;(3)将预分散硅灰放入容器中密封储存以便后续试验使用。

3.2 分散剂吸附量的测试

采用有机碳(TOC-L)残留量法表征硅灰上的分散剂吸附量,其原理为:用加入的分散剂总碳量减去上清液残留的分散剂总碳量从而得到被吸附的分散剂总碳量,再根据标准曲线计算出所吸

附的分散剂质量。

3.3 预分散硅灰的分散性

对分散剂吸附量进行TOC测试,所取得的数据见表4。

表4 分散剂 TOC 测试结果表

分散剂掺量 / %	吸附量 / mg·g ⁻¹ (硅灰)
0.4	8.02
0.7	8.65
1.0	9.85
1.3	9.89

从TOC测试数据可以看出:随着分散剂掺量的增加,其分散剂吸附量亦提高。在掺量为1.0%时进入平台期或达到饱和吸附点,这样的规律与Langmuir吸附和热力学吸附平衡规律吻合,并与前期试验发现的分散剂掺量>1.0%时其分散效果达到最佳相匹配。但是,按表4吸附量进行计算时发现:介质中还有0.15 mg/g的分散剂残留,说明分散剂即使达到平衡吸附状态亦无法100%吸附。为了保证分散效果,我们仍然采用1.0%的分散剂掺量进行试验,并对分散剂残留造成的对早期水化影响导致凝结时间变化的程度进行了评估。

将预分散硅灰和原硅灰加入酒精配制成固体含量为1.0%的溶液,然后用移液枪取10 μL配制悬浮液滴在载玻片上并用盖玻片密封。使用YJ-2005透射偏光显微镜放大(目镜16×,物镜40×)640倍进行分散性观测并用ImageView记录图像。

将200 g水泥与200 g蒸馏水混合搅拌1 min,再放入凯特TD5A离心机内以1 000 rpm离心1 min制备水泥上清液,采用上清液模拟实际水泥浆体中的离子浓度以及碱度对硅灰分散性的影响。直接对未处理的硅灰按照3.1中的步骤(1)进行处理,但不加入HB-2D硅灰分散剂,配制成固体含量为40%的悬浮液,然后分别在预分散和未处理硅灰悬浮液中加入10%重量的水泥上清液,在20℃条件下静置24 h,通过测试沉降度用以表征分散性。

3.4 孔隙率测试

空隙率测试采用烘干脱水法处理并采用甲醇法进行。因其操作方便且精度介于汞压法和氮吸附法之间,而且满足对含有粗骨料的混凝土的测试要求(汞压法及氮吸附法只能测试浆体孔隙),具体操作步骤如下:将混凝土试块切割成 $10\text{ cm} \times 5\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ 的块体,然后将其放入 $100 \sim 105\text{ }^\circ\text{C}$ 的烘干箱(升温速率 $< 10\text{ }^\circ\text{C}/\text{h}$)中恒温干燥 24 h,然后缓慢降温至室温。取出试块,用放大镜检查其是否存在肉眼可见的裂缝,因为只有无裂缝试块才能用于下一步的试验。

将干燥试块称重记为 W_D ,将其放入真空干燥器中,保持真空压力为 $5 \pm 0.5\text{ Pa}$,持续 5 h,然后保持真空负压条件加入甲醇直至试块被完全覆盖。保持负压 24 h 后分别测试试块悬吊在甲醇中的重量(W_{SUS})和试块表面的干燥重量(W_{SSD}),最后按以下公式进行孔隙率 P 的计算。

$$P = \frac{W_{\text{SSD}} - W_D}{W_{\text{SSD}} - W_{\text{SUS}}}$$

3.5 力学性能及抗渗性测试

文中所述的所有试件均采用标准养护,成型后在室内 $20 \pm 5\text{ }^\circ\text{C}$ 的环境中静置 24 h,然后拆模放入标准养护室,待其达到 3 d, 7 d 和 28 d 龄期时取出进行混凝土性能测试。对混凝土抗压强度以及抗渗性能的测试按照《水工混凝土试验规程》DL/T5150-2017 进行。

4 试验结果

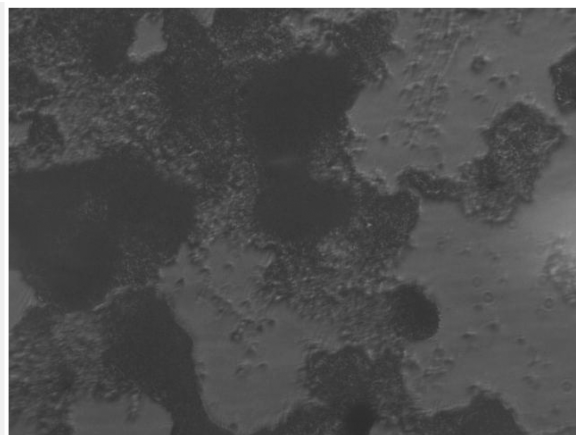
4.1 分散效果

分别对未处理的硅灰及预分散的硅灰进行观察。硅灰分散性效果见图 1。

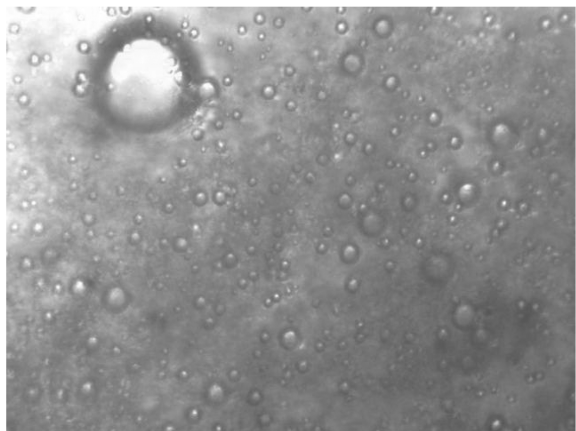
从图 1 中可以看出:未处理的硅灰大部分呈现出不同的团聚状态,最严重的团聚硅灰直径至少已经达到单个硅灰直径的 100 倍,其与 Zhang 观察到的现象一致;而经过预分散的硅灰均以原始粒径独立存在且在介质中均匀分布。由此可以看出:采用 HB-2D 分散剂处理后的硅灰可以打破团聚,从而实现其在介质中的均匀分布。

对于加入水泥上清液、静置 24 h 未处理及预分散的硅灰悬浮液进行了沉降对比,未处理与预分散的硅灰悬浮液沉降对比情况见图 2。

由图 2 可以看出:24 h 后,未处理的硅灰上清液几乎完全透明澄清,固体颗粒均沉淀于杯底;



未处理的硅灰



预分散后的硅灰

图 1 硅灰分散性效果图



未处理

预分散

图 2 未处理与预分散的硅灰悬浮液沉降对比情况图

而预分散的硅灰仍然保持良好的悬浮状态,肉眼无法观察到分层以及清液析出。由 Stock 公式可知:在悬浮介质一定的情况下,颗粒沉降是因其质量不同所致,从而说明未处理的硅灰悬浮液出现了颗粒团聚而导致其质量增加的现象,而预分散的硅灰并未出现团聚导致颗粒质量的增加,其保持了良好的分散性。

4.2 混凝土孔隙率

研究时分别考察了5%~10%掺量未处理及预分散硅灰3 d及28 d的孔隙率。不同掺量未处理和预分散的硅灰孔隙率数据见表5。

表5 不同掺量未处理和预分散的硅灰孔隙率数据表

掺量 / %	3 d		28 d	
	未处理的硅灰	预分散的硅灰	未处理的硅灰	预分散的硅灰
0(基准)	11.22		10.86	
5	10.78	10.19	10.05	9.15
10	10.26	9.47	9.56	8.59

从整体规律看:无论掺入哪种硅灰以及其位于哪个龄期,孔隙率均随着硅灰掺量的增加而减少,说明硅灰分散与否均具有填充效应。笔者在5%掺量条件下对比了两种硅灰,其3 d孔隙率对比基准未处理和预分散硅灰分别下降了0.40%和1.03%,28 d孔隙率分别下降了0.81%和1.71%。在10%掺量条件下,3 d孔隙率分别下降了0.96%和1.75%,28 d孔隙率分别下降了1.30%~2.27%。从中可以看出:随着龄期的发展,混凝土的总体孔隙率呈现下降趋势,这与长时间水化反应生成更多的凝胶导致水泥石致密度增加的规律吻合。对于混凝土孔隙率的优化幅度,无论是3 d还是7 d,预分散效果均优于未处理硅灰,说明打破团聚可以增加硅灰填充效应的假设成立。

4.3 混凝土抗渗及力学性能

为了验证预分散是否能提高硅灰的填充效应,研究时采用抗渗试验进行表征。预处理硅灰对抗渗性的影响情况见表6。

表6 预分散硅灰对抗渗性影响表

掺量 / %	平均渗水高度 / mm		抗渗等级	
	未处理	预分散	未处理	预分散
0(基准)	100		≥6	
4	51	28	≥8	≥10
6	44	24	≥10	≥10
8	25	17	≥10	≥10
10	32	14	≥10	≥10

当硅灰掺量从4%增加到8%,无论预分散与否均增加了混凝土的抗渗能力,抗渗等级从6提高到10,平均渗水高度从100 mm降低至最小14 mm,说明硅灰本身具有填充性。当未处理硅灰掺量从4%提高至8%,其渗水高度呈线性下降趋势,但在10%掺量时出现了拐点,渗水高度反增。

而掺入预分散硅灰后,其平均渗水高度呈良好的线性下降趋势。以上结果说明:随着未处理硅灰掺量的增加,颗粒相互距离变近,范德华力急剧增加导致出现了很明显的大颗粒团聚,而造成填充效应下降;而预分散后的硅灰很好地消除了范德华力造成的团聚影响,保证了填充效应。

掺量为4%、8%和10%时,预分散硅灰的渗水高度较未处理硅灰分别下降了45%、32%和56%。由此可见:预分散硅灰对平均渗水高度的改善优于未处理硅灰。由此可知:预分散可提升硅灰的填充效应,且在4%掺量下即可达到未处理硅灰8%掺量的抗渗效果。

研究过程中,对于0%~10%掺量范围内的两种硅灰混凝土的1 d、3 d和28 d强度发展进行了对比,以评价预分散对硅灰火山灰活性的影响。两种硅灰对混凝土抗压强度的影响见表7。

表7 两种硅灰对混凝土抗压强度影响表

硅灰掺量 / %	抗压强度 / MPa					
	未处理			预分散		
	1 d	3 d	28 d	1 d	3 d	28 d
0(基准)	18.4	25.3	53.1	18.4	25.3	53.1
4	18.9	25.9	56.8	19.2	27.9	60.9
6	20.3	26.5	58.3	20.4	28.3	67.4
8	21.8	27.8	59.6	18.5	28.1	73.4
10	22.2	28.1	61.6	18.1	28.2	77.8

预分散硅灰在≤6%掺量条件下对混凝土的1 d强度有少许提升,最大增幅为10.8%,但在≥8%掺量时其强度与基准基本持平。预分散硅灰因其残留液相的分散剂会减弱硅灰自身对混凝土早期水化的促进作用。掺两种硅灰的混凝土3 d强度差异并不明显,说明3 d龄期时的残留分散剂对于混凝土水化的影响已经消失。28 d强度差异明显,10%掺量下的掺预分散硅灰混凝土强度较掺未处理硅灰混凝土强度提升了26.2%,掺量为4%时即达到未处理硅灰10%掺量的强度水平。

5 结语

笔者在文中提出了采用HB-2D分散剂快速、简易分散硅灰的方法,研究了该预分散硅灰的分散性能及其对混凝土性能的影响,结论如下:

(1)HB-2D分散剂平衡吸附量为0.9 mg/g时,液相有约0.15 mg/g硅灰的残留,其会减弱硅灰早强促进水化的作用,但并不会较基准延长

凝结时间和降低 1 d 强度；

(2) 偏光显微镜观察以及沉降试验结果充分说明硅灰经 HB-2D 预分散后具有良好的分散性；

(3) 硅灰经过预分散后,对比未处理的硅灰混凝土达到目标扩展度所需的减水剂用量可降低 19%,混凝土 28 d 孔隙率降低 10%,平均渗水高度可降低原有硅灰水平的 56%,说明 HB-2D 预分散处理可明显提升硅灰的填充效应；

(4) 掺预分散硅灰的混凝土 28 d 强度较掺未处理硅灰的混凝土强度提高 26.2%,其掺量为 4%时即可达到未处理硅灰 10%掺量的强度水平,从而体现出 HB-2D 预分散硅灰对火山灰效应的促进作用。

参考文献:

[1] Korpa A, Kowald T, Trettin R. Hydration behavior, structure and morphology of hydration phases in advanced cement-based systems containing micro and nanoscale poz-zolanic additives [J]. Cement and Concrete Research, 2008, 38(7):955-962.

[2] G Hernández-Carrillo, A Durán-Herrera, Valdez-Tamez P

(上接第 58 页)

5 微波炉法的应用

在取得正交试验成果后,将优化参数后的微波炉法在黏土芯墙填筑施工中进行了实际应用。微波炉法的优化参数为:烘烤时间为 7 min,样品加瓷杯重量为 55~60 g,2 个样品,微波炉功率为 754 W 的参数组合。为了验证优化参数后微波炉法取得的检测结果的可靠性,笔者抽取了 30 组样品进行了含水率对比试验。对比试验仍以烘干法为基准,优化参数后的微波炉法与烘干法结果对比情况见表 4。

通过对优化参数后的微波炉法与烘干法结果进行对比分析得知:微波炉法与烘干法含水率差值(绝对值)平均为 0.3%,最大为 0.6%,最小为 0%。对比试验情况与正交试验结果吻合,说明优化参数后的微波炉法取得的结果准确、可靠。

6 结 语

对于细粒土含水率的检测,烘干法获得的结果较为准确,但因其耗时较长而不能满足快速填筑施工的要求。微波炉法获取结果快速,但其影响因素较多,若参数组合选择不合适,则其准确性较烘干法差。本次研究通过正交试验找出了使用

L. ULTRA HIGH PERFORMANCE CONCRETE (UH-PC) WITH LOW SILICA FUME CONTENTS AND LIMESTONE AGGREGATES[C]// Proceedings of the International RILEM Conference Materials, Systems and Structures in Civil Engineering 2016. 2016.

[3] Ye Q, Zhang Z, Kong D, et al. Influence of nano-SiO₂ addition on properties of hardened cement paste as compared with silica fume[J]. Construction & Building Materials, 2007, 21(3):539-545.

[4] Belkowitz J S, Belkowitz W L B, Nawrocki K, et al. Impact of Nanosilica Size and Surface Area on Concrete Properties[J]. ACI Materials Journal, 2015.

[5] 张波. 不同形态硅灰在高性能混凝土中的作用机理[D]. 清华大学, 2015.

[6] 张玉德,刘钦甫,伍泽广,等. 纳米高岭土和白炭黑硫化橡胶复合材料[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2006, 21(2):73-76

作者简介:

雷英强(1989-),男,四川眉山人,工程师,学士,从事试验检测及混凝土材料研究工作;

吴伟(1985-),男,重庆万州人,工程师,硕士,从事高性能混凝土材料研发工作。

(责任编辑:李燕辉)

微波炉法检测细粒土含水率的影响因素及影响的主次关系,为微波炉法检测含水率的参数选择提供了有力依据。微波炉法的使用解决了烘干法耗时较长,酒精燃烧法不经济、环保数值偏高、存在安全隐患的问题。优化参数组合后的微波炉法在保证检测结果准确性的同时缩短了细粒土填筑施工检测周期,提高了施工效率,所取得的经验可为类似工程参考。

参考文献:

[1] 土工试验方法标准,GB/T 50123-2019[S].

[2] Standard Test Method for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass, D2216-98[S].

[3] Standard Test Method for Determination of Water (Moisture) Content of Soil by the Microwave Oven Heating, D4643-00[S].

[4] Standard Test Method for Calibration of Microwave Ovens, F1317-98[S].

[5] Standard Test Methods for Moisture, Ash, and Organic Matter of Peat and Other Organic Soils, D2974-00[S].

作者简介:

钟波(1982-),男,贵州瓮安人,正高级工程师,从事工程试验检测工作。

(责任编辑:李燕辉)