

引文格式:段新鸽,杨新红,张久鹏.冻融循环作用下硅粉改性水泥土抗压性能研究[J].建筑科学与工程学报,2025,42(4):124-135.

DUAN Xinge, YANG Xinhong, ZHANG Jiupeng. Study on compressive property of cement soil modified by silica fume under freeze-thaw cycle[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2025, 42(4): 124-135.

DOI:10.19815/j.jace.2024.03034

# 冻融循环作用下硅粉改性水泥土抗压性能研究

段新鸽<sup>1</sup>,杨新红<sup>2</sup>,张久鹏<sup>3</sup>

(1. 中铁十六局集团第三工程有限公司,浙江 湖州 313000;

2. 陕西交通控股集团有限公司建设管理分公司,陕西 西安 710065;

3. 长安大学 公路学院,陕西 西安 710064)

**摘要:**水泥土作为公路工程路基土的一种常见加固方式,具有造价低且力学性能良好的特点,但在冻融环境下易出现抗压性能劣化,进而引发道路结构层失稳破坏。为此,以硅粉作为辅助胶凝剂开展水泥土复合改良研究,通过开展无侧限抗压强度试验、冻融循环试验,研究养护龄期、胶凝剂配比和冻融周期对硅粉-水泥土抗压强度的影响规律。结果表明:硅粉对水泥土前期抗压强度提升效果有限,对后期抗压强度提升效果较为显著,硅粉改良后水泥土的28 d无侧限抗压强度提升了8%;硅粉对水泥土抗冻融性能具有良好的改善作用,硅粉-水泥土试样抗冻指标较纯水泥试样最高可提升35%,当硅粉含量在20%~30%时,硅粉-水泥土试样抗冻融性能最优;建立了基于硅粉和水泥配比、养护龄期和冻融周期的无侧限抗压强度预测模型,可实现硅粉-水泥土抗压强度的精准预测。

**关键词:**道路工程;硅粉-水泥土;抗压性能;冻融循环;胶凝剂

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2025)04-0124-12

## Study on compressive property of cement soil modified by silica fume under freeze-thaw cycle

DUAN Xinge<sup>1</sup>, YANG Xinhong<sup>2</sup>, ZHANG Jiupeng<sup>3</sup>

(1. The 3rd Engineering Co., Ltd., of China Railway 16th Bureau Group, Huzhou 313000, Zhejiang, China;

2. Construction Management Branch of Shaanxi Transportation Holding Group Ltd., Xi'an 710065,

Shaanxi, China; 3. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** As a common method of reinforcing road subgrade soil in highway engineering, cement soil has the advantages of low cost and favorable mechanical properties. However, its compressive properties tend to deteriorate under freeze-thaw conditions, leading to destabilization and damage to the road's structural layer. Therefore, silica fume was utilized as an auxiliary gelling agent to study the composite improvement of cement soil. The unconfined compressive strength test and freeze-thaw cycle test were conducted to examine the changes in compressive strength of silica fume-cement soil under different curing ages, gelling agent ratios, and freeze-thaw cycles. The results show that the effect of silica fumes on the early compressive strength of

收稿日期: 2024-03-15

投稿网址: <http://jace.chd.edu.cn>

基金项目: 中铁十六局集团有限公司科技研究开发计划项目(K2021-022)

作者简介: 段新鸽(1975-),男,高级工程师, E-mail: 18857809868@sina.cn.

通信作者: 张久鹏(1983-),男,工学博士,教授,博士生导师, E-mail: zhjiupeng@chd.edu.cn.

cement soil is limited, and the later compressive strength is significantly improved. The addition of silica fume can increase the 28 d unconfined compressive strength of cement soil samples by up to 8%. Silica fume demonstrates a significant positive impact on the freeze-thaw performance of the cement soil, with the freezing index of cement soil sample can be increased by up to 35% compared with that of pure cement sample. Optimal frost resistance of the silica fume-cement soil samples is achieved when the content of silica fume is 20%-30%. The prediction model for unconfined compressive strength is established considering the proportion of silica fume to cement, the curing age and the freeze-thaw cycle, which can realize the accurate prediction of compressive strength of silica fume-cement soil.

**Key words:** road engineering; silica fume-cement soil; compressive property; freeze-thaw cycle; gelling agent

**Author resumes:** DUAN Xinge(1975-), male, senior engineer, E-mail: 18857809868@sina.cn; ZHANG Jiupeng(1983-), male, PhD, professor, E-mail: zhjiupeng@chd.edu.cn.

## 0 引言

中国东北、华北以及西北地区等主要季节冻土区长期受到低温冻结与高温消融等环境的影响,铺设于此的路基、路堤或土工结构物会面临冻融与荷载的综合作用,产生严重的力学性能劣化。寒冬季节日气温大幅下降,造成路基土层、路堤或土工建筑物中的温度低于冰点,此时土层表面孔隙水冻结成冰,下部未冻结土层中的水分逐渐向上迁移,最终冻结成冰透镜体,使土体结构出现大幅度冻胀变形;当气温回升至 $0^{\circ}\text{C}$ 以上时,冻结的土层逐渐融化,解冻的土体发生弱化且强度降低,土体整体结构开始出现不均匀沉降及失稳现象<sup>[1-5]</sup>。因此,开展改良土体特性以提升其抗冻融性能的相关研究,对于提高道路交通基础设施安全稳定性具有重要意义。

近年来,国内外学者对冻融循环作用下改良土体的力学性能进行了一系列研究。张淑玲等<sup>[5]</sup>针对粉煤灰和水泥改良黄土开展研究,结果表明两种改良土的抗压强度随冻融次数的增加呈现不同程度的降低,粉煤灰改良黄土的抗冻融性能优于水泥土改良黄土。王天亮等<sup>[6]</sup>以水泥土和石灰土为研究对象,探究了两种改良土的静力破坏类型,并研究了围压和冻融次数对改良土力学特性的影响。郭存鸽<sup>[7]</sup>通过室内冻融循环研究水泥、石灰、粉煤灰改良黄土的强度特性,得出了在水泥改良黄土中掺入新型高分子材料 SH 可以提高其抗冻融能力的结论。Wang 等<sup>[8]</sup>深入分析了水灰比对水泥土流动性和防泌水性的影响,研究结果表明水泥土的最佳水灰比随水泥掺量的变化而改变,在此基础上建立了最佳水灰比预估模型。Dong 等<sup>[9]</sup>使用 CT 扫描分析了

水泥花岗岩残土的孔隙结构特征,并提出判断整体土壤骨架结构是否存在的标准。

道路基层土体在冻融循环过程中将产生冻融损伤,这种损伤类型的本质是土体孔隙水结冰过程中引起孔隙应力增加,从而导致其扩展的过程,在冻融过程中土体孔隙是否扩展延伸取决于冻胀力和土体抵抗力之间的相对大小<sup>[10]</sup>。因此,阻碍土体孔隙在冻融过程中的扩展延伸可有效提高土体抗冻融性能。胡建林等<sup>[11]</sup>对冻融循环作用下铁尾矿砂水泥土强度及变形特性进行了研究,郝雅芬等<sup>[12]</sup>分析了冻融循环对赤泥-钢渣改性水泥土强度的影响,并发现其外加材料具有一定局限性。目前,部分科研人员将硅粉作为水泥的辅助胶凝材料用于改良土体,研究表明硅粉具有良好的水胶活性和填充效应,可以大幅改善土体内部细微孔隙结构,从而提高其抗压强度<sup>[13-15]</sup>。然而,现有研究并未精确揭示硅粉与水泥的最佳掺配比,不同硅粉含量对改良土力学性能的影响亟需深入探究。

鉴于此,本文通过掺入硅粉改良水泥土的抗冻融性能,研究了不同硅粉含量下改良土抗压性能变化规律,并通过室内冻融循环试验模拟现场冻融环境,研究硅粉-水泥改良土在冻融作用下抗压强度变化规律,最后基于室内试验数据提出两种改良剂的最佳配比,研究成果可为季节冻土区公路底基层土体改良设计提供参考和借鉴。

## 1 试验设计

### 1.1 试验材料

土样取自陕西省京昆高速公路改扩建工程现场,为低液限黏土,其基本物理参数见表 1,试验土

样的颗粒级配曲线如图 1 所示。

表 1 土样基本物理参数

Table 1 Basic physical parameters of soil samples

液限/%	塑限/%	天然含水率/%	塑性指数
26	15	5.6	11

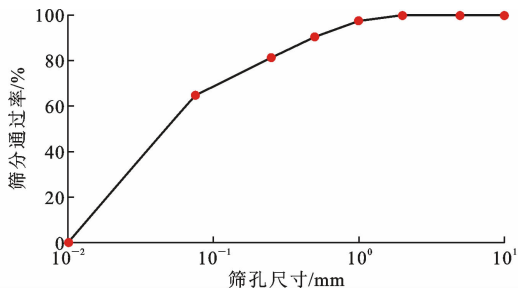


图 1 土体颗粒筛分级配曲线

Fig. 1 Soil particle sieving gradation curve

研究使用的水泥为 P. O42.5 缓凝硅酸盐水泥<sup>[16-17]</sup>，水泥物理和力学性能指标如表 2 所示。硅粉<sup>[18]</sup>采购自河南洁洋新材料有限公司。对黄土、硅粉和水泥进行 X 射线荧光光谱 (XRF) 测试，得到 3 种材料的化学成分，如表 3 所示。

表 2 水泥物理和力学性能指标

Table 2 Indicators of physical and mechanical properties of cement

初凝时间/min	终凝时间/min	3 d 抗折强度/MPa	28 d 抗折强度/MPa	3 d 抗压强度/MPa	28 d 抗压强度/MPa
194	256	3.5	8	33.2	49.4

表 3 黄土、硅粉和水泥化学成分指标

Table 3 Indicators of chemical composition of yellow soil, silica fume and cement

化学成分	各组分含量/%					
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	MgO
硅粉	97.10	0.20	0.08	0.57	0.80	0.32
水泥	20.30	5.17	51.66	3.30	5.21	2.15
黄土	50.93	13.42	8.86	5.20	0.14	2.55

## 1.2 胶凝剂配比设计

本文共对 3 种不同胶凝剂掺量 (3%、4%、6%) 的水泥进行试验研究。为提高水泥土抗冻融性能，将硅粉作为辅助胶凝剂应用于水泥土中，其中硅粉的比例根据总胶凝剂质量按百分比计算得到，共设计 6 组不同硅粉掺量 (10%、20%、30%、40%、50%、60%)，详细信息如表 4 所示 (后续各水泥土配比按表 4 编号简称)。

## 1.3 试样制备

参照《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)<sup>[19]</sup>进行击实试验，测试 3 种胶凝剂掺量水泥

表 4 胶凝剂配比

Table 4 Gelling agent ratio

试样编号	水泥占比/%	硅粉占比/%
3%-1	3.0	0.0
3%-2	2.7	0.3
3%-3	2.4	0.6
3%-4	2.1	0.9
3%-5	1.8	1.2
3%-6	1.5	1.5
3%-7	1.2	1.8
4%-1	4.0	0.0
4%-2	3.6	0.4
4%-3	3.2	0.8
4%-4	2.8	1.2
4%-5	2.4	1.6
4%-6	2.0	2.0
4%-7	1.6	2.4
6%-1	6.0	0.0
6%-2	5.4	0.6
6%-3	4.8	1.2
6%-4	4.2	1.8
6%-5	3.6	2.4
6%-6	3.0	3.0
6%-7	2.4	3.6

土的最佳含水率和最大干密度。试验结果表明：3% 胶凝剂掺量水泥土的最佳含水率为 12.8%，最大干密度为 1.91 g·cm<sup>-3</sup>；4% 胶凝剂掺量水泥土的最佳含水率为 13.6%，最大干密度为 1.91 g·cm<sup>-3</sup>；6% 胶凝剂掺量水泥土的最佳含水率为 14.2%，最大干密度为 1.93 g·cm<sup>-3</sup>。后续进行水泥土试样制作时，试样压实度为 96%，根据上述试验数据确定水泥土中水、土和胶凝剂的配比。

试样制作过程为：①按设计参数称量土、水和胶凝剂材料；②将土、水和胶凝剂材料拌合后装入制样模具，装料质量根据最大干密度确定；③使用静力压实方式将混合料压实成型，加载速率为 1 mm·min<sup>-1</sup>；④将试样脱模后放置于专业养护室进行养护，养护环境为恒温 20℃，湿度 95%。最终成型的硅粉-水泥土试样如图 2 所示，试样尺寸为 50 mm (长)×50 mm (宽)×50 mm (高)。

## 1.4 无侧限抗压强度测试

本研究共设置 4 个养护龄期 (3、7、14、28 d)，对不同养护龄期硅粉-水泥土试样进行单轴无侧限压缩试验，加载速率为 1 mm·min<sup>-1</sup>，记录加载过程中的应力峰值，并根据应力峰值计算试样抗压强度，无侧限抗压强度计算公式如式 (1) 所示。



图2 硅粉-水泥土试样

Fig. 2 Silica fume-cement soil specimens

$$\sigma_c = \frac{P}{A} \quad (1)$$

式中: $\sigma_c$ 为试样的无侧限抗压强度; $P$ 为试样破坏时的最大竖向应力; $A$ 为试样的横截面积。

### 1.5 冻融循环试验

本研究通过室内冻融试验模拟低温冻结-常温消融环境。首先将硅粉-水泥土试样养护28 d,然后进行冻融循环试验。参照《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)中的冻融试验方法,冻结温度为 $-18\text{ }^\circ\text{C}$ 。试件完全浸泡在水中,保持试件表面湿润。同时,冷冻室内部设置风扇或空气流动系统,使空气均匀循环,从而保证试件表面的温度分布均匀。每次冻融循环试验对试样冻结12 h,每个冻融循环周期消融时间为12 h,每完成一次冻结和消融试验即为完成一次冻融循环试验。

测试硅粉-水泥土试样在不同冻融循环次数(3、5、10、15次)下的抗压强度,分析各配比下胶凝剂对硅粉-水泥土试样抗压性能的影响规律。本研究中,针对每个配比胶凝剂的硅粉-水泥土试样,在不同阶段开展无侧限抗压强度测试时,每组设置3个平行样本。测试完成后,取3个试样的测试数据平均值作为最终分析依据。参照《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG E51—2009)<sup>[20]</sup>计算各配比硅粉-水泥土试样的抗冻性指标,如式(2)所示。

$$B = \frac{\sigma_{DC}}{\sigma_c} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $B$ 为经过 $n$ 次冻融循环后试样的抗压强度损失; $\sigma_{DC}$ 为 $n$ 次冻融循环后试样的抗压强度。

参照《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG E51—2009)计算各配比硅粉-水泥土试样在不同冻融循环次数后试样的质量变化率,如式(3)所示。

$$W_n = \frac{m_0 - m_n}{m_0} \times 100\% \quad (3)$$

式中: $W_n$ 为经 $n$ 次冻融循环后试样的质量变化率; $m_0$ 为冻融循环前试样的质量; $m_n$ 为经 $n$ 次冻融循环后试样的质量。

## 2 试验结果及分析

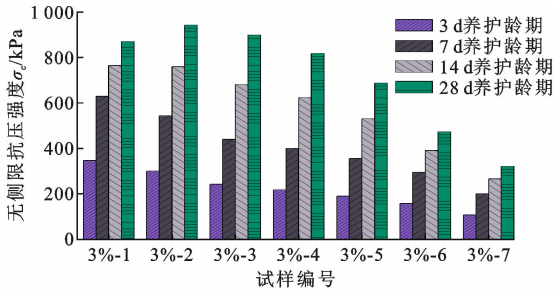
### 2.1 无侧限抗压强度

对表2中21个配比胶凝剂的硅粉-水泥土在养护3、7、14、28 d后进行单轴无侧限压缩测试,最终测试结果如图3所示。由图3可知:3%胶凝剂试样的3 d强度范围在106~346 kPa,7 d强度范围在200~628 kPa,14 d强度范围在265~763 kPa,28 d强度范围在320~942 kPa;4%胶凝剂试样的3 d强度范围在163~416 kPa,7 d强度范围在303~752 kPa,14 d强度范围在492~910 kPa,28 d强度范围在663~1 126 kPa;6%胶凝剂试样的3 d强度范围在272~542 kPa,7 d强度范围在496~976 kPa,14 d强度范围在739~1 176 kPa,28 d强度范围在955~1 464 kPa。

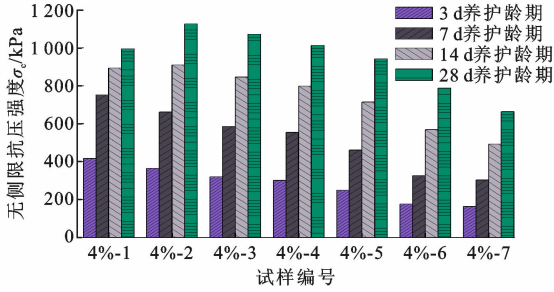
此外,从图3可以看出:试样养护龄期为3 d和7 d时抗压强度较高,3%-1试样的3 d抗压强度分别比3%-2和3%-3试样高15%和44%,7 d抗压强度高15%和43%;当养护龄期为14 d时,3%-1、3%-2和3%-3试样的抗压强度呈下降趋势,但相差不大,说明硅粉的增多会与水泥中的水竞争,导致水化反应减慢,从而影响其早期强度;此外,硅粉的加入会使体系的密实度降低,较多的孔隙和微裂缝导致试件抗压性能降低。当养护龄期为28 d时,3%-2和3%-3试样的抗压强度分别比3%-1试样高8%和3%,说明硅粉主要提升试样后期抗压强度,当养护龄期小于14 d时,硅粉对试样抗压性能的影响要小于水泥。4%-1、4%-2、4%-3以及6%-1、6%-2、6%-3试样抗压强度的变化规律与前述一致。

值得注意的是,当胶凝材料整体质量占比相同时,随着硅粉在试样中使用比例的增加,硅粉-水泥土试样的28 d抗压强度呈现先上升后下降的趋势,整体变化曲线呈“驼峰”形,驼峰位置处于硅粉使用比例在10%~20%之间。因此,根据28 d无侧限抗压强度测试结果可知,硅粉的最佳使用比例应为胶凝剂整体质量的10%~20%。

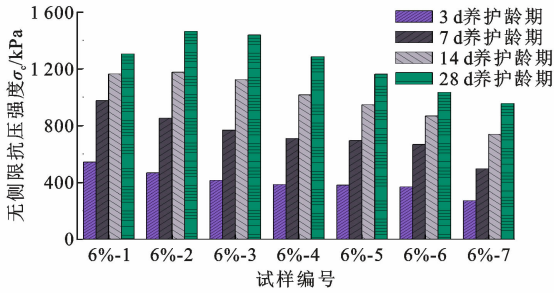
图4为不同胶凝剂配比的硅粉-水泥土试样在不同养护龄期下无侧限抗压强度拟合曲线,拟合公式及判定系数 $R^2$ 见表5。从图4可以看出,可以采



(a) 3%胶凝剂试样



(b) 4%胶凝剂试样



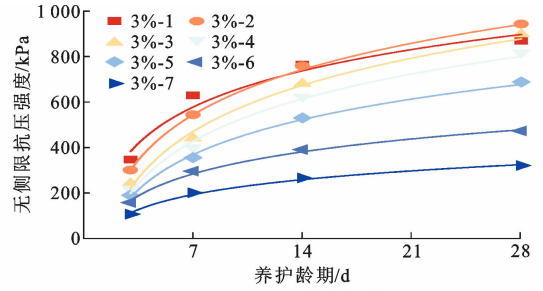
(c) 6%胶凝剂试样

图3 不同配比胶凝剂硅粉-水泥土试样在各养护龄期的无侧限抗压强度

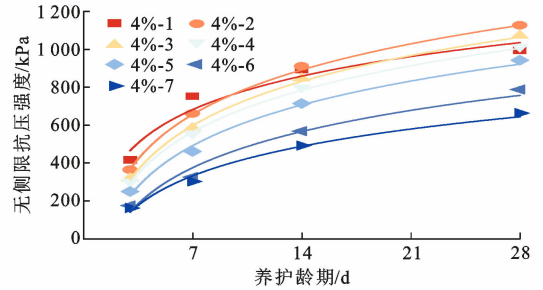
Fig. 3 Unconfined compressive strength of silica fume-cement soil specimens with different ratios of gelling agents at various curing ages

用对数函数拟合硅粉-水泥土试样的养护龄期与无侧限抗压强度之间的关系。从表5可以看出,不同胶凝剂配比的硅粉-水泥土试样无侧限抗压强度与养护龄期 $t$ 拟合后的 $R^2$ 均大于0.95,说明硅粉-水泥土材料的养护龄期与无侧限抗压强度呈现出良好的对数函数关系。

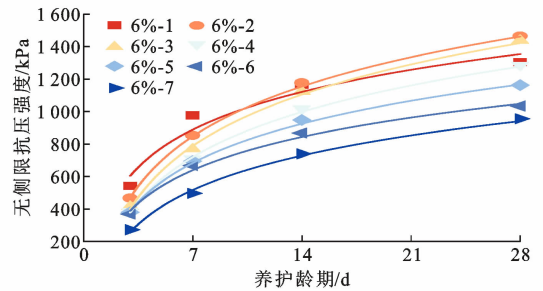
为分析各配比胶凝剂对硅粉-水泥土试样抗压强度在不同养护时期的影响规律,计算试样7、14、28 d抗压强度相较于前一养护时期抗压强度的提升百分比,计算结果如图5所示。从图5可以看出:各配比胶凝剂的硅粉-水泥土试样7 d无侧限抗压强度相较于3 d无侧限抗压强度提升均在80%左右;14 d无侧限抗压强度相较于7 d无侧限抗压强度的提升以及28 d无侧限抗压强度相较于14 d无侧限抗压强度的提升均呈现“驼峰”形变化趋势。值



(a) 3%胶凝剂试样



(b) 4%胶凝剂试样



(c) 6%胶凝剂试样

图4 不同配比胶凝剂硅粉-水泥土试样在各养护龄期的无侧限抗压强度拟合曲线

Fig. 4 Fitting curves of unconfined compressive strength of silica fume-cement soil specimens with different ratios of gelling agents at various curing ages

得注意的是,含有硅粉的胶凝剂对硅粉-水泥土试样14、28 d无侧限抗压强度提升均高于纯水泥试样;纯水泥试样的14、28 d无侧限抗压强度提升均在15%~20%之间,而含有硅粉的胶凝剂使硅粉-水泥土试样14 d无侧限抗压强度提升百分比大多位于30%~55%之间,28 d无侧限抗压强度提升百分比位于20%~40%之间。由此说明,硅粉作为胶凝剂可以显著提升水泥土材料的后期抗压性能。

## 2.2 冻融后试样无侧限抗压强度

对21个胶凝剂配比试样在养护28 d后进行冻融循环试验,对经过3、5、10、15次冻融循环测试的硅粉-水泥土试样进行无侧限压缩测试,不同冻融循环次数下硅粉-水泥土试样质量损失情况如图6所示,冻融后试样无侧限抗压强度测试结果如图7所示。从图6可以看出,纯水泥试样在冻融作用下的质量损失较含硅粉的试样更高。含有硅粉的试样经

表5 抗压强度与养护龄期拟合公式

Table 5 Fitting equations for compressive strength and curing age

试样编号	拟合公式	$R^2$
3%-1	$\sigma_c = 232.54 \ln(4.50t) - 222.36$	0.97
3%-2	$\sigma_c = 289.63 \ln(2.31t) - 259.10$	0.99
3%-3	$\sigma_c = 297.53 \ln(1.81t) - 282.95$	0.99
3%-4	$\sigma_c = 272.29 \ln(1.69t) - 242.81$	0.99
3%-5	$\sigma_c = 225.16 \ln(1.81t) - 201.33$	0.99
3%-6	$\sigma_c = 141.16 \ln(1.13t) - 7.47$	0.99
3%-7	$\sigma_c = 95.97 \ln(1.32t) - 20.46$	0.99
4%-1	$\sigma_c = 256.93 \ln(5.25t) - 241.38$	0.95
4%-2	$\sigma_c = 342.72 \ln(1.09t) - 37.99$	0.99
4%-3	$\sigma_c = 339.88 \ln(0.95t) - 43.40$	0.99
4%-4	$\sigma_c = 321.53 \ln(0.61t) + 99.79$	0.99
4%-5	$\sigma_c = 313.74 \ln(1.80t) - 300.30$	0.99
4%-6	$\sigma_c = 278.61 \ln(1.46t) - 269.23$	0.98
4%-7	$\sigma_c = 227.21 \ln(1.53t) - 203.98$	0.99
6%-1	$\sigma_c = 338.42 \ln(5.00t) - 311.00$	0.95
6%-2	$\sigma_c = 448.50 \ln(2.45t) - 422.34$	0.99
6%-3	$\sigma_c = 462.18 \ln(2.10t) - 448.53$	0.99
6%-4	$\sigma_c = 406.34 \ln(1.19t) - 137.23$	0.99
6%-5	$\sigma_c = 352.05 \ln(1.10t) - 30.71$	0.99
6%-6	$\sigma_c = 297.72 \ln(2.98t) - 261.99$	0.99
6%-7	$\sigma_c = 309.16 \ln(1.93t) - 284.02$	0.99

过3次冻融后的质量损失率在1.5%左右,经过5次冻融后试样的质量损失率在2%~3%之间,经过10次冻融后试样的质量损失率在4%~5%之间,经过15次冻融后试样的质量损失率在5%~6%之间。从图7可以看出,掺入硅粉的水泥土试样在经过冻融循环试验后的抗压强度呈现明显提升趋势。这是因为硅粉颗粒细小,具有很高的比表面积,可以有效填充水泥土中的微细孔隙使结构更加紧密,使抗压强度得到提升。当硅粉占比为总胶凝剂质量的10%~40%时,经冻融循环试验后试样的抗压强度均高于纯水泥试样,这是因为硅粉中的活性SiO<sub>2</sub>在水化反应中与Ca(OH)<sub>2</sub>反应生成额外的钙矾石(C—S—H)凝胶,这种凝胶是水泥土强度的主要来源。C—S—H凝胶含量的增加可以增强水泥土的整体结构,从而提高其抗压强度。而图3中硅粉占比为总胶凝剂质量的30%和40%时,试样28 d无侧限抗压强度低于纯水泥试样。可以认为硅粉的加入提升了试样抗冻融性能,造成该现象的主要原因是硅粉属于纳米材料<sup>[21]</sup>,具有良好的水胶活性和填充效应,可以显著改善水泥土试样中的细微孔隙<sup>[22]</sup>,这使得硅粉-水泥土试样在冻融循环试验过

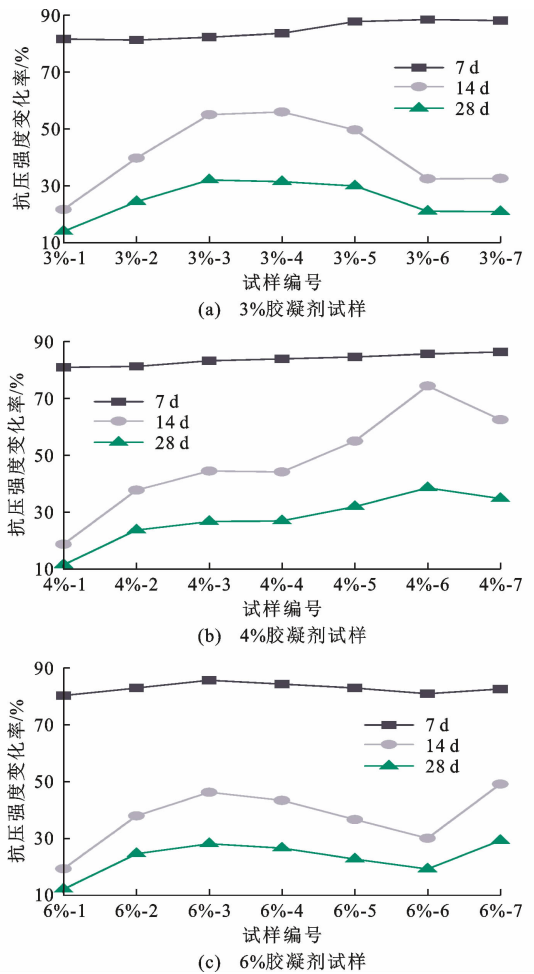


图5 不同配比胶凝剂硅粉-水泥土试样在各养护龄期的无侧限抗压强度变化率

Fig. 5 Change rates of unconfined compressive strength of silica fume-cement soil specimens with different ratios of gelling agents at various curing ages

程中,因为试样内部冻胀而产生的细微裂纹的扩展延伸得到了一定程度的缓解,从而达到提升水泥土抗冻融性能的效果<sup>[13-15]</sup>。

图8为硅粉-水泥土试样冻融循环次数 $T_f$ 与无侧限抗压强度拟合曲线,具体拟合公式见表6。可以看出,随着冻融循环次数的增加,硅粉-水泥土试样无侧限抗压强度呈现出对数下降的趋势。由表6中的拟合结果可知,判定系数 $R^2$ 均大于0.95,由此说明使用对数函数可以较好地拟合硅粉-水泥土试样无侧限抗压强度与冻融循环次数的关系。

以各配比试样28 d无侧限抗压强度作为参照值,计算经不同冻融次数后试样的抗冻性指标 $B$ ,结果见图9。可以看出,在水泥土中掺入硅粉后,试样抗冻性得到了明显提升。当胶凝剂占比为3%时,经3次冻融循环试验后纯水泥试样(3%-1)抗冻性指标为52.95%,而硅粉-水泥土试样则均高于

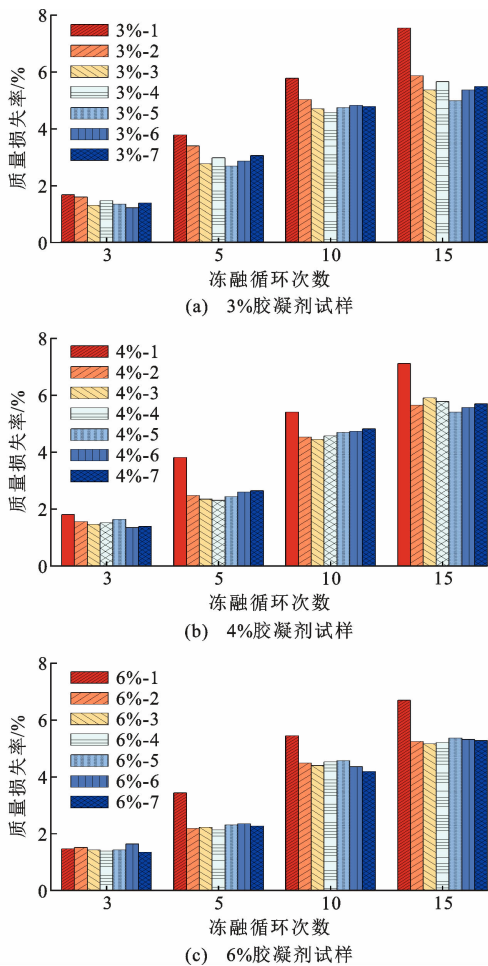


图6 不同配比胶凝剂硅粉-水泥土试样经冻融循环试验后的质量损失

Fig. 6 Mass loss of silica fume-cement soil specimens with different ratios of gelling agents after freeze-thaw cycle test

75%，最高可达 88.19%；5 次冻融后纯水泥试样抗冻性指标为 40.41%，而硅粉-水泥土试样则均高于 62%，最高可达 74.47%；10 次冻融后纯水泥试样抗冻性指标为 40.41%，而硅粉-水泥土试样则均高于 50%，最高可达 63.69%；15 次冻融后纯水泥试样抗冻性指标为 21.30%，而硅粉-水泥土试样则均高于 33%，最高可达 47.89%。由此说明，掺入硅粉后水泥土材料的抗冻融性能得到明显提升，当胶凝剂占比为 3% 时，硅粉-水泥土试样抗冻性指标较纯水泥试样提升 20%~35%；当胶凝剂占比为 4% 时，抗冻性指标提升 10%~35%；当胶凝剂占比为 6% 时，抗冻性指标提升 10%~25%。

值得注意的是，纯水泥试样中胶凝剂占比的提升会增强水泥土试样的抗冻性，4% 胶凝剂的纯水泥试样 (4%-1) 经 3 次冻融循环后抗冻性指标为 60.72%，5 次冻融循环后为 47.35%，10 次冻融循环后为 33.78%，15 次冻融循环后为 23.63%；6%

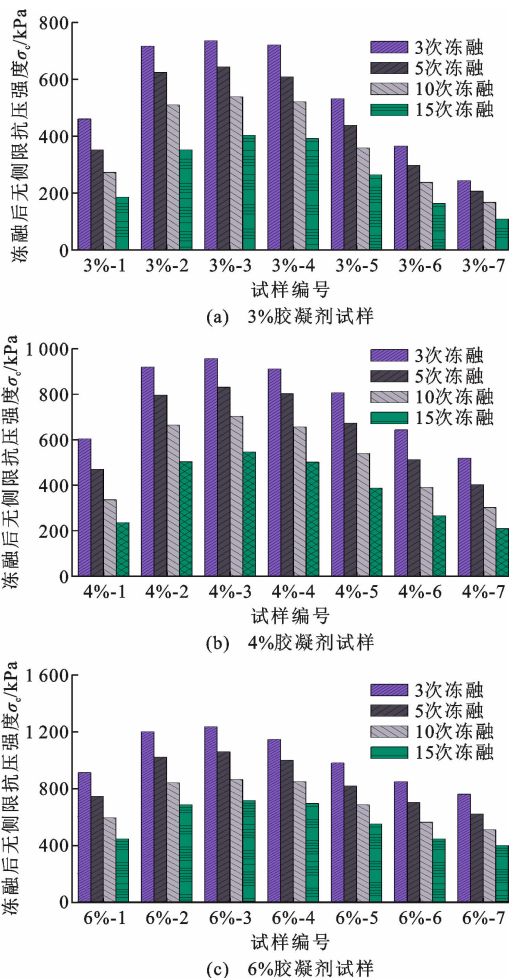


图7 不同配比胶凝剂硅粉-水泥土试样经冻融循环试验后无侧限抗压强度

Fig. 7 Unconfined compressive strength of silica fume-cement soil specimens with different ratios of gelling agents after freeze-thaw cycle test

胶凝剂的纯水泥试样 (6%-1) 经 3 次冻融循环后抗冻性指标为 69.71%，5 次冻融循环后为 56.98%，10 次冻融循环后为 45.32%，15 次冻融循环后为 33.97%，由此说明胶凝剂在水泥土试样中的整体占比是影响试样抗冻融性能的关键因素。根据图 9 数据可以看出，当硅粉与水泥比例为 2:8 或 3:7 时，试样抗冻融性能最优。

### 2.3 硅粉-水泥土压缩破坏形态

图 10 为不同胶凝剂参数条件下试样压缩破坏形式。图 10(a) 表明，纯水泥试样在压缩荷载下生成的裂缝大多为贯通型，这表明纯水泥试样内部细微孔隙较多，在压缩荷载作用下，随着试样内部微裂隙的萌生、发育，最终形成贯通裂缝。图 10(b) 表明，当纯水泥试样经过冻融循环试验后，试样表面因为冻融侵蚀作用呈现出强烈的剥落风化形态，在压缩荷载作用下试样不仅会生成贯通裂缝，还有很多

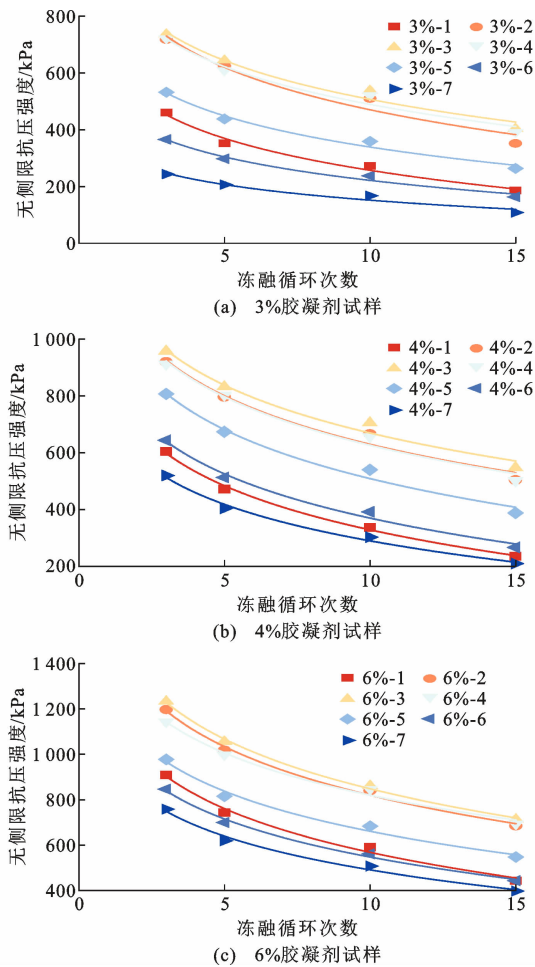


图8 不同配比胶凝剂硅粉-水泥土试样冻融循环次数与无侧限抗压强度拟合曲线

Fig. 8 Fitting curves of number of freeze-thaw cycles and unconfined compressive strength of silica fume-cement soil

specimens with different ratios of gelling agents

细小横向裂缝产生,这说明经冻融试验后纯水泥试样内部孔隙结构已被严重破坏。图10(c)表明,含有硅粉的改良土试样在压缩荷载作用下产生的裂纹大多为局部细小裂纹,这是因为硅粉有效填充了试样内部细微孔隙,造成试样在压缩荷载下生成的细微裂纹无法快速贯通试样孔隙结构,延缓了试样细微裂纹的发育进程,从而有效提升试样整体抗压性能。图10(d)表明,经冻融作用后,含硅粉的改良土试样边角也会出现部分剥落破坏,但试样表面整体侵蚀破坏不严重,并且试样在压缩荷载作用下生成的裂纹以纵向裂纹为主,该现象表明硅粉对试样整体细微孔隙有较好的填充效应,使其抵抗冻融侵蚀破坏性能得到有效提升。

### 3 微观机理分析

图11为部分试样未进行冻融试验的电镜扫描

表6 冻融后抗压强度与冻融循环次数的拟合公式

Table 6 Fitting equations for post-freeze-thaw compressive strength and number of freeze-thaw cycles

试样编号	拟合公式	$R^2$
3%-1	$\sigma_c = -162.05 \ln(0.12 T_f) + 287.01$	0.98
3%-2	$\sigma_c = -215.53 \ln(0.05 T_f) + 306.78$	0.96
3%-3	$\sigma_c = -196.86 \ln(0.01 T_f) + 102.63$	0.97
3%-4	$\sigma_c = -191.66 \ln(0.01 T_f) + 83.85$	0.97
3%-5	$\sigma_c = -157.99 \ln(0.04 T_f) + 193.66$	0.98
3%-6	$\sigma_c = -119.10 \ln(0.09 T_f) + 212.70$	0.98
3%-7	$\sigma_c = -79.04 \ln(0.06 T_f) + 111.98$	0.96
4%-1	$\sigma_c = -224.02 \ln(0.15 T_f) + 416.82$	0.95
4%-2	$\sigma_c = -246.49 \ln(0.01 T_f) + 140.59$	0.99
4%-3	$\sigma_c = -243.09 \ln(0.004 T_f) - 135.32$	0.99
4%-4	$\sigma_c = -246.61 \ln(0.004 T_f) - 201.35$	0.99
4%-5	$\sigma_c = -249.08 \ln(0.05 T_f) + 355.64$	0.99
4%-6	$\sigma_c = -224.60 \ln(0.11 T_f) + 392.45$	0.98
4%-7	$\sigma_c = -185.34 \ln(0.05 T_f) + 166.11$	0.98
6%-1	$\sigma_c = -278.36 \ln(0.05 T_f) + 346.07$	0.99
6%-2	$\sigma_c = -309.13 \ln(0.01 T_f) - 21.60$	0.99
6%-3	$\sigma_c = -316.48 \ln(0.003 T_f) - 269.20$	0.99
6%-4	$\sigma_c = -269.33 \ln(0.0002 T_f) - 862.29$	0.99
6%-5	$\sigma_c = -255.15 \ln(0.01 T_f) + 52.24$	0.99
6%-6	$\sigma_c = -242.43 \ln(0.05 T_f) + 373.06$	0.99
6%-7	$\sigma_c = -214.60 \ln(0.05 T_f) + 324.89$	0.99

(SEM)图片。可以看出,硅粉-水泥土和纯水泥土试样的微观形貌存在差异。相较于纯水泥土试样,硅粉-水泥土试样的细微孔隙尺寸更小,孔隙数量也更多。硅粉的填充作用和胶结作用能提高水泥土试样强度,具体体现在以下两个方面:①由于硅粉的比表面积较水泥大且主要化学成分为 $\text{SiO}_2$ ,活性较高,掺入水泥土中与水泥水化产生的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 会发生二次水化反应,生成钙矾石和一系列水化产物,填充在水泥土的细微孔隙中,使得试样整体结构更为致密,如图11(c)、(d)所示;②硅粉与水泥二次水化反应生成的产物不仅具有填充作用,其本身还具有较高的胶结强度,能将黏土颗粒连接在一起,进而使得硅粉-水泥土试样宏观强度增强。硅粉的胶结作用如图11(c)、(d)所示,图11(d)中6%-3试样黏土颗粒间的胶结产物相较于图11(c)中6%-1试样更多,且颗粒之间连接更为紧密,虽然6%-1试样、6%-3试样中的胶凝剂整体占比相同,均为6%,但是由于1.2%硅粉的掺入,其活性成分与水泥产物反应,最终使得6%-3试样胶结产物的数量得到提升。

图12为部分试样进行冻融试验后的SEM图

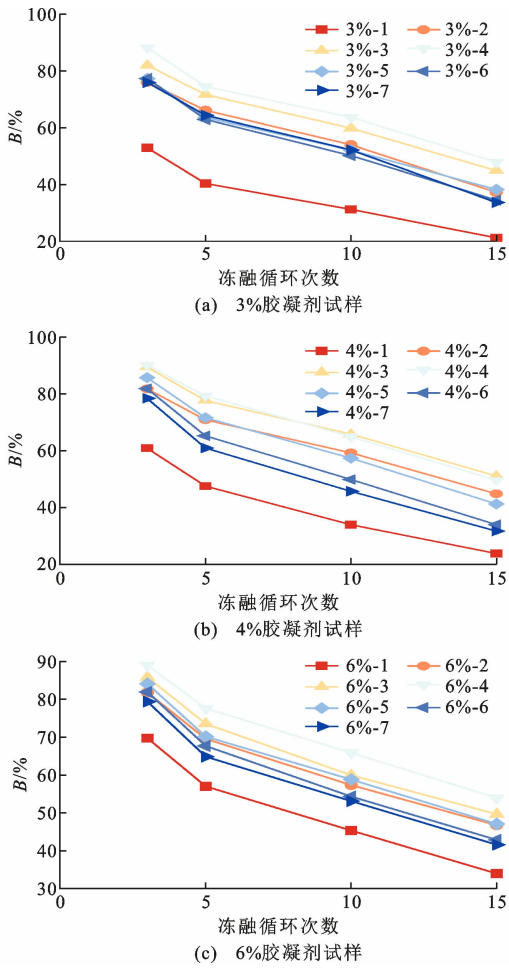


图 9 不同配比胶凝剂硅粉-水泥土试样经不同冻融循环次数后的抗冻性指标

Fig. 9 Frost resistance indexes of silica fume-cement soil specimens with different ratios of gelling agents after different numbers of freeze-thaw cycles

片。可以看出,冻融循环试验后的硅粉-水泥土和纯水泥土试样中,内部细微裂纹的发育存在较大差异。图 12(a)为纯水泥土试样经冻融循环后的 SEM 图片,可以发现纯水泥土试样经冻融循环作用后的孔隙率显著增加,大量微裂纹萌生发育,将细微孔隙连接贯通后形成了贯通裂纹,成为结构破坏的薄弱环节。同时,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  含量增加,裂缝中出现更多的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  结晶, C—S—H 凝胶部分破坏,从而造成试样宏观强度劣化。图 12(b)为硅粉-水泥土试样冻融循环后的 SEM 图片,可以看出硅粉-水泥土试样经冻融循环作用后结构稳定性较好,虽然也有部分细微裂纹萌生,但是并未形成贯通裂纹,这是因为冻融循环后 Ca 和 Si 含量分布变化不大, C—S—H 凝胶仍然占主导地位,且硅粉与水泥二次水化产物将细微孔隙黏结在了一起,有效阻止了冻融裂纹的

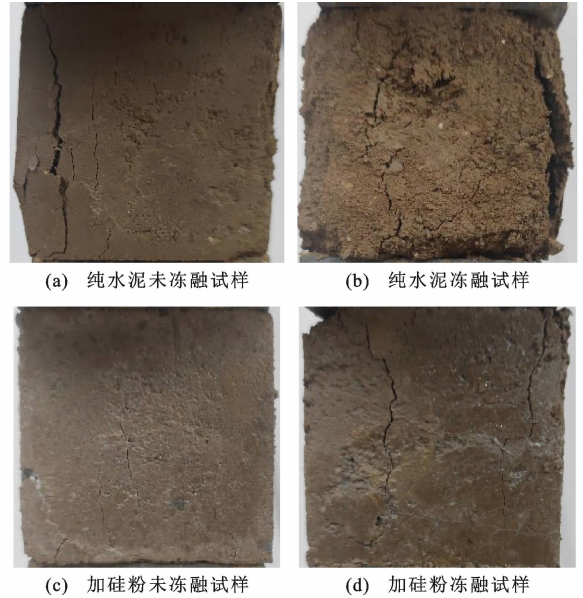


图 10 硅粉-水泥土试样抗压破坏形态

Fig. 10 Compressive damage patterns of silica fume-cement soil specimens

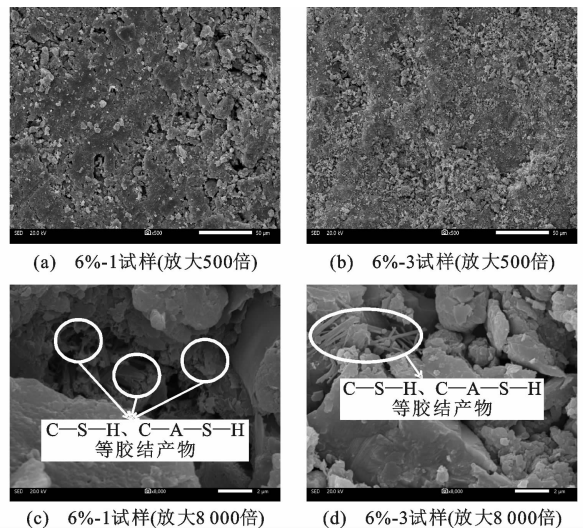


图 11 未冻融试样 SEM 图片

Fig. 11 SEM photos of specimens with unfreeze-thaw cycle

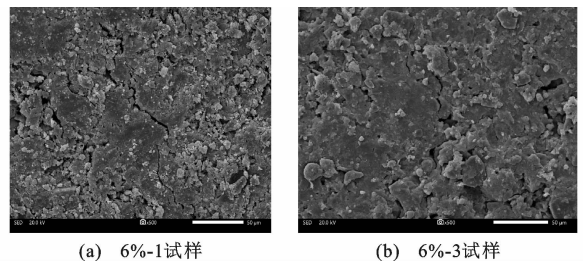


图 12 冻融后试样 SEM 图片

Fig. 12 SEM photos of specimens after freeze-thaw cycle 发育。总体来说,硅粉可以有效填充和桥接孔隙,使孔隙和裂缝扩展受到抑制,整体密度较高,因此微

观结构较为稳定。

## 4 抗压强度预估模型

### 4.1 不同养护龄期抗压强度预测

为了预估不同养护龄期下的抗压强度规律变化,本文通过建立预测模型,分析不同胶凝剂配比对材料抗压强度的影响,从而优化硅粉掺量和水泥配比,提高材料的抗冻融性能。国内外学者已进行大量关于水泥土无侧限抗压强度影响因素的研究,并提出了一些可预测水泥土抗压强度的表征参数<sup>[23]</sup>。已有研究表明<sup>[24-25]</sup>,影响水泥土抗压强度的因素主要包括温度、胶凝剂配比和养护龄期。本文通过构建包含水泥土胶凝剂配比参数和养护龄期的无侧限抗压强度表征参数,建立硅粉水泥土无侧限抗压强度经验公式,如式(4)所示。

$$C_s = \frac{1}{a_w \lg(t)} \quad (4)$$

式中: $C_s$ 为硅粉-水泥土强度表征参数; $a_w$ 为胶凝剂配比系数。

本文试样采用了硅粉和水泥两种胶凝剂,因此在计算 $a_w$ 时需要同时考虑硅粉和水泥在试样中的占比,具体计算方法如式(5)所示。

$$a_w = \frac{S_p}{C_p} + C_p \quad (5)$$

式中: $S_p$ 为硅粉在试样中的整体质量占比; $C_p$ 为水泥在试样中的整体质量占比。

将计算得出的 $C_s$ 值应用于水泥土强度预测中,建立最终硅粉-水泥土材料无侧限抗压强度预测模型,如式(6)所示。

$$\sigma_c = a C_s^{-b} \quad (6)$$

式中: $a$ 、 $b$ 为模型的拟合参数。

计算各胶凝剂配比以及不同养护龄期下硅粉-水泥土试样的 $C_s$ 值,通过式(3)将其与无侧限抗压强度测试值进行拟合,最终拟合结果如图13所示。

根据图13的拟合结果可知,本文提出的预测模型的判定系数为0.88,表明该模型具有较好的预测效果。将图13拟合得到的模型参数值代入式(6),得到硅粉-水泥土材料无侧限抗压强度预测模型,如式(7)所示。式(7)可应用于预测不同硅粉与水泥比例下硅粉-水泥土材料在不同养护龄期下的无侧限抗压强度。

$$\sigma_c = 188.09 \left[ \frac{1}{a_w \lg(t)} \right]^{-0.98} \quad (7)$$

### 4.2 不同冻融次数抗压强度预测

为准确把握硅粉-水泥土材料在不同冻融周期

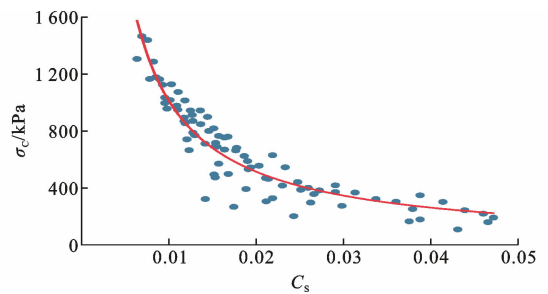


图13 硅粉-水泥土无侧限抗压强度与材料表征参数关系  
Fig. 13 Relationship between unconfined compressive strength of silica fume-cement soil and material characterization parameters

下抗压性能变化规律,考虑不同胶凝剂配比和冻融周期对材料抗压强度的影响,基于材料参数和冻融周期建立硅粉-水泥土材料在冻融后的抗压强度预测模型。表征冻融后硅粉-水泥土材料特征的材料参数为

$$C_{sf} = \left( \frac{1}{|S_p - 0.25C|} + C_p \right) C / \lg(T_f) \quad (8)$$

式中: $C_{sf}$ 为硅粉-水泥土冻融后材料表征参数; $C$ 为胶凝剂整体质量占比。

将计算得到的 $C_{sf}$ 值应用于硅粉-水泥土冻融后的抗压强度预测中,建立硅粉-水泥土材料冻融后无侧限抗压强度预测模型,如式(9)所示。

$$\sigma_c = d C_{sf}^e \quad (9)$$

式中: $d$ 、 $e$ 为模型的拟合参数。

对不同胶凝剂配比和冻融周期下的硅粉-水泥土试样材料表征参数和无侧限抗压强度测试值进行拟合,最终拟合结果如图14所示。

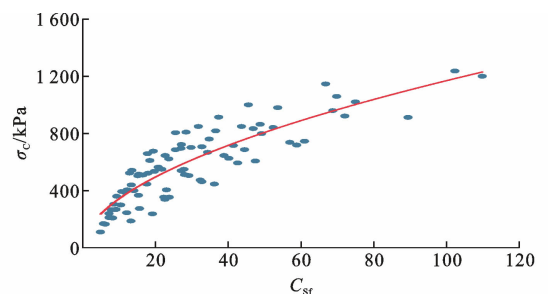


图14 硅粉-水泥土冻融无侧限抗压强度与材料表征参数关系

Fig. 14 Relationship between freeze-thaw unconfined compressive strength of silica fume-cement soil and material characterization parameters

由图14的拟合结果可知,本文提出的硅粉-水泥土材料冻融抗压强度预测模型判定系数为0.86,表明该模型具有较好的预测效果。将图14中拟合得到的模型参数值代入式(9),得到硅粉-水泥土材

料冻融无侧限抗压强度预测模型,如式(10)所示。式(10)可用于预测不同硅粉与水泥比例下硅粉-水泥土材料经不同冻融循环次数作用后试样的无侧限抗压强度。

$$\sigma_c = 77.79 \left[ \frac{1}{\left( \frac{|S_p - 0.25C|}{\lg(T_f)} + C_p \right) C} \right]^{0.60} \quad (10)$$

## 5 结 语

(1) 硅粉对水泥土前期抗压性能提升有限,对养护龄期达到 15 d 后的抗压性能有明显的提升作用,并且随着养护龄期的增加,硅粉对水泥土抗压性能的提升作用也逐渐增加。

(2) 当水泥土中胶凝剂整体质量占比一定时,硅粉-水泥土试样 28 d 无侧限抗压强度随硅粉在胶凝剂中占比的增加呈先增大后减小的趋势,最佳硅粉占比为胶凝剂总质量的 10%~20%。

(3) 硅粉可以有效提升水泥土材料在冻融作用后的抗压性能,当硅粉使用比例适当时,硅粉-水泥土试样在冻融作用后抗压强度的下降呈现明显降低的趋势;硅粉-水泥土试样抗冻性指标较纯水泥试样提升了 10%~35%,最佳硅粉占比为胶凝剂总质量的 20%~30%。

(4) 基于硅粉-水泥土材料的表征参数所建立的无侧限抗压强度预测模型判定系数为 0.86,可以较好地预测硅粉-水泥土在不同养护龄期、冻融周期和不同胶凝剂配比下的抗压强度。

### 参考文献:

### References:

- [1] 王 泉,马 巍,张 泽,等.冻融循环对黄土二次湿陷特性的影响研究[J].冰川冻土,2013,35(2):376-382.  
WANG Quan, MA Wei, ZHANG Ze, et al. Research on the secondary collapse properties of loess under freeze-thaw cycle[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(2): 376-382.
- [2] 刘慕宸,崔自治,宋 鑫.硫酸钠-干湿-冻融共同作用对水泥土性能的影响[J].科学技术与工程,2022,22(29):12977-12984.  
LIU Muchen, CUI Zizhi, SONG Xin. Effects of sodium sulfate on properties of cement-soil under dry-wet and freeze-thaw cycles[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(29): 12977-12984.
- [3] 庞文台,申向东.冻融循环对水泥土力学性能的影响[J].公路,2012,57(9):30-32.

PANG Wentai, SHEN Xiangdong. Effect of freeze-thaw cycle on mechanical properties of cement soil [J]. Highway, 2012, 57(9): 30-32.

- [4] 邵 俐,李佩青,王彬杰.冻融循环对碱激发高炉矿渣微粉加固软土强度的影响[J].公路交通科技,2022,39(1):40-47.  
SHAO Li, LI Peiqing, WANG Binjie. Influence of freeze-thaw cycle on strength of soft soil solidified by alkali-activated ground granulated blast furnace slag [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2022, 39(1): 40-47.
- [5] 张淑玲,倪 静,马 蕾,等.冻融循环作用后水泥土及粉煤灰土的力学性能试验研究[J].水资源与水工程学报,2018,29(4):196-201.  
ZHANG Shuling, NI Jing, MA Lei, et al. Experimental study on mechanical properties of cement soils and fly ash soils after freeze-thaw cycling[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2018, 29(4): 196-201.
- [6] 王天亮,刘建坤,田亚护.冻融作用下水泥及石灰改良土静力特性研究[J].岩土力学,2011,32(1):193-198.  
WANG Tianliang, LIU Jiankun, TIAN Yahu. Static properties of cement- and lime-modified soil subjected to freeze-thaw cycles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(1): 193-198.
- [7] 郭存鸽.改良黄土强度特性的室内冻融循环试验研究[J].中国新技术新产品,2012(4):97.  
GUO Cunge. Experimental study on improving the strength characteristics of loess by indoor freeze-thaw cycle[J]. China New Technologies and Products, 2012(4): 97.
- [8] WANG F T, LI K Q, LIU Y. Optimal water-cement ratio of cement-stabilized soil[J]. Construction and Building Materials, 2022, 320: 126211.
- [9] DONG X X, BAO X H, CUI H Z, et al. Macro-porosity and skeleton of a cement-gravel-treated granite residual soil for subgrade from CT scanning[J]. Construction and Building Materials, 2023, 371: 130703.
- [10] 贾海梁,项 伟,谭 龙,等.砂岩冻融损伤机制的理论分析和试验验证[J].岩石力学与工程学报,2016,35(5):879-895.  
JIA Hailiang, XIANG Wei, TAN Long, et al. Theoretical analysis and experimental verifications of frost damage mechanism of sandstone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(5): 879-895.
- [11] 胡建林,高鹏飞,张玉龙.冻融循环作用下铁尾矿砂水

- 泥土强度及变形特性研究[J]. 森林工程, 2022, 38(5): 121-127, 136.
- HU Jianlin, GAO Pengfei, ZHANG Yulong. Study on strength and deformation characteristics of cement soil of iron tailing sand under freeze-thaw cycles[J]. Forest Engineering, 2022, 38(5): 121-127, 136.
- [12] 郝雅芬, 温浩, 樊珮阁, 等. 冻融循环对赤泥-钢渣改性水泥土强度的试验研究[J]. 太原理工大学学报, 2021, 52(1): 117-121.
- HAO Yafen, WEN Hao, FAN Peige, et al. Experimental study of freeze-thaw cycle on strength of cemented soil modified with red mud-steel slag [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2021, 52(1): 117-121.
- [13] YARBAŞI N, KALKAN E, AKBULUT S. Modification of the geotechnical properties, as influenced by freeze-thaw, of granular soils with waste additives [J]. Cold Regions Science and Technology, 2007, 48(1): 44-54.
- [14] SAYGILI A, DAYAN M. Freeze-thaw behavior of lime stabilized clay reinforced with silica fume and synthetic fibers[J]. Cold Regions Science and Technology, 2019, 161: 107-114.
- [15] CHAI M T, ZHANG H, ZHANG J M, et al. Effect of cement additives on unconfined compressive strength of warm and ice-rich frozen soil[J]. Construction and Building Materials, 2017, 149: 861-868.
- [16] 通用硅酸盐水泥: GB 175—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- Common portland cement: GB 175—2007[S]. Beijing: Standards Press of China, 2007.
- [17] 公路路面基层施工技术细则: JTG/T F20—2015[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- Technical guidelines for construction of highway roadbases: JTG/T F20—2015[S]. Beijing: China Communications Press, 2015.
- [18] 多晶硅用硅粉: YS/T 724—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- Silicon powder for polycrystalline silicon: YS/T 724—2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.
- [19] 公路土工试验规程: JTG 3430—2020[S]. 北京: 人民交通出版社, 2020.
- Test methods of soils for highway engineering: JTG 3430—2020[S]. Beijing: China Communications Press, 2020.
- [20] 公路工程无机结合料稳定材料试验规程: JTG E51—2009[S]. 北京: 人民交通出版社, 2009.
- Test methods of materials stabilized with inorganic binders for highway engineering: JTG E51—2009[S]. Beijing: China Communications Press, 2009.
- [21] WANG L, JIN M M, WU Y H, et al. Hydration, shrinkage, pore structure and fractal dimension of silica fume modified low heat portland cement-based materials [J]. Construction and Building Materials, 2021, 272: 121952.
- [22] MOUSAVI S E. Utilization of silica fume to maximize the filler and pozzolanic effects of stabilized soil with cement[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2018, 36(1): 77-87.
- [23] JONGPRADIST P, JUMLONGRACH N, YOUWAI S, et al. Influence of fly ash on unconfined compressive strength of cement-admixed clay at high water content[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2010, 22(1): 49-58.
- [24] 曹智国, 章定文. 水泥土无侧限抗压强度表征参数研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(增1): 3446-3454.
- CAO Zhiguo, ZHANG Dingwen. Key parameters controlling unconfined compressive strength of soil-cement mixtures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(S1): 3446-3454.
- [25] 李永辉, 韩海霞, 孟乐乐. 郑州粉土水泥土无侧限抗压强度试验研究[J]. 公路, 2019, 64(5): 209-213.
- LI Yonghui, HAN Haixia, MENG Lele. Experimental study on unconfined compressive strength of silt cement-soil in Zhengzhou [J]. Highway, 2019, 64(5): 209-213.