



# 全固废材料固化硫酸盐渍土的抗压性能研究

马桂平

(宁夏宁东铁路有限公司,宁夏 银川 750021)

**摘要:**宁夏地区硫酸盐渍土路基工程在季节性冻融作用下很容易发生盐冻胀破坏,进而导致强度降低。为此,文章开展基于冻融循环下固化硫酸盐渍土的抗压性能研究,以冻融循环次数、氯硫比、粉煤灰掺量、电石渣掺量及硅灰掺量为5个影响因素,通过5因素4水平正交试验设计和无侧限抗压强度试验及XRD衍射试验,得到不同龄期下固化硫酸盐渍土冻融后的抗压强度及反应产物。试验结果表明:1)7、28 d龄期中各因素对固化硫酸盐渍土无侧限抗压强度的影响主次顺序:硅灰掺量>电石渣掺量>冻融循环次数>氯硫比>粉煤灰掺量,且硅灰掺量对强度的影响显著。2)7 d抗冻融效果最佳的设计配比:冻融循环次数为3次,氯硫比为0.1,粉煤灰掺量为15%,电石渣掺量为8%,硅灰掺量为7%,此时抗压强度为5.20 MPa;28 d抗冻融效果最佳设计配比:冻融循环次数为3次,氯硫比为0.1,粉煤灰掺量为25%,电石渣掺量为8%,硅灰掺量为7%,此时抗压强度为7.32 MPa。3)在3种固废材料的协同作用下,生成了水化硅酸钙(C-S-H)、水化铝酸钙(C-A-H)、钙矾石(Aft)以及硫酸钙(CaSO<sub>4</sub>)等胶凝物质,这些物质与土骨架相互连接填充构成稳定牢固的空间网状架构,促使土体强度整体提升。

**关键词:**硫酸盐渍土;全固废材料;冻融循环;抗压强度;衍射分析

中图分类号:TU448

文献标志码:A

文章编号:1673-8993(2025)03-0001-07

doi:10.13402/j.gcjs.2025.03.028

## Research on compressive properties of solidified sulfate saline soil with solid waste materials

MA Guiping

(Ningxia Ningdong Railway Co., Ltd., Yinchuan 750021, Ningxia, China)

**Abstract:** Under the seasonal freeze-thawing action of sulfate saline soil subgrade engineering in Ningxia, it is easy to cause salt freezing and swelling damage, which leads to a decrease in strength. Therefore, based on the research of the compressive properties of solidified sulfate saline soil under freeze-thaw cycles, the compressive strength and reaction products of solidified sulfate saline soil at different ages are obtained based on five influencing factors: the number of freeze-thaw cycles, chlorine-sulfur ratio, fly ash content, calcium carbide slag content and silica fume content, through the 5-factor 4-level orthogonal test design and unconfined compressive strength test and XRD diffraction test. The test results show that: 1) The effects of various factors on the unconfined compressive strength of solidified sulfate saline soil in 7 ~ 28 d are silica fume content > calcium carbide slag content > freeze-thaw cycle number > chloride-sulfur ratio > fly ash content, and the effect of silica fume content on the strength is significant. 2) The design ratio with the best freeze-thaw resistance effect for 7 d is as follows: the number of freeze-thaw cycles is 3 times, the chlorine-sulfur ratio is 0.1, the fly ash content is 15%, the calcium carbide slag content is 8%, the silica fume content is 7%, and the compressive strength is 5.20 MPa. The optimal design ratio of freeze-thaw resistance in 28 d is as follows: the number of freeze-thaw cycles is 3 times, the chlorine-sulfur ratio is 0.1, the fly ash content is 25%, the calcium carbide slag content is 8%, the silica fume content is 7%, and

收稿日期:2024-04-30

作者简介:马桂平(1996—),男,硕士研究生,从事特殊土性状及工程应用方面的研究工作。

the compressive strength is 7.32 MPa. 3) Under the synergistic effect of three solid waste materials, cementitious substances such as calcium silicate hydrate (C-S-H), calcium aluminate hydrate (C-A-H), calcite (AFt) and calcium sulfate ( $\text{CaSO}_4$ ) are generated, which are interconnected with the soil skeleton to form a stable and solid spatial network structure, which promotes the overall improvement of soil body strength.

**Key words:** sulfate saline soil; total solid waste materials; freeze-thaw cycles; compressive strength; diffraction analysis

随着我国高质量发展目标的提出,基础道路交通工程的建设数量与日俱增。路基填土的工程性质是否优良对道路工程建设来说十分重要。受西北内陆气候、地形、地貌及地下水等因素的影响,宁夏红寺堡地区的土壤盐渍化程度明显,尤以硫酸及亚硫酸盐渍土居多。这种盐渍土容易受温度和水分的影响发生盐冻胀、融沉和溶陷等问题,进而危及工程安全性,对当地路基工程的建设及生产运输造成严重影响。国内外不少学者从固化硫酸盐渍土对工程的影响开展了研究,如:张卫兵等<sup>[1]</sup>研究了粉煤灰、氯化钙固化硫酸盐渍土经历冻融循环后的抗剪强度及微观结构,发现固化盐渍土强度受冻融循环的影响较大;丁永发等<sup>[2]</sup>研究了水泥、粉煤灰、硅灰和脱硫石膏掺时各因素对固化超硫酸盐渍土强度的影响,并给出4种材料联合固化盐渍土的最优配比;KANIRAJ等<sup>[3]</sup>开展了水泥、纤维固化粉煤灰盐渍土研究,发现水泥和纤维的复掺固化盐渍土强度优于单掺;李宏波等<sup>[4]</sup>探究了水泥、粉煤灰、硅灰及镁渣对渠道硫酸盐渍土力学性能的影响,建议在渠道盐渍土的固化中宜采用高掺量水泥和粉煤灰、中掺量硅灰及低掺量镁渣;CONSOLI等<sup>[5]</sup>将石灰和纤维玻璃用于硫酸盐渍土的改良,通过无侧限抗压强度、劈裂抗拉强度及耐久性试验研究,发现石灰质量分数对抗压、抗拉强度和剪切模量的影响较为敏感;杨晓华等<sup>[6]</sup>通过化学成分分析试验、XRD衍射试验及SEM扫描试验,探究分析了石灰、石灰+火山灰及石灰+粉煤灰单复

掺方案固化硫酸盐渍土的效果及微观机制;文桃等<sup>[7]</sup>探究了石灰对硫酸盐渍土的抗压和抗剪强度的影响,发现石灰掺量过大或过小均不利于盐渍土强度的提高。

上述研究中关于硫酸盐渍土的固化多以水泥、石灰等传统高能耗、高 $\text{CO}_2$ 排放量的材料为主,而对于全固废材料的应用较少。积极开展全固废材料的工程利用是响应国家保护环境、节能减排的具体举措。为此,本文选用电石渣、粉煤灰及硅灰3种固废材料进行盐渍土的工程固化,以冻融循环次数、氯硫比、粉煤灰掺量、电石渣掺量及硅灰掺量为影响因素,通过正交试验设计,开展无侧限抗压强度试验及XRD衍射试验,分析冻融后固化盐渍土的抗压强度变化规律及固化机理,以为宁夏硫酸盐渍土在路基工程中的应用提供理论支持。

## 1 试验原料与方法

### 1.1 试验材料

试验所用土料取自宁夏回族自治区红寺堡地区。该地区属于干旱-半干旱气候带,地下水矿化度较高,土壤盐渍化程度明显,多呈现硫酸盐渍土及亚硫酸盐渍土。试验所取原状土粒径分析及土体内易溶盐离子体积分数如表1、2所示。

由表1可知:粒径范围为0.075~2.000 mm时的占比为55.26%,而小于0.075 mm的占比为32.96%,由《土的工程分类标准》(GB/T 50145—2007)可知,此土为粉质砂土。由表2可知: $c(\text{Cl}^-)/$

表1 颗粒粒径占比

$\leq 0.050$ mm	(0.050, 0.075] mm	(0.075, 0.250] mm	(0.250, 2.000] mm	> 2.000 mm
20.12	12.84	49.01	6.25	11.78

表2 原状土易溶盐离子体积分数

$\text{CO}_3^{2-}$	$\text{HCO}_3^-$	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{K}^+$	$\text{Na}^+$
0.036	0.161	3.607	5.608	0.612	0.455	0.077	6.700

$2c(\text{SO}_4^{2-}) = 0.87$  ( $c$  为浓度, mol/L), 根据《岩土工程勘察规范》(GB 50021—2018), 试验用土为中亚硫酸盐渍土。

试验用硫酸盐为 99% 纯度白色结晶粉末状的无水硫酸钠; 氯盐为 99.5% 纯度的氯化钠。粉煤灰取自宁夏某电厂, 主要成分为  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; 硅灰取自宁夏某硅业有限公司, 其颗粒度小, 主要成分为  $\text{SiO}_2$ ; 电石渣取自宁夏某乙炔厂, 主要成分为  $\text{CaO}$ , 具有较好的化学催化作用。各固化剂材料成分及其对应质量分数如表 3 所示。

## 1.2 试验方案与制样

为了降低原状土中其他离子对试验结果的影响, 将原状土用去离子水进行洗盐、晾晒风干、过 2 mm 筛, 得到洗后土样, 保存备用。为了探究在冻融循环作用下各工业固体废料对固化硫酸盐渍土强度的影响, 采用正交试验的设计方法, 以冻融循环次数、氯硫比、粉煤灰掺量、电石渣掺量、硅灰掺量为 5 个影响因素, 各因素水平如表 4 所示。相对粉煤灰而言, 试验中电石渣、硅灰二者各自的掺量占比较小, 故而未考虑电石渣、硅灰对试样土最优含水率和最大干密度的影响。因此, 对粉煤灰掺量为 0、10%、15%、20%、25% 的土样进行击实试验 (结果如表 5 所示), 并按照粉煤灰掺量对应的最优含水率和最大干密度制样。

试验设置硫酸钠体积分数恒定为 5%, 根据氯硫比计算得到氯化钠盐质量, 将硫酸钠盐和氯化钠盐溶解于制样时所需质量蒸馏水中, 然后加入素土中拌和均匀后用保鲜膜密封闷料 24 h, 闷料

结束后再将混合料固化剂拌合于土中。试样高度为 80 mm、直径为 39.1 mm, 采用加厚钢模制样。制样时在模具内壁涂上凡士林, 上下两端贴上滤纸, 确保拆模时试样不被损坏。设计试样压实度为 0.95, 采用双向静力压实法制样, 将每个试样料称取 3 等份依次压实、刮毛、装入、脱模, 重复上述过程, 完成所有试样的制作。制样结束后, 进行称重、编号、密封试样, 之后放入温度为  $(20 \pm 2)$  °C、湿度为 95% 的养护箱内进行标准养护。

达到养护龄期后, 取出试样, 放入恒定温度为  $-15$  °C 的温控冰箱中冷冻 12 h, 结束后取出试样置于 20°C 恒温箱中融化 12 h, 即完成一次冻融循环。无侧限抗压强度试验采用 YAW-300 kN 微机控制电子压力试验机, 设置加荷速率为 1 mm/min, 每组制备 3 个平行样。XRD 试验采用 Dmax2200/PC X 射线粉末衍射仪。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 试验结果

根据因素水平表, 选取  $L_{16}(4^5)$  正交设计方案, 通过试验得到养护 7、28 d 经历不同冻融循环作用后的无侧限抗压强度, 试验结果如表 6 所示。

由表 6 可知: 固化硫酸盐渍土在经历不同冻融循环次数之后, 7、28 d 龄期的无侧限抗压强度最大值分别为 5.20、7.20 MPa, 均出现在工况 DR-5。工况 DR-9、DR-10、DR-14、DR-15、DR-16 在 7 d 龄期经历冻融循环后强度值丧失为 0, 其中工况 DR-9、DR-10、DR-14 在经历 4 次冻融循环之

表 3 固化剂化学成分 (质量分数)

固化剂种类	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{CaO}$	$\text{MgO}$	$\text{SO}_3$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{Na}_2\text{O}$
粉煤灰	56.17	20.96	6.05	5.86	2.49	1.13	2.66	0.007
电石渣	4.71	1.36	0.85	69.60	0	0.10	0.03	0.060
硅灰	89.42	2.30	0.72	0.67	3.22	0	2.91	0

表 4 各因素水平

因素水平	冻融循环/次	氯硫比	粉煤灰掺量/%	电石渣掺量/%	硅灰掺量/%
1	1	0.1	10	4	1
2	3	0.3	15	6	3
3	6	0.5	20	8	5
4	9	0.8	25	10	7

表 5 粉煤灰盐渍土击实试验结果

粉煤灰掺量/%	最优含水率/%	最大干密度/( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )
0	13.68	1.87
10	15.16	1.80
15	16.02	1.75
20	16.64	1.69
25	17.22	1.64

表 6 无侧限抗压强度试验结果

工况	试验设计					无侧限抗压强度/MPa	
	冻融循环/次	氯硫比	粉煤灰掺量/%	电石渣掺量/%	硅灰掺量/%	7 d	28 d
DR-1	1	0.1	10	4	1	0.06	0.36
DR-2	1	0.3	15	6	3	0.28	3.48
DR-3	1	0.5	20	8	5	1.60	6.10
DR-4	1	0.8	25	10	7	2.76	5.37
DR-5	3	0.1	15	8	7	5.20	7.20
DR-6	3	0.3	10	10	5	0.19	4.85
DR-7	3	0.5	25	4	3	0.11	2.02
DR-8	3	0.8	20	6	1	0.02	1.47
DR-9	6	0.1	20	10	3	0	2.35
DR-10	6	0.3	25	8	1	0	3.02
DR-11	6	0.5	10	6	7	2.87	5.83
DR-12	6	0.8	15	4	5	0.03	0.02
DR-13	9	0.1	25	6	5	0.07	4.79
DR-14	9	0.3	20	4	7	0	0.77
DR-15	9	0.5	15	10	1	0	0.58
DR-16	9	0.8	10	8	3	0	0

后强度丧失, 工况 DR-15、DR-16 在经历 5 次冻融循环作用之后强度丧失, 可见其内部反应不足, 胶结物的胶凝、团簇、包裹作用低下, 造成土样最终以松散细碎状、片状形式存在。工况 DR-16 在 28 d 龄期中经历冻融后其强度破坏为 0, 在经历 6 次冻融循环之后强度也完全丧失。这一方面说明固化硫酸盐渍土抵抗冻融循环的能力与养护龄期之间呈现正相关; 另一方面也表明固化土中无机结合料间的配比关系对抵抗冻融循环破坏的能力具有重要的影响作用。

## 2.2 强度极差分析

固化硫酸盐渍土无侧限抗压强度极差分析结果如表 7 所示, 其中:  $t_i$  为各因素相应水平的无侧限抗压强度平均值,  $i=1\sim 4$ ;  $R$  为极差值。

由表 7 可知:

(1) 7 d 龄期下, 按照强度极差的大小顺序排出各影响因素: 硅灰掺量 > 电石渣掺量 > 冻融循环次数 > 氯硫比 > 粉煤灰掺量。在多因素作用下, 硅灰掺量为影响固化盐渍土无侧限抗压强度值的首要因素, 且随着硅灰掺量的增多, 其

表 7 无侧限抗压强度极差分析结果

龄期/d	因素水平	冻融循环/次	氯硫比	粉煤灰掺量/%	电石渣掺量/%	硅灰掺量/%
7	$t_1$	1.18	1.33	0.78	0.05	0.02
	$t_2$	1.38	0.12	1.38	0.81	0.10
	$t_3$	0.73	1.15	0.41	1.70	0.47
	$t_4$	0.02	0.70	0.74	0.74	2.71
	$R$	1.36	1.22	0.97	1.65	2.69
28	$t_1$	3.83	3.68	2.76	0.79	1.36
	$t_2$	3.89	3.03	2.82	3.89	1.96
	$t_3$	2.81	3.63	2.67	4.08	3.94
	$t_4$	1.54	1.72	3.80	3.29	4.79
	$R$	2.35	1.96	1.13	3.29	3.44

无侧限抗压强度也随之提高。在 7 d 全面试验中, 强度值表现最优的搭配组合为冻融循环次数为 3 次、氯硫比取 0.1、粉煤灰掺量取 15%、电石渣掺量取 8%、硅灰掺量取 7%, 这与正交试验方案中的设计一致。28 d 龄期下, 各因素对固化盐渍土无侧限抗压强度的影响次序: 硅灰掺量 > 电石渣掺量 > 冻融循环次数 > 氯硫比 > 粉煤灰掺量, 硅灰依然为影响固化盐渍土强度的首要因素。在 28 d 全面试验中, 强度表现最优的配方为冻融循环次数为 3 次、氯硫比取 0.1、粉煤灰掺量取 25%、电石渣掺量取 8%、硅灰掺量取 7%, 补做试验得到其抗压强度为 7.32 MPa, 该值大于工况 DR-5 的强度值。

(2) 在 7、28 d 龄期下, 各因素不同水平处强度值的变化规律较为相似。

随着冻融循环次数的增多, 固化盐渍土的无侧限抗压强度值表现出先略微上升然后下降的趋势。峰值点出现在冻融循环 3 次后, 此时对应的峰值强度为 3.89 MPa, 较冻融循环 1 次后的强度提高了 1.6%; 而在冻融循环 6、9 次后, 强度骤降, 降幅分别为 27.8%、60.4%。冻融 3 次后固化土强度升高的原因可归结为, 随着冻融循环次数的增加, 试样内水结晶消融, 土体内盐溶液浓度增大, 进而使得硫酸钠盐结晶析出及溶解, 土体膨胀, 颗粒间间距有所增大, 加之部分土颗粒在冻融循环作用下发生破碎; 此时, 盐晶体和破碎土粒充斥在土体中起到骨架支撑和填充土孔隙的作用, 增强了土体结构, 使得强度提升; 冻融循环 6~9 次后土体强度持续降低则可能是多次的冻融交替促使土中的易溶盐和水的相态不断转变, 加之冷暖端水分迁移速率、迁移量的差异导致易溶盐分布不均, 故而土体必然会经受反复的盐冻胀和融沉, 如此反复, 外界温度作用所产生的盐冻胀力大于土颗粒分子间的引力, 之前排列有序稳定的土骨架被破坏, 结构损伤, 强度降低。

随着氯硫比的逐渐增加, 固化盐渍土的强度值出现先降低后升高再降低的态势, 总体来说, 其强度在氯硫比作用下表现出降低趋势。在氯硫比为 0.1~0.5 范围内, 强度值呈现“V”型变化, 之后强度由 3.63 MPa 降低至 1.72 MPa, 降幅超过 50%, 这说明在一定的氯硫比范围内, 溶液

中所含氯离子的量对硫酸钠盐在水中的溶解与析出具有明显的拟制作用, 较少的芒硝晶体对土体产生骨架作用, 强度波动较小; 当氯硫比偏大时, 其对硫酸钠盐的溶解析出抑制效果表现不佳, 硫酸钠盐溶解析出较多, 盐冻胀作用表现较强, 土体强度下降。

当粉煤灰掺量范围为 10%~20% 时, 固化土的强度值约为 2.8 MPa, 浮动较小; 当掺量为 25% 时, 强度值增长迅速, 由 2.67 MPa 上升到 3.80 MPa, 涨幅为 42.3%。另外, 随着电石渣掺量的增加, 固化土的强度呈现先上升后下降的趋势, 最大点处强度对应的电石渣掺量为 8%。当电石渣掺量从 4% 增加到 8% 时, 固化土强度值提升 416.5%; 当电石渣掺量从 8% 增加到 10% 时, 强度下降 19.4%。固化盐渍土的无侧限抗压强度随硅灰掺量的增加而增大。究其原因在于, 一方面是硅灰活性极强, 表面的高价  $\text{Ca}^+$  与盐渍土体中的  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$  等低价阳离子发生离子交换作用, 生成具有胶结作用的黏聚体, 包裹土粒, 使强度得以增长; 另一方面, 硅灰具有比粉煤灰、电石渣更细的细度, 硅灰的加入对孔隙起到了有效的优化填充, 提高了土体密实度, 进而促使无侧限抗压强度提升。

### 2.3 强度方差分析

极差分析计算虽简单直观, 但较粗糙, 不能将因素水平变化所带来的试验结果的波动与由试验误差引起的试验结果的波动很好地区分, 也无法判断影响因素对试验结果是否存在显著性影响。为此, 进行方差分析。由于试验设计方案正交表上没有空白列, 选择将因素的偏差平方和明显偏小的列当作误差列来处理。试验的无侧限抗压强度方差分析结果如表 8 所示。

试验中显著性水平  $\alpha$  分别取 0.01、0.05、0.10。由文献[8]知,  $F_{0.99}(3, 3) = 29.5$ ,  $F_{0.95}(3, 3) = 9.28$ ,  $F_{0.90}(3, 3) = 5.39$ 。由表 2、3 可得, 7 d 龄期下,  $F_{0.95}(3, 3) < F_E < F_{0.99}(3, 3)$ , 表明硅灰掺量  $F_E$  对 7 d 冻融后无侧限抗压强度值的影响显著; 28 d 龄期,  $F_{0.95}(3, 3) < F_E < F_{0.99}(3, 3)$ ,  $F_{0.90}(3, 3) < F_D < F_{0.95}(3, 3)$ , 说明硅灰掺量对 28 d 冻融后无侧限抗压强度值的影响显著,

表 8 无侧限抗压强度方差分析结果

龄期	方差来源	偏差平方和	自由度	均方和	F 值	显著性
7 d	冻融循环	4.37	3	1.46	2.22	—
	氯硫比	3.50	3	1.17	1.78	—
	粉煤灰掺量(误差)	1.97	3	0.66	1.00	—
	电石渣掺量	5.50	3	1.83	2.79	—
	硅灰掺量	19.38	3	6.46	9.85	**
28 d	冻融循环	14.61	3	4.87	4.36	—
	氯硫比	10.03	3	3.34	3.00	—
	粉煤灰掺量(误差)	3.35	3	1.12	1.00	—
	电石渣掺量	27.67	3	9.22	8.27	*
	硅灰掺量	31.48	3	10.49	9.41	**

注：\* 为有一定影响；\*\* 为影响显著；\*\*\* 为影响高度显著。

而电石渣掺量对抗压强度产生一定影响。综上，方差分析中各因素对无侧限抗压强度的影响次序与极差分析一致。

## 2.4 XRD 衍射分析

为了探明电石渣、粉煤灰和硅灰固化硫酸盐渍土试样内部发生化学反应所产生新物质的概况，选取 7、28 d 龄期中经过冻融循环后无侧限抗压强度值最大(DR-5) 以及随着龄期的增长强度值提升较明显(DR-13) 的工况和素土进行 XRD 衍射试验分析。利用 Jade 6.5 软件对衍射图谱进行物质分析，衍射分析结果如图 1、2 所示。由图 1 可知：与素土相比，经过固化之后的土样发生化学反应之后生成  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 $\text{CaCO}_3$ 、 $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CaSO}_4$ 、 $\text{CaSiO}_3$ 、 $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 30\text{H}_2\text{O}$  等物质。

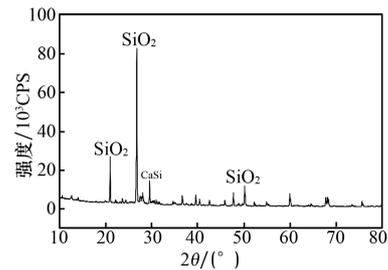
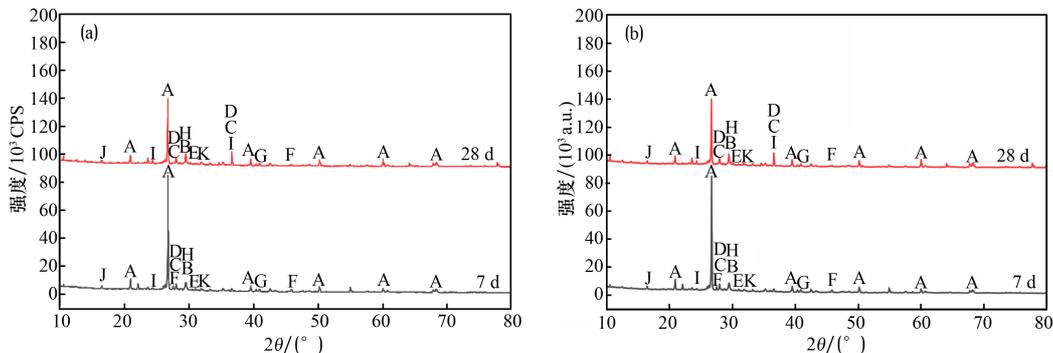


图 1 素土 XRD 衍射图谱

由图 1、2 可知：素土和固化土的晶体衍射主峰均为  $\text{SiO}_2$ ，且  $\text{SiO}_2$  在低矮峰中的存在较多，这是因为试验所用土样材料为砂土，而且所用固化剂粉煤灰和硅灰材料中所含的  $\text{SiO}_2$  居多。

由图 2(a)可知：7 d 龄期粉煤灰和硅灰中的  $\text{SiO}_2$  及  $\text{Al}_2\text{O}_3$  在电石渣提供的碱性环境中经过火山灰反应之后生成具有胶结性能的水化硅酸钙(C-S-H)和水



工况：(a) DR-5；(b) DR-13

A— $\text{SiO}_2$ ；B— $\text{CaCO}_3$ ；C— $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ；D— $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ；E— $\text{CaSO}_4$ ；F— $\text{Al}_2\text{O}_3$ ；

G— $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ；H— $\text{CaSiO}_3$ ；I— $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 30\text{H}_2\text{O}$ ；J— $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ；K— $\text{NaCl}$ 。

图 2 固化盐渍土 XRD 衍射图谱

化铝酸钙(C-A-H)沉淀等物质,衍射峰值较高。这些物质形成的硅铝包裹层附着于土颗粒表面,对土颗粒起到了很好的包裹、联结以及填充孔隙作用,使得土体力学性能提升显著。随着时间的推移,28 d时,其衍射峰值明显发生降低,这是因为火山灰反应在养护7 d期间较为剧烈,28 d时伴随着碱性激发剂浓度的降低和 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 及 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 质量分数的减少,反应渐渐迟缓,生成物逐渐减少,强度提升速率远不及7 d。XRD图谱中还存在 $\text{CaSO}_4$ 、 $\text{CaCO}_3$ 、 $\text{CaSiO}_3$ 及AFt(钙矾石)等胶凝物质,其中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和 $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 反应生成 $\text{CaSO}_4$ ;  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和空气中的部分 $\text{CO}_2$ 气体反应生成 $\text{CaCO}_3$ ;  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和 $\text{H}_2\text{SiO}_3$ 反应生成 $\text{CaSiO}_3$ ;  $\text{CaSO}_4$ 和水化铝酸钙(C-A-H)反应生成AFt,这些物质的生成进一步加固了土体的整体性,再加之3次冻融循环的作用,使得土体内部的土颗粒重新组合排列聚集,形成以电石渣-粉煤灰-硅灰-盐渍土为主的统一的稳定致密体系。另外,28 d衍射图谱中的低矮峰数量多于7 d,这表明28 d龄期后土样内部的化学反应已基本完成。

由图2(b)可知:7 d龄期的晶体衍射主峰数量明显少于28 d。7 d龄期强度很小是因为大掺量(25%)的粉煤灰表现出早期活性较低,其水硬性不易被激发,水化反应较慢,仅有少量活性硅灰参与化学反应,即未参与反应的 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 氧化物较多,生成的胶凝物较少,板结性低,再加之9次反复冻融循环对土体结构造成破坏,最终导致强度提升极为缓慢。而28 d龄期的固化土经历冻融循环后强度值较高的原因在于粉煤灰后期活性较高,土体中的粉煤灰、硅灰在碱性激发剂电石渣的作用下表现出的火山灰反应加强,消耗的氧化物量增多,继而生成更多的C-S-H、C-A-H、AFt等黏聚物,这些物质不仅附着在松散的土颗粒表面,而且还会充斥在土颗粒间的孔隙当中,最终将整个土体形成一个牢固稳定的空间网状结构。

### 3 结论

(1)在7、28 d龄期中,通过极差分析可得各因素对固化盐渍土冻融后无侧限抗压强度的影响主次顺序:硅灰掺量>电石渣掺量>冻融循环次数>氯硫比>粉煤灰掺量。方差分析表明:7 d龄期中硅灰

掺量对冻融后无侧限抗压强度的影响最为显著;28 d龄期中硅灰掺量对冻融后无侧限抗压强度的影响最为显著,而电石渣掺量则对其有一定影响。

(2)7 d龄期抗冻融效果最好的设计方案:冻融循环3次,氯硫比为0.1,粉煤灰掺量为15%,电石渣掺量为8%,硅灰掺量为7%。28 d龄期抗冻融效果最好设计方案:冻融循环3次,氯硫比为0.1,粉煤灰掺量为25%,电石渣掺量为8%,硅灰掺量为7%。

(3)XRD衍射分析结果表明,DR-5工况的强度提升主要发生在7 d龄期,在此期间生成的水化硅酸钙(C-S-H),水化铝酸钙(C-A-H)和钙矾石(AFt)等胶凝物较多,对土体加固效果较好,后期激发剂等物质减少,水化反应减弱;DR-13工况在大掺量粉煤灰作用下7 d强度表现不佳,后期反应加剧,强度提升明显。

### 参考文献:

- [1] 张卫兵,雷过,周瑞璞,等.冻融作用下固化盐渍土的强度劣化及微观机理研究[J].科学技术与工程,2022,22(20):8869-8876.
- [2] 丁永发,李宏波,张轩硕,等.工业废渣协同水泥固化渠道地基盐渍土强度及微观机理研究[J].灌溉排水学报,2022,41(6):113-120.
- [3] KANIRAJ S R, HAVANAGI V G. Behavior of cement-stabilized fiber-reinforced fly ash-soil mixtures [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, 127(7): 574-584.
- [4] 李宏波,田军仓,南红兵,等.几种固化剂对渠道盐渍土地基力学性能影响的试验研究[J].灌溉排水学报,2018,37(12):94-99.
- [5] CONSOLI N C, FESTUGATO L, MIGUEL G D, et al. Fatigue life of green stabilized fiber-reinforced sulfate-rich dispersive soil [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2021, 33(9): 04021249.
- [6] 杨晓华,王利鑫,张莎莎,等.无机材料改良硫酸盐渍土微观机理分析[J].建筑科学与工程学报,2023,40(2):129-137.
- [7] 文桃,米海珍,马连生,等.石灰改良黄土状硫酸盐渍土强度的影响因素研究[J].建筑科学与工程学报,2015,32(2):104-110.
- [8] 郑国萍,申玉发.概率论与数理统计(第三版)[M].北京:中国铁道出版社:2022.