

碱激发矿渣固化重氯盐渍土强度与固化机理研究

屈磊¹, 沈君², 宋心彤^{2*}, 赵志阳³, 邹东博², 程寅²

(1. 新疆生产建设兵团公路科学技术有限公司, 新疆维吾尔自治区 乌鲁木齐 830000;

2. 交通运输部科学研究院 工程技术与材料研究中心, 北京 100029; 3. 浙江省地矿建设有限公司, 浙江 杭州 310052)

摘要: 采用碱激发矿渣胶凝材料(矿渣)固化重氯盐渍土, 以水泥(PC)固化重氯盐渍土为对照组, 通过室内试验与现场测试, 研究了不同养护方式对固化重氯盐渍土强度发展的影响。同时, 通过分析固化重氯盐渍土的水化产物和微观形貌, 揭示了矿渣固化重氯盐渍土的固化机理。研究结果表明: 不同类型的固化重氯盐渍土在标准养护条件下的抗压强度均最高。与水泥固化重氯盐渍土相比, 矿渣固化重氯盐渍土受养护方式影响较大, 其在 CM3 养护方式下养护比在 CM2 养护方式下的 180 d 抗压强度损失降低了 21.2%, 其在低温养护下 7、28 d 抗压强度仅为同龄期标准养护试样的 27.0% 和 44.7%。现场测试结果显示, 矿渣固化重氯盐渍土在气温回升后抗压强度大幅度增长, 其长期性能优于水泥固化重氯盐渍土。随着养护龄期的增加, 矿渣固化重氯盐渍土中出现了更多的水滑石类化合物, 且形成了比较致密的板块状结构, 因此其抵御氯盐侵蚀能力更强, 土中 C-S-H 也越稳定, 长期性能更好。

关键词: 重氯盐渍土; 碱激发矿渣; 养护方式; 抗压强度; 固化机理

中图分类号: TU 472.5

文献标志码: A

Study on Strength and Curing Mechanism of Heavy Chlorinated Saline Soil by Alkali Activated Slag

Qu Lei¹, Shen Jun², Song Xintong^{2*}, Zhao Zhiyang³, Zou Dongbo², Cheng Yin²

(1. Xinjiang Production and Construction Corps Highway Science and Technology Co., Ltd., Urumqi 830000, China;

2. Engineering Technology and Materials Research Center, China Academy of Transportation Sciences, Beijing 100029, China;

3. Zhejiang Geological and Mineral Construction Co., Ltd., Hangzhou 310052, China)

Abstract: That alkali activated slag cementitious material (slag) is used to solidified heavy chloride saline soil are compared with that cement ones. The influence of different curing methods on the strength development of solidified heavy chloride saline soil is studied by indoor and field tests. Meanwhile, by analyzing the hydration products and microstructure, the curing mechanism of slag solidified heavy chloride saline soil was revealed. The research results indicate that different types of solidified heavy chloride saline soils have the highest compressive strength under standard curing conditions. Compared with cement solidified heavy chloride saline soil, slag solidified heavy chloride saline soil is more affected by the curing method. Its compressive strength loss at 180 days of curing method CM3 is reduced by 21.2% than curing method CM2. Its compressive strength at 7 and 28 days under low-temperature curing is only 27.0% and 44.7% of the standard curing samples of the same age. The on-site test results show that the compressive strength of slag solidified heavy chloride saline soil increases significantly after the temperature

收稿日期: 2024-11-20

基金项目: 中央级公益性科研院所基本业务费项目(20247505)

作者简介: 屈磊, 男, 正高级工程师, 硕士, 主要从事交通运输工程工作, E-mail: 122056963@qq.com。

通讯作者: 宋心彤, 女, 研究实习员, 硕士, 主要从事固废资源化利用与特殊岩土处治工作, E-mail: 17801123657@163.com。

引文格式: 屈磊, 沈君, 宋心彤, 等. 碱激发矿渣固化重氯盐渍土强度与固化机理研究[J]. 市政技术, 2025, 43(3): 215-223. (QU L, SHEN J, SONG X T, et al. Study on strength and curing mechanism of heavy chlorinated saline soil by alkali activated slag[J]. Journal of municipal technology, 2025, 43(3): 215-223.)

risers, and its long-term performance is better than that of cement solidified heavy chloride saline soil. With the increase of maintenance age, more water sliding stone compounds appeared in the slag solidified heavy chloride saline soil to form a relatively dense plate-like structure. Therefore, slag solidified heavy chloride saline soil has stronger ability to resist chloride salt erosion, and the C-S-H in the soil is more stable with better long-term performance.

Key words: heavily chlorinated saline soil; alkali activated slag; maintenance method; compressive strength; curing mechanism

我国盐渍土类型繁多且分布广泛,西部内陆地区主要是氯盐型盐渍土、硫酸盐型盐渍土和复合型盐渍土,沿海地区主要是氯盐型盐渍土。随着我国“一带一路”发展战略的推进,大型基础设施项目(包括交通、港口、核电、钢铁等)集聚,如何解决重大工程建设过程中遇到的盐渍土地基处理难题,特别是重盐渍土地基处理,是目前亟待解决的问题。

软土固化技术是盐渍土地基处理技术中的重要方法^[1-4],但由于盐渍土中含有大量盐分,用水泥、石灰或常用的固化剂固化盐渍土常不能取得满意的固化土工程性能和经济指标^[5]。柴寿喜^[3]认为,石灰固化滨海氯盐渍土存在早期强度低和水稳性差的问题。而水泥作为固化剂固化氯盐渍土的效果也不好。王宝勋^[6]提出,水泥固化海积软土存在强度增长缓慢、干缩大、易开裂、易软化和水稳定性差等特点。周铁华^[7]通过研究发现,水泥加固的沿海地区盐渍土的干缩系数和温缩系数较大,水泥改良盐渍土易开裂。也有研究者^[8-9]发现,受氯盐渍土中 Cl^- 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 等多种离子的不良影响,滨海盐渍土固化需要的水泥掺量大幅度提高。

碱激发地质聚合物为一种新型的环保材料,已有众多学者研究了地质聚合物在混凝土中替代硅酸盐水泥的效果^[10],为地质聚合物应用于固化软土提供了良好的理论基础,其中也包含盐渍软土的固化。Wei 等^[11]表明石灰-粉煤灰固化氯盐渍土的单轴抗压强度和三轴抗剪性能均得到明显改善。刘景锦等^[10]基于国内外既有研究成果,从碱激发地质聚合物盐渍土的反应机理、力学特性和抗腐蚀性能等方面进行了系统的分析,对碱激发地质聚合物在软土地基加固中的应用进行了系统梳理和展望。苏文轩等^[12]研究了水泥与碱激发矿渣/粉煤灰(AASF)复合掺比和龄期对固化氯盐渍土力学性能的影响及其固化机理,发现当水泥与 AASF 按照 11:9 的最佳掺比时,固化氯盐渍土各龄期的抗压强度均高于水泥单一固化强度的 50%左右。田亮等^[13]采用矿渣碱激发胶

凝材料对氯盐渍土进行了固化,并通过击实试验和无侧限抗压强度试验研究了矿渣碱激发胶凝材料对氯盐渍土性能的影响,发现矿渣碱激发胶凝材料可有效改善氯盐渍土的密实度,提高氯盐渍土的固化强度。

上述研究表明,利用碱激发胶凝材料固化氯盐渍土可起到良好的固化效果,但针对碱激发胶凝材料固化重氯盐渍土的研究较少,重氯盐渍土的固化效果与相关机理研究也鲜见于文献中。基于此,以青海省察尔汗盐湖近湖区氯盐渍土为试验土样,研究碱激发矿渣材料(矿渣)对重氯盐渍土长期固化性能的影响,通过室内试验与现场测试,分析不同养护条件下矿渣固化重氯盐渍土的强度特性与固化机理,该研究成果可为重氯盐渍土地基高效固化处理提供科学依据。

1 试验方案

1.1 试验材料

试验采用磨细高炉矿渣,比表面积为 $400 \text{ m}^2/\text{kg}$,记为 GB;采用普通硅酸盐水泥(P·C32.5),记为 PC,其物理力学性能见表 1;碱激发剂采用氢氧化钙,记为 CH。主要材料化学成分见表 2。

表 1 水泥物理力学性能

Tab. 1 Physical and mechanical properties of cement

水泥 类型	比表面积/ (m^2/kg)	初凝时间/ min	终凝时间/ min	抗压强度/ MPa		抗折强度/ MPa	
				3 d	28 d	3 d	28 d
				16.0	37.0	3.5	6.0

表 2 主要材料化学成分

Tab. 2 Chemical composition of the main material

材料	化学成分/%											
名称	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	MnO	P ₂ O ₅	Cl	损失
GB	44.06	28.72	15.13	0.83	5.34	0.20	0.47	3.81	0.23	0.08	0.06	1.07
PC	57.46	15.46	3.63	13.50	6.09	0.32	0.24	0.75	0.25	0.16	0.05	2.09
CH	99.00			0.01	0.25	0.22	0.12	0.20			0.01	0.19

试验土样采用青海省察尔汗盐湖近湖区现场挖取的氯盐渍土(见图 1),按含盐性质分为重氯盐渍土,根据 LY/T 1251—1999《森林土壤水溶性盐分析》^[14]、GB/T 50123—2019《土工试验方法标准》^[15],对氯盐渍土样的可溶盐离子含量、pH 值、物理力学性质和颗粒粒径组成进行测定。测试所得土样主要可溶盐离子含量与 pH 值见表 3,其物理力学性质指标见表 4,土样级配曲线见图 2。



图 1 氯盐渍土样
Fig. 1 Chloride saline soil sample

表 3 氯盐渍土样主要可溶盐离子含量与 pH 值
Tab. 3 The main soluble salt ion content and pH value of chloride saline soil samples

可溶盐离子含量/%									总含盐量/%	pH 值
Cl ⁻	Na ⁺	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	Al ³⁺	K ⁺		
21.54	14.66	1.01	0.34	0.24	0.03		1.63	2.88	42.33	7.74

表 4 氯盐渍土样物理力学性质指标
Tab. 4 Physical and mechanical properties indicators of chloride saline soil samples

含水量/ %	天然密度/ (g/cm ³)	液限/ %	塑限/ %	液性指数/ %	塑性指数/ %
19.9	2.13	24.2	16.6	0.79	7.6

1.2 试验方法

对氯盐渍土进行固化试验,以碱激发矿渣(矿渣)、水泥作为固化剂,固化剂掺量为 10%(固化剂与湿土样的质量比),水灰比为 0.5。

矿渣的碱激发剂为 Ca(OH)₂,依据试验结果选取 Ca(OH)₂ 激发矿渣的最佳干质量掺入比为矿渣:Ca(OH)₂=9:1。

室内试验分别采用水泥(PC)和矿渣(GC)固化重氯盐渍土,试样的制备步骤如下:1)对土样进行

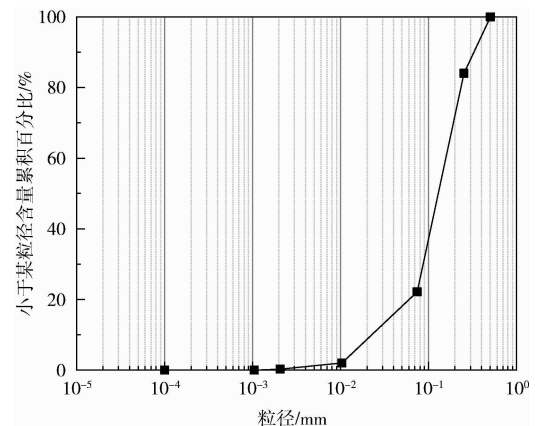


图 2 氯盐渍土样级配曲线
Fig. 2 Grading curves of chloride saline soil sample

手工预拌和,将土中的大块碾碎后放入土中并搅拌均匀;2)将定量的预拌土样放入搅拌机中高速搅拌 90 s 后待用;3)将湿土质量 10%的固化剂按水灰比 0.5 配制成浆液,并加入已搅拌均匀的土样中,先低速搅拌 30 s 再高速搅拌 60 s,将锅壁四周土样刮入锅内后,再高速搅拌 90 s;4)将固化试样分 3 层放入 70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm(长×宽×高)的钢试模中,每层土样由手工压实;5)试样成型后覆盖塑料薄膜,室温保湿养护 1 d 后脱模。试样养护方式有:养护方式①(Cuing Method1,CM1)试样脱模后移入温度为 18~22 ℃、RH(相对湿度)在 95%以上的标准养护箱中,标准养护至规定龄期;养护方式②(Cuing Method2,CM2)试样脱模后直接放入 37.8%含盐量氯盐渍土中;养护方式③(Cuing Method3,CM3)试样标准养护至 28 d 后再放入 37.8%含盐量氯盐渍土中;养护方式④(Cuing Method4,CM4)试样 5 ℃低温养护至 28 d 后取出,再进行标准养护至规定龄期,观测其强度发展。

现场试验选用固化剂掺量为 10%的固化重氯盐渍土,制备与养护步骤如下:1)将定量土样放入砂浆搅拌机中,匀速搅拌 90 s 后待用;2)将湿土质量 10%的固化剂按水灰比 0.5 配制成浆液加入已搅拌的土样中,匀速搅拌 90 s 停止,将锅壁四周土样刮入锅内后,匀速搅拌 90 s;3)将固化试样分 3 层放入 70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm 的塑料试模中(无底板、模具上下通透),每层土样由手工压实;4)试样不脱模,成型后直接埋入现场 1.5 m 深的养护坑中,对其 7、15、28、60、90、180 d 的抗压强度进行测试。

为探究矿渣固化重氯盐渍土的固化机理,选取代表龄期固化土样,以水泥固化重氯盐渍土为对照组,通过 XRD、SEM 测试,对固化重氯盐渍土的水化产物和微观结构进行分析。其中,XRD 试验采用 X 射线衍射仪对试样进行测试,并利用 MDI Jade 6.0 分析软件对测试结果进行分析;SEM 试验采用电子扫描显微镜对试样进行测试。

2 试验结果分析

2.1 标准养护条件下固化重氯盐渍土抗压强度发展

标准养护条件下水泥和矿渣固化重氯盐渍土抗压强度随养护龄期变化见图 3。

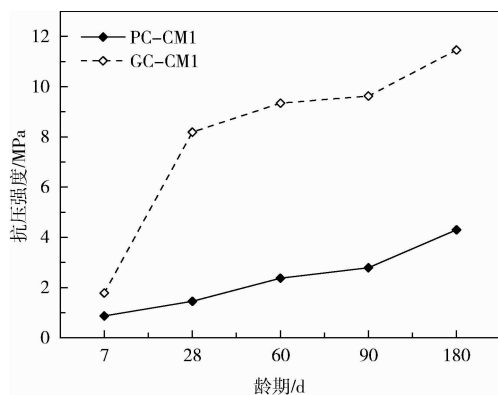


图 3 标准养护条件下水泥和矿渣固化重氯盐渍土抗压强度随养护龄期变化

Fig. 3 The variation of compressive strength of cement and slag solidified heavy chloride saline soil with the curing age under standard curing conditions

由图 3 可知,采用养护方式 CM1,水泥和矿渣固化重氯盐渍土抗压强度在 180 d 内均保持稳定增长,且矿渣固化重氯盐渍土在各试验龄期内的抗压强度均高于水泥固化重氯盐渍土。28、180 d 龄期下,矿渣固化重氯盐渍土抗压强度分别为 8.19、11.46 MPa,而水泥固化重氯盐渍土抗压强度仅为 1.45、4.30 MPa,是前者的 17.7%和 37.5%。固化重氯盐渍土在不受外部盐分侵蚀情况下的抗压强度发展规律可以初步表明固化剂对土中盐分的适应性。

2.2 含盐量对固化重氯盐渍土抗压强度的影响

在实际工程中,固化土始终面临外部盐分侵蚀的问题。将试样脱模后放入盐土中养护以模拟该条件下固化土的抗压强度发展。不同养护方式下水泥和矿渣固化重氯盐渍土抗压强度随养护龄期变化见图 4。

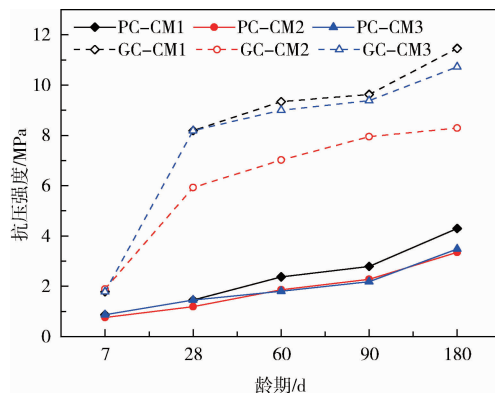


图 4 不同养护方式下水泥和矿渣固化重氯盐渍土抗压强度随养护龄期变化

Fig. 4 The variation of compressive strength of cement and slag solidified heavy chloride saline soil with the curing age under different curing methods

由图 4 可知,随着养护龄期的增加,水泥和矿渣固化重氯盐渍土抗压强度总体呈增长趋势,且不同养护条件下矿渣固化重氯盐渍土的抗压强度均高于水泥固化重氯盐渍土。对比不同养护条件下固化重氯盐渍土的抗压强度可知,不同类型的固化重氯盐渍土在标准养护条件下的抗压强度均最高。

为表征不同养护方式对固化重氯盐渍土抗压强度的影响,引入抗压强度损失指标 S_L ,并计算 180 d 龄期下的抗压强度损失,其计算式见式(1)。

$$S_L = \frac{S_{CM1} - S_{CM2} \text{ (或 } S_{CM3})}{S_{CM1}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: S_{CM1} 、 S_{CM2} 、 S_{CM3} 分别为同龄期不同养护方式下的不同固化重氯盐渍土的抗压强度。

不同养护方式下,水泥和矿渣固化重氯盐渍土 180 d 抗压强度损失见表 5。

表 5 水泥和矿渣固化重氯盐渍土 180 d 抗压强度损失
Tab. 5 180 days compressive strength loss of cement and slag solidified heavy chloride saline soil

固化土类型	抗压强度损失/%	
	养护方式 CM2	养护方式 CM3
PC	22.1	19.1
GC	27.7	6.5

由表 5 可知,养护方式对固化重氯盐渍土抗压强度损失的影响较大,与养护方式 CM2 相比,养护方式 CM3 下固化重氯盐渍土的抗压强度损失较低,即抗压强度降幅较小,抗压强度较高。与养护方式

CM2 相比,水泥固化重氯盐渍土在养护方式 CM3 下的抗压强度损失降低了 3.0%;矿渣固化重氯盐渍土在养护方式 CM3 下的抗压强度损失降低了 21.2%。因此,养护方式对矿渣固化重氯盐渍土抗压强度的影响更大。

2.3 温度对固化重氯盐渍土抗压强度的影响

为模拟西部地区气温变化对固化重氯盐渍土长期性能的影响,研究水泥和矿渣固化重氯盐渍土在温度变化(由低温至常温)下的抗压强度发展。早期低温养护对水泥和矿渣固化重氯盐渍土抗压强度的影响见图 5。

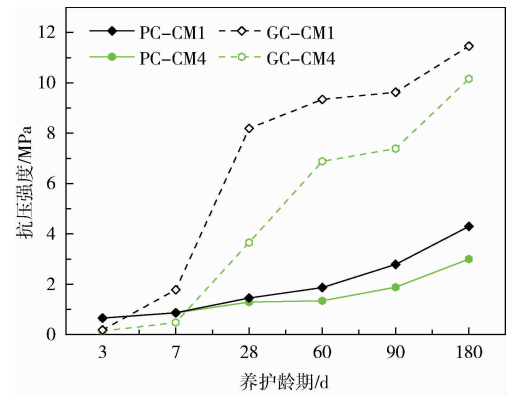


图 5 早期低温养护对水泥和矿渣固化重氯盐渍土抗压强度的影响

Fig. 5 The effect of early low-temperature curing on the compressive strength of cement and slag solidified heavy chloride saline soil

由图 5 可知,在温度改变的情况下,水泥和矿渣固化重氯盐渍土抗压强度的变化规律并不一致。水泥固化重氯盐渍土抗压强度受低温影响较小,低温养护下其 7、28 d 抗压强度分别为同龄期标准养护试样的 98.9%和 89.0%,在 28 d 转为标准养护后,抗压强度继续增加,180 d 抗压强度达到同龄期标准养护试样的 69.8%;矿渣固化重氯盐渍土低温养护 7、28 d 抗压强度分别为同龄期标准养护试样的 27.0%和 44.7%,试样转为标准养护后,其抗压强度也继续增加,180 d 抗压强度达到同龄期标准养护试样的 88.7%。

2.4 现场测试结果分析

室内试验结果表明,在 10%的固化剂掺量下,水泥和矿渣固化重氯盐渍土 28 d 抗压强度分别为 8.19、1.45 MPa,并且在标准养护 28 d 后将其埋在含盐量

37.8%的盐渍土中养护,固化重氯盐渍土抗压强度仍继续增加。因此,可以认为该类固化剂在重氯盐渍土盐湖地区的地基处理中具有应用前景。为了验证固化重氯盐渍土现场应用效果,在青海省察尔汗盐湖地区进行现场试验,试验方案与结果见表 6。

表 6 察尔汗盐湖现场试验方案与结果
Tab. 6 The testing program and results of field test in Cha'er'han Salt Lake

固化剂	养护条件	抗压强度/MPa					
		7 d	15 d	28 d	60 d	90 d	180 d
10%GC	1.5 m 深盐渍土中养护	0.09	0.23	0.74	2.53	3.01	3.78
10%PC	1.5 m 深盐渍土中养护	0.39	0.56	0.64	0.69	0.90	0.92

由于测试时间为 2 月,地面结冰,平均气温为 0℃,而且温差较大,夜间温度通常处于 0℃以下,在这种养护条件下,固化土抗压强度增长很慢。由表 6 可知,矿渣固化重氯盐渍土的 28 d 抗压强度不足 1 MPa,但在气温回升后其抗压强度大幅度增加。早期低温对矿渣固化重氯盐渍土抗压强度影响较大,与室内试验结果一致。但早期低温养护仅影响固化重氯盐渍土抗压强度的发展过程,并不影响固化重氯盐渍土最终的抗压强度。固化重氯盐渍土施工若发生在冬季,可考虑通过设置地面隔热层,如覆盖聚苯板、厚土层等保温材料进行保温,并且为了避免水渗入盐渍土中造成冻胀现象,还可以选用土工布作为隔水层材料,在隔水层的上、下各铺设一层砂土保护层,形成一个既能保温又能隔水的复合结构,以削弱低温对固化重氯盐渍土抗压强度的负面影响。

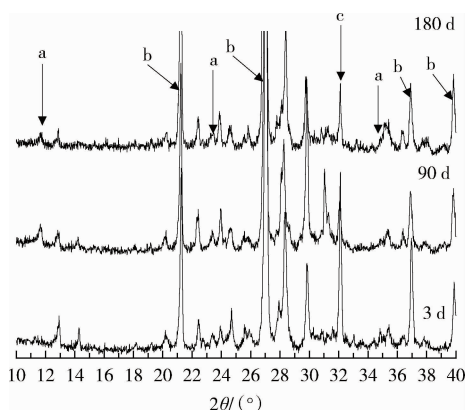
综上,水泥和矿渣固化重氯盐渍土在实验室和现场的抗压强度发展表明,上述固化剂可以应用于重氯盐渍土固化,且矿渣固化重氯盐渍土的长期性能更好。

3 固化机理分析

3.1 水化产物

标准养护条件下水泥和矿渣固化重氯盐渍土的 3、90、180 d 的 XRD 衍射图谱对比见图 6、7。

由图 6、7 可知,随着养护龄期的增加,水泥和矿渣固化重氯盐渍土中出现了水滑石类化合物(HT,其化学式为 $[Mg_6Al_2(OH)_{16}CO_3] \cdot 4H_2O$,是一种结构类似 AFm,却又有所不同的镁铝层状双金属氢氧化



注:a、b、c 分别代表水滑石类化合物 (HT)、 SiO_2 和 NaCl。

图 6 标准养护条件下水泥固化重氯盐渍土 XRD 衍射图谱对比

Fig. 6 Comparison of XRD diffraction patterns of cement solidified heavy chloride saline soil under standard maintenance conditions

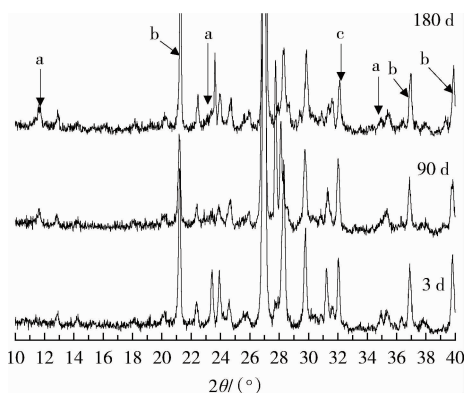


图 7 标准养护条件下矿渣固化重氯盐渍土 XRD 衍射图谱对比

Fig. 7 Comparison of XRD diffraction patterns of slag solidified heavy chloride saline soil under standard maintenance conditions

物), NaCl 逐渐减少, 无明显 CH 峰位, C-S-H 凝胶结晶较差, 加上土中其他物质的干扰, 在 XRD 图谱中不易识别和标示, 但通过衍射强度的变化可以反映其在不同龄期的生成量和稳定情况。

水泥和矿渣固化重氯盐渍土中 NaCl、HT 与 C-S-H 衍射强度随龄期变化见图 8、9。

由图 8、9 可知, 对于水泥固化重氯盐渍土而言, 养护龄期小于 90 d 时, NaCl 的衍射强度减小, HT 和 C-S-H 的衍射强度均增大; 90 d 后, HT 和 C-S-H 的衍射强度均减小, NaCl 的衍射强度增大。而矿渣固化重氯盐渍土中, NaCl 的衍射强度一直在减小, HT 和 C-S-H 的衍射强度则不断增大。通过分析水泥和

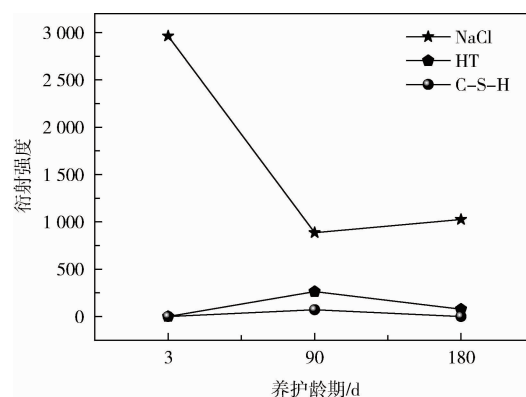


图 8 水泥固化重氯盐渍土中 NaCl、HT 与 C-S-H 衍射强度随龄期变化

Fig. 8 Variation of NaCl, HT, and C-S-H diffraction intensity with the age in cement solidified heavy chloride saline soil

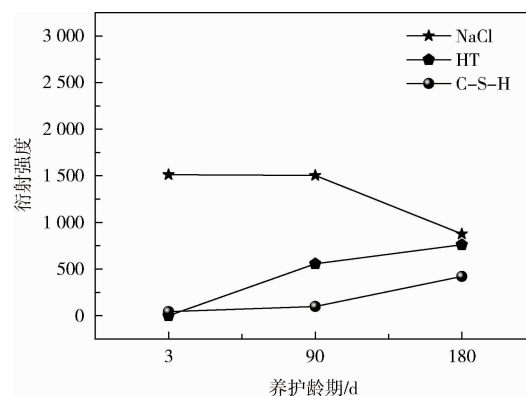


图 9 矿渣固化重氯盐渍土中 NaCl、HT 与 C-S-H 衍射强度随龄期变化

Fig. 9 Variation of NaCl, HT, and C-S-H diffraction intensity with the age in slag solidified heavy chloride saline soil

矿渣在氯化物侵蚀下的腐蚀机理可得到出现上述现象的原因: 固化土体系中存在的 CH 会与侵入的氯盐发生反应, 使得固化土体系中 CH 浓度降低, 并使钙从浆体相中浸析出来, 故而在水化作用的持续进行下, CH 与氯盐不断发生反应, C-S-H 会发生分解, 水泥固化重氯盐渍土长期耐久性降低; 而矿渣固化重氯盐渍土中含有大量矿渣和少量 CH, 其主要水化产物 C-S-H 的形成稳定过程与水泥固化重氯盐渍土不同, 对体系 CH 要求不高, 且 CH 的低掺量杜绝了盐分与其发生大量反应, 这是矿渣固化重氯盐渍土中 C-S-H 比较稳定的原因; 此外, 矿渣固化重氯盐渍土中形成的大量水滑石类化合物对阴离子有较强的吸附作用, 可大量形成 HT-Cl, 在固化重氯

盐渍土中比较稳定。因而可以观察到,矿渣固化重氯盐渍土中的 HT 衍射强度逐渐增大,而 HT 含量的增加,其结合的 Cl^- 就越多,抵抗氯盐侵蚀的能力也就越强,C-S-H 被破坏的程度越低,故 NaCl 衍射强度减小,C-S-H 衍射强度增大。

不同养护条件下水泥和矿渣固化重氯盐渍土 180 d 龄期 XRD 衍射图谱对比见图 10、11。

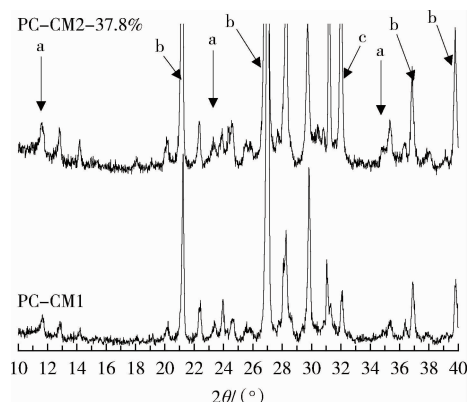


图 10 不同养护条件下水泥固化重氯盐渍土 180 d 龄期 XRD 衍射图谱对比

Fig. 10 Comparison of XRD diffraction patterns of cement solidified heavy chloride saline soil at 180 days of age under different curing conditions

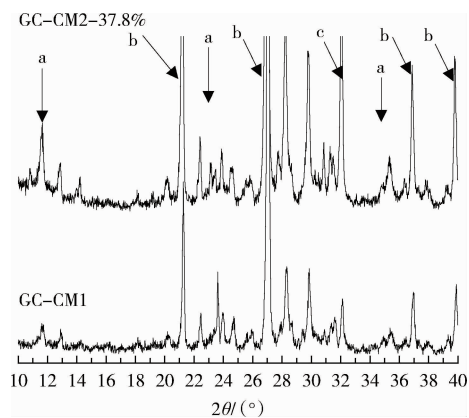


图 11 不同养护条件下矿渣固化重氯盐渍土 180 d 龄期 XRD 衍射图谱对比

Fig. 11 Comparison of XRD diffraction patterns of slag solidified heavy chloride saline soil at 180 days of age under different maintenance conditions

由图 10、11 可知,盐土养护土样的 HT 峰位更明显。

养护龄期为 180 d 时,水泥和矿渣固化重氯盐渍土中 NaCl、HT 与 C-S-H 衍射强度随养护方式变化

见图 12、13。

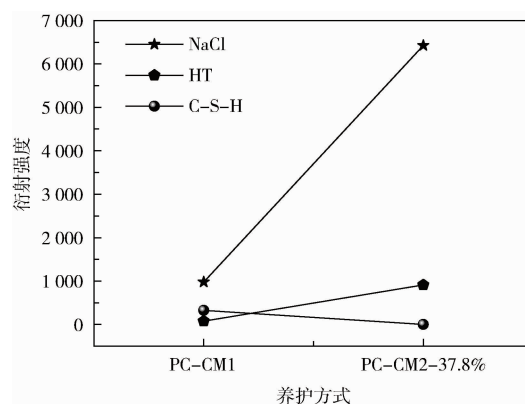


图 12 水泥固化重氯盐渍土中 NaCl、HT 与 C-S-H 衍射强度随养护方式变化

Fig. 12 Variation of diffraction intensity of NaCl, HT, and C-S-H with different curing methods in cement solidified heavy chloride saline soil

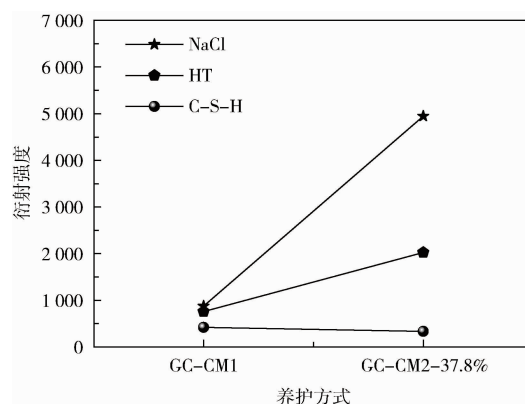


图 13 矿渣固化重氯盐渍土中 NaCl、HT 与 C-S-H 衍射强度随养护方式变化

Fig. 13 Variation of diffraction intensity of NaCl, HT, and C-S-H with different curing methods in slag solidified heavy chloride saline soil

由图 12、13 可知,与标准养护相比,脱模后立即将试样置于盐土养护环境中,使得水泥和矿渣固化重氯盐渍土中 C-S-H 的衍射强度呈下降趋势,但 HT 衍射强度增大。

由图 6~13 可知,水泥和矿渣固化重氯盐渍土中 HT、NaCl 和 C-S-H 的含量存在相关性。盐土养护与标准养护下,矿渣固化重氯盐渍土中形成的 HT 数量均比水泥固化重氯盐渍土多,C-S-H 数量也较多,但 NaCl 较少。盐土养护与标准养护下,水泥和矿渣固化重氯盐渍土中 C-S-H 数量均有所下降,但整

体变化幅度不大。矿渣固化重氯盐渍土受养护方式影响显著,主要表现为 HT 数量提升较大,固化土中 HT 越多,对土中 NaCl 等氯盐抵御能力就越强,盐土养护可以促进土中 HT 的形成,但在固化土结构比较疏松的情况下,盐土养护引入的大量氯盐对固化土中形成 C-S-H 不利,即使后期形成更多的 HT,也不足以弥补这一损失,因此盐土养护试样的 C-S-H 衍射强度降低,其宏观强度也低于标准养护试样。

3.2 微观形貌

养护龄期为 180 d 时,水泥和矿渣固化重氯盐渍土标准养护(CM1)和 37.8%含盐量氯盐渍土养护(CM2-37.8%)的 SEM 照片(放大倍数为 5 000)对比见图 14。

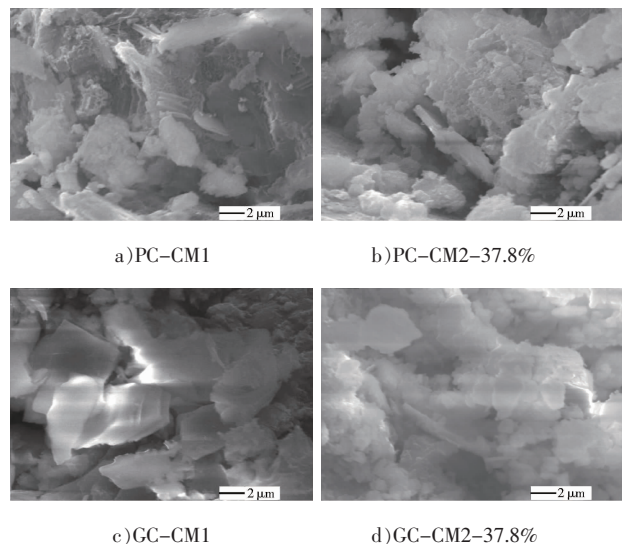


图 14 不同养护方式下水泥和矿渣固化重氯盐渍土 SEM 照片对比

Fig. 14 Comparison of SEM photos of cement and slag solidified heavy chloride saline soil under different maintenance methods

由图 14 a)、b)可知,与标准养护相比,盐土养护下水泥固化重氯盐渍土的微观结构较为疏松,存在一些孔隙。试样中存在纤维网络状的 C-S-H 凝胶^[16],少量的板状 CH 晶体和团簇状的 C-A-H 凝胶体。这是由盐渍土中大部分的硅铝矿物与 Ca^{2+} 发生化学反应生成的,2 种凝胶交织包裹在土颗粒表面,提高了盐渍土强度^[4]。由图 14 c)、d)可知,矿渣固化重氯盐渍土在标准养护下形成的结构比较致密,大量的 C-S-H 凝胶将土颗粒和少量 CH 包裹形成比较致密的板块状结构,而盐土养护下矿渣固化重氯盐渍土

的结构较疏松。通过分析水泥和矿渣固化重氯盐渍土的 SEM 图片可知,脱模后直接把固化重氯盐渍土置于盐土中养护会对试样结构产生影响,标准养护的固化重氯盐渍土可以形成比盐土养护中更为致密的结构。

4 结 论

针对察尔汗盐湖地区重氯盐渍土的固化,采用碱激发矿渣作为主要固化材料,水泥固化重氯盐渍土为对照组,探究了固化重氯盐渍土在盐分、低温影响下的强度变化,并利用 XRD 和 SEM 测试方法,研究了固化重氯盐渍土在盐分影响下的水化产物及微观形貌,主要结论如下:

1)标准养护下,矿渣固化重氯盐渍土的抗压强度在各试验龄期内均较高,其 28、180 d 抗压强度分别为 8.19、11.46 MPa,而对应龄期的水泥固化重氯盐渍土的抗压强度仅为 1.45、4.30 MPa。

2)不同养护条件下,矿渣固化重氯盐渍土的抗压强度普遍高于水泥固化重氯盐渍土。对比不同养护条件下固化重氯盐渍土的抗压强度可知,不同类型的固化重氯盐渍土在标准养护条件下的抗压强度均最高。养护方式对固化重氯盐渍土抗压强度损失指标影响较大,水泥固化重氯盐渍土在 CM3 养护方式下养护比在 CM2 养护方式下的抗压强度损失降低了 3.0%,矿渣固化重氯盐渍土在 CM3 养护方式下养护比在 CM2 养护方式下的抗压强度损失降低了 21.2%。

3)水泥固化重氯盐渍土受低温影响较小,低温养护下其 7、28 d 抗压强度分别为同龄期标准养护试样的 98.9%和 89.0%;而矿渣固化重氯盐渍土低温养护下 7、28 d 抗压强度仅为同龄期标准养护试样的 27.0%和 44.7%。

4)现场测试结果显示,矿渣固化重氯盐渍土的 28 d 抗压强度不足 1 MPa,但气温回升后其抗压强度大幅度增长。水泥和矿渣固化重氯盐渍土在实验室和现场的抗压强度发展表明,水泥和矿渣均可以应用于重氯盐渍土固化,且矿渣固化重氯盐渍土的长期性能更好。

5)随着龄期的增加,水泥和矿渣固化重氯盐渍土中均出现了水滑石类化合物,NaCl 逐渐减少。固化重氯盐渍土中形成的 HT 越多,抵御氯盐侵蚀能力就

越强,土中 C-S-H 也越稳定。矿渣固化重氯盐渍土中 HT 的形成量多于相同条件下的水泥固化重氯盐渍土,因而土中 C-S-H 更加稳定,相应强度也更高。

6)矿渣固化重氯盐渍土在标准养护下形成的结构比较致密,大量薄片状的 C-S-H 凝胶将土颗粒和少量 CH 包裹形成比较致密的板块状结构,而盐土养护下矿渣固化重氯盐渍土的结构较为疏松。

[参考文献]

- [1] 宫经伟,林浩然,王亮,等.基于正交试验的全固废复合胶凝材料固化盐渍土的力学性能[J].科学技术与工程,2021,21(7):2865-2872. (GONG J W, LIN H R, WANG L, et al. Mechanical properties of solidified saline soil of all solid waste composite cementitious material based on orthogonal test[J]. Science technology and engineering, 2021, 21(7):2865-2872.)
- [2] 张荣,卢正,刘杰,等.矿渣+粉煤灰+聚丙烯酰胺固化硫酸盐渍土的物理力学性能[J].岩土力学,2024,45(Sup1):123-132. (ZHANG R, LU Z, LIU J, et al. Physical and mechanical properties of saline soil stabilized by combined slag, fly ash and polyacrylamide[J]. Rock and soil mechanics, 2024, 45(Sup1):123-132.)
- [3] 柴寿喜. 固化滨海盐渍土的强度特性研究[D]. 兰州:兰州大学,2006. (CHAI S X. Study on the special properties of strength of solidified saline soil in inshore[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2006.)
- [4] 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. (DING Y F, LI H B, ZHANG X S, et al. Using mixture of industrial waste residues and cement to reinforce channel foundation in salinized soils[J]. Journal of irrigation and drainage, 2022, 41(6):113-120.)
- [5] 朱燕,甄祥,余湘娟,等.高分子材料固化盐渍土的强度试验研究[J].公路,2020,65(5):265-271. (ZHU Y, ZENG X, YU X J, et al. Experimental study on the strength of polymer cured saline soil[J]. Highway, 2020, 65(5):265-271.)
- [6] 王宝勋.海积软土力学特征与固化新技术研究[D].长沙:中南大学,2008. (WANG B X. Research on the mechanical characteristics and new solidification technologies of marine soft soil[D]. Changsha: Central South University, 2008.)
- [7] 周铁华.沿海地区盐渍土用于路基填筑的改良技术研究[J].科技创新与应用,2024,14(25):63-67. (ZHOU T H. Research on improvement technology of saline soil used for roadbed filling in coastal areas[J]. Technology innovation and application, 2024, 14(25):63-67.)
- [8] 杨晓明.水泥处置高含盐量软土的微观试验和机理研究[D].上海:同济大学,2006. (YANG X M. Microscopic experiment and mechanism study on cement treatment of high salt content soft soil[D]. Shanghai: Tongji University, 2006.)
- [9] 邢皓枫,徐超,叶观宝,等.水泥加固高含盐软土的强度和微观结构研究[J].同济大学学报(自然科学版),2008,36(12):1606-1610. (XING H F, XU C, YE G B, et al. Strength and microstructure of salt-rich soft soil improved by cement[J]. Journal of Tongji University (natural science), 2008, 36(12):1606-1610.)
- [10] 刘景锦,罗昊鹏,雷华阳,等.碱激发地质聚合物固化软土的研究进展[J].硅酸盐通报,2023,42(2):565-574. (LIU J J, LUO H P, LEI H Y, et al. Research progress on application of alkali-activated geopolymers to stabilize soft soil[J]. Bulletin of the Chinese ceramic society, 2023, 42(2):565-574.)
- [11] WEI L, CHAI S X, GUO Q L, et al. Mechanical properties and stabilizing mechanism of stabilized saline soils with four stabilizers[J]. Bulletin of engineering geology and the environment, 2020, 79(10):5341-5354.
- [12] 苏文轩,宁宝宽,刘剑平,等.水泥与碱激发材料协同固化氯盐渍土的机理研究[J].建筑材料学报,2025,28(1):26-32,41. (SU W X, NING B K, LIU J P, et al. Mechanistic study of chlorine saline soil synergistically solidified by cement and alkali-activated materials[J]. Journal of building materials, 2025, 28(1):26-32, 41.)
- [13] 田亮,姚晓,董洁,等.矿渣碱激发胶凝材料固化盐渍土试验研究[J].混凝土与水泥制品,2018(9):98-101. (TIAN L, YAO X, DONG J, et al. Experimental study on the solidification of salt crushed soil using slag alkali activated cementitious materials[J]. China concrete and cement products, 2018(9):98-101.)
- [14] 国家林业和草原局.森林土壤水溶性盐分分析:LY/T 1251—1999[S].北京:中国标准出版社,1999:154-167. (National Forestry and Grassland Administration. Analysis methods of water soluble salts of forest soil: LY/T 1251—1999[S]. Beijing: Standards Press of China, 1999:154-167.)
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部,等.土工试验方法标准:GB/T 50123—2019[S].北京:中国计划出版社,2019:118-120. (Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, et al. Standard for geotechnical test method: GB/T 50123—2019[S]. Beijing: China Plans Publishing House, 2019:118-120.)
- [16] 廉慧珍,童良,陈恩义.建筑材料物相研究基础[M].北京:清华大学出版社,1996:22-75. (LIAN H Z, TONG L, CHEN E Y. Fundamentals of phase research on building materials[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1996:22-75.)

其他作者: 沈君,男,助理研究员,硕士,主要从事固废资源化利用与特殊岩土处治工作。
赵志阳,男,助理工程师,学士,主要从事道路工程施工工作。
邹东博,男,助理工程师,学士,主要从事固体废弃物资源化利用工作。
程寅,男,副实习员,博士,主要从事固废资源化利用与特殊岩土处治工作。