

水泥-镁渣固化盐渍土力学性能实验

单 龙¹, 李宏波^{1, 2, 3}, 程银银¹, 康鑫睿¹, 朱一丁¹

(1. 宁夏大学 土木与水利工程学院, 宁夏 银川 750021; 2. 宁夏节水灌溉与水资源调控工程技术研究中心, 宁夏 银川 750021;
3. 旱区现代农业水资源高效利用教育部工程研究中心, 宁夏 银川 750021)

摘要:为改善宁夏盐渍土地基混凝土渠道衬砌易冻胀、易腐蚀等缺陷,提高当地镁渣利用率,采用水泥-镁渣对盐渍土进行固化研究,设计13种不同配比的水泥-镁渣固化盐渍土试样,通过三轴试验、XRD和SEM表征手段分析试样的抗剪强度指标及水化机理。结果表明:对7、28 d龄期试样,水泥-镁渣固化盐渍土的黏聚力、内摩擦角均随压实系数的增大而增大;单掺水泥时,固化盐渍土的黏聚力和内摩擦角随水泥含量的增加而变大;镁渣的加入对试样的黏聚力影响较大,对摩擦角影响较小;建立水泥及镁渣掺量与固化盐渍土抗剪强度指标的关系模型;固化盐渍土的水化产物及抗剪强度增强来源均以水化硅酸钙为主;28 d龄期试样的固化盐渍土颗粒能更好地填充孔隙,微观结构更致密,从而强度更高;水泥-镁渣固化盐渍土的抗剪强度显著提高,其中水泥质量分数为3%、镁渣质量分数为10%的固化盐渍土力学效果较佳。

关键词:水泥-镁渣固化盐渍土;抗剪强度;水化机理;微观结构

中图分类号: TU448; TB4

文献标志码: A

引用格式:

单龙, 李宏波, 程银银, 等. 水泥-镁渣固化盐渍土力学性能试验[J]. 中国粉体技术, 2023, 29(5): 8-16.

SHAN L, LI H B, CHENG Y Y, et al. Mechanical properties test of solidified saline soil with cement-magnesium slag[J]. China Powder Science and Technology, 2023, 29(5): 8-16.

Mechanical properties test of solidified saline soil with cement-magnesium slag

SHAN Long¹, LI Hongbo^{1, 2, 3}, CHENG Yinyin¹, KANG Xinrui¹, ZHUYiding¹

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. Ningxia Engineering Technology Research Center of Water-Saving Irrigation and Water Resources Regulation, Yinchuan 750021, China; 3. Engineering Research Center for Efficient Utilization of Modern Agricultural Water Resources in Arid Regions, Ministry of Education, Yinchuan 750021, China)

Abstract: In order to improve the lining defects of concrete channel in saline soil foundation in Ningxia, such as frost heave and corrosion, and to improve the utilization rate of local magnesium slag, the study on solidification of saline soil was carried out with cement-magnesium slag. Thirteen kinds of cement-magnesium slag with different mass fractions were designed to cure saline soil samples, and the shear strength and hydration mechanism of the samples were analyzed by XRD and SEM characterization methods. The results show that the cohesion and internal friction angle of cement-magnesium slag solidify saline soil increase with the increasing of compacting coefficient for samples at 7 and 28 d of age. The cohesion and internal friction angle of solidified saline soil increase with the increasing of cement content. The addition of magnesium slag has a great effect on the cohesion of the sample, but a small effect on the friction angle. The relationship model between cement and magnesium slag content and shear strength index of cured saline soil is established. Hydrated calcium silicate is the main source of hydration products and shear strength enhancement of cured saline soil. The solidified saline soil particles at the age of 28 d can fill the pores and the microstructure is more dense, thus the strength is higher. The shear strength of cement and magnesium slag solidified saline soil is improved significantly, and the mechanical effect of cement and magnesium slag solidified soil is better when the cement fraction is 3% and the magnesium slag fraction is 10%.

Keywords: cement-magnesium slag solidified saline soil; shear strength; hydration mechanism; microstructure

收稿日期: 2023-03-30, **修回日期:** 2023-05-28。

基金项目:国家自然科学基金项目, 编号: 52069025; 宁夏回族自治区自然科学基金项目, 编号: 2021AAC03080; 宁夏高等学校一流学科(水利工程学科)资助项目, 编号: NXYLXK2021A03。

第一作者简介: 单龙(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为道路材料。E-mail: 12022131152@stunxu.edu.cn。

通信作者简介: 朱一丁(1967—), 教授, 博士, 研究方向为土木工程新材料。E-mail: zyd-1011@163.com。

宁夏地区有 75%左右的干旱土地^[1],是典型的缺水干旱区^[2],盐渍化是干旱地区的普遍特性。一方面盐渍土极易发生盐腐蚀和盐胀等危害,另一方面宁夏地区也属于季节性冻土区^[3],盐渍土在长期的盐冻融循环作用下,加速了渠道衬砌的破坏^[4],因此盐渍土地基的固化变得愈发重要^[5]。

为了有效解决这一问题,增加渠道衬砌混凝土的使用时间,许多学者进行了分析与研究。徐永丽等^[6]、周坤渊等^[7]、刘浪等^[8]采用的动三轴试验系统表明,石灰可改良盐渍土路基的稳定性;李舒洁等^[9]探究再生微粉固化剂固化盐渍土的力学性能并通过 SEM 和 XRD 手段观察后证明了掺入再生微粉后的盐渍土抗压强度有明显提升,且水化产物硅酸钙和铝酸钙填充到盐渍土颗粒孔隙中,增加了土体密实度;张杨^[10]分析了土凝岩改良盐渍土直剪试验数据,得出了土凝岩掺量对强度的破坏规律,发现将改良土建筑到路基边坡,安全系数可增加 20%以上;朱燕等^[11]使用新型亲水性丙烯酸酯共聚乳液(ZM)来改良盐渍土,发现 ZM 质量分数为 1.5%的改良氯盐渍土的抗干湿循环性及水稳性效果最佳;杨家顺等^[12]对镁渣及多种固废进行利用,作为盐渍土的固化剂加入工业废渣可提高盐渍土的无侧限抗压强度,并具备更稳定的体积安定性,其中钢渣-石灰稳定盐渍土的作用最明显;杜玉凤等^[13]发现施加矿物改良剂可减少盐渍土的可溶盐含量,增强土壤的抗冻性,降低腐蚀破坏的影响,其中磷矿粉和活化沸石(PR3)的效果最佳。

在宁夏地区,镁渣固废利用率仅为 35%左右^[14-16],为提高工业废料的利用率,降低环境污染^[17-18],本文中探究利用水泥-镁渣作为固化剂固化盐渍土,研究固化盐渍土的力学性能等特性,为水泥-镁渣固化盐渍土的应用及渠道衬砌提供理论依据和技术支撑,可一定程度降低冻胀破坏和腐蚀破坏带来的影响。

1 实验

1.1 主要试剂材料和仪器设备

材料:水泥(P.O. 32.5,宁夏平罗恒达水泥有限责任公司);镁渣(惠冶镁业集团有限公司);盐渍土(平罗县引黄灌区)。使用 X 射线荧光分析仪(XRF)对水泥、镁渣和盐渍土的化学成分具体分析,结果如表 1 所示,水泥的物理性能如表 2 所示,盐渍土颗粒级配曲线如图 1 所示,镁渣的外观形态如图 2 所示。

仪器设备:S2RANGER LE03040428 型 XRF(德国布鲁克 AXS 公司);D8 ADVANCE 型 X 射线衍射仪(XRD,德国布鲁克 AXS 公司);EVO 18 型扫描电镜(SEM,德国 Zeiss 公司);TSZ302.0 型应变控制式三轴仪(南京土壤仪器厂有限公司)。

表 1 水泥、镁渣和盐渍土的化学成分
Tab.1 Chemical composition of cement,magnesium slag and saline soil %

名称	w(SiO ₂)	w(Fe ₂ O ₃)	w(Al ₂ O ₃)	w(K ₂ O)	w(CaO)	w(MgO)	w(P ₂ O ₅)	w(SO ₃)	w(TiO ₂)
水泥	19.41	6.51	7.91	0.94	64.25	0.98			
镁渣	34.68	4.09	0.58	0.13	47.00	12.51	0.28	0.22	
盐渍土	62.70	6.20	8.30		9.00	2.00			0.10

注:“空白”表示无此项。

表 2 P.O. 32.5 水泥的物理性能
Tab.2 Physical properties of P.O. 32.5 cement

体积 安定性/mm	比表面积 /(m ² ·kg ⁻¹)	凝结时间/min		抗压强度/MPa		抗折强度/MPa	
		初凝	终凝	7 d	28 d	7 d	28 d
2.23	214	169	284	10.77	35.44	4.01	5.54

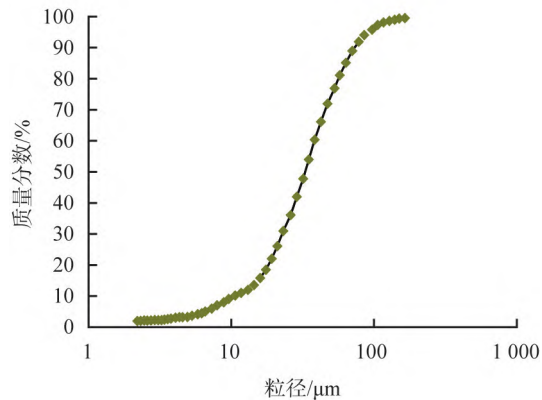


图 1 盐渍土颗粒级配曲线

Fig.1 Particle grading curve of saline soil

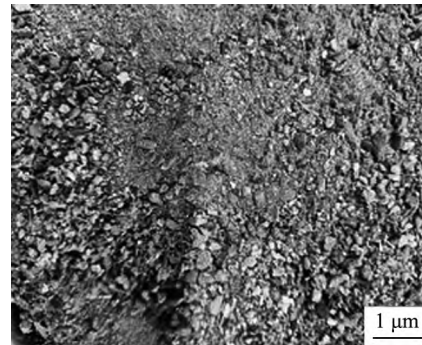


图 2 镁渣外观形态

Fig.2 Appearance of magnesium slag

1.2 方案

工程固化盐渍土中水泥掺量(质量分数,下同)最高为 6%,一般为 3%~6%^[19],这是为了避免盐渍土经固化后干缩性过大,试验的最大掺量为 5%;镁渣的掺量一般为水泥掺量的 5%~15%^[20];设计了 13 种不同水泥和镁渣掺量的固化盐渍土样本,具体掺量见表 3 所示。

表 3 掺入不同质量分数水泥、镁渣的固化盐渍土

Tab.3 Solidified saline soil with different mass fraction of cement and magnesium slag

试验编号	水泥掺量	镁渣掺量	试验编号	水泥掺量	镁渣掺量	试验编号	水泥掺量	镁渣掺量	试验编号	水泥掺量	镁渣掺量
1	0	0	5	1	5	8	3	5	11	5	5
2	1	0	6	1	10	9	3	10	12	5	10
3	3	0	7	1	15	10	3	15	13	5	15
4	5	0									

为表征水泥和镁渣掺量对盐渍土的固化效果和强度机制,采用三轴试验、XRD 和 SEM 等手段对不同龄期、不同压实系数的试样进行研究。盐渍土渠道地基土压实系数一般在 0.90 以上,所以最小压实系数取 0.89;实际工程最大压实系数为 0.96 左右,因此最大压实系数取 0.97。基于此,再设计压实系数为 0.93。即选取 0.89、0.93、0.97 共 3 种压实系数。

1.3 三轴试验

三轴试验是指侧限压缩和剪力同时作用于试块,使其内部应力分布较均匀,并探究试块的抗剪强度指标及获得其内部有效应力的变化趋势。

注意事项:本试验中的土粒粒径应保持在 20 mm 内;每个性质相同的试块需做 2 个平行试验最终取平均值,可减小试验误差。图 3 所示为试块加载过程及模型图。

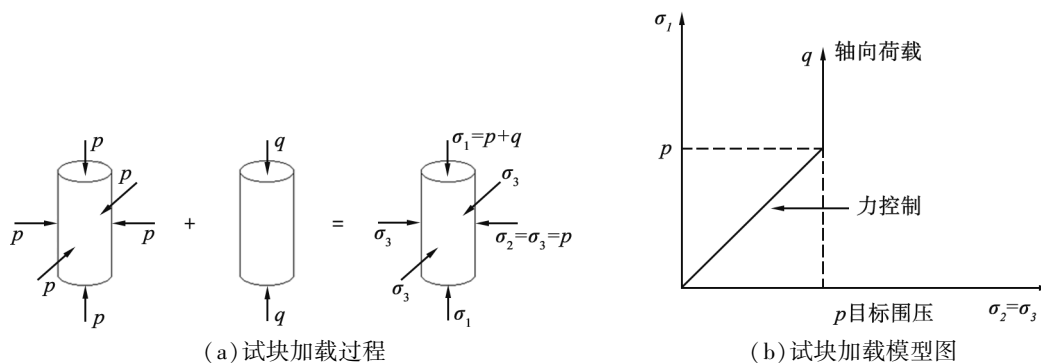


图 3 试块加载过程及模型图

Fig.3 Test block loading process and model diagram

步骤:按上下顺序将不透水板、试块、试块帽放在压力室底座处;用水填满压力室,将活塞朝向测力计及试块顶部;调整离合器至粗位,若试块帽与测力计接近时可调整离合器至细位,并安装调零后的变形指示剂;关闭水阀,施加围压并记录每个编号的测力计、变形指示计读数。

2 结果与分析

2.1 三轴试验

2.1.1 7 d 龄期试样

图4所示为7 d龄期试样的压实系数与黏聚力及内摩擦角的增减关系。由图可知,水泥、镁渣固化盐渍土的黏聚力和内摩擦角均随压实系数的增大而增加;当压实系数从0.89~0.93增大到>0.93~0.97时,对于固化盐渍土的黏聚力和内摩擦角而言,均为前者较小;单掺水泥时,不同压实系数固化盐渍土的黏聚力和内摩擦角均随着水泥含量的增加而增加;随着镁渣的加入,不同压实系数的固化盐渍土黏聚力为先增后减趋势,内摩擦角增幅不明显。

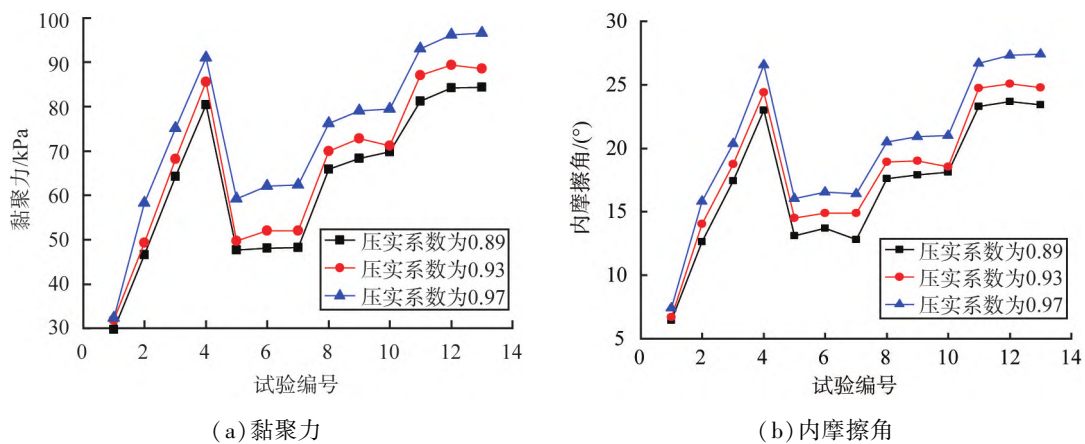


图4 7 d龄期试样的压实系数与黏聚力、内摩擦角的增减关系

Fig.4 Relationship between compaction coefficient and increase and decrease of cohesion and internal friction angle of samples at 7 days

2.1.2 28 d 龄期试样

图5所示为28 d龄期试样的压实系数与黏聚力及内摩擦角的增长关系。由图可知,与7 d龄期试样结果相同,水泥-镁渣固化盐渍土的黏聚力和内摩擦角均随压实系数的增大而增加;当压实系数从0.89~0.93增大到>0.93~0.97时,对固化盐渍土的黏聚力增长幅度相似,而内摩擦角的增长幅度较小;单掺水泥时,与7 d龄期试样结果相同,不同压实系数固化盐渍土的黏聚力和内摩擦角均随水泥掺量的增加而增加;当镁渣掺入后,水泥掺量为1%时,固化盐渍土的黏聚力随镁渣掺量的增加而变大,水泥掺量为4%时,固化盐渍土的黏聚力随镁渣掺量的增加,其增长幅度较小,甚至降低;随镁渣掺量的增加,不同压实系数的固化盐渍土的内摩擦角的增长幅度不突出。

2.1.3 抗剪强度提升机制分析

水泥经水化产生的 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 会置换出盐渍土中 Na^{+} 、 K^{+} , 该离子交换发生在碱性介质中, 减少了土颗粒中 Ca^{2+} 扩散层, 增加了土粒间的凝结。随水泥进一步水化, 土中 Ca^{2+} 与大量铝硅矿物发生反应生成水化铝酸钙和水化硅酸钙, 这2种物质属于胶凝体并交错覆盖土粒表面, 使土结构更加密实, 进而提高土的强度; 镁渣加入后, 土样的抗剪强度提高, 一方面由于镁渣中存在丰富的硅酸二钙, 以 $\gamma-C_2S$ 为主, 可更好地填充于孔隙中; 另一方面镁渣的水化促进了水化硅酸钙和 $Ca(OH)_2$ 的生成, 增加了其填充效应。对7、28 d龄期的试样, 土样黏聚力提高, 内摩擦角的变化并不突出, 表明产生的水化物加强了土粒间的黏结力从而表现为黏聚力的增强。水泥、盐渍土、镁渣中的 Al_2O_3 、 SiO_2 等物质水化后生成铝酸钙、硅酸钙等物质提高土体的抗剪强度。

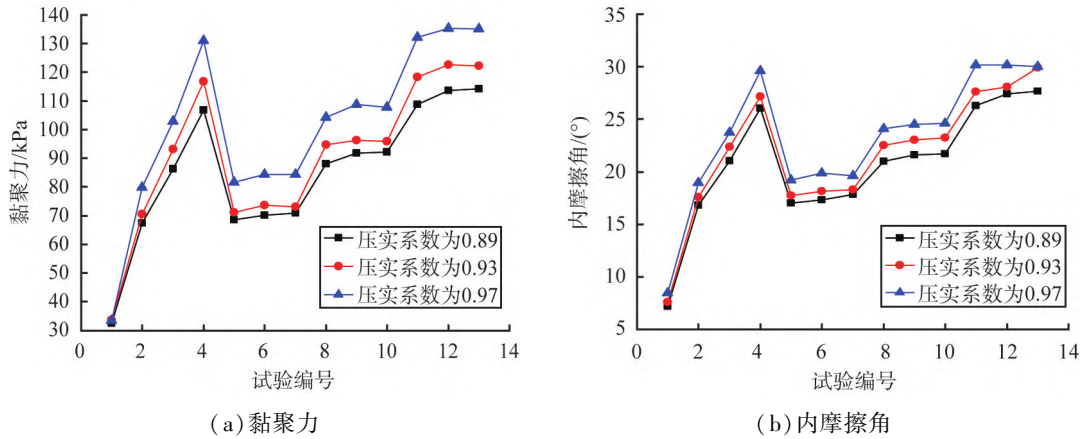


图 5 28 d 龄期试样的压实系数与黏聚力、内摩擦角的增长关系

Fig.5 Relationship between compaction coefficient and increase and decrease of cohesion and internal friction angle of samples at 28 days

2.2 样品的抗剪强度模型计算

通过 Design-Expert 对每个试样的强度机制进行方差计算,得出固化盐渍土的强度指标和不同水泥及镁渣掺量的关系模型,结果见式(1)~(12),为计算不同水泥及镁渣掺量盐渍土的抗剪强度指标提供理论依据。

$$c_{7-0.89} = -0.764 \ 9x_c^2 - 0.012 \ 3x_m^2 - 0.004 \ 1x_c x_m + 13.463 \ 0x_c + 0.468 \ 9x_m + 31.585 \ 2, \quad (1)$$

$$\varphi_{7-0.89} = -0.096 \ 5x_c^2 - 0.011 \ 2x_m^2 - 0.028 \ 9x_c x_m + 3.499 \ 0x_c + 0.314 \ 6x_m + 7.831 \ 5, \quad (2)$$

$$c_{7-0.93} = -0.619 \ 8x_c^2 - 0.025 \ 7x_m^2 - 0.039 \ 9x_c x_m + 13.424 \ 2x_c + 0.771 \ 1x_m + 33.824 \ 5, \quad (3)$$

$$\varphi_{7-0.93} = -0.076 \ 2x_c^2 - 0.012 \ 49x_m^2 - 0.051 \ 1x_c x_m + 3.552 \ 4x_c + 0.404 \ 7x_m + 8.644 \ 4, \quad (4)$$

$$c_{7-0.97} = -0.8778x_c^2 - 0.028 \ 6x_m^2 - 0.104 \ 9x_c x_m + 15.017 \ 3x_c + 1.196 \ 1x_m + 37.987 \ 8, \quad (5)$$

$$\varphi_{7-0.97} = -0.111 \ 7x_c^2 - 0.008 \ 7x_m^2 - 0.045 \ 9x_c x_m + 3.925 \ 1x_c + 0.368 \ 1x_m + 9.689 \ 1, \quad (6)$$

$$c_{28-0.89} = -1.127 \ 9x_c^2 - 0.038 \ 2x_m^2 - 0.111 \ 2x_c x_m + 18.802 \ 2x_c + 1.477 \ 9x_m + 40.698 \ 2, \quad (7)$$

$$\varphi_{28-0.89} = -0.227 \ 2x_c^2 - 0.007 \ 7x_m^2 - 0.046 \ 9x_c x_m + 4.372 \ 5x_c + 0.391 \ 2x_m + 9.919 \ 8, \quad (8)$$

$$c_{28-0.93} = -1.040 \ 1x_c^2 - 0.045 \ 8x_m^2 - 0.141 \ 6x_c x_m + 20.106 \ 5x_c + 1.562 \ 6x_m + 42.246 \ 2, \quad (9)$$

$$\varphi_{28-0.93} = -0.352 \ 1x_c^2 - 0.008 \ 5x_m^2 - 0.046 \ 4x_c x_m + 5.173 \ 9x_c + 0.386 \ 1x_m + 10.120 \ 5, \quad (10)$$

$$c_{28-0.97} = -1.234 \ 0x_c^2 - 0.057 \ 2x_m^2 - 0.269 \ 4x_c x_m + 23.256 \ 9x_c + 2.243 \ 8x_m + 45.194 \ 7, \quad (11)$$

$$\varphi_{28-0.97} = -0.286 \ 9x_c^2 - 0.014 \ 3x_m^2 - 0.068 \ 8x_c x_m + 5.136 \ 3x_c + 0.522 \ 1x_m + 11.152 \ 2, \quad (12)$$

式中: $c_{7-0.89}$ 为 7 d 龄期试样且压实系数为 0.89 固化盐渍土的黏聚力,以此类推; $\varphi_{7-0.89}$ 为 7 d 龄期试样且压实系数为 0.89 固化盐渍土的内摩擦角,以此类推; x_c 为水泥质量分数,在 1%~5%之间; x_m 为镁渣质量分数,范围为 5%~15%。

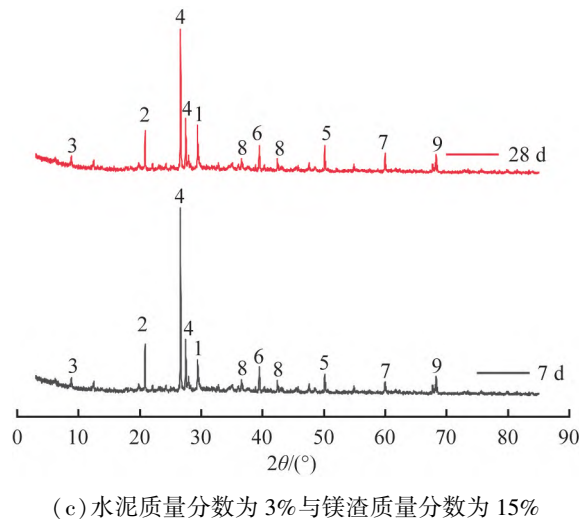
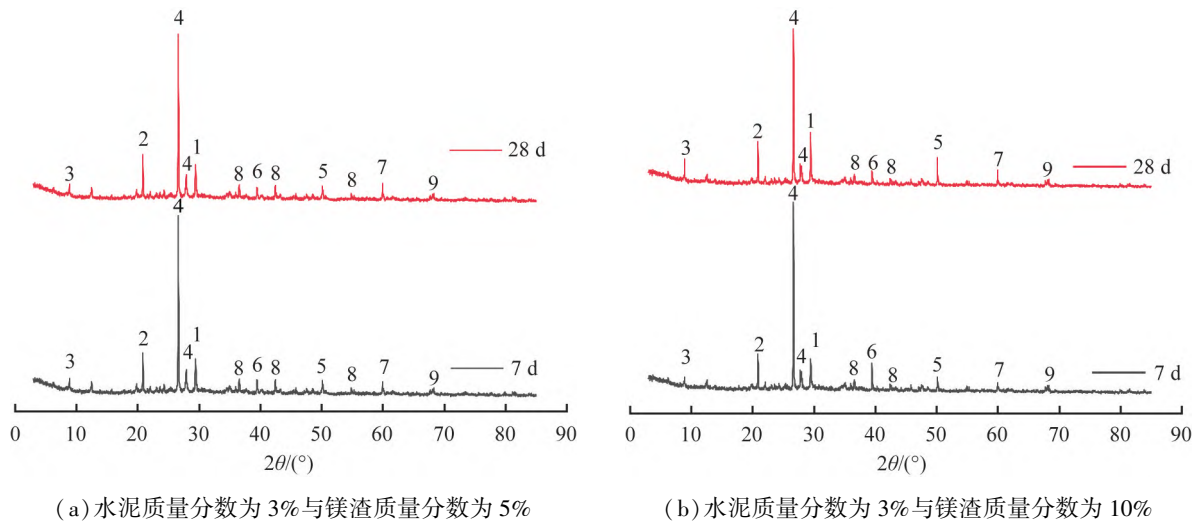
通过以上模型计算的 P 值均 $<0.000 \ 1$,说明模型精度较高;在单因素 x_c 的条件下, P 值均 <0.005 ,说明固化盐渍土的水泥掺量对其黏聚力和内摩擦角的影响较大;单因素 x_m 的条件下, P 值均 >0.05 ,说明固化盐渍土的镁渣掺量对其黏聚力和内摩擦角的影响较小,这与上述抗剪强度原因分析当中描述相符。

2.3 水泥-镁渣固化盐渍土水化机理分析

为弄清水泥-镁渣双掺固化盐渍土的水化机制,用 XRD 和 SEM 分别对 7、28 d 龄期的水泥质量分

数为3%和镁渣质量分数分别为5%、10%、15%的固化盐渍土进行表征分析,XRD分析结果见图6、SEM分析结果见图7。

SEM微观检测中被检测样品一般采用试样中心破碎的块体。XRD检测中被检测样品一般采用玛瑙研钵研磨成无颗粒感的粉体。文献[21-22]中均采用此方式进行微观样品制作,并认为取中心完整的块状体不会影响硬化浆体的微观形态。

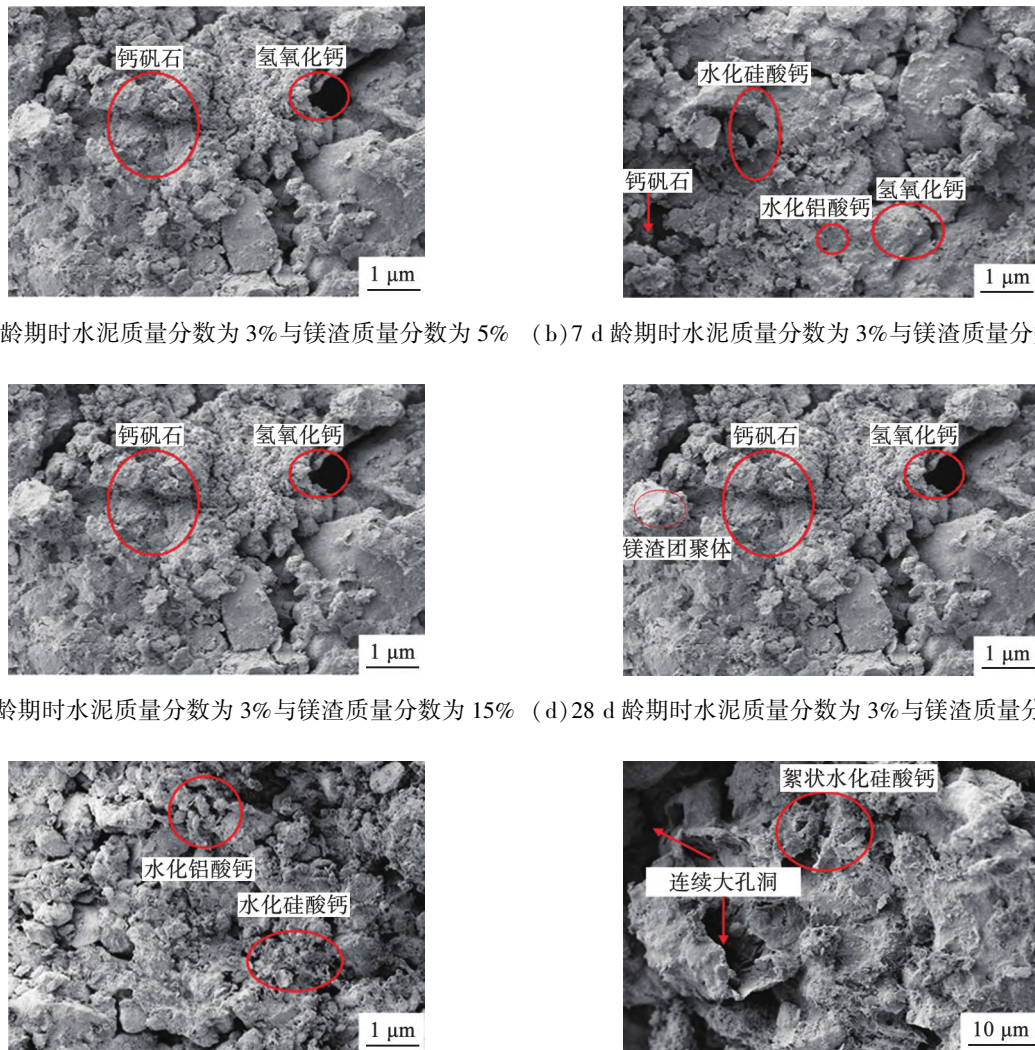


1—硅酸三钙; 2—硅酸二钙; 3—铝酸三钙; 4—水化硅酸钙; 5—水化铝酸钙;
6—氢氧化钙; 7—钙矾石; 8—硅酸钙镁水合物; 9—石英。

图6 水泥质量分数为3%和不同掺量镁渣固化盐渍土的XRD结果

Fig.6 XRD analysis of 3% cement and different contents of magnesium slag solidified saline soil

由图6可以看出,主要观察到的有 2θ 为 8.90° 处的水化铝酸钙特征峰、 2θ 为 20.86° 处的硅酸二钙特征峰、 2θ 分别为 26.64° 和 27.46° 处的水化硅酸钙的特征峰、 2θ 为 27.65° 处的硅酸三钙的特征峰及 36.54° 和 42.45° 处的 $\text{Ca}_2\text{Mg}_8\text{Si}_{12}\text{O}_{32}(\text{HO})_4$ (硅酸钙镁水合物)的特征峰、 2θ 为 39.46° 处的特征峰最低;固化后,盐渍土抗剪强度提高的主要原因是水化硅酸钙的存在,这与抗剪强度原因分析当中的描述一致。由图7可以看出,对7 d龄期试样且镁渣掺量较少时,观察到固化盐渍土SEM图像中出现大量连续孔洞、孔隙和团聚体之间不密实现象,而当镁渣掺量较多时,观察到固化盐渍土的SEM图像中孔洞、孔隙逐渐减少,且水化产物水化铝酸钙明显增多;当处于28 d龄期时,SEM图像中大部分孔隙被某些微团粒水化产物填补,盐渍土中的颗粒显现出块状或片状,且土粒全部相互交错在一起或相互镶嵌,这是因为镁渣颗粒较小,可进行颗粒间的填充,表明固化盐渍土的强度和密实度得到了改善。



(a) 7 d 龄期时水泥质量分数为 3% 与镁渣质量分数为 5% (b) 7 d 龄期时水泥质量分数为 3% 与镁渣质量分数为 10%

(c) 7 d 龄期时水泥质量分数为 3% 与镁渣质量分数为 15% (d) 28 d 龄期时水泥质量分数为 3% 与镁渣质量分数为 5%

(e) 28 d 龄期时水泥质量分数为 3% 与镁渣质量分数为 10% (f) 28 d 龄期时水泥质量分数为 3% 与镁渣质量分数为 15%

图 7 水泥质量分数为 3% 和不同掺量镁渣固化盐渍土的 SEM 图像

Fig.7 SEM images of 3% cement and different contents of magnesium slag solidified saline soil

3 结论

通过 13 种不同水泥和镁渣掺量固化盐渍土的三轴试验、XRD 和 SEM 表征分析得出以下结论。

1) 7 d 龄期试样水泥-镁渣固化盐渍土的黏聚力和内摩擦角均随压实系数的增大而增加;单掺水泥时,固化盐渍土的黏聚力和内摩擦角均随着水泥含量的提升而变大;镁渣加入后,固化盐渍土的黏聚力为先增后减,内摩擦角增幅不明显。

2) 对单掺水泥的 28 d 龄期固化盐渍土试样,其黏聚力和内摩擦角变化趋势与 7 d 龄期试样相同;水泥-镁渣双掺且前者掺量为 1% 时,固化盐渍土的黏聚力随镁渣掺量的增加而变大,水泥掺量为 4% 时,黏聚力增长幅度较小;随镁渣掺量的增加,不同压实系数固化盐渍土的内摩擦角的增长幅度不突出,由此可知:掺量多的水泥镁渣对固化盐渍土强度提升不明显。

3) 水泥-镁渣固化盐渍土的水化产物以水化铝酸钙、氢氧化钙、水化硅酸钙和钙矾石为主,其中水化硅酸钙的特征峰最强(钙矾石次之), $\text{Ca}_2\text{Mg}_8\text{Si}_{12}\text{O}_{32}(\text{HO})_4$ 的特征峰最低;固化盐渍土抗剪强度提高的主要原因是水化硅酸钙的生成。

4) SEM 分析发现 28 d 龄期试样较 7 d 龄期的表现出更密实、孔洞减少、颗粒显现出块状或片状且相互镶嵌的现象,表明固化盐渍土的强度和密度得到增强。

5)建立了固化盐渍土抗剪强度指标与水泥和镁渣掺量的关系模型, P 值均 <0.0001 ,模型精度较好;水泥-镁渣固化盐渍土的抗剪强度得到提升,水泥质量分数为3%与镁渣质量分数为10%混合料固化盐渍土具有较好的力学性能,为水泥-镁渣固化剂的应用提供理论支持。

参考文献(References):

- [1]陈艳萍,张通和,刘畅.中国水资源利用效率及其影响因素研究:基于Shephard水资源距离函数[J].世界地理研究,2022,31(3):591-601.
CHEN Y P, ZHANG T Z, LIU C. Study on water resources utilization efficiency and its influencing factors in China: based on Shephard water resources distance function[J]. World Geographical Research, 2022, 31(3): 591-601.
- [2]刘子西,席睿,黑正军,等.宁夏沿黄城市带碳足迹及其关联关系研究[J].水资源与水工程学报,2023,34(2):1-8.
LIU Z X, XI R, HEI Z J, et al. Study on carbon and water footprint and its correlation along Huangcheng City Belt in Ningxia[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2023, 34(2): 1-8.
- [3]陆立国.宁夏灌区末级渠系衬砌现状与破坏原因分析研究[J].水利水电技术,2011,42(10):106-109.
LU L G. Analysis on the lining status and failure causes of the last canal system in Ningxia Irrigation Area[J]. Water Resources and Hydropower Technology, 2011, 42(10): 106-109.
- [4]BAVE O A, KOSICHENKO Y M, GARBUZ A Y. Composite polymer coatings for repair of concrete linings of channels[J]. Defect and Diffusion Forum, 2021, 410: 799-805.
- [5]李宏波.盐渍土地基整体式渠道衬砌冻融响应机理及模型研究[D].银川:宁夏大学,2022.
LI H B. Study on freeze-thaw response mechanism and model of integrated channel lining of saline soil foundation[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2022.
- [6]徐永丽,董子建,周吉森,等.冻融及不同温度下石灰改良盐渍土动力参数研究[J].岩土工程学报,2022,44(1):90-97.
XU Y L, DONG Z J, ZHOU J S, et al. Study on dynamic parameters of saline soil improved by lime under freeze-thaw conditions and different temperatures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(1): 90-97.
- [7]周坤渊,刘仕翔,罗泽娇.常见碱性工业废渣稳定化修复重金属污染土壤的研究进展[J].安全与环境工程,2021,28(6):174-181.
ZHOU K Y, LIU S X, LUO Z J. Research progress in stabilization of heavy metal contaminated soils by common alkaline industrial wastes[J]. Safety and Environmental Engineering, 2021, 28(6): 174-181.
- [8]刘浪,阮仕山,方治余,等.镁渣的改性及其在矿山充填领域的应用探索[J].煤炭学报,2021,46(12):3833-3845.
LIU L, RUAN S S, FANG Z Y, et al. Modification of magnesium slag and its application in mine filling field[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(12): 3833-3845.
- [9]李舒洁,常立君.再生微粉固化黄土状盐渍土的力学特性和微观机理[J].中国粉体技术,2022,28(5):30-39.
LI S J, CHANG L J. Mechanical properties and microscopic mechanism of regenerated micro-powder solidified loessial saline soil[J]. China Powder Science and Technology, 2022, 28(5): 30-39.
- [10]张杨.土凝岩改良盐渍细砂土直剪试验及边坡稳定性研究[D].兰州:兰州交通大学,2021.
ZHANG Y. Study on direct shear test and slope stability of modified saline fine sand by soil set rock[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2021.
- [11]朱燕,余湘娟,陈佳佳.丙烯酸酯共聚乳液固化盐渍土的耐久性试验[J].扬州大学学报(自然科学版),2022,25(4):59-65.
ZHU Y, YU X J, CHEN J J. Durability test of acrylate copolymerization emulsion curing saline soil[J]. Journal of Yangzhou University (Natural Science Edition), 2022, 25(4): 59-65.
- [12]杨家顺,柴志军.工业废渣改良盐渍土性能试验研究[J].山东交通学院学报,2012,20(2):67-70,74.
YANG J S, CHAI Z J. Experimental study on improvement of saline soil by industrial waste slag[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2012, 20(2): 67-70, 74.
- [13]杜玉凤,何振全,张仙梅,等.活化矿物对盐渍土改良及玉米生长的影响[J].山东农业科学,2021,53(4):494-497.
DU Y F, HE Z Q, ZHANG X M, et al. Effects of activated minerals on improvement of saline soil and growth of maize[J].

- Shandong Agricultural Sciences, 2021, 53(4): 494-497.
- [14] 张旭. 金属镁渣在水泥生产中的应用实践[J]. 水泥技术, 2023(1): 62-67, 73.
ZHANG X. Application practice of metal magnesium slag in cement production[J]. Cement Technology, 2023(1): 62-67, 73.
- [15] 孙伟吉, 刘浪, 徐龙华, 等. 改性镁渣基矿用复合胶凝材料的水化性能[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(10): 4057-4070.
SUN W J, LIU L, XU L H, et al. Hydration properties of modified magnesium slag based composite cementifier for mine[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(10): 4057-4070.
- [16] 王正龙, 邓杰, 梅岭, 等. 聚乙烯醇纤维加筋水泥固化疏浚土静力特性试验研究[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2021, 35(4): 104-108.
WANG Z L, DENG J, MEI L, et al. Experimental study on static properties of dredged soil solidified with polyvinyl alcohol fiber reinforced cement[J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2021, 35(4): 104-108.
- [17] 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. Study on strength and microscopic mechanism of saline soil in channel foundation solidified with industrial waste slag[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(6): 113-120.
- [18] DIAZ-SECADES L A, GONZÁLEZ R, RIVERA N, et al. Waste heat recovery system for marine engines optimized through a preference learning rank function embedded into a Bayesian optimizer[J]. Ocean Engineering, 2023, 281: 114747.
- [19] 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.
LI H B, TIAN J C, NAN H B, et al. Experimental study on effects of curing agents on mechanical properties of saline soil foundation in channels[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(12): 94-99.
- [20] 孙睿, 邬兆杰, 王栋民, 等. 超细镁渣微粉-水泥复合胶凝材料的性能及水化机理[J]. 材料导报, 2023, 37(9): 98-108.
SUN R, WU ZHAO J, WANG D M, et al. Properties and hydration mechanism of superfine magnesium slag micro-powder cement composite cementitious materials[J]. Materials Review, 2023, 37(9): 98-108.
- [21] 卫煜, 陈平, 明阳, 等. 超细高活性矿物掺合料对UHPC水化和收缩性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(2): 461-468.
WEI Y, CHEN P, MING Y, et al. Effect of ultra-fine and highly active mineral admixtures on hydration and shrinkage properties of UHPC[J]. Bulletin of the Chinese Ceramics, 2022, 41(2): 461-468.
- [22] 黄华, 郭梦雪, 张伟, 等. 粉煤灰-矿渣基地聚物混凝土力学性能与微观结构[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2022, 54(3): 74-84.
HUANG H, GUO M X, ZHANG W, et al. Mechanical properties and microstructure of polymer concrete in flyash-slag base[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2022, 54(3): 74-84.

(责任编辑:吴敬涛)