

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.02.018

MICP 联合活性炭改性的季冻区盐渍土压缩特性

王永辉^{1,2}, 朱辰宇², 张铭帅², 赵仲辉^{1,3}, 王延宁^{1,2}

(1. 中铁十四局集团第二工程有限公司; 2. 汕头大学土木与智慧建设工程系; 3. 河海大学土木与交通学院)

摘要: 通过采用微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)联合活性炭改性季冻区盐渍土, 试验研究了含盐量、冻融循环次数对改性盐渍土压缩特性的影响。结果表明: 经 MICP 改性后, 产生的碳酸钙对土颗粒的胶结作用能够抵抗盐冻胀带来的膨胀破坏, 土体压缩性降低; 由于活性炭对脲酶活性的促进作用, 添加活性炭促使 MICP 反应更加剧烈、彻底, 产生了更多的碳酸钙强化土体结构, 且随着活性炭掺量增大强化效果更加明显, 土体压缩性进一步降低; 随着含盐量的增大, 脲酶的活性被抑制, 导致尿素水解速率下降, MICP 效果不明显, 不能提供足够的碳酸根离子, 碳酸钙覆盖面积减小。因此, MICP 技术对于季冻区盐渍土的压缩特性有着明显的提升作用。

关键词: 盐渍土; MICP; 活性炭; 压缩性; 冻融循环; 季冻区

Compressibility characteristics of saline soil in seasonally frozen regions modified by MICP combined with activated carbon

Wang Yonghui^{1,2}, Zhu Chenyu², Zhang Mingshuai², Zhao Zhonghui^{1,3}, Wang Yanning^{1,2}

(1. China Railway 14th Bureau Group 2nd Engineering Co., Ltd.;
2. Department of Civil Engineering and Smart Cities, Shantou University;
3. School of Civil Engineering and Transportation, Hohai University)

Abstract: The effects of salt content and freeze-thaw cycles on the compressibility characteristics of modified saline soil in seasonally frozen regions were experimentally investigated by modifying the soil with microbial-induced calcite precipitation (MICP) combined with activated carbon. The results show that after MICP modification, the cementation effect of the generated calcium carbonate on soil particles can resist the expansion damage caused by salt-frost heave, and the compressibility is reduced. The addition of activated carbon promotes urease activity, making the MICP reaction more intense and thorough. This process generates more calcium carbonate to reinforce the soil structure. Furthermore, with the increase of activated carbon content, the reinforcement effect becomes more significant, and the compressibility is further reduced. However, with the increase of salt content, urease activity is inhibited, leading to a decrease in the urea hydrolysis rate. Consequently, the MICP effect becomes insignificant, unable to provide sufficient carbonate ions, and the calcium carbonate coverage area decreases. Therefore, MICP technology significantly improves the compression characteristics of saline soil in seasonally frozen regions.

Key words: saline soil; MICP; activated carbon; compressibility; freeze-thaw cycle; seasonally frozen region

季节性冻土区(季冻区)因周期性冻融作用引发的工程地质问题在我国华北地区极为突出^[1], 该区域冬季低温导致土体经历反复冻胀-融沉, 造成土体结构劣化、强度衰减及水分迁移加剧^[2-6]。研究表明, 冻融循环会破坏土颗粒间胶结作用, 改变孔隙分布特征, 进而显著降低土体的工程稳定性^[7-9], 对道路、边坡等基础设施构成严重威胁^[10-12]。我国盐渍土分布广泛, 面积约占全球盐渍土总面积的 3.8%^[13]。此类盐渍土中富集的硫酸钠、氯化钠等盐分, 在温度与湿度变化时通过结晶-溶解作用引发体积变形, 会导致边坡失稳、地基沉降等灾害^[14-15]; 特别是在季冻区环境下, 冻胀与盐胀的叠加作用会显著提高土体的压缩性, 从而造成土体结构劣化, 加剧土体结构强度衰减^[16]。所以, 针对季冻区盐渍土进行土体改良以降低盐冻胀的影响是十分必要的。

季冻区盐渍土研究涵盖了多个学科领域, 陈肖柏等^[17-18]通过室内试验验证了盐胀的累加性与不可逆性, 并指出盐分类型、含水率及降温速率是核心控制因素。荆志东等^[19]通过单向冻结水热耦合试验揭示了

基金项目: 广东省自然科学基金项目(2022A1515011200); 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室开放基金项目(SKLGDUK2005)

作者简介: 王永辉(1981—), 男, 高级工程师, 博士研究生, 主要从事岩土工程管理工作。E-mail: wyncumt@gmail.com

通信作者: 王延宁(1982—), 男, 教授, 博士, 主要从事岩土与环境工程研究。E-mail: wangyn@stu.edu.cn

冻区高氯盐渍土水分向冷端迁移规律,并发现在耦合作用下土体冻结强度整体上升且远离冻端因盐晶体析出强度局部回升。程卓等^[20]通过冻融循环试验发现粉煤灰掺量(10%~20%)使盐渍土强度呈先增后减趋势,并明确冻融第7次为强度衰减临界点,含水率升高会加剧劣化效应。康鑫睿等^[21]通过冻融循环试验,验证了水泥-粉煤灰固化剂可显著降低盐渍土地基的冻胀力和盐分迁移量,并指出压实系数是控制变形与盐分分布的关键参数。王春雷等^[22]利用热重-差示扫描量热(TG-DSC)技术证明易溶盐浓度升高会加剧盐渍土在相变过程中的两级放热/吸热反应,并通过无侧限抗压试验验证了冻结强度随含水率增大和温度降低而显著提升。

已有研究通过室内试验、数值模拟及理论分析,系统揭示了盐渍土在冻融环境中的多场耦合机制,为工程建设提供了一定的指导意义。虽然现有研究在揭示机理层面已臻完善,但在解决方案上仍依赖高环境成本的传统方法。微生物诱导碳酸钙沉淀(microbial induced calcite precipitation, MICP)作为一种可持续的生物修复技术,已成为近20年跨学科研究的热点。这种由细菌驱动的生物矿化技术,在岩土工程^[23]、环境工程^[24]及材料科学^[25]等领域表现出广泛适用性。本文针对季冻区盐渍土改良问题,提出MICP联合活性炭的协同改性方法,并通过室内固结压缩试验,系统研究了含盐量、冻融循环次数及活性炭掺量对改性土体压缩特性的影响。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

a. 黏土。由于自然界盐渍土的含盐成分十分复杂且其中杂质较多,难以对单一试验进行精确控制,因此本文试验所用的盐渍土均为室内人工配制。按照GB/T 50123—2019《土工试验方法标准》、GB/T 50145—2007《土的工程分类标准》,可得到配置的黏土液限、塑限及其他物理指标。共配制了如表1所示的4种黏土(含素黏土),盐渍土中盐分氯化钠与硫酸钠的质量比均为3:1。

表1 盐渍土的盐分质量分数

Table 1 Mass fraction of salt in saline soil

土样编号	盐分质量分数/%	
	氯化钠	硫酸钠
CK	0	0
S1	0.50	0.17
S2	2.00	0.67
S3	5.00	1.67

b. 盐渍土基本物理指标。按照GB/T 50123—2019《土工试验方法标准》检测得到素黏土基本物理指标如下:土粒比重为2.69,液限为39%,塑限为19%,塑性指数为20,击实试验测得最佳含水率为20.8%,最大干密度为1.82 g/cm³。

1.2 固结压缩试验

1.2.1 土样制备

因配制出的黏土最佳含水率均在20%左右,故采取略小点的18%含水率作为本文试验的制样含水率,将目标土样通过拌和法按18%含水率制作成击实度为95%的200 mm×200 mm土柱,使用尺寸为61.8 mm×20 mm环刀取样并称重,再使用双层不透水塑料薄膜包裹,以保证冻融循环过程中不失水,每次冻融循环试验前后均称重。

探究不同改性手段对盐渍土压缩特性影响的试验方案干土用量均为2.5 kg,冻融循环次数均为1~13次,采用MICP改性的土样均使用光密度(OD₆₀₀)为1.8的巴氏芽孢杆菌(ATCC11859),胶结液选用等摩尔比(1.5 mol/L)的尿素与氯化钙的混合溶液,菌液与胶结液体积比为1:2,养护10 d,活性炭使用前期试验确定的木屑活性炭。

在进行固结压缩试验前测定了相关指标,结果如表2所示。

1.2.2 试验过程

冻融循环次数设置为1、3、5、7、9、11、13次,以在-20℃冷冻12 h、室温解冻12 h作为一次冻融循环,达到设定的冻融循环次数后对土样进行真空饱和。冯丽莉等^[26]研究表明,经过冻融作用后,土的内摩擦角增大,密度增大,强度参数的变化与土颗粒的胶结和重排列、粒径重分配以及孔径分布的变化有关。

根据GB/T 50123—2019《土工试验方法标准》,采用50、100、200、400 kPa标准固结试验,每级压力下持续24 h为压缩稳定标准,记录土样高度变化后,再施加下一级压力。

表 2 不同方式改性后土样基本物理指标及碳酸钙质量分数

Table 2 Basic physical indices and mass fraction of calcium carbonate of soil samples modified by different methods						
改性方式	土样编号	比重	初始孔隙比	饱和度/%	击实度/%	碳酸钙质量分数/%
MICP	CK-2	2.71	0.609	94.8	95.9	1.46
	S1-2	2.71	0.588	95.4	96.4	1.25
	S2-2	2.69	0.560	95.3	95.4	1.05
	S3-2	2.68	0.545	98.3	95.6	0.84
MICP 联合 活性炭	CK-3	2.72	0.599	95.3	96.0	1.55
	S1-3	2.71	0.582	95.5	96.5	1.35
	S2-3	2.69	0.555	94.7	95.5	1.15
	S3-3	2.68	0.542	94.3	95.6	0.93
	CK-4	2.71	0.585	95.3	96.2	1.75
	S3-4	2.67	0.536	94.1	95.8	1.12

注:编号中,“-2”表示 MICP 改性,“-3”表示 MICP 联合 10 g/L 活性炭改性,“-4”表示 MICP 联合 100 g/L 活性炭改性。

饱和土样置于固结容器中并施加 50 kPa 压力后,立即向水槽中注入去离子水或饱和液体,后续按照上述压力梯度设置进行标准压缩试验。

2 试验结果与分析

2.1 含盐量对素黏土的影响

根据室内固结压缩试验得到的不同含盐量盐渍土孔隙比变化数据绘制不同含盐量盐渍土 e - $\lg p$ 曲线,结果如图 1 所示,随着含盐量的增大,盐渍土初始孔隙比逐渐降低,且降低幅度呈越来越小的趋势。当施加竖向压力后,随着含盐量的增大,固结完成后的孔隙比减小幅度先增后减,压缩性呈现先增大后减小的变化规律。

由压缩曲线得到不同含盐量盐渍土的压缩系数 a_{v1-2} 和压缩指数 C_c 如表 3 所示,其中压缩系数采用 100~200 kPa 加载压力计算而得,因加载压力最大值为 400 kPa,故仅采取 300~400 kPa 计算土体压缩指数。

随着含盐量的增大,土样的压缩系数、压缩指数均呈先增大后减小的趋势,但按照压缩系数评价均属于中压缩性土。

在添加氯化钠和硫酸钠后,土颗粒周围结合水膜增厚,从而导致土体润滑作用增强、土颗粒更容易移动、土样更容易被压缩,体现为压缩系数和压缩指数增大。当含盐量较低时,盐分大多溶解于孔隙水中或者存在于土体孔隙中,部分盐分占据土体孔隙,还有部分盐晶体占据土体中原本土颗粒的位置,土颗粒之间的胶结作用被破坏,且新形成的盐分之间胶结作用较弱,抵抗压缩变形的能力较弱。

但当含盐量超过 2.67%(S2-1)后,由于孔隙水盐分浓度较高,继续增大含盐量将导致多余盐分不能完全溶解,以固态晶体形式存在于土体中成为土骨架的一部分,并且能够起到比较重要的胶结作用,使得土体强度提高,反而降低了土体压缩性。郭新红^[27]的研究中这一含盐量为 1.5% 左右,可能是因为该试验使用硫酸钠作为唯一盐分,其溶解度较小,土样含水率偏低时只能溶解很小一部分土体中的盐分。

2.2 冻融循环对盐渍土的影响

图 2 为不同含盐量、不同冻融循环次数(N)下盐渍土 e - $\lg p$ 曲线,根据图 2 试验结果,计算得到不同含盐量和冻融循环次数下土样的压缩系数和压缩指数变化,结果如图 3 所示。

从图 3 可明显观察到,无盐分土样(CK-1)经过多次冻融循环后的压缩系数和压缩指数变化幅度远不如

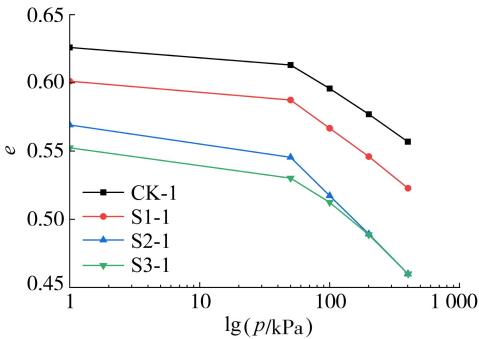


图 1 不同含盐量盐渍土的 e - $\lg p$ 曲线

Fig. 1 e - $\lg p$ curves of saline soil with different salt contents

表 3 不同含盐量盐渍土的压缩系数与压缩指数

Table 3 Compressibility coefficient and compression index of saline soil with different salt contents

土样编号	a_{v1-2}/MPa^{-1}	C_c
CK-1	0.187	0.149
S1-1	0.240	0.186
S2-1	0.290	0.279
S3-1	0.234	0.225

注:编号中,“-1”表示未改性。

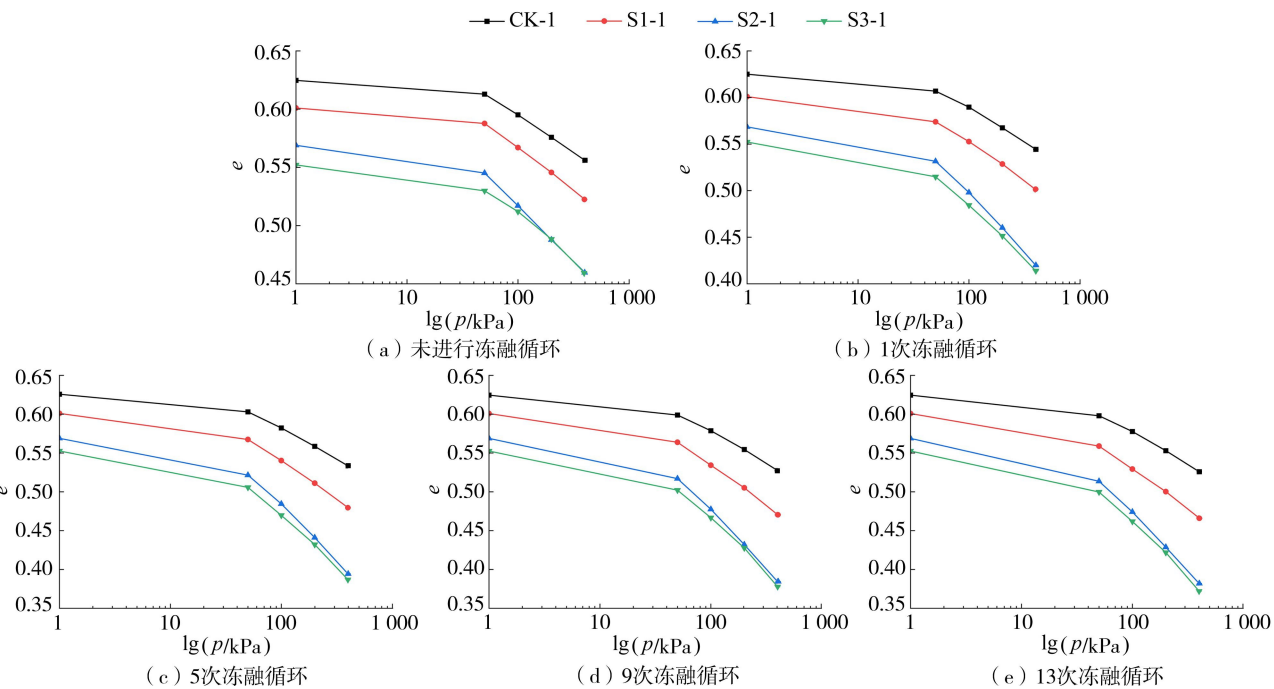


图 2 不同含盐量和冻融循环次数下盐渍土 e - $\lg p$ 曲线

Fig. 2 e - $\lg p$ curves of saline soil under different salt contents and freeze-thaw cycles

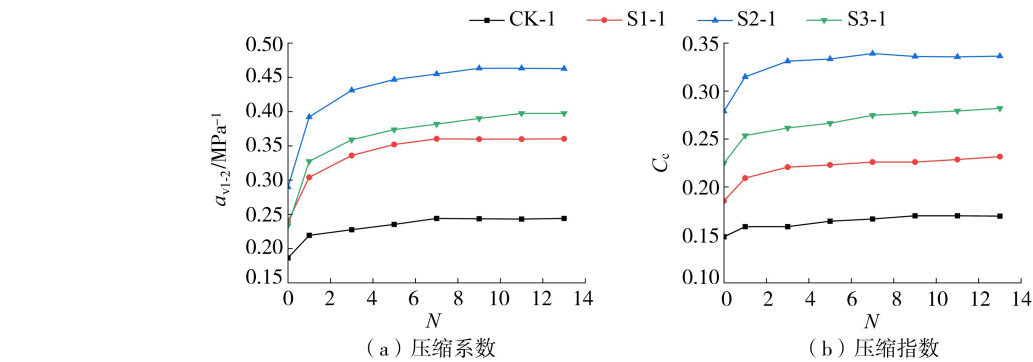


图 3 不同含盐量和冻融循环次数下土样压缩系数和压缩指数变化

Fig. 3 Variations of compressibility coefficient and compression index of soil samples under different salt contents and freeze-thaw cycles

盐渍土。这是因为无盐分土样在冻融时仅发生孔隙水冻结膨胀现象,体积增大为原来的 1.11 倍,而盐渍土中发生盐冻胀现象,孔隙水结成冰晶体,体积膨胀为原来的 1.3 倍、芒硝体积膨胀为原来的 3.18 倍,并且随着含盐量增大会生成更多含水盐晶体,膨胀程度加剧,从而更大程度破坏土体结构,导致土体压缩性增大。冻融过程是使土体从不稳定态向动态稳定态的发展过程,反复的冻融循环改变了土体的性状,使得土体向新的动态稳定平衡状态发展^[28]。

由图 3 可知,在不同冻融循环次数下,与未发生冻融循环的土样相比,压缩系数和压缩指数增长逐渐增大,且较上一次冻融循环而言,呈现前期增幅较大、后期增幅较小的变化规律。前 3~5 次冻融循环对土样压缩系数和压缩指数增加影响最大,含盐量与冻融循环后压缩系数增幅呈明显正相关关系,而与压缩指数增幅未呈现明显正相关关系,这可能是因为最大加载压力仅为 400 kPa, e - $\lg p$ 曲线还未出现直线段,斜率并未达到稳定值,代表性不强。

2.3 MICP 的改性效果

不同含盐量、不同冻融循环次数下 MICP 改性盐渍土 e - $\lg p$ 曲线如图 4 所示。经 MICP 改性后,土样初始孔隙比均降低,这是因为 MICP 作用产生的碳酸钙填充土样中的孔隙,并且由于高盐分会造成孔隙液盐分浓度增大,进一步压缩了土颗粒间的双电层,使得土样孔隙比降低,两者共同作用下导致改性土样初始孔隙比

均低于未改性土样。与同条件下未改性土样相比,不同含盐量和冻融循环次数的 MICP 改性土样的孔隙比降低幅度均减小。这是因为 MICP 作用时消耗了土样中的水分,而后冻结时部分盐分无法结合水分子生成含水盐晶体,反而因析出盐晶体加强了土颗粒结构,降低了土体压缩性。

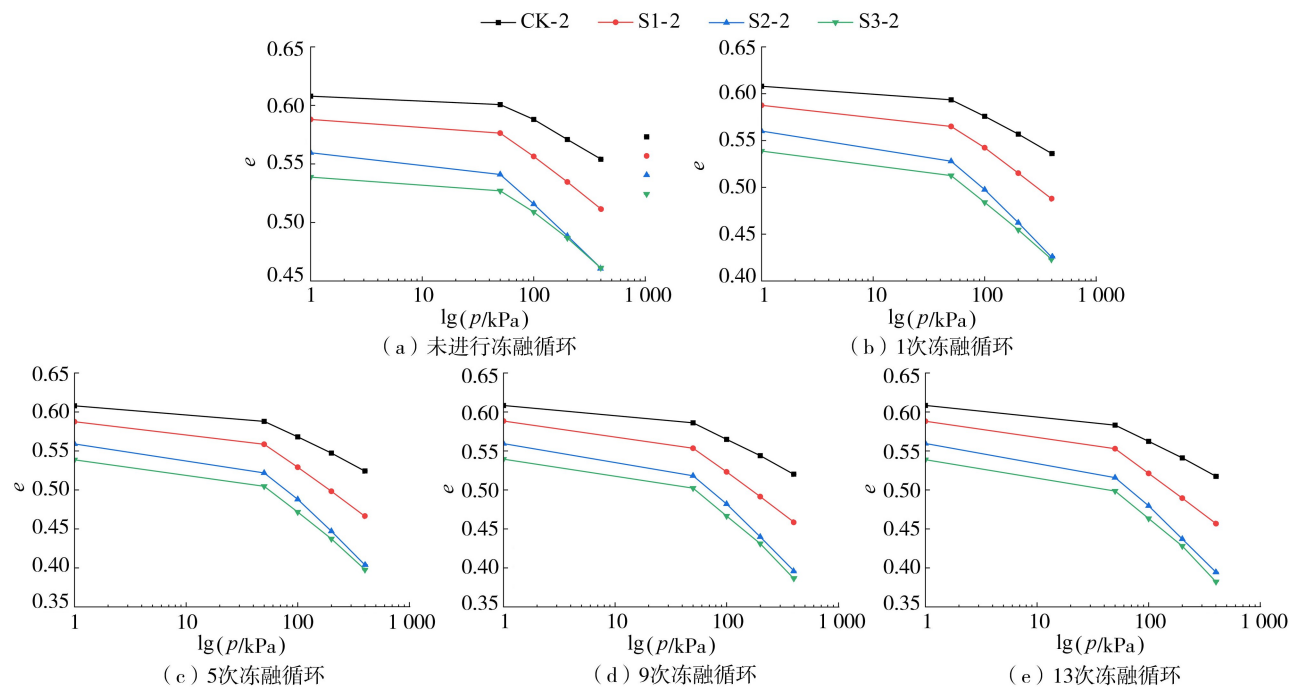


图 4 MICP 改性盐渍土 e - $\lg p$ 曲线

Fig. 4 e - $\lg p$ curves of MICP-modified saline soil

王效宾等^[29]研究表明,黏土经冻融循环作用后,压缩系数大于原状土的压缩系数。根据图 4 结果计算得到不同含盐量和冻融循环次数下 MICP 改性土样的压缩系数和压缩指数变化,结果如图 5 所示。

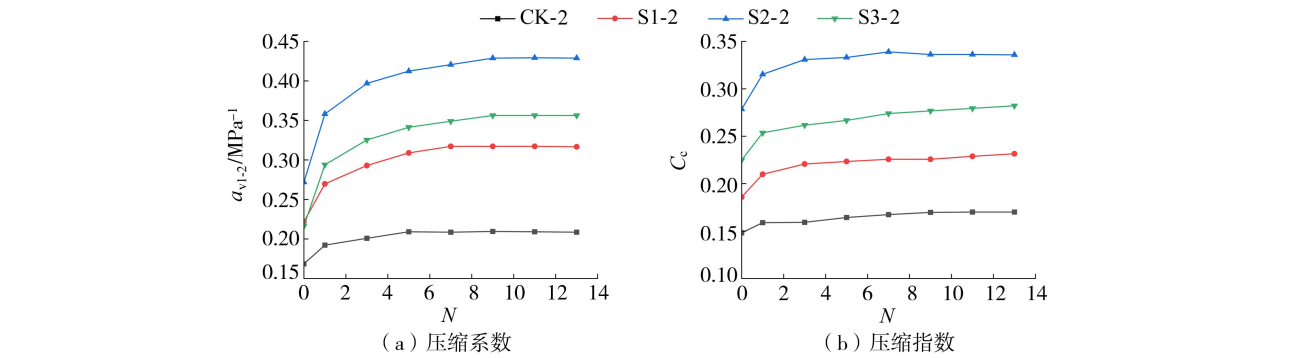


图 5 MICP 改性后土样压缩系数和压缩指数变化

Fig. 5 Variations of compressibility coefficient and compression index of MICP-modified soil samples

由图 5 可以看出,当含盐量为 2.67%(S2-2)时,土体的压缩性最高。这是因为孔隙液中盐分的结晶状态直接影响土体结构;对于低含盐量土样,其硫酸钠含量较少,结合水分子生成芒硝后产生的体积膨胀破坏相对较小;对于高含盐量土样,尽管硫酸钠含量高,但受限于土样含水率,部分盐分无法充分结合水分子生成芒硝,未反应的析出盐分反而填充孔隙,加强了土颗粒结构;而 S2-2 土样的硫酸钠含量适中,既能充分结合水分子生成芒硝导致剧烈的结晶膨胀破坏,又无多余盐分析出以提供骨架支撑。因此,稳定后 S2-2 土样的压缩特性在所有试验组中表现最差。

由图 5 可知,在不同冻融循环次数下,与未冻融土样相比,压缩系数和压缩指数的增长量逐渐增大;较上一次冻融循环而言,呈现前期增幅较大、后期增幅较小的变化规律。经过不同次数的冻融循环后,各土样的压缩系数和压缩指数均有不同幅度的增长,含盐量与冻融循环后压缩系数增大幅度呈明显正相关关系,表明经过 MICP 改性作用产生的碳酸钙能够抵抗由盐冻胀导致的土体结构破坏。而含盐量与压缩指数增幅未呈

明显正相关关系,这可能是因为最大加载压力仅为 400 kPa, e - $\lg p$ 曲线还未出现直线段、斜率并未达到稳定值,代表性不强。

经过 13 次冻融循环后,以压缩指数评价土样的压缩性,CK-2、S1-2 属于低压缩性土,S2-2、S3-2 为中压缩性土;若以压缩系数评价,则这几组土样均属于中压缩性土。尽管两种指标在具体的土体分类界定上存在细微差异,但二者所反映的土体压缩性随含盐量与冻融循环次数的变化规律是一致的,均表明 MICP 改性土在特定含盐量下的结构劣化特征。

2.4 MICP 联合活性炭的改性效果

MICP 联合活性炭改性盐渍土的 e - $\lg p$ 曲线如图 6 所示。

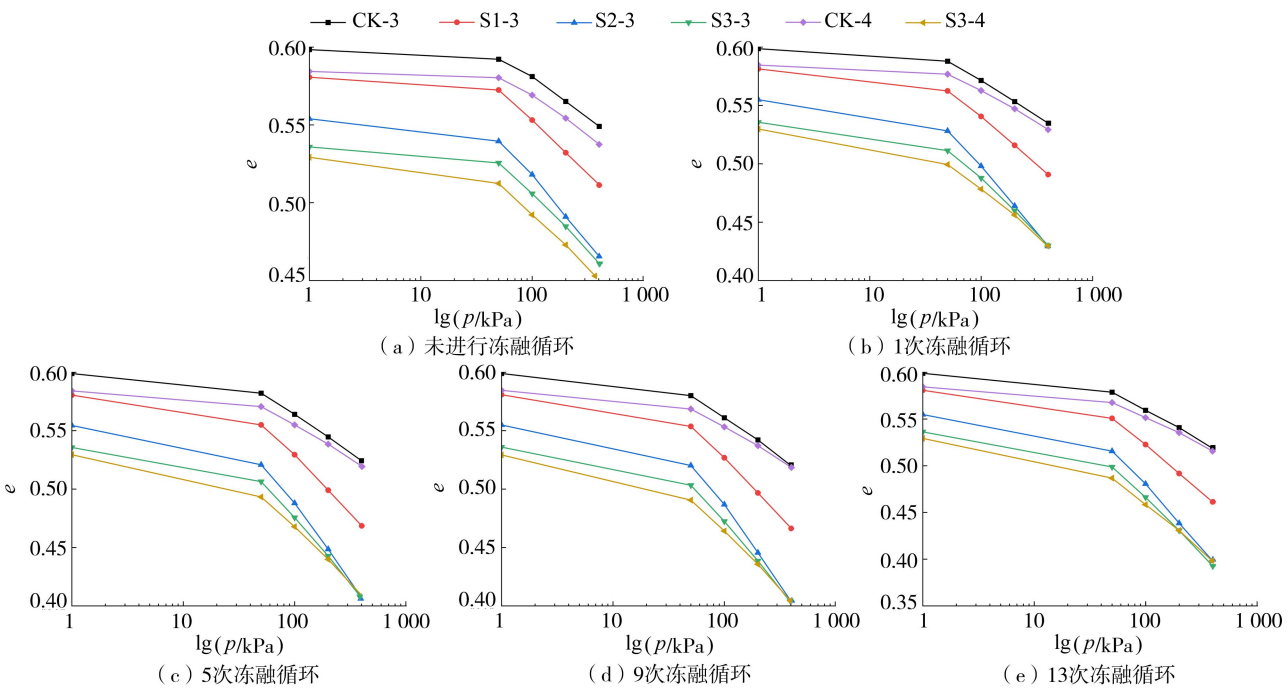


图 6 MICP 联合活性炭改性盐渍土 e - $\lg p$ 曲线

Fig. 6 e - $\lg p$ curves of saline soil modified by MICP combined with activated carbon

MICP 技术通过巴氏芽孢杆菌代谢尿素水解产生 CO_3^{2-} ,与 Ca^{2+} 结合生成碳酸钙晶体,填充土体孔隙并胶结颗粒。同时,活性炭凭借其巨大比表面积和丰富官能团,既作为微生物载体提升脲酶活性,又吸附 Na^+ 抑制盐晶体破坏,形成协同强化机制。对比图 4 和图 6 可知,经过 MICP 联合活性炭改性后的土样,相较于仅使用 MICP 改性的土样初始孔隙比均降低,添加 100 g/L 活性炭的土样降低程度更高。这是因为添加活性炭后,脲酶活性得到了增强,MICP 作用将产生更多的碳酸钙填充土样中的孔隙,且由于高盐分会造成孔隙液盐分浓度增大,进一步压缩了土颗粒间的双电层,使得土样孔隙比降低。同时因活性炭添加量较小,并未起到有效增大孔隙比的效果,三者共同作用下出现土样初始孔隙比均降低的结果。

根据图 6 计算得到不同含盐量和冻融循环次数下 MICP 联合活性炭改性土样的压缩系数和压缩指数变化,结果如图 7 所示。与仅使用 MICP 改性情况相比,同样含盐量为 2.67% 时的土样稳定后的压缩特性也是所有试验组中最差的。经过 MICP 联合活性炭(10 g/L)改性后,CK-3、S1-3、S2-3、S3-3 需要达到压缩性能稳定的冻融循环次数分别为 5、5、7、9 次,经过 MICP 联合活性炭(100 g/L)改性后的 CK-4、S3-4 需要次数分别为 3、7 次。活性炭掺量更多,反应生成更多的碳酸钙,使得稳定期提前。

由图 7(a) 可知,在不同冻融循环次数下,与未冻融土样相比,压缩系数增幅随冻融循环次数增多逐渐增大,且呈现较上一次冻融循环而言,前期增幅较大、后期增幅较小的变化规律。前 3~5 次冻融循环对土样压缩系数影响最大。

由图 7(b) 可知,前 3~5 次冻融循环对土样压缩指数影响最大。经过 13 次冻融循环后,压缩指数增幅与含盐量未呈明显正相关关系,这可能是因为最大加载压力仅为 400 kPa,绘制出的 e - $\lg p$ 曲线还未出现直线段、斜率并未达到稳定值,代表性不强。

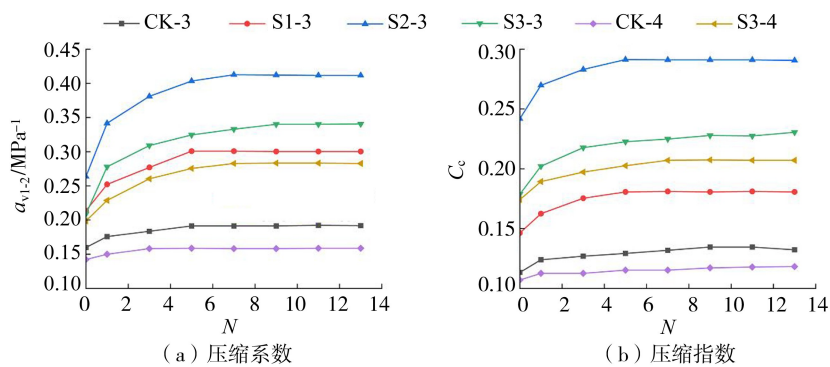


图 7 MICP 联合活性炭改性后土样压缩系数和压缩指数变化

Fig. 7 Variations of compressibility coefficient and compression index of soil samples modified by MICP combined with activated carbon

经过 13 次冻融循环后,由图 7 可知,以压缩指数评价土样的压缩性,CK-3、S1-3、CK-4、S3-4 为低压缩性土,S2-3、S3-3 为中压缩性土;若同等条件下以压缩系数评价,则这几组土样均属于中压缩性土。尽管两者在分类界定上存在差异,但所反映出的土体压缩性变化规律是一致的。

由图 5 和图 7 可知,MICP 联合活性炭改性的土样在不同冻融循环次数后,其压缩系数和压缩指数的增幅均低于仅使用 MICP 改性的土样,即通过添加活性炭的 MICP 改性后,冻融循环对土体压缩性影响变小。这一方面是因为活性炭有效增强脲酶活性后使得碳酸钙产量提高,加强了土颗粒之间的胶结作用,可更好地抵消由盐冻胀带来的结构破坏;另一方面因为活性炭有极大的比表面积,具有很强的吸附能力,能够吸附孔隙中游离的 Na^+ 。当 MICP 作用时,活性炭成为细菌吸附位点和碳酸钙晶核,生成的碳酸钙能将游离的钠离子原位封锁于活性炭内部,从根源上减少冻结时含水盐晶体的生成量,进而减轻盐冻胀带来的结构破坏。在碳酸钙的胶结强化与活性炭的吸附封锁的共同作用下,共同作用下改善了冻融循环后的土体压缩性能。

2.5 微观结构分析

图 8 为 3 组土样扫描电镜 (SEM) 的微观形貌。如图 8(a) 所示,盐渍土表面呈现破碎结构,并附着片状/块状盐晶体。伴随着 MICP 的加入,碳酸钙晶体以颗粒状填充于孔隙中,使土体致密化 (图 8(b)), 填充呈局部点状分布,部分大孔隙未被覆盖,大量盐晶体仍暴露于表面。这与高盐环境下脲酶活性抑制相关,导致胶结不连续。如图 8(c) 所示,活性炭的加入显著改变了微观结构,碳酸钙晶体在活性炭颗粒表面大量生成,形成连续胶结层,覆盖大部分孔隙;同时,活性炭通过表面官能团 ($-COOH$ 、 $-OH$) 吸附游离离子 (Na^+),降低盐晶体含量,从根源上抑制芒硝生成,故盐晶体几乎消失,土颗粒团聚为致密整体。

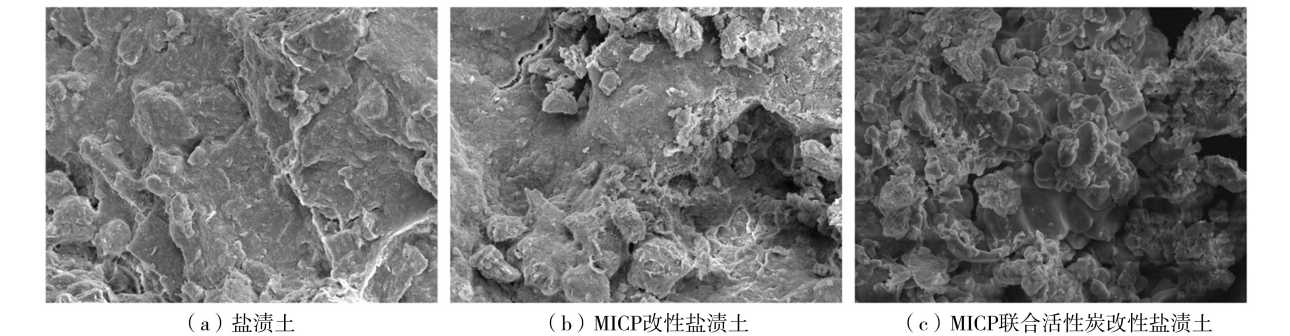


图 8 3 组土样扫描电镜图

Fig. 8 Scanning electron microscope images of three groups of soil samples

3 结 论

a. 随着含盐量的增大,土体的压缩性呈先增大后减小的变化规律。含盐量为 2.67% 的土样 (S2-2) 因盐分可以比较充分溶解,且不会析出盐晶体填充孔隙、降低压缩性,所以其压缩性最高。

b. 经过 MICP 改性后,碳酸钙颗粒填充土体孔隙、胶结土颗粒、降低土体压缩性,这一效果在添加活性

炭后得到加强,因为活性炭能提高脲酶活性、吸附营养物质,使 MICP 反应生成更多碳酸钙而降低土体压缩性。

c. 随着冻融循环次数的增加,各土样的压缩性持续增大,但均有一个限值;当冻融循环 7~9 次后,土样的压缩性基本趋于稳定,其中未改性土样的压缩性增幅更大。

d. 经 MICP 改性后,碳酸钙的胶结作用能够有效抵抗因盐冻胀带来的膨胀破坏。添加活性炭后的 MICP 作用过程中脲酶活性增强,使得碳酸钙产量提高,加强土颗粒之间的胶结作用,更好地抵消由盐冻胀带来的结构破坏,且因为活性炭具有极强吸附能力,可以将土体中游离钠离子吸附在活性炭孔隙内部,减少冻结时含水盐晶体的生成量,降低土体压缩性,具有较好的应用前景,因此推荐采用此方法改良季冻区盐渍土压缩特性。

参考文献:

[1] 倪万魁,师华强. 冻融循环作用对黄土微结构和强度的影响[J]. 冰川冻土,2014,36(4):922-927. (Ni Wankui, Shi Huaqiang. Influence of freezing-thawing cycles on micro-structure and shear strength of loess[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2014,36(4):922-927. (in Chinese))

[2] 靳德武,孙剑锋,付少兰. 青藏高原多年冻土区两类低角度滑坡灾害形成机理探讨[J]. 岩土力学,2005,26(5):774-778. (Jin Dewu, Sun Jianfeng, Fu Shaolan. Discussion on landslides hazard mechanism of two kinds of low angle slope in permafrost region of Qinghai-Tibet Plateau[J]. Rock and Soil Mechanics,2005,26(5):774-778. (in Chinese))

[3] 刘泉声,黄诗冰,康永水,等. 裂隙冻胀压力及对岩体造成的劣化机制初步研究[J]. 岩土力学,2016,37(6):1530-1542. (Liu Quansheng, Huang Shibing, Kang Yongshui, et al. Preliminary study of frost heave pressure and its influence on crack and deterioration mechanisms of rock mass[J]. Rock and Soil Mechanics,2016,37(6):1530-1542. (in Chinese))

[4] 邹峰,祁长青,张爽,等. 冻融循环作用下红砂岩物理力学性质及冻融损伤特性研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2026,54(2):187-196. (Zou Feng, Qi Changqing, Zhang Shuang, et al. Study on physical and mechanical properties and freeze-thaw damage characteristics of red sandstone under freeze-thaw action[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2026,54(2):187-196. (in Chinese))

[5] 张江浩,冀鸿兰,杨震,等. 冻融循环下黄河堤岸砂质壤土宏细观破坏过程[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(6):69-80. (Zhang Jianghao, Ji Honglan, Yang Zhen, et al. Macroscopic and microscopic damage processes of sandy loam soils in Yellow River embankment under freeze-thaw cycles[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2024,52(6):69-80. (in Chinese))

[6] 苏安双,王宇,石北啸,等. 冻融循环条件下粗粒料变形特性试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(6):61-66. (Su Anshuang, Wang Yu, Shi Beixiao, et al. Experimental study on deformation characteristics of coarse aggregates under freeze-thaw cycling conditions[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2023,51(6):61-66. (in Chinese))

[7] 李卓,孙屹,姜鑫,等. 低围压与不同温度作用下土石坝护坡土石混合体力学特性[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(6):90-96. (Li Zhuo, Sun Yi, Jiang Xin, et al. Study on mechanical properties of earth-rock mixture for earth-rock dam slope protection under low confining pressure and different temperatures[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2024,52(6):90-96. (in Chinese))

[8] 张泽,马巍,张中琼,等. 球形模板压入仪在冻土长期强度测试中的应用[J]. 岩土力学,2012,33(11):3516-3520. (Zhang Ze, Ma Wei, Zhang Zhongqiong, et al. Application of spherical template indenter to long-term strength tests for frozen soil[J]. Rock and Soil Mechanics,2012,33(11):3516-3520. (in Chinese))

[9] 齐吉琳,马巍. 冻土的力学性质及研究现状[J]. 岩土力学,2010,31(1):133-143. (Qi Jinlin, Ma Wei. State-of-art of research on mechanical properties of frozen soils[J]. Rock and Soil Mechanics,2010,31(1):133-143. (in Chinese))

[10] 杨成松,何平,程国栋,等. 冻融试验对土中含水量分布的影响(英文)[J]. 冰川冻土,2004,26(增刊1):50-55. (Yang Chengsong, He Ping, Cheng Guodong, et al. Freeze-thaw experiment influence on moisture content distrution of soil[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2004,26(S1):50-55. (in Chinese))

[11] 张世民,李双洋. 青藏粉质黏土冻融循环试验研究[J]. 冰川冻土,2012,34(3):625-631. (Zhang Shimin, Li Shuangyang. Experimental study of the tibetan silty clay under freeze-thaw cycles[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2012,34(3):625-631. (in Chinese))

[12] 魏厚振,周家作,韦昌富,等. 饱和粉土冻结过程中的水分迁移试验研究[J]. 岩土力学,2016,37(9):2547-2552. (Wei Houzhen, Zhou Jiazuo, Wei Changfu, et al. Experimental study of water migration in saturated freezing silty soil[J]. Rock and Soil Mechanics,2016,37(9):2547-2552. (in Chinese))

[13] 陈炜韬,王鹰,王明年,等. 冻融循环对盐渍土黏聚力影响的试验研究[J]. 岩土力学,2007,28(11):2343-2347. (Chen Weitao, Wang Ying, Wang Mingnian, et al. Testing study on influence of freezing and thawing circulation on saline soil's cohesion [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(11): 2343-2347. (in Chinese))

[14] 包卫星,杨晓华,谢永利. 典型天然盐渍土多次冻融循环盐胀试验研究[J]. 岩土工程学报,2006,28(11):1991-1995. (Bao Weixing, Yang Xiaohua, Xie Yongli. Research on salt expansion of representative crude saline soil under freezing and thawing cycles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(11): 1991-1995. (in Chinese))

[15] 吕擎峰,申贝,王生新,等. 水玻璃固化硫酸盐渍土强度特性及固化机制研究[J]. 岩土力学,2016,37(3):687-693. (Lyu Qingfeng, Shen Bei, Wang Shengxin, et al. Strength characteristics and solidification mechanism of sulphate salty soil solidified with sodium silicate[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(3): 687-693. (in Chinese))

[16] 高玉峰,王玉杰,张飞,等. 边坡工程与堤坝工程研究进展[J]. 土木工程学报,2024,57(8):97-118. (Gao Yufeng, Wang Yujie, Zhang Fei, et al. State-of-art review on slope and embankment dams [J]. China Civil Engineering Journal, 2024, 57(8): 97-118. (in Chinese))

[17] 陈肖柏. 我国土冻胀研究进展[J]. 冰川冻土,1988,10(3):319-326. (Chen Xiaobo. Current development of the study on frost susceptibility of soils [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1988, 10(3): 319-326. (in Chinese))

[18] 陈肖柏,邱国庆,王雅卿,等. 降温时之盐分重分布及盐胀试验研究[J]. 冰川冻土,1989,11(3):231-238. (Chen Xiaobo, Qiu Guoqing, Wang Yaqing, et al. Salt redistribution and heave of saline soil during cooling [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1989, 11(3): 231-238. (in Chinese))

[19] 荆志东,王春雷,谢强. 冻区盐渍土水热耦合效应及对力学性能的影响[J]. 路基工程,2009(3):16-18. (Jing Zhidong, Wang Chunlei, Xie Qiang. Hydrothermal coupling effect of saline soil in frozen area and its effect on mechanical properties [J]. Subgrade Engineering, 2009(3): 16-18. (in Chinese))

[20] 程卓,崔高航,高原昊,等. 季冻区粉煤灰加固路基土力学性能试验研究[J]. 硅酸盐通报,2021,40(11):3854-3864. (Cheng Zhuo, Cui Gaoang, Gao Yuanhao, et al. Mechanical properties of fly ash reinforced subgrade soil in seasonally frozen area [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2021, 40(11): 3854-3864. (in Chinese))

[21] 康鑫睿,李宏波,田军仓,等. 季冻区渠基盐渍土冻胀和盐分迁移试验研究[J]. 灌溉排水学报,2025,44(2):83-92. (Kang Xinrui, Li Hongbo, Tian Juncang, et al. Reducing frost heave and salt migration in saline soil foundations of channels in seasonal frozen regions using solidification [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2025, 44(2): 83-92. (in Chinese))

[22] 王春雷,谢强,姜崇喜,等. 青藏铁路冻区盐渍土热特性及力学性能分析[J]. 岩土力学,2009,30(3):836-839. (Wang Chunlei, Xie Qiang, Jiang Chongxi, et al. Analysis of thermal characteristics and mechanical properties of salty soil in frozen area of Qinghai-Tibet Railway [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(3): 836-839. (in Chinese))

[23] 何稼,黄鑫,晏凤元,等. 仿生岩土技术的研究进展[J]. 岩土工程学报,2023,45(6):1200-1211. (He Jia, Huang Xin, Yan Fengyuan, et al. Research advances in bio-inspired geotechnics [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(6): 1200-1211. (in Chinese))

[24] 何稼,吴敏,孟浩,等. 生物固土用于防风固沙的研究进展[J]. 高校地质学报,2021,27(6):687-696. (He Jia, Wu Min, Meng Hao, et al. Research progress of bio-cementation for sand stabilization and wind erosion control [J]. Geological Journal of China Universities, 2021, 27(6): 687-696. (in Chinese))

[25] 刘汉龙,张涵,叶琳,等. 出土破损陶器文物活性生物泥黏接修复技术[J]. 土木与环境工程学报(中英文),2023,45(1):225-226. (Liu Hanlong, Zhang Han, Ye Lin, et al. Repair of unearthed damaged pottery relics using biocementation [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2023, 45(1): 225-226. (in Chinese))

[26] 方丽莉,齐吉琳,马巍. 冻融作用对土结构性的影响及其导致的强度变化[J]. 冰川冻土,2012,34(2):435-440. (Fang Lili, Qi Jinlin, Ma Wei. Freeze-thaw induced changes in soil structure and its relationship with variations in strength [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, 34(2): 435-440. (in Chinese))

[27] 郭新红. 硫酸盐渍土低温压缩特性研究[D]. 西安,长安大学,2006.

[28] 王大雁,马巍,常小晓,等. 冻融循环作用对青藏粘土物理力学性质的影响[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(23):4313-4319. (Wang Dayan, Ma Wei, Chang Xiaoxiao, et al. Physico-mechanical properties changes of qinghai-tibet clay due to cyclic freezing and thawing [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(23): 4313-4319. (in Chinese))

[29] 王效宾,杨平,王海波,等. 冻融作用对黏土力学性能影响的试验研究[J]. 岩土工程学报,2009,31(11):1768-1772. (Wang Xiaobin, Yang Ping, Wang Haibo, et al. Experimental study on effects of freezing and thawing on mechanical properties of clay [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(11): 1768-1772. (in Chinese))