

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2024.099



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



钙源及固化方式对 MICP 处理砂黄土均匀性及强度的影响

黄趁趁^a, 杜强^{a,b,c}, 曲立强^a, 刘旭梅^a, 薛嘉麟^a

(内蒙古工业大学 a. 土木工程学院; b. 沙旱区地质灾害与岩土工程防御自治区高等学校重点实验室; c. 地质技术与岩土工程内蒙古自治区工程研究中心, 呼和浩特 010051)

摘要: 砂黄土砂粒含量高, 具有疏松多孔的结构特征, 其力学性质不同于典型粉质黄土与砂土。为研究钙源及固化方式对微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)技术加固砂黄土效果的影响, 选取氯化钙、乙酸钙与乳酸钙 3 种钙源, 通过浸泡法与灌注法两种处理方式开展小尺寸试验, 以固化试样的碳酸钙含量、碳酸钙分布均匀性以及无侧限抗压强度为评价指标开展对比分析。结果表明: 以乙酸钙为钙源时, 固化试样的均匀性较好; 以乳酸钙为钙源时, 处理初期试样的碳酸钙含量与无侧限抗压强度较高, 但随着处理时间的增加, 氯化钙作为钙源的固化试样强度更高。与浸泡法相比, 灌注法能有效改善乳酸钙渗流不畅的问题, 对乳酸钙为钙源时固化效果的提升作用优于氯化钙和乙酸钙。灌注法固化试样的碳酸钙分布更均匀、强度更高。

关键词: 微生物诱导碳酸钙沉淀; 钙源; 固化方式; 碳酸钙含量; 砂黄土; 无侧限抗压强度

中图分类号: TU444 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2026)03-0048-10

Influences of calcium source and curing method on uniformity and strength of sandy loess treated by MICP

HUANG Chenchen^a, DU Qiang^{a,b,c}, QU Liqiang^a, LIU Xumei^a, XUE Jialin^a

(a. College of Civil Engineering; b. Key Laboratory of Geological Hazards and Geotechnical Engineering Defense in Sandy and Drought Regions at Universities of Inner Mongolia Autonomous Region; c. Inner Mongolia Engineering Research Center of Geological Technology and Geotechnical Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, P. R. China)

Abstract: Sandy loess has high sand content and a loose porous structure, and its mechanical properties are different from those of typical silty loess and sand. In order to study the effect of calcium source and curing method on the curing effect of microbially induced carbonate precipitation (MICP) technique in the treatment of sandy loess, small-scale tests were carried out by the soaking method and the perfusion method with three

收稿日期: 2024-07-03

基金项目: 内蒙古自然科学基金(2022LHMS05010); 内蒙古自治区直属高校基本科研业务费项目(JY2022096, ZTY2023058, ZTY2023056)

作者简介: 黄趁趁(1999-), 女, 主要从事微生物岩土工程研究, E-mail: hcc27416@163.com。

杜强(通信作者), 男, 副教授, E-mail: dq410@imut.edu.cn。

Received: 2024-07-03

Foundation items: Inner Mongolia Natural Science Foundation (No. 2022LHMS05010); Basic Scientific Research Business Fee Project of Colleges and Universities Directly Under the Inner Mongolia Autonomous Region (Nos. JY2022096, ZTY2023058, ZTY2023056)

Author brief: HUANG Chenchen (1999-), main research interest: microbial geotechnical engineering, E-mail: hcc27416@163.com.

DU Qiang (corresponding author), associate professor, E-mail: dq410@imut.edu.cn.

calcium sources (calcium chloride, calcium acetate and calcium lactate) respectively. The calcium carbonate content, calcium carbonate distribution uniformity and unconfined compressive strength (UCS) of the solidified samples were used as evaluation indexes for comparative analysis. The results show that the uniformity of the solidified samples is better when calcium acetate is used as the calcium source. The calcium carbonate content and UCS of the solidified samples are greater when calcium lactate is used as the calcium source in the early stage of treatment, but with the increase of treatment time, the strength of the solidified samples with calcium chloride as the calcium source is greater. Compared with the soaking method, the perfusion method can effectively improve the poor seepage of calcium lactate, and the curing effect is better than that of calcium chloride and calcium acetate when calcium lactate is used as the calcium source. The calcium carbonate distribution of the solidified sample by the perfusion method is more uniform and the strength is greater.

Keywords: microbially induced carbonate precipitation (MICP); calcium source; curing method; calcium carbonate content; sandy loess; unconfined compressive strength

砂黄土主要分布于黄土高原与沙漠的过渡地带,其颗粒组成具有细砂粒含量高、黏粒含量低的特点,因此表现出土质疏松、水稳性差、抗侵蚀能力弱及黏聚力极低等不良工程特性^[1-2]。与典型粉质黄土相比,砂黄土松散多孔的结构特征使其更易受外界环境影响,进而诱发滑塌、剥落等地质灾害^[3],亟需进行加固处理。

微生物诱导碳酸钙沉淀(microbially induced carbonate precipitation, MICP)技术利用微生物新陈代谢水解尿素,产生碳酸根离子并与钙离子结合,形成碳酸钙沉淀,近年来被广泛应用于土体固化与改良研究。MICP技术的加固效果受多种因素影响,对不同土体(砂土、粉砂、粉土、黏土等)的适用性是该技术现阶段面临的重要挑战^[4]。刘汉龙等^[5]采用MICP技术固化钙质砂发现,该技术可有效提高钙质砂的抗液化能力与力学性能。Qu等^[6]通过小规模风洞模型试验发现, MICP处理能有效提高风积沙的抗风蚀性能。程瑶佳等^[7]采用MICP技术对黄土进行改性处理发现,该技术能有效提高粉质黄土的抗侵蚀性能。赵志峰等^[8]通过不同掺砂量粉土的MICP固化试验发现,土体颗粒级配对加固效果具有显著影响。马国梁等^[9]发现,掺入细粒黏土材料固载微生物能改善MICP加固粗砂的效果。砂黄土在颗粒级配、物质组成及细观结构等方面均与粉质黄土、砂土存在显著差异,工程性质亦有较大不同,目前MICP技术对其加固效果尚不明确,仍有待深入研究。

目前MICP固化土体中碳酸钙沉积的不均匀性和力学性质变化仍是该技术研究重点关注的问题,选择合适的钙源对固化土体不同应用场景的适配至关重要。Zhang等^[10]分别采用氯化钙、乙酸钙和硝酸钙3种钙源开展注浆试验,探究了不同钙源对砂柱耐久性与力学性能的影响,结果表明,乙酸钙处理试样的强度更高、均匀性更好。Achal等^[11]通过

对比氯化钙、氧化钙、醋酸钙和硝酸钙4种钙源条件下的碳酸钙生成量,得出在纯溶液环境下氯化钙为最优钙源的结论。梁仕华等^[12-13]从宏观及微观角度分析了不同钙源对花岗岩残积土、砂土物理力学性质的影响,结果表明,固化花岗岩残积土时乙酸钙的固化效果优于氯化钙,而固化砂土时硝酸钙的固化效果优于氯化钙。王玮^[14]分别采用氯化钙、乙酸钙和硫酸钙对粉土进行固化处理发现,氯化钙对试样的强度改善效果最好。以上研究表明,钙源对不同类型土体的处理效果存在显著差异,但不同学者的研究结果不尽相同。此外,固化方式的不同也极大影响固化效果,主要原因在于不同固化方法中菌液与胶结液的渗入方式存在差异。张锦程等^[15]对两相法、pH法和温控法3种MICP加固方法开展对比研究,结果表明,不同固化方式对碳酸钙分布具有显著影响。周杨等^[16]采用不同灌注方式固化砂土,通过测定无侧限抗压强度和观察扫描电镜图像评估试样加固效果发现,加固效果与胶结液的灌注方式密切相关。目前,较为主流的室内小尺寸MICP固化方式有浸泡法^[17-18]和灌注法^[19-21]。其中,浸泡法通过表面入渗的方式固化试样,具有操作简便、所需机械动力少的特点,相比压力注浆,在单元试验尺度下更容易进行大批量试验;灌注法具有扰动小、工期短、加固效果显著的优势,已有许多学者开展了室内和原位试验^[22]。但现有研究大多针对松散土体,对于砂黄土这类低渗透性且具有湿陷性的特殊土体,开展不同固化方式下MICP技术的可行性与固化效果对比研究,具有重要意义。

笔者针对鄂尔多斯地区的砂黄土,以巴氏芽孢杆菌作为固化细菌,选取氯化钙、乙酸钙、乳酸钙3种钙源,通过浸泡法和灌注法两种方式对试样进行固化处理。测定固化后试样不同部位的碳酸钙含量,并开展无侧限抗压强度试验,探究不同钙源和固化方式对土体碳酸钙沉积均匀性及强度的影响。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

土样取自鄂尔多斯市准格尔旗,其不均匀系数 C_u 为 4.26, 曲率系数 C_c 为 1.17, 级配不良, 颗粒级配曲线见图 1。根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)^[23] 对该土体进行基本物理性质指标测定, 结果见表 1。

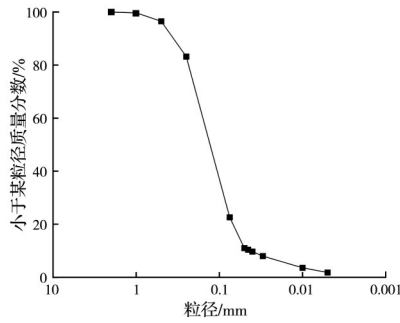


图 1 颗粒级配曲线

Fig. 1 Particle gradation curve

表 1 土体物理性质指标

Table 1 Physical property indexes of sandy loess

天然 含水率/%	天然密度/ (g/cm ³)	渗透系数/ (cm/s)	孔隙比	土粒比重
5.6	1.728	9.44×10^{-4}	0.75	2.7

试验用菌为巴氏芽孢杆菌(ATCC 11859), 购于上海保藏微生物中心。将初代菌液扩大培养后制得试验用菌液, 液体培养基成分见表 2。将配制好的培养基装入锥形瓶并置于高压蒸汽灭菌锅中, 在 120 °C 条件下灭菌 20 min, 冷却后在超净工作台上将菌液接种至锥形瓶内, 再将其放入振荡培养箱中(温度 30 °C、转速 200 r/min)培养 48 h。经测定, 试验所用菌液的 OD₆₀₀ 为 1.60, 脲酶活性为 13.33 (mmol/L)/min。

胶结液主要为细菌生长提供营养物质, 并为 MICP 反应过程提供钙源^[24], 具体成分见表 2。

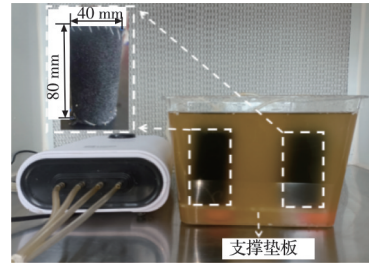
表 2 液体培养基和胶结液

Table 2 Liquid medium and cementation solution

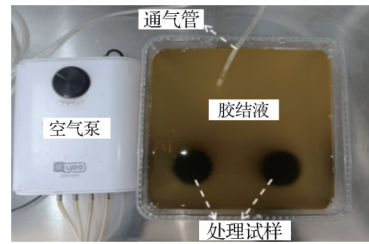
类别	成分	质量浓度/(g/L)
液体培养基	硫酸铵	10.000
	三羟甲基氨基甲烷	15.748
	酵母粉	20.000
胶结液(3种钙源分别选取)	氯化铵	10.00
	碳酸氢钠	2.12
	尿素	30.00
	营养肉汤	15.00
	氯化钙	73.51
	乙酸钙	88.10
乳酸钙	154.17	

1.2 试验设计

为对比不同固化方式对试样强度的影响, 分别采用浸泡法和灌注法制备试样。采用浸泡法时, 将 45 mL 菌液与 175 g 烘干土样拌和均匀, 装入直径为 40 mm、高为 80 mm 的土工布柔性模具中并缝合顶盖, 然后将封装完成的试样放入盛有胶结液的试验箱中, 通过表面入渗胶结液的方式固化试样。试验箱底部放置垫板, 并通过空气泵为试验提供充足氧气, 如图 2 所示。



(a) 正视图



(b) 俯视图

图 2 浸泡法试验图

Fig. 2 Photograph of the immersion test setup

斯日古楞等^[25]的研究表明, 试样固化 7 d 时 MICP 反应可充分进行, 能够达到理想的强度效果。试验中每种钙源分别设置 4 组固化时间(1、3、5、7 d), 每组制备 3 个平行试样; 为对比 3 种钙源的固化效果, 共制备 36 个试样。试样处理方式及编号见表 3, 其中编号 A_{I-1} 表示以氯化钙为钙源、采用浸泡法处理 1 d 的试样。

表 3 试样处理方式及编号

Table 3 Sample processing methods and numbering

处理方法	钙源及固化时间	试样编号
浸泡法(I)	A: 氯化钙固化 1、3、5、7 d	A _{I-1,3,5,7}
	B: 乙酸钙固化 1、3、5、7 d	B _{I-1,3,5,7}
	C: 乳酸钙固化 1、3、5、7 d	C _{I-1,3,5,7}
灌注法(II)	A: 氯化钙固化 1、2、3、4 轮	A _{II-1,2,3,4}
	B: 乙酸钙固化 1、2、3、4 轮	B _{II-1,2,3,4}
	C: 乳酸钙固化 1、2、3、4 轮	C _{II-1,2,3,4}

灌注法采用蠕动泵进行, 试样模具为定制的不锈钢两瓣模, 直径为 40 mm、高为 80 mm, 由侧壁、顶盖和底盖组成。顶盖和底盖各设有一个通道, 分别

作为灌注口和流出口,试样上下均铺设土工布,以防止土粒流失,试验装置如图3所示。

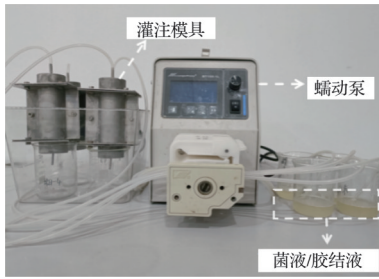


图3 灌注法试验图

Fig. 3 Photograph of the perfusion test setup

灌注速度为1.4 mL/min,每次灌注的菌液和胶结液体积为1倍试样孔隙体积,灌注流程见图4。完成一个灌注流程后,将试样倒转,再按照该流程间歇式循环灌注菌液和胶结液^[26],灌注两个流程为一轮。试样灌注完成后静置2 d,脱去模具。由文献^[27]可知,灌注轮数对加固效果起到重要作用,因此每种钙源分别设置4组灌注轮数(1、2、3、4轮),每组制备3个平行试样;为对比3种钙源的固化效果,共制备36个试样,试样处理方式及编号见表3。

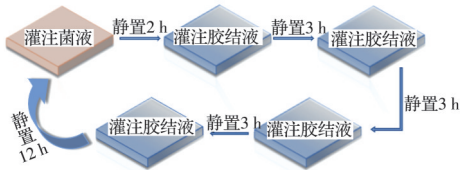


图4 灌注流程图

Fig. 4 Perfusion flow chart

采用两种方法制样结束后,参照Lv等^[28]的操作方法,用去离子水反复冲洗固化后的试样,直至试样底部流出的液体呈澄清状态,以去除试样表面的可溶性物质。

2 试验内容

2.1 碳酸钙含量测定及分布均匀性计算

浸泡法主要依靠胶结液扩散并水平入渗至试样内部,与菌液反应生成碳酸钙,以固化土体,易在试样表面形成碳酸钙硬壳^[29],与试样内部土体存在明显差异。因此,在浸泡法条件下测定碳酸钙含量及分布特征时,需将试样分为内外两部分分别检测。灌注法主要依靠蠕动泵,使菌液和胶结液垂直入渗加固试样,改善了浸泡法中碳酸钙内外分布不均的问题;但垂直入渗会使碳酸钙沿垂直方向产生分布差异,易在灌注口和流出口形成碳酸钙堆积^[30]。因此,将固化后的试样均分为上、中、下3部分,分别测定各部分的碳酸钙含量。两种方法的碳酸钙含量测定流程如图5所示。

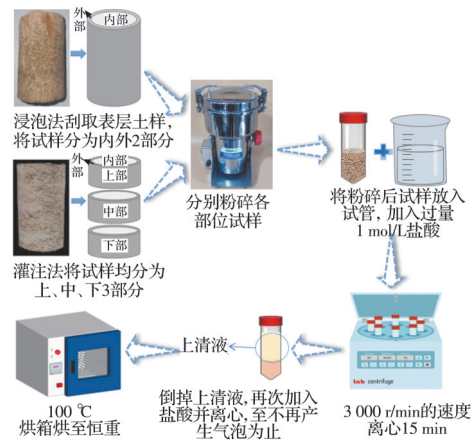


图5 碳酸钙含量测定流程

Fig. 5 Determination process of calcium carbonate content

采用酸洗法测定试样的碳酸钙含量,计算式为

$$C = \frac{M_{s+c} - M_s}{M_{s+c}} \times 100\%$$

式中: M_{s+c} 为试样酸洗前的干质量; M_s 为试样酸洗后的干质量。

为探究不同钙源及固化方式对碳酸钙分布均匀性的影响,采用概率统计中的样本标准差表征碳酸钙在试样中的分布离散程度^[31],计算式为

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (C_i - \bar{C})^2}$$

式中: S 为样本标准差,反映碳酸钙在试样中的分布离散程度, S 越小,表明试样中碳酸钙分布均匀性越好; n 为试验样本数量,浸泡法取2(内部和外部),灌注法取3(上部、中部、下部); C_i 为单个样本的碳酸钙含量; \bar{C} 为样本碳酸钙含量的平均值。

2.2 无侧限抗压强度试验

采用无侧限抗压强度指标评价试样经MICP固化处理后的强度。依据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)对固化试样开展无侧限抗压强度试验。将不同条件下固化后的试样置于60℃烘箱中烘干48 h,随后按标准规定进行无侧限抗压强度测试。取应力-应变曲线上的最大轴向应力作为试样的无侧限抗压强度。

3 试验结果及分析

3.1 碳酸钙含量

采用氯化钙、乙酸钙和乳酸钙3种钙源,在浸泡法和灌注法两种固化方式下固化砂黄土,测定试样不同部位的碳酸钙含量并计算样本标准差,结果如图6(a)、(b)所示。在浸泡法条件下,试样 C_{1-1} 外部碳酸钙含量为4.44%,而试样 A_{1-1} 、 B_{1-1} 外部碳酸钙含量仅1.67%~1.77%,表明浸泡1 d时,相比于氯化钙和乙酸钙,以乳酸钙为钙源更有利于碳酸钙生

成。但浸泡7 d时,乳酸钙处理试样的碳酸钙含量最低。一方面,以乳酸钙为钙源时易发生渗流不畅现象,导致土体内部固化效果不佳^[32];另一方面,浸

泡1 d时乳酸钙试样中生成的碳酸钙更多,更易在试样外部沉积并阻碍胶结液向内部渗透,因而7 d时试样的总碳酸钙含量最低。

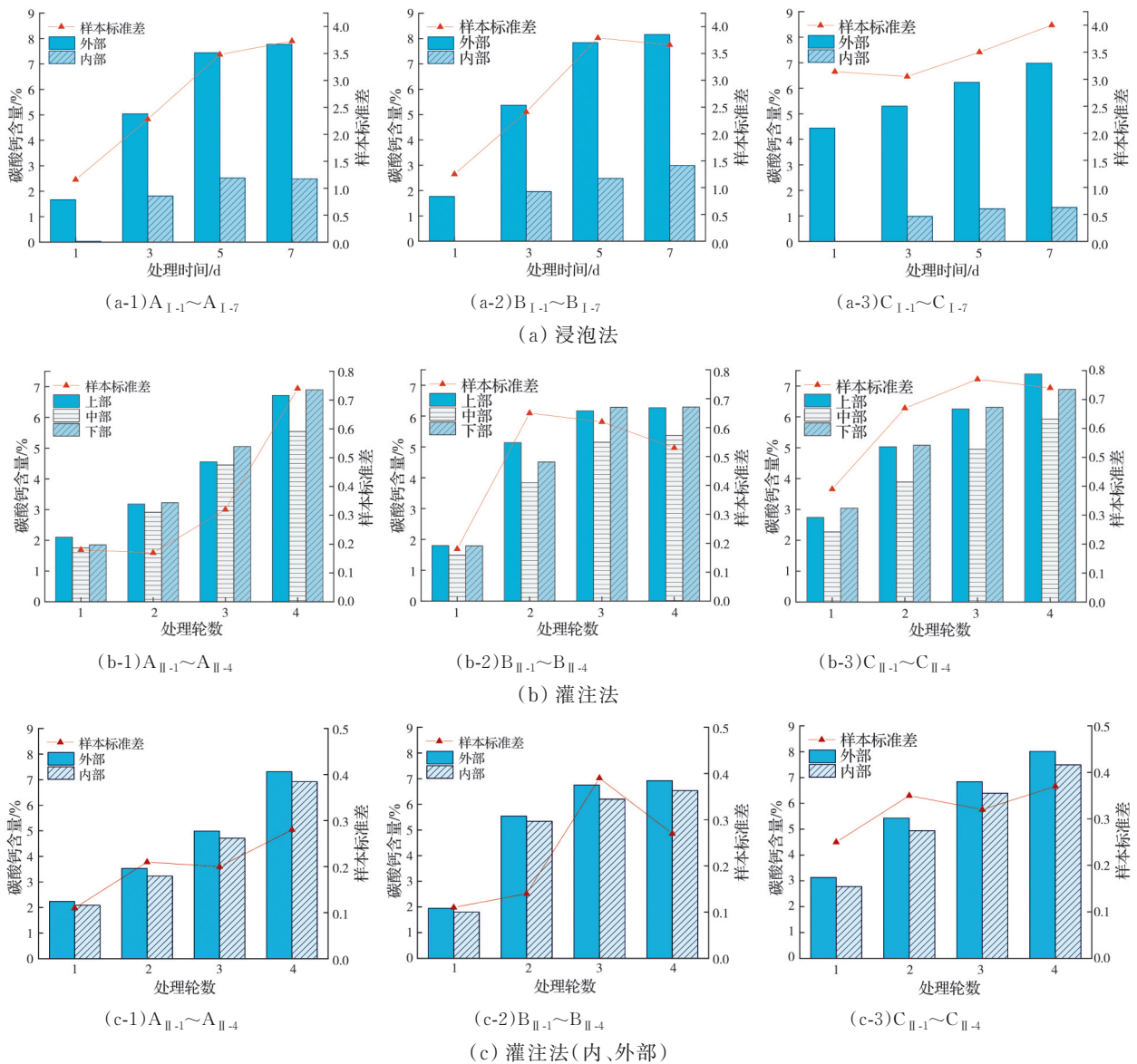


图6 试样不同部位碳酸钙含量及样本标准差

Fig. 6 Production and distribution uniformity of calcium carbonate in different parts of the samples

在灌注法条件下,试样上、中、下3部分的碳酸钙含量差异较小。灌注1轮时,不同钙源处理试样的总碳酸钙含量表现为乳酸钙>氯化钙>乙酸钙,其中氯化钙和乙酸钙含量相近,该结果与浸泡法所得结果规律相似。灌注4轮时,总碳酸钙含量呈现乳酸钙>氯化钙>乙酸钙的规律。可见,相较浸泡法,采用灌注法处理试样可在一定程度上改善乳酸钙的渗流不畅问题,进而显著提升乳酸钙为钙源时的固化效果。

在浸泡1 d及灌注4轮条件下,以乳酸钙为钙源时试样中生成的碳酸钙均高于以氯化钙和乙酸钙为钙源的试样。灌注法的外部压力作用使溶液渗

透速率较快,从而有效改善乳酸钙渗流不畅的现象。相比氯化钙和乙酸钙,乳酸钙作为钙源时有压注浆对其固化效果的提升更为显著。

3.2 碳酸钙分布均匀性

由图6(a)、(b)可知,随着处理天数或轮次的增加,不同钙源固化试样的碳酸钙含量标准差呈现不同变化规律:氯化钙处理试样的标准差持续增大;乳酸钙处理试样的标准差在初期已处于较高水平,后续变化不大;乙酸钙处理试样的标准差在浸泡5 d及灌注2轮时均达到最大值,继续处理后呈减小趋势,表明试样均匀性有所提升。试样 $A_{I-1} \sim A_{I-7}$ 、 $B_{I-1} \sim B_{I-7}$ 标准差范围为1.16~3.73,试样 $C_{I-1} \sim C_{I-7}$

标准差范围为 3.14~4.00,其中试样 A₁₋₇、C₁₋₇ 标准差分别为 3.73、4.00,试样 B₁₋₇ 为 3.66,说明浸泡 7 d 时乙酸钙固化试样的碳酸钙分布更均匀,该结果与徐溪晨等^[33]试验结论一致。此外,Zhang 等^[10]研究发现,乙酸钙处理试样的孔隙结构较氯化钙分布更均匀,进一步证明乙酸钙处理试样碳酸钙沉积均匀性更好。在灌注法条件下,试样 A_{II-4}、C_{II-4} 标准差均为 0.74,试样 B_{II-4} 为 0.53,同样表明乙酸钙固化试样的均匀性更佳。

为进一步对比固化方式对试样碳酸钙分布均匀性的影响,采用与浸泡法相同的方法测定灌注法试样内、外部碳酸钙含量并计算其标准差,结果见图 6(c)。由图 6 可知,浸泡法处理 7 d 时试样内、外部碳酸钙含量标准差范围为 3.66~4.00,碳酸钙分布均匀性较差;而灌注法处理 4 轮后,试样内、外部碳酸钙含量标准差为 0.27~0.37,上、中、下 3 部分标准差为 0.53~0.74。可见,灌注法处理试样的碳酸钙分布整体均匀性较好。

综上,相比氯化钙和乳酸钙,乙酸钙作为钙源时试样的碳酸钙分布均匀性更优,且随着固化天数或轮数的增加,试样的碳酸钙分布均匀性有所提升。对比两种固化方式,灌注法下试样的碳酸钙分布均匀性优于浸泡法。

3.3 无侧限抗压强度

不同钙源和固化方式处理后试样的无侧限抗

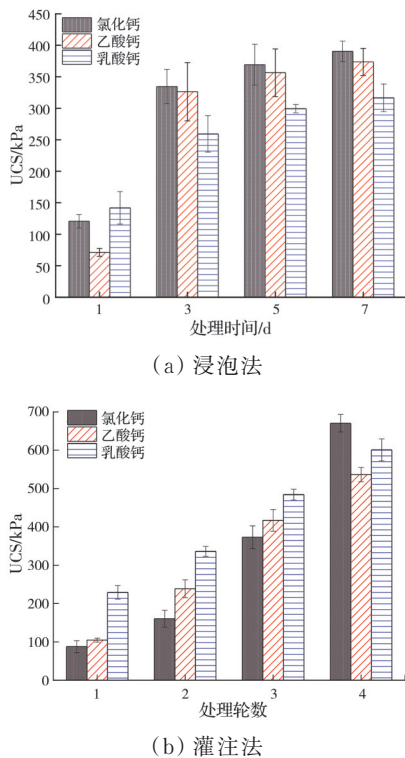


图 7 无侧限抗压强度

Fig. 7 Unconfined compression strength

压强度如图 7 所示。在浸泡 1 d 及灌注 1~3 轮条件下,乳酸钙作为钙源的试样碳酸钙含量最高,其强度较高。但在浸泡 3~7 d 及灌注 4 轮条件下,相比乙酸钙和乳酸钙,氯化钙处理试样强度更高,其中试样 A₁₋₇ 为 390.37 kPa,试样 A_{II-4} 为 670.30 kPa。对比两种固化方式可知,灌注法处理 3 轮时试样强度范围为 373.05~416.35 kPa,与浸泡法处理 7 d 时的强度相近,随着处理轮次的继续增加,灌注法处理试样强度高于浸泡法。

4 讨论

在浸泡法条件下,试样内、外部碳酸钙含量差异显著且变化规律不同,为分析试样不同部位碳酸钙含量与强度的关系,分别对内、外部碳酸钙含量与 UCS 进行拟合,结果如图 8(a)、(b)所示。在灌注法条件下,试样碳酸钙分布较均匀,各部位碳酸钙

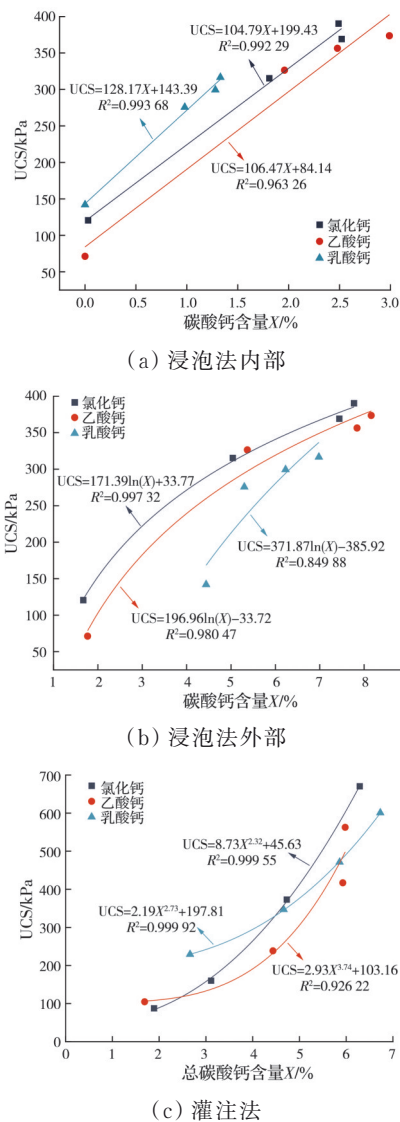


图 8 无侧限抗压强度与碳酸钙含量拟合曲线

Fig. 8 Relationship between unconfined compressive strength and calcium carbonate content

含量差异较小,因此对总碳酸钙含量与 UCS 进行拟合,结果如图 8(c)所示。浸泡法下试样内部碳酸钙含量与 UCS 呈线性增长,表明内部碳酸钙沉积对强度增长具有重要作用;试样外部碳酸钙含量与 UCS 呈对数函数增长,随着处理时间的增加,其对强度的影响程度逐渐减弱。但由于浸泡法处理试样的外部碳酸钙含量远高于内部,对强度的影响也更为

显著^[34]。灌注法下 UCS 随试样总碳酸钙含量呈幂函数增长,该规律与郑俊杰等^[35]采用有压入渗开展微生物固化钙质砂研究所得结果一致。

为进一步探究不同钙源及固化方式对 MICP 技术处理砂黄土时碳酸钙生成量、分布均匀性与强度变化规律的影响,对试样各部位碳酸钙增量及强度增量进行分析,结果如图 9 所示。

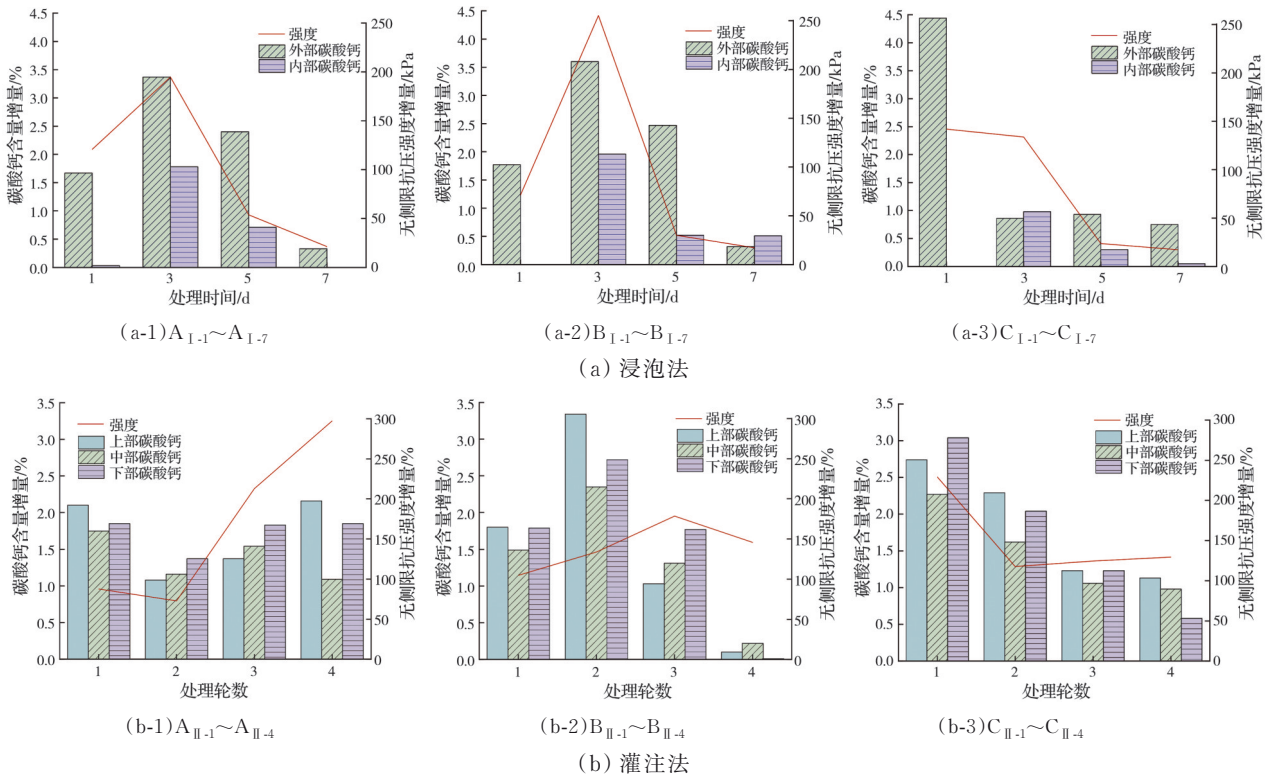


图 9 强度增量及试样不同部位碳酸钙增量变化

Fig. 9 Strength increment and calcium carbonate increment change in different parts of the sample

在浸泡法条件下,处理 1 d 时试样外部碳酸钙含量增加较多,内部几乎未检测到碳酸钙,而强度较处理前显著提升,推测此时强度提高主要由外部碳酸钙沉积控制。处理 5~7 d 时,与氯化钙和乳酸钙相比,乙酸钙处理试样内部碳酸钙含量增加较多,但由于内、外部碳酸钙含量差异仍较大,强度提升幅度有限。1~3 d 内试样强度迅速增长,处理 3 d 时均达到 7 d 时的 80% 以上,3~7 d 强度增量大幅减小并逐渐趋于稳定,这是由于具有胶结作用的碳酸钙沉积联结土体颗粒,是强度提高的关键,而表面堆积的碳酸钙虽可减小孔隙体积,但对土体强度的提升作用十分有限^[31,36]。由此可知,达到一定强度后,单纯增加浸泡时间对试样强度的提升效果有限,这与斯日古楞等^[25]的研究结果一致。

与土体颗粒松散、透水性良好的砂土相比,砂黄土渗透性较低且遇水易发生崩解、湿陷。采用无压入渗的 MICP 固化方式处理砂黄土时,土体孔隙易被堵塞,碳酸钙易在土体表面沉积,形成硬壳,导

致内部土体难以充分固化。但高强度的硬化壳能够降低土体渗透性,阻止水分进入土体内部,避免内部未胶结土体发生湿陷、滑塌^[7]。采用 MICP 技术固化砂黄土能提高土体的抗侵蚀性,对土体防护有重要意义,仍需进一步探索和研究。

在灌注法条件下,氯化钙处理试样的碳酸钙增量与强度增量的变化趋势一致。而乙酸钙处理试样的强度增量变化与碳酸钙含量变化并不完全一致:处理 2 轮时碳酸钙增量最大,但强度增量在处理 3 轮时达到峰值,结合此时碳酸钙分布标准差有所减小可知,试样碳酸钙沉积均匀性的提升有利于强度的提高,这也验证了 Lian 等^[37]的结论,即在总碳酸钙含量相近的一组试样中,碳酸钙分布越均匀,无侧限抗压强度越高。随着处理轮数的增加,乳酸钙处理试样的碳酸钙增量不断减小;由于 3~4 轮时试样碳酸钙分布均匀性有所提升,尽管碳酸钙增量较小,但强度增量略有提升,同样说明沉积均匀性的提升有利于试样强度的提高。

处理4轮时,与乙酸钙和乳酸钙相比,氯化钙固化试样的强度最高,且此时强度增量也较大,可见通过增加灌注轮数,试样强度仍可有较大幅度提升,这与Wang等^[34]采用有压入渗固化花岗岩残积土的研究结果相似。在相近碳酸钙含量范围内,氯化钙处理试样的UCS为87.6~670.3 kPa(碳酸钙含量为1.89%~6.29%),明显高于彭劼等^[38]固化砂土的强度(UCS为122.7~374.3 kPa,碳酸钙含量为3.20%~6.30%),但略低于Liu等^[39]固化粉质黄土的强度(UCS为223.7~865.8 kPa,碳酸钙含量为2.00%~7.00%),这表明砂黄土的固化效果与土体颗粒级配、物质组成及碳酸钙沉积均匀性等因素密切相关。已有研究表明^[35],在一定粒径范围内,颗粒粒径及颗粒间孔隙尺寸越小,固化后土体强度越高。

5 结论

通过3种钙源(氯化钙、乙酸钙、乳酸钙)及两种固化方式(浸泡法和灌注法)对小尺寸砂黄土试样(直径40 mm×高80 mm)进行处理,测定试样不同部位的碳酸钙含量,计算碳酸钙分布标准差,并开展无侧限抗压强度试验,得到如下结论:

1)不同钙源处理后,乙酸钙固化试样的碳酸钙沉积均匀性最好。在灌注法条件下,随着处理轮次的增加,以乙酸钙和乳酸钙为钙源时试样均匀性均有所提升,进而有利于试样强度的提高;而浸泡法固化试样内、外部碳酸钙含量差异较大,其均匀性小幅提升,对强度影响有限。不同固化方式下试样碳酸钙沉积均匀性差异显著,灌注法处理试样的均匀性优于浸泡法。

2)MICP固化砂黄土时,初期阶段(浸泡1 d、灌注1~3轮)以乳酸钙为钙源的试样强度较高;但随着处理天数或轮次的增加,氯化钙固化试样强度最高。浸泡法固化3 d时试样强度已达到7 d时的80%以上,继续增加浸泡时间对强度提升效果有限;而灌注法在固化4轮内试样强度持续增长,可通过进一步增加固化轮数来提高试样强度。随着处理轮次的增加,灌注法对试样强度的提升优于浸泡法。

3)浸泡1 d及灌注1轮时,以乳酸钙为钙源的试样生成的碳酸钙含量多于氯化钙和乙酸钙,但由于乳酸钙渗透能力较弱,随着固化时间的增加,试样碳酸钙增量逐渐减小。与浸泡法相比,灌注法可有效改善乳酸钙渗流不畅的现象,对其固化效果的提升显著高于氯化钙和乙酸钙。

参考文献

- [1] 李静, 马义娟, 苏志珠, 等. 六种不同前处理方法对陕北砂黄土粒度测量的影响[J]. 地球科学前沿, 2021, 11(3): 279-289.
Li J, Ma Y J, Su Z Z, et al. Influence of six different pretreatment methods on grain size measurement of sandy loess in northern Shaanxi province[J]. Advances in Geosciences, 2021, 11(3): 279-289. (in Chinese)
- [2] 宋世鑫, 岳英民, 黄锋. 陕北砂黄土地区滑塌变形特征及形成机制[J]. 电力勘测设计, 2022, 34(10): 81-86.
Song S X, Yue Y M, Huang F. Deformation characteristics and formation mechanism of sliding collapse in sandy loess area of northern Shaanxi[J]. Electric Power Survey & Design, 2022, 34(10): 81-86. (in Chinese)
- [3] Lin G C, Liu W, Zhao J X, et al. Experimental investigation into effects of lignin on sandy loess[J]. Soils and Foundations, 2023, 63(5): 101359.
- [4] 刘汉龙, 赵常, 肖杨. 微生物矿化反应原理、沉积与破坏机制及理论: 研究进展与挑战[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(7): 1347-1358.
Liu H L, Zhao C, Xiao Y. Reaction principles, deposition and failure mechanisms and theories of biomineralization: progress and challenges[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(7): 1347-1358. (in Chinese)
- [5] 刘汉龙, 张宇, 郭伟, 等. 微生物加固钙质砂动孔压模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(4): 790-801.
Liu H L, Zhang Y, Guo W, et al. A prediction model of dynamic pore water pressure for MICP-treated calcareous sand[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(4): 790-801. (in Chinese)
- [6] Qu J, Li G, Ma B, et al. Experimental study on the wind erosion resistance of aeolian sand solidified by microbially induced calcite precipitation (MICP) [J]. Materials, 2024, 17(6): 1270.
- [7] 程瑶佳, 唐朝生, 泮晓华, 等. 微生物矿化作用(MICP)-铺砂联合提高黄土抗侵蚀性试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2022, 42(5): 1010-1018.
Cheng Y J, Tang C S, Pan X H, et al. Experimental study on erosion resistance improvement in loess through coupled microbial mineralization(MICP)-sand paving[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(5): 1010-1018. (in Chinese)
- [8] 赵志峰, 刘德民. 采用MICP加固不同掺砂比例粉土的试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2023, 53(2): 270-277.
Zhao Z F, Liu D M. Experimental study on MICP reinforcement of silt with different proportions of sand[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2023, 53(2): 270-277. (in Chinese)
- [9] 马国梁, 何想, 路桦铭, 等. 高岭土微粒固载成核微生

- 物固化粗砂强度[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(2): 290-299.
- Ma G L, He X, Lu H M, et al. Strength of biocemented coarse sand with Kaolin micro-particle improved nucleation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(2): 290-299. (in Chinese)
- [10] Zhang Y, Guo H X, Cheng X H. Role of calcium sources in the strength and microstructure of microbial mortar[J]. Construction and Building Materials, 2015, 77: 160-167.
- [11] Achal V, Pan X L. Influence of calcium sources on microbially induced calcium carbonate precipitation by *Bacillus* sp. CR2[J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2014, 173(1): 307-317.
- [12] 梁仕华, 房采杏, 牛九格, 等. 钙源对微生物固化花岗岩残积土效果影响的研究[J]. 工业建筑, 2019, 49(7): 102-107.
- Liang S H, Fang C X, Niu J G, et al. Research on effect of microbial induced calcite precipitation adopting different calcium sources on cemented granite residual soil [J]. Industrial Construction, 2019, 49(7): 102-107. (in Chinese)
- [13] 梁仕华, 牛九格, 房采杏, 等. 营养液钙源对微生物固化砂土效果影响的试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2018, 38(5): 781-786.
- Liang S H, Niu J G, Fang C X, et al. Experimental study on the effect of nutrient solution calcium sources on bio-cemented sand[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2018, 38(5): 781-786. (in Chinese)
- [14] 王玮. 不同钙源对微生物胶结加固粉土的影响研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2022.
- Wang W. Study on the influence of different calcium sources on the reinforcement of silt by microbial bonding [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2022. (in Chinese)
- [15] 张锦程, 李俊, 肖鹏, 等. MICP加固砂土方法对比研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2023, 45(6): 151-157.
- Zhang J C, Li J, Xiao P, et al. Comparative study on MICP-treatment schemes for sands[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2023, 45(6): 151-157. (in Chinese)
- [16] 周杨, 张家铭, 朱纪康, 等. 基于原生微生物 MICP 的土体加固试验研究[J]. 长江科学院院报, 2022, 39(5): 132-139.
- Zhou Y, Zhang J M, Zhu J K, et al. Experimental study on soil reinforcement by native microbial induced calcite precipitation[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2022, 39(5): 132-139. (in Chinese)
- [17] Wen K, Li Y, Amini F, et al. Impact of bacteria and urease concentration on precipitation kinetics and crystal morphology of calcium carbonate[J]. Acta Geotechnica, 2020, 15(12): 17-27.
- [18] Zhao Q, Li L, Li C, et al. A full contact flexible mold for preparing samples based on microbial-induced calcite precipitation technology[J]. Geotechnical Testing Journal, 2014, 37(5): 917-921.
- [19] Hoang T, Alleman J, Cetin B, et al. Sand and silty-sand soil stabilization using bacterial enzyme-induced calcite precipitation (BEICP)[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2018, 56(6): 808-822.
- [20] Yasuhara H, Neupane D, Hayashi K, et al. Experiments and predictions of physical properties of sand cemented by enzymatically-induced carbonate precipitation [J]. Soils and Foundations, 2012, 52(3): 539-549.
- [21] An R, Gao H D, Zhang X W, et al. Mechanical behaviour and microstructure of granite residual biocemented soil by microbially induced calcite precipitation with different cementation-solution concentrations[J]. Environmental Earth Sciences, 2023, 83(1): 31.
- [22] 程晓辉, 麻强, 杨钻, 等. 微生物灌浆加固液化砂土地基的动力反应研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(8): 1486-1495.
- Cheng X H, Ma Q, Yang Z, et al. Dynamic response of liquefiable sand foundation improved by bio-grouting[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(8): 1486-1495. (in Chinese)
- [23] GB/T 50123—2019 土工试验方法标准 [S]. GB/T 50123—2019 Standard for geotechnical testing method[S].(in Chinese)
- [24] Mortensen B M, Haber M J, Dejong J T, et al. Effects of environmental factors on microbial induced calcium carbonate precipitation[J]. Journal of Applied Microbiology, 2011, 111(2): 338-349.
- [25] 斯日古楞, 李驰, 周团结. 基于 MICP 技术的生物岩土材料强度性能及碳酸钙结晶过程优化[J]. 应用基础与工程科学学报, 2021, 29(6): 1403-1417.
- Bai S, Li C, Zhou T J. Study on strength properties of bio-geomaterial and optimization of crystallization process based on MICP technology[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2021, 29(6): 1403-1417. (in Chinese)
- [26] 田志锋, 唐小微, 修志龙, 等. 不同形式生物液加固砂土试验及机理分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52(11): 120-126.
- Tian Z F, Tang X W, Xiu Z L, et al. Experimental study and mechanism analysis on sand reinforcement with different compositions of biological solution[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2020, 52(11): 120-126. (in Chinese)
- [27] Zhou Y J, Chen Y L. Experimental study on the aeolian

- sand solidification via MICP technique[J]. *Geofluids*, 2022, 2022(1): 4858395.
- [28] Lv C, Tang C S, Zhang J Z, et al. Effects of calcium sources and magnesium ions on the mechanical behavior of MICP-treated calcareous sand: experimental evidence and precipitated crystal insights[J]. *Acta Geotechnica*, 2022, 18(5): 2703-2717.
- [29] Zeitouny J, Lieske W, Alimardani Lavasan A A, et al. Impact of new combined treatment method on the mechanical properties and microstructure of MICP-improved sand[J]. *Geotechnics*, 2023, 3(3): 661-685.
- [30] Tian Z F, Tang X W, Xiu Z L, et al. The spatial distribution of microbially induced carbonate precipitation in sand column with different grouting strategies[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2023, 35(2): 04022437.
- [31] 沈泰宇, 汪时机, 薛乐, 等. 微生物沉积碳酸钙固化砂质黏性紫色土试验研究[J]. *岩土力学*, 2019, 40(8): 3115-3124.
- Shen T Y, Wang S J, Xue L, et al. An experimental study of sandy clayey purple soil enhanced through microbial-induced calcite precipitation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(8): 3115-3124. (in Chinese)
- [32] 明道贵, 邱明喜, 殷立静, 等. 钙源对微生物固化风积沙效果影响的试验研究[J]. *人民黄河*, 2020, 42(4): 85-88, 111.
- Ming D G, Qiu M X, Yin L J, et al. Experimental study on effect of calcium source on bio-cementation of aeolian sand[J]. *Yellow River*, 2020, 42(4): 85-88, 111. (in Chinese)
- [33] 徐溪晨, 郭红仙, 程晓辉, 等. 钙源对微生物矿化胶结砂土材料均匀性的影响[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2024, 46(5): 57-63.
- Xu X C, Guo H X, Cheng X H, et al. Effect of calcium sources on uniformity of bio-cemented sand materials[J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2024, 46(5): 57-63. (in Chinese)
- [34] Wang R, Li H W, Chen Z C, et al. Strength and mechanism of granite residual soil strengthened by microbial-induced calcite precipitation technology[J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(15): 8863.
- [35] 郑俊杰, 吴超传, 宋杨, 等. MICP胶结钙质砂的强度试验及强度离散性研究[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2020, 41(2): 250-256.
- Zheng J J, Wu C C, Song Y, et al. Study of the strength test and strength dispersion of MICP-treated calcareous sand[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2020, 41(2): 250-256. (in Chinese)
- [36] 钱春香, 王安辉, 王欣. 微生物灌浆加固土体研究进展[J]. *岩土力学*, 2015, 36(6): 1537-1548.
- Qian C X, Wang A H, Wang X. Advances of soil improvement with bio-grouting[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(6): 1537-1548. (in Chinese)
- [37] Lian J J, Xu H Y, He X Q, et al. Biogrouting of hydraulic fill fine sands for reclamation projects[J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2018, 37(2): 212-222.
- [38] 彭劼, 何想, 刘志明, 等. 低温条件下微生物诱导碳酸钙沉积加固土体的试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2016, 38(10): 1769-1774.
- Peng J, He X, Liu Z M, et al. Experimental research on influence of low temperature on MICP-treated soil[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(10): 1769-1774. (in Chinese)
- [39] Liu X J, Fan J Y, Yu J, et al. Solidification of loess using microbial induced carbonate precipitation[J]. *Journal of Mountain Science*, 2021, 18(1): 265-274.

(编辑 朱备)