

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2025.028



开放科学(资源服务)标识码OSID:



硅酸钠增强微生物注浆加固效果的试验研究

商志阳¹, 彭劼¹, 卫仁杰¹, 李亮亮¹, 蒋钊¹, 戴迪²

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 南京 210098; 2. 盐城工学院土木工程学院, 江苏 盐城 224051)

摘要:微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)技术在改良岩土体力学性质方面具有广泛的应用价值以及潜力,但目前该方法仍存在加固效率低、加固周期长等缺陷。为了提高MICP的加固效率并缩短加固周期,在常规MICP基础上,向菌液中添加适量硅酸钠,开展MICP溶液试验及砂柱试验,并进行宏观和微观检测试验,研究硅酸钠对微生物固砂的增强效果与机理。结果表明:添加适量硅酸钠后,细菌活性提高约14%,砂柱内碳酸钙生成量提高约7%,MICP加固效率与试样均匀性得到增强;砂柱加固2次后,试样即可成型,加固10次后试样抗压强度约5.9 MPa,相较于对照组强度提高约7倍以上。微观检测试验表明,添加硅酸钠后,环境中生成的水化硅酸钙凝胶能起到填充砂土孔隙与胶结砂颗粒的作用,进而提高试样强度与加固效率。

关键词:微生物诱导碳酸钙沉淀;硅酸钠;注浆加固;力学性能;微观机理

中图分类号: TU411.3

文献标志码: A

文章编号: 2096-6717(XXXX)XX-0001-11

Experimental study on the effect of sodium silicate enhanced microbial grouting reinforcement

SHANG Zhiyang¹, PENG Jie¹, WEI Renjie¹, LI Liangliang¹, JIANG Zhao¹, DAI Di²

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, P. R. China; 2. College of Civil Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224051, Jiangsu, P. R. China)

Abstract: Microbially induced calcium carbonate precipitation (MICP) technology has broad application value and potential in improving the mechanical properties of rock and soil. However, this method still has defects, such as low efficiency and long reinforcement periods. An appropriate amount of sodium silicate was added to the bacterial solution to enhance the efficiency of MICP reinforcement and shorten the reinforcement period based on conventional MICP. The solution tests and sand column tests were carried out, as well as the macro and micro detection tests. The enhancement effect and mechanism of sodium silicate on microbial sand fixation were studied. The results show that the bacterial activity increased by about 14 % and the amount of calcium

收稿日期: 2024-11-13

基金项目: 国家自然科学基金(51578214); 江苏省交通运输厅转化项目(2021QD07)

作者简介: 商志阳(1998-), 男, 博士, 主要从事软土地基处理以及微生物固化研究, E-mail: shangzy1206@163.com。

彭劼(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: peng-jie@hhu.edu.cn。

Received: 2024-11-13

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 51578214); Transformation Program of Scientific and Technological Achievements of Jiangsu Province, China (No. 2021QD07)

Author brief: SHANG Zhiyang (1998-), PhD, main research interest: soft soil foundation treatment and microbial solidification, E-mail: shangzy1206@163.com.

PENG Jie (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: peng-jie@hhu.edu.cn.

carbonate in the sand column increased by about 7 % after adding appropriate amount of sodium silicate, and the MICP reinforcement efficiency and sample uniformity were enhanced. After 2 times of sand column reinforcement, the sample can be formed. After 10 times of reinforcement, the compressive strength of the sample is about 5.9 MPa, which is about seven times higher than that of the control group. Microscopic detection tests show that after adding sodium silicate, the hydrated calcium silicate gel generated in the environment can play a role in filling sand pores and cemented sand particles, thereby improving the strength and reinforcement efficiency of the sample. This method can provide theoretical guidance for popularising and applying microbial sand fixation.

Keywords: microbial induced carbonate precipitation (MICP); sodium silicate; grouting reinforcement; mechanical properties; microscopic mechanism

随着城市化进程加快,土地资源短缺这一问题越发突出,越来越多的基础设施需要建立在土质不良的土地上,传统的解决方法一般是利用物理或化学方法进行加固处理,以期满足工程建设需求。但是这些方法往往伴随着施工成本较高、施工周期长以及对环境影响大等问题。为解决上述问题,有学者提出使用微生物诱导碳酸钙沉淀(简称MICP)技术对土体进行改良,该方法具有经济、环保、高效等优点^[1-3],可以利用自然界某些特定的微生物反应过程生产矿物结晶,填充岩土体孔隙,进而改善其力学性能^[4-5]。学者们已经开展了MICP在砂土加固^[6-7]、防渗堵漏^[8-11]以及地基加固^[12-13]等方面的相关研究。在利用MICP加固砂土时,学者们分别以砂颗粒粒径^[14]、营养盐种类^[15]以及浓度^[16]作为变量,对砂土进行了MICP加固试验,综合对比发现,当砂颗粒粒径较小,同时采用适宜浓度的硝酸钙时加固效果最好,加固9次后砂土强度约为2.8 MPa^[15]。与此同时,MICP加固松散砂颗粒时,砂颗粒中大部分孔隙会被方解石所填充,使砂土地基强度提高、渗透系数大幅度降低,进而实现对砂土地基的防渗和加固。如Chu等^[1]利用MICP技术处理砂土,使得砂土表面形成一定厚度的胶结层,渗透系数下降至少两个数量级,并利用该方法建立了水池模型。刘汉龙等^[17]利用微生物对南海钙质砂地基进行加固,发现经MICP加固后钙质砂地基抗液化能力显著提高,并以此建立了钙质砂动孔压模型。虽然研究表明MICP技术在砂土加固和地基处理等方面具有巨大潜力,但若将其应用于实际工程中,仍面临着许多挑战,其中较为重要的就是MICP技术处理效率较低,难以在短时间内获得较好的效果^[18]。为解决此类问题,学者们对微生物加固效果进行改良,其中研究较为广泛的是向MICP反应中引入不同种类的外加剂。熊雨等^[19]将少量火山灰与砂土混合后,再进行MICP加固处理,发现火山灰能够显著提高微生物加固过程中的固菌率、胶结物产量和砂柱强

度。Wei等^[20]将铝离子絮凝剂引入MICP反应中,发现加固3次试样即可成型,大幅度缩短了加固周期。Wang等^[21]利用海藻酸钠和MICP技术对珊瑚砂进行了加固,研究表明海藻酸钠的添加可以提高试样的无侧限抗压强度。现有研究表明,大部分外加剂对于MICP固砂效果的提高幅度大概在30%~300%之间^[19, 22-25],加固后的强度往往在3 MPa以内,要获得更高的强度,往往需要多次灌注菌液和外加剂,导致成本增大,因此,需要寻找一种廉价、绿色、高效的外加剂,实现对MICP技术的改良。

硅酸钠又名泡花碱,是一种水溶性硅酸盐,水溶液呈碱性,由于其粘结力强、价格低廉、对环境污染小、无毒无害等优点^[26-27],常被用作碱性激发剂与化学注浆材料^[28-30]。研究发现^[31-33],在硅酸钠溶液的碱激发作用下,活性SiO₂发生水化并与环境中钙离子发生反应,产生具有胶凝性能的水化硅酸钙,从而可以起到加固土体的作用。硅酸钠对环境友好、粘结能力强,可以有效吸附材料,具有胶结作用。同时硅酸钠水溶液呈碱性,在MICP技术中,细菌的抗碱能力以及钙离子充足的环境,更加有利于碳酸钙的析出,因此,利用硅酸钠对MICP加固效果进行改良在理论上具有可行性。

笔者将硅酸钠作为外加剂应用于MICP加固砂土中,通过开展MICP水溶液试验、砂柱试验,探究硅酸钠对细菌活性、碳酸钙生成量以及砂柱力学特性的影响,从宏观力学角度分析硅酸钠对微生物固砂的增强效果;同时采用XRD和SEM电镜扫描从微观角度分析硅酸钠对MICP加固效果的增强机制。

1 试验材料

1.1 细菌及胶结液

试验所用细菌为巴氏芽孢杆菌(ATCC11859),该菌能通过自身代谢作用产生的大量脲酶分解尿素,为碳酸钙的生成提供碱性环境与CO₃²⁻离子,从

而实现微生物矿化作用。采用液体培养基对细菌进行扩大培养,液体培养基主要成分为:20 g/L 酵母浸粉、10 g/L NH_4Cl ,并调节溶液 pH 值至 8.5 左右。培养条件为:按体积比 1:100 的比例接种,并放置于振荡速度为 120 r/min、温度 30 ℃ 的恒温振荡培养箱中培育 12 h,培养完成后收集微生物进行测试,以便后续使用,试验所用细菌培养后的平均脲酶活性为 $(7.5\pm0.5)\text{mmol/L urea hydrolysed}\cdot\text{min}^{-1}$, $\text{OD}_{600}=1.5\pm0.1$ 。

胶结液为 CaCl_2 和尿素按 1:1 的摩尔比配制,其浓度均为 1 mol/L,胶结液均为以上浓度。

1.2 试验用砂

试验用砂均为福建标准砂,其主要成分为 SiO_2 ,粒径范围为 0.25~2 mm,其颗粒分布曲线如图 1 所示,相对密实度为 0.8,不均匀系数为 2.04, $D_{50}=0.60$,最大孔隙率为 0.5,标准砂土粒比重约为 $G_s=2.71$,为级配不良砂。

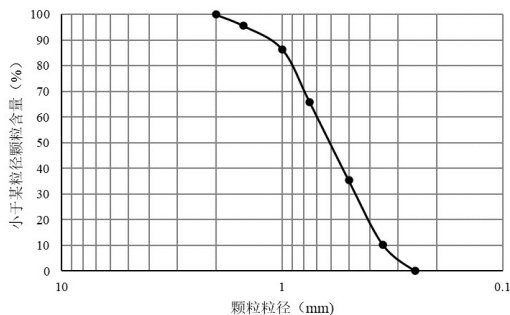


图 1 土颗粒级配曲线

Fig.1 Soil particle gradation curve

1.3 外加剂

试验所用外加剂为 $\text{Na}_2\text{SiO}_3\cdot5\text{H}_2\text{O}$,采用化学分析纯,是一种无毒、无味、无公害的白色粉末或结晶颗粒,易溶于水,水溶液呈碱性^[28]。已有研究表明,硅酸钠是一种无毒无害材料,常被用作化学灌浆材料加固土体^[34-35]。

2 试验方法

2.1 水溶液试验

为探究硅酸钠对微生物矿化的影响,在烧杯中进行水溶液试验。首先,进行细菌活性测定,将不同含量的硅酸钠加入到菌液中,探究硅酸钠的添加对细菌活性的影响。随后进行水溶液试验,在对照组 A0 中,直接将菌液加入到 CaCl_2 和尿素的混合溶液中;在试验组 A1~A5 中,分别在菌液中配制不同浓度的硅酸钠,再将其加入到胶结液中。前期试验结果表明,硅酸钠浓度高于 0.5% 时,会使砂柱初次注浆时便发生堵塞,影响注浆效果,因此设定硅酸

钠浓度为 0%~0.5%,共 6 个梯度。具体浓度和试验方案如表 1 所示。固定菌液与胶结液体积之比为 1:10。

表 1 水溶液试验分组
Table 1 Aqueous solution test groupings

试验组别	硅酸钠添加量/%	胶结液组成	菌胶比 (V/V)
Ax	0、0.1、0.2、0.3、 0.4、0.5	1 mol/L 尿素+ CaCl_2	1:10

注:硅酸钠添加量为细菌菌液质量百分比,例如 A1 组硅酸钠添加量细菌菌液质量的 0.1%。

在每组试验中,先配置 10 mL 菌液与不同硅酸钠添加量的混合液,然后将其加入到 100 mL 胶结液中,反应进行 12 h,其间测定溶液 pH,反应结束后用抽滤装置获得生成物并烘干,测定生成物质量。试验中每组均进行 3 个平行试验,取其平均值作为试验结果取值。

2.2 砂柱试验

试验开始前,将标准砂用去离子水洗净并烘干,然后将其均匀地灌入底部直径为 5 cm、高度为 12 cm 的圆筒形模具中。具体试验过程如下:先向试样中注入约 1 倍孔隙体积的固定液(试验中约为 80 mL),固定液主要成分为 0.05 mol/L 的 CaCl_2 溶液,相关研究表明,先注入固定液能有效提高细菌吸附量^[36]。随后注入 80 mL 菌液与不同硅酸钠添加量的混合溶液,在恒温 $((25\pm2)^\circ\text{C})$ 条件下静置 6 h,之后多次注入胶结液,胶结液每隔 12 h 注入一次,每次注入 80 mL。试验过程中,为保证液体在砂柱中有充足的接触时间,灌注速度控制在 6 mL/min。为对比分析硅酸钠对砂柱加固的影响,设计用质量浓度为 0.5% 的硅酸钠溶液代替菌液与硅酸钠的混合溶液,对砂柱进行加固试验。具体试验方案以及试验装置如表 2 与图 2 所示。

表 2 砂柱试验方案
Table 2 Sand column test program

试验分 组	混合溶液组成	硅酸钠添加量/%	加固轮 次
M0	菌液	0	10
MX	菌液+ Na_2SiO_3	0.1、0.2、0.3、0.4、0.5	10
S	Na_2SiO_3	0.5	10

注:其中 MX 组中 X 代表硅酸钠添加量,如 M1 代表硅酸钠添加量为菌液质量的 0.1%。

在砂柱试验中,固定液与混合溶液均只灌注 1 次,胶结液根据表 2 方案进行灌注,探究不同硅酸钠添加量条件下砂柱的无侧限抗压强度、碳酸钙生成量以及砂柱均匀性的变化情况,并对砂柱强度表现

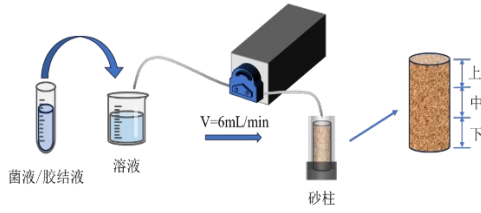


图2 砂柱试验装置图

Fig.2 Diagram of sand column test setup

最好的试验组进行不同轮次的加固试验,以探究加固次数对砂柱的影响。灌浆结束后将加固好的砂柱取出,并放置于去离子水中浸泡24 h,去除试样中的可溶性物质,随后将其放置于恒温烘箱($65^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$)中烘干48 h,再进行后续的检测。

2.3 相关检测试验

1) 无侧限抗压强度试验。将烘干后的试样冷却至室温,再对试样上表面打磨平整光滑,制成直径5 cm,高为10 cm的砂柱,避免受压过程中偏应力对试样强度造成影响。然后采用南京泰克奥科技有限公司生产的全自动无侧限压力仪进行无侧限抗压强度试验,荷载精度为 $\pm 0.5\%$,加载板速度为1 mm/min。

2) 碳酸钙含量测试。根据相关文献^[36],采用称重法测定碳酸钙生成量。将浸泡烘干后的试样进行称重记为 m_1 ,试验前试样质量为 m_0 ,则生成碳酸钙质量为 m_1 与 m_0 的差值。试样碳酸钙生成量按式(1)计算。

$$K = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: K 为碳酸钙生成量。

3) 均匀性测试。将烘干的砂柱试样,按照图2分为均匀的上中下3部分,分别测试每一部分中生成的碳酸钙含量,其具体操作参照Wei等^[36]做法。

4) XRD与SEM试验:XRD试验采用布鲁克D8 advance型号仪器,扫描角度为 $5^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 、速率为 $8^{\circ}/\text{min}$,采用衍射方式进行物相扫描。将SEM试样进行抽真空处理并喷金20 s,然后放置于场发射扫描电子显微镜内进行扫描,以获取试样微观信息。

3 试验结果与分析

3.1 水溶液试验

3.1.1 细菌活性测试

细菌活性是影响MICP加固效果的重要指标之一^[37],为了深入探究硅酸钠对MICP加固效果的影响,首先对细菌活性进行定量分析。通常细菌的活性通过水溶液中脲酶分解尿素的速度来进行表征,试验采用便携式电导率仪进行测量,将细菌摇匀后吸取2 mL细菌,并与18 mL尿素(浓度为1.1 mol/L)

一同置于试管中摇匀,测定反应5 min内试管中电导率读数的变化,考虑到溶液电导率变化量1 mS/cm对应溶液中脲酶水解量的11 mmol/L,同时考虑菌液的稀释倍数(10倍),进而按式(2)进行细菌活性计算,并将试验结果绘制于图3中。

$$A = \Delta B \times 11 \times 10 \quad (2)$$

式中: A 为脲酶活性,mmol/(L·min); ΔB 为平均每分钟电导率变化量,mS/(cm·min)。

如图3所示,在硅酸钠的添加量介于0.1%~0.4%范围内时,细菌活性随着硅酸钠浓度的增加而显著提升。当硅酸钠的添加量达到0.4%时,细菌活性达到峰值,约为9.02 mmol/(L·min),较未添加硅酸钠时的初始水平提高了约14%。然而,当硅酸钠的添加量超出0.4%,细菌活性开始下降,但仍高于初始水平。细菌活性的提升表明其产生脲酶的能力增强,从而促进了尿素向铵根离子和碳酸根离子的转化,进而提高了碳酸钙的生成效率。这一现象主要归因于硅酸钠对溶液pH值的调节作用。硅酸钠遇水会发生水解反应,生成OH⁻离子,提高了细菌溶液的pH值,已有研究表明^[38],在pH值在8~9之间,pH值的增加有助于细菌活性的增强;当硅酸钠添加量为0.5%时,环境pH值大于9,导致细菌活性在高碱性环境中受到了抑制,细菌活性下降。

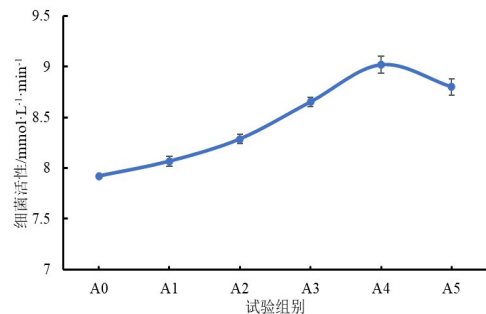


图3 细菌活性变化图

Fig. 3 Plot of changes in bacterial activity

3.1.2 水溶液pH值测定

影响MICP加固效果的另一指标是环境中的pH值^[39],pH值的波动对MICP反应过程及其结果具有显著影响。图4展示了水溶液试验过程中pH值的动态变化。在对照组A0中,随着MICP反应的进行,微生物脲酶催化尿素水解,生成碳酸根离子和铵根离子,导致溶液pH值上升。随后,钙离子与碳酸根离子结合形成碳酸钙沉淀,这一过程消耗了溶液中的碳酸根离子,导致溶液pH值下降并最终稳定在7左右。在添加硅酸钠的试验组中,硅酸钠在溶液中水解生成OH⁻离子,引起溶液pH值上升。水解反应的具体化学方程式如下所示。随着硅酸钠添加量的增加,水解反应加剧,溶液中初始pH值

逐渐增大。

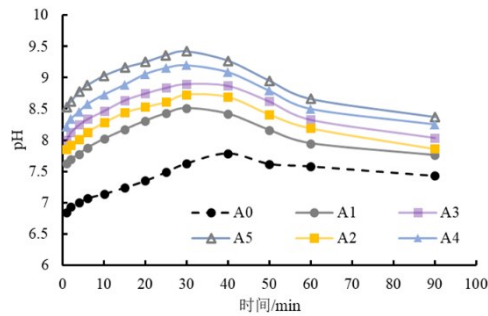


图4 水溶液 pH 变化情况

Fig. 4 Varying the pH of an aqueous solution

随着反应的进行,硅酸根离子与钙离子结合形成水化硅酸钙,推动化学反应平衡向生成物方向移动,导致溶液 pH 值进一步上升。同时,脲酶催化尿素分解,进一步提高了体系的 pH 值。在高 pH 值环境下,碳酸钙沉淀更容易发生,导致碳酸根离子逐渐被消耗,溶液 pH 值开始下降。最终,溶液 pH 值稳定在 7.5~8.5 之间。

图 5 展示了不同实验方案下水溶液中碳酸钙的最终生成量。在 Ax 组中,碳酸钙生成量通过计算生成物总质量并减去初始添加的硅酸钠固体质量确定,生成物主要被认为是 MICP 反应生成的碳酸钙。如图 5 所示,随着硅酸钠添加量的增加,碳酸钙生成量逐渐上升,在硅酸钠添加量为 0.4% 时,碳酸钙的生成量达到最大值,约为 9.02 g。这一现象主要归因于 pH 值对细菌和脲酶活性的影响。根据先前细菌活性的测定结果,硅酸钠的添加提高了溶液 pH 值,从而增强了细菌活性。研究表明^[39],在环境 pH 值升高至 8~9 的范围内,脲酶活性显著增加,提高了钙离子利用率,进而增加了碳酸钙生成量。然而,在 A5 组中,环境 pH 值过高^[40],细菌活性受到抑制,脲酶生成能力下降,导致碳酸钙生成量减少,但仍高于对照组。此外,硅酸钠溶液的碱性环境对尿素水解具有催化作用^[41],促进了尿素向铵离子和碳酸根离子的转化。在钙离子充足的条件下,这不仅

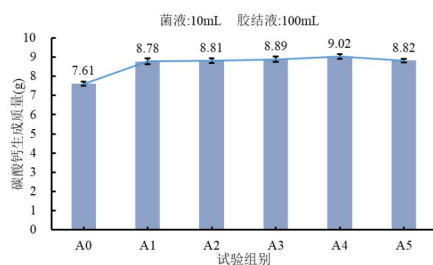


图5 水溶液中碳酸钙生成量

Fig. 5 Production of calcium carbonate in an aqueous solution

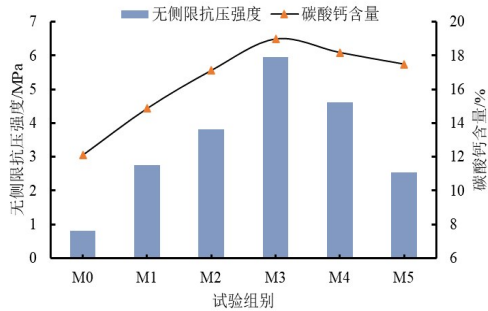
增加了碳酸钙的生成,还可能生成少量水化硅酸钙(C-S-H)^[42-43],这也是试验组生成物质量高于对照组的原因之一。

3.2 砂柱试验

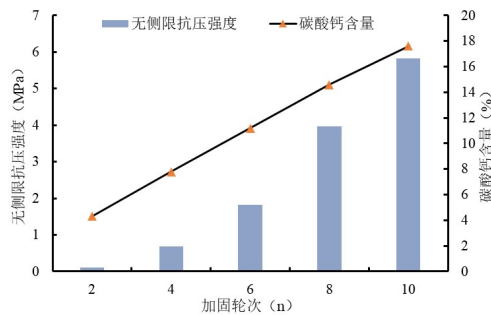
3.2.1 砂柱强度以及生成物

由于 S 组试样(仅添加 0.5% 硅酸钠溶液与胶结液,不含菌液)经 10 次加固处理后未形成完整砂柱结构,表明单纯依赖硅酸钠溶液无法实现砂体整体加固。其他试验组的无侧限抗压强度与碳酸钙含量测试结果如图 6 所示。图 6(a)显示,砂柱中碳酸钙含量随硅酸钠添加量的增加而上升。当硅酸钠添加量达到 0.3% 时,砂柱内的碳酸钙含量达到峰值,约占初始砂柱质量的 19%,较对照组 M0 提高约 7%。砂柱的无侧限抗压强度呈现出相似的趋势,M0 组在经过 10 轮加固后强度约为 0.8 MPa。而添加硅酸钠的试样强度随浓度增加逐渐升高,其中 M3 组(硅酸钠添加量 0.3%)强度达 5.9 MPa,约为 M0 组的 7 倍。随着硅酸钠添加量的增加,试样的强度虽有所下降,但仍明显高于对照组试样。这一现象主要归因于硅酸钠对环境的双重作用:首先,硅酸钠的引入提高了环境的 pH 值,增强细菌活性,促进了尿素更高效地水解为碳酸根离子。碳酸根离子与胶结液中的钙离子反应生成更多的碳酸钙,填充砂土孔隙,从而提升试样强度。其次,硅酸钠水解生成的硅酸根离子在碱性条件下与钙离子反应生成水化硅酸钙 C-S-H^[35, 42],C-S-H 是普通硅酸盐水泥的主要水化产物,对水泥基材料的强度和耐久性有着显著影响。一般认为 C-S-H 的分子结构与一些矿物的晶体结构非常相似,如托勃莫来石等^[44]。这些胶体的特点是具有明显的层状结构和孔隙结构,其分子硅氧链为由两个对位硅氧四面体和一个桥接硅氧四面体组成的 dreierketten 单元不断重复构成的长链结构,这些长链在空间中相互交联,可以形成一种的网状结构填充砂颗粒之间的孔隙,并将其胶结为一个整体,使得砂柱强度增大。然而,当硅酸钠的添加量超过 0.4% 时,砂柱的强度反而逐渐降低。这主要是因为砂柱内部 pH 值的显著增加促进了碳酸钙的快速生成,这些碳酸钙填充了砂柱上部的孔隙,导致砂柱在灌浆初期就出现了堵塞现象。如在硅酸钠添加量为 0.4% 和 0.5% 时,仅经过 5 次和 4 次灌浆后,就观察到了堵塞现象。这种堵塞可能会影响砂柱内部碳酸钙的分布,导致加固效果不均匀,从而降低了砂柱的整体强度。与 Wei 等^[20]的研究结果相似,他们在使用氯化铝作为 MICP 外加剂加固砂柱时,同样出现了堵塞现象,导致试样的整体强度下降。

根据所获得的结果, M3组试样展现出最佳的加固效果。因此, 选取 M3组以探讨不同加固轮次对试样强度和碳酸钙生成量的影响, 如图 6(b) 所示。



(a) 不同组试样无侧限抗压强度与碳酸钙含量



(b) 不同加固轮次下 M3 组试样强度和碳酸钙含量变化

图 6 砂柱的无侧限抗压强度与碳酸钙含量

Fig. 6 UCS and calcium carbonate content of sand column

图 6(b) 表明, M3 组试样在经过两轮加固处理后即可成型, 其强度达到约 110 kPa。根据室内试验结果, 试样注入细菌后, 间隔 6 h 进行胶结液的灌注, 胶结液灌注时间间隔为 12 h, 因此加固两次只需约 30 h, 灌注后进行 18 h 晾晒烘干, 即可形成一定强度。这意味着在实际工程中仅需 48 h 左右场地即可获得初期强度。与传统的微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)加固方法相比, 这一方法显著缩短了施工周期, 减少了资本投入。此外, M3 组在经过 6 轮加固后的强度约为 1.82 MPa, 是 M0 组经过十轮加固后强度的两倍以上, 同时材料消耗仅为 M0 组的 60%。表明在采用 MICP 技术加固砂土时, 适量添加硅酸钠能够显著缩短施工周期, 节约原材料使用, 并降低施工成本。

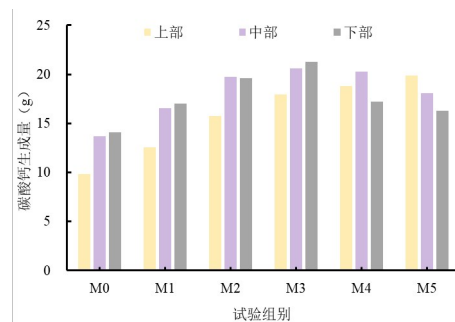
3.2.2 砂柱均匀性

为了验证硅酸钠添加对砂柱内碳酸钙分布的影响, 对砂柱进行了均匀性测试。将砂柱沿高度方向均匀划分为 3 个部分, 并测定了每个部分的碳酸钙生成量, 测试结果如图 7(a) 所示。图 7(a) 显示, 在硅酸钠添加量低于 0.3% 时, 砂柱内碳酸钙的分布呈现规律性, 即从上至下碳酸钙含量依次递增。

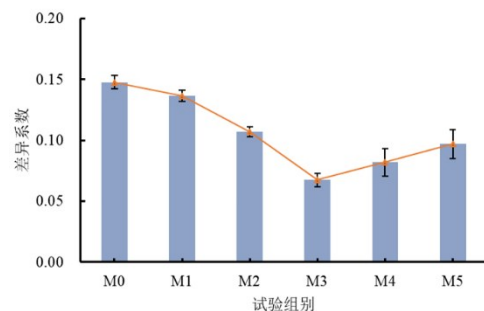
然而, 当硅酸钠的添加量增至 0.4% 和 0.5% 时, 砂柱内碳酸钙的分布模式发生了显著变化: 上部的碳酸钙生成量显著增加, 而下部的生成量则降至最低。这种分布变化的主要原因在于, 当硅酸钠添加量达到 0.4% 和 0.5% 时, 碳酸钙和 C-S-H 凝胶的形成速率加快, 导致砂柱上部迅速被新生的碳酸钙和 C-S-H 凝胶堵塞。由于渗流通道受阻, 胶结液难以继续向下渗透, 下部砂柱中的细菌因此无法获得充足的尿素和钙离子, 从而使得下部碳酸钙的生成量减少。

为了直观地展示砂柱内部生成物分布的均匀性, 将砂柱内部生成物分布的差异系数绘制于图 7(b)。差异系数是衡量砂柱内部生成物分布均匀性的指标, 差异系数越小, 表明砂柱内部生成物的分布越均匀^[36]。图 7(b) 显示, 当硅酸钠的添加量介于 0.1%~0.3% 之间时, 随着添加量的增加, 差异系数减小, 表明砂柱内部生成物的分布趋于均匀。然而, 当硅酸钠添加量超过 0.3% 时, 差异系数逐渐增大, 表明砂柱内部生成物的分布开始变得不均匀。结合图 7(a) 的观察结果可以发现砂柱生成物的质量在上部逐渐增多, 而在下部逐渐减少。这种不均匀的内部生成物分布导致砂柱的整体性降低, 从而在宏观上表现为砂柱的无侧限抗压强度下降。

为了与现有文献中关于外加剂改良 MICP 加固效果的研究进行比较, 收集了相关文献中的数据,



(a) 砂柱各部分生成物质量



(b) 差异系数

图 7 砂柱生成物分布图

Fig. 7 Distribution of sand column products

并将文献中加入外加剂前后 MICP 加固砂土的无侧限抗压强度数据汇总于表 3。通过比较可以发现，硅酸钠在增强 MICP 加固效果方面具有明显的优势。

表 3 不同外加剂的改良效果
Table 3 Improvement effect of different admixtures

文献来源	外加剂种类	外加剂掺量/g	处理周期/d	改良前强度/kPa	改良后强度/kPa	提高倍率
谢约翰等 ^[22]	聚丙烯纤维	0.3	7	850	1 550	1.8
朱文义等 ^[45]	木质素	12.4	20	803	1 054	1.3
徐望清等 ^[23]	脲酶抑制剂	0.56	14	1 370	2 710	2.0
熊雨等 ^[19]	火山灰	20	8	3 110	4940	1.6
张鹏等 ^[25]	碳纤维	2.67	7	660	1 420	2.2
本文	硅酸钠	0.24	5	810	5960	7.4

3.3 XRD 与 SEM

3.3.1 XRD 分析

将水溶液中 A3 组与 A0 组所得生成物进行 XRD 试验,分析物相组成,结果绘制于图 8 中。如图 8(a)所示,对照组 A0 中生成物的衍射峰主要是碳酸钙的特征峰,表明在未添加硅酸钠的情况下, MICP 反应主要生成碳酸钙。在添加硅酸钠后,如图 8(b)所示, XRD 衍射图谱在 28° 等位置出现了新的 C-S-H(水化硅酸钙)衍射峰,说明在 MICP 反应中引入硅酸钠能使硅酸钠与氯化钙在碱性条件下发生反应,生成水化硅酸钙(C-S-H)。同时,添加硅酸钠后,碳酸钙的峰强度也发生了明显变化,特别是在 26° 和 44° 处的峰强度均有所降低。这一变化表明硅酸钠或其生成的 C-S-H 可能影响了原本 MICP 反应生成的碳酸钙。可能的解释是 C-S-H 的多孔结构为碳酸钙的生成提供了额外的成核位点,导致碳酸钙和 C-S-H 团聚或交接在一起,这种团聚或交接现象可能降低了碳酸钙的结晶度,从而导致相应的峰强度降低。

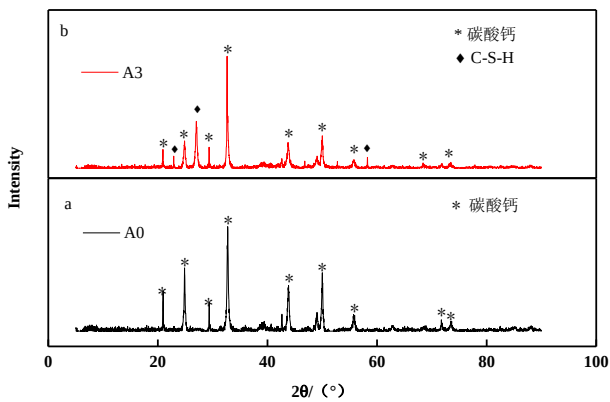


图 8 水溶液生成物 XRD 图
Fig8 XRD diagram of aqueous solution product

3.3.2 SEM 分析

为了分析硅酸钠的添加对 MICP 反应生成物产生的影响,通过扫描电子显微镜对水溶液试验所得生成物进行微观结构观察,将结果呈现于图 9 中。

由图 9 可以看出, A0 组生成物主要为以球霏石和方解石形态存在的碳酸钙。当添加 0.3% 的硅酸钠后, A3 组主要生成物仍为碳酸钙,但在所生成的碳酸钙上可以明显观察到有空间网状结构生成,根据 XRD 试验结果推测其可能是生成的水化硅酸钙附着在碳酸钙表面。

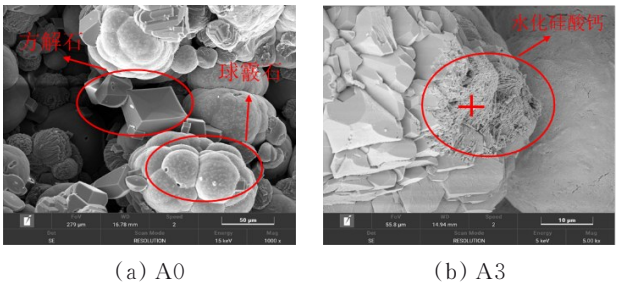


图 9 水溶液试验 SEM 图
Fig. 9 SEM image of aqueous solution test

图 10 为砂柱试验中试样的 SEM 图。图 10 表明,在 M0 组中,砂颗粒表面被以方解石形态存在的碳酸钙包裹,大量的碳酸钙在砂颗粒表面互相交联与嵌入,将砂颗粒紧紧地结合在一起。同时生成的碳酸钙部分填充了砂颗粒之间的孔隙,降低了试样的孔隙率,提高了砂柱的强度。在加入 0.3% 的硅酸钠后,砂柱中除了碳酸钙之外,还生成了部分无定形、多孔的层状结构物质,它可以进一步填充砂颗粒之间的孔隙,在砂颗粒之间起到桥接作用,将

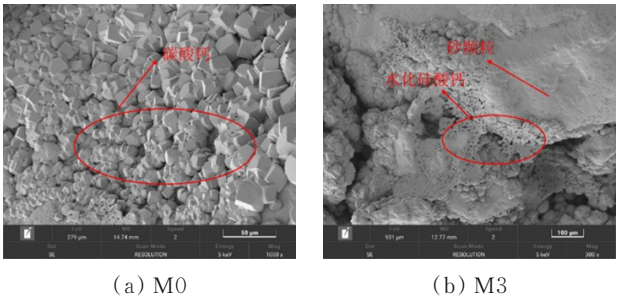


图 10 砂柱试验 SEM 图
Fig. 10 SEM image of sand column test

砂颗粒更加有效地连接起来,形成一个空间网状整体,宏观上表现为试样强度大幅度增长。

4 讨论

试验结果表明,硅酸钠对微生物固化砂土的力学性能有明显的增强效果,分析其内在机理主要为以下几个方面:

1) 硅酸钠促进生成更多的碳酸钙。一方面,根据图 3 与 Lai 等^[39]的研究可知,在一定范围内,pH 值升高会使生物碳酸钙质量增加,生成的生物碳酸钙能胶结砂颗粒,提高砂柱强度。另一方面,硅酸钠溶液的碱性环境会对尿素水解产生一定的催化作用^[41],导致生成更多的化学碳酸钙颗粒,化学生成的碳酸钙颗粒虽然不具有胶结作用,但是可以填充砂土孔隙,提高砂柱的密实度,这也是导致试验组生成物质量和砂柱强度均高于对照组的原因之一。

2) C-S-H 的胶结作用。在反应过程中,硅酸钠在溶液中发生水解反应,生成 NaOH 和 $\text{Si}(\text{OH})_4$,然后 $\text{Si}(\text{OH})_4$ 在溶液中会继续分解产生 $\text{SiO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$,在钙离子存在条件下,会生成水化硅酸钙,这一过程在 XRD 和 SEM 试验结果中得到了验证。同时在 SEM 中可以观察到砂颗粒之间的孔隙被碳酸钙与 C-S-H 凝胶所填充,C-S-H 凝胶在砂颗粒之间形成了一种空间网状结构,在填充孔隙的同时,也使得孔隙不易被压缩。不同砂颗粒之间被 C-S-H 所形成的“桥梁”连接到一起(如图 11 所示),由于 C-S-H 凝胶形成的胶结键属于强连接作用,当试样受到外来荷载时,胶结键可以承担较大部分荷载,所以这也使得添加硅酸钠后,砂柱试样强度较对照组有着明显提高。

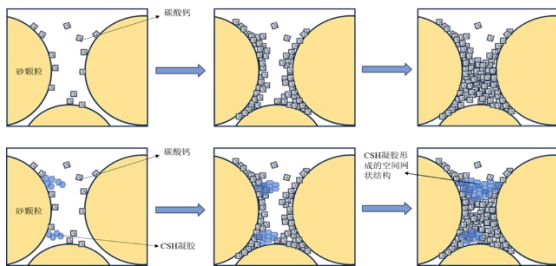


图 11 C-S-H 凝胶增强胶结原理图

Fig. 11 Schematic diagram of C-S-H gel enhanced cementation

3) C-S-H 凝胶可能通过界面成核作用促进碳酸钙结晶。研究表明^[46-47],C-S-H 凝胶比表面积较大,可以为水化产物提供额外的成核位点,降低成核势垒,促进水化产物的生成。Artioli 等^[48]通过试验证实,C-S-H 的非均匀相成核过程可产生二次成核位点,这与赵越等^[49]发现的 C-S-H 表面金属阳离子吸

附特性形成机制互补——其表面活性位点可通过离子交换和络合作用富集 Ca^{2+} 。值得注意的是,XRD 结果显示添加硅酸钠后碳酸钙部分特征峰强度降低,结合上述机理可推断:C-S-H 介导的异相成核导致碳酸钙晶体缺陷密度增加,进而降低整体结晶度。该过程可能涉及 C-S-H 对钙离子的选择性吸附及晶格匹配诱导的定向结晶。

5 结论

针对 MICP 改善砂土力学性能提出一种改良方法,即在菌液中加入适量的硅酸钠,通过水溶液试验、砂柱试验以及微观试验,探究了硅酸钠对 MICP 加固的增强效果与内在机理,得出以下主要结论:

1) 在水溶液试验中,硅酸钠添加量为菌液质量的 0.1%~0.4% 时,可以提高溶液的 pH 值,增强脲酶活性,进而增加溶液中碳酸钙的生成量,但是当硅酸钠添加量超过 0.4% 时,细菌代谢抑制,导致碳酸钙生成量减少。

2) 砂柱试验中,添加硅酸钠能显著提高 MICP 加固效率,在硅酸钠添加量为 0.3% 时,仅加固 2 次试样即可成型,10 次处理后砂柱无侧限抗压强度约为 5.9 MPa,较对照组提升 7 倍。同时硅酸钠的添加将会影响砂柱内部生成物的分布均匀性,添加 0.3% 硅酸钠时,砂柱均匀性最好,强度最高。

3) 硅酸钠对微生物加固砂的增强效应主要源于生物-化学-力学的耦合作用:硅酸钠的添加可以增强细菌脲酶活性,同时诱导生成的 C-S-H 凝胶,为碳酸钙的生成提供成核位点,使得碳酸钙生成量增多。砂柱中生成的 C-S-H 凝胶形成网状结构,提高了砂柱的胶结程度,导致砂土强度大幅提高,加固效果得到增强。

硅酸钠对 MICP 加固砂土的效果具有显著增强作用,在实际工程中,仅需通过添加少量的硅酸钠即可使得砂土地基快速成型,具有初步的强度,以便后续施工。由于该方法的效果目前仅在室内试验中证实,且加固效果受环境温度、砂土颗粒级配等影响较大,后续的研究应主要集中于该方法在不同施工场地、不同环境下的改良效果。

参考文献

- [1] CHU J, IVANOV V, STABNIKOV V, et al. Microbial method for construction of an aquaculture pond in sand [J]. Géotechnique, 2013, 63(10): 871-875.
- [2] LIU S Y, YU J, ZENG W L, et al. Repair effect of tabia cracks with microbially induced carbonate precipitation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and

- Engineering, 2020, 39(1): 191-204.
- [3] 邵光辉, 尤婷, 赵志峰, 等. 微生物注浆固化粉土的微观结构与作用机理[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2017, 41(2): 129-135.
- SHAO G H, YOU T, ZHAO Z F, et al. Microstructure and mechanism of microbial cementation silt treated by bio-grouting [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2017, 41 (2): 129-135. (in Chinese)
- [4] ZHAO C, TOUFIGH V, ZHANG J X, et al. Enhancing biomineralization process efficiency with trained bacterial strains: A technical perspective [J]. Biogeotechnics, 2023, 1(2): 100017.
- [5] LIU H L, CHU J, KAVAZANJIAN E. Biogeotechnics: A new frontier in geotechnical engineering for sustainability [J]. Biogeotechnics, 2023, 1: 100001.
- [6] 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)
- [7] 崔昊, 肖杨, 孙增春, 等. 微生物加固砂土弹塑性本构模型[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(3): 474-482.
- CUI H, XIAO Y, SUN Z C, et al. Elastoplastic constitutive model for biocemented sands [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(3): 474-482. (in Chinese)
- [8] GAO Y F, TANG X Y, CHU J, et al. Microbially induced calcite precipitation for seepage control in sandy soil [J]. Geomicrobiology Journal, 2019, 36(4): 366-375.
- [9] CUTHBERT M O, MCMILLAN L A, HANDLEY-SIDHU S, et al. A field and modeling study of fractured rock permeability reduction using microbially induced calcite precipitation [J]. Environmental Science & Technology, 2013, 47(23): 13637-13643.
- [10] 练继建, 吴昊潼, 闫玥, 等. 基于微生物诱导碳酸钙沉积的生物覆膜防渗研究[J]. 水利水电技术, 2019, 50 (8): 128-136.
- LIAN J J, WU H T, YAN Y, et al. Study on anti-seepage with microbially induced calcium carbonate precipitation (MICP) -based bio-membrane [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50(8): 128-136. (in Chinese)
- [11] 张宇, 何想, 路桦铭, 等. 微生物-膨润土联合矿化防渗模型试验研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(8): 2337-2349.
- ZHANG Y, HE X, LU H M, et al. Experimental study on sand anti-seepage by microorganism-bentonite combined mineralization [J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(8): 2337-2349. (in Chinese)
- [12] SANEIYAN S, NTARLAGIANNIS D, OHAN J, et al. Induced polarization as a monitoring tool for in situ microbial induced carbonate precipitation (MICP) processes [J]. Ecological Engineering, 2019, 127: 36-47.
- [13] VAN PAASSEN L A, GHOSE R, VAN DER LIN-DEN T J M, et al. Quantifying biomediated ground improvement by ureolysis: large-scale biogROUT experiment [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, 136(12): 1721-1728.
- [14] 崔明娟, 郑俊杰, 赖汉江. 颗粒粒径对微生物固化砂土强度影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(增刊 2): 397-402.
- CUI M J, ZHENG J J, LAI H J. Experimental study of effect of particle size on strength of bio-cemented sand [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(Sup 2): 397-402. (in Chinese)
- [15] 梁仕华, 牛九格, 房采杏, 等. 钙源对微生物沉积碳酸钙固化砂土的试验研究[J]. 工业建筑, 2018, 48(7): 10-15.
- LIANG S H, NIU J G, FANG C X, et al. Experimental research on the effect of calcium source on microbial deposits of calcium carbonate [J]. Industrial Construction, 2018, 48(7): 10-15. (in Chinese)
- [16] 王绪民, 郭伟, 余飞, 等. 营养盐浓度对胶结砂试样物理力学特性试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(增刊 2): 363-368, 374.
- WANG X M, GUO W, YU F, et al. Experimental study of effect of nutrient concentration on physico-mechanical properties of cemented sand [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(Sup 2): 363-368, 374. (in Chinese)
- [17] 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)
- [18] WANG Y Z, KONSTANTINOUC, TANG S K, et al. Applications of microbial-induced carbonate precipitation: A state-of-the-art review [J]. Biogeotechnics, 2023, 1(1): 100008.
- [19] 熊雨, 邓华锋, 李建林, 等. 火山灰增强微生物固化砂土效果的试验研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(12): 3403-3415.
- XIONG Y, DENG H F, LI J L, et al. Experimental study of MICP-treated sand enhanced by pozzolan [J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(12): 3403-3415. (in Chinese)
- [20] WEI R J, PENG J, LI L L, et al. Accelerated reinforcement of calcareous sand via biomineralization with aluminum ion flocculant [J]. Applied Biochemistry

- and Biotechnology, 2023, 195(12): 7197-7213.
- [21] WANG Z K, TAN H M, SUN Y F, et al. Bio-cementation of coral sand using microbial-induced calcite precipitation with sodium alginate [J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2024, 42(10): 1325-1336.
- [22] 谢约翰, 唐朝生, 尹黎阳, 等. 纤维加筋微生物固化砂土的力学特性[J]. *岩土工程学报*, 2019, 41(4): 675-682.
- XIE Y H, TANG C S, YIN L Y, et al. Mechanical behavior of microbial-induced calcite precipitation (MICP)-treated soil with fiber reinforcement [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, 41(4): 675-682. (in Chinese)
- [23] 徐望清, 郑俊杰, 崔明娟, 等. 引入脲酶抑制剂的微生物固化砂土试验研究[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2020, 48(10): 114-118.
- XU W Q, ZHENG J J, CUI M J, et al. Experimental study on microorganism solidifying sand with urease inhibitor [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2020, 48(10): 114-118. (in Chinese)
- [24] 张国城, 童华炜, 彭秋旺, 等. 镁的引入对微生物加固砂土试验的影响[J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(26): 10659-10664.
- ZHANG G C, TONG H W, PENG Q W, et al. The effect of magnesium on the experiment of microbial reinforcement of sand [J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(26): 10659-10664. (in Chinese)
- [25] 张鹏, 孙忠平, 陶志刚, 等. 碳纤维基EICP矿化砂土渗一力学特性试验研究[J]. *金属矿山*, 2023(5): 325-332.
- ZHANG P, SUN Z P, TAO Z G, et al. Experimental study on permeation-mechanical properties of carbon fiber based EICP mineralized sand soil [J]. *Metal Mine*, 2023(5): 325-332. (in Chinese)
- [26] 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, 727.
- LÜ Q F, SHEN B, WANG S X, 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, 727. (in Chinese)
- [27] 侯云芬, 王栋民, 李俏, 等. 水玻璃性能对粉煤灰基矿物聚合物的影响[J]. *硅酸盐学报*, 2008, 36(1): 61-64, 68.
- HOU Y F, WANG D M, LI Q, et al. Effect of water glass performance on fly ash-based geopolymers [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2008, 36(1): 61-64, 68. (in Chinese)
- [28] 贺文, 周兴旺, 徐润. 新型水玻璃化学注浆材料的试验研究[J]. *煤炭学报*, 2011, 36(11): 1812-1815.
- HE W, ZHOU X W, XU R. Experimental research on the new type of sodium silicate chemical grouting material [J]. *Journal of China Coal Society*, 2011, 36(11): 1812-1815. (in Chinese)
- [29] 孙亮, 苏迎春, 李珍, 等. 关于绿色灌浆技术和化学灌浆环保体系构建的思考[J]. *中国建筑防水*, 2016(20): 6-9.
- SUN L, SU Y C, LI Z, et al. Reflection on green grouting technology and construction of environmental protection system for chemical grouting [J]. *China Building Waterproofing*, 2016(20): 6-9. (in Chinese)
- [30] 王永辉, 陈佩圆, 张立恒, 等. MgO/硅酸钠复合对碱矿渣水化和力学特性的影响[J]. *建筑材料学报*, 2023, 26(2): 186-192.
- WANG Y H, CHEN P Y, ZHANG L H, et al. Effect of MgO/sodium silicate composite activator on hydration and mechanical properties of alkali-activated slag materials [J]. *Journal of Building Materials*, 2023, 26(2): 186-192. (in Chinese)
- [31] 乔飞, 余其俊, 赵三银, 等. 适应于碱激发碳酸盐矿-矿渣胶凝材料的缓凝剂研究[J]. *长江科学院院报*, 2007, 24(1): 36-39, 43.
- QIAO F, YU Q J, ZHAO S Y, et al. Research on retarder available for alkali activated carbonatite-slag cementitious material [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2007, 24(1): 36-39, 43. (in Chinese)
- [32] 杨光, 赵宇, 朱伶俐, 等. 碱激发偏高岭土地质聚合物的制备及抗压强度研究[J]. *硅酸盐通报*, 2022, 41(3): 894-902.
- YANG G, ZHAO Y, ZHU L L, et al. Preparation and compressive strength of geopolymers based on alkali activated metakaolin [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2022, 41(3): 894-902. (in Chinese)
- [33] 殷素红, 管海宇, 胡捷, 等. 碱激发粉煤灰-矿渣灌浆材料的流变性与流动性[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(8): 120-128, 135.
- YIN S H, GUAN H Y, HU J, et al. Rheological properties and fluidity of alkali-activated fly ash-slag grouting material [J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2019, 47(8): 120-128, 135. (in Chinese)
- [34] LI W T, WANG J H, CHEN Y, et al. Treating sulfate-bearing soil by using sodium silicate and NaOH-activated ground granulated blast-furnace slag [J]. *Acta Geotechnica*, 2024, 19(5): 3129-3138.
- [35] YANG Y Y, CUI Z D, LI X Q, et al. Development and materials characteristics of fly ash-slag-based grout for use in sulfate-rich environments [J]. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2016, 18(3): 949-956.
- [36] WEI R J, PENG J, HE J, et al. Effects of adding aluminum ion flocculant on MICP reinforcement of sand [J]. *Acta Geotechnica*, 2024, 19(6): 3505-3517.

- [37] 尹黎阳,唐朝生,谢约翰,等.微生物矿化作用改善岩土材料性能的影响因素[J].岩土力学,2019,40(7): 2525-2546.
YIN L Y, TANG C S, XIE Y H, et al. Factors affecting improvement in engineering properties of geomaterials by microbial-induced calcite precipitation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(7): 2525-2546. (in Chinese)
- [38] 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)
- [39] LAI H J, CUI M J, CHU J. Effect of pH on soil improvement using one-phase-low-pH MICP or EICP biocementation method [J]. Acta Geotechnica, 2023, 18 (6): 3259-3272.
- [40] 何稼,楚剑,刘汉龙,等.微生物岩土技术的研究进展[J].岩土工程学报,2016,38(4): 643-653.
HE J, CHU J, LIU H L, et al. Research advances in biogeotechnologies [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(4): 643-653. (in Chinese)
- [41] NASR-EL-DIN H A, TAYLOR K C. Evaluation of sodium silicate/urea gels used for water shut-off treatments [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2005, 48(3/4): 141-160.
- [42] XIAO Z Q, XU C Y, WU G D. The research and comparing test on calcium carbonate-acid water glass grouting material [J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 357/358/359/360: 635-640.
- [43] 赵宏海,李磊,秦福刚,等.裂隙岩体加固浆材的试验研究[J].长江科学院院报,2012,29(7): 77-81.
ZHAO H H, LI L, QIN F G, et al. Experimental analysis on a grouting material for strengthening fractured rock [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2012, 29(7): 77-81. (in Chinese)
- [44] 朱新平,何倍,汤宇祺,等.水化硅酸钙微纳结构及超低温稳定性研究进展[J].建筑材料学报,2024,27(12): 1112-1121, 5.
ZHU X P, HE B, TANG Y Q, et al. Research progress on micro/nano-structure and cryogenic stability of calcium-silicate-hydrate [J]. Journal of Building Materials, 2024, 27(12): 1112-1121, 5. (in Chinese)
- [45] 朱文义,邓华锋,李建林,等.木质素磺酸钙增强花岗岩残积土微生物固化效果研究[J].土木工程学报,2024,57(3): 123-132.
ZHU W X, DENG H F, LI J L, et al. Effect of calcium lignosulfonate on mechanical properties of fully weathered granite solidified by microorganism [J]. China Civil Engineering Journal, 2024, 57(3): 123-132. (in Chinese)
- [46] DONG B Q, CHEN C F, FANG G H, et al. Positive roles of lime mud in blended Portland cement [J]. Construction and Building Materials, 2022, 328: 127067.
- [47] YAMADA K, TAKAHASHI T, HANEHARA S, et al. Effects of the chemical structure on the properties of polycarboxylate-type superplasticizer [J]. Cement and Concrete Research, 2000, 30(2): 197-207.
- [48] ARTIOLI G, VALENTINI L, DALCONI M C, et al. Imaging of nano-seeded nucleation in cement pastes by X-ray diffraction tomography [J]. International Journal of Materials Research, 2014, 105(7): 628-31.
- [49] 赵越,郑欣,徐畅,等.改性硅酸钙(CSH)对重金属废水中 Ni^{2+} 的吸附特性研究[J].安全与环境学报,2017,17(5): 1904-1908.
ZHAO Y, ZHENG X, XU C, et al. On the adsorptive behaviors of calcium silicate hydrate(CSH) to Ni^{2+} [J]. Journal of Safety and Environment, 2017, 17(5): 1904-1908. (in Chinese)

(编辑 XXX)