

微生物诱导碳酸钙沉淀加固热带土质边坡 现场试验研究

刘 静¹, 王 昊¹, 杨 鑫², 苏进臣², 张友良¹

(1. 海南大学 土木建筑工程学院, 海南 海口 570228; 2. 海南省水利电力集团有限公司, 海南 海口 570203)

摘 要: 热带土质边坡在极端天气下, 极易产生崩塌、滑坡等地质灾害, 因此, 考虑采用微生物诱导碳酸钙沉淀 (microbial induced calcium carbonate precipitation, 简称 MICP) 的方式, 达到绿色生态的治理目的。将巴氏芽孢杆菌扩大化培养后, 采用滴灌和喷灌相结合的方式对热带土质边坡进行现场加固处理, 从宏观、微观、原位试验和室内试验多个角度探究了其对于热带土质边坡典型黄黏土的加固效果与固化机制。在对不同 MICP 菌液用量的边坡完成现场加固后, 分别进行了后续各项试验。其中, 原位试验包括回弹试验、贯入试验; 室内试验包括碳酸钙生成量、无侧限抗压试验、直接剪切试验、渗透试验以及扫描电镜 (scanning electron microscope, 简称 SEM) 和能谱仪 (energy dispersive spectrometer, 简称 EDS) 观测。结果表明: (1) 经过加固后的土体表面强度与贯入强度均有明显提高, 且随菌液用量的增多而增高, 但同时强度呈现出离散性, 即加固具有不均匀性; (2) 土体的抗压强度特性也得到一定改善, 在中等加固强度时各项抗压强度特性指标增幅最大, 变化最明显; (3) 随着菌液用量的提高, 抗剪强度也逐渐增强, 内摩擦角和黏聚力均有所上升, 最终起到有效的固结作用; (4) 在抗渗性能方面, 渗透系数的降低幅度最大为 63.5%, 削弱了雨水冲刷对边坡的破坏; (5) 通过 SEM-EDS 联合技术观测得出了碳酸钙晶体对土颗粒的 3 种具体加固形式, 并通过定量分析进行了论证。因此, MICP 处理能够明显提高黏土的各项强度性能, 且能够有效增强边坡的稳定性。

关 键 词: 微生物诱导碳酸钙沉淀 (MICP); 无侧限抗压试验; 直接剪切试验; 微观观测分析

中图分类号: TU442

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2025) 增刊-0343-11

Field test study on reinforcement of tropical soil slope using microbial induced calcium carbonate precipitation

LIU Jing¹, WANG Hao¹, YANG Xin², SU Jin-chen², ZHANG You-liang¹

(1. School of Civil and Architectural Engineering, Hainan University, Haikou, Hainan 570228, China;

2. Hainan Provincial Water Conservancy and Hydropower Group Co., Ltd., Haikou, Hainan 570203, China)

Abstract: Tropical soil slopes are highly susceptible to geological disasters such as collapses and landslides under extreme weather conditions. Therefore, microbial-induced calcium carbonate precipitation (MICP) is considered an environmentally friendly method for slope stabilization. Following large-scale cultivation of *Bacillus pasteurii*, a combination of drip and sprinkler irrigation was applied for on-site reinforcement of tropical soil slopes. The reinforcement effect and solidification mechanism of typical yellow clay in tropical soil slopes were investigated through macro, micro, in-situ tests and laboratory tests. After on-site reinforcement with different dosages of MICP bacterial solution, subsequent tests were conducted accordingly. In-situ tests included rebound test and penetration test. Laboratory tests included calcium carbonate generation, unconfined compressive strength test, direct shear test, permeability test, as well as observations via scanning electron microscopy (SEM) and energy dispersive spectroscopy (EDS). Results show that: (1) The surface strength and penetration strength of the reinforced soil have been significantly improved, and they increase with the dosage of bacterial solution. However, the strength is discrete, indicating the reinforcement is uneven. (2) The compressive strength characteristics of the soil have also been improved to a certain extent. The compressive strength characteristic indexes have

收稿日期: 2024-05-21

录用日期: 2024-07-26

基金项目: 国家自然科学基金 (No.12262012); 海南省院士团队创新中心资金; 海南省院士创新平台科研项目 (No.YSPTZX202320)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (12262012), the Fund of the Innovation Platform for Academicians of Hainan Province, and the Scientific Research Projects of the Innovation Platform for Academicians of Hainan Province (YSPTZX202320).

第一作者简介: 刘静, 女, 1999 年生, 硕士研究生, 主要从事边坡绿色加固及稳定性计算方面的研究。E-mail: 1340363514@qq.com

通讯作者: 张友良, 男, 1972 年生, 博士, 教授, 主要从事多场耦合问题的数值模拟和试验研究、边坡和地下工程三维可视化动态反馈设计、热带地区边坡生态防护技术等方面的研究。E-mail: zhangyouliang@hainanu.edu.cn

the largest increase and the most obvious change at the medium reinforcement strength. (3) With the increase of bacterial solution dosage, the shear strength gradually increases, and both the internal friction angle and cohesion rise, contributing to effective soil consolidation. (4) In terms of anti-seepage performance, permeability coefficient decreases by up to 63.5%, mitigating slope erosion and degradation caused by rainfall. (5) Through SEM-EDS observation, three specific reinforcement forms of calcium carbonate crystals on soil particles are obtained and proved by quantitative analysis. Therefore, MICP treatment can significantly improve the strength properties of clay and effectively enhance the stability of the slope.

Keywords: microbial induced calcium carbonate precipitation (MICP); unconfined compressive strength test; direct shear test; microscopic observational analysis

1 引言

海南省地处热带强降雨地区,经常受到极端恶劣天气的耦合作用从而导致地质灾害频发。鉴于以崩塌、滑坡、泥石流为主的地质灾害对土质边坡稳定性造成极大破坏,严重威胁生态平衡与人类活动安全,因此治理边坡稳定性已迫在眉睫^[1-2]。近年来,随着土木行业的不断发展以及学科交叉的推动,作为一种绿色环保的治理技术,微生物诱导碳酸钙沉淀技术(microbial induced calcium carbonate precipitation, 简称 MICP)应运而生。此项技术有着操作简便、对环境友好等优点,已经被广泛应用于混凝土的补缝抗渗^[3]、文物修复^[4]、边坡加固^[5]等多个方面。其加固原理主要是利用自然界中广泛存在的某些微生物代谢出有效产物,与环境中存在的相关离子发生反应而产生沉淀物,最终在颗粒间达到有效胶结与加固^[6-7]。

MICP 技术有着巨大的发展前景,因此不少学者就 MICP 对土体的加固机制及效果等方面展开了一系列研究^[8-10]。彭劼等^[11]综合评价了 MICP 压力灌浆加固有机质黏土的效果,并得出了其能够有效改善黏土性能的结论。张宽等^[12]采用新型单相法对黏土进行改性后定量分析,认为该方法能明显提升土体胶结的深度和均匀性,但是该方法更适用于渗透性较差的黏土。Liu 等^[13]利用干湿循环试验来表征 MICP 对黏性土干燥开裂行为的影响,探究了流体类型和循环次数对黏土裂隙演化和体积变形的影响。谢约翰等^[14]发现了 MICP 能够改善黏土的水稳性,为改善水土流失提供了一定的参考,但是试验仅采用喷洒法处理土层会导致碳酸钙分布不均匀。蔡红等^[15]通过室内试验固化淤泥质土,探明了微生物固化的增强机制和作用机制。综上所述,可以看出目前还存在两个问题制约该技术的应用推广:①对黏土实际应用方面的相关数据探究还不够详尽,即对于工程中的黏土能否适用 MICP 技术还需进一步研究;②现有的对 MICP 技术的研究大多停留在室内模拟试验或理论分析阶段,关于现场试验的参

考数据还比较少。因此,结合上述问题,考虑到海南省的典型热带土坡黏性土具有多见于山地,无明显层理,干燥时较坚固,遇水易于剥落,在高发极端暴雨天气下极易受侵蚀等特性,展开了相关试验。最终从宏观和微观相结合、原位试验和模拟试验相结合的角度下,探索了 MICP 对典型热带土质边坡在不同胶结程度下的加固效果和加固特性机制。该研究能够为热带土坡的生态治理以及 MICP 技术在黏性土工程中的应用推广提供一定的思路和参考,具有重要的理论和应用价值。

2 试验材料

2.1 试验用土

试验基于海南省南渡江干流中下游河段的一座控制水利枢纽工程,其开发任务以供水、灌溉、防洪为主,兼顾发电,并为改善下游水生态环境和琼北地区水系连通创造条件。该工程具有堆积体范围广,厚度深方量大,边坡高度高,地处多雨地区等特点。为避免发生地质灾害,对该工程进行治理的意义重大。边坡工程如图 1 所示。



图 1 边坡工程现场图

Fig.1 Site view of the slope project

试验地点选定于工程的六号副坝,边坡的整体平均坡度在 34° 左右,试验地块规格为沿斜面 $2.0\text{ m} \times 2.0\text{ m}$ 。参照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)^[16]测定了土样的物理性质指标,见表 1。粒径级配曲线如图 2 所示。经过计算得出不均匀系数 $C_u = 4.20$, 曲率系数 $C_c = 2.24$, 查阅《土

表 1 土样物理性质指标
Table 1 Physical properties of soil sample

天然含水率 $\omega\%$	最优含水率 $\omega_p\%$	液限 $\omega_L\%$	塑限 $\omega_P\%$	液性指数 I_L	塑性指数 I_P	天然密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	干密度 $\rho_d/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	土样定名
14.62	16.83	40.22	5.50	0.26	34.72	1.75	1.53	低液限黏土

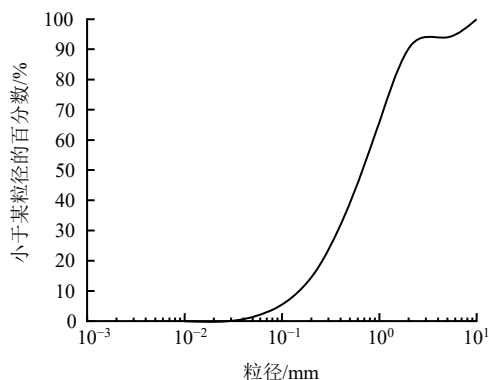


图 2 土样粒径级配曲线

Fig.2 Particle size grading curve of soil sample

的工程分类标准》(GB/T 50145—2007) [17], 得出这种土属于级配不良土。

2.2 菌种及扩培

试验中选用的菌种是购自上海保藏生物技术中心的巴氏芽孢杆菌, 编号为 ATCC 11859。该菌在自然界中广泛存在, 无毒无害, 并且对环境也有很强的适应能力, 是进行试验的理想菌种[18]。

OD₆₀₀ 通常是指在 600 nm 波长处的吸光度, 可以间接反映微生物细胞的浓度。该菌种初始 OD₆₀₀ 值为 2.0, 活化处理后由液体培养基进行扩大化培养。为了满足经济效益, 用工业蛋白胨代替细菌学蛋白胨。试验采用的液体培养基中各成分浓度分别为工业蛋白胨 20 g/L、氯化钠 10 g/L、葡萄糖 20 g/L。

菌液培养具体操作步骤如下所述: 首先, 将 10 L 已经按照比例配置好的液体培养基经高温灭菌后, 根据巴氏芽孢杆菌的中度嗜碱特性, 将 pH 值调节至 9.2[19]。然后, 加入 2 L 浓度为 1 mol/L 的尿素溶液, 并采用移液枪将目的菌种以 3% 的接种量加入到上述培养基中。扩培时容易氧气不足, 所以利用氧气泵通入适量的氧气, 最后放入恒温摇床中振荡培养 24 h。本次试验着重探究细菌的数量及所产生的脲酶的最终反应能力, 这比常规研究中探究酶的活性更有针对性。于是选择在 0~48 h 内, 利用分光计每 2 h 测定一次菌液的 OD₆₀₀ 值, 持续观测细菌的浓度变化; 同等条件下, 利用电导率仪测定最终值来代表其脲酶的反应能力; 最终用总脲酶反应能力值与 OD₆₀₀ 值的比值来表示单位脲酶的反应能

力。根据测试结果绘制出巴氏芽孢杆菌培养的生长曲线如图 3 所示, 脲酶的最终反应能力变化曲线如图 4 所示。

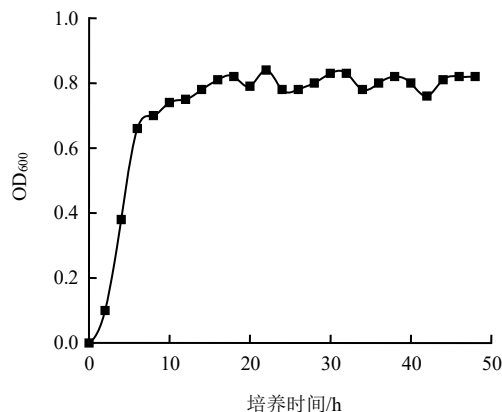


图 3 巴氏芽孢杆菌生长曲线

Fig.3 Growth curve of *Bacillus pasteurilla*

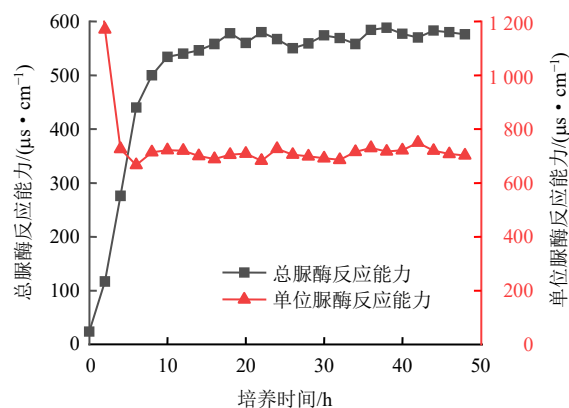


图 4 酶反应能力随时间变化曲线

Fig.4 Enzyme reaction ability vs. time curves

微生物的数量生长趋势与总脲酶的反应能力大致相同, 单位脲酶的反应能力与总脲酶的反应能力呈现相反的变化状态。在前期发展时, 微生物的生长趋势较快, 总脲酶的反应能力也随之快速增长, 培养到 10 h 左右时增长变缓, 均产生了相对稳定的波动。选择二者的波动平台数值, 即 OD₆₀₀ 值为 0.8 时, 总脲酶的反应能力值为 500~600 μs/cm 时作为最佳参考数据[20]。

2.3 其余反应液

因为所选取的土壤中原有的游离钙离子含量

比较少, 所以为了使得加固效果更加明显, 采用 1 mol/L 的氯化钙溶液作为加固前的固定液, 1 mol/L 的氯化钙溶液与 1 mol/L 的尿素溶液等体积均匀地混合作为胶结液。

3 试验方案

本试验方案包括室外现场试验和室内检验试验两个主要部分。进行室外现场试验时, 首先应该对坡面进行清理处理。为了保证菌液渗透的相对均匀性, 采用滴灌和喷灌两种方式相结合在坡面进行 MICP 加固处理, 现场处理图片如图 5 所示。



图 5 现场处理图

Fig.5 Picture of field processing

为避免微生物溶液与反应液提前反应生成碳酸钙堵塞喷灌通道, 应当少量多次地分批添加, 进行一次 MICP 加固具体的操作步骤如下:

(1) 采用滴灌、喷灌轮流加入固定液后等待 2 h, 滴灌、喷灌交替加固一轮为一次加固操作。

(2) 采用同样的方法, 均匀加入菌液并等待 10 h, 保证菌液能够充分渗透土层。

(3) 最后采用同样的方法加入混合的胶结液并等待 12 h。

(4) 及时覆盖透明塑料薄膜对坡面进行养护, 其目的在于有效减少菌液、反应液的蒸发作用以及暴雨、暴晒等极端情况对试验结果产生干扰, 并且保持自然干燥与透气性。

为了研究 MICP 的加固特性以及确定不同加固程度对边坡的加固效果, 将试验细分为 A0、A3、A6、A9 共 4 组。编号 A0、A3、A6、A9 分别代表对试验地块进行 0、3、6、9 次 MICP 处理。具体加固溶液浓度及用量见表 2, 对应的边坡加固方案见表 3。

加固完成后的平均深度可达到 15~20 cm, 如图 6 所示, 白色部分均为生成的碳酸钙沉淀, 覆盖在土层表面以及分布在土壤夹层中, 只是在加固的

强度、均匀度等方面有一定的差异。刚加固完成的土壤湿度较高, 强度并未发挥到最大, 因此, 需要采用特制取土器在试验地块上随机均匀地取回土样进行养护, 以便进行下一步室内检测试验, 现场取样情况如图 7 所示。

表 2 MICP 处理溶液
Table 2 MICP treatment solution

名称	成分	浓度/(mol · L ⁻¹)	每次用量/L
固定液	CaCl ₂	1	10
菌液	巴氏芽孢杆菌	—	10
胶结液	CaCl ₂	1	5
	尿素	1	5

表 3 MICP 加固土坡方案
Table 3 MICP reinforcement scheme for soil slope

编号	加固次数/次	菌液浓度/(mol · L ⁻¹)	菌液用量/L	加固程度
A0	0	—	0	未加固
A3	3	1	30	弱加固
A6	6	1	60	中加固
A9	9	1	90	强加固

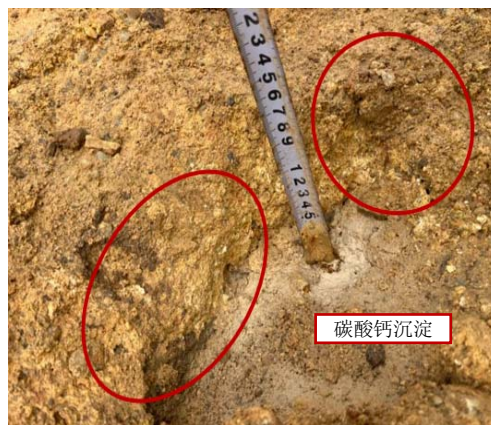


图 6 加固深度测量图

Fig.6 Picture of reinforcement depth measurement



图 7 取样器现场取样示意图

Fig.7 Schematic of sampler on-site sampling

4 试验检测与成果分析

4.1 原位回弹试验

由于现场条件限制,在试验完成后选择量程适宜的改良回弹仪进行原位强度试验。将测头加上一个垫片以保证有示数读出,测出不同菌液用量加固土的表面强度变化,将其相对值作为初步的效果评估。选择合适的测区位置布设 16 个测点,由于加固土无法按规格折算抗压强度,因此,用回弹仪示数进行表征,多次测量分别去除前 3 个最大值和后 3 个最小值,再将剩余 10 个数字取平均值,可得到不同菌液用量下加固土表面强度的变化情况,如图 8 所示。

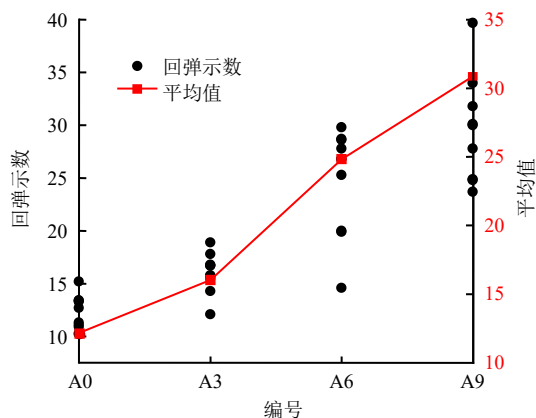


图 8 菌液用量与表面强度的关系

Fig.8 Relationship between bacterial solution dosage and surface strength

由图 8 可知,随着菌液用量的增加,回弹示数逐步增大,即抗压强度逐渐增大,但是增幅不同,A6 组增幅最大。随着加固程度的增大,回弹示数的离散性更强,说明存在强度加固不均匀的问题。

4.2 原位贯入试验

采用 WXGR-2 笔式微型贯入仪测量原位的土体表面贯入阻力值,快速评估土体的密实度,粗估土体的承载能力。查阅附表后可得出不同加固程度下表面基本承载力的变化曲线,如图 9 所示。

由图 9 可知,相较于 A0 组,A1、A2、A3 组土体的基本承载能力随菌液用量增加的增幅为 11.1%、85.7%、21.0%,其中 A0 组到 A3 组的加固效果并不显著,因为此时菌液用量相对较少,土体的黏结作用并未明显提高;到 A6 组时基本承载力有明显提高,此时的加固效果最明显,到 A9 组加固强度最高能达到 215 kPa。

将带回的土样进行分类并按照不同试验要求进行养护,随后开展不同类型的试验。

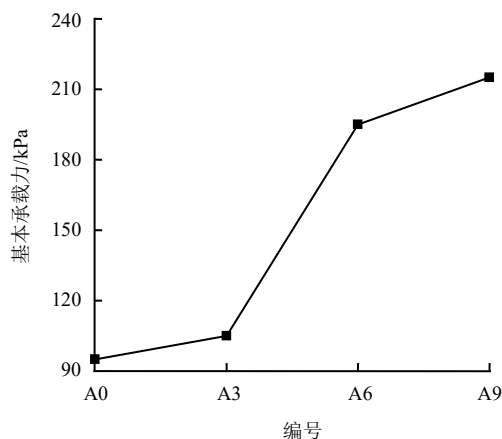


图 9 不同加固程度下基本承载力变化曲线

Fig.9 Variation of basic bearing capacity under different reinforcement levels

4.3 碳酸钙含量

生成碳酸钙是 MICP 加固土体的关键因素,并且所用的试验土中钙离子的含量很少,可以忽略不计,因此试验采用酸洗法测量得出碳酸钙含量,具体含量如图 10 所示。A0、A3、A6、A9 组的碳酸钙含量分别为 0%、3.75%、4.85%、5.1%,表明碳酸钙的生成量与菌液用量有着良好的相关性。

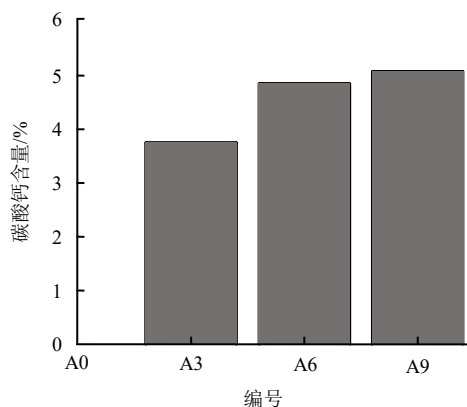


图 10 碳酸钙含量图

Fig.10 Calcium carbonate contents

4.4 土体抗压强度特性

对养护好的土样进行无侧限抗压强度试验,土体试样尺寸为直径 39.1 mm、高 80 mm,试验过程中采用轴向恒速稳定加压,速度为 1.5 mm/min,选取平均值作为试验结果的代表值,绘制出各组试样的应力-应变曲线,如图 11 所示。将曲线峰值参数作为该组的最终无侧限抗压强度值^[21],不同的菌液用量对应的抗压强度情况如图 12 所示。

图 11 中应力-应变曲线都有相似的变化规律,即刚开始一小段时间内处于试样的空隙压实阶段,

因此增长比较缓慢,随后急速上升达到最大值,紧接着在拐点处应力急速下降,达到一定值后趋于稳定。4 种情况下无侧限抗压强度所对应的拐点轴向应变也有差异,A0、A3、A6、A9 组分别为 2.9%、3.2%、3.9%、3.1%,即中等加固强度 A6 组的拐点应变发生了一定程度的右移,而其余试验组在 3% 左右。

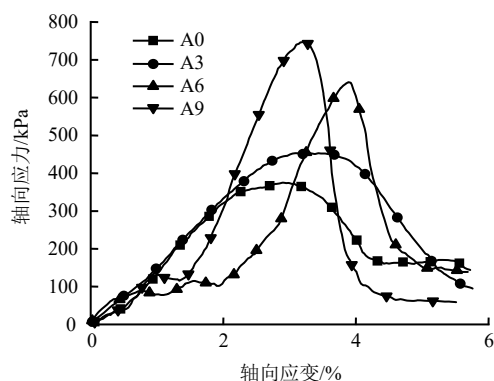


图 11 各组试样的应力-应变曲线

Fig.11 Stress-strain curves of each group of samples

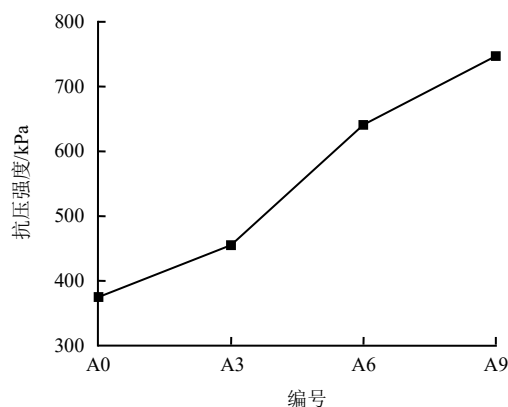


图 12 抗压强度指标与菌液用量的关系

Fig.12 Relationship between compressive strength index and bacterial solution dosage

出现应力峰值后,应力便开始快速下降,这表明试样裂缝在此阶段发展迅速,且逐渐发展为脆性破坏^[22-23],随着加固程度的增加,脆性更明显。由图 11 可知,A3、A6、A9 组土样的强度与未加固 A0 组相比分别提高了 21.3%、70.9%、99.2%。无侧限抗压强度值并不是随着加固次数的增加呈现线性增长,而是表现为中等加固强度时的提高最为明显,为 49.6%。

进一步得到 4 组试样的弹性模量分别为 11.7、15.9、22.7、28.2 MPa,A3、A6、A9 组相对于未加固 A0 组的增幅分别为 35.9%、94.2%、141.0%,与上述无侧限抗压强度的增长规律基本一致,在中等

加固程度时提高最明显,为 58.3%。4 组试样的代表性加载破坏情况如图 13 所示。

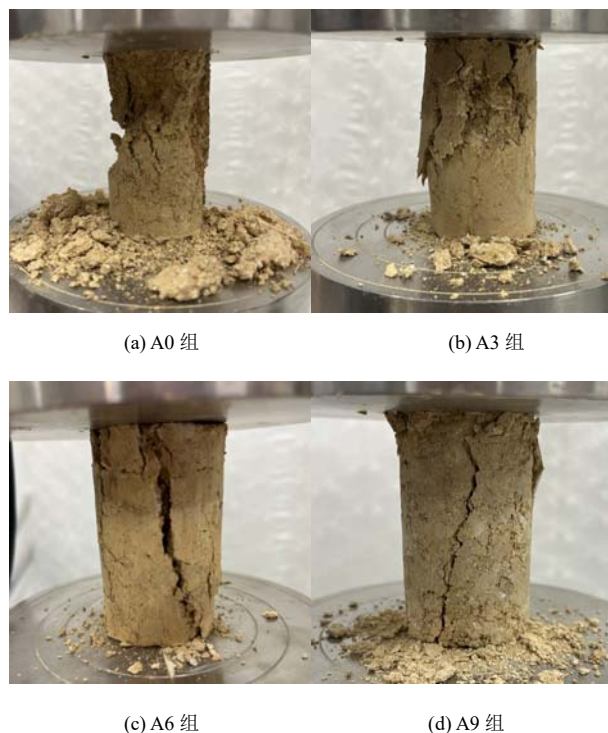


图 13 各组试样加载破坏图

Fig.13 Loading failure diagrams of each group of samples

各组试样的加载破坏图也可以证实上述结论,每个试样在加载过程中均有不同程度的土屑掉落,但是破坏程度随菌液用量的增多而减小,也说明 MICP 处理能够提高土体的整体性。纵观 4 组土样的破坏情况,A3 组到 A6 组的试样破坏情况由局部碎散状破坏转变成整体贯通裂缝破坏,变化差异最为明显,也印证了上述 A6 组土样各项力学指标变化最为明显这一结论。各组土样的具体表现如下:A0 组土样处于相对松散状态,破坏时产生的破裂面比较多且没有规律,但大多集中在中上部;A3 组沿着中上部的某些破裂面发生了破碎破坏,但整体与 A0 组相比更加完整,掉落的土屑更少;A6 组并没有出现较多明显的破裂面,有一条较为明显的宽裂缝构成了试样的主要破坏形式;A9 组仍存在一条最主要的贯通裂缝,但裂缝的宽度明显小了很多,整体的黏结性也更强。因此,可以得出 MICP 加固能够有效提高热带典型黄黏土的抗压性能,提高土体的整体性,能更好发挥护坡固坡作用。

4.5 土体抗剪强度特性

为了检测 MICP 加固土体的抗剪特性,采用型号为 ZJ-4A 应变控制式直剪仪进行快速直接剪切试验^[24-25]。分别在 100、200、300、400 kPa 法向应力

下,以 0.8 mm/min 的剪切速率进行试验,这种试验方式也间接模拟了土在不同深度下的受力情形,所得数据绘制成应力-应变曲线,如图 14 所示。剪切后的试样破碎情况如图 15 所示。

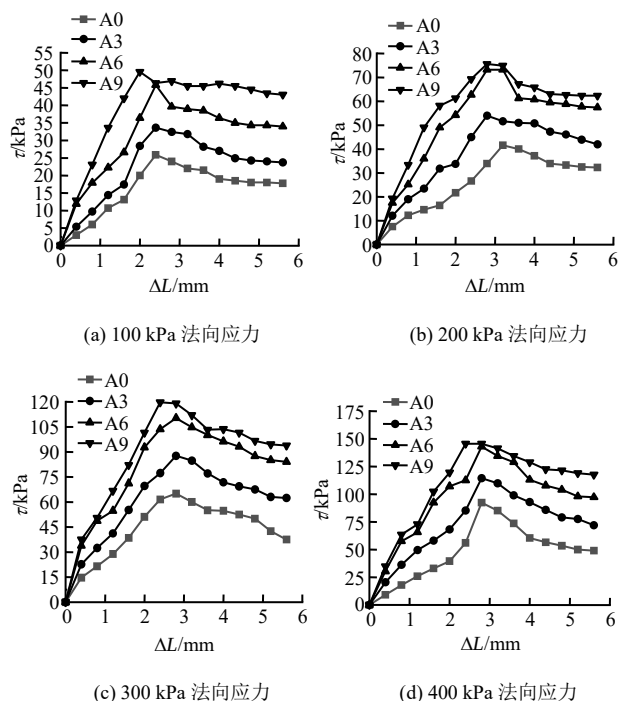


图 14 各组试样应力-应变曲线
Fig.14 Stress-strain curves of specimens

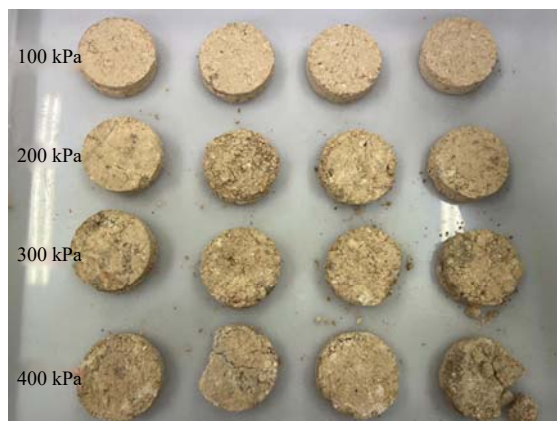


图 15 各组试样破碎情况图
Fig.15 Fragmentation of samples in each group

由图 14 可以看出,试样各组的应力-应变曲线趋势也大致相同,均是快速上升到一定的应力峰值之后缓缓下降直至平稳,且应变的峰值保持在 2.8~3.0 mm。与 A0 组相比较, A3 组的 4 组抗剪强度分别提高了 29.7%、29.8%、34.8%、23.9%, A6 组分别提高了 76.8%、76.0%、69.6%、54.7%, A9 组分别提高了 91.4%、81.7%、84.2%、57.6%。可见仍然是中等加固程度的 A6 组相较于 A3 组的增幅最明

显。再结合图 15 可以看出,剪坏的试样中有些许不规则破裂和碎屑掉落的情况,且随着法向应力的增大,这种脆性特点越明显。

为了进一步探明原因,以抗剪强度为纵坐标,法向应力为横坐标绘制摩尔-库伦破坏包线图,如图 16 所示。线性拟合后可得到两个具体评判指标,即直线在纵轴上的截距作为黏聚力 c ,直线的倾角作为内摩擦角 φ 。得到不同菌液用量下试样的内摩擦角和黏聚力,如表 4 所示。

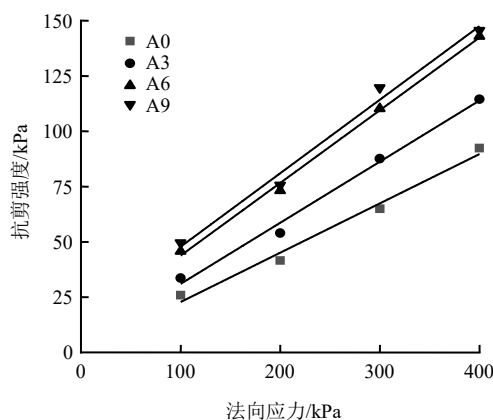


图 16 各组试样抗剪强度
Fig.16 Shear strength of specimens

表 4 各试样抗剪强度指标
Table 4 Shear strength indexes of samples

编号	抗剪强度指标		
	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	斜率 k
A0	5.5	12.5	0.22
A3	8.1	15.5	0.28
A6	14.5	17.8	0.33
A9	14.6	18.4	0.34

随着菌液用量的增大,试样强度包线的截距与斜率均逐渐增大,即内摩擦角和黏聚力均增大。生成的碳酸钙在土颗粒间起到了胶结作用,并且使得土颗粒表面的粗糙程度上升,从而改变了土的受力特性,强化了土体结构。内摩擦角的增大主要源于土颗粒表面的凹凸部分与碳酸钙胶结团的相互咬合以及部分滑动摩擦。因此,菌液用量越大,生成的碳酸钙越多,相互咬合力越强,从而呈现上述趋势。然而,低等加固强度下生成的碳酸钙不足以满足土颗粒间的胶结需求,各项参数上升有限;中等加固强度下生成的碳酸钙能够相对满足胶结需求,因此增幅最为明显;而强加固组在中等加固强度的基础上,土体颗粒的胶结占有率已接近饱和,导致其相对增幅不明显。

4.6 土体渗透特性

土壤的渗透性变化是评判 MICP 加固效果的一个重要标准^[26]。针对土壤特性,采用变水头渗透试验测量得出相关参数,并根据达西定律计算得到渗透系数^[27],具体结果如图 17 所示。

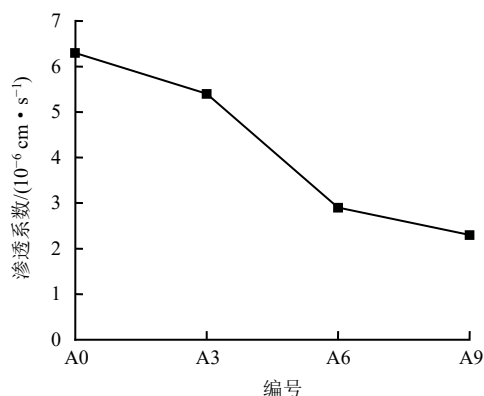


图 17 各组试样渗透系数
Fig.17 Permeability coefficients of samples

由图 17 可以看出,最终渗透系数由 6.3×10^{-6} cm/s 降低到 2.3×10^{-6} cm/s,最大可以减少 63.5%,主要原因可归纳为以下 3 个方面^[28]:首先,碳酸钙晶体胶结后土颗粒结构更加致密,水分子难以通过土颗粒间的孔隙;其次,碳酸钙分子填充在土体的孔隙和裂隙中,阻挡了水的流通路径,导致渗透系数降低;最后,微生物分泌的胞外聚合物 (extracellular polymeric substances, 简称 EPS) 附着在孔隙材料的表面和内部,随着碳酸钙沉淀物的逐渐积累,微生物细胞被矿物颗粒覆盖,形成了一层生物膜,这层生物膜也能起到一定的抗渗作用。这表明 MICP 能够有效降低土壤的渗透性能,减少雨水等对边坡的冲蚀破坏,提高边坡的稳定性。

5 微观观测分析

5.1 SEM 形貌表征

以上研究从宏观层面进行分析,随后利用电子显微镜进行微观层面的分析,以便更准确地揭示 MICP 的胶结本质。本次采用的仪器型号为 S-3000N 扫描电子显微镜,对直剪试验的代表性断面试样进行取样扫描,并分别进行显微形貌观察与元素含量定量分析。在 MICP 加固过程中,碳酸钙晶体以微生物作为成核位点不断增多,并在邻近的土颗粒之间发展成孔洞充填、间隙连接、表层包裹等形态^[29],发挥不同的作用进行胶结,不同加固程度下的试样 SEM 图像如图 18 所示。

由图 18 可以清晰地观察到碳酸钙颗粒的表面

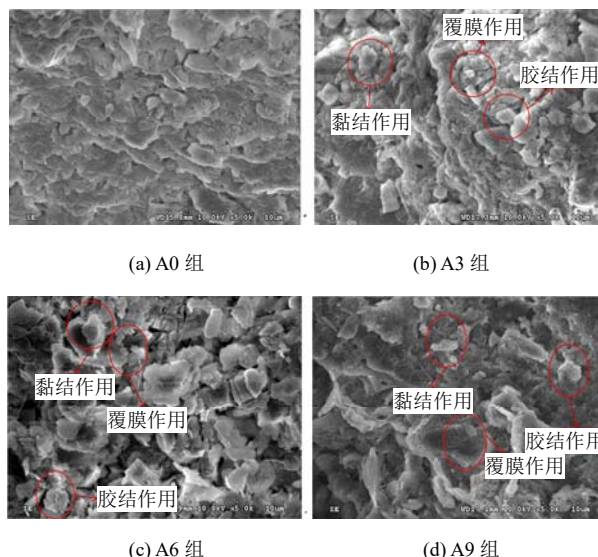
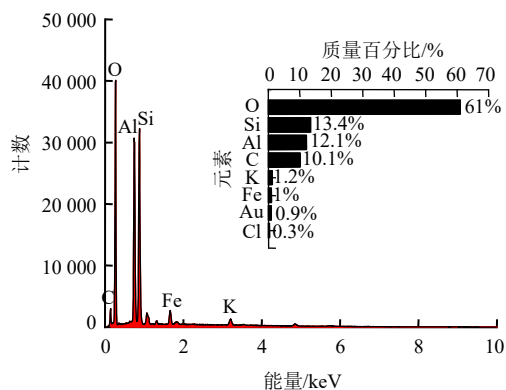


图 18 各组试样 SEM 图像
Fig.18 SEM images of each group of samples

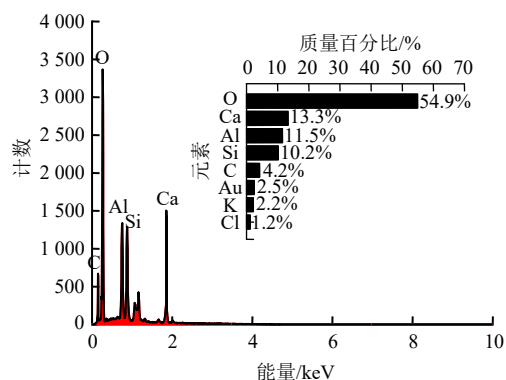
特征,包括粗糙度和晶体生长的细节,这些微观特征对于理解土颗粒之间的相互作用和加固机制至关重要。由微观图可以看出加固方式主要有以下 3 种^[30-31]:①覆膜作用,碳酸钙晶体在土颗粒表面形成一层均匀的覆盖膜,这种覆膜不仅增加了土壤结构的体积和表面积,而且通过提高土颗粒间的摩擦力,增强了土壤的整体力学性能。覆膜作用还有助于减少水分和气体通过土壤的渗透,提高土壤的抗渗性能。②黏结作用,碳酸钙晶体在土颗粒的接触点处沉淀和聚集,形成一种黏结剂,将相邻且相互接触的土颗粒紧密地黏接在一起。这种黏结作用增强了颗粒间的凝聚力,提高了土壤的承载能力和抗剪强度。此外,黏结作用还能够促进土颗粒间的机械互锁,进一步增强土壤的稳定性。③胶结作用,碳酸钙晶体在相邻但不直接接触的土颗粒之间起到胶结作用,通过碳酸钙的桥接效应,将这些颗粒聚集在一起,形成更为坚固的土壤骨架。胶结作用也有助于填充土壤孔隙,减少孔隙率,从而降低土壤的渗透性。同时,胶结作用还能够提高土壤的耐久性,使其更能抵抗外部力的作用,如水流冲刷或机械振动。上述 3 种加固方式共同作用,不仅提高了土壤的力学性能,还显著降低了固化土体的孔隙率和渗透率。

5.2 EDS 元素含量表征

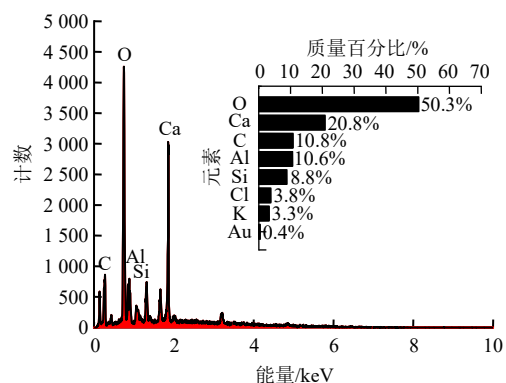
选取试样的代表区域进行能量色散 X 射线光谱能谱分析。EDS 技术通过检测样品在高能电子束激发下发出的 X 射线,根据 X 射线的能量特征来识别和定量分析样品中的元素^[32]。结合定量分析能够使得结论更加准确,具体谱图如图 19 所示。



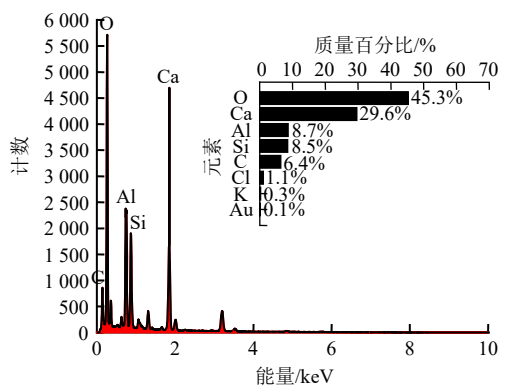
(a) A0 组



(b) A3 组



(c) A6 组



(d) A9 组

图 19 各组试样 EDS 扫描图

Fig.19 X-ray energy dispersive spectra(EDS) of each group of samples

定量分析结果显示,A0 组的钙元素含量低于检测下限。这表明在未经过 MICP 处理的原始土壤样本中,钙元素含量极低,可以忽略不计。因此,额外添加固定液(如氯化钙溶液)是有必要的,否则会影响加固效果。A3 组到 A9 组的 EDS 分析结果证实了碳酸钙的存在,并且随着 MICP 处理强度的增加,钙元素含量也依次增加,进一步验证了上述结论。

6 结 论

在对海南省南渡江下游现场边坡完成 MICP 加固处理之后,本文围绕边坡稳定性进行了一系列探究工作,得出主要结论如下:

(1) 明确了 MICP 现场扩培与加固的工法,经过 MICP 处理后,边坡稳定性显著增强。表面强度、抗压强度、抗剪强度和抗渗性能方面的各项性能都有明显的提升,且土体的整体性也有所提高,为 MICP 在热带边坡工程中的应用提供了参考与借鉴。

(2) 各项代表性指标随菌液用量的增加并非呈现线性关系,特别是在中等加固强度阶段,指标的变化速度最快且最为明显,这一现象对于深入理解 MICP 加固机制具有重要意义。

(3) 利用现代 SEM 和 EDS 技术联合观测了其微观加固机制。其中,SEM 揭示了 MICP 加固的本质原理,包括覆膜作用、黏结作用和胶结作用 3 种;EDS 也通过量化元素含量论证了所得结论的正确性。

参 考 文 献

- [1] 闫金凯, 黄俊宝, 李海龙, 等. 台风暴雨型浅层滑坡失稳机理研究[J]. 地质力学学报, 2020, 26(4): 481-491.
YAN Jin-kai, HUANG Jun-bao, LI Hai-long, et al. Study on instability mechanism of shallow landslide caused by typhoon and heavy rain[J]. *Journal of Geomechanics*, 2020, 26(4): 481-491.
- [2] 沈佳, 董岩松, 简文彬, 等. 台风暴雨型土质滑坡演化过程研究[J]. 工程地质学报, 2020, 28(6): 1290-1299.
SHEN Jia, DONG Yan-song, JIAN Wen-bin, et al. Study on evolution process of landslides triggered by typhoon rainstorm[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2020, 28(6): 1290-1299.
- [3] WANG B Q, GUO L, LUO X L, et al. Identification and extraction of cementation patterns in sand modified by MICP: new insights at the pore scale[J]. *PLoS One*,

- 2024, 19(3): e0296437.
- [4] 杨阳, 张程, 何想, 等. 活性生物泥诱导碳酸钙修复仿真文物砖可行性研究[J]. 岩土力学, 2025, 46(6): 1777-1787.
- YANG Yang, ZHANG Cheng, HE Xiang, et al. Feasibility study on repairing simulated heritage bricks using bioslurry induced calcium carbonate[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2025, 46(6): 1777-1787.
- [5] 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 Han-long, ZHAO Chang, XIAO Yang. Reaction principles, deposition and failure mechanisms and theories of biomineralization: progress and challenges[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2024, 46(7): 1347-1358.
- [6] 赵天宇, 安亮, 谌文武, 等. 微生物诱导碳酸钙沉淀加固黄土影响因素试验研究[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(4): 1620-1627.
- ZHAO Tian-yu, AN Liang, CHEN Wen-wu, et al. Experimental study on the influencing factors of microbial-induced calcium carbonate precipitation for consolidation of loess[J]. **Science Technology and Engineering**, 2025, 25(4): 1620-1627.
- [7] 张茜, 叶为民, 刘樟荣, 等. 基于生物诱导碳酸钙沉淀的土体固化研究进展[J]. 岩土力学, 2022, 43(2): 345-357.
- ZHANG Qian, YE Wei-min, LIU Zhang-rong, et al. Advances in soil solidification by biologically induced calcium carbonate precipitation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2022, 43(2): 345-357.
- [8] SHAZIA B, MERIAM O, YOUSAF M A, et al. Isolation, differentiation and biodiversity of ureolytic bacteria of Qatari soil and their potential in microbially induced calcite precipitation (MICP) for soil stabilization[J]. **RSC Advances**, 2018, 8(11): 5854-5863.
- [9] ZHANG G Z, WANG X D, LI H F, et al. Study on the prompting effect of basalt fibers on the change from two-dimensional to three-dimensional deposition of CaCO_3 to improve the healing properties of microbial mortars[J]. **Construction and Building Materials**, 2024, 423: 135897.
- [10] FU T, SARACHO A C, HAIGH S K. Microbially induced carbonate precipitation (MICP) for soil strengthening: a comprehensive review[J]. **Biogeotechnics**, 2023, 1(1): 100002.
- [11] 彭劼, 温智力, 刘志明, 等. 微生物诱导碳酸钙沉积加固有机质黏土的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(4): 733-740.
- PENG Jie, WEN Zhi-li, LIU Zhi-ming, et al. Experimental research on MICP-treated organic clay[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2019, 41(4): 733-740.
- [12] 张宽, 唐朝生, 刘博, 等. 基于新型单相 MICP 技术改性黏性土力学特性的试验研究[J]. 工程地质学报, 2020, 28(2): 306-316.
- ZHANG Kuan, TANG Chao-sheng, LIU Bo, et al. Mechanical behavior of clayey soil treated by new one-phase MICP technique[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2020, 28(2): 306-316.
- [13] LIU B, ZHU C, TANG C, et al. Bio-remediation of desiccation cracking in clayey soils through microbially induced calcite precipitation (MICP)[J]. **Engineering Geology**, 2020, 264: 105389.
- [14] 谢约翰, 唐朝生, 刘博, 等. 基于微生物诱导碳酸钙沉积技术的黏性土水稳性改良[J]. 浙江大学学报(工学版), 2019, 53(8): 1438-1447.
- XIE Yue-han, TANG Chao-sheng, LIU Bo, et al. Water stability improvement of clayey soil based on microbial induced calcite precipitation[J]. **Journal of Zhejiang University (Engineering Science)**, 2019, 53(8): 1438-1447.
- [15] 蔡红, 肖建章, 王子文, 等. 基于 MICP 技术的淤泥质土固化试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(增刊 1): 249-253.
- CAI Hong, XIAO Jian-zhang, WANG Zi-wen, et al. Experimental study on solidification of soft clay based on MICP[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2020, 42(Suppl.1): 249-253.
- [16] 中华人民共和国水利部. GB/T 50123—2019 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. GB/T 50123—2019 Standard for geotechnical testing method[S]. Beijing: China Planning Press, 2019.
- [17] 中华人民共和国水利部. GB/T 50145—2007 土的工程分类标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2007.
- Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. GB/T 50145—2007 Standard for engineering classification of soil[S]. Beijing: China Planning Press, 2007.
- [18] 喻成成, 卢正, 姚海林, 等. 微生物诱导碳酸钙沉淀改

- 性膨胀土试验研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(增刊 1): 157-163, 172.
- YU Cheng-cheng, LU Zheng, YAO Hai-lin, et al. Experimental study of modifying expansive soils using microbial induced calcite precipitation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2022, 43(Suppl.1): 157-163, 172.
- [19] 刘汉龙, 马国梁, 肖杨, 等. 微生物加固岛礁地基现场试验研究[J]. 地基处理, 2019, 1(1): 26-31.
- LIU Han-long, MA Guo-liang, XIAO Yang, et al. In situ experimental research on calcareous foundation stabilization using MICP technique on the reclaimed coral reef islands[J]. **Chinese Ground Improvement**, 2019, 1(1): 26-31.
- [20] 刘兴. MICP 固化沙漠风积沙工程特性与抗风蚀性能试验研究[D]. 西安: 西京学院, 2023.
- LIU Xing. Experimental study on engineering properties and wind erosion resistance of desert sand solidified by MICP[D]. Xi'an: Xijing University, 2023.
- [21] YANG Z H, LIU L K, DONG Y R, et al. Analysis of unconfined compressive strength and environmental impact of MICP-treated lead-zinc tailings sand instead of sand as embankment material[J]. **Science of the Total Environment**, 2024, 931: 172809.
- [22] CHHABRA S R, MAHADEVA R, RN R D G. Unconfined compressive strength prediction of recycled cement-treated base mixes using soft computing techniques[J]. **Road Materials and Pavement Design**, 2024, 25(2): 423-437.
- [23] 王子文, 魏然, 吴帅峰, 等. MICP 固化粉煤灰的强度效应与机制分析[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(增刊 1): 88-91.
- WANG Zi-wen, WEI Ran, WU Shuai-feng, et al. Strength effect and mechanism analysis of MICP-solidified coal ash[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2023, 45(Suppl.1): 88-91.
- [24] JIE Y W, JUN N J, LE X H, et al. Shear behavior of bio-cemented calcareous sand treated through bio-stimulation under the direct shear condition[J]. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, 2022, 81(10): 413.
- [25] YUAN J, LEI D L, SHAN Y, et al. Direct shear creep characteristics of sand treated with microbial-induced calcite precipitation[J]. **International Journal of Civil Engineering**, 2022, 20: 763-777.
- [26] 彭丽云, 杜辛涛, 齐吉琳, 等. MICP 加固粉土的渗透特性及微观机理[J]. 北京交通大学学报, 2023, 47(6): 154-162.
- PENG Li-yun, DU Xin-tao, QI Ji-lin, et al. Permeability characteristics and micro-mechanism of MICP-reinforced silt[J]. **Journal of Beijing Jiaotong University**, 2023, 47(6): 154-162.
- [27] 李贤, 汪时机, 何丙辉, 等. 土体适用 MICP 技术的渗透特性条件研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(8): 2956-2964, 2974.
- LI Xian, WANG Shi-ji, HE Bing-hui, et al. Permeability condition of soil suitable for MICP method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(8): 2956-2964, 2974.
- [28] PENG S Q, DI H, FAN L, et al. Factors affecting permeability reduction of MICP for fractured rock[J]. **Frontiers in Earth Science**, 2020, 8: 8217.
- [29] 程果, 汪时机, 李贤, 等. 微生物固化纤维加筋砂质黏性紫色土试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(6): 1829-1838.
- CHENG Guo, WANG Shi-ji, LI Xian, et al. Experimental study on bio-cemented solidification fiber-reinforced sandy clayey purple soil[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2021, 17(6): 1829-1838.
- [30] 段金贵, 王怀星, 姚姬璇, 等. 黄土坡面的微生物矿化加固及抗侵蚀性能试验研究[J]. 水土保持通报, 2022, 42(5): 33-40.
- DUAN Jin-gui, WANG Huai-xing, YAO Ji-xuan, et al. Experimental study on the microbial mineralization reinforcement and erosion resistance of loess slope surfaces[J]. **Bulletin of Soil and Water Conservation**, 2022, 42(5): 33-40.
- [31] 谢毅鑫, 郑文杰, 薛中飞, 等. 微生物诱导碳酸盐沉淀修复铜污染黄土的试验研究[J]. 岩土力学, 2024, 45(增刊 1): 443-450.
- XIE Yi-xin, ZHENG Wen-jie, XUE Zhong-fei, et al. Feasibility study of applying microbially induced carbonate precipitation to copper-contaminated loess remediation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2024, 45(Suppl.1): 443-450.
- [32] 刘鹏, 曹源兴, 程钰, 等. 碳酸酐酶增强微生物矿化固土效果的试验研究[J]. 岩土力学, 2024, 45(9): 2554-2564.
- LIU Peng, CAO Yuan-xing, CHENG Yu, et al. Experimental study of enhancing the effects of microbial-induced calcite precipitation treated sand using carbonic anhydrase[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2024, 45(9): 2554-2564.