

干湿循环作用下聚丙烯纤维对酶诱导碳酸盐沉淀固化砂土的耐久性研究

张建伟 吕子壮 李想 郑俊杰 盛桂琳 李青飞

Durability study of polypropylene fibers on enzyme-induced carbonate precipitation cured sandy soil under dry-wet cycling

ZHANG Jianwei, LYU Zizhuang, LI Xiang, ZHENG Junjie, SHENG Guilin, LI Qingfei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240521.006>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

废弃口罩加筋酶诱导碳酸盐沉淀固化砂土的抗剪强度特性

Shear strength characteristics of sand solidified by enzyme-induced carbonate precipitation with waste face mask reinforcement

复合材料学报. 2024, 41(1): 350–361 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20230529.003>

干湿循环条件下生物聚合物改良砂土强度特性

Strength characteristics of biopolymer modified sand under dry-wet cycle

复合材料学报. 2023, 40(4): 2285–2295 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220623.006>

聚丙烯纤维珊瑚海水混凝土循环受压试验及应力-应变本构关系

Cyclic compression test and stress-strain constitutive relationship of polypropylene fiber coral seawater concrete

复合材料学报. 2024, 41(8): 4247–4259 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240821.006>

聚丙烯纤维-钢筋/混凝土管节受力性能试验

Experimental study on the mechanical properties of polypropylene fiber-steel bar reinforced concrete pipe

复合材料学报. 2021, 38(12): 4349–4361 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210203.003>

聚丙烯-钢纤维/混凝土柱大偏心受压承载力计算

Calculation of bearing capacity of polypropylene-steel fiber reinforced concrete column under large eccentric loading

复合材料学报. 2020, 37(9): 2336–2347 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200201.001>

高温后聚丙烯纤维增强水泥基复合材料导热的多尺度方法

Multi-scale method for thermal conductivity of polypropylene fiber reinforced cementitious composites after high temperature

复合材料学报. 2021, 38(10): 3541–3552 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201211.001>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20240521.006

干湿循环作用下聚丙烯纤维对酶诱导碳酸盐沉淀固化砂土的耐久性研究



分享本文

张建伟^{1,2}, 吕子壮¹, 李想³, 郑俊杰⁴, 盛桂琳^{*1,2}, 李青飞¹

(1. 河南大学 建筑工程学院, 开封 475004; 2. 河南省历史建筑智能保护与修复工程研究中心, 开封 475004; 3. 上海寰球工程有限公司, 上海 200030; 4. 武汉大学 土木建筑工程学院, 武汉 430072)

摘要: 为了研究砂土在干湿循环作用下的耐久性, 进行纤维加筋法改良酶诱导碳酸盐沉淀 (EICP) 的研究。将废弃口罩粉碎后作为纤维加筋, 研究了不同纤维掺量和不同循环次数下砂土的无侧限抗压强度、质量损失率、浸泡吸水率、碳酸钙含量的变化, 并结合扫描电子显微镜从微观层面分析聚丙烯纤维联合 EICP 固化砂土的机制。研究表明: 随着干湿循环次数的增加, 改良砂土的无侧限抗压强度逐渐减小, 并且在纤维掺量为 0.2wt% 时试样强度损失率最小, 纤维过少无法形成“桥梁作用”, 过多容易出现团聚体; 并且纤维加筋能显著提高 EICP 固化砂土的碳酸钙生成率, 还可以起到固定碳酸钙晶体的作用; 质量损失率随干湿循环次数先减小后增大, 纤维掺量为 0.2wt% 时最小; 聚丙烯纤维加入后, 可以生成更多碳酸钙填充空隙, 减少干湿循环中水流的侵蚀作用。

关键词: EICP; 聚丙烯纤维; 大豆脲酶; 干湿循环; 微观分析

中图分类号: TU443; TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2025)02-0995-10

Durability study of polypropylene fibers on enzyme-induced carbonate precipitation cured sandy soil under dry-wet cycling

ZHANG Jianwei^{1,2}, LYU Zizhuang¹, LI Xiang³, ZHENG Junjie⁴, SHENG Guilin^{*1,2}, LI Qingfei¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Henan University, Kaifeng 475004, China; 2. Henan Province Research Center for Intelligent Protection and Restoration of Historical Buildings, Kaifeng 475004, China; 3. Shanghai Huanqiu Contracting & Engineering Corp, Shanghai 200030, China; 4. School of Civil and Architectural Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: To study the durability of sand under the action of dry and wet cycling, the fiber reinforcement method to improve enzyme induced carbonate precipitation (EICP) was studied. Utilizing the waste mask as fiber reinforcement after crushing, the unconfined compressive strength, mass loss rate, soaking water absorption rate, and calcium carbonate content of sand under different fibers content and different dry-wet cycles were studied. Additionally, the method of EICP combined with polypropylene fiber solidification of sand soil was integrated with scanning electronic microscopy under the microscope. The results demonstrate that the improved sand soil's unconfined compressive strength gradually decreases as the number of dry-wet cycles increases. At the minimum sample strength loss rate at the fibers content of 0.2wt% set, too few fibers are unable to form the "bridge effect" and too many fibers are too prone to clustering. Additionally, the fibers reinforcement can significantly increase the production of calcium carbonate in EICP-solidified sand soil and can also play a role in fixing calcium carbide

收稿日期: 2024-03-19; 修回日期: 2024-04-22; 录用日期: 2024-05-12; 网络首发时间: 2024-05-22 16:08:32

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240521.006>

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42177454); 河南省科技研发计划联合基金项目 (225200810005); 河南省自然科学基金项目 (232300420073)

National Natural Science Foundation of China (42177454); Joint Fund of the Technical R&D Program of Henan Province (225200810005); Natural Science Foundation of Henan Province (232300420073)

通信作者: 盛桂琳, 硕士, 副教授, 研究方向为建筑材料 E-mail: shengguilin1214@163.com

引用格式: 张建伟, 吕子壮, 李想, 等. 干湿循环作用下聚丙烯纤维对酶诱导碳酸盐沉淀固化砂土的耐久性研究 [J]. 复合材料学报, 2025, 42(2): 995-1004.

ZHANG Jianwei, LYU Zizhuang, LI Xiang, et al. Durability study of polypropylene fibers on enzyme-induced carbonate precipitation cured sandy soil under dry-wet cycling[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2025, 42(2): 995-1004(in Chinese).

crystals. The number of dry-wet cycles causes the quality loss rate to first decline before increasing and the rate is lowest when the fibers content is 0.2wt%. Following the addition of polypropylene fibers, more calcium carbide is generated to fill in gaps and lessen the erosion effect of water flow in the dry-wet circulation.

Keywords: EICP; polypropylene fiber; soybean urease; dry-wet cycle; microscopic analysis

酶诱导碳酸盐沉淀^[1-3] (Enzyme induced carbonate precipitation, EICP) 技术因具备环境友好、成本低廉等优点而在岩土工程领域备受关注,其原理是从植物中提取脲酶促使尿素水解成碳酸根离子^[4], 再与钙离子结合生成碳酸钙沉淀^[5], 以达到胶结土体, 改善其力学性能的目的。在土体加固^[6-7]、防风固沙^[8-9]、污染土修复^[10]、防渗封堵^[11]等方面有着广泛的应用前景。已有研究证明 EICP 对砂土的确具有固化效果, 然而经过脲酶诱导碳酸钙沉积技术处理的砂土却是呈现典型的脆性破坏特征^[12], 具有一定的安全隐患。

纤维可以为碳酸钙的生成提供有效的成核位点^[13], 提升碳酸钙的生成量, 进而可以提升土体的强度和耐久性^[14-15]。Sun 等^[16] 进行干湿和冻融循环试验研究了 EICP 与聚醋酸乙烯酯联合固化灰尘土壤的耐久性, 结果表明, 经其他方法简单处理的土体在两种循环下都会造成结构破坏, 而 EICP 处理后强度下降幅度明显减小, 抵抗冻融能力大于干湿, 且处理区草生长良好有利于保持长期耐久性, Wu 等^[17] 也有相似的结论。Huang 等^[18] 发现随干湿和冻融循环次数增加, 微生物诱导碳酸钙沉淀固化黏土的黏聚力逐渐减小, 黏土颗粒间强度被破坏, 土体结构受到影响。Cheng 等^[19] 在砂土中注入芽孢杆菌, 探究雨水冲刷和冻融循环造成的影响, 结果表明雨水冲刷不利于 MICP 的反应, 碳酸钙沉淀率大幅降低, 而冻融循环对级配良好的砂土影响较小, 两种情况下抗压强度均有降低。李艺隆等^[20] 在海水环境下对 MICP 固化钙质砂进行干湿循环, 发现海水中试样相比淡水具有更好的耐干湿能力, 在 21 次循环后抗压强度分别下降至原本的 30% 和 7.53%。综上, MICP 或 EICP 固化的土体在受到干湿循环或冻融循环, 会出现强度大幅下降、结构受损等问题, 力学性质被影响。因此有必要对 EICP-纤维联合加固土

体的耐久性进行研究, 确保其应用于实际工程时具有长期稳定性能。

本文在干湿循环的情况下利用 EICP 联合聚丙烯纤维改善砂土的力学性能和耐久性, 研究在 5 种掺量、30 种工况下 EICP 固化效果的影响, 通过无侧限抗压强度、质量损失率、浸泡吸水率、碳酸钙含量、砂柱表面侵蚀状态及微观试验来进行探究与评价。

1 试验材料与试验方法

1.1 原材料

1.1.1 试验用砂

试验用砂为中国厦门 ISO 标准砂, 级配曲线如图 1 所示, 其成分为二氧化硅含量≥96% 的石英砂, 由粗、中、细粒砂配置而成。制样前先将标准砂进行清洗, 去除杂质后放入 DGF30 型电热鼓风干燥箱(南京实验仪器厂)中烘干备用。基于颗粒筛分试验和干密度试验, 得出标准砂的基本性质(表 1)。

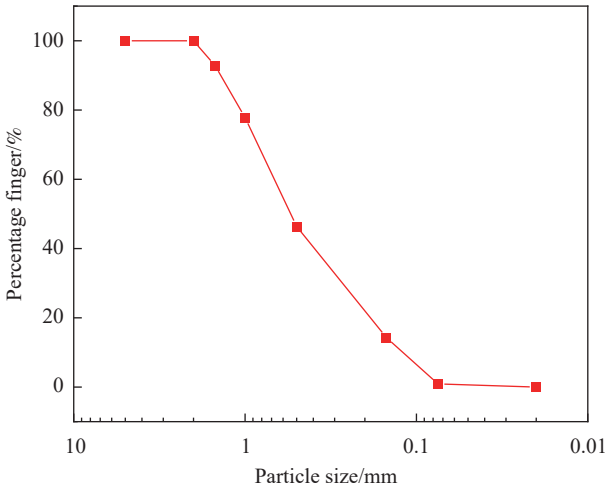


图 1 砂土颗粒级配曲线

Fig. 1 Sand particle grading curve

表 1 标准砂的物理力学性质

Table 1 Physical and mechanical properties of standard sand

Effective particle size/mm			Relative density/(g·cm ⁻³)	Curvature coefficient	Nonuniformity coefficient	Maximum dry density/(g·cm ⁻³)	Minimum dry density/(g·cm ⁻³)
D ₁₀	D ₃₀	D ₆₀					
0.13	0.3	0.66	2.65	1.05	5.07	1.9	1.54

Note: D₁₀, D₃₀, D₆₀—Diameter at 10%, 30%, 60% passing, respectively.

1.1.2 大豆脲酶与胶结液

本试验所需脲酶从黄豆中提取：(a) 购买市售黄豆，使用 800 Y 多功能粉碎机 (武义海纳电器有限公司) 将黄豆研磨成豆粉后放入烘箱备用；(b) 每 100 mL 去离子水中添加 10 g 豆粉，放置在磁力搅拌机 (上海皋精科学仪器有限公司) 上，搅拌时间在 0.5~1 h 间保证均匀混合，后静置片刻沉淀豆渣；(c) 将豆粉溶液置于 HC-301BR 高速冷冻离心机 (常州普天仪器制造有限公司) 低温中速离心 15 min，取出后过滤获得的液体即为大豆脲酶溶液。

大豆脲酶活性可根据 Whiffin^[21] 提出的电导率法测得，由于脲酶水解尿素产生 NH_4^+ 和 CO_3^{2-} ，溶液内离子的变化会导致电导率改变，具体操作为：使用移液枪提取液体，将大豆脲酶溶液和 1.1 mol/L 的尿素溶液按 1 : 9 的体积比混合约 30 mL，然后将混合液体放入 30℃ 水浴锅中，使用电导率仪 (上海仪电科学仪器股份有限公司) 测定溶液电导率值，即可得到大豆脲酶活性 U_a ：

$$U_a = \frac{B - A}{15 \times 10 \times 11.11}$$

(1)

表 2 聚丙烯纤维的物理力学性质

Table 2 Physical and mechanical properties of polypropylene fiber

Specific gravity	Melting point/℃	Water absorption/%	Tensile strength/MPa	Elongation at break/%	Tensile strength at break/MPa
0.91	160	9.5	4.25	118.9	4.18

需要说明，考虑到防疫安全问题，目前室内试验使用的是干净的未拆封口罩纤维。Xiang 等^[24]研究表明，在 60~70℃ 的干热状态下 1 h 可以确保一次性口罩的杀菌效果，同时保持其过滤效率；Mohammad 等^[25]将口罩放入 75℃ 烘箱加热后进行试验，发现加热前后口罩的伸长率差异在 0.05%，口罩与水泥混合后的抗压强度差异在 8%。因此，热消毒处理废弃一次性口罩对其加筋效果和强度影响很小，本文使用干净口罩纤维得到的数据和结论有效且与实际误差不大。

1.2 试验步骤与方案

1.2.1 试验步骤

试验所用试样 (直径 $\Phi 39.1\text{ mm} \times 80\text{ mm}$) 使用对切的亚克力模具 (高 100 mm，内径 39.1 mm) 进行制备，模具装置和试验流程如图 2 所示。

具体步骤如下：(1) 在模具底部放置 $\Phi 50\text{ mm}$ 的透水石，上放一张滤纸防止砂粒与透水石粘结；(2) 控制砂柱干密度为 1.67 g/cm^3 、密实度 50%，初始孔隙率约 0.368，分别与不同掺量的聚丙烯纤维混合均匀，分三层装入模具，每层均要压实并

式中：A 为 0 min 溶液电导率值；B 为 15 min 溶液电导率值。本试验所用大豆脲酶活性在 30℃ 时平均为 22 mmol/(L·min)。

胶结液为 0.75 mol/L 的尿素和氯化钙溶液按体积比 1 : 1 混合，试验时每轮滴注胶结液与大豆脲酶溶液体积比为 1 : 1 即可。

1.1.3 加筋纤维

加筋纤维选用废弃的一次性医用口罩，剪碎后备用。一次性口罩为三层结构，主要成分均为聚丙烯纤维：最内层和最外层均为聚丙烯无纺布，纤网由连续长丝的纤维构成，具有强度高、纵横向性能接近的优点，但均匀性较差；中间层是聚丙烯熔喷布，结构由超细纤维组成，纤维直径细、孔隙率小、有表面覆盖性好的优点，但强度较低，纤维具体参数见表 2。试验前使用剪刀将口罩剪为 $2\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 的尺寸备用。目前已有学者将废弃医护材料用于土壤改性中^[22-23]，证实可提高土壤强度、增强土壤延展性、减少垂直位移，为本试验提供了一些理论参考。

刮毛；(3) 完成装样后，顶部放一层土工布，可以使脲酶和胶结液更均匀地渗入砂柱；(4) 通过 BT100-3J 蠕动泵 (保定兰格恒流泵有限公司) 以 6 mL/min 的速率依次灌注 20 mL 的大豆脲酶与胶结液，在 12 h 间隔后进行第二轮灌注，共滴注 4 轮，在固化完成后缓慢注入蒸馏水 1 h 冲洗试样即可；(5) 试件在室内养护 2 天后转入 50℃ 电热鼓风干燥箱 (DHG9240，绍兴市苏珀仪器有限公司) 内养护 5 天即可拆模进行试验。

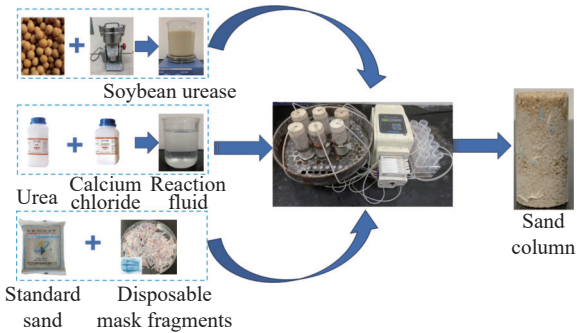


图 2 制样流程
Fig. 2 Sample preparation process

1.2.2 试验方案

干湿循环试验设计参考规范《混凝土耐久性设计规范》(GB/T 50476—2008)^[26],模拟了砂土地基在长期潮湿的不利环境下的工作状态,具体流程如下:(1)将养护好的试样取出并进行编号,称量其干燥状态的初始质量记为 m ;(2)将试样完全浸泡在去离子水中 12 h,为一增湿开胀过程,取出后小心擦净表面水分,称量吸湿后试样质量 m_1 ;(3)将试样放入烘箱中烘干 12 h,为一干燥脱湿过程,称量烘干后试样质量 m_2 ,上述流程为一轮干湿循环,可以继续进入下一循环周期。根据下式分别计算试样每轮循环的吸水率 M 和质量损失率 M' :

$$M = \frac{m_1 - m}{m} \times 100\% \tag{2}$$

$$M' = \frac{m - m_2}{m} \times 100\% \tag{3}$$

本试验试样的纤维掺量选取为 0wt%、0.1wt%、0.15wt%、0.2wt%、0.25wt% 和 0.3wt%,共进行 1~11 轮干湿循环,在每轮干湿循环后进行无侧限抗压强度试验分析其强度的变化情况,并采用酸洗法测得试样内残余的碳酸钙含率。试样浸湿过程如图 3,具体工况见表 3。

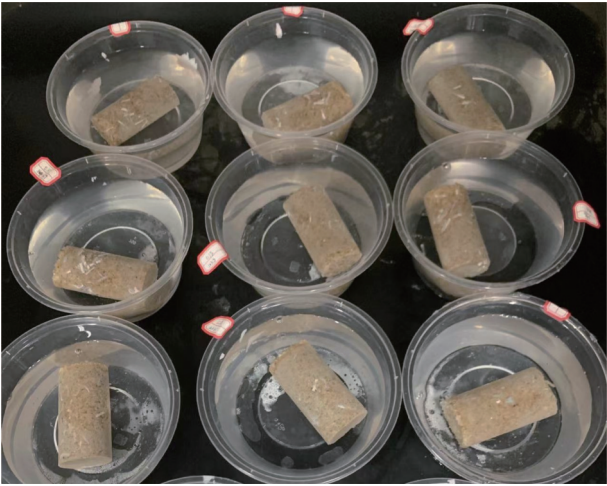


图3 浸湿过程

Fig.3 Wetting process

表3 工况设置

Table 3 Operating condition settings

Test condition	Fiber content/wt%	Dry-wet cycle number/time
W-D	0, 0.1, 0.15,	1, 3, 5,
	0.2, 0.25, 0.3	7, 9, 11

Notes: W—Wet; D—Dry.

2 试验结果与分析

2.1 无侧限抗压强度

干湿循环过程中会受人工扰动和温度影响,本试验在通风橱内进行以保证不受扰动且温度变化很小。干湿循环下 EICP-聚丙烯纤维联合固化砂土的无侧限抗压强度变化情况如图 4 所示,强度损失率变化如图 5 所示。可以看出,各工况的无侧限抗压强度均随干湿循环轮次增加而逐渐减小,最终趋于稳定。

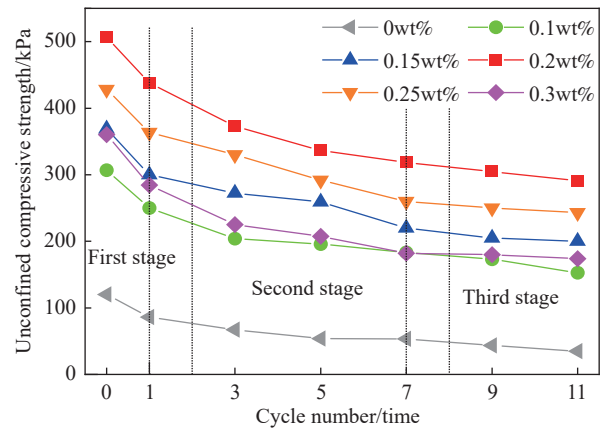


图4 干湿循环下酶诱导碳酸盐沉淀(EICP)固化砂土的无侧限抗压强度变化情况

Fig.4 Changes in unconfined compressive strength of enzyme induced carbonate precipitation (EICP) solidified sand under dry-wet cycles

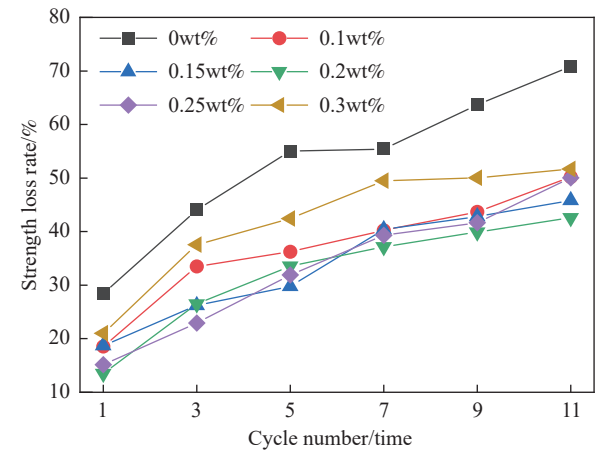


图5 不同聚丙烯纤维掺量下 EICP 固化砂土的强度损失率变化情况

Fig.5 Changes in strength loss rate of EICP solidified sand under different polypropylene fiber contents

这种变化主要可以分为 3 个阶段:(1)迅速衰减阶段:干湿循环 1 轮时,强度的下降幅度最大,对照组强度损失率为 28.4%,加筋组强度损失率为 13.5%~18.7%,其中损失率最小的是纤维掺量 0.2wt% 组。这是由于干湿循环作用下,湿胀干缩

会破坏试样的整体性，加上水流迅速进入试样的冲击作用，均会导致试样内部碳酸钙流失，粘结作用减弱。根据 Ciantia 等^[27] 研究可知，当水淹没进而渗透试样后，粉状粘结剂、未粘结或松散粘结的方解石等会迅速进入悬浮状态，EICP 处理后的砂柱中有一部分碳酸钙存在于砂粒间的孔隙中，没有起到连接砂粒的作用，因此受水侵蚀后易流失，导致强度降低。加筋组由于纤维的存在，使大量碳酸钙附着在纤维丝上，对碳酸钙晶体起固定作用，减少了碳酸钙流失量，因此强度下降幅度相对小；(2) 缓慢衰减阶段：干湿循环 2~7 轮时，强度的下降幅度逐渐变缓，是由于第一轮时大部分游离的碳酸钙已遭到破坏，随干湿循环轮次增加，剩余碳酸钙比较牢固不易“失活”，因此干湿循环对强度影响降低。在 7 轮循环结束时掺量 0.2wt% 组的强度损失率为 37.18%，对照组强度损失率为 55.42%；(3) 强度稳定阶段：干湿循环 8~11 轮时，无侧限抗压强度的变化趋势平缓，已基本稳定。但从强度损失率来看，这个阶段加筋组的强度损失率变化不大，而对照组的强度损失率还在持续增长，说明了加筋确实也有利于维持改良砂土在干湿侵蚀下的强度。

根据无侧限抗压强度结果可知，干湿循环次数一定时，无侧限抗压强度随纤维掺量的增加呈先增大后减小的趋势，这是由于一定量的纤维可以提高碳酸钙的生成率并减少流失率，而过量的纤维反而更易吸水，出现薄弱处，导致砂柱黏聚程度下降。经过 11 轮干湿循环后，对照组的剩余强度约 35 kPa，强度损失率达 70.83%，加筋组的强度损失率在 42.6%~51.7%，其中纤维掺量 0.2wt% 时强度损失率最小且剩余强度最大约 290.9 kPa，说明添加聚丙烯纤维可以抑制 EICP 固化砂土受干湿侵蚀导致的强度衰减。

2.2 质量损失率

在干湿循环侵蚀下，砂柱表面会出现不同程度的剥落情况，是由于试样湿胀干缩造成，可以根据质量损失率来评判砂柱整体性受到破坏的程度，EICP-聚丙烯纤维联合固化砂柱的质量损失率变化情况如图 6 所示。可以看出，当干湿循环次数增多时，不同纤维含量试样的质量损失率均逐渐变大；当循环次数相同时，试样质量损失率随掺量增加基本呈先减小后增大的趋势，且加筋组质量损失率均小于对照组。当经过 1 轮干湿循环

时，对照组质量损失率为 0.72%，加筋组质量损失率为 0.54%~0.7%，相差不大；而干湿循环 11 轮结束后，对照组质量损失率达到 4.31%，加筋组质量损失率在 2.26%~3.46%，其中纤维掺量 0.2wt% 时损失率最小。对于各工况曲线出现平缓-突增现象，如对照组第 3、8、10 周期出现的质量损失率突增，分析原因是由于某些矿化效果良好的点位在受到多次干湿侵蚀后累计了许多破坏势能，达到临界状态后就会突然剥落使质量损失率增幅变大。同时可以发现干湿循环 7 轮后，虽然强度变化不大，但质量损失率的变化幅度没有减缓，依然持续增长，说明砂柱受干湿侵蚀强度稳定后表面还会持续破坏。

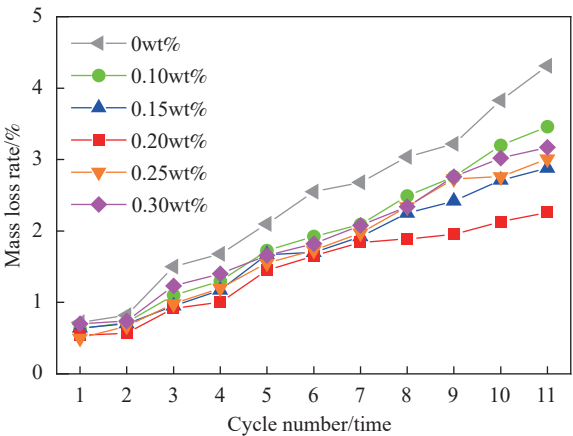


图 6 干湿循环下 EICP 固化砂土的质量损失率变化情况
Fig. 6 Changes in mass loss rate of EICP solidified sand under dry-wet cycles

综上所述可知，聚丙烯纤维加筋对保持 EICP 固化砂柱在干湿侵蚀下的长期完整性有利，且试样的初始无侧限抗压强度越大，最终质量损失率就越小。分析原因，初始强度高的试样本身碳酸钙含率更高、胶结程度更加紧密，受破坏相对困难，同时纤维可以抑制裂隙发展，减缓砂柱内胶结程度的降低，因此加筋后强度越高的试样砂粒更不易剥落，质量损失率更小。

2.3 浸泡吸水率

改良砂土试样在干湿循环后由于砂粒剥落，加上整体不断的收缩和膨胀，会使内部碳酸钙胶结减弱，孔隙扩张，因此试样每轮干湿循环的吸水率在不断变化，这也是影响试样强度的原因之一，各工况试样的吸水率随干湿循环次数变化的结果如图 7 所示。很明显，各工况的吸水率均随干湿循环次数增加而增大，增加幅度在干湿循环

后期逐渐变缓；干湿次数一定时，加筋组基本可以视为纤维掺量越多的吸水率越大，且对照组的吸水率始终大于加筋组。干湿循环前 6 轮时，纤维掺量 0.15wt% 组的吸水率最小，继续进行干湿作用后就变为掺量 0.1wt% 组的吸水率最小。当干湿循环 11 轮时，对照组吸水率达到约 15.8%，掺量 0.1wt% 组的吸水率最小约 14.5%。

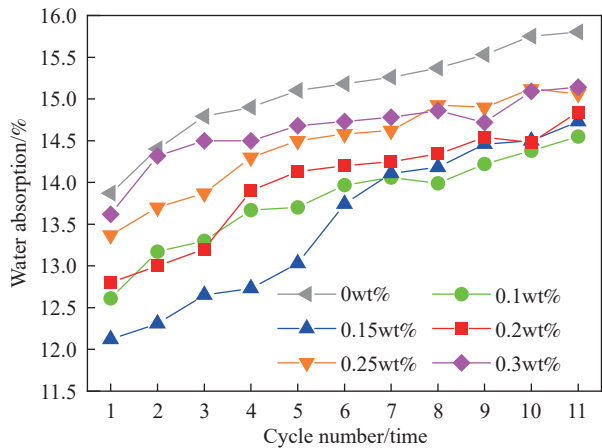


图 7 干湿循环下 EICP 固化砂土的吸水率变化情况
Fig. 7 Changes in water absorption of EICP solidified sand under dry-wet cycles

上述结果说明，改良砂土每轮干湿时的吸水率是孔隙率、聚丙烯纤维掺量(口罩本身吸水性

强)、碳酸钙含率等共同作用的结果，添加聚丙烯纤维有利于降低 EICP 固化砂土的吸水率。试样吸水率增幅与无侧限抗压强度降幅的变化均为先大后小，随着强度越低，试样胶结程度减弱，吸水率便逐渐升高；越高的吸水率对试样内部的冲刷和侵蚀作用越大，对强度产生负面作用，因此二者是一个互相关联影响的关系。

2.4 碳酸钙含率

碳酸钙含率是判断改良砂土加固效果、胶结程度的指标之一，为研究干湿循环过程中碳酸钙的具体流失情况，将已测完无侧限抗压强度的试样分上、中、下三部分，分别测量碳酸钙含率，结果如图 8 所示。图中的 T、M、B 分别指上、中、下，例如 0-T 指对照组上部碳酸钙含率随干湿循环次数增加的变化情况。可以看出，不同纤维掺量试样的三部分碳酸钙含率均随干湿循环次数增加而减少，这验证了前文的看法，黏性小或附着在砂粒表面的碳酸钙会在水流侵蚀下悬浮而流失。由图可知，各试样初始状态均为上部的碳酸钙生成率最大，对照组在 11 轮干湿循环后上、中、下三部分碳酸钙损失率分别为 44.8%、33.3% 和 35.3%，纤维掺量 0.2wt% 组的碳酸钙损失率分别为 36%、32% 和 29.1%，说明无论是否添加纤维，试样上部碳酸钙损失率均大于中下部。分析原因，

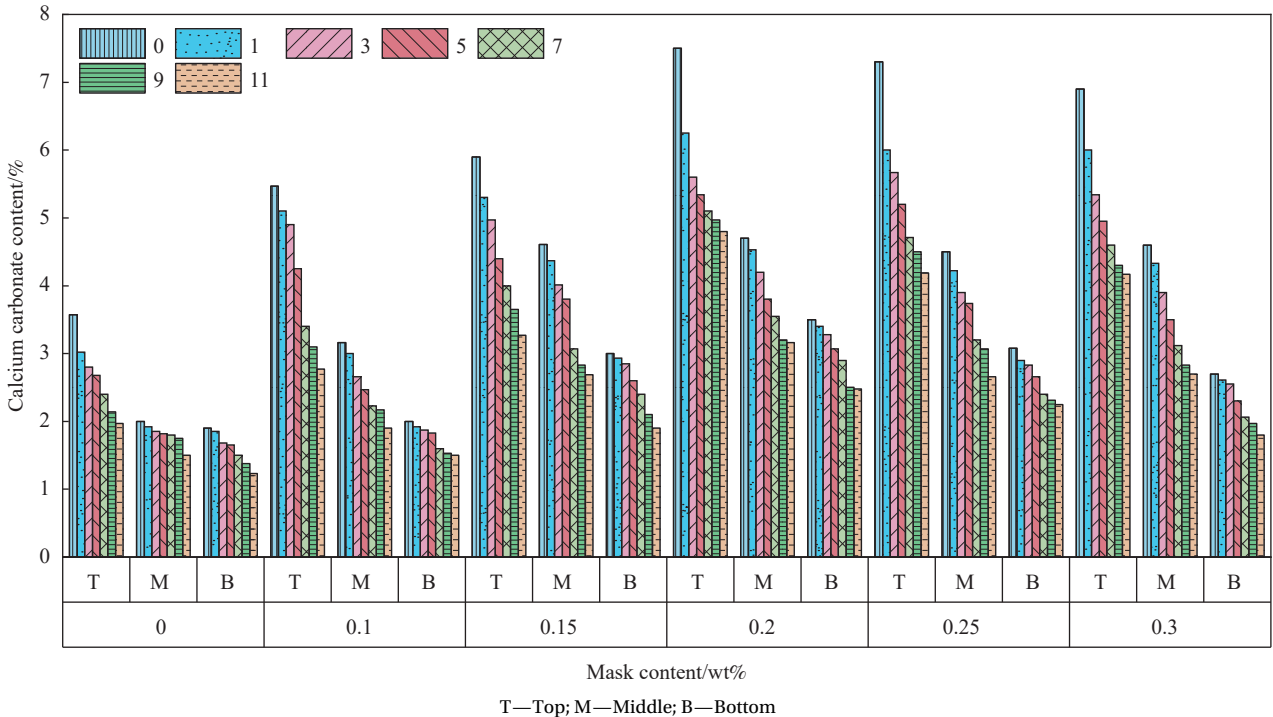


图 8 干湿循环下 EICP 固化砂土的碳酸钙含率变化情况
Fig. 8 Changes in calcium carbonate content of EICP solidified sand under dry-wet cycles

考虑到制样时不可避免小部分粉砂与细砂会向下部移动, 因此试样上部粒径大的砂粒占比较多, 孔隙相比中下部更大, 导致沉淀在上部的碳酸钙更易受水侵蚀而流失。

将各工况试样上、中、下三部分的碳酸钙含率取平均值 (图 9), 很明显试样内碳酸钙在前几轮干湿循环中损失较大, 后期碳酸钙含率减小趋势逐渐平缓。对照组的碳酸钙含率平均值经 11 轮干湿循环后从 2.49% 下降到 1.57%, 加筋组的碳酸钙含率平均值始终大于对照组, 纤维掺量 0.2wt% 组的碳酸钙含率平均值从 5.23% 下降到 3.48%, 可见干湿循环 11 轮后掺量 0.2wt% 组的碳酸钙含率比受干湿循环侵蚀前对照组的初始碳酸钙含率还要高。综上所述, 纤维加筋能显著提高 EICP 固化砂土的碳酸钙生成率, 并能起固定碳酸钙晶体的作用, 可有效减少其流失, 达到提高改良砂土抵抗干湿循环损伤能力的目的。

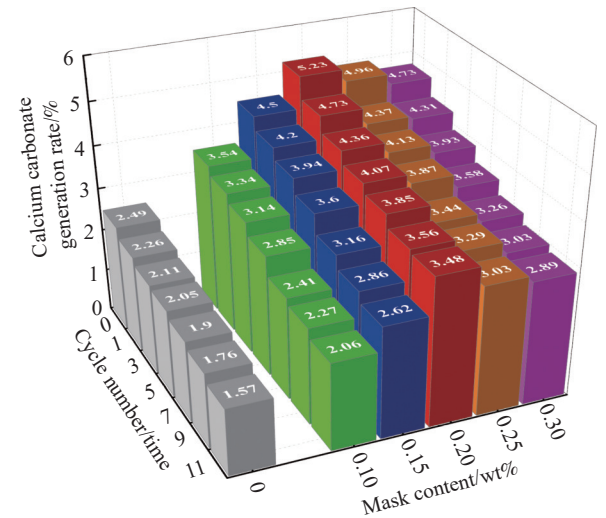


图 9 干湿循环下 EICP 固化砂土的碳酸钙含率平均值
Fig. 9 Average calcium carbonate content of EICP solidified sand under dry-wet cycles

2.5 砂柱表面侵蚀状态

图 10 是经过干湿循环 11 轮后各工况试样的侵蚀状态, 可以看到各工况都能保持结构的基本整体性, 没有断裂破碎的情况。EICP 固化的纯砂试样表面剥落情况最严重, 特别是上部、下部已有很明显的缺损; 纤维加筋后砂柱损伤度得到改善, 加筋组试样的外观整体强于对照组, 特别是纤维掺量 0.15wt%~0.25wt% 的试样, 仅为边缘砂颗粒剥落, 没有明显损伤; 掺量 0.1wt% 组剥落较明显的原因考虑为纤维掺量太少, 对碳酸钙

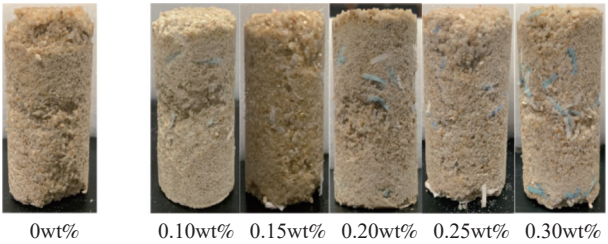


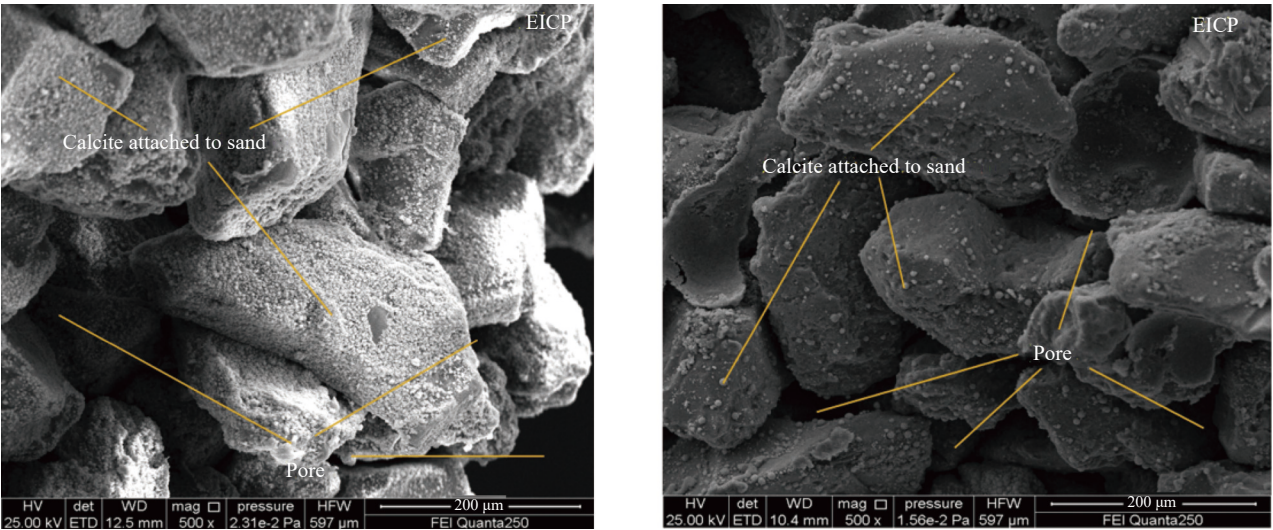
图 10 不同聚丙烯纤维掺量下干湿循环 11 轮后试样状态
Fig. 10 Sample state after 11 cycles of dry-wet cycles under different polypropylene fiber contents

含率的提升和固定作用不明显; 掺量 0.3wt% 则是纤维过多在一些部位堆积导致试样存在薄弱处, 经干湿循环后该部位砂粒易脱落。

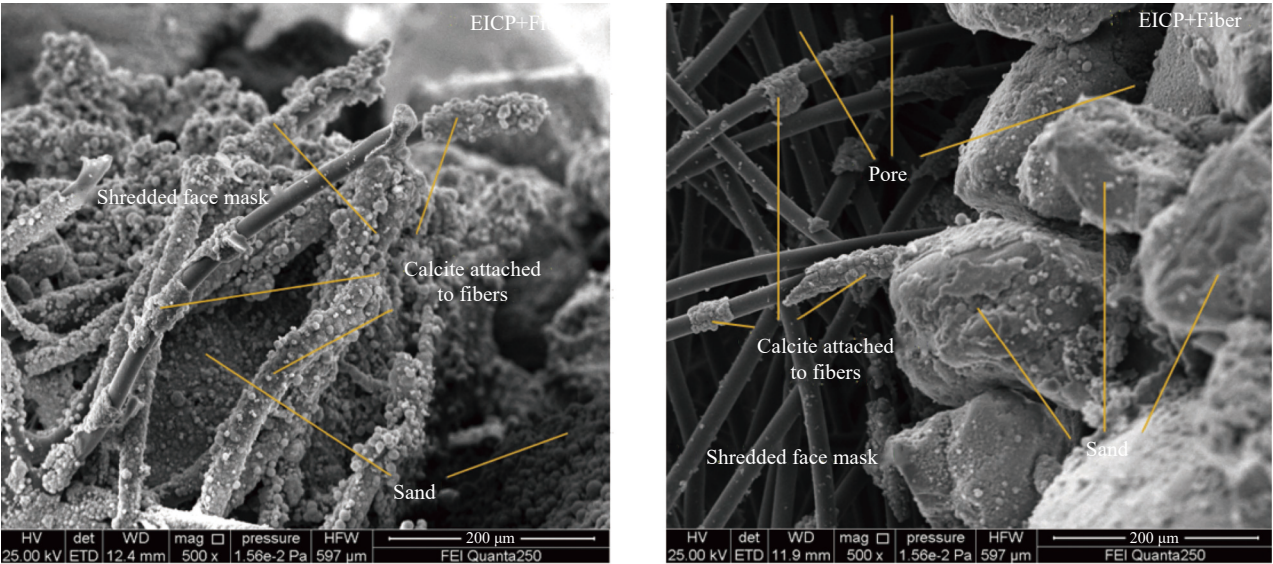
3 微观分析

取小块固化试样放在扫描电镜下观察, 分析聚丙烯纤维与 EICP 胶结砂土的微观机制作用, 以纤维掺量为 0.2wt%、干湿循环 11 轮后的工况为例。土体内部微观结构如图 11 所示, 分别为单纯 EICP 处理的砂土、聚丙烯纤维联合 EICP 处理的砂土、经干湿循环后 EICP 处理的砂土及经干湿循环后聚丙烯纤维联合 EICP 处理的砂土。

图 11(a) 是仅在 EICP 处理的情况下干湿循环前后碳酸钙分布情况及内部结构情况, 可以看出仅在 EICP 处理的情况下内部孔隙结构比较明显, 并且经过干湿循环后明显可以看出附着在砂颗粒表面的碳酸钙晶体明显减少, 由此可以证实仅在 EICP 处理的情况下经过多次干湿循环后碳酸钙晶体含量明显下降, 进而其无侧限抗压强度及其力学性能也会随之下降。图 11(b) 是在 EICP 联合聚丙烯纤维共同作用下干湿循环前后碳酸钙分布情况及内部结构情况, 可以看出纤维为碳酸钙的生成提供了成核位点, 大量的碳酸钙晶体附着在纤维上, 同时经过数轮的干湿循环后, 纤维上的碳酸钙晶体也是大幅度下降, 但是相比于仅 EICP 处理的砂土颗粒还是有较好的力学性能。通过试验及微观分析可以证实 EICP 处理的聚丙烯纤维加筋砂土在一定程度上可以提高砂土的耐久性, 纤维可以为碳酸钙提供大量的成核位点, 提升了碳酸钙的生成量, 产生更强的胶结力, 更多的碳酸钙也将填充更多的孔隙, 从而减弱干湿循环中水流的侵蚀作用。并且碳酸钙可以对纤维起到包裹作用, 也会减少干湿循环过程中水流对纤维自身的影响, 在一定程度上也可以提高砂土的强度和耐久性。



(a) Sand treated by EICP



(b) Sand treated by EICP combined with polypropylene fiber

图 11 干湿循环下加筋前后 EICP 固化砂土的 SEM 微观图像

Fig. 11 SEM micrographs of EICP-cured sandy soil before and after reinforcement under dry-wet cycles

4 结论

基于无侧限抗压强度试验，质量损失率、吸水率和碳酸钙含率的测定，对聚丙烯纤维-酶诱导碳酸盐沉淀 (EICP) 联合固化砂土进行干湿循环处理，来探究改良砂土受干湿侵蚀下加固效果的变化情况，得到以下结论：

(1) 纤维加筋可以提高 EICP 固化砂土抵抗干湿侵蚀的能力。随干湿循环进行，改良砂土的无侧限抗压强度逐渐减小，在干湿作用后期，强度变化趋于稳定。经过 11 轮干湿循环后，EICP 固化纯砂试样强度下降至 35 kPa，强度损失率为 70.83%；而纤维掺量 0.2wt% 组试样的剩余强度还

有 290.9 kPa，强度损失率为 42.59%；

(2) 改良砂土的质量损失率随干湿循环次数增加而逐渐增大，随纤维掺量增加呈先减小后增大的趋势，掺量 0.2wt% 时最小。干湿循环 11 轮后对照组的的质量损失率为 4.31%，加筋组质量损失率最小为 2.26%，说明聚丙烯纤维加筋能有效减少砂粒剥落，有利于保持砂柱在干湿侵蚀下的整体完整性；

(3) 改良砂土的吸水率均随干湿循环次数增加而逐渐增大，加筋组吸水率始终小于对照组，且纤维掺量越小吸水率越小。干湿循环 11 轮后，对照组吸水率约 15.8%，加筋组吸水率在掺量 0.1wt%

时最小, 约 14.5%;

(4) 添加聚丙烯纤维可以起固定碳酸钙的作用, 有效减少其流失, 对照组试样三部分的碳酸钙含率平均值由 2.49% 下降到 1.57%, 掺量 0.2wt% 组试样的碳酸钙含率平均值由 5.23% 下降到 3.48%。

综上所述, 添加聚丙烯纤维可以提高 EICP 固化砂土的耐久性, 减少碳酸钙损失率, 维持试样在长期干湿作用下的胶结度, 使其能保持自身一定强度和结构整体性。

参考文献:

[1] SHU S, YAN B Y, MENG H, et al. Comparative study of EICP treatment methods on the mechanical properties of sandy soil[J]. *Soils and Foundations*, 2022, 62(6): 101246.

[2] 张建伟, 李贝贝, 边汉亮, 等. 钙源对酶诱导碳酸钙沉淀影响的试验研究 [J]. *应用基础与工程科学学报*, 2022, 30(5): 1245-1255.

ZHANG Jianwei, LI Beibei, BIAN Hanliang, et al. Experimental study on the effect of calcium sources on enzyme-induced calcium carbonate precipitation [J]. *Journal of Applied Fundamentals and Engineering Science*, 2022, 30(5): 1245-1255(in Chinese).

[3] 曹光辉, 刘士雨, 俞缙, 等. 酶诱导碳酸钙沉淀 (EICP) 技术及其在岩土工程中的应用 [J]. *高校地质学报*, 2021, 27(6): 754-768.

CAO Guanghui, LIU Shiyu, YU Jin, et al. Enzyme-induced calcium carbonate precipitation (EICP) technology and its application in geotechnical engineering [J]. *Journal of Geology of Higher Education Institutions*, 2021, 27(6): 754-768(in Chinese).

[4] 刘汉龙, 肖鹏, 肖杨, 等. 微生物岩土技术及其应用研究新进展 [J]. *土木与环境工程学报*, 2019, 41(1): 1-14.

LIU Hanlong, XIAO Peng, XIAO Yang, et al. New progress in microbial geotechnical technology and its application research [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2019, 41(1): 1-14(in Chinese).

[5] 吴林玉, 缪林昌, 孙潇昊, 等. 植物源脲酶诱导碳酸钙固化砂土试验研究 [J]. *岩土工程学报*, 2020, 42(4): 714-720.

WU Linyu, MIAO Linchang, SUN Xiaohao, et al. Experimental study on plant-derived urease-induced calcium carbonate solidification of sandy soil [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, 42(4): 714-720(in Chinese).

[6] 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 Weimin, LIU Zhangrong, et al. Research progress on soil solidification based on biologically induced calcium carbonate precipitation [J]. *Geotechnical Mechanics*, 2022, 43(2): 345-357(in Chinese).

[7] 董博文, 刘士雨, 俞缙, 等. 基于微生物诱导碳酸钙沉淀的天然海水加固钙质砂效果评价 [J]. *岩土力学*, 2021, 42(4): 1104-1114.

DONG Bowen, LIU Shiyu, YU Jin, et al. Evaluation of the effect of natural seawater reinforcement on calcareous sand based on microbial-induced calcium carbonate precipitation [J]. *Geotechnical Mechanics*, 2021, 42(4): 1104-1114 (in Chinese).

[8] 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 on biological soil fixation for wind and sand prevention [J]. *Journal of Geology of Higher Education Institutions*, 2021, 27(6): 687-696 (in Chinese).

[9] 范广才, 缪林昌, 孙潇昊, 等. 脲酶抑制剂对 EICP 防风固沙效果的影响研究 [J]. *防灾减灾工程学报*, 2022, 42(5): 1019-1027.

FAN Guangcai, MIAO Linchang, SUN Xiaohao, et al. A study on the effect of urease inhibitors on the windbreak and sand fixation of EICP [J]. *Journal of Disaster Prevention and Reduction Engineering*, 2022, 42(5): 1019-1027(in Chinese).

[10] 边汉亮, 吉培瑞, 王俊岭, 等. EICP 修复重金属污染土的环境耐久性研究 [J]. *岩土力学*, 2023, 44(10): 2779-2788.

BIAN Hanliang, JI Peirui, WANG Junling, et al. Research on environmental durability of EICP remediation of heavy metal polluted soil [J]. *Geotechnical Mechanics*, 2023, 44(10): 2779-2788(in Chinese).

[11] 邓红卫, 罗益林, 邓峻仁, 等. 微生物诱导碳酸盐沉积改善裂隙岩石防渗性能和强度的试验研究 [J]. *岩土力学*, 2019, 40(9): 3542-3548, 3558.

DENG Hongwei, LUO Yilin, DENG Jieren, et al. Experimental study on microbially induced carbonate deposition to improve the anti-seepage performance and strength of fractured rocks [J]. *Geotechnical Mechanics*, 2019, 40(9): 3542-3548, 3558(in Chinese).

[12] FANG X W, YANG Y, CHEN Z, et al. Influence of fiber content and length on engineering properties of MICP-treated coral sand[J]. *Geomicrobiology Journal*, 2020, 37(6): 582-594.

[13] DEJONG T J, FRITZGES B M, NÜSSELEIN K. Microbially induced cementation to control sand response to undrained shear[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2006, 132(11): 1381-1392.

[14] XIAO Y, HE X, EVANS M T, et al. Unconfined compressive and splitting tensile strength of basalt fiber-reinforced biocemented sand[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2019, 145(9): 04019048.

[15] ZHANG J W, YIN Y, SHI L, et al. Experimental investigation

- on mechanical behavior of sands treated by enzyme-induced calcium carbonate precipitation with assistance of sisal-fiber nucleation[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2022, 10: 992474.
- [16] SUN X H, MIAO L C, WANG H X, et al. Research on freeze-thaw and dry-wet durability of enzymatic calcification for surface protection.[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2022, 29(11): 16762-16771.
- [17] WU L Y, MIAO L C, SUN X H, et al. Enzyme-induced carbonate precipitation combined with polyvinyl alcohol to solidify aeolian sand[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2021, 33(12): 04021373.
- [18] HUANG W, MOU Y Q, LI Y, et al. Study on durability of MICP treated cohesive soils under dry-wet cycle and freeze-thaw cycle[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2022, 15(5): 422.
- [19] CHENG L, SHAHIN M A, MUJAH D. Influence of key environmental conditions on microbially induced cementation for soil stabilization[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2016, 143(1): 4016083.
- [20] 李艺隆, 国振, 徐强, 等. 海水环境下 MICP 胶结钙质砂干湿循环试验研究 [J]. *浙江大学学报 (工学版)*, 2022, 56(9): 1740-1749.
LI Yilong, GUO Zhen, XU Qiang, et al. Experimental study on dry wet cycles of MICP cemented calcareous sand in seawater environment [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Edition)*, 2022, 56(9): 1740-1749(in Chinese).
- [21] WHIFFIN V S. Microbial CaCO_3 precipitation for the production of biocement[D]. Perth, Australia: Murdoch University, 2004.
- [22] 闭东民, 孔纲强, 陈庚, 等. 废弃口罩加筋固化土的强度特性与破坏模式 [J]. *防灾减灾工程学报*, 2022, 42(5): 993-998, 1009. BI Dongmin, KONG Gangqiang, CHEN Geng, et al. Strength characteristics and failure modes of reinforced solidified soil for discarded masks [J]. *Journal of Disaster Prevention and Reduction Engineering*, 2022, 42(5): 993-998, 1009(in Chinese).
- [23] ABDULLAH G M S, AAL A A E. Assessment of the reuse of COVID-19 healthy personal protective materials in enhancing geotechnical properties of Najran's soil for road construction: Numerical and experimental study[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 320: 128772.
- [24] XIANG Y, SONG Q, GU W. Decontamination of surgical face masks and N95 respirators by dry heat pasteurization for one hour at 70℃ [J]. *American Journal of Infection Control*, 2020, 48(8): 880-882.
- [25] MOHAMMAD S, JIE L, SHANNON K, et al. Repurposing of COVID-19 single-use face masks for pavements base/subbase[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 769: 145527.
- [26] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构耐久性设计规范: GB/T 50476—2008[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for durability design of concrete structures: GB/T 50476—2008 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008(in Chinese).
- [27] CIANTIA O M, CASTELLANZA R, PRISCO D C. Experimental study on the water-induced weakening of calcarenites[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2015, 48(2): 441-461.