

羟乙基纤维素联合脲酶诱导碳酸盐沉淀固化粉砂的水稳定性

原华 孙放 李瑾 刘帅星 王凯

Water stability of silty sand solidified by enzyme-induced carbonate precipitation combined with hydroxyethyl cellulose

YUAN Hua, SUN Fang, LI Jin, LIU Shuaixing, WANG Kai

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240829.005>

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>

原位在线监测多因素协同对玻璃纤维/环氧树脂复合材料热老化性能的影响

Effects of multiple factors on thermal aging properties of glass fiber/epoxy composites using in-situ monitoring

复合材料学报. 2020, 37(7): 1531–1538 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20191017.001>

凝水膨胀充填复合材料的配比优化与形成机制凝水膨胀充填复合材料的配比优化与形成机制

Formulation optimization and formation mechanism of condensate expansion and filling composites

复合材料学报. 2019, 36(6): 1536–1545 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180913.002>

机械力诱导双重交联各向异性纤维素水凝胶的制备与性能

Preparation and properties of mechanically induced double crosslinked anisotropic cellulose hydrogel

复合材料学报. 2022, 39(2): 718–725 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210414.001>

复合材料层合板剪切稳定性试验及强度预测

Shear stability test and strength prediction of composite laminates

复合材料学报. 2023, 40(3): 1707–1717 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220530.002>

玄武岩-碳纤维/矿渣混凝土力学性能正交试验

Orthogonal experiment on mechanical properties of basalt fiber-carbon fiber/slag concrete

复合材料学报. 2020, 37(7): 1743–1753 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190930.001>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

羟乙基纤维素联合脲酶诱导碳酸盐沉淀固化粉砂的水稳定性



分享本文

原华¹, 孙放¹, 李瑾¹, 刘帅星², 王凯^{*1}

(1. 河南大学 建筑工程学院, 开封 475004; 2. 郑州宝冶钢结构有限公司, 郑州 450000)

摘要: 为提高脲酶诱导碳酸盐沉淀 (EICP) 固化地基土的效果, 本文提出羟乙基纤维素 (HEC) 联合 EICP 固化粉砂的技术, 并分析了该技术固化粉砂的水稳定性。以表面强度和水稳定性为考察指标 (水稳定性通过崩解率与浸水强度损失率评估), 进行四因素 (HEC 浓度、喷洒量、喷洒遍数、钙源浓度) 四水平正交试验, 通过微型贯入、崩解率测定、浸水强度损失率测定试验以及微观试验, 从宏观角度分析其固化机制。结果表明: 对于不同考察指标, HEC 浓度在各因素影响的主次顺序中均为第一位; HEC 联合 EICP 固化粉砂的最佳固化参数组合为: HEC 浓度为 0.6 g/L、喷洒量为 3 L/m²、喷洒遍数为 4 遍、钙源浓度为 0.75 mol/L, 此时固化粉砂的表面强度较传统 EICP 提高了 57.47%、崩解率和浸水强度损失率较传统 EICP 分别降低了 78.64% 和 83.75%; HEC 的掺入改变了 EICP 单一的胶结模式, 在土颗粒间产生“包裹”、“连接”效应, 形成土颗粒-HEC-CaCO₃ 的链式网状结构, 提高了粉砂的表面强度和水稳定性。

关键词: 酶诱导碳酸盐沉淀; 羟乙基纤维素; 正交试验; 表面强度; 水稳定性

中图分类号: TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2025)05-2753-11

Water stability of silty sand solidified by enzyme-induced carbonate precipitation combined with hydroxyethyl cellulose

YUAN Hua¹, SUN Fang¹, LI Jin¹, LIU Shuaxing², WANG Kai^{*1}

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Henan University, Kaifeng 475004, China; 2. Zhengzhou Baoye Steel Structure Co., Ltd., Zhengzhou 450000, China)

Abstract: In order to improve the effect of enzyme induced carbonate precipitation (EICP) in solidifying sub-ground soil, this study proposed a technique of hydroxyethyl cellulose (HEC) combined with EICP to solidify silty sand, and analyzed the water stability of treated silty sand. The surface strength and water stability were taken as the investigation indexes (Water stability was evaluated by disintegration rate and strength loss rate after immersion). Four factors (HEC concentration, spraying amount, spraying times, calcium source concentration) and four levels orthogonal test were carried out. The solidified mechanism was analyzed from the perspective of macro and micro through micro penetration test, disintegration rate determination test, strength loss rate after immersion determination test and micro experiments. The results showed that for different evaluation indicators, HEC concentration ranked first in the primary and secondary order of each factor's influence. The optimal solidification parameter for HEC combined with EICP to solidify silty sand is HEC concentration of 0.6 g/L, spraying amount of 3 L/m², spraying frequency of 4, and calcium source concentration of 0.75 mol/L. At this time, the surface strength of solidified silty

收稿日期: 2024-06-14; 修回日期: 2024-08-07; 录用日期: 2024-08-15; 网络首发时间: 2024-08-30 09:55:01

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240829.005>

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (42177454); 河南省 2022 年本科高校研究性教学改革研究与实践项目 (2022SYJXLX010)

National Natural Science Foundation of China (42177454); Research and Practice Program on Research Teaching Reform in Undergraduate Colleges and Universities in Henan Province in 2022 (2022SYJXLX010)

通信作者: 王凯, 博士, 讲师, 硕士生导师, 研究方向为采动岩石力学、注浆支护 E-mail: kwang@henu.edu.cn

引用格式: 原华, 孙放, 李瑾, 等. 羟乙基纤维素联合脲酶诱导碳酸盐沉淀固化粉砂的水稳定性 [J]. 复合材料学报, 2025, 42(5): 2753-2763.

YUAN Hua, SUN Fang, LI Jin, et al. Water stability of silty sand solidified by enzyme-induced carbonate precipitation combined with hydroxyethyl cellulose[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2025, 42(5): 2753-2763(in Chinese).

sand is increased by 57.47% compared to that of traditional EICP, and the disintegration rate and strength loss rate after immersion are 78.64% and 83.75% lower than those of traditional EICP, respectively. The incorporation of HEC changed the single cementation mode of EICP, generating "wrapping" and "connection" effects between soil particles, forming a chain network structure of soil particles-HEC-CaCO₃, which improves the surface strength and water stability of silty sand.

Keywords: enzyme induced carbonate precipitation; hydroxyethyl cellulose; orthogonal test; surface strength; water stability

世界范围内水土流失现象依然十分严峻，其中危害最大的水土流失类型就是水蚀。我国长江以北、黄河流域两岸广泛分布着粉砂。由于粉砂颗粒级配差、黏聚力低、质地疏松、水稳定性差，每年受降雨、地表径流、河水冲刷等影响，导致的土体流失现象尤为严重。因此如何处理粉砂土体流失问题显得尤其迫切。

目前，工程中主要通过注入水泥、石灰等无机类固化剂来固化土体^[1-3]。王盛年等^[4]发现水泥与偏高岭土掺量比为5:1时，水泥偏高岭土复合稳定粉砂土的抗渗性能最佳；李新明等^[5]通过试验研究得出石灰偏高岭土改良粉砂土的抗冻性能和强度优于天然水硬性石灰改良粉砂土。这些无机类固化剂在使用过程中可能会对生态环境带来一定的污染。与传统方法相比，酶诱导碳酸盐沉淀(EICP)^[6-7]和微生物诱导碳酸盐沉淀(MICP)技术^[8-12]作为新兴的生物固化技术，具有稳定性好、绿色环保等优点。人们尝试将EICP/MICP技术用于土体固化^[13-16]、边坡处理^[17-18]、防风固沙^[19-20]、裂缝修复^[21-22]、土壤重金属处理^[23]、古建筑保护修护^[24]等领域。

与MICP相比，EICP中脲酶的尺寸较小，不易发生堵塞^[25]。但由于脲酶呈游离态，致使EICP所生成的碳酸钙(CaCO₃)尺寸偏小且不聚集，土体固化效果低于MICP。研究人员尝试用不同方法来解决这一缺陷。Martin等^[26]将脱脂奶粉掺入EICP用来改善沉淀碳酸盐的粘附性，提高处理土体的强度。Hamdan等^[27]利用黄原胶等水凝胶辅助脲酶诱导碳酸盐沉淀，发现水凝胶可长时间保持水分，延长反应时间，提高碳酸盐沉淀效率。张建伟等^[28]通过废弃口罩联合EICP固化砂土的试验，发现口罩加筋可改善固化砂土的脆性破坏特征，提高CaCO₃生成率。曹光辉等^[29]借助生物刺激促进EICP中CaCO₃沉淀的生成，提高CaCO₃分布的均匀性并优化其晶体结构，固化试样的无侧限抗压强度提高至2.3 MPa。

羟乙基纤维素(HEC)是一种易溶于水的白色

或淡黄色的环保型粉末状固体。具有良好的增稠、保护水分、粘合、成膜等优点，已被广泛应用在石油开采^[30]、涂料^[31]、建筑工程^[32]等领域。

鉴于HEC自身优异的工程特性，本文尝试将HEC引入到EICP中，研究两者联合固化粉砂及其水稳定性问题。采用正交试验方法分析了四因素(HEC浓度、喷洒量、钙源浓度和喷洒遍数)对固化效果的影响，并由正交试验得出的最佳固化参数组合进行固化效果对比试验，借助微观试验探讨HEC联合EICP的作用机制。

1 试验材料及方法

1.1 原材料

试验用土取自河南省东部开封市黄泛区，其粒径分布及基本物理参数见图1。粒径大于0.075 mm的颗粒质量占总质量的56.46%，根据《建筑地基基础设计规范》(GB 50070—2011)^[33]，可确定其为粉砂。

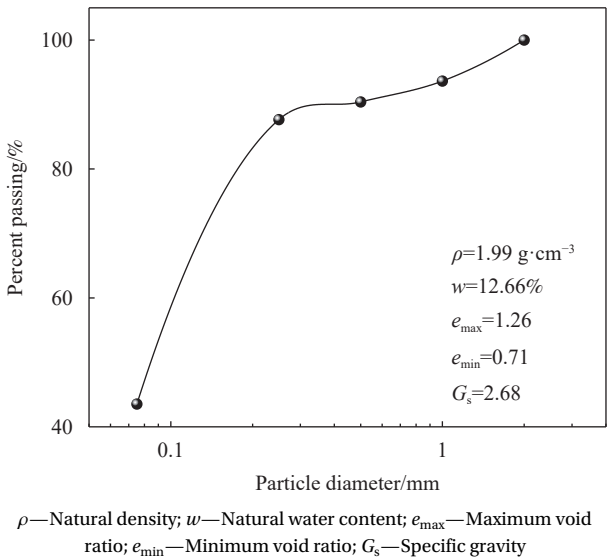


图1 黄泛区粉砂的粒径级配及基本物理参数

Fig. 1 Particle size grade and basic physical parameters of silty sand in Yellow River flooding area

从大豆中提取、制备质量浓度为100 g/L的脲酶；胶结液由CaCl₂和尿素按浓度比2:3组成；

每轮喷洒中脲酶和胶结液以体积比 1 : 1 依次喷洒。所用 HEC 购自山东赫达股份有限公司, 粒径不大于 40 目 (0.425 mm)。

1.2 试验设计

试验流程如图 2 所示: (1) 以表面强度和水稳定性 (水稳定性通过崩解率与浸水强度损失率评估) 为考察指标, 进行四因素四水平的正交试验, 得出各因素的最佳水平和主次顺序, 确定最佳固

化参数组合; (2) 基于正交试验的结果进行不同固化方式的土体固化试验, 对比固化效果, 验证 HEC 联合 EICP 在固化粉砂方面的优越性与可靠性; (3) 通过扫描电子显微镜 (SEM)、能谱测试 (EDS) 与 X 射线衍射 (XRD) 试验, 从微观角度观察土颗粒、HEC 和 CaCO_3 晶体三者之间的结合状态, 以及土样中的元素组成与晶体物质, 揭示 HEC 联合 EICP 固化粉砂的作用机制。

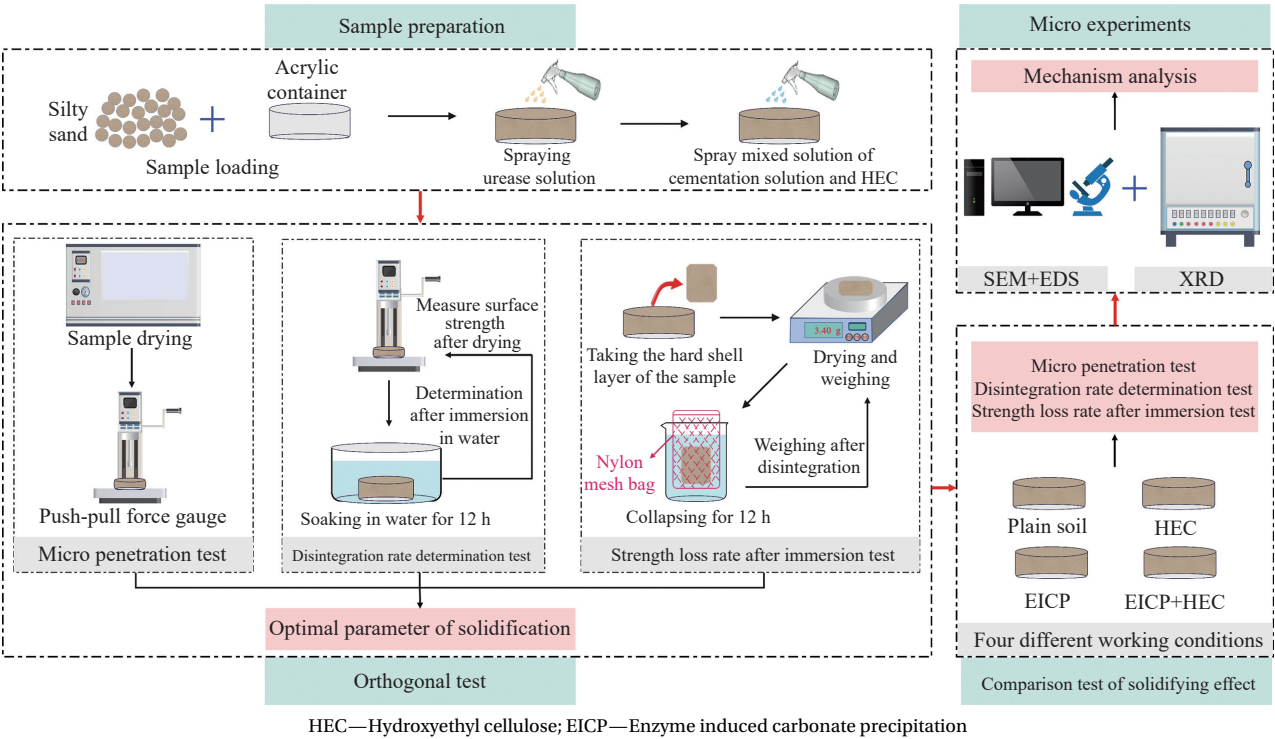


图 2 试验流程

Fig. 2 Test process

1.2.1 试样制备

烘干后的粉砂过 2 mm 筛后, 将其配制成含水率同于天然含水率的粉砂。将配制好的粉砂倒入直径为 80 mm、高度 25 mm 的亚克力质圆容器内, 每个试样质量为 250.46 g。击实后对试样端口处刮平, 并喷洒处理液, 每遍喷洒间隔 12 h。将喷洒完成后的试样置于室温 (25±2)℃ 下养护 3 d, 然后在 60℃ 的 DGF30 型烘箱 (南京实验仪器厂) 中烘干。

1.2.2 正交试验方案

进行四因素四水平的正交试验 (表 1), 具体正交试验设计方案见表 2。共测试了 16 种工况, 每种工况 6 个试样开展平行试验, 共计 96 个试样, 用来测定固化粉砂的表面强度、崩解率和浸水强度损失率。每个工况中的 3 个试样进行微型贯入

试验和崩解率测定试验, 剩余 3 个试样进行浸水强度损失率测定试验。

表 1 正交试验因素水平表

Table 1 Orthogonal experimental factor level table				
Factor				
Level	HEC concentration/(g·L ⁻¹)	Spray amount/(L·m ⁻²)	Spray frequency	Calcium source concentration/(mol·L ⁻¹)
1	0.2	1	1	0.25
2	0.4	2	2	0.5
3	0.6	3	3	0.75
4	0.8	4	4	1

1.2.3 试验方法

(1) 微型贯入试验

用艾德堡 HLD 数显式推拉力计测定试样表面

表 2 四因素正交试验方案

Table 2 Four factor orthogonal experimental scheme				
Factor				
Test number	HEC concentration/(g·L ⁻¹)	Spray amount/(L·m ⁻²)	Spray frequency	Calcium source concentration/(mol·L ⁻¹)
1	0.2	1	1	0.25
2	0.2	2	2	0.5
3	0.2	3	3	0.75
4	0.2	4	4	1
5	0.4	1	2	0.75
6	0.4	2	1	1
7	0.4	3	4	0.25
8	0.4	4	3	0.5
9	0.6	1	3	1
10	0.6	2	4	0.75
11	0.6	3	1	0.5
12	0.6	4	2	0.25
13	0.8	1	4	0.5
14	0.8	2	3	0.25
15	0.8	3	2	1
16	0.8	4	1	0.75

强度，取同一工况下 3 个平行试样表面强度 q 的平均值为最终结果，其计算公式如下：

$$q = \frac{f}{s} \tag{1}$$

式中： f 为峰值贯入力； s 为测量探头截面积，本文中为 28.07 mm²。

(2) 水稳定性测定

从固化试样表层取样，在 60℃ 烘箱中烘干后称重。之后放入尼龙网袋中浸没在去离子水中；浸水 12 h 后将崩解后的剩余土样置于 60℃ 烘箱中烘干。测量浸水前后土样干质量损失的比率，即为崩解率^[34]。

每种工况制作 6 个平行试样，将各工况 6 个试样中的 3 个直接测定其表面强度并取其平均值；剩余 3 个试样完全浸没在去离子水中，12 h 后取出来沥干，置于 60℃ 的烘箱中烘干并测定其表面强度并取其平均值，计算浸水前后的强度损失比率，即为浸水强度损失率。

(3) 微观试验

取固化后粉砂土样的硬壳层，用去离子水轻轻冲洗去硬壳层表面未反应完成的无机盐与杂质后，于 60℃ 烘箱中烘干。采用美国 FEI Quanta 250 环境扫描电子显微镜，观测处理土样的微观结构及土颗粒连接状况，揭示其固化机制。采用日本 JEOL JSM-7610F Plus 场发射扫描电镜系统进行 EDS 测试，分析试样中的元素组成进而推断其物质构成。

借助德国 D8 Advance 型 Bruker X 射线衍射仪进行 XRD 测试，以测定试样中的晶体物质。X 射线衍射仪辐射源为 Cu，波长为 0.154439 nm，狭缝宽度为 0.6 mm，扫描角度为 10°~80°，步进扫描速率为 0.025°/s，测量时间为 10 min。

2 正交试验结果分析

对各工况试样的表面强度和崩解率、浸水强度损失率试验数据进行整理，详见图 3。

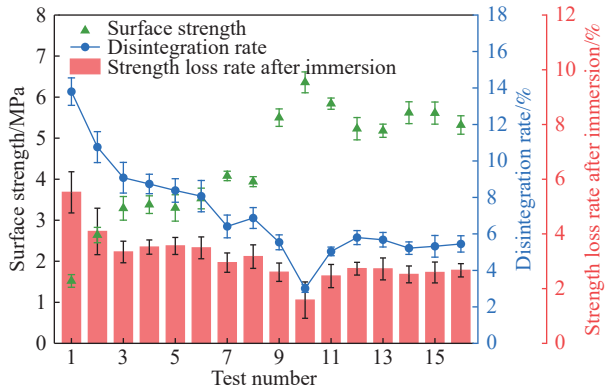


图 3 不同测试方案下土样的指标数据
Fig. 3 Index data of soil samples under different testing schemes

2.1 影响因素主次顺序分析

对图 3 中的表面强度、崩解率和浸水强度损失率数据进行极差分析。极差 R 越大说明该因素对考核指标影响越大。极差分析图中考察指标随各因素水平的变化趋势，直观反映各因素水平对考察指标的影响程度；落差越大说明该因素的影响程度越大，其在各因素影响的主次顺序中排序越靠前；反之则影响程度越小，排序越靠后。各因素对不同考察指标的极差 R 的计算公式如下：

$$R = k_{j\max} - k_{j\min} \tag{2}$$

式中： k_j 为各因素分别在第 j 水平对应 y 值的平均值 ($j=1、2、3、4$)； $k_{j\max}$ 与 $k_{j\min}$ 分别为平均值 k_j 中的最大值与最小值。

为进一步分析极差中各影响因素的显著性及最佳选择的合理性，引入方差分析。分别用 F 和 P 表示影响因子对考察指标影响的强弱和显著性。当 $P>0.05$ 时，说明影响因素不具显著性；反之则具有显著性。基于各因素离差平方和 S_v 计算方差 S ， S_v 和 S 计算公式分别如下：

$$S_v = \frac{K_1^2 + K_2^2 + K_3^2 + K_4^2}{m} - \frac{\left(\sum_{i=1}^n y_i\right)^2}{n} \tag{3}$$

式中： K_j 为每因素第 j ($j=1、2、3、4$)水平对应 y 的加和值； y_i 表示第 i 个试验的结果； m 和 n 分别表示每个水平和总的试验次数。

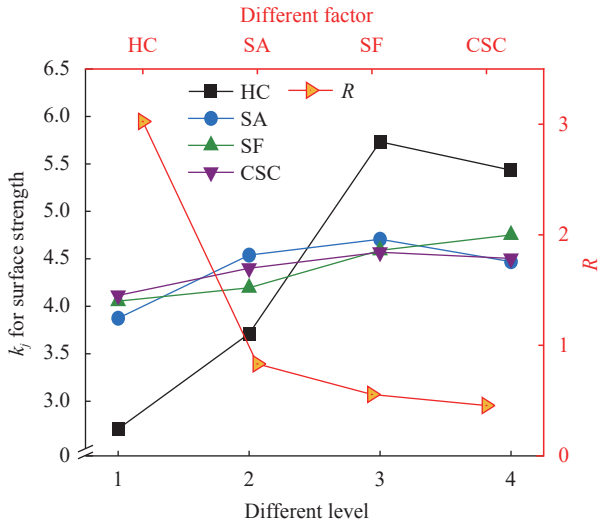
$$S = \frac{S_v}{d}$$

(4)

式中： S 为方差； d 为自由度。

2.1.1 以表面强度为评价指标

以表面强度为评价指标的各因素极差分析结果见图 4。对于表面强度这一指标，各因素影响主次顺序为 HEC 浓度>喷洒量>喷洒遍数>钙源浓度，HEC 浓度是最重要的影响因素，其次是喷洒量、喷洒遍数和钙源浓度。从试样表面强度的角度来讲，HEC 联合 EICP 固化粉砂的最佳参数组合为：HEC 浓度的第 3 水平 (0.6 g/L)、喷洒量的第 3 水平 (3 L/m²)、喷洒遍数的第 4 水平 (4 遍)、钙源浓度的第 3 水平 (0.75 mol/L)。



HC—HEC concentration; SA—Spray amount; SF—Spray frequency; CSC—Calcium source concentration; R—Range; k_j — j level corresponds to the average y value

图 4 针对表面强度的极差分析

Fig. 4 Range analysis for surface strength

各因素针对表面强度这一考察指标的方差分析结果见表 3。若以表面强度作为评价指标，HEC 浓度、喷洒量和喷洒遍数的 P 值均小于 0.05，故 HEC 浓度、喷洒量和喷洒遍数对表面强度的影响为显著，且 HEC 浓度为高度显著。而钙源浓度对表面强度影响不显著。

2.1.2 以崩解率为评价指标

以崩解率为评价指标的各因素极差分析结果见图 5。对于崩解率这一指标，各因素影响的主次顺序为 HEC 浓度>喷洒遍数>喷洒量>钙源浓度，

表 3 针对表面强度的方差分析

Table 3 Variance analysis for surface strength

Source of variance	S_v	d	S	F	$P/10^{-2}$
HC	24.73	3	8.24	213.33	0.05
SA	1.58	3	0.53	13.59	2.98
SF	1.29	3	0.43	11.08	3.94
CSC	0.49	3	0.16	4.18	13.53
Error	0.17	3	0.04	1.00	50.00

Notes: S_v —Sum of squares of deviations; d —Degree of freedom; S —Square deviation; F — F -statistic; P — P -value.

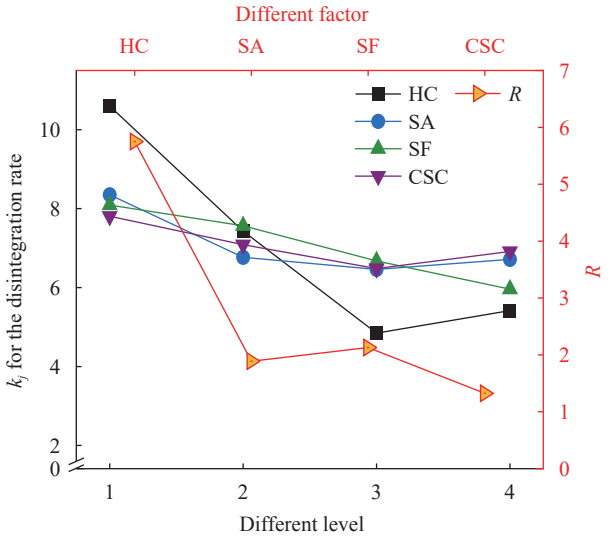


图 5 针对崩解率的极差分析

Fig. 5 Range analysis for disintegration rate

HEC 浓度是最重要的影响因素，其次是喷洒遍数、喷洒量和钙源浓度。崩解率最低所对应的固化参数组合同于 2.1.1 节。

各因素对崩解率这一考察指标的方差分析结果见表 4。若以崩解率为评价指标，HEC 浓度对崩解率的影响为高度显著；喷洒量、喷洒遍数和钙源浓度对崩解率的影响为显著。

表 4 针对崩解率的方差分析

Table 4 Variance analysis for disintegration rate

Source of variance	S_v	d	S	F	$P/10^{-2}$
HC	80.98	3	26.99	223.24	0.05
SA	8.91	3	2.97	24.55	1.30
SF	10.70	3	3.57	29.49	1.00
CSC	3.65	3	1.22	10.07	4.48
Error	0.36	3	0.12	1.00	50.00

2.1.3 以浸水强度损失率为评价指标

以浸水强度损失率为评价指标的各因素极差分析结果见图 6。对于浸水强度损失率，各因素影响的主次顺序为 HEC 浓度>喷洒遍数>喷洒量>钙源浓度，HEC 浓度仍是最重要的影响因素，其

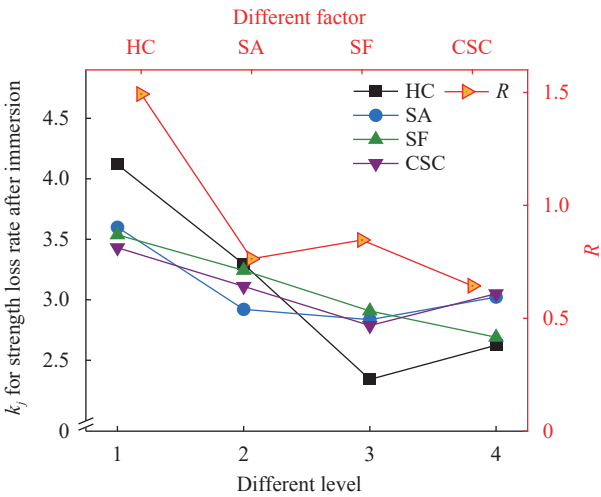


图 6 针对浸水强度损失率的极差分析

Fig. 6 Range analysis of strength loss rate after immersion

次是喷洒遍数、喷洒量和钙源浓度。浸水强度损失率最低时对应固化参数组合也同于 2.1.1 节表面强度最高所对应的参数。

各因素对浸水强度损失率考察指标的方差分析结果见表 5。若以浸水强度损失率为评价指标，HEC 浓度对浸水强度率的影响是高度显著；而喷洒量、喷洒遍数和钙源浓度三者对浸水强度损失率的影响是显著的。

表 5 针对浸水强度损失率的方差分析

Table 5 Variance analysis for strength loss rate after immersion

Source of variance	S_v	d	S	F	$P/10^{-2}$
HC	7.49	3	2.50	86.55	0.21
SA	1.43	3	0.48	16.49	2.28
SF	1.67	3	0.56	19.22	1.84
CSC	0.84	3	0.28	9.69	4.72
Error	0.09	3	0.03	1.00	50.00

以表面强度、崩解率和浸水强度损失率为考察指标分析发现，HEC 浓度的 P 值均显著低于 0.05，且远低于其他因素的 P 值。这说明 HEC 的掺入对固化粉砂土的影响非常显著，HEC 与 CaCO_3 结合效果很好。钙源浓度的 P 值显著高于其他因素，可能是由于 HEC 与钙源浓度之间存在显著的交互作用，具体来说可能是高浓度钙源和 HEC 导致溶液中分子缠结力增加，从而削弱了固化效果，使得钙源浓度的 P 值增大。

2.2 各参数对试样固化的影响分析

基于上述正交试验结果分析，可发现在粉砂固化过程中，各参数对固化效果(表面强度和水

稳定性)的影响均呈现一定的规律性。

随着 HEC 浓度的增加，固化效果呈现先增后减的趋势，当 HEC 浓度达到 0.6 g/L 时达到最佳效果。较低浓度的 HEC 溶液因其黏度不足，对土颗粒填充效果不明显，固化效果提升不显著。而高于 0.6 g/L 的 HEC 浓度则导致溶液分子间缠结力增加，界面能下降，进而增加了入渗阻力；并在喷洒初期便易堵塞土体孔隙，在土体表层形成薄膜层，从而降低了固化效果。

随着喷洒量的增加，试样的固化效果先提高后减弱，喷洒量的第三水平 3 L/m² 时表现最佳。过高的喷洒量会导致试样内部在喷洒初期便会形成大量 CaCO_3 晶体，填充并堵塞了粉砂孔隙，降低了渗透性，导致后续喷洒的溶液难以渗入到粉砂内部，进而降低固化效果。

随着喷洒遍数的增加，试样的固化效果不断提升，但第四遍喷洒后固化效果的提升程度明显小于第三遍喷洒。这是由于前三次喷洒所形成的 CaCO_3 晶体与 HEC 胶体填充了粉砂内部大部分孔隙，后续进行喷洒溶液入渗阻力增大，导致后续喷洒的固化效果提升不明显。

随着钙源浓度的增加，固化效果呈先增后减的趋势；钙源浓度在 0.75 mol/L 时固化效果最佳，1 mol/L 钙源浓度处理试样相较于 0.75 mol/L 处理试样的固化效果减弱。原因在于高浓度钙源与 HEC 溶液混合后会抑制 CaCO_3 的生成，导致孔隙填充效果减弱。

基于各参数对试样固化的影响分析及极差方差结果，可确定最佳固化参数组合：HEC 浓度为 0.6 g/L，喷洒量为 3 L/m²，喷洒遍数为 4 遍，钙源浓度为 0.75 mol/L。

3 固化效果对比分析

为验证在固化粉砂方面，HEC 联合 EICP 较其他方法的优越性，按照最佳固化参数来制备试样，并设置素土、仅 HEC、仅 EICP 3 种固化方式作为对照组，每种方式设置 3 组平行试样。根据 1.2.3 节所述试验方法，测定试样表面强度、崩解率和浸水强度损失率，其结果如图 7 所示。

素土试样表面强度为 0.42 MPa，崩解率为 98.97%，几乎完全崩解；浸水强度损失率为 94.01%。仅 HEC 固化试样的表面强度为 3.04 MPa，崩解率为 70.31%，试样崩解剧烈，在最初 1 h 内大部分土样崩解，浸水强度损失率高达 67.91%。仅 HEC

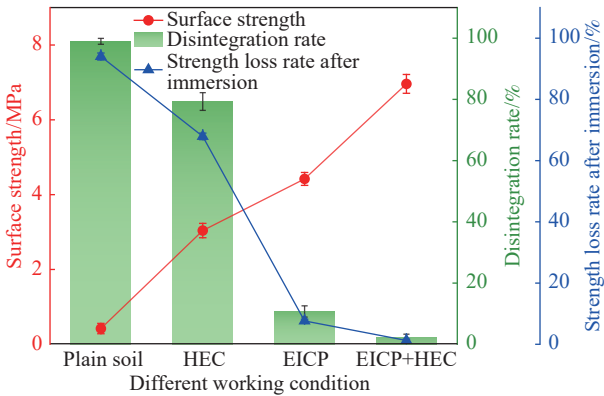


图 7 不同方式处理后试样的特性指标

Fig. 7 Characteristic indicators of samples treated with different methods

处理试样的表面强度较高，但崩解率和浸水强度损失率也较高，这是由于试样中的 HEC 遇水后吸湿膨胀，导致土颗粒连接性变差，黏聚力减小，形成裂缝；且 HEC 会溢到土体外部逐渐溶解在水中，造成试样破坏。

仅 EICP 处理试样的表面强度为 4.42 MPa，崩解率为 10.72%，浸水强度损失率为 7.63%。仅 EICP 试样的表面强度较高，崩解率与浸水强度损失率较低，主要原因是仅 EICP 试样遇水后吸水膨胀，内部孔隙被逐渐侵蚀而变大，导致土颗粒间的连接性变差，黏聚力减小，导致土颗粒剥落，

形成较小的裂缝。

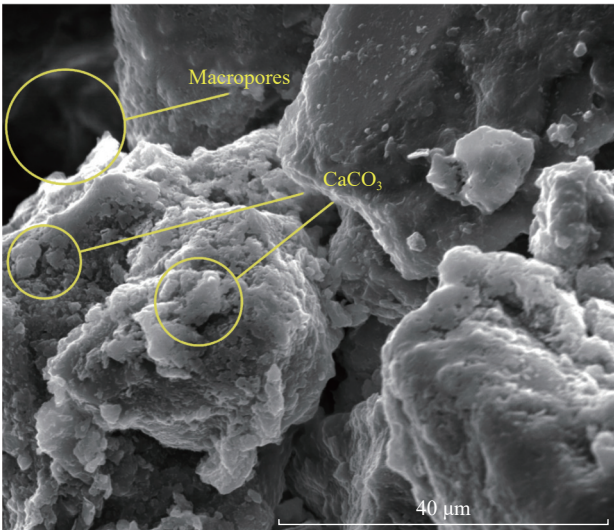
HEC 联合 EICP 试样的表面强度为 6.96 MPa，比仅 HEC 和仅 EICP 处理试样分别提高了 128.95%、57.47%；浸水后，试样防护层基本保持原状，崩解率仅为 2.29%，相较仅 HEC 和仅 EICP 处理试样分别下降 96.74% 和 78.64%；浸水强度损失率低至 1.24%，相比仅 HEC 和仅 EICP 处理试样分别下降了 98.17%、83.75%。

综上，HEC 联合 EICP 的固化效果远优于仅 HEC 和仅 EICP 的固化效果。

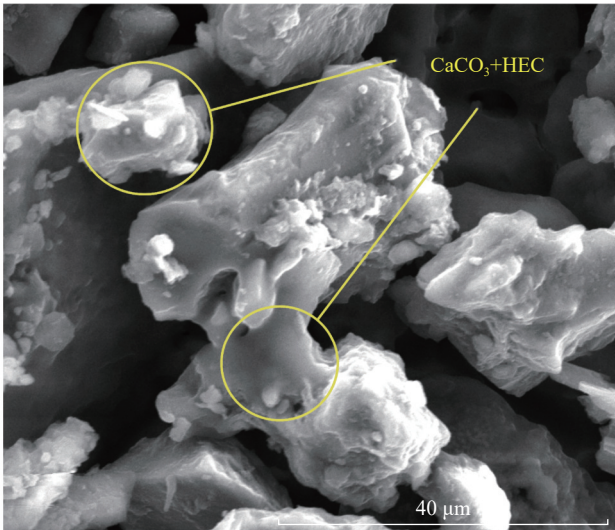
4 微观与机制分析

4.1 微观结构及元素分析

不同固化方式下试样的 SEM 结果见图 8。仅 EICP 固化时，少量 CaCO_3 晶体聚集成不规则的团簇体，并附着在部分土颗粒上，大部分 CaCO_3 晶体仍呈分散状态，土体孔隙较大(图 8(a))。HEC 的掺入，不仅增大了 CaCO_3 晶体和土颗粒的接触面积，HEC 胶体紧密包裹着土颗粒，有效填充了土体内部孔隙，土体整体性更高；且 HEC 为 CaCO_3 的沉淀提供成核位点，沉淀的 CaCO_3 不断聚集成大量片状、块状等不规则形状的大体积 CaCO_3 晶簇。生成的 CaCO_3 附着在 HEC 胶体上，土颗粒、HEC 和 CaCO_3 三者之间连接得更加紧密，土体结构更为致密(图 8(b))。



(a) EICP only



(b) HEC combined with EICP

图 8 不同方式固化试样的 SEM 图像

Fig. 8 SEM images of specimens solidified by different methods

不同方法固化试样的 EDS 图谱见图 9。仅 EICP 及 HEC 联合 EICP 处理的试样均含有 C、O

和 Ca 元素，且后者中的 Ca 元素含量远高于前者，说明后者中产生了更多的 CaCO_3 晶体，这与 HEC

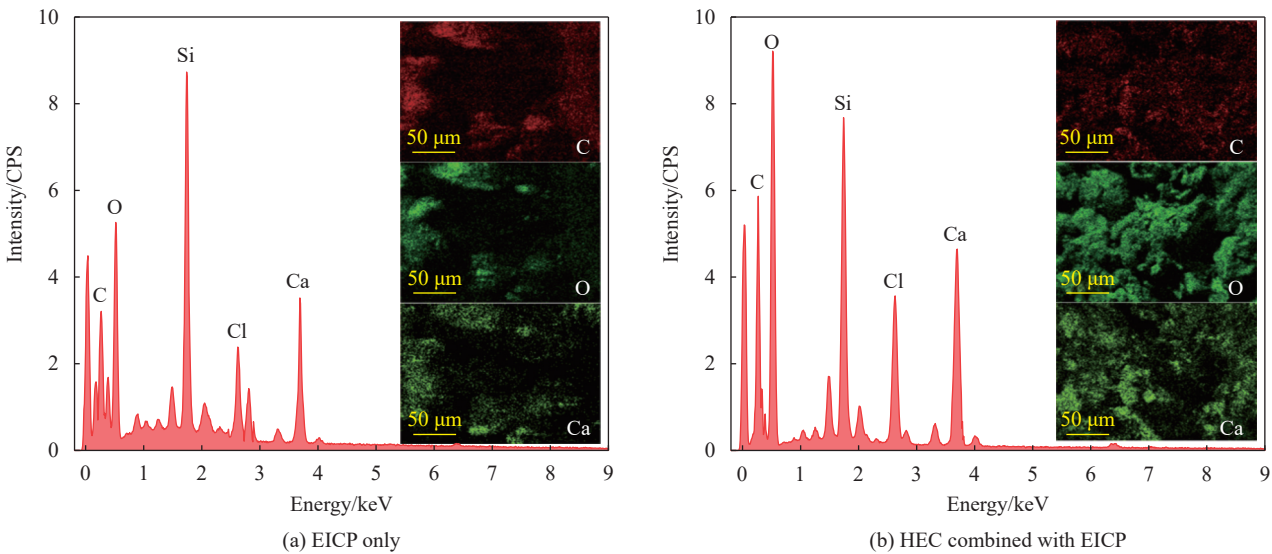


图9 不同方式固化试样的 EDS 图像

Fig. 9 EDS images of specimens solidified by different methods

为 CaCO_3 沉淀提供成核位点并促进 CaCO_3 生成的推断一致。可能由于所添加的 HEC 也能提供一部分 C、O 元素，HEC 联合 EICP 处理试样中的 C、O 元素含量均超过 Ca 元素，这与图 8(b) SEM 图像中观察到 HEC 胶体与 CaCO_3 晶体混合体的现象相吻合。同时，两种试样中均检测到 Si 和 Cl 元素，这些元素分别来源于粉砂的组分和胶结液的残留物。

4.2 晶体结构

不同处理方式土样的 XRD 结果见图 10。素土 XRD 图谱中方解石的衍射峰不显著，表明其中以方解石晶体形态存在的 CaCO_3 含量偏低。EICP 处

理土样的 XRD 图谱中方解石衍射峰的峰数和峰值均有增加，说明 EICP 促使沉淀的 CaCO_3 以方解石晶体形态呈现。而经 HEC 联合 EICP 处理土样的 XRD 图谱中，方解石衍射峰的峰值个数虽与仅 EICP 处理土样相同，但方解石衍射峰的峰值明显增强，说明以方解石形式存在的 CaCO_3 晶体明显增加，HEC 联合 EICP 能生成更多方解石形态的 CaCO_3 晶体；而方解石是 CaCO_3 晶体中最稳定的存在形式^[35]。

4.3 作用机制

HEC 联合 EICP 固化粉砂的机制如图 11 所示。大豆脲酶将尿素水解后生成了 CO_3^{2-} ， CO_3^{2-} 与钙源中的 Ca^{2+} 相结合形成 CaCO_3 沉淀，并沉积在土颗粒表面。HEC 胶体自身的持水、保湿及增稠性能，

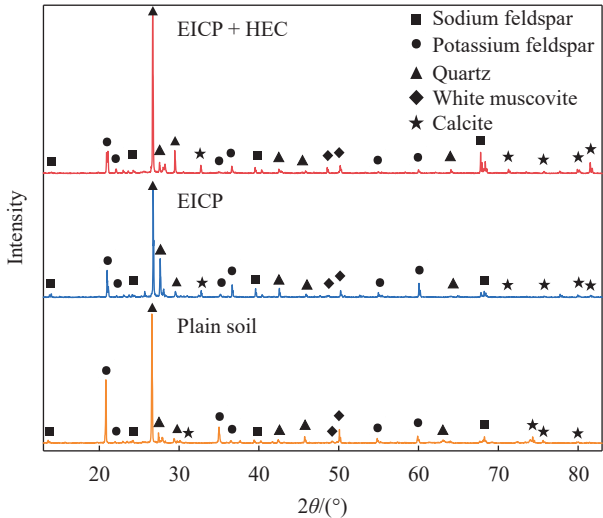


图10 不同方式处理土样的 XRD 图谱

Fig. 10 XRD patterns of soil treated with different methods

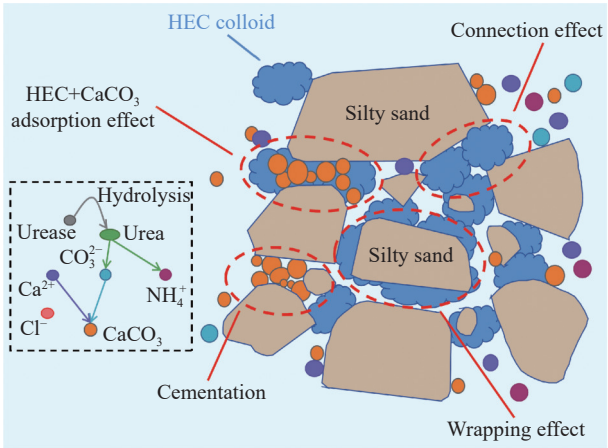


图11 HEC 联合 EICP 固化粉砂的机制

Fig. 11 Mechanism of solidifying silty sand by HEC combined with EICP

为尿素的水解提供有利条件,增加了碳酸钙的生成量。HEC对于土颗粒的“包裹”、“连接”效应,使松散的土颗粒转变为更加稳定的团聚体。HEC为CaCO₃晶体提供成核位点,游离的CaCO₃减少,形成了更多的CaCO₃晶簇。土颗粒-HEC-CaCO₃链式网状结构的形成,进一步提高了土颗粒的胶结力,增大土体密实度,增强了骨架效应,提升了粉砂的力学性能。

5 结论

本文通过正交试验研究了羟乙基纤维素(HEC)浓度、喷洒量、喷洒遍数、钙源浓度对HEC联合脲酶诱导碳酸盐沉淀(EICP)固化粉砂的表面强度和水稳定性(水稳定性通过崩解率与浸水强度损失率评估)的影响,得到最佳固化参数组合;并进行固化效果对比和微观试验分析,得出如下结论:

(1)在正交试验中,当考察指标为表面强度时,HEC浓度对结果影响最显著,其次是喷洒量、喷洒遍数和钙源浓度;而当考察指标为崩解率和浸水强度损失率时,各影响因素的主次顺序均为HEC浓度>喷洒遍数>喷洒量>钙源浓度;

(2)在正交试验条件下,HEC联合EICP固化粉砂的最佳固化参数组合为:HEC浓度0.6 g/L、喷洒量3 L/m²、喷洒遍数4遍、钙源浓度0.75 mol/L;

(3)在最佳固化参数条件下,HEC联合EICP固化粉砂试样的表面强度为6.96 MPa,崩解率为2.29%,浸水强度损失率为1.24%。相比于传统EICP固化粉砂,表面强度提高了57.47%,崩解率、浸水后强度损失率分别下降了78.64%、83.75%。HEC联合EICP固化粉砂的表面强度和水稳定性均优于仅EICP固化粉砂;

(4)HEC的引入改变了传统EICP固化土体的胶结模式,不仅为CaCO₃沉淀提供了成核位点,且其自身的保水和增稠性能,增加了CaCO₃的生成量,并能生成更多以稳定的方解石形态存在的CaCO₃。HEC对于土颗粒产生“包裹”、“连接”效应,土颗粒、HEC和CaCO₃三者之间形成链式网状结构,增大了土体密实度,改善了土体结构,提高了粉砂的表面强度和水稳定性。

HEC联合EICP固化技术在增强粉砂的强度和水稳定性方面具有显著优势,为细粒表层土体的改良提供了一种有效的解决方案。

参考文献:

[1] XIAO Y, TONG L, CHE H, et al. Experimental studies on compressive and tensile strength of cement-stabilized soil reinforced with rice husks and polypropylene fibers[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 344: 128242.

[2] YING Z, CUI Y J, BENAHMED N, et al. Changes of small strain shear modulus and microstructure for a lime-treated silt subjected to wetting-drying cycles[J]. *Engineering Geology*, 2021, 293: 106334.

[3] 龙开荃, 方祥位, 申春妮, 等. 复合型早强土壤固化剂固化淤泥强度特性研究 [J]. 岩土力学, 2023, 44(S1): 309-318.

LONG Kaiquan, FANG Xiangwei, SHEN Chunni, et al. Strength characteristics of sludge solidified by composite rapid soil stabilizer[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2023, 44(S1): 309-318(in Chinese).

[4] 王盛年, 高新群, 吴志坚, 等. 水泥偏高岭土复合稳定粉砂土渗透特性试验研究 [J]. 岩土力学, 2022, 43(11): 3003-3014.

WANG Shengnian, GAO Xinqun, WU Zhijian, et al. Permeability characteristics of cemented silty sand improved by metakaolin[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(11): 3003-3014(in Chinese).

[5] 李新明, 张浩扬, 武迪, 等. 石灰-偏高岭土改良遗址土强度劣化特性的冻融循环效应 [J]. 岩土力学, 2023, 44(6): 1593-1603.

LI Xinming, ZHANG Haoyang, WU Di, et al. Strength deterioration characteristics of lime-metakaolin improved earthen site soil under freeze-thaw cycles[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2023, 44(6): 1593-1603(in Chinese).

[6] GITANJALI A, JHUO Y S, YEH F H, et al. Bio-cementation of sand using enzyme-induced calcite precipitation: Mechanical behavior and microstructural analysis[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 417: 135360.

[7] HE J, GAO Y, GU Z, et al. Characterization of crude bacterial urease for CaCO₃ precipitation and cementation of silty sand[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2020, 32(5): 04020071.

[8] CHOI S G, CHANG I, LEE M, et al. Review on geotechnical engineering properties of sands treated by microbially induced calcium carbonate precipitation (MICP) and biopolymers[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 246: 118415.

[9] CUI M J, LAI H J, WU S F, et al. Comparison of soil improvement methods using crude soybean enzyme, bacterial enzyme or bacteria-induced carbonate precipitation[J]. *Géotechnique*, 2022, 74(1): 18-26.

[10] GEBRU K A, KIDANEMARIAM T G, GEBRETINSAE H K. Bio-cement production using microbially induced calcite precipitation (MICP) method: A review[J]. *Chemical Engineering Science*, 2021, 238: 116610.

[11] 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. Advances in soil cementation by biologically induced calcium carbonate precipitation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(2): 345-357(in Chinese).
- [12] 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. State-of-the-art review of biogeotechnology and its engineering applications [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2019, 41(1): 1-14(in Chinese).
- [13] ZHANG J, WANG X J, SHI L, et al. Enzyme-induced carbonate precipitation (EICP) combined with lignin to solidify silt in the Yellow River flood area [J]. Construction and Building Materials, 2022, 339: 127792.
- [14] 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 sand solidification using plant-derived urease-induced calcium carbonate precipitation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(4): 714-720(in Chinese).
- [15] 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 strengthening calcareous sand based on MICP [J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(4): 1104-1114(in Chinese).
- [16] 彭丽云, 陈星, 齐吉琳, 等. 微生物加固粉土的强度特性及加固机理研究 [J]. 材料导报, 2024, 38(13): 99-105.
- PENG Liyun, CHEN Xing, QI Jilin, et al. Study on strength characteristics and strengthening mechanism of microbial reinforced silt [J]. Materials Reports, 2024, 38(13): 99-105(in Chinese).
- [17] WANG Y, SUN X, MIAO L, et al. State-of-the-art review of soil erosion control by MICP and EICP techniques: Problems, applications, and prospects [J]. Science of the Total Environment, 2024, 912: 169016.
- [18] SUN X, MIAO L, YUAN J, et al. Application of enzymatic calcification for dust control and rainfall erosion resistance improvement [J]. Science of the Total Environment, 2021, 759: 143468.
- [19] LIU L, GAO Y, GENG W, et al. Comparison of jack bean and soybean crude ureases on surface stabilization of desert sand via enzyme-induced carbonate precipitation [J]. Geoderma, 2023, 435: 116504.
- [20] 吴敏, 高玉峰, 何稼, 等. 大豆脲酶诱导碳酸钙沉积与黄原胶联合防风固沙室内试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2020, 42(10): 1914-1921.
- WU Min, GAO Yufeng, HE Jia, et al. Laboratory study on use of soybean urease-induced calcium carbonate precipitation with xanthan gum for stabilization of desert sand against wind erosion [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(10): 1914-1921(in Chinese).
- [21] SOHAIL M G, AL DISI Z, ZOUARI N, et al. Bio self-healing concrete using MICP by an indigenous bacillus cereus strain isolated from qatari soil [J]. Construction and Building Materials, 2022, 328: 126943.
- [22] SUN X, MIAO L, WU L, et al. Theoretical quantification for cracks repair based on microbially induced carbonate precipitation (MICP) method [J]. Cement and Concrete Composites, 2021, 118: 103950.
- [23] 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. Study on the environmental durability of heavy metal contaminated soil remediated by enzyme induced carbonate precipitation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(10): 2779-2788(in Chinese).
- [24] LIU S, YU J, PENG X, et al. Preliminary study on repairing tabia cracks by using microbially induced carbonate precipitation [J]. Construction and Building Materials, 2020, 248: 118611.
- [25] 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.
- [26] MARTIN K, TIRKOLAEI H K, KAVAZANJIAN E. Enhancing the strength of granular material with a modified enzyme-induced carbonate precipitation (EICP) treatment solution [J]. Construction and Building Materials, 2021, 271: 121529.
- [27] HAMDAN N, ZHAO Z, MUJICA M, et al. Hydrogel-assisted enzyme-induced carbonate mineral precipitation [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2016, 28(10): 04016089.
- [28] 张建伟, 李想, 韩智光, 等. 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 [J]. 复合材料学报, 2024, 41(1): 426-437.
- ZHANG Jianwei, LI Xiang, HAN Zhiguang, et al. Shear strength characteristics of sand solidified by enzyme-induced carbonate precipitation with waste face mask reinforcement [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 41(1): 426-437(in Chinese).
- [29] 曹光辉, 刘士雨, 蔡燕燕, 等. 靶向激活产脲酶微生物联合酶诱导碳酸盐沉淀加固陆域吹填海砂试验研究 [J]. 岩土力学, 2022, 43(8): 2241-2252.

CAO Guanghui, LIU Shiyu, CAI Yanyan, et al. Experimental study on solidification of land reclamation sea sand by EICP combined with targeting activation of microbes producing urease[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(8): 2241-2252(in Chinese).

[30] PAN Y, WANG J, YANG S, et al. Research progress of hydroxyethyl cellulose materials in oil and gas drilling and production[J]. *Cellulose*, 2023, 30(17): 10681-10700.

[31] LIU X, ZENG W, ZHAO J, et al. Preparation and anti-leakage properties of hydroxyethyl cellulose-g-poly (butyl acrylate-co-vinyl acetate) emulsion[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2021, 255: 117467.

[32] 王荣博, 严从立, 王志强. 羟乙基纤维素对喷涂速凝橡胶沥青防水涂料耐热性能的影响研究 [J]. *中国建筑防水*, 2019(S2): 18-21, 32.

WANG Rongbo, YAN Congli, WANG Zhiqiang. Influence of hydroxyethyl cellulose on heat resistance of sprayed quick-curing rubber modified bitumen waterproofing coatings[J]. *China Building Waterproofing*, 2019(S2): 18-21, 32(in Chinese).

[33] 中国建筑科学研究院. 建筑地基基础设计规范: GB 50007—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.

China Academy of Building Research. Code for design of building foundation: GB 50007—2011[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011(in Chinese).

[34] 邵光辉, 冯建挺, 赵志峰, 等. 微生物砂浆防护粉土坡面的强度与抗侵蚀性影响因素分析 [J]. *农业工程学报*, 2017, 33(11): 133-139.

SHAO Guanghui, FENG Jianting, ZHAO Zhifeng, et al. Influence factor analysis related to strength and anti-erosion stability of silt slope with microbial mortar protective covering[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(11): 133-139(in Chinese).

[35] 刘士雨, 俞缙, 曾伟龙, 等. 微生物诱导碳酸钙沉淀修复三合土裂缝效果研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(1): 191-204.

LIU Shiyu, YU Jin, ZENG Weilong, 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(in Chinese).