

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2024.01.009

EICP 与木质素联合改性粉土边坡抗雨蚀试验研究

张建伟, 钱思羽, 王小锯, 边汉亮, 韩智光, 石磊

(河南大学土木建筑学院, 河南 开封 475004)

摘要: 通过设置 6 组试样, 采用降雨试验, 通过试样的表面侵蚀状况与冲蚀量、表面强度、碳酸钙含量的变化分析了改性后粉土边坡的抗雨蚀性能。试验结果表明: 植物源酶诱导碳酸钙沉淀(EICP)与木质素联合改性试样并在表面喷洒 EICP 溶液后, 试样表面完整度更好, 表面强度及碳酸钙含量更高, 质量损失更小, 抗雨蚀能力明显提高, 与其他试样的平均值相比, 边坡土体侵蚀量降低了 75.0%, 表面强度提高了 33.8%, 碳酸钙含量提高了 235.2%; 坡面喷洒 EICP 溶液可形成硬壳层, 有效避免坡面侵蚀; 木质素可为碳酸钙提供成核位点, 使分布散乱的碳酸钙附着在木质素上, 添加木质素后试样碳酸钙含量提高, 且表面强度随碳酸钙含量提高而增大。

关键词: 植物源酶诱导碳酸钙沉淀(EICP); 木质素; 粉土边坡; 雨蚀; 成核位点

中图分类号: TU441

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2024)01-0070-07

Experimental study on resistance of EICP and lignin joint-modified silt slope to rain erosion

ZHANG Jianwei, QIAN Siyu, WANG Xiaojun, BIAN Hanliang, HAN Zhiguang, SHI Lei

(School of Civil Engineering and Architecture, Henan University, Kaifeng 475004, China)

Abstract: By setting up six groups of specimens and using the rainfall test, the resistance of modified silt slopes to rain erosion was analyzed through the changes in the surface erosion condition of specimens with respect to the amount of erosion, surface strength and calcium carbonate content. The results show that after spraying the enzyme induced carbonate precipitation (EICP) solution on the surface for EICP and lignin joint-modified samples, the surface integrity is better, the strength and calcium carbonate content are higher, the quality loss is smaller, and the resistance to rain erosion is improved obviously. As results, the erosion amount of the slope soil is reduced by 75.0% on average compared with other specimens, the surface strength is increased by 33.8% on average, and the calcium carbonate content is increased by 235.2% on average. The slope surface sprayed with EICP solution can form a hard shell layer that effectively avoids the erosion of the slope surface, while lignin can provide nucleation sites for the calcium carbonate. Therefore, the distribution of scattered calcium carbonate attaches to lignin, so that the addition of lignin improves the calcium carbonate content and the surface strength also increases with the increase of calcium carbonate content.

Key words: enzyme induced carbonate precipitation; lignin; silt slope; rain erosion; nucleation sites

粉土的性质特殊, 黏颗粒含量少, 难以压实, 具有水稳性差、遇水强度低等特点, 降雨作用下常造成不均匀沉降等病害, 需处理方可用作路基填料^[1], 如何改善粉土作为路基填料是值得研究的课题。

近年来, 以生物反应为基础过程的改性技术得到了国内外学者的广泛关注^[2-5], 而以微生物诱导碳酸盐沉淀(microbially induced carbonate precipitation, MICP)或植物源脲酶诱导碳酸盐沉淀(enzyme induced carbonate precipitation, EICP)是目前研究的热点, Qabany 等^[6-9]对 MICP 技术的研究表明, 对 MICP 技术进行不同方式的改进或在 MICP 的作用过程中加以某种控制, 处理后的土体抗剪强度和抗侵蚀能力均有所提升。EICP 技术方面, 目前对土体加固的研究^[10-12]较多, 对土体雨蚀耐久性研究还较少, Cuccurullo 等^[13-15]的研究表明, 经 EICP 处理可使土体的力学性能提升, 并证明了利用 EICP 稳定土壤抗侵蚀的可行性。MICP 技术中

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(42177454); 河南省高等学校青年骨干教师培养计划项目(2019GGJS041); 河南省研究生教育改革与质量提升工程项目(YJS2021JD13); 河南省科技攻关计划项目(222102320355); 河南省自然科学基金项目(232300420073)

作者简介: 张建伟(1981—), 男, 教授, 博士, 主要从事桩基础工程及岩土工程研究。E-mail: zjw@henu.edu.cn

通信作者: 边汉亮(1981—), 男, 副教授, 博士, 主要从事环境岩土工程及岩土测试技术研究。E-mail: bian2020@126.com

引用本文: 张建伟, 钱思羽, 王小锯, 等. EICP 与木质素联合改性粉土边坡抗雨蚀试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(1): 70-76.

ZHANG Jianwei, QIAN Siyu, WANG Xiaojun, et al. Experimental study on resistance of EICP and lignin joint-modified silt slope to rain erosion[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2024, 52(1): 70-76.

微生物尺寸较大,会限制该技术在细颗粒土体中的应用^[16],但脲酶尺寸小,因此利用 EICP 技术改性粉土不易发生生物堵塞,但 EICP 技术存在生成的碳酸钙缺乏成核位点和对土体改性后强度不足的问题。Yuan 等^[17-18]在 EICP 过程中添加有机材料或碳酸钙“种子”,为碳酸钙提供成核位点,调节碳酸钙晶型,进而改善土体性能。木质素作为转化生物质能源的原材料,具有填充和胶结等性能,近年来也被用于土体改性^[19-21]。

本文采用模拟降雨试验,探讨 EICP 与木质素联合改性粉土对提高粉土边坡抗侵蚀性的效果,通过分析改性后粉土边坡的表面侵蚀状况、冲蚀量、表面强度和碳酸钙含量来评价抗雨蚀效果,以期为类似工程提供参考。

1 试验材料与方法

1.1 试样制备

以开封市黄泛区粉土作为研究土体,其物理性质如下:最大干密度 1.67 g/cm^3 ,液限 26.5% ,塑限 16.8% ,天然含水率 14.8% ,最优含水率 15.6% ,不同粒径($<2\text{ mm}$ 、 $<1\text{ mm}$ 、 $<0.5\text{ mm}$ 、 $<0.25\text{ mm}$ 、 $<0.074\text{ mm}$)颗粒质量占比分别为 99.1% 、 98.0% 、 97.4% 、 95.6% 和 56.8% 。

试验所用脲酶溶液是从大豆中提取的,脲酶溶液的提取过程如图 1 所示。用破碎机将大豆粉碎,把粉碎后的大豆粉末与去离子水混合,质量浓度为 100 g/L ,然后用磁力搅拌器搅拌 30 min 获均匀悬浮液,将均匀悬浮液放入离心管,在转速为 $3\,500\text{ r/min}$ 的高速离心机内离心 15 min ,取离心后的上层清液即可得到大豆脲酶溶液。试验所用的木质素为一种棕黄色粉末,有特殊芳香气味,是造纸厂制浆的废液经过干燥制成的,其成分在土体中会发生氧化或与其他化学成分化合,结构发生变化后生成的螯合物在一定程度上会发生变色现象。所用反应液为体积比 $1:1$ 的尿素-氯化钙溶液,浓度为 0.75 mol/L 。

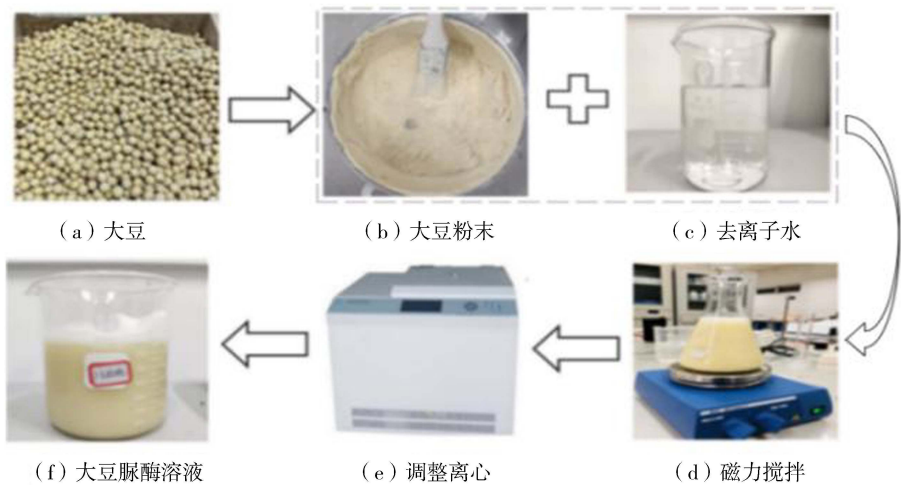


图 1 大豆脲酶溶液提取过程

Fig. 1 Extraction process of soybean urease solution

1.2 试验装置

试验采用的降雨模拟装置如图 2 所示,主要由储水箱、土体样本托盘、雾化喷嘴、坡度调节装置、流土收集槽等部分组成,如图 2(a)所示。雾化喷嘴连接导管和隔膜泵,隔膜泵可调节不同降雨强度;集土槽内铺设透水纸以收集冲刷的泥土;将烘干后的粉土和一定量木质素拌和均匀,把配制好的大豆脲酶溶液和 0.75 mol/L 的反应液 $1:1$ 混合配成 EICP 溶液,基于木质素最优掺量 5% ^[22]将 9.3% 的 EICP 溶液加入到混合均匀的粉土和木质素中,闷料 24 h 后分 3 层装入土体样本托盘中。土体样本托盘的长度为 40 cm ,宽度为 20 cm ,深度为 5 cm (图 2(b)),本文采用小尺寸模型,易于操作,便于初步研究与方案筛选。

为找到最优的粉土边坡抗雨蚀处理方式,利用 EICP 技术与木质素联合对粉土边坡进行处理,通过设置不同试样处理方式,来对比模拟降雨后的雨蚀现象。

1.3 试验方法

在控制粉土干密度和含水率相同的情况下,通过相同的击实方法制样,保证各组试样初始状态相同。为研究不同边坡处理方式对抵抗雨蚀的效果,试验共设置 A1、B1、C1、D1、C2 和 D2 共 6 组试样,采用如表 1 所

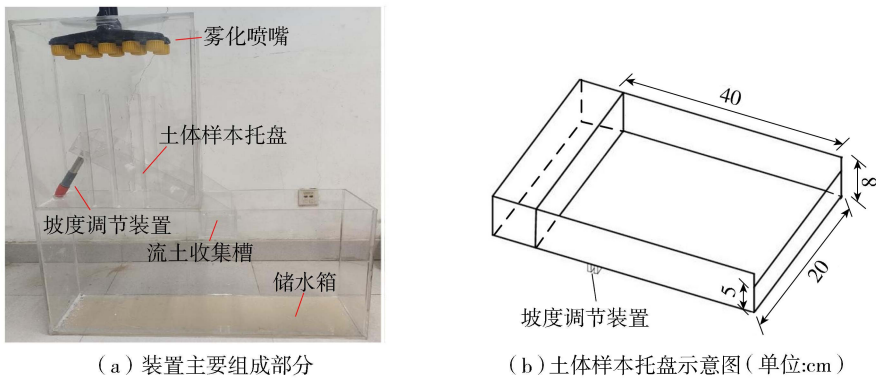


图 2 降雨模拟装置

Fig. 2 Rainfall simulation device

示的 6 种试样处理方式 进行降雨试验。①试样 A1 为木质素(5% 掺量)改性粉土,将木质素与粉土拌和均匀,配至最优含水率,均匀压实装填于试样盆中;②试样 B1 为仅用 EICP 技术改性的粉土,在粉土中添加相应质量的 EICP 溶液,全部拌和均匀后装填于试样盆中;③试样 C1 为 EICP 与木质素(5% 掺量)联合改性粉土,将木质素和粉土拌和均匀后添加相应的 EICP 溶液,再拌和均匀得到;④试样 D1 为脲酶溶液和反应液反应 3 d 后的 EICP 溶液与木质素联合改性粉土,用于研究不同碳酸钙生成方式对试验结果的影响,以此对比边坡的抗雨蚀效果;⑤C2 是在 C1 的基础上,养护 28 d 后再在试样表面均匀喷洒 EICP 溶液,将处理后的试样放置在室内温度 25℃、湿度 44% 条件下反应 3 d 得到的试样;⑥D2 是在 D1 的基础上养护 28 d 后,再在试样表面均匀喷洒 EICP 溶液,将处理后的试样放置在室内温度 25℃、湿度 44% 条件下反应 3 d 得到。

a. 表面侵蚀状态观测。目测观察边坡表面的侵蚀状态是最简单直观的方法,即观察不同时间段各试样表面的侵蚀状态。为研究不同试样处理方式对边坡抗雨蚀的影响,在模拟降雨试验的过程中每隔 20 min 对边坡表面进行拍照记录,对比不同处理方式下边坡的侵蚀状态。

b. 土体冲蚀量测定。边坡在降雨下的质量损失是指在一定时间内,边坡表面经降雨冲刷后土体的损失质量,该指标可以定量反映出不同处理方式下土体边坡抵抗降雨冲刷侵蚀的能力。试验中每隔 10 min 收集冲刷的泥水并烘干称重。

c. 表面强度测定。降雨试验结束后使用艾德堡推拉力计测定试样表面强度。如图 3 所示,将试样分为 9 个区域进行测量,匀速转动手柄使推拉力计探头匀速缓慢地贯入这 9 个区域表面,读取最大贯入力(F)数据,推拉力计探头的面积(S)为 28.07 mm²,表面强度计算公式为 $P=F/S$ 。

d. 碳酸钙含量测定。采用酸洗称重法测定不同试样中碳酸钙的含量。取试验后各区域的土体烘干称重,得到质量 m_1 ,然后浸泡于 1 mol/L 的盐酸中,直至溶液中没有气泡产生,此时试样中的碳酸钙已完全溶解,排除溶液并用去离子水冲洗,烘干后称重得到质量 m_2 ,生成的碳酸钙含量计算公式为 $C=(m_1-m_2)/m_2$ 。对每个区域进行 3 次平行试验,得到的平均值为该区域表面的碳酸钙含量。

表 1 试样处理方式	
Table 1 Treatment schemes of specimens	
试样	处理方式
A1	木质素改性
B1	EICP 改性
C1	EICP 与木质素联合改性
D1	反应 3 d 的 EICP 溶液与木质素联合改性
C2	在 C1 试样表面喷洒 EICP 溶液
D2	在 D1 试样表面喷洒 EICP 溶液

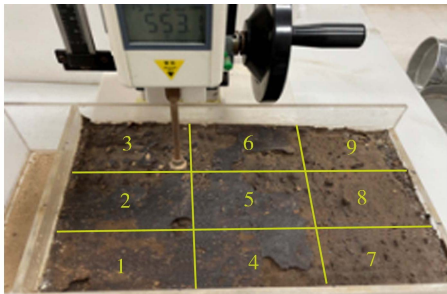


图 3 表面强度的测量

Fig. 3 Measurement of surface strength

2 试验结果与分析

2.1 降雨作用下表面侵蚀状况变化

试验粉土来自开封市黄泛区,河南省年平均气温为 12.7 ~ 16.20℃,年降水量为 477.08 ~ 1 167.30 mm,年内变化较大,而且主要集中在 5—8 月^[23],设降雨强度为 30 mm/h(较大雨量),坡口角度为 20°,降雨时间

为 60 min,图 4 为不同时间 6 组试样表面侵蚀状况。

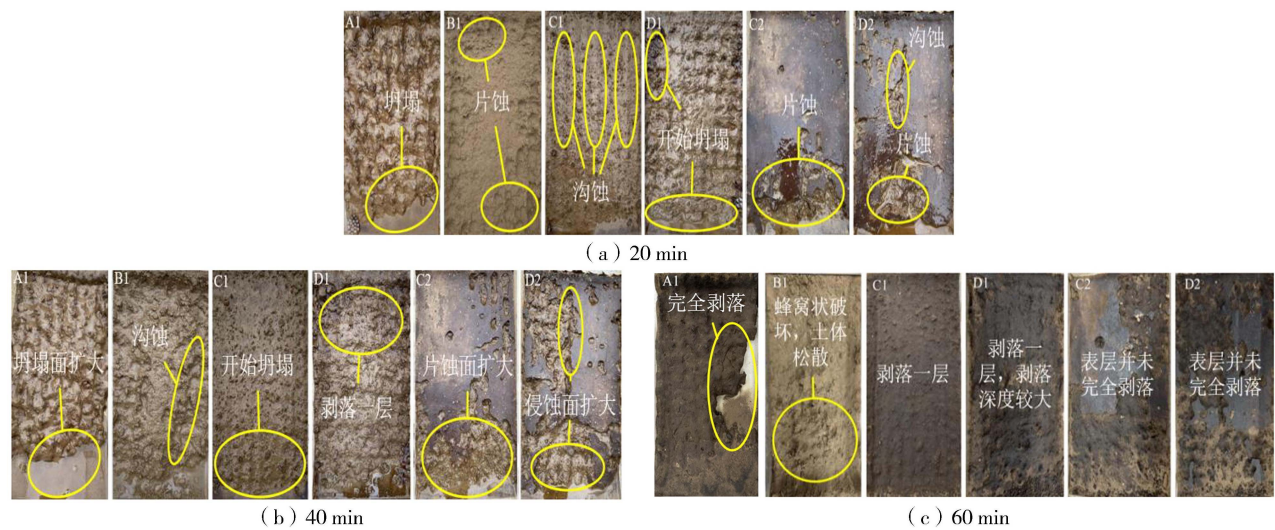


图 4 不同时间粉土边坡表面侵蚀状况
Fig. 4 Surface erosion condition at different time

从图 4 可以看出,随着时间的变化,不同处理方式的试样破坏程度都随着时间的增长而增大,试样 A1、B1、C1、D1 在雨水冲刷 20 min 后,呈现出蜂窝麻面状破坏且伴随土体剥落的现象,试样 C2 仅出现片蚀现象,试样 D2 片蚀、沟蚀伴随;40 min 后试样 A1、B1、C1 和 D1 已呈现不同程度坍塌趋势,A1 坍塌面积变大,C2、D2 呈现出片状侵蚀,而试样 C2 的边坡表面变化很小,仅有部分溅蚀破坏;当降雨 60 min 后自然风干,可以看到试样 A1 局部已完全剥落,B1 呈蜂窝状破坏且土体松散,试样 C1、D1 表面均已剥落一层,试样 C2、D2 表层并未完全剥落。相对于各试样的坍塌和土体剥落表现,试样 C2 的边坡表面相对完整,呈局部脱落状,坡面侵蚀以面蚀为主,没有影响其抗雨蚀性能。在降雨作用下,边坡破坏最初呈溅蚀,其原因是降雨对边坡表面的撞击作用,导致边坡表面的土体剥离。降雨作用下在边坡坡面雨水充分入渗,导致边坡土体强度减小,引起非饱和土中基质吸力丧失或减小,再次降雨极易引起边坡滑坡^[24]。当降水量大于土壤表层入渗量时,雨水会在坡面汇聚形成薄层面流,进而形成坡面径流。试验中 EICP 与木质素联合改性会提高试样抗剪强度^[22],因试样 A1、B1 不是联合改性,故其抗剪强度低,坡面直接侵蚀较快。试样 A1、B1、C1、D1 并未在表面喷洒 EICP 溶液进行加固,表面没有形成硬壳层,所以降雨的击溅作用直接导致土体剥落;而试样 C2、D2 溅蚀作用不明显。

2.2 土体冲蚀量变化对比

在雨水冲刷边坡的过程中,每隔 10 min 收集冲刷下的泥水,然后烘干称重,得到该边坡质量累计损失随时间变化情况如图 5 所示。

从图 5 可以看出,试样 A1、B1 和 C1 的质量损失较大。其中 B1 在 30 min 后质量损失突然增大,因为 B1 是只用 EICP 技术处理过的试样,并没有对边坡内部进行加固,所以边坡的内部强度较低,土体剥落多,质量损失较大。相对于 A1、B1 在 60 min 后的质量累计损失,试样 C1 的土体侵蚀量分别降低 44. 8% 和 18. 81%。试样 C2 和 D2 前期抵抗径流冲刷的能力高于其他试样,没有出现大量土体剥落和坍塌的现象,因为试样 C2 和 D2 表面喷洒了 EICP 溶液,表面加固效果较好。试样 D2 喷洒的 EICP 溶液为反应 3 d 后的,因为 EICP 溶液的作用是在土中生成碳酸钙,填充土体孔隙,相比试样 D1 直接将 EICP 溶液拌于粉土中产生的碳酸钙可能要少,故土体在降雨作用 20 min 之前质量损失速率较大,且在 10 ~ 20 min 期间边坡冲刷后试样 D2 表面的部分沟蚀和片蚀扩大,由于表面具有一定的胶结性,会有块状土体掉落,导致在此期间的质量损失速率

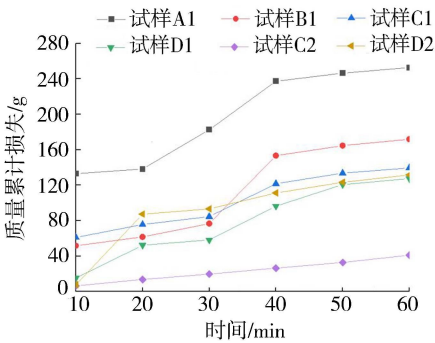


图 5 边坡质量累计损失随时间变化曲线
Fig. 5 Variation of cumulative loss of slope mass with time

最大。降雨 20 min 后,粉土边坡的稳定性较好。在 60 min 后试样 C2 相对于试样 C1 的土体侵蚀量降低了 70.5%,比其他试样的平均值降低了 75.0%。总体来说,试样 C2 的边坡因为 EICP 溶液在土体中反应充分,且木质素在土体中具有一定的黏结作用,EICP 与木质素联合改性使碳酸钙有序排列,进一步增强了土壤颗粒之间的胶结作用,故质量损失最小,抗雨蚀效果最好。

2.3 降雨后平均表面强度对比

试样的表面强度是评价试样加固和抗雨蚀能力的一项指标,表面强度越高,表明生成的硬壳层越硬,抗雨蚀的能力越强。将经过雨蚀的试样自然风干 3 d 后放置 60℃烘箱中烘干,如图 3 所示检测每个区域的表面强度。去掉每个试样不同区域的表面强度最大值和最小值,求和取平均值代表每个试样的表面强度,结果如表 2 所示。

表 2 各试样不同区域表面强度
Table 2 Surface strength in different areas of each sample

试样	表面强度/MPa									
	区域 1	区域 2	区域 3	区域 4	区域 5	区域 6	区域 7	区域 8	区域 9	平均值
A1	9.45	7.14	3.95	6.48	4.19	3.20	6.03	7.52	6.50	6.05
B1	6.85	6.98	6.39	5.65	6.73	7.20	5.82	7.32	4.07	6.33
C1	7.56	4.31	7.34	7.28	10.70	9.38	8.98	8.36	8.21	8.00
D1	8.18	8.27	7.14	6.49	7.93	8.94	7.94	8.12	7.43	7.83
C2	10.90	9.24	8.37	9.01	10.30	11.70	11.40	9.02	8.43	9.82
D2	7.82	8.53	8.29	8.00	8.55	9.94	8.34	8.85	7.96	8.48

从表 2 可以看出,采用 6 种方式处理后,试样表面强度都有提高,相比试样 A1、B1,经 EICP 与木质素联合改性的试样 C1 表面强度分别提高了 32.2% 和 26.4%,试样 D1、C2、D2 相比试样 C1 表面强度分别降低了 2.2% 和提高了 22.8%、6.0%。试样 C2、D2 平均强度降低是由于碳酸钙在土中反应程度不同引起的。试样 D2 的平均表面强度相比试样 C1、D1 有不同程度的提升,是由于在表面喷洒 EICP 溶液所致。添加木质素后碳酸钙晶型仅为方解石^[22],方解石热力学性质稳定且机械强度高,对比可知,试样 C2 比其他试样表面强度的平均值提高了 33.8%,表面形成的硬壳层也会提供部分强度,表面强度越高,固结效果越好,抗雨蚀能力越强。

2.4 降雨后碳酸钙含量与表面强度变化规律

表 3 是不同处理方式下边坡经过雨蚀后每个区域内的表面碳酸钙含量,从对比碳酸钙含量的角度来探究碳酸钙含量对粉土边坡抗雨蚀的影响。从表 3 可以看出每个区域的碳酸钙含量并不完全相同,这是因为对边坡进行表面喷洒时是人为喷洒,每个区域的喷洒量不能保证完全一致,且喷洒量过多时 EICP 溶液无法下渗,会随着坡面往下流失,下部可能会出现碳酸钙堆积现象,所以分析 EICP 溶液处理粉土边坡表面的次数也极为重要。

表 3 各试样不同区域碳酸钙含量
Table 3 Calcium carbonate content in different areas of each sample

试样	碳酸钙含量/%									
	区域 1	区域 2	区域 3	区域 4	区域 5	区域 6	区域 7	区域 8	区域 9	平均值
A1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B1	3.67	3.93	2.90	2.61	3.77	3.97	2.65	4.01	1.89	3.27
C1	9.40	2.70	9.30	5.40	16.40	14.20	13.70	13.50	9.80	10.49
D1	10.50	12.60	5.50	5.30	6.00	12.70	7.30	8.10	5.70	8.19
C2	16.70	9.60	11.20	15.20	17.40	60.70	79.80	13.80	8.60	25.89
D2	12.20	20.20	19.30	11.00	17.10	20.60	16.50	16.80	16.30	16.67

从表 3 可以看出,碳酸钙含量小的区域在降雨作用下表面侵蚀程度相对较高,表面侵蚀严重,表明试样的胶结效果整体较弱。部分试样表面生成了碳酸钙,边坡表面的整体加固效果更好,故其抗雨蚀的能力也越好。表 4 为不同试样平均表面强度和平均碳酸钙含量变化情况。

从表 4 可知,试样 C2 比其他试样碳酸钙含量的平均值提高了 235.2%,相对于试样 C1,试样 C2 和 D2 的碳酸钙含量分别提高了 146.8% 和 58.9%,试样 D1 的碳酸钙含量降低了 21.9%,说明反应 3 d 的 EICP 溶液并不能提高土体中的碳酸钙含量,在表面喷洒 EICP 溶液,使得边坡表面生成了碳酸钙的硬壳层,碳酸钙

含量升高;木质素可为碳酸钙提供成核位点^[22],同样,试样 C1 相对于试样 B1 的碳酸钙含量提高了 220.8%,亦可说明添加木质素可改善 EICP 技术缺乏成核位点的问题,使得碳酸钙富集从而提高黏聚力,增强土颗粒间胶结能力,表面强度随之提高,抗雨蚀的能力也随之增强,也说明碳酸钙含量和表面强度的变化呈正相关关系。

3 结 论

- a. 经不同改性方式处理的粉土边坡具有不同的抗雨蚀能力,EICP 与木质素联合改性试样再喷洒 EICP 溶液的方式抗雨蚀效果最优(试样 C2)。对比各试样的侵蚀状况,发现表面强度和碳酸钙含量对边坡的抗雨蚀效果影响最为明显,且边坡的表面强度与碳酸钙含量呈正相关关系。
- b. 试样 C2 表面侵蚀最小,表面完整度最高;试样 C1 侵蚀量比试样 A1、B1 分别降低 44.8% 和 18.81%,表明 EICP 与木质素联合改性的方式具有较好的抵抗土体流失能力;试样 C2 比试样 C1 土体侵蚀量降低 70.5%,表明在坡面喷洒一定的 EICP 溶液后抵抗土体流失能力进一步增强。
- c. 表面喷洒 EICP 溶液会在边坡表层形成碳酸钙硬壳层,有效减弱雨蚀作用,提高边坡强度及碳酸钙含量,保持边坡良好的完整性。
- d. 添加木质素改性,可调节 EICP 碳酸钙晶型并为碳酸钙提供成核位点,使碳酸钙附着在木质素上,更好地填充颗粒间空隙,降低其孔隙度,增强颗粒间胶结能力,使粉土边坡具有更佳的抗雨蚀能力,亦验证了坡面碳酸钙含量与表面强度呈正相关关系。

参考文献:

[1] 朱志铎,郝建新,赵黎明. 交通荷载作用下粉土路基变形特性分析[J]. 地下空间与工程学报,2009,5(5):1013-1019. (ZHU Zhiduo,HAO Jianxin,ZHAO Liming. Deformation characteristics of silt subgrade under traffic loads[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2009,5(5):1013-1019. (in Chinese))

[2] 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(中英文),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))

[3] 刘士雨,俞缙,刘文强,等. 基于 MICP 的珊瑚砂砂浆裂缝自修复新型细菌载体[J]. 建筑材料学报,2021,24(4):687-693. (LIU Shiyu,YU Jin,LIU Wenqiang,et al. New bacterial carrier for the crack self-healing in coral sand mortar based on MICP [J]. Journal of Building Materials,2021,24(4):687-693. (in Chinese))

[4] 贾强,丁鹏. 微生物灌浆碳酸钙沉积规律[J]. 建筑材料学报,2021,24(3):578-583. (JIA Qiang,DING Peng. Deposition regularities of calcium carbonate on microbial grouting[J]. Journal of Building Materials,2021,24(3):578-583. (in Chinese))

[5] GHASEMI H,HATAM-LEE S M,TIRKOLAEI H K,et al. Biocementation of soils of different surface chemistries via enzyme induced carbonate precipitation (EICP): an integrated laboratory and molecular dynamics study[J]. Biophysical Chemistry, 2022,284:106793.

[6] QABANY A A, SOGA K. Effect of chemical treatment used in MICP on engineering properties of cemented soils[J]. Géotechnique,2013,63(4):331-339.

[7] JIANG N J, SOGA K, KUO M. Microbially induced carbonate precipitation for seepage-induced internal erosion control in sand-clay mixtures[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2017,143(3):04016100.

[8] WANG Xiangrong,TAO Junliang,BAO Ruotian,et al. Surficial soil stabilization against water-induced erosion using polymer-modified microbially induced carbonate precipitation[J]. Journal of Materials in Civil Engineering,2018,30(10):04018267.

[9] 彭劼,黄慕凡,谢高强,等. 微生物诱导碳酸钙沉积加固土体的注浆方法[J]. 河海大学学报(自然科学版),2019,47(3):259-264. (PENG Jie,HUANG Mufan,XIE Gaoqiang,et al. Grouting method of MICP-treated soil[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2019,47(3):259-264. (in Chinese))

[10] AHENKORAH I,RAHMAN M,KARIM R,et al. A review of enzyme induced carbonate precipitation (EICP): the role of enzyme kinetics[J]. Sustainable Chemistry,2021,2(1):92-114.

表 4 各试样平均表面强度和碳酸钙含量
Table 4 Average surface strength and calcium carbonate content of each sample

试样	平均表面强度/MPa	平均碳酸钙含量/%
A1	6.05	0
B1	6.33	3.27
C1	8.00	10.49
D1	7.83	8.19
C2	9.82	25.89
D2	8.48	16.67

[11] CUI M J, LAI H J, HOANG T, et al. One-phase-low-pH enzyme induced carbonate precipitation (EICP) method for soil improvement[J]. *Acta Geotechnica*, 2021, 16(2): 481-489.

[12] MALEKI M, EBRAHIMI S, ASADZADEH F, et al. Performance of microbial-induced carbonate precipitation on wind erosion control of sandy soil[J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2016, 13(3): 937-944.

[13] CUCCURULLO A, GALLIPOLI D, BRUNO A W, et al. Soil stabilization against water erosion via calcite precipitation by plant-derived urease[C]//National Conference of the Researchers of Geotechnical Engineering. Cham: Springer, 2020: 753-762.

[14] NEUPANE D, YASUHARA H, KINOSHITA N, et al. Applicability of enzymatic calcium carbonate precipitation as a soil-strengthening technique[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2013, 139(12): 2201-2211.

[15] OSSAI R, RIVERA L, BANDINI P. Experimental study to determine an EICP application method feasible for field treatment for soil erosion control[C]//Geo-Congress 2020: Biogeotechnics. Reston: American Society of Civil Engineers, 2020: 205-213.

[16] MITCHELL J K, SANTAMARINA J C. Closure of "Biological considerations in geotechnical engineering" [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2007, 133(10): 1222-1233.

[17] YUAN H, REN G Z, LIU K, et al. Experimental study of EICP combined with organic materials for silt improvement in the Yellow River Flood Area[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(21): 7678.

[18] KHODADADI T H, KAVAZANJIAN E, VAN PAASSEN L, et al. Bio-grout materials: a review[C]//Grouting 2017. Reston: American Society of Civil Engineers, 2017: 1-12.

[19] 张建伟, 亢飞翔, 边汉亮, 等. 冻融循环下木质素改良黄泛区粉土无侧限抗压强度试验研究[J]. *岩土力学*, 2020, 41(增刊2): 271-276. (ZHANG Jianwei, KANG Feixiang, BIAN Hanliang, et al. Experiments on unconfined compressive strength of lignin modified silt in Yellow River flood area under freezing-thawing cycles[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(Sup2): 271-276. (in Chinese))

[20] 贺智强, 樊恒辉, 王军强, 等. 木质素加固黄土的工程性能试验研究[J]. *岩土力学*, 2017, 38(3): 731-739. (HE Zhiqiang, FAN Henghui, WANG Junqiang, et al. Experimental study of engineering properties of loess reinforced by lignosulfonate[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(3): 731-739. (in Chinese))

[21] TINGLE J S, NEWMAN J, LARSON S L, et al. Stabilization mechanisms of nontraditional additives[J]. *Transportation Research Record*, 2007, 1989-2(1): 59-67.

[22] 张建伟, 王小锯, 李贝贝, 等. EICP-木质素联合固化粉土的试验研究[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2021, 43(2): 201-202. (ZHANG Jianwei, WANG Xiaoju, LI Beibei, et al. Experimental study on silt reinforced by EICP-lignin technology[J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2021, 43(2): 201-202. (in Chinese))

[23] 靳春香. 河南省 1986—2015 年降雨侵蚀力时空分布变化特征分析[J]. *河南水利与南水北调*, 2019, 48(10): 63-65. (JIN Chunxiang. Characteristic analysis of spatial and temporal distribution changes of rainfall erosion force in Henan Province, 1986-2015[J]. *Henan Water Resources and South-to-North Water Diversion*, 2019, 48(10): 63-65. (in Chinese))

[24] 李卓, 何勇军, 李宏恩, 等. 前期降雨作用下边坡滑坡模型试验[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2016, 44(5): 400-405. (LI Zhuo, HE Yongjun, LI Hongen, et al. Model test on slope landslides under antecedent rainfall[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2016, 44(5): 400-405. (in Chinese))

(收稿日期: 2023-02-24 编辑: 熊水斌)