

脲酶诱导碳酸钙沉积(EICP)固化土体研究进展

张一佳, 严德强*, 王鑫雨, 雷雨嫣, 杜彬宇, 薛凯鑫, 李刚

西京学院, 陕西省混凝土结构安全与耐久性重点实验室, 陕西 西安

收稿日期: 2024年3月14日; 录用日期: 2024年4月4日; 发布日期: 2024年4月15日

摘要

近年来, 脲酶诱导碳酸钙沉积(Enzyme Induced Calcium Carbonate Precipitation, 简称EICP)技术在岩土领域得到广泛应用, 作为一种加固土体的新型方法, EICP直接从植物中提取脲酶, 催化尿素水解成碳酸根离子, 与钙离子反应产生碳酸钙沉淀; 所生成的游离脲酶可降解, 不会对环境造成长期影响, 且其尺寸小能透过孔隙更小的土体, 生成碳酸钙过程中不易发生堵塞。本文从EICP的背景出发, 研究了EICP的国外现状、固化土体力学特性及作用机理, 为EICP固化土体进行了系统的总结。

关键词

EICP, 土体加固, 脲酶, 力学特性, 作用机理

Research Progress in Soil Solidified by Enzyme Induced Calcium Carbonate Precipitation (EICP)

Yijia Zhang, Deqiang Yan*, Xinyu Wang, Yuyan Lei, Binyu Du, Kaixin Xue, Gang Li

Shaanxi Key Laboratory of Safety and Durability of Concrete Structures, Xijing University, Xi'an Shaanxi

Received: Mar. 14th, 2024; accepted: Apr. 4th, 2024; published: Apr. 15th, 2024

Abstract

In recent years, Enzyme Induced Calcium Carbonate Precipitation (EICP) technology has been widely used in the field of rock and soil. As a new method for soil reinforcement, EICP directly extracts urease from plants, and catalyzes the hydrolysis of urea into carbonate ion, which reacts with calcium ion to produce calcium carbonate precipitation; The generated free urease is degrada-

*通讯作者。

文章引用: 张一佳, 严德强, 王鑫雨, 雷雨嫣, 杜彬宇, 薛凯鑫, 李刚. 脲酶诱导碳酸钙沉积(EICP)固化土体研究进展[J]. 土木工程, 2024, 13(4): 374-382. DOI: 10.12677/hjce.2024.134042

ble, and does not have a long-term impact on the environment. Its small size can penetrate the soil with smaller pores, and is not prone to blockage during the formation of calcium carbonate. In this paper, based on the background of EICP, the present situation of EICP abroad, the mechanical characteristics and mechanism of solidified soil were studied, and the soil solidified by EICP was systematically summarized.

Keywords

EICP, Soil Reinforcement, Urease, Mechanical Characteristics, Action Mechanism

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 研究背景与意义

我国因黄土覆盖面积超过 64 万平方公里, 占据了国土面积的 6.8%, 其中约 38 万平方公里的区域观测到黄土崩塌现象, 故在基础建设过程中, 黄土的不稳定性代表着工程可能会存在不稳定和不安全等因素[1]。由于黄土拥有大孔隙、松散等结构, 在水的作用下, 经常形成崩塌和地基沉降现象[2] [3], 而黄土的崩塌和不均匀沉降现象可能会引起严重的房屋裂缝、地面沉降、甚至是建筑倒塌的现象。对于黄土地基的处理方法有物理改性处理和化学改性处理, 但 these 方法都或多或少会对环境造成一定的损害[4]。因此, 当务之急是研究一种新型的黄土地基处理方法。

脲酶诱导碳酸钙沉积技术(EICP)是一项新兴的土壤加固技术, 它是在微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)的基础上进一步演化而来的技术[5]。其原理是通过向土体内引入脲酶和反应物质, 在土体颗粒表面生成碳酸钙沉淀, 从而将土颗粒胶结起来, 使土体内的孔隙得到填充[6] (图 1)。脲酶来源广泛, 早在 1999 年就被证实从植物和微生物中提取的脲酶能够诱导形成碳酸钙沉淀[7]。相比于 MICP 技术中利用微生物提取的脲酶, EICP 技术不存在与生物安全性和氧气有效性等相关问题, 并且从植物中提取的脲酶则更加直接, 无需考虑营养物质、细菌培养与其他微生物的竞争影响[8], 同时也继承了 MICP 耗能小、环保、工期短、对土体扰动小等特点[9]具有许多实际的应用优势。

本文主要对 EICP 技术的国内外发展状况、对固化土体的力学特性、作用机理进行了总结归纳, 为后续 EICP 研究工作指明了方向。

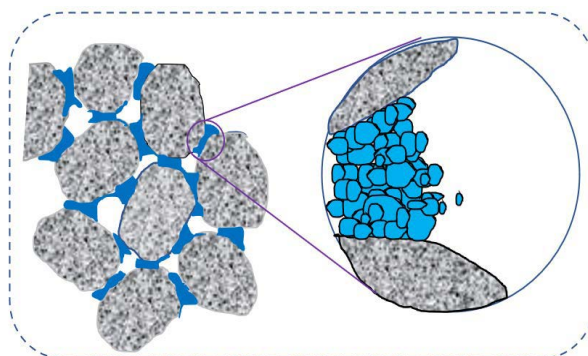


Figure 1. Calcium carbonate cemented sand diagram [10]

图 1. 碳酸钙胶结砂示意图[10]

2. 研究现状

2.1. 国内研究现状

EICP 这一概念最早是由国外研究者提出[11], 在过去的十多年里, 大量学者[12] [13] [14] [15]研究 EICP 作为一种新型的土体加固技术以代替 MICP。张建伟、范广才、喻文晔等[16] [17] [18]使用大豆脲酶分别对粉土、风积沙、钙质砂验证 EICP 的可行性, 证明大豆脲酶可以用于固化土体, 并改善土体的力学性能。张建伟等[16]利用 EICP 技术治理黄泛区裸露粉土扬尘, 发现随着沉积的 CaCO_3 含量的增加及豆粉浓度增加, 土样的表面强度随之增强。崔猛等[19]对 EICP 进行了多变量研究, 并且通过酶的催化作用引发碳酸盐的沉淀, 能提高土壤的抗压强度和稳定性。

曹光辉等[20]为加固陆域吹填海砂, 提出了生物刺激联合 EICP 的土体固化方法, 并且改进了 EICP 缺乏成核位点的问题。结果发现了 EICP 能够促进更高的 EICP 沉积量和使 CaCO_3 分布更加均匀, 对海砂加固提供了新的方法。赵丽娜等[21]研究了添加有机物质, 如脱脂奶粉、阳离子膨胀土、杰克豆粉等能够增加 EICP 生成碳酸钙的产量和处理效率, 而黄原胶则提高了溶液的黏度, 但并不一定导致碳酸钙产量的增加。此外, 钠蒙脱石也被证明可以增强 EICP 的效果。边汉亮等[22]通过 EICP 对 Zn^{2+} 重金属污染土进行了修复, 有效降低了土中重金属的含量, EICP 为污染土的修复提供了新的方法。李笑磊[23]将 EICP 技术应用到土遗址城墙修复中, 成功提高了土的抗剪强度及改善了渗透作用。郑伟[24]利用玄武岩纤维-EICP 进行了黄泛区粉砂改良, 验证了掺入纤维对 EICP 技术固化黄泛区粉砂有良好的改善效果, 并且为土体加固和地基处理提供了新的方法研究。

2.2. 国外研究现状

Chandra 等[25]分析了酶诱导碳酸钙沉积在粉质砂、黏质砂和淤泥土三种土体的固化效果, 试验结果表明, EICP 技术均能提高三种土体的抗剪强度。Pratama 等[26]利用大豆粗制脲酶进行 EICP 土样加固, 并通过无侧限抗压强度(UCS)试验和酸浸试验, 评价了 EICP 溶液对土样的加固效果。结果证明了 EICP 有用于土壤改良技术的潜力。Meng 等[27]提出了多相 EICP 处理方法改良土壤力学性能, 这种方法能极大提高尿素的利用率, 并且有效的改善了土体的胶结能力。Ossai 等[28]利用 EICP 在坡地沙质土壤中创建胶结表层。利用重力渗流、一步混合密实及两步混合密实方法处理土壤。有效的改善了渥太华 20-30 砂进一步验证了 EICP 对控制径流侵蚀的可行性。

Dilrukshi 等[29]以西瓜碎籽粗提物为脲酶源进行酶促碳酸钙沉淀, 成功的提高了松散砂的强度, 减轻液化, 石灰石纪念碑和雕像以及人工软岩层的保护和修复。Cui 等[15]提出采用单相低 pH 溶液注入方法, 将 pH 为 6.5 的 EICP 固化液(脲酶溶液、尿素溶液和 CaCl_2 溶液组成的混合溶液)注入土体中。显著提高钙的转换效率和改善碳酸钙在砂样中的分布均匀性, 增强了土体的强度。Zhao 等[30]将聚丙烯酸(PAA)与酶诱导碳酸盐沉淀(EICP)结合, 研究出一种多功能、高性能的土壤稳定方法。这种方法对增强 EICP 具有多种优势, 包括延长供水时间, 胶结反应本地化, 减少有害副产物铵, 实现超高土壤强度。研究还表明了 EICP 具有改善土壤和减少铵盐的潜力, 可用于风蚀控制和其他应用。Arab 等[31]研究了酶稳定剂对 EICP 地基改善的生命周期进行环境评价, 并试验 RSM 模型模拟了添加海藻酸钠(SA)对 EICP 处理土壤性能的影响。经海藻酸钠改性的 EICP 处理的试件在干湿循环下具有良好的性能。表明了 SA 联合 EICP 方法为土壤稳定和改善提供了一种有效且环保的替代方法。Jain 等[32]研究了酶促碳酸盐沉淀对粘性砂非饱和土性质的影响。与未处理的试件相比, 经黄原胶(X-EICP)结合 EICP 处理的试件强度有所增加, 并改变土壤的孔隙度和渗透性。

综合上述, EICP 技术在固化土体方面具有较好的效果, 目前 EICP 技术应用广泛, 在众多领域均有良好的研究成果, 表 1 列举了众多学者关于 EICP 技术的不同研究方向。

Table 1. Domestic and foreign scholars have different research directions on EICP
表 1. 国内外学者对 EICP 不同的研究方向

研究者	研究方法	研究方向	研究结论	参考文献
柴少波等	橡胶颗粒与 EICP 结合	改良黄土力学特性	增加了黄土动力特性, 提高黄土地区抗震性能	[33]
王琳等	生物反应墙(PRB)联合 EICP	修复污染黄土	黄土中铜离子减少 20%	[34]
Yuan 等	EICP 与有机物质混合	黄河洪区粉土加固	粉土强度比未处理提高 4 倍	[35]
Hamdan 等	EICP	抑制粉尘排放	有效地减少了逸散性粉尘排放	[36]
张建伟等	EICP 联合木质素	增强粉土抗雨侵蚀	形成硬壳层, 表面强度提高 36%	[37]
原鹏博等	EICP	加固遗址土	土体强度增加	[38]
Pasillas 等	甘油与黄原胶+EICP	土壤加固	胶结力有所提升	[39]

3. EICP 固化土体力学特性研究

力学特性是直接反映 EICP 固化土体效果的重要指标。Beser 等[40]利用脲酶催化尿素水解与钙反应生成固体碳酸钙用于封堵近井环境或裂缝中的泄漏通道, 结果表明 EICP 固化的土样抗压强度达到 28 天养护水泥的 77%。试验表明了 EICP 固化的土样拥有足够的强度, 可以应用于封堵泄露通道。Oliveira 等[41]基于 UCS 对五种土壤类型低(分级砂、两种粉质砂、一种粉质土和一种有机土)的稳定性进行了测试, 以检验其对强度和刚度的影响。UCS 试验结果表明, 在砂质和粉质土壤中, 酶促碳酸钙沉淀增强了土壤的强化作用。Simatupang 等[42]对 EICP 处理的砂土进行了不排水条件下的循环三轴剪切试验。结果表明, EICP 处理砂土的最大剪切模量随方解石含量的增加、围压的增加和固化过程中饱和度的降低而增大。析出的碳酸钙沉淀有利于砂粒力学性能的提高。

曹光辉等[43]通过生物刺激联合 EICP 的加固方法比单独的 EICP 方法得到了更高的 UCS 强度。田威等[44]采用植物脲酶诱导碳酸钙沉积技术固化路基黄土, 结果表明木钙源 EICP 溶液能同时显著提高黄土的 UCS 值和三轴抗剪强度指标。其中, 黄土的抗剪强度随木钙源 EICP 溶液掺量的增加而增大, 到达最大值后随之减小。Moghal 等[45]利用酶诱导方解石沉淀研究了两种印度粘性土(黑色和红色)的膨胀和渗透特性, 通过对多种重金属(Cd、Ni 和 Pb)在土壤上的吸附和解吸实验, 了解重金属对土壤的吸附响应。在养护期结束时, 沉积在土壤空隙中的碳酸钙沉淀将土壤渗透性降低了 47 倍、溶胀压力降低 4 倍。研究表明了 EICP 技术能显著地固定土壤中的重金属, 降低土壤的溶胀性和渗透性。

Yuan 等[46]研究了钠蒙脱土(Na-Mt)与酶促碳酸盐沉淀(EICP)联合对黄河洪涝区粉砂进行加固。通过无侧限抗压强度(UCS)试验、研究了 Na-Mt 与 EICP 对试样的固化效果。结果表明 UCS 和 Ca^{2+} 利用率分别比传统 EICP 提高 1.4 倍和 2.72 倍。Ahenkorah 等[47]对 EICP 处理砂试件进行了无侧限抗压强度(UCS)试验、干湿循环(WD)、冻融循环(FT)和高温循环(耐火试验-FR 和热重分析-TG)。经过一定次数的 WD 或 FT 循环后, CaCO_3 的平均含量(ACn)和相应的 UCS (qn)随着质量损失的增加而降低。FR 测试和 TG 分析表明, 随着温度的升高, CaCO_3 的质量损失和含量降低明显。Sun 等[48]研究了 EICP 及混合物对粉土强度和抗液化性能的改善作用, 无侧限抗压强度和动态三轴试验的结果表明, 不同的 EICP 处理方法均能改善粉土的强度及抗液化性能。Kavazanjian 和 Almajed 等[49] [50]利用 EICP 进行土壤改良, 研究发现, EICP 沉淀的碳酸钙通过填充土壤孔隙, 使得土壤颗粒变大和表面粗糙, 并将其他颗粒连接在一起, 提高土壤强度、刚度。

综合上述, EICP 可显著提高土体力学性能并且做到了在封堵泄露通道、吸附重金属、加固黄河洪涝区粉砂等实际应用方面的能力。一些研究表明, EICP 固化后的土体抗压强度能够满足实际工程需求, 但也存在不同土体类型的固化效果差异。因此在实际应用方面, 还需要根据现场环境及时做出相应处理。

4. EICP 固化土体胶结机理研究

通过微观观测 EICP 的工作动态、反应情况及生成晶体形态, 进而得到作用机制。EICP 固化土体的胶结机理可通过细微观试验(SEM、XRD、FTIR 等)来反应。一般来说, EICP 生成的碳酸钙晶体类型有方解石、球霰石、文石 3 种, 其中方解石是最为稳定的晶型。He 等[51]采用酶促碳酸盐沉淀法处理砂柱, 在经过 5 次 EICP 处理后, 干态抗压强度及湿态抗压强度大幅提高。且碳酸钙含量达 2%~3%。通过扫描电镜(SEM)和 x 射线衍射仪(XRD)分析, 砂中碳酸钙的晶体类型为方解石。Miao 等[52]通过 EICP 固化风积沙, 试验表明, EICP 在砂粒之间生成方解石, 通过将砂粒转化为骨料, 进而改变砂样表面结构。Putra 等[53]在 EICP 溶液内添加氯化镁和硫酸镁, 研究发现, 处理后的土体强度受内部沉淀量的控制, EICP 溶液中添加 Mg^{2+} 是可以促进文石形成的, 此外, 硫酸镁也可以促进石膏的形成。Chandra 等[54]将 Mg^{2+} 引入土体当中, Mg^{2+} 离子的加入使得碳酸盐逐步结晶, 随着 Mg^{2+}/Ca^{2+} 摩尔比的增加, 矿物形态从方解石到文石、球霰石和白云石的混合形态。镁的加入促进了更多棱角、更粗糙的晶体形成, 更容易形成密集、颗粒直径更大的连接键。Zomorodian 等[55]对压实中级配石英砂试样的表面抗侵蚀性能进行了研究, 并利用扫描电镜研究了地壳砂层孔隙空间中沉淀物质的空间分布和形态。得出生成的沉淀为方解石。Refaei 等[56]研究了 EICP 与海藻酸钠生物聚合物在表层土壤中的应用, 采用扫描电子显微镜(SEM)对处理后的砂样进行微观结构研究, 并证明了方解石物质的存在是归功于碳酸盐沉淀剂和生物聚合物的颗粒间结合作用。Shu 等[57]发现在 EICP 过程中, 先析出的碳酸钙可能作为成核种子, 随后促进析出的碳酸钙团聚增大, 方解石团簇位于砂粒之间的接触区。Almajed 等[58]通过向 EICP 处理液中添加奶粉, 降低硅砂试样所需底物和酶浓度, 在扫描电镜图像中, 含奶粉溶液处理的样品, 碳酸钙相的主要形态为方解石, 这些方解石沉积在颗粒间的接触位置。Park 等[59]对不同尿素和不同钙源处理过的砂土进行了一系列无侧限压缩试验和分析方法。试验发现了处理砂的无侧限抗压强度(UCS)达到 317 kPa, 其强度与掺高早强硅酸盐水泥的 4% 胶结砂相近, 并且在沙砾沉淀基质中得到稳定的方解石。Ahenkorah 等[60]通过 EICP 将土颗粒进行胶结, 扫描电镜(SEM)成像结果表明, EICP 中 $CaCO_3$ 的析出形态为球霰石, 这种晶体形态会直接影响土壤的强度。对部分 EICP 机理进行了总结归纳如下表 2。

Table 2. Some EICP microscopic observation and crystal formation

表 2. 部分 EICP 微观观测及生成晶体形态

研究者	主要研究结论	生成晶型	参考文献
Simatupang 等	EICP 生成的碳酸钙沉淀有利于砂粒力学性能的提高	方解石	[42]
Moghal 等	吸附土壤中的重金属	方解石	[45]
Yuan 等	UCS 强度和碳酸钙利用率显著提高	方解石	[46]
He 等	经过 5 次处理后, 湿态抗压强度可达 204 kPa	方解石	[51]
Chandra 等	经 EICP 处理后土体强度有所提高	文石、球霰石及白云石的混合形态	[54]
Refaei 等	EICP 和 SA 的掺入混合物显著提高了 UCS	方解石	[56]
Ahenkorah 等	EICP 产生的碳酸钙沉淀量大, 将土壤颗粒胶结起来	球霰石	[60]

综合上述, EICP 作为一项新型土壤改良技术, 通过诱导碳酸钙生成沉淀来增强土壤的物理力学性能, 通过微观观测晶体形态得出 EICP 的固化机理, 以此来达到固化土体的目的。

5. 结语与展望

我国的黄土地域广泛, 拥有丰富的土体资源, 但是土地的利用率较低, 通过研究 EICP 技术对土体固化是非常有必要的, 本文对 EICP 处理土体进行了系统的归纳总结, 从 EICP 的研究背景出发, 综合地叙述了 EICP 的国内外发展状况, 对固化土体的力学特性及微观形态的工作机制进行了叙述, 对 EICP 的国内外研究现状、力学特性及作用机理进行了系统的阐述, 可以得出以下结论:

(1) EICP 固化土体技术是由 MICP 技术衍化而来, 相比之下, EICP 具有更小的脲酶尺寸, 且不易发生堵塞, 土颗粒接触点越多, 可为碳酸钙提供的沉积点位越多, 固化效果越好, 对于细颗粒土的胶结效果更好。而且 EICP 技术不用考虑生物安全问题, 脲酶可以直接利用, 在固化土体方面具有更好的研究前景。

(2) 目前 EICP 适用领域广泛, 并且对于土体的力学特性有不同程度改善。但是目前对 EICP 固化土体的耐久性能研究不多, 而且大多数的 EICP 相关试验仍处于室内试验阶段, 对于现场试验应用较少, 需要进一步的研究。

(3) 但是对于 EICP 技术来说相关研究还属于起步阶段, 很多理论尚未成熟, 相比 MICP, EICP 技术缺少必要的成核位点。对于 EICP 固化土体的方法多种多样, 但对土体强度的提高相对有限, 甚至会造成资源的浪费。因此, EICP 技术作为一种新型土壤固化技术, 仍需进行系统的研究。

基金项目

本研究由省级大学生创新创业训练计划资助项目(S202312715038)资助。

参考文献

- [1] 李腾. 不同钙源 EICP 溶液改良黄土力学性能及微观机制研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2022.
- [2] 田威, 云伟, 党可欣, 等. 不同钙源 EICP 溶液改良路基黄土动力特性研究[J]. 材料导报, 2024, 2(28): 1-13.
- [3] Shen, D., Liu, Z., Song, Z., *et al.* (2023) Reinforcement Mechanism and Erosion Resistance of Loess Slope Using Enzyme Induced Calcite Precipitation Technique. *Sustainability*, **15**, Article No. 1044. <https://doi.org/10.3390/su15021044>
- [4] Chen, Y., Chai, S., Cai, D., *et al.* (2023) Experimental Study on Shear Mechanical Properties of Improved Loess Based on Rubber Particle Incorporation and EICP Technology. *Frontiers in Earth Science*, **11**, Article ID: 1270102. <https://doi.org/10.3389/feart.2023.1270102>
- [5] Wang, L., Cheng, W.C., Xue, Z.F., *et al.* (2023) Study on Cu- and Pb-Contaminated Loess Remediation Using Electrokinetic Technology Coupled with Biological Permeable Reactive Barrier. *Journal of Environmental Management*, **348**, Article ID: 119348. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119348>
- [6] Ahenkorah, I., Rahman, M.M., Karim, M.R., *et al.* (2023) Characteristics of MICP- and EICP-Treated Sands in Simple Shear Conditions: A Benchmarking with the Critical State of Untreated Sand. *Géotechnique*, 1-15. <https://doi.org/10.1680/jgeot.22.00329>
- [7] Stocks-Fischer, S., Galinat, J.K. and Bang, S.S. (1999) Microbiological Precipitation of CaCO₃. *Soil Biology and Biochemistry*, **31**, 1563-1571. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(99\)00082-6](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(99)00082-6)
- [8] Yasuhara, H., Neupane, D., Hayashi, K., *et al.* (2012) Experiments and Predictions of Physical Properties of Sand Cemented by Enzymatically-Induced Carbonate Precipitation. *Soils and Foundations*, **52**, 539-549. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2012.05.011>
- [9] Alotaibi, E., Arab, M.G., Abdallah, M., *et al.* (2022) Life Cycle Assessment of Biocemented Sands Using Enzyme Induced Carbonate Precipitation (EICP) for Soil Stabilization Applications. *Scientific Reports*, **12**, Article No. 6032. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-09723-7>
- [10] Wang, Z., Zhang, N., Ding, J., *et al.* (2018) Experimental Study on Wind Erosion Resistance and Strength of Sands

- Treated with Microbial-Induced Calcium Carbonate Precipitation. *Advances in Materials Science and Engineering*, **2018**, Article ID: 3463298. <https://doi.org/10.1155/2018/3463298>
- [11] Nemati, M. and Voordouw, G. (2003) Modification of Porous Media Permeability, Using Calcium Carbonate Produced Enzymatically *in Situ*. *Enzyme and Microbial Technology*, **33**, 635-642. [https://doi.org/10.1016/S0141-0229\(03\)00191-1](https://doi.org/10.1016/S0141-0229(03)00191-1)
- [12] Jiang, X., Rutherford, C., Cetin, B., *et al.* (2020) Reduction of Water Erosion Using Bacterial Enzyme Induced Calcite Precipitation (BEICP) for Sandy Soil. *Geo-Congress 2020: Biogeotechnics (GSP 320)*, Minneapolis, 25-28 February 2020, 104-110. <https://doi.org/10.1061/9780784482834.012>
- [13] Alarifi, S.A., Mustafa, A., Omarov, K., *et al.* (2022) A Review of Enzyme-Induced Calcium Carbonate Precipitation Applicability in the Oil and Gas Industry. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, **10**, Article ID: 900881. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.900881>
- [14] Almajed, A., Lateef, M.A., Moghal, A.A.B., *et al.* (2021) State-of-the-Art Review of the Applicability and Challenges of Microbial-Induced Calcite Precipitation (MICP) and Enzyme-Induced Calcite Precipitation (EICP). Techniques for Geotechnical and Geoenvironmental Applications. *Crystals*, **11**, Article No. 370. <https://doi.org/10.3390/cryst11040370>
- [15] Cui, M.J., Lai, H.J., Hoang, T., *et al.* (2021) One-Phase-Low-PH Enzyme Induced Carbonate Precipitation (EICP) Method for Soil Improvement. *Acta Geotechnica*, **16**, 481-489. <https://doi.org/10.1007/s11440-020-01043-2>
- [16] 张建伟, 韩一, 边汉亮, 等. 大豆脲酶诱导碳酸钙固化粉土抗风侵蚀性能的试验研究[J]. 工业建筑, 2020, 50(12): 19-24+118.
- [17] 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.
- [18] 喻文晔. 海水环境下不同酶源加固钙质砂试验研究[D]: [硕士学位论文]. 三亚: 海南热带海洋学院, 2022.
- [19] 崔猛, 符晓, 郑俊杰, 等. 黄豆脲酶诱导碳酸钙沉淀多变量试验研究[J]. 岩土力学, 2022(11): 1-9.
- [20] 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.
- [21] 赵丽娜, 曹扬. 海螺状碳酸钙的可控合成与荧光性能[J]. 高等学校化学学报, 2017, 38(12): 2144-2148.
- [22] 边汉亮, 张旭钢, 韩一, 等. 大豆脲酶对 Zn^{2+} 污染土的修复试验研究[J]. 工业建筑, 2022, 52(11): 67-70+66.
- [23] 李笑磊. 土遗址城墙 EICP 加固技术研究[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 河南大学, 2022.
- [24] 郑伟. 玄武岩纤维-EICP 改良粉砂剪切特性研究[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 河南大学, 2022.
- [25] Chandra, A. and Ravi, K. (2021) Application of Enzyme-Induced Carbonate Precipitation (EICP) to Improve the Shear Strength of Different Type of Soils. In: Gali, M.L. and Rao, P.R., Eds., *Problematic Soils and Geoenvironmental Concerns*, Springer, Berlin, 617-632. https://doi.org/10.1007/978-981-15-6237-2_52
- [26] Pratama, G.B.S., Yasuhara, H., Kinoshita, N., *et al.* (2021) Application of Soybean Powder as Urease Enzyme Replacement on EICP Method for Soil Improvement Technique. *Earth and Environmental Science*, **622**, Article ID: 012035. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/622/1/012035>
- [27] Meng, H., Shu, S., Gao, Y., *et al.* (2021) Multiple-Phase Enzyme-Induced Carbonate Precipitation (EICP) Method for Soil Improvement. *Engineering Geology*, **294**, Article ID: 106374. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106374>
- [28] Ossai, R., Rivera, L. and Bandini, P. (2020) Experimental Study to Determine an EICP Application Method Feasible for Field Treatment for Soil Erosion Control. *Geo-Congress 2020*, Minneapolis, 25-28 February 2020, 205-213. <https://doi.org/10.1061/9780784482834.023>
- [29] Dilrukshi, R.A.N., Nakashima, K. and Kawasaki, S. (2018) Soil Improvement Using Plant-Derived Urease-Induced Calcium Carbonate Precipitation. *Soils and Foundations*, **58**, 894-910. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2018.04.003>
- [30] Zhao, Z., Hamdan, N., Shen, L., *et al.* (2016) Biomimetic Hydrogel Composites for Soil Stabilization and Contaminant Mitigation. *Environmental Science & Technology*, **50**, 12401-12410. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b01285>
- [31] Arab, M.G., Refaei, M., Alotaibi, E., *et al.* (2024) Optimizing the Compressive Strength of Sodium Alginate-Modified EICP-Treated Sand Using Design of Experiments. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **36**, Article ID: 04024017. <https://doi.org/10.1061/JMCEE7.MTENG-16400>
- [32] Jain, S., Alothman, S., Kavazanjian Jr., E., *et al.* (2024) Effect of EICP Treatment on the Unconfined Compressive Strength and Soil Water Characteristic Curve of a Clayey Sand Material. *Geo-Congress*, Vancouver, 25-28 February 2024, 338-344. <https://doi.org/10.1061/9780784485354.033>
- [33] 柴少波, 李显鹏, 李轶楠, 等. 橡胶颗粒及 EICP 技术改良黄土动力特性试验[J/OL]. 工程科学与技术, 2024: 1-14. <https://doi.org/10.15961/j.jsuese.202300961>

- [34] 王琳, 郑文杰, 薛中飞, 等. 生物反应墙联合电动修复铜污染黄土试验研究[J/OL]. 土木工程学报, 2024: 1-9. <https://doi.org/10.15951/j.tmgcxb.23110939>
- [35] Yuan, H., Ren, G., Liu, K., *et al.* (2020) Experimental Study of EICP Combined with Organic Materials for Silt Improvement in the Yellow River Flood Area. *Applied Sciences*, **10**, Article No. 7678. <https://doi.org/10.3390/app10217678>
- [36] Hamdan, N. and Kavazanjian Jr., E. (2016) Enzyme-Induced Carbonate Mineral Precipitation for Fugitive Dust Control. *Géotechnique*, **66**, 546-555. <https://doi.org/10.1680/jgeot.15.P.168>
- [37] 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.
- [38] 原鹏博, 朱磊, 钟秀梅, 等. 酶诱导碳酸钙沉淀加固遗址土动力特性试验研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(12): 3385-3392+3415.
- [39] Pasillas, J.N., Khodadadi, H., Martin, K., *et al.* (2018) Viscosity-Enhanced EICP Treatment of Soil. *IFCEE 2018*, Orlando, 5-10 March 2018, 145-154. <https://doi.org/10.1061/9780784481592.015>
- [40] Beser, D., West, C., Cunningham, A., *et al.* (2017) Assessment of Ureolysis Induced Mineral Precipitation Material Properties Compared to Oil and Gas Well Cements. *ARMA US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*, ARMA, San Francisco, 25-28 June 2017, ARMA-2017-0588.
- [41] Oliveira, P.J.V., Freitas, L.D. and Carmona, J.P.S.F. (2017) Effect of Soil Type on the Enzymatic Calcium Carbonate Precipitation Process Used for Soil Improvement. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **29**, Article ID: 04016263. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001804](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001804)
- [42] Simatupang, M., Sukri, A.S., *et al.* (2019) Effect of Confining Pressures on the Shear Modulus of Sand Treated with Enzymatically Induced Calcite Precipitation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **615**, Article ID: 012042. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/615/1/012042>
- [43] 曹光辉, 刘士雨, 蔡燕燕, 等. 靶向激活产脲酶微生物联合 EICP 加固陆域吹填海砂试验研究[J]. 岩土力学, 2022(8): 1-13.
- [44] 田威, 李腾, 贾能, 等. 木钙源 EICP 溶液固化路基黄土性能研究[J]. 材料导报, 2022, 36(15): 78-85.
- [45] Moghal, A.A.B., Lateef, M.A., Abu Sayeed Mohammed, S., *et al.* (2020) Heavy Metal Immobilization Studies and Enhancement in Geotechnical Properties of Cohesive Soils by EICP Technique. *Applied Sciences*, **10**, Article No. 7568. <https://doi.org/10.3390/app10217568>
- [46] Yuan, H., Liu, K., Zhang, C., *et al.* (2022) Mechanical Properties of Na-Montmorillonite-Modified EICP-Treated Silty Sand. *Environmental Science and Pollution Research*, **29**, 10332-10344. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16442-5>
- [47] Ahenkorah, I., Rahman, M.M., Karim, M.R., *et al.* (2023) Unconfined Compressive Strength of MICP and EICP Treated Sands Subjected to Cycles of Wetting-Drying, Freezing-Thawing and Elevated Temperature: Experimental and EPR Modelling. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, **15**, 1226-1247. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2022.08.007>
- [48] Sun, Y., Zhong, X., Lv, J., *et al.* (2023) Experimental Study on Different Improvement Schemes of EICP-Lignin Solidified Silt. *Materials*, **16**, Article No. 999. <https://doi.org/10.3390/ma16030999>
- [49] Kavazanjian Jr., E., Almajed, A. and Hamdan, N. (2017) Bio-Inspired Soil Improvement Using EICP Soil Columns and Soil Nails. *Grouting 2017*, Honolulu, 9-12 July 2017, 13-22. <https://doi.org/10.1061/9780784480793.002>
- [50] Almajed, A., Khodadadi, H. and Kavazanjian, E. (2018) Sisal Fiber Reinforcement of EICP-Treated Soil. *IFCEE 2018*, Orlando, 5-10 March 2018, 29-36. <https://doi.org/10.1061/9780784481592.004>
- [51] He, J., Mao, X., Zhou, Y., *et al.* (2022) Cementation of Sand with Enzyme-Induced Carbonate Precipitation (EICP) Using Concrete-Extracted Calcium. *Frontiers in Physics*, **9**, Article No. 808. <https://doi.org/10.3389/fphy.2021.825356>
- [52] Miao, L., Wu, L., Sun, X., *et al.* (2020) Method for Solidifying Desert Sands with Enzyme-Catalysed Mineralization. *Land Degradation & Development*, **31**, 1317-1324. <https://doi.org/10.1002/ldr.3499>
- [53] Putra, H., Yasuhara, H. and Kinoshita, N. (2017) Optimum Condition for the Application of Enzyme-Mediated Calcite Precipitation Technique as Soil Improvement Technique. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, **7**, 2145. <https://doi.org/10.18517/ijaseit.7.6.3425>
- [54] Chandra, A. and Ravi, K. (2020) Effect of Magnesium Incorporation in Enzyme-Induced Carbonate Precipitation (EICP) to Improve Shear Strength of Soil. *Advances in Computer Methods and Geomechanics, IACMAG Symposium 2019*, Volume 2, 333-346. https://doi.org/10.1007/978-981-15-0890-5_28
- [55] Zomorodian, S.M.A., Nikbakht, S., Ghaffari, H., *et al.* (2023) Enzymatic-Induced Calcite Precipitation (EICP) Method for Improving Hydraulic Erosion Resistance of Surface Sand Layer: A Laboratory Investigation. *Sustainability*, **15**, Article No. 5567. <https://doi.org/10.3390/su15065567>

- [56] Refaei, M., Arab, M.G. and Omar, M. (2020) Sandy Soil Improvement through Biopolymer Assisted EICP. *Geo-Congress 2020*, Minneapolis, 25-28 February 2020, 612-619. <https://doi.org/10.1061/9780784482780.060>
- [57] Shu, S., Yan, B., Ge, B., *et al.* (2022) Factors Affecting Soybean Crude Urease Extraction and Biocementation via Enzyme-Induced Carbonate Precipitation (EICP) for Soil Improvement. *Energies*, **15**, Article No. 5566. <https://doi.org/10.3390/en15155566>
- [58] Almajed, A., Tirkolaie, H.K., Kavazanjian, E., *et al.* (2022) Enzyme Induced Biocementated Sand with High Strength at Low Carbonate Content. *Scientific Reports*, **9**, Article No. 1135. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-38361-1>
- [59] Park, S.S., Choi, S.G. and Nam, I.H. (2014) Effect of Plant-Induced Calcite Precipitation on the Strength of Sand. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **26**, Article ID: 06014017. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001029](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001029)
- [60] Ahenkorah, I., Rahman, M.M., Karim, M.R., *et al.* (2022) Evaluation of the Treatment Processes for MICP- and EICP-Treated Sands. *Geo-Congress 2022*, Charlotte, 20-23 March 2022, 365-374. <https://doi.org/10.1061/9780784484012.038>