

# EICP技术在古旧建筑裂缝修复中的应用

张少睿\*, 关敬轩, 刘同济

西京学院土木工程学院, 陕西 西安

收稿日期: 2025年3月27日; 录用日期: 2025年4月18日; 发布日期: 2025年4月28日

## 摘要

酶诱导碳酸钙沉淀(EICP)技术作为一种绿色、经济且兼容性强的修复方法, 在古旧建筑修复领域展现出独特潜力。该技术基于酶催化反应, 通过碳酸钙沉淀实现材料的加固与修复。本文系统探讨了EICP在古旧建筑砖石和砂浆裂缝修复中的应用效果。结果表明, EICP技术对古建筑材料具有高度兼容性, 修复过程中无化学侵蚀, 能够有效增强材料的力学性能, 同时保持其外观和历史风貌。这一创新技术为文化遗产保护提供了全新的解决方案, 为古建筑的修复与文化遗产保护开辟了新的思路和方法。

## 关键词

EICP技术, 古旧建筑修复, 碳酸钙沉积, 注射法, 文化遗产保护

# Application of EICP Technology in Crack Repair of Ancient Buildings

Shaorui Zhang\*, Jingxuan Guan, Tongji Liu

School of Civil Engineering, Xijing University, Xi'an Shaanxi

Received: Mar. 27<sup>th</sup>, 2025; accepted: Apr. 18<sup>th</sup>, 2025; published: Apr. 28<sup>th</sup>, 2025

## Abstract

Enzyme-Induced Calcium Carbonate Precipitation (EICP) emerges as an innovative conservation technique demonstrating exceptional sustainability, cost-efficiency, and material compatibility for historical structure restoration. This bio-mediated approach utilizes enzymatic catalysis to generate calcium carbonate deposition, achieving simultaneous structural reinforcement and fracture remediation. This paper systematically discusses the application effect of EICP in the repair of masonry and mortar cracks in old buildings. The findings reveal that EICP technology maintains superior compatibility with heritage materials, eliminates chemical degradation risks during treatment,

\*通讯作者。

**enhances mechanical strength, and preserves both aesthetic authenticity and historical value through non-invasive intervention. This innovative technology provides a groundbreaking solution for cultural heritage conservation, paving new avenues and methodologies for the restoration of ancient buildings and the preservation of cultural heritage.**

## Keywords

**EICP Technology, Ancient Building Restoration, Calcium Carbonate Precipitation, Injection Method, Cultural Heritage Conservation**

Copyright © 2025 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

我国约有 33 座古城墙，大约 2.47 万处的历史文化古迹。风雨侵蚀等自然因素与人为因素的负面影响导致古文物墙体表面的裂缝不断增多。因此保护古建筑就是在传承文化，但是现有的裂缝检测及评估技术存在效率较低、精度受限的问题，制约着行业的发展[1]。其裂缝问题一直是影响结构安全性和耐久性的关键因素。裂缝的形成不仅削弱了承载能力，还可能引起渗漏、木材腐蚀等问题，进而影响建筑物的寿命。传统的裂缝修复方法，如灌浆、表面处理等，虽然在一定程度上能够解决问题，但存在操作复杂、成本高、环境不友好等缺点。

近年来，微生物诱导碳酸钙沉淀(Microbially Induced Calcium Carbonate Precipitation, MICP)技术因其环保和高效的特点受到关注，但其微生物培养过程复杂，且活性难以控制[2]。在此背景下，脲酶诱导碳酸钙沉积(Enzyme-Induced Calcium Carbonate Precipitation, EICP)技术应运而生。EICP 技术通过从植物中提取脲酶，与尿素和钙源反应生成碳酸钙沉淀，从而实现裂缝的修复[3][4]。利用 EICP 技术，对仿遗址土开展拌合、注浆渗透加固试验，研究 EICP 技术对仿遗址土的加固效果，并通过扫描电镜对加固机理进行分析[5]。该技术不仅克服了 MICP 的局限性，还具有操作简便、成本低、环境友好的优点，为古旧建筑裂缝修复提供了一种新的解决方案[6][7]。EICP 技术能够显著提高混凝土的力学性能和耐久性，有效解决传统修复方法的不足，为混凝土结构的维护和加固提供了新的技术手段[8]。

## 2. EICP 技术研究发展现状

### 2.1. 国内研究现状

郑文杰等[9]通过研究不同底物浓度、不同镁离子浓度、不同铵根离子浓度对脲酶矿化过程中电导率、酸碱度、碳酸钙沉淀量及沉淀率变化的影响规律，证明脲酶诱导碳酸钙沉淀技术用于古迹建筑保护的可行性；张建伟等[10]研究 EICP 技术在干湿循环作用下，采用大豆脲酶诱导碳酸钙沉淀技术抑制遗址土的劣化；崔猛等[11]通过 SEM 图像可发现，沉淀碳酸钙晶体包裹并黏结砂粒成为整体，固化效果非常理想，尿素浓度与 pH 值脲酶活性对固化效果产生不同影响，二者都存在一个最优组合，结果表明，当尿素浓度在 0.1~1.0 mol/L 时最优 pH 值为 7，当尿素浓度在 1.0~1.5 mol/L 时最优 pH 值为 8；余云燕等[12]通过无侧限抗压强度试验、膨胀试验、渗透试验及干湿循环下裂隙发育试验检测优化不同配比 EICP 溶液的固化效果，结果表明：优化后工艺参数胶酶比为 1.5:1、脲酶浓度为 100 g/L 和胶结液浓度为 1.4 mol/L；优化配比后试样的无侧限抗压强度较素土提高了 55.21%。曹光辉等[13]探究了多种因素对 EICP 胶结效果的

影响, 归纳检测 EICP 加固试样的强度、碳酸钙含量、微观结构和成分的方法。

## 2.2. 国外研究现状

Niu 等[14]研究提出了一种双酶强化微生物诱导碳酸盐沉淀(E-MICP)技术, 用于提高沙质土壤的生物固化效率。结果表明, 与传统生物固化技术相比, E-MICP 处理后的土壤生物固化率、无侧限抗压强度(UCS)和  $\text{CaCO}_3$  含量分别提高了 5.89 倍、2.76 倍和 2.1 倍。为沙质土壤的生态治理提供了理论依据和创新视角; Samuel Ng 等[15]通过在适宜温度储存来延长大豆来源的脲酶的储存时间。实验结果表明, 冷冻保存的脲酶活性显著增高。同时, 冷冻储存酶处理的细砂的剪切强度仍有显著提升; Saif 等[16]认为 EICP 技术可以应用于不同的土壤类型, EICP 以脲酶作为催化剂来促进孔隙水中的尿素水解, 在钙离子存在的情况下, 导致碳酸钙沉淀, 从而体现出其稳定性; Pratama 等[17]通过研究比较大豆脲酶和商品脲酶在 EICP 中的活性, 以及对沉淀材料的矿物类型分析和土样的补强效果评价, 为 EICP 技术的优化和应用提供了重要依据。Masato 等[18]通过实验优化了酪蛋白辅助的 EICP 技术, 显著提高了低碳酸钙含量沉淀物的抗压强度。这种复合沉淀物不仅提高了力学性能, 还为 EICP 技术在土壤加固、建筑材料修复等领域的应用提供了新的思路和方法; Hua 等[19]利用钠蒙脱石(Na-Mt)引入传统的 EICP 中以提高固化效率。Na-Mt 可以有效填充冻融循环过程中 EICP 处理土壤中新形成的孔隙, 从而抵消部分孔隙变化。Hanliang 等人[20]研究酶诱导碳酸钙沉淀(EICP)技术修复 Pb 和 Zn 污染砂土的有效性。实验发现, 脲酶活性随着酶浓度的增加而线性上升, 并在浓度为 100 g/L 时达到稳定, 活性为 18 mmol/min, 且在 pH 为 8 时活性达到峰值。温度对脲酶活性也有显著影响, 标准室温下即可实现有效的修复效果。同时, 该技术还能增强砂土的机械性能, 显示出其作为修复重金属污染砂土的可行解决方案的巨大潜力。Gao 等人[21]以石灰、粉煤灰和  $\text{CaCl}_2$  为基准材料, 探讨了酶诱导方解石沉淀(EICP)技术对三种分散性土壤的改性潜力, 并通过碎屑试验和针孔试验对四种材料的改性效果进行了系统评估。结果表明, EICP 技术和石灰均能显著改善分散性土壤的抗水蚀性能和力学特性, 表现出优越的改性效果。与石灰相比, EICP 技术具有更高的改性效率和更强的环境可持续性。此外, 低浓度的 EICP 溶液即可有效改性本研究中测试的三种分散性土壤, 显示出其在土壤改性领域的巨大应用潜力。

## 3. EICP 技术修复裂缝研究

基于诱导碳酸钙沉淀技术(EICP)原理, 才俊达[22]通过提取大豆、刀豆、毛豆和豌豆四种植物中的脲酶, 开展脲酶活性和碳酸钙产率影响因素试验。结果表明, 在脲酶活性试验中, 当刀豆粉溶液浓度为 50 g/L、环境温度为  $30^\circ\text{C}\sim 35^\circ\text{C}$  且 pH 值为 7 时, 单位浓度脲酶活性最高, 为遗址裂隙修复材料的适用性提供了科学依据; 张建伟等[23]采用胶结液中添加脱脂奶粉的方法改良微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)和酶诱导碳酸钙沉淀(EICP)来修复古建筑块, 通过对比分析发现, 两种方法均可较好地填充试块裂缝, EICP 生成碳酸钙沉淀质量最多, 修复用量少; 李明东[24]研究表明 EICP 可显著提升土体性能: 无侧限抗压强度最高达 3 MPa, 抗风蚀能力达 29.1 m/s, 表面贯入强度达 1.065 MPa, 渗透系数降低率可达 98.2%, 重金属离子质量分数降低率可达 99.96%。建议制定植物脲酶促沉碳酸钙改良土体的方法标准, 并开展植物脲酶保存方法及 EICP 改良土体在特殊环境下的长期性能研究。Li 等人[25]以混凝土为研究对象, 石英砂为填充介质, 采用 EICP 注射法进行修复混凝土裂缝。通过 EDS、XRD 和 SEM 等测试, 确定了 EICP 的修复机制。结果表明, 0.3 mm 宽试件在最高抗压强度恢复率为 98.41%。采用 EICP 注射修复方法, 形成的碳酸钙晶体可以紧密、均匀地附着在裂缝上, 从而达到更好的修复效果; 方昌航等人[26]利用大豆脲酶处理液对砂质边坡进行表面的加固处理, 处理后的土质边坡能够有效地抵抗水流的表面径流侵蚀。李帅[27]对 EICP 技术进行优化改良, 蔗糖改良 EICP 技术则可以使土体孔隙率降低 11.6%, 效果提升较为显

著。蔗糖改良 EICP 技术不仅实现裂缝修复, 并且能够废物利用。Li G 等人[28]研究以水泥砂浆为对象, 添加两种填充介质, 采用注射法、灌注法和浸泡法三种基于 EICP 的修复方法, 针对不同裂缝宽度的水泥砂浆进行修复。通过 XRD、SEM 和 EDS 等测试建立砂浆微观结构, 揭示修复机制。结果表明, 以石英砂为修复介质时, 试样截面上附着更多碳酸钙, 修复效果最佳。注射法修复效果优于灌注法和浸泡法, 超声波传播时间缩短 1.22%。石英砂与 EICP 结合, 砂粒间沉淀的碳酸钙可增强粘结力, 促进修复; J. Jędrzejko 等人[29]研究对比了酶诱导碳酸钙沉积(EICP)和微生物诱导碳酸钙沉积(MICP)修复水泥基材料外部裂缝的效果。结果表明, 两种方法均能有效封堵 0.35 mm 以下的裂缝。姜启武等人[30]研究通过砂柱固化试验, 探究了不同配合比的豆砾石与标准砂(0.5、0.75、1.0、1.25、1.5)及不同灌浆次数(9、12、15 次)对 EICP 固化效果的影响。经无侧限抗压测试、渗透性测试等多种试验分析, 得出 EICP 加固豆砾石混合砂的最优配比为 1:1.5, 15 次灌浆后, 试样单轴抗压强度最高达 4.55 MPa, 渗透系数为  $1.72 \times 10^{-5}$  m/s。含砂量高的试样因碳酸钙晶体填充密实, 结石体强度高。该研究为 EICP 技术在隧道掘进机壁后吹填豆砾石工程中的应用提供了理论支持。向瑞等人[31]研究以三峡库区紫色土坡面为对象, 设置裸坡对照(CK)和单施脲酶及 4 种浓度(0.5、1.0、1.5、2.0 mol/L)的 EICP 处理, 开展 60 和 120 mm/h 降雨强度的模拟降雨试验。结果表明, 与 CK 相比, 单施脲酶有增流减沙效果, EICP 处理增流减沙效果显著( $P < 0.05$ ), 且随浓度增加先增后减, 1.5 mol/L 时效果最佳。不同浓度 EICP 处理间产流和产沙总量无显著差异( $P > 0.05$ ), 低浓度(0.5 mol/L)已能较好控制片蚀。侵蚀泥沙分选现象为黏粒、细粉粒和粗粉粒富集、砂粒亏损, EICP 处理后分选程度降低。微观分析显示, EICP 处理使土颗粒间隙和表面出现球形碳酸钙沉淀和脲酶丝状物质, 提高土体整体性和抗蚀性, 为揭示 EICP 减蚀机理提供了依据。

#### 4. EICP 技术加固土体研究

付贵永[32]研究通过植物脲酶诱导碳酸钙沉淀(EICP)联合黄原胶(XG)对南海钙质粉土进行加固, 分析了不同干湿循环次数下固化粉土的物理、力学和微观特性。结果表明, 随着黄原胶含量和 EICP 反应液浓度增加, XG 固化土和联合(XG-EICP)固化土的无侧限抗压强度显著提升。在干湿循环作用下, XG 固化土强度降幅大于联合固化土, 后者表现出更优的抗干湿循环特性。试验发现, XG 在 EICP 溶液中可形成不溶于水的凝胶状沉淀, 且其上粘连的碳酸钙颗粒体积大于纯 EICP 生成的颗粒。研究表明, XG 与 EICP 的联合应用可有效提高生物聚合物固化土的抗干湿循环侵蚀能力, 为海洋土加固提供了新思路和方法; 原鹏博等人[33]本研究探讨了酶诱导碳酸钙沉淀技术(EICP)对遗址土动力特性的影响。对初始干密度为 1.55、1.65、1.75 g/cm<sup>3</sup> 的遗址土进行 EICP 处理并设对照组。结果表明, 在相同动应力下, EICP 处理后的遗址土动应变更小, 耗散能量更少, 阻尼比更小。同时, 随着干密度、围压、振动频率增大, 动应变降低效果依次减弱; 张建伟等人[34]通过自制仿遗址土, 并进行室内干湿循环模拟试验, 验证采用大豆脲酶诱导碳酸钙沉淀技术抑制遗址土的劣化, 验证 EICP 的可行性, SEM 结果显示 EICP 加固试样的内部生成了碳酸钙晶体, 起到胶结和填充土颗粒的作用, 提高了固化土的强度; 林敖[35]本研究以遗址土为对象, 采用钻入阻力测试方法对 EICP 加固效果进行定量评价。通过多项试验, 分析了钻入阻力测试的影响因素以及 EICP 加固遗址土效果的影响因素。结果表明, EICP 能显著提升土遗址力学特性, 钻入阻力测试是有效的定量评价手段, 为土遗址保护加固提供了技术支撑; 刘阳等人[36]研究将脲酶诱导碳酸钙沉淀技术应用用于风积沙表面固化, 通过室内试验探究其效果与机理。试验中, 从大豆中提取脲酶, 与氯化钙和尿素溶液混合后喷洒于试样表面, 形成薄层硬壳。测试结果显示, 该技术可使试样表面强度达兆帕级, 保水性提高 60%, 风蚀率和渗透速率显著降低, 碳酸钙生成量约为 0.6%。与仅喷洒盐溶液或酶液的试样对比, 表明该技术综合了盐分和酶的作用, 生成的碳酸钙使颗粒胶结更耐久, 具有良好的防风固沙效果; 董瑾, 刘效彬[37]采用扫描电镜、X 射线衍射等研究了脲酶诱导碳酸钙沉淀(EICP)技术对三合土性能的影响。

响。结果表明,随着豆粉质量浓度的增大,脲酶活性呈近似线性增长,其中最适宜的环境 pH 值为 3~11。与三合土空白样相比,脲酶改性三合土碳化深度提高了 94%~112%,抗压强度提高了 68.0%~103.0%,耐候性提高了 150%~200%,60 d 表面硬度提高了 15.0%~18.3%。脲酶掺入后,出现了长条状晶体和团簇状晶体,且随着豆粉质量浓度的增大,团簇状晶体相对增多,长条状晶体相对减少,使三合土的各项性能逐渐提高;Xu J 等人[38]研究通过渗透不同浓度的硫酸钠溶液,探究干湿循环对盐渍黄土试样的损伤特性影响。采用扫描电子显微镜(SEM)、三轴剪切试验和核磁共振(NMR)等方法,检测土体强度参数及微观结构随干湿循环和含盐量的变化。结果表明,干湿循环和盐风化耦合作用下,土体损伤特征显著。最终建立了基于孔隙率方程的损伤度预测模型,该模型可有效预测盐渍原状黄土在干湿循环和盐风化耦合作用下的损伤程度;陈毅,张虎元,杨龙[39]研究以暴露时间不同的黄土质边坡为对象,采用 SEM 和 MIP 对表部及内部土样微观孔隙结构进行观察和量测。结果表明,表部土体微观结构变化大于内部土体,且具规律性。表部土颗粒呈致密叠片状,孔径分布为双峰模式,团聚体内孔隙占比较大。随着风化时间增长,表部土体孔隙总体积和表面分形维数减小,孔壁粗糙度降低,颗粒间摩擦减小,宏观上易诱发表层剥离损耗等病害。黎梭君等人[40]研究采用生物矿化技术(MICP/EICP)对紫色土进行加固,引入单相低 pH 负压注浆的新型 EICP 技术,并通过表面硬度、无侧限抗压强度、碳酸钙含量、SEM 和 XRD 测试对比分析预拌合、单相低 pH 注浆、双相低 pH 负压注浆和单相低 pH 负压注浆法的固化效果。结果表明,50 g/L 脲酶浓度和 1.2 mol/L 胶结液浓度为 EICP 注浆固化紫色土的最适浓度。单相低 pH 负压注浆法可使表面硬度增加 9.1%,无侧限抗压强度提升 84.44%,刚度提升 144.37%,且能显著提高碳酸钙含量和胶结均匀性,在 4 种固化方法中效果最优。研究表明,新型 EICP 单相低 pH 负压注浆法对砂质黏性紫色土力学性能的改善效果显著。李驰等人[41]研究以内蒙古呼伦贝尔某水库工程的筑坝土料为岩土基质,采用针孔试验、双密度计试验和碎块试验对微生物矿化改良前后的土样进行分散性鉴定和评价。结果显示,微生物矿化改良后的土样抗分散能力显著增强,尤其是脲酶溶液制备的微生物改性剂改良后的土样,在针孔试验中,经 50 mm、180 mm、380 mm 和 1020 mm 水头后,流出水清澈透明,出水口平整,针孔尺寸不变,碎块试验中未出现胶粒分散。双密度计试验中,脲酶溶液改良后土样分散度低于 30%,较原土样降低约 50%,由分散性转变为非分散性;微生物菌液改良后土样分散度为 41.1%,较原土样降低 22%,由分散性转变为过渡性。脲酶溶液在粒径细小的黏性土中矿化作用更充分,抗分散能力优于微生物菌液改性剂。该研究首次将脲酶诱导碳酸钙沉积(EICP)技术应用于分散性土改良,是绿色微生物矿化技术与水利筑坝材料改良结合的创新,具有良好的应用前景。

## 5. 结语与展望

近年来,EICP 技术在古旧建筑裂缝修复中的应用研究逐渐增多,取得了显著进展。研究表明,EICP 技术通过脲酶催化尿素分解生成碳酸钙沉淀,能够有效填充裂缝,显著提高古旧建筑的力学性能和耐久性。现有研究主要集中在脲酶活性的影响因素、不同修复方法的比较、裂缝尺寸对修复效果的影响以及微观结构分析等方面。这些研究为 EICP 技术的优化和实际应用提供了重要的理论支持。尽管 EICP 技术在实验室研究中取得了显著进展,但现有研究仍存在一些不足之处。首先,大多数研究集中在实验室规模的试件修复,对于实际工程中复杂的裂缝形态和环境条件的适应性研究较少。其次,EICP 技术的长期耐久性和抗渗性能仍需进一步验证。此外,现有研究对脲酶提取和修复工艺的优化不够深入,尚未形成系统化的修复工艺。这些不足之处限制了 EICP 技术在实际工程中的广泛应用。未来的研究应更加注重实际工程应用,结合不同古旧建筑的特点,优化脲酶提取和修复工艺,提高修复效率和耐久性。同时,应加强多学科交叉研究,结合材料科学、生物技术和建筑工程等领域的最新成果,进一步完善 EICP 技术的理论体系和应用方法。通过这些努力,EICP 技术有望在古旧建筑裂缝修复中发挥更大的作用,为文化遗

产的保护和传承提供有力支持。

## 基金项目

西京学院 2024 年“大学生创新创业训练计划”项目(S202412715078)。

## 参考文献

- [1] 易识远, 魏国锋, 张秉坚, 等. 中国传统三合土材料配方的试验研究[J]. 西北民族大学学报(自然科学版), 2019, 40(4): 31-41.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 李笑磊. 土遗址城墙 EICP 加固技术研究[D]: [硕士学位论文]. 开封: 河南大学, 2022.
- [5] 杨凡. 酶诱导碳酸钙沉淀加固土遗址试验研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2019.
- [6] 王磊, 王博, 刘志强, 等. 基于脲酶诱导碳酸钙沉淀的土体固化研究进展[J]. 工业建筑, 2022, 52(11): 57-66.
- [7] 彭成, 谢佑材, 欧阳以, 等. EICP 修复三合土预制微裂缝效果试验及机理分析[J]. 南华大学学报(自然科学版), 2024, 38(4): 56-64.
- [8] 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.
- [9] 郑文杰, 胡文乐, 袁可, 等. 脲酶矿化作用机制及其提升仿古黏土砖瓦阻水性能研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(S2): 255-264.
- [10] 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): 1000-1009.
- [11] 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, 43(11): 3027-3035.
- [12] 余云燕, 郭秋月, 崔文豪, 等. 基于响应面法优化 EICP 溶液配比固化红层泥岩填料试验研究[J/OL]. 岩土工程学报, 1-9. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1124.TU.20240930.1619.012.html>, 2025-03-05.
- [13] 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.
- [14] Niu, L., Duan, Y., Xu, X., Wu, X., Wang, Z. and Zheng, C. (2025) Double Enzyme Enhanced Microbial Induction of Carbonate Precipitation (E-MICP) to Improve Mechanical Properties of Sandy Soil and Its Biocementation Mechanism. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **13**, Article115349. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.115349>
- [15] Ng, S. and Chu, J. (2024) Frozen Enzyme EICP Method for More Effective Soil Improvement. *Acta Geotechnica*, **19**, 7117-7124. <https://doi.org/10.1007/s11440-024-02348-2>
- [16] Saif, A., Cuccurullo, A., Gallipoli, D., Perlot, C. and Bruno, A.W. (2022) Advances in Enzyme Induced Carbonate Precipitation and Application to Soil Improvement: A Review. *Materials*, **15**, Article 950. <https://doi.org/10.3390/ma15030950>
- [17] Pratama, G.B.S., Yasuhara, H., Kinoshita, N. and Putra, H. (2021) Application of Soybean Powder as Urease Enzyme Replacement on EICP Method for Soil Improvement Technique. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **622**, Article 012035. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/622/1/012035>
- [18] Miyake, M., Kim, D. and Hata, T. (2022) Casein-Assisted Enhancement of the Compressive Strength of Biocemented Sand. *Scientific Reports*, **12**, Article No. 12754. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-16879-9>
- [19] Yuan, H., Shi, Q., Li, J. and Zhao, Z. (2023) Effect of Freeze-Thaw Cycling on Mechanical Properties of Na-Montmorillonite Modified EICP-Treated Silty Sand. *Case Studies in Construction Materials*, **19**, e02641. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02641>
- [20] Bian, H., Zhang, Z., Li, J., Zhang, X., Li, Z. and Yang, Q. (2025) Application of EICP Technology in the Remediation of Lead- and Zinc-Contaminated Sand and Improvement of Its Mechanical Properties. *Journal of Environmental Engineering*, **151**, 1-8. <https://doi.org/10.1061/joeeedu.eeeng-7962>
- [21] Gao, Y., Ren, G., Fan, H., Li, X., Pang, S. and Meng, M. (2025) Study on the Modification of Different Kinds of Dispersive Soils Using EICP: Comparative Analysis with Traditional Modification Materials. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **13**, Article 115826. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.115826>

- [22] 才俊达. 基于诱导  $\text{CaCO}_3$  沉淀技术的土遗址裂隙修复试验及模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2023.
- [23] 张建伟, 黄小山, 边汉亮, 等. 基于脱脂奶粉联合诱导碳酸钙沉淀技术的古建筑修复加固[J]. 中国科技论文, 2021, 16(10): 1035-1039+1054.
- [24] 李明东, 张诗艾, 杨远江, 等. 植物脲酶诱导碳酸盐沉淀改良土体研究进展[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2024, 45(1): 1-9.
- [25] Li, G., Yan, D., Liu, J., Yang, P. and Zhang, J. (2024) Experimental Study on the Crack Concrete Repaired via Enzyme-Induced Calcium Carbonate Precipitation (EICP). *Materials*, **17**, Article 3205. <https://doi.org/10.3390/ma17133205>
- [26] 方昌航, 何稼, 严柏杨, 等. 大豆脲酶固化土体表面防止径流冲刷实验研究[J]. 河南科学, 2019, 37(11): 1777-1783.
- [27] 李帅. 基于土遗址裂隙修复的EICP技术改良试验及模拟[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2024.
- [28] Li, G., Yan, D., Liu, J., Yang, P. and Zhang, J. (2024) Study on the Mechanical Properties of Crack Mortar Repaired by Enzyme-Induced Calcium Carbonate Precipitation (EICP). *Materials*, **17**, Article 2978. <https://doi.org/10.3390/ma17122978>
- [29] Jedrzejko, M.J., Gan, Y., Chen, X., Jonkers, H.M. and Luo, H. (2025) Performance Evaluation of EICP with Organic/Non-Organic Additives for Repairing External Cracks in Cement-Based Materials. *Construction and Building Materials*, **458**, Article 139646. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139646>
- [30] 姜启武, 黄明, 崔明娟, 等. 酶诱导碳酸钙沉淀技术加固 TBM 壁后吹填豆砾石最优配比试验及机制研究[J]. 岩土力学, 2024, 45(7): 2037-2049.
- [31] 向瑞, 郭俊奎, 张伦, 等. 酶诱导碳酸钙沉淀处理对紫色土坡面片蚀过程及泥沙分选的影响[J]. 农业工程学报, 2024, 40(24): 81-88.
- [32] 付贵永, 肖杨, 史金权, 等. 干湿循环下 EICP 联合黄原胶加固钙质粉土劣化特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(11): 2341-2351.
- [33] 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.
- [34] 张建伟, 董悦, 李贝贝, 等. 干湿循环作用下 EICP 固化仿遗址土的耐久性[J]. 中国科技论文, 2023, 18(10): 1049-1055.
- [35] 林敖. 基于钻入阻力的酶诱导碳酸钙沉淀加固遗址土效果评价[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2023.
- [36] 刘阳, 高玉峰, 何稼, 等. 大豆脲酶诱导碳酸钙沉积技术的防风固沙试验研究[J]. 河南科学, 2019, 37(11): 1784-1789.
- [37] 董瑾, 刘效彬. 脲酶诱导碳酸钙沉淀技术改良传统三合土的性能[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(8): 853-859.
- [38] Xu, J., Li, Y., Ren, C. and Lan, W. (2020) Damage of Saline Intact Loess after Dry-Wet and Its Interpretation Based on SEM and NMR. *Soils and Foundations*, **60**, 911-928. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2020.06.006>
- [39] 陈毅, 张虎元, 杨龙. 遗址土劣化进程中微观结构变化的类比研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(11): 4117-4124+4141.
- [40] 黎桢君, 刘鹏, 张静, 等. 新型 EICP 注浆固化砂质黏性紫色土力学性能试验研究[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(11): 2429-2438.
- [41] 李驰, 史冠宇, 武慧敏, 等. 基于脲酶诱导碳酸钙沉积的微生物矿化技术在分散性土改良中应用的试验研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(2): 333-342.