黄原胶“粘”住酶，钙砂“硬”起来！研究团队破解生物胶结砂遇水易崩难题

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：https://www.iikx.com/news/progress/41466.html

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

黄原胶“粘”住酶，钙砂“硬”起来！研究团队破解生物胶结砂遇水易崩难题。传统岩土加固材料（如水泥、石灰）的应用往往伴随着高能耗、高碳排放及生态环境破坏等问题。为响应双碳目标与生态文明建设需求，低碳可持续的新型加固技术迫在眉睫。酶诱导碳酸钙沉淀（EICP）技术利用脲酶催化尿素水解，促使碳酸钙（CaCO3）在土颗粒间沉淀胶结，是绿色岩土工程领域备受瞩目的前沿方向。然而，由于游离酶在土体孔隙中缺乏固定的异质成核位点，CaCO3的生成往往呈现无序状态且分布极不均匀，严重制约了该技术的宏观加固效能与工程化应用。

近日，东南大学丁建文教授团队在ENGINEERING Structure and Civil Engineering期刊上发表了一篇题为Mechanistic insights into the strength and slaking resistance enhancement of biocemented sand through xanthan gum-assisted CaCO3 nucleation的研究论文。该研究创新性地引入黄原胶（XG）辅助EICP过程，揭示了其通过增强酶滞留与诱导成核的双重机制，显著提升了生物胶结砂的无侧限抗压强度（UCS）与抗崩解性能，为绿色岩土工程提供了新的理论依据与技术路径。

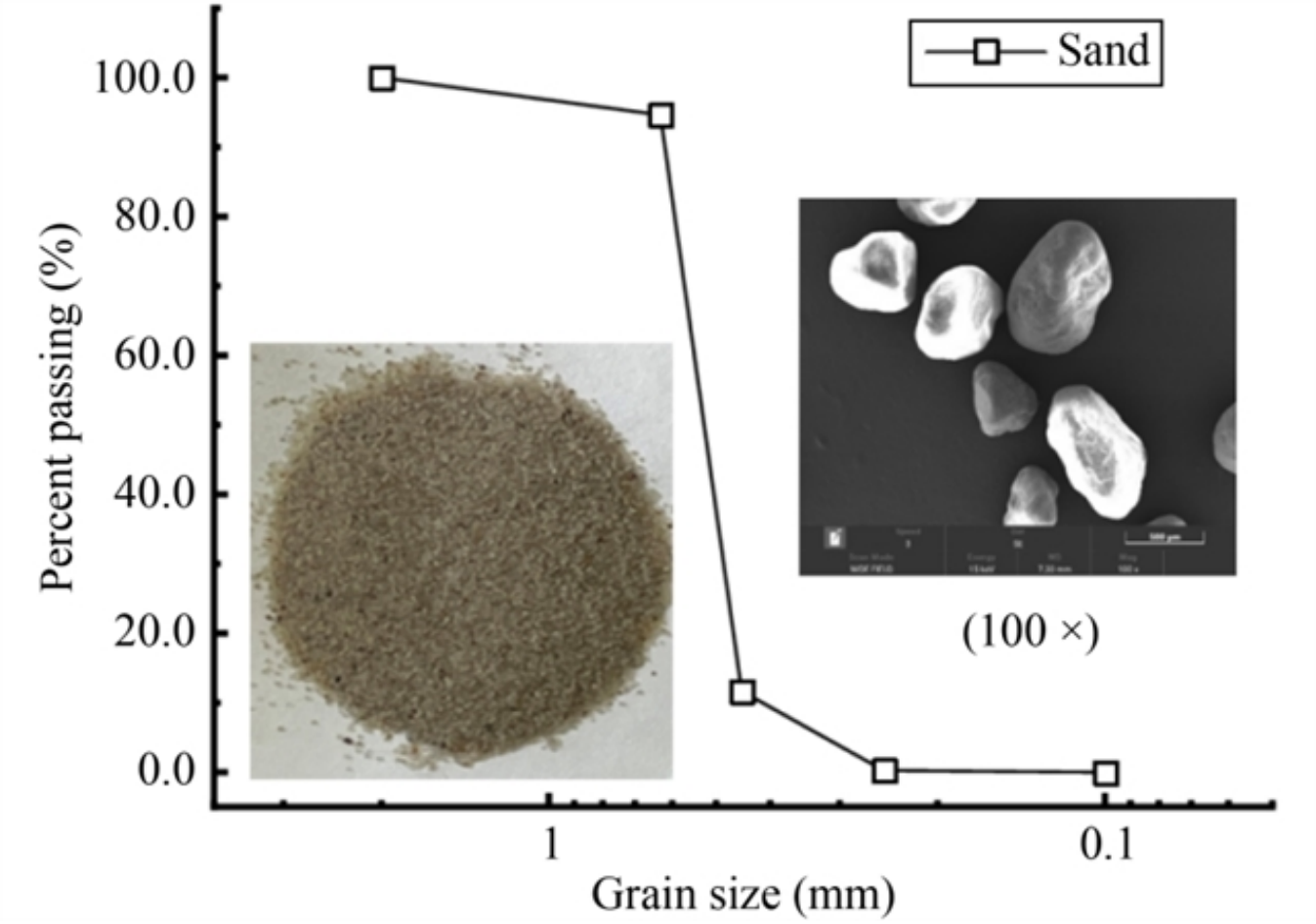


图1.砂土的基本物理性质

引入黄原胶：从简单混合到双重赋能

为攻克EICP成核难、效率低的瓶颈，研究团队创造性地引入了天然生物聚合物——XG。XG是一种由野油菜黄单胞菌分泌的阴离子多糖，具有良好的增粘性和丰富的负电官能团。研究的核心思路并非简单混合，而是利用XG实现对EICP过程的双重赋能。首先，利用XG的高粘度，将脲酶溶液更有效地滞留在砂颗粒的接触点和表面凹陷等低能位点，防止其在后续胶结液注入时被置换冲走。更重要的是，XG分子链上带负电的羧酸根基团能像触手一样主动吸附溶液中的钙离子（Ca^{2+}），为CaCO3的结晶提供了大量、均匀的异质成核位点。通过一系列不同XG浓度的对比试验，包括UCS测试、超声振荡抗崩解测试以及微观表征，团队系统验证了这一巧妙策略的有效性。

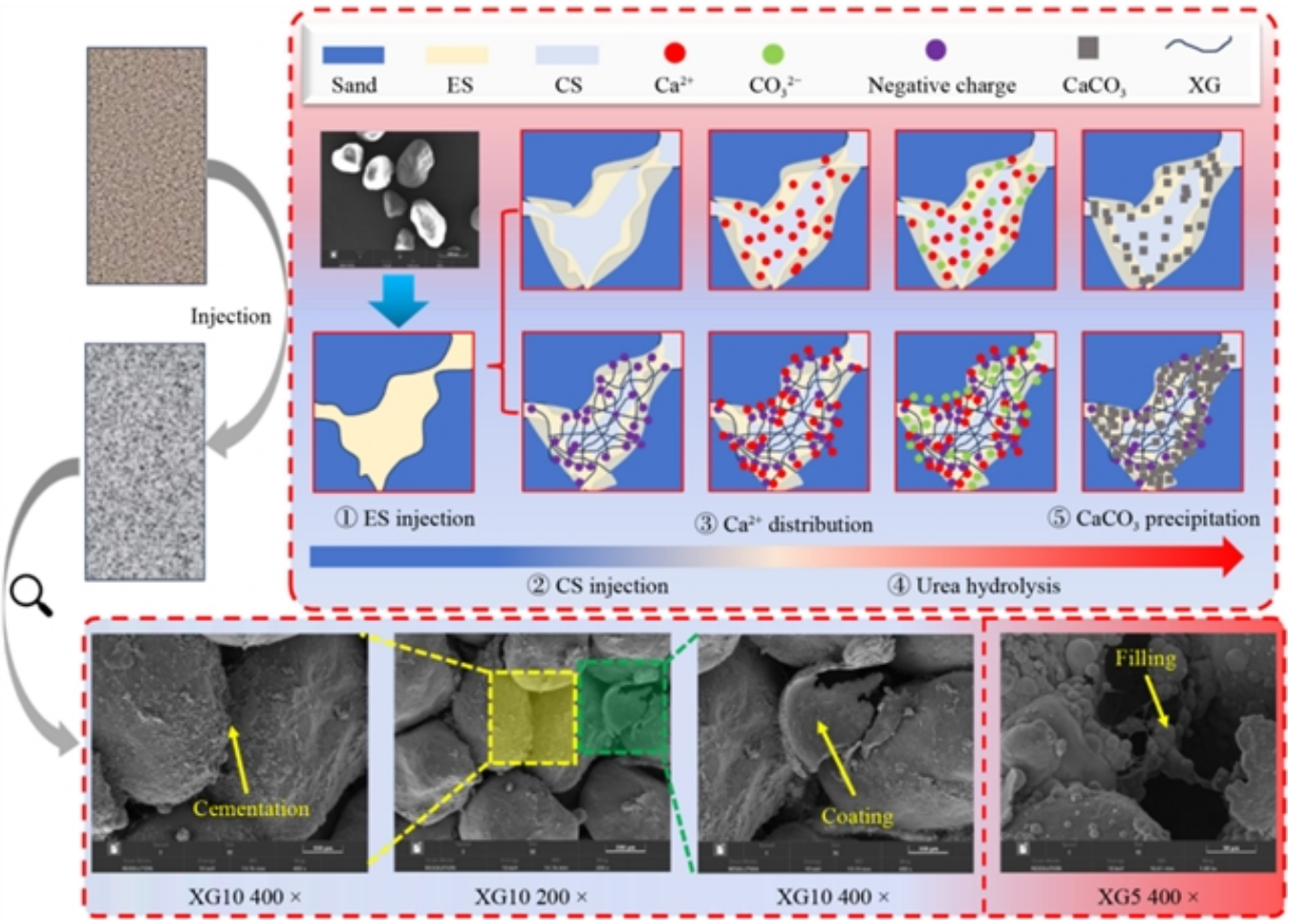


图2.不同加固方法下砂土的胶结机理

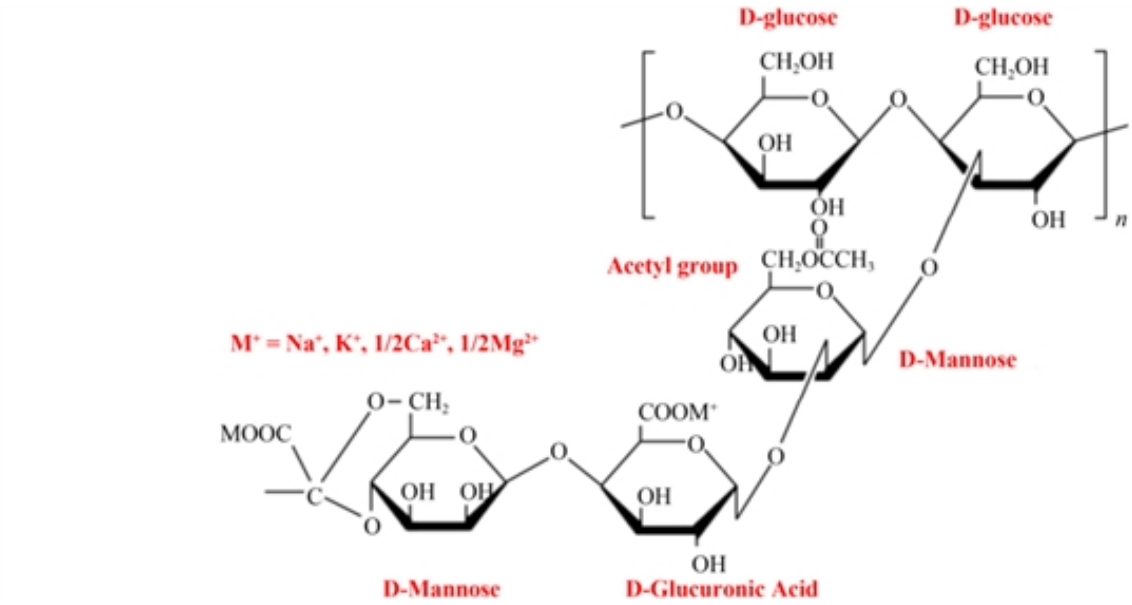


图3.XG的主要分子结构

宏观性能跃升与微观胶结机制

宏观力学测试验证了该策略的有效性。测试显示，随着XG浓度从0增至2g/L，生物胶结砂的UCS从121.10kPa飙升至231.05kPa，增幅高达90.8%，同时材料的抗崩解性也显著增强，平均崩解指数（SI）从2.588降至1.323。微观分析揭示了性能飞跃的根源：扫描电镜-能谱分析（SEM-EDS）结果显示，加入XG后，原本稀疏的Ca元素分布变得高度富集，尤其在颗粒接触点形成了更大、更厚的CaCO3团聚体，构建起牢固的微桥。X射线衍射（XRD）分析进一步确认，尽管XG轻微抑制了亚稳态球霰石向稳态方解石的转化，但总体CaCO3生成量的增加占据了主导地位。研究还发现，UCS与CaCO3含量呈指数正相关，而SI则呈指数负相关，定量化地证明了提高有效CaCO3生成量是性能改善的关键。

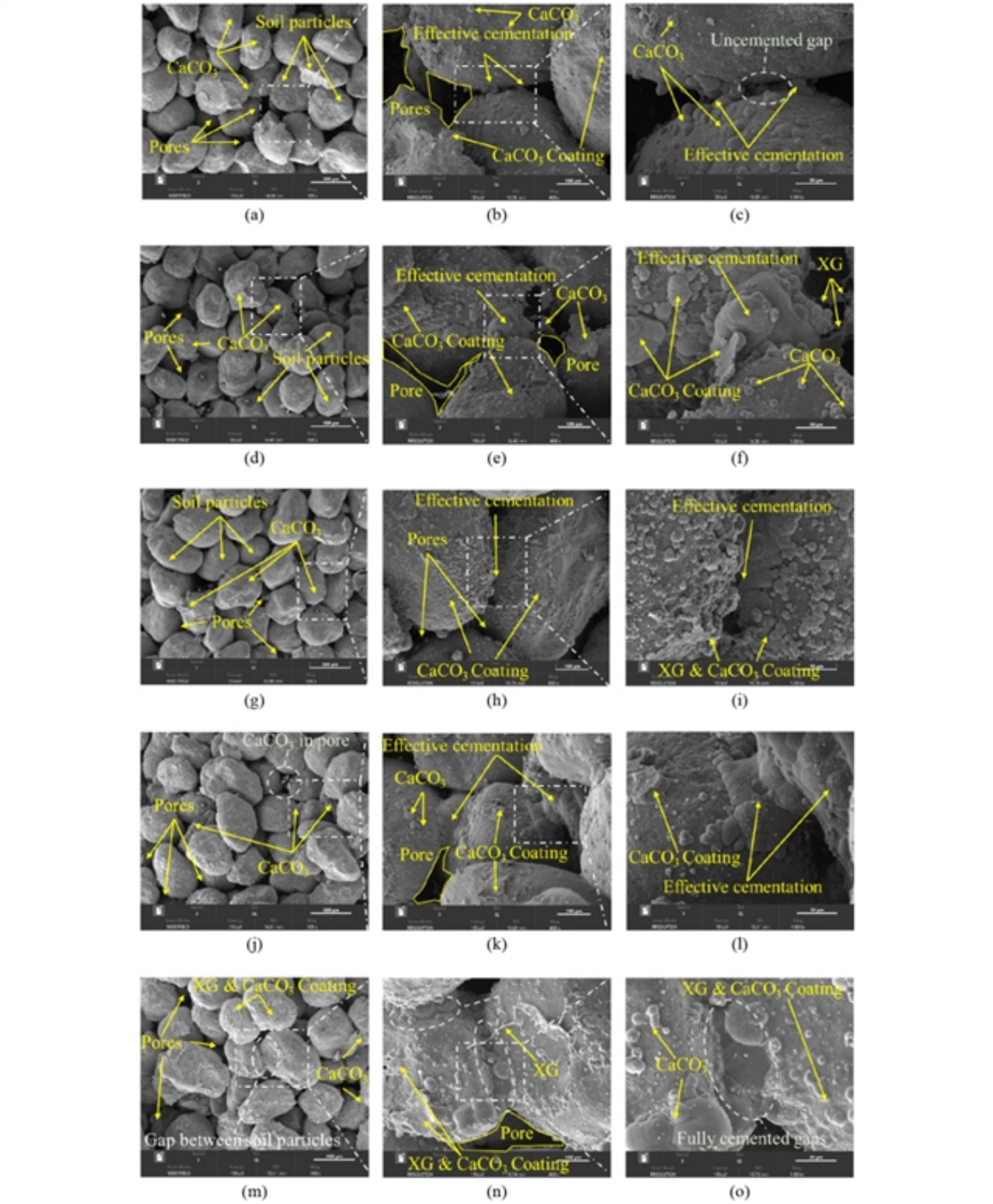


图4.不同XG浓度下生物胶结砂的微观结构：(a) XG0 100×；(b) XG0 400×；(c) XG0 1000×；(d) XG5 100×；(e) XG5 400×；(f) XG5 1000×；(g) XG10 100×；(h) XG10 400×；(i) XG10 1000×；(j) XG15 100×；(k) XG15 400×；(l) XG15 1000×；(m) XG20 100×；(n) XG20 400×；(o) XG20 1000×

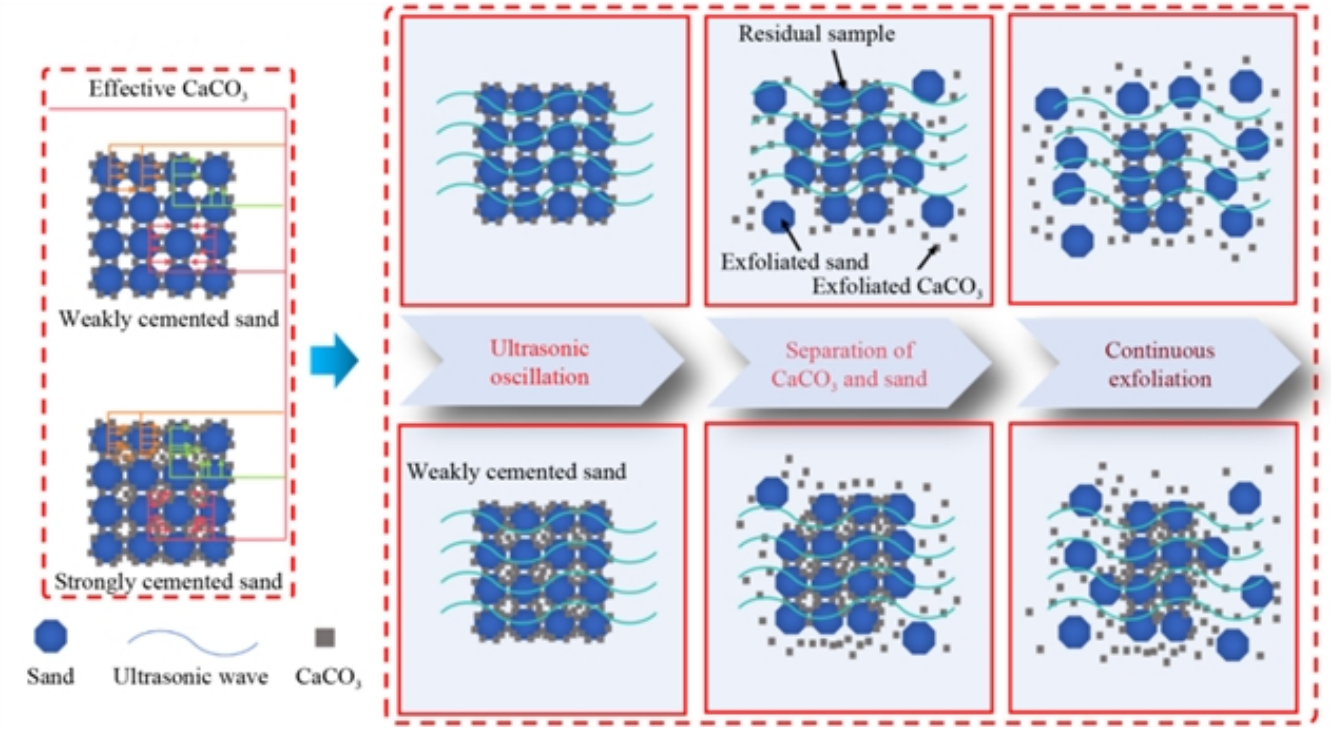


图5.生物胶结砂在超声振荡作用下的崩解过程

响应双碳战略，直击工程耐久性痛点

这项研究的突破不仅在于理论层面的创新，更在于其与工程实际和国家战略的深度契合。在双碳目标指引下，利用可再生的XG辅助EICP技术替代高碳排的传统水泥基材料，为边坡防护、防风固沙等工程提供了一条真正的绿色低碳路径。更为关键的是，该研究直击水利、交通基础设施长期面临的水致侵蚀与崩解破坏痛点。这种兼顾强度提升与抗崩解增强的双重赋能策略，赋予了材料在复杂水环境下长期服役的卓越耐久性。加之该工艺相对简单、材料来源广泛，具备极高的经济性与推广潜力。可以说，该研究不仅为EICP技术的工程化落地夯实了基础，更为未来绿色岩土工程的发展开辟了广阔的创新空间。（来源：EngineeringJournals微信公众号）

相关论文信息：https://journal.hep.com.cn/fsce/EN/10.1007/s11709-026-1293-9

作者：丁建文等 来源：《工程·结构与土木工程》

更多 科学进展 请访问 https://www.iikx.com/news/progress/

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，爱科学iikx.com转发