•绿色岩土工程•

DOI:10.12454/j.jsuese.202400477

本刊网刊

黄河泥沙在海藻酸钠+EICP制备生物砖中的应用

原　华[1],李　瑾[1],何德洪[2],苏忠胜[3],韩智光[1],朱　想[1*]

(1.河南大学 建筑工程学院,河南 开封 475004;2.河南省建院勘测设计有限公司,河南 郑州 450014;
3.中国建筑第七工程局有限公司,河南 郑州 450003)

摘　要:近年来,利用生物胶结技术制备“生物砖”因绿色环保、强度可调控等优势,在工程与材料领域引起广泛关注,然而,现有研究多集中于生物砖在常规环境下的性能,对其在特殊环境中的特性,尤其耐久性问题尚缺少深入研究。本文以黄河泥沙作为添加组分,将其引入基于酶诱导碳酸钙沉积(EICP)和海藻酸钠制备石英砂砖的工艺中,通过测试砂砖在正常、酸性、干湿循环及冻融循环4种环境下的强度、吸水率和微观结构,并基于机理分析,探讨掺入黄河泥沙对石英砂砖性能的影响。结果表明:海藻酸钠的掺入可有效提高EICP处理石英砂砖的强度,其强化效应既源于碳酸钙含量的增加,也与砂砖内部结构及碳酸钙沉淀结晶形态密切相关。所掺黄河泥沙的粒径越小,海藻酸钠与EICP协同固结石英砂砖的抗压与抗折强度越大;在黄河泥沙最佳掺量下,砂砖的抗压与抗折强度可分别提高1.09和0.97倍,且其对干湿、冻融循环及酸性环境的适应能力显著增强。海藻酸钠为Ca^{2+}的沉淀提供成核位点,促使碳酸钙在海藻酸大分子网格中生长;黄河泥沙被碳酸钙晶体和海藻酸钙凝胶包裹,形成“海藻酸钙凝胶–碳酸钙–黄河泥沙–石英砂”的四相单元结构,颗粒之间的黏聚力增大,结构也更为致密。

关键词:生物砖;酶诱导碳酸钙沉积;黄河泥沙;海藻酸钠;干湿循环;冻融循环

中图分类号:TU432　　**文献标志码:**A　　**文章编号:**2096-3246(2026)03-0146-09

传统的制砖方式需要在1 200 °C高温下烧制黏土坯。与能源密集型的传统制砖方式相比,利用微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)[1–2]和脲酶诱导碳酸钙沉淀(EICP)[3]等生物矿化技术,将碎散状土体胶结成砖块(简称“生物砖”),具有新型、环保、可持续发展等优点[4–6]。

生物砖的概念最早由Bernardi等[7]提出。Bu等[8]将MICP溶液与沙子混合后浸入含尿素和盐的溶液中,制备出抗弯强度可达950 kPa的生物砖。Poornima等[9]发现经MICP处理的粉煤灰砖的强度比传统粉煤灰砖提高34.06%,吸水量降低28%。Liu等[10]发现加入椰子椰壳纤维后经MICP处理的砂砖的弯曲强度峰值高达1 200 kPa。尽管MICP处理后砂砖强度得到较大提高,但MICP存在环节多,耗时长,不适用于大规模生产,且所制备的生物砖均匀性欠佳等缺点。

EICP和MICP制作生物砖的机理相似,不同的是EICP将游离的脲酶作为酶源,减少了MICP繁杂的环节[11]。王钰轲等[12]发现EICP可有效固化黄河泥沙并提高其水稳定性。然而,由于EICP不能为碳酸钙沉淀提供成核位点,生成的碳酸钙晶体不易聚集,应尝试通过添加生物聚合物来克服这一缺陷。Arab等[13]发现,EICP与海藻酸钠(SA)联合制备生物砖的抗弯强度较纯EICP提高了175%,但纯EICP生成的碳酸钙晶体较细、桥接效果差。

黄河泥沙颗粒的粒径大小介于砂土和粉土之间,常用在建筑用沙、空心砖、彩陶制品和免烧砖等建材领域[14]。与普通沙土相比,黄河泥沙的矿物主要由石英、蒙脱石、伊利石和长石等组成,是一种新型、稳定的传统矿产的替代资源。Wang等[15]以黄河泥沙和煤粉为主要原料制备多孔轻质陶粒,并用陶粒代替标准

收稿日期:2024 – 06 – 20　　**修回日期:**2024 – 08 – 10　　**网络出版日期:**2024 – 09 – 07

基金项目:国家自然科学基金项目(52578485);河南省科技研发计划联合基金(重点)项目(245200810037);河南省研究生教育改革与质量提升工程项目(YJS2025XQLH37)

作者简介:原　华(1982—)女,教授. 研究方向:微生物岩土;地下结构. E-mail: yuanhuazzl@163.com

* **通信作者:**朱　想,副教授,E-mail: zhux@henu.edu.cn

砂制备砌筑砂浆。然而,该工艺需经历高温煅烧环节,能耗与碳排放量均较高,致使整体经济性欠佳。

本研究将黄河泥沙引入SA辅助EICP石英砂砖制备工艺,通过基础性能测试优化SA掺量及黄河泥沙粒组与掺量,分析其对碳酸钙生成量、抗压强度和吸水率[16]的影响;开展多环境耐久性试验,结合SEM微观分析揭示增强机理[17],为黄河泥沙在生态建材领域的应用提供理论与技术支撑。

1　试验材料与方法

1.1　试验材料

试验所用石英砂的堆积密度为1.6 g/cm^3,石英的质量分数大于95%,颗粒级配曲线如图1所示,由图1可见,其颗粒级配不良。

EICP溶液由脲酶和胶结液按照体积比2∶3混合而成,其中:脲酶从大豆中提取,质量浓度为100 g/L;胶结液由尿素和$CaCl_2$按浓度比3∶2配制而成,尿素浓度为1.5 mol/L[2]。

SA购自中国医药集团化学试剂有限公司,为乳白色–淡黄色的颗粒状或粉状固体,其化学纯≥99.5%,黏度≥0.02 Pa·s(溶液质量浓度10 g/L,测量温度20 ℃),化学特性见表1。

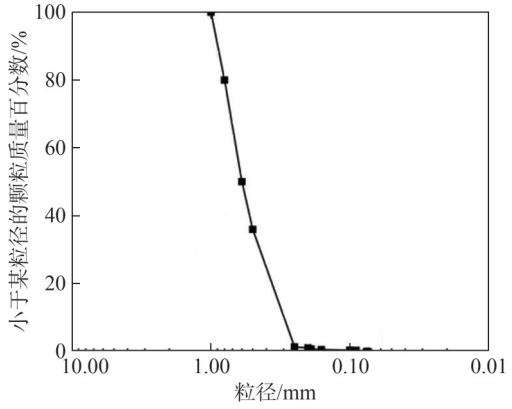


图1　石英砂及其颗粒级配

Fig. 1　Quartz sand and its particle grading

表1　SA的化学特性

Tab. 1　Chemical properties of sodium alginate

成分	铁	砷	铅	灼烧残渣	干燥失重
质量分数/%	≤0.04	≤0.000 2	≤0.001	30～35	≤22

黄河泥沙取自河南开封柳园口。经测定,该黄河泥沙的天然含水率为44.8%,细度模数为1.12,粒径主要集中于0.050～0.500 mm范围内。试验中,将黄河泥沙分为[0.250,0.500] mm、[0.075,0.250) mm和[0,0.075) mm3种粒组。

1.2　试验研究过程

本研究的试验过程如图2所示。

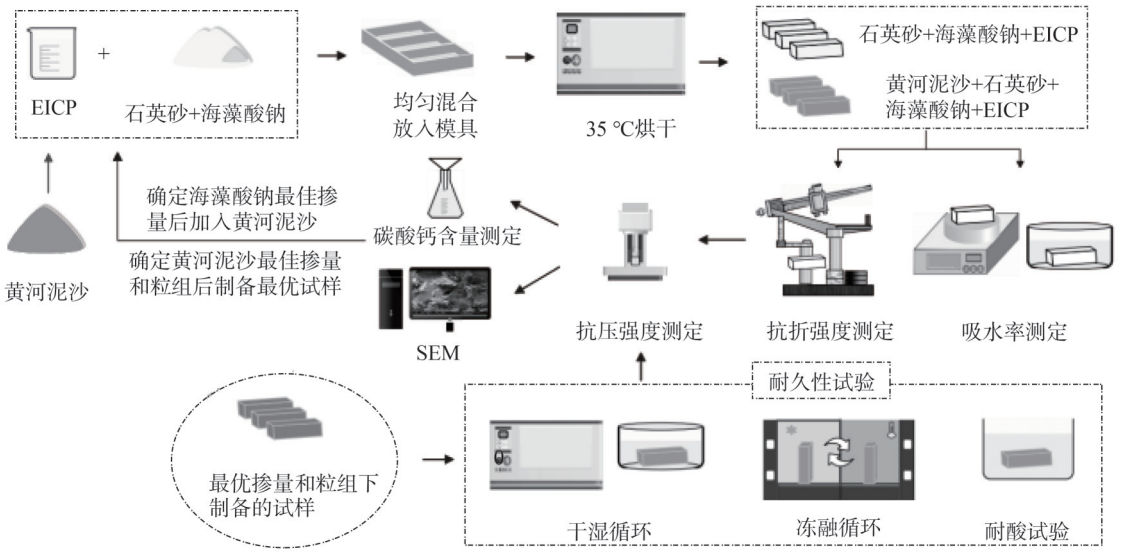


图2　试验过程

Fig. 2　Experimental procedure

生物砖制备及性能研究试验过程为:

1)将EICP溶液与石英砂、SA(EICP溶液与石英砂的水固比为0.25)搅拌均匀后,放入160 mm×40 mm×40 mm的水泥胶砂三联铸铁试模模具中养护7 d,在35 ℃条件下烘干水分。

2)先用标准抗折试验机测定养护好的石英砂砖的抗折强度,再用万能试验机测定折断后石英砂砖的抗压强度;从强度测试后的破碎砂砖中部取重5～10 g的碎块,经过烘干粉碎后,依次进行一次酸洗和一次水洗,每次清洗结束后过滤,使用EDTA滴定法测定砂砖中碳酸钙的含量C。

3)用浸泡法分析砂砖的吸水能力。称量砂砖的干质量G;将其放入去离子水中浸泡24 h,待充分吸水后取出,用湿毛巾吸附砂砖表面多余的水分,称量砂砖

质量B；根据式(1)计算吸水率W。

$$W=\frac{B-G}{G}\times 100\% \tag{1}$$

4)根据试件的强度、C和吸水率分析SA掺量(其与石英砂的质量比)对生物砖性能的影响，确定SA的最佳掺量。

5)在SA最佳掺量下制备掺有黄河泥沙的SA+EICP固化石英砂试样，测试该试样的强度和吸水率，得出黄河泥沙的最优粒组和最佳掺量。

6)对黄河泥沙的最优粒组和最佳掺量下的石英砂砖，分别进行干湿循环、冻融循环和酸环境下的耐久性研究，计算质量损失率F：

$$F=\frac{m_0-m_i}{m_0}\times 100\% \tag{2}$$

式中，m_0、m_i分别为初始状态及第i次循环或侵蚀后的试样质量。

7)将强度测试后破碎的试样切割成1.0 cm×1.0 cm×0.5 cm的土块，经喷金处理后用美国FEI Quanta 250环境扫描电子显微镜(SEM)观测试样的微观图像，探索固化机理。

1.2.1 SA最佳掺量的确定

基于第1.1节所述材料进行预试验，图3给出了不同SA掺量下EICP处理石英砂砖的特性。

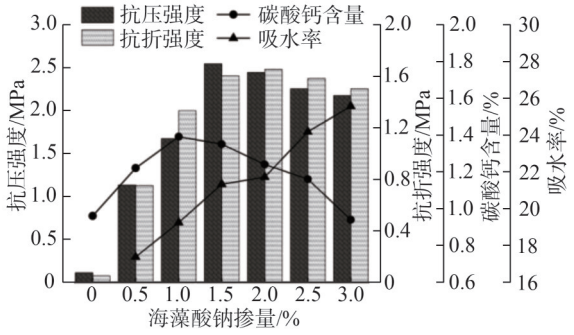


图3 不同SA掺量下EICP处理石英砂砖的特性

Fig. 3 Characterization of EICP-treated quartz sand bricks with different content of sodium alginate

由图3发现：SA掺量为1.0%时石英砂砖的C最大，而SA掺量分别为1.5%和2.0%时砂砖的抗压强度和抗折强度最大。砂砖抗压强度、抗折强度与C随SA掺量的变化并不具有同步性，砂砖的抗压强度和抗折强度最大时所对应的C并非最大。这可能是由于SA掺量略高于1.0%时，多余SA形成的水凝胶具有较高的抗拉和黏结强度、弹性及韧性，使得砂砖呈现更高的抗压强度和抗折强度，但过高的SA掺量(≥2.0%)会使砂砖保水性增强且抗压强度降低。由此可见，石英砂砖强度的提高不仅仅源于C的增大，很大程度上还由砂砖内部结构及所沉淀碳酸钙晶体的形态所决定。试件的吸水率随SA掺量的增大而增大。

Arab等[13]发现SA掺量为1.5%时，EICP制成的生物砖抗压强度和抗弯强度最高。考虑砂砖强度、C等因素，在后续试验中SA的掺量取1.5%。

1.2.2 试验工况

试验工况如表2所示，按照“ES−A或Y−B”格式对不同的处理方式砂砖试样进行编号，其中，“ES”表示EICP中加入1.5%的SA，“A”表示所掺黄河泥沙粒组的最大粒径，“Y”表示未筛分的原状黄河泥沙，“B”表示黄河泥沙掺量的百分比。选取未掺入黄河泥沙(仅SA+EICP处理)的试样作为对照组，对比分析改性生物砂砖的耐久性。

表2 试验工况

Tab. 2 Test conditions

试样编号	处理方式	黄河泥沙粒径/mm	黄河泥沙掺量/%	试样数	
				抗折强度测定	抗压强度测定
ES	SA+EICP		0	3	6
ES−0.500−5	SA+EICP+黄河泥沙	[0.250,0.500]	5	3	6
ES−0.500−10			10	3	6
ES−0.500−15			15	3	6
ES−0.500−20			20	3	6
ES−0.500−25			25	3	6
ES−0.500−30			30	3	6
ES−0.250−5	SA+EICP+黄河泥沙	[0.075,0.250)	5	3	6
ES−0.250−10			10	3	6
ES−0.250−15			15	3	6
ES−0.250−20			20	3	6
ES−0.250−25			25	3	6
ES−0.250−30			30	3	6
ES−0.075−5	SA+EICP+黄河泥沙	[0,0.075)	5	3	6
ES−0.075−10			10	3	6
ES−0.075−15			15	3	6
ES−0.075−20			20	3	6
ES−0.075−25			25	3	6
ES−0.075−30			30	3	6
ES−Y−5	SA+EICP+黄河泥沙	原状黄河泥沙	5	3	6
ES−Y−10			10	3	6
ES−Y−15			15	3	6
ES−Y−20			20	3	6
ES−Y−25			25	3	6
ES−Y−30			30	3	6

1.2.3 耐久性试验

1)干湿循环试验

将养护完成的干燥试样称重后浸入水中5 h，使其达到95%的相对湿度，在50 ℃烘箱中干燥42 h，再冷却1 h，此为一次干湿循环(共48 h)；每次循环结束后轻刷试件，去除表层不稳定的碎片后再称重。分别进

行 1、3、6、10、15 次干湿循环。

2）冻融循环试验

将养护完成的干燥试样称重后放入水中浸泡 12 h，待试件充分吸水饱和后，将试件置于容器中并用保鲜膜封堵避免水分流失。先在−10 ℃低温环境中冻结 12 h，之后在 10 ℃条件下融化 12 h，此为一次冻融循环（共 24 h）；每个循环周期结束后，将试件取出置于室温下自然冷却后称重，重复此步骤对试样分别进行 1、3、6、10、15 次冻融循环。

3）耐酸试验

在去离子水中滴加一定量的浓硫酸，分别配制 pH 值为 2.5、3.5、4.5、5.5、7.0 的溶液。将试件放入溶液浸泡 12 h 后取出，转移至 50 ℃的烘箱中干燥 48 h，之后称量试样质量，并进行抗压强度试验。

2　结果与分析

2.1　黄河泥沙粒径与掺量的确定

图 4 展示了不同黄河泥沙粒径和掺量下，SA+EICP 固结石英砂砖的抗压强度、抗折强度，以及掺入[0, 0.075) mm 黄河泥沙时吸水率随黄河泥沙掺量的变化。

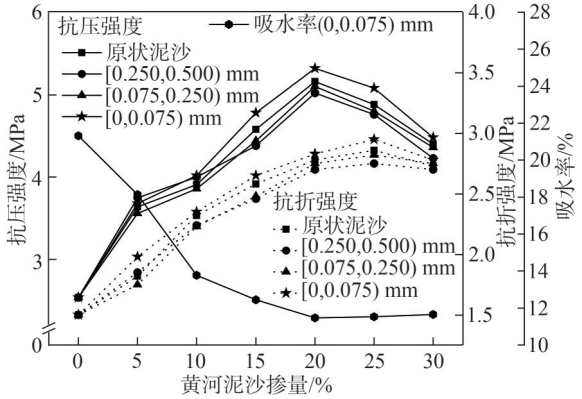


图 4　不同黄河泥沙粒径及掺量下砂砖的强度和吸水率

Fig. 4　Strength and water absorption of sand bricks with different grain sizes and content of Yellow River sediment

由图 4 可见：砂砖抗压、抗折强度始终随所掺黄河泥沙粒径的减小而增加；掺量一定时，与其他 3 个粒组相比，[0,0.075) mm 粒组基本表现出最好的抗压强度、抗折强度。因此，后续试验所掺黄河泥沙粒径均为 [0,0.075) mm。随黄河泥沙掺量的增加，砂砖的吸水率先快速减小后逐渐趋于平缓。黄河泥沙掺量为 5%～30%时，同一掺量下[0,0.075) mm 粒组砂砖的抗压与抗折强度的比值约为 1.61～1.88，且抗压、抗折强度并未始终随黄河泥沙掺量的增加而增大。黄河泥沙掺量为 20%和 25%时，砂砖抗压和抗折强度出现峰值，最高抗压强度、最高抗折强度分别为未掺加黄河泥沙时的 2.09 和 1.97 倍。黄河泥沙掺量由 20%增大至 25%时抗折强度仅提高 8%，黄河泥沙掺量为 20%时对应的吸水率最低，因此，后续试验所用黄河泥沙掺量均取 20%。

不同黄河泥沙掺量下砂砖的应力−应变曲线如图 5 所示。由图 5 可见：曲线呈明显脆性破坏特征，掺入黄河泥沙后，峰值应力（即抗压强度）虽得到提高，但应变软化的现象较未掺入黄河泥沙时更显著。砂砖峰值应力对应的应变主要集中于 3.00%～3.75%。ES−0.075−20 试样的峰值应力和残余强度均为最大，且有较好的延性[18]。

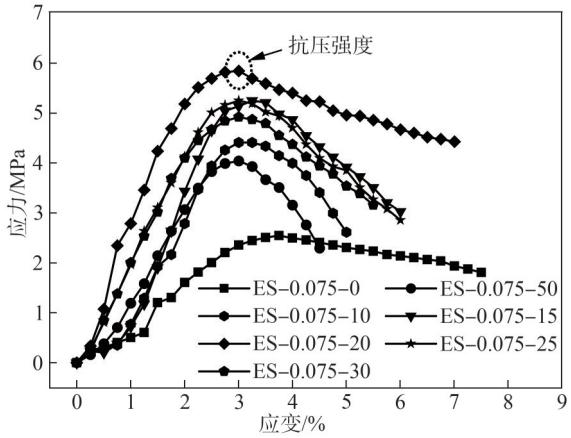


图 5　不同黄河泥沙掺量时生物砖应力−应变曲线

Fig. 5　Stress−strain curves of biological bricks with different content of Yellow River sediment

2.2　耐久性分析

2.2.1　干湿循环

图 6 给出了不同干湿循环次数下 ES−0.075−20 试样的应力−应变曲线。

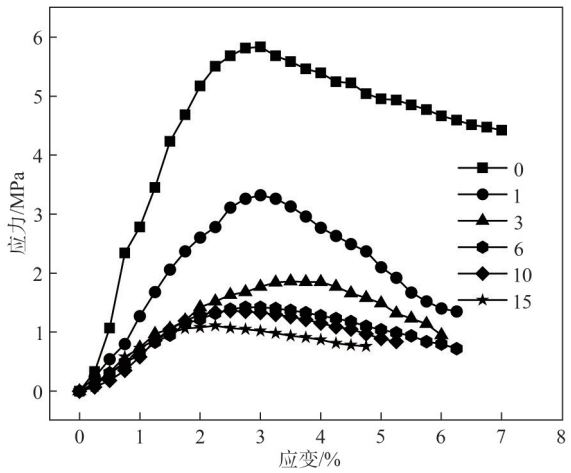


图 6　不同干湿循环次数下 ES−0.075−20 试样的应力−应变曲线

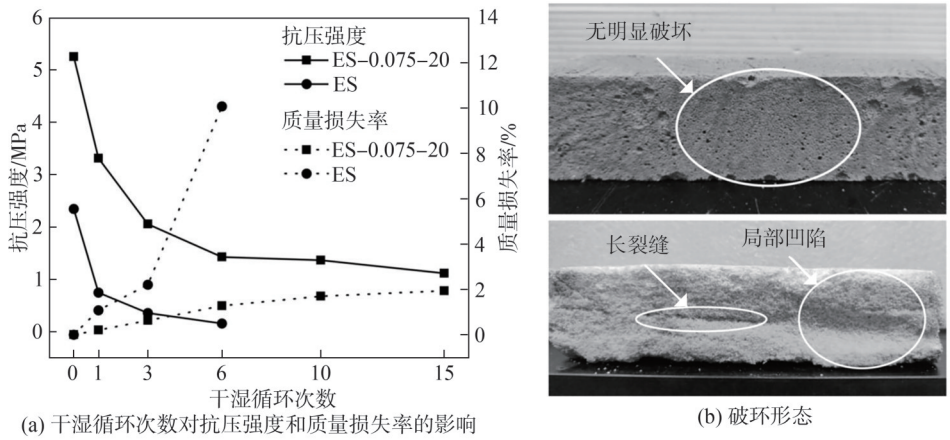
Fig. 6　Stress−strain curves of ES−0.075−20 specimen under different dry−wet cycles

由图 6 可见：干湿循环作用下，ES−0.075−20 试样呈现出不同程度的强度劣化；随干湿循环次数的增加，应变软化的程度逐渐减小。经 0、1、3 次干湿循环后，峰

值应力对应的应变，随干湿循环次数的增大略微增大，表明试样延性有所增加。经 6、10、15 次干湿循环后，峰值应力对应的应变却随干湿循环次数的增大逐渐减小。这可能是多次干湿循环后，砂砖频繁吸水、失水而形成的裂隙损伤逐步累积，骨架结构遭受破坏，砂土颗粒间距增大，连接减少的缘故[19]。

图 7 给出了干湿循环次数对 ES 和 ES−0.075−20 试样的无侧限抗压强度、质量损失率及破坏形态的影响。

由图 7 可见：经 0、1、3 次干湿循环后，砂砖的抗压强度降低尤为显著。ES 经 6 次干湿循环后，表面颗粒脱落严重，出现局部凹陷，质量损失率高达 10.08%，抗压强度仅为 0.15 MPa，承载能力即将丧失。而 ES−0.075−20 经 15 次干湿循环后，抗压强度仍为 1.11 MPa，质量损失率仅为 1.94%，无明显破坏且保持相对完好的形态。表明干湿循环对未掺加黄河泥沙的 ES 试样的破坏更为显著。干湿循环侵蚀下，砂砖矿物溶解流失，胶结物减少，孔隙度增大[20]，产生空洞与微裂缝，这是导致其抗压强度大幅度降低、质量损失率显著增大的主要原因[21−22]。黄河泥沙的掺入填充了石英砂砖的孔隙，有效弥补孔隙的变化，使试样强度增大，抗干湿循环能力得到提高。



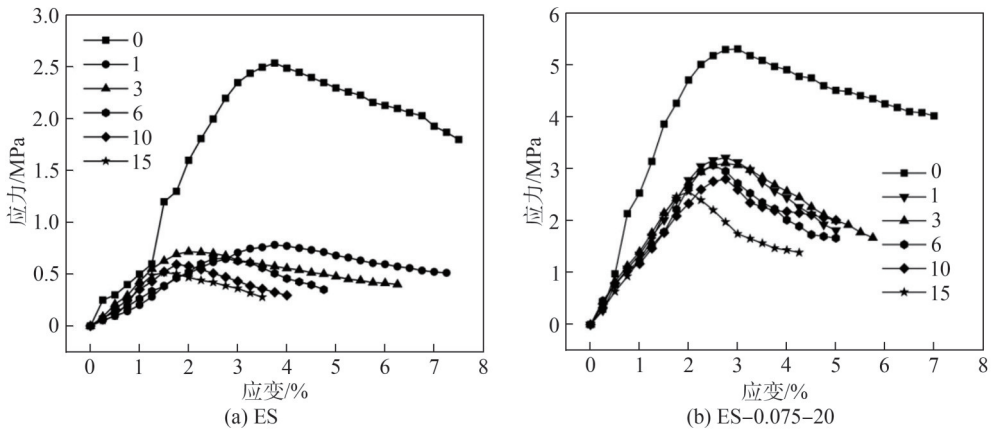
(a) 干湿循环次数对抗压强度和质量损失率的影响　(b) 破坏形态

图 7　干湿循环次数对 ES 和 ES−0.075−20 试样的无侧限抗压强度、质量损失率及破坏形态的影响

Fig. 7　Effect of the number of dry−wet cycles on the unconfined compressive strength, mass loss rate and damage morphology of ES and ES−0.075−20 specimens

2.2.2　冻融循环

不同冻融循环次数下 ES 和 ES−0.075−20 试样的应力−应变曲线如图 8 所示。由图 8 可见：经冻融循环后，ES 的应力−应变曲线形态变化不大，但峰值强度对应的应变随冻融循环次数的增加不断减小，曲线整体向应变减小的方向平移。ES−0.075−20 试样的应力−应变曲线呈现显著的应变软化，峰值应力对应的应变主要集中于 2%～3%，且随冻融循环次数的增加而逐渐减小。



(a) ES　(b) ES−0.075−20

图 8　不同冻融循环次数下 ES 和 ES−0.075−20 试样的应力−应变曲线

Fig. 8　Stress−strain curves of ES and ES−0.075−20 specimens under different freeze−thaw cycling numbers

冻融循环次数对 ES 和 ES−0.075−20 试样强度和质量损失率的影响如图 9 所示。由图 9 可见：经多次冻融循环后，砂砖的强度下降，质量损失率增大，这是因为砂砖反复膨胀、收缩，砂粒间的团聚体遭到破坏，裂纹和损伤逐渐累积，孔隙度变大，内聚力降低[23−24]，骨架效应减弱[25]。相同冻融循环次数下，ES 砂砖的无侧限抗压强度始终小于 ES−0.075−20 的 1/4。ES 和 ES−0.075−20 试样的抗压强度随冻融循环次数的变化曲线

基本平行，二者质量损失率的差值却随冻融循环次数增加逐渐增大。15 次冻融循环后，ES 和 ES−0.075−20 试样的无侧限抗压强度比循环前分别降低了 77.78%、51.04%，质量损失率分别为 2.02%、0.52%。因此，黄河泥沙的掺入使试样内部结构更加致密，抵抗冻融循环的能力有所增强。

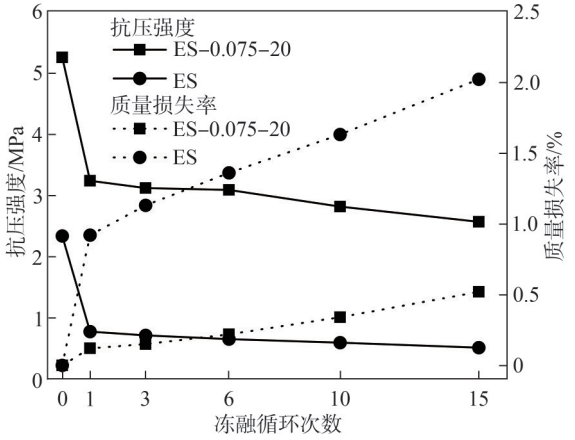


图 9　冻融循环次数对 ES 和 ES−0.075−20 试样的无侧限抗压强度和质量损失率的影响

Fig. 9　Influence of freeze−thaw cycles on unconfined compressive strength and mass loss rate of ES and ES−0.075−20 specimens

2.2.3　酸性环境

图 10 展示了不同酸性环境中 ES 和 ES−0.075−20 试样的抗压强度和质量损失率的变化。

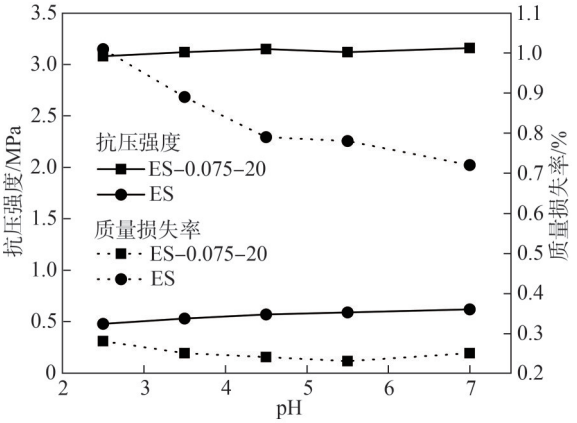


图 10　环境 pH 值对 ES 和 ES−0.075−20 试样的无侧限抗压强度和质量损失率的影响

Fig. 10　Effect of environmental pH values on the unconfined compressive strength and mass loss rate of ES and ES−0.075−20 specimens

由图 10 可见，ES−0.075−20 与 ES 两种试样的抗压强度随 pH 值的变化曲线基本平行，二者质量损失率的差值却随 pH 值的减小而增大。究其原因是，随环境酸性的增强（pH 值的减小），石英砂中碳酸盐溶解使胶结键断裂、石英砂结构退化[26]，两种砂砖的抗压强度均有轻微降低，且 ES 的质量损失率迅速增大，而由于 ES−0.075−20 的密实度较高，其质量损失率仅有缓慢增加。因此，与 ES 相比，ES−0.075−20 对酸性环境有更强的适应性。

2.3　微观测试

图 11 对比了 ES 与 ES−0.075−20 试样在不同环境作用下的微观形貌特征。

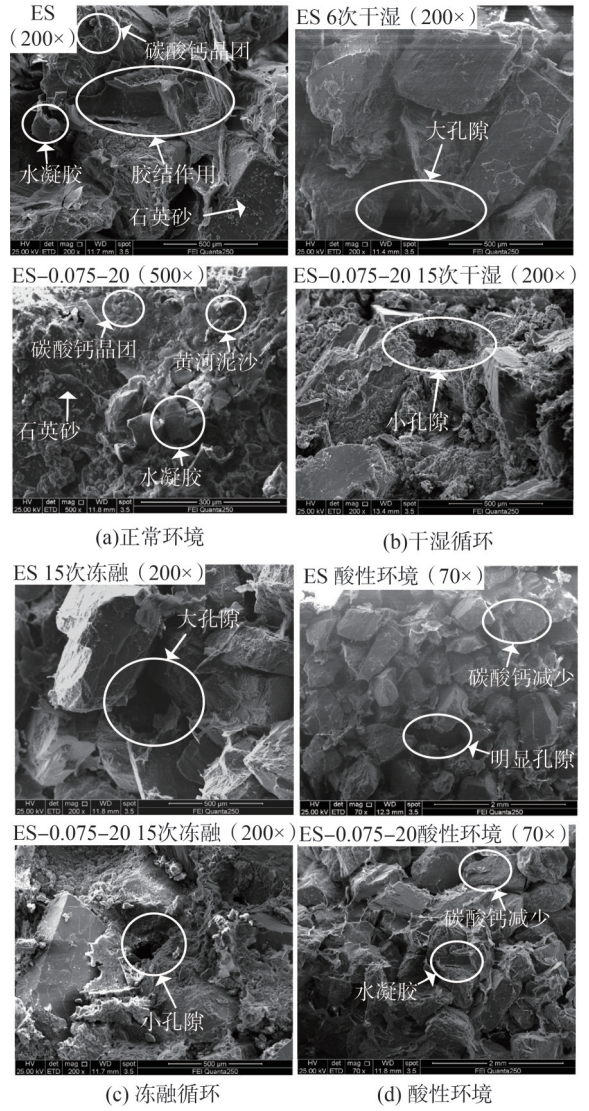


图 11　不同环境下 ES 与 ES−0.075−20 试样的 SEM 图像

Fig. 11　SEM images for ES and ES−0.075−20 specimens under different environments

由图 11 可见：正常环境下，ES 试样中凝胶状 SA 与碳酸钙沉淀共同填充砂粒间隙，但内部仍存在较多孔隙；而 ES−0.075−20 试样中，碳酸钙以细小晶粒形式锚固于水凝胶表面并聚集成团[27]，部分黄河泥沙颗粒被海藻酸钙凝胶包裹，使原有的“海藻酸钙凝胶−碳酸钙−石英砂”的三相单形成“海藻酸钙凝胶−碳酸钙−黄河泥沙−石英砂”的四相胶结结构，致密度与颗粒间联结强度显著提高。经 15 次干湿循环后，ES 试样出现凝胶收缩开裂与碳酸钙钝化溶蚀，孔隙连通性增加；冻

融循环引发凝胶–碳酸钙复合体剥落及贯穿性微裂隙;酸性环境中碳酸钙溶解与凝胶降解明显,黏结失效显著。相较之下,ES–0.075–20 试样因四相结构密实、水分与酸液渗透受阻,干湿、冻融及酸性作用对其微观损伤程度明显减弱,仅表现为边缘孤立微孔或表层轻微溶蚀,内部结构保持完整。

3 机理分析

图 12 展示了黄河泥沙与 SA 联合 EICP 制备生物石英砂砖的机理。由图 12 可见,固化机理主要源于以下 3 个方面:

1)碳酸钙沉淀反应结束后,SA 与剩余的 Ca^{2+} 发生离子交换反应生成海藻酸钙凝胶[28–29],海藻酸钙凝胶在表面电荷的作用下黏连成团,填充在砂粒之间,减小了石英砂的孔隙率,使其黏聚力增大。

2)SA 螯合 Ca^{2+},同时,海藻酸钙凝胶固定游离的脲酶;被固定的脲酶持续分解尿素产生 CO_3^{2-},极大程度地使 Ca^{2+} 沉淀为碳酸钙晶体,增加了碳酸钙的沉淀量,形成更多的碳酸钙晶簇[2],增强了骨架效应。

3)所掺入的黄河泥沙表面被碳酸钙结晶和海藻酸钙凝胶包裹;在三者的共同作用下,石英砂颗粒被黏结成团聚体,孔隙被均匀填充,颗粒之间的胶结力和咬合力得到大幅度增加。

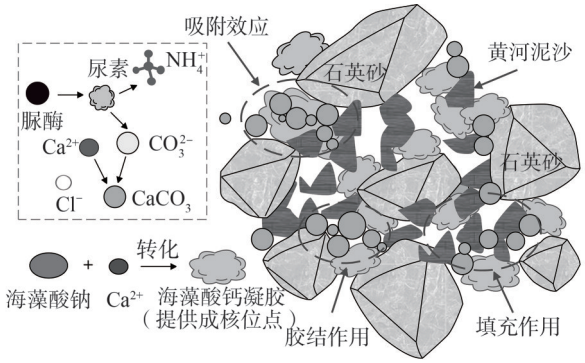


图 12 黄河泥沙与 SA 联合 EICP 固化石英砂的机理

Fig. 12 Mechanism of quartz sand consolidated by Yellow River sediment and sodium alginate combined with EICP

4 结 论

本文结合力学测试与微观结构表征,系统分析海藻酸钠掺量、黄河泥沙粒径及掺量对 EICP 固化砂砖强度演化与耐久性的影响机制。主要结论如下:

海藻酸钠掺量对碳酸钙沉积量与力学强度的影响呈现非同步特征。当掺量为 1.0% 时,碳酸钙生成量最高;而抗压与抗折强度峰值则出现在 1.5%～2.0% 掺量区间。该现象表明,海藻酸钠的强度贡献不仅依赖于碳酸钙含量,更与凝胶网络的空间连续性密切相关。

海藻酸钠+EICP 固结石英砂砖的抗压强度、抗折强度始终随所掺黄河泥沙粒径的减小而增加。综合考虑砂砖强度及吸水特性,在本研究试验条件下黄河泥沙掺量宜取 20%,最优粒组为[0,0.075) mm。

黄河泥沙对生物砖的微观结构与耐久性能具有显著的改善作用。掺入黄河泥沙后,生物砖的抗压强度和抗折强度最高可比掺入黄河泥沙之前分别提高 1.09 和 0.97 倍,遭受破坏时有较好的延性,对干湿循环、冻融循环及酸性环境有更强的适应性。

微观机理分析表明,海藻酸钠与 Ca^{2+} 反应形成海藻酸钙凝胶,该凝胶为 Ca^{2+} 的沉淀提供成核位点。碳酸钙在海藻酸大分子网格中生长。所掺入的黄河泥沙被碳酸钙结晶和海藻酸钙凝胶包裹,黏结石英砂颗粒,形成了更致密的“海藻酸钙凝胶–碳酸钙–黄河泥沙–石英砂”四相单元结构,颗粒之间的黏聚力增大。

在干湿循环、冻融循环和酸性环境中,黄河泥沙的填充效应可有效抵消部分孔隙体积的劣化演变,使得改良生物砖维持更致密的微观结构、更低的孔隙率与更高的残余强度。

参考文献:

[1] Liu Xiaojun,Gao Xin,Pan Chaofan.Experimental study on shear strength of cracks in MICP solidified soil sites[J]. China Civil Engineering Journal,2022,55(4):88–94.[刘小军,郜鑫,潘超钒.MICP 固化土遗址裂隙的剪切强度试验研究[J].土木工程学报,2022,55(4):88–94.]

[2] Yue Jianwei,Huang Xuanjia,Xing Xuanxuan,et al.Experimental study on the improvement of the particle gradation of the Yellow River silt based on MICP technology[J].Advanced Engineering Sciences,2021,53(3):89–98.[岳建伟,黄轩嘉,邢旋旋,等.基于 MICP 改良黄河泥沙颗粒级配的试验研究[J].工程科学与技术,2021,53(3):89–98.]

[3] Li Chi,Shi Guanyu,Wu Huimin,et al.Experimental study on bio-mineralization for dispersed soil improvement based on enzyme induced calcite precipitate technology [J].Rock and Soil Mechanics,2021,42(2):333–342.[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.]

[4] Ni Jing,Wang Ziteng,Geng Xueyu.Experimental study on combined plant–biopolymer method for soil stabilization [J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2020,42 (11):2131–2137.[倪静,王子腾,耿雪玉.植物–生物聚合物联合法固土的试验研究[J].岩土工程学报,2020,42(11): 2131–2137.]

[5] Xiao Yang,Stuedlein A W,Ran Jinyu,et al.Effect of particle shape on strength and stiffness of biocemented glass beads[J].Journal of Geotechnical and Geoenvironmental

Engineering,2019,145(11):06019016.

[6] Cheng Liang, Kobayashi T, Shahin M A. Microbially induced calcite precipitation for production of “bio-bricks” treated at partial saturation condition[J]. Construction and Building Materials,2020,231:117095.

[7] Bernardi D,DeJong J T,Montoya B M,et al.Bio-bricks:Biologically cemented sandstone bricks[J]. Construction and Building Materials,2014,55:462−469.

[8] Bu Changming, Wen Kejun, Liu Shihui, et al. Development of bio-cemented constructional materials through microbial induced calcite precipitation[J]. Materials and Structures,2018,51(1):30.

[9] Poornima V, Venkatasubramani R, Sreevidya V, et al. Study on properties of bio-bricks[J]. Materials Today: Proceedings,2022,49:2103−2109.

[10] Liu Shihui, Du Kang, Huang Wei, et al. Improvement of erosion-resistance of bio-bricks through fiber and multiple MICP treatments[J]. Construction and Building Materials, 2021,271:121573.

[11] Almajed A, Lateef M A, Ali Baig Moghal A, et al. 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[J]. Crystals,2021,11(4):370.

[12] Wang Yuke, Chen Hao, Song Yingbin, et al. Experimental study on water stability of Yellow River silt solidified by soybean-urease induced carbonate precipitation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2024, 55(1): 71−79. [王钰轲，陈浩，宋迎宾，等. 大豆脲酶诱导碳酸钙固化黄河泥沙水稳定性试验研究[J]. 水利学报,2024,55(1):71−79.]

[13] Arab M G, Omar M, Almajed A, et al. Hybrid technique to produce bio-bricks using enzyme-induced carbonate precipitation(EICP) and sodium alginate biopolymer[J]. Construction and Building Materials,2021,284:122846.

[14] Wang Jun,Yao Shiming,Zhou Yinjun.Review on river sediment resources utilization in China[J].Journal of Sediment Research,2019,44(1):73−80.[王军,姚仕明,周银军.我国河流泥沙资源利用的发展与展望[J]. 泥沙研究,2019,44(1): 73−80.]

[15] Wang Shanshan, Yang Liyan, Ma Xin, et al. The formation of porous light ceramsite using Yellow River sediment and its application in concrete masonry production[J]. Case Studies in Construction Materials,2022,17:e01340.

[16] Islam M S, Elahi T E, Shahriar A R, et al. Effectiveness of fly ash and cement for compressed stabilized earth block construction[J]. Construction and Building Materials, 2020, 255:119392.

[17] Yuan Hua, Shi Qishuai, Li Jin, et al. Effect of freeze−thaw cycling on mechanical properties of Na-montmorillonite modified EICP−treated silty sand[J]. Case Studies in Construction Materials,2023,19:e02641.

[18] Ran Yuling,Zhang Wenbo,Bai Wei,et al.Effect of free iron oxide on shear strength of laterite based on borehole shear test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45(9): 2573−2582. [冉宇玲,张文博,柏巍,等. 基于孔内剪切试验的游离氧化铁对红黏土抗剪强度影响研究[J]. 岩土力学,2024,45(9): 2573−2582.]

[19] Song Zezhuo,Hao Shefeng,Mei Hong,et al.Strength characteristics of biopolymer modified sand under dry−wet cycle [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(4): 2285−2295.[宋泽卓,郝社锋,梅红,等. 干湿循环条件下生物聚合物改良砂土强度特性[J]. 复合材料学报,2023,40(4): 2285−2295.]

[20] Fu Guiyong, Xiao Yang, Shi Jinquan, et al. Experimental study on degradation of EICP and xanthan gum treated calcareous silt under wetting−drying cycles[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2024,46(11):2341−2351.[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.]

[21] Liu Jundong, Tang Chaosheng, Zeng Hao, et al. Evolution of desiccation cracking behavior of clays under drying−wetting cycles[J].Rock and Soil Mechanics,2021,42(10):2763−2772.[刘俊东,唐朝生,曾浩,等. 干湿循环条件下黏性土干缩裂隙演化特征[J]. 岩土力学,2021,42(10):2763−2772.]

[22] Liu Xinrong, Yuan Wen, Fu Yan, et al. Porosity evolution of sandstone dissolution under wetting and drying cycles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(3): 527−532.[刘新荣,袁文,傅晏,等. 干湿循环作用下砂岩溶蚀的孔隙度演化规律[J]. 岩土工程学报,2018,40(3): 527−532.]

[23] Adeli Ghareh Viran P, Binal A. Effects of repeated freeze−thaw cycles on physico-mechanical properties of cohesive soils[J].Arabian Journal of Geosciences,2018,11(11):250.

[24] Yang Xiurong, Jiang Annan, Li Mingxin. Experimental investigation of the time-dependent behavior of quartz sandstone and quartzite under the combined effects of chemical erosion and freeze−thaw cycles[J]. Cold Regions Science and Technology,2019,161:51−62.

[25] Zhai Jinbang, Zhang Ze, Melnikov A, et al. Experimental study on the effect of freeze−thaw cycles on the mineral particle fragmentation and aggregation with different soil types[J].Minerals,2021,11(9):913.

[26] Meng Jie,Li Xian.Effects of carbonate on the structure and properties of loess and the corresponding mechanism:An experimental study of the Malan loess, Xi’an area, China[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment,2019,

78(7):4965−4976.
[27] Almajed A, Lemboye K, Arab M G, et al. Mitigating wind erosion of sand using biopolymer-assisted EICP technique [J]. Soils and Foundations, 2020, 60(2): 356−371.
[28] Cheng Liang, Yang Yang, Chu Jian. *In-situ* microbially induced Ca^{2+}-alginate polymeric sealant for seepage control in porous materials[J]. Microbial Biotechnology, 2019, 12(2): 324−333.
[29] Yang Xin, Yan Mengqiu, Zheng Jianan. Acid corrosion micro-macro mechanism of enzyme − induced carbonate precipitation(EICP) treated sandy soils[J]. Journal of Central South University, 2024, 31(2): 636−648.

Application of Yellow River Sediment in the Preparation of Bio-bricks by Sodium Alginate+EICP

YUAN Hua[1], *LI Jin*[1], *HE Dehong*[2], *SU Zhongsheng*[3], *HAN Zhiguang*[1], *ZHU Xiang*[1*]

(1.School of Civil Engineering and Architecture, Henan University, Kaifeng 475004, China;
2.Henan Geological Investigation & Design Institute Company Limited, Zhengzhou 450014, China;
3.China Construction Seventh Engineering Division Company Limited, Zhengzhou 450003, China)

Abstract:

Objective Biomineralization technology using urease-induced calcium carbonate precipitation (EICP) to cement soil into bricks (referred to as "biobricks") provides advantages in terms of sustainable development. In this study, Yellow River sediment is introduced into the preparation of quartz sand bricks using sodium alginate+EICP to evaluate the feasibility of Yellow River sediment in improving the strength and durability of biobricks prepared through sodium alginate+EICP.

Methods First, compressive strength and flexural strength tests were conducted on quartz sand bricks. Fragments were then collected from the middle sections of the sand bricks damaged during the strength tests, and the calcium carbonate content (*C*) in the sand bricks was determined using EDTA titration. The water absorption capacity of the sand bricks was analyzed using the immersion method. Based on the strength, *C*, and water absorption results of the specimens, the effect of sodium alginate doping was analyzed, and the optimal sodium alginate dosage was determined. Then, specimens containing Yellow River silt were prepared, and the optimal grain group and doping amount of Yellow River silt were determined by testing the strength and water absorption of the specimens. The durability of the optimal specimens was investigated under dry−wet cycles, freeze−thaw cycles, and acidic environments, respectively. In addition, the curing mechanism was explored by observing the microscopic images of the specimens using a scanning electron microscope (SEM).

Results and Discussions The *C* of the quartz sand bricks reached the maximum value at a sodium alginate dosage of 1.0%, while the compressive and flexural strengths of the sand bricks reached their maximum values at dosages of 1.5% and 2.0%, respectively. After six dry−wet cycles, the surface particles of ES were severely dislodged, with localized depressions observed on the surface. The mass loss rate reached 10.08%, and the compressive strength decreased to only 0.15 MPa, indicating that the load-bearing capacity was nearly lost. In contrast, ES−0.075−20 maintained a compressive strength of 1.11 MPa after 15 dry −wet cycles, with a mass loss of only 1.94% and no obvious damage, maintaining a relatively intact morphology. Under the same number of freeze−thaw cycles, the unconfined compressive strength of ES sand bricks remained less than one-quarter of that of ES−0.075−20. After 15 freeze−thaw cycles, the unconfined compressive strengths of ES and ES−0.075−20 decreased by 77.78% and 51.04%, respectively, while the corresponding mass losses were 2.02% and 0.52%, respectively. The incorporation of Yellow River silt produced a denser internal structure in the specimens and improved their resistance to freeze−thaw cycles.

Conclusions The improvement in the strength of EICP-treated quartz sand bricks by sodium alginate is attributed not only to the increase in calcium carbonate content, but also to the internal structure of the sand bricks and the morphology of the precipitated calcium carbonate crystals. Sodium alginate provides nucleation sites for Ca^{2+} precipitation, while the Yellow River sand is encapsulated by calcium carbonate crystals and calcium alginate gel, forming a four-phase unit structure of "calcium alginate gel−calcium carbonate−Yellow River sand−quartz sand". This structure enhances interparticle cohesion and results in a denser internal structure.

Key words: bio-brick; enzyme-induced calcium carbonate deposition; Yellow River sediment; sodium alginate; dry−wet cycle; freeze−thaw cycle

（编辑　赵　婧）

引用格式: Yuan Hua, Li Jin, Shen Wenbo, et al. Application of Yellow River sediment in the preparation of bio-bricks by sodium alginate+EICP[J]. Advanced Engineering Sciences, 2026, 58(3): 146–154. [原华, 李瑾, 何德洪, 等. 黄河泥沙在海藻酸钠+EICP制备生物砖中的应用[J]. 工程科学与技术, 2026, 58(3): 146–154.]