

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2024.075



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



酶诱导碳酸钙沉淀联合高岭土固化砂的物理力学特性试验研究

崔猛^{1a,1b}, 汪佳莹^{1a}, 郑俊杰², 吴京涛^{1a}, 周思思^{1a}, 熊辉辉^{1a}

(1. 江西水利电力大学 a. 土木与建筑工程学院; b. 江西省水利土木特种加固与安全监控工程研究中心, 南昌 330099; 2. 武汉大学土木建筑工程学院, 武汉 430072)

摘要:为进一步提升酶诱导碳酸钙沉淀(EICP)技术的固化效果,采用EICP联合高岭土对标准砂进行固化处理,设置高岭土掺量与养护时间两个试验变量,开展不同变量组合条件下固化砂的宏微观试验研究。结果表明:EICP联合高岭土固化砂的无侧限抗压强度随高岭土掺量与养护时间的增加持续提高,4%高岭土掺量、养护14 d的抗压强度为722.19 kPa,是纯EICP固化砂的13.15倍;碳酸钙沉淀率不会随着养护时间和高岭土掺量的增加持续提升,3%高岭土掺量、养护7 d的碳酸钙沉淀效率最高;随着高岭土掺量的增加,孔隙度先减小后增加,高岭土掺量为2%时,孔隙度最小;掺加高岭土前后固化砂的孔隙由以中孔为主(占比超过90%)转变为以小孔为主(占比80%左右),孔隙结构得到明显改善;EICP联合高岭土固化砂颗粒间沉积的碳酸钙晶体以球霰石为主,呈堆叠状填充于砂粒间隙并覆盖在砂粒表面,能显著提升砂粒间的胶结作用。

关键词:黄豆脲酶;碳酸钙沉淀;高岭土;标准砂

中图分类号:TU411.2 文献标志码:A 文章编号:2096-6717(2025)06-0086-09

Solidification characteristics of enzyme-induced calcium carbonate precipitation treated sand combined with kaolin

CUI Meng^{1a,1b}, WANG Jiaying^{1a}, ZHENG Junjie², WU Jingtao^{1a}, ZHOU Sisi^{1a},
XIONG Huihui^{1a}

(1a. School of Civil and Architectural Engineering; 1b. Jiangxi Provincial Engineering Research Center of the Special Reinforcement and Safety Monitoring Technology in Hydraulic & Civil Engineering, Jiangxi University of Water Resources and Electric Power, Nanchang 330099, P. R. China; 2. School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, P. R. China)

Abstract: To enhance the solidification effect of enzyme-induced calcium carbonate precipitation (EICP) technique, this study employed EICP combined with kaolin to treat standard sand for solidification. Two experimental variables were set: the amount of kaolin added and the curing time. Macroscopic and microscopic experiments were conducted on solidified sands under different variable combinations. The experimental results

收稿日期:2024-05-21

基金项目:国家自然科学基金(52268059);江西省自然科学基金(20232BAB204079)

作者简介:崔猛(1986-),男,博士,教授,主要从事土体加固技术与微细观测试技术研究,E-mail:cmyfwy@126.com。

Received: 2024-05-21

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 52268059); Natural Science Foundation of Jiangxi Province (No. 20232BAB204079)

Author brief: CUI Meng (1986-), PhD, professor, main research interests: soil reinforcement technology and micro-morphological testing technology, E-mail: cmyfwy@126.com.

revealed that the unconfined compressive strength of the EICP-combined kaolin solidified sand continued to increase with the increase in kaolin content and curing time. The compressive strength after curing with 4% kaolin content for 14 days was 722.19 kPa, which was 13.15 times that of pure EICP solidified sand. The calcium carbonate precipitation rate did not continue to increase with curing time or kaolin content. The efficiency of calcium carbonate precipitation was highest when cured with 3% kaolin content for 7 days. As the kaolin content increased, the porosity first decreased and then increased, with the minimum porosity observed at a kaolin content of 2%. The pore structure of the solidified sand before and after adding kaolin changed from being dominated by medium pores (accounting for over 90%) to being dominated by small pores (around 80%), indicating a significant improvement in the pore structure. The calcium carbonate crystals deposited between the particles of the EICP-combined kaolin solidified sand were mainly aragonite spheres, which were stacked and filled in the interstices between sand particles and covered the surface of sand particles, significantly enhancing the bonding effect between sand particles.

Keywords: soybean urease; calcium carbonate precipitation; kaolin clay; standard sand

传统土体加固技术有挤密砂桩、强夯、振冲、高压喷射注浆等,与这些技术相比,微生物诱导碳酸钙沉积(MICP)和脲酶诱导碳酸钙沉积(EICP)是一类更加绿色生态的新兴生物土体固结技术。MICP是产酶微生物通过理化反应诱导生成碳酸钙固化土体^[1],而EICP是利用脲酶水解尿素生成碳酸钙进行土壤固结^[2],由于EICP技术具备无生物安全风险、不需考虑是否有氧等诸多优势,近几年受到普遍关注。EICP技术中的脲酶可来源于商业脲酶与植物脲酶,其中商业脲酶成本较高,约占总材料成本的90%^[3],植物脲酶的性价比更高。研究表明,大豆、杰克豆、桑树、南瓜籽、剑豆、西瓜籽、卷心菜叶等都富含脲酶^[4-5],其中大豆脲酶活性强、成本低、性价比高^[6],被学者们广泛采用,Gao等^[7]利用大豆脲酶催化碳酸钙沉淀改良粉土,通过三轴试验发现,与未经处理的土壤相比,经EICP处理后的粉土在应力-应变曲线中表现出更大的膨胀响应和峰值偏应力,力学性能有显著改善。

近年来,诸多研究表明EICP可应用于实际工程,如改善边坡抗侵蚀性^[8],改良膨胀土^[9]和修复重金属污染土^[10]等。还有学者提出了EICP技术的潜在工程应用^[11],如净化地下水和废水、保护和恢复石灰岩纪念碑、堵塞回油水库等。另外,为进一步提高EICP技术的应用效果,部分学者采用EICP联合外添加剂的处理方式,如纤维^[12]、钠基蒙脱石^[13]、黄原胶^[14]、木质素^[15]等。Yuan等^[13]采用EICP联合钠基蒙脱石处理粉砂,分析了改性土体在冻融循环下的力学性能,结果表明,Na-Mt能与钙离子发生螯合作用,形成微系统单元结构,显著提升粉土的无侧限抗压强度等力学特性。付贵永等^[14]在植物脲酶胶液中添加黄原胶,显著增强了钙质粉土的抗干湿循环特性,进而有效提高了海洋土的抗侵蚀能力。

张建伟等^[15]在EICP体系中引入木质素,为碳酸钙的沉积提供了更多成核位点,且促进形成了更加稳定的方解石结构,显著提高了粉土边坡的抗雨蚀能力。

作为橡胶、化工、医药等行业的一种矿物原料,高岭土具有较强的吸附性,能提高颗粒材料的塑性与强度^[16]。如袁建民等^[17]围绕高岭土对Cu²⁺、Pb²⁺与Cd²⁺的吸附容量及影响因素进行了系统研究,结果表明,高岭土对3种金属离子均表现出较好的吸附能力。魏代琳等^[18]通过室内试验探讨了高岭土掺量对饱和砂土剪切特性的影响,结果表明,掺入高岭土后,饱和砂土的黏聚力增大、内摩擦角减小,且随掺量增加呈现一定的塑性。然而,将高岭土作为添加剂,联合EICP技术对土体进行改良的研究还鲜见报道。基于此,笔者提出EICP联合高岭土的固化技术,并开展固化砂的无侧限抗压强度、碳酸钙沉淀率等宏观测试以及低场核磁共振(LF-NMR)、扫描电镜(SEM)等微观试验,旨在探讨EICP联合高岭土的固化效果与固化机理,为进一步深化EICP技术的工程应用提供参考。

1 试验材料与方案

1.1 试验材料

1.1.1 脲酶溶液

试验以市售黄豆为脲酶源,脲酶溶液的制备步骤如下:

- 1)利用打磨机把黄豆磨成粉末状,放入烘干机烘24 h,将完全干燥的黄豆粉过100目筛备用;
- 2)称量超纯水,将过筛的豆粉配置成浓度为100 g/L的豆粉溶液,并用磁力搅拌器搅拌30 min,至溶液充分混合,如图1(a)所示;

3)将搅拌后的豆粉溶液在低温环境(4℃)下静置1 h,然后用高速离心机以3 500 r/min的转速离心25 min,离心后上层清液即为试验所需脲酶溶液,如图1(b)所示。

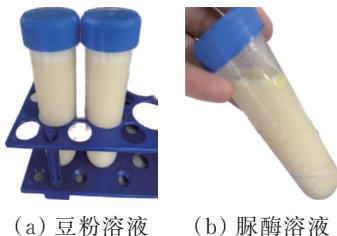


图1 脲酶溶液的制备

Fig. 1 Preparation of urease solution

1.1.2 胶结液

利用无水氯化钙与尿素配置浓度均为1 mol/L的氯化钙溶液与尿素溶液,二者的混合液即为胶结液,所用胶结液中二者的体积比为1:1。

1.1.3 砂

试验用砂为中国ISO标准砂(GB/T 17671—2021)^[19],其不均匀系数 C_u 为8.69,曲率系数 C_c 为1.03,属于级配良好的砂。试验用砂的粒径级配曲线如图2所示。

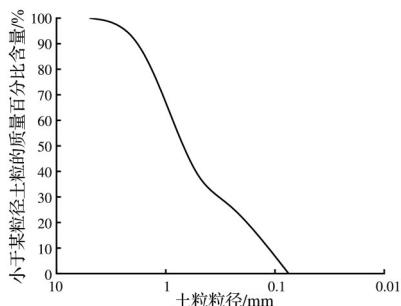


图2 试验用砂的粒径级配曲线

Fig. 2 Cumulative particle size distribution curve of experimental sand

1.1.4 高岭土

EICP添加水洗纯度为96%的高岭土,呈土状,含有微量伊利石和石英杂质,悬浮性、分散性较好,水下粒径测试: $D_{50}=0.35$ mm, $D_{90}=2.01$ mm,其粒径级配曲线如图3所示。

1.2 试验方案

1.2.1 无侧限抗压强度试验

1)方案设计。采用YYW-2型应变控制式无侧限压力仪进行试验,加载速率为2.4 mm/min,设置高岭土掺量与养护时间两个试验变量,试样编号及变量取值如表1所示。

2)试样制备。用直径为39.1 mm、高为100 mm的钢管制备试样,试样制备步骤如下:

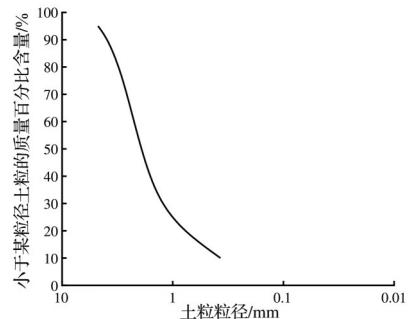


图3 高岭土粒径级配曲线

Fig. 3 Kaolin particle size distribution curve

表1 无侧限抗压强度试样编号及变量

Table 1 Sample numbers and variables of unconfined compressive strength test

编号	高岭土掺量/%	养护时间/d	试样个数
G-3-0	0	3	3
G-7-0	0	7	3
G-14-0	0	14	3
G-3-1	1	3	3
G-7-1	1	7	3
G-14-1	1	14	3
G-3-2	2	3	3
G-7-2	2	7	3
G-14-2	2	14	3
G-3-3	3	3	3
G-7-3	3	7	3
G-14-3	3	14	3
G-3-4	4	3	3
G-7-4	4	7	3
G-14-4	4	14	3

①根据表1中高岭土掺量分别称取高岭土与标准砂,二者质量之和保持165 g不变,将称取后的高岭土与标准砂拌和均匀;

②量取12.5 mL脲酶溶液与12.5 mL胶结液^[20],将二者与预拌合土样充分搅拌;

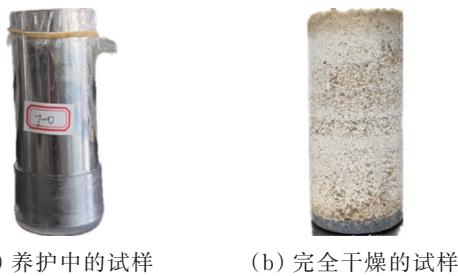
③将搅拌均匀的混合物分为4等份,分次倒入钢管内,压实至80 mm后用保鲜膜和橡皮筋进行封口处理,如图4(a)所示;

④将制作完成的试样置于25℃的恒温培养箱内,养护至表1中规定的天数,然后进行干燥处理,即得到试验所需试样,如图4(b)所示。

为确保试验数据的准确性,每个初始条件均制备3个相同试样,并同步开展试验,取3组试验结果的平均值作为该初始条件下试样的无侧限抗压强度。

1.2.2 碳酸钙沉淀率试验

为测试表1中各编号试样在固化过程中的碳酸



(a) 养护中的试样 (b) 完全干燥的试样

图4 无侧限抗压强度试样制备

Fig. 4 Preparation of unconfined compressive strength test specimens

钙沉淀率,在无侧限抗压强度试验结束后,对各编号的破坏试样进行酸洗试验,具体步骤如下:

1)将各编号的破坏试样置于70℃的烘箱内,去除试样中的水分,确保完全干燥;

2)各编号的干燥试样均称取25 g,浸泡在过量的浓度为20%的盐酸溶液中,常温静置至不再产生气泡,如图5所示;

3)称量并记录好滤纸的质量后,过滤废液,分离残渣,使用超纯水反复冲洗残渣4~5遍,确保洗净残余盐酸;

4)冲洗完毕后,将试样和滤纸放入烘箱中烘干,称取烘干后的试样和滤纸的总质量,根据式(1)计算出碳酸钙沉淀率C。

$$C = \frac{m_0 - (m_1 - m_2)}{1 \times 0.125 \times M \times \frac{m_0}{165}} \times 100\% \quad (1)$$

式中:C为碳酸钙沉淀率,%; m_0 为试样初始质量,取25 g; m_1 为烘干后试样与滤纸的总质量,g; m_2 为过滤冲洗前滤纸的质量,g; M 为碳酸钙的摩尔质量,取100.086 g/mol。



图5 静置在过量盐酸中的破坏试样

Fig. 5 Damaged test specimen placed in an excessive hydrochloric acid solution

1.2.3 LF-NMR试验

1)试验原理。LF-NMR试验主要是测量土体孔隙中含氢流体的弛豫特征,以横向弛豫时间来反映土体的孔隙度和孔径大小,其中横向弛豫时间与孔径之间的关系式为

$$\frac{1}{T_2} = \rho_2 \frac{2}{R} \quad (2)$$

式中: T_2 为横向弛豫时间,ms; ρ_2 为表面弛豫率, $\mu\text{m/s}$; R 为孔径, μm 。

T_2 分布能反映孔径分布,其信号强度反映了不同孔径的孔隙数量,波峰面积代表了对应 T_2 范围内孔隙水的含量,即孔隙体积。

2)试样制备。根据表1中高岭土掺量与养护时间两个变量的取值制备试样,试样为直径39.1 mm、高50 mm的圆柱体,干密度设为1.56 g/cm³,具体制备步骤如下:

①根据不同掺量称取标准砂和高岭土,将称取后的高岭土与标准砂拌和均匀;

②称量相应体积的脲酶溶液与胶结液,将二者与预拌合土样充分拌和;

③采用拌合法将高岭土、脲酶溶液和胶结液先后与标准砂充分拌和,拌和后将混合物分为4等份,分次装入不锈钢管内并压实至50 mm,压实完成后进行封口处理;

④将试样置于25℃的恒温培养箱内养护至表1中规定的天数,养护完成后对试样进行干燥处理,对干燥试样进行24 h的抽真空饱和处理,后将试样置于核磁共振仪进行试验。

3)试验设备。试验采用MicroMR12-025V型低场核磁共振仪进行试验,共振频率为12.337 MHz,磁体温度控制在(32.00±0.02)℃,探头线圈直径为40 mm。

1.2.4 SEM试验

为分析高岭土对固化效果影响的微观机理,对养护14 d、高岭土掺量分别为0%(试样编号为G-14-0)和4%(试样编号为G-14-4)的固化砂试样进行扫描电镜试验,试验仪器为Tescan-Mira3型扫描电子显微镜,测试步骤如下:

1)选取断面较为规则的砂样作为试验样品,其长宽高均控制在10 mm左右,置于70℃烘箱内烘干;

2)给试验样品贴上导电胶带,放入离子溅射仪中进行真空处理,当真空度达 5×10^{-4} Pa后,将样品放入喷金仪器中进行喷金处理;

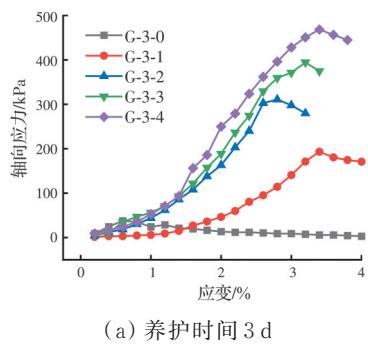
3)将喷金完成后的样品放在扫描电子显微镜下,调节倍数、焦距和亮度,选择图像清晰的区域进行扫描拍照。

2 试验结果及分析

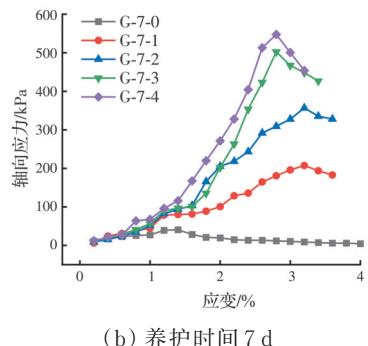
2.1 无侧限抗压强度试验

对试验数据进行处理,得到养护时间为3、7、14 d的EICP联合不同高岭土掺量固化砂试样的应力-应

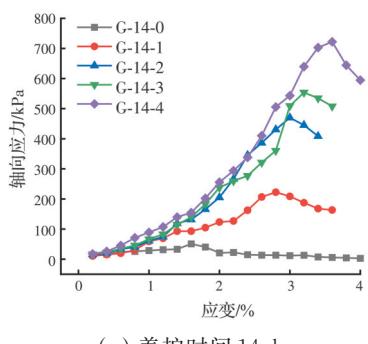
变关系曲线,如图 6 所示。



(a) 养护时间 3 d



(b) 养护时间 7 d



(c) 养护时间 14 d

图 6 不同变量下试样的应力-应变曲线

Fig. 6 Stress-strain curves of test samples under different variables

由图 6 可以发现,不同养护时间下 EICP 联合高岭土固化砂的应力-应变关系呈现较好的规律性,主要表现在两个方面:

1) 每个试样的应力-应变变化规律相同,先增加后减小,存在明显的应力峰值,即无侧限抗压强度,表明固化后的砂土得到硬化;

2) EICP 联合高岭土固化砂的无侧限抗压强度随着高岭土掺量的增加而不断增大,表明掺入高岭土可以明显提升 EICP 技术的固化效果。

同时,为了进一步细化分析高岭土掺量与养护时间对无侧限抗压强度的影响,在图 6 的基础上整理绘制了 3 种不同养护时间下无侧限抗压强度与高岭土掺量的关系曲线,如图 7 所示。

由图 7 可以发现:纯 EICP 固化砂(高岭土掺量为 0)在不同养护时间下的无侧限抗压强度大致相

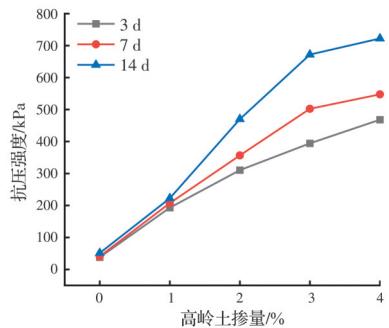


图 7 无侧限抗压强度-高岭土掺量关系曲线

Fig. 7 Relationship curves between unconfined compressive strength and kaolin content

同,在 40~55 kPa 之间;掺入高岭土后,试样的无侧限抗压强度得到快速提升,提升速率随高岭土掺量的增加先大后小,且前面大致呈线性关系,3、7、14 d 养护时间下,与未掺入高岭土的试样相比,4% 高岭土掺量试样无侧限抗压强度分别提高了 11.35、13.48、13.14 倍;同一高岭土掺量下,试样无侧限抗压强度随养护时间的增加而增大,4% 高岭土掺量试样在 3、7、14 d 养护下的无侧限抗压强度分别为 455.36、547.60、722.19 kPa,7、14 d 养护时间下无侧限抗压强度分别为 3 d 的 1.20、1.59 倍。

2.2 碳酸钙沉淀率试验

养护时间为 3、7、14 d 条件下 EICP 联合高岭土固化砂的碳酸钙沉淀率与高岭土掺量间的关系曲线如图 8 所示。

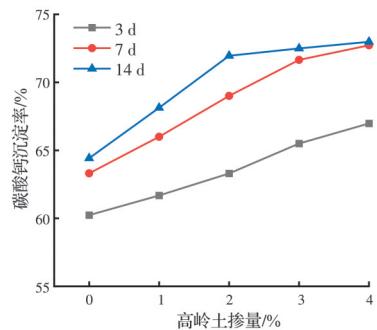


图 8 碳酸钙沉淀率-高岭土掺量关系曲线

Fig. 8 Relationship curves between precipitation rate of calcium carbonate and kaolin content

由图 8 可以发现,养护 3 d 的固化砂试样碳酸钙沉淀率随高岭土掺量的增加大致呈线性增长,4% 掺量的碳酸钙沉淀率为 66.98%;养护 7 d 的固化砂试样碳酸钙沉淀率随高岭土掺量的增加而不断增长,但在 3% 掺量后的增速明显放缓,4% 掺量的碳酸钙沉淀率为 72.73%;高岭土掺量超过 2% 后,养护 14 d 的固化砂试样碳酸钙沉淀率则基本不再增长,维持在 73% 左右,与养护 7 d 的最高值大致相同。可见,碳酸钙沉淀率受养护时间与高岭土掺量

共同影响,二者分别通过增长反应时间与增加附着点来进一步促进碳酸钙的生成。但同时也可以看到,碳酸钙沉淀率不会一直增长,这主要是因为沉积的碳酸钙晶体会阻碍胶结液在试样内部流动,导致在试样表面尤其是上端面会沉积部分碳酸钙晶体。

2.3 LF-NMR试验

2.3.1 T_2 谱与孔径分布

由式(2)可知,核磁共振 T_2 谱分布与孔径大小呈正相关,即 T_2 值越大,孔径越大,故 T_2 谱分布可以反映固化砂中孔隙的分布情况。据此可以得到表1中各固化砂试样的 T_2 谱与孔径分布曲线,由于不同养护时间试样呈现出的规律大致相同,限于篇幅,只列出养护3 d固化砂试样的 T_2 谱与孔径分布曲线,分别如图9、图10所示。

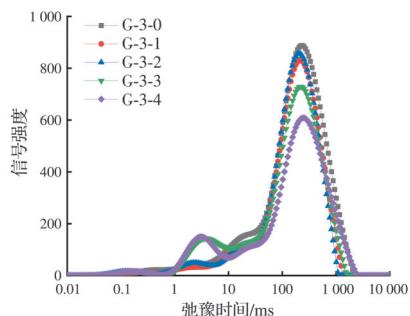


图9 养护3 d试样 T_2 谱分布曲线

Fig. 9 Distribution curves of T_2 spectrum of sample after 3-day maintenance

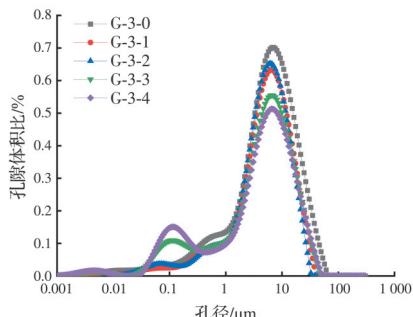


图10 养护3 d试样孔径分布曲线

Fig. 10 Particle size distribution curves of the sample after three days of maintenance

由图9和图10可见,纯EICP固化砂的 T_2 谱分布曲线仅有一个明显的波峰,峰值信号强度为886,弛豫时间分布在100~10 000 ms之间,对应的孔径大小分布在4~200 μm 之间,而掺加高岭土后 T_2 谱分布曲线有两个明显波峰,第1个波峰(次波峰)的峰值信号强度为32~149,分布于2~20 ms,对应的孔径大小为0.06~1 μm ,第2个波峰(主波峰)的峰值信号强度为607~853,分布于100~1 000 ms,对应的孔径大小为4~150 μm 。由此可见,随着高岭

土掺量的增加,主波峰信号强度逐渐减弱,次波峰信号强度逐渐增强,对应的大孔径孔隙体积占比逐渐减小,而小孔径孔隙体积占比逐渐增大。

2.3.2 孔隙度

通过饱和与烘干后试样称重可计算得到其孔隙度,3种不同养护时间下孔隙度与高岭土掺量的关系曲线如图11所示。在试样真空加压饱和过程中,水的流入会导致悬浮状态的碳酸钙晶体流失,只留下附着在砂粒和高岭土上的碳酸钙晶体。

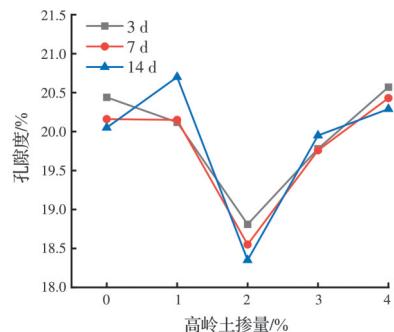


图11 孔隙度-高岭土掺量关系曲线

Fig. 11 Relationship curves between porosity and kaolin content

由图11可以看出,不同养护时间下固化砂样孔隙度随高岭土掺量的变化规律大致相同,即随着高岭土掺量的增加,孔隙度先减小后增加,高岭土掺量为2%时,孔隙度最小。这是因为当高岭土掺量较小时,掺入的高岭土可充当碳酸钙附着点,提高碳酸钙晶体的附着效率,进而减小孔隙度;当高岭土掺量较大时,多余的高岭土会堵塞砂粒间隙通道,阻碍胶结液下渗参与水解反应,在很大程度上降低了碳酸钙晶体的附着效率,导致孔隙度的增大,以及孔隙分布的不均匀。

2.3.3 孔隙占比

为了进一步量化各孔径孔隙的体积占比,根据孔径大小将孔隙分为小孔($3 \mu\text{m} < r \leq 30 \mu\text{m}$)、中孔($30 \mu\text{m} < r \leq 100 \mu\text{m}$)和大孔($r > 100 \mu\text{m}$),基于此计算处理得到不同养护时间下各高岭土掺量试样的各类孔隙占比,如图12所示。

由图12可以发现,在养护3、7、14 d条件下,EICP联合不同掺量高岭土固化砂试样的孔隙占比大致相同,即纯EICP固化砂以中孔为主,占比超过90%,其次是小孔,最后是大孔;掺加高岭土后以小孔为主,占比在80%左右,其次是中孔,大孔占比可忽略不计。可见,掺加高岭土能有效填充砂粒间的孔隙,一方面是通过高岭土自身的细小颗粒填充,另一方面是高岭土的掺入为碳酸钙的沉积提供了更多的附着点,提高了碳酸钙的沉淀率。

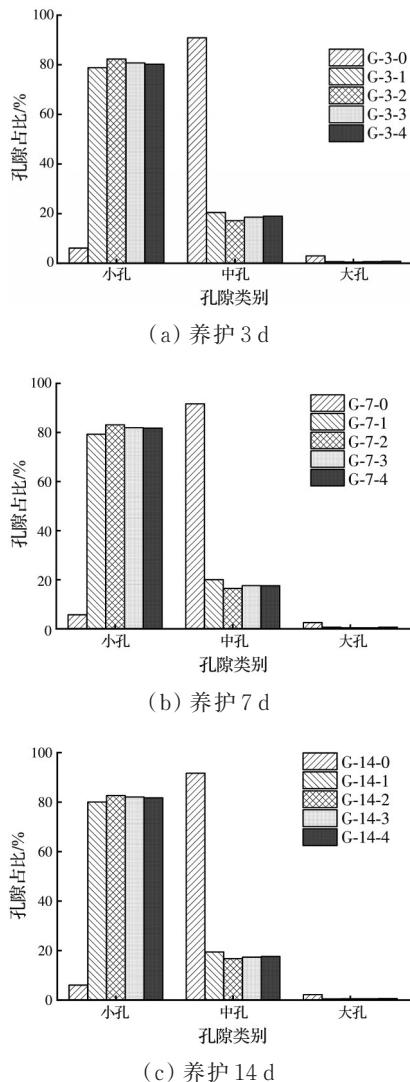


图 12 不同变量下试样的孔隙占比

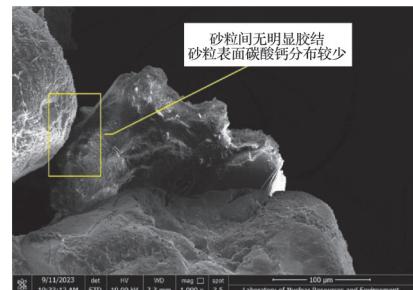
Fig. 12 Proportion of pores of different test samples

2.4 SEM 试验

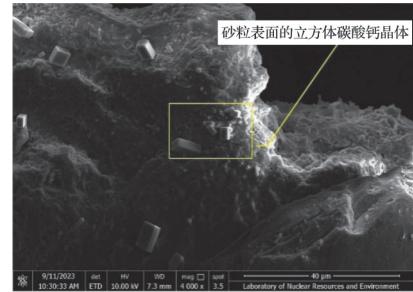
对养护 14 d、高岭土掺量为 0% (试样编号为 G-14-0) 和 4% (试样编号为 G-14-4) 的固化砂试样进行扫描电镜试验, 其在放大 1 000、4 000 倍下的 SEM 图像分别如图 13 和图 14 所示。

对比图 13(a) 和图 14(a) 可以发现, 纯 EICP 固化砂颗粒间的孔隙较大, 掺加高岭土后颗粒间的孔隙被充分填充。而且, 纯 EICP 固化砂颗粒间沉积的碳酸钙晶体较少, 对砂粒的胶结作用不明显, 而掺加高岭土后砂粒表面已完全被沉积的碳酸钙晶体包裹, 砂粒被全部胶结在一起, 砂粒间的连接力明显增强。

对比图 13(b) 和图 14(b) 可以发现, 纯 EICP 固化砂颗粒表面存在较多的规则立方体碳酸钙晶体, 该晶型为方解石, 方解石结构稳定, 相互独立, 较难形成大体积的碳酸钙晶体; 而 EICP 联合高岭土固化砂颗粒表面沉积的碳酸钙晶体呈堆叠状, 该晶型



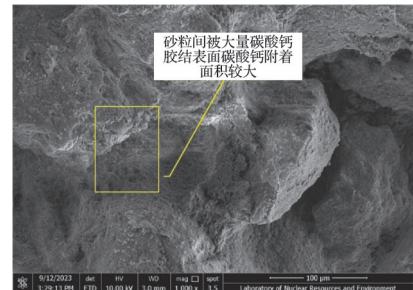
(a) 1 000 倍



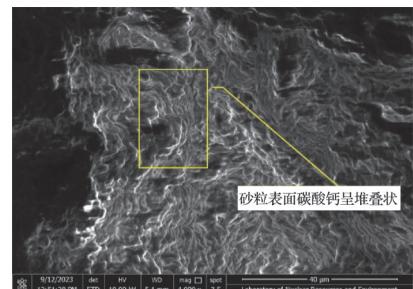
(b) 4 000 倍

图 13 养护 14 d 纯 EICP 固化砂 SEM 图像

Fig. 13 SEM images of pure EICP solidified sand after 14 days of maintenance



(a) 1 000 倍



(b) 4 000 倍

图 14 养护 14 d 的 EICP 联合 4% 高岭土固化砂 SEM 图像

Fig. 14 SEM image of 4% kaolin-EICP combined solidified sand after 14 days of maintenance

为球霰石, 球霰石性质不稳定, 易形成大体积碳酸钙晶体, 填充于砂粒间隙并覆盖在砂粒表面, 将砂粒更好地胶结在一起, 显著提升 EICP 技术的固化效果。

3 结论

从黄豆提取脲酶,开展EICP联合不同高岭土掺量、养护时间固化砂的宏观力学特性与微观结构特性的试验研究,得到以下结论:

1)EICP联合高岭土固化砂无侧限抗压强度随高岭土掺量的增加不断增大,增长速率先大后小,且前面大致呈线性关系;养护时间对纯EICP固化砂无侧限抗压强度的影响甚微,但掺加高岭土后,同一掺量固化砂无侧限抗压强度随养护时间的增加而增大;4%高岭土掺量养护14 d的无侧限抗压强度为722.19 kPa,是纯EICP固化砂强度的13.15倍。

2)碳酸钙沉淀率受养护时间与高岭土掺量共同影响,养护3 d时碳酸钙沉淀率随高岭土掺量的增加大致呈线性增大;养护7、14 d时,碳酸钙沉淀率随高岭土掺量的增加先线性增大后趋于稳定,拐点处高岭土掺量随养护时间的增加而减小;同一高岭土掺量下,碳酸钙沉淀率随养护时间的增加而增大,但增大速率先大后小,7、14 d的数值差别不大。

3)随着高岭土掺量的增加,孔隙度先减小后增大,高岭土掺量为2%时,孔隙度最小;掺加高岭土后固化砂的微观孔隙结构得到明显改善,纯EICP固化砂以中孔为主,占比超过90%;EICP联合高岭土固化砂则以小孔为主,占比在80%左右;掺加高岭土后,养护时间与高岭土掺量对各类型孔隙占比的影响不大。

4)纯EICP固化砂颗粒间沉积的碳酸钙晶体较少,晶型为方解石,较难形成大体积碳酸钙晶体,对砂粒的胶结作用不明显;EICP联合高岭土固化砂颗粒间沉积的碳酸钙晶体较多,晶型为球霰石,易形成大体积碳酸钙晶体填充于砂粒间隙并覆盖在砂粒表面,对砂粒的胶结效果显著,能有效提升EICP的固化效果。

以整个试样为试验研究对象,对其固化均匀度方面的探讨较少。同时,宏观力学特性仅采用了无侧限抗压强度试验,未涉及三轴剪切试验。今后需围绕试样固化均匀度与三轴应力状态下的强度和变形特性开展研究,进一步明确EICP联合高岭土固化技术的效果与机理。

参考文献

- WHIFFIN V S. Microbial CaCO_3 precipitation for the production of biocement [D]. Murdoch, Western Australia: Murdoch University, 2004.
- HAMDAN N, KAVAZANJIAN E Jr. Enzyme-induced carbonate mineral precipitation for fugitive dust control [J]. *Géotechnique*, 2016, 66(7): 546-555.
- PRATAMA G S, YASUHARA H, KINOSHITA N, et al. Application of soybean powder as urease enzyme replacement on EICP method for soil improvement technique [J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, 622(1): 012035.
- NAM I H, CHON C M, JUNG K Y, et al. Calcite precipitation by ureolytic plant (*Canavalia ensiformis*) extracts as effective biomaterials [J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2015, 19(6): 1620-1625.
- AHENKORAH I, RAHMAN M M, KARIM M R, et al. A review of enzyme induced carbonate precipitation (EICP): The role of enzyme kinetics [J]. *Sustainable Chemistry*, 2021, 2(1): 92-114.
- 熊辉辉, 崔猛, 吕苏颖, 等. 不同植物源脲酶的活性与钙化变量试验研究[J]. 南昌工程学院学报, 2022, 41(6): 12-17, 58.
- XIONG H H, CUI M, LV S Y, et al. Experimental study on activity and calcification variables of different plant-derived urease [J]. *Journal of Nanchang Institute of Technology*, 2022, 41(6): 12-17, 58. (in Chinese)
- GAO Y F, HE J, TANG X Y, et al. Calcium carbonate precipitation catalyzed by soybean urease as an improvement method for fine-grained soil [J]. *Soils and Foundations*, 2019, 59(5): 1631-1637.
- ZHANG S X, LIU Z Y, LI Z Y, et al. Experimental study on the reinforcement mechanism and wave thumping resistance of EICP reinforced sand slopes [J]. *Biogeotechnics*, 2023, 1(4): 100041.
- 王欢, 张佳伟, 郭合家. EICP改良膨胀土的物理力学性质试验研究[J]. 土木与环境工程学报, 2024, 46(5): 109-116.
- WANG H, ZHANG J W, GUO H J. Experimental study on physical and mechanical properties of expansive soil improved by EICP[J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2024, 46(5): 109-116.
- 边汉亮, 吉培瑞, 王俊岭, 等. EICP修复重金属污染土的环境耐久性研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(10): 2779-2788.
- BIAN H L, JI P R, WANG J L, et al. Study on the environmental durability of heavy metal contaminated soil remediated by enzyme induced carbonate precipitation [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2023, 44(10): 2779-2788. (in Chinese)
- DILRUKSHI RAN, KAWASAKI S. Effective use of plant-derived urease in the field of geoenvironmental/geotechnical engineering [J]. *Journal of Civil & Environmental Engineering*, 2016, 6(1): 1000207.

- [12] ALOTAIBI E, ARAB M, OMAR M. Combination of enzyme-induced calcium carbonate precipitation (EICP) and macro-synthetic fibers for soil improvement [C]// Geo-Congress 2022, 2022: 408-417.
- [13] YUAN H, SHI Q S, LI J, 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.
- [14] 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.
FU G Y, XIAO Y, SHI J Q, 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. (in Chinese)
- [15] 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 J W, QIAN S Y, WANG X J, 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. (in Chinese)
- [16] 钟孝乐, 詹良通, 龚标, 等. 我国3种典型高岭土的固结、渗透及吸附特性[J]. 浙江大学学报(工学版), 2014, 48(11): 1947-1954.
ZHONG X L, ZHAN L T, GONG B, et al. Consolidation permeability and adsorption properties of three kinds of typical Kaolin clays in China [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2014, 48(11): 1947-1954. (in Chinese)
- [17] 袁建民. 粘土矿物对重金属离子的吸附能力研究[D]. 石家庄: 河北地质大学, 2018.
YUAN J M. Study on adsorption capacity of clay minerals for heavy metal ions [D]. Shijiazhuang: Hebei GEO University, 2018. (in Chinese)
- [18] 魏代琳, 李大勇, 牛冰艳. 膨润土和高岭土掺量对饱和细砂剪切特性的影响[J]. 中国科技论文, 2018, 13(1): 31-36.
WEI D L, LI D Y, NIU B Y. Effects of contents of bentonite and Kaolin on shear properties of saturated fine sand [J]. China Sciencepaper, 2018, 13(1): 31-36. (in Chinese)
- [19] 水泥胶砂强度检验方法(ISO法): GB/T 17671—2021 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
Test method of cement mortar strength (ISO method): GB/T 17671—2021 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2021. (in Chinese)
- [20] 吕苏颖, 崔猛, 熊辉辉, 等. 基于黄豆脲酶的EICP变量试验研究[J]. 南昌工程学院学报, 2023, 42(1): 33-38.
LV S Y, CUI M, XIONG H H, et al. Experimental study on EICP variables based on soybean urease [J]. Journal of Nanchang Institute of Technology, 2023, 42(1): 33-38. (in Chinese)

(编辑 胡英奎)