

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.130



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



EICP 改良膨胀土的物理力学性质试验研究

王欢^{1,2}, 张佳伟¹, 郭合家³

(1. 河南大学土木建筑学院, 河南 开封 475004; 2. 河南交通职业技术学院 公路学院, 郑州 451460; 3. 中国五冶集团有限公司, 成都 610063)

摘要:为了探究脲酶诱导碳酸钙沉淀(EICP)技术改良弱膨胀土的物理力学特性,利用大豆脲酶开展EICP技术处理弱膨胀土的膨胀特性和力学特性试验研究。通过EICP多因素配比正交试验研究脲酶浓度、初始Ca²⁺浓度、酶胶比、尿钙比、养护时间对膨胀土碳酸钙生成率、自由膨胀率的影响及其变化规律,确定了EICP反应液最佳配比。采用不同掺量EICP反应液改良膨胀土,通过无荷载膨胀率试验、无侧限抗压强度试验及三轴压缩试验验证改良效果。结果表明:EICP反应液掺量为20%时抑制膨胀土膨胀性效果最好,且此时土体力学强度和碳酸钙生成率最高。大豆脲酶诱导产生的沉淀物为方解石型碳酸钙,附着在土颗粒表面既填充了土颗粒孔隙,也胶结了土体骨架颗粒,阻碍土体与水分接触,提高了土体密实性和黏结强度,改善了膨胀土膨胀性和力学性能。

关键词:脲酶诱导碳酸钙沉淀;膨胀土;膨胀特性;力学特性;微观机理

中图分类号:TU443

文献标志码:A

文章编号:2096-6717(2024)05-0109-08

Experimental study on physical and mechanical properties of expansive soil improved by EICP

WANG Huan^{1,2}, ZHANG Jiawei¹, GUO Hejia³

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Henan University, Kaifeng 475004, Henan, P. R. China; 2. Road School, Henan College of Transportation, Zhengzhou 451460, P. R. China; 3. China MCC5 Group Corp., Ltd., Chengdu 610063, P. R. China)

Abstract: In order to explore the physical and mechanical properties of weak expansive soil improved by urease Enzyme-Induced Calcium Carbonate Precipitation (EICP) technique, the expansion characteristics and mechanical properties of weak expansive soil treated by EICP were tested by soybean urease. The effects of urease concentration, initial Ca²⁺ concentration, enzyme-binder ratio, urine-calcium ratio and curing time on the formation rate of calcium carbonate and free expansion rate were studied by orthogonal test of EICP multi-factor ratio, and the optimum ratio of EICP reaction solution was determined. On this basis, the expansive soil was improved by different dosages of EICP reaction liquid, and the effect was tested by free expansion rate test, unconfined compressive strength test and triaxial compression test. The results show that when the content of EICP reaction solution is 20%, the inhibiting is the best, and the mechanical strength and calcium carbonate

收稿日期:2023-07-06

基金项目:河南省高等学校重点科研项目(18A580002);开封市科技发展计划项目(1801004)

作者简介:王欢(1982-),男,博士,主要从事特殊土处理、道路工程研究,E-mail:happy_king0924@sina.com.

Received: 2023-07-06

Foundation items: Key Scientific Research Project of Higher Education Institutions of Henan Province (No. 18A580002); Science and Technology Development Program of Kaifeng (No. 1801004)

Author brief: WANG Huan (1982-), PhD, main research interests: special soil treatment, road engineering, E-mail: happy_king0924@sina.com.

formation rate of soil are the highest. The precipitate induced by soybean urease is calcite calcium carbonate, which is attached to the surface of soil particles. It not only fills the pores of soil particles, but also cements the skeleton particles of soil, hinders the contact between soil and water, improves the compactness and bonding strength of soil, and finally improves the expansibility and mechanical properties of expansive soil.

Keywords: enzyme-induced calcium carbonate precipitation; expansive soil; expansion characteristics; mechanical properties; microscopic mechanism

膨胀土是一种特殊黏土,其具有显著的“吸水膨胀和失水收缩”特性,造成了很多工程灾害^[1],被工程界称为“工程中的毒瘤”^[2]。膨胀土路基治理一直是一个问题,目前工程中对膨胀土路基的传统改良方法主要有物理^[3]和化学^[4]改良,但其改良方式对环境的污染较为严重,而且由于较高的成本其不适合大规模地使用。

微生物诱导碳酸钙沉淀(Microbial Induced Carbonate Precipitation, MICP)技术主要基于高产脲酶细菌自身的新陈代谢产生脲酶,进而水解尿素,产生具有胶凝性的碳酸钙晶体,以改善土体性能。此技术环境友好,资源丰富,目前被广泛应用于岩土工程领域^[5]。但MICP技术存在两个局限性:一是因其培养产脲酶细菌过程复杂,具体工程中不易实现;二是MICP技术中产脲酶细菌的尺寸和好氧性更适用于固化砂土等大孔隙土^[6],因而仍面临一些挑战。为解决以上问题,EICP(Enzyme-Induced Calcium Carbonate Precipitation)技术引起了诸多学者的注意^[7-9],EICP产生碳酸钙的机理类似于MICP^[10-14],但相比于MICP技术中培养细菌的方法,EICP技术中脲酶的提取避开了细菌培养^[11],并且EICP技术直接利用小尺寸游离脲酶诱导碳酸钙沉淀,能穿透更细土颗粒^[12]。Qabany等^[15]证明单独使用脲酶和利用细菌催化尿素水解的效果具有很高相似性,这为解决MICP技术存在的局限性提供了一定理论基础。原华等^[16]通过正交实验探究了多个因素对大豆脲酶诱导碳酸钙沉淀的影响,发现pH值、脲酶与胶结液体积比是影响Ca²⁺利用率的主要因素,为达到较高的Ca²⁺利用率各因素有其最佳值。张茜等^[13]在EICP土体固化中发现一定脲酶浓度或脲酶活性范围内,碳酸钙生成速率和生成总量随脲酶浓度及活性的增大而增大,但过高的脲酶浓度或活性易导致碳酸钙生成速率过快,从而在土体注入端发生堵塞。

对于EICP改良土体力学方面的研究,郎钊棚^[17]将豆粉浸出液与不同浓度尿素氯化钙溶液配制成改良液,研究了SUICP技术中改良液和含水率对改良膨胀土胀缩性和力学特性的影响,证明了SUICP技术改良膨胀土的可行性。吴敏等^[18]、Gao等^[19]利用大豆脲酶诱导碳酸钙沉积法抑制风沙土风蚀和风积沙的表面固化,检验了EICP技术的防风固沙效果,证明了EICP技术能够降低风沙土的可蚀性且具有良好的耐久性。张建伟等^[20]利用EICP-木质素联合技术,将EICP产生的分散碳酸钙聚拢成型,提高了改良土土体强度。Ali Baig Moghal等^[21]运用EICP技术固定印度黏性土中的重金属,降低了土壤膨胀性和渗透特性,修复污染土,使其成为合格路基填埋材料。

大豆是脲酶含量非常丰富的植物,被广泛应用于碳酸钙沉淀和土壤改良领域^[17-22]。相对于其他改良方法,EICP技术脲酶提取过程简单,具有绿色环保、无污染等优点,但目前以大豆作为EICP技术植物源脲酶改良膨胀土方面的研究不够充分。因此,开展EICP技术对膨胀土的改良效果和改良机制研究具有重要意义。

1 试验

1.1 试验材料

试验所用膨胀土取自河南省新乡市,取回后根据《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)^[23]确定土样基本物理特性,结果如表1所示。

测得膨胀土自由膨胀率为50.2%,根据《膨胀土地区建筑技术规范》(GB 50112—2013)^[24],可以判断试验土样为弱膨胀土。

试验所用大豆脲酶溶液提取过程如图1所示。用粉碎机将大豆粉碎,把粉碎后的大豆粉末与去离子水混合得到豆液,将豆液置于电磁搅拌器上均匀搅拌0.5 h,放进冰箱(4℃)冷藏2 h;将冷藏静置后的豆液倒入离心管,使用高速冷冻离心机进行离

表1 膨胀土基本物理性质指标

Table 1 Basic physical properties of expansive soil

最佳含水率/%	最大干密度/(g/cm ³)	液限 W _L /%	塑限 W _P /%	塑性指数 I _p /%	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	自由膨胀率/%
15.9	1.78	35.21	16.1	19.96	74.6	24.8	50.2

心,在 4 500 r/min, 4 °C 下离心 15 min, 得上清液即为大豆脲酶溶液。

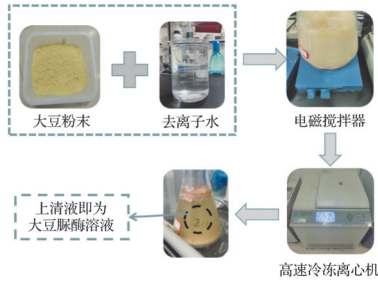


图 1 大豆脲酶溶液提取过程

Fig. 1 Extraction process of soybean urease solution

试验采用的胶结液由尿素 urea (广东西陇科学股份有限公司) 和无水氯化钙 CaCl₂ (上海国药集团化学试剂有限公司) 组成, 尿素为 EICP 反应过程提供氮源和能量源, 氯化钙充当钙源。

1.2 试验方案及测试方法

1.2.1 试验方案

将天然膨胀土烘干、碾碎、过 2 mm 筛, 备用。

试验首先以反应液中脲酶浓度 C₁、初始 Ca²⁺ 浓度 C₂、酶胶比 (脲酶和胶结液质量比) B₁、尿钙比 (urea 和 CaCl₂ 浓度比) B₂、养护时间 T 为研究因素, 每个因素确定 4 个试验水平, 采用正交试验法, 每个工况下 4 组平行试验, 均分别进行碳酸钙生成率检测试验和自由膨胀率试验, 以确定 EICP 反应液最佳配比, 具体试验方案见表 2。EICP 技术反应液最佳配比是改良膨胀土膨胀性、力学特性的前提。

表 2 正交试验因素和水平表

Table 2 Orthogonal test factors and level table

水平	C ₁ /(g/L)	C ₂ /(mol/L)	B ₁	B ₂	T/d	试验名称
1	50	0.5	0.75	0.5	1	
2	100	1.0	1.00	1.0	3	碳酸钙生产率、
3	150	1.5	1.25	1.5	5	自由膨胀率
4	200	2.0	1.50	2.0	7	

依据 EICP 多因素配比正交试验结果, 得出最佳反应液配比, 配制反应液。以反应液与膨胀土质量比为 16%、18%、20%、22%、24% 制作试件, 进行力学微观试验。

在标准条件下, 将养护完成的试件分别进行无荷载膨胀率试验、无侧限抗压强度试验和三轴压缩试验。然后将试验完成后的试件分别进行碳酸钙生成率检测试验, 探究改良土膨胀性、力学性质和碳酸钙生成率的关系。

微观试验中, 对素膨胀土和 20% 掺量 EICP 反应液改良土三轴压缩试验完成后的试样分别进行扫描电镜 (SEM) 试验和 X 射线衍射 (XRD) 试验。

1.2.2 测试方法

采用酸洗法测定土样碳酸钙的生成量, 用去离子水浸泡试样去除可溶性盐, 烘干称重记为 m₁, 向试样中加入过量稀盐酸直至无气泡生成, 用去离子水清洗反应结束后的试样, 随后烘干称重记为 m₂。两者质量差为碳酸钙生成量, 进一步得出碳酸钙生成率。

碳酸钙生成率按式 (1)、式 (2) 计算。

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

$$W_c = M_E - M_0 \quad (2)$$

式中: m₁ 为试验前质量; m₂ 为干燥后质量; M 为碳酸钙生成率; M_E、M₀ 为改良土、素膨胀土中的碳酸钙含量; W_c 为改良后碳酸钙生成率。

在自由膨胀率试验中, 采用自由膨胀率测定仪, 按照《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)^[23] 要求进行自由膨胀率试验, 计算自由膨胀率。

自由膨胀率按式 (3) 计算。

$$\delta_i = \frac{V - V_0}{V_0} \times 100\% \quad (3)$$

式中: δ_i 为膨胀土自由膨胀率; V 为膨胀土试样吸水膨胀后体积; V₀ 为膨胀土试样吸水前体积。

在无荷载试验中, 采用无荷载膨胀仪, 制备尺寸直径 61.8 mm、高 20 mm 的环刀试样, 养护完成以后将土样放入膨胀仪中测试。试验方法参照《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)^[23]。

无荷载膨胀率按式 (4) 计算。

$$\delta_e = \frac{R_t - R_0}{H_0} \times 100\% \quad (4)$$

式中: δ_e 为膨胀土无荷载膨胀率; H₀ 为环刀试样高度; R_t 为百分表在试样浸水 t 时刻的读数; R₀ 为百分表初始读数。

在无侧限抗压强度试验中, 采用全自动无侧限仪, 试样尺寸为直径 39.1 mm、高 80 mm, 设置加载速率为 0.8 mm/min。试验方法参照《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)^[23]。

在三轴压缩试验中, 采用 TSZ-10 型全自动三轴仪, 制备成高 80 mm、直径 39.1 mm 的土柱, 设置围压为 100、200、300 kPa 进行试验。试验方法参照《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)^[23]。

抗剪强度指标黏聚力 c 和内摩擦角 φ 二者的值根据莫尔-库伦破坏准则计算。

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = c \cos \varphi + \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \sin \varphi \quad (5)$$

式中: σ₁ 为大主应力; σ₃ 为小主应力; c 为黏聚力; φ 为内摩擦角。

扫描电镜 (SEM) 试验仪器采用环境扫描电子显微镜 (FEI Quanta250), 取尺寸 5 mm × 5 mm ×

2 mm的试件各一块,在40℃烘箱内烘干48 h。对土样表面均匀喷金处理,然后放进扫描电镜仓内进行真空处理,对土样进行电镜扫描试验,得到放大2 000倍、4 000倍的微观扫描图像。X射线衍射(XRD)试验采用Bluker D8 ADVANCE型X射线衍射仪(X-ray Diffraction)对土样晶体结构进行物性表征。测试条件:扫描范围 $10^{\circ}\sim 80^{\circ}$,光源Cu K α 辐射,波长 λ 为0.154 nm。

2 试验结果与讨论

2.1 EICP多因素配比正交试验

根据EICP多因素配比影响分析正交试验表2所示,正交试验各因素各水平所对应的碳酸钙生成率平均值见图2,对应的自由膨胀率平均值见图3。

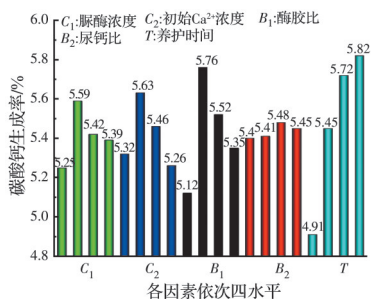


图2 不同因素对碳酸钙生成率的影响

Fig. 2 The influence of different factors on the formation rate of calcium carbonate

由图2可知,碳酸钙生产率在 C_1 、 C_2 、 B_1 、 B_2 这4种因素影响下会出现先升高后降低的变化,当脲酶浓度为100 g/L、初始 Ca^{2+} 浓度选择1 mol/L、酶胶比为1:1以及尿钙比为1.5时,EICP反应液中碳酸钙生成率到达峰值,超过这一数值,碳酸钙生产率会有不同程度降低。对于养护时间 T 因素,EICP反应液中碳酸钙生成率会随着养护时间增加而持续增加,养护时间为7 d时,碳酸钙生成率到达峰值。

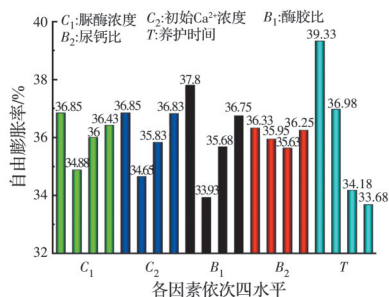


图3 不同因素对自由膨胀率的影响

Fig. 3 The influence of different factors on the free expansion rate

由图3可知,改良土自由膨胀率均低于素膨胀土,已经转变为非膨胀土(自由膨胀率小于40%)。这表明土样经EICP处理可以改变膨胀土膨胀潜

势,达到改良目的。膨胀土经EICP处理后,黏土矿物吸附的 Na^+ 等阳离子被 Ca^{2+} 取代,经过离子交换,膨胀土颗粒之间结合水膜变薄,从而降低了土颗粒表面的负电荷密度,土颗粒间的静电排斥作用减弱^[25],膨胀土胀缩性得到改善,自由膨胀率减小。此外,生成的碳酸钙颗粒会在土壤颗粒之间产生摩擦阻力,进而抵消了部分膨胀应力。因此,双重作用下改良土的自由膨胀率下降。

结合正交试验中碳酸钙检测试验可发现,碳酸钙检测结果与自由膨胀率改良效果成反比,即碳酸钙生成率越高,改良土自由膨胀率越低。并确定以脲酶浓度为100 g/L,初始 Ca^{2+} 浓度选择1 mol/L,酶胶比为1:1,尿钙比为1.5,作为初始条件配制EICP反应液,养护时间为7 d,在此条件下采用不同掺量EICP反应液探究其物理力学性能。

2.2 无荷载膨胀率试验

不同掺量EICP反应液改良膨胀土的无荷载膨胀率随时间变化的曲线见图4,浸水48 h后改良土无荷载膨胀率随EICP掺量变化的关系曲线见图5。

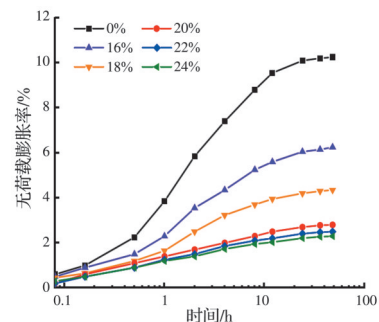


图4 试样无荷载膨胀率随时间变化曲线

Fig. 4 The curves of no-load expansion rate of specimen with time

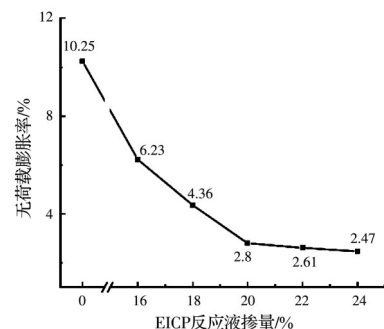


图5 无荷载膨胀率随EICP反应液掺量变化曲线

Fig. 5 The curve of no-load expansion rate with the content of EICP reaction solution

以48 h后无荷载膨胀率试验数据结果为基准,对不同EICP掺量下改良膨胀土膨胀速率进行分析。由图4可以看出经过EICP技术改良后,改良土的无荷载膨胀率明显降低,浸水0.2 h内,素膨胀土和改良土无荷载膨胀率曲线的变化趋势大致相同,

浸水 0.2~12 h 后,改良土膨胀率增长速率明显低于素膨胀土。由图 5 可知,浸水 48 h 后素膨胀土无荷载膨胀率为 10.25%,掺入 16%、18%、20%、22%、24% EICP 反应液改良土试样无荷载膨胀率分别为 6.23%、4.36%、2.8%、2.61%、2.47%。20% 掺量 EICP 反应液改良土膨胀率相较素膨胀土,降低了 7.45%,当 EICP 掺量大于 20% 后,无荷载膨胀率变化不大。这主要是因为膨胀土掺入 EICP 反应液后碳酸钙沉淀,土孔隙被碳酸钙填充,碳酸钙胶结物附着在土颗粒表面,并且碳酸钙沉淀加强了土颗粒之间胶结,阻止水分的进入,土体亲水性降低,有效抑制了膨胀潜势。

2.3 无侧限抗压试验

根据试验数据得到不同 EICP 反应液掺量下试样的应力-应变曲线见图 6,试样抗压强度随 EICP 反应液掺量变化曲线见图 7。

由图 6 可知,素膨胀土和改良土的应力-应变曲线发展规律相似,关系曲线可分为弹性上升、压缩、

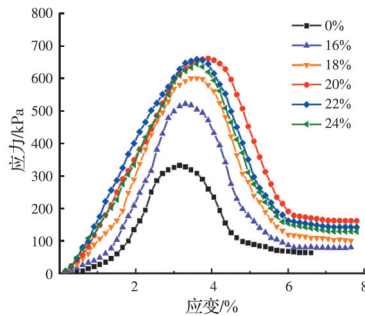


图 6 不同 EICP 反应液掺量下试样应力-应变曲线

Fig. 6 The stress-strain curves of samples with different EICP reaction liquid contents were obtained

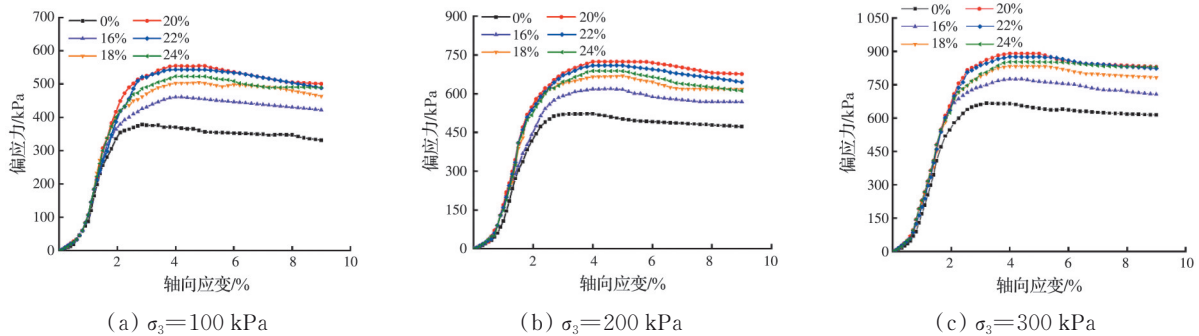


图 8 不同 EICP 反应液掺量改良土试样的偏应力-应变关系曲线

Fig. 8 The deviatoric stress-strain relationship curves of improved soil samples with different EICP reaction solution contents

由图 8 可知,试样应力-应变关系曲线都呈软化型,能看到明显的曲线峰值,试样偏应力先上升后下降,最后趋于稳定。随着 EICP 掺入量的增加,改良土的软化行为越明显。EICP 技术能有效地提高膨胀土抗剪强度,相同围压下,不同 EICP 反应液掺量改良土的抗剪强度均高于素膨胀土;不同围压

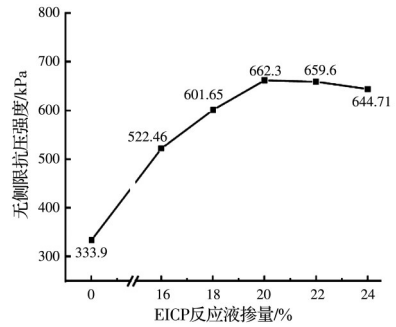


图 7 EICP 反应液掺量对试样抗压强度的影响

Fig. 7 The effect of EICP reaction solution content on the compressive strength of the sample

塑性上升、破坏、残余强度 5 个阶段。由图 7 可以看出,16%~20% 范围内,EICP 反应液改良土强度逐步提高,EICP 反应液掺量为 20% 时,改良土抗压强度达到最大值 662.3 kPa,EICP 反应液掺量超过 20% 时,改良土抗压强度反而下降。究其原因,当 EICP 掺量过少时,土体内碳酸钙生成率较少,不足以填充土颗粒间的孔隙,未完全发挥改良土体力学性能,随着 EICP 反应液掺量的增加,试样内碳酸钙晶体生成量变多,提升了土颗粒间的胶结强度,土颗粒间孔隙被填充,进而增强了改良土抗压强度。但当 EICP 反应液掺量逐渐增多时,试样中的水分也会相应变多,含水率是影响膨胀土抗压强度的重要因素,含水率过高会导致改良土抗压强度改良效果减弱。

2.4 三轴压缩试验

2.4.1 应力-应变关系曲线

在相同围压条件下,不同 EICP 反应液掺量改良土试样偏应力-应变关系曲线如图 8 所示。

下,20% EICP 反应液改良土关系曲线在峰值阶段均位于最上方,说明 20% EICP 反应液改良土抗剪强度最大。

2.4.2 抗剪强度指标

不同 EICP 反应液掺量改良膨胀土黏聚力和内摩擦角关系曲线如图 9 所示。

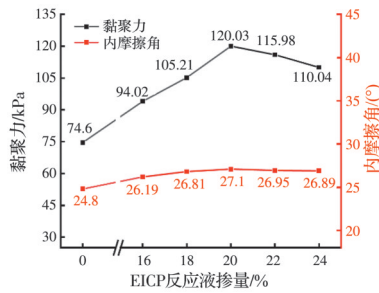


图 9 EICP 反应液掺量对试样抗剪强度指标的影响

Fig. 9 The effect of EICP reaction solution content on the shear strength index of the sample

由图 9 可知,改良土黏聚力随着 EICP 反应液掺量增加呈先增大后减小的变化规律。在 16%~20% 范围内,EICP 反应液改良土黏聚力逐步提高,EICP 掺量为 20% 时黏聚力达到最大值 120.03 kPa,比素膨胀土增加了 45.43 kPa。试样内摩擦角同样会受到 EICP 反应液掺量影响,不同 EICP 反应液掺量对改良土内摩擦角影响不同,但改良土内摩擦角仅比素膨胀土提高了 1.39°~2.3°,变化趋势较小,说明 EICP 改良土体主要通过黏聚力提升来改善抗剪性能。

2.5 碳酸钙生成率试验

将试验完成后的试件分别进行碳酸钙生成率检测,得到碳酸钙生成率平均值(见图 10)。

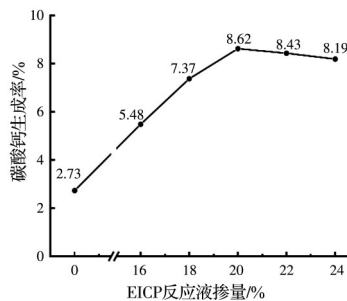


图 10 不同 EICP 反应液掺量下试样碳酸钙生成率

Fig. 10 The calcium carbonate formation rate of the sample under different EICP reaction solution content

由图 10 可以看出,随着 EICP 反应液掺量的增加,碳酸钙生成率先增大后减小,当 EICP 反应液掺量为 20% 时,试样碳酸钙生成率达到峰值 8.62%,结合上述无荷载膨胀率、无侧限抗压强度、抗剪强度测试结果,表明碳酸钙生成率较高的试样能更好地抑制土体膨胀以及改良土体力学性能。

综上所述,不同掺量 EICP 反应液改良土膨胀性及力学特性均优于素膨胀土,且 EICP 反应液最优掺量为 20%。

2.6 微观分析

如图 11 和图 12 所示,分别采用 SEM 和 XRD 分析素膨胀土和 20% 掺量 EICP 反应液改良土三轴压

缩试验完成后试样的微观结构和矿物成分。

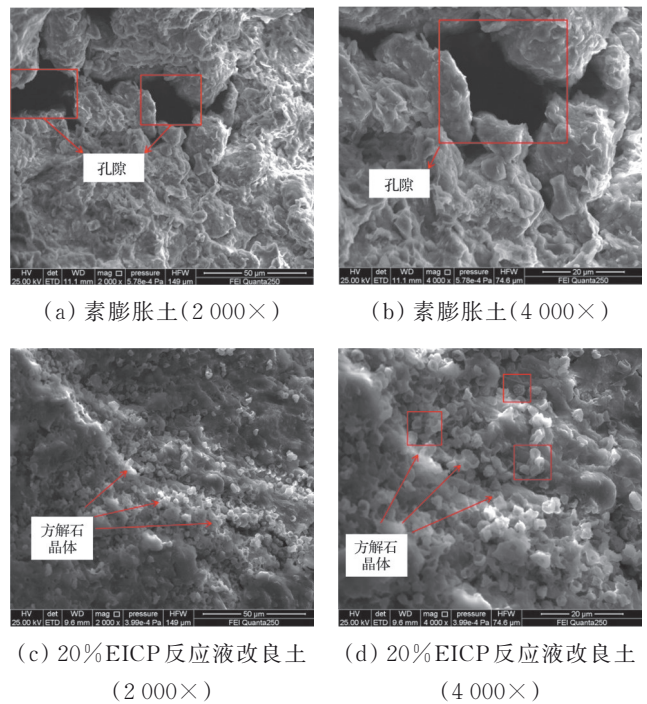


图 11 素膨胀土和 20% EICP 反应液改良土扫描电镜图
Fig. 11 Scanning electron microscopy of plain expansive soil and 20% EICP reaction solution improved soil

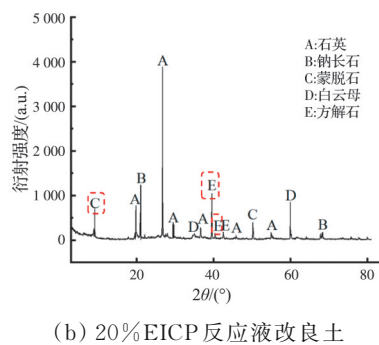
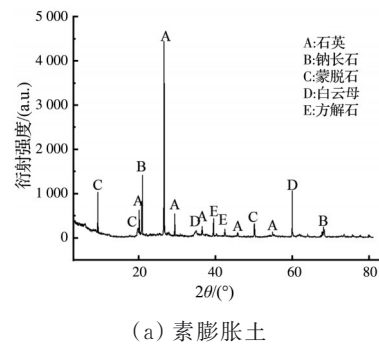


图 12 素膨胀土和 20% EICP 反应液改良土衍射图谱
Fig. 12 The diffraction patterns of plain expansive soil and 20% EICP reaction solution improved soil

如图 11(a)、(b) 所示,素膨胀土含有一定絮凝状黏土矿物,土颗粒大多为片状结构和扁平状颗粒聚集体,颗粒形状不规则;同时,可以发现素膨胀土颗粒相对松散,颗粒之间存在大量孔隙,且土壤中

没有发现较多碳酸钙晶体存在。在图 11(c)、(d)中可以看到,脲酶诱导碳酸钙经沉淀附着在土壤颗粒表面,填充了土颗粒之间孔隙,阻碍了水分和土体接触,降低了土体亲水性。并且大量碳酸钙沉淀物汇聚形成胶结点,连接周围片状结构和单粒体,固结多个土壤颗粒形成骨料,提高了土体密实性,增强了土壤颗粒之间的连接能力和土体结构强度。在图 11(d)中可清楚地看到,采用大豆脲酶诱导的碳酸钙晶体形貌是体积微小的球形或半球形。

如图 12(a)所示,素土样主要成分是石英、钠长石、白云母、蒙脱石及少量方解石。土样经 EICP 处理后,衍射图谱见图 12(b),相较于素膨胀土,改良土主要成分未发生改变,但方解石衍射强度明显增大,改良土方解石含量从 5.28% 增长至 12.67%。由此也验证 EICP 技术中有碳酸钙生成的事实,且生成的碳酸钙主要是以方解石晶体的形式存在。同时可以看到蒙脱石的含量相对减少,原因是产生的碳酸钙晶体附着在蒙脱石表面,阻止了水分进入土体基质,并且碳酸钙胶结物限制了原子平面的特征衍射^[26],使得 XRD 衍射图中蒙脱石含量减少,膨胀土胀缩性得到改善。

3 结论

基于室内改良试验,采用 EICP 技术对弱膨胀土进行改良,研究了 EICP 改良膨胀土的物理力学性质。得到以下结论:

1) EICP 反应液能显著降低膨胀土自由膨胀率,各组分在脲酶浓度为 100 g/L,初始 Ca^{2+} 浓度为 1 mol/L,酶胶比为 1:1,尿钙比为 1.5,养护时间为 7 d 时,碳酸钙生成率最高,改良土自由膨胀率最小,并以此确定 EICP 反应液最佳配比和养护时间。

2) 在最佳反应液配比下,不同掺量 EICP 反应液改良土膨胀性及力学特性均优于素膨胀土。最优掺量 20% EICP 反应液改良土 48 h 后无荷载膨胀率降低 72.7%;无侧限抗压强度提高 49.6%,且土体抗剪强度在不同围压下均最大,抗剪强度指标 c 值提高 37.8%;试验完成后的试件碳酸钙生成率平均值提高 67%。掺量过高时,土体无荷载膨胀率变化不大,土体强度以及碳酸钙生成率有所降低。

3) EICP 反应液诱导产生碳酸钙晶体经沉淀后,通过附着在土颗粒表面,胶结土壤骨架结构以及填充颗粒间孔隙,阻碍土体与水分接触,提高土体密实性和黏结强度,改善了土体物理力学性能。

参考文献

[1] 冷挺,唐朝生,徐丹,等. 膨胀土工程地质特性研究进

展[J]. 工程地质学报, 2018, 26(1): 112-128.

LENG T, TANG C S, XU D, et al. Advance on the engineering geological characteristics of expansive soil [J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(1): 112-128. (in Chinese)

[2] 郑健龙, 杨和平. 公路膨胀土工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2009.

ZHENG J L, YANG H P. Expansive soil engineering in highway [M]. Beijing: China Communications Press, 2009. (in Chinese)

[3] 胡雪松, 唐朝晖, 万佳文, 等. 煤矸石换填膨胀土路基的沉降研究[J]. 地质科技情报, 2017, 36(6): 261-266.

HU X S, TANG Z H, WAN J W, et al. Replacing expansive soil with coal gangue in subgrade settlement [J]. Geological Science and Technology Information, 2017, 36(6): 261-266. (in Chinese)

[4] 符策岭, 曾召田, 莫红艳, 等. 石灰改良膨胀土的工程特性试验研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2019, 44(2): 524-533.

FU C L, ZENG Z T, MO H Y, et al. Experimental study on the engineering characteristics of the improved expansive soils with lime [J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2019, 44(2): 524-533. (in Chinese)

[5] 何稼, 楚剑, 刘汉龙, 等. 微生物岩土技术的研究进展[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(4): 643-653.

HE J, CHU J, LIU H L, et al. Research advances in biogeotechnologies [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(4): 643-653. (in Chinese)

[6] HAMED KHODADADI T, KAVAZANJIAN E, VAN PAASSEN L, et al. Bio-grout materials: A review [C]//Grouting 2017. Honolulu, Hawaii. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2017: 1-12.

[7] ALSHIBLI U, ALSAIDI M S, AKHTAR A, et al. Enzyme induced calcite precipitation (EICP) for engineering application by using plant based biomaterials [J]. Materials Science Forum, 2022, 1059: 189-201.

[8] OLIVEIRA P J V, FREITAS L D, CARMONA J P S F. Effect of soil type on the enzymatic calcium carbonate precipitation process used for soil improvement [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2016, 29(4): 04016263.

[9] 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.

CAO G H, LIU S Y, YU J, et al. Enzyme-induced calcium carbonate precipitation (EICP) and its application in geotechnical engineering [J]. Geological Journal of China Universities, 2021, 27(6): 754-768. (in Chinese)

[10] 喻成成, 卢正, 姚海林, 等. 微生物诱导碳酸钙沉淀改

- 性膨胀土试验研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(Sup1): 157-163, 172.
- YU C C, LU Z, YAO H L, et al. Experimental study of modifying expansive soils using microbial induced calcite precipitation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(Sup1): 157-163, 172. (in Chinese)
- [11] WEN K J, LI Y, AMINI F, et al. Impact of bacteria and urease concentration on precipitation kinetics and crystal morphology of calcium carbonate [J]. *Acta Geotechnica*, 2020, 15(1): 17-27.
- [12] CUI M J, LAI H J, WU S F, et al. Comparison of soil improvement methods using crude soybean enzyme, bacterial enzyme or bacteria-induced carbonate precipitation [J]. *Géotechnique*, 2022: 1-9.
- [13] 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.
- ZHANG Q, YE W M, LIU Z R, et al. Advances in soil cementation by biologically induced calcium carbonate precipitation [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(2): 345-357. (in Chinese)
- [14] 刘汉龙, 肖鹏, 肖杨, 等. 微生物岩土技术及其应用研究新进展[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2019, 41(1): 1-14.
- LIU H L, XIAO P, XIAO Y, et al. State-of-the-art review of biogeotechnology and its engineering applications [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2019, 41(1): 1-14. (in Chinese)
- [15] QABANY A A, SOGA K, SANTAMARINA C. Factors affecting efficiency of microbially induced calcite precipitation [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2012, 138(8): 992-1001.
- [16] 原华, 刘康, 原耀楠, 等. 大豆脲酶诱导碳酸钙沉淀的多因素影响分析[J]. 人工晶体学报, 2021, 50(2): 375-380.
- YUAN H, LIU K, YUAN Y N, et al. Affecting analysis of multi-factors on soybean urease-induced calcium carbonate precipitation [J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2021, 50(2): 375-380. (in Chinese)
- [17] 郎钞棚. 豆粉浸出液促沉碳酸钙(SUICP)改良膨胀土物理力学特性研究[D]. 南昌: 东华理工大学, 2021.
- LANG C P. Study on physical and mechanical properties of expansive soil improved by soybean leaching solution induced calcium carbonate (SUICP) [D]. Nanchang: East China University of Technology, 2021. (in Chinese)
- [18] 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.
- WU M, GAO Y F, HE J, et al. Laboratory study on use of soybean urease-induced calcium carbonate precipitation with xanthan gum for stabilization of desert sand against wind erosion [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, 42(10): 1914-1921. (in Chinese)
- [19] GAO Y F, MENG H, HE J, et al. Field experiment on inhibition of wind erosion in aeolian sandy soil by calcium carbonate deposition induced by urease extracted from soybean [J]. *Journal of Central South University*, 2020, 27(11): 3320-3333.
- [20] 张建伟, 王小锯, 李贝贝, 等. EICP-木质素联合固化粉土的试验研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2021, 43(2): 201-202.
- ZHANG J W, WANG X J, LI B B, et al. Experimental study on EICP- lignin combined solidification of silt [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2021, 43(2): 201-202. (in Chinese)
- [21] BAIG MOGHAL A ALI, LATEEF M A, SAYEED MOHAMMED SABU, et al. Heavy metal immobilization studies and enhancement in geotechnical properties of cohesive soils by EICP technique [J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(21): 7568.
- [22] 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.
- [23] 公路土工试验规程: JTG 3430—2020 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2020.
- Test methods of soils for highway engineering: JTG 3430—2020 [S]. Beijing: China Communications Press, 2020. (in Chinese)
- [24] 膨胀土地区建筑技术规范: GB 50112—2013 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- Technical code for building in expansive soil regions: GB 50112—2013 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013. (in Chinese)
- [25] 赵春吉. 水泥改性强膨胀土的试验及改性机理研究[D]. 辽宁 大连: 大连理工大学, 2015.
- ZHAO C J. Experimental study on cement modified expansive soil and its modification mechanism [D]. Dalian, Liaoning: Dalian University of Technology, 2015. (in Chinese)
- [26] ALAZIGHA D P, INDRARATNA B, VINOD J S, et al. The swelling behaviour of lignosulfonate-treated expansive soil [J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, 2016, 169(3): 182-193.