

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.047



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



微生物诱导碳酸钙沉积固化三峡库区黏性 紫色土试验研究

夏振尧^{a,b,c},董欣慧^a,胡欢^a,张伦^a,朱志恩^a,闫茹冰^a,刘畅^a,徐萌苒^a,肖海^{a,b,c}

(三峡大学 a.三峡库区地质灾害教育部重点实验室; b.土木与建筑学院; c.三峡库区生态环境教育部工程研究中心,湖北宜昌 443002)

摘要:三峡库区自然灾害频发,微生物诱导碳酸钙沉积(MICP)技术是一种具有能耗低、无污染且可持续等优点的土体加固技术。黏性紫色土是三峡库区主要土壤类型,土壤孔隙较小,而 MICP 对其加固效果尚不明确。设置不同巴氏芽孢杆菌菌液浓度(OD_{600} 为 0、0.5、1.0、1.5)和胶结液浓度(0、0.5、1.0、1.5、2.0 mol/L)组合,对土壤试样进行 MICP 固化处理。开展不固结不排水三轴剪切试验,研究各试样的应力-应变关系、弹性模量和抗剪强度指标(黏聚力、内摩擦角),并利用扫描电镜测试分析其微观结构。结果表明:固定菌液浓度或胶结液浓度时,抗剪强度、弹性模量及黏聚力均随胶结液浓度或菌液浓度的增加呈先增后减的变化趋势,最适菌液与胶结液浓度组合为菌液 $OD_{600}=1.0$ 和胶结液 1.5 mol/L。平均内摩擦角随胶结液浓度的增加呈先增后减趋势,而胶结液浓度不变时,在菌液浓度 $OD_{600}=0.5$ 或 1.0 时达到最高。固化后试样抗剪强度、弹性模量、黏聚力及内摩擦角最大分别提高 62.59%、50.18%、119.50% 和 10.33% (226.00 kPa、6.44 MPa、48.30 kPa 和 26.70°)。通过扫描电镜观察发现 MICP 加固紫色土形成了大量球状碳酸钙晶体和片状碳酸钙晶体,分布于土壤颗粒表面和间隙中起胶结作用并增加土颗粒表面粗糙度,从而提升了土的黏聚力和内摩擦角。MICP 可以有效提高紫色土的强度,在菌液浓度为 $OD_{600}=1.0$ 和胶结液浓度 1.5 mol/L 组合时加固效果最优。

关键词:微生物诱导碳酸钙沉积;土壤加固;黏性紫色土;微观结构;三峡库区

中图分类号: TU446 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2024)05-0091-10

收稿日期: 2022-12-26

基金项目: 国家自然科学基金(U2040207);三峡库区生态环境教育部工程研究中心开放研究基金(KF2022-13);土木工程防灾减灾湖北省引智创新示范基地(2021EJD026);中国三峡建设管理有限公司科研项目(BHT/0869)

作者简介: 夏振尧(1981-),男,博士,教授,博士生导师,主要从事生物岩土水土治理研究,E-mail: xzy_yc@126.com。

肖海(通信作者),男,博士,副教授,博士生导师,E-mail: oceanshawctgu@163.com。

Received: 2022-12-26

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. U2040207); Open Fund of Engineering Research Center of Environment in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education (No. KF2022-13), Hubei Talent Introduction and Innovation Demonstration Base for Civil Engineering Disaster Prevention and Mitigation (No. 2021EJD026); Scientific Research Project of China Three Gorges Construction Management Co., Ltd. (No. BHT/0869)

Author brief: XIA Zhenyao (1981-), PhD, professor, doctoral supervisor, main research interests: geotechnical soil and water management, E-mail: xzy_yc@126.com.

XIAO Hai (corresponding author), PhD, associate professor, doctoral supervisor, E-mail: oceanshawctgu@163.com.

Performance of microbial induced carbonate precipitation (MICP) for reinforcing cohesive purple soil in the Three Gorges Reservoir Area

XIA Zhenyao^{a,b,c}, DONG Xinhui^a, HU Huan^a, ZHANG Lun^a, ZHU Zhien^a,
YAN Rubing^a, LIU Chang^a, XU Mengran^a, XIAO Hai^{a,b,c}

(a. Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area, Ministry of Education; b. College of Civil Engineering & Architecture; c. Engineering Research Center of Eco-environment in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, China Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei, P. R. China)

Abstract: Three Gorges Reservoir Area is prone to natural disasters; microbial induced carbonate precipitation (MICP) is a soil consolidation technique with the advantages of low energy consumption, less pollution and great sustainability. The clayey purple soil is the main soil type in the Three Gorges Reservoir Area with small soil pores, and the effect of MICP on its reinforcement is unclear. In this study, the MICP-cured soil specimens, which conformed of different *Bacillus* bacterium concentrations ($OD_{600}=0, 0.5, 1.0, 1.5$) and curing fluid concentrations (0, 0.5, 1.0, 1.5 and 2.0 mol/L) were subjected to unconsolidated undrained triaxial shear tests to examine the stress-strain relationship, elastic modulus and shear strength index (cohesion and internal friction angle) while their microstructures were analyzed by SEM tests. The results indicated that the shear strength, elastic modulus and cohesion increased and then decreased with the increase of the bacterium concentration or the curing fluid concentration under the same curing fluid concentration or the same bacterium concentration. The best combination existed when bacterium concentration is $OD_{600}=1.0$ and the concentration of cement solution is 1.5 mol/L. The average internal friction angle was characterized as increase followed by decrease with the increase of curing fluid concentration, the highest value of internal friction angle was obtained at the bacterium concentration with $OD_{600}=0.5$ or $OD_{600}=1.0$ under the same curing fluid concentration. Compared with no treatment, the maximum values of the cured specimens were increased by 62.59%, 50.18%, 119.50%, and 10.33% (226.00 kPa, 6.44 MPa, 48.30 kPa and 26.70°), respectively. The SEM revealed that the MICP-reinforced purple soil formed a large number of spherical and flaky calcium carbonate crystals, which distributed on the surface and in the interstices of soil particles. The crystals present on the surface of soil particles increased the surface roughness and soil particle size, which in turn increased the friction angle of the soil, while the crystals present in the interstices of soil particles produced cementation, contributing to the cohesion. The MICP can effectively improve the strength of cohesive purple soil, and the optimal reinforce performance occurred at the combination of the bacterium concentration with $OD_{600}=1.0$ and curing fluid concentrations with 1.5 mol/L.

Keywords: microbial induced carbonate precipitation (MICP); soil reinforcement; cohesive purple soil; microstructure; Three Gorges Reservoir Area

微生物诱导碳酸钙沉积 (Microbial Induced Carbonate Precipitation, MICP) 技术是利用自然界中可以产生脲酶分解尿素的某类细菌, 通过为之提供丰富的钙源及氮源的营养盐, 快速析出具有优异胶结作用的方解石型碳酸钙结晶^[1]。该技术具有控制简单、经济高效等优势, 自被提出以来, 已经广泛应用于文物的裂缝修复、土壤重金属污染处理、岩土体防渗、防风固沙和减少侵蚀^[2]等领域, 尤其是在岩土体加固领域取得了大量成果。

黏性紫色土为三峡库区的主要土壤类型, 其孔

径尺寸和土颗粒大小介于砂土和粉土之间^[3]。该土壤抗蚀性较差, 土层浅薄, 库区自然灾害频发, 如滑坡、崩塌、滚石、泥石流等, 自然状态下库区植被覆盖率低、水土流失现象非常严重^[4], 严重威胁三峡库区的安全运行, 因此, 有必要对其进行加固处理以达到防灾减灾的目的。三峡库区是长江上游重要的生态屏障区, 但随着移民工程以及社会经济的发展, 人类活动对其的破坏逐渐凸显, 脆弱性问题越发严重^[5], 因此, 对环境无害的土体加固技术十分重要, 而MICP技术是一种具有能耗低、无污染且可持

续优点的土体加固技术,将该技术应用于三峡库区将有利于减少自然灾害发生的频率且不会对周围环境造成不良影响。

MICP目前应用于砂土加固方面较多且效果较好^[6-8],但黏性土颗粒粒径较小,渗透性相对于砂土较小,不利于细菌的移动,MICP加固土体难度更大,加固效果也不明确。目前关于MICP加固黏性紫色土研究较少,相关研究主要集中于MICP加固技术对其崩解性的改善效果及不同固化次数后固化效果的变化规律^[3,9-10],胶结液浓度和菌液浓度对MICP加固效果影响很大^[11-12],但其对黏性紫色土影响规律尚不明确。

因此,笔者以三峡库区典型土壤黏性紫色土为研究对象进行MICP加固,开展不固结不排水剪切试验,结合扫描电镜探究胶结液浓度、菌液浓度对MICP固化三峡库区黏性紫色土效果的影响与微观机理,为加固三峡库区紫色土、降低自然灾害发生概率提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

以三峡库区典型土壤紫色土作为试验土壤。所用紫色土取自宜昌市秭归县(30°38'N~31°11'N; 110°18'E~111°00'E),土壤取回自然风干后过5 mm筛并去除杂质。经测土壤粒径>0.075 mm的颗粒含量占73.60%,碳酸钙含量为0.15%,pH值为6.91,有机质含量为6.75 g/kg,液限和塑限分别为33.70%和19.70%,塑性指数为14.00(>10)。根据《土的工程分类标准》(GB/T 50145—2007),所用土壤属于黏性土。

MICP试验过程中需要产生脲酶的微生物和提供氮源以及钙源的胶结液。所用菌种为具有高脲酶活性的巴氏芽孢杆菌(*Sporosarcina pasteurii*, ATCC11859,湖北泽川科技有限公司),是一种长2~3 μm的杆状好氧革兰氏阳性细菌,以冻干粉形式真空保存于冻干管内。所用胶结溶液是摩尔浓度比为1:1的氯化钙(CaCl₂)和尿素(CO(NH₂)₂)混合溶液。

1.2 细菌培养

液体培养基成分为15.0 g/L胰蛋白胨、5.0 g/L大豆蛋白胨、20.0 g/L尿素、5.0 g/L NaCl。分别测量不同培养时长的细菌光密度和电导率以获得每隔4 h时间点的细菌微生物数量(OD₆₀₀)和脲酶活性。从图1可以发现,细菌生长大致经历了调整期、对数期、稳定期和衰亡期4个阶段,培养24 h后细菌生长进入相对稳定期,在48 h时微生物数量、脲酶

活性达到峰值,对应OD₆₀₀值2.122,脲酶活性5.835 mmol/min。因此,试验中选用培养48 h的巴氏芽孢杆菌,微生物数量和脲酶活性均达到了最高值,有利于诱导碳酸钙的沉淀。

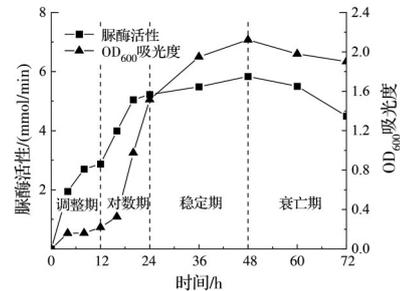


图1 微生物生长过程曲线图

Fig. 1 Microbial growth process curves

1.3 试验设计与样品形成过程

为研究胶结液和菌液浓度对MICP固化三峡库区黏性紫色土效果的影响,设置0.5、1.0、1.5、2.0 mol/L共4个胶结液浓度水平和OD₆₀₀=0.5、OD₆₀₀=1.0、OD₆₀₀=1.5共3个菌液浓度水平,两者正交处理,并以未处理试样为对照(CK)。为便于理解,将OD₆₀₀=0.5胶结液浓度0.5 mol/L试样编号为Z0.5-0.5,OD₆₀₀=0.5胶结液浓度1.0 mol/L试样编号为Z0.5-1.0,以此类推,特别地,OD₆₀₀=0胶结液浓度0 mol/L为CK。含水率为20%时处在紫色土液限和塑限之间,也是自然状态下常见的含水率,因此,控制紫色土的初始含水率为20%。目前的固化方式主要为拌和法、单向注浆法、分步注浆法、浸泡法。拌和法^[13]相对加固均匀,但一次性拌和菌液及胶结液导致固化后的土体强度低。单向注浆法^[14]由于混合液会立即进行反应,注入部分产生积累的碳酸钙较多,对于土颗粒粒径较小的粉土或黏土,较低的渗透性(远小于砂土)可能导致试验刚开始时试样端部就堵塞^[15],浆液难以渗入更深处,更易出现注浆困难、加固效果不均匀等现象。分步注浆法由于后注入的胶结液会将先注入土体中的脲酶菌或脲酶冲走^[16],对碳酸钙沉淀效率产生负面影响,且反应液用量较大,容易造成浪费^[17]。而Zhao等^[18]研究发现,使用浸泡法可以增加微生物以及胶结物质与试样的接触面积,且土工织物模具的纤维结构可以有效地增加化学物质的渗透^[19],促进反应进程并防止土样在溶液中崩解,因此,选取浸泡法,并在浸泡时使用土工布包裹试样。

使用培养基培养至48 h得到细菌悬浊液,加入无菌纯水稀释得到相应OD₆₀₀值。参照前人研究^[20],将初始含水率和土壤容重分别控制为20%和1.48 g/cm³,并按照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—

2019)将土样装填于制样器中。在制样器内分3层击实,每层接触面做刨毛处理,土样直径和高度分别为3.91、8 cm,用饱和缸真空饱和12 h后,存放于保湿缸中。用一层1.5 mm厚的黑色土工布包裹三轴试样,上表面不封口,且高出土体上表面约1 cm,每4个一组放于浸泡容器(透明高硬化塑料容器,10 cm×10 cm×10 cm)中,浸泡处理时将整个容器放入温度为25℃的恒温箱中以保证整个生化反应温度一致。取过量的菌液500 mL加入浸泡容器,保证试样全部淹没,在浸泡4 h后将菌液倒出后加入350 mL尿素-CaCl₂胶结液,然后加入150 mL菌液,浸泡20 h。浸泡试验通过先使用纯菌液浸泡试样,再使用菌液+胶结液,保证了巴氏芽孢杆菌菌液能更多地渗入试样内部土颗粒间隙中,提高试样胶结程度。浸泡结束后,放置于室内自然风干3 d进一步充分反应,完成上述步骤4 d后,再进行不固结不排水剪试验。

1.4 试验过程与方法

采用应变控制式三轴仪(TSZ30-2.0,南京土壤仪器厂)开展不固结不排水剪切试验。试验净围压设置为100、200、300 kPa,以剪切速率0.8 mm/min开展试验,直至最大轴向应变达到20%或试样破坏时停止试验。剪切试验结束后,将试样大致还原,然后将试样分为上、中、下三份切割,并分别放入105℃烘箱中烘干。将烘干后的试样进行研磨,随机取出10 g试样通过酸洗法测定试样中碳酸钙含量^[21]。具体方法为:用过量1.0 mol/L盐酸浸泡12 h至完全溶解且无明显气泡产生,加入蒸馏水并静置沉淀24 h以上后再使用移液枪吸出上清液,确保试样质量不损失,然后将试样放入烘箱中烘干至恒重。

此外,对未加固土样及加固后三轴土样外表(上表面、侧表面)碳酸钙覆盖层及试样内部土体进

行取样并使用分辨率为1.0 nm的扫描电子显微镜(JSM7500F型,日本电子)进行扫描以观测微观结构。烘干采集的试样,选取1 cm²片状烘干三轴土样做喷金处理后进行扫描电镜微观观测。

1.5 数据处理

所有试样均为最大轴向应变达到20%时停止试验,未出现提前破坏现象。参考《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019),由轴向应变为20%时对应的偏应力确定抗剪强度。通过选取应力-应变曲线上弹性变形阶段的数据进行拟合,计算拟合直线的斜率即为弹性模量。以 $(\sigma_1 + \sigma_3)/2$ 为圆心、 $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$ 为半径绘制不同围压下莫尔应力圆,得到剪切强度线,进一步确定试样内摩擦角 φ 和黏聚力 c 。

碳酸钙百分含量表示碳酸钙生成质量与原始质量之比,计为 $M(\%)$,见式(1)。

$$M = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100 \quad (1)$$

式中: M_1 为待测土样质量,g; M_2 为蒸馏水洗净后烘干土质量,g。

采用SPSS 24软件进行数据处理和显著性差异分析。

2 结果

2.1 碳酸钙含量

经MICP处理后试样平均碳酸钙含量较土壤中原有碳酸钙含量增加8~34倍,表明MICP处理能够在试样中生成大量碳酸钙。菌液浓度和胶结液浓度对碳酸钙含量影响较大(图2)。同一菌液浓度下,随着胶结液浓度的增加,试样平均碳酸钙含量呈现先增加后减少的变化规律,在胶结液浓度为1.5 mol/L时达到最大值。同一胶结液浓度下,随着菌液浓度增加,试样平均碳酸钙含量也呈现先增

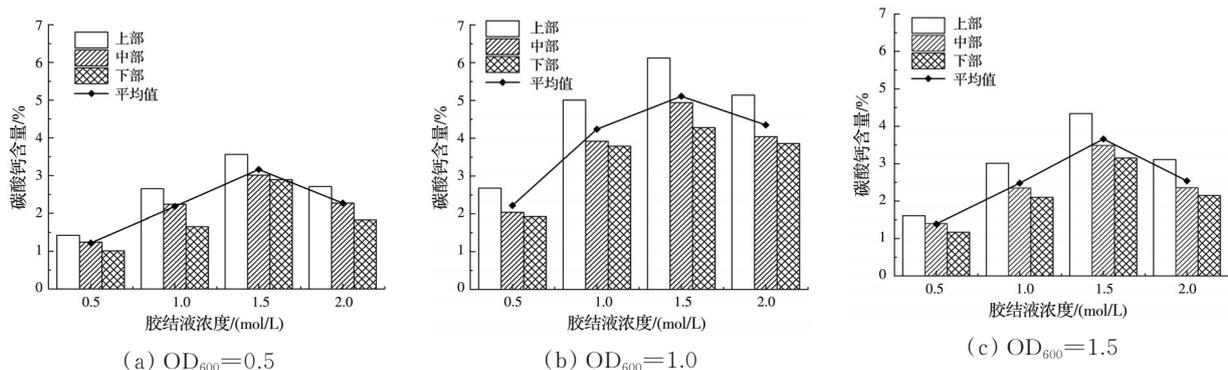


图2 试样平均碳酸钙含量与胶结液、菌液浓度关系图

Fig. 2 Average calcium carbonate content of specimens in relation to the concentration of cementation solution and bacterial solution

加后减少的变化趋势,在菌液 OD₆₀₀ 值为 1.0 时达到最大值。试样不同部位碳酸钙含量存在差异,呈现上部>中部>下部的变化规律,表明碳酸钙在试样中分布并不均匀。

2.2 菌液-胶结液浓度对力学特性的影响

2.2.1 应力与应变关系

空白对照组试样的应力-应变曲线总体表现为硬化型^[3,22],偏应力随轴向应变增加不断上升,大致先呈线性增加(初始屈服阶段),后增大趋势逐渐变缓,其应变硬化模量相对较小(应力强化阶段),同时随着围压的增加,应力-应变曲线上移(图 3)。经 MICP 加固后,各围压条件下试样的应力-应变曲线变化规律与空白对照基本一致(图 4),表明 MICP 加固并未影响试样应力-应变变化规律和破坏模式。与空白对照相比,经 MICP 处理后的试样应力-应变曲线均上移,表明 MICP 处理后试样强度均得到提高。

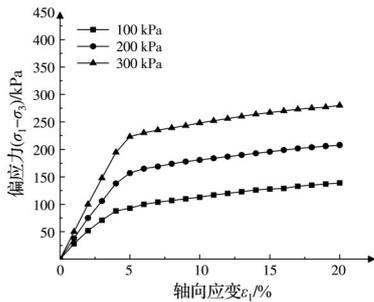


图 3 未经 MICP 处理的原状紫色土应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves of in-situ purple soil without MICP treatment

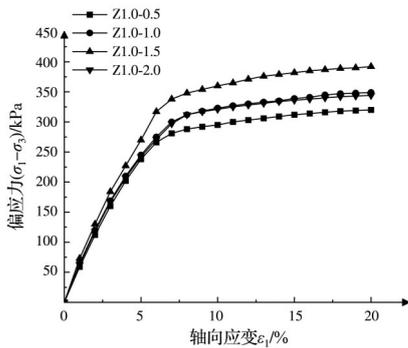


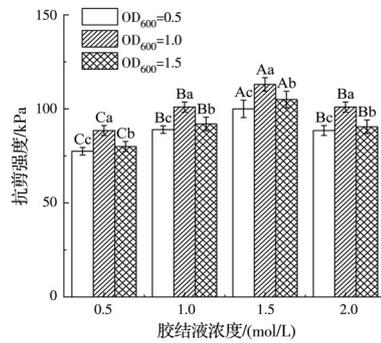
图 4 围压 300 kPa 条件下 OD₆₀₀=1.0 应力-应变曲线

Fig. 4 OD₆₀₀=1.0 stress-strain curves under 300 kPa confining pressure

2.2.2 抗剪强度与胶结液-菌液浓度关系

原状紫色土试样抗剪强度在 100、200、300 kPa 围压下分别为 69.50、104.00、140.00 kPa。各个围压下变化规律相同,以围压 100 kPa 为例,在菌液浓度 OD₆₀₀ 值为 0.5、1.0、1.5 时,各试样的抗剪强度分

别是 77.50~100.00、88.50~113.00、80.00~105.00 kPa;而在胶结液浓度为 0.5、1.0、1.5、2.0 mol/L 时,各试样抗剪强度分别为 77.50~88.50、89.00~101.00、100.00~113.00、88.50~101.00 kPa,表明经 MICP 处理后各试样抗剪强度均显著高于空白对照(图 5)。同一菌液浓度下,随着胶结液浓度的增加,试样抗剪强度呈现先增加后减小的变化规律,在胶结液浓度为 1.5 mol/L 时达到最大值。同一胶结液浓度下,随着菌液浓度增加,试样抗剪强度也呈现先增加后减小的变化趋势,在菌液 OD₆₀₀ 值为 1.0 时达到最大值。经 MICP 加固后,试样抗剪强度增加 11.51%~62.59%,增加最少和最多的组合分别为 Z0.5-0.5 和 Z1.0-1.5。



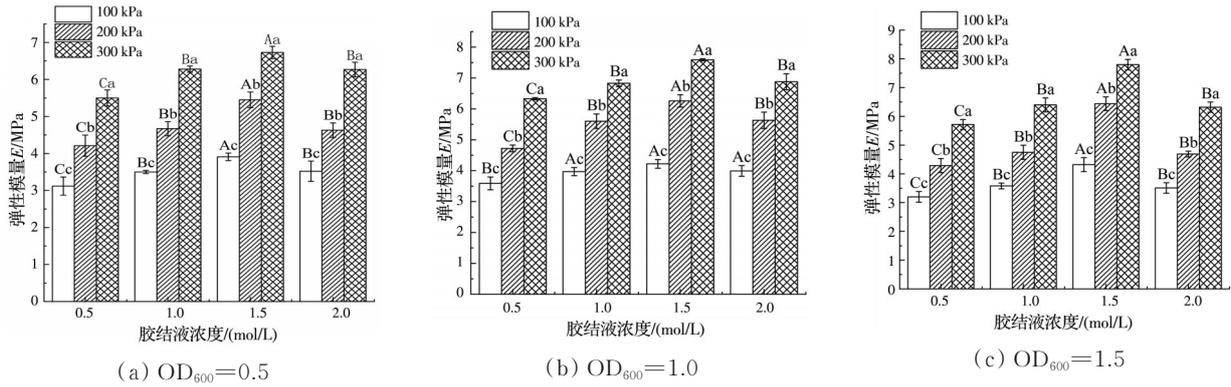
注:大写字母表示同一菌液浓度不同胶结液浓度组间差异性;小写字母表示同一胶结液浓度不同菌液浓度组间差异性。

图 5 试样抗剪强度与胶结液、菌液浓度关系图

Fig. 5 Relationship between the shear strength of the sample and the cementation solution and bacterial solution

2.2.3 弹性模量

在围压 100、200、300 kPa 下,原状紫色土弹性模量为 2.81、3.92、5.10 MPa,试验结果表明紫色土的弹性模量随围压的上升而增大(图 6)。各个围压下变化规律相同,以围压 100 kPa 为例,在菌液浓度 OD₆₀₀ 值为 0.5、1.0、1.5 时,各试样的弹性模量分别是 3.12~3.91、3.59~4.22、3.20~4.32 MPa;而在胶结液浓度为 0.5、1.0、1.5、2.0 mol/L 时,各试样弹性模量分别为 3.12~3.59、3.50~3.97、3.91~4.32、3.51~3.99 MPa,表明经 MICP 处理后各试样弹性模量均显著高于空白对照。同一菌液浓度下,随着胶结液浓度的增加,试样弹性模量呈现先增加后减小的变化规律,在胶结液浓度为 1.5 mol/L 时达到最大值。同一胶结液浓度下,随着菌液浓度增加,试样弹性模量也呈现先增加后减小的变化趋势,在 OD₆₀₀=1.0 时对紫色土试样的弹性模量提升最明显。经 MICP 加固后,试样弹性模量增加 11.03%~50.18%,增加最少和最多的组合分别为 Z0.5-0.5 和 Z1.0-1.5。



注:大写字母表示同一菌液浓度不同胶结液浓度组间差异性;小写字母表示同一胶结液浓度不同菌液浓度组间差异性

图 6 不同菌液-胶结液浓度下各试样弹性模量变化图

Fig. 6 Variation of modulus of elasticity of each specimen at different concentrations and bacterial solutions

2.2.4 抗剪强度指标

原状土的黏聚力为 22.00 kPa。在菌液浓度为 0.5、1.0、1.5 时,各试样的黏聚力分别是 24.00~42.00、38.40~48.30、28.60~46.20 kPa;而在胶结液浓度为 0.5、1.0、1.5、2.0 mol/L 时,各试样黏聚力分别为 24.00~38.40、35.40~42.20、42.00~48.30、35.20~42.10 kPa,表明经 MICP 处理后各试样黏聚力均显著高于空白对照(图 7)。同一菌液浓度下,随着胶结液浓度的增加,试样黏聚力呈现先增加后减小的变化规律,在胶结液浓度为 1.5 mol/L 时达到最大值。同一胶结液浓度下,随着菌液浓度增加,试样黏聚力也呈现先增加后减小的变化趋势,在菌液 OD₆₀₀ 值为 1.0 时达到最大值。经 MICP 加固后,试样黏聚力增加 9.10%~119.50%,增加最少和最多的组合分别为 Z0.5-0.5 和 Z1.0-1.5。

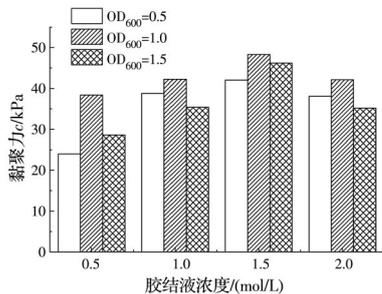


图 7 不同处理下各试样黏聚力变化

Fig. 7 Changes in cohesion of each specimen under different treatments

未加固的原状土试样内摩擦角为 24.20°,在菌液浓度为 0.5、1.0、1.5 时,各试样的内摩擦角分别是 24.80°~26.70°、24.90°~25.50°、24.80°~25.40°;而在胶结液浓度 OD₆₀₀ 值为 0.5、1.0、1.5、2.0 mol/L 时,各试样内摩擦角分别为 24.80°~25.50°、25.10°~25.50°、24.90°~26.70°、25.00°~

25.50°,表明经 MICP 处理后各试样内摩擦角均略高于空白对照(图 8)。同一菌液浓度下,随着胶结液浓度的增加,试样内摩擦角基本呈现先增加后减小的变化规律,在胶结液浓度为 1.5 mol/L 时达到最大值。同一胶结液浓度下,在胶结液浓度为 1.0、1.5 mol/L 时,内摩擦角在菌液 OD₆₀₀=0.5 时最大,而在胶结液浓度为 0.5 mol/L 时,内摩擦角在菌液 OD₆₀₀=1.0 时达到最大。经 MICP 加固后,试样内摩擦角增加 2.48%~10.33%,增加最少和最多的组合分别为 Z0.5-0.5 和 Z0.5-1.5。

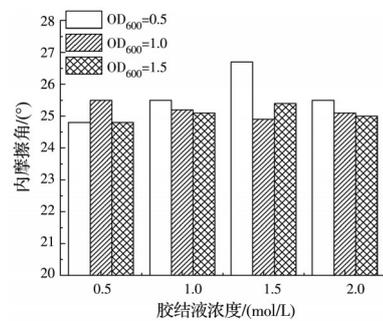


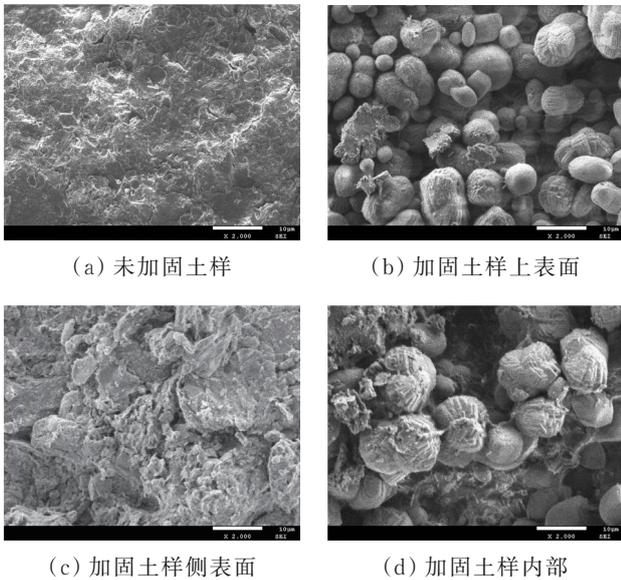
图 8 不同处理下各试样内摩擦角变化

Fig. 8 Variation of internal friction angle of each specimen under different treatments

2.3 微观特征

未加固土样表面光滑平整,与加固前相比,加固后土样结构发生明显变化,各部位均观察到明显的碳酸钙沉淀(图 9)。加固土样上表面发现大量球状的碳酸钙晶体,它们彼此相互交错,不断堆积接触,形成多层碳酸钙晶体叠加覆盖(图 9(b))。加固土样侧表面可以明显看到相对尺寸更小片状碳酸钙晶体零散地附着在土颗粒表面(图 9(c))。随着固化反应的进行,加固土样内部则生成了大约 7~10 μm 的球状碳酸钙晶体和 1~2 μm 的片状碳酸钙晶体,晶体表面不是很光滑,且球状多样(图 9(d))。土壤孔隙被球状碳酸钙晶体填充,同时片状碳酸钙

晶体覆盖在土颗粒和球状碳酸钙晶体表面,两种晶型碳酸钙和土颗粒共同胶结,从而相互咬合以此提高土体整体性和稳定性。



(a) 未加固土样

(b) 加固土样上表面

(c) 加固土样侧表面

(d) 加固土样内部

图 9 土样加固前后不同位置 2 000 倍下 SEM 图

Fig. 9 SEM images at 2 000×at different locations before and after reinforcement of soil samples

3 讨论

试样碳酸钙含量随着胶结液浓度和菌液浓度的增加呈先增后减的趋势,这可能是由于菌液浓度在较低时细菌数量不足,生成的碳酸钙较少;菌液浓度过高时细菌数量过剩,且会消耗更多的物质能量,碳酸钙产量不再增加反而会减少。此外,在胶结液浓度过高(2.0 mol/L)时,相较 1.5 mol/L 多个指标数值上要小,可能是由于 Ca^{2+} 离子浓度的提高会抑制微生物活性,碳酸钙转化率大大降低^[23-24]。试样碳酸钙含量从上至下逐渐减少,这可能是由于试样上表面直接接触溶液,并在重力作用下向下渗透,上部孔隙生成的碳酸钙易堵塞孔隙而导致溶液堆积,中下部碳酸钙含量越来越少。随着胶结液浓度和菌液浓度的增加,加固后土样抗剪强度和弹性模量均呈现先增后减趋势,这与 Soon 等^[25]得出的试样的抗剪强度随胶结液升高先增后减的结论较一致,然而 Soon 等得到的最佳胶结液浓度为 0.5 mol/L,小于本研究的 1.5 mol/L,所得结果存在差异可能与试验用菌和加固对象不同有关。笔者所选用的菌种为具有高脲酶活性的巴氏芽孢杆菌,而 Soon 所选用的巨大芽孢杆菌的生长代谢在超过 1.0 mol/L 的胶结液中便会受到盐溶液的抑制^[26],且其选取的土壤为低液限残积粉土,粒径小于紫色土。

加固后黏聚力和内摩擦角均有所提高,黏聚力

较内摩擦角提升明显。这可能是由于土颗粒间隙生成的碳酸钙晶体起胶结作用,从而提高了黏聚力;土颗粒表面的碳酸钙晶体提高了土颗粒粗糙程度,因而提高土壤内摩擦角^[27]。这与沈泰宇等^[28]得出的所有固化试样的黏聚力增幅远大于内摩擦角、黏聚力在强度提高中占主导的结论类似。在本研究中,黏聚力和内摩擦角均随碳酸钙含量的增加而增加(图 10、图 11)。进一步分析发现, MICP 加固后试样的黏聚力和内摩擦角与碳酸钙含量的关系分别为指数函数关系和线性函数关系,其中内摩擦角与碳酸钙含量关系的斜率仅为 0.111,说明内摩擦角增加幅度有限。产生该现象可能是由于发挥黏结作用和桥接作用的碳酸钙多于起覆膜作用的碳酸钙,因此,抗剪强度、弹性模量及黏聚力的提升规律一致且最优条件相同,而内摩擦角变化规律及最优条件不同。

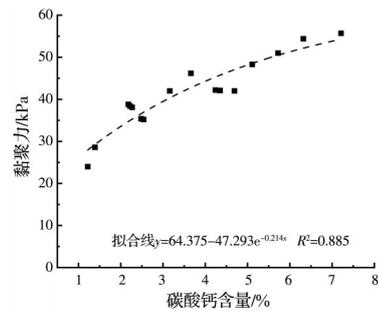


图 10 试样黏聚力-碳酸钙含量关系图

Fig. 10 Sample cohesion-calcium carbonate content relationship graph

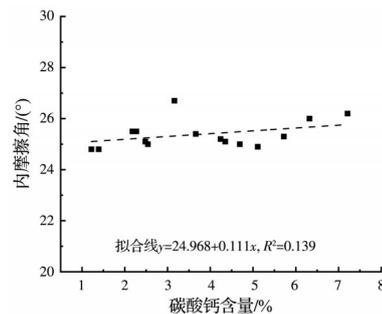


图 11 试样内摩擦角-碳酸钙含量关系图

Fig. 11 Specimen internal friction angle-calcium carbonate content relationship graph

加固后土样侧面与内部生成的碳酸钙晶体形态不同,虽然土工布本身可以促进胶结液进入,但后期随着土工布附近的碳酸钙生成,可能对于胶结液的进入起一定的阻碍作用,使得土样侧面只附着少量尺寸很小的片状碳酸钙结晶,而胶结液可以通过上表面进入土体内部,与土体中的菌液反应共同生成尺寸更大的球状碳酸钙晶体以及片状碳酸钙晶体,而上表面相对土体内部菌液浓度会更高,会

生成更多的球状碳酸钙晶体。随着固化反应的推进,土颗粒间孔隙逐渐被球状碳酸钙晶体和片状碳酸钙晶体的簇状混合物填充,土颗粒与碳酸钙沉淀相互胶结,从而提高了土体强度^[29]。

值得注意的是,本研究中MICP加固紫色土能够提高黏聚力 9.10% (24.00 kPa)~119.50% (48.30 kPa),平均提升 74.00%;内摩擦角提升了 2.48% (24.80°)~10.33% (26.70°),平均提升 4.51%。已有研究中砂土经过MICP加固后内摩擦角可以提升约 12.6%^[30],花岗岩残积土经过固化后黏聚力可以提升约 399%^[31],究其原因,砂土的初始黏聚力较低(接近0)^[32],固化后出现了较大的增幅,而紫色土壤初始黏聚力较大,所以提升幅度小。粉质黏土经固化后黏聚力可提升 22.85%^[33],可能由于二者颗粒粒径不同,且紫色土中黏粒含量对比粉质黏土较少,固化后紫色土沉积在颗粒间接触点(起有效的黏结和桥接作用^[16])的碳酸钙含量较粉质黏土多;其次,文献[33]中对应的T2试样滴注胶结液(25 mL)一次后不再处理,而本研究试样一直浸泡在菌液和胶结液中,反应更加充分;最后,文献中处理时间只养护 3 d,而本研究浸泡 3 d 且养护 4 d,因此,三峡紫色土与一般粉质黏土固化效果不同。

此外,本研究发现使用浸泡法加固颗粒粒径较小、渗透性低的黏性紫色土存在碳酸钙沉积分布不均匀的情况,这可能是由于上表面附近碳酸钙的不断生成阻碍了胶结液向土体内部的进一步扩散造成的。其他学者使用浸泡法、普通注浆法和喷涂法等方法研究也发现碳酸钙沉积分布不均匀现象^[2,11],而不均匀的碳酸钙分布会明显减弱MICP的加固效果。为此,学者们探索通过调节胶结液浓度、脲酶活性和pH值等方法减缓碳酸钙沉积速度和生物絮凝作用^[34-35],从而有利于混合液进入土体深部,使得混合溶液均匀分布于土体内部后再进行反应,以提高土体固化的均匀性^[16]。但目前这些改进方法对MICP加固黏性土过程中碳酸钙不均匀分布问题的改善效果仍需进一步研究,为MICP技术的现场应用提供科学依据。

4 结论

采用巴氏芽孢杆菌对三峡库区常见紫色土进行固化,基于三轴剪切试验和电镜扫描测试,探究胶结液-菌液浓度对微生物固化紫色土力学特性的影响及其微观机理。主要结论如下:

1)加固紫色土的应力-应变曲线呈应变硬化型且无明显峰值,抗剪强度、弹性模量随着胶结液浓度和菌液浓度的增加均呈现先增后减趋势,最适菌

液+胶结液浓度组合为 $OD_{600}=1.0$ +胶结液浓度 1.5 mol/L。

2)试样的内摩擦角增幅均比较小,远小于黏聚力增幅,碳酸钙晶体存在于土颗粒间隙中起胶结作用并提升了土的黏聚力,存在于土颗粒表面增加了土颗粒表面粗糙度和土粒粒径,提高了土的内摩擦角。

3)通过电镜扫描微观观测,试样中生成的碳酸钙晶体为 7~10 μm 的球状碳酸钙晶体和 1~2 μm 的片状碳酸钙晶体两种形态。

参考文献

- [1] DEJONG J T, FRITZGES M B, NÜSSLEIN K. Microbially induced cementation to control sand response to undrained shear [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2006, 132(11): 1381-1392.
- [2] 肖海, 胡欢, 吕广柳, 等. 微生物诱导碳酸钙沉淀影响因素研究进展分析[J]. *三峡大学学报(自然科学版)*, 2022, 44(6): 66-75.
XIAO H, HU H, LYU G L, et al. Research progress on factors of microbial induced calcium carbonate precipitation [J]. *Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences)*, 2022, 44(6): 66-75. (in Chinese)
- [3] 沈泰宇, 汪时机, 薛乐, 等. 微生物沉积碳酸钙固化砂质黏性紫色土试验研究[J]. *岩土力学*, 2019, 40(8): 3115-3124.
SHEN T Y, WANG S J, XUE L, et al. An experimental study of sandy clayey purple soil enhanced through microbial-induced calcite precipitation [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(8): 3115-3124. (in Chinese)
- [4] 陈雅如, 肖文发. 三峡库区土地利用与生态环境变化研究进展[J]. *生态科学*, 2017, 36(6): 213-221.
CHEN Y R, XIAO W F. Research progress on land use and ecological environment change in the Three Gorges Reservoir Area [J]. *Ecological Science*, 2017, 36(6): 213-221. (in Chinese)
- [5] 王兆林, 张露洋, 钟激懿, 等. 三峡库区生态空间脆弱性时空演变特征[J]. *水土保持研究*, 2023, 30(1): 348-355.
WANG Z L, ZHANG L Y, ZHONG W Y, et al. Temporal and spatial evolution characteristics of ecological space vulnerability in Three Gorges Reservoir area [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(1): 348-355. (in Chinese)
- [6] 董博文, 刘士雨, 高歆雨, 等. 海水环境下微生物诱导磷酸盐沉淀加固钙质砂效果评价[J]. *土木与环境工程*

- 学报(中英文), 2020, 42(6): 205-206.
- DONG B W, LIU S Y, GAO X Y, et al. Evaluation of effect of microbial induced struvite precipitation strengthening calcareous sand in seawater environment [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2020, 42(6): 205-206. (in Chinese)
- [7] PAKBAZ M S, BEHZADIPOUR H, GHEZELBASH G R. Evaluation of shear strength parameters of sandy soils upon microbial treatment [J]. *Geomicrobiology Journal*, 2018, 35(8): 721-726.
- [8] VAN PAASSEN L A, GHOSE R, VAN DER LINDEN T J M, et al. Quantifying biomediated ground improvement by ureolysis: Large-scale biogROUT experiment [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2010, 136(12): 1721-1728.
- [9] 黎梭君, 许冲, 李贤, 等. 非饱和砂质黏性紫色土崩解特性及 MICP 加固试验[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(22): 127-135.
- LI A J, XU C, LI X, et al. Experimental investigation on disintegration characteristics and MICP reinforcement of unsaturated sandy clayey purple soil [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(22): 127-135. (in Chinese)
- [10] 沈泰宇. 微生物诱导碳酸钙沉积固化砂质黏性紫色土试验研究[D]. 重庆: 西南大学, 2020.
- SHEN T Y. Experimental study on solidification of sandy cohesive purple soil by microbial-induced calcium carbonate deposition [D]. Chongqing: Southwest University, 2020. (in Chinese)
- [11] 王子文, 魏然, 蔡红, 等. 营养液浓度和微生物活性对 MICP 固化淤泥质土强度的影响[J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2020, 18(6): 486-493.
- WANG Z W, WEI R, CAI H, et al. Effect of nutrient solution concentration and microbial activity on MICP solidified strength of soft clay [J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2020, 18(6): 486-493. (in Chinese)
- [12] 周应征, 管大为, 成亮. 微生物诱导碳酸盐在土体加固中的应用进展[J]. *高校地质学报*, 2021, 27(6): 697-706.
- ZHOU Y Z, GUAN D W, CHENG L. Review on application of microbially induced carbonate precipitation (MICP) for soil stabilization [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2021, 27(6): 697-706. (in Chinese)
- [13] 郭红仙, 李东润, 马瑞男, 等. MICP 拌和固化钙质砂一维固结试验[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2019, 59(8): 593-600.
- GUO H X, LI D R, MA R N, et al. Oedometer test of calcareous sands solidified using the MICP mixing method [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2019, 59(8): 593-600. (in Chinese)
- [14] TOBLER D J, MACLACHLAN E, PHOENIX V R. Microbially mediated plugging of porous media and the impact of differing injection strategies [J]. *Ecological Engineering*, 2012, 42: 270-278.
- [15] 朱效博. 微生物拌入粉土诱导碳酸钙沉积加固效果研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2021.
- ZHU X B. Study on reinforcement effect of calcium carbonate deposition induced by microbial mixing into silt [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2021. (in Chinese)
- [16] 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)
- [17] 欧益希, 方祥位, 申春妮, 等. 颗粒粒径对微生物固化珊瑚砂的影响[J]. *水利与建筑工程学报*, 2016, 14(2): 35-39.
- OU Y X, FANG X W, SHEN C N, et al. Influence of particle sizes of coral sand on bio-cementation [J]. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 2016, 14(2): 35-39. (in Chinese)
- [18] ZHAO Q, LI L, LI C, et al. A full contact flexible mold for preparing samples based on microbial-induced calcite precipitation technology [J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2014, 37(5): 20130090.
- [19] ZHAO Q, LI L, LI C, et al. Factors affecting improvement of engineering properties of MICP-treated soil catalyzed by bacteria and urease [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2014, 26(12): 04014094.
- [20] 汪明星. 重庆山地丘陵区紫色土饱和导水率传递函数研究[D]. 重庆: 西南大学, 2017.
- WANG M X. Study on transfer function of saturated hydraulic conductivity of purple soil in mountainous and hilly areas of Chongqing [D]. Chongqing: Southwest University, 2017. (in Chinese)
- [21] 张宽, 唐朝生, 刘博, 等. 基于新型单相 MICP 技术改性黏性土力学特性的试验研究[J]. *工程地质学报*, 2020, 28(2): 306-316.
- ZHANG K, TANG C S, LIU B, et al. Mechanical behavior of clayey soil treated by new one-phase MICP technique [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2020, 28(2): 306-316. (in Chinese)
- [22] 陈锐, 张星, 郝若愚, 等. 干湿循环下地聚合物固化黄土强度劣化机制与模型研究[J]. *岩土力学*, 2022, 43(5): 1164-1174.
- CHEN R, ZHANG X, HAO R Y, et al. Shear strength deterioration of geopolymer stabilized loess under wet-dry cycles: Mechanisms and prediction model [J]. *Rock*

- and Soil Mechanics, 2022, 43(5): 1164-1174. (in Chinese)
- [23] OKWADHA G D O, LI J. Optimum conditions for microbial carbonate precipitation [J]. Chemosphere, 2010, 81(9): 1143-1148.
- [24] QABANY AAL, SOGA K, SANTAMARINA C. Factors affecting efficiency of microbially induced calcite precipitation [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2012, 138(8): 992-1001.
- [25] SOON N W, LEE LEE MIN, KHUN T C, et al. Factors affecting improvement in engineering properties of residual soil through microbial-induced calcite precipitation [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2014, 140(5): 04014006.
- [26] HARKES M P, VAN PAASSEN L A, BOOSTER J L, et al. Fixation and distribution of bacterial activity in sand to induce carbonate precipitation for ground reinforcement [J]. Ecological Engineering, 2010, 36(2): 112-117.
- [27] 吴超传, 郑俊杰, 赖汉江, 等. 微生物固化砂土强度增长机理及影响因素试验研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2020, 42(1): 31-38.
WU C C, ZHENG J J, LAI H J, et al. Experimental study of the strength enhancing mechanism of bio-cemented sand and its influential factors [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2020, 42(1): 31-38. (in Chinese)
- [28] 沈泰宇, 李贤, 汪时机, 等. 微生物固化砂质黏性紫色土的三轴抗剪强度与浸水抗压强度[J]. 农业工程学报, 2019, 35(21): 135-143.
SHEN T Y, LI X, WANG S J, et al. Triaxial shear strength and immersion compressive strength of sandy clayey purple soil treated by microbial induced calcite precipitation [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(21): 135-143. (in Chinese)
- [29] 孙潇昊, 缪林昌, 童天志, 等. 微生物沉积碳酸钙固化砂土试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(11): 3225-3230, 3239.
SUN X H, MIAO L C, TONG T Z, et al. Experimental study of solidifying sand using microbial-induced calcium carbonate precipitation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(11): 3225-3230, 3239. (in Chinese)
- [30] 王绪民, 郭伟, 余飞, 等. 营养盐浓度对胶结砂试样物理力学特性试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(Sup2): 363-368, 374.
WANG X M, GUO W, YU F, et al. Experimental study of effect of nutrient concentration on physico-mechanical properties of cemented sand [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(Sup2): 363-368, 374. (in Chinese)
- [31] 梁仕华, 房采杏, 牛九格, 等. 钙源对微生物固化花岗岩残积土效果影响的研究[J]. 工业建筑, 2019, 49(7): 102-107.
LIANG S H, FANG C X, NIU J G, et al. Research on effect of microbial induced calcite precipitation adopting different calcium sources on cemented granite residual soil [J]. Industrial Construction, 2019, 49(7): 102-107. (in Chinese)
- [32] CUI M J, ZHENG J J, CHU J, et al. Bio-mediated calcium carbonate precipitation and its effect on the shear behaviour of calcareous sand [J]. Acta Geotechnica, 2021, 16(5): 1377-1389.
- [33] 刘东鹭, 岳建伟, 孔庆梅, 等. 负压作用下微生物矿化粉质黏土的性能试验研究[J]. 人民黄河, 2022, 44(5): 136-141.
LIU D L, YUE J W, KONG Q M, et al. Experimental study on properties of microbial mineralized silty clay under negative pressure [J]. Yellow River, 2022, 44(5): 136-141. (in Chinese)
- [34] CUI M J, LAI H J, HOANG T, et al. One-phase-low-pH enzyme induced carbonate precipitation (EICP) method for soil improvement [J]. Acta Geotechnica, 2021, 16(2): 481-489.
- [35] CHENG L, SHAHIN M A, CHU J. Soil bio-cementation using a new one-phase low-pH injection method [J]. Acta Geotechnica, 2019, 14(3): 615-626.

(编辑 胡玲)