

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2023.06.015

# 胶结液浓度对 MICP 固化残积土力学性能影响及机理研究

陈欣<sup>1</sup>, 安然<sup>1,2</sup>, 汪亦显<sup>2</sup>, 陈昶<sup>1</sup>

(1. 武汉科技大学 城市建设学院, 湖北 武汉 430081;  
2. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

**摘要:** 为分析微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)技术对加固花岗岩残积土的适宜性,以及胶结液浓度对固化效果的影响,通过开展无侧限压缩和三轴剪切试验,对5组不同胶结液浓度的固化土试样进行力学测试,并基于扫描电镜图像和X射线衍射图谱分析 MICP 固化机理。试验结果表明:当胶结液浓度为 2 mol/L 时,固化土的无侧限抗压强度和弹性模量分别提高 47.15% 和 82.08%,残积土的破坏模式从局部压裂破坏转变为整体剪切破坏;MICP 固化残积土的抗剪强度随胶结液浓度增加得到较大程度提升,在 2 mol/L 胶结液作用下,黏聚力和内摩擦角增幅分别为 127.62% 和 36.50%;碳酸钙晶体主要分布在土颗粒表面、孔隙以及接触点上,在土体内部分别发挥着包裹、填充和胶结作用;细菌与胶结液反应生成的碳酸钙沉淀主要以方解石晶体的形式存在。研究成果可为花岗岩残积土的改性提供参考,拓宽了 MICP 在非均质土中的应用范围。

**关键词:** 花岗岩残积土;微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP);胶结液浓度;力学性能;固化机理

中图分类号: TU431

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2023)06-0100-07

## Effects of Cementing Concentrations on Mechanical Properties and Solidified Mechanism of MICP Cured Residual Soils

CHEN Xin<sup>1</sup>, AN Ran<sup>1,2</sup>, WANG Yixian<sup>2</sup>, CHEN Chang<sup>1</sup>

(1. Institute of Urban Construction, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430081, China;

2. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China)

**Abstract:** In order to analyze the suitability of MICP for consolidating granite residual soil, the effects of cementation solution concentration on the treating was investigated. By conducting unconfined compression and triaxial shear tests, five groups of treated soil specimens with different cementation concentration were mechanically tested, and the MICP curing mechanism was analyzed based on scanning electron microscope images and X-ray diffraction patterns. The results showed that the unconfined compressive strength and modulus of elasticity of the treated soil at 2 mol/L cementation solution increased by 47.15% and 82.08% respectively, and the damage mode of the residual soils were changed from fracture damage to overall shear damage. The shear strength of the MICP-treated soils increased to greater extent with the increase of the cementation concentration, and the cohesion and the internal friction angle increased by 127.62% and 36.50%, respectively, with the increase of the cementation concentration of 2 mol/L. The calcium carbonate crystals were mainly distributed on the surface of soil particles, pores and contact points, playing the roles of wrapping, filling and cementing in soils respectively. The calcium carbonate precipitates generated from the reaction of bacteria and cementation mainly existed as calcite crystals. The research results could provide reference for the modification of granite residual soils and expand the application of MICP in non-homogeneous soils.

**Keywords:** granite residual soil; microbially induced carbonate precipitation (MICP); cementation solution concentration; mechanical properties; curing mechanism

收稿日期:2023-08-19

修稿日期:2023-09-11

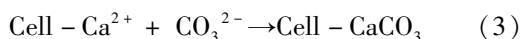
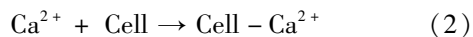
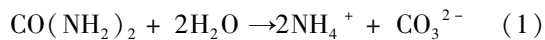
基金项目:国家自然科学基金项目(12102312);岩土力学与工程国家重点实验室开放基金项目(SKLGME021018)

作者简介:陈欣(1999—),男,硕士研究生,研究方向为特殊土改性试验。E-mail:2218074222@qq.com

通讯作者:安然(1992—),男,博士,讲师,主要从事特殊土宏-细观试验、本构模型和数值分析研究工作。E-mail: anran@wust.edu.cn

花岗岩残积土是我国南方地区基础建设中最常见的一种土体,其成土过程主要受制于亚热带和热带气候条件与母岩性质的影响。花岗岩残积土具有从黏土到砾石的特殊颗粒分布以及复杂的原生孔隙和裂隙结构<sup>[1-3]</sup>。压实残积土是公路、地基和挡土墙等工程中常用的一种填料,其工程特性对工程稳定性具有重要作用。物理化学风化过程在很大程度上影响了残积土的微观结构,导致压实残积土具有强度低、孔隙度高、渗透性强和遇水易软化崩解等特征<sup>[4-5]</sup>。传统工艺是通过添加水泥、石灰等无机材料用于加固土体,虽然取得了一定效果,但隐藏着污染环境工程的潜在危害<sup>[6-7]</sup>。因此,找到一种兼顾加固效果、工程经济与环境效应的固化方法,从而对残积土进行生态、经济和高效改性具有重要意义。

微生物矿化是一种存在于自然界的普遍现象,是指微生物通过其新陈代谢功能将无机物转化为矿物晶体的过程。将微生物培养基置于含有尿素和钙源的胶结液中,利用自身的尿素分解能力产生碳酸根离子,与钙离子发生化学反应达到快速析出碳酸钙晶体沉淀的目的,此方法通常被称为微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)<sup>[8]</sup>。MICP 主要化学反应过程如下:



MICP 技术早期多被用于填补多孔材料孔洞、裂隙修复、污水治理以及粉尘稳定等研究方向<sup>[9-13]</sup>。后期随着灌浆技术深度发展,MICP 在岩土工程领域的应用才逐步得到推广。MICP 可对不同土体进行固化改良试验,其原理是微生物诱导生成的碳酸钙可以将土颗粒包裹、黏结或填充孔隙,从而达到固化土体的作用。彭劫等<sup>[14]</sup>采用压力灌浆方法对有机质黏土进行 MICP 固化处理,通过开展无侧限抗压强度试验和渗透试验,并结合对有机质含量以及钙离子浓度的测定结果,全面评价了压力灌浆法的效果,研究表明 MICP 能够显著提高固化黏土的作用。杨司盟等<sup>[15]</sup>将海水原料作为胶结液用于砂土的 MICP 固化处理,从细菌注入方式、尿素浓度和注浆速率等角度,综合分析各因素对加固效果的影响规律。Soon 等<sup>[16]</sup>对粉土素试样和 MICP 固化试样进行了电镜扫描分析,根据 SEM 图像观测出 MICP 处理后粉土颗粒接触更为紧密,方解石晶体主要沉淀在颗粒接触点和表面处,多为叶片式的棱柱状形貌。

在 MICP 固化土体过程中,胶结液是产生大量

碳酸钙沉淀的前提,为微生物营造了钙源和氮源环境。最佳的胶结液浓度不仅为微生物提供良好的生存条件,还在一定程度上对微生物矿化、晶体成形、细菌活性产生显著的影响。因此确定最佳的胶结液浓度,不仅能够减少试验成本,还可以提高 MICP 在土体中的固化效果。Qabany and Soga<sup>[17]</sup>基于不同浓度的胶结液条件下观察了固化石英砂内部方解石晶体的大小和分布。Dejong 等<sup>[18]</sup>采用巴氏芽孢杆菌作为试验菌种,通过 SEM 试验研究了土体内部方解石沉淀分布特征,结合剪切波试验分析了胶结液浓度对固化土的加固效果,发现较高的  $\text{CaCl}_2$  浓度有助于方解石沉淀更加密集,土体刚度更大。Soon 等<sup>[19]</sup>通过 SEM 图像观察了不同胶结液浓度处理的试样中方解石晶体形态和分布,发现方解石主要集聚在土颗粒间的接触区,尤其在 0.5 mol/L 胶结液处理时分布最为密集。

以往研究多集中在 MICP 改良砂土或黏土性能,并且取得了丰硕的成果。而花岗岩残积土兼顾从黏粒到砾石的颗粒组成,具有特殊的粒径分布和孔隙尺寸,与碳酸钙晶体的兼容性较为复杂,这为开展 MICP 技术带来一定的难度。因此,本研究尝试对花岗岩残积土进行 MICP 固化处理,以胶结液浓度作为试验变量,制备不同固化程度的 MICP 改良土,开展宏微观试验分析 MICP 对残积土力学特性的改良效果以及作用机制,并且探究胶结液浓度对 MICP 固化效果的影响规律。研究成果旨在评价 MICP 固化花岗岩残积土的可行性,为压实残积土的固化改性提供了一种新思路。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料

#### 1.1.1 花岗岩残积土

试验采用的花岗岩残积土取自广西桂林的某公路边坡。参照《土工试验方法标准》<sup>[20]</sup>(GB/T 50123—2019),开展相关的物理试验和微观试验,得出土体基本物理指标和矿物成分,如表 1 所示。在不同取样点随机选择三组,进行筛分试验,得出粒径分布曲线,如图 1 所示,可见花岗岩残积土级配分布极其不均匀,主要含有大量的砂粒和粉粒。

#### 1.1.2 菌液

试验选用细菌为巴氏芽孢杆菌(*Sporosarcina pasteurii*, CC11859),是一种普遍存在于自然界土壤的菌种,具有较高的尿素分解能力和稳定性。细菌培养基制备过程如下:将 15 g 胰蛋白胨、5 g 蛋白

脲、5 g 氯化钠溶于 900 mL 的蒸馏水中,用 1 mol/L 的 NaOH 调节 pH 为 7.3,在 121℃ 高温灭菌 20 min,待上述混合液灭菌后温度降至 60℃ 左右后加入经过紫外线灭菌的 20 g/L 尿素溶液 100 mL,制成 1 L 细菌培养基。然后在无菌、有氧、恒温的条件下,将巴氏芽孢杆菌甘油保种液以 1:100 的体积比接种于配置好的培养基中,并在 30℃ 和 130 rpm 的

恒温振荡培养箱中振荡 36 h。将细菌培养基以 4 000 rpm 离心两次,每次 30 min,弃去悬浮液。保留新鲜培养基。通过检测溶液中  $\text{NH}_4^+$  浓度间接得出细菌活性为 29 U/mL,利用分光光度计测出菌液在 600 nm 波长处吸光度  $\text{OD}_{600} = 0.91$ ,细菌溶液储存在 4℃ 的冰箱中,在一周内使用。

表 1 土体基本物理参数及矿物成分

含水率 /%	干密度 /( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	相对 密度	孔隙 比	液限 /%	塑性 /%	塑性 指数	矿物成分/%			
							石英	高岭石	伊利石	蒙脱石
35.2	1.49	2.68	1.05	50.5	25.6	24.9	53.8	37.7	5.6	2.9

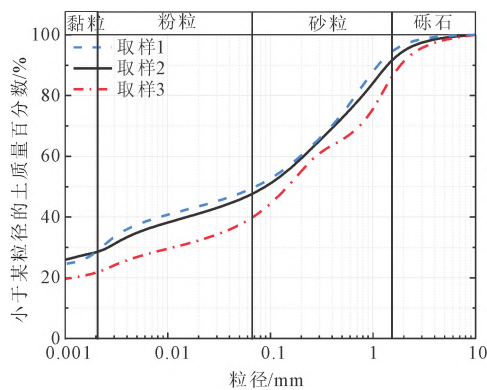


图 1 花岗岩残积土粒径分布曲线

### 1.1.3 胶结液

胶结液为氯化钙和尿素以摩尔比 1:1 配制的混合液,在 MICP 过程中为微生物提供钙源和氮源。尿素可被细菌产生的脲酶水解产生碳酸根离子,碳酸根离子与氯化钙提供的钙离子发生化学反应生成  $\text{CaCO}_3$  沉淀。本研究中,制备胶结液浓度分别为 0.5 mol/L、1.0 mol/L、1.5 mol/L、2.0 mol/L、2.5 mol/L 共 5 组不同的 MICP 固化土试样,并设置不经处理的素土样作为对照组。

### 1.2 试样制备

试验采用的注浆装置示意图如图 2 所示,装样模具是内径为 40 mm,高为 150 mm 的有机玻璃管。模具外部用止水胶带缠绕,起到固定有机玻璃、防止液体渗漏的作用,同时在上下两端用具有调节内径大小功能的 PVC 套箍进行固定。模具上口通过橡胶管与蠕动泵相连,蠕动泵为液体输送提供动力源,在泵吸作用下,将菌液或胶结液注入到土样内部;模具下口与烧杯相连,用于收集注浆过程中溢出的废液,防止污染。试验中先称量烘干的土料,分三层装入模具中,以含水率为 20%、压实度为 95% 进行土

样压实,随后开启注浆过程。注浆中以 10 mL/min 速率先向土样注入 50 mL 菌液,静置 6 h 后以相同速率注入等体积的胶结液,此为第一轮灌浆过程。每组试样共进行 6 轮灌浆,每轮灌浆间隔 12 h。最后一轮灌浆结束后,将试样脱模,并放入标准养护室内进行养护,养护 7 d 后开展后续试验。

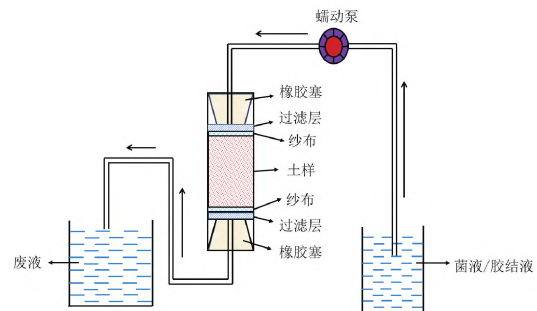


图 2 MICP 注浆装置示意图

### 1.3 无侧限压缩试验

测试试验仪器采用的是 YYW-II 无侧限压力仪。将直径为 39.1 mm、高为 80 mm 试样放在下加压板上,升高下加压板使试样与上加压板刚好接触,将千分表读数调至零位。控制加载速度为 1.0 mm/min,使试验在 8 min ~ 10 min 内完成。最终根据测力计与位移千分表读数,得出每组土样的应力-应变曲线。

### 1.4 三轴固结不排水剪切试验

试验仪器使用全自动应力路径控制三轴仪。仪器主要技术参数:最大轴向位移为  $\pm 50$  mm,试样尺寸为  $\Phi 39.1$  mm  $\times$  80 mm 圆柱样。测试前,将圆柱样置于压力室中 24 h,通入蒸馏水进行反压饱和,等土样饱和度达到 95% 以上,然后在不同围压下等向固结,固结压力分别为 50 kPa、100 kPa、200 kPa 和 400 kPa,待固结完成后,取剪切速率 0.01 mm/min,

在不排水条件下,对试样进行剪切,当轴向变形超过15%时,试验停止。

## 2 结果与分析

### 2.1 无侧限抗压强度

根据无侧限压缩试验得出应力-应变曲线,如图3所示。可以看出,所有试样的应力-应变曲线均表现出典型的应变软化特性:首先应力随着应变的增加而逐渐增大,直到达到峰值,之后随着应变继续增加而降低。MICP固化试样的峰值应力明显高于素土样,其中当胶结液浓度为2 mol/L,峰值应力最高。这表明,MICP固化处理对残积土强度具有一定的提升效果,且在2 mol/L胶结液条件下,MICP增强效果最为显著。

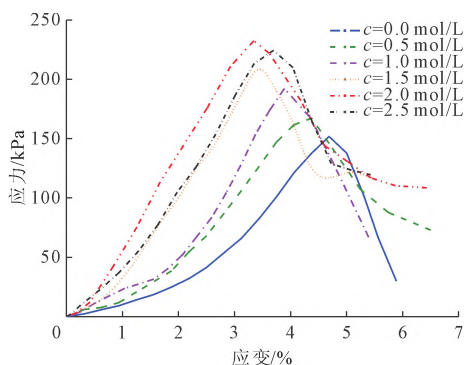


图3 无侧限压缩试验的应力-应变曲线

根据应力-应变曲线,计算得出土体的无侧限抗压强度  $S_u$  以及弹性模量  $E$ ,并分析出胶结液浓度对这两个指标的影响,如图4所示。由图可知,与素土样相比,MICP固化土样的强度和弹性模量均有所提高,胶结液浓度不同,提高幅度有所差异。当胶结液浓度为0.5 mol/L、1.0 mol/L、1.5 mol/L时,试样的  $S_u$  分别提高了10.59%、27.15%、37.74%,  $E$  分别提高了14.29%、39.86%、62.51%;当浓度为2 mol/L时,土样的  $S_u$  和  $E$  提高程度最大,分别增加了47.15%和82.08%;随着浓度继续增大至2.5 mol/L,  $S_u$  和  $E$  提高幅度稍微下降,分别为47.17%和66.44%。这是因为,当胶结液浓度从0增大至2 mol/L,固化反应所需钙源含量逐渐增多,保证菌液和胶结液能够得到充分反应,从而提升碳酸钙沉淀量,增大胶结作用。然而随着胶结液浓度继续升高至2.5 mol/L时,其中钙离子浓度会引起碱性环境增强,从而阻碍了细菌正常的代谢活动,抑制尿素水解酶的生成<sup>[21-22]</sup>。

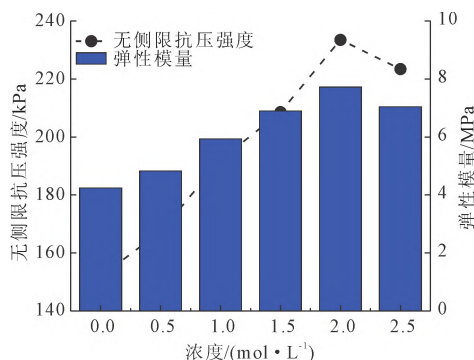


图4 不同胶结液浓度的强度和弹性模量

图5显示了单轴压缩后土样的破坏模式。总体而言,经过MICP的固化处理,残积土由原本的局部压裂破坏转变为整体剪切破坏。如图5(a)、图5(b)所示,胶结程度较低的素土样和0.5 mol/L固化样在破坏时出现多条压缩裂缝,且伴有碎块掉落现象,表现出局部压裂破坏。如图5(c)和图5(d)所示,当浓度增加至1 mol/L和1.5 mol/L时,试样破坏时产生的裂隙数量有所减少,破坏裂隙增长变宽。如图5(e)和图5(f)所示,当胶结液浓度增至2.0 mol/L和2.5 mol/L时,试样呈现出明显整体剪切破坏特征,破坏裂隙从土样顶部沿与轴向荷载成30°~45°方向延伸至底部。试样破坏模式的变化主要归因于碳酸钙沉淀的胶结作用。由于MICP固化作用形成了大量碳酸钙,增强了土体的整体黏结效应,从而使其具有较高的强度和均匀性,破坏时容易发生整体断裂,并伴随着贯穿裂隙的形成。

### 2.2 抗剪强度特征

分析不同土样的应力-应变曲线,当应变在0~3%时,应力随应变增加而迅速上升;应变超过3%时,应力缓慢增大,增大幅度逐渐降低,直到应变超过5%时,应力基本保持稳定。经过MICP处理后,残积土的应力-应变关系未发生变化,表现为应变硬化特征。固结围压越大,应变硬化效应越显著。

根据应力-应变曲线特征,绘制莫尔圆如图6所示,由摩尔-库仑理论计算得出抗剪强度参数( $c$ 和 $\varphi$ )列入表2。不难发现,经过MICP固化处理,残积土的黏聚力和内摩擦角均在不同程度上有所提高。胶结液浓度为0.5 mol/L、1.0 mol/L、1.5 mol/L、2.0 mol/L、2.5 mol/L时,黏聚力分别提高了29.15%、66.36%、94.85%、127.62%和106.98%,内摩擦角则分别增加了9.97%、19.01%、26.53%、36.50%和31.49%。显然,采用2 mol/L胶结液进行MICP处理的残积土抗剪强度增强效果最为明

显,这与前文的抗压强度试验所得结果一致。

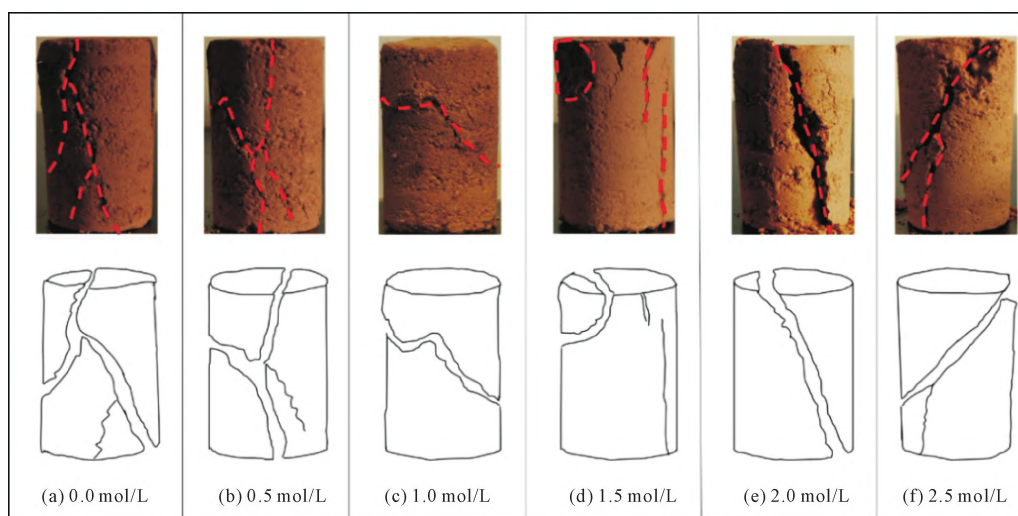


图 5 不同固化液浓度的土样破坏模式

为了进一步研究 MICP 固化残积土在不同胶结液浓度下的抗剪强度变化规律,选取轴向应变 15% 所对应的主应力差作为破坏应力,在归一化偏应力-平均主应力( $p-q$ )平面上绘制了强度包线。其中,偏应力  $q$  和平均主应力  $p$  计算公式如下:

$$q = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (4)$$

$$p = \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{3} \quad (5)$$

$$\frac{q}{P_a} = k \left( \frac{p}{P_a} \right) \quad (6)$$

式中: $\sigma_1$  和  $\sigma_3$  分别是主应力和小主应力; $P_a$  是大气压,为 101 kPa; $k$  为拟合系数,即式(6)线性方程的斜率。

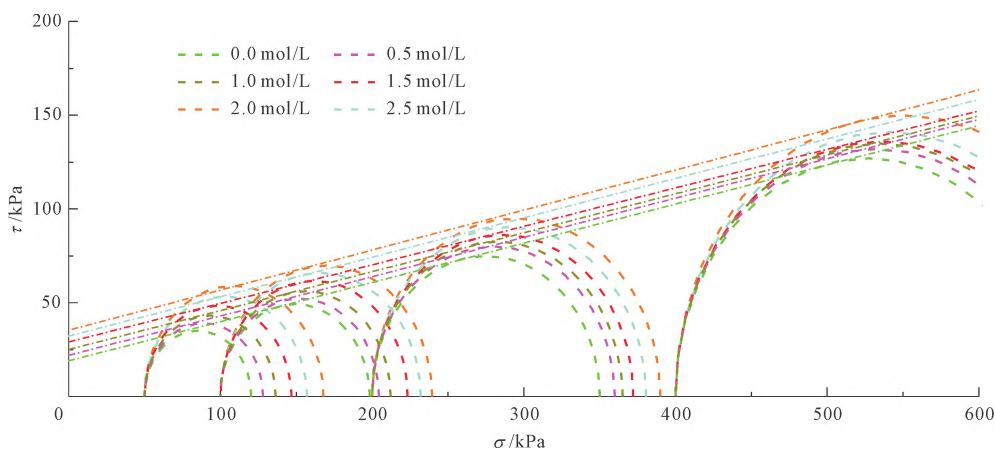


图 6 应力莫尔圆与包络线

表 2 土样的强度特性参数

浓度 /(mol · L <sup>-1</sup> )	$c$ /kPa	$\varphi$ /(°)	$k$
0.0	19.62	23.56	1.02
0.5	25.34	25.91	1.13
1.0	32.64	28.04	1.22
1.5	38.23	29.81	1.30
2.0	44.66	32.16	1.37
2.5	40.61	30.98	1.32

$p/P_a - q/P_a$  平面内强度包线如图 7 所示, $q/P_a$  随  $p/P_a$  增加呈线性增长趋势,即强度包线始终上升,说明土样具有应变硬化特征<sup>[23]</sup>。此外,对于不同胶结液浓度的固化土样,其斜率  $k$  有所不同。对于素土样,由拟合曲线得出  $k = 1.02$ ,随着浓度的增加,强度包线向上移动,表明在平均主应力增加幅度相同时,试样的抗剪强度增加速度更快。当胶结液浓度为 2 mol/L 时, MICP 固化土试样的  $k$  最高,为 1.37,表明其抗剪强度最大。

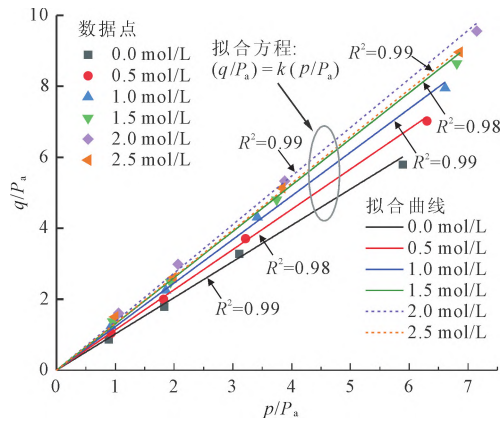


图 7  $p/P_a - q/P_a$  平面内强度包线

### 2.3 微观形态特征

为了观察 MICP 固化残积土的微观形貌,选取 0.0 mol/L、0.5 mol/L 和 2.0 mol/L 浓度的试样进行 SEM 分析。如图 8(a)所示,未固化处理的残积土结构松散且其表面发育大量的内孔隙。从图 8(b)可以看出,当胶结液浓度较小时,土体内形成的碳酸钙沉淀数量较少。这种类型的晶体沉淀可能不足以承受很高的剪切强度,这是因为土颗粒之间的胶结较为薄弱,孔隙较多,导致低浓度胶结液的固化效果不够理想。如图 8(c)和图 8(d)所示,当采用 2 mol/L 胶结液进行固化时,生成的碳酸钙晶体尺寸明显增大,孔隙数量减少。究其原因,当胶结液浓度较低时,用于反应的钙源不足,难以供应细菌发挥固

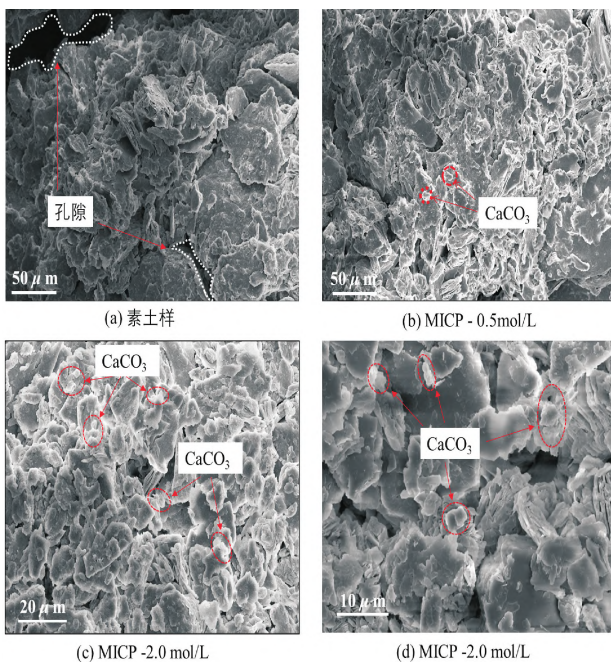


图 8 MICP 固化残积土的 SEM 图像

化作用,因此生成的碳酸钙晶体尺寸小、数量少。而合理的胶结液浓度有利于细菌水解生成的碳酸根离子与钙源充分结合,生成的碳酸钙沉淀数量也会随之增多。

此外,根据微观图像与前人的研究结果,可以看出碳酸钙晶体集中分布于土颗粒表面、孔隙以及颗粒接触点,分别发挥着包裹、填充和胶结作用<sup>[24]</sup>。包裹作用是指沉淀在土颗粒表面的  $\text{CaCO}_3$  晶体,能够提高土体颗粒表面粗糙程度从而增加其内摩擦角;填充作用是指集聚在孔隙内的  $\text{CaCO}_3$  晶体,使试样整体更加密实;胶结作用则表明接触点上分布的碳酸钙能够扩大颗粒联结面积,提高了土颗粒间的黏聚强度。

### 2.4 矿物成分

在 MICP 固化处理过程中,微生物诱导生成的碳酸钙主要以三种类型呈现,分别为方解石、球霏石和文石<sup>[25]</sup>。这三类晶体在自然中稳定性各异,其中以方解石最为稳定,文石次之,球霏石最差。为进一步确定本试验中碳酸钙晶体类型以及胶结液浓度对它的影响,故选取素土样、0.5 mol/L - MICP 以及 2.0 mol/L - MICP 固化土试样进行 XRD 试验,得出 XRD 图谱如图 9 所示。可以清晰看出素土样含有石英、高岭石、伊利石和赤铁矿衍射峰,而经过 MICP 固化处理的残积土的衍射图谱除了土体本身存在的石英、高岭石、伊利石和赤铁矿外,出现了方解石晶型的特征衍射峰。随着胶结液浓度的增加,方解石的衍射峰数量明显增多。矿物分析结果说明在花岗岩残积土中采用 MICP 固化技术,得到的碳酸钙为稳定的方解石结晶。胶结液浓度是方解石晶体生成量的重要影响因素,合理的胶结液浓度能确保碳酸钙沉淀量达到最佳,对固化效果至关重要。

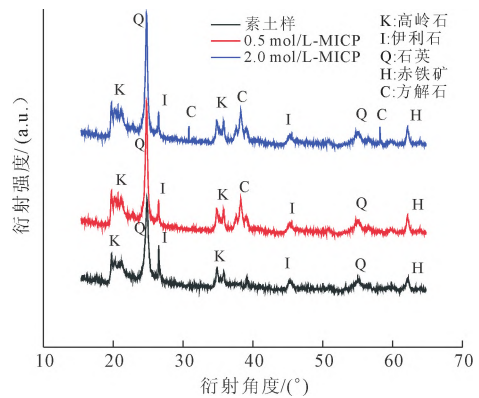


图 9 MICP 固化残积土的 X 射线衍射图谱

综合微观形貌与矿物成分试验结果来看,经过

MICP 处理后,以方解石为主要形式的碳酸钙晶体在残积土内部产生包裹、填充和胶结作用,是提高土体内摩擦角和黏聚力的内驱因素。花岗岩残积土的颗粒级配呈黏粒与砂砾混合分布特点,细菌与胶结液的反应使得残积土内的粗砂和黏粒形成混合体系,而碳酸钙晶体的固化效果受胶结液浓度的影响显著。本研究通过多尺度的试验结果证明了 MICP 技术在残积土中的适宜性。

### 3 结 论

采用不同浓度的胶结液对花岗岩残积土开展 MICP 固化改性,通过开展力学和微观试验,对比分析了不同胶结液浓度对试样力学特性的影响及固化机理。得到了如下主要结论:

(1) 无侧限压缩试验结果表明 MICP 固化技术能大幅提高土体的抗压强度和弹性模量,当胶结液浓度为 2 mol/L 时,强度的增益效果达到最佳。经过 MICP 处理后,花岗岩残积土压缩破坏特征由局部压裂破坏转变为整体剪切破坏,这是碳酸钙晶体固化作用的外在表现。

(2) 三轴剪切试验结果表明在胶结液为 2 mol/L 条件下, MICP 固化土的抗剪强度提高程度最显著,黏聚力和内摩擦角提升幅度最大,分别为 127.62% 和 36.50%。究其原因, MICP 处理形成的碳酸钙晶体在残积土内部产生了包裹作用,提高土颗粒的表面粗糙程度,从而提升内摩擦角。同时,碳酸钙晶体在土颗粒间发挥胶结能力,达到增强黏聚力目的。

(3) 由 MICP 固化作用产生的碳酸钙晶体生成量与胶结液浓度密切相关。碳酸钙沉淀主要分布土颗粒表面、孔隙和接触点位上,在土体内部分别发挥着包裹、填充和胶结作用,这是固化后土样力学性能提高的内在原因。

(4) 花岗岩残积土内部形成的碳酸钙沉淀为方解石晶体,且方解石的含量与胶结液浓度有关,胶结液浓度为 2 mol/L 时,方解石衍射峰出现次数最多,进一步证明了胶结液浓度是影响 MICP 整体固化效果的重要因素。

#### 参考文献:

[1] An Ran, Kong Lingwei, Zhang Xianwei, et al. Effects of dry-wet cycles on three-dimensional pore structure and permeability characteristics of granite residual soil using X-ray micro computed tomography[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2022, 14(3):

851-860.

- [2] 黎澄生,安然,舒荣军,等. 花岗岩残积土初期崩解规律与数学形态学方法近似模拟[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(4): 845-854.
- [3] 安然,孔令伟,黎澄生,等. 炎热多雨气候下花岗岩残积土的强度衰减与微结构损伤规律[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(9): 1902-1911.
- [4] 汤连生,陈洋,叶扬海,等. Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液对花岗岩残积土物理力学特性的影响规律[J]. *岩土工程学报*, 2014, 53(9): 35-39.
- [5] 安然,黎澄生,孔令伟,等. 花岗岩残积土原位力学特性的钻探扰动与卸荷滞时效应[J]. *岩土工程学报*, 2020, 42(1): 109-116.
- [6] 王志兵,刘金明,顾翔. 纤维和纳米材料改良花岗岩残积土的力学试验及机理研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2022, 33(4): 185-191.
- [7] Zhao Yong, Chen Xiao, Wen Tong, et al. Experimental investigations of hydraulic and mechanical properties of granite residual soil improved with cement addition[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 318: 126016.
- [8] 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.
- [9] 李昊,唐朝生,尹黎阳,等. MICP-FR 协同作用改善钙质砂的力学性能及抗侵蚀试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2021, 43(10): 1941-1949.
- [10] Ramachandran S K, Ramakrishnan V, Bang S S. Remediation of concrete using microorganisms[J]. *ACI Materials Journal*, 2001, 98(1): 3-9.
- [11] 斯日古楞,毕力贡,李驰. 砂土基 MICP 土工材料剪切强度试验及可靠性分析[J]. *防灾减灾工程学报*, 2018, 38(5): 795-800, 821.
- [12] Naeimi M, Chu J. Comparison of conventional and bio-treated methods as dust suppressants[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24: 23341-23350.
- [13] Ersan Y Ç, Belie N D, Boon N. Microbially induced CaCO<sub>3</sub> precipitation through denitrification: an optimization study in minimal nutrient environment[J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2015, 101: 108-118.
- [14] 彭劼,温智力,刘志明,等. 微生物诱导碳酸钙沉积加固有机质黏土的试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2019, 41(4): 733-740.
- [15] 杨司盟,彭劼,温智力,等. 浓缩海水作为钙源在微生物诱导碳酸钙加固砂土中的应用[J]. *岩石力学*, 2021, 42(3): 746-754.

(下转第 149 页)

- of soil-water characteristic curves [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2010, 136(3):445-455.
- [5] 吴越,刘东升,孙树国,等. 岩土强度参数正态-逆伽马分布的最大后验估计[J]. *岩石力学与工程学报*, 2019,38(6):1188-1196.
- [6] Wang Yunqiang, Shao Ming'an, Han Xiangwei, et al. Spatial variability of soil parameters of the van genuchten model at a regional scale [J]. *Clean Soil Air Water*, 2015,43(2):271-278.
- [7] Al-Bittar T, Soubra A H. Bearing capacity of strip footings on spatially random soils using sparse polynomial chaos expansion[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2013, 37(13):2039-2060.
- [8] Wu Shihhsuan, Ou Changgu, Ching Jianye, et al. Reliability-based design for basal heave stability of deep excavations in spatially varying soils[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 2012, 138(5):594-603.
- [9] 张抒,唐辉明,刘晓,等. 基于饱和渗透系数空间变异结构的斜坡渗流及失稳特征[J]. *地球科学*, 2018,43(2):622-634.
- [10] Li Yichuan, Pang Rui, Xu B, et al. GPDEM-based stochastic seismic response analysis of high concrete-faced rockfill dam with spatial variability of rockfill properties based on plastic deformation [J]. *Computers and Geotechnics*, 2021,139(12):104416.
- [11] 李典庆,蒋水华,周创兵. 基于非侵入式随机有限元法的地下洞室可靠度分析[J]. *岩土工程学报*, 2012, 34(1):123-129.
- [12] 董辉,黄润秋,罗潇,等. 堆积碎石土斜坡浅表入渗的空间分布与变异性研究[J]. *岩土工程学报*, 2017,39(8):1501-1509.
- [13] Santoso A M, Phoon K K, Quek S T. Effects of soil spatial variability on rainfall-induced landslides [J]. *Computers & Structures*, 2011,89(11-12):893-900.
- [14] Cho Sungeum. Probabilistic stability analysis of rainfall induced landslides considering spatial variability of permeability[J]. *Engineering Geology*, 2014,171:11-20.
- [15] 薛阳,吴益平,苗发盛,等. 库水升降条件下考虑饱和和渗透系数空间变异性的白水河滑坡渗流变形分析[J]. *岩土力学*, 2020,41(5):1709-1720.
- [16] Tan X, Wang X, Khoshnevisan S. Seepage analysis of earth-rock dams considering spatial variability of hydraulic parameters[J]. *Engineering Geology*, 2017,288:60-269.
- [17] 刘印. 饱和-非饱和土体渗流分析及其工程应用[D]. 上海:同济大学,2009.
- [18] 卢斌,谢兴华,吴时强,等. 超高心墙坝非稳定渗流三维有限元分析[J]. *岩土工程学报*, 2018,40(S2):73-76.

(上接第106页)

- [16] Soon N W, Lee L M, Khun T C, et al. Improvements in engineering properties of soils through microbial-induced calcite precipitation[J]. *Ksce Journal of Civil Engineering*, 2013,17(4):718-728.
- [17] Qabany A A, Soga K. Effect of chemical treatment used in MICP on engineering properties of cemented soils [J]. *Geotech*, 2013,63(4):331-339.
- [18] Dejong J T, Mortensen B M, Martinez B C. Bio-mediated soil improvement [J]. *Ecological Engineering*, 2010,36(2):197-210.
- [19] Soon N W, Lee L M, 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*, 2014,14(5):04014006
- [20] 土工试验方法标准:GB/T 50123—2019[S]. 北京:中国计划出版社,2019.
- [21] Kim D, Park K. Effects of ground conditions on microbial cementation in soils [J]. *Materials*, 2013,7(1):143-156.
- [22] Cui Mingjie, Zheng Junjie, Zhang Ruijie, et al. Influence of cementation level on the strength behavior of bio-cemented sand [J]. *Acta Geotechnical*, 2017,12(5):971-986.
- [23] 李艺隆,国振,徐强,等. 海水环境下 MICP 胶结钙质砂干湿循环试验研究 [J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2022,56(9):1740-1749.
- [24] Tian Xu, Xiao Hua, Li Zhi, et al. Experimental study on the strength characteristics of expansive soils improved by the MICP method [J]. *Geofluids*, 2022:3089820.
- [25] 郑俊杰,宋杨,赖汉江,等. 微生物固化纤维加筋砂土抗剪强度试验研究 [J]. *土木与环境工程学报*, 2019,41(1):15-21.