

# 固化次数与钙源对 MICP 固化花岗岩残积土均匀性的影响研究<sup>\*</sup>

刘涛, 杨懿, 张永杰, 黄万东, 粟仁熙

(长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

**摘要:** 微生物诱导碳酸钙沉淀 (Microbially Induced Calcite Precipitation, MICP) 是一种多学科交叉的岩土处置技术, 在改良岩土体性能方面具有显著效果。花岗岩残积土具有孔隙比大、遇水易崩解等特性, 花岗岩残积土路基边坡表层水土保持困难。为解决该问题, 文中提出采用 MICP 固化花岗岩残积土表层的方法, 采用巴氏芽孢杆菌对花岗岩残积土进行室内固化试验, 以固化次数和钙源作为变量, 通过无侧限抗压强度试验、碳酸钙含量测定试验及电镜扫描试验探讨不同固化次数和钙源对固化试样均匀性的影响。结果表明, 钙源相同时, 随着固化次数的增加, 试样中碳酸钙含量逐渐升高, 且碳酸钙分布均匀性得到改善; 固化次数相同时, 氯化钙固化试样中碳酸钙含量和均匀性最高, 氯化镁次之, 乙酸钙最差; 采用 MICP 固化后, 试样中碳酸钙含量显著提高, MICP 能有效固化花岗岩残积土, 其固化机理是生成碳酸钙沉淀填充土颗粒间隙。

**关键词:** 公路; 微生物诱导碳酸钙沉淀 (MICP); 花岗岩残积土; 固化次数; 钙源; 碳酸钙含量; 碳酸钙分布均匀性

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2023)04-0061-05

花岗岩残积土是在中国南方地区广泛分布的一种特殊土, 具有结构性强、易扰动、遇水易崩解等特点<sup>[1-3]</sup>。采用花岗岩残积土进行路基填筑时, 由于南方地区长时间持续降雨或晴雨交替的气候, 路基边坡表层易发生侵蚀破坏, 且难以进行有效防护。微生物诱导碳酸钙沉淀 (MICP) 作为一种土体处置技术, 被广泛应用于各类土体强度及渗透性改良, 如 Sharaky A. M. 等研究了固化砂土的稳定性与机械性能<sup>[4]</sup>; 刘汉龙、董博文等研究了 MICP 对钙质砂动力特性和静力特性的改善效果<sup>[5-6]</sup>; 陈适、伍玲玲等研究了不同条件下微生物固化对珊瑚砂、金属矿尾砂的改善效果<sup>[7-8]</sup>; 岳建伟、邵光辉等研究了不同固化方式下 MICP 对粉土性能的改善效果<sup>[9-10]</sup>; 沈泰宇、欧孝夺等研究了不同固化方式下 MICP 对紫色黏性土、湿性铝尾黏土性能的影响<sup>[11-12]</sup>; 陈彦瑞等研究了 MICP 对玄武岩残积土力学特性的影响<sup>[13]</sup>; 梁仕华等研究了不同固化次数和钙源下 MICP 对砂土性能的影响<sup>[14-15]</sup>。上述研究大多是针对砂类土, 对花岗岩残积土固化特性改善的研究

还处于初步阶段, 未对不同固化因素下 MICP 对花岗岩残积土的固化均匀性进行研究, 而固化均匀性是影响固化效果的重要指标。为此, 本文选取中国南方地区公路边坡的花岗岩残积土, 以巴氏芽孢杆菌为固化细菌, 通过无侧限抗压强度试验研究固化试样不同部位的破坏模式, 同时利用酸洗法测定不同固化次数和钙源下固化试样不同部位的碳酸钙含量, 分析固化次数和钙源对固化试样均匀性的影响, 最后通过电镜扫描观察固化试样的微观结构, 分析 MICP 对花岗岩残积土的固化机理, 为改善花岗岩残积土边坡表面性能提供参考。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 菌种培养

采用巴氏芽孢杆菌作为固化细菌, 其主要成分及含量见表 1。采用液体培养基扩大活化细菌, 培养过程中严格遵守细菌培养守则, 所用器材主要有高压灭菌锅、苏州净化无菌操作台、水浴恒温振荡摇床、高精度电子天平等。菌种培养完成后采用分光

<sup>\*</sup> 基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51878071; 52178416); 湖南省教育厅重点项目 (20A020); 长沙理工大学国际合作项目

光度计测试细菌的光密度值  $D_{OD600}$ 。 $D_{OD600}$  取值范围为 0.7~3.0, 本文取 1.9 左右。

表 1 液体培养基的成分及含量

成分	含量/(g·L <sup>-1</sup> )
酵母提取物	20.0
硫酸铵	10.0
氢氧化钠	1.3

细菌 48 h 生长曲线见图 1。由图 1 可知:巴氏芽孢杆菌的生长主要分为延滞期、对数期、稳定期。0~3 h 时  $D_{OD600}$  值小于 0.1, 溶液中细菌的分裂增殖速度缓慢;3~18 h 时细菌数量呈对数增长,  $D_{OD600}$  值由 0.1 快速升至 1.9;18~48 h 时  $D_{OD600}$  值维持在 1.9~2.1, 随着培养液中营养物质的减少和代谢产生有害物质的增加, 细菌增殖和细菌死亡趋于平衡, 细菌数量几乎不再变化, 细菌生长处于稳定期。由此可见, 巴氏芽孢杆菌的生长在 18 h 后达到顶峰, 为保证细菌优良性, 细菌培养时间不少于 18 h。

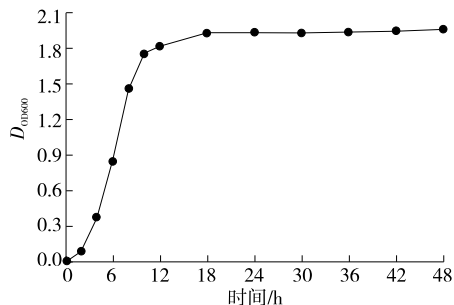


图 1 巴氏芽孢杆菌 48 h 生长曲线

## 1.2 试验土体

试验用土取自湖南省长沙市望城区湘江北路甘家洲附近公路边坡。根据 JTG 3430—2020《公路土工试验规程》<sup>[16]</sup>测试该花岗岩残积土的基本物理力学指标, 结果见表 2, 土体颗粒级配见图 2。

表 2 花岗岩残积土的基本物理力学参数

试验项目	试验结果
不均匀系数	16.32
曲率系数	1.23
密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	2.635
渗透系数/(cm·s <sup>-1</sup> )	$5.60 \times 10^{-6}$
天然含水率/%	19.65
最大干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	1.78
最优含水量/%	17.6
塑性指数	9.90
液性指数	-1.54

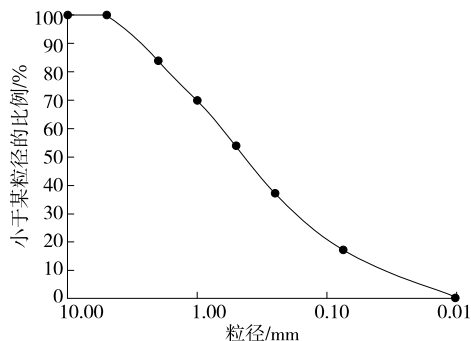


图 2 花岗岩残积土的颗粒级配曲线

## 1.3 试样制作与试验方法

固化试验采用针筒和蠕动泵注浆装置, 其中针筒为圆柱形, 外径为 38 mm、内径为 35 mm。制备试样时, 花岗岩残积土采用四分法取样, 为保证填筑压实度相近, 控制试样初始干密度相同。分 4 层填筑, 试样高度为  $(80 \pm 2)$  mm, 土样质量为  $(100 \pm 1)$  g。分别在针筒两端铺垫一层粗砂作为过滤层, 采用带橡胶连接管的橡胶塞将针筒上端封闭。试样制备完成后进行注浆固化处理, 利用蠕动泵将菌液与胶结液匀速注入试样中。胶结液为尿素和氯化钙混合液(质量比为 1:1), 其中氯化钙作为钙源为 MICP 提供钙离子, 尿素水解后为其提供碳酸根离子。采用分步间隔式注浆方法, 先将 40 mL 菌液以 1 mL/min 的速度灌入试样, 完成后静置 2 h, 待细菌均匀分布后再将 40 mL 胶结液以 2 mL/min 的速度灌入试样, 并静置 24 h, 确保微生物诱导碳酸钙沉淀的化学反应充分进行。以上为一个固化循环。固化周期结束后, 将试样在室内静置 7 d, 再放入烘箱烘干 24 h 后进行脱模处理。脱模完成后, 用塑料袋密封保存。

以固化次数(分别为 8 次、10 次、12 次、14 次)与钙源(分别为氯化钙、氯化镁、乙酸钙)作为试验因素, 通过无侧限抗压强度试验观察不同组合工况(见表 3)下固化试样的破坏形式, 采用过量盐酸浸泡法<sup>[17]</sup>测试固化试样不同部位的碳酸钙含量, 研究固化次数和钙源对固化试样均匀性的影响。

表 3 固化次数与钙源的正交组合

固化次数 $N$ /次	氯化钙	氯化镁	乙酸钙
8	$A_0$	$A_1$	$A_2$
10	$B_0$	$B_1$	$B_2$
12	$C_0$	$C_1$	$C_2$
14	$D_0$	$D_1$	$D_2$

## 2 固化效果分析

### 2.1 固化前后试样对比

完成不同工况下花岗岩残积土固化试验后,按前述方法养护 7 d,达到养护要求后拆模。固化前后花岗岩残积土见图 3。由图 3 可知:固化前土体呈松散的颗粒状,固化后土样胶结为具有一定强度的圆柱体,说明 MICP 对土体起到了胶结作用。

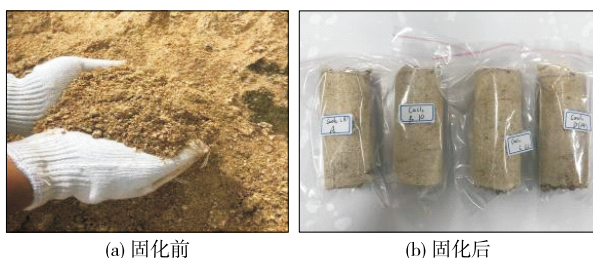


图 3 花岗岩残积土固化前后对比

### 2.2 固化试样破坏情况

为进一步分析 MICP 技术对花岗岩残积土试样的加固效果,根据 JTG 3430—2020《公路土工试验规程》对固化试样进行无侧限抗压强度试验。试验采用全自动无侧限抗压仪,加载精度为 $\pm 0.5$ ,加载速率为 1 mm/min。在对固化试样进行抗压强度试验前,用打磨石将试样上下两端打磨平整,以减少试验误差。

对不同组合工况下固化试样进行抗压强度试验,钙源为氯化钙时试样破坏形式见图 4。由图 4 可知:采用氯化钙固化 8 次、10 次的试样,在压力作用下,中部表面最先出现破坏裂缝,且随着压力的逐渐增大,破坏明显加剧,直至完全丧失强度;固化 12 次、14 次的试样在压力作用下由上自下产生斜裂缝,随着压力的增加斜裂缝逐渐发展,最后裂缝贯穿试样。不同工况下试样破坏形式出现差异,主要原因是低固化次数时试样固化不均匀,试样上下两端固化效果好,中部固化效果差,试样固化均匀性差;随着固化次数的增加,试样中部固化效果得到改善,整体均匀性有所提升。在低固化次数时,试样发生中部膨胀破坏;高固化次数时,试样发生斜裂缝破坏。钙源为氯化镁、乙酸钙时试样出现类似现象。

### 2.3 碳酸钙含量

#### 2.3.1 测定装置及方法

采用过量盐酸浸泡法分别测试固化试样上部、中部、下部的碳酸钙含量,探究钙源和固化次数对试样固化均匀性的影响。原状土中碳酸钙含量小于

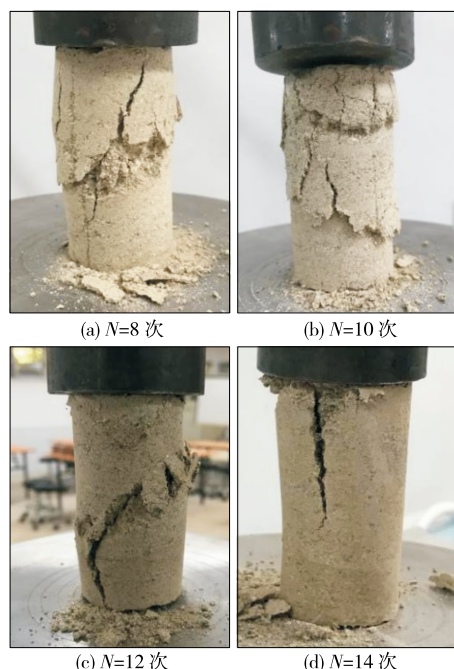


图 4 钙源为氯化钙时不同固化次数下固化试样的破坏形式

0.5%,对试验的影响可忽略不计。试验步骤如下: 1) 将压碎的固化试样放置在 105 °C 烘箱中烘干 24 h。2) 分别在试样上(出浆口)、中、下(注浆口)取样,放入质量为  $M$  的铝杯中,称量其质量  $M_0$ ,再放入一次性塑料杯中,并将大颗粒研磨至碎颗粒。3) 在烧杯中缓慢加入盐酸浸没土样,并用玻璃棒搅拌均匀。静置一夜,直至不产生气泡,认为碳酸钙完全反应。4) 称量滤纸质量  $M_1$ ,将滤纸沿漏斗边缘均匀铺设,将反应完的土颗粒倒入铺好滤纸的漏斗中,将土样中完全反应的离子全部过滤掉。5) 将滤纸及试样放入烘箱中烘干 24 h,烘干后称量其质量  $M_2$ 。6) 根据式(1)计算碳酸钙含量  $C$ 。

$$C = \frac{M_0 + M_1 - M_2}{M_0 - M} \quad (1)$$

#### 2.3.2 测试结果分析

固化试样不同部位的碳酸钙含量见图 5、表 4。

由图 5、表 4 可知:1) 经过 MICP 固化的土体,碳酸钙含量明显提高,说明碳酸钙的生成是花岗岩残积土试样强度提高的原因;不同固化次数和钙源下试样中碳酸钙含量及均匀性各不相同,试样上部、下部碳酸钙含量较高,中部碳酸钙含量较低,随着固化次数的增加,各部位碳酸钙含量均上升,且中部与上下部碳酸钙含量差值越来越小,试样均匀性得到改善;氯化钙固化 8 次试样上部、中部的碳酸钙含量

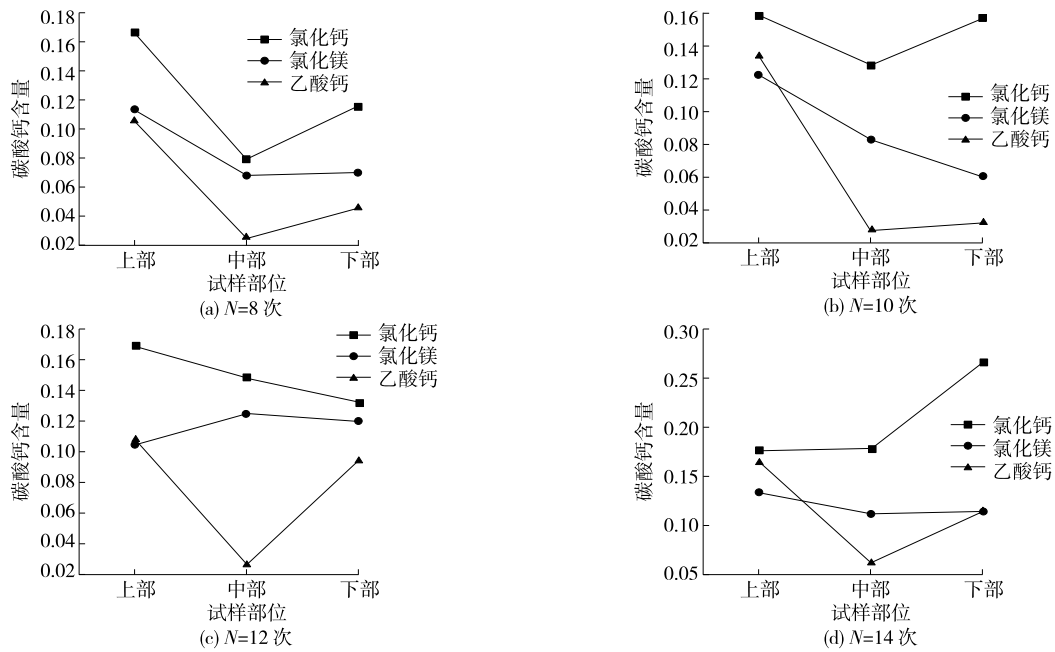


图5 固化试样不同部位的碳酸钙含量

表4 固化试样碳酸钙含量分布

固化次数 $N$ /次	不同钙源时试样不同部位的碳酸钙含量/%								
	氯化钙			氯化镁			乙酸钙		
	上	中	下	上	中	下	上	中	下
8	16.6	7.9	11.6	11.4	6.8	7.0	10.6	2.5	4.6
10	15.8	12.8	15.7	12.3	8.3	6.1	13.4	2.8	3.3
12	16.9	14.8	13.2	10.5	12.5	12.0	10.8	2.7	9.4
14	17.6	17.9	26.7	13.4	11.2	11.4	16.5	6.2	11.5

差值最大(为8.7%),氯化钙固化14次试样上部、中部的碳酸钙含量差值最小(为0.3%)。其原因为固化初期菌液和胶结液积聚在上部和下部发生反应生成大量碳酸钙,上部和下部碳酸钙大量累积,而试样中部由于上下两端堵塞,细菌和胶结液难以到达,因而中部碳酸钙含量较低;随着固化次数的增加,试样上下两端碳酸钙沉积率下降,而试样中部碳酸钙累积仍较高,试样均匀性得到改善。2) 氯化钙固化14次试样上、中、下部碳酸钙含量分别为17.6%、17.9%、26.7%,乙酸钙固化14次试样上、中、下部碳酸钙含量分别为16.5%、6.2%、11.5%,氯化钙固化试样的碳酸钙含量整体高于乙酸钙固化试样,且离散程度比乙酸钙固化试样低。固化次数相同时,氯化钙固化试样的碳酸钙含量和均匀性最高,氯化镁固化试样次之,乙酸钙固化试样最差。

### 3 固化微观机理分析

选取氯化钙固化14次的试样进行电镜扫描试

验,分析微生物固化花岗岩残积土的微观机理,结果见图6。

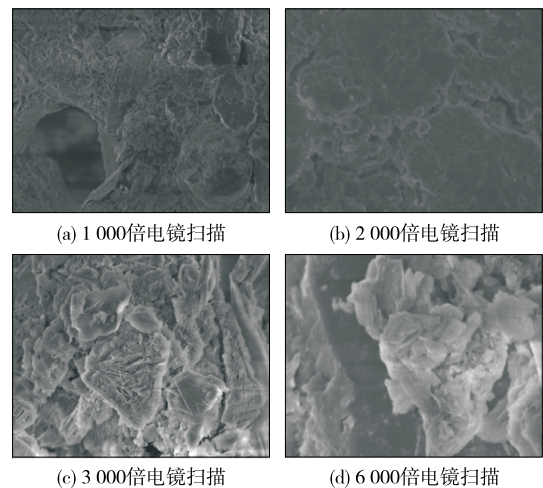


图6 固化试样的电镜扫描结果

由图6可知:电镜扫描不同放大倍数下均可见土颗粒表面有碳酸钙沉淀覆盖。放大1000倍时,

碳酸钙晶体依附在花岗岩残积土颗粒表面,对土颗粒产生一定保护作用;放大2 000倍时,部分区域有一层碳酸钙薄膜覆盖在土颗粒表面;放大3 000倍时,碳酸钙出现层叠现象,逐渐形成较厚的沉淀聚集体;放大6 000倍时,碳酸钙以方解石的晶体形态覆盖或填充土体颗粒表面,部分空隙区还可看到丝状连接的胶结物。方解石结构的抗压能力强,稳定性较强。可见,碳酸钙的生成是MICP技术改善花岗岩残积土性质的原因,其内在机理是生成的碳酸钙对土颗粒表层覆盖、包裹、填充,进而起到对土体的胶结作用。

#### 4 结论

本文通过微生物固化花岗岩残积土室内试验,得到不同钙源和固化次数下花岗岩残积土的固化试样,通过无侧限抗压强度试验得到试样破坏情况,采用过量盐酸浸泡法测试试样不同部位的碳酸钙含量,并通过电镜扫描探究其固化机理,得出如下结论:

(1) 钙源相同时,随着固化次数的增加,试样中碳酸钙含量增大,且碳酸钙分布均匀性得到改善。

(2) 固化次数相同时,氯化钙固化试样的碳酸钙含量和均匀性最高,氯化镁次之,乙酸钙最差。

(3) MICP能有效固化花岗岩残积土。在宏观上,固化试样中碳酸钙含量显著提高;在微观上,生成的碳酸钙以方解石的晶体形态覆盖或填充土体颗粒表面,这是MICP固化花岗岩残积土的内在机理。

#### 参考文献:

- [1] COUTINHO R Q, SILVA M M, DOS SANTOS A N, et al. Geotechnical characterization and failure mechanism of landslide in granite residual soil[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2019, 145(8): 05019004.
- [2] 孙银磊, 汤连生. 化学成分对花岗岩残积土抗拉张力学特性的影响[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2018, 57(3): 7-13.
- [3] 吴能森. 花岗岩残积土的分类研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(12): 2299-2304.
- [4] SHARAKY A M, MOHAMED N S, ELMASHAD M E, et al. Application of microbial biocementation to im-

prove the physico-mechanical properties of sandy soil[J]. Construction and Building Materials, 2018, 190: 861-869.

- [5] 刘汉龙, 马国梁, 赵常, 等. 微生物加固钙质砂的宏微观力学机理[J]. 土木与环境工程学报, 2020, 42(4): 205-206.
- [6] 董博文, 刘士雨, 俞缙, 等. 基于微生物诱导碳酸钙沉淀的天然海水加固钙质砂效果评价[J]. 岩土力学, 2021, 42(4): 1104-1114.
- [7] 陈适, 方方位, 申春妮, 等. 珊瑚砂微生物固化条件优化的正交试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17(3): 125-131.
- [8] 伍玲玲, 张志军, 喻清, 等. 微生物注浆改善某金属矿尾砂性质的试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47(6): 1354-1359.
- [9] 岳建伟, 张宝玺, 赵丽敏, 等. 改良微生物诱导碳酸钙沉淀技术加固粉性土力学性能[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(18): 7702-7710.
- [10] 邵光辉, 尤婷, 赵志峰, 等. 微生物注浆固化粉土的微观结构与作用机理[J]. 南京林业大学学报, 2017, 41(2): 129-135.
- [11] 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.
- [12] 欧孝夺, 莫鹏, 江杰, 等. 生石灰与微生物共同固化过湿性铝尾黏土试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(4): 624-631.
- [13] 陈彦瑞, 雷学文, 孟庆山, 等. 自源型铁细菌固化玄武岩残积土的室内试验研究[J]. 工业建筑, 2017, 47(9): 95-100.
- [14] 梁仕华, 牛九格, 戴君, 等. 循环灌浆次数对微生物固化砂土效果的影响[J]. 工业建筑, 2018, 48(7): 22-26.
- [15] 梁仕华, 牛九格, 房采杏, 等. 钙源对微生物沉积碳酸钙固化砂土的试验研究[J]. 工业建筑, 2018, 48(7): 10-15.
- [16] 交通运输部公路科学研究院. 公路土工试验规程: JTG 3430—2020[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2020.
- [17] 谢约翰, 唐朝生, 尹黎阳, 等. 纤维加筋微生物固化砂土的力学特性[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(4): 675-682.

收稿日期: 2022-05-17