

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.202303142024061981

文章编号:1674-599X(2024)03-0001-08

引用格式:张永杰,唐银港,欧阳健,等.微生物诱导碳酸钙沉淀技术对花岗岩残积土渗透性的影响规律研究[J].交通科学与工程,2024,40(3):1-8,107.

Citation: ZHANG Yongjie, TANG Yingang, OUYANG Jian, et al. Study on the effect law of microbial induced calcite precipitation technique on the permeability of granite residual soil[J]. J Transp Sci Eng, 2024, 40(3): 1-8, 107.

微生物诱导碳酸钙沉淀技术对花岗岩残积土 渗透性的影响规律研究

张永杰¹,唐银港^{1,2},欧阳健¹,罗志敏¹,谭长江¹

(1.长沙理工大学 土木工程学院,湖南 长沙 410114;

2.中交第二航务工程勘察设计院有限公司,湖北 武汉 430071)

摘要:用花岗岩残积土填筑的路基具有水稳性差、渗透系数大、易受降雨冲刷等特点。为探讨微生物诱导碳酸钙沉淀(microbial induced calcite precipitation, MICP)技术对花岗岩残积土渗透性的影响规律及作用机理,测定MICP固化前后重塑花岗岩残积土试样的渗透系数,并对固化前后的试样进行碳酸钙质量分数测定、核磁共振扫描、电镜扫描以及X射线衍射分析。结果表明:1) MICP技术能使花岗岩残积土试样的渗透系数降低两个数量级,且在试验范围内,将各因素按照对渗透系数的影响程度从大到小排列,依次为:胶结液浓度、固化次数、灌注液量。同时,最佳固化条件为灌注液量40 mL、胶结液浓度1.0 mol/L、固化16次。2) 固化产生的沉淀填充在花岗岩残积土孔隙中,致使孔隙间的连通性变差,孔隙率下降。总体上,越靠近注入端碳酸钙的质量分数越大,固化效果越好。3) 簇状的方解石碳酸钙有效胶结了原本松散的土颗粒,堵塞了土颗粒孔隙间的渗流通道,降低了试样的渗透系数。
关键词:花岗岩残积土;渗透系数;微生物诱导碳酸钙沉淀技术;核磁共振;扫描电镜;X射线衍射

中图分类号:U416.1

文献标志码:A

Study on the effect law of microbial induced calcite precipitation technique on the permeability of granite residual soil

ZHANG Yongjie¹, TANG Yingang^{1,2}, OUYANG Jian¹, LUO Zhimin¹, TAN Changjiang¹

(1. School of Civil Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China;

2. CCCC Second Harbor Consultants Co., Ltd., Wuhan 430071, China)

Abstract: Granite residual soils are characterized by poor water stability, high permeability coefficients, and susceptibility to damage by rainfall scour when used for roadbed filling. To explore the effect of microbial induced calcite precipitation (MICP) technique on the permeability coefficient of granite residual soils and the mechanism of action, the permeability coefficient of remodeled granite residual soil specimens before and after MICP curing was measured, and the calcium carbonate content, nuclear magnetic resonance scan, scanning electron microscope scan and X-ray diffraction analysis were performed on the specimens before and after curing. The results showed that 1) The

收稿日期:2023-03-14

基金项目:国家自然科学基金项目(51878071,52178416);湖南省教育厅重点项目(20A020);湖南省自然科学基金项目(2022JJ30615)

通信作者:张永杰(1981—),男,教授,主要从事边坡与隧道工程稳定及可靠性分析等方面的研究工作。

E-mail:zhangyongjie@csust.edu.cn

投稿网址:https://jtkxygc.csust.edu.cn/jtkxygc/home

MICP technique can reduce the permeability coefficient of granite residual soil specimens by two orders of magnitude, in the test range, the order of the influence degree of each factor on the permeability coefficient from large to small is: cement concentration, number of cycles, infusion volume, and the best effect is achieved when the infusion volume is 40 mL, the concentration of cement is 1.0 mol/L and the curing cycle is 16 times. 2) The precipitation generated by curing fills in the between the pores of the granite residual soil, resulting in poor connectivity between the pores and a decrease in porosity, and overall the higher the calcium carbonate content near the injection end, the better the curing effect. 3) The clustered calcite calcium carbonate effectively cemented the originally loose soil particles, blocked the seepage channels between the soil particles pores, and reduced the permeability coefficient of the specimen.

Key words: granite residual soil; permeability coefficient; microbial induced calcite precipitation technique; nuclear magnetic resonance; scanning electron microscope; X-ray diffraction

花岗岩残积土这一特殊土体广泛分布在我国两广以及湘赣等南方地区^[1],具有渗透系数大、抗剪强度低等特点。在降雨侵蚀作用下,用花岗岩残积土填筑的路基边坡可能会遭受局部冲刷,进而影响边坡的整体稳定性^[2-3]。目前,普遍采用水泥砂浆对花岗岩残积土路基边坡进行边坡稳定防护^[4],但传统水泥砂浆加固法对路基的水相、生物相以及土壤相的相互联系有负面影响^[5]。因此,有必要采用一种效果更好的技术对花岗岩残积土路基表层进行加固,提高其抗侵蚀能力。

微生物诱导碳酸钙沉淀(microbial induced calcite precipitation, MICP)技术作为一种新兴的土壤改良方法,具有反应快、固化效果好、反应过程可控及对环境友好等优点^[6],引发了许多专家学者对其进行深入研究。MICP固化反应的作用效果受到许多因素的影响。CHENG等^[7]发现在脲酶活性较低的环境和温度条件下,MICP技术对于砂土的固化效果更好。尹黎阳等^[8]系统研究了胶结液浓度、温度以及钙源等因素对MICP的影响。彭劫等^[9]发现在不同的温度下采用不同的固化方式会影响MICP技术的固化效率。此外,多位学者发现MICP技术能有效降低土体的渗透系数。何稼等^[10]发现砂土内碳酸钙的质量分数大于15%有利于砂土渗透性的改善。因此,MICP技术在土体抗渗方面具有广泛的工程应用前景,尤其在边坡和堤防的防渗处理方面。刘璐等^[11]将菌液和营养液均匀地撒在堤坝模型表层,使堤坝的抗渗性能得到了大幅提升。谈叶飞等^[12]对黏性土堤防进行了MICP固化试验,将其渗透系数降低了两个数量级。以上研究未涉及花岗岩残积土这一南方常见的特殊土,更未对MICP

降低花岗岩残积土渗透系数的作用效果及机理进行深入研究。因此,有必要进行MICP对花岗岩残积土渗透系数的影响规律和作用机理的研究。

本文在课题组前期研究的基础上^[13-14],通过控制灌注液量、胶结液浓度以及固化次数,对固化前后的花岗岩残积土试样进行渗透系数的测定,并对固化前后的试样进行碳酸钙质量分数测定、核磁共振(nuclear magnetic resonance, NMR)扫描、电镜(scanning electron microscope, SEM)扫描以及X射线衍射(X-ray diffraction)分析,揭示MICP对花岗岩残积土渗透系数的影响规律以及作用机理,以期MICP技术在花岗岩残积土路基表层固化处理的应用方面提供指导和借鉴。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 试验用土

本文所用花岗岩残积土土样均为湖南省长沙市某公路东侧边坡0~10 cm深度的表层土,根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)的要求^[15],对所取土样进行基本物理和颗粒筛分试验,得到图1所示的颗粒级配曲线。花岗岩残积土的基本物理参数见表1。

1.1.2 菌液和胶结液

由于巴氏芽孢杆菌分泌的脲酶具有较强的活性,目前微生物固化土领域普遍采用该菌^[16]。本文采用的巴氏芽孢杆菌编号为bio-67773,液体培养基的具体成分为酵母提取粉、硫酸铵分析纯及氢氧化钠分析纯,其质量浓度分别为20.0、10.0、1.3 g/L。

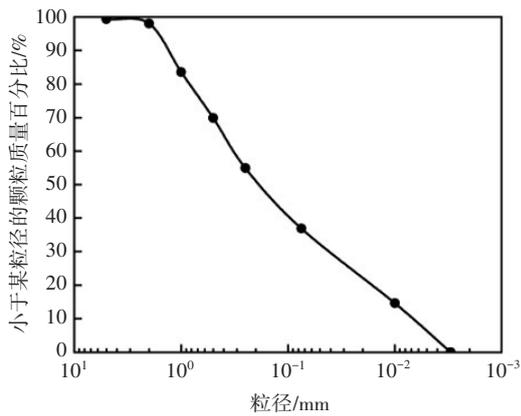


图1 花岗岩残积土的颗粒级配曲线

Fig. 1 Grain gradation curve of granite residual soil

表1 花岗岩残积土的基本物理参数

Table 1 Basic physical parameters of granite residual soil

含水率/%	密度/(g·cm ⁻³)	渗透系数/(cm·s ⁻¹)	最大干密度/(g·cm ⁻³)	最优含水率/%
19.65	1.819	1.37×10 ⁻⁴	1.768	17.42

氯化钙能为固化反应提供钙源,而尿素经脲酶水解后能生成碳酸根离子。因此,本文采用氯化钙和尿素的混合溶液作为胶结液,课题组前期研究发现当胶结液浓度为1.0 mol/L左右时,固化效果最佳^[14-15]。故设置胶结液的浓度分别为0.5、1.0、1.5及2.0 mol/L,且氯化钙和尿素物质的量的比为1:1。在上述4种胶结液浓度下,氯化钙的质量分别为55.5、111.0、166.5、222.0 g,尿素的质量分别为30.0、60.0、90.0、120.0 g。

1.2 试样制备与处理

1.2.1 固化模具

在将花岗岩残积土完全干燥并重新筛分后,按照颗粒级配及最优含水率(17.42%),采用静压法制备重塑试样。试样直径为3.91 cm,高为8.00 cm,质量为(159.5±2.0) g,天然密度为1.660 g/cm³,压实度为80%。将试样压实重塑后,采用自制模具对重塑试样进行MICP固化试验,本文对试样进行上、中、下三等分,固化模具如图2所示。



图2 固化模具

Fig. 2 Cementing mold

1.2.2 固化装置

采用饱和和分步注浆的方式将菌液和胶结液先后通过蠕动泵从下至上注入试样^[17-19]。控制灌注菌液和胶结液的流速分别为 2.8×10^{-3} 、 1.4×10^{-3} cm/s,菌液和胶结液的灌注时间间隔2 h。当灌注全部完成后,静置24 h以待完全反应。以上步骤为一次固化。灌注完成并养护14 d后将试样烘至完全干燥,再对试样进行常水头渗透试验。微生物固化装置如图3所示。

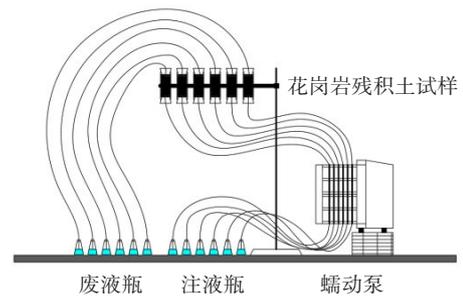


图3 微生物固化装置

Fig. 3 Microbial curing device

1.3 正交试验方案设计

在预试验结果以及课题组前期研究成果的基础上^[13-14],根据正交试验设计原理,以固化前后试样的渗透系数为评价指标,并以H1试样为对照,分析灌注液量、胶结液浓度和固化次数(每次间隔24 h)对MICP固化重塑花岗岩残积土渗透系数的影响规律。H1试样未进行固化处理,只注入等量的去离子水。正交试验方案见表2~3。

表2 正交试验因素水平

Table 2 The factor level of orthogonal experiment

项目	灌注液量/mL	胶结液浓度/(mol·L ⁻¹)	固化次数/次
水平	30, 35, 40, 45	0.5, 1.0, 1.5, 2.0	10, 12, 14, 16
代表符号	A ₁ , A ₂ , A ₃ , A ₄	B ₁ , B ₂ , B ₃ , B ₄	C ₁ , C ₂ , C ₃ , C ₄

表3 正交试验设计

Table 3 Orthogonal experiment design

试样编号	固化条件	试样编号	固化条件
G1	A ₁ B ₁ C ₁	G9	A ₃ B ₁ C ₃
G2	A ₁ B ₂ C ₂	G10	A ₃ B ₂ C ₄
G3	A ₁ B ₃ C ₃	G11	A ₃ B ₃ C ₁
G4	A ₁ B ₄ C ₄	G12	A ₃ B ₄ C ₂
G5	A ₂ B ₁ C ₂	G13	A ₄ B ₁ C ₄
G6	A ₂ B ₂ C ₁	G14	A ₄ B ₂ C ₃
G7	A ₂ B ₃ C ₄	G15	A ₄ B ₃ C ₂
G8	A ₂ B ₄ C ₃	G16	A ₄ B ₄ C ₁

1.4 渗透试验设计

本文使用图4所示的自制常水头渗透装置对H1以及G1~G16花岗岩残积土试样进行渗透系数的测定。

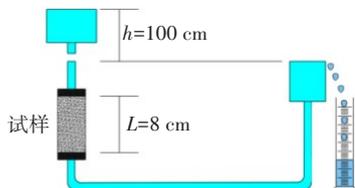


图4 常水头渗透试验装置

Fig. 4 Constant head permeability test device

常水头渗透试验的原理为达西定律^[20]。在进行饱和和渗透系数 k 的计算前,需确定渗流长度 L 、渗透断面面积 A 、水位差 h 、渗水量 V 以及渗流时间 t 。在本次试验中, $L=8\text{ cm}$, $A=12\text{ cm}^2$, $h=100\text{ cm}$, $t=1\text{ h}$,渗水量 V 为测量值。待试样饱和后,对其进行渗水量测量,每个试样重复测量3次,取平均值。渗透系数 k 的计算公式为:

$$k = \frac{VL}{Aht} \quad (1)$$

1.5 碳酸钙质量分数的计算

排出去的碳酸钙对试样渗透系数的降低并没起到作用,因此本文对于碳酸钙质量分数的测定只包括残留在试样内的碳酸钙。对H1及G10试样的不同部位进行碳酸钙质量分数的测定,可以在一定程度上反映MICP固化重塑花岗岩残积土的固化效率及固化均匀程度。将H1及G10试样完全烘干后,根据试样高度将其切割成三等份,并对不同部位采用过量盐酸浸泡,称量并记录各部位浸泡前后的质量,然后根据式(2)计算G10试样上、中、下部位的反应率及碳酸钙的质量分数。

$$M_{\text{CaCO}_3} = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \quad (2)$$

式中: M_{CaCO_3} 为碳酸钙的质量分数,%; W_1 为酸洗前的质量,g; W_2 为酸洗后的质量,g。

2 渗透结果分析

由于MICP固化作用不可控,固化存在不均匀的现象。因此,计算结果代表重塑花岗岩残积土试样的平均渗透系数。根据测定结果,试样H1的饱和渗透系数为 $1.01 \times 10^{-4}\text{ cm/s}$,G1~G16试样的饱和渗透系数见表4。

表4 常水头渗透试验结果

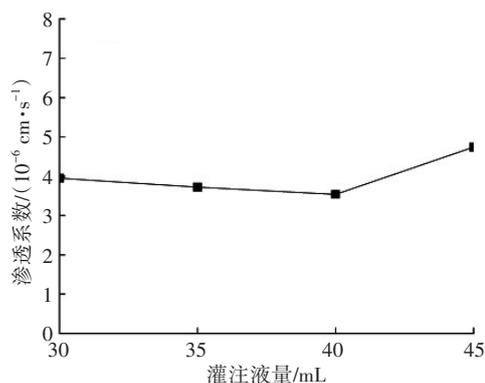
Table 4 Result of constant head permeation tests

试样编号	渗透系数/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	试样编号	渗透系数/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)
G1	5.48×10^{-6}	G9	3.05×10^{-6}
G2	2.86×10^{-6}	G10	2.03×10^{-6}
G3	3.35×10^{-6}	G11	4.04×10^{-6}
G4	4.10×10^{-6}	G12	5.05×10^{-6}
G5	4.00×10^{-6}	G13	2.99×10^{-6}
G6	3.29×10^{-6}	G14	2.69×10^{-6}
G7	2.80×10^{-6}	G15	4.23×10^{-6}
G8	4.78×10^{-6}	G16	9.04×10^{-6}

分析表4可知,G1~G16试样渗透系数的平均值为 $3.98 \times 10^{-6}\text{ cm/s}$,与未固化的H1试样相比,G1~G16试样渗透系数的平均值仅为H1试样的3.9%,这说明MICP技术能显著降低重塑花岗岩残积土的渗透系数,也说明该技术是可行的。其中,G10试样的渗透系数为 $2.03 \times 10^{-6}\text{ cm/s}$,下降最明显,说明MICP对G10试样的固化效果最好,即在正交试验范围内存在一个最佳固化条件,即灌注液量为40 mL、胶结液浓度为1.0 mol/L以及固化16次。

在固化试验过程中,能在硅胶管内观察到白色碳酸钙沉淀随着固化液的注入而被排出,且在固化结束后,在废液收集锥形瓶瓶底有一层碳酸钙沉淀,但在不同的固化条件下瓶底碳酸钙沉淀的厚度有差异,说明在MICP固化过程中存在碳酸钙被冲刷出试样及固化液反应不完全的现象。

图5所示为菌液胶结液的灌注液量、胶结液浓度以及固化次数与渗透系数之间的对应关系。由图5可知,试样的渗透系数随着灌注液量和胶结液浓度的增大均呈现出先降低后增大的趋势,而随着固化次数的增加,呈现出下降的趋势。



(a) 灌注液量

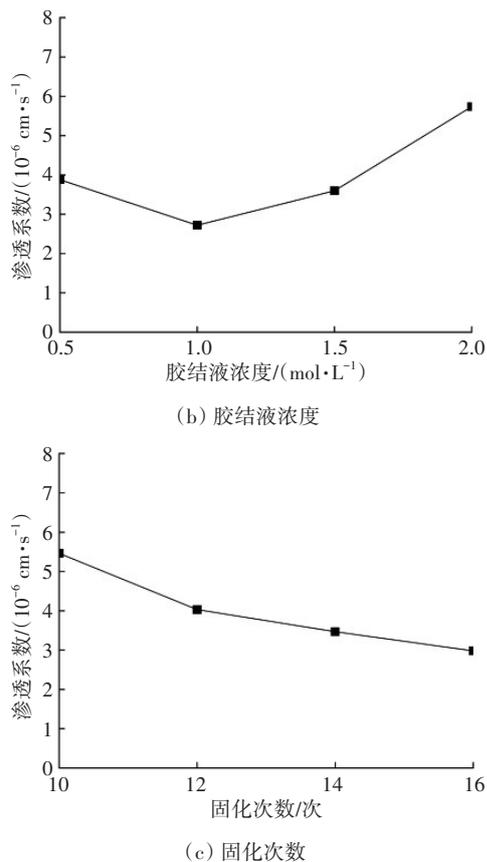


图5 试验因素与渗透系数的关系

Fig. 5 Relationship between the test factors and the permeability coefficient

对灌注液量、胶结液浓度及固化次数与渗透系数之间的对应关系进行方差(偏离程度)分析有着重要的意义。方差分析结果能体现不同固化变量对试验结果的影响程度^[21]。在本试验中灌注液量、胶结液浓度以及固化次数对于渗透系数的方差分别为1 620.2、43 855.4和29 988.5。

通过对以上试验结果进行综合分析可得到以下推断:1) 随着灌注液量和胶结液浓度的增加,固化效果并未随之变好,这是因为灌注液量过大会使花岗岩残积土试样内的碳酸钙沉淀随着菌液和胶结液的注入而被排出。而过大的胶结液浓度会使巴氏芽孢杆菌活性下降^[22],进而使产生的脲酶数量变少。2) 随着固化次数的逐渐增加,试样内的碳酸钙沉淀逐渐增多并进一步填充了试样的孔隙,表现为试样的渗透系数随着固化次数的增加而降低。3) 根据方差计算结果,在固化条件范围内,将各影响因素按照对重塑花岗岩残积土渗透系数的影响程度从大到小排列,依次为:胶结液浓度、固化次数、灌注液量。因此,在MICP技术固化花岗岩残积土的研究中应着重关注胶结液的配比和浓度的

确定。

根据以上结论,在本试验中渗透系数降低最多的是G10试样,后文所有的关于MICP对重塑花岗岩残积土渗透系数影响的作用机理研究均以未固化试样H1及试样G10为试验对象。

3 固化机理分析

3.1 碳酸钙质量分数的测定

H1试样在酸洗前后质量并无明显变化,说明在未固化的试样中不含碳酸钙等溶于盐酸的矿物。在对G10试样各部位进行酸洗后,其质量均有明显下降,说明固化反应正常进行且试样中有碳酸钙生成,MICP固化改变了花岗岩残积土试样的矿物组成,总体上表现为试样内部的孔隙被碳酸钙填充,各部位酸洗前后的质量如图6所示。

根据式(2)求出G10试样上、中、下3个部位碳酸钙的质量分数,结果分别为18.29%、24.3%和28.18%,说明不同部位碳酸钙的质量分数并不相同,其中试样下部碳酸钙的生成量最多,总体上表现为越靠近菌液和胶结液注入端,固化效果越好。这是由于在反应初期在试样注入端积累了大量的碳酸钙沉淀,其对渗流路径造成封堵,使菌液与胶结液的渗流受阻。菌液与胶结液在试样下部停留时间变长,导致碳酸钙容易在试样下部沉淀,所以固化效果整体分布不均匀。

总体来看,G10试样中含钙离子0.512 mol,在整个固化过程中注入试样G10的胶结液中的钙离子为0.720 mol,因此钙离子在花岗岩残积土试样G10中的总体转化率为71%。

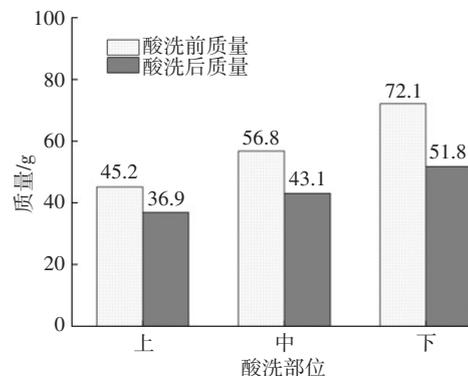


图6 酸洗前后的质量

Fig. 6 Mass before and after acid washing

3.2 NMR扫描

NMR扫描结果可用来对岩土试样的孔隙率、孔

径分布以及孔隙连通性进行定量分析。为了更加直观地描述孔隙率的变化情况,将孔径小于0.24 μm的孔隙定义为小孔隙,将孔径为0.24~10.00 μm的孔隙定义为中孔隙,将孔径大于10.00 μm的孔隙定义为大孔隙^[21]。分别对H1及G10试样进行NMR扫描,H1及G10试样的 T_2 (弛豫时间)弛豫图谱如图7所示。

从图7可以看出,在固化前后的试样中均存在大(弛豫时间为100~10 000 ms)、中(弛豫时间为10~<100 ms)、小(弛豫时间为0.01~<10 ms)3种尺寸的孔隙。其中,相对于H1试样,在G10试样中小孔隙和中孔隙的比例均有一定程度的下降。

以上结果说明,在MICP的固化作用下,重塑花岗岩残积土试样的内部孔隙逐渐减少,中、小孔隙被有效填充,大孔隙的占比增大。随着反应的进行,试样内部的孔隙率总体变小,试样孔隙间的连通性变差,宏观表现为试样渗透系数大幅降低。

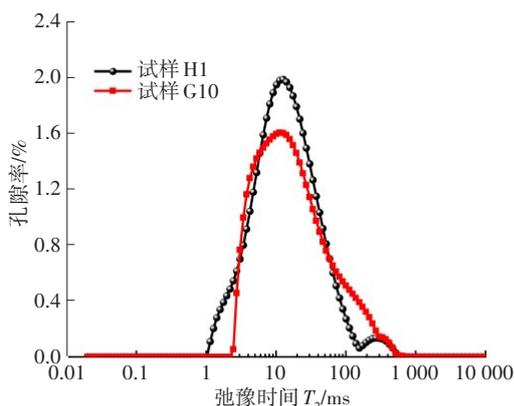
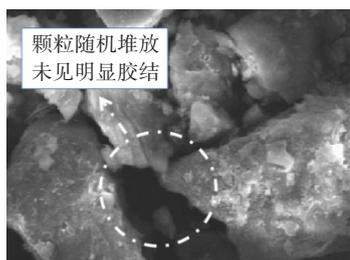


图7 核磁共振 T_2 图谱

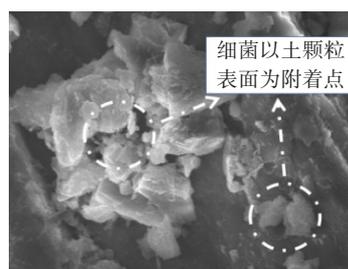
Fig. 7 T_2 spectra of nuclear magnetic resonance

3.3 SEM扫描

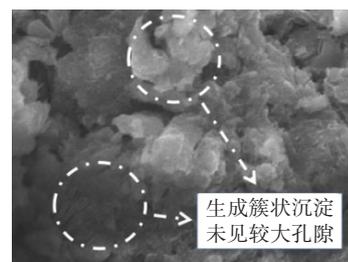
为探究微观角度下碳酸钙沉淀以及试样孔隙的分布形式,本文对H1及G10试样进行了SEM扫描。分别对G10试样的上、中、下3个部位进行取样并扫描,以探究不同部位的固化差异。将扫描放大倍数设置为3 000倍,SEM扫描结果如图8所示。



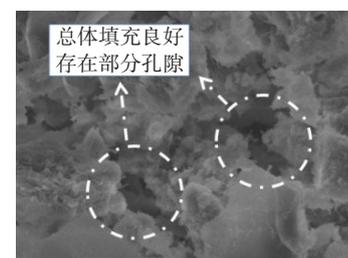
(a) H1试样



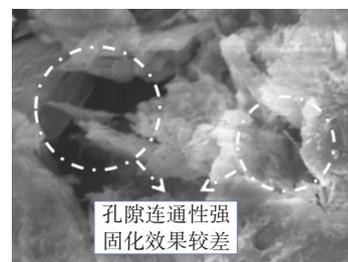
(b) 细菌附着点



(c) G10试样下部



(d) G10试样中部



(e) G10试样上部

图8 SEM图

Fig. 8 SEM images

由图8(a)可知,试样H1中的土颗粒随机堆放,呈现出类似砂土的性质,颗粒间没有明显的胶结,且试样的孔隙率较大,颗粒粒径也较大。这说明未固化试样的孔隙连通性较好,为液体的渗流提供了通道,宏观表现为试样的渗透系数较大,抗渗性能不佳。由图8(b)可知,巴氏芽孢杆菌以土颗粒表面为附着点,随着胶结液的注入生成簇状碳酸钙沉淀并填充在土颗粒之间。

由图8(c)~8(e)可知,G10试样上、中、下部均出现了簇状的亮白色晶体沉淀,并填充于土颗粒孔隙中,将大孔隙分割成小孔隙,试样中的渗流通道减少。试样总体上表现为越靠近注入端,沉淀越

多,孔隙越小,渗流通道越少,连通性越差,这和碳酸钙质量分数测定结果以及NMR扫描结果一致,这也说明了MICP固化花岗岩残积土的不均匀性,这对MICP技术在实际工程中的应用具有一定的参考价值。

3.4 XRD分析

自然界中常见的碳酸钙的同素异构体为方解石。为了探究MICP固化试验中碳酸钙沉淀的晶型,对H1试样及G10试样分别进行XRD分析,结果如图9所示。

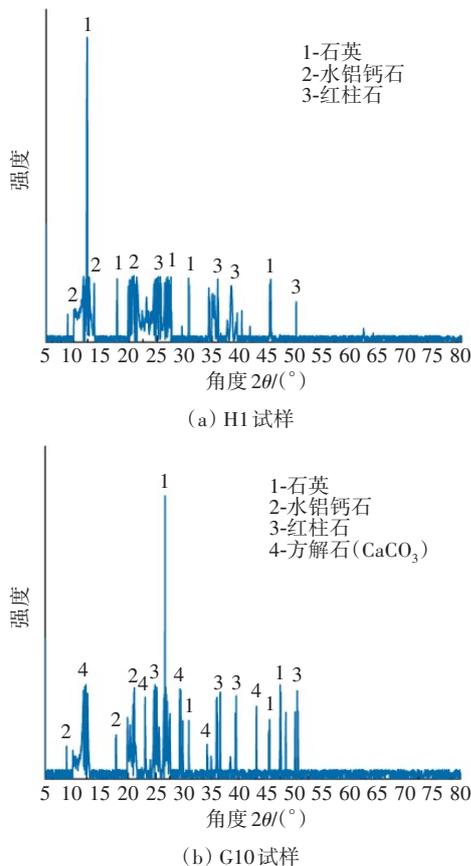


图9 XRD图谱

Fig. 9 XRD patterns

由图9可知,未被MICP固化的H1花岗岩残积土试样的主要物质组分为石英、水铝钙石及红柱石,并未见任何碳酸钙同素异构体。而在经过固化处理的试样G10的衍射图谱中,出现了方解石晶型的碳酸钙特征衍射峰,但文石和球霰石形态的特征衍射峰并未出现在G10试样中。这说明MICP固化反应生成的碳酸钙是以方解石形态存在于花岗岩残积土试样孔隙中的。方解石作为具有稳定结构的碳酸钙同素异构体,具有不溶于水以及胶结能力强的特性。因此,方解石晶体能有效地填充于花岗

岩残积土试样的孔隙中,堵塞土颗粒孔隙间的渗流通道,进而降低试样的渗透系数。

4 结论

本文以不同灌注液量、胶结液浓度以及固化次数作为变量,以固化前后花岗岩残积土的渗透系数为固化效果评估对象,对MICP技术对花岗岩残积土渗透系数的影响规律进行研究,确定了最佳固化参数。并对固化前后的试样进行碳酸钙质量分数的测定、NMR扫描、SEM扫描及XRD分析,揭示了MICP降低花岗岩残积土渗透系数的作用机理,并得到以下主要结论:

1) MICP技术能显著降低重塑花岗岩残积土的渗透系数。在试验范围内,将各因素按照对渗透系数的影响程度从大到小排列,依次为:胶结液浓度、循环次数、灌注液量,MICP使花岗岩残积土的渗透系数达到最小的最优固化条件为:灌注液量40 mL,胶结液浓度1.0 mol/L,固化16次。

2) 固化产生的沉淀填充在花岗岩残积土孔隙中,随着试样内中、小孔隙被有效填充,试样内部的孔隙率大幅降低,致使试样孔隙间的连通性变差,渗透系数也大幅下降。同时,固化中存在固化不均匀的现象,总体上越靠近注入端碳酸钙的质量分数越大,固化效果越好。

3) 巴氏芽孢杆菌以花岗岩残积土颗粒表面为附着点,生成了簇状的碳酸钙沉淀,原本松散的土颗粒被有效地胶结在一起。碳酸钙沉淀为稳定的方解石形态,有效地填充于花岗岩残积土试样的孔隙中,切割、堵塞了土颗粒孔隙间的渗流通道。

参考文献(References):

- [1] 陈杰,刘正楠,张锐.花岗岩残积土路基压实控制方法研究[J].交通科学与工程,2016,32(1):1-6. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2016.01.001.
CHEN Jie, LIU Zhengnan, ZHANG Rui. Study on the controlling method for subgrade compaction of granite residual soil [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2016, 32(1): 1-6. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2016.01.001.
- [2] 汤连生,桑海涛,宋晶,等.非饱和花岗岩残积土粒间联结作用与脆弹塑性胶结损伤模型研究[J].岩土力学,2013,34(10):2877-2888. DOI: 10.16285/j.rsm.2013.10.015.
TANG Liansheng, SANG Haitao, SONG Jing, et al.

- Research on soil particle joint function and brittle-elastoplastic cement damage model of unsaturated granite residual soil [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34 (10): 2877-2888. DOI: 10.16285/j.rsm.2013.10.015.
- [3] 胡华, 吴轩, 张越. 基于模拟试验的强降雨条件下花岗岩残积土斜坡滑塌破坏机理分析[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2021, 32(5): 92-97. DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2021.05-11.
- HU Hua, WU Xuan, ZHANG Yue. Experimental study on slope collapse characteristics of granite residual soil slope under heavy rainfall [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2021, 32(5): 92-97. DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2021.05-11.
- [4] 唐皇, 阳逸鸣. 减水剂影响下湿磨黏土水泥灌浆材料性能研究[J]. *交通科学与工程*, 2020, 36(4): 76-80. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.04.011.
- TANG Huang, YANG Yiming. Experimental study on properties of wet-grinding clay cement grouting material under the influence of water reducer [J]. *Journal of Transport Science and Engineering*, 2020, 36(4): 76-80. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.04.011.
- [5] 周跃. 植被与侵蚀控制: 坡面生态工程基本原理探索[J]. *应用生态学报*, 2000, 11(2): 297-300. DOI: 10.13287/j.1001-9332.2000.0078.
- ZHOU Yue. Vegetation and erosion control: exploration on basic principle of slope engineering [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(2): 297-300. DOI: 10.13287/j.1001-9332.2000.0078.
- [6] 吴创周, 楚剑, 成亮, 等. 微生物注浆地基处理技术研究进展[J]. *地基处理*, 2020, 2(3): 181-186. DOI: 10.3785/j.issn.2096-7195.2020.03.001.
- WU Chuangzhou, CHU Jian, CHENG Liang, et al. Advances of ground improvement with MICP-based biogrouting [J]. *Journal of Ground Improvement*, 2020, 2(3): 181-186. DOI: 10.3785/j.issn.2096-7195.2020.03.001.
- [7] CHENG L, SHAHIN M A, MUJAH D. Influence of key environmental conditions on microbially induced cementation for soil stabilization [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2017, 143(1): 1-11. DOI: 10.1061/(asce)gt.1943-5606.0001586.
- [8] 尹黎阳, 唐朝生, 谢约翰, 等. 微生物矿化作用改善岩土材料性能的影响因素[J]. *岩土力学*, 2019, 40(7): 2525-2546. DOI: 10.16285/j.rsm.2018.0520.
- YIN Liyang, TANG Chaosheng, XIE Yuehan, et al. Factors affecting improvement in engineering properties of geomaterials by microbial-induced calcite precipitation [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(7): 2525-2546. DOI: 10.16285/j.rsm.2018.0520.
- [9] 彭劼, 冯清鹏, 孙益成. 温度对微生物诱导碳酸钙沉积加固砂土的影响研究[J]. *岩土工程学报*, 2018, 40(6): 1048-1055. DOI: 10.11779/CJGE201806010.
- PENG Jie, FENG Qingpeng, SUN Yicheng. Influences of temperatures on MICP-treated soils [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 40(6): 1048-1055. DOI: 10.11779/CJGE201806010.
- [10] 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. DOI: 10.11779/CJGE201604008.
- HE Jia, CHU Jian, LIU Hanlong, et al. Research advances in biogeotechnologies [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(4): 643-653. DOI: 10.11779/CJGE201604008.
- [11] 刘璐, 沈扬, 刘汉龙, 等. 微生物胶结在防治堤坝破坏中的应用研究[J]. *岩土力学*, 2016, 37(12): 3410-3416. DOI: 10.16285/j.rsm.2016.12.009.
- LIU Lu, SHEN Yang, LIU Hanlong, et al. Application of bio-cement in erosion control of levees [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(12): 3410-3416. DOI: 10.16285/j.rsm.2016.12.009.
- [12] 谈叶飞, 郭张军, 陈鸿杰, 等. 微生物追踪固结技术在堤防防渗中的应用[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2018, 46(6): 521-526. DOI: 10.3876/j.issn.1000-1980.2018.06.008.
- TAN Yefei, GUO Zhangjun, CHEN Hongjie, et al. Study on application of microbial tracing consolidation technology in the seepage prevention of earth bank [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2018, 46(6): 521-526. DOI: 10.3876/j.issn.1000-1980.2018.06.008.
- [13] 刘涛. 钙源与固化次数对微生物固化花岗岩残积土的影响规律研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2022.
- LIU Tao. Influence of calcium source and curing times on the curing characteristics of granite residual soil [D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2022.
- [14] 黄万东. 胶结液浓度与灌注次数对花岗岩残积土固化特性的试验研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2022.
- HUANG Wandong. Experimental study on solidifying characteristics of granite residual soil by concentration of cementing fluid and times of infusion [D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2022.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for geotechnical testing method: GB/T 50123—2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019.
- [16] 裴迪, 刘志明, 胡碧茹, 等. 巴氏芽孢杆菌矿化作用机理及应用研究进展[J]. *生物化学与生物物理进展*, 2020, 47(6): 467-482. DOI: 10.16476/j.pibb.2020.0012.
- PEI Di, LIU Zhiming, HU Biru, et al. Progress on

(下转第107页)

- behavior of large stud shear connectors for steel-concrete composite bridges [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2005, 61: 1270-1285.
- [17] BADIE S S, TADROS M K, KAKISH H F, et al. Large shear studs for composite action in steel bridge girders [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2002, 7(3): 195-203.
- [18] 赵根田,侯智译,高鹏,等. 拟静力作用下群钉连接件抗剪性能研究[J]. *工程力学*, 2020, 37(7): 201-213.
ZHAO Gentian, HOU Zhiyi, GAO Peng, et al. Study on shear behavior of group nail connectors under quasi-static action [J]. *Engineering Mechanics*, 2020, 37(7): 201-213.
- [19] 周绪红,逯文茹,狄谨,等. 钢锚箱栓钉剪力连接件群钉效应及抗剪承载力计算方法[J]. *中国公路学报*, 2014, 27(12): 33-45.
ZHOU Xuhong, LU Wenru, DI Jin, et al. Calculation method of group nail effect and shear capacity of steel anchor box stud shear connectors [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2014, 27(12): 33-45.
- [20] 蔺钊飞,刘玉擎. 大直径焊钉连接件抗剪性能试验[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2015, 43(12): 1788-1793.
LIN Zhaofei, LIU Yuqing. Experimental study on shear behavior of large stud connectors [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science Edition)*, 2015, 43(12): 1788-1793.
- (责任编辑:欧碧峰;英文编辑:杜雪明)

(上接第8页)

- mineralization mechanism and application research of *sporosarcina pasteurii* [J]. *Progress in Biochemistry and Biophysics*, 2020, 47(6): 467-482. DOI: 10.16476/j.pibb.2020.0012.
- [17] YANG Z, CHENG X H. A performance study of high-strength microbial mortar produced by low pressure grouting for the reinforcement of deteriorated masonry structures [J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 41: 505-515. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.12.055.
- [18] ZHANG Y, GUO H X, CHENG X H. Role of calcium sources in the strength and microstructure of microbial mortar [J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 77: 160-167. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.12.040.
- [19] 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. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2012.02.027.
- [20] 刘伟,曾鹏,闫雷,等. 循环冲击下弱风化石力学特性与渗透率演化[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(6): 1855-1863. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2020.0066.
LIU Wei, ZENG Peng, YAN Lei, et al. Mechanical properties and permeability evolution of weakly weathered rocks under cyclic impact [J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(6): 1855-1863. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2020.0066.
- [21] 刘瑞江,张业旺,闻崇炜,等. 正交试验设计和分析方法研究[J]. *实验技术与管理*, 2010, 27(9): 52-55. DOI: 10.16791/j.cnki.sjg.2010.09.016.
LIU Ruijiang, ZHANG Yewang, WEN Chongwei, et al. Study on the design and analysis methods of orthogonal experiment [J]. *Experimental Technology and Management*, 2010, 27(9): 52-55. DOI: 10.16791/j.cnki.sjg.2010.09.016.
- [22] 崔明娟,郑俊杰,章荣军,等. 化学处理方式对微生物固化砂土强度影响研究[J]. *岩土力学*, 2015, 36(增刊1): 392-396. DOI: 10.16285/j.rsm.2015.S1.068.
CUI Mingjuan, ZHENG Junjie, ZHANG Rongjun, et al. Study on the influence of chemical treatment methods on the strength of microbial solidified sand [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(sup 1): 392-396. DOI: 10.16285/j.rsm.2015.S1.068.
- (责任编辑:石月珍;英文编辑:陈成)