

DOI: 10.16285/j.rsm.2018.1703

土体适用 MICP 技术的渗透特性条件研究

李 贤^{1,2}, 汪时机², 何丙辉¹, 沈泰宇²

(1. 西南大学 资源与环境学院, 重庆 400715; 2. 西南大学 工程技术学院, 重庆 400715)

摘 要: 影响土体适用微生物诱导碳酸钙沉淀 (MICP) 技术的主要因素有颗粒的有效粒径、孔隙直径、颗粒级配以及水力学参数等, 实际工程土中复杂的孔隙结构难以通过单一的参数来衡量, 而土体的渗透性能够综合反映诸多因素。针对分步、低速工艺下的定容量饱和和渗透灌浆, 提出了在满足土壤颗粒粒径和微生物尺寸相容性的前提下, 以渗透系数表征的土体适用 MICP 技术的条件判断公式; 并通过涵盖砂土、粉土、砂质黏性土、膨胀土等 9 种土 (控制粒径 $d_{60} = 0.040 \sim 0.913$ mm, 初始孔隙率 $n_0 = 31.5\% \sim 54.9\%$) 的固化试验、渗透试验和强度试验进行了验证。结果表明: 结合渗透性折减参数 ξ 值的选取 (无黏性土 10^{-2} , 黏性土 10^{-1}), 渗透条件 III 可适用于多种土体; 渗透条件 I 适用于 MICP 技术广为应用的砂土。同时得出了灌浆浆液总量和灌浆总时长的计算公式, 为 MICP 固土技术可行性评估和进一步推广应用提供参考。

关 键 词: 渗透系数; MICP; 适用性; 土体基质; 固化参数

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2019) 08-2956-10

Permeability condition of soil suitable for MICP method

LI Xian^{1,2}, WANG Shi-ji², HE Bing-hui¹, SHEN Tai-yu²

(1. College of Resource and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China,

2. College of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: The application of microbial-induced calcite precipitation (MICP) technology in the soil is mainly affected by the factors: the effective particle size, pore diameter, particle gradation, and hydrodynamic parameters of the particles. The complex pore structure of the soil is difficult to be determined by a single parameter in practical engineering, whereas most of them can be reflected comprehensively by the permeability of the soil. The conditional judgment formulas are proposed for the saturated osmotic grouting with the constant capacity, the step-by-step and low-speed process in this paper. Moreover, with the premise of the size compatibility between the microorganism and the soil particle, the formulas are suitable for MICP method in the soil characterised by the permeability coefficient. Furthermore, the formulas are verified by conducting solidification test, permeability test and strength test on nine types of soil (control particle size $d_{60} = 0.040-0.913$ mm, initial porosity $n_0 = 31.5\%-54.9\%$) including sand, silt, sandy-clayey purple soil and expansive soil. In the condition of the appropriate value of the permeability reduction parameter ξ (10^{-2} for cohesionless soil, 10^{-1} for cohesive soil), it is showed that the third permeability condition can be applied to all types soil in the tests. In addition, the first permeability condition is more suitable for sandy soil than others in MICP technology. Meanwhile, the formulas of the total volume of grouting solution and the total grouting time are obtained, which provide references for the feasibility assessment of the MICP method and further promotion of this technology.

Keywords: permeability coefficient; MICP; applicability; soil matrix; solidification parameters

1 引 言

微生物诱导碳酸钙沉淀 (microbial induced calcite precipitation, 简称 MICP) 是一种在自然界中广泛存在的生物矿化过程, 将这种原理运用到土

壤中, 通过特定的微生物诱导, 并提供充足的 Ca^{2+} 及氮源的营养盐, 从而加快方解石型碳酸钙结晶的成矿作用常被称为微生物诱导方解石沉积技术^[1]。因其相对于传统的化学胶凝材料, 可操控性和环境友好性均更为优越, 蕴含着巨大的经济和环境效益。

收稿日期: 2018-09-14

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 11572262, No. 41771312); 重庆市留学人员回国创业创新支持计划项目 (No. CX2018103)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (11572262, 41771312) and the Chongqing Innovative Program for the Returned Overseas Chinese Scholars (CX2018103).

第一作者简介: 李贤, 女, 1978 年生, 博士研究生, 讲师, 主要从事水土工程和岩土力学方面的教学和科研工作。E-mail: haoyushi@swu.edu.cn

通讯作者: 何丙辉, 男, 1966 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事水土保持和农业水土工程方面的教学和科研工作。E-mail: hebinghui@swu.edu.cn

目前,许多学者通过室内试验,对菌液活性、胶结液的成分和浓度、灌浆和固化方式、环境等影响因素进行研究,对固化工艺进行优化;通过不排水剪切强度、无侧限抗压强度、动三轴、无损地球物理、渗透性能等试验测试技术对 MICP 技术在提高土体强度、降低液化、改变渗透性能等方面的效果进行了广泛的评估和肯定^[2-4]。该技术的应用已由初期多孔介质材料的堵漏、石质和水泥基材料的表面裂缝缺陷修复,发展到加固软弱地基、降低砂土液化、建造漂浮的沙滩、护堤、防风治沙以及修复环境重金属和碳封存等工程中^[3-6]。但是目前还存在两个问题制约该技术的进一步发展,一个是适用性问题,即如何判断工程中的土能否适用 MICP 技术;一个是效果的评估,即如何通过较为简便有效的方法衡量固化效果。

2 土体适用 MICP 技术的研究现状

影响土体适用 MICP 技术的主要因素有土体特征、浆液特性和灌浆工艺等^[7]。就土体基质本身而言,颗粒有效粒径、孔隙直径、颗粒级配以及水动力学参数都会影响微生物、胶结液在土颗粒间的吸附、运移及反应。

2.1 土壤颗粒粒径和微生物的尺寸相容性

目前的研究主要从土壤颗粒粒径和微生物的尺寸相容性进行判断土体是否适用 MICP 技术。Mitchell 等^[8]认为,细菌的细胞直径通常在 $0.5\sim 3.0\ \mu\text{m}$,不可能在尺寸小于约 $0.4\ \mu\text{m}$ 的孔隙内进行传输;Dejong 等^[1]总结了土中微生物与土颗粒尺寸相容的边界条件,认为 MICP 技术主要适用于砂类土以及含有少量砾石、泥炭或黏土的砂类土;Mortensen 等^[9]发现胞外沉积时菌体膨胀了 20 倍,许可微生物进入的孔隙范围需进一步调整。

2.2 土壤颗粒有效粒径、颗粒级配、压实度

仅依据土壤颗粒粒径和微生物的尺寸相容性来判断土体是否适用 MICP 技术存在几个问题:首先,多孔介质复杂的孔隙结构难以通过简单的参数来确定;其次,工程用土通常非单一类土,不易界定,往往无法从单一的土壤类别进行对应。而且,各种固化工艺的发展使适用 MICP 技术的土体范围扩展至粉土、残积土等细粒土^[10-11]。许多学者通过试验研究不同土体(包括砂土、风沙土、残积土、淤泥土等)的有效粒径、颗粒级配和压实度等因素对 MICP 固化的影响,见表 1。

表 1 土体适用 MICP 技术影响因素的研究
Table 1 Study of the influencing factors of soil by MICP method

作者	研究对象(土体)	结论
Rebata 等 ^[12]	砂	最有利于方解石沉积的颗粒粒径为 $50\sim 400\ \mu\text{m}$ 。
Kim 等 ^[13]	砂土、淤泥土和风化土	相对密度大的砂土比相对密度小的砂土碳酸钙沉淀效果好,相对压实度对淤泥土影响不明显,颗粒级配不良的风化土碳酸钙沉淀效果优于级配良好的风化土碳酸钙。
Al Qabany 等 ^[7]	中砂和细砂	级配良好的中砂比级配不好的细砂碳酸钙沉淀效果好。
李驰等 ^[6]	风沙土、标准砂、级配良好的混合砂	级配良好的混合砂固化后强度最高。
崔明娟等 ^[14]	3 种不同颗粒粒径范围的砂土	颗粒粒径对微生物固化试样的无侧限抗压强度有显著影响。

但试验结果不尽相同,甚至出现相反的结论,主要原因是生物处治涉及的影响因素较多,试验材料、环境因素和固化方式都会造成差异,而且往往非单一因素的影响,而是涉及到多种因素的共同作用。因此,对能够综合反映诸多影响因素的土体适用 MICP 技术的判断方法或条件的研究颇为紧迫。

3 基于渗透性参数的适用条件理论推导

从微生物固化提高土颗粒的胶结性的过程而言,要产生足够的碳酸钙沉淀才能达到一定的强度,虽然沉淀在土颗粒间的不同分布状态会造成一定的差异性,但诸多学者通过试验证明了土体固化强度与碳酸钙沉积量之间良好的相关性^[15-16]。因此,目前的固化效果通常用碳酸钙的含量来表征衡量。这

是和微生物固化的过程密不可分的,只有一定碳酸钙含量的基础上,才能进一步讨论其有效性。而碳酸钙沉淀是由菌液促进尿素水解产生碳酸根离子,再由碳酸根离子和钙盐溶液反应生成的,所以整个过程都处于液态中,也就是说,若要在土体中产生碳酸钙,首先需要满足灌浆过程中有相应的溶液可以进入土体孔隙中,这就对土体的渗透性提出了要求。颗粒状介质的渗透性是由外因(水力梯度)和内因(粒状介质本身和流体)综合作用的结果。所以渗透性能够综合体现出 MICP 对土体颗粒有效粒径、孔隙直径、颗粒级配以及水动力学参数等多方面的要求。

3.1 固化过程及研究范围

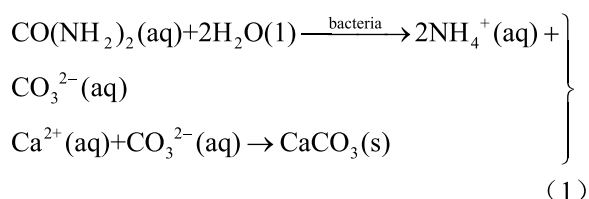
根据灌浆压力和速度、土样含水率等处理方式

的不同, 可将目前的 MICP 灌浆技术分为: 饱和或非饱和渗透灌浆、速度控制或压力控制灌浆以及其他灌浆方式(搅拌或磁力处理)。Harkes^[15]、钱春香等^[3]通过低速、分步灌浆工艺使砂颗粒中生成的碳酸盐分布更为均匀, 该工艺已被当前诸多学者所采用^[2-3, 7]。低速一般是指灌浆流速不大于 5 mL/min; 分步则是指先行灌入菌液, 经一段停滞时间后再灌注胶结液(尿素和钙盐的混合液)。为确保浆液在土体孔隙中分布的充分和有效, 所灌注胶结液体积多为土体孔隙的 1~2 倍, 菌液体积采用土体孔隙的 1 倍左右, 以菌液和胶结液分别灌注完成一次为一个固化循环, 每次的灌浆浆液容量恒定, 可称为定量灌浆。随着土体中碳酸钙沉淀的生成, 渗透性不断下降, 直至无法完成灌入为止, 经不同研究团队的大量试验而得固化后渗透系数比初始值下降 1~3 个数量级^[2-3, 17-19]。

本文主要针对分步、低速工艺下的饱和渗透灌浆, 通过质量守恒和渗流理论分析流速控制下进行定量灌浆的土体适用 MICP 的渗透条件。

3.2 基本假定

(1) 微生物水泥胶结过程仅发生以下反应^[16]:



(2) 碳酸钙沉淀不影响液体的总体积。

(3) 灌浆液体为不可压缩的均质各向同性 Newton 流体, 忽略黏度的时变性、浆液的滤过效应。

3.3 理论推导

3.3.1 灌浆浆液总量

根据固化过程和假设(2)、(3)可知灌浆浆液的体积不发生改变, 设土体初始孔隙率为 n_0 , 土体体积为 V (m^3), 每次灌注菌液和胶结液的体积分别为土体孔隙体积的 β 和 α 倍, 整个固化通过 N 次循环灌浆完成, 则固化期间灌浆浆液(菌液和胶结液)总量 V_{UC} (m^3) 为

$$V_{\text{UC}} = N(\alpha + \beta)n_0V \quad (2)$$

3.3.2 分步灌浆固化次数

固化期间灌入胶结液容量 V_{C} (m^3) 为

$$V_{\text{C}} = N\alpha n_0V \quad (3)$$

根据式(1), 理论计算生成的碳酸钙沉淀与钙盐对应的钙离子摩尔比为 1:1。定义碳酸钙产率 S

为实际产生的碳酸钙沉淀质量 m_{CaCO_3} (kg) 与理论计算值之比, 则有

$$S = m_{\text{CaCO}_3} / C_{\text{Ca}^{2+}} N \alpha n_0 V M_{\text{CaCO}_3} \quad (4)$$

式中: $C_{\text{Ca}^{2+}}$ 为注入的钙盐摩尔浓度(mol/L); M_{CaCO_3} 为碳酸钙摩尔质量, 常量为 100.1 kg/kmol。

定义 m'_{CaCO_3} 为单位灌浆土体中实际生成的碳酸钙沉淀质量:

$$m'_{\text{CaCO}_3} = m_{\text{CaCO}_3} / V \quad (5)$$

联立式(3)~(5)可得分步灌浆的固化次数:

$$N = \frac{m'_{\text{CaCO}_3}}{\alpha S n_0 C_{\text{Ca}^{2+}} M_{\text{CaCO}_3}} \quad (6)$$

3.3.3 灌浆时间

在假设(2)、(3)的前提下, 可知注浆液体的体积不发生改变(可称为定量注浆), 且浆液流量 Q 符合达西定律:

$$Q = qA \quad (7)$$

式中: A 为注浆土体截面积(m^2), 因目前 MICP 技术采用试件多为圆柱体、长方体或立方体, 故设为等截面形式。其中, 渗流速度 q 三维形式为

$$q = kJ = -k\nabla\phi \quad (8)$$

式中: $J = -\nabla\phi$ 为水力梯度矢量; k 为渗透系数(m/s)。

令 ξ 为渗透性折减参数, k_0 为初始渗透系数, 经过 N 次灌浆后渗透系数降为 k_N :

$$k_N = \xi k_0 \quad (9)$$

假设每次灌浆后土体渗透性呈线性降低, 而每次灌浆循环过程中渗透性的改变忽略不计, 则每次固化后渗透系数减少为

$$\Delta k = (k_0 - k_N) / N \quad (10)$$

则第 x 次灌浆后渗透系数为

$$k_x = k_0 - x\Delta k = k_0(N - x + \xi x) / N \quad (11)$$

由 3.3.1 节可知每次灌浆浆液容量为

$$V_{\text{UC}} / N = (\alpha + \beta)n_0V = Qt_x \quad (12)$$

其中 t_x (s) 为第 x 次灌浆时长, 联立式(7)、(8)、(11)、(12)得

$$t_x = \frac{(\alpha + \beta)n_0LN}{k_0(N - x + \xi x)J} \quad (13)$$

因此, 包含 N 次分步灌浆的灌浆总时长为

$$t_s = \frac{(\alpha + \beta)n_0LN}{k_0J} \sum_{x=1}^N \frac{1}{(N - x + \xi x)} \quad (14)$$

3.3.4 渗透条件

满足 MICP 的渗透条件主要从两方面考虑。一方面, 是灌浆的可持续性。灌浆初期, 渗透较快, 经过若干次灌浆后, 随着土体中碳酸钙沉淀的生成, 渗透性逐渐降低, 每次灌浆时间增加, 直至无法在菌液活性或工作条件允许的时间 $[t]$ 内完成灌注。则第 N 次灌浆时间须满足:

$$t_N \leq [t] \quad (15)$$

将式 (13) 代入得渗透条件 I:

$$k_0 \geq \frac{(\alpha + \beta)n_0L}{\xi[t]J} \quad (16)$$

满足渗透条件的第二个方面是固化效果, 主要考虑固化后土体的强度需要。Harkes^[15]、Chu^[20]等试验均表明, 砂柱的强度与碳酸钙含量具有较好的相关性, 碳酸钙含量高于 3.5% 或 60 kg/m³ 时, 土体强度才有明显改善。因此, 可以根据具体的固化强度需求确定所需的单位土体中碳酸钙的生成量 $[m'_{\text{CaCO}_3}]_{\text{cr}}$ 。则经 N 次灌浆后单位土体中生成的碳酸钙质量为

$$m'_{\text{CaCO}_3} \geq [m'_{\text{CaCO}_3}]_{\text{cr}} \quad (17)$$

将式 (6) 代入得渗透条件 II:

$$n_0 \geq \frac{[m'_{\text{CaCO}_3}]_{\text{cr}}}{\alpha S C_{\text{Ca}^{2+}} M_{\text{CaCO}_3} N} \quad (18)$$

将式 (18) 代入式 (16) 得渗透条件 III:

$$k_0 \geq \frac{L}{M_{\text{CaCO}_3}} \frac{\alpha + \beta}{\alpha J C_{\text{Ca}^{2+}} N [t]} \frac{[m'_{\text{CaCO}_3}]_{\text{cr}}}{\xi S} \quad (19)$$

3.4 公式分析与参数说明

由 3.3 节归纳可得分步、低速工艺下的饱和渗透灌浆, 通过质量守恒和渗流理论分析流速控制下进行定量灌浆的土体适用 MICP 的渗透条件、灌浆时长、浆液总量。

3.4.1 公式分析

式 (16)、(18)、(19) 均为适用 MICP 的土体渗透条件。渗透条件 I (式 (16)) 对土体的渗透系数提出要求, 其影响因素有土体条件 (土体深度 L 和孔隙率)、水力条件 (水力坡降)、注浆条件 (灌浆容量和灌注时长)、菌液的脲酶活性 (许可灌浆时

长)。对于渗透性较弱的细粒土, 可采取改善菌液的脲酶活性和水力梯度条件等措施, 但土体改良深度有限; 对于渗透性较好的粗粒土, 如初始孔隙率过大, 需要灌入大量浆液才能达到固化效果, 对菌液脲酶活性的保持、灌浆的时间和经济效益均造成一定负担。

渗透条件 II (式 (18)) 是通过质量守恒规律所得, 现有的相关 MICP 室内试验基本都可满足。为了碳酸钙沉淀生成更加均匀而采用极小浆液浓度势必造成灌浆次数的增多, 将对土体初始渗透性提出更高要求。另外, 该式可反映出对灌浆浆液浓度的要求和固化次数的计算。

渗透条件 III (式 (19)) 综合体现了土体进行 MICP 灌浆的可持续性和固化要求。该式含 3 部分因式, 第 1 部分反映了土体的特征 (固), 第 2 部分反映了灌浆浆液的特征 (流), 第 3 部分反映了固化效果的特征。

式 (2)、(14) 则分别给出灌浆浆液总量和灌浆时长的计算式, 可为开展大型室外试验的技术方案设计提供依据。浆液总量与土体孔隙率密切相关, 故当前室内试验多选择饱和和土体孔隙的用量。改善水力条件和初始渗透性较好的土体有益于缩短灌浆时长。

3.4.2 参数说明

式 (16)、(18)、(19) 共包括 11 个参数, 式 (2)、(14) 分别包括 5 个和 8 个参数, 存在许多相同参数。

β 和 α 可根据灌浆设计参数取值, 考虑到饱和灌浆的前提和浆液在土体孔隙中的均匀分布, α 、 β 均需不小于 1, 即灌入菌液和胶结液均大于等于一倍孔隙体积。

n_0 、 L 可根据土体条件测定; J 、 $C_{\text{Ca}^{2+}}$ 可分别通过灌浆的水力条件和浆液参数得出。

ξ 可根据土体特性结合固化要求进行取值, 如堤坝防侵蚀、堵漏工程要求固化后渗透性降低 2~4 个数量级; 而在一般固化土体的应用中, 经不同研究团队的大量试验得出固化后渗透系数比初始值下降 1~3 个数量级^[2-3, 17-19] (砂土为 2~3, 黏土为 1~2); 对性质复杂的土体、渗透性要求不明确的工程, 也可通过预试验进行实测。因此, 土体固化中 ξ 可取值为 $10^{-3} \sim 10^{-1}$, 将进一步结合实测结果进行分析修正, 见第 4 节。

$[t]$ 可根据菌液在土体中存活的有效时长或工作条件确定, 因土体固化过程中各种离子对酶活性造成干扰, 可根据土体外部菌液活性试验测试结果折

减进行参考。本课题组测定细菌在土体外部 24 h 内保持有效稳定的酶活性,因此,取土体内为 24 h 固化时间上限。另外如果考虑停滞时间及各种具体情况,可能需要进一步折减。

$[m'_{\text{CaCO}_3}]_{\text{cr}}$ 可根据固化的强度目标确定。对于砂土可取值 3.5% 或 60 kg/m³ [15, 20]; 邵光辉 [10] 和 Soon [11] 等学者通过试验得出粉土和残积土的强度阈值分别为 1.81% 和 1.0%。

许多学者通过试验研究对碳酸钙的产率 S 进行了研究和计算,见表 2。

表 2 碳酸钙产率
Table 2 The effective input rates of calcium carbonate in the literature

研究者	胶结液浓度 / (mol/L)	碳酸钙产率 / %
Dejong 等 [1]	0.10	92
Rebata 等 [12]	0.25	95
Whiffin 等 [16]	1.10	88
Al Qabany 等 [7]	0.50	90
Martinez 等 [21]	1.00	43
Inagaki 等 [22]	0.50	80

4 试验验证及结果分析

对于砂土 MICP 技术的固化效果已有诸多学者进行了深入研究,因此,本文仅对标准砂进行校核试验;主要针对两种特殊的细粒土——砂质黏性紫

色土和膨胀土进行试验验证。另外,本文还归纳整理了方祥位等学者对珊瑚砂、粉土、商业砂进行 MICP 固化试验的结果 [10, 17-19], 对涵盖砂土、粉土、砂质黏性紫色土、膨胀土等 9 种土 (控制粒径 $d_{60} = 0.040 \sim 0.913$ mm, 初始孔隙率 $n_0 = 31.5\% \sim 54.9\%$) 的固化试验进行分析计算,进一步验证渗透条件对不同类型和颗粒特征的土体适用性的判断并进行参数选取与修正。

4.1 室内 MICP 试验与测试

4.1.1 菌种

试验采用的菌种为巨大芽孢杆菌 (BNCC 336739), 课题组通过正交试验对基础培养基配方和培养条件进行了优化;菌液培养后通过电导率法进行脲酶活性的检验 [23], 初始为 3.655 mmol/L/min, 10 h 后仍大于 1.4 mmol/L/min, 24 h 后稳定在 0.8 mmol/L/min 左右,可以满足整个固化过程的要求。试验均在 $(24 \pm 2)^\circ\text{C}$ 的室内进行,以控制温度变化对微生物反应的影响。

4.1.2 试验用土

试验用土共 3 种,分别为厦门 ISO 标准砂、砂质黏性紫色土和膨胀土,基本物理性质及颗粒级配情况见表 3。重庆砂质黏性紫色土中小于 0.075 mm 的颗粒粒径含量仅占 19.3%,而塑性指数为 14.8,故定义为砂质黏性土;邯郸膨胀土属强膨胀土。

表 3 试验用土基本物理性质及颗粒级配
Table 3 The basic physical properties and grain distributions of soils

土样种类	取土地点	土粒密度 / (g/cm ³)	试样干密度 / (g/cm ³)	试样含水率 / %	液限 / %	塑限 / %	塑性指数	不均匀系数 C_u	曲率系数 C_c	<0.075 mm 颗粒粒径含量 / %	自由膨胀率 / %
标准砂	厦门	2.62	1.69	—	—	—	—	6.660	2.046	0.21	—
砂质黏性土 (紫色土)	重庆市北碚区缙云山水土保持基地	2.69	1.45	18	34.30	19.50	14.80	20.100	0.700	19.30	0
膨胀土	邯郸	2.72	1.65	10	81.86	47.32	34.54	8.684	1.000	64.82	132

4.1.3 试样制备

厦门 ISO 标准砂:采用落砂法,于内径为 61.8 mm 的可拆卸式有机玻璃圆柱筒型试模中形成高 125 mm 的砂柱试样;试模通过螺丝连接下部底板,底板部开有 13 个直径 5 mm 的密集小孔,确保浆液及时、均匀渗出。砂质黏性紫色土过 5 mm 筛后,通过 TYS-50 型土样压实装置制备成直径 61.8 mm,高 125 mm 的试样,再用橡皮膜沿圆柱土样侧面密封后置于同上试模中。膨胀土过 2 mm 筛后,通过 TYS-50 型土样压实装置制备成直径 39 mm,高 80 mm 的试样,再用橡皮膜沿圆柱土样侧面密封后置于试模中,材质构造同上。

3 种试样上下缘分别垫置 1.5 mm 厚的土工布,注浆口放置有棉花,起到分散导流注浆液的作用,同时防止试样表面变形。

4.1.4 固化试验

采用定流量饱和渗透灌浆。首先通过蠕动泵以小于 5 mL/min 的速率对 3 种试样灌入菌液 (1/2 倍试样体积),静置 2 h 后再以同样速率注入胶结液 (1 倍试样体积),静置 4 h,以此为 1 次灌浆循环,直至无法完成有效渗入。

4.1.5 试验测试

渗透试验:固化前后采用变水头法进行渗透系数的测试。

强度试验：固化后试样于 60℃烘箱中烘干 48 h 后，采用 FLSY30-1 型应力-应变控制式非饱和土三轴仪进行无侧限抗压强度试验或固结不排水三轴试验。

碳酸钙含量试验：取强度试验破坏后的试样通过洗酸试验测定碳酸钙的质量^[14]，试验前后试样干重差即为细菌诱导产生的碳酸钙质量。（砂质黏性紫色土原状土中含有碳酸钙，故实际碳酸钙生成量需减去空白试样中的碳酸钙质量。将 9 个固化土样沿试样高度均分为上、中、下 3 段后检测其碳酸钙含量，结果显示靠近注浆口区域的上段土样碳酸钙含量与整个土样碳酸钙含量平均值差异为 -0.4%~11.8%，表明该工艺下土体的固化具有较好的均匀性。）

微观结构测试试验：固化前后的黏性砂质紫色土土样分别进行电镜扫描分析（COXEM EM-30 Plus 台式扫描电子显微镜）。

4.2 渗透条件验算

根据 4.1 节中标准砂、砂质黏性紫色土、膨胀土，以及方祥位等学者对珊瑚砂、商业砂、粉土等 9 种土进行 MICP 固化的试验测试数据对 3.3.4 节中通过理论推导所得渗透条件判别式进行分析验证。验算思路：分别根据土体原始条件、灌浆工艺参数进行 3 个渗透条件判别式的计算，得出判断结果，根据实

际的试验结果来验证公式的可行性、适用性并进行参数的选取。

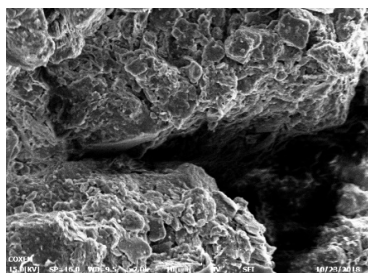
所有试验和引文的固化参数详见表 4，试验结果中显示砂质黏性紫色土 MICP 固化后单位土体中生成的碳酸钙质量和无侧限抗压强度相对砂土而言较小，但相对未固化的平行参照土样其无侧限抗压强度提高了 63.3%。同时，为进一步确定其固化效果在固化前后进行了电镜扫描分析。结果表明，固化前土颗粒形状不规则，存在卷曲状、片状黏土矿物；而固化后形成的碳酸钙对土壤颗粒起到了均匀包裹和有效胶结的作用。

因此，共有 4 种土体不宜采用饱和定量渗透灌浆法进行 MICP 固化土体：粒径全部 < 0.075 mm 的珊瑚砂在第 1 次固化中就完全失去了渗透能力^[18]；人工吹填粉土对应的试验参数为邵光辉等^[10]通过加围压注浆而得，未加压固化强度仅能提高 12% 左右^[24]；本课题组对邯郸的强膨胀土进行第 1 次灌入 1 倍孔隙体积菌液后，经 24 h 仍未能完成渗入。另外，陈婷婷等对 5 m 长的商业砂柱体进行微生物注浆，试验表明，固化后的碳酸钙沉淀量随距注浆口距离增大而减小，距注浆口 1 m 处达到最大值，最远端 5 m 处降至极低^[19]，可认为该土体 $L \leq 1$ m 时满足固化条件，而 $L > 5$ m 时不适用。

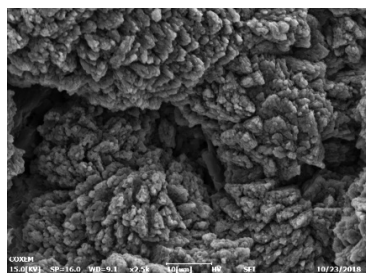
表 4 不同土体固化参数及渗透特性

Table 4 The biogROUT experimental parameters and permeability coefficients of different soils

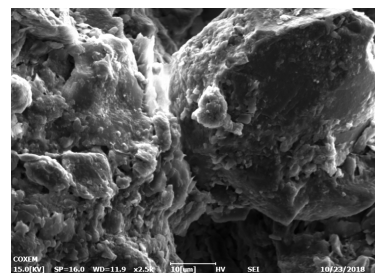
土体种类	粒径 / mm	L / m	固化次数 或时间	$C_{Ca^{2+}}$ / (mol/L)	S / %	固化效果		k_0 / (m/s)	n_0 / %	备注
						m'_{CaCO_3} / (kg/m ³)	q_u / MPa			
珊瑚砂	<0.075	0.125	1 次固化	1.0	—	第 1 次固化中未能完成有效渗入		6.90×10^{-6}	54.91	文献[18]
粉土	$d_{60} \approx 0.049$	0.076	12 h	0.1	28.9	33.58	0.083	6.60×10^{-7}	31.51	文献[10]
膨胀土	$d_{60} = 0.066$	0.080	1 次固化	1.0	0	第 1 次固化中未能完成有效渗入		4.39×10^{-8}	39.33	本文
商业砂	$d_m = 0.165$	5.000	35.2 h	1.1	—	距注浆口 1 m 处为 107		1.92×10^{-5}	37.80	文献[19]
珊瑚砂	$d_{60} = 0.275$	0.100	5 次固化	1.0	45.0	225.20	2.140	6.00×10^{-5}	47.70	文献[17]
砂质黏性紫色土	$d_{60} = 0.400$	0.125	5 次固化	1.0	17.4	88.16	0.098	5.20×10^{-6}	46.13	本文
珊瑚砂	$d_{60} = 0.486$	0.100	5 次固化	1.0	60.3	301.39	2.920	8.00×10^{-5}	49.50	文献[17]
标准砂	$d_{60} = 0.893$	0.125	6 次固化	1.0	28.0	170.24	16.890	4.39×10^{-4}	39.92	本文
珊瑚砂	$d_{60} = 0.913$	0.100	5 次固化	1.0	40.6	202.90	1.810	4.00×10^{-4}	45.90	文献[17]



(a) 固化前



(b) 固化后（均匀分布）



(c) 固化后（胶结作用）

图 1 砂质黏性紫色土固化前后扫描电镜下的微观形貌

Fig.1 SEM images of the untreated and treated sandy clay purple soil specimens

4.2.1 渗透条件 I 验算

由式(16)可知,渗透条件 I 以初始渗透系数 k_0 是否满足许可值为依据,而影响初始渗透系数的因子有 7 项,考虑到本研究主要针对饱和渗透定量注浆,结合 3.4.2 节的分析,水力梯度 J 可近似取 1; 尽管各研究团队所用菌种、培养条件、稀释程度及环境条件均有差异,但结合其酶活试验数据,取 $[t]=24\text{ h}$,各土体初始孔隙率、土样高度、浆液容量为已知,因此,影响初始渗透系数许可值的主要参量为 ξ ,当 ξ 分别取 10^{-1} 、 10^{-2} 、 10^{-3} 时,结果相差 1~2 个数量级,对 k_0 值的影响远远大于其他参数,其分布范围见图 2,以 3 种颜色显示。红点位置为对应不同粒径特征 ($d_{60}=0.040\sim 0.913\text{ mm}$) 土体的实测 k_0 ,其值需大于渗透条件 (分别超越 3 种颜色范围) 才能达到 MICP 技术的要求。

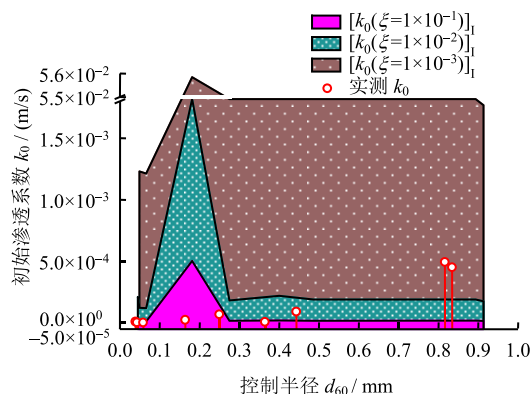


图 2 不同颗粒粒径土体 MICP 技术的渗透条件 I 验算 ($\xi=10^{-1}$ 、 10^{-2} 、 10^{-3})

Fig.2 The first permeability conditions of MICP method for different particle sizes of soils ($\xi=10^{-1}$, 10^{-2} , 10^{-3})

显然 $\xi=10^{-3}$ 对应的许可初始渗透系数 $[k_0(\xi=10^{-3})]_I$ 界限过高 (咖色界限远远超出另外两个界限值),没有土体能够满足,而实际试验有 6 个土体具备良好的固化性能,因此 $\xi=10^{-3}$ 一般不宜选取;而 $\xi=10^{-2}$ 对应的许可初始渗透系数 $[k_0(\xi=10^{-2})]_I$ 的界限 (湖蓝色上限) 仅颗粒最大的最后两种珊瑚砂 ($d_{60}>0.5\text{ mm}$) 满足渗透条件,结合表 4 的实测结果, $\xi=10^{-2}$ 的取值仅适用于大粒径砂类土;未超出 $\xi=10^{-1}$ 对应的许可初始渗透系数 $[k_0(\xi=10^{-1})]_I$ 界限 (玫红色上限) 的有 5 种土体: 对前 3 种土体 (控制粒径 $<0.075\text{ mm}$) 的判断完全符合试验结果;对商业砂的计算结果显示, $L=5\text{ m}$ 未能达到渗透要求 (图示红点未能超越界限值),符合试验中距注浆口 5 m 处碳酸钙沉淀极低的实测结果;仅对砂质黏性土的判断与试验结果有悖。

因此,渗透条件 I 的公式对无黏性土的判断较为准确, ξ 对初始渗透系数许可值影响明显,在较大颗粒粒径 ($d_{60}>0.5\text{ mm}$) 土体中可选取 $10^{-2}\sim 10^{-1}$, 对小颗粒粒径 ($d_{60}\leq 0.5\text{ mm}$) 土体仅可取为 10^{-1} 。

4.2.2 渗透条件 II 验算

由式(18)可知,渗透条件 II 以初始孔隙率 n_0 是否满足许可值为依据,而影响初始渗透系数的因子有 5 项,考虑到本研究主要针对饱和渗透定量注浆,结合 3.4.2 节的分析和各研究团队灌浆工艺,为统一比较,采用较为普遍的灌浆数据 $N=5$ 进行计算, $[m'_{\text{CaCO}_3}]_{\text{cr}}$ 取 60 kg/m^3 , 计算结果见图 3, 红点位置为对应不同粒径特征 ($d_{60}=0.040\sim 0.913\text{ mm}$) 土体的实测 n_0 ,其值均大于渗透条件 II 计算所得许可初始孔隙率 (超越绿色范围), 达到 MICP 技术的要求。

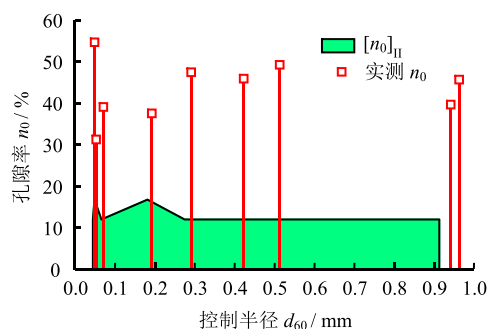


图 3 不同颗粒粒径土体 MICP 技术的渗透条件 II 验算

Fig.3 The second permeability conditions of MICP method for different particle sizes of soil

与实际情况对比,该条件未能进行有效判断。原因主要有: 实测的细粒土孔隙率并不能反映细粒土的有效孔隙率,而渗透灌浆机制决定了只有有效孔隙才能满足菌体的进入、浆液的流动和碳酸钙的沉淀,所以在细粒土中,该渗透条件应用有效孔隙率进行初始孔隙率的判断。党发宁等^[25]利用稠度指标法、双电层参数法等方法计算黏性土的有效孔隙比,给出了考虑有效孔隙比的黏性土渗透系数修正公式;刘一飞等^[26]采用离散元数值模拟方法提出了反映粒径和级配特征的渗透系数计算方法。对砂土而言, $[m'_{\text{CaCO}_3}]_{\text{cr}}$ 取 60 kg/m^3 仅满足最基本的固化强度要求,实验室测试中的生成量往往远远超过该值。渗透条件 II 的推导基于质量守恒定律,未能反映水动力学的影响,宜用于土体初始密实程度和注浆工艺中灌注次数的设计计算。

4.2.3 渗透条件 III 验算

由式(19)可知,与渗透条件 I 相似,渗透条

件Ⅲ以初始渗透系数 k_0 是否满足许可值为依据, 在渗透原理的应用基础上增加了质量守恒的考量, 影响其初始渗透系数的因子有 10 项, 同渗透条件 I, 取 $J=1$, $[t]=24\text{ h}$, n_0 、 L 、 α 、 β 按各土体及试验方案已知条件取值; 同渗透条件 II, $N=5$, $[m'_{\text{CaCO}_3}]_{\text{cr}}=60\text{ kg/m}^3$; 根据表 2 及表 4 实测值, S 取 50%。与渗透条件 I 同理, 当影响初始渗透系数许可值的主要参量 ξ 取 10^{-3} 时无法得以有效判断, 因此 ξ 可取 $10^{-2} \sim 10^{-1}$ 。根据式 (19) 计算渗透条件Ⅲ的初始渗透系数许可值, 其分布界限见图 4, 以两种颜色分别显示。红点位置为对应不同粒径特征 ($d_{60}=0.040 \sim 0.913\text{ mm}$) 土体的实测 k_0 , 其值需大于渗透条件 (分别超越两种颜色界限) 才能达到 MICP 技术的要求。 $\xi=10^{-2}$ 对应的许可初始渗透系数 $[k_0(\xi=10^{-2})]_{\text{III}}$ (蓝色上限) 的渗透条件计算结果显示, 除砂质黏性土外, 其他 8 种土体的判断结果均与实测符合; 而 $\xi=10^{-1}$ 对应的许可初始渗透系数 $[k_0(\xi=10^{-1})]_{\text{III}}$ (草绿色上限) 的渗透条件计算结果显示, 除第一种珊瑚砂有所偏差外, 其他 8 种土体的判断结果均符合实测情况。另外, 商业砂中取 $L=0.4\text{ m}$ 时, $[k_0(\xi=10^{-1})]_{\text{III}}=1.79 \times 10^{-5}\text{ m/s}$, 小于 $k_0=1.92 \times 10^{-5}\text{ m/s}$, 说明该土体渗透条件有效固化深度可达 0.4 m 。

特别是对砂质黏性紫色土这一较特殊土体的判断与试验结果相符, 适用性优于渗透条件 I。因此, 渗透条件Ⅲ针对 MICP 技术适用条件的判断可用于多种土体, 对无黏性土 ξ 取 10^{-2} , 对黏性土 ξ 取 10^{-1} 可使计算结果的判断更为准确。

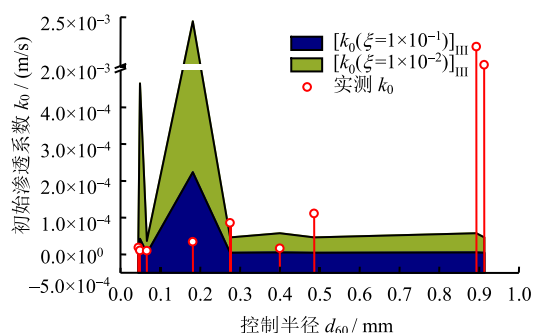


图 4 不同颗粒粒径土体 MICP 技术的渗透条件Ⅲ验算 ($\xi=10^{-1}$ 、 10^{-2})

Fig.4 The third permeability conditions of MICP method for different particle sizes of soil ($\xi=10^{-1}$, 10^{-2})

4.2.4 分析与比较

由式 (16)、(18)、(19) 及渗透条件验算结果表明, 渗透条件Ⅲ对土体适用 MICP 技术的渗透条件判断适用范围包括黏性土、无黏性土等多种土体,

结合 ξ 的取值可用于多种土体的判断; 而渗透条件 I 对无黏性土的判断较为准确, 仅包含 7 个参数且较易测定; 渗透条件 II 宜用于土体初始密实程度和注浆工艺中灌注次数的设计计算, 实际的参数值(孔隙率和固化效果)须做更为有效的修正。

5 结论与探讨

在已有的土壤颗粒粒径和微生物的尺寸相容性前提下, 针对分步、低速工艺下的定容量饱和和渗透灌浆, 提出了土体适用 MICP 技术的渗透性条件判断公式。通过对涵盖砂土、粉土、砂质黏性紫色土、膨胀土等 9 种土 (控制粒径 $d_{60}=0.040 \sim 0.913\text{ mm}$, 初始孔隙率 $n_0=31.5\% \sim 54.9\%$) 的固化试验结果进行验证, 并分析了参数值的选取。主要得出以下结论:

(1) MICP 加固技术对土体的要求可通过土体的渗透条件综合反映。复杂的工程土不易精细化分类, 而渗透系数的经验公式计算和试验测试较易开展, 便于进行土体是否适用 MICP 技术的初步判断。

(2) 结合渗透性折减参数 ξ 值的选取 (无黏性土 10^{-2} , 黏性土 10^{-1}), 渗透条件Ⅲ可较广泛地用于多种土体的判断; 而渗透条件 I 虽然简洁并容易计算, 但更适于 MICP 技术广为应用的砂土。同时, 式 (2)、(14) 则分别对灌浆浆液总量和灌浆时长提供了计算式, 可为开展大型室外试验或固土工程的技术方案设计提供依据。

存在的问题与探讨: 在进行理论推导时忽略了浆液黏度的时变性和土体的滤过效应, 且渗透系数的变化实际应为非线性的, 是随着孔隙率中碳酸钙的生成而变化的, 需要考虑微生物进行酶化的反应速度, 耦合影响效应复杂, 有待后续研究。

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] 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. SUN Xiao-hao, MIAO Lin-chang, TONG Tian-zhi, et al. Experimental study of solidifying sand using microbial-induced calcium carbonate precipitation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(11): 3225—3230.
- [3] 钱春香, 王安辉, 王欣. 微生物灌浆加固土体研究进展[J].

- 岩土力学, 2015, 36(6): 1537—1548.
- QIAN Chun-xiang, WANG An-hui, WANG Xin. Advances of soil improvement with bio-grouting[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(6): 1537—1548.
- [4] 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.
- LIU Lu, SHEN Yang, LIU Han-long, et al. Application of bio-cement in erosion control of levees[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(12): 3410—3416.
- [5] JIANG N J, SOGA K. The applicability of microbially induced calcite precipitation (MICP) for internal erosion control in gravel-sand mixtures[J]. **Geotechnique**, 2017, 67(1): 42—55.
- [6] 李驰, 刘世慧, 周团结, 等. 微生物矿化风沙土强度及孔隙特性的试验研究[J]. 力学与实践, 2017, 39(2): 165—171, 184.
- LI Chi, LIU Shi-hui, ZHOU Tuan-jie. The strength and porosity properties of MICP-treated aeolian sandy soil[J]. **Mechanics in Engineering**, 2017, 39(2): 165—171, 184.
- [7] AL QABANY 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.
- [8] MITCHELL J K, SANTAMARINA J C. Biological considerations in geotechnical engineering[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2005, 131(10): 1222—1233.
- [9] MORTENSEN B M, HABER M J, DEJONG J T, et al. Effects of environmental factors on microbial induced calcium carbonate precipitation[J]. **Journal of Applied Microbiology**, 2011, 111(2): 338—349.
- [10] 邵光辉, 尤婷, 赵志峰, 等. 微生物灌浆固化粉土的微观结构与作用机制[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2017, 41(2): 129—135.
- SHAO Guang-hui, YOU Ting, ZHAO Zhi-feng, et al. Microstructure and mechanism of microbial cementation silt treated by bio-grouting[J]. **Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)**, 2017, 41(2): 129—135.
- [11] 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, 140(5): 04014006.
- [12] REBATA LANDA V, SANTAMARINA J C. Mechanical limits to microbial activity in deep sediments[J]. **Geochemistry, Geophysics, Geosystems**, 2006, 7(11): 1—12.
- [13] KIM D, PARK K, KIM D. Effects of ground conditions on microbial cementation in soils[J]. **Materials**, 2014, 7(12): 143—156.
- [14] 崔明娟, 郑俊杰, 赖汉江. 颗粒粒径对微生物固化砂土强度影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(增刊 2): 397—402.
- CUI Ming-juan, ZHENG Jun-jie, LAI Han-jiang. Experimental study of effect of particle size on strength of bio-cemented sand[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(Suppl.2): 397—402.
- [15] 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.
- [16] WHIFFIN V S, PAASSEN L A VAN, HARKES M P. Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique[J]. **Geomicrobiol**, 2007, 24(5): 417—423.
- [17] 李捷, 方祥位, 申春妮, 等. 颗粒级配对珊瑚砂微生物固化影响研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2016, 14(6): 7—12.
- LI Jie, FANG Xiang-wei, SHEN Chun-ni, et al. Influence of grain composition on coral sand bio-cementation[J]. **Journal of Water Resources and Architectural Engineering**, 2016, 14(6): 7—12.
- [18] 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 Yi-xi, FANG Xiang-wei, SHEN Chun-ni, 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.
- [19] 陈婷婷, 程晓辉. 微生物改性砂柱水力渗透性质的有限元模拟[J]. 工业建筑, 2015, 45(7): 31—35.
- CHEN Ting-ting, CHENG Xiao-hui. Finite-element simulation of the hydraulic permeability properties of the microbial modified sand column[J]. **Industrial Construction**, 2015, 45(7): 31—35.
- [20] CHU J, IVANOV V, NAEIMI M, et al. Optimization of calcium-based bioclogging and biocementation of sand[J]. **Acta Geotechnica**, 2014, 9(2): 277—285.