

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.116



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



MICP 加固花岗岩残积土的渗透特性

王延宁^{1,2}, 黄龙剑¹, 陈前¹, 俞缙³, 刘士雨³

(1. 汕头大学土木与智慧建设工程系; 广东省结构安全与监测工程技术研究中心, 广东 汕头 515063; 2. 中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221116; 3. 华侨大学福建省隧道与城市地下空间工程技术研究中心, 福建 厦门 361021)

摘要: MICP 技术可以显著降低固化土壤的渗透系数, 然而目前没有关于 MICP 固化土壤渗透系数的理论计算方法。基于理论推导和试验验证的方法, 研究 MICP 加固花岗岩残积土的渗透特性, 提出 MICP 加固花岗岩残积土的碳酸钙生成量和渗透系数理论表达式。假设 MICP 的反应速率线性衰减, 通过酶促反应动力学方程得到 MICP 加固土体的 CaCO_3 生成量, 估算 CaCO_3 晶体的粒径和个数, 从而获得加固后试样的孔隙比、迂曲度和颗粒比表面积, 代入修正的 Kozeny-Carman 方程, 得到加固后土体的渗透系数理论表达式。与试验数据对比分析结果表明: CaCO_3 的产量早期增加快, 后期增加变缓并逐渐趋于稳定; MICP 加固土体的渗透系数其具有早期降低快, 后期趋于平稳的特征。胶结液浓度为 0.50、0.75、1.00、1.25 kmol/m^3 的试样渗透系数最终分别降低了 35%、40%、45% 和 55%。提出的 CaCO_3 含量表达式和渗透系数表达式与试验结果拟合良好, 可为微生物加固的设计计算提供参考。

关键词: 微生物诱导碳酸钙沉淀; 花岗岩残积土; 加固; Kozeny-Carman 方程; 胶结作用
中图分类号: TU43 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2024)05-0038-09

Hydraulic conductivity of MICP-treated granite residual soil

WANG Yannning^{1,2}, HUANG Longjian¹, CHEN Qian¹, YU Jin³, LIU Shiyu³

(1. Department of Civil Engineering and Smart Cities, Shantou University, Shantou 515063, Guangdong, P. R. China; 2. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, P. R. China; 3. Fujian Research Center for Tunneling and Urban Underground Space Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, Fujian, P. R. China)

Abstract: Hydraulic conductivity of soil decreases significantly after MICP treatment, but there is a lack of theoretical calculation of the hydraulic conductivity of MICP-treated soil. This paper presents theoretical analysis and experimental study on hydraulic conductivity of MICP treated granite residual soils, and proposes theoretical expressions for CaCO_3 contents and hydraulic conductivity. CaCO_3 mass contents were derived based on the kinetic equation of the enzymatic reaction that decays linearly. Moreover, the particle size and number of CaCO_3 crystals were calculated using the SEM image, and then void ratio, tortuosity and average specific

收稿日期: 2023-06-28

基金项目: 广东省自然科学基金(2022A1515011200); 广东省科技计划(STKJ2021129); 国家自然科学基金(51878657)

作者简介: 王延宁(1982-), 男, 博士, 副教授, 主要从事岩石力学及岩土环境工程研究, E-mail: wangyn@stu.edu.cn.

Received: 2023-06-28

Foundation items: Natural Science Foundation of Guangdong Province of China (No. 2022A1515011200); Science and Technology Planning Project of Guangdong Province of China (No. STKJ2021129); National Natural Science Foundation of China (No. 51878657)

Author brief: WANG Yannning (1982-), PhD, associate professor, main research interests: rock mechanics and geoenvironmental engineering, E-mail: wangyn@stu.edu.cn.

surface area of the grain were deduced. These factors were substituted into Kozeny-Carman equation to propose a theoretical expression of the hydraulic conductivity of MICP-treated soils. Compared to the experimental data, the results show that CaCO_3 contents increase sharply at the beginning and then become stable, while hydraulic conductivity exhibits the features of an early rapid decrease and subsequent tendency to stabilize. Hydraulic conductivity of the specimens with the concentration of 0.50 kmol/m^3 , 0.75 kmol/m^3 , 1.00 kmol/m^3 and 1.25 kmol/m^3 of cementitious solution decreased by 35%, 40%, 45% and 55% respectively. The expression of CaCO_3 mass contents and the model of hydraulic conductivity agree well with the testing data. The findings provided valuable insights into prediction of CaCO_3 contents and hydraulic conductivity of MICP treated granite residual soil.

Keywords: microbial induced carbonate precipitation (MICP); granite residual soil; reinforcement; Kozeny-Carman equation; cementation

崩塌侵蚀和内部侵蚀是中国南方花岗岩残积土地区普遍存在的现象,往往造成严重的水土流失^[1-3]。Liu等^[1]通过室内试验研究不同流速下花岗岩残积土的侵蚀行为,入渗流速越大,侵蚀量越大;Liu等^[2]发现花岗岩残积土易发生崩塌侵蚀,且坡角越大侵蚀量越大;Li等^[3]的研究表明,花岗岩残积土在低含水率下易产生裂缝,然后在大雨作用下受到侵蚀,易发生崩解。机械压实和注入水泥浆的土壤处理方式存在高污染和高成本等缺点^[4],因此,研究节能减排、环境友好的土壤加固方法意义重大^[5]。微生物诱导碳酸钙沉淀(Microbial Induced Carbonate Precipitation, MICP)可持续性、污染少、能耗低^[6-7],在土壤的加固抗侵蚀,防止水土流失方面具有良好的应用前景^[8]。

众多学者致力于研究MICP降低土壤的水力渗透系数以提高其抗侵蚀性和抗渗性能。Tan等^[9]通过试验发现不同粒径的砂土经过MICP加固后渗透系数显著降低;Wang等^[10]通过模型试验采用MICP技术降低了花岗岩残积土的侵蚀速率和渗透性;Liang等^[11]研究发现,花岗岩残积土经过MICP处理后的崩解速率大大降低;Soon等^[12]通过试验探究MICP加固残积土的影响因素发现,加固后试样渗透系数显著降低。然而,MICP加固花岗岩残积土的碳酸钙生成量、渗透系数与固化时间之间的关系仍需进一步研究。

笔者主要研究MICP加固花岗岩残积土的渗透特性。基于酶促反应动力学方程,假设反应速率线性衰减,推导碳酸钙生成量的表达式;基于MICP原理和Ren等^[13]改进的Kozeny-Carman方程(K-C方程),提出MICP固化花岗岩残积土渗透系数表达式,通过电镜扫描法(SEM)和试验数据验证理论分析的可行性。SEM图和理论表达式计算值与试验数据对比表明, CaCO_3 含量和渗透系数表达式具有良好的适用性,为MICP加固花岗岩残积土的

CaCO_3 含量和渗透系数计算提供了理论依据。

1 理论分析

1.1 基本假设

考虑MICP加固土壤过程中孔隙比、颗粒比表面积和迂曲度对试样渗透系数的影响。为方便推导,所需基本假设如下:

- 1) 碳酸钙晶体的颗粒形状为圆形^[14-15];
- 2) 碳酸钙沉淀不影响处理液的反应体积^[16];
- 3) 碳酸钙晶体在土体内均匀分布^[17]。

1.2 理论推导

1927年,Kozeny^[18]根据达西定律提出渗透系数表达式。

$$k = C_F \frac{\gamma}{\mu} \cdot \frac{d_m^2}{36} \cdot \frac{e^3}{1+e} \quad (1)$$

式中: C_F 为孔隙形状参数; γ 为流体重度, N/m^3 ; μ 为流体的动力黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; d_m 为土颗粒有效平均直径, m ; e 为孔隙比。

Carman^[19]在1939年提出颗粒有效平均粒径 $d_m = \sum Nd^3 / \sum N^2 d^2$,土颗粒比表面积 $S_0 = 6 \sum Nd^2 / \sum Nd^3$ (式中, d 为土颗粒直径),修正Kozeny的方程得到K-C方程的表达式为

$$k = C_F \frac{\rho_w g}{\mu} \cdot \frac{1}{S_0^2} \cdot \frac{e^3}{1+e} \quad (2)$$

式中: g 为重力加速度, m/s^2 ; ρ_w 为流体密度, kg/m^3 。

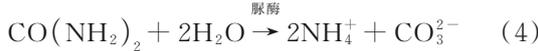
K-C方程将渗流假设为圆管的均匀流,经验证适用于粗粒土的渗透系数计算^[20],但由于没有考虑结合水影响而不适用于黏土^[21]。

花岗岩残积土既有黏性土的性质,又有粗粒土的某些特性^[22],由于K-C方程没有考虑黏性土颗粒表面的结合水,所以并不适用于花岗岩残积土。2016年,Ren等^[13]引入有效孔隙比修正经典的K-C方程。此外,形状参数可通过迂曲度确定^[23]。因此,适用于黏性土的K-C方程为

$$k = C_F \frac{\rho_w g}{\mu} \cdot \frac{1}{S_0^2} \cdot \frac{e_i^{3m+3}}{(1+e_i)^{\frac{5}{3}m+1} [(1+e_i)^{m+1} - e_i^{m+1}]^{\frac{4}{3}}} = \frac{1}{2\tau} \frac{\rho_w g}{\mu} \cdot \frac{1}{S_0^2} \cdot \frac{e_i^{3m+3}}{(1+e_i)^{\frac{5}{3}m+1} [(1+e_i)^{m+1} - e_i^{m+1}]^{\frac{4}{3}}} \quad (3)$$

式中: τ 为迂曲度; e_i 为总孔隙比; m 为特定土壤常数。

MICP 过程中, 细菌分解脲酶催化尿素和氯化钙反应生成碳酸钙沉淀, 反应式为^[24]



该反应属于酶促反应, 反应速率 v 由米氏方程确定, 主要与底物浓度相关。此外, 还受到细菌活性、胶结液浓度、pH 值、土体温度的影响^[25]。由于反应物的浓度在初始时刻最大, 并且假设线性衰减, 因此, 反应速率在开始时最大, 反应过程中逐渐减小, 最终为零, 表达式为^[26]

$$v = \begin{cases} \frac{C^{\text{urea}} v_{\max}}{K_m + C^{\text{urea}}} \left(1 - \frac{t}{t_{\max}}\right), & 0 \leq t \leq t_{\max} \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (6)$$

式中: t_{\max} 为最长反应时间, h, 以碳酸钙含量不再增加的时刻作为取值依据; v_{\max} 为最大反应速率, mol/(L·s), 以反应开始后 1 h 碳酸钙生成量作为取值依据; K_m 为米氏常数, $K_m = 0.1 \text{ mol/L}$ ^[27]; C^{urea} 为底物(尿素)浓度, mol/L。

胶结液和菌液的混合比例为 1:1, 混合后胶结液的浓度减少一半。根据基本假设 3), 对式(6)进行积分得到 $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 在时间 t 内浓度的变化量为

$$\Delta C^{\text{urea}} = \frac{1}{2} \int_0^t v dt = \frac{1}{2} \frac{C^{\text{urea}} v_{\max}}{K_m + C^{\text{urea}}} \left(t - \frac{t^2}{2t_{\max}} + C\right) \quad (7)$$

根据初值条件 $t=0$ 时, $\Delta C^{\text{urea}}=0$, 所以 $C=0$, $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 在时间 t 内浓度的变化量为

$$\Delta C^{\text{urea}} = \frac{1}{2} \frac{C^{\text{urea}} v_{\max}}{K_m + C^{\text{urea}}} \left(t - \frac{t^2}{2t_{\max}}\right) \quad (8)$$

碳酸钙浓度定义为单位孔隙体积内碳酸钙物质的量。反应过程中, 每产生 1 mol 的 CaCO_3 消耗 1 mol 的 $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$, 所以, 碳酸钙沉淀的浓度为

$$\Delta C^{\text{CaCO}_3} = \frac{1}{2} \frac{C^{\text{urea}} v_{\max}}{K_m + C^{\text{urea}}} \left(t - \frac{t^2}{2t_{\max}}\right) \quad (9)$$

反应过程中土体孔隙内生成 CaCO_3 的质量为

$$m_{\text{CaCO}_3} = \frac{1}{2} \frac{C^{\text{urea}} v_{\max}}{K_m + C^{\text{urea}}} \left(t - \frac{t^2}{2t_{\max}}\right) V_{v0} M_{\text{CaCO}_3} \quad (10)$$

式中: V_{v0} 为初始孔隙体积, m^3 ; M_{CaCO_3} 为 CaCO_3 的摩尔质量, 取 100 kg/kmol 。

CaCO_3 的质量分数可表示为

$$W = \frac{m_{\text{CaCO}_3}}{m_s} = \frac{\frac{C^{\text{urea}} v_{\max}}{K_m + C^{\text{urea}}} \left(t - \frac{t^2}{2t_{\max}}\right) V_{v0} M_{\text{CaCO}_3}}{2d_s V (1 - n_0)} \times 100\% \quad (11)$$

式中: d_s 为颗粒比重; V 为试样总体积; n_0 为试样初始孔隙率。

生成的 CaCO_3 的体积 V_{CaCO_3} 的表达式为

$$V_{\text{CaCO}_3} = \frac{m_{\text{CaCO}_3}}{\rho_{\text{CaCO}_3}} \quad (12)$$

式中: ρ_{CaCO_3} 为 CaCO_3 的密度, 取 2710 kg/m^3 。

假设碳酸钙体积分数为 x (碳酸钙体积与初始孔隙体积的比值), x 的表达式为

$$x = \frac{V_{\text{CaCO}_3}}{V_i n_0} = \frac{\Delta C^{\text{CaCO}_3} M_{\text{CaCO}_3}}{\rho_{\text{CaCO}_3}} = \frac{1}{2\rho_{\text{CaCO}_3}} \frac{C^{\text{urea}} v_{\max}}{K_m + C^{\text{urea}}} \left(t - \frac{t^2}{2t_{\max}}\right) M_{\text{CaCO}_3} \quad (13)$$

式中: n_0 为初始孔隙率; V_i 为试样体积, m^3 。

MICP 固化土壤的孔隙比 e_i 为

$$e_i = \frac{V_{v0} \left[1 - \frac{1}{2\rho_{\text{CaCO}_3}} \frac{C^{\text{urea}} v_{\max}}{K_m + C^{\text{urea}}} \left(t - \frac{t^2}{2t_{\max}}\right) M_{\text{CaCO}_3}\right]}{V_{s0} + V_{\text{CaCO}_3}} \quad (14)$$

式中: V_{s0} 为土颗粒体积, m^3 。

SEM 成像法通常被用来近似计算碳酸钙晶体的粒径 d_{CaCO_3} ^[28], 根据基本假设 1), 单个 CaCO_3 晶体的体积为

$$V'_{\text{CaCO}_3} = \frac{\pi d_{\text{CaCO}_3}^3}{6} \quad (15)$$

式中: d_{CaCO_3} 为碳酸钙晶体的粒径。

颗粒数量定义为总体积与单个颗粒体积之比, CaCO_3 晶体的颗粒数量 N_2 为

$$N_2 = \frac{V_{\text{CaCO}_3}}{V'_{\text{CaCO}_3}} = \frac{6V_{\text{CaCO}_3}}{\pi d_{\text{CaCO}_3}^3} \quad (16)$$

同理, 单个土颗粒的体积为

$$V'_{s0} = \frac{\pi d_{\text{soil}}^3}{6} \quad (17)$$

式中: d_{soil} 为土颗粒平均粒径。

土颗粒数量 N_1 为

$$N_1 = \frac{V_{s0}}{V'_{s0}} = \frac{6V_{s0}(1 - n_0)}{\pi d_{\text{soil}}^3} \quad (18)$$

式中: n_0 为初始孔隙率。

碳酸钙在土体中的胶结作用和分布存在 3 种形式(图 1)^[28]。1) 覆膜作用: 碳酸钙附在土颗粒的表面, 增大土颗粒体积和表面积。2) 桥接作用: 碳酸钙在土颗粒表面沉积, 将相邻土壤颗粒连接。3) 黏

结作用:碳酸钙沉积、聚集在颗粒接触点之间,黏结相接触的土颗粒。

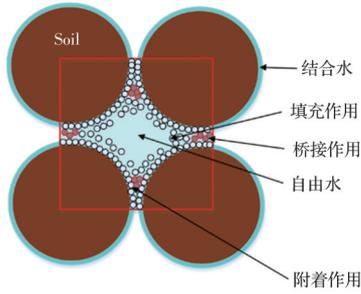


图 1 胶结作用示意图

Fig. 1 Schematic diagram of cementation

将胶结作用的碳酸钙晶体视为单独存在的颗粒,根据 Carman 提出颗粒有效平均粒径 $d_m = \sum Nd^3 / \sum N^2 d^2$, 颗粒平均比表面积 $S_0 = 6 \sum Nd^2 / \sum Nd^3$, MICP 固化土壤的颗粒有效平均粒径为

$$d'_m = \frac{d'^3_{soil} N_1 + d^3_{CaCO_3} N_2}{d'^2_{soil} N_1 + d^2_{CaCO_3} N_2} \quad (19)$$

土颗粒形状会影响颗粒比表面积,土颗粒被假设为圆形,而黏土颗粒有时呈长方形或片状结构,使得黏土颗粒比表面积增加,引入参数修正得到平均颗粒比表面积为

$$S'_0 = \alpha \frac{6 \times (d'^2_{soil} N_1 + d^2_{CaCO_3} N_2)}{d'^3_{soil} N_1 + d^3_{CaCO_3} N_2} \quad (20)$$

式中: α 为比表面积修正系数,与颗粒形状相关, $\alpha > 1$ 。

MICP 过程产生碳酸钙沉淀,填充土壤孔隙,使其孔隙比减小。此外,颗粒数量增加,造成更加复杂的几何颗粒排列。当存在胶结沉积物时,K-C 方程中的形状参数迂曲度 τ 还受到孔隙度的影响,加固后花岗岩残积土迂曲度的表达式为^[23]

$$\tau = \tau_0 \left[1 + \frac{2 \frac{n_0 - n}{1 - n}}{\left(1 - \frac{n_0 - n}{1 - n} \right)^{0.33}} \right]^2 \quad (21)$$

式中: τ_0 为试样初始迂曲度; n_0 为试样初始孔隙率; n 为试样固化后孔隙率。

综上,MICP 加固花岗岩残积土的 K-C 方程的理论表达式为

$$k = \frac{1}{2\tau} \frac{\rho_w g}{\mu} \cdot \frac{1}{S'^2_0} \cdot \frac{e_t^{3m+3}}{(1 + e_t)^{\frac{5}{3}m+1} \left[(1 + e_t)^{m+1} - e_t^{m+1} \right]^{\frac{4}{3}}} \quad (22)$$

式中: e_t 、 S'_0 和 τ 分别由式(14)、式(20)和式(21)确

定。若确定最大反应速率、最大反应时间、底物尿素的浓度、脲酶的米氏常数和菌液的 OD_{600} 值和体积,便可根据式(22)预测 MICP 加固花岗岩残积土的渗透系数,相关计算过程如图 2 所示。

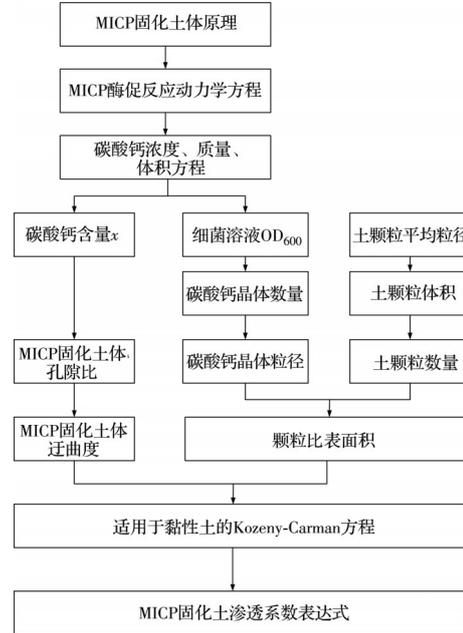


图 2 MICP 加固土渗透系数计算流程图

Fig. 2 Flow chart for calculating the hydraulic conductivity of MICP treated-soil

2 试验材料与过程

2.1 花岗岩残积土

试验用的花岗岩残积土取自广东省汕头市桑浦山下,按照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)对其进行颗粒分析,颗粒级配曲线如图 3 所示。

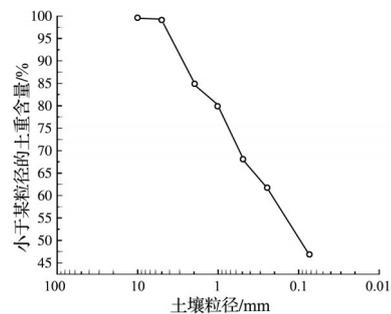


图 3 花岗岩残积土颗粒级配曲线

Fig. 3 Particle size distribution of granite residual soil

根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019),确定试验用花岗岩残积土的基本物理特性,如表 1 所示。

将花岗岩残积土在 105 °C 的烘箱中烘干 6 h,去除土体内绝大部分水分,提高土样过筛率,并过 1.18 mm 筛,继续烘干 8 h,去除土样内的水分后,取

表 1 花岗岩残积土基本物理性质

Table 1 Basic geotechnical properties of granite residual soil

含水率/%	密度/(g/cm ³)	孔隙率	液限/%	塑限/%	颗粒比重/(g/cm ³)
22.74	1.73	0.425	34.20	22.70	2.65

出放入干燥的塑料箱备用。

2.2 微生物材料

试验菌种为中国普通微生物菌种保藏管理中心的巴氏芽孢杆菌(CGMCC 1.3687)。细菌溶液培养如图 4 所示,将冻干粉状态(如图 4(a)所示)的菌种在细菌培养液(氯化钠 2.5 g/L、牛肉膏 10 g/L、尿素 5 g/L、蛋白胨 10 g/L)中进行活化。用 1 mol/L 的 NaOH 溶液调节培养液 pH 值至 8。将细菌从平板接种到培养液中,置于振荡培养箱(30 °C, 121 r/min)培养 48 h。测定其细菌浓度和活性,培养好的菌液 OD₆₀₀ 值大约为 1.3。

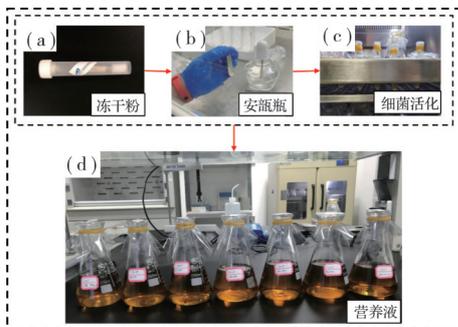


图 4 细菌溶液培养

Fig. 4 Culture of bacterial

胶结液使用的是氯化钙-尿素混合液,其中氯化钙与尿素的比例为 1:1,浓度设置为 0.5、0.75、1.0、1.25 kmol/m³。

2.3 试验装置

制备的环刀土样培养到所需时间后,从养护箱拿出,放入 75% 浓度的酒精中灭菌。灭菌完成后按《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)第 4.6.3 条的操作对试样进行饱和。

依据达西定律,采用变水头试验方法测定试样的渗透系数,根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)第 16.3.3 条,渗透系数计算式为

$$k_T = 2.3 \frac{aL}{At} \lg \frac{h_1}{h_2} \quad (23)$$

式中: A 为试样的横截面积; L 为渗流路径,等于试样高度; k_T 为水温 T 为 °C 时试样的渗透系数; a 为变水头管截面积; h_1 为开始时水头; h_2 为终止时水头。

2.4 试样制备

依据潮汕地区花岗岩残积土的特性^[29],室内试样控制土壤孔隙率为 42.5%。渗透试验用环刀样,直径为 61.8 mm,高为 40 mm。

采用拌和方式对花岗岩残积土进行加固,实验组的处理液体积与孔隙体积相等,制样饱和度为 80%,对照组拌和蒸馏水的体积为 41 mL。环刀试样制备完成后在养护箱中养护,每个浓度的试样每隔 24 h 取出一个做渗透试验,渗透试验完成后采用酸洗法测量碳酸钙的质量分数。试验方案见表 2。

表 2 试验方案

Table 2 Experimental scheme

胶结液浓度/(kmol/m ³)	试验方案
0	对照组,加 41 mL 蒸馏水拌和花岗岩残积土
0.5、0.75、1.0、1.25	实验组,加 20.5 mL 胶结液和 20.5 mL 菌液拌和花岗岩残积土

3 试验结果

3.1 碳酸钙的生成量

MICP 加固土壤的过程中, Ca²⁺ 结合 CO₃²⁻ 生成碳酸钙沉淀,因此,可以通过 Ca²⁺ 的浓度改变量或碳酸钙质量确定反应速率的快慢^[30]。渗透系数试验完成后从环刀试样中取样,采用酸洗法测定碳酸钙质量分数。所需参数见表 3。

表 3 碳酸钙质量分数计算参数

Table 3 Parameters for the calculation of CaCO₃ mass fraction

胶结液浓度/(kmol/m ³)	K_m /(kmol/m ³)	t_{max} /h	v_{max} /(kmol/(m ³ ·h))	V_{v0} /cm ³
0.5	0.1	175	0.006 12	51
0.75	0.1	175	0.008 28	51
1.00	0.1	175	0.010 8	51
1.25	0.1	175	0.013 32	51

将表 3 的参数代入式(11),得到 CaCO₃ 的质量分数与时间的关系曲线,并与试验值进行对比,碳酸钙质量分数-时间关系如图 5 所示。

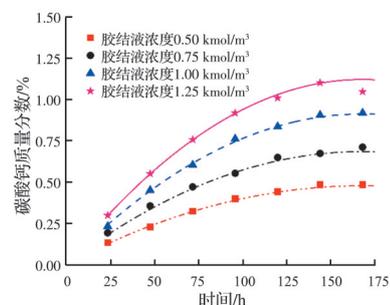


图 5 碳酸钙质量分数-时间关系

Fig. 5 Relationship between CaCO₃ mass fraction and time

从图 5 可以看出:1)胶结液浓度在 0.5~1.25 kmol/m³ 之间时,在相同反应时间下, CaCO₃ 质量分数随胶结液浓度增加而增加;2)不同胶结液浓度的

试样, CaCO₃质量分数均随固化时间的增加而增加; 3) 反应速率线性衰减, 在 0~t_{max} 时间范围内, 开始生成 CaCO₃ 的速率快, 随着反应时间的增加逐渐变缓, 最后趋于稳定。计算值和试验结果对比分析表明, 式 (11) 能较好地预测 MICP 加固花岗岩残积土的 CaCO₃ 质量分数。由于受 pH 值、菌液与处理液比例

和温度等因素影响, 试验 CaCO₃ 产率为 85%~90%。

3.2 渗透系数试验

通过分析渗透系数-时间关系进一步验证式 (22) 的适用性。在进行渗透系数计算时, 需要用到表 3 所列参数。此外, 还需补充的参数见表 4。

表 4 渗透系数计算参数

Table 4 Hydraulic conductivity calculation parameters

胶结液浓度/(kmol/m ³)	d _{CaCO₃} /μm	d _{soil} /mm	α	m	τ ₀	ρ _w /(kg/m ³)	g/(m/s ²)	μ/(kg/ms)
0.50	9.0	0.004	1.4	0.8	0.64	1 050	9.8	0.011 7
0.75	8.5	0.004	1.4	0.8	0.64	1 050	9.8	0.011 7
1.00	7.5	0.004	1.4	0.8	0.64	1 050	9.8	0.011 7
1.25	6.5	0.004	1.4	0.8	0.64	1 050	9.8	0.011 7

将表 3 和表 4 的参数代入式 (14) 求得加固土样孔隙比, 代入式 (20) 求得加固土样颗粒比表面积, 代入式 (21) 求得加固土样迂曲度。将加固土样孔隙比、颗粒比表面积、迂曲度代入式 (22) 得到渗透系数的计算值, 渗透系数-反应时间关系如图 6 所示。

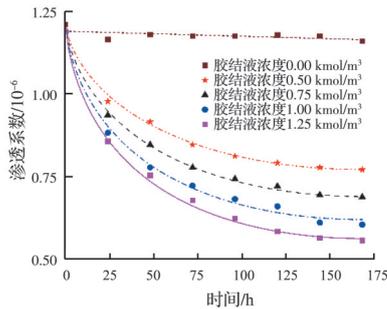


图 6 渗透系数-反应时间关系

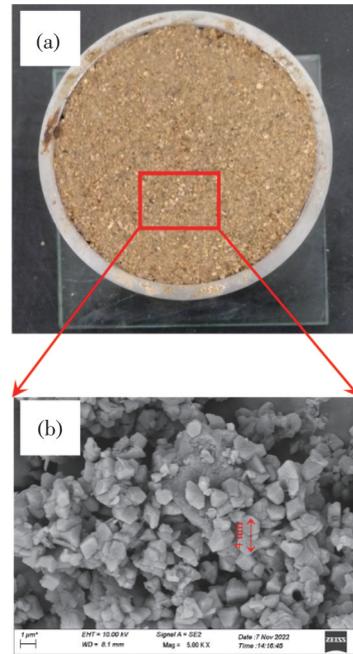
Fig. 6 Relationship between hydraulic conductivity and time

图 6 揭示了渗透系数与反应时间的关系: 1) 胶结液浓度在 0.5~1.25 kmol/m³ 之间时, 在相同固化时间下, 胶结液的浓度越大, 土样的渗透系数下降幅度越大; 胶结液浓度为 0.5、0.75、1.0、1.25 kmol/m³ 的试样渗透系数最终分别下降了 35%、40%、45%、55%。2) 不同胶结液浓度的试样, 其渗透系数均随固化时间的增大而减小。3) 渗透系数下降速率在固化初期最大, 渗透系数下降速率会随着时间的增长而逐渐减小。理论计算值经过室内试验结果验证, 式 (23) 可以正确预测 MICP 拌和加固花岗岩残积土的渗透系数。

3.3 SEM 试验结果

为了观察花岗岩残积土固化后的内部显微结构, 采用 SEM 观察浓度为 1 kmol/m³ 固化 7 d 的试样内部结构, 如图 7 所示。

从图 7 的试样 SEM 图中观察到: 1) 花岗岩残积土颗粒之间存在大量碳酸钙晶体, 填充土壤孔隙,



注: (a) 环刀试样; (b) SEM。

图 7 环刀试样 SEM 图

Fig. 7 Soil sample and SEM image

导致孔隙比减小; 2) 碳酸钙晶体颗粒附着在土颗粒的表面, 把相邻花岗岩残积土颗粒胶结在一起, 导致水力渗透路径变得更加曲折。

3.4 算例

将给定参数代入碳酸钙体积分数和渗透系数表达式, 与试验结果对比, 评估推导的 MICP 加固土壤碳酸钙体积分数和渗透系数理论计算表达式的适用性。

MICP 过程中的酶促反应生成碳酸钙沉淀, 算例一中, 对比提出的碳酸钙浓度计算公式与 Wen 等^[30] 的试验结果, 验证式 (9) 的适用性。所需参数见表 5。

算例一考察碳酸钙浓度与时间的关系, 给定米氏常数 K_m、最大反应时间 t_{max}、最大反应速率 v_{max} 和底物

表 5 算例一计算参数

Table 5 Calculating parameters in Example 1

OD ₆₀₀	K _m / (kmol/m ³)	t _{max} / h	v _{max} / (kmol/(m ³ ·h))	C ^{urea} / (kmol/m ³)
0.1	0.13	170	0.077	0.245
0.3	0.13	170	0.085	0.240
0.6	0.13	170	0.088	0.150
1.0	0.13	170	0.095	0.130

浓度 C^{urea}, 代入式(9)得到碳酸钙浓度与时间的关系曲线, 并与 Wen 等的室内试验结果对比, 如图 8 所示。

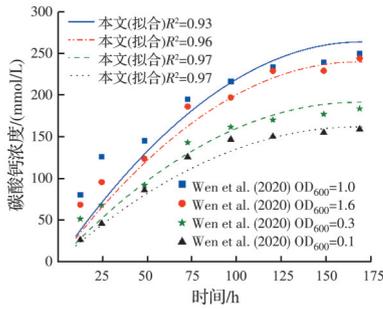


图 8 碳酸钙浓度与时间关系

Fig. 8 Relationship between CaCO₃ concentration and time

从图 8 可以看出: 1) 菌液的 OD₆₀₀ 越大, 消耗的胶结液越多, 最大反应速率越大; 2) 碳酸钙浓度开始增加的速率最大, 随着反应时间增加逐渐变缓, 最后趋于稳定; 3) 提出的碳酸钙浓度计算公式能较好拟合 Wen 等的室内试验值, 所有曲线的确定系数 R² 均大于 0.93。

算例二采用 Soon 等的试验结果^[12], 验证碳酸钙质量分数表达式的适用性, 所需参数如表 6 所示。

表 6 算例二计算参数

Table 6 Calculating parameters in Example 2

胶结液浓度 / (kmol/m ³)	K _m / (kmol/m ³)	t _{max} / h	v _{max} / (kmol/(m ³ ·h))	孔隙率 n ₀	比重 d _s / (g/cm ³)	V _{vo} / cm ³
0.25	0.1	72	0.057 6	0.44	2.73	334
0.5	0.1	72	0.064 8	0.44	2.73	334

将表 6 中的参数代入式(11), 得到碳酸钙质量分数与时间关系曲线, 如图 9 所示。

从图 9 可以看出: 1) 胶结液浓度越大, 相同时间下碳酸钙产量越大; 2) 碳酸钙质量分数开始增加的速率最大, 随着反应时间增加逐渐变缓, 最后趋于稳定。式(11)与 Soon 等的室内试验值拟合良好, 所有曲线的确定系数 R² 均大于 0.95。

算例三探究渗透系数 k 与 CaCO₃ 体积分数 x 的关系, 对比提出的渗透系数计算公式与 Soon 等的实验结果^[12], 验证式(22)的适用性。所需参数如表 7 所示。

通过式(13)求得碳酸钙的体积分数 x; 然后根

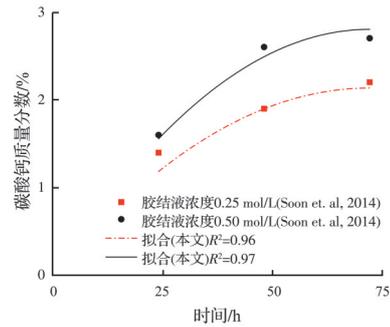


图 9 碳酸钙质量分数与时间关系

Fig. 9 Relationship between CaCO₃ mass fraction and time

表 7 算例三计算参数

Table 7 Calculating parameters in Example 3

τ ₀	ρ _w / (kg/m ³)	g / (m/s ²)	μ / (kg/ms)	V _i / m ³
1.5	1 050	9.8	0.011 7	3.34 × 10 ⁻⁴
e ₀	d _{CaCO₃} / μm	d _{soil} / mm	α	m
0.389	1.5	0.001 5	1.4	1

据碳酸钙的平均粒径求得单个碳酸钙的体积, 应用式(16)求得碳酸钙颗粒总数 N₂; 通过土颗粒的平均粒径求得单个土颗粒体积, 应用式(18)求得土颗粒总数 N₁。将 N₁、d_{m1}、N₂ 和 d_{CaCO₃} 代入式(20)得到 MICP 固化土样的颗粒平均比表面积 S'₀; 将 x 代入式(14), 得到总孔隙比 e_i; 将 e_i 代入式(21), 得到固化后土壤的迂曲度 τ。

将 S'₀、e_i、τ 代入式(22)得到渗透系数与碳酸钙体积分数的关系曲线, 结果如图 10 所示。

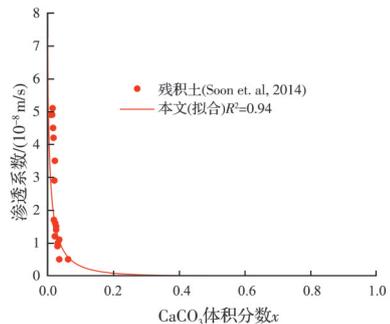


图 10 渗透系数与碳酸钙体积分数 x 的关系曲线

Fig. 10 Relationship between hydraulic conductivity and CaCO₃ contents

图 10 揭示了渗透系数与碳酸钙体积分数 x 的关系: 1) MICP 固化土样的渗透系数先快速降低, 随着碳酸钙体积分数增加, 渗透系数下降速率逐渐减小, 最后趋于零; 2) 经室内试验结果验证, 提出的 MICP 固化土壤渗透系数的表达式可以准确地预测 MICP 固化花岗岩残积土渗透系数。

4 结论

基于MICP加固土的机理和K-C方程,通过理论推导和数据验证的方式验证,得到以下结论:

1)基于酶促反应动力学方程,假设反应速率线性衰减,提出了MICP加固花岗岩残积土的碳酸钙生成量。

2)基于MICP加固土的机理和K-C方程得到预测MICP固化花岗岩残积土渗透系数的理论表达式并验证可行。

3)固化初期碳酸钙质量分数快速增加,反应过程中速率变缓,最终趋于平稳;固化初期渗透系数下降速率最大,反应过程中逐渐减缓,最终趋于平稳。

MICP加固花岗岩残积土过程中,土颗粒间会形成孤孔和盲孔,无法形成有效渗流。此外,迂曲度不仅与孔隙度相关,还与颗粒排列形式密切相关,这些因素对MICP加固花岗岩残积土渗透系数的影响有待探究。

参考文献

- [1] LIU W P, WAN S F, LUO X Y, et al. Experimental study of suffusion characteristics within granite residual soil controlling inflow velocity [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2020, 13(22): 1191.
- [2] LIU W P, SONG X Q, LUO J, et al. The processes and mechanisms of collapsing erosion for granite residual soil in Southern China [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2020, 20(2): 992-1002.
- [3] LI C S, KONG L W, SHU R J, et al. Disintegration characteristics in granite residual soil and their relationship with the collapsing gully in South China [J]. *Open Geosciences*, 2020, 12(1): 1116-1126.
- [4] NAEIMI M, ZANDIFAR S. Reduction of hydraulic conductivity of sand using combination of microbially produced and chemical source of ferrous cations [J]. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, 15(9): 1135-1144.
- [5] 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 C X, WANG A H, WANG X. Advances of soil improvement with bio-grouting [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(6): 1537-1548. (in Chinese)
- [6] 李昊, 唐朝生, 刘博, 等. 模拟海水环境下MICP固化钙质砂的力学特性 [J]. *岩土工程学报*, 2020, 42(10): 1931-1939.
LI H, TANG C S, LIU B, et al. Mechanical behavior of MICP-cemented calcareous sand in simulated seawater environment [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, 42(10): 1931-1939. (in Chinese)
- [7] LIU B, ZHU C, TANG C S, et al. Bio-remediation of desiccation cracking in clayey soils through microbially induced calcite precipitation (MICP) [J]. *Engineering Geology*, 2020, 264: 105389.
- [8] 刘汉龙, 肖鹏, 肖杨, 等. 微生物岩土技术及其应用研究新进展 [J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2019, 41(1): 1-14.
LIU H L, XIAO P, XIAO Y, et al. State-of-the-art review of biogeotechnology and its engineering applications [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2019, 41(1): 1-14. (in Chinese)
- [9] TAN Y F, XIE X H, WU S Q, et al. Microbially induced CaCO₃ precipitation: Hydraulic response and micro-scale mechanism in porous media [J]. *ScienceAsia*, 2017, 43(1): 1-7.
- [10] WANG Y N, LI S K, LI Z Y, et al. Exploring the application of the MICP technique for the suppression of erosion in granite residual soil in Shantou using a rainfall erosion simulator [J]. *Acta Geotechnica*, 2023, 18(6): 3273-3285.
- [11] LIANG S H, XIAO X L, FANG C X, et al. Experimental study on the mechanical properties and disintegration resistance of microbially solidified granite residual soil [J]. *Crystals*, 2022, 12(2): 132.
- [12] 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.
- [13] REN X W, ZHAO Y, DENG Q L, et al. A relation of hydraulic conductivity-void ratio for soils based on Kozeny-Carman equation [J]. *Engineering Geology*, 2016, 213: 89-97.
- [14] VAN WIJNGAARDEN W K, VERMOLEN F J, VAN MEURS G A M, et al. Modelling biogROUT: A new ground improvement method based on microbial-induced carbonate precipitation [J]. *Transport in Porous Media*, 2011, 87(2): 397-420.
- [15] 王延宁, 黄龙剑, 李思侃, 等. 一种估算MICP加固砂土体渗透系数的简便方法 [J]. *汕头大学学报(自然科学版)*, 2023, 38(1): 3-12.
WANG Y N, HUANG L J, LI S K, et al. A simple method for estimating permeability coefficient of sandy soil strengthened by MICP [J]. *Journal of Shantou University (Natural Science Edition)*, 2023, 38(1): 3-12. (in Chinese)
- [16] 李贤, 汪时机, 何丙辉, 等. 土体适用MICP技术的渗透特性条件研究 [J]. *岩土力学*, 2019, 40(8): 2956-2964, 2974.
LI X, WANG S J, HE B H, et al. Permeability

- condition of soil suitable for MICP method [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(8): 2956-2964, 2974. (in Chinese)
- [17] 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)
- [18] KOZENY J. Über kapillare leitung der wasser in boden [J]. *Royal Academy of Science, Vienna, Proc. Class I*, 1927, 136: 271-306.
- [19] CARMAN P C. Permeability of saturated sands, soils and clays [J]. *The Journal of Agricultural Science*, 1939, 29(2): 262-273.
- [20] 房营光, 陈建, 谷任国, 等. 基于有效比表面积修正的Kozeny-Carman方程在黏土渗透中的适用性研究[J]. *岩土力学*, 2020, 41(8): 2547-2554.
FANG Y G, CHEN J, GU R G, et al. Applicability of clay permeability based on modified Kozeny-Carman equation by effective specific surface area [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(8): 2547-2554. (in Chinese)
- [21] 刘海伟, 党发宁, 田威, 等. 修正Kozeny-Carman方程预估黏土渗透系数的研究[J]. *岩土工程学报*, 2021, 43(Sup1): 186-191.
LIU H W, DANG F N, TIAN W, et al. Prediction of permeability of clay by modified Kozeny-Carman equation [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, 43(Sup1): 186-191. (in Chinese)
- [22] 王清, 唐大雄, 张庆云, 等. 中国东部花岗岩残积土物质成分和结构特征的研究[J]. *长春地质学院学报*, 1991, 21(1): 73-81.
WANG Q, TANG D X, ZHANG Q Y, et al. A study on the structure and composition of granite residual soil in the eastern China [J]. *Journal of Changchun University of Earth Science*, 1991, 21(1): 73-81. (in Chinese)
- [23] DAVIS J M, ROY N D, MOZLEY P S, et al. The effect of carbonate cementation on permeability heterogeneity in fluvial aquifers: An outcrop analog study [J]. *Sedimentary Geology*, 2006, 184(3/4): 267-280.
- [24] WHIFFIN V S, VAN PAASSEN L A, HARKES M P. Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique [J]. *Geomicrobiology Journal*, 2007, 24(5): 417-423.
- [25] 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.
DONG B W, LIU S Y, YU J, et al. Evaluation of the effect of natural seawater strengthening calcareous sand based on MICP [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(4): 1104-1114. (in Chinese)
- [26] VAN WIJNGAARDEN W K, VAN PAASSEN L A, VERMOLEN F J, et al. A reactive transport model for biogROUT compared to experimental data [J]. *Transport in Porous Media*, 2016, 111(3): 627-648.
- [27] 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.
PEI D, LIU Z M, HU B R, et al. Progress on mineralization mechanism and application research of *Sporosarcina pasteurii* [J]. *Progress in Biochemistry and Biophysics*, 2020, 47(6): 467-482. (in Chinese)
- [28] LIN H, SULEIMAN M T, BROWN D G. Investigation of pore-scale CaCO_3 distributions and their effects on stiffness and permeability of sands treated by microbially induced carbonate precipitation (MICP) [J]. *Soils and Foundations*, 2020, 60(4): 944-961.
- [29] 吴能森. 花岗岩残积土的分类研究[J]. *岩土力学*, 2006, 27(12): 2299-2304.
WU N S. Study on classification of granite residual soils [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(12): 2299-2304. (in Chinese)
- [30] WEN K J, LI Y, AMINI F, et al. Impact of bacteria and urease concentration on precipitation kinetics and crystal morphology of calcium carbonate [J]. *Acta Geotechnica*, 2020, 15(1): 17-27.

(编辑 胡英奎)