

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20210621003

添加剂对微生物胶结砂渗流特性的影响研究*

彭 萌, 邓华锋, 熊 雨, 程 雷, 徐鹏飞, 李冠野

(三峡库区地质灾害教育部重点实验室(三峡大学), 湖北 宜昌 443002)

摘要:从MICP反应环境及细菌代谢过程分析出发,选取 NH_4Cl 与 NaHCO_3 作为添加剂,应用于砂土的微生物改性加固,研究结果表明:(1) NH_4Cl 、 NaHCO_3 添加浓度为0.1 mol/L时, CaCO_3 生成量显著增加,相较于添加前增加了68.30%,原因是 NH_4Cl 和 NaHCO_3 的添加,调节反应体系pH值,使其更趋近于脲酶最佳活性所需碱性环境,同时促进细菌活性及代谢过程,进而增加 CaCO_3 生成量;(2)核磁共振检测结果显示,添加 NH_4Cl 、 NaHCO_3 后固化砂柱的孔隙率减小了15.93%,渗透系数降低了2~3个数量级,与MICP固化结果相比也有明显改善,渗透系数降低了50%以上;(3)在渗流模型分析中,一方面考虑 CaCO_3 沉淀对孔隙的填充作用,将其等效为填充于砂颗粒间的小颗粒,提出了MICP固化效应系数表述灌浆加固前后砂颗粒平均粒径的变化,另一方面根据固化后微观检测分析结果,考虑 CaCO_3 沉淀对砂颗粒表面形貌的改变,调整模型中的颗粒材料形状系数 α 的取值。综合这两个方面对Kozeny-Carman渗流模型进行了修正,验证分析表明,修正后的Kozeny-Carman渗流模型能够较好地描述加固体的渗流特性,这也为MICP固化砂土的渗流特性分析提供了一种便捷的思路,只需测试不同阶段 CaCO_3 的生成量,就可以比较准确地估算加固体的渗透系数。

关键词: 添加剂; 微生物; 砂土固化; 渗流系数; 渗流模型

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)05-0999-11

Effect of Chemical Agents on Seepage Characteristics of Microbial Cemented Sand

PENG Meng, DENG Huafeng, XIONG Yu, CHENG Lei, XU Pengfei, LI Guanye

(Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area, Ministry of Education(China Three Gorges University), Yichang 443002, China)

Abstract: This study starts from the analysis of the microbial induced calcite precipitation (MICP) reaction environment and bacterial metabolism process, NH_4Cl and NaHCO_3 were selected as additives for microbial modification and reinforcement of sandy soil. The results showed that: (1) when the concentration of NH_4Cl and NaHCO_3 was 0.1mol/L, the amount of calcium carbonate increased significantly, which was 68.30% more than that before adding. The reason is that the adding of NH_4Cl and NaHCO_3 adjusts the pH value of the reaction system to make it closer to the alkaline environment required for the optimal activity of urease, and at the same time promotes bacterial activity and metabolic processes, which thereby increases the amount of calcium carbonate precipitation; (2) The results

* 收稿日期:2021-06-21;修回日期:2021-09-18

基金项目:国家自然科学基金项目(U2034203)资助

作者简介:彭萌(1995—),男,硕士研究生。主要从事岩土工程方面的研究。E-mail:1562988764@qq.com

通讯作者:邓华锋(1979—),男,教授,博士。主要从事岩土工程方面的教学与研究。E-mail:dhf8010@ctgu.edu.cn

of nuclear magnetic resonance show that the porosity of the solidified sand column decreased by 15.93% and the permeability coefficient decreased by 2-3 orders of magnitude after adding NH_4Cl and NaHCO_3 . Compared with the conventional MICP curing results, the permeability coefficient decreased by more than 50%; (3) In the analysis of the seepage model, on the one hand, the filling effect of CaCO_3 precipitation on the pores was considered, and it is equivalent to the small particles filled between the sand particles. The MICP solidification effect coefficient was proposed to express the changes in the average particle size of sand particles before and after grouting reinforcement. On the other hand, according to the microscopic inspection and analysis results after solidification, the change in the surface morphology of sand particles caused by the precipitation of CaCO_3 was considered, and the value of the shape coefficient α of the granular material in the model was adjusted. Combining these two aspects, the Kozeny-Carman seepage model was revised. The verification analysis shows that the revised Kozeny-Carman seepage model can better describe the seepage characteristics of solids, which also provides information for the analysis of the seepage characteristics of MCP-solidified sand. A convenient way of thinking is that only by testing the amount of CaCO_3 produced at different stages, the permeability coefficient of the solid can be more accurately estimated.

Keywords: additive; microorganism; sand solidification; seepage coefficient; seepage mode

引 言

微生物诱导 CaCO_3 沉淀技术 (Microbial Induced Calcite Precipitation, 简称 MICP), 作为一类生态环保、可持续发展加固技术正处于研究热潮。其实质是利用某些特定微生物自身的新陈代谢活动产生大量的高活性脲酶将尿素水解生成 CO_3^{2-} 与 NH_4^+ , 通过为之提供富含 Ca^{2+} 及氮源的营养盐, 促使生成胶结效果优异的 CaCO_3 沉淀^[1-3]。目前, 该技术广泛应用于土体加固、岩土体防渗、防治砂土液化、污染土治理等方面^[4]。

近年来, MICP 技术固化砂土体取得了较大的进展, 如抗渗性方面, V. Iavnov 等^[5]运用微生物膜固化砂土后, 其渗透系数的数量级由 10^{-2} cm/s 降低至 10^{-4} cm/s。余清鹏等^[6]通过改变 Ca^{2+} 浓度进而影响砂柱的固化效果, 最佳试验条件下砂柱渗透系数的数量级为 10^{-4} cm/s。基于 MICP 技术对加固体渗流特性的影响, 相关渗流模型也成为了研究热点。S. Peng 等^[7]在裂隙岩体的加固试验中, 考虑注浆比、渗透率和电化学阻抗等因素, 提出了 MICP 技术固化裂隙岩体的等效电路模型, 较为准确地预测了固化后裂隙岩体渗透系数。陈婷婷等^[8]采用 Bio-grout 一维有限元模型对微生物改性砂柱的渗透特性进行模拟, 能准确反映渗透系数与孔隙率变化的关系, 并为后续试验优化提供理论依据。

MICP 技术提升加固体强度同样是研究重点, W.R.L. Van der Star 等^[9]对 100 m^3 砂基模型进行微生物灌浆加固, 其局部无侧限抗压强度达 12 MPa。M.P. Harkes 等^[10]通过测定砂柱强度与 CaCO_3 生成量, 发现两者关系密切并拟合出关系曲线。J. Chu 等^[11]进一步得出了强度与 CaCO_3 生成量的经验公式。另外, 钱春香等^[1]、支永艳等^[12]、崔明娟等^[13]、程晓辉等^[14]从不同角度研究了微生物矿化作用对砂土体强度、刚度、抗渗性、抗液化能力的影响。

为了进一步提升 MICP 固化效果, 部分学者在已有的基础上通过外加剂、改变颗粒级配等方式开展了相关研究。李弘妍^[15]使用天然多糖、可溶性淀粉对 CaCO_3 晶体的形貌与结构进行调控, 使其趋向于更加稳定的方解石。荣辉等^[16]通过添加镁离子影响 CaCO_3 晶体的形成, 从而改善了砂土体的强度。王丽娟等^[17]以相关外加剂作为媒介改变 Ca^{2+} 与 CO_3^{2-} 的离子核间距, 增大 CaCO_3 晶体的晶格能, 从而增强其稳定性及强度。在以往添加剂的研究中, 绝大多数通过天然多糖、镁离子、钙源等对 CaCO_3 晶体的晶型、形貌及稳定性进行调控, 以提升加固体的物理力学性能。然而基于微生物固化原理的角度, 改变反应环境的 pH 及提升细菌的活性同样影响固化效果^[18-20], 但相关的研究相对较少。基于此, 本文重点考虑 MICP 的反应环境及细菌的代谢过程, 添加合适类型的试剂, 进一步提升微生物固化砂土体的物理力学性能, 并通过对比固化前后砂

柱孔隙率、渗流系数的变化规律,分析建立固化砂柱的渗流模型。

1 试验方案

1.1 基本试验材料

试验用砂为 ISO 标准砂,颗粒级配曲线如图 1 所示。试验前将砂颗粒分别用 1.0 mol/L 的盐酸和 1.0 mol/L 的氢氧化钠溶液浸泡 12 h,清除砂颗粒中的杂质及其他细菌,然后用去离子水反复冲洗,直至 pH=7,使得砂颗粒自身处于中性条件。

试验菌种为巴氏芽孢杆菌,最佳培养条件为^[12]: 尿素含量 40 g/L,接种量 2.0 mL,转速 180 r/min,培养时间 72 h。参考赵茜^[21]对试验模具的探索,以硅胶管设计柔性模具实现改进,内径 50 mm,壁厚 2 mm,高度 50 mm,于管壁周围钻孔,孔径 1 mm,如图 2 所示。

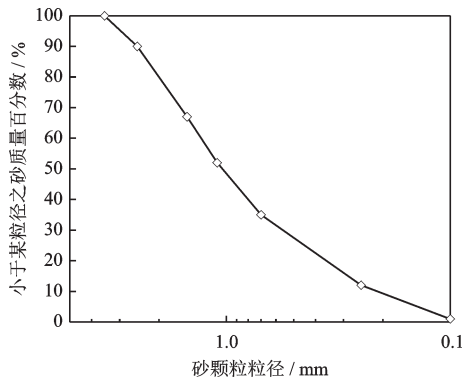


图1 颗粒级配曲线

Fig.1 Particle size distribution curve

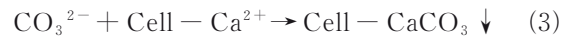
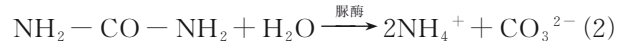
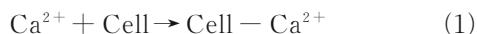


图2 柔性模具

Fig.2 Flexible mold

1.2 添加剂选取

MICP 过程的化学式^[1]为:



由上述化学式可以看出 NH_4^+ 和 CO_3^{2-} 离子是 MICP 过程的主要控制因素,试验用巴氏芽孢杆菌是一种中度嗜碱菌,适宜 pH 值为 8~9^[22]。V.S. Whiffin^[18]、O.A. Cuzman 等^[23]研究发现巴氏芽孢杆菌的 ATP(腺嘌呤核苷三磷酸)合成机制与细菌体内 NH_4^+ 的生产过程密切相关,进入细菌胞内的尿素经脲酶水解生成 NH_4^+ ,并扩散到胞外,其中部分转化为氨分子和质子,使得胞外质子浓度高于胞内,形成质子浓度梯度,形成质子动力势,从而驱动细胞膜上的三磷酸腺苷合成酶(质子泵)合成 ATP,为细菌供应能量,促进新陈代谢活动^[19]。因此,拟在试验中添加 NH_4Cl ,增大 MICP 过程中 NH_4^+ 离子浓度,但 NH_4Cl 溶液偏酸性,对脲酶的活性可能会有一定的影响。为此,参考以往调节溶液酸碱性的经验^[24],考虑同时添加一定量的 NaHCO_3 ,一方面调节灌浆溶液的酸碱性,另一方面也可以为矿化反应提供更多的 CO_3^{2-} 。基于此,本文试验中考虑添加化学剂 NH_4Cl 和 NaHCO_3 ,通过单独添加和组合添加的方式探究两种添加剂对 MICP 固化效果的影响,确定最优掺量,进而对固化试样进行渗流试验,分析其固化效果。

试验用 NH_4Cl 、 NaHCO_3 试剂均为分析纯,根据以往研究经验,一方面,文献[25]的研究成果显示:适量浓度(0.1 mol/L)的 NH_4Cl 有利于提高对细菌的激活效果,从而建立产脲酶微生物的生长优势,浓度过高时反而具有抑制作用,因此,试验方案中选取 NH_4Cl 的起始浓度为 0.1 mol/L。另一方面,文献[26]研究发现低浓度(0.05~0.2 mol/L)的 NaHCO_3 与 CaCl_2 反应只有微量 CaCO_3 沉淀生成,为了避免灌浆前胶结液与 NaHCO_3 混合时发生反应消耗 Ca^{2+} ,影响后期灌浆固化过程,试验方案中选取 NaHCO_3 的起始浓度为 0.1 mol/L。在起始浓度选取的基础上,为了对比分析化学试剂浓度的影响,同时考虑了 0.2、0.3 mol/L 两种情况。不同浓度下的 pH 值测定见表 1。考虑不同的掺量组合,具体试验方案见表 2,共设计了 A、B、C、D 四组平行试验,每组设置 3 个平行试样。

借鉴以往试验的制样工艺、加固流程^[21],制备微生物固化试样的过程如下:(1)柔性模具底部用亚克力板密封,热熔胶固定;(2)A、B、C、D 四组模具中分别装入 140 g 标准砂;(3)配置胶结液与化学

表1 不同浓度NaHCO₃、NH₄Cl溶液的pH值

Table 1 pH values of NaHCO₃ and NH₄Cl solutions with different concentrations

	溶液种类					
	NH ₄ Cl溶液			NaHCO ₃ 溶液		
浓度/(mol·L ⁻¹)	0.1	0.2	0.3	0.1	0.2	0.3
pH值	5.9	5.7	5.5	8.5	8.7	8.9

表2 试验方案

Table 2 Test scheme

组号	试样编号	细菌	单位: mol/L	
			NH ₄ Cl	NaHCO ₃
A	A1-1、A1-2、A1-3	✓	0.1	—
	A2-1、A2-2、A2-3	✓	0.2	—
	A3-1、A3-2、A3-3	✓	0.3	—
B	B1-1、B1-2、B1-3	✓	—	0.1
	B2-1、B2-2、B2-3	✓	—	0.2
	B3-1、B3-2、B3-3	✓	—	0.3
C	C1-1、C1-2、C1-3	✓	0.1	0.1
	C2-1、C2-2、C2-3	✓	0.2	0.2
	C3-1、C3-2、C3-3	✓	0.3	0.3
D	D1-1、D1-2、D1-3	✓	—	—

剂的混合溶液:首先预制0.5 mol/L的尿素和氯化钙混合液作为胶结液,并根据试验需要添加不同的化学剂至指定的浓度;(4)将所有的试样放入容器中进行微生物加固试验,一次加固的流程为:从顶部滴入20 ml的细菌菌液,细菌固定2 h,加入胶结液与化学剂的混合溶液没过砂柱顶面,室内静止反应24 h。在MICP反应过程中会消耗菌液中的脲酶及胶结液中的Ca²⁺,因此待反应24 h后,需重新补充反应物,具体操作流程如上述。参考以往试验经验^[12,21],本次试验共进行了10次循环加固过程,使得成本控制与固化效果达到均衡。

2 添加剂对微生物固化效果影响研究

加固试验结束后,将试样放入烘箱以60℃烘干养护48 h^[12],各组典型试样照片如图3所示。随后进行CaCO₃生成量百分比 ω 的测定($\omega(\text{CaCO}_3) = m(\text{CaCO}_3)/m(\text{砂样})$),结果如图4所示。

由图4可以看出:

(1)单独添加NH₄Cl的A1、A2、A3试样,CaCO₃生成量分别为11.48%、10.65%、7.91%,相对于D1试样(不添加化学剂)CaCO₃生成量7.76%,分别增

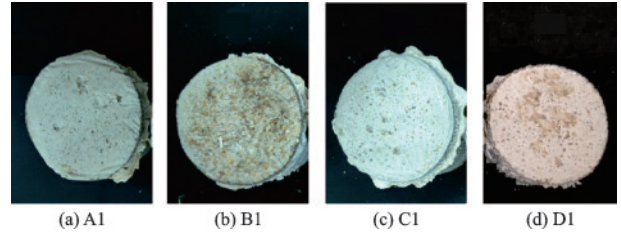


图3 典型加固试样照片

Fig.3 Photographs of typical reinforced specimens

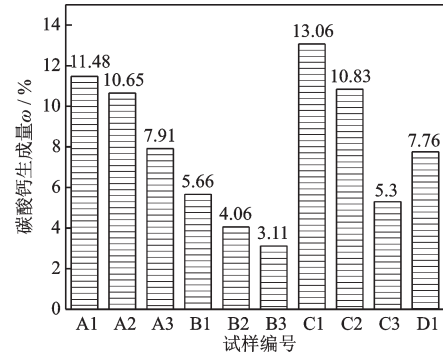


图4 四组方案下CaCO₃生成量柱状图

Fig.4 Column charts of calcium carbonate contents under four schemes

加了47.94%、37.24%、1.93%,说明NH₄Cl对CaCO₃的生成具有良好的促进作用,但随着NH₄Cl浓度的增高,其促进效应逐步减弱。分析其原因是:低浓度的NH₄Cl(0.1 mol/L)提高了细菌的激活效应,浓度增大时其促进作用明显减弱^[25],导致对应A2、A3试样的CaCO₃生成量逐渐降低。

(2)单独添加NaHCO₃的B1、B2、B3试样,CaCO₃生成量分别为5.56%、4.06%、3.11%,相对于D1试样分别减少了28.35%、47.68%、57.35%。说明NaHCO₃对CaCO₃的生成具有一定的抑制作用,且随着NaHCO₃浓度的增高,抑制效应逐步加强。分析其原因主要是:一方面,NaHCO₃与胶结液、细菌溶液混合时,NaHCO₃与胶结液中的CaCl₂反应生成CaCO₃沉淀,降低后续灌浆加固过程中Ca²⁺浓度,影响固化过程中CaCO₃的生成量;另一方面,引入的Na⁺会同Ca²⁺一起占据细菌表面的成核位点,导致Ca²⁺的结合位点减少,从而降低了CaCO₃的生成量。

(3)NH₄Cl和NaHCO₃以相同浓度混合添加时,C1、C2试样的CaCO₃生成量分别为13.06%、10.83%,相较于D1试样分别增多了68.30%、39.56%,而C3试样CaCO₃生成量为5.30%,相较于D1试样减少了31.70%。说明以浓度0.1 mol/L

的 NH_4Cl 和 NaHCO_3 混合添加时,对 CaCO_3 生成量的促进效果最为明显,然而随着浓度的增加促进效应逐渐减弱,当浓度为 0.3 mol/L 时,表现为抑制效应。分析其原因主要是由于:当 NH_4Cl 、 NaHCO_3 的浓度为 0.1 mol/L 时,对应 C1 试样,混合溶液中 HCO_3^- 电离、 NH_4^+ 水解生成的 H^+ 会中和部分 OH^- , 溶液的 $\text{pH}=7.9$, 趋近 MICP 矿化反应最佳碱性环境,而且低浓度的 NH_4Cl (0.1 mol/L) 促进细菌的新陈代谢活动以及脲酶产量,进而使得 MICP 固化效果明显提升。随着 NH_4Cl 和 NaHCO_3 浓度逐渐增加,一方面, NH_4Cl 对细菌的激活效应逐渐减弱,另一方面, NH_4Cl 、 NaHCO_3 与胶结液混合时, NaHCO_3 与 CaCl_2 反应生成的 CaCO_3 沉淀也会逐渐增多, Ca^{2+} 的消耗量增大,导致后期灌浆加固过程中钙源逐渐减少,影响固化过程中 CaCO_3 的生成量。在这两个方面的作用下,导致 CaCO_3 的生成量逐渐减小,当 NH_4Cl 和 NaHCO_3 的浓度达到 0.3 mol/L 时,添加剂对 MICP 固化效果表现出一定的抑制效应。

3 微生物固化砂柱抗渗性能研究

3.1 微生物固化砂柱渗流特性分析

为探究添加剂对固化砂柱渗透性的影响机理,选取最优掺量下的固化试样 C1 和无添加剂固化试样 D1 进行渗流试验。试验中渗透水压以 0.5 MPa 为公差,由 0.5 MPa 递增至 3.5 MPa ;围压以 0.5 MPa 为公差,由 2.0 MPa 递增至 5.0 MPa ,渗透系数的计算依据达西渗流定律:

$$K = \frac{QL\gamma_w}{\Delta PA} \quad (4)$$

式中, Q 为单位时间内流经砂柱的水量; L 为砂柱的高度; γ_w 为水的重度; ΔP 为砂柱两端的压力差; A 为砂柱的断面面积; K 为砂柱的渗透系数。

固化后试样 C1 和 D1 的渗透系数随渗透水压的变化曲线如图 5 所示。

由图 5 可知:固化后试样的渗透系数随渗透水压的增加而增加,当渗透水压为 0.5 MPa 时, C1、D1 试样的渗透系数分别为 $1.66 \times 10^{-5} \sim 5.40 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ 、 $3.70 \times 10^{-5} \sim 8.70 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$;当渗透水压为 3.5 MPa 时, C1、D1 试样的渗透系数分别为 $8.84 \times 10^{-5} \sim 11.44 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ 、 $2.08 \times 10^{-4} \sim 2.39 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ 。总体来看,固化前试样本身的渗透系数为 10^{-2} cm/s 数量级,经微生物固化后其渗透系数降低了 2~3 个

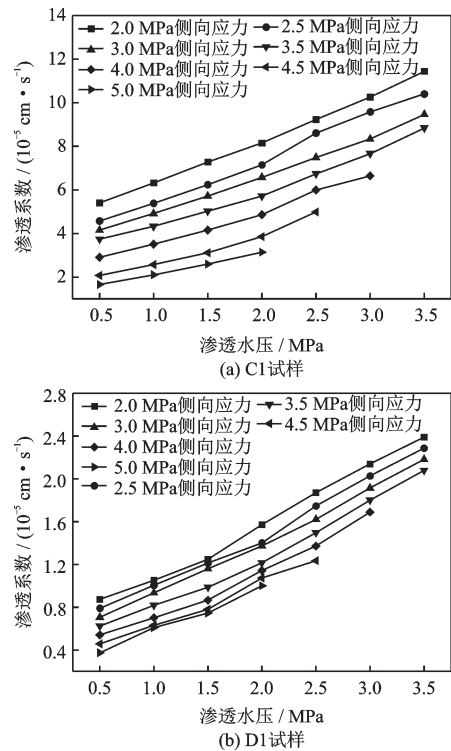


图 5 固化后试样的渗透系数随渗透水压的变化曲线
Fig.5 Variation curves of permeability coefficients of solidified samples with permeability water pressure

数量级,与以往研究的总体趋势一致^[5,27],但添加 NH_4Cl 和 NaHCO_3 后,固化砂柱的渗透系数明显偏小。具体对比来看,渗透水压为 0.5 MPa 时,无添加剂试样 D1 的渗透系数为有添加剂试样 C1 的 1.61~2.22 倍;渗透水压为 3.5 MPa 时,无添加剂试样 D1 的渗透系数为有添加剂试样 C1 的 2.09~2.35 倍,说明添加剂的使用有效提升了微生物加固效果。

3.2 微生物固化砂柱孔隙结构变化规律分析

微生物灌浆加固过程中,试样内部生成的 CaCO_3 沉淀直接改变试样的孔隙结构和尺寸,研究表明,核磁共振能够有效地反映多孔介质内部微观结构的变化特征^[28-29],为了对其孔隙结构特征变化进行量化分析,特采用 MacroMR12 核磁共振仪,如图 6 所示,对固化前后的试样进行核磁共振检测,详细分析微生物加固对试样孔隙尺寸、数量、分布情况的影响。

典型试样的 T2 谱如图 7 所示。其中弛豫时间与孔径大小的对应划分如下: $0 \sim 10 \text{ ms}$ 对应为小孔径、 $10 \sim 100 \text{ ms}$ 对应为中孔径、 100 ms 以上为大孔径^[28-29]。试样加固前后内部大孔径、中孔径及小孔径占比见表 3。

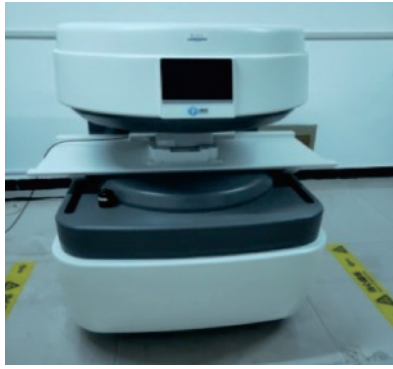


图6 MacroMR12核磁共振仪

Fig.6 MacroMR12 Nuclear Magnetic Resonance System

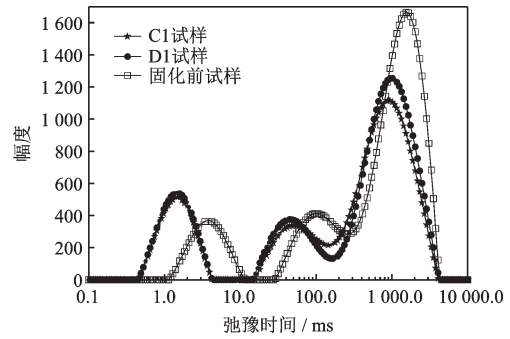


图7 微生物固化砂柱的T₂谱分布

Fig.7 T₂ spectrum distributions of microbial solidified sand columns

表3 不同孔径尺寸占比及孔隙率变化

Table 3 The ratio of different pore sizes and porosity changes

单位: %

砂样编号	峰1(小孔径)	峰2(中孔径)	峰3(大孔径)	加固前孔隙率	加固后孔隙率	孔隙减少率
加固前	10.01	17.31	72.68	31.14	—	—
C1	19.63	18.09	62.28	31.14	15.21	15.93
D1	19.98	16.75	63.27	30.54	17.60	13.94

典型试样的NMR二维截面扫描图如8所示(从左往右,依次为顶部、中部和底部),图中灰色区域为

试样的成像图,亮色区域表示孔隙水的存在,亮点越深越密集代表该处孔隙水含量越高,孔隙数量越多。

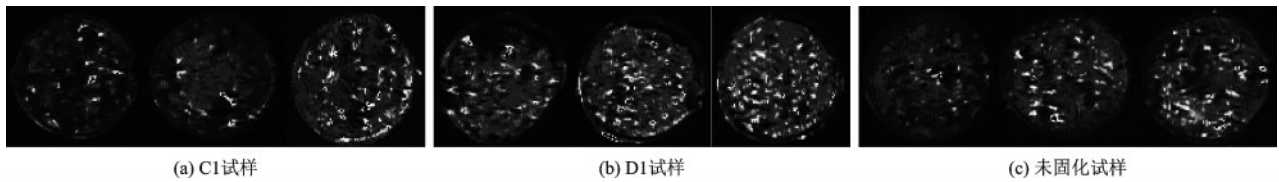


图8 典型试样NMR二维截面扫描图

Fig.8 Two-dimensional NMR cross-section scan of a typical sample

通过图7、表3可以看出,经微生物固化后,不同孔径的孔隙数量发生了较大变化。其中,未固化试样中大孔径、中孔径、小孔径数量占比分别为:72.68%、17.31%、10.01%,D1试样对应的三种孔径数量占比分别为:63.27%、16.75%、19.98%,固化后大孔径、中孔径的孔隙数量分别减少了9.41、0.56个百分点,小孔径的孔隙增加了9.97个百分点。说明加固过程中,CaCO₃沉淀对三种孔径的孔隙都有明显的影响,并将部分大孔径、中孔径孔隙通过填充转化为了小孔径孔隙。除此之外,CaCO₃沉淀还会对砂颗粒之间的通道产生封堵作用,使得连通的通道减少,闭合的通道增多。最终表现为较未固化试样,经微生物固化后的试样渗流通道急剧减少,抗渗性能明显提升。

比较而言,添加了化学剂的C1试样较无添加剂的D1试样固化后的孔隙率低2.39个百分点。结合

图8,C1试样较D1试样顶部及中部的亮色区域少,底部亮点分散,说明添加剂的使用能有效减少内部孔隙数量,提高整体的密实度、固化效果,更加有利于改善砂柱试样的物理力学性能。

4 微生物固化砂柱渗流模型分析

渗透系数是表征岩土体渗透特性的一个关键参数,但由于孔隙结构及其物性较为复杂,很难建立一个精确的渗流模型^[30]。在众多土体渗透系数预测公式中,Kozeny提出并经Carman修正后的Kozeny-Carman方程广泛应用于多孔介质渗流特性分析领域。

水在孔隙介质中的流动,是在颗粒之间的孔隙中流动,Kozeny-Carman渗流模型将多孔介质中的

孔隙假设为一组相互平行且具有相同内径的圆柱状毛细直管道^[31],认为孔隙分布随机、大小均匀、液体通过多束毛管在多孔介质中流动。微生物固化后,诱导生成的CaCO₃沉淀填充砂颗粒间的孔隙,并将砂颗粒胶结在一起,使得渗流通道减少,导致砂柱的渗透系数明显减小,但其渗流特性仍为典型多孔介质。为此,特在Kozeny-Carman渗流模型基础上,考虑MICP固化效应,建立微生物固化砂柱渗流分析模型。

当砂柱未固化时,设试样的直径为 r ,高度为 h ,孔隙率为 m 。假设砂颗粒为均匀球体,平均直径为 d ,参考已有的研究^[32-33],取为 d_{50} 。

试样的体积为:

$$V = h \frac{\pi}{4} r^2 \quad (5)$$

则试样的孔隙体积为:

$$V_k = mh \frac{\pi}{4} r^2 \quad (6)$$

试样骨架体积为:

$$V_g = (1 - m)h \frac{\pi}{4} r^2 \quad (7)$$

砂颗粒为均匀球体,单个球状颗粒的体积为:

$$V_s = \frac{\pi}{6} d^3 \quad (8)$$

试样中砂颗粒的总数为:

$$M = \frac{V_g}{V_s} = \frac{3(1 - m)hr^2}{2d^3} \quad (9)$$

砂颗粒的边界总表面积为:

$$S_s = M\pi d^2 = \frac{3\pi(1 - m)hr^2}{2d} \quad (10)$$

依据Kozeny-Carman渗流模型,将毛细管束的水力半径 R 定义为试样的总孔隙体积 V_k 与边界总表面积 S_s 之比。

$$R = \frac{V_k}{S_s} = \frac{dm}{6(1 - m)} \quad (11)$$

根据雷诺数 Re 、阻尼系数 λ 以及两者之间的关系有如下的定义^[34]:

$$Re = \frac{\mu R}{v_m} \quad (12)$$

$$\lambda = \frac{RgJ}{\mu^2} \quad (13)$$

$$\lambda = \frac{5.1\alpha^2}{Re} \quad (14)$$

式中, v_m 为毛细管束流速; R 为水力半径; J 为水力梯

度; μ 为水的动力黏滞系数(取25℃, $\mu=0.89 \text{ m}^2/\text{s}$); α 为颗粒材料的形状系数(标准砂, α 取值范围:1.50~1.67^[34],固化前 α 取1.50;固化后,微细观检测结果显示CaCO₃沉淀附着在砂颗粒的表面,对颗粒表面形貌产生了比较明显的影响,特将 α 取为1.67);微生物固化前、后的孔隙率 m 由核磁共振检测确定。

联立式(11)~(14)可得单一毛细管束的流速 v_m 为:

$$v_m = \frac{R^2 g J}{5.1\mu\alpha^2} = \frac{d^2 m^2 g J}{183.6\mu\alpha^2 (1 - m)^2} \quad (15)$$

试样中孔隙的平均流速为:

$$v_k = mv_m = \frac{d^2 m^3 g J}{183.6\mu\alpha^2 (1 - m)^2} \quad (16)$$

孔隙的渗流系数为:

$$K = \frac{v_k}{J} = \frac{d^2 m^3 g}{183.6\mu\alpha^2 (1 - m)^2} \quad (17)$$

由式(17)可知,当孔隙率一定时,砂柱试样的渗透系数与颗粒的平均粒径直接相关。微生物固化砂柱后,在砂柱孔隙中生成大量的CaCO₃沉淀,一般而言,CaCO₃沉淀的颗粒尺寸比砂颗粒要小很多,可以将CaCO₃沉淀近似等效为填充在砂颗粒间的小颗粒,使得砂柱试样的颗粒级配发生变化,对应平均粒径减小。因此,在分析固化后砂柱渗透系数时,可按照这个思路对Kozeny-Carman模型渗流公式中加固后的颗粒粒径进行修正,进而定义MICP效应系数 c 为:

$$c = d/d' \quad (18)$$

式中, d 和 d' 分别为固化前、后砂柱试样颗粒的平均粒径。

修正后的渗流系数计算公式为:

$$K_c = \frac{v_k}{J} = \frac{\left(\frac{d}{c}\right)^2 m^3 g}{183.6\mu\alpha^2 (1 - m)^2} \quad (19)$$

对加固后的砂柱取样进行SEM试验,观察其细观结构及粒径大小,其结果如图9所示。并对砂颗粒之间的填充物质进行了X射线能谱(EDS)成分分析,测定结果如图10所示。

由图9、图10可以看出,砂颗粒之间填充物质成分为CaCO₃,并对多个CaCO₃沉淀颗粒进行测量,结果显示其粒径为20~30 μm,与彭劫等^[35]、王绪民等^[36]、王铖^[37]所得结果基本一致,取平均粒径为25 μm。结合试验测得各试样的CaCO₃生成量,将固化后试样的颗粒级配曲线重新绘制,如图11所示。

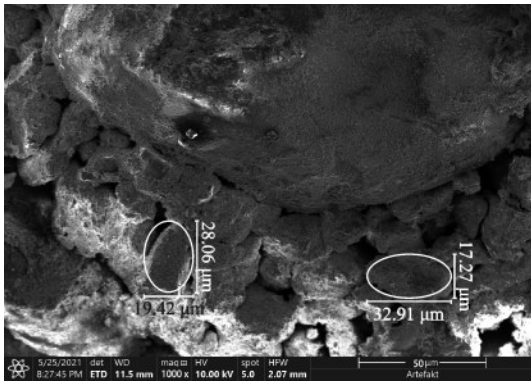


图9 CaCO₃沉淀及砂颗粒分布

Fig.9 Calcium carbonate precipitate particle size

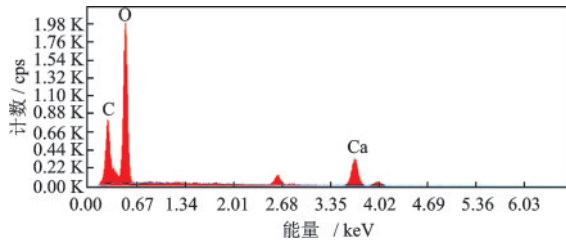


图10 尺寸测量区域EDS成分分析

Fig.10 EDS component analysis of dimension measurement area

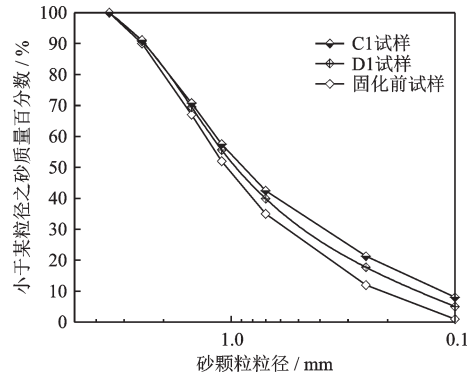


图11 固化前、后试样的颗粒级配曲线

Fig.11 Particle size distribution curves of samples before and after carbonate precipitation curing

根据上述分析测试,可以得到固化前后的颗粒平均粒径、孔隙率等参数,根据公式(18)、(19)可以计算得到MICP效应系数和试样的渗透系数(表4)。由于上述渗流模型中没有考虑围压对渗透系数的影响,特在上述渗流试验中取围压和渗透水压相等情况下的试验结果进行比较。

表4 固化前、后相关渗透系数计算结果

Table 4 Calculation results of correlation permeability coefficients before and after curing

试样	固化前颗粒平均粒径 d/mm	固化后颗粒平均粒径 d'/mm	MICP效应系数 c	固化前孔隙率 $m/\%$	固化后孔隙率 $m'/\%$	固化前渗透系数 $(cm \cdot s^{-1})$	固化后渗透系数试验值 $(cm \cdot s^{-1})$	固化后渗透系数计算值 $(cm \cdot s^{-1})$
C1	1.08	0.88	1.23	31.14	15.21	4.88×10^{-2}	$(8.12 \sim 8.81) \times 10^{-5}$	8.15×10^{-5}
D1	1.08	0.96	1.13	30.54	17.60	4.88×10^{-2}	$(1.57 \sim 2.07) \times 10^{-4}$	1.59×10^{-4}

由表4分析可知,试样C1、D1经微生物固化后颗粒平均粒径分别降低至0.88、0.96 mm,较固化前的平均粒径减小了11.11%、18.52%,在添加剂的作用下,试样C1固化后的平均粒径更小;通过修正后的Kozeny-Carman渗流模型计算得出的渗流系数与试验所得的渗流系数数量级一致,而且在试验值区间范围之内,计算值与试验值的差别最大为23.18%,说明考虑MICP效应系数修正后的Kozeny-Carman渗流模型能够较为准确地量化CaCO₃沉淀对渗流系数的影响。

5 结论

(1)NH₄Cl、NaHCO₃添加浓度为0.1 mol/L时,固化砂样中的CaCO₃钙沉淀量显著增加,其主要原

因是添加剂可以调节反应体系的pH值,使其更趋近于脲酶最佳活性适宜酸碱度,同时强化了细菌的ATP合成能力,促进了细菌活性及代谢过程,进而增加CaCO₃生成量,提升MICP固化效果。

(2)相较于未固化试样,添加NH₄Cl、NaHCO₃后固化砂柱的孔隙率减小了15.93%,其中大孔隙数量明显减少,而小孔隙明显增加,说明CaCO₃沉淀充填了部分大孔径,并将转化为了小孔隙,整体的密实度明显提高;对应固化砂柱的渗透系数降低2~3个数量级,抗渗性能明显提升,而且与不添加时的固化结果相比也有明显改善,渗透系数降低了50%以上。

(3)以Kozeny-Carman方程为基础,对加固体的渗流模型进行了分析,一方面考虑CaCO₃沉淀对砂颗粒表面形貌的改变,对颗粒材料的形状系数 α 取

值进行调整;另一方面,将 CaCO_3 沉淀等效为填充在砂颗粒间的小颗粒,采用 MICP 固化效应系数表述加固前后砂柱颗粒平均粒径的变化。综合这两个方面对 Kozeny-Carman 渗流模型进行了修正,验证分析表明,修正后的渗流模型可以较好地描述固化体的渗流特性。

(4)在实际工程应用时,加固后,原位加固体可能会受到环境条件(例如,干湿循环、污染物入侵、侵蚀等)、固化时间、静动荷载等多种因素影响,加固体中的 CaCO_3 含量会逐步发生变化,如果采用本文提出的方法进行分析,需要测试各阶段对应的 CaCO_3 含量,这样方可比较准确地估算该阶段加固体的渗透系数。

参考文献:

- [1] 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. Research progress on soil reinforcement by microbial grouting [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(6): 1537-1548. (in Chinese)
- [2] 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.
Siri G L, Bi L G, Li C. Shear strength test and reliability analysis of sand-based MICP geomaterials [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2018, 38(5): 795-800, 821. (in Chinese)
- [3] 刘志明,孙益成,冯清鹏,等. MICP 胶结液中尿素过量的影响研究[J].防灾减灾工程学报,2020,40(4):574-580.
Liu Z M, Sun Y C, Feng Q P, et al. Study on the influence of excessive urea in MICP cementing fluid [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2020, 40(4): 574-580. (in Chinese)
- [4] 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.
He J, Chu J, Liu H L, et al. Research progress in microbial geotechnical technology [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(4): 643-653. (in Chinese)
- [5] Ivanov V, Jian C. Applications of microorganisms to geotechnical engineering for bioclogging and biocementation of soil in situ [J]. Reviews in Environmental Science & Biotechnology, 2008, 7(2): 139-153.
- [6] 余清鹏,李娜,符平,等.微生物灌浆加固砂土效果的试验研究[J].中国水利水电科学研究院学报,2019,17(3):204-210.
Yu Q P, Li N, Fu P, et al. Experimental study on the effect of microbial grouting in strengthening sand [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydro-power Research, 2019, 17(3): 204-210. (in Chinese)
- [7] Peng S, Zhang K, Fan L, et al. Permeability reduction and electrochemical impedance of fractured rock grouted by microbial-induced calcite precipitation [J]. Geofluids, 2020, 2020: 112-119.
- [8] 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 T T, Cheng X H. Finite element simulation of hydraulic permeability of microbial modified sand column [J]. Industrial Construction, 2015, 45(7): 31-35. (in Chinese)
- [9] Van der Star W R L, Van Wijngaarden-van Rossum W K, Van Paassen L A, et al. Stabilization of gravel deposits using microorganisms [C] // Proceedings of the 15th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. [S.l.]: IOS Press, 2011: 85-90.
- [10] Harkes M P, Booster J L, Van Paassen L A, et al. Microbial induced carbonate precipitation as ground improvement method-bacterial fixation and empirical correlation CaCO_3 vs strength [C] // BGCE 2008-1st International Conference BioGeoCivE Engineering. [S.l.]: TU Delft en Deltares, 2008: 37-44.
- [11] 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.
- [12] 支永艳,邓华锋,肖瑶,等.微生物灌浆加固裂隙岩体的渗流特性分析[J].岩土力学,2019,40(增1):237-244.
Zhi Y Y, Deng H F, Xiao Y, et al. Analysis of seepage characteristics of microbial grouting in fractured rock mass [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(Sup1): 237-244. (in Chinese)
- [13] 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2):397-402.
Cui M J, Zheng J J, Lai H J. Experimental study on the influence of particle size on the strength of microbial solidified sand [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(Sup2): 397-402. (in Chinese)
- [14] 程晓辉,麻强,杨钻,等.微生物灌浆加固液化砂土地基的动力反应研究[J].岩土工程学报,2013,35(8):1486-1495.
Cheng X H, Ma Q, Yang Z, et al. Study on dynamic response of microbial grouting to strengthen liquefied sand

- foundation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(8): 1486-1495. (in Chinese)
- [15] 李弘妍. 基于 MICP-B 技术固化砂性土的试验研究 [D]. 内蒙古: 内蒙古工业大学, 2017.
Li H Y. Experimental study on solidification of sandy soil based on MICP-B technology [D]. Inner Mongolia: Inner Mongolia University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [16] 荣辉, 钱春香, 李龙志. 镁添加剂对微生物水泥基材料力学性能的影响 [J]. 硅酸盐学报, 2012, 40(11): 1564-1569.
Rong H, Qian C X, Li L Z. The effect of magnesium additives on the mechanical properties of microbial cement-based materials [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2012, 40(11): 1564-1569. (in Chinese)
- [17] 王丽娟, 李凯, 符平, 等. 微生物浆液加固砂土外加剂的初步试验研究 [J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2020, 18(2): 130-135.
Wang L J, Li K, Fu P, et al. Preliminary experimental study on additives for strengthening sand with microbial grout [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2020, 18(2): 130-135. (in Chinese)
- [18] Whiffin V S. Microbial CaCO_3 precipitation for the production of biocement [D]. Perth: Murdoch University, 2004.
- [19] 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. Research progress on the mineralization mechanism and application of *Bacillus Pasteurella* [J]. Progress in Biochemistry and Biophysics, 2020, 47(6): 467-482. (in Chinese)
- [20] 赵志峰, 孔繁浩. 土体环境对微生物诱导碳酸钙沉积加固海相粉土的影响研究 [J]. 防灾减灾工程学报, 2018, 38(4): 608-614, 692.
Zhao Z F, Kong F H. Study on the influence of soil environment on microbial-induced calcium carbonate deposition to strengthen marine silt [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2018, 38(4): 608-614, 692. (in Chinese)
- [21] 赵茜. 微生物诱导碳酸钙沉淀 (MICP) 固化土壤实验研究 [D]. 北京: 中国地质大学, 2014.
Zhao Q. Experimental study on soil solidification by microbial induced calcium carbonate precipitation [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2014. (in Chinese)
- [22] 陈杰, 李广悦, 张振远, 等. 1 株尿素分解菌的分离及其生长特性 [J]. 微生物学杂志, 2014, 34(2): 37-40.
Chen J, Li G Y, Zhang Z Y, et al. Isolation and growth characteristics of a urea-decomposing bacteria [J]. Journal of Microbiology, 2014, 34(2): 37-40. (in Chinese)
- [23] Cuzman O A, Richter K, Wittig L, et al. Alternative nutrient sources for biotechnological use of *Sporosarcina pasteurii* [J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 2015, 31(6): 897-906.
- [24] 艾华. 酸性缓冲剂的研究进展及应用 [J]. 中国运动医学杂志, 2004, 23(2): 169-179, 203.
Ai H. Research progress and application of acid buffers [J]. Chinese Journal of Sports Medicine, 2004, 23(2): 169-179, 203. (in Chinese)
- [25] 董博文, 刘士雨, 俞缙, 等. 靶向激活产脲酶微生物加固钙质砂试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2021, 43(7): 1315-1321.
Dong B W, Liu S Y, Yu J, et al. Experimental study on reinforcement of calcareous sand by targeted activation of urease-producing microorganisms [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(7): 1315-1321. (in Chinese)
- [26] 伍强. 碳酸钠和碳酸氢钠性质对比实验的研究 [J]. 化学教学, 2015, 37(12): 48-50.
Wu Q. Research on the comparative experiment of the properties of sodium carbonate and sodium bicarbonate [J]. Chemistry Teaching, 2015, 37(12): 48-50. (in Chinese)
- [27] 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.
Li X, Wang S J, He B H, et al. Study on the permeability characteristics of soil with MICP technology [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(8): 2956-2964. (in Chinese)
- [28] 黄明, 张瑾璇, 靳贵晓, 等. 残积土 MICP 灌浆结石体冻融损伤的核磁共振特性试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(12): 2846-2855.
Huang M, Zhang J X, Jin G X, et al. Experimental study on nuclear magnetic resonance characteristics of MICP grouting stones in residual soil [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(12): 2846-2855. (in Chinese)
- [29] 高瑜, 姚德, 秦晓, 等. 盐蚀环境下微生物矿化岩土材料的冻融特性研究 [J]. 防灾减灾工程学报, 2018, 38(5): 787-794.
Gao Y, Yao D, Qin X, et al. Study on freeze-thaw characteristics of microbial mineralized rock and soil materials under salt erosion environment [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2018, 38

- (5):787-794. (in Chinese)
- [30] 郑斌,李菊花.基于Kozeny-Carman方程的渗透率分形模型[J].天然地球科学,2015,26(1):193-198.
Zheng B, Li J H. Fractal model of permeability based on Kozeny-Carman equation [J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(1): 193-198. (in Chinese)
- [31] 王佳琪.基于孔隙网络模型的水合物沉积物渗流特性研究[D].大连:大连理工大学,2017.
Wang J Q. Research on seepage characteristics of hydrate sediments based on pore network model [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [32] 杨兵,刘一飞,万奋涛,等.级配特性对砂土渗透系数影响试验研究[J].西南交通大学学报,2016,51(5):855-861.
Yang B, Liu Y F, Wan F T, et al. Experimental study on the influence of gradation characteristics on sand permeability coefficient [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2016, 51(5): 855-861. (in Chinese)
- [33] 杨钻.高强微生物砂浆机理与工作性能研究[D].北京:清华大学,2013.
Yang Z. Research on the mechanism and performance of high-strength microbial mortar [D]. Beijing: Tsinghua University, 2013. (in Chinese)
- [34] 速宝玉,詹美礼,张祝添.充填裂隙渗流特性实验研究[J].岩土力学,1994,15(4):46-52.
Su B Y, Zhan M L, Zhang Z T. Experimental study on the seepage characteristics of filled fissures [J]. Rock and Soil Mechanics, 1994, 15(4): 46-52. (in Chinese)
- [35] 彭劼,何想,刘志明,等.低温条件下微生物诱导碳酸钙沉积加固土体的试验研究[J].岩土工程学报,2016,38(10):1769-1774.
Peng J, He X, Liu Z M, et al. Experimental study on soil reinforcement by microorganism-induced calcium carbonate deposition under low temperature conditions [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(10): 1769-1774. (in Chinese)
- [36] 王绪民,王铖,崔芮.微生物在不同营养盐环境下矿化产物研究[J].工业建筑,2019,49(10):208-212.
Wang X M, Wang C, Cui R. Study on mineralization products of microorganisms in different nutrient environments [J]. Industrial Construction, 2019, 49(10): 208-212. (in Chinese)
- [37] 王铖.不同钙源及营养盐浓度对MICP胶结的影响研究[D].武汉:湖北工业大学,2020.
Wang C. Study on the influence of different calcium sources and nutrient concentration on MICP cementation [D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2020. (in Chinese)

(本文责编:池营营)



(上接第998页)

- [9] 刘建龙,侯天顺,骆亚生.棉纤维加筋土无侧限抗压强度试验研究[J].水力发电学报,2018,37(2):12-21.
Liu J L, Hou T S, Luo Y S. Unconfined compressive strength of synthetic cotton fibers reinforced soil [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2018, 37(2): 12-21. (in Chinese)
- [10] Chen M, Shen S L, Arulrajah A, et al. Laboratory evaluation on the effectiveness of polypropylene fibers on the strength of fiber-reinforced and cement-stabilized Shanghai soft clay [J]. Geotextiles & Geomembranes, 2015, 43(6): 515-523.
- [11] 梁仕华,林焕生,周世宗,等.聚丙烯纤维与水泥固化广州南沙软土的实验研究[J].工业建筑,2018,48(7):87-90,152.
Liang S H, Lin H S, Zhou S Z, et al. Experimental research on polypropylene fiber and cement reinforced nansha soft soil in Guangzhou [J]. Industrial Construction, 2018, 48(7): 87-90, 152. (in Chinese)
- [12] 张艳军,于沉香,凌飞,等.石棉纤维粉煤灰水泥加固软土试验研究[J].工程地质学报,2015,23(5):982-988.
Zhang Y J, Yu C X, Ling F, et al. Experimental study on asbestos fiber reinforced fly ash soil-cement soft soil enhancement [J]. Journal of Engineering Geology, 2015, 23(5): 982-988. (in Chinese)
- [13] Fadare O O, Okoffo E D. Covid-19 face masks: a potential source of microplastic fibers in the environment [J]. Science of the Total Environment, 2020, 737: 140279.
- [14] Daryabeigi Z A, Vaezi H A. Emerging challenges in urban waste management in Tehran, Iran during the Covid-19 pandemic [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2020, 162: 105051.
- [15] Saberian M, Li J, Kilmartin-Lynch S, et al. Repurposing of COVID-19 single-use face masks for pavements base/subbase [J]. Science of the Total Environment, 2021, 769: 145527.