

DOI: 10.11779/CJGE202102009

高岭土微粒固载成核微生物固化粗砂强度

马国梁^{1,2}, 何 想^{1,2}, 路桦铭^{1,2}, 吴焕然^{1,2}, 刘汉龙^{1,2,3}, 楚 剑⁴, 肖 杨^{*1,2,3}

(1. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 2. 重庆大学山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045; 3. 库区环境地质灾害防治国家地方联合工程研究中心(重庆), 重庆 400045; 4. 南洋理工大学土木与环境工程学院, 新加坡 639789)

摘 要: 提出一种基于微粒固载成核的微生物固化技术(MICPMPIN), 用于改善微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)固化粗砂的力学特性, 即在灌浆前给菌液中加入一定量的高岭土形成微生物固载胶体, 然后将微生物固载胶体与反应液混合形成 MICP 浆体(MICPCS), 利用自重渗流法加固粗砂。试验结果表明新型 MICPMPIN 固化粗砂的强度比传统 MICP 固化粗砂的强度高。其他条件相同时, MICPMPIN 固化粗砂的强度随高岭土掺量的增加而增加, 随微生物固载胶体含量的增大而增加, 且每间隔 1 次灌入 MICPCS 时固化粗砂的强度较高。高岭土本身提供的胶结强度不能使砂柱成型, 可忽略不计, 其作用主要是辅助成核, 增加有效碳酸钙沉淀量, 并减小试样孔隙比从而增强固化粗砂的效果。MICPMPIN 固化粗砂的湿强度也大于传统 MICP 固化粗砂的湿强度, 且高岭土的掺入显著增强了固化粗砂的抗软化能力。

关键词: MICP; 粗砂; 高岭土; MICP 浆体; 微粒固载成核

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2021)02-0290-10

作者简介: 马国梁(1990—), 男, 博士研究生, 主要从事微生物土加固机理方面的研究工作。E-mail: magl09@163.com。

Strength of biocemented coarse sand with kaolin micro-particle improved nucleation

MA Guo-liang^{1,2}, HE Xiang^{1,2}, LU Hua-ming^{1,2}, WU Huan-ran^{1,2}, LIU Han-long^{1,2,3}, CHU Jian⁴, XIAO Yang^{1,2,3}

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 3. National Joint Engineering Research Center of Geohazards Prevention in the Reservoir Areas (Chongqing), Chongqing 400045, China; 4. School of Civil and Environmental Engineering, Nanyang Technological University, Singapore 639798, Singapore)

Abstract: A new treatment, microbially induced calcium carbonate precipitation (MICP) with micro-particle improved nucleation (MICPMPIN), is introduced to improve the performance of MICP technology for the stabilization of coarse sand. A certain amount of kaolin is augmented into the bacterial suspensions to obtain immobilized bacterial slurry, then the bacterial slurry is mixed with cementation solution to form MICP-clay slurry (MICPCS) and percolated through the coarse-sand specimens under gravity. The results show that the unconfined compressive strength (UCS) of MICPMPIN-treated specimens is higher than that of MICP-treated ones. When other conditions are the same, the UCS increases with the increasing dosage of kaolin and volume ratio of immobilized bacterial slurry. The specimens with higher UCS can be obtained by grouting MICPCS every two cycles. The cementation of pure kaolin is so small that the stabilized specimen cannot be a solid. The main contribution for the higher UCS of kaolin is the nucleation that is formed by kaolin, the increment in the amount of effective precipitates, and the decrement in the amount of pore. The wet UCS of the MICPMPIN-treated specimens is larger than that of the conventional MICP treated ones, and the softening resistance is also improved by adding kaolin into the MICP process.

Key words: MICP; coarse sand; kaolin; MICP-clay slurry; micro-particle improved nucleation

0 引 言

微生物岩土技术是一种新型土体固化技术, 它利用微生物诱导矿化作用在砂孔隙中沉淀无机矿物以胶结砂颗粒^[1]。微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)反应是目前研究最广泛的一种微生物岩土技术, 其中尿素水

解反应是最常用的一种反应过程^[2-3]。该反应利用微生物分泌的脲酶, 促进尿素水解生成铵根和碳酸根, 改

基金项目: 国家自然科学基金项目(51922024); 中央高校基本科研业务费项目(2019CDQYTM031); 重庆市研究生科研创新项目(CYB19012)

收稿日期: 2020-06-25

***通信作者** (E-mail: hhuxyanson@163.com)

变孔隙溶液的 pH 值,在钙离子存在的条件下生成碳酸钙。碳酸钙沉淀在砂颗粒表面或颗粒接触点处,填充颗粒间孔隙并胶结砂颗粒,从而起到防渗和加固的作用^[4-5]。

近年来,中国学者针对 MICP 固化砂土的静力学特性^[6-8]、动力学特性^[9-10]及渗透特性^[11-12]等开展了大量试验研究,并将 MICP 技术分别用于裂隙岩体修复^[13],风蚀防护^[14]及尾矿处理^[15]等。越来越多的学者将 MICP 技术用于细粒土加固,包括三合土^[16]、残积土^[17]、有机质黏土^[18]及泥炭土^[19]等。

砂颗粒粒径是决定 MICP 加固效果的一个重要因素。首先,颗粒粒径会影响砂土内部孔喉大小,从而影响细菌在孔隙间的迁移^[2]。巴氏生孢八叠球菌 (*Sporosarcina pasteurii*, CGMCC 1.3687) 的尺寸一般为 0.5~3.0 μm ,为了使细菌能够在孔隙间迁移,理论上砂土的特征粒径 D_{10} 必须大于细菌尺寸的 5 倍,否则在加固过程中容易出现堵塞问题^[2, 20]。其次,在相同的加固程度下,颗粒粒径会影响 MICP 固化砂土的无侧限抗压强度^[21-25],Rebata-landa 的研究结果表明 MICP 可以有效胶结颗粒粒径为 10~1000 μm 的细、中砂,但是对粗砂加固效果较差^[26-27]。现有研究主要集中于中细砂的 MICP 固化,并且向细粒土方向延伸,但是在实际地基中砂土分布是不均匀的,部分区域可能会遇到粗砂、砾石地基^[28],此外粗砂、砾石等粗粒料在路基、土石坝等岩土工程建设中广泛存在,而针对粗粒料的微生物固化报导较少^[28-33]。粗砂由于孔隙较大,颗粒间接触配位数少,要达到与中、细砂相当的固化强度需要进行多次灌浆处理,导致微生物加固粗砂成本增加,不利于 MICP 技术的推广应用。

添加辅助材料,通常被用于提高加固效率,改善加固效果并降低成本,例如 Cheng 等^[34]提出用 MICP 反应预生成的碳酸钙颗粒与砂混合后再灌入反应液加固砂;Dhami 等^[35]提出首先混合粉煤灰和细菌,再将混合物与砂进一步混合,然后喷洒反应液加固的方法;Zhao 等^[36]提出用活性炭辅助加固砂,首先混合活性炭和砂,然后用 MICP 灌浆加固;谢约翰等^[37]、郑俊杰等^[38]和 Xiao 等^[39]提出在砂中混合纤维来改善砂土加固后的强度及刚度。尽管上述方法提出了多种添加剂,但是这些研究均将添加剂与砂混合,然后灌入 MICP 反应液。然而在实际工程中,尤其是已有建筑物地基、大坝、路基等防添加固工程中只能用灌浆法对地基进行处理,利用混合法向土体中添加辅助材料很难实现。基于上述原因,Pan 等^[28]提出 MICP 加固粗砂时向反应液中添加 MICP 反应预生成的碳酸钙颗粒,试验结果表明该方法可以快速降低粗砂的渗透系数,但是加固后的强度改善较小,成本较高。为降低加固成本,

本文提出通过在不影响注浆溶液黏性、密度等物理化学指标的条件下,加入细粒黏土材料固载微生物来改善 MICP 加固粗砂的效果。

高岭土在中国分布较广,物理化学性质稳定,无污染,且价格低廉,是一种理想的天然材料。因此本文提出用高岭土作为添加剂固载微生物形成微生物固载胶体,并与反应液混合形成浆体 (MICPCS) 的新型加固方法 (MICPMPIN),将其用于粗砂的微生物加固。通过一系列无侧限抗压强度试验研究高岭土掺量,微生物固载胶体含量,灌入 MICPCS 的间隔次数对粗砂固化效果的影响;并讨论了高岭土沉淀量、细菌浓度、高岭土的胶结作用及浸水饱和对固化粗砂无侧限抗压强度的影响。

1 MICPMPIN 加固方法

1.1 试验材料

本文使用的石英砂从福建标准砂中筛得,粒径为 1~2 mm,石英砂相对质量密度为 2.65,最大孔隙比和最小孔隙比分别为 0.83 和 0.54。高岭土主要成分为 SiO_2 (53%)、 Al_2O_3 (45%)、 Fe_2O_3 (0.3%)、 TiO_2 (0.6%)、 CaO (0.07%)、 MgO (0.06%)、 K_2O (0.05%) 等,平均粒径为 5 μm ,相对质量密度为 2.57,白度为 (94 \pm 0.5) %,吸油量为 40%~45%,溶于水后 pH 值为 7。高岭土使用前在 105 $^{\circ}\text{C}$ 烘干 24 h,然后密封保存。高岭土和石英砂的电镜图片分别在图 1 (a), (b) 中给出。

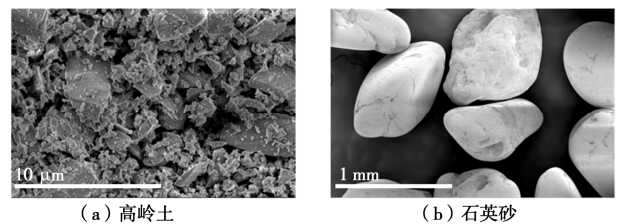


图1 试验材料

Fig. 1 Test materials

1.2 微生物

本文采用巴氏生孢八叠球菌 (*Sporosarcina pasteurii*, 菌株编号 CGMCC 1.3687) 开展 MICP 加固试验。培养基配方为: 酵母提取物 (20 g/L), NH_4Cl (10 g/L), $\text{MnSO}_4\cdot\text{H}_2\text{O}$ (12 mg/L), $\text{NiCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (24 mg/L), 培养基的 pH 用 1 mol/L 的 NaOH 调节至 9.0 左右。培养基在高压灭菌锅中灭菌 30 min, 灭菌温度为 121 $^{\circ}\text{C}$ 。待培养基冷却后在超净工作台中接种, 然后在恒温振荡培养箱中培养 24 h (转速 200 rpm, 温度 30 $^{\circ}\text{C}$)。将培养好的细菌在 4000 r 条件下离心 20 min, 去除上清液, 然后用等体积 0.85% 的 NaCl 溶液稀释沉

淀物，稀释后的菌液在4℃条件下储存。

细菌活性用电导率法测量，单位时间内电导率读数差值越大，表明细菌活性越好^[40]。具体测试方法为：向18 mL 1.1 mol/L尿素溶液中加入2 mL菌液，分别测试1，6，11 min及16 min时的读数，并用线性拟合得到的斜率来表征细菌活性^[41]。

1.3 试样制备

制样模具由两个半圆柱形有机玻璃模具对拼得到，模具用喉箍固定。模具内径为39.1 mm，高度120 mm。为了防止漏水及方便取样，制样前在模具内部放一层硬塑料胶片，并在模具底端放置厚15 mm左右的透水石（图2（a））。

本试验所用试样高度为78.2 mm，体积为93.85 cm³，干密度为1.63 g/cm³，孔隙率为0.38，孔隙体积为36.12 mL。为保证试样沿高度方向的均匀性，参考Xiao等^[42]的装样方法，分3层装样。装样结束后，取出底部透水石，并在试样两端各放一层百洁布，然后用橡胶塞封堵试样底部，试样顶部预留一部分空间，用于缓存浆液（图2（b））。

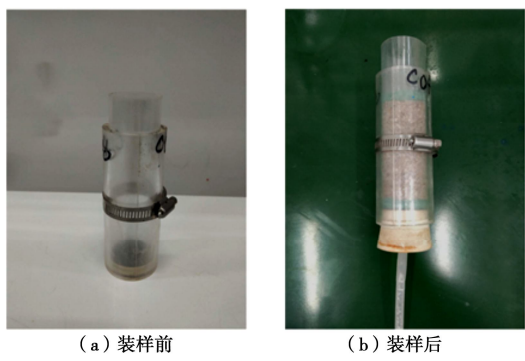


图2 制样模具

Fig. 2 Moulds for preparing specimens

1.4 微生物固载胶体制备

本文选用的高岭土质量浓度分别为10，20，40，100 g/L，以未加入高岭土的菌液作为参照组（0 g/L）。微生物固载胶体的制备如下：根据菌液用量取一定体积的菌液加入锥形瓶中，然后称量相应质量的干燥高岭土加入锥形瓶中，以1200 r/min的转速磁力搅拌20 min。

1.5 MICPMPIN 方法

本文采用自重渗流法注浆加固粗砂试样。上述微生物固载胶体在电磁振荡结束后立即与反应液按一定比例混合制备 MICPCS。为防止 MICPCS 中高岭土沉淀及碳酸钙沉淀反应发生，将 MICPCS 立即倒入模具顶部空余部位，浆液依靠自重渗流快速穿过砂柱，当液面与百洁布顶面持平时，立即关闭止水夹，并静置 24 h。这种新型加固方法称为微粒固载成核微生物固

化技术（MICPMPIN）。重复上述步骤，所有试样的总加固次数为 8 次。

每次注入 MICPCS 总体积为 50 mL（约 1.4 倍孔隙体积），为研究微生物固载胶体含量（MICPCS 中微生物固载胶体与 MICPCS 总体积的比值）对加固效果的影响，分别设计了 3 种微生物固载胶体含量，具体参数见表 1。其中，反应液由等浓度的 CaCl₂ 和尿素组成。为了使 MICPCS 中 CaCl₂ 和尿素的最终浓度（即 MICP 浆体浓度）为 1 mol/L，针对不同的微生物固载胶体含量设计了 3 种不同的反应液浓度。

为了进一步优化 MICPMPIN 技术施工工艺，针对每个微生物固载胶体含量，本试验设计了 3 种不同的注入间隔次数，具体试验设计如表 2 所示。

表 1 MICPCS 参数

Table 1 Parameters of MICP-clay slurry				
微生物固载胶体含量	微生物固载胶体体积 /mL	反应液体积 /mL	反应液浓度 /(mol·L ⁻¹)	MICP 浆体浓度 /(mol·L ⁻¹)
1/2	25.0	25.0	2.00	1.00
1/4	12.5	37.5	1.34	1.00
1/10	5.0	45.0	1.11	1.00

表 2 MICPMPIN 加固粗砂试验设计

Table 2 Test design for stabilizing coarse sand by MICPMPIN					
间隔次数	高岭土质量浓度/(g·L ⁻¹)				
	0	10	20	40	100
0	√	√	√	—	—
1	√	√	√	√	√
3	√	—	√	—	√

间隔次数表示两次注入 MICPCS 之间注入传统 MICP 的次数，微生物含量均与同组 MICPCS 相同。由于间隔 0 次时，质量浓度为 40，100 g/L 的高岭土会导致砂柱快速封堵，因此未测试相应试样的强度。此外间隔 3 次时，仅开展质量浓度 20，100 g/L 高岭土的试验。

1.6 无侧限抗压强度测试

加固 8 次后，用大量自来水冲洗试样，直至试样底部流出液澄清、无杂质，然后试样在 65℃ 下烘干直至试样的质量不再变化，采用位移控制型路强仪检测试样的无侧限抗压强度，试样加载速率为 1.0 mm/min。

1.7 碳酸钙及高岭土沉淀量测试

无侧限抗压强度试验结束后，分别在试样顶部，中间及底部取样，每个位置取 20 g 左右的样品，用过量的 1 mol/L HCl 溶液溶解碳酸钙。由于高岭土不溶于盐酸，所以酸解前后测得的质量差主要是由于 MICP 生成的碳酸钙沉淀引起的。为了区分碳酸钙和高岭土，利用慢速定量滤纸过滤碳酸钙溶解后的溶液，

具体计算方法在文献[41]中给出。文中给出的碳酸钙沉淀量为顶部、中部及底部碳酸钙含量的平均值。

1.8 微观观测

无侧限抗压强度试验结束后,取胶结块体,用扫描电子显微镜(SEM)观察试样的微观结构,并用能谱(EDS)分析沉淀物的元素组成。

2 试验结果

2.1 无侧限抗压强度

无侧限抗压强度是评价试样胶结效果最常用的指标,本文固化粗砂的无侧限抗压强度在图3中给出。

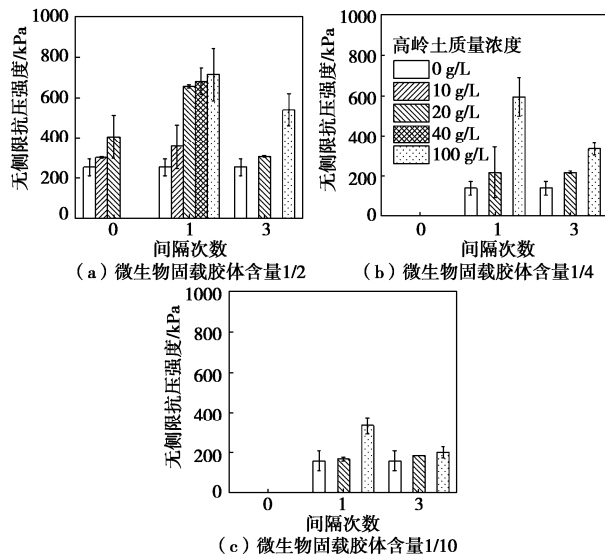


图3 MICPMPIN 固化粗砂试样的无侧限抗压强度

Fig. 3 UCS of MICPMPIN-treated coarse sand specimens

在相同加固次数下, MICPMPIN 固化试样的无侧限抗压强度均大于传统 MICP 固化试样的无侧限抗压强度,这说明高岭土的掺入确实能够提高粗砂加固后的无侧限抗压强度。但是 MICPCS 注入间隔次数、微生物固载胶体中高岭土的浓度及微生物固载胶体含量均对粗砂加固后的无侧限抗压强度有影响。注入间隔次数及微生物固载胶体含量相同时,粗砂加固后的无侧限抗压强度随高岭土掺量的增加而增加。在相同的间隔次数及高岭土掺量条件下,微生物固载胶体含量越低(从 1/2 到 1/10),MICPMPIN 固化粗砂的无侧限抗压强度越小。间隔次数较小或者较大时,固化粗砂的强度均较小,仅当间隔次数为 1 次时,固化粗砂的强度较大。

2.2 碳酸钙沉淀量

微生物固化砂的主要原理是在砂颗粒间沉淀碳酸钙以胶结砂颗粒,从而使砂具有一定强度。碳酸钙沉淀量结果在图4中给出。图4(a),(b)和(c)分别代表注入 MICPCS 的间隔次数为 0, 1 和 3。

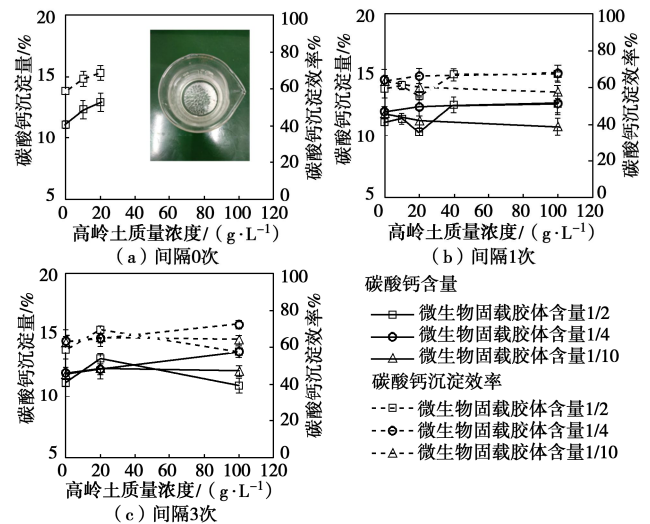


图4 碳酸钙沉淀量及沉淀效率

Fig. 4 CaCO_3 contents and precipitation efficiency

碳酸钙沉淀效率为

$$E_{\text{Ca}} = \frac{m_{\text{Ca}}}{m_{\text{Tca}}} \times 100 \quad (1)$$

式中, E_{Ca} 为碳酸钙沉淀效率(%), m_{Ca} 为碳酸钙沉淀量(g), m_{Tca} 为试样饱和时孔隙中所有钙离子转化为碳酸钙时的沉淀量(g),其中孔隙体积按初始体积 36.12 mL 计算。所有试样的碳酸钙沉淀量都分布在 10%~13%;沉淀效率基本在 58.5%~69.1%,远小于 100%。这与流出液中测得的残余 Ca^{2+} 浓度差异较大(Ca^{2+} 浓度采用 EDTA-2Na 滴定法测定,详细方法见 Ma 等[41])。所有试样流出液中 Ca^{2+} 都基本完全消耗。缺失的大量 CaCO_3 主要是在溶液排出过程中随溶液一起流出。如图4中插图所示流出液中能观察到大量白色沉淀。这说明在粗砂中, MICP 诱导生成的部分碳酸钙沉淀是在孔隙溶液中成核生长的,并且部分碳酸钙簇的粒径小于粗砂中颗粒间孔喉大小。这可能也是导致砂柱中沉淀的碳酸钙差异较大的原因。

2.3 高岭土沉淀量

结合图3,4可以看出,尽管部分试样中碳酸钙沉淀量较低,但是其强度较大。这主要是由于高岭土与碳酸钙共同沉积造成的,高岭土沉淀量在图5中给出。

相同的微生物固载胶体含量和间隔次数条件下微生物固载胶体中高岭土浓度越高,砂柱中沉淀的高岭土越多。当其他条件相同时,高岭土沉淀量随间隔次数增加而减小,随微生物固载胶体含量的降低而降低。

2.4 高岭土及碳酸钙沿试样高度分布

高岭土的掺入可能会导致大量黏土颗粒残留在砂柱顶部,导致砂柱顶部快速封堵,使固化砂柱中碳酸钙沉淀及黏土沉淀分布不均匀。沉淀物分布的部分试验结果(间隔1次注入 MICPCS、微生物固载胶体含量 1/2)在图6中给出。

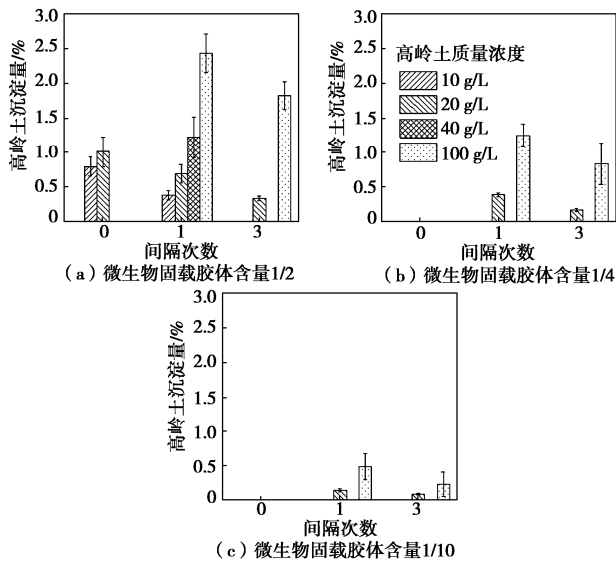


图5 MICPMPIN 固化粗砂高岭土沉淀量

Fig. 5 Kaolin contents of MICPMPIN-treated specimens

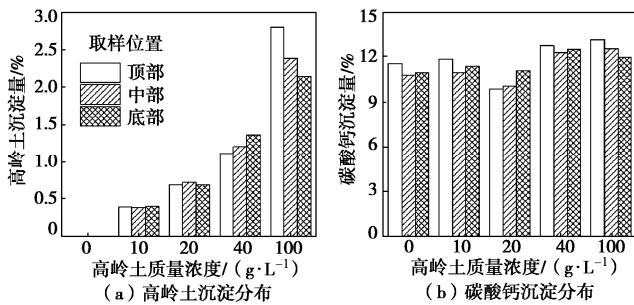


图6 高岭土及碳酸钙沿试样高度分布(间隔1次注入MICPCS, 微生物固载胶体含量 1/2)

Fig. 6 Distribution of kaolin and CaCO₃ along height of specimens (injecting MICPCS with 1/2 immobilized bacterial slurry every 2 times)

图6(a)和(b)分别是高岭土和碳酸钙沉淀沿试样高度的分布情况。除了100 g/L条件下加固的试样外,其他试样均表现出较好的均匀性。在100 g/L条件下,从试样顶部到底部高岭土和碳酸钙沉淀量均依次降低,并且高岭土沉淀量差异更明显,这说明当高岭土掺量较高时,高岭土更容易沉淀在砂柱顶部,导致注浆口封堵。

2.5 微观结构

图7(a), (c)和(e)给出了微生物固载胶体中高岭土的掺量分别为0, 20, 100 g/L时(微生物固载胶体含量为1/2, 间隔1次注入MICPCS)的SEM结果。图7(b), (d)和(f)分别是(a), (c)和(e)的局部放大图。

从图中可以看出未添加高岭土时,起胶结作用的沉淀连续性较差(图7(a)),并且未添加高岭土时生成的碳酸钙中存在大量的孔洞(图7(b)),孔洞尺寸与细菌尺寸吻合。当加入高岭土后,沉淀物总量明显

增加,起胶结作用的沉淀面积(图7(c)和(e))比未添加高岭土的沉淀面积(图7(a))大且连续性较好,从而改善了固化粗砂的强度。同时,加入高岭土后沉淀物表面(图7(d)和(f))未观察到图7(b)中出现的空洞。并且从图中可以观察到,沉淀物与砂颗粒的分离是固化粗砂破坏的一种方式;至于碳酸钙胶结本身是否发生破坏,需要进一步验证。

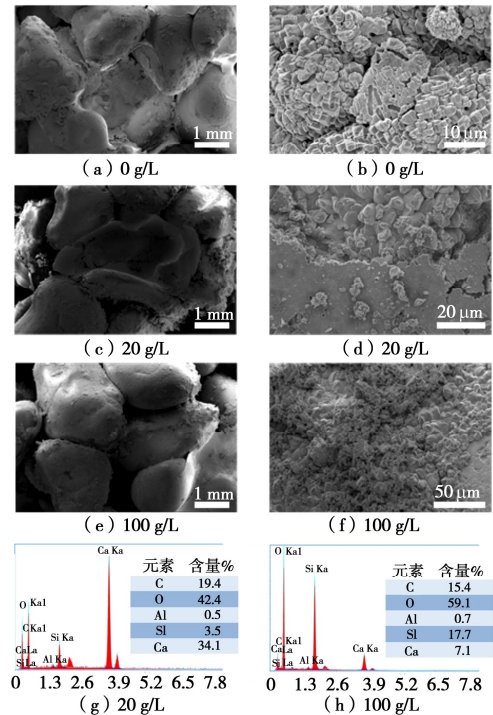


图7 MICPMPIN 固化粗砂试样(间隔1次注入MICPCS, 微生物固载胶体含量 1/2)的微观结构及其物质组成

Fig. 7 Microstructure and chemical composition of MICPMPIN-treated coarse-sand specimens (injecting MICPCS with 1/2 immobilized bacterial slurry every 2 times)

利用能谱分析(EDS)检测图7(d)和(f)中的物质组成,结果分别在图7(g)(20 g/L)和图7(h)(100 g/L)中给出。掺入高岭土后,沉淀物中元素主要包含了C, O, Ca, Al和Si元素。由于高岭土主要由铝硅酸盐组成,而砂颗粒成分主要为SiO₂,因此Al元素含量可以表征高岭土在沉淀物中的含量。由EDS结果可知高岭土掺入量较大(100 g/L)时,Al元素含量较高,与高岭土沉淀量测试结果一致。

3 MICPMPIN 固化效果影响因素分析

3.1 高岭土沉淀量对固化粗砂强度的影响

高岭土沉淀量与粗砂无侧限抗压强度之间的关系在图8中给出,图例中1/2, 1/4和1/10分别代表微生物固载胶体含量。高岭土沉淀量较低时(<0.5%),无侧限抗压强度均较低(<400 kPa)且试样之间的无侧

限抗压强度值相差较小,例如图中实线圈内的数据。当高岭土沉淀量大于1.2%时,固化粗砂的无侧限抗压强度均较大。当高岭土沉淀量处于0.5%~1.2%时,固化粗砂的强度变化较大,这主要是与沉淀物分布、细菌浓度等有关。其中沉淀物分布除受高岭土含量影响(如2.4节所述)外,还受MICPCS间隔次数的影响,例如当间隔1次注入MICPCS时,上部残余的高岭土可以被冲刷到试样底部或者流出(如图4中插图所示),使试样中碳酸钙沉淀分布比较均匀;但是当每次都灌入MICPCS时可能会使高岭土在试样顶部积聚,导致底部加固效果较差,使试样整体强度较低;当间隔次数较大时,沉淀物总量减小,砂颗粒间起桥接作用的沉淀物减小,导致砂样强度较小。

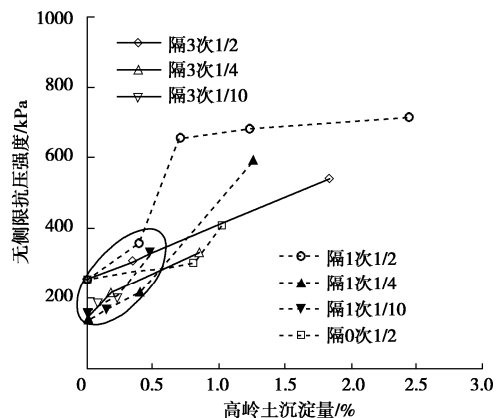


图8 高岭土沉淀量对无侧限抗压强度的影响

Fig. 8 Effects of kaolin content on UCS

3.2 菌液浓度对固化粗砂强度的影响

图9给出的3组试样中,每一组试样的注入间隔次数和MICPCS中高岭土浓度相同,唯一不同的是MICPCS中细菌的浓度。第1组试样注入的MICPCS中高岭土质量浓度为10 g/L,间隔3次注入(高细菌浓度试样的微生物固载胶体中高岭土质量浓度20 g/L,含量为1/2;低细菌浓度试样的微生物固载胶体中高岭土质量浓度为100 g/L,含量为1/10)。第2组试样注入的MICPCS中高岭土质量浓度为5 g/L,间隔1次注入(高细菌浓度试样的微生物固载胶体中高岭土质量浓度10 g/L,含量为1/2;低细菌浓度试样的微生物固载胶体中高岭土质量浓度20 g/L,含量为1/4)。第3组试样注入的MICPCS中高岭土质量浓度为10 g/L,间隔1次注入(高细菌浓度试样的微生物固载胶体中高岭土质量浓度20 g/L,含量为1/2;低细菌浓度的微生物固载胶体中高岭土质量浓度100 g/L,含量为1/10)。

高细菌浓度的MICPMPIN固化试样的无侧限抗压强度都大于低细菌浓度的MICPMPIN固化试样,这与其他学者的研究结果一致^[43-44]。这说明在粗砂加固

时,较高的细菌浓度有利于增强加固效果。一方面该结果与沉淀的碳酸钙形貌有关^[45-46],另一方面可能是由于粗砂中孔隙较大,颗粒间接触点的表面张力很小,碳酸钙很难沉淀在颗粒间接触点处。但是当菌液浓度较高时,大量碳酸钙在孔隙溶液中成核生长形成较大的团簇^[47],在反应废液排出过程中,这些大碳酸钙簇残留在较小的孔喉处,形成优势成核位点,使更多碳酸钙沉淀在砂颗粒接触点间,从而使粗砂加固后的无侧限抗压强度更高。

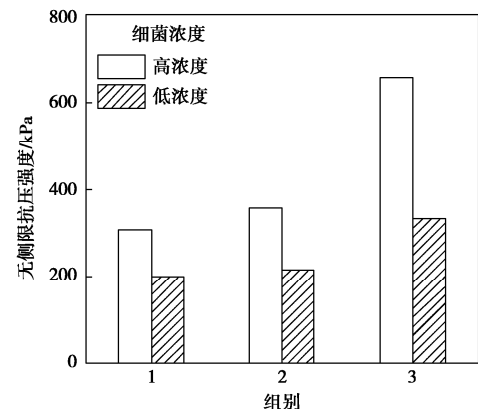


图9 菌液浓度对无侧限抗压强度的影响

Fig. 9 Effects of bacterial density on UCS

3.3 高岭土的胶结作用

根据图8结果可以看出高岭土沉淀量较高时,固化粗砂的强度均较高。高岭土本身可以提供一定的黏聚力来胶结砂颗粒,尤其是在较低含水率时,高岭土的黏聚力更大^[48]。由于MICPMPIN固化粗砂试样的强度都是在烘干后测得的,因此MICPMPIN固化粗砂的部分强度可能来源于高岭土的黏聚力。

为了研究高岭土对粗砂无侧限抗压强度的贡献,本文仅测试了最大高岭土含量对粗砂无侧限抗压强度的贡献。首先制备100 g/L高岭土浆液,然后混合高岭土浆液与2 mol/L反应液并立即灌入粗砂试样中,加固方法与MICPMPIN加固方法相同;其次本文参考最大高岭土沉淀量(2.4%),采用分层压实法制备相同高岭土含量的压实试样:在制样前用4%的去离子水增湿粗砂颗粒,待粗砂颗粒与水混合均匀后,给湿砂中加入2.4%的高岭土,搅拌均匀,然后分层制样。上述试样在65℃下烘干48 h后取出。两种方法制备的试样都无法形成有效强度,拆模后试样呈松散状态,如图10所示。

其中,图10(a)是用灌浆法加固的试样,图10(b)是分层压实法制备的试样。可以证明MICPMPIN加固粗砂的强度主要来源于MICP胶结,黏土的作用主要是辅助成核^[49],增加有效碳酸钙沉淀量(图7),并减小试样孔隙比^[28]从而增强固化粗砂的效果。



(a) 100 g/L高岭土浆液灌浆加固试样 (b) 高岭土混合加固试样

图 10 高岭土固化试样

Fig. 10 Kaolin-stabilized specimens

3.4 MICPMPIN 固化粗砂的湿强度

为了进一步研究高岭土对固化粗砂试样强度的影响,本文测试了部分试样(微生物固载胶体含量 1/2, 间隔 1 次)的湿强度。为测试固化粗砂试样的湿强度, MICPMPIN 加固结束后,用大量自来水冲洗试样,然后将冲洗后的试样浸水饱和 24 h。测试前取出试样,擦拭表面水珠,然后直接测试样的湿强度,试验结果在图 11 中给出。

$$\sigma = \frac{UCS_{wet}}{UCS_{dry}}, \quad (2)$$

式中, σ 为固化粗砂试样的软化系数, UCS_{wet} 为湿试样的无侧限抗压强度 (kPa); UCS_{dry} 为干试样的无侧限抗压强度 (kPa)。

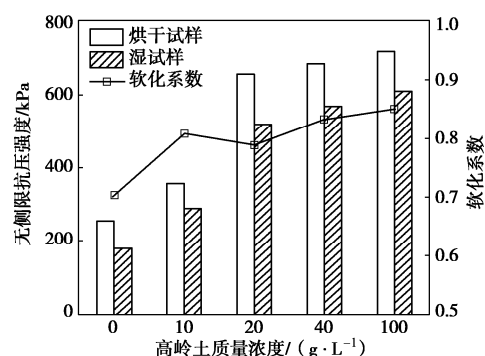


图 11 浸泡对 MICPMPIN 固化粗砂强度的影响

Fig. 11 Effects of immersion on UCS of MICPMPIN-stabilized coarse sand

高岭土质量浓度对湿强度的影响与对干强度的影响规律相似,固化粗砂的无侧限抗压强度均随高岭土质量浓度的增加而增加;且所有试样的湿强度均小于干强度,这主要是由于水的存在使试样内部结构、水与胶结相互作用、裂纹起裂及扩展机制发生变化造成的^[50]。试样的软化系数随高岭土质量浓度的增加而增大,这说明黏土的加入可以改善 MICP 固化粗砂的抗软化性。综上所述,基于微粒固载成核的微生物固化技术可以有效固化粗砂。

4 结 论

本文提出一种基于微粒固载成核的微生物固化技

术 (MICPMPIN) 用于粗砂加固。在原有 MICP 技术的基础上,给菌液中加入不同掺量的高岭土制备微生物固载胶体,然后与反应液混合形成 MICPCS 来加固粗砂。通过开展无侧限抗压强度试验分析了微生物固载胶体中高岭土掺量、微生物固载胶体含量及 MICPCS 注入间隔次数对固化粗砂强度的影响,得到以下 5 点结论。

(1) 高岭土的掺入可以改善微生物固化粗砂的强度,且改善程度与微生物固载胶体中高岭土的掺量、微生物固载胶体含量及微生物固载胶体注入间隔次数有关。在其他条件下相同时,固化粗砂的强度随高岭土质量浓度的增加而增加,随微生物固载胶体含量的增大而增大,并且间隔 1 次注入 MICPCS 时固化粗砂的强度较高。

(2) 当微生物固载胶体含量为 1/2 且间隔 1 次注入 MICPCS 时,微生物固载胶体中掺入的高岭土质量浓度较低时 (0~40 g/L),碳酸钙和高岭土沉淀沿试样高度方向的分布比较均匀;当微生物固载胶体中掺入的高岭土质量浓度较高时 (100 g/L),碳酸钙与高岭土在注入口处 (试样顶部) 的沉淀量较高。

(3) 高岭土作为黏土胶结提供的强度有限,砂柱难以成型。黏土的作用主要是辅助成核,增加有效碳酸钙沉淀量,并减小试样孔隙比从而增强固化粗砂的效果。

(4) 细菌浓度对微生物固化粗砂的强度有较大的影响,细菌浓度较高时,固化粗砂的强度也较大。

(5) 高岭土的掺入不仅可以改善固化粗砂的干强度,还可以改善固化粗砂的湿强度,并能提高固化粗砂的软化系数。

本文为微生物改性加固研究提供了新的思路,希望本研究可以对微生物加固技术的发展起到一定的推动作用。

参考文献:

- [1] 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 Jia, CHU Jian, LIU Han-long, et al. Research advances in biogeotechnologies[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(4): 643 - 653. (in Chinese))
- [2] DEJONG J T, MORTENSEN B M, MARTINEZ B C, et al. Bio-mediated soil improvement[J]. Ecological Engineering, 2010, 36(2): 197 - 210.
- [3] XIAO Y, CHEN H, STUEDLEIN A W, et al. Restraint of particle breakage by biotreatment method[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2020,

- 146(11): 04020123.
- [4] 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 Han-long, XIAO Peng, XIAO Yang, 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))
- [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 Chun-xiang, WANG An-hui, WANG Xin. Advances of soil improvement with bio-grouting[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(6): 1537 - 1548. (in Chinese))
- [6] 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. (PENG Jie, FENG Qing-peng, SUN Yi-cheng. Influences of temperatures on MICP-treated soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(6): 1048 - 1055. (in Chinese))
- [7] 孙潇昊, 缪林昌, 吴林玉, 等. 低温条件微生物 MICP 沉淀产率试验研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(6): 1133 - 1138. (SUN Xiao-hao, MIAO Lin-chang, WU Lin-yu, et al. Experimental study on precipitation rate of MICP under low temperatures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(6): 1133 - 1138. (in Chinese))
- [8] 王旭民, 郭 伟, 余 飞, 等. 营养盐浓度对胶结砂物理力学特性试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(增刊 2): 363 - 374. (WANG Xu-ming, GUO Wei, YU Fei, et al. Experimental study of effect of nutrient concentration on physico-mechanical properties of cemented sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(S2): 363 - 374. (in Chinese))
- [9] 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 Xiao-hui, MA Qiang, YANG Zuan, et al. Dynamic response of liquefiable sand foundation improved by bio-grouting[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(8): 1486 - 1495. (in Chinese))
- [10] 张鑫磊, 陈育民, 张 喆, 等. 微生物灌浆加固可液化钙质砂地基的振动台试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(6): 1023 - 1031. (ZHANG Xin-lei, CHEN Yu-min, ZHANG Zhe, et al. Performance evaluation of liquefaction resistance of a MICP-treated calcareous sandy foundation using shake table tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(6): 1023 - 1031. (in Chinese))
- [11] 马瑞男, 郭红仙, 程晓辉, 等. 微生物拌和加固钙质砂渗透特性试验研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(增刊 2): 217 - 223. (MA Rui-nan, GUO Hong-xian, CHENG Xiao-hui, et al. Permeability experiment study of calcareous sand treated by microbially induced carbonate precipitation using mixing methods[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(S2): 217 - 223. (in Chinese))
- [12] 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 - 2974. (LI Xian, WANG Shi-ji, HE Bing-hui, et al. Permeability condition of soil suitable for MICP method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(8): 2956 - 2974. (in Chinese))
- [13] 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(增刊 1): 237 - 244. (ZHI Yong-yan, DENG Hua-feng, XIAO Yao, et al. Analysis of seepage characteristics of fractured rock mass reinforced by microbial grouting[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(S1): 237 - 244. (in Chinese))
- [14] 李 驰, 王 硕, 王燕星, 等. 沙漠微生物矿化覆膜及其稳定性的现场试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(4): 1291 - 1298. (LI Chi, WANG Shuo, WANG Yan-xing, et al. Field experimental study on stability of bio-mineralization crust in the desert[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(4): 1291 - 1298. (in Chinese))
- [15] 欧孝夺, 莫 鹏, 江 杰, 等. 生石灰与微生物共同固化过湿性铝尾黏土试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(4): 624 - 631. (OU Xiao-duo, MO Peng, JIANG Jie, et al. Experimental study on solidification of bauxite tailing clay with quicklime and microorganism[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(4): 624 - 631. (in Chinese))
- [16] 刘士雨, 俞 缙, 韩 亮, 等. 三合土表面微生物诱导碳酸钙沉淀耐水性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(8): 1718 - 1728. (LIU Shi-yu, YU Jin, HAN Liang, et al. Experimental study on water resistance of tabia surface with microbially induced carbonate precipitation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(8): 1718 - 1728. (in Chinese))
- [17] 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 Ming, ZHANG Jin-xuan, JIN Gui-xiao, et al. Magnetic resonance image experiments on the damage feature of microbial induced calcite precipitated residual soil during freezing-thawing cycles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and

- Engineering, 2018, **37**(12): 2846 – 2855. (in Chinese))
- [18] 彭 劫, 温智力, 刘志明, 等. 微生物诱导碳酸钙沉积加固有机质黏土的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(4): 733 – 740. (PENG Jie, WEN Zhi-li, LIU Zhi-ming, et al. Experimental research on MICP-treated organic clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(4): 733 – 740. (in Chinese))
- [19] 桂 跃, 吴承坤, 刘颖伸, 等. 利用微生物技术改良泥炭土工程性质试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(2): 269 – 278. (GUI Yue, WU Cheng-kun, LIU Ying-shen, et al. Improving engineering properties of peaty soil by biogeotechnology[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(2): 269 – 278. (in Chinese))
- [20] HOLTZ R D, KOVACS W D. An Introduction to Geotechnical Engineering[M]. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1983.
- [21] AMARAKOON G G N N, KAWASAKI S. Factors Affecting the Improvement of Sand Properties Treated with Microbially-Induced Calcite Precipitation[C]// Geo-Chicago, 2016, Chicago.
- [22] 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**(S2): 397 – 402. (in Chinese))
- [23] MWANDIRA W, NAKASHIMA K, KAWASAKI S. Bioremediation of lead-contaminated mine waste by pararrhodobacter sp. based on the microbially induced calcium carbonate precipitation technique and its effects on strength of coarse and fine grained sand[J]. Ecological Engineering, 2017, **109**: 57 – 64.
- [24] HOANG T, ALLEMAN J, CETIN B, et al. Engineering properties of biocementation coarse- and fine-grained sand catalyzed by bacterial cells and bacterial enzyme[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2020, **32**(4): 04020030.
- [25] MAHAWISH A, BOUAZZA A, GATES W P. Effect of particle size distribution on the bio-cementation of coarse aggregates[J]. Acta Geotechnica, 2018, **13**(4): 1019 – 1025.
- [26] REBATA-LANDA V. Microbial Activity in Sediments: Effects on Soil Behavior[D]. Atlanta: Civil and Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology, 2007.
- [27] 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. (YING Li-yang, TANG Chao-sheng, XIE Yue-han, 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. (In Chinese))
- [28] PAN X, CHU J, YANG Y, et al. A new biogrouting method for fine to coarse sand[J]. Acta Geotechnica, 2020, **15**(1): 1 – 16.
- [29] WU C, CHU J, CHENG L, et al. Biogrouting of aggregates using premixed injection method with or without pH adjustment[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2019, **31**(9): 06019008.
- [30] MAHAWISH A, BOUAZZA A, GATES W P. Biogrouting coarse materials using soil-lift treatment strategy[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2016, **53**(12): 2080 – 2085.
- [31] MAHAWISH A, BOUAZZA A, GATES W P. Improvement of coarse sand engineering properties by microbially induced calcite precipitation[J]. Geomicrobiology Journal, 2018, **35**(10): 887 – 897.
- [32] MAHAWISH A, BOUAZZA A, GATES W P. Factors affecting the bio-cementing process of coarse sand[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement, 2018, **172**(1): 25 – 36.
- [33] 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. (in Chinese))
- [34] CHENG L, SHAHIN M A. Urease active bioslurry: a novel soil improvement approach based on microbially induced carbonate precipitation[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2016, **53**(9): 1376 – 1385.
- [35] DHAMI N K, MUKHERJEE A, REDDY M S. Viability of calcifying bacterial formulations in fly ash for applications in building materials[J]. Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology, 2013, **40**(12): 1403 – 1413.
- [36] ZHAO Y, FAN C, LIU P, et al. Effect of activated carbon on microbial-induced calcium carbonate precipitation of sand[J]. Environmental Earth Sciences, 2018, **77**(17): 615.
- [37] 谢约翰, 唐朝生, 尹黎阳, 等. 纤维加筋微生物固化砂土的力学特性[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(4): 675 – 682. (XIE Yue-han, TANG Chao-sheng, YIN Li-yang, et al.

- Mechanical behavior of microbial-induced calcite precipitation (MICP)-treated soil with fiber reinforcement[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(4): 675 - 682. (in Chinese))
- [38] 郑俊杰, 宋 杨, 吴超传, 等. 玄武岩纤维加筋微生物固化砂力学特性试验[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2019, **47**(12): 73 - 78. (ZHENG Jun-jie, SONG Yang, WU Chao-chuan, et al. Experimental study on mechanical properties of basalt fiber reinforced MICP-treated sand[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2019, **47**(12): 73 - 78. (In Chinese))
- [39] XIAO Y, HE X, EVANS T M, et al. Unconfined compressive and splitting tensile strength of basalt fiber-reinforced biocemented sand[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2019, **145**(9): 04019048..
- [40] WHIFFIN V S. Microbial CaCO_3 Precipitation for the Production of Biocement[D]. Perth: Murdoch University, 2004.
- [41] MA G, HE X, JIANG X, et al. Strength and permeability of bentonite-assisted biocemented coarse sand[J/OL]. Canadian Geotechnical Journal, 2020. <https://doi.org/10.1139/cgj-2020-0045>.
- [42] XIAO Y, LIU H, NAN B, et al. Gradation-dependent thermal conductivity of sands[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2018, **144**(9): 06018010.
- [43] ZHAO Q, LI L, LI C. Factors affecting improvement of engineering properties of MICP-treated soil catalyzed by bacteria and urease[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2014, **26**(12): 4014094.
- [44] CHOU C W, SEAGREN E A, AYDILEK A H. Biocalcification of sand through ureolysis[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2011, **137**(12): 1179 - 1189.
- [45] CHENG L, QIAN C X, WANG R X. Study on the mechanism of calcium carbonate formation induced by carbonate-mineralization microbe[J]. Acta Chimica Sinica, 2007, **65**(19): 2133 - 2138.
- [46] 何 想, 马国梁, 汪 杨, 等. 基于微流控芯片技术的微生物加固可视化研究[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(6): 1005 - 1012. (HE Xiang, MA Guo-liang, WANG Yang, et al. Visualization investigation of bio-cementation process based on microfluidics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **42**(6): 1005 - 1012. (in Chinese))
- [47] THAWADI A S, CORD-RUWISCH R. Calcium carbonate crystals formation by ureolytic bacteria isolated from australian soil and sludge[J]. Journal of Advanced Science & Engineering Research, 2012, **2**(1): 12 - 26.
- [48] MULLINS C E, PANAYIOTOPOULOS. The strength of unsaturated mixtures of sand and kaolin and the concept of effective stress[J]. Journal of Soil Science, 1984, **35**: 459 - 468.
- [49] XU H, ZHOU M, FANG Y, et al. Effect of mica and hematite (001) surfaces on the precipitation of calcite[J]. Minerals, 2018, **8**(1): 17.
- [50] 郭佳奇, 刘希亮, 乔春生. 自然与饱水状态下岩溶灰岩力学性质及能量机制试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, **33**(2): 296 - 308. (GUO Jia-qi, LIU XI-liang, QIAO Chun-sheng. Experimental study of mechanical properties and energy mechanism of karst limestone under natural and saturated states[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, **33**(2): 296 - 308. (in Chinese))