

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2019.03.011

微生物诱导碳酸钙沉积加固土体的注浆方法

彭 劼^{1,2}, 黄慕凡^{1,2}, 谢高强^{1,2}, 田艳梅^{1,2}

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;
2. 江苏省岩土工程技术工程研究中心, 江苏 南京 210098)

摘要: 为了探讨微生物诱导碳酸钙沉积(MICP)在实际工程中的应用方法, 尝试注浆管 MICP 加固土体, 即在土体中插入不同分布密度注浆孔的注浆管, 将菌液和胶结液通过注浆管注入土体中, 从而形成加固体, 并通过对比试验, 研究注浆管 MICP 的加固效果。试验结果表明, 经过注浆管 MICP 处理, 能形成完整的且强度较高的固化砂柱, 并且固化砂柱的强度比较均匀。

关键词: 微生物诱导碳酸钙沉积; 注浆管; 土体加固; 模型试验

中图分类号: TU43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2019)03-0259-06

Grouting method of MICP-treated soil

PENG Jie^{1,2}, HUANG Mufan^{1,2}, XIE Gaoqiang^{1,2}, TIAN Yanmei^{1,2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China
2. Jiangsu Research Center for Geotechnical Engineering Technology, Nanjing 210098, China)

Abstract: To explore the application method of MICP in the actual project, the MICP grouting pipe is used to reinforce the soil in this study. That is to insert the grouting pipe into the soil through holes of different densities, then penetrate the bacteria fluid and the cementing fluid into the soil through the holes on the grouting pipe, and at last, the cemented sand column can be formed in the soil. By comparing the reinforcement effect of contrast experiments, the results show that this grouting method can be used to form a complete and high strength cemented sand column and the strength of each layer is relatively balanced.

Key words: MICP; grouting pipes; model experiment; soil reinforcement

传统的土体加固方法如真空预压固结、电渗固结、化学注浆等方法存在诸多不足^[1-3], 如工期长、能耗大、对环境有不良影响等。近年来, 微生物诱导碳酸钙沉积(microbially induced carbonate precipitation, MICP)在土体加固方面的研究得到越来越多的重视^[4-7]。MICP 是指特定细菌的代谢产物与周围环境中的物质合成碳酸钙的过程^[8]。自然界中存在多种微生物, 可在新陈代谢过程中生成碳酸钙, 其机制种类主要包括: 尿素水解如巴氏芽孢杆菌八叠球菌(*Sporosarcina pasteurii*)、反硝化作用如 *Castellaniella denitrificans*、硫酸盐还原如 sulphate reducing bacteria 等^[9-11]。其中尿素水解类微生物具有环境适应性强、碳酸钙生成量高、沉积速度快等优点^[11-12], 因此成为 MICP 加固土体研究中受到最多关注和应用的微生物。

Whiffin^[11]首次将 MICP 方法应用于土体加固中, 其利用巴氏芽孢杆菌八叠球菌诱导碳酸钙沉积在松散砂中, 显著地提高了砂土的剪切强度。Dejong 等^[4]进一步用 X 射线衍射试验确定了其中起到胶结作用的物质是方解石晶型碳酸钙。之后, 学者们进一步研究了不同的微生物、钙源种类、化学试剂浓度以及环境因素的影响等^[13-15]。

如何有效地将微生物和相关的化学试剂(如尿素和氯化钙)输送到需要加固的土体位置是 MICP 加固土

基金项目: 国家自然科学基金(51578214)

作者简介: 彭劼(1971—)男, 教授, 博士, 主要从事软基处理研究。E-mail: peng-jie@hhu.edu.cn

引用本文: 彭劼, 黄慕凡, 谢高强, 等. 微生物诱导碳酸钙沉积加固土体的注浆方法[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019, 47(3): 259-264.

PENG Jie, HUANG Mufan, XIE Gaoqiang, et al. Grouting method of MICP-treated soil[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2019, 47(3): 259-264.

体的关键问题。Whiffin 等^[16]提出了分步的一维注浆法,即各种浆液分别从上往下依次注入:先将菌液注入土中,然后注入固定液(如 50 mm 的氯化钙溶液),最后注入沉淀所需的化学试剂。不过由于形成的碳酸钙容易导致上部淤堵,后期浆液难以注入,用该方法生成的砂柱较短,且上下强度不均匀。Cheng 等^[17-18]直接在试样表面依次喷洒菌液和化学试剂来加固非饱和土。Soon 等^[19]在研究 MICP 加固热带残积土时采用了泵压法输送营养液,显著地提高砂土的剪切强度和降低其渗透系数。Zhao 等^[20]提出了将砂柱浸润在胶结液中的固化方法:使用土工布(其纤维结构提供很好的支撑、具有很好的透水能力)制作 MICP 模具,将砂样与菌液混合搅拌均匀,然后装入制作好的模具中,将模具放入盛有足够量胶结液的反应器中,经过固化后的试样固化比较均匀,没有发现明显的分层和脆弱砂层,整个样品胶结成完整的砂柱。

之后,多个学者进一步研究了加固较大体积土体的注浆方法, Van Paassen 等^[21]研究了单点灌浆,模型箱尺寸为 0.9 m×1.1 m×1.0 m,周边布置排水过滤通道,注射口埋设于砂体中心,经过 50 d 的加固处理,整个立方体砂样胶结成型,为近似球形的胶结砂体。Li^[22]研究了引流灌浆,模型箱尺寸 1.12 m×0.96 m×0.95 m,结果发现胶结效果更好,整个立方体砂体胶结成型,胶结效率高达 93%, Van Paassen 等^[23]将这种灌浆方法应用于实际工程,进行了 8 m×5.6 m×2.5 m 的大体积 MICP 试验,在一侧依次重复注入菌液和试剂,另一侧用抽水井辅助其运移,能形成体积约 100 m³的加固体。

综上所述,在以往的 MICP 研究中,小体积砂柱的注浆方式多为一维单向注浆,加固范围小且不均匀,较大体积的土体采用单点、引流等方法,往往将整个试验土体加固成了一个整体。上述方法在将来的实际应用中均有明显缺陷。因此,本文尝试了注浆管 MICP 的方法,即在土体中插入带有注浆孔的注浆管,将菌液和胶结液通过注浆管小孔渗透于土体中,从而形成加固体。本文通过 3 个模型槽对比试验,研究了该注浆方法的可行性及加固效果,为 MICP 方法将来应用于实际工程提供了参考。

1 试验装置与材料

1.1 试验装置

如图 1 所示,试验装置主要包括模型槽、注浆管、蠕动泵及连接管等。圆柱形模型槽由有机玻璃制成,内径为 120 mm,高度 600 mm,模型槽底部设置了出水口。在模型槽内放置砂样后将注浆管插入模型槽。进行了 A、B、C 共 3 组试验,3 组试验分别采用不同的注浆管。注浆管由薄的有机玻璃制成,长度 400 mm,内径 10 mm,壁厚 0.5 mm,底部封闭。3 组试验的注浆管上的注浆孔分布各不相同,注浆管展开图如图 2 所示。注浆孔直径均为 2 mm。A 组试验注浆管上的注浆孔是均匀分布,注浆管展开后注浆孔水平距离 12 mm,垂直距离 20 mm;B 组试验注浆管上的注浆孔从上到下的分布密度逐渐加大,注浆管展开后注浆孔水平距离从上到下分别为 12 mm、9 mm、7 mm,垂直距离 20 mm;C 组试验注浆管上的注浆孔从上到下的分布密度比 B 组更大,注浆管展开后注浆孔水平距离从上到下分别为 12 mm、7 mm、5 mm,垂直距离 20 mm。

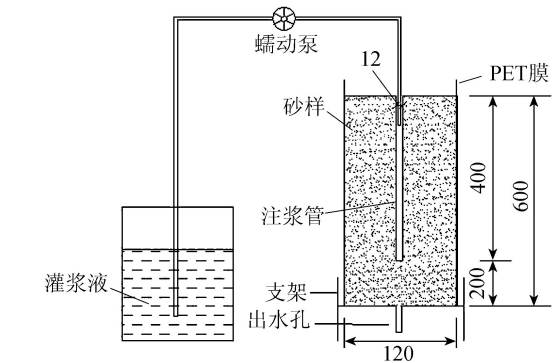


图 1 试验装置示意图(单位:mm)

Fig.1 Experimental device (units: mm)

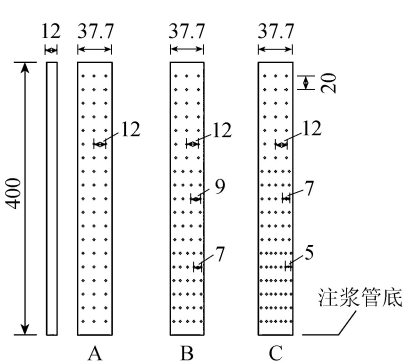


图 2 注浆管平剖图(单位:mm)

Fig.2 Cross section of the grouting pipe (units: mm)

蠕动泵型号为 BT100-2J,转速范围为 0.1 ~ 100 r/min,泵头采用型号为 YZ1515x 的单通道泵头。

1.2 砂样制备与物理力学特性

试验砂土选用标准砂,平均粒径 $d_{50}=0.64\text{ mm}$, $d_{60}=0.80\text{ mm}$,不均匀系数 $C_u=5.33$,曲率系数 $C_c=1.33$,该试验用砂级配良好,其颗粒级配曲线如图 3 所示。

将砂灌入模型槽内,插入注浆管,注浆管底部距离模型槽底200 mm,注浆管范围内的砂样高度为400 mm。试验前3组模型槽中的砂质量均为13.1 kg,平均孔隙比为0.370,平均含水率为11.2%。

1.3 MICP 菌液及胶结液

本试验所用菌种为巴氏芽孢杆菌(美国菌种保藏中心,编号为ATCC 11859),依照培养液配方(表1)配制培养液,并调节pH值为9.0。将细菌从平板接种至培养液中,置于振荡培养箱(30℃,121 r/min)中培养18~24 h,然后测定其OD值(1.0~2.2)和活性。胶结液由0.5 mol/L CaCl₂和1 mol/L 尿素 Urea 配制而成。

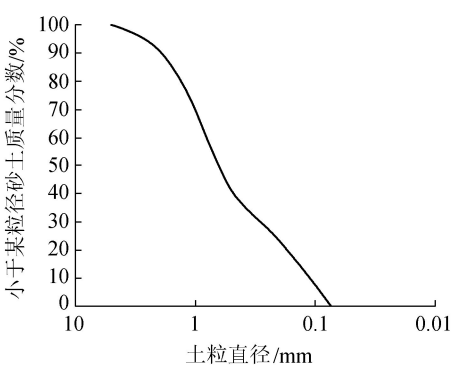


图3 颗粒级配曲线
Fig.3 Distribution curve of sand particles

表1 细菌培养液配方
Table 1 Formula of the bacterial culture medium

化学物质	消毒方式	摩尔质量/(g·mol ⁻¹)	用量/(g·L ⁻¹)
酵母提取物(Yeast extract)	高压蒸汽灭菌		20.000
氯化铵(NH ₄ Cl)	高压蒸汽灭菌	53.49	10.000
硫酸锰(MnSO ₄ ·H ₂ O)		169.01	0.010
氯化镍(NiCl·H ₂ O)		129.60	0.024
尿素(Urea)	过滤	60.06	10.000

2 试验方法

2.1 注浆过程

采用分步注浆法分别将菌液和胶结液通过注浆管注入砂土中,即灌入1次菌液后灌入2次胶结液。先将菌液通过注浆管灌入砂土中,静止4 h后用蠕动泵将相同体积的胶结液从注浆管内灌入,静置4 h后再进行第二次胶结液灌入,然后静置。每24 h进行一次上述的灌注过程,直至试样堵塞无法灌注为止。菌液和胶结液用量如表2所示。3组试验的注浆过程分别耗时14 d左右。

表2 菌液和胶结液用量

Table 2 Dosage of the bacteria and cementing liquid

砂柱编号	菌液用量/L	胶结液用量/L
A	6.5	12.0
B	8.0	15.5
C	9.0	17.0

2.2 测试项目

注浆结束后形成砂柱,将砂柱取出后进行无侧限抗压强度试验及碳酸钙含量的测定。如图4所示,取出砂柱时,试样底部约100 mm高的砂样不成型。注浆砂柱试样最终形成一个高400 mm、直径12 mm的圆柱体砂柱。

2.2.1 无侧限抗压强度

为了比较3组试验的加固效果,对加固后的砂样进行不同部位的无侧限抗压强度试验。先将砂柱试样从上至下切割成块,确保切割后的砂样高度一致,砂样表面平整。砂样切割示意如图5所示。每块试样均为



图4 砂柱 A
Fig.4 Sand column A

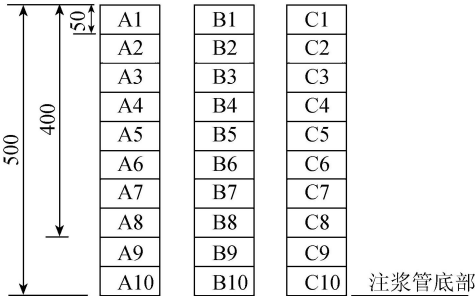


图5 试样切分示意图(单位:mm)
Fig.5 Sample segmentation (units:mm)

高 50 mm、直径 12 mm 的圆柱体。将切割后的砂样按照 GB/T 50123—1999《土工试验方法标准》进行无侧限抗压强度试验。

2.2.2 碳酸钙含量

测量加固后试样中的碳酸钙含量,可反映 MICP 过程中菌液和胶结液的反应情况及砂样加固效果。取固化后的砂样,将其烘干后放入烧杯中,砂样和烧杯的总质量记为 W_1 ,烧杯的质量记为 W_2 。向烧杯中加入足量稀盐酸浸泡 1 h,用蒸馏水洗净后重新放入烘箱中干燥,烘干后砂样和烧杯的总质量记为 W_3 。

碳酸钙含量 M_{CaCO_3} 即为试样中碳酸钙的质量 ($W_1 - W_2$) 与试样总质量 ($W_3 - W_2$) 的比值。

$$M_{CaCO_3} = \frac{W_1 - W_2}{W_3 - W_2}$$

(1)

根据 M_{CaCO_3} 的分布,可以研究菌液流动的途径及与胶结液反应的区域,并建立起与强度之间的关系。

3 试验结果与分析

3.1 强度比较

如图 5 所示切分试样,测得固化后砂柱各个部分的无侧限抗压强度如表 3 及图 6 所示。

表 3 砂柱无侧限抗压强度

Table 3 Column strength

砂样编号	强度/kPa	砂样编号	强度/kPa	砂样编号	强度/kPa
A1	627	B1	1 095	C1	1 493
A2	496	B2	810	C2	1 240
A3	696	B3	936	C3	1 380
A4	808	B4	1 180	C4	1 390
A5	910	B5	1 350	C5	1 836
A6	1 010	B6	1 210	C6	1 310
A7	851	B7	912	C7	987
A8	298	B8	392	C8	423

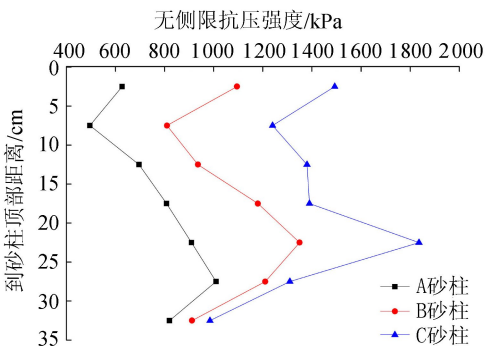


图 6 强度曲线

Fig. 6 Variation curve of strength with depth

可以看出,注浆管最下端的 A8、B8、C8 砂样试块的强度明显偏低,应是由于该砂样位于注浆管末端、胶结液容易逸出所致,因此在讨论砂柱强度均匀性时将其剔除。根据表 3 所示的 A、B、C 砂柱强度值(A1 ~ A7, B1 ~ B7, C1 ~ C7)分别算出平均相对偏差分别是 16.0%、12.9%、10.8%,变异系数分别为 21.1%、16.7%、17.3%,可以得出在同一砂柱试样注浆管加固区域内,各个位置的无侧限抗压强度相差不明显,尤其是 C 砂柱,强度分布均匀。通过分析试验过程,作者认为相对于不变的小孔密度,设置不同密度的注浆小孔能够使碳酸钙在砂土中均匀分布,达到均匀加固试样的效果。

从图 6 可以看出,总体上 C 砂柱的强度最大,B 砂柱强度次之,A 砂柱强度最小,A、B、C 砂柱各个位置平均强度为 1 376.57 kPa、1 070.43 kPa、771.14 kPa。通过对比数据可以得出,C 柱强度大约是 A 柱强度的 2 倍,出现 C 砂柱与 A 砂柱强度相差较大的现象的主要原因是各个模型菌液的消耗量和砂体胶结程度的不同。C 砂柱的注浆小孔设置更为合理,生成的碳酸钙量更多,砂体间能够胶结得更充分,表现为砂体强度最高。

从图 6 中还发现 3 个砂柱试样强度变化规律为:从 A1 试样到 A2 试样强度呈下降趋势,然后逐渐增大,到 A5 试样强度达到最大值,然后强度再逐渐降低,B、C 砂柱呈现相似规律。出现 A1 试样到 A2 试样强度下降的现象是因为砂柱内砂颗粒间以及注浆管小孔的堵塞。从强度图中得出,相比较于 A 砂柱和 B 砂柱,C 砂柱中的 C5 试样强度显著增大。C5 试样正好位于注浆管管孔分布最多的区域,管孔越多,渗流途径越多,砂颗粒间填充越多。从侧面也给出了注浆方法的启示,在实际工程中,对特定土层的修复可以通过控制管孔的分布来实现。

由于砂土下部应力比上部应力大,下部注浆管孔分布应比上部多,这说明了本试验研究注浆管管孔分布的合理性。通过改变注浆管管孔的分布,可以提高试样的强度,从而提高注浆加固效果。

3.2 碳酸钙含量比较

水平轴数字代表砂柱试样位置,如水平轴 1 表示 A1、B1、C1 试样碳酸钙测点位置。计算 A、B、C 砂柱总

的碳酸钙含量平均值,绘制曲线如图 7 所示。

图 7 反映出大体上碳酸钙含量平均值随着砂柱深度的增加稍微降低,但是碳酸钙含量变化量很小(8%~13%),可视碳酸钙均匀分布。笔者从灌浆的速度以及土体堵塞的角度分析出现这种结果可能的原因:注浆开始时,蠕动泵注浆速度快,越靠近底部的注浆孔液体压强越大,液体更多是从注浆管底部慢慢地通过小孔渗透到土体中;随着注浆的进行,对注浆管下半部分土体来说,靠近注浆管区域砂颗粒孔隙最先被填充堵塞,阻碍了液体流向模型槽槽壁附近土体,也阻碍了液体向注浆管底部流动,注浆速度变慢,CaCO₃的生成主要发生在注浆管上半部分土体。所以,上半部土体的注浆时间最长,产生的 CaCO₃ 也较多。

通过比较图 6 与图 7,可以看出试样中 CaCO₃ 的含量与试样强度之间的关系。A 砂柱总体的 CaCO₃ 含量较低,其试样强度也低于 B、C 试样。从总体上看,A、B、C 试样的 CaCO₃ 含量相差并不大,但是 3 个试样之间的强度相差较大。这是因为土样强度不仅仅取决于 CaCO₃ 含量,跟 CaCO₃ 在土体中的分布及均匀性也有关系。

分析 CaCO₃ 的含量可以看出,试验所使用的三维注浆方法可以使加固土体内生成的 CaCO₃ 含量分布均匀,有利于强度增长,进一步说明该注浆方法具有应用于实际工程的可能行。

3.3 菌液用量对比分析

将各砂柱菌液和胶结液用量汇总如表 2 所示。试验中 A 砂柱在第 9 次注入菌液后堵塞无法继续注入,即第 11 d 时菌液已经渗透极慢或者无法渗透流出,此时砂孔隙被完全堵住;B 砂柱在第 12 次注入后无法继续注入,即第 21 d 时无法进行注入;C 砂柱在第 14 次注入菌液后无法继续注入,即第 26 d 时砂孔隙完全被堵住。

A 砂柱菌液消耗量最少,B 砂柱最先堵住,C 砂柱的菌液消耗量最多。由此说明,通过设置注浆管管孔的分布(密集程度),可以延缓砂柱堵塞的情况。注浆量的提高,使得土体砂粒与菌液的接触更加均匀,土体砂颗粒能够胶结更充分,从而提高加固效果。

4 结 论

- a. 采用向土体中插入注浆管这种注浆方法能形成完整的且强度较高的固化砂柱,且形成的砂柱上下强度比较均匀,表明实际工程可以应用该注浆方法对土体进行加固或者对某特定土层进行修复。
- b. 通过合理设置注浆管管孔的分布(密集程度),可以延缓砂柱堵塞的情况,使得浆液的注入量得到提高,土体砂颗粒能够胶结更充分,土体强度会得到大幅度的提升。
- c. 采用三维 MICP 注浆方法固化砂柱,其碳酸钙分布随着砂柱深度的增加略有降低。

参考文献:

[1] 徐伟,刘斯宏,王柳江,等. 真空预压联合电渗法加固软基的固结方程[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2011, 39(2): 169-175. (XU Wei,LIU Sihong,WANG Liujiang, et al. Analytical theory of soft ground consolidation under vacuum preloading combined with electro-osmosis [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2011, 39(2):169-175. (in Chinese))

[2] 吴跃东,吴鸿昇,罗如平,等. 考虑真空度衰减及涂抹区渗透系数变化的真空预压固结解析解[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2016, 44(2):122-128. (WU Yuedong, WU Hongsheng, LUO Ruping, et al. Analytical solutions for vacuum preloading consolidation considering vacuum degree attenuation and change of permeability coefficient in smear zones [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2016, 44(2):122-128. (in Chinese))

[3] 卜凡波,王海建,吴国强,等. 真空预压联合导电排水板电渗法加固海相吹填土现场试验[J]. 水利水电科技进展,2017,37(4):63-69. (BU Fanbo,WANG Haijian,WU Guoqiang, et al. Field tests on marine dredger fill reinforced by vacuum preloading combined with electro-osmosis using electric vertical drains[J]. Advances in Science and Technology of Water

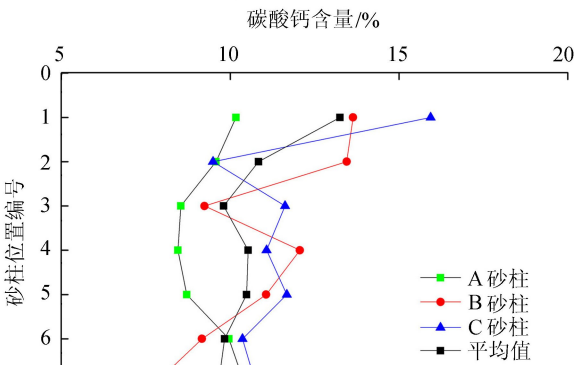


图 7 A、B、C 试样碳酸钙含量及其平均值
Fig.7 Content of CaCO₃ for sample A, B, and C, and their average value

- Resources, 2017, 37(4): 63-69. (in Chinese))
- [4] DEJONG J T, MORTENSEN B M, MARTINEZ B C, et al. Bio-mediated soil improvement[J]. Ecological Engineering, 2010, 36(2): 197-210.
- [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 Chunxiang, WANG Anhui, WANG Xin. Advances of soil improvement with bio-grouting[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(6): 1537-1548. (in Chinese))
- [6] 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 Xiaohui, 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))
- [7] 彭劫, 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 Jie, HE Xiang, LIU Zhiming, et al. Experimental research on influence of low temperature on MICP-treated soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(10): 1769-1774. (in Chinese))
- [8] 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 Hanlong, et al. Research advances in biogeotechnologies[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(4): 643-653. (in Chinese))
- [9] CASTANIER S, Le METAYER-LEVREL G, PERTHUISOT J P. Ca-carbonates precipitation and limestone genesis: the microbiogeologist point of view[J]. Sedimentary Geology, 1999, 126(1): 9-23.
- [10] HAMMES F, VERSTRAETE W. Key roles of pH and calcium metabolism in microbial carbonate precipitation[J]. Reviews in Environmental Science and Biotechnology, 2002, 1(1): 3-7.
- [11] WHIFFIN V S. Microbial CaCO_3 precipitation for the production of biocement[D]. Western Australia: Murdoch University, 2004.
- [12] 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.
- [13] DE MUYNCK W, DE BELIE N, VERSTRAETE W. Microbial carbonate precipitation in construction materials: a review[J]. Ecological Engineering, 2010, 36(2): 118-136.
- [14] LU Wangjie, QIAN Chunxing, WANG Ruixing. Study on soil solidification based on microbiological precipitation of CaCO_3 [J]. Science China Technological Sciences, 2010, 53(9): 2372-2377.
- [15] AL-THAWADI S. High strength in-situ biocementation of soil by calcite precipitating locally isolated ureolytic bacteria[D]. Perth: Murdoch University, 2008.
- [16] 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.
- [17] CHENG L, CORD-RUWISCH R. In situ soil cementation with ureolytic bacteria by surface percolation [J]. Ecological Engineering, 2012, 42: 64-72.
- [18] CHENG L, CORD-RUWISCH R, SHAHIN M A. Cementation of sand soil by microbially induced calcite precipitation at various degrees of saturation[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2013, 50(1): 81-90.
- [19] SOON N W, LEE L M, KHUN T C, et al. Improvements in engineering properties of soils through microbial-induced calcite precipitation[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2013, 17(4): 718-728.
- [20] ZHAO Qian, LI Lin, LI Chi, et al. 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): 04014094.
- [21] VAN PAASSEN L A, HARKES M P, VAN ZWIETEN G A, et al. Scale up of BioGrout: a biological ground reinforcement method[C]//Proceedings of the 17th international conference on soil mechanics and geotechnical engineering. London: Lansdale IOS Press, 2009: 2328-2333.
- [22] LI Bing. Geotechnical properties of biocement treated soils[D]. Singapore: Nanyang Technological University, 2014.
- [23] VAN PAASSEN L A, GHOSE R, VAN DER LINDEN T J M, et al. Quantifying biomediated ground improvement by ureolysis: large-scale biogROUT experiment[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, 136(12): 1721-1728.

(收稿日期: 2018-04-13 编辑: 张志琴)