doi:10.11918/j.issn.0367-6234.2016.12.014

可液化砂土微生物处置试验

韩智光,程晓辉

(清华大学 土木工程系,北京 100084)

摘 要: 为科学评价实验室试样尺度下 MICP 对可液化砂土的加固效果,采用监测营养盐注浆过程中压力变化和铵根离子量变化方法,比较试样尺度放大和注浆流速变化条件下可液化砂土的刚度和渗透性差异.试验结果表明:以巴氏芽孢八叠球菌为菌液、乙酸钙和尿素为营养盐,采用间歇式注浆方式制备固化砂土试样,注浆过程中试样内部压力变化和铵根离子变化能够有效表征可液化砂土的 MICP 加固效果;试样尺度放大时,依据面积比设计注浆流速,灌浆压力显著降低,试样成矿均匀性显著提高.监测试样压力变化和铵根离子变化,是研究可液化砂土微生物处置效果的简单和非破坏性试验方法.MICP 应用实践中,随着试样尺度的放大,需要兼顾刚度、成矿均匀性和注浆流速之间的平衡.

关键词: 液化砂土;MICP;P 波;S 波;压强;氨根离子
中图分类号: TU41 **文献标志码**: A **文章编号**: 0367-6234(2016)12-0103-05

An experimental study of microorganism's treatment on liquefiable sands

HAN Zhiguang, CHENG Xiaohui

(Civil Engineering Department, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: To evaluate the sand consolidation effect of MICP under the condition of the laboratory, the stiffness and permeability of the liquefied sand samples of different size under different grouting flow velocity were analyzed by monitoring the change of internal pressure and the amount of ammonium ion in the process of the grouting of nutrient salt. Sporosarcina pasteurii was selected to produce bacteria liquid, with nutritive salts, such as calcium acetate and urea. The intermittent grouting method was applied to produce solidified sand samples. Results show that the MICP modification effect can be effectively characterized with the variation of internal pressure and the concentration of ammonium during grouting. When grouting velocity is designed according to the area ratio, the grouting pressure is significantly lower down and mineralization uniformity is significantly improved along with the sample size increasing. Monitoring the change of the pressure and the amount of ammonium ion is a simple and non-destructive method for the study of the effect of the microbial treatment of liquefied sand soil. In the application of MICP, the design of grouting should consider both rigidity and mineralization uniformity when the sample size is enlarged.

Keywords: liquefiable sands; MICP; P wave; S wave; pressure; ammonium (NH_4^+)

MICP 技术(microbial induced carbonate precipitation),作为一种新型的微生物加固方法,可对土体进行改良与改性,在封堵防漏与胶结加固等工程上已经得到很好的应用[1].特别是面对重大地震诱发的土体液化灾害事件,该技术旨在降低渗透性、减缓饱和的无粘性土壤流动性,无论在宏观实验或工程应用上都显得非常必要[2].

MICP 对液化土壤改性的结果表现为降低土体的渗透性和提高土体强度两方面.环境适宜条件下,MICP 可以使试样的渗透性降低 2~3 个数量级,提高抗剪强度约 50%[2].其解释之一是微生物诱导的碳酸钙沉积通过影响液化砂土的孔隙率改变土体的渗透性和刚度等力学性质[3-7],并认为,砂土相对密度和孔隙比是解释"由于液化砂土阻抗不同而导致试验结果差异"的关键因素[8].

目前,MICP 技术应用中,多以巴氏芽胞八叠球菌(sporosarcina pasteurii)为主,并且在实验室试样尺度的试验模拟研究中普遍关注的是 MICP 对刚度改性结果,甚少关注改性过程中微生物成矿均匀性及其对渗透性和刚度变化关系,尽管人们通过调控灌浆速率达到了提高土体强度、降低土体渗透性和孔隙率的目的[9],通过控制巴氏芽孢八叠球菌的反应浓度和灌浆速率达到渗透性平缓降低的效果[10],

收稿日期: 2015-05-06
基金项目: 科技基础性工作专项资助项目(2014FY110600)
作者简介: 韩智光(1985—)男,博士研究生;
程晓辉(1971—)男,副教授,博士生导师
通信作者: 韩智光,hanzhiguang01@163.com

以及采用分步灌注巴氏芽孢八叠球菌提高了土体碳酸钙分布的均匀性[11].脲酶水解尿素($CO(NH_2)_2$)过程产生的铵根离子导致了微生物环境 pH 值增加[12],但基于铵根离子压力以及波速变化表征液化砂土渗透性和刚度的研究鲜见报道.不仅如此,MICP 在岩土工程领域具有广泛的应用前景,人们已经意识到,微生物注浆过程中连续观测土体渗透性和灌浆压力变化的重要性.尽管目前多采用离心机实验解决了宏观尺度的相关问题[12-16],但在实验室试样尺度上如何解决好土体改性的均匀性以及连续参数化表征等实验方法尚需不断完善.

本文以饱和液化砂土为试验材料,采用 $Ca(CH_3COO)_2$ 为营养盐,通过对巴氏芽孢八叠球菌灌浆过程中渗滤液铵根离子和试样内部压力变化的连续观测,结合超声仪测定的 P 波波速和 S 波波速,探讨 MICP 对于液化砂土改性效果.

1 试验材料与研究方法

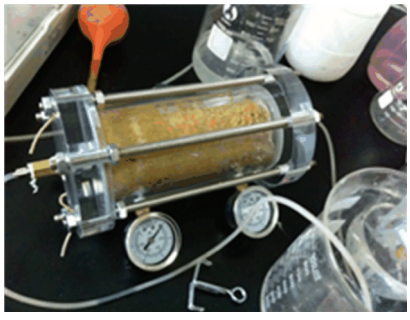
1.1 试验材料与砂土试样制备

本文选取的砂土材料,平均粒径 $d_{50}=0.212$ mm,比重 $G_s=2.61$,不均匀系数 $C_u=1.655$,最大和最小堆积密度分别为 1.593 g/cm^3 和 1.362 g/cm^3.该试验用砂属于级配不良细砂($C_u<5$,$C_c<1$),由棱角形颗粒及次圆形颗粒组成,属于易液化砂.

砂土试样制备方法采用砂雨法进行,其相对密实度为 30%.备置好的试样,干砂的密度控制在 1.424 g/cm^3.试样制备的模具分为标准注射器和有机玻璃圆柱体.以标准注射器为骨架的试样(本文称其为 SS),直径为 2.88 cm,长度为 9.79 cm,在试样两端各备有一个注浆入口和一个出口;以有机玻璃圆柱体为骨架的试样(图 1),直径 5.40 cm,长度 13.00 cm,依据试样两端的注浆入口和出口数为 1 个或 4 个,本文称其为 BS1 或 BS4.

图 1(a)示出的是有机玻璃为骨架的砂土试样(BS1 或 BS4).有机玻璃圆柱体的两端由法兰盘连接,法兰盘中部设有注浆入口和出口.每个圆柱体配有 3 块液压表,其中 2 块对称安装在圆柱体的侧壁上(间距 10.00 cm,毗邻注浆入口的称为上表,毗邻出口的称为下表),用以监测注浆过程中试样内部压力的变化,藉此表达微生物成矿不均匀性导致的渗透性差异,本文称其为位置水头压力;另 1 块连接在试样注浆入口和蠕动泵之间,用以监测注浆压力的变化,本文称其为源头压力.

注浆流速选择:SS 试样,采用 1.0 mL/min,该速率是参考清华大学程晓辉副教授研究团队研究结果—即该流速下试样强度与成矿效果均较好.BS1 和 BS4 试样,因其横截面积较 SS 试样高约 3.4 倍,为了模拟研究试样尺度放大后 MICP 改性效果,本文选择 BS1 的注浆流速与 SS 相同,而 BS4 的流速放大 3.4 倍(依据尺度放大决定,以确保达西流速与小试样一致).图 1(b)示出的是 BS1 和 BS4 不同注浆强度的系统示意图.



(a) 有机玻璃骨架的试样



(b) 具有不同注浆强度的试样

图 1 试验用 BS1 试样(附压力表)示意

Fig.1 Schematic diagram of BS1 test specimen (with pressure gauge)

1.2 液化砂土试样的 MICP 灌浆方法

菌液备制:利用购自美国菌种保藏中心(ATCC)的巴氏芽孢八叠球菌(编号 11859),并进行亚硝基弧(NTG)诱变,培养液采用 ATCCT 推荐的 #1376培养液.

菌液使用前对其 OD_{600} 及脲酶活性进行测定,在每轮灌浆之前分别使用摇床培养菌液.本项研究中,试验制备的菌液的生物量 OD_{600} 平均值为 2.485,平均脲酶活性为 2.62 mS/min,室内温度为 22.65 ℃.试样灌浆菌液采用细菌培养液与等体积固定液(25 mM/L $CaCl_2$)的混合液,菌液注入量按砂土孔隙体积的 1.2 倍设计.

营养盐备制:按单次注入营养盐量设计,采用 0.5 mol/L的钙盐($Ca(CH_3COO)_2$)和相同浓度的尿素混合液为营养盐,按试样孔隙体积的 2 倍和 10 倍设计钙盐注入量(本文相应地称其为低强试样 L-S 和中强试样 M-S),中强和低强试样各进行 3 组平行试验.

灌浆步骤:首先将采用砂雨法制备好的砂土试样经蠕动泵注入的蒸馏水进行充分饱和 24 h,以减少砂土中离子及杂质对实验过程的影响.然后,采用

间歇式注浆方式完成 MICP 改性过程，即(1)选择试样的一侧为注浆入口(本文称其为正向注浆过程)，在注入菌液固定液的混合液之后，再灌注营养盐.待完成每一次灌注菌液或营养盐动作之后，每一步均需静置 12 h；完成正向注浆过程需要灌注菌液(加固定液)和营养盐各 2 次.(2)与正向注浆过程相反，选择试样的另一端为注浆入口(本文称其为反向注浆过程)，重复(1)的步骤，即完成一个完整的 MICP 改性过程.从试样两端依次灌浆的目的，就是尽可能保证液化砂土颗粒之间碳酸钙填充和胶凝效果的均匀性.

1.3　研究方法

1.3.1　NH_4^+测定

连续收集微生物和营养盐注浆过程中流经试样的渗滤液体，采用 SmartChem140 流动分析仪的靛酚蓝比色法测定 NH_4^+离子量(mg · L^{-1})，用于指征微生物影响土壤改性过程的指标.液体样品采集后及时进行−20 ℃低温保存.

1.3.2　试样力学特性检测

本文用于描述 MICP 对液化砂土改性的力学参数分别是 P 波波速和 S 波波速和试样渗透系数.由于介质物理参数(杨氏模量和剪切模量)与岩土体弹性波波速的 2 次方成正比，且因 P 波波速受水体影响大，故在 MICP 对液化砂土改性中多关注 S 波波速，即用 S 波表征试样抗剪性能或刚度.本文是采用中国科学院物理所颗粒物理实验室的超声测试仪(ULT−100)测定试样 P 波和 S 波波速的.砂土试样的渗透系数，则是通过测定灌注菌液和营养盐过程中流经试样的液体量、内外液压差实现的.

2　试验结果与讨论

2.1　试样的尺度和注浆速率对液化砂土力学特性影响

2.1.1　不同尺度和灌浆速率下的 P 波和 S 波比较

表 1 给出的是试样 SS、BS1 和 BS4 在不同注浆速率条件下的 P 波和 S 波测定结果.比较试样 SS 和 BS1，可以看出，在相同注浆速率下(1 mL/min)，试样在做尺度放大后，P 波波速锐减.表观看，在试验过程中，SS 和 BS1 自第一次灌注营养盐以后，渗透系数急剧下降，致使第二次营养盐注浆无法完成；并且发现在试样拆模之后，试样内的碳酸钙沉积非常不均匀，通常在试样的两端形成一层坚硬的壳层，拆模时常出现断裂现象，导致 S 波波速测定难以完成.比较试样 BS1 和 BS4，BS4 的 P 波波速却因注浆速率的增加而减小，但此时 BS4 可以顺利完成注浆全过程，且拆模之后试样内碳酸钙沉积很均匀，试样两端没有明显的成壳现象，甚少发生断裂现象，也可测得 S 波参数.

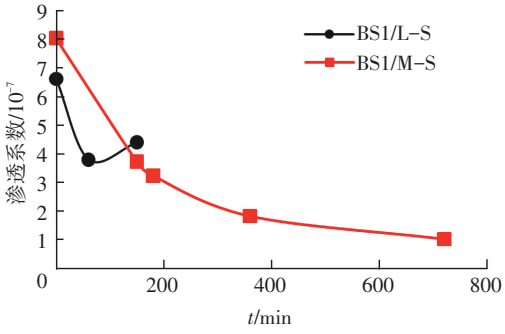
表 1　100 kPa 下，$Ca(CH_3COO)_2$处理的砂土试样超声波速测定结果

Tab.1　Ultrasonic velocity results of sand samples treated by $Ca(CH_3COO)_2$ under 100 kPa

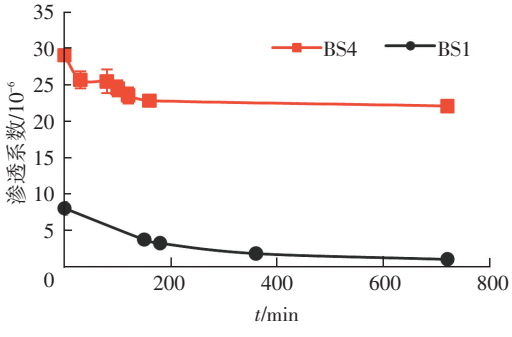
砂土试样	注浆营养盐速率/(mL · min^{-1})	L−S		M−S	
		P 波/(m · s^{-1})	S 波/(m · s^{-1})	P 波/(m · s^{-1})	S 波/(m · s^{-1})
SS	1.0	1 038±79	—	1 643±118	—
BS1	1.0	564±164	—	575±175	—
BS4	3.4	401±16	255±16	542±21	263±13

2.1.2　MICP 对不同液化砂土试样渗透性的影响

图 2 示出的是营养盐灌注过程中试样渗透率变化.其中图 2(a)分别是 BS1 试样在 L−S 和 M−S 条件下灌注营养盐过程的渗透性变化，图 2(b)分别是 M−S 条件下 BS1 和 BS4 渗透性变化.



(a) BS1 试样在 L−S 和 M−S 处理下的渗透系数



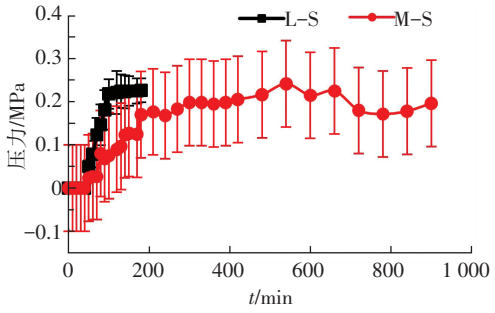
(b) 试样 BS1 和 BS4 在 M−S 处理下的渗透系数

图 2　营养盐灌注过程中砂土试样的渗透性

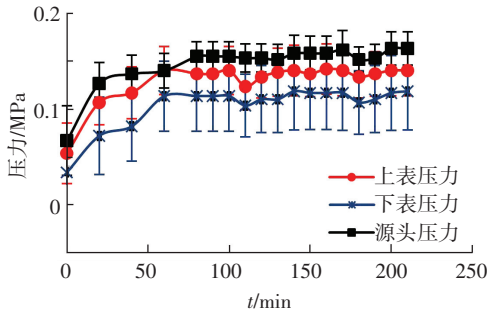
Fig.2　Permeability of sand samples during nutrient salt grouting

2.2　营养盐和菌液灌注过程压力的变化

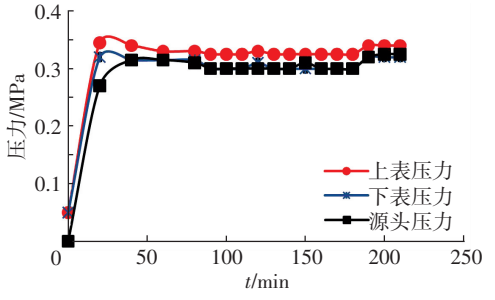
图 3 示出了试样的尺度变化和注浆流速变化对成矿过程的影响.结果显示，BS1 采用与 SS 相同的注浆速率下，在第一次灌注营养盐过程中源头压力表就有所反应，第二次灌注菌液和营养盐过程中源头压力表和位置压力表均有示数(图 4 示，竖线为方差).而对于 BS4 试样，在维持注浆速率为3.4 mL/min时，源头或位置水头的压力示数几乎为 0.



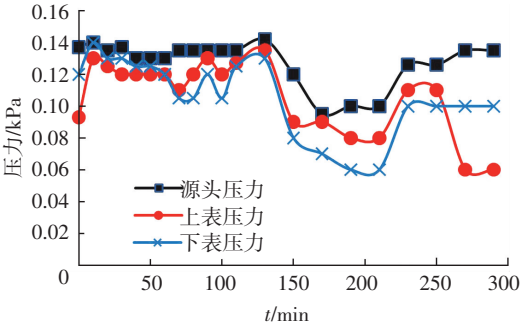
(a) BS1 试样第一次注营养盐过程源头压力变化



(b1) L-S 处理的 BS1 试样第二次注菌液过程中源头和位置(上表和下表)压力变化



(b2) M-S 处理的 BS1 试样第二次注菌液过程中源头和位置(上表和下表)压力变化



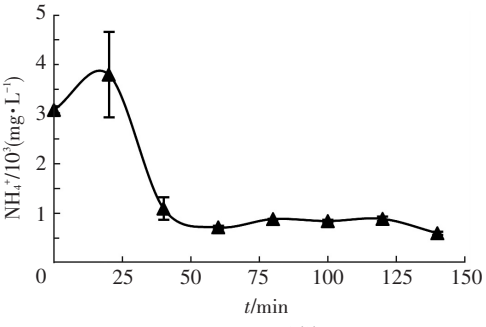
(c) L-S 处理的 BS1 试样灌注第二次菌液过程中源头和位置(上表和下表)压力变化

图 3　注浆过程中砂土试样内外压力变化

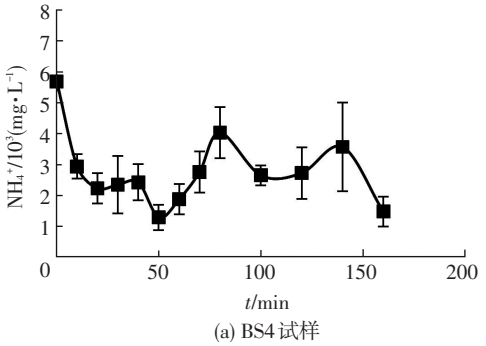
Fig.3　Variation of internal and external pressure of sand samples in the process of grouting

2.3　营养盐和菌液灌注过程中 NH_4^+ 变化特征

试验测得营养盐和菌液灌注过程 NH_4^+ 离子呈复杂的衰减变化(图 4).M-S 处理下,BS1 试样的 NH_4^+ 变化在灌注营养盐的初期(30 min)内反映剧烈,BS4 试样则在灌注营养盐的整个过程中呈平缓的起伏变化,且平均量要明显高于 BS1 试样.



(a) BS1 试样



(a) BS4 试样

图 4　M-S 砂土试样营养盐灌浆下 NH_4^+ 变化

Fig.4　Variation of NH_4^+ during nutrient salt grouting in M-S sand sample

MICP 之所以能够提高液化砂土的剪切刚度和承载力,是与微生物诱导碳酸钙沉积均匀性密切相关的,尤其是在宏观工程实践中备受关注.Tobler 等[11]采用分步灌注方法提高了土体碳酸钙分布的均匀性.本项研究显示,试样的尺度放大后(SS→BS1),相同注浆速率下,在维持 1 个注浆口的前提下,仍无法解决试样内部碳酸钙沉积的均匀性问题.但是,当试样尺度放大后,采用多个注浆口分流且提高注浆速率的方法(BS1→BS4),使得试样碳酸钙沉积的均匀性得到显著改善,尽管会伴随刚度降低的风险.本试验提出的依据试样放大的面积比界定注浆速率方法,解决了试样胶凝的均匀性,并且低强(L-S)试样的剪切刚度和承载力亦可满足工程要求,较中强(M-L)处理比较也降低了 MICP 应用的成本.

MICP 改善液化砂土力学性质也体现在渗透性的降低上.本文的试验结果显示,BS1 砂土试样,碳酸钙沉积与孔隙度的分布存在显著的空间异质性,在营养盐灌注过程中常在注浆入水口和出水口形成一个明显不同于其他部位的坚硬壳层,显著影响菌液和营养盐渗透性,此时试样渗透系数数量级为 10^{-6} ~ 10^{-7},由 NH_4^+ 反映的微生物成矿能力也与位置水头压力呈显著负相关.而 BS4 砂土试样,渗透系数在注浆过程中一直呈平缓的下降趋势,观测到的试样孔隙分布的空间异质性显著降低,试样的渗透系数为 10^{-5}(较 BS1 试样至少提高 1~2 个数量级),上述实验结论与 Qabany 等[10]通过控制巴氏芽孢八

叠球菌反映的灌浆速率达到渗透性平缓降低的效果以及 Tobler 等[11]采用分步灌注巴氏芽孢八叠球菌提高了土体碳酸钙分步的均匀性相一致.

MICP 改性砂土试样的渗透性和强度效果也可以通过注浆过程中 NH_4^+变化及其与压力变化的相关性反映出来.在巴氏芽孢八叠球菌细胞内,钙化成矿代谢途径与质子氧化过程相偶联[17].当基质中有尿素存在时,能启动尿素代谢过程,脲酶使用质子水解尿素产生 NH_4^+和方解石沉淀.理论上方解石产量与 NH_4^+生产量密切相关.图 5 是依据图 3(b2)和图 4(a)建立的 NH_4^+与灌浆压力之间的相关性,两者呈显著负相关($R^2=0.939\ 2$).显然采用 NH_4^+变化可以间接表征 MICP 对液化砂土改性的效果,营养盐灌注过程中,NH_4^+离子量呈平缓波动时,微生物活性稳定,碳酸钙均匀沉积,注浆过程中试样渗透性越平缓,微生物对砂土的力学性质改性效果就越好[18].

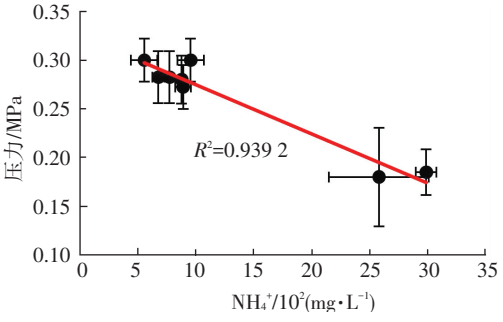


图 5　营养盐灌注过程中 NH_4^+变化与压力变化的相关性

Fig.5　Correlation between NH_4^+ variation and pressure variation during nutrient salt grouting

3　结　论

本文选用 $Ca(CH_3COO)_2$作为钙盐,与相同浓度(mol/L)的尿素混合液为营养盐,按砂土孔隙体积的 2 倍和 10 倍设计钙盐量,均可显著改善液化砂土力学性质.

采用监测注浆过程中试样内部压力和铵根离子,可以有效表征液化砂土的 MICP 改性效果,是一种旨在监测成矿过程的具有非破坏性、简单和便捷性的监测方法.

营养盐灌注过程中,NH_4^+变化呈指数衰减规律.实验室条件下进行试样尺度放大时,依据试样的面积比例设计的注浆速率,可以提高液化砂土渗透性,灌浆压力显著降低且试样成矿均匀性却显著提高.

试样的尺度放大时,需要兼顾刚度、成矿均匀性以及注浆成本之间的平衡.

致谢:本项研究得到国家科技基础性工作专项经费的支持.研究过程中得到清华大学程晓辉副教授的悉心指导,实验过程中得到中国科学院沈阳应用生态研究所郑俊强副研究员和各位实验员许多帮助,对他们的支持和帮助表示感谢.

参考文献

[1] 张优龙,杨坪.微生物改善土体性能研究进展[J].微生物学通报,2014,41(10):2122-2127.
ZHANG Youlong, YANG Ping. Research progress in microorganism improving soil properties[J]. Microbiology China, 2014, 41(10): 2122-2127.

[2] MARTINEZ B C, DEJONG J T, GINN T R, et al. Experimental optimization of microbial-induced carbonate precipitation for soil improvement[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013, 139(4): 587.

[3] HARKER M P, VAN PAASSEN L A, BOOSTER J L, et al. Fixation and distribution of bacterial activity in sand to induce carbonate precipitation for ground reinforcement[J]. Ecological Engineering, 2010, 36(2): 112-117.

[4] MITCHELL A C, PHILLIPS A J, HIEBERT R, et al. Biofilm enhanced geologic sequestration of supercritical CO_2[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2009, 3(1): 90-99.

[5] CHU Jian, STABNIKOV V, IVANOV V. Microbially induced calcium carbonate precipitation on surface or in the bulk of soil[J]. Geomicrobiology Journal, 2012, 29(6): 544-549.

[6] IVANOV V, CHU Jian. Applications of microorganisms to geotechnical engineering for bioclogging and biocementation of soil in situ[J]. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, 2008, 7(2): 139-153.

[7] CHOU Chiungwen, SEAGRENE A, AYDILEK A H, et al. Biocalcification of sand through Ureolysis[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2011, 137: 1179-1189.

[8] POLITO C P, MARTIN Ⅱ J R. A reconciliation of the effects of non-plastic fines on the liquefaction resistance of sands reported in the literature[J]. Earthquake Spectra, 2003, 19(3): 635-651.

[9] VAN PAASSEN L A. Biogrout, ground improvement by microbial induced carbonate precipitation[D]. Delft: Delft University of Technology, 2009.

[10] QABANY A A L, SOGA K. Effect of chemical treatment used in MICP on engineering properties of cemented soils[J]. Geotechnique, 2013, 63(4): 331-339.

[11] TOBLER D J, MACLACHLAN E, PHOENIX V R. Microbially mediated plugging of porous media and the impact of differing injection strategies[J]. Ecological Engineering, 2012, 42: 270-278.

[12] CONNOLLY J, KAUFMAN M, ROTHMAN A, et al. Construction of two ureolytic model organisms for the study of microbially induced calcium carbonate precipitation[J]. Journal of Microbiological Methods, 2013, 94: 290-299.

[13] ZIENKIEWICZ O C, CHANG C T, HINTON E. Non-linear seismic response and liquefaction[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1978, 2(4): 381-404.

[14] ÖZENER P T, ÖZAYDIN K, BERILGEN M M. Investigation of liquefaction and pore water pressure development in layered sands[J]. Bull Earthquake Engineering, 2009, 7: 199-219.

[15] BOULANGER R W, KAMAI R, ZIOTOPOULOU K. Liquefaction induced strength loss and deformation: simulation and design[J]. Bull Earthquake Engineering, 2014, 12: 1107-1128.

[16] KUTTER B L, GAJAN S, MANDA K K, et al. Effects of layer thickness and density on settlement and lateral spreading[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, 130(6): 603-614.

[17] MCCONNAUGHEY T A, WHELAN J F. Calcification generates protons for nutrient and bicarbonate uptake[J]. Earth Science Review, 1997, 42: 95-117.

[18] BANG S S, RAMAKRISHNAN V. Microbiologically-enhanced crack remediation (MECR)[C]//Proceedings of the International Symposium on Industrial Application of Microbial Genomes. Daegu, Korea: [s.n.], 2001: 3-13.

(编辑　赵丽莹)