

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.201904056

胶结液注入轮数和体积对微生物加固粉土的影响*

朱效博, 赵志峰

(南京林业大学土木工程学院, 江苏 南京 210037)

摘要: 通过微生物诱导碳酸钙沉积可以将松散土颗粒胶结成整体从而达到加固目的。胶结液的注入轮数和每轮使用的胶结液体积会影响加固效果,但目前关于这方面的研究还不充分。以海相粉土为处理对象,通过室内试验来研究胶结液的注入轮数和体积对加固效果的影响。改变胶结液注入轮数的试验结果表明:随着注入轮数的增加,试样中沉积生成的碳酸钙逐渐增多,碳酸钙的分布比较均匀,加固后的无侧限抗压强度逐渐提高;但当胶结液的注入达到一定轮数后,强度的增长幅度逐渐减缓。改变每轮胶结液体积用量的试验结果表明:胶结液体积的增加会带来碳酸钙数量的增加和强度的提高,但当胶结液体积从 $1.5V_0$ (孔隙体积)增加至 $2V_0$ 后,效果改善不明显。从钙离子用量与无侧限抗压强度的关系也表明,每轮注入的胶结液体积应选择 $1.5V_0$ 。

关键词: 微生物诱导碳酸钙沉积; 海相粉土; 注入轮数; 胶结液体积

中图分类号: TU447 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)03-0485-06

Influence of Number of Rounds and Volumes of Cementation Solution Injection on Improving Silt by Microbial Method

ZHU Xiaobo, ZHAO Zhifeng

(College of civil engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: The soil can be improved by the microbial induced calcite precipitation method, which cements loose soil particles together. The number of rounds and volumes of cementation solution injection have great influence on the improvement effect. However, this influence is not well understood. The objective of the present study is to study the influence of number of rounds and volumes of cementation solution injection on improving marine silt via a series of laboratory tests. The results of injecting rounds of cementation solution indicate that the amount of precipitated calcite carbonate and unconfined compressive strength both increase with injecting rounds, and the distributions of calcite carbonate are nearly uniform in the treated samples. However, the strength growth slows down when the injecting round reaches a certain number. The results of cementation solution volume of each round indicate that the amount of calcite carbonate and unconfined compressive strength increase with the increase of the volume of cementation solution. Nevertheless, when the volume of each round increases

* 收稿日期:2019-04-22;修回日期:2019-08-05

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51578293)资助

作者简介:朱效博(1996—),男,硕士研究生。主要从事微生物地基处理方面的研究。E-mail:807820484@qq.com

通讯作者:赵志峰(1978—),男,副教授。主要从事生物岩土地基处理、城市地下工程方面的研究。

E-mail:zzf0911@163.com

from $1.5V_v$ (volume of void) to $2V_v$, the improvement is not obvious. From the relationship between the dosage of calcium ion and unconfined compressive strength, it can also be seen that the cementation solution volume of each round should be $1.5V_v$.

Keywords: microbial induced calcite precipitation; marine silt; injecting rounds; volumes of cementation solution

引言

微生物诱导沉积碳酸钙(MICP)技术通过特定微生物分解尿素在土中诱导沉积碳酸钙晶体从而达到胶结松散土颗粒的目的^[1]。该技术受到了越来越多岩土学者的重视,并在过去的十几年间得到了长足的发展^[2-4]。目前MICP技术主要用于加固粒径较大的砂土,对加固方法、加固机理、影响加固效果的因素等内容已开展了不少研究^[5-7]。根据加固机理,在多轮注浆加固方法中,胶结液的注入轮数和每轮的注入体积对加固效果有着直接影响^[8-9]。目前这方面的研究还不充分,而关于胶结液注入轮数和体积对MICP加固粉土或黏性土的研究则更少^[10]。

本文以江苏省东台条子泥吹填工程的海相吹填粉土为研究对象,通过微生物注浆的方法加固该粉土,研究胶结液注入轮数和体积对加固效果的影响,为明确MICP加固粉土的影响因素提供更多的试验数据。

1 试验材料与方法

1.1 菌液和胶结液

菌种为德国菌种中心的巴氏芽孢杆菌,培养液采用该中心推荐的营养液。每升培养液含15 g胰蛋白胨、5 g大豆蛋白胨、5 g分析纯NaCl、20 g尿素。用无菌移液枪吸取50 mL已培养24小时的菌液于离心管内,离心后去除上清液,菌种按体积比1:800的比例接种至培养液后,置于培养箱中,以130 r/min的转速,30 °C的温度培养至菌液OD₆₀₀值为1.2左右备用。

胶结液为氯化钙CaCl₂和尿素的混合溶液(摩尔浓度比1:1)。由于胶结液浓度过高会影响微生物的工作性能,过低又会影响碳酸钙的沉积量^[11],

本次试验选取了两个胶结液浓度:0.5 mol/L(0.5 M)和0.75 mol/L(0.75 M)。

1.2 待加固粉土

土样取自江苏省盐城市东台条子泥吹填工程,属于海相吹填粉土。对粉土进行了基本物理指标的测定:该土的相对密度为2.7,干密度为1.46 g/cm³,塑限为14%,液限为21.8%,渗透系数为 6.6×10^{-5} cm/s。根据颗粒级配试验,土颗粒分布集中在区间0.005~0.25 mm;不均匀系数C_u=1.97,曲率系数C_c=1.12,级配不良。

1.3 注浆装置与注浆方法

采用注浆的方法对粉土进行加固,模具为内径30 mm、高120 mm的注射器,如图1所示。制样时称取试验用土81.0 g,均分为3份后采用分层击实法制样,控制试样的高度为80 mm、干密度为1.42 g/cm³左右。采用蠕动泵注浆,注浆速度控制在1 mL/min左右,方向由下至上。

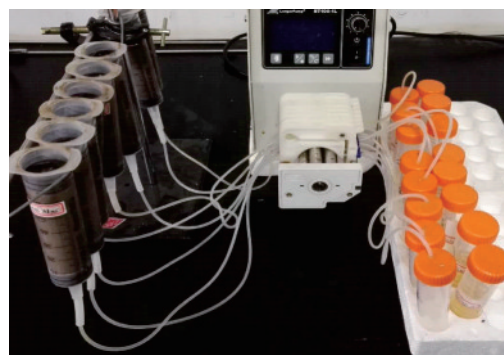


图1 注浆试验装置

Fig.1 Photograph of the device of the injecting test

试验采用单轮注菌然后多轮注入胶结液的注浆方法:首先向试样内注入2倍孔隙体积(V_v)约50 ml的菌液,静置12 h以便让微生物吸附在土颗粒上,然后注入 $2V_v$ 的胶结液;间隔12 h后再注入 $2V_v$ 的胶结液……菌液只注入一轮,胶结液的注入轮数

可以根据需要选取。

1.4 加固效果测定

(1) 无侧限抗压强度

通过广泛使用的无侧限抗压强度试验来评价加固后的试样强度。注浆结束后,静置 24 h 后拆样。将试样从注射器完整取出后两端切削平整,加载速率为 1 mm/min。

(2) 碳酸钙生成百分比

将进行无侧限抗压试验后的土样尽量均分成上中下三部分,然后进行 CaCO_3 生成量的测定。海相粉土本身含有可溶性盐及少量 CaCO_3 ,因此在测定前要对土样进行洗盐操作^[12]。随后利用盐酸溶解法测定土样中的 CaCO_3 质量,将处理后试样的质量减去处理前试样的质量及原土中可溶盐的质量,即得到 MICP 反应生成的 CaCO_3 质量,将其除以不含可溶盐的干土质量就得到 CaCO_3 生成百分比。

1.5 试验方案

(1) 研究胶结液注入轮数对加固效果的影响。根据选取的胶结液浓度,将每轮胶结液的注入体积固定为 $2V_0$,改变胶结液的注入轮数:6、8、10、12、14 轮。

(2) 研究胶结液注入体积对加固效果的影响。根据选取的胶结液浓度,分别进行 6、10、14 轮注浆,每轮胶结液的注入体积分别为 $1V_0$ 、 $1.5V_0$ 和 $2V_0$ 。

2 胶结液注入轮数对加固效果的影响

2.1 胶结液注入轮数对 CaCO_3 生成情况的影响

当胶结液体积不变($2V_0$)时,随着胶结液注入轮数增加,理论上生成的 CaCO_3 应该增多。如图 2 所示,当胶结液浓度为 0.5 M(M 代表 mol/L) 和 0.75 M 时,生成的 CaCO_3 百分比逐渐增加,从 6 轮时的 11% 左右增加至 14 轮时的 18%。胶结液为 0.75 M 时 CaCO_3 的变化规律相近,从 6 轮时的 14% 左右增加至 14 轮时的 21%。由于浓度更高,所以相同轮数时 0.75 M 胶结液生成的 CaCO_3 更多。

图 3 为两种浓度胶结液在不同注入轮数时的 CaCO_3 分布情况。总体来看,试样中 CaCO_3 的分布

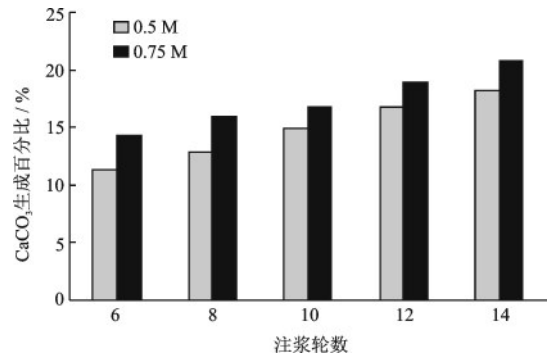


图 2 胶结液注入轮数与 CaCO_3 生成百分比的关系
Fig.2 Relationship between the number of rounds of cementation solution injection and calcite ratio

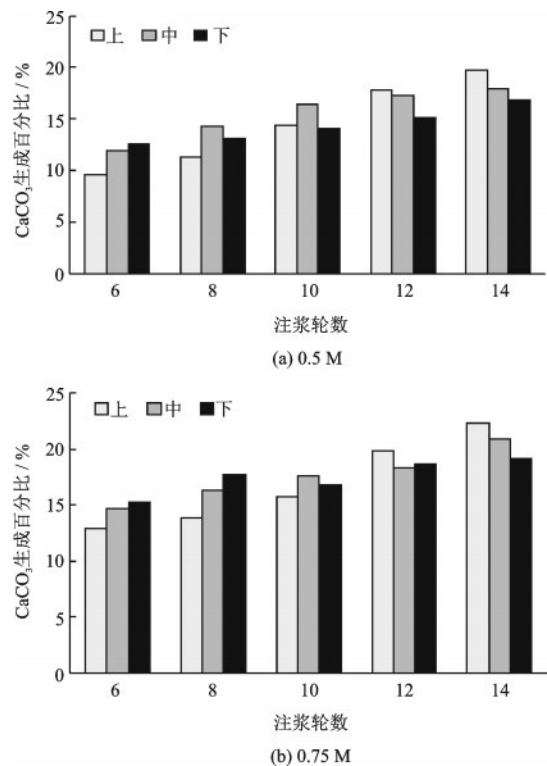


图 3 不同胶结液注入轮数时的 CaCO_3 分布
Fig.3 Relationship between injecting rounds of cementation solution and calcite precipitation distribution

比较均匀。当胶结液注入轮数不超过 10 轮时,试样中部及下部沉积生成的 CaCO_3 较多;轮数超过 10 轮后,上部和中部的 CaCO_3 含量超过下部。这是由于试验中的注浆方向是从下向上,因此靠近注浆口的下部容易先发生沉积反应^[13],所以在初期沉积的 CaCO_3 相对较多。随着注浆轮数的增加,试样各部位受到的胶结液补给趋同,而靠近注浆口的下部可能由于受到液体流动的影响,沉积生成的 CaCO_3 反而增长较慢。

图4为0.75 M胶结液注浆后的试样微观形貌。可以看出处理后的粉土中有CaCO₃晶体形成,部分晶体附着在土颗粒表面,部分沉积在土颗粒之间,起到了胶结作用,且晶体尺寸超过30 μm。同时可以看出尺寸较大的CaCO₃晶体有明显的生长台阶。

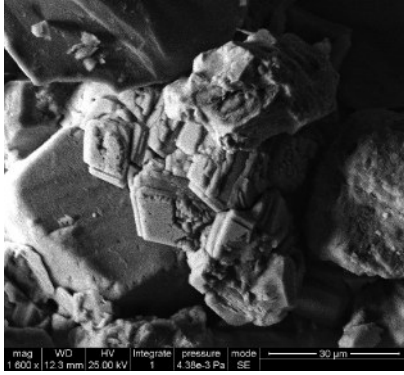


图4 处理后粉土的微观形貌

Fig.4 Microscopic morphology of silt after treatment

2.2 胶结液注入轮数对无侧限抗压强度的影响

不同胶结液注入轮数时的无侧限抗压强度整理如图5所示。微生物注浆对粉土起到了良好的加固效果,处理后试样的强度相比处理前的不足100 kPa有了大幅提高。试样的无侧限抗压强度随着注入轮数的增多而提高,胶结液为0.75 M时的强度高于0.5 M,这是由于浓度高的胶结液中含有更多尿素和钙离子。值得注意的是,当轮数超过12轮时,强度的增幅变缓,这说明对胶结液利用率可能在下降。

为了评价不同情况下胶结液的利用效率,对不同浓度胶结液在不同轮数时消耗的钙离子和强度之间的关系进行分析。

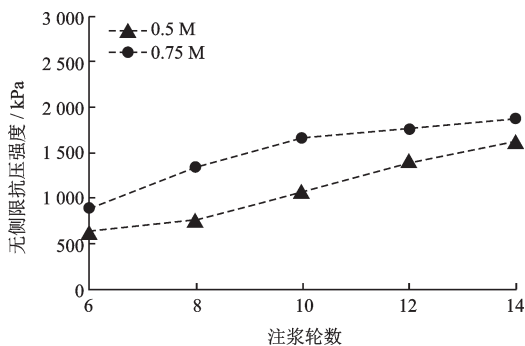


图5 不同胶结液注入轮数时的无侧限抗压强度

Fig.5 Unconfined compressive strength at different injecting rounds of cementation solution

将不同情况下的胶结液浓度(即氯化钙浓度)×每轮使用胶结液的体积×胶结液注入轮数,就得到注入的氯化钙总体积,然后再×氯化钙的分子量,就可以计算出使用的钙离子用量(单位: mol)。将多轮注入胶结液的钙离子用量和无侧限抗压强度整理如图6所示。从图中可以看出,0.5 M的曲线和0.75 M的曲线在相同钙离子消耗区间上的强度非常接近。而且,随着钙离子消耗量的增多,曲线变得比较平缓,这也说明随着轮数的增多,对胶结液的利用效率在降低。由于两种胶结液浓度在钙离子利用效率上接近,而0.75 M时加固的强度更高,所以在实际操作中胶结液的浓度建议选择0.75 M。

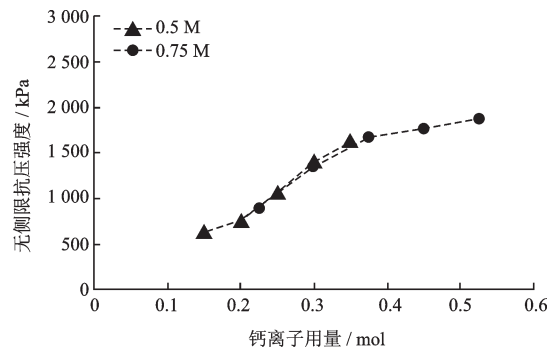


图6 不同胶结液注入轮数时钙离子用量与无侧限抗压强度的关系

Fig.6 Relationship between calcium ion amount and unconfined compressive strength at different injecting rounds of cementation solution

3 胶结液注入体积对加固效果的影响

3.1 胶结液注入体积对CaCO₃生成情况的影响

选用0.5 M和0.75 M两个浓度的胶结液对试样进行注浆,每轮胶结液的注入体积分别为1V₀、1.5V₀和2V₀,注浆轮数为6、10、14轮。从图7可以看出,胶结液浓度为0.5 M时,增加每轮胶结液的体积会使沉积生成的CaCO₃逐渐增多,说明增加每轮胶结液用量对加固有积极作用。胶结液浓度为0.75 M时,胶结液体积从1.5V₀增至2V₀后,CaCO₃的增加幅度随着注浆轮数而减缓。

已有研究表明,虽然MICP的加固效果很大程度上取决于沉积生成的CaCO₃数量,但并不是唯一

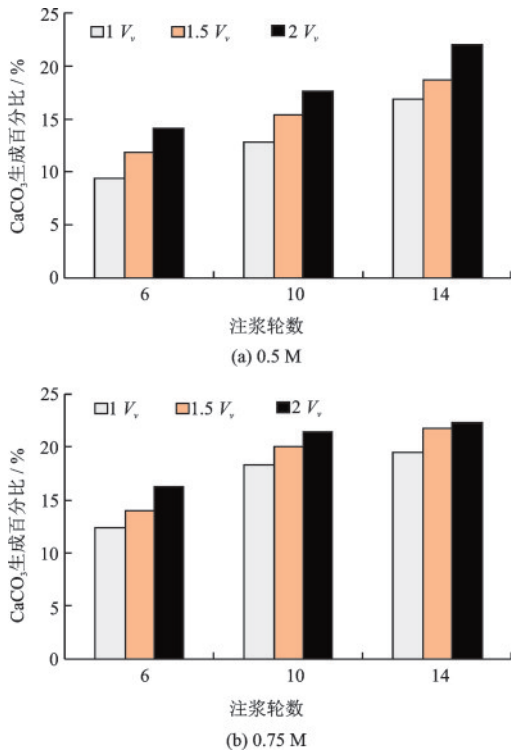


图7 不同胶结液注入体积时的CaCO₃生成百分比
Fig.7 Calcite precipitation ratio at different injecting volume of cementation solution

相关;CaCO₃沉积的位置和大小等也可能会对加固的强度产生影响^[14-15]。研究每轮胶结液的体积是为了确定出有效加固粉土的合理参数,因此接下来分析胶结液体积对加固强度的影响。

3.2 胶结液浓度对加固强度的影响

图8为多轮注入胶结液时,采用不同体积加固的无侧限抗压峰值强度。当注浆轮数相同时,加固后的强度随着每轮胶结液体积用量的增加而提高(采用0.5 M、1V₀的胶结液处理6轮后,试样难以完整拆样,因此强度未测)。当胶结液浓度为0.75 M时,胶结液体积从1.5V₀增加至2V₀时的强度增幅低于从1V₀增加至1.5V₀。

从图8可以看出,不同胶结液注入体积、轮数以及浓度对加固后的强度都存在影响。为了分析胶结液体积对强度的影响,将图8中每个试样加固过程中使用的钙离子总量和强度分别整理出来,如图9所示。当每轮胶结液体积用量为1V₀时(图9(a)),两个胶结液浓度下的无侧限抗压强度与钙离子用量呈幂函数关系。当每轮胶结液体积为1.5V₀和2V₀时(图9(b,c)),无侧限抗压强度与钙离子用量

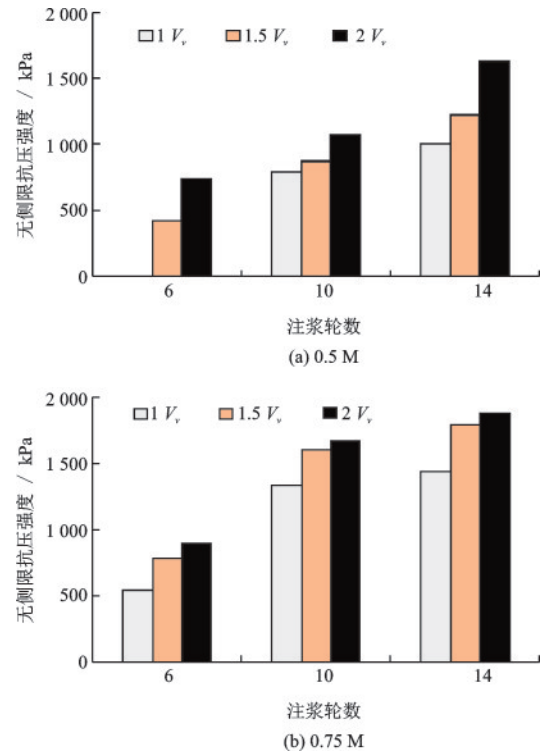


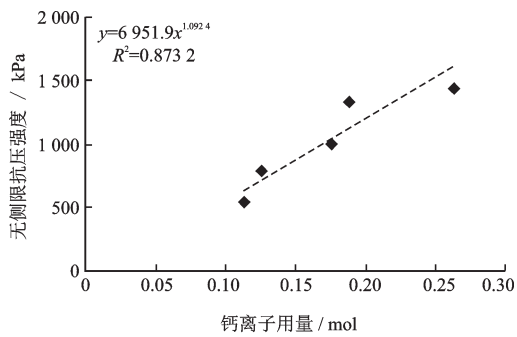
图8 不同胶结液注入体积时的无侧限抗压强度
Fig.8 Unconfined compressive strength at different injecting volume of cementation solution

均呈现出幂函数关系,而且相关系数更高。从曲线斜率或拟合方程($y=6195.6x^{1.1911}$)不难看出,每轮胶结液体积为1.5V₀时,无侧限强度随钙离子用量增长的最快,说明胶结液的利用效率最高;而每轮胶结液体积为2V₀时,无侧限强度随钙离子用量增长的较慢($y=3531.8x^{0.8428}$),此时胶结液的利用效率较低。因此,在多轮注入胶结液时,每轮胶结液的注入体积应选择1.5V₀。

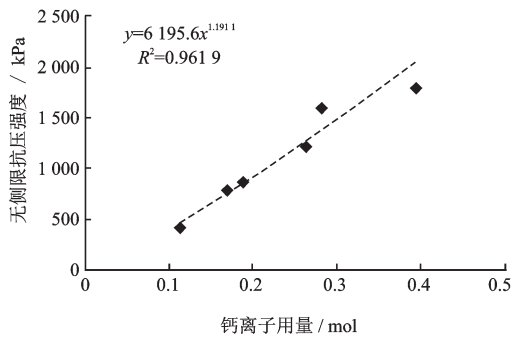
4 结 论

(1)采用注入一次菌液多轮注入胶结液的方法可以对该粉土进行有效加固。随着胶结液注入轮数的增加,试样中沉积生成的碳酸钙逐渐增多,碳酸钙的分布比较均匀。加固后的无侧限抗压强度也随着注入轮数而提高,但当胶结液的注入达到一定轮数后,强度的增长幅度逐渐减缓。

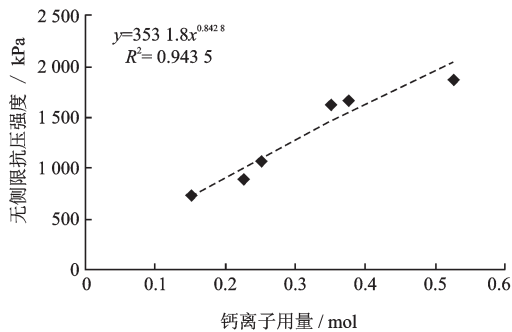
(2)每轮胶结液体积的增加会带来碳酸钙数量的增加和强度的提高,但改善幅度并不相同。当胶结液体积从1V₀增加至1.5V₀时,效果比较明显;但再增加至2V₀,效果不明显。从钙离子用量与无侧限抗压强度的关系也可以看出,胶结液体积为



(a) 1V₀



(b) 1.5V₀



(c) 2V₀

图9 不同胶结液注入体积时钙离子用量与无侧限抗压强度的关系

Fig.9 Relationship between calcium ion amount and unconfined compressive strength at different injecting volume of cementation solution

1.5V₀时的加固效率较高。

(3)合理地选择注浆轮数和每轮胶结液的体积有助于充分利用胶结液材料。当胶结液注入轮数不超过14轮、每轮胶结液体积为1.5V₀时,加固效果较好。

参考文献:

[1] De Jong J T, Fritzes M B, Nüsslein K. Microbially induced cementation to control sand response to undrained shear[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, 132(11): 1381-1392.

[2] Mujah D, Shahin M, Cheng L. State-of-the-art review of biocementation by microbially induced calcite precipitation (MICP) for soil stabilization[J]. Geomicrobiology Journal, 2016, 34(6): 524-537.

[3] 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 improvement using microbial induced calcite precipitation (MICP) [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2014. (in Chinese)

[4] Al Qabany A, Soga K. Effect of chemical treatment used in MICP on engineering properties of cemented soils[J]. Géotechnique, 2013, 63(4): 331-339.

[5] Martinez B C, De Jong J T, Ginn T R, et al. Experiment optimization of micro-induced carbonate precipitation for soil improvement[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013, 139(4): 587-598.

[6] Al Qabany A, Soga K, Santamarina C. Factors affecting efficiency of microbially induced calcite precipitation [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2012, 138(8): 992-1001.

[7] Feng K, Montoya B M. Influence of confinement and cementation level on the behavior of microbial-induced calcite precipitated sands under monotonic drained loading [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2016, 142(1): 04015057.

[8] Rowshanbakht K, Khamsehchian M, Sajedi R H, et al. Effect of injected bacterial suspension volume and relative density on carbonate precipitation resulting from microbial treatment[J]. Ecological Engineering, 2016, 89: 49-55.

[9] 王绪民, 郭伟, 余飞, 等. 营养盐浓度对胶结砂试样物理力学特性试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(增2): 363-368.

Wang X M, Guo W, Yu F, et al. Experimental study of effect of nutrient concentration on physico-mechanical properties of cemented sand [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(Sup 2): 363-368. (in Chinese)

[10] 许朝阳, 张莉, 周健. 微生物改性对粉土某些特性的影响[J]. 土木建筑与环境工程, 2009, 31(2): 80-84.

Xu Zh Y, Zhang L, Zhou J. Effect of microorganisms on some engineering properties of silt [J]. Journal of Civil Architectural and Environmental Engineering, 2009, 31(2): 80-84. (in Chinese)

(本文责编: 赵霞)

(下转第 548 页)