

养护温度和冻融循环等对微生物胶结试样强度的影响^{*}

曹 晨, 赵志峰, 王 玮

(南京林业大学土木工程学院, 江苏 南京 210037)

摘要: 目前在研究影响微生物胶结土体时, 着重于研究加固方法及影响加固效果的因素, 缺少对养护条件以及处理后试样耐久性的探讨。本文以海相吹填粉土为处理对象, 选用巴氏芽孢杆菌为试验用菌, 采用两阶段注浆的方法进行加固, 研究不同养护温度、冻融循环以及干湿循环对加固效果的影响。试验结果表明: (1) 采用注浆方法可以有效对该粉土进行胶结加固。在排除水分的影响后, 高、低温养护温度对试样的无侧限抗压强度以及 CaCO_3 生成百分比均无明显影响; (2) 冻融循环对试样无侧限抗压强度的削弱主要发生在第1次冻融循环中, 然后随着冻融循环次数的增加, 试样的加固效果无明显变化。冻融循环后的试样烘干后, 其无侧限抗压强度有明显提高, 但仍低于未经冻融循环的试样; (3) 干湿循环次数对试样强度的影响较小。烘干试样和饱和试样的强度有较大差别, 说明试样的含水状态对强度有明显影响。因此在进行强度试验前, 应明确试样的含水状态以便于评价加固效果。

关键词: 微生物胶结; 海相粉土; 养护温度; 冻融循环

中图分类号: TU447 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)05-1046-07

Influence of Curing Temperature and Freeze-thaw Cycle on Reinforcement Strength by Microbial Cementation

CAO Chen, ZHAO Zhifeng, WANG Wei

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

Abstract: The current studies on soil improvement by microbial cementation focus on treatment methods and various variables that have influence on the reinforcement effect. Nevertheless, there are a lack of research on curing condition and durability of treated samples. In this study, the microbial cementation was applied to treat marine silt, and *Bacillus pasteurus* was selected as the microorganism. The two-phase injection method was adopted to reinforce the samples and the influence of curing temperature, freeze-thaw cycles and wet-dry cycles on reinforcement effect was studied. The following results are derived from the experiments: (1) The silt could be cemented with the applied injection method. After eliminating the interference of water, high and low temperatures have no significant ef-

^{*} 收稿日期: 2020-05-16; 修回日期: 2020-08-05

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51578293)、江苏省高校自然科学基金(15KJB580008)资助

作者简介: 曹晨(1997—), 男, 硕士。主要从事微生物岩土加固技术方面的研究。E-mail: 649702695@qq.com

通讯作者: 赵志峰(1978—), 男, 副教授, 博士。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

fect on the unconfined compressive strength of the sample and the overall percentage of CaCO_3 . (2) The decline of the unconfined compressive strength by the freeze-thaw cycles mainly occurs in the first freeze-thaw cycle, afterwards with the increased number of freeze-thaw cycles, the reinforcement effect of the sample has no significant variation. The strength of the samples experienced freeze-thaw cycles has a significant increase when the samples are dried but still lower than samples without freeze-thaw cycles. (3) The wet-dry cycles have little effect on the strength of treated samples. Significant strength variation exists in dry and saturated samples, which suggests the water condition of sample has dramatic impact on reinforcement effect. Therefore, the water condition should be specified before strength testing for the purpose of effect evaluation.

Keywords: microbial cementation; marine silt; curing temperature; freeze-thaw cycle

引 言

近年来,通过微生物诱导碳酸钙沉积来胶结加固土体受到了学术界的重视,相继开展了一系列的试验研究。作为新兴的加固技术,研究重点主要集中在寻找合适的加固方法、优化加固参数、提高加固效果等方面,例如:注浆、表面入渗和拌入法的提出^[1-3]、菌液浓度、胶结液浓度等因素对加固效果的影响^[4-6],不同种类土体的加固效果等^[7-8]。

根据已有研究成果,目前已经可以对砂土、粉土等进行有效加固并达到一定的强度。大多数试验在室内进行,试样在室温条件下得到加固和养护。当养护环境例如温度发生变化时,可能会对试样强度产生影响。部分学者认识到温度对试样加固效果会产生影响,在试验中会采取不同温度处理试样^[9-10],但对于温度的取值不统一,也未深入研究加固效果随养护时间的变化。

有学者研究了含水率对胶结试样加固效果的影响^[11]。不少学者在微生物处理后对试样进行了干燥养护然后进行强度测试,包括室温风干和烘箱烘干,研究表明温度对加固强度具有影响^[12]。由此可见,研究者们已经逐渐认识到养护环境对试样强度和耐久性的影响。但目前关于加固后试样强度及耐久性方面的研究尚不充分。

基于以上背景,本文以海相粉土为加固对象,在前期已对该粉土进行有效加固的工作基础上^[13],通过室内试验研究试样在不同温度下的强度,以及冻融循环、干湿循环对试样加固效果的影响。

1 试验材料与方法

1.1 菌种和试验用菌培养

试验菌种为巴氏芽孢杆菌(*Sporosarcina pasteurii*),初代菌种(代号为DSM33)购买自德国菌种保藏中心。采用高压蒸汽灭菌处理后的营养液培养菌种。

从锥形瓶中取配好的菌液放入离心管,以4 000 r/min的转速离心20 min,将底部沉淀的菌体接种进营养液,其中菌体和营养液的体积比为1:800。然后放置在30℃、频率为130 r/min的振动培养床中培养,控制菌液浓度 OD_{600} 值在1.2左右。酶活性测定上,使用DDSJ-318型的电导率仪,将1.1 mol/L的尿素溶液和菌液各取90 mL与10 mL、通过测定5 min内电导率平均变化值来评估菌液的酶活性。所用菌液的酶活性控制在5.5 mS/cm/min左右。

1.2 试验用土

土样取自江苏省盐城市吹填工程,属于海相吹填粉土。对粉土进行了基本物理指标的测定^[14]:相对密度 $d_s=2.7$,含水率 $w=27.1\%$,干密度 $\rho_d=1.46 \text{ g/cm}^3$,塑限 $w_p=13.2\%$,液限 $w_L=21.2\%$,渗透系数 $k=6.6 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ 。

根据颗粒级配试验,该粉土粒径主要集中在0.005~0.25 mm;不均匀系数 $C_u=1.99$,曲率系数 $C_c=1.11$,级配不良。

1.3 胶结液

胶结液选择摩尔比例为 1:1 的氯化钙(CaCl_2)和尿素混合溶液,浓度为 0.75 mol/L(0.75M)。

1.4 制样和注浆方法

将烘干后的粉土以 2 mm 筛网过筛,按照四分法取于针筒中。分 3 层(每层约 27.0 g)击实后,试样高 81 mm。为防止注浆时土体渗漏,上下两端均垫有四层纱布和带小孔的橡胶塞头。

注浆时,首先将注入去离子水使其饱和,然后采用两阶段注浆法:先注入 2 倍孔隙体积(V_v)菌液(约 50 mL);静置 12 h 后,注入少量去离子水清洗注浆软管和注浆口残留的细菌以防止堵塞。随后间断注入 10 轮胶结液,每轮胶结液注入体积为 1.5 V_v ,时间间隔为 12 h。加固结束后注入过量去离子水冲洗试样,以去除土中的可溶性盐及未反应的胶结液等杂质,并静置 24 h。

1.5 试样的拆模

注浆结束的试样从铁架台上拆除,用酒精灯加热刀具,先切除针筒的注射端,然后将针筒两侧均匀划开。制样前针筒内侧涂抹了凡士林,拆样时可保证试样的完整性。从拆样的结果来看(图 1),经过注浆各试样得到了有效的胶结,整体性较好。



图 1 拆样后的试样形态

Fig.1 Sample shape after disassembling

1.6 加固效果测定

(1) 无侧限抗压强度

测定前在无侧限抗压仪上下两端面涂抹凡士林。将试样两端削平(图 2)并保证长径比大于 2:1。加载速率为 1 mm/min。

(2) 碳酸钙生成百分比

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



图 2 削平后的试样

Fig.2 Flattened specimen

可溶盐的质量,即得到反应生成的 CaCO_3 质量,将其除以干土质量得到 CaCO_3 生成百分比^[13]。

1.7 试验方案

(1) 养护温度的影响

已有研究中不同学者采用不同的养护温度,例如室温 25 °C、烘箱 60 °C、烘箱 105 °C 等;而在研究低温对胶结加固效果的影响时,温度最低取 -20 °C。为了评价温度对加固效果的影响,本次试验中考虑了两种极端条件:105 °C 和 -20 °C。将干燥试样放置于 105 °C 的烘箱和 -20 °C 的环境箱中养护 1、3、5、7、9 d,以研究高、低温对加固效果的影响。

(2) 冻融循环的影响

一个冻融循环时间为 24 h:先将饱和试样置于 -20 °C 的环境箱中冷冻 12 h,然后取出在室温 25 °C 下融化 12 h。冻融循环次数分别取 1、3、5、7、9 次,研究试样经历不同冻融循环次数后的加固效果。

(3) 干湿循环的影响

干湿循环一次的时长为 24 h:拆模后的试样在 105 °C 的烘箱中养护 12 h,然后将试样取出浸泡在水中 12 h;干湿循环次数选择 1、3、5、7、9 次。

2 养护温度对试样加固强度的影响

将注浆完成的试样置于 105 °C 的烘箱养护 1、3、5、7、9 d,研究加固效果随着高温养护时间的变化,如图 3 所示。为了排除水分的干扰,试样在养护时均处于干燥状态。各试样碳酸钙含量比较接近,基本在 12% 左右,表明采用的微生物注浆方法加固效果较好。试样在高温养护下的强度变化很小,无侧

限抗压强度在 3 000 kPa 左右,强度最低的试样与强度最高强度仅相差 3.2%。这表明高温养护时间对试样的无侧限抗压强度和碳酸钙含量的影响很小。

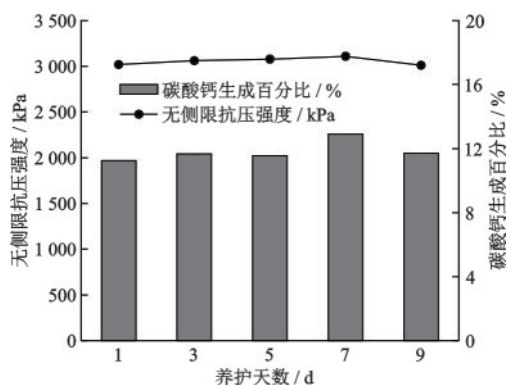


图3 高温养护试样加固效果随养护时间的变化

Fig.3 Variation of reinforcement effect with curing time under high temperature curing condition

将注浆后的试样置于 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的环境箱中同样养护 1、3、5、7、9 d。为了排除水分变化的干扰,在低温养护前先对试样进行烘干处理。加固效果随低温养护时间的变化绘制如图 4 所示。低温养护 7 d 试样的无侧限抗压强度仅比养护 1 d 试样增大了 1.65%,说明干燥状态下,试样的无侧限抗压强度基本不受养护天数的影响。

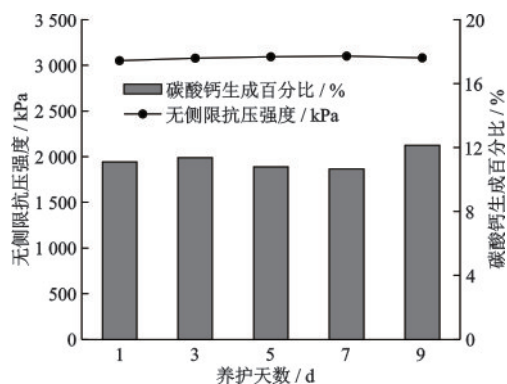


图4 低温养护试样的加固效果随养护时间的变化

Fig.4 Variation of reinforcement effect with curing time under low temperature curing condition

将 $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ 高温和 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 低温养护的结果进行对比,两组试样的无侧限抗压强度相差很小($<3\%$)。这说明当试样处于干燥状态或含水率不变时,试样在养护过程中的温度对加固效果没有明显影响。

3 冻融循环对试样加固强度的影响

对注浆后的试样拆模后进行冻融循环,各试样在冻融循环养护中均处于饱和状态。冻融过程中,为防止试样水分流失,使用密封袋密封试样。达到指定的冻融次数后,将试样取出进行无侧限抗压强度等测试,试验结果整理如图 5 所示。各试样的无侧限抗压强度随着冻融循环次数增加未发生明显变化,各试样的 CaCO_3 百分比也基本一致。对比冻融循环中和高温及低温养护试样的强度可以发现,尽管不同冻融循环次数下的强度比较稳定,但强度值对比图 3、图 4 降低了很多。这表明,冻融循环及饱和状态对试样的强度可能产生影响。

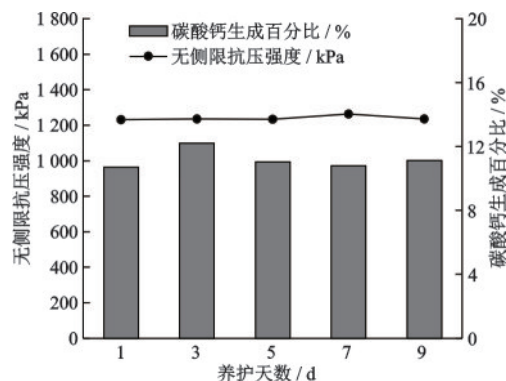


图5 冻融循环试样的加固效果随循环次数的变化

Fig.5 Variation of reinforcement effect with the number of freeze-thaw cycles

为分析冻融循环对加固效果的影响,将冻融循环 1 次试样与未经过冻融循环的饱和试样进行对比(表 1)。冻融循环 1 次试样的无侧限抗压强度比饱和试样减小了 20.1%。有研究分析其原因为,孔隙水在冻融过程中凝固成冰,土壤颗粒周围的拉应力导致微裂纹的形成和增长^[15]。结合强度随冻融循环次数的试验结果(图 5)可知,冻融循环对试样强度的削弱主要发生在第 1 次冻融,循环次数的增加对强度的影响很小,这和国外学者的研究结论一致^[16]。

为进一步分析烘干对强度的影响,将经过冻融循环后的试样进行烘干,各试样的强度和碳酸钙含量如图 6 所示。对比图 5 可看出,烘干后试样的强度有明显提高,不同冻融循环次数下的强度基本

表1 冻融循环1次对加固效果的影响

Table 1 Influence of one freeze thaw cycle on the reinforcement effect

	冻融循环1次	饱和试样
无侧限抗压强度/kPa	1 232	1 542
碳酸钙生成百分比/%	10.7	10.7

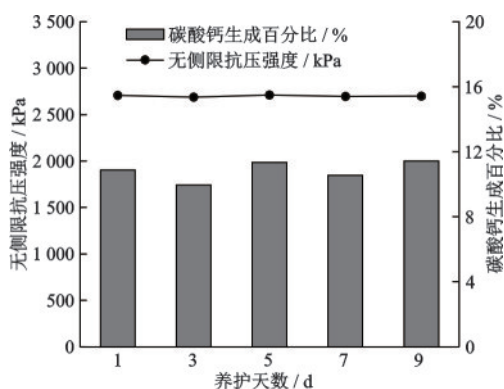


图6 冻融循环后烘干试样的加固效果随循环次数的变化
Fig.6 Variation of reinforcement effect of dried samples after different freeze-thaw cycles

相同。

试验结果表明,经历冻融循环后试样是否烘干对强度具有明显的影响,冻融循环对试样的强度有所降低。为了分析冻融循环对不同含水状态试样强度的影响,分别进行了烘干试样和饱和试样的对比。图7(a)中冻融循环的强度是在试样完成指定冻融循环次数后烘干测得,未经冻融循环的强度是将试样在烘箱中养护不同时间后量测。图7(b)中两组试样均一直处于饱和状态。由于1次冻融循环历时1 d,进行对比的试样养护的天数与冻融循环次数相同,故图7中的横坐标为冻融循环次数(冻融试样)或养护天数(未冻融试样)。

如图7(a)所示,经历冻融循环后烘干强度低于未经冻融的烘干样。养护天数对烘干试样强度的影响很小。经历不同冻融循环次数试样的强度为2 694~2 711 kPa,养护不同天数的烘干试样强度为3 020~3 112 kPa。冻融循环使无侧限抗压强度下降了约12%。

如图7(b)所示,饱和状态下(浸泡)试样的强度随养护天数的增加略有下降,浸泡5 d的强度比1 d降低了约10%,之后强度基本不变。冻融循环试样的强度低于未经历冻融的试样。冻融循环1次的试样比浸泡相同时间的试样强度下降的最多,达到

20%。冻融循环5次以上试样的强度相比浸泡5 d的试样,强度下降了约8%。

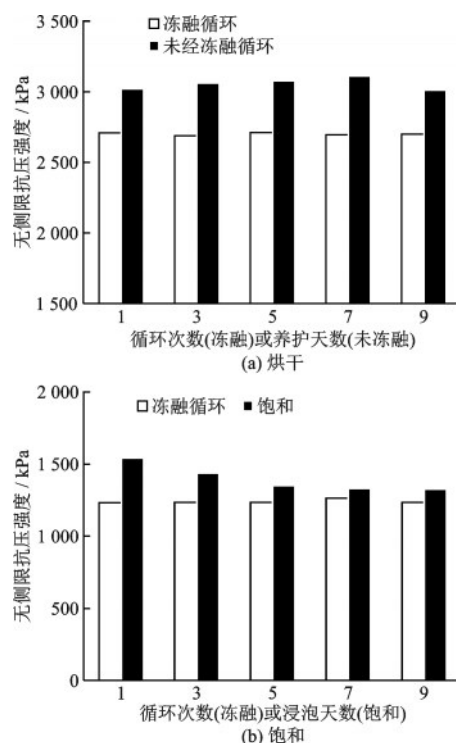


图7 冻融循环和未经冻融循环试样的强度对比

Fig.7 Comparison of reinforcement effect of samples with and without freeze-thaw cycles

图7的对比表明,尽管试样在强度测试前的养护总时长和含水情况相同(烘干或饱和),但试样经历冻融循环后烘干的强度低于一直处于烘干状态的试样;经历冻融循环后饱和的强度也低于未经冻融循环的试样。冻融循环对试样强度会造成一定的削弱。

4 干湿循环对试样加固强度的影响

通过前述试验发现,试样处于干燥状态时进行强度测试的结果明显高于饱和状态。这表明试样的含水情况对强度具有较大影响。下面进行干湿循环对强度的影响试验,如图8所示。

如图8(a)所示,干湿循环次数的增加对试样无侧限抗压强度的影响较小。干湿循环5次相比干湿循环1次的强度减小约7%;而干湿循环9次的强度仅比循环5次的减小了不足2%,这与部分学者的研究结果接近^[17]。干湿循环后未经烘干时测的强度在1 600 kPa左右。将经历干湿循环的试样烘干后

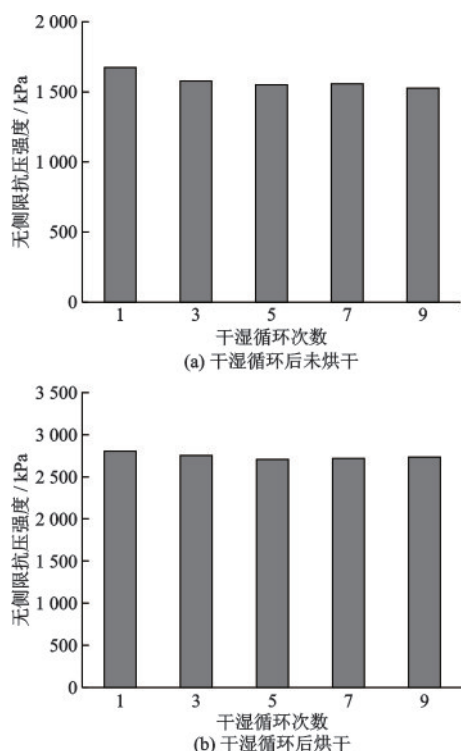


图8 干湿循环试样强度随循环次数的变化

Fig.8 Reinforcement effect after dry-wet cycles

再进行强度测试,各试样的无侧限抗压强度明显高于未烘干试样。如图8(b)所示,烘干后的无侧限抗压强度基本保持在2700 kPa左右,基本不受干湿循环次数的影响。

干湿循环次数对试样强度的影响较小,但处于干湿交替环境中试样的强度和一直处于饱和状态下的试样是否有所差别,尚不得而知。将处于干湿循环下的试样同一直浸泡在水中的饱和试样进行了对比。图9为两种条件下试样的强度对比,横坐标为循环次数(针对干湿循环试样)或养护天数(针对浸泡试样)。如图所示,浸泡时间对强度存在一定的不利影响。当试样浸泡时间从1 d增加至5 d时,强度下降了约8%;超过5 d后,强度基本不变。相比浸泡下的饱和试样,经历干湿循环试样的强度更高,但总体来看相差不大。

从一系列试验结果可以看出,试样的养护条件或环境变化对试样的加固强度会造成不同程度的影响。试样在强度测试前的含水状态(是否烘干)对测定的强度值具有明显影响。当试样一直在水中处于饱和状态时,其强度值相对较低。因此,在评价处理后试样的强度或进行加固效果的比较时,应统一试样在测试前的含水状态。

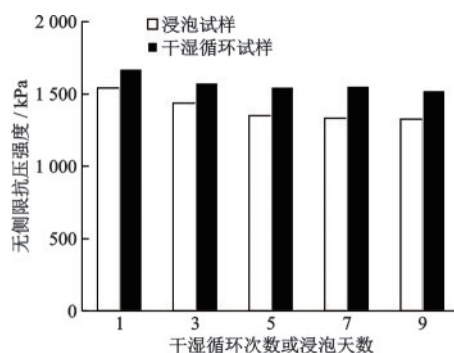


图9 干湿循环和浸泡试样强度的对比

Fig.9 Comparison of strength of samples with dry-wet cycles and immersed samples

5 结 论

依托微生物诱导碳酸钙技术,采用注浆的方法胶结加固粉土,并重点研究养护温度、冻融循环、干湿循环等条件对处理后试样强度的影响。试验结果表明:

(1)在排除水分干扰后,养护温度(105℃和-20℃)对试样的无侧限抗压强度以及 CaCO_3 含量均无明显影响,不同养护天数下的强度基本稳定。

(2)冻融循环次数对试样强度及 CaCO_3 含量的影响不大。与未经冻融循环试样的对比表明,冻融循环对试样的强度有削弱作用,但这种削弱作用主要发生在第1次冻融循环。冻融循环对强度的影响与试样的含水情况有关。

(3)干湿循环次数对试样强度的影响较小。但干湿循环试样的强度高于处于饱和状态的试样(相差约8%)。强度试验前试样的含水状态(烘干或饱和)对试验结果有明显影响,烘干状态下的强度高于饱和状态。因此,在评价加固强度时应明确试样在测试前的含水情况。含水率、湿度等因素对胶结效果的影响将在今后进行更深入的研究。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Al Qabany A, Soga K. Effect of chemical treatment

- used in MICP on engineering properties of cemented soils[J]. *Geotechnique*, 2013, 63(4):331-339.
- [3] 彭邦阳, 赵志峰. 表面入渗法诱导碳酸钙沉积加固海相粉土研究[J]. *林业工程学报*, 2018, 3(5): 136-141.
Peng B Y, Zhao Z F. Improvement of marine silt by microbial induced calcite precipitation by surface percolation [J]. *Journal of Forestry Engineering*, 2018, 3(5): 136-141. (in Chinese)
- [4] 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.
- [5] Cui M J, Zheng J J, Zhang R J, et al. Influence of cementation level on the strength behavior of bio-cemented sand[J]. *Acta Geotechnica*, 2017, 5(12):971-986.
- [6] Rowshanbakht K, Khamsehchiyan 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.
- [7] 邵光辉, 侯敏, 刘鹏. MICP 固化粉土细菌的分布和固定规律研究[J]. *林业工程学报*, 2019, 4(1): 128-134.
Shao G H, Hou M, Liu P. Distribution and fixation characteristics of microorganism in MICP treated silt column [J]. *Journal of Forestry Engineering*, 2019, 4(1): 128-134. (in Chinese)
- [8] Mahawish A, Bouazza A, Gates W P. Effect of particle size distribution on bio-cementation of coarse aggregates [J]. *Acta Geotechnica*, 2018, 13(10): 1019-1025.
- [9] 李凯, 王丽娟, 李娜, 等. 基于微生物成因的加固砂粒技术研究[J]. *水利与建筑工程学报*, 2017, 15(6): 148-152.
Li K, Wang L J, Li N, et al. Research on reinforced sand technology based on microbial genesis[J]. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 2017, 15(6): 148-152. (in Chinese)
- [10] Quiros A, 张帅, 程晓辉. 微生物入渗注浆法加固非饱和砂土的研究[J]. *工业建筑*, 2015, 45(7):28-30,175.
Quiros A, Zhang S, Cheng X H. Study on strengthening unsaturated sand by microbial infiltration grouting [J]. *Industrial Construction*, 2015, 45(7): 28-30, 175. (in Chinese)
- [11] 李捷, 方祥位, 申春妮, 等. 含水率对珊瑚砂微生物固化体力学特性影响研究[J]. *工业建筑*, 2016, 46(12): 93-97.
Li J, Fang X W, Shen C N, et al. Effect of water content on mechanical properties of coral sand microbial solidified body [J]. *Industrial Construction*, 2016, 46(12): 93-97. (in Chinese)
- [12] 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 Y, Feng Q P, Sun Y C. Effects of temperature on soils reinforced by microbial induced calcium carbonate deposition[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 40(6): 1048-1055. (in Chinese)
- [13] 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.
Zhao Z F, Kong F H. Effects of soil environment on microbially induced calcite precipitation in marine silt[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2018, 38(4): 608-614. (in Chinese)
- [14] 土工试验方法标准:GB/T50123—2019[S]. 北京:中国计划出版社, 2019.
- [15] Cheng L, Shahin M, Mujah D. Influence of key environmental conditions on microbially induced cementation for soil stabilization[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2017, 143(1): 04016083.
- [16] Azadi M, Ghayoomi M, Shamskia N, et al. Physical and mechanical properties of reconstructed bio-cemented sand [J]. *Soils and Foundations*, 2017, 57(5): 698-706.
- [17] 徐丹, 唐朝生, 冷挺, 等. 干湿循环对非饱和膨胀土抗剪强度影响的试验研究[J]. *地学前缘*, 2018, 25(1): 286-296.
Xu D, Tang C S, Leng T, et al. Shear strength of unsaturated expansive soil during wetting-drying cycles [J]. *Earth Science Frontiers*, 2018, 25(1): 286-296. (in Chinese)

(本文责编:赵霞)