

DOI: 10.11779/CJGE201806010

温度对微生物诱导碳酸钙沉积加固砂土的影响研究

彭 劼^{1, 2}, 冯清鹏^{1, 2}, 孙益成^{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: 利用尿素水解菌 ATCC 11859, 在 10℃, 20℃, 30℃ 的环境下进行了微生物诱导碳酸钙沉积 (MICP) 水溶液试验、一维砂柱加固试验和细菌活性试验。研究表明, 水溶液试验中, 温度对于 MICP 的影响和反应时间有关, 反应前期, 温度较高的环境下钙离子消耗量较大, 反应一段时间后温度较低的环境下钙离子消耗量较大; 砂柱试验中, 温度较低的环境下加固形成的砂样无侧限抗压强度较大, 碳酸钙含量的检测表明, 环境温度越高, 砂柱中生成的碳酸钙含量越低; 无侧限压缩试验的应力应变关系表明, 相对低温条件下 MICP 处理的砂样在达到峰值强度时能够产生较大的变形; 不同温度下细菌活性试验表明, 细菌活性衰减较快是高温环境下碳酸钙的最终沉积量较小的原因。

关键词: 微生物诱导碳酸钙沉积; 温度; 土体加固

中图分类号: TU41

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2018)06-1048-08

作者简介: 彭 劼(1971-), 男, 湖南衡阳人, 教授, 博士生导师, 主要从事软基处理相关研究。E-mail: peng-jie@hhu.edu.cn。

Influences of temperatures on MICP-treated soils

PENG Jie^{1, 2}, FENG Qing-peng^{1, 2}, SUN Yi-cheng^{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: A series of aqueous tests, one-dimension sand column trials and bacterial activity tests using the ureolytic bacteria ATCC11859 are conducted to investigate the influences of temperatures (10℃, 20℃ and 30℃) on the microbially induced carbonate precipitation (MICP). The results show that in the aqueous tests, the effect of temperatures on the MICP is related to the reaction time; at the early stage, the consumption of calcium ion is much more at the higher temperature environment; after a period of time of the reaction, the consumption of calcium ion is much more at the lower temperature. In the sand column trials, the unconfined compressive strength of the sand samples after consolidation at the lower temperature is greater than that at the higher one, and the results of the calcium carbonate content of the samples show that the content of calcium carbonate in the sand columns is much lower at the higher temperature than that at the lower one. The stress-strain relationship of the unconfined compression tests shows that the sand column treated by MICP in the lower temperature environment can produce a larger deformation when the peak strength is reached. The bacterial activity tests under different temperatures show that the rapid decline in bacterial activity is the reason why the final amount of calcium carbonate is lower at the higher temperature.

Key words: microbially induced carbonate precipitation; temperature; soil improvement

0 引 言

传统的土体加固方法如预压固结、化学灌浆等, 普遍存在工期长、能耗大、费用高等不足, 化学灌浆法中的大多数浆液还对环境有害^[1]。在当前生态环境恶劣、急需整治这一背景下, 微生物诱导碳酸钙沉积 (microbially induced carbonate precipitation, 后文缩写为 MICP) 因其具有能耗低、污染小的优点^[2-6], 并且应用领域较为广泛^[7], 在加固土体、污染物处理等方面日益引起关注。

目前已有的 MICP 加固土体研究主要集中于室温

20℃~30℃下的注浆方式^[8-12]、配方研究^[13-16]、土壤类型^[14, 17-18]、三轴试验下的应力应变行为^[19-21]以及 MICP 对土壤导热系数^[22]的影响、MICP 与纤维的复合效应^[23-24]、MICP 下砂基的动力反应研究^[25-26]、铁基灌浆对液化粉土动力特性的改性研究^[27]等。而 MICP 是一个复杂的生物、物理、化学过程。温度对其有重要的影响。对于生物过程, 温度是微生物重要

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51578214)

收稿日期: 2017-03-23

的生命表征,影响它的生长、繁殖、代谢活动;对于物理过程,温度影响化学物质在液相中的迁移扩散速率,同时也对吸附-解吸产生影响;对于化学过程,温度影响沉淀反应的平衡常数,对化学反应的动力学速率产生影响。目前已有学者进行了有关于温度的研究,Cacchio等^[28]研究了31种不同的能生成碳酸钙沉淀的菌株,发现微生物形成碳酸钙的能力、生成沉淀的程度、形成碳酸钙晶体的类型受到细菌培养温度(4℃, 22℃, 32℃)的影响。Whiffin^[4]研究了温度在15℃~80℃之间脲酶活性的变化趋势,发现脲酶活性在15℃~20℃之间保持稳定,25℃~60℃之间呈线性增长,在70℃左右达到最大值。Zamarreno等^[29]研究了十种淡水细菌在10℃~40℃的液体培养基中产生碳酸钙沉淀的情况,发现生物钙化只发生在有细菌存在且能生长的情况下,碳酸盐沉淀量随着细菌培养基温度和培养时间的增加而增加。温度不仅影响沉淀的质量,也影响沉淀晶体的质量和形态。De Muynck等^[30]观察了尿素水解微生物在不同温度(10℃, 20℃, 28℃, 37℃)时的生长情况。研究了不同温度下试管环境中细菌的尿素水解能力,以及在菌液中浸泡24 h后石灰石试样的尿素水解能力。发现在低温10℃时,培养21 d后,所有菌株均有碳酸钙沉淀生成。*S.pasteurii*在溶液中的尿素水解率在反应1 d后20℃, 28℃, 37℃相差很小,而10℃在反应3 d时开始追上20℃, 28℃, 37℃,甚至在反应第4天时有超过高温的趋势。对于*S.pasteurii*,在石灰石试样中的尿素水解率在反应3 d之后,有28℃≈20℃>37℃>10℃。对于*S.pasteurii*,10℃~28℃石灰石试样的质量增加随温度的增加而增加。彭劼等^[31]进行了不同温度(10℃, 14℃, 18℃, 21℃, 25℃)微生物诱导碳酸钙沉积加固土体的试验研究,发现温度越高,碳酸钙沉淀速率越快,生成的碳酸钙量越多。在(10℃~25℃)范围内,土壤温度越高,MICP加固后土体的强度越高、渗透性越低,但是该文中MICP试验未进行足够长的时间,得到的结论仅适用于MICP反应后开始的72 h内。鉴于目前有关于温度对MICP影响的文献不是很多且对温度的影响认识不全面以及土壤温度随着深度是在10℃~30℃范围内变化,特别是在夏天,因而研究这个温度范围内的加固效果,对于实际工程具有重要的意义。

为了研究这个温度范围内MICP加固效果的变化,本文分别在10℃, 20℃, 30℃的温度下进行了MICP水溶液试验、一维砂柱加固试验和细菌活性试验,水溶液试验在反应过程中始终保持菌液和胶结液充分接触,并且保持氯化钙充足,砂柱试验采用一次加入菌液、固定间隔加入胶结液的方式。水溶液试验

中对比分析了不同温度下MICP钙离子消耗摩尔质量的变化规律,在砂柱试验中,研究了各温度下砂柱的强度、碳酸钙沉积量随着胶结液加入次数的变化规律。细菌活性试验中,研究了不同温度下细菌活性随时间的变化规律。

1 试验材料

1.1 细菌的培育生长

本试验用菌为巴氏芽孢杆菌(美国国家菌种库编号ATCC11859),培养液的配方为:每升培养液包括20 g酵母提取物、10 g NH_4Cl 、10 mg $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 及24 mg $\text{NiCl} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$,并用1 M的NaOH调节pH至9.0。培养液经过121℃高压蒸汽消毒30 min。将细菌从平板接种至培养液中,置于振荡培养箱(30℃, 121 r/min)培养30~40 h,试验前测定其吸光度(OD值)和活性,吸光度采用可见光分光计测量,测量波长为600 nm。

微生物活性采用电导率法测量。Whiffin提出测量每分钟电导率的变化来推算脲酶水解能力。在室温条件下,试验前将3 mL培养好的待测菌液加入到27 mL urea中,细菌和urea的混合液中urea浓度为1 M,观察五分钟之内的电导率变化,本文采用此变化值来表征菌液的活性。

1.2 胶结液的配置

本试验中胶结液采用Urea- CaCl_2 混合液,其中尿素为微生物生长的氮源和能量来源, CaCl_2 为MICP过程中的钙源。水溶液试验中Urea为1.5 M, CaCl_2 为0.5 M。砂柱试验中Urea为1.0 M, CaCl_2 为0.5 M,试验所用胶结液未经消毒处理。

1.3 生化培养箱

本试验控制环境温度所用生化培养箱精度为0.1℃,误差为±1.5℃。所用3个生化培养箱的温度为(10±1.5)℃,(20±1.5)℃,(30±1.5)℃。

1.4 砂柱试验模具

砂柱试验所用模具为内径为4.8 cm,高度为13 cm的圆柱筒,将圆柱筒放在有小孔的支座上,为防止砂流出,小孔上放置一层1.5 mm厚土工布。所制成的砂柱直径为4.7 cm,高度为10 cm。模具示意图和实物图见图1。

1.5 砂样的性质

砂柱试验砂为渥太华砂,粒径参数为($d_{50}=0.33$ mm, $d_{90}=0.47$ mm),砂的级配曲线见图2。土粒比重为2.65,最大孔隙比为0.87,最小孔隙比为0.55。砂样采用分层压实的方法制成,制成后的砂样干密度为1.59~1.66 g/cm³,相对密实度为0.66~0.84。试验前

砂样在室温下自由滤水, 静置 24 h 后开始试验。

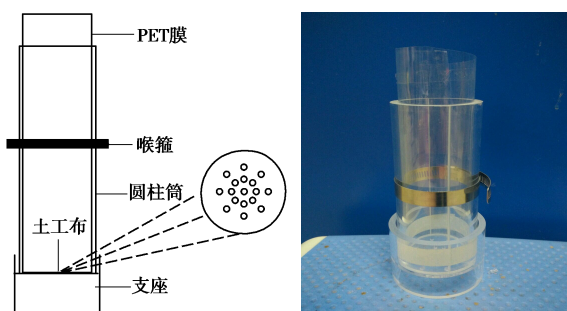


图 1 模具示意图和实物图

Fig. 1 Schematic plan of mold and picture of real products

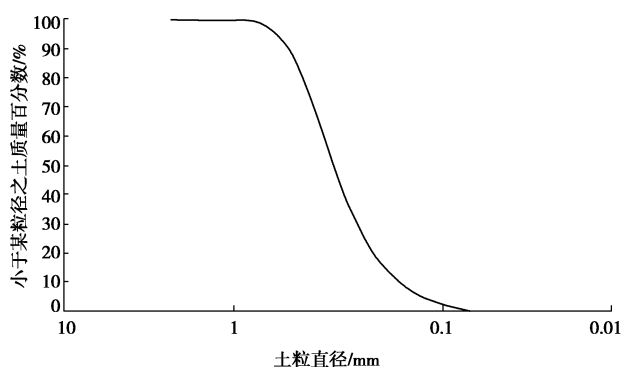


图 2 颗粒分布曲线

Fig. 2 Distribution curve of sand

2 试验方法

2.1 MICP 水溶液试验

分别在 10°C , 20°C , 30°C 的温度下进行 MICP 水溶液试验: 培养好的菌液分别在不同的温度下, 将 80 mL 菌液 (试验前测定所加菌液的活性和吸光度) 和 720 mL 胶结液于烧杯中混合, 并用磁力搅拌器使其充分混合。由于试验过程中 MICP 生成的碳酸钙易吸附在烧杯壁上, 不能直接测量, 因此在试验过程中每隔 24 h 测量混合液中的水质钙离子的浓度, 推算出碳酸钙的生成量, 从而得到 MICP 水溶液条件下碳酸钙的生成速度和温度关系曲线。试验装置示意图及实物图如图 3 所示。

水质钙离子浓度采用 ISO 6058—1984《水质钙含量的测定 EDTA 滴定法》测定混合液中的钙离子浓度。每次测定钙离子浓度所取水样经过稀释后都要通过带有过滤头的注射器过滤, 以去除混合液中碳酸钙微粒的影响。不同温度下混合液中钙离子消耗的摩尔质量由所测钙离子浓度与混合液体积相乘所得, 然后可得到碳酸钙生成摩尔质量。

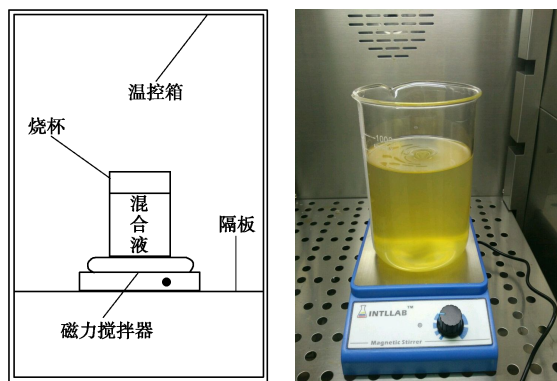


图 3 水溶液试验装置示意图及实物图

Fig. 3 Schematic plan of test setup and picture of real products

2.2 MICP 砂柱试验

分别在 10°C , 20°C , 30°C 的温度下进行 MICP 砂柱试验。试验时菌液、胶结液和砂样均处于各个研究温度下。在注入砂样之前试验前测得细菌 OD_{600} 为 2.358, 5 min 电导率变化为 0.18 mS/cm。每个砂样从顶部先泵入 70 mL 0.05M CaCl_2 固定液, 静置 12 h 后加入 70 mL 菌液, 静置 5 h 后泵入胶结液, 泵入速率均为 12.15 mL/min。胶结液每隔 12 h 注入一次, 每个砂样中前 3 次注入 70 mL 胶结液, 但是灌入胶结液时发现每个温度下的砂样底部有白色浑浊液体流出, 因此之后将注入胶结液的体积改为 60 mL。注入一次胶结液计加固一次。每个砂样在达到所需的加固次数后在温控箱内放置 24 h 后取出, 用去离子水冲洗后放入 60°C 烘箱内烘干。

2.3 碳酸钙的测量

砂柱中沉积碳酸钙采用酸洗的方法进行测量。将进行无侧限压缩试验后的砂样烘干, 用 6 M 稀盐酸浸泡, 完全反应后用去离子水洗净并烘干。砂样清洗前后变化的质量为砂样中生成的碳酸钙量。碳酸钙的百分含量为碳酸钙生成质量与原来砂的质量之比。

2.4 无侧限抗压强度

将脱模后的砂样进行无侧限抗压试验, 为保持砂样上下端部受力均匀垫有 3 mm 厚土工毡布。控制应变速率为 1.5%/min。

2.5 微观结构测试

对冷冻真空升华干燥法处理后的中部砂样进行电镜扫描分析 (FEI•Quanta200 环境扫描电子显微镜), 观察不同温度下 MICP 加固砂样后砂粒表面以及碳酸钙产物的微观形貌。

2.6 不同温度下细菌活性试验

将细菌从平板接种至培养液中, 置于振荡培养箱 (30°C , 121 r/min) 培养 30~40 h, 使菌液达到一定的活性。将培养好的菌液进行以下处理: 将 900 mL

菌液分装在 3 个锥形瓶中并将其分别置于 10℃, 20℃, 30℃ 的温控箱中, 测定菌液活性随时间的变化。试验装置示意图如图 4 所示。

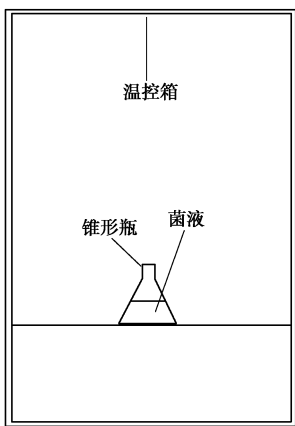


图 4 试验装置示意图
Fig. 4 Schematic plan of test setup

3 结果与讨论

3.1 MICP 水溶液试验

本次试验中尿素的用量为钙离子的 3 倍, 理论上能够将钙离子全部沉淀。试验前测得细菌 OD₆₀₀ 为 0.590, 5 min 电导率变化为 0.10 mS/cm。不同温度下混合液中钙离子消耗的摩尔质量和钙离子消耗速率随时间的变化如下图 5, 6 所示。前 40 h 内温度越高, 钙离子的消耗量越多。但是在 40 h 后, 温度越高, 钙离子的消耗量越少。30℃ 和 20℃ 下钙离子的消耗量在反应 8 d 后不再发生变化, 10℃ 在反应 10 d 后不再发生变化。从钙离子消耗速率来看, 30℃ 和 20℃ 开始要高于 10℃, 但是在第 2 天时 10℃ 开始超过 30℃ 和 20℃。30℃ 和 20℃ 的钙离子消耗速率开始最大, 之后逐渐减小直至为 0, 而 10℃ 钙离子消耗速率先增后减, 存在峰值。温度越高, 钙离子消耗速率衰减的越快。

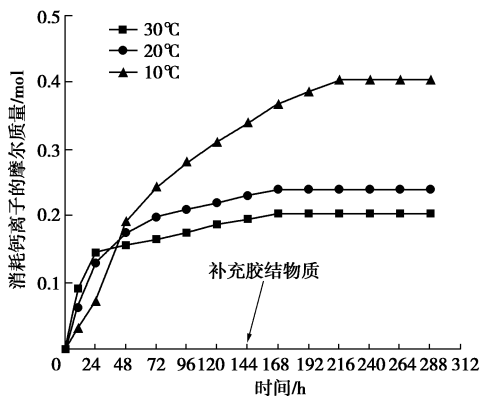


图 5 不同温度下混合液中钙离子消耗的摩尔质量
Fig. 5 Molar mass of consumption of calcium ion in mixture under different temperatures

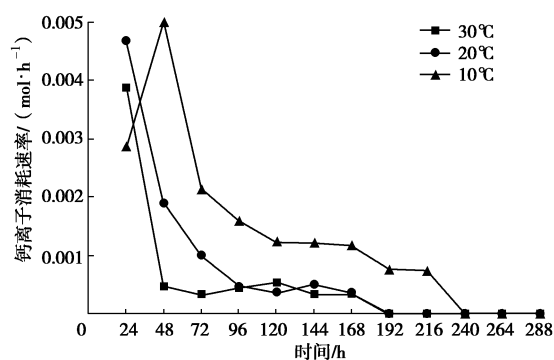


图 6 不同温度下钙离子消耗速率
Fig. 6 Consumption rates of calcium ion under different temperatures

由上述分析可总结出, 本文试验条件下, 温度对于 MICP 的影响和反应时间有关, 反应前期, 温度较高的环境下钙离子消耗量较大, 反应一段时间 (约 40 h) 后温度较低的环境下钙离子消耗量较大。

3.2 砂柱试验数据整理

(1) 进行了小型砂柱试验, 由钙离子消耗的摩尔质量图 5 推测在加固次数为 22 次时, 各个温度下微生物的反应活动已经停止, 因此在保证砂样能成型且具备一定强度来脱模的前提下, 测定不同温度下加固次数为 10, 12, 14, 18, 22 次时无侧限抗压强度的变化情况。图 7 为无侧限强度试验前后的砂样图片。不同温度下砂柱胶结体的无侧限抗压强度变化范围, 从图 8 可以看出, 经微生物加固 10~22 次后 10℃ 砂样的无侧限抗压强度可以达到 178.85~279.29 kPa, 而 20℃ 和 30℃ 砂样为 84.26~185.77 kPa、24.22~98.61 kPa, 温度越低, 无侧限抗压强度反而越大, 这也可以从图 7 看出, 温度越低, 无侧限压缩试验破坏后的砂样完整度越好。图 8 为不同温度不同加固次数时无侧限抗压强度的变化曲线, 同一温度下不同加固次数无侧限抗压强度有上下的浮动, 这是各个砂样处理之前的相对密实度略有不同所致。但是从整体的变化范围来看, 10℃~30℃ 范围内, 温度越低, 砂样的无侧限抗压强度越大。

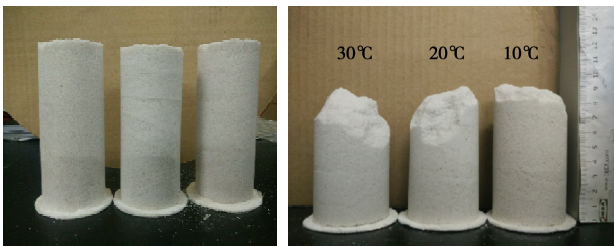


图 7 无侧限压缩试验前后的砂样
Fig. 7 MICP-treated sand samples before and after unconfined compression stress tests under different temperatures
笔者等^[31]发现在 (10℃~25℃) 范围内, 土壤温

度越高, MICP 加固后土体的强度越高, 其 MICP 砂柱试验采用的注浆方式为: 以注入一次菌液后静置 30 min, 随后注入胶结液后静置 6 h 为一个循环, 持续 10 次循环, 而本文砂柱试验采用的是一次加入菌液、固定间隔加入胶结液的注浆方式。

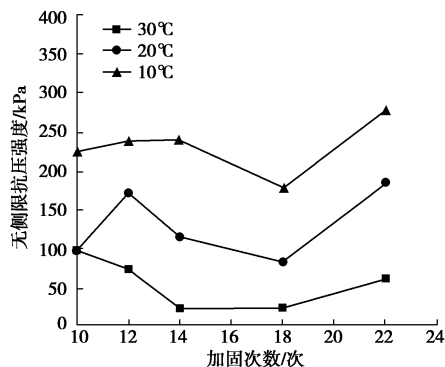


图 8 不同温度不同加固次数时无侧限抗压强度

Fig. 8 Unconfined compression stresses after different reinforcement times under different temperatures

(2) 将经过无侧限压缩试验的砂样中分为上下两个部分进行碳酸钙含量的测试, 图中“上、下”分别指砂样的整个上半部分和整个下半部分, 所得碳酸钙含量为各个部分的平均含量 (CaCO_3 质量/砂质量 g)。图 9 为不同温度不同加固次数砂样上下部分碳酸钙含量的变化曲线, 从图中可以看出不同温度下砂样加固 10 次后碳酸钙含量随着加固次数的增多变化不大, 有所浮动是各个砂样处理之前的相对密实度略有不同所致。不同温度不同加固次数的砂样碳酸钙含量呈现出上部低、下部高的现象, 这与顶部注浆对上部砂样的冲刷有关。不同温度不同加固次数的砂样上下部分碳酸钙含量的差值相差不大, 保持在 1.1% 左右。对于砂样的上部碳酸钙含量, 从图中可以看出, 温度越低, 碳酸钙含量越高。对于砂样的下部碳酸钙含量, 10°C 和 20°C 相差不多, 略高于 20°C, 但是 10°C 和 20°C 都要高于 30°C。

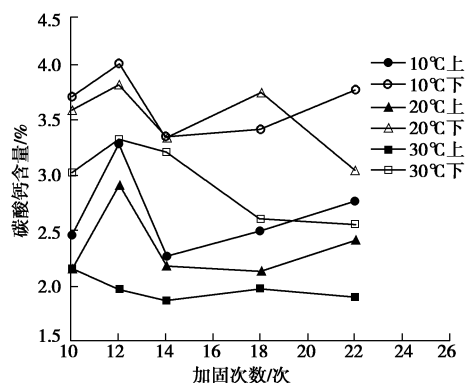


图 9 不同温度不同加固次数时碳酸钙含量

Fig. 9 Content of calcium carbonate after different reinforcement times under different temperatures

图 10 为不同温度不同加固次数碳酸钙平均含量与无侧限抗压强度平均值之间的关系图, 碳酸钙平均含量与无侧限抗压强度平均值呈正比关系, 这与人所得结论一致, 但是随着温度的升高, 碳酸钙平均含量和无侧限抗压强度反而降低。

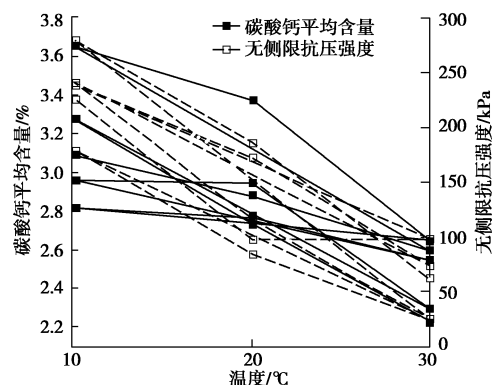


图 10 不同温度碳酸钙平均含量与无侧限抗压强度的关系

Fig. 10 Relationship between average content of calcium carbonate and unconfined compression stress under different temperatures

综上所述, 在采用一次加入菌液、固定间隔加入胶结液的方式加固砂柱时, 10°C~30°C 内且加固次数超过 10 次时, 随着温度的升高, 砂样的无侧限抗压强度反而越小, 这一现象的原因是温度越高砂样中碳酸钙含量越低, 这与 MICP 水溶液试验所得的结论一致。

(3) 图 11 为不同温度下加固 22 次后砂柱无侧限压缩试验的应力应变关系图。由图可以看出较低温度下砂柱的强度比高温下高, 在达到峰值强度时, 10°C 和 20°C 处理的砂柱应变相差不大, 但是都比 30°C 要大。说明相对低温条件下 MICP 处理的砂样在达到峰值强度时能够产生较大的变形。不同温度下的砂样在破坏前均存在一个过渡平台, 这一过渡平台的存在是由砂样上下均垫有土工毡布所致。

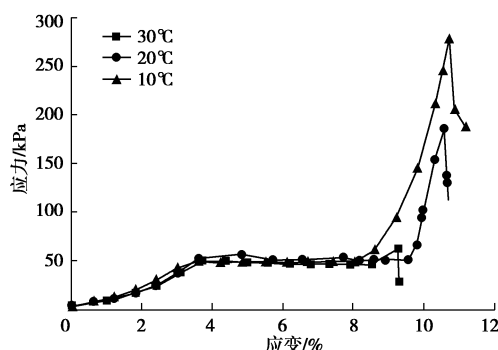


图 11 不同温度加固 22 次时无侧限压缩试验应力应变曲线

Fig. 11 Curves of stress-strain of unconfined compression stress tests after 22 reinforcement times under different temperatures

(4) 图 12 为不同温度下 MICP 处理的砂样 SEM

图。3 个温度下砂颗粒表面均有碳酸钙晶体生成。30℃时, 砂颗粒的周围零零散散地分布着碳酸钙晶粒, 晶体尺寸在 10 μm 左右, 但是砂颗粒之间的空隙较多; 20℃时, 砂颗粒周围的碳酸钙晶粒比 30℃明显增多且在颗粒连接处也有较多胶结, 碳酸钙晶体尺寸大小不一, 在 10~20 μm 之间; 10℃时, 砂颗粒周围的碳酸钙晶粒分布和 20℃差不多, 但是在颗粒连接处晶体堆积比 20℃多一些致使砂粒胶结更强一些, 碳酸钙晶体尺寸大小不一, 也在 10~20 μm 之间, 但是整体晶粒尺寸要比 20℃大。SEM 图的结果分析也和无侧限抗压强度和碳酸钙含量结果一致。各个温度下碳酸钙的形态基本为斜六方体或者由斜六方体堆积而成的圆球状颗粒。

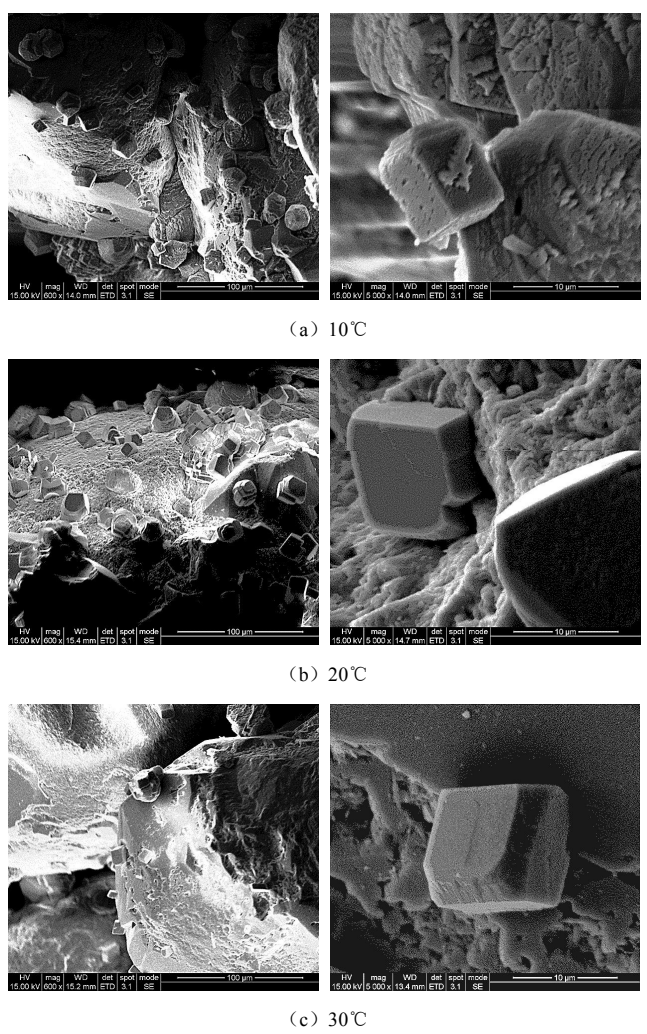


图 12 砂样 SEM 图像

Fig.12 SEM images of sand coated in minerals

3.3 不同温度下细菌活性试验

按 2.6 节的试验方法将培养到一定活性的菌液 (OD600 为 1.533, 5 min 电导率变化为 0.28 mS/cm) 分成 3 份分别置于 10℃, 20℃, 30℃的温控箱中, 测定细菌活性 (5 min 电导率变化值) 与时间的关系,

试验结果如图 13 所示。从图中看出, 从菌液分装开始的 20 h 内, 10~30℃内细菌活性随着温度的升高而增大, 这与 Whiffin^[4]、笔者等^[31]研究所得的结论一致, 但是其研究仅是冷却至相应环境温度时细菌的活性, 而未考虑不同温度下细菌活性随时间的变化情况。也有学者发现温度越高脲酶活性越高, 但是与本文的研究对象不一样, Nemati 等^[32]研究的是低浓度的豆类提纯脲酶, Ferris 等^[33]、Mitchell 等^[34]和 De Muynck 等^[30]研究的是用超纯水冲洗离心后的细菌细胞沉淀物。

菌液分装并冷却至相应研究温度后, 10℃和 20℃的细菌活性有所下降, 整体而言, 3 个温度下细菌活性均先增后减, 但是在经历峰值之后衰减的速度不同, 温度越高, 细菌活性衰减越快。

对比图 5 和图 13 得知, 不同温度下细菌活性随时间的变化趋势和水溶液中钙离子消耗量的变化趋势一致。温度越高, 细菌活性衰减越快, 细菌分解尿素的能力降低地越快, 钙离子消耗速率也降低地越快。

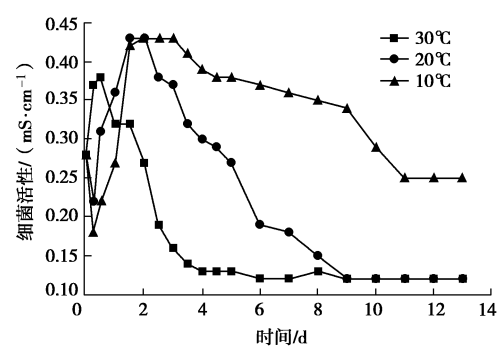


图 13 不同温度下细菌活性与时间的关系图

Fig. 13 Relationship between bacterial activity and time under different temperatures

4 结 论

本文利用尿素水解菌 ATCC 11859, 在 10℃, 20℃, 30℃的环境下进行了 MICP 水溶液试验、一维砂柱加固试验和细菌活性试验, 水溶液试验在反应过程中始终保持菌液和胶结液充分接触, 并且保持氯化钙充足; 砂柱试验采用一次加入菌液、固定间隔加入胶结液的方式。得到的如下结论。

(1) 水溶液试验中, 10℃~30℃范围内温度对于 MICP 的影响和反应时间有关, 反应前期, 温度较高的环境下钙离子消耗量较大, 反应一段时间后温度较低的环境下钙离子消耗量较大。

(2) 温度对于 MICP 加固后的砂柱强度影响与注浆方式有关。10℃~30℃范围内, 采用一次加入菌液、固定间隔加入胶结液的方式加固砂柱时, 10℃~30℃内且加固次数超过 10 次时, 随着温度的升高, 砂柱的

无侧限抗压强度反而越小;采用以注入一次菌液后静置 30 min,随后注入胶结液后静置 6 h 为一个循环,持续 10 次循环的注浆方式时,温度越高,MICP 加固后土体的强度越高。

(3) 从无侧限压缩试验的应力应变关系来看,在达到峰值强度时,10℃和 20℃处理的砂柱样应变相差并不大,但是都比 30℃要大。说明相对低温条件下 MICP 处理的砂样在达到峰值强度时能够产生较大的变形。

(4) 不同温度下细菌活性试验表明,细菌活性随时间的变化趋势和水溶液中钙离子消耗量的变化趋势一致。细菌活性衰减较快是高温下碳酸钙的最终沉积量较小的原因。

参考文献:

- [1] DEJONG J T, MORTENSEN B M, MARTINEZ B C, et al. Bio-mediated soil improvement [J]. *Ecological Engineering*, 2010, **36**(2): 197 – 210.
- [2] DEJONG J T, SOGA K, KAVAZANJIAN E, et al. Biogeochemical processes sand geotechnical applications: progress opportunities sand challenges[J]. *Géotechnique*, 2013, **63**(4): 287 – 301.
- [3] IVANOV V, CHU J. Applications of microorganisms to geotechnical engineering for bioclogging and biocementation of soil in situ[J]. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 2008, **7**(2): 139 – 153.
- [4] WHIFFIN V S. Microbial CaCO₃ precipitation for the production of Biocement[D]. Perth: Murdoch University, 2004.
- [5] DE MUYNCK W, DE BELIE N, VERSTRAETE W. Microbial carbonate precipitation in construction materials: A review [J]. *Ecological Engineering*, 2010, **36**(2): 118 – 136.
- [6] DHAMI N K, REDDY M S, MUKHERJEE A. Biomineralization of calcium carbonates and their engineered applications: a review[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2013, **314**(4): 1 – 13.
- [7] 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))
- [8] WHIFFIN V S, VAN PAASSEN L A, HARKES M P. Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique[J]. *Geomicrobiol J*, 2007, **24**(5): 417 – 23.
- [9] 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 – 598.
- [10] HARKES 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 – 7.
- [11] ZHAO Q, LI L, LI C, 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.
- [12] 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.
- [13] CHU J, IVANOV V, NAEIMI M, et al. Optimization of calcium-based bioclogging and biocementation of sand[J]. *Acta Geotechnica*, 2014, **9**(2): 277 – 285.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] OKWADHA G D O, LI J. Optimum conditions for microbial carbonate precipitation[J]. *Chemosphere*, 2010, **81**(9): 1143 – 1148.
- [17] 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.
- [18] OLIVEIRA P J V, FREITAS L D, CARMONA J P S F. Effect of soil type on the enzymatic calcium carbonate precipitation process used for soil improvement[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2016, **29**(4): 04016263.
- [19] DEJONG J T, FRITZGES M B, NUSSLEIN K. Microbially induced cementation to control sand response to undrained shear[J]. *J Geotech Geoenviron*, 2006, **132**(11): 1381 – 1392.
- [20] MONTROYA B M, DEJONG J T. Stress-strain behavior of sands cemented by microbially induced calcite precipitation[J]. *Journal of Geotechnical and*

- Geoenvironmental Engineering, 2015, **141**(6): 04015019.
- [21] MONTOYA B, FENG K. Deformation of microbial induced calcite bonded sands: a micro-scale investigation[M]. Amsterdam: Ios Press, 2015.
- [22] VENULEO S, LALOU I, TERZIS D, et al. Microbially induced calcite precipitation effect on soil thermal conductivity[J]. Géotechnique Letters, 2016, **6**(1): 39 - 44.
- [23] CHOI S G, WANG K, CHU J. Properties of biocemented, fiber reinforced sand[J]. Construction and Building Materials, 2016, **120**: 623 - 629.
- [24] LI M, LI L, OGBONNAYA U, et al. Influence of fiber addition on mechanical properties of MICP-treated sand[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2015, **28**(4): 04015166.
- [25] 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))
- [26] HAN Z G, CHENG X H, MA Q. An experimental study on dynamic response for MICP strengthening liquefiable sands[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2016, **15**(4): 673 - 679.
- [27] 许朝阳, 周 锋, 孟 涛, 等. 铁基灌浆对液化粉土动力特性的改性研究[J]. 建筑材料学报, 2015, **18**(6): 1055 - 1059. (XU Zhao-yang, ZHOU Feng, MENG Tao, et al. Improvement of dynamic characteristics of liquefaction silt using iron-based bio-grouting[J]. Journal of Building Materials, 2015, **18**(06): 1055 - 1059. (in Chinese))
- [28] CACCHIO P, ERCOLE C, CAPPUCCIO G, et al. Calcium carbonate precipitation by bacterial strains isolated from a limestone cave and from a loamy soil[J]. Geomicrobiol J, 2003, **20**(2): 85 - 98.
- [29] ZAMARRENO D V, MAY E, INKPEN R. Influence of environmental temperature on biocalcification by non-sporing freshwater bacteria[J]. Geomicrobiol J, 2009, **26**(4): 298 - 309.
- [30] DE MUYNCK W, VERBEKEN K, DE BELIE N, et al. Influence of temperature on the effectiveness of a biogenic carbonate surface treatment for limestone conservation[J]. Appl Microbiol Biot, 2013, **97**(3): 1335 - 1347.
- [31] 彭 劼, 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 Zhi-ming, 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))
- [32] NEMAT I M, VOORDOUW G. Modification of porous media permeability, using calcium carbonate produced enzymatically in situ[J]. Enzyme and Microbial Technology, 2003, **33**(5): 635 - 642.
- [33] FERRIS F G, PHOENIX V, FUJITA Y, et al. Kinetics of calcite precipitation induced by ureolytic bacteria at 10 to 20°C in artificial groundwater[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2004, **68**(8): 1701 - 10.
- [34] MITCHELL A C, FERRIS F G. The coprecipitation of Sr into calcite precipitates induced by bacterial ureolysis in artificial groundwater: temperature and kinetic dependence[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2005, **69**(17): 4199 - 210.