

金属离子种类对珊瑚砂微生物固化影响研究

宋平¹, 方祥位¹, 李洋洋¹, 李捷¹, 申春妮²

(1. 中国人民解放军后勤工程学院 土木工程系, 重庆 401311; 2. 重庆科技学院 建筑工程学院, 重庆 401331)

摘要: 选用巴斯德芽孢杆菌, 对微生物诱导钙离子、镁离子以及铁离子形成碳酸盐固化松散珊瑚砂颗粒的效果进行对比研究。试验结果表明, 在相同试验方法、相同注入次数的条件下, 微生物诱导形成的碳酸钙和碳酸镁能将珊瑚砂松散颗粒固化成为整体, 加入铁离子的试样因为反应过程的原因没有成功。通过渗透性、干密度变化、无侧限抗压强度及微观结构等方面进行对比分析, 钙离子试样相对于镁离子试样, 具有固化过程平稳、干密度增量、强度高、微观颗粒包裹更好的优点。综合试验结果得出, 钙离子是现阶段微生物固化珊瑚砂较为理想的金属离子。本试验首次探讨了金属离子种类对珊瑚砂微生物固化效果的影响, 为微生物固化技术提供了一定理论基础, 对该技术的进一步应用具有一定借鉴意义。

关键词: 珊瑚砂; 微生物固化; 碳酸钙; 碳酸镁

中图分类号: TU 411 文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2017)07-0087-07

DOI: 10.11759/hyxx20161010003

南海地理位置(0°~25°N)和海水温度(17~28℃)适合碳酸盐岩和造礁生物的生长和发育, 岛礁以珊瑚礁为主^[1]。珊瑚礁体的表层结构通常由松散礁砂砾层占主要地位, 其中礁砂我们称之为珊瑚砂。珊瑚砂生成于漫长的海洋过程中, 由礁珊瑚碎屑加上其他海洋生物碎屑形成。珊瑚砂特殊的物质组成、结构以及发育环境等导致其具有独特的工程性质, 具有颗粒易破碎、压缩性较大、地基承载力较低等特性^[2]。土壤固化途径包括物理作用、机械方法、化学胶结和土工织物等诸多手段与方法。这些方法用于处理远离陆地的珊瑚砂时存在设备材料运输困难, 环境污染严重等问题^[3-5]。近年来, 南海工程建设及将微生物与海洋工程结合的技术手段, 受到广泛关注^[1, 5-8]。

微生物固化技术是一种新兴土壤固化技术。Whiffin^[9]提出, 某些特定细菌, 在提供金属离子和有机物的条件下, 可以生成具有胶结性质的碳酸盐, 这些胶结物质可以把松散的土颗粒固化为具有一定强度和刚度的整体。该技术具有操作简单、环境友好、能耗低等优点, 已经广泛应用于土木工程、文物修复、污水处理等领域^[10-11]。将微生物固化技术应用于岛礁建设, 可以就地取材, 保护生态环境, 解决材料设备运输不便等问题。

目前, 微生物诱导碳酸钙固化砂土的技术发展较快。国外研究者通过大量的试验, 对细菌活性对沉淀生成、固化砂柱强度和刚度的影响因素等方面进

行了研究, 实现了从室内小型砂柱试验到现场大型试验的进步, 并进行了初步的数值模拟^[12-15]。国内主要以室内试验研究为主。钱春香等^[16]对微生物在土木工程中的应用进行了系列研究, 取得了重要进展。程晓辉等^[17]对微生物固化砂基的动力特性进行了研究。方祥位等^[4, 18-19]率先对珊瑚砂的微生物固化技术进行研究, 为实际应用奠定了良好的基础。

根据元素周期表中金属离子的性质, 可以与碳酸盐反应生成沉淀的有镁离子、铁离子、钙离子和钡离子。钡离子会使蛋白质变性失活, 毒性较强, 不宜在工程中应用。现阶段采用的金属离子以钙离子为主。荣辉、钱春香等^[20]对微生物诱导碳酸镁胶结松散砂进行了试验研究。对微生物诱导其他金属离子形成碳酸盐固化松散砂颗粒的研究还鲜有报道。在相同试验条件下, 研究微生物诱导不同金属离子形成碳酸盐固化松散砂颗粒的固化效果, 对于优选

收稿日期: 2016-10-10; 修回日期: 2016-12-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(51479208, 11272354); 总后勤部基建营房部资助项目(CY114C022)

[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41271547, No.41401644; Project Supported by the Department of Infrastructure Barracks of the General Logistics Department, No.CY114C022]

作者简介: 宋平(1992-), 男, 吉林长春人, 硕士研究生, 主要从事岩土微生物技术研究, 电话: 15223209122, E-mail: 1783887621@qq.com; 方祥位(1975-), 通信作者, 男, 重庆人, 教授, 博士生导师, 主要从事非饱和土与特殊土力学及岩土微生物技术研究, E-mail: fangxiangwei1975@163.com

微生物固砂所用金属离子具有重要意义。

本文在相同试验条件下研究微生物诱导钙离子、镁离子及铁离子形成碳酸盐固化珊瑚砂的效果,从渗透特性、干密度变化、无侧限抗压强度和微观结构等方面对比研究金属离子种类对微生物固化珊瑚砂的影响,为微生物固化珊瑚砂技术提供理论基础。

1 试验材料及试验方法

1.1 珊瑚砂

珊瑚砂取自南海某岛礁,其成分以碳酸钙为主。试验中每个试样的珊瑚砂均采用相同级配,具体粒径组成为: 2~5、1~2、0.5~1、0.25~0.5、0.075~0.25、<0.075 mm,其中最大粒径不超过 5 mm。其不同颗粒的质量占总质量的百分比分别为 11.28%、3.94%、32.64%、37.70%、11.58%、2.86%。

1.2 细菌的选用及培养

采用巴斯德芽孢杆菌,细菌培养的整个过程在无菌环境中进行。具体的方法为:(1)利用平板划线法,培养挑选无杂菌的单菌落配制菌液母液 100 mL,放入震荡培养箱培养;(2)将培养的菌液母液倒入培养基中扩大培养;(3)进行细菌活性(细菌水解尿素的能力,即每分钟水解尿素的量,单位为 mmol/(L·min))测试,本次试验培养的细菌活性为 0.8 mmol/(L·min)以上。

1.3 固化模具

本文试验装置如图 1 所示。采用模具为对开的直径 50 mm 的透明有机玻璃管。将模具用环保有机双面玻璃胶粘牢,底部塞入缠好止水胶布的带孔橡胶塞,将带有变径接头的橡胶管插入橡胶塞的孔中,最后在模具上、中、下部分别加钢制套箍。装样时在模具底部垫入生化棉,防止细颗粒砂滑落,将珊瑚砂装入模具后,加一层生化棉,防止注入液体时砂土受到扰动。最后将组装好的模具安装在试验架上。

1.4 试验方案

为研究金属离子种类对微生物固化珊瑚砂的影



图 1 试验装置

Fig. 1 Test apparatus

响,本文设置了钙离子组、镁离子组和铁离子组,共计 9 个试样。对每个试样注入 100 mL 菌液,关闭止水夹,静置 0.5 h,使菌液与珊瑚砂颗粒充分接触。将流出的菌液再次注入珊瑚砂中,如此往复 3 次,确保细菌充分吸附到珊瑚砂颗粒表面上。然后一次性注入 200 mL 混合溶液,每组试样的混合溶液由不同溶液组成,其具体组成成分如表 1 所示,表中每种溶液的浓度均为 2 mol/L。混合溶液注入完毕,立即关闭止水夹,使反应充分进行,2 h 后打开止水夹。溶液流尽后,再次将混合溶液倒入模具。每次混合溶液流尽时,对每个试样的溶液进行 EDTA 滴定试验,检测溶液中金属离子含量。当所有试样的溶液中不再有金属离子残留时,混合溶液无法与细菌反应生成沉淀,更换下一组菌液和混合溶液,重复上述过程。试验中每次更换混合溶液后,大多数试样的金属离子在第五次滴定时全部消耗,个别试样的金属离子在第四次全部消耗,为保证通入溶液的次数一致,所有试样均通入五次后更换菌液及混合溶液。试验中保证每个试样通入混合溶液总量及次数一致。整个过程利用蠕动泵控制溶液渗透速率。2 周后固化结束,拆除模具。

表 1 混合溶液组成成分

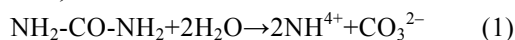
Tab. 1 Composition of mixed solution

试样编号	氯化钙溶液体积(mL)	氯化镁溶液体积(mL)	氯化铁溶液体积(mL)	尿素溶液体积(mL)
1—3	0	0	100	100
4—6	0	100	0	100
7—9	100	0	0	100

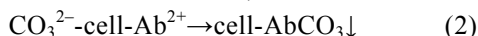
2 试验结果与分析

2.1 试验原理

将松散珊瑚砂装入有机玻璃管，注入菌液，菌液在砂颗粒表面的吸附作用下，大部分附着于颗粒表面。注入混合溶液时，尿素在细菌的水解作用下水解生成碳酸根，反应式如下：



碳酸根遇到金属离子反应生成沉淀，反应式如下：



随着菌液和混合溶液的不断注入，反应不断进行，胶结物质增多。胶结物质将砂颗粒包裹或填充在孔隙中，使松散的砂形成一个具有强度的整体。

2.2 表观特性

钙离子和镁离子试样反应过程平稳，拆除模具后试样完整，表面较光滑，固化效果较好，达到了预期的效果，如图 2 所示。

铁离子试样在第一次通入混合溶液时，产生大量气泡，如图 3 所示；试样拆模后没有成型，珊瑚砂

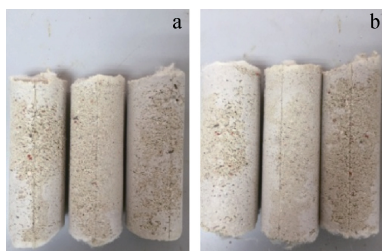


图 2 固化好的砂柱

Fig. 2 Solidified sand pillars

a. 钙离子试样; b. 镁离子试样

a. Specimens bio-cemented with calcium ions; b. specimens bio-cemented with magnesium ions



图 3 铁离子试样产生大量气泡

Fig. 3 Specimens bio-cemented with iron ions produced plenty of bubbles

处于完全松散状态，如图 4 所示。这是因为菌液与三价铁离子和尿素的混合溶液接触时，瞬间生成碳酸铁，碳酸铁不稳定，快速水解，产生大量二氧化碳，同时生成氢氧化铁沉淀。反应式如下：

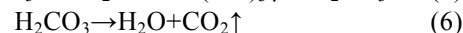
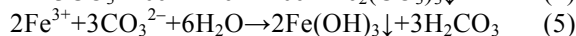
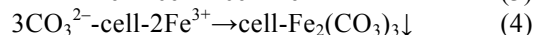
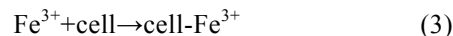


图 4 铁离子试样

Fig. 4 Specimens bio-cemented with iron ions

氢氧化铁可以使松散砂固化为整体。可是反应过程剧烈，表层珊瑚砂的孔隙被快速填充，并产生大量气泡，导致固化过程受阻并影响溶液下渗，最终影响固化效果。如果通过适当的方法控制反应速率，并导出二氧化碳，试验有成功的可能性，留待以后解决。

铁离子试样没有成型，下文将围绕钙离子和镁离子固化试样展开讨论研究。

2.3 渗透特性

固化过程中，随着反应进行，胶结物质不断生成，颗粒被包裹得愈加密实，孔隙变少、变小，渗透性不断降低。每次完整地注入菌液和混合溶液后，进行下一次注入菌液前测量渗透性。图 5 为渗透性变化关系。

试验开始后，所有试样的渗透性均有小幅度下降。在第三次测量时，镁离子试样(4—6 号)渗透性大幅度下降，钙离子试样(7—9 号)下降幅度始终平稳。所有试样在固化结束后渗透性都几乎降低为零，孔隙基本被填充。

钙离子试样反应平稳，固化过程持续稳定。镁离子试样前期反应迅猛，固化过程进行快，这种情况

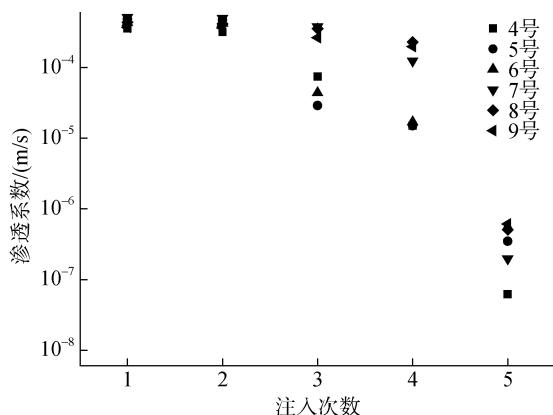


图5 渗透性变化关系

Fig. 5 Permeability versus number of times

更易导致固化不均匀性。镁离子试样在第三次测量时渗透性大幅降低,影响后期固化的进行,从而影响固化效果。

2.4 干密度增量

试验测得各组固化试样的干密度增量如表 2 所示。从表 2 中可以看出,固化前珊瑚砂在相同条件下烘干至平衡,干密度大致相同。固化后,镁离子试样干密度增量范围在 17.2%~26.6%,钙离子试样增量范围在 38.6%~41.2%。从物质的量分析,每立方厘米生成碳酸镁沉淀为 $2.6 \times 10^{-3} \sim 4.0 \times 10^{-3}$ mol,碳酸钙生成的量为 $5.1 \times 10^{-3} \sim 5.6 \times 10^{-3}$ mol。从中可以看出,在反应过程中,钙离子组有更多的沉淀生成,颗粒表面包裹的胶结物质更多。

表 2 干密度增量

Tab. 2 Increments of dry density

组号	干密度(g/cm ³)		干密度增量(%)
	固化前	固化后	
4	1.28	1.62	26.6
5	1.29	1.54	19.4
6	1.28	1.50	17.2
7	1.32	1.83	38.6
8	1.29	1.81	40.3
9	1.36	1.92	41.2

2.5 强度特性

为进行无侧限抗压强度试验,对固化试样进行磨平处理,并将试样完全烘干。处理后的试样高 10 cm、直径 5 cm。采用重庆科技学院电液伺服万能试验机对固化试样进行无侧限抗压强度试验,加载速率为 1 mm/min。

图 6、图 7 分别为钙离子和镁离子固化试样的应力-应变曲线。从图中可以看出,钙离子固化试样无侧限抗压强度最高达 6 MPa,镁离子固化试样只有 1 MPa 左右。从图 6 可以看出,钙离子固化试样的应力-应变曲线分为两段。第 1 段,剪切初始阶段,应力随应变快速增长,试样基本处于弹性状态;第 2 段,试样应力达到峰值,随即破坏,应力随应变增加而下降。曲线具有明显的破坏点。破坏的应力-应变曲线离散性较大,这是由于试样固化不均匀导致内部存在薄弱结构面,薄弱面受压破坏后应力降低,内部颗粒重新排列压实后强度继续发展。其中 9 号试样在达到最大应力值时劈裂破坏(如图 8 所示),出现贯穿裂缝,导致应力突降。从图 7 可以看出,镁离子固化试样应力-应变曲线分为两段。第 1 段,应力随应变缓慢增长;第 2 段,应力达到峰值,然后应力随应变缓慢下降,没有明显破坏点。

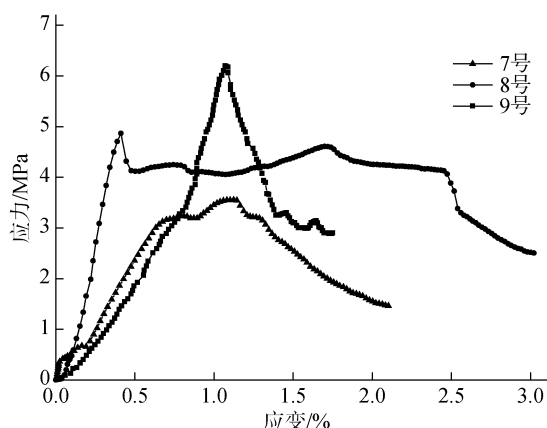


图 6 钙离子固化试样应力-应变曲线

Fig. 6 Stress-strain curves of specimens biocemented with calcium ions

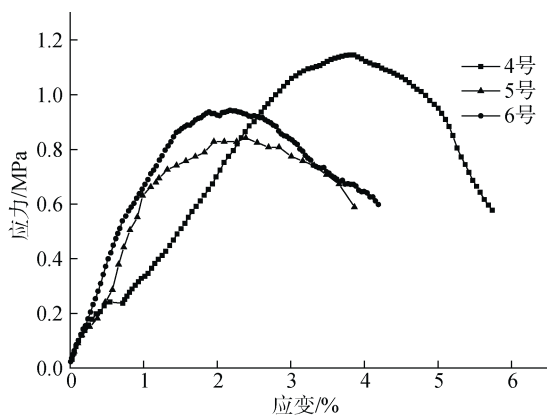


图 7 镁离子固化试样应力-应变曲线

Fig. 7 Stress-strain curves of specimens biocemented with magnesium ions



图 8 破坏后的 9 号试样
Fig. 8 Destroyed No. 9 specimen

2.6 微观结构特征

采用 Quanta200 型扫描电镜观察微观结构。Quanta 扫描电镜有 3 种真空操作模式,分别为高真空模式,环境扫描模式和低真空模式,能对多种样品进行照相。本文试验采用环境扫描模式,样品无需干燥和镀金属膜,能更好地反映样品原貌。

图 9 为 7 号(钙离子)和 4 号(镁离子)固化试样放大 3 000 倍和 400 倍的微观结构照片。从图中可以看出,两个固化试样均生成了大量的胶结物质,颗粒表面被碳酸盐完整包裹,且孔隙减少,故渗透性大幅降低;颗粒间被胶结物质咬合连接,故强度大幅提高。

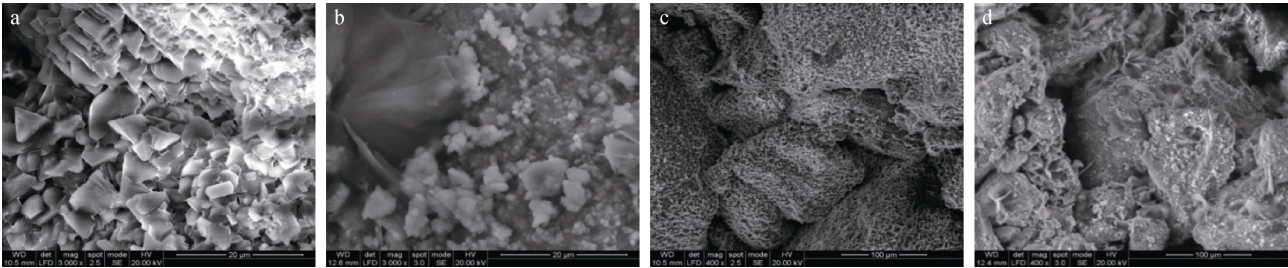


图 9 微观结构照片

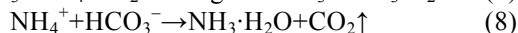
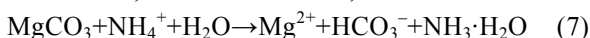
Fig. 9 Microstructure photos of specimens

a. 7 号 3 000 倍的图像; b. 4 号 3 000 倍的图像; c. 7 号 400 倍的图像; d. 4 号 400 倍的图像
a. 3 000 times image of No. 7; b. 3 000 times image of No. 4; c. 400 times image of No. 7; d. 400 time image of No. 4

钙离子固化试样(图 9 a、9 c),胶结物质为方解石型碳酸钙,颗粒包裹密实,钙离子反应充分,颗粒已经紧密固化在一起,对于提高强度十分有利。镁离子固化试样(图 9 b、9 d),根据文献[20]可知生成物为菱镁矿型碳酸镁。通过观察微观图像,发现残留大量氯化镁、尿素等其他结晶,说明混合溶液中的离子没有充分利用,细菌诱导碳酸镁生成胶结物质的反应不彻底。

2.7 结果分析

经试验结果可知,钙离子相比于镁离子对于微生物固化珊瑚砂的效果更好。由反应环境和碳酸镁与碳酸钙的性质可知,尿素水解生成大量氨根,碳酸钙在氨根溶液中不会分解,可以稳定地存在于溶液中,固化过程的反应不受干扰,因此用于胶结砂颗粒的碳酸钙更多。而碳酸镁溶于氨根溶液,同时有微量气体生成,具体反应式如下,



这就使碳酸镁不能稳定存在,生成的碳酸镁不能均

用于胶结砂颗粒,一定程度上干预了固化过程的进行;固化过程不平稳,且用于胶结砂颗粒的碳酸镁较少,使得镁离子试样干密度增量小;同时生成微量气体,气体量少不会溢出,观察不到,但是却可以存在于砂颗粒之间,使碳酸镁分布不均,孔隙不全由胶结物质填充,砂颗粒包裹不充分,容易出现薄弱面,导致试样的强度进一步降低。

3 结论

1) 在相同条件下,钙离子组和镁离子组都可以将松散的珊瑚砂固化成为一个整体,并具有一定的强度刚度等力学特性;铁离子组没有达到预期固化效果。

2) 钙离子试样相比于镁离子试样,反应过程平稳,干密度增量,强度高,颗粒包裹更好。

3) 钙离子和镁离子试样应力-应变曲线均可以分为两个阶段,即应力随应变上升段和下降段。但是,钙离子试样具有明显破坏点,而镁离子试样无明显破坏点。

4) 综合试验结果得出, 钙离子是现阶段微生物固化珊瑚砂较为理想的金属离子。

参考文献:

- [1] 黄昱丞, 吴时国, 王大伟, 等. 南海北部流花碳酸盐岩储层频域属性分析[J]. 海洋科学, 2016, 40(3): 167-177.
Huang Yucheng, Wu Shiguo, Wang Dawei, et al. Spectral attribute analysis of Lihua carbonate reservoir in the northern South China Sea[J]. Marine Sciences, 2016, 40(3): 167-177.
- [2] 孙宗勋. 南沙群岛珊瑚砂工程性质研究[J]. 热带海洋, 2000, 19(2): 1-8.
Sun Zongxun. Engineering properties of coral sands in Nansha Islands[J]. Tropic Oceanology, 2000, 19(2): 1-8.
- [3] 柯结伟, 庞有师. 土壤固化剂及其在工程中的应用[J]. 国防交通工程与技术, 2007, 5(4): 74-77.
Ke Jiewei, Pang Youshi. Soil stabilizers and their application in engineering[J]. Traffic Engineering and Technology for National Defense, 2007, 5(4): 74-77.
- [4] 方祥位, 申春妮, 楚剑, 等. 微生物沉积碳酸钙固化珊瑚砂的试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(10): 2773-2779.
Fang Xiangwei, Shen Chunni, Chu Jian, et al. An experimental study of coral sand enhanced through microbially-induced precipitation of calcium carbonate[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(10): 2773-2779.
- [5] 李岩, 杨茹君, 张爱斌, 等. 海水中溶解有机质对 Fe 的迁移转化的影响[J]. 海洋科学, 2014, 38(6): 94-101.
Li Yan, Yang Rujun, Zhang Aibin, et al. The effect of dissolved organic matter (DOM) on migration, transformation and bioavailability of Fe in seawater[J]. Marine Sciences, 2014, 38(6): 94-101.
- [6] 刘洪艳, 王红玉, 谢丽霞, 等. 海洋沉积物中一株铁还原细菌分离及 Fe() 还原性质[J]. 海洋科学, 2016, 40(3): 65-70.
Liu Hongyan, Wang Hongyu, Xie Lixia, et al. Isolation and characterization of Fe ()-reducing bacterium *Klebsiella* sp. KB52 from marine sediment[J]. Marine Sciences, 2016, 40(3): 65-70.
- [7] 李林, 王帅, 郑立. 海洋微藻固碳及其培养技术的研究进展[J]. 海洋科学, 2015, 39(3): 135-140.
Li Lin, Wang Shuai, Zheng Li. Research progress of marine microalgae on carbon dioxide biofixation and its cultivation technology[J]. Marine sciences, 2015, 39(3): 135-140.
- [8] 张丽红, 刘艳芳, 胡青平. 中国南海一株固氮类芽孢杆菌的筛选和分离鉴定[J]. 海洋科学, 2015, 39(3): 100-105.
Zhang Lihong, Liu Yanfang, Hu Qingping. Isolation and identification of a *Paenibacillus* sp. producing nitrogenase activity from South China Sea[J]. Marine sciences, 2015, 39(3): 100-105.
- [9] Whiffin V S. Microbial CaCO₃ precipitation for the production of biocement[D]. Western Australia: Murdoch University, 2004.
- [10] 李为, 刘丽萍, 曹龙, 等. 碳酸盐生物沉积作用的研究现状与展望[J]. 地球科学进展, 2009, 24(6): 597-605.
Li Wei, Liu Liping, Cao Long, et al. Research status and prospect of biological precipitation of carbonate[J]. Advances in Earth Science, 2009, 24(6): 597-605.
- [11] DeJong J T, Soga K, Kavazanjian E, et al. Biogeochemical processes and geotechnical applications: progress, opportunities and challenges[J]. Geotechnique, 2013, 63(4): 287-301.
- [12] DeJong J T, Mortensen B M, Martinez B C, et al. Bio-mediated soil improvement[J]. Ecological Engineering, 2010, 36(2): 197-210.
- [13] Montoya B M. Bio-mediated soil improvement and the effect of cementation on the behavior, improvement, and performance of sand[D]. California: University of California, Davis, 2012.
- [14] Dick J, De Windt W, De Graef B, et al. Bio-deposition of a calcium carbonate layer on degraded limestone by *Bacillus* species[J]. Biodegradation, 2006, 17(4): 357-367.
- [15] Rodriguez-Navarro C, Rodriguez-Gallego M, Chekroun K B, et al. Conservation of ornamental stone by *Myxococcus xanthus*-induced carbonate biomineralization[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2003, 69(4): 2182-2193.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 欧益希, 方祥位, 申春妮, 等. 颗粒粒径对微生物固化珊瑚砂的影响[J]. 水利与建筑工程学报, 2016, 14(2): 35-39.
Ou Yixi, Fang Xiangwei, Shen Chunni, et al. Influence of particle sizes of coral sand on bio-cementation[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2016, 14(2): 35-39.
- [19] 欧益希, 方祥位, 张楠, 等. 溶液盐度对微生物固化

珊瑚砂的影响[J]. 后勤工程学院学报, 2016, 32(1): 78-82.

Ou Yixi, Fang Xiangwei, Zhang Nan, et al. Influence of solution salinity on microbial biocementation of coral sand[J]. Journal of Logistical Engineering University,

2016, 32(1): 78-82.

[20] 荣辉. 微生物水泥的研制及其胶结机理[D]. 南京: 东南大学, 2014.

Rong Hui. Preparation and binding mechanism of microbe cement[D]. Nanjing: Southeast University, 2014.

Influence of metal ion type on coral sand biocementation

SONG Ping¹, FANG Xiang-wei¹, LI Yang-yang¹, LI Jie¹, SHEN Chun-ni²

(1. Department of Civil Engineering, Logistical Engineering University of PLA, Chongqing 401311, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China)

Received: Oct. 10, 2016

Key words: coral sand; biocementation; calcium carbonate; magnesium carbonate

Abstract: Using calcium, magnesium, and iron ions with *Bacillus pasteurii* to biocement coral sand, we investigated and compared the effect of coral sand biocementation with different types of metal ions. The results show that coral sand can be cemented tightly by calcium carbonate and magnesium carbonate produced by *Bacillus pasteurii*, whereas in the same test conditions, the biocementation of iron ions was unsuccessful in the reaction process. Our analyses of permeability, dry density, unconfined compressive strength, and microstructure suggest that compared with specimens biocemented with magnesium ions, specimens biocemented with calcium ions undergo a more stable biocementation process, have a wider range of dry density, and better strength and particle packaging. Our test results indicate that calcium ions are ideal metal ions for the biocementation of coral sand. In this paper, we discuss the influence of metal ion type on coral sand biocementation for the first time, which provides a theoretical basis for the development of microbial biocementation technology and a certain reference value for further applications of this technology.

(本文编辑: 刘珊珊)