

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2016.02.007

颗粒粒径对微生物固化珊瑚砂的影响

欧益希¹, 方祥位¹, 申春妮², 李捷¹, 高菱悦³

(1. 后勤工程学院 军事土木工程系, 重庆 401311; 2. 重庆科技学院 建筑工程学院, 重庆 401331;

3. 后勤工程学院 国防建筑规划与环境工程系, 重庆 401311)

摘 要: 为了确定微生物固化珊瑚砂的最佳粒径范围, 提高固化效果, 选取 5 组不同单一粒径的珊瑚砂试样进行微生物固化试验, 通过固化后珊瑚砂试样的表观特征分析、渗透性改变对比, 以及利用环境扫描电镜对固化后的珊瑚砂颗粒进行微观扫描, 以此综合分析颗粒粒径对微生物固化珊瑚砂的影响。试验表明, 中等粒径(0.075 mm ~ 2 mm)的珊瑚砂试样固化效果较好, 特别是中砂(0.25 mm ~ 0.5 mm)试样, 经固化后整体性最好, 无侧限抗压强度达到 2.61 MPa, 经微观照片显示, 珊瑚砂颗粒表面被一层形状不规则且带棱角的碳酸钙结晶包裹, 这些结晶填充了颗粒之间的部分孔隙; 粗粒径(大于 2 mm)和细粒径(小于 0.075 mm)的珊瑚砂试样, 由于其颗粒间孔隙和渗透性等因素导致固化效果较差。

关键词: 珊瑚砂; 微生物; 固化; 粒径; 渗透性

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2016)02-0035-05

Influence of Particle Sizes of Coral Sand on Bio-cementation

OU Yixi¹, FANG Xiangwei¹, SHEN Chunni², LI Jie¹, GAO Lingyue³

(1. Department of Civil Engineering, LEU, Chongqing 401311, China;

2. School of Civil Engineering and Architecture, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China;

3. Department of National Defence Architecture Planning & Environmental Engineering, LEU, Chongqing 401311, China)

Abstract: In order to determine the optimal size range of coral sand for bio-cementation and improve the effect of bio-cementation, five groups of different particle sizes were selected to analyze the influence of different particle sizes of coral sand on bio-cementation were conducted by analyzing the apparent characteristics of biocemented coral sand samples, contrasting the change of permeability of biocemented coral sand samples and scanning microscopic structure of coral sand by environment scanning electron microscope. The tests indicate that the biocementing effect of medium size (0.075 mm ~ 2 mm) coral sand samples is better, especially for medium sand (0.25 mm ~ 0.5 mm) works best, and the unconfined compressive strength is 2.61 MPa. According to the microscopic photographs, particles of coral sand are wholly surrounded by a large number of irregular and angular calcium carbonate crystals after biocementing, and part of intergranular pores are filled by the calcium carbonate. Because of the factors of pores between particles and permeability of coral sand et al, biocementing effect of large size (particle size is greater than 2 mm) and small size (particle size is less than 0.075 mm) coral sand is poorer.

Keywords: coral sand; microbe; biocementation; particle size; permeability

微生物成矿技术在砖石古建筑修复、地基加固、边坡防护和改善地基基础抗渗性中逐渐被广泛应用^[1], 张越等^[2]利用微生物诱导碳酸钙沉积技术对

某地下室渗漏的问题进行了现场试验, 试验发现生成碳酸钙结晶填充了部分土体孔隙, 并减轻了渗水现象, 姜欢^[3]对微生物诱导碳酸钙沉淀用于防渗堵

收稿日期: 2015-11-27

修稿日期: 2015-12-30

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

作者简介: 欧益希(1990—), 男, 四川广安人, 硕士研究生, 研究方向为岩土微生物技术及应用。E-mail: ouyixi@yeah.net

通讯作者: 方祥位(1975—), 男, 重庆铜梁人, 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工作。

E-mail: fangxiangwei1975@163.com

漏做了深入研究,并分析了其防渗机理。微生物成矿技术可作为一种新型技术^[4-6]用于土壤固化,该技术固化时间短,且固化产物为性质稳定的难溶性碳酸盐,一般不会对环境造成影响,对特殊地区的土壤固化和改性具有良好的优势和前景^[7-9]。黄琰等^[10-11]对微生物诱导方解石沉淀加固进行了基础研究,并探讨了它的影响因素。

珊瑚礁岛是分布在海洋中水深较浅地方的一种石灰石堆积物,一些岛礁由于其所处的地理位置对于维护国家主权利益具有重要的战略意义,常被称为永不沉没的航空母舰。珊瑚砂是分布在珊瑚礁岛表层主要的岩土介质,其主要组成成分为碳酸钙,它的工程力学性质与内陆的普通石英砂有很大的区别^[12-13]。随着我国南海岛礁建设步伐加快,合理处理珊瑚砂是岛礁工程的一个重要问题。使用微生物固化技术对珊瑚砂进行固化处理,不会影响珊瑚礁盘的生长,固化后的珊瑚砂强度高,工程性能好,且渗透性降低不明显,可用于道路、机场跑道、建筑物地基加固和环海护坡等岛礁工程中。方祥位等^[14-15]在国内率先对微生物沉积碳酸钙固化珊瑚砂进行了试验研究,研究得出经固化后珊瑚砂渗透性降低 1~2 个数量级,无侧限抗压强度最高可达 14 MPa。

珊瑚砂的微生物固化工艺从溶液通入方式上通常分为两种^[14],一种是先向珊瑚砂中通入特定的菌液,使微生物吸附在珊瑚砂颗粒表面,再通入固化液(其成分为尿素和氯化钙),微生物水解尿素产生碳酸根离子,与固化液中的钙离子结合生成碳酸钙,碳酸钙作为胶结物对珊瑚砂颗粒形成包裹并填充颗粒间部分孔隙,将珊瑚砂黏结成具有一定强度的整体,以此来完成固化;另一种是先将菌液、固化液按一定比例混合通入珊瑚砂中,溶液混合后迅速变成碳酸钙悬浊液,通过碳酸钙悬浊物附着珊瑚砂表面并填充颗粒孔隙,附着的悬浊物有利于碳酸钙结晶,从而形成粘结,这种通入方式较前一种而言,反应速度快,短时间内生成的碳酸钙量较多,容易导致试样的溶液通入端孔隙堵塞,造成与流出端的固化效果存在较大差异。

珊瑚礁岛表层不同区域的珊瑚砂粒径组成不尽相同,所采取的微生物固化工艺也应有所区别。珊瑚砂的颗粒粒径决定了整体的渗透性和微生物对于颗粒的吸附,直接影响珊瑚砂的最终固化效果。对于不同粒径的珊瑚砂在微生物固化中的影响至今鲜见报道,为了确定微生物固化珊瑚砂的最佳粒径范

围,本文针对不同单一粒径组成的珊瑚砂进行微生物固化试验,初步研究颗粒粒径对微生物固化珊瑚的影响。

1 试 验

1.1 试验制备

微生物:固砂微生物采用巴斯德氏芽孢杆菌(*Bacillus Pasteurii*),将微生物接种到经灭菌处理的液体培养基中,并置于振荡培养箱中培养(振荡频率为 180 r/min,温度为 30℃),36 h 后取出放在 4℃ 冰箱中保存备用,测其脲酶活性为 2.2 mmol/(L·min)。培养基主要成分如表 1 所示。

表 1 培养基成分

酵母 浸出粉 /(g·L ⁻¹)	胰蛋 白胨 /(g·L ⁻¹)	氯化钠 /(g·L ⁻¹)	尿素 /(g·L ⁻¹)	氯化 镍	氯化 锰
10	10	20	20	微量	微量

骨料:采用取自海南省三沙市永兴岛沿岸的珊瑚砂,其主要成分为碳酸钙。将珊瑚砂过筛后按不同粒径分别装入内径 5 cm、长 30 cm 的模具中各 300 g,表 2 为各分组参数。

表 2 试验分组设计

分组	1 号	2 号	3 号	4 号	5 号
粒组	细砾	粗砂	中砂	细砂	细粒
粒径/mm	2~5	0.5~2	0.25~0.5	0.075~0.25	<0.075

1.2 试验方法

固化试验采用菌液与固化液分开通入的方式,固化液由 2 mol/L 氯化钙溶液与 2 mol/L 尿素溶液按体积比 1:1 混合。首先从试验模具上部通入菌液,使其以较快速度从底部出水管流出,反复通入 3~4 遍,让微生物充分吸附在珊瑚砂颗粒表面;然后通入固化液,控制固化液以较慢的恒定速度流出,使固化液与吸附在珊瑚砂颗粒表面的微生物充分反应,待固化液流尽后,将流出的固化液重新通入,重复 3~4 遍后更换新的菌液和固化液,按照上述操作进行通入。每更换一次新菌液和固化液为固化一次,每次固化后,采用变水头试验法对试样的渗透系数进行测定。固化试验结束后,将珊瑚砂试样置于恒温鼓风烘箱(温度为 80℃,时间为 48 h)进行烘干。

微生物细胞表面通常带有负电荷,容易使带正电荷的钙离子吸附在细胞壁表面,在固化反应过程

中,尿素分子进入微生物细胞内部与产生的脲酶反应产生碳酸根离子并运输到细胞外部,结合吸附在细胞表面的钙离子形成碳酸钙,以细胞为晶核形成碳酸钙结晶,随着细胞表面逐渐被包裹,阻碍了营养

物质进入细胞内部,最终导致微生物死亡。微生物固化反应过程示意图如图 1 所示。形成的碳酸钙结晶对珊瑚砂颗粒逐渐形成包裹,并填充颗粒间部分孔隙,黏结珊瑚砂颗粒成为具有一定强度的整体。

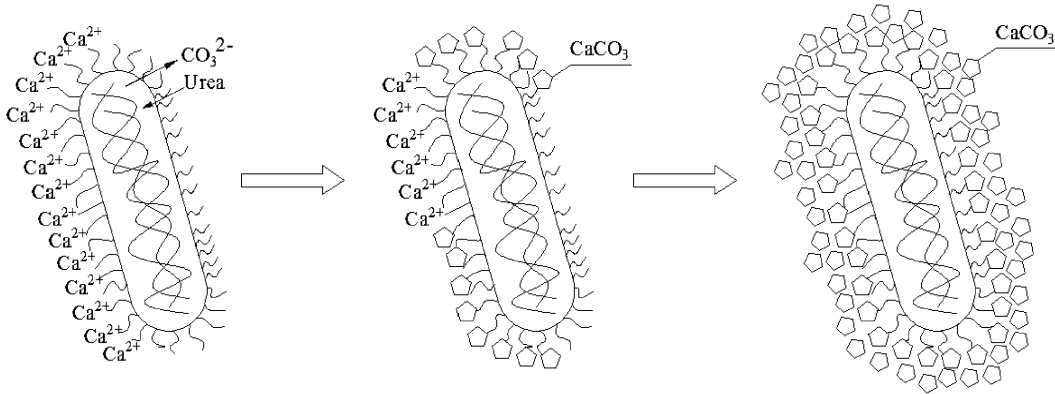


图 1 微生物的固化反应过程

2 试验结果与分析

2.1 珊瑚砂固化体的表观特征

珊瑚砂试样固化后经烘干拆模,如图 2 所示。1 号试样经微生物固化后仍处于松散状态,仅有少数颗粒相互黏结形成碎块,并没有形成整体固化;2 号

试样基本形成固化,但试样中部出现 2 处断裂现象;3 号试样整体固化较好,形成了具有一定强度的整体;4 号试样经固化后上部(溶液通入端)基本形成固化,但下部(溶液流出端)固化效果较差,出现破碎现象;5 号试样除了顶部表面略微变硬以外,整体基本没有形成固化。

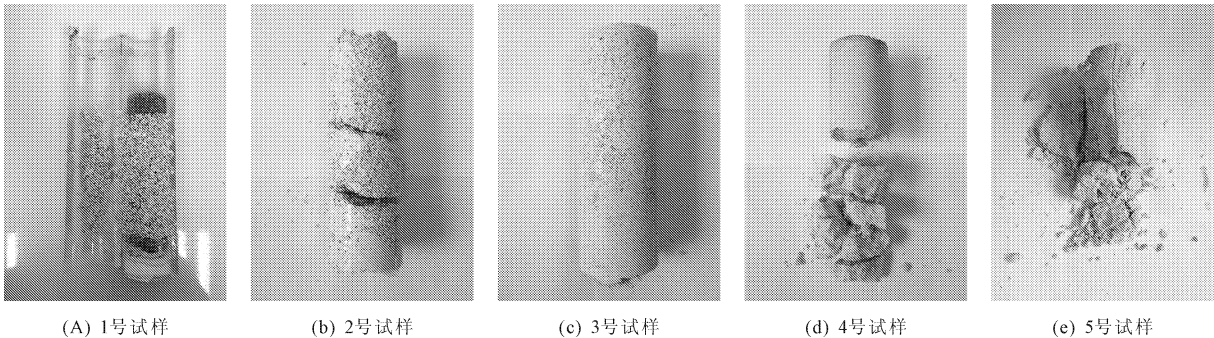


图 2 固化后的珊瑚砂试样

从固化后的珊瑚砂试样干密度(见表 3)变化可以看出,经微生物固化后,各组试样的干密度均有增加。3 号试样的干密度提高最多,增加约 35.9%,固化效果也最好,将试样切割成 10 cm 长的标准试样进行无侧限压缩试验,得其无侧限抗压强度为 2.61 MPa;1 号试样虽然经固化后干密度得到了提高,颗粒表面可以看出存在明显的白色物质,但是没有形成整体固化,可能是由于珊瑚砂颗粒较大,颗粒比表面积较小,颗粒之间的接触面积也较小,且颗粒之间孔隙较大,以微生物细胞为晶核形成的碳酸钙结晶远小于颗粒之间的孔隙,仅能对珊瑚砂颗粒表面形成包裹,光靠黏结颗粒之间接触点难以使珊瑚砂形

成为一个牢固的整体。5 号试样经固化后干密度几乎没有变化,结合表观特征,说明试样仅是通入端表面发生了固化反应。

表 3 珊瑚砂试样经固化后的干密度变化

分组	初始干密度 /(g·cm ⁻³)	固化后的干密度 /(g·cm ⁻³)	干密度增加百分比 /%
1 号	1.09	1.29	18.1
2 号	1.09	1.36	24.9
3 号	1.13	1.54	35.9
4 号	1.22	1.55	27.1
5 号	1.13	1.14	0.7

2.2 珊瑚砂固化体的渗透性

渗透性的改变在微生物固化中是固化效果的一个重要表现,也是影响试样最终固化效果的一个重要因素,试验中各组试样渗透系数随固化次数变化如图 3 所示。

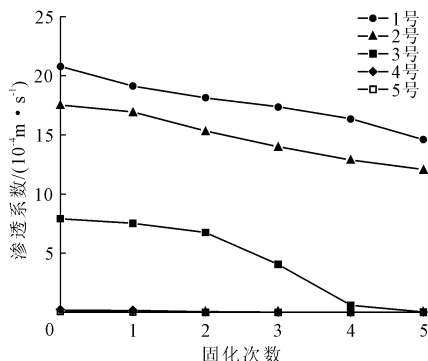


图 3 渗透性变化

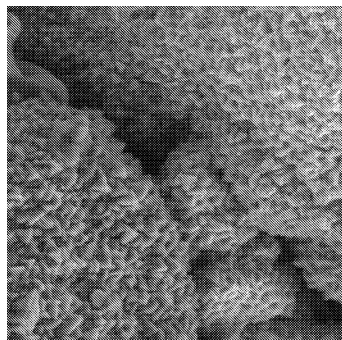
由图 3 可以看出,试样的渗透系数随固化液的不间断注入逐渐降低,固化 5 次后,1 号和 2 号试样的渗透系数分别从 $20.788 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ 和 $17.527 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ 降低到 $14.609 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ 和 $12.078 \times 10^{-4} \text{ m/s}$,渗透系数降低了约 30%,降低不明显。对于粒径较大的珊瑚砂,可能是因为其颗粒间的孔隙较大,故试样整体渗透性较大,通入菌液后菌液迅速流过珊瑚砂,微生物无法较好地吸附在珊瑚砂颗粒表面,由于碳酸钙是以吸附在珊瑚砂上的微生物为晶核形成的结晶,故而每次通入溶液后生成的碳酸钙结晶较少,对颗粒表面的包裹层较薄,无法填充珊瑚砂颗粒之间的较大孔隙;4 号和 5 号试样的初始渗透系数分别为 $0.154 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ 和 $0.069 \times 10^{-4} \text{ m/s}$,4 号试样

在固化 2 次后渗透系数降为 0,而 5 号试样在通入第一次固化液时不久便失去渗透性,说明粒径较小的珊瑚砂,其本身颗粒间孔隙较小,渗透性也较小,由于固化液是从试样上部通入渗向下部,固化反应首先从试样上部开始,通入固化液后,固化液中的尿素和氯化钙与吸附在珊瑚砂颗粒表面的微生物反应,生成的碳酸钙结晶填充了试样上部的珊瑚砂颗粒间孔隙,降低了渗透性,阻碍了溶液向下渗入,使得试样下部固化效果较差或没有发生固化反应。

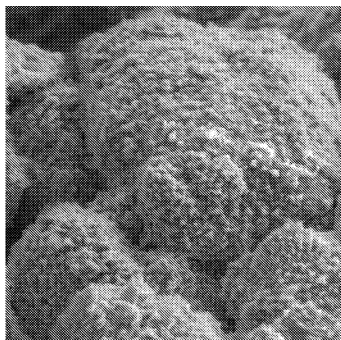
2.3 珊瑚砂固化体的微观结构特征

利用荷兰 FEI 仪器公司生产的 Quanta 200 型环境扫描电镜,对固化较好的 2~4 号珊瑚砂试样进行 SEM 扫描,其微观形貌如图 4 所示,图 4(a)~图 4(c) 分别为 2~4 号试样珊瑚砂放大 500 倍的微观图。

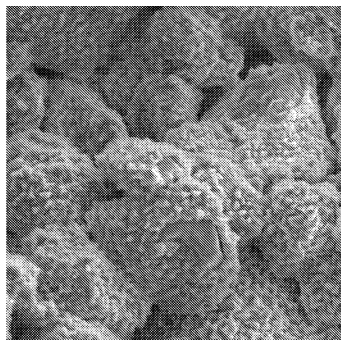
由图 4 可以看出,2~4 号试样经微生物固化后珊瑚砂颗粒表面均被一层形状不规则且带棱角的碳酸钙结晶包裹,产生了较好的胶结效果。2 号试样由于其粒径较大,经微生物固化后珊瑚砂颗粒之间依然存在较大的孔隙;4 号试样由于其粒径较小,相比 2 号和 3 号试样更为密实。从 3 号和 4 号试样珊瑚砂的微观图还可以看出,由于微生物固化反应生成的碳酸钙结晶不仅对颗粒表面形成包裹,还对颗粒之间的部分孔隙进行了填充,这可能是由于微生物吸附在上一次固化后珊瑚砂表面形成的碳酸钙结晶层上,与固化液发生反应后,生成新的碳酸钙结晶加厚了珊瑚砂颗粒表面的包裹层,在颗粒之间的较小孔隙处产生连接,从而使得颗粒之间胶结程度更加牢固。



(a) 2 号试样



(b) 3 号试样



(c) 4 号试样

图 4 固化后的珊瑚砂颗粒微观照片

3 结 论

(1) 中等粒径($0.075 \text{ mm} \sim 2 \text{ mm}$)的珊瑚砂试样固化效果较好,特别是中砂($0.25 \text{ mm} \sim 0.5 \text{ mm}$)试

样,经固化后整体性最好。

(2) 粗粒径(大于 2 mm)的珊瑚砂,由于其颗粒间孔隙较大,颗粒之间的接触面积较小,微生物固化反应产生的碳酸钙结晶难以填充颗粒间孔隙和对颗

粒之间形成牢固黏结,使用菌液与固化液分开通入的方式固化效果较差。

(3) 细粒径(小于 0.075 mm)的珊瑚砂,由于其本身渗透性较小,试验时,随着固化液从试样上部往下渗入,固化反应从试样上部开始发生,上部渗透性降低后减缓并阻碍了固化液下渗,使得试样下部难以形成固化。

(4) 目前仅对单一粒径的珊瑚砂进行了试验研究,不同级配的珊瑚砂固化效果的影响有待进一步研究。

参考文献:

[1] 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.

[2] 张越,郭红仙,程晓辉,等.微生物诱导碳酸钙沉积技术治理某地下室渗漏的现场试验[J].*工业建筑*,2013, 43(12):138-143.

[3] 姜欢.微生物诱导碳酸钙沉积防渗堵漏的试验研究[D].*济南:山东建筑大学*,2014.

[4] Whiffin V S. Microbial CaCO₃ precipitation for the production of biocement[D]. *Perth: Murdoch University*, 2004.

[5] DeJong J T, Fritzges 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.

[6] 荣辉,钱春香,李龙志.微生物水泥胶结机理[J].*硅酸盐学报*,2013,41(3):314-319.

[7] 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.

[8] Chu J, Ivanov V, Naeimi M, et al. Optimization of calcium-based bioclogging and biocementation of sand[J]. *Acta Geotechnica*, 2013, 9(2): 277-285.

[9] Paassen L A V. Bio-mediated ground improvement from laboratory experiment to pilot applications[C]// *Geo-Frontiers 2011: Advances in Geotechnical Engineering*. Texas, United States: American Society of Civil Engineers, 2015: 4099-4108.

[10] 黄琰,罗学刚,杜菲.微生物诱导方解石沉积加固的影响因素[J].*西南科技大学学报*,2009,24(3): 87-93.

[11] 黄琰.微生物诱导方解石沉积加固的关键技术研究[D].*绵阳:西南科技大学*,2009.

[12] 孟庆山,秦月,汪稔.珊瑚礁钙质沉积物液化特性及其机理研究[J].*土工基础*,2012,26(1):21-24.

[13] 朱长歧,陈海洋,孟庆山,等.钙质砂颗粒内孔隙的结构特征分析[J].*岩土力学*,2014,35(7): 1831-1836.

[14] 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.

[15] 方祥位,楚剑,申春妮,等.利用微生物固化松散珊瑚砂的方法:CN103773376A[P].2014-05-07.



(上接第 34 页)

[10] 王峥峥,张哲,高波,等.山岭隧道洞口震害因素分析与抗震风险模糊综合评价[J].*中南大学学报(自然科学版)*,2012,43(3):1122-1130.

[11] 路美丽,刘维宁,罗富荣,等.隧道与地下工程风险评估方法研究进展[J].*工程地质学报*,2006,14(4):462-469.

[12] 程远,刘志彬,刘松玉,等.基于层次分析法的大跨浅埋公路隧道施工风险识别[J].*岩土工程学报*,2011, 33(S1): 191-195.

[13] 张英,沈蕊文.AHP法在工程风险评估中的应用及风险防范[J].*水利与建筑工程学报*,2009,7(3): 63-65.

[14] 欧尔峰,严松宏,梁庆国.岩体隧道施工安全风险模糊综合评判研究[J].*兰州交通大学学报*,2011,30(4): 38-42.

[15] 许崇帮,田海宁,周宁.鳌峰山隧道洞口段风险源辨识与风险评估分析[J].*公路交通科技*,2012,29(10): 96-101.

[16] 吕厚伟,马成松.建筑工程评标中模糊层次分析法的应用[J].*水利与建筑工程学报*,2007,5(2): 61-65.