

doi: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.097

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



# 微生物加固钙质砂的宏微观力学机理

刘汉龙, 马国梁, 赵常, 张娟, 何想, 肖杨

(重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045)

## Macro- and micro- mechanical regime of biotreated calcareous sand

Liu Hanlong, Ma Guoliang, Zhao Chang, Zhang Juan, He Xiang, Xiao Yang

(College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

微生物岩土技术是一种利用微生物诱导调控无机矿物生长以胶结砂土颗粒、填充土体孔隙来达到固化土体、降低砂土体渗透系数等目的的新型岩土加固技术,以尿素水解为反应方式的微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)技术的研究最为广泛<sup>[1]</sup>。

采用两相法加固钙质砂样(图 1),通过无侧限抗压试验、劈裂抗拉试验、等向压缩试验、三轴固结不排水试验、三轴固结排水试验,研究了 MICP 加固钙质砂的变形特性<sup>[2]</sup>。结果表明, MICP 加固可有效降低钙质砂的压缩性,其变形模量随着加固因子的提高呈指数增长;钙质砂经 MICP 加固后的应力-应变特性是由应变硬化逐步向应变软化过渡,其剪胀性随加固程度的增加而增加。

根据抗压、抗拉、抗剪试验结果,系统分析 MICP 加固钙质砂的强度特性,发现 MICP 加固钙质砂的强度随加固程度的提高而增加,特别是 MICP 加固钙质砂的抗压强度、抗拉强度以及抗剪强度的黏聚力均随加固因子的增加呈指数增长;基于莫尔库仑破坏准则,提出了未加固钙质砂以及 MICP 加固钙质砂的统一强度理论;通过 X 射线荧光光谱分析、X 射线衍射分析、扫描电镜等微观分析,探究了 MICP 改善钙质砂强度特性的微观机理。

在系统研究 MICP 加固钙质砂变形和强度特性的基础上,基于界面塑性理论和临界状态理论框

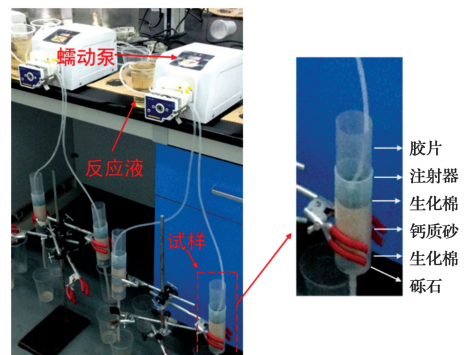


图 1 微生物加固钙质砂试样

Fig. 1 Sample preparation device used to prepare biocemented calcareous sand specimens

架,建立了考虑 MICP 胶结作用以及剪切过程中因胶结断裂而产生退化效应的界面本构模型,并通过 MICP 加固钙质砂的三轴试验结果验证了模型的可行性。

采用不同来源的游离钙离子加固钙质砂发现,将醋酸溶解的钙离子和氯化钙作为钙源加固钙质砂,试样的干密度均随加固次数增加而增加,渗透系数均随加固次数增加而减小,强度和刚度均随加固次数增加呈指数增加,且用醋酸钙加固后试样的强度更高。

经过 MICP 处理后的钙质砂动强度随加固程度呈现出不同的演化规律,剪胀性也得到了提高,循环

收稿日期:2020-07-10

基金项目:国家自然科学基金(51922024,41831282)

作者简介:刘汉龙(1964-),男,教授,博士生导师,主要从事岩土工程研究,E-mail: hliuhhu@163.com。

肖杨(通信作者),男,教授,博士生导师,E-mail: hhuxyanson@163.com。

抗剪能力明显增加,表现出类似密砂的特性<sup>[3]</sup>。随着加固程度的提高,相同破坏振次所需的动强度也显著提高。经过 MICP 处理后的钙质砂,孔隙水压力的发展趋势逐渐变缓,钙质砂的孔压发展大致可以分为 4 个阶段:初始阶段、稳定发展阶段、快速发展阶段(试样逐渐开始发生失稳现象)、完全液化阶段(试样发生失稳破坏)。

在相同破坏振次下,未加固的天然钙质砂试样所需的动强度随着试样相对密实度的增加而显著提高,经过 MICP 加固处理后,密实度对钙质砂的动强度影响将逐渐减弱,说明松砂的加固效率相对于中密砂更高,且加固次数越多效果越明显。钙质砂相对密实度的增加导致循环应力比不断增加,且相对密实度越大,孔压发展相对越平缓。随着加固程度的增加,孔压发展也逐渐趋于平缓,循环活动特征更显著<sup>[4]</sup>。

在循环应力作用下,经 MICP 加固后的钙质砂弹性阶段明显变长,且随着加固程度的增加,轴向动应变发展逐渐变缓,失稳点后移。此外,试样的压缩趋势和压缩幅度均有所减小,钙质砂从多孔材料逐渐转变为具有一定强度和刚性的材料,进而提高了抵抗变形的能力。循环应力比与有效围压也是影响抗液化性能的重要因素,有效围压的大小将显著影响动强度值,在相同循环振次下,有效围压越大,动强度越大。同时,循环应力比的增加也会导致发生液化所需的循环振次更少。

针对人工吹填岛礁地基开展了微生物加固试验,试验场地如图 2(a)所示,将拟加固地基分为 4 块,每块长 1.5 m,宽 1.5 m,拟加固厚度为 0.5 m。4 块地基的加固次数分别为 0、3、6、9 次。加固过程中使用的反应液浓度为 1 mol/L 等浓度的尿素和氯化钙溶液<sup>[5]</sup>。在加固过程中采用袖珍灌入仪检测地基表面加固效果,加固结束后使用回弹仪测试地基加固强度,然后开挖地基,检测地基加固深度,并测试无侧限抗压强度。

利用表面倾倒法加固人工吹填岛礁地基,加固后的照片见图 2(b)。经过 3~4 次微生物加固处理后,地基表面强度开始提升;经过 9 次微生物加固处理后,地基加固深度可达 70 cm;微生物加固后的地基表面强度均大于 10 MPa,最高可达 20 MPa;无侧限抗压强度最高可达 821 kPa。加固结果表现出明显的不均匀性,包括了加固过程中强度增长的不均匀性以及加固结束后强度分布的不均匀性。这说明在工程实践过程中,还需要进一步考虑土体不均匀性对加固效果及对整体加固强度的影响。



(a)加固前地基

(b)加固后地基

图 2 MICP 加固人工吹填岛礁地基前后对比

Fig. 2 Comparison before and after reinforcement of artificial reef foundation by MICP

微生物加固技术能有效胶结钙质砂,提高其强度及其抗液化能力。通过开展现场地基加固试验,验证了 MICP 技术应用于钙质砂地基加固的可行性。

#### 参考文献:

- [1] 刘汉龙,肖鹏,肖杨,等. 微生物岩土技术及其应用研究新进展[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2019, 41(1): 1-14.  
LIU H L, XIAO P, XIAO Y, et al. State-of-the-art review of biogeotechnology and its engineering applications [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2019, 41(1): 1-14. (in Chinese)
- [2] LIU L, LIU H L, STUEDLEIN A W, et al. Strength, stiffness, and microstructure characteristics of biocemented calcareous sand [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2019, 56(10): 1502-1513.
- [3] XIAO P, LIU H L, XIAO Y, et al. Liquefaction resistance of bio-cemented calcareous sand [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2018, 107: 9-19.
- [4] XIAO P, LIU H L, STUEDLEIN A W, et al. Effect of relative density and biocementation on cyclic response of calcareous sand [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2019, 56(12): 1849-1862.
- [5] 刘汉龙,马国梁,肖杨,等. 微生物加固岛礁地基现场试验研究[J]. 地基处理, 2019(1): 26-31.  
LIU H L, MA G L, XIAO Y, et al. In situ experimental research on calcareous foundation stabilization using MICP technique on the reclaimed coral reef islands [J]. Chinese Ground Improvement, 2019(1): 26-31. (in Chinese)