

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.007



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



微生物加固研究可视化试验系统的开发与应用

李俊¹, 何想^{1,2}, 张瑾璇¹, 赵常¹, 肖杨¹, 刘汉龙¹

(1. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 2. 南洋理工大学土木与环境学院, 新加坡 639798)

摘要: 微生物加固是近十几年来兴起的绿色低碳建筑技术, 在地基处理、边坡治理、混凝土裂缝修复等方面具有较好的应用前景。微生物加固涉及复杂的生物-物理-化学动态过程, 需要开发实时可视化系统对其反应机理和加固机制进行研究。分析微生物加固可视化系统研发的必要性, 提出微生物加固可视化试验系统由溶液输送系统、微反应器、观测系统、环境控制及监测系统组成的主要构造思路, 其中溶液输送系统用于进样和控制流场边界条件, 微反应器作为反应模具, 观测系统用于反应过程的实时观测, 环境控制及监测系统用于控制温度、光照等外部环境条件并获取流体压力等反馈数据。研究以图像处理为主, 辅以环境监测的试验数据获取方法, 提出相应的试验结果分析方法。结果表明: 微生物加固可视化系统既能直接获取加固过程图像和渗透压力变化数据, 亦能与扫描电镜等微观试验手段相结合进行材料表征和微观力学特性分析; 开发的试验系统能用于微生物加固的微观实时研究, 为微生物加固微观机制研究提供了新的手段, 有利于揭示微生物加固机理。

关键词: 微生物加固; 试验系统; 生物矿化; 微生物诱导碳酸钙沉淀; 微流控

中图分类号: TU415 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2024)03-0073-07

Development and application of visualization test system for biocementation

LI Jun¹, HE Xiang^{1,2}, ZHANG Jinxuan¹, ZHAO Chang¹, XIAO Yang¹, LIU Hanlong¹

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 2. School of Civil and Environmental Engineering, Nanyang Technological University, Singapore 639789, Singapore)

Abstract: Biocementation is a green and low-carbon building technique that has emerged in recent decades. It shows promising prospects in foundation treatment, slope treatment, and concrete crack repair. Biocementation involves complex bio-physical-chemical dynamic processes, requiring developing a real-time visualization system to figure out the regimes of reaction and reinforcement. The necessity of developing the visualization system for biocementation is analyzed. A framework of the visualization test system is established for biocementation, composing of a solution transport system, microreactor, observation system, as well as environmental control and monitoring system. The solution transport system is used for solution delivery and

收稿日期: 2022-11-02

基金项目: 国家自然科学基金(52078085); 重庆英才计划优秀科学家项目(cstc2021ycjh-bgzxm0051)

作者简介: 李俊(1998-), 男, 主要从事微生物固化技术与土体改良研究, E-mail: lijuncqu03@163.com。

何想(通信作者), 男, 博士, E-mail: medihe@163.com。

Received: 2022-11-02

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 52078085); Chongqing Talents Program (No. cstc2021ycjh-bgzxm0051)

Author brief: LI Jun (1998-), main research interests: bio-stabilization and soil improvement, E-mail: lijuncqu03@163.com.

HE Xiang (corresponding author), PhD, E-mail: medihe@163.com.

fixing of boundary conditions. The microreactor is used as a mold for reaction. The observation system is used to visualize the reaction process. The environmental control and monitoring system is used to control the environmental conditions such as temperature and light and also collect the feedback data including fluid pressure. The methods for test data acquisition are based on image processing associated with the data logged by the environmental monitors. Analytical approaches are also proposed to deal with the test data. Results show that the biocementation visualization system can not only directly obtain the image of the reinforcement process and the data of the osmotic pressure change, but also be combined with microscopic test methods such as scanning electron microscopy for material characterization and micro-mechanical characteristics analysis. It can be used for microscopic real-time research of biocementation, providing a new method for study of the microscopic mechanism of biocementation, which is conducive to revealing the mechanism of biocementation.

Keywords: biocementation; test system; biomineralization; microbially-induced carbonate precipitation; microfluidics

微生物加固是利用微生物新陈代谢作用过程或作用产物实现建筑、岩土地质等材料工程性能改善的一系列工程技术总称^[1]。作为近十几年来兴起的新技术,微生物加固与传统加固技术存在显著差异。从全寿命周期的角度来分析,相较于化学注浆、水泥等为代表的传统加固技术,微生物加固在能量消耗、碳排放量及环境保护等方面较具优势^[2]。在全球气候变暖及能源危机日益严峻的时代背景下,微生物加固技术符合长远的发展趋势,有望引领下一代工程加固技术,成为目前的研究热点^[3-4]。

微生物加固技术按照作用途径不同可分为微生物产气^[5]、微生物矿化^[6]、微生物膜^[7-8]等。微生物矿化因其同时具备胶结土体、填充孔隙的能力,在边坡防止侵蚀、地基防液化、地基防渗等工程案例^[9-11]中,显示了良好的应用前景。总体说来,目前大部分研究基于传统的力学及土木工程的知识体系,着重于探究加固前后材料工程力学特性的变化,并分析其影响因素,如饱和度^[12]、颗粒粒径^[13]、纤维改性等^[14-15]。然而,微生物矿化加固涉及矿物材料的结晶、生长、沉积,多孔介质中迁移等一系列复杂的生物-物理-化学动态过程,传统的力学和土木工程学科的研究对象主要以静态体的形式存在,无法捕捉动态反应过程揭示矿化加固的演化规律^[16],而微生物矿化加固的演化规律对于探明矿化机理及加固机制具有重要的基础理论意义^[17-18]。

可视化是生物、物理等学科的主要研究手段之一,也是岩土工程试验研究领域的重要分支。早在20世纪90年代,有学者制备了可视化静力触探仪^[19]。21世纪初,Iskander等^[20-21]研发了透明土系统用于研究岩土工程中的应力和渗流问题,此后以数字图像相关(DIC)和粒子图像测速度(PIV)为基础的岩土可视化技术大量用于研究各类岩土工程问题^[22]。然而,该技术并不能研究包含矿物生长等化

学问题在内的微生物加固研究。针对化学过程研究,20世纪有学者提出了微分析系统(μ TAS)^[23],通过将化学分析仪器微型化以达到反应更可控、检测更便捷的目的,并由此发展了微流控技术^[24]。微流控技术的独特优点在于对于反应流体的可控性,此外由于反应腔室或管道常由石英、有机树脂等透明材料制备形成^[25-26],因此,通过常规的光学仪器即能观测整个反应过程,适宜于矿物晶体的生长研究。将微流控技术应用于微生物加固试验研究近年来逐渐成为研究热门,相关成果不断出现。

Wang等^[18]利用微流控技术研究了细菌的分布和碳酸钙晶体的生长过程。何想等^[16]采用微流控技术研究了微生物加固过程中孔隙间碳酸钙的胶结行为,并对颗粒尺度的碳酸钙生长进行了量化^[17]。Xiao等^[27]研究了微生物矿化的动力学特性,分析了浓度、细菌分布等因素对晶体生长行为的影响^[28]。鉴于可视化试验系统对于研究微生物加固机制的重要性,笔者在微流控技术的基础上结合微生物加固的特点,自主研发了一套微生物加固可视化试验系统^[27-28],介绍系统的基本组成单元,简述相应的分析方法,分析矿物胶结加固机理,为微生物加固技术的优化及推广应用提供基础。

1 可视化系统组成

注浆法是微生物矿化加固技术中最主要的施工方法。注浆溶液通常分为两种,分别为微生物/酶悬浮液和反应液(如尿素和氯化钙混合液)^[29]。加固时将两种溶液混合或先后注入待加固岩土体,随后发生矿化反应生成矿物沉淀。室内微生物加固试样制备装置通常包括蠕动泵、装样模具、溶液收集瓶等,其中蠕动泵用于输送液体,装样模具为反应容器,溶液收集瓶为注浆溶液储存收集器^[30]。此外,若需研究温度、湿度的影响还需要温控箱等环

境控制设备并对温度、压力等环境参数进行监测^[31]。借鉴室内微生物加固试样制备装置,微生物矿化加固微型化系统需要包括溶液储存、输送设备及反应器,而为实现可视化还需要配备观测设备。依据上述分析,将微生物加固可视化系统分为4个子系统,分别为溶液输送系统、微反应系统、观测系统、环境控制及监测系统^[16]。

1.1 溶液输送系统

溶液输送系统主要由注射泵、注射器、导管、接头组成,如图1所示。由于微反应器所需的溶液量较少,因而注射泵要求的精度较高,通常为mL~ μ L量级。采用的为Harvard注射泵,精度可达1.28 μ L/min。注射器需要较大的刚度且量程应与注射泵匹配,通常采用高硼硅玻璃制成,如采用Hamilton注射器。导管用于连接注射器和微反应器及废液收集瓶,为防止导管接口处漏液,导管的末端需先与接头相联。接头的类型与所连接的装置有关,如用于连接注射器的鲁尔接头,连接压力传感器的三通接头及连接微反应器的钢接头等。需要指出的是,若导管的刚度足够大,则无须使用钢接头。

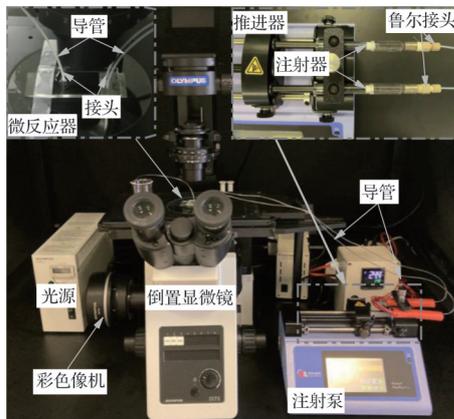


图1 注射泵及溶液输送系统

Fig. 1 Syringe pump and solution transport system

1.2 微反应系统

微反应系统又被称为微流控芯片,是微生物加固可视化系统的核心组成之一,也是研制流程最为复杂的子系统,其制备材料、结构与所研究的具体问题有关。一般在常温常压的研究问题中,微反应系统的制备材料为硅胶/脂,如聚二甲基硅氧烷(PDMS),一方面由于其加工工艺成熟,另一方面因其透光率较高,如PDMS的透光率超过95%。然而,PDMS为弹性材料,容易变形,不适用于高压问题研究。对于高压问题,常使用二氧化硅制备微反应器。鉴于PDMS材料的微反应器应用最为广泛,下面将以PDMS微反应器为例,介绍相应的制备方法。

未固化的PDMS为高黏度流塑状液体,经过热固化后变成固态透明体,因而,可通过倒模法制备不同结构的微反应器。简单来说,制备PDMS的流程为倒模、固化、打孔、胶合4步。倒模是指将主剂和固化剂按一定比例(如10:1)充分混合除气后导入模具中;固化指将模具及PDMS置于高温条件下养护(如置于85 $^{\circ}$ C的烘箱中养护2 h);打孔是指将固化后的PDMS脱模并把含有管道结构的区域切割出来,然后在预定的位置处用打孔器按压打孔;胶合指将PDMS或玻璃片待胶合的面朝上进行等离子清洗,处理30~90 s后将待胶合面贴好并压紧,等待1~2 min后,PDMS结构与待胶合面将紧紧黏合。制备好的微反应器为包含连接导管的孔洞及内部的管道/腔室(反应容器)在内的微型立体结构。图2为Y形PDMS微流控芯片。

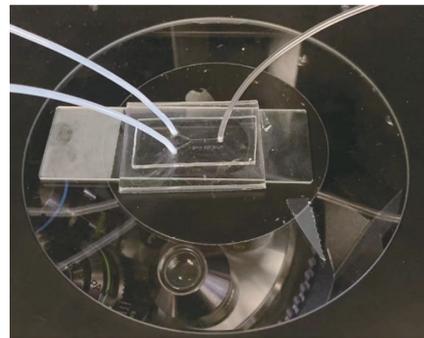


图2 Y形PDMS微流控芯片

Fig. 2 Y-shaped PDMS microfluidic chip

微反应器的管道结构按拓扑形态可分为均质多孔介质、非均质多孔介质、填砂管道、晶体旅馆等,而按照功能又可分为混合、扩散、液滴、筛选等结构。根据上述管道制备步骤可知,管道机构主要由模具决定,因而制备具有特定结构的微反应器的前提是与之匹配的模具。初始模板通常由多层材料构成,其基底材料为单晶硅,上面为二氧化硅层、光刻胶层或树脂层等。模具的生产就是将特定结构雕刻在初始模板上,模具生产工艺较多,包括软蚀刻、光蚀刻、激光雕刻等。其中,光蚀刻具有加工精度高的特点,通常为制备模具的首选工艺。在光蚀刻技术中首先需要采用设计软件(如Auto CAD等)设计需要的管道结构图形,并将其打印到掩膜板上。随后把掩模板置于初始模板的上方,紫外光通过掩模板和透镜,把图形投射到初始模板上,然后经过一系列显隐和刻蚀工艺将掩模板上的图形按一定比例大小复刻到模板上,得到微反应器模具。一般而言,微反应器模具为阳模,其管道结构部分向上凸出,因此管道的深度由模具中管道结构凸出的高度决定。在制备过程中管道结构的凸出

高度主要由初始模板光刻胶的厚度决定,当然显隐及刻蚀工艺也会对精度产生一定的影响。总体说来,模具的制备是微反应系统制备过程中最关键和复杂的一部分,需要专业的技术人员,对于非精密加工/芯片加工技术出身的研究者具有一定的技术壁垒,但是由于微芯片技术的发展,目前市面上已有相关商业化公司可提供模具代加工服务,并且制备的精度可达 $1\sim 2\ \mu\text{m}$,能够满足制备微反应器的需要。

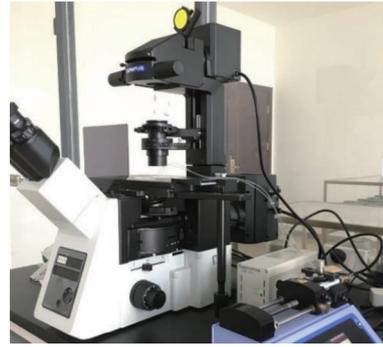
1.3 观测系统

观测系统的主要作用是获取反应过程的原始数字图像,其主要设备包括观测平台、镜头、照相机及数据存储器。由于微反应系统尺寸较小,需要经过放大才能得到便于研究的图像,因此,观测系统配备的通常为放大镜头。观测系统可以通过购买相应的设备进行搭建,亦可使用现有商业化设备,如以光学显微镜为基础的各类显微成像系统。图像的质量如清晰度、分辨率等主要受照相机和光源的影响,因而照相机也是观测系统中成本最高的设备。若采用的相机相同,对于自行搭建系统,通常选择的自由度高(如可使用光学支架和LED无影光源等),相对较为便宜,但是需要花费较多时间调试;而专业显微成像系统集成度较高(如光源、镜头、载物台等均安装在一台设备上),成本较高,购置方便,设备基本无须调试,且设备认可度较高。然而,值得注意的是,专业显微成像系统种类较多,如从显微镜的物镜和照明系统的相对位置来看可分为正置、倒置显微镜,从研究对象来看可分为生物和金相显微镜,而从照明光线来看可分为明场、暗场、相差、偏光等类型。对于微生物矿化研究而言,存在观测细菌的需要,因而一般使用生物荧光显微镜,同时具有相差功能。此外,由于微反应系统安装在观测系统上,显微镜载物台上需要较大的工作空间,采用倒置显微镜较为适宜。根据上述分析可知,带相差的倒置生物荧光显微镜较适合微生物加固可视化观测系统,图3显示了奥林巴斯倒置荧光显微镜及荧光场下观测到的砂颗粒和微生物。

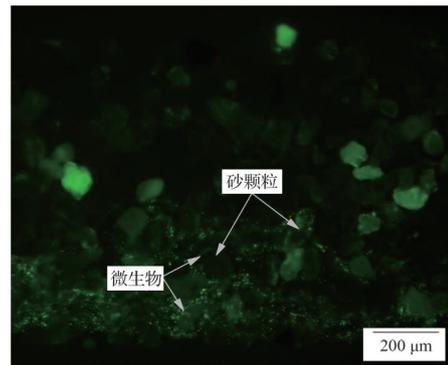
1.4 环境控制及监测系统

微生物加固可视化系统中的环境控制主要包括环境光、压力、温度的控制。环境光会影响观测结果,因而微生物加固系统需要单独的密闭空间,实现环境光隔绝。此外,该密闭空间还需具备隔热功能,防止其与外界空间进行热交换改变试验温度。

微生物矿化加固常以注浆的形式进行施工,加



(a) 倒置荧光显微镜及相机



(b) 荧光场下砂颗粒间的微生物矿化菌

图3 观测系统及典型荧光图片

Fig. 3 Observing system and typical fluorescence image

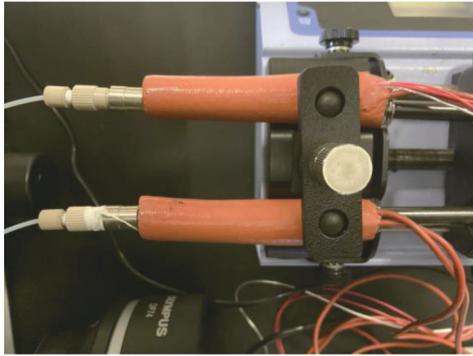
固过程中生成的矿物将颗粒间的孔隙胶结堵塞,从而导致渗透系数降低。在达西定律中,岩土体的渗透系数可通过测量水头差、流量和渗透路径得到。微反应系统中的流量可由溶液输送系统中的精密注射泵进行测量,渗透路径即反应器中反应区域溶液流入口和流出口之间的距离,而水头差为流入口和流出口之间的压力差,因而可在溶液流入口和流出口处布置压力传感器测量压力差。

温度对微生物矿化过程有较大影响,试验过程中需要对环境温度进行控制的设备包括注射器和微反应器。温度控制的方式有两种,其一是控制加固系统密闭空间的温度,并通过监测环境温度提供反馈实现对反应温度的控制;其二是通过在注射器和微反应器上粘贴柔性加热板/降温板,通过温度控制器实现升温或降温,达到温度控制的目的。其中,前者配置较为简单,但使用时需考虑升/降温时温度的滞后效应,后者温控滞后效应较弱但配置复杂,需要自行制备相应的加热/降温板。图4为笔者使用的温控仪及压力传感器。

2 试验后处理与结果分析

2.1 试验后处理

宏观微生物加固研究中试样制备完成后需要脱模取出加固后试样,并开展一系列单轴、三轴、压



(a) 温控仪



(b) 压力传感器

图4 典型监测设备

Fig. 4 Typical monitoring devices

缩、渗透等室内试验评估加固体的工程特性。在微生物加固可视化研究中,矿物的分布特性及生成量可通过图像识别和处理进行衡量评估,加固过程中渗透系数的变化亦可由流入口和流出口的压力差计算得到,而加固体的表面微观形貌、微观力学特性、晶体类型等性质无法从可视化观测系统中直接获得。与宏观试验类似,对于表征微反应器中加固体的微细观特性,需要将其从微反应器中脱模取出。加固体的脱模为微生物加固可视化试验最主要的后处理步骤。二氧化硅微反应器通过将二氧化硅熔融胶结,较难取出加固体,而其他通过表面等离子处理胶结的微反应器均较容易将管道揭开取出加固体。如可将利用PDMS制备的微反应器浸泡在乙醇中,4~5 h后便能将胶合的结构分开,随后可用精密尖头镊子将加固体从管道中取出。当加固体矿物含量较高时,取出的加固体仍能保持完整,可进行后续微观强度试验;若加固体矿物含量较低,则需要在显微镜下选出胶结的颗粒,进行力学试验。

2.2 试验结果分析

微生物加固可视化试验结果包括两部分:一部分是试验过程中观测到的加固过程图像;另一部分则为试验完成后对取出的加固体开展的一系列微

细观试验。因此,微生物加固可视化试验结果分析主要为加固图像的处理分析和加固体其他微观试验结果分析。

对于加固过程图像的分析,首先需要对原始图像进行处理,通过比较反应前后图像之间的差异(如图5所示),采用图像识别方法对图像中的矿物进行识别,随后对矿物的大小、数量、形状等参数进行测量和统计得到试验原始数据。在此基础上,根据这些原始数据,可分析出不同因素下矿物的颗粒粒径分布随时间的演化图和概率分布图,以及矿物的统计平均生长速率、分布状态等。从而得到矿物加固过程中的生长规律。

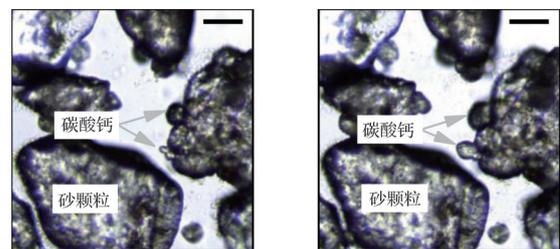


图5 典型试验结果

Fig. 5 Typical test result

对于取出的加固体,可开展的微细观试验包括XRD、拉曼、电镜、微/纳米压痕、CT等。具体来说,通过电镜可得到矿物表面的微观形貌,从而分析矿物在分子尺度的生长规律;通过XRD可测定加固体的矿物成分,确定微生物加固后生成的具体矿物类型;通过拉曼光谱可分析出不同的晶型,如碳酸钙矿物中的球霏石、方解石和文石;通过微/纳米压痕可测定矿物、岩土体及矿物和岩土颗粒胶结处的硬度和模量,并以此为基础评估不同矿物形貌微观模量的差别;通过微型拉压加载设备可测量胶结体之间的应力、应变和强度,为基于加固体的微观胶结的模拟(如离散元模拟)提供相应的物理参数;此外,还可采用微纳CT对其三维结构进行重构分析,研究矿物的沉积模式等。

3 结论

微生物加固是岩土工程领域的新兴加固技术,涉及复杂的生物-物理-化学动态过程,目前存在较多的问题有待解决,开发可视化试验系统可对该动态过程从微观角度进行实时研究,对探究加固机理具有重要的意义。通过模拟宏观试验方法,研制了微生物加固可视化试验系统,介绍了系统的主要组成部分,试验结果处理和分析方法,得到以下结论:

1)微生物加固可视化试验系统主要由4部分构成,分别为溶液输送系统、微反应系统、观测系统、

环境控制及监测系统,其中溶液输送系统与宏观试验中注浆设备对应;微反应系统与制样模具对应;观测系统、环境控制及监测系统与室内试验仪器对应。

2)微生物加固可视化系统不仅能够获取直接试验数据,还可制备微尺寸加固试样开展后续试验。微生物加固可视化试验结果分析包括两部分,既包括对直接获取的图像、压力值的研究,也包括后续开展的加固体微观试验结果解析。

3)微生物加固可视化系统可直接获取微生物加固过程演化图像和渗透系数随时间变化的数据;通过对图像进行处理分析研究颗粒尺度的矿物生长、分布规律。通过试验后处理可将加固体从微生物加固可视化试验系统中取出,开展材料表征、力学性质分析等微观试验,对微生物加固体的微观性质进行进一步分析。

参考文献

- [1] XIAO Y, HE X, ZAMAN M, et al. Review of strength improvements of biocemented soils [J]. *International Journal of Geomechanics*, 2022, 22(11): 03122001.
- [2] 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 J, CHU J, LIU H L, et al. Research advances in biogeotechnologies [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(4): 643-653. (in Chinese)
- [3] 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)
- [4] TERZIS D, LALOUI L. A decade of progress and turning points in the understanding of bio-improved soils: A review [J]. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 2019, 19: 100116.
- [5] HE J, CHU J, IVANOV V. Mitigation of liquefaction of saturated sand using biogas [J]. *Géotechnique*, 2013, 63(4): 267-275.
- [6] WHIFFIN V S, VAN PAASSEN L A, HARKES M P. Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique [J]. *Geomicrobiology Journal*, 2007, 24(5): 417-423.
- [7] PROTO C J, DEJONG J T, NELSON D C. Biomediated permeability reduction of saturated sands [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2016, 142(12): 0416073.
- [8] NG C W W, SO P S, COO J L, et al. Effects of biofilm on gas permeability of unsaturated sand [J]. *Géotechnique*, 2019, 69(10): 917-923.
- [9] 谈叶飞, 郭张军, 陈鸿杰, 等. 微生物追踪固结技术在堤防防渗中的应用 [J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2018, 46(6): 521-526.
TAN Y F, GUO Z J, CHEN H J, et al. Study on application of microbial tracing consolidation technology in the seepage prevention of earth bank [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2018, 46(6): 521-526. (in Chinese)
- [10] 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(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]. *Journal of Ground Improvement*, 2019, 1(1): 26-31. (in Chinese)
- [11] GHASEMI P, MONTOYA B M. Field implementation of microbially induced calcium carbonate precipitation for surface erosion reduction of a coastal plain sandy slope [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2022, 148(9): 04022071.
- [12] CHENG L, CORD-RUWISCH R, SHAHIN M A. Cementation of sand soil by microbially induced calcite precipitation at various degrees of saturation [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2013, 50(1): 81-90.
- [13] MAHAWISH A, BOUAZZA A, GATES W P. Effect of particle size distribution on the bio-cementation of coarse aggregates [J]. *Acta Geotechnica*, 2018, 13(4): 1019-1025.
- [14] XIAO Y, HE X, EVANS T M, et al. Unconfined compressive and splitting tensile strength of basalt fiber-reinforced biocemented sand [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2019, 145(9): 04019048.
- [15] 郑俊杰, 宋杨, 赖汉江, 等. 微生物固化纤维加筋砂土抗剪强度试验研究 [J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2019, 41(1): 15-21.
ZHENG J J, SONG Y, LAI H J, et al. Experimental study on the shear behavior of fiber-reinforced biocemented sand [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2019, 41(1): 15-21.
- [16] 何想, 马国梁, 汪杨, 等. 基于微流控芯片技术的微生物加固可视化研究 [J]. *岩土工程学报*, 2020, 42(6): 1005-1012.
HE X, MA G L, WANG Y, et al. Visualization investigation of bio-cementation process based on microfluidics [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, 42(6): 1005-1012. (in Chinese)
- [17] 何想, 刘汉龙, 韩飞, 等. 微生物矿化沉积时空演化的

- 微流控芯片试验研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(10): 1861-1869.
- HE X, LIU H L, HAN F, et al. Spatiotemporal evolution of microbial-induced calcium carbonate precipitation based on microfluidics [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(10): 1861-1869. (in Chinese)
- [18] WANG Y Z, SOGA K, DEJONG J T, et al. A microfluidic chip and its use in characterising the particle-scale behaviour of microbial-induced calcium carbonate precipitation (MICP) [J]. Géotechnique, 2019, 69(12): 1086-1094.
- [19] RASCHKE S A, HRYCIW R D. Vision cone penetrometer for direct subsurface soil observation [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1997, 123(11): 1074-1076.
- [20] ISKANDER M G, LIU J Y, SADEK S. Transparent amorphous silica to model clay [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, 128(3): 262-273.
- [21] LIU J Y, ISKANDER M G. Modelling capacity of transparent soil [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2010, 47(4): 451-460.
- [22] NI Q, HIRD C C, GUYMER I. Physical modelling of pile penetration in clay using transparent soil and particle image velocimetry [J]. Géotechnique, 2010, 60(2): 121-132.
- [23] 方肇伦. 微流控分析芯片发展与展望[J]. 大学化学, 2001, 16(2): 1-6.
- FANG Z L. Development and prospect of microfluidic analytical chip [J]. University Chemistry, 2001, 16(2): 1-6. (in Chinese)
- [24] WHITESIDES G M. The origins and the future of microfluidics [J]. Nature, 2006, 442(7101): 368-373.
- [25] XIA Y N, WHITESIDES G M. Soft lithography [J]. Annual Review of Materials Science, 1998, 28: 153-184.
- [26] BECKER H, LOCASCIO L E. Polymer microfluidic devices [J]. Talanta, 2002, 56(2): 267-287.
- [27] XIAO Y, HE X, WU W, et al. Kinetic biomineralization through microfluidic chip tests [J]. Acta Geotechnica, 2021, 16(10): 3229-3237.
- [28] XIAO Y, HE X, STUEDLEIN A W, et al. Crystal growth of MICP through microfluidic chip tests [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2022, 148(5): 04019048.
- [29] CHENG L, SHAHIN M A, CHU J. Soil biocementation using a new one-phase low-pH injection method [J]. Acta Geotechnica, 2019, 14(3): 615-626.
- [30] 桂跃, 吴承坤, 刘颖伸, 等. 利用微生物技术改良泥炭土工程性质试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(2): 269-278.
- GUI Y, WU C K, LIU Y S, et al. Improving engineering properties of peaty soil by biogeotechnology [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(2): 269-278. (in Chinese)
- [31] 肖鹏, 刘汉龙, 张宇, 等. 微生物温控加固钙质砂动强度特性研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(3): 511-519.
- XIAO P, LIU H L, ZHANG Y, et al. Dynamic strength of temperature-controlled MICP-treated calcareous sand [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(3): 511-519. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)