

DOI: 10.11779/CJGE201604008

# 微生物岩土技术的研究进展

何稼<sup>1,2</sup>, 楚剑<sup>2</sup>, 刘汉龙<sup>3</sup>, 高玉峰<sup>1</sup>, 李冰<sup>2</sup>

(1. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098; 2. 南洋理工大学土木与环境工程学院, 新加坡 639798;  
3. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045)

**摘要:** 岩土体中存在着大量的微生物, 这些微生物的活动对岩土体的物理、力学性质有一定的影响。微生物岩土技术, 是将微生物反应加以控制和利用, 来解决岩土工程中的问题。在近十年里, 微生物岩土技术逐渐成为岩土工程研究界的一个热门课题, 并取得了很大的进展。从原理和应用两个角度对这一领域的研究进行归类和分析。从微生物反应原理的角度来说, 微生物岩土技术所利用的微生物过程包括微生物矿化作用, 微生物产气泡过程, 以及微生物膜生长过程等。从实际应用的角度来说, 微生物岩土技术的应用领域包括岩土体加固、防渗, 砂土液化防治, 土体抗侵蚀, 污染土治理等。此外, 还对微生物岩土技术的实施方法特点, 监测和检测技术, 以及环境影响进行了介绍。

**关键词:** 微生物岩土技术; 微生物过程; 地基处理; 灾害防治

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000 - 4548(2016)04 - 0643 - 11

**作者简介:** 何稼(1982 - ), 男, 讲师, 主要从事微生物岩土技术、地基处理等方面的教学和科研。E-mail: hejiahhu@163.com。

## Research advances in biogeotechnologies

HE Jia<sup>1,2</sup>, CHU Jian<sup>2</sup>, LIU Han-long<sup>3</sup>, GAO Yu-feng<sup>1</sup>, LI Bing<sup>2</sup>

(1. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. School of Civil and Environmental Engineering, Nanyang Technological University, Singapore 639798, Singapore; 3. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

**Abstract:** There is a large number of microorganisms in soil and rock masses. The activities of these microorganisms can influence the physical and mechanical behaviours of soils and rocks. These microbial activities can be controlled, enhanced, and used to solve geotechnical problems. Such methods have been named as biogeotechnologies. In the last decade, the biogeotechnologies have received increasing research efforts and gained great advances. This study aims at classifying and evaluating these studies from two aspects, mechanisms and applications. From the aspect of mechanisms, microbial processes that can be adopted by the biogeotechnologies include biomineralization, biogas generation, and biofilm growth, etc. From the aspect of applications, the biogeotechnologies can be used for the strengthening of soils and rocks, sealing of water leakage, prevention or mitigation of soil liquefaction, soil erosion control, and rehabilitation of contaminated soils, etc. In addition, the construction methods, monitoring and quality inspection techniques, and environmental impacts of biogeotechnologies are also introduced.

**Key words:** biogeotechnology; microbial process; ground improvement; disaster prevention and rehabilitation

## 0 引言

岩土工程作为一门应用学科, 其基本理论主要源自于物理、力学和化学等基础学科。主要的岩土工程理论知识起始于力学理论的发展, 如库仑和郎肯土压力理论、达西渗流理论、布辛内斯克应力分布理论、以及太沙基有效应力原理、一维固结理论等。此后, 人们又逐渐认识到化学和电化学过程对土, 特别是黏性土的形成、演变、和力学性质起到了重要的作用。在应用方面, 如岩土工程中地基处理、边坡加固等问题, 往往采用

的是物理和力学的技术手段来解决。岩土材料的化学处理方法、特别是水泥等胶凝材料的使用, 也已经成为了岩土工程技术里常规和广泛使用的手段。

在天然环境里, 表层和深层土体中存在着大量的微生物。在接近地表的土层中, 每千克土体中微生物的数量大约是  $10^9$  至  $10^{12}$  个; 在 2~30 m 的深度, 土

基金项目: 新加坡南洋理工大学博士生奖学金、中国高等学校学科创新引智(111)计划项目(B13024); 国家自然科学基金项目(51578096)  
收稿日期: 2015 - 02 - 20

体里微生物的数量降至大约  $10^{11} \sim 10^6$  个每千克<sup>[1-2]</sup>。这些微生物的活动,对土体的物理力学特性和工程性质会产生影响。Mitchell 等<sup>[1]</sup>指出,微生物活动能够影响土的形成和性质,如微观结构、强度、刚度、渗透性等。历史上一些边坡和土体结构失稳、地基土膨胀等工程事故案例,其原因或部分原因可能来自于微生物的活动<sup>[1]</sup>。然而,在岩土工程学科发展的历史上,由于知识储备不足和研究手段缺乏,研究者在很长时间内鲜有对微生物活动这一因素的探索。

在近十年里,和微生物活动相关的岩土工程问题得到了越来越多的研究关注。这一领域的探索,将会拓展岩土工程理论的范围,并使得研究手段更加丰富。更为重要的是,可以将微生物过程加以控制和利用,作为一种技术手段来解决具体的工程问题。本文中,将这一用微生物过程来解决岩土工程问题的技术,称为微生物岩土技术。微生物岩土技术作为一项实用技术,自本世纪初被研究者提出<sup>[1,3]</sup>,在近些年里得到了非常快速的发展,积累了较多的文献资料。本文将对这些研究成果进行介绍、归类和分析。首先介绍岩土工程中可以利用的几种微生物过程,包括微生物矿化作用、微生物产气泡过程和微生物膜。其次,介绍微生物岩土技术常见的应用,包括岩土加固、岩土防渗、砂土液化治理,地基和土工结构抗侵蚀和污染土治理等。最后介绍微生物岩土技术的一些实际问题,如实施方法、监测和检测手段、环境影响等。

## 1 微生物过程

### 1.1 土壤中的微生物和微生物过程

自然界中的微生物包括了原核生物,如细菌、古细菌等,和真核生物,如藻类、真菌等。细菌是土壤中最常见的微生物,也是微生物岩土技术里主要利用的微生物。细菌在土壤中的生存和繁殖需要空间。细菌的直径大约在  $0.5 \sim 3 \mu\text{m}$ ,细菌的孢子直径可以小至  $0.2 \mu\text{m}$ 。而按照一般土的分类,直径小于  $2 \mu\text{m}$  的矿物称为黏土矿物。在黏土等细粒土中,微生物活动会受到土的空隙大小的影响。微生物的常见尺寸和土的矿物尺寸对比如图 1 所示。因此,微生物岩土技术处理的对象,大部分都是砂土、砾土等粗粒土;对细粒土的处理,往往需要采用机械搅拌等方法。此外,微生物的生长条件还包括了合适的营养、水、酸碱度、氧化还原条件、温度等。这些条件,既可能成为技术应用中的制约因素,又可以成为对反应系统控制的手段。例如,可以通过调节营养物的量,来控制微生物反应的进度和有效产物的生产量。

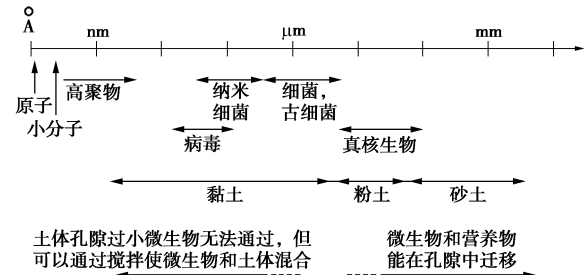


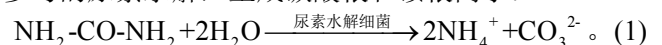
图 1 微生物和土颗粒的尺寸对比 (图片改编自文献[1])

Fig. 1 Comparison of sizes of microorganisms and soil grains (adapted from Reference [1])

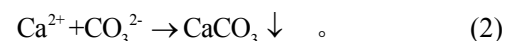
微生物反应的一些自身特点,为其在岩土工程中的应用带来了优势。微生物反应是自然界、特别是土体的生态环境中本身存在的过程,因此对环境的影响较小;而岩土工程中的化学处理方法往往都是有毒性的或是对环境有危害的<sup>[4]</sup>。微生物反应过程和产物的多样性,也为不同类型的应用带来了便利。针对不同的应用,来选择合适的微生物反应过程。这些具体的微生物过程及其应用将在下文详述。

### 1.2 微生物矿化作用

微生物过程可以生产一些结晶和非结晶的无机化合物,这些微生物过程被称为微生物矿化作用。生产的无机化合物在岩土材料中起到填充和胶结的效果,其功能类似于水泥,叫做生物水泥 (biocement)。生物水泥可以由多种微生物过程来获得,如尿素水解过程<sup>[4-7]</sup>、反硝化过程<sup>[8-9]</sup>、硫还原过程<sup>[10]</sup>、铁还原过程等<sup>[11-12]</sup>。这些过程的有效产物即生物水泥通常是不溶性的沉淀物质,如碳酸钙、氢氧化铁等。如果沉淀物质能形成结晶体,如由碳酸钙结晶形成的方解石晶体,能起到比非晶体更好的胶结效果。以碳酸盐为产物的微生物过程,被称为微生物诱导碳酸盐沉积 (microbially induced carbonate precipitation, MICP),这是微生物岩土技术里研究最为广泛的课题。这里主要介绍采用尿素水解反应的 MICP 过程。这一方法的主要原材料包括尿素水解细菌,以及尿素和氯化钙的混合溶液。使用的大致步骤:首先,对被处理土体进行接种,使得细菌吸附在土颗粒表面;其次,将混合溶液与被处理土体充分结合,使得反应发生。详细的微生物处理方法将在后文详述,这里着重介绍这一方法的原理。尿素水解过程中,第一步的反应是微生物参与的尿素水解,生成碳酸根和铵根离子:



第二步反应是化学反应,在反应体系中加入可溶性钙盐,如氯化钙,碳酸根离子和钙离子结合生成沉淀:



在上述的反应过程中,最终产物碳酸钙就是起到

生物水泥作用的有效物质。而碳酸钙的胶结和填充作用是如何形成的呢? 首先, 需要微生物吸附在土颗粒的表面, 这样有利于的矿物晶体在土颗粒表面生长并形成胶结作用。微生物在孔隙材料中的吸附能力和多种因素相关, 包括孔隙水的化学成分和性质, 固体孔隙材料的形态、表面质地、矿物成分, 以及微生物细胞本身的性质如细胞壁的亲水性等<sup>[13]</sup>。其次, 碳酸钙结晶在微生物细胞表面形成和生长<sup>[4, 14-15]</sup>。微生物细胞表层结构上的负电荷和尿素水解过程中形成的碱性微环境, 有利于带正电荷的钙离子吸附在细胞的表面上。这一层带正电荷的钙离子和微生物细胞中尿素水解的代谢产物碳酸根结合, 形成碳酸钙晶体的结晶核。碳酸钙晶体逐渐增长, 会吸附在土颗粒的表面形成包裹以及在土颗粒之间形成搭桥, 从而对土体形成了胶结和孔隙填充的作用<sup>[4]</sup>。图 2 显示的是经生物水泥处理的砂土的电子显微镜照片, 图中可以看见吸附在土颗粒表面以及在土颗粒之间接触位置生成的碳酸钙晶体。由此, 土体的力学性能主要发生两个方面的变化。首先, 土体的强度、刚度增长、压缩性降低, 这一作用被称为生物胶结 (biocementation); 其次, 土体的渗透性降低, 这一作用被生物防渗 (bioclogging), 见图 3。这两个作用的应用将在第二部分详述。

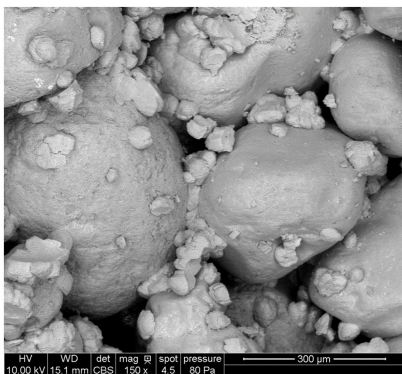


图 2 经生物水泥处理的砂土电子显微镜照片

Fig. 2 SEM image of biocemented sand

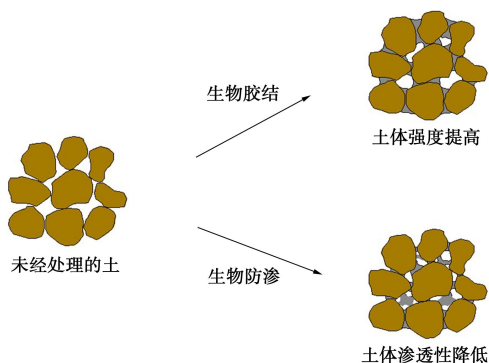


图 3 生物胶结和生物防渗作用的原理示意

Fig. 3 Schematic of biocementation and bioclogging

### 1.3 微生物产气过程

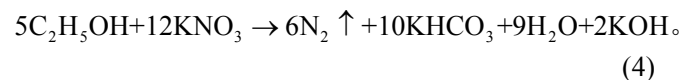
向液化土中加入气泡降低土体饱和度, 作为一种地基液化的防治手段, 得到一些研究者的关注<sup>[16-17]</sup>。

此外, 降低饱和度作为一种技术手段, 还可以用作防止污染物迁移、地基绝热等<sup>[18]</sup>。

微生物过程可以生产多种气体, 常见的包括  $O_2$ ,  $H_2$ ,  $CO_2$ ,  $N_2$  等。采用微生物反硝化法 (microbial denitrification) 生成的  $N_2$ , 由于其化学性质稳定和在水中的溶解度低, 适合作为一种技术手段来降低土的饱和度<sup>[17, 19]</sup>。此外, 在地下土体的无氧或微氧环境中, 反硝化过程相比较其他的微生物过程能够从一定量的有机营养物中获得更高的能量, 因此是主导性的微生物过程, 其他的微生物过程将会受到抑制<sup>[4]</sup>。这里将介绍微生物反硝化过程及其特点。在实验室条件里, 这一过程的实施, 首先将反硝化细菌和反应物 (硝酸盐、有机物等) 混合; 再将混合的液体采用渗透或注射的方式, 均匀的散布在要处理的土体中; 气泡在土体孔隙中生成的同时土的饱和度将下降。完全的反硝化过程, 是从硝酸根 ( $NO_3^-$ ) 开始, 经过一系列微生物酶的还原反应, 最终生成  $N_2$  的过程:



反硝化过程可以采用多种的有机物作为电子供体, 常见的有乙醇、醋酸盐、葡萄糖等。用乙醇作为电子供体是, 其总反应方程式为



微生物反硝化过程能否如式 (3) 一样完全反应, 受到几个因素的影响, 包括:  $NO_3^-$  和  $NO_2^-$  的浓度<sup>[8, 20-21]</sup>, 酸碱度<sup>[22-23]</sup>, 营养物类型<sup>[24]</sup>, 温度<sup>[25]</sup>等。在这些因素中, 一个需要注意的是  $NO_3^-$  和  $NO_2^-$  的浓度。当  $NO_3^-$  在反应体系中的浓度过高时, 会造成  $NO_2^-$  浓度积累, 从而阻碍反硝化的进一步进行。 $NO_2^-$  是一种有毒性的物质, 会造成污染。因此, 在应用中要加以重视。

### 1.4 微生物膜

微生物分泌的胞外聚合物 (extracellular polymeric substances, EPS) 是一种常见的微生物反应产物。这些黏液状的聚合物附着在孔隙材料的表面和内部, 形成微生物膜, 使得材料的渗透性降低。由胞外聚合物导致的孔隙材料的阻塞, 在天然和人工环境里存在非常广泛。在环境工程学科领域, 微生物膜对孔隙材料渗透性的影响, 有着长期的研究<sup>[26-27]</sup>。胞外聚合物通常是一些亲水性的物质, 其含水率约为 99%。胞外聚合物带来的孔隙材料渗透性的降低, 主要是来自于填充作用, 另一因素是来自于孔隙水黏度的升高<sup>[26]</sup>。微生物的这一作用在以往的一些工程应用中, 被认为是一个负面的因素, 例如, 会使过滤系统发生堵塞<sup>[2, 28]</sup>。然而, 在另一些场合, 微生物的这一作用还可以成为人为降低孔隙材料渗透性的技术手段, 如土石堤坝的止水、蓄水结构的渗漏防治等。很多原核生物都可以

分泌胞外聚合物,常见的分泌胞外聚合物的微生物包括某些有氧或兼氧型的异养细菌,某些贫营养细菌和硝化细菌等<sup>[3]</sup>。关于胞外聚合物的生成和降解及其影响因素,在过往的研究中也有大量的积累。Baveye等<sup>[26]</sup>总结的主要影响因素包括:孔隙材料的类型、孔隙材料的含水率、温度、氧化还原条件、营养物质的供给及其类型、氮元素的供给、氧气浓度、微生物的生理状态等。在室内试验中,大量的试验数据展示了,胞外聚合物的生成能够使得孔隙材料的渗透性发生显著的降低。在不同类型的试验中,渗透性一般能降低约2~4个数量级<sup>[3, 27]</sup>。在现场试验中,大多数的研究表明胞外聚合物的生成量和渗透性的下降是呈正相关的<sup>[26]</sup>。应用中有一点需要注意:微生物分泌的胞外聚合物,可能会被其他类型的微生物降解,导致渗透性恢复<sup>[3]</sup>。

## 2 微生物岩土技术的应用研究

### 2.1 土体加固

在微生物岩土技术里,研究最为广泛的方法是采用MICP法来进行的土体加固。特别是砂土,由于其渗透性好,适合采用微生物方法来处理。单轴压缩试验简单快速,被很多学者用于测试生物水泥加固土的强度。图4显示的是采用生物水泥固化的砂土的单轴抗压强度和碳酸钙含量的关系<sup>[29]</sup>。图中的数据来源于几个不同的研究组。由图可见,虽然数据有较大的离散性,总的趋势是碳酸钙含量越高,无侧限抗压强度越大。碳酸钙含量在5%~25%之间时,试样的强度值大约是在几百kPa至几个MPa之间,这一范围的强度足以满足大多数工程应用的需要。图中数据的离散性,可能来自于不同类型的砂土、碳酸钙在土中的空间分布、不同的处理方法等因素。有数据表明,生物水泥试样的强度值相当于或者略高于水泥试样<sup>[29]</sup>。静力和动力的三轴试验,以及振动台试验,也被用于测试生物水泥固化土的强度和抗液化性能。在三轴静力不排水剪试验中,生物水泥试样相比较未处理的砂土,有着更高的峰值强度和初始刚度<sup>[4]</sup>。在剪切过程中,其胶结作用会随着剪切应变的发展而逐渐破坏。然而,由于碳酸钙的填充作用和土颗粒本身形状的改变,即使生物水泥的胶结作用完全破坏,其残余强度仍然高于天然土的残余强度<sup>[4]</sup>。生物水泥加固土的动力性质和抗液化性能也是研究的关注点<sup>[30-31]</sup>。循环加载动力三轴试验结果表明,生物水泥加固砂土的动力强度远高于未经处理的砂土,液化的可能性基本被消除。在振动台和离心机模型试验中,生物水泥加固土也显示了良好的力学性能,其超净孔隙水压力的上升和土体的变形,均远小于未经处理的土体。Montoya等<sup>[30]</sup>表明,当生物水泥含量较高时,地基对地震加速度有放

大作用;程晓辉等<sup>[31]</sup>表明,生物水泥加固的地基土对地震加速度是放大还是抑制,和加速度的频率有关。

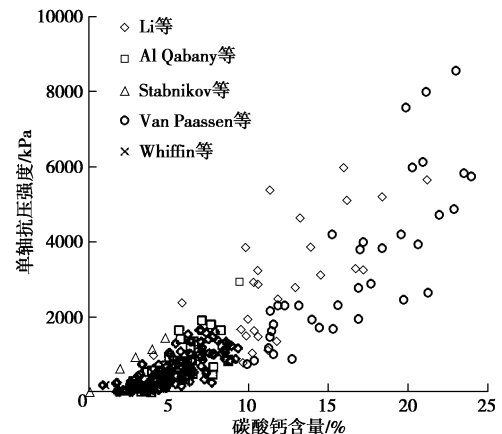


图4 单轴压缩强度和生物水泥含量的关系<sup>[7, 29, 32-34]</sup>

Fig. 4 Relationship between unconfined compression strength and calcite content<sup>[7, 29, 32-34]</sup>

关于土体的处理方法和试样制备也有大量的研究。在微生物因素方面,有较多的研究集中在微生物的活性和分布、被处理土体的碳酸钙沉积分布和土体力学性质之间的关系上<sup>[13, 35]</sup>。有研究采用某些技术手段,如不同盐度的溶液对已接种微生物的土体进行处理,来调节微生物活性在土中的分布<sup>[13]</sup>。在处理溶液配方因素方面,较低浓度的处理溶液能够提高处理质量,而采用较高浓度的处理溶液能提高效率节约时间<sup>[7, 36]</sup>。在处理溶液中降低尿素和钙盐的摩尔比,能减少副产物氨气的生成量<sup>[35]</sup>。在流体因素方面,主要的研究方向是处理溶液在土中的流动方式,和处理效果之间的关系上<sup>[35]</sup>。采用间歇性水流,反向水流(细菌接种流体和处理溶液流体流向相反),可以提升碳酸钙沉积的均匀性<sup>[35]</sup>。在处理的过程中使得土体保持非饱和状态,能使处理土体获得更高的强度<sup>[37]</sup>。有研究者对低渗透性土进行研究,结果表明微生物加固法同样能改善黏土或粉土的力学性质<sup>[29, 38]</sup>。然而,对于低渗透性土的研究难点,主要在于细菌缺少生存空间、处理溶液流动缓慢。有研究者提出,可以采用搅拌的方法来使得土和微生物及处理溶液充分结合<sup>[2]</sup>。

微生物加固法可以用来加固地基土,特别是渗透性较高的液化砂土地基。微生物加固法地基处理的过程对地基土几乎没有扰动。因此,这一方法较适合于处理已有建筑的地基,以及深埋管线的地基等。目前,微生物加固法现场试验的报告还很少。在荷兰进行的,对地下输气管线地基加固的现场试验是一例<sup>[39]</sup>。这一现场试验处理的土有约1000 m<sup>3</sup>,深度在3~20 m范围变化,土的类型为松散砾土。处理采用的是尿素水解反应的MICP法,处理的过程是将事先培养的细菌和尿素、碳酸钙溶液注射进被处理土体的一侧,并在处理范围的另一侧抽取出来。这一现场试验总体是成功的。

### 2.2 岩土体防渗

微生物岩土技术另一项应用领域是岩土体防渗。对于不同的工程问题, 可以采用不同类型的微生物反应过程, 以及不同的施工技术手段。前文所介绍的几种微生物过程, 包括微生物矿化作用、微生物产气泡过程、以及微生物膜, 都可以用作岩土体防渗。图 5 显示的是采用 MICP 法处理的砂土, 其渗透系数随碳酸钙含量变化的关系。由图 5 可见, 砂土中碳酸钙含量达到大约 15% 时, 其渗透系数较未处理砂土低两个数量级; 图中右下角的几个数据点, 是在砂土的表层生成了一层碳酸钙硬壳层的情形。在此情况下, 土体变成了几乎完全不透水。微生物分泌的胞外聚合物 (EPS) 形成的微生物膜也能有效的降低孔隙材料的渗透性, 对土体起到防渗的作用。试验数据表明, 经过微生物膜处理的砂土, 其渗透系数从约  $10^{-4}$  降至约  $10^{-6}$  m/s<sup>[3]</sup>。有研究采用微生物膜法处理堤防渗漏, 处理之后的渗漏量降低了一个数量级<sup>[40]</sup>。使用微生物气泡法同样能够降低土体的渗透性。试验数据显示, 采用微生物气泡法将饱和砂土的饱和度降至 82%, 其渗透系数从  $10.4 \times 10^{-4}$  降至  $3.2 \times 10^{-4}$  m/s<sup>[41]</sup>。采用 MICP 等微生物过程的生物注浆法, 可以用做岩石裂隙灌浆, 用来在岩石开挖中起到止水作用, 或阻隔岩石裂隙中的污染物、封存物迁移<sup>[42-44]</sup>。Phillips 等表明<sup>[43]</sup>, 经生物水泥填补的岩石裂隙, 其渗透性下降了约 2~4 个数量级, 经过修补的岩石裂隙, 使之重新开裂的水压力较使原岩开裂的水压力高约 3 倍。

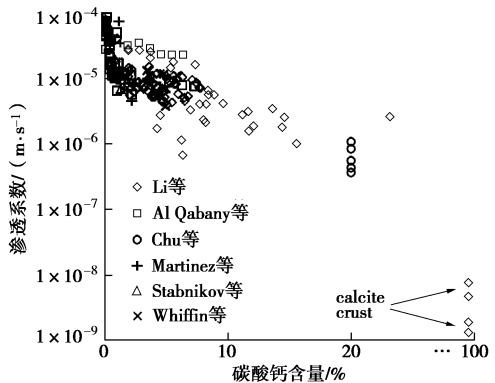


图 5 砂土渗透系数和生物水泥含量的关系<sup>[7, 29, 32, 34-35, 45]</sup>

Fig. 5 Relationship between permeability and calcite content for sand<sup>[7, 29, 32, 34-35, 45]</sup>

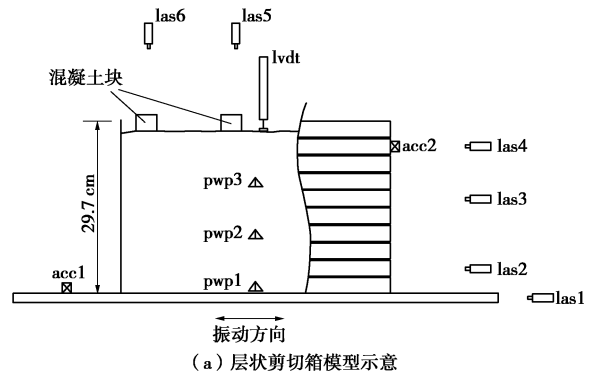
微生物防渗有很多潜在的应用, 包括水坝和堤防的防渗, 水库和蓄水池的防渗, 岩体开挖止水等<sup>[42-47]</sup>。微生物防渗材料在使用中可采用多样的施工手段。在蓄水池的表层防渗处理中, 可以在蓄水池底的表层土中采用喷洒或倾倒的方法进行微生物防渗处理, 使得表层土变得不透水<sup>[5, 45]</sup>。在水坝和堤防的防渗漏和渗透破坏处理中, 可以在水坝和堤防和表层进行防渗处理; 另一种方法是在坝体或坝基中设置砂桩, 并对砂桩进行微生物防渗处理, 形成一道止水帷幕<sup>[48]</sup>。对于

岩石、土体和混凝土结构的裂隙的防渗处理, 可以采用微生物注浆法, 利用微生物处理溶液低黏性的特点, 对裂隙和孔隙取得更好的填充效果。微生物防渗技术也有一些现场试验的报告<sup>[40, 44, 49]</sup>。在奥地利进行的现场试验, 通过注射井向渗漏河堤中注射营养物, 来促进生物膜的生长, 起到防渗的作用<sup>[40]</sup>。经过两次的营养物注射, 河堤的渗漏问题得到了很好的解决。另一现场试验采用了生物水泥填充岩石裂隙, 结果显示, 在注射井周围几平方米的范围内, 岩石裂隙的透水性得到了明显的下降<sup>[44]</sup>。

### 2.3 微生物气泡法治理砂土液化

近年的研究表明, 将饱和液化土体的饱和度降低, 可以改善土体的抗液化性能<sup>[16, 50-52]</sup>。这一性质, 可以用作砂土液化治理的技术手段。相比较采用 MICP 法的砂土液化治理手段, 微生物气泡法操作更为简单且成本更低。室内试验结果表明, 将饱和松砂的饱和度降低几个百分点, 其不排水抗剪强度, 不论是在动力还是静力荷载下, 均能得到显著的提高<sup>[50-54]</sup>。此外, 在静力荷载固结不排水条件下, 松砂的应力-应变曲线, 将随着饱和度的逐渐降低, 由应变软化型转变为硬化型<sup>[53-54]</sup>。振动台试验结果显示, 不饱和砂土的抗液化性能明显高于饱和砂土<sup>[16]</sup>。图 6 显示的是两组不同饱和度的松砂在  $a=0.5$  m/s<sup>2</sup> 下的振动台试验的结果。饱和砂土孔隙水压力系数接近 1, 几乎完全液化 (孔隙水压力系数在这里定义为超净孔隙水压力和初始有效应力的比值); 不饱和砂土的孔隙水压力增长和体积应变均远小于饱和砂土; 位于砂土上的结构物模型, 在不饱和试样里几乎没有沉降, 而在饱和试样里发生了明显的沉降。

有许多研究者提出了多种降低土体饱和度的方法, 用以解决液化等岩土工程问题, 包括气体注射法<sup>[55]</sup>、电解水法<sup>[56]</sup>、化学生成气泡法<sup>[57]</sup>和微生物气泡法<sup>[16]</sup>。在这些方法中, 微生物法优势在于: 首先, 气泡是在土体中原位生成的, 相比较直接注射和电解法, 气泡在土体中的分布更均匀; 其次, 相比较化学方法, 微生物反应较为缓慢, 过程更加可控; 再次, 采用微生物反硝化法生成的氮气, 具有化学性质稳定、溶解度低的特点, 使气泡能在土中保持更长的时间。



(a) 层状剪切箱模型示意

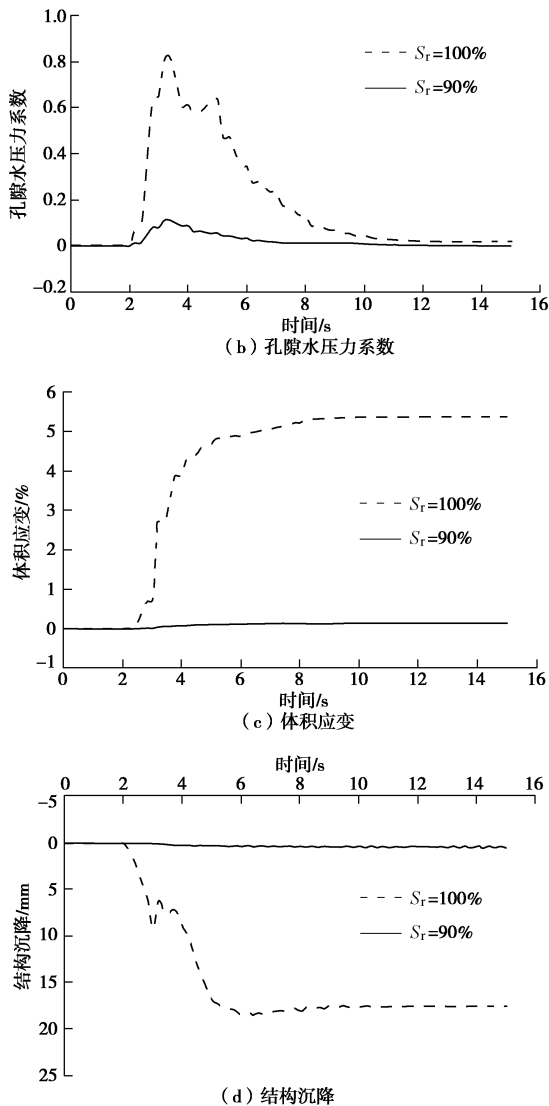
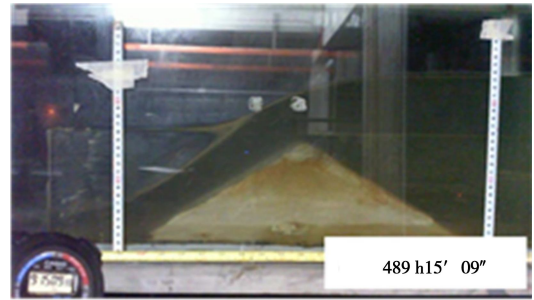


图6 饱和度为100%和90%的两个砂土试样振动台试验结果  
Fig. 6 Results of shaking table tests on two specimens with  $S_r$  of 100% and 90%

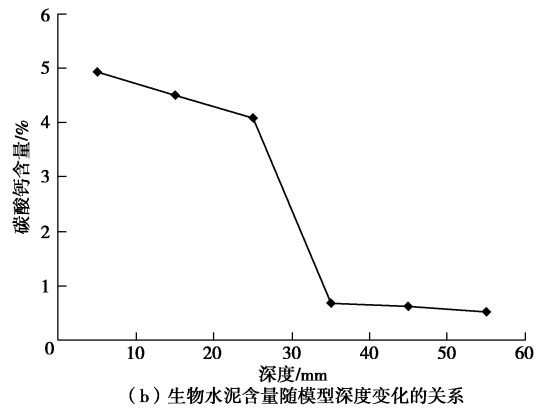
#### 2.4 地基、土工结构抗侵蚀

生物水泥处理的土体有着很好的抵抗水力、风力侵蚀的特性。这些特性使得生物水泥可以被用作地基和土工结构物抗水力、风力侵蚀, 以及控制扬尘污染<sup>[58-60]</sup>。洪水期的堤防冲刷和漫顶破坏, 是堤防结构破坏的常见形式之一。在土体的表面进行固化处理, 可以用来解决这一问题。图7显示的是一个经生物水泥处理的河堤的模型在漫顶的情形下的抗侵蚀试验<sup>[58]</sup>。试验将砂质的堤防模型进行生物水泥表面喷洒处理, 处理共进行了6次。水力模型槽冲刷试验显示, 经过处理的模型经历的连续30 d不同流量的漫顶水流冲刷, 而未发生垮塌。对模型进行的解剖试验表明, 碳酸钙聚集在表层的3 cm内, 形成了一个硬壳层。除了水力侵蚀之外, 也有试验表明, 对土体表面进行生物水泥的喷洒处理, 能有效的控制风力侵蚀和由此带来的扬尘污

染<sup>[58-59]</sup>。生物水泥在这一方面的用途, 实施简单, 处理效果明显, 且适用范围广泛。许多学者认为, 生物水泥在防侵蚀和扬尘控制方面的用途, 是一项有可能首先实现应用的微生物岩土技术<sup>[2]</sup>。此外, 生物水泥还可以用作土体内部的管涌侵蚀防治。Jiang等<sup>[60]</sup>研究表明, 采用生物水泥处理的砂-高岭土混合物, 其临界水力梯度增长明显, 被水流侵蚀带走的固体颗粒质量大大降低。



(a) 水力模型槽中进行的抗侵蚀实验



(b) 生物水泥含量随模型深度变化的关系

图7 经生物水泥处理的河堤模型抗水力侵蚀试验

Fig. 7 Biocemented levee model under water erosion

#### 2.5 污染土治理

污染土治理也是微生物岩土技术一个潜在的应用领域。前文所述的岩土体防渗技术, 可以用作阻隔污染物迁移。此外, MICP技术还可以用来固化污染土中的重金属离子。采用MICP法, 重金属离子和碳酸根结合, 形成不可溶的沉淀, 使得重金属污染物不再扩散。在实验室研究中, 可以被固化的金属离子包括镍(Ni)、铜(Cu)、铅(Pb)、钴(Co)、锌(Zn)、镉(Cd)等<sup>[61-65]</sup>。采用不同的实验室处理过程, 这些重金属离子的去除率达到50%~99%, 显示了较好的效果<sup>[61,65]</sup>。另有相关试验研究探索了这一方法的影响因素, 包括了重金属离子浓度、酸碱度和温度等<sup>[66-67]</sup>。试验结果显示: 较高浓度的重金属离子会对细菌的反应能力产生抑制, 但是反应仍能以较慢的速率进行; 在弱酸性( $5 < \text{pH} < 7$ )的环境里, 细菌的活性受到影响但是可以进行, pH低于5时需要将污染物中和后再处

理; 温度越低细菌的活性越弱, 但是在  $15^{\circ}\text{C}$  时, 反应速率仍然可以接受。一项现场试验研究了一个被金属镉-90 污染的场地的治理过程<sup>[68]</sup>。试验采用注射可溶糖浆和尿素的方法, 一方面加速地下细菌的繁殖生长, 一方面促进重金属的固化沉积。处理溶液从注射井进行注射, 同时在相隔几米远的抽取井进行抽取, 并循环到注射井。试验观察到了重金属碳酸盐的沉积, 并且反应速率满足了工程的需要。另一现场试验, 研究了在表层污染土中采用 MICP 法固化重金属离子<sup>[67]</sup>。试验采用的是表层喷洒的方法, 处理深度为 20 cm。试验结果表明可交换态的重金属离子减少了 61%。

## 2.6 其他应用

微生物岩土技术的潜在应用还包括了浅层土中的碳封存<sup>[69]</sup>, 深层岩体中的碳封存<sup>[2]</sup>, 以及用来提高石油和天然气的开采率<sup>[2]</sup>, 等。此外, 生物水泥还可以将一些废弃材料加以固化, 用作建筑材料, 起到更多的环保和经济效益<sup>[2, 48]</sup>。例如, 采矿和工业生产中的含钙元素废水废渣, 农业生产中的有机废弃物, 都可以成为生物水泥的原材料来源<sup>[48]</sup>。

## 3 技术实施中的一些问题

### 3.1 实施方法特点

微生物岩土技术的一个显著的特点是, 使用的处理材料往往是和水一样的低黏度的液体。例如, 在 MICP 法中, 处理液体是氯化钙和尿素的混合溶液; 在微生物气泡法中, 处理溶液包括了硝酸盐和溶于水的有机物。这给微生物岩土技术的具体实施带来了很大的便利。如前所述, 在处理地基土的过程中, 只需要将液体流过土中, 不需要扰动土体。这一特点带来的好处是, 微生物岩土技术能用来加固那些不能扰动土体, 如埋有管线的地基土, 已有建筑物地基等。处理溶液的低黏性的特点, 也给微生物岩土技术的应用带来了多样化的特点。例如, 既可以采用渗流的方法对地基土进行大范围的处理, 又可以采用喷洒的方法对土体的表层进行防渗或防侵蚀风化处理, 也可以采用注浆的方法对土体孔隙或岩石裂隙进行处理。

### 3.2 监测和检测技术

微生物岩土技术的应用需要一些特别的监测和检测手段, 来对工程进行监控和质量评估。地球物理勘察方法, 是一类较为合适的手段。地球物理方法一般不需要对处理区域进行扰动, 并且可以进行实时连续的监控。有多种的地球物理方法, 可以对不同的参数进行监测。例如, 通过探测剪切波 (S 波) 速变化, 可以得知土体的剪切模量变化, 这与生物水泥生成量相关<sup>[6]</sup>; 通过探测压缩波 (P 波) 速变化, 可探知土

体饱和度的变化, 用来评估生物气泡的生成量<sup>[51]</sup>; 在尿素水解法中, 通过探测土体中的导电率, 可知水解反应的进行程度<sup>[39]</sup>。在用微生物技术处理岩土体渗漏问题时, 用示踪技术可以得知渗漏修复的效果<sup>[42]</sup>。除此之外, 传统的岩土工程现场和取样勘察技术及环境工程中的取样检测手段, 都可以用来对工程的过程和结果进行评估。

### 3.3 环境影响

微生物岩土技术主要考虑的环境问题之一, 是所选用的微生物须是无害的、非致病的。这一问题一般会采用以下几种方式解决。首先, 可以选用已知的无害细菌, 这一类细菌可以从微生物保藏库购买并加以培养增殖。常用的微生物保藏库包括美国的 ATCC 和德国的 DSMZ 等。这些微生物保藏库, 对所出售的细菌的安全等级和安全操作都有明确的叙述。其次, 对于从环境中分离培养的细菌, 可以通过基因测序的方法, 识别其物种, 以此鉴定安全性。再次, 还可以利用原位固有的细菌, 通过原位培养的方法加以增殖, 使微生物反应的速率达到工程的需要。原位培养方式可以消除公众对外来细菌安全性的顾虑, 但是, 采用这一方式微生物反应速率可能较慢<sup>[68]</sup>。最后, 对于某些生物反应过程, 可以不直接采用活性的微生物, 而采用从细菌提取的催化酶作为替代。例如, 从细菌中提取的尿素水解酶, 在 MICP 过程中可以起到和活性细菌类似的效果<sup>[70]</sup>。

另一环境问题是生物反应中反应物和产物的安全性。微生物尿素水解过程中的副产物氨气, 是一种有刺激气味的气体; 在微生物反硝化过程中, 中间产物亚硝酸根  $\text{NO}_2^-$  是一种有毒的物质。这些有害物质, 可能会对土壤、地下水、空气或人的健康造成危害。在利用某一微生物过程的时候, 需要对这些潜在的环境风险进行分析评估, 并且在实施的过程中进行监控。

## 4 总结与展望

微生物岩土技术作为一个全新的研究领域, 在近十年里取得了快速的进展。本文对这些研究进行了回顾和总结。微生物岩土技术是一个具有多样性的技术领域, 其多样性体现在可选择的技术手段丰富、应用领域广泛两方面。首先, 有多种的微生物过程可以被加以利用, 用来解决实际工程问题。文中介绍的微生物过程包括微生物矿化过程, 微生物产气泡过程, 微生物膜生长过程。其次, 微生物岩土技术有着广泛的应用。文中主要介绍的应用包括岩土体加固、防渗, 微生物气泡法处理砂土液化, 土体防侵蚀, 以及污染土治理等。此外, 还对具体的实施技术、监测和监测

技术以及环境影响进行了总结分析。

目前,微生物岩土技术的研究,已经积累了大量的试验成果。然而,研究者也遇到了一些问题和困难。例如,微生物反应的影响因素多,试验中对反应过程不能可靠的控制,某些试验结果难以解释;一些情形下,微生物的反应速率和反应物的转化率不高;生物水泥处理低渗透性土时效果不佳;对于一些副产物,如MICP法中的氨气的处理,缺乏有效的方法。此外,目前的研究方向以MICP法为主,其他的课题,如生物气泡法防治液化,生物膜法治理渗漏,虽然有试验结果证明了这些方法的有效性,但是仍需要更多系统化的研究。

需要指出的是,微生物岩土技术虽然获得了较多的试验研究,但是离系统化的工程应用还有距离。微生物岩土技术的工程应用,可以从一些实施简单、成本低的应用领域开始。例如土体侵蚀防治、扬尘控制等。而一些复杂的、需要特殊机械的应用领域,需要更多的现场试验验证,来保证方法的可靠。

微生物岩土技术作为一项跨学科的研究方向,需要岩土工程领域与微生物学、环境生物技术等领域之间的合作。良好的沟通协作有助于研究的顺利进行。此外,还可以通过学术交流、专业教育和科普活动来提高专业人员和公众对这项新技术的认知。

致谢:感谢 Volodymyr Ivanov 博士在微生物技术方面的指导和建议。

#### 参考文献:

- [1] MITCHELL J, SANTAMARINA J. Biological considerations in geotechnical engineering[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 2005, **131**(10): 1222 - 1233.
- [2] DEJONG J T, SOGA K, KAVAZANJIAN E, et al. Biogeochemical processes and geotechnical applications: progress, opportunities and 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] DEJONG J T, MORTENSEN M B, MARTINEZ B C, et al. Biomediated soil improvement[J]. *Ecological Engineering*, 2010, **36**(2): 197 - 210.
- [5] CHU J, STABNIKOV V, IVANOV V. Microbially induced calcium carbonate precipitation on surface or in the bulk of soil[J]. *Geomicrobiology Journal*, 2012, **29**(6): 544 - 549.
- [6] 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*, ASCE, 2010, **136**(12): 1721 - 1728.
- [7] AL QABANY A, SOGA K. Effect of chemical treatment used in MICP on engineering properties of cemented soils[J]. *Géotechnique*, 2013, **63**(4): 331 - 339.
- [8] VAN PAASSEN L A, DAZA C M, STAAL M, et al. Potential soil reinforcement by biological denitrification[J]. *Ecological Engineering*, 2010, **36**(2): 168 - 175.
- [9] 范珊珊. 微生物反硝化土体加固新技术初探[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013. (FAN Shan-shan. Preliminary research on a novel soil improvement technique by microbial denitrification[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013. (in Chinese))
- [10] WARTHMAN R, VAN LITH Y, VASCONCELOS C, et al. Bacterially induced dolomite precipitation in anoxic culture experiments[J]. *Geology*, 2000, **28**(12): 1091 - 1094.
- [11] WEAVER T, BURBANK M, LEWIS R, et al. Bio-induced calcite, iron, and manganese precipitation for geotechnical engineering applications[C]// *Proceedings of GeoFrontiers 2011: Advances in Geotechnical Engineering*. Dallas, TX, 2011: 3975 - 3983.
- [12] CHU J, IVANOV V. Iron- and calcium-based biogROUTs for soil improvement[C]// *Proceedings of Geo-Congress 2014*. Atlanta, Georgia, 2014: 1596 - 1601.
- [13] 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 - 117.
- [14] 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. (RONG Hui, QIAN Chun-xiang, LI Long-zhi. Cementation mechanism of microbe cement[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2013, **41**(3): 314 - 319. (in Chinese))
- [15] DHAMI, N K, REDDY M S, MUKHERJEE A. Biomineralization of calcium carbonates and their engineered applications: a review[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2013, **4**: 314.
- [16] HE J, CHU J, IVANOV V. Mitigation of liquefaction of saturated sand using biogas[J]. *Géotechnique*, 2013, **63**(4): 267 - 275.

- [17] REBATA-LANDA V, SANTAMARINA J C. Mechanical effects of biogenic nitrogen gas bubbles in soils[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 2012, **138**(2): 128 - 137.
- [18] CATNEY S F, LYNCH R J. Experimental investigations of air sparging to control contaminated groundwater[J]. *Proceedings of ICE-Geotechnical Engineering*, 2001, **149**(4): 253 - 258.
- [19] HE J. Mitigation of liquefaction of sand using microbial methods[D]. Singapore: Nanyang Technological University, 2013.
- [20] BLASZCZYK M, GALK A E, SAKOWICZ E, et al. Denitrification of high concentrations of nitrites and nitrates in synthetic medium with different sources of organic carbon: III methanol[J]. *Acta Microbiologica Polonica*, 1985, **34**(2): 195 - 205.
- [21] GLASS C, SILVERSTEIN J. Denitrification kinetics of high nitrate concentration water: pH effect on inhibition and nitrite accumulation[J]. *Water Research*, 1998, **32**(3): 831 - 839.
- [22] SALEH-LAKHA S, SHANNON K E, HENDERSON S L, et al. Effect of pH and temperature on denitrification gene expression and activity in *Pseudomonas mandelii*[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2009, **75**(12): 3903 - 3911.
- [23] SIMEK M, JISOVA L, HOPKINS D W. What is the so-called optimum pH for denitrification in soil?[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2002, **34**(9): 1227 - 1234.
- [24] BLASZCZYK M. Effect of medium composition on the denitrification of nitrate by *Paracoccus denitrificans*[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1993, **59**(11): 3951 - 3953.
- [25] STANFORD G, DZIENIA S, VANDERPOL R A. Effect of temperature on denitrification rate in soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1975, **39**(5): 867 - 870.
- [26] BAVEYE P, VANDEVIVERE P, HOYLE B L, et al. Environmental impact and mechanisms of the biological clogging of saturated soils and aquifer materials[J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 1998, **28**(2): 123 - 191.
- [27] THULLNER M. Comparison of bioclogging effects in saturated porous media within one- and two-dimensional flow systems[J]. *Ecological Engineering*, 2010, **36**(2): 176 - 196.
- [28] BOUWER H. Artificial recharge of groundwater: hydrogeology and engineering[J]. *Journal of Hydrology*, 2002, **10**(1): 121 - 142.
- [29] LI B. Geotechnical properties of biocement treated soils[D]. Singapore: Nanyang Technological University, 2014.
- [30] MONTAYA B M, DEJONG J T, BOULANGER R W. Dynamic response of liquefiable sand improved by microbial-induced calcite precipitation[J]. *Géotechnique*, 2013, **63**(4): 302 - 312.
- [31] 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 Zhuan, 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))
- [32] STABNIKOV V, CHU J, IVANOV V, et al. Halotolerant, alkalophilic urease-producing bacteria from different climate zones and their application for biocementation of sand[J]. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2013, **29**(8): 1453 - 1460.
- [33] VAN PAASSEN L A, HARKES M P, VAN ZWIETEN G A, et al. Scale up of biogrout: a biological ground reinforcement method[C]// *Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering: The Academia and Practice of Geotechnical Engineering*. Egypt, 2009: 2328 - 2333.
- [34] 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.
- [35] 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*, ASCE, 2013, **139**(4): 587 - 598.
- [36] AL QABANY A, SOGA K, SANTAMARINA J C. Factors affecting efficiency of microbially induced calcite precipitation[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 2012, **138**(8): 992 - 1001.
- [37] CHENG L, CORD-RUWISCH R, AND SHAHIN M A. Cementation of sand soil by microbially induced calcite precipitation at various degrees of saturation[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2012, **50**(1): 1 - 10.
- [38] SOON N, LEE L, KHUN T, et al. Factors affecting improvement in engineering properties of residual soil through microbial-induced calcite precipitation[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 2014, **140**(5): 04014006.

- [39] VAN PAASSEN L A. Bio-mediated ground improvement: from laboratory experiment to pilot applications[C]// *Proceedings of GeoFrontiers 2011: Advances in Geotechnical Engineering*. Dallas, TX, USA: ASCE Pressing, 2011: 4099 - 4108.
- [40] BLAUW M, LAMBERT J W M, LATIL M N. Biosealing: a method for in situ sealing of leakages[C]// *Proceedings of the International Symposium on Ground Improvement Technologies and Case Histories*. Singapore, 2009: 125 - 130.
- [41] CHU J, IVANOV V, HE J, et al. Microbial geotechnical engineering for disaster mitigation and coastal management[C]// *WCCE-ECCE-TCCE Joint Conference: Earthquake & Tsunami*. Istanbul Turkey, 2009.
- [42] LAMBERT J W M, NOVAKOWSKI K, BLAUW M, et al. Pamper bacteria, they will help us: application of biochemical mechanisms in geo-environmental engineering[C]// *Proceedings of GeoFlorida 2010: Advances in Analysis, Modeling & Design*. Florida, 2010: 618 - 627.
- [43] PHILLIPS A J, LAUCHNOR E, ELDRING J, et al. Potential CO<sub>2</sub> leakage reduction through biofilm-induced calcium carbonate precipitation[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(1): 142 - 149.
- [44] CUTHBERT M O, MCMILLAN L A, HANDLEY-SIDHU S, et al. A field and modeling study of fractured rock permeability reduction using microbially induced calcite precipitation[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(23): 13637 - 13643.
- [45] CHU J, IVANOV V, STABNIKOV V, et al. Microbial method for construction of aquaculture pond in sand[J]. *Géotechnique*, 2013, **63**(10): 871 - 875.
- [46] SEKI K, MIYAZAKI T, NAKANO M. Effects of microorganisms on hydraulic conductivity decrease in infiltration[J]. *European Journal of Soil Science*, 1998, **49**(2): 231 - 236.
- [47] JAMES G A, WARWOOD B K, HIEBERT R, et al. Microbial barriers to the spread of pollution[M]// VALDES J J: *Bioremediation*. Amsterdam: Kluwer Academic, 2000: 1 - 13.
- [48] CHU J, IVANOV V, HE J, et al. Use of biogeotechnologies for disaster mitigation[M]// LAI S, ed: *Geotechnics for Catastrophic Flooding Events*. London: CRC Press, 2014: 49 - 56.
- [49] VAN MEURS G, VAN DER ZON W, LAMBERT J, et al. The challenge to adapt soil properties[C]// *Proceedings of 5th ICEG-Environmental Geotechnics: Opportunities, Challenges and Responsibilities for Environmental Geotechnics*. 2006: 1192 - 1199.
- [50] YANG J, SAVIDIS S, ROEMER M. Evaluating liquefaction strength of partially saturated sand[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 2004, **130**(9): 975 - 979.
- [51] TSUKAMOTO Y, ISHIHARA K, NAKAZAWA H, et al. Resistance of partly saturated sand to liquefaction with reference to longitudinal and shear wave velocities[J]. *Soils and Foundations*, 2002, **42**(6): 93 - 104.
- [52] OKAMURA M, SOGA Y. Effects of pore fluid compressibility on liquefaction resistance of partially saturated sand[J]. *Soils and Foundations*, 2006, **46**(5): 695 - 700.
- [53] HE J, CHU J. Undrained responses of microbially desaturated sand under monotonic loading[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 2014, **140**(5): 04014003.
- [54] HE J, CHU J, LIU H. Undrained shear strength of desaturated loose sand under monotonic shearing[J]. *Soils and Foundations*, 2014, **54**(4): 910 - 916.
- [55] OKAMURA M, TAKEBAYASHI M, NISHIDA K, et al. In-situ desaturation test by air injection and its evaluation through field monitoring and multiphase flow simulation[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2011, **137**(7): 643 - 652.
- [56] YEGIAN M, ESELLER-BAYAT E, ALSHAWABKEH A, et al. Induced-partial saturation for liquefaction mitigation: Experimental investigation[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2007, **133**(4): 372 - 380.
- [57] ESELLER-BAYAT E, YEGIAN M, ALSHAWABKEH A, et al. Liquefaction response of partially saturated sands. I: Experimental results[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2013, **139**(6): 863 - 871.
- [58] MARYAM N. Biocementation of sand in geotechnical engineering[D]. Singapore: Nanyang technological University, 2014.
- [59] BANG S, MIN S H, BANG S S. Application of microbiologically induced soil stabilization technique for dust suppression[J]. *International Journal of Geo-Engineering*, 2011, **3**(2): 27 - 37.
- [60] JIANG N, SOGA K, DAWOUD O. Experimental study of the mitigation of soil internal erosion by microbially induced calcite precipitation[C]// *Proceedings of Geo-Congress 2014: Geo-Characterization and Modeling for Sustainability*.

- Atlanta, 2014: 1586 - 1595.
- [61] LI M, CHENG X, GUO H. Heavy metal removal by biomineralization of urease producing bacteria isolated from soil[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2013, **76**: 81 - 85.
- [62] 陆兆文, 钱春香, 许燕波. 微生物菌粉与菌液矿化固结  $Zn^{2+}$  的研究与对比[J]. *环境科学与技术*, 2012, **35**(12J): 58 - 61. (LU Zhao-wen, QIAN Chun-xiang, XU Yan-bo. Study and comparison of mineralized consolidation  $Zn^{2+}$  between bacteria and powder[J]. *Environmental Science and Technology*, 2012, **35**(12J): 58 - 61. (in Chinese))
- [63] 钱春香, 许燕波, 胡黎明, 等. 一种微生物固结污染体系中  $Cu^{2+}$  的研究[J]. *环境科学与技术*, 2011, **34**(12H): 33 - 36. (QIAN Chun-xiang, XU Yan-bo, HU Li-ming, et al. Study on  $Cu^{2+}$  in contaminated system mineralized by bacteria[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **34**(12H): 33 - 36. (in Chinese))
- [64] 李 萌, 郭红仙, 程晓辉. 土壤中产脲酶微生物分离及对重金属的固化[J]. *湖北农业科学*, 2013, **52**(14): 3280 - 3282. (LI Meng, GUO Hong-xian, CHENG Xiao-hui. Isolation of urease producing bacteria from soil and its mineralization on heavy metal[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2013, **52**(14): 3280 - 3282. (in Chinese))
- [65] 王瑞兴, 钱春香, 吴 淼, 等. 微生物矿化固结土壤中重金属研究[J]. *功能材料*, 2007, **38**(9): 1523 - 1526. (WANG Rui-xing, QIAN Chun-xiang, WU Miao, et al. Study on heavy metal removal in soil mineralized by bacteria[J]. *Functional Materials*, 2007, **38**(9): 1523 - 1526. (in Chinese))
- [66] 许燕波, 钱春香, 陆兆文. 微生物矿化修复铅离子污染的研究[J]. *化工时刊*, 2012, **26**(6): 14 - 17. (XU Yan-bo, QIAN Chun-xiang, LU Zhao-wen. Study on  $Pb^{2+}$  mineralized by bacteria for remediation[J]. *Chemical Industry Times*, 2012, **26**(6): 14 - 17. (in Chinese))
- [67] 许燕波, 钱春香, 陆兆文. 微生物矿化修复重金属污染土壤[J]. *环境工程学报*, 2013, **7**(7): 2763 - 2768. (XU Yan-bo, QIAN Chun-xiang, LU Zhao-wen. Remediation of heavy metal contaminated soils by bacteria biomineralization[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2013, **7**(7): 2763 - 2768. (in Chinese))
- [68] FUJITA Y, TAYLOR J L, WENDT L M, et al. Evaluating the potential of native ureolytic microbes to remediate a 90Sr contaminated environment[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **44**(19): 7652 - 7658.
- [69] MANNING D A C. Biological enhancement of soil carbonate precipitation: passive removal of atmospheric  $CO_2$ [J]. *Mineralogical Magazine*, 2008, **72**(2): 639 - 649.
- [70] 赵 茜. 微生物诱导碳酸钙沉淀 (MICP) 固化土壤试验研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2014. (ZHAO Qian. Experimental study on soil improvement using microbial induced calcite precipitation[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2014. (in Chinese))