

doi:10.11835/j.issn.2096-6717.2019.001



微生物岩土技术及其应用研究新进展

刘汉龙^{1a, 1b}, 肖鹏^{1a, 1b}, 肖杨^{1a, 1b}, 楚剑^{1a, 2}

(1. 重庆大学 a. 土木工程学院; b. 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045;

2. 南洋理工大学 土木与环境工程学院, 新加坡 639798)

摘要:微生物岩土技术主要是利用自然界广泛存在的微生物的代谢功能, 与环境中的其他物质发生一系列生物化学反应, 改变土体的物理力学及工程性质, 从而实现环境净化、土壤修复、地基处理等目的。微生物岩土技术作为岩土工程领域新的分支逐渐成为一个热门研究方向, 近年来, 许多学者已经开展了相关研究。为了促进该领域更加全面深入的基础研究, 指导微生物技术在岩土工程中更切合实际的推广与应用, 对环境岩土工程领域涉及的几种主要微生物种类、相关生物化学反应过程以及微生物作用机理进行详细的介绍与总结, 并对微生物岩土技术在土体加固、岩土体抗渗封堵、金属污染土修复等方面的相关研究及应用进行了总结与评述。

关键词:环境岩土; 微生物; 微生物加固; 微生物封堵; 污染土修复

中图分类号: TU44; Q939.99; X172 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2019)01-0001-14

State-of-the-art review of biogeotechnology and its engineering applications

Liu Hanlong^{1a, 1b}, Xiao Peng^{1a, 1b}, Xiao Yang^{1a, 1b}, Chu Jian^{1a, 2}

(1a. School of Civil Engineering; 1b. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China;

2. School of Civil and Environmental Engineering, Nanyang Technological University, Singapore 639798, Singapore)

Abstract: Biogeotechnology mainly utilizes microorganisms that widely existed in natural environment, and the metabolic functions of these microorganisms will induce serials of bio-chemical reactions with other materials in the environment. The physical mechanical and engineering properties of geo-material would remediate after the biochemical process, and thus achieving the aims of environmental purification, soil remediation and foundation treatment, etc. As a new branch of geotechnical engineering, biogeotechnology has gradually become a popular trend, many researchers have carried out a lot of related researches in recent years. This paper summarizes the representative microorganisms, the biochemical reaction processes and the function mechanisms of the microorganisms involved in the field of bio-geotechnical engineering. Then, the related researches and its applications from the aspects of bio-soil improvement technology, bio-sealing technology and metal contaminated soil remediation technology are summarized and discussed.

收稿日期: 2019-02-01

基金项目: 国家自然科学基金(41831282、51578096); 重庆市社会事业与民生保障科技创新专项重点研发项目(cstc2017shms-zdyfX0073)

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。

Received: 2019-02-01

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 41831282, 51578096); Key Project of Scientific and Technological Innovation for Social Undertakings and People's Livelihood Guarantee in Chongqing (No. cstc2017shms-zdyfX0073)

Author brief: Liu Hanlong (1964-), professor, doctoral supervisor, main research interest: geotechnical engineering, E-mail: hliuhhu@163.com.

Through the collection and summary works on this topic, it is expected to promote more comprehensive and in-depth basic researches and contribute to more practical promotion and application of the bio-technology in geotechnical engineering.

Keywords: environmental geotechnology; microorganism; bio-improvement; bio-sealing; contaminated remediation

岩土工程是以土力学、岩石力学、地质力学等为基础,解决包括地基与基础、边坡以及地下工程等岩土体工程问题的一门学科。作为岩土工程的研究对象,岩石和土体一直被认为是一种静态、力学性质复杂、无生命的特殊材料,存在于自然界岩土中的微生物及其作用则长期被人们忽视。究其原因,一方面是因为与微生物活动相关的工程案例较少,另一方面是因为岩土工程师对土体中微生物的作用认识不足,因此,人们认为微生物对岩土体的工程特性影响微小,不足以用来解决实际工程中的问题。

自 20 世纪 60 年代以来,土壤学家、地质学家们开始注意到生物圈物质循环和转移过程中的微生物代谢活动能直接参与环境中元素的氧化还原过程,改变地质特性,其作用甚至超过单纯的物理化学作用,人们也开始重视地球表层微生物对地质环境的作用并对其开展深入研究。同时,近年来由于人类活动造成的温室效应、土地污染等全球性环境问题变得日益严峻,世界各国纷纷大力倡导利用绿色天然、节能环保型材料,环境因素在土木工程建设中开始占据重要地位,并成为现代施工建设关注的重点。与传统材料相比,生物材料能在岩土基质中表现出特有的自发性、重塑性及重生性等特点,被认为是环境友好、生态低碳的材料,因此,生物材料受到越来越多科学家的青睐。

作为岩土工程领域一个新的研究分支,微生物环境岩土已经发展了十多年,许多学者开展了相关研究。笔者对环境岩土工程领域几种主要微生物种类、相关生物化学反应过程以及微生物作用机理进行了总结,并对微生物岩土技术在土体加固技术、岩土体抗渗封堵技术、金属污染土修复技术等方面的相关研究及应用进行了总结与评述,以推动微生物岩土领域更加全面深入的基础研究,促进该技术在岩土工程中的推广与应用。

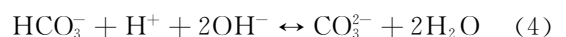
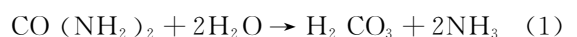
1 微生物岩土技术

微生物岩土技术主要是指利用自然界广泛存在的微生物,通过其自身的代谢功能与环境中其他物质发生一系列生物化学反应,吸收、转化、清除或降解环境中的某些物质,通过生物过程诱导形成

碳酸盐、硫酸盐等矿物沉淀,从而改善土体的物理力学及工程性质,达到环境净化、土壤修复、地基处理等目的。其作用方式主要依靠的反应类型包括氧化还原、基团转移、水解以及酯化、缩合、氨化、乙酰化等^[1-2]。

1.1 脲酶菌的反应机理

微生物诱导生成碳酸盐沉淀(MICP)是自然界普遍存在的一种生物诱导矿化作用,其中,碳酸盐的析出主要依赖于微生物新陈代谢活动产生的碳酸根离子、碱性条件以及环境中存在的金属离子,与参与的微生物种类关系不大。因此,不同代谢类型的微生物可形成不同的生物诱导矿化方式。尿素水解的 MICP 作用作为其中一种矿化类型,反应机制简单,过程容易控制,且在短时间内能产生大量的碳酸根,因此,基于尿素水解的 MICP 技术是目前研究最多、应用最广泛的生物矿化技术。巴氏芽孢杆菌(*Sporosarcina pasteurii*, DSMZ33, ATC5199, 曾用名 *Bacillus pasteurii*^[3])是一种能促进尿素水解的高产脲酶嗜碱性细菌(脲酶菌),该细菌无毒无害,在土壤或水环境中广泛存在,在酸碱及高盐等恶劣土壤环境中也具有较强的生物活性。脲酶菌能以环境中的尿素为氮源,通过自身新陈代谢活动产生大量高活性脲酶分解,脲酶水解溶液中的尿素生成 CO₂ (DIC)和 NH₃ (AMM),溶液中 CO₃²⁻ 含量随溶液 pH 值升高而升高。脲酶催化作用的本质是脲酶破坏尿素的共价键,其活性中心与尿素底物分子之间通过氢键、离子键、疏水键等短程非共价力作用形成脲酶-尿素反应中间物^[4]。脲酶菌诱导碳酸盐结晶的主要反应方程式(以碳酸钙为例)如式(1)~式(5)所示^[5-6]。



研究者普遍认为,脲酶菌主要起两个作用:1)为碳酸盐的沉积结晶提供成核点;2)代谢活动缓慢释放高效脲酶水解尿素,从而提高环境 pH 值^[5-6],其 MICP 沉淀示意图如图 1(a)所示。然而,近来有学

者就脲酶菌的第一个作用提出不同观点,Zhang 等^[7]通过微观试验,观测到碳酸钙并非围绕细菌生长,并认为反应过程中碳酸钙首先在溶液中生成,然后,细菌向碳酸钙结晶靠拢并被吸附在晶体表面(如图 1(b)所示)。因此,脲酶水解诱导碳酸钙沉淀过程的机理仍需进一步研究。

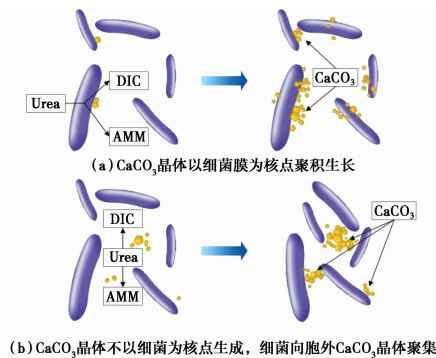
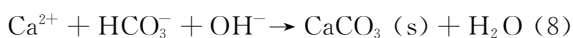
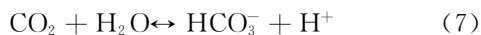
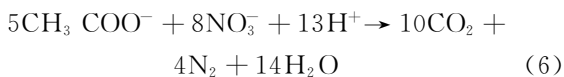


图 1 微生物诱导碳酸钙沉淀示意图

Fig1. Schematic diagram of microbial induced calcium carbonate precipitation

1.2 反硝化菌的反应机理

反硝化细菌是一种典型的兼性厌氧菌,在缺氧环境下,反硝化细菌能促使硝酸根接受电子,还原成氮气,同时消耗环境中的氢离子,生成二氧化碳,从而提高环境碱度;在碱性条件下,溶液中的碳酸氢根与钙离子(金属离子)结合生成沉淀。Karatas^[8]、Van Paassen 等^[9]采用革兰氏阴性、兼性厌氧菌(*Pseudomonas denitrificans*)在液体培养基、琼脂平板和砂柱等不同条件下的反硝化作用诱导生成碳酸钙沉淀试验,验证了利用反硝化菌进行 MICP 的可行性;Erşan 等^[10]对不同反硝化菌进行分离、筛选发现,*D. nitroreducens* 菌和 *P. aeruginosa* 菌具有更好的生长活性和环境耐受性,更有利于反硝化作用的发生。反硝化菌诱导碳酸盐(碳酸钙)结晶的反应方程式如式(6)~式(8)所示。

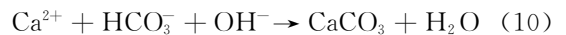
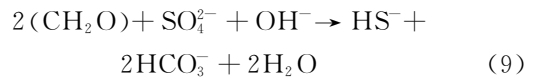


由于反硝化作用具有较高负值的标准吉布斯自由能,因此,在缺氧环境下,微生物的反硝化作用较其他微生物过程起主导作用,并从硝酸盐和有机营养物中获得能量,其他微生物过程会受到抑制^[11]。

1.3 硫酸盐还原菌的反应机理

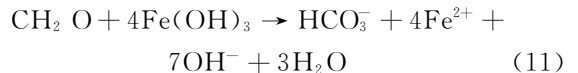
硫酸盐还原菌能利用硫酸盐作为电子受体,在有足够有机质的缺氧环境下,将硫酸根还原为硫化氢,同时生成碳酸氢根,碳酸氢根与金属离子(钙离

子)结合形成碳酸盐沉淀,同时,硫酸盐还原细菌还原硫酸盐的过程中,造成周围水体环境 pH 值上升,进一步影响碳酸盐的饱和系数,诱导碳酸盐沉淀产生^[12]。即便对于代谢不活跃的硫酸盐还原菌,也能通过多相成核点诱导碳酸盐沉淀^[13]。硫酸盐还原菌在白云石的沉淀研究中也起到了先锋作用^[14]。生成的硫化物沉淀可以胶结土颗粒,提高土壤抗剪强度。常见的硫酸盐还原菌包括 *D. desulfuricans*, *D. vulgaris* 等^[15]。硫酸盐还原菌反应过程的主要化学方程式如式(9)~式(10)所示。



1.4 铁盐还原菌的反应机理

铁盐还原菌的矿化作用过程主要是将不溶于水的三价铁还原为可溶性二价铁离子,同时,生成的亚铁离子不稳定,易发生氧化反应,生成不溶性三价铁氢氧化物或者铁盐产物,并在土颗粒间形成具有粘结力的填充物质,封堵土壤孔隙,增强土壤强度^[16-17]。*Shewanella putrefaciens* 是常见的铁盐还原菌。铁白云石的形成主要就是铁还原菌的反应过程,以氢氧化铁为例,其化学反应方程式为^[18]



1.5 其他微生物反应

水环境中常见的海藻、蓝藻等微生物可通过光合作用引起碳酸盐沉积^[19]。这类产氧光合微生物的新陈代谢活动可将水中的碳酸氢根(HCO_3^-)进行同化作用生成碳酸根(CO_3^{2-}),致使环境 pH 值提高;当溶液中存在钙离子等金属离子时,就会产生碳酸盐沉淀^[20]。另外,如产甲烷菌等其他菌类也能诱导生成沉淀,改善土体特性^[21];还有如克雷伯氏杆菌 *Klebsiella oxytaca*^[22]、粘球菌 *Slime-forming bacteria*^[23]、荧光假单胞菌 *Pseudomonas aeruginosa*^[24] 等微生物能产生大量多糖类胞外聚合物,并与细胞组成生物膜,生物膜虽非矿物沉淀,但能改变土体蠕变量,降低渗透系数等,并引起土工织物排水系统淤堵,因此,对土体的工程性质也有较大影响^[22,25-26]。

2 微生物岩土加固技术研究

微生物岩土加固技术主要是利用土体原位微生物或者土体中添加环境友好的特定微生物菌落以及指定的添加剂,利用微生物菌落群体新陈代谢作用的产物以及生物化学反应的生成物,在土体表面及

颗粒间形成胶结物质,以提高岩土体的强度和刚度等力学特性。其中,胶结沉淀可能包括含钙、镁、铁、锰、铝等的化合物。微生物加固技术未来可能应用于提高地基、边坡、大坝等的强度和稳定性,地下管道的开挖支护,土工构筑物抗侵蚀,砂土抗液化性能改善以及防尘固沙等方面。

2.1 地基加固处理

2001年,Dutch报社报道了利用细菌加固砂土修复纪念碑^[27],并由此开始了利用微生物进行岩土加固的研究。2004年,Deltares、Volker Wessels、荷兰代尔夫特理工大学以及莫道克大学展开合作,率先利用基于脲酶菌的微生物技术,开始了生物灌浆研究。近十年来,研究人员已经开展了大量室内试验研究,并通过无侧限抗压试验、弯曲元试验等技术判别加固效果。图2为不同研究团队得到的微生物加固砂土无侧限抗压强度和剪切波速与碳酸钙含量的关系^[28-40]。

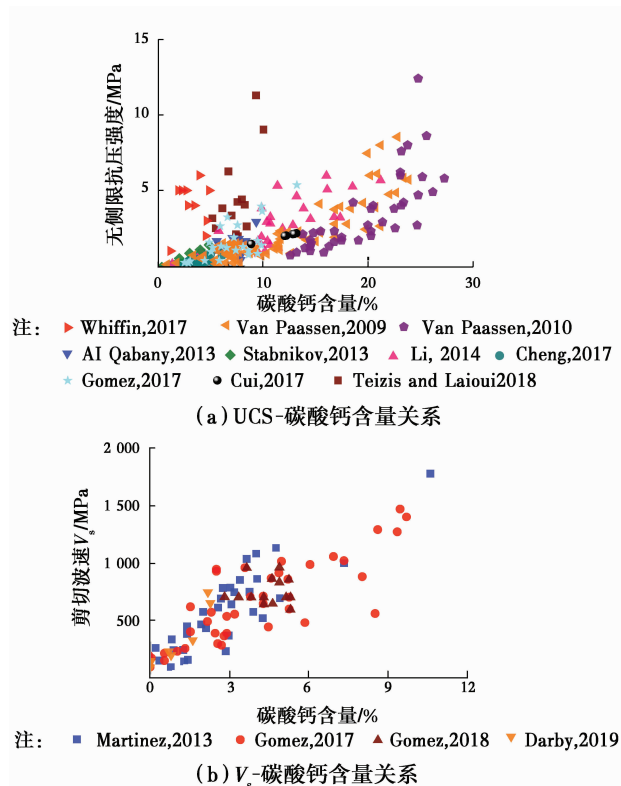


图 2 不同研究团队的研究成果

Fig. 2 Research results from different research teams

Liu等^[41]通过无侧限抗压试验、巴西劈裂、三轴试验等,系统地分析了MICP加固砂土的强度特性,发现加固后砂土的黏聚力随加固因子的增加成指数增长;并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。

一些团队针对微生物加固的大型模型试验及应

用也开展了相关研究。Van Paassen等^[27,30]于2008年搭建了100 m³的砂土试验地基场地,并在场地内间隔5 m处预埋两列管道,分别作为注浆管和出浆管(如图3(a)所示)。加固试验步骤:首先,通过3个注浆管灌注5 m³菌液,使其与土体充分接触;然后,将5 m³细菌固定液(0.05 mol/L CaCl₂)以同样的方式灌注进场地;在随后的16天里将96 m³的反应液(1 mol/L CaCl₂+Urea)分10次以1 m³/h的流速分别灌注进场地;整个灌浆过程保持0.3 m/m的恒定水力梯度。灌浆加固完成后,进行了一系列检测试验,试验结果表明,细菌可以在砂土地基里传输5 m以上的距离,且仍保持一定脲酶活性诱导矿化作用^[42];加固后剪切波速从100 m/s增加到最大400 m/s;静力触探在井口处最大可达5 MPa;无侧限强度最大达12.6 MPa。试验数据表明,经过MICP处理后,地基强度显著提高,但由于灌浆采用一侧灌浆一侧抽浆的方式,导致整个加固场地的不均匀性较明显:靠近注浆口生成的碳酸钙含量较多,最高达到23.5%;随着距离增大,到出浆口的碳酸钙含量明显降低,仅为3.7%~5.6%。加固试验完成后,进行冲刷试验,结果发现,场地内剩余约40 m³可见硬化地基,整个加固反应过程反应液的利用率为50%。

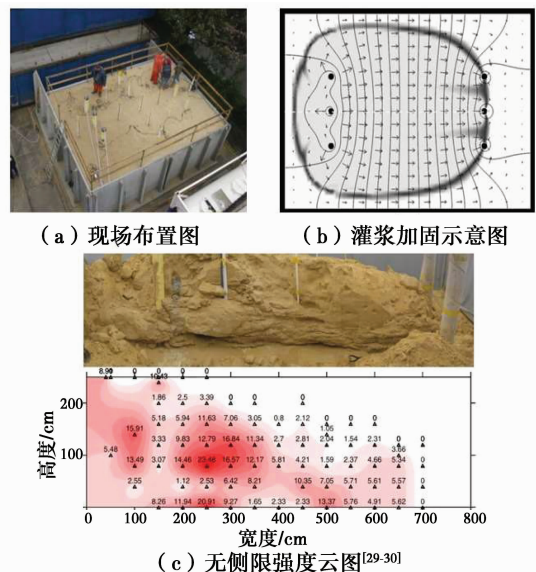


图 3 100 m³地基加固场地

Fig. 3 100 m³ foundation reinforcement site

Visser和Smit Hanab在2008年开展了3 m³的砾石MICP加固,并进行钻孔试验(HHD),证明了微生物加固的砾石同样具有足够的稳定性;在随后的2010年,该团队进一步开展了砾石场地的现场加固试验研究,如图4所示。试验过程:首先,在水平钻孔规划线附近1000 m³的场地内设置灌浆井口、出浆井

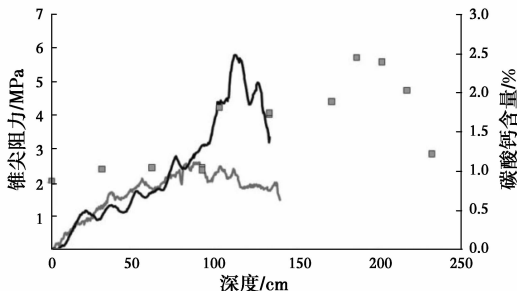
口和监测井口,并按照先灌注 200 m³ 稀释菌液,然后再灌注 300~600 m³ 反应液的顺序进行施工。灌浆过程中,持续从出浆口抽出地下水,直到废液中的电导率和铵离子浓度恢复初始值。灌浆结束后,场地整体强度明显提高,土体具有足够的强度和稳定性,随后,也成功进行了水平钻孔和管道的布设安装。



图 4 砾石稳定性试验及现场应用^[43-44]

Fig. 4 Gravel stability test and field application

Burbank 等^[45]利用富集培养基刺激原位场地的特定细菌,快速生长成为优势菌落,利用环形渗透计,分 9 次灌入加固液进行现场地基加固处理,加固完成后,通过碳酸钙含量测试发现,从地表到地下 0.9 m 处的碳酸钙含量在 1% 左右,1~2 m 深度范围碳酸钙含量为 1.8%~2.4%,同时,CPT 试验表明,在 1~1.3 m 间锥尖贯入阻力是未加固的 2~3 倍,如图 5 所示。试验结果同时表明,碳酸钙在 1% 左右时,对土壤力学性能改变不大,CPT 试验无法检测出来。



注:—CPT 1:Untreated —CPT 4:Untreated ■ Calcite Precipitation
图 5 锥尖阻力与碳酸钙含量随处理深度关系变化曲线^[45]

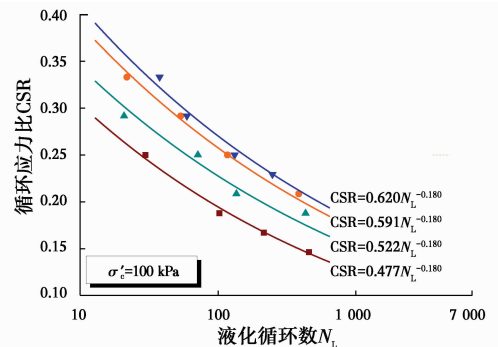
Fig. 5 Cone tip resistance and calcium carbonate content at depth

2.2 抗液化处理

MICP 技术不仅可以用于地基加固,也可以用于场地抗液化处理^[46],近年来,也得到一些学者的关注,但相关问题还处于室内试验研究阶段。

Burbank 等^[47]通过循环三轴试验,验证了经过

MICP 处理后的石英砂动强度明显提高。肖鹏等^[48-49]通过一系列试验,研究了不同 MICP 处理程度、有效围压、相对密实度、动剪应力比等因素对砂土抗液化性能的影响。试验发现,MICP 处理后将改变松砂的液化机理,随着加固程度的提高,试样从流滑破坏逐渐变为循环活动,如图 6 所示。通过 SEM 分析,发现颗粒表面和颗粒间生成的碳酸钙结晶改变了砂土的表面特性,使得粘聚力和摩擦力都有一定改变^[41],同时,生成的胶结物抑制了砂土大应变的发生。总体而言,加固后的砂土动力特性接近于密砂,但由于胶结作用的存在,MICP 加固的抗液化效果比振冲密实更有效。Feng 等^[50]发现,对于相同碳酸钙含量的砂土试样,由于生成的碳酸钙空间分布可能不均匀,剪切波速(V_s)越大的试样,其抗液化能力越强。因此,用碳酸钙含量值结合剪切波速值来衡量加固土体的力学性能更加合理。



注: ■ MICP=0 ▲ MICP=0.2 CS ● MICP=0.4 CS ▼ MICP=0.6 CS

图 6 MICP 加固砂土循环三轴试验^[49]

Fig. 6 The dynamic triaxial test of MICP treated sand

Montoya 等^[51]利用离心振动台对液化砂土自由场进行微生物加固试验,发现经 MICP 处理后,场地内不同深度下的孔隙水压力在不同地震强度下均不同程度减小,加固后场地的震后地表沉降明显小于未加固松砂,但地表加速度较松砂有一定增强。同时,程晓辉等^[52-53]利用小型振动台和循环三轴进一步论证了 MICP 能显著提高模型地基的抗液化性能。Darby 等^[54]对碳酸钙含量分别为 0.8%、1.4%、2.2% 的 3 组不同加固模型进行了 80g 的离心振动台试验,结果表明,经过 MICP 处理后,砂土的锥尖阻力从 2 MPa 分别提高到 5、10、18 MPa,剪切波速从 140 m/s 分别提高到 200、325、660 m/s,随着胶结程度的提高,其抗液化能力也随之提高,并最终不再液化,模型试样的力学性能逐渐由土的性质变为岩石的性质。

除此之外,利用微生物过程产生气体来降低土体饱和度也是一种防治地基液化的手段。研究表

明,对于饱和砂土,即便饱和度极少量降低,土体的抗液化性能也将明显提高^[55-56]。不同的微生物作用能产生不同气体^[57],相比于如二氧化碳、氢气、甲烷等其他气体,微生物作用生成的氮气难溶于水,其化学性质稳定、不易分解。因此,通过用氮气减少饱和度来提高抗液化性能是一种很好的选择。He等^[58-59]利用微生物的反硝化作用产生生物气泡开展了振动台试验,发现在加速度 0.5 m/s^2 的情况下,未经过微生物处理的饱和松砂完全液化,其超孔隙水压比接近1,地表发生明显沉降,体变达到5%;经过不同程度微生物处理后,砂土的饱和度分别降低到95%~80%,其中,80%饱和度模型在加速度为 0.5 m/s^2 的情况下,超孔隙水压比仅为0.1,地表几乎没有沉降发生,体变小于0.2%。

2.3 防尘固沙处理

空气中悬浮的尘土微粒严重影响环境质量和人类健康,研究表明,只要在砂土表面形成一层很薄的硬壳,即可有效控制环境尘土的飞扬和风沙土流动、风蚀^[60-61]。近年来,许多研究人员尝试利用微生物技术进行砂土表面固化处理,以缓解建筑、道路扬尘,改善城市空气质量,通过沙漠土表面生物覆膜处理,解决风沙土流动、风蚀等问题。

Bang等^[62-63]利用*S. pasteurii*细菌对地表砂土、粉土进行扬尘抑制试验,设计了不同细菌浓度、不同环境温度、不同湿度以及是否对土表面进行冲洗预处理等不同因素,针对级配良好的砂土进行表面微生物处理,成功地在砂土表面形成一层坚固硬壳,并获得碳酸钙沉积和扬尘抑制的最优配比,表明该技术可以用于砂土表面抗侵蚀。Naeimi等^[64]进一步利用风洞试验验证了微生物处理砂土表面的抑制扬尘和抗风力侵蚀能力,并估算了生物抑尘剂的用量,发现与目前应用于道路、机场场地的传统尘土抑制剂相比,生物抑尘剂所需的剂量更少^[65]。为研究现场表面固砂的可行性、稳定性以及植被可恢复性,Gomez等^[66]在加拿大一矿区附近开展了微生物表面固化现场试验,如图7所示。试验区包括4块不同MICP反应液浓度的加固区域(如图7(a)),每块面积 $2.4\text{ m}\times 4.9\text{ m}$,设计处理深度为0.3 m。表面处理结束后,动力触探试验发现,场地贯入阻力明显提高,结壳厚度在0.64~2.5 cm之间(如图7(b))。结壳表面碳酸钙含量为2.1%左右,生成的碳酸钙随着深度增加而降低,在深度10 cm左右仅为0.5%。随后又进行了长期标准贯入试验,以检测加固区域的耐久性(如图7(c))。试验发现,第64天时场地强度没有明显退化现象;然而,经历一个寒

冬,在试验第318天后再检测,发现加固场地强度有一定退化现象。

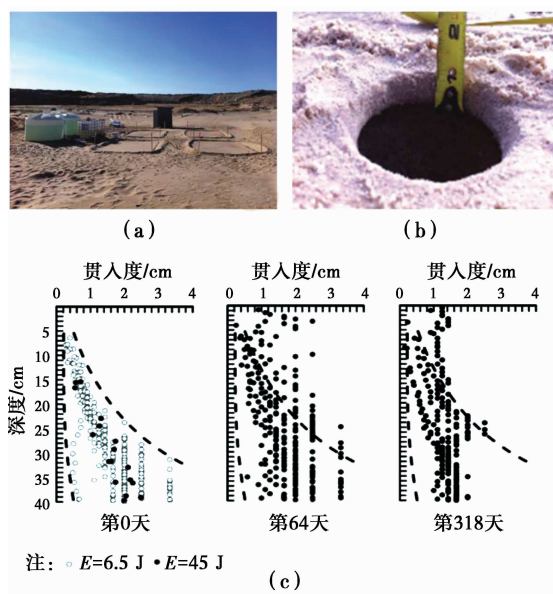


图7 微生物表层固沙处理现场试验^[66]

Fig. 7 The field application of sand surface treatment using MICP

李驰等^[67]在中国内蒙古乌兰布和沙漠地区进行了原位微生物矿化覆膜现场试验。现场处理面积为 $3.3\text{ m}\times 1.65\text{ m}$,观察深度为0.3 m。试验分别选用巴氏芽孢杆菌和葡萄球菌作为菌液,将菌液和反应液按1:2.5的比例以每天43.5 L细菌、108.75 L反应液($0.5\text{ mol/L, CaCl}_2 : \text{Urea} = 1 : 1$)按照交替喷洒的方式进行现场表面喷洒覆膜,处理过程持续4 d。覆膜试验结束后,利用微型贯入装置对加固区域进行了总计210 d的贯入试验,同时测定了覆膜内的碳酸钙含量。矿化试验第7天检测发现,两块试验区覆膜平均厚度均为2~2.5 cm左右,碳酸钙含量14%左右;矿化210 d,葡萄球菌处理表面覆膜厚度降低约0.2 cm,碳酸钙含量降低1%,巴氏芽孢杆菌处理表面覆膜厚度降低约1.5 cm,碳酸钙含量降低约4%。表面覆膜后在贯入深度2 cm时,贯入阻力从2 N提高到24.3 N和20.3 N,且经过210 d后,贯入阻力仍能保持稳定。试验表明,沙漠原位葡萄球菌可以用于沙漠的表面覆膜处理,以此抑制沙漠风蚀。但需要注意的是,该试验结果显示,贯入强度的离散性较大,这可能受到沙漠环境的昼夜温差变化以及冬春季节性变化较大的影响。Zhan等^[68]利用胶质类芽孢杆菌(*Paenibacillus mucilaginosus*)的酶促作用,将 CO_2 吸收、转化并生产碳酸根离子,然后与环境中的钙离子矿化反应,形成具有一定力学性能的方解石胶结层来抑制

扬尘,并利用该技术开展了 900 m² 的现场应用。经过微生物处理之后,现场区域的固化平均厚度为 13.2 mm,肖氏硬度为 24.6 度。在风速为 12 m/s 的抗风蚀试验下,处理后土体的质量损失由原来的 2 600 g/(m²·h)减小为 30 g/(m²·h);在雨水侵蚀试验中,微生物处理后的土体质量损失由原来的 750 g/(m²·h)减小为约 60 g/(m²·h),残余肖氏硬度仍保持雨水侵蚀前的 90% 以上。同时,微生物矿化作用形成的方解石表层坚硬结构还可以提高土体的保湿性能,通过植物发芽生长试验,确认了该技术具有良好的环境兼容性,微生物处理后更有利于土壤保水和植物生长。一系列检测试验表明,利用微生物进行表面处理的场地防尘效果十分显著,同时,该技术绿色节能,经济环保。

3 微生物岩土封堵技术研究

微生物岩土封堵技术主要利用微生物作用的代谢物及系列生物化学反应的生成物作为孔隙填充材料来降低渗透性。目前,主要的微生物封堵方式有两种:一种是利用 MICP 作用形成碳酸盐沉淀封堵,另一种是生物膜技术(biofilm)。生物膜技术主要通过激发微生物的新陈代谢,使其产生大量胞外聚合物(EPS),EPS 是一种柔软、有延性、有弹性的有机黏滑固体,能促进更多细菌附着并形成一种生物膜^[69-70]。在岩土材料生物膜修复过程中,由于孔隙处的流速最大,新添加的营养物持续在孔隙处供应,更容易形成较多 EPS,从而降低孔隙率;与此同时,基底里还添加有一些金属元素,与 EPS 一起絮凝成黏土块,可以填充孔隙、降低渗透特性、并增加延展性。微生物封堵技术可以用于土体防渗处理、岩石裂隙修复以及排水管道抗侵蚀、防止土石坝发生管涌等方面。

3.1 土体防渗处理

大量研究表明,存在于土体中累积的细菌生物量、不溶性细菌黏液、不溶性多糖和低溶解度生物气泡等可以降低土体的渗透性^[16,71-72];在氨氧化过程中,反硝化菌通过空气中的 CO₂ 形成多聚糖,随着细菌的聚集和累积,形成一层微生物粘液,也能进行土壤封堵^[73-74]。Ivanov 等^[16]发现,在低浓度葡萄糖砂土环境中富集培养贫氧细菌产生多糖物质,可使砂土的渗透系数从 10⁻⁴ m/s 降低到 10⁻⁶ m/s。Veenbergen 等^[75]利用微生物产生的生物粘液进行了生物封堵缩尺试验,经过 6 d 处理后,土壤的抗渗性能提高了 5 倍,随着营养液的继续添加,抗渗性能最后提高到 30 倍;在停止灌注营养液 3 个月之后,

抗渗性能仍保持不变。Cheng 等^[76]采用碳酸钙沉积技术,并结合海藻酸钠与钙离子反应,形成凝胶状海藻酸钙进行砂土防渗处理。试验结果表明,处理后的砂土渗透性从 5.0×10⁻⁴ m/s 降低到 2.2×10⁻⁹ m/s,防渗效果比单纯 MICP 技术提高 1~2 个量级。

大量室内试验已证明多种细菌种群可用于生物封堵,Blauw 等^[77]较早地将生物膜技术应用于奥地利多瑙河的一个黏土心墙堤坝渗漏修复,该堤坝黏土心墙长期渗漏,在进行混凝土-膨润土墙处理后,仍然没有解决渗漏问题。Blauw 等利用原位微生物的生长,进行了为期 23 d 营养液灌注来降低心墙的孔隙进行堵漏。6 周后发现渗透性开始下降,10~14 周后发现,原来大坝的单位时间渗漏量明显下降,从修复前每天 17.33 m³ 减少到 2.35 m³。5 个月后再检测灌浆口的渗漏情况,发现其渗漏量只有处理前的 0.1~0.2 倍,表明生物膜技术在土工构筑物的修复中具有可行性。同时,工业界存在大量有机废水,可以变废为宝,作为许多发酵细菌和胞外多糖产生菌的有机营养源,为现场大规模微生物封堵应用提供原材料。

但需要说明的是,由于生物聚合物的可降解性、热敏感性及较差的力学性能,其堵塞作用的耐久性不易保证,不足以满足大部分土工结构的设计使用寿命,因此,该技术目前还无法大规模推广。利用微生物矿化生成的无机物沉淀具有更好的稳定性和力学性能,因此,此类生物封堵技术被认为更有潜力。其中,利用脲酶菌反应形成碳酸钙沉淀来填充土体孔隙、降低流体流量、降低渗透系数为最主要的研究方向^[5,78-79]。大量研究发现,对于土体材料,经过微生物处理生成的碳酸钙含量与渗透系数存在一定的规律(如图 8 所示)^[28,31,33,39,80-82]。

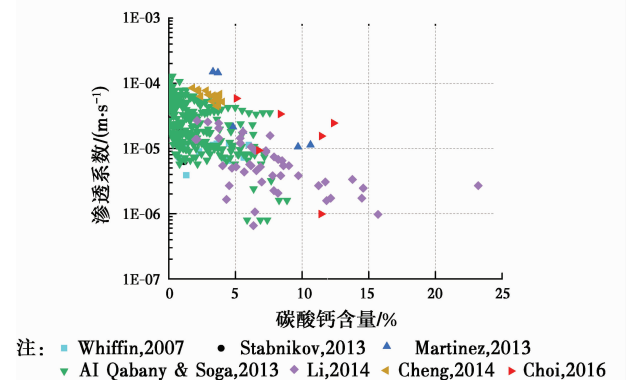


图 8 渗透系数 - 碳酸钙含量关系图

Fig. 8 Relationship between the permeability and the calcium carbonate content

Chu 等^[83]利用微生物技术,按照每平方米砂土表面使用 2.1 kg 氯化钙来建造蓄水池,如图 9 所示,经过 MICP 表面处理后,砂土的渗透性可以从 10^{-4} m/s 降低到 10^{-7} m/s。随后,在池底取样进行四点抗弯试验,发现抗弯强度为 90~256 kPa,侧壁和池底的无侧限抗压强度为 215~932 kPa,均具有一定强度。

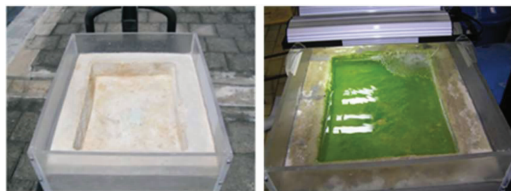


图 9 MICP 修建临时蓄水池^[83]

Fig. 9 The construction of temporary reservoir using MICP method

刘璐等^[84]通过向模型堤坝喷洒微生物细菌以及营养盐进行加固,并对处理好的堤坝模型进行水槽试验,如图 10 所示。经过连续多天的冲刷后,除模型试样两侧有少量细砂被水流带出外,模型整体无侵蚀破坏现象发生。对 MICP 处理堤坝表层形成的外壳进行三轴渗透试验,发现渗透系数从 4×10^{-4} m/s 降低至 7.2×10^{-7} m/s。对堤坝表层的试样进行强度测试,发现无侧限抗压强度可高达 9 MPa。试样中生成的碳酸钙含量占试样重量的 18% 左右。

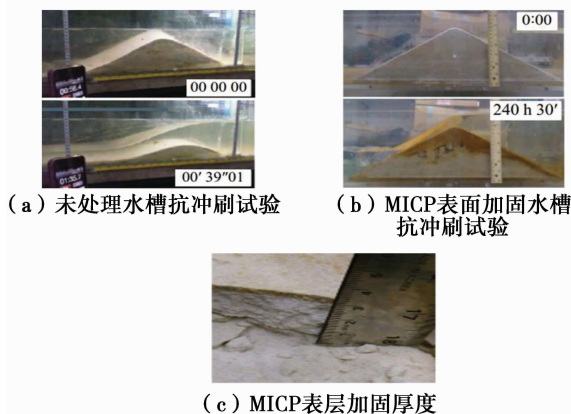


图 10 微生物处理堤坝水槽试验^[84]

Fig. 10 The flume test of MICP treated model dam

谈叶飞等^[85]在安徽滁州大洼水库黏性土堤防的 3 个区段开展了 MICP 防渗现场试验,利用坝体内部测压管对内部水头进行监测,同时监测渗漏部位的渗漏量。结果表明,该技术能迅速将黏性土堤防坝段渗透系数降低 2 个数量级。Gao 等^[86]提出了基于 MICP 的防渗沟渠的施工工艺:首先利用注浆管工艺处理待修建沟渠场地,然后进行开挖,最后

利用喷洒和浸泡技术处理沟渠表面。结果表明,该施工工艺能有效减小砂土表面渗透系数,满足使用要求。

3.2 岩石裂隙修复

利用微生物技术在岩石裂隙修复方面的研究,目前,国际上已开展了不少原位试验和现场应用。Cuthbert 等^[87]利用 MICP 修复地下深 25 m、面积为 4 m^2 的一段裂隙岩体,检测发现 MICP 修复后渗透性显著减低,且在环境地下水作用 12 周后,渗透性没有明显改变。Phillips 等^[88]开展了地下 340.8 m 的深部岩石裂隙修复现场试验研究,对钻井孔附近天然存在的水平裂隙进行修复,如图 11 所示。在注浆修复过程中发现,由于表面封堵的形成,在恒定注浆压力下注入量随着时间的发展降低。经过修复处理后,灌浆流速从 1.9 L/min 降低到 0.47 L/min;井口关闭下测定每 5 min 的压力减小值,发现压力变化值从修复前的 30% 降低到修复后的 7%。结果表明,井口的完整性和密封性得到很好的提高,修复后的岩土裂缝再次发生开裂破坏需要比之前更大的压力。在此处裂隙修复完成并投入使用一段时间后,超声成像测井仪检测发现,深度为 310 m 的区域出现了新的水泥性能退化现象,针对钻井孔出现退化区域再次进行 MICP 灌浆修复,同样取得了良好效果,修复后灌浆流速从 $0.29 \text{ m}^3/\text{h}$ 降低到 $0.011 \text{ m}^3/\text{h}$,超声成像测井仪显示,此处的固体含量明显增多^[89]。

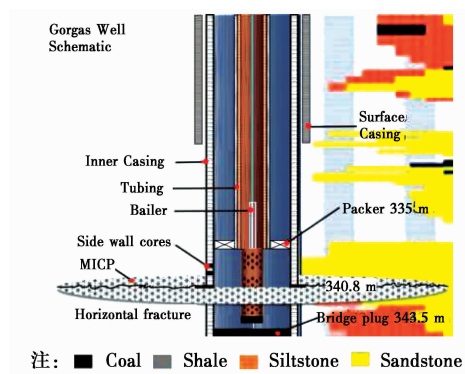


图 11 深部岩体修复^[88]

Fig. 11 The remediation of deep rock mass

Lambert 等^[90]在加拿大南安大略一处深井旁进行了石灰岩裂隙的微生物修复处理,该岩石裂隙在地下约 16 m 深处,裂隙大小 $439 \sim 569 \mu\text{m}$,通过 21 d 的营养液灌注,其渗漏明显减小并成功隔绝地下污染水的泄露,52 d 时检测抗渗效果提高一个量级,但 210 d 后再次检测发现,抗渗效果开始出现退化。

4 微生物金属污染土修复技术研究

微生物金属污染土修复技术主要利用微生物诱导碳酸盐沉积的过程中,一些金属离子和放射性元素会与碳酸根离子结合发生共沉淀,将这些金属固定在其晶体结构中。该技术可用于固化污染土中的重金属离子使其不再扩散^[91]。不同研究者^[92-98]从不同地区提炼出多种细菌,利用 MICP 技术实现了对 Cu、Pb、Zn、Cd、Cr、Sr、As 等多种不同重金属污染土壤的稳定化处理,重金属去除率达到 50%~99%,证明 MICP 可以在恶劣的自然条件下对重金属污染土壤进行固化作用。另外,Ganesh 等^[99]还利用铁盐还原菌(*Shewanella alga*)和硫酸盐还原菌(*Desulfovibrio desulfuricans*)将六价铀还原为四价铀,然后将四价铀沉淀形成沥青铀矿(UO₂(S))从水溶液中移除。目前,利用 MICP 技术进行重金属污染治理的研究仍主要集中在室内试验阶段,有报道的重金属处理现场试验研究仅有两个:Fujita 等^[100]在华盛顿的一块场地开展了 90Sr 污染治理试验,试验添加尿素和糖浆来促进场地土著脲酶菌的生长和重金属的固化沉积,并利用注浆管道在相隔几米的地方一边注浆一边抽取,循环处理,试验结果表明,MICP 技术是一种可以用于现场 90Sr 污染物处理的技术手段;许燕波等^[101]在也开展了 MICP 去除重金属离子的现场试验研究,试验选用革兰氏阳性菌作为矿化菌种,对某废弃铁矿场进行处理,现场修复深度 20 cm,面积 1 000 m²,处理前污染土中 As、Pb、Cd、Zn、Cu 的交换态浓度分别为 14.01、4.95、0.64、33.46、12.95 mg/kg,进行 MICP 现场喷洒处理的环境温度为 30 ℃、pH 值为 5.5、尿素用量 12.65 kg、菌液用量 160 L,修复后上述重金属的交换态浓度分别减少为 2.37、1.25、0.311、16.67、3.42 mg/kg,试验表明,利用盐矿化菌喷洒处理受重金属污染土壤效果显著,重金属去除率最高达到 83%,重金属离子被作物吸收的风险明显降低。以生物矿化为基础,通过固结重金属离子修复受重金属污染土壤的微生物修复技术方法简单、易于操作,能有效降低金属离子对环境的危害,具有很好的应用前景。

5 结论与展望

对微生物岩土领域涉及的几种主要微生物的生物化学反应过程及其作用机理进行了详细介绍,并对已开展的相关研究及应用进行总结与评述,以促进对微生物岩土领域更全面深入的了解。微生物环

境岩土作为岩土工程领域一个新的研究分支,在中国已经发展了十多年,除了文中提到的几种微生物岩土应用,根据研究者的研究成果和设想^[44],微生物技术未来还会在岩土和建筑领域的更多方面实现应用,如二氧化碳的封存、沙漠绿化、填海造地、混凝土修复、古建筑修复等。与此同时,由于岩土工程的建设施工项目通常十分庞大,涉及到不同的场地条件、复杂的施工工艺,而微生物本身的生物化学反应又十分复杂,因此,微生物技术的应用必须针对不同的施工环境,选取不同的菌种,并识别、筛选、优化细菌,以得到适合应用环境的最优细菌及生物活性,满足生态安全性及修复的可靠性。同时,细菌参与过程中的一系列副产物也需要特别关注和去除,如脲酶菌水解过程产生的铵根离子,反硝化过程中不完全反应产生的有毒亚硝酸盐、一氧化二氮等中间产物等都可能造成环境污染等问题。虽然目前对微生物技术已开展较多研究,但在当前技术方法下,微生物技术的推广仍面临巨大的挑战:成本是工程项目中要考虑的重要因素,但该技术并不成熟,更无法与水泥为传统的岩土加固方式形成成本上的优势。降低成本的关键和瓶颈在于细菌的选择和培养,因而非常有必要开展跨学科合作,与相关材料学、微生物学、化学研究团队开展深入合作。

总体来说,微生物岩土技术及应用的研究还处于起步阶段,微生物岩土技术走向真正大规模实际应用还有很多问题需要克服,这也需要新一代岩土工作者加倍努力,建立跨学科学习与合作机制,共同打造环境友好型岩土技术新体系。

参考文献:

- [1] MITCHELL J K, SANTAMARINA J C. Biological considerations in geotechnical engineering [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(10): 1222-1233.
- [2] 王镜岩,朱圣庚,徐长法. 生物化学教程[M]. 北京:高等教育出版社,2008.
WANG J Y, ZHU S G, XU C F. Essential biochemistry [M]. Beijing: Higher Education Press, 2008. (in Chinese)
- [3] YOON J H, LEE K C, WEISS N, et al. *Sporosarcina aquimarina* sp. nov., a bacterium isolated from seawater in Korea, and transfer of *Bacillus globisporus* (Larkin and Stokes 1967), *Bacillus psychrophilus* (Nakamura 1984) and *Bacillus pasteurii* (Chester 1898) to the genus *Sporosarcina* as *Sporosarcina globispora* comb. nov., *Sporosarcina psychrophila*

- comb. nov.* and *Sporosarcina pasteurii comb. nov.*, and emended description of the genus *Sporosarcina* [J]. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 2001, 51(3): 1079-1086.
- [4] 王茂林, 吴世军, 杨永强, 等. 微生物诱导碳酸盐沉淀及其在固定重金属领域的应用进展[J]. *环境科学研究*, 2018, 31(2): 206-214.
- WANG M L, WU S J, YANG Y Q, et al. Microbial induced carbonate precipitation and its application for immobilization of heavy metals: A review [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2018, 31(2): 206-214. (in Chinese)
- [5] STOCKS-FISCHER S, GALINAT J K, BANG S S. Microbiological precipitation of CaCO₃[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, 31(11): 1563-1571.
- [6] DE MUYNCK W, DE BELIE N, VERSTRAETE W. Microbial carbonate precipitation in construction materials; A review [J]. *Ecological Engineering*, 2010, 36(2): 118-136.
- [7] ZHANG W C, JU Y, ZONG Y W, et al. In situ real-time study on dynamics of microbially induced calcium carbonate precipitation at a single-cell level [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(16): 9266-9276.
- [8] KARATAS I. Microbiological improvement of the physical properties of soils [D]. Phoenix: Arizona State University, 2008.
- [9] 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.
- [10] ERŞAN Y Ç, DE BELIE N, BOON N. Microbially induced CaCO₃ precipitation through denitrification; An optimization study in minimal nutrient environment [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2015, 101: 108-118.
- [11] DEJONG J T, MORTENSEN B M, MARTINEZ B C, et al. Bio-mediated soil improvement [J]. *Ecological Engineering*, 2010, 36(2): 197-210.
- [12] BAUMGARTNER L K, REID R P, DUPRAZ C, et al. Sulfate reducing bacteria in microbial mats; Changing paradigms, new discoveries [J]. *Sedimentary Geology*, 2006, 185(3/4): 131-145.
- [13] BOSAK T, NEWMAN D K. Microbial nucleation of calcium carbonate in the Precambrian [J]. *Geology*, 2003, 31(7): 577-580.
- [14] WARTHMAN R, VAN LITH Y, VASCONCELOS C, et al. Bacterially induced dolomite precipitation in anoxic culture experiments [J]. *Geology*, 2000, 28(12): 1091-1094.
- [15] 戴永定. 生物矿物学 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1994: 572.
- DAI Y D. *Biom mineralogy* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1994: 572. (in Chinese)
- [16] IVANOV V, CHU J. Applications of microorganisms to geotechnical engineering for bioclogging and biocementation of soil in situ [J]. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 2008, 7(2): 139-153.
- [17] IVANOV V, STABNIKOV V, ZHUANG W Q, et al. Phosphate removal from the returned liquor of municipal wastewater treatment plant using iron-reducing bacteria [J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2005, 98(5): 1152-1161.
- [18] RODEN E E, LEONARDO M R, FERRIS F G. Immobilization of strontium during iron biomineralization coupled to dissimilatory hydrous ferric oxide reduction [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2002, 66(16): 2823-2839.
- [19] RIDING R. Cyanobacterial calcification, carbon dioxide concentrating mechanisms, and Proterozoic-Cambrian changes in atmospheric composition [J]. *Geobiology*, 2006, 4(4): 299-316.
- [20] ALTERMANN W, KAZMIERCZAK J, OREN A, et al. Cyanobacterial calcification and its rock-building potential during 3.5 billion years of Earth history [J]. *Geobiology*, 2006, 4(3): 147-166.
- [21] REEBURGH W S. Oceanic methane biogeochemistry [J]. *Chemical Reviews*, 2007, 107(2): 486-513.
- [22] CHANEY R, DEMARS K, PERKINS S W, et al. The influence of biofilm on the mechanical behavior of sand [J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2000, 23(3): 300-312.
- [23] XU Z M, WANG J T, JIA Y T, et al. Experimental study on microbial fouling characteristics of the plate heat exchanger [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 108: 150-157.
- [24] ABDOLAH A, HAMZAH E, IBRAHIM Z, et al. Microbially influenced corrosion of steels by *Pseudomonas aeruginosa* [J]. *Corrosion Reviews*, 2014, , 32(3/4): 129-141.
- [25] FLEMMING H C, WINGENDER J, SZEZYK U, et al. Biofilms: an emergent form of bacterial life [J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2016, 14(9): 563-575.
- [26] WU H N, WANG Q, KO J H, et al. Characteristics of geotextile clogging in MSW landfills co-disposed with MSWI bottom ash [J]. *Waste Management*, 2018, 78: 164-172.
- [27] VAN PAASSEN L A. Bio-mediated ground

- improvement: From laboratory experiment to pilot applications [C] // *Geo-Frontiers Congress 2011*, March 13-16, 2011, Dallas, Texas, USA, 2011: 4099-4108.
- [28] 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.
- [29] 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 Academic and Practice of Geotechnical Engineering*, 2009: 2328-2333.
- [30] 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*, 2010, 136 (12): 1721-1728.
- [31] QABANY A A, SOGA K. Effect of chemical treatment used in MICP on engineering properties of cemented soils [J]. *Géotechnique*, 2013, 63 (4): 331-339.
- [32] VIKTOR S, CHU J, VOLODYMYR I, et al. Halotolerant, alkaliphilic 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] LI B. Geotechnical properties of biocement treated sand and clay [D]. Singapore: Nanyang Technological University, 2014.
- [34] CHENG L, SHAHIN M A, MUJAH D. Influence of key environmental conditions on microbially induced cementation for soil stabilization [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2017, 143(1): 04016083.
- [35] GOMEZ M G, DEJONG J T, Engineering properties of bio-cementation improved sandy soils [C] // BYLE M J, JOHNSEN L F, BRUCE D A, et al. *Grouting 2017: Grouting, Drilling, and Verification*, 2017: 23-33.
- [36] CUI M J, ZHENG J J, ZHANG R J, et al. Influence of cementation level on the strength behaviour of bio-cemented sand [J]. *Acta Geotechnica*, 2017, 12(5): 971-986.
- [37] TERZIS D, LALOUI L. 3-D micro-architecture and mechanical response of soil cemented via microbial-induced calcite precipitation [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 1416.
- [38] GOMEZ M G, DEJONG J T, ANDERSON C M. Effect of bio-cementation on geophysical and cone penetration measurements in sands [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2018, 55(11): 1632-1646.
- [39] 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.
- [40] DARBY K M, HERNANDEZ G L, GOMEZ M G, et al. Centrifuge model testing of liquefaction mitigation via microbially induced calcite precipitation [C] // *Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics V*, June 10-13, 2018, Austin, Texas, 2018.
- [41] LIU L, LIU H L, STUEDLEIN A W, et al. Strength, stiffness, and microstructure characteristics of biocemented calcareous sand [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2018, <https://doi.org/10.1139/cgj-2018-0007>.
- [42] FILET A E, GADRET J-P, LOYGUE M, et al. Biocalcis and its applications for the consolidation of sands [C] // *Grouting and Deep Mixing 2012*, 2012: 1767-1780.
- [43] VAN DER STAR W R L, VAN WIJNGAARDEN W K, VAN PAASSEN L A, et al. Stabilization of gravel deposits using microorganisms [C] // *Proceedings of the 15th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2011: 85-90.
- [44] 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.
- [45] BURBANK M B, WEAVER T J, GREEN T L, et al. Precipitation of calcite by indigenous microorganisms to strengthen liquefiable soils [J]. *Geomicrobiology Journal*, 2011, 28(4): 301-312.
- [46] 刘汉龙,肖鹏,肖杨,等. MICP 胶结钙质砂动力特性试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2018, 40(1): 38-45. LIU H L, XIAO P, XIAO Y, et al. Dynamic behaviors of MICP-treated calcareous sand in cyclic tests [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 40(1): 38-45. (in Chinese)
- [47] BURBANK M, WEAVER T, LEWIS R, et al. Geotechnical tests of sands following bioinduced calcite precipitation catalyzed by indigenous bacteria [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental*

- Engineering, 2013, 139(6): 928-936.
- [48] XIAO P, LIU H L, STUEDLEIN A W, et al. Effect of relative density and bio-cementation on the cyclic response of calcareous sand [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2019, <https://doi.org/10.1139/cgj-2018-0573>.
- [49] 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.
- [50] FENG K, MONTOYA B M. Quantifying level of microbial-induced cementation for cyclically loaded sand [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2017, 143(6): 06017005.
- [51] MONTOYA 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.
- [52] 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 X H, MA Q, YANG Z, 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)
- [53] HAN Z G, CHENG X H, MA Q. An experimental study on dynamic response for MICP strengthening liquefiable sands [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2016, 15(4): 673-679.
- [54] DARBY K M, HERNANDEZ G L, DEJONG J T, et al. Centrifuge model testing of liquefaction mitigation via microbially induced calcite precipitation [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, 130(9): 975-979.
- [55] PIETRUSZCZAK S, PANDE G N, OULAPOUR M. A hypothesis for mitigation of risk of liquefaction [J]. Géotechnique, 2003, 53(9): 833-838.
- [56] YANG J, SAVIDIS S, ROEMER M. Evaluating liquefaction strength of partially saturated sand [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, 130(9): 975-979.
- [57] REBATA-LANDA V, SANTAMARINA J C. Mechanical effects of biogenic nitrogen gas bubbles in soils [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2012, 138(2): 128-137.
- [58] HE J, CHU J, IVANOV V. Mitigation of liquefaction of saturated sand using biogas [J]. Géotechnique, 2013, 63(4): 267-275.
- [59] HE J. Mitigation of liquefaction of sand using microbial methods [D]. Singapore: Nanyang Technological University, 2013.
- [60] PIECHOTA T C, VAN EE J, BATISTA J R, et al. Potential environmental impacts of dust suppressants: "Avoiding another Times Beach" [M]. Washington, DC United States: Environmental Protection Agency, 2004.
- [61] MORGAN R P C, QUINTON J N, SMITH R E, et al. The European Soil Erosion Model (EUROSEM): A dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1998, 23(6): 527-544.
- [62] MEYER F D, BANG S, MIN S, et al. Microbiologically-induced soil stabilization: application of *sporosarcina pasteurii* for fugitive dust control [C]// Geo-Frontiers Congress 2011: Advances in Geotechnical Engineering, March 13-16, 2011, Dallas, Texas, USA, 2011: 4002-4011.
- [63] BANG S C, MIN S H, BANG S S. Application of microbially induced soil stabilization technique for dust suppression [J]. International Journal of Geo-Engineering, 2011, 3(2): 27-37.
- [64] NAEIMI M, CHU J. Comparison of conventional and bio-treated methods as dust suppressants [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, 24(29): 23341-23350.
- [65] US Army, US Air Force. Dust control for roads, airfields, and adjacent areas [M]. Honolulu: University Press of the Pacific, 2005: 48.
- [66] GOMEZ M G, MARTINEZ B C, DEJONG J T, et al. Field-scale bio-cementation tests to improve sands [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement, 2015, 168(3): 206-216.
- [67] 李驰, 王硕, 王燕星, 等. 沙漠微生物矿化覆膜及其稳定性的现场试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(4).
- LI C, WANG S, WANG Y X, et al. Field experimental study on stability of bio-mineralization crust in Ulan Buh Desert, Inner Mongolia of China [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(4). (in Chinese)
- [68] ZHAN Q W, QIAN C X, YI H H. Microbial-induced mineralization and cementation of fugitive dust and engineering application [J]. Construction and Building Materials, 2016, 121: 437-444.
- [69] BAI Y, GUO X J, LI Y Z, et al. Experimental and visual research on the microbial induced carbonate precipitation by *Pseudomonas aeruginosa* [J]. AMB Express, 2017, 7: 57.

- [70] THULLNER M, BAVEYE P. Computational pore network modeling of the influence of biofilm permeability on bioclogging in porous media [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2008, 99(6): 1337-1351.
- [71] VANDEVIVERE P, BAVEYE P. Relationship between transport of bacteria and their clogging efficiency in sand columns [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1992, 58 (8): 2523-2530.
- [72] 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.
- [73] STEHR G, ZÖRNER S, BÖTTCHER B, et al. Exopolymers: An ecological characteristic of a flocculated, ammonia-oxidizing bacterium [J]. *Microbial Ecology*, 1995, 30(2): 115-126.
- [74] IVANOV V, STABNIKOVA O, SIHANONTH P, et al. Aggregation of ammonia-oxidizing bacteria in microbial biofilm on oyster shell surface [J]. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2006, 22 (8): 807-812.
- [75] ERDEM Y, SOLAK T. Underground space use, analysis of the past and lessons for the future [M]. Abingdon: Taylor & Francis, 2005:7-12.
- [76] CHENG L, YANG Y, CHU J. In-situ microbially induced Ca^{2+} -alginate polymeric sealant for seepage control in porous materials [J]. *Microbial Biotechnology*, 2019, 12(2): 324-333.
- [77] BLAUW M, LAMBERT J W M, LATIL M N. Biosealing: A method for in situ sealing of leakages [C] // *International Symposium on Ground Improvement Technologies & Case Histories*. 2011.
- [78] BACHMEIER K L, WILLIAMS A E, WARMINGTON J R, et al. Urease activity in microbially-induced calcite precipitation [J]. *Journal of Biotechnology*, 2002, 93(2): 171-181.
- [79] HAMMES F, VERSTRAETE W. Key roles of pH and calcium metabolism in microbial carbonate precipitation [J]. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 2002, 1(1): 3-7.
- [80] STABNIKOV V, CHU J, MYO A N, et al. Immobilization of sand dust and associated pollutants using bioaggregation [J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2013, 224(9): 1631.
- [81] CHENG L, SHAHIN M A, CORD-RUWISCH R. Bio-cementation of sandy soil using microbially induced carbonate precipitation for marine environments [J]. *Géotechnique*, 2014, 64(12): 1010-1013.
- [82] CHOI S G, WANG K J, CHU J. Properties of biocemented, fiber reinforced sand [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 120: 623-629.
- [83] CHU J, IVANOV V, STABNIKOV V, et al. Microbial method for construction of an aquaculture pond in sand [J]. *Géotechnique*, 2013, 63 (10): 871-875.
- [84] 刘璐, 沈扬, 刘汉龙, 等. 微生物胶结在防治堤坝破坏中的应用研究 [J]. *岩土力学*, 2016, 37 (12): 3410-3416.
- LIU L, SHEN Y, LIU H L, et al. Application of bio-cement in erosion control of levees [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(12): 3410-3416. (in Chinese)
- [85] 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)
- [86] GAO Y F, TANG X Y, CHU J, et al. Microbially induced calcite precipitation for seepage control in sandy soil [J]. *Geomicrobiology Journal*, 2019, 10: 1-10.
- [87] 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.
- [88] PHILLIPS A J, CUNNINGHAM A B, GERLACH R, et al. Fracture sealing with microbially-induced calcium carbonate precipitation: a field study [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(7): 4111-4117.
- [89] PHILLIPS A J, TROYER E, HIEBERT R, et al. Enhancing wellbore cement integrity with microbially-induced calcite precipitation (MICP): A field scale demonstration [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, 171: 1141-1148.
- [90] 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] // *GeoFlorida 2010, February 20-24, 2010, Orlando, Florida, USA, 2010*.
- [91] MAURI L A W P A. Microbially mediated calcium carbonate precipitation: implications for interpreting

- calcite precipitation and for solid-phase capture of inorganic contaminants[J]. *Geomicrobiology Journal*, 2001, 18(1): 93-115.
- [92] ACHAL V, PAN X L, ZHANG D Y. Remediation of copper-contaminated soil by *Kocuria flava* CR1, based on microbially induced calcite precipitation [J]. *Ecological Engineering*, 2011, 37(10): 1601-1605.
- [93] ACHAL V, PAN X L, FU Q L, et al. Biomineralization based remediation of As (III) contaminated soil by *Sporosarcina ginsengisoli* [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, 201/202: 178-184.
- [94] ACHAL V, PAN X L, ZHANG D Y. Bioremediation of strontium (Sr) contaminated aquifer quartz sand based on carbonate precipitation induced by *Sr resistant Halomonas sp.* [J]. *Chemosphere*, 2012, 89(6): 764-768.
- [95] LI M, CHENG X H, GUO H X. Heavy metal removal by biomineralization of urease producing bacteria isolated from soil [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2013, 76: 81-85.
- [96] KUMARI D, PAN X L, LEE D J, et al. Immobilization of cadmium in soil by microbially induced carbonate precipitation with *Exiguobacterium undae* at low temperature [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2014, 94: 98-102.
- [97] KANG C H, HAN S H, SHIN Y, et al. Bioremediation of Cd by microbially induced calcite precipitation [J]. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2014, 172(4): 1929-1937.
- [98] KUMARI D, LI M M, PAN X L, et al. Effect of bacterial treatment on Cr(VI) remediation from soil and subsequent plantation of *Pisum sativum* [J]. *Ecological Engineering*, 2014, 73: 404-408.
- [99] GANESH R, ROBINSON K G, REED G D, et al. Reduction of hexavalent uranium from organic complexes by sulfate- and iron-reducing bacteria [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1997, 63(11): 4385-4391.
- [100] 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.
- [101] 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 Y B, QIAN C X, LU Z W. Remediation of heavy metal contaminated soils by bacteria biomineralization [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2013, 7(7): 2763-2768. (in Chinese)

(编辑 胡英奎)