

微生物诱导固化技术研究进展

王恒星, 缪林昌[†], 孙潇昊, 吴林玉
(东南大学 交通学院, 江苏 南京 210096)

摘要:微生物诱导固化(Microbial induced carbonate precipitation, MICP)技术因其环境友好性已成为近些年研究的热点. 本文对 MICP 的固化机理进行了介绍, 阐述了细菌、成核位点和生物膜对 MICP 矿化反应的影响, 并对相关理论模型进行了总结, 包括该技术涉及到的溶液的传输与分布、尿素水解速率和孔隙模型等. 通过对相关文献进行总结发现, 基于 MICP 具有良好的流动性并且可以生成具有胶结性沉淀的特点, MICP 能够在砂土固化、地基改良、防渗封堵、混凝土修复等领域发挥出良好的改善效果, 具有广阔的应用前景. 最后, 在已有研究成果的基础上, 对 MICP 当前研究的问题以及未来的研究方向进行了讨论与展望.

关键词:微生物固化技术; 理论模型; 砂土固化; 地基改良; 防渗封堵; 混凝土修复

中图分类号: TU443

文献标志码: A

Research Advances in Microbially Induced Carbonate Precipitation

WANG Hengxing, MIAO Linchang[†], SUN Xiaohao, WU Linyu
(School of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Microbially induced carbonate precipitation (MICP) has become a research hot spot due to its environmental friendliness in recent years. This paper introduces the mechanism of MICP, and expounds the influence of bacteria, nucleation microdots and Extracellular Polymeric Substances (EPS) on the reaction of MICP. Similarly, the relevant theoretical models involved in this technology are summarized, including the model of solution transmission and distribution, the model of urea hydrolysis rate and the model of pore. In addition, through summarizing the relevant literature, it is found that, based on MICP better fluidity and cemented precipitation, MICP can play a good improvement effect in broadly application fields, such as sand solidification, foundation improvement, anti-seepage plugging, concrete repair. Finally, the current research problems and future research directions of MICP are discussed and prospected based on the current research results.

Key words: microbially induced carbonate precipitation; theoretical model; sand solidification; foundation improvement; anti-seepage plugging; concrete repairing

近年来为满足快速工业化和日益增长的城市化需求, 受人类活动影响, 环境恶化加剧, 因此绿色、天

* 收稿日期: 2020-01-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51578147), National Natural Science Foundation of China(51578147)

作者简介: 王恒星(1992—), 男, 安徽合肥人, 东南大学博士研究生

[†] 通信联系人, E-mail: Lc.miao@seu.edu.cn

然环保的材料受到重视. 微生物诱导固化 MICP (Microbially induced carbonate precipitation) 技术由于其独特的环境友好性, 成为了当下研究的热点^[1-3].

自然界中存在着大量微生物, 其对地基、矿物、地质及地下工程等往往会起到潜移默化的影响. 传统工程中人们往往更多地关注宏观构造物, 对微生物的认识不足且缺乏案例, 从而忽略了微生物对工程的影响. MICP 的实质是利用自然界中某类细菌, 其新陈代谢可产生分解尿素的脲酶, 尿素分解后产生的碳酸根离子与自然界游离的金属阳离子结合生成胶凝晶体的过程^[4]. MICP 技术的应用对生产能耗、生产成本要求低, 同时能减少温室气体排放. MICP 技术可提高土的地质特性, 因此可利用其作为一种替代地质加固技术.

近些年来, 和微生物活动相关的工程问题得到了越来越多的关注, 岩土工程与材料学的研究学者采用微生物固化技术为混凝土材料修复和砂土固化等工程问题开辟了新的研究方向. 本文针对微生物固化技术, 结合国内外相关研究文献资料, 对其反应机理、理论研究、固化应用及当下面临的问题进行相关的总结和评述.

1 微生物加固技术

MICP 是利用微生物将自然界的化学物质转化为沉淀矿物的方法^[5]. 矿物析出在地质沉积中广泛存在, 但在正常情况下进行得非常缓慢, 需要很长的地质演化过程, 然而 MICP 技术可以依赖微生物的新陈代谢或代谢产物加速反应, 在较短的时间内产生大量的具有胶结性的矿物质^[6].

1.1 固化机理

MICP 的反应原理主要有四种, 分别是尿素分解反应、反硝化反应、反硫化反应、碳氧化反应. 其中尿素分解反应是最直接也是最容易控制的方式^[7-8]. 目前关于微生物矿化技术的应用大多数是采用尿素类细菌, 该类细菌在自然界中分布广泛^[9-10]. 具体的原理是通过细菌自身产生脲酶, 该类酶可以分解尿素生成碳酸根离子[见式(1)], 而生成的碳酸根离子再与自然界游离的金属阳离子结合生成具有胶结性的沉淀物质[见式(2)], 钙离子对细菌细胞的吸引力导致细胞局部发生超饱和, 从而导致碳酸钙在细菌细胞表面的沉淀^[11], 碳酸钙晶体形成过程如图 1 所示. 这类细菌最具代表性的就是巴氏芽孢杆菌 (*Bacillus pasteurii*)^[12]. 除此之外, 国内外也有研究学者采用尿

小球菌 (*Micrococcus ureae*)、变形杆菌、沙门氏菌、大肠杆菌和葡萄球菌^[13]等进行技术应用. 这类细菌的共同点在于能产生脲酶.

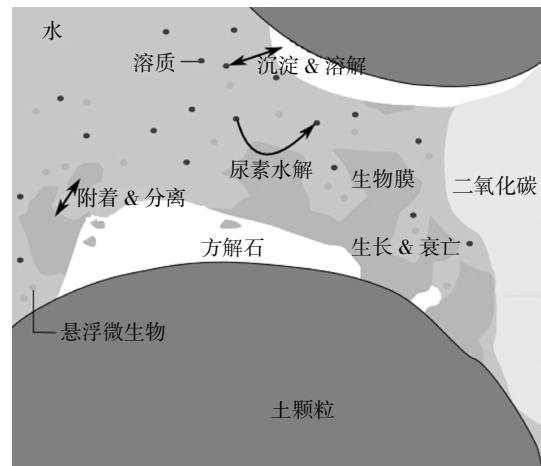


图 1 MICP 机制与影响因素示意图^[14]

Fig.1 Schematic diagram of MICP mechanism and influencing factors^[14]

脲酶 (又称尿素酶) 如图 2 所示, 属于酰胺水解酶和磷酸三酯酶^[15], 是高分子量的含镍金属酶^[16], 具有绝对专一性, 能够特异性地催化尿素水解, 释放出氨和二氧化碳.



图 2 脲酶分子示意图^[17]

Fig.2 Molecular diagram of urease^[17]

巴氏芽孢杆菌的孢子具有较高的脲酶活性, 由于其能够产生大量脲酶, 且能在高碱性环境和高钙离子浓度下生存, 因此常被选作生物催化剂^[18-19]. Ferris 等^[20]首次采用巴士芽孢杆菌生成脲酶, 进行新型降渗, 开拓了微生物矿化技术在生物岩土工程中的应用前景, 他们利用生成的碳酸钙沉淀矿物作为堵塞和固化剂. 之后该想法激发了大量对 MICP 土壤改良技术的应用研究^[21].

1.2 影响因素

MICP 是一个生物化学过程,通常由几个因素决定:钙离子的浓度、溶解无机碳的浓度、pH 值和可用的成核位点^[22].其诱导产生的碳酸钙沉淀以 3 种多晶形式存在^[11,23],通常最稳定的为方解石^[24].自然界中有很多微生物都有在碱性环境中诱导方解石析出的能力^[25-26],可诱导碳酸盐沉淀的主要微生物有光合微生物(例如蓝藻和蓝藻微藻)、硫酸盐还原菌、某些参与氮循环的微生物^[27].

1.2.1 细菌

细菌是非常重要的因素.在混凝土裂缝修复的研究中,由于裂缝中存在高碱性等不良环境,为了使选择的细菌能正常存活,芽孢类细菌成为较好的选择^[28].巴氏芽孢八叠球菌的产脲酶量可以达到微生物细胞干重的 1%^[29],具有较高的产脲酶能力^[30].麻强^[31]研究得到试验中脲酶活性的大小不仅与细菌浓度有关,还受到细菌分泌脲酶的速率与数量的影响.Rivadeneyra 等^[32]则研究发现不同微生物诱导产生的碳酸钙具有不同的晶体结构.这可能是由于微生物种类不同造成的^[33-34],也可能是由外界环境不同造成的^[35].Park 等^[36]利用 4 种不同的尿素水解类细菌进行 MICP 反应,最终发现诱导产生的矿物成分均为方解石,但晶体结晶模式存在差异.

1.2.2 成核位点

碳酸钙的胶结作用与细菌的分布密切相关,当土颗粒的表面附着大量细菌时,能生成较多的具有胶结性能的碳酸钙晶体.细菌在孔隙材料中的附着能力受众多因素影响,如孔隙材料形态、表面质地、矿物成分,以及细菌本身的亲水性等^[14].其次,细菌细胞表层带负电荷,尿素水解过程中溶液 pH 值逐渐增大,这都有利于带正电荷的钙离子附着在细胞表面,因此碳酸钙结晶在细菌细胞表面形成并不断聚集^[37-38].

1.2.3 生物膜

尿素分解类微生物矿化反应不仅与尿素水解速率相关,还会受到细胞膜通透性等因素的影响^[39].微生物分泌的胞外聚合物(extracellular polymeric substances, EPS)是一种常见微生物反应产物^[40].这种反应产物会附着在孔隙材料的表面和内部,该胞外聚合物会对细菌具有保护作用^[41].当大量细菌和胞外聚合物形成一个整体时可形成微生物膜,并降低试样的渗透性^[42-45].常见的能够分泌胞外聚合物的微生物为有氧或兼氧型的异养细菌^[46].也有部分学者对胞外聚合物的生成和降解及其影响因素进行了大量研

究.在大量的室内试验研究中发现,胞外聚合物的生成使得孔隙材料的渗透性一般降低约 2~4 个数量级^[44,46].王瑞兴^[47]研究发现碳酸钙生成大约发生在菌液与胶凝液混合后 30 min,最终碳酸钙晶体直径可达到 10~20 nm.

2 理论模型研究

由于 MICP 涉及复杂的生物化学反应和水动力过程,更需要通过理论研究了解 MICP 机制.国内外研究学者主要针对 MICP 的尿素分解速率、菌种传输运输分布特性、碳酸钙结晶过程及矿化后孔隙模型特性的变化开展了研究.

2.1 尿素分解速率

关于尿素分解速率的理论计算研究,需要注意多个因素的影响,例如:尿素浓度、pH 值、钙离子浓度、温度、微生物生长繁殖、微生物衰落、碳酸钙沉淀包裹等.Wijngaarden 等^[48]针对不同因素对细菌脲酶活性的影响进行了研究,并对试验数据进行拟合,得到相关经验公式,如式(3)所示.Hommel 等^[49]则考虑更复杂的微生物生长模型,对尿素分解速率公式进行了修正,得到的新的尿素分解速率公式更适合于 MICP 模型研究.

$$\frac{r}{r_0} = \frac{C_{\text{urea}}}{K_{\text{m,urea}} + C_{\text{urea}}} \times \frac{1 + 2 \times 10^{0.5(\text{pH}_{\text{UL}} - \text{pH}_{\text{LL}})}}{1 + 10^{(\text{pH} - \text{pH}_{\text{LL}})} + 10^{(\text{pH} - \text{pH}_{\text{UL}})}} \times \exp\left(\frac{-t}{t_d}\right) \times \exp\left(\frac{-C_{\text{Ca}^{2+}}}{K_{37\%} C_{\text{Ca}^{2+}}}\right) \times \exp\left[(T - T_0) \frac{\ln Q_{10}}{10}\right] \times \exp\left(\frac{S_{\text{CaCO}_3}}{S_d}\right) \quad (3)$$

式中: C_{urea} 为尿素浓度; r 为尿素分解速率; r_0 为尿素分解速率的最大值; $K_{\text{m,urea}}$ 为半饱和常数; pH_{LL} 和 pH_{UL} 为水解速率降低 50%时对应的两个 pH 值; $C_{\text{Ca}^{2+}}$ 为钙离子浓度; T 为试验温度; T_0 为基准温度; Q_{10} 为升高 10 °C 时脲酶活性的变化值; t_d 为时间常数(即脲酶活性降低为初始 63% 对应的时间); S_d 为碳酸钙的特征衰减浓度.

2.2 菌种运输、分布特性

当 MICP 技术采用灌注等工艺时,还需要考虑细菌的悬浮、运输、附着、解附着等与对流扩散相关的性质.除此之外,还需要考虑孔隙结构的性质,即渗透性、孔隙率、模型尺寸以及生物膜生长等,这些参数都会影响细菌的分布,并最终影响 MICP 产生的碳酸钙的分布.

为了研究生物膜和孔隙结构的关系,Peszynska

等^[4]使用玻璃珠代替砂土颗粒,并利用3D成像技术获取生物膜填充后混合物的孔隙尺寸与几何形状,探究生物膜对流体运动的影响与灌注速率对生物膜增长的影响,结果表明生物膜会减小渗流的横截面积,使局部流速增大,而这将进一步导致生物膜更容易滞留在变小的局部区域。Van Paassen等^[50]采用扩散-吸附方程研究灌注过程中细菌的运输、沉淀与附着。在其研究中利用附着和解附着的形式建立了一个整体的微分方程来研究悬浮液细菌、暂时附着细菌和永久附着细菌三者的数量变化。

2.3 碳酸钙沉淀及胶结性能研究

MICP 技术固化砂柱或土体的强度提升的关键在于生成的碳酸钙的胶结作用。但在研究固化试样强度时,有研究得到固化后试样的破坏形式主要为两种,碳酸钙与砂颗粒连接处断裂和碳酸钙内部断裂。为确定固化后强度的关键影响因素,Wang等^[51]采用SEM扫描观察破坏后的试样形态,最终得到破坏界面大部分位于碳酸钙内部,即主要是生成的碳酸钙内部出现断裂。Wang等^[52]还参考渥太华砂的孔隙分布,利用二甲基硅氧烷(PDMS)制备多孔介质模型。试验时,颗粒内表面被等离子体处理成带负电荷的亲水性表面来模拟砂土颗粒性质。试验中先后灌注菌液、固定液与胶凝液,并通过显微镜观察细菌的分布特征与碳酸钙的沉淀形式。图3为二维多孔介质模型^[53]。

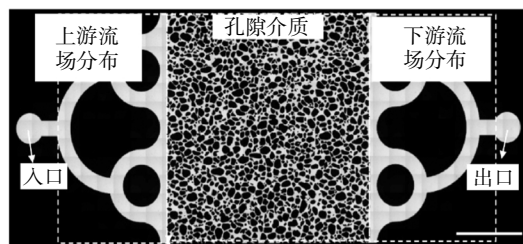


图3 二维多孔介质模型^[53]

Fig.3 Two-dimensional porous media model^[53]

2.4 MICP 矿化模型研究

参考静态吸附-脱附-反应体系,通过碳酸钙沉积改变砂土孔隙率和渗透系数进行时间迭代,研究MICP固化砂土过程中碳酸钙随时间与空间变化的模型^[54]。陈婷婷等^[55]根据杨钻的一维模型,进一步探究了不同灌浆速率下碳酸钙生成量、胶凝液浓度、初始细菌脲酶活性与灌注距离的关系。Fauriel等^[56]通过对液相与固相的质量守恒、混合物线性动量守恒和各组分质量守恒的宏观表示,采用连续介质的方法,得到了生物化学-水-力学模型的数学公式,进而描述MICP灌注固化在饱和、可变形的多孔介质的注

入、分布和反应过程。整个模型主要包括4个部分:生物学、化学、水力学、力学部分,各部分的关系如图4所示。

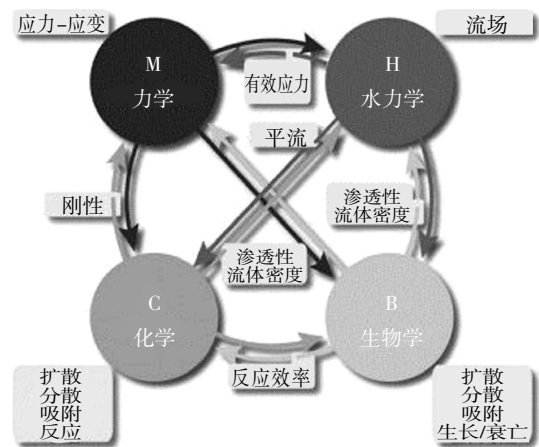


图4 BCHM模型各组成部分之间的联系^[50]

Fig.4 Relation between components of BCHM model^[50]

在MICP固化砂土的研究中,由于砂柱为孔隙结构,因此,有研究学者对于孔隙尺寸、孔隙形态等对MICP的影响进行了研究。整个孔隙结构大致为孔体和孔喉连接的形式,这不仅影响细菌在砂土中扩散,而且影响碳酸钙的沉积与胶结性能。Yoon等^[57]利用孔隙网络模型建立圆柱孔隙结构,研究了碳酸钙在孔隙中沉淀对孔隙率、渗透性的影响。Qin等^[58]首先建立了不同形状条件下生物膜增长模式与溶质运移模型,并得到了水相与生物膜之间质量交换的半经验公式。在此基础上,Qin等^[59]又根据MICP的特点,建立了整体二维孔隙模型模拟颗粒孔隙真实分布,并研究砂土孔隙尺寸对MICP固化效果的影响。

3 MICP 固化技术应用

MICP 技术是一种胶结松散颗粒从而形成结构材料的新方法^[60]。研究表明,MICP 技术可提高土壤强度、刚度与密实度,并减小土壤与混凝土裂缝的渗透性^[61-62]。因此,国内外研究学者采用此技术进行很多领域的应用。

3.1 砂土固化

3.1.1 整体性

MICP 技术可在土颗粒之间形成具有胶结性的物质,从而提高土体的整体性,改善了土体内部的物理、力学性质,起到加固的效果。Reddy等^[63]直接将砂与细菌混合培养再注入砂柱中,然后将含有营养物质、尿素和钙源的胶凝液以一定的速率灌注,得到固

化砂柱。

生成的碳酸钙分布不均匀是影响 MICP 固化整体性的一个问题^[9]。分析原因发现,细菌细胞表面带负电荷,细菌细胞之间的静电力作用使得它们相互排斥,而这种负电荷却会吸引溶液中的 Ca^{2+} ,从而出现电荷中和并聚集成团。聚集后的团粒会封堵砂土颗粒孔隙,这不利于后续液体的传输,从而导致砂柱各处碳酸钙生成量不均匀。

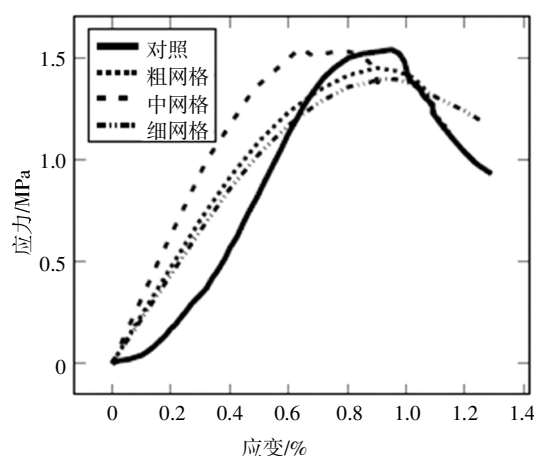
大多数 MICP 固化室内试验都注意到碳酸盐沉淀存在分布不均,且主要是灌注点的封堵问题^[4]。Cheng 等^[64]试图解决灌注点封堵和处理土壤样品的均匀性问题,他们提出了一种新的脲酶活性材料(bioslurry),最终发现碳酸钙含量分布的均匀性得到了改善。Cheng 等^[65]还提出了采用单相低 pH 值注入法来代替现有的使用较多的多次灌注法。结果表明,采用单相低 pH 值注入法既可防止灌注扣表面封堵的发生,又可减少氨气的产生。Omorieg 等^[66]研究发现相比于菌液与砂土预先混合的形式,不混合能得到更好的固化效果,采用 1 mol/L 的尿素和氯化钙混合液与菌液缓慢灌注的方式有助于碳酸钙的均匀分布。Al Qabany 等^[67]发现较低胶凝液浓度减缓了空隙的堵塞,方解石的分布更加均匀,从而使固化效果得到提升。

3.1.2 改善土体力学性质

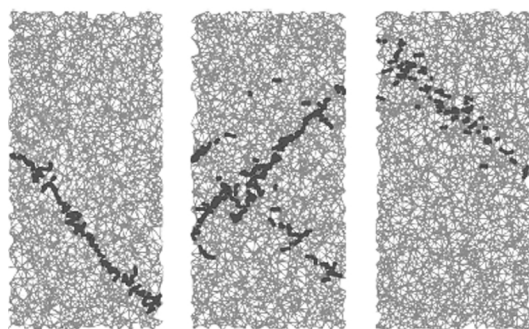
由于 MICP 技术能在潮湿的环境中析出具有胶结性的物质,因而可改变土体内部的孔隙结构及颗粒间的相互作用方式,进而改变土体的一些力学性质。

张帅等^[68]采用饱和灌浆法和非饱和入渗法分别处理砂土,发现均可使砂土胶结在一起,并具有无侧限抗压强度,但采用入渗固化的最终抗压强度要高于灌注固化。Rowshanbakht 等^[69]发现细菌利用率随菌液灌注量减小而减小,随试样初始相对密度增加而增加,碳酸钙生成量随初始相对密度增加而下降,但最终无侧限抗压强度却上升。Zamani 等^[70]研究发现固化后的砂柱刚度显著提高是因为 MICP 技术将细颗粒胶结成团粒,而团粒又将粗颗粒的孔隙填充,这种现象优化了颗粒间的荷载传递路径,因此减小了整体应变,增大了刚度。景天宇等^[71]利用 MICP 技术对黄河泥沙进行了加固,发现可提升泥沙的无侧限抗压强度和抗剪强度。谢约翰等^[72]采用 MICP 技术对黏性土进行改性处理,以改善其水稳性与抗侵蚀能力,通过崩解试验和粒度分析试验发现, MICP 改性土的崩解速率和崩解度均小于未处理土,且土的细颗粒含量减少、粗颗粒含量增加,同时生成的碳酸

钙在土颗粒之间形成有效的胶结,极大地增加了土颗粒的强度,提高了土体的水稳性。Rizvi 等^[73]利用 MICP 对砂土进行加固,进行了无侧限抗压强度测试,并提出了利用粗、中、细 3 种格状单元法,对砂柱的破坏形式进行分析,试验结果表明生物矿化作用有助于增加粒状介质的内聚力和摩擦角,且不连续非线性格网单元方法可准确拟合生物胶结砂的中尺度断裂现象,破坏时对角斜向剪切裂纹很少,如图 5 所示。



(a) 应力应变曲线



(b) 粗网格破坏线 (c) 中网格破坏线 (d) 细网格破坏线

图 5 CaCO_3 质量分数为 8.24% 时不同网格下破坏曲线^[73]

Fig.5 8.24% of precipitation obtained with different meshes^[73]

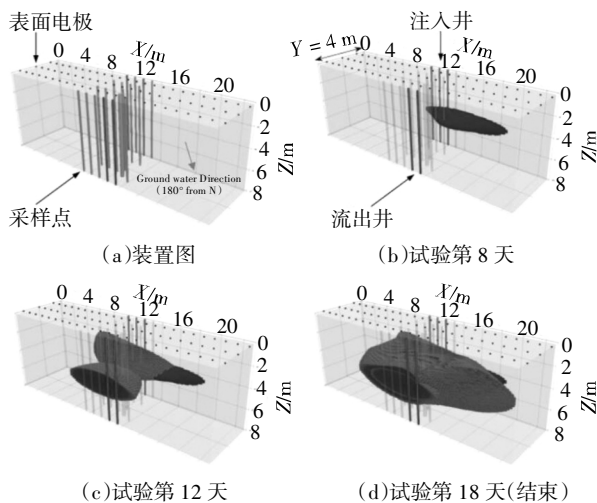
3.2 地基改良

MICP 可用于改良地基,由于可生成具有胶结性的物质,因此 MICP 对不良地基特别是渗透性强大的砂性土层具有明显的改良作用。地基中本身就存在大量的微生物,利用土中的微生物进行反应,对环境几乎没有危害。同时,这项技术对地基土几乎没有扰动,对地基土上层的建筑物没有影响,是一种理想的地基改良手段。

3.2.1 地基加固

Gomez 等^[74]利用 MICP 对某一矿区进行现场固化试验,发现经 MICP 处理过后的场地产生明显的固

化层,表面灌入阻力明显提升,生成的碳酸钙量随着深度的增加而降低. Paassen^[75]利用 MICP 技术进行微生物地基加固,成功地处理了 100 m² 的场地,并在 12 d 内固化了 40 m³ 的砂土. 虽然 2 个试验中地基的平均强度获得了显著提高,但在砂层中观察到了不同的力学性能. 原因可能是受到了流场、细菌分布、试剂供应和结晶过程的影响. Suer 等^[76]则采用 MICP 技术研究了胶结片状岩石和基岩的可行性. 结果表明,生物灌浆工艺比喷射灌浆工艺成本低,且环境影响小. 同时生物灌浆还消耗更少的水,产生更少的垃圾填埋. Saneiyani 等^[77]利用 MICP 过程中电导率与横波波速的变化,通过地球物理成像技术得到固化区域的发展过程,如图 6 所示.

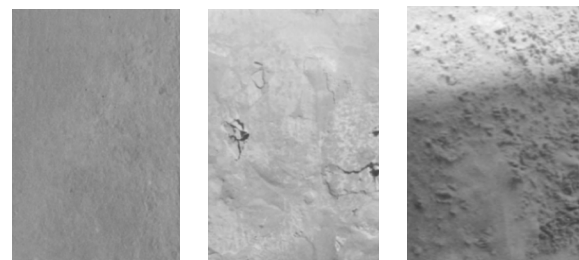
图6 电导率变化^[77]Fig.6 Changes in conductivity^[77]

3.2.2 防尘固沙

利用 MICP 加固技术,还能对荒漠地区或城市施工工地等细颗粒进行表层固化,起到防尘固沙的作用,可以从源头上解决沙尘污染问题,净化空气.

Zhan 等^[78]利用 MICP 技术将粉尘胶结起来,通过 X 射线衍射(XRD)、扫描电子显微镜(SEM)、傅里叶变换红外光谱(FTIR)和差示扫描量热-热重分析(DSC-TG)方法分析了样品的特定组成、形态和热分解特性. 试验结果表明,利用微生物矿化产生的方解石可令疏松的断尘颗粒结合并形成固结层,具有良好的抗风蚀作用. 蒋耀东^[79]利用 MICP 技术研究出脲酶、微生物新型抑尘剂,并以江苏省南京、苏州、南通等城市街道扬尘作为对象开展试验,结果表明脲酶、微生物抑尘剂的抑尘效果非常明显,抑尘效率可达到 79%,且新型的生物抑制剂对 PM_{1.0}、PM_{2.5}、PM₁₀ 具有较好的控制效果. 李驰等^[80]利用 MICP 技术对内蒙

古乌兰布和沙漠地区进行了表层覆膜固化试验,通过对表层覆膜的贯入试验以及长期的现场观测,发现利用 MICP 技术可在沙漠表面形成一层稳定强度和厚度的保护膜,这层保护膜随着时间推移会有一定的剥落,但相较于未覆膜,其防风固沙效果还是非常明显的,如图 7 所示.

图7 现场试验区域观测结果对照^[80]Fig.7 Visual observation on test plots^[80]

3.2.3 抗液化

松散的饱和砂土在遭受地震波或振动时,会使内部的孔隙水压力上升、有效应力减小,使地基发生破坏,对上覆结构和人员造成损伤. MICP 技术可以改变可液化砂土的内部形式,提高颗粒间的胶结性,降低内部孔隙水压力,起到抗液化的效果.

Burbank 等^[81]在潜在可液化的饱和土中,对当地土壤中的尿素分解类微生物进行了富集,再添加工尿素和 CaCl₂ 在原位生成 CaCO₃ 沉淀对场地进行加固,现场土体较加固前的抗液化性提高. Xiao 等^[82]研究了 MICP 对钙质砂的抗液化性能,通过循环三轴试验发现, MICP 处理过的钙质砂与清洁的钙质砂相比,内部孔隙水压力更加稳定,并且压缩变形显著降低,可明显改善钙质砂的液化潜力. Xiao 等^[83]对经 MICP 处理的砂样和未经处理的砂样进行了不排水三轴剪切试验(CTS),对超静孔隙压力产生、轴向应变的演变以及液化的循环次数进行了比较,定量分析了循环响应的改善,结果表明, MICP 处理可将液化破坏机理从流动破坏变为周期性流动,并可显著改变超静孔隙压力生成. SEM 图像表明, CaCO₃ 晶体的生成改变了砂粒的特性,从而影响了砂土的动力学行为和抗液化性. 同时将 MICP 处理的试件与只进行机械压密的试件进行了对比,显示 MICP 处理后比机械压密的砂土具有更高的改善循环阻力的效率,如图 8 所示.

一些研究表明^[84],在饱和砂土中适当掺入一些气体,使其略微不饱和,可大大降低饱和砂土的液化能力. He 等^[85]利用反硝化细菌对饱和砂土进行抗液化

处理,发现处理过后的砂土内部孔隙水压力较之前下降非常明显,这是由于反硝化细菌通过新陈代谢可以产生氮气(N_2),且氮气相对稳定、不易溶于水,因此可改变砂土内部的饱和度,从而降低砂土的潜在液化能力。

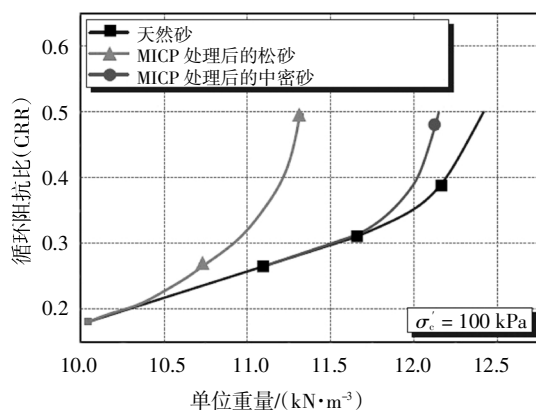


图8 不同方法处理的砂土单位重量和循环阻抗比的影响比较^[83]

Fig.8 Comparison of the effect of unit weight and cyclic resistance ratio for calcareous sand under different magnitudes of biocementation^[83]

3.3 抗渗、封堵

MICP 技术生成的碳酸钙能够将固化试样的孔隙进行填充,从而减小渗透性,达到了封堵的目的。此外,固化过程中微生物会不断地产生胞外聚合物,也会对渗透性有所影响^[86]。在工程中,提高土石坝的抗渗能力,对污染区域的土体进行有效的封堵和隔离,提高石油的采收率等等,都可利用 MICP 的封堵性能而得以实现。

Stocks-Fischer 等^[5]研究发现在低速情况下灌注菌液和胶凝液会造成灌注点的完全封堵。Achal 等^[87]采用巴氏芽孢杆菌进行砂土固化试验,研究发现 40% 的方解石沉积在砂土中,导致了砂柱的孔隙率和渗透性的降低。Gao 等^[88]基于 MICP 技术对砂质土进行改良,以控制在砂质土壤基础上灌溉渠道和水库的渗水问题,结果表明砂土经过生物处理后,表面形成 10~20 mm 的硬壳,利用渗透仪进行渗透测试发现其渗透性远远高于未经处理的土壤。Stabnikov 等^[89]使用耐盐、耐碱性芽孢杆菌来密封砂衬砌的模型池,利用 MICP 技术通过对模型池表面砂进行连续渗滤处理,在砂衬表面形成了一层致密的钙化层,从而显著降低了渗透率。Cuthbert 等^[90]利用 MICP 技术,采用灌注法对地下深 25 m、面积为 4 m² 的裂隙进行了封堵,并提出一种新型的数值模型,将细菌和溶质的

反应传输特性与流体耦合。结果表明, MICP 现场灌注试验能有效地降低裂缝的渗透性,如图 9 所示,且数值模型也很好模拟了现场数据。Phillips 等^[91]自制了一种中尺度高压容器,用于模拟高温、高压环境,并利用该容器探究了在相关压力下, MICP 技术降低压裂岩心渗透性的问题,试验结果表明, MICP 处理过后的岩心试样渗透性降低了两个数量级以上,这表明在高压条件下, MICP 可用于降低裂缝渗透性。同时 Phillips 等^[92]还对油田地区地下 340.8 m 的砂层岩裂隙进行了封堵,结果表明经过灌注处理后,裂缝较处理前能承受的压力更大,且裂缝再次压裂需要的压力更大。多氯联苯(PCB)是威胁环境和人类健康的其他顽固污染物,当设备中含有多氯联苯的机油泄漏时,多氯联苯会污染混凝土表面。Okwaha 等^[93]利用 MICP 技术来密封受 PCB 污染的混凝土,将表面含有油的 PCB 封闭起来,试验结果表明封层渗透率降低了 1~5 个数量级,且没有观察到通过 MICP 涂层的浸出。

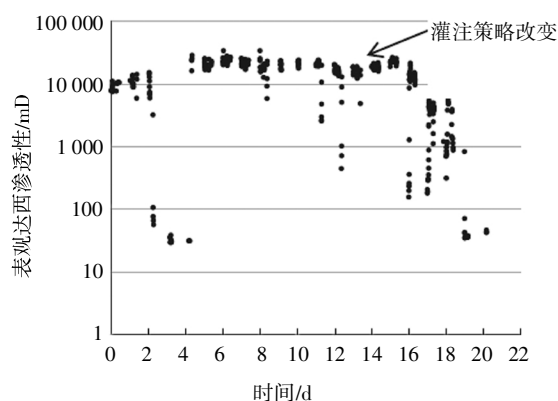


图9 高压环境下岩心 MICP 处理过后渗透性的变化^[90]

Fig.9 Permeability of cores after MICP treatment under high pressure^[90]

3.4 混凝土修复

传统的混凝土裂缝修复方法包括灌注环氧树脂或水泥浆,但是这类方法会导致热膨胀、环境和健康危害^[94-95]。利用 MICP 方法进行裂缝修复时可有效避免上述问题,可采用细菌作为混凝土自愈剂,特别是使用耐碱性细菌(嗜碱芽孢杆菌和科氏芽孢杆菌^[96])。

Jonkers 等^[97-98]还通过研究得到采用好氧细菌进行 MICP 裂缝修复,主要是好氧细菌能通过自身的呼吸作用诱导碳酸钙方解石的形成。潘庆峰^[99]同样采用从土壤中提取得到的兼性好氧细菌进行裂缝修复研究,选用的细菌具有较强的耐碱能力。研究结果表明,一开始培养液中的 pH 值不断增大,之后当加入

一定浓度的底物后, 培养液的 pH 值反而急剧降低, 最终溶液呈酸性. Ramakrishnan 等^[100]研究添加磷酸钠缓冲液和生理盐水对力学性能的影响, 结果发现添加磷酸钠缓冲液对混凝土强度的影响与菌液浓度密切相关, 而添加生理盐水会显著降低混凝土强度.

由于裂缝的高碱性环境, 细菌数量随着养护时间的增加逐渐减少. 因此需要选择一种合适的载体, 保护微生物免受裂缝高碱性的侵害, 并为微生物提供足够的生存空间. Jonkers^[101]采用陶粒来固载细菌, 最终该方法极大地延长了细菌的存活时间, 可将其存活期延长至 6 个月以上. Wang 等^[102]采用硅藻土作为细菌载体对水泥浆中细菌脲酶活性和裂缝自修复效果进行了观测, 结果显示当硅藻土用量与细菌用量比为 3:5 时, 细菌具有最高的脲酶活性, 此时能完全修复宽度为 0.15~0.17 mm 的裂缝. Wang 等^[103]还采用聚氨酯和硅凝胶作为微生物载体进行裂缝自修复试验. 结果表明, 采用固载方式修复的混凝土裂缝渗透性降低了约 3 个数量级. 此外, Yang 等^[104]研究发现, 混凝土中加入微生物胶囊, 能提高混凝土的抗裂性能以及疲劳荷载下的韧性. Wiktor 等^[105]选用多孔轻质骨料固载细菌修复宽度为 50 μm ~1 mm 的裂缝, 结果表明采用固载修复使得 MICP 修复的效率提高, 浸没在水中 100 d 后, 最大修复宽度可达 470 μm , 如图 10 所示, 证明 MICP 在潮湿环境中具有提高混凝土结构耐久性的潜力.

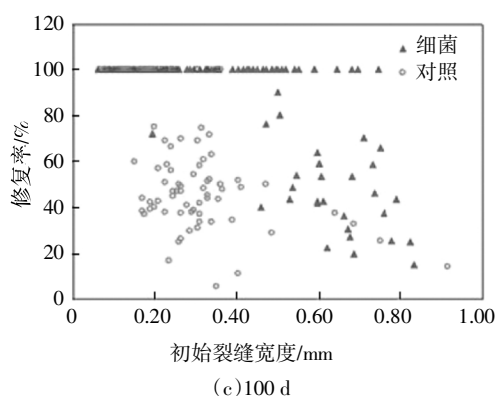
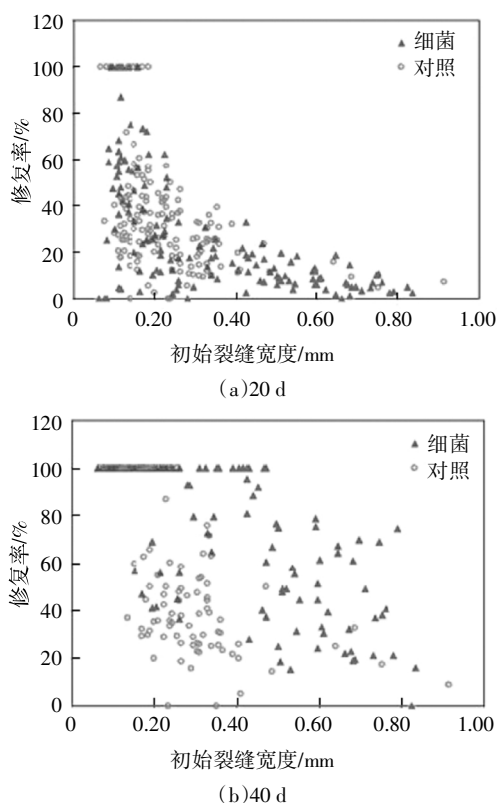


图 10 裂纹愈合率随裂缝宽度的变化
(生物砂浆和普通砂浆对比)^[105]

Fig.10 Crack healing rate as a function of the initial crack width
(bio-chemical agent-based and control mortar specimens)^[105]

钱春香等^[106]考虑到混凝土裂缝中高碱性环境对 MICP 技术的不利影响, 使用嗜碱芽孢杆菌, 对不同修复龄期下, 自修复混凝土裂缝的自修复效果进行了研究. Van Tittelboom 等^[107]以渗透系数、超声波无损检测以及肉眼观察裂缝填充情况等手段, 对比分析了传统混凝土裂缝修复技术与 MICP 技术的修复效果. 陈怀成等^[108]为了提高水泥基材料早期裂缝的自修复效果, 采用了一种具有矿化作用的碳酸酐酶微生物. 利用渗水法和图像处理技术研究了该微生物修复剂对不同裂缝宽度、不同开裂龄期下水泥净浆裂缝的修复情况. Zhang 等^[109]采用膨胀珍珠岩作为细菌载体并将珍珠岩填充入裂缝并量化研究裂缝.

3.5 其他应用

除上述领域, 利用 MICP 技术还可对文物古迹进行修复^[110], 提高石油和天然气采收率、增加产能^[45], 对 CO₂ 进行地质封存缓解温室效应, 设置地下隔栅防止盐水侵入, 固化受污染淤泥土便于挖掘, 对一些可回收固体废弃物进行固化用作建筑材料等^[111].

4 总结与展望

MICP 作为近年来新兴的技术, 由于可快速生成具有胶结性的物质从而改良土体内部孔隙和力学性质, 并且对原位环境的影响较小, 在现代岩土工程领域具有很大的应用潜力及很高的研究价值. 本文对 MICP 技术的反应原理进行了总结和介绍, 并且对 MICP 的理论研究进行了归纳和总结, 可为后续研究工作提供一定的理论支持. 对 MICP 在工程上的一些潜在应用进行了一定的归纳和总结, 可为后续从事

MICP 研究及应用提供借鉴。

虽然当下国内外学者对 MICP 技术的研究已取得了许多可喜的成果,但还存在一些不足,从而制约了 MICP 技术的进一步研究和工程应用。通过分析之前国内外的研究资料,建议在今后的研究工作中多注意以下问题:

1)深化理论计算. MICP 过程是一个极为复杂的生物化学反应过程,但计算时为了简化模型,采用了大量的假设和经验公式,无法准确描述固化后砂土孔隙率与强度等变化规律。此外,菌液灌注过程中,现有的研究没有准确描述颗粒形态对菌液灌注的影响,同时没有考虑孔隙、孔喉尺寸对细菌的过滤、阻挡作用,最终无法准确描述细菌分布的不均匀性。关于最终固化试验的强度研究,现有的研究只是能通过经验公式来描述碳酸钙生成量与砂土固化强度的关系,研究没有考虑碳酸钙胶结颗粒机理、碳酸钙的位置和孔隙结构的颗粒粒径与分布的关系。

2)耐久性. 大多数研究学者都只考虑了固化后的砂柱或土体的强度、刚度和渗透性等力学性能,关于固化砂体的耐久性(抗渗性、抗冻性等)研究还明显不足,尤其是缺乏长期耐久性的研究。MICP 多生成 CaCO_3 , 会受到酸雨的侵蚀,不利于固化的长期耐久性。

3)MICP 的副产物处理. 在进行 MICP 的研究中,生成碳酸钙的同时还会产生高浓度的 NH_4Cl ,会产生 NH_3 , NH_4Cl 会导致地下水污染,而 NH_3 的产生会影响到大气环境,如何限制 NH_3 的外溢,也是后期值得研究的方向。

4)采用 MICP 技术修复混凝土时,其内部的高碱环境和有限空间不利于细菌的生长繁殖并抑制其脲酶活性,甚至导致细菌死亡。虽然大量国内外研究学者提出采用多孔载体进行细菌固载,防止细菌与恶劣环境直接接触,但这些技术操作复杂,且成本较高。

5)经济性. MICP 技术应用与现场使用还存在一个问题是大规模的细菌培养,细菌培养的经济成本和时间成本占据总成本的大部分,因此对当地微生物进行原位激活,比添加外源细菌更加便宜,且有利于当地环境的保护。

6)由于 MICP 技术主要利用产脲酶细菌分解尿素进行固化,因此直接采用催化酶作为微生物的替代物也是一种简单、快捷的方式。

7)MICP 技术还需要更多的现场试验来验证其可靠性,为后期的工程推广提供支持。

参考文献

- [1] SUN X H, MIAO L C, TONG T Z, *et al.* Improvement of microbial-induced calcium carbonate precipitation technology for sand solidification[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2018, 30(11): 04018301.
- [2] 孙潇昊, 缪林昌, 童天志, 等. 微生物诱导碳酸镁沉淀试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2018, 40(7): 1309—1315.
SUN X H, MIAO L C, TONG T Z, *et al.* Comparison between micro-biologically induced calcium carbonate precipitation and magnesium carbonate precipitation [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 40(7): 1309—1315. (In Chinese)
- [3] DEJONG J T, FRITZGES M B, NÜSLEIN K. Microbially induced cementation to control sand response to undrained shear[J]. *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, 2006, 132(11): 1381—1392.
- [4] 孙潇昊, 缪林昌, 童天志, 等. 砂土微生物固化过程中尿素的影响研究[J]. *岩土工程学报*, 2018, 40(5): 939—944.
SUN X H, MIAO L C, TONG T Z, *et al.* Effect of methods of adding urea in culture media on sand solidification tests [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 40(5): 939—944. (In Chinese)
- [5] STOCKS-FISCHER S, GALINAT J K, BANG S S. Microbiological precipitation of CaCO_3 [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, 31(11): 1563—1571.
- [6] 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.
- [7] CASTANIER S, LE MÉTAYER-LEVREL G, PERTHUISOT J P. Ca-carbonates precipitation and limestone genesis - the microbiogeologist point of view [J]. *Sedimentary Geology*, 1999, 126(1/2/3/4): 9—23.
- [8] EHRLICH H L. Geomicrobiology: its significance for geology [J]. *Earth-Science Reviews*, 1998, 45(1/2): 45—60.
- [9] DEJONG J T, MORTENSEN M B, MARINEZ B C, *et al.* Bio-mediated soil improvement [J]. *Ecological Engineering*, 2010, 36(2): 197—210.
- [10] DE MUYNCK W, DEBROUWER D, DE BELIE N, *et al.* Bacterial carbonate precipitation improves the durability of cementitious materials [J]. *Cement and Concrete Research*, 2008, 38(7): 1005—1014.
- [11] ERCOLE C, CACCHIO P, CAPPUCIO G. Deposition of calcium carbonate in karst caves: role of bacteria in Stiffe's Cave [J]. *International Journal of Speleology*, 2011, 30A(1/4): 69—79.
- [12] BELIE N D, VERSTRAETE W, MUYNCK W D. A synergistic approach to microbial presence on concrete: cleaning and consolidating effects [J]. *Structural Concrete*, 2006, 7(3): 105—109.
- [13] LEE Y S, KIM H J, PARK W. Non-ureolytic calcium carbonate precipitation by *Lysinibacillus* sp. YS11 isolated from the rhizosphere of *Miscanthus sacchariflorus* [J]. *Microbial Ecology and Environmental Microbiology*, 2017, 55: 440—447.
- [14] 王瑞兴, 钱春香, 王剑云. 水泥石表面微生物沉积碳酸钙覆膜的不同工艺[J]. *硅酸盐学报*, 2008, 36(10): 1378—1384.
WANG R X, QIAN C X, WANG J Y. Different treated methods of microbially deposited CaCO_3 layer on hardened cement paste surface[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2008, 36(10): 1378—1384. (In Chinese)
- [15] HOLM L, SANDER C. An evolutionary treasure: unification of a broad set of amidohydrolases related to urease [J]. *Proteins: Struc-*

- ture, Function, and Bioinformatics, 1997, 28 (1): 72—82.
- [16] KRAJEWSKA B, VAN ELDIK R, BRINDELL M. Temperature- and pressure-dependent stopped-flow kinetic studies of jack bean urease. Implications for the catalytic mechanism [J]. *JBIC Journal of Biological Inorganic Chemistry*, 2012, 17(7): 1123—1134.
- [17] KAROL R H. Chemical grouting and soil stabilization, revised and expanded [M]. New York: CRC Press, 2003: 245—257.
- [18] SUN X H, MIAO L C, WU L Y, *et al.* Improvement of bio-cementation at low temperature based on *Bacillus megaterium* [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2019, 103(17): 7191—7202.
- [19] GARCÍA G M, MÁRQUEZ G M A, MORENO H C X. Characterization of bacterial diversity associated with calcareous deposits and drip-waters, and isolation of calcifying bacteria from two Colombian mines [J]. *Microbiological Research*, 2016, 182: 21—30.
- [20] FERRIS F G, STEHMEIER L G, KANTZAS A, *et al.* Bacteriogenic mineral plugging [J]. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 1997, 36: 56—61.
- [21] KIM G, YOUNG H. Microbially induced calcite precipitation employing environmental isolates [J]. *Materials (Basel, Switzerland)*, 2016, 9(6): 468—479.
- [22] HAMMES F, VERSTRAETE W. Key roles of pH and calcium metabolism in microbial carbonate precipitation [J]. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 2002, 1(1): 3—7.
- [23] MORTENSEN B M, HABER M J, DEJONG J T, *et al.* Effects of environmental factors on microbial induced calcium carbonate precipitation [J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2011, 111 (2): 338—349.
- [24] SIMKISS K. Variations in the crystalline form of calcium carbonate precipitated from artificial sea water [J]. *Nature*, 1964, 201 (4918): 492—493.
- [25] EHRlich H L. How microbes influence mineral growth and dissolution [J]. *Chemical Geology*, 1996, 132 (1/2/3/4): 5—9.
- [26] RIVADENEYRA M A, PÁRRAGA J, DELGADO R. Biomineralization of carbonates by *Halobacillus trueperi* in solid and liquid media with different salinities [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2004, 48 (1): 39—46.
- [27] ARIYANTI D, HANDAYANI N A, HADIYANTO. An overview of biocement production from microalgae [J]. *International Journal of Science and Engineering*, 2011, 2 (2): 30—33.
- [28] 钱春香, 罗勉, 潘庆峰, 等. 自修复混凝土中微生物矿化方解石的形成机理 [J]. *硅酸盐学报*, 2013, 41 (5): 620—626.
- QIAN C X, LUO M, PAN Q F, *et al.* Mechanism of microbially induced calcite precipitation in self-healing concrete [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2013, 41 (5): 620—626. (In Chinese)
- [29] BENINIS, RYPNIEWSKI W R, WILSON K S, *et al.* A new proposal for urease mechanism based on the crystal structures of the native and inhibited enzyme from *Bacillus pasteurii*: why urea hydrolysis costs two nickels [J]. *Structure*, 1999, 7 (2): 205—216.
- [30] LI M, LI L, OGBONNAYA U. Influence of fiber addition on mechanical properties of MICP-treated sand [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2016, 28 (4): 04015166.
- [31] 麻强. 微生物注浆加固砂土地基的抗液化能力研究 [D]. 北京: 清华大学, 2013: 56—63.
- MA Q. Anti-liquefaction performance study of sand foundation improved by bio-grouting [D]. Beijing: Tsinghua University, 2013: 56—63. (In Chinese)
- [32] RIVADENEYRA M A, DELGADO G, RAMOS-CORMENZANA A, *et al.* Biomineralization of carbonates by *Halomonas eurihalina* in solid and liquid media with different salinities: crystal formation sequence [J]. *Research in Microbiology*, 1998, 149 (4): 277—287.
- [33] KAWAGUCHI T, DECHO A W. A laboratory investigation of cyanobacterial extracellular polymeric secretions (EPS) in influencing CaCO_3 polymorphism [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2002, 240 (1/2): 230—235.
- [34] RIVADENEYRA M A, DELGADO G, SORIANO M, *et al.* Precipitation of carbonates by *Nesterenkonia halobia* in liquid media [J]. *Chemosphere*, 2000, 41 (4): 617—624.
- [35] V KNORRE H, KRUMBEIN W E. Bacterial calcification [M]// *Microbial Sediments*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2000: 25—31.
- [36] PARK S J, PARK Y M, CHUN W Y, *et al.* Calcite-forming bacteria for compressive strength improvement in mortar [J]. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2010, 20 (4): 782—788.
- [37] 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 H, QIAN C X, LI L Z. Cementation mechanism of microbe cement [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2013, 41 (3): 314—319. (In Chinese)
- [38] DHAMI N K, REDDY M S, MUKHERJEE A. Biomineralization of frontier carbonates and their engineered applications: a review [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2013, 4: 314.
- [39] BANG S S, RAMAKRISHNAN V. Microbiologically enhanced crack remediation (MECR) [C]// *Proceedings of the International Symposium on Industrial Application of Microbial Genomes*. 2001: 3—13.
- [40] DICK J, WINDT W, GRAEF B, *et al.* Bio-deposition of a calcium carbonate layer on degraded limestone by *Bacillus* species [J]. *Biodegradation*, 2006, 17 (4): 357—367.
- [41] PESZYNSKA M, TRYKOZKO A, ILTIS G, *et al.* Biofilm growth in porous media: experiments, computational modeling at the porescale, and upscaling [J]. *Advances in Water Resources*, 2016, 95: 288—301.
- [42] 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.
- [43] 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.
- [44] BOUWER H. Artificial recharge of groundwater: hydrogeology and engineering [J]. *Journal of Hydrology*, 2002, 10 (1): 121—142.
- [45] DEJONG J T, SOGA K, KAVAZANJIAN E. Biogeochemical processes and geotechnical applications: progress, opportunities and challenges [J]. *Géotechnique*, 2013, 63 (4): 287—301.
- [46] 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.
- [47] 王瑞兴. 碳酸盐矿化菌研究 [D]. 南京: 东南大学, 2005: 27—36.
- WANG R X. Study on carbonate-mineralization microbe [D]. Nanjing: Southeast University, 2005: 27—36. (In Chinese)
- [48] WIJNGAARDEN W K, VERMOLEN F J, MEURS G A M, *et al.* A mathematical model and analytical solution for the fixation of bacteria in biogROUT [J]. *Transport in Porous Media*, 2012, 92 (3): 847—866.
- [49] HOMMEL J, LAUCHNOR E, PHILLIPS A J, *et al.* A revised model for microbially induced calcite precipitation: improvements and new insights based on recent experiments [J]. *Water Resources Research*, 2015, 51 (5): 3695—3715.
- [50] 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.

- [51] 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 Carbonate Precipitation (MICP) [J]. *Géotechnique*, 2019, 69(12): 1086—1094.
- [52] WANG Y, SOGA K, DEJONG J T. Micro-scale experimental study of Microbial-Induced Carbonate Precipitation (MICP) by using microfluidic devices [J]. *AGUFM*, 2017, 2017: H111—08.
- [53] WIJNGAARDEN W K, VERMOLEN F J, MEURS G A M, *et al.* Modelling biogROUT: a new ground improvement method based on microbial-induced carbonate precipitation [J]. *Transport in Porous Media*, 2011, 87(2): 397—420.
- [54] 荣辉. 微生物水泥的研制及其胶结机制 [D]. 南京: 东南大学, 2014: 41—49.
- RONG H. Development of microbial cement and its cementing mechanism [D]. Nanjing: Southeast University, 2014: 41—49. (In Chinese)
- [55] 陈婷婷, 程晓辉. 微生物改性砂柱水力渗透性质的有限元模拟 [J]. *工业建筑*, 2015, 45(7): 31—35.
- CHEN T T, CHEGN X H. Finite-element simulation of the hydraulic permeability properties of the microbial modified sand column [J]. *Industrial Construction*, 2015, 45(7): 31—35. (In Chinese)
- [56] FAURIEL S, LALLOU L. A bio-chemo-hydro-mechanical model for microbially induced calcite precipitation in soils [J]. *Computers and Geotechnics*, 2012, 46: 104—120.
- [57] YOON H, VALOCCHI A J, WERTH C J, *et al.* Pore-scale simulation of mixing-induced calcium carbonate precipitation and dissolution in a microfluidic pore network [J]. *Water Resources Research*, 2012, 48(2): W02524.
- [58] QIN C Z, HASSANIZADEH S M. Solute mass exchange between water phase and biofilm for a single pore [J]. *Transport in Porous Media*, 2015, 109(2): 255—278.
- [59] QIN C Z, HASSANIZADEH S M, EBIGBO A. Pore-scale network modeling of microbially induced calcium carbonate precipitation: insight into scale dependence of biogeochemical reaction rates [J]. *Water Resources Research*, 2016, 52(11): 8794—8810.
- [60] 孙满昊, 缪林昌, 童天志, 等. 微生物沉积碳酸钙固化砂土试验研究 [J]. *岩土力学*, 2017, 38(11): 3225—3230.
- SUN X H, MIAO L C, TONG T Z, *et al.* Experimental study of solidifying sand using microbial-induced calcium carbonate precipitation [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(11): 3225—3230. (In Chinese)
- [61] SUN X H, MIAO L C, WANG C C. Experimental study on calcium carbonate precipitates induced by *Bacillus megaterium* [M]// *Springer Series in Geomechanics and Geoengineering*. Cham: Springer International Publishing, 2018: 834—837.
- [62] 孙满昊, 缪林昌, 吴林玉, 等. 低温条件微生物 MICP 沉淀产率试验研究 [J]. *岩土工程学报*, 2019, 41(6): 1133—1138.
- SUN X H, MIAO L C, WU L Y, *et al.* Experimental study on precipitation rate of MICP under low temperature [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, 41(6): 1133—1138. (In Chinese)
- [63] REDDY M S, ACHAL V, MUKHERJEE A. Microbial concrete, a wonder metabolic product that remediates the defects in building structures [M]// *Microorganisms in Environmental Management*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2012: 547—568.
- [64] CHENG L, SHAHIN M A. Urease active bioslurry: a novel soil improvement approach based on microbially induced carbonate precipitation [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2016, 53(9): 1376—1385.
- [65] CHENG L, SHAHIN M A, CHU J. Soil bio-cementation using a new one-phase low-pH injection method [J]. *Acta Geotechnica*, 2018, 14(3): 615—626.
- [66] OMOREGIE A, SIAH J, PEI B C S. Integrating biotechnology into geotechnical engineering: a laboratory exercise [J]. *Transaction on Science and Technology*, 2018, 5(2): 76—87.
- [67] AL QABANY A, SOGA K, SANTAMARINA C. Factors affecting efficiency of microbially induced calcite precipitation [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2012, 138(8): 992—1001.
- [68] ANDRES Q, 张帅, 程晓辉. 微生物入渗注浆法加固非饱和砂土的研究 [J]. *工业建筑*, 2015, 45(7): 28—30.
- ANDRES Q, ZHANG S, CHENG X H. Study of the MICP injection in unsaturated sandy soils [J]. *Industrial Construction*, 2015, 45(7): 28—30. (In Chinese)
- [69] ROWSHANBAKHT K, KHAMEHCHIYAN M, SAJEDI R H, *et al.* Effect of injected bacterial suspension volume and relative density on carbonate precipitation resulting from microbial treatment [J]. *Ecological Engineering*, 2016, 89: 49—55.
- [70] ZAMANI A, MONTOYA B M. Undrained monotonic shear response of MICP-treated silty sands [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2018, 144(6): 04018029.
- [71] 景天宇, 姜晗琳, 李振山. 微生物诱导碳酸钙沉淀固结黄河泥沙试验研究 [J]. *人民黄河*, 2019, 41(11): 11—16.
- JING T Y, JIANG H L, LI Z S. Experimental study on solidification of Yellow River sediment through microbial induced carbonate precipitation [J]. *Yellow River*, 2019, 41(11): 11—16. (In Chinese)
- [72] 谢约翰, 唐朝生, 刘博, 等. 基于微生物诱导碳酸钙沉积技术的黏性土水稳性改良 [J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2019, 53(8): 1438—1447.
- XIE Y H, TANG C S, LIU B, *et al.* Water stability improvement of clayey soil based on microbial induced calcite precipitation [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2019, 53(8): 1438—1447. (In Chinese)
- [73] RIZVI Z H, NIKOLIĆ M, WUTTKE F. Lattice element method for simulations of failure in bio-cemented sands [J]. *Granular Matter*, 2019, 21(2): 1—14.
- [74] 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.
- [75] PAASSEN L A V. BiogROUT ground improvement by microbially induced carbonate precipitation [D]. Delft, Netherlands: Delft University of Technology, 2009: 71—76.
- [76] SUER P, HALLBERG N, CARLSSON C. BiogROUTING compared to jet grouting: environmental (LCA) and economical assessment [J]. *Journal of Environmental Science and Health*, 2009, 44(4): 346—353.
- [77] SANEIYAN S, NTARLAGIANNIS D, OHAN J, *et al.* Induced polarization as a monitoring tool for in-situ microbial induced carbonate precipitation (MICP) processes [J]. *Ecological Engineering*, 2019, 127: 36—47.
- [78] ZHAN Q W, QIAN C X. Mineralization and cementation of fugitive dust based on the utilization of carbon dioxide and its characterization [J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Materials Science)*, 2018, 33(2): 263—267.
- [79] 蒋耀东. 微生物及活性酶诱导碳酸钙沉淀新型抑尘剂试验研究 [D]. 南京: 东南大学, 2018: 57—64.
- JIANG Y D. Research on new dust-depressor of calcite precipitation induced by microbe and enzyme [D]. Nanjing: Southeast University, 2018: 57—64. (In Chinese)
- [80] 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): 1291—1298.

- LI C, WANG S, WANG Y X, *et al.* Field experimental study on stability of bio-mineralization crust in the desert [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(4): 1291—1298. (In Chinese)
- [81] 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.
- [82] 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.
- [83] 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, 56(12): 1849—1862.
- [84] PIETRUSZCZAK S, PANDE G N, OULAPOUR M. A hypothesis for mitigation of risk of liquefaction [J]. *Géotechnique*, 2003, 53(9): 833—838.
- [85] HE J, CHU J, IVANOV V. Mitigation of liquefaction of saturated sand using biogas [J]. *Géotechnique*, 2013, 63(4): 267—275.
- [86] 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.
- [87] ACHAL V, MUKHERJEE A, BASU P C. Strain improvement of *Sporosarcina pasteurii* for enhanced urease and calcite production [J]. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*, 2009, 36(7): 981—988.
- [88] GAO Y, TANG X, CHU J, *et al.* Microbially induced calcite precipitation for seepage control in sandy soil [J]. *Geomicrobiology Journal*, 2019, 36(4): 366—375.
- [89] STABNIKOV V, NAEIMI M, IVANOV V, *et al.* Formation of water-impermeable crust on sand surface using biocement [J]. *Cement and Concrete Research*, 2011, 41(11): 1143—1149.
- [90] 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.
- [91] PHILLIPS A J, ELDRING J, HIEBERT R, *et al.* Design of a meso-scale high pressure vessel for the laboratory examination of biogeochemical subsurface processes [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2015, 126: 55—62.
- [92] 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.
- [93] OKWADHA D O, LI J. Biocontainment of polychlorinated biphenyls (PCBs) on flat concrete surfaces by microbial carbonate precipitation [J]. *Journal of Environmental Management*, 2011, 92(10): 2860—2864.
- [94] GAVIMATH C C, MALI B M, HOOLI V R, *et al.* Potential application of bacteria to improve the strength of cement concrete [J]. *International Journal of Advanced Biotechnology and Research*, 2012, 3(1): 541—544.
- [95] WONG L S. Microbial cementation of ureolytic bacteria from the genus *Bacillus*: a review of the bacterial application on cement-based materials for cleaner production [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 93: 5—17.
- [96] JONKERS H M, THIJSEN A, MUYZER G, *et al.* Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete [J]. *Ecological Engineering*, 2010, 36(2): 230—235.
- [97] JONKERS H M, SCHLANGEN E. Development of a bacteria-based self healing concrete [C]// *Proceedings of the international FIB symposium*. Amsterdam, Netherlands: CRC Press, 2008: 425—430.
- [98] JONKERS H M, THIJSEN A. Bacteria mediated remediation of concrete structures [C]// *Proceedings of the Second International Symposium on Service Life Design for Infrastructures*. Delft, The Netherlands: RILEM Publications, 2010: 833—840.
- [99] 潘庆峰. 混凝土裂缝的微生物自修复机理及自修复剂研究 [D]. 南京: 东南大学, 2012: 47—51.
- PAN Q F. Study on microorganism self-repairing mechanism and self-repairing agent of concrete crack [D]. Nanjing: Southeast University, 2012: 47—51. (In Chinese)
- [100] RAMAKRISHNAN V, BANG S S, DEO K S. A novel technique for repairing cracks in high performance concrete using bacteria [C]// *Proceedings of the International Conference on HPHSC*. Perth, Australia: Elsevier, 1998: 597—618.
- [101] JONKERS H M. Bacteria-based self-healing concrete [J]. *Heron*, 2011, 56(1/2): 195.
- [102] WANG J Y, BELIE N, VERSTRAETE W. Diatomaceous earth as a protective vehicle for bacteria applied for self-healing concrete [J]. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*, 2012, 39(4): 567—577.
- [103] WANG J Y, VAN TITTELBOOM K, DE BELIE N, *et al.* Use of silica gel or polyurethane immobilized bacteria for self-healing concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 26(1): 532—540.
- [104] YANG Z X, HOLLAR J, HE X D, *et al.* A self-healing cementitious composite using oil core/silica gel shell microcapsules [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2011, 33(4): 506—512.
- [105] WIKTOR V, JONKERS H M. Quantification of crack-healing in novel bacteria-based self-healing concrete [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2011, 33(7): 763—770.
- [106] 钱春香, 李瑞阳, 潘庆峰, 等. 混凝土裂缝的微生物自修复效果 [J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2013, 43(2): 360—364.
- QIAN C X, LI R Y, PAN Q F, *et al.* Microbial self-healing effects of concrete cracks [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2013, 43(2): 360—364. (In Chinese)
- [107] VAN TITTELBOOM K, DE BELIE N, DE MUYNCK W, *et al.* Use of bacteria to repair cracks in concrete [J]. *Cement and Concrete Research*, 2010, 40(1): 157—166.
- [108] 陈怀成, 钱春香, 任立夫. 基于微生物矿化技术的水泥基材料早期裂缝自修复 [J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2016, 46(3): 606—611.
- CHEN H C, QIAN C X, REN L F. Self-healing of early age cracks in cement-based materials based on mineralization of microorganism [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2016, 46(3): 606—611. (In Chinese)
- [109] ZHANG J G, LIU Y Z, FENG T, *et al.* Immobilizing bacteria in expanded perlite for the crack self-healing in concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 148: 610—617.
- [110] 刘士雨, 俞缙, 曾伟龙, 等. 微生物诱导碳酸钙沉淀修复三合土裂缝效果研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(1): 191—204.
- LIU S Y, YU J, ZENG W L, *et al.* Repair effect of tabia cracks with microbially induced carbonate precipitation [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(1): 191—204.
- [111] PHILLIPS A J, GERLACH R, LAUCHNOR E, *et al.* Engineered applications of ureolytic biomineralization: a review [J]. *Biofouling*, 2013, 29(6): 715—733.