

微生物灌浆加固土体研究进展

钱春香^{1,2}, 王安辉^{1,2}, 王 欣^{1,2}

(1. 东南大学 材料科学与工程学院 江苏 南京 211189; 2. 东南大学 绿色建材技术研究所, 江苏 南京 211189)

摘 要: 水泥和化学浆材是土体加固中最为常用的胶凝材料, 但由于存在着高能耗、高污染排放和高成本等缺点而限制了它们的应用。微生物灌浆加固技术是最近发展起来的一种新型的土体加固方法, 通过向松散砂土中灌注菌液以及营养盐, 利用微生物矿化作用在砂颗粒间快速析出方解石凝胶, 改善土体的物理力学性质。系统总结了国内外关于微生物灌浆加固土体的室内及现场试验研究, 同时对固化土体的工程特性、原位无损测试方法以及灌浆效果的影响因素等进行了论述。研究表明, 微生物灌浆技术具有施工扰动小、灌浆压力低、环境友好等优势, 并可显著提高土体的强度、刚度及抗液化性能, 在土体加固领域有着非常广阔的应用前景, 但关于微生物固化土体的耐久性以及灌浆的经济性等问题仍需进行深入的探讨与研究。

关 键 词: 土体加固; 微生物诱导方解石沉积(MICP); 生物胶结; 微生物灌浆; 砂土

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2015) 06-1537-12

Advances of soil improvement with bio-grouting

QIAN Chun-xiang^{1,2}, WANG An-hui^{1,2}, WANG Xin^{1,2}

(1. School of Materials Science and Engineering, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 211189, China;

2. Research Institute of Green Construction Materials, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 211189, China)

Abstract: As cementing materials, cement and chemical grouts have often been used for soil improvement. However, high energy consumption, high-pollution discharge and high cost restrict their applications. A new soil improvement method, called bio-grouting reinforcement technology, has recently emerged, which is based on microbial induced calcite precipitation by injecting bacteria solution and nutrient into loose sand for the purpose of binding soil particles together and improving its physico-mechanical properties. Laboratory and field experimental studies of bio-grouting treated soils are systematically summarized. The engineering characteristics of bio-treated soils, non-destructive geophysical process monitoring method, and factors influencing the improvement effect are also discussed. The research results show that the bio-grouting process has many advantages such as small disturbance, low grouting pressure, less environmental harm, and remarkable treatment effect on improving the engineering properties of the soil (e.g. strength, stiffness, liquefaction resistance), which make it a broad engineering application prospect in soil improvement. However, the durability of bio-treated soils and economy of bio-grouting still need discussing and investigating further.

Keywords: soil improvement; microbial induced calcite precipitation(MICP); bio-cementation; bio-grouting; sandy soil

1 引 言

随着人口的急剧增加和城市化进程的加快, 国内外对土木基础设施的需求量空前增长, 尤其在我国, 城市基础设施建设面临着严重的供给不足问题。而在土木工程建设过程中, 不可避免地会遇到一些不能满足工程需求的不良土体, 此时必须对土体进行加固处理。目前, 大部分地基加固方法是利用机械能或人造材料对土体进行物理化学加固, 而在机

械施工及材料生产过程中均需要消耗大量的能源^[1]。其中, 基于水泥、石灰或化学浆材的灌浆技术是一种极为常用的地基加固方法, 它是将浆液灌入土体的孔隙或者与土体强制搅拌混合, 从而达到增强土体强度, 降低其渗透性的目的^[2]。但水泥、石灰等传统的胶凝材料能改变土体的 pH 值, 使土体呈碱性并形成一定范围的侵蚀环境, 对地下水与周围植被均会造成不良的影响^[3]。水泥生产过程中还会排放大量的温室气体, 每生产 1 t 水泥熟料, 因燃煤和石

灰石分解会排放出 1t CO₂, 其存在能耗高、污染环境等缺点, 势必会对生态环境构成威胁, 严重阻碍我国建设资源节约型和环境友好型社会的发展进程。对于化学灌浆材料而言, 除了水玻璃 (Na₂SiO₃) 外, 所有化学浆材 (环氧树脂类、丙烯酸盐类、酚醛树脂类、聚氨酯类等) 都是有毒的^[4]。1974 年日本福冈发生了一起因丙烯酰胺灌浆引起的中毒事故, 开始禁止使用除水玻璃之外的其他所有化学灌浆材料, 而其他国家也纷纷建议减少或者禁止使用人造化学灌浆材料^[4]。因而, 研究节能减排、生态环保、经济高效的新型土体加固方法意义重大。长期以来, 国内外研究者力图通过技术创新寻找到具有能耗小、污染少且性能优良的新型胶凝材料, 并以此开发出一种可持续发展的土体加固新技术。

微生物矿化是自然界中普遍存在的一种现象, 自然界中的某些微生物能够利用自身的新陈代谢活动生成多种矿物结晶。由于碳酸钙是自然界中分布最广的一种碳酸盐, 且性质较为稳定, 具有较强的强度和耐久性, 因而微生物沉积碳酸钙一直是微生物成矿作用研究的热点。微生物科学家利用一些特定的微生物 (如脲酶菌、反硝化细菌), 通过为之提供丰富的 Ca²⁺ 及氮源的营养盐, 快速析出具有优异胶结作用的方解石型碳酸钙结晶, 这一微生物成矿作用常被称为微生物诱导方解石沉积 (microbial induced calcite precipitation, 简称 MICP) 技术^[5]。该技术最早应用于多孔介质材料的堵漏^[6-7], 随后被推广应用到修复石质材料 and 水泥基材料的表面裂缝缺陷中^[8-9], 而关于土体加固的研究起步较晚。

澳大利亚默多克大学的 Whiffin 博士^[10]率先提出采用微生物沉淀碳酸钙技术胶结松散砂颗粒, 以提高砂土的强度和刚度等宏观力学性质。Mitchell 等^[11]明确提出了微生物改性岩土体的广泛应用价值及潜力。与此同时, 美国国家科学研究委员会 (NRC) 将微生物岩土工程技术确立为 21 世纪的一项重要研究课题^[12]。随后在国外掀起了研究 MICP 加固土体的热潮, 并发展了一种新型的原位灌浆技术——MICP 灌浆技术^[13-14], 即通过向原位砂土中灌注菌液以及胶结溶液 (尿素和 CaCl₂ 的混合液), 使微生物诱导形成的碳酸钙沉积在砂土颗粒间, 从而将松散砂颗粒胶结起来, 使砂土地基得到加固。过去十多年, 国内外研究机构对 MICP 灌浆加固松散砂土开展了大量的室内试验研究和尝试性的现场应用研究。现有研究表明, MICP 灌浆技术能有效提高砂土的强度、刚度、抗液化及抗侵蚀性能等, 且微生物灌浆材料为溶液或悬液,

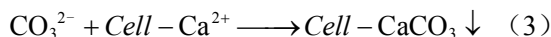
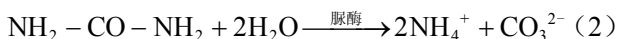
与传统胶凝材料相比, 具有黏性低、流动性好、渗透性强、反应速率和胶结强度可调控、环境污染少等优势, 属于低能耗、低排放材料。

与国外的研究热潮相比, 国内对 MICP 加固土体的研究还相对较少, 目前只有东南大学、清华大学和西南科技大学等几家研究机构对其进行了研究, 这严重制约了微生物灌浆加固技术在国内岩土工程中的发展与应用。本文基于近年来东南大学绿色建材研究所在微生物灌浆加固砂土方面的应用研究, 旨在对国内外 MICP 技术在土体加固领域中的应用及其研究成果进行系统综述, 以便使岩土工程工作者对这一新型土体加固技术有更全面的认识, 从而推动国内微生物灌浆技术的发展。

2 MICP 加固土体技术

MICP 是自然界广泛存在的一种生物诱导矿化作用, 其中碳酸钙的析出主要依赖于微生物新陈代谢活动产生的 CO₂、碱性条件以及环境中存在的 Ca²⁺, 而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便可形成不同的 MICP 方式。目前, 可供选择的 MICP 方式主要有: 尿素水解、反硝化作用、三价铁还原和硫酸盐还原, 但鉴于尿素水解机制简单, 反应过程容易控制, 而且在短时间内能够产生大量的 CO₃²⁻, 因此, 基于尿素水解的 MICP 一直作为主流的碳酸钙生物矿化技术被广泛应用^[15-16]。

尿素水解的 MICP 大都基于一种高产脲酶的巴氏芽孢杆菌, 它是一种土壤中富含的嗜碱性细菌, 具有较强的环境适应性, 能以尿素为能源, 通过自身新陈代谢活动产生大量的高活性脲酶, 将尿素水解生成 NH₄⁺ 和 CO₃²⁻。由于微生物代谢产物胞外聚合物 (EPS) 中含有羟基、胺基、酰胺基、羧酸等负离子基团, 细菌细胞壁的特殊结构使得细菌表面通常带有负电荷, 并不断吸附周围溶液中的 Ca²⁺, 使其聚集在细菌细胞外表面, 同时扩散到细胞内部的尿素分子在细菌产生的脲酶作用下不断分解出 CO₃²⁻, 并运输到细胞表面, 从而以细胞为晶核, 在细菌周围析出碳酸钙结晶。随着碳酸钙晶体数量不断增多, 细胞逐渐被包裹, 使得细菌代谢活动所需的营养物质难以传输利用, 最后导致细菌逐渐死亡。以上反应示意图如图 1 所示^[16], 反应方程式为



在整个生物化学反应过程中, 巴氏芽孢杆菌起

到两个最核心的作用:一是为尿素水解提供脲酶;二是为碳酸钙晶体的形成提供晶核。由于上述过程中脲酶水解尿素产生了 NH_4^+ ,使得环境pH值升高,脲酶表现出对尿素更高的活性和更强的亲和力,这也促进了碳酸钙晶体的形成。而且在整个生物矿化过程中,巴氏芽孢杆菌基本不产生毒性物质或其他副产物,细菌细胞间也不会发生聚集,保证其具有一个较高的细胞比表面积,这些优势都使得巴氏芽孢杆菌具备了实际应用的能力^[5]。

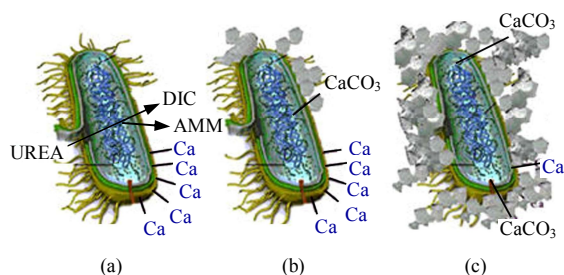


图1 微生物诱导方解石沉积示意图^[16]

Fig.1 Schematics of microbial induced calcite precipitation^[16]

近年来的研究发现,通过利用MICP技术向砂土中灌注菌液以及尿素和 CaCl_2 的营养液,可快速析出方解石凝胶,并将松散砂颗粒胶结成为整体。微生物胶结砂颗粒的过程如图2所示^[17]。首先带有负电荷的微生物吸附在砂颗粒表面,然后以孔隙溶液中的尿素及可溶性钙盐为营养源,通过微生物诱导方解石沉积作用,便会在砂颗粒间形成胶结物质——方解石,方解石凝胶在砂粒间充当桥梁作用,最终将松散砂颗粒胶结成为具有一定力学性能的整体^[18](如图3所示)。

微生物诱导形成的方解石在土颗粒孔隙中可能出现两种极端分布状态^[1](如图4所示):一种是在土颗粒周围形成等厚度的方解石,此时土颗粒之间的胶结作用相对较弱,对土体性质的改善并不明显;另一种仅仅是在土颗粒相互接触的位置形成方解石,这种分布使得方解石全部用于土颗粒间的胶结,对土体工程性质的提高非常有利。然而,DeJong等^[5,12]通过SEM和CT图像揭示了方解石在砂土颗粒中的真实分布是介于以上两种极端分布之间,即主要分布在土颗粒相互接触的附近(如图5所示)。这一方面是由于微生物易于吸附在较小表面处,如颗粒-颗粒相互接触的附近,较高浓度的微生物直接导致较多的方解石沉积在这个区域;另一方面是由于沉积在孔隙溶液和土颗粒表面的方解石会随着溶液流过孔喉而吸附在颗粒相互接触的附

近。砂颗粒中方解石的有效沉积是微生物胶结作用实现的关键,而不同的空间分布状态使得胶结砂体的工程性质表现出较大的差异性。

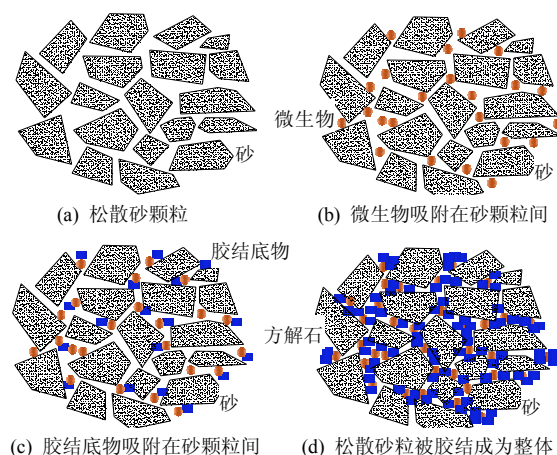


图2 微生物胶结砂颗粒过程示意图^[17]

Fig.2 Schematic process of bio-cementing sand particles^[17]

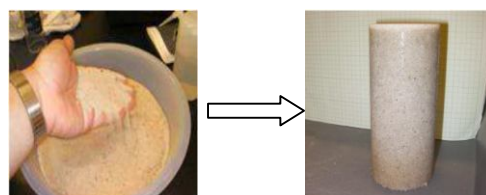


图3 松散砂颗粒胶结为砂柱^[18]

Fig.3 Loose sand particles to sand column by bio-cementation^[18]

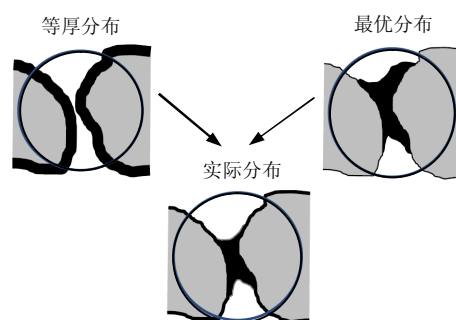


图4 方解石在砂土孔隙中的分布状态示意图^[1]

Fig.4 Illustration of calcite distribution alternatives within pore space^[1]

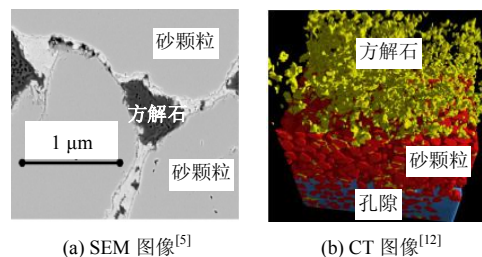


图5 砂颗粒间方解石分布的微观图像^[5,12]

Fig.5 Microscopic images of calcite distribution among sand particles^[5,12]

3 MICP 加固土体的应用现状

Whiffin 将^[10]菌液、尿素溶液和钙盐的预混合液注入充填 50 mL 砂颗粒的注射器内, 松散砂粒逐渐被胶结成为具有一定力学性能的整体, 但砂柱不同位置的强度分布(胶结程度)明显不均。随后 Whiffin 等^[19]研究发现, 将菌液与尿素/钙盐混合后, 其有效灌注距离最多不超过 0.5 m。这是因为微生物细胞表面带负电荷, 静电力作用使得微生物细胞之间相互排斥, 当菌液中混合有 CaCl_2 时, 微生物会吸附一定量的 Ca^{2+} , 从而呈电中性并絮凝成一定尺寸的颗粒(20~120 μm), 这些颗粒在较低的灌浆速度下会滞留在砂粒孔隙中, 最终导致灌注口附近发生堵塞, 影响浆液传输距离。为了提高微生物

在松散砂粒间的传输距离和吸附固定效果, Harkes 等^[13-14]提出了一种分步灌浆方法, 即先向砂土中注入一定量的菌液, 然后低速注入低浓度的 CaCl_2 溶液(固定溶液), 利用 Ca^{2+} 的絮凝作用实现微生物的固定, 最后低速灌注胶结溶液(尿素- CaCl_2), 使得吸附在砂颗粒中的微生物不断矿化生成方解石凝胶。基于 MICP 加固机制以及分步灌浆加固方法, 国外研究机构纷纷利用微生物灌浆技术对不同尺度砂柱及砂土地基进行加固试验研究(如表 1 所示)。在国内, 荣辉^[23]通过多次循环灌注菌液和胶结溶液成功胶结出 0.5 m 的砂柱和尺寸为 0.5 m×0.5 m×0.5 m 的砂基, 其无侧限抗压强度最高分别达到 7.8 MPa 和 3 MPa。

表 1 微生物灌浆加固砂土的室内试验研究(不同尺度)

Table 1 Laboratory test studies of sand soils improvement by bio-grouting method(different scales)

试验类型	试验简述	主要结论	来源
14.4 cm 砂柱	砂样直径为 72 mm, 高为 144 mm; 渥太华砂 $D_{50}=0.12$ mm, $D_r=35\%$; 使用蠕动泵从试样底部依次注入菌液和胶结溶液, 灌注加固 28 h。	原来松散的砂颗粒胶结在一起, 砂柱剪切波速达到 540 m/s, 约为饱和松砂的 2.8 倍, 其不排水剪切强度约提高 4 倍(围压为 100 kPa)。	文献[5]
0.5 m 砂柱 (如图 6(a))	砂样试模 $\phi 5$ mm×50 mm; 渥太华砂 $D_{50}=0.21$ mm, $D_r=80\%$; 从砂柱顶部和底部依次注入菌液和胶结溶液, 灌浆加固 50 h。	砂柱内方解石生成量为 50~98 kg/m^3 , 其剪切波速为 600~1100 m/s(初始剪切波速为 100 m/s)。	文献[20]
5.0 m 砂柱 (如图 6(b))	PVC 管试模长为 5 m, 内径为 66 mm; Itterbeck 细砂(125~250 μm); 采用蠕动泵依次注入菌液、 CaCl_2 溶液(固定溶液)和胶结溶液, 灌浆加固 124 h。	5 m 砂柱内方解石生成量平均为 59 kg/m^3 , 固结排水强度为 200~570 kPa(围压为 50 kPa), 砂样的渗透性降低 22%~75%。	文献[19]
1 m^3 砂基 (单点灌浆)	模型箱尺寸为 0.9 m×1.1 m×1 m, 周边布置排水过滤通道; 采用与文献[20]相似的细砂; 注射口埋设于砂体中心, 在 40 d 灌浆加固过程中, 分步循环注入 100 L 菌液和 4000 L 胶结溶液。	形成近似球形的胶结砂体(图 6(c)), 其方解石生成量平均为 100 kg/m^3 , 浅部静力触探锥尖阻力高达 5 MPa, 砂样单轴抗压强度最高约为 9 MPa。	文献[21]
1 m^3 砂基 (引流灌浆)	塑料箱尺寸为 1.12 m×0.96 m×0.95 m; 河砂平均粒径为 0.25 mm, $D_r=60\%$; 箱体两端分别设置灌浆口和抽取口, 分阶段循环灌注菌液、 CaCl_2 溶液和胶结溶液。	1 m^3 砂体被胶结起来(图 6(d)), 胶结效率高达 93%, 固化砂基中方解石含量约为 2%~9%(平均含量为 4.55%), 其无侧限抗压强度为 10~1 400 kPa。	文献[22]
100 m^3 砂基	混凝土模型箱尺寸为 8 m×5.6 m×2.5 m; Itterbeck 细砂 $\rho_d=1.56$ g/m^3 ; 箱体两端分别布置灌注井和抽取井, 并埋设剪切波速测试仪; 从灌注井依次注入菌液和胶结溶液, 循环灌注 12 d。	沿流线方向形成透镜体状的胶结体, 约 40 m^3 (图 6(e)), 其方解石含量为 0.8%~24%(平均为 110 kg/m^3), 剪切波速平均为 300 m/s, 无侧限抗压强度为 0.7~12.4 MPa。	文献[21]

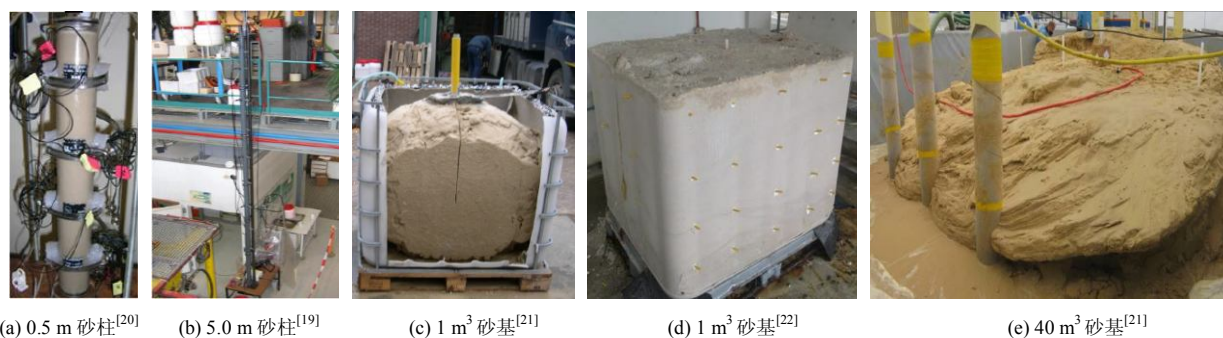


图 6 微生物灌浆加固不同尺度砂体模型^[19-22]

Fig. 6 Different-scale bio-cemented sand improved with the bio-grout process^[19-22]

通过微生物灌浆胶结砂土的室内试验研究, 使其改性与加固现场软弱土体成为可能。2010 年荷

兰代尔夫特理工大学首次将 MICP 灌浆技术应用于现场砂砾土稳固工程中^[24-25], 即利用微生物灌浆加

固地下砂砾土层来稳定水平定向钻孔。该工程灌浆加固深度为地面以下 3~20 m, 待加固的砂砾土体积约为 100 m³, 沿钻孔路径布置灌注井和抽注井, 其中抽取井对称设置于灌注井两侧, 如图 7(a)所示^[24]。首先通过灌注井依次注入约 200 m³ 菌液以及 300~600 m³ 胶结溶液, 浆液沿渗流方向传输至抽取井附近, 然后抽取出含有高浓度 NH₄Cl 的地下水进行污水处理。加固结束后砂砾胶结体中方解石含量高达 6%, 并且在进行水平定向钻孔和天然气管道铺设(图 7(b)^[25])时, 砂砾层一直保持着稳定状态, 没有发生坍塌事故, 微生物灌浆的首次现场应用取得了很好的试验效果。尽管如此, 目前关于 MICP 加固土体的研究还主要局限于室内试验, 大规模工程应用实例还很少, 微生物灌浆施工经验明显不足, 因此有必要进一步开展大尺度灌浆模型试验以及现场应用试验, 总结软弱地基中 MICP 灌浆技术的实践经验, 以推动该技术在岩土加固领域中的广泛应用。



(a) 现场灌注井和抽取井布置^[24] (b) 现场铺设天然气管道^[25]

图 7 微生物灌浆加固砂砾土稳定水平钻孔^[24-25]

Fig.7 Bio-cementing gravel for improving horizontal drilling holes^[24-25]

4 微生物灌浆无损测试技术

MICP 加固土体是一个复杂的生物化学过程, 因而需要运用多种测试手段对加固过程及其效果进行实时监测, 除了静(动)力触探、开挖取样等常规测试方法外, 剪切波速和电阻率等地球物理测试技术因具有测试方便、无损、快捷、连续和经济等应用优势而备受关注。

4.1 剪切波速法

剪切波速是指震动横波在土体中的传播速度, 常用于衡量岩土体的物理力学性质。其中土体剪切模量与剪切波速存在一定的比例关系:

$$G = \rho V_s^2 \quad (4)$$

式中: G 为小应变下土体的剪切模量; ρ 为土体的密度; V_s 即为剪切波速。

砂体中方解石凝胶的沉积使得土体的剪切刚度(模量)得到提高, 同时颗粒间胶结的破坏会直接导致土体剪切刚度的降低^[26]。Van Paassen 等^[27]对 100 m³ 砂基模型进行灌浆加固后, 分别采用剪切波速和无侧限抗压强度来评价其胶结效果, 两种方法计算得到的剪切模量处于同一数量级, 因此, 剪切波速可有效评价胶结砂体的刚度。Al Qabany 等^[28]基于 MICP 灌浆加固试验, 研究了砂土中方解石含量与其剪切波速之间的关系, 分析结果表明: 采用相同的灌浆参数, 即相同的化学浓度和灌注量, 方解石沉积量与剪切波速具有很好的线性相关性(见图 8), 即剪切波速随方解石含量的增加呈线性增长; 而灌注参数不同时, 剪切波速与方解石含量之间表现出非线性增长关系, 这可能是由于灌浆工艺的差异导致方解石晶体在砂颗粒间具有不同的沉积状态, 还有待进一步探究。

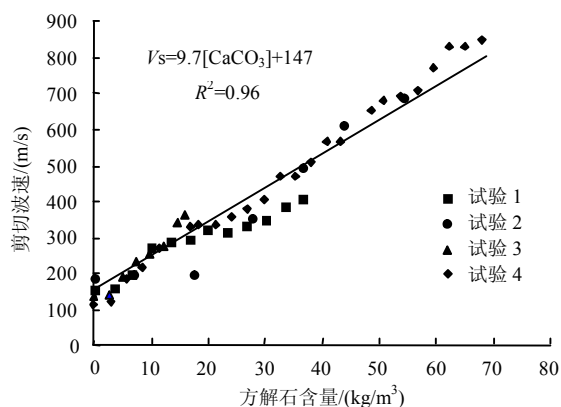


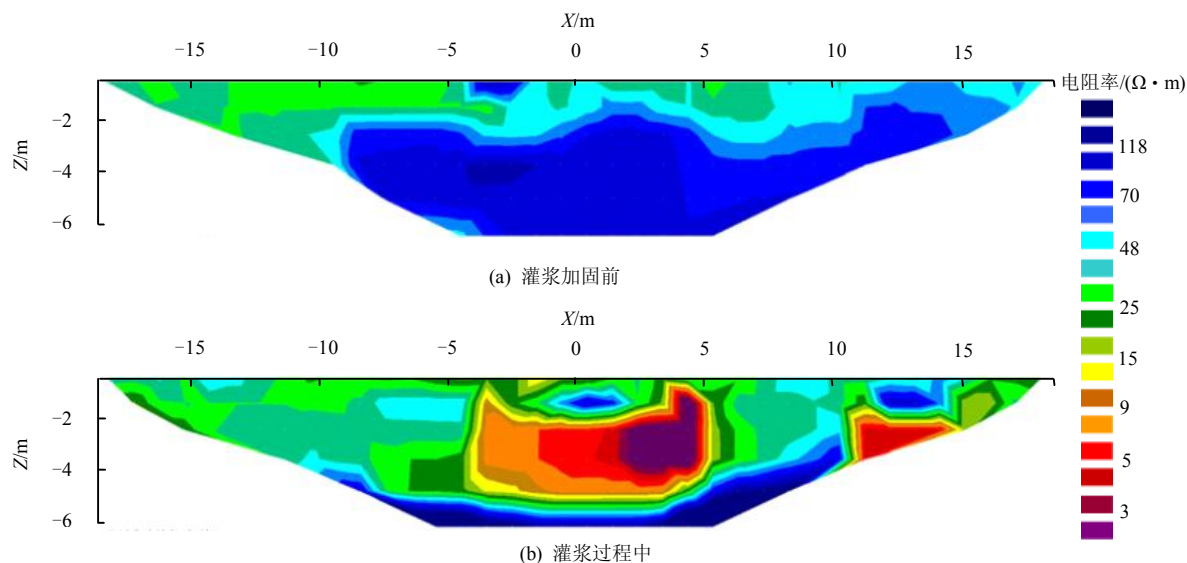
图 8 固化砂样的剪切波速与方解石含量之间的关系^[28]

Fig.8 S-wave velocity versus CaCO₃ precipitation for bio-treated samples^[28]

4.2 电阻率法

电阻率(或导电率)是表征物质导电性的基本参数, 土的电阻率主要取决于土的孔隙率、颗粒矿物成分、孔隙液的化学组分、颗粒比表面积、饱和度和胶结状态等。作为一种原位无损测试技术, 电阻率法已在测定岩土体的工程性质、土体污染特征和孔隙液的化学成分变化等方面取得了一定的研究成果^[1]。

在首次微生物灌浆现场应用中, 对灌浆前及灌浆过程中砂砾层的电阻率进行了测试^[24], 如图 9 所示, 高盐性浆液使得其电阻率由初始的 120 Ω·m 降低至 2 Ω·m, 电阻率的显著变化有效地监测了菌液和胶结溶液在土层中的流动和传输。但目前就电阻率评价 MICP 浆液的分布及其胶结体的工程力学性质的研究还非常少, 需要进一步加强该测试技术在微生物灌浆应用中的基础研究。

图9 灌浆前及灌浆过程中砂砾土层的电阻率分布图^[24]Fig.9 Resistivity mapping of subsurface gravel soils before and during bio-grouting treatment^[24]

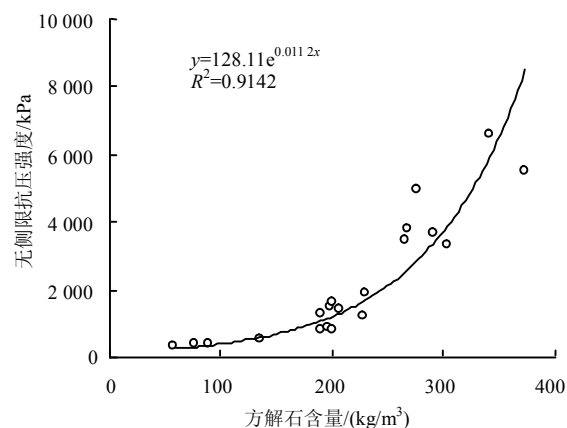
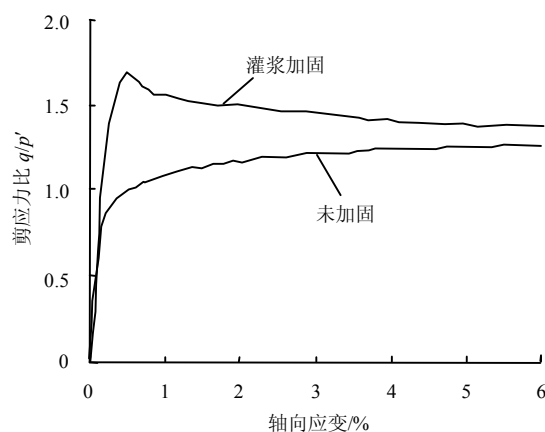
5 MICP 固化土体的工程性质

5.1 强度

无侧限抗压强度 (UCS) 是表征 MICP 固化土强度特性的重要指标之一。由 MICP 胶砂机制可知, 对固化土强度起主要作用的是土颗粒间沉积的方解石凝胶。Harkes 等^[29]采用微生物灌浆方法胶结了 20 个砂柱模型, 通过测试无侧限抗压强度及其方解石沉积量, 发现砂柱强度与方解石含量有着密切关系, 并拟合得出一个经验曲线 (图 10)。Chu 等^[30]研究发现, 固化砂柱的 UCS 与其方解石沉积量具有较强的线性相关性, 并得到相应的线性经验公式。相关试验结果表明, 随着方解石含量的增加, 砂柱强度表现出不尽相同的生长方式, 即在方解石含量相同的条件下, 固化砂土的力学性能也可能存在较大差异。DeJong 等^[1]认为, 这主要是由于方解石在砂颗粒间的不同分布状态造成的。尽管如此, 砂柱的 UCS 与方解石含量仍具有较好的相关性, 即方解石含量低于 3.5% 或 60 kg/m³ 时, 砂柱的强度改善并不明显, 而方解石沉积量较多时, 其强度会得到显著提高^[19]。

DeJong 等^[5]通过三轴不排水试验研究了微生物胶结砂柱的剪切力学性状, 发现加固后砂柱的不排水剪切强度得到显著提高, 并在剪切过程中表现出应变软化的特征, 如图 11 所示。Chou 等^[31]研究发现, MICP 灌浆加固后砂体的黏聚力 c 和内摩擦角 φ 均获得不同程度的增加, 从而提高了砂土的抗剪强度。Li 等^[22]进一步研究了不同胶结程度下砂柱的固结排水剪切特性, 通过绘制摩尔应力圆及抗剪强度

包线, 发现其剪切强度的增加主要依赖于胶结作用形成的黏聚力。

图10 砂柱的 UCS 与方解石含量之间的关系^[29]Fig.10 Relation between UCS strength and calcite content of sand column^[29]图 11 微生物灌浆加固及未加固砂样的不排水剪切性状^[5]
Fig.11 Response to undrained shear for untreated and bio-treated specimens^[5]

为了评价微生物灌浆加固砂土地基的动力特性和抗液化强度, Montoya 等^[32]对固化后的饱和砂土地基模型(自由场地基和简化结构物下的非自由场地基)进行了动力离心模型试验,发现在不同震动反应水平下(震动峰值加速度 $a_{\max}$ 分别为 0.3、0.7), MICP 砂基的超孔隙水压力和地基沉降量均会明显降低。程晓辉等^[33]通过振动台模型试验研究了微生物灌浆加固砂基的抗液化强度,发现 MICP 灌浆加固技术较之传统碎石桩挡墙加固方式在中强震中表现出更强的抗液化能力,更能有效地抑制土层对地震波的放大作用。Montoya 等^[34]研究了液化砂土地基在不同胶结程度下的抗液化性能,发现随着胶结程度的增加,砂基抗液化强度逐渐提高,但胶结程度高的砂基,其地面峰值加速度会有所增加,这实际上放大了地面运动响应。因此,在实际灌浆加固中须权衡两者之间的平衡关系以确定最优的胶结水平。

5.2 刚度

刚度是表征材料抵抗弹性变形能力的力学性能指标,土体的刚度可通过剪切模量或弯曲元测试得到的剪切波速来衡量。DeJong 等^[20]采用 MICP 技术对 0.5 m 砂柱进行灌浆加固试验,固化砂样的剪切波速达到 600~1 100 m/s(初始剪切波速为 100 m/s),其剪切刚度得到显著增加。Van Paassen 等^[21]通过 100 m³ 大规模原位砂基的灌浆试验发现,固化砂基的平均剪切波速为 300 m/s,有效地提高了砂基的刚度。DeJong 等^[1]进行了浅基础模型的灌浆加固试验,通过静载荷试验结果表明,地基承载力和刚度显著提高,在同一荷载作用下沉降量减少近 5 倍,如图 12 所示。

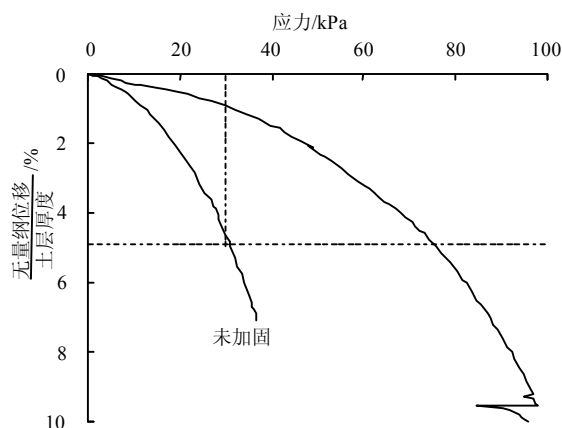


图 12 微生物灌浆加固浅基础模型的静载荷试验结果^[1]
Fig.12 Static loading experimental results for bio-grouting improvement of soil support under a shallow foundation^[1]

5.3 渗透性

微生物矿化形成的方解石填充于土颗粒孔隙中,使得土体的孔隙率和渗透性得以改善。早在1992

年, Ferris 等^[35]就提出利用生物矿化沉积的方解石来降低地层的渗透性,并建议将其应用于油田开采中。Chu 等^[36]通过 MICP 技术在砂土表面形成一定厚度的胶结层,使得砂体的渗透系数由 10^{-4} m/s 下降至 10^{-7} m/s,并成功构建了实验室尺度的水池模型。因此,当松散砂粒中大部分孔隙被方解石所填充时,砂土的渗透性会大幅度降低,并实现对多孔材料的封堵。

在地基加固等领域,固化土体的最大无侧限抗压强度一般控制在 1.5~3.0 MPa,而所需相应的微生物诱导方解石沉积量仅约为 100~200 kg/m³,这就意味着微生物改性砂土后依然能保持较高的孔隙率和渗透性^[37]。Whiffin 等^[19]对 5 m 砂柱灌浆加固后,发现其强度得到显著提高,但整个砂柱的孔隙率及渗透性却降低较少,渗透系数由初始的 1.92×10^{-5} m/s 降低至固化后的 9.0×10^{-6} m/s(平均值),即使方解石沉积量最高的砂样,其孔隙率仅减少 10%,大部分孔隙被保留下来,如图 13 所示。沈吉云^[38]研究发现固化砂柱的无侧限抗压强度达到 1.38 MPa 时,其方解石生成量仅占孔隙体积的 14%,表明砂柱内仍有大量孔隙存在,并保持着较大的渗透系数。Rong 等^[39]通过对不同灌注次数的砂柱进行强度、孔隙率和 XCT 测试,发现灌注 14 次后胶结体的抗压强度达到 6.1 MPa,而其孔隙率仅由最初的 42.6% 降低至 28.1%,CT 灰度值由初始状态的 273 增大到 310。

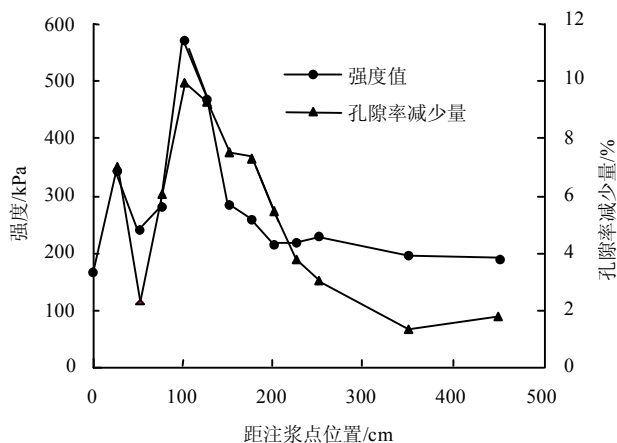


图 13 砂柱不同位置处的强度和孔隙率减少量^[19]
Fig.13 Relative decrease in porosity and strength over different lengths of sand column^[19]

以上分析表明,只有当 MICP 固化砂体的强度超过一定值时,其渗透性才会显著降低,这种特性可通过方解石在砂土的微观分布状态来解释。由于方解石倾向于沉积在砂颗粒相互接触的附近,因此,

MICP 胶结砂颗粒, 并获得一定强度的同时, 还保持了孔隙的连通性和较大的渗透性。这些特点也使得微生物灌浆能够实现低压、长距离和多次循环灌注。

5.4 耐久性

抗侵蚀性是表征材料抵抗风力、水流、酸碱盐溶液等物理或化学侵蚀作用的性能, 它是评价固化土体耐久性的重要指标。Bang 等^[40]研究发现, 将菌液及胶结溶液均匀喷洒于砂土表面可形成具有一定硬度的胶结薄层, 从而有效提高固化土体的抗风蚀性能。Gomez 等^[41]率先开展了微生物胶结表层砂体抵抗侵蚀破坏的现场试验研究 (见图 14), 采用菌液和胶结溶液对现场松散尾矿砂进行表面胶结加固, 最终形成了 2.5 cm 厚的坚硬胶结层, 通过动力触探和方解石含量测试表明, 有效加固深度达到 28 cm, 显著提高了松散矿砂的抗侵蚀能力, 并为今后植被恢复创造有利条件。Jiang 等^[42]对微生物灌浆加固后的混合土样 (砂: 高岭土=5:1) 进行了一系列渗流侵蚀试验, 结果表明, 加固后土体的临界水力梯度和剪应力得到显著提高, 而相同水力条件下的内部侵蚀量明显减少。在抗化学侵蚀方面, Cheng 等^[43]通过向胶结砂柱中连续灌注人工酸雨 ($\text{pH}=3.5$), 发现其质量不断损失, 且强度降低高达 40%, 这表明微生物固化砂体的抗酸雨侵蚀能力较差。究其原因在于, 酸雨中 H^+ 离子与砂颗粒间的碳酸钙发生反应, 致使其胶结作用遭到破坏。

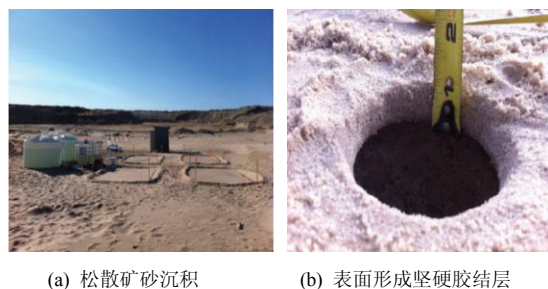


图 14 微生物胶结固化表层砂土现场试验^[41]

Fig.14 Field-scale bio-cementation tests to improve surface sands^[41]

此外, Cheng 等^[43]还对比分析了水泥固化砂样与 MICP 胶结砂体的抗冻融性能, 发现经 10 次冻融循环后, 水泥固化试样的强度降低了 40%, 而 MICP 胶结体的强度仅降低 10%, 如图 15 所示。荣辉等^[44]对微生物胶结砂柱进行了冻融循环以及冲刷性试验, 结果表明, 固化砂样表现出较好的抗冻性和抗

冲刷性。目前, 国内外研究者主要集中于研究微生物胶结砂体的力学性能 (强度、刚度和渗透性), 对其在常规及复杂环境条件下的耐久性研究则相对较少, 因而需要进一步加强该方面的研究。

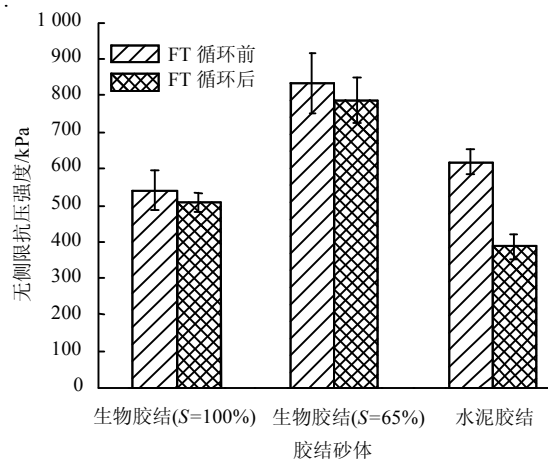


图 15 10 次冻融循环前后胶结砂体的强度值^[43]

Fig.15 UCS of cemented fine sand samples before and after 10 cycles of freeze-thaw (FT) action^[43]

6 微生物灌浆加固土体的影响因素

过去十多年, 国内外就影响微生物灌浆加固效果的因素进行了较为深入的基础研究^[45-47], 结果表明, 除了菌液浓度及其酶活性、营养液浓度、pH 和温度等影响方解石沉积加固的常见因素外, 灌浆工艺和土粒粒径也是决定 MICP 加固效果的关键因素。

尽管分步灌浆方法使得长距离、大体积土体的原位灌浆加固得以实现, 但无论是大尺度砂柱还是原型尺度砂基, 胶结砂体的强度 (或方解石沉积量) 仍呈现出均匀性。Whiffin 等^[19]认为, 这主要是由于尿素水解速率与胶结溶液供给速率之间的失衡所导致的, 若两者之间能够达到很好的平衡, 便会得到强度分布比较均匀的胶结体。另外, 微生物在砂体中的分布不均也会引起胶结程度的差异。为了提高灌浆加固的均匀性, 国内外研究机构对微生物灌浆工艺做了进一步优化试验, 并得到一些有益的研究成果 (见表 2)。结果表明, 合理的灌浆速度、适宜的胶结液浓度以及分步循环灌浆方式等均有利于提高胶结砂体的均匀性。而针对大尺度砂基加固, 可通过布置灌注井和抽取井, 使得形成的水力梯度有效引导菌液和胶结溶液在砂土中的传输, 从而改善浆液在加固区域的空间分布, 并有效提高砂基的胶结均匀性。

表 2 微生物灌浆加固效果的影响因素
Table 2 Factors influencing bio-treatment effect

研究机构	研究内容（影响因素）	来源
荷兰代尔夫特理工大学	胶结砂体中方解石的分布不均可通过多次灌浆来补偿，而且胶结溶液灌注速率要高于尿素分解速率，灌注间歇时间要足够长，以保证反应物全部转化。	文献 [13]
美国加州大学戴维斯分校	对比了间歇性及连续性灌浆方式，提出间歇性注入胶结溶液能够显著提高砂体胶结的均匀性。	文献 [45]
英国剑桥大学	胶结溶液灌注速率低于 0.042 mol/L/h 时，可使方解石沉积效率达到 100%；胶结溶液浓度较低 (0.25 mol/L) 时，方解石晶体尺寸小且空间分布均匀，而浓度较高 (0.5~1.0 mol/L) 时，方解石尺寸较大且空间分布的均匀性变差。	文献 [46-47]
中国东南大学	较低的菌液注入速率 (5 mL/min) 可使砂颗粒中的微生物分布更加均匀，而较高的胶结液灌注速率 (10 mL/min) 可以避免方解石在灌注口附近过早沉积而导致堵塞。	文献 [23]

此外，砂土粒径大小也是影响 MICP 灌浆加固效果的重要因素，这主要是由于孔隙尺寸影响了微生物在砂颗粒间的滞留、吸附以及传输移动造成的。微生物的细胞直径通常在 0.5~3.0 μm ，不可能在尺寸小于约 0.4 μm 的孔隙内进行传输^[11]，因此较小的孔隙会抑制微生物在颗粒间的传输分布，但较大的孔隙会使得微生物难以在砂粒间滞留和吸附，其大部分会随着胶结液的灌注被冲刷带走，最终导致方解石沉积效率很低。Rebata^[48]研究发现，最有利于方解石沉积的颗粒粒径为 50~400 μm 。Kim 等^[49]还研究了土体的相对密实度和颗粒级配对胶结效果的影响，其实质仍可归因于微生物与孔隙尺寸之间的相容性问题。鉴于此，当前微生物灌浆技术主要应用于渗透性好的砂类土以及含有少量砾石、泥炭或黏土的砂性土。

7 讨论及进一步研究方向

MICP 灌浆技术是一种低压、非扰动、生态环保的地基原位加固新方法。通过以上的文献综述表明，微生物矿化形成的方解石凝胶能够将松散砂颗粒胶结成为整体，显著提高了砂体的强度、刚度、抗侵蚀性能等，并改善了砂土的孔隙结构和渗透性。尽管如此，在实际应用中仍存在以下几个方面的问题和挑战有待于进一步的研究讨论：

（1）微生物灌浆加固土体的均匀性和耐久性

就 MICP 灌浆大规模现场应用而言，首先要考虑的两个问题是土体加固的均匀性和固化土体的耐

久性^[1]。目前已有很多学者针对砂体内方解石分布不均问题提出了一些优化灌浆方法，但仅局限于室内砂柱试验，而关于 MICP 固化砂体的耐久性（抗渗性、抗冻性、抗侵蚀性等）研究还明显不足，因此，这两方面的问题均需要进一步加强研究，尤其是长期耐久性。

（2）激发土壤中原有微生物

土壤作为一种天然的疏松多孔体，本身就是微生物的良好载体，通常生活着种类和数量繁多的微生物，因而可以通过向土体中注入营养物质激发土中原有微生物的生长繁殖和新陈代谢来改善岩土体的工程性质。Burbank 等^[50]利用土壤中天然的脲酶菌进行了原位土体加固试验，有效提高了土体的抗液化能力。

由于该方法利用土体中固有的微生物，有助于保持岩土体的生态环境，避免灌浆本身引起的微生物分布不均问题，并大大降低微生物的培养成本，因此，具有显著的应用优势。但目前对激发土体中固有微生物矿化的研究还比较少，下一步还需要大量的室内及现场试验来检验和优化完善该项研究。

（3）微生物有害代谢产物的最低化

基于尿素水解的 MICP 固化土体一直是国内外研究的热点，但在矿化过程中除了形成方解石凝胶外，还会产生高浓度的 NH_4Cl ，这种副产物残留于土体中会导致地下水污染，因而必须将其抽取出来进行污水处理，但这无疑增加了灌浆工艺的复杂性，降低了灌浆加固效率，并提高了加固处理费用。

为此，Van Paassen 等^[51]提出利用反硝化细菌矿化生成碳酸钙来加固土体，鉴于反硝化作用的最终产物仅为氮气，具有巨大的环境效益，同时所用原料价格低廉，在未来很有可能取代脲酶菌成为该领域的主力军，但反硝化细菌生长缓慢且活性低，在实际应用中尚需进一步的论证和优化研究。

（4）微生物灌浆数值模拟

微生物灌浆加固土体涉及到一系列生物化学反应过程，因此，在利用岩土工程有限元或有限差分对灌浆效果进行分析计算时，需要将生物化学反应与水力传输及力学模型结合起来，并根据 MICP 固化土体的应力-应变特性建立新的本构关系。基于此，国内外岩土、微生物和材料科研工作者建立了一些简化的 MICP 灌浆模型^[52-54]，并很好地预测了土体中方解石的分布情况以及固化砂体的力学性状，但还有很多问题考虑不足，如微观尺度的生物化学过程（包括微生物生长、吸附-脱附、酶解过程

等)、相关生物化学反应网络的结合、土体孔隙率及饱和度的局部变化等。因此,有必要结合原位监测数据对微生物灌浆模型做进一步的研究和完善。

8 结 论

(1) 基于尿素水解的微生物诱导方解石沉积在自然环境中是普遍存在的。利用 MICP 技术,通过向砂土中灌注菌液及胶结溶液(尿素- CaCl_2),可在砂颗粒间快速生成具有胶结作用的方解石型碳酸钙,并将松散砂粒胶结成为具有一定力学性能的整体。

(2) 微生物灌浆技术可显著提高砂土强度(无侧限抗压强度、剪切强度和抗液化强度)、剪切刚度、抗侵蚀及抗冻性能,而且胶结砂体在一定强度范围内仍可维持较高的孔隙率和渗透性,保证其低压、长距离和多次循环灌浆得以实现。通过剪切波速、电阻率等地球物理无损测试技术能够实时地监测灌浆过程中土体工程性质的变化以及浆液的流动与传输。

(3) MICP 灌浆加固效果受众多因素影响,除了菌液浓度及其酶活性、营养液浓度、pH 和温度等常规因素外,灌浆工艺和土粒粒径也对灌浆效果起着决定性作用。合理的灌浆速度、适宜的胶结液浓度以及分步循环灌浆方式等均有利于提高 MICP 胶结砂体的均匀性效果。然而,现有研究还主要局限于室内试验,仍需结合现场试验进行深入探讨。

(4) 微生物灌浆具有施工扰动小、灌注压力低、扩散距离远、施工周期短和生态相容性好等优势,而且所用的灌浆材料与传统胶凝材料相比,也有低能耗、低污染和低排放等特点。作为一种可持续发展的土体加固新方法,微生物灌浆技术具有潜在的工程实用价值和广泛的应用前景,如加固软弱地基、防治砂土液化、稳定路堤边坡和防治土体侵蚀等,但关于微生物灌浆加固土体的耐久性和经济性等问题还有待进一步探究。

微生物灌浆加固土体的研究已不再局限于室内试验,国外已有成功利用 MICP 稳定砂砾土和固化表层砂体的工程应用实例。因此,国内有必要积极开展相关课题研究,以促进该技术在工程中的推广和应用。

参 考 文 献

- [1] DEJONG J T, MORTENSEN B M, MARTINEZ B C. Biomediated soil improvement[J]. **Ecological Engineering**, 2010, 36(2): 197—210.
- [2] CHU J, IVANOV V, NAEIMI M, et al. Development of microbial geotechnology in Singapore[C]//Proceedings of Geofrontiers 2011: Advances in Geotechnical Engineering. Dallas: ASCE, 2011: 4070—4078.
- [3] SHERWOOD P. Soil stabilization with cement and lime: State of the art review[M]. London: Her Majesty's Stationery Office, 1993.
- [4] KAROL R H. Chemical grouting and soil stabilization[M]. New York: Marcel Dekker, 2003.
- [5] DEJONG J T, FRITZGES M B, NÜSSLEIN K. Microbially induced cementation to control sand response to undrained shear[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2006, 132(11): 1381—1392.
- [6] KANTZAS A, STEHMEIER L, MARENTETTE D F. A novel method of sand consolidation through bacteriogenic mineral plugging[C]//Annual Technical Meeting. Calgary: Petroleum Society of Canada, 1992.
- [7] FERRIS F G, STEHMEIER L G, KANTZAS A, et al. Bacteriogenic mineral plugging[J]. **Journal of Canadian Petroleum Technology**, 1996, 35(8): 56—61.
- [8] RAMACHANDRAN S K, RAMAKRISHNAN V, BANG S S. Remediation of concrete using microorganisms[J]. **ACI Materials Journal**, 2001, 98(1): 3—9.
- [9] QIAN C X, WANG R X, CHENG L, et al. Theory of microbial carbonate precipitation and its application in restoration of cement-based materials defects[J]. **Chinese Journal of Chemistry**, 2010, 28(5): 847—857.
- [10] WHIFFIN V S. Microbial CaCO_3 precipitation for the production of biocement[D]. Perth: Murdoch University, 2004.
- [11] MITCHELL J K, SANTAMARINA J C. Biological considerations in geotechnical engineering[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2005, 131(10): 1222—1233.
- [12] DEJONG J T, SOGA K, KAVAZANJIAN E, et al. Biogeochemical processes and geotechnical applications: Progress, opportunities and challenges[J]. **Geotechnique**, 2013, 63(4): 287—301.
- [13] HARKES M P, VAN PAASSEN L A, WHIFFIN V S. Immobilisation of bacteria to a geological material: U.S. Patent No.20090215144[P]. 2006-12-15.
- [14] 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.
- [15] BACHMEIER K L, WILLIAMS A E, WARMINGTON J R, et al. Urease activity in microbiologically induced calcite precipitation[J]. **Journal of Biotechnology**, 2002, 93(2): 171—181.
- [16] MUYNCK D W, BELIE D N, VERSTRAETE W. Microbial carbonate precipitation in construction materials: A review[J]. **Ecological Engineering**, 2010, 36(2): 118—136.
- [17] QIAN C X, PAN Q F, WANG R X. Cementation of sand grains based on carbonate precipitation induced by microorganism[J]. **Science China Technological Sciences**, 2010, 53(8): 2198—2206.
- [18] ALVARADO D. Bio-mediated soil improvement: cementation of unsaturated sand samples[D]. Tempe: Arizona State University, 2009.
- [19] 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.
- [20] DEJONG J T, SOGA K, BANWART S A, et al. Soil engineering in vivo: Harnessing natural biogeochemical systems for sustainable, multi-functional engineering solutions[J]. **Journal of The Royal Society Interface**, 2011, 8(54): 1—15.
- [21] 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. [S.l.]: Lansdale IOS Press, 2009: 2328—2333.
- [22] LI BING. Geotechnical properties of biocement treated soils[D]. Singapore: Nanyang Technological University, 2014.
- [23] 荣辉. 微生物水泥的研制及其胶结机制[D]. 南京: 东南大学, 2014.
- [24] VAN PAASSEN L A. Bio-mediated ground improvement: from laboratory experiment to pilot applications[C]//Geo-Frontiers: Advances in Geotechnical Engineering. Dallas: ASCE, 2011: 4099—4108.
- [25] VAN DER STAR W R L, VAN WIJNGAARDEN W K, L A, et al. Stabilization of gravel deposits using microorganisms[C]//Proceedings of the 15th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Athens: IOS Press, 2011: 85—90.
- [26] MARTINEZ B C, DEJONG J T. Bio-mediated soil improvement: load transfer mechanisms at the micro-and macro-scales[C]//Advances in Ground Improvement: Research to Practice in the United States and China. Orlando: ASCE, 2009: 242—251.
- [27] VAN PAASSEN L A, GHOSE R, VAN DER LINDEN T J M, et al. Quantifying biomediated ground improvement by ureolysis: Large-scale bio-grout experiment[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2010, 136(12): 1721—1728.
- [28] AL QABANY A, MORTENSEN B, MARTINEZ B, et al. Microbial carbonate precipitation: Correlation of S-wave velocity with calcite precipitation[C]//Geo-Frontiers 2011: Advances in Geotechnical Engineering. Dallas: ASCE, 2011: 3993—4001.
- [29] HARKES P H, BOOSTER J L, VAN PAASSEN L A, et al. Microbial induced carbonate precipitation as ground improvement method-bacterial fixation and empirical correlation CaCO_3 vs. strength[C]//Proceedings of 1st International Conference BGCE. Delft: [s.n.], 2008: 37—44.
- [30] CHU J, IVANOV V, NAEIMI M, et al. Optimization of calcium-based bioclogging and biocementation of sand[J]. **Acta Geotechnica**, 2014, 9(2): 277—285.
- [31] CHOU C, SEAGREN E A, AYDILEK A H, et al. Biocalcification of sand through ureolysis[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2011, 137(12): 1179—1189.
- [32] MONTOYA B M, DEJONG J T, BOULANGER R W, et al. Liquefaction mitigation using microbial induced calcite precipitation[C]//GeoCongress: State of the Art and Practice in Geotechnical Engineering. Oakland: ASCE, 2012: 1918—1927.
- [33] 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 Zuan, et al. Dynamic response of liquefiable sand foundation improved by bio-grouting[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 2013, 35(8): 1486—1495.

- [34] 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.
- [35] FERRIS F G, STEHMEIER L G. Bacteriogenic mineral plugging: U.S. Patent No. 5143155[P]. 1992-9-1.
- [36] CHU J, IVANOV V, STABNIKOV V, et al. Microbial method for construction of an aquaculture pond in sand[J]. **Geotechnique**, 2013, 63(10): 871—875.
- [37] VAN DER RUYT M, VAN DER ZON W. Biological in situ reinforcement of sand in near-shore areas[J]. **Proceedings of the ICE-Geotechnical Engineering**, 2009, 162(1): 81—83.
- [38] 沈吉云. 微生物成因土工材料实验及应用研究[D]. 北京: 清华大学, 2009.
- [39] RONG H, QIAN C. Microstructure evolution of sandstone cemented by microbe cement using X-ray computed tomography[J]. **Journal of Wuhan University of Technology**, 2013, 28(6): 1134—1139.
- [40] BANG S C, 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.
- [41] GOMEZ M G, MARTINEZ B C, DEJONG J T, et al. Field-scale bio-cementation tests to improve sands[J]. **Proceedings of the ICE-Ground Improvement**, 2014: 1—11. Dio: 10.1680/grim.B.00052.
- [42] JIANG N J, SOGA K, DAWOUD O. Experimental study of mitigation of soil internal erosion by microbially induced calcite precipitation[C]//Geo-Congress: Geo-characterization and Modeling for Sustainability. Atlanta: ASCE, 2014: 1586—1595.
- [43] CHENG L, CORD-RUWISCH R, SHAHIN M A. Cementation of sand soil by microbially induced calcite precipitation at various degrees of saturation[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2013, 50(1): 81—90.
- [44] 荣辉, 钱春香, 王欣. 微生物水泥基材料抗冻性和抗冲刷性[J]. **功能材料**, 2014, 11: 11091—11095.
- RONG Hui, QIAN Chun-xiang, WANG Xin. Performance of microbe cementitious materials[J]. **Journal of Functional Materials**, 2014, 11: 11091—11095.
- [45] BARKOUKI T H, MARTINEZ B C, MORTENSEN B M, et al. Forward and inverse bio-geochemical modeling of microbially induced calcite precipitation in half-meter column experiments[J]. **Transport in Porous Media**, 2011, 90(1): 23—39.
- [46] AL QABANY A, SOGA K, SANTAMARINA C. Factors affecting efficiency of microbially induced calcite precipitation[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2011, 138(8): 992—1001.
- [47] 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.
- [48] REBATA-LANDA V. Microbial activity in sediments: Effects on soil behavior[D]. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2007.
- [49] KIM D, PARK K, KIM D. Effects of ground conditions on microbial cementation in soils[J]. **Materials**, 2013, 7(1): 143—156.
- [50] 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**, 2012, 139(6): 928—936.
- [51] 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.
- [52] VAN WIJNGAARDEN W K, VERMOLEN F J, VAN 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.
- [53] MARTINEZ B C, DEJONG J T, GINN T R. Biogeochemical reactive transport modeling of microbial induced calcite precipitation to predict the treatment of sand in one-dimensional flow[J]. **Computers and Geotechnics**, 2014, 58: 1—13.
- [54] FAURIEL S, LALOUI L. A bio-chemo-hydro-mechanical model for microbially induced calcite precipitation in soils[J]. **Computers and Geotechnics**, 2012, 46: 104—120.