

# Experimental Study of the Cementation of Coral Sand by Biogrouting

Fei Gao, Yuqin Sun, Di He, Yi Zhong

School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing Jiangsu  
Email: 2363827723@qq.com

Received: Apr. 26<sup>th</sup>, 2020; accepted: May 19<sup>th</sup>, 2020; published: May 26<sup>th</sup>, 2020

---

## Abstract

Compared with traditional chemical grouting reinforcement technology, microbial induced calcium carbonate reinforcement technology (MICP) can effectively improve the strength, permeability and erosion resistance of sand, and the microbial grouting material is a solution or suspension, and traditional cementitious materials. Compared with the advantages of low viscosity, good fluidity, adjustable reaction rate and less environmental pollution, the bacteria liquid and the cement solution (mixture of urea and calcium chloride) are poured into the sand column, and the sand column is strengthened by four-round grouting. Based on the unconfined compressive strength test, the effects of sand particle size distribution and solution concentration on the reinforcement effect of sand columns are analyzed. Combined with electron microscopy scanning, the microscopic mechanism of microbial grouting reinforcement technology was explored. The experimental results show that there is obvious calcium carbonate formation between the sand particles, and the formed calcium carbonate exhibits the structure of the membrane and the shape of the particles, and the sand particles are bonded and filled. A more compact whole is formed to improve the impermeability and compressive strength of the sand column. At the same time, the appropriate concentration and particle size play a role in promoting reinforcement.

## Keywords

Microbial Reinforcement Technology, Unconfined Compressive Strength, Sand Particle Distribution, Calcareous Sand

---

# 微生物灌浆技术加固钙质砂的实验研究

高飞, 孙雨勤, 何谡, 仲毅

东南大学土木工程学院, 江苏 南京  
Email: 2363827723@qq.com

收稿日期: 2020年4月26日; 录用日期: 2020年5月19日; 发布日期: 2020年5月26日

## 摘要

微生物诱导碳酸钙加固技术(MICP)与传统化学灌浆加固技术相比,能有效提高砂土的强度、渗透性及抗侵蚀性能等,且微生物灌浆材料为溶液或悬浊液,与传统胶凝材料相比,具有黏性低、流动性好、反应速率可调控、环境污染少等优势。向砂土柱中灌注菌液以及胶结溶液(尿素和氯化钙混合溶液),通过四轮注浆实现对砂土柱的加固,基于无侧限抗压强度实验,分析砂土颗粒级配、营养液浓度对于砂土柱加固效果的影响。并且结合电镜扫描探究微生物灌浆加固技术的微观机理,实验结果表明:砂颗粒之间有明显的碳酸钙生成,生成的碳酸钙呈现出膜结构和颗粒的形态,将砂土颗粒黏结并填充起来,形成一个更加致密整体,从而提高砂土柱抗渗性和抗压性,同时适宜的浓度和颗粒大小对加固起到了明显的促进作用。

## 关键词

微生物加固技术, 无侧限抗压强度, 砂土颗粒级配, 钙质砂

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

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。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。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作用,对地下水和周围植被均会造成影响。水泥生产过程中还会排放大量的温室气体,每生产一吨水泥熟料,因燃煤和石灰石分解会排放出一吨二氧化碳,其存在能耗高、污染环境等缺点,势必会对生态环境造成危害[1]。因此,亟需寻求一种高效环保的土体加固技术。

Whiffin [2]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[3]明确提出了微生物改性岩土体的广泛应用价值及潜力。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[4] [5]提出了一种分步灌浆方法。在国内也有李娜等人[6]对生化原理加固液化砂土地基的进行研究,广东工业大学的梁仕华[7]对于循环灌浆技术加固效果进行研究,山东建筑大学的贾强[8]等人就微生物诱导碳酸钙沉淀加固砂土地基方向开展了一系列的实验研究。

现有研究表明,微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)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浊液,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。

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、渗透性及抗液化性能,在土体加固领域有着非常广阔的应用前景。本文旨在研究砂土的颗粒级配、营养液浓度对于加固效果的影响,每个变量设置多组实验组。

## 2. MICP 作用机理

微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)是自然界中常见的生物矿化现象,即通过向原位砂土中灌注菌液以及

胶结溶液(尿素和  $\text{CaCl}_2$  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。如图 1 所示,碳酸钙沉淀的产生主要取决于碱性溶液环境下的碳酸根离子和钙离子,两者相互结合达到饱和状态,从而析出碳酸钙沉淀。其中以产脲酶细菌为微生物诱导碳酸钙沉淀的代谢过程为主。

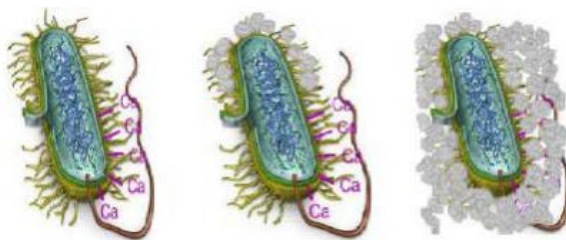
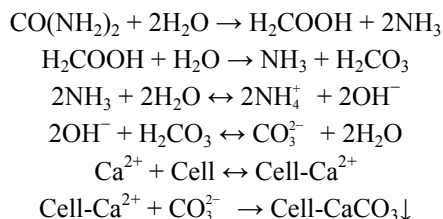


Figure 1. Schematics of microbial induced calcite precipitation [9]

图 1. 微生物诱导方解石沉积示意图[9]

本文采用的微生物为巴氏芽孢杆菌,营养液采用尿素和氯化钙溶液。尿素水解加固法对于环境要求较低,能够在较短时间内水解生成  $\text{CO}_3^{2-}$  和  $\text{NH}_4^+$ 。微生物代谢胞外聚合物中含有酰胺基、氨基、羟基等负离子集团,细菌细胞壁由于其结构特殊性,使其表面带有大量负离子,并吸附周围的  $\text{Ca}^{2+}$ ,在脲酶影响作用下尿素分子不断分解出  $\text{CO}_3^{2-}$  并运输至细胞表面,最后析出碳酸钙结晶[10]。尿素水解反应过程见如下方程式:



如图 2 所示,尿素水解形成的碳酸钙沉淀在松散的砂土颗粒之间形成了联系彼此的桥梁,将个体联系成整体,从而提高了砂土柱的无侧限抗压强度,并且在渗透性能方面也有所提高,从而实现了利用更环保、经济的手段实现更高性能的加固效果。

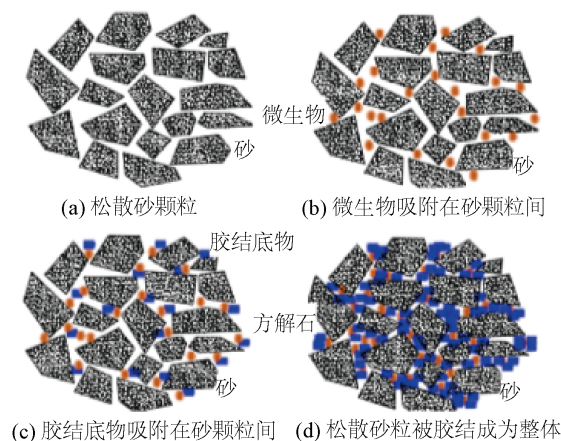


Figure 2. Schematic process of bio-cementing sand particles [11]

图 2. 微生物胶结砂颗粒过程示意图[11]

### 3. 实验材料与装置

#### 3.1. 实验材料

实验所选用的钙质砂来自于我国南海某岛礁，经破碎过筛后选取粒径小于 5 mm 砂烘干使用。

实验所用的菌液为高脲酶活性的巴氏芽孢杆菌，细菌采用氨盐基与酵母提取物培养基进行培养。培养基溶液中各成分含量为：1 L 的培养液中蛋白胨 5 g，酵母 3 g，尿素 20 g，一水合硫酸锰溶液(浓度为 10 mg/L) 1 ml，将所有溶液混合后统一在 120℃ 下灭菌 30 分钟，恢复至常温条件下放入无菌接种台进行接种，随后在 30℃ 的恒温条件下，放置在转速为 180 r/min 的振荡器上进行振荡约 24 小时，培养完成后测得 OD<sub>600</sub> 约为 1.3。

#### 3.2. 实验装置

本实验装置采用自制有机玻璃管，管内壁 50 mm，壁厚 2 mm，高 150 mm，底部附螺纹底盖进行封闭。因试样特殊，且制成后的砂土柱形态完好，脱模简便。使用蠕动泵进行灌浆。

#### 3.3. 制样步骤

- ① 在管壁上涂抹一层凡士林，作用为脱模润滑；
- ② 在底部的管口插入橡胶管用于排水；
- ③ 在容器底盖的螺纹上缠绕防水胶带，拧上盖子；
- ④ 在容器底部壁上缠绕防水胶带防止溶液侧漏；
- ⑤ 在容器内部底塞入纱布阻挡砂土流失；
- ⑥ 在管中放置带有高 11 cm 黑线标记的纸筒；
- ⑦ 放入砂土，压实直径 5 cm，高度 11 cm，密度 1.39~1.41 g/cm<sup>3</sup>。

#### 3.4. 实验方法

分别研究颗粒大小和营养液浓度对微生物灌浆技术效果的影响。

为了研究不同粒径对微生物灌浆加固效果的影响，将钙质砂按表 1 配成细砂、中砂、粗砂三种级配。每种级配设 3 个试样在相同条件下进行微生物加固，测得的各项实验数据取组内平均值再行比较以减小实验的误差，降低数据的离散性。

Table 1. Particle grading table

表 1. 颗粒级配表

编号	0~0.25 mm	0.25~0.5 mm	0.5~1 mm
细	33.3%	66.7%	0
中	29.53%	43.48%	26.09%
粗	0	30%	70%

#### 3.5. 加固步骤

- ① 取已制备完成的不同颗粒级配钙质砂试样，进行统一灌浆；
- ② 取 80 mL 菌液倒入烧杯中，使用蠕动泵以 5 mL/min 的速度将菌液灌入试样顶部，使菌液在试样内自上而下缓慢渗流，静置 24 小时；
- ③ 取浓度均为 1 mol/L 的营养溶液 80 mL 倒入烧杯中倒入烧杯中，使用蠕动泵以 5 mL/min 的速度

将营养液灌入试样顶部，使菌液在试样内自上而下缓慢渗流，同时采用变水头法测量土样的渗透系数，静置 24 小时；

④ 重复上述步骤 4 轮或试样渗透系数几乎降为 0 后停止试验，将试样从容器中缓慢推出，烘干后称重，并进行无侧限抗压强度测试。

为了研究不同营养液浓度对微生物灌浆加固效果的影响，配置两组不同浓度的营养液，分别为 1.5 mol/L 和 2.0 mol/L，砂土选取前述中砂。

## 4. 实验结果与分析

### 4.1. 加固效果

粒径为粗的试样表面比较粗糙，如图 3(b)所示，表面沙粒也有轻微的掉落的现象。可以看出：两个试样表观致密整体加固均匀，颗粒间孔隙被大量填充。其中粒径为细的表面较为光滑，整体性非常好，如图 3(a)所示。

以上现象分析，微生物加固反应生成的碳酸钙会包裹黏结钙质砂颗粒，堵塞颗粒间孔隙。造成钙质砂试样渗透系数降低。上图为部分组试样的表观特征照片。



Figure 3. (a) fine sand sample; (b) coarse sand sample

图 3. (a) 细砂土试样；(b) 粗砂土试样

### 4.2. 渗透性变化

通过前四轮灌浆数据计算及表 2 分析，可见通过微生物灌浆后同一颗粒级配的砂土柱渗透系数逐渐变小，总体趋势均有所下降，如图 4 所示。但效果有一定的差距，细砂渗透系数为开始的 43%，而中砂渗透系数为开始时的 25%，粗砂为开始时的 32%。

Table 2. Permeability changes with different particle sizes

表 2. 不同颗粒大小的渗透系数

编号	灌浆一	灌浆二	灌浆三	灌浆四	灌浆四
	渗透系数(cm/s)	渗透系数(cm/s)	渗透系数(cm/s)	渗透系数(cm/s)	渗透系数 标准差
细	$3.78 \times 10^{-3}$	$2.88 \times 10^{-3}$	$2.55 \times 10^{-3}$	$2.53 \times 10^{-3}$	$2.99 \times 10^{-4}$
中	$1.41 \times 10^{-2}$	$8.65 \times 10^{-3}$	$7.13 \times 10^{-3}$	$6.07 \times 10^{-3}$	$1.48 \times 10^{-3}$
粗	$3.21 \times 10^{-2}$	$1.58 \times 10^{-2}$	$1.14 \times 10^{-2}$	$1.01 \times 10^{-2}$	$2.94 \times 10^{-3}$

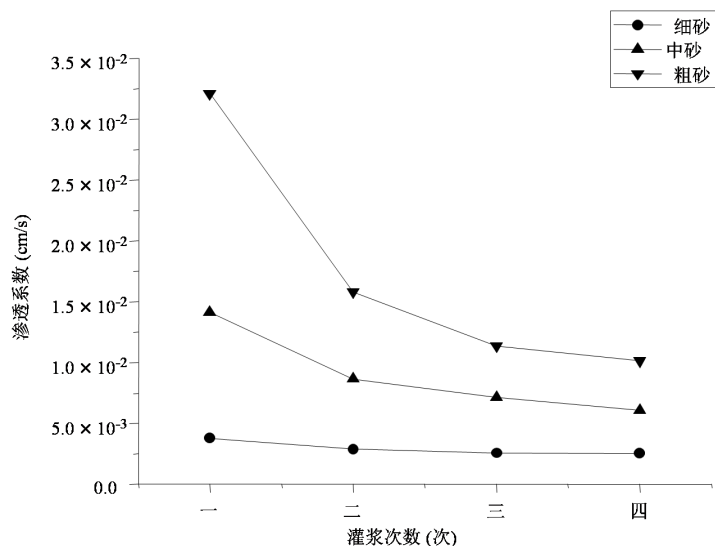


Figure 4. Permeability changes with different particle sizes

图 4. 不同颗粒大小渗透性变化

根据以上现象分析,粗砂试样由于砂土颗粒之间空隙较大,仅靠碳酸钙等胶凝物质无法较好加固且无法有效吸附大量细菌,微生物代谢作用不充分,未形成足够的连结物质,渗透系数降低较弱;细砂试样初始渗透系数良好,但其内部孔隙更容易被微生物加固生成的碳酸钙堵塞,阻断反应进行,加固效果不佳;颗粒级配适中的中砂既能使颗粒对细菌的吸附性足够大,又能保证底物溶液在试样中的顺畅流通,从而使得微生物代谢作用充分,形成足够的连接物质填充砂土颗粒的空隙,渗透系数降低最明显。

可以从表 3 及图 5 中看出,1.5 mol/L 的试样渗透性降低最为明显,仅为开始的 25%,2 mol/L 下降幅度起初最高,后期略微低于 1.5 mol/L 组,营养液浓度 1.0 mol/L 的试样,渗透系数相对最低。

根据以上现象分析,营养液浓度 1.0 mol/L 由于加固反应速率较慢、产物偏少,因此渗透系数降低不明显;营养液浓度 2.0 mol/L 的试样反应速率太快,混合溶液大部分在试样上部与菌液发生剧烈反应,生成大量碳酸钙堵塞了孔隙,致使溶液难以渗流到试样下部,从而导致整体渗透系数不够理想;适中的营养液浓度 1.5 mol/L 既能够保证加固反应的效率,又不会因为过早堵塞试样上部而阻碍试样下部的加固,可以使得微生物代谢作用充分,生成足够的连接物质填充砂土颗粒。

### 4.3. 无侧限抗压强度变化

将试样从模具中脱出,用砂纸打磨,将上下表面打磨光滑后放入 Instron 3367 电子材料试验机进行无侧限抗压实验。试验采用应变控制式加载,加载速率为 12.7 mm/min。测量结果如下表 4 所示。

Table 3. Permeability changes with different concentrations

表 3. 不同营养液浓度的渗透系数

编号	灌浆一	灌浆二	灌浆三	灌浆四	灌浆四
	渗透系数(cm/s)	渗透系数(cm/s)	渗透系数(cm/s)	渗透系数(cm/s)	渗透系数 标准差
1.0 mol/L	1.41 × 10 <sup>-2</sup>	8.65 × 10 <sup>-3</sup>	7.13 × 10 <sup>-3</sup>	6.07 × 10 <sup>-3</sup>	1.48 × 10 <sup>-3</sup>
1.5 mol/L	1.41 × 10 <sup>-2</sup>	8.13 × 10 <sup>-3</sup>	3.92 × 10 <sup>-3</sup>	3.47 × 10 <sup>-3</sup>	2.33 × 10 <sup>-4</sup>
2.0 mol/L	1.38 × 10 <sup>-2</sup>	7.75 × 10 <sup>-3</sup>	4.45 × 10 <sup>-3</sup>	4.24 × 10 <sup>-3</sup>	5.60 × 10 <sup>-4</sup>

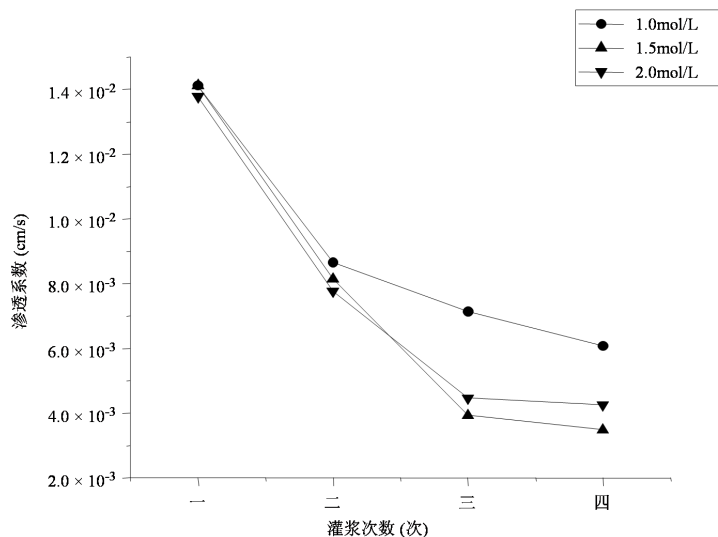


Figure 5. Permeability changes with different concentrations  
图 5. 不同浓度渗透性变化

Table 4. Unconfined compressive strength of different groups  
表 4. 不同组别的无侧限抗压强度

编号	无侧限抗压压力峰值(kN)	峰值位移(cm)	无侧限抗压平均强度(MPa)	无侧限抗压强度标准差
细	0.57	1.6	0.288	0.11879
中	0.9	1.6	0.459	0.13341
粗	1.38	1.4	0.701	0.02881
1.5 mol/L	1.73	2.6	0.881	0.02950

微生物加固砂土柱的强度来自于反应生成的碳酸钙胶结材料在颗粒间的作用, 各组试样的颗粒级配状态和无侧限抗压强度如表格所示。当营养液浓度在 1 mol/L 时, 砂土柱的强度随砂土颗粒增大而增大。当砂土的颗粒控制在中砂时, 砂土柱强度随营养液浓度的增大而增大。

根据以上现象分析, 微生物加固的砂土柱对其力学性能的改善有很大帮助, 且砂土颗粒级配直接影响着加固后砂土的力学性能, 越粗颗粒的砂土表面积更大, 其周围覆盖的碳酸钙更容易与沙土颗粒结合形成整体, 对力学性能提供的帮助更大; 同时, 提高营养液浓度能在一定范围内加快微生物的反应速率, 提供了更多钙离子, 有利于微生物反应形成碳酸钙结晶, 从而提高固化效果。

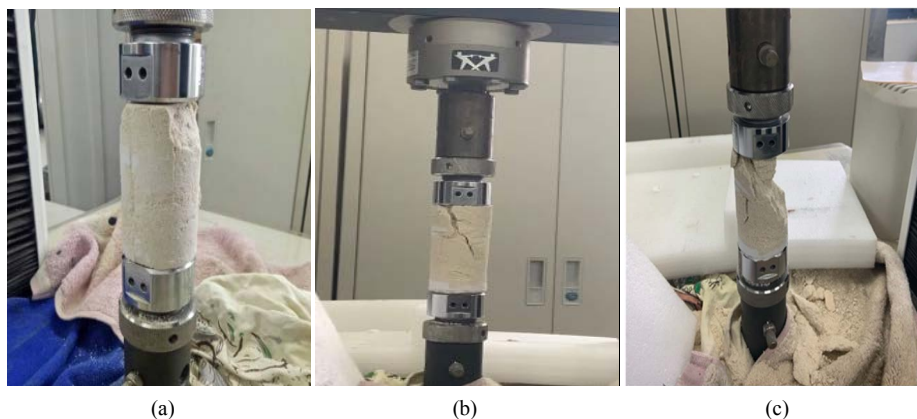
试样破坏形态分析, 如图 6 所示, 各个试样的破坏都呈现出脆性破坏的特征。大部分是先从上端或下端开始出现裂缝并延伸, 最后在上端或下端出现不同程度的脱落从而导致构件破坏。小部分是中部出现裂缝并延伸, 还未脱落先出现中部先侧向突出从而导致构件破坏。

根据以上现象分析, 加固砂土柱均由于柱内抗剪能力不足而被破坏, 表明微生物在沙土内加固不够均匀, 存在许多内部缺陷, 在破坏时容易连在一起形成薄弱面, 导致砂土柱在薄弱面受剪破坏。

## 5. 微观结构分析

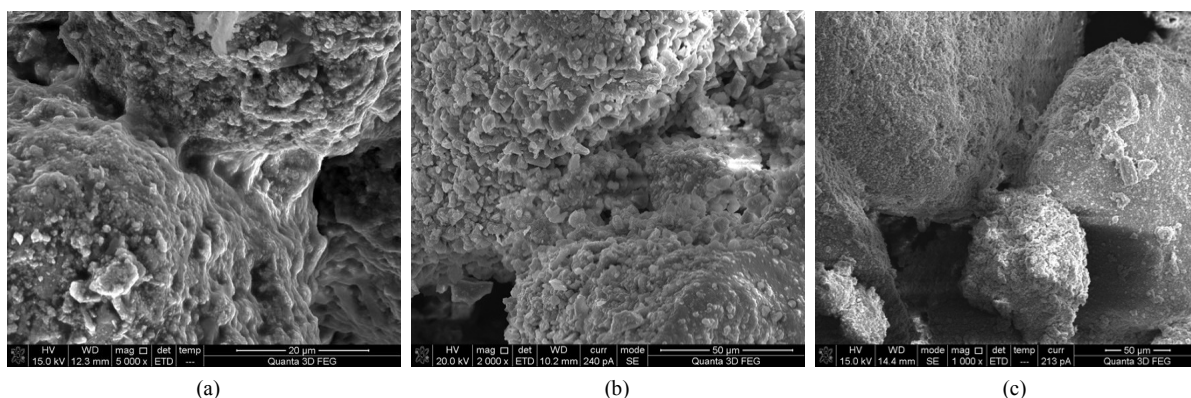
可以从图 7(a)是浓度为 1 mol/L 的试样看出, 砂土试样的颗粒之间形成了类似于凝胶的物质, 将相邻两个砂土颗粒胶结在一起, 通过这种方式提高整个砂土试样的整体性, 从而提高砂土试样的强度; 图 7(b)是 1.5 mol/L 的试样, 可以看出砂土除了类似于凝胶的物质以外, 还有许多细小的白色颗粒, 颗粒大小远

小于单个砂土颗粒大小，这些颗粒分布于间隙之间，很好地填充了砂土颗粒间的间隙，增强了砂土试样的密实性，从而提高了砂土试样的抗渗透性和强度。图 7(c)是 2 mol/L 的试样，可以看出，没有明显的凝胶类物质，白色颗粒物质非常多，多覆盖于颗粒表面。



**Figure 6.** (a) Pressure damage of sand sample; (b) Pressure damage of sand sample; (c) Pressure damage of sand sample

**图 6.** (a) 砂土受压破坏图; (b) 砂土受压破坏图; (c) 砂土受压破坏图



**Figure 7.** (a) The micro structure of sand sample; (b) The micro structure of sand sample; (c) The micro structure of sand sample

**图 7.** (a) 砂土样微观结构; (b) 砂土样微观结构; (c) 砂土样微观结构

从上面的微观结构，可以看出低浓度(1 mol/L)的试样有凝胶类物质出现，也有少量小颗粒，适中的浓度(1.5 mol/L)试样中颗粒物质增多，高浓度(2 mol/L)的几乎全部为颗粒，整体颗粒胶结程度没有适中浓度的效果好，与之前关于浓度影响的实验结果相符合，高浓度营养液的情况下，加固效果有一定的下降。

## 6. 结论

从实验中我们看出通过 MICP 技术，在砂土中灌注定量营养液和菌液，可以使砂土颗粒间产生碳酸钙等胶结物质，有效改善砂土的渗透性和力学性能，我们在实验中也得到以下的结论：

① 渗透性方面中砂效果最好，既使颗粒对细菌的吸附性足够大，又保证底物溶液流通，微生物代谢作用充分，形成足够的连接物质填充砂土颗粒的空隙；粗砂沙土颗粒间空隙较大，无法有效吸附大量细菌，微生物代谢作用不充分，未形成足够的连结物质；细砂容易被加固生成的碳酸钙堵塞，阻断反应进行，加固效果不佳。



② 适中营养液浓度(1.5 mol/L)既保证加固反应的效率,也使溶液在砂土中流通,生成足够的连接物质填充砂土颗粒,加固效果较好。浓度偏低的式样反应速率较慢,生成的产物偏少;偏高的式样会造成大量碳酸钙的堵塞,溶液难以渗流到试样下部,二者均不利于渗透性能的改良。

砂土柱强度方面,颗粒大小的影响在一定范围内与砂土力学性能呈正相关,越粗颗粒的砂土表面积更大,其周围覆盖的碳酸钙更容易与沙土颗粒结合形成整体,对力学性能提供的帮助更大。适中营养液浓度也对砂土柱强度起到促进作用,提供了更多钙离子,提高反应速率,有利于微生物反应形成碳酸钙结晶,从而提高固化效果;但微生物在沙土内加固不够均匀,存在许多内部缺漏,在破坏时容易连在一起形成薄弱面,导致砂土柱在薄弱面受剪破坏。

MICP 灌浆加固效果受众多因素影响,除了营养液浓度、和砂土颗粒大小,pH、细菌活性、温度等因素也对灌浆效果有较大影响。同时不同实际工程条件下,微生物灌浆加固砂土的改进方法,仍是目前困扰相关研究小组的一个难题。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。在实际加固方面,根据实际条件,应注重选择适合的浓度进行加固,以达到较好的加固效果。

## 参考文献

- [1] 钱春香,王安辉,王欣. 微生物灌浆加固土体研究进展[J]. 岩土力学, 2015, 36(6): 1537-1548.
- [2] Whiffin, V.S. (2004) Microbial CaCO<sub>3</sub> Precipitation for the Production of Biocement. Ph.D. Thesis, Murdoch University, Perth.
- [3] Mitchell, J.K. and Santamarina, J.C. (2005) Biological Considerations in Geotechnical Engineering. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **131**, 1222-1233. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2005\)131:10\(1222\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:10(1222))
- [4] Harkes, M.P., Van Paassen, L.A. and Whiffin, V.S. (2006) Immobilisation of Bacteria to a Geological Material. US Patent No. 20090215144.
- [5] Harkes, M.P., Van Paassen, L.A., Booster, J.L., et al. (2010) Fixation and Distribution of Bacterial Activity in Sand to Induce Carbonate Precipitation for Ground Reinforcement. *Ecological Engineering*, **36**, 112-117. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.01.004>
- [6] 李娜,符平,黄立维,等. 基于生化原理的砂土加固技术研究进展[J]. 水利与建筑工程学报, 2016, 14(1): 1-5+77.
- [7] 梁仕华,牛九格,戴君,等. 循环灌浆次数对微生物固化砂土效果的影响[J]. 工业建筑, 2018, 48(7): 22-26.
- [8] 贾强,赵程程,孙增斌. 微生物沉积碳酸钙修复混凝土裂缝抗渗性研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2017, 25(1): 141-148.
- [9] Muynck, D. W., Belie, D.N. and Verstraete, W. (2010) Microbial Carbonate Precipitation in Construction Materials: A Review. *Ecological Engineering*, **36**, 118-136. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.02.006>
- [10] 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.
- [11] Qian, C.X., Pan, Q.F. and Wang, R.X. (2010) Cementation of Sand Grains Based on Carbonate Precipitation Induced by Microorganism. *Science China Technological Sciences*, **53**, 2198-2206. <https://doi.org/10.1007/s11431-009-3189-z>