

微生物注浆加固粉土模型试验研究

王睿宇¹, 王文莉¹, 孙怡源¹, 张中行¹, 薛铠佳¹, 王春容²

¹华北水利水电大学地球科学与工程学院, 河南 郑州

²南宁师范大学师园学院, 广西 南宁

收稿日期: 2024年11月26日; 录用日期: 2024年12月22日; 发布日期: 2024年12月30日

摘要

为探索微生物注浆技术的大规模应用, 文章进行了基于微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)技术的粉土固化大尺寸模型试验。试验以黄河中下游的典型粉土为加固对象, 通过蠕动泵以低压将微生物菌液和营养盐注入粉土中。研究分析了在不同注浆量条件下, 粉土表层的扩散半径、注浆管道周围的凸起高度及其半径之间的关系, 并观察了粉土加固后沿注浆管pH值的变化; 通过直剪试验和静三轴固结不排水试验, 分析了加固粉土的强度和变形特性; 同时, 借助盐酸溶解试验阐述了碳酸钙生成与强度变化之间的关系。试验结果表明, 微生物扩散效果并不会随着注浆量的增加而持续提升。此外, 经过MICP处理后的土体pH值略有上升, 这表明碳酸盐的有效沉淀。随着注浆量的增加, 土样中的碳酸钙沉淀量增长, 进一步促进了内摩擦角和粘聚力的提高, 增强了土样的抗剪强度。同时, 无侧限抗压强度也因碳酸钙生成量的增加而显著提升。当注浆量达到3200 ml时, 处理后的土体无侧限强度相比未进行MICP处理的土体提升了86.8%。在低围压(100 kPa)条件下, 素土表现出应变软化特性, 而在高围压(200 kPa和300 kPa)条件下则表现为应变硬化。在相同围压条件下, 随着注浆量的增加, 加固土在弹性阶段的强度提升速度更快, 峰值强度显著增强, 同时峰值点的轴向应变也显著增大。本研究成果可为生物注浆加固粉土的应用提供一定的参考价值。

关键词

微生物注浆, 大尺寸模型, 无侧限

Experimental Study on Silt Model Reinforced by Microbial Grouting

Ruiyu Wang¹, Wenli Wan¹, Yiyuan Sun¹, Zhonghang Zhang¹, Kaijia Xue¹, Chunrong Wang²

¹College of Geosciences and Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou Henan

²Shiyuan College of Nanning Normal University, Nanning Guangxi

Received: Nov. 26th, 2024; accepted: Dec. 22nd, 2024; published: Dec. 30th, 2024

Abstract

In order to explore the large-scale application of microbial grouting technology, this paper conducted

文章引用: 王睿宇, 王文莉, 孙怡源, 张中行, 薛铠佳, 王春容. 微生物注浆加固粉土模型试验研究[J]. 土木工程, 2024, 13(12): 2435-2447. DOI: 10.12677/hjce.2024.1312267

a large-scale model test of silt solidification based on Microbially Induced Carbonate Precipitation (MICP) technology. In the experiment, the typical silt in the middle and lower reaches of the Yellow River was used as the reinforcement object, and the microbial liquid and nutrients were injected into the silt at low pressure through the peristaltic pump. The relationship between the diffusion radius of the silt surface, the height of the bulge around the grouting pipe, and its radius under different grouting amounts was studied and analyzed, and the change of pH value along the grouting pipe after silt reinforcement was observed. The strength and deformation characteristics of the reinforced silt were analyzed using a direct shear test and a static triaxial consolidated undrained test. At the same time, the relationship between calcium carbonate formation and strength change was described by the hydrochloric acid dissolution test. The test results show that the microbial diffusion effect will not continue to increase with the increase of grouting amount. In addition, the pH value of the soil after MICP treatment increased slightly, indicating the effective precipitation of carbonate. With the increase of grouting amount, the amount of calcium carbonate precipitation in soil samples increases, which further promotes the improvement of internal friction angle and cohesion and enhances the shear strength of soil samples. At the same time, the unconfined compressive strength is also significantly improved due to the increase in calcium carbonate production. When the grouting amount reaches 3200 ml, the unconfined strength of the treated soil is 86.8 % higher than that of the soil without MICP treatment. Under low confining pressure (100 kPa), the plain soil exhibits strain-softening characteristics, while it exhibits strain-hardening under high confining pressure (200 kPa and 300 kPa). Under the same confining pressure, with the increase of grouting amount, the strength of reinforced soil increases faster in the elastic stage, the peak strength increases significantly, and the axial strain at the peak point also increases significantly. The research results can provide some reference value for the application of biological grouting to reinforce silt.

Keywords

Microbial Grouting, Large Size Model, No Lateral Limit

Copyright © 2024 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

黄河作为中国的母亲河,流域涵盖了众多重要的经济与农业区域。特别是黄河中下游地区,不仅是农业生产的核心区域,同时也是社会经济发展的重要支撑。然而,该地区土壤主要由粉土构成,粉土在水分和负载条件下表现出较高的变形性和脆弱性,容易受到水土流失、滑坡和液化等地质灾害的影响。这些问题给当地的经济、基础设施建设以及生态环境造成了严重威胁。为了有效应对上述挑战,粉土加固显得尤为必要。通过加固措施,可以显著提高土壤的承载能力,降低水土流失的风险,减少自然灾害引发的损失。这不仅为基础设施的安全运行提供了保障,还有助于改善农业灌溉条件,促进植被生长与生态恢复。因此,针对黄河中下游粉土的加固工作,不仅是维护区域安全和可持续发展的重要举措,更是应对气候变化与生态保护的必要措施。

微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP),这一微生物矿化现象最早由 Boquet [1]发现,其加固机理是微生物利用自身生产出的脲酶将尿素水解生成碳酸根和铵根离子,并在碱性环境下结合生成性质稳定的碳酸钙,进而以胶结土颗粒达到加固土体的目的[2]。近年来国内外学者对 MICP 的研究如火如荼,在土体物理指标方面: Whiffin [3]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;岳建伟[4]采用改良 MICP 技术加固粉土,结果表明被加固后的粉土粘聚力提高了 50%、内摩擦角提高了约 17%;彭丽云[5]采用 MICP 加固粉土使其渗透系数降低 96%;赵志峰[6]、林文彬[7]使用 MICP 分别对

粉土和沙漠风积砂进行处理, 结果表明都存在最佳注浆胶结液浓度, 且各项物理力学指标均为先上升后下降。在微生物注浆影响因素方面: 韦张林[8]进行了不同间隔时间和注浆轮数的多组对比试验, 发现粉土强度随注浆轮数的增加而提高, 注浆间隔时间为 12 h 效果最好。王倩[9]研究了不同注浆方向对 MICP 加固砂土的影响, 结果表明胶结液与菌液注浆方向相同时效果最好。彭劼[10]发现随温度的升高碳酸钙的生成量会增加, 其中在 10℃~25℃内, MICP 都能有效加固土体。温智力等[11]通过相同渗径、不同截面积下微生物注浆加固砂土的模型槽试验, 发现尺寸效应影响了加固砂土中的碳酸钙的生成和分布情况。

尽管 MICP 被证实在土体加固方面有着积极作用, 但现有研究大多是在室内小尺寸模型的基础上获得, 并不能有效指导工程实践。基于此问题, Van Paassen 等[12][13]利用 MICP 开展了大尺寸(100 m³)的加固砂土模型试验, 结果表明, 细菌在土体内可以传输 5 m 以上的距离, 且无侧限抗压强度最高达 12.6 MPa; Wu 等[14]采用 MICP 加固砂石混合材料的大型室内模型试验, 使砂和花岗岩石块牢固胶结在一起, 并且降低了砂石混合材料的渗透性。

本文选择黄河中下游的粉土作为注浆加固的研究对象, 通过室内大尺寸模型箱进行样品制备, 并增加注浆轮数, 以探讨注浆量与粉土表层扩散半径、注浆管道周围凸起高度及凸起半径之间的关系。同时, 分析沿注浆管的 pH 值变化, 并对加固区域的粉土进行无侧限抗压强度、抗剪强度和静三轴固结不排水实验, 以深入研究加固后抗压强度、粘聚力、内摩擦角与碳酸钙产量之间的关系, 以及应力 - 应变曲线的特性。研究的目的是评估在大尺寸模型下进行两轮注浆对粉土的加固效果。

2. 试验材料与方法

2.1. 粉土

本试验选取黄河中下游典型粉土为微生物注浆加固对象。其中试验用土的基本物理指标如表 1 所示, 级配曲线见图 1。

Table 1. Basic physical indexes of test soil
表 1. 试验用土的基本物理指标

土样名称	孔隙比 e	含水率 W/%	液限 W _L /%	塑限 W _P /%	塑性指数 I _p	土粒比重 G _s	干密度 ρ _d
粉土	0.8	10	23.9	17.3	6.6	2.7	1.5

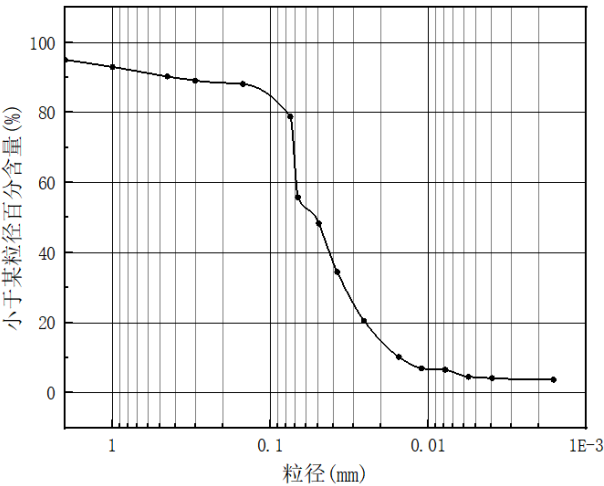


Figure 1. Soil gradation curve for testing
图 1. 试验用土级配曲线

2.2. 菌液

选用的菌种为巴氏生孢八叠球菌(Sporosarcina, 编号 1.3687), 购自中国商城北纳创联生物科技有限公司。培养基成分见表 2。使用文献[15]中的方法获得高脲酶菌液(脲酶活性为 20 U/ml), 液体培养基初始 pH 值调到 8, 为下一步微生物注浆做准备。

Table 2. Media composition
表 2. 培养基成分

培养基成分	牛肉膏	蛋白胨	尿素	NaOH	氯化镍
剂量(g/L)	3	1	20	1.48	0.02

2.3. 胶结液

采用 1.1 mol/L 的乙酸钙和尿素的混合溶液, 其中乙酸钙提供钙源, 尿素提供氮源。试验中注浆速度为 10 ml/min。

2.4. 模型装置

本研究使用的模型箱尺寸为 72 cm (长) × 51 cm (宽) × 53 cm (高)。为了顺利把多余的注浆液排出来, 在模型箱的底部均匀地设置直径为 0.2 cm 的孔。此外在模型箱的底部铺设滤纸并且增加 3 cm 厚的粗砂以防止粉土颗粒随着注浆液体流出。注浆管道采用直径为 3 cm、长度为 50 cm 的 PVC 管, 并在 PVC 管的四周均匀开设直径为 0.2 cm 的孔, 底部采用橡胶塞进行封堵。注浆液体均由每根 PVC 管的上端注入, 注浆液体将沿着 PVC 管深度方向注入并向管道周围喷射, 如图 2、图 3 所示。

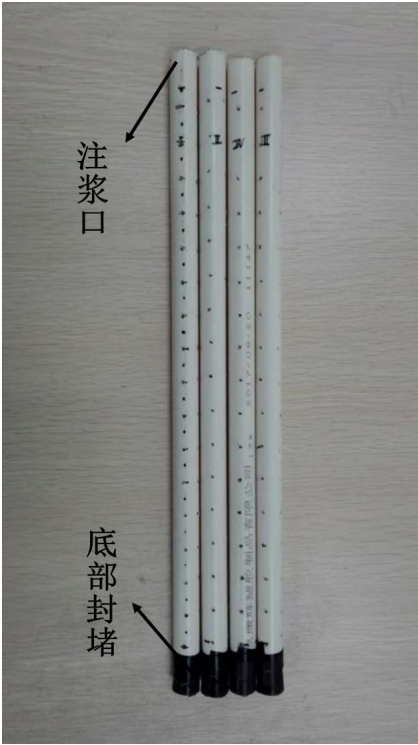


Figure 2. Grout PVC pipe
图 2. 注浆 PVC 管

3.2. 注浆方案

利用蠕动泵对菌液和营养盐分两步进行低压注浆。首先注入脲酶活性为 20 U/ml 的菌液。微生物菌液注入完后间隔 2 小时后，再注入浓度为 1.1 mol/L 的胶结液。本研究注浆轮数为两轮，两轮间隔时间为 24 小时，每轮的微生物菌液注浆速度为 6 ml/min，胶结液注浆速度为 10 ml/min。注浆量见表 3。需要注意的是每轮微生物菌液注入完成后，需要及时用蒸馏水清洗注浆用的乳胶管，防止第二步注入营养盐时菌液和营养盐在乳胶管内壁发生反应生成碳酸钙堵塞注浆管道。

Table 3. Grouting amount of different grouting pipes
表 3. 不同注浆管道的注浆量

注浆管	菌液(ml)	胶结液(ml)
1	600	500
2	800	1000
3	1000	1500
4	1200	2000

4. 试验结果与分析

4.1. 注浆管道周围粉土凸起高度与凸起半径分析

微生物的活性和数量会影响碳酸钙的沉淀速率，进而影响凸起的高度和半径。凸起高度是指在凸起部位距离注浆管底部的距离；凸起半径是指浆液在凸起部位向水平四周的扩散范围。通过注入不同量的注浆液研究微生物固化粉土的表面扩散范围(半径 R)来进一步评价大尺寸生物灌浆效果，如图 5 所示。扩散半径选择最大处进行测量。

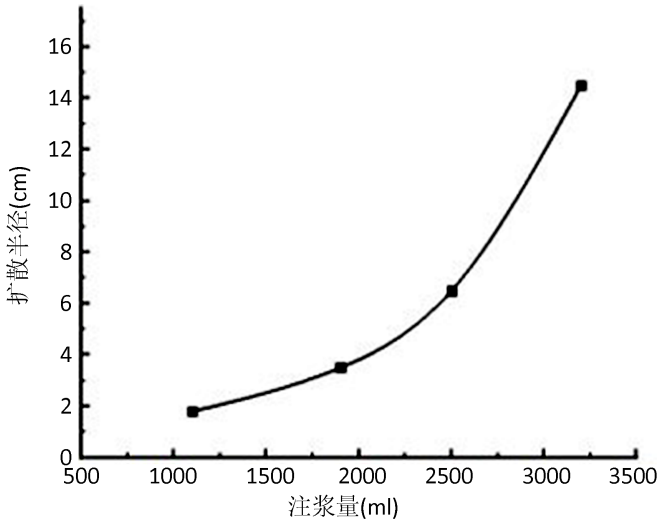


Figure 5. Relationship between grouting amount and diffusion radius
图 5. 注浆量与扩散半径的关系

从图 6 可以看出，1 号、2 号、3 号、4 号注浆管上表面固结半径分别为 1.8 cm、3.5 cm、6.5 cm、14.5 cm。随着注浆量的增加，粉土表面的扩散半径逐渐增大，在 3200 ML 处达到最大值 14.5 cm。注浆量在 2500~3200 ML 区间内表面扩散半径增幅最大。这是因为本试验注浆液是由注浆管道上端向下端注入，由

于注浆管底部封堵, 注浆液优先在管道下部生成碳酸钙, 随后浆液开始由下端向上端溢出, 最终在模型试样最上端并在注浆口进行扩散, 直到形成最大化的碳酸钙层面为止。



Figure 6. Diffusion radius of each grouting pipe surface

图 6. 各注浆管表面扩散半径

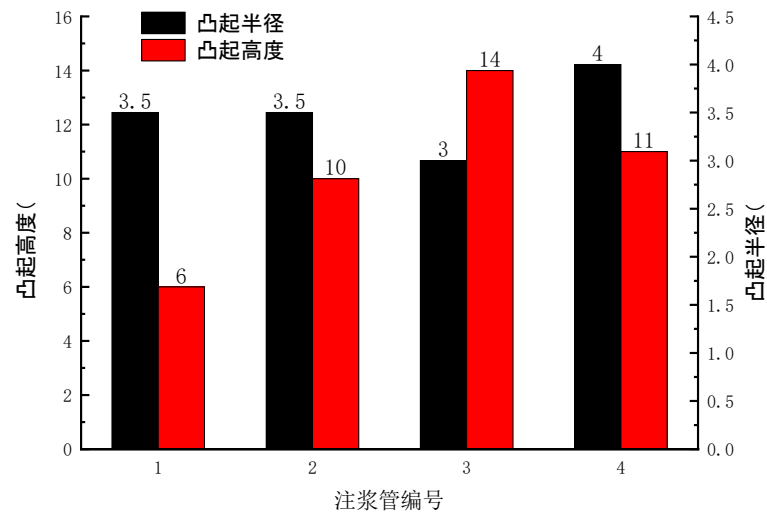


Figure 7. Height and radius of protrusion under different grouting amounts

图 7. 不同注浆量下的凸起高度和凸起半径

从图 7 中可以看出, 随着注浆量的增加, 凸起半径呈现出先减小后增大的规律, 在 2500 ML 时出现最小值 3 cm。而凸起高度随着注浆量的增加出现先增大后减小的趋势, 且在 2500 ML 达到峰值 14 cm。3 号管道的凸起位置在距底部 14 cm 处, 可能是因为浆液的注入, 生成的碳酸钙会堵塞管道孔, 导致浆液无法向下流动, 致使凸起高度变大; 而 4 号管道的凸起高度下降, 其原因可能是浆液在对底部粉土中扩散完成后, 开始向上回流, 但随着管道中胶结液增多, 胶结液的重力和蠕动泵的压力使凸起高度又重新下降; 回流的浆液在同一部位加固了两遍, 导致凸起半径又重新变大。

4.2. pH 值变化

土壤 pH 值变化是 MICP 过程的一个重要指标, 较高的 pH 值通常指示碳酸盐的有效沉淀, 这有助于评估处理效果和土体的强度变化。一般来说, 当土壤 pH 值较高时, 碳酸根离子更容易与尿素水解生成氢氧根离子反应生成沉淀, 从而达到加固土壤的效果。而土壤 pH 值较低时(酸性环境), 碳酸盐沉淀更容易以可溶的形式存在, 达不到固化土体的效果。

沿着注浆管从上到下依次选取部分土样进行 pH 值的测定。由图 8 可以看出经过 MICP 生物处理后的土体 pH 值整体高于土体 pH 值 7.71 (原状土 pH), 因为碳酸盐沉淀反应通常会消耗溶液中的酸性离子,

会导致周围环境 pH 值的上升,但是微生物矿化过程中生成的沉淀会消耗 OH⁻离子,所以又导致土体 pH 降低,使得土壤整体 pH 值变化幅度不大。

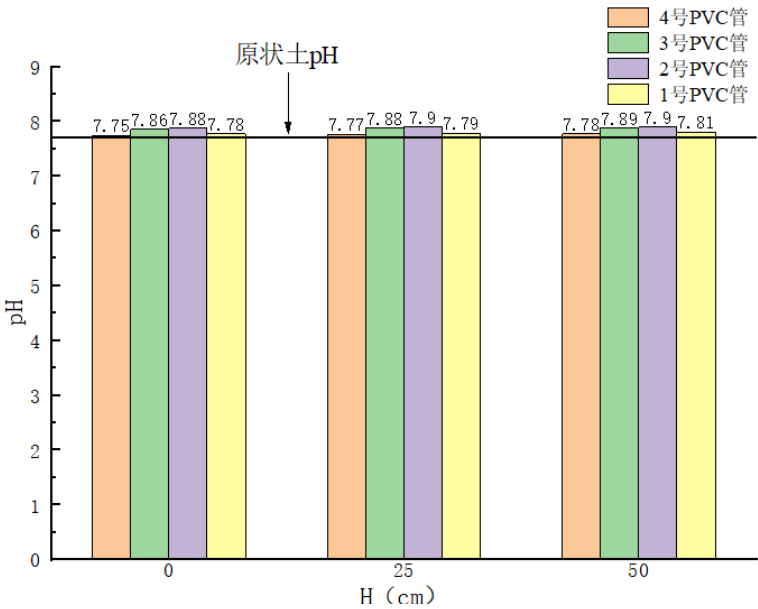


Figure 8. Changes of pH value around different grouting pipes
图 8 不同注浆管周围 pH 值变化

4.3. MICP 固化粉土的强度试验结果分析

4.3.1. 直剪试验分析

在本实验中,选择重塑快剪试验进行强度测试,如图 9 所示。因为在许多工程应用中,土体在施工过程中会经历扰动,重塑快剪试验能模拟这种情况,反映出土体在实际工况下的行为。该试验能在较短时间内获取结果,可以快速评估土体性质,特别是工程现场决策时。

粘聚力和内摩擦角是影响土体抗剪强度的决定因素。由表 4 可知,当初始孔隙比为 0.8 时,黄河粉土的抗剪强度参数粘聚力取值范围为 18.13~31.17 kPa,内摩擦角的取值范围为 16.12°~24.66°。由图 10 可知,随着注浆量的增加,土体中沉淀的碳酸钙量增多,土样的内摩擦角和粘聚力随之增加,这是因为 MICP 过程通过细菌的代谢作用,将溶解的碳酸钙沉淀在土颗粒之间,从而增加颗粒间的粘结力,提升了内摩擦角,使土体的抗剪强度得以增强。

Table 4. Direct shear test parameters
表 4. 直剪试验参数

管号	垂直压力(kPa)	抗剪强度(kPa)	C (kPa)	ϕ (°)
1	100	47.6	18.13	16.12
	200	74.8	18.13	16.12
	300	105.4	18.13	16.12
2	100	61.2	23.23	20.93
	200	100.3	23.23	20.93
	300	137.7	23.23	20.93

续表

3	100	69.7	25.50	23.44
	200	110.5	25.50	23.44
	300	156.4	25.50	23.44
4	100	76.5	31.17	24.66
	200	124.1	31.17	24.66
	300	168.3	31.17	24.66
素土	100	56.1	15.87	22.20
	200	98.6	15.87	22.20
	300	137.7	15.87	22.20

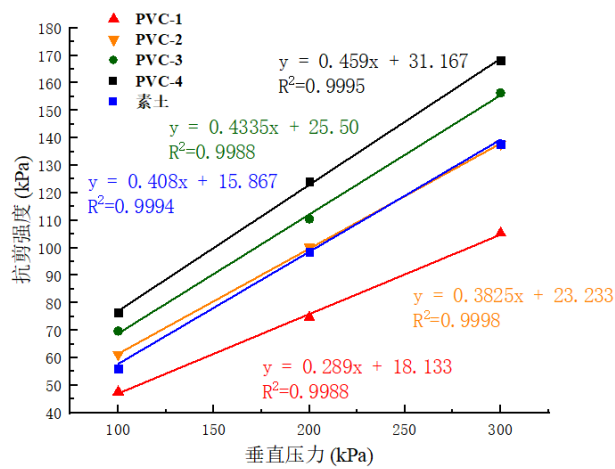


Figure 9. Shear strength of MICP treated specimens

图 9. MICP 处理试样的抗剪强度

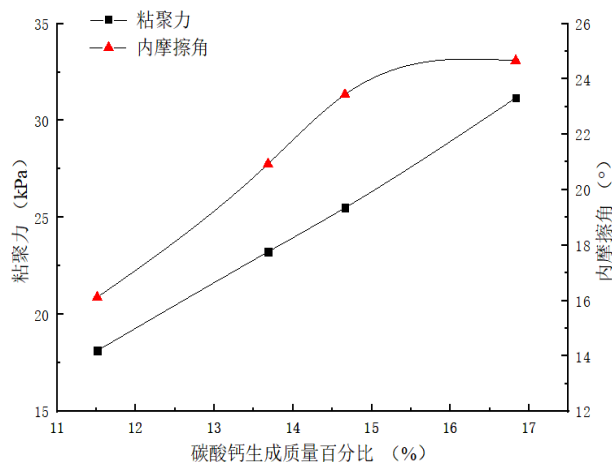


Figure 10. The relationship between the percentage of calcium carbonate formation and cohesion and internal friction angle

图 10. 碳酸钙生成质量百分比与粘聚力和内摩擦角的关系

4.3.2. 无侧限抗压试验结果分析

通过 MICP 微生物处理后土体无侧限强度如图 11 所示, 随着菌液和胶结液注入量的增加土体无侧限

强度呈增大的趋势，当 3 号管注入量为 2500 ml 时，无侧限强度增势减缓，可能是由于灌注胶结液时，未能及时冲刷管内菌液，使得生成的碳酸钙堵住 PVC 管侧壁，未能扩散至土体中或者扩散进土体中的液体不均匀分布。对比 4 号 PVC 管，注浆时间变长和注浆量增大，微生物与土体反应生成的碳酸钙沉淀增多，无侧限强度提高，4 号管周围土体比未进行 MICP 处理的土体无侧限强度提高 86.8%。

将进行无侧限抗压强度测试后压坏的土样收集，使用盐酸法浸泡法测量不同注浆量各个土样的碳酸钙含量，绘制无侧限抗压强度与碳酸钙含量关系曲线，如图 12 所示，土样无侧限抗压强度随碳酸钙生成质量增加而增加，说明碳酸钙沉淀量的增多有助于粉土试样强度提升。

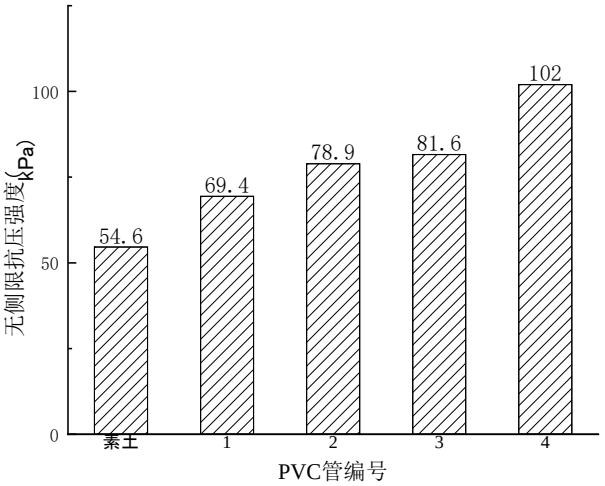


Figure 11. Unconfined compressive strength of soil after grouting
图 11. 注浆后土体无侧限抗压强度

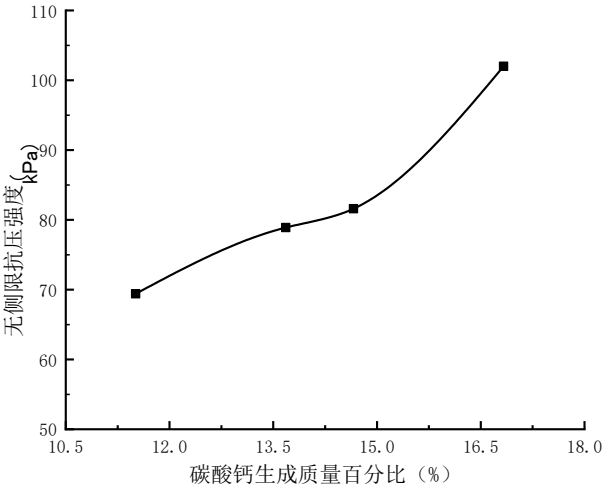


Figure 12. Relationship between unconfined compressive strength and mass percentage of calcium carbonate formation
图 12. 无侧限抗压强度与碳酸钙生成质量百分比关系曲线

4.3.3. 三轴压缩试验结果分析

黄泛区的粉土存在强度低、湿润时流动性强、易沉降的缺点，雨季来临时，土中水分迁移速度较快，排水条件好，这能达到固结的状态，而当施加上部瞬时荷载时类似不排水剪切状态，因此采用三轴压缩中的固结不排水剪切状态可以更好地模拟土壤在自然环境中所处的状态。

1) 素土的应力 - 应变关系

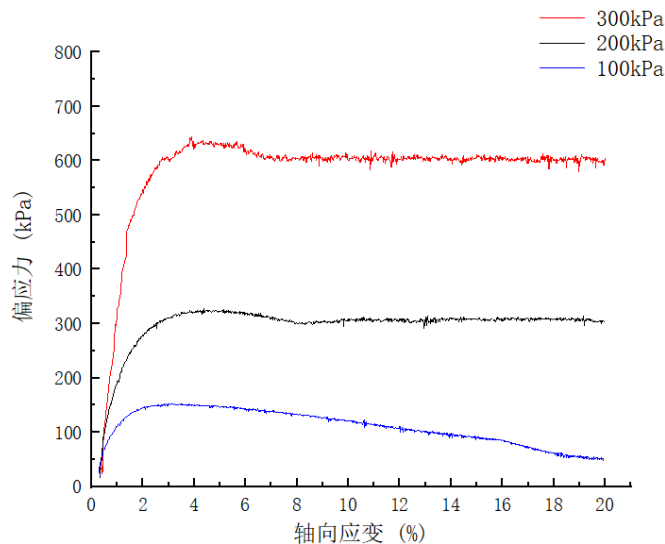


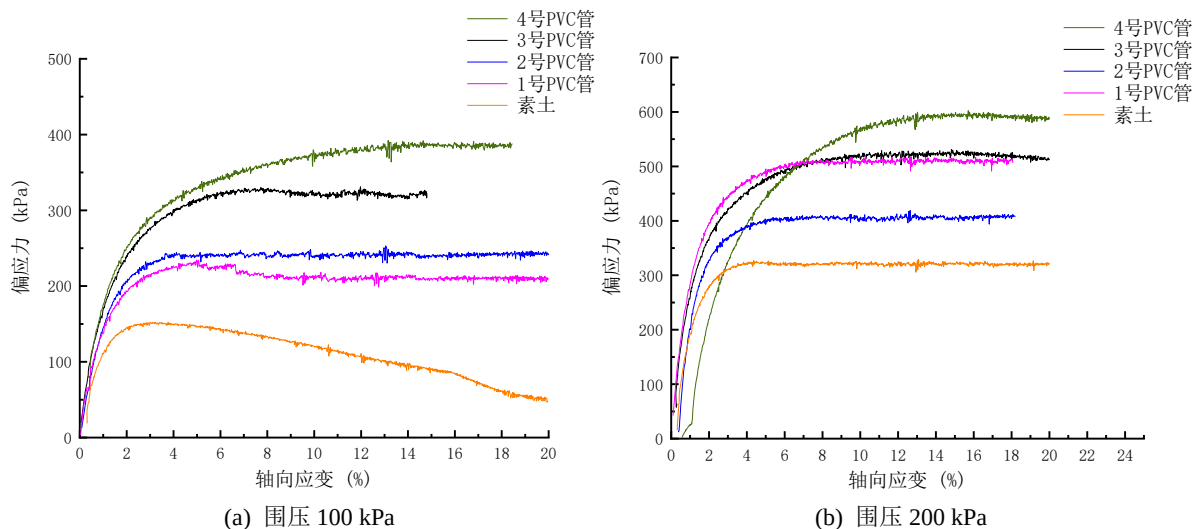
Figure 13. The stress-strain relationship curve of plain soil

图 13. 素土的应力 - 应变关系曲线

由图 13 可知, 在低围压下(100 kPa), 随着轴向应变的增加, 偏应力出现先增大后减小的变化; 在高围压下(200 kPa, 300 kPa)下, 随着轴向应变的增加, 偏应力出现先增大后逐渐稳定的变化。出现以上变化可能是因为, 低围压条件下, 土壤的固结程度和颗粒之间的接触力较弱, 随着轴向应变的增加, 土壤中可能出现了微裂纹或局部屈服, 导致偏应力增加, 达到某一点后, 随着塑性变形的持续, 土壤结构受到破坏, 偏应力开始减小; 高围压条件下, 土体被挤压得十分密实, 虽然土体产生了断裂面, 但是不容易抵抗高围压而继续扩展, 从而表现出应变硬化的特点。围压为 300 kPa 时的峰值强度是 100 kPa 时峰值的 6 倍。

2) 不同注浆量下, 围压与应力 - 应变的关系

由图 14 可知, 在围压一定的条件下, 随着轴向应变的增加, 加固土的偏应力初期呈现出线性增加的趋势, 随后增速逐渐减缓, 并最终趋于稳定。这一过程体现了应变硬化的特征。与素土相比, 加固土偏



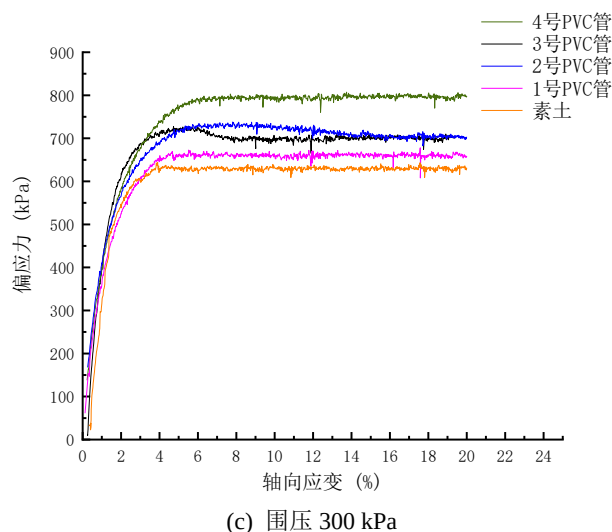


Figure 14. Relationship between confining pressure and stress-strain under different grouting amounts
图 14. 不同注浆量下围压与应力 - 应变的关系

应力增大阶段的速度更快、增幅更大。低围压下(100 kPa), 素土率先进入屈服阶段并达到峰值强度; 高围压下(200 kPa, 300 kPa), MICP 处理加固后的土与素土的增长斜率大致相同, 但加固土是在较大轴向应变时才达到峰值。如: 在 100 kPa 围压下, 素土的峰值点强度 152 kPa, 峰值点轴向应变为 2.99%, 而加固土的峰值强度分别是素土的 1.54 倍、1.63 倍、2.58 倍、2.17 倍; 加固土的峰值点轴向应变分别比素土增加了 66.2%、71.2%、95.9%、134%。在 300 kPa 围压下, 素土的峰值点强度 661 kPa, 峰值点轴向应变为 3.9%, 加固土的峰值强度分别是素土的 1.01 倍、1.09 倍、1.11 倍、1.21 倍。加固土的峰值点轴向应变分别比素土增加了 41.5%、54.9%、98.2%、100%。

与素土相比, 加固土的强度和应变差异主要源于 MICP(微生物诱导碳酸钙沉淀)加固反应的持续进行。通过微生物的代谢, 产生的碳酸钙颗粒填充了土体内部的一部分孔隙, 从而将松散的土颗粒粘结在一起, 使土体更加稳固。在低围压环境下, 围压的增加对已经较为密实的加固土影响有限, 导致强度的提升幅度较小。而在高围压条件下, 土体经过挤密后, 碳酸钙颗粒与土颗粒之间的接触度增加, 摩擦力增强, 从而使得强度的提升速度和幅度更为显著。

5. 结论

本文采用了微生物诱导碳酸钙(MICP)技术, 在室内小尺寸微生物固结粉土试验的基础上, 对较大尺寸粉土进行固化研究。得出以下几点微生物固化粉土的相关结论:

- 1) **灌浆量与固结效果:** 灌浆管道的灌浆量影响周围粉土的固结程度和形成的凸起, 同时注浆管底部周围的固结半径也随灌浆量变化存在一个优化的临界值。
- 2) **MICP 生物处理对 pH 值的影响:** 经过微生物矿化(MICP)处理后, 土体的整体 pH 值会高于原状土(7.71), 因矿化过程中的碳酸盐沉淀和酸性离子的消耗导致 pH 值变化相对较小。
- 3) **沉淀碳酸钙与抗剪强度的关系:** 注浆量增加时, 土体中的碳酸钙沉淀量增多, 从而提升内摩擦角和粘聚力, 增强土体抗剪强度。
- 4) **无侧限抗压强度的提升:** 随着碳酸钙生成量的增加, 粉土试样的无侧限抗压强度显著提升, 例如, 3200 ml 注浆处理的土体强度比未处理的提高 86.8%。
- 5) **围压对土体性质的影响:** 在低围压下(100 kPa), 素土表现出应变软化特性; 而在高围压下(200 kPa)

和 300 kPa), 则表现为应变硬化。随着注浆量增加, 在相同围压下, 土体的弹性阶段强度和峰值强度都显著提升, 轴向应变也显著增大。

参考文献

- [1] Boquet, E., Boronat, A. and Ramos-Cormenzana, A. (1973) Production of Calcite (Calcium Carbonate) Crystals by Soil Bacteria Is a General Phenomenon. *Nature*, **246**, 527-529. <https://doi.org/10.1038/246527a0>
- [2] Yu, T., Souli, H., Péchaud, Y. and Fleureau, J. (2020) Optimizing Protocols for Microbial Induced Calcite Precipitation (MICP) for Soil Improvement—A Review. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, **26**, 2218-2233. <https://doi.org/10.1080/19648189.2020.1755370>
- [3] Whiffin, V.S. (2004) Microbial CaCO_3 Precipitation for the Production of Biocement. Murdoch University.
- [4] 岳建伟, 张宝玺, 赵丽敏, 等. 改良微生物诱导碳酸钙沉淀技术加固粉性土力学性能[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(18): 7702-7710.
- [5] 彭丽云, 陈星, 齐吉琳, 等. 微生物加固粉土的强度特性及加固机理研究[J/OL]. 材料导报, 2024, 38(13): 95-101. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1078.TB.20230628.1746.022.html>, 2023-10-29.
- [6] 韦张林, 赵志峰. 微生物注浆加固海相粉土的均匀性和强度研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2020, 53(10): 869-874.
- [7] 林文彬, 程晓辉, 由爽, 等. 微生物注浆加固沙漠风积砂试验研究[J]. 工程力学, 2023: 1-13.
- [8] 韦张林. 注浆参数及养护条件对微生物胶结粉土的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京林业大学, 2020.
- [9] 王倩, 许晓峰, 何蕃民, 等. 不同注浆方向对微生物固化砂土体力学性质的影响[C]//中冶建筑研究总院有限公司. 2021 年工业建筑学术交流会论文集(中册). 2021: 5.
- [10] 彭劫, 何想, 刘志明, 等. 低温条件下微生物诱导碳酸钙沉积加固土体的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(10): 1769-1774.
- [11] 温智力, 杨建贵, 马昌龙, 等. 微生物诱导碳酸钙加固砂土的尺寸效应[J]. 扬州大学学报(自然科学版), 2020, 23(2): 57-62.
- [12] van Paassen, L.A., Daza, C.M., Staal, M., Sorokin, D.Y., van der Zon, W. and van Loosdrecht, M.C.M. (2010) Potential Soil Reinforcement by Biological Denitrification. *Ecological Engineering*, **36**, 168-175. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.03.026>
- [13] van Paassen, L.A., Ghose, R., van der Linden, T.J.M., van der Star, W.R.L. and van Loosdrecht, M.C.M. (2010) Quantifying Biomediated Ground Improvement by Ureolysis: Large-Scale Biogrout Experiment. *Journal of Geotechnical and Environmental Engineering*, **136**, 1721-1728. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0000382](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0000382)
- [14] Wu, S., Li, B. and Chu, J. (2023) Large-Scale Model Tests of Biogrouting for Sand and Rock. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers—Ground Improvement*, **176**, 23-32. <https://doi.org/10.1680/jgrim.18.00074>
- [15] 肖志阳, 程留全, 葛飞, 等. 微生物加固黄河中下游典型粉土的影响因素分析[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2019, 40(3): 94-98.