

微生物诱导碳酸钙沉淀技术固化海相淤泥试验

柳嘉豪¹, 林文彬^{1,2}, 卓祖磊³, 吴杉颖¹, 高玉朋¹, 张佳源¹, 罗承浩⁴

(1. 福建省土木工程新技术与信息化重点实验室, 福建 福州 350118;

2. 福建理工大学 地球科学与工程研究所, 福建 福州 350118;

3. 中国地震局厦门海洋地震研究所, 福建 厦门 361013;

4. 福建永强岩土股份有限公司, 福建 龙岩 364000)

摘要: 探究了菌液浓度(OD_{600})、胶结液浓度和龄期等因素对微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)技术固化海相淤泥的物理力学性能的影响,并通过X射线衍射(XRD)和扫描电镜(SEM)试验,探究加固后试样微观形态特征及其固化机理。结果表明,MICP固化后,试样的无侧限抗压强度(UCS)、内摩擦角和黏聚力随着菌液浓度的增加而增加,而液塑限逐渐减小。在低菌液浓度条件下,MICP固化后淤泥试样的UCS、内摩擦角和黏聚力都随着胶结液浓度的增加而增加,而液塑限逐渐减小;在高菌液浓度条件下,随着胶结液浓度的增加,MICP固化后淤泥试样的UCS、内摩擦角和黏聚力先增加后减小,而液塑限先减小后增加。MICP固化淤泥的物理力学性能在7 d内随着龄期的增加而增强,7 d后基本不再增加。因此,当 OD_{600} 为4、胶结液浓度为2 mol/L时,淤泥固化效果最佳,7 d后试样UCS可达104.96 kPa,内摩擦角可达 27.2° ,黏聚力可达9.4 kPa,同时液塑限也有着一定程度的减小。微观试验结果显示,MICP产生的六面体形态的方解石将其周围的片状淤泥土颗粒黏结为团聚体,从而起到固化土体的作用。

关键词: 微生物诱导碳酸钙沉淀; 碳酸钙; 固化; 淤泥; 微观机理; 无侧限抗压强度

中图分类号: TU442

文献标志码: A

文章编号: 2097-3853(2025)01-0033-07

Experimental study on reinforcement of marine silt by microbial induced calcium carbonate precipitation technology

LIU Jiahao¹, LIN Wenbin^{1,2}, ZHUO Zulei³, WU Shanying¹, GAO Yupeng¹, ZHANG Jiayuan¹, LUO Chenghao⁴

(1. Fujian Provincial Key Laboratory of Advanced Technology and Informatization in Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;

2. Institute of Earth Sciences and Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;

3. Xiamen Institute of Marine Seismology, China Earthquake Administration, Xiamen 361013, China;

4. Fujian Yonking Construction Geotechnical Co., Ltd., Longyan 364000, China)

Abstract: In this study, the effects of bacterial liquid concentration (OD_{600}), cementing liquid concentration, age and other factors on the physical and mechanical properties of marine silt reinforced by microbial induced calcium carbonate precipitation (MICP) technology were investigated, and the micro-morphological characteristics and the reinforcement mechanism of the consolidated specimens were probed by X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM). Test results show that after MICP curing, the unconfined compressive strength (UCS), internal friction angle and cohesion of the specimens increased with the rising of the bacterial liquid concentration, while the liquid-plastic limit gradually decreased. Under the condition of low bacterial solution concentration, the UCS, internal friction angle and cohesion of the

收稿日期: 2024-05-09

基金项目: 福建省科技计划项目(2023Y3008); 大学生创新创业训练计划项目(S202410388061, S202410388066)

第一作者简介: 柳嘉豪(1999—), 男, 福建漳州人, 硕士研究生, 研究方向: 微生物岩土工程。

通信作者: 林文彬(1991—), 男, 福建南安人, 副教授, 博士, 研究方向: 微生物岩土工程。

reinforced specimens increased with the rising of cement concentration, while the liquid-plastic limit gradually decreased. However, at high bacterial solution concentrations, as cement concentration increased, the UCS, internal friction angle and cohesion of the reinforced specimens initially increased and then decreased, while the liquid-plastic limit firstly decreased and then increased. The physical and mechanical properties of the reinforced specimens enhanced with the increase of curing age within 7 days and then basically no more changes would occur. The optimal solidification effect of silt was achieved with an OD_{600} of 4 and a bonding fluid concentration of 2 mol/L, resulting in a UCS of 104.96 kPa, an internal friction angle of 27.2° , and a cohesion of 9.4 kPa after 7 days, along with a significant reduction in the liquid limit. The microscopic test results reveal that the hexahedral calcite produced by MICP process can bind the surrounding flaky silt particles into aggregates, thus helping to solidify the soil.

Keywords: microbial induced calcium carbonate precipitation; calcium carbonate; reinforcement; silt; micro-mechanism; unconfined compressive strength

我国每年在水利工程和水环境治理过程中会产生大量的淤泥。这些淤泥如果处理不当,将会占用宝贵的土地资源,造成二次污染。目前,工程中通常使用化学固化剂来处理淤泥质土^[1],但这种方法可能会对周围环境造成负面影响。因此,寻找一种新型、绿色的处理方法来固化淤泥迫在眉睫。微生物诱导碳酸钙沉积(microbial induced calcium carbonate precipitation, MICP)技术利用产脲酶微生物诱导尿素水解形成碳酸根离子,再结合胶结液中的钙离子形成碳酸钙沉淀,能够有效地改善土体的强度、刚度及渗透性等^[2-3]。

在过去的二十年里,微生物岩土技术已经从初期的概念验证阶段,成功迈进了多个相关领域的技术示范与实践阶段,实现了显著的进步与发展^[4]。现如今,已经有许多学者加入到了 MICP 固化砂土领域的研究^[5-6]。目前,大部分学者使用灌浆法加固砂土,探究不同条件下 MICP 固化砂土的性能差异以及固化机理^[7-8]。然而,微生物在细土中活动受限,导致 MICP 灌浆法加固细粒土的效果与砂土有显著差距。Dejong^[9]提出采用拌合的方法,将土粒、菌液与胶结液充分混合,固化后淤泥的抗压及抗剪强度均有所提高,被许多学者应用到 MICP 固化淤泥土的研究中^[10-12]。

已有的 MICP 固化淤泥的研究多针对液限以内的含水率,缺少对含水率大于液限的海相淤泥的探索。此外, MICP 固化淤泥的强度与固化砂土强度仍相差了至少一个数量级。因此,本文开展 MICP 固化含水率高于液限的海相淤泥的试验,探究在不同龄期、不同 OD_{600} 以及不同胶结液浓度条件下,固化后淤泥的抗压强度、抗剪强度、

液塑限等物理力学性能变化以及微观加固机理,旨在为 MICP 技术固化淤泥提供一定的数据,同时为今后的相关试验奠定基础。

1 材料和方法

1.1 微生物材料

所用巴氏芽孢杆菌菌株采购自美国菌种保藏中心,编号 ATCC 11859,其在扩大培养 24 h 后达到稳定期,酶活在 $2.2 \mu\text{mol} \cdot \text{min}^{-1}$ 左右。

1.2 淤泥土

淤泥取自福建某沿海地区淤泥层。在直剪实验中,内摩擦角标准值为 4.8° ,黏聚力标准值为 6.2 kPa;无侧限抗压强度标准值为 6.5 kPa,液限平均值为 40.20%,塑限平均值为 20.97%。使用密度计法对淤泥土进行颗粒分析^[13],得出所用淤泥粒径均小于 1 mm, $d_{50} = 0.007 \text{ mm}$ 。通过 X 射线衍射(XRD)分析试验,可知淤泥土以石英、白云母、伊利石与斜绿长石等矿物成分为主。

1.3 试样制备

将现场取到的淤泥在温度为 75°C 下烘干,之后使用破碎机对烘干后淤泥粉碎,再过 1 mm 细筛,取筛下土。淤泥含水率设置为 45%。含水率为水的质量与干淤泥土粉质量的比值。若加入的液体为菌液与胶结液,则将试样中 45% 含水率所需的水代替为等质量的菌液和胶结液,且菌液与胶结液的比例为 1:1。将称重好的淤泥土粉末放入搅拌碗中,使用砂浆搅拌机搅拌均匀;加入胶结液,搅拌至无大颗粒;加入菌液搅拌 2~3 min。

使用直径 50 mm、高 100 mm 的可拆卸圆柱模具制作圆柱试样,每个变量组合的试样制备 4

个。将装填完毕的试样在室内自然养护((20±3)℃,湿度高于40%)24 h后拆模,并继续相同条件下养护至设定时间,该试样将用于无侧限抗压强度和微观试验。

使用内径6.18 cm、高2 cm,塑料垫片边长0.8 cm的环刀制作试样,每个变量组合的试样制备6个。将装填完毕的试样在室内自然养护((20±5)℃,湿度高于35%)24 h后拆模,并继续养护至设定时间,该试样将用于直剪和微观试验,每组直剪试验需用4个环刀试样。

1.4 试验方案

MICP 固化淤泥试验分为两步:①龄期设置7 d;OD₆₀₀设置4组,由低浓度到高浓度分别是1、2、3、4;胶结液浓度(等比例的尿素和氯化钙)设置4组,分别是1、1.5、2、2.5 mol/L。②龄期设置1、3、7、14 d;OD₆₀₀取①中得到的试验组试样物理力学性能最优值;胶结液浓度同样设置4组,分别是1、1.5、2、2.5 mol/L。MICP 固化淤泥试验的测试内容包括 UCS、直剪、液塑限、XRD 和 SEM 试验。不同 OD₆₀₀的脲酶活性如表 1 所示。

表 1 不同 OD600 菌液的脲酶活性

Tab.1 Urease activities of bacterial solutions with different OD₆₀₀

OD ₆₀₀	1	2	3	4
脲酶活性/(μmol·min ⁻¹)	0.96	1.38	1.84	2.64

1.5 试验方法

1.5.1 无侧限抗压强度试验

无侧限抗压强度(UCS)试验用圆柱试样,仪器为 ETM 电子万能试验机。采用位移控制法,以 2 mm/min 的速率对试样加荷至破坏。

1.5.2 直剪试验

直剪试验所用为环刀试样,仪器为应变控制型直剪仪,试样剪切速率控制在 0.80 mm/min。

1.5.3 液塑限试验

待测土样风干或烘干后,将土过 0.5 mm 筛,并称取 200~300 g,分别放入 3 个盛土皿中,加入不同数量的纯水,使其分别呈现干、中湿、湿润 3 种状态,放入密封的保湿缸静置 24 h 使土体颗粒均匀湿润。土样制备好后,使用电脑土壤液塑限联合测定仪测定土体的液塑限。

1.5.4 微观试验

(1)扫描电子显微镜(SEM)分析试验

使用场发射扫描电镜研究 MICP 固化后淤泥的微观样貌与固化机理,场发射扫描电镜型号为 Nova NanoSEM 450。将 UCS 试验或直剪试验破坏后的试样敲碎成体积小于 10 mm³ 的试块,将其黏在导电胶上,喷金处理后放入仪器中抽至真空,最后在 15~20 kV 的电压下微观观察。

(2)X 射线衍射(XRD)分析试验

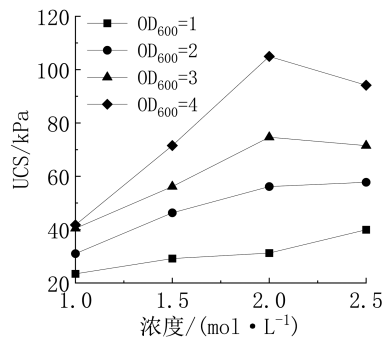
使用 X 射线衍射仪,对经过 MICP 固化后的试样进行 X 射线衍射分析,以获得固化后淤泥中生成矿物的成分。XRD 试验样品同样为 UCS 试验或直剪试验破坏后的试样,将部分破坏的试样使用研钵捣碎并过 0.01 mm 的细筛得到粉末,把过筛后的粉末均匀放置在 Cu 靶上,放入 X 射线衍射仪中,设置扫描速率为 6°/min,扫描角度为 5°~90°。最终得到的 XRD 原始谱图使用软件 Jade6.0 进行分析。

2 结果与分析

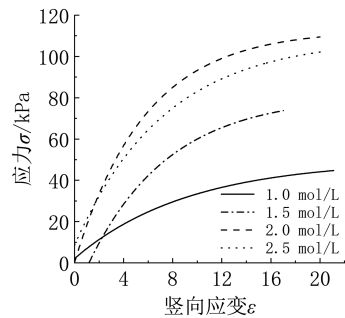
2.1 无侧限抗压强度

如图 1(a)所示,MICP 固化后淤泥土的 UCS 可达 23.44~104.96 kPa。在相同胶结液浓度下,随着菌液浓度的增大,MICP 固化淤泥的 UCS 随之增大。这是由于淤泥土颗粒较小且含水量较大,而菌液浓度的增大会使 MICP 产生的碳酸钙增多,进而使黏结的土颗粒增多,UCS 逐渐增大;同时,碳酸钙的增多,代表着反应消耗的水分增多,进而使淤泥含水率减小^[11],同样有利于 UCS 的增大。

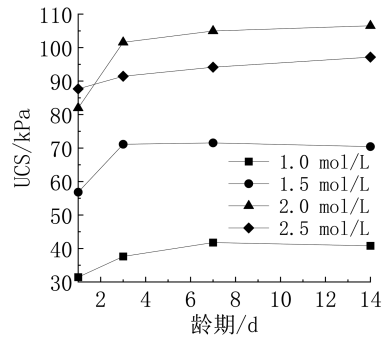
从图 1(a)中还可以看出,不同菌液浓度下淤泥试样 UCS 随着胶结液浓度变化的规律不同。当菌液浓度较低时,即 OD₆₀₀ 为 1 和 2 时,MICP 固化后淤泥土的 UCS 随着胶结液浓度的增大而增大;而当菌液浓度较高时,即 OD₆₀₀ 为 3 和 4 时,随着胶结液浓度的增大,固化后淤泥土的 UCS 先增大后减小,在胶结液浓度为 2 mol/L 时出现峰值,其中当 OD₆₀₀ 为 4 时,该组试验达到最大值 104.96 kPa。出现这种现象的原因可能是在菌液浓度较低时,胶结液也相对被稀释,低浓度胶结液中的金属离子对微生物的生理活动以及脲酶活性的影响较低,因此 UCS 随着浓度的提升而增大;而在菌液浓度较高时,高浓度胶结液中的金属离子会对微生物的生理活动以及脲酶活性造成一定的胁迫,导致碳酸钙生成量的降低,从而导致 UCS 下降。



(a) 7d龄期时不同浓度菌液下MICP固化淤泥UCS与胶结液浓度的关系



(b) 7d龄期且OD₆₀₀为4时不同胶结液浓度下MICP固化淤泥应力应变关系



(c) OD₆₀₀为4时不同胶结液浓度下MICP固化淤泥UCS与龄期的关系

图 1 无侧限抗压强度试验结果

Fig.1 Unconfined compressive strength test results

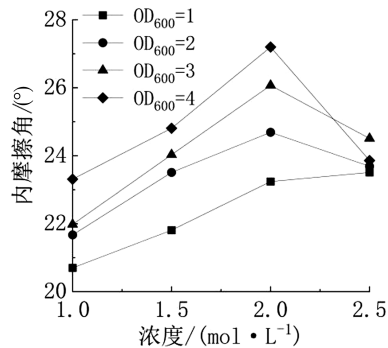
选取龄期 7 d,且 OD_{600} 为 4 时不同胶结液浓度下 MICP 固化淤泥的应力-应变关系进行分析。如图 1(b) 所示, MICP 固化淤泥应力-应变曲线呈现应变硬化规律, 没有出现峰值, 根据规范^[13]取应变为 15 时的应力作为 UCS。UCS 越高的试样, 其弹性阶段的斜率越大, 当胶结液浓度为 2 mol/L 时, 固化后淤泥的 UCS 最大。

在 OD_{600} 为 4 时, MICP 固化后的 UCS 提升最大。因此探究 OD_{600} 为 4 时, 不同胶结液浓度下淤泥 UCS 与龄期的关系。如图 1(c) 所示, 固化后淤泥土的 UCS 可达 31.4~106.538 kPa, 且在龄期为 14 d、胶结液浓度为 2 mol/L 时, 达到最大值。

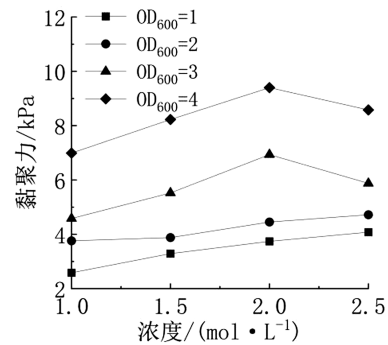
固化后淤泥土的 UCS 在 7 d 内随着龄期的增大而增大, 但在 7 d 后 UCS 的提升程度可忽略不计。这是由于在试样中缺少微生物生理活动所需的营养物质, 因此在 7 d 后微生物基本失去活性, 导致 UCS 几乎不再变化。

2.2 直剪试验

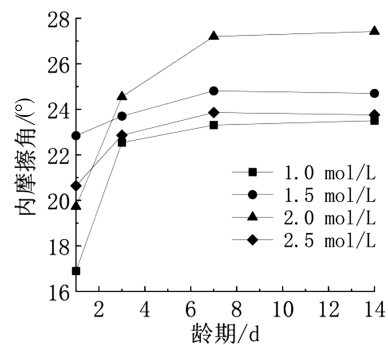
如图 2(a) 所示, MICP 固化淤泥的内摩擦角可达 $20.7^{\circ} \sim 27.2^{\circ}$ 。总体上看, 固化后淤泥的内摩擦角随着菌液浓度的增大而增大。当 OD_{600} 为 1 时, MICP 固化淤泥的内摩擦角随着胶结液浓度的增大而增大; 当 OD_{600} 为 2~4 时, 随着胶结液浓度的增大, 内摩擦角先增大后减小, 在胶结液浓度为 2 mol/L 时, 出现峰值, 试验最大值为 27.2° 。



(a) 7d龄期时不同浓度菌液下MICP固化淤泥内摩擦角与胶结液浓度的关系



(b) 7d龄期时不同浓度菌液下MICP固化淤泥黏聚力与胶结液浓度的关系



(c) OD₆₀₀为4时不同胶结液浓度下MICP固化淤泥内摩擦角与龄期的关系

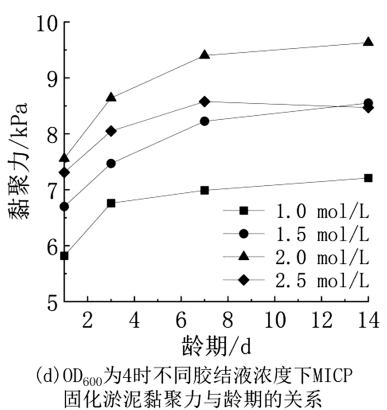


图 2 直剪试验结果
Fig.2 Direct shear test results

如图 2(b) 所示, MICP 固化后, 淤泥土的黏聚力可达 2.59~9.4 kPa。当 OD_{600} 为 1 和 2 时, 固化后淤泥土的黏聚力随着胶结液浓度的增大而增大; 当 OD_{600} 为 3 和 4 时, 随着胶结液浓度的增大, 黏聚力先增大后减小, 在浓度为 2 mol/L 时出现峰值。在高浓度菌液条件下, 淤泥土的直剪强度随着胶结液浓度提高先增后减, 原因与上文中 UCS 规律的原因相似。另外, 固化后淤泥土的黏聚力随着 OD_{600} 的增大而增大, 同时增幅随着 OD_{600} 的增加而增大。李佳明^[14] 的研究表明, 若只是单独往土体加入碳酸钙反而会使土体的直剪强度减小。MICP 反应生成的碳酸钙之所以能使土体的直剪强度提高, 是因为巴氏芽孢杆菌的细胞壁带有负电荷, 会被吸附在土颗粒上, 而巴氏芽孢杆菌作为成核位点, 在细菌周围产生的碳酸钙则会牢固地胶结在土颗粒表面, 随着碳酸钙晶体不断生长或者两个土颗粒距离较近, 碳酸钙则会将土颗粒胶结在一起, 从而提高淤泥土的直剪强度。

在 OD_{600} 为 4 时, MICP 固化淤泥的内摩擦角与黏聚力提升最大。因此探究 OD_{600} 为 4 时, 不同胶结液浓度下淤泥内摩擦角与黏聚力与龄期的关系, 结果如图 2(c) 和图 2(d) 所示。MICP 固化淤泥的内摩擦角可达 $16.9^{\circ} \sim 27.42^{\circ}$, 黏聚力可达 5.82~9.63 kPa, 且都在龄期为 14 d、胶结液浓度为 2 mol/L 时, 达到最大值。当固化后淤泥土的内摩擦角与黏聚力在 7 d 内随着龄期的增大而增大, 而在 7 d 后总体上不再增加。

2.3 液塑限试验

龄期为 7 d 时, 不同浓度菌液下 MICP 固化淤

泥液塑限与胶结液浓度的关系如图 3(a) 和图 3(b) 所示。

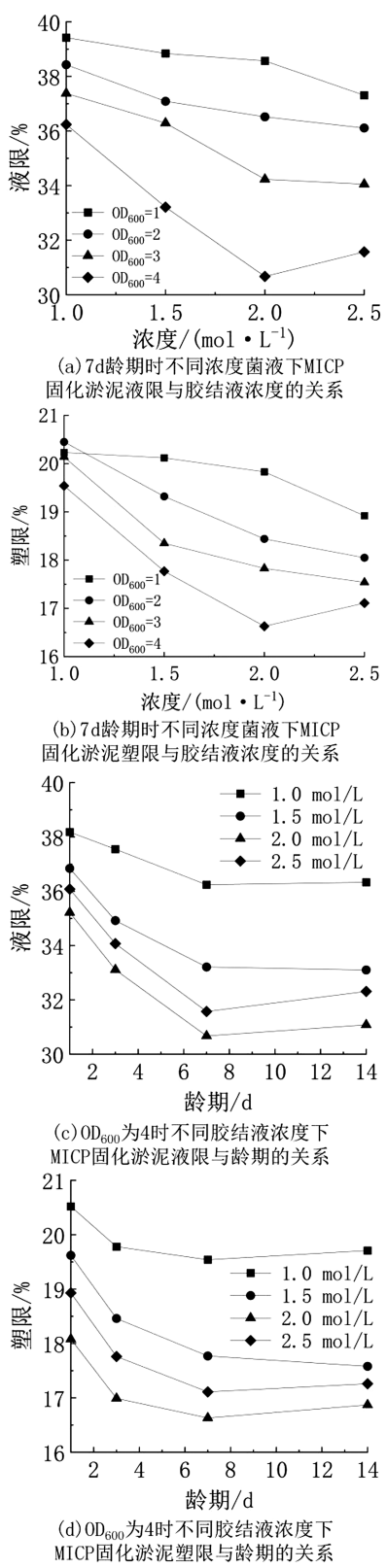


图 3 液塑限试验结果

Fig.3 Liquid limit and plastic limit test results

由图可知, MICP 固化后淤泥的液限可达 30.67%~39.42%, 塑限可达 16.63%~20.45%, 且在 OD₆₀₀ 为 4、胶结液浓度为 2 mol/L 时, 液塑限达到最小值。当 OD₆₀₀ 为 1~3 时, MICP 固化后淤泥土的液塑限随着胶结液浓度的增大而减小; 而 OD₆₀₀ 为 4 时, 随着胶结液浓度的增大, 液塑限先减小后增大, 在胶结液为 2 mol/L 时, 液塑限达到最小值。

液塑限降低可能是由于: (1) 在淤泥土中加入钙源后, Ca²⁺ 与土颗粒表面扩散层中的阳离子产生静力斥电, 静力斥电将扩散层的阳离子挤压至吸附层中, 导致扩散层厚度减小, 又使弱结合水减少; (2) 一部分进入土颗粒吸附层的 Ca²⁺ 平衡了负电荷, 使强结合水减少; (3) Ca²⁺ 与 CO₃²⁻ 结合生成碳酸钙, 而碳酸钙基本无吸水性, 且生产碳酸钙的部位增加了扩散层的厚度, 又进一步使扩散层的弱结合水减少。这 3 方面的原因共同使土颗粒的持水能力减小。OD₆₀₀ 为 4 时, 液塑限随着胶结液的浓度先减小后增大的原因是菌液浓度较高, 2.5 mol/L 的胶结液使细菌活性下降, 导致碳酸钙产量减小, 因此液塑限有所上升, 但是由于加入的钙离子过多, 其上升幅度较小。

当 OD₆₀₀ 为 4 时, MICP 固化后淤泥的 UCS 与直剪强度指标效果最佳, 因此探究 OD₆₀₀ 为 4 时, 不同胶结液浓度下淤泥液塑限与龄期的关系。结果如图 3(c) 和图 3(d) 所示, MICP 固化淤泥的液限可达 30.67%~38.18%, 塑限可达 16.63%~20.52%, 且都在龄期为 7 d、胶结液浓度为 2 mol/L 时, 达到最小值。总体上, 当固化后淤泥土的液塑限在 7 d 内随着龄期的增大而减小, 而在 7 d 后总体上略有增加, 但可以忽略不计。

2.4 SEM 试验

如图 4 所示, MICP 产生的六面体碳酸钙将四周的片状淤泥土颗粒黏结为团聚体, 在一定程度上增加了淤泥土的力学强度。但也可以看出, 多个碳酸钙晶体黏结的淤泥土颗粒数量少、体积小, 导致黏结效率低下。因此相比前人关于 MICP 固化砂土的研究^[5-8], MICP 固化淤泥效果相对较差。

2.5 XRD 试验

如图 5 所示, MICP 固化后, 淤泥试样的主要矿物成分有石英、白云母、伊利石、斜绿长石与方解石等。对比加固前淤泥的主要成分, MICP 固

化后淤泥试样中多了方解石, 由此可见, MICP 产生的碳酸钙晶体为方解石。

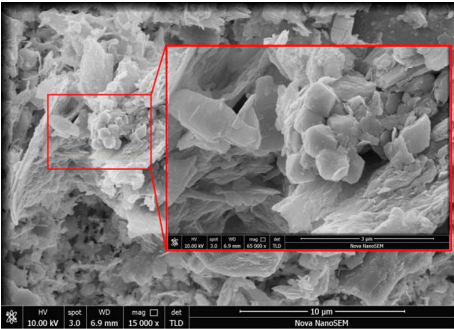


图 4 MICP 固化后淤泥的扫描电镜照片
Fig.4 SEM image of MICP-cured silt

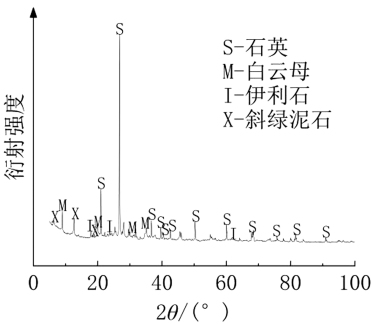


图 5 MICP 固化淤泥 XRD 图谱
Fig.5 XRD pattern of MICP-cured silt

2.6 MICP 固化淤泥机理分析

基于上述宏观和微观试验结果, 本文对 MICP 固化淤泥土的机理进行了分析, 结果如图 6 所示。

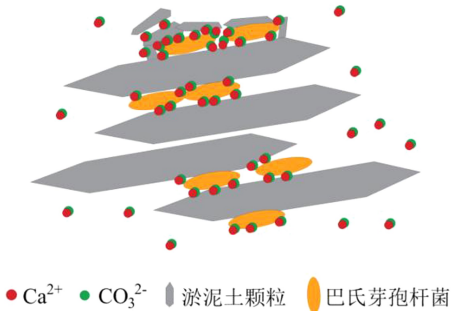


图 6 MICP 固化淤泥微观示意图
Fig.6 Micro-schematic of MICP-cured silt

经过 MICP 作用后, 淤泥土中产生了大量的碳酸钙(主要为六面体方解石)沉积, 但淤泥土中含水率较高, 单个或少量微生物聚集产生的碳酸钙粒子游离于液体中, 无法生长为较大的碳酸钙晶体, 因此无法胶结淤泥颗粒。而在数量较多的微生物群聚的部位, 能生成体积较大

的碳酸钙晶体,并将四周的片状淤泥土颗粒黏结为团聚体,填充孔隙,进而将淤泥颗粒胶结为团聚体,从而起到加固淤泥土体的作用。然而, MICP 所胶结的淤泥土颗粒体积与数量较小,胶结效率相对低下。

3 结论

1)在低菌液浓度条件下, MICP 固化后淤泥试样的 UCS、黏聚力和内摩擦角随着胶结液浓度的增加而增长,而液塑限逐渐减小;当菌液浓度较

高时,由于细菌受到的胁迫作用会随着胶结液浓度增加而加强,导致碳酸钙生成量降低,因此淤泥试样的 UCS、黏聚力和内摩擦角随胶结液的增加先增加后减小,而液塑限先减小后增加,在胶结液浓度为 2 mol/L 时,达到峰值。

2) 微观材料分析结果表明, MICP 产生的六面体形态的方解石将四周的片状淤泥土颗粒黏结为团聚体,填充孔隙、胶结土颗粒,从而起到加固土体的作用,但黏结效率相对低下,无法形成较大的团聚体。

参考文献:

[1] 陈萌,杨国录,徐峰,等. 淤泥固化处理研究进展[J]. 南水北调与水利科技,2018,16(5):128-138.

[2] 许万强,林文彬,罗承浩,等. MICP 技术研究进展及在海洋岩土工程的应用展望[J]. 福建工程学院学报,2022,20(6):511-519.

[3] ZHANG X S, WANG H Y, WANG Y, et al. Improved methods, properties, applications and prospects of microbial induced carbonate precipitation (MICP) treated soil; a review[J]. Biogeotechnics, 2024; 100123.

[4] 刘汉龙, 赵常, 肖杨. 微生物矿化反应原理、沉积与破坏机制及理论:研究进展与挑战[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(7): 1347-1358.

[5] 刘鹏, 曹源兴, 程钰, 等. 碳酸酐酶增强微生物矿化固土效果的试验研究[J]. 岩土力学, 2024(9): 1-11.

[6] 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/OL]. 工程力学.(2023-10-17)[2024-04-19]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2595.O3.20231016.1147.008>

[7] 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.

[8] LIN W B, GAO Y P, LIN W, et al. Seawater-based bio-cementation of natural sea sand via microbially induced carbonate precipitation[J]. Environmental Technology & Innovation, 2023, 29: 103010.

[9] DEJONG J T, SOGA K, KAVAZANJIAN E, et al. Biogeochemical processes and geotechnical applications: progress, opportunities and challenges[J]. Géotechnique, 2013, 63(4): 287-301.

[10] 邵光辉,尤婷,赵志峰,等. 微生物注浆固化粉土的微观结构与作用机理[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2017, 41(2): 129-135.

[11] 蚁曼冰. MICP 技术加固软土的物理力学性能研究[D]. 汕头:汕头大学,2020.

[12] 刘建兴. 微生物诱导矿化加固黏性土的试验与机理研究[D]. 杭州:浙江大学,2020.

[13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 土工试验方法标准:GB/T 50123—2019[S]. 北京:中国计划出版社,2019.

[14] 李佳明,陈学军,黄翔,等. 纳米碳酸钙对红黏土的影响及其作用机理分析[J]. 桂林理工大学学报,2020,40(1): 109-116.

(责任编辑:陈雯)