

文章编号:1672-3031(2020)06-0486-08

# 营养液浓度和微生物活性对 MICP 固化淤泥质土强度的影响

王子文, 魏 然, 蔡 红, 肖建章, 吴帅峰

(中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100048)

**摘要:** 用微生物成因碳酸钙良好胶结能力来改善砂土性质得到了越来越多的关注, 由于淤泥质土特殊的化学组成及工程性质, 对于微生物法用于淤泥质土的固化人们还知之甚少。本文基于 MICP 技术, 考虑不同营养液浓度、不同微生物浓度和脲酶活性等多种工况, 对低渗透性的固化淤泥质土开展了系统的抗剪强度分析, 深入探讨了微生物固化淤泥质土的抗剪强度影响因素。结果表明: 选用高酶活微生物来固化淤泥质土, 固化后抗剪强度有明显提高, 与未固化淤泥质土相比, 内摩擦角提高 3.96~5.52 倍, 抗剪强度在养护初期就有较快提高; 随着营养液浓度不断增加, 内摩擦角表现为先增大后减小, 最大可达 28.10°; 采用拌合法更适用于 MICP 固化淤泥质土。

**关键词:** MICP; 淤泥质土; 固化; 强度

**中图分类号:** TV42·3

**文献标识码:** A

**doi:** 10.13244/j.cnki.jiwhr.20190225

## 1 研究背景

微生物诱导碳酸钙沉积(MICP)技术是一种改进岩土工程性质的前沿技术, 基本原理是特定微生物利用周围尿素等有机物以及钙离子源, 较快生成具有胶凝性质的碳酸钙, 基于该技术的微生物灌浆方法在砂土等材料中已经进行了较为深入的研究<sup>[1-4]</sup>, 如 Dejong 等<sup>[5]</sup>通过试验发现经过微生物处理后的砂土具有较高的初始剪切刚度, 抗剪强度也有明显提高; Whiffin<sup>[6]</sup>研究了不同离子浓度对微生物脲酶活性的影响, 经过微生物灌浆的砂土抗剪强度达到 1.80 MPa; Van der Ruyt 等<sup>[7]</sup>通过试验得出采用 MICP 技术可提高砂土抗剪切和抗侵蚀能力, 还降低了砂土液化可能性; 程晓辉等<sup>[8]</sup>通过标准三轴及振动台试验, 表明微生物灌浆加固液化砂土的抗液化和动力性能有了明显提升; 夏璐等<sup>[9]</sup>针对砂柱微生物堵塞过程进行渗流试验, 确定了造成含水介质微生物堵塞的优势菌群; Okwadha 等<sup>[10]</sup>研究了微生物数量对 MICP 过程的影响, 表明随着微生物浓度增大, 尿素分解率呈线性增加; 赵茜<sup>[11]</sup>发现氯化钙  $\text{CaCl}_2$  和尿素  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$  浓度为 0~1.50 mol/L 时, 随营养液浓度的提高, 碳酸钙生成量明显增加, 当营养液浓度超过 1.50 mol/L 时, 高盐浓度对微生物活性具有抑制作用从而导致碳酸钙生成量迅速下降; 余清鹏等<sup>[12]</sup>试验得到钙离子浓度为 1.00 mol/L, 尿素浓度为 2.00 mol/L 时, 砂柱的结晶体均匀致密, 灌浆效果较好; 王绪民等<sup>[13]</sup>开展营养盐浓度对胶结砂试样物理力学特性研究表明营养盐浓度在 0.50 mol/L 时试样强度提高效果最好。

MICP 技术用于砂土加固中为了达到较好的加固效果, 一般采用灌注法和泵送法来多次输送微生物和营养液, 应用中对于微生物的数量和活性、营养液浓度没有明确的标准; 此外, 淤泥质土矿物成分复杂, 主要以伊利石和蒙脱石为主, 具有黏粒含量高, 结构松散、颗粒细小、含水量高, 渗透性弱的特点, 使得采用 MICP 技术固化淤泥质土更为困难, 需要更为精准微生物的选取和营养液浓度。

基于此, 本文在借鉴砂土固化的相关研究成果基础上, 将菌液、淤泥质土和营养盐直接拌合, 通过改变二水氯化钙  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  和尿素  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$  组成的营养液浓度, 对比分析了营养盐浓度、菌液酶活、龄期对淤泥质土固化强度的影响因素, 为 MICP 技术在淤泥质土固化中的应用积累研究经验。

收稿日期: 2019-12-26; 网络首发时间: 2020-12-09

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5020.TV.20201207.1456.005.html>

基金项目: 中国电建股份科技项目(DJ-ZDXM-2015-12); 中国水科院基本科研项目(GE0145B512016)

作者简介: 王子文(1991-), 博士生, 主要从事微生物固化淤泥质土研究。E-mail: 791912970@qq.com

## 2 试验材料

试验材料主要包括淤泥质土、巴氏芽孢杆菌、营养盐、去离子水，其中，淤泥质土取自安徽省清弋江流域，微生物为巴氏芽孢杆菌，营养液由二水氯化钙  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  和尿素  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$  组成，试验材料的具体特性如下。

**2.1 土样** 采用安徽省清弋江流域风干淤泥质土样，初始含水率为 2%，制样含水率为 40%。依据《土工试验规程 SL237-1999》<sup>[14]</sup>，淤泥质土料用橡皮锤碾散，过 2.00 mm 筛，颗粒级配曲线见图 1。

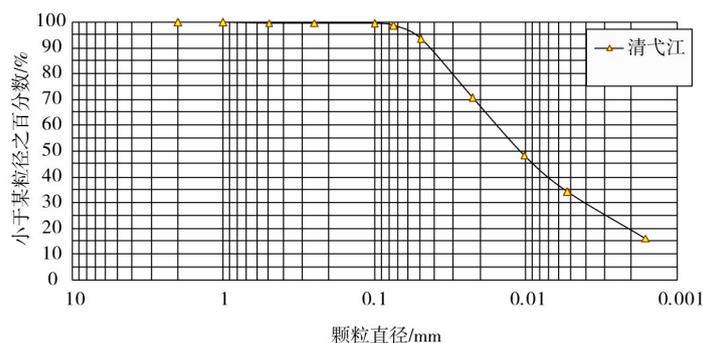


图 1 试验所用淤泥质土颗粒级配曲线

实测清弋江淤泥质土粒组含量以粉粒和黏粒为主，液限为 37.8%，塑限为 17.4%，比重为 2.70，具体基本物理性质见表 1。

表 1 淤泥质土基本物理性质

土样	粒组含量/%			含水率/%	液限	塑限	比重
	砂粒组 > 0.075mm	粉粒组 0.075 ~ 0.005mm	黏粒组 < 0.005mm				
清弋江淤泥质土	2	66	33	40	37.80	17.40	2.70

**2.2 菌液** MICP 固化试验所用巴氏芽孢八叠球菌的菌株购于中国科学院微生物研究所，为化能异养菌，细胞呈杆状，长度 2 ~ 3  $\mu\text{m}$ ，芽孢圆形，直径 0.5 ~ 1.5  $\mu\text{m}$ ，革兰氏阳性。

菌液培养过程中选用了优化培养基，添加氢氧化钠溶液将培养基 pH 值调整为 9.0，高压蒸汽灭菌锅在 120  $^{\circ}\text{C}$  灭菌 20 分钟后，在超净工作台中完成接种，在振荡培养箱中培养 20 h。

由于脲酶水解尿素的能力直接决定了微生物生成碳酸钙的能力，为了对比不同酶活的菌液对固化淤泥质土的影响，试验所用两种菌液的  $\text{OD}_{600}$  分别为 2.41 和 4.12，脲酶活性分别为 1.28  $\text{ms}/(\text{cm} \cdot \text{min})$  和 1.62  $\text{ms}/(\text{cm} \cdot \text{min})$ ，相应的单体酶活分别为 0.53  $\text{ms}/(\text{cm} \cdot \text{min})$  和 0.39  $\text{ms}/(\text{cm} \cdot \text{min})$ ，具体见表 2。

表 2 试验所用菌液  $\text{OD}_{600}$  及活性

$\text{OD}_{600}$	脲酶活性/ $(\text{ms}/(\text{cm} \cdot \text{min}))$	单体酶活/ $(\text{ms}/(\text{cm} \cdot \text{min}))$
2.41	1.28	0.53
4.12	1.62	0.39

**2.3 营养盐** 营养液为等摩尔浓度钙源和尿素混合溶液，溶液中二水氯化钙  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  : 尿素  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2 = 1:1$ ，均由中国国药集团化学试剂有限公司生产。

为了进一步对比营养液浓度对 MICP 固化淤泥质土的强度影响，在不同试验组别中，营养液浓度分别为 0.50 mol/L、1.00 mol/L、1.50 mol/L、2.00 mol/L 以及 3.00 mol/L。

**2.4 试验设备** 抗剪强度试验采用南京土壤仪器厂生产的 ZJ 型应变控制型直剪仪，该仪器为电动控

制，能实现匀速剪切，测力环位移表采用德国麦思德(Masterproof)高精度电子数显千分表，量程为0~12.70 mm，能实现剪切力精确量测，试样剪切速率控制为0.80 mm/min。

**2.5 试验设计** 由于淤泥质土渗透性差、孔隙小、水动力学性质差，通常在MICP固化砂土采用的灌注法和泵送法并不适用于固化淤泥质土。为了提高菌液和营养液在淤泥质土中的空间分布均匀性，便于诱导碳酸钙的生成，经过多次尝试，采用了拌合法对微生物固化淤泥质土进行制样，具体试验方案设计见表3。

表3 MICP固化淤泥质土试验方案

试验组别	脲酶活性/ (ms/(cm·min))	OD <sub>600</sub>	试验组别	脲酶活性/ (ms/(cm·min))	OD <sub>600</sub>	营养液浓度/(mol/L)	养护龄期/d
A			A			0.00	7
B1	1.62	4.12	B2	1.28	2.41	0.50	7
C1	1.62	4.12	C2	1.28	2.41	1.00	7
D1	1.62	4.12	D2	1.28	2.41	1.50	7
E1	1.62	4.12	E2	1.28	2.41	2.00	7
F1	1.62	4.12	F2	1.28	2.41	3.00	7
G1	1.62	4.12	G2	1.28	2.41	1.50	0.5
H1	1.62	4.12	H2	1.28	2.41	1.50	1
I1	1.62	4.12	I2	1.28	2.41	1.50	2
J1	1.62	4.12	J2	1.28	2.41	1.50	3
K1	1.62	4.12	K2	1.28	2.41	1.50	5

注：表中A组为未添加菌液和营养盐，含水率相同的对照试验组。

根据《青弋江分洪道工程稳定性分析报告》<sup>[15]</sup>，现场淤泥质土的含水率实测基本在40%左右，未添加菌液和营养盐的对照试验组的制样含水率为40%，微生物固化试样制备中，将试样中40%含水率所需水量置换为等质量的菌液和营养液，控制制样干密度均为1.35 g/cm<sup>3</sup>。根据控制干密度，将称量好的淤泥质土倒入烧杯，量取菌液和不同浓度的营养液掺入土料中拌合，拌合10 min，至土料均匀后，将环刀样放入保湿缸中进行养护。

试验设计中，采用OD<sub>600</sub>分别为2.41和4.12，脲酶活性分别为1.28 ms/(cm·min)和1.62 ms/(cm·min)的两种活性的菌液进行不同营养液浓度的固化试验。其中对照组为A组，0.50 mol/L、1.00 mol/L、1.50 mol/L、2.00 mol/L、3.00 mol/L等不同营养液浓度的微生物固化试样依次为B、C、D、E、F组；选择固化强度最高试样所对应的营养盐浓度，考虑龄期对固化强度影响，将0.5 d、1.0 d、2.0 d、3.0 d、5.0 d养护龄期的固化试验依次为G、H、I、J、K组，每组试验制作4个环刀样。均采用拌合法制样，在保湿缸中养护至相应龄期，控制缸内温度为23.80 ℃，湿度为88.50%RH。

### 3 试验结果与分析

**3.1 相同龄期条件下不同营养液浓度和菌液酶活的固化效果对比** 经过7 d养护后，对A—F组试样开展了直剪试验，不同菌液酶活和营养液浓度条件下试验得到的抗剪强度指标。对试验得到的抗剪强度指标进行整理，分别得到了不同营养盐浓度条件下的内摩擦角变化和黏聚力随营养盐浓度变化分布(见图2和图3)。

从图2和图3可以看出，未固化的对照组内摩擦角仅为5.09°，黏聚力为23.93 kPa，相比之下，经过MICP固化后淤泥质土抗剪强度均有了明显提高，酶活1.62，OD4.12的菌液固化后，试样内摩擦角最大为28.10°，黏聚力为5.41 kPa；菌液酶活1.28，OD2.41的菌液固化后试样内摩擦角最大为

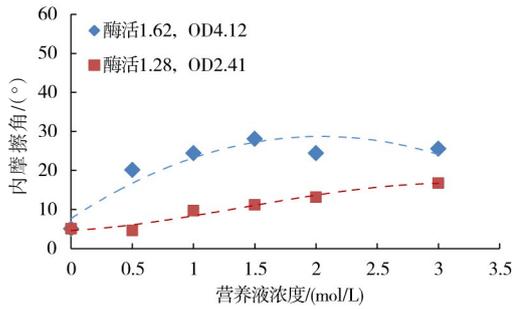


图2 不同营养盐浓度条件下内摩擦角变化曲线

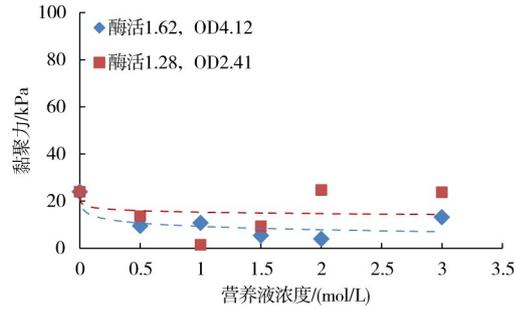


图3 不同营养盐浓度条件下黏聚力变化曲线

16.79°，黏聚力为 23.77 kPa，表明对渗透性差、孔隙小、水动力学性质差的淤泥质土，高浓度、高酶活巴氏芽孢杆菌更适用于淤泥质土的固化。

对比图 2 可以看出，菌液酶活 1.62 ms/(cm·min)，OD<sub>600</sub> 为 4.12 情况下，随营养液浓度增加，固化试样内摩擦角呈先增加后下降的趋势；当营养液浓度为 0.50 mol/L 时，与相同含水率未固化试样相比，内摩擦角提高近 4 倍，较高 OD<sub>600</sub> 的菌液在土体内部参与尿素水解反应会更充分，提高了碳酸钙产率。营养液浓度 1.50 mol/L 时，测得内摩擦角最高为 28.10°，同比提高 5.52 倍；营养液浓度进一步提高后测得内摩擦角有所下降，主要是因为高浓度营养盐对菌液有了一定抑制作用。

菌液酶活 1.28 ms/(cm·min)，OD<sub>600</sub> 为 2.41 情况下，随营养液浓度的增加，固化后试样的内摩擦角也逐渐增加，营养液浓度为 3.00 mol/L 时，内摩擦角最高为 16.79°；与高浓度菌液相比，一方面，由于利用低酶活和低浓度的菌液固化淤泥质土，会使得单位体积土体内菌液数量较少，诱导生成相同质量的碳酸钙在时间上存在一定的滞后性；另一方面，低浓度菌液在一定程度上也会稀释营养液浓度，进而降低营养盐浓度过高对菌液活性的抑制作用，有利于提高固化强度。

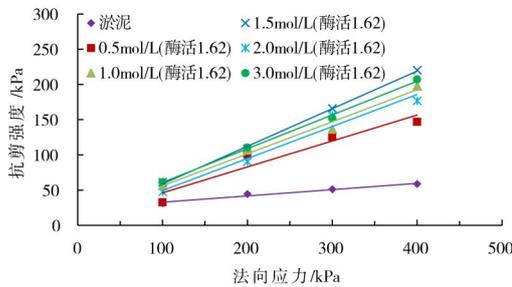


图4 不同盐浓度条件下酶活 1.62 试样法向应力-抗剪强度

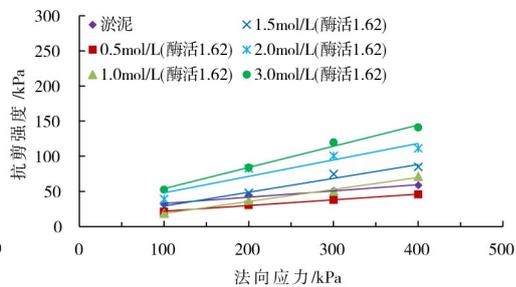


图5 不同盐浓度条件下酶活 1.28 试样法向应力-抗剪强度

MICP 固化淤泥质土对于土体内摩擦角提高显著，内摩擦角增大在一定程度上会导致黏聚力的减小。对不同营养盐浓度条件下的直剪试验结果进行进一步整理后得到抗剪强度包线，如图 4 和图 5 所示，对比可以看出，MICP 固化处理后淤泥试样的实测强度包线均靠上，与未固化淤泥试样相比，抗剪强度有了明显提高，选用高酶活菌液的试样中，营养液浓度为 1.50 mol/L 时，抗剪强度达到最大，在低酶活菌液组别中，虽然参与诱导生成碳酸钙的微生物量较少，由于高浓度的营养盐溶液中游离的 Ca<sup>2+</sup>、NH<sup>4+</sup> 数量较多，随营养盐溶液浓度的增大，微生物反应后抗剪强度仍有一定提高。综合固化效果与经济性，优先选用高酶活、高 OD<sub>600</sub> 值的菌液进行固化试验更有优势。

**3.2 优化营养液浓度条件下不同养护龄期和菌液酶活的固化效果对比** 在 3.1 试验基础上，优选营养液浓度 1.50 mol/L，进行不同养护龄期和菌液酶活的微生物固化淤泥质土试验，得到的抗剪强度指标通过对优化营养盐下不同龄期试样的抗剪强度指标进一步整理，得到优化营养盐情况下内摩擦角和黏聚力随龄期变化，如图 6 和图 7 所示。

从图 6 和图 7 可以看出，优化营养盐浓度条件下，不同菌液酶活的微生物固化淤泥质土试样在养

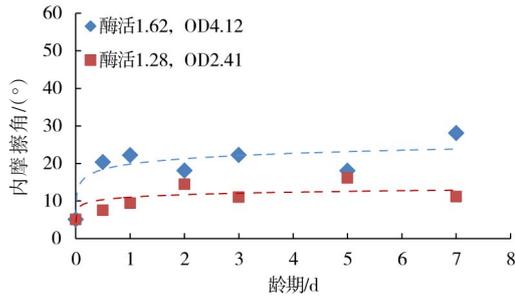


图6 优化营养盐条件下不同龄期内摩擦角变化曲线

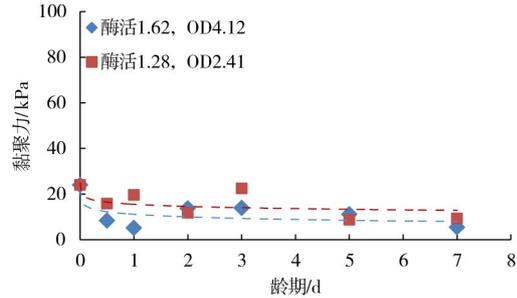


图7 优化营养盐条件下不同龄期黏聚力变化曲线

护前期的抗剪强度就有了明显提高，养护龄期 0.5 d 菌液酶活 1.62、OD4.12 情况下，实测内摩擦角为 20.35°；菌液酶活 1.28、OD2.41 的内摩擦角为 7.56°，与对照组相比，分别提高了 4.00 倍和 1.49 倍，表明相同营养液浓度不同养护菌液酶活的各组固化淤泥质土的抗剪强度在养护初期就能有较快提高，微生物固化淤泥质土在实际工程中不需要过多养护龄期。

同未固化试样比较，养护龄期为 0.5 d 时，微生物固化试样的抗剪强度已明显提高，养护龄期 1.0 d 情况下，菌液酶活 1.62 ms/(cm·min) 和 1.28 ms/(cm·min) 的固化内摩擦角为 22.2°和 9.45°，接近 7 d 养护龄期测得的内摩擦角 28.1°和 11.8°，说明微生物酶催化尿素的水化作用在试样养护初期就可快速进行。

数据表明，相同营养液浓度条件下，固化试样内摩擦角在反应初期的增幅较大，24 小时后增长幅度趋缓，整体表现为先上升后稳定，而黏聚力随龄期变化没有明显规律。

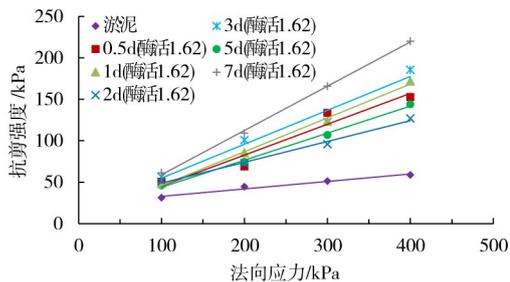


图8 不同龄期条件下酶活 1.62 试样法向应力-抗剪强度

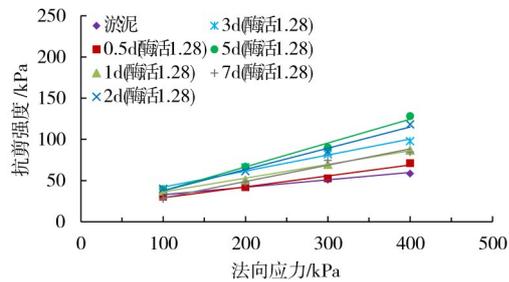


图9 不同龄期条件下酶活 1.28 试样法向应力-抗剪强度

1.50 mol/L 营养盐浓度条件下不同养护龄期试样抗剪强度包线如图 8 和图 9 所示，可以看出高酶活菌液组别抗剪强度增长幅度较大，抗剪强度增长主要发生在养护龄期前期，与内摩擦角随龄期变化一致，选用高酶活菌液的试样固化效果同样优于酶活较低的组别。低酶活菌液组别细菌数量较少，诱导生成的碳酸钙容易产生集聚效应，难以均匀分散地分布在土壤孔隙中，抗剪强度增长幅度较小。

**3.3 微生物固化淤泥质土的含水率和干密度变化对比** 巴氏芽孢八叠球菌在固化淤泥质土过程中，产生脲酶来促进尿素水解作用，转化成  $\text{NH}_4^+$  和  $\text{HCO}^-$  的同时也会消耗水分；此外，在碱性条件下  $\text{HCO}^-$  也会与营养盐中的  $\text{Ca}^{2+}$  结合生成碳酸钙，提高固化强度的同时，也使得固化前后淤泥质土的含水率和干密度发生变化，含水率的降低和干密度的提高均有利于提高淤泥质土的抗剪强度指标。

图 10 对比了不同营养液浓度掺加相同菌液在保湿缸中养护 7 d 前后的含水率变化情况，对比可以看出，初始制样含水率均为 40%，B、C、D、E、F 等 5 组不同营养盐浓度固化试样的 7 d 龄期含水率比 0 d 含水率分别降低了 7.14%、7.23%、6.71%、7.17%、8.50%。由于试样均在保湿缸内养护，含水率的降低主要是由微生物活动所引起，高浓度的微生物在一定时间内代谢活动比较旺盛，微生物生物酶催化尿素的水解作用进一步引起含水率的下降。此外，淤泥质土本身含有有机质也为微生物活动提供有利因素，促使了淤泥土体中的水分的降低。

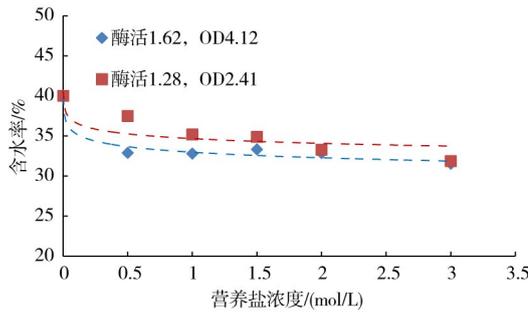


图10 不同营养盐浓度下试样含水率变化曲线

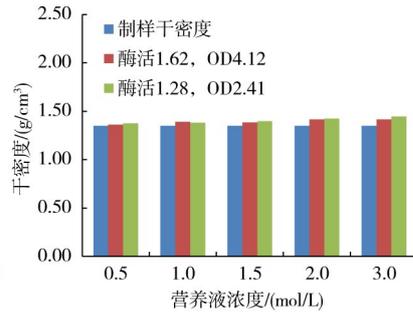


图11 不同营养液浓度下7d养护前后试样干密度变化

微生物和营养盐通过拌合填充了部分淤泥质土的孔隙，产生碳酸钙堆积后也增大了淤泥质土固体颗粒的质量，宏观上致使试样干密度增加。整理得到的MICP固化过程中试样干密度变化见图11，可以看出，7d养护龄期结束后，在0.5 mol/L、1.0 mol/L、1.5 mol/L、2 mol/L、3 mol/L等不同营养液浓度条件下，高酶活菌液固化试样的平均干密度从初始1.35 g/cm<sup>3</sup>，分别增加到了1.36 g/cm<sup>3</sup>、1.39 g/cm<sup>3</sup>、1.38 g/cm<sup>3</sup>、1.42 g/cm<sup>3</sup>和1.42 g/cm<sup>3</sup>，分别增加0.01 g/cm<sup>3</sup>、0.04 g/cm<sup>3</sup>、0.03 g/cm<sup>3</sup>、0.07 g/cm<sup>3</sup>和0.07 g/cm<sup>3</sup>。

低酶活菌液固化试样的平均干密度也分别增加0.03 g/cm<sup>3</sup>、0.03 g/cm<sup>3</sup>、0.08 g/cm<sup>3</sup>和0.10 g/cm<sup>3</sup>，相应的含水率分别降低了2.52%、4.82%、5.12%、6.73%及8.15%。微生物参与尿素水解作用以及自身生命活动均消耗水分，会降低试样的含水率的同时也提高了固化试样的强度。当营养液浓度大于2.0 mol/L后，高酶活菌液固化处理后的试样干密度没有增加，表明高盐浓度的营养液对微生物诱导生成碳酸钙起到了抑制作用；而低酶活情况下，由于菌液对高浓度营养液的稀释作用，仍然可以继续诱导生成碳酸钙，只是由于菌液浓度较低，诱导生成的碳酸钙量相对高酶活情况表现更为集中，影响了固化效果。

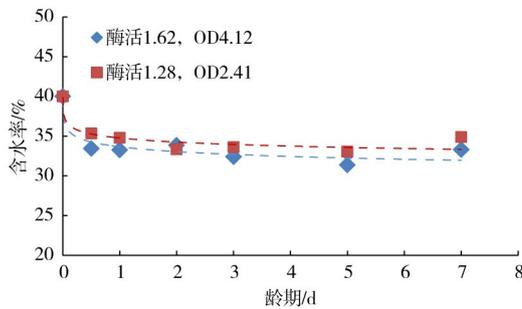


图12 相同营养盐条件下含水率随龄期变化曲线

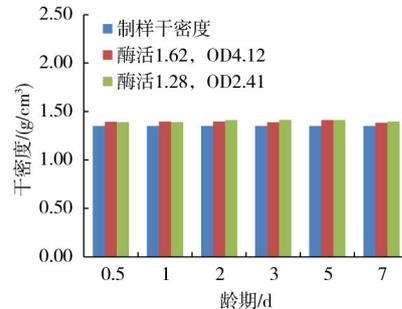
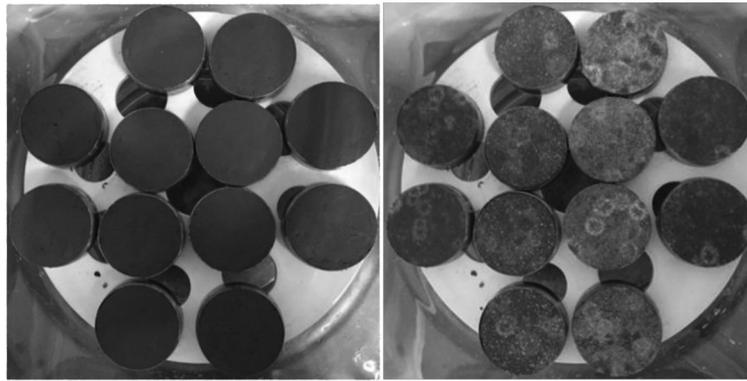


图13 不同龄期试样干密度随龄期变化

营养液浓度1.50 mol/L条件下，不同养护龄期的含水率及干密度随龄期变化如图12和图13所示，对比可以看出，随着养护龄期的增加，高酶活菌液固化试样含水率分别降低了6.57%、6.75%、6.16%、7.60%、8.62%和6.71%，干密度分别增加了0.04 g/cm<sup>3</sup>、0.05 g/cm<sup>3</sup>、0.05 g/cm<sup>3</sup>、0.06 g/cm<sup>3</sup>、0.06 g/cm<sup>3</sup>及0.04 g/cm<sup>3</sup>；低酶活菌液固化试样含水率分别降低了4.67%、5.22%、6.67%、6.37%、6.95%和5.12%，干密度分别增加了0.04 g/cm<sup>3</sup>、0.04 g/cm<sup>3</sup>、0.06 g/cm<sup>3</sup>、0.06 g/cm<sup>3</sup>、0.06 g/cm<sup>3</sup>及0.05 g/cm<sup>3</sup>。说明在优化营养液浓度条件下，生物酶催化尿素的水化作用也在试样养护初期就快速进行，含水率降低及干密度增加均较为明显。

对比不同龄期固化试验结果发现，两种酶活菌液固化试样含水率下降和干密度增加主要集中在淤泥质土固化12h的反应初期，内摩擦角由未固化的5°提高到了20°，为7d测得28.10°的65%。由于菌液和营养液在土体内部24h内参与尿素水解反应效率较高，新陈代谢旺盛也消耗了一定土体内部的水分，使得试样在养护初期的含水率有了较大降低，也相应提高试样的干密度。此外，反应初期微生物诱导形成的碳酸钙的迅速生成后，以细菌为成核位点产生的碳酸钙相互堆积，填充了部分土



(a) 制样完成(0d) (b) 养护完成(7d)

图 14 试样制备及养护情况

体孔隙，进而提高土体抗剪强度。

**3.4 微生物固化淤泥质土外观对比** 淤泥质土固化以细胞为核心来形成碳酸钙晶体，养护过程中，晶体颗粒逐渐增大，彼此堆积后形成具有一定强度的微生物诱导碳酸钙块体，营养盐浓度不同诱生成成碳酸钙情况不尽相同，在固化土样外观上也有所区别，图 14 为养护前后的土样外观变化，可以看出，养护 7 d 后，试样表面生成了白色圆点或团絮状斑点，营养液浓度为 1.50 mol/L 试样表面斑点最密集，浓度 3.00 mol/L 试样表面未出现明显的白色斑点。

## 4 结论

本文基于 MICP 技术对淤泥质土开展了固化试验，分析了不同活性菌液情况下，营养液浓度和养护龄期对固化强度的影响，主要结论如下：

(1) 由于淤泥质土渗透性差、孔隙小、水动力学性质差，菌液的酶活对 MICP 固化淤泥质土有明显影响，高浓度、高酶活巴氏芽孢杆菌更适用于淤泥质土的固化。同等条件下，MICP 固化后的淤泥质土抗剪强度有明显提高，内摩擦角比未固化提高 3.96 ~ 5.52 倍，具有较好的工程应用前景。

(2) 营养液浓度对固化淤泥质土抗剪强度有重要影响，随着营养液浓度不断增加，内摩擦角表现为先增大后减小，实测最大内摩擦角 28.10° 对应的优化营养液浓度为 1.50 mol/L。

(3) 相同营养液浓度条件下，固化试样抗剪强度在养护初期就有较快的提高，表明实际工程中用较短养护龄期就可以实现固化土体强度的提高。

(4) 微生物代谢过程中诱导生成碳酸钙过程不仅消耗淤泥质土中的水分，降低淤泥质土含水率，同时也增大了固化土体的干密度，有利于提高固化淤泥质土抗剪强度。

(5) 不同于传统的灌浆法和泵送法，微生物固化淤泥质土采用拌合法具有良好的适用性，能有效提高菌液和营养液在土体中空间分布均匀性，更有利于诱导碳酸钙的生成。

## 参 考 文 献：

- [ 1 ] 钱春香, 王欣, 於孝牛. 微生物水泥研究与应用进展[J]. 材料工程, 2015, 43(8): 92-103.
- [ 2 ] WHIFFIN V S, van PAASSEN L A, HARKES M P. Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique[J]. Geomicrobiology Journal, 2007(24): 417-423.
- [ 3 ] LI BING. Geotechnical properties of bioelement treated sand and clay[D]. Nanyang Technological University, 2015.
- [ 4 ] RAMACHANDRAN S K. Remediation of concrete using micro-organisms[J]. Aci Material Journal, USA, 2001, 98(4): 3-9.

- [ 5 ] DEJONG J T, FRITZGES M B, NUSSLEIN K . Microbially induced cementation to control sand response to undrained shear[J] . Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, 132(11): 1381–1392 .
- [ 6 ] WHIFFIN V S . Microbial CaCO<sub>3</sub> precipitation for the production of biocement[D] . Perth: Murdoch University, 2004 .
- [ 7 ] van der RUYT M, van der ZON W . Biological in situ reinforcement of sand in near-shore areas[C] . Proceedings of the ICE-Geotechnical Engineering, 2009 .
- [ 8 ] 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 .
- [ 9 ] 夏璐, 郑西来, 段玉环, 等 . 砂柱微生物堵塞过程及机理分析[J] . 水利学报, 2014, 45(6): 749–755 .
- [ 10 ] OKWADHA G D O, LI JIN . Optimum conditions for microbial carbonate precipitation[J] . Chemosphere, 2010, 81(9): 1143–1148 .
- [ 11 ] 赵茜 . 微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)固化土壤试验研究[D] . 北京: 中国地质大学(北京), 2014 .
- [ 12 ] 余清鹏, 李娜, 符平, 等 . 微生物灌浆加固砂土效果的试验研究[J] . 中国水利水电科学研究院学报, 2019, 17(3): 204–210 .
- [ 13 ] 王绪民, 郭伟, 余飞, 等 . 营养盐浓度对胶结砂试样物理力学特性试验研究[J] . 岩土工程学报, 2016, 37(2): 363–374 .
- [ 14 ] 南京水利水电科学研究院 . SL237–1999土工试验规程[S] . 北京: 中国水利水电出版社, 1999 .
- [ 15 ] 中国水电十三局芜湖建设有限公司 . 青弋江分洪道工程稳定性分析报告[R] . 2016 .

### **Effect of nutrient solution concentration and microbial activity on MICP solidified strength of soft clay**

WANG Ziwen, WEI Ran, CAI Hong, XIAO Jianzhang, WU Shuaifeng

*(State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin,*

*China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China)*

**Abstract:** The microbial induced calcium carbonate deposition (MICP) technology of biomineralization has the characteristics of small energy consumption, with great variety, rich resources and friendly environment. More and more attention has been paid to improving the properties of sandy soil by using the good cementation ability of microbial calcium carbonate. Due to the special chemical composition and soil mechanical properties of soft clay, microbial methods in the solidification of soft clay are still poorly understood. Based on MICP technology, considering different nutrient solution concentration, microbial concentration and urease activity, this paper carried out a systematic shear strength analysis of low permeability solidified soft clay, and further discussed the affecting factors of shear strength. The results show that the high enzyme active microorganism should be selected as far as possible to solidify the soft clay. After curing, the shear strength of the MICP solidified soft clay are improved significantly, and compared with the uncured samples, the internal friction angle increases by 3.96–5.52 times and the shear strength increases rapidly in the early stage of curing. With the increasing concentration of nutrient solution, the internal friction angle increases first and then decreases up to 28.10°. The mixing method is more suitable for the soft clay by MICP.

**Keywords:** MICP; soft clay; solidification; strength

(责任编辑: 祁 伟)