

# 菌胶比影响微生物固化黏土的效果分析

陈 垚<sup>1</sup>, 王重卿<sup>1</sup>, 王 浩<sup>2</sup>, 李流芳<sup>2</sup>, 赖国正<sup>2</sup>, 李 熙<sup>1</sup>, 江世雄<sup>1</sup>, 王 林<sup>1</sup>

(1. 国网福建省电力有限公司电力科学研究院, 福建 福州 350007;

2. 福州大学 紫金地质与矿业学院, 福建 福州 350116)

**摘要:** 为研究菌胶比对微生物固化黏土效果的影响, 选用巴氏生孢八叠球菌作为固化菌种, 设置三组不同菌胶比的试验开展微生物固化黏土试验, 通过直剪试验、无侧限抗压试验研究改性土体的力学性能, 并在此基础上采用酸洗法测量固化土的碳酸钙生成量, 与清水对照组对比分析微生物固化黏土的效果。试验结果表明: 采用的方法可有效加固黏土, 生物固化后试样的抗剪强度和无侧限抗压强度均明显优于清水对照组; 菌胶比等于1的土体强度提升幅度最大, 菌胶比等于2时次之, 等于0.5时最低, 力学强度随着菌胶比增加而呈现先增大后减小的趋势; 碳酸钙生成量与土体强度之间呈现正相关关系, 菌胶比会影响碳酸钙生成量进而影响黏土加固效果。说明菌胶比对微生物固化黏土效果影响较大, 优化菌胶比对提升微生物固土强度具有重要作用。

**关键词:** 微生物固化; 菌胶比; 黏土; 直剪试验; 无侧限抗压强度

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2024)04-0175-06

## Analysis of Bacteria-binder Ratio on the Effectiveness of Microbial Reinforcement of Clay

CHEN Yao<sup>1</sup>, WANG Zhongqing<sup>1</sup>, WANG Hao<sup>2</sup>, LI Liufang<sup>2</sup>, LAI Guozheng<sup>2</sup>, LI Xi<sup>1</sup>, JIANG Shixiong<sup>1</sup>, WANG Lin<sup>1</sup>

(1. State Grid Fujian Electric Power Research Institute, Fuzhou, Fujian 350007, China;

2. Zijin School of Geology and Mining, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350116, China)

**Abstract:** In order to analyze the effects of bacterial-binder ratio on the curing effects of microorganisms, *Sporosarcina pasteurii* is used. Three groups of experiment corresponding to different bacterial-binder ratios are conducted to reinforce clay. The mechanical strengths of clay are obtained by direct shear test and unconfined compressive test. Additionally, the acid washing method is employed to obtain the production of calcium carbonate. The enhancement of the mechanical strength of reinforced clay is compared with that of their reference counterpart which uses clear water instead of MICP. The results show that the method can effectively reinforce clay, and the shear strength and unconfined compressive strength of the samples are obviously higher than that of their reference counterparts. The mechanical strength of clay with bacterial-binder ratio equal to 1 is the highest (with the unconfined compressive strength reached 192.49 kPa and the production of calcium carbonate reached 4.28%) among the three groups of experiments conducted, followed by the ratio equal to 2. The large amount of calcium carbonate produced corresponds to high improvement of the mechanical strength of clay. The bacterial-binder ratio could affect the production of calcium carbonate and thus affect the mechanical strength of clay. These results demonstrate that the ratio has a significant impact on the effectiveness of reinforcing clay, indicating the importance of optimizing the ratio to improve the effectiveness of MICP.

**Keywords:** microbial solidification; bacterial-binder ratio; clay; direct shear test; unconfined compressive strength

收稿日期: 2024-03-30

修稿日期: 2024-05-17

基金项目: 国网福建省电力有限公司项目“输电线路塔基裸土植被修复生境调控技术研究及生态基材研制”(SGFJDK00DYJ2310139)

作者简介: 陈 垚(1990—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事电网建设水土保持与地质灾害防控研究工作。E-mail: chenyaoyao@163.com

通讯作者: 王 浩(1978—), 男, 博士, 教授, 主要从事岩土工程与工程地质方面的研究工作。E-mail: h\_wang@126.com

微生物固土技术自提出以来就引起了岩土工程界的广泛关注,诸多专家和学者投身到微生物固土的研究当中<sup>[1]</sup>。微生物诱导碳酸钙沉淀技术(MICP)是目前微生物岩土工程中研究最多、应用最广的技术,已在边坡加固、地基土改性、微生物粘合剂、微裂缝修复等领域中展现出旺盛的生命力<sup>[2-6]</sup>。MICP的核心是诱导产生碳酸钙沉淀,三价铁还原、硫酸盐还原、反硝化作用、尿素水解四类方法都能生成碳酸钙,其中基于尿素水解机制的固化方法反应过程易于控制并且固化效率高,与其它碳酸钙生成途径相比更有优势<sup>[7]</sup>。其原理是通过自然生态系统中某些菌种新陈代谢产生的尿素水解酶,促进周围环境的尿素水解产生 $\text{CO}_3^{2-}$ 和 $\text{NH}_4^+$ ,在碱性条件下与游离的 $\text{Ca}^{2+}$ 等金属离子结合形成碳酸盐结晶沉淀,充填于土体孔隙和裂隙之中以增强岩土体颗粒间联结强度,形成一个逐渐趋于密实的整体<sup>[8]</sup>。

目前国内外已有较多关于 MICP 的研究,研究成果主要集中在砂土固化。Sharaky 等<sup>[9]</sup>对沙漠风积沙进行生物矿化,并指出分步固化能够增加固化层厚度;Chu 等<sup>[10]</sup>通过无侧限抗压强度试验发现 MICP 固化砂土强度与碳酸盐含量间呈现明显的线性关联;郭红仙等<sup>[11-12]</sup>采用拌和法固化岛礁钙质砂土发现少量反应液和菌液能够改善其压缩特性,改性后钙质砂土的渗透性会降低 1~2 个数量级;郑俊杰等<sup>[13]</sup>分析了 MICP 固化砂柱的应力应变特征,并基于此提出了一种评价低胶结水平固化砂土脆性特征的指标。此外,部分学者也对砂土外的其他土体进行了 MICP 固化研究。陈欣等<sup>[14]</sup>采用不同浓度的胶结液对花岗岩残积土进行处理,发现固化土体抗剪强度随胶结液浓度增加而增加,且在 2 mol/L 胶结液处理下黏聚力和内摩擦角分别提升 127.62% 和 36.5%;童友东<sup>[15]</sup>采用注浆法分别对吹填软土进行室内和现场试验,发现固化后强度有明显提升,在无侧限压力试验中土柱如岩石般呈现脆性破坏;王倩<sup>[16]</sup>对比了不同细颗粒含量粉土经过 MICP 固化后的强度特征,发现固化粉土无侧限抗压强度随黏粒含量升高而增大;王连锐等<sup>[17]</sup>以活性炭为载体,对比了 2 种不同微生物加固土样基本物理性质

和力学强度,发现改性后土样趋于密实,物理力学性质也得到极大改善。可见, MICP 在各类土体中具有广泛的适用性,改性后土体的物理性质和强度等都有了明显提升。

此外,如何提升微生物固化效果也成为研究的热点问题之一。Whiffin<sup>[18]</sup>对比了巴氏芽孢杆菌和普通变形杆菌之间的酶活性和矿化效果,得出巴氏芽孢杆菌的矿化能力更优;张继生等<sup>[19]</sup>测定了不同浓度矿化菌的脲酶活性,发现菌液浓度与脲酶活性之间为正相关关系,即菌液浓度越高,碳酸钙的生成量越高;赵志峰等<sup>[20]</sup>采用拌合法研究了胶结液用量和浓度对微生物固化效果的影响,发现当浓度低于 0.5 mol/L 时,碳酸钙的生成量随着用量的增加而呈线性增加,0.75 mol/L~1.25 mol/L 的胶结液浓度下矿化效果更佳。目前的研究主要集中于菌液或胶结液对固化效果的影响,关于菌液和胶结液间比例(简称为菌胶比)对微生物固化效果影响的研究相对较少。而黏土在我国分布广泛,但是由于其结构复杂且孔隙较小,目前使用 MICP 加固黏土的研究鲜有报道。

本文以黏土为研究对象,通过直剪试验和无侧限抗压试验测试固化黏土的强度性能和变形特征,并在此基础上采用酸洗法测量破坏后试样的碳酸钙生成量,分析菌胶比改变对 MICP 加固效果的影响,以期得出最佳的菌液和胶结液比例,为 MICP 加固效果调控和后期工程应用提供参考。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料

#### 1.1.1 试验土样

试验所用黏土取自福州市晋安区益凤村某边坡,依照《土工试验方法标准》<sup>[21]</sup>(GB/T 50123—2019)测试其物理性质,如表 1 所示。通过筛分法计算得土样不均匀系数  $C_u$  为 8.23,曲率系数  $C_c$  为 1.35,为级配良好土。将取回后土样放入烘箱中以 105℃ 烘烤 24 h,将烘干后土样碾碎并用 2 mm 标准筛筛分,取小于 2 mm 的土颗粒用于微生物固化试验。

表 1 试验土样物理参数指标

天然含水率/%	饱和含水率/%	天然密度/( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	干密度/( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	液限/%	塑限/%	孔隙率/%	比重 $G_s$	不均匀系数 $C_u$	曲率系数 $C_c$
18.46	35.6	1.45	1.23	42.1	26.5	48.1	2.73	8.23	1.35

### 1.1.2 固化菌种

本次固化试验所用菌种为巴氏生孢八叠球菌 (*Sporosarcina pasteurii*), 购自福建省微生物研究所, 经  $\text{NH}_4\text{-YE}$  培养基活化培养 24 h 后再扩大培养, 随后接种至发酵培养基中发酵 48 h 后分装, 4℃ 冷藏备用, 采用单位时间内尿素的水解量来表征菌液浓度, 为 5 mmol/(L·min)。

### 1.1.3 胶结液

试验所用胶结液为 1 mol/L 的氯化钙与尿素混合溶液, 摩尔浓度比为 1, 均由天津市众联化学试剂有限公司生产。

## 1.2 试样制备及试验方法

目前室内微生物固化试验土样制备的主流方法有注浆法和预拌和法<sup>[22]</sup>, 注浆法制样时因注浆位置的差异易出现固化不均匀的现象, 而预拌和法通过预先将微生物菌种和固化剂均匀混合, 可以确保固化效果更加稳定和可靠, 故本文采用预拌和法制备试验土样。本次试验设置菌胶比 0.5、1、2 三组试验组, 一组清水对照组, 具体见表 2。根据现场取土样含水率测试结果, 在试验用土中加入清水制备天然含水率重塑土样作为对照组, 然后将清水替换成等体积的菌液和胶结液掺入土料中拌和不少于 10 min, 至土样混合均匀后停止搅拌, 静置 3 h 后制备试验土样并进行 7 d 养护。

表 2 试验方案

试验编号	制备方法	菌胶比	胶结液浓度 / (mol·L <sup>-1</sup> )	氯化钙 : 尿素	养护天数 / d
A	预拌和法	0.5	1	1	7
B	预拌和法	1	1	1	7
C	预拌和法	2	1	1	7
清水对照组	预拌和法	—	—	—	7

### 1.2.1 直剪试验

将试验土样制备成标准环刀试样后采用 ZJ-D 型应变控制式直剪仪进行快剪试验, 分 4 级设置荷载 100 kPa、200 kPa、300 kPa、400 kPa, 剪切速率 0.80 mm/min, 每间隔 0.8 mm 位移读取测力计量表一次, 直至试样剪破。一般试样宜剪切至变形 4 mm 处, 若量表指针仍持续增加, 则剪切至变形 6 mm 为止。

### 1.2.2 无侧限抗压试验

将试验土样制备成直径 39.1 mm, 高 80 mm 的标准土柱, 采用 YYW-2 型应变控制式无侧限压力仪测试土样的抗压强度, 设置加载速率为 1.0 mm/min, 记录土柱变形破坏的应力-应变过程和峰值应力。当轴向应变小于 3% 时, 每隔 0.4 mm 记录一

次; 轴向应变超过 3% 时, 每隔 0.8 mm 记录一次。

### 1.2.3 碳酸钙生成量测试

分别选取无侧限抗压试验破坏后土样上、中、下三个部位各约 8 g, 采用酸洗法<sup>[23]</sup>测定微生物固化黏土试样的碳酸钙生成量, 将三个部位土样酸洗前后的质量差取均值后作为固化土样的碳酸钙生成量。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 直接剪切试验结果与分析

将不同菌胶比处理下固化土样和天然含水率重塑土样进行剪切, 将所得数据绘制成应力-位移曲线, 如图 1 所示。由图 1 可以看出, 相较于清水对照组, 不同菌胶比下微生物固化黏土的抗剪强度都得到了明显的提升。由剪应力-剪切位移曲线可知, 不同竖向应力下试验土样均呈现应变硬化特征, 随着菌液和胶结液比例的提高, 土体的剪应力由平稳逐渐变陡, 剪应力的迅速增加说明微生物固化作用有效提升了土体的强度。究其原因, 这是由于固化菌种催化产生碳酸钙结晶发挥生物胶结作用, 增强了土颗粒间的联结作用和摩擦力, 让土体结构变得更加紧密。

抗剪强度曲线如图 2 所示。由图 2 可以看出, 在三种菌胶比配比处理后试验组的抗剪强度均有不同程度的增长, 菌胶比等于 1 时提升最大, 等于 2 时次之, 等于 0.5 时最小。抗剪强度参数变化曲线如图 3 所示, 菌胶比 0.5、1、2 三组试验组的黏聚力分别为 109.16 kPa、136.70 kPa、127.26 kPa, 相较于天然含水率重塑土的 25.27 kPa 分别提升了 331.97%、440.96%、403.60%; 三组试验组的内摩擦角分别为 28.43°、29.60°、28.68°, 相较于对照组的 19.92°增加了 42.72%~48.59%。可见, 微生物固化能够有效提升黏土的抗剪强度参数, 菌胶比 1 试验组 > 菌胶比 2 试验组 > 菌胶比 0.5 试验组, 说明菌液是影响微生物固化作用的重要因素, 但并非比例越高越好, 选择合适的菌液与胶结液比例对于试验的结果有较大的影响。

除去养护条件等外部因素, 微生物固化效果的主要影响因素为固化菌种和胶结液的参数。本次试验采用的巴氏生孢八叠球菌具有极高的尿素降解活性, 能够迅速提升碳酸根浓度并营造适宜细胞生活的碱性环境。在适宜环境下, 菌种快速发育繁殖, 能够产生大量的脲酶。在菌胶比等于 0.5 条件下, 矿化菌种的浓度较低, 产生的脲酶浓度不足以完全催化钙源与碳酸根结合产生沉淀结晶; 在菌胶比等于 1 条件下, 菌种脲酶产量与胶结液含量保持在比较

均衡的比例,水解尿素产生更多的碳酸根与钙离子结合;在菌胶比等于 2 条件下,菌液所占比例更高,产生的脲酶更充足,但是胶结液所占比例降低导致引入的钙离子不足,产生的碳酸钙含量要少于菌胶

比为 1 的条件。综合来看,矿化菌种浓度较低或胶结液体积不足均难以使黏土矿化加固效果达到最佳,但相较于未处理对照组仍具有明显的固化效果,试验结果与胡其志等学者<sup>[24-25]</sup>研究结论具有一致性。

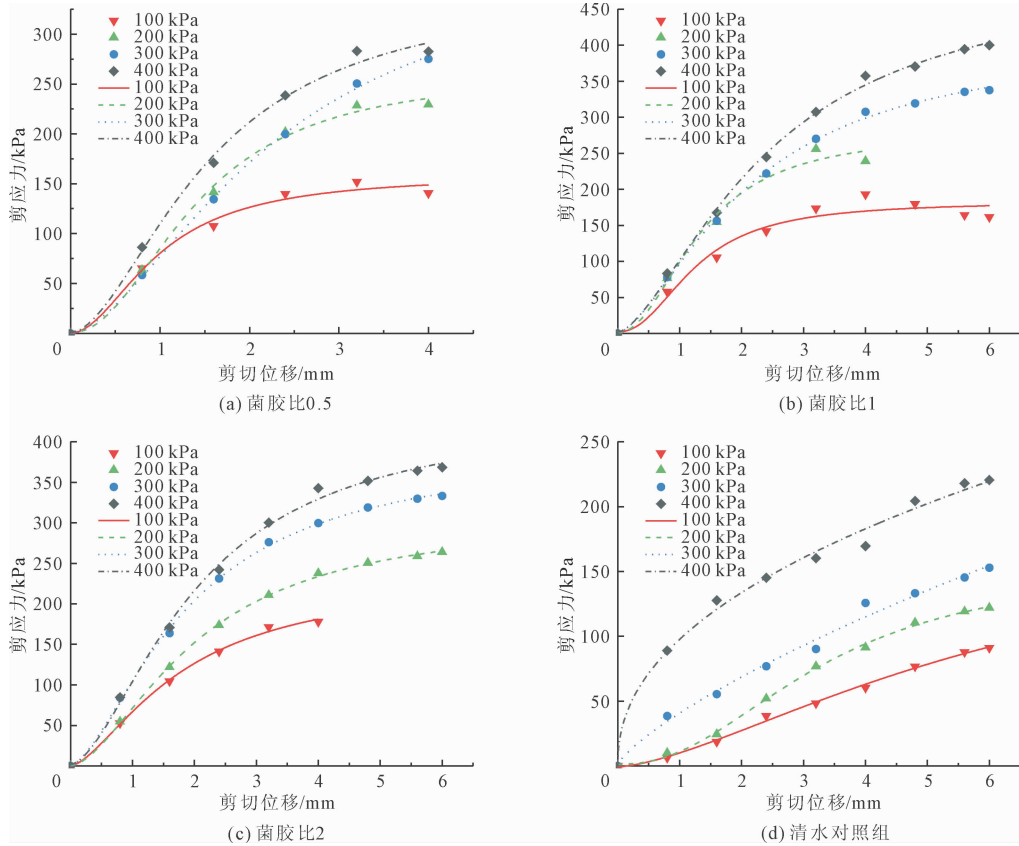


图 1 不同法向应力下土体剪应力-剪切位移曲线

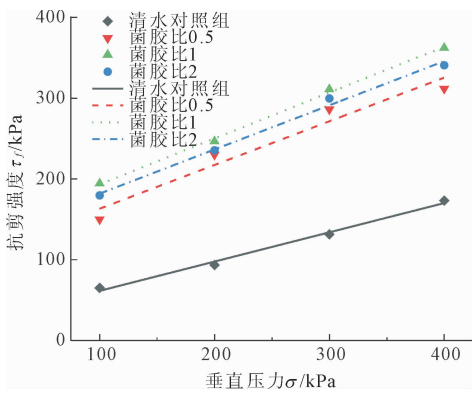


图 2 抗剪强度变化曲线

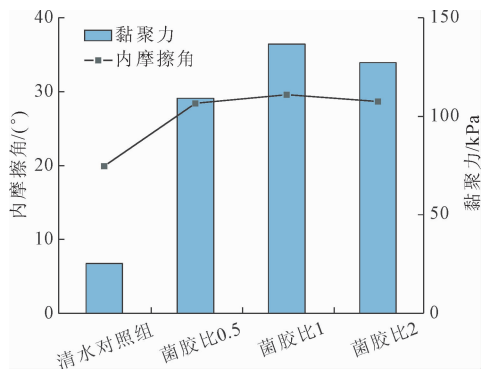


图 3 抗剪强度参数变化曲线

2.2 无侧限抗压试验结果与分析

微生物诱导产生的碳酸钙晶体能够通过生物胶结作用增强颗粒间的黏结力,使原本结构疏松的土体之间结合越加紧密成为具有一定强度的整体。不同处理下土体强度曲线如图 4、图 5 所示,由图 4 和图 5 可知,天然含水率重塑土、菌胶比 0.5、1、2 加固

土的无侧限抗压强度分别为 72.45 kPa、132.06 kPa、192.49 kPa、148.78 kPa。菌胶比 1 试验组的强度最大,较清水对照组强度提高 1.66 倍,菌胶比 0.5 和菌胶比 2 试验组的强度较为接近,与对照组相比分别提高 0.82 倍和 1.05 倍。由无侧限抗压试验结果显示,相较于天然含水率重塑土柱,微生物固化土柱在相同应变条件下承受的轴向应力呈现增大趋

势。随着菌胶比的增加,试样所承受轴向应力呈现先增大后减小的趋势,在菌胶比为1时峰值强度达到最大,这与快剪试验所表现的趋势相吻合。与此同时,可以发现应力峰值随着菌胶比增大而逐渐向右侧发生偏移,证明经过处理后的黏土变形性质得到增强,能够承受更大的应变而不断裂。这说明微生物固化的胶结作用不仅体现在强度的增长上,还能增强材料的延展性,对于黏土的改性效果显著。

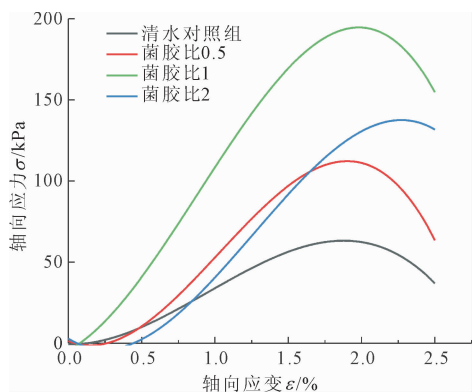


图4 不同处理下土体的典型应力-应变曲线

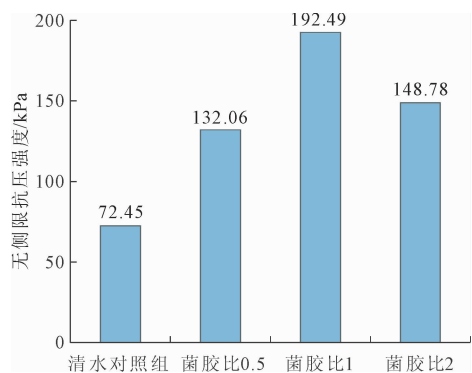


图5 不同处理下土体的无侧限抗压强度

无侧限抗压试验通过向无侧限约束条件下的待测试样施加轴向应力,测量试样在应力下的极限强度,过程中可以同时观测土柱的破坏形态。在本次试验当中,不同菌胶比试验组的抗压强度都得到了明显的增长,特别是菌胶比等于1条件下峰值强度达到最大。一方面试验结果与碳酸钙的生成量相关<sup>[26]</sup>,菌液和胶结液两者配比合理时,矿化反应更加充分,产生的沉淀数量更多;另一方面可能与碳酸钙产物的形貌有关<sup>[25,27]</sup>,在菌液浓度较高且反应物充足的条件下,菌种分泌的孢外聚合物及其特殊的结构使得固化菌与土颗粒表面更加贴合,在细胞表面负电荷的吸引下,环境周围的钙离子等金属阳离子被吸附到菌种聚合体表面,在催化作用下产生结晶沉淀与土颗粒联结形成较大的团簇集聚体,增强

了土柱的无侧限抗压强度。

### 2.3 碳酸钙生成量测试结果与分析

将不同菌胶比固化作用下无侧限抗剪测试后土样收集,分别从破坏试样上、中、下三部分取出8g的固化黏土,经过酸洗法测定碳酸盐生成量,经过平均后记为试样的碳酸钙生成量,如图6所示。菌胶比0.5、1、2处理下土样的碳酸钙生成量为2.11%、4.28%、3.74%。可见,菌胶比为1时碳酸钙生成量最高、菌胶比为2时次之、菌胶比为0.5时最少。如图7所示,碳酸钙生成量结果与无侧限抗压试验所测得的强度增长趋势相符,呈现正向关联,说明碳酸钙晶体的生成有效增强了土体的强度和变形特性,与其它学者结论一致<sup>[28]</sup>。菌胶比1和菌胶比2之间结果较为接近,与菌胶比0.5之间分别相差1.03倍和0.77倍,说明在优化菌液和胶结液配比条件下,脲酶催化尿素的水化作用更加充分,促进碳酸根离子与钙离子结合得更加均匀,使得MICP加固效果更加明显。

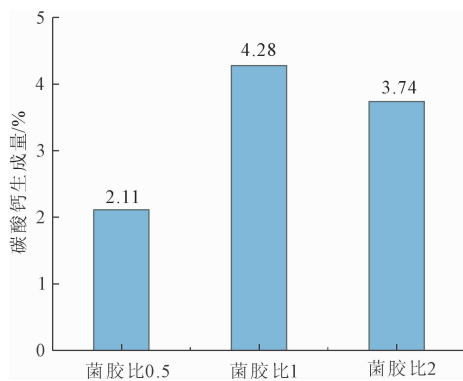


图6 不同菌胶比处理下碳酸钙生成量

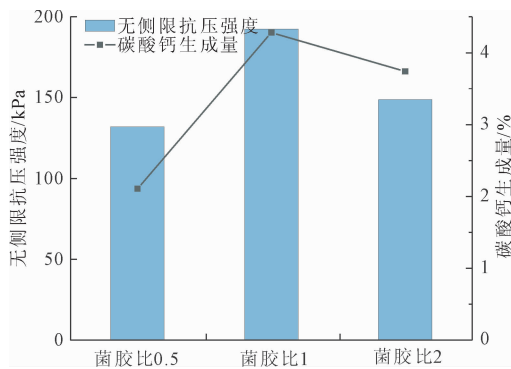


图7 无侧限抗压强度与碳酸钙生成量间变化关系曲线

## 3 结论

本文通过设置不同菌液和胶结液配比条件,结合直接剪切试验和无侧限抗压测试结果,研究微生物固化技术对黏土的矿化加固效果,并与碳酸钙生

成量关联分析,发现优化菌胶比对提升微生物固土效果具有重要作用,主要结论如下:

(1) 采用巴氏生孢八叠球菌和胶结液进行微生物固化能够有效增强黏土的强度,说明微生物固化在改善土体工程性质上具有显著成效,在黏土加固中也具有适用性。

(2) 菌胶比对微生物固化黏土效果具有较大的影响,菌胶比等于 1 时对土体的改良作用最为明显,较天然含水率重塑土的抗剪强度有显著增长,其中土体黏聚力最大可增加 440.96%,内摩擦角最大可提升 48.59%。

(3) 黏土的无侧限抗压强度在微生物固化作用下也得到了明显提升,随着菌液和胶结液比例的增加,强度峰值逐渐向右侧偏移,在菌胶比等于 1 条件下峰值强度最大,可达到 192.49 kPa。

(4) 微生物诱导产生的碳酸钙晶体充填与土颗粒间的孔隙,通过胶结作用使土体形成愈加密实的集聚体,显著增强了试样的抗剪强度和抗压强度,碳酸钙生成量与土体强度之间呈现正相关关系。

#### 参考文献:

- [1] 唐朝生,泮晓华,吕超,等.微生物地质工程技术及其应用[J].高校地质学报,2021,27(6):625-654.
- [2] 熊雨,肖瑶,邓华锋,等.海水环境下混凝土裂缝微生物改性修复研究[J].应用基础与工程科学学报,2024,32(1):160-177.
- [3] 段金贵,王怀星,姚姬璇,等.黄土坡面的微生物矿化加固及抗侵蚀性能试验研究[J].水土保持通报,2022,42(5):33-40.
- [4] 章懿涛.不同含水状态下微生物珊瑚砂桩单桩复合地基承载特性[D].重庆:重庆大学,2022.
- [5] 金泽康,张旋,李敏,等.微生物自修复混凝土裂缝自修复动力学模型[J].材料导报,2020,34(S2):1994-2000.
- [6] 储方舟,吴静云,丁静鹤,等.生物水泥技术应用于液化地基处理的研究进展[J].水利与建筑工程学报,2019,17(2):91-96.
- [7] 王双娇,李志清,田怡帆,等.微生物岩土工程技术的过去、现在与未来[J].工程地质学报,2024,32(1):236-264.
- [8] 何稼,楚剑,刘汉龙,等.微生物岩土技术的研究进展[J].岩土工程学报,2016,38(4):643-653.
- [9] Sharaky A M, Mohamed N S, Elmashad M E, et al. Application of microbial biocementation to improve the physico-mechanical properties of sandy soil[J]. Construction and Building Materials, 2018,190:861-869.
- [10] Chu Jian, Ivanov V, Naeimi M, et al. Optimization of calcium-based bioclogging and biocementation of sand

- [J]. Acta Geotechnica, 2014,9(2):277-285.
- [11] 郭红仙,李东润,马瑞男,等. MICP 拌和固化钙质砂一维固结试验[J].清华大学学报(自然科学版),2019,59(8):593-600.
- [12] 马瑞男,郭红仙,程晓辉,等.微生物拌和加固钙质砂渗透特性试验研究[J].岩土力学,2018,39(S2):217-223.
- [13] 郑俊杰,宋杨,吴超传,等.低胶结水平 MICP 固化砂土脆性评价方法研究[J].华中科技大学学报(自然科学版),2020,48(11):96-101.
- [14] 陈欣,安然,汪亦显,等.胶结液浓度对 MICP 固化残积土力学性能影响及机理研究[J].水利与建筑工程学报,2023,21(6):100-106,149.
- [15] 童友东.大连太平湾含黏粒吹填粉细砂的微生物固化研究[D].沈阳:沈阳建筑大学,2020.
- [16] 王倩.黄河中下游粉土微生物固化改性机制及其抗液化性能研究[D].郑州:华北水利水电大学,2022.
- [17] 王连锐,陈筠,杨恒,等.微生物对红黏土强度的改良效应及机理研究[J].长江科学院院报,2022,39(5):125-131.
- [18] Whiffin V S. Microbial CaCO<sub>3</sub> precipitation for the production of biocement[D]. Western Australia: Murdoch University, 2004.
- [19] 张继生,刘伟,管大为,等.不同细菌注浆方法对 MICP 一相注工艺的影响[J].河海大学学报(自然科学版),2020,48(3):222-230.
- [20] 赵志峰,彭邦阳,邵光辉.胶结液参数对微生物加固粉土的影响[J].东南大学学报(自然科学版),2021,51(3):456-462.
- [21] 土工试验方法标准:GB/T 50123—2019[S].北京:中国计划出版社,2019.
- [22] 刘汉龙,肖鹏,肖杨,等.微生物岩土技术及其应用研究新进展[J].土木与环境工程学报(中英文),2019,41(1):1-14.
- [23] 沈泰宇,汪时机,薛乐,等.微生物沉积碳酸钙固化砂质黏性紫色土试验研究[J].岩土力学,2019,40(8):3115-3124.
- [24] 胡其志,霍伟严,马强,等. MICP 联合纤维加筋黄土的力学性能及水稳性研究[J].人民长江,2023,54(8):227-232,248.
- [25] 马国梁,何想,路桦铭,等.高岭土微粒固载成核微生物固化粗砂强度[J].岩土工程学报,2021,43(2):290-299.
- [26] 张世参,骆亚生,田堪良,等.风积沙的微生物固化试验研究[J].人民黄河,2021,43(10):144-149,160.
- [27] 何想,马国梁,汪杨,等.基于微流控芯片技术的微生物加固可视化研究[J].岩土工程学报,2020,42(6):1005-1012.
- [28] 赵志峰,王浩然.多轮反应溶液用量对微生物加固粉土的影响[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2023,42(8):51-56.