

培养液诱导微生物改性粉土的抗剪强度特性研究

李 洲¹, 丁临生^{1,2}, 王 艳^{1*}

(1. 宁波大学 建筑工程与环境学院, 浙江 宁波 315211; 2. 宁波交通工程建设集团有限公司, 浙江 宁波 315010)

摘要: 通过直剪试验, 研究培养液类型、浓度和培养时间 3 因素变化时, 微生物对粉土抗剪强度的影响。通过向土体中注入不同浓度的葡萄糖和淀粉溶液, 对土体进行 15、30 和 60 d 的培养。制作环刀试样, 进行直剪试验。分析发现, 淀粉溶液和葡萄糖溶液培养的微生物均能显著提高粉土的抗剪强度; 相同培养时间下, 培养液浓度增大, 粘聚力和内摩擦角呈增大趋势; 用葡萄糖和淀粉溶液培养 60 d 后, 粉土的粘聚力提高 2.38 和 2.03 倍, 内摩擦角扩大了 6.54 和 8.40 倍。实验结果可为微生物改性土工程提供参考。

关键词: 改性粉土; 微生物; 抗剪强度; 内摩擦角; 粘聚力

中图分类号: TU431

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2017) 03-0076-05

随着城市化进程的不断加快, 我国相继建设了众多世界级工程, 这不仅满足了人们生活的需要, 也在很大程度上象征着国家的经济活力。然而, 城市建设也考验着环境的承受能力, 大气污染、水污染、土壤污染等新问题困扰着人们的日常生活。为寻找一种更加环保的土体加固技术, 一些学者开始利用微生物来处理建设用土。微生物可以在多孔介质中生长、运移和繁殖, 深入到每一寸土壤, 并通过新陈代谢活动, 排出具有胶结作用的矿物成分^[1-3]。这些矿物的沉积和死亡的细菌尸体保留下来, 能产生胶结并堵塞孔隙, 从而减小土的压缩性, 提高土体抗剪强度^[4-6]。利用微生物改性土壤是一种全新的理论和技术创新, 对生态环境的可持续发展带来了深远的影响。

目前, 针对微生物改性土壤技术已有了一些研究成果。Ahmed 等^[7]、Okwadha 等^[8]发现了不同微生物浓度、尿素浓度、温度、钙离子浓度和环境 pH 值对尿素酶活性具有一定影响, 并进而影响到微生物沉积碳酸钙的数量。许朝阳等^[9]研究发现, 掺碳酸钙矿化菌和多糖粘胶菌对粉土的强度均有不同程度的提高, 且矿化菌提高粉土内摩擦角 φ 的幅度较大, 而多糖粘胶菌提高粉土粘聚力 c 的幅度

较大。Martinez 等^[10]对经微生物处理的土样进行室内渗透和强度试验, 结果表明: 该土样的渗透性下降了 2~3 个数量级, 抗剪强度提高约 50%。由此可见, 微生物对土体的渗透性和强度有一定的影响。张优龙等^[11]认为, 微生物活动对各种性质的土体均能提高其强度, 对于砂土主要通过诱导无机矿物沉淀胶结颗粒提高强度, 对于粉土主要通过多糖等粘性分泌物胶结颗粒增加强度, 而对于粘土主要通过微生物及其代谢产物减小结合水膜厚度提高土体强度。Martinez 等^[10]利用微生物技术胶结加固一层粘结性较差的砂砾石层, 成功阻止了其失稳塌落。总之, 该技术有着较好的应用前景。

本文通过对粉土添加不同浓度的淀粉和葡萄糖培养液, 考察不同培养时间下粉土抗剪强度参数的变化, 以此评估微生物改性土的工程适宜性。

1 材料与试验方法

1.1 粉土试样

试验采用钱塘江粉土作为研究对象, 将粉土样烘干储备备用。对粉土进行颗粒比重试验、颗粒分析试验、液塑限试验、轻型击实试验等, 确定钱塘江粉土基本的物理力学性质指标(表 1)。

收稿日期: 2016-11-30.

宁波大学学报(理工版) 网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(51678311, 51308310)。

第一作者: 李洲(1994-), 男, 浙江杭州人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 环境岩土工程。E-mail: 458629028@qq.com

*通信作者: 王艳(1985-), 女, 湖北随州人, 博士/副教授, 主要研究方向: 环境岩土工程。E-mail: wangyan@nbu.edu.cn

表 1 粉土的主要性能指标

土粒 比重	塑限/ %	液限/ %	塑性 指数	最大干密 度/(g·cm ⁻³)	最优含 水量/%
2.71	26.3	34	7.6	1.52	22

1.2 培养液配制

营养物质作为微生物新陈代谢的能量物质,是微生物活动与繁殖的关键因素. 本试验配置淀粉和葡萄糖 2 种溶液作为微生物培养液, 溶液浓度设定为 0.1%、0.2%、0.4%(淀粉、葡萄糖营养物质与粉土的质量比), 试验用水为实验室制备的去离子水. 试验用马铃薯淀粉为生物试剂, 葡萄糖为分析纯试剂. 称取适量的粉土, 按照最优含水量配制淀粉和葡萄糖溶液, 将溶液加入粉土中, 获得淀粉和葡萄糖浓度分别为 0.1%、0.2%、0.4%的 6 组土样. 将培养液注入粉土并搅拌均匀, 放入保鲜袋, 室温储存.

1.3 直剪试验

在土样培养至 15、30、60 d 时, 分别制备添加了不同浓度培养液的环刀土样以备直剪试验用. 本次直剪试验在应变控制式直剪仪(ZJ 型, 南京土壤仪器厂)上进行, 直剪试验用的环刀高 2 cm、直径 6.18 cm, 对各组土样均施加 50、100、200 kPa 的法向应力, 剪切速率为 2.4 mm·min⁻¹.

2 结果分析

2.1 未添加培养液的粉土抗剪强度

图 1 为未添加培养液时粉土剪应力与剪切位移的关系曲线. 从图 1 可知, 原粉土的剪应力最初随着垂直压力的增加而增加, 达到一个峰值后再缓慢减小, 最后趋于一个稳定值. 从图 1 可得到相

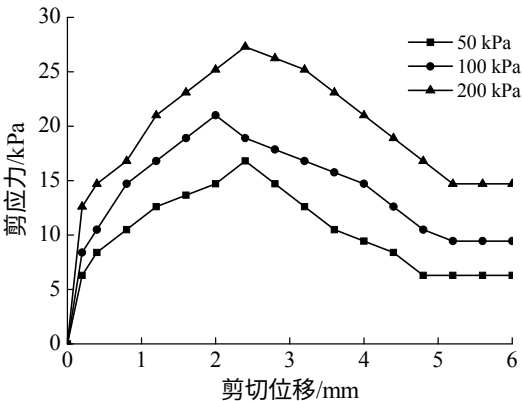


图 1 粉土剪应力与剪切位移的关系曲线

应垂直压力对应的剪应力峰值, 从而得到原粉土的抗剪强度与垂直压力的关系曲线(图 2).

根据库仑抗剪强度定律可知, 粉土的粘聚力为 13.7 kPa, 内摩擦角为 3.9°.

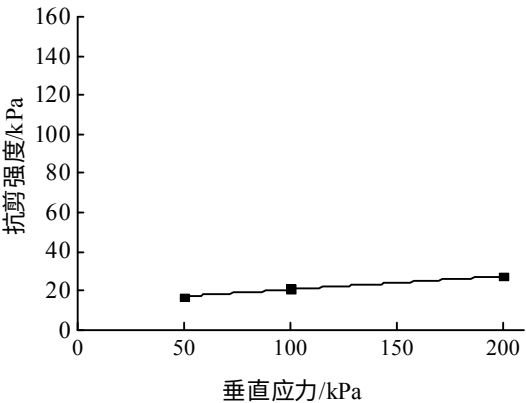


图 2 原粉土的剪切强度变化

2.2 葡萄糖培养的粉土抗剪强度

将粉土分别用葡萄糖溶液培养 15、30、60 d, 不同浓度的葡萄糖培养的粉土剪切强度曲线分别如图 3~5 所示.

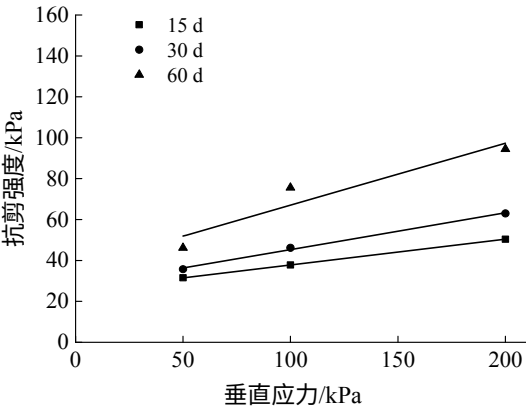


图 3 0.1%葡萄糖溶液所培养粉土的剪切强度变化

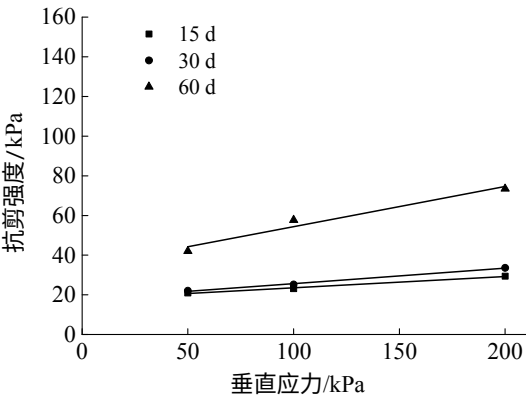


图 4 0.2%葡萄糖溶液所培养粉土的剪切强度变化

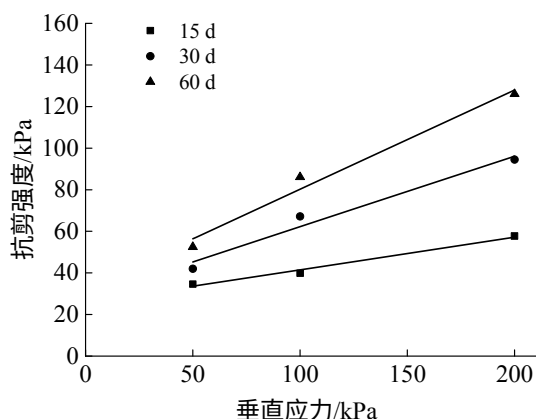


图5 0.4%葡萄糖溶液所培养粉土的剪切强度变化

不同浓度葡萄糖培养的粉土抗剪强度参数见表2.

表2 不同浓度葡萄糖溶液培养的粉土的粘聚力和内摩擦角

培养液 浓度/%	粘聚力/kPa			内摩擦角/(°)		
	15 d	30 d	60 d	15 d	30 d	60 d
0.1	17.85	17.85	34.13	3.26	4.46	11.45
0.2	25.20	27.30	36.75	7.18	10.20	16.86
0.4	25.73	28.35	32.55	8.95	18.73	25.50

结合图3~5及表2可以发现,以0.1%葡萄糖培养的粉土为例,培养时间为15、30 d的土体粘聚力不变,培养时间为60 d的土体粘聚力较第15天增强了90%;而培养时间为30、60 d的土体内摩擦角分别是第15天的1.36倍和3.51倍.随着培养时间的增加,粘聚力和内摩擦角也随之增大,但粘聚力增强较小,尤其是第15天与第30天的粘聚力基本保持不变,而内摩擦角的增大则较为明显.随着葡萄糖溶液浓度的增大,所培养粉土的粘聚力和内摩擦角均有明显的增加.用0.4%葡萄糖培养60 d后,粉土的粘聚力和内摩擦角是原粉土的粘聚力和内摩擦角的2.38和6.54倍.说明葡萄糖溶液培养的微生物对粉土抗剪强度的提高有明显的作用,随着葡萄糖溶液浓度的增大,粉土抗剪强度整体呈增强趋势.

2.3 淀粉培养的粉土抗剪强度

将粉土分别用淀粉溶液培养15、30、60 d,不同浓度淀粉培养的粉土的剪切强度曲线分别如图6~8所示.不同浓度淀粉培养的粉土的抗剪强度参数见表3.

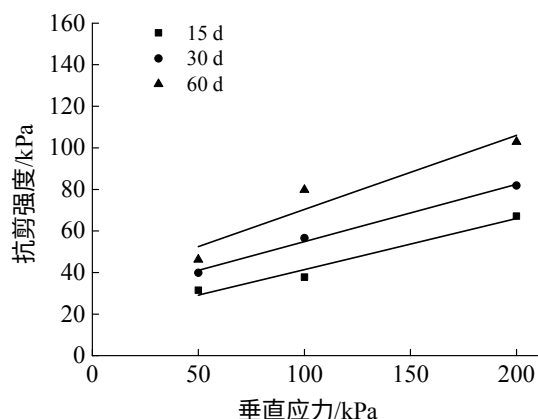


图6 0.1%淀粉溶液所培养粉土的剪切强度变化

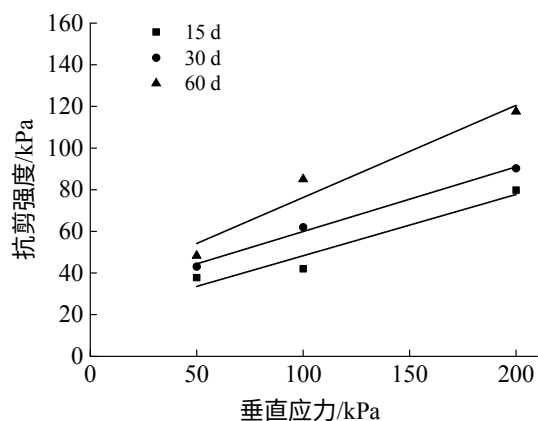


图7 0.2%淀粉溶液所培养粉土的剪切强度变化

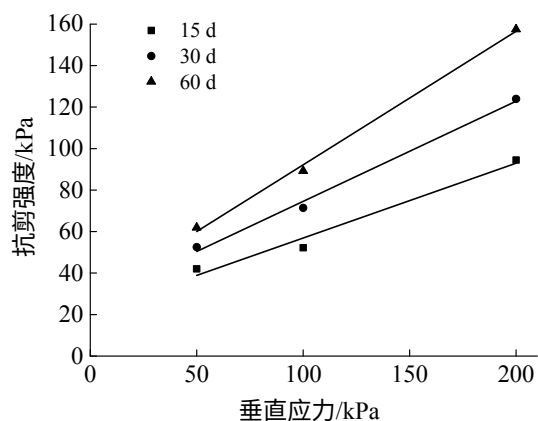


图8 0.4%淀粉溶液所培养粉土的剪切强度变化

表3 不同浓度淀粉溶液培养粉土的粘聚力和内摩擦角

培养液 浓度/%	粘聚力/kPa			内摩擦角/(°)		
	15 d	30 d	60 d	15 d	30 d	60 d
0.1	16.80	27.25	34.65	13.82	15.44	19.65
0.2	18.90	28.88	32.03	16.38	17.25	23.87
0.4	20.85	26.25	27.83	19.82	25.78	32.76

从图6~8及表3可以发现, 用0.1%淀粉溶液培养30、60 d的土体的粘聚力较培养第15天的土体增强了0.62和1.06倍; 而内摩擦角分别是第15天的1.09和1.42倍。随着培养时间的增长, 粘聚力和内摩擦角也随之有显著提高。在相同培养时间下, 随着淀粉溶液浓度的增大, 粘聚力基本呈增强趋势, 而内摩擦角的增大较为明显。用0.4%淀粉溶液培养60 d后, 粉土的粘聚力和内摩擦角是原粉土粘聚力和内摩擦角的2.03和8.4倍。说明淀粉溶液培养的微生物对粉土抗剪强度有一定的影响, 随着淀粉溶液浓度的增大, 粉土的抗剪强度整体呈增强趋势。

2.4 不同培养液种类的影响

图9和图10分别为不同浓度培养液培养粉土的内摩擦角和粘聚力的变化曲线。从图9和图10可知, 用淀粉溶液所培养的微生物与用葡萄糖溶液所培养的微生物对改善粉土抗剪强度的作用效

果相似, 均可显著提高粉土的粘聚力和内摩擦角。从提高土的内摩擦角看, 淀粉提高的内摩擦角比葡萄糖高1.3~4.2倍; 从土的粘聚力变化看, 随着培养时间的延长以及培养液浓度的增大, 粉土的粘聚力增速变缓。

利用微生物技术来改善粉土的工程性质是一种新兴技术, 该技术主要是将微生物繁殖与土体改性结合起来。微生物具有一定的吸附能力, 可以吸附于土体颗粒表面形成一层生物膜, 随着生物膜的增厚, 导致土体孔隙减小; 微生物本身具有一定的电极性, 可以改变土体颗粒结构表面双电层结构, 通过吸附、胶结、斥水等方式使结合水膜变薄, 增大颗粒间凝聚力^[11]。另外, 微生物代谢活动释放出的物质具有一定的胶结性能, 可以将分散的粉土颗粒结合起来, 提高颗粒间的粘聚力, 从而改善粉土的工程性质。

3 结论

通过直剪试验, 研究了培养液种类、培养液浓度、培养时间3因素对微生物改性土的影响, 得出如下结论:

- (1)用葡萄糖溶液培养的微生物和用淀粉溶液培养的微生物均能提高粉土的抗剪强度。
- (2)随着溶液浓度的增加和培养时间的延长, 用葡萄糖溶液和淀粉溶液所培养的土体的抗剪强度均呈增强趋势。
- (3)淀粉溶液培养的微生物与葡萄糖溶液培养的微生物改善粉土抗剪强度的效果相似, 用葡萄糖和淀粉溶液培养60 d后, 粉土的粘聚力分别提高2.38和2.03倍, 内摩擦角分别增大6.54和8.4倍。

参考文献:

- [1] 苗晨曦, 李亚梅, 郑俊杰, 等. 微生物改性土体研究进展[J]. 土木工程与管理学报, 2012, 29(1):25-29.
- [2] 沈吉云. 微生物成因土工材料实验及应用研究[D]. 北京: 清华大学, 2009.
- [3] 张贺超. 砂土介质中微生物诱导封堵技术试验研究[D]. 北京: 清华大学, 2010.
- [4] 张莉. 微生物改性粉土的试验及机理研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2008.
- [5] 杜静, 周东. 微生物改良膨胀土的试验研究[J]. 水利

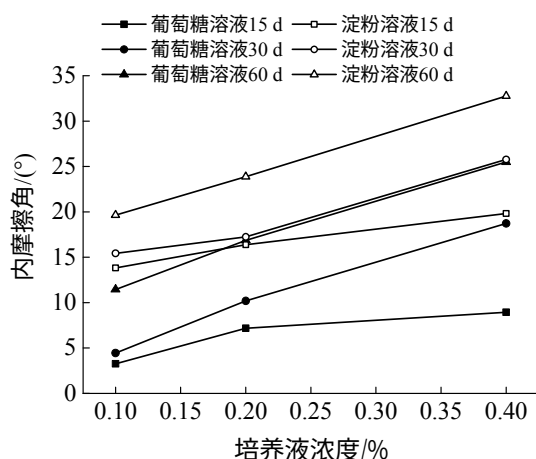


图9 不同浓度培养液培养粉土的内摩擦角变化

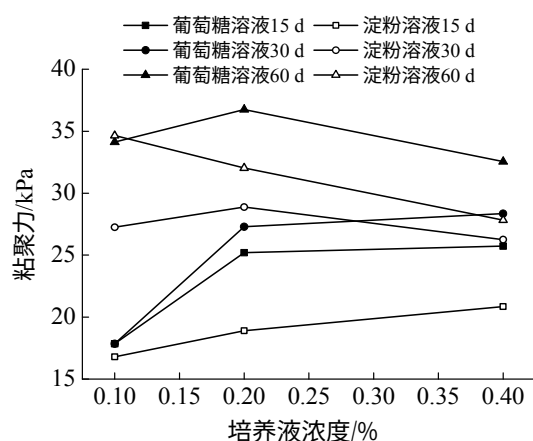


图10 不同浓度培养液培养粉土的粘聚力变化

- 水电技术, 2012, 43(7):103-105; 87.
- [6] 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.
- [7] AHMED A Q, KENICHI S, CARLOS S. Factors affecting efficiency of microbially induced calcite precipitation[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2012, 138(8):992-1001.
- [8] OKWADHA G D, LI J. Optimum conditions for microbial carbonate precipitation[J]. Chemosphere, 2010, 81(9):1143-1148.
- [9] 许朝阳, 张莉. 微生物改性对粉土强度的影响[J]. 建筑科学, 2009, 25(5):45-48.
- [10] MARTINEZ B C, DEJONG J T, GINN T R. Bio-geochemical reactive transport modeling of microbial induced calcite precipitation to predict the treatment of sand in one-dimensional flow[J]. Computers and Geotechnics, 2014, 58(5):1-13.
- [11] 张优龙, 杨坪. 微生物改善土体性能研究进展[J]. 微生物学通报, 2014, 41(10):2122-2127.
- [12] IVANOV V, CHU J. Applications of microorganisms to geotechnical engineering for bioclogging and biocementation of soil in situ[J]. Reviews in Environmental Science and Biotechnology, 2008, 7(2):139-153.

Study on shear strength of silty soil modified by microbes induced by culture medium

LI Zhou¹, DING Lin-sheng^{1,2}, WANG Yan^{1*}

(1.Faculty of Architectural, Civil Engineering and Environment, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2.Ningbo Communication Engineering Construction Group Co., Ltd., Ningbo 315010, China)

Abstract: In this paper, direct shear test is conducted to investigate the effect of microbes on the shear strength of silty soil under the conditions with varying culture medium, culture medium concentration and culture time. By injecting different concentrations of glucose and starch solution into the soil, observations after 15 days, 30 days and 60 days of culture are carried out, respectively. As can be seen from direct shear tests, both glucose and starch solution can improve the shear strength of silty soil. Both cohesion and internal friction angle of silty soil show increasing trend along with increasing concentration of culture medium at the same culture time. After cultured by glucose and starch solution for 60 days, the cohesion of silty soil can increase to 2.38 and 2.03 times respectively, and the internal friction angel of silty soil can increase to 6.54 and 8.4 times respectively. The results are expected to provide reference for soil improvement by microbes.

Key words: modified silty soil; microbe; shear strength; internal friction angle; cohesion

(责任编辑 史小丽)