DOI：10.11779/CJGE2023S10047

采用微生物技术复合改良膨胀土的工程特性试验研究

肖建章[1]，刘禹杉[1]，王 迪[2]，李 健[1]，吴帅峰[1]，王 波[1]

(1. 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；2. 翁牛特旗海拉苏水利工程管护中心，内蒙古 赤峰 024500)

摘 要：膨胀土是岩土工程界的公认难题之一，基于微生物技术，结合石灰、水泥、粉煤灰等改良材料，系统开展了复合改良膨胀土的工程特性试验研究。结果表明：①微生物复合改良膨胀土成功的将弱膨胀土变为无膨胀土，自由膨胀率最低降低至 8%，降幅达 84.31%，工程效果良好。②经复合处理试样中的蒙脱石相对含量降低、伊利石相对含量上升是抑制胀缩特性的一个重要原因。③膨胀土中单掺菌液 20%情况下，摩擦角同比可增加 23%。④菌液、粉煤灰、石灰复合改良膨胀土情况下，石灰掺比 1%粉煤灰 2%的低掺比组合对提高强度更为有利。

关键词：膨胀土；微生物；复合改良；胀缩特性

中图分类号：TU43 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-4548(2023)S1-0097-05

作者简介：肖建章(1977—)，男，博士，主要从事岩土工程材料力学性质方面的试验研究工作。E-mail：xiaojz@iwhr.com。

Experimental study on engineering characteristics of composite improvement of expansive soil by using microbial technology

XIAO Jianzhang[1], LIU Yushan[1], WANG Di[2], LI Jian[1], WU Suaifeng[1], WANG Bo[1]

(1.State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China; 2. Hai Lasu Water Conservancy Engineering Management and Protection Center of Weng Niute, Chifeng 024500, China)

Abstract: The expansive soil is one of the recognized challenges in the field of geotechnical engineering. Based on the microbial technology, combined with the improved materials such as lime, cement and fly ash, the experimental researches on the engineering characteristics of composite improved expansive soil are conducted. The results show that: (1) The weak expansive soil is successfully changed into the non-expansive one by the microbial composite improvement of expansive soil, and the free expansion rate is reduced to 8% at the lowest, with a decrease of 84.31%. The engineering effect is good. (2) The decrease of the relative content of montmorillonite and the increase of the relative content of illite in the composite treated samples are the important reason for inhibiting the expansion and contraction characteristics. (3) When the bacterial solution of 20% is added to the expansive soil, the friction angle can increase by 23% compared to that at the same time last year. (4) In the case of composite improvement of expansive soil with bacterial solution, fly ash and lime, a low ratio combination of lime of 1% and fly ash of 2% is more advantageous for improving the strength.

Key words: expansive soil; microorganism; compsite improvement; engineering characteristic

0 引 言

中国是世界上膨胀土分布最广，面积最大的国家之一，在多个省区均有分布。膨胀土具有强亲水性、强膨胀性、收缩性与裂隙性、快速崩解性与弱抗风化性的特点，常常具有多次反复性和长期潜在危险性，极难防治，不仅施工困难，也严重影响工程进度和造价[1-2]。

为保证地基稳定与强度，减轻工程损失，膨胀土改性研究引起了越来越多的注意[3-5]。置换法能根治膨胀性，但对大面积膨胀土地区不适用；强夯法能降低地基土体压缩性，胀缩性没有从根本上消除，仅适用于弱膨胀土；化学改性造价较高，还会造成二次污染。因此，针对膨胀土特点，研究能有效降低胀缩特性的新型改良材料是类似工程中亟待解决的关键技术问题之一，在当前经济快速发展形势下具有重要的现实意义。

已有研究表明，微生物具有繁殖迅速、代谢灵活性大特点，是地球表层最强大的地质营力之一，对岩土的力学及工程性质产生了重要影响[6]。本文在借鉴

基金项目：国家重点研发计划课题（2019YFC1509800）；引江济淮公司科研项目（YJJH-ZT-ZX-20221130515）

收稿日期：2023-07-06

常规膨胀土改良的基础上，基于微生物技术，探索环保高效的新型膨胀土复合改良技术[7-10]，分析微生物复合改良对膨胀土工程特性的影响，为膨胀土的微生物治理与工程应用积累研究经验。

1 材料选择

1.1 膨胀土

试验所用膨胀土取自广西省宁明县国道G322线K2301+750—K2301+950段膨胀土滑坡体，取样深度为2 m，属于弱膨胀土。液限 w_L 为47%，塑限 w_P 为26%，塑性指数 I_P 为21.0，相对质量密度2.62，天然重度为18.8 kN/m^3。

1.2 菌液

巴氏芽孢杆菌菌液初始OD_{600}为1.82，脲酶活性0.78mS/cm/min。

1.3 营养盐

营养盐为$CaCl_2·2H_2O$（分子量147.01）和CH_4N_2O（分子量60.06），中国国药集团化学试剂有限公司生产，营养盐浓度为1.50 mol/L。

2 方案设计

微生物复合改良试验设计中主要从经济合理和工程效果角度出发，依据文献经验以及传统改良方法，分别考虑单掺、双掺、三掺及四掺组合，共分为6组，见表1。

表 1 复合改良处理对膨胀土固化强度影响试验设计

Table 1 Experimental design for the effect of composite improvement treatment on the solidification strength of expansive soil

试验组别	含水率或掺比	试验编号
A	水+膨胀土、含水率 10%	A10
	水+膨胀土、含水率 15%	A15
	水+膨胀土、含水率 20%	A20
	水+膨胀土、含水率 25%	A25
B	菌液+膨胀土、含水率 10%	B10
	菌液+膨胀土、含水率 15%	B15
	菌液+膨胀土、含水率 20%	B20
	菌液+膨胀土、含水率 25%	B25
C	菌液 20%、粉煤灰掺比 3%	C3
	菌液 20%、粉煤灰掺比 6%	C6
	菌液 20%、粉煤灰掺比 9%	C9
D	菌液 20%、石灰掺比 3%	D3
	菌液 20%、石灰掺比 6%	D6
	菌液 20%、石灰掺比 9%	D9
E	菌液 20%、石灰 1%、粉煤灰 2%	E3
	菌液 20%、石灰 2%、粉煤灰 4%	E6
	菌液 20%、石灰 3%、粉煤灰 6%	E9
F	菌液 20%、粉煤灰 1%、石灰 1%、水泥 1%	F3
	菌液 20%、粉煤灰 2%、石灰 2%、水泥 2%	F6

3 试样制备

试验主要依据《水泥土配合比设计规程：JGJ/T233—2011》、《土工试验方法标准：GBT 50123—2019》、《膨胀土地区建筑技术规范：GB 50112—2013》进行。

采用一次性拌和法进行试样制备按 1.30 g/cm^3 的干密度将土样制成 2 cm 高的环刀试样，养护温度为20.2℃，湿度为 65.3%RH。

4 试验方法

强度试验采用南京土壤仪器厂生产的 ZJ 型电动数采应变控制四联直剪仪，剪切速率为 0.8 mm/min，法向压力分别为 100，200，300，400 kPa。自由膨胀率试验采用自由膨胀率测定仪进行测试。

5 结果分析

依据上述试验设计，对养护 1 d 的 6 组试样进行试验，探讨微生物技术复合改良后膨胀土的工程特性。

5.1 水+膨胀土

为对比MICP试验组治理的强度影响，试验中先对含水率分别为10%，15%，20%，25%（相应组别为A10，A15，A20，A25）仅加水拌和的膨胀土试样进行剪切试验。

表 2 水+膨胀土不同含水率抗剪强度指标

Table 2 Shear strength indicators of water + expansive soil with different moisture contents

组别	c/kPa	φ/(°)
A10	12.96	29.9
A15	46.87	29.5
A20	55.04	23.4
A25	59.34	21.0

从表2中A组单掺水拌和的膨胀土样在养护龄期为1d的情况下，A10内摩擦角为29.9°，A15为29.5°，A20为23.4°，A25为21°，相应的黏聚力分别为12.96，46.87，55.04，59.34 kPa。可以看出，随着含水率的增加，内摩擦角依次降低，黏聚力相应增加。

5.2 菌液+膨胀土

与A组类似，添加微生物菌液后制备的试样对应含水率依次为10%，15%，20%，25%，相应组别为B10，B15，B20，B25。

从表3可以看出，养护1 d后，B组单掺菌液的膨胀土样，B10内摩擦角为31.2°，B15为32.4°，B20为28.9°，B25为17.5°，同比增加4.35%，9.83%，23.50%，16.67%，微生物改性效果良好。对比可以看出，含菌量20%情况下本次试验强度最高，因此，文中基于微

生物技术的膨胀土复合改良试验中，尽管改良剂种类不同，均采用了含菌量20%来对比改良效果。

表 3 菌液+膨胀土不同含水率抗剪强度指标

Table 3 Shear strength indicators of bacterial solution + expansive soil with different moisture contents

组别	c/kPa	φ/(°)
B10	8.44	31.2
B15	5.33	32.4
B20	39.37	28.9
B25	47.87	17.5

5.3　菌液、粉煤灰+膨胀土

表4可以看出，养护1 d、含菌量20%情况下，C组中粉煤灰掺比3%，6%和9%的内摩擦角依次为24.2°，29.7°，25.3°，相应黏聚力分别为35.44，12.96，23.2 kPa。

表 4 菌液、粉煤灰+膨胀土抗剪强度指标

Table 4 Shear strength indicators of bacterial solution, fly ash + expansive soil

组别	c/kPa	φ/(°)
C3	35.44	24.2
C6	12.96	29.7
C9	23.2	25.3

6%粉煤灰掺比情况下比相同含菌量未掺粉煤灰的B20试样内摩擦角提高了0.8°，增幅为2.76%，表明采用菌液与单掺粉煤灰组合进行复合改良膨胀土后强度未能明显提高。

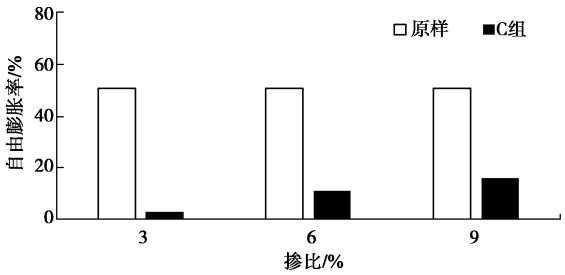

图 1 菌液、粉煤灰+膨胀土改良前后自由膨胀率降幅对比

Fig. 1 Comparison of the decrease in free expansion rate before and after improvement with bacterial solution, fly ash, and expansive soil

C组膨胀土改良前后自由膨胀率降幅对比见图1，其中，菌液20%+粉煤灰3%改良膨胀土的自由膨胀率为48%，降幅为5.88%；菌液20%+粉煤灰6%改良膨胀土的自由膨胀率为40%，降幅为21.57%；菌液20%+粉煤灰9%改良膨胀土的自由膨胀率为31.37%，降幅为35%。可以看出菌液+粉煤灰改良膨胀土的相对降幅随掺比的增大而增大，6%和9%两种掺比自由膨胀率均低于弱膨胀土标准，改良效果良好。

5.4　菌液、石灰+膨胀土

从表5可以看出，养护1 d、含菌量20%、石灰掺比3%，6%，9%情况下，D组试样内摩擦角依次为29.4°，32.5°，26.1°，比C组相同掺比测得的24.2°，29.7°，25.3°提高了5.2°，2.8°，0.7°，相应黏聚力分别为6.02，26.66，34.54 kPa。

其中6%石灰掺比情况下比相同含菌量未掺石灰的B20试样内摩擦角提高了3.6°，增幅为12.46%。

这里，由于石灰作为土料改良剂强度发展速度比较慢，试验中为统一比较固化效果，养护龄期统一设为1 d，测得强度是相对偏低的。

表 5 菌液、石灰+膨胀土抗剪强度指标

Table 5 Shear strength indicators of bacterial solution, lime + expansive soil

组别	c/kPa	φ/(°)
D3	6.02	29.4
D6	26.66	32.5
D9	34.53	26.1

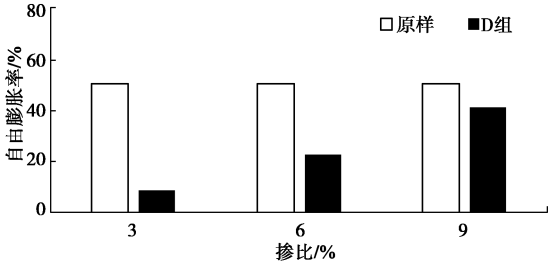

图 2 菌液、石灰+膨胀土改良前后自由膨胀率降幅对比

Fig. 2 Comparison of the decrease in free expansion rate before and after improvement with bacterial solution, lime, and expansive soil

D组膨胀土改良前后自由膨胀率降幅对比见图2，菌液20%+石灰3%改良膨胀土的自由膨胀率为42%，降幅为17.65%；菌液20%+石灰6%改良膨胀土的自由膨胀率为29%，降幅为45.10%；菌液20%+石灰9%改良膨胀土的自由膨胀率为9%，降幅为82.35%。菌液+石灰改良膨胀土的相对降幅随掺比的增大而增大，自由膨胀率降低幅度明显大于粉煤灰组，相对降幅达到82.35%，与C组类似，6%和9%两种掺比自由膨胀率也均低于弱膨胀土标准，改良效果良好。

5.5　菌液、粉煤灰、石灰+膨胀土

制样中将粉煤灰作为辅料，石灰作为主料，两者比例为1∶2，即石灰1%+粉煤灰2%、石灰2%+粉煤灰4%，及石灰3%+粉煤灰6%。

从表6可以看出，含菌量20%、粉煤灰+石灰掺比

分别是3%，6%，9%情况下，E组试样内摩擦角依次为34.9°，27.2°，28.2°，其中石灰掺比为1%粉煤灰为2%情况下得到的内摩擦角最大，依次比C、D组强度最高的组合测得的29.7°，32.5°提高了5.2°和2.4°，相应黏聚力分别为18.93，19.38，21.49 kPa，表明采用菌液、粉煤灰、石灰组合进行复合改良膨胀土，石灰掺比为1%粉煤灰为2%低掺比组合对强度提高更为有利。

表 6 菌液、粉煤灰、石灰+膨胀土抗剪强度指标

Table 6 Shear strength indicators of bacterial solution, fly ash + expansive soil

组别	c/kPa	φ/(°)
E3	18.93	34.9
E6	19.38	27.2
E9	21.49	21.49

菌液、粉煤灰、石灰+膨胀土组膨胀土改良前后自由膨胀率降幅对比见图3，菌液20%+石灰1%+粉煤灰2%改良膨胀土的自由膨胀率为29%，降幅为39.22%；菌液20%+石灰2%+粉煤灰4%改良膨胀土的自由膨胀率为31%，降幅为43.14%；菌液20%+石灰3%+粉煤灰6%改良膨胀土的自由膨胀率为8%，降幅为84.31%。自由膨胀率降低幅度明显大于粉煤灰组，相对降幅达到84.31%，E组中，3%，6%，9%两种掺比自由膨胀率均下降至40%以下，最低达到8%。

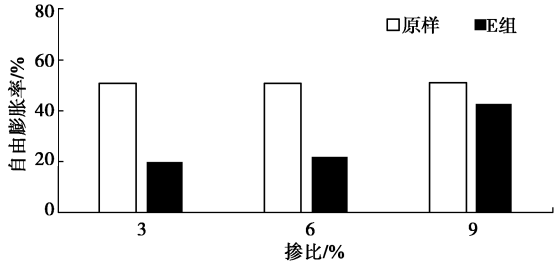

图 3 E 组改良前后自由膨胀率降幅对比

Fig. 3 Comparison of the decrease in free expansion rate before and after improvement in Group E

5.6 菌液、粉煤灰、石灰、水泥+膨胀土

从表7中可以看出，养护1 d、含菌量20%、粉煤灰+石灰+水泥掺比分别是3%，6%，9%情况下，F组试样内摩擦角依次为20.81°，30.6°，26.9°，其中石灰掺比为2%、粉煤灰为2%水泥掺比为2%的试验组合测得的内摩擦角最大，相应黏聚力分别为20.81，28.97，31.93 kPa，表明采用菌液、粉煤灰、石灰、水泥组合进行复合改良膨胀土，石灰掺比为2%、粉煤灰为2%、水泥掺比为2%情况下对强度提高更为有利。

图4中菌液20%+粉煤灰1%+石灰1%+水泥1%改良膨胀土的自由膨胀率为25%，降幅为50.98%；菌液20%+粉煤灰2%+石灰2%+水泥2%改良膨胀土的自由膨胀率为23%，降幅为54.90%；菌液20%+粉煤灰3%+石灰3%+水泥25%改良膨胀土的自由膨胀率为21%，降幅为58.82%。3%，6%和9%两种掺比自由膨胀率也均低于弱膨胀土标准，均下降至40%以下，最低21%。

表 7 菌液、粉煤灰、石灰、水泥+膨胀土抗剪强度指标

Table 7 Shear strength indicators of bacterial solution, fly ash + expansive soil

组别	c/kPa	φ/(°)
F3	20.81	24.3
F6	28.97	30.6
F9	31.93	26.9

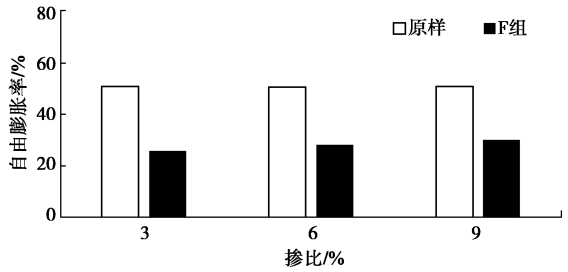

图4 F组改良前后自由膨胀率降幅对比

Fig. 4 Comparison of the decrease in free expansion rate before and after improvement in Group F

6 复合改良膨胀土效果机制分析

实测微生物处理前后膨胀土伊蒙混层相对含量从未处理前的61%降低到处理后的34%～51%，最大降幅44%，为B组（菌液+膨胀土）试样；伊利石相对含量则从未处理前的12%增大到处理后的19%～22%，分别是D组（菌液、石灰+膨胀土）和F组（菌液、粉煤灰、石灰、水泥+膨胀土），具体见图5。

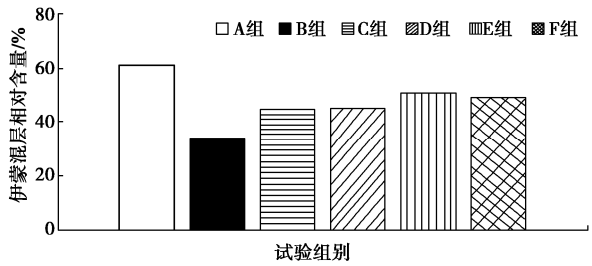

图 5 膨胀土改良前后各组伊蒙混层相对含量对比

Fig. 5 Comparison of relative content of each group of Yimeng mixed layer before and after improvement of expansive soil

微生物处理后膨胀土伊蒙混层比为20%，比未进行微生物处理的膨胀土中的伊蒙混层比30%绝对值降低了10%，降幅为33%，易吸水膨胀的蒙脱石相对含量降低，无膨胀性的伊利石含量上升，使得亲水性降低和吸水能力减弱，抑制了膨胀土的整体膨胀性。

7 结　　论

（1）微生物复合改良膨胀土成功的将弱膨胀土变为无膨胀土，自由膨胀率最低降低至8%，降幅达84.31%。

（2）经复合处理试样中的蒙脱石相对含量降低、伊利石相对含量上升是抑制胀缩特性的一个重要原因。

（3）膨胀土中单掺菌液20%情况下，摩擦角同比可增加23%。

（4）菌液、粉煤灰、石灰复合改良膨胀土情况下，石灰掺比1%粉煤灰2%的低掺比组合对提高强度更为有利。

参考文献：

[1] 廖世文. 膨胀土与铁路工程[M]. 北京：中国铁道出版社, 1984. (LIAO Shiwen. Expansive Soil and Railway Engineering[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1984. (in Chinese))

[2] 刘清秉, 项　伟, 吴云刚. 膨胀土工程特性及改性理论研究[M]. 武汉：中国地质大学出版社, 2015. (LIU Qingbing, XIANG Wei, WU Yungang. Study on Engineering Characteristics and Modification Theory of Expansive Soil[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2015. (in Chinese))

[3] 谢长征. 膨胀土路基填料石灰改良机理研究[D]. 武汉：湖北工业大学, 2017. (XIE Changzheng. Study on Lime Improvement Mechanism of Expansive Soil Subgrade Filler[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2017. (in Chinese))

[4] CHEW S H, KAMRUZZAMAN A H M, LEE F H. Physicochemical and engineering behavior of cement treated clays[J]. J Geotech Geoenviron, 2004, **130**(7): 696-706.

[5] ZHAO H H, GE L, PETRY T M, et al. Effects of chemical stabilizers on an expansive clay[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2014, **18**(4): 1009-1017.

[6] 阎葆瑞, 张锡根. 微生物成矿学[M]. 北京：科学出版社, 2000. (YAN Baorui, ZHANG Xigen. Microbial Metallogeny[M]. Beijing: Science Press, 2000. (in Chinese))

[7] MARTINEZ B C, DEJONG J T, GINN T R, et al. Experimental optimization of microbial-induced carbonate precipitation for soil improvement[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering(ASCE), 2013, **139**(4): 587-598.

[8] MUJAH D, SHAHIN M A, CHENG L. State-of-the-art review of biocementation by microbially induced calcite precipitation (micp) for soil stabilization[J]. Geomicrobiology, 2017, **34**(6): 524-537.

[9] XIAO J Z, WEI Y Q, CAI H, et al. Microbial-induced carbonate precipitation for strengthening soft clay[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2020: 8140724.

[10] WEI R, XIAO J Z, WU S F, et al. Effectiveness of microbially induced calcite precipitation for treating expansive soils[J]. Advances in Civil Engineering Materials, 2021, **10**(1): 350-361.

（编校：黄贤沙）