

# 微生物改性对粉土某些特性的影响

许朝阳<sup>1,2</sup>, 张莉<sup>1</sup>, 周健<sup>2</sup>

(1. 扬州大学建筑科学与工程学院, 江苏扬州 225009; 2. 同济大学地下建筑工程系, 上海 200092)

**摘要:**将微生物技术引入岩土改性中, 筛选出多种碳酸盐矿化菌和多糖粘胶菌, 利用碳酸盐矿化菌 ATCC 6453、3 和多糖粘胶菌 5、6 的代谢产物对粉土的工程性能进行改性, 对改性土体进行了渗透和无侧限强度试验, 测定土体工程指标的变化。通过扫描电镜 (ESEM) 和能量弥散 X 射线 (EDX) 能谱分析, 研究不同微生物改性粉土的微观结构特征, 揭示微生物改性粉土的机理。研究表明: 掺碳酸钙矿化菌和多糖粘胶菌对粉土的渗透性和无侧限抗压强度均有不同程度的影响。

**关键词:**粉土; 微生物; 渗透系数; 无侧限抗压强度; 室内试验; 微观结构; 改性机理

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

文章编号: 1674-4764(2009)02-0080-05

## Effect of Microorganisms on Some Engineering Properties of Silt

XU Zhao-yang<sup>1,2</sup>, ZHANG Li<sup>1</sup>, ZHOU Jian<sup>2</sup>

(1. College of Civil Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu 225009, P. R. China; 2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, P. R. China)

**Abstract:** The microbiology was introduced in foundation treatment. Several Carbonate-mineralization microorganisms and polysaccharides viscose microorganisms were screened and the microorganisms No. ATCC 6453, 3, polysaccharides viscose microorganisms 5 and 6 were used in silt modification. The engineering properties of silt before and after modification were compared by unconfined compressive strength test and indoor seepage test. The microstructures of silt incorporating different microorganisms were analysed by mean of scanning electron microscope and energy dispersive X-ray (EDX) analysis. And the modification mechanism of silt has been revealed. These studies indicate that certain engineering properties of silt can be improved by incorporating microorganisms.

**Key words:** silt; microorganisms; permeability coefficient; unconfined compressive strength; indoor experiments; microstructure; modification mechanism

土壤本身是微生物的良好载体, 土壤中通常含有各种各样的微生物——细菌、放线菌和真菌。在农业上, 微生物对土壤性质的影响早已引起重视和系统研究, 但微生物对岩土工程性质的影响研究较少。微生物学最新研究表明: 微生物的生命活动可对岩土的形成和改性起到不同的作用<sup>[1-14]</sup>。利用微生物可以在多孔介质中生长、运移和繁殖这一特性,

将微生物这一自然资源直接应用到岩土处理中, 不仅是全新的理论突破和技术创新, 而且对生态环境和可持续发展将带来广为深远的影响。

文中利用 4 种微生物的代谢产物对粉土进行改性研究, 比较分析了土体改性前后渗透和强度特性的变化, 并从微观角度出发, 初步探讨了微生物改性粉土的作用机理。

收稿日期: 2008-10-15

基金项目: 国家自然科学基金项目资助 (90815008)

作者简介: 许朝阳 (1971-), 女, 扬州大学副教授, 博士研究生, 主要从事岩土工程地基处理、数值计算等方面研究, (E-mail) zhaoyang\_xu@yahoo.com.cn.

## 1 微生物菌株的培养、筛选

试验采用土培试验从土中筛选出几种性能较稳定的微生物菌株进行试验,并与文献[1-3]中提到的碳酸盐矿化菌 ATCC 6453 进行了对比研究,选择改性效果较为明显的菌株进行介绍。将染色后的 3 种菌体及矿化菌 ATCC 6453 在显微镜下进行观察,其微生物的形貌见图 1-4。由图可以看出:矿化菌 ATCC 6453 和碳酸盐矿化菌 3 呈杆状;而筛选出的多糖粘胶菌形态均呈圆柱形,多糖粘胶菌中间的多糖粘胶菌形态均呈圆柱形,多糖粘胶菌中间的深蓝色柱状物为细胞,细胞周围的晕为包裹着细胞的多糖。

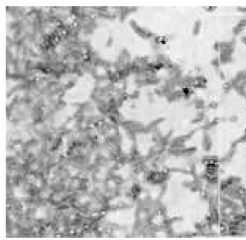


图 1 矿化菌 ATCC 6453 的光学显微照片(1 000 倍)

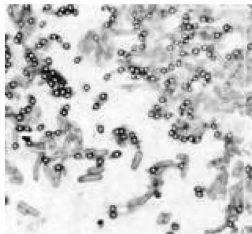


图 2 矿化菌 3 的光学显微照片(1 000 倍)

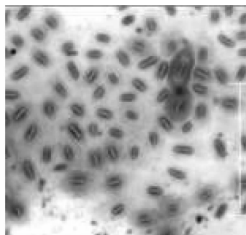


图 3 多糖粘胶菌 5 的光学显微照片(1 000 倍)

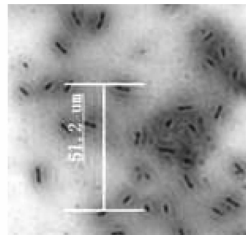


图 4 多糖粘胶菌 6 的光学显微照片(1 000 倍)

## 2 生物改性土的宏观力学试验研究

为了考察微生物的掺入对粉土性能的影响,对掺入上述 4 种微生物及其培养液的粉土进行渗透及无侧限强度试验。

### 2.1 试验土体

试验采用扬州地区的灰色粉土,其主要性质指标见下表 1。该粉土具有低塑性、高压缩性等特点,其力学强度低,在动荷载(如地震)作用下,易发生液化。

表 1 粉土的主要性能指标

土粒比重 $G_s$	塑限 $W_p$	液限 $W_L$	塑性指数 $I_p$	最大干密度 $\rho_{dmax}$ $/(g \cdot cm^{-3})$	最佳含水率 $w_{op}$
2.71	26.4%	34%	7.6	1.52	22%

表 2 土的颗粒组成

颗粒组成 /mm	2~0.5	0.5~0.25	0.25~0.075	0.075~0.005	<0.005
粉土	1.6%	1.2%	8.1%	75.9%	13.2%

### 2.2 渗透试验结果分析

采用 TST-55 型渗透仪对掺入不同微生物的粉土进行试验,土样制样采用击实成型的方法,采用的击实次数和含水率相同。不同微生物处理粉土的渗透效果可见表 3、4。

表 3 渗透试验数据比较

掺入微生物的种类	渗透系数 $K_{20}/(10^{-5} cm \cdot s^{-1})$
无	61.06
矿化菌 3	21.1
矿化菌 ATCC 6453	6.5
多糖粘胶菌 5	15.8
多糖粘胶菌 6	9.95

参加微生物后,粉土渗透系数基本上均呈减小趋势,其中矿化菌 3 的下降幅度比较小,而掺加矿化菌 ATCC 6453 土体的渗透系数减小幅度比较大。

### 2.3 无侧限抗压强度试验分析

将土样烘干后,过 2 mm 筛,掺入不同微生物及其液体培养基,拌和均匀,试件采用圆柱体,尺寸:直径 3.91 cm,高 8 cm,试验采用三轴压缩仪进行无侧限抗压强度试验。试验控制加载应变速率为 0.386 mm/min。

根据上述试验方法和计算结果处理,所测得的掺入不同微生物粉土的无侧限抗压强度值如图 5-9 所示:

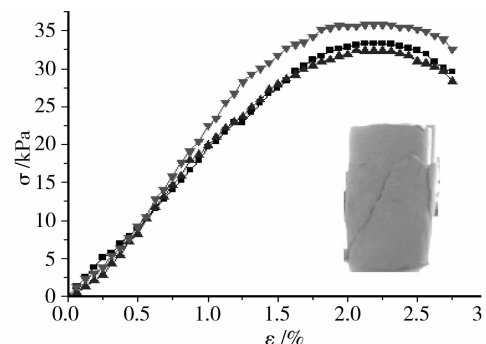


图 5 索土无侧限应力—应变曲线及试样破坏形态

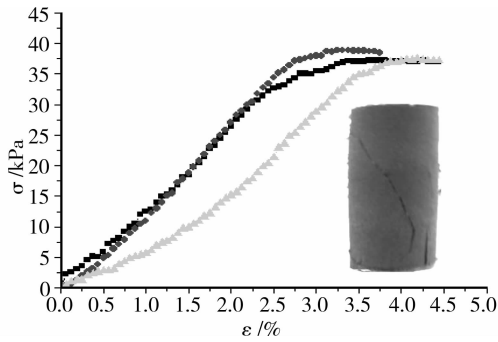


图 6 掺入矿化菌 3 土无侧限应力—应变曲线及试样破坏形态

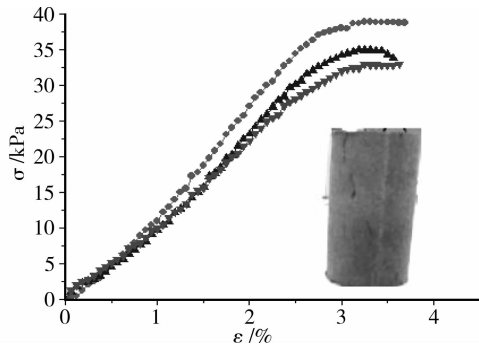


图 7 掺入矿化菌 ATCC 6453 土无侧限应力—应变曲线及试样破坏形态

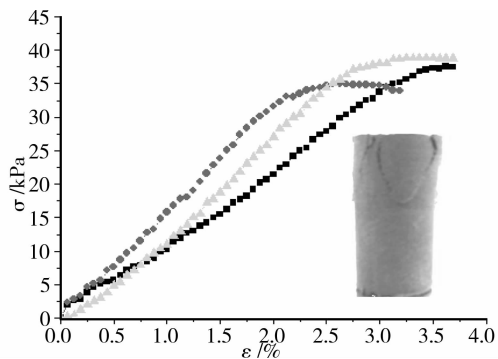


图 8 掺入多糖粘胶菌 5 土无侧限应力—应变曲线及试样破坏形态

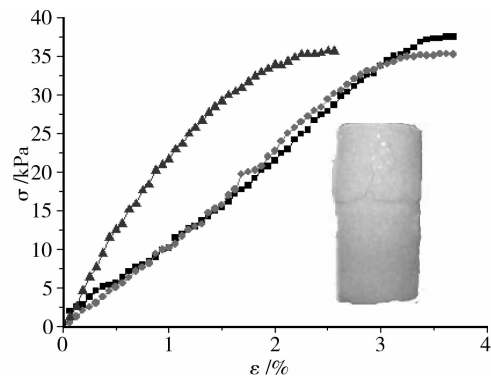


图 9 掺入多糖粘胶菌 6 土无侧限应力—应变曲线及试样破坏形态

表 4 改良前后无侧限抗压强度试验数据

掺微生物类别	试样平均抗压强度/kPa
无	33.39
掺入矿化菌 3	37.13
掺入矿化菌 ATCC 6453	37.91
掺入多糖粘胶菌 5	36.59
掺入多糖粘胶菌 6	36.37

由不同土的破坏形态和应力—应变曲线,可以看出:素土的无侧限抗压强度表现为应变软化的塑性破坏;掺矿化菌表现为应变硬化的脆性破坏,强度较素土提高 12% 左右,掺多糖粘胶菌表现为应变硬化的塑性破坏,强度较素土提高 9% 左右。

### 3 改性机理的研究

利用电镜扫描观测改性前后土的微观结构变化,并对颗粒胶结处的元素进行能谱分析。

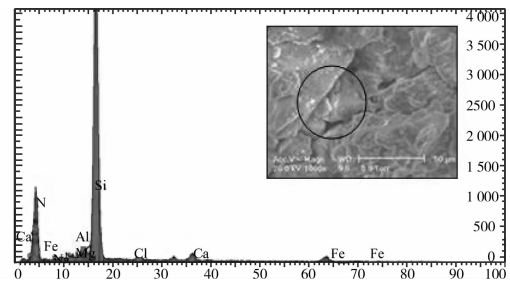


图 10 原始粉土的 ESEM 和 EDX 分析图象

如图 10 所示,对于原始粉土,颗粒分布松散,架空孔隙明显,颗粒间填充物质较少,对颗粒接触处进行轰击的 EDX 分析图谱显示,土中以 Si 元素为主,这是组成土颗粒的主要元素,还有一些 Ca、Fe、N、Cl 等元素,但是含量相对较少。

#### 3.1 碳酸盐矿化菌改性机理

如图 11 所示,对于矿化菌改性粉土,土颗粒表面及缝隙间均附着有小团粒和团粒状凝胶,导致孔隙体积减小,颗粒间接触面增大。对矿化菌胶结部位进行能谱分析可以发现,经矿化菌处理后土样颗粒胶结物中钙离子的含量明显增加,故析出的物质主要为  $\text{CaCO}_3$  晶体,其在粉土中的作用主要表现两方面:

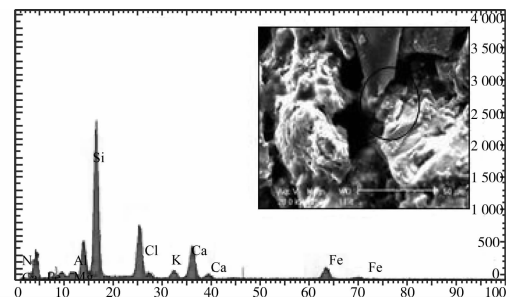


图 11 矿化菌 ATCC 6453 巴氏芽孢杆菌改性粉土的 ESEM 和 EDX 分析图象

1)胶结作用 在土壤团聚过程中,无机胶结的粘结起着重要作用,其中碳酸钙是土中胶结能力很强的一种粘结剂,它可以把较细的矿质土粒胶结起来,形成紧实块状体,土颗粒间粘结力得到增加。

2)填充作用 沉积的  $\text{CaCO}_3$  填充在土颗粒的缝隙中,胶结土体颗粒,加强土层间连接的致密性,增加土的紧实程度及土颗粒的摩擦和嵌挤作用,土体的抗剪强度提高。

### 3.2 多糖粘胶菌改性机理

多糖粘胶菌附着在土颗粒表面及粒间(如图12、13),其代谢产物捆绑粘连着细小土颗粒,并填充土颗粒之间的孔隙。多糖是由碳氢氧组成的碳水化合物,由于EDX能谱检测方法的局限性,在日常测试的元素中,只能测出4-72号元素,而无法准确测出的C、O、N的含量,C、O、N的具体含量要通过化学法才能定量。其主要作用表现在两方面:

1)胶结作用 表现在多糖粘胶菌代谢产物对土壤颗粒的粘接作用。多糖作为一种有机胶体,具有巨大的外表面、内表面和比表面积,具有相当大的反应活性和吸附性,有机胶体可直接吸附在土壤颗粒表面,或在土粒表面形成不溶于水的有机胶膜,并通过胶膜胶结土粒起到粘结作用。

2)离子作用 多糖是一种线性绕曲的高分子聚合物,其分子上有很多接触点,同时含有大量的功能团,如 $\text{R}-\text{COOH}$ 、 $\text{R}-\text{CH}_2-\text{OH}$ 等,这些功能团解离有很强的离子交换性,与土壤中的离子发生物理化学反应,形成一种胶凝物质,将分散的土颗粒胶结在一起,提高颗粒间相互联系和土体强度。

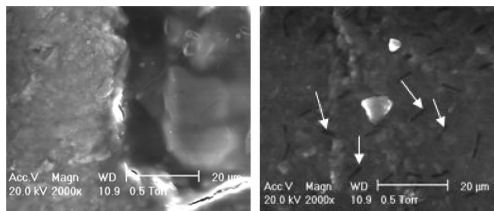


图12 土中的多糖粘胶菌5和6形态

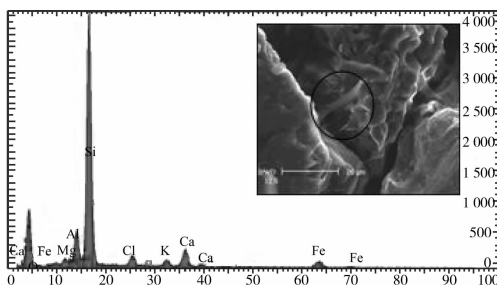


图13 多糖粘胶菌5改性粉土的ESEM和EDX分析图象

## 4 结论

采用4种菌株研究了微生物对粉土渗透性和无侧限抗压强度及其破坏模式的影响。试验结果可以看出:将微生物矿化菌和多糖粘胶菌代谢物掺入粉土中,代谢物与粉土间发生了一系列物理、化学及生物反应,通过吸附、包裹和胶结细小颗粒,填充土颗粒之间的孔隙,可改善粉土的工程性质。

由此可见,微生物在土体改良方面可起到积极作用。对于改善粉土的液化特性、水利工程坝基处理,以及垃圾土地基的处理等均具有借鉴意义。另外在一定驯化条件下,还可以诱导微生物某类酶的产生和活化,提高土体改良效果,这在微生物研究领域是可以做到的。

### 参考文献:

- [1] STOCKS-FISCHER S, GALINAT J K, BANG S S. Microbiological precipitation of  $\text{CaCO}_3$  [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, 31:1563-1571.
- [2] BANG S S, GALINAT J K, RAMAKRISHNAN V. Calcite precipitation induced by polyurethane-immobilized *Bacillus pasteurii* [J]. *Enzyme and Microbial Technology*, 2001, 28:404-409.
- [3] RAMACHANDRAM S K, RAMAKRISHNAN V, BANG S S. Remediation of concrete using microorganisms [J]. *American Concrete Institute Materials Journal*, 2001, 98: 3-9.
- [4] BACHMEIER K L, WILLIAMS A E, WARMINGTON J R, et al. Urease activity in microbially-induced calcite precipitation [J]. *Journal of Biotechnology*, 2002, 93:171-181.
- [5] VEMURI S, PANCHALAN R, RAMAKRISHNAN V, et al. Plastic shrinkage crack remediation capacity of bacterial concrete-a smart biomaterial[C]//*Proceedings of the ICFRC International Conference on Fibre Composites, High Performance Concretes and Smart Materials: Chennai, India. 2004:1057-1067.*
- [6] DAY J L, RAMAKRISHNAN V, BANG S S. Microbiologically induced sealant for concrete crack remediation [C]//*Proceedings of the 16 Engineering Mechanics Conference, Seattle, WA. 2003.*
- [7] YERRA U, RAMAKRISHNAN V, BANG S S. Concrete remediation with a novel technique [C]//*Proceedings of the 9 CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete: Warsaw, Poland. 2007.*
- [8] GABRIEL M, TOMAS V. Bacterial oxidation of ferrous iron by acidithiobacillus ferrooxidans in the pH range 2.5-

- 7.0[J]. Hydrometallurgy, 2003,71:149-158.
- [9] JEFFREY M S, MICHAEL T L. Cell-cycle progression and the generation of asymmetry in *Caulobacter crescentus*[J]. Nature Reviews Microbiology, 2004(2):325-337.
- [10] 周芳琴, 罗鸿禧, 王银善. 微生物对某些岩土工程性质的影响[J]. 岩土力学, 1997, 18(2):17-22.  
ZHOU FANG-QIN, LUO HONG-XI, WANG YIN-SHAN. The effect of microbes on some geotechnical engineering properties[J]. Rock and Soil Mechanics, 1997, 18(2):17-22.
- [11] 胡春香, 刘永定, 张德禄, 等. 荒漠藻结皮的胶结机理[J]. 科学通报, 2002(12):931-937.  
HU CHUN-XIANG, LIU YONG-DING, ZHANG DE-LU et al. Cementing mechanism of algal crusts from desert area [J]. Chinese Science Bulletin, 2002, 47(16):1361-1368(in English).
- [12] 周东, 欧孝夺, 杜静, 等. 生物技术改良膨胀土探讨[J]. 广西大学学报:自然科学版, 2004, 29(3):197-200.  
ZHOU DONG, OU XIAO-DU, DU JING, et al. The discussion of improving expansive clay with Biotechnology [J]. Journal of Guangxi University: Natural Science Edition, 2004, 29(3):197-200.
- [13] 崔艳红, 黄现青. 微生物胞外多糖研究进展[J]. 生物技术通报, 2006(2):25-28.  
CUI YAN-HONG, HUANG XIAN-QING. The advance in investigation of microbial[J]. Biotechnology Bulletin, 2006(2):25-28.
- [14] 王瑞兴, 钱春香, 王剑云. 微生物沉积碳酸钙研究[J]. 东南大学学报:自然科学版, 2005, 35(S1):191-195.  
WANG RUI-XING, QIAN CHUN-XIANG, WANG JIAN-YUN. Study on microbiological precipitation of CaCO<sub>3</sub>[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2005, 35(S1):192-195.
- [15] 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.  
ZHANG LI. Experiment and mechanism analysis for silt by microorganisms [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2008.

(编辑 陈蓉)

(上接第 67 页)

- [12] 裘军良, 夏永旭. 人工神经网络在公路隧道围岩判别中应用[J]. 广西交通科技, 2003, 28(4): 15-18.  
QIU JUN-LIANG, XIA YONG-XU. The application of artificial neural network in highway tunnel's rock masses classification[J]. Guangxi Communication Science & Technology, 2003, 28(4):15-18.
- [13] 宫凤强, 李夕兵, 张伟. 隧道围岩分级的距离判别分析模型及应用[J]. 铁道学报, 2008, 30(3):119-123.  
GONG FENG-QIANG, LI XI-BING, ZHANG WEI. Study and application on distance discriminant analysis model in tunnel surrounding rock classification[J]. Journal of the China Railway Society, 2008, 30(3):119-123.
- [14] 王光远. 论未确知性信息及其数学处理[J]. 哈尔滨建筑工程学院学报, 1990, 23(4):52-58.  
WANG GUANG-YUAN. Uncertainty information and its mathematical treatment[J]. Journal of Harbin Architecture and Engineering Institute, 1990, 23(4): 52-58.
- [15] 董陇军, 李夕兵, 宫凤强. 膨胀土胀缩等级分类的未确知均值聚类方法及应用[J]. 中南大学学报:自然科学版, 2008, 39(5): 1075-1080.  
DONG LONG-JUN, LI XI-BING, GONG FENG-QIANG. Unascertained average clustering method for classification of grade of shrink and expansion for expansive soils and its application [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2008, 39(5): 1075-1080.
- [16] 曹庆奎, 刘开展, 张博文. 用熵计算客观型指标权重的方法[J]. 河北建筑科技学院学报, 2000, 17(3): 40-42.  
CAO QING-KUI, LIU KAI-ZHAN, ZHANG BO-WEN. Calculation method of objective index weight by entropy[J]. Journal of Hebei Institute of Architectural Science and Technology, 2000, 17(3): 40-42.
- [17] 程乾生. 属性识别理论模型及其应用[J]. 北京大学学报(自然科学版), 1997, 33(1): 12-20.  
CHENG QIAN-SHENG. Attribute recognition theoretical model with application [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 1997, 33(1): 12-20.

(编辑 王秀玲)