

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2018.03.019



生物酶改良膨胀土的压缩特性

曾娟娟¹, 文畅平², 刘子健²

(1. 湖南城建职业技术学院 建筑工程系, 湖南 湘潭 411100;

2. 中南林业科技大学 土木工程与力学学院, 长沙 410004)

摘要:为探究生物酶改良膨胀土压缩特性,通过一维固结试验,研究了生物酶、石灰、水泥改良膨胀土体孔隙比、压缩系数、单位沉降量与荷载变化规律。探讨了固结压力对生物酶、石灰、水泥改良膨胀土体压缩特性的影响。试验结果表明:生物酶、石灰、水泥改良膨胀土表现出不同的压缩性,主要反映在压缩曲线与压缩系数上;掺生物酶、石灰、水泥都能改善膨胀土的压缩性,其中,生物酶配比为 1:300 改良膨胀土的压缩性最小;改良膨胀土的单位沉降量与荷载的关系可用幂函数来表示: $s_i = bp_i^a$ 。

关键词:生物酶;膨胀土;压缩特性

中图分类号:TU411 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2018)03-0133-06

Characteristics of compressibility of bio-enzyme expansive soil modified

Zeng Juanjuan¹, Wen Changping², Liu Zijian²

(1. Department of Structural Engineering, Hunan Urban Construction College, Xiangtan 411100 Hunan, P. R. China; 2. College of Civil Engineering and Mechanics, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, P. R. China)

Abstract: In order to determine the compressibility characteristics of bio-enzyme expansive soil, by a series of one-dimensional consolidation tests, the effect of consolidation pressure on compressibility attributions of bio-enzyme-treated, lime-treated and cement-treated expansive soil is scrtutinizied, and voids ratio, compression coefficient and unit settlement are gained. The influence of compression pressure on bio-enzyme-treated expansive soil, lime-treated expansive soil, and cement-treated expansive soil is discussed. Bio-enzyme-treated, lime-treated and cement-treated expansive soil possesses different compressibility, which is embodied by e-p curve and coefficient compressibility. The compressibility of expansive soil is improved by adding bio-enzyme, lime and cement. When the mass ratio between enzyme and water is 1:300, compressibility is minimum. Linear equations can describe the relation between unit settlement and unit loads: $s_i = bp_i^a$.

Keywords: bio-enzyme; expansive soil; compressibility

膨胀土具有普通粘性土的物理化学性质,还具有多裂隙性、强膨胀性与收缩性、超固结性、以及强

度衰减性等^[1-4]。在膨胀土地区修建的公路、铁路、建筑物等,由于这些不良特性导致的工程问题频繁

收稿日期:2017-06-05

基金项目:湖南省科技厅项目(19801-8025);湖南省研究生科研创新资助项目(CX2015B308);中南林业科技大学研究生科技创新基金(CX2015B31)

作者简介:曾娟娟(1991-),女,主要从事岩土工程研究,E-mail:724777534@qq.com。

Received:2017-06-05

Foundation item: Hunan Traffic Science and Technology Project (No. 19801-802); Hunan Provincial Innovation Project for Postgraduate Students (No. CX2015B308); Central South University of Forestry and Technology Innovation Project for Postgraduate Students (No. CX2015B31)

Author brief: Zeng Juanjuan (1991-), main research interest: geotechnical engineering, E-mail:724777534@qq.com.

发生。尤其是膨胀土地区高速公路地段,往往经过多年运行,其路基仍然不稳定,容易发生路基沉陷等各种问题^[5-8]。由于路基的不均匀沉降会导致路面出现严重裂缝、坑洼等,严重影响工程体的运营质量和上部结构的稳定性。而这些问题与土体的压缩过程密切相关,因此,如何有效、快速、且经济改良膨胀土路基成为一个必须解决的技术难题。

一方面,许多学者对膨胀土掺合剂开展了大量研究。周葆春等^[9]对石灰改良膨胀土的应力-应变-强度曲线进行研究,分析改良膨胀土的压硬性、剪缩性与应变强化特性,选用 Duncan 模型验证了模型参数。陈涛等^[10]对石灰、水泥、粉煤灰改良膨胀土胀缩性能进行对比,发现石灰改良膨胀土效果最佳。刘清秉等^[11]对离子固化剂改良膨胀土的机理进行研究,发现改良土体通过离子交换可以降低土体的膨胀性、水稳定性。另一方面,许多学者对土体长期压缩特性做了大量研究。Nash 等^[12]和 Al-Shamrani 等^[13]研究了次压缩系数与固结压力的关系。马少坤等^[14]对南宁膨胀土进行研究,得出南宁膨胀土的压缩指数与次压缩系数呈线性关系,通过预压和改良能有效减小土体的次压缩性。但是,这些掺合剂却不及生物酶环保、高效、便捷、经济。生物酶是一种环保新型土壤固化剂,是由植物发酵产生的一种无毒、无污染的环保生物试剂。生物酶作为土壤固化剂在国外得到了广泛的应用于认可^[15-19],中国却处于起步阶段。且对于膨胀土压缩特性研究主要集中在压缩指数、次压缩系数、 P_c 、 $e-\log t$ 、 $e-\lg p$ 的求解,而忽视了 $e-p$ 曲线本身规律与单位沉降量与荷载 p 的关系。

基于一维固结试验,用生物酶、石灰、水泥对湖南娄底至益阳高速公路路基膨胀土进行改良,着重研究生物酶、石灰、水泥改良膨胀土曲线与单位沉降量与荷载 p 的关系,从而得到生物酶改良膨胀土的最佳配比。

1 试验方案

1.1 试验材料及试样制备

试验土样取自湖南娄底至益阳高速公路路基填土,地表以下 5 m。通过土工试验获得其基本物理性质:天然含水率 25%、最佳含水率 24%、液限 60%、塑限 33.7%、塑性指数 26.3、自由膨胀率 61.5%、标准吸湿含水率 8.9%,根据《公路路基设计规范》(JTGE 40—2015)^[20] 的膨胀土详判指标及膨胀潜势能的分级,判别为中膨胀土。

试验所用的生物酶是泰然酶(TerraZyme)如图

1 所示,通过泰然路通科技有限公司从美国引进;石灰、水泥均从当地采购;试验采用 GDG-4S 型三联高压固结仪如图 2 所示。



图 1 生物酶

Fig. 1 TerraZyme



图 2 固结仪

Fig. 2 Consolidation apparatus

试样制备方法:对取回的土样进行烘干碾碎过 2 mm 筛,一共配制 13 组土样。素土生物酶含量(酶:水)为 1:400、1:300、1:200、1:100;石灰掺量为 3%、5%、7%、9%;水泥掺量为 3%、5%、7%、9%。这 13 组试样控制其 $\rho=1.68 \text{ g/cm}^3$ 、 $\omega=24\%$,采用静压制样,土样面积均为 30 cm^2 ,高 2 cm。

1.2 试验方案

共进行 13 组试验,分别为:1 组不改良膨胀土、4 组不同配比生物酶改良膨胀土、4 组不同掺量石灰改良膨胀土、4 组不同掺量石灰改良膨胀土同时进行一维压缩试验。加载等级:50、100、200、300、400、800 kPa;固结时间 1 d。

2 生物酶改良膨胀土的压缩特性

2.1 孔隙比变化规律

根据试验结果,绘制不同掺量改良膨胀土的 $e-p$ 曲线如图 3 所示。

1)初始阶段的 $e-p$ 曲线较为陡峭,土体的压缩量较大,接着曲线趋于平缓,土的压缩量随之减小。这是由于土的密实度会随孔隙比的减小而逐渐增加,但当其达到一定程度之后,土体中颗粒移动越来越趋于困难,所产生的 Δp 应变增量也因此减小。

2)在相同压力 p 下:素土的孔隙比是最小的,掺 9% 石灰改良膨胀土的孔隙比与掺 9% 水泥改良膨胀土居中,而生物酶配比为 1:300 的改良膨胀土孔隙比最大。在生物酶改良膨胀土中,孔隙比随着酶溶液浓度的变化,先增大后减小,在生物酶配比为 1:300 时,孔隙比是最大的。在掺石灰、水泥改良膨胀土中,孔隙比随着石灰、水泥掺量的增大而增大,在石灰、水泥掺量为 9% 时,其孔隙比最大。一般来说,在相同压力 p 之下,应变增量越小,其压缩性越

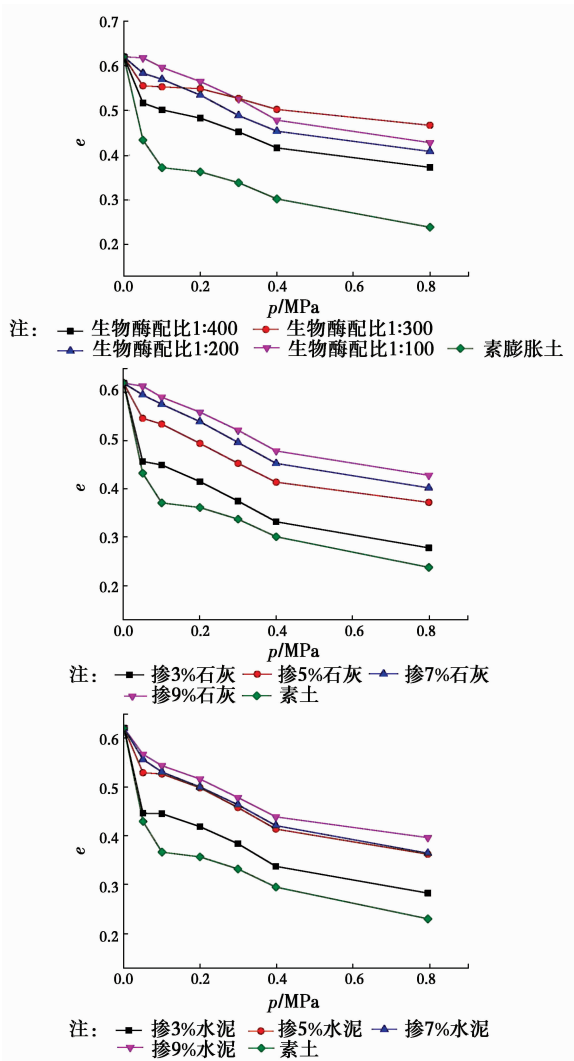


图 3 不同掺量生物酶、石灰、水泥改良膨胀土 $e-p$ 曲线
 Fig. 3 The $e-p$ curves of bio-enzyme-treated expansive soil, lime-treated expansive soil and cement-treated expansive soil in different content

小,孔隙比越大。由此可以推出:掺生物酶、石灰、水泥都能改善膨胀土的压缩性,其中,生物酶配比为 1:300 改良膨胀土压缩性效果最好。

2.2 压缩系数变化规律

根据试验结果得到生物酶、石灰、水泥改良膨胀土的压缩系数如表 1、图 4 所示。实际工程中通常采用压缩系数 a_{1-2} 来判断土压缩性。

- 1) 当 $a_{1-2} \leq 0.1 \text{ MPa}^{-1}$ 时,为低压缩性土;
- 2) 当 $0.1 \text{ MPa}^{-1} \leq a_{1-2} \leq 0.5 \text{ MPa}^{-1}$ 时,为中压缩性土;
- 3) 当 $a_{1-2} \geq 0.5 \text{ MPa}^{-1}$ 时,为高压缩性土。

由此可知,素土 $a_{1-2} = 1.13 \text{ MPa}^{-1}$ 为高压缩性土;经过生物酶、石灰、水泥进行改良之后土体的压缩系数均小于 0.25 MPa^{-1} ,达到中压缩性土的标准。其中,生物酶配比为 1:300 改良膨胀土 $a_{1-2} =$

0.01 MPa^{-1} ,达到低压缩性土体的标准。由图 3 可知,石灰、水泥改良膨胀土的压缩系数随石灰、水泥的掺量增大而降低;生物酶改良膨胀土的压缩系数随生物酶配比的增大呈先减小,后增大的趋势,在生物酶配比为 1:300 达到极小值。

由此可知,掺生物酶、石灰、水泥都能改善膨胀土的压缩性,其中,生物酶配比为 1:300 改良膨胀土的压缩性最小,掺 9% 石灰改良膨胀土次之,掺 9% 水泥改良膨胀土再次之,未改良的膨胀土压缩性最大。

表 1 压缩系数

Table 1 Compression coefficients

试验土样	压缩系数/ MPa^{-1}	试验土样	压缩系数/ MPa^{-1}
素土	1.13	生物酶 1:400	0.12
生物酶 1:300	0.01	生物酶 1:200	0.07
生物酶 1:100	0.11	掺 3% 石灰	0.20
掺 5% 石灰	0.16	掺 7% 石灰	0.15
掺 9% 石灰	0.14	掺 3% 水泥	0.24
掺 5% 水泥	0.23	掺 7% 水泥	0.20
掺 9% 水泥	0.19		

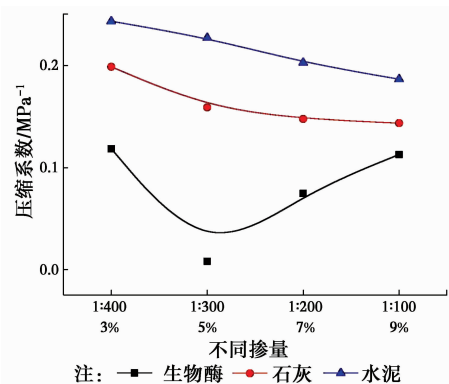


图 4 不同掺量生物酶、石灰、水泥改良膨胀土压缩系数
 Fig. 4 Consolidation coefficients curves of bio-enzyme-treated expansive soil, lime-treated expansive soil and cement-treated expansive soil in different content

2.3 单位沉降量与荷载变化规律

单位沉降量与荷载 p 的关系如图 5 所示。总体来看,单位沉降量随荷载 p 增大而增大,但其增加的幅度逐渐减小。生物酶、石灰、水泥改良膨胀土的单位沉降量可用式(1)表示

$$s_i = bp_i^a \quad (1)$$

式中: s_i 为某一级荷载下的沉降量; p_i 为某一荷载值; a, b 为与掺合物有关系数。

其拟合曲线如图 5 所示,拟合参数如表 2 所示。

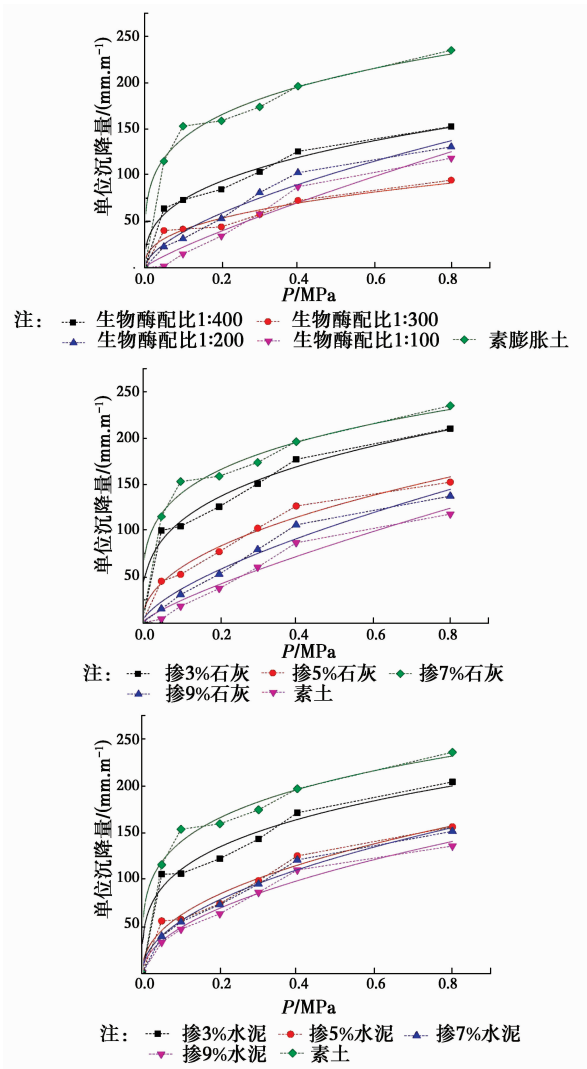


图 5 单位沉降量与 p 关系

Fig. 5 Relation curves between unit settlement and p

表 2 线性回归系数

Table 2 Linear regression coefficients

试验土样	a	b	R^2
素土	0.24	243.92	0.99
生物酶 1:400	0.35	164.27	0.99
生物酶 1:300	0.39	99.68	0.95
生物酶 1:200	0.61	157.33	0.97
生物酶 1:100	0.84	150.98	0.95
掺 3% 石灰	0.31	224.34	0.98
掺 5% 石灰	0.47	175.50	0.98
掺 7% 石灰	0.67	167.72	0.97
掺 9% 石灰	0.79	148.12	0.96
掺 3% 水泥	0.29	212.29	0.97
掺 5% 水泥	0.45	173.20	0.97
掺 7% 水泥	0.50	172.82	0.99
掺 9% 水泥	0.51	156.89	0.98

以不同掺量为横坐标, a 、 b 为纵坐标, 分别得到 a 、 b 随生物酶、石灰、水泥掺量的关系变化如图 6 所示。

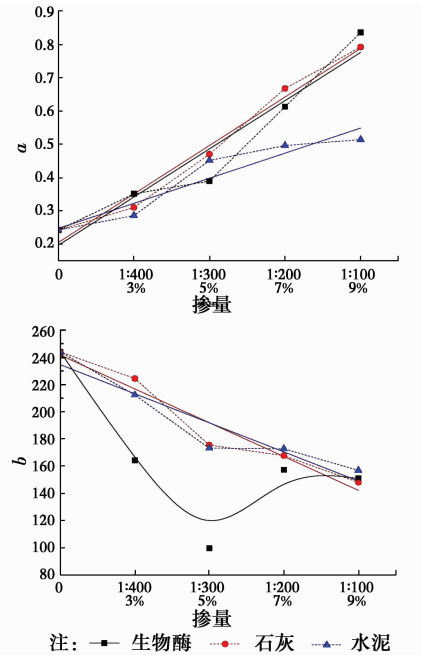


图 6 不同掺量生物酶、石灰、水泥与参数 a 、 b 变化曲线

Fig. 6 The relationship curves between a , b and bio-enzyme-treated expansive soil, lime-treated expansive soil and cement-treated expansive soil in different content

由图 6 可知, 石灰改良膨胀土, 参数 a 随着石灰掺量的增加而增加; 水泥改良膨胀土, 参数 a 随着水泥掺量的增加而增加; 可用 $a = cx + d$ 线性函数拟合。参数 b 随着石灰、水泥掺量的增加而减小, 可用 $b = mx + n$ 线性函数拟合。从而掺石灰、水泥改良膨胀土的单位沉降量可以用一个通式

$$s_i = (mx + n) p_i^{(cx+d)} \quad (2)$$

式中: c 、 d 、 m 、 n 是与掺量有关的参数。

而对于生物酶改良膨胀土, 参数 a 随着生物酶含量增加而增加, 呈线性变化, 但是参数 b 变化却比较复杂, 呈三次函数变化。可用式 (3) 表示。

$$s_i = (ux^3 + vx^2 + mx + n) p_i^{cx+d} \quad (3)$$

究其原因, 是和生物酶本身性质分不开的, 生物酶与膨胀土不仅仅发生物理、化学变化, 还存在生物反应。因此, 对比式 (2) 与式 (3), 生物酶改良膨胀土比石灰、水泥改良膨胀土多 $ux^3 + vx^2$ 这两项, 是由于生物反应产生的。

4 结论

1) 通过室内一维固结试验, 绘制生物酶、水泥、石灰改良膨胀土的 $e-p$ 曲线: 初始阶段曲线较为陡峭, 土的压缩量较大, 接着曲线趋于平缓, 土的压缩

量随之减小。

2)生物酶、石灰、水泥都能降低膨胀土体的压缩性,其中,生物酶改良效果最佳,石灰次之,水泥再次之,未改良膨胀土的压缩性最大;生物酶改良膨胀土压缩性的最佳配比为1:300。

3)生物酶、石灰、水泥改良膨胀土的单位沉降量与荷载关系可用幂函数 $s_i = bp_i^a$ 表示。石灰、水泥改良膨胀土参数 a, b 可用线性方程描述,则 $s_i = (cx + d)p_i^{mx+n}$, 而生物酶改良膨胀土参数 a 可用线性方程描述,参数 b 用三次函数描述,则 $s_i = (ux^3 + vx^2 + mx + n)p_i^{(cx+d)}$ 。

参考文献:

- [1] 殷宗泽,袁俊平,韦杰,等. 论裂隙对膨胀土边坡稳定的影响[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(12): 2155-2160.
YIN Z Z, YUAN J P, WEI J. Influences of fissures on slope stability of expansive soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(12): 2155-2160. (in Chinese)
- [2] 刘华强,殷宗泽. 裂缝对膨胀土抗剪强度指标影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(3): 723-727.
LIU H Q, YIN Z Z. Test study of influence of crack evolution on strength parameters of expansive soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(3): 723-727. (in Chinese)
- [3] 陈志伟,蒋关鲁,王智猛,等. 分级连续加载条件下原状膨胀土固结变形研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(3): 710-716.
CHEN W Z, JIANG G L, WANG Z M. Study of consolidation deformation of intact expansive soil under stage continuous loading conditions [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(3): 710-716. (in Chinese)
- [4] 饶锡保,黄斌,吴云刚,等. 膨胀土击实样膨胀特性试验研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2011, 44(2): 211-215.
RAO X B, HUANG B, WU Y G, et al. Experimental study of expansion characteristics of compacted expansive soil [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2011, 44(2): 211-215. (in Chinese)
- [5] 杨果林,丁加明. 膨胀土路基的胀缩变形模型试验[J]. 中国公路学报, 2006, 19(4): 23-29.
YANG G L, DING J M. Model test on expansion and shrinkage deformation in expansive soil roadbed [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(4): 23-29. (in Chinese)
- [6] 郑健龙,张锐. 公路膨胀土路基变形预测与控制方法[J]. 中国公路学报, 2015, 28(3): 1-10.
ZHENG J L, ZHANG R. Prediction and control method for deformation of highway expansive soil subgrade [J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(3): 1-10. (in Chinese)
- [7] 丁加明,王永和,陈治亚,等. 膨胀土路基水毁灾害及其粗糙神经网络预测[J]. 自然灾害学报, 2006, 15(6): 168-173.
DING J M, WANG Y H, CHEN Z Y, et al. Water-destroyed disaster of expansive soil roadbed and its forecast based on rough neural network [J]. Journal of Natural Disasters, 2006, 15(6): 168-173. (in Chinese)
- [8] 张季如,徐三峡. 石灰和粉煤灰稳定膨胀土路基的压实特性研究[J]. 武汉理工大学学报, 2002, 24(9): 27-30.
ZHANG J R, XU S X. Compaction behaviour on subgrade filler of stabilizing expansive soil mixed with lime and fly ash [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2002, 24(9): 27-30. (in Chinese)
- [9] 周葆春,孔令伟,郭爱国. 石灰改良膨胀土的应力-应变-强度特征与本构描述[J]. 岩土力学, 2012, 33(4): 999-1006.
ZHOU B C, KONG L W, GUO A G. Stress-strain-strength behaviour and constitutive description of lime-treated expansive soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(4): 999-1006. (in Chinese)
- [10] 陈涛,顾强康,郭院成. 石灰、水泥、粉煤灰改良膨胀土对比试验[J]. 公路, 2008(6): 164-167.
CHEN T, GU Q K, GUO Y C. Experiment research of lime, cement and fly ash treated expansive soil [J]. Highway, 2008(6): 164-167. (in Chinese)
- [11] 刘清秉,项伟,崔德山,等. 离子土固化剂改良膨胀土的机理研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(4): 648-654.
LIU Q B, XIANG W, CUI D S, et al. Mechanism of expansive soil improved by ionic soil stabilizer [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(4): 648-654. (in Chinese)
- [12] NASH D F T, SILLS G C, DAVISON L R. One-dimension consolidation testing of soft clay from bothkennar [J]. Geotechnique, 1992, 42(2): 241-256.
- [13] AL-SHAMRANI M A. Application of sabkkha soils [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998, 35: 15-26.
- [14] 马少坤,赵乃峰,周东,等. 南宁膨胀土长期压缩特性研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(8): 2280-2286.
MA S K, ZHAO N F, ZHOU D, et al. Characteristics study of long-term compressibility of Nanning expansive soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(8): 2280-2286. (in Chinese)
- [15] 戴北冰,徐锴,杨俊,等. 基于生物酶的固土技术在香港的应用研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(6): 1735-1742.
DAI B B, XU K, YANG J, et al. An investigation into application of bio-enzyme-based soil stabilization

- technology to Hong Kong [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(6):1735-1742. (in Chinese)
- [16] RAVI S A U, HARSHA K R, RAMESHA M I. Bio-enzyme stabilized lateritic soil as a highway material [J]. *Journal of the Indian Roads Congress*, 2009, 143-151.
- [17] MGANGIRA M B. Evaluation of the effects of enzyme-based liquid chemical stabilizers on subgrade soils [C]// 28th Southern African Transport Conference, 2009, 192-198.
- [18] YILMAZ Y, GUNGOR A G, AVAS C. Stabilization of clays using liquid enzymes [C]// *Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields: Proceedings of the 8th International Conference, Urbana-Champaign*, 2009, 65-69.
- [19] SUREKA N, GANGADHARA S. Swelling properties of bio-enzyme treated expansive soil [J]. *International Journal of Engineering Studies*, 2010(2):155-159.
- [20] 中交第二公路勘察设计研究所. 公路路基设计规范: JTGD 030—2015[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015. The Second Highway Investigation and Design Institute of Ministry of Communication of China. Specification for design of highway subgrades: JTGD 030-2015[S]. Beijing: China Communication Press, 2015. (in Chinese)

(编辑 胡玲)