

DOI: 10.11779/CJGE2016S2005

# 香根草加固不同含水率膨胀土的侧限膨胀和直剪试验

周 成<sup>1,2</sup>, 路永珍<sup>1</sup>, 黄月华<sup>1</sup>

(1. 四川大学水电学院水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065; 2. 南京水利科学研究院水利部土石坝破坏机理与  
防控技术重点实验室, 江苏 南京 210024)

**摘要:** 针对初始含水率不同的膨胀土, 开展了侧限膨胀试验和直剪试验, 分别测定有、无香根草根系的试样在不同初始含水率时的膨胀力和抗剪强度指标。分析表明香根草根系能够减小膨胀力和增加抗剪强度。试验结果可以启发我们: 对于具有一定饱和度的膨胀土边坡, 在有降雨的情况下香根草根系可以作为一种柔性加固方法帮助边坡控制膨胀变形和释放膨胀力。

**关键词:** 膨胀土; 香根草根系; 根系固土; 初始含水率; 柔性加固

**中图分类号:** TU443    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1000-4548(2016)S2-0030-06

**作者简介:** 周 成(1970-), 男, 江苏赣榆人, 教授, 从事环境岩土工程研究。E-mail: czhou@scu.edu.cn。

## Oedometer expansion and direct shear tests on vetiver root-reinforced expansive soil with different water contents

ZHOU Cheng<sup>1,2</sup>, LU Yong-zhen<sup>1</sup>, HUANG Yue-hua<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, College of Water Resource & Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. Key Lab of Failure Mechanism and Safety Control Techniques of Earth-Rock Dam of the Ministry of Water Resources, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

**Abstract:** Oedometer expansion and direct shear tests are conducted on expansive soil with various initial water contents. Expansive force and shear strength of the samples with/without vetiver roots with different initial water contents are measured. The expansive force and shear strength with respect to reinforcement of vetiver roots are investigated. It is illustrated that vetiver root can increase shear strength and be used as flexible reinforcement to control expansive deformation and release expansive force of expansive soil with a degree of saturation under rainfall.

**Key words:** expansive soil; vetiver root; root reinforcement; initial water content; flexible stabilization

## 0 引言

膨胀土广泛分布于世界各处。经历过干湿循环后, 特别是持续降雨之后, 常常会诱发许多滑坡。当膨胀土吸水时, 自重和体积会增加、基质吸力和抗剪强度会降低。因此, 无论边坡缓陡, 滑坡常常发生<sup>[1]</sup>。对于膨胀土质边坡, 由降雨而引发的浅层或深层失稳和破坏, 以及后续诱发的环境污染和其他灾难, 已经成为阻碍人与自然共存的关键问题<sup>[2]</sup>。对于浅层滑动和1.5 m以内的浅表面坡土滑移破坏问题, 为了防止雨水入渗, 工程师们常常会选择浆砌石、喷射混凝土等方式封盖住边坡表面。为了维持膨胀土边坡的稳定性, 也常用挡土墙, 锚杆和抗滑桩进行加固<sup>[3]</sup>。对于路基型膨胀土填筑体, 可以通过掺加稳定剂进行处理, 例如水泥、石灰、火电厂的粉煤灰、风化的砂岩等等<sup>[4-6]</sup>, 但这很难应用于天然膨胀土边坡。众所周知, 对于有刚性支护的膨胀土边坡来说, 水是造成其失稳破坏的

关键性因素, 但要把膨胀土完全与水隔绝不是一件容易的事。因此, 对于具有一定饱和度的膨胀土边坡来说, 应该采用能够起到控制膨胀变形和释放膨胀力的柔性防护措施。例如通过土工织物与膨胀土共同填筑, 构成填筑复合体, 能较好地解决膨胀填土带来的膨胀变形问题<sup>[7-8]</sup>。生态袋作为一种柔性加固方式, 能够很好地适应膨胀土坡的膨胀变形, 进而保证边坡稳定<sup>[9-11]</sup>。

生态护坡的技术经济优势和绿化功能, 近几年已经吸引了诸多人员开展研究分析工作<sup>[12]</sup>。对于易于滑动的1.5 m左右厚的边坡表层, 人们采用植被及其根系来进行加固<sup>[13-14]</sup>。如果采用诸如根系较发达的香根草之类的植物与某些特定的岩土工程措施相结合进行

基金项目: 国家自然科学基金项目(51579167); 水利部行业专项项目(201301022); 水利部土石坝破坏机理与防控技术重点实验室开放基金项目(YK913002)

收稿日期: 2016-05-19

边坡加固, 那么环境和生态效益将会更加明显。在设计中可以通过模型试验和原位试验测算植物根系固土提高的坡土抗剪强度值<sup>[15-16]</sup>。

在有根系加固边坡的稳定计算和渐进变形分析中, 需要考虑根系的力学特性及其与周围土的相互作用。然而对于根系加固研究, 目前只有很少可借鉴的实际经验例如增加土体的黏聚力。对于膨胀土边坡根系固土的研究, 由于不仅涉及到抗剪强度问题, 还有更重要的膨胀变形问题, 但还很少见到针对如此复杂问题的研究报道。因此在本文中, 针对一定饱和度的膨胀土开展侧限膨胀试验和直剪试验, 测定和分析在不同的初始含水率时香根草根系如何增加抗剪强度、控制膨胀变形和释放膨胀力。

## 1 膨胀土物理特性

膨胀土是具有高液限的黏土。通过室内试验, 膨胀土的部分物理特性测定如表 1 所示, 所测膨胀土的粒径分布见表 2。

表 1 膨胀土的物理特性指标

Table 1 Measured physical properties of expansive soil

$w_L$ /%	$w_p$ /%	$G_s$	$w_{op}$ /%	$\rho_{d,max}$ /( $g \cdot cm^{-3}$ )	$\delta_e$ /%
60.0	34.0	2.71	30.7	1.57	94

表 2 膨胀土的粒径范围

Table 2 Measured particle distribution of expansive soil

粒径范围 mm	0.5~2 mm	0.25~0.5 mm	0.075~0.25 mm	<0.075 mm
	百分含量/%	17.98	57.64	24.26

## 2 侧限膨胀试验

先在容器中拌制试验所需的膨胀土。所加香根草的质量是土样的 1%。香根草根系的长度为 4 cm, 其中 2 cm 嵌在土试样中, 并在试样的上下两边各留出 1 cm, 以便在加压时, 起到锚固的作用, 如图 1 所示。

根据《土工试验规程》SL237—027—1999, 将制备好的土样放置在侧限膨胀仪中, 将水缓慢注入直至水面高出土试样的顶部 5 mm 左右。当被浸润的膨胀土试样开始膨胀时, 施加垂直压力, 以测定抑制试样膨胀变形而施加的力; 如果不施加垂直压力, 则可以测定试样的自由膨胀变形量。在没有施压时, 所测得膨胀土的自由膨胀率和吸水率见图 2。

从图 2 中可以看出, 刚受到浸泡时, 膨胀土试样膨胀缓慢, 紧接着膨胀急剧增加直到膨胀率达到 12.3% 左右。而吸水率增长缓慢, 最终达到饱和值 40.5%。

在土样吸水的过程中, 通过施加压力, 保持土样体积不变, 由此测量初始含水率不同的土样, 在膨胀变形稳定后 2 h 的压力, 就是膨胀力。膨胀土试样有、无有香根草根系情况下膨胀力的测试结果见表 3。从表 3 可以看出, 所测最大膨胀力在最优含水率附近, 而不是在最小含水率处。香根草根系能够抑制膨胀土的膨胀, 所以测定的含有香根草根系试样的膨胀力远小于没有含香根草根系试样的值。



(a) 平面视图



(b) 侧视图

图 1 含根系的膨胀土试样

Fig. 1 Expansive soil samples with roots

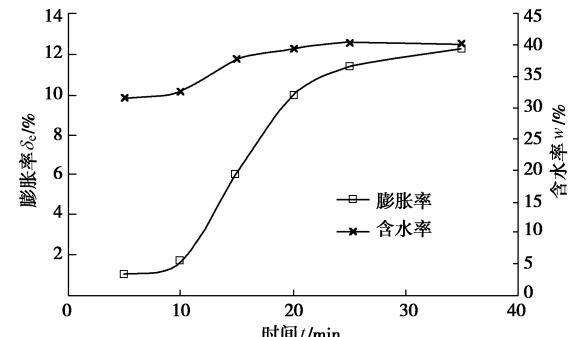


图 2 试样吸水时的自由膨胀率和吸水率曲线

Fig. 2 Measured free expansive ratio and soaked water ratio during soaking period

表 3 膨胀力和吸水率测定值

Table 3 Measured expansive force and soaked water ratio

初始含水率 /%	干密度 /( $g \cdot cm^{-3}$ )	膨胀力/kPa		吸水率/%	
		无根系	有根系	无根系	有根系
11.3	1.26	37.5	3.0	33.9	33.5
21.4	1.42	60.0	5.6	35.6	34.4
27.1	1.52	87.5	6.7	36.2	34.6
29.9	1.55	100.0	8.6	37.4	35.0
34.3	1.49	7.9	5.1	38.0	35.7
35.6	1.47	7.1	4.1	38.5	37.3
38.5	1.39	7.0	2.0	39.1	38.6

### 3 直剪试验

对初始含水率不同的膨胀土, 在含有和无香根草根系的情况下, 开展快剪试验, 进而对香根草根系的加固作用进行测定。针对不同初始含水率的膨胀土试样, 在有无香根草根系的情况下, 所测得的剪应力和剪切位移曲线列于图 3~9。所测得的剪应力峰值和莫尔-库仑抗剪强度参数列于表 4。

从图 3~9 可以看出, 在初始含水率较低时, 膨胀土直剪试验曲线表现出剪切软化的特性, 然而在初始含水率较高时, 膨胀土的剪切软化特性较弱些, 这是由于含水率增大降低了土体膨胀趋势。通过分析比较有、无香根草根系膨胀土试样在不同含水率时的剪切曲线可以发现, 当含水率小于最优含水率且垂直压力较低时, 有香根草根系试样的软化特征较弱些; 在最优含水率附近时, 有、无香根草根系试样的软化特征大致趋于一致。

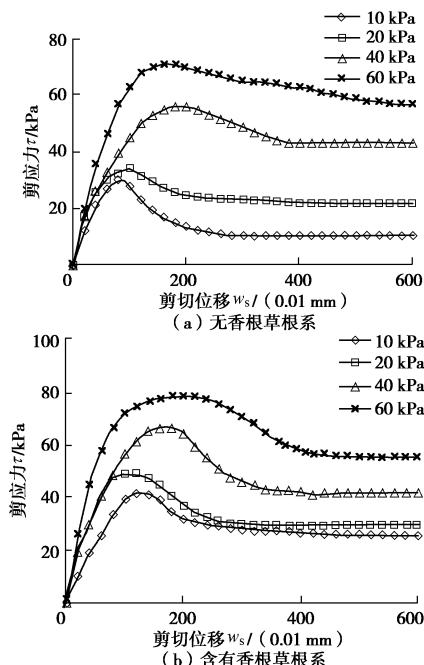


图 3 初始含水率为 11.3% 的膨胀土试样在有、无香根草根系时的剪应力和剪切位移曲线

Fig. 3 Shear stress-shear displacement curves of expansive soil samples with and without vetiver roots under initial water content of 11.3%

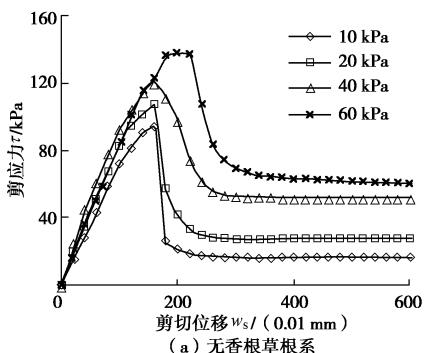


图 4 初始含水率为 21.4% 的膨胀土试样在有、无香根草根系时的剪应力和剪切位移曲线

Fig. 4 Shear stress-shear displacement curves of expansive soil samples with and without vetiver roots under initial water content of 21.4%

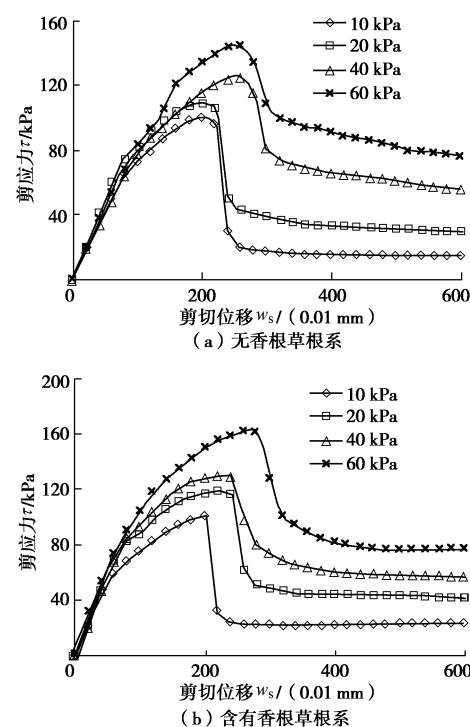
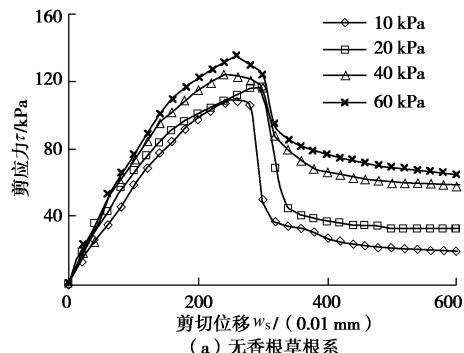


图 5 初始含水率为 27.1% 的膨胀土试样在有、无香根草根系时的剪应力和剪切位移曲线

Fig. 5 Shear stress-shear displacement curves of expansive soil samples with and without vetiver roots under initial water content of 27.1%



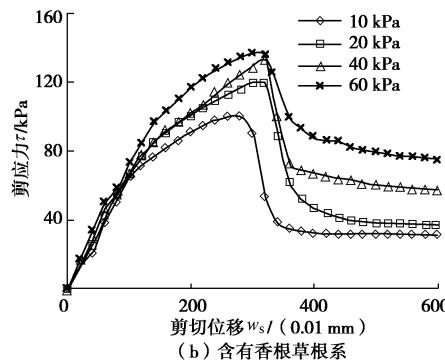


图 6 初始含水率为 29.9% 的膨胀土试样在有、无香根草根系时的剪应力和剪切位移曲线

Fig. 6 Shear stress-shear displacement curves of expansive soil samples with and without vetiver root under initial water content of 29.9%

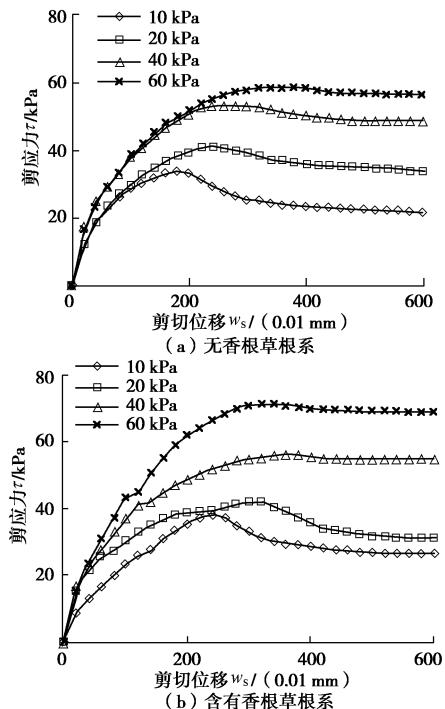


图 7 初始含水率为 34.3% 的膨胀土试样在有、无香根草根系时的剪应力和剪切位移曲线

Fig. 7 Shear stress-shear displacement curves of expansive soil samples with and without vetiver root under initial water content of 34.3%

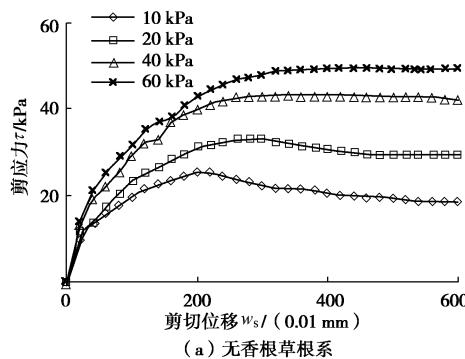


图 8 初始含水率为 35.6% 的膨胀土试样在有、无香根草根系时的剪应力和剪切位移曲线

Fig. 8 Shear stress-shear displacement curves of expansive soil samples with and without vetiver root under initial water content of 35.6%

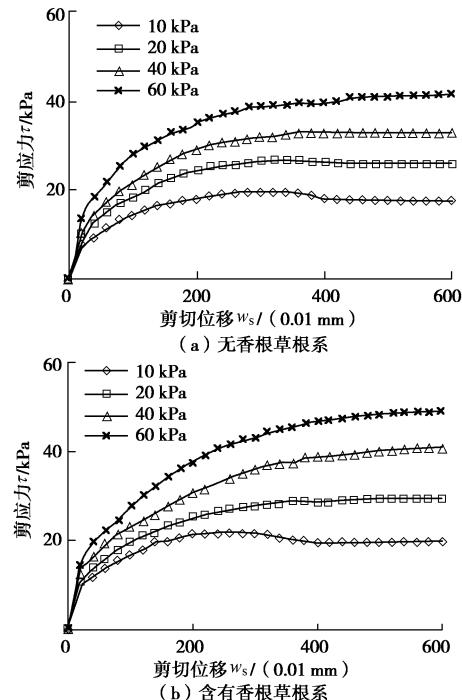


图 9 初始含水率为 38.5% 的膨胀土试样在有、无香根草根系时的剪应力和剪切位移曲线

Fig. 9 Shear stress-shear displacement curves of expansive soil samples with and without vetiver root under initial water content of 38.5%

从表 4 中可以看出, 随着初始含水率增加, 重塑膨胀土的黏聚力和内摩擦角都出现减小的趋势。相比于无香根草根系的膨胀土而言, 含有香根草根系的膨胀土的黏聚力和内摩擦角都要偏大一些。同时, 相较于根系对黏聚力的影响, 香根草根系对内摩擦角的影响似乎更加明显。

对有、无香根草根系的膨胀土试样的剪应力和剪切位移曲线进行分析还发现, 剪应力和剪切位移曲线呈现出双曲线特征; 绘制  $w_s/\tau - w_s$  关系曲线, 以获得在不同初始含水率时的初始切线剪切刚度  $k_{st,i}$ , 见图

10。

表4 在峰值剪应力时的莫尔-库仑抗剪强度参数

Table 4 Measured Mohr-Coulomb shear strength parameters under peak shear stress

初始含水率/%	干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	黏聚力/kPa		内摩擦角/(°)	
		无根系	有根系	无根系	有根系
21.4	1.42	90.8	92.1	41.4	42.1
27.1	1.52	87.7	91.1	38.2	40.7
29.9	1.55	87.0	90.0	29.5	33.2
34.3	1.49	30.2	30.7	26.3	29.9
35.6	1.47	22.3	25.5	25.5	28.2
38.5	1.39	16.6	17.4	22.9	28.1

从图10中可以发现,最大的初始切线剪切刚度出现在最优含水率附近。在含水率没有达到最优含水率之前,剪切刚度有一个明显的增加。达到最优含水率之后,剪切刚度随着含水率的增加而减小。比对图10(a), (b)两图发现,香根草根系抑制了膨胀土的膨胀变形,使得膨胀土对正应力的大小变得不敏感。

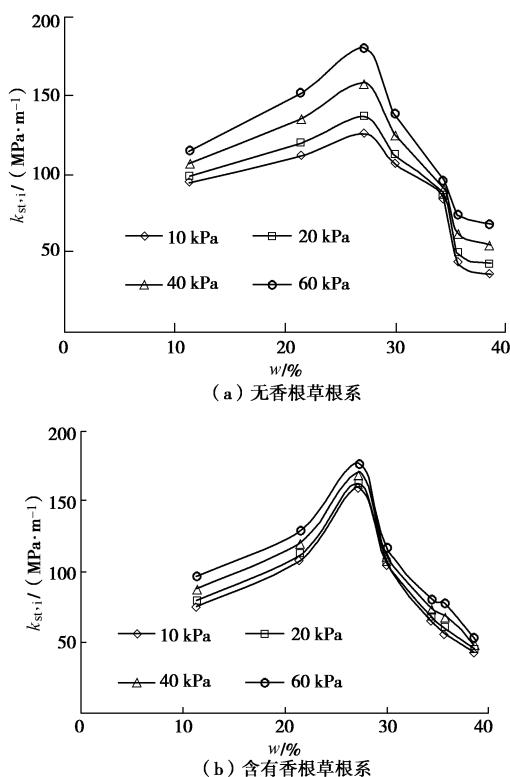


图10 含有和无香根草根茎的膨胀土试样在不同初始含水率时的初始剪切刚度曲线

Fig. 10 Curves of initial tangent shear stiffness  $k_{st,i}$  of expansive soil samples with and without vetiver roots under various initial water contents

## 4 结 论

有、无香根草根系的膨胀土试样的侧限膨胀试验和直剪试验结果表明:

(1) 对膨胀土的侧限膨胀试验表明,膨胀土吸水膨胀时的最大膨胀力在最优含水率附近,在有锚固的情况下,香根草根系可以帮助抑制膨胀土的膨胀变形,降低膨胀力。

(2) 通过分析比较有、无香根草根系膨胀土试样在不同含水率时的剪切曲线可以发现,当含水率小于最优含水率且垂直压力较低时,有香根草根系试样的软化特征较弱些;在最优含水率附近时,有、无香根草根系试样的软化特征大致趋于一致。

(3) 相较于无香根草根系的膨胀土试样,含有香根草根系试样的黏聚力和内摩擦角要更大一些。同时,相较于根系对黏聚力的影响,香根草根系对内摩擦角的影响要更加明显。膨胀土的膨胀特性造成这一现象有异于一般的根系固土作用特征。

(4) 在直剪试验中,剪切滑动面上切线剪切刚度的最高值出现在最优含水率附近,然后随着含水率增加而减小。由于香根草根系的存在,抑制了膨胀土的膨胀变形并有助于膨胀力释放,使得膨胀土对正应力的大小较为不敏感。

## 参考文献:

- [1] GENS A, ALONSO E. A framework for the behavior of unsaturated expansive clays[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1992, **29**(6): 1013 – 1032.
- [2] CHO S E, LEE S R. Instability of unsaturated soil slopes due to infiltration[J]. Computers and Geotechnics, 2001, **28**(3): 185 – 208.
- [3] SOROCHEAN E A. Use of piles in expansive soils[J]. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1974, **11**(1): 33 – 38.
- [4] MUZAHIM Al-Mukhtar, SUHAIL Khattab, ALCOVER Jean-Francois. Microstructure and geotechnical properties of lime-treated expansive clayey soil[J]. Engineering Geology, 2012, **39**: 17 – 27.
- [5] COKCA E. Use of class C fly ashes for the stabilization of an expansive soil[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, **27**(7): 568 – 573.
- [6] 杨俊,黎新春,张国栋,等.风化砂改良膨胀土机理及边坡稳定性分析[J].江苏大学学报(自然科学版),2014, **35**(5): 600 – 604. (YANG Jun, LI Xin-chun, ZHANG Guo-dong, et al. Improving mechanism of expansive soil by weathered sand and slope stability analysis[J]. Journal of Jiangsu University, 2014, **35**(5): 600 – 604. (in Chinese))
- [7] 肖杰,杨和平,符浩,等.膨胀土边坡加筋作用的对比模型试验[J].中国公路学报,2014, **27**(7): 24 – 31. (XIAO Jie, YANG He-ping, FU Hao, et al. Comparison model test on

- effect of geogrid reinforcement for expansive soil slope[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2014, **27**(7): 24 - 31. (in Chinese))
- [8] VISWANADHAM B V S, PHANIKUMAR B R, MUKHERJEE Rahul V. Swelling behavior of a geofiber-reinforced expansive soil[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2009, **27**(1):73 - 76.
- [9] LIU Si-hong, YANG Lu, WENG Li-ping, et al. Field study of treatment for expansive soil/rock channel slope with soilbags[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2015, **43**(4): 283 - 292.
- [10] WANG Liu-jiang, LIU Si-hong, ZHOU Bin. Experimental study on the inclusion of soilbags in retaining walls constructed in expansive soils[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2015, **43**(1): 89 - 96.
- [11] LIU Si-hong, BAI Fu-qing, WANG Yi-sen, et al. Treatment for expansive soil channel slope with soilbags[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2013, **26**(4): 657 - 666.
- [12] ROERING J J, SCHMIDT K M, STOCK J D, et al. Shallow landsliding, root reinforcement, and the spatial distribution of trees in the Oregon Coast Range[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2003, **40**(2): 237 - 253.
- [13] GRAY D H, SOTIR R. Biotechnical stabilization of highway cut slope[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1992, **118**(9): 1395 - 1409.
- [14] WU T H, KOKESH C M, TRENNER B R. Use of live poles for stabilization of a shallow slope failure[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2014, **140**(10): 1 - 13.
- [15] WU T H, WATSON A. In situ shear tests of soil blocks with roots[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1998, **35**(4): 579 - 590.
- [16] MICKOVSKI S B, BRANSBY M F, BENGOUGH A G, et al. Resistance of simple plant root systems to uplift loads[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2010, **47**(1): 78 - 95.

(责任编辑 明经平)