

DOI: 10.11779/CJGE2017S1032

# 有纺土工织物覆土条件下的渗透特性试验研究

吴 纲<sup>1, 2, 3</sup>, 雷国辉<sup>\*1, 2</sup>, 姜 红<sup>1, 2, 4</sup>

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学江苏省岩土工程技术工程研究中心, 江苏 南京 210098;  
3. 浙江大学海洋学院, 浙江 杭州 310058; 4. 青岛利业建设咨询有限公司, 山东 青岛 266071)

**摘 要:** 分别配制不同孔隙比的粉砂、标准砂和黏土试样, 采用自主研发的一套多功能渗透试验装置, 开展了一系列纯土和有纺土工织物覆土条件下的渗透试验, 对比分析了这两种条件下渗透系数的差异, 并探讨了有纺土工织物与土共同作用下的渗透机理。结果表明, 有纺土工织物对于土体渗流略有一定的抑制作用, 表现为覆土条件下的渗透系数略小于纯土的渗透系数, 但是对于粉砂, 当其孔隙比较大、细砂颗粒的含量相对较多时, 细砂颗粒则有可能在渗流作用下通过有纺土工织物孔隙而产生流失, 使得覆粉砂条件下的渗透系数略大于纯粉砂的渗透系数。

**关键词:** 多功能渗透仪; 有纺土工织物; 渗透系数; 孔隙比; 渗透机理

中图分类号: TU441

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2017)S1-0161-05

**作者简介:** 吴 纲(1990-), 男, 江苏无锡人, 博士研究生, 从事软土地基处理技术研究。E-mail: 605615170@qq.com。

## Experimental study on permeability of woven geotextile covered with soil

WU Gang<sup>1, 2, 3</sup>, LEI Guo-hui<sup>1, 2</sup>, JIANG Hong<sup>1, 2, 4</sup>

(1. Key Laboratory of Geomechanics and Embankment Engineering of the Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Jiangsu Research Center for Geotechnical Engineering Technology, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Ocean College, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 4. Qingdao Liye Construction Profession Co., Ltd., Qingdao 266071, China)

**Abstract:** The specimens of silty sand, standard sand and clay with different void ratios are prepared. By utilizing a multifunctional permeability test apparatus, a series of permeability tests are carried out under the conditions of pure soils and woven geotextiles covered with soils. The difference in hydraulic conductivity under these two conditions is analyzed by comparisons. The mechanism of seepage under the interaction between geotextile and soil is discussed. The results show that the woven geotextile has a slight suppression effect on the seepage of soil, resulting in the case that the hydraulic conductivity of the geotextile covered with soil is a bit lower than that of the soil. However, for the silty sand with a relatively large void ratio and a relatively high content of fine sands, loss of fine sand grains owing to passing through the voids of woven geotextile may take place under the actions of seepage. This will result in the case that the hydraulic conductivity of the geotextile covered with silty sand is a bit higher than that of the silty sand.

**Key words:** multifunctional permeameter; woven geotextile; hydraulic conductivity; void ratio; seepage mechanism

## 0 引 言

在土木与环境岩土工程中, 有纺土工织物因抗拉强度和渗透性高而广泛用作加筋和反滤材料。不过, 通过分析相关的工程事故案例<sup>[1-2]</sup>可以发现, 在绝大多数的工程应用条件下, 无论是加筋还是反滤材料, 与其对应的力学和水力性能的发挥并非仅仅取决于材料本身, 而是取决于它与土体之间的共同作用, 尤其是在水力性能方面。

为揭示有纺土工织物与土共同作用下的渗透特性, 本文采用自主研发的土工织物多功能渗透试验装置<sup>[3]</sup>, 开展了有纺土工织物分别覆粉砂和黏土的渗透试验, 确定了其渗透系数, 并与纯粉砂和纯黏土的渗

透试验确定的渗透系数进行了对比, 分析了两者之间的相关关系, 探讨了有纺土工织物与土共同作用下的渗透机理。

## 1 试验装置、材料和方法

### 1.1 试验装置

本文所采用的试验仪器是在总结和分析现有土工织物垂直渗透特性试验仪器、测试标准和方法研究现

基金项目: 国家自然科学基金项目(51278171); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2015B06014)

收稿日期: 2016-12-02

\*通讯作者(leiguohui@hhu.edu.cn)

状<sup>[4]</sup>的基础上, 自主研发的多功能渗透试验装置<sup>[3]</sup>。利用该装置, 可以开展纯土、纯土工织物以及覆土土工织物在垂向无压和有压情况下的常水头和变水头渗透试验。具体的试验装置的系统组成、性能指标以及功能实现等可参见文献<sup>[3]</sup>。前期的应用结果表明, 该试验装置在土工织物无拉伸和无垂向压力情况下的渗透试验结果与满足国标和国际标准要求的土工织物渗透仪的试验结果基本一致<sup>[3]</sup>。

## 1.2 试验材料

本文渗透试验所采用的土样为粉砂和黏土, 其中, 粉砂取自南京市秦淮河, 黏土取自温州市苍南县某围垦工程施工现场。粉砂和黏土的粒径分布曲线如图 1 所示。黏土的基本物理性质指标为: 土颗粒相对密度  $G_s=2.69$ , 液限  $w_L=59\%$ , 塑限  $w_p=29\%$ , 塑性指数  $I_p=30$ 。

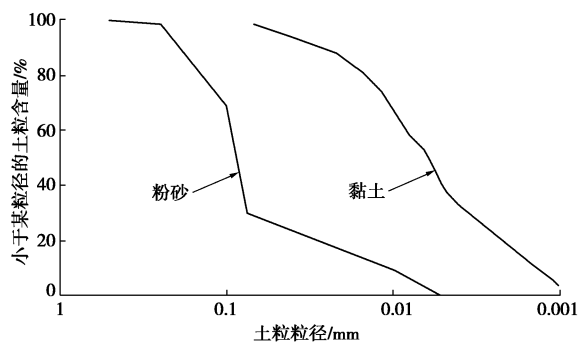


图 1 试验土样的粒径分布曲线

Fig. 1 Grain-size distribution curves of test soil specimens

渗透试验所用有纺土工织物的单位面积质量为  $200 \text{ g/m}^2$ , 厚度为  $0.67 \text{ mm}$ , 渗透系数为  $3.5 \sim 6.0 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ , 等效孔径  $O_{95}$  为  $0.08 \sim 0.5 \text{ mm}$ , 经向和纬向断裂强度分别大于等于  $40, 28 \text{ kN/m}$ , 顶破力为  $3.2 \text{ kN}$ 。

## 1.3 试验方法

采用上述自主研发的多功能渗透试验装置, 开展了纯粉砂、纯黏土、以及有纺土工织物分别覆粉砂和黏土的渗透试验。对于粉砂试样, 开展常水头渗透试验; 对于黏土试样, 开展变水头渗透试验。多功能渗透仪如图 2 所示, 其内径为  $7 \text{ cm}$ 。开展有纺土工织物覆土的渗透试验时, 先将土工织物裁剪成  $8 \text{ cm} \times 8 \text{ cm}$  的方形试样并放置于渗透仪的多孔滤板之上, 然后将渗透仪上筒安置于土工织物之上。在安装上筒时, 在其底面边缘处涂抹防水胶, 以防止渗透室的侧漏, 同时, 让上筒和下筒的螺栓口对齐, 然后拧紧螺栓, 通过上筒底面边缘涂抹的防水胶以及下筒顶面设置的 O 形橡胶密封圈, 使得渗透仪上、下筒之间不产生渗漏现象。开展纯土条件下的渗透试验时, 多孔滤板上放置滤纸, 渗透仪上筒安置于滤纸之上, 其余步骤与上述步骤相同。此外, 还需对渗透仪进行排气处理。采用脱气水或蒸馏水开展试验, 以避免水中的气泡附

着在织物表面, 影响织物的渗透。将出水口的软管放在较低的高度, 利用较高的流速, 将处在渗透室内的空气或气泡排出, 当较长时间内没有空气或气泡排出时, 再开始填入饱和土样, 土样的高度为  $20 \text{ cm}$ , 装样过程中始终保持土样在液面以下。最后, 在土样顶部上覆滤纸和多孔滤板以平整土样, 并防止渗透变形。

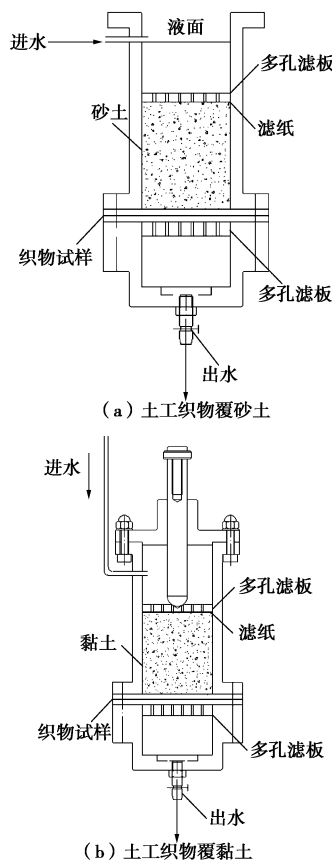


图 2 土工织物覆土渗透试验示意图

Fig. 2 Sketch of permeability tests on geotextile covered with soil

常水头渗透试验的进水口连接马氏瓶装脱气水或蒸馏水以提供常水头, 水头差为  $20 \text{ cm}$ , 经过一段时间, 待流速稳定后, 再开始测读数据。变水头渗透试验的进水口则与带刻度的细玻璃管相连, 最大水头差为  $100 \text{ cm}$ 。试验过程中, 由于粉砂的渗透性较高, 故每  $10 \text{ min}$  测读一次数据, 得到其渗透系数随时间的变化曲线。而黏土的渗透系数相对较小, 因此每  $30 \text{ min}$  测读一次数据, 也得到其渗透系数随时间的变化曲线图。在水位和流量数据测读的同时, 也测读温度的变化, 以便将测试结果修正到  $20^\circ\text{C}$  情况下的渗透系数。根据测试数据确定渗透系数的方法依照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—1999) 进行。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 有纺土工织物覆粉砂

取试验用粉砂配制成 10 种不同孔隙比的试样, 分

别开展纯粉砂和有纺土工织物覆粉砂的常水头渗透试验。在不同的孔隙比情况下, 纯粉砂和有纺土工织物覆粉砂的渗透系数随时间变化过程的典型试验结果如图 3 所示。从图 3 (a)、(b) 中可以看出, 孔隙比为 0.67 和 0.73 时, 纯粉砂的渗透系数约为  $7.0 \sim 10.0 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ , 有纺土工织物覆粉砂的渗透系数约为  $6.0 \sim 8.0 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ , 两者虽然相差不大, 但纯粉砂的渗透系数都明显大于有纺土工织物覆粉砂的渗透系数。从图 3 (c)、3 (d) 中可以看出, 孔隙比为 0.83 和 0.91 时, 纯粉砂的渗透系数分别约为  $2.2 \times 10^{-4}$ ,  $2.8 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ , 有纺土工织物覆粉砂的渗透系数分别约为  $2.5 \times 10^{-4}$ ,  $3.0 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ , 两者相差也不大, 但此时, 有纺土工织物覆粉砂的渗透系数却都明显大于纯粉砂的渗透系数, 这与粉砂孔隙比为 0.67 和 0.73 时测试得到的结果相反, 其原因和机理将在下文中解释。不过, 与纯有纺土工织物的渗透系数  $3.5 \sim 6.0 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$  相比, 纯粉砂和有纺土工织物覆粉砂的渗透系数约低 1~2 个数量级。这说明有纺土工织物覆粉砂情况下的渗透系数基本上取决于粉砂的渗透系数, 与纯土工织物的渗透系数关系不大。

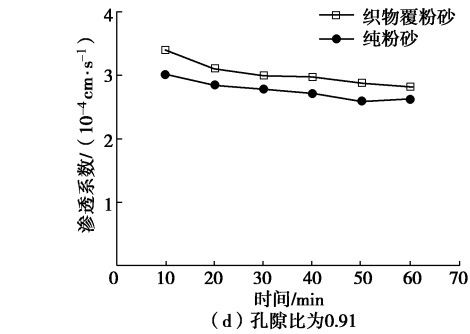
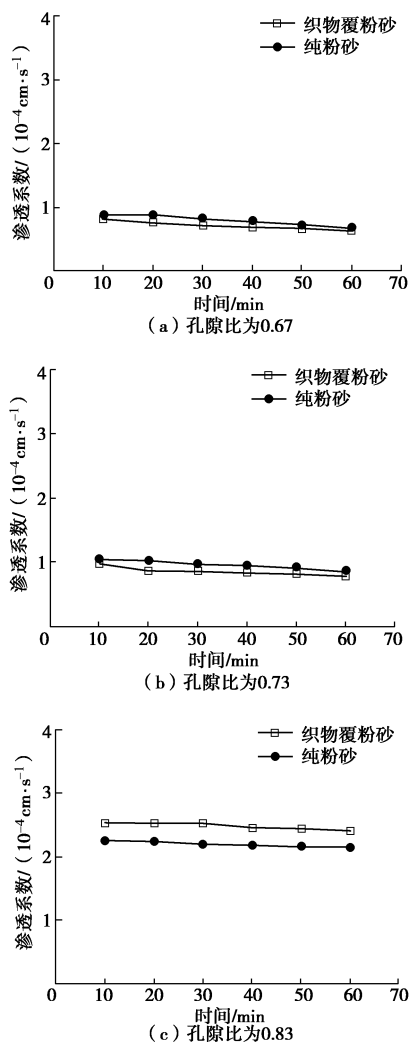


图 3 不同孔隙比粉砂试样渗透系数随时间变化过程

Fig. 3 Variation of hydraulic conductivity with time for silty sand specimens with different void ratios

图 4 所示为粉砂在不同孔隙比条件下纯粉砂和有纺土工织物覆粉砂的渗透系数试验结果。从图 4 中可以看出, 渗透系数随着孔隙比的增大而增大, 这符合预期。孔隙比小于等于 0.75 时, 纯粉砂的渗透系数略大于有纺土工织物覆粉砂的渗透系数, 而孔隙比大于等于 0.8 时, 有纺土工织物覆粉砂的渗透系数则略大于纯粉砂的渗透系数。这说明粉砂在不同的孔隙比条件下, 粉砂与有纺土工织物之间的水力相互作用机制是不同的。其原因可以解释为: 当粉砂的孔隙比较大时, 其中的细颗粒容易从有纺土工织物经向和纬向之间的孔隙中流失。因为, 有纺土工织物的等效孔径  $O_{95}$  为  $0.08 \sim 0.5 \text{ mm}$ , 且以较小值为主, 而从图 1 所示粉砂的粒径分布曲线可以看出, 粉砂中约有 30% 的颗粒小于  $0.1 \text{ mm}$  粒径。在高孔隙比条件下, 粉砂的结构疏松, 这些细小的砂颗粒就容易在渗流作用下通过有纺土工织物而产生流失, 使得粉砂的孔隙比增大, 而在纯粉砂情况下, 由于有滤纸的阻挡, 细小砂颗粒未被带走, 从而导致有纺土工织物覆粉砂的渗透系数略大于纯粉砂的渗透系数。图 5 所示为有纺土工织物覆高孔隙比粉砂试样在渗透试验完成后渗透仪下筒顶部的照片, 从中可以清晰地看出, 粉砂中的细小颗粒的确通过有纺土工织物的孔隙流失而残留在渗透仪下筒的顶部。这验证了上述给出的物理解释。

为进一步验证上述物理解释, 本文还采用标准砂开展了纯标准砂与有纺土工织物覆标准砂的常水头渗透试验, 渗透系数试验结果如图 6 所示。所用标准砂的粒径为  $0.25 \sim 0.5 \text{ mm}$ , 基本都大于有纺土工织物的孔隙。从图 6 中可以看出, 有纺土工织物覆标准砂时, 其渗透系数几乎都一致地小于纯标准砂的渗透系数, 这是由于标准砂的粒径基本都大于有纺土工织物的孔隙, 在渗流作用下砂颗粒难以通过有纺土工织物孔隙而产生流失, 而有纺土工织物有限的过水面积对标准砂的渗流起到一定的抑制作用, 使得有纺土工织物覆标准砂的渗透系数基本都小于纯标准砂的渗透系数。

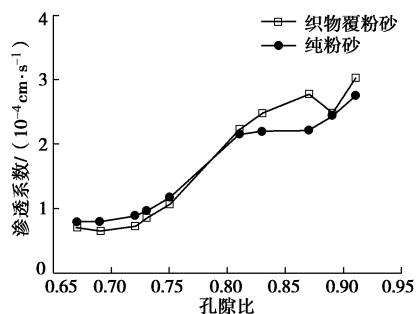


图4 不同孔隙比粉砂试样情况下的渗透系数

Fig. 4 Hydraulic conductivities of silty sand specimens with different void ratios



图5 土工织物覆粉砂渗透试验后渗透仪下筒顶部的照片

Fig. 5 Photo of top of lower part of permeameter after permeability tests on geotextile covered with silty sand

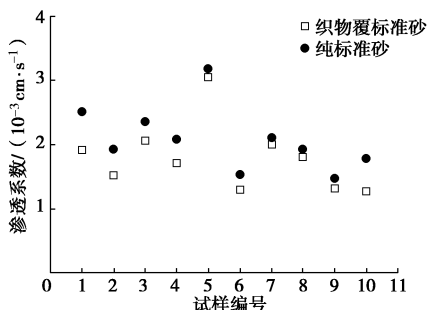


图6 标准砂试样的渗透系数

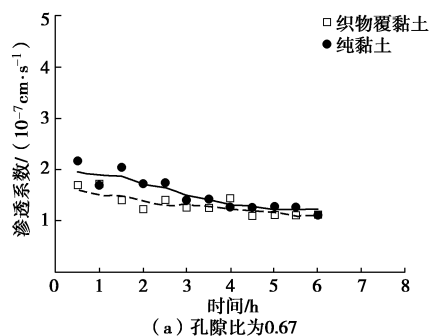
Fig. 6 Hydraulic conductivities of standard sand specimens

## 2.2 有纺土工织物覆黏土

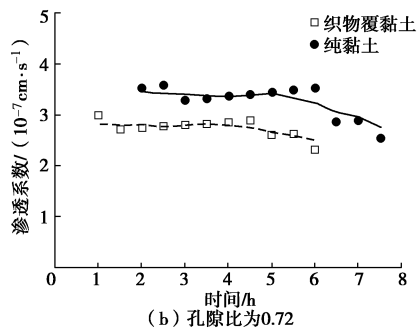
取试验用黏土配制成3种不同孔隙比的试样,分别开展纯黏土和有纺土工织物覆黏土的变水头渗透试验,试验时的起始水头差为1 m。在不同的孔隙比情况下,纯黏土和有纺土工织物覆黏土的渗透系数随时间变化过程的典型试验结果如图7所示,图中符号点代表实测结果,图中曲线为采用相邻数据平均法得到的渗透系数变化趋势线。从图7中可以看出,测试结果表现出一定的波动性和离散性,这可能与变水头试验方式有关。因为不同的水头差作用下,土中的渗流速度不一样,有可能导致试验结果产生偏差。图7中不同孔隙比条件下的测试结果均显示,纯黏土的渗透系数与有纺土工织物覆黏土的渗透系数相差不大,

但是,纯黏土的渗透系数基本都明显一致地大于有纺土工织物覆黏土的渗透系数。这与前述采用粉砂试样情况下所得到的测试结果有所不同。这可能是由于黏土颗粒的粒间力的作用使得其不易被渗透水流带走,反而造成有纺土工织物孔隙被淤堵,对黏土的渗流起到抑制作用。有纺土工织物覆黏土渗透试验后的照片如图8所示,可以看出,有纺土工织物的孔隙的确发生了部分被淤堵的现象,这与其他学者开展的渗透试验<sup>[5-8]</sup>中观察到的有纺土工织物表面产生泥皮的现象是一致的。此外,从图7还可以看出,与有纺土工织物覆粉砂情况下的结果类似,有纺土工织物覆黏土情况下的渗透系数基本上取决于黏土的渗透系数,也与纯土工织物的渗透系数关系不大。

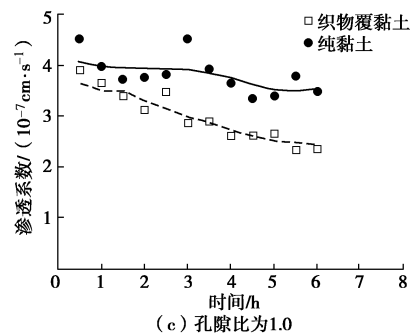
另外,从图3、7可以看出,渗透系数随着时间基本呈减小的趋势,但是,其变化速率随着时间的推移也逐渐减小至零。这主要是由于在渗流过程中,渗流力使得土体有所密实、孔隙比有所减小,从而使得渗透系数有所降低。



(a) 孔隙比为0.67



(b) 孔隙比为0.72



(c) 孔隙比为1.0

图7 不同孔隙比黏土试样渗透系数随时间变化过程

Fig. 7 Variation of hydraulic conductivity with time for clay specimens with different void ratios

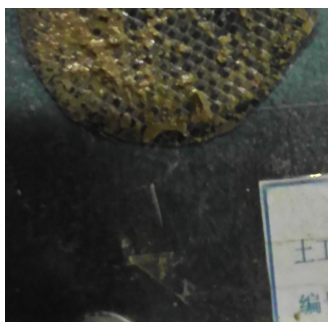


图 8 土工织物覆黏土渗透试验后的照片

Fig. 8 Photo of geotextile covered with clay after permeability tests

### 3 结 论

(1) 有纺土工织物覆粉砂时, 其渗透系数与纯粉砂的渗透系数之间的关系与粉砂的孔隙比、细砂含量以及有纺土工织物的孔隙直径有关。对于本文所采用的粉砂试样, 当孔隙比小于等于 0.75 时, 有纺土工织物覆粉砂的渗透系数略小于纯粉砂的渗透系数, 而孔隙比大于等于 0.8 时, 有纺土工织物覆粉砂的渗透系数则略大于纯粉砂的渗透系数, 这是由于在土质疏松的情况下, 细小的砂颗粒容易在渗流作用下通过有纺土工织物的孔隙而产生流失所导致。有纺土工织物覆上缺失细砂粒径的标准砂时, 其渗透系数则基本一致地略小于纯标准砂的渗透系数, 这说明在排除细砂颗粒通过有纺土工织物孔隙流失影响的情况下, 有纺土工织物对标准砂的渗流起到了抑制作用。

(2) 有纺土工织物覆黏土时的渗透系数基本一致地略小于纯黏土的渗透系数, 有纺土工织物对黏土的渗流也起到了抑制作用, 这主要是由于渗流力以及细粒土的粒间力作用, 使有纺土工织物的表面形成泥皮, 从而导致有纺土工织物的孔隙产生淤堵所致, 这与有纺土工织物对砂土渗流的抑制作用有着明显的不同。

### 参考文献:

- [1] KOERNER R M, KOERNER G R. A data base, statistics and recommendations regarding 171 failed geosynthetic reinforced mechanically stabilized earth (MSE) walls[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2013, **40**: 20 - 27.
- [2] KOERNER R M, KOERNER G R. Lessons learned from geotextile filter failures under challenging field conditions[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2015, **43**(3): 272 - 281.
- [3] 雷国辉, 吴 纲, 姜 红, 等. 土工织物双向可拉伸多功能渗透试验装置[J]. *岩土工程学报*, 2016, **38**(增刊 1): 119 - 124. (LEI Guo-hui, WU Gang, JIANG Hong, et al. Multifunctional permeability test apparatus for geotextiles under biaxial tension[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, **38**(S1): 119 - 124. (in Chinese))
- [4] 姜 红, 雷国辉, 杨明昌. 土工织物垂直渗透特性的研究进展[J]. *水利水电科技进展*, 2014, **34**(3): 89 - 94. (JIANG Hong, LEI Guo-hui, YANG Ming-chang. Research progress of vertical infiltration characteristics of geotextiles[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2014, **34**(3): 89 - 94. (in Chinese))
- [5] KOERNER G R, KOERNER R M. Geotextile tube assessment using a hanging bag test[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2006, **24**(2): 129 - 137.
- [6] HUANG C C, LUO S Y. Dewatering of reservoir sediment slurry using woven geotextiles. part 1: experimental results[J]. *Geosynthetics International*, 2007, **14**(5): 253 - 263.
- [7] WEGGEL J R, DORTCH J, MERIDA V Z. Experiments with water and slurries in hanging geotextile bags: a further appraisal[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2011, **29**(5): 502 - 513.
- [8] WEGGEL J R, DORTCH J. A model for filter cake formation on geotextiles: experiments[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2012, **31**: 62 - 68.

(本文责编 孙振远)