

DOI: 10.11779/CJGE2016S1022

土工织物双向可拉伸多功能渗透试验装置

雷国辉^{1, 2}, 吴纲^{1, 2, 3}, 姜红^{1, 2, 4}, 茅加峰⁵

(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. 河海大学岩土工程科学研究所, 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; 5. 南京土壤仪器厂有限公司, 江苏 南京 210014)

摘要: 为揭示土工织物工程应用时处于拉伸状态下的渗透和反滤特性, 自主研制了一套多功能渗透试验装置。采用两套独立的、稳定可靠的砝码和杠杆加载机构, 可以实现土工织物在单向和双向不同拉伸应力作用情况下的渗透试验。设计开发了一种多功能渗透仪, 可以开展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。初步应用结果表明, 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渗透仪的试验结果基本一致, 且能够实现试验装置设计的所有功能, 为后续开展土工织物拉伸条件下渗透和反滤特性的试验研究奠定了基础。

关键词: 土工织物; 双向拉伸; 多功能渗透仪; 渗透特性; 反滤特性

中图分类号: TU415 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2016)S1-0119-06

作者简介: 雷国辉(1972-), 男, 江西丰城人, 教授, 从事土力学及地基基础工程研究。E-mail: leiguohui@hhu.edu.cn。

Multifunctional permeability test apparatus for geotextiles under biaxial tension

LEI Guo-hui^{1, 2}, WU Gang^{1, 2, 3}, JIANG Hong^{1, 2, 4}, MAO Jia-feng⁵

(1. Key Laboratory of Geomechanics and Embankment Engineering of the Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098,

China; 2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Ocean College, Zhejiang University, Hangzhou
310058, China; 4. Qingdao Liye Construction Profession Co., Ltd., Qingdao 266071, China; 5. Nanjing Soil Instrument Factory Co., Ltd.,
Nanjing 210014, China)

Abstract: A multifunctional permeability test apparatus is developed to investigate the permeability and filtration properties of geotextiles under tension as encountered in practice. By adopting two individual sets of stable and reliable counterweight-and-lever loading assemblies, permeability tests can be carried out for geotextiles under either uni-axial or biaxial tension with different tensile stresses. A multifunctional permeameter is designed and developed for performing constant head and falling head permeability tests on geotextiles or soil-covered geotextiles with and without vertical load. The preliminary experimental results show that the permeability of geotextiles without tension and vertical load obtained from the newly developed apparatus is generally consistent with that obtained from a permeameter conform to the national and international standards. Moreover, all functions designed for this apparatus can be accomplished. This provides a basis for future studies on the permeability and filtration properties of geotextiles under tension.

Key words: geotextile; biaxial tension; multifunctional permeameter; permeability property; filtration property

0 引言

土工织物作为反滤材料已在土木、水利、港口和环境等工程建设中有着广泛的应用, 对其渗透和反滤特性的认知是决定工程应用成败的关键^[1-2], 而渗透试验仪器或装置的开发则是发现和掌握土工织物渗透和反滤规律不可或缺的前提条件。姜红等^[3]对土工织物垂直渗透特性的试验仪器、测试标准和方法的研究现状进行了较为全面和系统的总结, 从中可以看出, 现有的渗透试验仪器功能较为单一, 不同的试验方法, 比如土工织物和覆土土工织物情况下、有垂向压力和

无垂向压力作用情况下的渗透试验需要采用不同的试验仪器或装置。更为重要的是, 实际工程应用中土工织物往往处于垂向受压、平面内双向受拉应力状态^[4], 不同的应用条件下, 拉应力或拉应变的大小各异^[5-11], 这将导致其渗透和反滤特性必然与无拉伸的自然状态下的渗透和反滤特性不同。因此, 十分有必要构建相应的试验条件, 模拟土工织物在实际工程应用时的应

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: 2015-11-30

力状态, 研究其物理、力学以及水力学特性。

对于土工织物的物理和力学特性, 已经研制和开发了一些双轴拉伸^[12-15]和多轴拉伸(即环向固定、垂向顶压拉伸)^[16]的试验装置, 用于土工织物开口孔径^[12-13]和应力、应变和强度关系^[14-16]的研究。对于土工织物在拉伸状态下渗透和反滤特性的研究, Fourie 等^[17]、Wu 等^[18]、唐琳等^[19]、Zhang 等^[20]均通过研制单轴拉伸仪和固定拉伸后土工织物用的法兰盘, 采用先拉伸土工织物、然后用螺栓将拉伸后的土工织物固定于法兰盘中并裁去其周边的土工织物, 再将其置于渗透仪的方法, 展开渗透或反滤特性的试验研究。不过, 采用这种拉伸与渗透分隔处置的试验方法很有可能导致螺栓之间的土工织物产生局部的应力或应变松弛现象, 虽然未见相关报道, 但却值得对此作进一步的改进。另外, 目前还未见有土工织物双向拉伸情况下的渗透试验装置及相应的研究成果。

为揭示土工织物实际工程应用时双向拉伸应力状态下的渗透和反滤特性, 笔者自主研发了一套土工织物双向可拉伸多功能渗透试验装置, 并获得国家实用新型发明专利授权^[21]。该装置可以实现土工织物拉伸与渗透操作一体化处置, 即在保持双向拉伸状态下开展渗透试验, 避免了土工织物拉伸后可能产生的应力或应变松弛现象。设计了两套独立的、稳定可靠的砝码和杠杆加载机构, 使得双向拉伸应力的大小在土工织物拉伸强度范围内任意可调, 以模拟实际工程应用时土工织物双向应力大小通常不等的应力状态。同时, 设计了一台多功能渗透仪, 可以开展纯土工织物和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。

1 试验装置的系统组成

研制的土工织物双向拉伸多功能渗透试验装置如图 1 所示, 主要由双向拉伸机构、多功能渗透仪和垂向加压机构组成。试验装置的系统结构及主要部件如示意图 2 所示, 为清晰起见, 图 2 中仅显示了一个方向的拉伸机构。

1.1 土工织物双向拉伸机构

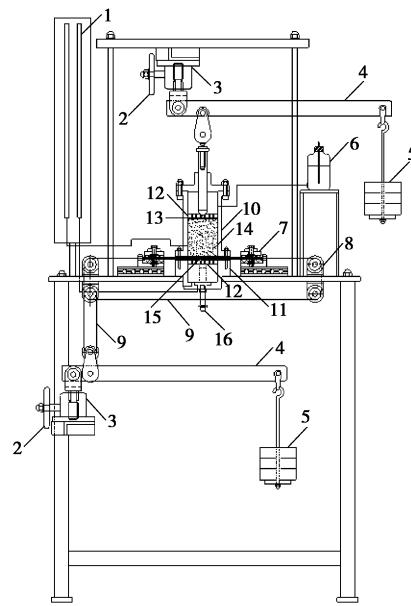
双向拉伸机构由正交布置的 2 套独立的加载机构和 4 套土工织物夹具组成, 1 套加载机构负责对 2 套正对的夹具所夹持的土工织物实施拉伸。加载机构包括砝码、杠杆、钢丝绳、滑轮、齿轮箱和手轮, 夹具包括导轨和上、下夹板。下夹板置于两条相互平行的导轨上, 以避免土工织物受到偏心受拉作用。下夹板顶面与渗透仪下筒顶面在同一平面, 使得土工织物在夹持拉伸后与渗透仪下筒顶面贴合, 以便在保持双向

拉伸状态下安装渗透仪上筒后开展渗透试验。



图 1 多功能渗透试验装置照片

Fig. 1 Photo of multifunctional permeability test apparatus



1. 测压管; 2. 手轮; 3. 齿轮箱; 4. 杠杆; 5. 砝码; 6. 马氏瓶;
7. 夹具; 8. 滑轮; 9. 钢丝绳; 10. 渗透仪上筒; 11. 渗透仪下筒;
12. 滤板; 13. 滤纸; 14. 土样; 15. 土工织物; 16. 进/出水口

图 2 试验装置系统结构示意图

Fig. 2 Sketch of structure of test apparatus system

十字形土工织物试样双向拉伸和渗透仪安装如图 3 所示。对于无纺土工织物, 试样的十字形交叉的边角处应裁剪成圆弧形, 以避免产生应力集中现象。开展单向拉伸渗透试验时, 则采用条形土工织物试样, 利用其中的任意 1 套加载机构和对应的 2 套正对的夹具即可实施。

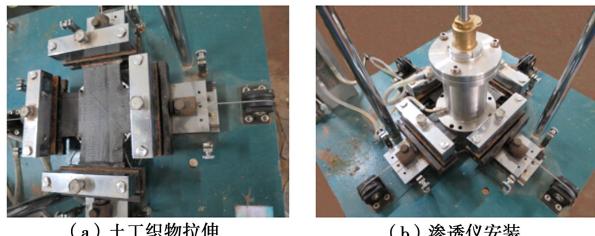


图 3 土工织物双向拉伸及渗透仪安装

Fig. 3 Biaxial stretching of geotextile and installation of permeameter

双向拉伸时, 在杠杆的吊盘上安放砝码, 通过杠杆作用对滑轮上的钢丝绳进行拉伸, 同一方向正对的夹具所用的是一根钢丝绳, 这样可以使得土工织物试样两端均匀受拉, 且拉伸前后土工织物的中心位置保持不变。

考虑土工织物的拉伸变形对加载效果的影响, 杠杆和吊盘的高度可以通过手轮及其控制的齿轮箱进行调节, 同时, 钢丝绳的线程也可以通过钢丝绳的调长装置进行调节, 以保证所施加的荷载稳定、可靠地传递到土工织物上。

试验时, 先在渗透仪下筒中放入多孔滤板, 将十字形土工织物试样置于夹具中并固定好, 然后调节钢丝绳的线程以及杠杆的高度, 在试验台座上利用每套夹具旁预埋的 2 套紧固件安装好百分表并使其与夹具接触良好, 再施加砝码对土工织物实施拉伸。每套夹具配置 2 个百分表。通过 8 个百分表的读数可以判断土工织物拉伸的偏心程度和均匀程度, 评估拉伸效果, 以决定是否需要修正拉伸试验过程。另外, 根据百分表读数与所施加的荷载的大小, 还可以得到土工织物的拉伸应力与应变之间的关系。

1.2 多功能渗透仪

渗透室由不锈钢制成, 内径 7 cm, 能抵抗在进行覆土试验时, 土体加载所产生的侧向土压力。渗透室分为上筒和下筒, 其主要结构如示意图 4 所示。

土工织物均匀拉伸后, 将渗透仪上筒放置于拉伸后的土工织物之上。在安装上筒时, 应在上筒底面边缘涂抹防水胶, 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。

对于土工织物渗透试验, 在安装好渗透仪上筒后, 放入滤板、盖上顶盖, 再固定好轴压杆后开展渗透试验。对于覆土土工织物渗透试验, 在安装好渗透仪上筒后, 装入土样、铺设滤纸、放入滤板、盖上顶盖, 再固定好轴压杆后开展渗透试验。开展轴向有压情况下的渗透试验时, 则将轴压杆与垂向加压机构连接, 施加轴压后再开展渗透试验。

渗透试验前, 需要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, 再进行渗透试验。

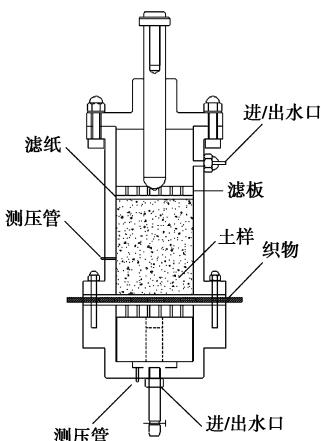


图 4 多功能渗透仪示意图

Fig. 4 Sketch of multifunctional permeameter

开展常水头渗透试验时, 用马氏瓶(如图 2 所示)装脱气水或蒸馏水, 可以提供恒定的水头, 将脱气水或蒸馏水从底部的进水孔进入渗透仪, 自下向上渗透, 最终从上部出水孔排出收集, 经过一段时间, 当流速稳定后, 根据收集到的水量和所用时间, 计算流速。上部排水孔用软管相连, 调整软管出口的高度, 可以使织物上下两侧的水头差高度改变。记录试样上下的测压管的水头差, 得到流速和水头差之间的关系, 进而得到织物的透水率或渗透系数。

开展变水头渗透试验时, 则采用测压管(如图 2 所示)与进水口相连, 其原理与常规变水头试验原理一致。

1.3 垂向加压机构

垂向加压机构主要由砝码、杠杆、齿轮箱和手轮组成, 与双向拉伸机构的区别在于无需钢丝绳和滑轮, 但其加载原理和方法与双向拉伸机构是相同的, 不再赘述。

1.4 装置的主要性能指标

上述土工织物双向可拉伸多功能渗透试验装置的主要性能指标如表 1 所示。

表 1 试验装置的主要性能指标

Table 1 Major technical parameters for test apparatus

最大水头差 /cm	十字试样宽度 /cm	最大垂向荷载 /N	最大拉伸荷载 /N	最大拉伸位移 /mm
50	8	30×30	1320	660

2 初步应用效果

为验证所研制的土工织物双向可拉伸多功能渗透试验装置的可靠性,利用某工程充泥土工织物管袋施工现场所采用的有纺土工织物,开展了无压条件下的渗透试验。有纺土工织物的材料参数如表2所示。试验前,对于无拉伸情况下土工织物的渗透试验,裁取 $8\text{ cm} \times 8\text{ cm}$ 的方形土工织物试样;对于单向拉伸情况,裁取 $8\text{ cm} \times 30\text{ cm}$ 的条形土工织物试样;对于双向拉伸情况,先裁取 $30\text{ cm} \times 30\text{ cm}$ 的土工织物试样,再将其四角裁去 $11\text{ cm} \times 11\text{ cm}$,形成中心为 $8\text{ cm} \times 8\text{ cm}$ 、外延全长为 30 cm 的十字形试样。

表2 土工织物物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of geotextiles

单位面积质量/ $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$	厚度/mm	经向断裂强度/ $\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$	纬向断裂强度/ $\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$	顶破力/kN
200	0.67	≥ 40	≥ 28	3.2

分别采用本文所研制的渗透试验装置和满足国标和国际标准的YT020型土工织物渗透仪,开展了土工织物无拉伸和无垂向压力情况下的常水头渗透试验,所得到的流速与水头差关系试验结果如图5所示。可以看出,考虑土工织物试样的离散性引起试验结果差异的因素,采用本文研制的渗透试验装置得到的结果与常规土工织物渗透仪所得到的试验结果基本吻合。

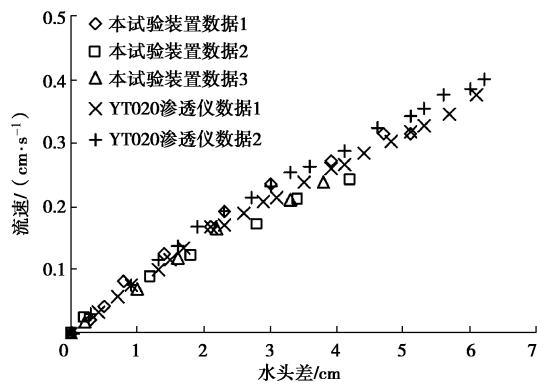


图5 土工织物无拉伸渗透试验结果

Fig. 5 Permeability test results for geotextiles without tension

采用条形土工织物试样,开展了经向和纬向单向拉伸试验,所得到的应力和应变关系试验结果如图6所示。可以看出,经向的抗拉变形能力要强于纬向的抗拉变形能力,这与表2中的经向断裂强度高于纬向断裂强度是一致的。

采用十字形土工织物试样,开展了经向和纬向双向同时拉伸试验,所得到的土工织物的透水率与双向拉伸应力关系试验结果如图7所示。可以看出,总体

上,随着双向拉伸应力的增加,织物的透水率是变大的。在从无拉伸自然状态到初始拉伸状态期间,土工织物的透水率稍有下降。这是因为在自然状态下,有纺土工织物的经丝与纬丝重叠部分,还存在一定的孔隙,在拉伸初期,施加一个很小的拉伸应力,织物就被绷紧,经丝与纬丝重叠部分的孔隙就消失了,渗透水流只能在丝与丝之间的孔隙流动,由此导致土工织物的透水率稍有下降。当土工织物被拉伸绷紧之后,继续施加拉伸应力,经纬向丝线变窄,丝与丝之间的孔隙变大,通过织物的水流变大,继而导致土工织物的透水率增加。

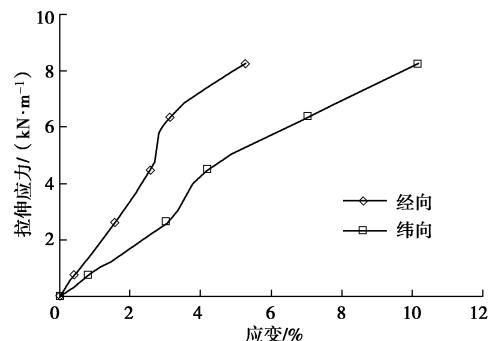


图6 土工织物单向拉伸应力应变关系

Fig. 6 Relationship between stress and strain of geotextiles subjected to uni-axial tension

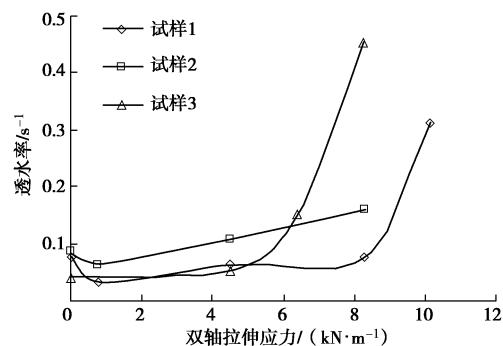


图7 土工织物透水率与双向拉伸应力关系

Fig. 7 Relationship between permeability and biaxial tensile stress of geotextiles

从图7中还可以看出,土工织物的透水率与双向拉伸应力之间呈现出非线性变化关系。当拉伸应力达到一定程度之后,透水率明显快速增大,这反映了随着拉伸应力的增大,土工织物的孔隙面积增大,渗透水流有可能从层流状态过渡到紊流状态,这方面的试验结果还有待于后续的深入研究。

3 结论

(1)自主研制了一套土工织物双向可拉伸多功能

渗透试验装置, 利用该装置, 可以开展土工织物无拉伸、单向和双向任意拉伸条件下, 纯土工织物和覆土土工织物, 以及有垂向压力和无垂向压力条件下的常水头和变水头渗透试验。

(2)该装置实现了土工织物拉伸与渗透试验操作一体化处置, 即在保持土工织物拉伸状态下开展渗透试验, 避免了土工织物拉伸后可能产生的应力或应变松弛现象。所设计的双向拉伸机构能够保证土工织物均匀受拉。

(3)初步应用结果表明, 采用本文研制的试验装置与采用常规土工织物渗透仪所得到的试验结果基本吻合。此外, 采用本试验装置, 还可以得到土工织物的应力、应变关系, 以及土工织物渗透参数与拉伸应力之间的关系。

(4)土工织物在拉伸状态下的渗透性能与无拉伸自然状态下的渗透性能明显不同。土工织物的透水率与双向拉伸应力之间呈现出非线性变化关系, 证明了开展双向拉伸条件下土工织物渗透试验装置研究、以及深入开展模拟实际工程中土工织物双向拉伸条件下的渗透和反滤特性试验研究的必要性。

参考文献:

- [1] ROWE R K. The 45th Rankine lecture: long-term performance of contaminant barrier systems[J]. *Géotechnique*, 2005, **55**(9): 631 – 678.
- [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] 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))
- [4] GIROUD J P. Biaxial tensile state of stress in geosynthetics[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 1992, **11**(3): 319 – 325.
- [5] ROWE R K, GNANENDRAN C T. Geotextile strain in a full scale reinforced test embankment[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 1994, **13**(2): 781 – 806.
- [6] BERGADO D T, LORENZO G A, LONG P V. Limit equilibrium method back analyses of geotextile-reinforced embankments on soft Bangkok clay—a case study[J]. *Geosynthetics International*, 2002, **9**(3): 217 – 245.
- [7] ROWE R K, LI A L. Geosynthetic-reinforced embankments over soft foundations[J]. *Geosynthetics International*, 2005, **12**(1): 50 – 85.
- [8] WON M S, KIM Y S. Internal deformation behavior of geosynthetic-reinforced soil walls[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2007, **25**(1): 10 – 22.
- [9] LAWSON C R. Geotextile containment for hydraulic and environmental engineering[J]. *Geosynthetics International*, 2008, **15**(6): 384 – 427.
- [10] BRIANÇON L, SIMON B. Performance of pile-supported embankment over soft soil: full-scale experiment[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 2012, **138**(4): 551 – 561.
- [11] PORTELINHA F H M, ZORNBERG J G, PIMENTEL V. Field performance of retaining walls reinforced with woven and nonwoven geotextiles[J]. *Geosynthetics International*, 2014, **21**(4): 270 – 284.
- [12] FOURIE A B, ADDIS P C. The effect of in-plane tensile loads on the retention characteristics of geotextiles[J]. *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, 1997, **20**(2): 211 – 217.
- [13] FOURIE A B, ADDIS P C. Changes in filtration opening size of woven geotextiles subjected to tensile loads[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 1999, **17**(5/6): 331 – 340.
- [14] 吴海民, 束一鸣, 曹明杰, 等. 土工合成材料双向拉伸多功能试验机的研制及初步应用[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(1): 170 – 175. (WU Hai-min, SHU Yi-ming, CAO Ming-jie, et al. Development and application of multi-functional biaxial tensile testing machine for geosynthetics[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, **36**(1): 170 – 175. (in Chinese))
- [15] 白 彬, 唐晓武, 唐 琳, 等. 等双轴拉应变对无纺土工织物孔径变化的影响[J]. 岩土力学, 2015, **36**(6): 1615 – 1621, 1626. (BAI Bin, TANG Xiao-wu, TANG Lin, et al. Influence of equal biaxial tension on opening sizes of nonwoven geotextiles [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, **36**(6): 1615 – 1621, 1626. (in Chinese))
- [16] ANDREJACK T L, WARTMAN J. Development and interpretation of a multi-axial tension test for geotextiles[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2010, **28**(6): 559 – 569.
- [17] FOURIE A B, KUCHENA S M. The influence of tensile stresses on the filtration characteristics of geotextiles[J]. *Geosynthetics International*, 1995, **2**(2): 455 – 471.
- [18] WU C S, HONG Y S, WANG R H. The influence of uniaxial

tensile strain on the pore size and filtration characteristics of geotextiles[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2008, **26**(3): 250 – 262.

[19] 唐琳, 唐晓武, 余巍, 等. 单向拉伸对土工织物反滤性能影响的试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2013, **35**(4): 785 – 788. (TANG Lin, TANG Xiao-wu, SHE Wei, et al. Influence of uniaxial tensile strain on filtration characteristics of geotextiles[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, **35**(4): 785 – 788. (in Chinese))

[20] ZHANG Y P, LIU W C, SHAO W Y, et al. Experimental study on water permittivity of woven polypropylene geotextile under tension[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2013, **37**: 10 – 15.

[21] 雷国辉, 吴纲, 姜红, 等. 一种土工织物垂向渗透装置: 中国, 201420163963.9[P]. 2015. (LEI Guo-hui, WU Gang, JIANG Hong, et al. A vertical permeability test apparatus for geotextiles: China, 201420163963.9[P]. 2015. (in Chinese))

(本文责编 胡海霞)