

土工织物垂直渗透特性的研究进展

姜红^{1,2},雷国辉^{1,2},杨明昌³

(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. 南京水利科学研究院岩土工程研究所,江苏 南京 210029)

摘要:对比了国内外现行的土工织物垂直渗透试验测试标准及参数取值方法,总结了测试过程中的影响和控制因素,包括试验用水条件、试样饱和程度及仪器结构设计等方面的研究现状,分析了垂向压力、拉伸应变及覆土情况对土工织物垂直渗透特性的影响及相关研究成果,并对仪器改进、数据处理的规范化及试验工况与实际应用工况的一致性等方面提出了研究展望。

关键词:土工织物;垂直渗透特性;水头差;垂向压力;拉伸应变

中图分类号:TV443⁺.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2014)03-0089-06

Research progress of vertical infiltration characteristics of geotextiles//JIANG Hong^{1,2}, LEI Guohui^{1,2}, YANG Mingchang³(1. Key Laboratory of Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Ministry of Education, Nanjing 210098, China; 2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: In this study we compare the existing test standards for vertical infiltration of geotextiles along with the parameter selection method, both at home and abroad. The influence and control factors including the conditions for water supply and the saturated degree of sample during the test, as well as the research status of structural design of test equipment, are summarized. Additionally, we analyzed the influences of vertical pressure, tensile strain and cover soil on the vertical infiltration of geotextiles. The analysis sheds light on the improvement of test equipment, the standardization of the data processing, the consistency between the test condition and the working conditions in practical.

Key words: geotextile; vertical infiltration; water head difference; vertical pressure; tensile strain

土工织物具有质量轻、运输方便、价格低廉、生产技术成熟等优点,已广泛应用于岩土和环境工程的诸多领域,例如,土工织物加筋用以加固软基、边坡和支挡结构物,土工织物发挥保土透水功能用于堤坝或卫生填埋场的反滤结构,编织成袋或管袋充填浆料用于堤岸防护、筑堤围堰、污泥脱水等^[1-4]。在工程实践中,对土工织物物理力学特性与渗透特性的深入认识是其成功应用的关键。目前,国内外对于土工织物加筋作用的研究已较为系统和深入,但相比而言,对于土工织物垂直渗透特性方面的认知却明显不足。而日益增加的土工织物的工程应用中充泥管袋的固结排水与稳定问题均对掌握土工织物的渗透特性提出了迫切要求,如黄骅港和天津港大型充泥管袋筑堤工程^[5-7]。为此,本文对土工织物垂直渗透特性的研究现状进行总结和分析,指出存在的问题,并提出研究展望。

1 土工织物的垂直渗透特性

1.1 垂直渗透特性的表示方法

a. 渗透系数表示法。该法依据达西定律提出,存在以下缺点:一是达西定律只适用于层流,而测试时透过土工织物的水流只在很小的水头差范围内才表现为层流,白建颖等^[8]通过试验结果分析得出,对于机织布和编织布,当流速小于0.05 cm/s时水头差仅为3 mm;对于无纺布,当流速小于0.5 cm/s时水头差仅为5 mm,即在试验过程中流体是极易偏离层流的,此时达西定律不再适用。Sluys等^[9]也提出,只有在较小的水头差下才能保证层流状态,且这种水头差已小到用常规测试仪器难以准确测得,对于实际工程并没有什么意义。二是土工织物的厚度一般很小,而水头差通常比厚度大很多倍,如果土工织物的厚度测量不准或者变形产生的微小差异,均

会导致水力梯度的较大变化。该法的优点是土工织物的渗透性与土的渗透性可以直接进行对比。

b. 透水率表示法。该法用于描述渗流速度与水头差的关系,可避免采用渗透系数描述土工织物渗透特性带来的测量误差。

c. 流速指数表示法。该法可将不同土工织物的渗透性进行比较,试验方法简单可行,同时不受层流、紊流的影响,但是不能与土的渗透性进行比较。

1.2 垂直渗透特性的测试标准

目前,国内外针对土工织物垂直渗透特性的测试尚无统一的标准,从表 1 可以看出,从测试所使用的仪器到试验数据的处理方法,各个标准之间存在差异^[10-16]。

2 垂直渗透特性试验的影响因素

2.1 试验的用水条件

水温 and 水质会对土工织物渗透试验结果产生影响,相关规范^[10,14-15]对于水的供给要求(如温度、含氧量、水质等)做出了相应的规定。

对于温度的影响,现有的规范中均将 20℃ 作为标准温度,此时水的动力黏滞系数 η 为 1,测试试验水温,采用相对于 20℃ 水温校正系数 R_T 对测试所得流速进行校正。Rudolf 等^[17]指出,由 Darcy-Weisbach 方程,可以得到紊流情况下流量 Q 与水头损失的关系式:

$$Q^2 = \frac{4\pi^2 r^5 g}{\lambda} \frac{dh}{dl}$$
 (1)

式中: r 为水流通道的半径; h 为水头损失; l 为通道的长度; λ 为摩擦因数; g 为重力加速度。由 Hagen-Poiseuille 方程,可以得到层流情况下流量与水头损失的关系式:

$$Q = \frac{\pi r^4 \rho g}{8 \eta} \frac{dh}{dl}$$
 (2)

式中: ρ 为流体的密度。

将式(1)(2)结合可得到表示总的水头损失的 Forchheimer 公式,即

$$\Delta h = \frac{Q^2 \lambda}{4 \pi^2 g} \int r^{-5} dl + \frac{8 Q \eta}{\pi \rho g} \int r^{-4} dl$$
 (3)

式中: Δh 为总水头损失。

从公式(3)可以看出仅有 η 是与水温相关的。所以水温只是对于层流有影响,而对于紊流没有影响,国际标准^[16]及中华人民共和国国家标准^[10]中也都提到了这一点。因此现行的温度校正系数 R_T 对于流速进行了多余校正,是不合理的。试验时为了消除温度修正带来的误差,宜将水温保持在 18 ~ 22 ℃ 之间。

对于水质的影响,一方面水中的杂质若积聚在土工织物的表面容易堵塞织物孔隙,从而降低织物的透水性能;另一方面,溶解在水中的气体极易在渗透仪内部形成气泡积聚,而且在通过土工织物时容易被织物纤维吸附而在其表面形成截留气泡^[17],从而引起织物有效孔径减小,导致织物的渗透性降低。对于水中的杂质自然是采用过滤的方法来处理。而气体的处理方面,使用蒸馏水可以大大降低这一因素的影响,但是此种方法的成本较高,因此一般不予采用。目前采用的主要方法有:①反向渗透法^[13,18],文献[13]给出了反向渗透装置的示意图;②将自来水放在水箱中静置十几个小时,然后从静置水箱中引入^[10,16-17];③增加各类滤气装置消除水中气体^[19-20];④ASTM 中还提出可以采用真空除氧法^[14-15]。

2.2 试样的饱和程度

Kerry 等^[21]通过试验研究发现,土工织物试样

表 1 土工织物垂直渗透特性测试标准比较

测试标准	渗透特性评价指标	水头差/mm	最小过水直径/mm	取值方法
GB/T 15789—2005 ^[10]	流速指数 渗透系数 透 水 率	≥70	50	从流速-水头差的二次拟合曲线上取 50 mm 水头差的流速值,以 5 块试样的平均值作为流速指数,也可以取 100 mm、150 mm 的水头差进行计算,同时也给出了渗透系数、透水率的计算公式
SL/T 235—2012 ^[11]	渗透系数 透 水 率	1 ~ 150	25	取渗透流速与水力梯度关系曲线上线性范围内的试验结果,计算渗透系数平均值,也给出了透水率的计算公式
JTGE 50—2006 ^[12]	流速指数 渗透系数 透 水 率	≥70	50	从流速-水头差的二次拟合曲线上取 50 mm 水头差的流速值,以 5 块试样的平均值作为流速指数,同时也给出了渗透系数和透水率的计算公式
BS 6906-3 ^[13]	流速指数	0 ~ 250	40	以 5 块试样在 100 mm 水头差下的平均流速作为流速指数,也可取 50 mm、150 mm 水头差下的流速指数
ASTM D4491 ^[14] (无垂向压力)	透 水 率	0 ~ 75	50	取 4 块试样在 50 mm 水头差下透水率的平均值
ASTM D5493 ^[15] (有垂向压力)	透 水 率	0 ~ 75	50	从透水率-水头差的关系曲线上取 50 mm 水头差对应透水率,并取 4 块试样在层流时(即关系曲线为水平段)的透水率的平均值
ISO 11058—2010 ^[16]	流速指数	≥70	50	从流速-水头差过原点的最佳二次拟合曲线上取 50 mm 水头差的流速值,以 5 块试样平均值作为流速指数

在非饱和状态下的渗透系数有时会比饱和状态下的渗透系数小几个数量级。因此,试验进行前需对试样进行饱和处理。比较简单的方法是将试样置于含有湿润剂(烷基苯磺酸钠)的水中,并轻轻搅动驱走空气,浸泡至少 12 h,但在试验过程中,湿润剂会产生泡沫(烷基苯磺酸钠是一种人工合成的洗涤剂,具有起泡能力强的特性),从而影响试验结果^[10]。因此,Rudolf 等^[17]提出了一种新的有效方法,即先把试样放在去离子水(除去了呈离子形式杂质后的纯水)中浸泡,然后把水放在 15 kPa 的负真空压力下至少 6 h,这样可有效消除气泡导致试样非饱和对试验结果的影响。此外,在试样安装后向仪器内注水排气的过程中,又很难避免气泡吸附在试样表面,因此水中装样的方式也逐渐被采用。

2.3 仪器的结构设计

对土工织物垂直渗透性的测试,尚没有标准统一的测试仪器。起初一些学者都是根据测定土渗透特性的渗透仪的原理,利用自制的简易装置进行垂直渗透特性的测试。随着土工织物的广泛应用,在对测试过程中影响因素分析的基础上,测试仪器结构本身及测试方法都有了长足的改进和完善。

土工织物渗透仪大多数存在试样与渗透仪内壁之间漏水或者试样夹持器处侧漏的问题,因此为了保证试样与仪器内壁之间的密封性,多采用蜡、膨胀胶、密封胶或油泥等进行密封,显然这样的方法并不能完全保证试样边缘流态的稳定性^[9,18,22-23]。仿照旁压仪由两侧平衡腔和中间量测腔组成的原理,对于仪器的测试部分进行相应改装,当前已被广泛采用,这种方式可以避免试样边缘流态不稳定的现象,保证有效的透水面积^[18-19,22]。

试验过程中,试样两侧水头差测试的准确度也是影响试验结果的重要因素。目前主要有测试局部水头差或全局水头差两种。局部水头差是指试样两侧的水头损失,而全局水头差是指整个测试系统的水头损失,显然,局部水头差更能反映流体通过织物时的水头损失。穆占领等^[23]指出,对于多孔材料垂直渗透性测试仪器,测压管应设置在离试样端面 2 cm 以外,以避免因试样阻滞而产生的涡流对于水头测试的影响。因此,土工织物垂直渗透仪的测压管也应设置在离试样两侧一定范围内。

土工织物在实际工程应用中不可避免会受到上覆压力的作用,而垂向压力作用下土工织物会发生压缩,从而影响其渗透特性。因此,测试土工织物在垂向压力作用下渗透特性的仪器相继产生^[17-19,22],ASTM 也给出了相应的测试标准^[15]。为了使垂向压力在试样上均匀分布,在试样两侧设置刚性滤板,

其是测试仪器的一个重要组成部分。Rudolf 等^[17]从可重复制造性、耐腐蚀性、承压能力这三方面,对 8 种不同材质滤板进行了对比试验分析,发现 POM (polyoxymethylene,聚甲醛)是一种较为理想的滤板材料。

3 垂直渗透特性的研究成果

3.1 无垂向压力作用时的垂直渗透特性

目前,对于无垂向压力作用时土工织物垂直渗透特性的研究已经取得了一些成果。不同学者利用自制的仪器对于不同种类的土工织物开展试验,并对试验所得的数据进行处理分析。试验结果显示,用于描述土体渗透特性的达西定律并不能完全适用于土工织物的渗透特性^[9],尤其是对于有纺土工织物^[17]。因为土工织物的孔隙分布不规则,且孔隙大小和形状各不相同,水在织物孔隙内的流动状态是极其复杂的,不是绝对的层流,也非绝对的紊流。那么,应该用什么样的方式去描述土工织物的渗透规律呢?

常仕维^[24]运用修正的达西定律去描述土工织物的渗透特性,认为对于水头损失 Δh 和流速 v 而言, $\lg \Delta h$ 与 $\lg v$ 呈线性关系,这一关系在 Sluys 等^[9]的试验结果中也得到了证实。如果利用水力学管流理论分析^[25],当水流通过由织物形成的孔隙时,产生的水头损失为沿程水头损失,与流速 v 成正比;当水流进入孔隙或从孔隙流出时,均会产生局部水头损失,且这种局部水头损失与 v^2 成正比。当流速较小时,后者相对于前者可以忽略,表现为层流;当流速逐渐增大时,一部分层流状态的流体转化为紊流状态,且其比例随着流速的增加逐渐增加,此阶段的水头损失为 av 与 bv^2 的和(a 和 b 为试验常数);当流速继续增大时,前者相对于后者可忽略不计,即水头损失基本与 v^2 呈线性关系,表现为紊流。国家标准^[10]和国际标准^[16]就是采用通过原点的二次曲线对水头差和流速的关系进行拟合,然后从该曲线上确定水头差为 50 mm 时的流速,文献^[25-27]中也都是采用二次曲线来对水头差与流速的关系进行拟合,其中白建颖等^[25]指出,对于有织物和无织物几乎所有的测试点都在拟合曲线上,即相关系数接近 1。

1930 年 Forchheimer 提出了适用于非层流的 Forchheimer 定律,其表达式为

$$i = \frac{v}{k} + \left(\frac{v}{k_i} \right)^2 \tag{4}$$

其中
$$k_i = \frac{v_i}{\sqrt{i}} \tag{5}$$

式中: i 为水力梯度; v 为流速; k 为渗透系数; k_i 为流

态在完全紊流流速 v_i 时的渗透系数。

Gourc 等^[28]将 Darcy 定律与 Forchheimer 定律结合,得到 Darcy-Forchheimer 模型,即:

$$i = \frac{v}{k} \quad (i \leq i_{lim}) \quad (6)$$

$$i - i_{lim} = \frac{v - v_{lim}}{k} + \left(\frac{v - v_{lim}}{k_i} \right)^2 \quad (i \geq i_{lim}) \quad (7)$$

式中: i_{lim} 为层流状态时的临界水力梯度; v_{lim} 为层流状态时的临界流速。

以上模型可以涵盖所有流态的情况,根据式(6)(7) Gourc 等^[28]还推导出流态介于层流与紊流之间(即 $i \geq i_{lim}$)时渗透系数的表达式:

$$k_i = \frac{1}{i} \left\{ k i_{lim} + \frac{k_i^2}{2} \left[-\frac{1}{k} + \sqrt{\frac{1}{k^2} + \frac{4(i - i_{lim})}{k_i^2}} \right] \right\} \quad (8)$$

3.2 有垂向压力作用时的垂直渗透特性

对于无纺土工织物而言,织物纤维排列杂乱无章,丝与丝之间以针刺或粘结连接,孔隙分布不规则,结构蓬松,具有一定的厚度。在垂向压力的作用下,土工织物发生压缩,纤维重新调整定位,引起内部孔隙减小,水流通道减少,从而使其渗透性降低,这一点在一些测试结果中已得到证实^[17-18, 22, 26, 29-33]。其中任之忠等^[33]提出用折减系数对无纺土工织物渗透参数进行修正的方法,指出无纺土工织物垂直渗透参数的折减系数一般取 0.05 ~ 0.07,压力小时取大值,压力大时取小值。

有纺土工织物与无纺土工织物在微观结构上有着本质的区别,它是由经纬两个方向的丝交织而成。其中机织布由合股丝交织而成,因此每束丝的纤维之间也存在孔隙;而编织布由裂膜丝、管膜丝或条膜丝交织而成,孔隙只是织物纵横丝交织的部分,因此其孔隙率较无纺土工织物小得多,透水性也差得多。白建颖等^[25]给出了土工织物的微观结构图,在垂向压力作用下,有纺土工织物的厚度变化并不明显。Rudolf 等^[17]从试验温度的选择、试验用水的脱气处理、土工织物的饱和方法以及试验中所用的滤板等几个方面对 ASTM 的测试仪器及测试过程进行了改进和完善,并对测试结果进行分析,得出垂向压力对于有纺土工织物的渗透特性是没有影响的。王保田等^[18]的试验结果却表明有纺土工织物的渗透特性随着垂向压力的增大而减小,显然两者的结论是不同的。

以上两种结论的差异,可能是由试验所用有纺土工织物的加工工艺不同导致的。有纺土工织物经纬两个方向(经向是指沿着机器纺织的方向,纬向是指垂直纺织机器的方向)上丝的挺直程度是不同

的,一般而言纬丝要挺直许多,经丝随着单位面积质量的增加,弯曲程度增大。而且丝越薄,织成布后丝越挺直,织出的布也就越平整,法向压力对于布的结构基本没有影响,从而对其渗透特性基本没有影响。对于不平整的布,或是说厚一些的编织布,法向压力使布有一定的压缩,孔隙也会相应地减小,即布的结构发生了变化,进而使其渗透性降低。

3.3 拉伸应变对垂直渗透特性的影响

在实际工程应用中土工织物往往处于受拉状态,而拉伸通常会对土工织物孔径特征产生影响,进而影响土工织物的透水性能。因为各类土工织物在微观组成上存在本质区别,所以拉伸应变对其孔径影响的规律也是不同的。

余巍^[34]将拉伸应变对土工织物孔径影响的研究成果进行了分类对比分析,结果表明,短纤针刺无纺土工织物单向拉伸时等效孔径减小,导致透水性能降低;而热粘无纺土工织物和条膜有纺织物单向拉伸时等效孔径增大,导致透水性能增加;根据拉应变对于孔径的定量影响,提出了织物受拉时孔径的计算公式,并根据试验测试值对计算公式进行修正。不过其试验程序是先对土工织物进行一定拉伸率的单向拉伸,再用拉伸后的织物进行后续的渗透试验,很明显这种方式存在拉伸后织物回缩的缺陷。

Zhang 等^[35]将拉伸装置与渗透装置相结合,有效地解决了拉伸后织物回缩的问题。针对有纺土工织物,在两种试验条件(经向拉伸,纬向固定或者自由;纬向拉伸,经向固定或自由)下开展了 13 组试验,结果发现其渗透特性是各向异性的。对于经向拉伸而言,透水率随着拉力的增大先减小后趋于稳定,稳定后的值仅为无拉伸作用时的 10% ~ 25%。而对纬向进行拉伸,透水率则随着拉力的增大而持续增加。这一结果可以从制造工艺方面去理解,有纺土工织物纬丝相对经丝一般要挺直得多,经丝随单位面积质量的增大,弯曲程度亦增大。进行单向拉伸时,经丝要先经过由曲到直的过程,丝的宽度不变,而丝变得平整,孔隙自然减小。而纬丝一开始就比较挺直,拉伸将导致其丝的宽度持续变小,丝与丝交织处的孔隙变大,透水性自然增大。

3.4 覆土条件对垂直渗透特性的影响

土与土工织物的相互作用将会改变(主要是降低)土工织物的渗透性参数,甚至产生淤堵。目前,对于覆土条件下土工织物渗透特性的研究一般是进行加压过滤试验、梯度比试验或是标准悬挂袋试验。现有的试验结果表明,土工织物在覆土条件下的渗透性能大大低于其在纯水条件下渗透性能,这是由于织物孔隙会被部分堵塞,而且织物与土的交界面

会慢慢形成一层滤饼,滤饼一旦形成,土工织物渗透性将急剧下降^[36-38]。

覆土条件下土工织物的渗透特性主要取决于土与土工织物两者的物理性质,而压力仅仅起到增加排水速率的作用^[36-37]。Satyamurthy 等^[38]则认为土工织物的开口孔径与土的特征粒径的比值对于土工织物的保土排水性能起主要作用。土的性质及其与土工织物的相互作用是影响渗透特性的主要因素,其渗透机理相当复杂,这方面的研究仍有待深入。

4 结语及展望

随着土工织物在岩土工程、环境工程等领域的广泛应用,国内外关于土工织物垂直渗透特性的研究有了长足的进展,现有的研究均是考虑单一因素的影响,且只是定性的分析其影响规律。但实际工程应用中土工织物所处的状态是极其复杂的。由于试验仪器与试验过程的复杂性,还未能综合考虑垂向压力、拉伸应变及覆土条件等多种因素的影响。土工织物垂直渗透特性测试标准的统一以及测试的状态与实际应用状态的一致性,还有待于测试仪器的不断改进及测试方法的不断完善,为土工织物在工程中的应用提供更可靠的依据。

对于土工织物垂直渗透特性,以下几个方面还有待进一步研究:

a. 现有的研究中均认为水头差是渗透速率的决定因素,而并未涉及在相同的水头差作用下,织物上所受到的水压力对渗透速率的影响。这对于层流是适用的,但对于紊流而言,水压力对土工织物垂直渗透性的影响还有待于进一步的研究。

b. 在试验数据的分析过程中,有的学者采用对数曲线拟合,有的学者采用二次曲线拟合,也有学者提出了分段拟合的方式(即分层流段、紊流段和中间过渡段)。也就是说对两者关系的描述还没有达成共识,试验数据处理方法的规范化仍值得探究。

c. 在垂向压力对于土工织物垂直渗透特性影响的研究方面,多数的研究仅仅是针对无纺土工织物的,而对有纺土工织物的研究很少,而且从现有的研究成果中可以看出,物理特性不同的有纺织物,垂向压力对其渗透特性的影响不同。因此,垂向压力对有纺土工织物垂直渗透特性的影响有待于进一步的研究。

d. 现有的关于拉伸应变对于土工织物垂直渗透特性影响的研究中只进行了织物单向拉伸条件下的试验,因此有必要进行相关试验对有纺土工织物在双向拉伸甚至环向拉伸情况下的垂直渗透特性进行研究,以使试验工况与实际应用工况尽可能保持

一致。

参考文献:

[1] 包承纲. 堤防工程土工合成材料应用技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社,1999.

[2] GB 50290—1998 土工合成材料应用技术规范[S].

[3] 《土工合成材料工程应用手册》编写委员会. 土工合成材料工程应用手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.

[4] 许仲生. 土工合成材料在岩土工程中的应用[J]. 岩土力学, 1989, 10 (4) : 55-65. (XU Zhongsheng. Use of geosynthetics in geotechnical engineering [J]. Rock and Soil Mechanics, 1989, 10 (4) : 55-65. (in Chinese)).

[5] 马燕. 大型充泥袋结构在黄骅港一期工程引堤工程中的应用[J]. 港工技术, 1999 (4) : 21-24. (MA Yan. Application of big filled bags to the approach embankment of phase one project, huanghua port [J]. Port Engineering Technology, 1999 (4) : 21-24. (in Chinese))

[6] YAN S W, CHU J. Construction of an offshore dike using slurry filled geotextile mats [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2010, 28 (5) : 422-433.

[7] YEE T W, LAWSON C R, WANG Z Y, et al. Geotextile tube dewatering of contaminated sediments, Tianjin Eco-City, China [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2012, 31 : 39-51.

[8] 白建颖, 夏启星. 土工合成材料垂直渗透性能规律及取值方法探讨[J]. 产业用纺织品, 2005 (3) : 30-36. (BAI Jianying, XIA Qixing. Discussion on regularity of vertical penetration and way for collection of data on geosynthetics [J]. Technical Textiles, 2005 (3) : 30-36. (in Chinese)).

[9] SLUYS L V, DIERICKX W. The applicability of Darcy's law in determining the water permeability of geotextiles [J]. Geotextiles and Geomembranes, 1987, 5 (4) : 283-299.

[10] GB/T15789—2005 土工布及其相关产品无负荷时垂直渗透特性的测定[S].

[11] SL/T235—2012 土工合成材料测试规程[S].

[12] JTG E50—2006 公路工程土工合成材料试验规程[S].

[13] BS6906-3 Determination of water flow normal to the plane of the geotextile under a constant head[S].

[14] ASTM D4491 Standard test methods for water permeability of geotextiles by permittivity[S].

[15] ASTM D5493 Standard test methods for permittivity of geotextiles under load[S].

[16] ISO 11058—2010 Geotextiles and geotextile-related products-determination of water permeability characteristics normal to the plane, without load[S].

[17] RUDOLF H, ULRICH S. An optimized method to measure

- the hydraulic conductivity of geosynthetics under load[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2006, 24(4): 243-253.
- [18] 王保田,徐志伟,张文慧,等.土工织物渗透仪研制及试验成果[J].大坝观测与土工测试,1999,23(1):37-39. (WANG Baotian, XU Zhiwei, ZHANG Wenhui, et al. A new permeameter for geotextures and experimental results [J]. Hydropower Automation and Dam Monitoring, 1999, 23(1): 37-39. (in Chinese)).
- [19] 吴凤彩.土工织物垂直渗透仪的设计及使用[J].大坝观测与土工测试,1992(1):44-48. (WU Fengcai. Design and application for geotextile vertical permeameter (transverse section permeability) [J]. Hydropower Automation and Dam Monitoring, 1992(1): 44-48. (in Chinese)).
- [20] 郑伟,胡凌,朱海荣.土工布及其有关产品垂直渗透系数检测方法的应用[J].广东建材,2010(8):138-139. (ZHENG Wei, HU Ling, ZHU Hairong. The application of detection method of permeation parameters for geotextiles [J]. Guangdong Building Materials, 2010(8): 138-139. (in Chinese)).
- [21] KERRY I T, ROWE R. On the hydraulic behavior of unsaturated nonwoven geotextiles [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2003, 21(6): 381-404.
- [22] 徐志伟.加荷条件下土工织物垂直渗透性能试验研究[J].地下空间,1998,18(增刊1):336-342. (XU Zhiwei. Tests on vertical permeability of geotextile under load[J]. Underground Space, 1998, 18(Sup1): 336-342. (in Chinese)).
- [23] 穆占领,田波,牛开民,等.多孔材料垂直渗透系数测定装置[J].公路交通科技,2005,22(10):47-50. (MU Zhanling, TIAN Bo, NIU Kaimin, et al. Research on testing apparatus for permeability of porous pavement material [J]. Journal of Highway and Transportation, 2005, 22(10): 47-50. (in Chinese)).
- [24] 常仕维.关于土建纺织品渗透特性试验理论的探讨[J].产业用纺织品,1987(6):39-40. (CHANG Shiwei. Discuss about theory of permeability test for civil engineering textiles[J]. Technical Textiles, 1987(6): 39-40. (in Chinese)).
- [25] 白建颖,夏启星.土工织物垂直渗透系数测试技术研究[J].产业用纺织品,2007(3):27-33. (BAI Jianying, XIA Qixing. Study on test of vertical permeation parameters for geotextiles [J]. Technical Textiles, 2007(3): 27-33. (in Chinese)).
- [26] 于双双.土工合成材料渗透性能评价指标及测试方法研究[D].天津:天津大学,2009.
- [27] 陆浩杰.针刺土工织物垂直渗透率理论研究[D].上海:东华大学,2011.
- [28] GOURC J P, GIROUD, J P, AUBERT V. Theoretical model for the hydraulic properties of geosynthetic drainage materials[J]. Geosynthetics International, 2012, 19(2): 183-190.
- [29] 贾文琪.土工织物的渗透性与荷载关系试验研究[J].大坝观测与土工测试,1990(4):35-41. (JIA Wenqi. Experimental studies of the relation between hydraulic conductivity of compressible geotextiles and pressure action[J]. Hydropower Automation and Dam Monitoring, 1990(4): 35-41. (in Chinese)).
- [30] 周蓉,张洪弟.土工织物渗透性能评价及其工程意义[J].纺织学报,2000,21(3):180-183. (ZHOU Rong, ZHANG Hongdi. Assessment and engineering significance of geotextiles permeability [J]. Journal of Textile Research, 2000, 21(3): 180-183. (in Chinese)).
- [31] ALI P, ZAHRA Z. Experimental study of geotextile's drainage and filtration properties under different hydraulic gradients and confining pressures [J]. International Journal of Civil Engineering, 2011, 9(2): 97-102.
- [32] PALMEIRA E M, GARDONI M G. Drainage and filtration properties of non-woven geotextiles under confinement using different experimental techniques [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2002, 20(2): 97-115.
- [33] 任之忠,李学军.土工织物透水性能的研究[J].公路交通科技,1997,8(4):24-27. (REN Zhizhong, LI Xuejun. The study on hydraulic conductivity of geotextile [J]. 1997, 8(4): 24-27. (in Chinese)).
- [34] 余巍.土工织物拉伸对反滤性能影响的研究[D].杭州:浙江大学,2012.
- [35] ZHANG Y P, LIU W C. Experimental study on water permittivity of woven polypropylene geotextile under tension[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2013, 37: 10-15.
- [36] MOO-YOUNG H K, GAFFNEY D A, MO X H. Testing procedures to assess the viability of dewatering with geotextile tubes [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2002, 20(5): 289-303.
- [37] LIAO K X, BHATIA S K. Geotextile tube: filtration performance of woven geotextile under pressure [C]// Proceedings of NAGS 2005/GRI-19 Cooperative Conference. Las Vegas: [s. n.], 2005: 1-15.
- [38] SATYAMURTHY R, LIAO K, BHATIA S K. Investigations of geotextile tube dewatering [C]// HAN J, ALZAMORA D A. Proceedings of the Geo-Frontiers 2011 Conference. Dallas: Geotechnical Special Publication, 2011: 2121-2130.

(收稿日期:2013-05-15 编辑:周红梅)