

DOI: 10.11779/CJGE201608023

不等轴双向拉应变下有纺织物孔径变化试验研究

唐琳¹, 唐晓武², 王艳³, 白彬²

(1. 哈尔滨工业大学(威海), 山东 威海 264209; 2. 浙江大学建筑工程学院滨海和城市岩土工程研究中心, 浙江 杭州 310058;

3. 宁波大学建筑工程与环境学院, 浙江 宁波 315000)

摘要: 有土工织物的孔径特征是反滤设计的重要指标。工程中有纺织物常处于不等轴双向受拉状态, 引起孔径变化, 导致织物反滤性能失效。采用数字图像法测试了不等轴双向拉应变下, 3种条膜有纺织物的孔径参数变化, 包括孔洞长宽比、开孔面积率、等效孔径(O_{95})等。对比经纬向应变比2:1, 3:1, 4:1对试验结果的影响, 根据孔径特征变化规律, 揭示不等轴双向拉伸引起孔径变化的机理。运用图像法试验结果, 验证已推导的双向应变下开孔面积率及孔径理论解。试验结果表明: 开孔面积率、等效孔径(O_{95})均随双向拉应变的增大而增大。纬向应变相同时, 经纬向应变比越大, 孔洞形态(即孔洞长宽比)变化越大, 开孔面积率及孔径变化的斜率越大。理论解较好地预测了开孔面积率及孔径的变化率及数值, 孔径参数与双向拉应变呈现近似线性关系。但理论解的孔径计算以孔面积为指标, 无法考虑应变比造成的孔形态变化对反滤作用的影响。

关键词: 有纺织物; 孔径特征; 不等轴双向拉应变; 孔洞长宽比; 数字图像法

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2016)08-1535-06

作者简介: 唐琳(1986-), 女, 讲师, 主要从事土工合成材料和边坡工程等方面的教学和科研工作。E-mail: tanya_tang3@163.com。

Experimental study on pore size characteristics of woven geotextiles subjected to unequal biaxial tensile strains

TANG Lin¹, TANG Xiao-wu², WANG Yan³, BAI Bin²

(1. Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai 264209, China; 2. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering,

College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 3. Faculty of Architecture, Civil Engineering

and Environment College, Ningbo University, Ningbo 315000, China)

Abstract: The pore size characteristics are the important parameters in filtration design of woven geotextiles. The filtration applications are typically subjected to unequal biaxial tensile strains, which can cause variations of pore size characteristics and result in the failure of filtration engineering. The digital image analysis is adopted to test the variations of pore size parameters under unequal biaxial tensile strains of 3 slit-film woven geotextiles. The parameters include length-width ratio of pores, percent open area, and characteristics opening size O_{95} . The ratios of warp to weft strains are set to be 2:1, 3:1 and 4:1. The analytical solutions of pore size parameters corresponding to the biaxial strains are compared with the experimental results. The results indicate that the percent open area and O_{95} increase with the tensile strains. The larger the ratio of warp to weft strain is, the larger the rate of the curves of pore size parameters is, and the larger the change of length-width ratio of pores. The analytical results correlate well with the experimental values and the rates of variations, and the pore size parameters change approximately linearly with biaxial tensile strains. And the calculation of pore size in the analytical solutions depends on the area of pores, neglecting the variation of the shape of pores.

Key words: woven geotextile; pore size characteristic; unequal biaxial tensile strain; length-width ratio of pore; digital image analysis

0 引言

有土工织物作为一种新兴反滤材料, 具有允许水流通过, 阻挡土粒迁移, 消减冲蚀动力等作用^[1], 在海洋、水利、土木工程中应用广泛。例如, 围海造

基金项目: 山东省自然科学基金项目(ZR2015PE006); 哈尔滨工业大学(威海)校科学研究基金项目(HIT(WH)201423); 国家自然科学基金项目(51308310); 哈尔滨工业大学科研创新基金项目(HIT.NSRIF.2017018)

收稿日期: 2015-07-28

陆中, 使用有纺织物管袋构筑围堰^[2]; 污染物治理中, 常用有纺织物包裹污染泥浆^[3], 净化渗出水; 岸坡防护工程中, 以有纺织物制成“软体沉排”覆盖坡面, 或构筑防洪防浪堤^[4]。

尽管工程中有纺织物受力是三维问题, 但作为长宽尺寸远大于厚度的卷材, 工程中主要利用其垂直渗透性能完成反滤作用, 因此织物平面的不等轴双向拉应变是影响反滤性能的关键因素^[5]。实际工程中, 有纺织物往往处于复杂的双向应变状态。例如, 纽约港污染淤泥处理中, 测得土工管袋顶部织物的纵向应变为 4%, 横向应变为 1.5%, 底部织物最大双向应变 5%^[4]。

目前反滤设计及产品规格均以未受拉孔径为指标, 不等轴双向拉应变会引起孔径变化, 导致原本满足设计的织物反滤失效, 引起防护体掏空、岸坡塌陷、决堤、污染物扩散等事故^[1,4]。因此亟需从微观孔径入手, 测试孔径特征受拉变化规律, 揭示孔径变化机理, 从而在设计阶段合理预测孔径变化, 确保工程中的织物有效发挥反滤作用。

目前不等轴双向拉伸下的有纺织物孔径测试较少。Fourie 等^[6]采用动力水筛法测得: 双向应力比 1 : 1 受拉使较薄条膜有纺织物等效孔径 O_{95} 增大, 较厚织物的 O_{95} 减小。Edwards^[7]采用简易渗透仪测得: 双向应力比 4 : 1 受拉使通过条膜有纺织物的水流流速增大。Zhang 等^[8]采用双向拉伸机, 一个方向夹持不动, 另一个方向进行拉伸, 测得经向受拉使流速显著减小, 纬向受拉使流速持续增大。现有试验研究存在的问题有: 结果存在矛盾, 难以总结规律, 且对不等轴应变比的测试不系统; 测试参数多是间接反映孔径变化的水力学参数, 对孔径 O_{95} 的测试也是采用间接法, 未直观测试每个孔洞在受拉过程中的形态、尺寸变化; 参数测试多是在拉伸试验后将试样固定剪下, 难以避免织物回弹。

因此本文通过数字图像法, 在不等轴双向拉伸试验的同时采集图像, 经纬向应变分别按 2 : 1, 3 : 1, 4 : 1 的比例逐级增长, 直观观测各级应变下孔洞的尺寸、形态变化。通过测试 3 种不同规格条膜有纺织物的开孔面积率 (POA, percent open area)、等效孔径、孔洞长宽比的变化, 揭示孔径受拉应变影响的机理, 并与现有理论公式预测结果对比, 得出不等轴双向受拉时孔径特征的变化规律。

1 数字图像法测试

1.1 图像采集

采用数字图像法测试孔径, 将数码相机架设在双向拉伸仪上方, 双向拉伸仪按照设定的不等轴应变比

逐级拉伸织物, 拉伸到指定应变时, 停止拉伸进行图像采集 (如图 1), 避免织物回弹产生误差。选用同种材料不同规格的 3 种聚丙烯条膜有纺织物进行试验。3 种规格有纺织物的单位面积质量近似为 120, 150, 250 g/m², 将三者分别命名为 W120、W150、W250。试验材料的基本物理力学参数如表 1。有纺织物条膜近似不可压缩材料, 3 种织物的初始泊松比取为 0.5。

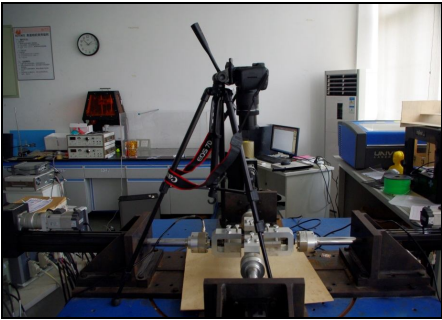


图 1 双向拉伸仪

Fig. 1 Biaxial tensile tester

有纺织物经向条膜较纬向条膜强度高, 工程中常采用经向作为主要受力方向, 因此本次试验设经向为不等轴拉伸的较大拉应变方向。选取经、纬向应变比为 2 : 1, 3 : 1, 4 : 1 三组试验, 各组应变比采集图像的经纬向应变值如表 2。

表 1 有纺织物物理力学性质

Table 1 Properties of woven geotextiles							
名称	织物厚度 T /mm	单位面积质量 μ /(g·m ⁻²)	经向强度 /(kN·m ⁻¹)	纬向强度 /(kN·m ⁻¹)	条膜密度 ρ /(kg·m ⁻³)	条膜宽度 a /mm	条膜厚度 t /mm
W120	0.25	125.5	20.5	15.5	900	1.920	0.089
W150	0.27	159.4	31.8	21.3	900	2.060	0.102
W250	0.58	245.5	54.1	34.4	900	2.120	0.152

表 2 各组应变比的经、纬向应变测试值

Table 2 Unequal biaxial tensile strains under warp-weft ratio		
2 : 1 (经 : 纬)	3 : 1 (经 : 纬)	4 : 1 (经 : 纬)
4% : 2%	3% : 1%	4% : 1%
8% : 4%	6% : 2%	8% : 2%
12% : 6%	9% : 3%	12% : 3%
16% : 8%	12% : 4%	16% : 4%
20% : 10%	15% : 5%	20% : 5%

试验所用双向拉伸仪如图 1, 最大拉力 2000 N。将双向受拉方向设为织物经纬条膜方向, 经、纬向按指定应变比同时拉张试样, 双向拉伸速度均设为 10 mm/min。张思云等^[9]对不同形状的土工膜及无纺布试样进行双向受拉研究, 得出十字型圆角过度试样能最好地消除应力集中, 使试样中部处于较均匀的双向受拉状态。邓国红等^[10]运用 ANSYS 对十字形双向拉伸试样进行有限元分析, 得出十字型试件中心区域的

应力应变分布均匀。因此本次双向拉伸采用十字型圆角过度试样, 试样尺寸如图 2 所示。夹具夹持处织物宽 50 mm, 夹持深度 37 mm。初始试验状态, 同方向夹具间距为 100 mm×100 mm, 图像采集区域为中心 50 mm×50 mm 应变均匀区。为防止织物与夹具间滑动, 采用 VHB 双面胶 (very high bond) 将 ABS 板 (acrylonitrile butdiene styrene) 固定在夹持区防滑, 保持夹持区受力均匀, 试样制成后如图 2。

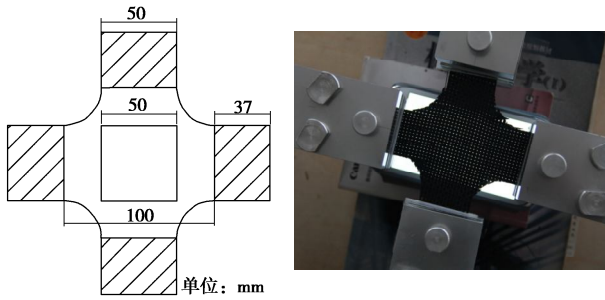


图 2 双向拉伸试样

Fig. 2 Sample of biaxial tensile tests

1.2 图像处理及孔洞形态变化

运用 MATLAB 软件编程, 将拍摄的彩色图像转换为只有黑、白像素组成的二值图 (黑色像素值为 0, 代表条膜; 白色值为 1, 代表孔洞)^[11]。根据相机拍摄的比例尺, 换算每个像素代表的实际尺寸, 从而通过对像素数统计运算得出各项孔径参数。图 3 为双向受拉前后, 有纺织物的二值图。图 3 (a)、(b) 为 2:1 应变比受拉前后的试样, (c)、(d) 为 4:1 应变比受拉前后的试样。对比应变前后图可见, 双向拉伸使孔洞面积变大, 应变大的方向孔边长变化相对较大。对比 2:1 和 4:1 应变比下的孔洞形态图 3 (b)、(d), 可见同样是纬向应变 4%, 4:1 组孔洞的长宽比较 2:1 组大, 说明孔洞形态变化受到不等轴双向应变比的影响。

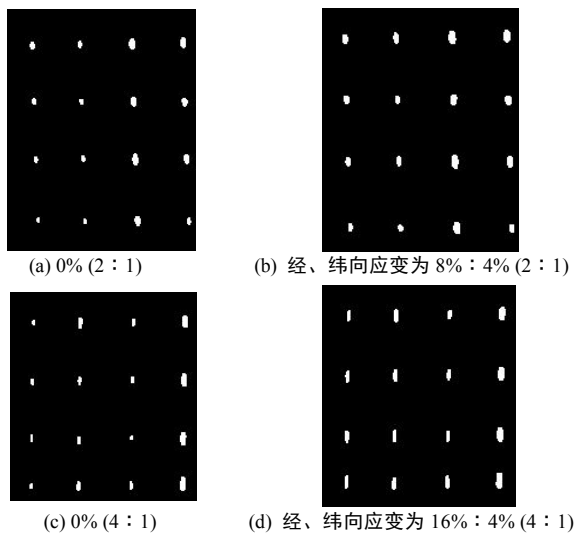


图 3 不等轴双向受拉前后有纺织物 W120 二值图

Fig. 3 Binary images of biaxial strained and unstrained woven geotextiles W120

定义每个孔洞沿经纬向的最大长度和最大宽度之比为孔洞的长宽比。在试样上随机读取 100 个孔, 跟踪这 100 个孔的长宽比平均值随应变的变化。0%应变下试样 W120 孔洞长宽比平均值为 1.4。当纬向应变为 4%, 经向应变分别为 8% (2:1 组)、12% (3:1 组)、16% (4:1 组) 时, 3 组试样孔洞的长宽比平均值分别变为 1.8, 2.0, 2.3。可见应变比越大, 孔洞长宽比变化越大, 孔洞形态受影响越大。

2 孔径参数计算分析

观察有纺织物受拉过程可见, 每根条膜各自沿受力方向产生拉应变, 经、纬向条膜间无粘结。孔径变化主要由经、纬向条膜的轴向及侧向变形造成。拉应变越大, 孔径变化越大。目前唐琳^[12]基于此种变化机理, 已推导了不等轴双向拉应变下, 条膜有纺织物开孔面积率及理论孔径的变化公式, 但尚未进行试验验证。本文采用图像法计算孔径参数值, 分析不等轴双向拉伸孔径参数变化规律, 并与理论解的预测结果对比。

2.1 孔径参数理论解

有纺织物受力是三维问题, 但其长宽尺寸远大于厚度, 其垂直渗透性能决定其反滤性能, 因此平面孔径的改变是影响反滤性能的关键因素。基于此种考虑, 将有纺织物简化为经、纬向条膜垂直的二维结构, 双向受拉方向分别与经、纬条膜平行, 推导出双向拉应变 ε_x , ε_y 下的开孔面积率 POA_{ε}^{bi} 公式^[12]:

$$POA_{\varepsilon}^{bi} = \left[1 - \frac{\mu}{2t\rho(1+\varepsilon_x)^{\frac{3}{2}}} \right] \left[1 - \frac{\mu}{2t\rho(1+\varepsilon_y)^{\frac{3}{2}}} \right], \quad (1)$$

式中, a 为条膜宽度, t 为条膜厚度, ρ 为条膜密度, μ 为织物单位面积质量 (g/m^2)。

通过孔洞面积 A 来计算理论孔径, 取与实际孔径有相同面积的正方形边长 \sqrt{A} 为孔径值^[13]。推导出不等轴双向应变 ε_x , ε_y 下, 理论孔径 O^{bi} 的计算公式为^[12]

$$O^{bi} = \sqrt{A^{bi}} = a \sqrt{\left[\frac{2t\rho}{\mu}(1+\varepsilon_x) - \frac{1}{\sqrt{1+\varepsilon_y}} \right] \left[\frac{2t\rho}{\mu}(1+\varepsilon_y) - \frac{1}{\sqrt{1+\varepsilon_x}} \right]}, \quad (2)$$

式中, A^{bi} 为双向受拉后的孔面积。通过式 (1)、(2) 即可计算指定应变 ε_x , ε_y 下, 有纺织物开孔面积率及孔径的值。

2.2 开孔面积率变化

开孔面积率即开孔面积与织物总面积的比值。对图像法运算, 即图片中白色像素总数与图片总像素数的比值。运用 MATLAB 软件编程, 读取各应变状态

下试样的开孔面积率。基于 W120, W150, W250 的基本物理参数,通过式(1) 计算各组拉应变下的开孔面积率,并与图像法得出的试验结果比较。以纬向应变为横坐标绘制各组应变比的开孔面积率变化曲线,如图 4。

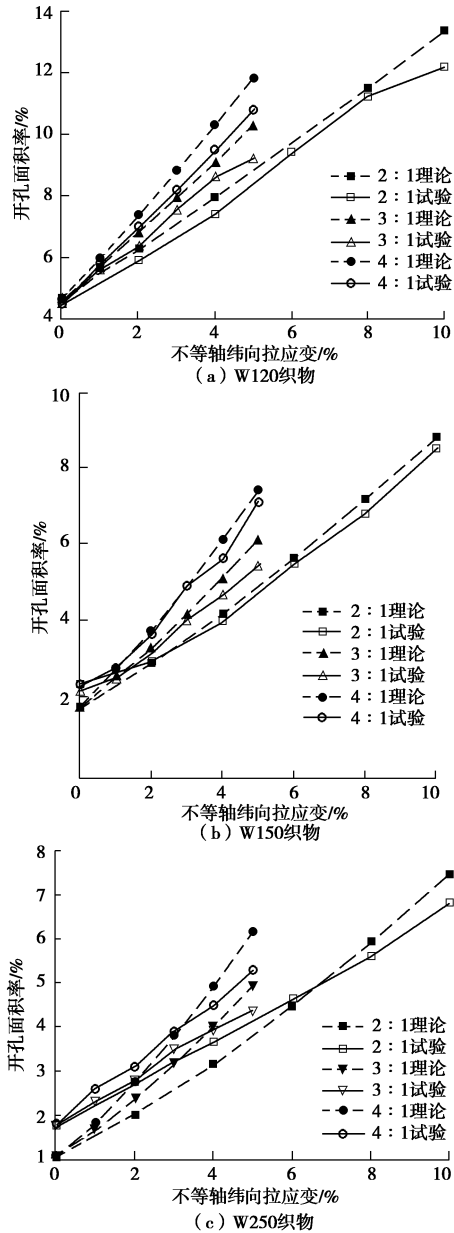


图 4 不等轴拉应变开孔面积率变化

Fig. 4 Comparison between analytical POA and experimental POA

对比图 4 (a)、(b)、(c) 的初始开孔面积率可见,有纺织物单位面积质量越小,纺织越稀疏,开孔面积率越大。随着不等轴双向拉应变的增大,3 种规格有纺织物的开孔面积率理论值与试验值均增大,理论曲线较好地预测了试验曲线的数值范围及变化趋势。同种织物不同应变比 2:1 组、3:1 组、4:1 组的曲线斜率依次增大。表明纬向应变值相同,应变比越大其开孔面积率变化越大。例如,纬向拉应变同为 2% 时, W120 开孔面积率试验值在 2:1 应变比下为 5.9%,

3:1 为 6.4%, 4:1 为 7.0%。

比较图 4 中 2:1 应变比的 3 种织物可见,随着纬向应变由 0% 增长到 10%, W120 的开孔面积率试验值由 4.5% 增长到 12.2%, 增长率 171%; W150 由 2.4% 增长到 8.5%, 增长率 254%; W250 由 1.8% 增长到 6.8%, 增长率 278%。可见单位面积质量越小的织物,初始开孔面积率大,同级应变水平下变化率较小, 3:1 组、4:1 组的 3 种织物呈现同样的变化规律。

图 4 中理论值与试验值的变化规律基本一致,但 3 种织物的试验值平均增长率都比理论值小,且曲线近似线性。用线性关系拟合开孔面积率变化的理论曲线与试验曲线,得出线性拟合斜率 k (无量纲) 如表 3。由表 3 可见,理论斜率与试验斜率相近,证明理论解较好地预测了开孔面积率的变化规律。但理论曲线斜率均比对应的试验曲线斜率大,与图 4 表现出的规律相同。首先,这与双向拉伸中织物和夹具间有轻微打滑有关。其次,织物拉应变是取夹具位移与两夹具间的织物初始长度之比,而非织物表面各部分的平均位移,实际织物表面的平均应变会小于理论应变,是导致理论斜率偏大的另一原因。4 组线性拟合决定系数均大于 0.90,证明在有纺织物工作应变范围内,开孔面积率与双向拉应变存在近似线性关系。

表 3 双轴拉伸开孔面积率线性拟合斜率 k

Table 3 Linear fitting of POA under biaxial tensile strains

应变比	W120 织物		W150 织物		W250 织物	
	理论	试验	理论	试验	理论	试验
2:1	0.87	0.80	0.71	0.63	0.64	0.50
3:1	1.13	0.95	0.88	0.68	0.78	0.54
4:1	1.43	1.25	1.14	1.97	1.03	0.69

2.3 孔径变化

据统计较大孔径的变化率可以稳定地反映织物孔径随应变的变化趋势,又不受试验中新拉开小孔洞的干扰^[14]。因此选取较大特征孔径 O_{95} 为代表,将图像法测试的 O_{95} 试验值与理论孔径 O^{bi} 进行对比。

根据图像中拍摄 1 cm 比例尺的像素数,换算出每个像素代表的实际尺寸。通过累计每个孔内白色像素数,计算每个孔的实际面积 A ,取 \sqrt{A} 为每个孔的等效孔径值。统计小于各孔径的累积百分数,绘出孔径分布曲线。从各级拉应变的孔径分布曲线上读取 95% 累积频率对应的孔径值即为 O_{95} 。以 O_{95} 代表织物孔径的变化趋势,与式(2) 计算的 O^{bi} 比较,如图 5。

由图 5 可见,随着不等轴双向拉应变值增大,3 种规格有纺织物的孔径均呈增大趋势,理论曲线较好地预测了试验曲线的变化规律。织物单位面积质量越大,同等应变下的孔径越小。对比 3 种试样的 2:1 组曲线,当纬向应变同为 2% 时, W120 的 O_{95} 试验值

为 0.59 mm, W150 的 O_{95} 为 0.43 mm, W250 的 O_{95} 为 0.37 mm。纬向应变相同, 径向应变越大孔径变化越大。从未受拉状态 0% 到纬向应变 4%, W120 的 O_{95} 试验值在 2 : 1 应变比组由 0.55 mm 增长到 0.71 mm; 3 : 1 应变比组增长到 0.74 mm; 4 : 1 应变比组增长到 0.81 mm。

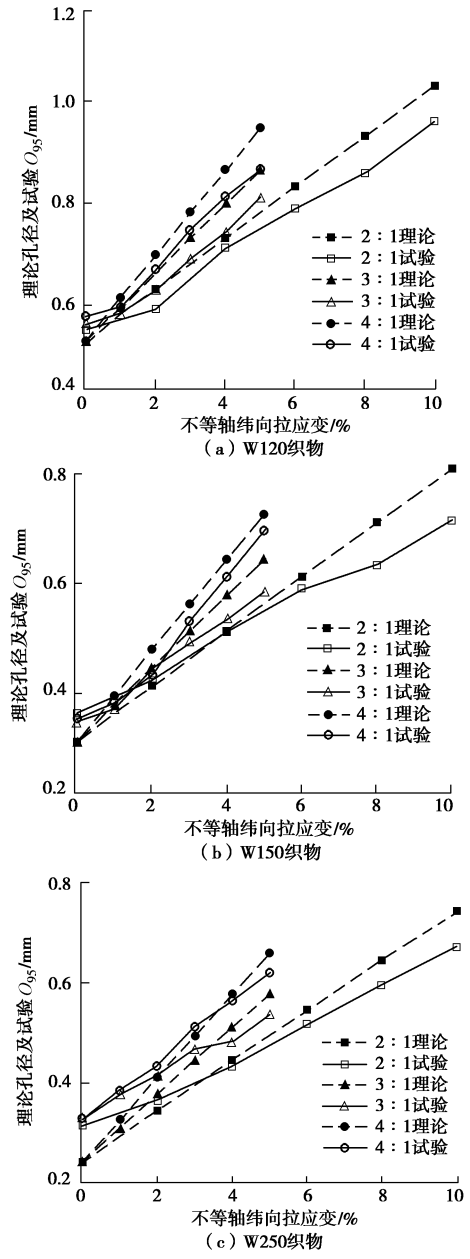


图 5 不等轴拉应变孔径变化

Fig. 5 Comparison between analytical and experimental pore sizes

用线性关系拟合孔径变化的理论曲线与试验曲线, 得出线性拟合斜率 k_1 (mm), 如表 4。由表 4 可见, 同种织物的 2 : 1, 3 : 1, 4 : 1 三组 O_{95} 曲线斜率依次增大。式 (2) 比较好地预测了孔径随不等轴双向拉应变的变化趋势, 但理论曲线斜率均比对应的试验曲线斜率大, 与开孔面积率表现出的规律相同。对于同样是聚丙烯制成的条膜有纺织物, 不同规格的 W120, W150, W250 孔径 O_{95} 曲线斜率相近, 可见织

物孔径 O_{95} 随应变的变化率与织物材料及编织工艺有关。

表 4 双轴拉伸孔径拟合斜率 k_1

Table 4 Linear fitting of pore size under biaxial tensile strains						
应变比	W120 织物		W150 织物		W250 织物	
	理论	试验	理论	试验	理论	试验
2 : 1	4.98	4.15	4.96	3.50	4.99	3.65
3 : 1	6.68	5.05	6.66	4.92	6.69	3.96
4 : 1	8.30	6.17	8.26	7.12	8.31	5.91

2.4 理论公式的局限性

由于理论公式及图像法的孔径计算, 均以孔面积变化为计算指标, 无法反映不等轴应变比对孔形态造成的影响。

取 W120 为例, 以不等轴双向拉应变引起的织物面积变化率为横坐标, 孔径为纵坐标, 绘制理论及试验孔径变化, 如图 6。由图 6 可见, 当以面积变化率为变量时, 3 条理论曲线重合, 应变比分别为 2 : 1, 3 : 1, 4 : 1 的 3 条试验曲线变化规律基本一致, 试验曲线斜率小于理论曲线, 与图 4, 5 规律一致。不同应变比的曲线重合, 证明基于面积计算法得出的理论孔径, 可以较准确地预测工程中不等轴拉应变造成的孔径值变化, 为设计、施工提供理论参考。但无法体现不同应变比造成的孔形态变化。

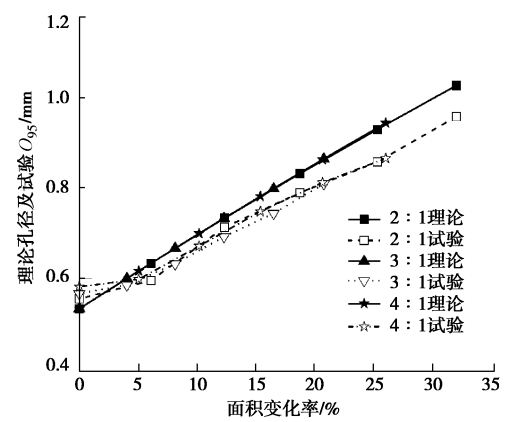


图 6 W120 织物理论与试验孔径值与面积变化率的关系

Fig. 6 Analytical and experimental pore sizes vs. variation ratio of pore area

实际工程中, 土颗粒形状复杂, 往往存在显著的各向异性, 孔洞形态可能对反滤性能产生显著的影响^[15]。对于不等轴双向拉应变造成的孔洞形态变化, 及其引起的反滤作用变化, 仍需通过土颗粒、水、织物三者直接作用的淤堵试验, 或工程应用进一步研究。

3 结 论

本文通过数字图像法, 测试了 3 种有纺织物不等轴双向拉应变下的孔径参数变化, 包括孔洞长宽比、开孔面积率、等效孔径 O_{95} 等。经纬向应变比分别设置为 2 : 1, 3 : 1, 4 : 1, 并将试验结果与双向应变下

的开孔面积率 POA_e^{bi} 及孔径 O^{bi} 理论解进行对比,得出如下结论:

(1) 不等轴双向拉伸使孔洞面积变大,应变值大的方向孔边长变化相对较大。孔洞形态变化受双向拉伸应变比的影响,经纬向拉应变差异越大,孔洞形态(即孔洞长宽比)变化越大。

(2) 有纺织物单位面积质量越小,开孔面积率越大,等效孔径 O_{95} 越大,相同受拉条件下的不同规格织物仍存在此种规律。开孔面积率 POA 、等效孔径 O_{95} 随拉应变的增大而增大。以纬向应变为横坐标, POA 或 O_{95} 为纵坐标,2:1组、3:1组、4:1组的曲线斜率依次增大。表明纬向应变值相同,经向应变值越大,其孔径参数变化越显著。

(3) 开孔面积率 POA_e^{bi} 及孔径 O^{bi} 理论解较好地预测了图像法试验曲线的斜率及数值,并拟合出孔径参数随拉应变的近似线性变化规律。此公式可以预估工程中孔径的变化规律,为设计提供理论依据。但理论孔径 O^{bi} 公式以孔面积为计算指标,无法反映不等轴应变比对孔形态造成的影响。实际工程中,土颗粒形状各异,不同应变比下孔洞长宽比变化不同,仍需通过淤堵试验及实际工程进一步研究。

参考文献:

- [1] 包承纲. 土工合成材料应用原理与工程实践[M]. 北京: 中国水利电力出版社, 2008. (BAO Cheng-gang. The principle and application of geosynthetics in engineering[M]. Beijing: China Water Power Press, 2008. (in Chinese))
- [2] CHU J, YAN S W, LI W. Innovative methods for dike construction-an overview[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2012, **30**(SI): 35 - 42.
- [3] 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, **32**: 39 - 50.
- [4] 土工合成材料工程应用手册编委会. 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. (Geosynthetics Engineering Application Manual Compilation Committee. Geosynthetics engineering application manual[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2000. (in Chinese))
- [5] GIROUD J P. Biaxial tensile state of stress in geosynthetics[J]. Geotextiles and Geomembranes, 1992, **11**(3): 319 - 325.
- [6] 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): 331 - 340.
- [7] EDWARDS M, HSUAN G. Permittivity of geotextiles with biaxial tensile loads[C]// 9th International Conference on Geosynthetics. Brazil, 2010: 1135 - 1140.
- [8] ZHANG Y P, LIU W C, SHAO WY, et al. Experimental study on water permittivity of woven polypropylene geotextile under tension[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2013, **37**: 10 - 15.
- [9] 张思云, 张艳, 靳向煜. 土工膜和非织造土工布单向与双向拉伸机理对比试验研究[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2014, **40**(2): 220 - 224. (ZHANG Si-yun, ZHANG Yan, JIN Xiang-yu. Comparison studies on unilateral and biaxial strength mechanism of geomembrane and nonwoven geotextiles[J]. Journal of Donghua University(Natural Science), 2014, **40**(2): 220 - 224. (in Chinese))
- [10] 邓国红, 余雄鹰, 汤爱华. 十字形双向拉伸试验有限元模拟及分析[J]. 重庆工学院学报(自然科学版), 2007, **5**(2): 15 - 17, 46. (DENG Guo-hong, YU Xiong-ying, TANG Ai-hua. FEM simulation and analysis of cruciform biaxial tensile test[J]. Journal of Chongqing Institute of Technology (Natural Science Edition), 2007, **5**(2): 15 - 17, 46. (in Chinese))
- [11] 余巍, 唐晓武. 用图像分析法研究有纺土工织物单向受拉时孔径的变化[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(8): 1522 - 1526. (SHE Wei, TANG Xiao-wu. Research on changes of pore size of woven geotextiles affected by uniaxial tension using image analysis method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(8): 1522 - 1526. (in Chinese))
- [12] 唐琳. 拉应变对土工织物孔径特征及反滤性能影响的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014. (TANG Lin. Pore size characteristics and filtration properties of geotextiles subjected to tensile strains[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014. (in Chinese))
- [13] DIERICKX W. Opening size determination of technical textiles used in agricultural applications[J]. Geotextiles and Geomembranes, 1999, **17**(4): 231 - 245.
- [14] TANG X W, TANG L, SHE W, et al. Prediction of pore size characteristics of woven slit-film geotextiles subjected to tensile strains[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2013, **38**: 43 - 80.
- [15] 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))