

•水利与土木工程•

DOI:10.15961/j.jsuese.202101220



本刊网刊

土工布环向约束球形鼓胀变形及破坏特性分析

韩瑞晨¹, 薛霞¹, 李辰², 李旺林^{1*}

(1. 济南大学 水利与环境学院, 山东 济南 250022; 2. 山东省水利工程试验中心, 山东 济南 250013)

摘要: 复合土工膜由土工膜和土工布组成, 在平原水库防渗中, 土工布起保护加强作用, 并对复合土工膜鼓胀变形有重要影响。本文将土工布气胀现象简化为环向约束球形鼓胀变形模型, 借助土工布布下铺设的不透气薄膜, 通过鼓胀变形专门试验设备, 进行鼓胀变形试验, 研究土工布鼓胀的变形特征和力学特性, 并借助显微镜着重分析土工布变形过程中纤维结构变化过程和胀破机理。结果表明: 1) 土工膜胀破压力约为土工布胀破压力的 50%~60%, 可见膜上土工布除起保护作用外, 还会对土工膜变形产生约束作用, 并增加其抵抗变形的能力。2) 土工布在鼓胀变形中, 张应力-应变曲线表现为塑性变形特征, 可分为线弹性、屈服、强化和胀破拉断共 4 个阶段。3) 土工布鼓胀变形形状为半球状, 撕裂点一般出现在冠顶处, 且进一步扩展为纺锤形撕裂破坏; 微观结构分析表明, 针刺短纤维形成的缠结点具有一定的缠结力, 缠结点之间的纤维具有一定的拉伸强度, 缠结点缠结力逐渐失效和纤维断裂是土工布鼓胀变形破坏的主要原因。4) 土工布单位面积质量越大, 纤维和缠结点越密, 可承受的鼓胀压力越大, 即抵抗鼓胀变形的能力越强。研究成果对于分析膜上土工布对土工膜鼓胀变形强度的贡献具有一定实际意义。

关键词: 土工布; 鼓胀变形; 胀破分析; 力学特性; 纤维; 缠结点

中图分类号: TV49

文献标志码: A

文章编号: 2096-3246(2023)02-0267-08

Analysis of Deformation and Failure Characteristics of Geotextile Spherical Bulging Under Circumferential Constraints

HAN Ruichen¹, XUE Xia¹, LI Chen², LI Wanglin^{1*}

(1. School of Water Conservancy and Environment, Univ. of Jinan, Ji'nan 250022, China; 2. Shandong Provincial Hydraulic Test Center, Ji'nan 250013, China)

Abstract: Composite geomembrane has been widely used in reservoir seepage prevention. Usually, composite geomembrane is composed of geomembrane and geotextile, which plays a protective and strengthening role and has an important influence on the swelling deformation of composite materials. The phenomenon of geotextile inflation was simplified as a hoop-constrained spherical bulging deformation model. With the help of the impermeable film laid under the geotextile, the bulging deformation test was carried out through bulging deformation test equipment, and the deformation characteristics and mechanical characteristics of geotextile bulging were studied. With the help of a microscope, the fiber structure change process and bursting mechanism during the deformation of geotextile are emphatically analyzed. The results showed that the bursting pressure of the geomembrane was about 50%~60% of the bursting pressure of the geomembrane. It could be seen that in addition to protecting the geomembrane, it would also restrain the deformation of the geomembrane and increase its resistance to deformation. In the bulging deformation of geotextile, the tensile stress-strain curve approximately showed the characteristics of plastic deformation, which could be divided into four stages: linear elasticity, yield, strengthening, and bursting and breaking. The swelling deformation shape of the geotextile was hemispherical, and the tear point generally appears at the crown top and further expanded to the spindle-shaped tear failure. The microstructure analysis showed that the twining point formed by the needled short fiber had a certain entanglement force, and the fiber between the twining points had a certain tensile strength. The gradual failure of the twining force of the twining point and the fiber fracture were the main reasons for the swelling deformation

收稿日期: 2021-12-13

基金项目: 山东省自然科学基金项目 (ZR2019MEE106)

作者简介: 韩瑞晨 (1997—), 男, 硕士生. 研究方向: 土木水利工程. E-mail: 517605693@qq.com

* 通信作者: 李旺林, 教授, E-mail: cswlw@163.com

网络出版时间: 2022-07-28 15:51:23

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20220727.1829.006.html>

failure of the geotextile. The greater the mass of geotextile per unit area, the denser the fiber and the entanglement, the greater the swelling pressure that can withstand, and the stronger the ability to resist deformation. The research results had a practical significance for analyzing the contribution of geotextiles on the membrane to the strength of geomembrane bulging deformation.

Key words: geotextile; bulging deformation; bursting analysis; mechanical properties; fiber; bound node

随着防渗技术的不断提高,复合土工膜因其适应变形能力强、抗拉强度大及较好的防渗性能,在平原水库防渗工程中得到了极为广泛的应用^[1-2]。但是,平原水库库盘面积通常较大,气、水排出效率很低,甚至出现不排水、不排气的状况^[3],在地下水位上升、库水位骤降、土工膜缺陷渗漏等因素的影响下,土工膜极有可能发生气胀现象甚至产生破坏问题^[4-6]。另外,气胀破坏产生渗漏点,增加土工膜的渗漏量,又会进一步加剧气胀问题的产生与扩大^[7]。针对土工膜的气胀问题,现有的应对措施一般是在膜下设置排水排气通道^[8],在膜上覆土压重^[2-3]。这些措施在一定程度上防止了气胀问题的发生,但并没有完全解决这一问题。

在复合土工膜气胀变形及破坏过程中,下方土工膜发生鼓胀变形时,上方土工布也同时发生气胀变形和破坏^[9],土工布对土工膜的保护和增强作用显而易见^[10]。赵永霞^[11]、杨广庆^[12]和任大春^[13]等也发现土工布会提高复合材料的强度,减小变形率,对复合材料的力学特征有着重要的影响。

土工布和土工膜性质的不同造成了其力学特性有较大差异。土工膜延伸率较大但强度较小,几乎不透水、不透气,便于进行室内试验;土工布延伸率较小,强度大,透水透气,难以在室内以水/气体作为压力介质进行试验,往往需要在布下设置薄膜进行试验,增加了试验的困难程度^[14-16]。现阶段针对土工布鼓胀变形的研究较少^[11],已有研究主要针对土工膜的鼓胀变形。李旺林等^[17]选择外径为20 cm的试验设备进行试验,得出土工膜鼓胀变形的力学特性。薛霞等^[16]针对分离式复合土工膜鼓胀变形开展胀破试验研究发现,土工布对分离式复合土工膜的胀破压力和胀破高度起决定性作用。普勇怪等^[9]模拟分离式复合土工膜鼓胀变形和破坏过程,得出土工膜和有效布层数都会影响复合土工膜的鼓胀压力和张应力。Peggs^[7]发现土工合成材料的气胀变形形态一般近似为半球状,故Bray^[18]和Rachik^[19]等将土工膜气胀变形问题简化为多轴拉伸变形模型。张博凡^[20]、卫如春^[21]将土工膜气胀变形问题称为鼓胀变形问题。考虑到球形顶点的变形在经向和纬向一般是相同的,Charalambides等^[22]将该变形视为等双轴变形。

目前,对土工合成材料鼓胀变形相关试验研究较为完善的标准是美国《土工合成材料多轴拉伸试

验标准》^[23],该标准给出了检测土工布基本参数的试验方法。土工布为透水透气材料,中国《土工合成材料测试规程》^[15]规定了各类土工织物和片状土工复合材料的胀破试验要求及相关问题,并提出将试样覆盖在薄膜上进行试验,利用最大总压力和薄膜校正压力计算试样的胀破强度。

基于上述研究,以非织造涤纶短纤土工布为试验材料,在试验过程中土工布下部铺设一层薄膜;进而通过土工布的球形鼓胀变形试验得到土工布鼓胀变形的力学特性,如:鼓胀压力-鼓胀高度曲线、张应力-应变曲线,以及胀破压力、胀破高度等特征指标;通过在宏观和微观两方面下的破坏特性的分析,明晰了土工布鼓胀变形及破坏机理及在各阶段下土工布的变形特征;同时,与土工膜的比较阐明了土工布对土工膜鼓胀变形的保护和增强作用;另外,还进行了单位面积质量对土工布鼓胀变形力学特性的影响试验,进一步丰富了土工布的鼓胀变形力学特性研究,为工程实践提供一定的参考和指导。

1 试验设计

1.1 基本原理

将土工布气胀现象简化为环向约束球形鼓胀变形模型,并研制专门环向约束球形鼓胀变形试验设备;借助土工布布下铺设的不透气薄膜实现土工布鼓胀变形试验,测得鼓胀压力和试样中心处的鼓胀高度,计算分析得出张应力-应变关系。

试验中,应力应变计算采用周琼等^[24]以薄膜理论推导得到的张应力(T)公式(式(1)),以避免土工布在鼓胀变形中由于厚度变化带来的影响:

$$T = \frac{L}{8} \left(\frac{2H}{L} + \frac{L}{2H} \right) P \quad (1)$$

式中, T 为鼓胀变形产生的张应力, L 为夹具直径, H 为鼓胀冠顶高度, P 为鼓胀压力。

应变(ε)通常定义为长度的变化(ΔL)与初始长度(L_0)的比值:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L_D - L_0}{L_0} \quad (2)$$

式中, ε 为鼓胀产生的应变, ΔL 为长度变化量, L_0 为初始长度, L_D 为变形后长度。

以式(2)为基础,利用试样球形变形的几何关系进一步推导,得到土工布的应变计算公式^[9]:

$$\varepsilon = \frac{L^2 - 4H^2}{4HL} \times \arccos \frac{L^2 - 4H^2}{L^2 + 4H^2} - 1 \quad (3)$$

1.2 试验设备

为研究土工布的力学特性, 作者团队自主研发了一套由动力装置、操作装置和测控装置共同组成的液胀试验设备。试验装置示意图如图1所示。

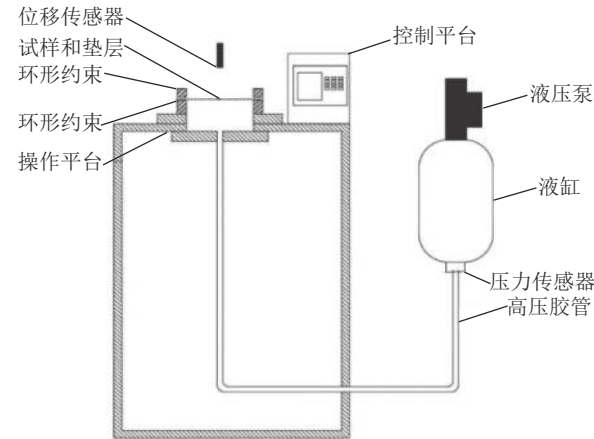


图 1 试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of test apparatus

其中: 动力装置主要有液压泵、连杆及液缸等, 如图2所示。操作装置由控制平台与操作平台共同组成, 操作平台上设置有提供环向约束的内径为100 mm、外径为150 mm的不锈钢法兰环, 如图3所示。测控装置主要包括传感器和高清录像设备, 其中, 传感器包括精密数显压力传感器和红外线位移传感器。

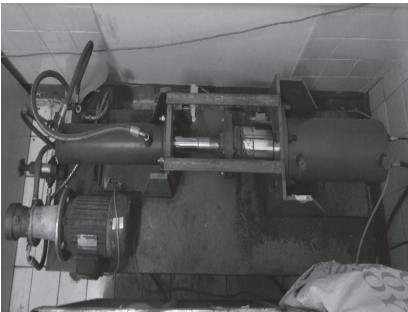


图 2 动力装置

Fig. 2 Power device



图 3 操作装置

Fig. 3 Operating device

试验过程中, 由液压泵提供动力, 推动液缸中的液体介质进入操作平台, 对固定在环向约束设备上的试样产生压力, 使试样发生鼓胀变形; 与此同时, 通过压力传感器测量得到作用于试样的鼓胀压力, 通过红外线位移传感器测量得到试样的鼓胀高度。

1.3 试验材料

试验材料为涤纶短纤土工布、HDPE土工膜和PE膜(垫层材料)。试验材料常规指标见表1。试验前, 将每份试验材料剪裁成直径为140 mm的圆形, 以便固定在不锈钢法兰环之间进行试验。

表 1 试验材料常规指标

Tab. 1 Conventional index of test material				
试验材料	单位面积 质量或膜厚	断裂强度/ (kN·m ⁻²)	断裂伸 长率/%	撕裂强度/ (kN·m ⁻¹)
涤纶短纤土工布	200 g/m ²	6.5	25~100	0.16
	300 g/m ²	9.5	25~100	0.24
	400 g/m ²	12.5	25~100	0.33
HDPE土工膜	0.35 mm	8.1	615	37.50
垫层材料(PE膜)	0.05 mm	1.8	250	4.00

1.4 试验方法

土工布试验分为两组: 1) 由于土工布透水透气, 需要在布下铺设PE膜垫层, 将土工布与垫层视整体结构进行试验^[14]。2) 参照单层土工膜的试验方法, 单独进行PE膜垫层试验。将两组试验所得的鼓胀压力和鼓胀高度的数据进行差值计算, 再根据式(1)和(3)可计算得出土工布的张应力与应变的值。

由加载速率的预试验和已有加载速率试验的经验可知, 加载速率为130~140 mL/min时, 胀破冠顶高度趋于稳定, 因此, 本文采用的加载速率为140 mL/min, 每组平行试验不少于8次。

2 试验结果及分析

根据试验测量结果, 利用式(1)和(3)计算得到土工布的张应力和应变指标值, 绘制得到相应的鼓胀压力-鼓胀高度曲线和张应力-应变曲线。同时, 试验过程中设置的高清录像设备, 可实时记录试验过程中试样的鼓胀变形形态。具体结果及分析如下。

2.1 鼓胀压力-鼓胀高度曲线

环向约束条件下, 土工布在鼓胀变形时, 鼓胀压力是土工布下部的封闭空间内的压力, 鼓胀高度是变形过程中对应的冠顶处的高度。以单位面积质量为200 g/m²的涤纶短纤土工布为例, 其鼓胀压力-鼓胀高度曲线如图4所示, 可以看出, 土工布的鼓胀压力与鼓胀高度成正相关关系, 鼓胀高度随压力增加而增大。

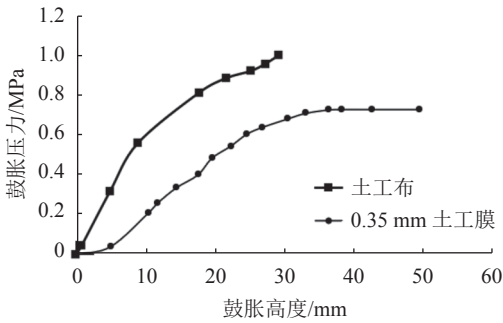


图 4 鼓胀压力与鼓胀高度分布曲线

Fig. 4 Distribution curve of swelling pressure and swelling height

在图4中补充0.35 mm的聚乙烯土工膜在相同条件下的鼓胀压力-高度曲线^[17],对比两条曲线可以看出:鼓胀压力相同的情况下,土工膜(0.35 mm)对应的鼓胀高度大于土工布(200 g/m²)的鼓胀高度。图4中曲线的末端即为土工布和0.35 mm土工膜的胀破高度和胀破压力,土工膜的胀破高度(51 mm)远大于土工布的胀破高度(29 mm);土工膜相应的胀破压力约为0.73 MPa,约为土工布胀破压力的60%。由此可知,当土工布位于土工膜上部时,除基本的保护作用,因土工布强度高、变形小,土工布会约束土工膜的变形,以增强土工膜抵抗鼓胀变形的能力。

2.2 张应力-应变曲线

为探究土工布鼓胀变形时张应力与应变之间的关系,以单位面积质量为200 g/m²的涤纶短纤土工布为例,其张应力-应变关系如图5所示。

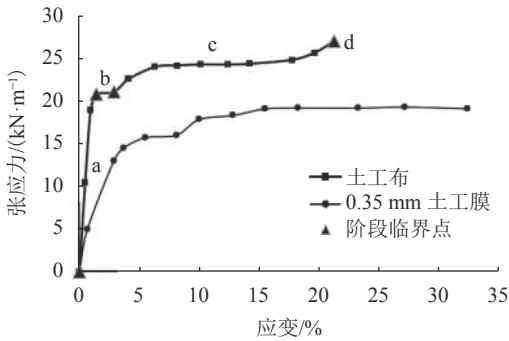


图 5 张应力-应变关系曲线

Fig. 5 Tensile stress-strain relationship curves

由图5可以看出,在环向约束条件下,土工布的鼓胀变形过程大致可分为4个阶段:1)线弹性阶段,如图5中a段所示,张应力-应变曲线为线形关系,此时如果撤除施加压力,土工布会恢复到原本的形状,且由于土工织物纤维的伸缩性有限,线弹性阶段的应变范围极小;2)屈服阶段,如图5中b段所示,该阶段应力出现微小波动,变形增加较快,曲线接近小锯齿状,变形为塑性变形,若卸载,变形不能恢复;3)强

化阶段,如图5中c段所示,屈服阶段过后曲线又有上升,在该阶段张应力随应变的增加而增加,材料变形以塑性变形为主;4)胀破阶段,如图5中d处,土工布随着荷载增加,变形逐渐增大,当应变增加到应变极限的时候,试样鼓胀破坏。

将土工布的张应力-应变关系曲线与图5中相同试验条件下0.35 mm聚乙烯土工膜的张应力-应变曲线比较,土工布张应力-应变曲线具有明显的屈服阶段,材料一旦达到应变极限,几乎瞬间胀破。

鼓胀变形过程中,当应变相同时,土工布所承受的张应力较土工膜所承受的大,土工布对土工膜具有保护和增强作用。当张应力一定时,土工布的鼓胀高度小于土工膜的鼓胀高度,上层的土工布对于下层土工膜存在一定的约束作用。因此,上布下膜的复合材料发生鼓胀变形时,一开始土工布和土工膜共同承担压力和变形;之后,下层的土工膜向上鼓胀,而上层的土工布约束下层的土工膜,土工布承担主要的鼓胀压力;当达到上层土工布的应变极限时,土工布破坏,此时复合材料的应力已远大于土工膜材料本身;随后,土工膜继续产生一定的变形后也发生破坏,其承受的鼓胀压力和张应力都较单层材料本身大了很多^[16]。综上,土工布对土工膜的保护、约束和强化作用使得复合土工膜会比单独使用土工膜具有更高的强度和安全性。

2.3 变形破坏特征与分析

图6为涤纶土工布鼓胀变形及破坏特征。

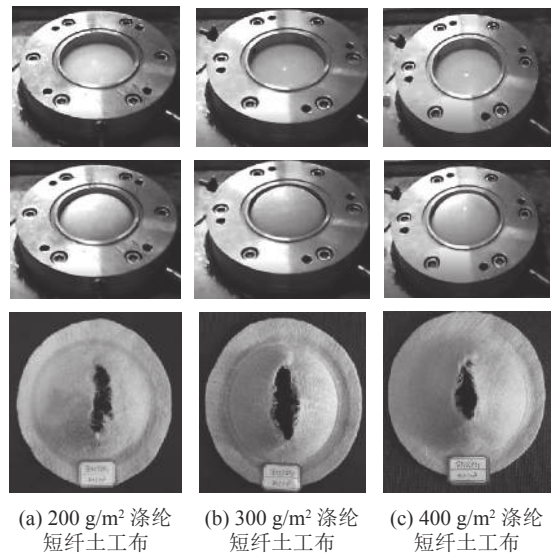


图 6 涤纶土工布鼓胀变形及破坏特征

Fig. 6 Bulging deformation and failure characteristics of polyester geotextile

试验前,土工布形态平整无褶皱(图6第1行)。试验过程中,土工布鼓胀形态(图6第2行),其形状接近半球形,与实际工程中的变形形态十分接近。随着加

载压力增加,土工布的鼓胀变形程度越来越大,半球形体积也越大;土工织物纤维之间的拉伸增强,平面内空隙减少,与单轴拉伸出现颈缩形态有所不同。当超过张拉变形的极限时,土工布出现拉伸撕裂点,土工布的破坏特征如图6第3行所示,破裂口为位于冠顶附近的纺锤形撕裂破坏,撕裂长度占整个圆弧的2/3,其边缘有很多锯齿状的小纤维束。单位面积质量越大,纤维越密实,土工布的撕裂长度越小,撕裂点一般出现在冠顶附近,并顺着该点沿针刺方向不断扩大直到破裂;撕裂破坏的走向并不是随意的,其走向总是沿着生产时针刺加工的方向。

进一步分析发现,试验中土工布试样采用非织造针刺工艺,碎散纤维在针刺穿梭前基本没有抵抗拉伸变形的能力。针刺穿梭使纤维之间相互穿插,形成一个个缠结点,拥有一定的缠结力,且纤维本身在拉伸过程中能承受一定的拉伸强度。缠结点和纤维共同组成具有一定强度的纤维网结构,缠结程度影响结构的弹性和变形表现,宏观上表现为不同致密程度的土工织物。鼓胀变形过程中,纤维顺着球冠截面圆切线方向延伸,相邻缠结点及缠结点间的纤维发生拉伸变形;如果缠结力较小不能维持纤维稳定,缠结点会在张拉力的作用下被拉开从而失去作用,失效点的范围不断变大就会使得土工布发生鼓胀破坏;即使缠结点可以保持稳定,随着张拉力的增大,缠结点之间的纤维也会不断拉伸直至断裂,当纤维发生断裂时缠结点也就失去了作用,最后材料发生鼓胀变形破坏。冠顶处撕裂点的出现,说明了冠顶某处缠结点的率先失效。缠结点和纤维的失效基本是同时发生的,且在破坏过程种,二者会有相互促进作用。通过电子显微镜观察土工布纤维排列如图7所示。

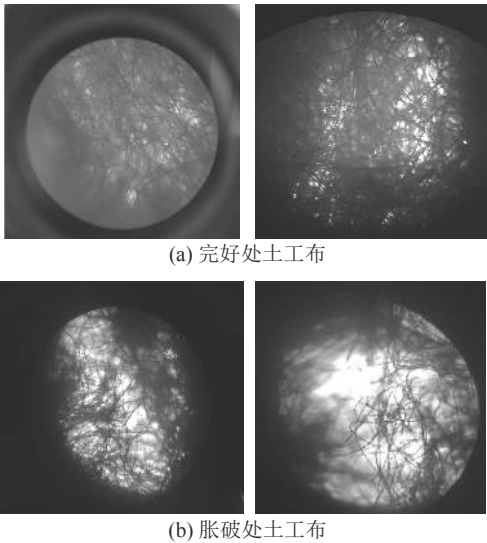
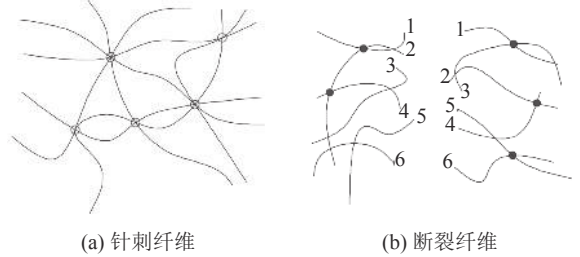


图7 显微镜下土工布纤维细节

Fig. 7 Microscopic detail of geotextile fibers

结合图7及土工布破坏机理可知,完好处土工布缠结点密集,且纤维呈多层分布,纤维交错形成缠结点;胀破处的土工布不存在缠结点,纤维根根独立不相互缠结,且被拉断的纤维有明显的回弯现象;随着距离撕裂点距离越远,缠结点越多且纤维越密集。土工布纤维变化局部细节如图8所示,每根纤维的断裂点用相同标号(1~6)表示。

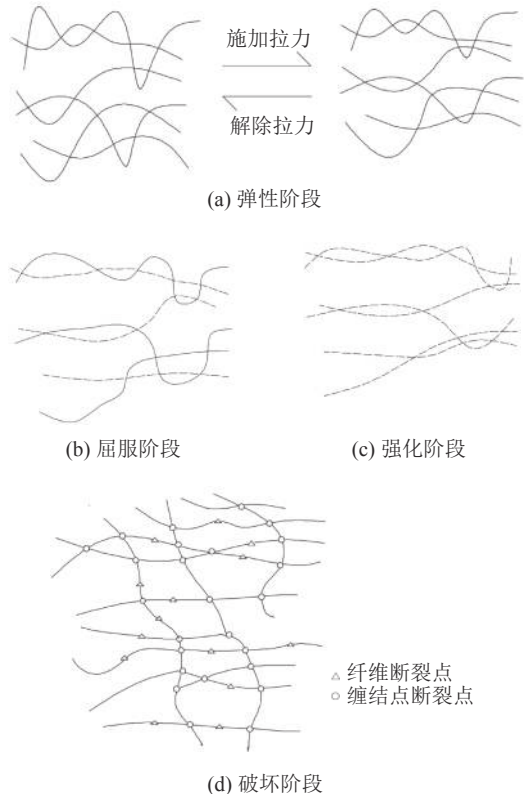


注:图中线条代表纤维,圆圈处指针刺点(纤维缠结)。

图8 土工布纤维细节示意图

Fig. 8 Detail diagram of geotextile fiber

结合土工布鼓胀变形的张应力-应变曲线,土工布环向约束条件下鼓胀变形破坏机理可分为4个阶段,如图9所示。



注:实线表示纤维处于弹性状态,虚线表示纤维处于塑性状态,断裂点处纤维处于塑性状态。

图9 土工布破坏各阶段纤维变化示意图

Fig. 9 Schematic diagram of fiber change at different stages of geotextile destruction

第1阶段:土工布纤维网弹性模量较大,缠结点间的纤维发生弹性拉伸和变形,纤维被逐渐拉细但

具有一定的弹力,卸载后变形还可恢复,称为弹性变形阶段(图9(a))。第2阶段:部分纤维被完全拉开,纤维处于弹性和塑性临界点,继续拉伸则发生塑性变形;部分纤维仍处于弹性变形阶段,未达到弹性和塑性临界点,塑性变形和弹性变形综合起来,为屈服变形阶段(图9(b))。第3阶段:随着鼓胀变形加大,所有缠结点被拉紧且纤维被完全拉伸开,纤维发生塑性变形,此时塑性变形状态下的纤维仍具有一定强度且因拉伸使得纤维间排列更加密集,缠结点仍具有一定的缠结力,与纤维拉伸强度共同组成土工布抵抗变形的能力,为强化阶段(图9(c))。第4阶段:张拉力不断增大,冠顶处缠结点最先开始失效,且失效点逐渐变多,纤维也逐渐被拉断,土工布达到抵抗极限,宏观上表现为土工布冠顶处的撕裂破坏,也即胀破拉断阶段(图9(d))。

2.4 单位面积质量对土工布鼓胀变形的影响

土工布单位面积质量不同,缠结点及其之间的纤维密度不同,相应变形及破坏特征也不同。故单位面积质量是影响土工布力学特性的关键指标,也是工程中不同类型土工布选择与应用的主要参考标准,明确单位面积质量对土工布力学特性的影响十分必要。不同单位面积质量的涤纶短纤土工布的鼓胀变形及破坏试验结果如图6、10、11和表2所示。

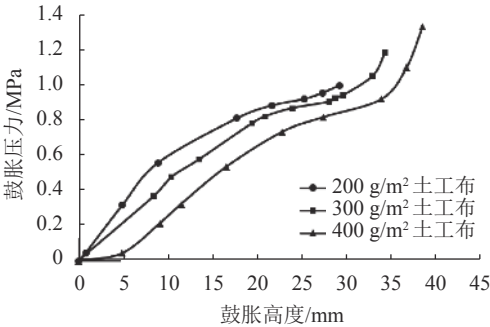


图 10 单位面积质量不同时鼓胀压力-鼓胀高度曲线
Fig. 10 Relation curves of swelling pressure and swelling height with different mass per unit area

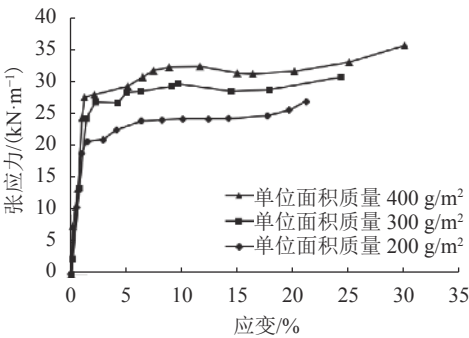


图 11 单位面积质量不同时张应力-应变曲线
Fig. 11 Tensile stress-strain curves for different mass per unit area

表 2 不同单位面积质量试样的破坏指标值

Tab. 2 Failure index values of quality samples of different unit area

单位面积质量/ (g·m ⁻²)	胀破压力/ MPa	胀破高度/ mm	胀破张应力/ (kN·m ⁻¹)	胀破 应变/%
200	0.96	29.2	25.90	21.10
300	1.16	33.9	30.12	24.77
400	1.38	37.8	34.76	29.43

由图6可以看出,不同单位面积质量的土工布的鼓胀变形形状基本相似,都呈半球状。综合图10和11可知,单位面积质量越大,纤维越密,缠结点越多,相同变形时所对应的鼓胀压力和张应力越大,破坏时的鼓胀高度越大,抵抗变形的能力越强^[25]。对于不同单位面积质量的涤纶短纤土工布,弹性变形阶段的曲线斜率,即弹性模量基本一致;不同之处主要从屈服阶段开始,单位面积质量越大,能达到的屈服点的张应力和应变就越大,这一趋势在之后的强化和破坏阶段得到顺应和发展,单位面积质量越大,相应的张应力和应变也越大。

由表2可知:土工布的胀破压力、胀破高度及胀破时张应力和胀破时应变随单位面积质量增加而增加,说明单位面积质量越大,土工布鼓胀变形的破坏强度和变形率都越大。相较于200 g/m²,300 g/m²涤纶短纤土工布胀破压力增加幅度为20.8%,胀破高度增加幅度为16.1%;400 g/m²涤纶短纤土工布胀破压力增加幅度为43.8%,胀破高度增幅为29.5%。说明单位面积质量本身越大,胀破压力和胀破高度的增长幅度越大;相应地,胀破张应力和胀破应变的增长幅度也越大。另外,胀破压力的增幅大于胀破高度,从一定程度上反映了土工布高强度、低延伸率的特性。

因此,在实际工程中,根据不同使用工况下的抗拉要求,配合土工膜选择合适的土工布及其相应的单位面积质量指标,有助于保障工程安全,合理规划不同单位面积质量土工布的有效使用范围,减少工程投资。

3 结 论

1)土工布鼓胀变形过程分为4个阶段:线弹性阶段、屈服阶段、强化阶段和胀破拉断阶段。与土工膜相比,土工布屈服阶段明显。相同条件下,土工布的鼓胀高度和应变都小于土工膜,而鼓胀压力和张应力都要比土工膜大;土工布对土工膜的鼓胀变形具有一定的保护、约束和强化作用,能够提高膜布复合材料鼓胀变形的安全性。

2)土工布球形鼓胀变形时,其外观近似为半球体;鼓胀变形破坏点一般首先出现在冠顶处,并进一

步发展形成纺锤状撕裂破坏。在微观条件下,完好土工布纤维相互缠结,并形成一个个缠结点;撕裂处土工布无缠结点,且纤维断裂。破坏机理在于,针刺短纤维形成的缠结点具有一定的缠结力,缠结点之间的纤维则具有一定的拉伸强度,二者的逐渐失效是材料破坏的主要原因。

3)单位面积质量对土工布的鼓胀变形力学特性影响很大。单位面积质量越大,纤维和缠结点的数量越多,材料越密实,可以承受的鼓胀压力和张应力越大,胀破撕裂长度越小。另外,单位面积质量本身越大,相同单位面积质量增幅的鼓胀变形强度增幅越大。在实际工程复合土工膜选材时,可充分利用膜上土工布的增强作用,通过适当提高单位面积质量的膜上土工布,在增加土工膜保护能力的同时,大幅度提高复合土工膜的鼓胀强度。

参考文献:

- [1] Shu Yiming. Progress in geomembrane barriers for seepage prevention in reservoirs and dams in China[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2015, 35(5): 20–26. [束一鸣. 我国水库大坝土工膜防渗工程进展[J]. *水利水电科技进展*, 2015, 35(5): 20–26.]
- [2] Liu Xia, Tian Hangong, Ma Guoqing, et al. Key technologies for laying membrane on Datun reservoir plate[J]. *South-to-North Water Diversion and Water Science & Technology*, 2011, 9(6): 110–114. [刘霞, 田汉功, 马国庆, 等. 大屯水库库盘铺膜关键技术试验研究[J]. *南水北调与水利科技*, 2011, 9(6): 110–114.]
- [3] Cao Xueshan, Yuan Junping, Yin Zongze, et al. Investigation of air bulging beneath geomembranes used as a liner for the Datun reservoir[J]. *Environmental & Engineering Geoscience*, 2016, 22(1): 53–66.
- [4] Li Wanglin, Li Zhiqiang, Wei Xiaoyan, et al. Air expansion caused by leakage water resulting from geomembrane defects[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(6): 1161–1165. [李旺林, 李志强, 魏晓燕, 等. 土工膜缺陷渗漏引起气胀的研究[J]. *岩土工程学报*, 2013, 35(6): 1161–1165.]
- [5] Yuan Junping, Cao Xueshan, He Guiling, et al. Field test study of mechanism of bulge phenomenon under geomembrane in plain reservoir[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(1): 67–73. [袁俊平, 曹雪山, 和桂玲, 等. 平原水库防渗膜下气胀现象产生机制现场试验研究[J]. *岩土力学*, 2014, 35(1): 67–73.]
- [6] Wang Liujiang, Liu Sihong, Sun Lai, et al. Experimental study on the air expansion of geomembrane under operation condition of plain reservoir[J]. *Journal of Hohai University(Natural Sciences)*, 2017, 45(6): 522–527. [王柳江, 刘斯宏, 孙来, 等. 平原水库运行条件下的土工膜气胀试验研究[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2017, 45(6): 522–527.]
- [7] Peggs I D. Application of geosynthetics in irrigation and drainage projects, Herve Plusquellec. ICID, New Delhi, India. 2001[J]. *Irrigation and Drainage*, 2006, 55(4): 459–460.
- [8] Li Wanglin, Wei Xiaoyan, Li Zhiqiang, et al. Research on air expansion of geomembranes used in plain reservoir basins for anti-seepage[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2014(10): 129–132. [李旺林, 魏晓燕, 李志强, 等. 平原水库库盘防渗土工膜气胀现场试验研究[J]. *中国农村水利水电*, 2014(10): 129–132.]
- [9] Pu Yongcheng, Wei Ruchun, Li Wanglin, et al. Effect of combination modes of geomembrane and geotextile on bulging deformation of separated composite geomembrane[J]. *Journal of University of Ji'nan(Science and Technology)*, 2020, 34(6): 548–553. [普勇桢, 卫如春, 李旺林, 等. 土工膜与土工布组合方式对分离式复合土工膜鼓胀变形的影响[J]. *济南大学学报(自然科学版)*, 2020, 34(6): 548–553.]
- [10] Miao Qingchun, Yang Hongjian. Application and example of geotextile in water conservancy project[J]. *Heilongjiang Science and Technology of Water Conservancy*, 2010, 38(3): 227–228. [苗青纯, 杨宏建. 土工布在水利工程中的应用与实例[J]. *黑龙江水利科技*, 2010, 38(3): 227–228.]
- [11] Zhao Yongxia. Development and application of nonwoven geotextiles[J]. *China Textile Leader*, 2009(3): 79–84. [赵永霞. 非织造土工布的发展与应用[J]. *纺织导报*, 2009(3): 79–84.]
- [12] Yang Guangqing. Development status-quo and outlook of geotextiles[J]. *China Textile Leader*, 2017(5): 20. [杨广庆. 土工布发展现状及趋势展望[J]. *纺织导报*, 2017(5): 20.]
- [13] Ren Dachun, Zhang Wei, Wu Changyu, et al. Testing techniques and functional mechanism of composite geomembranes[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1998, 20(1): 10–13. [任大春, 张伟, 吴昌瑜, 等. 复合土工膜的试验技术和作用机理[J]. *岩土工程学报*, 1998, 20(1): 10–13.]
- [14] 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.
- [15] 中华人民共和国水利部. 土工合成材料测试规程: SL 235—2012[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012.
- [16] Xue Xia, Li Wanglin, Li Chen, et al. Experimental study on expansion deformation of non-thermal-bonding composite geomembrane under ring restraint[J]. *Chinese Journal of*

- Geotechnical Engineering,2020,42(6):1145–1150.[薛霞,李旺林,李辰,等.分离式复合土工膜环向约束鼓胀变形试验研究[J].岩土工程学报,2020,42(6):1145–1150.]
- [17] Li Wanglin,Liu Zhanlei,Meng Xiangtao,et al.Experimental study on air expansion deformation of geomembrane under ring-restrained conditions[J].[Chinese Journal of Geotechnical Engineering](#),2016,38(6):1147–1151.[李旺林,刘占磊,孟祥涛,等.土工膜环向约束气胀变形试验研究[J].[岩土工程学报](#),2016,38(6):1147–1151.]
- [18] Bray J D,Merry S M.A comparison of the response of geosynthetics in the multi-axial and uniaxial test devices[J].[Geosynthetics International](#),1999,6(1):19–40.
- [19] Rachik M,Schmidt F,Reuge N,et al.Elastomer biaxial characterization using bubble inflation technique.II:Numerical investigation of some constitutive models[J].[Polymer Engineering & Science](#),2001,41(3):532–541.
- [20] Zhang Bofan.Experimental study on spherical bulging deformation of the composite geomembrane in ring-restrained conditions[D].Ji'nan:University of Ji'nan,2017.[张博凡.复合土工膜环向约束球形鼓胀变形试验研究[D].济南:济南大学,2017.]
- [21] Wei Ruchun.Experimental study on spherical bulging deformation of separated composite geomembrane applied to plain reservoir[D].Jinan:Jinan University,2019.[卫如春.应用于平原水库的分离式复合土工膜球形鼓胀变形试验研究[D].济南:济南大学,2019.]
- [22] Charalambides M N,Wanigasooriya L,Williams G J.Biaxial deformation of dough using the bubble inflation technique.II.Numerical modelling[J].[Rheologica Acta](#),2002,41(6):541–548.
- [23] ASTM Geosynthetic Materials Committee D35.Standard test method for multi-axial tension test for geosynthetics: D5617–04[S].ASTM International,2015.
- [24] Zhou Qiong,Wang Chunling,Pan Jiang.Study on blemish characteristic and application of geomembrance[J].[Sichuan Water Conservancy](#),2002,23(6):29–33.[周琼,王春宁,潘江.土工膜损伤特性及其应用研究[J].[四川水利](#),2002,23(6):29–33.]
- [25] Zhang Yiping,Long Hairu.Testing and analysis of biaxial tensile performance of weft knitted fabrics[J].[Journal of Textile Research](#),2011,32(11):37–41.[张一平,龙海如.纬编针织物双向拉伸性能测试与分析[J].[纺织学报](#),2011,32(11):37–41.]
- (编辑 李轶楠)

引用格式: Han Ruichen,Xue Xia,Li Chen,et al.Analysis of deformation and failure characteristics of geotextile spherical bulging under circumferential constraints[J].[Advanced Engineering Sciences](#),2023,55(2):267–274.[韩瑞晨,薛霞,李辰,等.土工布环向约束球形鼓胀变形及破坏特性分析[J].[工程科学与技术](#),2023,55(2):267–274.]