

DOI: 10.11779/CJGE202006020

# 分离式复合土工膜环向约束鼓胀变形试验研究

薛 霞<sup>1</sup>, 李旺林<sup>\*1</sup>, 李 辰<sup>1</sup>, 卫如春<sup>2</sup>, 于海瑞<sup>1</sup>

(1. 济南大学, 山东 济南 250022; 2. 山东大学, 山东 青岛 266200)

**摘要:** 由于热融合工艺在复合土工膜生产和施工分体拼接过程中, 容易灼伤土工膜而产生隐患, 因此在南水北调东线大屯水库全库盘防渗中采用了膜、布单独铺设的分离式复合土工膜。针对分离式复合土工膜的气胀问题, 将其变形简化为环向约束条件下的球形鼓胀变形并进行了胀破试验, 结论如下: ①分离式复合土工膜(膜0.4 mm, 布250 g/m<sup>2</sup>)鼓胀变形的胀破压力随加载速率(用液体压入速率示)的增加而缓慢增大, 基本加载速率推荐采用100 mL/min。②其鼓胀变形张应力-应变关系曲线可分为线性、塑性、强化和胀破4个阶段, 曲线整体形态与土工布类似; 其中线、塑性阶段时间很短, 曲线形态与膜类似, 受膜影响较大; 强化阶段时间长, 曲线形态与布类似, 主要受土工布影响。③其鼓胀压力由膜、布共同决定, 变形初期土工膜承担较多内压力, 影响较大; 之后土工布逐渐承担越来越多的内压力, 并起决定作用, 直到发生破坏, 相应胀破压力为1.51 MPa, 胀破冠顶高度31.5 mm。④其鼓胀变形破坏的断裂伸长率为25.3%, 主要由土工布的断裂伸长率决定; 破坏形态分为不完全破坏和完全破坏, 其原因分别为土工布的非均匀和均匀变形。

**关键词:** 平原水库; 分离式复合土工膜; 环向约束; 鼓胀变形; 破坏

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2020)06-1145-06

作者简介: 薛 霞(1990—), 女, 博士, 主要从事岩土工程、水利工程和土工合成材料力学特性等方面的研究工作。

E-mail: xxhoper@163.com。

## Experimental study on expansion deformation of non-thermal-bonding composite geomembrane under ring restraint

XUE Xia<sup>1</sup>, LI Wang-lin<sup>1</sup>, LI Chen<sup>1</sup>, WEI Ru-chun<sup>2</sup>, YU Hai-rui<sup>1</sup>

(1. University of Jinan, Jinan 250022, China; 2. Shandong University, Qingdao 266200, China)

**Abstract:** The non-thermal-bonding composite geomembrane separately laid by geomembrane and geotextile is adopted in the horizontal anti-seepage control schemes of Datun Reservoir on the Eastern Route of the South-to-North Water Diversion Project. The reason is that the heat-melt craft is easy to burn the composite geomembrane in the process of production and welding construction, and then to cause hidden troubles. The mechanical model for the air expansion deformation of the non-thermal-bonding composite geomembrane is simplified to the spherical bulging deformation under the ring restraint, and the experiment is accomplished. The conclusions are drawn as follows: (1) The bursting pressure of the non-thermal-bonding composite geomembrane (the thickness of geomembrane is 0.4 mm, the mass per unit area of geotextile is 250 g/m<sup>2</sup>) increases slowly with the increase of loading rate. The basic loading rate, i.e., liquid injection rate, is recommended to be 100 mL/min. (2) The unit tensile force and strain curve can be divided into four stages: linear, yield, strengthening and bursting. Its overall shape is similar to that of geotextile. The curve shape is similar to that of the geomembrane, which has greater influence during the very short linear and yield stages. In the strengthening stage, the curve shape is more like that of the geotextile and is mainly determined by the geotextile. (3) The expansion and bursting pressure is determined by both the geomembrane and the geotextile. In the initial stage of the deformation, the geomembrane bears more internal pressure. Then the geotextile gradually bears more and more internal pressure and plays a decisive role until failure. The bursting pressure is 1.51 MPa, and the bursting height is 31.5 mm. (4) The elongation at break of expansion is 25.3%, which is mainly determined by the geotextile. There are two types of failure patterns: incomplete failure and complete failure, caused respectively by the non-uniform deformation and uniform deformation of the geotextile.

**Key words:** plain reservoir; non-thermal-bonding composite geomembrane; ring restraint; expansion deformation; failure

基金项目: 山东省自然科学基金项目(ZR2019MEE106)

收稿日期: 2019-08-27

\*通信作者 (E-mail: cswlw@163.com)

## 1 概 述

土工膜在运输和现场施工过程中会产生损伤，损伤会改变土工膜的破坏机制，影响土工膜的防渗和受力特性<sup>[1-2]</sup>。复合土工膜是通过热融合工艺将膜、布黏合在一起使用的，两侧土工布可以有效保护土工膜不受破坏，但在生产和施工分体拼接过程中，热融合工艺不可避免地造成土工膜热灼伤，产生缺陷，成为防渗隐患<sup>[3]</sup>。为此，在利用复合土工膜作为全库盘防渗结构时，逐渐开始采用新的铺设方案即膜、布单独铺设的分离式复合土工膜，以保证土工膜的完整性，如南水北调东线山东段大屯水库（围堰型平原水库）库盘防渗（库底全铺土工膜的水平防渗）就采用了分离式复合土工膜<sup>[4]</sup>。

土工膜的气胀变形问题对其施工和应用影响较大，文献表明地下水位上升、库水位快速降低、围堰填筑、土工膜缺陷渗漏等都可能引起土工膜气胀现象<sup>[5-9]</sup>，严重的甚至发生气胀破坏，导致整个水平防渗系统失效。参照土工膜气胀变形特点<sup>[10]</sup>，可以将分离式复合土工膜气胀变形近似简化为环向约束球形鼓胀变形来探究其力学性质，目前在该方面的研究较少。

在与土工膜气胀变形力学特性相关的研究中，Merry 等<sup>[11]</sup>认为采用不同直径的试验设备进行多轴拉伸试验时，应采用不同的加载速率。李旺林等<sup>[10]</sup>研制了 4 种不同规格的土工膜气胀变形专用试验设备，总结了环向约束条件下土工膜气胀变形和气胀破坏的特性和规律。Xu 等<sup>[2]</sup>通过试验说明了环向约束条件下土工膜气胀强度与试验设备孔径大小、加载速率快慢，以及土工膜损伤程度和环境温度高低等因素有关。此外，Andrejack 等<sup>[12]</sup>进行了土工布的多轴拉伸试验，对土工布的多轴拉伸应力应变公式进行了推导。

为了模拟实际工程中分离式复合土工膜的气胀变形形态，研究环向约束条件下鼓胀变形的力学性质特点，本文研制了高强度鼓胀变形试验设备，进行了环向约束条件下分离式复合土工膜的胀破试验，总结了相应的力学特征和规律，对平原水库和人工湖区等水体底部工程的水平防渗体系设计和分离式土工膜选型具有一定的指导意义。

## 2 试验设计

### 2.1 试验设备

针对分离式复合土工膜的强度特性，研制了高强度鼓胀变形试验仪，主要由密封系统、加压系统和测控系统 3 部分组成，详见图 1。

密封系统由不锈钢法兰盘组和操作平台组成。法

兰盘组由内径分别为 100, 200 mm 的两套上、下法兰盘组成，用于固定试样，施加环向约束，并与操作平台共同形成密封容器，是试样鼓胀变形试验的基础平台。



图 1 试验装置照片

Fig. 1 Photo of test equipment

加压系统主要由电机、减速机、丝杆、活塞以及压力缸组成。其加载原理为利用电机带动活塞，将压力缸内的压力介质通过连接导管压入试样下的密封容器之中，使试样发生鼓胀变形。采用三相异步电机变频调速技术来改变活塞驱动速度和加载速率。在试验中该系统持续加压，保证试验过程中能稳定施加压力。

测控系统由精密数显压力传感器、激光位移传感器和高清录像系统组成，能自动测量和记录试样鼓胀变形的冠顶高度、容器内介质压力。

### 2.2 试验材料

试验样品选用聚乙烯土工膜、短纤针刺无纺布（以下简称土工布）以及由土工膜与土工布复合而成的分离式复合土工膜，其常规试验指标见表 1。

表 1 试验材料常规试验指标

Table 1 Routine test indexes of composite geomembrane

类型	厚度 /mm	密度 /(g·cm <sup>-3</sup> )	单位面积 质量 /(g·m <sup>-2</sup> )	断裂 强度 /(kN·m <sup>-1</sup> )	断裂 伸长率 /%
聚乙 烯 土工 膜	0.4	0.926	—	8.1	615.0
短纤针刺 无纺布	—	—	250	8.2	62.7

### 2.3 试验方案

目前已有的较为成熟的试验标准为美国土工合成材料多轴拉伸试验标准（ASTM D5617—04）<sup>[13]</sup>，该标准要求试验设备的夹具直径最小为 450 mm，但 Merry 等<sup>[11]</sup>采用了 4 种不同夹具直径（102, 203, 356, 508 mm）的试验设备进行了土工膜的气胀变形试验，得到其应力应变关系，并分析说明夹具的直径与膜厚之比为 60 以上时，其关系曲线及分布特性基本一致，无系统性差异。因此，根据试验样品指标选用试验设备的直径为 100 mm，夹具直径与膜厚比值为 250，满足要求。

为探究加载速率对分离式复合土工膜气胀变形的

影响, 试验中加载速率采用加压系统的液体压入速率表示, 分别选用 80, 90, 100, 110, 120, 130 mL/min 等 6 种液体压入速率。

试验样品选择土工膜、土工布和分离式复合土工膜, 试验前将试样裁剪成直径为 140 mm 的圆形。由于土工布的渗透性较大<sup>[12]</sup>, 水、气等压力介质可以通过, 若采用布在下、膜在上的方案, 膜下的土工布仅起到保护作用, 对气胀变形的力学性能基本没有影响, 因此在选择分离式复合土工膜试样时, 仅选用布在上、膜在下的一布一膜。同理, 在进行单一土工布试验时, 其渗透性也会导致难以进行有效的试验, 因此采用在土工布下面加垫层(薄层氯丁橡胶膜)方法<sup>[12]</sup>, 通过预先试验得到垫层的试验数据, 再对土工布加垫层试验数据进行修正, 以取得土工布的试验结果。

试验步骤为将试样放入上下法兰盘之间夹紧固定后, 通过操作平台设置加载速率, 同时将测控系统与电脑相连接后, 启动电机连续加载, 试验数据由电脑程序自动记录, 直至试样破坏, 试验结束。

同一种胀破试验的平行试验不少于 6 次。

### 3 试验成果与分析

#### 3.1 加载速率对鼓胀变形力学性质的影响

从土工布、土工膜和分离式复合土工膜胀破压力与加载速率的关系曲线(图 2)中可以看出, 土工布胀破压力随加载速率的增加而减小, 而土工膜、分离式复合土工膜以及土工膜、土工布之和随加载速率的增加而增大, 其中增长幅度土工膜较为明显, 其余两者较为平缓。另外, 分离式复合土工膜的胀破压力大于土工布、土工膜的, 约为二者之和的 1 倍~1.05 倍, 这与 Andrejack 等<sup>[12]</sup>得出的结论基本一致。

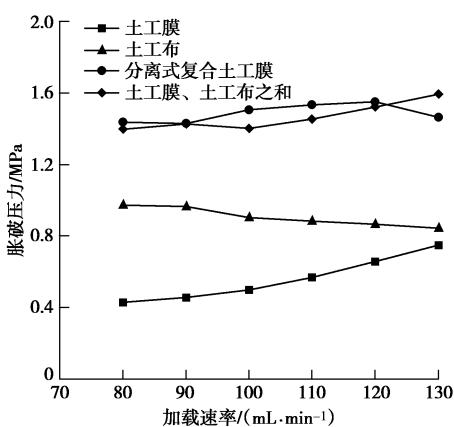


图 2 胀破压力与加载速率的关系曲线

Fig. 2 Relation between bursting pressure and loading rate

试验中发现, 对于分离式复合土工膜, 在加载速率为 100 mL/min 时, 相应的胀破压力曲线增长变为平缓, 之后随着加载速率增加, 胀破压力趋于稳定。同

时, 参照 ASTM 试验标准<sup>[13]</sup>与分离式复合土工膜试验时的实际变形形态, 选定曲线转折点即加载速率 100 mL/min 作为分离式复合土工膜胀破试验的基本加载速率, 进行以下试验和分析。

#### 3.2 鼓胀变形张应力与弯曲应变关系分析

Reuge 等<sup>[14]</sup>使用磁性探针直接测量出球形鼓胀变形时的膜厚值, 与计算值差异较大, 认为利用体积不变假设无法计算出有效的膜厚值。因此, 选择文献[10]中介绍的通过薄膜理论推导出的、不含膜厚度的张应力公式:

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

式中,  $T$  为复合土工膜鼓胀变形的应力, 采用薄膜公式的张应力 (kN/m),  $P$  为容器内压力 (MPa),  $\delta$  为胀破冠顶高度 (mm),  $L$  为夹具直径 (mm)。

描述分离式复合土工膜的应力。选择文献[10]中介绍的通过球冠顶点的球面大圆曲线上平均应变  $\varepsilon$  计算公式为

$$\varepsilon = \frac{4\delta^2 + L^2}{4\delta L} \times \arcsin \frac{4\delta L}{4\delta^2 + L^2} - 1 , \quad (2)$$

式中,  $\varepsilon$  为鼓胀变形的弯曲应变, 采用通过球冠顶点的球面大圆曲线上的平均应变。

根据公式计算得到单一土工膜, 单一土工布与分离式复合土工膜的张应力和弯曲应变曲线, 见图 3。

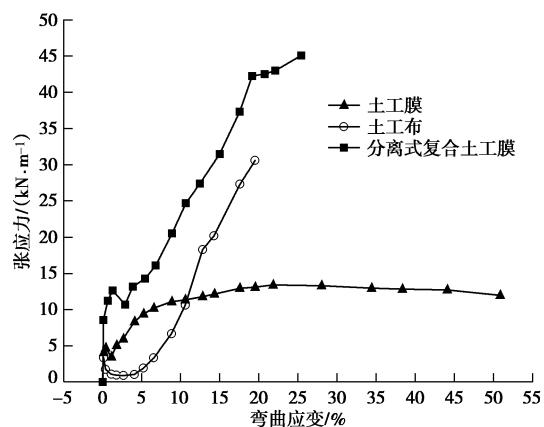


图 3 张应力和弯曲应变关系曲线

Fig. 3 Relation between tensile stress and bending strain

由图 3 可以看出: 分离式复合土工膜张应力和弯曲应变关系曲线整体趋势与土工布相似, 随弯曲应变增加, 张应力快速增大。其具体变化可以分为线性、塑性、强化和胀破变形 4 个阶段。

(1) 线性阶段。该阶段时间很短, 张应力和弯曲应变曲线近似于直线, 表现为线弹性变形。单一土工膜和土工布变形也均为线弹性变形, 去除外力后变形可恢复。

(2) 塑性阶段。当试样中的张应力达到第一个峰值, 接近材料的屈服点时, 随着应变增加张应力有所

下降, 开始产生塑性变形。单一土工膜张应力值较土工布大, 强度高, 同时膜下布上的组合方式使土工膜先于土工布受力, 因此分离式复合土工膜曲线形态与膜相似, 土工膜对变形影响较大。另外, 参照聚合物典型应力应变曲线的特点, 单一土工布由于应变软化等原因屈服程度较大, 随变形增加张应力下降较多, 强度降低, 与土工膜复合之后, 其强度提高, 使分离式复合土工膜张应力值略大于二者之和。

(3) 强化阶段。随塑性变形的发展, 张应力随着弯曲应变的增加而迅速增大, 曲线形态和斜率与土工布类似, 大小约为二者之和, 说明该阶段的鼓胀变形大小由二者共同作用, 变形特点主要由土工布决定。

(4) 胀破阶段。变形随应变的增加而加大, 当其达到土工布的最大变形量时土工布胀破, 同时布下变形量较大的土工膜从土工布胀破处挤出并继续鼓胀变形直至胀破, 整体强度降低, 曲线斜率减小。

### 3.3 鼓胀变形冠顶高度与鼓胀压力的关系

将分离式复合土工膜视为由膜、布组成的复合材料, 从复合材料力学的角度, 分析鼓胀变形过程中分离式复合土工膜体中膜、布复合应力作用。为此, 在图 4 中按照下式整理了分离式复合土工膜鼓胀压力理论计算值与冠顶高度关系曲线:

$$P_{GT-GM} = P_{GM} + P_{GT}, \quad (3)$$

式中,  $P_{GT-GM}$  为分离式复合土工膜容器内压力理论计算值 (MPa),  $P_{GT}$  为土工布容器内压力试验值 (MPa),  $P_{GM}$  为土工膜容器内压力试验值 (MPa)。

由图 4 可知: 在整个胀破试验过程中, 分离式复合土工膜鼓胀变形的冠顶高度随鼓胀压力的增加而增大。对比分析分离式土工膜的冠顶高度与鼓胀压力的理论计算值和实际试验值关系曲线, 可以看出, 冠顶高度在 20~25 mm 时, 土工布的胀破压力超过土工膜, 理论计算值超过实际试验值, 说明鼓胀变形初期, 土工膜承担较大的内压力; 随着鼓胀变形的发展和冠顶高度的增加, 土工膜承担的内压逐渐下降, 而土工布承担的内压逐渐上升为主要内压, 且起决定作用, 直至发生破坏。破坏时分离式复合土工膜冠顶高度 31.5 mm, 略大于单一土工布胀破时的冠顶高度, 其胀破压力 1.51 MPa, 接近于土工膜胀破压力 0.65 MPa 与土工布胀破压力 1.03 MPa 之和, 整体上分离式复合土工膜的理论计算值与实际试验值曲线也较为接近, 说明分离式土工膜承担的鼓胀压力是由膜、布压力分别作用共同形成的。

### 3.4 胀破变形特征和胀破机理分析

分离式复合土工膜的鼓胀破坏顺序为土工布、土工膜先后破坏, 且只要土工布破坏, 其承担的压力立刻由膜承担, 并迅速在该处产生应力集中, 导致土工

膜也迅速破坏。分离式复合土工膜鼓胀变形的断裂伸长率为 25.3%, 接近于土工布的断裂伸长率 21.0%, 而大大小于土工膜的断裂伸长率 50.2%, 说明分离式复合土工膜的胀破变形及其断裂伸长率主要由土工布决定。

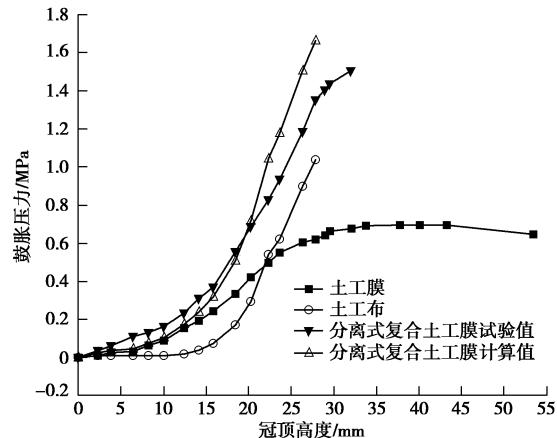


图 4 冠顶高度与鼓胀压力的关系曲线

Fig. 4 Relation between expansion pressure and bursting height

其破坏形态经统计 (表 2), 分为不完全破坏和完全破坏两种形态。不完全破坏形态表现为上层土工布冠顶处某一点首先发生破坏, 并迅速形成一条通过冠顶的裂缝, 裂缝的长度约为整个球冠直径的 1/3, 裂缝内纤维未完全断裂, 其数量从裂缝中心向两端逐渐增加, 如图 5 (a) 所示; 而土工膜在土工布破坏的裂缝范围内发生小范围的拉伸破坏, 形状多为圆点状或短裂缝, 破坏处膜厚变薄程度与单一土工膜发生破坏时不同, 约为原膜厚的 1/2~1/3, 如图 5 (b) 所示。完全破坏形态表现为上层土工布首先从冠顶处产生一个近似圆形的爆破口, 开口内纤维全部断裂, 如图 5 (c) 所示; 下层土工膜在土工布破坏的近圆形开口范围内迅速拉伸变薄直至破坏, 土工膜膜厚变薄程度与单一土工膜发生破坏时相近, 约为原膜厚的 1/10 以下, 如图 5 (d) 所示。

表 2 分离式复合土工膜破坏形式统计表

Table 2 Failure patterns of non-thermal-bonding composite geomembrane samples

序号	加载速率 (mL·min <sup>-1</sup> )	胀破压力 /MPa	破坏形式/次	
			不完全破坏	完全破坏
1	80	1.44	2	4
2	90	1.47	3	3
3	100	1.51	4	2
4	110	1.52	1	5
5	120	1.53	4	2
6	130	1.52	3	3
合计			17	19

在试样下部均匀加载的条件下, 可能影响其破坏形式的主要因素有加载速率、胀破压力和分离式复合土工膜本身的性能状态等。根据表 2 可知加载速率和

胀破压力基本不影响分离式复合土工膜的破坏形式。分析认为其破坏形式主要取决于上层土工布破坏时破坏处材料的性能状态。具体而言, 破坏时冠顶处承受最大的拉应力<sup>[10]</sup>, 若破坏处材料性能接近于各向同性或均匀, 破坏时各个方向强度达到极限, 在多个通过冠顶大圆曲线的方向上同时发生变形破坏, 外观表现为爆炸型破坏, 形成完全破坏; 反之, 破坏时各个方向强度不同, 强度最弱方向上土工布内纤维开始脱离纤维网缠结点, 使纤维网发生破坏解体并向边缘发展, 因此成线条状裂缝, 为不完全破坏。

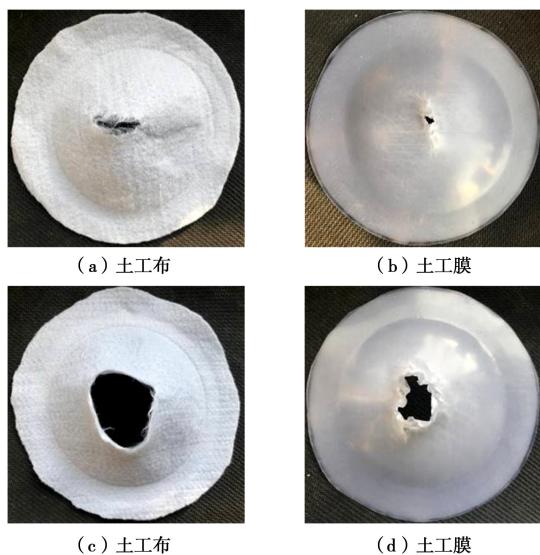


图5 分离式复合土工膜不完全/完全破坏形态

Fig. 5 Incomplete/complete failure patterns of non-thermal-bonding composite geomembrane samples

## 4 结 论

通过上述试验和分析, 对于环向约束条件下分离式复合土工膜鼓胀变形和胀破规律, 可以得出以下4点结论。

(1) 分离式复合土工膜的胀破压力随加载速率的增加而缓慢增大, 加载速率100 mL/min为关系曲线转折点, 选其作为分离式复合土工膜胀破试验的基本加载速率。

(2) 分离式复合土工膜鼓胀变形的应力可用薄膜张应力描述, 应变采用通过球冠顶点球面大圆曲线上平均应变, 其张应力-应变关系曲线整体形态与土工布的类似, 可分为线性、塑性、强化和胀破4个阶段。其中线、塑性阶段时间很短, 曲线形态与膜类似, 该阶段土工膜影响较大; 强化阶段时间长, 曲线形态与布类似, 该阶段主要受土工布影响。

(3) 分离式土工膜的鼓胀压力是由膜、布压力分别作用共同形成的, 初期土工膜承担较多的内压力,

影响较大; 随鼓胀变形的发展, 土工膜承担的内压力相对降低, 土工布开始承担较多的内压力, 并起决定作用, 直至发生破坏, 相应胀破压力为1.51 MPa, 胀破冠顶高度31.5 mm。

(4) 分离式复合土工膜胀破时土工布先于土工膜发生破坏, 鼓胀变形断裂伸长率为25.3%, 与土工布相近, 故主要由土工布的鼓胀变形决定。破坏形态分为不完全破坏和完全破坏两种形态: 若破坏处土工布性能接近于各向异性或非均匀, 破坏时最弱方向强度达到极限形成裂缝, 纤维未完全断裂, 为不完全破坏; 反之, 各个方向强度达到其极限, 纤维完全断裂, 则形成完全破坏。

## 参 考 文 献:

- [1] GUDINA S, BRACHMAN R W I. Geomembrane strains from wrinkle deformations[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2010, **29**(2): 181 - 189.
- [2] XU F, LI W, LIU Z, et al. Study of factors that influence geomembrane air expansion deformation under ring-restrained conditions[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2017, **45**(3): 178 - 183.
- [3] 孔祥峰, 李志强, 金阳. 土工膜在防渗工程中的探索与实践[J]. 治淮, 2018(8): 49 - 50. (KONG Xiang-feng, LI Zhi-qiang, JIN Yang. Exploration and practice of geomembrane in anti-seepage control engineering[J]. Harnessing the Huai River, 2018(8): 49 - 50. (in Chinese))
- [4] 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 - 152. (LIU Xia, TIAN Han-gong, MA Guo-qing, 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 - 152. (in Chinese))
- [5] 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. (YUAN Jun-ping, CAO Xue-shan, HE Gui-ling, 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. (in Chinese))
- [6] CAO X S, YUAN J P, HE G L, et al. In situ test and analysis method of air bulging under geomembranes in a shallow-lined reservoir[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2015, **43**(1): 24 - 34.
- [7] CAO X S, YUAN J P, YIN Z Z, et al. Investigation of air bulging beneath geomembranes used as a liner for the datun reservoir[J]. Environmental and Engineering Geoscience,

- 2016, **22**(1): 53 - 66.
- [8] 张 凯, 刘斯宏, 王柳江. 土工膜防渗平原水库膜下气场数值模拟[J]. 南水北调与水利科技, 2012, **10**(5): 97 - 118. (ZHANG Kai, LIU Si-hong, WANG Liu-jiang, et al. Numerical simulation of air field under geo-membrane in anti-seepage plain reservoir[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2012, **10**(5): 97 - 118. (in Chinese))
- [9] 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. (LI Wang-lin, LI Zhi-qiang, WEI Xiao-yan, et al. Study on air expansion caused by leakage water resulted from geomembrane defects[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(6): 1161 - 1165. (in Chinese))
- [10] 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. (LI Wang-lin, LIU Zhan-lei, MENG Xiang-tao, et al.
- Experimental study on air expansion deformation of geomembrane in ring-restrained conditions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(6): 1147 - 1151. (in Chinese))
- [11] MERRY S M, BRAY J D. Size effects for multi-axial tension testing of HDPE and PVC geomembranes[J]. Geotech Test J, 1995, **18**: 441 - 449.
- [12] ANDREJACK TL, WARTMAN J. Development and interpretation of a multi-axial tension test for geotextiles[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2010, **28**(6): 559 - 569.
- [13] Standard Test Method for Bursting Strength of Textile Fabrics—Diaphragm Bursting Strength Tester Method: D3786/D3786M—13[S]. 2013.
- [14] REUGE N, SCHMIDT F M, MAOULT Y L, et al. Elastomer biaxial characterization using bubble inflation technique. I: experimental investigations[J]. Polymer Engineering & Science, 2001, **41**(3): 522 - 531.

## 《岩土工程学报》征订启事

《岩土工程学报》创办于 1979 年, 是我国水利、土木、力学、建筑、水电、振动等六个全国性学会联合主办的学术性科技期刊。由南京水利科学研究院承办, 国内外公开发行。主要刊登土力学、岩石力学领域中能代表当今先进理论和实践水平的科学研究所和工程实践成果等。报道新理论、新技术、新仪器、新材料的研究和应用。欢迎国家自然科学基金项目及其他重要项目的研究成果向本刊投稿, 倡导和鼓励有实践经验的作者撰稿, 并优先刊用这些稿件。主要栏目有黄文熙讲座、综述、论文、短文、工程实录、焦点论坛、讨论和简讯等。

本刊被《中文核心期刊要目总览》连续多年确认为核心期刊, 并在建筑类核心期刊中位于前列; 本刊被科技部“中国科技论文统计源期刊”(中国科技核心期刊)及“中国科技论文与引文数据库”收录; 本刊被中国科学院“中国科学引文数据库”收录; 本刊被“中国知网”全文收录及“中国学术期刊综合评价数据库”收录; 本刊被“工程索引 Ei Compendex 数据

库”和“日本科学技术振兴机构数据库 JST”等国际数据库收录。本刊网址 ([www.cgejournal.com](http://www.cgejournal.com)) 全文发布本刊所有刊载文章。

本刊读者对象为土木建筑、水利电力、交通运输、矿山冶金、工程地质等领域中从事岩土工程及相关专业的科研人员、设计人员、施工人员、监理人员和大专院校师生。

本刊为月刊, A4 开, 双栏排版, 192 页, 每月中旬出版, 每期定价 40 元, 全年定价 480 元。

本刊国际标准刊号 ISSN 1000 - 4548, 国内统一刊号 CN 32 - 1124/TU, 国内发行代号 28 - 62, 国外发行代号 MO 0520。欢迎广大读者在全国各地邮局订购, 也可在编辑部订购(不另收邮费)。编辑部订购地址: 南京虎踞关 34 号《岩土工程学报》编辑部; 邮编: 210024; 联系电话: 025-85829534, 85829543, 85829553, 85829556; 传真: 025-85829555; E-mail: ge@nhri.cn。

《岩土工程学报》编辑部