

DOI: 10.11779/CJGE201606023

# 土工膜环向约束气胀变形试验研究

李旺林, 刘占磊, 孟祥涛, 徐 芳

(济南大学环境与资源学院, 山东 济南 250022)

**摘要:** 对于库底采用土工膜水平防渗的围坝型平原水库, 由于库水渗漏、地下水位上升等多种原因, 使库区非饱和土层中孔隙气体聚集、上升, 并在土工膜膜下形成有压气体, 使土工膜产生局部隆起的气胀现象。根据土工膜气胀鼓起变形的特点, 将土工膜气胀变形近似简化为环向约束球形鼓胀变形。为了解土工膜环向约束条件下球形鼓胀变形的特性, 研制了4种不同规格的土工膜气胀变形专用试验设备, 分析了试验设备孔径对土工膜胀破压力的影响, 选择外径20 cm试验设备作为土工膜气胀变形试验的基本设备。利用选定的土工膜气胀变形基本试验设备, 进行了环向约束条件下土工膜气胀变形和气胀破坏试验, 总结了土工膜气胀变形和破坏的规律, 得出结论: ①土工膜气胀应力应变曲线可分为线性变形、强化变形、弱化变形和胀破拉断4个阶段; ②气胀变形表现为不均一性, 气胀破坏为张拉破坏, 破坏形态表现为一条通过球冠顶点的大圆曲线或不通过球冠顶点的小圆曲线; ③对于厚度0.35~0.6 mm的土工膜, 其气胀胀破压力为0.08~0.12 MPa, 胀破冠顶高度为4.6~5.5 cm; ④对于厚度0.35~0.6 mm的土工膜, 其气胀延伸率为17.6%~18.5%, 远小于土工膜单向拉伸延伸率。

**关键词:** 平原水库; 库盘防渗; 土工膜; 气胀变形; 胀破压力; 气胀延伸率; 胀破冠顶高度

**中图分类号:** TU47      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-4548(2016)06-1147-05

**作者简介:** 李旺林(1964-), 山东成武人, 博士, 教授, 主要从事岩土工程、水工结构工作。E-mail: cswlw@163.com。

## Experimental study on air expansion deformation of geomembrane under ring-restrained conditions

LI Wang-lin, LIU Zhan-lei, MENG Xiang-tao, XU Fang

(School of Resources and Environment, University of Jinan, Jinan 250022, China)

**Abstract:** For the surrounding dam plain reservoirs that use a horizontal anti-seepage scheme, the leakage of reservoir water, rise in groundwater table and other reasons lead to the pore gas in unsaturated soil under the geomembrane gather, rise and change into pressure, which can cause geomembrane air expansion with local swelling. According to its characteristics, the air expansion deformation of geomembrane is simplified as the spherical bulging deformation under ring-restrained conditions. A set of test equipment with four different diameters is developed to study the characteristics of air expansion deformation of geomembrane under ring-restrained conditions, and the influence of the diameter of test equipment on burst pressure of geomembrane is analyzed. The test equipment with outside diameter of 20 cm is selected as the basic equipment of air expansion of geomembrane. A test is conducted using the selected equipment, and the rules of air expansion deformation and failure of geomembrane are summarized. The conclusions are drawn as follows: (1) The stress-strain curves of air expansion deformation of geomembrane can be divided into four stages: linear deformation, strengthening deformation, weakening deformation and bursting break. (2) The air expansion deformation is not uniform, the mechanism of air expansion failure is the tension failure, and the failure mode is a great circle curve through the vertex of spherical cap or a small round curve which does not pass through the vertex of the spherical cap. (3) For the geomembrane with thickness of 0.35~0.6 mm, the burst pressure of air expansion is 0.08~0.12 MPa, and the air expansion crown height is 4.6~5.5 cm. (4) For the geomembrane with thickness of 0.35~0.6 mm, the air expansion elongation is 17.6%~18.5%, which is far less than the unidirectional tensile elongation of geomembrane.

**Key words:** plain reservoir; anti-seepage of reservoir basin; geomembrane; air expansion deformation; burst pressure; air expansion elongation; air expansion crown height

## 0 引言

对于整个库底全铺土工膜水平防渗(库盘防渗)

基金项目: 山东省自然科学基金项目(ZR2014EFM023); 山东省科技计划项目(2013GSF11606)

收稿日期: 2015-01-22

的围坝型平原水库, 地下水位上升、库水位快速降低、围坝填筑、土工膜缺陷渗漏等都会引起土工膜气胀现象<sup>[1-4]</sup>。对于较高饱和度的非饱和土层, 土工膜缺陷渗水, 接触地下水形成水幕后, 可将原连续的非饱和土层分割开来<sup>[4]</sup>; 围坝填筑过程中, 坝基非饱和土层的固结, 也使得坝基和库区非饱和土层产生非均匀性; 非饱和土层土质分布的不均匀性和库区坝体坝基防渗结构等也影响非饱和土层的非均匀性。平原水库土工膜气胀现场试验和土工膜气胀有限元数值模拟分析<sup>[1-3]</sup>都表明: 较高饱和度的非饱和土层, 其膜下气场分布存在不均匀性。考虑到土工膜气胀时膜上水压和土压分布的相对均匀性、膜下孔隙气压分布的不均匀性, 以及外观表现为土工膜气胀鼓起变形的特点, 将土工膜气胀变形近似简化为环向约束球形鼓胀变形。

目前开展土工膜气胀变形力学特性的研究很少, 相关研究主要体现在土工膜液胀多轴拉伸试验中。在土工膜液胀多轴拉伸试验中, 变形挠度曲线上各点的厚度和曲率也非恒定值, 锚固环附近试样处于平面应变状态, 液胀膜球顶部位为双向等值拉伸应力状态<sup>[5]</sup>。Charalambides 等<sup>[6]</sup>采用图像处理的方式得到液胀试验过程中的应变值, 克服了试验过程中土工膜应力和应变值难以测定的问题。Bray 等<sup>[7]</sup>假定土工膜液胀后变形为球面, 采用几何方法推导出液胀压力与土工膜应力应变之间的关系, 但由于在液压作用下土工膜变形挠度曲线上各点的厚度和曲率并非恒定值, 这种假定会导致试验得到应力应变产生较大误差。束一鸣等<sup>[8]</sup>通过理论简化、试验, 分析归纳出液胀极限荷载与 PE 膜厚度、支持层、孔径之间的关系。

环向约束条件下, 土工膜气胀变形与液胀多轴拉伸变形有相似之处, 外在均表现为球形鼓胀变形, 但也存在着明显的区别: ①二者产生的机理不同, 土工膜液胀变形是由水压对土工膜产生的向下挤压变形, 而土工膜气胀变形是因土工膜膜下非饱和土中孔隙气体聚集、气压增大而对土工膜产生的向上顶胀变形。②土工膜液胀多轴拉伸变形相对较小, 模拟圆形设备孔径一般为 1~2 cm (个别达 5 cm)<sup>[8]</sup>; 而土工膜气胀球形鼓胀变形较大, 需要较大孔径的试验设备。

因此, 进行土工膜气胀变形力学性质的研究, 不仅可以解决土工膜气胀厚度设计的有关问题, 还能更全面地认识土工膜应力变形的力学性质。

## 1 土工膜气胀变形应力和应变

在环向约束条件下, 土工膜气胀变形与液胀多轴拉伸变形具有相似性, 其挠度曲线上各点的厚度和曲率也非恒定值, 锚固环附近试样也处于平面应变状态,

而膜球顶部也为双向等值拉伸应力状态, 这反映出土工膜环向约束气胀变形的不均匀性和复杂性。

土工膜膜球顶部薄面所产生的张应力  $T$  与膜下孔隙气体对薄膜产生的压应力 (孔隙气体气压)  $p$  的关系, 可采用潘江<sup>[9]</sup>根据薄膜理论分析假定弯曲面为轴对称导出的关系式:

$$T = \frac{d}{8} \left( \frac{2h}{d} + \frac{d}{2h} \right) p \quad , \quad (1)$$

式中,  $h$  为薄膜球形气胀冠顶高度 (m),  $d$  为薄膜环向约束内环直径, 即气胀试验设备孔径大小 (m)。

需要说明的是式 (1) 适用于土工膜冠顶高度小于内环半径的情况, 不适用于高延伸率膜冠顶高度大于内环半径的情况。土工膜薄膜弯曲通过球冠顶点的球面大圆曲线上平均应变:

$$\varepsilon = \frac{4h^2 + d^2}{4hd} \arcsin \frac{4hd}{4h^2 + d^2} - 1 \quad , \quad (2)$$

式中,  $\varepsilon$  为土工膜气胀变形的弯曲应变, 采用通过球冠顶点的球面大圆曲线上平均应变。

土工膜气胀变形应力采用式 (1) 所示的张应力, 土工膜气胀变形弯曲应变采用式 (2) 所示的平均应变。

## 2 试验设计

### 2.1 试验装置

土工膜环向约束气胀变形力学性质试验设备由气胀容器、加压系统和测控系统组成, 详见图 1。

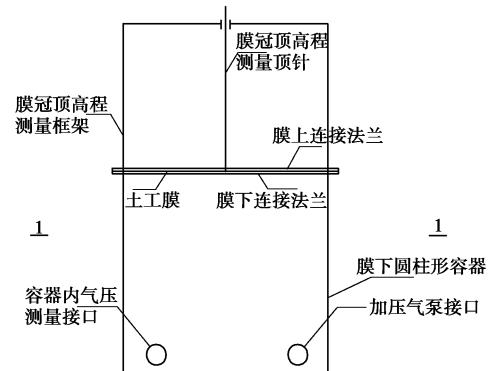


图 1 试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of test equipment

气胀容器包括膜下容器和约束法兰。膜下容器采用有机玻璃材质的圆柱体加工而成, 容器顶部为一带有圆孔的有机玻璃圆形顶板, 该板兼做下连接法兰, 下连接法兰设有一安置密封圈的环形槽, 在圆形顶板设上连接法兰。一般将土工膜平铺在膜下容器顶板之上, 膜上再加上连接法兰, 通过螺栓将上、下连接法兰连接, 同时夹紧土工膜, 对土工膜施加环向约束作用, 并在膜下容器内形成闭气系统。

加压系统利用气泵, 通过膜下容器侧壁加压气泵接口, 对容器内气体施加压力。

测控系统包括膜下容器内气压和膜顶中心冠顶高度测量。气压测量采用精密压力表, 冠顶高度测量设计了一套专门测量装置, 同时可结合摄像设备实现半自动测量, 以弥补人工瞬时读取数据的不足。

## 2.2 试验材料

土工膜试验材料选用聚乙烯土工膜, 试样尺寸  $400\text{ mm} \times 400\text{ mm}$ , 试样厚度选用 0.35, 0.60 mm, 土工膜试样材料常规试验指标见表 1。

表 1 土工膜常规试验指标

Table 1 Routine test indices of geomembrane

厚度 $\delta / \text{mm}$	单位面积质量 $(\text{g} \cdot \text{m}^{-2})$	拉伸强度 $/ \text{MPa}$	延伸率 $/ \%$
0.35	455	20.74	644
0.60	780	22.44	666

## 2.3 试验方案

土工膜气胀变形力学性质试验选用 4 种不同内径(外径)的试验设备, 采用  $2 \text{ kPa/s}$  试验加载速率, 选择 0.35, 0.60 mm 两种厚度的土工膜, 每种材料土工膜气胀试验的平行试验次数不少于 6 次。

## 2.4 试验设备孔径对土工膜胀破压力的影响分析

研制了内径  $d$  为 8 cm(外径  $D$  为 10 cm)、内径  $d$  为 18 cm(外径  $D$  为 20 cm)、内径  $d$  为 38 cm(外径  $D$  为 40 cm) 和内径  $d$  为 58 cm(外径  $D$  为 60 cm) 4 种土工膜气胀变形试验装置, 分别进行 0.35 mm 厚土工膜气胀试验, 得到土工膜胀破压力。考虑土工膜液胀试验与气胀试验具有一定的相似性, 参考引用文献[8]中 0.35 mm 厚土工膜小直径液胀试验试验成果, 并与本文试验成果综合, 得到 0.35 mm 厚土工膜胀破压力与试验设备孔径的近似关系曲线, 见图 2。

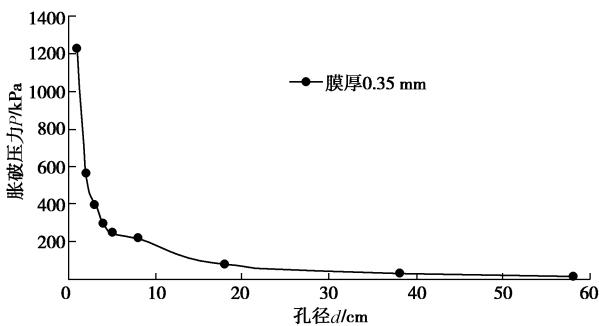


图 2 土工膜胀破压力与孔径的关系

Fig. 2 Relationship between burst pressure and aperture of geomembrane

由图 2 可知: 当试验设备内径小于 8 cm 时, 土工膜胀破压力随着试验设备内径的增大而快速减小; 当试验设备内径增加到 18 cm 以上时, 土工膜胀破压力随试验设备内径的增大而减小的幅度迅速降低。因此,

可选择内径  $d$  为 18 cm(外径  $D$  为 20 cm) 试验设备作为土工膜气胀变形试验的基本设备。以下土工膜气胀变形的试验成果均选用内径  $d$  为 18 cm(外径  $D$  为 20 cm) 土工膜气胀变形仪的试验结果。

## 3 土工膜气胀变形试验研究

### 3.1 土工膜张应力与弯曲应变的关系

土工膜张应力和弯曲应变关系见图 3。

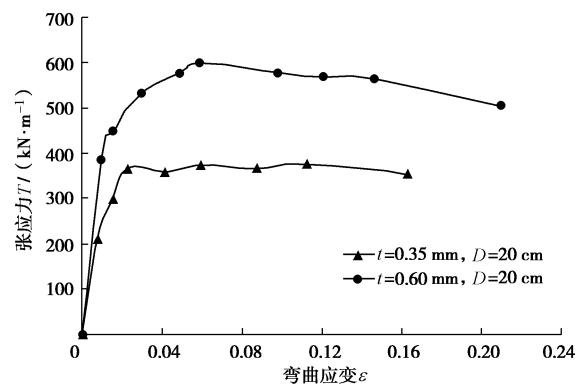


图 3 土工膜张应力和弯曲应变关系

Fig. 3 Relation between tensile stress and bending strain for geomembrane

图 3 可以看出, 在环向约束条件下, 土工膜气胀张应力和弯曲应变之间的关系曲线可以分为 4 段: ①线性变形阶段。在低应力阶段, 试样应力变形曲线较陡, 近似于线性变形。②强化变形阶段。随着应力增加, 塑性变形显著增加, 强度也随着增加, 并出现一个强度峰值。③弱化变形阶段。当试样中的应力超过峰值强度后, 土工膜产生较长的塑性变形, 并且随着塑性变形的增加, 强度逐渐降低。④胀破拉断阶段。当弯曲应变达到极限值时, 土工膜突然胀破拉断。

### 3.2 土工膜气胀破坏形态和破坏机理分析

土工膜典型气胀破坏形态见图 4。



图 4 土工膜试样典型胀破形态

Fig. 4 Typical failure pattern for geomembrane sample

土工膜气胀变形破坏特征: ①土工膜气胀变形不均匀, 冠顶处土工膜变形较大, 拉伸程度最大, 厚度最薄; 靠近法兰约束部位, 土工膜变形最小, 拉伸

程度最小, 厚度变化较小。②土工膜破坏一般是从冠顶处某一区域开始, 其伸长急剧增加, 先在某一点发生拉伸破坏, 再形成一条小的破裂缝, 然后沿着这条裂缝迅速扩大, 直至试样胀破。试样破坏形态表现为一弧线, 个别由两条弧线或由三条弧线组成(中间错动、两头平行); 试样破坏线为通过球冠顶点的大圆弧线, 或为不通过球冠顶点的小圆弧线。

环向约束条件下土工膜气胀变形破坏的机理: ①在气胀压力作用下, 土工膜发生鼓起变形。随着气胀压力的增加, 土工膜气胀变形逐渐增大。对于球面上同一圆弧, 沿圆弧切线方向上, 其张拉力处处相等; 通过冠顶的球面大圆弧线切线方向, 产生最大的张拉力。②在环向约束附近, 由于环向约束作用较强, 土工膜变形近似表现为单向拉伸变形, 其变形相对较小, 膜厚度变化相对不大; 而在土工膜冠顶中心附近, 由于环向约束作用较弱, 土工膜变形近似表现为多向拉伸, 其变形相对较大, 厚度相对变薄。③对于球面上同一圆弧线, 在相同张拉力作用下, 由于不均匀变形的持续发展, 圆弧线上不同点处的厚薄发生变化, 其张拉应力也发生变化。越接近冠顶中心处, 膜厚度越薄, 而张拉应力越大, 膜最薄处, 其张拉应力最大。④在土工膜生产过程中, 由于流道料线交汇处表面精度不够, 或纵向牵引力不均等, 在成膜过程中会影响膜厚度的均匀性, 产生一些横向条纹, 并在条纹间形成局部强度薄弱区。⑤随着土工膜气胀变形的进一步发展, 在土工膜中心附近, 一方面因膜中心厚度变薄使其张拉应力变大, 另一方面由于土工膜生产过程中存在的横向条纹而使条纹间存在低强度区。当某一点张拉应力逐渐接近、并达到膜体材料横向条纹间低强度区的抗拉强度时, 率先在该点产生张拉破坏。⑥当土工膜中心横向条纹间某一强度薄弱点产生张拉破坏时, 在该破坏点产生应力集中, 沿横向条纹强度薄弱区迅速扩张, 形成一条沿大圆(或小圆)的张拉破坏裂缝带, 瞬间产生气胀破坏。

### 3.3 土工膜气胀破坏压力与气胀冠顶高度

环向约束条件下, 土工膜发生气胀破坏时, 膜下封闭气腔内的气压(即膜下容器气体内压)称为土工膜气胀变形破坏压力(简称胀破压力), 气胀破坏时的最大冠顶高度称为土工膜气胀变形胀破冠顶高度。

选择 0.35, 0.6 mm 厚两种土工膜进行土工膜气胀破坏试验, 不同厚度土工膜气胀变形胀破压力和胀破冠顶高度详见表 2。

由表 2 可知, 土工膜气胀变形胀破压力和胀破冠顶高度随土工膜厚度的增加而增大。

表 2 土工膜气胀变形胀破压力和胀破冠顶高度

Table 2 Air expansion burst pressure and burst crown height

试验数据	胀破压力/MPa		胀破冠顶高度/cm	
	0.35 mm	0.6 mm	0.35 mm	0.60 mm
试验次数	6	6	6	6
最大值	0.0900	0.1400	4.80	5.70
最小值	0.0800	0.1200	4.50	4.60
平均值	0.0800	0.1200	4.60	5.50
标准差	0.0052	0.0084	0.10	0.48

注: ①胀破压力平均值为小值平均值; ②胀破冠顶高度平均值为大值平均值。

### 3.4 土工膜气胀延伸率

环向约束条件下, 土工膜气胀变形破坏时大圆的延伸率称为土工膜气胀延伸率。0.35 mm 厚土工膜的气胀延伸率平均为 17.6%, 0.6 mm 厚土工膜的气胀延伸率平均为 18.5%, 可见土工膜气胀延伸率随膜厚的增加而增大。与土工膜单向拉伸时延伸率(见表 1)相比, 土工膜气胀延伸率远小于土工膜单向拉伸时延伸率, 这是土工膜环向约束气胀变形的一个重要特点。

土工膜气胀延伸率远小于单向拉伸延伸率的机理分析:

(1) 土工膜单向拉伸变形基本为单向拉伸状态, 约束条件简单, 土工膜试样除夹具受拉端部附近存在局部不均匀变形外, 而标定长度统计范围内断面基本均匀受拉, 各断面均匀、充分变形, 破坏时各断面基本均达到极限变形, 因此单向拉伸延伸率较大。单向拉伸延伸率既代表整个试样(标定长度统计范围内)的平均延伸率, 又基本代表各断面的延伸率。

(2) 土工膜气胀变形延伸率只能代表大圆的平均延伸率, 不能代表各点的延伸率。由于环向约束条件下土工膜气胀变形的不均一性, 使得冠顶处土工膜是多向受拉, 变形相对充分, 土工膜厚度较薄, 而环向约束处土工膜是单向受拉, 变形较少, 土工膜厚度较厚; 同时, 土工膜又存在横向条纹间强度薄弱区, 使得横向条纹间强度变形较大, 厚度变薄。由此推论, 土工膜气胀破坏时, 仅能使大圆弧线上少部分点处的膜发生充分变形, 接近极限变形状态; 而大部分点处的膜不能发生充分变形, 远未达到极限变形状态。因此土工膜气胀变形延伸率较小。

## 4 结 论

通过上述试验和分析, 对于环向约束条件下土工膜气胀变形, 可以得出以下 5 点结论。

(1) 研制的土工膜气胀变形试验设备可以用来测试环向约束条件下土工膜气胀变形的力学性质。

(2) 土工膜气胀条件下, 张应力和弯曲应变关系曲线分为4段: 线性变形、强化变形、弱化变形和胀破拉断。

(3) 土工膜气胀变形表现为不均一性, 冠顶处土工膜变形较大, 拉伸程度最大; 气胀破坏形态表现为一条通过球冠顶点的大圆曲线或不通过球冠顶点的小圆曲线。其破坏机理是在气胀压力作用下, 冠顶膜体材料横向条纹间低强度区产生的张拉破坏。

(4) 在气胀设备内径  $d$  为 18 cm 的情况下, 对于厚度 0.35~0.60 mm 的土工膜, 其气胀胀破压力为 0.08~0.12 MPa, 胀破冠顶高度为 4.6~5.5 cm。

(5) 在气胀设备内径  $d$  为 18 cm 情况下, 对于厚度 0.35~0.60 mm 的土工膜, 其气胀延伸率在 17.6%~18.5%, 远小于土工膜单向拉伸时延伸率 (644%~666%), 这是土工膜环向约束鼓胀变形的一个重要特点。

## 参考文献:

- [1] 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))
- [2] CAO Xue-shan, YUAN Jun-ping, HE Gui-lin, 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.
- [3] 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): 97~100. (ZHANG Kai, LIU Si-hong, WANG Liu-jiang. 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): 97~100. (in Chinese))
- [4] 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. Air expansion caused by leakage water resulting from geomembrane defects[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(6): 1161~1165. (in Chinese))
- [5] ASTM D5017—04. Standard test for multi-axial tension test for geosynthetics[S]. 2004.
- [6] CHARALAMBIDES M N, WANIGASOORIYA L, WILLIAMS G J, et al. Biaxial deformation of dough using the bubble inflation technique I: experimental[J]. Rheol Acta, 2002, **41**(6): 532~540.
- [7] 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.
- [8] 束一鸣, 叶乃虎. LDPE 土工膜液胀极限荷载的工程仿真实验[J]. 水利水电科技进展, 2013, **23**(5): 1~3. (SHU Yi-ming, YE Nai-hu. Simulation test for mullen burst limit load of LDPE geomembrane[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2013, **23**(5): 1~3. (in Chinese))
- [9] 潘江. 土工膜损伤特性及其工程应用研究[D]. 南京: 河海大学, 2002. (PAN Jiang. Researches on characteristic geomembrane with damnification and applications[D]. Nanjing: Hohai University, 2002. (in Chinese))