

# 土工膜缺陷对堤坝渗流影响的试验研究

吴大志,余璐

(浙江理工大学建筑工程学院,杭州 310018)

**摘 要:** 为了分析土工膜缺陷对堤坝渗流的影响,通过自制渗流模型槽开展室内试验研究。试验时分别考虑了土工膜的缺陷率和缺陷孔径对堤坝渗流的影响,选取孔径大小分别为 2、5 mm 和 10 mm 以模拟不同原因引起的缺陷。试验结果表明:采用土工膜作为水平铺盖进行防渗是有效的,但土工膜中的缺陷对防渗效果有较大影响;试验发现土工膜的缺陷孔径相同时,渗流量随着缺陷率的增大而增大;对于同一种缺陷率的土工膜,孔径越大时,渗流量越大。所得结果可为堤坝渗流的防治提供参考。

**关键词:** 土工膜;堤坝;渗流量;缺陷率;缺陷孔径

**中图分类号:** TV614.22 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-3851(2016)03-0474-05 **引用页码:** 051102

## 0 引 言

我国七大江河堤防总长 14 万多 km,大堤的险情 60%以上是由渗流所造成。所以对于大坝而言,防渗工程是一项很重要的工作。目前用于堤坝防渗的技术有粘土心(斜)墙、混凝土心(斜)墙、面板防渗和土工膜防渗<sup>[1]</sup>。土工膜作为一种新的防渗材料,由于其重量轻、整体性好、施工简易等特点而被广泛应用。土工膜中的渗流可分为渗透和缺陷渗漏两类,目前土工膜渗透的计算主要是采用土工膜与防渗土体的等效替代法<sup>[2]</sup>,而关于缺陷渗漏量的计算还没有明确的定论。由于土工膜厚度很薄,在施工的过程中很容易破损,成为渗漏的主要通道,由渗漏而引起堤坝破坏的事故也时有发生。Messerklinger<sup>[3]</sup>介绍了一发电站的导水沟由于土工膜衬里破坏引起渗漏最终导致堤坝破坏的案例。关于土工膜缺陷对渗漏影响的研究,也有一些学者开展了研究。Giroud 等<sup>[4]</sup>用特制的渗透仪,研究分析了土工膜的渗透特性。Gan 等<sup>[5]</sup>基于非稳定饱和一非饱和渗流理论和 Galerkin 有限元分析方法,建立三维有限元模型讨论了土工膜缺陷对渗漏的影

响。吴景海等<sup>[6]</sup>计算了土工膜防渗层的渗漏流量并利用特制渗透仪分析各相关因素对渗漏流量的影响。李旺林等<sup>[7]</sup>分析了库水渗漏引起土工膜气胀变形的机理,通过大型专用气胀试验设备,模拟土工膜缺陷渗漏引起的气胀现象。胡利文等<sup>[8]</sup>采用光学显微镜和电镜分析了土工膜在不同延伸率受力状况下的微结构进行了分析,得出土工膜破坏不仅与颗粒杂质有关,而且与结构本身塑性有关。束一鸣<sup>[9]</sup>说明了防渗土工膜周边连接处和土工膜缺陷处的渗流计算及其影响,分析了不同的支持层对缺陷渗流和土工膜稳定的影响。刘凤茹等<sup>[10]</sup>对复合土工膜的缺陷渗漏量进行试验观测,得出了在不同的压力水头作用下、不同缺陷孔径与两种垫层材料组合的多种工况下缺陷渗漏量实测值,建立了复合土工膜缺陷渗漏量的经验拟合公式。孙丹等<sup>[11]</sup>根据某土工膜防渗砂砾石坝的实际情况,构建了三维有限元数值计算模型,分析了在不同压力水头下复合土工膜发生不同程度的破损对渗流场的影响,获得了土工膜防渗砂砾石坝缺陷渗漏流场的特性。李霞<sup>[12]</sup>通过长方形模型槽中的模型试验和垂直渗透仪上的渗漏量试验,研究了土工膜缺陷对高密度聚乙烯土工膜结合膨

润土防水毯这种防渗结构渗漏的影响。

前人的研究主要集中在土工膜自身渗透特性的理论研究和通过室内模型试验分析压力水头、垫层、缺陷孔径等对土工膜渗漏的影响。但土工膜缺陷率和缺陷孔径对堤坝渗流影响的研究还未见报道,本试验采用人工打孔的方式来模拟土工膜缺陷:根据文献[10]选取 2mm 和 10mm 孔径模拟接缝缺陷、偶然因素引起的缺陷,选取 5mm 孔径以模拟介于这两者之间的缺陷。分别讨论相同孔径时缺陷率对堤坝渗流的影响和相同缺陷率时缺陷孔径对堤坝渗流的影响,所得结论可为相关工程实践提供参考。

## 1 试验装置及材料

### 1.1 试验装置

试验装置采用自制渗流模型槽,如图 1 所示。模型槽尺寸为 3.0 m×0.5 m×1.2 m,水从进水端的平水箱流入模型槽,通过调整平水箱的高度来改变堤坝上游水位,模型槽右侧留有排水口。模型槽一面采用有机玻璃,一方面观察筑堤时的压实情况,另一方面观察渗流过程中出现的现象。且在此侧设 8 根测压管以观察试验过程中的水头变化,测压管的编号从左到右为 1—8。

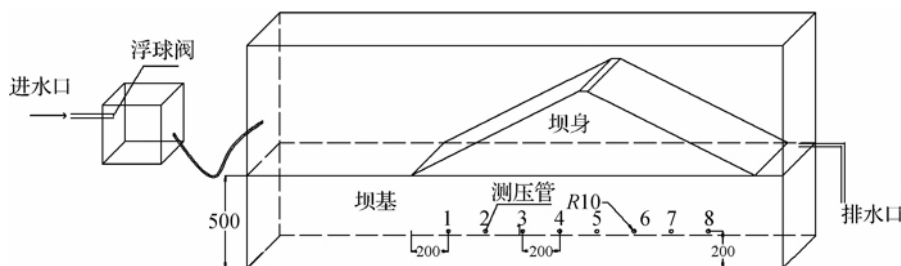


图 1 渗流模型槽示意(单位:mm)

### 1.2 试验材料

本试验主要针对透水坝基开展研究,坝基采用砂土填筑。前人很多的模型槽试验都采用不透水材料来模拟坝身,但实际工程中,坝身很难做到完全不

透水,故本试验采用粉土填筑坝身,粉土取自浙江理工大学第 2 综合实验楼基坑。填筑材料的基本物理性质指标如表 1 所示。为方便土工膜与槽壁的紧密贴合,试验所用的土工膜采用普通塑料薄膜代替。

表 1 坝基、坝身材料的基本物理性质指标

名称	土的类型	塑限/%	液限/%	最优含水率/%	比重	孔隙比	含水量/%	渗透系数/( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )
坝基	砂土				2.65	0.68	8.7	$2.8 \times 10^{-2}$
坝身	粉土	20.27	29.83	22.2	2.70	1.04	17.6	$1.46 \times 10^{-5}$

## 2 试验过程及方案

坝身和坝基的填筑,采用分层施工法,分层填筑厚度为 10 cm。按照要求将材料逐层夯实到规定的高度,填筑过程中控制填土的压实度在 88%左右。

本文中所有试验统一采用上游水头 20 cm,下游水位 7 cm。为了避免水从铺盖和斜坡连接处集中渗漏,将薄膜沿坝身向坝基表面铺设。水平铺盖长度均为 3 倍上游水头即 60 cm。土工膜宽度比模型槽内径大 50 cm,用凡士林将土工膜两侧多余 25 cm 部分与模型槽内壁贴牢,避免气泡的产生,防止水沿模型槽侧壁下渗,造成集中渗漏。最后,在土工膜与坝基贴合的前端用坝基材料覆盖,防止土工膜前端上浮,水进入铺盖下方造成渗漏。土工膜的铺设如图 2 所示。



图 2 土工膜铺设(俯视)

铺设完土工膜,进水端开始放水。在上下游水位差的作用下,渗流发生。观察测压管内水位变化和下游出水情况。测压管示数不变并且下游渗流孔单位时间溢出的水量达到稳定后,说明渗流已经达到稳定。记录测压管示数和3 min内坝基下游的渗流量,将水量换算成流量。

选取缺陷的孔径分别为2、5 mm和10 mm,缺陷率分别为0.05%、0.1%、0.2%开展试验研究,分别讨论同一孔径下,缺陷率对堤坝渗流的影响,同一缺陷率时,缺陷的孔径对堤坝渗流的影响。此外还开展了无缺陷和不铺设土工膜两组对比试验。

### 3 试验结果

#### 3.1 试验现象

从上游开始放水到下游出水大约1h左右,每隔一段时间测一次出水量,发现渗漏量先增大再减小。这主要是堤坝有逐渐饱和的过程,随着时间的增加,在水压力的作用下,水平铺盖与坝基之间贴合更紧密,同时坝基材料之间也越来越紧密,导致了出水量逐渐减小。

#### 3.2 分析与讨论

渗流稳定后,记录下3 min的出水量,除以时间和模型槽宽度可得单位时间单位宽度堤坝的渗流量,结果见表2。表3给出渗流稳定后,1-1组及对比组1、2的测压管读数。图3给出了渗流量随缺陷率的变化曲线;图4给出了渗流量随缺陷孔径的变化曲线。渗流稳定后,坝基不同位置处的静水压力可由测压管的读数反映出来。坝基底部静水压力的分布曲线如图5所示。

表2 试验数据表

试验 编号	孔径 /mm	缺陷 分布/个	缺陷率/%	渗流量/ ( $\text{mL} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ )
1-1	2	400	0.2	6.92
1-2	2	200	0.1	6.73
1-3	2	100	0.05	6.62
2-1	5	100	0.2	7.04
2-2	5	50	0.1	6.82
2-3	5	25	0.05	6.71
3-1	10	16	0.2	7.17
3-2	10	8	0.1	6.92
3-3	10	4	0.05	6.83
对比组1	无缺陷	/	/	6.50
对比组2	无铺盖	/	/	7.39

表3 试验1-1组及对比组1、2的测压管示数(单位:cm)

测压管 编号	1	2	3	4	5	6	7	8
到堤脚 距离	20	40	60	80	100	120	140	160
1-1组	46.5	45.3	44.5	43.2	42.5	41.7	40.0	39.3
对比组1	46.3	45.1	44.4	43.0	42.3	41.5	39.8	39.2
对比组2	47.7	46.4	45.5	44.2	43.0	42.5	40.6	39.8

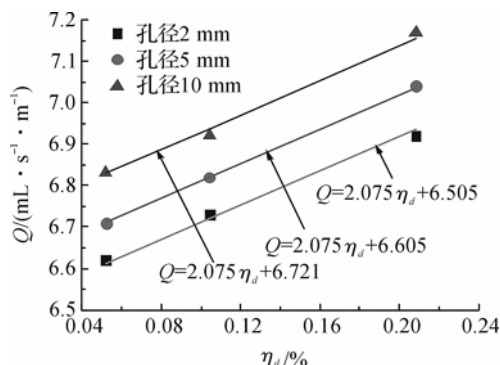


图3 渗流量随缺陷率的变化

图3反映了不同缺陷孔径时渗流量随缺陷率的变化规律,由图可见,相同的缺陷孔径时,渗流量随着缺陷率的增大而增大,可以拟合成线性关系。

$$Q = 2.075\eta_d + a_1 \quad (1)$$

式中: $Q$ 为堤坝下游单宽渗流量, $\text{mL} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ;  $\eta_d$ 为土工膜缺陷率,%;  $a_1$ 为拟合系数。线性拟合后得到3种缺陷孔径的 $a_1$ 分别为6.505、6.605和6.721,对应的拟合相关系数分别为0.997、1.000和0.988。

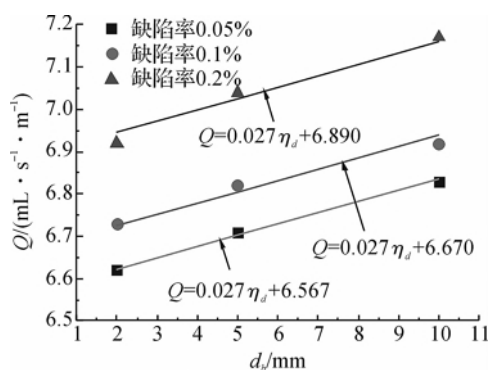


图4 渗流量随缺陷孔径的变化

图4反映了相同缺陷率时渗流量随缺陷孔径的变化规律。由图可见,同一种缺陷率的土工膜,孔径越大时,渗流量越大。渗流量与缺陷孔径成较明显的线性关系,可以拟合成线性式:

$$Q = 0.027d_b + a_2 \quad (2)$$

式中: $d_b$ 为土工膜缺陷孔径,mm;  $a_2$ 为拟合系数。线

性拟合后得到3种缺陷孔径的 $a_2$ 分别为6.567、6.670和6.890,对应的拟合相关系数分别为0.992、0.974和0.971。

Giroud 研究发现若土工膜下面支持层的渗透系数 $k_s \geq 10^{-3} \text{ m/s}$ ,可采用孔口自由出流的Bernoulli方程计算土工膜缺陷的渗漏量,此时,渗流量只与缺陷总面积有关。本试验中,土工膜下面土层渗透系数为 $2.8 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ ,不足以看成无限透水路,试验发现,渗漏量不仅与缺陷总面积有关,还与缺陷孔径大小有关。

此外,分析表1中对比组1可以看出,土工膜上的缺陷对堤坝渗流量的影响比较大。由对比组2可以看出,上游铺设水平土工铺盖,可以有效地减少堤坝的渗漏量。

由表3及图5可以看出,3种工况下测压管示数的变化规律都相同。可以拟合成如下的线性关系:

$$h = -0.053d + a_3 \quad (3)$$

式中: $h$ 为测压管示数,cm; $d$ 为测压管到坝脚的距离,cm; $a_3$ 为拟合系数。经拟合 $a_3$ 分别为47.285、47.482和48.775,对应的拟合相关系数分别为0.991、0.992和0.992。

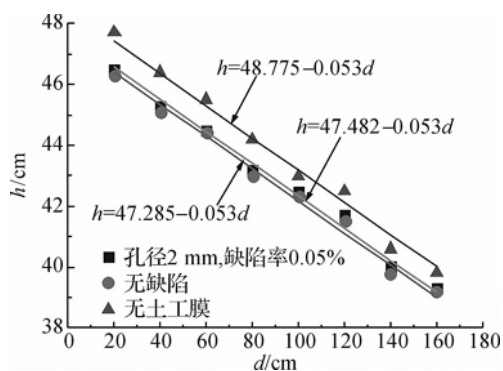


图5 测压管示数变化

由图5可以看出,沿堤坝渗流路径,测压管示数呈下降趋势,这与稳定渗流时流网中流线的变化规律一致,同时也表明试验中坝身对试验结果影响较小。图5还可以发现,相同情况下,无土工膜时静水压力最大,无缺陷时静水压力最小,这与图4所反映的规律一致。

## 4 结论

通过自制室内渗流模型槽,填筑堤坝并用塑料薄膜模拟水平铺盖铺设于堤坝上,并在土工膜上人

工开孔以模拟土工膜缺陷,开展了土工膜缺陷对堤坝渗流影响的试验。试验结果表明:堤坝采用土工膜作为水平铺盖进行防渗效果是很明显的,但土工膜上的缺陷对防渗效果有较大影响;土工膜的缺陷孔径大小一致时,渗流量随着缺陷率的增大而增大,可以拟合成线性关系;对于同一种缺陷率的土工膜,孔径越大时,渗流量越大,可以较好地拟合成线性关系。由此可得,在堤坝水平防渗层铺设过程中,应尽可能采用合适的技术手段减少缺陷的产生,特别是较大缺陷的产生。

## 参考文献:

- [1] 颜宏亮. 水工建筑物[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007: 118-119.
- [2] 魏继中, 刘圻, 廖文丽. 长海水库复合土工膜防渗体系渗流分析[J]. 人民长江, 2014, 45(s1): 107-108.
- [3] MESSERKLINGER S. Failure of a geomembrane lined embankment dam- Case study [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2014, 42(3): 256-266.
- [4] GIROUD J P, BADU-TWENEBOAH K, BONAPARTE R. Rate of leakage through a composite liner due to geomembrane defects[J]. Geotextiles and Geomembranes, 1992, 11(1): 1-28.
- [5] GAN L, SHEN Z H, YAN, Z G et al. Numerical simulation of geomembrane defect leakage by saturated-unsaturated seepage method [J]. Advanced Materials Research, 2014, 904: 474-478.
- [6] 吴景海, 陈环. 土工膜防渗层渗漏流量的计算[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(2): 93-99.
- [7] 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.
- [8] 胡利文, 陈嘉欧. 土工膜微结构破损机理分析[J]. 岩土力学, 2002, 23(6): 702-705.
- [9] 束一鸣. 土工膜连接和缺陷渗漏量计算与缺陷渗流影响[J]. 人民长江, 2002, 33(3): 26-28.
- [10] 刘凤茹. 复合土工膜缺陷渗透量试验观测[J]. 南水北调与水利科技. 2004, 2(2): 49-51
- [11] 孙丹, 沈振中, 崔健健. 土工膜缺陷引起的土工膜防渗砂砾石坝渗漏数值模拟[J]. 水电能源科技, 2013, 31(4): 69-73.
- [12] 李霞. 内蒙古克什克腾旗蒸发塘缺陷渗漏试验研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2013: 26-52.

## Experimental Study on the Influence of Defects in Geomembrane on the Seepage of a Dam

WU Dazhi, YU Lu

(School of Civil Engineering and Architectural, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** To analyze the influence of defects in geomembrane on the seepage of a dam, a series of experiments were carried out by using a self-made seepage model tank. In experiments, influences of defect rate of geomembrane and defective bore diameter were taken into consideration respectively. Bore diameters were selected as 2mm, 5mm and 10mm to simulate the defects caused by different reasons. Experimental results show that the seepage is effective when geomembrane is selected as the horizontal impervious blanket layer of a dam. Besides, the defects in geomembrane can largely affect its anti-seepage effect. It is also found in experiments that the seepage flow of a dam increases with the increasing defect rate of geomembrane when the defective bore diameters of geomembrane are the same. Besides, at the same conditions, the seepage of a dam increases with the increasing bore diameter of geomembrane with the same defect rate. The conclusions can provide a reference for the seepage control of a dam.

**Key words:** geomembrane; dam; seepage; defect rate; defective bore diameter

(责任编辑: 张祖尧)