

PP 织物袋对渗透破坏的影响

麻乐乐¹,朱首军^{1,2*},路东敏¹,林成行¹,韩峰²

(1.西北农林科技大学水土保持研究所,陕西 杨陵 712100;2.西北农林科技大学 资源环境学院,陕西 杨陵 712100)

摘要:渗透破坏是淤地坝最常见的一种破坏方式,为探究 PP 织物袋对渗透破坏的影响,给病险坝的除险加固提供理论依据,模拟陕北靖边地区的筑坝土料(粉砂质壤土)在渗流作用下的渗透破坏现象及过程,并用 PP 织物袋装填原状土作为反滤体对比其对原土坝渗透历时、浸润线的影响。结果表明,随着渗透破坏的发生,2 个坝体内各个部位的水位高度逐渐增加到一定数值后达到稳定,即当前区域土体达到饱和,坝体内水位高度从坝前向坝后总体呈降低趋势;PP 织物袋装填原状土作为反滤体不仅可以减缓坝体内各个部位水位升高的速率,而且可以降低最大水位高度,从而降低坝体浸润线,减缓渗透破坏现象的发生。

关键词:渗透破坏;PP 织物袋;浸润线

中图分类号:S714.7

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2018)02-0213-06

Effects of Polypropylene Geotextile Bags on Seepage Failure

MA Le-le¹, ZHU Shou-jun^{1,2*}, LU Dong-min¹, LIN Cheng-hang¹, HAN Feng²

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Seepage failure is the most common damage to the check dam. To explore the effects of polypropylene geotextile bags on seepage failure, and to provide theoretical basis for dam reinforcement, this paper simulated the seepage damage of the dam soil (silty loam) in Jingbian area of Northern Shaanxi. Polypropylene geotextile bags filled with original soil were used as a filter to its effects on the permeation time and phreatic line of the original dam. The results showed that with the occurrence of seepage failure, the water level height in all parts of the two dams gradually increased to a certain stable value, the current area of the soil was saturated. The dam water level from the front of the dam to the back of the dam decreased. Polypropylene geotextile bags filled with soil as the filter not only could slow the rate of water level in the dam parts, but also reduce the maximum height of the water level, thus reduce the phreatic line of dam and slow down the occurrence of seepage failure.

Key words: seepage failure; polypropylene geotextile bags; phreatic line

黄土高原地区是我国经济最不发达的地区之一,水土流失极为严重^[1-3],目前,黄土丘陵区年土壤侵蚀量一般在 5 000 t·km⁻² 以上^[4]。淤地坝建设可以说是黄土高原众多水土保持措施中最为重要的一项,既可以增加耕地面积、提高农业生产力,又可以防止水土流失^[5]。上世纪 70 到 80 年代,陕北靖

定地区由于当地砂石料缺乏,建设经费不足,所建淤地坝大部分未布设反滤体,导致淤地坝产生渗透破坏而成为病险坝,目前这一问题一直未得到很好的解决,给当地淤地坝工程带来严重的安全隐患^[6-7]。坝后渗透破坏已成为制约当地淤地坝建设的一个重要问题。

收稿日期:2017-04-27 修回日期:2017-05-24

基金项目:陕西水利科技计划项目(2014slkj-23)。

作者简介:麻乐乐,男,在读硕士,研究方向:水土保持工程。E-mail:443275639@qq.com

*通信作者:朱首军,男,博士,副教授,硕士生导师,研究方向:水土保持工程、小流域综合治理。E-mail:zhushoujun@nwsuaf.edu.cn

关于渗透破坏防治方面的研究,近年来我国采用了多种技术,其中应用最为广泛有劈裂灌浆、高压喷射灌浆和混凝土防渗墙等技术。结合陕北靖定地区淤地坝产生渗透变形破坏的成因,劈裂灌浆是较好的防治工程之一,因为劈裂灌浆可营造“垂直连续的防渗帷幕”,如果能做到科学合理的设计和施工,就能有效地解决坝后出现的散浸、浸润线出逸点过高、管涌流土等隐患,满足抗渗稳定的要求^[8]。蒋彭年^[9]提出坝体斜墙防渗,比如高度 60 m 左右的土坝需要布设厚度为 6~10 m 的粘土斜墙,并还要在斜墙上面布设厚度为 0.8~2 m 的兼有防冻作用的砂石料保护层,解决坝坡抗冻、固膜、压膜等问题。另外桩柱式防渗墙的形成方式有 2 种:一是采用钻机间隔套打后浇砼;二是采用多头小直径深层搅拌机,将水泥浆喷入坝体土内搅拌成墙,成墙深度一般在 20 m 左右^[10]。预制拼装防渗墙则是将钢板或者钢筋砼板捶击打入、振动插入或置入已成槽孔中,并注入水泥浆液成墙,深度不大于 20 m^[11]。在水库的下游防渗过程中,可采用无纺土工布与砂子和碎石结合做成暗沟,并结合 PVC 排水管道,将坝体内多余水分排出^[12]。

PP 织物袋是由含碳墨和其他抗紫外线(UV)成分与聚丙烯复合而成的新型高分子材料经针刺双面熨烫而成的无纺布。经国家建筑材料测试中心检验的数据表明,在 270 kPa 压力下,PP 织物袋的使用寿命超过 80 a,并且生态环保,所以在海堤岸工程中应用比较广泛,尤其是在湖岸河岸砌护和水库迎水坡防冲等工程,都取得了很好的防护效果^[13-14]。关于 PP 织物袋应用于坝体渗透破坏防治方面的研究鲜为少见。

因此,以陕西省榆林市靖边县土桥梁流域粉砂质壤土为研究对象,采用自制的坝体模型对其进行渗透破坏试验,并在坝后铺筑装填原装土的 PP 织物袋作为反滤体,观察其对渗透破坏的影响,以期为陕北靖定地区产生渗透破坏的淤地坝进行除险加固提供理论依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验坝位于靖边县东部高家沟乡土桥梁流域内(109°10′56″E,37°34′50″N),距县城约 46 km,该流域为典型的黄土丘陵沟壑强度侵蚀区,梁峁、沟坡、沟床是该流域典型的 3 个地貌单元,以沟坡为主,沟壑纵横、梁峁林立、沟谷深切、地形破碎,沟壑密度 2.1 km/km²,主要的地理特点是北高南低,走向由北向南倾斜。地表覆盖黄土深厚,沟床被淤积土所

覆盖。该流域主要的气候类型为北温带干旱半干旱大陆性季风气候,多年平均气温 7.8℃,极端最高气温 36℃,极端最低气温 -28.5℃,日间气温差异大,来霜早,无霜期 130 d 左右。年最大降雨量为 744.6 mm,年最小降雨量为 205 mm,多年平均降雨量为 395.4 mm,降雨主要集中在 7—9 月,约占全年降雨量的 60%,沟道内有常流水,多年平均径流深为 50 mm,最大冻层深为 1.10 m,多年平均侵蚀模数为 $1.3 \times 10^4 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

淤地坝坝址所处沟道呈“梯形”。坝址处右岸表层土壤为砂质壤土,厚 1.0~2.5 m,左岸粉砂质壤土较厚,厚约 3~6.5 m,筑坝土料均为黄土,土壤质地疏松,抗蚀性差,易被冲刷侵蚀。

1.2 基础试验

以《土工实验规程》(SL237-1999)为指导,对榆林市靖边县筑坝土料现场采样并测定坝体密度,室内的常规土工试验主要测定指标及方法见表 1。

表 1 常规土工试验主要测定的指标

Table 1 Physical indicators for the test of the experimental soil material

试验名称	仪器	测试指标
比重瓶法	比重瓶	颗粒相对密度
颗粒级配分析试验	马尔文 2 000 颗粒分析仪	颗粒级配
击实试验	JDS-1 型数控电动击实仪	最大干密度和最优含水率
液塑限	液塑性联合测定仪	液限、塑限、塑性指数

根据《土工合成材料测试规程》(SL/T235-1999)测定试验所用 PP 织物袋的单位面积重量和厚度,并用拉力试验测定 PP 织物袋分别在干燥和 65%相对湿度下与不同基底的摩擦系数^[15]。

1.3 渗透破坏模拟试验

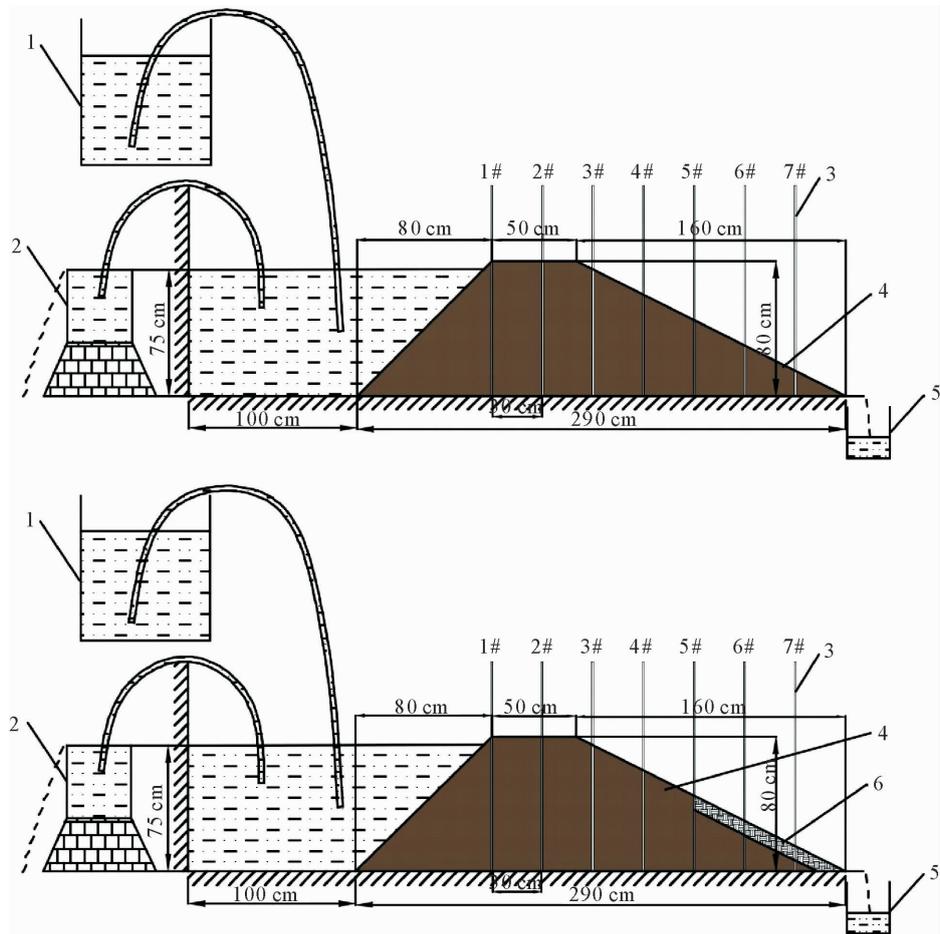
采用砖砌槽子制作 1:20 的坝体模型,保持稳定的坝前水位高度,模拟坝后渗透破坏试验,观测坝体渗透破坏的全过程。其中一个为原状筑坝土料的渗透破坏模拟试验,另一个为用 PP 织物袋作反滤体的渗透破坏模拟试验,之后进行相同条件下的渗透试验,观察对比两者坝后渗透破坏现象及过程,分析 PP 织物袋对坝后渗透破坏的防护效果。

1.3.1 试验装置构建与模型制备 试验装置为砖砌小槽,试验槽规格为长 3.9 m、宽 0.8 m、高 1.25 m。小槽底部和边壁采用混凝土抹面,以模拟实际中相对不透水坝基,模拟单位断面的坝体排水及渗透破坏现象。

模型制备:1)防渗处理:用防渗漆对槽底和槽壁进行防渗处理,防止底部和槽壁渗水,对试验产生影

响。2)测压管安装:测压管为“L”形,横向长45 cm,竖向长125 cm,测压管材质为亚克力管,尺寸:外径8 mm,内径6 mm,壁厚1 mm,横向测压管和竖向测压管用内径8 mm的直角PP塑料弯头连接,并用胶水进行粘贴,防止连接处漏水。底部横向测压管管壁打满直径3 mm的小孔,以便坝体内部流水进入测压管,同时用土工布包裹横向测压管,防止坝体内细小土颗粒进入管内,堵塞测压管,整套测压管装置安装好后,用强力胶将其粘贴在槽子底部和槽壁的一侧,每隔30 cm安装1套测压管,每个试验槽总共安装7套测压管,从坝前向坝后测压管编号依次为1#~7#测压管。同时在槽壁粘贴钢尺,以方便碾压筑坝时土方量的把握和压实度的保证。3)模拟筑坝:首先,将从靖边地区运回的原筑坝土料过5 mm筛,主要去除土料里的根系、石块等杂物,然后根据取样测定结果,采用人工分层压实的方法来模拟筑

坝,坝体干密度取 1.60 g/cm^3 ,每层压实厚度为10 cm,每一层所需的压土量通过目标干密度和土体含水率计算得到,模拟筑坝时试验槽的出口处要用挡板拦挡,当完成筑坝和削坡之后去掉挡板,需要注意的是夯实第1层土方时,要注意不能损坏测压管,尤其是安装在槽子底部的测压管,人工基本夯实后,需用小锤对边边角角没有夯实的方进行压实,对照槽壁的钢尺刻度,以保证每层土体达到目标干密度。坝体夯实后进行人工削坡,为了尽可能保证与实际坝体的几何相似,坝前坡度采用1:1边坡,坝后坡度采用1:2边坡。模型制备完成后的尺寸为坝长2.9 m,坝高0.8 m,坝宽0.8 m。4)PP织物袋作反滤体筑坝:前面与原状土筑坝方法一样,待削完坡之后,挖掉坝后土体,用PP织物袋装填原状土作为反滤体整齐连接铺筑于坝后。试验模型如图1所示。



注:1. 注水桶;2. 溢流桶;3. 测压管;4. 土坝;5. 集流桶;6. 反滤体(PP织物袋装填原状土)。

图1 渗透破坏模拟试验装置总图

Fig. 1 The master chart of seepage failure simulation test

1.3.2 试验步骤 模型制备完成后,分别给2个模拟坝坝前加水至距坝顶5 cm处,然后分别在2个槽子外放置同坝前水位相同的溢流桶,以保证整个试

验过程中保持坝前水位稳定不变(即坝前水位稳定在75 cm),如果槽子外溢流桶始终在向外溢水,此时认为注水量达到要求,坝前水位稳定不变。之后

定时用测钎测得测压管内水位高度,同时注意观测溢流桶是否向外溢水和坝坡下游坡面有无裂缝、坡脚有无位移。整个试验过程每隔 8 h 测量测压管内水位高度 1 次,待下游坝坡坡面开始出现裂缝和渗水,收集渗流,测定其流速,直至坝体被完全破坏。整个试验过程应保证溢流桶有水溢出,并不定时检查连接坝前与溢流桶的水管是否被泥沙堵塞,防止坝前水位持续升高。

1.4 数据处理与分析

利用 Excel 软件绘制各个测压管水位稳定后的坝体浸润线及各个测压管内水位高度随时间变化折

线图,分析 PP 织物袋对浸润线的影响效果。

2 结果与分析

2.1 基础试验结果与分析

供试土料的常规土工试验结果见表 2。

由表 2 可知,供试土料的砂粒、粉粒和粘粒各占 9.7%、76.1%、14.2%,根据国际制土壤质地分级标准,该土样为粉砂质壤土^[16]。

PP 织物袋单位面积重量和厚度测定结果见表 3,PP 织物袋与不同基底摩擦系数参考值见表 4。

表 2 土样物理性质

Table 2 Physical properties of the soil sample

土样名称	颗粒相对密度	液限 $\omega_L/\%$	塑限 $\omega_P/\%$	塑性指数 I_P	颗粒组成/%			最大干密度 $\rho_{dmax}/(g \cdot cm^{-3})$	最优 $\omega_{op}/\%$	土样类别
					砂粒/mm 2~0.02	粉粒/mm 0.002~0.02	黏粒/mm <0.002			
粉砂质壤土	2.71	27.96	14.99	12.97	9.7	76.1	14.2	1.70	13.3	低液限黏土

表 3 PP 织物袋单位面积重量和厚度测定结果

Table 3 Result of weight and thickness measurement of polypropylene geotextile bags

项目	重量/($g \cdot m^{-2}$)	厚度/mm
平均值	50	0.45
标准差	5.26	0.06
变异系数/%	0.08	0.12

表 4 PP 织物袋与不同基底摩擦系数参考值

Table 4 Reference value of polypropylene geotextile bags with different basal friction coefficients

基底类型	基底摩擦系数	
	干燥	65%的相对湿度
黏性土	0.65	0.40
砂性土	0.65	0.86
碎石	0.70	0.74
混凝土	0.78	0.93
PP 织物袋	0.84	

由表 3 和表 4 可知,本试验所选用的 PP 织物袋的单位面积重量为 $50 g/m^2$,单位面积厚度为 0.45 mm,它与砂性土在干燥和 65%的相对湿度下基底摩擦系数分别为 0.65 和 0.86,说明 PP 织物袋如果作为坝后反滤体,当坝前水渗透到坝后,进入 PP 织物袋内,将增大它与土壤的摩擦系数,使得 PP 织物袋与坝坡下游接触更加稳定。

2.2 渗透破坏现象模拟试验结果与分析

2.2.1 坝体浸润线 当 2 个坝体发生渗透破坏且各个测压管的数值稳定时,2 个坝体浸润线对比如图 2。

由图 2 可知,当 2 个坝体发生渗透破坏时,原坝

和 PP 织物袋作反滤体的淤地坝各个测压管数值变化趋势相同,均为从坝前向坝后的测压管读数依次减小,即说明坝体内水位呈降低趋势。再对比 2 个坝体的浸润线,PP 织物袋作反滤体的淤地坝浸润线要比原坝低,而本试验除设置 PP 织物袋装填原状土作反滤体的试验处理外,其他试验处理均相同,说明 PP 织物袋装填原状土起到了降低坝体浸润线的作用。

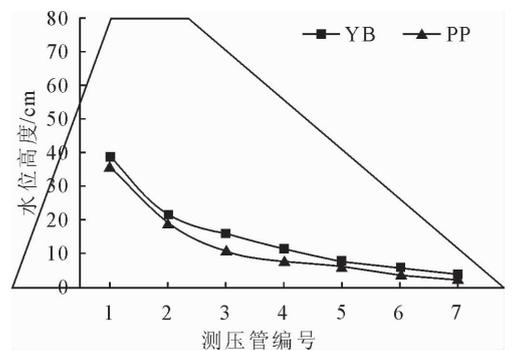


图 2 坝体浸润线对比

Fig. 2 Comparison of dam phreatic line

2.2.2 渗透历时 坝后渗透破坏现象模拟试验于 4 月 6 日 17:30 开始向坝前注水,4 月 20 日 8:30 原坝坝后土体开始出现裂缝,4 月 23 日 8:30 PP 织物袋作反滤体的淤地坝坝后土体开始出现裂缝。

从整个试验过程的历时来看,PP 织物袋装填原状土作反滤体的淤地坝要比原淤地坝坝后土体开始出现裂缝的时间要晚,本试验除设置反滤体外,其他处理均相同,因此可以断定 PP 织物袋延缓了渗透破坏开始发生的时间,主要原因为 PP 织物袋降低了坝体浸润线,使得 PP 织物袋作反滤体的淤地坝

坝体内水位高差要比原淤地坝坝体内水位高差低,所以水流在坝体内的流动速率相对原淤地坝要慢,导致 PP 织物袋装填原状土作反滤体的淤地坝要比原淤地坝坝后开始出现渗透的时间要晚。另外 PP 织物袋装填原状土作反滤体的淤地坝要比原淤地坝发生渗透破坏整个破坏过程的历时要长,其主要原因有两方面:一方面是上文提到的 PP 织物袋可以降低坝体浸润线,从而使得坝体内水位高差降低,水流在坝体内的渗透速率降低,从而使得整个渗透破坏用时延长;另一方面是由于 PP 织物袋袋体本身特殊的性质,PP 织物袋袋体的孔径大小可以使水流通过,而土体中较大颗粒不能通过^[17],所以 PP 织物袋装填原状土作反滤体的淤地坝相比原淤地坝通过渗透破坏形成的渗流通道要窄,尤其是下游坝坡坡面,PP 织物袋只容许水流和土体中的细小土颗粒通过,而土体大颗粒不能通过,所以形成的渗透通道相对较窄,再加之渗流速率较低,使得整个渗透破坏过程较为缓慢,用时较长。

2 个模拟坝各个测压管从注完水开始,一直到测压管内开始出水所用时间如图 3 所示。

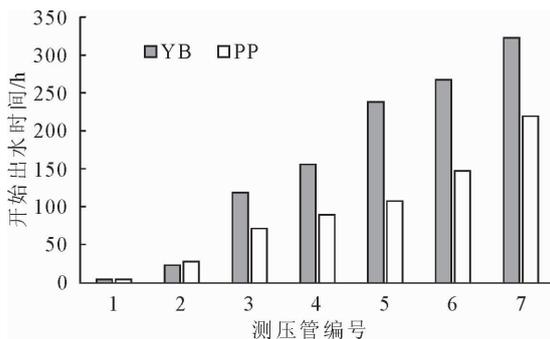


图 3 测压管开始出水时间对比

Fig. 3 Comparison of the start time when piezometric tube begins to have effluent

由图 3 可知,2 个淤地坝的测压管出水顺序依次为 1#~7# 测压管,这是因为坝前水是逐步从坝前慢慢通过土体渗向坝后,直到坝体完全发生渗透破坏。再对比 2 个淤地坝各个测压管的开始出水时间,会发现除 1# 和 2# 测压管开始出水时间基本相同外,其他 5 个测压管中 PP 织物袋装填原状土作反滤体的淤地坝都要比原淤地坝的出水时间晚,分析造成此现象的原因可能跟 PP 织物袋有关,但是 PP 织物袋主要铺筑在坝后的坝坡位置,影响测压管出水时间较大的也就是相对靠近坝后的 5#、6# 和 7# 测压管,而对于 3# 和 4# 测压管的出水时间影响并不大,所以造成此现象得原因可能与淤地坝的压实度有很大关系,虽然 2 个淤地坝都是按照 1.60 g/cm^3 的坝体干密度进行压实的,但是由于坝体每

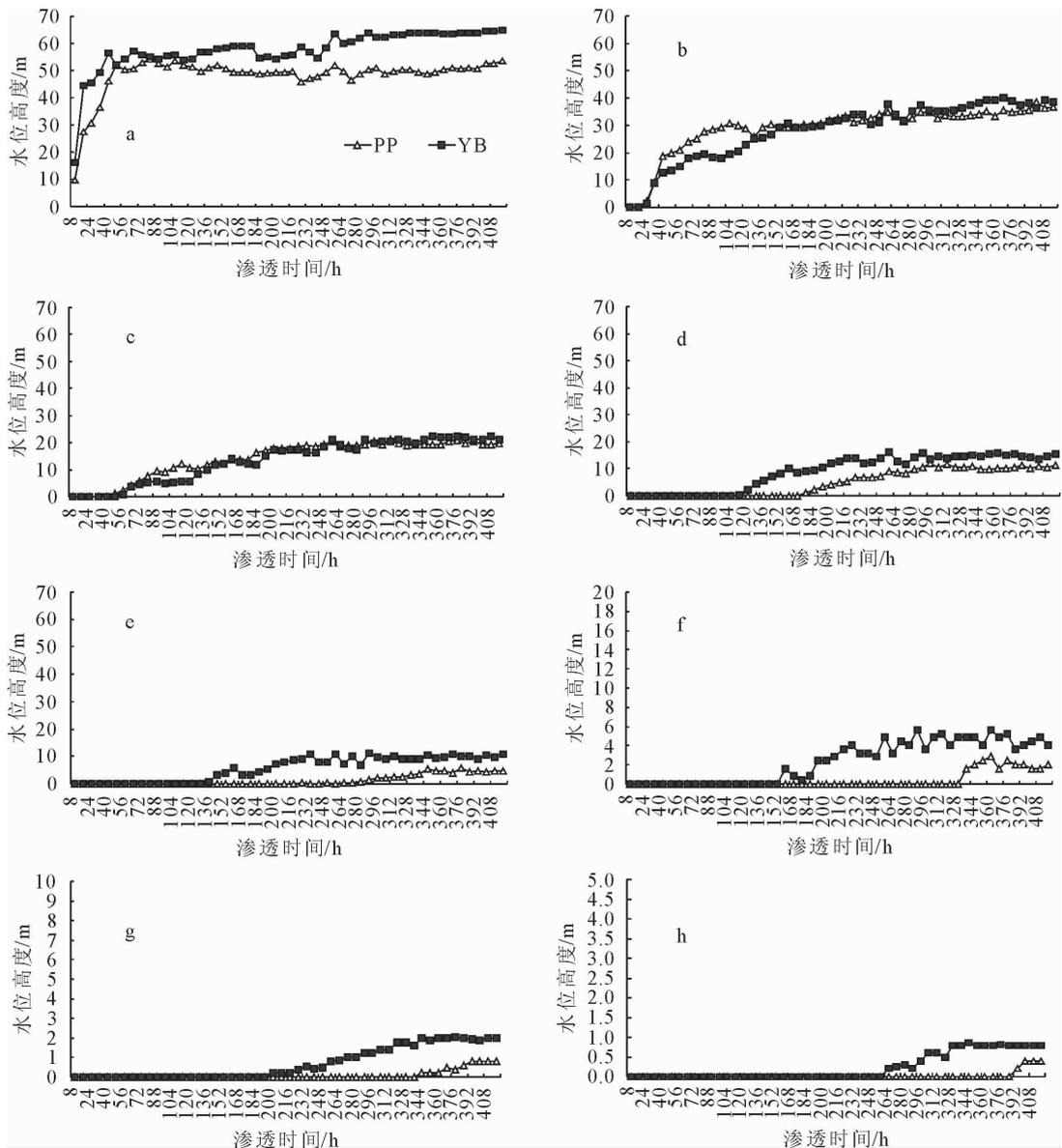
层的截面积较大,再加之人工压实,不可能保证每个淤地坝每层坝体的压实度都是均匀的,也不能完全保证 2 个淤地坝的压实度完全相同和均匀,所以才影响测压管的开始出水时间。

2.2.3 各个测压管水位高度分析 随着试验的进程,坝前水逐步向坝后渗透,导致坝体内的水位不断升高,这也就直观的反映在各个测压管随着试验进程的推进,水位逐步升高到一定程度后达到稳定水位。随着试验进程各个测压管内水位高度变化如图 4 所示。

由图 4 可知,随着试验进程的推进,各个测压管水位高度变化规律为:随着时间的变化,各个测压管水位高度逐步上升,达到一定水位高度后持续稳定不变。并且 PP 织物袋装填原状土作反滤体的淤地坝的测压管同一时间段水位高度基本低于原淤地坝的测压管水位高度。这是因为坝前水位保持不变,但是水流一直通过土坝向坝后渗透,久而久之,随着水流的渗透,坝体内的水位高度会逐步上升,土坝的含水率也会逐步升高,当某区域土体的含水率达到最大含水率,即土体达到饱和后,水位不再上升且保持稳定在一定高度,该高度即为使该区域坝体达到饱和的水位高度,而本试验安装在坝体侧壁的测压管内水位高度变化就直观地反映了这一点,先是逐步升高,后达到稳定保持不变。2 个坝体相比较,PP 织物袋装填原状土作反滤体的淤地坝的各个测压管水位高度同一时间段都是要高于原淤地坝的,但是从 1# 和 2# 测压管水位变化过程图来看,某些时段内 PP 织物袋装填原状土作反滤体的淤地坝的各个测压管水位高度是要低于原淤地坝的,分析此现象的原因可能与上述的坝体压实度有关,由于人工压实,不可能保证每隔淤地坝每层坝体的压实度都是均匀的,也不能完全保证 2 个淤地坝的压实度完全一样均匀,所以使得原淤地坝测压管内水位高度某些时间段内高于 PP 织物袋装填原状土作反滤体的淤地坝。而后面的 4#~7# 测压管相对较接近坝后,PP 织物袋的作用就体现出来了,即 PP 织物袋袋体只容许水流和土壤的部分小颗粒通过,而土壤较大颗粒不能通过,所以减慢了渗流速度,使得坝体内水位高度上升较为缓慢,测压管内水位高度变化相对于原淤地坝较为缓慢且最终达到的水位高度较低。

3 结论与讨论

随着渗透破坏的发生,原土坝坝体内各个部位的水位高度逐渐增加到一定数值后达到稳定,即当前区域土体达到饱和,坝体内水位高度从坝前向坝后总体呈降低趋势。



注: a、b. 1#测压管; c. 2#测压管; d. 3#测压管; e. 4#测压管; f. 5#测压管; g. 6#测压管; h. 7#测压管。

图4 各个测压管水位高度随时间变化折线

Fig. 4 Variation line chart of water level of each piezometric tube with time

由于PP织物袋袋体孔径只容许水流和小颗粒土壤通过,因此PP织物袋装填原状土作为反滤体在防治渗透破坏时,一方面可以减缓坝体内各个部位水位升高的速率并降低最大水位高度,使得坝体相对较难发生渗透破坏;另一方面可以将坝体内多余水分排出来,降低坝体浸润线,减缓渗透破坏的发生。

本试验只是定性研究了PP织物袋装填原状土作为反滤体对渗透破坏的影响,对于不同材质和规格的PP织物袋、PP织物袋不同的铺筑方式和连接方式等对渗透破坏的影响有待进一步研究,并在实践中不断探索和完善新的防渗措施。

参考文献:

[1] 杨森浩,颜婷燕,安亚明,等. 运用静力触探技术探求水坠坝流

态区位置的研究——以陕西省志丹县前拐沟淤地坝为例[J]. 西北林学院学报, 2015, 30(3): 187-190.

YANG S H, YAN T Y, AN Y M, *et al.* Seeking the flow condition location of sluicing-siltation earth dam with cone penetration test——a case study of Qianguaigou sluicing-siltation earth dam in Zhidan county of Shaanxi Province[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2015, 30(3): 187-190. (in Chinese)

[2] 颜婷燕,张武俊,许怀东,等. 中粉质壤土泥浆泵法修筑淤地坝人工排水管网布设优选研究[J]. 西北林学院学报, 2014, 29(5): 53-58.

YAN T Y, ZHANG W J, XU H D, *et al.* Optimization of the layout of pipe drainage for building check dam using mud pump in middle silt loam area[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2014, 29(5): 53-58. (in Chinese)

(下转第 230 页)

- phia, USA, 1974.
- [4] ROUGHGARDON J. Peachiness in the spatial distribution of a population caused by stochastic fluctuations in resources [J]. *Oikos*, 1977, 29: 52-59.
- [5] KOTLIAR N B, WIENS J A. Multiple scales of peachiness and patch structure: a hierarchical framework for the study of heterogeneity [J]. *Oikos*, 1990, 59: 253-260.
- [6] 郭建国. 景观生态学: 格局、过程尺度与等级[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [7] 傅伯杰, 等. 景观生态学原理及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 117-126.
- [8] MARINA Z, FRANCISCO P, DANIEL B. The jaguar's patches: viability of jaguar populations in fragmented landscapes [J]. *Ecological Modeling*, 2004, 174: 411-420.
- [9] 陈端吕, 李际平, 陈哲夫. 森林景观“斑块耦合网络”视角下森林经营的思考[J]. *西北林学院学报*, 2015, 30(5): 268-272.
CHEN D L, LI J P, CHEN Z F. Forestry management in perspective of coupling network of landscape patches[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2015, 30(5): 268-272. (in Chinese)
- [10] 刘畅, 刘亚, 刘海轩, 等. 游憩型城镇景观林内景观斑块类型特征研究[J]. *西北林学院学报*, 2016, 31(4): 305-311
LIU C, LIU Y, LIU H X, *et al.* Characteristics of in forest landscape patch types of recreational landscape forest in urban and suburban area[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2016, 31(4): 305-311. (in Chinese)
- [11] 刘灿然, 陈灵芝. 北京地区植被景观中斑块大小的分布特征[J]. *植物学报*, 1999, 41(2): 199-205.
- [12] BASKENT E Z, JORDAN G A. Characterizing spatial structure of forest landscape [J]. *Can J For Res*, 1995, 25: 1830-1849.
- [13] 何东进. 武夷山风景名胜区的景观格局动态及其环境分析[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2004.
- [14] 文克·E·德拉姆施塔德, 詹姆斯·D·奥尔森, 理查德·T·福曼. 景观设计学和土地利用规划中的景观生态原理[M]. 朱强, 黄丽玲, 俞孔坚, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [15] 何建源, 兰思仁, 刘初钊, 等. 武夷山研究—自然资源卷[M]. 厦门: 厦门大学出版社, 1994: 33-64.
- [16] 张春英, 张春玲. 植被景观指数随复合地形因子分异的变化规律[J]. *中国农学通报*, 2012, 28(1): 65-68.
- [17] 张春英, 卓德雄, 张祖柱, 等. 植被景观指数随一阶地形因子分异的变化规律[J]. *山西农业大学学报: 自然科学版*, 2010, 30(6): 536-541
- [18] 王静龙, 梁小筠. 非参数估计统计[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 1-5.
- [19] 王雪峰, 唐守正. 直径结构模拟中的核方法与直方图及列点法的比较分析[J]. *林业研究*, 1996(9): 469-474.
- [20] 崔恒建, 王雪峰. 核密度估计及其在直径分布研究中的应用[J]. *北京林业大学学报*, 1996, 18(2): 67-71.
CUI H J, WANG X F. Property of kernel density estimation and application in the diameter distribution[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 1996, 18(2): 67-71. (in Chinese)
- [21] 吴承祯, 洪伟, 吴继林, 等. 两种珍稀植物群落物种多度的分布的核方法研究[J]. *热带亚热带植物学报*, 2000, 8(4): 301-307.
WU C Z, HONG W, WU J L, *et al.* Studies on kernel density estimation of species abundance distribution in two communities of rear and endangered plants[J]. *Journal Tropical and Subtropical Botany*, 2000, 8(4): 301-307. (in Chinese)

(上接第 218 页)

- [3] 陈中鼎. 贵州省长顺县石漠化营造林工程技术设计[J]. *森林工程*, 2016, 32(2): 23-26.
CHEN Z D. Technical design of forest silviculture and afforestation project in stony desertification area of Changshun county of Guizhou Province[J]. *Forest Engineering*, 2016, 32(2): 23-26. (in Chinese)
- [4] 王利霞, 朱首军, 陈云明, 等. 黄土高原森林带人工油松林水土保持作用[J]. *西北林学院学报*, 2011, 26(4): 47-52.
WANG L X, ZHU S J, CHEN Y M, *et al.* Soil and water conservation function of *Pinus tabulae* formis plantation in the forest zone of Loess Plateau[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2011, 26(4): 47-52. (in Chinese)
- [5] 张勇, 李少毅. 陕北地区淤地坝建设现状、成效、问题与建议[J]. *中国水土保持*, 2003(5): 21-22.
- [6] 马宁. 陕北淤地坝现状调查与效益评价[D]. 杨陵: 西北农林科技大学, 2011.
- [7] 姜峻, 都全胜. 陕北淤地坝发展特点及其效益分析[J]. *中国农学通报*, 2008, 24(1): 503-509.
JIANG G J, DU Q S. The developing character and benefits analysis of check dams in North Shaanxi Province of Loess Plateau[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2008, 24(1): 503-509. (in Chinese)
- [8] 孙峰, 张顶立, 姚海波. 土坝坝体底部劈浆灌浆加固效果研究[J]. *岩土力学*, 2010, 31(4): 1187-1192.
SUN F, ZHANG D L, YAO H B. Study of effects of split grouting for reinforcing bottom of embankment[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(4): 1187-1192. (in Chinese)
- [9] 张启岳. 土石坝加固技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
- [10] 李思慎. 长江重要堤防隐蔽工程建设中的防渗处理[J]. *长江科学院院报*, 2000, 17(增刊): 4-8.
LI S S. Seepage prevention treatment in construction of hidden engineering for Changjiang's major levees[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2000, 17(Supp.): 4-8. (in Chinese)
- [11] 张家发, 吴昌瑜, 李胜常, 等. 堤防加固工程中防渗墙的防渗效果及应用条件研究[J]. *长江科学院院报*, 2001, 18(5): 56-60.
ZHANG J F, WU C Y, LI S C, *et al.* Seepage control efficiency and application conditions of cut-off wall used for dyke reinforcement[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2001, 18(5): 56-60. (in Chinese)
- [12] 陈永强, 贺事忠. 无纺土工布在庙滩水库坝体暗沟排水中的应用[J]. *广东水利水电*, 2010, 1(1): 54-56.
- [13] 李光录, 柳诗众, 邓民兴, 等. PP 织物袋梯田筑坎技术在陕南秦巴山区的应用[J]. *中国水土保持*, 2011(11): 29-31.
- [14] 刘平印. PP 织物袋梯田筑坎示范工程初探[J]. *陕西水利*, 2011(3): 79-80.
- [15] 高霞. PP 织物袋梯田筑坎型式及其稳定性分析[D]. 杨陵: 西北农林科技大学, 2013.
- [16] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 66-97.
- [17] 潘建刚. 无纺土工合成材料编织袋在防汛抢险中的应用研究[J]. *江苏水利*, 2011(9): 31-33.