

文章编号: 1000-7709(2019)06-0062-04

土壤固化剂在陕北淤地坝渗透破坏治理中的应用

路东敏^a, 朱首军^{a,b}, 林成行^a, 巴明坤^a, 赵宇^a

(西北农林科技大学 a. 水土保持研究所; b. 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 砂土区淤地坝破坏的主要形式是渗流, 在淤地坝的反滤体中运用土壤固化剂能够防止渗透破坏的发生。为探寻一种最优配比的无机固化剂, 以陕西省榆林市靖边县沙旋沟淤地坝筑坝土料为例, 通过原土料和添加不同配比固化剂土料的渗透破坏试验, 对比分析不同配比固化剂的完全破坏临界水力坡降来寻找最优配比的固化剂, 并将选出的最优固化剂应用于模型坝的试验中来检验固化剂的实际效果。结果表明, 所有土料渗流流速在渗透破坏前均随水力坡降的增大而增大; 添加固化剂降低了土样的渗流流速, 增加了土样的抗渗能力和稳定性, 其中添加 5% 的无机复合固化剂土料的效果最好; 在模型试验中, 添加无机复合固化剂的土料对于“坝后流泥”现象具有一定的修复效果。

关键词: 固化剂; 轻粉质壤土; 渗流流速; 水力坡降

中图分类号: TV698.2

文献标志码: A

1 引言

淤地坝在陕北地区分布广泛, 2009 年陕西省水土保持局调查显示陕北地区淤地坝总数为 36 216 座, 其中大、中型淤地坝 11 470 座, 占陕西省淤地坝总数的 29.5%^[1]。淤地坝在调整产业结构、促进退耕还林还草、拦泥淤地、改善生态环境等方面发挥了巨大作用, 是水土保持一项重要的工程措施^[2]。淤地坝大多修建在相对不透水的土质河床上, 坝后易产生蓄水从而抬升坝体的浸润线, 下游半个坝坡处于饱和状态, 在水力、冻融和重力作用下, 下游坝坡常出现滑塌、流泥等现象, 危及大坝安全, 最终导致溃坝^[3]。对于淤地坝来说, 渗透破坏是其存在的最主要问题, 若当地缺乏砂石料而未设置反滤体, 则易产生渗透破坏^[4], 解决该问题的方式是安装反滤体来降低坝体浸润线和渗流流速^[5]。因此, 本文以靖边地区筑坝土料为试验对象, 通过添加固化剂来改良筑坝土料的抗渗性能^[6], 并在模型坝上进行试验, 旨在探索一种既能渗流又不携走土粒的土料来替代反滤体, 以达到提高土体渗透稳定性的目的。

2 土壤固化剂材料来源及渗透试验方法

2.1 取样地点

榆林市西南部靖边县东部高家沟乡的一处淤地坝, 地处东经 109°20′、北纬 38°03′。根据常规土工试验, 研究区土料为轻粉质壤土, 土壤颗粒粒径小于 0.005 mm 的含量为 4.1%, 颗粒级配不连续, 中间部分颗粒级配缺失, 液限为 27.0, 塑限 W_p 为 14.3, 塑性指数 I_p 为 13, 试验土样最大干密度 95% 的置信区间为 [1.71, 1.75], 最优含水率 95% 的置信区间为 [13.50%, 13.92%], 渗透系数为 1.0×10^{-3} cm/s。

2.2 试验材料和方法

试验选择两种固化剂: ①粉煤灰固化剂; ②按粉煤灰: 氧化钙: 氧化铝: 氧化镁 = 24: 2: 1: 1 的比例混合组成的无机复合固化剂^[7,8]。

试验流程为先通过自制的渗透破坏装置进行固化剂的选择试验, 然后用选出的较优固化剂进行配比试验, 最后利用最优配比的固化剂进行模型坝修复试验。

收稿日期: 2018-06-13, 修回日期: 2018-09-13

基金项目: 陕西省水利科技计划项目(A2990216042)

作者简介: 路东敏(1992-), 女, 硕士研究生, 研究方向为水土保持, E-mail: 1048462503@qq.com

通讯作者: 朱首军(1965-), 男, 博士、副教授、硕导, 研究方向为水土保持工程、小流域综合治理, E-mail: zhushoujun@nwsuaf.edu.cn

2.3 固化剂配比设计

将粉煤灰固化剂和无机复合固化剂以干粉的形式添加到轻粉质壤土中(表 1),固化剂选择试验的固化剂掺和干重比率均为 5%,固化剂配比试验中无机复合固化剂掺和干重比率分别为 4%、5%、6%,试验土样的干密度均为 1.65 g/cm³,含水率为 15%,将固化剂材料和轻粉质壤土充分搅拌,按照预先设定的含水率用喷雾法加水,充分搅拌后密封养护 24 h,使固化剂与土样充分反应并使水分分布均匀。

表 1 固化剂配比设计

Tab.1 Ratio design of curing agent

项目	掺量/%
轻粉质壤土渗透破坏试验	0
添加粉煤灰固化剂的渗透破坏试验	5
添加无机复合固化剂的渗透破坏试验	4,5,6

2.4 试验仪器

2.4.1 渗透破坏试验仪器

试验装置为一套自制改良的渗透变形仪,见图 1。

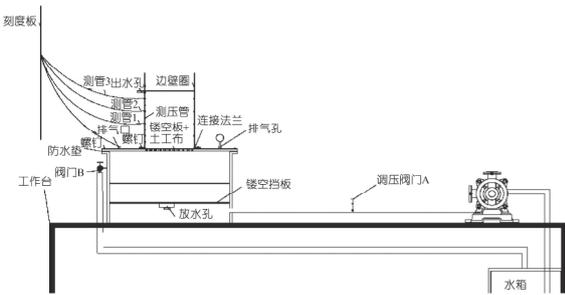


图 1 渗透破坏装置图

Fig.1 Seepage failure device diagram

试验仪器由加压装置和试验装置^[9]两部分组成。加压装置由加压水箱、扬程为 20 m 的自吸水泵、供水水箱和管道组成,能够提供稳定回流和压力;试验装置由刻度板、测管、出水口及直径为 16 cm 的 PVC 管道组成,其中测管 1、2、3 分别用来观测试验土样 10、15、20 cm 处的水头高度^[9],出水口位于试验装置 22cm 处,用来收集径流和

泥沙且与土样顶部持平。本文通过测量土样内部各处的水头高度来表现土样内部的压强变化,因此在排气孔处连接一根测管用来测量总水头差。

试验采取逐渐加压的方法,每次上升的水头为 5 cm。利用渗透破坏仪器,在变水头作用下分别进行原状土与添加固化剂土料的渗透破坏试验,分析计算临界水力坡降、渗流流速等^[10]。

2.4.2 模拟坝体渗流装置

坝体渗流装置见图 2。试验仪器由供压装置和模型两部分组成。供压装置能够给模型中的坝体提供一个 3.5 m 的恒定水头。为了观察试验现象模型采用透明的亚克力板制作槽子,基于水力学的几何相似和材料相似原理^[11],模拟坝体的设计规格为 75 cm×30 cm×45 cm(长×宽×高),坝后坡度为 45°,采用亚克力板保持不透水来模拟实际中淤地坝的不透水坝基。模型侧边每隔 10 cm 安装一个测管(直径为 1 cm 的透明软管)用来测量各处的水头高度,坝后为开放式用来收集径流。

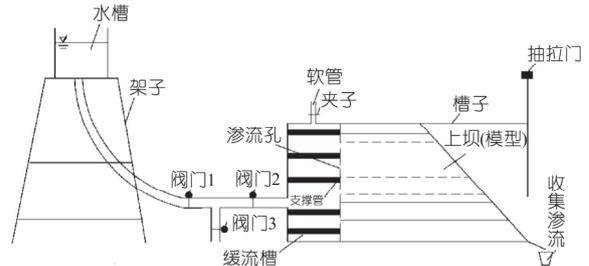


图 2 模拟坝体渗流装置

Fig.2 Seepage device for dam body simulation

3 土壤固化剂在淤地坝渗透破坏治理中的应用

3.1 固化剂挑选试验现象对比分析

3 种土样试验过程中的渗透坡降、渗流流速及试验现象见表 2。

表 2 试验现象

Tab.2 Record of test phenomena

土样	渗透坡降	渗流速度/(m·s ⁻¹)	试验现象
轻粉质壤土	1.820 保持	1.94×10 ⁻³	装置内土体饱和,土体稍微膨胀,各测管均无出水
	1.820~3.636	1.94×10 ⁻³ ~4.48×10 ⁻³	土体表面隆起,表面出现裂纹和沸点,上部有明显的积水,测管 1、测管 2、测管 3 处均无明显出水,装置内土体出现浑浊,渗流收集处有零散的泥沙流出,土体逐渐向洞口移动
	3.636~4.681	4.48×10 ⁻³ ~4.83×10 ⁻³	土体稍被顶起,径流收集处有泥沙持续流出,土体持续升高,关闭阀门后土体下降后试样表面出现一个较小的破坏通道
添加 5%粉煤灰土样	1.820 保持	0.57×10 ⁻³	装置内土体饱和,土体明显膨胀,颜色加深,各测管均无水,径流收集处开始渗水
	1.820~3.636	0.68×10 ⁻³ ~4.37×10 ⁻³	土体表面隆起,表面出现裂纹和沸点,上部有明显的积水,测管 1、测管 2、测管 3 处无水
	3.636~6.363	4.37×10 ⁻³ ~7.28×10 ⁻³	土体完全顶起,径流收集处有泥沙持续流出,土体持续升高,关闭阀门后土体下降后试样表面出现一个小型的破坏通道
添加 5%无机复合固化剂的土样	1.820 保持	1.26×10 ⁻³	装置内土体饱和,颜色加深,测管 1、2、3 内均无明显水头,径流收集处有稳定径流
	1.820~3.636	1.26×10 ⁻³ ~3.34×10 ⁻³	土体表面未出现沸点和裂纹,土样上部有明显的积水,测管 1、2、3 的水头为 0
	3.636~8.863	3.34×10 ⁻³ ~10.63×10 ⁻³	土体表面有细微裂缝,但是未见流土和破坏

(1) 渗流情况。在同一水力坡降的情况下, 添加两种固化剂土样的渗流流速均比轻粉质壤土低, 其中添加无机复合固化剂试验土样的渗流流速最小, 渗流流速越小能够带走的土壤颗粒越少, 表明添加无机复合固化剂土样的抵抗渗流破坏能力最强。

(2) 土体变形情况。经 24 h 加压饱和后轻粉质壤土产生明显变形, 添加粉煤灰固化剂的土样与其相比变形程度较大, 添加无机复合固化剂的土样未产生变形, 表明在设定的初始水头的作用下添加粉煤灰固化剂会使土样内部颗粒的移位更加明显, 而无机复合固化剂能够明显减少土样内部颗粒的位移情况; 轻粉质壤土在产生沸点后立刻出现流泥现象, 添加粉煤灰固化剂的土样虽然变形严重, 但在土样变形后逐渐增加水头高度才开始缓慢形成渗流通道进而产生流泥, 表明前者土样内部已产生了一条颗粒移动通道而后者未产生通道, 说明后者增加了土样颗粒间的摩阻力; 在水力坡降为 8.863 时, 添加无机复合固化剂土样表面产生了裂纹, 未见沸点和流土出现, 说明在水压力的作用下土样产生了机械破坏, 但未形成渗流通道, 表明无机复合固化剂增加了土样颗粒间的摩阻力和渗流稳定性。

(3) 水力坡降。添加粉煤灰固化剂对于土壤颗粒的开始移动和完全破坏的水力坡降都有一定的提高, 但添加无机复合固化剂使土壤颗粒开始移动的水力坡降成倍提高, 且在试验过程中未出现渗透破坏现象, 所以添加无机复合固化剂土样的渗透稳定性最好。

图 3 为土样渗流流速变化。结合图 3、表 1 可知, 在第一颗土粒移动前, 随着水力坡降的增大, 三种土样的渗流流速均随之增大, 几乎呈线性增长的趋势。其中轻粉质壤土由于土壤孔隙较大, 在增加水头初期较小颗粒易被带出, 形成细微的通道, 致使其初期渗流流速较大, 且在第一颗土粒移动后, 随着局部水压的迅速增大, 渗流量随之增大, 水压使颗粒重新分配并迅速形成涌道, 使土样出现浑浊状态甚至形成巨大的破坏通道; 添加粉煤灰固化剂土样的变化最不规则, 渗流流速呈先迅速增加后缓慢增加的趋势, 从第一颗颗粒开

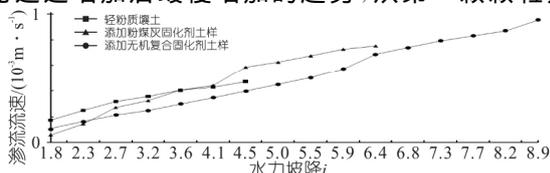


图 3 渗流流速变化图

Fig.3 Seepage velocity profile

始移动时土样的变化情况就与轻粉质壤土一致。在一定水头高度范围内, 粉煤灰固化剂通过增加渗流流速能够达到减轻渗透破坏的目的, 但随着水头高度和渗流流速的逐渐增加, 渗流对土壤颗粒的带动作用也迅速增加, 土壤颗粒间的凝聚力小于渗流对土壤颗粒的带动作用, 渗流流速的增加反而加快土样的渗透破坏速度; 在逐渐增加水头高度的过程中, 添加无机复合固化剂土样在试验最后也未发生渗透破坏现象且其渗流流速几乎完全呈线性增长的趋势, 说明土样内部未形成渗流通道, 土粒分布均匀且凝聚力较大。

综合试验现象、水力坡降和渗流流速的线性关系曲线并对比分析, 选择的固化剂为无机复合固化剂。

3.2 固化剂配比试验结果

试验过程中土体变形情况及试验现象并无明显差异, 具体结果见图 4。

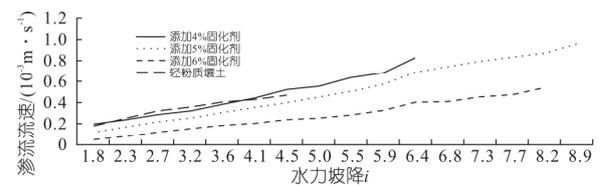


图 4 渗流流速变化图

Fig.4 Seepage velocity profile

由图 4 可看出, 随着无机复合固化剂含量的增加, 土样的渗流流速降低, 根据伯努利方程, 随着渗流流速增大, 土样内部压力越大、土壤颗粒越不稳定。轻粉质壤土、添加 4%、6% 无机复合固化剂土样渗透破坏的临界水力坡降分别为 4.5、6.4, 添加 5% 无机复合固化剂土样在水力坡降为 8.9 时土样表面开始出现少许裂纹且未发生渗透破坏现象, 说明添加 5% 固化剂时土样抵抗渗透破坏的能力最优。

将 3 种配比的固化剂与轻粉质壤土进行对比分析, 发现 3 种配比的固化剂都可以增加土样的临界水力坡降即增强土样的渗透稳定性。结合试验结果, 选择提高水力坡降效果最优及渗透能力适中的添加 5% 固化剂的土样进行模型坝修复试验。

3.3 模型坝试验

试验的总水头差为 3.5 m, 坝内土体密度为 1.65 g/cm³, 含水率为 15%, 在土体饱和后坝后开始出现渗流, 试验持续 72 h 后坝后开始出现流泥现象, 试验继续直至坝后出现垮塌。渗透破坏模拟数据见表 3。其中破坏前后渗流流速分别为 0.90 × 10⁻³、1.49 × 10⁻³ m/s, 采用固化剂修复后渗流流速为 0.25 × 10⁻³ m/s。与渗透破坏发生前

表 3 各个测管的压强变化情况

土料类型	测管 1	测管 2	测管 3	测管 4	测管 5	测管 6
渗透破坏	25.0	20	16	10	8.0	7
固化剂修复后	17.5	12	7	4	3.5	2

相比,渗透破坏后的渗流流速明显成倍增加,随着渗流的产生伴有流泥现象和微小的滑塌变形情况,说明土样的内部结构遭到破坏、形成渗流通道,破坏发生部位的土壤颗粒被渗流带出。经过无机复合固化剂修复后土样的渗透流速明显降低、流泥现象停止,说明固化剂增加了土样的抗渗能力和土样内部的稳定性。根据模型坝底部各测管内的水头高度绘制坝体浸润线^[12],见图 5。

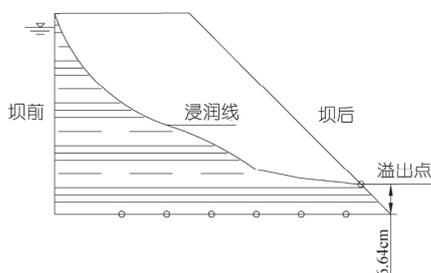


图 5 渗透破坏浸润线

Fig.5 Seepage velocity profile

由图 5 可知,模型的渗透部位距坝后最底端横向和纵向的距离均为 6.64 cm,将发生渗透破坏部位周围 5 cm 全部挖除,再将混合均匀添加固化剂的土样夯实到破坏发生部位,继续试验发现坝后只出现流水未见流泥情况且无滑塌,说明固化剂增加了土样内部颗粒的稳定性;通过各个测管的水头高度绘出渗透破坏前后的浸润曲线,对比发现固化剂能够降低坝体的浸润线和溢出点,使得坝体内水位降低,减少了对边坡的压力(表 3),降低了坝后的渗流流速,使得坝后边坡更加稳定,对坝后流泥渗透破坏现象具有一定的修复作用。

4 结论

a.随着水力坡降的增大所有土样的渗流流速

都增大。

b.与粉煤灰固化剂相比无机复合固化剂在增加土样内部颗粒稳定性和增强土样抗渗能力方面表现较优,其中添加 5%的无机复合固化剂改良效果优于添加其他含量固化剂的土样。

c.模型坝的渗透破坏发生部位位于坝后下部,且流泥过后伴随坍塌出现;通过渗透破坏试验选择的固化剂能较好地降低坝体内水位和渗流流速、增加坝后边坡的稳定性,对“坝后流泥”这一渗透破坏现象具有一定的修复作用。

参考文献:

- [1] 马宁,朱首军,王盼.陕北大、中型淤地坝现状调查与分析[J].水土保持通报,2011,31(3):155-160.
- [2] 李勉,杨剑锋,侯建才,王茂沟淤地坝坝系建设的生态环境效益分析[J].水土保持研究,2006,13(5):145-147.
- [3] 安亚明.陕北靖边地区淤地坝渗透破坏机理及土工布在渗透破坏治理中的应用试验研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2016.
- [4] 郑高峰.定边县病险淤地坝除险加固探讨[J].陕西水利,2012(3):87-88.
- [5] 张建成.浅析榆林市淤地坝存在的问题与加固对策[J].陕西水利,2011(2):171-172.
- [6] 张冠华,牛俊,孙金伟,等.土壤固化剂及其水土保持应用研究进展[J].土壤,2018,50(1):28-34.
- [7] 赵亮,唐泽军.粉煤灰对沙质土壤物理特性的影响[J].水土保持学报,2009,23(6):178-181,202.
- [8] 杨林,张秉夏.TG-2型土壤固化剂水泥石灰土的强度和稳定性试验[J].公路交通科技,2013,30(9):27-32.
- [9] 杨忠彦,贾志,朱挺,等.地热井套管外水位测管系统的设计与试验应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2015,42(11):15-19.
- [10] Yin J H. FE Modelling of Seepage in Embankment Soils with Piping Zone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,1998,17(6):679-686.
- [11] 仵锋锋,曹平,万琳辉.相似理论及其在模拟试验中的应用[J].采矿技术,2007,7(4):64-65,78.
- [12] Shigeki M, Yoshiyuki S, Yunhong W. Fractal Structure of Equipotential Curves on a Continuum Percolation Model[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications,2012,391(23):5 802-5 809.

Application of Soil Stabilizer in Seepage Failure Control of Silt Dam in Northern Shaanxi

LU Dong-min^a, ZHU Shou-jun^{a,b}, LIN Cheng-hang^a, BA Ming-kun^a, ZHAO Yu^a

(a. Institute of Soil and Water Conservation; b. College of Resources and Environment, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China)

Abstract: Seepage is the main failure form of silt dam in sandy soil area. Application of soil stabilizer in filter of silt dam can prevent seepage damage. In order to search for an optimal ratio of inorganic stabilizer, taking the soil material of Shaxuangou silt dam in Jingbian County, Yulin City, Shaanxi Province as an example, the complete damage critical hydraulic slope of different proportion stabilizer was comparative analysis based on the penetration failure test of raw soil and soil with different proportion of stabilizer. The selected optimal stabilizer was used to the test of the model dam for verifying the actual effect of the stabilizer. The results show that the seepage velocity of all soil materials increases with the increase of hydraulic gradient before seepage failure; The addition of stabilizer reduced the velocity of soil sample and increased the impermeability and stability of the soil sample; the effect of adding 5% inorganic composite stabilizer soil sample is the best; In the model dam test, the soil sample with inorganic composite stabilizer has a certain effect on repairing the phenomenon of "flowing mud behind dam".

Key words: stabilizer; light silty loam; seepage velocity; hydraulic gradient