

水流对土石坝心墙裂缝在反滤层保护下的冲蚀特性*

张朝晖¹, 李 振²

(1 杨凌职业技术学院, 陕西 杨陵 712100; 2 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨陵 712100)

[摘 要] 为了解水流冲刷作用下反滤层对土石坝心墙裂缝发展保护作用的特点和机理, 以黑河土石坝心墙裂缝冲刷试验为例, 分别采用常水头和变水头两种方法, 探讨了土石坝心墙裂缝在水流冲刷过程中的特点。结果表明, 宽度不大的裂缝在合适的反滤层保护下, 能防止心墙土体被水流冲刷。

[关键词] 反滤层; 心墙裂缝; 冲刷试验

[中图分类号] TV 698 2⁺ 31

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2003)04-0171-04

土石坝在不均匀沉陷及水力劈裂作用下会产生各种裂缝, 防渗体产生渗透变形的主要因素是防渗体的开裂, 裂缝一旦出现, 就会使防渗体开裂处的渗透性能明显提高, 而抗渗强度显著降低从而造成事故; 据统计, 我国土石坝水库发生裂缝事故占其总事故的 25.3%, 大坝裂缝有 80% 以上是发生在蓄水运行的初期^[1], 而国外在 1965 年以前建造的高 100 m 以上的土石坝中也有 25% 左右发生了裂缝^[2]。可见, 裂缝是土石坝防渗体比较常见的现象。这就要求工程设计人员不但要精心设计、防止坝体裂缝, 而且要对防渗体产生裂缝后的渗流特点有一定了解, 从而掌握防渗体一旦出现裂缝的应对措施; 目前国内外的试验大多数都集中在研究裂缝产生的原因, 而对在反滤层保护下水流对裂缝冲蚀特性的研究涉及

较少; 本研究以黑河大坝心墙的裂缝冲刷试验为对象, 讨论裂缝的渗流特点。

1 材料与方法

1.1 材 料

试验材料为黑河土石坝心墙土料及其反滤料。试验所用的心墙土料为粉质粘土, 颗粒组成见图 1, 1~3 号土样的粘粒含量分别为 15.1%, 17.6% 和 13.9%, 不均匀系数分别为 16.0, 25.7 和 11.9, 根据钠离子的分析及针孔试验结果, 它们均为非分散性土; 反滤砂的颗粒组成见图 1 中的曲线 4~9 号, 试验所用反滤砂的特征粒径值及不均匀系数见表 1。

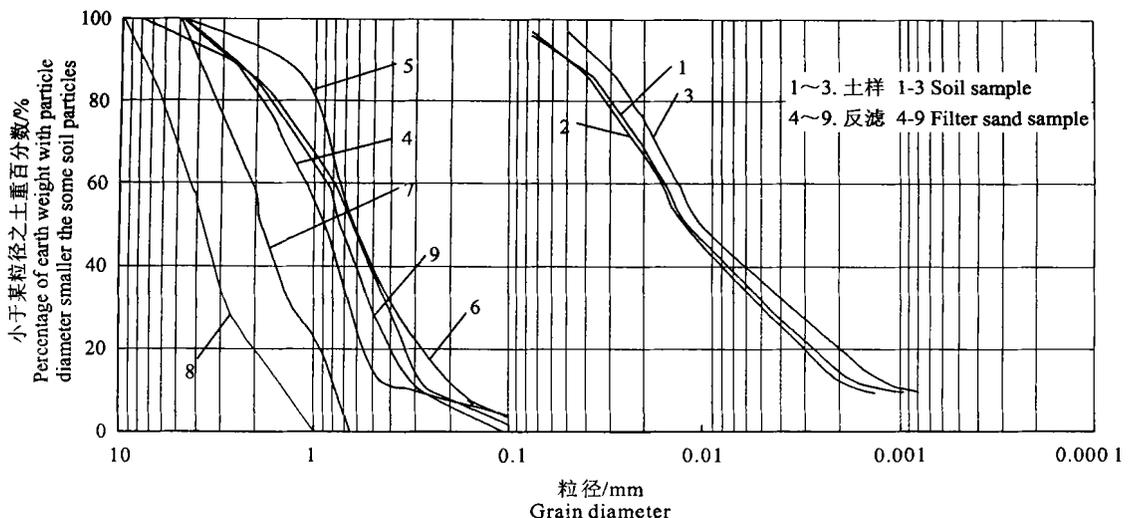


图 1 各试样的级配曲线

Fig. 1 Curve of grade for every sample

* [收稿日期] 2003-02-27

[作者简介] 张朝晖(1958-), 男, 陕西周至人, 副教授, 主要从事水利工程教学及教学管理研究。

表 1 反滤砂特征粒径及不均匀系数

Table 1 Characteristic diameter and asymmetry modulus for sand

试样编号 Sample number	D_{85}	D_{60}	D_{15}	D_{10}	不均匀系数 Coefficient of unifor mity
4	2.22	1.10	0.50	0.29	3.8
5	1.10	0.72	0.30	0.25	2.9
6	2.01	0.80	0.21	0.18	4.4
7	3.70	2.10	0.80	0.70	3.0
8	7.02	4.30	1.70	1.50	2.9
9	2.03	0.87	0.32	0.28	3.1

为了有效地控制反滤层的过水能力,防止裂缝内的冲蚀流速及土粒流失,根据《碾压式土石坝设计规范》SDJ218-84 要求,反滤砂的特征粒径 D_{15} 分别与土料的特征粒径 d_{15} 和 d_{85} 的比值应满足透水性和保土性的要求,即

透水性: $D_{15}/d_{15} \geq 5$,

保土性: $D_{15}/d_{85} \geq 4 \sim 5$ 。

经计算可知,本次试验所用的反滤砂和心墙土料均满足规范规定的透水性要求,但保土性要求基本不满足规范规定。

1.2 试验方法

试验采用直径为 $\phi = 10$ cm 的反滤层试验仪^[3]。制样密度按大坝的设计干密度土样为 1.70 g/cm³,反滤砂的制样密度按各种砂的设计密度进行控制;土样的裂缝分别采取 5, 2, 1 mm 3 种裂缝开度^[4]。制样时,先用不同厚度的成缝板把土样分为两部分,用千斤顶一次压至控制高度 4 cm 而形成模拟裂缝,但成缝板并不穿过反滤砂;然后再制反滤层,反滤砂样厚度 5 cm,分两层击至制样高度,最后抽去成缝板。

为了模拟水库在蓄水期和渗流稳定期水流对心墙裂缝所产生的影响,分在变水头作用下反滤砂位于土样的上游和在常水头作用下反滤砂位于土样的下游两种情况进行试验。

1.2.1 常水头裂缝冲刷试验 在常水头作用下反滤砂位于土样的下游时,进水段装以粒径为 $0.5 \sim 1$ cm 的卵石,用以减缓水流的冲击作用,反滤砂样后部采用铜丝网保护,铜丝网网眼直径为 0.5 mm。最后按竖向裂缝安装仪器,并分别在土样裂缝的进口和出口以及反滤砂的后部安装侧压管,用以观测试验过程中裂缝的进出口及反滤砂内部的水头变化。

分别对 3 种有裂缝的土样在反滤砂的保护下突然施加 15 m 的水头进行定水头试验,试验持续 3 h 观测其裂缝的冲蚀、愈合情况,并测定记录渗水量、渗流时间及测压管水头高,根据公式(1)~(3)分别计算裂缝进出口处的流量、渗透坡降和缝中的渗水

流速。

$$q = \frac{Q}{T}, \quad (1)$$

$$i = \frac{\Delta H}{L}, \quad (2)$$

$$V = \frac{q}{A}. \quad (3)$$

式中, q 为渗流量 (cm³ · s⁻¹); Q 为在时间 T 内的渗水量 (cm³); ΔH 为上下游测压管水头差 (cm); L 为与水头差 ΔH 相应的渗径长度 (cm); i 为渗透坡降; V 为缝隙内的流速 (cm · s⁻¹); A 为裂缝断面面积 (cm²)。

1.2.2 变水头裂缝冲刷试验 在变水头作用下反滤砂位于土样的上游时,进水段和出水段都装有粒径为 $0.5 \sim 1$ cm 的卵石,用以减缓水流的冲击作用;反滤砂样前部不采用任何材料进行保护。最后按竖向裂缝安装仪器,并分别在土样裂缝的进口和出口以及反滤砂的后部安装侧压管,用以观测试验过程中裂缝的进出口及反滤砂内部的水头变化,调整试验水头进行试验。

在试验过程中,对 3 种不同裂缝的土样在反滤砂的保护下逐渐升高水头,在每级压力下渗透稳定后再施加下一级压力直至 15 m,观察在施加每级压力开始到渗透稳定这段时间内的水流颜色和缝隙的冲刷变化情况,并同时测定记录测压管水位、渗水量及渗流时间,根据公式(1)~(3)及公式(4)分别计算流量、渗透坡降、裂缝开始和结束时的流量和反滤层中的渗透系数。

$$k = \frac{V}{i} \quad (4)$$

式中, k 为渗透系数 (cm · s⁻¹)。

2 结果与分析

2.1 常水头作用下土样裂缝冲刷的特点

根据在常水头作用下裂缝冲刷试验测定的渗水量、渗流时间及测压管水头高,计算得到裂缝进出口处的流量、渗透坡降和缝中的渗水

流速, 结果见表2。

表2 常水头作用下裂缝冲刷试验结果

Table 2 Result of crevice scour test in constant press

接触关系 Touch connection	缝宽/mm Crack width	反滤砂 干密度/ ($g \cdot cm^{-3}$) Dry density	流量/($cm^3 \cdot s^{-1}$) Quantity of flow		流速/($cm \cdot s^{-1}$) Velocity of flow		坡降 Seepage rate		稳定 时间/m in Stable time
			开始 Start	结束 Finish	开始 Start	结束 Finish	开始 Start	结束 Finish	
1/5	5	1.726	30.87	9.54	7.2	2.2	1.310	1.421	60
1/5	2	1.752	56.88	20.01	26.53	9.35	1.340	1.384	60
1/5	5	1.739	59.52	17.00	13.89	3.96	927	1.330	80
2/5	1	1.754	0.72	1.42	0.69	1.35	1.525	1.560	5
2/5	2	1.749	33.91	11.81	15.83	5.52	1.455	1.503	60
2/5	2	1.738	23.17	18.11	10.81	8.46	1.353	1.361	30
3/4	5	1.908	43.34	8.92	10.11	2.08	883	1.263	45
3/4	5	1.908	46.34	20.54	10.81	4.79	205	300	45
3/4	5	1.908	30.1	14.7	7.02	3.43	632	987	45
3/4	2	1.908	50.5	19.9	23.6	9.30	920	1.275	35
3/4	2	1.908	29.8	14.7	13.9	6.87	385	875	40
3/4	1	1.908	1.69	0.094	1.61	0.09	10	29	5
3/4	1	1.908	5.21	2.08	4.96	1.98	1.355	1.384	10
3/5	5	1.747	40.8	5.1	9.51	1.19	1.412	1.541	80
3/5	5	1.747	102.5	6.5	23.9	1.52	1.204	1.532	80
3/5	5	1.747	81.2	5.1	18.9	1.19	1.287	1.458	80
3/5	2	1.747	52.5	5.5	24.5	2.57	1.424	1.525	50
3/5	1	1.747	16.6	2.8	7.47	2.67	1.510	1.521	30

由试验观测的现象并结合表2的结果可以看出, 在常水头冲刷作用下, 有反滤砂保护的土样裂缝的变化有以下特点:

(1) 在水力作用下有一小部分细颗粒被水流带出。在水力作用下, 开始时反滤砂与铜丝网结合部位附近小于0.5 mm的细颗粒有一部分被水流带出, 水流浑浊。被水流带走细颗粒的质量不但与缝的开度有关, 而且与水的流速有关, 试验测得被带出的细颗粒1 mm的缝在1.30 g左右, 2 mm的缝在2.3 g左右, 5 mm的缝在2.65 g左右。由此可见, 随着裂缝开度的增大, 从整体上讲, 流失的细小颗粒的质量也逐渐增加。

(2) 在出口部位形成次生反滤层防止了水流对裂缝的冲蚀。在试验开始后2~3 min内水流逐渐变清, 由表1可以看到, 试验结束时缝出口处的渗透坡较试验开始时大, 这是由于水流通过反滤砂时, 随着时间的推移, 在水流作用下反滤砂内部的细颗粒和与裂缝接触处附近的细颗粒逐渐向出口处移动, 颗粒重新排列, 在出口部位形成次生反滤层, 使反滤砂对细颗粒起到了保护作用, 从而使渗透坡增大, 水流逐渐变清, 这也说明在水流冲蚀过程中, 反滤砂具有调节裂缝中渗透坡的作用, 从而防止了水流对裂缝的冲蚀。

(3) 随着时间的推移, 试样内水流的流速、流量

逐渐减小, 并趋于稳定。

随着试验的进行, 裂缝开度为5 mm的裂缝在30~80 min内流速趋于稳定, 裂缝开度为2 mm的裂缝在20~60 min内趋于稳定, 裂缝开度为1 mm的裂缝在5~30 min内就趋于稳定。各试样稳定后的流量、流速都较小; 在整个试验过程中, 未发现裂缝受到水流的冲蚀, 但由于试样遇水增湿, 体积增大, 使裂缝开度变小, 除一个试样外, 其余均未愈合; 试验结束后, 释放试验水头, 各试样的裂缝逐渐愈合。

2.2 变水头作用下土样裂缝冲刷的特点

根据在变水头作用下裂缝冲刷试验测定记录的测压管水位、渗水量及渗流时间, 计算得到裂缝开始和结束时的流量、渗透坡降和反滤层中的渗透系数, 结果见表3。

由试验观测的现象并结合表3的结果可以看出, 有反滤砂保护的土样裂缝在变水头冲刷作用下, 裂缝的变化有以下特点:

(1) 在变水头的作用下, 随着时间的推移渗水由试验开始时的浑浊变清, 流速由大变小, 坡降增大。由于试样遇水增湿, 体积增大, 使裂缝开度变小, 并且在渗透力的作用下, 上游的砂粒被渗水带入缝隙造成淤积而堵塞通道, 从而导致水流通过裂缝的流速减小, 渗透坡降增大。从表3可以看出, 对同一种接触关系的反滤试验来讲, 5 mm开度的裂缝在试验

开始时的缝内流速较大, 试验结束时其缝内流速减小的幅度却较大; 2 mm 开度的裂缝缝内流速减小的幅度次之, 1 mm 开度的裂缝最小。

(2) 从抗渗强度来看, 反滤砂在土样上游的坡降比在土样下游的坡降整体要小。由于反滤砂在土样的下游, 土样不但受到反滤砂的保护, 而且还受到铜丝网的影响, 所以其抗渗强度较高。但总的来讲, 不

论那种情况, 在试验条件范围内, 抗渗强度在试验结束时比开始时都有较大的提高。

(3) 从渗透系数来看, 砂的渗透系数比坝体土渗透系数大上千倍, 仍能起到减小缝内流速的作用。

(4) 由于砂是松散体, 砂子可以填充缝隙, 在水头不很高的情况下, 能促使裂缝愈合。在试验条件范围内, 各种开度的裂缝均未发生冲蚀和破坏现象。

表 3 在变水头作用下裂缝冲刷试验的结果

Table 3 Result of crevice scour test in press of change

接触关系 Touch conne- ction	缝宽/mm Crack width	反滤砂 干密度/(g · cm ⁻³) Dry density	流量/(cm ³ · s ⁻¹) Quantity of flow		流速/(cm · s ⁻¹) Velocity of flow		试验结束时坡降 Seepage rate at the end of test	渗透系数/ (cm · s ⁻¹) Seepage coefficient
			开始 Start	结束 Finish	开始 Start	结束 Finish		
6/2	5	1.642	20.50	8.63	4.78	2.01	490.65	0.0041
6/2	2	1.639	15.20	7.40	7.10	3.46	960.54	0.0036
6/2	1	1.651	4.80	2.60	4.57	2.48	990.48	0.0025
7/3	5	1.754	29.80	30.90	28.38	7.20	758.19	0.0095
7/3	2	1.760	25.40	11.81	24.19	5.52	681.32	0.0081
7/3	1	1.758	9.60	3.21	9.14	3.06	402.26	0.0076
8/1	5	1.748	43.30	10.90	41.24	2.54	158.80	0.0160
8/1	2	1.754	46.20	14.36	44.00	6.71	771.30	0.0087
8/1	1	1.750	10.50	3.22	10.00	3.07	958.33	0.0032
9/2	5	1.678	26.40	5.90	25.14	1.38	625.13	0.0022
9/2	2	1.669	18.30	2.11	17.43	0.99	1095.53	0.0009
9/2	1	1.705	1.69	0.23	1.61	0.22	199.13	0.0011

3 结 语

通过土样裂缝在定水头和变水头作用下的冲刷试验所表现出来的特点可以看到, 在裂缝不大的条件下, 只要有合适的反滤层就可以防止土体被冲刷,

而且在上游反滤砂保护下, 裂缝可能被砂粒淤积而自行愈合; 在下游反滤砂保护下, 可以在裂缝出口处形成次生反滤层, 使渗透系数增加, 抗渗强度增高。由此看来, 保护裂缝不受渗水冲刷并能促使裂缝愈合的关键, 是要做好反滤层的设计和施工。

[参考文献]

- [1] 牛运光 浅析土石坝防渗加固[A]. 土石坝工程[C]. 北京: 北京勘测设计研究院, 1999. 129- 147.
- [2] 苏德遂 防止土石坝心墙裂缝渗漏冲刷的反滤试验研究[J]. 水利学报, 1984, (3): 61- 65.
- [3] SL 237- 1999, 土工试验规程[S]. 北京: 水利水电出版社, 1999.
- [4] 刘 杰 土的渗透稳定与渗流控制[M]. 北京: 水利水电出版社, 1992.

Erodibility of flow for core crack of earth-rock dam under filter protection

ZHANG Zhao-hui¹, LI Zhen²

(1 Yangling Vocational and Technical College, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2 College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In order to understand the characteristics and mechanism of flow washout for the crevice of core wall in earth-rock dam, according to the example of crack washout test for the core of Heihe Dam, constant water level washout test and changing water level washout test are adopted differently, the process of test and the character of the flow washout for the core crack are gone into particulars. It is concluded that the filter layer can protect the core wall of earth-rock dam from flow erosion.

Key words: filter layer; the crack of core wall; washout test