

文章编号:1673-9469(2022)01-0072-06

DOI: 10.3969/j.issn.1673-9469.2022.01.011

## 坝坡垫层料降雨冲蚀破坏机理研究

何芳婵<sup>1,2</sup>, 李威<sup>3\*</sup>, 褚青来<sup>4</sup>, 吕正勋<sup>1,2</sup>, 李世伟<sup>1,2</sup>

(1. 河南省水利科学研究院, 河南 郑州 450003; 2. 河南省水利工程安全技术重点实验室, 河南 郑州 450003;  
3. 南京水利科学研究院 岩土工程研究所, 江苏 南京 210024; 4. 河南省燕山水库管理局, 河南 叶县 467224)

**摘要:** 针对燕山水库大坝开展三维有限元瞬态流固耦合计算, 对强降雨条件下坝坡降雨入渗过程进行模拟, 在降雨入渗模拟结果分析的基础上, 结合坝坡垫层料颗粒特性分析及现场勘测结果, 研究了坝坡垫层料降雨冲蚀破坏过程, 研究结果表明: 降雨入渗是导致下游坝坡垫层料冲蚀的主要原因, 水力梯度大于垫层料最小临界水力梯度值的区域是发生冲蚀的主要区域; 降雨入渗过程中, 随着细颗粒的不断流失, 垫层料的颗粒级配趋于劣化, 预制块与垫层料之间出现脱空等现象; 为保障下游坝坡的安全, 应对垫层料的颗粒级配进行调整设计, 提高垫层料的临界水力梯度值, 并通过调整预制块、设置排水沟等方式增强坝坡的排水能力。

**关键词:** 土石坝; 垫层料; 强降雨; 渗透; 冲蚀

中图分类号: TU43

文献标识码: A

## Study on Rainfall Erosion of Earth-rock Dam Slope Cushion Material

HE Fangchan<sup>1,2</sup>, LI Wei<sup>3\*</sup>, CHU Qinglai<sup>4</sup>, LV Zhengxun<sup>1,2</sup>, LI Shiwei<sup>1,2</sup>

(1. Henan Provincial Water Conservancy Research Institute, Zhengzhou, Henan 450003, China; 2. Key Laboratory of Hydraulic Engineering Safety Technique of Henan Province, Zhengzhou, Henan 450003, China; 3. Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing, Jiangsu 210024, China; 4. He'nan Yanshan Reservoir Authority, Yexian, Henan 467224, China)

**Abstract:** Based on the three-dimensional finite element transient fluid structure coupling calculation of Yanshan Reservoir Dam, the rainfall infiltration process of dam slope under heavy rainfall was simulated. On the basis of rainfall infiltration simulation results, combined with the particle characteristics analysis of dam slope cushion material and field survey results, the rainfall erosion process of dam slope cushion material was studied. The results show that: rainfall infiltration is the main cause of the erosion of the cushion material of the downstream dam slope, and the area where the hydraulic gradient is greater than the minimum critical hydraulic gradient of the cushion material is the main area of erosion; in the process of rainfall infiltration, with the continuous loss of fine particles, the particle gradation of cushion materials tends to deteriorate, and the voids between precast blocks and cushion materials appear; in order to ensure the safety of downstream dam slope, it is suggested to adjust and design the particle gradation of cushion material, improve the critical hydraulic gradient value of cushion material, and enhance the drainage capacity of dam slope by adjusting precast block and setting drainage ditch.

**Key words:** earth and rockfill dam; cushion material; heavy rainfall; permeability; erosion

统计表明, 渗流是造成土石坝、土质边坡等水利工程失事的主要原因之一<sup>[1]</sup>。特别地, 对土石坝而言, 在汛期库水位上涨明显, 渗流场已经产生

变化, 若再遭遇强降雨, 可能引起土石坝的渗透破坏和坝坡失稳。因此, 强降雨条件下土石坝的渗流分析是评价坝体安全的重要依据。对于土石坝

收稿日期: 2021-11-02

基金项目: 河南省水利科技攻关计划项目(GG201934)

作者简介: 何芳婵(1981-), 女, 河南灵宝人, 硕士, 高级工程师, 主要从事水利工程安全评价相关科研工作。

\* 通讯作者: 李威(1994-), 男, 安徽宿州人, 硕士, 工程师, 主要从事岩土工程数值计算等研究。

垫层料,人们往往更关注其在建设过程中的力学特性及填筑标准<sup>[2-3]</sup>,相关渗流分析则较少<sup>[4]</sup>。李子阳<sup>[5]</sup>分析了水位骤变下土石坝非稳定渗流及稳定性,倪沙沙<sup>[6]</sup>研究了降雨入渗对土石坝渗流场及坝坡稳定性的影响,张朝晖等<sup>[7]</sup>研究了土石坝心墙裂缝在反滤层保护下的冲蚀特性。此外,孙玉莲<sup>[8-11]</sup>等研究了降雨条件下坝体的变形、稳定与渗流特性。总体而言,在恒定水头作用下,土的渗透性确实具有时效自密性,渗透量随持续时间呈递减趋势。但在变水头、高水力梯度作用下,土的渗透规律会存在偏离达西渗透的现象。目前,对于垫层料在强降雨引起的变水头、高水力梯度作用下的冲刷特性研究并不充分。

以燕山水库大坝为例,从下游坝坡隐患区域的查勘、试验、分析情况看,下游坝坡出现隆起、塌陷、出沙现象的主要原因是由垫层料受雨水入渗引起,原垫层料中含泥量及超小粒径砂砾料过多,细砂砾料受水流冲蚀后流失严重,进而造成在坝坡中部以下部位出现预制块太闲,坝坡下部出现预制块隆起,马道处出现的出沙现象。

因此,本文从实际工程问题出发,以燕山水库大坝为例开展了有限元瞬态流固耦合分析,重点分析了强降雨入渗对下游坝坡垫层料冲蚀破坏机理,并根据分析结果提出了防冲蚀的具体措施,为相关工程提供参考。

## 1 坝坡降雨入渗分析

### 1.1 工程概况及计算模型

燕山水库工程总库容  $9.25 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,工程等别和规模属 II 等大(2)型。大坝全长约 4 070 m(桩号 0+650—4+720),大坝坝顶高程 117.8 m,最大坝高 34.7 m,坝顶宽 8.45 m。大坝上游坡分两级,为 1:3.0 和 1:3.5。下游坡亦为两级,自上而下坡

率为 1:2.25 和 1:2.5,于变坡高程 107 m 处设 2.0 m 宽马道。坝体采用混合型,即选用粘土斜墙坝作为燕山水库主坝河槽段和左岸阶地坝高较高坝段(桩号 2+700 以右)的代表坝型,该段采用混凝土防渗墙垂直防渗;左岸台地较低坝段(桩号 2+700 以左)选用均质土坝为代表坝型,加粘土截水槽。

根据尽量利用开挖料的原则,下游坝壳任意料区主要采用泄水、输水区开挖的石渣和溢洪道尾水渠开挖的第三系粘土质砂岩、砂砾岩填筑。

根据设计图纸,针对实际工程情况,建立河床坝段 4+265—4+600 断面三维精细化有限元计算模型,如图 1(a)所示。模型共 154 869 个节点,146 612 个单元。建基面以下取到 47 m 高程位置作为底部截断边界,上下游侧从坝脚向两侧取一定范围作为顺河向截断边界,坝轴线方向取 4+265 至 4+600 坝段作为研究对象。模型底部设置三向约束,四周设置法向约束。取建基面作为初始 0 孔压边界。其中 2+475 为典型断面,如图 1(b)所示。

### 1.2 计算参数及方案

邓肯 *E-B* 模型是近年来应用最为广泛的模型之一,其主要优点为:物理概念清晰,计算简单;模型参数少且都可由常规的三轴实验测定;应用时间较长,积累了大量的工程经验。基于以上原因,在本文的计算中也选用邓肯 *E-B* 模型,主要模型参数如表 1 所示。

针对极端降雨情况进行模拟,研究降雨历时过程中,坝体下游坡饱和和区域变化以及由降雨所引起的局部孔压变化情况。本次模拟的降雨强度曲线如图 2 所示。0~24 h,降雨强度从 0 mm/h 增加到 20 mm/h;24~48 h,降雨强度保持 20 mm/h;48~72 h,降雨强度由 20 mm/h 降到 0 mm/h。累计降雨量为 960 mm,降雨历时 3 d。

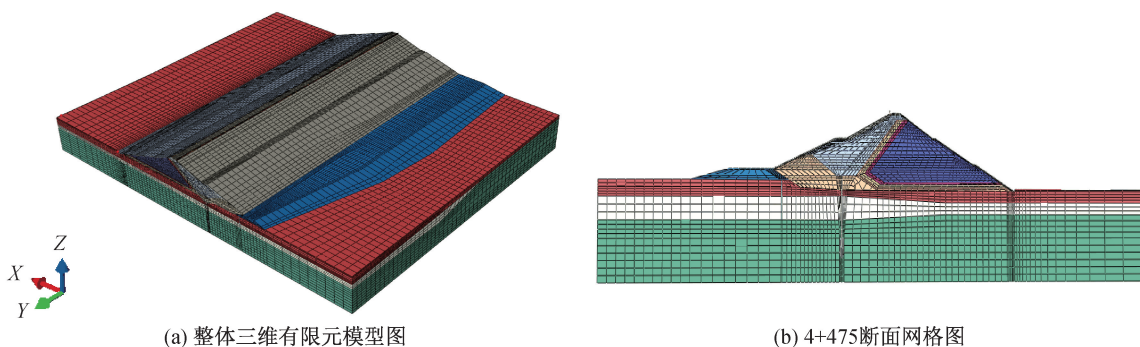


图 1 坝体有限元网格

Fig. 1 Finite element mesh of the dam

表 1 主要材料模型计算参数

Tab. 1 Main material model calculation parameters

坝料名称	渗透系数 $/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	干密度 $/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	邓肯 E-B 模型参数							
			$c/\text{MPa}$	$\varphi_0/(\text{°})$	$\Delta\varphi/(\text{°})$	$R_f$	$K$	$n$	$K_b$	$m$
低液限粘土(防渗体)	$1.0\times 10^{-6}$	1.62	49.6	25.8	0.0	0.950	169	0.93	47	0.650
全风化砂页岩开挖料	$2.0\times 10^{-2}$	2.09	0.0	42.1	11.1	0.830	250	0.310	55	0.340
粘土质砂砾岩	$3.5\times 10^{-3}$	1.90	0.0	30.0	1.5	0.900	180	0.650	120	0.350
14 层弱风化页岩	$6.3\times 10^{-2}$	2.04	0.0	29.6	0.8	0.848	330	0.220	32	0.480
Q4 卵石混合土	$7.3\times 10^{-3}$	1.94	0.0	45.2	6.5	0.840	320	0.536	120	0.251
低液限粘土(均质坝)	$1.0\times 10^{-6}$	1.62	49.6	25.8	0.0	0.950	169	0.930	47	0.650

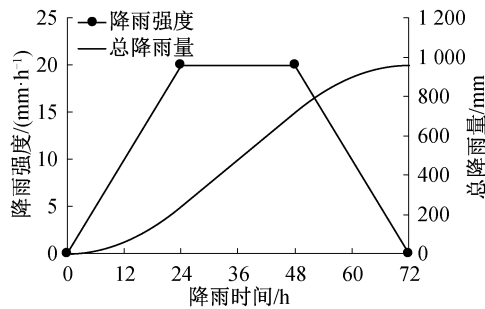


图 2 降雨强度曲线

Fig. 2 Rainfall intensity curve

### 1.3 不同降雨强度下坝体渗流分析

不同时刻坝体由降雨入渗导致的饱和区域如图 3 所示。0~24 h,降雨强度逐渐增强,坝体下游任意料内部逐渐出现饱和带,由于降雨强度较低(24 h 累计降雨 240 mm),如图 3(a)所示,此时坝体内部饱和区域较小,出现在下游坝坡垫层料下部浅层位置。随着降雨持续,24~48 h 时间段内,累计降雨 480 mm,且降雨强度一直持续在 20 mm/h,此时坝体下游任意料出现较大区域的饱和区,最大饱和深度达到 5 m,如图 3(b)所示。48~72 h,降雨强度逐渐降低,下游坝体任意料中的饱和区中孔隙水通过垫层料逐渐排出坝体外部,坝体内部饱和区域逐渐减少,如图 3(c)所示。

## 2 坝坡冲蚀破坏机理分析

### 2.1 渗流力

水在渗流过程中将受到土粒的阻力,同时水对土粒也产生一种反作用力。这种由于水的渗流作用对土粒产生的力,成为渗透力。渗透力  $j$  是一种体积力,单位为  $\text{kN}/\text{m}^3$ ,作用方向与渗透方向一致,其值等于水力坡降  $i$  与水的重度  $\gamma_w$  的乘积:

$$j = i\gamma_w \quad (1)$$

渗透力  $j$  的方向不同对土体的作用也不同,如图 4 所示,当渗流方向自上而下时,渗透力  $j$  方向与重力  $G$  方向一致(图中  $a$  点),增大了土粒间作

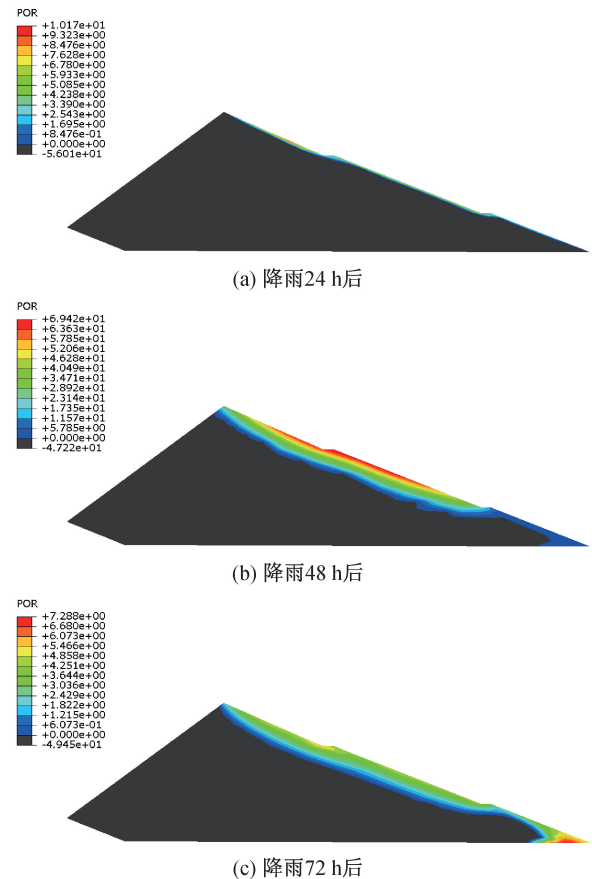


图 3 降雨后下游坝坡孔压分布云图(单位:kPa)

Fig. 3 Cloud map of hole pressure distribution of downstream Dam Slope after rainfall

用力,对土体稳定有利;反之,若渗流方向是自下而上,与土重方向相反(图中  $c$  点),渗透力减小土粒间的作用力,对土体稳定不利。当向上的渗透力大于土的浮重度时,土粒会被渗流挟带向上涌出,这是引起土体渗透变形的根本原因。显然,要了解土体渗透变形的机理,就必须了解渗透力的作用机理。另外,地基、土坝和基坑边坡也常有渗流,在进行稳定分析时也必须考虑渗透力的影响。

### 2.2 坝坡降雨冲刷

图 5 为垫层料在降雨过程中最大合成水力梯

度矢量图,图 6 为水平流速矢量图。

由垫层料渗流矢量图可知,107 m 高程以上,渗流方向指向坝体内部,表明该段是降雨引起的人渗;96~107 m 高程段,渗流流速合成图表明渗流方向同样指向坝体内部,但方向趋近于和坝坡平行,结合水平渗流矢量图来看,该段水平渗流分量指向坝外侧,表明该段有部分入渗水从坝坡排出坝外;96 m 高程以下,入渗水渗流合成方向几乎与坝坡平行,且该段水平渗流流速更大。

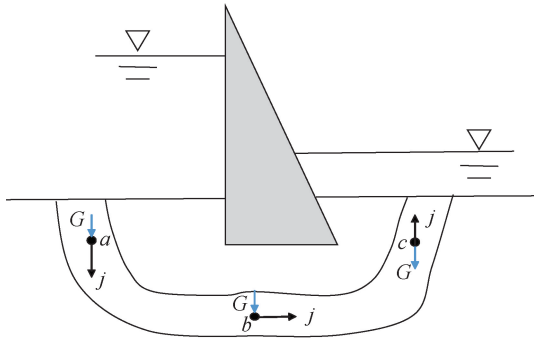


图 4 土体渗透示意图

Fig. 4 Schematic diagram of soil penetration

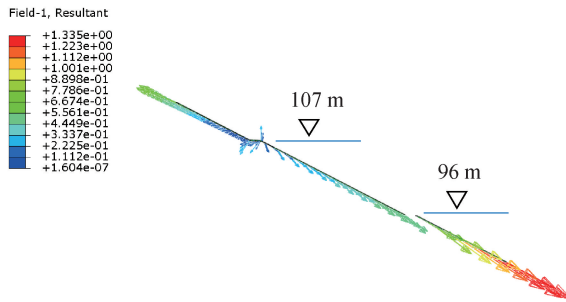


图 5 降雨过程中最大合成水力梯度矢量图

Fig. 5 The maximum synthetic hydraulic gradient vector graph during rainfall

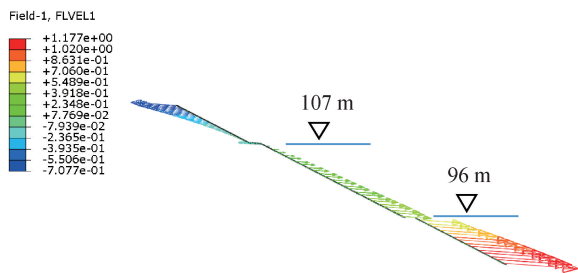


图 6 降雨过程中最大水平向水力梯度矢量图

Fig. 6 The maximum horizontal hydraulic gradient vector graph during rainfall

通过对蓄水期坝体渗流特性进行分析,坝体防渗体系效果良好,库区水通过坝体防渗体系后,水头迅速折减,坝体渗流通过反滤和排水体排出

坝体,渗流水不会进入下游任意料。下游坝体只有在降雨情况下,才会有水进入下游垫层料和任意料,进而对垫层料产生冲蚀作用。

因此,在下文分析中,将只分析强降雨对表层垫层料的冲刷,而不需考虑坝体内部渗流对表层的作用。未受降雨冲蚀前,根据筛分试验,坝坡垫层料的初始级配如图 7 所示。

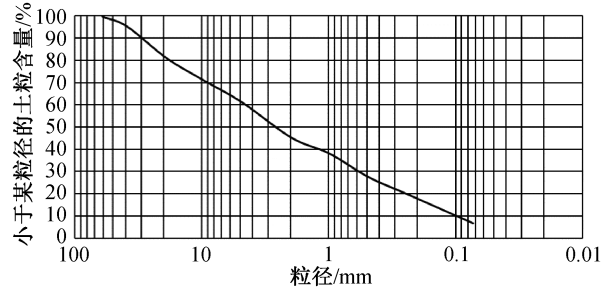


图 7 坝坡垫层料初始级配

Fig. 7 Initial gradation of dam slope bedding material

由图 5 和图 6 可知,坝坡水力梯度最大值为 1.335,最小水力梯度为  $1.604 \times 10^{-7}$ ,最大水力梯度发生在下游坝脚。综合多种临界水力梯度计算公式,结合图 7 中垫层料的初始级配,计算得到燕山水库下游垫层料的临界水力梯度最大值为 1.09 (毛昶熙<sup>[12]</sup>计算公式),最小值为 0.297 (刘杰计算公式<sup>[13]</sup>)。其中,刘杰<sup>[13]</sup>提出了土体发生管涌型或过渡型破坏的判定公式:

$$i_c = 2.2(1 - n)^2(G_s - 1) \frac{d_5}{d_{20}} \quad (2)$$

毛昶熙<sup>[12]</sup>提出的管涌的临界水力梯度:

$$i_c = \frac{7d_5}{d_f} [4P_f(1 - n)]^2 \quad (3)$$

式中, $n$  为孔隙比, $d_f$  是粗细颗粒分界的粒径, $P_f$  是对应的颗粒质量百分数。

根据数值计算得到的坝坡实际水力梯度与临界水力梯度的对比,结果表明下游坝坡受暴雨冲蚀破坏将主要发生在 101 m 高程以下,因此,将对该坡段进行重点分析。

### 2.3 现场勘测结果分析

图 8 为燕山水库下游预制块铺设情况,坝体竣工时,预制块铺设完毕,该类型的预制块在拼接完成后有一定的拼接缝,受蓄水荷载影响,坝体外轮廓发生一定的变形,将导致预制块间拼接缝隙进一步增大,形成明显的降雨入渗通道。107 m 高程以上,预制块表面依旧平整,未出现明显的塌陷或隆起,如图 8 所示,与 2.2 节中有限元分析结果相

近:该坡段受到降雨冲蚀的影响很小。

分析表明,96 m 高程以下坝坡由降雨导致的水力梯度大于临界水力梯度,可能会发生冲蚀破坏。现场勘测结果显示,水库下游坝坡 96 m 高程以下为排水棱体,坝坡并未出现隆起或沉陷,可见该坡段的暴雨通过排水体系及时排除,未造成坝坡冲蚀,因此不再赘述。

107 m 高程到 96 m 高程部分,计算得到最大水力梯度为 0.6,根据刘杰公式<sup>[13]</sup>计算临界水力梯度为 0.297,该部分坝坡也可能出现冲蚀破坏。对该部分坝坡坡面的检查发现:在桩号 4+300—4+650 部位,大坝下游坡面出现局部塌陷或隆起区域,多分布高程 98~104 m 之间,其中揭开预制块,典型塌陷区域如图 9 所示。



图 8 水库下游坝坡预制块(107 m 高程以上)

Fig. 8 Downstream dam slope precast block (above 107 m)



图 9 水库下游坝坡塌陷区域(107 m 到 96 m 高程)

Fig. 9 Downstream dam slope collapse area (107 m to 96 m)

为了探究塌陷或隆起区域是否由降雨冲蚀引起,对 107 m 到 96 m 高程垫层料的颗粒级配进行了测试,取样深度为 25、35、50 和 60 cm,桩号为 4+572。其中,深度为 25 和 35 cm 的土样为垫层料,深度为 50 和 60 cm 的土样为任意料。

以 104 m 和 97.5 m 高程 25 cm 深度垫层料级配曲线为例,如图 10 所示,97.5 m 高程处的级配相对于 104 m 高程,细颗粒含量显著增多。颗粒粒

径小于 2 mm 为砂粒和细粒,易被暴雨冲刷,因此,可将级配曲线上 2 mm 对应的百分含量作为研究对象。由图 10 可得,104 m 高程和 97.5 m 高程低于 2 mm 颗粒所占百分比分别为 50.6% 和 36.8%。

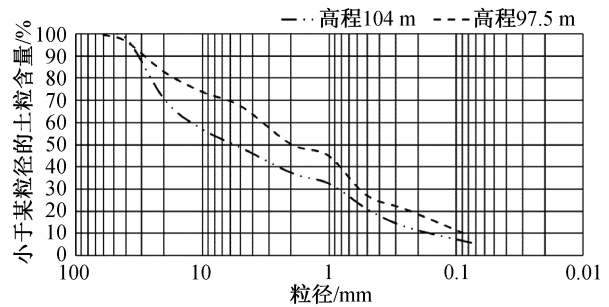


图 10 104 m 和 97.5 m 高程 25 cm 深度垫层料级配曲线

Fig. 10 Bedding material grading curves at elevation of 104 m and 97.5 m at depth of 25 cm

进一步地,绘制了 104 m 高程至 97.5 m 高程之间,25 cm 深度的垫层料小于 2 mm 颗粒含量分布曲线,如图 11 所示。随着高程降低,小于 2 mm 的颗粒含量逐渐增大。可以初步判定,这一现象是由降雨冲刷导致。若坝坡未受到降雨冲蚀,坝坡沿程级配分布应大致均匀,不会出现如图 10 中显著的规律。反之,细颗粒降雨入渗引起的渗流会导致垫层料中细颗粒流失,上部细粒含量降低,下部细粒含量增多,造成预制块与垫层料脱空,形成水流通道,加剧垫层料的冲蚀,从而形成冲沟现象。

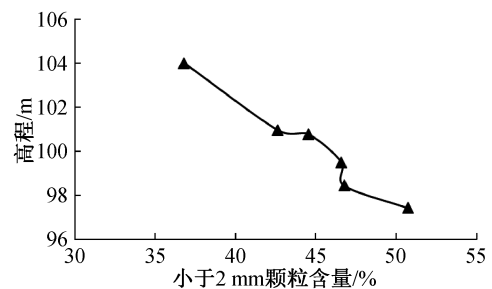


图 11 不同高程垫层料小于 2 mm 颗粒含量分布曲线

Fig. 11 The particle less than 2 mm content distribution curve of different elevation bedding materials

## 2.4 小结

在汛期强降雨情况下,当降雨入渗量较大,垫层料将起到排水体的作用,且自坝顶向下,垫层料中流量逐渐增大,入渗水通过垫层料后,进入马道排水沟,由于下游坝面降雨入渗料不断汇聚到垫层料中,自上而下水量不断增加,流速也逐渐增高,故极易在排水沟上游附近形成冲蚀现象,渗流水携带细颗粒进入排水沟,形成细颗粒

堆积现象。

通过对坝坡冲蚀机理分析可知,优化垫层料颗粒级配设计,提高垫层料的临界水力梯度值,提高垫层料的渗透系数,完善排水设施,减少降雨量入渗,可有效降低坝坡冲蚀发生的风险。

### 3 结论

1)降雨是导致下游坝坡垫层料冲蚀的主要原因,在强降雨情况下,垫层料发生冲蚀的区域其内部水力梯度大于其最小临界水力梯度值,是发生冲蚀的主要区域。

2)随着降雨冲蚀,垫层料的颗粒级配趋于劣化,导致该区域出现明显的冲沟,护坡预制块等结构与垫层料之间出现脱空等现象。

3)优化颗粒级配设计,提高垫层料的临界水力梯度值,提高垫层料的渗透系数,完善排水设施,减少降雨量入渗,可有效降低坝坡冲蚀发生的风险。

#### 参考文献:

- [1]周成,王一冰,王涵,等.含砾土坡坡面降雨和坡脚浸泡模型试验研究[J].水利水运工程学报,2019(6):96-106.
- [2]王艳丽,饶锡保,潘家军,等.砂砾石垫层料与混凝土面板接触面特性的大型单剪试验研究[J].岩土工程学报,2019(8):1538-1544.
- [3]李家向,王开科,蔡红,等.新疆玛热勒苏水库面板堆石坝天然砂砾石垫层料试验研究[J].水利水电技术,2019(S1):21-26.
- [4]林国财,谢兴华,阮怀宁,等.降雨入渗边坡非饱和渗流过程及稳定性变化研究[J].水利水运工程学报,2019(3):95-102.
- [5]李子阳,马福恒,张湛,等.水位骤变下土石坝非稳定渗流及稳定分析[J].人民黄河,2019,41(01):106-110.
- [6]倪沙沙.降雨入渗对土石坝渗流场及坝坡稳定性的影响[J].水电能源科学,2016,34(02):49-52.
- [7]张朝晖,李振.水流对土石坝心墙裂缝在反滤层保护下的冲蚀特性[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2003,31(04):171-174.
- [8]孙玉莲,魏迎奇,程兴奇,等.子坝加高对灰坝坝体应力和变形的影响[J].水利学报,2014,45(S2):39-44.
- [9]蒋树,王义锋,唐川,等.金沙江下游金坪子Ⅱ区低速滑坡活动机理初探[J].工程地质学报,2017,25(6):1547-1556.
- [10]冉启华,史致男,赵建均,等.移动降雨条件下结皮对坡面产沙的影响机理[J].清华大学学报:自然科学版,2012,6:821-829.
- [11]詹小军,李洪艺,林登辉,等.降雨条件下残积土的优先渗流机理分析[J].广西大学学报:自然科学版,2018,43(01):269-276.
- [12]毛昶熙.渗流计算分析与控制[M].2版.北京:中国水利水电出版社,2003.
- [13]刘杰.土的渗透稳定与渗流控制[M]北京:水利电力出版社,1992.

(责任编辑 王利君)