

梳子坝切口深度对淤砂形态影响的试验研究

韩文兵<sup>1,2</sup>, 欧国强<sup>1</sup>

(1. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041;  
2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 通过室内水槽试验, 探讨梳子坝切口深度对淤砂形态的影响等, 初步分析得到以下几点结论: (1) 在全闭塞状态下, 坝址附近淤砂高度大致等于坝高, 并不受切口深度的影响; 在部分闭塞状态下, 坝址附近淤砂高度受切口深度的影响非常明显, 并有随切口深度的增大而降低的趋势; 在不闭塞状态下, 坝址附近淤砂高度等于切口深度, 是坝前泥砂淤砂的基准点。(2) 切口深度影响淤砂长度, 随着切口深度的降低, 淤砂长度有逐渐减小的趋势。(3) 在淤砂形态上, 三种切口闭塞状态下都有一个共同的特征: 在淤砂区的尾部, 有一个陡坡, 但陡坡的起点有随切口深度的减小而逐渐后退的趋势。(4) 在淤砂形态上, 部分闭塞和不闭塞两种状态下还有一个共同的特征: 在淤砂区的前端, 都有一个缓坡。但部分闭塞时缓坡坡顶(淤砂肩)位置大致相近; 但不闭塞时缓坡坡顶(淤砂肩)的位置有随切口深度的减小而变得距离坝址更近的趋势。

关键词: 梳子坝; 淤砂形态; 切口深度  
中图分类号: TV 145      文献标识码: A      文章编号: 1005-3409(2005) 06-0235-03

Experimental Study on Configuration of Intercepted Sediment by Comb Dam

HAN Wen-bing<sup>1,2</sup>, OU Guo-qiang<sup>1</sup>

(1. Chengdu Institute of Mountain Disaster and Environment, Chinese Academy of Sciences and Water Conservancy Ministry, Chengdu 610041, China;  
2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** By flume experiments indoors, a series of model experiment which to research configuration of intercepted sediment by different slit depth of comb dam was discussed. Results as follows. (1) Under total blocking circumstance, the height of intercepted sediment is almost equal to the height of comb dam near foreside of dam body, and is irrelevant to slit depth; effect of slit depth is very obvious near foreside of dam body in part blocking conditions, with slit depth increasing, the height of intercepted sediment will gradually decrease; under slit opening circumstance, the height of intercepted sediment near foreside of dam body is almost equal to the height of comb dam. (2) Slit depth affects the length of intercepted sediment with slit depth gradually increasing. Length of intercepted sediment will gradually shorten. (3) There is also a common characteristics on configuration of intercepted in three different blocking forms. It has a steep slope at tail of intercepted sediment. With slit depth decreasing, climax point of steep slope become farther. (4) There is a common characteristic on configuration in part blocking and slit opening conditions, it is that there is a flat slope near foreside of dam body. But climax point of flat slope is similar to different slit depth in part blocking condition and it is become farther with slit depth gradually decreasing in slit opening condition.

**Key words:** comb dam; configuration of intercepted sediment; slit depth

1 引言

拦挡坝是泥石流防治经常采用的一种工程措施, 根据其坝体是否过流, 可以分为实体坝和透过性坝, 梳子坝是透过性坝的一种重要形式, 在国内外泥石流防治工程中应用广泛。其具有以下几种功效: 蓄积洪水时期大量泥砂, 并可用平时常水流将泥砂慢慢排至下游, 可降低下游地区的冲刷侵蚀作用等<sup>[1]</sup>。然而, 当前梳子坝设计还缺乏完善的理论指导, 部分设

计要素还需要进一步研究, 如坝后回淤坡度; 泥砂淤积形态等。目前, 国外对不同拦砂坝坝后淤砂形态已有部分研究成果, 水山高久<sup>[2]</sup> (1989) 对狭缝拦砂坝的淤砂形态进行研究, 测试结果证明: 从淤砂肩开始到下游的倾斜坡度 ( $Z_s/L_s$ ) 和冲刷力无关, 可以认为它大致和水中休止角相等; 池谷浩<sup>[3]</sup> (1980) 通过水工试验研究表明: 切口堵塞高度 ( $h_s$ ) 越大, 淤砂形态就越接近非切口坝, 淤砂肩位置对淤砂形态影响较大等; 周必凡<sup>[4]</sup> (1991) 在《泥石流防治指南》一书中关于切口深的设计方

\* 收稿日期: 2005-01-07  
基金项目: 云南省自然科学基金“梳子型切口坝拦砂性能实验研究”(2004D0054M); 中国科学院知识创新工程重要方向项目“南水北调西线工程山地灾害防治技术及环境影响研究”(KZCX3-SW-323)  
作者简介: 韩文兵(1980-), 男, 安徽潜山人, 博士研究生, 主要从事山地灾害防治工程技术研究。

法时指出“切口底部为侵蚀基准,  $h/b$  ( $h$  为切口深度,  $b$  为切口宽度) 决定坝库上游停淤区可输砂距离的远近”。但切口深度对坝后淤砂形态的影响, 目前还缺乏野外观测资料和试验研究成果, 因此通过室内水槽试验, 探讨梳子坝切口深度对淤砂形态的影响, 对完善梳子坝设计理论显得十分必要。

## 2 试验设备及条件

### 2.1 试验设备

试验在中国科学院成都山地灾害与环境研究所泥石流动力学实验室内进行, 设备主要由料斗(前端有闸门)、玻璃水槽、提升装置三部分组成。水槽长6 m, 宽20 cm, 高40 cm, 实测纵比降变化范围在0~23°。

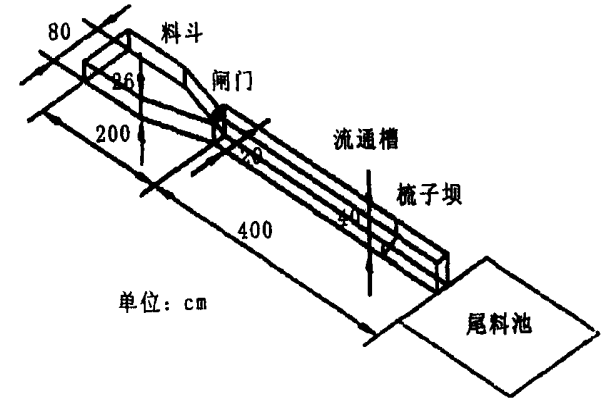


图1 试验水槽装置示意图

### 2.2 试验条件及方法

#### 2.2.1 试验用砂

试验用砂是从成都周边地区采取的天然砂配制而成, 其级配曲线如图2所示:

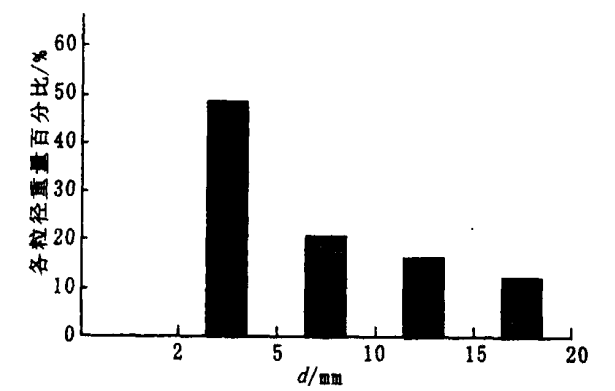


图2 四种试验用砂颗粒重量百分比组成直方图  
表1 试验用砂的物理特性参数<sup>[5]</sup>

$D$ (平均粒径) /mm	$\Phi$ (内摩擦角) /°	$\sigma$ (颗粒密度) /( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	粒径范围 /mm
7.633	33.78	2.65	2~20

#### 2.2.2 坝体模型

表2 梳子坝模型尺寸 <sup>[5]</sup>				cm
$B$ (坝体宽度)	$H$ (坝体高度)	$T$ (坝体厚度)	$h$ (切口深度)	
20.0	12.0	2.4	6	

### 2.2.3 试验条件

表3 试验条件一览表 <sup>[6]</sup>						
容重/( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	1.436					
切口密度 ( $b/B$ )	0.15	0.2	0.225	0.25	0.30	0.35
切口宽度 ( $b$ , cm)	0.375	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
	1	1.5	2	2.5	3	3.5
水槽坡度( $\theta$ , °)	4					
	11.2					

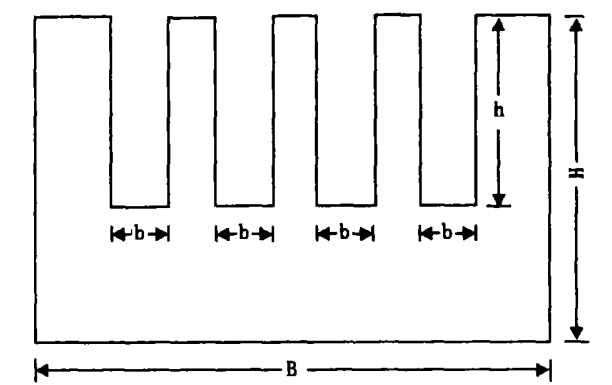


图3 梳子坝模型示意图

### 2.2.4 量测项目及方法

表4 量测项目及方法 <sup>[6]</sup>	
项 目	方 法
坝后堆砂区回淤高度	试验完毕后, 规定横断面方向10 cm为间距, 纵断面方向以5 cm的间距进行测量。
泥位	用直尺进行测量
泥砂流出量	在试验结束时, 在水槽下游测定停积下的泥砂
泥石流表面流速	浮标法
过坝泥砂级配变化	泥砂烘干后, 通过筛分法分析
泥砂拦截率	试验结束后, 坝后拦截泥砂烘干称重, 然后以此重量数除以试验前泥石流中所含泥砂总重量
水槽坡度	水准仪测量

### 2.3 试验流程

首先, 根据试验设计要求, 通过提升装置, 调整水槽坡度, 在水槽的下游段固定事先设计好的切口坝模型。然后, 将试验开始前配制的泥石流物料放入供料口的料斗中, 加入一定体积的水后搅拌均匀, 此时缓缓开启料斗前端闸门, 将泥石流物质有控制放出。在水槽下游端切口坝附近通过架设数码摄像机, 测试放置切口坝后水槽内流体运动参数<sup>[6]</sup>。

## 3 切口深度与淤砂形态

通过水槽试验, 发现梳子坝有三种闭塞形态: 全闭塞, 部分闭塞和不闭塞(全闭塞是指在试验开始阶段, 切口处有过流现象, 但随后切口被后续流所堵塞, 在试验结束时, 整个切口部全部闭塞; 部分闭塞是指在试验过程中, 切口过流, 但试验结束时, 切口部未全部闭塞; 不闭塞是指在试验过程中, 整个切口部未被泥砂物质所堵塞, 平稳、通畅过流)<sup>[6]</sup>。在上述三种闭塞形态下, 不同切口深度淤砂形态特征迥异。文中淤砂形态采用坐标轴的形式来描述, 其中以梳子坝中线(坝体左右翼的对称线)与水槽底板中线的交点为原点; 以梳子坝中线交线为纵轴; 以水槽底板中线为横轴(正方向为指向水槽上游方向, 因此时水槽倾斜, 所以横轴亦倾斜)。淤砂高度每隔5 cm 测量一个样点, 然后点绘成淤砂形态剖面图。

下面是粒径范围为2~20 mm, 坡度为11.2°下的三组试

验结果:

3.1 全闭塞状态时不同切口深度淤砂形态比较

切口宽度为2 cm,  $b/d_{\max} = 0.923$  时的四种不同深度下的试验结果, 在表5、表6、表7中切口深度用相对深度  $h/H$  ( $h$  为切口深度,  $H$  为坝体高度) 的比值表示。

表5 全闭塞时不同切口深度下各测点淤砂高度表												
距离/cm	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
高度( $h/H = 0.5$ )	12.0	10.4	10.1	9.2	9.4	9.0	10.0	6.0	1.2			
高度( $h/H = 0.417$ )	12.0	12.0	11.2	10.3	10.8	10.0	10.0	9.0	2.4	1.0		
高度( $h/H = 0.33$ )	11.6	10.4	10.0	9.8	10.0	9.1	9.6	8.0	3.0	1.2	0.4	
高度( $h/H = 0.25$ )	12.0	11.2	10.5	10.0	10.0	9.4	9.4	9.2	5.2	3.0	2.2	0.4

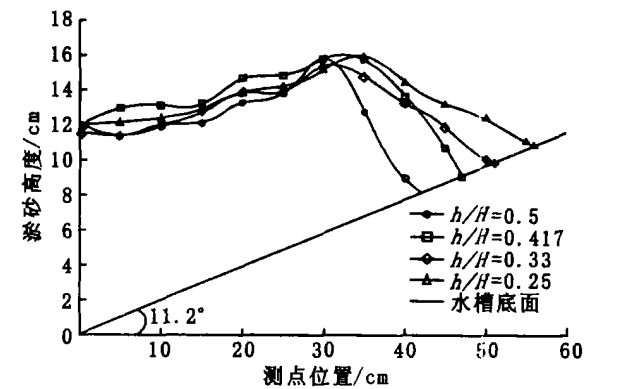


图4 全闭塞状态时不同切口深度条件下泥砂堆积形态图  
由表5和图4, 可以分析得出以下几点认识:

<sup>1</sup> 在全闭塞状态下, 坝址附近淤砂高度大致等于坝高, 并不受切口深度的影响。

④随着切口深度的降低, 堆积长度有逐渐减小的趋势。

(四)在堆积形态上, 都有一个共同的特征, 在淤砂区的尾部, 都有一个陡坡, 但陡坡的起始点有随切口深度的减小而逐渐后退的趋势。

3.2 部分闭塞时不同切口深度淤砂形态比较

切口宽度为3 cm,  $b/d_{\max} = 1.384$  时的四种不同深度下的试验结果, 在表中切口深度用相对深度  $h/H$  ( $h$  为切口深度,  $H$  为坝体高度) 的比值表示。

表6 部分闭塞状态时不同切口深度条件下拦截泥砂堆积形态												
距离/cm	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
高度 $(h/H=0.5)$	8.0	8.2	8.8	8.0	7.6	8.2	7.1	5.9	3.2	0.4		
高度 $(h/H=0.417)$	8.6	8.9	9.3	8.8	8.2	8.0	9.0	2.0	2.0	2.0	1.1	
高度 $(h/H=0.33)$	9.1	9.5	10.3	9.6	9.0	8.4	8.8	7.8	3.0	2.2	1.0	
高度 $(h/H=0.25)$	10.6	10.9	11	10.3	9.5	10.1	10.3	9.8	4.9	2.8	1.4	0.6

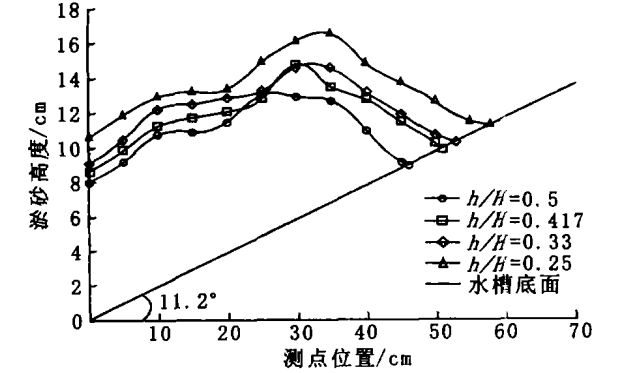


图5 部分闭塞状态时不同切口深度条件下泥砂堆积形态图  
由表6和图5, 可以分析得出以下几点认识:

<sup>1</sup> 在部分闭塞状态下, 坝址附近淤砂高度受切口深度的影响非常明显, 并有随切口深度的增大而降低的趋势。  $h/H = 0.5$  时, 坝址附近淤砂高度为8 cm, 但当  $h/H = 0.33$  时, 坝址附近淤砂高度增大为10.6 cm。

④随着切口深度的降低, 淤砂长度有逐渐减小的趋势。这与全闭塞状态的结果相似。

(四)在淤砂形态上, 都有两个共同的特征: 在淤砂区的前端, 都有一个缓坡。随切口相对深度的增大, 坡度分别为  $2.85^\circ$ 、 $5.75^\circ$ 、 $3.7^\circ$ 、 $3.4^\circ$ ; 但缓坡坡顶(淤砂肩)位置大致相近, 都大约在坝前10 cm处附近; 在淤砂区的尾部, 都有一个陡坡, 但陡坡的起点有随切口深度的减小而逐渐后退的趋势。

3.3 不闭塞时不同切口深度淤砂形态比较

下表为粒径范围为2~20 mm, 坡度为  $11.2^\circ$  切口宽度为4 cm,  $b/d_{\max} = 1.846$  时的四种不同深度下的试验结果, 在表中切口深度用相对深度  $h/H$  ( $h$  为切口深度,  $H$  为坝体高度) 的比值表示。

表 7 不闭塞状态时不同切口深度条件下拦截泥砂堆积形态													
距离/cm	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
高度( $h/H = 0.5$ )	6.0	6.4	6.5	6.7	7.0	7.0	7.0	7.0	4.0	1.0			
高度( $h/H = 0.417$ )	7.0	7.2	7.3	7.5	8.0	7.0	7.4	7.0	2.0	1.2	0.4		
高度( $h/H = 0.33$ )	8.0	8.9	9.3	9.6	9.2	9.8	9.0	9.4	7.0	3.0	1.6	0.4	
高度( $h/H = 0.25$ )	9.0	9.5	10.0	10.0	9.6	9.4	9.0	8.8	8.4	8.5	7.0	3.0	1.0

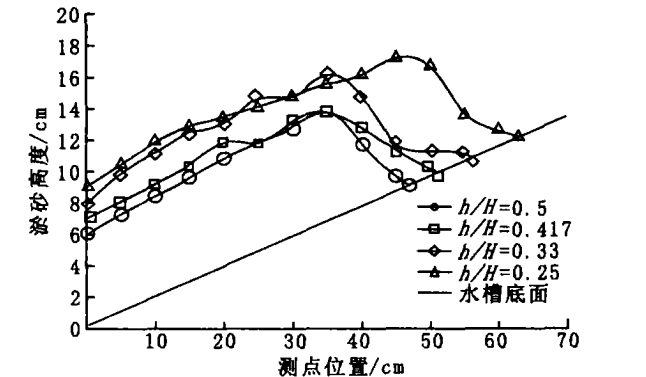


图6 不闭塞状态时不同切口深度条件下泥砂堆积形态图  
由表7和图6, 可以分析得出以下几点认识:

<sup>1</sup> 在不闭塞状态下, 坝址附近淤砂高度等于切口深度, 是坝前泥沙淤砂的基准点。

④随切口深度的降低, 淤砂长度有逐渐减小的趋势。这与全闭塞和部分闭塞状态的结果相似。

(四)在淤砂形态上, 都有两个共同的特征: 和部分闭塞状态下的结果一样, 在淤砂区的前端, 都有一个缓坡, 随切口相对深度的增大, 坡度分别为  $5.7^\circ$ 、 $7.9^\circ$ 、 $2.2^\circ$ 、 $3.25^\circ$ ; 但缓坡坡顶(淤砂肩)的位置随着切口深度的减小而变得距离坝址更近的趋势; 在淤砂区的尾部, 都有一个陡坡, 但陡坡的起点有随切口深度的减小而逐渐后退的趋势。

4 结论与建议

本文主要通过室内水槽试验, 探讨梳子坝切口深度对淤砂形态的影响等, 初步分析得到以下几点结论:

(1)在全闭塞状态下, 坝址附近淤砂高度大致等于坝高, 并不受切口深度的影响; 在部分闭塞状态下, 坝址附近淤砂高度受切口深度的影响非常明显, 并有随切口深度的增大而降低的趋势; 在不闭塞状态下, 坝址附近淤砂高度等于切口深度, 是坝前泥沙淤砂的基准点。

缘过窄, 受其前方基岩的阻挡, 以致使其位移不能很好的向下传递, 才导致其向下位移量变小, 与此同时, 其方向也有所改变, 只沿前缘较窄处向河谷方向运动。堆积体的这种收口效应对坡体的稳定性起着重要的改善(控制)作用。

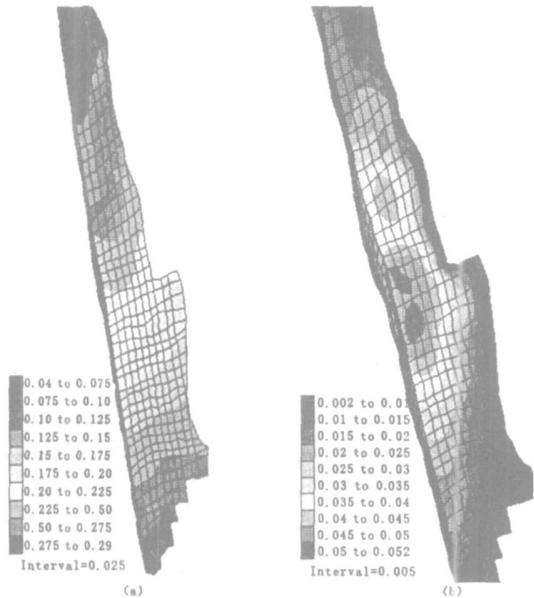


图6 合位移(  $U$  )等值线

从位移量上来看, 堆积体的中部附近(1 387 ~ 1 610 m 高程)为主要变形或破坏区, 有可能发生部分的变形或破坏, 其破坏底界为堆积体与基岩接触面及附近的一定范围, 破坏深度一般为10 ~ 20 m。此外, 堆积体前后缘也可能有零星的浅表部破坏, 其深度一度不超过5 m。

参考文献:

[ 1 ] 黄润秋, 王士天, 胡卸文, 等. 澜沧江小湾水电站高拱坝坝基重大工程地质问题研究[ M ]. 成都: 西南交通大学出版社, 1996.  
[ 2 ] 成都理工大学, 昆明勘测设计研究院, 云南华能澜沧江水电开发公司联合课题组. 小湾工程边坡研究阶段报告(四)[ R ]. 2003.  
[ 3 ] 王士天, 黄润秋, 张倬元, 等. 中国西南地壳浅表层动力学过程及其工程环境效应研究[ M ]. 成都: 四川大学出版社, 2001.  
[ 4 ] 黄润秋, 许强, 陶连金, 等. 地质灾害过程模拟和过程控制研究[ M ]. 北京: 科学出版社, 2002.  
[ 5 ] Itasca. FLAC3D version 2.0. User's manual[ M ]. Minneapolis: ICG, 1997.  
[ 6 ] 张倬元, 王士天, 王兰生, 等. 工程地质分析原理[ M ]. 北京: 地质出版社, 1994. 134- 137, 321- 338.  
[ 7 ] Hoek, 等. 岩石边坡工程[ M ]. 卢世宗译. 北京: 煤炭工业出版社, 1983.

(上接第237页)

(2) 切口深度影响淤砂长度, 随着切口深度的降低, 淤砂长度有逐渐减小的趋势。

(3) 在淤砂形态上, 三种切口闭塞状态下都有一个共同的特征: 在淤砂区的尾部, 有一个陡坡, 但陡坡的起点有随切口深度的减小而逐渐后退的趋势。

(4) 在淤砂形态上, 部分闭塞和不闭塞两种状态下还有一个共同的特征: 在淤砂区的前端, 都有一个缓坡。但部分闭

参考文献:

[ 1 ] 李三畏. 奥地利与台湾地区之砂防工程[ J ]. “中华水土保持学报”, 1986, 17(2): 15- 26.  
[ 2 ] 水山高久, 阿部宗平, 矢岛重美. 狭缝拦砂坝流量系数与淤砂形状[ J ]. 新砂防, 1989, 42(4): 165- 167.  
[ 3 ] 池谷浩, 上原信司. 切口拦砂坝调节泥沙效果的实验研究[ J ]. 新砂防, 第114号, 1980, 3: 37- 44.  
[ 4 ] 周必凡, 李德基, 罗德富, 等. 泥石流防治指南[ M ]. 北京: 科学出版社, 1991. 156- 157.  
[ 5 ] 韩文兵, 欧国强, 水石流过梳子型切口坝拦砂性能试验研究[ J ]. 水土保持研究, 2004, 11(3): 286- 288.  
[ 6 ] 韩文兵. 泥石流切口坝、实体坝拦砂性能试验对比研究[ D ]. 成都: 中国科学院·水利部成都山地灾害与环境研究所, 2004. 10- 14.

5 小 结

野外现场调研与三维数值模拟结果表明:

(1) 堆积体边坡由下伏基岩与松散的堆积物组成, 堆积体与下伏基岩接触面不存在相对软弱夹层, 属深切冲沟型崩塌式堆积体。

(2) 堆积体平面与空间形态开挖前后均近似成长条形(状), 且堆积体在1 360 ~ 1 450 m 之间有一个较为明显的收口转向特征, 它利于增加堆积体的稳定性。

(3) 堆积体的主应力主要受岩性控制, 在堆积体与基岩接触的部位具有屏蔽效应, 主应力分异现象较为明显, 基岩为相对高应力区, 堆积体为相对低应力区。在堆积体内, 其中部的主应力较大, 但其前缘的收口效应改善了其应力状态, 增加了它的稳定性。

(4) 堆积体的潜在滑面为堆积体与其下伏基岩接触部位的一定范围内, 中前缘部位的潜在主滑面为基覆界面以上的10 m 处附近。

(5) 堆积体的变形总体表现为向临空面方向滑移, 且中部的位移量相对较大。

(6) 堆积体的整体稳定性较好, 不会发生大范围的变形或破坏, 但其中部(1 387 ~ 1 610 m 高程)为相对危险区, 有可能发生中浅层的小范围的变形或破坏。

(7) 两种模拟分析方法有较强的对比性和吻合性。总的来说, 后者对了解堆积体的变形破坏情况较为直观, 但安全储备有所偏低; 前者安全储备偏高, 对于设计治理措施显得过于保守。建议对分析堆积体的变形与破坏情况时, 采用后者, 即基座无位移的方法。

塞时缓坡坡顶(淤砂肩)位置大致相近; 但不闭塞时缓坡坡顶(淤砂肩)的位置有随切口深度的减小而变得距离坝址更近的趋势;

致谢: 在试验及分析过程中, 承蒙中国科学院·水利部成都山地灾害与环境研究所游勇、吕娟、陈顺理、魏德元、柳金峰、岳丽霞、张秋英等老师和同学的大力帮助, 在此一并致谢!