

# 崩塌堆积体启动坡面泥石流判别与防治

——以北川县开坪乡平石板泥石流为例

余涛<sup>1,2</sup>, 李金洋<sup>1,2</sup>, 陈欢<sup>1,2</sup>, 孙金辉<sup>1,2</sup>, 李波<sup>1,2</sup>

(1.中国地质科学院探矿工艺研究所,四川成都 611734; 2.中国地质调查局地质灾害防治技术中心,四川成都 611734)

**摘要:**强震区地震后大量的崩塌堆积体堆积于高陡斜坡中上部,堆积体远离居民点,一旦诱发为坡面泥石流,形成新的次生地质灾害,将严重威胁下方居民的生命财产安全。本文以北川县开坪乡平石板坡面泥石流为例,平石板沟“5.12”地震崩塌堆积体在 2010、2013 年强降雨作用下失稳转变为坡面泥石流淤积场镇。在平石板泥石流暴发特征介绍基础上,通过粒径不均匀系数、堆积体启动判别指标、后缘汇水面积等来分析崩塌堆积体启动条件及影响因素,并针对此类灾害发育特征,提出了通过上游稳控固源方法进行治理的防治思路。以期与研究高陡斜坡堆积体的启动机制及防治提供一定的借鉴意义。

**关键词:**崩塌堆积体;坡面泥石流;不均匀系数;判别指标;防治

**中图分类号:**P642.23 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2018)08-0088-05

**Discrimination and Prevention of Slope Debris Flow Caused by Collapse Accumulation: A Case Study on Pingshiban Debris Flow in Beichuan/SHE Tao<sup>1,2</sup>, LI Jin-yang<sup>1,2</sup>, CHEN Huan<sup>1,2</sup>, SUN Jin-hui<sup>1,2</sup>, LI Bo<sup>1,2</sup>** (1.Institute of Exploration Technology, CAGS, Chengdu Sichuan 611734, China; 2.Technical Center for Geological Hazard Prevention and Control, CGS, Chengdu Sichuan 611734, China)

**Abstract:** Great amount of collapsed accumulations are accumulated on the upper part of the high and steep slopes after the earthquake in the meizoseismal area. The accumulations are far away from the residential area, but once they are induced to form debris flow, a new secondary geological disaster will be produced, which will seriously threaten the lives and property of the residents below. Taking the debris flow of the Pingshibangou slope in Kaiping Township of Beichuan County as an example, the collapsed accumulation body of Pingshibangou in “5.12” earthquake turned into a slope debris flow under the inducement of heavy rainfall in 2010 and 2013. Based on the introduction of outbreak characteristics of Pingshibangou debris flow, this paper analyzes the starting conditions and influencing factors of the collapsed accumulation body by using the non-uniform coefficients of particle size, the discriminating index of starting body for accumulation and catchment area of the back edge, etc. In response to the development characteristics of such disasters, a prevention and control approach for upstream accumulations stabilization is proposed in order to provide a reference for the study on startup mechanism and control of high and steep slope accumulations.

**Key words:** collapsed accumulation; slope debris flow; non-uniform coefficient; discrimination index; prevention and control

汶川地震诱发崩塌 2383 处,绝大部分的地震地质灾害害点都分布在 20°~50°的范围内,其数量占总数的 86.8%,其中以 40°~50°范围分布密度最大<sup>[1]</sup>。强震区震级高、释放能量大、破坏力强、波及面广,震后强震区在山区高陡斜坡中上部形成大量崩塌堆积体,岩石破碎后形成大量粗大的块石,这些

块石连同山体表层碎屑物质一同堆积暂时停留在坡体中上部,形成表面接近自然休止角的高陡斜坡堆积体。堆积体由于形成时间短,结构松散,空隙度大,表面坡度大,非常不稳定,如遇强降雨极易失稳。由于堆积体远离下方居民点没有成灾,当地政府和居民存在侥幸心理,防范意识薄弱,一旦后期在强降

收稿日期:2018-07-01

基金项目:中国地质调查局地质调查项目“涪江流域 1:5 万环境地质调查”(编号:DD20160251)

作者简介:余涛,男,汉族,1981 年生,硕士,长期从事地质灾害成灾机理和防治技术研究工作,四川省成都市郫都区现代工业港(北区)港华路 139 号,94393175@qq.com。

雨诱发下形成坡面泥石流,形成新的次生地质灾害,将造成严重损失,威胁下方附近居民的生命财产安全。

高陡斜坡崩塌堆积体启动形成潜在泥石流由于其突发性、快速致灾性,成为预报和防治的难点。尤其是以前堆积体下方没有成形沟道的潜在泥石流。其规模不会很大,但先兆较少,流速快,“来去匆匆”,威胁较大,防不胜防。

因此,通过典型案例平石板坡面泥石流,提前判别高陡斜坡崩塌堆积体启动坡面泥石流条件,对其进行防治。在根源上减少灾害链的暴发。完善并建立一套行之有效的平石板崩塌堆积体启动坡面泥石流的判别方法及防治技术方法,具有重大而深远的意义。

## 1 灾害点概况

平石板坡面泥石流(图 1)位于绵阳市北川县开坪乡场镇,白草河左岸,沟口为北川县开坪乡场镇东南侧,正对开坪乡卫生院,沟口地理坐标东经  $104^{\circ}15'37.24''$ ,北纬  $31^{\circ}57'33.87''$ 。沟域形态为长条状,沟域纵向长度 610 m,平均宽度 90 m,沟域面积  $0.61 \text{ km}^2$ 。沟域最高点高程 1277 m,沟口与主河交汇处高程 805 m,相对高差 472 m。主沟长 720 km,沟谷平均纵坡降 645.3‰。



图 1 平石板沟全貌照片

流域属后龙门山区,区内构造形迹走向以北东—南西向为主,构造上为开坪村倒转向斜 SE 翼。受挤压变形作用明显,产状扭曲,岩体破碎<sup>[2]</sup>。出露地层为志留系上中统茂县群 SM<sup>5</sup> 绢云英千枚岩,岩性较为软弱,在断层作用下,节理面发育,岩体破碎,斜坡上主要覆盖残坡积层、崩坡积层。

平石板沟“5.12”地震前从未暴发过泥石流,也无明显沟道。斜坡上部“5.12”地震中坡顶高程 1075

~1277 m 发生崩落,崩塌堆积体厚度在 1~6 m,纵向长度 290 m,宽 88 m,平均纵坡 534‰,崩塌堆积体面积  $21784.67 \text{ m}^2$ ,体积  $47926.3 \text{ m}^3$ (见图 2)。崩塌堆积体下缘距离卫生院直线距离 230 m,并未引起充分重视。



图 2 平石板沟崩塌堆积体全貌

在 2010 年“8.13”特大山洪暴雨引发下,崩塌堆积体下部表层启动,在平坦剖面上拉出一条截面  $3 \text{ m} \times 2 \text{ m}$  的沟道形成坡面泥石流(见图 3),拉槽过程不断补给物质而增大规模,随着物质和能量不断积累,最后形成具有较大破坏能力的泥石流<sup>[3]</sup>。冲出固体物质约  $1600 \text{ m}^3$ ,导致场镇桥涵堵塞,泥石流漫入医院、居民房屋和道路,造成经济损失 900 余万元。“8.13”泥石流后政府于 2011 年开始在下游修筑拦排结合防治工程,2013 年“7.9”在当日降雨量 241 mm 下(50 年一遇暴雨),平石板沟再次暴发泥石流,防治工程局部失效,谷坊坝掏蚀坝底,基础悬空,排导槽右侧边墙基本被冲毁,公路涵洞淤积,泥石流再次溢出沟道。所幸暴发前当地居民已疏散转移,并未造成人员的伤亡。



图 3 2010 年平石板沟泥石流拉槽

平石板沟崩滑物源总量  $54087.5 \text{ m}^3$ ,其中动储量为  $14203.1 \text{ m}^3$ ;崩塌堆积体物源总量  $47926.3 \text{ m}^3$ ,可动方量  $11585.3 \text{ m}^3$ 。其中物源、动储量,崩塌

堆积体占到 88.61%、81.56%，物源统计如表 1 所示。

表 1 坡面泥石流冲沟物源统计

类型	面积/m <sup>2</sup>	平均厚度/m	方量/m <sup>3</sup>	可动方量/m <sup>3</sup>
崩塌体	16789.79	0.2	3358.0	235.1
崩塌堆积体	21784.67	2.2	47926.3	11585.3
沟道物源	2548.36	1.1	2803.2	2382.7
合计			54087.5	14203.1

平石板沟运动力学参数见表 2<sup>[4]</sup>，根据泥石流推理计算结果的情况，2010 年泥石流暴发规模一次固体物质冲出量为 1600 m<sup>3</sup>，按照降雨频率应为  $P=2\% \sim 5\%$ 。而 2013 年泥石流大致为 50 年一遇。

表 2 平石板坡面泥石流主要运动力学参数统计

参数	频率/%	值
泥石流重度 $\gamma_c/(t \cdot m^{-3})$		1.57
最大冲起高度/m		0.32
泥石流爬高/m		2.07
弯道超高/m		0.42
最大冲刷深度/m		2.54
泥石流流速 $V_c/(m \cdot s^{-1})$		5.04
泥石流冲击力 $P/kPa$		52.4
石块冲击力 $F/kPa$		27.41
暴雨洪峰流量/(m <sup>3</sup> · s <sup>-1</sup> )	5	6.86
	2	7.54
泥石流峰值流量/(m <sup>3</sup> · s <sup>-1</sup> )	5	10.67
	2	13.21
泥石流一次过程总量/m <sup>3</sup>	5	4225.32
	2	5231.16
泥石流一次固体冲出量/m <sup>3</sup>	5	1807.128
	2	1459.656

## 2 崩塌堆积体启动条件分析

陡坡坡面物源破坏特点，初始浸润阶段—整体失稳—产流冲蚀效应产生及细颗粒迁移侵蚀阶段—土体溜滑—坡面物源转化为泥石流体并阵性暴发<sup>[5]</sup>。崩塌堆积体启动受粒径组成、流高比、堆积体坡前纵坡、汇水面积等因素影响。

### 2.1 粒径不均匀系数 $K$ 分析

崩塌堆积体呈现上粗下细的倒石堆结构。松散堆积体失稳启动并泥石流化是流域降雨作用下堆积体内潜水位不断抬升、水力环境不断劣化的结果<sup>[6]</sup>。形成坡面流前提是降雨量大于雨水在堆积体入渗量，且随着时间增长<sup>[7]</sup>。若堆积体内部缝隙较大，整体结构性很差，在强降雨作用下，雨水可以很快顺缝隙进入堆积体内，短时间内达到饱水后便会使堆积

体失稳形成坡面泥石流。反之，堆积体中细颗粒所占比例很大，粗颗粒间的缝隙被细颗粒所填充，使得整个堆积体的结构性很好，渗透性较差，在强降雨条件下，雨水只是在表面形成冲刷，没有破坏整体的结构性，不易形成坡面泥石流。

通过泥沙不均匀系数  $K$ <sup>[8]</sup>

$$K = D_{60}/D_{10} \quad (1)$$

式中： $D_{60}$ ——堆积体中百分含量累计达到 60% 的颗粒粒径； $D_{10}$ ——堆积体中百分含量累计达到 10% 的颗粒粒径。

当  $K < 5$  时，粒度均匀；当  $5 < K < 10$  时，粒度均匀程度中等；当  $K > 10$  时，粒度不均匀。

高陡斜坡堆积体稳定性评价公式<sup>[9]</sup>

$$K_0 = 18.487 \ln P - 33.389 \quad (2)$$

$$K_0 = 20.622 \ln P - 48.476 \quad (3)$$

式中： $K_0$ ——不含细颗粒的不均匀系数，范围为 5~40； $P$ ——高岭土含量，范围为 0%~55%。

$K$  大于式(2)中  $K_0$ ，堆积体不稳定，强降雨时失稳发生坡面泥石流的可能性较大； $K$  小于式(3)中  $K_0$ ，堆积体稳定性较好；式(3)中  $K_0 < K < 式(2)$  中  $K_0$ ，可以认为该堆积体为不稳定体的临界区，在强降雨条件下存在失稳发生坡面泥石流的可能性。

平石板崩塌堆积体大小混杂，整体结构性很差，粒径一般为 20~70 cm，巨石含量约 15%，巨石大小为 1~2 m，其余为碎石土，该层厚度为 1~5 m，成分为千枚岩。平石板堆积体不均匀系数  $K$  为 12.4，为粒度不均匀。而且  $K$  大于式(2)中  $K_0$ ，满足高陡斜坡堆积体稳定性评价公式滑动条件。在强降雨作用下，雨水可快速进入堆积体内，饱水后便会使堆积体失稳启动。

### 2.2 崩塌堆积体启动泥石流判别指标

松散崩塌土的流动化过程中流高比超过崩塌土流高比的  $1 + \omega/\omega_L$  倍时形成泥石流<sup>[10]</sup>。Ellen 等人于 1987 年提出了判别崩塌堆积体启动泥石流的指标，把崩塌土饱和时的含水量与崩塌土的液限的比值称为流动化指数(A.M.I)。并提出了崩塌土流动化的判别标准<sup>[11]</sup>。

$A.M.I = \omega/\omega_L > 1$ ，容易产生流动化。

$0.45 < A.M.I < 1$ ，为了能够流动化必须增加含水量。

$A.M.I = \omega/\omega_L < 0.45$ ，不能形成泥石流。其中  $\omega/\omega_L$  为崩塌土饱和时的含水量与崩塌土的液限

的比值。

石川芳治认为崩塌堆积体启动泥石流流动的判别标准<sup>[12]</sup>：

$l/h < 4.0$  不容易产生流动； $l/h > 7.5$  容易产生流动。 $l$  为崩塌前缘滑出位置开始的水平距离； $h$  为崩塌高度； $l/h$  为松散崩塌土流动化过程的流高比。

平石板崩塌堆积体流动化指数 ( $A.M.I$ ) 为 1.12, 容易产生流动化, 启动坡面泥石流；而松散崩塌土流动化过程的流高比  $l/h$  为 8.1, 达到启动条件 (见表 3)。

表 3 平石板沟崩塌堆积体启动泥石流判别标准

判别标准	作者	平石板崩塌堆积体
$w/w_L > 1$	Ellen 等人	$w/w_L = 1.12$
$l/h > 7.5$	石川芳治	$l/h = 8.1$

### 2.3 坡前纵坡 $P$

松散崩塌土能否流动化取决于土体含水状态、坡前纵坡, 以及运动中与水流掺混程度。崩塌土要达到与水流充分掺混, 必须有足够掺混距离, 就是说崩塌土只有具有相当长的运动距离, 才能有时间与水流充分掺混, 崩塌土要一定运动距离, 坡前倾角要大于某一临界值<sup>[13]</sup>。

对于松散崩塌堆积体要形成坡面泥石流的条件需要一定的掺混距离及势能, 崩塌堆积体的坡前倾角必须大于某一临界纵坡, 堆积体坡前纵坡大, 势能极易转换为动能。芦田和男认为崩塌堆积体在流动时的纵向倾角为  $12^\circ$ , 坡前纵坡  $> 12^\circ$  就能产生流动化；而高桥保认为水石流形成的临界坡度为  $15^\circ$ <sup>[14]</sup>, 石川芳治认为坡前纵坡  $> 9^\circ$  就能出现流动化。达到临界纵坡以后, 泥石流冲出量会随着坡度增加而增加<sup>[15]</sup>。

通过对涪江上游禹里乡倒座庙泥石流、回头漩坡面泥石流、王家岩崩塌等 12 处  $> 2000 \text{ m}^3$  崩塌堆积体进行实地调查, 发现大致以坡前纵坡  $12^\circ$  为界, 7 处诱发泥石流的崩塌堆积体坡前纵坡均  $> 12^\circ$ , 平均纵坡  $18.7^\circ$ ；而没有启动形成泥石流的堆积体, 平均纵坡  $7.6^\circ$ , 仅老鹰岩崩塌堆积体纵坡为  $13^\circ$ 。从以上数据可以初步判断, 坡前纵坡  $> 12^\circ$  产生坡面泥石流可能性大, 坡前纵坡  $> 12^\circ$  堆积体稳定性较好或者崩塌堆积体在短暂流动后在缓坡上快速停止, 不会形成坡面泥石流。而开坪乡平石板坡面泥石流坡

前纵坡为  $29^\circ$ , 为 2010 年和 2013 年 2 次暴发坡面泥石流提供了良好的势能, 势能转换为高动能同时造成下游沟道拉槽现象严重。

### 2.4 崩塌堆积体上游汇水面积 $S_{\text{汇}}$ 与崩塌堆积体面积 $S_0$ 比值 $t$

采用崩塌堆积体上游汇水面积的平面投影面积  $S_{\text{汇}}$  与崩塌堆积体平面面积  $S_0$  比值  $t$  来反应堆积体启动的汇水条件。比值  $t$  越大, 表明单位面积堆积体的汇水面积越大, 启动泥石流的可能性也相应增高。从涪江上游 12 个点统计数据表 3 来看,  $t > 0.6$  就启动形成泥石流可行性大,  $t < 0.5$  诱发泥石流可能性较小。  $0.5 < t < 0.6$ , 可以认为该堆积体为不稳定的临界区 (见图 4)。

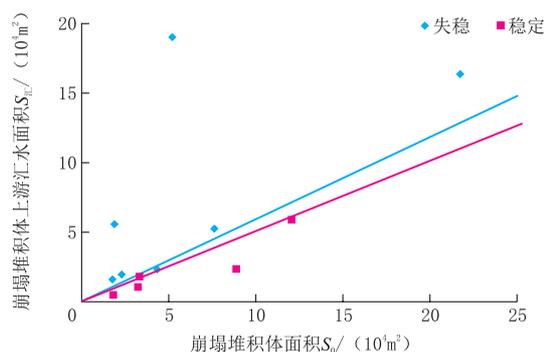


图 4 平石板沟崩塌堆积体启动泥石流判别标准

平石板沟崩塌堆积体上游汇水面积  $S_{\text{汇}}$  为  $16.46 \times 10^4 \text{ m}^2$ , 崩塌堆积体面积  $S_0$  为  $21.78 \times 10^4 \text{ m}^2$ , 两者比值  $t$  为 0.76,  $t > 0.6$ , 易启动堆积体形成泥石流。

### 3 防治建议

目前高陡斜坡中上部崩塌堆积体由于未形成坡面泥石流前远离威胁对象, 而且堆积体下方在暴发泥石流前并没有沟道, 基本采取成灾后进行治疗的思路, 针对性较差。

这类灾害防治具备以下特点: (1) 启动点位置较高, 坡度较大, 上大型工程难度大, 大型工程施工势必对坡体中下部坡体造成扰动破坏, 形成新的物源; (2) 由于坡面泥石流首次启动前, 中下游没有明显沟道, 灾前不能清楚判别泥石流流向, 在中游进行拦挡的可能性较小, 下游防治存在一定的难度<sup>[16]</sup>; (3) 纵坡较大, 修筑传统拦挡工程坝库容小, 坡面泥石流一旦启动, 拉槽现象较为严重, 泥石流存在“裹雪球”现象。

根据以上特征,高陡斜坡崩塌堆积体在判别可启动形成坡面泥石流情况下,防治宜针对中上游,采取固源崩塌堆积体,防止堆积体启动的思路。由于地形及运输条件限制,应减少在上游大开大挖,宜采取预制、轻便、就地取材等防治工程。可采用便携式施工小口径桩林坝、就地取材钢筋石笼谷坊坝、预制谷坊坝(拦渣墙)、预制可伸缩截水沟等在上游进行防治。

平石板坡面泥石流 2011 年工程中未有效采取对崩塌堆积体进行固源措施,导致工程在 2013 年泥石流中局部失效,谷坊坝基础受掏蚀、排导槽部分损坏,路面涵洞堵塞。新的防治工程采用固源崩塌堆积体的思路,在源头阻止堆积体启动。在崩塌堆积体前缘修建一排桩板墙(抗滑桩+挡土板),抗滑桩共布置 9 根,桩长为 13.0 m,桩身截面尺寸 1.5 m × 2.0 m,桩间距 5 m,桩心采用 C30 砼浇筑,嵌固段为 5.0 m。工程施工后,5 年内堆积体结构紧密,堆积体部分胶结,生长植被,再未暴发泥石流。

#### 参考文献:

- [1] 黄润秋,李为乐.“5.12”汶川大地震触发地质灾害的发育分布规律研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(12):2585-2592.
- [2] 冯金炜,马超,李勇,等.龙门山北段地貌发育特征及其形成因素分析——以通口河治城段流域为例[J].四川师范大学学报(自然科学版),2018,41(2):273-279.
- [3] 崔鹏,邹强.山洪泥石流风险评估与风险管理理论与方法[J].水利学报,2016,35(2):137-147.
- [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,1991:125-129.
- [5] 乔建平,李明俐,杨宗吉,等.基于模型试验的泥石流坡面物源启动预警模型[J].水科学进展,2018,29(1):64-72.
- [6] 吴永,何思明,裴向军,等.震后沟道泥石流启动条件——松散堆积体雨中失稳的水力学机制分析[J].岩石力学,2012,33(10):3043-3050.
- [7] 张世殊,裴向军,张雄,等.强震区泥石流坡面物源发育规律与侵蚀坡度效应研究[J].岩石力学与工程学报,2016,32(S2),4139-4147.
- [8] 编写组.工程地质手册[M].北京:中国建筑工业出版社,1975:135-136.
- [9] 韩林,鲁科,余斌.强震区硬岩崩塌形成的高陡斜坡堆积体形成泥石流的实验研究[C]//第三届全国岩土与工程学术大会论文集,294-298.
- [10] 徐永年.崩塌土流活化机理及泥石流冲淤特性的实验研究[D].北京:中国水利水电科学研究院,2001.
- [11] S.D.Ellen, R.W.Fleming. Mobilization of debris flows from soil slips, San Francisco Bay region, California[J]. Geological Society of America Reviews in Engineering Geology, 1987, (7):31-40.
- [12] 石川芳治.地震による土石流の発生に係わる地形[J].地质条件,砂防学会誌,1999,51(5).
- [13] 徐永年,匡尚富,黄永,等.崩塌土流活化机理的实验研究[J].水利学报,2002,(10):87-90.
- [14] 芦田和男,高桥保,道上正规.河流泥沙灾害及其防治[M].北京:水利电力出版社,1987.
- [15] 林炳森.崩塌型土石流潜在土方量推估模式之研究[D].中国台北:国立中心大学,2009.
- [16] 黄海,石胜伟,谢忠胜.汶川震区哈尔滨沟泥石流活动特征及防治[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(7),24-28.