

甲司口沟泥石流流动力学参数及堵河可能性计算

董晓叶

(阿坝藏族羌族自治州理县自然资源局,理县 623100)

摘要: 以甲司口泥石流为工程实例,利用遥感影像、无人机测量、现场调查等,对泥石流沟发育特征进行分析和评价;计算泥石流流动力学参数,并根据计算结果计算判断堵河可能性,为泥石流防治工程设计提供科学依据。研究表明:甲司口沟沟道总长度 13.9 km,流域面积 80.8 km²,流域内高差近 3 600 m,流域内物源总储量为 1.025×10⁴ m³,泥石流物源以沟道堆积物源、崩塌堆积物源为主,甲司口沟具备形成泥石流的地形、物源及水源条件;甲司口沟泥石流流动力学参数计算结果与灾害史实测数据相符;杂谷脑河有发生堵塞形成溃决性泥石流灾害的可能,经过计算采用以“拦”为主的泥石流治理方案时,发生泥石流堵塞杂谷脑河的可能性较小。

关键词: 泥石流;地质灾害;流动力学参数;堵塞河流

中图分类号: P642.23 **文献标识码:** A

CALCULATION OF DYNAMIC PARAMETERS OF DEBRIS FLOW AND THE POSSIBILITY OF RIVER BLOCKING IN JIASIKOUGOU

DONG Xiao-ye

(Lixian Natural Resources Bureau of the Aba Tibetan and Qiang Autonomous Prefecture, Li County 623100, China)

Abstract: Taking the debris flow as an engineering example, the development characteristics of the debris flow trench were analyzed and evaluated by using remote sensing images, UAV surveys, and on-site investigations. The dynamic parameters of debris flow were calculated, and the possibility of river blocking was calculated according to the calculation results, which provided a scientific basis for the design of debris flow prevention and control engineering. The results show that the total length of the Jiasikougou channel is 13.9 km, the area of the watershed is 80.8 km², the height difference in the basin is nearly 3 600 m, the total reserves of material sources in the watershed are 10.25 million m³, the debris flow sources are mainly channel accumulation sources and landslide accumulation sources, and Jiasikougou has the topography, material source and water source conditions for forming debris flows. The calculation results of the dynamic parameters of debris flow in Jiasikougou were consistent with the measured data of disaster history. There is a possibility that the Zagu Brain River may be blocked to form a collapse debris flow disaster, and when the “block” based debris flow control scheme is calculated, the possibility of mud and rock flow blocking of the Zagu Brain River is small.

Key words: debris flow; geological disaster; dynamic parameters; river blockage

地震诱发了大量崩塌滑坡体,震后泥石流以及雨季水流的作用,具有活动频率高、爆发性强、冲击力大的突发性地质灾害,沟道内的物源在水流的挟裹下短时间内大量冲出,是工程建设过程中亟需考虑的问题^[1]。

目前专家学者已采用基于某种数学方法采用定量或半定量加定性的分析方法,建立泥石流地质灾害评价模型,泥石流的危险性^[2-5]。例如:邓恩松等^[6]以中巴公路奥布段为研究对象,运用主成分分析法建立公路沿线的泥石流灾害危险性评价模型;王晨晖等^[7]提出了基于粗糙集理论的粒子群算法优化支持向量机模型评价泥石流的危害性。然而泥石流动力学参数计算结果对河流的影响缺乏实际定量评价,特别是泥石流的冲出物质堵河可能性的计算和判别方法有进一步研究的必要。

甲司口沟具有泥石流灾害史,因此,正确认识甲司口沟泥石流发育特征及泥石流动力学参数,并根据计算结果提出防御工程建议,以期为泥石流灾害防治与治理措施提供理论依据。

1 泥石流形成条件分析

1.1 地形条件

甲司口沟流域为高中山峡谷地貌,北高南低,其汇水面积大,沟域面积达 95 km²,流域平面形态呈长方形,横向宽约 8.2 km;主沟长度较长,主沟长 15 km;流域高差大,最高海拔为 5 597 m,沟口最低海拔高程 2 000 m;沟道总体纵坡较大,沟域后缘纵坡约 400‰,中上游纵坡较大达 120‰~150‰,沟口至杂谷脑河交汇段纵坡 100‰~120‰;支沟发育,共发育 6 条较大的支沟,支沟长度一般在 3~5 km,支沟纵坡一般在 200‰~300‰,其影像图如图 1 所示。甲司口沟在地形上具备形成泥石流的高差、汇水面积等条件。

沟源处沟道较缓,坡度在 13°左右,沟道切割较浅,岸坡平缓,短小支沟发育较多。上游段沟道坡度较陡,坡度在 20°左右,上部地形开阔,沟道切割较浅,其余部分沟道切割较深,沟道两岸岸坡较陡。中上游段上部沟道切割较深沟道较窄,下部沟道切割较浅,沟道宽度有所增加,两岸岸坡坡度减缓。沟道中上游段上部发生明显偏转后于下部转回主流向,总体流向无变化。中下游沟道切割较浅,沟道平缓,平均坡度在 6°左右,沟道开阔,两岸岸坡陡峻。

1.2 物源条件

从现场调查、遥感影像和无人机测量,物源主要分布于 2 300 m 以上高程段,崩塌堆积物源和沟道



图 1 甲司口沟全貌影像图

堆积物源为主要泥石流物源。

崩塌类物源:根据其崩塌源的不同分为花岗岩等岩浆岩体和土质崩滑堆积物。受地震影响,岩质崩塌堆积体主要分布于冲沟两侧斜坡中下部,崩塌规模往往较大,物质均一性极差;土质崩塌堆积体主要发育于冰水堆积基座阶地边缘,因具有良好的临空条件,在重力侵蚀作用下发生崩滑,形成阶坎变形,如图 2 所示。根据统计结果可知,崩塌(滑)体物源总储量 $135 \times 10^4 \text{ m}^3$,动储量 $38 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。



图 2 甲司口沟崩塌类物源特征

沟道堆积物源:根据野外调查情况,甲司口沟沟道呈深切的“U”字形或浅“V”字形沟谷,泥石流冲槽较深,局部堆积厚度达 30 m 以上,预测堆积方量达 $3\,300 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。支沟沟道堆积物厚度 3~8 m,沟道侵蚀宽度在 10 m 以上,如图 3 所示。根据统计结果可知,沟道堆积物源总储量 $850 \times 10^4 \text{ m}^3$,动储量 $172 \times 10^4 \text{ m}^3$,现阶段甲司口沟具备形成泥石流的物源条件。

1.3 水源条件

水源条件是诱发泥石流的重要因素,岸坡堆积的松散物质在充水条件下有效应力大幅降低,下滑力增加,从而发生失滑现象。

甲司口沟位于杂谷脑河右岸,总体流向由南向北,山体两侧“树枝状”冲沟发育,后缘及两侧岸坡沟床较陡,汇水面积较大,具有短时间内地表水汇聚的

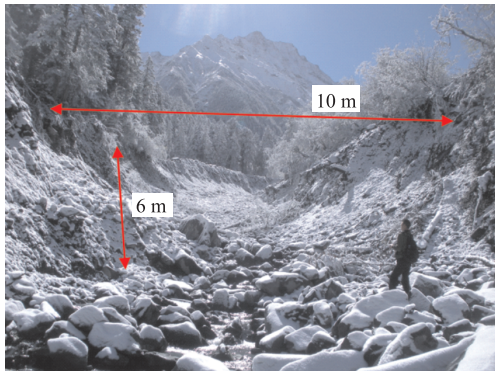


图3 甲司口沟道物源特征

水流条件。该地区年最大降雨量为 709.1 mm, 最大 24 h 降雨量为 55.9 mm, 且流域沟道内常年有水, 沟水的流量为 $2 \text{ m}^3/\text{s}$, 流水冲击力较大, 冲蚀和携带物质的能力较强。在甲司口沟灾害史中, 暴雨条件下, 水流急速将裹带松散物质顺流而下, 曾形成破坏力很强的泥石流, 因此甲司口沟具备形成泥石流的水源条件。

2 泥石流发育特征

2.1 分区特征

按泥石流形成条件、松散固体物源或堆积物组成特征, 沟域可划分为形成区、流通区、堆积区 3 个功能区。

形成区(上游段): 分布 2 600 m 以上高程, 为泥石流物源主要集中区段, 受灾害史影响, 崩塌地质现象发育, 沟道两侧岸坡分布大量崩塌、不稳定斜坡, 松散堆积体厚度相对较大, 具有大量松散固体物源分布。

流通区(中游段): 位于 2 180~2 600 m 高程段, 沟道平缓, 沟床弯曲, 河流冲刷现象明显, 沟道局部深切呈“V”字型。沟道长约 3.8 km, 沟道内主要以漂石土为主, 堆积厚度一般在 8 m 以上。

堆积区(下游段): 位于 2 180~2 000 m 高程段, 该区段沟道长约 1.0 km, 沟道平缓, 沟床平均比降 110‰, 整体沟道呈“U”字型, 利于泥石流的堆积。

2.2 冲淤特征

物源区(形成区)冲淤特征: 沟道内以松散的碎石土、漂石为主, 平均厚度在 8~10 m, 其冲刷能力弱。因主沟沟道较宽, 主沟内冲刷深度较浅, 在 1~2 m 左右, 支沟因坡降较大, 冲刷深度一般在 5~8 m。该区冲淤特征应表现为以冲为主的特征。

流通区冲淤特征: 沟道内主要堆积松散的碎石土、漂石, 平均厚度在 5~8 m。而随着汇水面积的增大, 松散堆积体冲刷能力弱, 强大的水动力条件决

定了流通区以冲为主的特征, 历史泥石流冲刷深度一般在 2~5 m 左右, 最大冲淤深度 10 m; 局部表现为冲淤平衡的特征, 淤积厚度约 2~3 m, 最大淤积厚度可达 5 m 左右。

堆积区: 沟道宽阔平缓, 沟床呈“U”字型, 沟床平均比降 115‰, 宽约 50~100 m 不等, 淤积厚度一般在 2~3 m 左右, 最大可达 5 m 左右, 如图 4 所示。



图4 甲司口堆积区特征

3 泥石流特征值计算

3.1 泥石流流体重度

泥石流流体重度主要有查表法和试验计算两种方法。实验手段, 主要在物源区利用泥石流堆积物配置泥石流浆体^[4], 其计算方法式(1), 计算所得甲司口泥石流重度计算平均值为 $1.80 \text{ t}/\text{m}^3$ 。

$$\gamma_c = \frac{G_c}{V_v} \quad (1)$$

式中, γ_c 为泥石流重度 (t/m^3); G_c 为配制泥浆重量 (t); V_v 为配制泥浆体积 (m^3)。

根据《泥石流灾害防治工程勘察规范》^[8] 进行易发程度评分, 评分结果为 119 分, 然后按附表 I.2 查表确定甲司口泥石流重度, 其结果为 $\gamma_c = 1.92 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。配方法测定比较有代表性, 因此本次泥石流重度采用现场配方测定结果, 取 $\gamma_c = 18.0 \text{ t}/\text{m}^3$ 。

3.2 流量计算

常用的泥石流流量计算方法为雨洪法, 《四川省中小流域暴雨洪水计算手册》进行的泥石流计算, 可以保证结果的准确性和可信度^[9], 暴雨洪水流量 Q_B 计算公式如下:

$$Q_B = 0.278\psi \frac{s}{\tau^n} F \quad (2)$$

式(2)中, ψ 为洪峰径流系数, $\psi = f(\mu, \tau^n)$; $\tau^n = f(m, s, J, L)$, 其中 s 为暴雨雨力, mm/h ; m 为汇流参数; J 为沟床平均纵比降; L 为沟道长度, km ; n 为暴雨指数; F 为流域面积, km^2 ; τ 为流域汇流时

间, h ; μ 为入渗强度, 根据公式 $\mu = 3.6F^{-0.19}$ 计算, 单位为 mm/h。

$$Q_p = 0.278r_p i_B F \quad (3)$$

式中, Q_p 为频率为 P 的暴雨洪水设计流量 (m^3/s); i_B 为产流系数, 取 0.5; r_p 为小时平均雨强 (mm/h); F 为流域面积 (km^2)。

泥石流洪峰流量 Q_c 按式(4)计算:

$$Q_c = (1 + \Phi)Q_p \cdot D_c \quad (4)$$

式中, Q_c 为频率为 P 的泥石流洪峰值流量 (m^3/s); 取 $1 + \Phi = 2.735$; γ_w 为清水的重度 (t/m^3), 为 $1.0 t/m^3$; γ_H 为泥石流中固体物质比重 (t/m^3); D_c 为泥石流堵塞系数。

根据甲司口特征, 采用类比的经验值确定泥石流固体颗粒容重 $2.65 t/m^3$, 确定甲司口堵塞系数 D_c 为 1.2。甲司口沟各断面计算参数见表 1。

表 1 甲司口沟(主沟)各断面计算参数

计算位置	上游	中游	下游	全流域
流域面积 F/km^2	54.3	59.8	77.2	80.8
沟长 L/km	8.4	12	12.2	13.9
河道比降 $J/\%$	0.11	0.12	0.15	0.13

3.3 泥石流流速

泥石流流速采用式(5)计算^[10]:

$$V_c = \frac{1}{\sqrt{\gamma_H \varphi + 1}} \frac{1}{n} H_c^{2/3} I_c^{1/2} \quad (5)$$

式中, V_c 为泥石流流速 (m/s); γ_H 为泥石流中固体物质比重 (t/m^3); φ 为泥石流泥沙修正系数; $1/n$ 为清水河沟床糙率系数; H_c 为平均泥深 (m); I_c 为泥位纵坡率。

3.4 一次泥石流过流总量

按式(6)、式(7)分别计算各设计频率一次泥石流总量 Q 和一次泥石流固体冲出物:

$$Q = KTQ_c = 0.0378TQ_c \quad (6)$$

其中, 当 $F < 5 km^2$, $K = 0.202$; $F = 5 \sim 10 km^2$, $K = 0.113$; $F = 10 \sim 100 km^2$, $K = 0.0378$; $F > 100 km^2$, $K < 0.0252$ 。

$$Q_H = Q(\gamma_c - \gamma_w) / (\gamma_h - \gamma_w) \quad (7)$$

式中, γ_w 为水容重, tf/m^3 ; γ_c 为泥石流重度, 取 $18.0 kN/m^3$; T 为泥石流持续时间, s 。

泥石流沟计算所得的一次泥石流过程总量和泥石流输砂量见表 2。

3.5 泥石流冲击力计算

泥石流整体冲压力按式(8)计算^[11]:

$$\delta = \lambda \frac{\gamma_c}{g} V_c^2 \sin \alpha \quad (8)$$

式中, δ 为泥石流整体冲压力 (Pa); λ 为受力体形状

系数, 方形为 1.47, 矩形为 1.33, 圆形、尖端、圆端形为 1.00; V_c 为泥石流平均流速 (m/s); α 为建筑物受方面与泥石流冲压力方向的夹角 ($^\circ$), 取 90° 。

表 2 甲司口沟主沟一次泥石流过程总量和泥石流输砂量

设计频率 $P/\%$	1	2	5	10	20
设计最大洪水流量 / $m^3 \cdot s^{-1}$	274.6	255.9	231.5	211.3	181.1
泥石流峰值流量 / $m^3 \cdot s^{-1}$	1126.5	1049.8	949.6	867.0	743.1
一次泥石流总量 / $m^3 \cdot s^{-1}$	49.05	45.72	41.35	37.75	32.36
一次泥石流输砂量 / $m^3 \cdot s^{-1}$	23.78	22.16	20.00	18.30	15.69

大块石的冲击力 F 按式(9)计算:

$$F = r \cdot V_c \cdot \sin \alpha_1 \cdot \frac{W}{C_1 + C_2} \quad (9)$$

式中, F 为单块巨石的撞击力, tf ; R 为动能折减系数, 取 0.3; α_1 为受力面与泥石流撞击面撞击角, 取 90° ; C_1 、 C_2 为巨石与建筑物的弹性变形系数, $C_1 + C_2 = 0.005$; W 为巨石重量 (tf)。

取 50 a、20 a 一遇泥石流计算结果, 对甲司口沟泥石流冲击力、单块巨石撞击力进行计算, 计算结果见表 3。

表 3 甲司口沟泥石流冲击力计算结果表

剖面位置	中游		下游		全流域	
设计频率 $P/\%$	2	5	2	5	2	5
泥石流整体冲压力 δ/Pa	32.9	28.6	42.4	24.3	42.2	49.3
单块巨石的撞击力 F/tf	2575	2400	2925	2213	2916	3154

现场选择泥石流物源区有代表性的部位测量了 6 个地点, 统计分析结果表明, 块径最大为 3 m, 最大体积达 $6 m^3$, 则 $W = 15 tf$ 。

3.6 泥石流爬高和最大冲起高度

泥石流爬高按式(10)、最大冲起高度按式(11)进行计算:

$$\Delta H = \frac{V_c^2}{2g} \quad (10)$$

$$\Delta H_c = \frac{bV_c^2}{2g} \approx 0.8 \frac{V_c^2}{g} \quad (11)$$

式中, ΔH 为泥石流最大冲起高度 (m); ΔH_c 为泥石流爬高 (m); b 为泥石流迎面坡度的函数。

计算时选择拟设拦挡工程的上、中、下游以及全流域进行计算, 计算结果详见下表 4。

表 4 主沟泥石流爬高和冲起高度计算表

剖面位置	上游		中游		下游		全流域	
设计频率 $P/\%$	2	5	2	5	2	5	2	5
泥石流流速 $V_c/m \cdot s^{-1}$	3.2	3.0	3.7	3.4	4.2	3.2	4.2	4.5
泥石流最大冲起高度/ m	0.5	0.5	0.7	0.6	0.9	0.5	0.9	1.0
泥石流爬高/ m	0.8	0.7	1.1	1.0	1.4	0.8	1.4	1.6

3.7 泥石流弯道超高

泥石流弯道超高指泥石流在凹凸地形条件下,在转弯处因凹岸处流速较快,凸岸受岸坡阻挡流速较慢,将对凹岸陡壁产生强大的侵蚀作用。泥石流弯道超高按式(12)进行计算:

$$\Delta h = \frac{2V_c^2 B}{gR} \quad (12)$$

式中, Δh 为泥石流弯道超高(m); R 为主流中心曲率半径(m); g 为重力加速度(m/s²); B 为泥面宽度(m)。

本次主要选择沟道中游、全流域进行计算,计算结果见表5,其计算结果与实测泥石流弯道超高结果误差在0.2 m范围之内,表明计算结果的准确度较高。

表5 甲司口泥石流弯道超高计算表

计算部位	泥石流平均流速 /m·s ⁻¹	泥面宽度 /m	主流中心曲率半径 /m	泥石流弯道超高 /m	实测泥石流弯道超高 /m
中游	3.79	60	150	1.17	1.00
全流域	4.97	33	170	0.98	0.90

4 泥石流堵河可能性计算

4.1 河流输砂能力计算

采用梅叶-彼德公式计算杂谷脑河输沙能力^[12]:

$$q_s = \frac{\left[\left(\frac{n'}{n} \right)^{3/2} \rho_s J - 0.047(\rho_s - \rho) d \right]^{3/2}}{0.125 \left(\frac{\rho}{g} \right)^{1/2} \frac{(\rho_s - \rho)}{\rho_s}} \quad (13)$$

其中, q_s 为推移质输沙率(t/m·s); n' 为河床平整情况下沙粒糙率, $n' = 26/d_{50}^{1/6}$; n 为河床糙率, $n = V/h^{2/3} J^{1/2}$; ρ 为水密度(kg/m³); ρ_s 为推移质比重(kg/m³),取2 650 kg/m³; d 为粒径(m),取0.06 m; d_{50} 为床沙粒径代表值,取0.2 m; J 为河床比降(‰),取60‰; V 为平均流速(m/s),取3.2 m/s; b 为河床宽度(m),取40 m。

根据计算可知, $q_s = 0.164$ t/m·s,杂谷脑河1 h推移质输沙量约23 616 t/h,该河1 h内能输移 0.89×10^4 m³。

4.2 堵河可能性的计算和判别方法

甲司口沟泥石流灾害史曾汇入杂谷脑河时发生堵塞,约有 2×10^4 m³泥石流堆积物堆积在甲司口中桥上下游,杂谷脑河输沙能力相对有限,不能完全对泥石流进行疏排。当发生泥石流时,杂谷脑河有发生堵塞形成溃决性泥石流灾害的可能。

泥石流堵河的经验判别公式^[13]:

$$\frac{\gamma_{支} Q_{支} V_{支} \sin \alpha_2}{\gamma_{主} Q_{主} V_{主}} \geq C_\gamma \quad (14)$$

式中, α_2 为泥石流沟入汇角(°); C_γ 为阈值,取1.44。

根据20 a一遇的泥石流参数特征值计算结果,分别按照上、中、下游设置稳拦工程进行计算判定,排导工程入汇角为50°,以全流域断面进行计算,计算结果如式(15)所示:

$$\begin{aligned} \frac{\gamma_{支} Q_{支} V_{支} \sin \alpha}{\gamma_{主} Q_{主} V_{主}} &= \frac{1.63 \times 480 \times 4.0 \times \sin 50}{1.0 \times 600 \times 3.2} \\ &= 1.35 \leq C_\gamma = 1.44 \end{aligned} \quad (15)$$

因此,当采用以“拦”为主的方案时,发生泥石流堵塞杂谷脑河的可能性较小。

5 结论

通过对甲司口沟泥石流研究发现:

(1) 甲司口沟曾发生过泥石流地质灾害,现阶段满足形成泥石流的地形、物源及水源条件。

(2) 采用式(1)~式(12)计算泥石流动力学参数,计算结果与实际测量结果相符。

(3) 采用式(13)计算泥石流沟口的河流输砂能力,并根据式(14)判断发生泥石流存在堵河的可能性。

(4) 根据泥石流发育特征,提出以“拦”为主的方案,并验证泥石流堵塞河流的可能性较小。

参考文献

- [1] 刘希林. 泥石流危险性评价[M]. 北京: 科学出版社, 1995.
- [2] 王有林, 赵志祥, 许晓霞, 等. 西藏某水电站坝前大型冰水堆积体稳定性研究[J]. 西北水电, 2021, 193(6): 38-43.
- [3] 康业渊, 张娜, 狄文龙. 基于模糊最优识别理论的水电工程泥石流危险性评价模型[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2017, 38(2): 56-60.
- [4] 陈宁生, 杨成林, 李欢. 基于浆体的泥石流容重计算[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2010, 37(2): 168-173.
- [5] 常文娟, 何文野, 王楷, 等. 一类型泥石流发育特征及危险性评价[J]. 地质灾害与环境保护, 2020, 31(3): 3-9.
- [6] 邓恩松, 魏学利, 李宾, 等. 中巴公路奥布段降雨型泥石流危险性评价[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(3): 1-8.
- [7] 王晨晖, 袁颖, 周爱红, 等. 基于粗糙集优化支持向量机的泥石流危险度预测模型[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(31): 70-77.
- [8] 中华人民共和国国土资源部. 泥石流灾害防治工程勘查规范(T/CAGHP006-2018)[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [9] 四川省水力电力厅. 四川省中小流域暴雨洪水计算手册[Z]. 成都: 四川省水力电力厅, 1984.
- [10] 中铁二院工程集团有限责任公司, 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都理工大学. 泥石流对铁路桥墩的冲击作用及综合整治技术试验[R]. 成都: 中铁二院工程集团有限责任公司, 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都理工大学, 2016. (下转第34页)