

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.202004075

基于能量耗散过程的拦砂坝泄流孔堵塞判别研究*

刘文润^{1,3}, 陈剑刚^{1,2}, 陈华勇^{1,2}, 王喜安^{1,3}

(1. 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室, 中国科学院成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041;
2. 中国科学院青藏高原地球科学卓越创新中心, 北京 100101; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 泄流孔堵塞对坝体结构稳定和长期安全运行有着极大的影响。现拦砂坝泄流孔的设计大多基于经验, 缺乏定量分析方法。基于泥石流在泄流孔中的能量耗散过程, 提出了基于获取必要参数情况下的泄流孔堵塞判别方法, 分析了泄流孔设计参数和泥石流性质对堵塞的影响。进一步通过对比验证了判别方法的合理性, 可将误差控制在15%以内。最后应用该法对四川省绵竹市文家沟的拦砂坝泄流孔进行了分析, 结果表明该坝泄流孔较易发生充满全孔的泥石流停淤堵塞, 与实地勘察结果一致。根据理论分析, 为保证泥石流的顺畅排导, 建议在该坝前布设能量调控设施, 调控进入泄流孔的泥石流流速使其控制在合理范围内。

关键词: 泥石流; 拦砂坝; 泄流孔; 堵塞

中图分类号: P642.23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)03-0614-09

Blocking Judgment of Check Dam Discharging Orifices based on Energy Dissipation Process

LIU Wenrun^{1,3}, CHEN Jiangang^{1,2}, CHEN Huayong^{1,2}, WANG Xi'an^{1,3}

(1. Key laboratory of Mountain Hazards and Surface Processes, Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, Chengdu 610041, China; 2. CAS Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Science, Beijing 100101, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The blocking of discharging orifices has a large influence on the stability of dam structures and long-term safe operation. The design of discharging orifices of sand bars is mostly based on experience and lacks a quantitative analysis method. By analyzing the energy dissipation process of debris flows in the spillway hole, a method based on the acquisition of necessary parameters is proposed for determining the clogging of discharging orifices, and the influence of the design parameters of the discharging orifices and the clogging of debris flows property is analyzed. The rationality of the discrimination method is further verified by controlling the error within 15%. Finally, using this method to analyze the discharging orifice of the Wenjiagou check dam in Mianzhu city, Sichuan Province. The results show that the discharging orifices of the Wenjiagou dam are more likely to be filled with debris flows, which is consistent with the field investigation results. According to the theoretical analysis, it

* 收稿日期:2020-04-25;修回日期:2020-09-04

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA23090403)、中科院青年创新促进会(2017426)、中科院“西部之光”人才项目资助

作者简介:刘文润(1996—),男,硕士研究生。主要从事山地灾害防灾减灾技术方面的研究。Email:liuwenrun@imde.ac.cn

通讯作者:陈剑刚(1982—),男,研究员,博士。主要从事泥石流灾害防治方面的研究。Email:chenjg@imde.ac.cn

is suggested to install energy control facilities in front of the dam. Regulate and control the flow rate of debris flows into the discharging orifice within a reasonable range, so as to ensure the smooth discharge of debris flow.

Keywords: debris flow; check dam; discharging orifice; blocking

引言

拦砂坝作为最常见的泥石流防治设施,可分为实体型拦砂坝和透过型拦砂坝^[1]。透过型拦砂坝在拦粗排细、调节流量、改善坝体受力方面较实体坝更有优势^[2]。如果泄流孔被泥石流堵塞,上游泥深将不断上升,拦砂坝坝体和坝基将承受泥石流带来的巨大静土压力和扬压力,不利于坝体结构稳定。而且坝体一旦垮塌,拦砂坝内拦蓄的泥沙将转化为泥石流的物源,造成泥石流流量的放大,给下游安全带来极大威胁^[3-4]。如在2010年8月13日文家沟特大泥石流事件之前,虽然文家沟内修建的谷坊坝设计了泄流孔,但泄流孔的堵塞导致了坝前水位的升高,加重了坝体的受力负荷,松散堆积物含水量也因达到饱和而变得非常不稳定,成为引发文家沟大型泥石流灾害的主因之一^[5]。因此,对拦砂坝泄流孔进行设计优化,使泥石流能够顺畅地排出泄流孔是保证拦砂坝结构稳定和降低后期维护费用的关键。

泥石流的停淤可分为水力型停淤和机械型停淤^[6-7],同样的,泄流孔堵塞可根据堵塞位置的不同分为机械力控制型洞口堵塞和水力控制型孔内堵塞。对于水力控制型孔内堵塞,如图1所示,稀性泥石流常因受排泄孔壁摩擦减速后,水力无法搬运的大颗粒在孔内沉积并阻碍后续泥石流通过排泄孔,形成分选型停淤堵塞;黏性泥石流则因自身黏性高,常发生整体型停淤堵塞。研究表明,透过型拦砂坝其调节流量功能主要取决于开口尺寸、泥石流性质、开口处的布置位置等^[8]。泄流孔的长度、直径、坡度、糙率和布置位置是泄流孔设计的关键性参数,直接关系到泥石流能否顺畅地通过泄流孔。随着国内外对透过型拦砂坝应用的深入,其过流能力的优化设计越来越被重视^[9]。但目前对拦砂坝泄流孔的设计尚无明确方法,大多依赖经验性分析,现行业规范针对泄流孔的布置位置给出“排泄孔尽可能成排布置在溢流坝段”和“单孔孔径大于等于2~4.5倍过流中最大石块粒径”的一般规定^[10],但未

进一步明确规范。经验设计中,常取泄流孔坡度纵坡率为0.05~0.10^[11]。王小军^[12]通过模型试验与数值模拟对不同来流状况下不同类型的泄流孔内泥石流排导性能进行了定性的比对,但对于泄流孔内泥石流能量耗散过程没有进行定量的分析。



(a) 分选型停淤堵塞 (b) 整体型停淤堵塞

图1 不同类型的水力型停淤堵塞

Fig.1 Different types of hydraulic jams

为得出拦砂坝泄流孔堵塞同各影响因子间的定量关系,为泄流孔形状、材料参数设计提供支持。本文通过分析泥石流在泄流孔内流动时的能量耗散过程,得到了可用于在已获取必要参数情况下进行泄流孔堵塞判别的方法。分析了泄流孔设计参数和泥石流性质影响孔内耗能的方式,得出了各影响因子对泄流孔堵塞影响程度。最后通过该方法对四川省绵竹市文家沟4#拦砂坝进行了分析,并通过实地勘察对结果进行了验证。

1 堵塞判别条件分析

王小军曾通过模型试验结合数值模拟指出,对于位于坝体中底部的泄流孔,在孔前水压力足够大时泥石流将充满整个泄流孔并处于有压排泄状态,同时有压排泄也是整个泥石流过程中最主要的过程^[12]。当泥石流暴发,坝前泥深快速上涨时,泥石流开始以 v_0 涌向泄流孔并以流速 v 开始在孔内流动。当泥位溢过泄流孔顶部后,在进口端处泥石流

充满整个泄流孔,如图2所示。本文重点分析泥石流溢过溢流堰后的阶段,此阶段可认为孔前流速、泥深处于稳定状态,泄流孔内泥石流流动处于稳定状态。此阶段中孔前总水头若不够大,则无法使泥石流在泄流孔内全程做有压管流动,此情况下泥石流进入孔内后将继续做加速流动并在泄流孔管道后段转变为明渠流动。由图2可知此时泄流孔内流速最低点为进口内侧处流速。

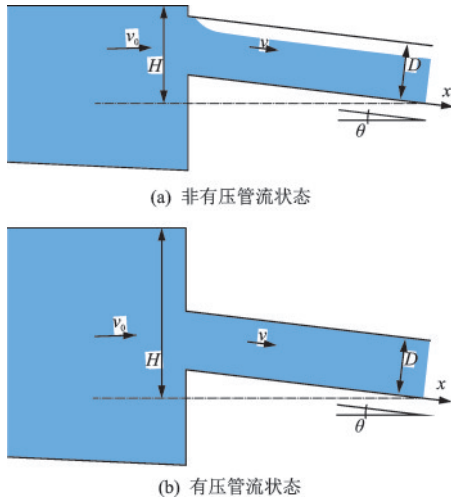


图2 泥石流进入泄流孔后可能出现的两种流动状态
Fig.2 Debris flow conditions in discharging orifice

若泄流孔前总水头足够,泥石流将充满整个泄流孔,并在孔内变为有压流动状态,之后随着孔前泥深的增大,泄流孔内泥石流流速也将不断增大。当孔前泥深达到最大值并维持不变后,泥石流在孔内将处于准平衡流态。此时泄流孔内泥石流各处的断面平均流速一致,且沿管道方向的管壁阻力等同于压力与重力分力之和。孔内流速由坝前总水头及泥石流在泄流孔内流动的能量损失共同决定。

不同于清水流,泥石流存在着临界不淤流速,当其流速低于临界不淤流速时,泥沙将不断沉降,进而影响后方泥石流的正常流动,最终导致泥石流在泄流孔内停止流动并堵塞泄流孔。根据《泥石流防治工程设计规范》^[13]可知,拦挡工程对泥石流重度的变化调控作用不显著。因此,本文在泄流孔长度较短的条件下假设泥石流容重不沿程发生改变是可行的。

泥石流在泄流孔内的两种流动状态具有很大差异,故在判别泄流孔是否堵塞前需先确定泥石流进入泄流孔后做何种流动方式,再判别在此流动方式下泄流孔内泥石流堵塞风险。本文仅考虑暴发

一次泥石流的总量大于拦砂坝库容的情况下泥石流满库溢流阶段。

由于泥石流进入泄流孔后流体充满全孔且水力坡降同泄流孔坡比一致是两种流动状态的分界点,定义此状态为临界状态。通过计算在泄流孔中泥石流流动的沿程能量损失,以及在进口端处的局部能量损失,将总能量损失与泄流孔出口端的能量相加,反算得到要保证泥石流在泄流孔内出现临界状态流动所需要的进口端外沿最低总水头为 H_1 ,再结合泄流孔进口端外沿的实际总水头 H_0 判别。当 $H_0 > H_1$ 时,则表示泥石流在进入泄流孔时的初始能量足以使泥石流在泄流孔内做有压管流。

当泄流孔内泥石流处于临界流动状态时,泄流孔内泥石流的沿程能量损失为:

$$h_f = \lambda \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \quad (1)$$

式中, L 为泄流孔的长度(m); D 为泄流孔的直径(m); g 为重力加速度(m/s^2); v 为孔内流速(m/s); λ 为沿程损失系数。

由曼宁公式可得:

$$\lambda = \frac{8gn^2}{R^{4/3}} \quad (2)$$

式中, n 为糙率; R 为水力半径(m)。

$$R = \frac{A}{\chi} = \frac{\pi D^2}{4\pi D} = \frac{D}{4} \quad (3)$$

式中, χ 为泄流孔内湿周(m); A 为泄流孔横截面积(m^2)。

上游泥石流涌入泄流孔内时,因截面变化导致的局部能量损失为:

$$h_j = \zeta \frac{v^2}{2g} \quad (4)$$

则当泥石流进入泄流孔后为匀速流动情况下,其总能量损失为:

$$h_w = h_f + h_j = \frac{v^2 n^2 L}{R^{4/3}} + \zeta \frac{v^2}{2g} \quad (5)$$

式中, n 为糙率。

由以上分析可知,处于临界状态下的泥石流速度为:

$$v = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} J^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

此时其水力坡降 J 同坡比 i 一致:

$$J = i \quad (7)$$

以泄流孔出口端水平面作为基准面,此时:

$$H_{\text{尾}} = 0 + 0 + \frac{v^2}{2g} = \frac{v^2}{2g} \quad (8)$$

临界状态下泄流孔进口位置外沿的总能量应为:

$$H_1 = h_f + h_j + \frac{v^2}{2g} = \frac{4^{4/3} n^2 v^2 L}{D^{4/3}} + (1 + \zeta) \frac{v^2}{2g} \quad (9)$$

根据坝前流速 v_0 与泄流孔前最大泥深 h , 可得实际的泄流孔进口位置的总能量为:

$$H_0 = h + L \sin \theta + \frac{v_0^2}{2g} \quad (10)$$

式中, θ 为泄流孔坡度; h 为泄流孔前最大泥深。

若要泥石流进入泄流孔后做有压管流排导, 则需满足:

$$H_0 > H_1 \quad (11)$$

将式(6)~(10)代入式(11)可得:

$$H_0 > Li + (1 + \zeta) \frac{R^{4/3} i}{2gn^2} \quad (12)$$

由式(12)可知, 泄流孔内泥石流的流动状态受坝前流速、泥深, 泄流孔高度位置、长度、坡度、直径, 泄流孔糙率、局部能量损失系数等共同影响。

泥石流的容重及性质对糙率有着较大影响, 随着泥沙含量的增大, 糙率值也将不断增大。对于无实测数据小流域暴发的稀性泥石流通过泄流孔时的糙率可参考式(13)^[10]:

$$\frac{1}{n} = \frac{1}{\sqrt{\gamma_H \Phi_C + 1}} \cdot \frac{1}{n_w} \quad (13)$$

式中, γ_H 为固体颗粒容重, 取 2.65 t/m^3 ; n_w 为清水过流时的糙率; Φ_C 为泥石流泥沙修正系数, 见式(14):

$$\Phi_C = \frac{\gamma_c - \gamma_w}{\gamma_H - \gamma_c} \quad (14)$$

式中, γ_w 为清水容重, 取 1.0 t/m^3 。

黏性泥石流通过泄流孔时会在孔内铺床, 在孔内壁上形成黏附层, 使内壁变得平顺光滑, 流速和在平顺沟道内的流动相似。可使用康志成公式计算其在人工槽道中的流速, 其糙率值通过经验系数表得出^[14]:

$$v = \frac{1}{n_{\text{粘}}} R^{2/3} J^{1/2} \quad (15)$$

$n_{\text{粘}}$ 为黏性泥石流在沟道中运动时的综合糙率, 可通过查经验系数表得到, 当泥石流在平顺沟道中流动时:

$$n_{\text{粘}} = \begin{cases} 0.0217 & 0.1 \text{ m} < R < 0.5 \text{ m} \\ 0.0384 & 0.5 \text{ m} < R < 2.0 \text{ m} \\ 0.05 & 2.0 \text{ m} < R < 4.0 \text{ m} \end{cases}$$

据游勇进行的黏性泥石流水槽试验, 在人工槽中黏性泥石流通过时的查表取值糙率相比于实际糙率偏小约 28%, 故人工槽中糙率取值可按平顺沟道取值的约 1.33 倍取^[11]。由于泄流孔与排导槽均为人工槽道, 借鉴此结论中的建议值, 取泄流孔中黏性泥石流通过时糙率为:

$$n_{\text{粘}} = \begin{cases} 0.0294 & 0.1 \text{ m} < R < 0.5 \text{ m} \\ 0.05 & 0.5 \text{ m} < R < 2.0 \text{ m} \\ 0.0667 & 2.0 \text{ m} < R < 4.0 \text{ m} \end{cases}$$

泥石流和高含砂水流的局部能量损失明显高于清水局部能量损失, 黄河高含砂水流的管道输运试验证实了其在弯管处水头损失会高于清水 2~7 倍^[10]。但目前尚未有关于泥石流在管道进水口处局部能量损失的研究, 由于泄流孔坡度较缓, 入流情况可视作直角管道进口平行入流。其取值可参考疏浚工程中高浓度泥浆输送管道吸泥口处局部能量损失系数, 取 $\zeta = 0.8$ ^[15]。

结合式(9)、(10)可得在有压管流情况下:

$$v = \frac{1}{\sqrt{1 + 2gLn^2R^{-4/3} + \zeta}} \sqrt{2gH_0} \quad (16)$$

$\left(1 + 2gLn^2R^{-4/3} + \zeta\right)^{-1/2}$ 即为流量系数。流量系

数判定的准确性, 很大程度取决于糙率及局部能量损失系数的取值。

当泄流孔内出现明渠流动时, 泄流孔的进口处泥石流仍充满内壁, 故结合式(4), 进口端内侧流速为:

$$v_{\text{进}} = \sqrt{\frac{2gH_0}{1 + \zeta}} \quad (17)$$

进而可得进口处流量为:

$$Q_{\text{进}} = \frac{\pi D^2}{4} \sqrt{\frac{2gH_0}{1 + \zeta}} \quad (18)$$

故后段明渠流处的流速及泥深, 可通过式(19)反解得出:

$$Q_{\text{后}} = Q_{\text{进}} = \frac{1}{n} \left(\frac{A}{\chi}\right)^{2/3} i^{1/2} \cdot A \quad (19)$$

在式(20)中, 进一步建立了流畅度指标 N , 当 $N \geq 1$ 时, 泄流孔不会被堵塞。当 $N < 1$ 时, 泥石流将面临堵塞风险, 但在此区间内 N 越大, 则代表泄

流孔的流畅性越好,泄流孔被堵塞的可能性越低。

$$N = \frac{v_{\min}}{v_c} > 1 \quad (20)$$

式中, v_c 为泥石流的临界不淤流速; v_{\min} 为泄流孔内的最低流速。

在进行堵塞判别时,应先确定在泄流孔前泥深达到最大稳定值时孔内泥石流的流动状态。再根据不同流动状态下的孔内流速与临界不淤流速比较,来判定其是否可以顺畅排导。泥石流的管流临界不淤流速参考 Tuiran 的颗粒流管流临界不淤流速公式^[16]:

$$v_c = 1.82C_v^{0.11}(1 - C_v)^{0.25} \left(\frac{d}{D}\right)^{0.06} \sqrt{2gD(s-1)} \quad (21)$$

式中, C_v 为泥石流浓度; d 为颗粒粒径(m); s 为泥沙重度同水重度之比,取 2.65。由于泥石流中颗粒级配较宽,为保证泄流孔的安全,选取 d_{90} 的粒径直径,即:

$$v_c = 1.82C_v^{0.11}(1 - C_v)^{0.25} \left(\frac{d_{90}}{D}\right)^{0.06} \sqrt{2gD(s-1)} \quad (22)$$

明渠流状态下人工槽内泥石流的不淤流速目前研究较少,游勇^[17]通过模型试验初步研究了泥石流排导槽的最小不淤纵坡,确定了不同容重泥石流过流时不淤纵坡的经验拟合公式:

$$J_{\min} = 0.062 + 0.11\gamma_c/\gamma_H \quad (23)$$

将人工排导槽明渠不淤坡度应用于泄流孔,则泄流孔内明渠流不淤流速为:

$$v_c = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} (0.062 + 0.11\gamma_c/\gamma_H)^{\frac{1}{2}} \quad (24)$$

常见的泄流孔除圆形外,还有矩形泄流孔。在判别矩形泄流孔是否堵塞时,可将其边长转换为当量直径^[18]:

$$D_e = \frac{2ab}{a+b} \quad (25)$$

式中, a 、 b 为矩形边长,当泄流孔为正方形时:

$$D_e = a \quad (26)$$

在判别矩形泄流孔内泥石流流动方式及是否堵塞时,可通过当量直径公式做到截面转换,之后使用圆形泄流孔判别方法按步骤求解判别。

2 堵塞判别影响因素分析

2.1 流量系数影响因素分析

拦砂坝泄流孔内的泥石流流速主要受到坝前

流速 v_0 , 最大泥深 h , 泄流孔直径 D , 坡降 i , 长度 L 以及糙率 n , 局部损失系数 ζ 的影响。为了直观的验证各影响变量对恒定均匀流状态下孔内流速的影响方式和影响程度,通过对比表 1 中王小军关于泄流孔有压恒定出流的试验结果,用来对比判别方法的合理性。

表 1 不同容重下流量系数值^[12]
Table 1 Flow coefficient values at different densities of debris flows^[12]

断面条件	流量系数值			
	流体容重/(kg·m ⁻³)			
	1 000	1 400	1 700	2 000
圆形 5% 坡降	0.655	0.633	0.603	0.525
圆形 10% 坡降	0.623	0.615	0.591	0.523
圆形 15% 坡降	0.596	0.584	0.556	0.490

由表 1 可知随着泥石流容重的增大,糙率不断增大,进而导致了流量系数的减小。在王小军的坝体模型中,泄流孔位于坝体底部,随着泄流孔坡度的增大,其长度也逐渐增大。根据试验结果,坡度增大导致了泄流孔长度增长,同时坡度的增大使得进口处局部能量损失增大,导致流量系数降低。

根据以上对比可知,在定性分析上使用有压管流理论计算泥石流泄流孔的出流是合理的。但是糙率和局部能量损失取值的精确性极大的影响了泄流孔内泥石流出流能力的评价。为对比泄流孔内泥石流过流时糙率取值方式与局部能量损失取值的合理性,选取表 1 中圆形泄流孔在不同泥石流容重下的流量系数值与本文计算值对比。表 1 为在泄流孔面积 0.01 m²,位于拦砂坝底部且拦砂坝底部厚度为 1 m,不同坡度的泄流孔在不同容重泥石流流入流时的工况下流量系数结果。因实际工程中泄流孔坡度均为 5° 左右,且由于较高坡降下泥石流流入流局部能量损失尚无研究,本文中局部能量损失系数的求解仅考虑了泄流孔较低坡度的情况,故选取 5% 坡降工况的结果来与判别方法进行对比。由表 2 中对比结果可知,本文计算得到的结果与表 1 的相对误差在 15% 范围内。最大误差出现在容重为 1 700 kg/m³ 时,该容重为稀性向黏性泥石流过渡范围,从而导致式 (13) 的求解与实际值出现了偏差。当泥石流容重为 2 000 kg/m³ 时,糙率取值方式改为黏性泥石流取值方法,此时相对误差进一步减小。

表2 流量系数精确度对比

Table 2 Comparisons of flow coefficient accuracy

泥石流容重/(kg·m ⁻³)	糙率	流量系数(理论公式)	流量系数	相对误差
1 000	0.016	0.689	0.655	5.20%
1 400	0.021	0.593	0.633	6.31%
1 700	0.027	0.533	0.603	11.61%
2 000	0.029	0.511	0.525	2.67%

2.2 泥石流进入泄流孔后堵塞判别影响因素分析

由式(20)可知,流畅度 N 的值与 v_c 呈反比,与 v_{min} 呈正比。由式(22)可知,影响 v_c 的因子有泥石流浓度 C_v , 泥沙粒径 d_{90} 泄流孔孔径 D 。随着 C_v 的增大,临界不淤流速 v_c 增大, N 值减小。但当 C_v 达到一定值后,随着 C_v 的增大,临界不淤流速 v_c 将不断减小, N 值增大。这是因为泥石流中泥沙颗粒绝大部分属粗颗粒,当泥石流浓度较低时,临界不淤流速主要受水流紊动强度影响,当 C_v 增大到一定值后,由于颗粒存在而使得过流面积减小,使得实际的液相速度大于平均输送流速,临界不淤流速相应的减小。

泥沙 d_{90} 粒径的大小对临界不淤流速 v_c 起正相关作用,对 N 值起负相关作用。这是因为泥石流中的泥沙颗粒大多为大于 1 mm 的粗颗粒,随着颗粒粒径的增大,颗粒有效重力增大,使得泥沙更易沉降,临界不淤流速增大。

由式(24)可知,明渠临界不淤流速主要取决于泥石流的容重及泄流孔直径。泄流孔坡度对孔内明渠段流速值有着较大影响,当泄流孔坡度较大时,明渠均匀流段的流速会增大,避免淤堵。但坡度的增大会使进口局部能量损失系数同时增大,导致在有压管流状态下孔内流速的降低。由于对进口处折角对泥石流局部能量损失系数的影响程度尚无研究,故泄流孔坡度对整体堵塞的影响程度目前尚不能确定。

3 案例分析

文家沟位于四川省绵竹市绵远河左岸,沟口坐标为 N 31.55°、E 104.10°。主沟长约 3.25 km,流域面积 7.81 km²。主沟的水平形态呈横卧 S 型,文家沟 1 300 m 以下沟段相对平直,沟床坡降为 150‰~180‰,沟谷上游坡降大于 300‰,且存在较多小冲沟,沟谷坡度区间约为 35°~55°。文家沟全沟汇水区面积约 4 km²,泥石流形成区位于 1 300 m 平台及以下范围^[19]。受汶川地震滑坡的影响,在 1 300 m 平台处及主沟中下

游,泥石流物源骤增,存在约 3 000 万 m³ 的堆积物^[20]。松散固体物质为文家沟泥石流的主要物源,最大堆积厚度达到 150 m^[21]。在 2010 年文家沟特大泥石流事件后,新的文家沟治理工程于 2011 年 5 月竣工,其中在主沟下游修建了三座拦砂坝以达到拦砂和停淤的目的,在上游修建两座拦砂坝来拦截泥石流。

3.1 泥石流性质

(1) 容重及性质判别

图 3 为文家沟拦砂坝泄流孔内土样颗粒级配图。由于文家沟泥石流为典型的黏性泥石流^[22],故可结合颗粒级配图利用余斌公式^[23]计算:

$$\gamma_c = 2P_{0.05}^{0.35}P_2 + 1.5 \quad (27)$$

式中, P_2 为粒径大于 2 mm 的土颗粒含量; $P_{0.05}$ 为粒径小于 0.05 mm 的土颗粒含量。计算得文家沟发生的泥石流密度为 1.96 g/cm³,为黏性泥石流。

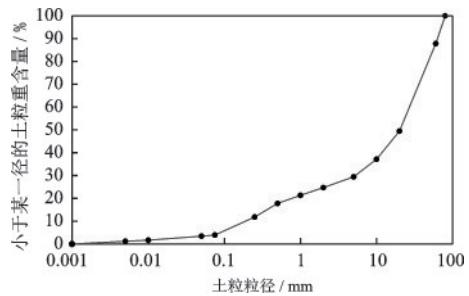


图3 文家沟土颗粒级配

Fig.3 Grain size distribution of the soil of Wenjia gully

(2) 糙率

当泄流孔内为有压管流时,其水力半径为最大值 0.25 m,根据 1.1 节中泄流孔内黏性泥石流过流糙率建议,取其糙率 $n=0.029 4$ 。

(3) 坝前流速

根据泥痕断面勘测,利用以下公式可求解黏性泥石流流速:

$$v_c = \frac{1}{n_c} H^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}} \quad (28)$$

式中, n_c 为该式中沟道糙率; H 为沟道泥深; I 为泥石流断面处沟床纵坡。由式(28)可知,泥石流泥深与

流速计算值呈正相关,柳金峰通过实地勘察,利用式(28)计算得文家沟“8·13”泥石流流速为 $9.89\text{ m/s}^{[22]}$ 。考虑到文家沟“8·13”泥石流属特大型泥石流,假如后续文家沟发生的泥石流规模均小于此次泥石流规模,故认为后续文家沟所发泥石流坝前流速值不超过 10 m/s ,取坝前流速 $5\sim 10\text{ m/s}$ 范

围进行流动状态判别。

3.2 泄流孔堵塞判别

取文家沟4#拦砂坝为例进行分析,如图4所示,共有泄流孔两排,拦砂坝坝顶至下部泄流孔底端高差 4.0 m ,其形状及位置参数见表3。

表3 文家沟4#坝泄流孔参数

Table 3 Drainage orifice parameters of Wenjia gully 4# dam

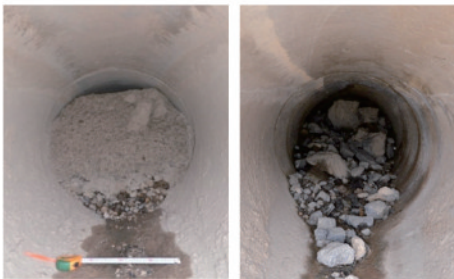
泄流孔位置	形状	直径/m	孔前最大泥深/m	坡度	孔内壁糙率 n	泄流孔长度/m
上部泄流孔	圆形	1	1.5	5°	0.029 4	7.5
下部泄流孔	圆形	1	3.5	5°	0.029 4	11.1



(a) 文家沟4#拦砂坝



(b) 上部泄流孔内部



(c) 下部泄流孔内部

图4 文家沟4#坝及上下部泄流孔内部

Fig.4 Upper and lower discharging orifices of Wenjia gully 4# dam

取4#坝泄流孔糙率系数 n 为0.029 4,以截面中点为标准点,则上下部泄流孔前最大泥深 h 分别为 1.5 m 和 3.5 m ;结合式(12)可知,若要泥石流进入泄流孔后全程充满管道,上下部泄流孔前总水头需分别不小于 2.08 m 和 2.39 m 。结合两泄流孔前最大泥深可知,下部泄流孔满足要求,上部泄流孔处需坝前流速不小于 3.4 m/s 。由于大部分情况下泥石流流速都是大于此值的,且由图4可知,上下部泄流

孔大多为满管堵塞,故在该案例中仅需考虑泥石流进入泄流孔后做充满泄流孔的有压管流流动。

结合式(13)以及1.1节中对糙率及局部能量损失的取值建议,可求得上下部泄流孔在不同坝前流速下的孔内流速,见表4。由式(21)结合泄流孔设计工况及其内部泥石流性质可得孔内泥石流的临界不淤流速为 6.64 m/s 。对比表4结果与临界不淤流速并结合式(20)对比可知:随着坝前流速的提升,泄流孔内流畅度逐渐提高,尽管下部泄流孔较长,孔内沿程能量损失较高,但排泄性能较上部泄流孔总体要好,这是因为下部泄流孔较上部泄流孔的孔前泥深较大。当坝前流速低于 10 m/s 时,上部泄流孔极易发生堵塞。坝前流速低于 8 m/s 时,下部泄流孔也将遭遇堵塞的风险。而由于文家沟泥石流流速最大值也才为 9.89 m/s ,故4#坝的两泄流孔均面临着较高的堵塞风险。

表4 不同坝前流速 v_0 下文家沟4#坝泄流孔内泥石流流速

Table 4 Debris flow velocity in discharging orifice in Wenjia gully 4# dam under different v_0 .

坝前流速 $v_0/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	5	6	7	8	9	10
上部泄流孔 孔内流速	4.58	5.02	5.49	5.99	6.50	7.04
下部泄流孔 孔内流速	5.61	5.93	6.28	6.66	7.07	7.50

由于坝体内泄流孔早已施工成型,故无法通过调整泄流孔形状参数,以降低临界不淤流速的方法来提高泄流孔流畅度,同时由于文家沟泥石流多为黏性泥石流,其在泄流孔内流动时会形成黏附层,故通过抹灰、喷浆等方式提高壁面光滑度的方式效果也将十分有限。考虑到4#坝泄流孔中泥石流的流动多是充满整个泄流孔的有压管流,可通过在坝

前布设能量调节设施调控进入泄流孔的泥石流流速。由于流速的提高会增大泥石流冲击力,从坝体安全来考虑,坝前流速只可适当提高部分。根据泄流孔堵塞的判别方法计算,建议通过能量调控措施使4#坝前流速处于6~9 m/s区间内,同时至少加高坝体2.5 m来使泥石流在上下部泄流孔内均可顺畅排导,结合实际考虑,取2.5~3.0 m。

4 结 论

(1)根据对泄流孔内泥石流流动的能量耗散的分析,以及对文家沟拦砂坝的分析和实地验证:坝前泥深稳定时,泄流孔内泥石流流动会出现前部充满而后部未充满的流动状态及充满全孔的有压管流状态,进一步提出了泄流孔内流动状态及堵塞的判别方法,通过对比前人研究结果证明了该判别方式精度较高,可将误差控制在15%以内。

(2)通过将本文的计算结果和文家沟4#拦砂坝堵塞情况对比发现,计算结果较好地反应了拦砂坝堵塞的实际情况,进一步提出在泥石流进入泄流孔前增设能量调控措施,调节进入泄流孔的初始流速,避免出现堵塞现象。

(3)本文提出的方法仅适用于土体含量较高的泥石流,对于大石块含量较高的泥石流以及漂木堵口、巨石停淤造成的泄流孔堵塞判别存在一定局限,此类泄流孔堵塞判别仍需进一步通过试验研究进行探讨。

参 考 文 献:

- [1] 陈华勇,柳金峰,赵万玉,等.非透过性泥石流拦砂坝研究现状及展望[J].防灾减灾工程学报,2016,36(2):323-330.
Chen H Y, Liu J F, Zhao W Y, et al. A review and prospect: the study on the closed-type check dams [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2016, 36(2): 323-330. (in Chinese)
- [2] 游勇,陈兴长,柳金峰,等.汶川地震后四川安县甘沟堵溃泥石流及其对策[J].山地学报,2011,29(3):320-327.
You Y, Chen X C, Liu J F, et al. Dam-breaking debris flows and its countermeasures of Gangou Gully following the Wenchuan earthquake in Anxian County, Sichuan [J]. Journal of Mountain Science, 2011, 29(3): 320-327. (in Chinese)
- [3] Ferrer-Boix C, Martín-Vide Juan P, Parker G. Channel evolution after dam removal in a poorly sorted sediment mixture: Experiments and numerical model [J]. Water Resources Research, 2015, 50(11): 8997-9019.
- [4] Sodnik Jošt, Martinčič Manica, Mikoš Matjaž, et al. Are Torrent Check-Dams potential debris-flow sources? [C]//Engineering Geology for Society and Territory-Volume 2. Torino, Italy: IAEG, 2015: 485-488.
- [5] 王兆印,漆力健,王旭昭.消能结构防治泥石流研究——以文家沟为例[J].水利学报,2012,43(3):253-263.
Wang Z Y, Qi L J, Wang X Z. Debris flow control with energy dissipation structures-experiences from Wenjiagou [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(3): 253-263. (in Chinese)
- [6] Armanini A, Dellagiacomma F, Ferrari L. From the check dam to the development of functional check dams [C]//Fluvial hydraulics of mountain regions Volume 37. Berlin, Heidelberg: Springer, 1991: 331-344.
- [7] Piton G, Recking A. Design of sediment traps with open check dams. I: hydraulic and deposition processes [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 142(2): 1-16.
- [8] 刘曙亮,游勇,柳金峰,等.窗口坝拦截泥石流性能试验研究[J].长江科学院院报,2015,32(8):40-44.
Liu S L, You Y, Liu J F, et al. Experimental study on performance of window-frame dam intercepting debris flow [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2015, 32(8): 40-44. (in Chinese)
- [9] 于献彬,陈晓清,赵万玉,等.透水型拦挡坝排泄孔开口参数对坝体应力场影响规律研究[J].防灾减灾工程学报,2016,36(6):1015-1025.
Yu X B, Chen X Q, Zh W Y, et al. Influence of the perforated parameters of permeable dam drain hole on the dam stress field [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2016, 36(6): 1015-1025. (in Chinese)
- [10] 泥石流灾害防治工程勘查规范: DZ/T 0220—2006 [S]. 北京:地质出版社,2006.
- [11] 蒋忠信.震后泥石流治理工程设计简明指南[M].成都:西南交通大学出版社,2014.
Jiang Z X. Concise guide on debris flow prevention design after the earthquake [M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2014. (in Chinese)
- [12] 王小军.拦砂坝泄流孔断面优化设计及其实验研究[D].北京:中国科学院大学,2016.
Wang X J. Optimal design of draining hole and its experiment research [D]. Beijing: Chinese University of Chi-

- nese Academy of Sciences, 2016. (in Chinese)
- [13] 泥石流防治工程设计规范: T/CAGHP 021—2018 [S]. 北京:中国地质大学出版社, 2018.
- [14] 康志成, 李焯芬, 马蔼乃, 等. 中国泥石流研究[M]. 北京:科学出版社, 2004.
Kang Z C, Li Z F, Ma G N, et al. Research on debris flow in China [M]. Beijing: Science Press, 2004. (in chinese)
- [15] 疏浚工程技术规范: JTJ 319—99[S]. 北京:人民交通出版社, 1999.
- [16] Turian R M, Hsu F L, Ma T W. Estimation of the critical velocity in pipeline flow of slurries [J]. Powder Technology, 1987, 51(1): 35-47.
- [17] 游勇. 泥石流排导槽最小不淤纵坡初步试验研究[J]. 水土保持通报, 2000, 20(6):36-38.
You Y. A preliminary experimental study on gradient of debris flow drainage canal[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2000, 20(6):36-38. (in Chinese)
- [18] 刘鹤年. 流体力学[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2004.
Liu H N. Hydromechanics [M]. Beijing: China Building Industry Press, 2004. (in Chinese)
- [19] 倪化勇, 郑万模, 唐业旗, 等. 汶川震区文家沟泥石流成灾机理与特征[J]. 工程地质学报, 2011, 19(2): 262-270.
Ni H Y, Zheng W M, Tang Y Q, et al. Mechanism and characteristics of WenJia-gully debris flow in epicenter area of Wenchuan earthquake [J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19(2): 262-270. (in Chinese)
- [20] 许强. 四川省8·13特大泥石流灾害特点、成因与启示[J]. 工程地质学报, 2010, 18(5):596-608.
Xu Q. The 13 august 2010 catastrophic debris flows in Sichuan province: Characteristics genetic mechanism and suggestions [J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(5):596-608. (in Chinese)
- [21] 黄河清, 赵其华. 汶川地震诱发文家沟巨型滑坡-碎屑流基本特征及成因机制初步分析[J]. 工程地质学报, 2010, 18(2):168-177.
Huang H Q, Zhao Q H. Basic characteristics and preliminary mechanism analysis of large scale rockslide-sturzstromat at WenJiaGou triggered by Wenchuan earthquake [J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(2):168-177. (in Chinese)
- [22] 游勇, 陈兴长, 柳金峰. 四川绵竹清平乡文家沟“8·13”特大泥石流灾害[J]. 灾害学, 2011, 26(4):68-72.
You Y, Chen X C, Liu J F. "8·13" Extra large debris flow disaster in Wenjia Gully of Qingping Township, Mianzhu, Sichuan Province[J]. Journal of Catastrophology, 2011, 26(4):68-72. (in Chinese)
- [23] 余斌. 根据泥石流沉积物计算泥石流容重的方法研究[J]. 沉积学报, 2008, 26(5):789-796.
Yu B. Research on the calculating density by the deposit of debris flows [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2008, 26(5):789-796. (in Chinese)

(本文责编:池营营)