

DOI: 10.11779/CJGE2018S1044

新型地锚扶壁式泥石流流格栅坝基础冲刷计算方法研究

王永胜^{1,2}, 张岩鉴^{1,2}, 朱彦鹏^{1,2}, 闫聪^{1,2}

(1. 兰州理工大学甘肃省土木工程防灾减灾重点实验室, 甘肃 兰州 730050; 2. 兰州理工大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 泥石流流格栅坝工程安全稳定的关键是基础, 相比外露结构的计算, 基础遭冲刷掏空的问题更值得引起重视。在提出新型地锚扶壁式泥石流流格栅坝的基础上, 将格栅坝基础冲刷分为初期和中后期两个阶段, 初期冲刷主要以坡面冲刷为主, 中后期冲刷主要考虑冲坑的变化发展。基于能量法, 推导了格栅坝基础冲刷深度的计算公式, 通过算例分析了不同流深下的冲刷深度, 并与其它公式的计算结果做了对比。结果表明: 推导公式计算的冲刷深度比其它公式计算的结果都大, 初期冲刷的影响在设计中应当予以重视。

关键词: 泥石流; 新型格栅坝; 基础冲刷; 能量法

中图分类号: P642.23; TV332

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2018)S1 - 0272 - 06

作者简介: 王永胜(1985 -), 男, 副教授, 主要从事滑坡泥石流防治技术研究。E-mail: wys591888@163.com。

Calculation of foundation scour for new debris flow grille dam with ground anchor and counterfort

WANG Yong-sheng^{1,2}, ZHANG Yan-jian^{1,2}, ZHU Yan-peng^{1,2}, YAN Cong^{1,2}

(1. Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation in Civil Engineering of Gansu Province, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. College of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: The foundation play a significant role in the reliability of debris flow grille dam. Compared with the exposed structures, foundation scour under debris flows is more important. On the basis of a new proposed debris flow grille dam with ground anchor and counterfort, the foundation scour is considered as two stages, that is, the initial and the mid-late. In the initial stage, surface scour is primary, and in the mid-late stage the changing and progressing of scour pit is important. The formula for calculating the scour depth of foundation of grille dam is deduced based on the energy method. The scour depth is analyzed under different flow depths based on an example. The results obtained from the above formula are compared with those obtained from the other formula. The results indicate that the scour depth by the deduced formula is larger than that by the others, and the initial scour should be considered carefully in the future design.

Key words: debris flow; new grille dam; foundation scour; energy method

0 引言

泥石流对沟床的冲刷可分为自然冲刷和受人类活动影响引起的冲刷两种^[1-2]。自然冲刷主要是由于沟床在自然发展过程中, 泥石流与沟床质的相互作用以及在相互作用的过程中伴随出现的沟床演变现象; 而受人类活动影响引起的冲刷一般是由于修建拦挡坝后改变了水流条件而产生的冲刷。泥石流过坝后, 因落差增大, 加上溢流口的束窄而造成的单宽流量大, 导致重力下落的速度和动能剧增, 对坝下沟床及坝脚产生严重的局部冲刷下切。工程应用发现^[3], 大部分泥石流拦挡坝因基础遭泥石流掏蚀、侧蚀后, 造成悬空, 最终导致毁坏。特别是对建筑在沙砾石基础上的坝体, 泥石流过境时就极易在坝下形成冲刷坑, 泥石流将结

束时, 流量随之锐减, 冲刷坑也逐渐被泥沙填平, 形成历时短暂, 消亡亦迅速^[4], 如不作当时实地观测是很难见到的, 往往容易被工程技术人员忽视。因此, 有必要对拦挡坝基础冲刷问题做进一步研究。

而泥石流冲刷坑深度的影响因素主要有^[5]: 泥深(或流深), 单宽流量, 上下游落差(或坝高), 沟床质颗粒粒径级配, 以及泥石流流体密度等。其中有些参数的确定难度较大, 各地情况又存在差异, 因此对计算公式应加以选择, 确定计算参数时也需慎重。否则同一条泥石流沟, 以不同公式计算的结果差异或许很大。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51768039); 2015年度建设科技建筑节能项目(JK2015-53)

收稿日期: 2017-06-11

综上所述, 基础被冲刷淘空危险性的研究应该是问题的关键。相比外露地面的结构, 拦挡坝工程安全稳定的关键是基础, 而基础的关键是认真分析研究该沟段沟床演变的发展趋势; 合理准确地计算冲刷深度, 分析其冲刷形成的原因, 采取相应的措施, 防止沟床基准面下降, 使坝下冲刷坑的发展得到控制, 真正使基础开挖线达到冲深线以下, 才能确保拦挡坝工程的安全。

为此, 本文在提出新型地锚扶壁式泥石流格栅坝(以下简称新型格栅坝)的基础上, 基于能量理论, 推导了新型格栅坝基础冲刷量的计算公式, 为以后新型格栅坝基础埋深和消能防冲设计提供参考, 以便其在泥石流防治工程中得到广泛的应用。

1 新型格栅坝

1.1 新型格栅坝简介

新型格栅坝主要由格栅(由格栅柱、格栅梁和废旧的型钢梁组成)、基础桩、扶壁墙、拉索、锚墩、底板和底板梁组成, 如图 1 所示。采用钢筋混凝土格栅梁与格栅柱大框架内嵌型钢梁的格栅结构, 实现了泥石流拦排结合的目标; 而地锚拉索又能够确保新型格栅坝的整体稳定性; 另外, 钢筋混凝土扶壁墙起到保护拉索被砸和分流的作用, 而分流又使新型格栅坝的受力比较均匀^[6]。

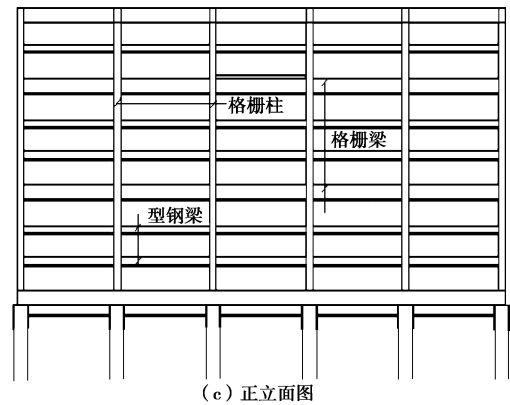
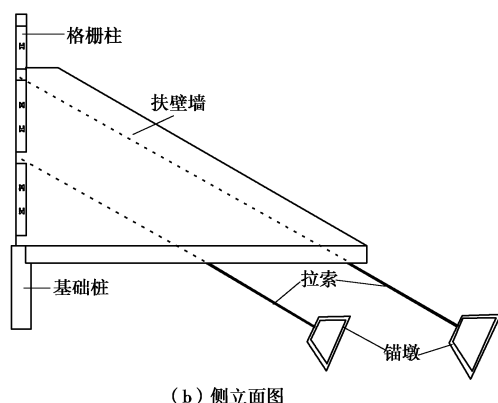
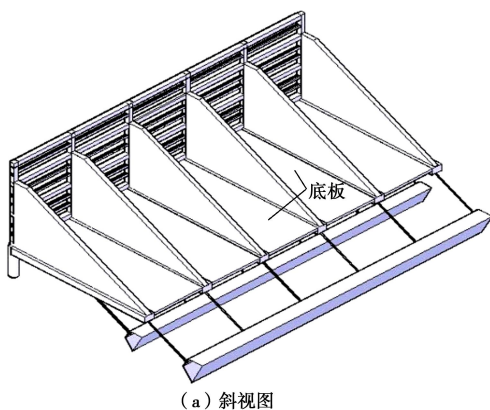


图 1 新型格栅坝示意图

Fig. 1 Schematic diagram of new grille dam

1.2 新型格栅坝特点

作为一种稳定性强、透水性好及耗用材料少的透水型泥石流防治结构其主要特点有: 能够留下较大的砾石, 而让对下游危害比较小的小颗粒固体物质下泄, 达到拦排结合的效果; 可通过调节格栅的间距控制下泄固体的孔径, 通过调节拦排数量比例、组成保证冲淤平衡; 通过调节栅孔, 利用雨后的流水冲刷, 冲走库内细粒物质, 适当提高结构的使用年限; 迅速排泄水体, 降低结构承受的水压力及扬压力, 提高结构稳定性; 利于向装配式、轻型化发展, 节省材料, 缩短工期。

2 基础冲刷模型的建立

将新型格栅坝基础冲刷分为初期冲刷和中后期冲刷两个阶段, 考虑每个阶段能量的转换和分配服从能量平衡原理, 建立各自的冲刷计算公式。

2.1 初期冲刷模型

新型格栅坝建成投入使用后, 初期运行阶段坝后淤积厚度不太高, 沟道内主要以水流和泥流为主, 坝前基础冲刷可认为是沿着沟床表面的浅层冲刷, 摩擦耗能和动能的改变是能量转换的主要方面。初期冲刷示意如图 2 所示。

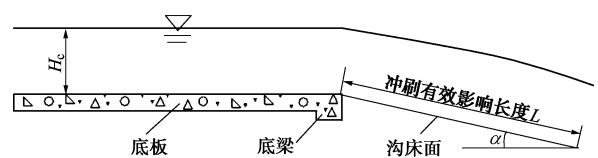


图 2 初期冲刷泥石流过坝示意图

Fig. 2 Schematic diagram of debris flow over dam in initial stage

根据文献[7]中坡面水土流模型, 在新型格栅坝前沟床面任意位置取如图 3 所示的单位质量为 m 的泥石流微元体, 则其在坝前沟床面上 L 范围内运动过程中的能量有下列 4 项。

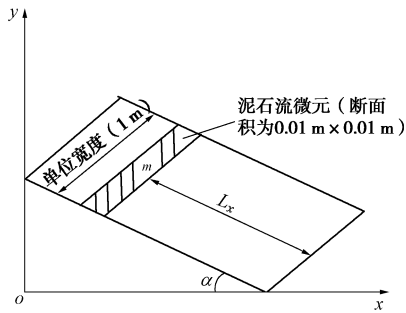


图3 泥石流沿沟床面冲刷模型

Fig. 3 Erosion model of debris flow along gully bed surface

(1) 泥石流微元体初始势能 E_1

$$E_1 = mgH = mgL \sin \alpha \quad (1)$$

式中 m 为泥石流微元体初始质量; H 为泥石流微元体初始高度; L 为格栅坝下泥石流对基础冲刷的有效影响长度, 可由公式 $L = 1.3U_1(H' + H_c)^{0.5}$ 计算得到, 其中 U_1 为坝前泥石流流速, H' 为格栅坝坝高, H_c 为泥石流流深。

(2) 泥石流微元体初始动能 E_2

$$E_2 = \frac{1}{2} m U_1^2 \quad (2)$$

格栅坝工程主要用于稀性泥石流和水石流的沟谷, 起拦蓄泥沙和石块, 调节泥沙的效果。其坝前泥石流流速^[8]可用下式表示:

$$U_1 = \frac{15.5}{\alpha} H_c^{0.67} I_c^{0.5} \quad (3)$$

式中, $\alpha = \left[\frac{\gamma_h(\gamma_c - 1)}{\gamma_h - \gamma_c} + 1 \right]^{0.5}$, γ_h 为泥石流中泥沙颗粒重度, γ_c 为泥石流重度; I_c 为泥石流水力坡度, 一般可用河床纵坡代替。

(3) 泥石流微元体沿程摩擦耗能 E_3

一般泥石流发生总是伴随着前期降雨, 不考虑入渗的情况下可以近似的认为泥石流沿沟床面冲刷过程中的变化量与有效影响长度 L 成线性关系, 于是在坡面任意距离 x 处泥石流质量为

$$m + \frac{\Delta m}{L} x \quad (4)$$

式中, Δm 为泥石流流体变化量 (在沟床面 L 范围内降雨时水的增加量相对泥石流流体比较少, 故此处只考虑冲刷泥沙的增加量)。

对泥石流沟床的土石体冲刷而言, 沟床物质对运动泥石流体的摩擦作用可用沟床粗度系数 n 表征。在泥石流运动过程中, 摩擦力可表示为运动物质对坡面的正压力与 n 之积

$$F = ng(m + \frac{\Delta m}{L} x) \cos \alpha \quad (5)$$

相应的摩擦能可写为

$$\begin{aligned} E_3 &= \int_0^L F dx = \int_0^L ng \left(m + \frac{\Delta m}{L} x \right) \cos \alpha dx \\ &= ngL \left(m + \frac{\Delta m}{2} \right) \cos \alpha \quad (6) \end{aligned}$$

(4) 泥石流微元体在沟床面 L 处的动能 E_3

$$E_3 = \frac{1}{2} (m + \Delta m) U_2^2 \quad (7)$$

式中, U_2 为泥石流微元体在沟床面 L 处的速度。泥石流经过格栅坝以后, 部分泥沙和大石块被拦蓄在坝前, 剩余泥石流通过格栅间隙下泄, 其重度发生明显变化, 流速也相应的发生变化。所以, 坝后有效冲刷长度 L 范围内泥石流流速 U_2 仍可用式 (3) 来计算, 但公式中的重度 γ_c 应用变化后的重度 γ'_c 来代替, 相应的 α 用 α' 代替。

根据能量效应服从能量叠加和平衡原理, 按泥石流体沿沟床面侵蚀过程物质变动和能量收支建立沟床质土石体冲刷能量平衡方程如下

$$E_1 + E_2 = E_3 + E_4 \quad (8)$$

将式 (1)、(2)、(6)、(7) 代入式 (8) 可得

$$\begin{aligned} mgL \sin \alpha + \frac{1}{2} m U_1^2 \\ = ngL \left(m + \frac{\Delta m}{2} \right) \cos \alpha + \frac{1}{2} (m + \Delta m) U_2^2 \quad (9) \end{aligned}$$

由式 (9) 可以得到泥石流微元体变化量 Δm

$$\Delta m = \frac{m(2gL \sin \alpha - 2ngL \cos \alpha + U_1^2 - U_2^2)}{ngL \cos \alpha + U_2^2} \quad (10)$$

即有

$$\Delta m = \frac{m \left(2gL \sin \alpha - 2ngL \cos \alpha + \frac{240}{\alpha^2} H_c^{1.33} I_c - \frac{240}{\alpha'^2} H_c'^{1.33} I_c' \right)}{ngL \cos \alpha + \frac{240}{\alpha'^2} H_c'^{1.33} I_c'} \quad (11)$$

而对于一场历时为 T 的泥石流, 在坝下有效流动宽度为 B_0 的沟床面上, 当泥石流流深为 H_c , 流速为 U_2 时, 总流量 M 可表示为

$$M = \rho'_c H_c B_0 U_2 T \quad (12)$$

式中, ρ'_c 为坝后泥石流体的密度, 对应于 γ'_c , $B_0 = 8 \sqrt{\frac{\tau_0}{\gamma_c I_c}} L' + B$, L' 为距离窄口处的距离, B 为窄口处沟床宽度, τ_0 为泥石流极限切应力。

由图 3 可知泥石流微元体质量为

$$m = 10^{-4} \rho'_c \quad (13)$$

则总冲刷量为

$$\Delta M = \frac{M}{m} \Delta m \quad (14)$$

2.2 中后期冲刷模型

随着泥石流的不断发生, 新型格栅坝后泥石流流体淤埋高度呈现动态变化的过程。随着淤积的进行, 高度不断增加, 冲击能量增大。泥石流流体在坝前冲击如图 4 所示。

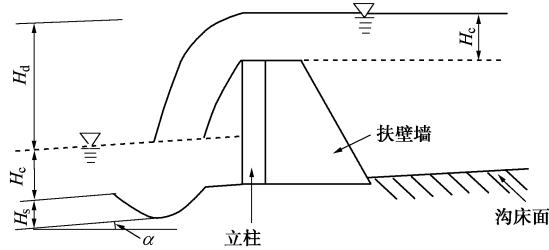


图 4 过坝泥石流流体冲击示意图

Fig. 4 Impact of debris flow over dam

(1) 过坝泥石流流体跌入下游沟床的初始动能 E_v

为

$$\begin{aligned}
 E_v &= \frac{1}{2}MU_2^2 \\
 &= \frac{1}{2} \times \rho'_c H_c B_0 T U_2^3 \\
 &= \frac{1862}{\alpha^3} \rho'_c B_0 T H_c^3 I_c^{1.5} \quad (15)
 \end{aligned}$$

(2) 过坝泥石流流体跌入下游沟床的初始重力势能

E_g 为

$$\begin{aligned}
 E_g &= MgH' \\
 &= \gamma'_c H_c B_0 U_2 T H' \quad (16)
 \end{aligned}$$

(3) 过坝泥石流流体撞入下游河床质中 H_s , 所做之功 E_w 为

$$E_w = H_c B_0 \sigma_s H_s \quad (17)$$

式中, σ_s 为河床质的抗压强度。

令 $E_v + E_g = E_w$, 并将相关式子代入得冲刷深度 H_s 为

$$H_s = \frac{15.5 H_c^{0.67} I_c^{0.5} \rho'_c T}{\sigma_s \alpha'} \left(\frac{120}{\alpha'^{1.2}} H_c^{1.33} I_c + gH' \right) \quad (18)$$

3 算例分析

某泥石流沟流域面积 10.05 km², 年平均冲出泥沙 6.35 万 m³, 主沟长 6.94 km, 平均比降 4%。流域内主要岩层有: 第三纪红色砂砾岩, 分布在中上游各支沟。第四系红色和青灰色黏土, 分布于中下游各支沟。泥石流重度一般为 1.4~1.7 t/m³, 实测最大重度为 1.78 t/m³, 实测最大流速 6~8 m/s, 流动时表面平滑, 不显波纹, 可以看到滚动的土块和大石块, 泥石流流动情况^[9]见下表 1。

在沟段流通区拟采用新型格栅坝进行拦排疏导。

主要设计参数有: 混凝土采用 C30, 钢筋采用 HPB300 和 HRB335, 拉索采用三股钢绞线; 立柱截面为 450 mm×650 mm, 间距 2500 mm; 横梁截面 400 mm×300 mm, 间距 2000 mm; 型钢梁采用工字钢 45a, 间距 500 mm; 扶壁墙厚 300 mm, 高 6500 mm, 底板厚 200 mm; 桩基础采用人工挖孔灌注桩, 桩径 1000 mm, 深 4500 mm。格栅坝设计剖面如图 5 所示。

表 1 泥石流流动状况

Table 1 Debris flow conditions

发生 时间	流量 (m ³ ·s ⁻¹)	流速/(m·s ⁻¹)		平均 沟床 比降/%	断面 面积/m ²	密度 (t·m ⁻³)	水面 宽/m	历时 /h	
		表面	平均						
1956-05-23	2.5	2.00	1.32	0.28	3.7	1.47	1.77	5.30	1:20
1959-09-13	86.7	7.41	5.59	1.44	3.7	15.5	1.68	10.8	5:01
1963-08-19	25.4	7.15	5.29	0.44	3.7	4.8	1.64	10.8	0:57

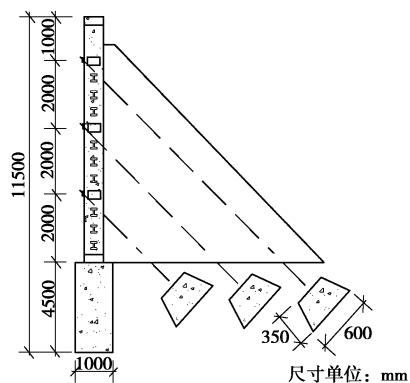


图 5 格栅坝设计剖面图

Fig. 5 Design section of new grille dam

3.1 传统公式和本文公式的比较

利用文中提出的考虑初期冲刷的计算公式, 计算不同流深情况下的冲刷深度, 并与文献[1]中公式的计算结果做对比, 如表 2 所示。

表 2 冲刷深度对比表

Table 2 Comparison of scour depths

泥石流流 深 H_c /m	利地格 公式	肖克里特 希公式	柿德市简 化公式	公式 (a)	本文 公式
0.26	0.54	0.75	0.48	0.82	1.08
0.47	0.91	1.15	0.60	1.85	2.02
1.44	1.73	2.07	1.53	2.45	2.50

注: 表中各公式见文献[1], 公式 (a) 为 $H_s = g^2 H_c h_c \rho_s / 12 \sigma_s$ 。

从表 2 可以看出, 随着泥石流流深的增加, 各公式计算的冲刷深度都相应的增大, 其中考虑大石块冲击的公式 (a) 和本文提出的公式计算结果都较大; 而利地格公式和柿德市简化公式计算的结果都较小, 且两者比较接近。由计算可知初期冲刷对泥石流基础冲刷深度的影响比较大, 设计时应给予足够的重视。

3.2 时间对冲刷深度的影响

截取一段泥石流主历时来分析冲刷深度随时间的变化情况,结果如图6所示。

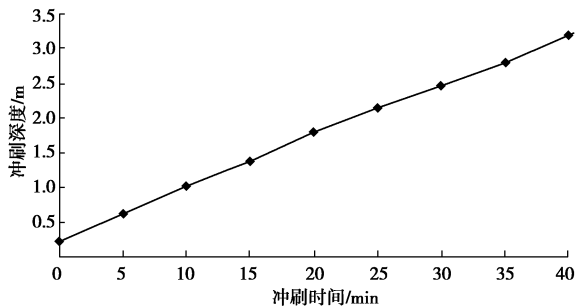


图6 冲刷深度随时间变化图

Fig. 6 Variation of scour depth with time

从图6可以看出,随着降雨和泥石流的不断发生,连续流对坝下沟床的冲刷逐渐加剧,冲刷深度随时间基本呈线性增长的趋势。而实际上最终的冲刷深度不可能无限的增加,随着泥石流峰值流量的减少和速度的减慢,冲刷坑将会被后面的泥沙慢慢回填,直到最后被填平为止。公式计算的冲刷深度可以认为是主历时阶段的峰值,埋深设计时可以作为参考。

3.3 沟床纵坡对冲刷深度的影响

沟床纵坡是地貌条件的主要体现参数,是影响泥石流形成和运动的重要因素。在泥石流的形成中,沟床纵坡是泥石流流体由位能转变为动能的底床条件,为泥石流侵蚀提供动力。泥石流沟的纵坡越大,越有利于泥石流的发生。因此,沟床纵坡是影响冲刷深度的重要因素之一。

从图7可知,当沟床组成物质、泥石流流体参数等条件相同的情况下,冲刷深度随着沟床纵坡的增大而增大。沟床纵坡的增大,使泥石流流体所具有的势能增大,所转化的侵蚀能力也增强。

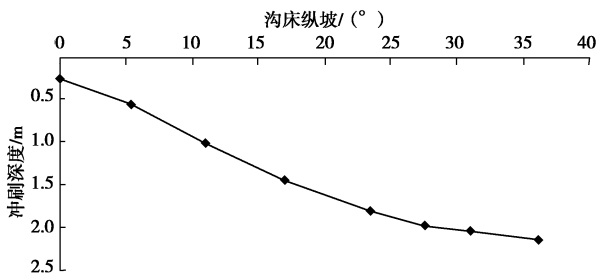


图7 沟床纵坡对冲刷深度的影响

Fig. 7 Influences of gully bed on scour depth

3.4 泥石流重度对冲刷深度的影响

泥石流的重度是决定泥石流性质的重要参数,也是泥石流防治工程设计的必要参数。然而不同重度的泥石流流体具有不同的含泥沙量和能力,因此重度也是影响冲刷深度的一个非常重要的因素。

图8显示了冲刷深度随流体重度(泥砂体积浓度)的变化趋势。在相同的泥石流流体基本条件下,随着重度的增大,冲刷深度逐渐减小。泥石流流体从沟床挟带泥砂的能力主要取决于其本身的泥砂体积浓度,泥砂体积浓度越小,则能将更多沟床表面泥砂带走,从而增大冲刷深度。

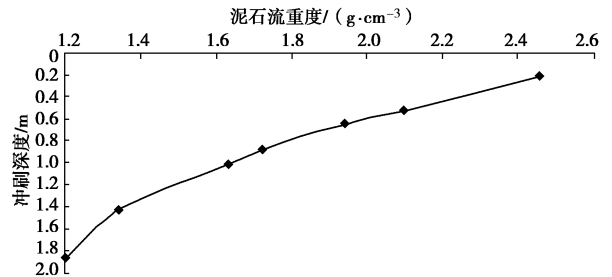


图8 泥石流重度对冲刷深度的影响

Fig. 8 Influences of bulk density of debris flow on scour depth

3.5 河床质对冲刷深度的影响

泥石流过坝对基础形成冲刷时,给坝下沟床砂石体施以强大的冲切作用,而沟床砂石体本身具有一定的抗压强度和抗剪切能力,当泥石流流体的冲切强度大于沟床质的抗剪切强度和抗压强度时,则发生冲刷。而沟床质的特性主要与泥砂粒径组成和黏性等因素有关。

图9是冲刷深度随泥石流沟床质抗压强度变化的曲线。当沟床质的抗压强度为1000 kN/m²时,冲刷深度为2.31 m;当沟床质的抗压强度在1000~1700 kN/m²时,冲刷深度逐渐减小,且减小的幅度比较大,曲线趋势比较陡;但当沟床质的抗压强度超过1700 kN/m²时,冲刷深度渐渐变小,曲线走势也比较平缓,这就意味着泥石流冲刷随着沟床质的变硬渐渐趋于平衡。

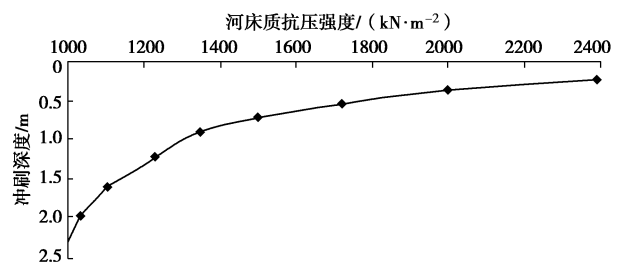


图9 泥石流沟床质抗压强度对冲刷深度的影响

Fig. 9 Influences of compressive strength of gully bed on scour depth

4 结 论

(1) 根据能量叠加和平衡原理,推导了初期和中后期泥石流格栅坝基础冲刷深度的计算公式。

(2) 计算了不同流深情况下的冲刷深度,并与其

它公式的计算结果做了对比, 本文的结果偏大, 说明初期冲刷影响较大, 结构设计时应予以重视。

(3) 沟床组成物质、泥石流流体参数等条件相同的情况下, 冲刷深度随着沟床纵坡的增大而增大; 随着重度的增大而减小; 随着沟床质抗压强度的增大而减小。

参考文献:

- [1] 中国科学院一水利部成都山地灾害与环境研究所. 中国泥石流[M]. 北京: 商务印书馆, 2000: 318 - 321. ((KMS Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS. Debris flow of China[M]. Beijing: The Commercial Press, 2000: 318 - 321. (in Chinese))
- [2] 孟兴民, 陈冠, 郭鹏, 等. 白龙江流域滑坡泥石流灾害研究进展与展望[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2013, 33(4): 1 - 15. (MENG Xing-min, CHEN Guan, GUO Peng, et al. Research of landslides and debris flows in bailong river basin: progress and prospect[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2013, 33(4): 1 - 15. (in Chinese))
- [3] 张军. 川滇两省泥石流拦沙坝基础埋深应考虑的几个问题[J]. 山地学报, 1992, 10(4): 229 - 233. (ZHANG Jun. Some problems on the burial depth of debris flow dam foundation in Sichuan and Yunnan provinces[J]. Journal of Mountain Research, 1992, 10(4): 229 - 233. (in Chinese))
- [4] 潘华利, 欧国强, 黄江成. 泥石流坝后侵蚀坑内部边坡规律实验研究[J]. 泥沙研究, 2009(6): 1 - 5. (PAN Hua-li, OU Guo-qiang, HUANG Jiang-cheng. Experimental study on the interior slope of scour pit below debris flow sabo dams[J]. Journal of Sediment Research, 2009(6): 1 - 5. (in Chinese))
- [5] 朱兴华, 崔鹏, 周公旦, 等. 稀性泥石流冲刷规律的试验研究[J]. 水利学报, 2012, 42(增刊 2): 85 - 91. (ZHU Xing-hua, CUI Peng, ZHOU Gong-dan, et al. Experimental study on the erosion law of diluted debris flow[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 42(S2): 85 - 91. (in Chinese))
- [6] 王永胜, 朱彦鹏, 王亚楠. 近场高烈度区新型地锚扶壁式泥石流格栅坝地震响应分析[J]. 水利学报, 2012, 42(增刊 2): 162 - 167. (WANG Yong-sheng, ZHU Yan-peng, WANG Ya-nan. Seismic response analysis of a new ground anchor counterfort grille-dam for debris flow under near-fault pulse-like ground motions[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 42(S2): 162 - 167. (in Chinese))
- [7] 李志刚, 邓学钧, 陈云鹤. 基于能量法的高等级公路路堤边坡冲刷临界坡度研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2003, 33(3): 340 - 342. (LI Zhi-gang, DENG Xue-jun, CHEN Yun-he. Research on critical gradient for erosion of expressway embank slope based on energy method[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2003, 33(3): 340 - 342. (in Chinese))
- [8] 余斌. 稀性泥石流的平均运动速度研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2009, 29(5): 541 - 548. (YU Bin. Study on mean velocity of thin viscous debris flows[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2009, 29(5): 541 - 548. (in Chinese))
- [9] 中国科学院兰州冰川冻土研究所, 甘肃省交通科学研究所. 甘肃泥石流[M]. 北京: 人民交通出版社, 1982. (Lanzhou Institute of Glaciology and Cryopedology, Academia Sinica, Traffic Science Institute of Gansu Province, China. Debris flow in Gansu province[M]. Beijing: People's Communications Press, 1982. (in Chinese))

(本文责编 黄贤沙)