

公路泥石流防治结构内泥石流流体运动规律研究*

陈野鹰, 唐红梅, 陈洪凯, 叶四桥

(重庆交通大学 岩土工程研究所, 重庆 400074)

摘要:泥石流是一种典型的公路水毁病害,也是公路水毁时主要破坏动荷载,遵循泥石流的运动规律和道路破坏特点,建立泥石流防治技术是治理公路水毁病害的关键。文章通过分析泥石流体的运动特点,提出了合理的速流槽泥石流防治结构剖面形状,根据能量守恒原理建立的泥石流流体运动方程和根据平抛理论建立的泥石流流体抛程计算公式,解决了泥石流防治结构受泥石流流体作用力大小的计算和泥石流防治与公路水毁病害治理效果的理论判断问题,为同类型的特大型公路泥石流防治结构设计及公路水毁病害治理提供了理论依据。

关键词:特大型公路泥石流;综合治理;合理剖面线形;运动规律

中图分类号:P642.23 **文献标识码:**A **文章编号:**1006-7329(2006)05-0035-03

Research on the Law of Highway Debris Flow Moving in Control Structures

CHEN Ye - ying, TANG Hong - mei, CHEN Hong - kai, YE Si - qiao

(Institute of Geotechnical Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, P. R. China)

Abstract: Debris flow is a kind of typical water ruins to highways, and it is a dynamic load for highway water ruin. The authors, following the moving law of debris flow and characteristics of highway ruin, put forward reasonable section shape of high-speed drainage trough. Then, according to the energy conservation principle and horizontal throwing theory, the authors established a calculation formula for the throwing distance. The results of the calculation formula given in this paper offer a solution for load calculation and control effect evaluation problems and provide theoretical foundation to structure design and disease control of debris flow along the highways.

Keywords: giant debris flow along highways; synthetic control; reasonable section's line shape; law of moving

高浓度水沙砾复合异相混合流的泥石流流体中沙、砾主要按滚动或跃动状态迁移^[1],在小流域内,滑坡和泥石流通常相伴而生、互为因果,具有强烈的冲击、破坏作用^[2],泥石流是毁损穿过泥石流沟的公路路基、路面和防治结构物的重要外在动力^[3~12]。我国是世界上泥石流发育的国家之一,泥石流主要分布在西部的云南、四川、西藏、新疆等地区^[13],其特点是暴发频繁,破坏力强,实测冲击力可达 92 t/m^2 以上^[1],会给道路设施造成很大的破坏,全国每年因泥石流断道造成的经济损失就高达50亿元之多。因此,开展公路泥石流防治是非常重要和必须的,为此陈洪凯等多年来致力于公路泥石流研究,建立了公路泥石流防治理论和防治技术,提出了速流结构、底埋隧道、异型墩汇流结构等^[14,15]公路泥石流防治结构,为治理公路泥石

流发挥了积极作用,为公路泥石流研究奠定了理论基础。

然而,对于公路泥石流的研究国内外尚处于起步阶段,相关技术规范尚缺乏较强的针对性,泥石流在防治结构中运动规律尚不清楚,进而导致公路泥石流防治结构的可靠性、耐久性得不到保障,严重威胁到公路运输的安全。可见,开展泥石流在防治结构中运动规律研究是公路泥石流研究的核心内容之一,对防治或减少公路泥石流防治结构的磨蚀、增强结构的耐久性 & 提高道路工程的安全性等具有比较重要的指导作用。

1 公路泥石流治理综合模式

通常大型特大型公路泥石流都由泥石流形成区、

* 收稿日期:2006-05-15

基金项目:交通部跨世纪人才基金项目(95050508);西部交通建设项目(200332822047)

作者简介:陈野鹰(1957-),男,重庆市人,副教授,主要从事地质灾害与水资源开发研究。

流通区和沉积区三部分组成,而公路往往是从沉积区即泥石流流域的下游区穿过,在这一地区的泥石流不仅汇集物质量大,而且聚集的能量也非常高,采用单一结构模式的泥石流防治工程是难达到预期的治理效果,通常需要采用截、导(汇)、排的综合防治结构(图1)才能有效地拦截破坏作用极强的粒径超过20 cm的泥石流固相物质、调控泥石流流体运动路径、提高泥石流流体的速度、最终让泥石流从速流槽内快速从公路的上方或下方排泄、保证泥石流暴发期间公路仍然能正常发挥作用。能否有效地排泄泥石流流体、使之安全穿越道路,是公路泥石流综合治理的关键和泥石流地区保证公路交通运输正常有序开展的核心内容。而正确掌握防治结构内泥石流流体的运动规律,确定合理的速流槽剖面线形,对于减小泥石流固相体对速流结构的磨蚀破坏,持续、可靠地发挥速流结构排泄泥石流流体的作用,实现防治公路水毁灾害非常必要。

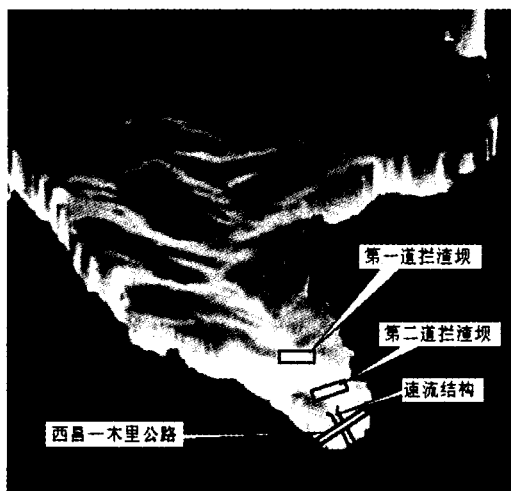


图1 泥石流综合治理模式

2 速流槽内泥石流流体运动规律

泥石流流体是固相和液相的混合物,所夹带的粗沙、巨砾对防治结构磨蚀十分严重,极大的影响防治结构的耐久性和安全性。采用不同的速流槽线形,排泄泥石流流体的距离和速流结构遭受泥石流两相体磨蚀程度存在明显差异。根据流体力学和平抛运动原理可知泥石流流体离开流通区进入速流槽后在惯性力的作用下将作平抛运动(图2中AB段),如果进口断速流槽沿着泥石流流体的下缘修建,防治结构受到的磨蚀作用将会很小(理论上没有磨蚀存在)。泥石流室内试验结果和理论分析均显示当速流槽出口反翘时排泄泥石流流体的距离最大(图2中CD段)。据此合理的速流槽线型应当设计成前半部分向上凸、后半部分向上凹的组合曲线(图2)。

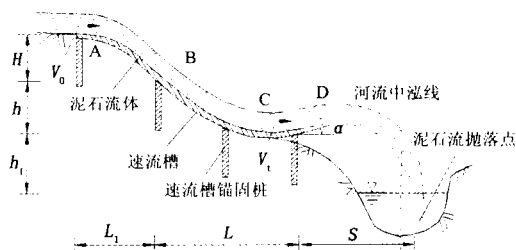


图2 速流槽纵断面形式

2.1 基本假定

- 1) 泥石流流体在速流槽中作层流运动、固相物质间的摩擦能量损失可忽略不计;
- 2) 在速流槽凸线部分流动的泥石流流体与速流槽间只发生粘滞能量损失;
- 3) 速流槽曲线拐点处正好是进槽泥石流流体自由出流的落点;
- 4) 在整个速流槽中泥石流流体的物性保持不变。

2.2 建立泥石流流体的运动方程

速流槽底线如图3所示,其中 φ 为泥石流流速与水平面的夹角、 α 为速流槽反倾角、 m 为泥石流流体质量、 V 为流速。取泥石流微元体(图4),在微段上的进槽流速为 V 、出槽流速为 $V + \Delta V$ 。

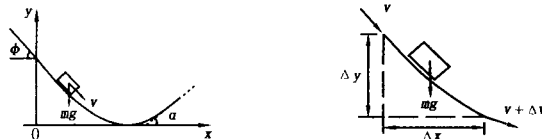


图3 速流槽底线图 图4 速流槽底线自由微元体图

(1) 由动力学理论得知,泥石流微元体 m 作用在槽底的正压力 N 为:

$$N \approx mg \frac{\Delta x}{\Delta s} + \frac{V^2}{\rho} m \quad (1)$$

式中: ρ 为速流槽曲率半径, Δs 为速流槽微段弧长。

(2) 设泥石流流体与速流槽之间的动摩擦阻力系数为 f ,则摩擦力在微段 Δs 上消耗的功 ΔW_f :

$$\Delta W_f = Nf\Delta s = fmg(\Delta x + \frac{\Delta s V^2}{g\rho}) \quad (2)$$

(3) 根据能量守恒定律、建立泥石流流体在微段 Δs 上的能量方程:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}mV^2 &= \frac{1}{2}m(V + \Delta V)^2 + \Delta ymg + \Delta W_f \\ &= \frac{1}{2}m(V^2 + 2V\Delta V + \Delta V^2) + \Delta ymg + \\ &\quad fm(g\Delta x + \frac{\Delta s V^2}{\rho}) \end{aligned} \quad (3)$$

整理(3)式并 x 对取微分可得(4)式

$$\frac{1}{2} \frac{d(V^2)}{dx} + \frac{f}{\rho} \frac{ds}{dx} V^2 = -g \frac{dy}{dx} - fg \quad (4)$$

$$\text{故} \quad \frac{d(V^2)}{dx} + \frac{2f}{\rho} \frac{ds}{dx} V^2 = -2g \frac{dy}{dx} - 2fg \quad (5)$$

如果令 $p(x) = \frac{2f}{\rho} \frac{ds}{dx}$ 、 $Q(x) = -2g \frac{dy}{dx} - 2fg$ 并代入方程(5)可得到:

$$(V^2)' + p(x)V^2 = Q(x) \quad (6)$$

由数学理论得知,方程(6)是关于 V^2 的一个典型的变系数一阶线性微分方程,从方程(5)可知,只要速流槽的线型确定以后,公式中的 y 和 s 都是关于 x 的显函数,换言之,一阶微分方程(6)中的变系数 $p(x)$ 、 $Q(x)$ 是已知函数,据此,方程(6)有如下形式的解答:

$$V^2 = e^{-\int p(x)dx} \left(\int Q(x) e^{\int p(x)dx} dx + C \right) \quad (7)$$

其中方程(7)的常数 C 是由问题的边界条件确定的待定系数。得到泥石流流体在速流槽中的运动规律后,根据牛顿定律即可求解速流槽内任意位置泥石流流体的作用效应,而且,一旦确定了速流槽出口反倾角度就能计算泥石流流体的抛程大小。

3 公路泥石流防治结构研究

速流结构的进口段的曲线形状至关重要,如果泥石流自由出流下缘线与槽顶相吻合,则泥石流流体紧贴速流槽表面下泄,排泄能力基本不受结构形状的影响,速流结构也不容易受到泥石流的磨蚀破坏。所以,理想的剖面形状应使速流槽顶面与自由出流的泥石流流体下缘吻合(图5),同时应设置能提高泥石流抛程的反倾角,如图2中的CD段所示。据此,可由公式(8):

$$y = H - \tan\varphi x - \frac{g}{2u^2 \cos^2\varphi} x^2 \quad (8)$$

确定速流槽进口段剖面曲线,公式中 H 、 v 、 φ 分别表示速流槽进口截面中点泥石流的坐标高度、流速和流速与水平面的夹角(图6)。为了施工方便,速流槽的出口段通常被设计成圆弧型,圆弧的半径则根据泥石流流通区出口处落差、沉积区的地形及道路的位置等因素

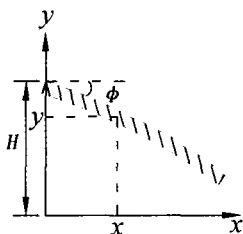
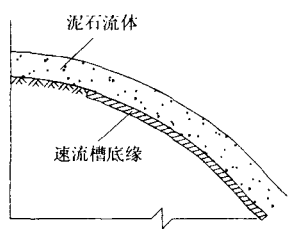


图5 速流槽进口段泥石流运动 图6 进口段速流槽剖面因素综合考虑确定。根据方程(7)可求得圆弧段速流槽中泥石流的运动方程为:

$$V^2(\theta) = e^{-2f(\theta-\theta_0)} \left[V_0^2 - 2Rg(\eta\cos\theta_0 + \zeta\sin\theta_0) \right] + 2Rg(\eta\cos\theta + \zeta\sin\theta) \quad (9)$$

式中: $\eta = \frac{3f}{1+4f^2}$, $\zeta = \frac{1-2f^2}{1+4f^2}$, $\frac{\pi}{2} < \theta < \pi$ 。据此,可得泥石流流体最大抛距离 S (图2)为:

$$S = \frac{1}{2g} V^2 \sin 2\alpha \left[1 + \sqrt{1 + \frac{gh}{2V^2 \sin^2 \alpha}} \right] \quad (0 < \alpha = \theta - \frac{\pi}{2} < \frac{\pi}{2}) \quad (10)$$

式中: θ 为速流槽的圆心角、以逆时针旋转为正, R 为速流槽剖面圆弧曲线半径, f 为泥石流流体与速流槽间摩擦系数, V_0 为泥石流流体初始流速(图7)。另外图7中的 L 为速流槽拐点至最低点的水平距离, α 为速流槽的反倾角。

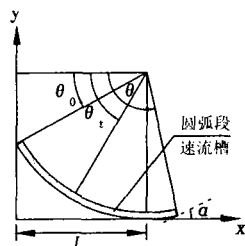


图7 出口段速流槽剖面

得到速流槽中泥石流流体的运动规律后,就能正确地计算泥石流流体产生的荷载、合理设计防治结构,进而当泥石流爆发时能够诱导泥石流流体顺利穿越公路和桥梁,保护道路结构不被破坏,确保道路交通运输正常有序开展。

4 结论

- 1) 治理大型及特大型冲淤变动型公路泥石流应当采用拦、导(汇)、排相结合的综合防治工程措施;
- 2) 合理的速流槽纵剖面应当是由上凸的进口段与上凹的出口段的复合曲线组成;
- 3) 通过改变速流槽结构的剖面形状可以减小泥石流流体对防治结构物的磨蚀作用、提高结构的安全性能,进而延长防治结构的使用年限,增加防治工程的经济效益;
- 4) 通过速流槽结构的泥石流流体的抛程不仅受到泥石流流体的物性制约,而且还与圆弧半径、始终点的角度有关。通常圆弧终点的反倾角在 $4 \sim 12^\circ$ 间时,泥石流流体的抛程最远。

参考文献:

[1] 钱宁,万兆惠. 泥沙运动力学[M]. 北京:科学出版社, 1983.
 [2] 唐红梅,陈洪凯. 公路泥石流研究综述(1)[J]. 重庆交通学院学报,2004,8:37-42.

大,河段水位最大日变幅分别为4.53 m和4.36 m,同样发生在界碑滩,景洪港分别为3.43和3.07 m,仍会对景洪港口停泊的船只造成一定程度的影响。

从图9和图10可以看出,景洪电站坝址至下游河道40 km,景洪电站非恒定流对下游河道影响较大,其中,方案二为最大,景洪枢纽升船机下闸首最大小时变率达到2.54 m左右,20 min变率达到1.99 m,此方案下船舶无法安全进出升船机;其次分别为方案三、方案一和方案四,景洪枢纽升船机下闸首最大小时变率分别为0.97、0.84和0.69 m,最大20 min变率分别为0.60、0.56和0.55 m,此三方案相对方案三对船舶安全进出升船机影响较小。

由上述分析可知,该工况下坝址下游河道各断面的水位日变幅、小时变率及20 min变率为4方案中最小,在升船机下闸首分别为4.36、0.69和0.55 m,对船舶安全进出升船机影响相对较小。因此,就其非恒定流对下游河道通航水流条件的影响而言,景洪电站日调节四种方案中,方案四最优,方案二最差,其间为方案三和方案一。

4 结语

采用数学模型研究电站运行引起的非恒定流已成为一种广泛运用的手段。本文得出如下结论:

1) 本文采用的 Preissmann 隐式格式,对计算稳定

条件限制少,计算速度快;针对山区河流的支流流量较小的特点,圣维南方程的水流连续方程中不考虑旁侧入流,而在内部边界条件中采取点源处理方法,大大简化了方程组的迭代过程和缩短了程序的计算时间;

2) 通过比较澜沧江景洪电站4种日调节运行工况下坝址下游河段非恒定流的水流特征参数:日变幅、小时变率和20 min变率,得到了对景洪电站下游河段通航水流条件影响较小的景洪电站日调节运行工况,即方案四最优,方案二最差,其间为方案三和方案一。

3) 对于电站发电而言,流量越大,发电效益越好。而在实际应用过程中,河道的总水量是有限的,在用电量高峰时期,我们能够应引用较大流量发电,在用电的低峰时期,可能只能保持发电基流,就造成较大较大流量变幅,对电站下游河段的水流条件造成较大的影响,对下游河段船舶航行、停泊以及下游河段的防洪带来较大影响。因此,拟定的电站运行方案既要满足电站发电的需要,同时又要考虑其对航运、防洪、环境等方面的综合影响。

参考文献:

- [1] 谢鉴衡. 河流模拟[M]. 北京:水利电力出版社,1988.
- [2] 杨国录. 河流数学模型[M]. 北京:海洋出版社,1993.
- [3] 麦赫默德 K, 叶夫耶维奇 V. 明渠不恒定流(第一卷)[M]. 北京:水利电力出版社,1987.

(上接第37页)

- [3] Ning Chien, Zhaohui Wan. MECHANICS OF SEDIMENT TRANSPORT[M]. ASCE, 1998.
- [4] 唐邦兴,章书成. 泥石流研究[J]. 中国科学院院刊, 1992, 2:119-123.
- [5] 吴积善,田连权. 论泥石流学[J]. 山地研究, 1996, 14(2):26-33.
- [6] 杜榕恒,李鸿琏,唐邦兴,等. 三十年来的中国泥石流研究[J]. 自然灾害学报, 1995, 4(1):64-73.
- [7] 章书成. 泥石流研究评述[J]. 理学进展, 1989, 19(3):365-375.
- [8] 李德基. 我国西南泥石流灾害现状与最新进展[J]. 中国地质灾害与防治学报. 1996, 7(1):10-41.
- [9] 倪晋仁,王光谦. 泥石流研究进展与启示[J]. 科技导报, 1992, 1:28-30.
- [10] 黄万里. 关于泥石流问题[C]. 泥石流学术会议讨论会兰州会议文集. 成都:四川科学技术出版社, 1986.
- [11] 吴积善,田连权,康志成,等. 泥石流及其综合治理[M]. 北京,科学出版社, 1993.
- [12] 陈洪凯. 白龙江流域的地貌与塑性泥石流[D]. 兰州大学, 1991.
- [13] 科学院甘肃省冰川冻土沙漠研究所. 泥石流[M]. 北京:科学出版社, 1972.
- [14] 陈洪凯,唐红梅,马永泰,等. 公路泥石流研究及治理[M]. 北京:人民交通出版社, 2004.
- [15] 唐红梅,陈洪凯. 公路特大型泥石流治理综合模式及应用[J]. 重庆交通学院学报, 2005, (12):112-115.