

# 排导结构中泥石流的流动形态

周富春<sup>1</sup>, 陈洪凯<sup>1</sup>, 马永泰<sup>2</sup>

(1 重庆交通学院岩土工程研究所, 重庆 400074; 2 凉山彝族自治州交通局, 四川 西昌 615000)

**摘 要:** 根据能量守恒原理, 推导出泥石流在排导槽中的能量方程。根据此方程, 可求出泥石流在排导槽中任意横断面的平均流速。对方程涉及的各参数进行了深入的讨论, 首次引入泥石流对一般水体的修正系数 K。并把该成果应用于平川泥石流的治理。

**关键词:** 泥石流; 排导槽; 流速

中图分类号: P642.2      文献标识码: A

泥石流治理的工程措施主要有排导槽、拦石渣坝、V 型固床槽等。其中排导槽主要用于泥石流堆积区, 具有纵坡使用范围大, 断面优化程度高, 能保证高、中、底水位时的最佳排淤效果与防冲效果, 实践证明, 排导槽是排泄泥石流的最理想和最具独特功能的防冲防淤技术。在排导槽的设计中有一项基本的原则, 即泥石流在排导槽中不能发生淤积, 而泥石流在排导槽中是冲是淤主要取决于泥石流的运动速度, 因此, 本文拟对泥石流在排导槽中的运动速度进行深入研究, 以期完善泥石流的工程治理措施。

## 1 排导槽的结构示意图

本文研究的排导槽的横断面为直墙 V 型 (尖底槽有改善流速, 引导流向, 有利于排泄固体物质, 有利于防止泥石流淤积, 优于平底槽), 纵断面为单一的坡降, 结构要素如图 1 所示。

一般说来, 排导槽入口处为一平底束流槽, 整个排导槽的平面示意图如图 2。

## 2 排导槽任意横断面处平均流速

### 2.1 泥石流的能量方程

泥石流是一种特殊的流体, 可以借助于流体的运动方程来描述其速度及能量损失, 依据此思想, 写出断面 1—1 和 2—2 之间的束流槽能量方程

$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma_c} + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma_c} + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} + h_{wl} \quad (1)$$

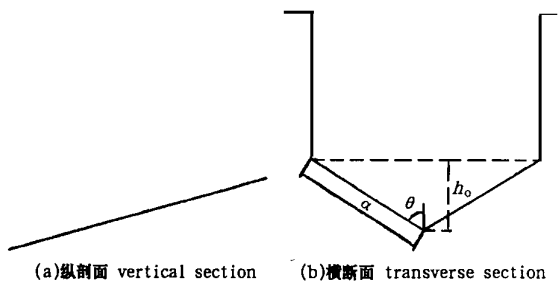


图 1 排导槽的纵横断面及其结构要素图  
Fig. 1 The vertical and transverse sections and the structure element of drainage canal

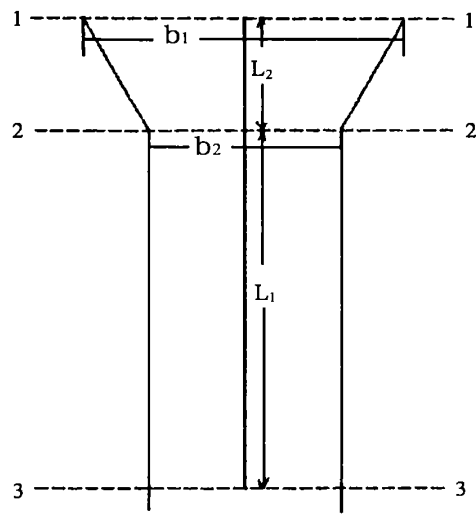


图 2 束流槽及排导槽的平面示意图  
Fig. 2 Plane figure of training canal & drainage canal

收稿日期: 2000-07-07; 改回日期: 2000-10-16.  
基金项目: 四川省交通厅重点科技项目、交通部重点科技项目(95-06-02-33)和交通部优秀青年骨干教师资助项目。  
作者简介: 周富春(1972-), 男(汉族), 四川犍为人, 现为重庆大学在职博士, 从事环境灾害的研究及教学工作。Tel. (023)62650053。

同理可以写出断面 2—2 和任意断面 3—3 之间排导槽的能量方程

$$Z_2 + \frac{P_2}{\gamma_c} + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = Z_3 + \frac{P_3}{\gamma_c} + \frac{\alpha_3 V_3^2}{2g} + h_{w2} \quad (2)$$

式中  $Z_1, Z_2, Z_3$  为断面 1—1、2—2 及 3—3 的底面高程(m);  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  为断面 1—1、2—2 及 3—3 动能修正系数;  $P_1, P_2, P_3$  为断面 1—1、2—2 及 3—3 底面压强(kPa);  $v_1, v_2, v_3$  为断面 1—1、2—2 及 3—3 的平均速度(m/s);  $\gamma_c$  为泥石流流体容重(kN/m<sup>3</sup>);  $h_{w1}, h_{w2}$  为水头损失(m);  $g$  为重力加速度(m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>)。

## 2.2 束流槽中的能量损失 $h_{w1}$

在束流槽中泥石流的能量损失(用水头损失来表示)包括泥石流入口处局部水头损失、泥石流在束流槽中的沿程水头损失及泥石流在束流槽出口处的局部水头损失三部分构成,即

$$h_{w1} = h_{j1} + h_{f1} + h_{j2} \quad (3)$$

式中  $h_{j1}$  为束流槽入口处局部水头损失(m);  $h_{f1}$  为束流槽中沿程水头损失(m);  $h_{j2}$  为束流槽出口处局部水头损失(m)。

$$h_{j1} = \zeta_1 \frac{V_1^2}{2g} \quad (4)$$

$$h_{j2} = \zeta_2 \frac{V_2^2}{2g} \quad (5)$$

式中  $\zeta_1, \zeta_2$  代表局部水头损失系数。

束流槽中沿程水头损失  $h_{f1}$  可以由谢才—巴甫诺夫斯基公式表示,即

$$h_{f1} = n_1^2 \frac{u_1^2 L_1}{R_1 2.8 \sqrt{n_1 + 1}} \quad (6)$$

式中  $n_1$  为束流槽的粗糙系数;  $u_1$  为束流槽中沿程的平均速度,  $u_1 = (v_1 + v_2)/2$  (m/s);  $L_1$  为束流槽入口沿中心线到出口处的距离(m);  $R_1$  为束流槽中位横断面的水力半径(m);

谢才—巴甫诺夫斯基公式主要适用于一般河渠中的水流,而泥石流特点是容重大,有大量的固体物质,固体物质除了与水一起运动外,还要发生滚动、碰撞,要消耗能量,因此,考虑泥石流流体与一般河渠中的水体差异,引入一修正系数  $k$

$$k = f(\gamma_c, d) \quad (k > 1) \quad (7)$$

式中  $d$  为泥石流流体的平均粒径(m)。

经修正后的沿程水头损失

$$h_{f1} = kn_1^2 \frac{u_1^2 L_1}{R_1 2.8 \sqrt{n_1 + 1}} \quad (8)$$

## 2.3 排导槽中的能量损失 $h_{w2}$

泥石流在排导槽中的能量损失只有沿程水头损失,即  $h_{w2} = h_{f2}$ ,而泥石流流体在排导槽中的沿程水头损失  $h_{f2}$

$$h_{w2} = h_{f2} = kn_2^2 \frac{u_2^2 L_2}{R_2 2.8 \sqrt{n_2 + 1}} \quad (9)$$

式中  $n_2$  为排导槽的粗糙系数;  $u_2$  为泥石流在排导槽中运行的平均速度,  $u_2 = (v_2 + v_3)/2$  (m/s);  $L_2$  这排导槽中断面 2—2 到断面 3—3 的长度(m);  $R_2$  为排导槽的水力半径(m)。

## 2.4 水力半径

(1)束流槽的水力半径 假定在束流槽及排导槽中泥石流流体没有淤积,即泥石流的流量  $Q$  在运行过程中保持不变。

在束流槽中

$$R_1 = \frac{\omega_z}{2h_z + b_z} = \frac{\frac{2Q}{(v_1 + v_2)}}{4 \frac{Q}{(v_1 + v_2)} + b_z} = \frac{2Q}{\frac{4Q}{b_z} + b_z (v_1 + v_2)} \quad (10)$$

式中  $\omega_z$  为束流槽中位断面的过水面积(m<sup>2</sup>);  $b_z$  为束流槽中位断面的宽度,  $b_z = (b_1 + b_2)/2$  (m);  $b_1$  为束流槽入口宽度(m);  $b_2$  为排导槽宽度(m);  $h_z$  为束流槽中位断面的深度(m);  $Q$  为泥石流流量(m<sup>3</sup>/s)。

(2)排导槽的水力半径 假定泥石流在排导槽深度为  $h$  ( $h_0$  如图 1), 当  $h < h_0$  时

$$R_2 = \frac{Q \cos \theta}{h(V_2 + V_3)} = \cos \theta \sqrt{\frac{b_2 Q}{4h_0(V_2 + V_3)}} \quad (11)$$

当  $h \geq h_0$  时

$$R_2 = \frac{1}{4} \frac{Q b_2}{2Q + (\alpha - \frac{h_0}{2})(V_2 + V_3)b_2} \quad (12)$$

式中  $\alpha, \theta$  如图 1。

## 2.5 排导槽中任意横断面处平均流速

在束流槽中

$$\frac{P_1}{\gamma_c} = h_1 = \frac{Q}{b_1 V_1} \quad (13)$$

$$\frac{P_2}{\gamma_c} = h_2 = \frac{Q}{b_2 V_2} \quad (14)$$

将公式(3)、(4)、(5)、(8)、(10)、(13)、(14)代入能量方程(1)中,可得

$$Z_1 + \frac{Q}{b_1 V_1} + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{Q}{b_2 V_2} + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} + \zeta_1 \frac{V_1^2}{2g} + \zeta_2 \frac{V_2^2}{2g} + K n_1^2 \frac{(V_1 + V_2)^2 L_1}{4 \left( \frac{2Q}{b_z} \right)^{2.8} \sqrt{n_1 + 1}} \quad (15)$$

式(15)中  $Z_1$ 、 $Z_2$ 、 $b_1$ 、 $b_2$ 、 $L_1$ 、 $V_1$ 、 $Q$ 、 $n_1$ 、 $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\zeta_1$ 、 $\zeta_2$  参数均可确定, 方程只含未知数  $V_2$ , 因此可解出  $V_2$ 。但由于该方程为非线性方程, 用解析解法不能求出, 可用牛顿迭代法计算其近似解(精度可控制)。在排导槽中

$$\frac{P_3}{\gamma_c} = h_3 = \frac{2Q}{b_2(V_2 + V_3)} + \frac{h_0}{2} \quad (16)$$

同理, 将公式(9)、(11)或(12)、(14)、(16)代入能量方程(2)中, 可求出排导槽中任意横断面处的平均流速  $V_3$ 。

2.6 参数的确定方法

2.6.1 流量  $Q$  及起始速度  $V_1$  确定

流量  $Q$  及起始速度  $V_1$  确定方法主要有两种: 一是经验公式法; 二是实测法。经验公式法可查阅其它有关泥石流书籍, 其特点是简单、实用, 但在应用时要进行修正或验证; 实测法准确, 但较麻烦。

2.6.2 结构要素确定

根据泥石流的流量、起始速度及地形特点, 束流槽结构要素即束流槽入口宽度、出口宽度、坡度可先确定。然后再暂定排导槽的结构要素, 经过计算, 如果泥石流在排导槽中的任意断面处的流速大于最小允许流速, 说明此结构可行, 如果小于最小允许流速, 说明此结构要素需要调整。

2.6.3 泥石流特性参数的确定

动能修正系数表示在断面上泥石流流速分布状况, 流速分布均匀, 则  $\alpha=1$ , 流速分布越不均匀  $\alpha$  越大, 一般  $\alpha=1.05-1.20$ 。

局部水头损失系数  $\xi$  为局部地段几何形状所决定的常数。在专业用的设计手册中, 详细载有各种形状局部地段局部阻力系数  $\xi$  的实验值。

粗糙系数  $n$  反映渠道壁面的粗糙情况与壁面的材料光滑度。可在专业的设计手册查得, 也可通过实验确定。

泥石流的修正系数  $k$  主要取决于泥石流中的固体物质含量及固体物质粒径情况, 该系数由笔者引入, 没有专业手册可查, 可通过实验确定。实验方法是在同一模型中一次放入清水, 一次放入泥石流, 对比水头损失来确定。或者在现场测定泥石流的流速及流量, 反推此参数取值一般在1.20~1.8间。

3 实际工程的应用

1999年笔者所在的项目组承担了四川省交通厅重点科技项目——“大金河泥石流与滑坡的研究及治理”研究, 2000年7月又承担了交通部重点科技项目“冲淤变动型沟谷泥石流治理与路基抗毁结构设计一体化模式研究”项目的研究。项目组在凉山州选取了极具代表的平川泥石流(51号沟)来进行研究与治理。平川泥石流位于四川省西昌地区平川县境内雅砻江平川河中游的宽阔河谷地段, 是典型的稀性泥石流。泥石流沟的流域面积16.8 km<sup>2</sup>, 流域沟长8.2公里, 沟谷平均比降181 ‰, 较大的形成区、狭长的流通区及两个短小而宽阔的沉积区是其基本特征。泥石流沟内以玄武岩、碳质页岩、灰岩等易于侵蚀岩性为主, 流域内发育有三条北西—南东向的中型断层, 另外, 流域内覆盖有大量的松散物质, 以中、细粒径为主。流域内年平均降雨量1 236 mm, 汛期(5—10月)降雨占全年降雨总量的94.5%, 日均降雨量≥100 mm的暴雨平均两年一遇, 最大日降雨量178 mm, 30 min的最大降雨38 min。该泥石流几乎每年都要淤积西(昌)木(里)公路, 中断交通, 同时冲毁路基路堤, 给当地造成了巨大的损失。

根据平川泥石流沟的地形地貌结构及泥石流的基本特征, 其防治技术坚持以泄为主、导排结合的原则。排导槽的纵断面为单一的坡降, 槽断面为直墙V形。根据现场的泥位观测, 结合平川泥石流的基本特征, 求出平川泥石流的初始流量为  $Q$  为396 m<sup>3</sup>/s, 对应的速度为7.9 m/s, 泥石流的容重为1.8 t/m<sup>3</sup>。

$K$  值主要通过室内模型——泥石流试验槽及现场修正来确定。试验槽由混凝土制成, 槽宽50 cm, 长15 m, 试验槽一端为事先储备好的泥石流库(库底比槽底高1.5 m)。通过比较清水和泥石流在槽中的水头损失, 得出  $K$  值为1.3。由于模型较小, 所用的模拟材料的粒径偏小, 所以其值可能偏小。经过现场调查修正为1.4。泥石流的其它特性参数参考有关规范, 选取如表1。排导槽的结构要素经过反复试算、验证后选取如下表1。

根据前面的理论推导, 编制 Fortran 程序, 代入以上参数, 可计算出泥石流在排导槽中任意断面的

表 1 排导槽结构要素及泥石流特性参数表

Table 1 The element of drainage canal structure and the parameter of debris flow

排导槽结构要素(m)							泥石流特性参数						
$b_1$	$b_2$	$L_1$	$\iota_1$	$\iota_2$	$h_0$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\xi_1$	$\xi_2$	$n_1$	$n_2$	$K$
5.0	2.6	5.0	150‰	180‰	0.8	1.8	1.35	1.15	1.15	0.05	0.015	0.014	1.4

注:  $\iota_1$  为束流槽的坡降,  $\iota_1 = (Z_1 - Z_2) / L_1$ ;  $\iota_2$  为排导槽的比降,  $\iota_2 = (Z_2 - Z_3) / L_2$ .

平均流速。当任意断面取排导槽出口时(设计整个排导槽长25 m), 计算出  $V_2 = 8.4 \text{ m/s}$ , 泥石流在排导槽出口流速  $V_3 = 4.2 \text{ m/s}$ 。

5 结 语

在泥石流多发区, 为了保证交通运输不致中断, 采用排导槽来治理泥石流是较为理想的工程措施。对于排导槽设计首先要保证其能承受泥石流的巨大冲击力, 同时也要保证泥石流不淤积, 也就是泥石流在排导槽中的流速要大于某一个最小允许流速, 小于该流速则会发生淤积。本文根据能量守恒原理, 推导出泥石流在排导槽中的流速分布规律, 为排导槽设计找到理论依据, 具有重要现实意义。

参考文献:

[1] 王继康. 泥石流防治工程技术[M]. 北京: 中国铁道出版社,

1996, 50~56.  
[2] 向华球. 水力学[M]. 北京: 人民交通出版社, 1993, 66~67.  
[3] 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, 7~10.  
[4] 吴积善, 田连权, 康志成, 等. 泥石流极其综合治理[M]. 北京: 科学出版社, 1993 16~23.  
[5] 吴积善, 康志成, 田连权. 云南蒋家沟泥石流观测研究[M]. 北京: 科学出版社, 1990 1~3.  
[6] [苏] C. M. 弗莱施曼(姚德基译). 泥石流[M]. 北京: 科学出版社, 1985, 4~7.  
[7] 李树德. 泥石流灾害与环境[J]. 水文地质工程地质, 1996, 23(4): 40~43.  
[8] 张学龄. 桥涵水文[M]. 北京: 人民交通出版社, 1995, 20~23.  
[9] 史正涛, 祁龙. 甘肃省文关家沟泥石流综合治理[J]. 山地研究, 1997, 15(2): 124~128.  
[10] Tanotsu Takahashi. Debris Flow on Prismatic Open Channel[J]. Journal of the Hydraulics Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 1980, 106(3): 381~396.

A Study on Flowwing Velocity in Aqueduct of Debris Flow

ZHOU Fu-chun<sup>1</sup>, CENG Hong-kai<sup>1</sup> and MA Yong-tai<sup>2</sup>

(1. The Bureau of Communications of Liangshan Yizu Municipality, Xichang, 61500 PRC;  
2. Institute of Geotechnical Engineering, Chongqing University Of Communications, 400074 PRC)

**Abstract:** This paper inquires into the energy equation of debis flow in drainage canal, according to the law of coservation of energy. Mean current velocity of any transverse section of the debris flow of the aqueduct can be ascertained from this equation. And this paper also gives the course of inference of the equation, the formula of hydraulic raidius and energy loss of the debris flow in the process of flowing. Meanwhile this paper makes concrete analysis of all parameteres— $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\alpha_3$ 、 $\xi_1$ 、 $\xi_2$ 、 $n_1$ 、 $n_2$  especially first leads into a revised coefficient  $K$  cotrast debris flow with water. Finally the theory is applied to the design of aqueduct of debris flow in Pinchuan.  $K$  value( $K=1.3$ ) is obtained by a model experiment, and it is revised to 1.4 by inspection of the scene, then utilizing the equation, mean current velocity of the debis flow is reached in the exit transverse section of the aqueduct.

**Key words:** debris flow; drainage canal; current velocity