

## 泥石流斜墙式 V 型排导槽的设计分析

灌千元

(重庆交通大学 河海学院 重庆 400074)

**摘要:** 针对泥石流斜墙式 V 型排导槽的水力最佳断面和槽底的内力计算问题, 基于水力学理论和链杆法, 分别推导其计算公式。结果表明: 该类槽型的水力最佳断面与深度无关, 用链杆法计算槽底内力更为简便。最后, 以平川泥石流为例, 进行了排导槽槽底的内力计算。

**关键词:** 泥石流; 斜墙式 V 型排导槽; 水力最佳断面; 链杆法; 内力计算

中图分类号: P642.23

文献标识码: A

### Analysis of V-shaped slope wall drainage channel in debris flow

GUAN Qian-yuan

(School of River & Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

**Abstract:** In order to solve the problems about the optimal hydraulic section and the internal force of the bottom of V-shaped slope wall drainage channel, based on the theories of hydraulics and rigid bar method, the calculating methods for them have been put forward. The results show that the optimal hydraulic section has nothing to do with the depth, and it is more convenient to calculate the internal force of the bottom of V-shaped slope wall drainage channel by rigid bar method. At last, the rigid bar method has been carried out in the case of Pingchuan debris flow to calculate the internal force of the bottom of V-shaped slope wall drainage channel.

**Key words:** debris flow; V-shaped slope wall drainage channel; optimal hydraulic section; rigid bar method; internal force calculation

排导槽具有工程简单、整治效果好、就地取材、施工方便等特点, 故广泛应用于泥石流防治工程中。在上世纪 70 年代以前设计的排导槽, 基本上是按一般洪水规律, 参照流量、流速和桥、涵孔径以及地形条件, 做成传统平底式的梯形和矩形排导槽, 遇陡坡时则设缓流井或消力池, 槽型具有宽、平、浅的特点。长期的工程实践证明, 这种排导槽对排泄洪水有效, 而排泄泥石流固体物质则很不利, 经常会产生淤积、堵塞桥孔、淤埋涵洞等。王继康等通过分析与实践, 提出了有利于输移泥石流固体物质的 V 型断面排导槽, 并在工程实践中取得了良好的效果<sup>[1]</sup>。目前, 关于斜墙式 V 型排导槽结构缺乏合理的计算方法, 本文拟讨论斜墙式 V 型排导槽的水力最佳断面, 计算其边坡的土压力, 最后引入链杆法, 对槽底的内力进行分析计算。

### 1 斜墙式 V 型排导槽的最佳水力断面

排导槽要求能满足不同流量的泥石流的过流要求。目前实际工程中广泛运用的排导槽的横断面形状主要有直墙 V 形断面、斜墙式 V 形断面、梯形断面、矩形断面、圆形断面等。V 型排导槽具有窄、深、尖的特点, 针对泥石流的冲、淤危害, 束水冲砂, 以达排泄泥石流固体物质的目标<sup>[1]</sup>。如何合理选择过流断面的形状和尺寸, 使泥石流排导槽具有最佳的排泄能力, 目前国内外的研究还较少涉及。故拟从水力最佳断面角度和经济实用的观点出发, 推导适合于 V 型排导槽最佳过流断面。

#### 1.1 水力最佳断面与实用经济断面

排导槽的过流能力主要取决于过流断面的形状、尺寸、底坡和粗糙系数的大小以及所排导物质

的组成成分。在设计排导槽时,底坡一般依地形条件或其他技术上的要求而定,粗糙系数则主要取决于修建渠槽时所用的材料。在底坡及粗糙系数已定的前提下,排导槽的过流能力则取决于槽的横断面尺寸和形状。排导槽的最佳水力断面是指在粗糙系数  $n$  和底坡  $I$  一定时,通过设计流量  $Q$  时的断面面积  $A$  最小,或者断面面积  $A$  一定时,通过的流量最大<sup>[2]</sup>。

泥石流排导槽的设计,通常是初选断面形状。一般情况下,梯形或者矩形断面的排导槽适用于一切规模和类型的泥石流,而 V 型排导槽则适用于频繁发生,规模较小的粘性泥石流<sup>[3]</sup>。斜墙式 V 型排导槽示意图见图 1。

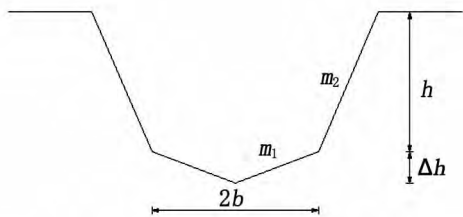


图1 斜墙式V型排导槽示意图

Fig.1 Sketch of V-shaped slope wall drainage channel

对于斜墙式 V 型排导槽,根据水力最佳断面的概念,我们可以得出:

$$\begin{cases} A = \text{常数} \\ x = \text{最小值} \end{cases}$$

即

$$\frac{dA}{dh} = 0$$

$$\frac{dx}{dh} = 0, \text{ 且 } \frac{d^2x}{dh^2} \geq 0 \quad (1)$$

又因为:

$$A = 2m_1\beta h^2 + m_2h^2 + m_1\beta^2h^2$$

$$x = 2\beta h \sqrt{1+m_1^2} + 2h \sqrt{1+m_2^2} \quad (2)$$

解之得:

$$\beta = \frac{m_1 \sqrt{1+m_2^2} + m_2 \sqrt{1+m_1^2}}{m_1(\sqrt{1+m_1^2} - \sqrt{1+m_2^2})} \quad (3)$$

(其中  $m_1 \neq m_2$ , 当  $m_1 = m_2$  时  $\beta$  无意义)

其中  $\beta = \Delta h / h$ , 为排导槽横坡段高度与斜墙段高度之比;  $h$  - 排导槽斜墙段高度,单位为 m;  $\Delta h$  - 排导槽底坡段高度,单位为 m;  $b$  - 排导槽底坡半宽,单位为 m;  $m_1$  - 排导槽槽底的横坡系数;  $m_2$  - 排导槽边墙的倾斜系数;  $A$  - 排导槽横断面的面积,单位为  $m^2$ ;  $x$  - 排导槽的湿周,单位为 m;

由  $\beta$  的表达式可以看出: 在斜墙式 V 型排导

槽取得水力最佳断面时,其断面仅与槽底横坡系数  $m_1$  以及边墙倾斜系数  $m_2$  有关,与流体深度无关。

## 2 斜墙式 V 型排导槽的设计计算

一般情况下,排导槽沿流向的几何形状、尺寸以及受力无明显变化,可取其横断面按平面问题进行计算<sup>[4]</sup>。

### 2.1 排导槽斜边墙的计算

排导槽的边墙可按挡土墙进行设计,其基础深度一般为 1.0 ~ 1.5 m,底为混凝土或浆砌块石铺砌<sup>[5]</sup>。

斜墙式 V 型排导槽的边墙可简化为如图 2 所示的挡土墙。

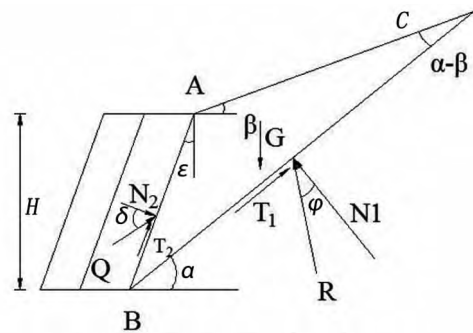


图2 挡土墙土压力计算简图

Fig.2 Sketch of lateral earth pressure of retaining wall

根据文献 [6],已知墙背 AB 仰斜,与竖直方向的夹角为  $\varepsilon$ ,填土表面为一平面,与水平面的夹角为  $\beta$ ,填土的内摩擦角为  $\varphi$ ,墙背与填土的摩擦角为  $\delta$ 。考虑滑动土楔 ABC 的静力平衡,由正弦定理可得:

$$\frac{G}{\sin[\pi - (\psi + \alpha - \varphi)]} = \frac{Q}{\sin(\alpha - \varphi)} \quad (4)$$

$$\text{式中 } \psi = \frac{\pi}{2} + \varepsilon - \delta。$$

经计算得:

$$G = \frac{1}{2} \gamma H^2 \left[ \frac{\cos(\varepsilon + \alpha) \cos(\varepsilon + \beta)}{\cos^2 \varepsilon \sin(\alpha - \beta)} \right] \quad (5)$$

将 G 的表达式带入式 (4) 得:

$$Q = \frac{1}{2} \gamma H^2 \frac{\cos(\varepsilon + \alpha) \cos(\varepsilon + \beta) \sin(\alpha - \varphi)}{\cos^2 \varepsilon \sin(\alpha - \beta) \cos(\alpha + \varepsilon - \varphi - \delta)} \quad (6)$$

令  $\frac{dQ}{d\alpha} = 0$  得:

$$E_a = Q_{\max} = \frac{1}{2} \gamma H^2 K_a \quad (7)$$

其中:

$$K_a = \frac{\cos^2(\varphi + \varepsilon)}{\cos^2 \varepsilon \cos(\delta - \varepsilon) \left[ 1 + \sqrt{\frac{\sin(\delta + \varphi) \sin(\varphi - \beta)}{\cos(\delta - \varepsilon) \cos(\varepsilon - \beta)}} \right]^2} \quad (8)$$

式中:  $\gamma$  - 墙后填土的重度, 单位为  $\text{kN}/\text{m}^3$ ;  $\varphi$  - 墙后填土的内摩擦角, 单位为 $^\circ$ ;  $\varepsilon$  - 墙背与竖直线间的夹角, 单位为 $^\circ$ ;  $\delta$  - 墙背与填土间的摩擦角, 单位为 $^\circ$ ;  $\beta$  - 填土面与水平面间的倾角, 单位为 $^\circ$ ;  $K_a$  - 主动土压力系数, 是  $\varphi$ 、 $\varepsilon$ 、 $\delta$ 、 $\beta$  的函数。

从  $E_a$  的表达式可以看出, 斜墙式 V 型排导槽边墙的主动土压力是墙高  $H$  的二次函数, 故主动土压力强度  $P_a$  沿墙高按直线分布, 其合力的作用点在墙高的  $1/3$  处。

## 2.2 排导槽槽底的计算

### 2.2.1 V 型排导槽横坡和纵坡的关系

V 型排导槽底部是由含纵、横坡度的两个斜面组成的复合断面, 其关系如下:

$$I_0 = \sqrt{I_1^2 + I_2^2} \quad (9)$$

式中  $I_0$  - V 型槽槽底总体坡度, ‰;  $I_1$  - V 型槽纵坡坡度, ‰;  $I_2$  - V 型槽横坡坡度, ‰。

由  $I_0$  的表达式可看出, V 型槽总体坡度是其横坡坡度与纵坡坡度的有机组合。因此, 合理的组合 V 型槽的横坡和纵坡, 以使其达到最佳的排导效果。

纵坡坡度  $I_1$  取决于泥石流堆积区的地形条件, 在设计排导槽之初, 其值基本已定, 可供设计者发挥的空间不大。

横坡坡度  $I_2$  常取决于理想的 V 型槽排淤效果的  $I_0$  值, 是控制 V 型槽束流能力的关键因素。很明显, 横坡坡度  $I_2$  越大, 越陡, 则束流能力越强; 反之, 则越差。

槽底总体坡度  $I_0$  的最佳值, 取决于  $I_1$  和  $I_2$  的合理组合。  $I_0$  越大, V 型排导槽的排导效果越好, 即其过流能力越强; 反之, 则越差。

根据工程资料, 对于  $I_0$ 、 $I_1$  和  $I_2$  可归纳出如下的规律:

排淤效果好的 V 型槽, 其  $I_0$  200 (‰);  $I_1$  值的区域为 10‰ ~ 344‰;  $I_2$  值的区域为 100‰ ~ 300‰<sup>[1]</sup>。

### 2.2.2 V 型排导槽槽底计算

作用在槽底的荷载有: 结构自重、泥石流流体的重量、地基反力以及泥石流流体的磨蚀力。在

简化计算中, 通常可将地基视为均质各向同性介质, 对于泥石流流体的磨蚀力, 我们从结构构造方面和材料方面予以考虑, 不列入工程计算<sup>[7]</sup>。

运用弹性半空间地基上梁的简化计算, 即链杆法分析 V 型排导槽结构。链杆法解地基梁的基本思路是把连续支承于地基上的梁简化为用有限根链杆支承于地基上的梁。简化的实质是把无穷个支点的超静定问题转化为在若干弹性支座上的连续梁, 则可利用结构力学的方法进行求解。弹性地基梁本来是无穷多次超静定结构, 需要解微分方程或微分积分方程才能求得精确解。采用链杆法后, 把问题简化为有限次超静定结构, 只需解代数方程就能求出近似解<sup>[8]</sup>。在解线性方程组时, 可采用 excel 中的规划求解, 可使求解过程变得相当简单。如果增加链杆的根数, 则可使解的精度提高, 一般情况下, 当采用手算时, 链杆数一般取为 6 ~ 10 根, 为计算方便, 链杆宜等距离布置<sup>[9]</sup>。采用链杆法对排导槽的计算过程如下:

#### (1) 布置链杆

由于排导槽结构的对称性, 我们取结构的一半进行计算。取单宽槽底进行研究, 在基础之上布置 8 根链杆。截断链杆, 代之以集中力  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_8$ 。同时, 解除固定端多余约束, 代之以位移  $s_0$  和角位变  $\varphi$ 。

#### (2) 列基础梁的变形协调方程与力平衡方程 (以 8 根链杆为例列方程)

$$X_1 \delta_{11} + X_2 \delta_{12} + X_3 \delta_{13} + \dots + X_8 \delta_{18} - S_0 - 0.5 \tan \Phi - \Delta_{1F} = 0$$

$$X_1 \delta_{21} + X_2 \delta_{22} + X_3 \delta_{23} + \dots + X_8 \delta_{28} - S_0 - 1.5 \tan \Phi - \Delta_{2F} = 0$$

$$X_1 \delta_{31} + X_2 \delta_{32} + X_3 \delta_{33} + \dots + X_8 \delta_{38} - S_0 - 2.5 \tan \Phi - \Delta_{3F} = 0$$

.....

$$X_1 \delta_{81} + X_2 \delta_{82} + X_3 \delta_{83} + \dots + X_8 \delta_{88} - S_0 - 8 \tan \Phi - \Delta_{8F} = 0$$

$$X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_8 = \Sigma F$$

$$0.5cX_1 + 1.5cX_2 + \dots + 7.5cX_7 + 8.0cX_8 = \Sigma Mi$$

#### (3) 求解方程组

解此方程组即可求出设置链杆处的位置力  $X_i$ , 再根据叠加原理可求出内力如下:

$$M = \overline{M}_1 X_1 + \overline{M}_2 X_2 + \overline{M}_3 X_3 + \dots + \overline{M}_n X_n + M_p$$

$$F_Q = \overline{F}_{Q1} X_1 + \overline{F}_{Q2} X_2 + \overline{F}_{Q3} X_3 + \dots + \overline{F}_{Qn} X_n + F_{QP}$$

$$F_N = \overline{F}_{N1} X_1 + \overline{F}_{N2} X_2 + \overline{F}_{N3} X_3 + \dots + \overline{F}_{Nn} X_n + F_{NP}$$

在求出结构内力之后, 即可按照相关的规范进行配筋等。

## 3 斜墙式 V 型排导槽工程实例

平川泥石流位于西昌—木里干线公路雅砻江河谷中游的宽阔河谷地带, 泥石流沟的平均比降

181‰。泥石流流体多年统计统计累积最大淤积高度为  $H_1 = 6.8 \text{ m}$  ,最大冲刷工况设计泥石流流量为  $4\ 839.5 \text{ m}^3$  ,最大冲刷工况设计泥石流流速为  $9.7 \text{ m/s}$  ,泥石流流体的容重为  $\gamma = 17.3 \text{ kN/m}^3$ 。

治理时排导措施采用斜墙式 V 型排导槽。槽净宽  $6 \text{ m}$  ,泥石流流体深度为  $1.5 \text{ m}$  ,设计深度为  $2.0 \text{ m}$  ,安全超高为  $0.25 \text{ m}$  ,其纵坡坡度为  $181‰$  ,槽底横向坡度为  $240‰$  [7]。

### 3.1 挡土墙内力计算

分别按照前述计算挡土墙土压力的公式进行挡土墙的计算 其计算过程省略。

### 3.2 排导槽槽底内力计算

取斜墙式 V 型排导槽的一半结构 ,如图 3 进行计算。

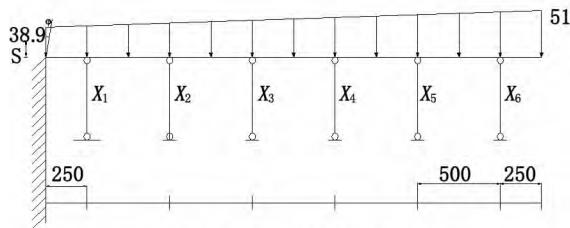


图3 排导槽槽底链杆法简图

Fig.3 Sketch of the bottom of drainage channel by rigid bar method

(1) 按照链杆法的要求 列出槽底的变形协调方程及静力平衡条件 得:

$$\begin{aligned} X_1\delta_{11} + X_2\delta_{12} + X_3\delta_{13} + X_4\delta_{14} + X_5\delta_{15} + X_6\delta_{16} - s_0 - 0.25\tan\Phi_0 - \Delta_{1F} &= 0 \\ X_1\delta_{21} + X_2\delta_{22} + X_3\delta_{23} + X_4\delta_{24} + X_5\delta_{25} + X_6\delta_{26} - s_0 - 0.75\tan\Phi_0 - \Delta_{2F} &= 0 \\ X_1\delta_{31} + X_2\delta_{32} + X_3\delta_{33} + X_4\delta_{34} + X_5\delta_{35} + X_6\delta_{36} - s_0 - 1.25\tan\Phi_0 - \Delta_{3F} &= 0 \\ X_1\delta_{41} + X_2\delta_{42} + X_3\delta_{43} + X_4\delta_{44} + X_5\delta_{45} + X_6\delta_{46} - s_0 - 1.75\tan\Phi_0 - \Delta_{4F} &= 0 \\ X_1\delta_{51} + X_2\delta_{52} + X_3\delta_{53} + X_4\delta_{54} + X_5\delta_{55} + X_6\delta_{56} - s_0 - 2.25\tan\Phi_0 - \Delta_{5F} &= 0 \\ X_1\delta_{61} + X_2\delta_{62} + X_3\delta_{63} + X_4\delta_{64} + X_5\delta_{65} + X_6\delta_{66} - s_0 - 2.75\tan\Phi_0 - \Delta_{6F} &= 0 \\ X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + X_5 + X_6 &= 134.85 \\ 0.25X_1 + 0.75X_2 + 1.25X_3 + 1.75X_4 + 2.25X_5 + 2.75X_6 &= 211.35 \end{aligned}$$

(2) 求解  $\delta_{ki}$

$$\begin{aligned} \delta_{ki} &= S_{ki} + \omega_{ki} \\ S_{ki} &= \frac{1-v^2}{\pi E c} \cdot \xi_{ki} = 8.78 \times 10^{-6} \xi_{ki} \\ \omega_{ki} &= \frac{c^3}{6E_c I} \eta_{ki} = 1.37 \times 10^{-6} \eta_{ki} \end{aligned} \quad (10)$$

由  $b/c$  的值查表 3-9 [9] 求  $\xi_{ki}$  ,查表 3-10 [9] 求  $\eta_{ki}$  ,最后将  $\xi_{ki}$  和  $\eta_{ki}$  的值代入  $\delta_{ki}$  整理得:

$$\begin{aligned} \delta_{11} &= 37.79; \delta_{21} = 10.756; \delta_{31} = 6.856; \delta_{41} = 6.375; \\ \delta_{51} &= 6.657; \delta_{61} = 7.236; \delta_{22} = 46.695; \delta_{32} = 27.881; \\ \delta_{42} &= 32.134; \delta_{52} = 39.94; \delta_{62} = 48.373; \delta_{33} = 80.191; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \delta_{43} &= 77.886; \delta_{53} = 98.579; \delta_{63} = 122.825; \delta_{44} = 153.897; \\ \delta_{54} &= 176.526; \delta_{64} = 222.29; \delta_{55} = 286.787; \delta_{65} = 342.296; \\ \delta_{66} &= 492.287; \end{aligned}$$

注: 单位  $10^{-6} \text{ m}$ 。

(3) 求荷载作用下各链杆处引起的变位  $\Delta_{kF}$

把槽底当成 A 端固定的悬臂梁求外荷载  $q(x)$  在各链杆处引起的挠度 ,即该处链杆的位移  $\Delta_{kF}$  ,用材料力学的公式求解 结果如下:

$$\begin{aligned} \Delta_{1F} &= 3.491 \times 10^{-4} \text{ m}; \Delta_{2F} = 2.293 \times 10^{-3} \text{ m}; \\ \Delta_{3F} &= 7.536 \times 10^{-3} \text{ m}; \Delta_{4F} = 1.360 \times 10^{-2} \text{ m}; \\ \Delta_{5F} &= 2.065 \times 10^{-2} \text{ m}; \Delta_{6F} = 2.835 \times 10^{-2} \text{ m}。 \end{aligned}$$

把  $\delta_{ki}$  和  $\Delta_{kF}$  代入变形协调方程组 解得:

$$\begin{aligned} X_1 &= 27.88 \text{ kN}; X_2 = 22.13 \text{ kN}; X_3 = 14.93 \text{ kN}; \\ X_4 &= 14.75 \text{ kN}; X_5 = 16.76 \text{ kN}; X_6 = 38.40 \text{ kN}; \\ S_0 &= 0.001\ 414; \tan\varphi_0 = 0.000\ 458\ 5 \end{aligned}$$

由此可以作出槽底的弯矩图和剪力图。从链杆法的计算过程可以看出 ,链杆法的计算过程简单 ,方便实用。

## 4 结论

1) 泥石流斜墙式 V 型排导槽的水力最佳断面仅与边墙倾斜系数  $m_2$ 、槽底横坡系数  $m_1$  有关 ,与流体深度无关。

2) 把槽底看成是支承于弹性地基上的梁 ,并采用链杆法对其进行计算 ,可以直接解代数方程求出其相应的内力 ,而不用去求解微分方程等。

## 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.
- [2]吴持恭. 水力学(上册) [M]. 北京: 高等教育出版社 2008.
- [3]游 勇. 泥石流直墙 V 型排导槽横断面优化设计 [J]. 山地学报, 2008 26(2): 218 - 222.
- [4]周必凡, 李德基, 吕儒仁, 等. 泥石流防治指南 [M]. 北京: 科学出版社, 1991.
- [5]袁聚云, 钱建固, 张宏鸣, 等. 土质学与土力学 [M]. 北京: 人民交通出版社 2011.
- [6]DZ/T 0239-2004 泥石流灾害防治工程设计规范 [S].
- [7]孙晓勇. 公路泥石流排导槽结构设计原理 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2011.
- [8]龙驭球. 弹性地基梁的计算 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1981.
- [9]周景星, 李广信, 虞石民, 等. 基础工程 [M]. 北京: 清华大学出版社 2007.

(责任编辑 王利君)