

文章编号: 1008-2786-(2011)1-101-08

交错齿槛槽排导粘性泥石流的试验

高全^{1,2}, 陈晓清^{1*}, 贾世涛³, 黄凯^{1,2}

(1. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所/中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室, 四川 成都 610041;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3. 西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610031)

摘 要: 排导槽是一种结构简单、效果明显、用途广泛的泥石流防治措施, 在总结东川槽、“V”型槽等现有排导槽槽型优缺点的基础上, 结合一种新槽型——交错齿槛型泥石流排导槽展开试验研究。提出排导槽排导指数概念, 即直接反应排导槽排泄能力的参数。利用室内水槽模型试验, 通过改变交错槽纵比降、齿槛间距、夹角等参数, 得出排导指数与上述参数的关系, 试验结果表明: 1. 与东川槽相比, 交错齿槛槽的排导能力有大幅度的提升, 最大增幅达 74%, 表明交错齿槛有较强的挑流排泄能力, 能有效解决东川槽等存在的淤积难题; 2. 不同比降下, 交错槽主要设计参数组合存在差异, 其中 10% 与 15% 比降下, 60° 齿槛间距为 30 cm 时, 交错槽的排导指数最大, 排导能力最强; 而 12% 比降下, 60° 齿槛间距为 40 cm 为最优组合; 3. 小角度齿槛 (60°) 齿槛挑流排导能力较大角度 (80°) 更强, 更适合坡降较小的排导槽; 齿槛角度越大, 齿槛的挑流能力有限, 阻流作用越明显, 对需控制流速及洪峰流量的泥石流, 可考虑采用大角度齿槛。

关键词: 泥石流; 排导槽; 交错齿槛; 排导特征

中图分类号: P642.23

文献标识码: A

泥石流是我国山区最常见的土地灾害, 尤其是四川、云南等西部山区, 山高陡峻, 水土流失严重, 泥石流暴发频繁, 给社会带来巨大的经济损失^[1]。“5.12”汶川大地震诱发了大量崩塌、滑坡及岩土体松动, 为泥石流形成提供了丰富的物质来源, 仅 2008—2009 年两个雨季灾区就暴发千余次泥石流, 四川省规划泥石流灾害治理点达 800 余处^[2], 因此急需采取相应措施对其进行防治处理。

排导槽是一种结构简单、施工方便、效果显著的泥石流防治工程, 目前主要有横向贯穿型齿槛软基消能排导槽 (东川槽) 和满铺底全衬砌排导槽 (“V”型槽)。针对两种槽型, 一些学者进行了相关研究。李德基^[3]等通过工程实践总结, 得出排导槽合理比降为 80‰~200‰; 张开平^[4]等对黑水河泥石流的

冲刷与淤积进行了观测研究; 游勇^[5-8]分析比较了直墙 V 型、梯形、矩形、圆型等槽型水力条件, 得出圆形断面槽最优。文献[9]对“V”型槽的最小不淤纵坡进行了试验研究; 黄海则利用水槽模型对东川槽的流速特性进行了探索^[10]。可见, 前人研究主要集中于两种槽型的工程特性及应用, 两者在大量泥石流灾害治理中也取得了良好效果^[11-14]。但两种槽型仍有明显缺点: 贯穿齿槛的截流作用影响了泥石流的排导效率, 使排导槽的淤积成为一大难题; 齿槛阻断了上下游的水力联系, 不利于水生生物洄游繁殖, 严重影响沟床的生态修复。为了解决上述问题, 陈晓清等首次提出“交错齿槛型泥石流排导槽”^[15] (以下简称交错槽)。

本文通过搜集东川槽等现有槽型的常用设计参

收稿日期 (Received date): 2010-08-10; 改回日期 (Accepted): 2010-10-31。

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金 (41072270) 与国家重点基础研究发展计划“973”计划 (2008CB425802)。[This research is supported by China National Science Fund (41072270) and National Basic Research Program “973” Program (2008CB425802).]

作者简介 (Biography): 高全, (1985-), 男, 湖北宜昌人, 硕士研究生, 主要从事泥石流防治。[Gao Quan, male, born in 1985, Yiduf of Hubei province, Master, Mainly engaged in debris flow prevention and mitigation.] E-mail: cheney.gao@gmail.com

* 通讯作者 (Corresponding author): 陈晓清 (1974-), 男, 四川遂宁人, 博士, 研究员, 主要从事山地灾害防治理论研究。[Chen Xiaoqing, male, born in 1974, Suining of Sichuan province, Doctor, professor, mainly engaged in mountain hazards prevention and mitigation.] E-mail: xqchen@imde.ac.cn

数,如槽宽、纵比降、贯穿齿槛间距、高度等指导试验设计,运用室内水槽模型试验,通过调整交错槽纵比降、交错齿槛间距、与书流侧墙夹角等参数,观测分析粘性泥石流在其中的排淤特征及不同工况条件下交错槽排导能力的变化情况,为该交错槽的定型设计提供一定的参考作用。

1 排导槽排导指数

泥石流排导槽的理想状态是在确保下游安全的前提下,将泥石流顺利排出沟口,而不产生淤积,此时称排导槽达到冲淤平衡状态。但实际工程中,泥石流排导槽不可能按照理想状态,将上游泥石流完全排入下游,总是或多或少产生淤积。为了延长排导槽的使用寿命,需要定期对其进行清淤,这大大增加了排导槽的维护费用。因此如何改进排导槽的结构设计,减少淤积,增大排导槽的排导能力显得十分重要。

地貌学上,常常忽略某一过程中的细节,而用该过程所产生的结果或效应来度量它^[16]。以某一排导槽为研究单元,从收支平衡的角度出发定义泥石流排导槽的排导指数(以下简称排导指数, Drain Index),即在满足泥石流设计标准,保证下游居民安全的前提下,排导指数为某段排导槽的输出泥石流流量与进入该段排导槽的泥石流总量之比,用以表征宏观意义上排导槽排导泥石流的能力。它与水力学中泥沙输移比或水流挟沙能力等概念有相似之处,但这两者是针对某一断面而言,不同位置断面的挟沙能力可能不同,而排导指数是针对整个宏观过程,只考虑该过程的始终点的状态,忽略其中发生的各种细节,可能在某些断面处排导能力偏强,而另一些断面处排导能力偏弱,两者可相互抵消。可用下式表示

$$\frac{Q_o}{Q_i}=1-\frac{Q_d}{Q_i} \tag{1}$$

其中 Q_i 为进入排导槽的泥石流总量; Q_o 为通过排导槽流出的泥石流总量; Q_d 为在排导槽中淤积存留下来的泥石流总量;

由上述分析可知,(1)式左端即为泥石流排导槽排导指数,记为 κ ;若只考虑淤积情况,(1)式右端第二项为泥石流的淤积比,它反映排导槽中淤积量占泥石流总量的百分比;易知, κ 能反映排导槽平衡或非平衡状态:若 $\kappa > 1$,则泥石流淤积量为负值,排导槽处于冲刷掏蚀状态; $\kappa = 1$,则泥石流淤积量为

零,排导槽处于冲淤平衡状态; $\kappa < 1$,则泥石流淤积量为正值,排导槽处于淤积状态;同时, κ 还能反映排导槽的泥石流排泄效率, κ 越大,排泄效率越高,当 $\kappa = 1$,即排导槽达到冲淤平衡状态时,排导效率达到 100%。

2 试验设计

2.1 试验内容

本试验固定泥石流重度($\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$)及模型试验物料的颗粒粒径($< 2 \text{ cm}$),主要考虑 3 个变量,分别为纵比降、齿槛间距、齿槛与侧墙夹角,具体情况见表 1。

表 1 关键试验参数对照表
Table 1 Key parameter comparison of test

纵比降/%	齿槛间距/cm	齿槛角度/°
10	30	60
12	40	70
15	50	80

为了尽可能简化试验流程,按照如下顺序调整试验工况,纵比降→齿槛间距→齿槛夹角,分 4 个层次进行试验。

1. 保证交错齿槛间距及夹角不变,调整模型槽纵比降;
2. 改变交错齿槛间距,按同样的方法调整模型槽纵比降;
3. 改变交错齿槛夹角,再调整试验槽纵比降;
4. 为了比较交错齿槛槽与东川槽等传统槽型的排导效果,补充东川槽及传统矩形槽排导试验。

2.2 试验装置

本试验于中国科学院东川泥石流观测研究站实施,试验模型由料斗、钢架水槽、尾料池三部分组成(图 1)。其中料斗尺寸为 1 000 mm(长)×1 000 mm(宽)×800 mm(高),为试验提供泥石流浆体;钢架水槽为矩形断面,两侧壁安装有机玻璃,用来模拟实际泥石流沟道,具体尺寸:6 000 mm(长)×400 mm(宽)×400 mm(高),可改变比降;试验尾料池 1 200 mm(长)×1 200 mm(宽)×500 mm(高),安装滚轮可移动操作,方便回收循环利用泥石流浆体。槽内交错齿槛用 40 mm×40 mm 矩形钢管制作(图 2),并用螺丝钉固定于试验槽底板。

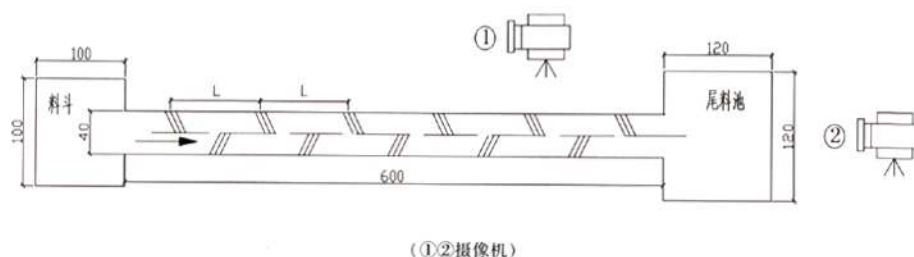


图1 试验装置平面示意图

Fig. 1 Plane sketch of experimental equipment

图1中①②为数码摄像机,摄像机①侧拍试验槽全貌,观察泥石流及龙头运动情况;摄像机②用于正面拍摄泥石流在试验槽中的运动情况,实时观测泥石流在交错齿槽间的运动状态。

2.3 试验物料配置

为了使模型试验更接近真实情况,选用云南东川蒋家沟泥石流原样进行试验。蒋家沟系长江上游金沙江一级支流小江右岸的一条支流,其泥石流发育典型,类型多样,过程完整,因此其泥石流原样也具有代表性,为典型的宽级配砾石土。利用20 mm × 20 mm 钢筛剔除粒径 > 20 mm 的砾石土颗粒,土样的颗粒级配情况见图3。由图3可知,试验土样的中值粒径 $D_{50} = 3.6$ mm,且粘粒含量较多, < 2 mm 颗粒含量达到31%。

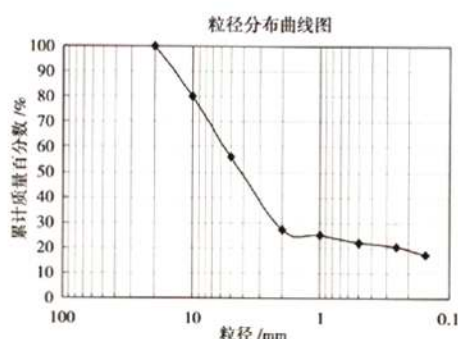


图3 试验物料颗粒级配曲线

Fig. 3 Particle-size distribution of test material

1. 于蒋家沟泥石流取一定量的宽级配砾石土原样,利用20 mm × 20 mm 钢筛剔除大颗粒砾石,按照设计重度将土样与水混合,利用电动搅拌机将原料搅拌均匀(图4),后将原料置入料斗中,关闭闸门,同时安装相应的齿槽,调整齿槽间距、夹角及试验槽纵比降,根据试验设计,在试验槽底部安装PSI孔隙水压力传感器,固定整套试验装置,在预定位置架设好摄像机。



图2 交错齿槽布置

Fig. 2 Lay out of Indented-sill

2.4 试验流程

整个试验过程主要包括准备试验、实施试验、后期处理三个阶段。



图4 混合泥石流物料搅拌机

Fig. 4 Photo of blender

2. 迅速拉开料斗闸门,进行试验。为了保证每次试验启动流量尽量一致,须保证各次试验用料相等,且每次拉开闸门的速度一致,同时,打开 PSI 孔隙水压力传感器系统及摄像机获取试验数据;

3. 试验结束后,记录相关试验数据,包括泥深、重度、流速等,于尾料池中取样,并测量排导的泥石流流体体积,测量试验槽中泥石流的淤积变化情况,后使试验槽中的泥石流浆体倾倒入尾料池中,再次测量泥石流的总体积。

2.5 主要测量内容及方法

本次试验中,主要以下 5 项测量内容:1. 重度测量:将泥石流物料搅拌均匀后,用取样桶取一定量原样,多次称重,求其平均重度;2. 流速测量:试验开始后,采用浮标法,在试验槽固定位置,贴近泥石流表面处抛投泡沫小浮标,通过提取录像获得流速;3. 泥深测量:利用 PSI 孔隙水压力测试系统,测得相应孔隙水压力值,反算出试验过程中泥石流泥深;4. 尾料体积测量:试验结束,将尾料池中的浆体推平,测出尾料池中泥浆深度,得出尾料池泥浆体积,从而计算得出排导槽的排泄效率。

3 试验结果分析

3.1 排导指数与纵比降的关系

纵比降是决定排导槽排淤能力的一个重要参数,沟床纵坡为泥石流运动提供底床和能量条件,比降越大,泥石流具有的势能越大,运动速度也相应增大,排导槽的排导指数也会随之增大。本试验包括 3 种比降,分别为 10%、12%、15%。图 5 为 70°齿槛在三种间距条件下,排导指数随纵比降变化曲线图。本文的测量结果都是基于模型尺寸试验得出。

由图 5 可知,在三种齿槛间距下,排导指数与比降呈正线性增长关系(表 2)。文献[7]指出,泥石流的流速与纵比降也呈正相关关系,可见,排导槽排导指数与纵比降亦呈正相关关系。其他角度齿槛下,排导指数与纵比降具有类似的线性关系。

表 2 排导指数与纵比降关系		
Table 2 Relationship between drainage index and longitudinal gradient		
间距/cm	y 与 x 关系式	R ²
40	y = 0.029x + 0.288	0.93
30	y = 0.037x + 0.158	0.991
50	y = 0.052x - 0.204	0.979

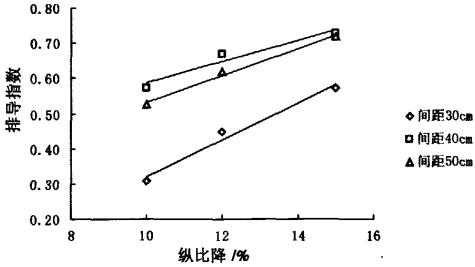


图 5 排导指数与纵比降变化曲线图
Fig. 5 Sketch between drainage index and longitudinal

3.2 排导指数与齿槛夹角的关系

丁坝是河道或航道整治中最常见的构筑物,坝身较长,突入河道,有较强的挑流作用。水利工程中常用下挑丁坝来加强河流集流,增大流速,保持河床的顺直,而且能有效的保护河床两岸,防止河床局部的冲刷不平衡,维持河床稳定,其中下挑丁坝的角度一般为 60°~70°^[17]。将类丁坝结构——交错齿槛运用于泥石流排导槽结构设计中,利用交错齿槛的挑流作用也能增强排导槽的排泄能力,但泥石流不同于一般高含沙水流,是一种高重度的多相介质流体,流体粘滞性很强。一般而言,上挑或垂直丁坝具有更明显的阻流效果,而下挑丁坝的挑流作用更强,因此需要寻找一个合适的角度使齿槛的阻挑流达到平衡状态,陈晓清^[15]等指出交错齿槛的最佳角度为 60°~80°,因此本试验将齿槛夹角设置为 60°、70°、80°探讨齿槛夹角对排导指数的影响。图 6(a)~(c)分别为不同比降下(10%、12%、15%),交错槽的排导指数与齿槛夹角的关系曲线。

由图可知,三种比降下,当齿槛间距为 30 cm 时,三种角度齿槛对排导指数呈现相同的影响趋势,均先减小后增大,但夹角 60°仍为最优;当齿槛间距为 50 cm 时,情况恰好相反,排导指数先后增大减小,但最大排导效率较 30 cm 小;当齿槛间距为 40 cm 时,排导效率变化趋势位于两者之间,变化幅度不明显,不同比降情况下,也没有统一的变化趋势。由图 6 易知,当纵比降为 10%或 15%,60°齿槛间距 30 cm 为最佳;而当纵比降为 12%时,60°齿槛间距为 40 cm 更适宜。

3.3 排导指数与齿槛间距的关系

齿槛间距是东川槽设计中的一个关键参数,可根据纵坡大小选择不同的齿槛间距,一般为 10~25 m^[3]。由于交错齿槛仅突出半个槽宽距离,改变了泥石流的流态结构,不仅在纵向上构成局部范围的

阶梯深潭系统,陡坎消能,而且使泥石流在平面上产生绕流。本试验设置 30 cm、40 cm、50 cm 三种齿槛间距。图 7(a) ~ (c) 分别为不同比降下(10%、

12%、15%),交错齿槛槽的排导指数与齿槛间距的关系曲线。

由图 7(a) ~ (c)可知,三种比降下,60°齿槛槽

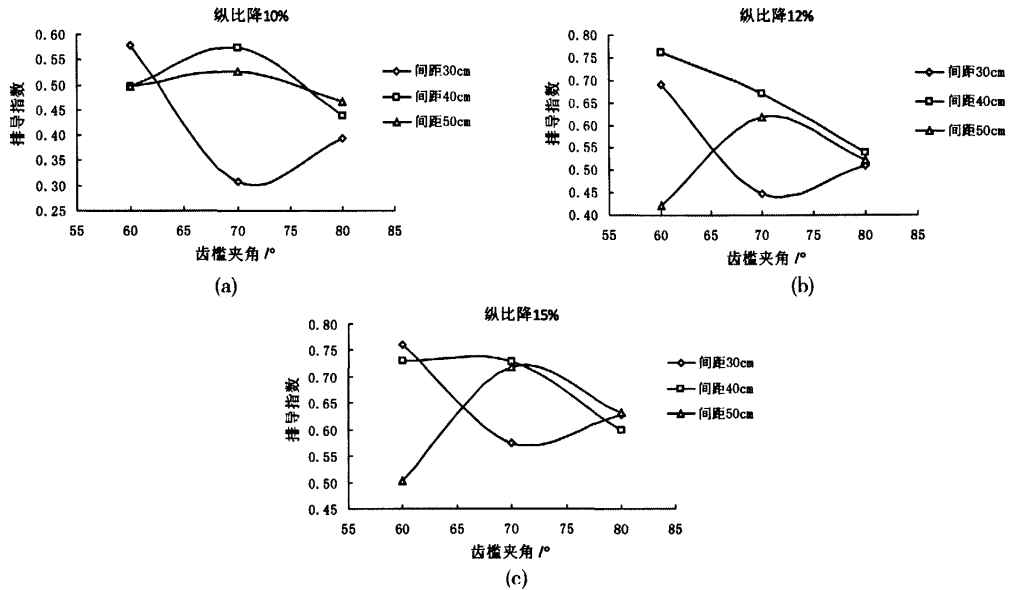


图 6 排导指数与齿槛夹角的关系曲线

Fig. 6 Sketch between drainage index and angle of indented-sill

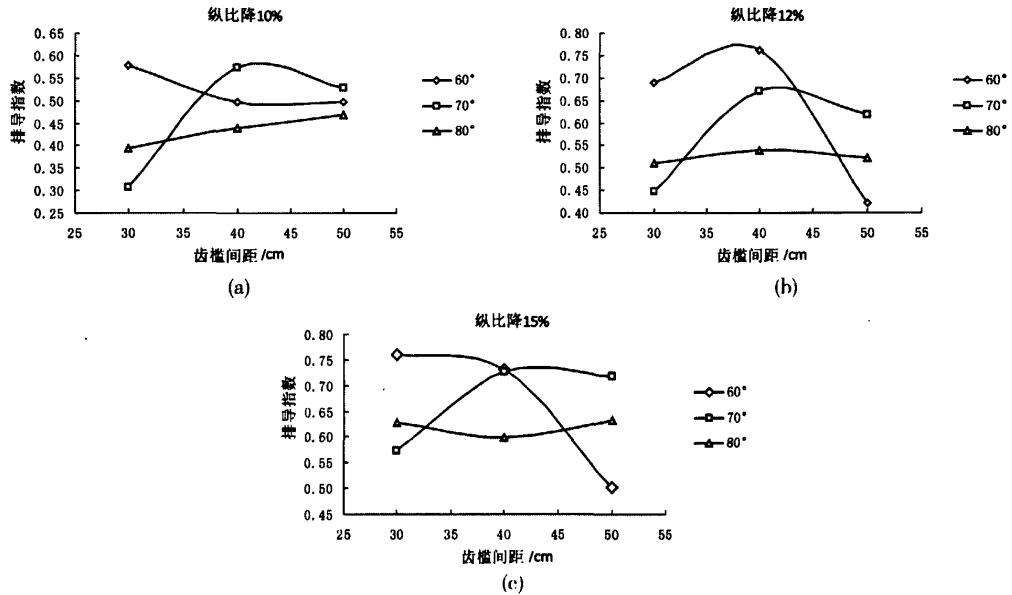


图 7 排导指数与齿槛间距关系图

Fig. 7 Sketch between drainage index and distance of two indented-sill

的排导指数总体呈下降趋势,尽管在比降为12%时,40 cm间距齿槛排导指数较其他两种间距均大;70°齿槛在三种比降情况下均呈现先增大后减小的趋势,表明40 cm间距较其他间距更优;80°齿槛在三种比降情况下,排导指数均随间距增大而增加,但增长幅度较小,表明齿槛间距对80°齿槛的排导能力的影响不大。且当排导槽纵比降为10%或15%时,间距为30 cm的60°齿槛更有利于排导槽排淤;当纵比降为12%时,将交错齿槛设置为60°,间距40 cm,排导槽的排导效率更高;与小角度齿槛相比,角度为80°齿槛对泥石流的排导促进作用有限。

3.4 泥石流在交错槽中的冲淤特征

贯穿型齿槛使泥石流淤积成为东川槽的一大难题,东川槽的淤积问题非常严重。本试验对各种工况下交错齿槛槽的淤积深度进行测量,为了尽量减少外界干扰,选择试验槽中间2.0~3.0 m段测量泥石流的淤积深度,并绘制等深线图。

图8为不同工况下,泥石流在交错槽中淤积等深线图,其中(a)为12%比降下,齿槛夹角70°,齿槛

间距40 cm的泥石流淤积等深线图;(b)、(c)、(d)为12%比降下,齿槛夹角80°,齿槛间距为30 cm,40 cm,50 cm的泥石流淤积等深线图。

由图可知,泥石流在交错齿槛前的淤积呈现如下规律:1. 随离齿槛距离减小,淤积量逐渐增大,至齿槛前沿初达到最大,而在齿槛后随离齿槛距离增大,淤积量增大,在齿槛后出现凹坑,为泥石流淤积量最小处;2. 泥石流在槛前坡度较缓,且脊线(图a)沿齿槛延伸方向,几乎与之平行;3. 由图(a)、(c)对比可知,齿槛角度越小,交错齿槛的挑流作用越明显,为使更多的泥石流排导如下游,建议采用角度较小(60°)齿槛;4. 角度越大,齿槛的阻流作用越明显,不建议使用大角度齿槛;

3.5 与东川槽的比较

与东川槽相比,交错齿槛槽能有效提高泥石流的排泄效率,增大排导指数,表3为间距为40 cm的交错齿槛槽与东川槽排导指数的对比结果。由表可知,三种比降和角度下,交错齿槛槽的排导指数较东川槽均有不同程度的增大,最大增量达74%,可见,

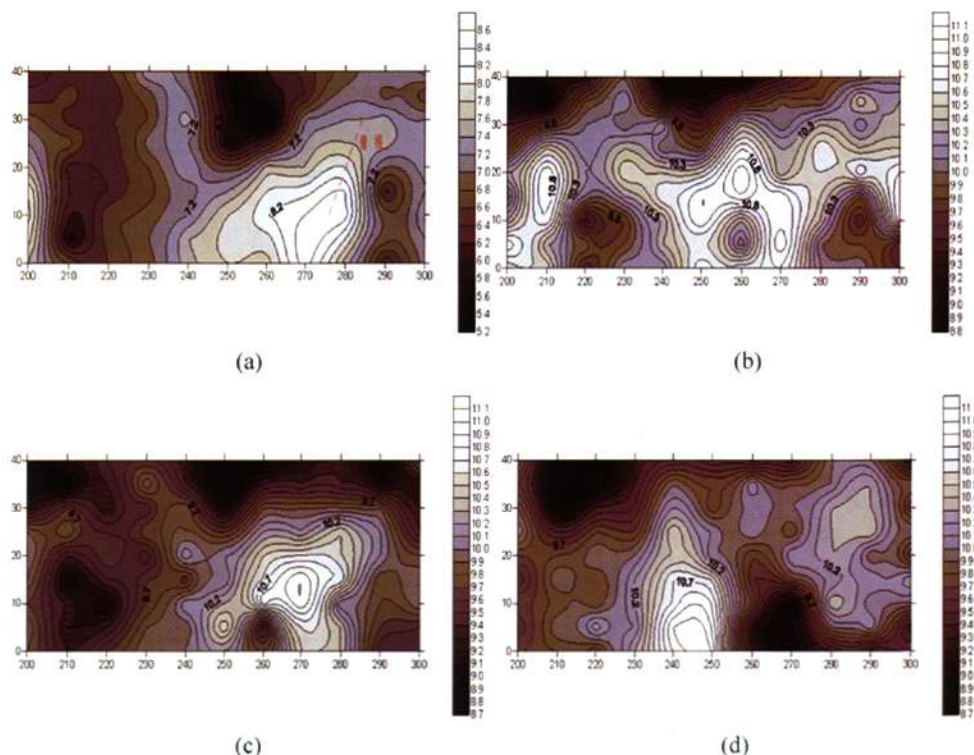


图8 交错齿槛槽淤积等深线图

Fig. 8 Ratymetric chart of siltation of debris-flow

交错齿槛的挑流排泄作用是非常显著的,这对于解决东川槽淤积严重的难题非常有利。

表3 交错齿槛槽与东川槽对比结果

Table 3 Comparison of drainage index between dongchuan canal and drainage channel with indented-sill

齿槛角度 /°	齿槛间距 /cm	纵比降 /%	排导指数	与东川槽相比的增量 /%
60	40	15	0.73	25.22
70	40	15	0.73	24.65
80	40	15	0.60	2.59
60	40	12	0.76	66.59
70	40	12	0.67	46.80
80	40	12	0.54	17.98
60	40	10	0.50	50.83
70	40	10	0.57	73.96
80	40	10	0.44	33.54

4 结语与讨论

本文在调研已建东川槽防治效果的基础上,通过室内水槽试验,对新型泥石流排导槽——交错齿槛槽的齿槛角度、间距等重要参数进行探讨,得出以下初步结论:

1. 交错槽非贯穿齿槛兼具阻流与挑流作用,能有效控制泥石流排导的洪峰流量,同时增加泥石流的排导能力,较横向贯穿齿槛东川槽有大幅度的提升,最大增幅达74%,能有效解决排导槽的淤积难题,减少排淤维护费用。
2. 模型试验中,10%与15%比降下,60°齿槛间距为30 cm时,交错槽的排导指数最大,排导能力最强;而12%比降下,60°齿槛间距为40 cm为最优组合,表明不同比降下,齿槛间距与角度相互制约,共同影响排导槽的排导能力。
3. 小角度齿槛(60°)齿槛挑流排导能力较大角度(80°)更强,更适合坡降较小的排导槽;齿槛角度越大,齿槛的挑流能力有限,阻流作用越明显,不建议采用该类齿槛。
4. 60°齿槛是否是最佳角度,需要通过更多的试验来验证,可将齿槛角度设置为45°开展相关试验探讨。
5. 粘性泥石流流体粘滞性强的特性使其与一般水石流或稀性泥石流有明显的区别,通过过渡或

稀性泥石流试验,探讨在交错齿槛槽中的排导特征及与粘性泥石流的差异有助于更更好的完善交错齿槛槽的参数率定。

致谢:本文的试验设计与实施,得到了中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所李德基研究员、游勇研究员的指导及中国科学院东川泥石流观测研究站洪勇副站长及全体工作人员的大力支持,在此一并感谢!

参考文献

[1] Wu Jishan, Tian Lianqua, Kang Zhicheng, et al. Comprehensive treatment of debris-flow [M]. Beijing: Science Press, 1993 [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]

[2] Sichuan earthquake "5.12" after restoration and reconstruction of geological hazards special planning group Planning Report of Disaster Area after 5-12 Wenchuan Earthquake (2008—2011)[R]. 2008 [四川省“5.12”特大地震灾后恢复重建地质灾害防治专项规划编写组. 四川省“5.12”特大地震灾后恢复重建地质灾害防治专项规划(2008—2011年) [R]. 2008]

[3] Li Deji. Theory and practice about reducing debris-flow hazards [M]. Beijing: Science Press, 1997 [李德基. 泥石流减灾理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 1997]

[4] Zhang Kaiping, Lu Taineng. Study on scouring and deposition laws of debris flow drainage trough [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2002, 9(4): 61-63 [张开平, 吕态能. 泥石流排导槽冲淤规律观察研究[J]. 水土保持研究, 2002, 9(4): 61-63]

[5] You Yong. Optimal hydraulic condition of debris flow drainage canal [J]. Journal of Mountain Science, 1999, 17(3): 255-258 [游勇, 泥石流排导槽水力最佳断面[J]. 山地学报, 1999, 17 (3): 255-258]

[6] You Yong, Liu Jinfeng. Optimal hydraulic condition of debris-flow drainage canal [J]. Journal of Mountain Science, 2008, 26(2): 218-222 [游勇, 柳金峰. 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]

[7] You Yong Liu Jinfeng, Ou Guoqiang. Comparison of hydraulic conditions among usual debris-flow drainage canal [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(suppl. 1): 2820-2825 [游勇, 柳金峰, 欧国强. 泥石流常用排导槽水力条件的比较[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增1): 2820-2825]

[8] You Yong, Pan Huali, Liu Jinfeng, et al. The optimal hydraulic cross-section design of the "trapezoid-V" shaped drainage canal of debris-flow [C]// Chen Zuyu. Landslides and Engineered Slopes, 2008: 2004-2006

[9] You Yong. A preliminary experimental study on gradient of debris-flow drainage canal [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2000, 20(6): 35-38 [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): 35-38]

[10] Huang Hai, Ma Dongtao, Wang Xianlin. Experimental study on the relationships between the velocities of debris-flow and structure

- of the dongchuan debris-flow channel [J]. *Journal of Mountain Science*, 2009, 27(5): 551–556 [黄海, 马东涛, 王显林. “东川型”排导槽结构对泥石流流速影响的实验研究[J]. *山地学报*, 2009, 27(5) 551–556]
- [11] Zhou Bifan, Li Deji, Luo Defu, et al. Guide to prevention of debris flow [M]. Beijing: Science Press, 1991 [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]
- [12] Cui Peng, Liu Suqing, Tang Bangxing, et al. Research and prevention of debris-flow in national parks [M]. Beijing: Science Press, 2005 [崔鹏, 柳素清, 唐邦兴, 等. 风景名胜区泥石流研究与防治[M]. 北京: 科学出版社, 2005]
- [13] Cui Peng, Chen Xiaoqing, Zhu Yingyan, et al. The Wencuan earthquake (12 May 2008), Sichuan province, China, and resulting geohazards [J]. *Nature Hazards*, 2009, DOI 10.1007/s11069-009-9392-1
- [14] Cui Peng, Wei Fangqiang, Chen Xiaoqing, et al. Geo-hazards in Wenchuan earthquake area and countermeasures for disaster reduction [J]. *China Academic Journal*, 2008, 23(4): 317–323 [崔鹏, 韦方强, 陈晓清, 等. 汶川地震次生山地灾害及其减灾对策[J]. *中国科学院院刊*, 2008, 23(4): 317–323]
- [15] Chen Xiaoqing, You Yong, Li Deji, et al. A new debris-flow drainage channel with indented-sill and its application [P]. China. 200910058217.7, 20090121. [陈晓清, 游勇, 李德基, 等. 一种基于梯级防冲刷齿槛群的泥石流排导槽及其应用[P]. 中国: 200910058217.7, 20090121(审查中)]
- [16] Xu Jiongxin. Influence to sediment transportation in lower Yellow river caused by the factors of valley and human [J]. *Science in China*, 2004, 34(8): 775–781 [许炯心. 流域因素与人类活动对黄河下游河道输沙功能的影响[J]. *中国科学(D 辑地球科学)*, 2004, 34(8): 775–781]
- [17] Ding Lijun, Han Lei. Structure forms of spur dike and its application in riverway [J]. *Water Conservancy Science and Technology and Economy*, 2009, 15(7): 654–658 [丁立军, 韩雷. 丁坝结构形式及在河道整治中的应用[J]. *水利科技与经济* 2009, 15(7): 654–655]

Experiment of Drainage Canal with Indented-sill for Viscous Debris Flow

GAO Quan^{1,2}, CHEN Xiaoqing¹, JIA Shitao³, HUANG Kai^{1,2}

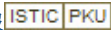
(1. CAS Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface Processes, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Science & Ministry of Water Conservancy, Chengdu 610041, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Drainage channel is one the most commonly useful debris flow countermeasures with such superiorities as simple structure and convenient construction. According to the construction experience of Dongchuan-type and “V-type”, an indoor flume model experiment on drainage channel with indented-sill has been performed. The definition of drainage index was proposed, i. e. a parameter of showing drainage ability of channel. In the experiment, longitudinal slope, distance between two sill and angle of sills were changed to analyze the variation law of drainage index. (1) Compared with Dongchuan-type, the drainage ability of drainage canal with indented-sill increased largely with the top increment rate of 73%, that is, indented sill has obvious flow oriented effect, which is helpful to solve the problem of debris-flow siltation; (2) When the longitudinal slope is 10% or 15%, indented sill with an angle of 60 and a distance of 30cm can largely increase drainage ability of channel, whereas when longitudinal slope is 12%, the best combination is 60° and 40 cm, (3) Sills with small angle (60°) can be more fit for debris-flow with low longitudinal slope, however, sills with large angle (80°) can be more suited to debris-flow with steep gradient.

Key words: debris flow; drainage channel; indented-sill; drainage characteristic

作者：[高全](#)，[陈晓清](#)，[贾世涛](#)，[黄凯](#)，[GAO Quan](#)，[CHEN Xiaoqing](#)，[JIA Shitao](#)，[HUANG Kai](#)

作者单位：[高全, 黄凯, GAO Quan, HUANG Kai \(中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所/中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室, 四川成都610041中国科学院研究生院, 北京100049\)](#)，[陈晓清, CHEN Xiaoqing \(中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所/中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室, 四川成都, 610041\)](#)，[贾世涛, JIA Shitao \(西南交通大学土木工程学院, 四川成都, 610031\)](#)

刊名：[山地学报](#)

英文刊名：[JOURNAL OF MOUNTAIN SCIENCE](#)

年，卷(期)：2011, 29(1)

参考文献(17条)

1. 吴积善;田连权;康志成 [泥石流及其综合治理](#) 1993
2. 四川省“5.12”特大地震灾后恢复重建地质灾害防治专项规划编写组 [四川省“5.12”特大地震灾后恢复重建地质灾害防治专项规划\(2008~2011年\)](#) 2008
3. 李德基 [泥石流减灾理论与实践](#) 1997
4. 张开平;吕态能 [泥石流排导槽冲淤规律观察研究](#)[期刊论文]-[水土保持研究](#) 2002(04)
5. 游勇 [泥石流排导槽水力最佳断面](#)[期刊论文]-[山地学报](#) 1999(03)
6. 游勇;柳金峰 [泥石流直墙V型排导槽横断面优化设计](#)[期刊论文]-[山地学报](#) 2008(02)
7. 游勇;柳金峰;欧国强 [泥石流常用排导槽水力条件的比较](#)[期刊论文]-[岩石力学与工程学报](#) 2006(增I)
8. You Yong;Pan Huali;Liu Jinfeng [The optimal hydraulic cross-section design of the “trapezoid-V” shaped drainage canal of debris-flow](#)
9. 游勇 [泥石流排导槽最小不淤纵坡初步试验研究](#)[期刊论文]-[水土保持通报](#) 2000(06)
10. 黄海;马东涛;王显林 [“东川型”排导槽结构对泥石流流速影响的实验研究](#)[期刊论文]-[山地学报](#) 2009(05)
11. 周必凡;李德基;罗德富 [泥石流防治指南](#) 1991
12. 崔鹏;柳素清;唐邦兴 [风景名胜区泥石流研究与防治](#) 2005
13. Cui Peng;Chen Xiaoqing;Zhu Yingyan [The Wencuan earthquake \(12 May 2008\),Sichuan province,China,and resulting geohazards](#) 2009
14. 崔鹏;韦方强;陈晓清 [汶川地震次生山地灾害及其减灾对策](#)[期刊论文]-[中国科学院院刊](#) 2008(04)
15. 陈晓清;游勇;李德基 [一种基于梯级防冲刷齿群的泥石流排导槽及其应用](#) 2009
16. 许炯心 [流域因素与人类活动对黄河下游河道输沙功能的影响](#)[期刊论文]-[中国科学D辑](#) 2004(08)
17. 丁立军;韩雷 [丁坝结构形式及在河道整治中的应用](#)[期刊论文]-[水利科技与经济](#) 2009(07)

本文链接：http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_sdx201101015.aspx