

文章编号: 1004-4574(2008) 04- 0152- 07

单切口坝对稀性泥石流的拦砂性能 ——试验研究与比较分析

韩文兵^{1,2}, 欧国强¹

(1 中国科学院·水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041; 2 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 通过室内水槽试验, 探讨了单切口坝对稀性泥石流的拦砂性能, 并与梳子坝的试验结果进行了比较分析。初步得到: (1) 单切口坝有全闭塞、部分闭塞和不闭塞 3 种闭塞类型。当切口宽度 b 与稀性泥石流中最大颗粒粒径 d_{max} 之比 $b/d_{max} \leq 0.394$ 时, 切口全闭塞; $b/d_{max} \geq 1.478$ 时, 切口不闭塞; $0.394 < b/d_{max} < 1.478$ 时, 切口为部分闭塞。(2) 单切口坝在降低过坝泥石流密度变化量上, 与梳子坝有相似规律。对单切口坝而言, b/d_{max} 在 $0.394 \sim 0.739$ 之间, 过坝泥石流密度变化量随 b/d_{max} 增大而增大, 在 $b/d_{max} = 0.739$ 时, 过坝泥石流密度变化量达到最大, 其后随着 b/d_{max} 的进一步增大, 过坝泥石流密度变化量逐渐减小; 在 $0.493 \leq b/d_{max} \leq 0.986$ 之间, 单切口坝降低过坝泥石流密度变化量较显著。(3) 在相同的试验条件下, 以过坝泥石流平均密度及其降低率为防治泥石流的效益指标, 显示梳子坝与单切口坝的坝后平均密度的比值大多小于 1, 表明在相同的试验条件下梳子坝对稀性泥石流的防治效果较好。

关键词: 单切口坝; 稀性泥石流; 拦砂效应

中图分类号: P642 **文献标识码:** A

Sediment-intercepting effect of slit dam on non-viscous debris flow: experimental study and comparative analysis

HAN Wen-bing^{1,2}, OU Guo-qiang¹

(1. Chengdu Institute of Mountain Disaster and Environment, Chinese Academy of Sciences and Water Conservancy Ministry, Chengdu 610041, China; 2. Graduated School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract Through a series of flume experiment indoors, the sediment-intercepting effect of slit dam on non-viscous debris flow was explored and a comparative analysis with comb dam was conducted. The result shows that (1) there are three kinds of blocking condition, i.e. whole blocking, partial blocking and no blocking, and the occurring kind of blocking condition depends on the ratio b/d_{max} between slit width and diameter of the maximum grain; (2) in respect to decreasing density of dam-passing debris flow, the same law exists for slit dam and comb dam, and the density decrease varies with b/d_{max} ; (3) in same experiment condition, the non-viscous debris flow-preventing/controlling effect of the comb dam is better than that of slit dam.

Key words slit dam; non-viscous debris flow; sediment-intercepting effect

拦砂坝是泥石流防治经常采用的一种工程措施, 根据坝体是否过流, 可分为实体坝 (closed-type dam) 和透过性坝 (open-type dam) 两类。而实体坝因为透水性差, 无选择性地拦阻砂石、容易淤满库容和使用年

收稿日期: 2007-08-21 修订日期: 2008-05-19

基金项目: 云南省自然科学基金“梳子型切口坝拦砂性能实验研究”(2004D0054M) 和中国科学院知识创新工程重要方向项目“南水北调西线工程山地灾害防治技术及环境影响研究”(KZCX3-SW-323)。

作者简介: 韩文兵 (1980-), 男, 博士研究生, 主要从事山地灾害防治工程技术研究。E-mail: ougq@imde.ac.cn

限有限等缺点,不仅对下游沟道造成严重冲刷,对泥石流的形成与发展也无法提出积极有效地防治措施。所以,自20世纪80年代以来,在砂防事业较先进的一些国家,如日本、奥地利以及我国等皆采用透过性拦砂坝代替传统的重力式拦砂坝,来解决上述问题^[1]。

在透过性拦砂坝研究方面,国内外已取得部分成果。日本学者渡边正幸^[2]首先提出评价泥石流防治工程效果的4项基本指标:(1)削减泥石流洪峰流量;(2)延缓泥石流到达时间;(3)减少泥石流土砂总流出量;(4)将泥石流中粗大颗粒分离等。并对多种形式的透过性拦砂坝进行试验,证明开口宽度 b 会影响泥砂拦截率,当 $b/d_{\max} < 2.0$ (d_{\max} 为最大泥砂颗粒粒径)时,梳子坝可以降低泥石流土砂流出峰值达50%以上;池谷浩^[3]证实切口坝的相对开度 $b/d_{\max} \leq 1.5$ 时,坝体对上游来砂具有闭阻作用,可以拦阻砂石自由穿过坝体,且开口密度 $\sum b/B = 0.2 \sim 0.6$ 时,切口坝对土砂调节能力较一般砂防坝高出1.2倍。水山高久^[4-5]等认为透过性拦砂坝对泥石流起拦阻作用,其开口宽度必须满足 $b/d_{\max} \leq 1.5 \sim 2.0$ 并通过水槽试验建立了泥石流洪峰土砂量减少率的表达式。

,可以提供较好的科学依据。

国内方面,李三畏^[6]提出透过性拦砂坝的防治概念,认为透过性拦砂坝可蓄积洪水时期大量泥砂,并可用平时常水流将泥砂慢慢排至下游,可降低下游地区的冲刷侵蚀作用,另外指出在泥石流较易发生和漂木较多的沟道,透过性拦砂坝具有较好的防治效果。江永哲等^[7-10]水槽定性试验,分别探讨了梳子坝、A型梳子坝、立体格子坝和水平透水栅等不同坝型对泥石流的防治效果,并根据渡边正幸所提出的四项基本功能进行分析,结果证明透过性拦砂坝确实有防治泥石流的功效^[11]然而,日本和我国台湾学者对透过性拦砂坝的探讨,多是针对水石流和火山泥流(lahar or pyroclastic flow)。我国是一个深受泥石流灾害困扰的大国,境内泥石流分布广泛且种类多样,如泥流、水石流、稀性泥石流、粘性泥石流等。但透过性拦砂坝对我国西南、西北广布的稀性泥石流有无防治效果,目前还少有研究成果。本文主要是通过室内水槽试验,探讨单切口坝对稀性泥石流的拦砂性能并运用梳子坝试验结果进行比较分析。

1 试验设备及条件

1.1 试验设备

试验在中国科学院成都山地灾害与环境研究所泥石流动力学实验室内进行,设备主要由料斗(前端有闸门)、玻璃水槽、提升装置3部分组成。水槽长6m,宽20cm,高40cm,实测纵比降变化范围在 $0^\circ \sim 23^\circ$ 。

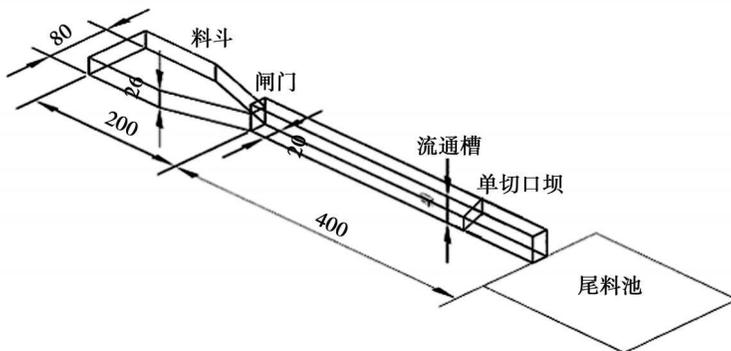


图1 试验水槽装置示意图(单位:cm)

Fig.1 Sketch of experimental flume device

1.2 试验流程

首先,根据试验设计要求,通过提升装置,调整水槽坡度,在水槽的下游段固定事先设计好的切口坝模型。然后,将试验开始前配制的泥石流物料放入供料口的料斗中,加入一定体积的水后搅拌均匀,此时缓缓开启料斗前端闸门,将泥石流物质有控制放出。在水槽下游端切口坝附近通过架设数码相机,测试放置切口坝后水槽内流体运动参数^[11,13]。

1.3 试验条件及方法

1.3.1 试验用砂

试验用砂是采用云南省小江流域蒋家沟泥石流样品中颗粒粒径小于 20 mm 部分, 其颗粒重量百分比组成直方图如下图 2 所示。

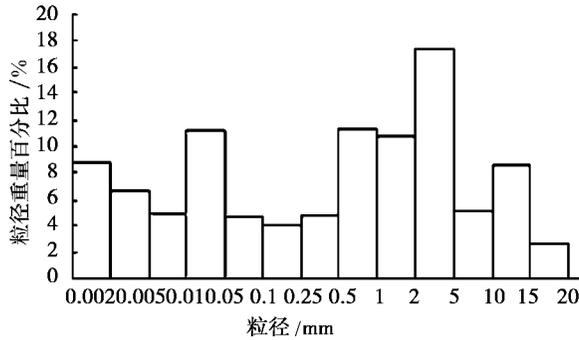


图 2 试验用砂各粒径重量百分比组成直方图^[13]

Fig 2 Weight percentage histogram of grain diameter of sediment used in experiment

因切口闭塞度、泥砂拦截率等与最大颗粒粒径 (d_{max}) 有关, 故对样品中筛分出来的 15~ 20 mm 泥沙颗粒用游标卡尺进行了测量, 测得最大颗粒三轴为 26.34 mm, 18.35 mm 和 17.26 mm。根据上述三轴尺寸, 用下列式 (1) 计算最大颗粒的大小。

$$d = \sqrt{abc} \tag{1}$$

表 1 试验用砂的物理特性参数^[13]

Table 1 Physical parameters of sediment used in experiment

平均粒径, D /mm	内摩擦角, Φ /($^\circ$)	颗粒密度, σ /($g \cdot cm^3$)	粒径范围 /mm
5.327	36.13	2.65	0.001~ 20.81

1.3.2 坝体模型

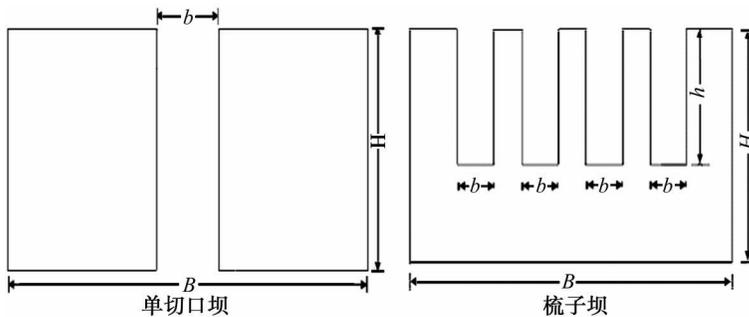


图 3 单切口坝和梳子坝模型示意图

Fig 3 Sketch of slit dam model and comb dam model

表 2 单切口坝和梳子坝模型尺寸

Table 2 Size of slit dam model and comb dam model

坝体类型	坝体宽度, B	坝体高度, H	坝体厚度, T	切口深度, h
单切口坝	20.0	12.0	2.4	12
梳子坝	20.0	12.0	2.4	6

1.3.3 试验条件

表 3 单切口坝水槽试验条件一览表

Table 3 Flume experiment conditions of slit dam

设计密度 $I/(g \cdot cm^{-3})$	1.5							
开口密度, $\Sigma b/B$	0.04	0.15	0.075	0.1	0.25	0.15	0.175	0.2
切口宽度, b/cm	0.8	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
水槽坡度 $\theta (^{\circ})$	11.2							

1.3.4 量测项目及方法:

表 4 量测项目及方法^[13]

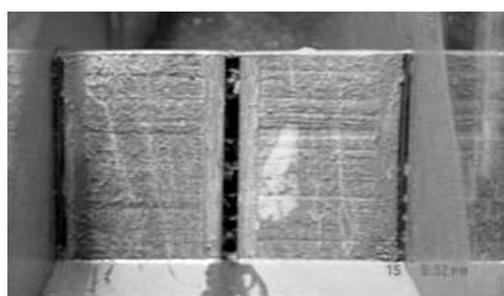
Table 4 Item and method of measurement

项目	方法
坝后堆砂区回淤高度	试验完毕后,横断面方向 10 cm 为间距,纵断面方向 5 cm 的间距进行测量
泥位	用直尺进行测量
过坝平均容重	在试验结束时,采用称重法计算
泥石流表面流速	浮标法
切口闭塞度	用直尺量测堵塞高度 h_p , 然后应用文中公式(2)计算

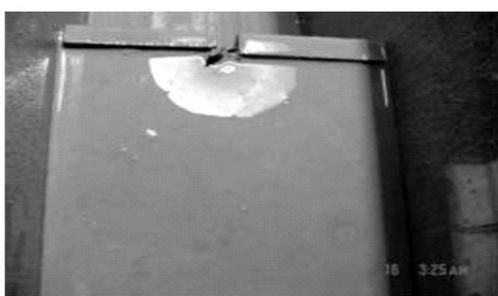
2 单切口坝闭塞类型与闭塞条件

2.1 单切口坝闭塞类型

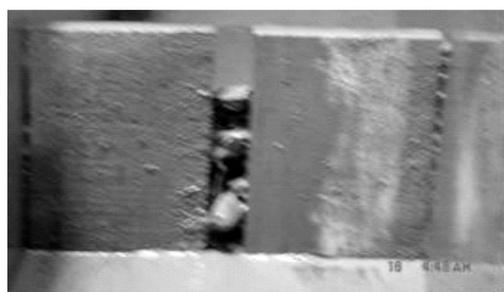
根据试验观测结果,单切口坝主要有下列 3 种闭塞类型:全闭塞:在试验开始阶段,切口处有过流现象,但随后切口被后续流所堵塞,在试验结束时,整个切口全部闭塞。部分闭塞:在试验过程中,切口通流畅流,但试验结束时,切口有部分被泥砂所堵塞。不闭塞:在试验过程中,整个切口部未被泥砂物质所堵塞,平稳,通流畅流。



(a) 全闭塞



(b) 全闭塞



(c) 部分闭塞



(d) 不闭塞

图 4 单切口坝三种闭塞类型示意图

Fig 4 Three blocking type of slit dam

2.2 闭塞条件

单切口坝的闭塞条件与泥石流的含砂量, 固体物质级配组成, 泥石流的泥深、流速、流量、水槽坡度, 固体

物质最大粒径 d_{max} 和切口宽度 b 的比值 b/d_{max} 等有关, 闭塞条件复杂。试验主要对闭塞条件影响较大的 b/d_{max} 进行研究, 文中闭塞度采用公式 (2) 计:

$$h_i/h = c \tag{2}$$

公式中, h 表示切口深度 (在本试验中等于坝体高度); h_i 表示切口的堵塞高度; c 表示闭塞度。当 $c = 0$ 时, 表示切口不闭塞; 当 $c \geq 100\%$ 时, 此时以 100% 计, 表示切口全闭塞; 当 c 介于 0 与 100% 之间, 表示切口为部分闭塞。图 5 和图 6 为单切口坝和梳子坝闭塞度与 b/d_{max} 关系图。

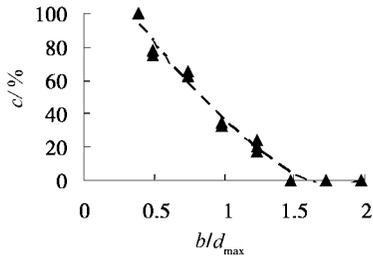


图 5 单切口坝闭塞度与 b/d_{max} 关系图

Fig 5 Relationship between blocking degree and b/d_{max} for slit dam

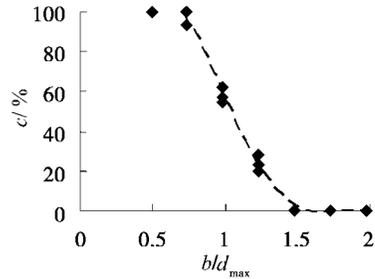


图 6 梳子坝闭塞度与 b/d_{max} 关系图 $P^{[13]}$

Fig 6 Relationship between blocking degree and b/d_{max} for comb dam

从图 5 和图 6 中可以分析出: 当单切口坝的切口宽度 b 与稀性泥石流中最大颗粒粒径 d_{max} 之比 $b/d_{max} \leq 0.394$ 时, 切口全闭塞, $c = 100\%$; $b/d_{max} \geq 1.478$ 时, 切口不闭塞, 如 $b/d_{max} = 1.724$ 时, $c = 0$; $0.394 < b/d_{max} < 1.478$ 时, 切口一般是部分闭塞, 如 $b/d_{max} = 0.986$ 时, 3 次试验结果的闭塞度分别是 33.13% 和 36.42% 。对梳子坝而言, 切口宽度 b 与稀性泥石流中最大颗粒粒径 d_{max} 之比 $b/d_{max} \leq 0.739$ 时, 切口全闭塞, 如 $b/d_{max} = 0.493$ 时, $c = 100\%$; $b/d_{max} \geq 1.478$ 时, 切口不闭塞, 如 $b/d_{max} = 1.724$ 时, $c = 0$; $0.739 < b/d_{max} < 1.478$ 时, 切口一般是部分闭塞, 如 $b/d_{max} = 0.986$ 时, 三次试验结果的闭塞度分别是 54.6% , 57.1% 和 62.3% 。

3 坝后容重变化

3.1 试验结果例

本文初步选用坝后容重变化作为评价单切口坝调节泥砂效果的一个定量指标, 下表为部分实验结果例:

表 5 部分试验结果例

Table 5 Partial experimental results

b / cm	$\sum b/B$	b/d_{max}	$\rho_D / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$R_D / \%$
0.8	0.400	0.398	1.4049	6.34
0.8	0.400	0.398	1.3955	6.97
0.8	0.400	0.398	1.4468	3.55
1.0	0.500	0.493	1.3700	8.67
1.0	0.500	0.493	1.4468	3.55
1.5	0.075	0.739	1.3100	12.67
1.5	0.075	0.739	1.3270	11.53
1.5	0.075	0.739	1.3590	9.4
2.0	0.100	0.986	1.4400	4.0
2.0	0.100	0.986	1.4050	6.33
2.5	0.125	1.232	1.4560	2.93
2.5	0.125	1.232	1.4770	1.53
3.0	0.150	1.478	1.4760	1.60
3.0	0.150	1.478	1.4570	2.87
3.5	0.175	1.732	1.468	2.13
3.5	0.175	1.732	1.4868	0.88

注: 表中 ρ_D 表示泥石流过坝后的平均密度; R_D 表示过坝泥石流平均密度相对于试验设计密度的降低率。

3.2 坝后平均容重变化与 b/d_{max} 关系

本文以坝后平均容重变化为指标来间接反映不同坝型的泥沙拦截效果,比较其优劣,图7和图8分别是单切口坝和梳子坝坝后平均容重与 b/d_{max} 关系图。

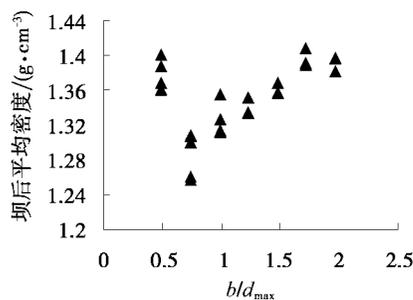
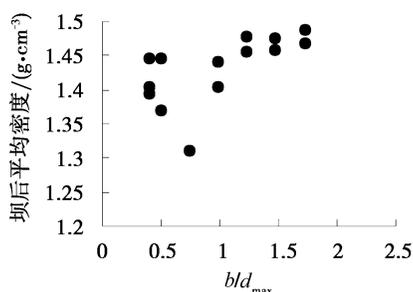


图7 单切口坝坝后泥硫平均密度与 b/d_{max} 关系图

图8 梳子坝坝后泥硫平均密度与 b/d_{max} 关系图^[13]

Fig 7 Relationship between mean density of debris flow passing through slit dam and b/d_{max}

Fig 8 relationship between mean density of debris flow passing through comb dam and b/d_{max}

根据图7和图8可以看出,单切口坝梳子坝在降低过坝泥石流密度变化量上具有相似的规律:起始,过坝泥石流密度变化量随 b/d_{max} (因本试验中最大颗粒粒径固定,所以 b/d_{max} 密度的变化与切口宽度一致。)增大而增大,当增大至一定量后,又随切口宽度的增大,密度变化量逐渐减小。对单切口坝而言,在 $0.394 \sim 0.739$ 之间,过坝泥石流密度变化量随 b/d_{max} 增大而增大,在 $b/d_{max} = 0.739$ 时,过坝泥石流密度变化量达到最大,其后随着 b/d_{max} 的进一步增大,过坝泥石流密度变化量逐渐减小,在 $0.493 \leq b/d_{max} \leq 0.986$ 之间,单切口坝降低过坝泥石流密度变化量较显著;对梳子坝而言,也是在 $b/d_{max} = 0.739$ 时,过坝泥石流密度变化量达到最大。在 $0.739 \leq b/d_{max} \leq 1.232$ 时,梳子坝降低过坝泥石流密度变化量最显著,泥石流平均密度降低 10% 以上。

3.3 两种坝体降低过坝平均容重比较

本文以过坝泥石流平均密度及其降低率为防治泥石流的效益指标,解析在相同试验条件下,单切口坝和梳子坝降低过坝泥石流密度的优劣性。图9为两种坝型在相同试验条件下过坝泥石流平均密度对比图。

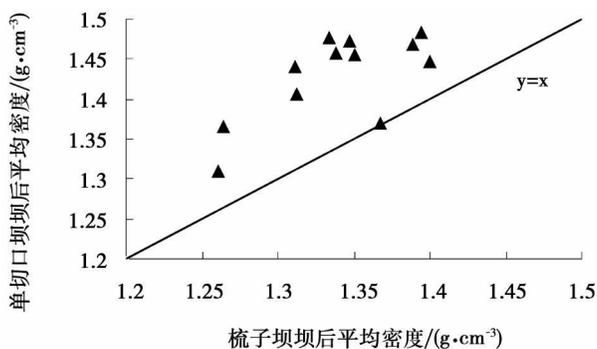


图9 单切口坝和梳子坝坝后平均密度比较图

Fig 9 Comparison of mean density of debris flow passing through slit dam and comb dam

从图9单切口坝和梳子坝的坝后平均密度关系图中资料点分布状态,可发现资料点多落在 $Y=X$ (45° 线) 的左上方,说明在相同的试验条件下,梳子坝与单切口坝的坝后平均密度的比值大多小于 1。其表示梳子坝坝后密度比单切口坝低,显示在相同的试验条件下梳子坝对稀性泥石流的防治效果较好。

4 结论与建议

本文主要通过室内水槽试验,探讨单切口坝对稀性泥石流的拦砂性能,并运用梳子坝的试验结果进行

了比较分析。初步得到:

(1)单切口坝有全闭塞、部分闭塞、不闭塞 3种闭塞类型。当切口宽度 b 与稀性泥石流中最大颗粒粒径 d_{max} 之比 $b/d_{max} \leq 0.394$ 时,切口全闭塞; $b/d_{max} \geq 1.478$ 时,切口不闭塞; $0.394 < b/d_{max} < 1.478$ 时,切口一般是部分闭塞。

(2)单切口坝在降低过坝泥石流密度变化量上,与梳子坝有相似规律:起始,过坝泥石流密度变化量随 b/d_{max} 增大而增大,当增大至一定量后,又随 b/d_{max} 的增大,密度变化量逐渐减小。

(3)对单切口坝而言, b/d_{max} 在 $0.394 \sim 0.739$ 之间,过坝泥石流密度变化量随 b/d_{max} 增大而增大,在 $b/d_{max} = 0.739$ 时,过坝泥石流密度变化量达到最大,其后随着 b/d_{max} 的进一步增大,过坝泥石流密度变化量逐渐减小,在 $0.493 \leq b/d_{max} \leq 0.986$ 之间,单切口坝降低过坝泥石流密度变化量较显著。

(4)在相同的试验条件下,以过坝泥石流平均密度及其降低率为防治泥石流的效益指标,显示梳子坝与单切口坝的坝后平均密度的比值大多小于 1,表明在相同的试验条件下梳子坝对稀性泥石流的防治效果较好。

致谢:在试验及分析过程中,承蒙中国科学院“水利部成都山地灾害与环境研究所游勇、吕娟、陈顺理、魏德元、柳金峰、岳丽霞、张秋英等老师和同学的大力帮助,在此一并致谢!

参考文献:

- [1] 薛祖淇,连惠邦, A 型梳子坝与梳子坝试验之比较分析 [J]. 海峡两岸山地灾害与环境保育研究 (第二卷),台中:中华防灾学会·中兴大学编印,2000 pp143~ 153
- [2] 渡边正幸,水山高久,水原信司,土石流对策砂防设施的检讨 [J]. 新砂防,1980 第 115 号, pp40~ 45
- [3] 池谷浩,上原信司,切口拦砂坝调节泥沙效果的实验研究 [J]. 新砂防,1980 3 第 114 号, pp37~ 44.
- [4] Mizuhara T, Suzuki H, Okawa Y, and Morita A, " Experimental Study on Permeable Sabo Dam, " Journal of the Japan Erosion Control Engineering Society, 1988 41(2), pp21~ 25(in Japanese).
- [5] Mizuhara T, Kobashi S, and Mizuno H, " Control of passing sediment with grid-type dams " Journal of the Japan Erosion Control Engineering Society, 1995 47(5), pp8~ 13(in Japanese).
- [6] 李三畏,奥地利与台湾地区之砂防工程 [J]. 中华水土保持学报,1986 17(2), pp15~ 26
- [7] 林裕益,江永哲,梳子坝调节土石流功效之研究 [J]. 中华水土保持学报,1988 19(1), pp40~ 57.
- [8] 李明晃,江永哲,立体格子坝防治土石流之功效研究 [J]. 中兴大学林学报,1989 38(2), pp191~ 216
- [9] 江永哲,吴明煦, A 型梳子坝防治土石流功效之研究 [J]. 中华水土保持学报,1990 21(2), pp29~ 43.
- [10] 江永哲,连惠邦,吴明煦,李明晃,林裕益,开放式砂防坝对土石流防治功效之探讨 [J]. 中华水土保持学报,1993 24(1), pp37~ 43
- [11] 韩文兵,欧国强,水石流过梳子型切口坝拦砂性能试验研究 [J]. 水土保持研究,2004, 11(3), pp286~ 288.
- [12] 韩文兵,泥石流切口坝、实体坝拦砂功能试验对比研究,中国科学院·水利部成都山地灾害与环境研究硕士学位论文 [D]. 2004 pp10 ~ 14
- [13] 韩文兵,欧国强,梳子坝对稀性泥石流拦砂性能试验研究 [J]. (待刊)