

山洪中漂木在拦砂坝前堵塞堆积实验

谢湘平^{1,2}, 韦方强¹, 谢涛^{1,2}, 杨红娟¹

(1. 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室/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. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 山洪和泥石流中夹带的漂木在拦砂坝开口处易造成严重堵塞, 使坝体对后续流体的分选效果减弱或失效, 甚至进一步威胁坝体安全, 因此探讨漂木在拦砂坝前的堵塞堆积规律和影响因素对于工程结构设计具有重要意义。考虑漂木长度 L 、溢流口开口宽度 b 、漂木量 V_w 及流体流量 V 等因素对漂木形成堵塞的影响, 通过实验研究了山洪中漂木在拦砂坝前堵塞堆积规律。实验发现漂木在拦砂坝溢流口的堵塞堆积形态主要有三种: 溢流口搭桥型、交错咬合型、坝前停积型。漂木堵塞率在 $L/b < 1$ 时基本保持不变, 在 $1 < L/b < 3$ 时, 随着 L/b 增大先增大后减小, 在 $L/b = 2$ 左右达到最大; 漂木拦截率在 $L/b < 2$ 呈线性增大, 在 $2 < L/b < 3$ 保持基本稳定。漂木大量堵塞在溢流口或滞留在库容区中后部都能形成较高的漂木拦截率。漂木体积含量 V_w/V 在 $L/b < 1$ 时对漂木堵塞率和拦截率基本无影响, 在 $1 < L/b < 3$ 时, 对漂木堵塞率和拦截率的影响呈增大趋势, 随着 L/b 的增大, 增大趋势越明显, 在 $L/b = 2$ 时基本呈线性增长。

关键词: 山洪; 漂木; 拦砂坝; 堵塞; 堆积

中图分类号: TV83

文献标志码: A

倾倒在沟道或坡面上的树木随山洪或泥石流向下游运动而形成漂木。携带大量漂木的山洪或泥石流往往会因漂木的存在而更具危害性^[1-2], 甚至形成漂木灾害。漂木在通过山洪或泥石流拦砂坝开口处时易发生堵塞堆积, 形成致密堵塞体, 导致后续流体过流不畅, 严重影响减灾效果, 甚至会因漂木堵塞而加重灾害。因此, 探讨漂木在拦砂坝前堵塞堆积影响因素及相关规律, 可为评估漂木对拦砂坝的减灾效果的影响提供依据, 对设计新的山洪或泥石流减灾工程更具指导意义。

从漂木在河道中的运动规律和堆积分布规律研究发现, 漂木在宽大的河流运动距离远, 短的漂木要比长漂木运动得远, 且大部分运动的漂木长度均比河道宽度小^[3-5], 这些研究结果表明漂木长度 L 与河道宽度 w 的比值 L/w (漂木相对长度) 可作为影响漂木运动状态的初级变量。拦砂坝作为沟道的一部分, 其开口处可看作是沟道的狭窄处, 漂木在拦砂

坝前的堆积堵塞情况也必然受到漂木相对长度的影响。

从拦砂坝的减灾效果研究来看, 拦砂坝开口宽度 b 与泥沙粗颗粒粒径 D 之比对泥沙拦截有重要影响^[6-8]。漂木作为粗颗粒的一种, 其长径尺寸相差悬殊, Uchiogi^[9] 等认为在设计漂木拦挡结构时要充分考虑漂木长度 L 与拦挡结构开口宽度 b 之间的关系。Matsumura 等人^[10] 通过格子坝对漂木捕获效果的实验探讨表明, 漂木对格子间隙的变化最敏感。韩文兵^[11] 对缝隙坝拦截漂木进行了尝试性研究, 发现随漂木长度的增大, 漂木拦截率逐渐增高。Shrestha 等^[12-13] 通过数值模拟和实验研究缝隙坝和格栅坝对泥石流和漂木的捕获过程和捕获效果, 发现漂木到达坝体开口形成堵塞的概率与漂木长度、坝体开口宽度以及漂木数量有关。

以上研究从不同侧面表明了漂木相对长度 L/b 对漂木在拦砂坝前形成堵塞堆积有重要影响, 但漂

收稿日期(Received date): 2013-07-03; 改回日期(Accepted): 2013-08-19。

基金项目(Foundation item): 国家科技支撑计划项目(2011BAK12B00)。[National Science and Technology Support Program (2011BAK12B00).]

作者简介(Biography): 谢湘平(1987-), 女(土家族), 湖南永顺县人, 硕士研究生, 主要从事泥石流灾害防治研究。[Xie Xiangping(1987-), female, born in Yongshun county, Hunan Province, M.D. student, majoring in mountain hazards mitigation.]E-mail: xxp_imde@163.com

木在坝前的堵塞堆积规律与 L/b 之间具体有怎样的关系则鲜有研究。Mizuyama 等^[14]曾指出拦砂坝对泥沙的拦截效果不仅与相对尺寸有关,还与含沙量有关。那么类似的漂木体积含量对拦砂坝漂木拦截效果有怎样的影响,相关研究也很少。韩文兵^[11]曾初步探讨了漂木规模对漂木拦截率的影响,得出随着漂木规模增大其拦截率也增大的定性结论。Doi 等^[15]曾探讨了 $L/b > 1$ 的漂木量占总漂木量的比例对漂木拦截率与泥沙拦截率的影响,但未涉及到漂木总量相对流体总量(漂木含量)变化对漂木拦截率的影响。

因此,本文将重点考虑漂木长度 L 、溢流口开口宽度 b 、漂木量 V_w 及流体流量 V 等因素对漂木形成堵塞的影响,通过山洪中的漂木在实体拦砂坝前的堵塞堆积实验来研究漂木相对长度 L/b 和漂木体积含量 V_w/V 对漂木在坝前堆积堵塞的影响,探讨漂木在坝前的堵塞堆积规律。

1 实验方法

1.1 实验装置

实验水槽长 300 cm,宽 20 cm,高 30 cm,料斗长 50 cm,宽 40 cm,高 85 cm,水槽坡度 α 可调(图 1),实验中设定坡度 10.8° ,在水槽尾部放置拦砂坝模型。拦砂坝模型为矩形开口实体坝,坝长 20 cm,高 20 cm,厚 5 cm,溢流口参数按面积相等原则取值,分为宽浅式、一般式、深窄式三种(表 1)。

1.2 模型比尺及控制参数

根据 Doi 对日本几个小流域(面积 $0.4 \sim 4 \text{ km}^2$)的调查统计,漂木最大长度为 $7 \sim 20 \text{ m}$,发生漂木灾害时的流量为 $20 \sim 45 \text{ m}^3/\text{s}$ ^[15]。因此,根据漂

木长度和实验条件,选择长度比尺 λ_L 为 $1:50$ 。依据重力相似准则,计算得出流量比尺 $\lambda_Q = \lambda_L^{2.5} = 1:17\,678$ 。通过换算后得到最大漂木模型长度为 $14 \sim 40 \text{ cm}$,模型流量为 $1.13 \sim 2.54 \text{ L/s}$ 。据此,本实验选用径均为 0.7 cm 、长度分别为 17.5 cm (60 根)、 15 cm (60 根)、 12 cm (87 根)和 5.5 cm (95 根)的 4 种漂木模型,控制清水流量 Q_w 为 1.428 L/s 。

表 1 矩形开口实体坝模型参数
Table 1 Rectangle spillway parameters of debris dam model

坝编号	坝型	坝长 cm	溢流口开口宽度 cm	溢流口深度 cm
1#	宽浅式	20	12	4
2#	一般式	20	8	6
3#	窄深式	20	6	8

以漂木相对长度(L/b)和漂木体积含量(V_w/V)两个控制变量来开展实验。溢流口宽度 b 设置为 6 cm 、 8 cm 和 12 cm ,则与 4 种漂木长度(L)组合后共有 12 种漂木相对长度 L/b ,涵盖了 Doi 文中涉及到的最大漂木长与拦砂坝溢流口宽度之比($0.9 \sim 2.5$)^[15]。漂木体积(V_w)由漂木规格和数量确定,通过控制实验水量大小便可以控制漂木体积含量(V_w/V),实验中控制其为 0.003 、 0.006 和 0.009 三种植。根据两个控制变量因子组合,共计 36 组实验。

考虑到现实中小流域产沙量较高,坝前很快会被淤满,因此实验时将坝设置为满库状态。满库淤积体为放水冲刷泥沙形成,所用泥沙材料为从河道中采集的天然砂石和石英砂,坝前淤积体长度基本一致(90 cm 左右),坡度 $2^\circ \sim 3^\circ$ 。

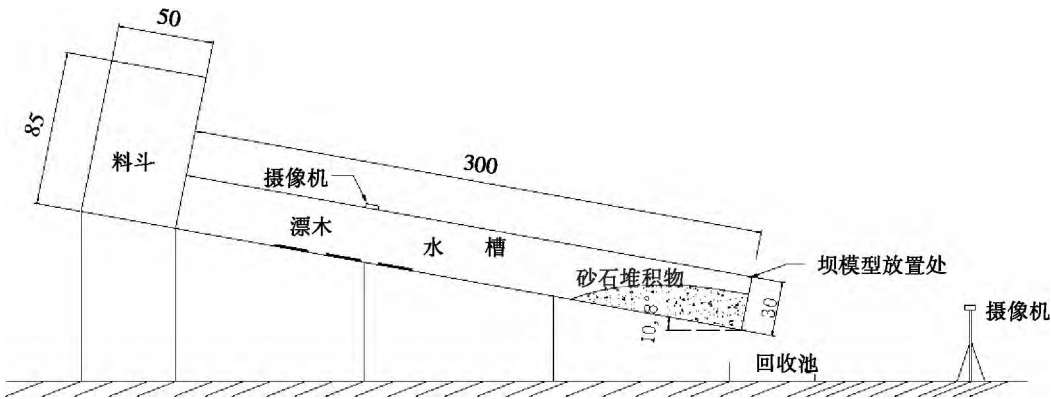


图 1 实验装置示意图(单位: cm)

Fig. 1 Sketch of experiment flume device

1.3 测试项目

根据预备实验结果,漂木基本停留在坝前或者淤积体尾部,因此分别统计停留在拦砂坝库区内的总漂木量 m 及坝前 20 cm 范围内的漂木量 m' ,通过影像解析漂木在溢流口附近的堵塞堆积形态。

2 实验结果和数据分析

2.1 实验结果

为了方便分析,定义漂木堵塞率 P_c 、漂木拦截率 P_w 来分别表征漂木在溢流口的堵塞堆积情况及拦砂坝对漂木整体的拦截情况,其定义式如下

$$P_c = \frac{m'}{N - m} \times 100\% \quad P_w = \frac{m}{N} \times 100\%$$

式中 P_c 即堵塞堆积在库首范围内的漂木数占到达库首区及流出的漂木数总量的比值; P_w 即拦砂坝后总拦截漂木数占总输入漂木数的比值,其中: N 为每组实验根据 V_w/V 值确定的漂木数。

2.2 漂木在溢流口堵塞堆积形态

实验发现,漂木大部分堆积在淤积体尾部或溢流口。因堆积在淤积体尾部的漂木是经一定时间冲刷形成的相对稳定的堆积,不易造成沟道堵塞而严重影响后续过流,故这里重点分析漂木在溢流口的堆积形态。对停留在溢流口及其附近 20 cm 范围内的漂木形态进行分析发现,漂木堵塞堆积主要有溢流口拦阻型、交错咬合型及坝前停积型三种形态,如图 2 所示。

2.2.1 溢流口搭桥型(图 2 I 所示)

有一根或多根漂木横拦在溢流口,后续漂木陆续堆积在其上或其后形成堵塞。横拦在溢流口的漂木对该类型堵塞体的形成起关键作用,主要发生在 $L/b > 1$ 的情况下,是形成堵塞体最常见的类型。堵塞体漂木数量与漂木体积含量成正相关。

2.2.2 交错咬合型(图 2 II 所示)

多根漂木在溢流口形成交错咬合状堵塞在溢流口,堵塞体中无明显横挡在溢流口的漂木起先导作用,主要发生在 $L/b > 1$ 且漂木含量较大的情况下。实验显示,特别是在 $L/b = 2$ 、 $V_w/V = 0.009$ 的工况下最易发生该类型堵塞。

2.2.3 坝前停积型(图 2 III 所示)

一根或多根漂木停留在坝前死水区,横在坝前或顺着水槽边缘堆积,溢流口未堵塞。此类型主要发生在 $L/b < 1$ 情况下,在 $L/b > 1$ 且 V_w/V 较小时也有发生。

表 2 实验因子组合及结果

Table 2 Combination of variable factors and experiment results

实验组号	L/b	V_w/V	漂木堵塞率 $P_c/\%$	漂木拦截率 $P_w/\%$
1	1.458	0.003	11.8	22.5
2	1.458	0.006	10	41.6
3	1.458	0.009	16.4	59.2
4	1	0.003	5.6	9
5	1	0.006	2.1	9.5
6	1	0.009	4.9	31
7	0.458	0.003	1.2	10.4
8	0.458	0.006	0	2.6
9	0.458	0.009	0	6.3
10	2.188	0.003	3.6	48.5
11	2.188	0.006	27.5	65.2
12	2.188	0.009	23.9	58.3
13	1.5	0.003	5.1	28.3
14	1.5	0.006	10.1	27.6
15	1.5	0.009	29.2	40.2
16	0.687	0.003	1.3	28.1
17	0.687	0.006	2.4	28.1
18	0.687	0.009	1	20.8
19	2.917	0.003	17.7	45.5
20	2.917	0.006	2.3	55.9
21	2.917	0.009	15.3	79.3
22	2	0.003	7.7	33.4
23	2	0.006	35.1	50
24	2	0.009	64.2	70.8
25	0.917	0.003	0	15.2
26	0.917	0.006	0	13
27	0.917	0.009	0	12.1
28	1.25	0.003	19.5	33.2
29	1.25	0.006	26.2	78.8
30	1.25	0.009	24	38.9
31	1.875	0.003	22.4	45.9
32	1.875	0.006	34.8	62.5
33	1.875	0.009	62.6	75.3
34	2.5	0.003	21.2	30.9
35	2.5	0.006	16.1	63.9
36	2.5	0.009	38.8	63.6

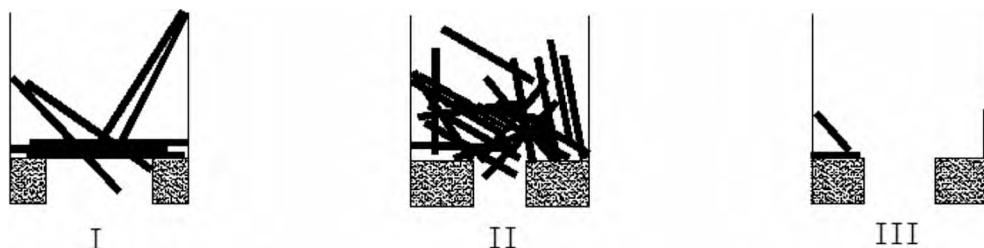
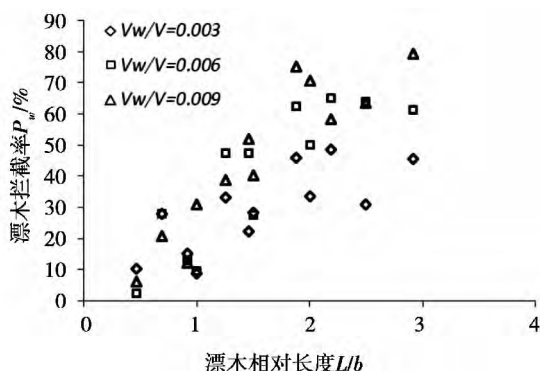
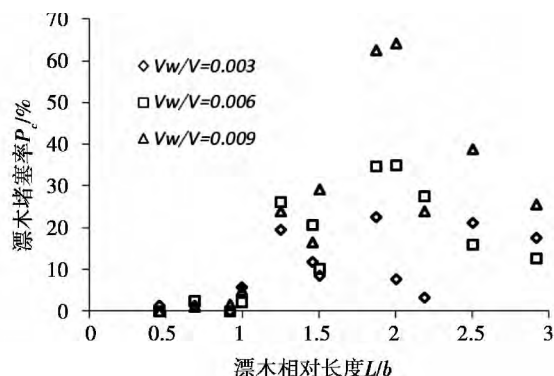


图2 漂木在溢流口的堵塞堆积形态示意图

Fig. 2 Sketch of woody debris clogging patterns in and adjacent to the spillway

图3 漂木拦截率 P_w 与漂木相对长度 L/b 关系Fig. 3 The relationship between woody debris trapping rate (P_w) and relative woody debris length (L/b)图4 漂木堵塞率 P_c 与漂木相对长度 L/b 关系Fig. 4 The relationship between woody debris clogging rate (P_c) and relative woody debris length (L/b)

2.3 漂木在坝前堵塞堆积与 L/b 之间的关系

对坝前拦截的所有漂木进行分析发现,总体上,漂木拦截率 P_w 在开始时随着 L/b 的增大而增大(图3);漂木堵塞率 P_c 随着 L/b 的增大先增大后减小,在 $L/b=2$ 左右时,堵塞率 P_c 达到最大(图4)。

1. 在 $L/b \leq 1$ 段, P_c 基本小于 10%, P_w 总体小于 30%。这说明当 $L/b \leq 1$ 时,漂木大多数通过溢流口流出,在库内滞留很少,实验设定的漂木体积含量对其基本无影响。

2. 在 $1 < L/b < 1.5$ 段, P_w 基本小于 50%,漂木以流出为主,且图5表明溢流口附近堵塞数占总拦截数的 30%~50% 左右,说明滞留在库容区中后部的漂木稍多于堵塞堆积在溢流口的漂木。

3. 在 $1.5 < L/b \leq 2$ 段, P_c 在 $L/b=1.85$ 和 2 时明显大于其他条件下的值, P_w 最高达到 70% 左右,且从图5可以看出堵塞在溢流口的漂木数占总拦截数的比例较大,这说明漂木多数堵塞在溢流口附近,流出及滞留在库区中后部的漂木较少。出现该现象的可能原因在于该段 L/b 值是由长 15 cm、12 cm 的漂木与不同坝体组合得到,漂木受到水槽的约束力相对适中,且充分发挥了水流的运输能力,使大量漂

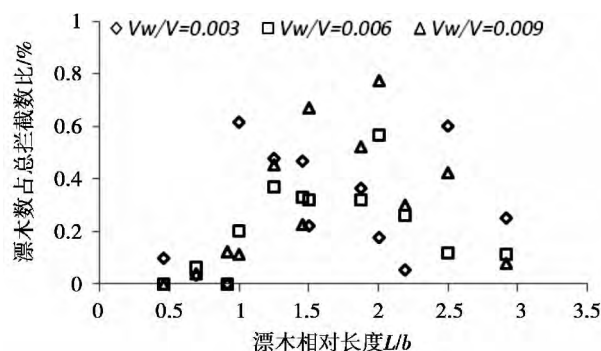


图5 堵塞堆积在溢流口的漂木对漂木拦截率的贡献

Fig. 5 The clogging woody debris number contribution to all the number trapped by debris dam

木能充分运动到溢流口附近。

4. 在 $2 < L/b < 3$ 段, P_c 逐渐减小,而 P_w 基本保持不变,这说明该条件下漂木主要堆积在库容区中后部,堵塞在溢流口的漂木逐渐减少。可能的影响因素还在于该段的 L/b 值基本由长 17.5 cm、15 cm 的大漂木与不同坝体组合得到,漂木本身尺寸大,受水槽约束强烈、相互作用大,使运动受到的阻力更大,更容易沉积在中后部。

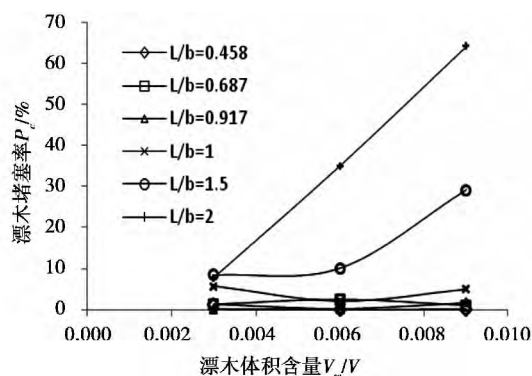


图6 漂木堵塞率 P_c 与漂木体积含量 V_w/V 关系图
Fig. 6 The relationship between woody debris retention rate (P_c) and relative woody debris volume (V_w/V)

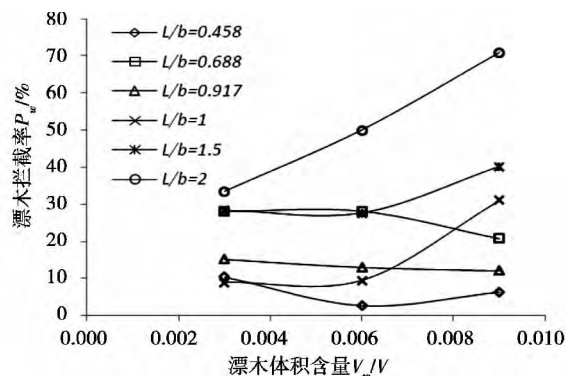


图7 漂木拦截率 P_w 与漂木体积含量 V_w/V 关系图
Fig. 7 The relationship between woody debris trapping rate (P_w) and relative woody debris volume (V_w/V)

由于 L/b 值是由不同漂木模型和不同坝模型组合得到,即两个因素同时变化。水槽对不同规格的漂木的约束力及漂木之间的作用力都不一样,因而也出现了相邻值变化很大的情况,但总体趋势是明显的。

2.4 漂木在坝前堵塞堆积与 V_w/V 之间的关系

根据实验中的堵塞堆积现象和相关数据分析(图6~7),漂木拦截率和堵塞率随着 V_w/V 总体上呈增大趋势,但因受 L/b 的影响,漂木在坝前堵塞堆积与 V_w/V 之间的关系存在较大差异。

1. 当 $L/b > 1$ 时,漂木拦截率 P_w 和堵塞率 P_c 随漂木体积含量 V_w/V 增大而明显增大,且随着的 L/b 增大该关系越发明显,当 $L/b = 2$ 时, P_w 和 P_c 均与 V_w/V 间呈近似线性增长关系。

2. 当 $L/b < 1$ 时,漂木拦截率 P_w 和堵塞率 P_c 随漂木体积含量 V_w/V 变化而无明显变化,也就是说当沟道较宽时,漂木体积含量对漂木的堵塞堆积影响不大。

3 结论

通过水槽实验,研究了漂木在实体拦砂坝前堵塞堆积的规律以及漂木相对长度 L/b 和漂木相对体积 V_w/V 对漂木在实体拦砂坝前堵塞堆积的影响,得到以下结论:

1. 漂木在拦砂坝溢流口形成堵塞堆积形态主要有三种,分别是溢流口搭桥型、交错咬合型以及坝后停积型,其中以溢流口搭桥型最为常见。

2. 漂木相对长度 L/b 对拦砂坝漂木拦截效果影响较大,漂木拦截率 P_w 随着 L/b 的增大逐渐增大,

在 $L/b = 2$ 后基本稳定不变。漂木堵塞率 P_c 随着 L/b 增大先增大后减小,在 $L/b = 2$ 左右达最大。

3. 在 $1.5 < L/b \leq 3$ 条件下形成较高的漂木拦截率的原因有所差异。在 $1.5 < L/b \leq 2$ 条件下漂木多堵塞堆积在溢流口及其附近,形成致密堵塞体;在 $2 < L/b < 3$ 条件下漂木则多停留在坝后库区的尾部。

4. 漂木体积含量 V_w/V 在 $L/b \leq 1$ 的情况下,对漂木堵塞率 P_c 和拦截率 P_w 影响不大。在 $L/b > 1$ 情况下, P_c 、 P_w 随着 V_w/V 的增大明显增大,且随着的 L/b 增大该关系越发明显,当 $L/b = 2$ 时, P_w 和 P_c 均与 V_w/V 间呈近似线性增长关系。

参考文献(References)

- [1] Nakagawa H, Takahashi T, Adachi K. Behavior of drift wood with overland flood flow [J]. Annuals of Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., 1991, 34(B-2): 373-386 (in Japanese with English abstract)
- [2] Braudrick C A, Grant G E, Ishikawa Y, et al. Dynamics of wood transport in streams: a flume experiment [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1997, 22: 669-683
- [3] Lienkaemper G W, Swanson F J. Dynamics of large woody debris in streams in old-growth Douglas-fir forests [J]. Canadian Journal of Forest Research, 1987, 17: 150-156
- [4] Nakamura F, Swanson F J. Distribution of coarse woody debris in a mountain stream, western Cascade Range, Oregon [J]. Canadian Journal of Forest Research, 1994, 24: 395-2403
- [5] Young M K. Movement and characteristics of stream-borne coarse woody debris in adjacent burned and undisturbed watersheds in Wyoming [J]. Canadian Journal of Forest Research, 1994, 24: 1933-1938
- [6] Ashida K, Takahashi T. Study on debris flow control-hydraulic function of grid type open dam [J]. Annuals of the Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 1980, 23: 433-441 (in Japanese with English abstract)

- [7] You Yong. Characteristics of intercepting sediment of debris flow check dam [J]. Journal of Soil and Water Conservation 2001 ,15 (1) : 113 – 115 [游勇. 泥石流梁式格栅坝拦砂性能试验研究 [J]. 水土保持学报 ,2001 ,15(1) : 113 – 115]
- [8] Han Wenbing ,Ou Guoqiang. Sediment-intercepting effect of slit dam on non-viscous debris flow: experimental study and comparative analysis [J]. Journal of Natural Disasters 2008 ,17(4) : 152 – 158 [韩文兵 欧国强. 单切口坝对稀性泥石流的拦砂性能——试验研究与比较分析 [J]. 自然灾害学报 2008 ,17(4) : 152 – 158]
- [9] Uchiogi T ,Shima J ,Tajima H et al. Design methods for wood-debris entrapment [G] //Proceedings Int. Symp. Interpraevent Garmisch Partenkirchen. 1996 5: 279 – 288
- [10] Matsumura K ,Hashida Y ,Kasai S. Effect of trapping floatwood by grid type sabo dam [J]. Journal of the Japan Erosion Control Engineering Society ,1990 43: 9 – 12
- [11] Han Wenbing. Fundamental Study on intercepting sediment capability of slit dam in preventing debris flow [D]. Beijing: The Graduate University of Chinese Academy of Sciences 2007: 79 – 86 [韩文兵. 泥石流缝隙坝拦砂性能基础研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院 2007: 79 – 86]
- [12] Shrestha B B ,Nakagawa H ,Kawaike K et al. Numerical simulation on debris-flow with driftwood and its capturing due to jamming of driftwood on a grid dam [J]. Annual Journal of Hydraulic Engineering JSCE ,2009 53: 169 – 174
- [13] Shrestha B B ,Nakagawa H ,Kawaike K et al. Driftwood deposition from debris flows at slit-check dams and fans [J]. Natural Hazards 2012 52: 577 – 602
- [14] Mizuyama T ,Kobashi S ,Mizuno H. Control of passing sediment with grid-type dams [J]. Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering ,1995 47: 8 – 13 (in Japanese with English abstract)
- [15] Doi Y ,Minami N ,Yamada T ,Amada T. Experimental analysis of woody debris trapping by impermeable type sabo dam ,filled with sediment-woody debris carried by debris flow [J]. Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering 2000 52(6) : 49 – 55(in Japanese with English abstract)

Experiment on the Clogging and Deposition of Woody Debris Flowing with Torrents in Front of Debris Dams

XIE Xiangping^{1 2} ,WEI Fangqiang¹ ,XIE Tao^{1 2} ,YANG Hongjuan¹

(1. Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface Process ,Chinese Academy of Sciences/Institute of Mountain Hazards and Environment , Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Conservancy ,Chengdu 610041 ,China;

2. University of Chinese Academy of Sciences ,Beijing 100049 ,China)

Abstract: Debris flow or torrents with woody debris could weaken the disaster mitigation function or threaten the safety of debris dams for woody debris may clog densely in the spillway. Hence it is important to study the clogging and deposition regularity of woody debris in front of debris dams for mitigation structure design. According to hydraulic experiments ,we considered the impact of woody debris length(L) ,spillway width(b) ,woody debris volume (V_w) and fluid volume(V) to the woody debris clogging and deposition. The experiment results show that there are three main types of clogging pattern in the spillway. The first one is several logs trapped transversely by the spillway and then trapping following woody debris. The second one is numerous woody debris arrive simultaneously at the spillway interlocked with each other. The third one is short woody debris deposit in Front of the dam adjacent to the spillway. The woody debris clogging rate is lower than 10% and has little change with L/b when $L/b < 1$,while increase firstly and decrease with L/b when $1 < L/b < 3$,reaching the peak at $L/b = 2$. The woody debris trapping rate presents a linear increase with L/b when $L/b \leq 2$,and keeps steady when $2 < L/b < 3$. Either debris clog in the spillway or deposit in front of dam can cause high trapping rate. The relative volume of woody debris(V_w/V) has little impact on the clogging rate and trapping rate when $L/b < 1$,while contributes to the increase of trapping rate and trapping rate when $1 < L/b < 3$ in general. The bigger L/b ,the higher increase presents ,with a linear increase at $L/b = 2$.

Key words: torrent; woody debris; debris dam; woody debris clogging; woody debris deposition