

泥石流堵塞主河条件

党超^{1,2,3}, 程尊兰^{1,2}, 刘晶晶^{1,2,3}

(1. 中国科学院地表过程与动力学重点实验室, 四川 成都 610041; 2. 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;
3. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 分析了泥石流堵河的主要影响因素, 包括泥石流与主河流量比, 泥石流与主河交汇角, 主河宽度, 泥石流体的抗冲强度和主河底床坡度。通过对这些主要因素的分析 and 对比, 将这 5 个主要因素简化为 4 个无量纲量。针对这些无量纲参数进行了一系列的泥石流堵塞主河试验。对比本次研究和其他文献关于泥石流堵河试验的变量和结果, 可以得出无量纲化的泥石流堵塞主河的临界条件。实验结果表明, 泥石流堵河的临界值 $C \geq 0.87$, 而且当流量比小于 1 时难以形成堵河现象。用该堵塞主河的条件能正确判断许多原型泥石流堵塞主河事件。

关键词: 泥石流; 主河; 堵塞; 堵河判别指数

中图分类号: P642.23

文献标识码: A

泥石流堵断江河淹没村庄, 公路铁路, 农田, 工厂和水电设施是泥石流危害的一种主要形式。云南省昆明市东川蒋家沟泥石流从 1919~1968 年的 50 a 间曾 7 次严重堵断小江, 有时堵江造成小江回水十几公里, 堵江处水位升高 10 m, 堵江时间长达 48 d 致使上游近 667 hm² 良田受淹而颗粒无收^[1]。1953-09-29 西藏古乡沟暴发的特大冰川泥石流堵断波堆藏布江, 上游水位猛涨 50 m, 沿江农田森林均被淹没^[2]。1976-07-25 甘肃省宕昌县化马乡一带 60 km² 范围内的泥石流堵断白龙江 2 处, 堵断岷江支流 4 处, 水位上涨 7.5~19.3 m, 淹没 2 处村庄, 房屋 708 间, 公路 4 km, 中断交通 40 d^[3]。1985-06-20 西藏培龙沟暴发大规模泥石流堵断帕隆藏布后被江水冲开, 以高出常水位 20 m 的水头冲向下游, 冲毁下游 40 km 内 54 座行人吊桥、房屋 22 间、汽车 80 辆, 损失 500 万元以上^[4]。1974-04-12 巴基斯坦境内的帕提巴尔沟泥石流堵断洪扎河, 形成深 42 m 的水库, 将中巴公路上最长的桥梁——友谊桥淹没在水中^[3]。

对泥石流堵塞主河的条件国内学者做了一系列

的研究^[3,5], 但都未能考虑各堵河因素对泥石流堵塞主河的综合作用, 如考虑泥石流总量的系数法; 考虑泥石流容重(粘度)的容重法; 考虑泥石流颗粒大小的粒度法; 考虑泥石流堵河堆积量和堆积形式的形态法^[3]。对泥石流堵河条件考虑较多的研究^[5]已涉及到了泥石流与主河流量, 泥石流与主河底床比降, 泥石流容重和总量, 主河宽度, 但未能对泥石流体的物理性质做定量的研究。探明泥石流堵塞主河的条件, 不仅能了解泥石流在主河中的泥沙输运规律, 也能了解泥石流堵塞主河后的河水淹没范围, 为防治与减灾工程, 西部大开发建设和国民经济发展提供有力的依据。本文通过室内水槽试验分析研究了泥石流堵塞主河的流量, 主河宽度, 交汇角, 泥石流体的抗冲强度和主河底床坡度条件, 提出了泥石流堵塞主河的判别指标。

1 泥石流堵塞主河试验

试验主河为单面钢化玻璃的混凝土水槽, 宽度 40 cm, 长 5 m, 坡度为 5%; 支沟为钢架结构, 双面为

收稿日期 (Received date): 2008-04-10; 改回日期 (Accepted): 2009-02-10.

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金 (40771024), 交通部西部交通建设科技项目 (2006 3187 9284). [This research is supported by China National Science Found (40771024), the Ministry of Communications (2006 3187 9284).]

作者简介 (Biography): 党超 (1982-), 男 (汉族), 博士研究生, 主要从事与山地灾害及其防治措施研究。[Dang Chao (1982-), male, Han nationality, born in Tengzhou of Shandong. Postgraduate major in mountain hazards and prevention methods study.]

钢化玻璃,顶端为 $50 \times 40 \times 75 \text{ cm}^3$ 料箱,末端高出主河 5 cm,支沟与主河正交(交汇角为 90° 的泥石流与主河交汇在泥石流堵塞主河的事件中具有代表性),具体结构见图 1。

试验中主河流水为清水,流量从 1.29 L/s 到 7.74 L/s 随试验组次变化。试验泥石流体容重为 1.50 t/m^3 , 1.70 t/m^3 , $1.80 \sim 1.93 \text{ t/m}^3$, 试验泥石流颗粒级配如图 1。泥石流流量从 1.60 L/s 到 9.8 L/s 随试验组次变化。试验中泥石流和主河的流量比随试验组次变化从 0.88~10.53。试验泥石流样配

制后还进行了颗粒分析和流变特性测试。试验泥石流体和蒋家沟泥石流体颗粒分布曲线如图 1。由于泥石流流量常数倍于主河流量,泥石流进入主河后泥流水位高于主河水位,主河的壅水与堵河很相似。当泥石流体抗冲强度(屈服应力)较小时,貌似堵河的主河壅水随着泥石流流量的减小而消失,而抗冲强度(屈服应力)较大的泥石流体在泥石流流量减小后仍能堵塞主河。因此对于泥石流堵塞主河的判断必须与主河的壅水区别开来。试验主要参数与结果如表 1。

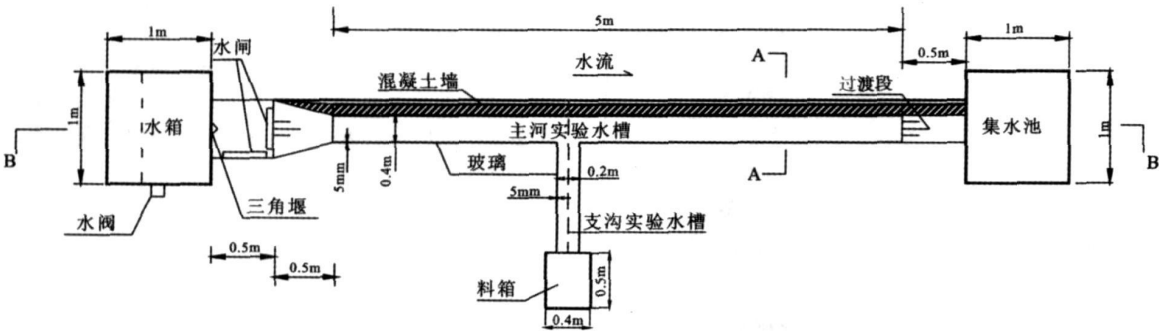


图 1 试验装置平面图

Fig 1 Settings of model test

表 1 堵河试验参数表

Table 1 Parameters in the experiments

| 组次 | 起始剪切力 τ (Pa) | 流量比 r | 主河宽度 W (m) | 主河坡度 ϕ ($^\circ$) | 交汇角 D ($^\circ$) | 堵河临界值 C | 堵塞情况 |
|-----------------|----------------------|---------|-----------------|-----------------------------|-------------------------|-----------|------|
| 1 [#] | 5.68 | 2.63 | 0.4 | 5 | 90 | 0.62 | 否 |
| 2 [#] | 4.69 | 4.60 | 0.4 | 5 | 90 | 0.77 | 否 |
| 3 [#] | 7.21 | 4.45 | 0.4 | 5 | 90 | 0.87 | 是 |
| 4 [#] | 14.63 | 6.67 | 0.4 | 5 | 90 | 1.35 | 是 |
| 5 [#] | 5.76 | 3.37 | 0.4 | 5 | 90 | 0.71 | 否 |
| 6 [#] | 2.11 | 7.53 | 0.4 | 5 | 90 | 0.75 | 否 |
| 7 [#] | 20.30 | 10.53 | 0.4 | 5 | 90 | 1.90 | 是 |
| 8 [#] | 29.95 | 1.01 | 0.4 | 5 | 90 | 0.67 | 否 |
| 9 [#] | 23.88 | 4.28 | 0.4 | 5 | 90 | 1.28 | 是 |
| 10 [#] | 15.22 | 9.24 | 0.4 | 5 | 90 | 1.62 | 是 |
| 11 [#] | 31.35 | 0.88 | 0.4 | 5 | 90 | 0.63 | 否 |
| 12 [#] | 19.71 | 8.78 | 0.4 | 5 | 90 | 1.72 | 是 |
| 13 [#] | 20.38 | 9.81 | 0.4 | 5 | 90 | 1.83 | 是 |
| 14 [#] | 25.93 | 8.00 | 0.6 | 8 | 60 | 0.71 | 否 |
| 15 [#] | 37.52 | 4.00 | 0.6 | 8 | 60 | 0.57 | 否 |
| 16 [#] | 55.66 | 8.00 | 0.6 | 8 | 30 | 0.43 | 否 |
| 17 [#] | 50.37 | 4.00 | 0.6 | 5 | 60 | 0.80 | 否 |
| 18 [#] | 77.48 | 6.00 | 0.6 | 5 | 30 | 0.52 | 否 |
| 19 [#] | 22.51 | 4.00 | 0.6 | 5 | 30 | 0.28 | 否 |

注: C 为泥石流堵河临界值, 计算过程如下文。

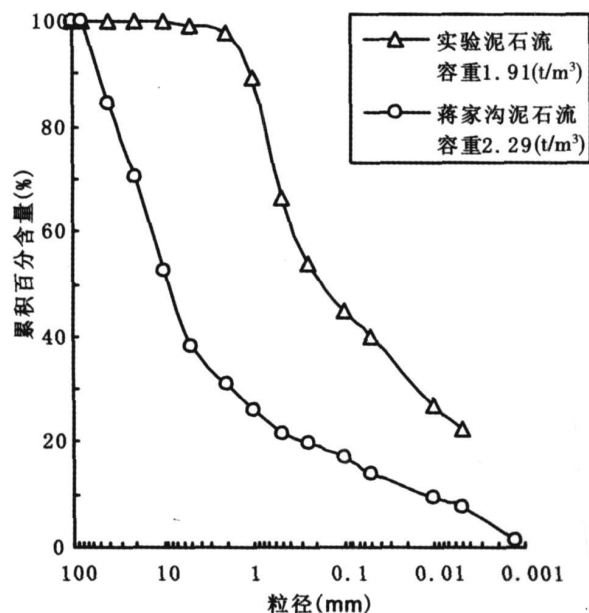


图 2 试验泥石流颗粒级配

Fig 2 Grain sizes of debris flow

2 影响泥石流堵塞主河的因素

泥石流与主河交汇在山区较为常见, 泥石流也常堵塞主河, 但并非所有的泥石流都能堵塞主河。泥石流完全堵塞主河以致形成泥石流堵塞坝, 主要受到主支沟的水力条件, 河床条件以及两侧的交汇关系的影响。

2.1 泥石流与主河流量比

泥石流与主河流量比是泥石流与主河交汇的重要参数。泥石流与主河流量比对交汇点上游壅水, 泥石流与主河的交汇模式和主河泥沙淤积的影响很大^[6]。尽管泥石流流域远小于主河流域且汇水面积也小得多, 但由于降雨的不均匀性, 泥石流流体中大部分是土与石, 泥石流流量往往大于主河流量, 甚至大出数倍。大流量的泥石流在有限的主河宽度方向运动不仅阻碍主河的水流运动, 造成主河壅水, 而且将大量泥沙带入主河, 在交汇口沿横向和纵向沉积在主河内, 以至堵塞主河。小流量的泥石流在主河强大的水流冲刷下不仅在主河内的壅水很有限, 而且沉积的泥沙也很容易被主河水流带走, 很难形成完全堵河现象。泥石流冲入主河后在主河内淤积泥沙造成主河水位上涨, 在淤积范围一定时泥沙淤积速度正比于泥石流流量, 主河水位上涨速度正比于主河流量; 如果泥石流与主河流量比过小, 就会出现泥沙淤积速度小于主河水位上涨速度而无法堵塞

主河。泥石流与主河流量比很大程度影响了泥石流能否堵塞主河。该无量纲参数反映了泥石流与主河流量的差别对泥石流堵塞主河的影响: 流量比越大, 泥石流越容易堵塞主河; 流量比越小, 泥石流堵塞主河越困难。

2.2 主河的宽度

泥石流入汇主河后与主河交汇并相互影响, 由于泥石流与主河水流具有不同的运动速度和方向, 相互扰动和削弱原有运动在所难免。如果主河在交汇口较窄, 泥石流还能克服主河水流的扰动保持较强的运动动能运动到对岸, 并将较多的泥沙搬运到对岸, 从而满足堵塞主河的条件。如果主河在交汇口较宽, 泥石流无法抵抗主河水流的干扰保持较强的运动势头运动到对岸, 因而不能将足够的泥沙搬运到对岸, 形成泥石流堵塞坝。泥石流冲入主河后, 泥沙淤积范围与主河宽度和在主河内的淤积长度两者有关, 而淤积长度往往随主河宽度增大而增大, 即泥石流在主河内泥沙淤积范围随主河宽度增大而增大。同样的淤积量时泥石流在主河内泥沙淤高与泥沙淤积范围成反比, 即泥石流在主河内泥沙淤高随主河宽度增大而降低。主河水位上涨速度与主河宽度成反比。因此主河宽度在泥沙淤高和主河水位上涨的过程中都有重要的作用, 而泥沙淤高和主河水位上涨直接影响到泥石流是否能够完全堵塞主河^[7]。主河宽度在泥沙淤高和主河水位上涨两方面的影响相互抵消一部分后, 堵塞主河的可能性随主河宽度增大而降低。因此主河的宽度也对泥石流能否堵塞主河有很大的影响: 主河越窄, 泥石流越容易堵塞主河; 主河越宽, 主河被泥石流堵塞的可能性越小。

2.3 泥石流与主河交汇角

泥石流与主河交汇角对泥石流堵塞主河也有很大的影响。泥石流与主河交汇角对交汇点上游壅水影响很大, 主河的相对壅水 (壅水高度与原水位比) 与交汇角 ($\tan(D/2)$, D 为交汇角) 成线性正比关系^[6]。如果交汇角很小, 泥石流在主河内沿垂直主河运动方向速度很小, 与主河水流相互扰动也很小, 有利于泥石流在主河中的运动 (沿主河水流运动方向) 和泥沙在主河中的输运, 很少有泥沙在交汇口沉积, 泥石流也无法堵塞主河。如果交汇角很大, 甚至于部分与主河对流 (交汇角 $> 90^\circ$), 泥石流在主河内沿垂直主河运动方向速度很大, 与主河水流相互扰动也很强, 泥石流在主河中的运动主要沿垂直

于主河水流运动方向,到达对岸后又返回主河并使大量泥沙沉积在主河中,极易堵塞主河。如蒋家沟泥石流最大流量为 $2\,920\text{ m}^3/\text{s}$,泥石流流体性质长年变化不大(指较大流量时的高浓度粘性泥石流);小江水流最大流量为 $531\text{ m}^3/\text{s}$ 在 1968 年修建蒋家沟泥石流导流堤之前,蒋家沟泥石流与小江交汇角为 90° ,泥石流几乎连年堵塞小江。在导流堤完工后到 1999-09 导流堤被冲开前,由于蒋家沟泥石流沿导流堤与小江交汇角为 35° ,尽管 1998 年泥石流最大流量为 $2\,920\text{ m}^3/\text{s}$ 交汇口小江宽度仅 20 m,小江仍未被蒋家沟泥石流堵塞。因此泥石流与主河交汇角对泥石流能否堵塞主河有很大的影响:交汇角越小,泥石流越不容易堵塞主河;交汇角越大,主河越容易被泥石流堵塞。

2.4 泥石流体的抗冲强度

常见的两江交汇在交汇口上游有壅水现象,但不会堵塞任何一条河流,无论两江的流量比,河宽和交汇角大小都不会堵河。泥石流之所以能堵塞主河,不仅因为有较强的流量比,较大的交汇角和较小的主河宽度(交汇口),更重要的是泥石流流体能抵抗主河水流的冲刷形成土石坝从而堵塞主河,而水流却不具有这样的性质。本文引入抗冲强度(量纲为: Pa)概念,指泥石流抵抗水流冲刷的强度;显然,水的抗冲强度为 0。因此泥石流体的抗冲强度对泥石流能否堵塞主河有很大的影响:抗冲强度越小,泥石流越不容易堵塞主河;抗冲强度越大,主河越容易被泥石流堵塞。

泥石流体的物理性质与水的物理性质完全不同,属非牛顿体,具有屈服应力。屈服应力使泥石流运动过后在原运动底床有残留层,在小坡度停积时有沉积厚度

$$h = \frac{\tau_b}{\rho g \sin \theta} \quad (1)$$

式中 $h(\text{m})$ 为泥石流沉积厚度; $\tau_b(\text{Pa})$ 为泥石流的屈服应力; $\rho(\text{kg}/\text{m}^3)$ 为泥石流流体密度; $g(\text{m}/\text{s}^2)$ 为重力加速度; $\theta(^{\circ})$ 为泥石流沉积的底坡坡度。具有屈服应力的泥石流流体也具有抗冲强度,因此可以用屈服应力表示一部分泥石流体的抗冲强度。用屈服应力表示的泥石流流体抗冲强度在试验中较容易得到,只须控制试验泥石流体的颗粒直径(使颗粒直径小于流变仪间隙的 $1/3$)。但对于原型泥石流流体,再大的流变仪间隙都微不足道,用屈服应力表示的泥石流流体抗冲强度只能代表小颗粒的抗冲强度,不

能反映泥石流体的真实抗冲强度。

在泥石流流体中,除屈服应力对泥石流体的抗冲强度有贡献外,大粒径的颗粒(如巨石)也很难被冲刷,对泥石流体的抗冲强度有很大的贡献,甚至于远大于屈服应力的贡献。对颗粒起动的判定有用起动功率表示,也有用水流流速和剪切应力表示^[8]。为了与屈服应力和抗冲强度保持量纲一致,本文采用剪切应力表示颗粒的起动。用剪切应力表示颗粒起动的研究较多,但大多数研究的颗粒粒径不大,还不能达到像泥石流中大颗粒的直径。由适合大颗粒粒径的颗粒起动剪切应力经验公式^[9]

$$\tau_c = 0.7852d_{75} \quad (2)$$

式中 $\tau_c(\text{Pa})$ 为颗粒起动剪切应力; $d_{75}(\text{mm})$ 为泥石流流体中质量百分比为 75% 的大颗粒粒径(除去 $\leq 1\text{ mm}$ 的小颗粒后的大颗粒)。公式(1)和公式(2)分别表示小颗粒和大颗粒对抗冲强度的贡献,因此泥石流体的抗冲强度为

$$\tau = \tau_b + \tau_c \quad (3)$$

式中 $\tau(\text{Pa})$ 为泥石流体的抗冲强度。

泥石流体的抗冲强度不仅影响泥石流流体抵抗水流冲刷形成土石坝堵塞主河,而且还很大程度地影响泥石流流体在主河内的沉积范围和厚度,从而影响泥石流堵河。泥石流进入主河后,由于主河底床坡度较泥石流沟底床坡度小,泥石流运动受阻,具有屈服应力的泥石流流体在泥石流停止运动时沉积下来,屈服应力越大,泥石流沉积厚度越大,沉积范围越小;屈服应力越小,泥石流沉积厚度越小,沉积范围越大。同样在泥石流停止运动沉积下来时,颗粒起动剪切应力越大的大颗粒越容易停积,颗粒起动剪切应力越小的大颗粒越不容易停积。因此抗冲强度使泥石流流体能在水中有较小的沉积范围和较大的沉积厚度,并抵抗主河水流的冲刷从而堵塞主河。

2.5 主河的坡度

山区河流具有较大的底床坡度,水流湍急,冲刷能力强,对泥石流在主河内的沉积物同样有很强的冲刷,主河底床坡度越大越不利于堵塞坝体的形成。其次,泥石流流体具有屈服应力,屈服应力使泥石流运动过后在原运动底床有残留层,在小坡度停积时有沉积厚度,沉积厚度与沉积坡度成反比。因此泥石流在主河内泥沙的淤积高度随主河底床坡度增大降低。再则,主河水位上涨速度与主河底床坡度成正比(底床坡度越小,水面线坡度越小,回水线越长,水位上涨越慢)。因此主河底床坡度在主河水流冲

刷, 泥沙淤高和主河水位上涨的过程中都有重要的作用, 从而间接的影响主河的堵塞过程。主河底床坡度在主河水流冲刷, 泥沙淤高和主河水位上涨三方面的影响叠加后, 堵塞主河的可能性随主河底床坡度的增加而减小。主河水流冲刷的计算不能用一般的冲刷公式, 因为泥石流进入主河后改变了主河在交汇口的局部比降, 流速和水深; 泥石流在主河内的淤积高度也不能由公式 (1) 确定, 因为泥石流在主河内的淤积是可以叠加的; 由于上游水流的作用, 主河内交汇口附近水位在主河水面线趋近水平前就上涨了。因此主河底床坡度对堵塞主河的可能性的影响不能简单地考虑主河水流冲刷, 公式 (1) 和主河回水水位上涨的多重作用。无量纲量 $\tan \varphi$ (φ 为主河底床坡度) 反映了主河底床坡度对泥石流堵塞主河的影响: 主河底床坡度越小, 泥石流越容易堵塞主河; 主河底床坡度越大, 主河被泥石流堵塞的可能性越小。

3 泥石流堵塞主河的条件

泥石流堵塞主河的条件受泥石流与主河流量比, 泥石流与主河交汇角, 主河宽度, 泥石流体的抗冲强度和主河底床坡度的控制。通过分析上述诸影响因素, 可以得出影响泥石流堵河的 4 个无量纲参数: r 为泥石流与主河流量比; $\tan(D/2)$ 反映泥石流与主河交汇角, $\tau/(\rho g w)$ 为泥石流体的抗冲强度和主河宽度综合参数, 其中 w 为主河宽度; $\tan \varphi$ 为主河比降。考虑山区河流比降变化幅度较大而主河底床坡度对泥石流堵塞主河的影响有限, 参照谢才 (Chezy) 或曼宁 (Manning) 公式中比降的影响, 取 $\tan 1/2\varphi$ 与堵河条件成反比。通过本文一系列试验和有关参考文献^[6-10] 对比, 得到泥石流堵河的临界值 $C = 0.87$ 即泥石流堵塞主河的条件为

$$C = \left[r / \tan \varphi \right]^{1/2} \left[\tau / (\rho g w) \right]^{1/3} \tan(D/2) / \tan^{1/2} \varphi \geq 0.87 \quad (4)$$

试验及文献 [6-10] 的堵河状况如图 3。除了堵河的临界条件外, 图 3 中同时存在两个不易堵河区域: $r^{1/2} < 1$ 时和 $\left[\tau / (\rho g w) \right]^{1/3} \tan(D/2) / \tan^{1/2} \varphi < 0.4$ 时都很难堵河。其物理意义为: 当泥石流与主河流量比较小时, 泥石流体在主河内沉积范围和高度的增加不足以抵消主河上游水位的上涨而无法堵断主河; 泥石流体的抗冲强度太小使泥石流体在主河内沉积范围太大和高度太低, 也无法抵抗主河水流的冲刷从而难于堵河; 主河在交汇口太宽使泥石

流体在主河内沉积范围过大和高度过低, 尤其是在主河对岸沉积高度太低而无法堵断主河; 泥石流与主河交汇角太小使泥石流中大部分沿主河运动到下游, 只有少部分泥石流在交汇口沉积不能形成堵河; 主河底床坡度太大使泥石流在主河内泥沙淤积高度太小而主河水位上涨太快, 主河不能被堵断。

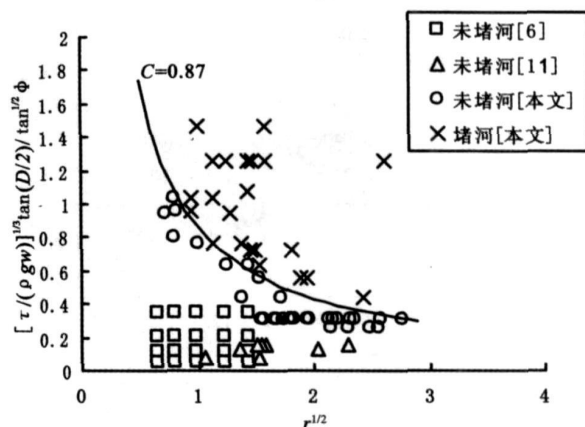


图 3 试验泥石流堵河判定

Fig. 3 Critical index for resulting from model tests dam-forming

4 堵河事件分析

大规模泥石流堵断主河在泥石流历史上屡见不鲜, 堵河时的交汇角绝大部分的是 90° 。在原型泥石流堵河条件诸参数中, 泥石流体的抗冲强度最难确定。原型泥石流中的巨石比比皆是, 实际上无法做到对所有的巨石进行颗粒分析。因此在泥石流中较多的巨石粒径可作为抗冲强度中的起动剪切应力计算颗粒粒径 (d_{τ})。此时小颗粒具有的屈服应力与大颗粒的起动剪切应力相比已很小。本文收集了国内几次重大的泥石流堵河事件^[2-14], 其相关参数如表 2 图 4 为原型泥石流是否堵断主河与公式 (4) 对比图。

从图 4 可以看出, 公式 (4) 能正确判断绝大多数堵河事件。四川甘洛利子依达沟泥石流堵塞大渡河和甘肃宕昌化马乡刘家湾沟泥石流堵塞岷江的泥石流, 与主河流量比分别为 0.71 和 0.74 正如试验中小流量比很难堵河一样, 用公式 (4) 还很难判断这两次泥石流能堵河。但刘家湾沟泥石流能堵塞岷江极有可能是因为其上游的化马沟和中牌沟先堵塞岷江, 造成岷江流量急剧减小后堵塞岷江。

表 2 堵河事件参数表
Table 2 Parameters in damming events

| 沟名 | 起始剪切力流量比 τ (Pa) | 主河宽度 r | 主河纵坡 W (m) | 堵河临界值 C |
|------------------|-------------------------|-------------|-----------------|--------------|
| 338沟 | 430 | 4.00 | 60 | 0.026 |
| 培龙沟 ¹ | 812 | 4.40 | 200 | 0.018 |
| 培龙沟 ² | 920 | 3.89 | 200 | 0.018 |
| 米堆沟 | 612 | 2.89 | 120 | 0.183 |
| 么堂子沟 | 420 | 2.00 | 28 | 0.022 |
| 利子依达沟 | 694 | 0.71 | 120 | 0.010 |
| 古乡沟 | 1020 | 6.49 | 130 | 0.018 |
| 日化马沟 | 632 | 5.04 | 50 | 0.020 |
| 刘家湾沟 | 540 | 0.74 | 40 | 0.020 |
| 中牌沟 | 540 | 7.52 | 30 | 0.020 |
| 石坳子沟 | 689 | 1.61 | 30 | 0.018 |
| 水地沟 | 523 | 3.17 | 60 | 0.018 |

注: 培龙沟一共出现过 2 次堵河事件, 1 为 1984 年, 2 为 1985 年。

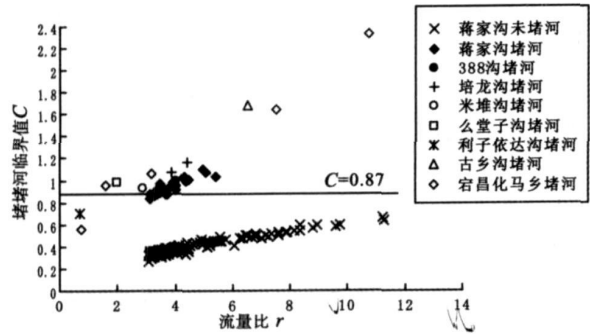


图 4 原型泥石流堵河判定

Fig.4 Critical index for the events of dam-forming

5 讨论

泥石流与主河流量比, 泥石流与主河交汇角, 主河宽度, 泥石流体的抗冲强度和主河底床坡度是影响泥石流堵塞主河的主要因素。通过对这些主要因素的分析 and 对比, 将这 5 个主要因素简化为 4 个无量纲因素, 并对比本文和其他文献关于泥石流堵河试验的变量和结果, 得出泥石流堵塞主河的临界条件。用该堵塞主河的条件能判断许多原型泥石流堵塞主河事件。尽管泥石流流入主河绝大多数呈正交, 但考虑交汇角对堵河的影响是非常有意义的, 特别是在泥石流防治工程中有很重要的实践意义。蒋家沟泥石流防治工程——导流堤就是一个成功范例: 将蒋家沟泥石流与小江交汇角由 90°减小到 35°, 使泥石流流量为 2 920 m³/s, 交汇口小江宽度仅 20 m 时仍不堵江 (交汇角为 90°时泥石流流量为

1 000 m³/s 交汇口小江宽度 51 m 都会堵江)。因此, 减小主支沟的交汇角是减少泥石流堵江灾害的首选措施。

实际原型泥石流堵塞主河远比室内试验复杂得多。首先, 试验中交汇口主河两岸是陡壁, 主河宽度是一定值, 主河宽度对堵河的影响容易确定。但实际泥石流流入主河时在交汇口往往主河两岸并不是陡壁, 特别是主河两岸河岸是一缓坡时, 主河宽度会随主河水位的上涨变得很宽, 河道也会由于泥石流的进逼而迫向对岸绕道流动, 主河宽度很难确定。其次, 试验中泥石流堵塞主河是一次流入主河堵塞, 主河的宽度也是固定值。但实际泥石流流入主河都有一较长时间过程, 如果最前面的泥石流堵塞主河, 主河宽度容易确定。当堵塞主河的是中间或后面的泥石流时, 前面的泥石流在主河中已有泥沙淤积, 已改变了主河原来的形状, 主河宽度已无法准确获得, 也会影响对堵塞主河的判断。如利子依达沟堵塞大渡河的泥石流很可能就是逐渐增大流量的泥石流将逐渐缩小宽度的大渡河堵塞的。

本文讨论了泥石流堵塞主河的条件, 对堵塞主河的定义局限在短时 (瞬时) 堵河。当泥石流总量不大时, 短时 (瞬时) 堵河后由于堵塞高度有限, 主河上游来水不断抬高主河上游水位, 一旦上游水位高过泥石流堵塞高度, 泥石流也就不再堵塞主河。要像蒋家沟堵断小江达数日之久, 没有相当大的泥石流堵河总量是不可能的。本文未考虑泥石流的总量和堵塞主河时间, 只研究了短时 (瞬时) 堵塞主河的条件。

要了解泥石流堵塞主河的危害和影响, 堵塞时间及其回水距离和高程都是非常重要的。因此, 研究交汇口主河两岸地形, 泥石流流量过程线和泥石流总量对泥石流堵塞主河的影响, 以及研究堵塞时间, 回水距离和高程及淹没范围和危险区域也是非常重要的工作。

参考文献 (References)

[1] Wu Jian, Kang Zhicheng, Tian Lianquan, et al. Observation of Debris Flow in Jiangjia Gully, Yunnan Province[M]. Beijing Science Press, 1990: 3~ 4[吴积善, 康志成, 田连权, 等. 云南蒋家沟泥石流观测研究[M]. 北京: 科学出版社, 1990: 3~ 4]

[2] Du Ronghuan, Zhuang Shucheng. Study on glacial debris flow in Guxiang Gully, Xizang, 1953[A]. In Bulletin 4 of Institute of Glaciology and Geocryology, CAS Lanzhou[C]. Beijing Science Press, 1984: 36~ 37 [杜榕桓, 章书成. 西藏古乡沟 1953 年特大冰川泥石流剖析[A]. 见: 中国科学院兰州冰川冻土研究所

- 集刊 4[C]. 北京:科学出版社, 1984: 36~ 47]
- [3] Zeng Siwei Mathematic model for shapes of debris flow damming [A]. In Bulletin of 2th Debris Flow Conference [C]. Beijing Science Press 1991: 58~ 62 [曾思伟. 泥石流堵江形态的数学模型 [A]. 见: 第二届全国泥石流学术会议论文集 [C]. 北京: 科学出版社, 1991: 58~ 62]
- [4] Luo Defu, Mao Jizhou Mountain Hazards and Countermeasures along Southern Sichuan-Xizang Highway (in Xizang) [M]. Beijing Science Press 1995: 190~ 194 [罗德富, 毛济周. 川藏公路南线(西藏境内)山地灾害及防治对策 [M]. 北京: 科学出版社, 1995: 190~ 194]
- [5] Zhou Bifan, Li Deji, Luo Defu, *et al* Direction for the Mitigations of Debris Flow [M]. Beijing Science Press 1991: 73~ 75 [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: 73~ 75]
- [6] Yu Bin, Hong Yong, Wei De Yuan, *et al* Study on the types of confluence between debris flow and mainstream [J]. *Journal of Catastrophology* 2008: 23(3) 45~ 51 [余斌, 洪勇, 魏德元, 等. 泥石流与主河的交汇模式研究 [J]. 灾害学, 2008: 23(3) 45~ 51]
- [7] Wu Jishan, Cheng Zunlan, Geng Xueyong Formation of dam from debris flow in southeast Tibet [J]. *Journal of Mountain Science*, 2005 23(4): 399~ 405 [吴积善, 程尊兰, 耿学勇. 西藏东南部泥石流堵塞坝的形成机理 [J]. 山地学报, 2005 23(4): 399~ 405]
- [8] Han Qiwei, He Mingmin. Initiating Laws and Velocity for Sediment [M]. Beijing Science Press 1999: 1~ 2 [韩其为, 何明民. 泥沙起动规律及起动流速 [M]. 北京: 科学出版社, 1999: 1~ 2]
- [9] Lane E. W. Design of stable channels [J]. *Trans. ASCE*, 1995, 120: 1234~ 1279
- [10] Qian Ning, Zhang Ren, Zhou Zhile The Evolution of Reverbed [M]. Beijing Science Press 1987: 62~ 90. [钱宁, 张仁, 周志德. 河床演变学 [M]. 北京: 科学出版社, 1987: 62~ 90]
- [11] Lang Guangma, Cheng Zunlan Study on Road Water damage in Tibet [M]. Chengdu Sichuan Science and Technology Press 2005: 123~ 144. [梁光模, 程尊兰. 西藏公路水毁研究 [M]. 成都: 四川科学技术出版社, 2005: 123~ 144]
- [12] Du Ronghuan, Kang Zhicheng, Chen Xunqian, *et al* A Comprehensive Investigation and Control Planning for Debris Flow in the Xiaojiang River of Yunnan Province [M]. Chongqing Scientific and Technical Document Publishing House 1987: 62 [杜榕桓, 康志成, 陈循谦, 等. 云南小江泥石流综合考察与防治规划研究 [M]. 重庆: 科学技术文献出版社, 1987: 62]
- [13] Zhu Pingyi, He Zhen, Wang Yangchun, *et al* A study of typical mountain Hazards along Sichuan-Tibet Highway [M]. Chengdu Science and Technology Press House 1999: 19~ 156 [朱平一, 何子文, 汪阳春, 等. 川藏公路典型山地灾害研究 [M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1999: 19~ 156]
- [14] Lü Ruren The character, history and development in Liziyida Gut by [A]. In Debris Flow (3) [C]. Chongqing Scientific and Technical Document Publishing House 1984: 15~ 20 [吕儒仁. 利子依达沟泥石流形成特征、活动历史和发展趋势 [A]. 见: 泥石流 (3) [C]. 重庆: 科学技术文献出版社重庆分社, 1984: 15~ 20]
- [15] Lanzhou Institute of Glaciology and Cryopedology, Academia Sinica Traffic Science Institute of Gansu Province, China Debris flow in Gansu Province [M]. Beijing The Publishing House of People's Transportation 1982: 44~ 137 [中国科学院兰州冰川冻土研究所, 甘肃省交通科学研究所. 甘肃泥石流 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1982: 44~ 137]

Critical Conditions for Dam-forming due to Injunction of Debris Flow into Mainstream

DANG Chao^{1, 2, 3}, CHENG Zunlan^{1, 2}, LIU Jingjing^{1, 2, 3}

(1. Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface Process, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;

2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;

3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract The events of dam-forming due to injunction of debris flow into mainstream often occur in mountainous drainage basin. The critical conditions for dam-forming mainly including discharge ratio between tributary and mainstream, the confluent angles with of mainstream, resistance of debris flow against erosion and the slope of mainstream, are discussed herein and the 5 elements could be simplified by 4 dimensionless parameters through theoretical analysis. A dimensionless critical index for dam-forming is given on the basis of model test and other documents related to dam-forming and complete blockage in mainstream. The results showed that the critical value of damming was $C \geq 0.87$, and dam-forming process could not occur when the discharge ratio below 1. Historical damming events indicate that the critical index is feasible for most of the documented events of dam-forming.

Key word debris flow; mainstream; blockage; critical index for dam-forming