

泥石流流体性质与弯道幅度角对超高影响的实验研究

黄远红^{1,2,3}, 赵晋恒^{4,5}, 胡凯衡^{1,2}, 李浦^{1,2,3}

(1. 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. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 国网四川省电力公司技能培训中心, 四川成都 610072; 5. 四川电力职业技术学院, 四川成都 610072)

摘要:泥石流的弯道超高特性随泥石流的流体性质不同而有显著差异。开展了稀性、亚黏性和黏性3类泥石流的25组弯道超高水槽实验, 研究发现: 1) 泥石流过弯的液面倾角与流速的关系分为3个不同区间。当流速小于2.4 m/s时、大于3.0 m/s时, 泥石流液面倾角分别在24°、50°左右波动; 处于两者之间时, 液面倾角随流速线性增长。2) 不同类型泥石流超高最大值出现的位置有显著差异, 稀性、亚黏性和黏性泥石流弯道超高最大值分别出现在75°、60°和45°幅度角左右。3) 采用线性回归分析方法分析了弯道超高分布系数随幅度角正弦值的变化曲线, 得到两者之间呈三次多项式的经验关系。

关键词:弯道超高; 稀性泥石流; 亚黏性泥石流; 黏性泥石流; 水槽实验

中图分类号: P694; X43; X9

文献标志码: A

Investigation of influence of debris-flow properties and channel's turning angle on its super-elevation by flume experiments

HUANG Yuanhong^{1,2,3}, ZHAO Jinheng^{4,5}, HU Kaiheng^{1,2}, LI Pu^{1,2,3}

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

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

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Electric Power Company Training Center of Sichuan Province, Chengdu 610072, China; 5. Sichuan Electric Vocational and Technical College, Chengdu 610072, China)

Abstract: Debris-flow properties such as bulk density have a great effect on its super-elevation. An experimental setup combining straight and bending flumes is designed to study the super-elevation characteristics of diluted, sub-viscous and viscous debris flows, and twenty-five tests are carried out under different slopes and flow densities. It is found that: 1) In the middle of the bending channel, the dependence of the flow surface inclination on the flow velocity shows three distinctive sections. When the flow velocity is lower than 2.4 m/s, and is higher than 3 m/s, the values of surface inclination are around at 24° and 50° respectively; when the velocity between 2.4 m/s and 3 m/s, the inclination generally linearly increases. 2) The maximum values of super-elevation occur at different turning angles of the bending channel for the three types of debris flows. The turning angles to the maximum occurrence is 75° for the diluted flow, 60° for the sub-viscous flow, and 45° for the viscous flow. (3) Linear regression

收稿日期: 2016-06-21; 修回日期: 2017-06-28

基金项目: 国家自然科学基金(41371039); 国家重点基础研究发展计划(2015CB452704); 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室开放基金(Y3K2040040)

Supported by: National Natural Science Foundation of China (41371039); National Program on Key Basic Research Project(2015CB452704); Open Foundation of Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Processes, Chinese Academy of Sciences (Y3K2040040)

作者简介: 黄远红(1992-), 男, 硕士研究生, 主要从事山地灾害防治工程研究. E-mail: 18681633358@163.com

通讯作者: 胡凯衡(1975-), 男, 研究员, 博士, 主要从事泥石流减灾理论与技术、泥石流流体力学过程和数值模拟研究.

E-mail: khhu@imde.ac.cn

analysis of the experimental data presents an empirical relationship of cubic polynomial function between the normalized super-elevation and the sine of the turning angle.

Key words: super-elevation; diluted debris flow; sub-viscous debris flow; viscous debris flow; flume experiment

流体过弯时由于离心运动使得凹岸的液面比凸岸高,出现弯道超高现象。作为一种特殊的固液两相流,泥石流的弯道超高现象更为明显,常常翻越十几米高的沟岸造成人员伤亡和财产损失。比如,谢洪等^[1]报道了四川省石棉县唐家沟特大泥石流在沟口右岸S弯形成超高,跃上约10 m高的台地,冲毁台地上3处民宅,造成2人死亡。Muñoz-Salinas等^[2]对墨西哥火山泥石流进行了野外勘察,发现2001年爆发的一次泥石流弯道超高值达到了12.9 m,相当于普通民宅4层楼之高。因此,弯道超高研究对泥石流减灾来说非常重要。

国内外对泥石流弯道超高开展了大量研究。上世纪50年代,Knapp^[3]便通过受力平衡的原则,初步推导了泥石流弯道超高值的计算公式。水山高久^[4]开展了稀性泥石流的弯道水槽实验,得到稀性泥石流的超高公式。Hung^[5]统计了野外泥石流爆发后弯道凹岸、凸岸的泥痕值,修正了水山高久公式中的系数。康志成等^[6]认为由于泥石流流速快,惯性大,在弯道凹岸处弯道超高现象比水流更显著,同时根据弯道泥面横比降动力平衡条件,推导出计算弯道超高的公式。周必凡等^[7]从泥石流沿弯道运动时的受力平衡出发,推导了粘性泥石流弯道超高的计算公式。游勇^[8]对比分析了不同泥石流弯道超高计算公式,发现泥石流弯道超高理论计算值与实测值相差较大。后续的一些研究对超高公式进行了改进,如陈宁生等^[9]根据泥石流凹岸和凸岸的速度差建立了超高的计算公式,赵晋恒等^[10]提出了考虑爬高效应的弯道超高计算公式。

不同密度的泥石流性质差别较大。稀性泥石流运动时水石明显分离,整体性差,惯性相对小,遇弯易改变运动方向。粘性泥石流运动的结构性好,惯性大,易截弯取直^[11]。有些专家也研究了泥石流流体性质对弯道超高的影响。如蒋忠信^[12]讨论了稀性和粘性泥石流弯道超高的差异,认为粘性泥石流的弯道超高必须考虑粘聚力和粒间摩擦力,由此归纳了不同性质泥石流弯道超高的流速计算公式。但现有研究多关注泥石流性质和流速对最大超高值的影响,较少涉及泥石流性质对最大超高在弯道出现位置的影响。而泥石流弯道超高最大值出现的位置对弯道处防护工程的设计也是非常重要的。本文设计了泥石流弯道超高的水槽实验,对稀性、亚粘性和粘性泥石流过弯泥面倾角与流速的关系、最大超高的位置、弯道超高与幅度角的关系等开展了初步研究,并用实验数据验证了常用的弯道超高公式。

1 实验装置和条件

弯道水槽试验于2016年3—4月在中国科学院东川泥石流观测站开展。整个水槽试验装置包括料斗、直道水槽、弯道水槽、尾料池、泥痕记录板、泥位计以及其他辅助设备(见图1)。实验水槽分为两部分:直道

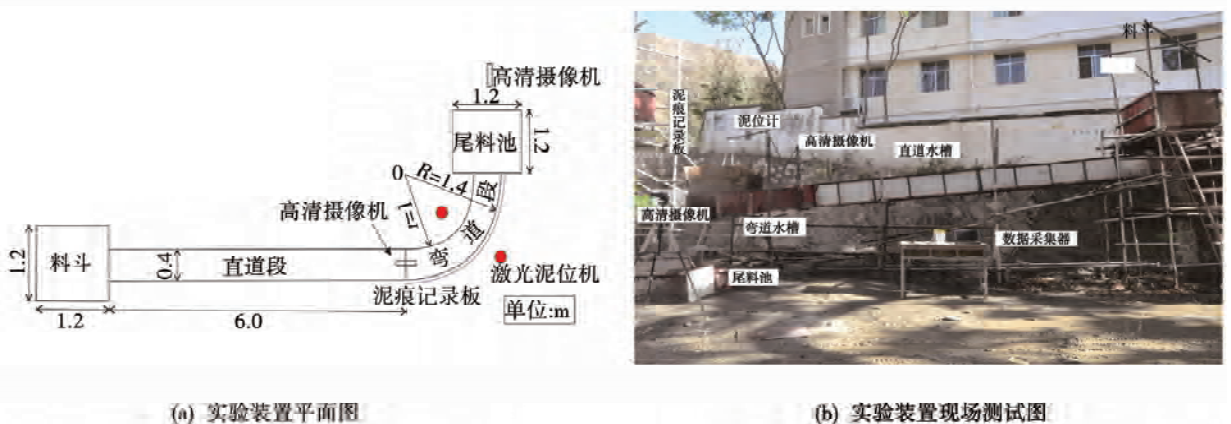


图1 水槽实验装置和测量系统

Fig. 1 Flume experiment setup and measuring system

部分和弯道部分。直道部分采用有机玻璃矩形槽,断面高0.4 m,断面宽0.4 m。弯道水槽旋转角度为 90° ,断面高0.4 m,宽0.4 m。幅度角 45° 断面中间安装了激光泥位计。实验中,泥石流通过直道部分加速流入弯道段产生超高,直道部分通过轱辘来调整坡度($8^\circ \sim 15^\circ$)。弯道的坡度与直道的坡度设置一致。直道同弯道连接处上方安装有高清摄像机,以获取泥石流入弯的流速值。泥石流流速的调节可通过变坡来实现。弯道结束段安装有高清摄像机,用于分析泥石流超高的形态特征。

实验所需的泥石流样品均采集于蒋家沟主沟。实验中,先筛去大于2 cm的粗颗粒,再将筛分出来的泥石流样品加水放入尾料池充分搅拌,使得泥石流固体颗粒和水充分混合。随机采集两个泥石流用土进行筛分,发现颗粒级配几乎是一样的(见图2)。

弯道内外侧泥位通过读取泥石流经过弯道时在内外壁和泥痕记录板上留下的泥痕得到(见图3)。同时,悬挂在弯道处的激光泥位计,记录了幅度角 45° 中间处的泥痕值随着时间的变化过程。泥石流龙头流速则利用位于直道末端的高清摄像机按帧读取,帧数为25帧/秒。Arratano and Marchi^[13]、Hurlimann^[14]、Genevois^[15]等均采用这种方法获得泥石流的龙头流速。

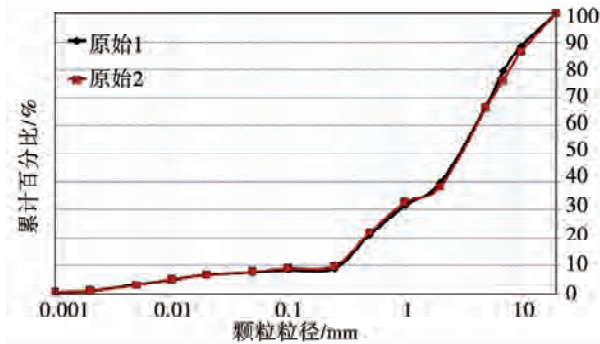


图2 实验所用泥石流样品颗分图

Fig. 2 Grain size distribution of debris-flow material in the experiments

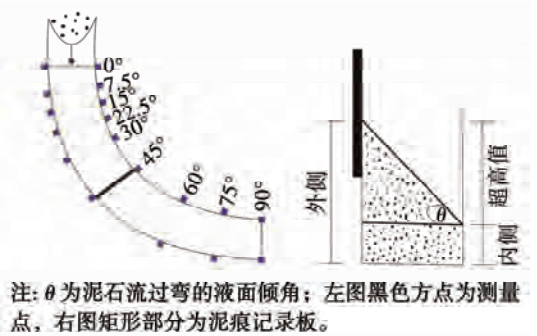


图3 实验弯道超高示意图

Fig. 3 Schematic graph of debris-flow superelevation in the experiments

实验主要研究不同水槽坡度和泥石流密度条件下泥石流过弯时内外侧泥位的分布。根据钟敦伦等研究^[16],将泥石流按流体性质分为稀性、亚黏性、黏性泥石流,密度区间分别为 $1\ 400 \sim 1\ 600\ \text{kg/m}^3$ 、 $1\ 600 \sim 2\ 000\ \text{kg/m}^3$ 、 $2\ 000 \sim 2\ 300\ \text{kg/m}^3$ 。水槽的坡度分别取 5° 、 10° 、 13° ,总共开展了25组水槽实验。其中, 5° 条件下,进行了5组稀性泥石流实验; 10° 条件下,进行了15组稀性、亚黏性、黏性泥石流实验; 13° 条件下进行了5组黏性泥石流实验。每次实验泥石流的初始总量均保持为 $0.2\ \text{m}^3$ 。实验时,在水槽末端用取样桶取样,获得每次实验泥石流密度。

2 实验现象分析

实验中3类泥石流弯道超高最大值均不是发生在刚进入弯道的时候,而是顺着弯道转过一定幅度角之后上升到最大高度,随后逐渐降低。不同流体性质泥石流的过弯运动特征明显不同。稀性泥石流过弯时,泥浆与石块分离,在弯道后半段才达到最大超高值。而黏性泥石流结构性强,水石没有明显分离,直进性强,在弯道一半左右就达到最大值(见图4)。

每次实验结束后,用钢尺测量弯道处的泥痕高度,泥痕高度为泥痕顶端到试验槽槽底的距离。超高值等于弯道内外侧泥痕高度的差值。表1归纳了本次实验所测得的泥痕、超高数据(不包括激光泥位计读取的数据)。

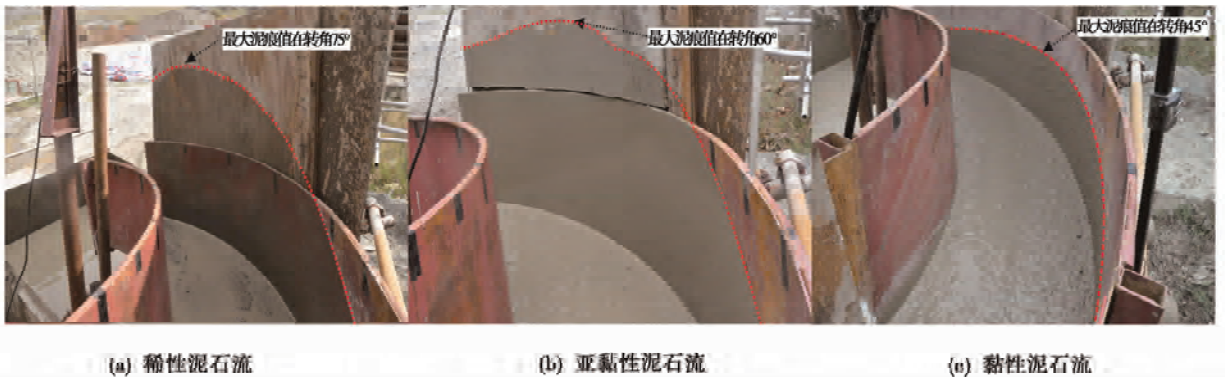


图 4 泥石流弯道运动泥痕图

Fig. 4 Photos of debris-flow superelevation traces with different debris-flow densities

表 1 25 次实验的坡度、流速、密度、泥痕值和超高值

Table 1 Values of slope, velocity, density, flow depth measured and superelevation value of the twenty-five tests

| 组号 | 泥石流性质 | 坡度/ $^{\circ}$ | 流速 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) | 密度 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) | 不同偏幅度角度处的泥痕值/cm | | | | | | | | | |
|----|-------|----------------|--|---|-----------------|---------------|--------------|----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|------|
| | | | | | 0° | 7.5° | 15° | 22.5° | 30° | 45° | 60° | 75° | 90° | |
| 1 | 稀性 | 5 | 3.5 | 1 422 | 外侧 | 9.6 | 13.4 | 17.6 | 26.3 | 34.9 | 48.5 | 50.6 | 58.6 | 57.2 |
| | | | | | 内侧 | 10.8 | 7.7 | 6.3 | 4.6 | 2.1 | 1.5 | 1 | 1 | 1 |
| | | | | | 超高值 | -1.2 | 5.7 | 11.3 | 21.7 | 32.8 | 47 | 49.6 | 57.6 | 56.2 |
| 2 | 稀性 | 5 | 3.32 | 1 511 | 外侧 | 11.2 | 15.5 | 23.4 | 29.8 | 33.7 | 44.9 | 52.3 | 57.1 | 52 |
| | | | | | 内侧 | 10.9 | 9.3 | 7.9 | 5.4 | 2.8 | 1.8 | 1 | 1 | 1 |
| | | | | | 超高值 | 0.3 | 6.2 | 15.5 | 24.4 | 30.9 | 43.1 | 51.3 | 56.1 | 51 |
| 3 | 稀性 | 5 | 3.13 | 1 471 | 外侧 | 8.9 | 13.5 | 19.4 | 26.1 | 29.3 | 41.8 | 47.1 | 57 | 54.4 |
| | | | | | 内侧 | 9.7 | 9.4 | 7.4 | 4.3 | 2.5 | 1.8 | 1 | 0.9 | 0.9 |
| | | | | | 超高值 | -0.8 | 4.1 | 12 | 21.8 | 26.8 | 40 | 46.1 | 56.1 | 53.5 |
| 4 | 稀性 | 5 | 3.44 | 1 552 | 外侧 | 10.1 | 13.5 | 16.8 | 24.6 | 32.1 | 43.5 | 46.6 | 55.5 | 54.2 |
| | | | | | 内侧 | 11.7 | 10.8 | 6.8 | 4.7 | 2.7 | 1.6 | 1.2 | 1 | 1 |
| | | | | | 超高值 | -1.6 | 2.7 | 10 | 19.9 | 29.4 | 41.9 | 45.4 | 54.5 | 53.2 |
| 5 | 稀性 | 5 | 3.19 | 1 581 | 外侧 | 9.8 | 13.5 | 17.6 | 24.4 | 30.7 | 41.8 | 48 | 50.6 | 49.5 |
| | | | | | 内侧 | 10.7 | 10.5 | 7.2 | 4.5 | 2.3 | 1.6 | 1.5 | 1.4 | 1.4 |
| | | | | | 超高值 | -0.9 | 3 | 10.4 | 19.9 | 28.4 | 40.2 | 46.5 | 49.2 | 48.1 |
| 6 | 稀性 | 10 | 3.62 | 1 597 | 外侧 | 9.2 | 13.8 | 19.2 | 27.6 | 36.9 | 58.4 | 73.5 | 75.8 | 71 |
| | | | | | 内侧 | 11.6 | 13.5 | 3.6 | 3.2 | 2.3 | 1.5 | 1 | 1.3 | 1.3 |
| | | | | | 超高值 | -2.4 | 0.3 | 15.6 | 24.4 | 34.6 | 56.9 | 72.5 | 74.5 | 69.7 |
| 7 | 稀性 | 10 | 3.87 | 1 527 | 外侧 | 11.5 | 15.2 | 21.3 | 25.8 | 30.4 | 46.7 | 65.3 | 74.1 | 72.6 |
| | | | | | 内侧 | 13.3 | 16 | 9.3 | 2.2 | 1.5 | 1 | 1.8 | 1.3 | 1 |
| | | | | | 超高值 | -1.8 | -0.8 | 12 | 23.6 | 28.9 | 45.7 | 63.5 | 72.8 | 71.6 |
| 8 | 稀性 | 10 | 3.38 | 1 561 | 外侧 | 7.4 | 14.4 | 25.6 | 27.4 | 30.7 | 43.3 | 59.4 | 69.7 | 66.4 |
| | | | | | 内侧 | 8.5 | 9.5 | 8.5 | 2.3 | 1.2 | 1.1 | 1.3 | 1 | 0.8 |
| | | | | | 超高值 | -1.1 | 4.9 | 17.1 | 25.1 | 29.5 | 42.2 | 58.1 | 68.7 | 65.6 |
| 9 | 稀性 | 10 | 3.5 | 1 500 | 外侧 | 10.8 | 13.4 | 18.5 | 25.6 | 33.1 | 51.3 | 72.9 | 78.4 | 70.5 |
| | | | | | 内侧 | 11.3 | 12.2 | 7.1 | 3 | 1.8 | 1.5 | 1.4 | 2 | 1.6 |
| | | | | | 超高值 | -0.5 | 1.2 | 11.4 | 22.6 | 31.3 | 49.8 | 71.5 | 76.4 | 68.9 |
| 10 | 稀性 | 10 | 3.45 | 1 448 | 外侧 | 9.4 | 15.3 | 18.6 | 23.8 | 30.7 | 46.2 | 66.5 | 72 | 70 |
| | | | | | 内侧 | 8.7 | 10.5 | 7.4 | 4.2 | 1.8 | 1.3 | 1.8 | 1.4 | 1.6 |
| | | | | | 超高值 | 0.7 | 4.8 | 11.2 | 19.6 | 28.9 | 44.9 | 64.7 | 70.6 | 68.4 |

续表

| 组号 | 泥石流 性质 | 坡度/° | 流速 (m·s ⁻¹) | 密度 (kg·m ⁻³) | 不同偏幅度角度处的泥痕值/cm | | | | | | | | | |
|----|-----------|------|----------------------------|-----------------------------|-----------------|------|------|-------|------|------|------|------|------|------|
| | | | | | 0° | 7.5° | 15° | 22.5° | 30° | 45° | 60° | 75° | 90° | |
| 11 | 亚黏性 | 10 | 3.25 | 1 765 | 外侧 | 9.8 | 14.6 | 18.1 | 26.7 | 35.8 | 50.3 | 58.5 | 57 | 54.2 |
| | | | | | 内侧 | 11.1 | 10.2 | 6.8 | 3.7 | 1.9 | 1.4 | 1.1 | 1.5 | 1.5 |
| | | | | | 超高值 | -1.3 | 4.4 | 11.3 | 23 | 33.9 | 48.9 | 57.4 | 55.5 | 52.7 |
| 12 | 亚黏性 | 10 | 3.12 | 1 941 | 外侧 | 7.9 | 9.9 | 15.1 | 24.8 | 33.3 | 40.5 | 49.3 | 47 | 44.5 |
| | | | | | 内侧 | 10.3 | 7.1 | 6.2 | 3.6 | 2.3 | 1.3 | 1.2 | 1 | 1 |
| | | | | | 超高值 | -2.4 | 2.8 | 8.9 | 21.2 | 31 | 39.2 | 48.1 | 46 | 43.5 |
| 13 | 亚黏性 | 10 | 3.18 | 1 686 | 外侧 | 8.1 | 10.4 | 13.8 | 20.4 | 30.5 | 50.1 | 59.4 | 57.6 | 55.1 |
| | | | | | 内侧 | 9.8 | 9.5 | 6 | 3.6 | 2.5 | 1.8 | 1.3 | 1.2 | 1 |
| | | | | | 超高值 | -1.7 | 0.9 | 7.8 | 16.8 | 28 | 48.3 | 58.1 | 56.4 | 54.1 |
| 14 | 亚黏性 | 10 | 2.75 | 1 863 | 外侧 | 9.9 | 13.4 | 16.3 | 21.5 | 28 | 38.4 | 43.9 | 42.5 | 35.3 |
| | | | | | 内侧 | 9.3 | 7.6 | 5.8 | 3.5 | 1.8 | 1 | 1 | 1.2 | 1.2 |
| | | | | | 超高值 | 0.6 | 5.8 | 10.5 | 18 | 26.2 | 37.4 | 42.9 | 41.3 | 34.1 |
| 15 | 亚黏性 | 10 | 2.98 | 1 812 | 外侧 | 7.6 | 11.4 | 18.4 | 23.4 | 32.6 | 49.6 | 57.5 | 56.4 | 55.5 |
| | | | | | 内侧 | 8.1 | 6.4 | 4.2 | 2.7 | 1.5 | 1 | 0.9 | 0.9 | 0.9 |
| | | | | | 超高值 | -0.5 | 5 | 14.2 | 20.7 | 31.1 | 48.6 | 56.6 | 55.5 | 54.6 |
| 16 | 黏性 | 10 | 2.16 | 2 023 | 外侧 | 8.4 | 13.2 | 17.5 | 19.8 | 21.8 | 23.5 | 19.5 | 17.7 | 16.2 |
| | | | | | 内侧 | 8.8 | 6.4 | 4.3 | 4 | 3.6 | 3.3 | 2.8 | 4.6 | 3.3 |
| | | | | | 超高值 | -0.4 | 6.8 | 13.2 | 15.8 | 18.2 | 20.2 | 16.7 | 13.1 | 12.9 |
| 17 | 黏性 | 10 | 2.19 | 2 078 | 外侧 | 9.5 | 13.4 | 17.5 | 20.4 | 22.5 | 23.7 | 19.9 | 17.1 | 15.3 |
| | | | | | 内侧 | 7.9 | 6 | 4.7 | 3.9 | 3.4 | 3.3 | 2.9 | 2.3 | 1.8 |
| | | | | | 超高值 | 1.6 | 7.4 | 12.8 | 16.5 | 19.1 | 20.4 | 17 | 14.8 | 13.5 |
| 18 | 黏性 | 10 | 1.83 | 2 112 | 外侧 | 9.6 | 12.8 | 15.4 | 18.5 | 20.3 | 22.5 | 19.8 | 18.2 | 17.8 |
| | | | | | 内侧 | 9.8 | 8.8 | 6.1 | 5.1 | 4.2 | 3.8 | 4.1 | 3.1 | 3 |
| | | | | | 超高值 | -0.2 | 4 | 9.3 | 13.4 | 16.1 | 18.7 | 15.7 | 15.1 | 14.8 |
| 19 | 黏性 | 10 | 2.42 | 2 132 | 外侧 | 8.9 | 12.4 | 14.3 | 16.6 | 19.3 | 20.7 | 19 | 16.4 | 16 |
| | | | | | 内侧 | 9.8 | 8.5 | 6.3 | 5 | 4.4 | 4 | 5.3 | 3.1 | 3 |
| | | | | | 超高值 | -0.9 | 3.9 | 8 | 11.6 | 14.9 | 16.7 | 13.7 | 13.3 | 13 |
| 20 | 黏性 | 10 | 1.95 | 2 172 | 外侧 | 10.3 | 12.2 | 13.8 | 15.3 | 17.2 | 18.5 | 17.3 | 16.7 | 15 |
| | | | | | 内侧 | 11.1 | 9.9 | 7.8 | 6.7 | 6.2 | 5.5 | 4.8 | 4.5 | 3 |
| | | | | | 超高值 | -0.8 | 2.3 | 6 | 8.6 | 11 | 13 | 12.5 | 12.2 | 12 |
| 21 | 黏性 | 13 | 2.58 | 2 028 | 外侧 | 9.6 | 15.8 | 18.9 | 22.2 | 25.1 | 28.1 | 23.4 | 20.6 | 19 |
| | | | | | 内侧 | 8.9 | 7.8 | 5.7 | 4.6 | 4.6 | 4.6 | 4.5 | 5 | 4.5 |
| | | | | | 超高值 | 0.7 | 8 | 13.2 | 17.6 | 20.5 | 23.5 | 18.9 | 15.6 | 14.5 |
| 22 | 黏性 | 13 | 2.17 | 2 059 | 外侧 | 11.6 | 15.5 | 18.3 | 20.3 | 22.3 | 24.1 | 22.2 | 16.6 | 14.3 |
| | | | | | 内侧 | 9.5 | 8.9 | 7.2 | 5.9 | 6 | 5.9 | 7 | 6 | 4.5 |
| | | | | | 超高值 | 2.1 | 6.6 | 11.1 | 14.4 | 16.3 | 18.2 | 15.2 | 10.6 | 9.8 |
| 23 | 黏性 | 13 | 2.21 | 2 082 | 外侧 | 10.7 | 16.3 | 19.1 | 21.9 | 25 | 26.3 | 23.4 | 20 | 18.8 |
| | | | | | 内侧 | 9.7 | 8.9 | 7 | 5.4 | 5.4 | 5.1 | 6.2 | 5.8 | 5 |
| | | | | | 超高值 | 1 | 7.4 | 12.1 | 16.5 | 19.6 | 21.2 | 17.2 | 14.2 | 13.8 |
| 24 | 黏性 | 13 | 2.25 | 2 112 | 外侧 | 10.4 | 14.9 | 18.3 | 19.6 | 21.9 | 23.5 | 22 | 19 | 16.7 |
| | | | | | 内侧 | 9.5 | 8.2 | 6.7 | 5.5 | 5.5 | 5.4 | 6.1 | 5.4 | 4.2 |
| | | | | | 超高值 | 0.9 | 6.7 | 11.6 | 14.1 | 16.4 | 18.1 | 15.9 | 13.6 | 12.5 |
| 25 | 黏性 | 13 | 1.95 | 2 156 | 外侧 | 13.5 | 17.4 | 19.8 | 21.3 | 22.5 | 24.6 | 20.2 | 18.2 | 15.8 |
| | | | | | 内侧 | 12.6 | 12.4 | 10.7 | 10.4 | 10.1 | 11.1 | 8.9 | 7.3 | 6.3 |
| | | | | | 超高值 | 0.9 | 5 | 9.1 | 10.9 | 12.4 | 13.5 | 11.3 | 10.9 | 9.5 |

通过分析观察到的实验现象和实验数据,可以得知:

1)在弯道中段(即幅度角为 45°的横截面),泥石流液面倾角随流速的变化趋势可以分为 3 个区间(图 5)。当流速小于 2.4 m/s 时,泥石流液面倾角变化幅度较小,均值约为 24°;当泥石流流速大于 2.4 m/s 小于 3.0 m/s 时,液面倾角大致呈线性增大的趋势;当泥石流流速大于 3.0 m/s 时,液面倾角在 50°左右波动。

2)坡度为 5°、10°的两组稀性泥石流弯道超高最大值均发生在幅度角 75°处左右(见图 6(a))。其中坡度为 5°的一组稀性泥石流密度均值为 1 507 kg/m³、流速均值为 3.12 m/s、最大弯道超高均值为 54.7 cm;坡度为 10°的一组稀性泥石流密度均值为 1 527 kg/m³、流速均值为 3.56 m/s、最大弯道超高均值为 72.6 cm;可得出在泥石流流体性质相似的情况下,流速越大泥石流水石分离,离心运动更强烈,导致弯道超高值越大。

3)在实验坡度相同的情况下,稀性、亚黏性、黏性泥石流的过弯运动特征明显不一样(图 6b)。稀性、亚黏性、黏性泥石流弯道超高最大值分别出现在幅度角 75°、60°、45°处左右,表明随着泥石流容重的增加,泥石流弯道超高最大值出现的位置越早;泥石流进入弯道以后,稀性、亚粘性、粘性泥石流弯道超高值增大速率依次减小。

4)坡度为 10°、13°的两组黏性泥石流弯道超高最大值均发生在幅度角 45°处左右(见图 6(c))。其中坡度为 10°的一组黏性泥石流密度均值为 2 103 kg/m³、流速均值为 2.11 m/s、最大弯道超高均值为 17.8 cm,坡度为 13°的一组黏性泥石流密度均值为 2 087 kg/m³、流速均值为 2.23 m/s、最大弯道超高均值为 18.9 cm。在泥石流流体性质相似、流速相差不大的情况下,泥石流弯道超高值大小、出现的位置、增大的速率基本一致。

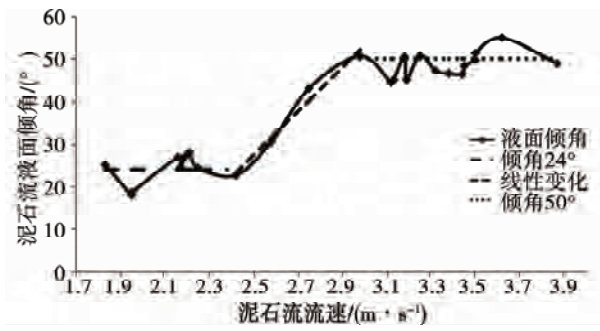


图 5 泥石流流速与液面倾角的关系

Fig. 5 Relation between the velocity and the surface inclination of debris flow

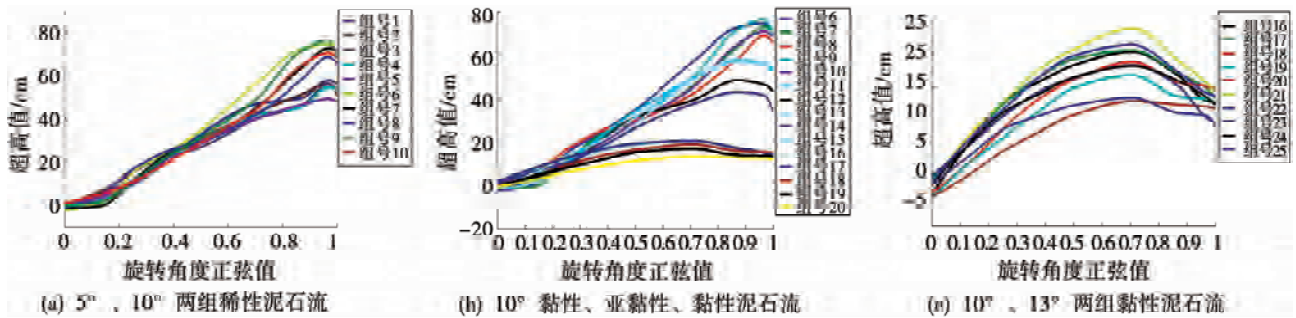


图 6 泥石流弯道超高值与幅度角正弦值的关系

Fig. 6 Relation between debris-flow superlevation and the turning angle's sine

3 实验结果分析

3.1 弯道超高值公式的验证

表 2 是现有的几类弯道超高计算公式。为了验证不同类型泥石流条件下这几个计算公式的适用性,将实验中获得计算弯道超高值的参数代入下面 5 个计算公式。其中, $R = 1.2 \text{ m}$ 、 $B = 0.4 \text{ m}$ 、 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 、 $k = 2$ 、 $\varphi = 4.5^\circ$ 、 $c = 0.088 \text{ kN/m}^2$ 。 $H\beta$ 根据蒋忠信^[12]的计算方法以每次实验泥石流实际测得数据计算,最后得到 5 个公式计算的弯道超高最大值(见表 3)。

表 2 国内外常用的泥石流超高计算公式

Table 2 Commonly used superelevation formula to calculate debris-flow velocity at home and abroad

| 序号 | 年份 | 超高公式 | 适用条件 | 作者 |
|-----|------|---|-----------|---------------------|
| 式 1 | 1981 | $\Delta h = kBv^2/Rg$ | 稀性泥石流、水石流 | 水山高久 ^[4] |
| 式 2 | 1991 | $\Delta h = B \left[\frac{v^2}{gR \cos \beta} + \tan \varphi \right]$ | 黏性泥石流 | 周必凡 ^[7] |
| 式 3 | 2007 | $\Delta h = B \left[\frac{v^2}{gR} + \tan \varphi + c / (H\gamma \cos^2 \beta) \right]$ | 黏性泥石流 | 蒋忠信 ^[12] |
| 式 4 | 2007 | $\Delta h = B \left(\frac{v^2}{gR} + \tan \varphi \right)$ | 稀性泥石流 | 蒋忠信 ^[12] |
| 式 5 | 2015 | $\Delta h = \left[0.2(4 - (1 + e)^2) \sin \varphi + \frac{(1 - e^2)}{2} \right] \frac{v^2}{g}$ | 稀、黏性泥石流 | 赵晋恒 ^[10] |

注: Δh 为弯道超高值, m; k 为弯道超高系数, 常取 1.5 ~ 2.0; R 为弯道中心曲率半径, m; B 为沟道宽度, m; v 为泥石流流速, m/s; g 为重力加速度, m/s²; H 为泥石流平均泥深, m; γ 为泥石流重度, N/m³; c 为泥石流粘聚力, 单位 kN/m²; β 为泥面斜度, °; φ 为内摩擦角, °; e 为弯道内外半径之比。

表 3 实验最大超高数据和不同公式计算结果

Table 3 Superelevation data and calculated values by the formulas

| 组号 | 泥石流性质 | β° | H m | 流速/ (m·s ⁻¹) | 密度/ (kg·m ⁻³) | 实验最 大超高值 | 公式 1 | 公式 2 | 公式 3 | 公式 4 | 公式 5 |
|----|-------|---------------|----------|-----------------------------|------------------------------|-------------|------|------|------|------|------|
| 1 | 稀性 | 55 | 0.39 | 3.5 | 1 422 | 0.58 | 0.83 | 0.76 | 0.47 | 0.45 | 0.52 |
| 2 | 稀性 | 55 | 0.39 | 3.32 | 1 511 | 0.56 | 0.75 | 0.68 | 0.42 | 0.41 | 0.47 |
| 3 | 稀性 | 55 | 0.37 | 3.13 | 1 471 | 0.56 | 0.67 | 0.61 | 0.38 | 0.37 | 0.42 |
| 4 | 稀性 | 54 | 0.38 | 3.44 | 1 552 | 0.55 | 0.81 | 0.71 | 0.45 | 0.43 | 0.50 |
| 5 | 稀性 | 51 | 0.35 | 3.19 | 1 581 | 0.49 | 0.69 | 0.58 | 0.39 | 0.38 | 0.43 |
| 6 | 稀性 | 62 | 0.48 | 3.62 | 1 597 | 0.75 | 0.89 | 0.97 | 0.50 | 0.48 | 0.58 |
| 7 | 稀性 | 61 | 0.49 | 3.87 | 1 527 | 0.73 | 1.02 | 1.09 | 0.56 | 0.54 | 0.66 |
| 8 | 稀性 | 60 | 0.42 | 3.38 | 1 561 | 0.69 | 0.78 | 0.80 | 0.44 | 0.42 | 0.50 |
| 9 | 稀性 | 62 | 0.49 | 3.5 | 1 500 | 0.76 | 0.83 | 0.93 | 0.47 | 0.45 | 0.54 |
| 10 | 稀性 | 60 | 0.44 | 3.45 | 1 448 | 0.71 | 0.81 | 0.85 | 0.46 | 0.44 | 0.52 |
| 11 | 亚黏性 | 55 | 0.39 | 3.25 | 1 765 | 0.57 | 0.72 | 0.66 | 0.41 | 0.39 | 0.45 |
| 12 | 亚黏性 | 50 | 0.33 | 3.12 | 1 941 | 0.48 | 0.66 | 0.55 | 0.38 | 0.36 | 0.41 |
| 13 | 亚黏性 | 55 | 0.38 | 3.18 | 1 686 | 0.58 | 0.69 | 0.64 | 0.39 | 0.38 | 0.43 |
| 14 | 亚黏性 | 47 | 0.31 | 2.75 | 1 863 | 0.43 | 0.51 | 0.41 | 0.30 | 0.29 | 0.31 |
| 15 | 亚黏性 | 55 | 0.36 | 2.98 | 1 812 | 0.57 | 0.56 | 0.52 | 0.33 | 0.31 | 0.35 |
| 16 | 黏性 | 27 | 0.19 | 2.16 | 2 023 | 0.20 | 0.32 | 0.21 | 0.20 | 0.19 | 0.16 |
| 17 | 黏性 | 27 | 0.19 | 2.19 | 2078 | 0.20 | 0.33 | 0.22 | 0.21 | 0.20 | 0.17 |
| 18 | 黏性 | 25 | 0.19 | 1.83 | 2 112 | 0.19 | 0.23 | 0.16 | 0.16 | 0.15 | 0.11 |
| 19 | 黏性 | 23 | 0.18 | 2.42 | 2 132 | 0.17 | 0.40 | 0.25 | 0.24 | 0.23 | 0.20 |
| 20 | 黏性 | 18 | 0.17 | 1.95 | 2 172 | 0.13 | 0.26 | 0.17 | 0.17 | 0.16 | 0.12 |
| 21 | 黏性 | 30 | 0.21 | 2.58 | 2 028 | 0.24 | 0.45 | 0.29 | 0.27 | 0.26 | 0.24 |
| 22 | 黏性 | 24 | 0.20 | 2.17 | 2 059 | 0.18 | 0.32 | 0.21 | 0.20 | 0.19 | 0.16 |
| 23 | 黏性 | 28 | 0.21 | 2.21 | 2 082 | 0.21 | 0.33 | 0.22 | 0.21 | 0.20 | 0.17 |
| 24 | 黏性 | 24 | 0.19 | 2.25 | 2 112 | 0.18 | 0.34 | 0.22 | 0.22 | 0.20 | 0.17 |
| 25 | 黏性 | 19 | 0.20 | 1.95 | 2 156 | 0.14 | 0.26 | 0.17 | 0.17 | 0.16 | 0.12 |

通过比较实验得到的最大超高数据和不同公式的计算值, 可以发现:

1) 式(1)、式(2)的计算结果偏大, 总的平均实验结果偏差分别为 46%、20%。因公式 1 涉及的计算特征值 k 为 2.0, 若取 1.5 ~ 2.0 来计算泥石流的超高值则效果会很好。同时公式 1 对稀性、亚黏性、黏性泥石流平均实验结果偏差分别为 28%、20%、78%, 式(2)对稀性、亚粘性、粘性泥石流平均实验结果偏差分别为 25%、11%、19%, 故式(1)对稀性、亚粘性泥石流适用更好。式(2)稀性、亚粘性、粘性均可适用。

2) 式(3)、式(4)、式(5)的计算结果相差不大, 总的平均实验结果偏差分别为 24%、24%、19%, 均小于 25%。在用于计算稀性泥石流时, 计算结果偏小, 实验结果偏差分别为 28%、31%、19%; 而在计算粘性泥石流时, 式(3)、式(4)计算结果偏大, 式(5)计算结果偏小。实验结果的平均偏差分别为 13%、15%、15%, 对

于亚粘性泥石流偏差分别为 31%、34%、26%；。可以认为式(3)、式(4)较适用于黏性泥石流,式(5)对稀性、亚黏性、黏性泥石流的计算结果均较好。

3)对比分析式(1) - 式(5),可以得知:稀性泥石流、亚黏性泥石流、黏性泥石流分别使用式(5)、式(2)、式(3)计算泥石流弯道超高值效果最好,其计算偏差分别为 19%、11%、13%。

3.2 弯道超高与幅度角的关系

泥石流流速对弯道超高具有重要影响,实验中流速越大时弯道最大超高值也越大。但是,弯道超高值的分布和最大超高值出现的位置有一定的规律。为了单纯分析超高值沿弯道幅度角的变化,需要消除泥石流流速对弯道超高的影响。基于 3.1 节分析,选取式(5)、式(2)、式(3)计算的稀性、亚黏性、黏性泥石流弯道最大超高值为特征高度,对实验得到的弯道超高值进行无量纲化为

$$K = \frac{h}{H} \tag{1}$$

式中:K 为无量纲化后的弯道超高值,称为弯道超高分布系数(见表 4),h 为某个幅度角处弯道超高实测值,H 分别为式(5)、式(2)、式(3)计算的弯道最大超高值。为了避免实验的随机性、尽量减少实验误差,统计了同一流体性质条件下不同幅度角处多次实验的平均 K 值。对 K 和幅度角正弦值的关系进行回归分析,发现两者存在显著的三次多项式关系,同时拟合了三次多项式各项系数 95% 置信区间和方差(见表 5):

表 4 弯道超高分布系数 K

Table 4 Superelevation characteristic coefficient K

| 幅度角 | 幅度角正弦值 | 稀性泥石流 | 亚粘性泥石流 | 粘性泥石流 |
|-------|--------|-------|--------|-------|
| 0° | 0 | -0.02 | -0.02 | 0.02 |
| 7.5° | 0.13 | 0.07 | 0.07 | 0.31 |
| 15° | 0.26 | 0.25 | 0.20 | 0.57 |
| 22.5° | 0.38 | 0.44 | 0.37 | 0.74 |
| 30° | 0.5 | 0.59 | 0.55 | 0.88 |
| 45° | 0.71 | 0.88 | 0.81 | 0.98 |
| 60° | 0.87 | 1.11 | 0.96 | 0.83 |
| 75° | 0.97 | 1.24 | 0.93 | 0.72 |
| 90° | 1 | 1.18 | 0.86 | |

1)稀性泥石流,弯道超高分布系数 K 与幅度角 θ 的正弦值存在以下经验关系(见图 7)为

$$K = -1.116 \sin^3 \theta + 1.67 \sin^2 \theta + 0.69 \sin \theta - 0.026 (0^\circ < \theta < 90^\circ), R^2 = 0.997. \tag{2}$$

2)亚黏性泥石流,弯道超高分布系数 K 同幅度角 θ 的正弦值存在以下经验关系(见图 7)为

$$K = -2.488 \sin^3 \theta + 3.28 \sin^2 \theta + 0.104 \sin \theta - 0.007 (0^\circ < \theta < 90^\circ), R^2 = 0.997. \tag{3}$$

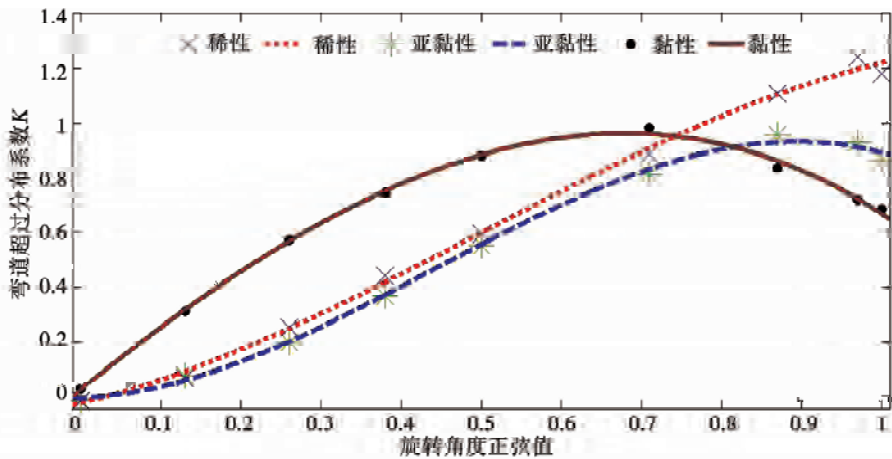


图 7 弯道超高分布系数 K 与幅度角正弦的关系及拟合曲线

Fig. 7 Relation between the superelevation characteristic coefficient K and turning angle's sine as well as its fitted curve

表 5 拟合关系各项系数 95% 置信区间和方差

Table 5 95% confidence limit of the coefficient and SSE of fitting relationship

| 流体性质 | 三次项 | 二次项 | 一次项 | 常数项 | 和方差 |
|------|----------------|---------------|---------------|---------------|-------|
| 稀性 | [-2.26, 0.03] | [-0.07, 3.4] | [-0.01, 1.39] | [-0.1, 0.05] | 0.011 |
| 亚黏性 | [-3.3, -1.65] | [2.02, 4.51] | [-0.39, 0.61] | [-0.06, 0.05] | 0.003 |
| 黏性 | [-1.49, -0.14] | [-1.95, 0.09] | [1.97, 2.79] | [-0.02, 0.07] | 0.002 |

3) 黏性泥石流, 弯道超高分布系数 K 与幅度角 θ 的正弦值存在以下经验关系(图 7)为

$$K = -0.83 \sin^3 \theta - 0.901 \sin^2 \theta + 2.377 \sin \theta - 0.021 \quad (0^\circ < \theta < 90^\circ), R^2 = 0.998. \quad (4)$$

4 结 论

泥石流流体性质对弯道超高有重要的影响, 比如超高最大值的大小、出现的位置和过弯液面倾角等。通过 25 组不同流体性质和坡度的泥石流弯道超高实验, 得到以下结论:

(1) 在弯道中段, 泥石流液面倾角与流速的关系可以分为 3 个不同区间。当流速小于 2.4 m/s 时、大于 3 m/s 时, 泥石流液面幅度角随流速变化幅度较少, 分别在 24° 、 50° 左右波动; 当泥石流流速从 2.4 m/s 增大至 3 m/s 时, 泥石流液面倾角大致呈线性增大的趋势。

(2) 虽然泥石流的最高值依赖于泥石流类型和流速。但是不同类型泥石流最高值出现的位置有一定的规律性。稀性、亚黏性、黏性泥石流弯道最大值分别在幅度角 75° 、 60° 、 45° 处左右。随着泥石流密度的增加, 弯道超高值最大值出现的位置越靠前。

(3) 统计了同一流体性质条件下不同幅度角处多次实验的平均 K 值。对 K 和幅度角正弦值的关系进行回归分析, 得到分布系数 K 为弯道幅度角正弦值的三次多项式函数。

本研究得到的结果可以在只知道泥石流流体性质的情况下判断弯道最大超高值出现的可能位置, 为弯道处泥石流防护工程设计提供一定的参考。当然, 下一步还需开展泥石流弯道超高野外观测对比研究, 对实验结果进行深入分析。

参 考 文 献:

- [1] 谢洪, 刘维明, 赵晋恒, 等. 2012 年“7·14”唐家沟泥石流灾害特征[J]. 地球科学与环境学报, 2013, 35(4): 90-97.
XIE Hong, LIU Weiming, ZHAO Jinheng, et al. Characteristics of Tangjiagou debris flow in Shimian of Sichuan in July 14, 2012[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2013, 35(4): 90-97.
- [2] Munoz-Salinas E, Manea V C, Palacios D, et al. Estimation of lahar flow velocity on popocatepetl volcano (Mexico)[J]. Geomorphology, 2007, 92(1): 91-99.
- [3] Knapp RT. Design of channel curves for supercritical flow: Tran[J]. ASCE, 1951, 116: 296-325.
- [4] 水山高久. 河湾上泥石流的流态[G]. 泥石流译文集(三). 铁道部科学研究院西南研究所, 1985: 72-79.
Mizukami, Uehara (Japan). The Flow Pattern of Debris Flow on River Bend[G]. Translations of Debris Flow (3). Southwest Institute of Scientific Research, Ministry of Railways, 1985: 72-79.
- [5] Hungr O, Morgan G C, Kellerhals R. Quantitative analysis of debris torrent hazards for design of remedial measures[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1984, 21(4): 663-677.
- [6] 康志成, 李焯芬, 马嵩乃, 等. 中国泥石流研究[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 182-185.
KANG Zhicheng, LI Zhuofen, MA Ainai, et al. Study on Debris Flow in China[M]. Beijing: Science Press, 2004: 182-185.
- [7] 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: 75-79.
ZHOU Bifan, LI Deji, LUO Defu, et al. Guidelines of Debris Flow Prevention[M]. Beijing: Science Press, 1991: 75-79.
- [8] 游勇. 泥石流弯道超高浅析[J]. 四川水利, 1994, 15(1): 18-20.
YOU Yong. Debris-flow super-elevation[J]. Sichuan Water Resources, 1994, 15(1): 18-20.
- [9] 陈宁生, 杨成林, 李战鲁, 等. 泥石流弯道超高与流速计算关系的研究—以巴塘通戈顶沟地震次生泥石流为例[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2009, 41(3): 165-171.
CHEN Ningsheng, YANG Chenglin, LI Zhanlu, et al. Research on the relationship between the calculation of debris flow velocity and its super elevation in bend[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2009, 41(3): 165-171.
- [10] 赵晋恒, 胡凯衡, 唐金波, 等. 考虑爬高效应的泥石流弯道超高公式[J]. 水利学报, 2015, 45(2): 190-196.
ZHAO Jinheng, HU Kaiheng, TANG Jinbo, et al. A modified debris-flow super-elevation formula with the run-up effect[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 45(2): 190-196.
- [11] 陈洪凯, 唐红梅, 鲜学福. 沟谷泥石流运动过程模型试验[J]. 自然灾害学报, 2009, 18(6): 160-165.
CHEN Hongkai, TANG Hongmei, XIAN Xuefu. Model test of valley-shaped debris flow motion[J]. Journal of Natural Disasters, 2009, 18(6): 160-165.
- [12] 蒋忠信. 基于弯道超高计算泥石流流速的探讨[J]. 岩土工程技术, 2007, 21(6): 288-291.
JIANG Zhongxin. Current velocity calculation of debris flow based on excess-height in bend[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2007, 21(6): 288-291.
- [13] Arattano M, Marchi L. Measurements of debris flow velocity through cross-correlation of instrumentation data[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2005, 5(1): 137-142.
- [14] Hürlimann M, Rickenmann D, Graf C. Field and monitoring data of debris flow events in the swiss alps[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2003, 40(1): 161-175.
- [15] Genevois R, Galgaro A, Tecca P R. Image analysis for debris-flow properties estimation[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Part C: Solar, Terrestrial & Planetary Science, 2001, 26(9): 623-631.
- [16] 钟敦伦, 谢洪. 泥石流灾害及防治技术[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 2014: 147-149.
ZHONG Dunlun, XIE Hong. Hazard and Prevention of Debris Flow[M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 2014: 147-149.