

文章编号:0559-9350(2017)04-0473-07

泥石流龙头的形成及特征研究

王 洋¹, 崔 鹏^{1,2}, 王兆印³, 梁双庆¹

(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重点实验室, 四川 成都 610041;

2. 中国科学院青藏高原地球科学卓越创新中心, 北京 100101; 3. 清华大学 水利水电工程系, 北京 100084)

摘要: 泥石流龙头的高度反映了泥石流的规模, 是防治工程的重要参数之一。陡峻的地形、大量松散固体物质、丰富的水源构成了泥石流发生的三大要素, 同时也是影响泥石流龙头高度的重要因素。通过采用均质沙及宽级配沙进行水槽实验, 探究泥石流运动过程中龙头高度与沟道物质级配、流量、坡度之间的关系, 提出泥石流龙头高度随流量、坡度、平均粒径、细沙含量的增加, 呈先上升后下降的趋势。利用回归分析方法, 采用水流功率的概念, 建立了泥石流龙头高度计算模型, 并采用其他科学家的试验数据进行了验证, 可为预测不同条件下泥石流规模提供科学依据。

关键词: 泥石流; 均质沙; 宽级配沙; 龙头高度; 水流功率

中图分类号: P642.23

文献标志码: A

doi: 10.13243/j.cnki.slxb.20160071

1 研究背景

泥石流在运动过程中, 大颗粒物质向龙头聚集, 形成高陡龙头, 比龙身和龙尾具有更大的固体含量和冲击力^[1], 下切沟床, 冲刷沟岸, 撞击排导槽、桥墩, 破坏桥梁, 堵塞江河, 掩埋房屋等^[2-3]。泥石流龙头的高度是泥石流危险性评价与防治工程设计中的主要参数, 直接关系到泥石流流速、冲击力等特征参数的计算, 是泥石流动力学的重要科学问题之一。魏鸿^[4]提出泥石流冲击力计算模型均与泥石流深度有关。韦方强等^[5]提出泥石流流深是危险性分区的重要指标。目前, 国内外研究者主要采用理论研究、实验研究及野外调查等三种方法, 分析泥石流龙头的形成及特征。Takahashi提出泥石流拜格诺膨胀流模型(Bagnold dilatant fluid model), 建立泥石流运动方程, 求解水流冲刷沟床形成泥石流流体深度^[6-7]。Cheng-lung Chen^[8]基于宾汉流体方程, 提出通用的泥石流黏塑流模型; O'Brien等^[9]建立了膨胀塑流模型; Iverson等^[10-11]提出了复杂泥石流“混合流理论动量守恒方程”。沈寿长等^[12]通过水槽试验, 分析稀性泥石流龙头的形成机制, 根据龙头粒径、浓度、阻力的变化探讨龙头高度的计算方法。王兆印^[13]采用卵石进行水流冲刷沟床沉积物发展形成两相泥石流的试验, 提出龙头的卵石粒径越大, 龙头高度越高。泥石流危险性评价与防治工程设计中, 龙头高度多以痕迹观察及模拟计算为主^[14], 根据野外调查泥石流暴发后在沟岸侧壁上留下的痕迹, 计算泥石流平均泥深^[15]; 泥深的模拟计算以泥石流运动方程为基础, 用计算流体力学方法求得微分方程的近似解, 求得泥深的时空分布。在野外调查工作中, 因自然或人为原因, 偏差较大。另外, 平均泥深不能客观真实地反映泥石流龙头的特征, 预测的龙头高度偏小。

为此, 本文采用均质沙及宽级配沙, 通过水槽试验, 探讨泥石流运动过程中泥石流龙头高度与泥石流形成条件间的关系, 建立泥石流龙头高度的计算模型, 以利于提前预测可能发生的泥石流龙头的高度, 为科学防范泥石流提供理论依据。

收稿日期: 2016-01-16; 网络出版日期: 2016-12-27

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20161227.1124.004.html>

基金项目: 中国科学院国际合作局对外合作重点项目(131551KYSB20150009); 中国科学院重点部署项目(KZZD-EW-05-01)

作者简介: 王洋(1984-), 女, 黑龙江鹤岗人, 博士生, 主要从事泥石流形成和预测研究。E-mail: 2611tt033@163.com

2 实验设计和实验材料

2.1 实验设计 本实验研究不同级配、坡度、流量条件下,沟床松散物质在水流冲刷作用下起动形成泥石流龙头高度的变化特征。材料1—材料5为均质沙,进行3个流量(7.0 L/s, 14 L/s, 28 L/s),6个坡度(11.5°, 13.5°, 16°, 19°, 22°, 25°)的实验,共计90组实验。材料6—材料12为人工配制沙,改变2 mm以下细沙含量,进行3个流量(2.4 L/s, 3.5 L/s, 7.0 L/s),5个坡度(11.5°, 13.5°, 16°, 19°, 22°)的实验,2个坡度(19°, 22°)进行部分流量小于2.0 L/s的试验,以研究流量与泥石流龙头高度间的关系,共计125组实验。

布置摄像机记录水箱内水头高度变化,利用小孔出流公式计算清水流量。水槽沿程布置摄像机,记录泥石流龙头的运动过程。前人实验结果表明,当龙头达到一定高度,龙头高度基本保持不变^[16]。通过对侧面拍摄视频进行逐帧分析,总结泥石流龙头高度 h 沿程的变化特征。实验结果表明当龙头到达水平位置为4.0 m,龙头基本保持高度不变(图1)。因此,以距离水槽入口5.0 m处的龙头高度为代表值。

2.2 沙样制备 本实验采用均质沙及宽级配沙,水槽宽度为30 cm,因此剔除了直径大于3 cm的颗粒。材料1—5为均质沙,中值粒径分别为25、20、16、9和6 mm,研究粒径对龙头高度的影响。材料6—12为人工配制沙,以2 mm为粗细颗粒界限,细颗粒含量依次为0%、10%、15%、20%、26%、34%和40%,研究2 mm以下细颗粒含量对龙头高度的影响。颗粒级配曲线如图2。

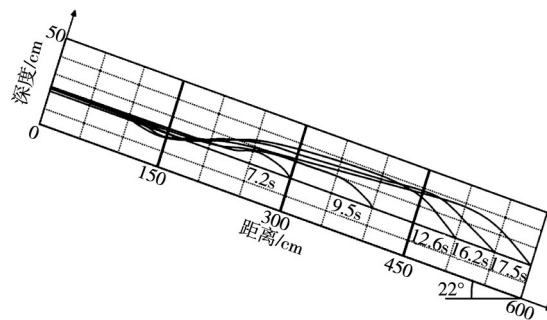


图1 泥石流龙头形态

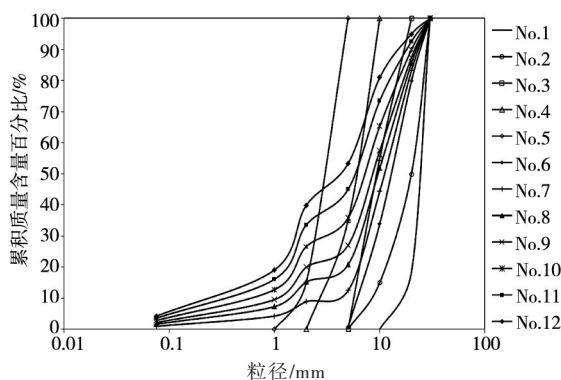


图2 颗粒级配曲线

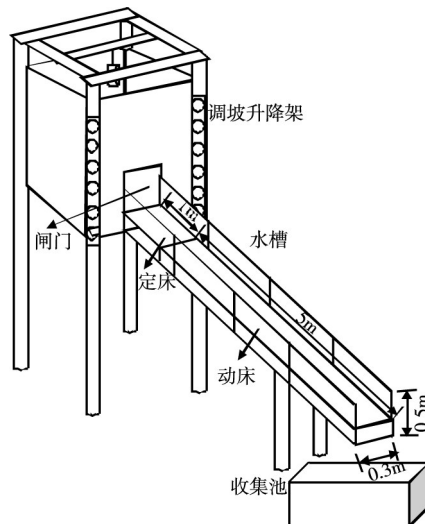


图3 实验装置

2.3 实验装置 实验装置包括以下4部分。

(1)水箱:前高140 cm,后高110 cm,长110 cm,宽100 cm。水箱出口由两道闸门控制。内部通过调整孔口大小,控制出水水量。外部通过开关闸门,控制实验开始与结束。闸门长与水槽宽相同,为30 cm(图3)。

(2)水槽:长600 cm,宽30 cm,高50 cm,为钢架结构,水槽左右两侧各由4块长1.5 m,宽50 cm的钢化玻璃组成,便于观察实验现象。入口端设置长100 cm,宽30 cm,高20 cm的定床,用于稳定水流。水槽底部每隔10 cm固定一根长30 cm,宽1 cm,高1 cm的矩形木条、粘贴卵石,用于增加水槽底部糙率。水箱与水槽连接为整体。实验材料从漏斗中落下,松散地堆积于水槽底部,厚度20 cm。

- (3)手动式变坡升降架：由手拉葫芦与钢架组成，可手动调节水箱与水槽的坡度，坡度范围0~30°。
- (4)收集池：长方体收集池，由钢板组成，用于收集水槽出口处泥沙。

3 实验分析

3.1 流量的影响 实验现象表明龙头后面的水流和颗粒运动速度大于龙头，部分颗粒追赶龙头的过程直接进入龙头；部分颗粒追上并翻跃龙头，在跌落过程被碾压进入龙头内部，二者共同作用，使龙头高度增加。随着流量的增加，后续水流的能量过大，携带的颗粒无法进入龙头内部，直接跃过龙头，向下游输移，造成龙头高度随着流量的增加，呈先上升后下降的趋势(如图4)。

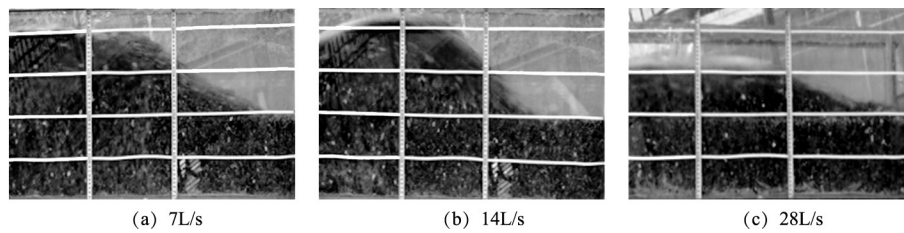


图4 龙头高度与流量关系(材料3, 25°)

王兆印^[13]提出水流冲刷沟床沉积物发展形成泥石流主要取决于两点，一是水流的冲击作用力足以带动床面颗粒进入运动，二是沉积物向下游运动中从势能和水流中得到的能量大于颗粒碰撞摩擦消耗的能量。

实验结果表明：无论是均匀沙还是宽级配沙起动后，形成泥石流龙头高度均随着流量的增加，呈先上升后下降的趋势(图5，图6)。

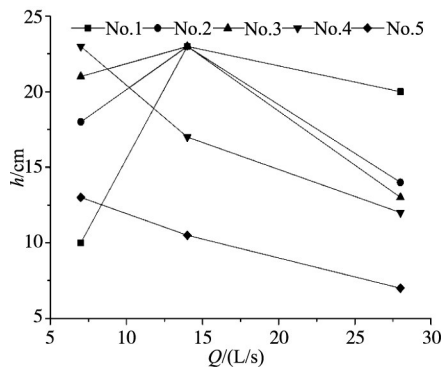


图5 坡度为19°时龙头高度与流量的关系

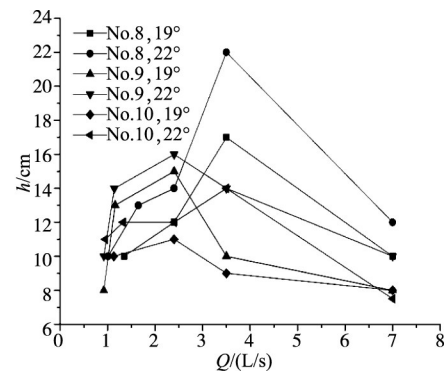


图6 龙头高度与流量的关系

泥沙起动条件定义为临界流量^[17]：

$$q_c = k \frac{\left(\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} D \right)^{3/2}}{J} \quad (1)$$

式中： γ_s 为固体颗粒容重，N/m³； D 为粒径，m； k 为系数； D 为粒径，m； q_c 为临界起动单宽流量，m²/s。

水既是泥石流的重要组成部分，又是激发泥石流的动力条件。当坡度、级配一定时，泥沙起动临界流量为定值，随着流量的增加， $|q - q_c|$ 逐渐增大，水流激发床面的大颗粒向龙头运移，龙头阻挡后续水流及小颗粒的扩散，共同导致泥石流龙头高度呈增加趋势；当水流流量继续增大，不利于大颗粒的分选作用，因此被输移到龙头的大颗粒减少，水流提供的能量远大于颗粒碰撞所消耗的能量，后续水流及小颗粒快速跃过龙头，向下游输移，造成泥石流龙头高度随流量的增加呈减小趋势，参见图7。

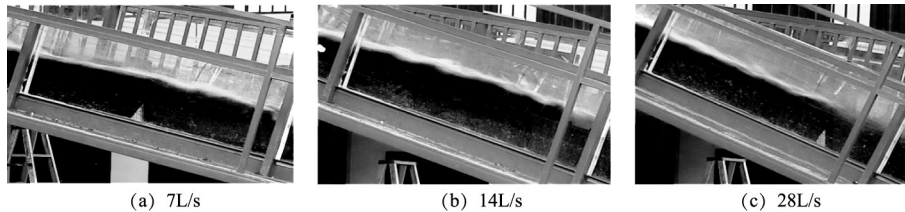


图7 龙头高度与流量关系(材料3, 25°)

3.2 坡度的影响 实验现象表明, 随着坡度的增加, 泥石流龙头高度呈先增大后减小的趋势。随着坡度的增加, 颗粒的下滑力增加, 摩擦力减小, 泥沙起动临界流量呈下降趋势。随着坡度的增加, 水流的势能增加, 同样流量的水流, 输沙率增大。当流量、级配一定, 随着坡度的增加, q_c 下降, $|q - q_c|$ 逐渐增大, 龙头高度随坡度的增加呈上升趋势。随着坡度的增加, 龙头本身的势能增大, 当 $|q - q_c|$ 过大, 水流能量与龙头本身的势能远大于颗粒碰撞消耗的能量, 后续水流及小颗粒快速跃过龙头, 因此龙头高度随坡度的增加呈缓慢下降趋势(图8)。

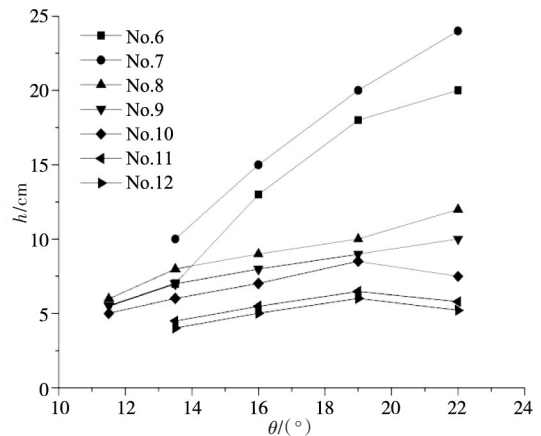


图8 流量为3.5L/s时龙头高度与坡度的关系

3.3 物质组成的影响

3.3.1 粒径的影响 国内外学者关于均匀沙起动的研究表明, 均匀沙起动条件随粒径增大呈先下降后上升趋势, 拐点约为粒径 0.2 mm 的位置^[20]。

材料1—5泥沙起动临界条件随着粒径增大而增大。但泥石流龙头高度与粒径的关系比较复杂, 必须综合考虑坡度和流量的影响。实验结果表明, 当坡度为 22°和 25°时, 泥石流龙头高度随着粒径的增加呈先上升后下降的趋势; 当坡度小于等于 19°时, 泥石流龙头高度随着粒径的增加呈下降的趋势(如图9)。

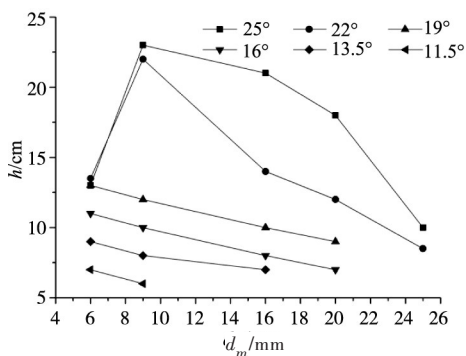


图9 流量为7L/s时龙头高度与平均粒径的关系

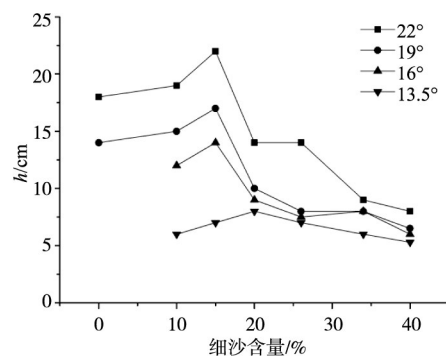


图10 流量为7L/s时龙头高度与细沙含量的关系

当坡度与流量一定, 泥沙起动临界流量 q_c 取决于粒径的大小, 当 $6 \text{ mm} < d_m < 25 \text{ mm}$, q_c 随粒径的增大而增大, $|q - q_c|$ 随粒径的增大而减小, $|q - q_c|$ 过大、过小均不利于龙头高度的增加。当 $|q - q_c|$ 较大, 水流提供的能量及龙头的势能远大于颗粒碰撞消耗的能量, 不利于龙头大颗粒的聚集, 此时龙头高度与粒径成正比; 当 $|q - q_c|$ 较小, 水流提供的能量及龙头的势能大于颗粒碰撞消耗的能量, 有利于龙头大颗粒聚集。此时, 龙头高度与粒径成反比。

3.3.2 细颗粒含量的影响 实验结果表明, 泥石流龙头高度随着细颗粒含量的增加, 呈先上升后下降的趋势(如图10)。非均匀泥沙粗细颗粒之间存在隐暴作用, 相比均匀沙, 粗颗粒更易起动, 细颗粒不易起动^[21]。随着细颗粒含量的增加, 粗、细颗粒的起动条件均下降, $|q - q_c|$ 增加, 此时水流的能量有利于维持龙头高度的增加, 龙头高度随细颗粒含量成正比; 细颗粒比例继续增大, 材料粗细颗

粒间粒径差异减小, 细颗粒起动条件进一步减小, 但粗颗粒的起动条件出现先下降后上升趋势^[22-23], 大量细颗粒泥沙输移到龙头, 龙头缺乏大颗粒无法阻止后续水流扩散, 因此, 龙头高度随细颗粒含量增加呈下降趋势。

4 泥石流龙头高度模型

4.1 水流功率的影响 沟床物质在水流冲刷作用下起动形成泥石流, 能量由水流提供。单位宽度、单位长度的水体在单位时间内所提供的能量 W 可以表示为^[18]:

$$W = \gamma q J \quad (2)$$

式中: γ 为浆体容重, (N/m^3); q 为单宽流量, m^2/s ; J 为能坡。

从功率的角度出发, 泥石流起动的临界条件可以写成:

$$W_c = \gamma q_c J \quad (3)$$

式中: W_c 为泥沙颗粒起动的单宽流量, m^2/s ; q_c 为单宽流量, m^2/s 。

泥石流起动后, 龙头几乎不含水, 由龙头本身的势能及后续水流输送的大颗粒的动能中得到能量, 向前运动, 因此龙头愈来愈高, 直到头部消耗的能量与供应的能量平衡, 龙头高度基本保持不变^[13]。部分学者认为泥石流的冲刷率与剩余水流功率有关, 并提出若干计算方法^[19]。剩余水流功率也决定了龙头大颗粒的聚集程度。因此, 本文认为泥石流龙头的高度与剩余水流功率 W_s 有关(图 11)。即随着水流功率的增大, 泥石流龙头高度呈先增大后减小的趋势。剩余水流功率过小或过大均无法形成泥石流, 仅能形成含沙水流。

$$W_s = W - W_c \quad (4)$$

4.2 模型建立 为建立具有普遍适用性的泥石流龙头高度计算模型, 综合考虑坡度、流量、平均粒径对龙头高度的影响, 首先进行无量纲化。

无量纲流量 q^* :

$$q^* = \frac{Q}{B d_m^{1.5} \cdot g^{0.5}} \quad (5)$$

式中: Q 为水流流量, m^3/s ; B 为水槽宽度, m ; d_m 为平均粒径, m ; g 为重力加速度, m/s^2 。

无量纲龙头高度 h^* :

$$h^* = \frac{h}{d_m} \quad (6)$$

式中: h 为泥石流龙头高度, m 。

实验结果表明, 龙头高度随流量、坡度、粒径、细颗粒含量的增加, 先上升后下降, 即龙头高度是无量纲水流功率的函数, 拟定义函数:

$$h^* = f(W^*) = f(q^*, J, C_u) \quad (7)$$

采用回归分析, 建立泥石流龙头高度计算模型(如图 12):

$$q^* C_u^{0.5} h^* = -0.4853(q^* J C_u^{0.5})^2 + 47.673 q^* J C_u^{0.5} - 45.601 \quad (8)$$

$$R^2 = 0.9026$$

式中: C_u 为材料不均匀系数; J 为水槽坡降。

4.3 模型验证 采取王兆印^[13]部分实验数据, 验证泥石流龙头高度计算模型。从对比结果看, 实测数据与模型计算结果吻合性较好(如图 13)。仅当 W 大于 $120 \text{ N}/(\text{m} \cdot \text{s})$ 时, 误差较大, 主要由于王兆印^[13]实

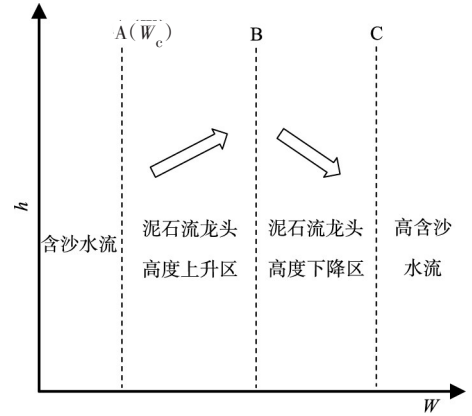


图 11 龙头高度与剩余水流功关系

验未考虑细颗粒(粒径小于2 mm)的影响,与本次实验材料存在一定的区别。本实验得出的公式仅适用于室内水槽实验设备,如应用于实际现场泥石流龙头高度的预测,有待进一步的修正与完善。

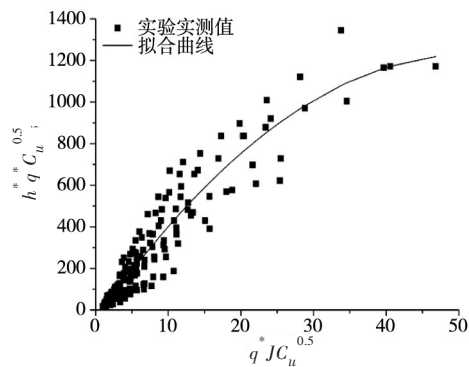


图12 泥石流龙头高度计算模型

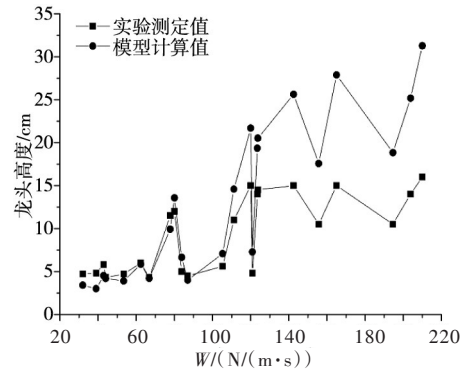


图13 泥石流龙头高度计算模型的验证

5 结论

通过开展室内水槽实验,得出以下结论:(1)泥石流龙头高度随流量、坡度、粒径、细颗粒含量的增加呈先上升后下降的趋势;(2)采用剩余水流功率判断泥石流龙头高度的变化趋势。随着剩余水流功率的增加,泥石流龙头呈先上升后下降的趋势。剩余水流功率过大或过小,仅能形成含沙水流;(3)综合考虑坡度、流量、粒径、细颗粒含量的影响,建立并验证泥石流龙头高度计算模型;

本文采用均质沙及人工配制宽级配沙,研究不同条件下泥石流龙头高度特征,缺少对黏性颗粒的考虑。在此后的实验研究中应采用准泥石流流体,考虑不同的土体特征参数,更好地认识泥石流龙头的运动机理。

参 考 文 献:

- [1] 周公旦,孙其诚,崔鹏.泥石流颗粒物分选机理和效应[J].四川大学学报:工程科学版,2013,45(1): 28-36.
- [2] 刘丽,陈洪凯.泥石流运动学研究现状及趋势[J].重庆交通大学学报:自然科学版,2010,29(2): 233-239.
- [3] 潘华利,欧国强,柳金峰.泥石流沟道侵蚀初探[J].灾害学,2009,24(1): 39-43.
- [4] 魏鸿.泥石流龙头对坝体冲击力的试验研究[J].中国铁道科学,1996,17(3): 50-62.
- [5] 韦方强,胡凯衡,LOPEZ J L.泥石流危险性分区及其在泥石流减灾中的应用[J].中国地质灾害与防治,2007,18(3): 23-26.
- [6] TAKAHASHI T. A review of Japanese debris flow research[J]. International Journal of Erosion Control Engineering, 2009, 2(1): 1-14.
- [7] TAKAHASHI T. Mechanical characteristics of debris flow[J]. Journal of the Hydraulics Division, 1978, 104(8): 1153-1169.
- [8] CHEN C L. Generalized viscoplastic modeling of debris flow[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1988, 114(3): 237-258.
- [9] O'BRIEN J S, JULIEN P Y, FULLERTON W T. Two-dimensional water flood and mudflow simulation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1993, 119(2): 244-261.
- [10] IVERSON R M, VALLANCE J W. New views of granular mass flows[J]. Geology, 2001, 29(2): 115-118.
- [11] IVERSON R M, DENLINGER R P. Flow of variably fluidized granular masses across three - dimensional terrain: 1. Coulomb mixture theory [J]. Journal of Geophysical Research: Soil Earth, 2001, 106(B1): 537-552.
- [12] 沈寿长,李良勋,魏鸿.稀性泥石流龙头形成机制的试验研究[J].中国铁道科学,1996,17(3): 42-48.
- [13] 王兆印.泥石流龙头运动的实验研究及能量理论[J].水利学报,2001(3): 18-26.

- [14] 干线公路灾害防治试点工程[S]. 北京: 中华人民共和国交通部, 2006.
- [15] 欧阳猛, 徐林荣. 泥石流泥痕深度的计算研究[J]. 地质灾害与环境保护, 2008, 19(1): 62-70.
- [16] TAKAHISA M, SUMIJI K, OU G. Development of debris flow[C]//Sediment Problems: Strategies for Monitoring, Prediction and Control(Proceedings of the Yokohama Symposium). IAHS Publish, 1993.
- [17] 钱宁, 万兆惠. 泥沙运动力学[M]. 北京: 科学出版社, 1983.
- [18] 王兆印, 张新玉. 水流冲刷沉积物生成泥石流的条件及运动规律的试验研究[J]. 地理学报, 1989, 44(3): 291-301.
- [19] 朱兴华, 崔鹏, 周公旦, 等. 稀性泥石流冲刷规律的试验研究[J]. 水利学报, 2012, 43(S2): 85-91.
- [20] 何文社, 方铎, 杨具瑞, 等. 泥沙起动流速研究[J]. 水利学报, 2002(10): 51-56.
- [21] 何文社, 杨具瑞, 方铎, 等. 泥沙颗粒暴露度与等效粒径研究[J]. 水利学报, 2002(11): 41-48.
- [22] 黄延杰, 陆彦, 陈帅, 等. 床沙粒径及级配对非均匀沙起动的影响分析[J]. 人民黄河, 2014, 37(1): 34-38.
- [23] 刘明潇, 王鹏涛, 孙东坡, 等. 颗粒非均匀性对推移质输移影响的试验研究[J]. 泥沙研究, 2014(6): 30-34.

Study on the formation and characteristics of height of debris flow head

WAHG Yang¹, CUI Peng^{1, 2}, WANG Zhaoyin³, LIANG Shuangqing¹

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment,

CAS/Key Laboratory of Mountain Hazards and Land Surface Process, Chengdu 610041, China;

2. CAS Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Sciences, Beijing 100101, China;

3. Tsinghua University, Department of Hydraulic Engineering, Beijing 100084, China)

Abstracts: The height of debris flow head is a major parameter for prevention and treatment engineering reflecting the scale of debris flow. Steep terrain, massive loose material and rich water source are three major elements for debris flow initiation, and meanwhile, they are key factors for height of debris flow head. The relationship between height of debris flow head and gradation of bed sediment, flow or gradient is explored with homogeneous sand and wide grading of sand in test flume. The results show that the height of debris flow head rises at first and goes down with the increasing of flow, gradient, the mean grain size and the content of fine sand. Finally, the calculation model of debris flow head is established based on the concept of flow power and regression analysis method, and validated by other scientist's experimental data. The results above are significant for predicting scales for debris flow.

Keywords: debris flow; homogeneous sand; wide grading of sand; the height of debris flow head; stream power

(责任编辑: 杨 虹)