

doi: 10.3969/j.issn.1005-3026.2016.11.022

基于人工降雨的天津盘龙谷泥石流起动特征

孙东彦¹, 陈剑平¹, 马玉飞², 孙铁³

(1. 吉林大学 建设工程学院, 吉林 长春 130026; 2. 济南市勘察测绘研究院, 山东 济南 250000;
3. 建设综合勘察设计研究院有限公司 天津分院, 天津 300012)

摘要: 通过泥石流物理模型试验研究了盘龙谷泥石流的起动特征,探讨了其起动方式、物源补给来源以及降雨条件的影响等. 实验结果表明,泥石流起动时形成区堆积物源不会整体滑移,而是在其表面形成冲沟并逐渐扩大直至引发泥石流;前期先降小雨使土体达到完全饱和,然后再降中雨或大雨的情形其危险性最高;冲沟两侧的不稳定岩土体构成泥石流物源的主要补给来源. 实验现象与盘龙谷泥石流具有较高的一致性,可以为建立泥石流预警系统及防灾减灾提供一定的参考依据.

关键词: 泥石流; 起动特征; 人工降雨; 冲沟; 不稳定岩土体

中图分类号: P 642.23 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2016)11-1625-06

Initiation of Debris Flow in Tianjin Panlonggu Based on Artificial Rainfall

SUN Dong-yan¹, CHEN Jian-ping¹, MA Yu-fei², SUN Tie³

(1. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun 130026, China; 2. Jinan Geotechnical Investigation and Surveying Institute, Ji'nan 250000, China; 3. Construction of Comprehensive Survey and Design Institute, Tianjin 300012, China. Corresponding author: CHEN Jian-ping, professor, E-mail: chenjpqw@126.com)

Abstract: A debris flow physical model was established to study the starting-up characteristics, and then the initiation mode, recharge sources of provenance, the influence of rainfall on debris flow were studied. The results shows that the major provenance in debris flow forming area wont slide integrally when the debris flow starts up, but rather forming some gullies on the surface of the forming area, and the gullies develop until the debris flow starts up. It's more dangerous in the case that the soil is saturated by small rainfall beforehand and then scoured by the moderate or heavy rainfalls. Unstable rock and soil mass on both sides of the gullies become the main recharge sources of provenance. The experimental results are well consistent with the natural Panlonggu debris flow. The research results can provide certain reference for building the early warning system and disaster prevention and reduction for Panlonggu debris flow and other similar debris flows.

Key words: debris flow; characteristics of initiation; artificial rainfall; gully; unstable rock and soil mass

泥石流是山区常见的一种地质灾害,通常由强降水或冰雪融水引发,携带有大量泥沙石块、巨砾、树木等^[1-3]. 泥石流具有突发性、流速快、历时短、破坏性强等特点^[4-5]. 2000 以来,我国每年有 100 余个城市遭受泥石流的威胁,造成巨大的人

员伤亡及经济损失^[6]. 泥石流严重制约着我国山区经济建设与发展,并且引起重大生态问题. 因此,研究泥石流具有重要意义^[7].

在我国,南方泥石流与北方泥石流有显著的区别. 北方泥石流以稀性泥石流(水石流)为主,

收稿日期: 2015-06-16

基金项目: 天津市国土资源和房屋管理局项目(国土房任[2012]12号); 国家自然科学基金资助项目(41402243).

作者简介: 孙东彦(1990-),女,吉林长春人,吉林大学博士研究生; 陈剑平(1957-),男,福建南平人,吉林大学教授,博士生导师.

主要由于北方多发育脆性岩层且植被覆盖率普遍较差,在地表水冲刷作用下易形成水石流。泥石流的发生与降雨量密切相关,我国南方多湿润,北方多干旱。所以我国沿海潮湿地区一般要达到特大暴雨才会发生泥石流,而干旱、半干旱地区日降雨量在大雨以上就能发生泥石流^[8]。北方泥石流发生频率普遍较低,容易被人忽略,一旦发生泥石流,产生的灾害将十分严重^[9]。

泥石流研究的核心问题是泥石流的起动机理,由于泥石流多发生于山区且具有突发性,很少有人能目睹泥石流的起动过程,故泥石流起动模型的设计为研究泥石流起动提供了一条重要途径^[10]。天津蓟县盘山风景区是国家重点风景名胜,规划区内历史上曾多次发生泥石流灾害,故本文专门针对天津蓟县盘龙谷泥石流进行单一物理模型模拟,进行人工降雨实验,通过分析实验中位移、含水率、冲沟形态等物理量的变化过程,研究了天津蓟县盘龙谷泥石流的起动特征,为该泥石流预警及防灾减灾提供一定的参考依据。

1 研究背景

1.1 地形地貌

盘龙谷位于天津蓟县盘山景区内,盘山位于北纬 $40^{\circ}05' \sim 40^{\circ}06'$,东经 $117^{\circ}15' \sim 117^{\circ}18'$,属燕山山脉南部分支系,中低山地貌,海拔一般在 $400 \sim 600$ m,主峰挂月峰海拔高度 857.3 m。泥石流汇水区以四周山脊为界,地势大体呈北东高南西低。盘龙谷泥石流流域面积为 2.5 km²,主沟长 3392 m,流域内最大相对高差为 670 m,沟底坡度无明显变化,较为平缓,平均坡度为 8° 。该地区内主要发育有花岗岩,花岗岩体内近直立的节理裂隙发育,形成陡崖,同时可见有球状风化现象。

1.2 降雨条件

该地区为大陆性气候,春冬干旱,夏秋潮湿。年平均降雨量 770.20 mm,历年汛期为 $6 \sim 8$ 月,占全年降水量的 77.3% ,根据天津市水资源公报,近年来最大降雨量出现在 2012 年,降雨量达 850.3 mm,其中 7.21 大暴雨当天即达到 124.5 mm。该地区平均每 8 年发生一次洪涝灾害。

1.3 泥石流概况

盘龙谷泥石流的形成区大致呈北东-南西走向。南侧发育有 13 条支沟,北侧发育有 9 条支沟。由于各方面条件限制,所设计模型仅对形成区中部由两侧山坡搬运下来的第四系堆积物为重点进

行了模拟研究。盘龙谷泥石流如图1所示。如图1中间细长环曲线包围区域,上游到下游按照其宽度大致可分为两段,前半段呈长条状,宽约 70 m,长约 750 m;后半段呈两个对接的喇叭口状,宽度先由 70 m逐渐增加至最宽处约 240 m,该段长度约 800 m,然后宽度又逐渐变窄,最窄处大约 120 m,该段长约 450 m。

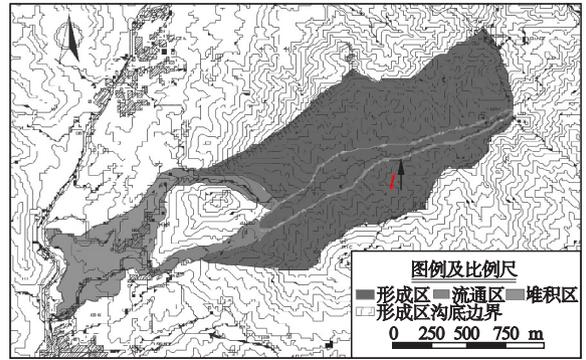


图1 盘龙谷泥石流分布图

Fig. 1 Panlonggu debris flow zone map

该泥石流的流通区前部有一小山体将泥石流的流通区分为南北两条槽状通道,由于流通区并不是本次研究的重点,且南沟较为顺直,长 830 m,宽平均为 95 m,所以模型中仅对南沟进行了简化模拟。

2 模型建立

2.1 相似比的确定

人工模拟实验的实质是根据几何相似、材料相似、运动学相似和动力学相似原理,模拟原型的变形及应力等。

由平衡条件、几何条件、物理条件及边界条件方程可以得到线弹性问题的基本相似判据如下:

$$\left. \begin{aligned} C_{\sigma} &= C_{\gamma} C_L, C_{\varepsilon} = C_{\delta} C_L, \\ C_{\sigma} &= C_E C_{\varepsilon}, C_X = C_{\sigma}, C_{\mu} = 1. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: C_{σ} , C_{γ} , C_L , C_{ε} , C_{δ} , C_E , C_{μ} , C_X 分别为应力、容重、几何、应变、位移、弹性模量、泊松比和面力相似常数。

本次模拟实验场地为一长约 35 m,宽近 20 m的大院,参照国内外通常做法,并考虑到实验目的与实验精度要求以及场地限制等因素,最终确定本次实验模型选取几何相似比例尺为 $1:100$ 。降雨是泥石流的主要诱发因素,通过相似原理第二定理推导出时间和雨强各自的相似比为

$$\left. \begin{aligned} q/q_m &= \lambda_q = \sqrt{\lambda_1}, \\ t/t_m &= \lambda_t = \sqrt{\lambda_1}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

根据以上关系式可以得到本次模拟实验中降雨强度及降雨时间相似比均为 1:10. 由于模型的尺寸是等比例缩小的,故坡降无变化,沟底坡度仍然为 8° .

2.2 物理实验模型的构建

为了便于建立模型及实验的实施,在不影响研究结果的前提下,对实际的泥石流沟进行一定程度的概化. 首先根据所设计的模型尺寸进行脚手架搭建,在搭建完成的脚手架上铺设木板,组成一斜槽来模拟泥石流沟. 形成区斜槽长约为 20 m,前半段斜槽长 750 cm,宽度不变,均为 70 cm;后半段呈两个对接的喇叭口状,宽度先由 70 cm 逐渐增加至最宽处约 240 cm,该段长度约 800 cm,然后宽度又逐渐变窄,最窄处大约为 120 cm,该段长约 450 cm. 模型后部最高处高约 4 m,整个模型长大约 29 m,沟底坡度为 8° 左右.

2.3 模拟物源

由于模型的几何尺寸与泥石流原型相比已大大缩小,为了使模拟流体不受阻地展现自然泥石流运动特征,对取自堆积区的土料进行筛选. 自然界中,大石块最大粒径与流体流宽(即河床宽度)之比很少超过 0.1~0.2,一般为 0.02~0.05. 此外,自然界中石块最大粒径与泥石流泥深之比通常为 0.2~0.5,而漂砾和石块最大粒径再大,亦不能超过泥深. 综合以上两点并考虑筛的尺寸,将粒径大于 20 mm 的大颗粒予以剔除.

2.4 人工降雨装置

实验中的人工降雨装置由喷头、三通、变径接头、阀门、塑料水管组成,将三个不同雨强的喷头组合成一组后,按 1.5 m 间隔分别连为一排固定于模型底板上方 1.75 m 处,使其喷洒半径能够覆盖模型槽,且达到一定的均匀度. 安装好后的降雨喷头如图 2 所示.

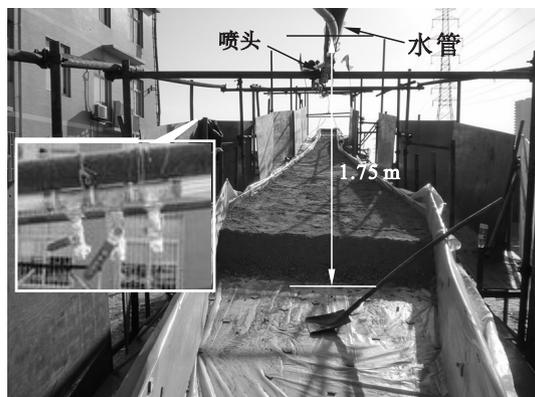


图 2 实验降雨装置

Fig. 2 Simulated rainfall equipment

2.5 支沟汇水装置

由于形成区南北两侧支沟内的降水均汇集到主沟内,所以为了考虑支沟内降水对泥石流起动的影 响,本次模拟实验中将各支沟的汇水面积按照比例缩小,计算出模型中各支沟在某一降雨强度下所汇集的雨量,然后在各支沟与主沟交汇处安装乳胶管,并在乳胶管上安装阀门控制其流量以使其流量与所计算的汇水量相同,见图 3.

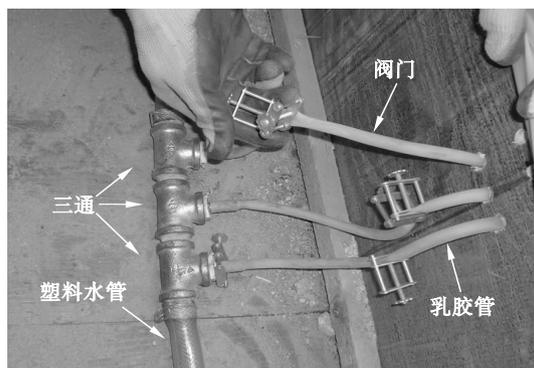


图 3 模拟支沟装置

Fig. 3 Simulator for the branch gully

3 实验过程及结果分析

3.1 实验过程

实验时由于受到场地、降雨喷头规格、大风天气等不利因素的限制,无法严格按照相似比将实际雨强缩小,因此在实验中设计了以下 4 种降雨状态.

第一次实验中设计了两种降雨状态,分别为降雨状态一和降雨状态二,两种降雨状态雨强均较大. 降雨状态一的雨强可达 20.17 mm/h,降雨持续时间约为 2 h;降雨状态二的雨强可达 76.40 mm/h,降雨持续时间约为 40 min,累计降雨量为 91.53 mm.

第二次实验中同样设计了两种降雨状态,分别为降雨状态三和降雨状态四. 降雨状态三的降雨强度较小,大约为 0.60 mm/h,降雨持续时间为 3 h;降雨状态四降雨强度较大,可达到 56.36 mm/h,降雨持续时间为 1 h,累计降雨量为 58.16 mm.

实验过程中对土体表面位移、土体含水率进行持续观测,实验后对土体表面的冲沟进行测绘.

3.2 实验结果

3.2.1 位移变化

本次实验过程中采用简易位移计对土体表面位移进行监测,实验过程中,除了一部分位移计所处位置形成冲沟,位移计被径流冲走之外,其余所有位移计的位移值均为 0,即该泥石流形成区内

的土体在降雨过程中均未发生明显位移。

位移监测数据表明该泥石流形成区内的松散堆积物在起动过程中不会整体下滑,而是在降雨及支沟汇水共同作用下形成冲沟,该冲沟发生溯源侵蚀达到一定程度后,水动力条件达到平衡状态,便不再继续溯源。冲沟内的物质主要来源于冲沟两侧坡体向沟内滑塌。冲沟下切深度不断增大,两侧坡体滑塌方量达到一定程度时,便有可能将冲沟堵塞,形成“堰塞湖”,沟内汇水不断积聚直至“堰塞湖”溃坝,这便是盘龙谷泥石流起动的特点之一。

3.2.2 含水率变化

第一次实验中,在降雨开始前与降雨结束后

分别在模型槽上中下游的相同位置各取一土样测其含水率,实验结果见表 1。

从表中数据可以看出,降雨之前土体的初始含水率值较低,且三个含水率监测点下部土层的初始含水率均大于表层土体的初始含水率。土体表层的含水率增长很快,而下部土体因降雨入渗路径以及入渗系数的影响,其含水率低于土体表层,土体表层的含水率增加幅度明显大于下部土层含水率的增加幅度。第二次实验过程中每间隔 30 min 取样一次,取样深度分别为 5, 10, 15, 20 与 25 cm(从顶面算起),然后在实验室中测其含水率,以研究实验过程中含水率的变化规律,实验结果见图 4。

表 1 第一次实验含水率实验结果

Table 1 Results of water content in first experiment

时间	取样位置	取样深度/cm	含水率/%	时间	取样位置	取样深度/cm	含水率/%
降雨开始前	II-1	3	11.49	降雨开始后	II-1	5	35.11
		22	13.95			17	27.35
	II-2	3	12.50		5	31.93	
		17	15.38		17	28.89	
	II-3	5	16.47		6	22.15	
		17	18.52		18	25.33	

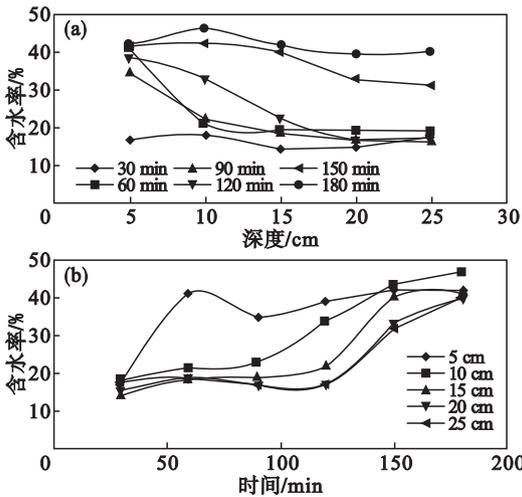


图 4 第二次实验含水率变化关系曲线

Fig. 4 Curves of water content in second experiment

(a)—不同深度; (b)—不同时刻。

从图 4a 中可以看出,第二次实验同一时刻不同深度的含水率基本都呈现出随深度减小而增加的趋势,只是各个时刻变化的幅度不同,这是由于降雨自上而下入渗,表面先达到饱和,在经过一定时间,入渗量达到一定值后,土体在整个厚度上含水率均已经较高,所以土体表面与底面的含水率差别不大,即曲线上降低的幅度变小;从图 4b 可以看出,该处同一深度在不同时刻的含水率基本

上都呈现出随时间增加而逐渐增大的变化趋势,说明降雨不断入渗,最终达到较高的含水率,土体达到饱和状态。

3.2.3 冲沟两侧拉张裂隙

在第二次实验中发现,在土体完全饱和(含水率达到 35%)之后再降暴雨的过程中,在冲沟下游两侧土体中逐渐产生多条平行于冲沟轴线方向的拉张裂隙,见图 5。裂隙两侧土体不断沿着拉张裂隙向冲沟内滑塌,继而由沟内水流冲走,成为泥石流物源的主要补给来源。

相对于第二次实验,在第一次实验中则未发现大量拉张裂隙出现,仅在冲沟末端处分布有少量裂隙。分析认为其主要原因是由于第一次实验中土体未经小雨饱和,土体内部仍然保持原有的强度,形成的冲沟下切深度有限。而第二次实验中土体经小雨饱和之后强度已经大大降低且容重增加,同时第二次实验中冲沟下切深度较第一次实验大,因此第二次实验中土体更容易形成拉张裂隙,使两侧土体向冲沟内滑塌形成泥石流物源的主要补给。这是盘龙谷泥石流起动的又一主要特点。

3.2.4 冲沟形态

两次实验之后都对泥石流的形成区选取了多个断面进行了测量,绘制出各断面的剖面形态。选取两次实验中两组位置相近的断面形态进行对

比,见图 6。

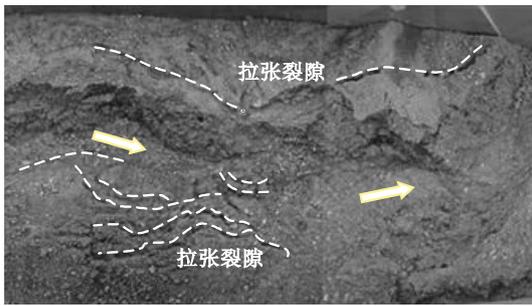


图 5 冲沟两侧的拉伸裂隙

Fig. 5 Tensile cracks along the gullies

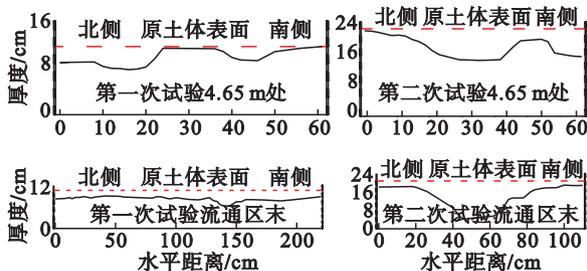


图 6 两次实验冲沟横剖面形态对比

Fig. 6 Comparison of cross-sections of gullies in the two experiments

通过图 6 中两次实验后冲沟断面形态对比可以明显看出,在第二次实验土体堆积厚度略有增高的情况下,第二次实验中冲沟的宽度与深度均大于第一次实验,说明在第二次实验条件下(即先降小雨使土体充分饱和后再降大雨)与第一次实验条件下(即无小雨饱和阶段而直接降大雨)相比,尽管后期降雨强度相差不大,但是由于第二次实验时土体已经完全饱和,强度已经降至最低,抗冲刷能力很差,使得水动力条件相对增大,在此条件下,一旦受到外力推动干扰,便会发生破坏,即泥石流开始起。

3.3 成因分析

第一次实验的土体在较低的初始含水率条件下,接受强降雨时入渗量远小于降雨量,土体表层出现自由水面,并逐渐汇流形成地表径流,逐渐带走土体表层的细颗粒物质。而下部土体因降雨入渗路径以及入渗系数的影响,含水率低于土体表层,使得当表层土体强度很低或者已经被冲刷形成冲沟时,下层土体尚有一定的抗剪强度。由于主沟坡度很小仅为 8° ,其坡降不利于泥石流的形成与起,坡上堆积物往下滚动的能量较小,无法带动原本静止的大颗粒运动,故研究区内的土体无法发生整体滑移、流动以致形成泥石流。

第二次实验开始时降小雨,雨水自表层向下逐渐入渗并储存在土壤中,土壤含水率逐渐增大

直至达到饱和,导致孔隙水压力持续增大,有效应力逐渐减小。此外,土体在动水压力下发生潜蚀现象,使得土体黏聚力下降。但是降雨强度小,不会形成地表径流,沟床松散物质处于稳定状态,不会起动泥石流。土体饱和之后降大雨,降雨强度大于土体的入渗系数,会在地表产生径流。随着地表径流的增大,斜坡上产生冲沟并且侵蚀下切越来越严重,冲沟岸坡会出现临空面直至崩塌,继而被沟内水流冲走。此外,表面水流会对土体产生向下的拖曳力,使剪应力逐渐增大,当剪应力超过土体抗剪强度后,土体会失稳起,产生泥石流。

4 结 论

1) 盘龙谷泥石流形成区内的堆积物不会在降雨作用下发生整体滑移,而是先形成冲沟,冲沟不断发育变大最终形成泥石流。

2) 前期先降小雨使土体达到完全饱和,然后再降中雨或大雨的情形其危险性要远大于直接降大雨的情形,应对这一类型的降雨进行重点关注。

3) 在泥石流发生时,沟谷两侧的不稳定岩土体将成为泥石流物源的主要补给来源。

4) 对于盘龙谷泥石流以及具有类似地质条件的其他泥石流,泥石流预警系统的核心部分应该是对沟内不稳定岩土体在不同降雨条件下的稳定性进行预警。

参考文献:

- [1] Wang G L. Lessons learned from protective measures associated with the 2010 Zhouqu debris flow disaster in China [J]. *Natural Hazards*, 2013, 69(3): 1835 - 1847.
- [2] Niu C C, Wang Q, Chen J P, et al. Debris-flow hazard assessment based on stepwise discriminant analysis and extension theory [J]. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 2014, 47(3): 211 - 222.
- [3] Zhang W, Li H Z, Chen J P, et al. Comprehensive hazard assessment and protection of debris flows along Jinsha River close to the Wudongde dam site in China [J]. *Natural Hazards*, 2011, 58(1): 459 - 477.
- [4] Ni H Y, Zheng W M, Li Z L, et al. Recent catastrophic debris flows in Luding county, SW China: geological hazards, rainfall analysis and dynamic characteristics [J]. *Natural Hazards*, 2010, 55(2): 523 - 542.
- [5] Li Y, Liu J J, Hu K, et al. Probability distribution of measured debris-flow velocity in Jiangjia Gully, Yunnan Province, China [J]. *Natural Hazards*, 2012, 60(2): 689 - 701.
- [6] Zhang W, Chen J P, Wang Q, et al. Susceptibility analysis of large-scale debris flows based on combination weighting and extension methods [J]. *Natural Hazards*, 2013, 66(2): 1073 - 1100.

(下转第 1639 页)