

北川土和粉细砂在降雨作用下泥石流启动的实验研究*

王淑云 叶天立 鲁晓兵

(中国科学院流固耦合系统力学重点实验室(中国科学院力学研究所) 北京 100190)

摘要 北川地区的山坡坡面和沟壑中覆盖着由2008年5月12日汶川地震而产生的大量松散土石堆积体,并在震后的几个月到几年的过程中,因持续降雨作用经历了数次严重的山体滑坡和泥石流灾害。本文基于北川地质、地形和降雨等实地考察资料,对北川土和粉细砂两种斜坡堆积土,进行了一系列降雨条件下的泥石流启动室内模型试验,分析了降雨历时、雨强、土坡坡角、土体密度等因素对泥石流启动的影响,揭示了北川土和粉细砂在降雨作用下泥石流启动的过程和机理。结果表明:(1)北川土的泥石流启动过程仅经历了完全入渗阶段,泥石流启动所需的临界雨强相对较大;(2)粉细砂的泥石流启动过程经历了完全入渗、薄层和深层地表径流3个阶段,当雨强超过一定量时,坡度越大,泥石流启动所需降雨历时越长;(3)粉细砂和北川土泥石流的启动均是重力和渗流共同作用的结果,而重力和渗流作用的大小取决于土的颗粒大小和级配。本研究成果为降雨作用下北川地区的泥石流灾害预警提供了重要的参考依据。

关键词 北川土 粉细砂 泥石流启动 降雨 模型试验

中图分类号:P642 文献标识码:A

EXPERIMENTAL STUDY ON INITIATION OF RAINFALL-INDUCED DEBRIS FLOW OF BEICHUAN SOIL AND SILTY FINE SAND

WANG Shuyun YE Tianli LU Xiaobing

(Key Laboratory for Mechanics in Fluid Solid Coupling Systems, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

Abstract There were bulk accumulation sediments of loose soil and rock in Beichuan area generated by Wenchuan earthquake on May 12, 2008, and continuous rainfall actions resulted in several times of severe landslides and debris flow disasters after a few months to few years of earthquake. Based on field investigation in geology, landform topography and rainfall data, a series of initiation of debris flow model tests under rainfall conditions in laboratory were performed respectively on Beichuan soil and silty fine sand sediments. Moreover, the effects of rainfall duration, rainfall density, slope angle and soil density on the initiation of debris flow were analyzed. Finally, the process and mechanism of debris flow initiation of Beichuan soil and silty fine sand under rainfall conditions were revealed. The results show that:(1)for Beichuan soil sediment, only the full infiltration stage occurs in the process of debris flow initiation and the critical rainfall density is needed much bigger in order to initiate debris flow.(2)for silty fine sand sediment, all the three stages of full infiltration, thin layer and deep surface seepage occur in the

* 收稿日期:2016-02-25;收到修改稿日期:2016-05-20.

基金项目:国家基础研究计划“地震引起山地此生灾害的活动性和形成规律”(2008CB425802)资助.

第一作者简介:王淑云(1965-),女,学士,高级工程师,主要从事岩土力学实验研究. Email: sywang@imech.ac.cn

process of debris flow initiation, and the rainfall duration is needed much longer when the slope angle is bigger and the rainfall density is beyond a certain value.(3) the initiation of debris flow, whether for Beichuan soil or for silty fine sand, is the result of the combined action of gravity and seepage, but the function of gravity and seepage depends on the grain size distribution of soil. This research provides important reference data for early warning of debris flow disaster under rainfall conditions in Beichuan area.

Key words Beichuan soil, Silty fine sand, Debris flow initiation, Rainfall, Model test

0 引言

泥石流是一种常见的山地自然灾害,其形成需要3个基本条件:地质条件、物源条件和水源条件(高波等,2014)。2008年5月12日,四川省汶川县映秀镇发生了8.0级大地震,地震导致全省12个县市严重受损并诱发出大量次生地质灾害,造成了严重的人员伤亡和巨大的经济损失。据不完全统计,地震后新增地质灾害点达5千余处,泥石流、滑坡、崩塌及不稳定斜坡总数超过97%(崔鹏,2008;许强,2010)。此次地震在强震区形成一系列次生灾害链,形成了大小几十处堰塞湖,大量的次生地质灾害严重威胁着震区人民群众的生命财产安全,其中北川县就是受严重威胁的县之一。2008年9月25日,持续降雨引发北川县城多处山体滑坡和泥石流灾害,掩埋了老县城的一半以上的地区。2010年9月9日,北川再次发生泥石流,当地的桥梁被冲毁,雷禹路全线瘫痪。2013年的7月16日,北川的桂溪乡陈家坝,暴雨引发泥石流,50多万立方米的泥石流冲进青林沟,将河床抬高了近4m,形成了一个危险的堰塞湖。

目前,国内外对泥石流的启动机理和运动规律有了一定程度的科学认识,但对泥石流的定义、启动条件、运动速度随时间和空间变化等问题,仍处在探索阶段,尚未取得共识。由于泥石流启动机制的复杂性以及启动因素的多样性,对泥石流启动的研究,一直是国内外学者关注的热点问题之一(钱宁等,1984; Anderson, et al.,1995; Iverson, 1997; Cannon et al.,2008; Jeffrey, et al.,2008)。在泥石流发生发展的成灾过程中,启动过程是关键环节,如果掌握了泥石流启动条件及启动机理,就可以适当控制和预测泥石流的启动条件和过程,把泥石流发生之后的被动治理转变为发生之前的主动治理。

实验研究是认识泥石流启动过程和现象的最基本手段和方法(倪化勇等,2014),也是验证泥石流理论模型和数值模拟计算正确与否的必不可少的步

骤。已有的实验研究表明,土体特征参数(包括土质、密实度、含水量、强度、颗粒级配、细颗粒含量等)、地形和地貌(包括堆积体形状、坡角等)、物源条件(包括降雨历时和雨强等)等是泥石流启动的主要影响因素。在物理机制和模型建立方面,国内学者基于野外的观测资料以及室内的模拟试验结果,研究了泥石流启动机理及其临界条件,建立泥石流启动的突变模型,解释了泥石流启动的物理机制(崔鹏等,1991)。也有基于蒋家沟流域的大型人工降雨滑坡泥石流现场试验,分析降雨对滑坡的激发作用,建立了暴雨滑坡泥石流的共生关系的含水模型(胡明鉴,2003)。有些学者把泥石流启动过程分成几个阶段来分析,比如土体从产生径流开始,到土体开裂、开溜、溜滑到泥石流启动(陈宁生等,2010)。还有学者认为震区暴雨泥石流的启动主要有两种方式:暴雨过程中形成的斜坡的表层径流导致悬挂在斜坡上的滑坡体表面及前缘松散物质向下输移,入沟道后转化为泥石流的过程;沟道水流迅速集中,强烈冲刷沟床中的松散物质,致使沟壑底床的物质启动并形成泥石流的过程(唐川等,2009)。有学者提出泥石流启动的两种力学机理:小强度降雨下的局部软化或者液化的机理以及强降雨下的振动软化或者液化的机理(陈晓清,2006)。因为降雨是坡面型泥石流的主要的激发因素,降雨入渗使斜坡残坡积岩土体饱和发生软化,黏聚力、内摩擦角与含水率的关系曲线都出现明显的拐点,斜坡上的土体由稳定状态不断向着破坏状态演化(杨为民等,2007)。暴雨作用下泥石流的形成需有一定厚度的饱和土层及一定深度的地表径流(江兴旺等,2002),土的密度、粗粒含量、含水量、黏粒含量(陈中学等,2010),以及底床坡度、颗粒级配、临界水量(徐友宁等,2009)、震区特殊土质(倪化勇等,2014)等变量对泥石流启动和过程也有明显的影响。

本文基于汶川震区特殊的地质地形以及降雨条件,在野外实地调查的基础上,采用北川土和粉细砂为试验用土,开展了一系列室内人工降雨试验,比较

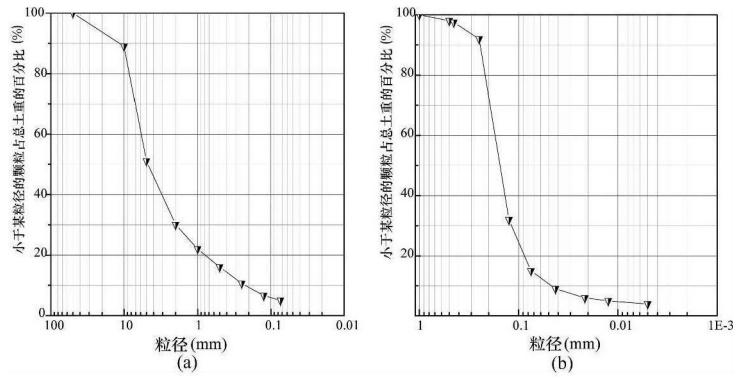


图1 a 北川土颗粒级配曲线; b 粉细砂颗粒级配曲线

Fig. 1 a Grain size distribution of Beichuan soil; b Grain size distribution of silty fine sand

了两种土在不同密度下的泥石流启动现象和规律, 得出了泥石流启动所需降雨历时和降雨强度与坡角的关系, 分析了降雨诱发泥石流的过程和启动机理, 为北川泥石流灾害预警提供参考。

1 现场条件和试验用土

北川地区的表层土体主要由砂岩和泥岩碎屑流组成, 存在大量的断裂带, 表层岩石受到多次地震扰动以及强烈的风化作用, 岩石碎块大多分布于坡角大于 25 度的斜坡之上, 现场地质和地形条件非常利于泥石流的形成。此外, 北川地区属于亚热带湿润季风气候, 属于著名的鹿头山暴雨区, 雨量充沛。年均降雨量 1399.1mm, 年最大降雨量达到 2340mm (1967 年), 日最大降雨量 101mm, 小时最大降雨量 32mm。降雨月份集中在 6~9 月, 一般占全年降雨量的 71%~76%, 最大达到 90%。

野外考察发现北川震区还存在部分粉细砂, 因此室内模型试验用土采用两种: 北川魏家沟土和室内配制的粉细砂, 旨在比较两种土体的泥石流启动形式及机理, 考察震区土和粉细砂对泥石流启动的不同作用。北川土和粉细砂的颗粒级配曲线(图 1), 北川土的粒径范围比较大, 最大粒径为 55mm; 粉细砂粒径范围比较小, 最大粒径只有 1mm。

2 试验介绍

试验设备主要包括人工降雨试验装置(供水系统、流量计、喷头及管道)、试验槽、石板、下游收集装置等(图 2)。供水系统保证足够的给水压力, 流量计采用两种量程(最大 10mL · min⁻¹ 和 10L · min⁻¹), 喷头为单孔式和多孔式, 并通过变换孔

的数目来调整雨强的大小。试验槽采用有机玻璃材料, 长×宽×高=2m×0.2m×0.5m。在试验槽底部放置一块具有一定摩擦力的石板, 以模拟下部土体和上部土体的接触作用。

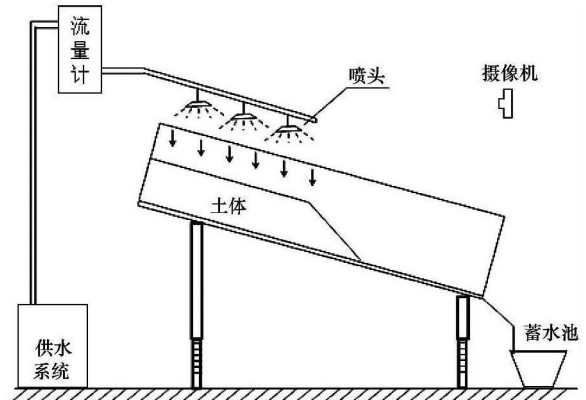


图2 降雨诱发泥石流启动试验示意图

Fig. 2 Sketch of model test for rainfall-induced debris flow

试验参数的选取根据现场考察和室内土性试验结果以及泥石流启动分析的需要。试验用土按密度不同分为两组, 按坡角不同分为 3 组, 同一种坡角条件下变换不同的降雨量。

试验土体先按照 40% 的含水量配制好, 静置 24h, 然后按照设计的密度和坡角, 将试验土一层一层铺在试验槽内, 形成一个梯形体(上底为 37cm, 下底为 72cm, 土层厚度为 10cm), 并静置 4h。人工降雨开始后, 采用摄像头和秒表等计时设备记录时间, 同时观察试验现象并进行记录。本文取土体中间部位出现较大滑动时的时间为泥石流启动时间标准, 启动降雨量为人工降雨开始到泥石流启动时间段的降雨总量。当土体出现完全滑动或停止滑动的迹象时, 停止人工降雨, 对降雨总量和试验土体进行计算和处理。

3 试验结果和分析

3.1 粉细砂

通过观察,粉细砂土体的泥石流启动过程可分为3个阶段(图3)。

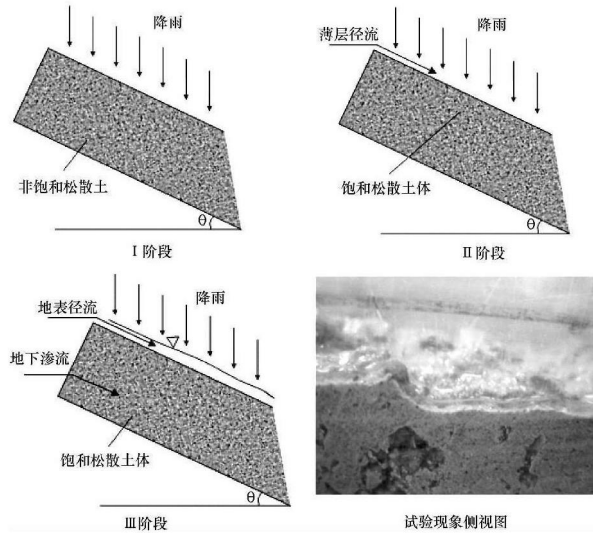


图3 泥石流试验过程示意图和试验现象图
Fig. 3 Sketch and photos of debris flow test

I阶段:完全入渗阶段。雨强小于土体入渗率,降雨全部渗入土体,斜坡表面无积水,上覆土层处于非饱和状态,土体主要受雨滴的打击(溅蚀)作用,土颗粒发生分散、分离和跃迁位移。

II阶段:薄层地表径流阶段。雨强等于或大于土体入渗率,降雨全部渗入土体,表层土体达到饱和,地表产生积水,降雨入渗从积水点开始继续,出

现薄层地表径流,土体受到雨滴的溅蚀和薄层径流冲刷的共同作用而形成含沙水流。

III阶段:深层地表径流阶段。随着降雨历时和雨强的增大,地表径流形成汇流,坡面径流水深不断增加,含沙水流运动得到加强,同时由于坡面的起伏不平,水流紊动加剧。

当雨强较小时,粉细砂土体的泥石流启动仅经历I阶段;当雨强相当大时,降雨作用下粉细砂的泥石流启动将会经历上述的3个阶段。

图4a和图4b分别给出了两种土密度情况下,粉细砂在降雨作用下泥石流启动所需的降雨历时和雨强关系。从图4可以看出,当底床坡角相同时,随雨强的减小,泥石流启动所需降雨历时不断增大,且增速不断增大;当雨强减小到一定值,泥石流启动所需降雨历时趋近于无穷大,此时的雨强为临界雨强。本试验条件下,粉细砂的最小临界雨强为 $1 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

对于不同的坡角,当雨强较小时,降雨为完全入渗,坡角越大,泥石流启动所需要的降雨历时越小。这是因为对于相同质量的土体重量,坡角越大,重力沿斜面向下的分力越大,泥石流更容易启动。而当雨强超过一定值,坡角越大,泥石流启动所需降雨历时越长。这是因为:当雨强较大时,降雨初期为完全入渗,随着降雨的继续,雨强将等于或大于土体入渗率,土层表面将很快形成地表积水,相当于在土层表面施加一定压力。地表积水深度越厚,压力值越大,土体中的渗流进入有压渗流阶段。当坡角较大时,地表径流速度增大,地表积水深度越薄,所施加的压力变小,渗流相对较慢,泥石流启动所需时间变长。

图5为粉细砂土体在不同坡角时泥石流启动所

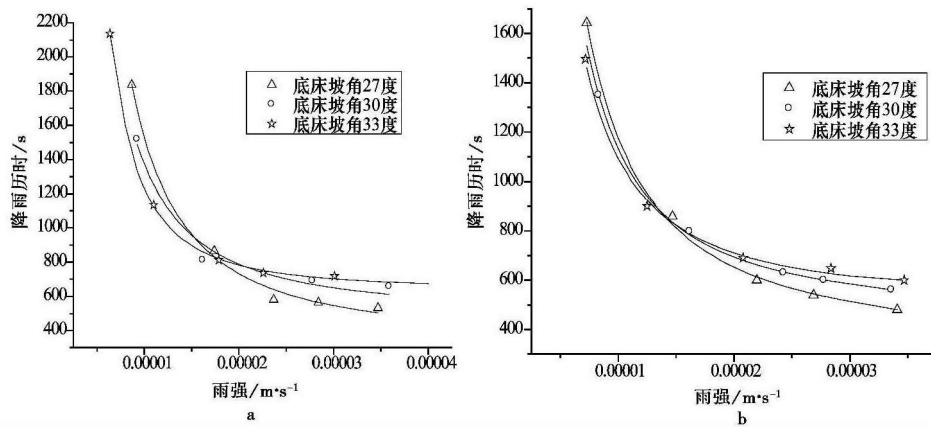


图4 粉细砂泥石流启动降雨历时-雨强曲线
Fig. 4 Rainfall duration and density curve of silty fine sand when soil density is
a. 土密度 $1200 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$; b. 土密度 $1037 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

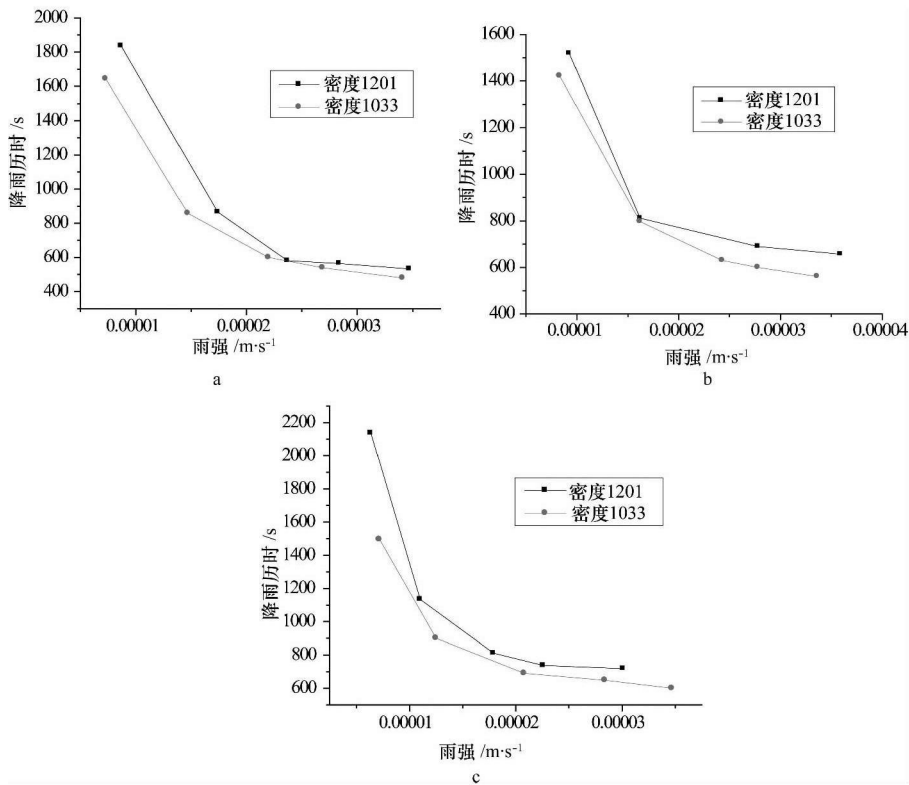


图5 粉细砂泥石流启动降雨历时-雨强关系

Fig. 5 Rainfall duration and density curve of silty fine sand when debris flow initiation
a.坡角 27°; b.坡角 30°; c.坡角 33°

需的降雨历时和雨强的关系,从中可以看到,土体密度越大,泥石流启动难度越大。原因是土体密度加大,渗透性变差,入渗率减小,渗流速度变慢,泥石流启动所需降雨历时增加。

大时,坡角越大,泥石流启动所需降雨总量越大。这是因为:在雨强较小时,降雨处于完全入渗阶段,当渗入土体径流,一部分雨水沿土体表面流入试验槽底部,渗入土体的有效降雨总量小于实际的降雨总量,并且当坡角越大,土体表层的地表径流速度越大,渗入土体的有效降雨总量占总降雨总量的比例越小。因此,随着坡角增大,粉细砂土体泥石流启动所需的降雨总量越多。

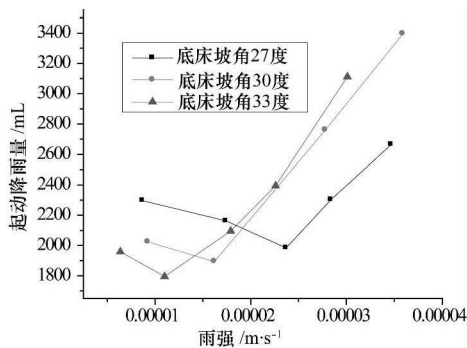


图6 粉细砂泥石流启动降雨量-雨强关系

Fig. 6 Total rain and rainfall density curve of silty fine sand when debris flow initiation

图6为粉细砂在不同坡角下泥石流启动所需降雨总量和雨强的关系,从中可以看出,在坡角和密度不变时,随雨强的增加,粉细砂土体泥石流启动所需降雨总量增加。当坡角不同时,在雨强较小时,坡角越大,泥石流启动所需降雨总量越小;而在雨强较

3.2 北川土

与粉细砂不同的是,北川土体在整个降雨过程中,土层表面始终没有形成积水,土体入渗率始终大于雨强,降雨完全渗入土体。当降雨历时达到一定时间,开始有水从坡脚处渗出,但不会形成地表径流。即北川土泥石流启动只经历了前文提出的I阶段。由于降雨的作用,表层土体也发生了一定的沉降,但相对于粉细砂土体来说,沉降量比较小。当雨强很小时,雨水不断缓慢下渗,最终从坡脚处均匀渗出,处于近似稳态阶段,泥石流未发生启动。当雨强较大时,在泥石流启动前,能听到相当大的土体错位摩擦的声音。

图 7 给出了北川土在不同坡角下泥石流启动所需要的降雨历时和雨强的关系,可以看出,当坡角相同时,随着雨强的减小,启动泥石流所需要的降雨历时不断增加,且增加的速度越来越大。当雨强相同时,坡角越大,启动泥石流所需要的降雨历时越短。

比较粉细砂和北川土的泥石流启动试验现象,北川土体在人工降雨作用下,不能进入有压渗流阶段,所以在土体中没有出现粉细砂土体试验的现象,即:在雨强较小时,坡角越大,粉细砂在重力作用下泥石流的启动更容易;当雨强超过一定量时,坡角越大,泥石流启动所需降雨历时反而越大。

另一方面,由于北川土质颗粒大小不均,孔隙比较大,雨水在土体中的渗流速度比较大,在雨水下渗过程中对颗粒的向下冲力也比较大,而且冲力方向与重力方向基本一致。此时土体在重力和冲力的共同作用下,泥石流启动所需要的降雨历时越短。

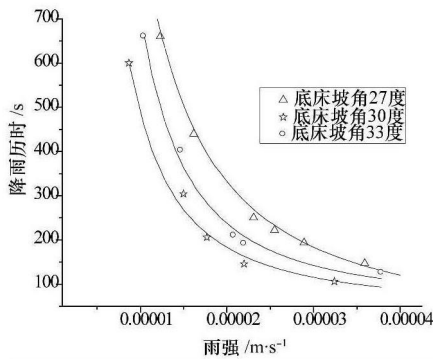


图 7 北川土泥石流启动降雨历时-雨强关系

Fig. 7 Rainfall duration and density curve of Beichuan soil when debris flow initiation

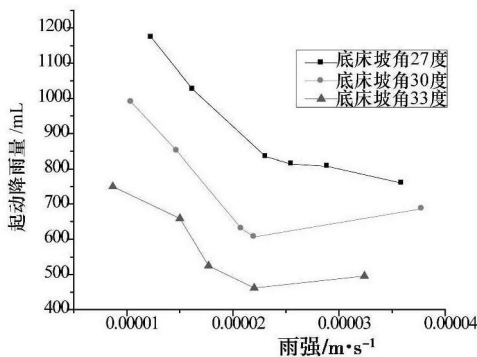


图 8 北川土泥石流启动降雨量-雨强关系

Fig. 8 Total rain and density curve of Beichuan soil when debris flow initiation

图 8 为北川土体在不同坡角下泥石流启动所需降雨总量和雨强的关系,可以看出,当坡角相同时,

随着雨强的减小,启动泥石流所需要的降雨总量不断增加;当雨强相同时,坡角越大,泥石流启动所需要的降雨总量越小。

在两种土体的模型试验中,粉细砂土体在降雨作用下,当雨强较大时,土体表面形成了地表径流,而北川土体表面不会形成地表径流。粉细砂模型试验中的有效入渗量小于降雨总量,而北川土的有效入渗量与降雨总量相同。从力学作用方面来看,人工降雨施加于土体上,雨滴击打在土体表面,土体会受到一定的击打力,对土体有一定的冲刷作用。同时,击打力有沿斜面向下的分力,对泥石流启动有一定的促进作用。击打力随雨强的增大而不断增大,使得泥石流启动所需总雨量相对较小。

4 结 论

通过对一系列粉细砂和北川土体的降雨泥石流启动模型试验,分析了降雨历时、雨强、土坡坡角、土体密度等因素对泥石流启动的影响,揭示了北川土和粉细砂在降雨作用下泥石流启动的过程和机理。初步结论如下:

(1)粉细砂在降雨作用下泥石流启动过程经历了完全入渗、薄层地表径流、深层地表径流 3 个阶段;北川土的泥石流启动过程仅经历了完全入渗阶段。

(2)粉细砂在降雨作用下土层表面出现一定的沉降,在降雨前期沉降速度最大,随着降雨历时的增加,沉降的速度不断减小,且随着降雨强度的增加总沉降量也有所增加;北川土在降雨作用下,土体沉降量相对较小,启动泥石流所需的临界雨强相对较大。

(3)粉细砂在雨强较小时,降雨为完全入渗,坡角越大,泥石流启动所需要的降雨历时越小;当雨强超过一定量时,坡度越大,泥石流启动所需降雨历时越长。北川土在坡角相同时,随着雨强的减小,启动泥石流所需要的降雨历时不断增加,且增加的速度越来越大;当雨强相同时,坡角越大,启动泥石流所需要的降雨历时越短。

(3)粉细砂和北川土泥石流的启动都是重力和渗流共同作用的结果,而土的颗粒大小和级配的影响使得两种作用所占的地位不同。对于粉细砂,当雨强较小时,重力起主导作用;当雨强较大时,渗流作用占主导地位。对于北川土,土体入渗率比较大,雨水下渗的向下冲力较大,并与重力方向基本一致,

土体在重力和冲力的共同作用下,泥石流启动所需要的降雨历时越短。

本研究成果为降雨作用下北川地区的泥石流灾害预警提供了参考依据。

参 考 文 献

- Anderson S A, Sitar N. 1995. Analysis of rainfall-induced debris flow[J]. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, **12**(7): 544~552.
- Cannon S H, Gartner J E, Wilson R C, et al. 2008. Storm rainfall conditions for floods and debris flows from recently burned areas in southwestern Colorado and southern California[J]. *Geomorphology*, **96**(3-4): 250~269.
- Chen N S, Zhou W, Yang C L, Hu G S, et al. 2010. The processes and mechanism of failure and debris flow initiation for gravel soil with different clay content[J]. *Geomorphology*, **121**: 222~230.
- Chen X Q, Cui P. 2006. Artificial rainfall experimental study on landslide translation to debris flow[J]. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, **25**(1): 106~116.
- Chen Z X, Wang R, Hu M J, et al. 2010. Study of content of clay particles for debris flow occurrence in Jiangjia valley[J]. *Rock and Soil Mechanics*, **31**(7): 2197~2201.
- Cui P, Wei F Q, et al. 2008. Geo-hazards in Wenchuan Earthquake area and countermeasures for disaster reduction[J]. **23**(4): 317~323.
- Gao B, Ren G M, Wang Y, et al. 2014. Study on formation conditions and initiation mechanism of Gaojia gully's debris flow in Wenchuan county[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, **25**(4): 1~5.
- Hu M J, Wang R, 2003. Testing study on the correlation among landslide, debris flow and rainfall in Jiangjia valley[J]. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, **22**(5): 824~828.
- Iverson R M. 1997. The physics of debris-flows[J]. *Reviews of Geophysics*, **35**(3): 245~296.
- Jeffrey A C, Kinner D A, Jonathan W G. 2008. Initiation conditions for debris flows generated by runoff at Chalk Cliffs, central Colorado[J]. *Geomorphology*, **96**: 270~297.
- Jiang X W, Zhang J, et al. 2002. Discussion on the dynamic features and dynamic mechanism of storm debris flow in loess area[J]. *Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, **13**(3): 29~33.
- Ni H Y, Tang C, 2014. Advances in the physical simulation on debris flow initiation in China[J]. *Advances in Water Sciences*, **25**(4): 606~613.
- Qian N, Wang Z Y. 1984. A preliminary study on the mechanism of debris flows[J]. *Acta Geographical Sinica*, **39**(1): 33~43.
- Tang C, Tie B. 2009. Reconnaissance and analysis on the rainstorm induced debris flow in Weijiagou valley of Beichuan city after Wenchuan earthquake[J]. *Journal of Mountain Science*, **27**(5): 625~630.
- Xu Q, 2010. The 13 August 2010 catastrophic debris flows in Sichuan province: characteristics, genetic mechanism and suggestions[J]. *Journal of Engineering Geology*, **18**(5): 596~607.
- Xu Y N, Cao D B, Zhang J H, et al. 2009. Research on starting of mine debris flow based on artificial simulation experiment in Xiaoqingling gold area[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, **28**(7): 1388~1395.
- Yang W M, Wu S R, Zhang Y S, et al. 2007. Research on Formation Mechanism of the Debris Flow on Slope Induced by Rainfall[J]. *Earth Science Frontiers*, **14**(6): 197~204.
- 陈晓清, 崔鹏等. 2006. 滑坡转化泥石流启动得人工降雨试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, **25**(1): 106~116.
- 陈中学, 汪稔, 胡明鉴, 等. 2010. 黏土颗粒含量对蒋家沟泥石流启动的影响分析[J]. *岩土力学*, **31**(7): 2197~2201.
- 崔鹏, 韦方强等. 2008. 汶川地震次生山地灾害及其减灾对策[J]. *科技减灾*, **23**(4): 317~323.
- 崔鹏. 1991. 泥石流启动条件及机理的实验研究[J]. *科学通报*, **36**(4): 1650~1652.
- 高波, 任光明, 王军等. 2014. 四川汶川高家沟泥石流形成条件与启动机理研究[J]. *中国地质灾害与防治学报*, **25**(4): 1~5.
- 胡明鉴, 汪稔. 2003. 蒋家沟流域暴雨滑坡泥石流共生关系研究[J]. *岩石力学与工程学报*, **22**(5): 824~828.
- 江兴旺, 张骏, 等. 2002. 黄土地区暴雨型泥石流的动力学特征及其成因机制探讨[J]. *中国地质灾害与防治学报*, **13**(3): 29~33.
- 倪化勇, 唐川. 2014. 中国泥石流启动物理模拟试验研究进展[J]. *水科学进展*, **27**(5): 625~630.
- 钱宁, 王兆印. 1984. 泥石流运动机理的初步探讨[J]. *地理学报*, **39**(1): 33~43.
- 唐川, 铁永波. 2009. 汶川震区北川县城魏家沟暴雨泥石流灾害调查分析[J]. *山地学报*, **27**(5): 625~630.
- 徐友宁, 曹淡波, 张江华, 等. 2009. 基于人工模拟试验的小秦岭矿区渣渣型泥石流启动研究[J]. *岩石力学与工程学报*, **28**(7): 1388~1395.
- 许强, 2010. 四川省813特大泥石流灾害特点、成因及启示[J]. *工程地质学报*, **18**(5): 596~607.