

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201703034

一次洪水过程的泥石流物源体侵蚀机制试验

王飞¹,王常明¹,徐佩华¹,丁桂伶²,王宁¹,李硕¹,江南¹

(1.吉林大学 建设工程学院,长春 130026;2.北京市地质研究所,北京 100120)

摘要: 洪流是泥石流动力条件的主要来源之一,洪流引起的沟道物源体形成的水力类-侵蚀型泥石流的形成机理较复杂,为研究一次洪水过程中,不同降雨类型对泥石流物源体的侵蚀-破坏过程的影响,利用自制大比例模型槽,通过降雨和洪水共同作用,以北京市南窖沟为研究对象,进行泥石流缩尺模型试验.通过对试验现象的观测和描述,实时记录了物源体表面在发生面蚀、坡脚掏蚀和切沟侵蚀过程中降雨量和洪水流量的变化.根据物源体不同位置的含水率仪及孔隙水压力计的测试结果,研究了泥石流物源体随降雨和洪水作用的侵蚀-破坏变化特征及机理.结果表明:一次洪水过程中,3种雨型作用下,物源体发生切沟侵蚀破坏的洪水流量均小于洪峰流量;前期降雨作用降低了物源体破坏的累计降雨量;直接暴雨作用下土体未饱和就已发生切沟破坏.试验结果为判断泥石流物源体发生破坏的降雨量和洪水量提供了借鉴,对泥石流启动过程中雨型的研究有重要意义.

关键词: 泥石流;洪水过程;不同雨型;模型试验;侵蚀机制

中图分类号: P642.23

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2017)12-0131-06

Experimental study on debris flow erosion mechanism based on a flood process

WANG Fei¹, WANG Changming¹, XU Peihua¹, DING Guiling², WANG Ning¹, LI Shuo¹, JIANG Nan¹

(1.College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun 130026, China; 2.Beijing Institute of Geology, Beijing 100120, China)

Abstract: The flood current is one of the main sources of hydrodynamic conditions of debris flow. The formation mechanism of the hydraulics-erosion debris flow caused by the flood current is more complicated. To study the influence of different types of rainfall on the erosion and destruction process of debris flow in a flood process, flume experiments were conducted in Nanjiao gully. The big-scale flume was made, and the artificial rainfall device as well as the rear flow device was needed. The changes of precipitation as well as flood discharge were recorded in the process of surface erosion, slope erosion and trench erosion through the observation and description of the experimental phenomena. The erosion-destruction characteristics and mechanism of debris flow were studied based on the test results by moisture content and pore water pressure at different locations of the soils. The results indicate that in a flood process the gully erosion damage occurs before the arrival of the flood peak under the three types of rainfall. The antecedent rainfall reduces the cumulative precipitation of the soil damage, and gully failure occurs before the soil is saturated with "direct rainstorm type". The experimental results provide references for judging the rainfall and flood volume of debris flow occurrence, which has great significance for the study of rainfall pattern in the process of debris flow initiation.

Keywords: debris flow; flood hydrograph; different rainfall types; model experiment; erosion mechanism

北京市北部和西部山区是泥石流灾害的多发区,文献[1]统计出北京地区现已查明的泥石流沟和潜在泥石流沟共有816条,分布在7个区县64个乡镇范围内,泥石流灾害已成为威胁北京市山区人民的重大地质灾害问题.泥石流爆发突然,成灾迅速,启动和运动过程复杂,越来越多的学者通过启动试验揭示泥石流的形成和运动过程,通过泥石流模型试验研究泥石流启动机理,也是泥石流预测预警的重要减灾手段.

近年来,国内外学者在泥石流模型试验方面取得了大量研究成果:如文献[2]通过降雨模型试验研究了细沟长度与横断面的变化规律;文献[3]指出,山洪作用是沟道中松散物质启动的主要因素,沟道内松散物质在山洪作用下,极易被掀动甚至揭底,展开山洪作用下泥石流的启动过程研究具有实际价值;文献[4]定义一次洪水过程指有一定质量的水在断面上通过,表现为水位起涨、顶峰和回落3个过程.文献[5]通过人工降雨模型试验对不同粒径的2种硅砂($D_{50}=0.13, 0.05$ mm)进行了模拟试验,得出土体滑动距离和孔压之间的关系;文献[6]得出细沟、浅沟、切沟和冲沟适宜的宽深比范围分别为5~17, 2~5, 0.4~1.8和0.1~0.6;文献[7]通过人工降雨诱发泥石流的水槽试验,研究了土体破裂面处的水土作用关系,得出随着初始含水率的增加,土体

收稿日期:2017-03-07

基金项目:国家自然科学基金(41572257);

北京市科委课题(Z141100003614052)

作者简介:王飞(1990—),男,博士研究生;

王常明(1966—),男,教授,博士生导师

通信作者:王常明, wangcm@jlu.edu.cn

的滑裂面逐渐升高的结论;文献[8]设计了3种降雨强度,研究了冲沟型泥石流形成机理和演化特征,发现小雨强条件下土体破坏以滑坡为主,大雨强条件下,土体以侵蚀垮塌破坏为主,并且雨强越大,泥石流黏度越小,试验多出现高含砂洪流.泥石流模型试验多考虑水的作用条件,一般分为两方面,即人工降雨模型或径流冲刷模型试验,这两种试验条件在国内外模型试验中应用最广,泥石流模型试验发展至今已取得了较大的研究成果.

目前,泥石流模型试验多基于降雨因素或者恒定流量的径流冲刷试验,但自然界中泥石流的启动破坏过程中,径流并非稳定不变,而是随降雨和时间的变化而变化.因此,稳定径流的泥石流冲刷试验存在一定缺陷,本文根据北京市水文手册,设计十年和百年一遇暴雨的洪水过程线进行径流模拟,并结合不同雨型的作用研究泥石流物源体的侵蚀-破坏机理.

本文对房山区南窖沟流域进行了现场调查,并选取了一处典型老泥石流堆积物为物源体,通过自制泥石流试验台,研究了一次洪水过程中,不同降雨类型对泥石流物源体侵蚀-破坏的影响.本文设计了3种不同的降雨类型,首次运用一次洪水过程作为泥石流的后方汇水,模拟降雨和洪水共同作用下泥石流的侵蚀-破坏机理.

1 试验方法

1.1 试验土体

南窖沟位于北京市房山区,流域面积 24 km²,沟谷总长为 39.24 km,属于特大型泥石流沟.选取沟内一泥石流流体为典型物源,该物源体长 135 m,宽 40 m,高 5 m.试验采用相似比法,现场取土,根据 SL 237—1999《土工试验规程》等质量替代法剔除 2 cm 以上粒径,进行材料配比,土的天然密度为 1.58 g/cm³,孔隙比 $e=0.76$, $d_{50}=53$ mm,级配曲线如图 1 所示,该土的不均匀系数 $C_u=304.3$,曲率系数 $C_c=30.1$,为不良级配土,根据《岩土工程勘察规范》定名为碎石土.

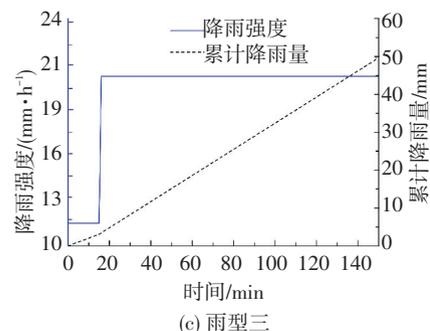
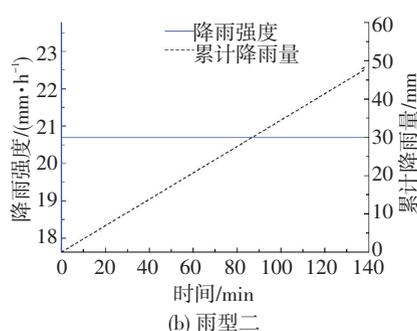
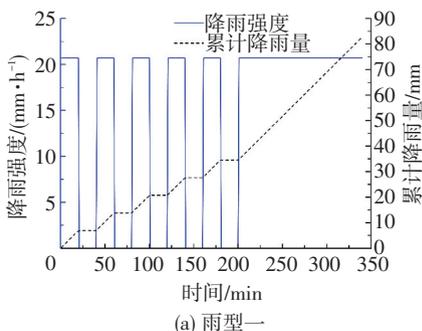


图 3 降雨类型

Fig.3 Rainfall patterns

1.2 试验模型

根据相似比原理,采用 1 : 30 比例尺,在北京自制泥石流试验台(见图 2).实验台由供水系统、降雨系统(雾化喷头,散射直径为 0.67 m,散射角 60°,纵向布设 1 列,共 4 个喷头)、后方汇水系统、和物料堆积台等构成,物料堆积台长 450 cm、宽 133 cm,高 30 cm.图 2 中 8 个位置均放置一个含水率仪和孔隙水压力计.其中 1 号和 4 号埋置深度为 5 cm,2 号和 5 号为 15 cm,3 号和 6 号为 10 cm,7 号和 8 号为 20 cm,其中 6 号仪器已压坏,试验中无数据,仪器纵向按等间距布置,间距均为 90 cm.

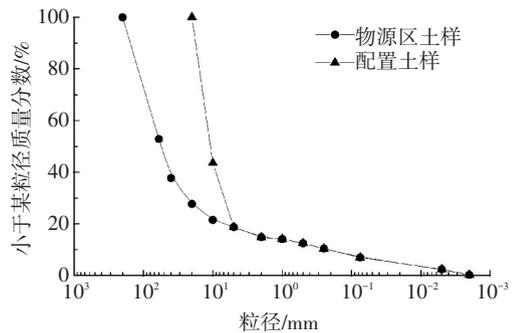


图 1 试验土体颗粒级配

Fig.1 Particle distribution curve

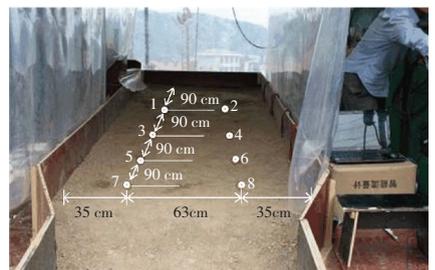


图 2 含水率和孔隙水压力仪器位置

Fig.2 Position of instrument

1.3 洪水过程线及雨型设计

试验采用 3 种雨型:雨型一:间歇前期降雨+暴雨;雨型二:暴雨;雨型三:小雨转暴雨(见图 3).根据《北京市水文手册》,计算出直接暴雨和小雨转暴雨洪水过程线(见图 4、5).图中虚线为实际洪水过程线,折线是为便于阀门调节的阶梯式洪水过程线.

2 试验过程及分析

2.1 雨型一试验过程及分析

0~200 min 按照图 3(a) 仅施加降雨,200 min 时按照图 3(a) 和图 4 同时施加降雨和后方汇水,203 min,前缘坡脚表面细颗粒被带走,表层土体呈蜂窝状;204 min,前缘坡脚开始形成两条长约 5~10 cm 的冲沟;205 min,溯源侵蚀和表面冲刷加剧,中间位置形成多条纹沟;210 min,溯源侵蚀速度增大,沟内粗细颗粒被洪水带走,大块颗粒由滑动搬运转化为滚动搬运,形成贯通性冲沟;210~216 min,洪峰逐渐来临,沟内粗粒物质被大量搬运和推移,物源体破坏具有阵性特征;物源体破坏照片见图 6。

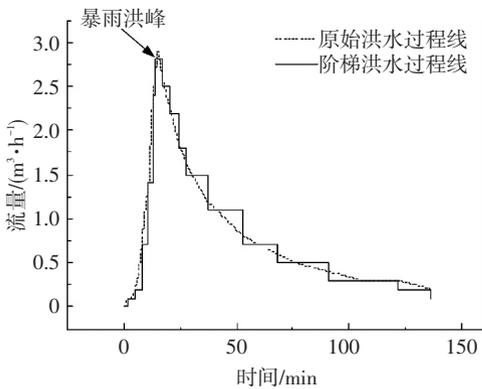


图 4 暴雨洪水过程线

Fig.4 Heavy rain flood hydrograph

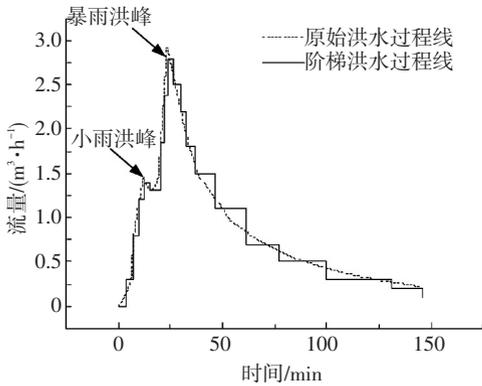


图 5 小雨转暴雨洪水过程线

Fig.5 Heavy rain to light rain flood hydrograph

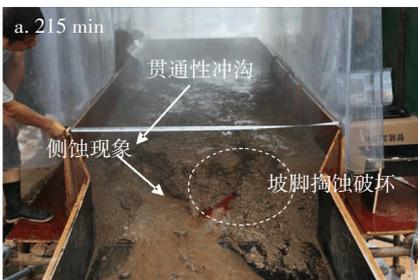


图 6 雨型一物源体破坏照片

Fig.6 Soil failure photo of rainfall type 1

2.2 雨型二试验过程及分析

0 min 时,按照 3(b) 和图 4 同时施加降雨和后方

汇水。4 min,坡脚处水流渗出,表面形成径流;5 min,坡脚处细砂颗粒从坡脚流出,颗粒之间的支撑力由粗颗粒之间的嵌合力与摩擦力承担;7 min,侵蚀加剧,坡脚处形成垂直侵蚀沟,下游可见含砂水流推移碎石颗粒运动;9 min,水流的侧蚀作用增强,冲沟两侧土体向沟内塌陷,土体发生渐进式破坏;12 min,溯源侵蚀加强,冲沟缓慢向后推移,未发生整体性破坏;12~16 min,随着洪峰来临,冲沟继续加宽加深,粗颗粒物质大量流失,物源体破坏照片见图 7。

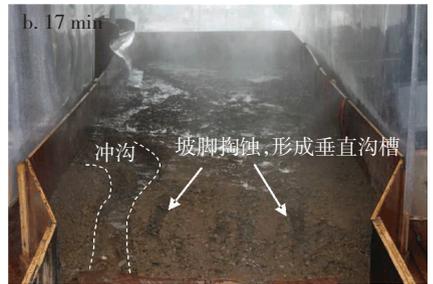


图 7 雨型二物源体破坏照片

Fig.7 Soil failure photo of rainfall type 2

2.3 雨型三试验过程及分析

按照图 3(c) 和图 5 同时施加小雨和后方汇水;4 min 形成径流,表层细颗粒被冲走,坡脚底部形成稳定渗流,并呈蜂窝状;6 min,前缘坡脚出现破坏,土体表层形成纹沟,底部为粗化层;14 min,同时施加暴雨和后方汇水;16 min,前缘中部形成宽 20 cm,长 30 cm,深 8~12 cm 冲沟;20 min,随着后方汇水流量增大,冲沟内碎石颗粒被水流冲到流通区或堆积区,并出现揭底现象;20~25 min,洪峰来临,物源体搬运能力增强;试验破坏照片见图 8。



图 8 雨型三物源体破坏照片

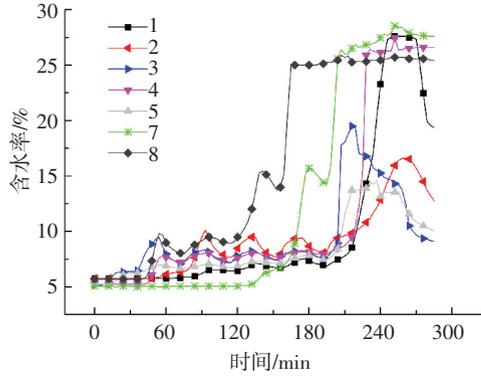
Fig.8 Soil failure photo of rainfall type 3

3 试验数据分析

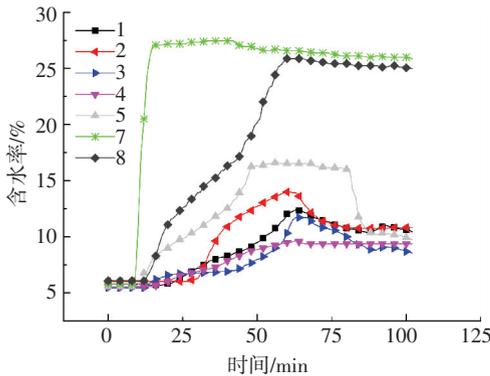
3.1 含水率分析

图 9(a) 中,土体的初始含水率为 5%~7%,其中 7 号和 8 号位于坡脚处,含水率上升最快,前期降雨结束时,含水率分别达到 25% 和 16%。1~5 号仪器在间断性前期降雨期间含水率为 8%~9%。其中 1 号埋深 5 cm,2 号埋深 15 cm,含水率分别达到 27% 和 16%,上部土体首先达到饱和。由于坡脚处水头差最

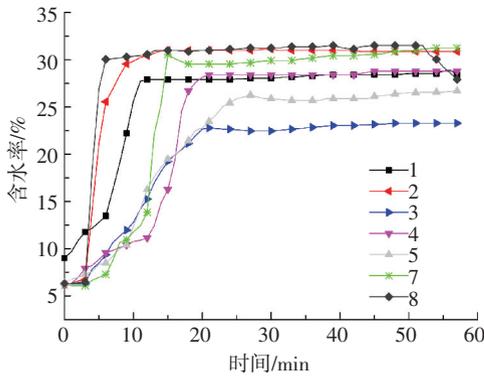
大,随着细颗粒物质冲出,土体骨架孔隙变大,渗透力也逐渐增大,土体下部未达到饱和就已经发生切沟破坏^[9].因此,上部土体达到饱和后基质吸力降为 0,土体抗剪强度 τ_f 下降,最终由于 $\tau > \tau_f$,土体发生破坏.



(a) 雨型一



(b) 雨型二



(c) 雨型三

图 9 不同雨型的含水率变化曲线

Fig.9 Water content curves of different rain types

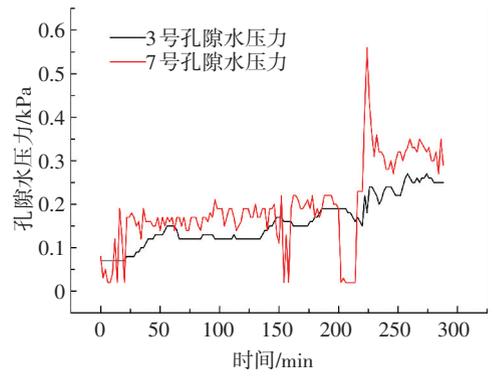
图 9(b)中,7 号和 8 号坡脚位置含水率最先达到饱和.1~5 号含水率随着时间的增大也逐步增大,最大含水率为 11%~13%,并未达到饱和.因此,直接暴雨作用下,降雨入渗少,土体表面径流大,土体内聚力下降小,土体抗剪强度 τ_f 下降不明显,但洪水作用下,剪切下滑力较大,土体来不及饱和就已经发生切沟破坏.

图 9(c)中,8 号、1 号和 2 号仪器在小雨时最先达到饱和,此时土体并未明显破坏.暴雨作用后,各位置均达到饱和.图中 3 号和 5 号位于模型箱右

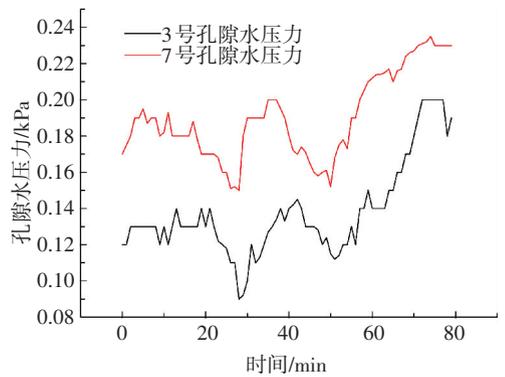
侧,冲沟在左侧,因此 3 号和 5 号含水率增加最缓慢,最终含水率分别达到 22% 和 25%.两种雨型的结合作用下,物源体含水率基本饱和,土体粘聚力迅速下降,土体内部掏蚀严重,发生切沟破坏,破坏模式仍为侵蚀-冲沟型.

3.2 孔隙水压力分析

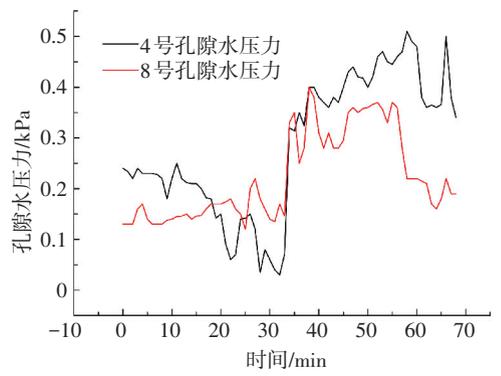
图 10(a)中,冲沟发生在模型箱左侧,因此选取冲沟一侧的 3 号和 7 号进行分析.7 号位置孔隙水压力在前期降雨过程中,变化较平稳,200 min 时由于施加洪水作用,坡脚位置发生侵蚀,210 min 时孔隙水压力迅速降低,破坏后又开始增加.3 号探头在 210~230 min 内发生突然下降,土体发生侵蚀破坏时,内部细颗粒向外迁移,土体骨架易形成集中渗流,造成孔隙水压力急剧下降,且下降过程复杂,跳跃性大.



(a) 雨型一



(b) 雨型二



(c) 雨型三

图 10 不同雨型的孔隙水压力变化曲线

Fig.10 Pore water pressure curves of different rain types

图 10(b)中,冲沟在左侧,仍取 3 号和 7 号位置进行分析.3 号和 7 号孔隙水压力在 18~29 min 时出现陡降现象,此时坡脚开始发生破坏,42~58 min 内又发生孔隙水压力的陡降现象.随着沟床物质不断启动并破坏,孔压出现阶梯型下降现象,40 min 时在水流的掏蚀作用下,土体向沟内倒塌,孔隙水压力随降雨和水流侵蚀作用的变化而变化.

图 10(c)中,冲沟在模型箱右侧,取冲沟一侧的 4 号和 8 号进行分析.两条曲线均在 15~20 min,25~35 min 发生陡降现象,暴雨作用后,在面蚀作用下土体迅速发生侵蚀破坏.孔隙水压力的变化与破坏现象吻合,因此孔隙水压力消散的过程也是土体发生破坏的过程.土体破坏并不是一个连续过程,而是一个随机的阵发性过程,孔隙水压力曲线也表现出阵发性特征^[10].

4 泥石流的侵蚀机制分析

4.1 矿物成分和流变性分析

取南窖沟堆积物进行 X 射线衍射分析结果见表 1.其中,堆积物样本以原生矿物为主,成分为石英和长石,其质量分数高达 73%;黏土矿物主要为伊利石和高岭石,分别占 20%和 7%.伊利石和高岭石比表面积小,压缩性低,亲水性弱.在黏粒含量相同情况下,伊利石和高岭石形成的网格结构较为松散,起始静切力、刚性系数和宾汉屈服力较小.

南窖沟泥石流介于携沙水流和塑性土体之间,属于非牛顿体,又具有宾汉塑性和圣维南体的特征,但其流变性与宾汉体有一定差异,可认为是具有起始静切力的 Herschel-Bulkley 流变模式(H-B 流体)^[11].

表 1 X 射线矿物衍射质量分数

Tab.1 X ray diffraction mineral percentages %									
泥石流名称	Q	fs	Pl	Cc	Do	Sid	Am	I	K
南窖沟	51	3	19	—	—	—	—	20	7

注:Q—石英;fs—碱性长石;Pl—斜长石;Cc—方解石;Do—白云石;Sid—菱铁矿;Am—角闪石;I—伊利石;K—高岭石

4.2 侵蚀状态分析

物源堆积体的侵蚀规律与物源体破坏过程相一致,图 11~13 为物源体破坏过程中的雨量、洪水流量和侵蚀时间随侵蚀阶段的变化特征对比图,切沟侵蚀是物源体发生破坏的显著标志^[12].

图 11 中,雨型一发生面蚀、坡脚掏蚀和切沟侵蚀所需雨量最小,物源体发生切沟侵蚀时累计降雨量为 103.4 mm;雨型二发生切沟侵蚀累计降雨量为 134.4 mm,雨型三发生切沟侵蚀的降雨量为 156.5 mm.因此,前期降雨的作用降低物源体切沟破坏时的累计雨量;小雨和暴雨的联合作用需要更大

的雨量使土体发生切沟破坏.

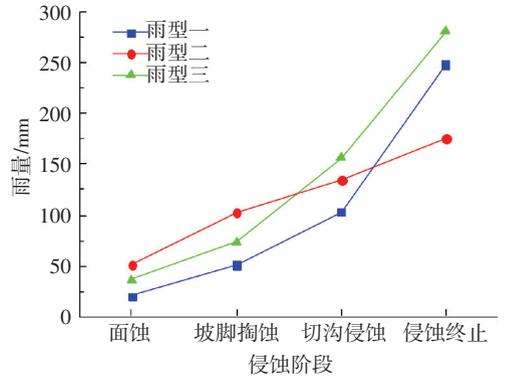


图 11 各侵蚀阶段雨量对比

Fig.11 Rainfall contrast of each erosion stage

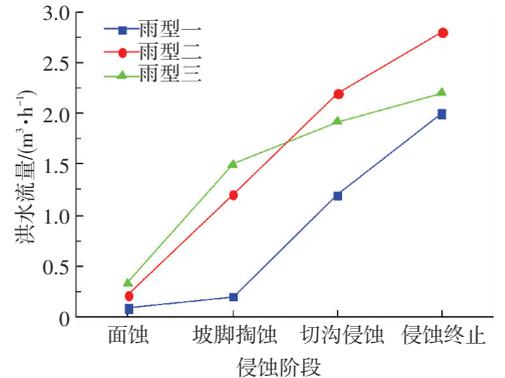


图 12 各侵蚀阶段洪水流量对比

Fig.12 Flood discharge contrast of each erosion stage

图 12 中,雨型一各个侵蚀阶段洪水流量最小;雨型二前 3 个侵蚀阶段,洪水流量近似呈直线型上升,雨型三发生面蚀和坡脚掏蚀时,洪水流量最大.发生切沟侵蚀时,3 种雨型后方洪水流量分别为 1.2、2.2 和 1.92 m³/h,均小于泥石流的洪峰流量 2.8 m³/h,且前期降雨作用减小了泥石流物源体破坏所需后方汇水.

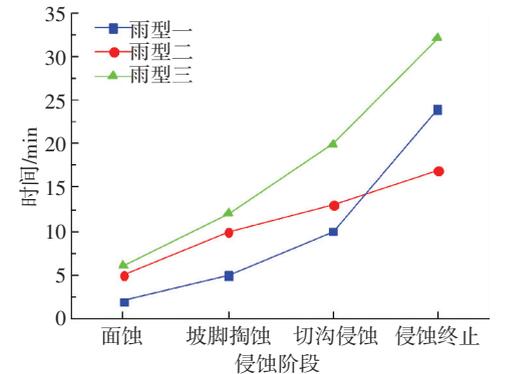


图 13 各侵蚀阶段时间点对比

Fig.13 Time contrast of each erosion stage

图 13 中,前 3 个侵蚀阶段的时间由大到小为雨型三>雨型二>雨型一,雨型三发生切沟侵蚀破坏时间为 20 min,雨型二为 14 min,雨型一为 10 min.雨型三发生切沟侵蚀破坏时间最长,在小雨降雨的 14 min 内,物源体破坏不明显,暴雨作用后泥石流侵

蚀加剧,侵蚀规模逐渐加大,20 min 时发生贯通性侵蚀切沟.雨型一发生面蚀、坡脚掏蚀和切沟侵蚀的时间最短.

泥石流侵蚀力根本上取决于土体剪切力和切向自身重力,其抗剪力取决于法向重力、孔压和土体 $c-\varphi$ 值^[13-14].试验过程中,3 种雨型作为试验变量因素,增加了土体的含水率和孔隙水压力,降低了土体的内聚力,洪水的作用使得土体的剪切力增加,土体更易发生剪切破坏.因此,雨型一在间断性前期降雨作用下,土体含水率迅速上升,土体发生切沟侵蚀破坏所需洪水流量最小,破坏时间最短.雨型二作用直接百年一遇暴雨,雨水来不及入渗,土体内聚力下降小,土体受水流剪切力破坏,因此土体破坏需要更多的洪水流量.雨型三在小雨作用下,雨水入渗量多,土体内聚力下降大,两种雨型的结合作用下,作用时间更长,破坏规模较大.

5 结 论

1) 本文首次将一次洪水过程作为泥石流启动和破坏的设计条件,具有合理性,泥石流侵蚀破坏机制为降雨-径流-面蚀-坡脚掏蚀-切沟侵蚀-侵蚀终止,切沟侵蚀发生在洪峰来临之前.

2) 3 种雨型的坡脚位置均达到饱和且最先发生破坏,饱和含水率为 25%~30%;直接暴雨作用下,土体尚未饱和就已发生切沟侵蚀破坏,且最大含水率为 9%~16%.

3) 土体侵蚀破坏并不是一个连续过程,而是随机的阵发性过程,孔隙水压力曲线也具有阵发性特征,孔隙水压力消散的过程也是物源体发生破坏的过程.

4) 切沟侵蚀破坏时,3 种雨型后方洪水流量分别为 1.2、2.2 和 1.92 m³/h,均小于泥石流的洪峰流量,切沟破坏时间分别为 10、14、20 min.前期降雨作用降低了物源体发生切沟破坏的临界雨量和洪水流量.

参考文献

- [1] 李容全,徐振溥.北京山区泥石流分布特点[J].山地研究,1983,1(3):42-48.
LI Rongquan, XU Zhenpu. The distribution of debris flow in the mountainous region of Beijing[J]. Mountain research, 1983, 1(3): 42-48.
- [2] BRUNO C, STEFANO C D, FERRO V. Field investigation on rilling in the experimental Sparacia area, South Italy [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2008, 33(2): 263-279.
- [3] TANG C, ZHU J, LI W L. Rainfall triggered debris flows after Wenchuan earthquake[J]. Bulletin Engineer Geology Environment, 2009, 68: 187-194.
- [4] 肖义,郭生练,熊立华,等.一种新的洪水过程随机模拟方法研究[J].四川大学学报(工程科学版),2007,39(2):55-60.
XIAO Yi, GUOSHenglian, XIONG Lihua, et al. A new random simulation method for constructing synthetic flood hydrographs [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2007, 39(2): 55-60.
- [5] WANG G, SASSA K. Factors affecting rainfall-induced flow slides in laboratory flumetests[J]. Geotechnique, 2001, 51(7): 587-599.
- [6] 赵春红,高建恩.坡面不同侵蚀沟断面特征及水力几何形态[J].水科学进展,2016,27(1):22-30.
ZHAO Chunhong, GAO Jian'en. Cross-section characteristics and hydraulic geometry of different erosion gullies on slopes [J]. Advances in Water Science, 2016, 27(1): 22-30.
- [7] 周健,高冰,张姣,等.初始含水量对砂土泥石流启动影响作用分析[J].岩石力学与工程学报,2012,31(5):1042-1048.
ZHOU Jian, GAO Bing, ZHANG Jiao, et al. Influence of initial water content on sandy debris flow starting process [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(5): 1042-1048.
- [8] 倪华勇.人工降雨条件下冲沟型泥石流起动试验研究[J].工程地质学报,2015,23(1):111-118.
NI Huayong. Field experiments for groove-type debris flow initiation with artificial rainfall [J]. Journal of Engineering Geology, 2015, 23(1): 111-118.
- [9] FUJII K. Study on the Accuracy of warning and evacuation timing for debris flow [J]. Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering, 1994, 47(2): 35-42.
- [10] GASH J H C. Comparative estimates of interception loss from three coniferous forests in Great Britain [J]. Journal of Hydrology, 1980, 48: 89-105.
- [11] 杨红娟,韦方强,胡凯衡,等.不同上限粒径泥石流浆体的流变参数变化规律[J].水利学报,2016,47(7):884-890.
YANG Hongjuan, WEI Fangqiang, HU Kaiheng, et al. Rheological parameters of debris flow slurries with different maximum grain sizes [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(7): 884-890.
- [12] 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(增刊2):85-91.
ZHU Xinghua, CUI Peng, ZHOU Gongdan, et al. Experimental study on the erosion law of diluted debris flow [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(S2): 85-91.
- [13] 陈剑,王全才,陈颖骐,等.基于 Hertz 理论的泥石流大块石冲击力修正计算[J].哈尔滨工业大学学报,2017,49(2):124-129.
CHEN Jian, WANG Caiquan, CHEN Yingqi, et al. Amending calculation on impact force of boulders in debris flow based on Hertz theory [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(2): 124-129.
- [14] 吴永,裴向军,何思明,等.降雨型泥石流对沟床侵蚀的水力学机理[J].浙江大学学报(工学版),2013,47(9):1585-1592.
WU Yong, PEI Xiangjun, HE Siming, et al. Hydraulic mechanism of gully bed erosion by debris flow in rainfall [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2013, 47(9): 1585-1592.