

文章编号: 1008 - 2786 - (2014) 1 - 98 - 07

坡面泥石流演化模式及其试验

唐红梅 陈洪凯 唐 兰

(重庆交通大学岩土工程研究所 重庆 400074)

摘 要: 坡面泥石流是斜坡地貌演化的重要环节,也是我国山区公路的主要水毁灾害,具有分布广、出现频率高、致灾作用强等特点。从地貌演化观点,将坡面泥石流演化模式分为顶部刮铲演化模式(模式 1)、溯源挖掘演化模式(模式 2)和局部饱和孕滑演化模式(模式 3)。其中模式 1 遵循蠕滑→滑流→刮铲滑流→沉积演化过程;模式 2 遵循前缘开裂→崩滑→链式崩滑→沉积演化过程;模式 3 遵循局部饱和→蠕滑→滑流→沉积演化过程;针对坡面泥石流演化模式 3,选取前期降雨量 120 mm 和降雨强度 15 mm/(10 min) 的试验工况,前期降雨分 4 次,降 1 h,停 2 h,强降雨分 4 次降雨实施,降 1 h,停 30 min。通过室内模型试验,通过试验过程中土体参数实时监测分析了前期降雨入渗阶段土体含水量、孔隙水压力的变化规律,强降雨阶段揭示了局部饱和阶段、蠕滑阶段、滑流阶段和沉积阶段随试验过程的变化过程,量化了饱和区、蠕滑区、滑流区、沉积区的面积大小与试验持续时间关系;初步分析了坡面泥石流演化过程研究的复杂性及研究趋势,尤其应高度重视坡面泥石流演化各阶段的力学机制描述与转换问题研究。

关键词: 地貌学;演化模式;坡面泥石流;室内模型试验

中图分类号: P642.23 P694 U418.5+6

文献标志码: A

关于泥石流启动与演化过程的研究,对防治泥石流灾害有着十分重要的作用。泥石流是由水和固体物质(泥沙、石块)组成的混相流体,其产生过程较复杂^[1]。从地貌形态角度,可将泥石流分为坡面泥石流和沟谷泥石流,其中坡面泥石流是指位于斜坡表面的松散土体在强降雨及冰雪融水作用下孕发的高浓度碎屑与水混合物的泥石流类型,是我国山区公路沿线的主要水毁类型^[2],具有分布广、出现频率高、致灾作用强等特点。迄今,沟谷泥石流研究进展迅猛,Savage 通过水槽试验分析了无粘性颗粒流的边壁摩擦、龙头跃动和颗粒弹跳等动力学作用^[3],唐红梅等对沟谷泥石流的形成条件进行了研究^[4],陈洪凯等对沟谷泥石流的运动过程进行了模型试验^[5],钱宁等运用高含沙水流理论分析了水力类泥石流的运动机理^[6],陈洪凯等通过模型试验探讨了沟谷泥石流冲击信号频率特性和能量分布规律^[7-8]。有关坡面泥石流形成机制与发育规律等方

面的研究进展缓慢,国内外学者主要从发生的条件和启动模型进行研究,如 Blijenberg 认为高强度降雨产生的地表径流和土体滑动是诱发坡面泥石流的必要条件^[9],曾凡伟等对重庆北碚地区 21 个坡面泥石流的坡度阈值进行了分析,启动坡度阈值为 27° ~ 32.5°^[10],马东涛等对云南盈江“7·20”坡面泥石流分析发现发生坡度为 30°,主要诱发因素是区域性特大强降雨^[11],李艳福等对汶川震区 19 个坡面泥石流的研究发现日降雨量超过 20 mm/d,就可能引发坡面泥石流,超过 30 mm/d,诱发群发性泥石流,日降雨量超过 90 mm/d,就有可能大量暴发坡面泥石流;形成区的平均坡度为 38°^[12]。张永双等对宁陕县城“8.29”坡面泥石流的形成机理研究发现强降雨是主要诱因,1 h 降雨量达 69.5 mm,远远超过阈值降雨量^[13]。杨为明等认为坡面流以平移式滑动破坏为主,残坡积土层厚度≤2 m 的陡坡地带,坡度大于 40°,土体含水量达到 28% ~ 30% 时,粘聚

收稿日期(Received date): 2013 - 03 - 18; 改回日期(Accepted): 2013 - 07 - 28。

基金项目(Foundation item): 项目基金(Foundation item): 国家自然科学基金项目“坡面泥石流精细演化机制研究”(编号 41071017)。[Study on fine evolution mechanism of slope debris flow ,No. 41071017.]

作者简介(Biography): 唐红梅(1968 -),女(汉),重庆人,博士,研究员。从事地质灾害减灾理论与减灾技术研究。[Tang Hongmei(1968 -), female(ethnic Han),Chongqing ,Ph D ,professor. Geological hazard mitigation theories and technologies.] Tel: 023 - 62652719 ,E - mail: hmtang6778@ sina. com

力,内摩擦角与含水量关系曲线中都出现明显的拐点,饱和度超过75%其值急剧下降,易诱发坡面泥石流^[14]。张万顺等从土体剪切力和抗剪切力之间的关系出发,探讨了坡面泥石流起动模式并建议采用St. Venent方程进行坡面泥石流演绎分析^[15],陈晓清等用人工降雨试验探讨了滑坡转化为泥石流的启动特性^[16]。为了深入探索坡面泥石流演化机制,本文采用地貌学方法,分析坡面泥石流演化模式,并通过室内模型试验,选取前期降雨和强降雨组合探讨坡面泥石流形成与演化过程。研究成果对于进一步实施坡面泥石流演化机制研究、推动公路沿线泥石流防灾减灾有积极意义。

1 坡面泥石流演化模式分类

自然斜坡及边坡表面一定厚度(3 m以内)^[14,17]的第四纪残积物、坡积物等松散土体、较陡峻的地形条件(坡角 $25^{\circ} \sim 50^{\circ}$)^[10-12,14]是产生坡面泥石流的基本条件,而强降雨及冰雪融水是形成坡面泥石流的主要诱发因素。如2004年云南盈江“7·20”坡面泥石流的发生于19 h降雨达到186.2 mm^[11],天山公路北段K616公路内侧边坡松散土体

在每年冰雪融化季节均要产生坡面泥石流。从地貌演化观点,可将坡面泥石流演化模式概化为三类,即顶部刮铲演化模式(模式1)(图1)、溯源挖掘演化模式(模式2)(图2)和局部饱和孕滑演化模式(模式3)(图3)。每种模式遵循的四阶段演化过程为:

模式1:蠕滑→滑流→刮铲滑流→沉积

模式2:前缘开裂→崩滑→链式崩滑→沉积

模式3:局部饱和→蠕滑→滑流→沉积

资料分析和现场调查发现,坡面泥石流的3种演化模式均需要强降雨或高强度冰雪融水作用,主要区别表现为:斜坡表面的松散土体厚度较薄时坡面泥石流基本遵循模式1演化,土体厚度较厚且缺乏足够的前期降雨时坡面泥石流基本遵循模式2演化,而土体厚度较厚且有较大前期降雨时坡面泥石流主要遵循模式3演化。本文针对模式3,通过室内模型试验探索坡面泥石流演化特性。

2 坡面泥石流局部饱和孕滑演化模式试验

2.1 试验模型与观测设备

人工降雨试验采用重庆交通大学泥石流动力模

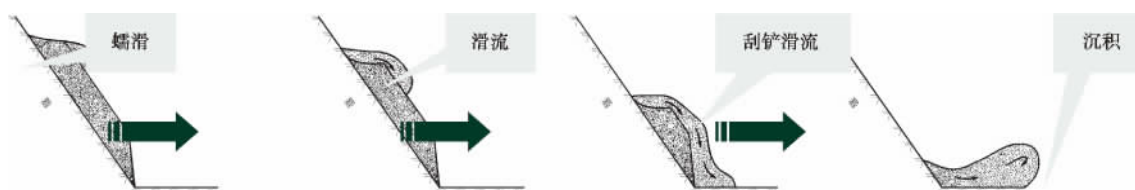


图1 坡面泥石流顶部刮铲演化模式

Fig. 1 Top scraping development model of slope debris flow



图2 坡面泥石流溯源挖掘演化模式

Fig. 2 Digging upward development model of slope debris flow



图3 坡面泥石流局部饱和孕滑演化模式

Fig. 3 Local saturated-triggering development model of slope debris flow

型 建造坡面泥石流试验模型(图4) ,基岩面沿斜坡倾向方向长度 5.5 m ,沿斜坡走向方向宽 4.3 m ,高 2.65 m ,基岩面倾角 30° ,坡面土体填筑厚度 60 cm ;降雨装置为具有自主知识产权的“智能降雨装置”(ZL201110113318.7) [18] ,该装置能模拟小雨至特大暴雨 ,有效降雨面积 15 m × 8 m (见图4) 。

含水量测试设备采用美国生产的 TRASE TDR 时域水分仪 ,孔隙水压力测量采用的 SL - 406 振弦式孔隙式压力计 ,SL - 406 系列读数仪。

在试验模型坡脚前方 2 m 处安置 pco. 1200 hs 型高速摄像机 ,用于连续观测试验过程中坡面泥石流的形成过程。

2.2 试验土体与铺设

试验土体取自重庆交通大学后山开采的侏罗系泥岩 ,岩性为粉质粘土 ,其物理参数见表 1 ,矿物成分通过 XD - 3 射线衍射仪获得 ,粘土矿物亲水矿物含量达到 31.2% 。将土体分 10 层铺设在试验模型斜坡表面 ,填筑过程中从人工压实土层内取样进行土工试验 ,为减小填土过程中对土体密实度的影响 ,采用先从两边铺筑 ,其宽度为 55 cm ,然后分层铺筑中间部分。按照天然重度 $18 \pm 0.1 \text{ kN/m}^3$ 控制土体压实密度。

2.3 试验降雨工况

依据模式 3 坡面泥石流演化需求 ,将降雨工况设为前期降雨量和降雨强度两个因子组合 [11 - 13 ,16] ,拟定试验工况:

前期降雨量: 累计降雨总量为 120 mm ,采用 5 mm/(10 min) 雨强 ,共需降雨历时 240 min ,分为 4 阶段 ,降 1 h ,停 2 h 。4 次降雨在 1 d 内完成。前期降雨中间的停顿时间为 2 h ,模拟的是非饱和土体自由入渗阶段需要的较长停顿时间。

降雨强度: 15 mm/(10 min) 。在前期降雨的第 4 次完成后 ,停 2 h ,进行短历时强降雨 ,降雨 1 h ,停 30 min 。分 4 阶段完成 ,强降雨阶段停顿 30 min ,降雨间断时间较短 ,因为形成大面积的坡面泥石流需要较强的坡面径流。

2.4 试验过程

传感器的埋设孔位置(图5) ,设置 TRASE 的采样为 2 min/次 ,SL - 406 空隙水压力仪 2 min/次 ,土样含水量取样位置: 基本与 3 孔传感器的地表高程相同 ,横向距离边缘距离坡壁约 0.2 m ,每次前期降雨完成后立即取样 ,土样自表层向下垂直深度分别为 5 cm、8 cm、12 cm、15 cm ,采用烘干法获取其含水量 ,取样量少 ,避免同一位置重复 ,基本未扰动坡面土体结构。

模型试验程序: 建造试验模型基岩面→铺设试

表 1 模型试验土体物性参数

Table 1 Physical parameters of indoor model test for soil

| 天然重度 /(kN/m^3) | 土石比 /(2 mm 界) | 天然含水量 /% | 饱和含水量 /% | 孔隙比 | 矿物成分 /% | 渗透系数 /(cm/s) |
|------------------------------|--------------------|-------------|-------------|------|---|----------------------------|
| 18 | 47:53 | 9.36 | 25 | 0.58 | 石英 66.7、方解石 2、粘土矿物 31.3(其中高岭石 11.8 , 蒙脱石 9.7 及绿泥石为 9.7) | 8.4×10^{-4} |

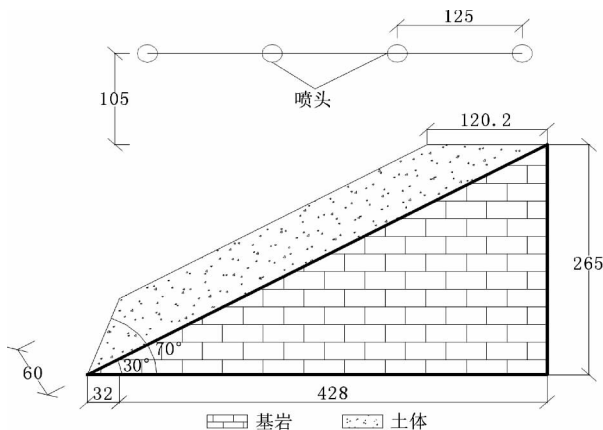


图 4 坡面泥石流试验模型(单位: cm)

Fig. 4 Test model of slope debris flow (unit : cm)

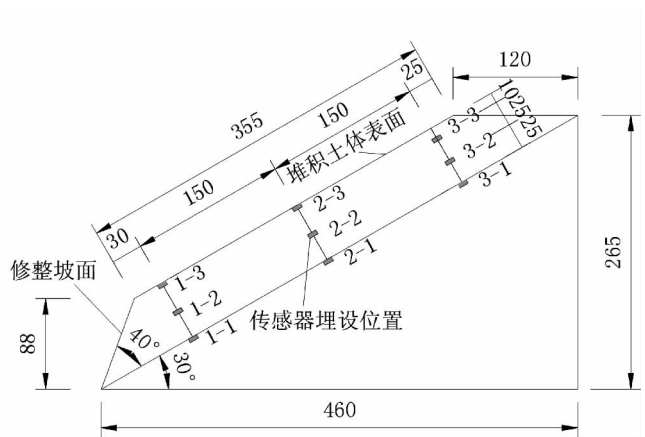


图 5 试验传感器埋设孔位布置图(单位: cm)

Fig. 5 Location of buried sensors(unit: cm)

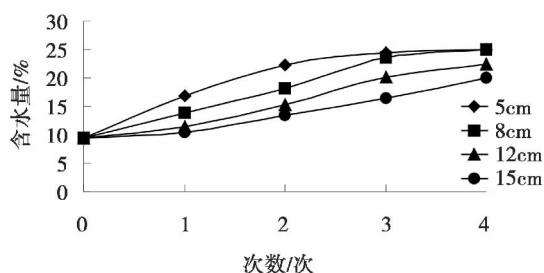


图6 测点3的质量含水量图

Fig. 6 mass water content of cite NO. 3

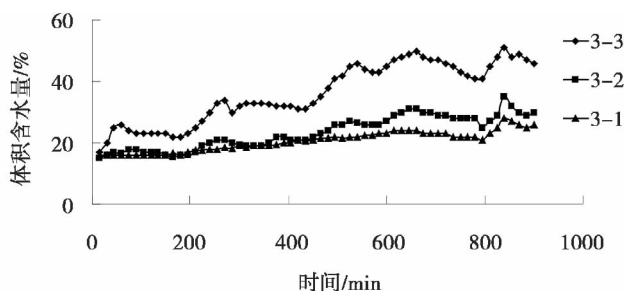


图7 测点3土体体积含水量曲线图

Fig. 7 Curve of volume water content in soil-body of cite No. 3

验土体→在模型前方架设高速摄像机→打开高速摄像机→开启智能降雨装置→采用高速摄像机记录试验过程中边坡表面土体的变形特征,记录传感器的读书,现场采样测试其含水量。

2.5 试验结果分析

2.5.1 前期降雨阶段

前期降雨分四阶段采用 5 mm/(10 min) 模拟的降雨蒸发过程,在这过阶段土体处于降雨非饱和自由入渗阶段到逐步饱和阶段。

1. 质量含水量的变化

从图6可知,测点3位置在从地表垂直向下 5 cm、8 cm、12 cm、15 cm 深,在前4次降雨后的质量含水量,5 cm 处在第2次前期降雨后就接近饱和,8 cm 处前期第3次降雨后接近饱和,12 cm 处在前期第4次降雨后未达到饱和,含水量已达到 22.8%,接近土体饱和。经历前期4次降雨,降雨历时 240 min,降雨饱和深度测试值约 10 cm,低于按照饱和渗透系数 8.4×10^{-4} cm/s 计算的饱和深度 12.1 cm。坡面土体浅表层实现了从非饱和到饱和的自由入渗阶段,此阶段土体入渗率即渗透系数 8.4×10^{-4} cm/s 与降雨雨强 5 mm/(10 min) 接近,降雨基本入渗,不形成坡面径流。

2. 土体体积含水量曲线

从图7可知,以测点3为例,对同一埋设孔位的不同深度进行比较,土体的体积含水量变化趋势是上部含水量比下部含水量先增加,土体自由阶段,水是逐渐向下渗透的,使下部含水量也在逐渐增加,在土体表层,含水量的变化与降雨相关性明显,稍有滞后现象,在降雨间隙阶段,含水量约有下降趋势,在第4次前期降雨后,含水量下降明显,存在明显的波动现象,这主要是此时浅表层土体开裂明显,中层含水量在降雨入渗阶段的初期,含水量变化不明显,在前期降雨的第3次,第4次,含水量增加就明显了,

而土体底层,在前4次前期降雨阶段,含水量增加不明显。

3. 孔隙水压力曲线

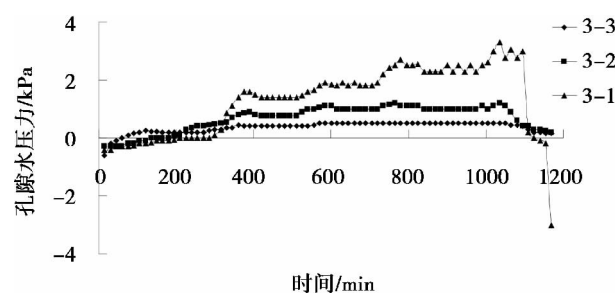


图8 测点3土体孔隙水压力曲线图

Fig. 8 Curve of soil pore pressure of cite No. 3

从图8可知,以测点3为例,对同一埋设孔位的不同深度孔隙水压力进行比较,土体从表层到深部,孔隙水压力是逐步增加的,在前期降雨的第1阶段,土体出现负孔隙水压力,水时间的增加,表层的孔隙水压力转为正,在中下部的空隙水压力仍为负,在前期降雨的第2阶段,中间土体的孔隙水压力逐渐转为正,出现负责可能与土体中的基质吸力有关,然后底层土体的孔隙水压力也变为正,且随着时间的增加,孔隙水压力增加很快,很快超过前表层的孔隙水压力,一直持续增长,在前期降雨的第3阶段后,孔隙水压力曲线出现波动,土体已开裂,在第四阶段降雨完成后,孔隙水压力曲线波动更明显,开裂在进一步加剧。

2.5.2 强降雨阶段

1. 局部饱和阶段(Local saturated stage)

前期降雨期间,试验模型表面土体含水量逐渐增大,直到第1次强降雨前,边坡表面深度 10 cm 范围内土体达到饱和,含水量由天然状态 9.36% 增大到 25%。第1次强降雨结束后,试验模型浅表层土

体含水量进一步增大,通过高速摄像观察到模型中上部出现2个饱和区(图9),边缘开裂,有地下水渗出,其浅层部分土体随地表径流而流失,面积分别约为 0.4 m^2 和 1.1 m^2 左右,饱和层厚度分别为约13 cm和15 cm左右,并在饱和区后部出现多条拉张裂缝。饱和区的形成主要与斜坡表面下凹微地貌及局部土体密实度较小有关,这种现象在自然界的边坡表面易于出现。

2. 蠕滑阶段(Creep sliding stage)

第2次强降雨结束后,坡面泥石流演化进入蠕滑阶段。斜坡中上部在局部饱和阶段出现的2个饱和区逐渐融合形成面积约 1.9 m^2 的蠕滑区(图10),区内的土体处于基本饱和状态,平均含水量增大到21.2%,蠕滑区基本饱和土体的厚度在27 cm左右,区内土体在自重作用下沿下部未饱和土体顶部向坡下滑动,滑动速度较慢,在 $2\sim 4\text{ cm}/(10\text{ min})$ 。蠕滑区面积增大到 3.2 m^2 左右(图8),其前部沿坡向下30 cm范围的自然斜坡为被蠕滑而来的初始泥石流流体覆盖。

3. 滑流阶段(Sliding-flowing stage)

第3次强降雨结束后,坡面泥石流进入到滑流阶段。初期,滑流区面积秉承蠕滑区演化而来,面积达到 3.6 m^2 ,随后在斜坡左侧出现新的滑流区,使滑流区总面积达到 6.7 m^2 (图11)。滑流区内土体含水量达到22.3%,土体呈现流动状态,泥石流流体流动速度 $20\sim 30\text{ cm}/(10\text{ min})$,泥石流流体进入坡脚地貌平台。

4. 沉积阶段(Depositing stage)

在第4次强降雨结束后,坡面泥石流演化过程全面进入沉积阶段,大量的泥石流流体沉积在坡脚的地貌平台上,淤埋作用强烈,沉积区面积约 4.4 m^2 ,区内泥石流流体淤埋厚度可及27 cm(图12)。此时,斜坡表面滑流区底部处于非饱和状态的土体或基岩面出露,两次强降雨所形成的地表径流沿坡快速下泄。

3 讨 论

3.1 坡面泥石流演化各阶段力学问题



图9 边坡表面局部饱和阶段

Fig.9 Local saturated stage of slope surface



图10 坡面泥石流蠕滑阶段

Fig.10 Creep sliding stage of slope debris flow



图11 坡面泥石流滑流阶段

Fig.11 Sliding-flowing stage of slope debris flow



图12 坡面泥石流沉积阶段

Fig.12 Depositing stage of slope debris flow

模型试验表明,坡面泥石流局部饱和孕滑演化模式可分为局部饱和阶段、蠕滑阶段、流滑阶段和沉积阶段。土体遵循从天然状态→非饱和状态→饱和状态演变过程。泥石流流体呈现土体多孔介质→固液气三相流体→固液两相演变规律。显然,坡面泥石流演化过程存在非常复杂的物理、力学及其变化问题。初步分析认为,在局部饱和阶段,可采用高等土力学方法,探索不同岩性土体吸水、入渗、强度衰减特性,量化不同降雨强度及降雨历时作用下可能出现局部饱和区的范围大小;在蠕滑阶段,可采用多相流理论,建立泥石流流体本构模型,提出泥石流蠕滑速度确定方法;在流滑阶段,可采用宾汉体理论,提出泥石流流体流动速度计算方法;在沉积阶段,可采用流变固结理论,构建泥石流流体固结方程,提出泥石流沉积物承载力估算式。值得指出的是,坡面泥石流演化各阶段力学机制的转换问题复杂而重要,提出相应的判别准则或许是解决该关键问题的一个有效途径。

3.2 坡面泥石流发育过程对强降雨的精细响应

模型试验表明,在不考虑大气蒸发条件下,降雨量可分为径流量和入渗量两部分,均会对坡面泥石流的发育过程做出贡献,其中径流作用主要通过流水沿地表的拖拽力/剪切力加速土体沿坡向下的迁移运动。对于坡面泥石流演化模式1和模式2作用更为显著,入渗水体对于坡面泥石流演化模式3和模式2更为明显。由于不同试验工况所表征的降雨强度、降雨历时不同,即使在土体、地貌等环境条件相同条件下,坡面泥石流可能出现不同的演化模式,每个演化模式中不同演化阶段出现的时间、历时等也存在显著差异。换言之,精确量化不同试验工况下降雨量入参与地表径流的分配关系,揭示坡面泥石流发育过程对强降雨的精细响应规律,这是实施坡面泥石流地貌演化机制研究的重要科学视野。

4 结论

1. 从地貌演化观点,将坡面泥石流演化模式分为3种模式,即顶部刮铲演化模式、溯源挖掘演化模式和局部饱和孕滑演化模式,并提出了坡面泥石流每种模式的4阶段演化过程。

2. 针对坡面泥石流局部饱和孕滑演化模式,拟定室内模型试验方案,通过室内模型试验,分析了前期降雨条件下土体内部质量含水量、体积含水量及孔隙水压力的变化规律;强降雨短历时阶段精细揭

示了局部饱和阶段、蠕滑阶段、流滑阶段和沉积阶段随试验过程的变化过程,量化了饱和区、蠕滑区、滑流区、沉积区的面积大小与试验持续时间关系。

3. 基于室内模型试验,从坡面泥石流演化各阶段力学问题和坡面泥石流发育过程对强降雨的精细响应两方面,初步分析了坡面泥石流演化过程研究的复杂性及研究趋势,尤其应高度重视坡面泥石流演化各阶段的力学机制描述与转换问题研究。

参考文献(References)

- [1] Fei Xiangjun, Shu Anping. Motion mechanism and control of debris flow disaster[M]. Beijing: Tsinghua university Press, 2004: 182 - 186 [费祥俊,舒安平. 泥石流运动机理与灾害防治[M]. 北京:清华大学出版社, 2004: 182 - 186]
- [2] Chen Hongkai, Tang Hongmei, Ye Siqiao. Study on debris flows along highways in china [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2008, 19(1): 1 - 5 [陈洪凯,唐红梅,叶四桥. 中国公路泥石流研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2008, 19(1): 1 - 5]
- [3] Bagnold R A. Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear [J]. Royal Society of London Proceedings Series A, 1954, 225(1160): 49 - 63
- [4] Savage S B. Gravity flow of cohesionless granular materials in chutes and channels [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1979, 92(1): 53 - 96
- [5] Tang Hongmei, Chen Hongkai. Research on formation condition of V-shaped debris flow with impact and deposit [J]. Journal of Chongqing JiaoTong University, 2004, 23(5): 82 - 88 [唐红梅,陈洪凯. 冲淤变动沟谷泥石流形成条件研究[J]. 重庆交通学院学报, 2004, 23(5): 82 - 88]
- [6] Chen Hongkai, Tang Hongmei, Xian Xuefu. Model test of valley-shaped debris flow motion [J]. Journal of Natural Disasters, 2009, 18(6): 160 - 165 [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]
- [7] Chen Hongkai, Tang Hongmei, Xian Xuefu et al. Experimental model of debris flow impact features [J]. Journal of Chongqing University, 2010, 33(5): 114 - 119 [陈洪凯,唐红梅,鲜学福,等. 泥石流冲击特性模型试验[J]. 重庆大学学报, 2010, 33(5): 114 - 119]
- [8] Chen Hongkai, Tang Hongmei, Xian Xuefu et al. Probability distribution characteristics of pulsating load formed by debris flow impact [J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(8): 124 - 127 [陈洪凯,唐红梅,鲜学福,等. 泥石流冲击脉动荷载概率分布特征[J]. 振动与冲击, 2010, 29(8): 124 - 127]
- [9] Harry M Blijenberg. Application of physical modeling if debris flow triggering to field conditions: Limitations posed by boundary conditions [J]. Engineering Geology, 2007, 91: 25 - 33
- [10] Zeng Fanwei, Xu Gang, Li Qing et al. Critical gradient and debris flow on slope—a case study in Beibei, Chongqing [J]. Mountain Research, 2004, 22(5): 568 - 571 [曾凡伟,徐刚,李青. 坡度阈值与坡面泥石流——以重庆北碚区为例[J]. 山地学报, 2004,

- 22(5):568-571]
- [11] Ma Dongtao ,Zhang Jinshan ,Feng Zili ,et al. Main causes of the landslide ,debris flow and torrential flood disasters on July 20 2004 in Yingjiang of Yunnan and the disaster reduction measures [J]. Journal of Catastrophology 2005 20(1) : 67 - 71 [马东涛 ,张金山 ,冯自立 ,等. 2004 7.20 云南盈江滑坡泥石流山洪灾害成因及减灾对策[J]. 灾害学 2005 20(1) : 67 - 71]
- [12] Li Yanfu ,Wang ZhaoYin ,Shi Wenjing ,et al. Investigation of slope debris in Wenchuan earthquake area [J]. Journal of Sediment Research 2011 1:1-7 [李艳福 ,王兆印 ,施文婧 ,等. 汶川震区的坡面泥石流调查研究[J]. 泥沙研究 2011 1:1-7]
- [13] Zhang Yongshuang ,Qu Yongxin ,He Feng ,et al. Resarch on the formation mechanism of debris flow on slope around Ningshan County in the Hinterland of the Qinling Orogen [J]. Hydrogeology & Engineering Geology 2005 5: 84 - 88. [张永双 ,曲永新 ,何峰 ,等. 秦巴山区宁陕县城坡面型泥石流的形成机理[J]. 水文地质工程地质 2005 5: 84 - 88]
- [14] Yang Weimin ,Wu Shren ,Zhang Yongshuang ,et al. Research on formation mechanism of the debris flow on slope induced by rainfall [J]. Earth Science Frontiers 2007 ,14(6) : 197 - 204 [杨为民 ,吴树仁 ,张永双 ,等. 降雨诱发坡面泥石流形成机理[J]. 地学前缘 2007 ,14(6) : 197 - 204.]
- [15] Zhang Wanshun ,Qiao Fei ,Chui Peng ,et al. study on the numerical model of debris flow on the slope [J]. Research of Soil and Water Conservation 2006 ,13(4) : 146 - 149 [张万顺 ,乔飞 ,崔鹏 ,等. 坡面泥石流起动模型研究[J]. 水土保持研究 2006 ,13(4) : 146 - 149]
- [16] Chen Xiaoping ,Cui Peng ,Feng Zili ,et al. Artificial rainfall experimental study on landslide translation to debris flow [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2006 25(1) : 106 - 116 [陈晓清 ,崔鹏 ,冯自立 ,等. 滑坡转化泥石流启动的人工降雨试验研究[J]. 岩石力学与工程学报 2006 25(1) : 106 - 116]
- [17] Peng Tao ,Xu Gang ,Xia Daqing. Occurrence of slope debris flow as self-organization criticality and its prediction and forecast [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation 2006 26(3) : 104 - 108 [彭涛 ,徐刚 ,夏大庆. 坡面泥石流暴发的自组织临界特性及其预测预报[J]. 水土保持通报 2006 26(3) : 104 - 108]
- [18] Chen Hongkai ,He Xiaoying ,Tang Hongmei ,et al. One auto-control rainfall device and its using method: China ,201110113318. 7 [P]. 2011 - 05 - 04 [陈洪凯 ,何晓英 ,唐红梅 ,等. 一种自动控制降雨装置及其使用方法: 中国 ,201110113318. 7 [P]. 2011 - 05 - 04]

Evolution Model and Test of Slope Debris Flow

TANG Hongmei ,CHEN Hongkai ,TANG Lan

(Institute of Geotechnical Engineering ,Chongqing Jiaotong University ,Chongqing 400074 ,China)

Abstract: Slope debris flow is the important link of geomorphic evolution for slope and also is the main water damage disaster of mountainous highway in China. It possesses the characteristics of wide distribution ,high frequency appearance and strongly disaster-caused effect. From the point of geomorphic evolution ,evolution model of slope debris flow is divided into top scraping development model (model 1) ,digging upward development model (model 2) ,and local saturated-triggering development model (model 3) . Model 1 follows the evolution process of creep sliding ,sliding-flowing ,scraping-sliding and depositing. Model 2 follows the developing process of cracking in the front ,collapsing-sliding ,chain collapsing-sliding ,depositing. Model 3 follows the developing process of local saturated ,creeps sliding ,sliding-flowing ,depositing stage. Aims to evolution model 3 ,choose the test condition of 120 mm previous rainfall and 15 mm/(10 min) rainfall intensity. Moreover ,rainfall 1 hour duration after 2 hours stopping intervention of one stage ,including four stages of previous rainfall ,rainfall 1 hour duration after 30 min stopping of rainfall intensity ,including four stages. Through indoor model test ,some soil parameters have been measured ,analysis the changing characteristics of curves of water content ,pore water pressure finely reveal the changing process of local saturated stage ,creep sliding stage ,sliding-flowing stage and depositing stage in the test. Quantify the relationship between area size and test duration of saturated region ,creep sliding region ,sliding-flowing region and depositing region. It preliminarily analyses the complexity of the study on the evolution process of slope debris flow and research trend. Above all ,study on the description of mechanical mechanism and conversion should be paid attention to for each stage of development. Study results have positive meaning in implementing the study on evolution mechanism of slope debris flow and promoting disaster prevention and reduction of slope debris flow.

Key words: geomorphology; evolution model; slope debris flow; indoor model test