

蒋家沟流域暴雨滑坡泥石流共生关系试验研究

胡明鉴 汪 稔

(中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学重点实验室 武汉 430071)

摘要 分析了蒋家沟流域内特殊环境下崩中有滑、滑中带崩的特殊形式的滑坡。通过大型人工降雨滑坡泥石流试验和小型模型试验,对试验现象进行观测和含水量监测,研究暴雨条件下发生的坡面侵蚀、崩滑现象和由此引发滑坡,滑坡土体转化成泥石流的全过程,揭示了蒋家沟流域特殊环境下的暴雨、滑坡、泥石流共生关系。试验证实,蒋家沟流域暴雨、滑坡、泥石流共生关系中含水量分布有一定范围。

关键词 工程地质, 滑坡泥石流, 共生, 崩滑, 人工降雨, 含水量

分类号 TU 14, P 642.23

文献标识码 A

文章编号 1000-6915(2003)05-0824-05

TESTING STUDY ON THE CORRELATION AMONG LANDSLIDE, DEBRIS FLOW AND RAINFALL IN JIANGJIA VALLEY

Hu Mingjian, Wang Ren

(Key Laboratory of Rock and Soil Mechanics, Institute of Rock and Soil Mechanics,
The Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071 China)

Abstract The special landslides with slide and collapse in Jiangjia debris flow valley is studied. A large-scale landslide test and model test were conducted in site excited with artificial rainfall. The moisture content of slope was measured in the tests, and the surface erosion, collapse and slide, and transfer from landslide into debris were analysed. The correlation among rainfall, landslide and debris flow is revealed with the moisture content distribution changed.

Key words engineering geology, landslide and debris flow, correlation, collapse and slide, artificial rainfall, moisture content

1 引言

蒋家沟流域特殊的地质地貌环境给沟谷发育、坡面侵蚀、坡面松散物质聚集和运移以可乘之机,造就地表裂缝密布、山崩四起、滑坡成群、坍塌丛生、泥石流群和规模庞大的泥石流沟密集的独特环境^[1]。因此,流域特殊的地质地貌环境是控制滑坡泥石流形成与发展的决定性因素,是导致滑坡泥石流频繁活动、经久不衰的根本原因。蒋家沟每年雨季(5~10月份)发生泥石流12~20多次,崩塌、滑

坡更是不计其数^[2]。频繁发生的滑坡泥石流往往给当地的人民生活造成很大的灾害。

然而,经过对蒋家沟泥石流沟谷长期考察发现:流域内密集的滑坡泥石流沟谷中发生滑坡并转化成泥石流的并非那些位置相对较高、规模巨大、具有典型滑坡形态特征、滑动过程鲜明而突出、滑面平整光滑的大中型滑坡;而是沟谷两岸的那些坡度较陡、位置较低、不具典型滑坡形态特征、规模较小、滑动面较浅、数量众多、形态多样的兼有坡面侵蚀、崩塌、滑坡等特征的小滑坡群。这些独具特征的小滑坡群,在暴雨冲刷和沟谷流水切割作用

2001年9月28日收到初稿,2001年11月24日收到修改稿。

作者 胡明鉴 简介:男,28岁,2001年于中国科学院武汉岩土力学研究所获硕士学位,现主要从事岩土工程和特殊土方面的相关研究工作。

下很容易发生兼有重力侵蚀、崩塌、滑坡特征的特殊形式的滑坡, 滑坡产生的土体在连续暴雨和坡面含沙水流作用下液化起动形成泥石流。本文针对流域内滑坡泥石流伴生现象, 在文[3]基础上进行人工降雨激发滑坡泥石流试验和多组模型试验, 研究暴雨、滑坡、泥石流的共生关系。

2 滑坡泥石流试验

2.1 试验场地和设备

以蒋家沟流域古、老滑坡堆积斜坡作为试验地点, 在综合多种因素的情况下, 选定蒋家沟沟口右侧查管沟与主沟的分水岭下鸡冠山南坡一老滑坡堆积斜坡为试验场地。主要成分为颗粒松散破碎, 粘聚力弱的砾石土。场地天然坡度为 42° , 高差为 113.3 m(山顶距蒋家沟主沟水面), 坡脚距河床中心 30 m。试验场地为老滑坡堆积体, 坡面受后期洪积、坡积及两侧流水切割的影响, 在斜坡上呈不规则圆锥形, 下部埋藏较深, 顶端可见基岩, 基岩面倾角为 62° 。

尽管斜坡为老滑坡体, 但滑坡体下部深埋入泥石流堆积层中, 一般洪水难以切割坡脚, 因而滑坡体很稳定。为模拟坡角流水切割而将坡脚修整成前缘高差约 1.8 m 的直立临空面, 临空面下部再挖掘形成约 0.7 m 的深沟。斜坡上宽 3.7 m、下宽 7.4 m、长 7 m。斜坡面两边开挖顺沟使斜坡成孤立块体。为减少降雨流失, 在坡面上开挖 3 条水平沟将坡面分成上、中、下 3 块(图 1)。中型 3.0 t 的消防车作为降雨的动力设备, 消防车水最大水压强 740 kPa, 最大扬程 17.4 m, 最大水平输水距离 360 m^[3]。消防车通过减压分水箱分送给 4 个侧喷降雨器。每个降雨器上有水阀, 可以调节水量大小和压力^[4]。试验布置图如图 1(b)和图 2 所示。

2.2 试验过程和现象

试验斜坡土体为原坡面物质在重力作用下散落、崩塌、滑坡等作用的混合堆积体, 松散破碎, 堆积杂乱, 粒径差异大, 级配不连续。岩屑成分为变质页岩和板岩碎屑, 粗粒含量很高, 含少量粘土质; 结构松散, 粘聚力较弱, 为级配不良微含细粒质砾石土, 简称砾石土^[5]。

试验共分 6 个时段, 最长 25 min, 最短 11 min, 累计降雨 92 min, 累计雨量 94.87 mm; 最大雨强 1.39 mm/min, 最小雨强 0.23 mm/min, 平均雨强为 1 mm/min^[3]。地面实测雨量 90.06 mm, 有效降雨

94.93%, 如表 1 所示。

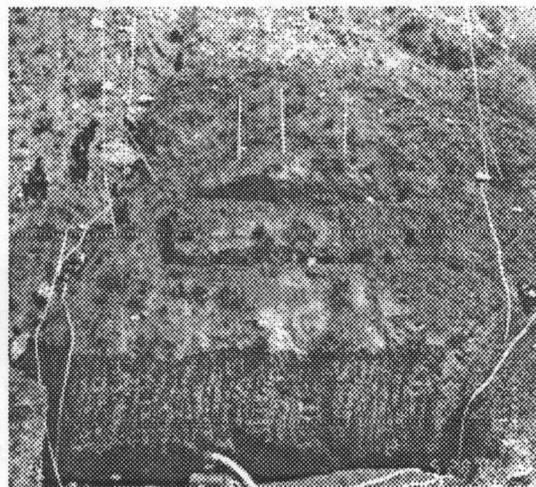
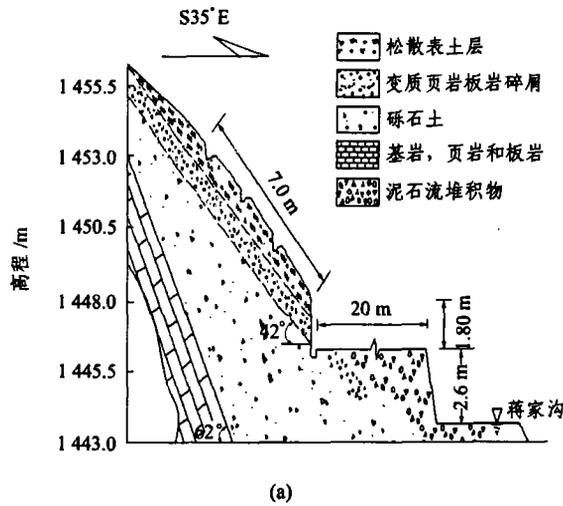


图 1 试验斜坡剖面图和照片

Fig.1 Sectional drawing and photo of the slope

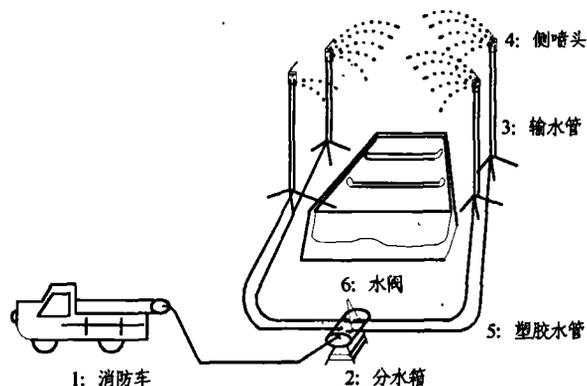


图 2 人工降雨滑坡泥石流试验布置图

Fig.2 Arrangement of the experiment slope

降雨进行 4~5 min 后表层松散土体开始溜滑、泻溜, 3~4 min 后水平沟后壁发生小崩塌, 伴随小

表 1 试验的降雨时间、雨强和降雨量

Table 1 Rainfall time, density and quantity

降雨时段	降雨时间 /min	雨强 /mm · min ⁻¹	降雨量 /mm	降雨总量 /mm
1	25	0.97	24.25	24.25
2	13	1.39	18.07	42.32
3	10	0.23	2.30	44.62
4	15	1.07	16.05	60.67
5	14	1.05	14.70	75.37
6	15	1.3	19.50	94.87

股表面径流。表面径流冲刷、携带表面的细粒和粘粒成分,形成浑浊的含沙水流。溜滑、崩塌持续约 5 min,表层松散细粒和粘粒流失后,粗大颗粒部分受雨水击打逐渐板结密实。表面径流逐渐变澄清,斜坡进入相对稳定期。

稳定期后崩塌、溜滑再度发生,崩塌后壁即刻有水流流出。流水冲刷松散崩塌堆积体中的细粒、粘粒物质形成极其浑浊的高含沙水流。高含沙水流冲刷掏蚀堆积体形成一条条的细沟。细沟两边的堆积体解体塌落并在自身重力、坡面汇流和含沙水流冲刷力合力作用下成高塑性流体状快速流动,形成一次微型泥石流。

由于坡面松散体溜滑、崩塌并向下聚集,使斜坡前沿小规模隆起,形态与试验前已有很大的改变。隆起物对斜坡堆载,同时,堆积物中驻留的大量水分成为斜坡不稳的重要因素。

随后的几场降雨试验过程中,均有坡面松散物质在降雨和径流作用下溜滑、崩塌,并经历短时的相对稳定期(5~8 min),此后再发生规模大小不等、形态各异的崩塌。第 6 场降雨开始时,松散破碎的高含水量崩塌、滑坡体堆积于下部块体前沿,使表面隆起。上部块体产生的表面径流携带大量泥沙、形成具有大量动能的高含沙水流,冲击并强烈刷深下部块体上的松散堆积体,形成许多大小、深浅不一,长度不等的细沟。水流的冲击、掏蚀作用使细沟两岸土体和下垫面解体塌落。细沟侵蚀加剧,刷深越来越深,很快在堆积体表面变形成一条条纵横交错的细沟群。细沟壁崩塌后牵引堆积体发生滑坡。滑体上宽 1.9 m,下宽 2.1 m,滑床长 1.3 m,滑床坡度 42°,呈不规则圆弧形,可观察到微弱的滑痕。块体在前缘临空面处形成剪出口,并沿临空面塌落堆积。滑坡堆积体表面坡度 37°,与

周围邻近松散体天然休止角一致^[3]。滑坡发生形态和规模如图 3 所示。

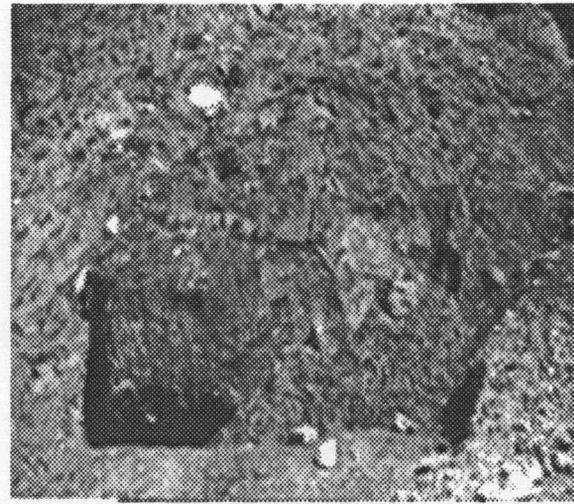


图 3 滑坡照片

Fig.3 The slope after landslide

滑坡发生后,立刻见到滑坡体后壁中间有大股水流流出,水流逐渐变小,逐渐变清。随着后壁水流流出,又促发小的崩塌。流水携带松软滑坡体中的细粒物质,形成极其混浊的高含沙水流,冲刷接近饱和的松软滑坡体形成沟槽,伴随着沟槽壁部的塌落和固体粗粒物质的补给,高含沙水流与高含水量滑坡体混合形成粘稠的塑性泥流向下快速流动,很快完成了由崩塌、滑坡体向泥石流的转化,整个过程持续 2~3 min。现场测得泥石流的容重达 23.2 kN/m³,浆体容重达 18~19.5 kN/m³(高含沙浊流),与泥石流沟谷暴发泥石流时相近。同时适时测定的土体含水量结果表明,试验土体初始含水量为 7.8%,在经过 92 min,平均降雨强度 1.00 mm/min 的降雨后,表层土体含水量平均值为 11.9%,滑坡土体含水量为 15.25%,泥石流含水量平均值为 18.22%。

2.3 试验启示

暴雨、滑坡、泥石流伴生是在蒋家沟流域特殊的地质地貌环境下、坡度普遍较大、坡角遭受流水切割、降雨充分且集中的条件下的现象。降雨条件下崩塌、溜滑而产生的松散体堆积于斜坡前沿,高含水量的堆积体受到降雨和上部表面径流产生的高含沙水流冲刷而强烈刷深、塌落,促使崩塌的发生,进而引发后部土体滑坡。高含水量的滑坡土体在后壁水流和表面径流的冲刷下形成粘稠的塑性泥流向下快速流动,实现从滑坡土体向泥石流的转

化。暴雨、滑坡、泥石流相伴而行、互动共生是在蒋家沟流域特殊的地质地貌环境条件下的独特的自然现象。

3 滑坡泥石流模型试验

为了再次验证流域内广泛存在的滑坡泥石流共生现象和研究不同坡度、不同降雨条件下的滑坡泥石流共生关系,同时为大量获取降雨滑坡泥石流试验过程中土体含水量指标的统计分析进行了大量的人工降雨滑坡泥石流模型试验,试验结果证实了蒋家沟流域老滑坡堆积斜坡上发生的暴雨-滑坡-泥石流的共生关系。

3.1 试验设置和参数

模型试验场地选择在蒋家沟流域东川泥石流观测研究站后院老滑坡泥石流堆积坡地上。3 个平行斜坡模型长 2 m, 宽 1 m, 坡度分别为 25°, 30°, 35°, 除去坡面杂草和树根。斜坡上部挖约 10 cm 的小沟, 两边各用白铁皮拦挡以避免降水外溢(如图 4)。模拟坡角流水切割而将前沿挖成高约 0.5 m 的直立面。

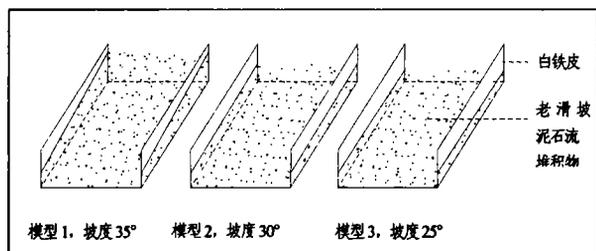


图 4 模型试验布置图
Fig.4 Modeling experiment

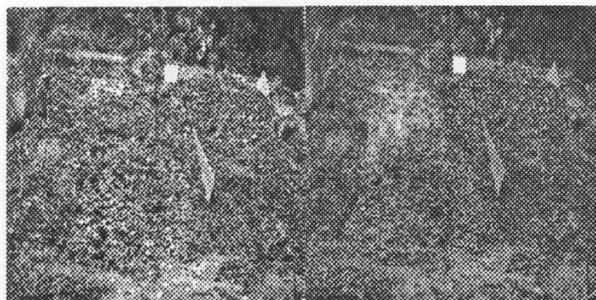
试验前测定含水量, 并进行容重和颗粒分析试验。在斜坡典型地点放置量雨杯, 适时监测雨强大小。根据雨强大小选择降雨时间: 雨强 0.7 mm/min, 降雨一般为 70~100 min; 雨强为 0.8~0.9 mm/min 时降雨 60~70 min; 雨强 1.1 mm/min 时降雨为 50 min。试验过程定时和特殊现象(如崩塌、滑坡发生、泥石流形成时)发生时测定含水量, 观察坡面物质形态变化和物质位移, 记录崩塌、滑坡发生、泥石流形成的时间和含水量等。

3.2 模型试验现象

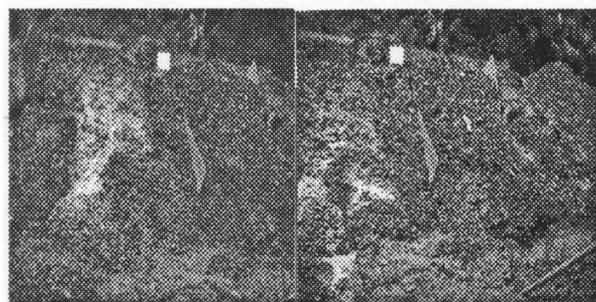
首次试验前测土体含水量 5.4%~6.6%, 容重 $(1.77\sim 1.89)\times 0.01 \text{ N/cm}^3$ 。试验采用 $\phi 11$ 侧喷降雨

器, 雨强指标为 0.9~1.1 mm/min。4~5 min 后顶沟积水、伴随表层松散物中细粒成分流失, 局部发生小溜滑。15 min 后模型 1 表面产生径流, 直到约 30 min 时模型 1, 2 前沿直立面处有小块土体崩塌。由于试验前久未降雨, 初始含水量小, 加上降雨受风力的影响流失严重, 因此 50 min 试验过程只有少量溜滑、崩塌发生而未见滑坡泥石流形成。然后, 补充降雨以达预期效果。继续降雨 42 min 后模型 1, 2 坡角崩塌和小块土体滑落。径流纵横, 在直立面处会聚成股流下, 同时坡面上形成纵横交错的纹沟和细沟。46 min 时模型 1 前沿崩塌, 崩塌土体受表面径流冲刷解体流失而形成非常浑浊的泥流。62 min 时模型 1 在距离斜坡顶端 1/5 处出现裂隙, 裂隙急速加宽加长(历时约 0.5 min), 裂隙下部土体逐渐与上部脱离而快速下滑——滑坡形成。之后 2 min, 模型 2 中部发生滑坡。同时模型 1 在滑动过程中滑动土体中部形成次生滑坡, 高含水量土体迅速滑动而向下滑动、堆积。

在连续降雨下, 表面挟沙径流冲刷高含水量的滑坡体, 形成细沟并使细沟两边土体塌落。塌落物直接补给到挟沙水流中, 使挟沙水流具有更大的规模和动能。滑坡土体在自身重力和挟沙水流合力的混合作用下液化呈流态快速流动, 形成短暂、小型的泥石流。整个形成过程见图 5。



(a) 快速下滑形成滑坡 (b) 滑坡体堆积



(c) 堆积体起动形成泥石流 (d) 泥石流后坡面形态

图 5 滑坡向泥石流转化照片组

Fig.5 Transfer from landslide to debris flow

为研究模型试验滑动面上下土体状况，笔者对滑坡发生后的土体进行开挖，并将滑动面土体颗粒成分与滑坡体颗粒进行对比分析，发现滑带土细粒和粘粒含量明显比滑坡体低(图 6)。滑带上可见到细微的水流，土体也比滑带上、下层湿润，经测试，滑带土体含水量为 14%~15%，滑带以下土体含水量分布为 11%~12%。

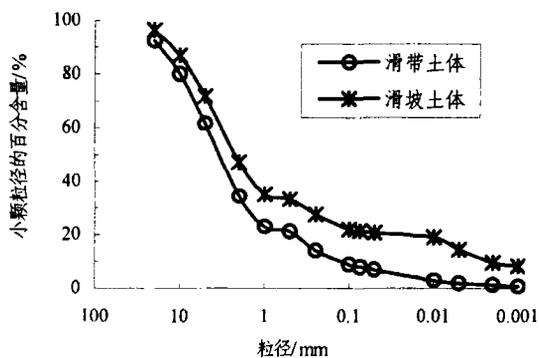


图 6 滑坡体与滑带土体颗粒分析
Fig.6 Grain comparison in different area

3.3 模型试验结果

近 30 场模型试验大致都经过了降雨条件下表层松散体流失→溜滑、崩塌→崩塌、溜滑体前沿堆载→细沟侵蚀→崩塌牵引滑坡→自身重力和含沙水流混合形成泥石流的全过程，但限于篇幅不能尽述。试验反映了在流域坡度较大，雨量充分条件下滑坡泥石流共生的独特现象和泥石流沟谷暴雨滑坡泥石流的基本形成过程。

4 共生关系中的土体含水量

由于现场试验的复杂性，试验过程中应尽可能准确、及时地取土，测定崩塌、滑坡、崩滑土体在大强度降雨条件下和雨水快速汇流形成的冲刷力作用下很快土崩瓦解并快速流动形成泥石流时的含水量。

从近 30 场降雨滑坡模型试验含水量测试结果统计分析(表 2)，崩塌、溜滑发生时土体含水量为 9%~11%，统计平均值为 10.9%。滑坡发生时含水量为 14%~16%，统计平均值为 15.3%。泥石流体含水量平均值为 18.7%，与该类土饱和含水量 18.9%相差很小，几乎达到饱和状态。泥石流形成时含水量龙头、龙尾稍有差别，龙头含水量为 19.0%，龙尾含水量 18.2%。

表 2 滑坡泥石流试验含水量统计

Table 2 Statistic moisture content in experiment				%			
试验序号	崩滑时表层	滑坡体	泥石流体	试验序号	崩滑时表层	滑坡体	泥石流体
1	6.09	12.53	15.80	16	11.10	15.44	19.51
2	6.28	16.11	18.32	17	11.98	15.00	19.13
3	8.60	14.87	18.32	18	11.24	15.63	18.49
4	11.13	15.44	19.28	19	11.48	15.83	19.35
5	11.04	14.53	17.31	20	11.48	16.50	19.20
6	10.60	14.87	18.53	21	11.63	15.22	18.73
7	11.80	13.96	17.80	22	11.80	15.22	19.35
8	11.24	15.25	19.23	23	12.09	15.44	18.96
9	11.56	14.60	17.95	24	11.27	15.63	19.55
10	11.09	15.44	18.90	25	11.56	16.02	19.16
11	11.98	15.63	18.60	26	10.89	15.80	19.40
12	11.40	15.92	18.43	27	/	15.00	18.69
13	11.71	14.37	18.69	28	/	15.92	/
14	11.19	15.49	19.24	29	/	15.30	/
15	11.00	16.40	18.75	30	/	15.29	/

5 结 论

从现场试验的观测和统计分析成果看来，基本上可以解释蒋家沟流域老滑坡堆积坡地在坡度较大、颗粒松散破碎、降雨集中条件下暴雨、滑坡、泥石流的共生关系，统计分析的含水量范围也相应的建立在老滑坡体堆积的砾石土斜坡上。

本文的研究仅是初步和试验性的，在流域特殊地质条件下降雨诱发的滑坡、滑坡体液化起动形成泥石流的机理方面，仍需进行大量和深入的研究工作。

参 考 文 献

- 1 杜榕桓, 康志成, 陈循谦. 云南小江泥石流综合考察与防治规划研究[M]. 重庆: 中国科学技术出版社重庆分社, 1987
- 2 吴积善, 康志成, 田连权等. 云南蒋家沟泥石流观测研究[M]. 北京: 科学出版社, 1990
- 3 胡明鉴, 汪 稔, 张平仓. 蒋家沟流域松散砾石土斜坡滑坡频发原因与试验模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(12): 1 831~1 834
- 4 胡明鉴, 汪 稔, 张平仓. 斜坡稳定性及降雨条件下激发滑坡试验研究[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(4): 454~457
- 5 王裕宜. 泥石流侵蚀过程中应力特征的分析研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1996, 7(2): 12~19