

# 蒋家沟流域松散砾石土斜坡滑坡频发原因 与试验模拟

胡明鉴 汪 稔 张平仓

(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** 降雨对滑坡的激发是广泛讨论的话题。从物质成分、结构构造和雨强、降雨量、土体应力特征等方面分析滑坡频发的原因,进行大型人工降雨滑坡试验,观测降雨激发滑坡的过程。室内土工实验表明内聚力和内摩擦角与含水量之间有突变现象。松散砾石土斜坡滑坡是在以降雨为主导因素的多种因素综合作用下发生的。

**关键词** 降雨, 滑坡, 含水量, 应力特征, 突变

**分类号** TU 147

**文献标识码** A

**文章编号** 1000-6915(2002)12-1831-04

## 1 前言

降雨滑坡是在降雨和渗透作用下,斜坡平衡遭受破坏而向下滑动现象<sup>[1]</sup>,包括缓慢的长期的斜坡变形和突然的急剧暴发过程。斜坡的稳定性由斜坡本身的物质成分、结构条件等因素决定,受环境条件如降雨、地震、人类活动等影响<sup>[2]</sup>。蒋家沟相当一部分滑坡都是在老滑坡的基础上,经过后期条件改变如坡脚流水切割、降雨入渗激发而再次发生规模不等形式不一的滑动。降雨是激发滑坡的主要因素,研究降雨对滑坡的激发作用很有意义。

## 2 蒋家沟流域地质条件和气候

### 2.1 流域内地质特征

斜坡本身的物质成分和结构构造决定其稳定性。在滑坡频繁发生的区域,一定有容易产生滑坡的相关地层和岩组,滑坡的分布也极其严格地局限于该类地层或岩组分布的范围内<sup>[3]</sup>。这些地层和岩组除本身极易发生滑动外,其风化破碎的产物也很容易发生滑动,导致上覆的土层或岩组也很容易沿着风化破碎层滑动。蒋家沟流域大量出露灰黑和灰绿色薄质板岩,层理清楚,褶皱强烈,节理裂隙发育,在构造应力作用下强烈变形和变质;在暴冷暴热气

候下遭受强烈风化剥蚀,使破碎的岩体极易风化剥落,形成细小的岩石碎屑,成为滑坡泥石流主要的物质来源。每逢降雨、地震时滑坡崩塌便大规模发生。

### 2.2 流域气候特征

蒋家沟流域由于受季风影响,干湿季节分明。全年降雨量多集中在雨季,夏秋两季(5~10月份)降雨量占全年的80%以上。其中6~8月份降雨最为集中,占全年降雨量的50%以上,这样强度大、雨量集中的降雨常常能激发大量的滑坡和泥石流。据统计降雨集中期常是滑坡泥石流暴发的高潮期,约有70%的滑坡泥石流是在6~8月份发生的<sup>[4]</sup>。

### 2.3 流域内滑坡泥石流

蒋家沟流域每年都要发生滑坡泥石流,平均每年雨季(5~10月)发生泥石流12~20余次,而在11~4月几乎没有滑坡泥石流发生,雨季滑坡泥石流频繁发生表明降雨是激发滑坡泥石流主要的环境因素。在1965~1985年共发生泥石流260多次,平均每年10多次,最多的一年达28次<sup>[4]</sup>。蒋家沟东川泥石流观测研究站特别研制了泥石流遥测雨量计开展泥石流预报试验。

## 3 降雨对滑坡的激发

(1) 降雨滑坡是前期降雨量和临界雨量共同作用的结果。前期降雨量是导致滑坡大规模暴发前一

2001年1月9日收到初稿,2001年3月22日收到修改稿。

作者 胡明鉴 简介:男,1974年生,2001年于中国科学院武汉岩土力学研究所获岩土工程专业硕士,现主要从事岩土工程和岩土力学方面的工作。

定时间内的降雨总量，但不是降雨量的简单叠加，而是根据一定的折减系数相加。临界雨量是造成某地区滑坡大规模暴发时的最小降雨量，与该地区岩性，气候，前期降雨量等因素相关。前期降雨量影响斜坡土体的含水量状况、增大岩体容重对斜坡加载；雨水入渗弱化岩土体、泥化软化滑带土层、降低斜坡稳定因数，造成斜坡渐进破坏。斜坡因动静水压力、表面径流、斜坡自重产生的下滑力和土体自身抗滑力等因素组成应力平衡而维持临界稳定状态，大雨强短历时的临界雨量打破这一平衡导致稳定因数降低而滑坡。

(2) 前期降雨量、临界雨量是互相联系、互相影响的。滑坡发生前的土体含水量状况与前期降雨量有密切的关系<sup>[3]</sup>。土体含水量越大则水分在土体内运移充分，增加容重对斜坡加载，土体抗剪强度降低越明显。前期降雨量越充分，斜坡土体含水量越接近饱和，激发滑坡的临界雨量也相对减少。相反地前期降雨量越小，土体含水量越小，激发滑坡就需更大的临界雨量。

### 4 降雨滑坡模拟试验

#### 4.1 实验区选择和降雨设备的架设：

试验斜坡坡度 42°，上宽 3.7 m，下宽 7.4 m，斜长 7 m。为使降雨尽可能入渗，在坡面上开挖三条水平沟使其分割成三块(如图 1, 2)。中型 3.0 t 的消防车一台作为降雨的动力设备，消防车提供的最大扬程 17.4 m，最大水平输水距离 360 m。实验时在场边两边对等的架设降雨器，设备的布置如图 2 所示。

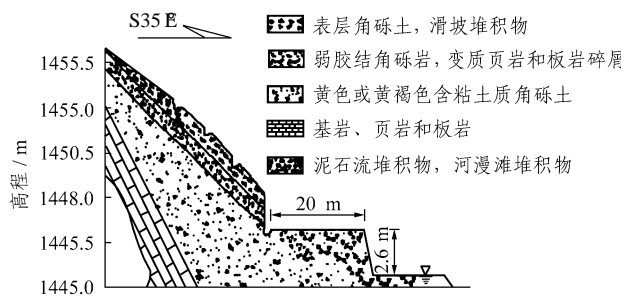


图 1 实验斜坡剖面图  
Fig.1 Section of the experiment slope

#### 4.2 试验前斜坡的稳定性检算

为验证降雨滑坡试验的可行性和对实验结果的预见性，首先对斜坡的稳定性进行初步估算。搜



图 2 实验布置图  
Fig.2 Arrangement of the experiment slope

索滑坡稳定性最小的滑面并模拟雨强 1 mm/min，持续降雨 90 min 的条件下，斜坡稳定因数发生的变化。

经计算：降雨前本实验斜坡稳定系数  $F_s = 1.21$ ，降雨后降至  $F_s = 0.96$ ，说明该降雨条件下是可以使此斜坡发生滑动，计算搜索到  $F_s$  最小的滑面如图 3 所示。

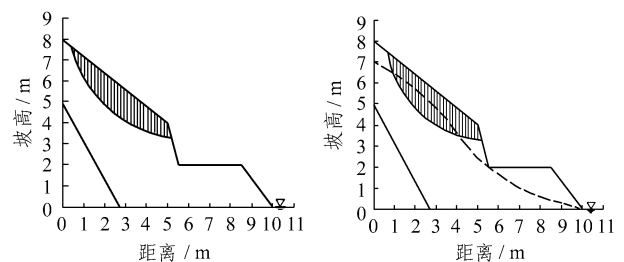


图 3 Bishop 法搜索到降雨前与降雨后  $F_s$  最小的滑面  
Fig.3 Slide surfaces with the minimal  $F_s$  searched by method of Bishop before and after rainfall

#### 4.3 试验过程及典型现象

实验采用短历时、大雨强的降雨模式，设计雨强为 0.8 ~ 0.9 mm/min。降雨分 6 个时段进行，降雨历时最长 25 min，最短 11 min，累计降雨 92 mm，最大雨强 1.39 mm/min，最小雨强 0.23 mm/min，平均雨强 1mm/min，过程如图 4 所示。

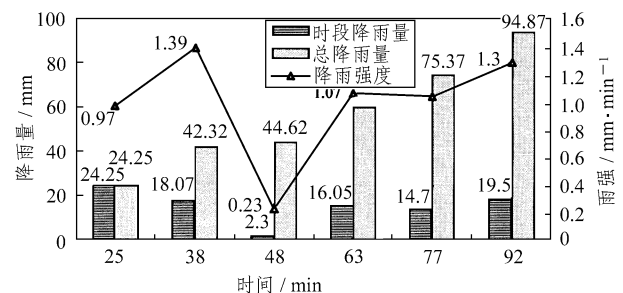


图 4 雨强、雨量随时间变化关系  
Fig.4 Variation of rainfall density and rainfall with time

因降雨时段间隔较长雨水有充分的入渗时间，因此，实验中没有明显的产流过程，降雨几乎全部入渗。实验中多出现溜滑、泻溜现象，且规模随降雨先由小变大，再由大变小，经过一段相对稳定期后随雨强变大规模也变大。第 6 时段结束时，坡脚陡壁崩塌，规模  $1.1 \times 0.8 \times 0.5 \text{ m}^3$  (如图 5)。崩塌壁中间有大股的层间水流出，层间水由大而小，由浊而清，并冲刷粗粒之间的细粒物质引发小的崩塌。滑坡发生于下部块体左侧，滑体上宽 1.9 m，下宽 2.1 m，后缘滑壁坡度  $62^\circ$ ，错距 1.9 m，有股状水流渗出。滑床上有微弱擦痕，滑体在前缘临空面处形成剪出口并沿临空面塌落堆积，量测滑体体积约  $3.8 \text{ m}^3$ ，堆积体表面坡度  $37^\circ$ ，与周围邻近松散体天然休止角一致。



图 5 滑坡发生后照片

Fig.5 Photo after the landslide

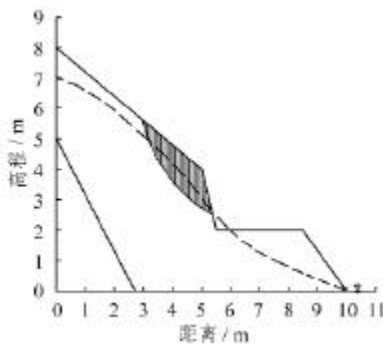


图 6 降雨发生后反算稳定性

Fig.6 Stability calculated by the slide surface after rainfall

通过反算稳定性时得到稳定因数  $F_s = 0.89$ ，与估算值相差 7.86% (见图 6)。主要对土体力学特征受降雨的影响估计不足，且所划分土层实际上只有细微的差别，斜坡中并不存在严格的隔水层和软弱层，滑面贯通，整体滑动比较困难，因此滑动规模没有实验前估算的大。且前沿陡立面很陡，当土体含水量到一定程度时前沿土体便发生崩塌滑落，降雨过程也因动力设备原因导致降雨量不足。

## 5 砾石土物理力学特征

### 5.1 实验斜坡土体颗粒级配

斜坡土体为原滑坡、崩塌、泻溜混合堆积物，颗粒松散破碎，岩屑成分为变质页岩或板岩碎屑；含少量粘土，结构松散，粘接力较弱，常称为含细粒质角砾土，简称角砾土<sup>[7]</sup>。根据实验区土体粘土含量和胶结程度的不同，将实验区土体分表层土和第二层土(图 7, 8)。两层土细粒含量相近，两层土级配都存在一定不连续性。

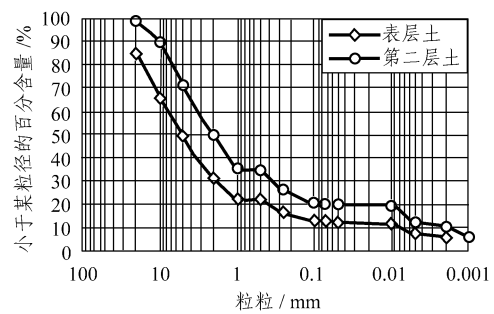


图 7 两层土级配累积曲线

Fig.7 Cumulation of the two layers' grade

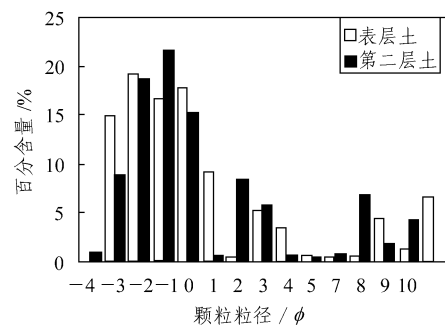


图 8 两层土粒度级配分布 ( $f = -\frac{\lg d}{\lg 2}$ )

Fig.8 Grade distribution for the two layers ( $f = -\frac{\lg d}{\lg 2}$ )

### 5.2 实验斜坡土体力学特征

我们选择表层土和第二层土进行室内不同含水量下不固结不排水剪实验。试样粒径 5 mm 并向试样中加入 5 ~ 10 mm 的岩屑(含量不超过 5%)而保持试样结构和粗粒含量。按实验要求配制含水量，试样规格  $f = 61.8 \text{ mm}$ ， $h = 150 \text{ mm}$ ，选择在 100 kPa，200 kPa，300 kPa，400 kPa 的围压下进行实验，实验结果如图 9 所示。

实验结果表明，土体粘聚力随含水量变化有明显的突变现象(如图 9)，表现在含水量  $W = 11\%$  左

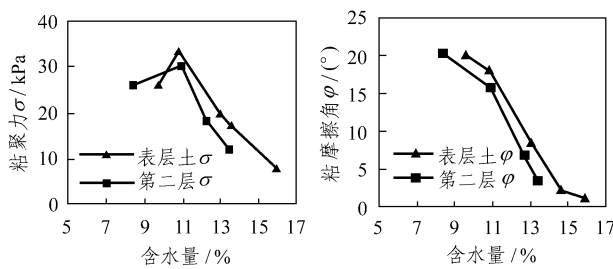


图9 粘聚力、内摩擦角随含水量变化关系

Fig.9 Variation of cohesion, angle of internal friction with moisture content

右时,粘聚力随含水量的增加而增加,而当含水量  $W = 11\%$  时,粘聚力随含水量的增加而减小。土体越接近饱和,粘聚力随含水量增加而减小的趋势愈变愈小。总体上内摩擦角随含水量增加而减小,但在含水量为  $11\%$  时也有突变现象,表现在曲线斜率在  $W = 11\%$  平缓,当  $W = 11\%$  时突然变陡,内摩擦角随含水量增加而降低的幅度变大,含水量接近饱和时曲线斜率又渐趋平缓。

## 6 结 论

蒋家沟流域松散砾石土斜坡降雨下滑坡频发由流域和斜坡物质条件和结构决定。降雨是激发滑坡的主要环境因素。

前期降雨量,临界雨量共同作用导致松散砾石土细粒和粘粒物质流失,粘聚力和内摩擦角不同形式的变化,改变斜坡稳定因数。前期降雨入渗和水在土体内运移使土体吸水含水量升高、土体容重增加;在含水量未到突变值时粘聚力随含水量增加

而增加,因此斜坡稳定性不但不降低反而可能提高,并在一定雨强和降雨量下达到和维持暂态平衡,使降雨试验过程中斜坡崩塌和溜滑规模变小,出现短期的稳定。临界雨量打破这一暂态平衡且含水量达到并超过突变值,粘聚力随含水量增加迅速降低,斜坡稳定因数迅速降低而滑坡。整个过程包括了渐进破坏和突然滑动。

降雨激发滑坡表现一定的滞后性,一般滞后于滑坡发生的临界雨强和降雨量。因为随着降雨的入渗,土粒吸水软化、力学性质降低、裂隙扩张、滑面贯通等是渐进过程,在一定的时间内才能完成。这一观点也为论文<sup>[6]</sup>所证实。

本文仅从模拟试验和室内实验表观现象进行分析,在降雨诱发滑坡机理方面有待进一步研究。

## 参 考 文 献

- 1 山田刚二. 滑坡和斜坡崩塌及其防治[M]. 北京: 科学出版社, 1980
- 2 谢守益,徐卫亚. 降雨诱发滑坡机制研究[J]. 武汉水利电力大学学报, 1999, 32(1): 21~23
- 3 乔建平. 滑坡减灾理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 1997
- 4 吴积善,康志成,田连权. 云南蒋家沟泥石流观测研究[M]. 北京: 科学出版社, 1990
- 5 陈景武. 云南东川蒋家沟泥石流暴发与暴雨关系的初步分析[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1990
- 6 李焯芬,陈虹. 雨水渗透与香港滑坡灾害[J]. 水文地质与工程地质, 1997, (4): 34~38
- 7 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

## CAUSE OF FREQUENT OCCURRENCE OF GRAVEL SLOPE LANDSLIDE AND EXPERIMENT SIMULATION

Hu Mingjian, Wang Ren, Zhang Pingcang

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

**Abstract** The effect of rainfall on landslide is a widely discussed theme. This paper expatiates the inspiring cause from some aspects such as the substance composition, structure conditions, rainfalls, rainfall density and the stress characteristics etc. We have observed the course inspired by artificial rainfall from the large outdoor landslide experiment. The indoor experiment illuminates that the cohesion and inner friction angle have a chop relationship with the moisture content. The gravel slope landslide is inspired by many factors of which the rainfall is the dominant.

**Key words** rainfall, landslide, moisture content, stress characters, chop