

DOI: 10.11779/CJGE2020S1010

# 基于离心模型试验的降雨诱发滑坡宏观机理研究

杜 强<sup>1</sup>, 周 健<sup>2</sup>

(1. 内蒙古工业大学土木工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010051; 2. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092)

**摘 要:** 利用同济大学土工离心机, 结合自主设计的可控强度降雨模拟器, 进行降雨诱发砂土质边坡滑坡的离心机模型试验, 研究降雨条件下滑坡发生的宏观机理。试验过程中, 采用高速动态数据采集仪和孔隙水压力传感器进行孔压量测; 利用高清数码成像设备采集图像, 并结合 Geodip 软件对滑坡形成过程中土体细观结构变化进行分析。研究结果表明: 雨水在坡体内部不同位置的流动和累积, 是土体发生滑坡的主要原因。砂土质边坡发生滑坡的宏观机理为坡体中细颗粒随雨水渗透向坡脚迁移, 使坡体内部雨水大量聚集导致孔压上升土体强度降低, 当下滑力大于抗剪强度时, 上部土体推动下部土体发生整体滑动, 形成滑坡。

**关键词:** 边坡失稳; 离心模型试验; 渗透系数; 宏观机理

中图分类号: P642.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2020)S1-0050-05

**作者简介:** 杜 强 (1987—), 男, 博士, 讲师, 主要从事土体宏观力学机理及离散元数值模拟方面的研究。E-mail: dq410@imut.edu.cn。

## Centrifugal model tests on slope failure induced by rainfall

DU Qiang<sup>1</sup>, ZHOU Jian<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Huhhot 010051, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** By using the geotechnical centrifuge of Tongji University and combining with an artificial rainfall simulator which is designed to control the rainfall intensities, the centrifugal model tests are carried out to study the macro-mesoscopic formation mechanism of cohesionless soil slope failure induced by rainfall. During the test processes of slope failure, the pore pressure is measured by the high-speed dynamic data acquisition instrument and the precise pore water pressure sensor. Using the HD digital imaging equipment and the mesoscopic structure analysis software Geodip, the variation laws of soil microstructure during the formation of landslide are analyzed. The results show that the permeation and cumulation of rainwater in the slope body is regarded as the main cause of slope failure. The formation mechanism of landslide is the motion of the fine particles with migration of pore water in the slope. The gathering of rain at the inner slope body causes the increase of pore pressure and the reduction of soil strength, and then the whole sliding occurs when the sliding force exceeds the shear strength of soil.

**Key words:** slope failure; centrifugal model test; permeability coefficient; macro-mesoscopic mechanism

## 0 引 言

作为典型的自然灾害, 降雨诱发滑坡的形成机理和水土作用过程比较复杂, 迄今仍是岩土工程界研究的重要课题。许多学者在室内自制人工降雨系统, 研究了降雨与边坡失稳的关系及坡体的破坏特征<sup>[1-7]</sup>, 但是室内模型试验无法达到原型重力场中的应力条件。利用离心机能得到与原型相近的应力状态、变形特征和运动规律, 直观揭示变形破坏机理, 并能与其他分析方法提供相关的参数依据, 因而得到越来越广泛的应用。张敏等<sup>[8]</sup>、钱纪芸等<sup>[9]</sup>设计了降雨模拟系统, 用于边坡离心模型试验。姚裕春等<sup>[10]</sup>进行了降雨条件下土质边坡离心模型试验研究。杨春宝<sup>[11]</sup>开展了控制

坡内外水位的离心模型试验研究。王维早<sup>[12]</sup>对沿基覆界面滑动的堆积层滑坡开展了降雨离心模型试验。上述成果大多是从宏观方面研究降雨对滑坡的影响, 少有从宏观细观相结合的角度揭示降雨条件下滑坡形态的变化规律及其水土作用机理。滑坡是一个复杂的动态过程, 具有宏观上的不连续性和单个块体运动的随机性。因此, 从土体的细观结构特征分析来研究滑坡有重要意义, 采取宏观力学试验与细观观察相结合的方法, 才可能有所发现。

基金项目: 内蒙古自治区自然科学基金项目 (2018BS05015); 内蒙古工业大学科学研究项目 (BS202044)

收稿日期: 2020-06-01

鉴于此, 本文以石英粉作为试验土样, 经离心放大作用后模拟粗砂, 进行降雨诱发滑坡的离心机模型试验。在宏观方面, 分析了边坡失稳前坡体内部的孔隙水压力变化规律; 在细观方面, 分析了边坡失稳过程中坡体不同位置土颗粒细观运动规律和细观组构变化。在接近实际应力条件下, 研究滑坡形成的宏观机理, 为滑坡预防和治理工程提供理论支撑。

## 1 离心机模型试验基本条件

本次试验使用同济大学离心机模型试验系统, 包括土工离心机、模型箱及模型槽、远程可控人工降雨系统和可视化动态测量系统。降雨诱发边坡失稳的离心机模型试验系统如图 1 所示。

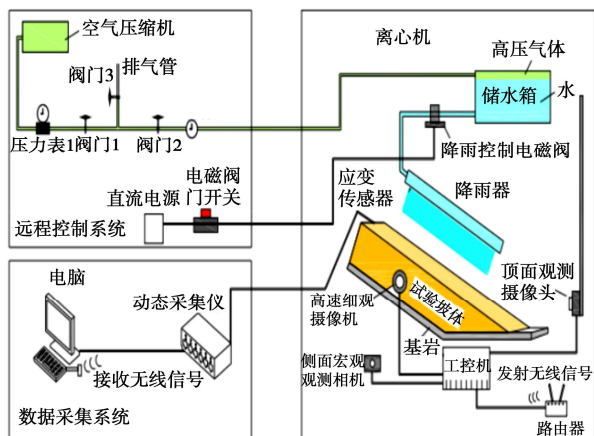


图 1 离心机模型试验系统

Fig. 1 Centrifuge model test system

### 1.1 离心机模型试验装置

(1) 同济大学 TLJ-150 复合型土工离心机的主要参数如下: 最大容量为 150g·t; 最大离心加速度为 200g; 有效转臂半径为 3.0 m。

(2) 离心机内采用尺寸为 90 cm×70 cm×70 cm 且一侧透明的模型箱。模型槽放置在模型箱内, 模型槽宽度为 25 cm, 深度为 20 cm。模型槽两侧和后侧采用 2.0 cm 厚的钢化玻璃, 可以近似忽略边界粗糙度对试验结果的影响, 且透过玻璃可以记录边坡失稳破坏过程中土体和水的宏观和细观变化情况。模型箱及模型槽如图 2 所示。



图 2 模型箱及模型槽

Fig. 2 Model box and tank

(3) 远程可控人工降雨系统包括降雨器、储水箱、远程压力调节和降雨控制系统。降雨器由 10 个低压雾化喷头双排排列构成。雾化喷头的喷口直径为 1.0 mm, 喷洒的水滴均匀呈雾状。试验过程中降雨强度通过调整空气压缩机的不同气压值来控制。

(4) 可视化动态测量系统包括观测照明、立体观测数码设备和远程数据采集系统。数据采集系统由数据采集、控制和传输等构成。孔隙水压力测量采用的是 HC-25 微型孔隙水压力传感器。

### 1.2 试验土样与基本条件

离心机模型试验的土样采用粒径为 0.005~0.10 mm 的石英粉, 经 20g 放大后模拟粗砂。经离心机放大作用后, 模拟粗砂的颗粒级配曲线如图 3 所示。

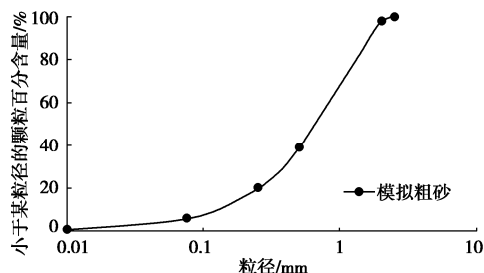


图 3 模拟粗砂试样的颗粒级配曲线

Fig. 3 Grain-size distribution curves of sandy samples

通过常水头渗透试验, 确定出该土样的渗透系数为  $9.6 \times 10^{-4}$  cm/s, 经离心机作用放大 20 倍后, 模拟粗砂渗透系数理论值约为 0.02 cm/s。根据某滑坡现场资料进行坡体设计, 现场的坡体坡度为  $35^\circ$ , 降雨强度为 49.4 mm/h。设计离心机试验的土体坡度为  $35^\circ$ , 厚度为 10 cm, 上表面长度为 65 cm, 相对密度为  $D_r=0.43$ , 降雨强度为 50 mm/h, 离心机模型试验的加速度采用 20g。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 宏观试验现象

在试验过程中, 通过安装在离心机模型箱内的数码相机对雨水入渗情况及坡体变形模式进行记录。图 4 所示降雨强度为 50 mm/h 时, 模拟粗砂坡体失稳破坏的宏观演化历程。根据试验现象, 可以大致将模拟粗砂坡体失稳破坏的全过程分为降雨入渗和滑坡发生两个阶段。

降雨入渗阶段 (0~420 s), 坡体内部出现湿润峰, 并逐渐下降。湿润峰下降过程中, 没有观测到雨水从坡脚渗出, 坡体表面产生沉降并出现多条横向裂缝, 该过程为入渗软化阶段。滑坡发生阶段 (420~480 s), 当湿润峰达到坡体底部后, 坡体突然整体快速向下运动发生滑坡。模拟粗砂坡体发生滑坡具有两个特点: ①坡体发生整体滑动前, 坡脚处没有发生渗透破坏; ②坡体后方土体的滑动速度大于前方土体, 前方土体

在后方土体的推动下向前运动, 坡体运动过程中呈现明显的波浪形断面。

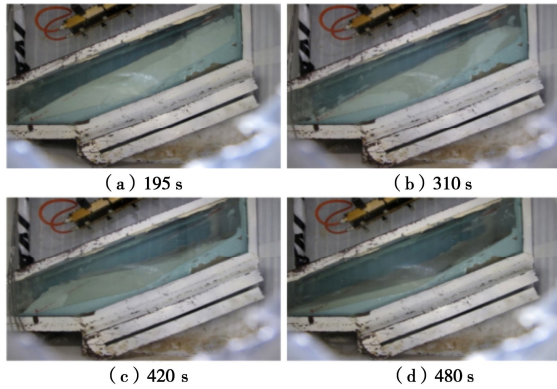


图4 试验中侧面观测图

Fig. 4 Observed images of profile of centrifugal model tests

通过设在坡体正面的摄像头可以观测滑坡形成过程, 坡体表面土体的变化情况如图5所示。



图5 试验中顶面观测图

Fig. 5 Observed images of centrifugal model tests from top

## 2.2 孔隙水压力分析

在坡体内部布置了3只孔压计, 从上向下依次编号为#1, #2, #3, 具体布置见图6。

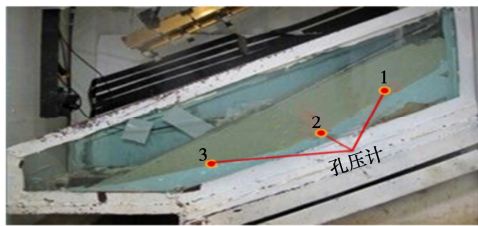


图6 孔隙水压力传感器布置图

Fig. 6 Layout of pore pressure sensors

图7为降雨强度50 mm/h时, 离心机模型试验中模拟粗砂坡体滑坡过程中的孔压变化曲线。

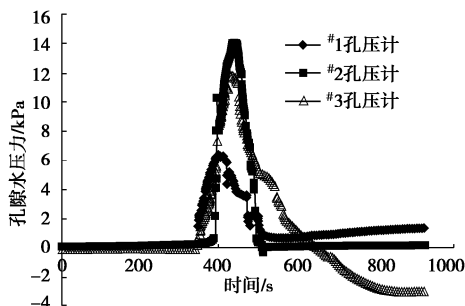


图7 孔隙水压力变化曲线

Fig. 7 Curves of pore water pressure

在降雨入渗阶段(0~420 s), 坡体内部孔隙水压力一开始没有发生明显变化, 在310 s左右#1, #2, #3孔压计出现迅速增长。在420 s左右时孔压达到峰值, #1, #2, #3孔压计测得的孔隙水压力峰值分别为5.9, 13.8, 11.7 kPa。这主要是因为坡体没有雨水渗出, 使得孔隙水压力不易消散, 所以坡体内孔隙水压力出现后就快速上升。

在滑坡发生阶段(420~480 s), 坡体内部各观测点的孔隙水压力出现不同程度的陡降, 在此阶段坡体发生滑坡。孔压消散的时间很短, 坡体发生滑坡破坏仅经历了1 min。在试验进行到480 s左右, #1, #3孔压计测得的孔隙水压力值分别下降了3.4, 5.7 kPa, 而#2的孔隙水压力几乎为0。坡体破坏以后, 各点的孔隙水压力值逐渐下降并趋于稳定, 最后#1的孔隙水压力值趋于0.8 kPa, #2的孔隙水压力值趋于0 kPa, #3孔压计由于被土体携带掉出模型槽, 因此孔压计为负值。

孔隙水压力的变化反映了降雨作用下坡体失稳过程中的土水作用关系, 是滑坡的成因之一。孔隙水压力对滑坡的启动和运动下滑过程有以下主要作用: ①孔隙水压力的升高降低了土体的抗剪强度, 使得土体发生整体流滑; ②雨水从坡体后方的裂缝渗入, 在土体上、下部间形成水头差, 较大渗透力的存在使土体有下滑的趋势。

## 2.3 颗粒细观运动分析

在试验坡体选取距离坡脚以上10 cm处和两级坡体交接处作为观测区域进行细观观测, 分别标记为#1, #2, 距坡底高度均为2.5 cm, 观测区域的面积为10.0 mm×10.0 mm, 观测区域位置见图8。

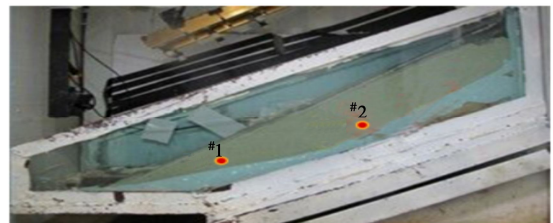


图8 细观观测区域在坡体位置

Fig. 8 Mesoscopic analysis area of debris flow slope

在降雨初期, 模拟粗砂坡体内不同粒径颗粒分布均匀, 初始相对密实度为0.43, 土体处于中密状态, 在显微镜下观测, 细观区域内可以明显观测到粗颗粒骨架间的孔隙比较大, 选取颜色比较明显、颗粒粒径相对较大的颗粒作为标志颗粒, 记为A。#1、#2观测点的细观观测图片如图9所示。

由图9可知, 降雨进行到195 s时, 坡脚处颗粒几乎没有变化, 而坡体中部颗粒发生明显的下沉, 颗粒A主要发生竖向移动, 粗颗粒骨架之间的孔隙减小。降雨进行到310 s时, 坡脚处观测区域内沿斜坡方向出现大量细颗粒, 填充了粗颗粒骨架间的孔隙, 坡脚



处的颗粒 A 发生沿斜坡方向的移动。坡体中部细颗粒同样有所增加, 且土体的含水率明显升高。观测区域内颗粒 A 的竖向位移增大, 同时也发生了一定的水平位移。降雨进行到 420 s 时, 标志颗粒 A 已运动出观测区域, 坡脚处含水率增加, 但饱和度较低, 结合宏观现象可知坡脚处没有雨水渗出。而在坡体中部, 观测区域内细颗粒含量明显增多, 且含水率很高, 土体接近饱和状态, 坡体中流动的孔隙水带动细颗粒向下迁移。

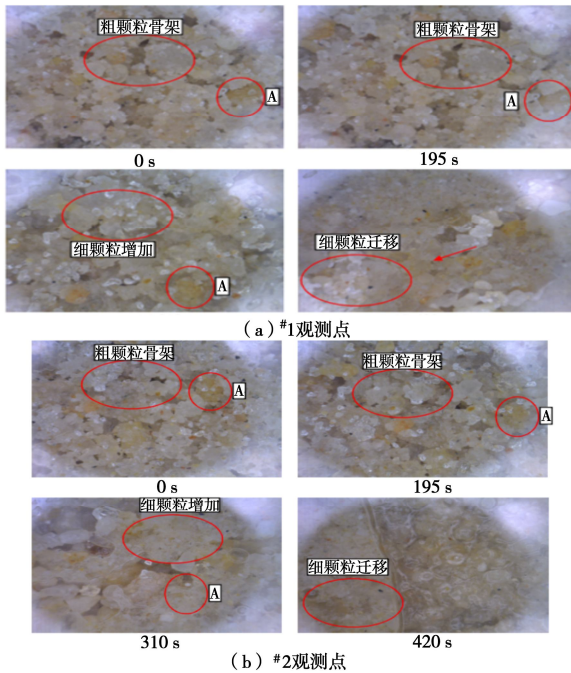


Fig. 9 Mesoscopic images of analysis area

颗粒细观运动分析表明: 坡脚处的土颗粒沿斜坡方向运动, 上部细颗粒在雨水的携带下发生迁移, 并在坡脚处聚积; 坡体中部的土颗粒则以竖向运动为主。在滑坡发生之前, 坡体会产生沉降, 土颗粒间的孔隙减小, 坡脚处含水率较低, 而坡体中部含水率很高, 接近饱和。坡体发生滑坡后, 沿斜坡方向快速流动, 土颗粒随水流沿斜坡方向快速流动。

## 2.4 颗粒细观组构分析

采用可视化细观测试系统和细观结构分析软件 Geodip, 分析坡体细观观测区域的颗粒长轴定向、面积孔隙率、颗粒接触数等细观组构特征。

### (1) 颗粒长轴定向

图 10 为模拟粗砂坡体滑坡发展过程中细观观测区域内颗粒长轴方向演化的玫瑰图, 它反映颗粒长轴方向的角度频数分布。

在滑坡形成过程中, 由于雨水的渗流, 坡脚处的颗粒长轴方向由初始的均匀分布变化到定向分布, 偏向于  $30^\circ$  方向。而由于坡体表面发生明显的沉降, 使坡体中部处的颗粒长轴方向由初始的均匀分布变化到定向分布, 偏向于竖直方向和水平方向。

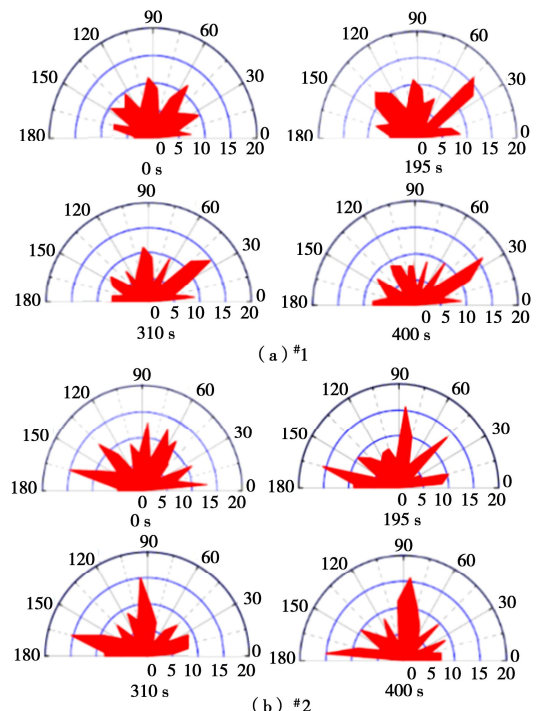


图 10 颗粒长轴方向玫瑰图

Fig. 10 Rose diagrams of long axis of particles

### (2) 面积孔隙率

面积孔隙率定义为孔隙面积与分析区域面积的比值。模拟粗砂坡体的面积孔隙率分别选择试验时间为 0, 195, 220, 310, 390, 420 s 时的细观区域的细观观测图进行分析, 图 11 为细观观测区域内面积孔隙率曲线。

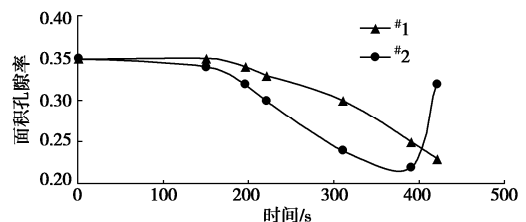


图 11 面积孔隙率曲线

Fig. 11 Curves of area porosity

细观面积孔隙率变化表明: 坡体在降雨作用下密实度发生了变化, 面积孔隙率随着降雨时间的增加而逐渐减小; 在坡体发生滑动后, 坡体中部观测区域的面积孔隙率有所增大, 而坡脚处观测区域的面积孔隙率继续减小, 反映出后部土体推动前部土体向下运动, 而坡脚处没有发生明显破坏的宏观现象。

### (3) 颗粒接触数

颗粒接触数是指颗粒与周围土体颗粒接触的平均数目, 用以分析颗粒运动、重新排列规律。图 12 为模拟粗砂坡体中细观区域的颗粒接触数曲线。

细观颗粒接触数变化表明: 坡体在降雨作用下发生了密实度的变化, 颗粒接触数随着降雨时间的增加而逐渐增加; 在坡体发生滑动后, 坡体中部观测区域的颗粒接触数突然减小, 而坡脚处观测区域的颗粒接触数继续增加, 这主要是由于雨水携带细颗粒向坡脚

堆积引起的。

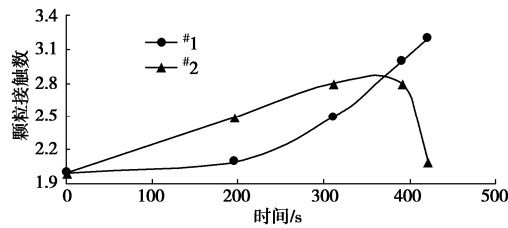


图 12 颗粒接触数曲线

Fig. 12 Curves of contact number of particles

### 3 结 论

(1) 砂土边坡发生滑坡的宏细观机理为坡体中细颗粒随雨水的迁移, 坡体内部雨水聚集, 孔压上升, 强度降低, 当下滑力大于抗剪强度时发生整体滑动。

(2) 宏观方面, 滑坡形成过程中孔压的变化明显, 具体表现为滑坡发生前孔隙水压力快速增加, 在滑坡形成后孔隙水压力急剧下降, 孔压基本呈抛物线升降, 且孔压峰值较大。

(3) 细观方面, 滑坡形成过程中坡脚处含水率较低, 土颗粒沿斜坡方向运动, 颗粒长轴方向由初始的均匀分布变化到偏向于  $30^\circ$  方向分布, 面积孔隙率逐渐减小而颗粒接触数逐渐增加; 坡体中部含水率接近饱和, 土颗粒以竖向运动为主, 颗粒长轴方向由初始的均匀分布变化到偏向于竖直方向和水平方向分布, 在滑坡发生之前, 面积孔隙率逐渐减小, 在滑坡发生后有所增加, 颗粒接触数逐渐增加, 在滑坡发生后突然减小。

### 参考文献:

- [1] 陈晓清, 崔 鹏, 冯自立, 等. 滑坡转化泥石流起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. (CHEN Xiao-qing, CUI Peng, FENG Zi-li, 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. (in Chinese))
- [2] 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. (HU Ming-jian, WANG Ren, ZHANG Ping-cang. Primary research on the effect of rainfall on landslide[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, **23**(4): 454 - 457. (in Chinese))
- [3] 林鸿州. 降雨诱发土质边坡失稳的试验与数值分析研究[D]. 北京: 清华大学, 2007. (LIN Hong-zhou. The Study on the Mechanism and Numerical Analysis of Rainfall-Induced Soil Slope Failure[D]. Beijing: Tsinghua University, 2007. (in Chinese))
- [4] HUANG C C, JU Y J, HWU L K, et al. Internal soil moisture and piezometric responses to rainfall-induced shallow slope failures[J]. Journal of Hydrology, 2009, **370**: 39 - 51.
- [5] 胥勋剑, 杨 强. 黄莲树滑坡形成机理及稳定性分析[J]. 工程勘察, 2014, **42**(8): 6 - 9. (XU Xun-jian, YANG Qiang. Formation mechanism and stability analysis of Huanglianshu landslide[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2014, **42**(8): 6 - 9. (in Chinese))
- [6] 陈 剑, 安孟可, 龙 维, 等. 云南汤家山松散堆积层滑坡滑带土的微观结构与机理分析[J]. 工程勘察, 2015, **43**(1): 5 - 10, 25. (CHEN Jian, AN Meng-ke, LONG Wei, et al. Microstructure and mechanism analysis on the slip zone soil of Tangjiashan loose deposits landslide in Yunnan province[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2015, **43**(1): 5 - 10, 25. (in Chinese))
- [7] WANG F W, SHIBATA H. Influence of soil permeability on rainfall induced flow slides in laboratory flume tests[J]. J of Can Geotech, 2007, **44**: 1128 - 1136.
- [8] 张 敏, 吴宏伟. 边坡离心模型试验中的降雨模拟研究[J]. 岩土力学, 2007, **28**(增刊 1): 53 - 57. (ZHANG Min, WU Hong-wei. Rainfall simulation techniques in centrifuge modelling of slopes[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(S1): 53 - 57. (in Chinese))
- [9] 钱纪芸, 张 嘎, 张建民. 离心场中边坡降雨模拟系统的研制与应用[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(6): 838 - 842. (QIAN Ji-yun, ZHANG Ga, ZHANG Jian-min. Development of rainfall simulation system for centrifugal model tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(6): 838 - 842. (in Chinese))
- [10] 姚裕春, 姚令侃, 袁碧玉. 降雨条件下边坡破坏机理离心模型研究[J]. 中国铁道科学, 2004, **25**(4): 64 - 69. (YAO Yu-chun, YAO Ling-kan, YUAN Bi-yu. Analysis of a centrifugal model of slope damage mechanism during rainfall[J]. China Railway Science, 2004, **25**(4): 64 - 69. (in Chinese))
- [11] 杨春宝, 朱 斌, 孔令刚, 等. 水位变化诱发粉土边坡失稳离心模型试验[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(7): 1261 - 1272. (YANG Chun-bao, ZHU Bin, KONG Ling-gang, et al. Centrifugal model tests on failure of silty slopes induced by change of water level[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(7): 1261 - 1272. (in Chinese))
- [12] 王维早, 许 强, 郑 光, 等. 强降雨诱发缓倾堆积层边坡失稳离心模型试验研究[J]. 岩土力学, 2016, **37**(1): 87 - 95. (WANG Wei-zao, XU Qiang, ZHENG Guang, et al. Centrifugal model tests on sliding failure of gentle debris slope under rainfall[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, **37**(1): 87 - 95. (in Chinese))

(编校: 明经平)