

DOI: 10.11779/CJGE201512005

# 不同颗粒组分下泥石流离心机模型试验研究

周 健<sup>1, 2</sup>, 杨 浪<sup>1, 2</sup>, 王连欣<sup>3</sup>, 张 娇<sup>4</sup>

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;  
3. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430063; 4. 上海城市管理职业技术学院土木工程与交通学院, 上海 200432)

**摘要:** 采用自主研发的离心机可视化试验装置, 在坡度和降雨强度不变的条件下, 进行降雨诱发泥石流离心机模型试验, 研究不同颗粒组分对泥石流形成形态的影响。通过配置五组不同细颗粒含量的土样进行 20g 加速度下的离心机试验, 分析宏观位移场、水分迁移、孔隙水压力等, 研究不同颗粒组分下泥石流的形成机理。研究结果表明: 随着细颗粒含量由 10% 增大至 70%, 泥石流破坏形态由分层滑动型破坏向整体流滑型破坏转变; 不同颗粒组分下渗透系数的不同, 是泥石流不同破坏形态的主要原因。

**关键词:** 降雨诱发泥石流; 离心机模型试验; 颗粒组分; 渗透系数

中图分类号: TU411.93 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2015)12-2167-08

**作者简介:** 周 健(1957-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事土动力学、土体细观力学与离散元数值模拟等方面的研究工作。E-mail: tjugezhoujian@tongji.edu.cn。

## Centrifugal model tests on debris flow with different particle compositions

ZHOU Jian<sup>1, 2</sup>, YANG Lang<sup>1, 2</sup>, WANG Lian-xin<sup>3</sup>, ZHANG Jiao<sup>4</sup>

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. China Railway Fourth Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Wuhan 430063, China; 4. Department of Civil Engineering and Transportation, Shanghai Polytechnic College, Shanghai 200432, China)

**Abstract:** Using the self-developed visualization test apparatus with constant slope and rainfall intensity, centrifuge model tests on rainfall-induced debris flow are carried out in order to study the formation mechanism of debris flow under different particle compositions. The test conditions include 20 times of gravity, five soil samples and different fine particle contents. Through the analysis of macroscopic displacement fields, moisture migration and pore water pressures under different particle compositions, different morphological characteristics of debris flow are observed and discussed. The test results indicate that the failure pattern of debris flow changes from retrograded sliding to whole flow sliding with the increasing content of fine particles from 10% to 70%. And the difference of permeability coefficient under different particle compositions is the major cause for different failure patterns of debris flow.

**Key words:** rainfall-induced debris flow; centrifugal model test; particle composition; permeability coefficient

## 0 引言

泥石流是一种非常严重的自然灾害, 具有爆发突然、来势凶猛、破坏性强的特点, 兼有滑坡和洪水的双重破坏作用, 对居民区、公路和铁路等造成严重危害。泥石流形成因素众多, 不仅与坡度、降雨特征、地震、人类活动等外部因素有关, 还与泥石流岩土体自身黏土矿物成分、颗粒级配、化学成分、土体分散性、地下水环境等内部因素密切相关<sup>[1]</sup>。

近几年, 国内外众学者在对泥石流研究方面取得了很多研究成果<sup>[2-7]</sup>。颗粒粒径方面, Wang 等<sup>[8-9]</sup>对不同粒径的两种砂土 ( $d_{50}=0.13$  mm 和  $d_{50}=0.05$  mm) 进

行了降雨诱发泥石流试验, 试样厚 10 cm, 控制降雨强度 1.7 mm/min, 分析了滑动距离与土体内孔压生成间的关系。降雨强度方面, 林鸿州等<sup>[10-11]</sup>通过降雨诱发土质边坡失稳的模型试验, 探讨降雨对边坡失稳的影响。Okura 等<sup>[12]</sup>用大比例尺室内模型试验研究在降雨条件下疏松砂土在流滑破坏过程中, 土体运动、体积应变和孔隙水压力的变化。周健等<sup>[13]</sup>利用室内模型槽研究不同降雨强度对砂土泥石流形成影响, 从水土

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41272296, 51479138)

收稿日期: 2014-09-23

相互作用角度分析砂土泥石流形成宏细观影响因素。

以上研究多基于室内模型试验对泥石流形成机理进行研究, 室内模型试验的缺点是试验土体较薄, 与实际应力情况相差较大。离心机可以在高应力场条件下模拟较厚土体应力状态, 使土体的应力场与真实情况较为接近, 弥补了室内模型试验的不足。

本文通过泥石流形成离心机模型试验, 在坡度和降雨强度不变的条件下, 利用高清数码相机、摄像头记录土体破坏全过程; 利用孔隙水压力计记录土体内孔隙水压力的变化情况; 通过分析土体位移场、水分迁移规律、孔压变化和初始滑动时间等探究高应力离心场条件下泥石流形成机理。

## 1 离心机模型试验方案设计

### 1.1 试验土样与参数选取

野外发生泥石流的原状土样粒径组分复杂, 包含黏粒、粉粒、砂土、砾石土等组分, 呈宽级配混合土体<sup>[14]</sup>, 如果对泥石流原状土样进行降雨试验, 由于土样成份复杂, 导致诱发泥石流的影响因素之间相互干扰, 将不易甄别诱发泥石流启动的真正动因。因此本文泥石流试验的土样为纯砂土土样, 试验土样与实际发生泥石流地区的土样存在一定的差异, 主要研究在离心机高应力场下, 降雨诱发砂土泥石流的启动机理。

一般发生坡面型破坏泥石流的土体破坏深度在 2 m 左右<sup>[15]</sup>, 为了将 10 cm 厚的土体放大为 2 m, 本次离心机模型试验选择在 20g 重力场下进行来满足此要求。选用中砂 (0.1~0.5 mm)、石英砂 (0.02~0.1 mm), 按不同质量比配置不同细颗粒含量的试验土体, 放大 20 倍后的等效粒径为 1~10 mm。虽然实际的泥石流坡体的粒径范围要比这一范围大得多, 但本文旨在通过对特定粒径范围下的纯砂土的研究来初步探索泥石流的启动机理, 因而在试验土样的选取上与实际的泥石流坡体存在一定差异。中砂 (0.1~0.5 mm) 由厦门艾思欧标准砂有限公司生产的中国 ISO 标准砂筛分得到; 石英砂相关参数为  $d_{50}=0.056 \text{ mm}$ ,  $G_s=2.75 \text{ g/cm}^3$ ,  $\varphi=27^\circ$ 。

不同区域的泥石流在形成时, 堆积土体的密实度是不相同的。通过研究发现密实度处于 0.33~0.47 的砂土边坡, 土体颗粒容易发生平动或转动, 颗粒间孔隙较大, 具有较高的渗透性, 更易形成泥石流; 密实度为 0.47~0.56 之间的砂土边坡, 具有较高的强度和较低的压缩性、渗透性, 土体颗粒排布紧密, 不易发生平动或转动, 颗粒间孔隙较小, 雨水不容易透过土

体渗流。密实度大于 0.56 后, 砂土边坡只会出现少量表面冲蚀, 并且自然界很少有相对密实度如此之大的堆积土体转化为泥石流。因此, 综合选取 0.45 作为本文试验的密实度。

另外, 选取 5% 作为初始含水率。在这一较小的初始含水率下, 既能保证土样的自立, 还能保证试样的疏松, 防止出现土体结块现象, 以便于均匀装样。

试验通过制备 5 组不同细颗粒含量的土体研究颗粒组分对泥石流形成形态的影响。土体参数如表 1 所示; 级配曲线如图 1 所示。

表 1 离心机试验土体参数表

Table 1 Soil parameters for centrifuge tests

组号	粒径 0.1~0.5 mm	粒径 0.1~0.02 mm	渗透系数 /( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )
L1	90	10	0.00512
L2	80	20	0.00380
L3	70	30	0.00258
L4	50	50	0.00173
L5	30	70	0.00124

注: 称粒径 0.1~0.5 mm 为粗颗粒; 粒径小于 0.1 mm 为细颗粒。

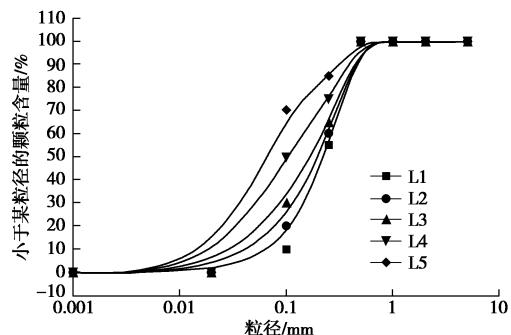


图 1 土样粒径分布曲线

Fig. 1 Grading curves of soil samples

### 1.2 离心机模型试验装置

降雨诱发泥石流形成离心机模型试验仪器——边坡降雨及动态测量系统, 是在同济大学现有土工离心机的基础上自主设计完成的, 包括离心机内部远程控制降雨系统 (图 2)、远程数据采集系统和泥石流发生槽 (图 3); 离心机的主要参数指标有: 最大荷载能力为 150 g·t; 最大离心加速度为 200g; 有效转壁半径为 3.0 m。经试验验证, 该套边坡降雨及动态测量系统可以实现离心机内部雾化、均匀、强度可控人工降雨, 远程控制动态测量系统可以通过高清数码相机、摄像头、孔压计完整地记录泥石流形成全过程力学参数变化规律。边坡降雨及动态测量系统具体描述见文献[16]。

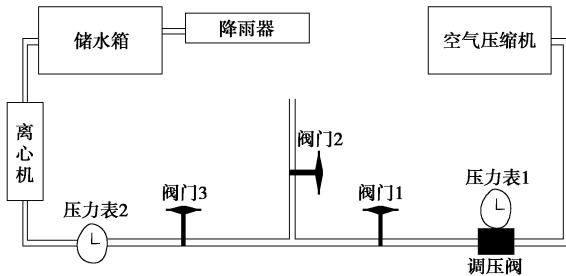


图 2 远程可调控人工降雨系统

Fig. 2 Remote adjustable artificial rainfall system

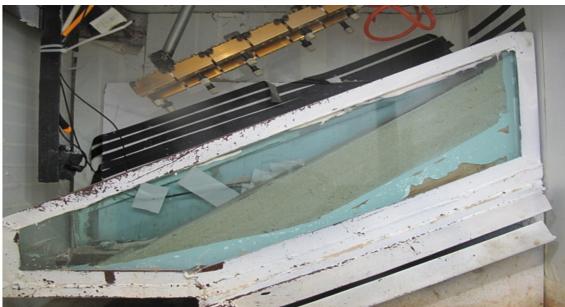


图 3 泥石流模型槽

Fig. 3 Model tank of debris flow

### 1.3 试验基本条件

降雨强度取 50 mm/h。土体坡度形式如图 4 所示, 一级坡体 15°, 二级坡体 35°, 坡体厚度为 10.0 cm, 宽度为 25.0 cm, 上表面长度为 80.0 cm。

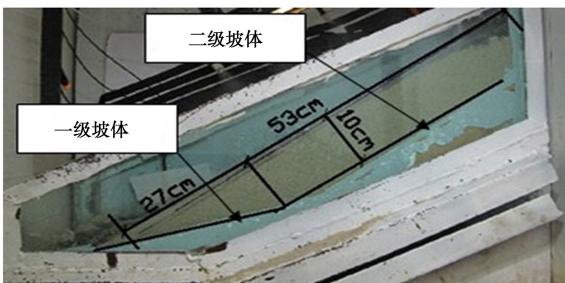


图 4 离心机试验坡体尺寸

Fig. 4 Slope size of centrifuge tests

### 1.4 试验过程

#### (1) 制作模型

控制试验土体含水率为 5% 并充分拌合均匀, 在模型槽外侧绘出试验坡体范围界限, 在该区域内制作坡体, 精确控制坡体分布范围(控制密实度), 在模型槽上均匀铺撒土样并分层压密。根据需要布置孔压计。

#### (2) 离心机设备调试

a) 安装降雨设备: 将降雨器安装固定于土体模型顶部, 调整降雨器位置和高度。固定水箱, 按顺序用油压管依次连接水箱出水口、电磁阀、降雨器。

b) 照明系统: 将光源固定于模型箱套筒内, 并螺旋固定。

c) 模型箱称重与吊装: 模型箱称重, 吊装于土工离心机并固定。

d) 连接数据采集系统: 在模型箱内部安装高清数码相机。将高清数码相机、摄像头、孔隙水压力计、

电磁阀航空插头连接于离心机线路板。

e) 连接降雨加压设备: 在水箱加压口连接油压管, 并与离心机油压端口连接, 离心机外将空压机等加压设备连接于离心机压力传输通道。

f) 密封模型箱: 离心机高度旋转风速较大, 影响降雨。因此用密封胶带密封模型箱, 保证试验过程中降雨不受风力影响。

#### (3) 降雨试验

a) 开启离心机, 加速度 20g, 加速度稳定后试验土体固结 20 min 密实度约为 0.45。

b) 调节降雨压力系统: 开启空气压缩机, 调整压力表至 0.2 MPa, 对应的降雨强度为 50 mm/h。

c) 开启数据采集设备: 开启数码相机、摄像头、孔隙水压力计等数据采集系统, 对数码相机进行远程控制。

d) 降雨试验: 开启降雨电磁阀进行降雨试验。

e) 停止降雨: 土体破坏基本完成后, 关闭降雨电磁阀, 关闭数据采集系统, 关闭离心机动力系统停止试验。

f) 整理试验现场。

## 2 离心机试验结果与分析

颗粒组分对泥石流形成形态影响的离心机模型试验进行 L1、L2、L3、L4、L5 共 5 组, 分别对应细颗粒含量 10%, 20%, 30%, 50%, 70%。

### 2.1 试验现象

#### (1) 不同颗粒组分土体破坏试验现象

在离心机高应力场环境下, 细颗粒含量 10%~30% 土体表现为分层滑动型破坏; 细颗粒含量大于 70% 土体表现为整体流滑型破坏; 细颗粒含量 50% 土体的破坏形式表现为介于分层滑动型破坏和整体流滑型破坏之间的过渡形态。选取细颗粒含量为 20%, 50%, 70% 的土体破坏过程(图 5~7)进行分析。

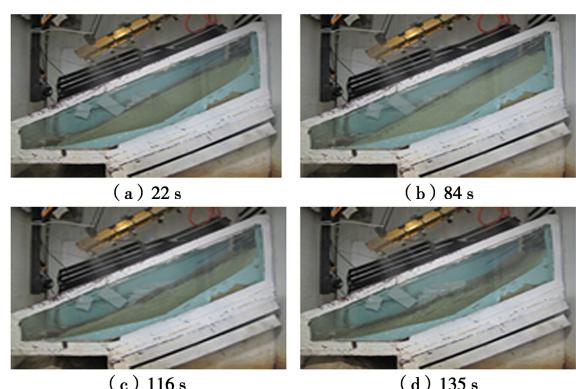


图 5 细颗粒含量 20% 土体破坏过程

Fig. 5 Failure process of soil with fine particle concentration of 20%

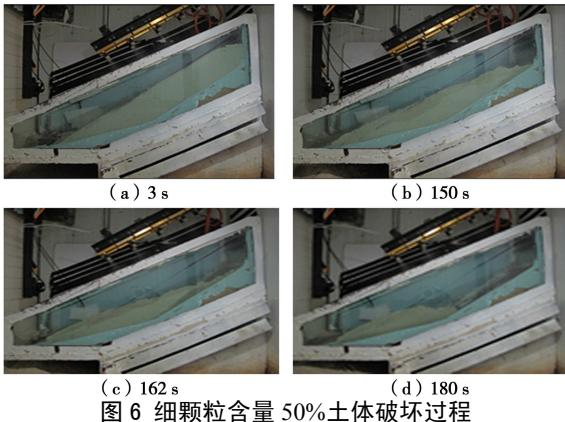


图 6 细颗粒含量 50% 土体破坏过程

Fig. 6 Failure process of soil with fine particle concentration of 50%

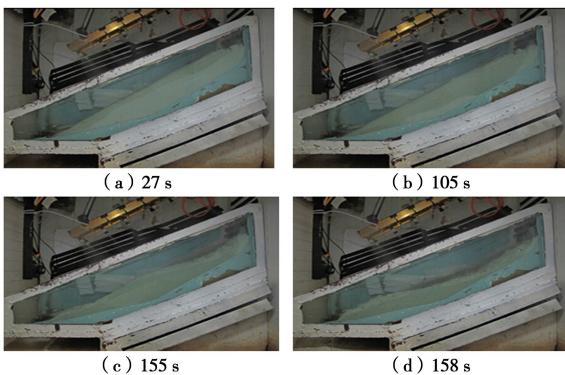


图 7 细颗粒含量 70% 土体破坏过程

Fig. 7 Failure process of soil with fine particle concentration of 70%

## (2) 土体破坏试验现象分析

根据上述试验现象, 分层滑动型破坏和整体流滑型破坏为泥石流形成过程两种较为典型的破坏形态, 破坏现象有着明显的差异。本文着重选取细颗粒含量 20% 和细颗粒含量 70% 两种颗粒组分试验, 分别代表分层滑动型和整体流滑型破坏。试验中在土体上部安装摄像头, 记录了土体正面破坏过程现象。图 8、9 为细颗粒含量 20% 和细颗粒含量 70% 颗粒组分土体正面破坏现象。

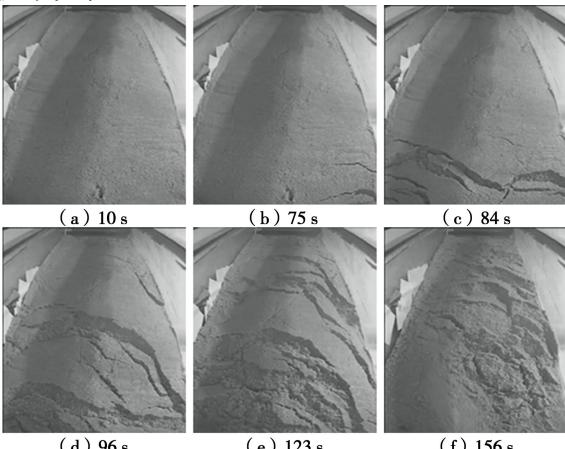


图 8 细颗粒 20% 土体正面破坏现象

Fig. 8 Top destruction phenomenon of soil with fine particles of 20%

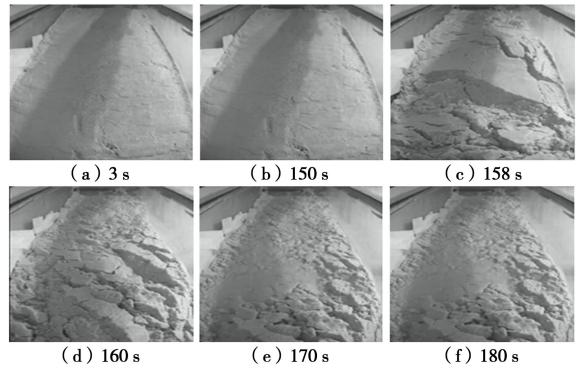


图 9 细颗粒 70% 土体正面破坏现象

Fig. 9 Top destruction phenomenon of soil with fine particles of 70%

根据图 5 土体破坏侧面图像和图 8 土体破坏顶面图像, 细颗粒 20% 土体破坏现象表现为分层滑动型破坏。降雨 75 s, 土体坡脚位置开始出现破坏; 84 s 坡脚破坏加剧, 坡脚裂缝不断增大并向下滑动; 在 96 s 坡体出现大裂缝并开始第一次大规模滑动; 123 s 土体出现第二次大规模滑动, 滑动范围延伸至边坡上部; 随着雨水不断由裂缝渗入土体内部, 土体形成类似泥浆的水土混合物即造浆阶段, 水土混合物快速下滑, 形成泥石流。

根据图 7 土体破坏侧面图像和图 9 土体破坏顶面图像, 细颗粒 70% 土体破坏现象表现为整体流滑型破坏。由于土体渗透系数较小, 105 s 雨水渗透仍未达到坡底; 158 s 土体发生瞬时整体滑动, 滑动时后部土体推动前部土体整体下滑, 并且在短时间内出现大量裂缝, 在降雨作用下形成类似泥浆的水土混合物, 随着降雨的持续, 泥浆状水土混合物规模不断增大并快速向下滑动形成泥石流。

## (3) 典型破坏形态对比分析

发生分层滑动型破坏土体, 渗透系数较大, 降雨在短时间内, 雨水渗透到坡体底部, 使得坡脚处土体迅速达到较高饱和状态; 对于整体流滑型破坏土体, 渗透系数较小, 降雨相对需要较长时间, 雨水才能完全渗透到坡体底部。

整体流滑型破坏土体在破坏之前, 土体无明显裂缝发展; 分层滑动型破坏土体在坡脚破坏后, 开始出现明显的裂缝发展, 并分层下滑, 单次破坏规模相对于整体流滑型的一次性破坏小很多, 且破坏历时时间相对较长。

## 2.2 水分迁移规律

细颗粒含量 10%~30% 土体破坏形态表现为分层滑动型破坏。以细颗粒含量 20% 为例, 降雨开启后, 雨水在降落至土体表面后开始向下入渗, 方向主要为竖直向下 (图 10 (a))。随着降雨的持续, 浸润线继

续下移, 降雨 66 s 浸润线到达土体底部 (图 10 (b))。69 s 浸润线开始出现上升趋势, 且靠近坡脚位置处的上升幅度大于后部土体 (图 10 (c)) 所示。降雨 81 s 浸润线继续上升, 上升高度约 3 cm 左右, 并趋于稳定。

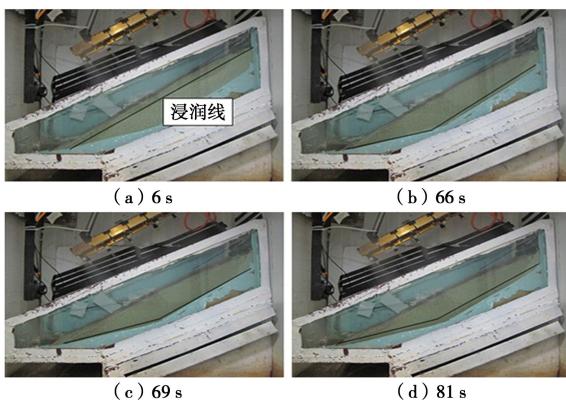


图 10 分层滑动型破坏雨水入渗过程

Fig. 10 Rain infiltration process of retrograded sliding

细颗粒含量 70% 破坏形态为整体流滑型破坏。降雨开启后雨水沿竖直方向向下入渗。降雨 9 s 浸润线深度约 1.5 cm (图 11 (a)); 随着降雨的持续浸润线继续向下发展, 但速度缓慢, 降雨 99 s 约 6.5 cm (图 11 (b)); 降雨 158 s 为土体发生整体流滑前拍摄到的图片 (图 11 (d)), 可以发现浸润线达到土体底部但上升高度仅 1 cm 左右, 上升趋势不明显。因此整体流滑型破坏雨水的入渗路径主要是由上向下缓慢入渗。

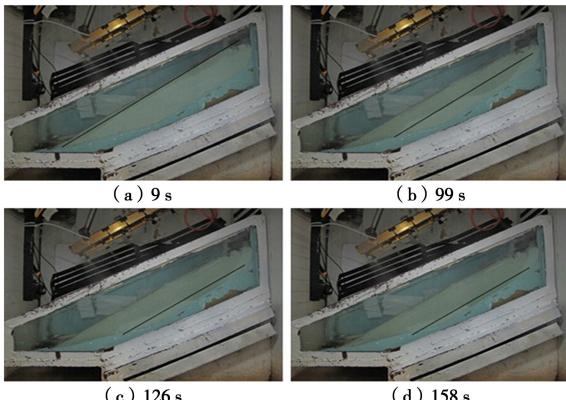


图 11 整体流滑型破坏雨水入渗过程

Fig. 11 Rain infiltration process of whole flow sliding

通过以上分析可知, 两种典型破坏形态雨水在土体中的入渗路径有着明显的差异, 渗流速度和路径的不同是泥石流形成形态不同的重要因素。

## 2.3 位移场分析

采用无标点数字图像量测技术对两种形成形态进行数据分析。利用 Geodog 图像分析软件分析试验过程中高清数码相机采集到得图像。分析区域(图 12) 为图中矩形线框标记部分。



图 12 位移场分析区域

Fig. 12 Analysis area of displacement field

### (1) 分层滑动型破坏位移场分析

以细颗粒含量 20% 为例, 分析土体破坏位移场变化情况。土体位移场如图 13 所示。

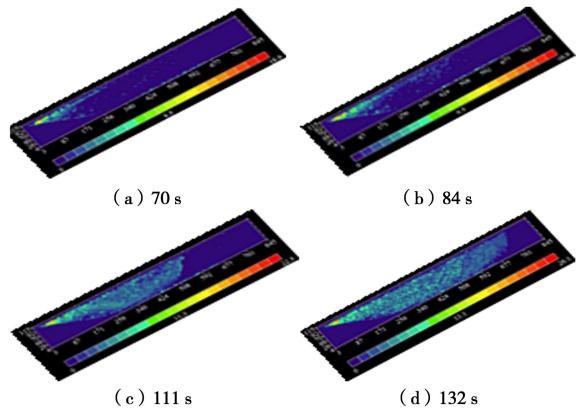


图 13 分层滑动型破坏位移场云图

Fig. 13 Displacement nephogram of retrograded sliding

根据图 13 可以发现分层滑动型破坏的发展以坡脚的破坏为起点。降雨约 70 s 左右, 坡脚处的位移开始增大; 降雨 84 s 左右, 坡脚位置开始发生破坏, 最大位移约 9 mm; 随着降雨的持续和坡脚破坏的不断发展, 开始分层下滑; 上部土体发生首次下滑后, 后部土体陆续下滑, 新的滑动面产生。

### (2) 整体流滑型破坏位移场分析

以细颗粒含量 70% 为例, 分析土体破坏位移场变化情况。土体位移场如图 14 所示。

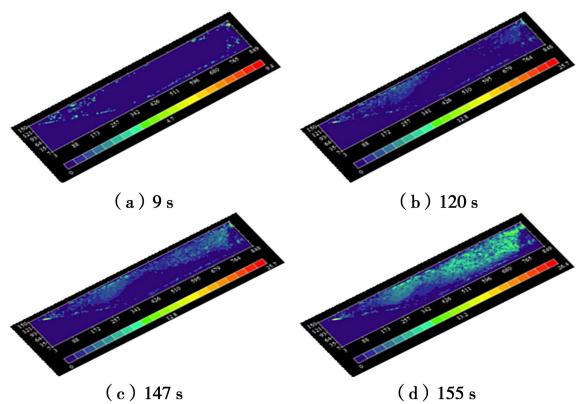


图 14 整体流滑型破坏位移云图

Fig. 14 Displacement nephogram of whole flow sliding

根据图 14 发现, 在降雨作用下, 在整体流滑型破坏发生前, 土体内部没有形成明显的潜在滑动面和裂缝, 土体表现为一种整体沉降的特征, 且后部土体

变形略大于前部土体。降雨开启后,雨水缓慢入渗;120 s 左右,土体整体沉降约 5 mm;降雨 147 s 土体整体沉降更为明显,且上部土体沉降明显大于下部;降雨 155 s,土体沉降继续增大,且向深层发展,最大位置约 13 mm。此时土体内部积蓄了较多的水分,下滑力较大,当下滑力大于抗滑力时,流滑破坏现象发生。

### (3) 典型破坏形态位移场对比分析

两种典型破坏形态位移场变化趋势明显不同。

分层滑动型破坏起点为坡脚的渗透破坏,随着裂缝的发展后部土体失去坡脚支撑继而陆续发生分层滑动;整体流滑型破坏表现为整体性、一次性流滑现象,破坏前土体连续性较好,无裂缝发展。其原因是细颗粒含量少的土体渗透系数大,雨水快速入渗并在底部产生渗透作用,破坏坡脚;细颗粒含量多的土体雨水入渗缓慢,不能在底部形成明显的渗透作用,破坏原因主要是上部土体下滑力的增大和下部土体基质吸力减小、抗滑力的降低。

整体流滑型破坏前土体发生明显沉降,而分层滑动型破坏前土体整体沉降相对较小。原因可能是细颗粒含量少的土体雨水快速渗透,土体重度增加相对小;细颗粒含量多的土体雨水积水入渗,土体容纳更多水分导致重度大幅度增大,附加应力值大,从而沉降明显。

## 2.4 孔隙水压力分析

20 倍离心场下,原本 10 cm 土体经离心场放大作用后相当于 2 m 厚土体。试验中通过在模型底部布设 3 个孔隙水压力计 W1、W2 和 W3 (图 15),分别距坡度变化位置 0, 100, 200 mm, 研究泥石流模型试验破坏过程土体孔隙水压力的变化规律。

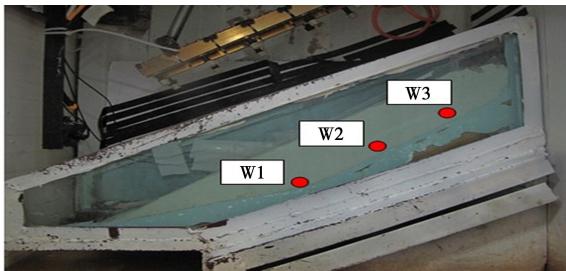


图 15 孔隙水压力计布置位置图

Fig. 15 Layout of pore pressure sensors

### (1) 分层滑动型破坏孔隙水压力分析

图 16 为细颗粒含量 20% 分层滑动型破坏孔隙水压力变化曲线,变化特征具有明显的波浪式下降的特点。降雨 50 s 左右孔压计数据开始上升。降雨 80 s 左右,孔压计 W1 首先出现数据下降,观察与此对应的土体破坏现象可以发现,80 s 左右坡体坡脚处开始出现大裂缝,W1 的位置相对于 W2、W3 距离坡脚较近,

受影响最大,坡脚裂缝的出现引起孔压的消散,W1 孔压数据下降。

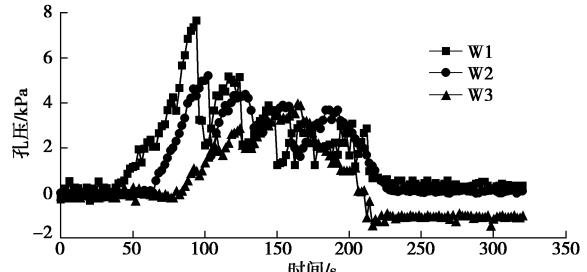


图 16 分层滑动型破坏孔隙水压力变化曲线

Fig. 16 Curves of pore water pressure for retrograded sliding

随着降雨的持续,坡脚处裂缝向上部土体发展,孔压随之耗散,110 s 左右 W2 数据下降,对比土体破坏现象可以发现 110 s 左右裂缝开展到达 W2 处。在降雨的作用下,雨水渗入裂缝和土体,引起孔压回升,孔压数据再次增大,孔压的上升引起土体基质吸力减小、抗剪强度降低、下滑力增大。123 s 土体第一次出现较大规模分层下滑,孔压迅速耗散,孔压计 W1、W2、W3 数据均出现不同程度的下降。前部土体的滑落使得后部土体失去原有支撑,同时在降雨的作用下土体含水率不断增加,继而在上部土体产生新的破坏。整个破坏过程,孔压计的最大数值均小于 20 kPa,土体一直处于一种非饱和状态。

### (2) 整体流滑型破坏孔隙水压力分析

图 17 为细颗粒含量 70% 整体流滑型破坏孔隙水压力变化曲线,其变化特征表现为一次瞬时陡降。130 s 左右,孔压计数据开始上升,对应土体破坏现象此时雨水入渗基本到达坡底位置。降雨 158 s 左右,W1、W2、W3 孔压计数据均出现瞬时陡降,分别由 12.01, 8.43, 7.32 kPa 降至 3.12, 2.26, 1.01 kPa。根据土体破坏现象可以看到,158 s 左右土体发生了突发性破坏,破坏前土体表面无明显裂缝的发展,因此自降雨开始到 158 s 这一较长的时间阶段内土体处于一种孔隙水压力积聚的状态,因此破坏发生前土体含水率较高、饱和程度较大、能量大。随着降雨的持续土体下滑力不断增大,当下滑力大于土体抗滑力时,土体发生整体流滑。

### (3) 典型破坏形态孔隙水压力对比分析

分层滑动型破坏和整体流滑型破坏孔隙水压力的变化特点,可以发现以下 4 点:①土体处于稳定状态时,土体孔隙水压力不断增大;土体发生破坏时孔隙水压力相应减小。②降雨开启后,发生分层滑动型破坏土体孔隙水压力计数值出现上升经历的降雨时间较小,约为 70 s,发生整体流滑型破坏土体孔隙水压力计数值上升所经历的降雨时间较长,约 130 s。③分层滑动型破坏孔压变化曲线呈波浪状下降,从开始下降到孔压数值稳定历时时间较长;整体流滑型破坏孔压

呈一次性陡降, 表现为瞬时陡降。④分层滑动型破坏和整体流滑型破坏过程中, 土体孔隙水压力都未达到饱和状态对应数值, 土体始终处于非饱和状态。

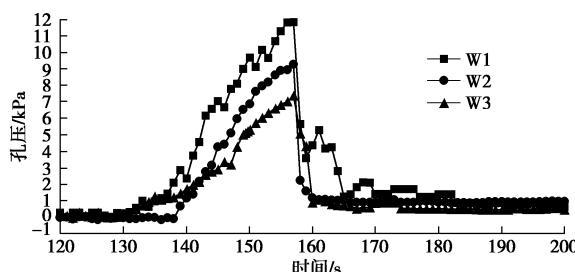


图 17 整体流滑型破坏孔隙水压力变化曲线

Fig. 17 Curves of pore water pressure for whole flow sliding

### 3 离心机模型试验与现场试验对比

将本文所进行的离心机模型试验与蒋家沟流域左支沟—多照沟上游弯房子的泥石流现场试验<sup>[17]</sup>进行对比分析。本次离心机模型试验的5组不同颗粒组分的L1~L3组试验, 即细颗粒含量在10%~30%的模型试验的土样在土体性质上与蒋家沟现场试验的土体性质较为接近, 蒋家沟泥石流源地土体为典型的宽级配砾石土, 粒径范围为0.002~100.00 mm, 模型试验的粒径范围为1~10 mm, 虽然在颗粒粒径范围上有较大差异, 但是L1~L3组试验土样的平均粒径 $d_{50}$ (3.8 mm)与现场试验土体的平均粒径 $d_{50}$ (3 mm)较为接近。通过对试验现象进行观察, L1~L3组模型试验较好地重现了蒋家沟泥石流现场试验的现象。模型试验与现场试验都表现为分层滑动型破坏, 表现出较为相似的破坏特征: 即降雨开始后孔隙水压力逐渐升高, 破坏从坡脚开始呈现出倒退、渐进式的滑动、分层破坏, 孔压也随之波浪式的下降。图18所示为现场试验的孔隙水压力变化曲线。因此说明离心机模型试验在模拟实际的泥石流发生上具有一定的可靠度, 并且可以在此基础上开展进一步的研究, 探索泥石流的启动机理。

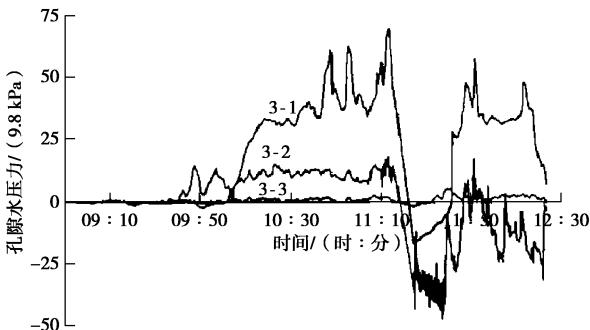


图 18 现场试验孔隙水压力变化曲线

Fig. 18 Curves of pore water pressure for field tests

### 4 讨 论

自然条件下, 实际泥石流的启动过程非常复杂, 对泥石流启动的物理模拟试验, 包括试验目的、对象、内容、条件、手段、过程、观测和分析等, 也是一个相当复杂的工程<sup>[18]</sup>; 虽然目前通过模型试验来研究泥石流启动机理的试验较多, 但是对于试验相似比尺条件的研究较少, 没有成熟的相似率<sup>[19]</sup>。因此模型试验所得到的试验结论往往只能与该试验的特定条件对应起来, 不具有普遍性, 给泥石流启动机理的研究带来了很大的困难。通常采取的手段是在缩尺条件下, 保证模型槽尺寸、试验土体与实际近似, 但是在人工降雨过程、边界条件控制等方面, 还需要进一步的加大研究力度。

本文模型试验的土样为人工配置的纯砂土边坡土样, 这与野外泥石流原状土样相比存在很大差别, 后续工作将扩大研究对象, 在试验土体中增加黏土进行试验, 提高模型试验与实际泥石流发生的相似度。虽然完全模拟实际泥石流的发生, 在当前看来, 还是相当困难的, 但是通过本文对纯砂土边坡下泥石流启动机理的研究, 还是能为后续泥石流启动机理的深入研究提供一定的借鉴与依据。

### 5 结 论

本文通过降雨诱发泥石流离心机模型试验, 在坡度和降雨强度不变的条件下, 研究颗粒组分对泥石流形成形态影响, 得到以下两点结论。

(1) 颗粒组分影响泥石流形成形态, 随着细颗粒含量的增大, 泥石流形成形态由分层滑动型向整体流滑型转变。表现为细颗粒含量10%~30%土体呈分层滑动型破坏, 孔隙水压力呈现出波浪式下降的趋势; 细颗粒含量70%土体呈整体流滑型破坏, 孔压呈现出不断积累后一次性陡降的特征; 细颗粒含量50%破坏形态为过渡形态。

(2) 不同的颗粒组分对应不同的渗透系数, 而渗透系数影响雨水在土体中的入渗路径, 分层滑动型破坏土体渗透系数大, 整体流滑型破坏土体渗透系数小, 因此渗透系数是泥石流不同形成形态的主要原因。

### 参考文献:

- [1] 陈中学, 汪 稔, 胡明鉴, 等. 云南东川蒋家沟泥石流形成内因初探[J]. 岩土力学, 2009, 30(10): 3053~3056. (CHEN Zhong-xue, WANG Ren, HU Ming-jian, et al. Study of internal factors for debris flow occurrence in Jianjia Ravine, Dongchun of Yunnan[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009,

- 30(10): 3053 – 3056. (in Chinese))
- [2] TRYGVE I, ANDERS E, DIETER I. Subaqueous debris flow behaviour and its dependence on the sand/clay ratio: a laboratory study using particle tracking[J]. *Marine Geology*, 2004, **213**: 415 – 438.
- [3] DAVID M, JEFFREY G M. Constraining the efficiency of turbidity current generation from submarine debris flows and slides using laboratory experiments[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2003, **20**: 883 – 899.
- [4] 陈宁生, 崔 鹏, 王晓颖, 等. 地震作用下泥石流源区砾石土体强度的衰减实验[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(16): 2743 – 2747. (CHEN Ning-sheng, CUI Peng, WANG Xiao-ying, et al. Testing study on strength reduction of gravelly soil in triggering area of debris flow under earthquake[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, **23**(16): 2743 – 2747. (in Chinese))
- [5] 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))
- [6] DAI F C, LEE C F, WANG S J. Analysis of rainstorm-induced slide-debris flows on natural terrain of Lantau Island, Hong Kong[J]. *Engineering Geology*, 1999, **51**: 279 – 290.
- [7] IVERSON R M, DENLINGER R P. Flow of variably fluidized granular masses across three-dimensional terrain coulomb mixture theory[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, **106**: 537 – 552.
- [8] WANG G, SASSA K. Factors affecting rainfall-induced flowslides in laboratory flume tests[J]. *Géotechnique*, 2001, **51**(7): 587 – 599.
- [9] WANG G, SASSA K. Pore-pressure generation and movement of rainfall-induced landslides: effects of grain size and fine-particle content[J]. *Engineering Geology*, 2003, **69**: 109 – 125.
- [10] 林鸿州. 降雨诱发土质边坡失稳的试验与数值研究[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))
- [11] 林鸿州, 于玉贞, 李广信, 等. 降雨特性对土质边坡失稳的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, **28**(1): 198 – 204. (LIN Hung-chou, YU Yu-zhen, LI Guang-xin, et al. Influence of rainfall characteristics on soil slope failure[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, **28**(1): 198 – 204. (in Chinese))
- [12] OKADA Y, OCHIAI H. Flow characteristics of 2-phase granular mass flows from model flume tests[J]. *Engineering Geology*, 2008, **97**: 1 – 14.
- [13] 高 冰, 周 健, 张 娇. 泥石流启动过程中水土作用机理的宏细观分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, **30**(12): 2567 – 2573. (GAO Bing, ZHOU Jian, ZHANG Jiao. Macro-meso analysis of water-soil interaction mechanism of debris flow starting process[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, **30** (12): 2567 – 2573. (in Chinese))
- [14] 吴积善, 田连权, 康志成. 泥石流及其综合治理[M]. 北京: 科学出版社, 1993. (WU Ji-shan, TIAN Lian-quan, KANG Zhi-cheng. Debris flow and its comprehensive control [M]. Beijing: Science Press (in Chinese))
- [15] 杨为民, 吴树仁, 张永双, 等. 降雨诱发坡面型泥石流形成机理[J]. 地学前缘, 2007, **14**(6): 197 – 204. (YANG Wei-min, WU Shu-ren, ZHANG Yong-shuang, et al. Research on formation of the debris flow on slope induced by rainfall[J]. *Earth Science Frontiers*, 2007, **14**(6): 197 – 204. (in Chinese))
- [16] 周 健, 杜 强, 李业勋, 等. 无黏性土滑坡型泥石流形成机理的离心机模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(11): 2010 – 2017. (ZHOU Jian, DU Qiang, LI Ye-xun, et al. Centrifugal model tests on formation mechanism of landslide-type debris flows of cohesiveless soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, **36**(11): 2010 – 2017. (in Chinese))
- [17] 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))
- [18] 倪化勇, 唐 川. 中国泥石流起动物理模拟试验研究进展[J]. 水科学进展, 2014, **25**(4). (NI Hua-yong, TANG Chuan. China landslide starting physical simulation experiment research progress[J]. *Advances In Water Science*, 2014, **25**(4). (in Chinese))
- [19] 王协康, 方 锋. 泥石流模型试验相似律分析[J]. 四川大学学报 (工程科学版), 2000, **32**(3): 9 – 12. (WANG Xie-kang, FANG Duo. Study on laws of debris model similarity[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2000, **32**(3): 9 – 12. (in Chinese))