

## 细粒含量对泥石流启动影响的离心机模型试验\*

周健<sup>1,2</sup>, 陈成<sup>1†</sup>, 杜强<sup>1,3</sup>, 张姣<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.内蒙古大学 交通学院, 内蒙古呼和浩特 010070; 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,配置6组不同细粒含量的坡体,进行降雨诱发泥石流离心机模型试验.通过分析坡体破坏形态、孔隙水压力变化、雨水迁移规律等,研究细粒含量对泥石流启动过程的影响.研究表明:泥石流启动存在临界细粒含量(约为15%),在临界细粒含量范围内,坡体表现为分层滑动破坏,10%细粒含量的泥石流启动时间最短;泥石流启动过程中坡内孔压逐渐上升至峰值后波浪状下降,随着细粒含量的增加,孔压曲线趋于平缓;细粒含量影响雨水的渗透速度和路径,这是影响坡体破坏形态和决定泥石流能否启动的直接原因.

**关键词:**细粒含量;泥石流;离心机模型试验

**中图分类号:**P642.23

**文献标志码:**A

## Centrifugal Model Tests on the Influence of Fine Contents on the Debris Flow Initiation Process

ZHOU Jian<sup>1,2</sup>, CHEN Cheng<sup>1†</sup>, DU Qiang<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.Transportation Institute of Inner Mongolia University, Hohhot, 010070, China; 4.School of Civil Engineering and Transportation, Shanghai Technical College of Urban Management, Shanghai 200432, China)

**Abstract:** Using the self-developed visualization test apparatus with constant slope and rainfall intensity and making six sets of slopes with different fine contents, centrifuge model tests on rainfall-induced debris flow were carried out. Through the analysis of slope failure patterns, the development of pore water pressure, moisture migration, and the influence of fine contents on the debris flow initiation process were studied. The test results indicate that there is a critical fine content (about 15%) with the initiation of debris flow, the failure pattern of slopes is retrograded sliding when fine contents are below the critical value, and the start time of debris flow with 10% fine content is the shortest. During the initiation of debris flow, the pore pressure increases to the peak before it declines like a wave and the curve of pore pressure tends to be gentle with the increase of fine contents. Fine contents influence the infiltration rate and the path of water, which affects slope failure patterns and determines whether the debris flow can start.

**Key words:** fine content; debris flow; centrifugal model test

\* 收稿日期:2016-07-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41272296, 51479138), National Natural Science Foundation of China(41272296, 51479138)

作者简介:周健(1957—),男,浙江临海人,同济大学教授,博士生导师

† 通讯联系人, E-mail: 18117214658@163.com

泥石流爆发突然、破坏性强,启动过程受众多因素影响,包括坡度、降雨特征、地震、人类活动等外部因素以及泥石流岩土体自身矿物成分、颗粒级配、化学成分、土体分散性和地下水环境等内部因素<sup>[1]</sup>。

国内外学者考虑了内外部因素,对泥石流启动过程做了研究,取得了一些研究成果<sup>[2-10]</sup>。在研究降雨因素方面,李驰等<sup>[11]</sup>通过室内人工降雨试验,发现了降雨入渗透发泥石流的启动最先出现在坡脚附近,随着降雨强度增大、土体饱和度增大,坡体稳定性降低促进泥石流的启动;林鸿州等<sup>[12]</sup>通过降雨诱发边坡失稳的模型试验,探讨了降雨特性对边坡失稳的影响。在研究坡度因素方面,陈中学等<sup>[13]</sup>通过在特定降雨强度下进行的室内模型试验,发现坡度越大,泥石流易发性越好,特别是当坡度大于 $45^\circ$ 时,泥石流启动所需时间大大缩短。在研究颗粒级配方面,周健等<sup>[14-15]</sup>通过室内模型试验以及离心机模型试验,研究了不同级配的砂土颗粒组分对泥石流启动形态的影响;Wang等<sup>[16]</sup>对不同粒径的两种硅砂进行降雨诱发泥石流试验,分析了滑动距离与土内孔压之间的关系;陈晓清等<sup>[17]</sup>通过蒋家沟现场试验,初步探索了黏土颗粒含量对泥石流启动的影响。

以上研究大多是采用室内模型试验手段对泥石流启动过程进行的研究,其缺点是试验坡体深度、宽度均比实际坡体小,与实际应力差距大。离心机模型试验在高应力场条件下模拟接近实际土体的应力状态,比室内模型试验更接近泥石流现场条件。

本文通过离心机模型试验,在坡度和降雨强度不变的条件下,利用高清数码相机记录坡体破坏过程;利用孔隙水压力计记录坡内孔隙水压力变化;通过分析不同细粒含量坡体的破坏过程、破坏特征时刻、累计滑动量、雨水迁移规律、孔压变化规律等研究细粒含量对泥石流启动过程的影响。

## 1 离心机模型试验设计

### 1.1 试验土样

考虑到离心机的放大效应,本文采用石英砂(0.005~0.100 mm)掺入不同比例的细粒(0.005~0.075 mm)作为试验土样。石英砂的相关参数为 $d_{50}=0.056$  mm, $G_s=2.75$  g/cm<sup>3</sup>, $\varphi=27^\circ$ ,其渗透系数经离心机重力场(20g)放大后与粗砂渗透系数接近,其模拟的粗砂粒径分布如表1所示。细粒塑性指

数为19,属于黏土范畴,由于本身粒径极小,难以用其他材料替代,并且其含量相对较少,所以可以近似认为:在离心机的放大效应作用下,试验土坡整体的渗透系数与实际土坡渗透系数一致。虽然野外泥石流的粒径组分复杂,包含黏粒、粉粒、砂土、砾石土等多种组分,呈宽级配混合土体,但本文旨在单独考虑细粒含量对泥石流启动过程的影响,因此试验土样与泥石流原状土样存在一定差异。前人研究表明坡面型泥石流以平移式滑动破坏为主,通常发生在残积土层厚度小于2 m的坡地<sup>[18]</sup>。受限于本次试验所用的模型槽尺寸较小,将坡体厚度定为10 cm,经过20g重力场放大基本满足研究坡面型泥石流启动机理的要求。

表1 模拟粗砂粒径分布

粒径/mm	>2.0	2.0-0.5	0.5-0.25	0.25-0.08	<0.075
模拟粗砂含量/%	2.0	58.9	19.2	14.1	5.8

不同区域的泥石流在形成时,堆积土体的密实度是不同的。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,因此本文试验中控制坡体密实度 $D_r=0.45$ 。在较小的初始含水率下,坡体容易自立,并可以保证松散程度,防止土体结块,便于均匀装样,因此,控制土样初始含水率为5%。试验制备6组不同细粒含量的土样研究细粒对泥石流启动的影响,土样编号及渗透系数如表2所示,土样颗粒级配曲线如图1所示。

表2 离心机模型试验土样编号及渗透系数

土样编号	细粒含量/%	渗透系数/(cm·s <sup>-1</sup> )	放大20倍后渗透系数/(cm·s <sup>-1</sup> )
S1	0	0.000 98	0.02
S2	5	0.000 51	0.01
S3	10	0.000 32	0.006 4
S4	15	0.000 24	0.004 8
S5	20	0.000 22	0.004 4
S6	25	0.000 12	0.002 4

### 1.2 试验装置

本文的降雨诱发泥石流离心机模型试验装置采用边坡降雨及动态采集系统,该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可控人工降雨系统(图2)、远程数据采集系统和泥石流发生槽(图3)。离心机的主

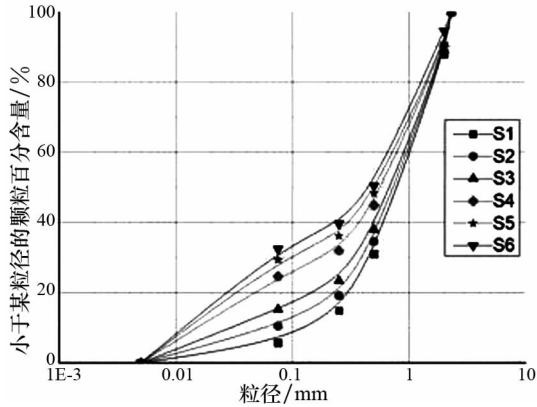


图 1 土样颗粒级配曲线

Fig.1 Grading curves of soil samples

要参数:最大荷载能力为  $150 \text{ g} \cdot \text{t}$ ;最大离心加速度为  $200g$ ;有效转臂半径为  $3.0 \text{ m}$ .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、强度可控的人工降雨,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[19].

1.3 试验坡体及降雨强度

试验坡体如图 4 所示,一级坡体  $15^\circ$ ,二级坡体  $35^\circ$ ,坡体厚度为  $10.0 \text{ cm}$ ,宽度为  $25.0 \text{ cm}$ ,上表面为  $80.0 \text{ cm}$ .结合参考文献[20]中中国山区灾害暴雨泥

表 3 中国山区灾害暴雨泥石流发生临界雨量阈值

Tab.3 Critical rainfall of rainstorm debris flow occurrence in the mountains of China mm

因子	大兴安岭山区	小兴安岭山区	龙岗山、千山区	七老图山、太行山区	五台山、中条山区	大娄山区	大别山、武当山区	雪峰山、幕阜山区	武夷山、阿里山区	泰山、崂山区
日雨量	100~200	200~300	200~300	200~300	100~300	100~300	100~300	150~300	200~300	200~300
小时雨量	40	40	50	50	50	50	50	50	60	60

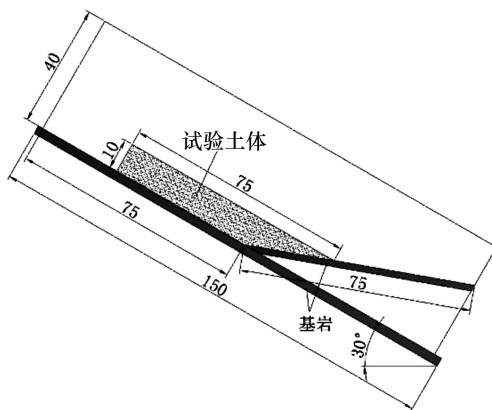


图 4 试验坡体

Fig.4 Test slope

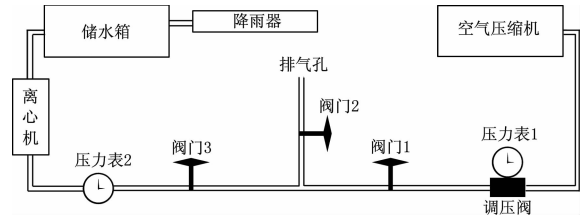


图 2 远程可调控人工降雨系统

Fig.2 Remote adjustable artificial rainfall system



图 3 泥石流模型槽

Fig.3 Model tank of rainfall induced debris flow

石流发生临界雨量阈值(表 3),发现泥石流通常在降雨强度  $40 \text{ mm/h}$  以上发生,所以离心机模型试验中控制降雨强度为  $50 \text{ mm/h}$ .

2 离心机试验结果与分析

本文采用 6 种不同细粒含量的土样制作试验坡体进行降雨诱发泥石流试验,试验编号沿用土样编号 S1, S2, S3, S4, S5 和 S6,对应细粒的质量分数为  $0\%$ ,  $5\%$ ,  $10\%$ ,  $15\%$ ,  $20\%$  和  $25\%$ .

2.1 坡体破坏形态分析

离心机模型试验中,在降雨强度  $50 \text{ mm/h}$  下,细粒质量分数  $0\% \sim 10\%$  的坡体破坏形态为分层滑动型,形成泥石流;细粒质量分数  $15\%$  的坡体破坏形态为分层滑动向坡面冲刷的过渡型,形成泥石流;细粒质量分数为  $20\% \sim 25\%$  的坡体破坏形态为冲刷型,没有形成泥石流.选取细粒质量分数为  $5\%$ ,  $15\%$ ,  $25\%$  的坡体破坏过程进行分析.

细粒质量分数为5%的坡体破坏形态为分层滑动型,其过程如图5所示。

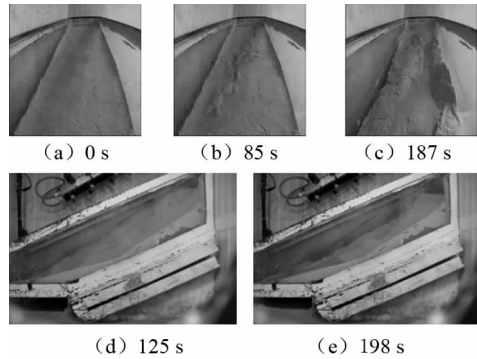


图5 5%细粒质量分数的坡体破坏过程  
Fig.5 Failure process of slope with 5% fine content

降雨至85 s时,坡面沉降明显,未渗入坡体的雨水形成径流(图5(b));降雨至125 s时,坡脚在坡面径流以及坡内渗流共同作用下开始破坏,靠近坡脚位置出现较大裂缝(图5(d));降雨至187 s时,坡脚附近土体裂缝贯通,坡体发生初始滑动(图5(c));随后坡面裂缝扩展,雨水加速入渗,滑动范围向坡体上部发展,相继发生多次滑动(图5(e))。

细粒质量分数15%的坡体破坏形态为分层滑动向坡面冲刷的过渡型,其过程如图6所示。

降雨至32 s时,由于该坡体的渗透系数相比细粒质量分数5%的坡体更小,所以径流较早出现,并在坡面冲刷出沟壑(图6(b));降雨至64 s时,坡脚被坡面径流逐渐侵蚀,开始破坏(图6(d));降雨至218 s时,坡体失去坡脚支撑发生初始滑动(图6(c)),相比细粒质量分数5%的坡体,其滑动深度较浅,坡体上部的滑动范围也较小(图6(e))。

细粒质量分数25%的坡体破坏形态为冲刷型破坏,其过程如图7所示。降雨至11 s时,大量未渗

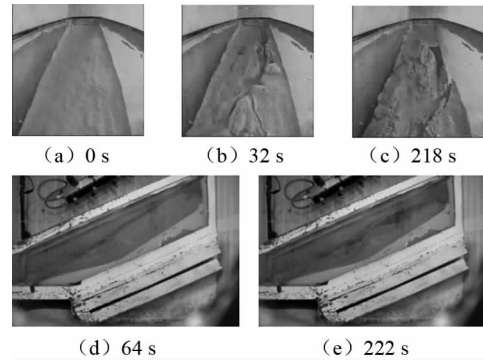


图6 15%细粒质量分数的坡体破坏过程  
Fig.6 Failure process of slope with 15% fine content

入坡体的雨水在坡面形成径流(图7(b));降雨至22 s时,坡面冲刷破坏明显,沟壑逐渐加深,坡脚被侵蚀(图7(d));降雨至100 s时,坡体在径流冲刷下严重流失(图7(c),7(e))。

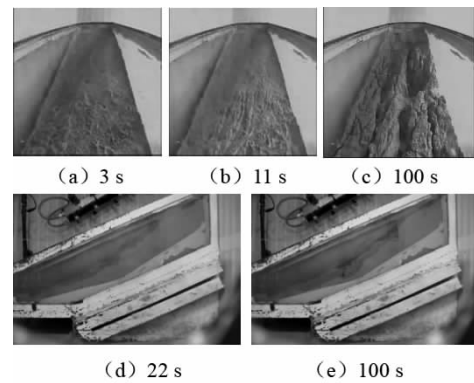


图7 25%细粒质量分数坡体破坏过程  
Fig.7 Failure process of slope with 25% fine content

## 2.2 坡体破坏特征时刻分析

不同细粒含量坡体破坏类型和特征时刻如表4所示,坡体破坏特征时刻拟合曲线如图8所示。

表4 不同细粒含量坡体破坏形态和特征时刻

Tab.4 Failure patterns and characteristic times of slopes with different fine contents

细粒质量分数/%	0	5	10	15	20	25
坡体破坏形态	分层滑动型	分层滑动型	分层滑动型	过渡型	冲刷型	冲刷型
坡面出现径流时刻/s	112	85	61	32	23	11
坡脚开始破坏时刻/s	157	125	98	64	34	22
坡体初始滑动时刻/s	235	187	134	218	—	—
是否形成泥石流	是	是	是	是	否	否

图8的拟合曲线可知:随着细粒含量的增加,由于坡体渗透系数减小,坡面出现径流以及坡脚开始破坏的时刻均提前,两条曲线的时间间隔逐渐缩短,说明随着细粒含量的增加,坡脚破坏由坡面径流与坡

内渗流共同作用转变为由坡面径流为主导,所以坡体破坏形态由分层滑动型向坡面冲刷型过渡。

通过分析上述不同细粒含量坡体的破坏形态及泥石流启动过程,并考虑到试验坡体的细粒含量

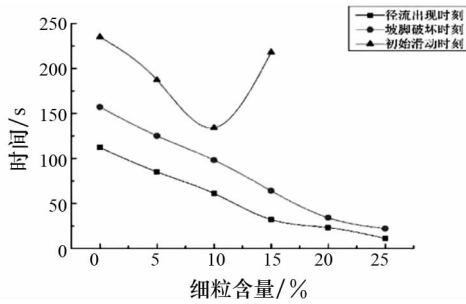


图 8 不同细粒含量坡体破坏特征时刻拟合曲线  
Fig.8 The fitting curves of characteristic times of slopes with different fine contents

分组较为粗糙,初步认为:泥石流启动存在某个临界细粒质量分数(约为 15%).在该值范围内(约为 0%~15%),随着细粒含量的增加,泥石流启动时间先减小后增大,细粒质量分数约为 10%坡体的泥石流启动时间最短.

### 2.3 累计滑动量分析

本文采用立体观测估算算法(即通过在坡体侧面以及顶部设置数码观测相机,拍摄侧面及顶部数码相机图片,确定坡体的滑动深度及形状轮廓、坡体表层的滑动轮廓及尺寸(图 9))来估测坡体累次滑动形成的松散土体土方量并研究细粒含量对泥石流启动过程中累计滑动量的影响.

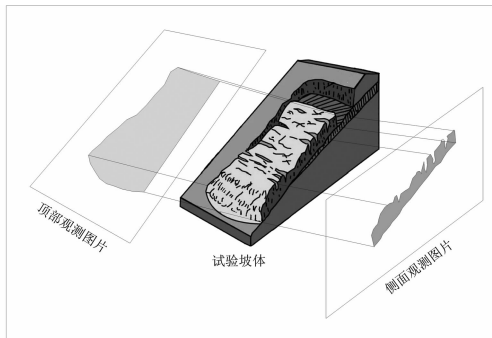


图 9 滑动量计算示意图  
Fig.9 Sketch of sliding quantity calculation

细粒质量分数 0%~15%的坡体在降雨作用下发生分层滑动,形成泥石流,其累计滑动量如图 10 所示.由图 10 可以发现:在临界细粒含量范围内,随着细粒含量的增加,坡体初始滑动量从 5 564 cm<sup>3</sup>(细粒质量分数 0%)减少至 1 712 cm<sup>3</sup>(细粒质量分数 15%),表明泥石流启动规模逐渐缩小;坡体后继滑动次数增加,曲线趋于平缓,表明泥石流形成的突发性下降;泥石流的土方总量从 9 309 cm<sup>3</sup>(细粒质量分数 0%)减少至 1 712 cm<sup>3</sup>(细粒质量分数 15%),表明坡体破坏形式从分层滑动型向冲刷型

破坏过渡.

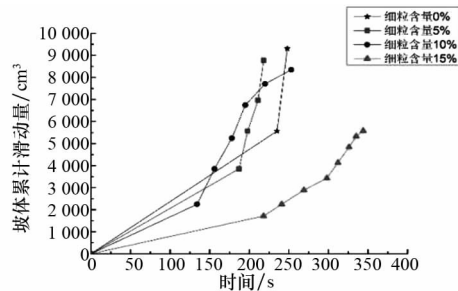


图 10 累计滑动量折线图  
Fig.10 Line chart of cumulative sliding quantity

### 2.4 孔隙水压力分析

在模型槽一级坡底部布置 3 个孔隙水压力计 3#, 2# 和 1#(图 11),分别距坡底 0 mm, 100 mm 和 200 mm,记录试验过程中坡内孔隙水压力.选取细粒质量分数 5%, 10%, 15% 和 20% 坡体的孔隙水压力变化曲线(图 12~15)研究细粒含量对泥石流启动过程中孔隙水压力的影响.

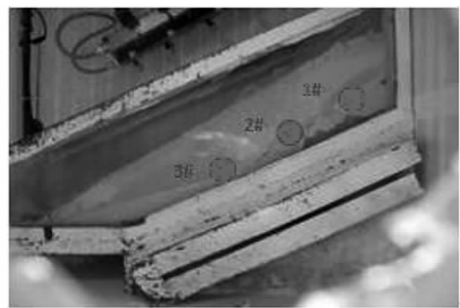


图 11 孔隙水压力计布置图  
Fig.11 Layout of pore water pressure sensors

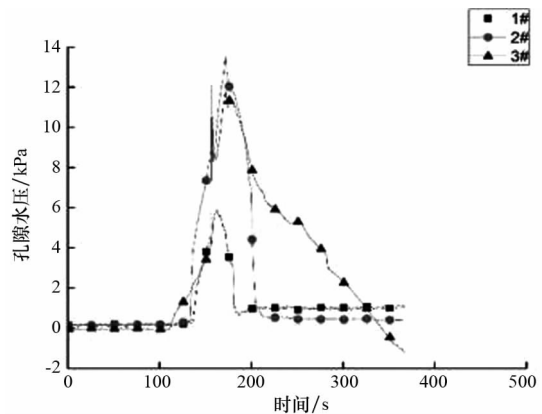


图 12 细粒质量分数 5% 坡体的孔隙水压力变化曲线  
Fig.12 Curves of pore water pressure of the slope with 5% fine content

结合不同细粒含量坡体的孔隙水压力图以及宏观试验现象,可以将泥石流启动过程分为 3 个阶段:入渗软化阶段、坡脚破坏阶段、分层滑动阶段.

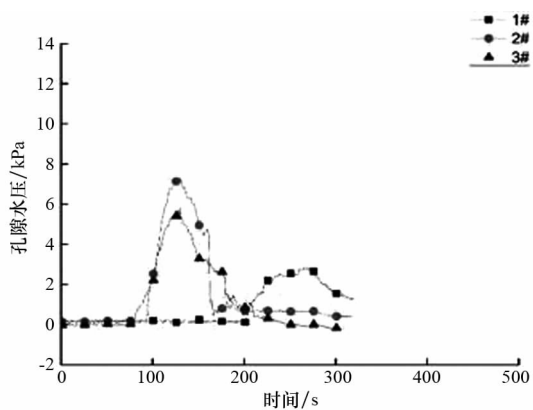


图 13 细粒质量分数 10% 坡体的孔隙水压力变化曲线  
Fig.13 Curves of pore water pressure of the slope with 10% fine content

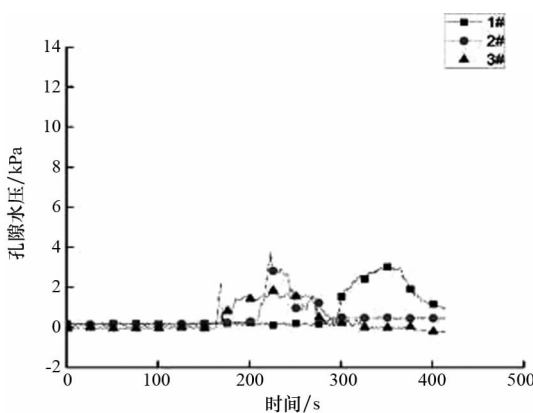


图 14 细粒含量 15% 坡体的孔隙水压力变化曲线  
Fig.14 Curves of pore water pressure of the slope with 15% fine content

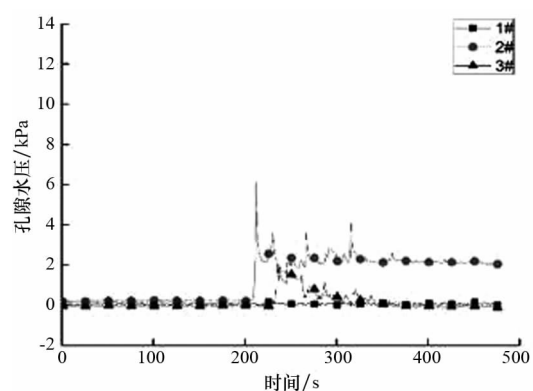


图 15 细粒含量 20% 坡体的孔隙水压力变化曲线  
Fig.15 Curves of pore water pressure of the slope with 20% fine content

以细粒质量分数 5% 坡体的孔隙水压力变化图(图 12)为例,在入渗软化阶段(0~85 s),坡内孔隙水压力保持不变,雨水逐渐从坡面渗透至坡底孔压计位置.在坡脚破坏阶段(85~187 s),坡内渗流及坡面径流逐渐使坡脚破坏,坡体出现多条裂缝,坡

内孔隙水压力迅速上升,说明雨水到达坡底,沿基岩面从坡脚渗出的速度远远小于雨水在孔隙内积聚的速度;3#,2#和1#孔压计到坡脚距离逐渐增加,对应位置孔压依次增长.在分层滑动阶段(187~350 s),由于初始滑动范围较大,在 185 s,3 处孔压基本同时从峰值(分别为 13.6 kPa,11.8 kPa 和 5.9 kPa)下降,孔压下降过程受裂缝扩展的影响呈现波浪状,最后 1#孔压趋于 0.2 kPa,2#孔压趋于 0.25 kPa,3#孔压趋于 -1.8 kPa.

细粒质量分数 20% 的坡体在试验降雨条件下冲刷破坏,不形成泥石流,结合其孔隙水压力图(图 15)以及宏观试验现象可知:由于细粒含量较大,坡体渗透系数极小,雨水入渗速度慢,径流冲刷侵蚀坡体;当冲刷至接近坡底孔压计位置,孔隙水压力曲线出现波动,随后基本保持不变.

将细粒质量分数 10%,15% 的坡体与细粒质量分数 5%,15% 的坡体的孔隙水压力变化图进行对比,可以发现:随着细粒含量的增加,在坡脚破坏阶段,由于坡体渗透系数变小,孔压上升速度减慢,靠近坡脚的 3#孔压先达到峰值,2#,1#孔压随后依次接近峰值,3 处孔压峰值均逐渐减小(细粒质量分数 10% 的为 5.7 kPa,7.4 kPa 和 3.7 kPa,细粒质量分数 5% 的为 2.1 kPa,3.9 kPa 和 3.3 kPa);在分层滑动阶段,孔压下降仍受裂缝扩展的影响,表现为波浪状,但下降速度减慢;当细粒质量分数接近临界值(15%),孔隙水压力曲线整体趋势与坡体冲刷型破坏的孔隙水压力曲线较为相似.

综合上述分析可知:泥石流启动过程可分为 3 个阶段,在入渗软化阶段,孔隙水压力基本保持不变;在坡脚破坏阶段,孔隙水压力迅速增大接近峰值;在分层滑动阶段,坡脚附近率先发生初始滑动,孔隙水压力释放并且受到坡体裂缝扩展的影响,表现为波浪状下降.随着细粒含量的增加,坡内孔隙水压力峰值逐渐降低,孔隙水压力曲线整体趋于平缓.

## 2.5 雨水迁移规律分析

细粒质量分数 0%,5%,10% 和 15% 的坡体在降雨作用下分层滑动,形成泥石流,泥石流启动过程中坡体浸润面变化如图 16~19 所示.图中实线表示浸润面位置,图(a)均为坡面出现径流时刻;图(b)均为坡脚开始破坏时刻;图(c)均为坡体初始滑动时刻;图中虚线表示坡体初始滑动的侧面轮廓.利用等比例放大的原理测量浸润面和初始滑动面相对于原始坡面的深度.

观察上述 4 种细粒含量坡体的浸润面变化图可



(a)62 s (b)131 s (c)235 s  
图 16 细粒质量分数 0% 的坡体浸润面变化图  
Fig.16 Variation of infiltration surface of the slope with 0% fine content



(a)46 s (b)107 s (c)176 s  
图 17 细粒质量分数 5% 的坡体浸润面变化图  
Fig.17 Variation of infiltration surface of the slope with 5% fine content



(a)35 s (b)80 s (c)128 s  
图 18 细粒质量分数 10% 坡体浸润面变化图  
Fig.18 Variation of infiltration surface of the slope with 10% fine content



(a)32 s (b)64 s (c)155 s  
图 19 15% 细粒含量坡体浸润面变化图  
Fig.19 Variation of infiltration surface of the slope with 15% fine content

以发现:当坡体细粒含量在泥石流启动临界细粒含量范围内(质量分数约为 0%~15%),降雨作用下,坡体浸润面变化过程相似,但是细粒含量对浸润面深度有显著影响.雨水降落在坡面后受重力场影响,竖直向下入渗,随着细粒含量的增加,坡面径流形成时的浸润面深度由 4.6 cm(细粒质量分数 0%)减小至 1.2 cm(细粒质量分数 15%)(图 16(a),17(a),18(a),19(a)).径流沿冲刷面(基本在坡面附近)向二级坡汇聚,使二级坡有压入渗水头增大,局部浸润线变化幅度大于一级坡.坡脚开始破坏时细粒质量分数 0%~10% 的坡体浸润面已经到达二级坡底,细粒质量分数 15% 的坡体浸润面还处于二级坡体中部(图 16(b),17(b),18(b),19(b)),说明随着细粒含量的增加,坡脚破坏由坡内渗流主导转变为径流冲刷主导.坡脚破坏后,坡体在浸润面附近发生

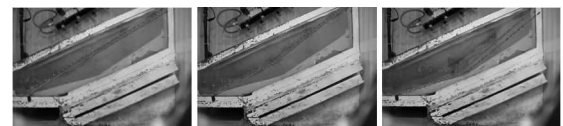
初始滑动,随着细粒含量的增加,坡体破坏时的滑动量减小,滑动深度从 9.4 cm(细粒质量分数 0%)减小至 5.3 cm(细粒质量分数 15%)(图 16(c),17(c),18(c),19(c)).

细粒质量分数 20%,25% 的坡体在降雨作用下冲刷破坏,没有发生泥石流.坡体破坏过程中浸润面和冲刷面变化如图 20,图 21 所示.图中实线为浸润面位置,虚线为冲刷面位置,图(a)均为坡面出现径流时刻;图(b)均为坡脚开始破坏时刻;图(c)均为二级坡完全破坏时刻;利用等比例放大的原理测量浸润面和冲刷面相对于原始坡面的深度.



(a)23 s (b)34 s (c)158 s  
图 20 细粒质量分数 20% 的坡体浸润面及冲刷面变化图

Fig.20 Variation of infiltration surface and erosion surface of the slope with 20% fine content



(a)11 s (b)20 s (c)162 s

图 21 25% 细粒含量坡体浸润面及冲刷面变化图  
Fig.21 Variation of infiltration surface and erosion surface of the slope with 25% fine content

对比上述两种细粒含量坡体的浸润面及冲刷面变化图可以发现:当坡体细粒含量超过泥石流启动临界细粒含量(质量分数约 15%),降雨作用下,坡面径流形成时,细粒质量分数 20% 的坡体浸润面深度为 0.9 cm,细粒质量分数 25% 的坡体浸润面深度为 0.6 cm(图 20(a),图 21(a)).随着降雨的进行,冲刷面与浸润面基本重合,逐渐向下迁移(图 20(b),图 21(b)).由于径流沿冲刷面向二级坡汇聚,所以二级坡体先于一级坡体完全破坏(图 20(c),图 21(c)).

对比两种坡体典型破坏形态(即分层滑动型破坏和冲刷型破坏)的浸润面、冲刷面变化过程可知:雨水渗透速度和路径是影响不同细粒含量坡体破坏形态和决定泥石流能否启动的直接原因.

### 3 离心机模型试验与现场试验对比

本次离心机模型试验的所用土样经过重力加

速度放大后的等效粒径范围 0.25~5 mm,与蒋家沟的宽级配砾石土粒径范围 0.002~100.00 mm 有较大区别.但是由于蒋家沟的宽级配砾石土也含有 10.7%的黏粒组分,且两种的平均粒径  $d_{50}$  分别为 3.3 mm 和 3.0 mm,所以两种土样的细粒性质较为相似,因此将本次离心机试验结果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结果进行对比是合理的.图 22 为现场试验孔隙水压力变化曲线,通过对比分析离心机试验与蒋家沟现场试验的宏观试验现象以及坡内孔隙水压力变化,可以发现两次试验的泥石流启动过程较为接近,均可分为 3 个阶段:在降雨入渗软化阶段,坡内孔隙水压力基本保持不变,坡面逐渐出现径流;在坡脚破坏阶段,坡内孔隙水压力迅速增大至峰值,坡内渗流与坡面径流共同使坡脚破坏;在分层滑动阶段,坡体从坡脚附近开始倒退、分层滑动破坏,形成泥石流,孔隙水压力从峰值开始波浪状下降.由此说明离心机模型试验在模拟泥石流启动上具有一定可靠度,可以在本文试验基础上开展进一步研究,探索其他因素对泥石流启动的影响.

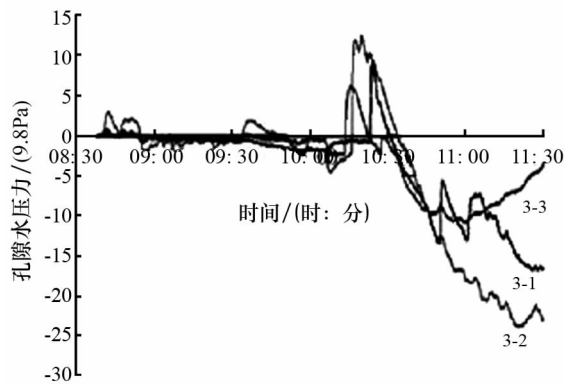


图 22 现场试验孔隙水压力变化曲线

Fig.22 Curves of pore water pressure for filed tests

## 4 结论

本文通过降雨诱发泥石流离心机模型试验,在降雨和坡度不变的条件下,研究细粒含量对泥石流启动过程的影响,得到以下结论:

1)泥石流启动存在临界细粒含量(质量分数约为 15%),当细粒含量在该临界值内,坡体发生分层滑动,形成泥石流;当细粒含量超过该临界值时,坡体发生冲刷型破坏.

2)在临界细粒含量范围内,泥石流启动时间先减小后增大,细粒质量分数 10%左右的泥石流启动

时间最短;泥石流启动规模随细粒含量增加而逐渐缩小.

3)泥石流启动过程可分为 3 个阶段:在入渗软化阶段,坡内孔隙水压力基本保持不变;在坡脚破坏阶段,坡内孔隙水压力逐渐上升;在分层滑动阶段,坡内孔隙水压力释放,呈波浪状下降;随着细粒含量的增加,孔隙水压力峰值减小,孔隙水压力曲线整体趋势更加平缓.

4)细粒的含量影响雨水在坡内的渗透速度和路径,这是决定坡体破坏形态和泥石流能否启动的直接原因.

## 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].岩石力学,2009,30(10):3053-3056.  
CHEN Zhongxue, WANG Ren, HU Mingjian, *et al.* Study of internal factors for debris flow occurrence in Jiangjia Ravine, Dongchun of Yunnan[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(10):3053-3056. (In Chinese)
- [2] WEN B P, AYDIN A. Mechanism of a rainfall-induced slide-debris flow: Constraints from microstructure of its slip zone[J]. Engineering Geology, 2005, 78: 69-88.
- [3] 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 Mingjian, WANG Ren, ZHANG Pingcang. Primary research on the effect of rainfall on landslide[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 23(4): 454-457. (In Chinese)
- [4] 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(2): 415-438.
- [5] HUANG C C, LO C L, JANG J S, *et al.* Internal soil moisture response to rainfall-induced slope failures and debris discharge[J]. Engineering Geology, 2008, 101(1): 134-145.
- [6] 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(1): 39-51.
- [7] 高冰,周健,张娇.泥石流启动过程中水土作用机理的宏观分析[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)
- [8] 冯杭建,唐小明,周爱国.浙江省泥石流与降雨历时关系研究及应用检验[J].自然灾害学报,2013,22(1):159-167.  
FENG Hangjian, TANG Xiaoming, ZHOU Aiguo. Study on relationship between rainfall duration and occurrence of debris flow in Zhejiang Province and its application examination[J]. Journal of Natural Disasters, 2013, 22(1): 159-167. (In Chinese)
- [9] 尹洪江,王志兵,胡明鉴.降雨强度对松散堆积土斜坡破坏的模型试验研究[J].土工基础,2011,25(3):74-76.  
YIN Hongjiang, WANG Zhibing, HU Mingjian. Influence of rainfall intensity on loosedeposits slopes failure by model tests [J]. Soil Engineering and Foundation, 2011, 25(3): 74-76. (In Chinese)
- [10] 周健,杜强,于仕才.泥石流启动试验的数值模拟研究[J].湖南大学学报:自然科学版,2015,42(9):97-103.



- ZHOU Jian, DU Qiang, YU Shicai. Numerical simulation study on the experiments of the initiation[J]. Journal of Hunan University; Natural Sciences, 2015, 42(9): 97—103. (In Chinese)
- [11] 李驰, 朱文会, 鲁晓兵, 等. 降雨作用下滑坡转化泥石流分析研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43: (S1) 499—505.  
LI Chi, ZHU Wenhui, LU Xiaobing, *et al.* Studied on landslide translating into debris-flow under rainfall[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(S1): 499—505. (In Chinese)
- [12] 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 Hongzhou, YU Yuzhen, LI Guangxin, *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)
- [13] 陈中学. 粘土颗粒含量对蒋家沟泥石流启动影响及成灾机理研究[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2010: 75.  
CHEN Zhongxue. Research on clay particles content for initiation and catastrophe mechanism of debris-flows in Jiangjia Ravine [D]. Wuhan: Institute of Rock & Soil Mechanics Chinese Academy of Sciences, China, 2010: 75. (In Chinese)
- [14] 周健, 王连欣, 贾敏才, 等. 颗粒组分对泥石流形成形态影响研究[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2014, 41(1): 9—14.  
ZHOU Jian, WANG Lianxin, JIA Mincai, *et al.* Influence of grain size distribution on the formation of debris flow[J]. Journal of Hunan University; Natural Sciences, 2014, 41(1): 9—14. (In Chinese).
- [15] 周健, 杨浪, 王连欣, 等. 不同颗粒组分下泥石流离心机模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(12): 2167—2174.  
ZHOU Jian, YANG Lang, WANG Lianxin, *et al.* Centrifugal model tests on debris flow with different particle compositions [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(12): 2167—2174. (In Chinese)
- [16] WANG G, SASSA K. Factors affecting rainfall-induced flow-slides in laboratory flume tests[J]. Geotechnique, 2001, 51(7): 587—599.
- [17] 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.  
CHEN Xiaqing, 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. (In Chinese)
- [18] 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 Weimin, WU Shuren, ZHANG Yongshuang, *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)
- [19] 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 Yexun, *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)
- [20] 谭万沛. 中国暴雨泥石流预报研究基本理论与现状[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1996, 2(1): 88—95.  
TAN Wanpei. Basic theory and study situation of rainstorm debris flow forecast in China [J]. Journal of Soil Erosion and Soil Conservation, 1996, 2(1): 88—95. (In Chinese)
- 
- (上接第 158 页)
- [8] 张强, 葛修润, 王水林, 等. 考虑材料变形和破坏特性的强度折减方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(S1): 2764—2769.  
ZHANG Qiang, GE Xiurun, WANG Shuilin, *et al.* Study of strength reduction method considering material deformation and failure characteristics [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(S1): 2764—2769. (In Chinese)
- [9] 白冰, 袁维, 石露, 等. 一种双折减法与经典强度折减法的关系[J]. 岩土力学, 2015, 36(5): 1275—1281.  
BAI Bing, YUAN Wei, SHI Lu, *et al.* A kind of double reduction method and classical strength reduction method [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(5): 1275—1281. (In Chinese)
- [10] YUAN Wei, BAI Bing, LI Xiaochun, *et al.* A strength reduction method based on double reduction parameters and its application[J]. Journal of Central South University, 2013, 20(9): 2555—2562.
- [11] JIANG Xiaoyong, WANG Zegen, LIU Lianyong. The determination of reduction ratio factor in homogeneous soil-slope with finite element double strength reduction method[J]. The Open Civil Engineering Journal, 2013, 7: 205—209.
- [12] PANTELIDIS L, GRIFFITHS D V. Stability assessment of slopes using different factoring strategies [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2012, 138(9): 1158—1160.
- [13] ISAKOV A, KORNEYEV D A, MORYACHKOV Y. Two-parameter criterion of road bed stability[C]//Proc. of Engineering Geology, Soil Mechanics and Foundations. Novosibirsk, Russia, 2010: 31—38.
- [14] ISAKOV A, MORYACHKOV Y. Estimation of slope stability using two-parameter criterion of stability[J]. International Journal of Geomechanics, 2014, 14(3): 613—624.
- [15] 赵炼恒, 曹景源, 唐高朋, 等. 基于双强度折减策略的边坡稳定性分析方法探讨[J]. 岩土力学, 2014, 35(10): 2977—2984.  
ZHAO Lianheng, CAO Jingyuan, TANG Gaopeng, *et al.* Discussion on slope stability analysis with double strength reduction technique [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(10): 2977—2984. (In Chinese)
- [16] 陈祖煜. 建筑物抗滑稳定分析中“潘家铮最大最小原理”的证明[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 1998, 38(1): 3—6.  
CHEN Zuyu. On Pan's principles of soil and rock stability analysis [J]. Journal of Tsinghua University; Nature Sciences, 1998, 38(1): 3—6. (In Chinese)
- [17] 苏永华, 何新亮, 罗正东. 基于强度折减法的隧道围岩稳定性研究[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(1): 49—53.  
SU Yonghua, HE Xinliang, LUO Zhengdong. Research on the stability of surrounding rocks based on the strength reduction method [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2014, 41(1): 49—53. (In Chinese)
- [18] BISHOP W. The use of the slip circle in the stability analysis of earth slopes [J]. Géotechnique, 1955, 5(1): 7—17.