

DOI: 10.11779/CJGE201411006

无黏性土滑坡型泥石流形成机理的离心机模型试验研究

周 健^{1, 2}, 杜 强^{1, 2}, 李业勋³, 张 姣⁴

(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. 中交三航局第二工程有限公司, 上海 200122; 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: 采用自主研发的可视化试验装置, 参照某泥石流现场试验进行了离心机模型试验, 研究典型滑坡型泥石流形成的宏细观机理。根据现场试验的颗粒级配和重力比, 用粉砂和细砂按比例配制土样进行 20g 加速度下的离心机试验。利用高清数码成像设备和细观结构分析软件 Geodip 分别从宏观和细观角度分析了滑坡型泥石流的形成模式和水土作用机理。研究表明: 离心机模型试验较好地重现了现场试验现象, 滑坡型泥石流的形成模式为自坡脚逐渐向上分块坍塌的倒退式块体滑动。滑坡型泥石流形成的原因是坡体中细颗粒随孔隙水迁移, 引起孔隙水压力升高并形成底部渗流, 造成坡体发生抗剪强度破坏形成泥石流。

关键词: 滑坡型泥石流; 离心机试验; 形成模式; 水土作用机理

中图分类号: TU441

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2014)11-2010-08

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 formation mechanism of landslide-type debris flows of cohesiveless soils

ZHOU Jian^{1, 2}, DU Qiang^{1, 2}, LI Ye-xun³, ZHANG Jiao⁴

(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. The Second Engineering Company of CCCC Third Harbor Engineering Co., Ltd., Shanghai 200122, China; 4. Department of Civil Engineering and Transportation, Shanghai Polytechnic College, Shanghai 200432, China)

Abstract: Using the self-developed visualization test apparatus, centrifuge model tests are carried out to study the macro-mesoscopic formation mechanism of typical landslide-type debris flows according to field tests on a debris flow. Based on the grain-size gradation of field tests and gravity ratio, the centrifugal model tests are carried out under 20g. The soil samples are made up by silt sands and fine sands. The formation mode and soil-water action mechanism of landslide-type debris flows are analyzed from the macroscopic and mesoscopic points of view respectively by using the HD digital imaging equipment and the mesoscopic structure analysis software Geodip. The test results indicate that the centrifugal model tests can reproduce the phenomenon of the field tests approximatively. The formation mode of landslide-type debris flows is gradually collapsed in form of retrogradation to sliding. The reason of the formation of landslide-type debris flows is the shear strength failure of the slope caused by the rise of the pore water pressure and the seepage on the floor resulted from the motion of the fine particles with migration of pore water in the slope.

Key words: landslide-type debris flow; centrifugal model test; formation mode; water-soil action mechanism

0 引 言

作为典型的自然灾害, 泥石流形成的影响因素众多。降雨诱发滑坡型泥石流的形成机理和力学过程比较复杂, 迄今仍是尚未取得共识的前沿课题。

国内外学者对泥石流进行了许多研究并取得了一定成果^[1-7]。李树德^[8]对滑坡型泥石流的形成机理进行研究, 提出了滑坡型泥石流的临界结构概念。冯自立

等^[9]提出滑坡转化为泥石流的过程是一个和土体液化密切相关的流态化过程, 是土体和水体强烈相互作用的结果。Zhou 等^[10]通过一系列室内模型试验, 分析了渗透系数与砂土泥石流破坏模式之间的相互关系。以

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41272296)

收稿日期: 2014-12-03

上文献多基于室内模型试验对泥石流形成机理进行研究。

室内模型试验受条件的限制, 多为小尺度研究, 使研究具有局限性。而现场试验工作量大, 不确定因素多, 且不易进行细观研究, 这就需要采用离心机试验来研究接近实际应力场条件下的泥石流形成机理。张敏等^[11]和钱纪芸等^[12-13]设计了降雨模拟系统, 用于边坡离心模型试验。Milne 等^[14]进行了山坡泥石流启动的离心机模型试验。

离心机模型试验能够得到与原型相近的应力状态、变形特征和运动规律等。参照文献[7]中所介绍的典型滑坡型泥石流现场试验, 利用自主研发的降雨诱发泥石流离心机可视化试验装置, 进行离心机模型试验, 较好地再现了现场试验条件下滑坡型泥石流的试验过程。利用高清数码成像设备对离心场下滑坡型泥石流的形成过程进行记录和观测; 采用高精度孔隙水压力传感器测量并分析滑坡型泥石流形成过程中坡体孔隙水压力变化; 采用细观结构分析软件 Geodip 计算分析坡体中细观观测区域的颗粒长轴定向、面积孔隙率和颗粒接触数等细观组构特征; 研究接近实际应力场条件下滑坡型泥石流形成的水土作用机理。

1 离心机模型试验

本次试验是在同济大学土工离心机上完成的。离心机的主要参数指标: 最大荷载能力为 150 g·t; 最大离心加速度为 200g; 有效转臂半径为 3.0 m。

1.1 离心机模型试验装置

降雨诱发泥石流离心机模型试验装置, 主要包括远程可控人工均匀降雨系统、模型槽和可视化动态测量系统。

(1) 远程可控人工均匀降雨系统

远程可控人工均匀降雨系统包括均匀雾化降雨器、储水箱、远程压力调节和远程降雨控制系统, 如图 1 所示。降雨器由 10 个低压雾化喷头双排排列构成。雾化喷头 (WP1304) 的工作压力为 0.07 MPa, 喷口直径为 1.0 mm, 喷洒的水滴小, 均匀呈雾状。

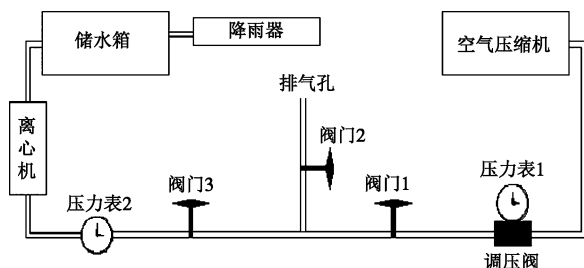


图 1 远程可控人工降雨系统

Fig. 1 Remote adjustable artificial rainfall system

(2) 泥石流模型槽

泥石流模型槽放置在离心机模型箱内, 模型箱尺寸为 90 cm×70 cm×70 cm (长×宽×高)。模型槽尺寸 (图 2) 宽度为 25 cm, 深度为 20 cm, 一、二级坡底长度分别为 35 cm 和 33 cm, 与水平面的夹角分别为 35° 和 15°。



图 2 泥石流模型槽

Fig. 2 Model tank for debris flow

(3) 可视化动态测量系统

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英国德鲁克 (Druck) 公司的 PDCR81 孔隙水压力传感器。

1.2 试验土样与基本条件

文献[7]中所述的现场试验地点为蒋家沟流域的左支沟—多照沟上游弯房子, 泥石流源地土体为宽级配砾石土, 粒径范围是 0.002~100.00 mm, 泥石流发生滑坡型破坏所对应临界颗粒组分的 d_{50} 约为 3.0 mm。在离心机模型试验中, 土颗粒粒径的放大倍数与加速度放大倍数相同。离心机模型试验加速度采用 20g, 根据离心场中颗粒尺寸放大效应, 采用粉砂 (0.05~0.1 mm) 和细砂 (0.075~0.25 mm) 以 2:8 的质量比例配制模拟砾石, 模拟砾石级配曲线见图 3。考虑到泥石流源地土体中黏粒组分所占比例较小 (只占 10.7%), 且在离心机放大作用下, 黏粒不易模拟, 所以本文并未考虑加入黏粒进行研究。

经离心机粒径放大作用后, 试样的粒径分布范围为 1.0~5.0 mm, 形成滑坡型泥石流所对应临界颗粒组分的 d_{50} 为 2.70 mm。虽然离心机模型试验土样的粒径范围和现场试验有一定差异, 但是其发生滑坡型破坏临界颗粒组分的平均粒径和现场试验比较接近。

现场试验的坡体坡度为 35°, 降雨强度为 59.4 mm/h。设计离心机试验的土体坡度为 35°, 厚度为 10 cm, 上表面长度为 65 cm, 相对密实度为 $D_r=0.43$, 降雨强度为 50 mm/h。

装样方法: 按质量比例称取砂、水, 控制初始含水率并拌和均匀。装样时通过自制落雨装置保证砂土

从一定高度自由落下, 每层装样高度为 2.5 cm, 表层磨平, 然后用厚度约为 7 mm 的玻璃板静压表面, 并按规定重量的砝码静压在玻璃板上, 目的是控制密实度, 保证装样均匀; 每层需静置 1 h 以上。待装样全部完成后, 静置 18 h 以上, 保证试样应力均匀分布。

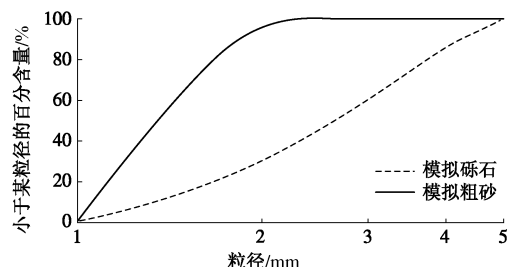


图 3 试验砂样的级配曲线

Fig. 3 Grading curves of sandy samples

1.3 试验过程

(1) 打开离心机主机系统、油源系统、伺服控制系统、数控系统电源接通, 使离心机处于待命状态。

(2) 打开视频监控系统 and 数据采集系统, 启动离心机加速至设计加速度 20g, 当离心机运转加速度达到 20g 后, 固结 20 min。

(3) 打开压力控制阀门 2 (见图 1), 使水箱内压力达到设计降雨强度 (50 mm/h), 启动侧面宏观观测相机和顶面观测摄像头进行可视化观测记录, 打开动态采集仪采集孔隙水压力等检测数据。

(4) 打开降雨控制开关进行人工降雨, 开始试验, 观测并记录试验过程中坡体的变形特征。

(5) 试验结束, 关闭电磁阀和压力系统, 停止降雨和数据采集, 保存试验数据, 停止离心机, 整理设备。

2 离心机试验结果与分析

2.1 宏观试验现象

文献[7]中现场试验的试验现象描述如下: “09:15 开始降雨; 09:30 坡面散粒下滑产生坡面泥流; 09:48 离坡顶 3.0 m 处产生崩塌; 旁边小股水流产生明显的冲蚀; 10:11 平整的坡面变得凹凸不平, 停止降雨”, “11:37 再次降雨。11:40 下缘出现大面积垮塌, 11:45 中部出现滑动。12:03 大面积崩滑流下滑。1-3 探头出露; 12:17 降雨停止。” 通过以上现场试验的现象描述可知, 坡体自坡脚向上发生了滑坡型破坏形成泥石流, 整个破坏过程具有渐进性。

图 4、5 为模拟砾石坡体形成泥石流过程的观测图。随着雨水浸润线的快速下降, 坡体未出现拉裂缝; 当浸润线下降到坡底后, 坡脚发生剪切破坏, 坡体自

坡脚向坡体后方发生分层滑动形成泥石流。降雨诱发模拟砾石坡体形成泥石流的离心机试验过程表现为入渗软化、分层滑动和泥石流流通 3 个阶段。

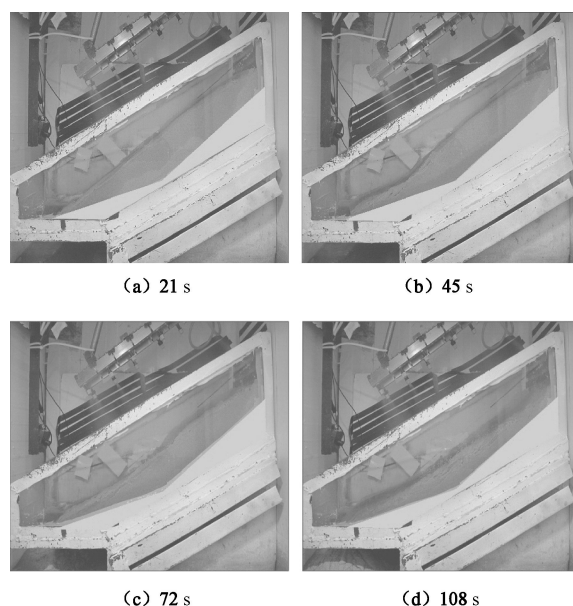


图 4 模拟砾石坡体形成泥石流试验的侧面观测图片

Fig. 4 Profile of observation images of centrifugal model tests on simulated gravel slope

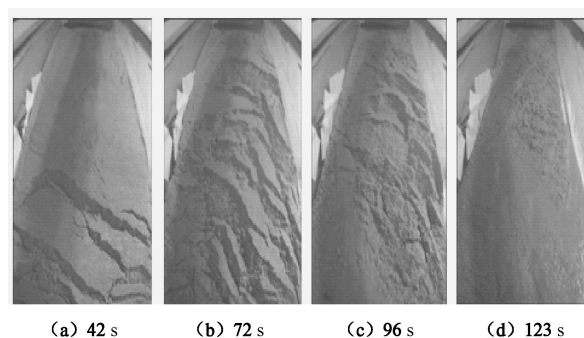


图 5 模拟砾石坡体形成泥石流试验的顶面观测图片

Fig. 5 Top of observation images of centrifugal model tests on simulated gravel slope

在 0~36 s, 试验观测到雨水浸润线逐渐下降, 当浸润线达到坡底时, 坡体后方出现表层沉降, 坡脚土体发生渗透变形 (图 4 (a)), 这个阶段为入渗软化阶段; 在 36~96 s, 坡体自坡脚开始发生渐进式分层滑动, 后方土体失去前方土体支撑发生滑坡并在雨水冲刷作用下向下流动 (图 5 (a)、(b)), 这个阶段为分层滑动阶段; 在 96 s 以后, 在雨水渗透和冲刷作用下, 松散土体与雨水混合形成泥石流快速向下流动 (图 4 (d)), 这个阶段为泥石流流通阶段。

模拟砾石坡体坡脚发生破坏, 然后逐渐向上发生分层滑坡破坏, 滑坡坍塌的松散土体和雨水混合物快速流动形成泥石流, 整个过程具有历时长、速度小的

特点, 形成过程具有渐进性, 离心机模型试验现象与现场试验比较相似。

降雨诱发泥石流的离心机模型试验结果表明: 离心机模型试验较好地重现了现场试验的试验现象, 滑坡型泥石流的形成模式为自坡脚逐渐向上分块坍塌的倒退式块体滑动。

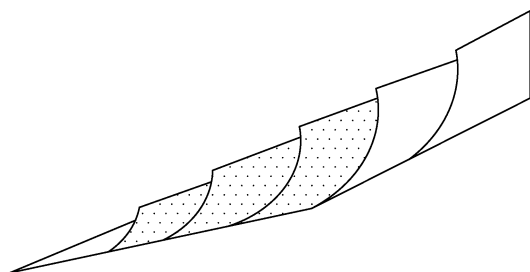


图 6 模拟砾石坡体形成泥石流试验的形成模式

Fig. 6 Formation mode of simulated gravel slope

2.2 孔隙水压力分析

为了研究泥石流形成过程中坡体内孔隙水压力的变化规律, 在坡体中布置了 4 个孔隙水压力传感器, 测点位置见图 7。孔隙水压力传感器测得的数据为经过离心机作用放大后的孔压数据。

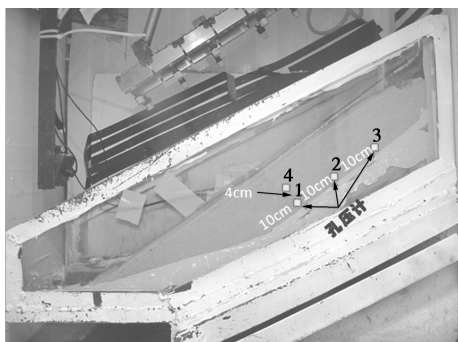


图 7 孔隙水压力传感器布置图

Fig. 7 Layout of pore pressure sensors

图 8 为离心机模型试验中模拟砾石坡体的孔隙水压力变化曲线, 曲线表明: 在离心机模型试验中, 坡体孔隙水压力出现了一个增长的过程, 峰值达到 6.70 kPa。孔隙水压力在坡体内积聚并达到峰值后坡体发生分层滑动, 孔隙水压力随坡体滑动而出现陡降, 此时孔隙水压力消散比较快, 几乎与坡体滑动同步, 并在后续试验过程中随着坡体分层滑动而出现波动起伏。

结合离心机试验宏观现象综合分析, 在入渗软化阶段 (0~36 s), 降雨渗透导致坡体内部孔隙水压力出现并逐渐升高。这主要是因为模拟砾石坡体中细颗粒含量较低, 坡体内孔隙体积相对较大, 经离心机试验放大后, 渗透系数理论值为 $2.9 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$, 雨水在坡体内渗透速度较大。因此, 观测点的孔隙水压力值

呈现为缓慢上升。同时, 本阶段雨水渗透导致土体内部应力改变, 土体表面发生表层沉降, 土体体积减小也会导致孔隙水压力上升。

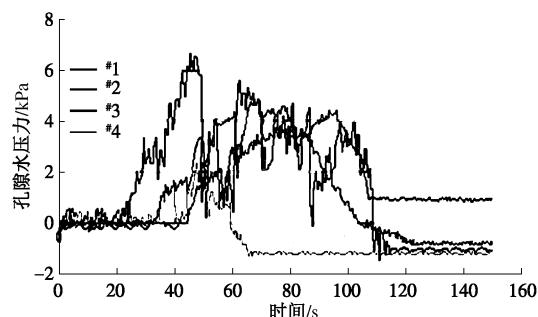


图 8 模拟砾石坡体孔隙水压力变化曲线

Fig. 8 Curves of pore water pressure of simulated gravel slope

在分层滑动阶段 (36~96 s), #1、#2 和 #4 观测点的孔隙水压力值增加, 且孔隙水压力值随着坡体的分层滑落而波动, #4 观测点孔隙水压力值趋于负值, 这可能是坡体坍塌滑动导致孔隙水压力计裸露所致; #3 观测点的孔隙水压力值在试验进行到 44 s 时开始增加, 前方坡体的坍塌和后方坡体厚度变薄使 #3 观测点的孔隙水压力值出现波动, 到本阶段后期孔隙水压力逐渐下降。

在泥石流流通阶段 (96 s 以后), 各观测点的孔隙水压力值基本趋于稳定, #1 和 #2 观测点孔隙水压力值分别趋于 1.8 kPa 和 -1.6 kPa, #3 和 #4 观测点孔隙水压力值趋于 -1.2 kPa。出现负孔压可能是由坡面连续开裂破坏, 土体发生剪胀造成的。

模拟砾石坡体内部的细颗粒含量较低, 降雨比较容易渗入坡体, 因此坡体内部的孔隙水压力缓慢增加, 当孔隙水压力增加到峰值后, 坡体发生分层块体坍塌, 孔隙水压力亦随之下降, 并随着坡体的分层坍塌出现波状起伏。孔隙水压力较好地体现出坡体的滑动过程, 反映了降雨作用下的泥石流形成过程中的土水作用关系。

图 9 为现场试验的孔隙水压力曲线。现场试验中, 孔隙水压力逐渐增长, 但坡体在 11:40 下缘出现大面积垮塌, 孔隙水压力随之发生陡降, 即坡体破坏时孔隙水压力存在一个跳跃, 反映了孔隙水压力与泥石流形成之间的关联。

将两种试验孔隙水压力曲线对比分析可知: 两种试验中孔隙水压力的增长消散规律基本相同, 离心机模型试验和现场试验中孔隙水压力均表现为随坡体的逐层滑动而升降起伏。

孔隙水压力升高是降雨诱发滑坡型泥石流的成因之一。具体表现为: ①孔隙水压力升高降低土体的抗

剪强度，使得土体抗滑能力下降；②模拟砾石坡体的渗透系数较大，在土体上、下部间存在水压力差，渗透力的存在导致土体快速下滑，表现为试验中首先在坡脚发生渗透破坏。

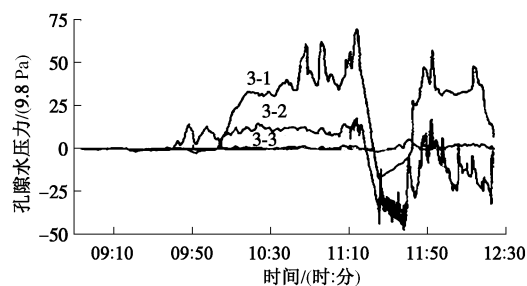


图 9 蒋家沟现场试验中孔隙水压力曲线

Fig. 9 Curve of pore water pressure of Jiangjia gully field test

在宏观方面，离心机模型试验和现场试验对比分析表明：离心机模型试验试样的临界粒径接近实际，因此更加真实地反映了滑坡型泥石流的形成模式。模拟砾石坡体发生滑坡型破坏形成泥石流时的孔隙水压力随坡体滑动发生陡降，其变化规律和现场试验比较相似。因此，降雨诱发泥石流的离心机模型试验结果比较可靠，可以近似模拟现场试验。

2.3 颗粒细观组构分析

现场试验不易进行细观研究，为了进一步研究滑坡型泥石流的形成机理，在离心机试验坡体的同一断面上选取不同区域进行细观观测，从细观角度探讨滑坡型泥石流的形成机理。

在试验坡体选取#1，#2 细观观测区域进行细观观测，#1，#2 细观观测区域距坡底高度分别为 2.5 cm 和 7.5 cm（见图 10），观测区域的面积为 10.0 mm×10.0 mm。图 11 为#1 细观观测区域的细观观测图片。采用自主开发的可视化细观测试系统和细观结构分析软件 Geodip，计算分析模拟砾石坡体中细观观测区域的颗粒长轴定向、面积孔隙率和颗粒接触数等细观组构特征，从细观角度分析滑坡型泥石流的形成机理。

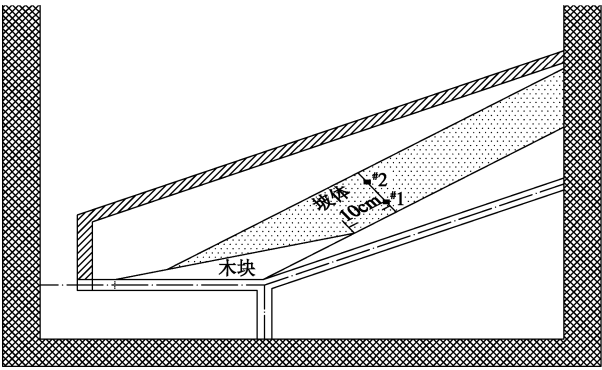


图 10 细观观测区域在坡体位置

Fig. 10 Mesoscopic analysis area of debris flow slope

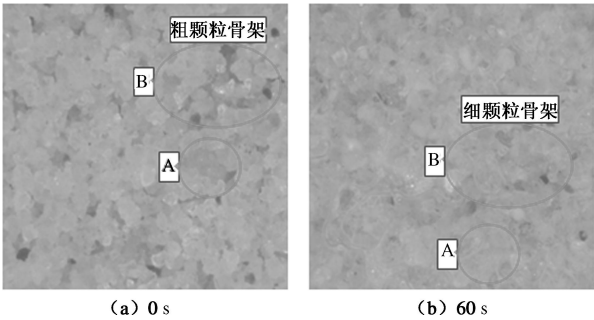


图 11 #1 观测区细观观测图片

Fig.11 Mesoscopic observation images of analysis area No. 1

(1) 颗粒长轴定向

图 12 为离心机试验中#1 细观观测区域内颗粒长轴方向玫瑰图，它反映了颗粒长轴方向的角度频数分布。

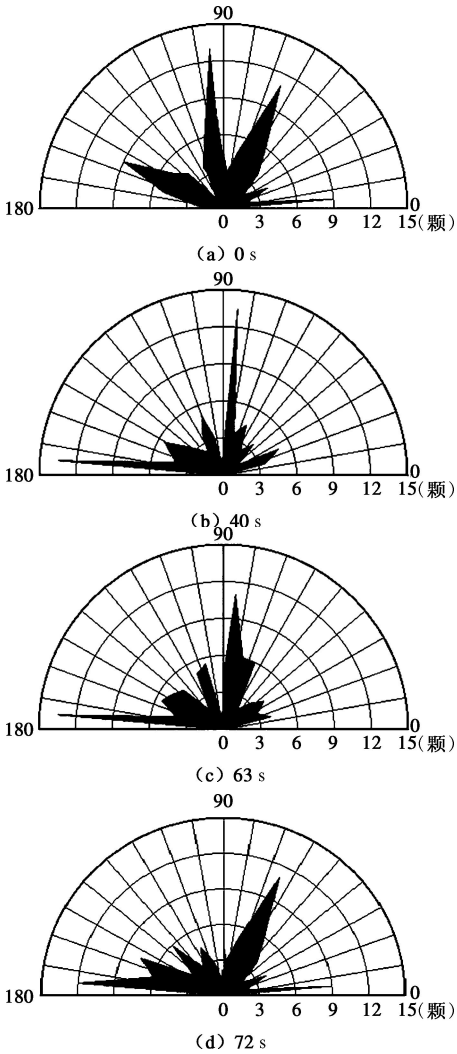


图 12 颗粒长轴方向玫瑰图

Fig. 12 Rose diagrams of long axis of particles

在试验初期（图 12（a）），细观区域内土颗粒的长轴方向分布相对比较均匀，长轴方向在 60°～70°，90°～100° 和 150°～160°之间的土颗粒较多；在试验进行到 40 s 时（图 12（b）），颗粒的长轴

方向主要集中在 $80^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 和 $170^{\circ} \sim 180^{\circ}$ 之间, 此时雨水已经渗透到坡体底部, 坡脚处已经发生坡脚破坏, 前方颗粒流失导致后方坡体颗粒骨架发生错位, 颗粒长轴方向分布情况发生了变化; 在试验进行到 63 s 时 (图 12 (c)), 颗粒的长轴方向主要集中在 $80^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 和 $170^{\circ} \sim 180^{\circ}$ 之间, 但是其它方向颗粒数量略有增加。这主要是因为颗粒在孔隙水渗透力作用下发生了平移和转动, 导致细观区域内的颗粒长轴方向发生了变化; 在试验进行到 72 s 时 (图 12 (d)), 细观观测区内土颗粒的长轴方向主要集中在 $60^{\circ} \sim 70^{\circ}$ 和 $170^{\circ} \sim 180^{\circ}$ 之间, 这主要是因为坡体的分层滑动已经接近细观观测区域, 孔隙水渗流近似于平行于坡底, 所以颗粒长轴方向平行于渗流方向分布。

颗粒长轴方向玫瑰图表明: 在模拟砾石坡体形成泥石流过程中, 颗粒长轴方向由初始的均匀分布变化到定向分布, 长轴方向变化经历了 2 个阶段。

(2) 面积孔隙率

由于细观拍摄图片是二维观测图片, 因此选用面积孔隙率作为考察土体孔隙性的指标, 面积孔隙率定义为孔隙面积与分析区域面积的比值。分别选择了 #1 细观观测区域在 0, 30, 50, 60, 70, 80, 90 和 100 s 时的细观观测图片进行分析面积孔隙率。图 13 为 #1 细观观测区域的面积孔隙率曲线。

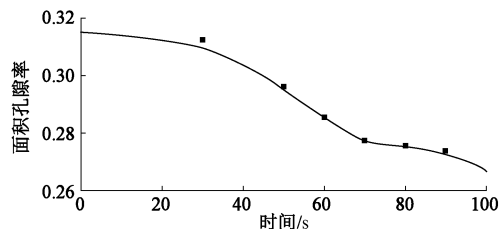


图 13 面积孔隙率曲线

Fig. 13 Curve of area porosity

由图 13 可看出, 在降雨开始后 0~30 s 内, 坡体处于入渗软化阶段, 坡体细观观测区域的面积孔隙率出现小幅度下降, 面积孔隙率下降了 0.95%, 减小至 0.312; 在降雨开始后 30~60 s 内, 坡体进入倒退式分层滑动阶段, 坡脚开始发生渗透破坏, 细观观测区域的面积孔隙率继续下降, 细观观测点的面积孔隙率下降了 8.0%, 减小至 0.287, 面积孔隙率下降趋势明显; 在降雨开始 60 s 后, 细观观测区域的面积孔隙率继续保持下降趋势, 在试验进行到 100 s 时, 面积孔隙率减小到 0.267。

模拟砾石坡体细观面积孔隙率变化表明: 在降雨作用下颗粒发生迁移和沉降导致坡体逐渐密实, 面积孔隙率随之逐渐减小, 当细观观测区域所处的坡体发生分层滑动时, 面积孔隙率减小幅度变缓。

(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、颗粒的重新排列规律等。图 14 为 #1 细观观测区域内颗粒的接触数曲线。

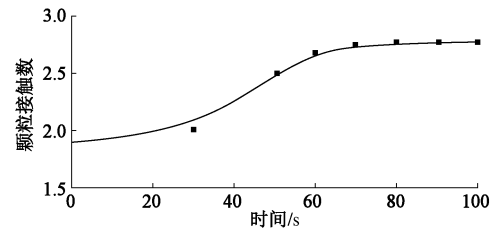


图 14 颗粒接触数曲线

Fig. 14 Curve of contact number of particles

在降雨开始后 0~30 s 内, 坡体处于入渗软化阶段, 颗粒接触数出现小幅度增加, #1 细观观测区域的颗粒接触数由 1.9 增加至 2.0, 增加了 5.3%。在降雨开始后 30~60 s 内, 坡体进入分层滑动阶段, 坡脚开始发生渗透破坏, 细观观测区域的颗粒接触数增加幅度变大, 颗粒接触数由 2.0 增加至 2.7, 增加了 34.2%, 这主要是因为细颗粒随孔隙水渗透而迁移, 导致坡体底部细颗粒含量增加, 坡体逐渐密实而颗粒接触数增加。在降雨开始 60 s 后, 颗粒接触数的增加幅度变小, 在试验进行到 100 s 时, 颗粒接触数增加到 2.8。

模拟砾石坡体细观颗粒接触数变化表明: 孔隙水入渗导致细颗粒迁移, 引起坡体底部细颗粒含量增加, 而前方坡体滑动引起后方坡体蠕动密实, 颗粒发生了重新排列, 造成颗粒接触数增加。

2.4 颗粒细观运动及水土作用机理分析

(1) 颗粒细观运动

由图 11 可以看出, 在试验初期, 标志颗粒 A 旁边的 B 区域内, 颗粒相对比较松散, 粗颗粒构成的颗粒骨架之间的孔隙清晰可见; 当试验进行到 60 s 时, B 区域内颗粒排列比较紧密, 细颗粒已经填充了颗粒骨架间的孔隙, 细颗粒含量增加。颗粒的细观运动分析表明: 孔隙水渗透过程中带动细颗粒迁移, 细颗粒向下迁移并在坡体底部积聚, 填充了颗粒骨架之间的孔隙。孔隙水渗透导致坡体上部的细颗粒发生竖向迁移, 细颗粒在坡体底部积聚并填充颗粒骨架之间的孔隙, 导致坡体底部土体的渗透系数减小。

图 15 为离心机模型试验进行到 45 s 时的试验观测图片, 通过该图可以看出: 坡体中存在一条很明显的浸润线 (含水率分界线)。浸润线以下, 坡体的颜色较深, 表明土体中孔隙水在坡体底部积聚, 此区域内土体的含水率较大, 见图 15 中高含水率区域; 浸润线以上, 坡体的颜色比较浅, 表明土体中孔隙水主要是发生了竖向渗透, 此区域内土体的含水率较小, 见图

15 中低含水率区域。

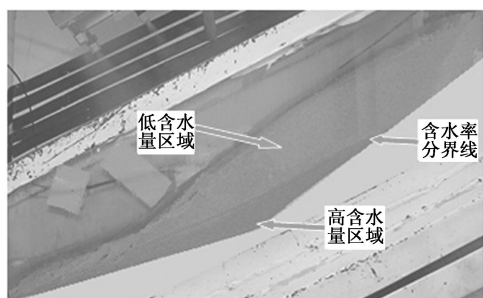


图 15 含水率分界线

Fig. 15 Boundary of water content

由此可知, 雨水渗透导致坡体上部的细颗粒迁移, 细颗粒发生竖向迁移并在坡体底部积聚, 填充了坡底土体骨架颗粒之间的孔隙, 坡体由粗细颗粒均匀结构改变为上部孔隙体积较大、下部细颗粒积聚的坡体分层结构。

(2) 水土作用机理

试验坡体上部孔隙体积较大、下部细颗粒积聚的分层结构改变了坡体中的孔隙水运动。在含水率分界线以上, 土体的含水率较小, 细颗粒含量较低, 土体渗透系数较大, 雨水可以快速渗透到坡体底部, 雨水渗透主要以竖向渗透为主, 如图 16 (a) 所示。在含水率分界线以下, 细颗粒含量较高, 土体渗透系数较小, 孔隙水在坡体中运动受阻, 导致孔隙水积聚孔隙水压力升高, 坡体底部土体含水率较大, 几乎达到饱和状态。因为坡脚处为透水边界, 使得土体内部与坡外存在水头压力差, 水能自由流出, 含水率分界线以下积聚的孔隙水以连续体形式发生近似于平行坡体底面流动, 沿坡体底面向坡脚方向流动, 形成具有一定速度的渗流, 如图 16 (a) 所示。坡体底部渗流导致孔隙水出流面附近的细颗粒随坡底渗流发生迁移排出坡体, 导致孔隙水出流面附近土体的细颗粒流失。

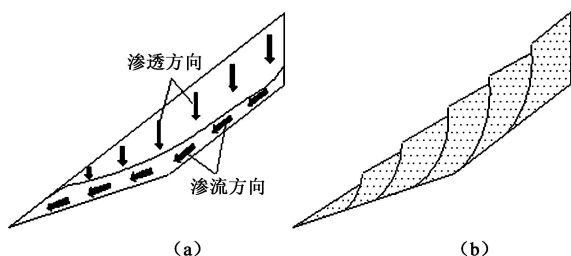


图 16 模拟滑坡型泥石流形成的水土机理

Fig. 16 Water-soil action mechanism of landslide-type debris flow

孔隙水在土体中可以起到润滑的作用, 土体饱和度增加导致土体颗粒之间摩擦力变小。土体由非饱和向饱和转变过程中, 基质吸力逐渐减小为零, 抗剪强度逐渐降低。同时土体饱和度增加导致坡体内孔隙水

压力升高, 土体的有效应力减小。

在坡体土体的湿重度增大、底部土体强度降低和底部渗透力等因素共同作用下, 底部坡体的粗颗粒骨架失稳发生抗剪强度破坏, 导致上部土体发生块体坍塌形成滑坡, 滑坡形成的散落体和雨水混合物快速流动形成泥石流, 如图 16 (b) 所示。

综上所述, 模拟砾石坡体形成泥石流的水土作用机理是: 坡体渗透系数较相对较大 (离心机渗透系数放大作用为 0.029 cm/s), 细颗粒随雨水渗透发生沉积, 坡体底部细颗粒含量增加、渗透系数减小, 使得孔隙水在坡体底部积聚, 引起孔隙水压力升高并形成具有一定速度的底部渗流, 对坡底土体形成冲刷, 造成孔隙水渗出面附近的坡体中细颗粒流失而发生渗透破坏。最后, 在土体湿重度增大、底部土体强度降低和坡体底部渗流力等共同作用下, 坡体发生滑坡形成泥石流。

3 结 论

利用自行设计的降雨诱发泥石流离心机可视化试验装置, 参考某泥石流现场试验, 进行了泥石流离心机模型试验, 从宏观细观两方面研究了典型滑坡型泥石流的形成机理, 得出 4 点主要结论。

(1) 离心机模型试验较好地重现了现场试验的试验现象。离心机试验中孔隙水压力的变化规律和现场试验比较相似。因此, 离心机模型试验可以近似模拟现场试验, 并在此基础上进行细观研究。

(2) 在离心机模型试验中, 滑坡型泥石流的形成模式为自坡脚逐渐向上分块坍塌的倒退式块体分层滑动, 整个过程分为入渗软化、分层滑动和泥石流流通 3 个阶段。

(3) 在离心机模型试验中, 孔隙水压力的变化与细颗粒的迁移相互影响, 反映了降雨作用下泥石流形成过程中的水土运动规律, 是滑坡型泥石流的成因之一。

(4) 模拟砾石坡体发生滑坡型破坏形成泥石流的水土作用机理是底部渗流引起的抗剪强度破坏。土体湿重度增大、底部土体强度降低和坡体底部渗流力等共同作用下, 坡体发生滑坡形成泥石流。

参考文献:

- [1] 康志成, 李焯芬. 中国泥石流研究[M]. 北京: 科学出版社, 2004. (KANG Zhi-cheng, LI Zhuo-fen. Debris flow research of China[M]. Beijing: Science Press, 2004. (in Chinese))
- [2] 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 mechanism of the debris flow on slope induced by rainfall[J]. *Earth Science Frontiers*, 2007, **14**(6): 197 - 204. (in Chinese))
- [3] ZHOU Jian, LI Ye-xun, ZHOU Kai-min, et al. Impact of permeability on failure mode of sandy debris flow[C]// *International Conference on Advances in Geotechnical Engineering*, Perth, Australia, 2011: 657 - 662.
- [4] 许 强. 四川省 8·13 特大泥石流灾害特点、成因与启示[J]. *工程地质学报*, 2010, **18**(5): 596 - 608. (XU Qiang. The 13 August 2010 catastrophic debris flows in Sichuan Province: characteristics, genetic mechanism and suggestions[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2010, **18**(5): 596 - 608. (in Chinese))
- [5] VINCENZO D, ZESCA M, MARCHI L. Field and laboratory investigations of runout distances of debris flows in the Dolomites (Eastern Italian Alps)[J]. *Geomorphology*. 2010, **115**: 294 - 304.
- [6] 朱颖彦, 崔 鹏, 陈晓晴. 泥石流堆积体边坡失稳机理的试验与稳定性分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, **24**(21): 3927 - 3934. (ZHU Ying-yan, CUI Peng, CHEN Xiao-qing. Experiment on mechanism of slope failure of debris flow fan and stability analysis[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, **24**(21): 3927 - 3934. (in Chinese))
- [7] 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))
- [8] 李树德. 滑坡型泥石流形成机理[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 1998, **34**(4): 519 - 522. (LI Shu-de. Formation mechanism of the landslide-type debris flow[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 1998, **34**(4): 519 - 522. (in Chinese))
- [9] 冯自立, 崔 鹏, 何思明. 滑坡转化为泥石流机理研究综述[J]. *自然灾害学报*, 2005, **14**(3): 8 - 14. (FENG Zi-li, CUI Peng, HE Si-ming. Mechanism of conversion of landslides to debris flows[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2005, **14**(3): 8 - 14. (in Chinese))
- [10] ZHOU Jian, LI Ye-xun, JIA Min-cai, et al. Numerical simulation of failure behavior of granular debrisflows based on flume model tests[J/OL]. [2013-04-12]. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/603130>.
- [11] 张 敏, 吴宏伟. 边坡离心模型试验中的降雨模拟研究岩土力学[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))
- [12] 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))
- [13] 钱纪芸, 张 嘎, 张建民. 降雨条件下土坡变形机制的离心模型试验研究[J]. *岩土力学*, 2011, **32**(2): 398 - 416. (QIAN Ji-yun, ZHANG Ga, ZHANG Jian-min. Centrifuge model tests for deformation mechanism of soil slope during rainfall[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, **32**(2): 398 - 416. (in Chinese))
- [14] MILNE F D, BROWN M J, KNAPPETT J A, et al. Centrifuge modelling of hillslope debris flow initiation[J]. *Catena*, 2012, **92**: 162 - 171.