

DOI: 10.11779/CJGE201604014

降雨条件下折线型滑面的大型滑坡稳定性离心模型试验

潘皇宋¹, 李天斌¹, 仵拔云^{1, 2}, 任洋¹, 宋涛¹

(1. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059; 2. 陕西省地质环境监测总站, 陕西 西安 710064)

摘要: 以大型土工离心机为技术依托, 采用离心模型试验, 研究开挖和降雨对滑面为折线型的大型滑坡变形破坏和稳定性的影响。试验中采用变形标志点、颗粒图像测速技术 (PIV) 和可承受高离心力的传感器, 在获取坡体土压力、孔隙水压力和位移矢量场的基础上, 综合分析开挖和降雨诱发大型滑坡变形破坏的特征及失稳模式。试验结果表明, 在滑面形态变化大的部位开挖卸荷容易引起折线型滑面大型滑坡的局部复活; 受开挖卸荷和降雨影响, 滑坡后缘的开挖斜坡位移最大且最先失稳; 受降雨的影响, 滑坡前部位移较大, 坡体表面变形破坏严重, 开挖斜坡下部发育一条次级滑裂面, 滑坡后缘和开挖平台前沿滑面坡度突变处各形成一条潜在主滑裂面。离心模型试验显示折线型滑面的滑坡受开挖和降雨的影响可表现出分级分块滑动的变形破坏特征。稳定性分析表明, 降雨使折线型滑面的大型滑坡不同滑段稳定性系数不同程度降低, 滑坡后缘、开挖斜坡和滑坡前缘处于不稳定状态。

关键词: 大型滑坡; 稳定性; 降雨; 离心试验; 颗粒图像测速技术

中图分类号: TU41

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2016)04-0696-09

作者简介: 潘皇宋(1988-), 男, 贵州黔东南人, 硕士研究生, 从事地质灾害与岩体工程研究。E-mail: gz_phs@163.com。

Centrifugal model tests on large-scale landslide with broken-line slip surface under rainfall

PAN Huang-song¹, LI Tian-bin¹, WU Bo-yun^{1, 2}, REN Yang¹, SONG Tao¹

(1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. The Geological Environmental Monitoring Station of Shaanxi Province, Xi'an 710064, China)

Abstract: Based on the technical support of the large geotechnical centrifuge, centrifugal model tests are performed to study the effects of rainfall and excavation on the deformation and stability of large-scale landslide with broken-line slip surface. The marking points, the particle image velocimetry technology and the sensors which can withstand high centrifugal force are applied during the tests. The earth pressure, pore water pressure and displacement vector field are obtained to make a comprehensive analysis on the characteristics of deformation and failure and the instability modes of large-scale landslide induced by rainfall. The test results show: (1) The unloading by excavation in the slope with large change of slip shape is easy to cause the local landslide in large-scale landslide with broken-line slip; (2) Under the rainfall and excavation, failure in the excavation slope is the earliest, and it has the maximum displacement; (3) Affected by the rainfall, large displacement occurs at the toe of slope and serious failure occurs on surface. A secondary slip surface occurs under the excavation slope, and two main slip surfaces located on the head of the slope and the down edge of the excavation area with change of the angle of the slip surface. The centrifugal mode tests indicate that the characteristics of deformation and failures of large-scale landslide with broken-line slip surface exhibit slide in different grades and blocks under the influence of excavation and rainfall. The stability analysis shows that the rainfall reduces the factor of safety of large-scale landslide, and the head of slope, excavation slope and slope toe are instable.

Key words: large-scale landslide; stability; rainfall; centrifuge test; particle image velocimetry

0 引言

降雨是诱发大型和巨型滑坡的主要原因之一, 仅近几十年来, 国内外降雨诱发的大型滑坡屡见不鲜, 如 1982 年 7 月暴雨引发古滑坡体复活的鸡扒子滑坡, 滑坡体面积约 0.77 km², 总土石方量约 1500×10⁴ m³;

基金项目: 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室团队重点课题 (SKLGP2011Z002); 成都理工大学优秀创新团队培育计划项目 (HY0084)

收稿日期: 2015-03-13

*通讯作者

1997年7月强降雨引起古滑坡复活的南昆铁路八渡滑坡及2004年9月暴雨引起的四川宣汉县天台乡滑坡; 1998年8月飓风米歇尔带来的强降雨在洪都拉斯诱发了体积达 $600 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的厄尔百林彻深层大型滑坡; 2010年2月在意大利南部 Vibo Valentia 地区的 Maierato 由于强降雨引起体积约 $1000 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的大型滑坡^[1]等。自20世纪80年代以来, 中国大陆所发生的大型灾害性滑坡约50%为强降雨直接触发^[2]。因此, 研究降雨对大型滑坡稳定性的影响十分重要。

国内外不少学者对降雨条件下边坡变形破坏的离心模型试验进行了研究, 并取得了丰硕的成果。如对预加固高填方斜坡失稳机制进行离心模型试验研究^[3], 研究不同降雨量对边坡失稳破坏的影响^[4-5]; 研究降雨条件下膨胀土边坡失稳机理^[6]; 研究降雨引起黏性土边坡的变形过程和变形特征^[7]以及降雨入渗与黏性土坡变形的关系^[8]等。有关大型滑坡的研究也不少, 如地震引发大型滑坡的特征和机制的研究^[9-10], 区域巨型滑坡形成机理和复活机理的研究^[11-12], 三维数值分析巨型滑坡形成机理^[13], 地下水位对大型滑坡运动影响的研究^[14-15], 大型滑坡的力学机制和变形速率的研究^[16], 灵敏性黏土大型滑坡滑动模式和特征的研究等^[17-18]。然而, 受离心机容量的影响, 已有滑坡离心模型试验研究主要针对小比尺模型, 对大型滑坡研究大多是根据现场条件和实测资料或进行数值模拟, 采用离心模型试验进行研究还较少, 考虑降雨条件的折线型滑面的大型滑坡离心模型试验研究更是少见。本文试验模型以折线形滑面的八渡大型滑坡为参照对象, 利用大型离心机给模型施加200g的离心加速度, 模拟大尺寸的原型滑坡, 再现了大型滑坡在降雨条件下的失稳过程。在此基础上, 分析降雨条件下大型滑坡离心模型的变形破坏特征、失稳模式和稳定性, 进一步加深对大型滑坡复杂的破坏特性及失稳机制的认识。

1 滑坡原型

南昆铁路八渡车站位于贵州省册亨县境内八渡口南盘江北岸半山腰上, 车站线路纵贯规模巨大的古滑坡体。八渡古滑坡体在八渡铁路车站施工前, 整体处于稳定状态。1994年, 铁路施工开挖车站平台, 开挖卸荷引起开挖滑坡以上发生次级滑坡, 挡护工程和地面开裂; 1997年6月—8月, 由于连续暴雨, 特别是7月份降雨量达480 mm左右, 远远大于历年7月平均降雨量226.7 mm。降雨条件下地面排水不畅导致雨水大量下渗, 诱发了该古滑坡复活, 表现出主、次级滑坡失稳破坏特征(详见文献[19, 20])。八渡滑坡典型剖面如图1所示。

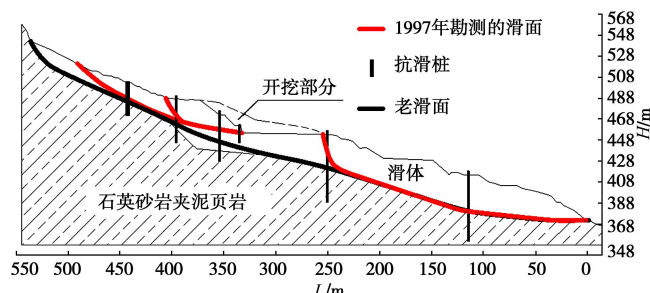


图1 八渡滑坡纵剖面示意图

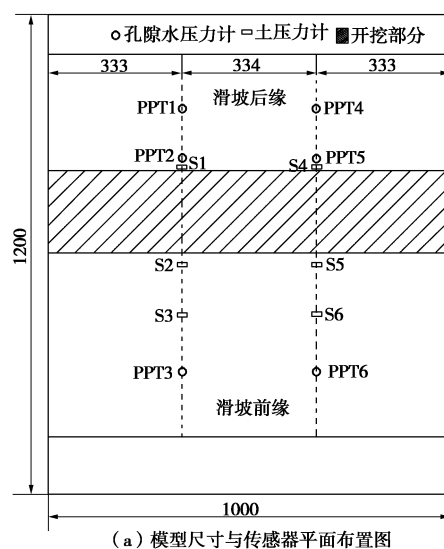
Fig. 1 Cross-section of Badu landslide

2 试验模型与方法

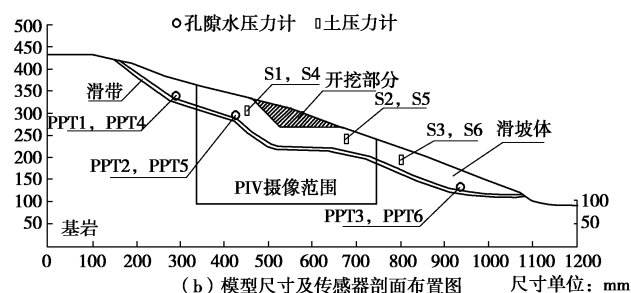
本试验采用成都理工大学 TLJ-500 型土工离心机设备, 该离心机是目前国内在运行的容量最大的土工离心机, 最大重量500 g·t, 有效旋转半径4.5 m。

2.1 模型尺寸

参照南昆铁路八渡滑坡原型进行试验模型设计, 受模型箱尺寸限制和比例缩尺关系的影响, 采用理想模型进行研究。在理想条件下, 滑床基岩为完整岩体, 滑带形状按照原型确定为折线型, 滑体为相对均质的土体。根据试验条件设计模型相似比 $n=200$, 模型长1200 mm, 宽1000 mm, 最大高度430 mm, 滑带厚10 mm, 滑体最大厚度100 mm。模型结构尺寸和传感器布置如图2所示。



(a) 模型尺寸与传感器平面布置图



(b) 模型尺寸及传感器剖面布置图

图2 模型结构及传感器布置图

Fig. 2 Model configuration and layout of sensors

表 1 模型土配比及其力学参数

Table 1 Grain-size distributions and mechanical parameters of slope model

粒径 /mm	0.047	0.074	0.2	0.25	0.5	1	含水率 /%	密度 /(g·cm ⁻³)	力学参数	
	各粒径土配比/%								黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
滑带	30	25	20	20	5	0	18	1.98	20.8	16.7
滑体	10	10	10	20	45	5	16.7	2.05	44.3	16.4

2.2 模型材料

滑体和滑带土选用不同颗粒级配的土体配置而成。土体材料配比通过室内筛分试验、颗粒级配试验、击实试验、密度测试、含水率测试和直剪试验确定，最终使模型土体的物理力学参数与原型相近（见表1）。模型中的滑床基岩应该有足够的强度和刚度，防止其在试验过程中发生变形。因此，基岩采用砖块、水泥掺石膏胶结材料筑砌。

2.3 量测方法

测量系统有土压力传感器、孔隙水压力传感器、PIV 系统。为了获取试验过程各滑坡段的土压力和孔隙水压力变化情况，本次试验共埋设 6 个土压力传感器（直径 8 mm 和 9 mm，量程分别为 0.3，0.5，1 和 2 MPa，精度 1%FS）和 6 个孔隙水压力传感器（直径 8 mm，量程为 0.3 MPa 和 0.5 MPa，精度 1%FS），分布于对称的两个剖面（见图 2（a））。根据折线形滑面的大型滑坡变形破坏特征，传感器主要布置于滑面坡度变化较大处。土压力传感器分布于容易发生拉裂破坏的开挖面上下沿以及蠕滑拉裂破坏的滑坡前缘；土压力传感器竖直埋设，其正面朝滑坡后缘，埋设深度为相应部位滑坡体厚度一半以下。为了尽可能测量滑坡体各部分的地下水位以及坡体破坏造成的孔压变化，孔隙水压力传感器主要分布于容易发生拉裂破坏的滑坡后缘和滑坡中部开挖斜坡下，以及地下水汇集的滑坡前缘；孔隙水压力传感器水平埋设于的滑带上，且正面朝上。本实验采用 PIV 系统对滑坡位移进行监测，由于 PIV 系统拍摄范围有限，不能遍及整个模型，考虑开挖斜坡稳定性差，选取滑坡中部为 PIV 位移矢量场监测范围（见图 2（b））。

2.4 模型制作

离心模型的基岩用砖块、水泥掺石膏筑砌，基岩表面起伏形态根据地层剖面情况确定。基岩表面用水泥浆抹成整体以防止开裂，其表面做成较粗糙便于堆积滑带，基岩筑砌完成后养护 24 h。堆积滑带和滑体前在模型箱两侧壁涂上凡士林，以减小模型箱侧壁和模型间摩擦力，即减小边界效应的影响。滑带层较薄，因此分一层堆积使其与基岩面黏结成整体；滑体分多层堆积，每层厚度 20~30 mm，堆积下一层前对已堆

积好的坡体表面进行拉毛，各层堆积过程中用橡皮锤轻轻击实，避免出现分层和空隙，最后一层堆积完成后用小铲刀整平坡面。滑体堆积至相应的传感器埋深位置时，量测好布置点并埋设相应的传感器。滑坡体堆积好后，在有机玻璃窗一侧滑体中埋设变形标志点（图 3 中的白色标志点），模型箱有机玻璃一面贴有精度为 5 mm 的网格透明纸，以观测变形标志点的位移。模型制作完成后，在其表面喷少量水雾再盖上塑料薄膜，以免坡体水分蒸发导致含水率降低，养护 24 h。制作好的离心试验模型见图 3。

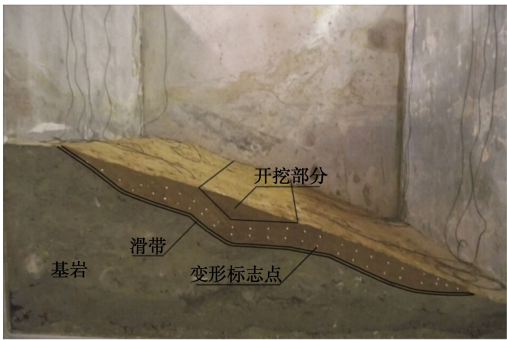


图 3 离心试验模型

Fig. 3 Centrifuge model of large-scale slope

2.5 试验过程

模型制作养护好后进行离心试验，试验过程包括模拟天然状态、模拟降雨过程、降雨条件下的离心模型试验 3 个过程。

（1）模拟天然状态

离心机从 0g 开始转动，加速至 20g，稳定 10 min 后卸载到 0g，然后进行人工开挖。开挖完成后进行天然状态下的离心试验，从 0g 开始加载，最大离心加速度为 200g，加载到 200g 后稳定 20 min。

（2）模拟降雨过程

文献[4]研究得出，和现有的离心机降雨设备对比，在坡体表面喷洒水雾的降雨模拟方法能更好的控制降雨在坡体表面的均匀分布和充分渗透，并且可控制降雨强度随时间变化；另外，采用离心机降雨设备很难控制离心机旋转过程中雨滴的大小，可能会对坡体表面造成侵蚀。本试验参照文献[4]中的降雨方法，在坡体表面喷洒水雾模拟降雨过程，根据相似比得出

降雨量比尺为 $n=200$, 参考已有研究取实际降雨量为 400 mm(中国南方暴雨强度达到 200~300 mm/d 时就易于触发大滑坡的发生^[2]), 则模型降雨量为 2 mm; 模型表面积为 $1.1 \times 10^6 \text{ mm}^2$, 需要喷水量为 $2.2 \times 10^6 \text{ mm}^3$, 相当于 2.2 L 的水。

模拟天然状态后停机, 进行降雨过程模拟。降雨过程模拟采用气压喷壶直接于模型坡体表面均匀喷洒水雾, 整个降雨模拟过程持续 12 h, 目的是使降雨均匀分布并充分渗透到土体内部, 逐渐增加坡体的饱和度, 并且可控制喷洒水雾的强度避免对模型造成冲刷侵蚀破坏。

(3) 降雨条件下的离心模型试验

模拟降雨过程后, 立刻进行降雨条件下离心模型试验。离心机从 0g 开始加载, 最大离心加速度为 200g, 加载到 200g 后稳定 20 min。本次试验不考虑加载过程切向加速度对模型的影响, 并且认为 0~200g 是均匀增长过程。

3 试验结果分析

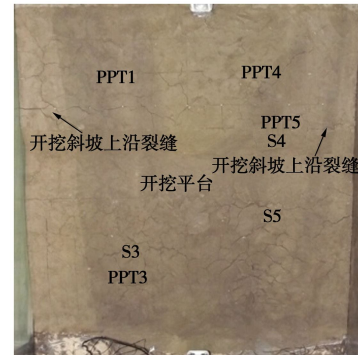
试验加载过程中, 由于离心力较大, 部分土压力计 S1, S2, S6 和孔压计 PPT2, PPT6 已经损坏, 未损坏的传感器分布见图 4。利用坡体内部监测的土压力和孔隙水压力变化结合能直接观察到的坡表变形破坏现象, 分析滑坡整体变形破坏特征; 利用 PIV 和位移标志点分析坡体内部的位移矢量场, 并将试验结果同原型进行比较。

3.1 变形破坏特征分析

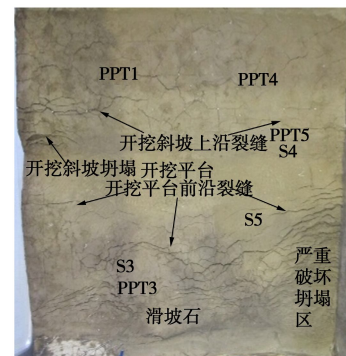
天然状态下, 如图 4(a) 所示, 滑坡整体在离心机加载到 200g 过程中没有发生失稳破坏, 局部坡面出现的不规则细小裂缝属于模型干缩裂缝, 开挖斜坡上沿左、右两侧各有一条细小的横向裂缝发育, 裂缝张开度小于 2 mm, 该两裂缝可以视为开挖卸荷引起次级滑坡后缘的裂缝发展。降雨条件下, 如图 4(b) 所示, 滑坡后缘发育多条不连续横向裂缝, 开挖斜坡上沿发展一条横向主裂缝, 裂缝张开度 2~6 mm, 裂缝以下的开挖斜坡形成次级滑块, 次级滑坡失稳使开挖斜坡外鼓, 部分开挖斜坡发生坍塌; 开挖平台的前沿发育一条横向主裂缝, 裂缝最大张开度 3 mm 左右; 滑坡前缘坡表破坏严重并有次级滑块出现, 发育大量密集的弧形裂缝, 裂缝最大张开度 10 mm 左右, 中部出现滑坡舌及明显的塑性流动特征, 前缘右侧发生坍塌。由于边界效应, 靠近模型箱壁的两侧滑坡边界变形没有中间部分明显。

试验过程中由于模型高速旋转产生较高度温和很高的风速, 导致水分蒸发较快, 对试验有一定影响。

天然状态下坡体含水率低, 离心旋转过程水分蒸发导致坡面龟裂(图 4(a)); 降雨条件下坡体的含水率较高, 离心旋转过程水分蒸发只造成坡体后缘出现局部龟裂(图 4(b))。



(a) 天然状态下



(b) 降雨条件下

图 4 滑坡破坏形态

Fig. 4 View of slope after failure

3.2 土压力分析

未损坏的土压力传感器 S3, S4, S5 分布见图 4, 对试验数据进行处理后得出土压力随时间及离心机加速度变化曲线如图 5 所示。由图 5 可知, 土压力随离心机加速度的增大而增大, 离心机加速过程土压力出现下降随后又逐渐增长的波动现象, 离心加速度达到最大值 200g 后, 土压力不再增大, 滑坡中部的开挖斜坡附近土压力比滑坡前缘和后缘大。

降雨条件下开挖斜坡上沿的土压力(S4)比天然状态下的土压力(S4')小, 说明降雨条件下开挖斜坡后缘进一步发生了破坏, 图 4(b)中 S4 处横向裂缝发育比图 4(a)明显; 坡体中部降雨条件下的土压力(S5)在 57 d 左右下降一定幅值后又开始增长, 说明坡体发生破坏后又达到新的平衡, 土压力再增长, 图 4(b)中 S5 处有一横向裂缝发育(在拆模时此处没有被裂缝贯穿); 坡体前缘降雨条件下的土压力(S3)较小, 说明该处坡体发生严重拉裂破坏, 图 4(b)中 S3 处周围坡体严重破坏, 发育多条弧形裂缝。以上分

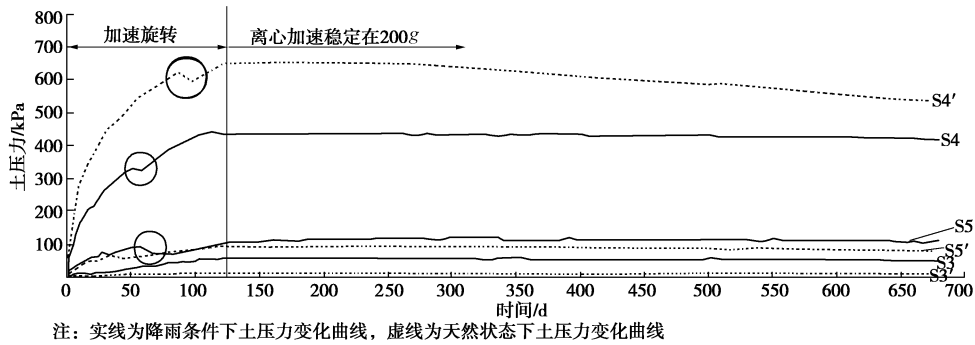


图5 土压力随时间变化

Fig. 5 Variation of earth pressure with time

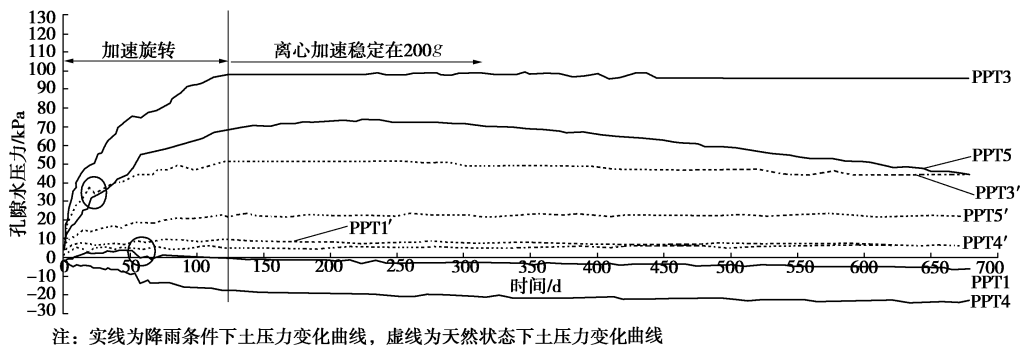


图6 孔隙水压力随时间变化

Fig. 6 Variation of pore water pressure with time

析表明,土压力值和坡体变形破坏情况有关,变形破坏使坡体各个部位表现不同的土压力值,然而降雨入渗使坡体含水率增大,土体重度增大,导致坡体中部和下部(S3和S5)降雨后的土压力比天然状态下的土压力大。此外,S4的土压力值比S3和S5大,这可能是开挖斜坡受滑坡推力作用使其内部土压力过大。

3.3 孔隙水压力分析

对图3中的未损坏的孔隙水压力传感器PPT1, PPT3, PPT4, PPT5采集到的试验数据进行处理,得出孔隙水压力随时间及离心机加速度的变化曲线如图6所示。由图6可知,在离心机加速度增长过程中,部分孔隙水压力不断增长,部分孔隙水压力逐渐减小,离心机加速过程中孔隙水压力出现骤降或波动现象,加速度稳定为200g后孔隙水压力几乎稳定。

降雨条件下,坡体后缘的孔隙水压力(PPT1和PPT4)一直下降并出现负值,其比天然状态下的孔隙水压力(PPT1'和PPT4')小,且PPT1在50d左右出现骤降的现象,这说明坡体后缘很早发生拉裂破坏,孔压消散较快,土体出现不饱和状态引起负压,从图4(b)看出坡体后缘已发生拉裂破坏,横向裂缝贯穿了PPT1和PPT4处;降雨条件下坡体中部孔隙水压力(PPT5)比天然状态下的孔隙水压力(PPT5')大,

且在离心机加速度达到最大值后孔隙水压力才缓慢下降,该处坡体在离心加速度达到最大值后地下水逐渐向滑坡前缘汇集,孔压缓慢消散,图4(b)中PPT5处有一横向细裂缝发育;降雨条件下位于坡体前缘左侧PPT3的孔隙水压力在离心加速过程坡体破坏瞬间有一定下降后又增长,离心加速度稳定在200g后其没有明显降低,说明该处坡体破坏只发生在坡表(在拆模过程中没有发现深部裂缝发展),并且地下水位较高($h_w/h=0.9$),从图4(b)看出PPT3处坡体表面发生严重破坏。此外,由于降雨垂直入渗和坡体后缘的地下水向坡体前缘渗流,因此坡体前缘孔隙水压力最大,坡体中部次之,坡体后缘最小。

3.4 位移矢量场分析

PIV (particle image velocimetry) 粒子图像测速系统可以实现离心机旋转过程中的坡体变形测量,同时还可以推测潜在滑裂面的位置,适用于离心环境中的模型试验,是研究完整物理过程的重要工具^[21]。PIV图像处理,得出降雨条件下开挖面附近坡体内部0~200g(试验最终状态)的位移矢量场如图7所示。

图7中位移矢量场显示,开挖斜坡处土体位移最大,位移方向近似平行斜坡面,推测位移梯度变化处为一条近平行于开挖坡面的潜在滑裂面1,其上部贯

通图4(b)中挖斜坡上沿的横向主裂缝,下部从开挖斜坡坡脚剪出,次级滑坡沿滑裂面1发生失稳滑移使其后缘张拉裂缝发展、开挖坡面鼓胀、开挖坡脚隆起。开挖平台前沿以下坡体位移也较大,推测位移梯度变化处存在潜在滑裂面2,其上部贯通图4(b)中开挖平台下沿的横向主裂缝,下部贯通主滑面。推测滑坡后缘还存在一条潜在滑裂面3,其上部贯通图4(b)中滑坡后缘的裂缝,下部交潜在滑裂面1于坡脚处。图7中的3条潜在滑裂面将滑坡体分成主、次级滑坡。

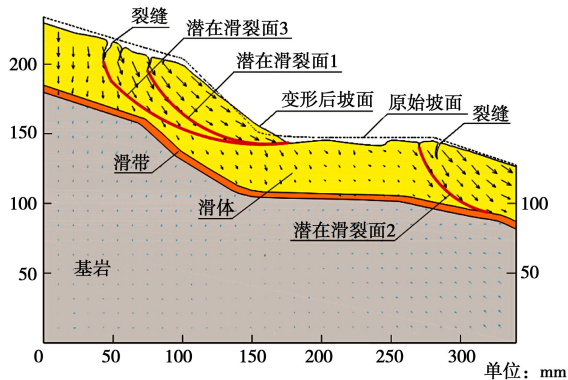


图7 滑坡中部土体位移矢量图

Fig.7 Displacement vectors of soil mass in middle of slope

根据埋设于模型内部的变形标志点试验前后坐标变化,分析得出离心滑坡体内部位移矢量场(如图8所示)。从图8可看出,滑坡后缘的变形以沉降为主,滑坡前缘沿滑带发生剪切滑移,使开挖平台前沿发生拉裂破坏。根据位移矢量梯度变化情况,大致可推测坡体内部存在和PIV矢量场分析一致的两条潜在滑裂面2,3。

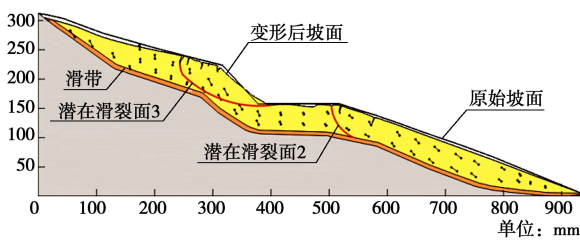


图8 标志点位移矢量图

Fig. 8 Displacement vectors of marking points

离心模型试验得出的坡体变形破坏特征和原型(详见文献[19, 20])相似;PIV和变形标志点分析的坡体内部位移矢量场相互印证,并和原型(见图1)比较,可见试验分析存在的潜在滑裂面和勘测的原型滑坡滑面位置大致相同。

综合以上分析,降雨条件下,滑坡体受软化作用强度参数有所降低,在渗流场、重力场、动水和静水压力共同作用下,加剧了滑坡变形破坏。滑坡后缘处

于张拉状态,张拉裂缝发展利于降雨入渗并对坡体产生渗流破坏,因此降雨条件下坡体后缘很快发生破坏。开挖平台上部的次级滑坡发生失稳,使开挖斜坡鼓胀、开挖坡脚隆起,斜坡下部和滑坡后缘各存在一条潜在滑裂面。滑坡中部开挖平台以下发生滑移-拉裂破坏,开挖平台前沿存在一条潜在滑裂面。滑坡体前缘变形较大并且坡表严重破坏,发生蠕滑、塑性流动以及坍塌。降雨条件下,整个坡体出现分级和分块滑动的变形破坏特征,滑坡体主要分为三级滑段,各滑段上又有次级滑块,不同滑段、不同滑块的变形破坏特征和失稳模式不同。

4 稳定性分析

降雨条件下,坡体处于部分饱和状态,因此可利用部分饱和土体强度理论对其进行研究。Ling等^[22]研究证明改进的库仑强度准则可应用于部分饱和土体:

$$\tau_f = c^* + \sigma'_n \tan \varphi \quad (1)$$

式中, τ_f 为抗剪强度, c^* 为表观黏聚力(包含真黏聚力和基质吸力), σ'_n 为有效应力, φ 为内摩擦角。部分饱和土体中,由于土颗粒间的毛细管作用而存在一定的表观黏聚力,随着饱和度增加,孔隙水压力 u 增大,土的表观黏聚力和有效应力($\sigma'_n = \sigma_n - u$)相应减小,则由式(1)知,坡体的抗剪强度随饱和度的增加而减小,从而推论降雨条件下滑坡稳定性降低。

为了定量分析降雨条件下滑坡稳定性,离心模型试验前对不同含水率下的模型坡体材料进行直剪试验,试验成果如图9所示。含水率为16.7%(饱和度为86.2%)对应天然状态下的模型坡体含水率,含水率为20.5%(饱和度为90.2%)对应降雨量为400 mm的模型坡体含水率。

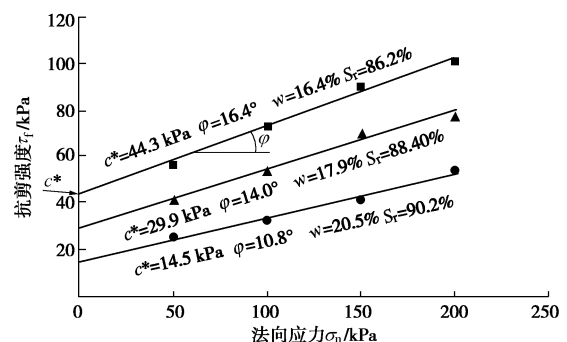


图9 不同含水率模型坡体材料直剪试验

Fig. 9 Direct shear tests on slope soil with different moisture contents

通过线性拟合确定部分饱和状态下坡体的抗剪强

表 2 滑坡稳定性系数的变化
Table 2 Variation of factor of safety

条件	滑坡后缘 ($h=9\text{ m}$, $\varphi=26^\circ$)			开挖斜坡 ($h=13\text{ m}$, $\varphi=36^\circ$)			开挖平台 ($h=9\text{ m}$, $\varphi=4^\circ$)			滑坡前缘 ($h=10\text{ m}$, $\varphi=15^\circ$)		
	h_w/m	α	F_s	h_w/m	α	F_s	h_w/m	α	F_s	h_w/m	α	F_s
天然状态下	0.8	0.057	1.18	3.5	0.250	0.65	3.0	0.333	6.24	5.2	0.520	1.39
降雨条件下	0.6	0.043	0.57	8.6	0.614	0.22	7.4	0.822	1.64	9.2	0.920	0.35
变化率	—	—	51.7%	—	—	66.1%	—	—	73.7%	—	—	74.8%

度指标 c^* ， φ 以及两者随含水率变化规律。图 9 中试验结果显示，随着饱和度增大，坡体材料表观黏聚力 c^* 和内摩擦角 φ 都降低，饱和度为 90.2% 时坡体表观黏聚力降到 14.5 kPa，内摩擦角降到 10.8°。文献[4]将模型理想化为无限边坡（边坡长度远大于厚度时考虑为无限边坡）进行稳定性分析，并给出了与表观黏聚力 c^* ，内摩擦角 φ 和地下水位 h_w 相关的边坡稳定性系数计算公式：

$$F_s = \frac{2c^*}{\{\gamma_t(1-\alpha) + \gamma_{\text{sat}}\alpha\}h\sin 2\beta} + \frac{\gamma_t(1-\alpha) + (\gamma_{\text{sat}} - \gamma_w)\alpha}{\gamma_t(1-\alpha) + \gamma_{\text{sat}}\alpha} \cdot \frac{\tan \varphi}{\tan \beta}, \quad (2)$$

式中， γ_t ， γ_{sat} ， γ_w ， β ， h ， h_w ， α 分别为土体重度、饱和重度，水的重度，滑坡体倾角，滑坡体厚度，地下水位高度，超孔压比（ $\alpha = h_w/h$ ）。其中， γ_t 和 γ_{sat} 由模型材料参数试验（重度测试）获取； β 和 h 由滑坡模型的滑面倾角和滑体厚度获得，滑坡体倾角取各段滑带倾角平均值； h_w 和 α 基于离心试验测得的孔隙水压力 u ，用简便公式 $h_w = u/\gamma_w$ 求地下水位高度以及超孔压比（ $\alpha = h_w/h$ ），并假设各段滑坡地下水位线近似平行坡面。将以上相关参数代入式（2）求出天然状态和降雨条件下的各段滑坡稳定性系数（ $\gamma_t=20.5\text{ kN/m}^3$ ， $\gamma_{\text{sat}}=21.0\text{ kN/m}^3$ ， $\gamma_w=10\text{ kN/m}^3$ ， c^* ， φ 值见图 8），如表 2 所示。

由表 2 可知，在天然状态下，滑坡后缘、前缘和开挖平台的稳定性系数均大于 1，只有开挖斜坡稳定性系数小于 1，滑坡整体处于稳定状态。降雨条件下，滑坡稳定性系数明显降低，滑坡处于不稳定或失稳状态；开挖斜坡稳定性系数最小（0.22），滑坡前缘稳定性系数下降百分比最大（74.8%）。

综合以上分析，降雨条件下，坡体表观黏聚力和内摩擦角降低，抗剪强度减小，滑坡后缘、前缘由稳定状态变为不稳定或失稳状态，滑坡前缘和开挖斜坡稳定性最差。

5 讨 论

将本次试验成果和八渡滑坡原型对比，本次离心模型试验的滑坡变形破坏特征及失稳模式和原型相

似，成功模拟了折线形滑坡在开挖和降雨条件下的变形破坏、失稳过程。

由于大型滑坡具有范围广、成因复杂等特点，其滑带和滑坡体通常不是单一而具多级滑面和多个滑段和滑动块体的特征。因此，降雨条件下大型滑坡稳定性同时受到滑带形状、滑坡体形状、开挖等因素影响，滑坡不同部位的失稳模式和变形破坏特征不同，往往具有分级分块的变形破坏特征。一定的坡度下，滑坡后缘往往最早出现破坏，且破坏模式主要为张拉破坏和沉陷；开挖斜坡容易发生牵引式滑坡，并出现次级滑面、滑段；在坡度相对较缓的滑坡中部，其稳定性相对较好；滑坡前缘变形最大、破坏最严重，发生蠕变和塑性流动，破坏模式主要为滑移—拉裂破坏，同时有次级滑块出现。

大型滑坡变形破坏特征复杂性使其治理难度大，根据大型滑坡区域工程地质条件和降雨条件等，通过计算预测降雨条件下滑坡体强度参数和地下水位变化，分析大型滑坡不同滑段、不同部位变形破坏特征和稳定性，分清主滑坡和次级滑坡，综合考虑其分级分块破坏特征以及社会经济条件，采用分级和分块的原则对其进行防治。坡体后缘张拉区容易出现张拉裂缝，此区应做好排水措施避免降雨大量入渗；滑带坡度缓的坡段在降雨条件下坡体相对稳定，工程建设可设计在此区域；坡度较陡的开挖斜坡对降雨十分敏感，坡顶处于张拉状态容易出现拉裂缝，发生牵引式滑坡，开挖坡度尽可能放缓且开挖后要及时对其进行处治，采取排水措施避免降雨入渗，同时增加设施阻止滑坡体下滑；坡度由缓变陡的区域在降雨条件下容易发生滑移—拉裂滑坡，坡度突变处存在潜在滑裂面，工程中应采取排水措施减少降雨入渗，防止滑裂面贯通；坡度由陡变缓的滑坡前缘区域在降雨条件下主要发生推移式滑坡破坏，该部分坡体地下水位较高，坡体变形大，坡表严重破坏，工程中应采取措施增加负重或设多级抗滑设施。

6 结 论

通过以八渡滑坡为原型的折线型滑面大型滑坡的

离心模型试验研究,可得出以下几方面的认识:

(1)在滑面形态变化大的部位开挖卸荷容易引起折线型滑面大型滑坡的局部复活。典型的离心模型试验显示,降雨条件下渗流场和重力场共同作用,坡体后缘很快发生张拉破坏;开挖斜坡部分对降雨最敏感且最先变形失稳;滑坡前缘在降雨条件下发生较大变形和坡体破坏,其被多条不连续裂缝分割形成多个滑块,并有次级滑坡和坍塌发生。

(2)降雨条件下,折线型滑面的大型滑坡不同滑段的坡体位移矢量各不相同,开挖斜坡和老滑坡前部位移最大,开挖斜坡和滑面坡度突变处容易形成潜在滑裂面。因此,折线型滑面的大型滑坡破坏应关注其分级和分块滑动的特征。

(3)降雨对滑坡稳定性影响主要体现在坡体强度参数降低和地下水位升高,大量降雨会导致大型滑坡稳定性系数明显降低,一定降雨量下滑坡的稳定性系数与坡体形态、开挖条件及地下水位条件有关。

(4)对具有分级和分块滑动的大型和巨型滑坡,应根据工程地质条件、降雨条件、滑面形态、开挖条件、地下水位特征,结合坡体不同滑段、不同部位变形破坏特征,采用分级和分块的防治原则对其进行防治。

本次试验模型只考虑一种土体,且没有模拟不同降雨量对大型滑坡稳定性的影响,这方面还有待进一步研究。

参考文献:

- [1] PAOLA Gattinoni, LAURA ScesiI, LUCA ArieniI, et al. The February 2010 large landslide at Maierato, Vibo Valentia, Southern Italy[J]. *Landslides*, 2012(9): 255 - 261.
- [2] 黄润秋. 20 世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, **26**(3): 433 - 454. (HUANG Run-qiu. Large-scale landslides and their sliding mechanisms in china since 20th century[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, **26**(3): 433 - 454. (in Chinese))
- [3] 田晓丽. 预加固高填方斜坡滑动失稳机制的离心模型试验研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2011. (TIAN Xiao-li. The centrifuge model test for the sliding mechanism of pre-reinforced high fill slope[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011. (in Chinese))
- [4] LING H, HOE I, LING M. Centrifuge model simulations of rainfall-induced slope instability[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 2012, **138**: 1151 - 1157.
- [5] LING H, LIING H L, LI L, et al. Centrifuge modeling of slope failures induced by rainfall[C]// *Proc 7th Int Conf on Physical Modelling in Geotechnics*, SPRINGMAN S, LAUE I, SEWARD L, eds. London, 2010: 1131 - 1136.
- [6] 程永辉, 程展林, 张元斌. 降雨条件下膨胀土边坡失稳机理的离心模型试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2011, **33**(增刊 1): 409 - 414. (CHENG Yong-hui, CHENG Zhan-lin, ZHANG Yun-bin. Centrifugal model tests on expansive soil slope under rainfall[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, **33**(S1): 409 - 414. (in Chinese))
- [7] ZHANG Ga, QIAN Ji-yun, WANG Rui, et al. Centrifuge model test study of rainfall-induced deformation of cohesive soil slopes[J]. *Soil and Foundations*, 2001, **51**(2): 297 - 305.
- [8] 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 - 402. (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 - 402. (in Chinese))
- [9] SCHULZA W H, GALLOWAY S L, HIGGINS J D. Evidence for earthquake triggering of large landslides in coastal Oregon, USA[J]. *Geomorphology*, 2012(141/142): 88 - 98.
- [10] DORTCH Jason M, OWEN Lewis A, HANEBERG William C, et al. Nature and timing of large landslides in the Himalaya and Transhimalaya of northern India[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2009(28): 1037 - 1054.
- [11] 张永双, 郭长宝, 周能娟. 金沙江支流冲江河巨型滑坡及其局部复活机理研究[J]. *岩土工程学报*, 2013, **35**(3): 445 - 453. (ZHANG Yong-shuang, GUO Chang-bao, ZHOU Neng-juan. Characteristics of Chongjianghe landslide at a branch of Jinsha River and its local reactivation mechanism[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, **35**(3): 445 - 453. (in Chinese))
- [12] 李小林, 郭小花, 李万花. 黄河上游龙羊峡-刘家峡河段巨型滑坡形成机理分析[J]. *工程地质学报*, 2011, **19**(4): 516 - 529. (LI Xiao-lin, GUO Xiao-hua, LI Fan-hua. Mechanism of giant landslides from Longyangxia valley to Liujiaxia valley along upper Yellow River[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2011, **19**(4): 516 - 529. (in Chinese))
- [13] 冯文凯, 何 川, 石豫川, 等. 复杂巨型滑坡形成机制三维离散元模拟分析[J]. *岩土力学*, 2009, **30**(4): 1122 - 1126. (FENG Wen-kai, HE Chuan, SHI Yu-chuan, etc. Simulation analysis of formation mechanism of some complex and giant landslides using three-dimensional discrete elements[J]. *Rock*

- and Soil Mechanics, 2009, **30**(4): 1122 - 1126. (in Chinese))
- [14] WANG Fa-wu, OKUNO T, MATSUMOTO T. Deformation characteristics and influential factors for the giant Jinnosuke-dani landslide in the Haku-san Mountain area, Japan[J]. Landslides, 2007(4): 19 - 31.
- [15] 黄润秋, 裴向军, 李天斌. 汶川地震触发大光包巨型滑坡基本特征及形成机理分析[J]. 工程地质学报, 2008, **16**(6): 730 - 741. (HUANG Run-qiu, PEI Xiang-jun, LI Tian-bin. Basic characteristics and formation mechanism of the largest scale landslide at Daguangbao occurred during the Wenchuan earthquake[J]. Journal of Engineering Geology, 2008, **16**(6): 730 - 741. (in Chinese))
- [16] CASTELLI M, CLAUDIO S, CHRISTOPHE B, et al. Mechanics and velocity of large landslides[J]. Engineering Geology, 2009(109): 1 - 4.
- [17] QUINN P E, DIEDERICH S, ROWE R K, et al. A new model for large landslides in sensitive clay using a fracture mechanics approach[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2011(48): 1151 - 1162.
- [18] QUINN P E, HUTCHINSON D J, DIEDERICH S, et al. Characteristics of large landslides in sensitive clay in relation to susceptibility, hazard, and risk[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2011(48): 1212 - 1232.
- [19] 孙德永. 南昆铁路八渡滑坡工程整治[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2000. (SU De-yong. Protect regulation of Badu landslide in Nan-Kun Railway[M]. Beijing: Chinese Railway Press, 2000. (in Chinese))
- [20] XUE De-min, LI Tian-bin, WEI Yong-xing, et al. Mechanism of reactivated Badu landslide in the Badu Mountain area, Southwest China[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, **73**(8): 4305 - 4312.
- [21] 张敏, 吴宏伟. 颗粒图像测速技术在离心试验变形分析中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(增刊 2): 3858 - 3864. (ZHANG Min, WU Hong-wei. Application of particle image velocimetry to deformation analysis in centrifugal tests[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(S2): 3858 - 3864. (in Chinese))
- [22] LING H I, WU M H, LESHCHINSKY D, et al. Centrifuge modeling of slope instability[J]. J Geotechnical Geoenvironmental Engineering, 2009, **135**(6): 758 - 767.

《岩土工程学报》征订启事

《岩土工程学报》创办于 1979 年, 是我国水利、土木、力学、建筑、水电、振动等六个全国性学会联合主办的学术性科技期刊。由南京水利科学研究院承办, 国内外公开发行。主要刊登土力学、岩石力学领域中能代表当今先进理论和实践水平的科学研究和工程实践成果等。报道新理论、新技术、新仪器、新材料的研究和应用。欢迎国家自然科学基金项目及其他重要项目的研究成果向本刊投稿, 倡导和鼓励有实践经验的作者撰稿, 并优先刊用这些稿件。主要栏目有黄文熙讲座、综述、论文、短文、工程实录、焦点论坛、讨论和简讯等。

本刊被《中文核心期刊要目总览》连续多年确认为核心期刊, 并在建筑类核心期刊中位于前列; 本刊被科技部“中国科技论文统计源期刊”(中国科技核心期刊)及“中国科技论文与引文数据库”收录; 本刊被中国科学院“中国科学引文数据库”收录; 本刊被“中国知网”全文收录及“中国学术期刊综合评价数据库”收录; 本刊被“工程索引 Ei Compendex 数据

库”和“日本科学技术振兴机构数据库 JST”等国际数据库收录。本刊网址(www.cgejournal.com)全文发布本刊所有刊载文章。

本刊读者对象为土木建筑、水利电力、交通运输、矿山冶金、工程地质等领域中从事岩土工程及相关专业的科研人员、设计人员、施工人员、监理人员和大专院校师生。

本刊为月刊, A4 开, 双栏排版, 192 页, 每月中旬出版, 每期定价 25 元, 全年 300 元。

本刊国际标准刊号 ISSN 1000 - 4548, 国内统一刊号 CN 32 - 1124/TU, 国内发行代号 28 - 62, 国外发行代号 MO 0520。欢迎广大读者在全国各地邮局订购, 也可在编辑部订购(不另收邮费)。编辑部订购地址: 南京虎踞关 34 号《岩土工程学报》编辑部; 邮编: 210024; 联系电话: 025-85829534, 85829543, 85829553, 85829556; 传真: 025-85829555; E-mail: ge@nhri.cn。

(本刊编辑部)