

DOI: 10.11779/CJGE201507020

降雨触发不同级配堆积体滑坡模型试验研究

左自波^{1, 2}, 张璐璐^{*2, 3}, 王建华^{2, 3}

(1. 上海交大海科(集团)有限公司, 上海 200231; 2. 上海交通大学海洋工程国家实验室, 上海 200240; 3. 上海交通大学土木工程系, 上海 200240)

摘要: 深入研究降雨条件下堆积体坡失稳规律对滑坡预测预报和防灾减灾具有重要的理论意义和工程实用价值。开发研制了降雨滑坡室内模型试验系统, 对3种配制的堆积体土样进行了模型试验。研究了降雨条件下堆积体土坡的渗流、变形、破坏和颗粒运移的规律, 探讨颗粒级配对堆积体土坡稳定性的影响。结果表明: 坡内土体体积含水率、孔隙水压力和吸力随降雨历程响应明确; 湿润锋到达后体积含水率和孔隙水压力持续增加而吸力持续减小, 达到峰值后稳定; 降雨停止后体积含水率和孔隙水压力立即降低而吸力逐渐增大。坡体破坏瞬时土体位移有一个加速过程。颗粒级配(含石量)对土坡破坏模式具有显著的影响; 堆积体含石量为13%, 19%, 41%的土坡破坏模式分别为多级后退式破坏、冲蚀引起的局部浅层滑动破坏和块状滑动破坏; 含石量越小, 滑裂面越明显; 含石量对细颗粒流失也有影响, 含石量越大细颗粒流失越显著, 坡脚细颗粒含量越大。

关键词: 堆积体; 滑坡; 模型试验; 降雨入渗; 颗粒级配

中图分类号: P642.22

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2015)07-1319-09

作者简介: 左自波(1986-), 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事岩土工程咨询设计与研究。E-mail: zuozibo@hotmail.com。

Model tests on rainfall-induced colluvium landslides: effects of particle-size distribution

ZUO Zi-bo^{1, 2}, ZHANG Lu-lu^{*2, 3}, WANG Jian-hua^{2, 3}

(1. Shanghai Jiao Tong University Hike (Group) Co., Ltd., Shanghai 200231, China; 2. State Key Laboratory of Ocean Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China; 3. Department of Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Investigation of the mechanism of rainfall-induced colluvium landslides and a reliable evaluation method for the colluvium slopes are essentially important for theoretical researches and practical projects. A fully instrumented laboratory model test system for rainfall-induced landslides is developed. Three model tests are conducted for three types of granular soils to investigate the seepage, deformation and particles migration of loose colluvium soil slopes under rainfall conditions, and the effects of particle-size distribution on infiltration and slope stability of colluvium slopes are discussed. The results show that the volumetric water content, pore water pressure and soil suction in the slope vary with rainfall infiltration. When the wetting front reaches the corresponding measuring point, the volumetric water content and pore water pressure continue to increase while the suction continues to decrease with time. After some time, the measured values become stable. Once the rain stops, the pore water pressure and water content response immediately and gradually decrease, while the soil suction in the slope gradually increases. The displacement of the slope is accelerated when a failure occurs. The initial particle-size distribution, e.g., the content of stone, has a significant impact on the failure modes. The failure modes for the three slopes, which are composed of colluvium soils with stone content of 13%, 19% and 41%, respectively, are multi-level retrogressive sliding failure, shallow sliding failure, massive sliding failure, correspondingly. With a smaller stone content, the slip surface is deeper. The transport of fine particles is more remarkable and the content of fine particles near the toe of a slope is greater when the stone content increases.

Key words: colluvium; landslide; model test; rainfall infiltration; particle-size distribution

0 引言

堆积体滑坡具有分布广泛、爆发频率高、持续危害大等特点, 在滑坡类型中占很大的比例^[1]。该类坡体结构具有大孔隙性、透水性强、易变性等特点, 因

基金项目: 国家重点基础研究发展计划“973项目”(2014CB049100); 国家自然科学基金项目(41172252, 51422905); 中组部青年拔尖人才计划

收稿日期: 2014-08-14

*通讯作者

而降雨条件极易诱发滑坡^[2-3],将严重威胁基础设施建设、人民生命财产安全,深入研究降雨条件下堆积体土坡失稳规律对滑坡预测预报和防灾减灾具有重要的理论意义和工程实用价值。

目前,针对降雨诱发土质、岩质等常规边坡失稳机理的研究主要集中于现场实测^[4]、数值模拟^[5]和模型试验。物理模型试验具有良好的直观性,能综合考虑多种因素,模拟复杂边界条件,在基本满足相似原理条件下能反映滑坡的内在相互作用。林鸿州等^[6]通过降雨诱发土质边坡失稳的模型试验探讨了降雨特性对边坡失稳的影响,并以此选取合适的雨量预警参数。罗先启等^[7]基于模型试验结果,揭示了滑坡在雨水及库水作用下渗透特性和变形破坏规律。李焕强等^[8]构建了不同坡角边坡人工模拟降雨试验,研究了坡体前端推力、含水率、变形的变化规律。徐光明等^[9]、Wang 等^[10]、Tohari 等^[11]、Huang 等^[12]开展降雨滑坡模型试验研究了密实度、粉粒含量、水位等因素对孔隙水压力、含水率、滑坡启动和发展及破坏模式的影响。

上述研究考虑了降雨入渗条件下坡体变形-渗流相互作用,但主要集中在砂性土、粉质黏土。堆积体为土石混杂材料^[1-2,13],在降雨入渗条件下,其非饱和和带的渗流和变形非常复杂,渗流场、应力场和位移场相互影响,目前有关降雨诱发堆积体滑坡的研究还很欠缺。一些研究者开展了有益的探索,例如,吴火珍等^[13]采用有限元法分析了某堆积层滑坡体的滑动机制及原因,尹洪江等^[14]在室内构建泥石流源区松散堆积土体斜坡模型,研究了降雨强度对松散堆积土斜坡土体流失与破坏方式的影响规律。本文以松散堆积体坡为研究对象,采用模型试验的方法,研究降雨条件下堆积体土坡的渗流、变形、破坏和颗粒运移的规律,探讨颗粒级配对入渗和土坡稳定性的影响,为堆积体滑坡防灾减灾、监测和预报提供可靠的理论依据和丰富的试验数据。

1 模型试验介绍

1.1 试验装置

图 1 所示为室内模型试验装置,主要包括模型槽、降雨模拟系统和测量系统。具体如下:

(1) 模型槽。长、宽、高分别为 3.0, 0.9, 1.2 m。模型槽两侧由有机玻璃制成,并由角钢固定。有机玻璃内侧贴有透明防护膜以减小边界效应,观测窗口一侧布设有坐标参考尺和控制基准点。

(2) 降雨模拟系统。主要包括供水管线系统、降雨喷头和降雨强度监测控制系统 3 部分。模拟降雨的有效降雨面积为 3 m²,降雨强度为 10~280 mm/h,平均均匀度为 81%。

(3) 测量系统。主要包括 PIV 系统和位移传感器(测量土体变形),孔隙水压力传感器(测量孔隙水压力)、体积含水率传感器(测量含水率),吸力传感器(测量土壤吸力)以及数据采集系统。PIV 系统即基于离子图像测试技术(particle image velocimetry, PIV)建立的变形分析系统,主要包括高分辨率数字照相和量测分析软件系统,本研究采用李元海开发的量测分析软件系统^[15]。位移等传感器分别采用 YWC-100 型应变式位移传感器、KPE-200kPa 微型孔隙传感器、ECH2O-5 体积含水率传感器和 Campbell 257 土壤吸力传感器。数据采集系统包括 CR1000、DH3816 数据采集仪等。测量装置规格、参数及标定方法等的详细介绍见文献[16]。

1.2 试验方案

为了研究堆积体颗粒级配、降雨特性、坡度等对堆积体土坡渗流、变形、破坏模式以及颗粒运移的影响,配制了 3 种堆积体土样,开展了一系列模型试验。

本文重点讨论颗粒级配的影响,受篇幅限制,仅给出了 3 组典型试验结果,其他相关试验结果见文献[16]。堆积体土样是由砂土,卵石配制而成。其中卵石粒径为 20~30 mm。3 种土样的基本参数如表 1 所示,定义土样 2 mm 以上的含量为含石量,则土样 S1, S2, S3 对应的含石量分别为 13%, 19%, 41%。本文讨论的颗粒级配的影响具体指含石量的影响。模型试验方案如表 2 所示,试验 G1, G2, G3 的坡度均为 38.7°,初始条件比较接近。降雨强度设为 76 mm/h,终止试验的时间是土坡不再发生进一步失稳破坏。由于试验 G1 中雨强 76 mm/h 的降雨持续超过 8 h,坡体仍未出现较大失稳,后加大降雨强度至 194 mm/h 至坡体失

表 1 试验用土的基本参数指标
Table 1 Basic property indexes of soils

土样	含石量(2 mm 以上含量)/%	最大干密度 $\rho_{dmax}/(g\cdot m^{-3})$	最小干密度 $\rho_{dmin}/(g\cdot m^{-3})$	比重 G_s	有效粒径 D_{10}/mm	控制粒径 D_{60}/mm	连续粒径 D_{30}/mm	不均匀系数 C_u	曲率系数 C_c	有效内摩擦角 $\varphi'/(^{\circ})$	有效黏聚力 c'/kPa
S1	13.00	1.81	1.48	2.69	0.20	0.62	0.35	3.01	0.99	37.60	2.80
S2	19.00	1.88	1.56	2.67	0.25	0.69	0.38	2.76	0.84	37.60	2.80
S3	41.00	1.92	1.63	2.64	0.45	2.10	0.67	4.67	0.48	—	—

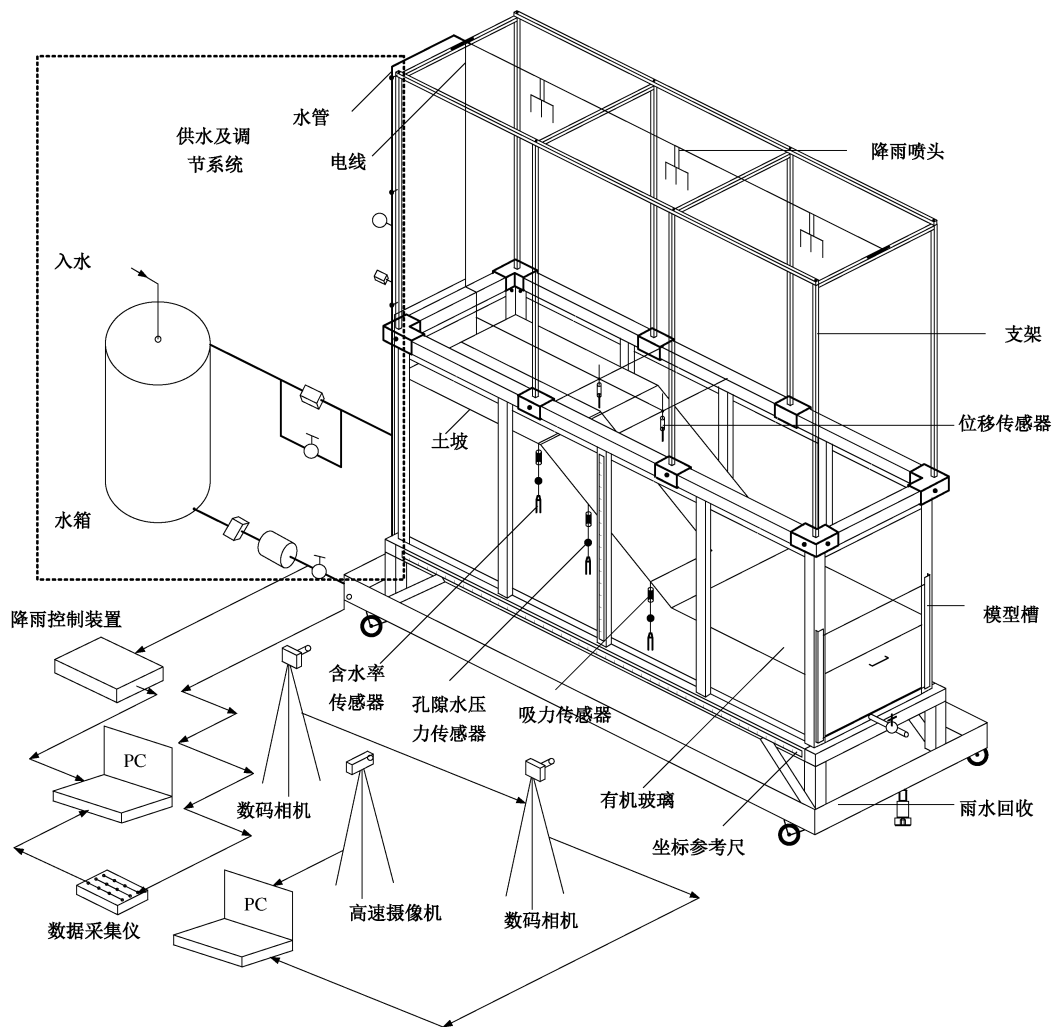


图 1 滑坡模型试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of model tests on landslide

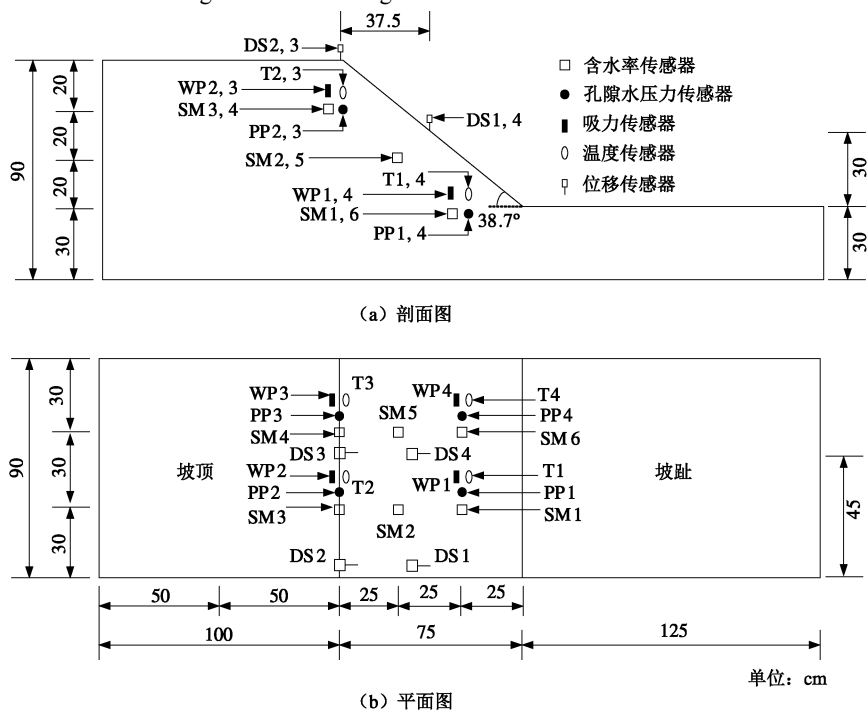


图 2 试验 G2 和 G3 传感器布置图

Fig. 2 Layout of sensors for tests G2 and G3

表 2 试验方案

Table 2 Schemes of model tests

编号	土类	坡角/(°)	干密度 $\rho_d/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	初始体积 含水率 $\theta_i/\%$	相对密度 $D_r/\%$	渗透系数 $k_s/(10^{-5}\text{ m}\cdot\text{s}^{-1})$	孔隙比 e	试验终止时累积 含水率/mm	降雨强度 q $/(\text{mm}\cdot\text{h}^{-1})$
G1	S2	38.7	1.66	9.40	34.50	—	0.61	250	76/116/194
G2	S1	38.7	1.58	9.70	33.70	—	0.70	134	76
G3	S3	38.7	1.72	10.40	35.70	—	0.53	426	76

稳结束试验（表 2）。试验 G2 和 G3 的传感器布置图见图 2，试验 G1 的传感器布置图与图 2 相似，但无吸力和位移传感器。试验分层填筑的土坡如图 3 所示。



图 3 试验边坡完成图

Fig. 3 Arrangement of test slope

2 试验结果与分析

2.1 降雨过程中土体含水率的变化

图 4 为体积含水率随着降雨的变化。由图 4（a）可见，试验 G1 降雨初期降雨历时 19 min 内各测点的体积含水率保持不变，降雨持续一定时间后，含水率急剧增加，最后达到稳定值（SM1 至 SM6 依次为 41%，29%，17%，19%，20%，39%）。由图 4（b）可见，试验 G2 降雨入渗湿润锋依次到达测点 SM1、SM5、SM2，用时分别为 7 min，16 min，33 min30 s，之后各测点的体积含水率急剧增大，36 min30 s，1 h4 min20 s，1 h42 min20 s 后坡脚测点 SM1 和 SM6、坡中测点 SM2 和 SM5、坡顶测点 SM3 和 SM4 分别达最大值 38%，40%，30%。由图 4（c）可见，试验 G3 湿润锋到达坡脚、坡中和坡顶内外各测点的初始时间分别为 6 min，8 min，17 min50 s，34 min 和 21 min，31 min10 s，之后各测点含水率急剧增大，最终达最大值分别为 34%，37%和 34%。上述测试结果表明，体积含水率随着降雨入渗而变化，降雨初期各测点土体含水率保持不变，降雨历时一定时间湿润锋到达测点后，含水率急剧增加，最后达到峰值并趋于稳定，一旦降雨停止，体积含水率立即减小。

2.2 土体孔隙水压力及吸力的变化

图 5 为孔隙水压力随着降雨的变化。由图 5（a）

可见，对于试验 G1，湿润锋到达各测点，孔隙水压力随着降雨历时逐渐增大，增大降雨强度，增大的幅度更加显著，一定时间后趋于稳定，正孔隙水压力最大值约 1.4 kPa。由图 5（b）可见，对于试验 G2，坡脚测点 PP1、PP4 和坡顶测点 PP2、PP3 孔隙水压力的最终值分别为 2.2，1.1，0.7，0.3 kPa。由图 5（c）可见，对于试验 G3，测点 PP1、PP4、PP2、PP3 孔隙水压力最大值分别为 4.7，2.5，1.7，1.6 kPa。

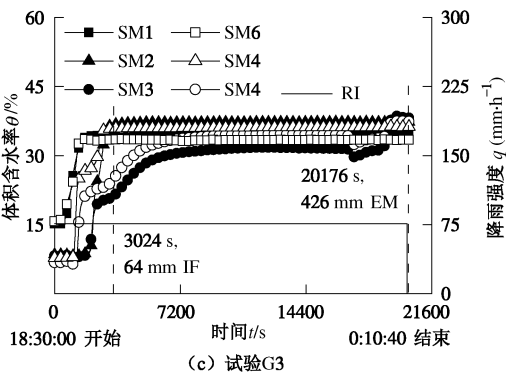
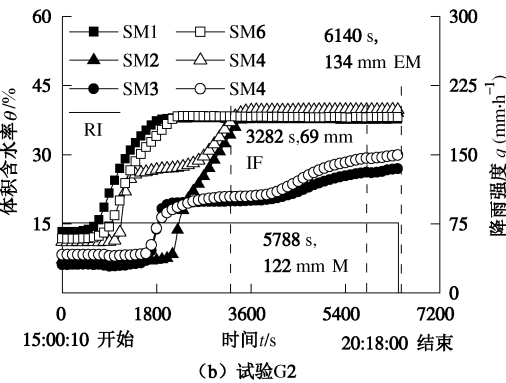
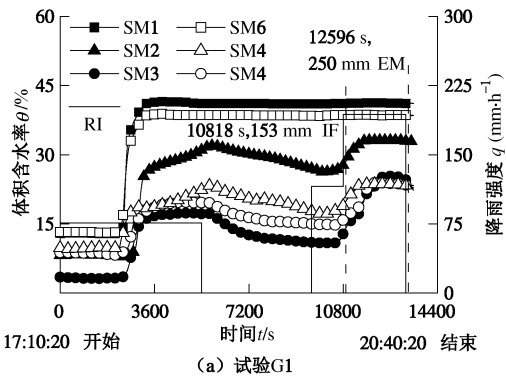


图 4 体积含水率随着降雨的变化

Fig. 4 Variation of volumetric water content with rainfall

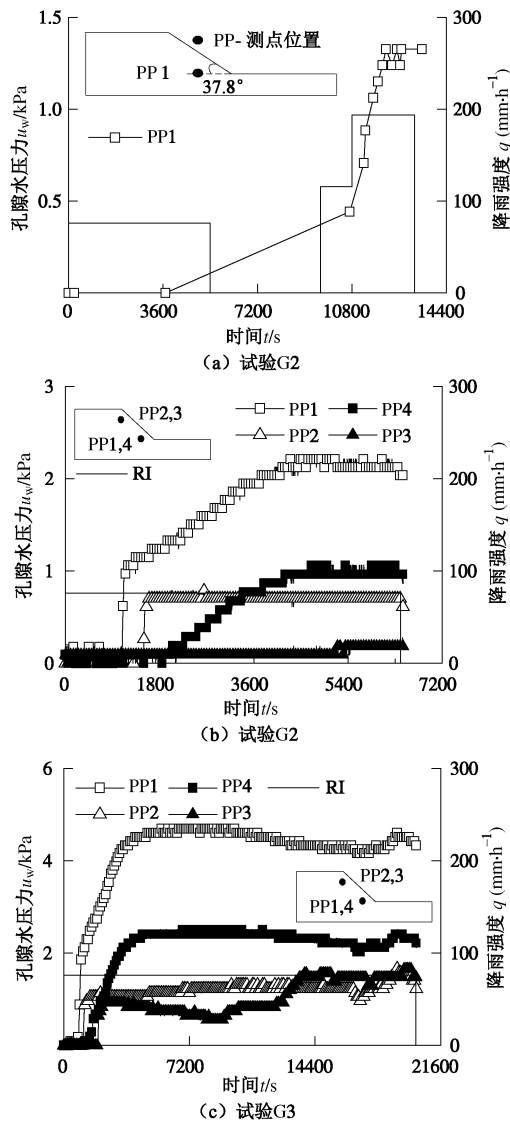


图 5 孔隙水压力随着降雨的变化

Fig. 5 Variation of pore water pressure with rainfall

图 6 为试验 G2 吸力随着降雨的变化。由图可见，对于试验 G2，吸力（负孔隙水压力）在 7~11.5 kPa 之间变化，降雨入渗初期各测点吸力变化较小，一段时间后吸力缓慢持续降低，直至最低点。需指出的是，Campbell 257 土壤吸力传感器为采用间接法吸力传感器（量程 200 kPa），而所配制的堆积体材料进气值小，因此当土样吸力低于 10 kPa 时传感器测量精度较差。

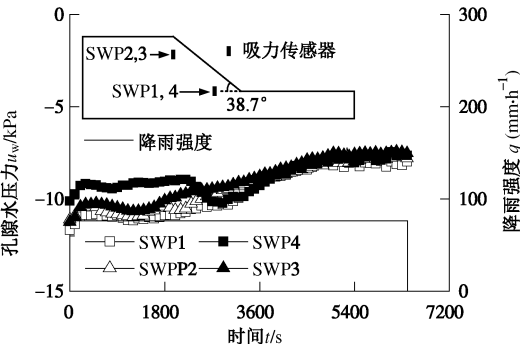


图 6 试验 G2 吸力随着降雨的变化

Fig. 6 Variation of soil water suction with rainfall for test G2

由上述结果可见，孔隙水压力和吸力随着降雨入渗而变化，降雨入渗湿润锋到达测点之前孔隙水压力和吸力保持不变，之后孔隙水压力随时间持续增加而吸力持续缓慢减小，达到峰值后稳定。停止降雨孔隙水压力立即减小而吸力逐渐增大。

2.3 降雨过程中位移的变化

本研究采用位移传感器和 PIV 系统量测坡体位移。采用 PIV 分析软件^[15]处理计算高像素试验照片，确定控制点间实际尺寸和照片像素之间的比例及坐标位置关系，对照片进行网格离散化，计算一定时序照片各像素点与控制点的位移变化关系。由于篇幅的限制，这里仅给出了利用 PIV 系统最终所计算的土坡标记点位移。图 7，8 分别为试验 G2 滑坡发展过程中传感器测量土坡位移及 PIV 系统计算土坡标记点位移的变化。由图 7 可见，坡顶测点 DS2 和 DS3 的位移变化较小，最大位移为 0.1 mm。坡中测点 DS1 和 DS4 位移最终均达到传感器的最大量程 100 mm，其中坡中内外测点（DS4 和 DS1）分别在 4495 s 和 4530 s 时开始破坏，位移有一个加速过程，5788 s 时土坡出现大规模的滑坡（见图 4（b））。由图 8 可见，各标志性测点的竖向位移变化规律不明显，在 1 mm 范围内变化。测点 PT3 在坡中坡面破坏瞬时土体位移有一个加速过程。试验 G1 和 G3 位移变化规律也相似。由此可见，坡体破坏瞬时土体位移有一个加速过程，这与文献[17]研究成果一致。

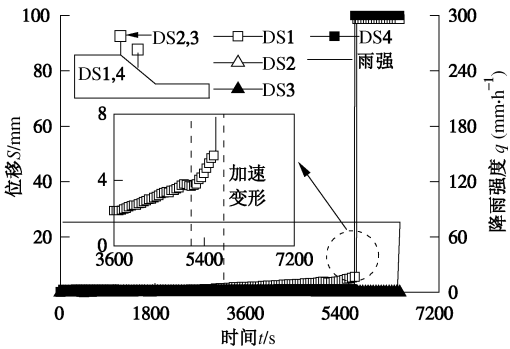
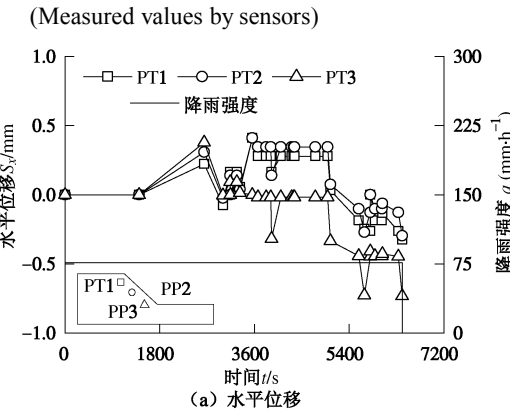


图 7 试验 G2 土坡位移的变化（传感器测得）

Fig. 7 Variation of displacement at measuring points for test G2



(a) 水平位移

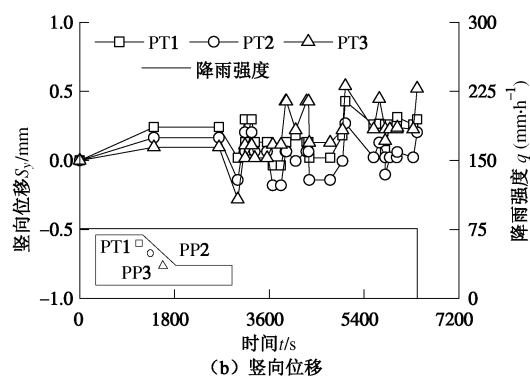


图 8 试验 G2 土坡标记点位移的变化 (PIV 计算)

Fig. 8 Variation of displacement at measuring points for test G2
(Calculated values by PIV)

3 颗粒级配 (含石量) 的影响

3.1 对破坏模式的影响

滑坡的破坏模式, 即滑坡的运动类型, 研究滑坡的破坏模式有助于滑坡灾害的预警、治理和减灾工作^[18-19]。笔者开展了一系列堆积体滑坡模型试验^[16], 结果表明相同级配条件下, 坡度、降雨强度仅影响破坏发展过程, 而对破坏模式没有影响, 但级配 (含石量) 对破坏模式有显著影响。本文所给出的 3 组试验 G1、G2、G3, 降雨强度、坡度一致, 但破坏模式有显著差别。堆积体 S2 (试验 G1)、堆积体 S1 (试验 G2) 和堆积体 S3 (试验 G3) 土坡破坏模式分别为冲蚀引起的局部浅层滑动破坏、多级后退式破坏和块状滑动破坏。其中, 滑坡发生时, 试验 G2 有圆弧形滑动面, 试验 G1、G3 则无明显的滑动面。

G1 为冲蚀引起的局部浅层滑动破坏, 其发展过程见图 9 (a)。第 1 阶段——坡面冲蚀沟的形成, 随着降雨的持续, 雨强的增大, 坡面发生冲蚀破坏, 冲蚀程度不均匀, 部分区域形成冲蚀沟; 第 2 阶段——浅层滑坡的产生, 冲蚀沟沟体由坡脚向坡顶逐渐扩展, 后期靠近坡顶的坡面出现浅层滑坡, 最终破坏状态见图 10 (a)。该种破坏模式与文献[20]研究结果相似。

G2 为多级后退式破坏, 其发展过程见图 9 (b)。第 1 阶段——坡脚侵蚀破坏, 随着降雨的进行, 坡面侵蚀, 侵蚀程度从坡顶至坡脚逐级增大, 坡脚土体塌落; 第 2 阶段——拉裂面的形成, 随着坡脚侵蚀的加重, 使坡脚产生一个小的弧面, 弧面凸向坡体内侧, 弧面上方形成一个拉裂面; 第 3 阶段——小型滑坡的产生, 由于弧面前侧土体临空, 拉裂面的发展, 促使拉裂面附近小型滑坡的产生; 第 4 阶段——系列滑坡的形成, 随着累积降雨量的增加, 小型滑坡滑体向坡趾堆积, 堆积区逐渐变大, 上一级小型滑动面圆弧面缓慢加深, 使得拉裂面的再一次形成, 较上一次拉裂

面有所增大, 随着拉裂面的发展, 促使滑坡的又一次产生, 滑坡规模较上一次有所增大, 如此重复, 土坡逐级形成一系列的拉裂面, 逐步形成滑坡, 滑坡规模由小增大, 直至土坡形成大的拉裂面, 最终发展成有明显滑动面的大规模滑坡, 促使土坡最终完全破坏, 见图 10 (b)。该种破坏模式与文献[21, 22]所提出的破坏模式相近。

G3 为块状滑动破坏, 发展过程见图 9 (c)。第 1 阶段——坡脚局部块体破坏, 累积降雨量达一定程度, 坡脚随机出现图块体破坏, 坡脚块体破坏位置的随机性取决于最不利雨水软化土体的位置; 第 2 阶段——坡面块体群破坏, 坡脚局部块体破坏沿着坡面向两边和坡顶发展, 块体滑动向两边发展, 同时部分块体滑动向坡顶发展, 逐步发展块体群, 块体的大小自下向上逐渐增大, 最终导致土坡破坏, 见图 10 (c)。该种破坏模式特点与文献[6, 23]所提破坏模式有共同之处。

如图 4 及表 1 所示, 当试验 G1、G2、G3 的累积含水率分别达到 153, 69, 64 mm 时, 土坡初始破坏 (第一块可见滑体开始滑动) 并出现较大的位移, 累积降雨量分别达到 250, 134, 354 mm 时, 土坡最终破坏并稳定, 位移达到最大值。许建聪等^[3]指出松散土质滑坡滑体位移与降雨量之间存在相关关系, 林鸿州等^[6]指出降雨型滑坡存在门槛累积雨量, 当累积雨量超过该门槛值则容易产生滑坡。本文研究表明, 堆积体坡失稳破坏的门槛累积雨量受含石量影响。

3.2 对土体颗粒运移的影响

试验结束后在坡顶、坡中和坡脚取土样进行筛分试验, 得到颗粒级配曲线。图 11 为试验 G1、G2、G3 土坡的滑坡破坏过程中颗粒级配的变化。对应的颗粒级配参数如表 3 所示。

由图 11 (a) 可见, G1 土坡破坏后坡顶处土体粗颗粒比例明显增大, 小于 10 mm 土粒质量分数降为 91%, 控制粒径 D_{60} 由 0.69 mm 增大到 0.77 mm。坡中处土体细颗粒比例有所增加, 小于 10 mm 土粒质量分数增加到 100%, D_{60} 由 0.69 mm 降低为 0.49 mm。坡脚处颗粒级配与原样级配差别不大。坡顶、坡中和坡脚处土粒有效粒径 D_{10} 较 K_0 原始土粒均减小, 说明土坡破坏过程中细颗粒在坡体各部位均有所流失。

由图 11 (b) 可见, G2 试验前后颗粒级配变化较小, 但不均匀系数 C_u 有所减小。由图 11 (c) 可见, G3 土坡破坏前后, D_{10} , D_{30} , D_{60} , C_u 都显著的减小, 说明粗颗粒和细颗粒都有所迁移。坡顶 0.1~1 mm 土粒含量显著减小, 说明坡顶土体细颗粒流失较多。

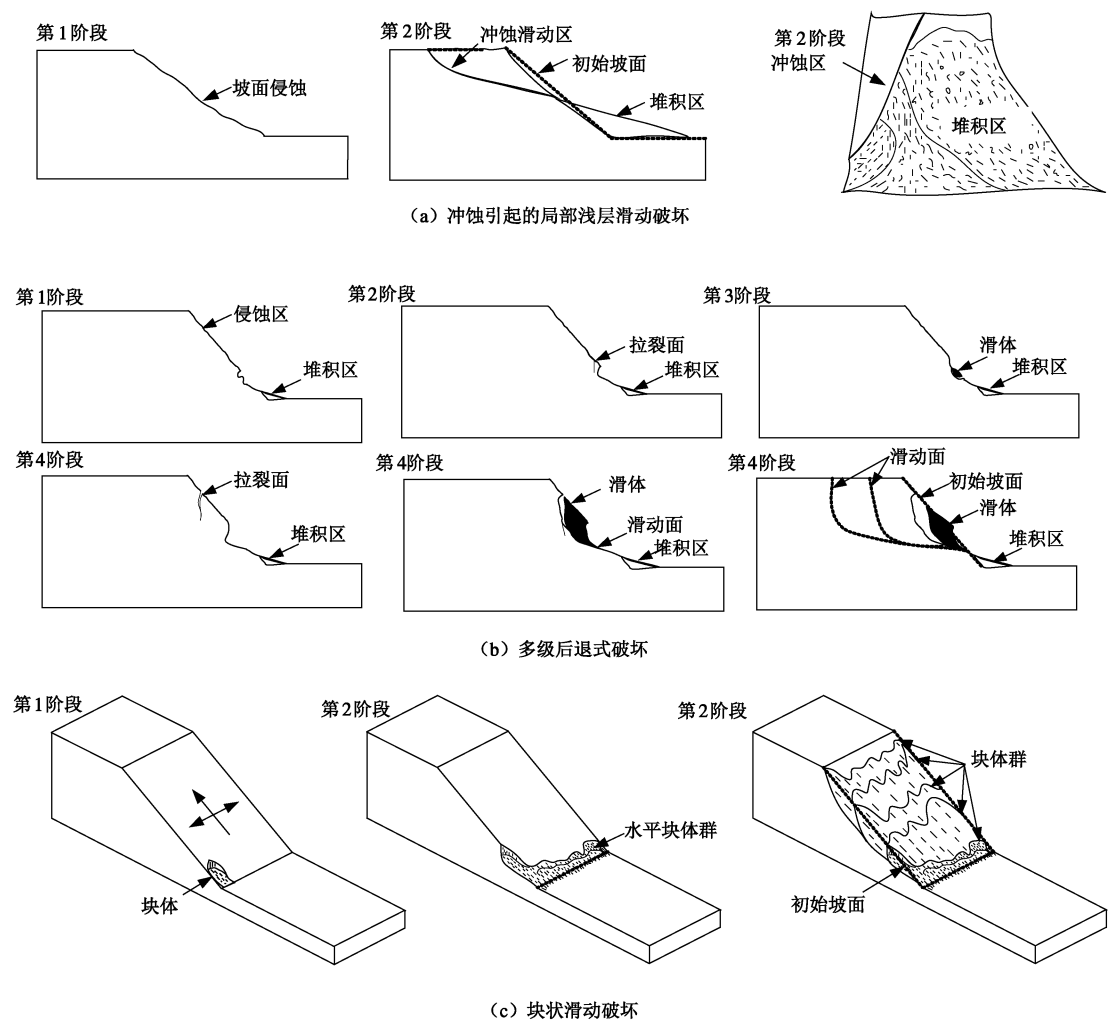


图 9 颗粒级配对滑坡破坏模式的影响

Fig. 9 Effect of particle-size distribution on failure modes

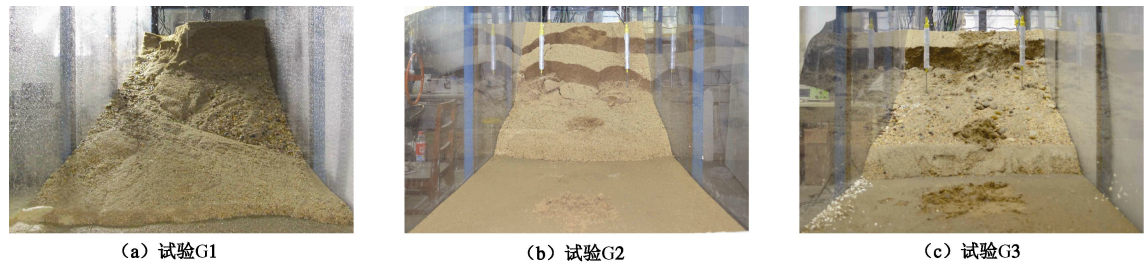


图 10 滑坡破坏模式

Fig. 10 Failure modes for test G1, G2 and G3

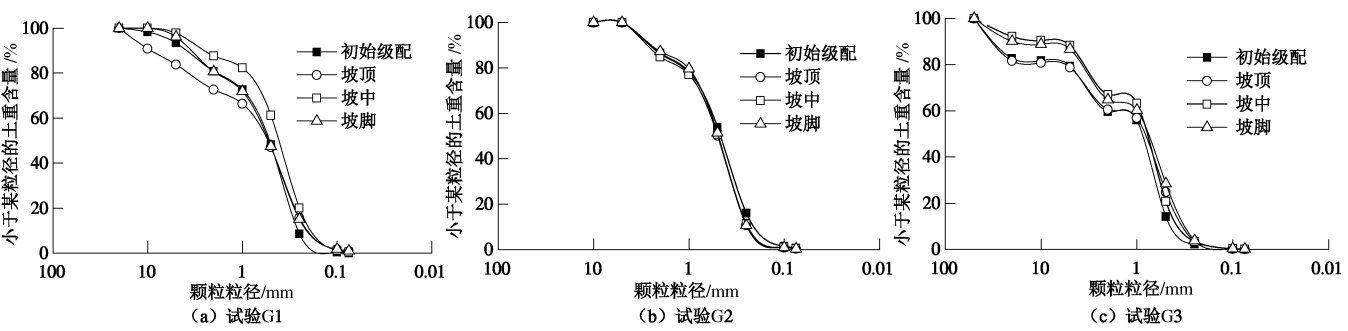


图 11 颗粒级配对土坡土体颗粒运移的影响

Fig. 11 Effect of particle-size distribution on particle migration

表 3 颗粒级配参数

Table 3 Parameters of particle-size distribution

取土位置 编号	D_{10}/mm	D_{60}/mm	D_{30}/mm	C_u	C_c
G1	初始	0.25	0.69	0.38	2.76 0.84
	坡顶	0.19	0.77	0.36	4.05 0.89
	坡中	0.17	0.49	0.31	2.88 1.15
	坡脚	0.20	0.69	0.36	3.35 0.94
G2	初始	0.20	0.62	0.35	3.01 0.99
	坡顶	0.25	0.63	0.38	2.52 0.92
	坡中	0.25	0.62	0.36	2.48 0.84
	坡脚	0.25	0.6	0.35	2.4 0.82
G3	初始	0.45	2.1	0.67	4.67 0.48
	坡顶	0.34	1.12	0.58	3.29 0.88
	坡中	0.38	0.93	0.60	2.45 1.02
	坡脚	0.32	0.98	0.51	3.06 0.83

由图 11 及表 3 可以看出,随着降雨的持续,坡顶的细颗粒土随雨水流失,使得坡顶粗颗粒和坡趾堆积区细颗粒比例增大。含石量越大,坡顶粗颗粒比例和坡趾细颗粒比例增大幅度越明显。前述已探讨 3 组试验由于颗粒级配(含石量)不同其破坏模式也不同,试验 G2(含石量为 13%)滑裂面呈圆弧型,试验 G1(含石量为 19%)和试验 G3(含石量为 41%)土坡滑裂面不明显。究其原因,由于级配不同,土体受入渗和冲蚀的影响不同,含石量增大,颗粒流失越显著,但细粒流失后局部坡体破坏后颗粒重分配,最终影响整体破坏模式。

4 结论与建议

(1) 开发研制了降雨滑坡室内模型试验装置系统,对不同配制的堆积体土样进行了模型试验。

(2) 试验结果表明:坡内土体体积含水率、孔隙水压力和吸力随降雨历程响应明确。湿润锋到达后体积含水率和孔隙水压力持续增加而吸力持续减小,达到峰值后稳定;降雨停止后体积含水率和孔隙水压力立即降低而吸力逐渐增大;坡体破坏瞬时土体位移有一个加速过程。

(3) 颗粒级配(含石量)对土坡破坏模式具有显著的影响。在相同坡度和降雨条件下,不同颗粒级配土坡的破坏模式不同,堆积体土样 S1(含石量为 13%)、S2(含石量为 19%)、S3(含石量为 41%)土坡破坏模式分别为多级后退式破坏、冲蚀引起的局部浅层滑动破坏和块状滑动破坏;含石量越小,滑裂面越明显;含石量对细颗粒流失也有影响,含石量越大细颗粒流失越显著,坡脚细颗粒含量越大。

需要说明的是,现场的堆积体含有粒径较大的石块,甚至有巨石。本文为了保证制样和室内试验的可操作性和可行性,采用等量替代法,将超粒径部分进行处理,并且配制的堆积体土样没有考虑相似材料的问题。堆积体土样相似材料的配制与现场的差别的理论和试验有待进一步探讨。

参考文献:

[1] 贺可强,周敦云,王思敬. 降雨型堆积层滑坡的加卸载响应比特征及其预测作用与意义[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(16): 2665 - 2670. (HE Ke-qiang, ZHOU Dun-yun, WANG Si-jing. Features of load-unload response ratio and its significance in predication of colluvial landslide[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(16): 2665 - 2670. (in Chinese))

[2] 周 中,傅鹤林,刘宝琛,等. 土石混合体边坡人工降雨模拟试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(7): 1931 - 1936. (ZHOU Zhong, FU He-lin, LIU Bao-chen, et al. Artificial rainfall tests on a well-instrumented soil-rock-mixture slope[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(7): 1931 - 1936. (in Chinese))

[3] 许建聪,尚岳全,王建林. 松散土质滑坡位移与降雨量的相关性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增刊 1): 2854 - 2860. (XU Jian-cong, SHANG Yue-quan, WANG Jian-lin. Study on relationship between slope-mass slide displacement and precipitation of loose soil landslide[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(S1): 2854 - 2860. (in Chinese))

[4] 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 the 20th century[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(3): 433 - 454. (in Chinese))

[5] 吴宏伟,陈守义,庞宇威. 雨水入渗对非饱和土坡稳定性影响的参数研究[J]. 岩土力学, 1999, 20(1): 1 - 14. (WU Hong-Wei, CHEN Shou-yi, PANG Yu-wei. Parametric study of effects of rain infiltration on unsaturated slopes[J]. Rock and Soil Mechanics, 1999, 20(1): 1 - 14. (in Chinese))

[6] 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 - 294. (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 - 294. (in Chinese))

[7] 罗先启,刘德富,吴 剑,等. 雨水及库水作用下滑坡模型

- 试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(14): 2476 - 2483. (LUO Xian-qi, LIU De-fu, WU Jian, et al. Model test study on landslide under rainfall and reservoir water fluctuation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(14): 2476 - 2483. (in Chinese))
- [8] 李焕强, 孙红月, 孙新民, 等. 降雨入渗对边坡性状影响的模型实验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, **31**(3): 589 - 594. (LI Huan-qiang, SUN Hong-yue, SUN Xin-min, et al. Influence of rainfall infiltration on slopes by physical model test[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **31**(3): 589 - 594. (in Chinese))
- [9] 徐光明, 王国利, 顾行文, 等. 雨水入渗与膨胀性土边坡稳定性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(2): 270 - 273. (XU Guang-ming, WANG Guo-li, GU Xing-wen, et al. Centrifuge modeling for instability of excavated slope in expansive soil due to water infiltration[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(2): 270 - 273. (in Chinese))
- [10] WANG G, SASSA K. Factors affecting rainfall-induced flowslides in laboratory flume tests[J]. Géotechnique, 2001, **51**(7): 587 - 599.
- [11] TOHARI A, NISHIGAKI M, KOMATSU M. Laboratory rainfall-induced slope failure with moisture content measurement[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2007, **133**(5): 575 - 587.
- [12] 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**(3/4): 134 - 145.
- [13] 吴火珍, 冯美果, 焦玉勇, 等. 降雨条件下堆积层滑坡体滑动机制分析[J]. 岩土力学, 2010, **31**(增刊 1): 324 - 329. (WU Huo-zhen, FENG Mei-guo, JIAO Yu-yong, et al. Analysis of sliding mechanism of accumulation horizon landslide under rainfall condition[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(S1): 324 - 329. (in Chinese))
- [14] 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 Hong-jiang, WANG Zhi-bing, HU Ming-jian. Influence of rainfall intensity on loose deposits slopes failure by model tests[J]. Soil Engineering and Foundation, 2011, **25**(3): 74 - 76. (in Chinese))
- [15] 李元海. 数字照相量测技术及其在岩石土工实验中的应用[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2009. (LI Yuan-hai. Application of the close range photogrammetric technique to the geotechnical engineering experiment[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2009. (in Chinese))
- [16] 左自波. 降雨诱发堆积体滑坡室内模型试验研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2013. (ZUO Zi-bo. Investigation on rainfall-induced colluvium landslides using laboratory model tests[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013. (in Chinese))
- [17] 许强, 汤明高, 徐开祥, 等. 滑坡时空演化规律及预警预报研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(6): 1104 - 1112. (XU Qiang, TANG Ming-gao, XU Kai-xiang, et al. Research on space-time evolution laws and early warning-prediction of landslides[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(6): 1104 - 1112. (in Chinese))
- [18] 牟太平, 张嘎, 张建民. 土坡破坏过程的离心模型试验研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2006, **46**(9): 1522 - 1525. (MU Tai-ping, ZHANG Ga, ZHANG Jian-min. Centrifuge modeling of failures of cohesive soil slopes[J]. Journal Tsinghua University (Science and Technology), 2006, **46**(9): 1522 - 1525. (in Chinese))
- [19] VARNES D J. Slope movement types and processes in landslides analysis and control[R]. Washington D C: National Research Council, 1978: 11 - 33.
- [20] ACHARYA G, COCHRANE T A. Rainfall induced shallow landslides on sandy soil and impacts on sediment discharge: A flume based investigation[C]// The 12th Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics. Goa, 2008.
- [21] 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**(1/2/3/4): 39 - 51.
- [22] JIA G W, ZHAN T L T, CHEN Y M, et al. Performance of a large-scale slope model subjected to rising and lowering water levels[J]. Engineering Geology, 2009, **106**(1/2): 92 - 103.
- [23] HONG Y, ADLER R F, HUFFMAN G. An experimental global prediction system for rainfall-triggered landslides using satellite remote sensing and geospatial datasets[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2007, **45**(6): 1671 - 1680.