

DOI: 10.11779/CJGE202102010

强降雨下无黏性土坡破坏的影响因素试验研究

缪海波¹, 柴少峰², 王功辉³

(1. 安徽理工大学土木建筑学院, 安徽 淮南 232001; 2. 中国地震局工程力学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080;

3. 京都大学防灾研究所, 京都 宇治 611-0011)

摘要: 利用自行研制的室内水槽模型试验系统, 对日本#6, #7和#8硅砂试样开展了固定降雨强度(90 mm/h)下诱发无黏性土坡破坏的模型试验; 描述了强降雨条件下无黏性土坡的破坏过程, 探讨了坡体厚度、前缘卸荷、土样颗粒尺寸及细颗粒含量对破坏过程的影响规律, 分析了土坡破坏过程中的孔隙水压力响应特征。结果表明: ①在持续强降雨作用下, 无黏性土坡的破坏过程可分为3个阶段, 即入渗、初始破坏与主要破坏阶段。②主要破坏阶段拉裂缝自坡脚向坡体中部、坡肩及坡顶渐次出现, 且破坏模式受土颗粒尺寸和细颗粒含量的控制, 控制机制为土体剪胀效应的强弱。③坡体厚度越小, 其破坏过程的持续时间越短, 但滑动距离和速率也将越小; 前缘卸荷可加速土坡的破坏, 并使其具有更长的滑动距离和更大的滑动速率。④当饱和土坡加速变形时, 滑动面处会产生超静孔隙水压力, 进而诱发突然滑动。与此同时, 滑动面处的孔隙水压力由于坡体厚度减小和剪胀效应的发生而急剧降低。

关键词: 无黏性土坡; 影响因素; 降雨入渗; 孔隙水压力; 剪胀效应; 水槽模型试验

中图分类号: TU435

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2021)02-0300-09

作者简介: 缪海波(1985—), 男, 博士, 副教授, 主要从事岩土体稳定性及地质灾害方面的教学与研究工作。E-mail: mhblowal@126.com。

Influence factors for failure of cohesionless soil slopes triggered by heavy rainfall

MIAO Hai-bo¹, CHAI Shao-feng², WANG Gong-hui³

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2. Institute of

Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China; 3. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto

University, Uji Kyoto 611-0011, Japan)

Abstract: Using the self-developed flume, the model tests are conducted to trigger heavy rainfall-induced failure of cohesionless soil slopes with Japan silica sand No. 6, No. 7 and No. 8 under the fixed rainfall intensity of 90 mm/h. The failure process is described and the effects of slope thickness and unloading at the leading edge, and the particle size and fine-particle content on the failure process are discussed. Moreover, the response of pore-water pressure in the failure process is also studied. The results show that: (1) Under the sustained heavy rainfall, the failure process of cohesionless soil slopes can be divided into three stages, i.e., rainfall infiltration, initial failure and major failure. (2) At the major failure stage, the tension cracks gradually appear from the toe to the middle, shoulder and top of the slope. The failure mode is controlled by the particle size of soils and fine-particle content with the mechanism of the extent of shear dilation effect. (3) The smaller the slope thickness is, the shorter the duration of failure process is, while the smaller the sliding distance and velocity are. In addition, unloading at the leading edge can accelerate the failure process of the slope, and make it have a longer sliding distance and a larger sliding rate. (4) When the deformation of the saturated slope is accelerated, the excess pore-water pressure is generated at the sliding surface, and then the sudden sliding is induced. At the same time, the pore-water pressure at the sliding surface decreases sharply due to the decrease of slope thickness and the occurrence of shear dilation effect.

Key words: cohesionless soil slope; influence factor; rainfall infiltration; pore-water pressure; shear dilation effect; flume model test

0 引言

2008年的汶川地震引发了超过6万个破坏性的滑坡灾害, 并在震区山体斜坡表面或底部形成了大量的

基金项目: 安徽省自然科学基金项目(1508085QD78); 国家自然科学基金项目(41502335); 中国博士后科学基金项目(2016M592032)
收稿日期: 2020-05-20

薄厚不均的松散堆积体^[1]。在强降雨作用下, 这些堆积体极有可能失稳破坏并形成灾难性的流化滑动或泥石流灾害, 而事实也确实如此^[2-4]。此外, 灾后重建过程中不可避免地会扰动这些松散堆积体 (如开挖卸荷等), 从而破坏了原先堆积状态下的应力平衡, 因而可能触发堆积体的失稳破坏。因此, 开展降雨条件下震后滑坡松散堆积体的破坏过程及其影响因素 (如堆积厚度、颗粒级配、人工扰动等) 的研究对灾后重建中的防灾减灾具有重要意义。

降雨诱发滑坡的模型试验是目前进行滑坡全过程研究的主要方法, 其中最常见有 3 种, 即现场人工降雨原位试验、基于地质力学模型的相似比例试验和室内水槽模型试验^[5]。然而, 现场人工降雨原位试验的投入成本高, 而且可能产生次生灾害, 故开展的较少。基于地质力学模型的相似比例试验一般以沉积岩地区的岩质滑坡或堆积层滑坡为原型, 这是由于此类滑坡具有清晰的边界和确定的滑动面位置^[6-9]。对于土质边坡来说, 相比前两者, 室内水槽模型试验具有成本低, 周期短, 风险低和易于实现等优点。

最近几十年, 国内外学者利用不同尺寸的室内水槽模型开展了大量降雨诱发土坡破坏的研究工作。代表性的有: Wang 等^[10-11]开展了一系列的水槽模型试验, 分析了土颗粒大小和细颗粒含量对降雨入渗过程中土坡破坏模式、孔隙水压力产生以及破坏后的运动过程影响规律; Moriwaki 等^[12]在日本筑波的国家防灾科学技术研究所 (NIED), 利用长 23 m, 高 7.8 m 和宽 3 m 的水槽模型, 采用 1.6 m 厚的松散砂土进行了降雨试验, 揭示坡体不同部位孔隙水压力增长的机制; Sasahara 等^[13-14]在该研究所进行了类似试验, 试验目的侧重于揭示降雨入渗过程中坡体剪应变的增长与体积含水率、基质吸力、孔隙水压力等的相关性, 并利用剪应变和孔隙水压力的关系建立了降雨诱发土质边坡失稳的预报模型; 周健等^[15]利用离心机水槽模型试验研究了无黏性土滑坡型泥石流的形成机理; 左自波等^[16]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; 雷先顺等^[17]研究了无黏性土堆积体在无侧限条件下沿斜面的滑动和堆积运动过程, 探讨了粒径、坡高滑动面摩擦系数等因素对滑坡运动最终堆积参数的影响规律。此外, Hu 等^[18-21]针对强震后的斜坡松散碎石堆积物在降雨和地表径流作用下形成流化滑动这一现象进行了一系列水槽模型试验研究, 揭示了松散碎石堆积物形成流化滑动过程中内部潜蚀和细颗粒含量的作用机制。

由上述文献分析可知, 当前的研究侧重于土体自身性质如颗粒级配、颗粒粒径、细颗粒含量在土坡启

滑及滑坡泥石流的转化的作用机制, 较少涉及土坡厚度、卸荷扰动以及颗粒粒径和细颗粒含量对土坡滑动模式的影响。野外调查结果表明, 震后滑坡松散堆积体为宽级配土体, 包含了碎石粒、砾粒、砂砾、粉粒以及黏粒等粒组, 其中黏粒组占比很小^[22-23], 因而可视为无黏性土。基于此, 本文利用自行研制的室内水槽模型, 选用不同颗粒级配的日本硅砂 (硅砂#6、#7 和#8), 开展固定降雨强度下诱发无黏性土坡破坏的模型试验, 以期得到颗粒尺寸、细颗粒含量、边坡厚度和卸荷扰动等因素对其破坏模式的影响规律, 并分析孔隙水压力在土坡破坏过程中的动态响应特征, 为降雨诱发无黏性土的破坏模式研究、预警预报和防灾减灾提供参考。

1 试验材料

试验材料为 3 种日本硅砂, 即硅砂#6、#7 和#8 (试样编号 S6、S7 和 S8), 其颗粒级配曲线如图 1 所示。

由不均匀系数 C_u 和曲率系数 C_c 的计算值可知, 3 种试样均为级配不良的砂土。试样 S6, S7 和 S8 的细颗粒 (粒径小于 0.075 mm) 含量 $P_{0.075}$ 分别为 1.19%, 3.40%, 13.88%, 平均粒径 d_{50} (通常表示土的粗细程度) 分别为 0.26, 0.18, 0.10 mm, 其余物理性质指标见表 1。

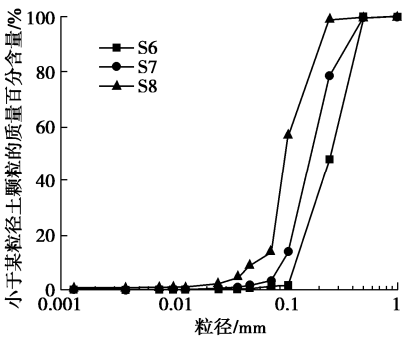


图 1 试样颗粒级配曲线

Fig. 1 Grain-size distribution curves of samples

表 1 试样基本物理性质指标

Table 1 Physical properties of samples

| 试样 | G_s | C_u | C_c | d_{50} /mm | $P_{0.075}$ /% |
|----|-------|-------|-------|-----------------|-------------------|
| S6 | 2.64 | 2.73 | 0.98 | 0.26 | 1.19 |
| S7 | 2.63 | 2.20 | 0.79 | 0.18 | 3.40 |
| S8 | 2.63 | 2.20 | 1.34 | 0.10 | 13.88 |

注: G_s 为土粒相对质量密度; C_u 为不均匀系数; C_c 为曲率系数; d_{50} 为平均粒径; $P_{0.075}$ 为粒径小于 0.075 mm 土的质量百分含量, 即本文中的“细颗粒含量”。

2 模型试验装置及试验程序

2.1 水槽模型试验装置

本文设计的降雨诱发无黏性土坡失稳破坏的水槽模型试验装置如图 2 所示。

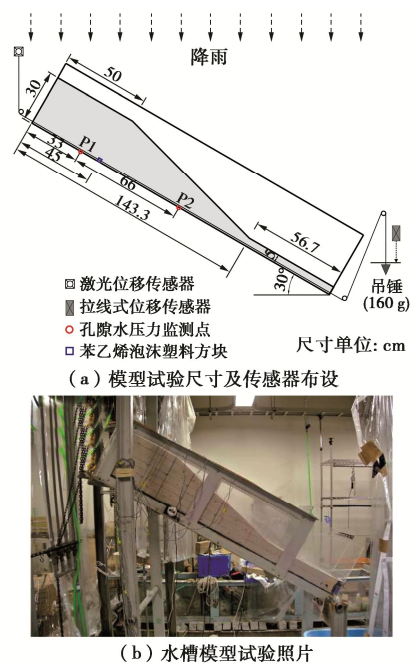


图 2 水槽模型试验装置图

Fig. 2 Arrangement of flume model tests

水槽长度为 200 cm, 宽度为 24 cm, 高度为 40 cm, 抬升角度为 30°。水槽两侧采用透明亚克力板材, 底部采用钢板并在钢板表面铺贴一层薄橡胶垫。为了增加模型槽底部的摩擦性能并防止试样滑动, 在橡胶垫表层胶黏硅砂颗粒。在水槽底板上沿其中心线向下游

方向分别在 33 cm 和 99 cm 处钻出直径 1.5 cm 的内螺纹圆孔 (2 个), 并在圆孔上面安放薄透水石片。在水槽底板下方将孔隙水压力传感器 P1、P2 分别安装在两个圆孔内, 具体位置见图 2 (a)。为了观测土坡滑动距离, 沿模型槽中心线自上游向下 45 cm 处设计一个边长 2.5 cm, 质量为 0.4 g 的苯乙烯泡沫塑料方块, 方块左右两端分别利用硬细线通过定滑轮与拉线式位移传感器和质量为 160 g 的用于平衡传感器上拉线阻力的圆锥吊锤相连。因此, 当土坡失稳滑动时, 方块能随土体一起移动, 并通过拉线式位移传感器测得位移。由于拉线式位移传感器的精度有限 (量程为 100 cm, 精度为 1 mm), 无法获得土坡破坏之前的微小变形, 故在平衡吊锤的上方某固定位置处安装一个激光位移传感器 (量程为 20 mm, 精度为 0.01 mm)。在模型槽上方设置两个喷嘴模拟降雨, 降雨强度通过水管上的调压阀进行控制。模型试验过程由摄像机全程录制。

2.2 试验方案与试验程序

为研究降雨入渗下无黏性土坡破坏过程中的孔隙水压力响应特征, 本文首先利用试样 S8 开展了模型试验 T1, 其次为研究试样的颗粒尺寸、细颗粒含量、土坡厚度和前缘卸荷对无黏性土坡破坏过程的影响规律, 利用试样 S8, S7 和 S6 先后进行了 4 次试验 (T2, T3, T4, T5), 具体方案见表 2。

表 2 水槽模型试验方案

Table 2 Schemes of flume model tests

| 试验 编号 | 试样 | w_0 /% | ρ_d /(g·cm ⁻³) | e | k_{sat} /(10 ⁻³ m·s ⁻¹) | 土坡形态与尺寸 | 土坡边界 | 降雨强度 /(mm·h ⁻¹) | 观测 项目 |
|----------|----|-------------|------------------------------------|------|---|---------|-------------------|--------------------------------|-----------|
| T1 | S8 | 10.59 | 1.09 | 1.37 | 0.23 | | 前缘卸荷 (前缘挡板开孔模拟卸荷) | 90 | 坡底孔压及滑动距离 |
| T2 | S8 | 10.38 | 1.11 | 1.33 | 0.21 | | 前缘卸荷 (前缘挡板开孔模拟卸荷) | 90 | *滑动距离 |
| T3 | S8 | 11.41 | 1.10 | 1.35 | 0.22 | | 前缘卸荷 (前缘挡板开孔模拟卸荷) | 90 | |
| T4 | S7 | 8.72 | 1.15 | 1.29 | 0.20 | | 前缘不卸荷 (前缘挡板不开孔) | 90 | |
| T5 | S6 | 9.23 | 1.12 | 1.30 | 0.20 | | 前缘不卸荷 (前缘挡板不开孔) | 90 | |

注: 土坡尺寸单位为 cm; w_0 为试样的初始含水率; ρ_d 为试样的干密度; e 为试样的孔隙比; k_{sat} 为试样的饱和渗透系数; *由于孔压计损坏, 仅观测滑动距离。

以试验 T1 为例, 试验程序为:

(1) 设定降雨强度。根据国家气象局颁布的降雨强度等级划分标准^[24], 试验的降雨强度设定为特大暴雨工况 ($\geq 250.0 \text{ mm}/24 \text{ h}$ 或 $\geq 140 \text{ mm}/12 \text{ h}$)。试样填筑之前反复调整水管上的调压阀, 直到获得稳定的降雨强度, 所有试验的降雨强度均设定为 90 mm/h 。

(2) 布置传感器。首先用脱气水饱和模型槽底部两个圆孔上的透水石, 然后安装孔隙水压力传感器 (P1, P2)。由于试样填筑是在模型槽平置的情况下完成, 因此在填筑第一层砂土之前, 将模型槽抬升至 30° 的位置, 固定苯乙烯泡沫塑料方块, 然后调整连接平衡吊锤的硬细线长度, 使得试验过程中激光位移传感器处于工作距离范围内, 然后将模型槽下放至水平位置。

(3) 试样准备与填筑。以 10% 的初始含水率配置试样, 然后分层填筑到模型槽内。为了得到密度均匀的土坡, 分层填筑时, 利用质量为 1.5 kg 的平整木块 ($20 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$) 由 20 cm 左右的高度自由下落夯实, 每次填筑高度 5 cm 。并在不同深度处取环刀样测其干密度并计算孔隙比。

(4) 试验过程。前述工作完成后, 将模型槽抬升至 30° , 静置 12 h 后打开数据采集仪获得各传感器的初始数据 (记录 30 min), 然后开始试验, 并同时打开摄像机全程摄录。

试验 T2, T3, T4, T5 除没有安装两个孔隙水压力传感器外, 其余试验程序与试验 T1 完全一致。

3 土坡破坏过程及影响因素分析与讨论

3.1 土坡破坏过程

表 3 整理了试验 T1, T2, T3, T4, T5 不同时刻的土坡剖面形态。分析表 3, 无黏性土坡的破坏过程具体可分为 3 个阶段:

(1) 入渗阶段。随着降雨的持续, 湿润锋逐渐下移, 土坡逐渐饱和。在此阶段, 试验 T1 中的湿润锋移动速度最快, 试验 T2, T3, T4 中的湿润锋移动速度基本相同, 但均小于试验 T1。这主要是由于试验 T1 中的土坡整体厚度小了 5 cm , 且 T2, T3, T4 试验中坡体渗透系数接近 (见表 2)。

(2) 初始破坏阶段。在湿润锋到达模型槽底部后, 最先饱和的坡脚部位发生浅层流滑并出现拉裂缝。在这一阶段, 试验 T1 中的坡脚由于厚度较薄流滑速度最快, 而试验 T4 和 T5 最慢。这里需要指出的是, 在试验 T3 中, 坡顶出现的拉裂缝可能是由于在该区域取环刀样测干密度后回填不密实所致。

(3) 主要破坏阶段。随着坡脚处的土体持续流滑,

拉裂缝自坡脚向坡体中前部、坡肩及坡顶渐次出现。在试验 T1, T2, T3 中, 土坡沿拉裂缝向模型槽底部呈近似圆弧剪切滑动, 表现“拉裂→滑动→冲刷流滑”破坏特征; 试验 T4 和 T5 中, 拉裂缝深度较浅, 表现出“拉裂→坍塌→冲刷流滑”破坏特征。此外, 在主要破坏阶段, 各试验的持续时间明显不同。试验 T1 的持续时间最短, 而试验 T5 的持续时间最长, 试验 T2, T3 和 T4 的持续时间依次增大。

由于滑动距离是评估滑坡灾害影响范围的关键指标, 因此本文进行的各水槽试验均利用随坡体一起运动的苯乙烯泡沫塑料方块获得土坡在主要破坏阶段的滑动距离。图 3 为苯乙烯泡沫塑料方块在土坡主要破坏阶段内的滑动距离和速率随时间变化曲线。其中, 图 3 (a) 为滑动距离曲线, 由拉线式位移传感器记录获得; 图 3 (b) 为计算出的滑动速率曲线。由图 3 可知, 试验 T4 和 T5 中, 伴随土体移动的小方块在土坡主要破坏阶段内几乎没有移动; 而明显不同的是, 试验 T1、T2 和 T3 中拉线式位移传感器均记录到明显的位移。试验 T1、T2 和 T3 中主要破坏阶段的累积滑动距离分别为 $19, 64, 51 \text{ cm}$, 最大滑动速率分别为 $12.0, 16.2, 11.3 \text{ cm/s}$ 。

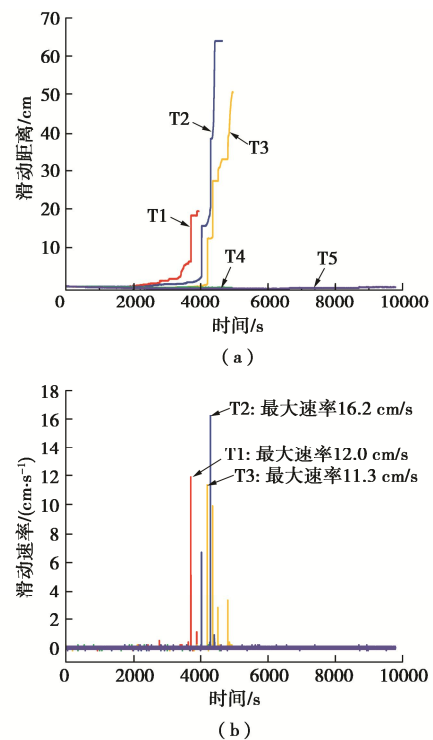


图 3 土坡主要破坏阶段的滑动距离与速率

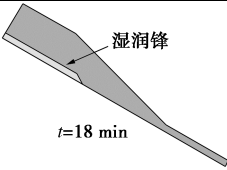
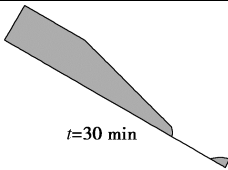
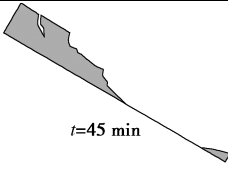
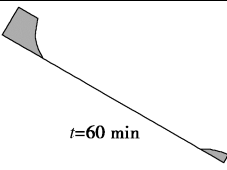
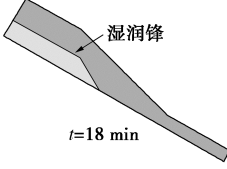
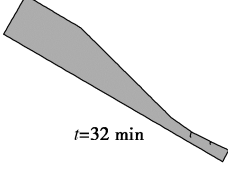
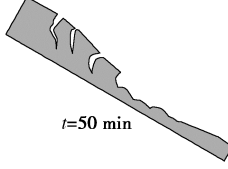
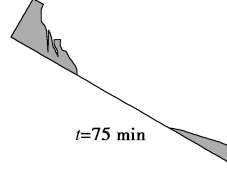
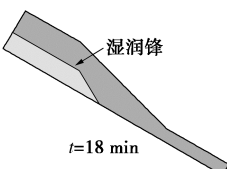
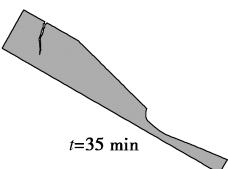
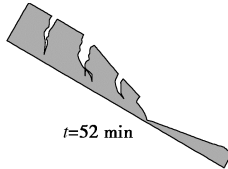
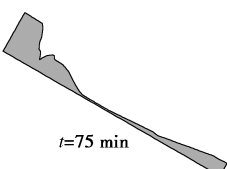
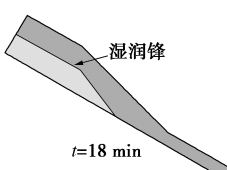
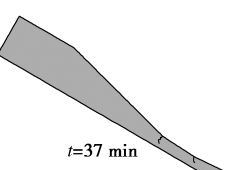
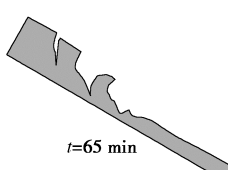
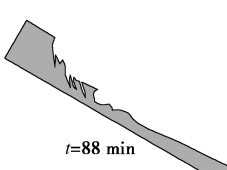
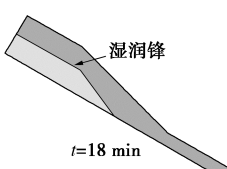
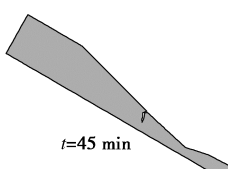
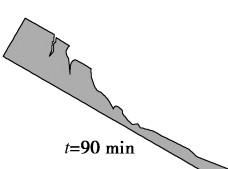
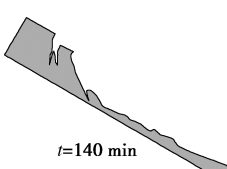
Fig. 3 Sliding distances and velocities of slope at stage of major failure

3.2 土坡破坏过程的影响因素及机理分析

根据表 2, 3 和图 3, 无黏性土坡的破坏过程与破坏模式、滑动距离及速率均与土体的自身性质、坡体厚度和边界条件等密切相关。详细分析如下:

表 3 土坡破坏过程中的剖面形态一览表

Table 3 Summary of characteristics of slope section during failure process of soil slopes

| 试验编号 | 试样 | 入渗阶段 | 初始破坏阶段 | 主要破坏阶段及破坏模式 | |
|------|----|--|--|---|---|
| T1 | S8 |  $t=18\text{ min}$ |  $t=30\text{ min}$ |  $t=45\text{ min}$ |  $t=60\text{ min}$ |
| T2 | S8 |  $t=18\text{ min}$ |  $t=32\text{ min}$ |  $t=50\text{ min}$ |  $t=75\text{ min}$ |
| T3 | S8 |  $t=18\text{ min}$ |  $t=35\text{ min}$ |  $t=52\text{ min}$ |  $t=75\text{ min}$ |
| T4 | S7 |  $t=18\text{ min}$ |  $t=37\text{ min}$ |  $t=65\text{ min}$ |  $t=88\text{ min}$ |
| T5 | S6 |  $t=18\text{ min}$ |  $t=45\text{ min}$ |  $t=90\text{ min}$ |  $t=140\text{ min}$ |

拉裂→
滑动→
冲刷流滑

拉裂→
坍塌→
冲刷流滑

(1) 试验 T1 和 T2 中，试验材料和边界条件完全相同，仅坡体厚度不同。由于试验 T1 中土坡整体厚度的减小，其主要破坏阶段的持续时间要小于试验 T2，且滑动距离和最大滑动速率也都明显小于试验 T2。这一试验结果表明，强降雨条件下，土坡厚度越小时破坏过程的持续时间越短，越易形成整体滑动，但滑动距离和速率也相对越小。究其原因，由于土层越薄，雨水入渗时间越短，滑动面处孔隙水压力上升速度越快，在短时间内坡体达到饱和，加之薄土层的储水能力有限，故能快速发生滑动破坏，并随后在持续降雨作用下形成快速流滑（Ho 等^[25]）。

(2) 试验 T2 和 T3 中，土坡整体厚度和试验材料均相同，但边界条件不同。试验 T2 中土坡前缘卸荷（挡板开孔允许渗漏），从而导致了主要破坏阶段的持续时间短于试验 T3，而滑动距离和最大滑动速率大于试验 T3。该试验结果表明，强降雨条件下，前缘卸荷能加速土坡主要破坏阶段的进程，并使得土坡具有更长的滑动距离和更大的滑动速率。

(3) 试验 T3，T4，T5 中，土坡的整体厚度、边界条件均相同，仅试验材料不同。各试验中土体材料的孔隙比和渗透系数均比较接近，但颗粒尺寸和细颗粒含量有显著区别（见表 1）。试验 T3 中土坡表现出来的破坏模式为“拉裂→滑动→冲刷流滑”，而试验 T4 和 T5 的破坏模式为“拉裂→坍塌→冲刷流滑”。两种破坏模式的区别在于 T3 试验中主要破坏阶段土坡沿模型槽底部发生多级后退式滑动，而试验 T4 和 T5 则无此现象。由于试验 T3 采用的试样 S8 的平均粒径最小且细颗粒含量最大，因此可推断在强降雨下，土的颗粒尺寸和细颗粒含量对土坡在主要破坏阶段能否发生滑动具有关键影响。文献[10，11]进行的均质硅砂水槽模型试验发现，试样细颗粒的含量对滑坡体的运动行为影响明显，表现为细颗粒含量更高的滑坡体具有更高的运动速率，更易形成“浮动（float）”。文献[18~21]对取自汶川地震形成的松散堆积碎石土进行的水槽模型试验研究表明，由渗透作用导致的细颗粒的部分流失（即内部侵蚀）是滑坡启动并转化为

流化滑动的根本控制因素。文献[22, 23]也认为降雨入渗下细颗粒在坡体前缘的堆积形成了软弱层并引发了土坡的破坏。因此, 上述研究结论佐证了本文的推断。

为揭示颗粒尺寸和细颗粒含量对均质土坡破坏模式的影响机制, 本文分别对3种硅砂试样(S6、S7和S8)开展了饱和状态下的固结不排水环剪试验。试验仪器利用日本京都大学防灾研究所的DPRI-6型环剪仪^[26]。该环剪仪的剪切盒内径为25 cm, 外径为35 cm, 剪切面积为471.24 cm², 装样最大高度为15 cm。试验前首先将烘干试样装入剪切盒内(装样高度均为15 cm), 根据装样质量计算试样S6、S7和S8的干密度分别为1.22, 1.18, 1.11 g/cm³。试样装填完毕后通CO₂气体1 h, 置换试样孔隙中的空气, 之后用脱气水饱和和试样, 并按文献[26]的方法测定试样的饱和程度。文献[26]提出用饱和度系数 B_D 评价试样的饱和程度, 即 $B_D \geq 0.95$ 时可认为试样已饱和。经测定3种试样的测定的饱和度系数 B_D 均大于0.95, 表明试样为饱和状态。随后在法向应力200 kPa下利用应变控制模式完成了各个饱和试样的固结不排水环剪试验, 测得剪切面附近的孔隙水压力与应力路径如图4所示。

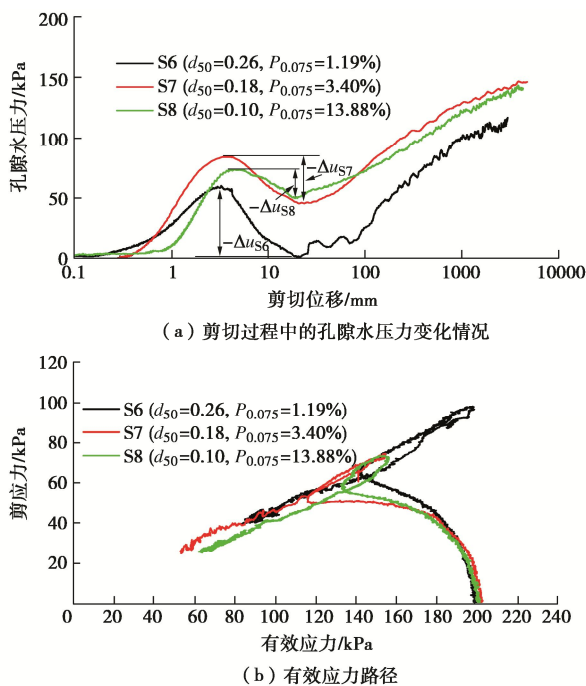


图4 饱和试样S6、S7和S8的固结不排水环剪试验

Fig. 4 Consolidated undrained ring-shear tests on saturated sample S6, S7 and S8

由图4可知, 在同一法向应力(200 kPa)条件下, 饱和试样S6、S7和S8在经历3~4 mm的剪切位移后, 产生的超静孔隙水压力逐渐减小, 并在继续剪切11~12 mm后超静孔隙水压力逐渐增加, 说明3个饱和试样均表现出剪胀效应, 即剪切过程中由于土颗粒空间

位置的调整导致孔隙体积增大而引起超静孔隙水压力的降低。值得注意的是, 饱和试样S6、S7和S8由于剪胀效应引起的超静孔隙水压力减小量($-\Delta u$)具有明显的差异, 具体为 $-\Delta u_{S6} > -\Delta u_{S7} > -\Delta u_{S8}$, 表明随着颗粒尺寸减小和细颗粒含量的增大, 土体的剪胀效应在减弱。由此可推断, 在强降雨条件下, 土质边坡物质组成中颗粒尺寸越小且细颗粒含量越高, 那么在剪切破坏过程中由于剪胀效应导致产生的超静孔隙水压力降低幅度越小。根据Mohr-Coulomb强度准则, 超孔压的存在使得土体抗剪强度下降并导致土坡滑动破坏。需要指出的是, 尽管本文环剪试验的法向应力远大于水槽模型试验中砂土的自重应力, 但是表现出来的剪切行为却说明土颗粒尺寸和细颗粒含量在土坡破坏模式中具有关键影响。

4 土坡破坏过程中孔隙水压力动态响应特征

试验T1在模型槽底部布置了两个孔隙水压力观测点, 具体位置见图2(a)。图5为观测点P2处孔隙水压力随时间的变化曲线。由图5可知, 随着降雨入渗的开始, 湿润锋逐渐下移, 一段时间后观测点P2处孔隙水压力开始上升, 直至峰值; 峰值之后, 孔隙水压力开始下降, 并在经历两次突降后呈现无规律变化特征。为更清晰地展现观测点P2处孔隙水压力的突降与其上覆土体破坏的对应关系, 根据试验录像绘制了对应于图5中指定时间节点 T_A 、 T_B 和 T_C 的土坡剖面形态, 如图6所示。由图6可知, 当P2处孔隙水压力处于峰值时, 其上覆土体厚度无明显变化; 第一次发生突降后, 其上覆土体部分破坏; 第二次发生突降后, 其上覆土体为破坏后的薄层堆积体。

观测点P1处的孔隙水压力的动态响应特征如图7所示, 其中图7(a)为孔隙水压力、剪切变形(由激光位移传感器获得)和滑动距离(由拉线式位移传感器获得)随时间的变化曲线。由图7(a)可知, 观测点P1处的孔隙水压力在湿润锋达到模型槽底部后开始逐渐上升, 并在一段时间趋于稳定, 表明观测点P1上覆土体中已形成稳定的水位。分析图7(a)中的剪切位移和滑动距离曲线可知, 在P1处孔隙水压力上升至稳定时, 其上覆土体开始沿模型槽底部发生剪切变形, 且当累积剪切位移约达6.5 cm后, 孔隙水压力突然下降, 同时滑动距离曲线陡然上升, 表明观测点P1上覆土体发生滑动破坏。值得注意的是, 在P1上覆土体的剪切变形阶段, 孔隙水压力先处于较长时间的稳定状态, 但随着剪切变形的快速增加(图中红色阴影区域所示), 孔隙水压力再次上升(增加值

$\Delta u \approx 1.3$ kPa)。这一现象表明,饱和土坡在加速剪切变形时会产生超静孔隙水压力,并导致了随后的滑动破坏。

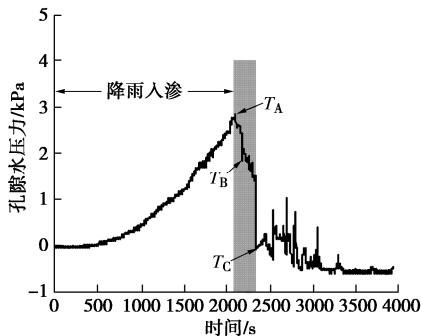


图5 试验 T1 中观测点 P2 处孔隙水压力随时间变化曲线

Fig. 5 Time series of pore-water pressure of monitoring point P2 in test T1

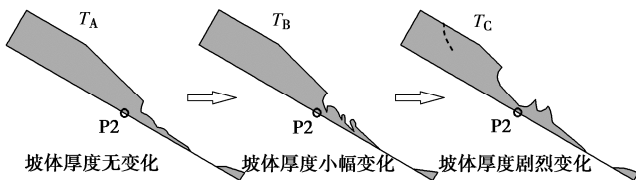
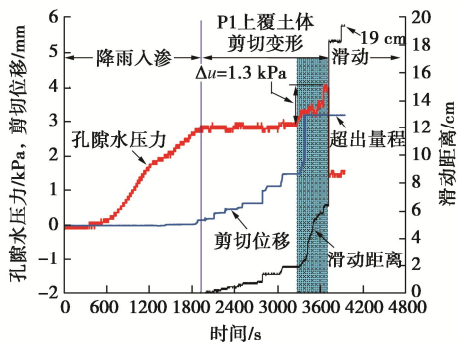
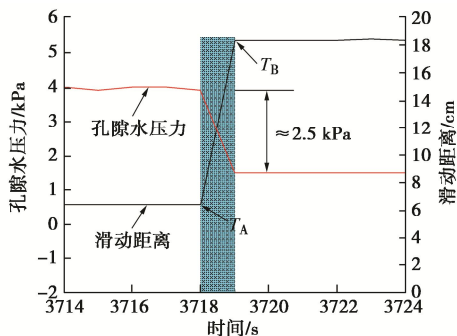


图6 试验 T1 中对应观测点 P2 处孔隙水压力曲线上不同时刻的土坡剖面形态

Fig. 6 Slope sections corresponding to specified time on curve of pore-water pressure of monitoring point P2 in test T1



(a) 孔隙水压力、剪切位移和滑动距离随时间变化曲线



(b) 孔隙水压力和滑动距离随时间变化曲线 ($t=3714 \sim 3724$ s)

图7 试验 T1 中观测点 P1 处孔隙水压力、剪切位移和滑动距离随时间变化曲线

Fig. 7 Time series of pore-water pressure of monitoring point P1, shear displacements and sliding distances in test T1

图7(b)为P1处孔隙水压力突降这一极短时间内的放大图。由图可知,在3718~3719 s这极短的1 s时间内,滑动距离由6.5 cm陡增至18.5 cm,孔隙水压力陡降了约2.5 kPa(图中红色阴影区域所示)。同样地,为更清晰地展现观测点P1处孔隙水压力的突降与其上覆土体破坏的对应关系,根据试验录像绘制了对应于图7(b)中指定时间节点 T_A 和 T_B 的土坡剖面形态,如图8所示。由图8可知,观测点P1上覆土体滑动破坏后的坡面厚度下降了约10 cm。根据孔隙水压力计算表达式 $u = \gamma_w \cdot h$ 可知,10 cm的坡面厚度减小值不足以产生2.5 kPa的孔隙水压力降低值。究其原因,根据图4(a),由于饱和试样S8在剪切滑动过程具有一定的剪胀效应,从而导致观测点P1处孔隙水压力的降低。

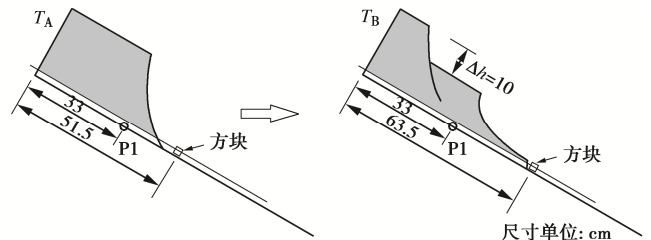


图8 试验 T1 中对应观测点 P1 处孔隙水压力曲线上不同时刻的土坡剖面形态

Fig. 8 Slope sections corresponding to specified time on curve of pore-water pressure of monitoring point P1 in test T1

5 结 论

本文针对3种日本硅砂试样开展了固定降雨强度下诱发无黏性土坡破坏的水槽模型试验研究,基于试验结果探讨了强降雨条件下无黏性土坡破坏的影响因素,得到以下4点结论。

(1) 强降雨条件下,无黏性土坡的破坏过程可分为3个阶段,即入渗、初始破坏和主要破坏。其中初始破坏发生在坡脚处,表现为浅层流滑和拉裂缝的出现;在主要破坏阶段拉裂缝自坡脚向坡体中前部、坡肩及坡顶渐次出现,其破坏模式受土体材料自身性质控制。

(2) 颗粒尺寸大且细颗粒含量低的无黏性土坡,由于较明显的剪胀效应,使其主要破坏阶段表现出“拉裂→坍塌→冲刷流滑”的破坏模式,无明显滑动距离。颗粒尺寸小且细颗粒含量大的均质土坡,由于剪胀效应的减弱,其主要破坏阶段表现出“拉裂→滑动→冲刷流滑”的破坏模式。

(3) 土坡厚度越小,其破坏过程的持续时间越短,越易形成整体滑动,但滑动距离和速率也相对越小。前缘卸荷能加速土坡破坏的进程,并使其具有更长的

滑动距离和更大的滑动速率。

(4)饱和和无黏性土坡在加速剪切变形时滑动面处产生超静孔隙水压力,并导致抗剪强度的降低而发生突然滑动。与此同时,由于坡体厚度减小和滑动时剪胀效应的发生而使滑动面处的孔隙水压力急剧降低。

需要说明的是,由于试验水槽尺寸较小,为了保证试验的可操作性,采用的砂土试样没有考虑震后滑坡堆积体材料相似性的问题。此外,本文仅开展了特大暴雨工况下的土坡破坏试验。关于土体相似材料问题和不同降雨强度下的模型试验将在后续研究中进一步探讨,但本文中的试验现象和孔隙水压力响应特征对强降雨条件下震后滑坡堆积体失稳破坏的预测预报和防灾减灾仍有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] HUANG R, FAN X. The landslide story[J]. *Nature Geoscience*, 2013, **6**(5): 325 - 326.
- [2] XU Q, ZHANG S, LI W, et al. The 13 August 2010 catastrophic debris flows after the 2008 Wenchuan earthquake, China[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2012, **18**: 596 - 608.
- [3] TANG C, ASCH T W J V, CHANG M, et al. Catastrophic debris flows on 13 August 2010 in the Qingping area, southwestern China: the combined effects of a strong earthquake and subsequent rainstorms[J]. *Geomorphology*, 2012(139/140): 559 - 576.
- [4] ZHANG S, ZHANG L M, CHEN H X. Relationships among three repeated large-scale debris flows at Pubugou Ravine in the Wenchuan earthquake zone[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2014, **51**(9): 951 - 965.
- [5] 常晓军, 王德伟, 唐业旗. 中国滑坡降雨试验的研究现状与发展趋势[J]. *沉积与特提斯地质*, 2010, **30**(1): 98 - 102. (CHANG Xiao-jun, WANG De-wei, TANG Ye-qi. Simulation experiments of rainfall-induced landslides in China: insights and foresights[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2010, **30**(1): 98 - 102. (in Chinese))
- [6] 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))
- [7] 肖诗荣, 刘德富, 姜福兴, 等. 三峡库区千将坪滑坡地质力学模型试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, **29**(5): 1023 - 1030. (XIAO Shi-rong, LIU De-fu, JIANG Fu-xing, et al. Geomechanical model experiment on Qianjiangping landslide in Three Gorges Reservoir area[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, **29**(5): 1023 - 1030. (in Chinese))
- [8] 王维早, 许强, 郑光, 等. 强降雨诱发缓倾堆积层边坡失稳离心模型试验研究[J]. *岩土力学*, 2016, **37**(1): 87 - 95. (WANG Wei-zao, XU Qiang, ZHENG Guang, et al. Centrifugal model tests on sliding failure of gentle debris slope under rainfall[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, **37**(1): 87 - 95. (in Chinese))
- [9] 杨旭, 周翠英, 刘镇, 等. 华南典型巨厚层红层软岩边坡降雨失稳的模型试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, **35**(3): 549 - 557. (YANG Xu, ZHOU Cui-ying, LIU Zhen, et al. Model tests for failure mechanism of typical soft rock slopes of red beds under rainfall in South China[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, **35**(3): 549 - 557. (in Chinese))
- [10] WANG G, SASSA K. Factors affecting rainfall-induced flowslides in laboratory flume tests[J]. *Géotechnique*, 2001, **51**(7): 587 - 599.
- [11] 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**(1): 109 - 125.
- [12] MORIWAKI H, INOKUCHI T, HATTANJI T, et al. Failure processes in a full-scale landslide experiment using a rainfall simulator[J]. *Landslides*, 2004, **1**(4): 277 - 288.
- [13] SASAHARA K, SAKAI N. Development of shear deformation due to the increase of pore pressure in a sandy model slope during rainfall [J]. *Engineering Geology*, 2014, **170**(4): 43 - 51.
- [14] SASAHARA K. Prediction of the shear deformation of a sandy model slope generated by rainfall based on the monitoring of the shear strain and the pore pressure in the slope[J]. *Engineering Geology*, 2017, **224**: 75 - 86.
- [15] 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))
- [16] 左自波, 张璐璐, 王建华. 降雨触发不同级配堆积体滑坡

模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(7): 1319 - 1327.
(ZUO Zi-bo, ZHANG Lu-lu, WANG Jian-hua. Model tests on rainfall-induced colluvium landslides: Effects of particle-size distribution[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(7): 1319 - 1327. (in Chinese))

[17] 雷先顺, 谢 沃, 卢坤林, 等. 无黏性土滑动和堆积特性的模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(2): 226 - 236.
(LEI Xian-shun, XIE Wo, LU Kun-lin, et al. Model tests of sliding and accumulation characteristics of cohesionless soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(2): 226 - 236. (in Chinese))

[18] HU W, XU Q, ASCH T W J V, et al. Flume tests to study the initiation of huge debris flows after the Wenchuan earthquake in S-W China[J]. Engineering Geology, 2014, **182**: 121 - 129.

[19] HU W, SCARINGI G, XU Q, et al. Sensitivity of the initiation and runout of flowslides in loose granular deposits to the content of small particles: an insight from flume tests[J]. Engineering Geology, 2017, **231**: 34 - 44.

[20] HU W, SCARINGI G, XU Q, et al. Internal erosion controls failure and runout of loose granular deposits: evidence from flume tests and implications for postseismic slope healing[J]. Geophysical Research Letters, 2018a, **45**(11): 5518 - 5527.

[21] HU W, HICHER P Y, SCARINGI G, et al. Seismic precursor to instability induced by internal erosion in loose granular slopes[J]. Géotechnique, 2018b, **68**(11): 989 - 1001.

[22] CUI Y, ZHOU X, GUO C. Experimental study on the moving characteristics of fine grains in wide grading unconsolidated soil under heavy rainfall[J]. Journal of Mountain Science, 2017, **14**(3): 417 - 431.

[23] CUI Y, JIANG Y, GUO C. Investigation of the initiation of shallow failure in widely graded loose soil slopes considering interstitial flow and surface runoff[J]. Landslides, 2019, **16**: 815 - 828.

[24] GB/T 28592—2012 降水量等级[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012. (GB/T 28592—2012 Precipitation Level[S]. Beijing: Standards Press of China, 2012. (in Chinese))

[25] HO J Y, LEE K T, CHANG T C, et al. Influences of spatial distribution of soil thickness on shallow landslide prediction [J]. Engineering Geology, 2012, **124**: 38 - 46.

[26] SASSA K, FUKUOKA H, WANG G, et al. Undrained dynamic-loading ring-shear apparatus and its application to landslide dynamics[J]. Landslides, 2004, **1**(1): 7 - 19.

彩色插图索引

| | |
|--|--------|
| Doi: 10.11779/CJGE202102001 一文彩色插图 | (后插 1) |
| Doi: 10.11779/CJGE202102004 一文彩色插图 | 后插 2) |
| Doi: 10.11779/CJGE202102005 一文彩色插图 | (后插 2) |
| Doi: 10.11779/CJGE202102011 一文彩色插图 | 后插 3) |
| Doi: 10.11779/CJGE202102012 一文彩色插图 | (后插 4) |
| Doi: 10.11779/CJGE202102014 一文彩色插图 | (后插 4) |
| Doi: 10.11779/CJGE202102015 一文彩色插图 | (封 3) |