

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.0024

# 降雨诱发填方路堤边坡变形机制物理模拟研究

赵建军<sup>1</sup>, 余建乐<sup>1</sup>, 解明礼<sup>1</sup>, 柴贺军<sup>2</sup>, 李 涛<sup>1</sup>, 步 凡<sup>1</sup>, 蔺 冰<sup>1</sup>

(1. 成都理工大学 地质灾害与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059;

2. 招商局重庆交通科研设计院有限公司, 重庆 400067)

**摘 要:** 填方路堤变形失稳是西部山区工程建设的常见问题。重庆某高速公路边坡为典型的堆载条件下降雨诱发型滑坡, 填方堆载后, 填方边坡在连续降雨条件下, 沿基岩之上的软弱面产生滑动破坏。定性分析认为, 降雨在滑坡形成中起着关键作用, 为了研究填方边坡在降雨条件下的变形破坏机制及孔隙水压力与变形之间的关系, 采用物理模拟方法研究边坡变形失稳的全过程, 分析孔隙水压力随降雨时间的变化规律及其与变形破坏的关系。研究表明: 边坡后缘大方量堆载, 改变了其应力条件, 是滑坡产生的主要因素。场地施工改变了原有的地表水环境, 连续强降雨致使大量下渗的雨水, 不仅显著改变坡体应力条件, 而且雨水沿着滑面运移软化滑带, 是滑坡产生的重要诱发因素。孔隙水压力在坡体失稳过程中起着关键作用, 填方体土碎屑、泥质含量大, 下渗的雨水携带上部细小颗粒及滑带泥质成分至滑带附近, 堵塞地下水消散通道, 表现为坡体变形积累, 孔隙水压力增加; 边坡变形陡增, 孔隙水压力降低。该滑坡破坏分为降雨下渗、滑带饱水软化、后缘产生裂缝、裂缝贯通-整体滑动 4 个阶段, 为蠕滑-拉裂式滑坡。

**关 键 词:** 填方路堤; 滑坡; 孔隙水压力; 变形; 物理模拟

中图分类号: TU 471

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2018)08-2933-08

## Physical model studies on fill embankment slope deformation mechanism under rainfall condition

ZHAO Jian-jun<sup>1</sup>, YU Jian-le<sup>1</sup>, XIE Ming-li<sup>1</sup>, CHAI He-jun<sup>2</sup>, LI Tao<sup>1</sup>, BU Fan<sup>1</sup>, LIN Bing<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Geo-hazard Prevention and Geo-environment Protection,

Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China;

2. Chongqing Communications Research & Design Institute Co., Ltd., China Merchants, Chongqing 400067, China)

**Abstract:** Deformation of filled embankment and its stability are common engineering problems of the western mountains area construction. A typical slope of one expressway in Chongqing slides along the weak stratum on the bedrock after stacking fill, under the condition of continuous heavy rain. To study the failure mechanism of the landslide, physical simulation is adopted to study the rainfall influence on slope deformation. We also analyze pore water pressure change with the rainfall time and its relationship with the deformation and failure. The results show that the landslide deformation and failure is due to large amount of stack at trailing edge, changing the slope stress condition greatly. Secondly, the construction changes the original hydrological environment, and continuous heavy rains cause a lot of rain infiltration into the slope. Pore water pressure in the process of the landslide plays a key role. Embankment has a mass of debris and argillaceous, which can be carried to the slide zone with rainwater. And argillaceous of slide is the same. These substances can block the dissipate of groundwater. This phenomenon is the accumulation of slope deformation and pore water pressure. Deformation suddenly increase and pore water pressure decrease. The landslide can divide four phases: rainfall infiltration, slide with full water softening, trailing edge cracks, crack through whole sliding. The final landslide deformation failure mode is creeping-cracking.

**Keywords:** fill embankment; landslide; pore water pressure; deformation; physical model test

收稿日期: 2017-01-07

基金项目: 国家科技支撑计划 (No. 2015BAK09B01); 国家创新研究群体科学基金 (No. 41521002); 国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目 (No. 2013CB733202)。

This work was supported by the National Key Technology R&D Program(2015BAK09B01), the Funds for Creative Research Groups of China(41521002) and the National Program on Key Basic Research Project of China (973 Program) (2013CB733202).

第一作者简介: 赵建军, 男, 1980 年生, 博士, 教授, 主要从事工程地质方面的教学科研工作。E-mail: zhaojianjun07@cdut.cn

## 1 引言

近几年随着西部山区大量高速公路的修建,挖方与填方引起的地质灾害频发。挖方导致斜坡向临空方向变形,填方堆载使得路堤边坡后缘自重增加,边坡应力条件改变;另一方面挖方与填方往往显著改变场区的水文环境,加之气象等突发情况难以预测,施工欠规范等,这些因素综合作用极易引起填方路堤边坡变形破坏。填方路堤失稳往往产生滑坡,其不但显著增加工程造价,并且对周围群众的生命财产造成极大威胁。据实际工程案例来看,填方边坡失稳较多是受降雨、地下水影响,因此,对填方路堤边坡降雨条件下孔隙水压力与变形之间的关系进行研究具有重要意义<sup>[1-6]</sup>。

地质物理模拟试验主要用于对斜坡岩体变形过程的研究,国内外均有较多的研究成果,解决了诸多实际工程问题<sup>[7-9]</sup>。在我国,地质物理模拟试验发展虽历经近半个世纪,但近几年才应用于公路边坡方面的研究,且应用于填方路堤边坡变形破坏机制的研究则极少,对边坡孔隙水压力与变形之间的耦合关系研究亦是如此。冯文凯等<sup>[10]</sup>采用底摩擦试验研究斜坡填筑路堤变形破坏机制,对填筑路堤破坏规律进行系统性分析,并指出坡脚是最易破坏的薄弱环节;赵炼恒等<sup>[11]</sup>通过室内大型模型试验分析了斜坡地基上填方路堤承受极限承载力作用下的变形和破坏物理力学行为,对模型破坏面及位置进行了较为准确地预测。物理模拟试验用于填方路堤的研究较少,其主要难点在于坡积体、填方体等广泛存在的块碎石土相似材料的配比缺乏可靠的研究成果,粒径效应研究尚且不足,其目前处于既缺乏广泛使用的可靠理论,又缺少大量的试验数据阶段,本文在这方面做了一些探索,供有兴趣的研究者参考。

重庆某高速公路填方路堤边坡变形破坏为典型的挖方与填方在降雨的不利条件下引起的边坡失稳。为了探究其变形破坏机制,分析孔隙水压力与坡体变形之间的关系及滑坡形成模式<sup>[12]</sup>,本文采用物理模拟的方法对其进行研究,为该类边坡变形破坏机制研究和填方路堤尤其是块碎石土材料物理模拟试验研究提供借鉴,另一方面为该地区相似工程建设提供参考。

## 2 滑坡地质概况

研究区位于重庆西南部,地形陡峻,边坡倾向 $190^\circ$ ,北高南低,高差近300 m,后部及前缘较陡,

中部较缓形成缓倾坡外的平台,地表坡度 $15^\circ \sim 60^\circ$ ,基覆界面坡度 $0^\circ \sim 38^\circ$ 。边坡岩性较单一,最上层为人工块碎石填土( $Q_4^{ml}$ ),中间为第四系崩坡积层( $Q_4^{col+del}$ ),最下部基岩为志留系下统龙马溪组( $S_1l$ )页岩,产状 $252^\circ \angle 4^\circ$ ,其上发育一层厚约2 m的灰黑色强风化泥状页岩(见图1)。

该地区构造行迹主要为北东南西向,路堤边坡区内无断层通过。边坡中部即滑坡前缘可见渗水点,两侧发育冲沟,于坡前缘交汇。

高速公路路堤填方至路基平面后,在连续强降雨下边坡失稳形成滑坡。据调查,该滑坡最终形成两个差异显著的滑坡区:滑坡I区和滑坡II区,且I区为主滑区,其对研究该滑坡成因机制更具代表性,因此,本文选择滑坡I区为研究对象。



图1 强风化泥状页岩

Fig.1 Strong weathering of muddy shale

I区主滑方向 $170^\circ$ ,纵向长约150 m,前缘横向宽约65 m,相对高差约50 m;坡体前缘产生垮塌堆积,后缘下错达0.7 m,滑坡体中后部表面裂缝发育,裂缝走向与主滑方向近垂直或大角度相交;坡体中部挡土墙开裂,为不均匀沉降产生的拉裂缝,裂缝最宽达9 cm;I区前缘剪出口强风化泥岩与崩坡积体界面处发现多处渗水。II区主滑方向 $255^\circ$ 左右,长约90 m,前缘宽约35 m。

研究区工程地质平面图见图2,I-I'工程地质剖面如图3所示。

## 3 模型试验方案

### 3.1 模拟范围及模型概化

为了研究该填方路堤的变形破坏机制,本文选择与边坡倾向近一致的I-I'工程地质剖面建立地质模型。在野外调查和室内资料分析的基础上,定性分析认为,影响该滑坡的主要内在因素为地层岩性,地形地貌次之;外在因素则主要为填方堆载以及连续强降雨。基岩之上发育的强风化泥状页岩强度小,遇水易软化,对坡体稳定性影响较大;连续的强降

雨，高速公路施工形成的路堤填方体以及施工显著改变的地表水环境则加剧了坡体的不稳定程度，促使了滑坡的产生。考虑试验的可操作性，将地质原型简化，模型共 4 层，从下往上分别是基岩、滑带、崩塌积体、人工填土；模型建立完成后采用人工降雨设备进行强降雨模拟。概化后的滑坡模型如图 3 所示。

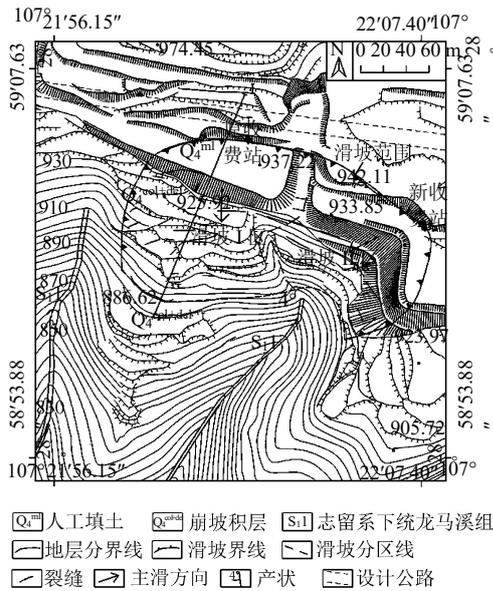


图 2 滑坡区工程地质平面图  
Fig.2 Engineering geological plan of landslide area

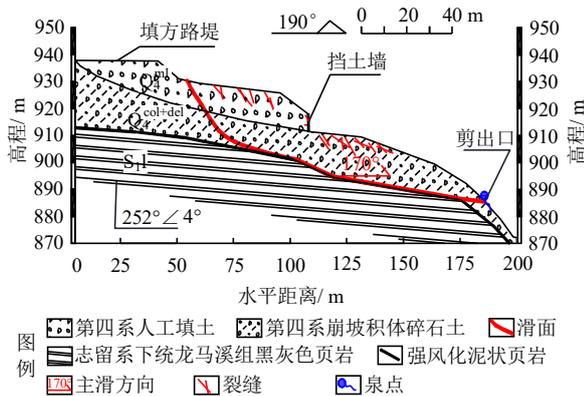


图 3 I-I'工程地质剖面图  
Fig.3 Engineering geological section of I-I'

### 3.2 相似条件及岩土参数

本试验采用假三维地质力学模型，几何相似系数为  $C_L = 100$ ，根据需要研究的滑坡区规模及几何相似比得到的模型长为 185 cm，宽为 47 cm，高为 68 cm。

各岩土层重度相似比  $C_\gamma = 1$ ，根据相似原理得到应力相似比  $C_\sigma = 100$ ，黏聚力相似比  $C_c = 100$ ，内

摩擦角相似比  $C_\phi = 1$ 。根据室内试验得到的各岩土层原型物理力学参数以及根据相似原理得到模型的物理力学参数（见表 1），崩塌积体和填方体的颗粒分曲线如图 4 所示。

表 1 滑坡原型和模型物理力学参数

Table 1 Physical-mechanical parameters of the slope and its models

地层岩性	重度		c		$\phi$	
	原型	模型	原型	模型	原型	模型
填方块碎石土	2.20	2.20	$2.2 \times 10^{-2}$	$2.20 \times 10^{-4}$	25.00	25.00
崩塌积体块碎石土	2.05	2.05	$3.0 \times 10^{-2}$	$3.00 \times 10^{-4}$	36.00	36.00
泥状页岩（滑带）	1.95	1.95	$1.8 \times 10^{-2}$	$1.80 \times 10^{-4}$	12.23	12.23
中等风化页岩	2.62	2.62	2.03	$2.03 \times 10^{-2}$	35.75	35.75

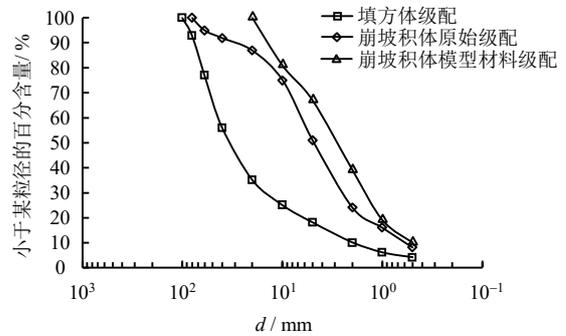


图 4 崩塌积体及模型材料与填方体颗粒分曲线  
Fig.4 The gradation curves of colluvial mass, model material and embankment

### 3.3 模型材料

本试验各模拟层性质差异大，需分别设计。从试验可操作性及合理性考虑，基岩的作用是提供支撑基座，选用砖块砌筑轮廓，再以砂浆抹面平整是环保且经济的。滑带是试验中非常关键的一层，通过正交法进行材料配比制作 8 组试样，利用 Fuzzy 评价方法进行试验材料参数选择<sup>[13-14]</sup>，最终采用的滑带材料配比结果见表 2。崩塌积体为块碎石土，其相似材料前人研究尚少，尤其是碎石土粒径与相似原理之间的关系，本试验中采用混合法<sup>[15]</sup>进行相似材料配比，经过配比与测试，采用的材料级配如图 4 所示，材料配比如表 2 所示。填方体亦为块碎石土，且大粒径为主，考虑填方体主要作用是施加荷载及使雨水顺利渗入，利用替代法<sup>[15]</sup>采用已破碎粒径大于 50 mm 块石的原状填土。

### 3.4 试验模拟方案

填方路堤边坡主要沿边坡倾向破坏，定性分析认为堆载和降雨是主要因素。因此，试验主要模拟

边坡在堆载和降雨条件下沿倾向的破坏过程。模型崩坡积层铺设好后静置 24 h，填方体堆载完成后静

置 12 h，然后开启降雨，实测降雨强度 18 mm/h，降雨 6 h，降雨结束后 6 h 试验结束。

表 2 模型材料配比及其物理力学参数

Table 2 Components of model materials and its physical and mechanical parameters

地层岩性	材料组成及质量配合比 (d 单位: mm)	重度 /(g/cm <sup>3</sup> )	c /MPa	φ /(°)
填方块碎石土	原状填土	2.20	2.2×10 <sup>-2</sup>	25
崩坡积块碎石土	石英砂 (20<d<10): 石英砂 (5<d<10): 石英砂 (2<d<5): 河沙 (1<d<2): 河沙 (0.5<d<1): 膨润土 (d<0.5) =1.9:1.4:2.8:2:0.9:1	2.11	2.8×10 <sup>-4</sup>	34
泥状页岩 (滑带)	滑石粉:膨润土:重晶石粉=3:5:3	1.87	1.4×10 <sup>-4</sup>	19
中等风化页岩	红砖砌底座、混凝土抹面	1.80		

### 3.5 模型量测

采用 CANON 7D 单反相机和侧边网格记录模型的变形破坏特征，采用 XY-TY02A 型微型土压力盒 (Φ28×9, 0.5 (%F.S.), Max:50 kPa) 及孔隙水压力计 (Φ28×9, 0.5 (%F.S.), Max: 50 kPa) 和 TST3822E-20 型静态应变测试分析系统记录坡体内部应力变化，采用莱卡 CH-9435 三维激光扫描仪 (精度 2 mm) [16]记录坡体表面位移特征。微型土压力盒 (T1~T6)、微型孔隙水压力计 (K1~K4) 布置在滑带上坡体角度变化位置，土压力盒沿中线对称并排布置两个，孔隙水压力计沿中线布置。贴有网格纸的有机玻璃板固定在模型侧边，三维激光扫描仪架设在模型体正前方 4.8 m 处，每次扫描位置保持固定。仪器布置和模型实况如图 5 所示。

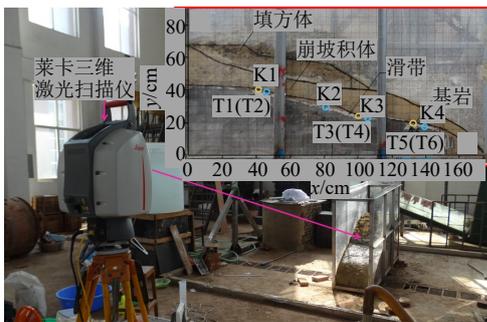


图 5 试验模型图  
Fig.5 Test model

## 4 试验过程

基岩用砖块砌筑轮廓，表面用砂浆水泥抹平。滑带按照配比制样完毕后，分层铺设在硬化的基岩之上，适当烤制以促进裂纹生成。在铺设崩坡积体前，按照设计安置好土压力盒及孔隙水压力计，并启动数据采集，持续至试验结束。然后将制备好的崩坡积体材料分层堆制在硬化后的滑带上。最后将预制好的填方体分层堆积在崩坡积体上。模型堆载完毕后，固定有机玻璃板，定位观测原点，最终模

型如图 4 所示。

模型堆载完毕后进行第一次三维激光扫描得到初始坡体形态，此后每 2 h 人工观察一次坡体变形情况以及应力监测数据，每 6 h 三维激光扫描一次，12 h 后启动降雨设备模拟人工降雨。降雨开始后至试验结束，每 30 min 观察并记录坡体变形情况，遇坡体出现明显破坏时适当增加观测次数，每 3 h 三维激光扫描一次坡体；模拟降雨 6 h 后停止，降雨停止后 6 h 试验结束。试验观测累计持续约 25 h。试验过程及模型量测方案见图 6。

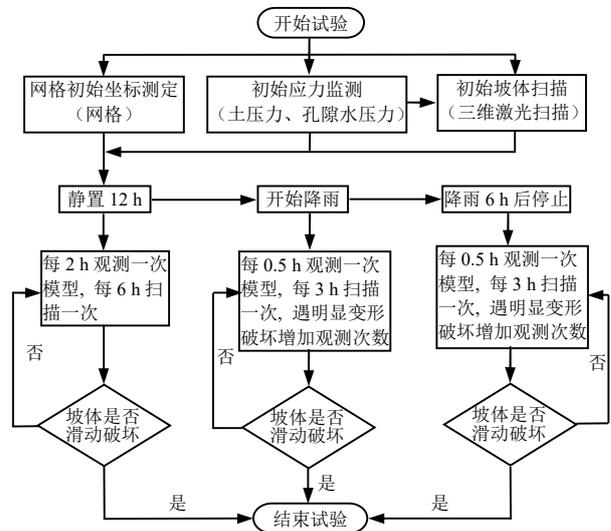


图 6 试验过程及模型量测流程图  
Fig.6 The flow chart of test process and model measurement

## 5 试验结果分析

### 5.1 坡体变形特征

三维激光扫描仪和数码相机记录了坡体的变形破坏过程。开始降雨后，首先雨水渗入坡体，约 30 min 后坡体向外排出黄白色雨水，坡体表面细颗粒明显被带走；降雨至 2 h 48 min 坡体前部观察到小面积垮塌，坡体可见明显沉降；降雨至 4 h 10 min

及 5 h 40 min，坡体前部出现大面积垮塌，埋设在坡体前部的监测仪器暴露，降雨停止；降雨结束后 2 h 30 min 左右坡体观察到后部产生裂缝，坡体产生显著的整体变形。

图 7~9 为三维激光扫描数据通过 SURFER 生成的坡表变形图，其中图 7 为模型堆载完成至降雨前的 12 h 扫描的结果，显示坡体无明显变形产生；图 8 为降雨 3 h 扫描结果，坡体前部出现了垮塌，且前部和中部均有不同程度的沉降，此外坡体后部等高线与降雨前相比增加一条，并略凸向坡外，表明此时坡体既产生了沉降又向坡外产生变形；图 9 为降雨结束后 3 h 坡体扫描的结果，可知坡体前部产生了大面积的垮塌，整个坡体沉降非常明显，坡体后部等高线显著凸向坡外，表明模型已经产生向坡外的整体变形。

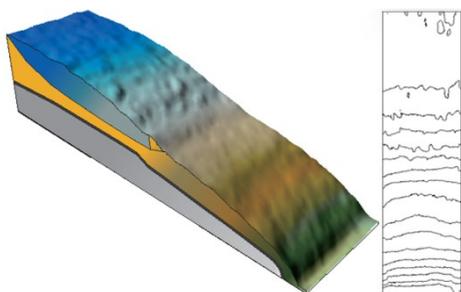


图 7 降雨前坡体表面 Surfer 图  
Fig.7 On the surface of the slope before rainfall

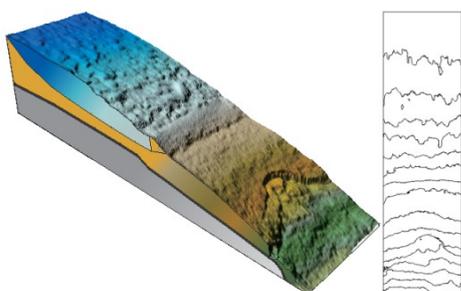


图 8 降雨 3 h 坡体表面 Surfer 图  
Fig.8 3 h rainfall on the surface of the slope

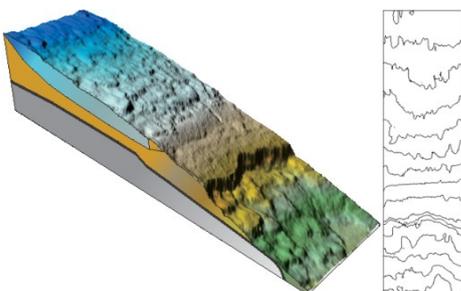


图 9 降雨停止后 3 h 坡体表面 Surfer 图  
Fig.9 3 hour after rainfall stopped on the surface of the slope

图 10 为三维激光扫描数据通过 Terra-model 等软件生成的坡体表面沉降变形图，图 10(a)是降雨 3 h 与降雨前扫描叠加的结果，图 10(b)是降雨停止后 3 h 与降雨前扫描叠加的结果。从图 10(a)可以看出，降雨 3 h 与降雨前相比，整个坡体均产生了沉降，中后部达 4 cm，整体沉降达 1~2 cm，前部垮塌堆积明显。由图 10(b)可知，降雨结束后 3 h 坡体沉降量显著增加，局部达 10 cm，前缘产生更大面积的堆积、垮塌；此外中部可见明显绿色区域，表明该处凸出，其与图 10(a)相比沉降量不但没有增加，反而向外突出。这很好地说明了坡体此时产生了向坡外的整体变形。变形监测结果表明，模型变形特征与野外滑坡实际基本一致。

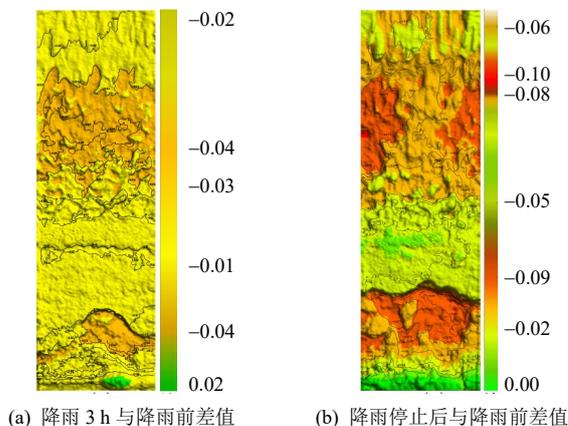


图 10 坡体沉降变形图（单位：m）  
Fig.10 Deformation and settlement of the slope (unit: m)

### 5.2 应力分析

试验应力监测曲线如图 11~15 所示。开始降雨后，T1~T6 号土压力逐渐上升，0.5 h 左右达到峰值随后下降并趋于稳定。K1~K4 号孔隙水压力在降雨后总的趋势是逐渐增大，并且埋设在坡体前部的 K4 号孔隙水压力增长速率明显小于 K1~K3，表现出一定的滞后性，分析认为这是由于坡体下渗的雨水沿着滑面向坡前运移形成的。K4 孔隙水压力计在降雨 4 h 左右由于坡体前部垮塌被揭露，T5、T6 土压力盒在降雨 5 h 40 min 坡体前部垮塌时被揭露，失去监测能力。模拟降雨停止后，土压力和孔隙水压力显著趋于下降。在降雨结束后 2.5 h 左右，T1、T2 土压力骤降，T3、T4 土压力出现上升，并且 K1 至 K3 的孔隙水压力均出现急剧上升随后降低的情况，K2 的压力值显著大于其他孔隙水压力值。

分析认为，降雨开始后土压力先增后减是因为降雨开始后雨水快速下渗入坡体，大部分雨水聚集在坡体内部，当坡体内的雨水不断汇集、运移，向

坡前贯通的时候,坡体压力出现下降并趋于稳定。K4 滞后于 K1~K3 是由于填方体与崩坡积体渗透性较好,雨水主要沿滑带向坡外运移,因此,坡体前部的孔隙水压力增长较慢。

降雨结束后 2.5 h 左右,土压力与孔隙水压力出现急剧变化原因在于降雨停止后,土压力与孔隙水压力总体应趋于减小,但由于此时坡体产生累积变形,导致坡体内部雨水消散通道被堵塞,而雨水受重力作用仍向坡下运动,材料中的膨润土吸水膨胀更加剧了孔隙水压力增长这一过程,因此,降雨结束后坡体产生蠕动变形,出现应力积累。到降雨停止后 2.5 h 左右,应力积累达到一定程度后,坡体产生整体变形破坏,孔隙水压力消散。坡体后部的拉裂带在 T1、T2 位置附近,所以才出现 T1、T2 压力下降, T3、T4 压力增加, K1~K3 孔隙水压力急剧增加随后下降的应力变化曲线。这与实际观察到的模型坡体破坏现象一致。此外, K1 在降雨结束后出现两次负量值,分析认为,这是因为降雨结束后坡体不断产生剪切变形所致。K1 位于坡体上部,堆积体较厚,且黏粒含量大,坡体发生剪胀后孔隙水压力计附近出现局部负压<sup>[7]</sup>,尤其是第 2 次坡体大变形后可能形成黏粒包裹的负压区,使得孔隙水压力较长时间表现为负值。

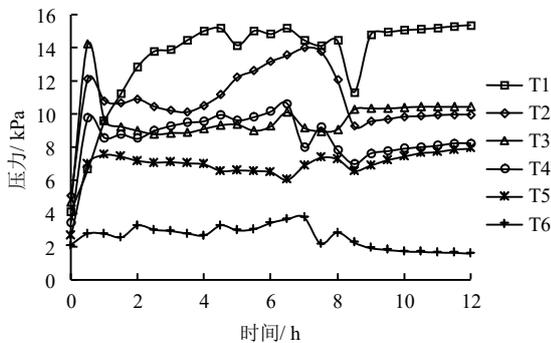


图 11 土压力监测曲线  
Fig.11 Soil pressure monitoring curves

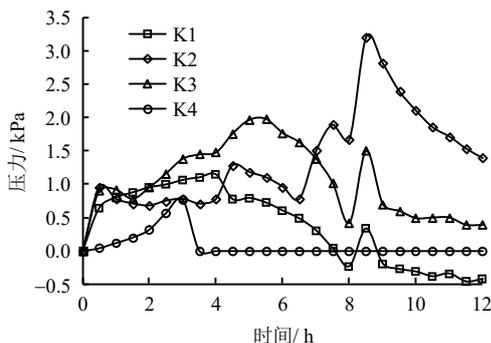


图 12 孔隙水压力监测曲线  
Fig.12 The pore water pressure monitoring curve

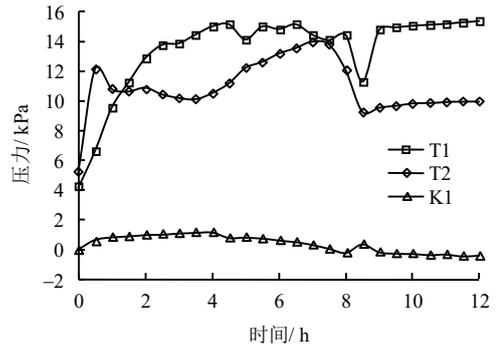


图 13 坡体后部土压力与孔隙水压力监测曲线  
Fig.13 The soil pressure & pore water pressure monitoring curves of rear part of the slope

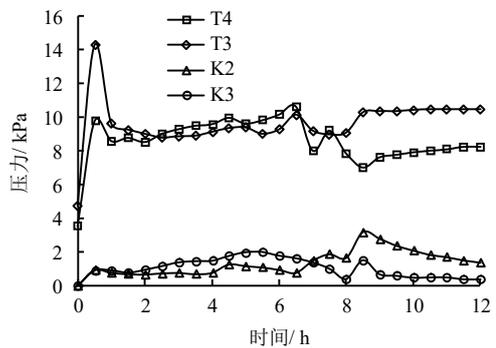


图 14 坡体中部土压力与孔隙水压力监测曲线  
Fig.14 The soil pressure & pore water pressure monitoring curves of central slope

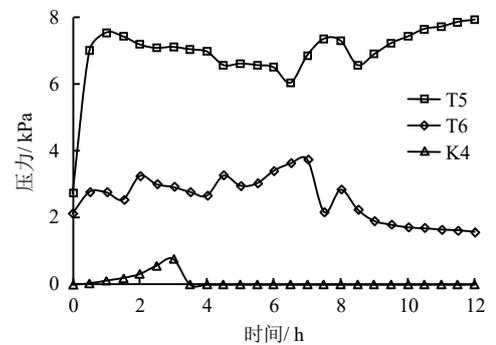


图 15 坡体前部土压力与孔隙水压力监测曲线  
Fig.15 The soil pressure & pore water pressure monitoring curves of front slope

## 6 孔隙水压力-变形及破坏机制分析

路堤填方堆载直接改变了坡体的应力条件,使得路堤边坡自重增加,下滑推力增大。场地施工显著地改变了地表水环境,原有冲沟被堵塞,且形成大面积平台,使得后方斜坡汇聚的雨水在填方平台地段被拦截,加之填方体土渗透性强,汇聚的雨水大量下渗入坡体,这致使坡体自重进一步增加;下渗的雨水穿过崩坡积体到达基覆界线的强风化泥状页岩,并沿着该层向坡外运移,强风化泥状页岩被长时间浸泡,强度大大降低,出现塑性变形,导致

坡体后缘产生裂缝。

此外由于填方土体不同于天然的崩坡积土, 其经人工破碎之后, 碎屑、泥质成分大大增加, 下渗的雨水携带大量上部细小颗粒以及滑带的黏质成分至滑带附近, 导致汇聚的雨水消散通道被堵塞, 加之滑带软化产生塑性变形, 使得孔隙水压力大大增加, 产生应力积累, 随着雨水的不断汇集, 形成扬压力及水平推力。最终裂缝沿强风化泥状页岩贯通, 填方路堤边坡产生滑动形成滑坡。

## 7 结 论

(1) 路堤填方堆载完成后坡体应力条件改变, 主要引起的是下滑推力增加, 但坡体未产生明显的变形破坏。

(2) 填方路堤在强降雨条件下, 坡体自重增加, 下渗的雨水软化滑带, 致使其产生塑性变形, 孔隙水压力增大, 坡体产生应力积累, 坡体后部产生裂缝, 最终裂缝沿滑带贯通形成整体变形破坏。

(3) 孔隙水压力在滑坡形成过程中起着关键作用, 填方体土碎屑和泥质含量高, 其随下渗的雨水运移至滑带附近, 加之坡体塑性变形, 地下水在坡体内部的消散通道被堵塞, 造成孔隙水压力急剧升高形成推力。

(4) 该滑坡变形破坏分为降雨下渗、滑带饱水软化、后缘产生裂缝、裂缝贯通-整体滑动 4 个阶段, 是典型的后缘堆载条件下降雨诱发的蠕滑-拉裂式滑坡。

(5) 该高速公路新收费站工程地质条件与滑坡地段基本一致, 根据对该滑坡的研究认为新收费站建设除了应进行堆载量评估, 还应做好场区的排水阻渗措施, 以此保证工程建设的安全。

## 参 考 文 献

- [1] 赵杰, 邵龙潭. 填筑和开挖边坡的稳定性分析[J]. 岩土力学, 2007, 26(5): 944—950.  
ZHAO Jie, SHAO Long-tan. Filling and excavation of the slope stability analysis[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 26(5): 944—950.
- [2] 陈安敏, 顾金才, 沈俊, 等. 地质力学模型试验技术应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(22): 3785—3789.  
CHEN An-min, GU Jin-cai, SHEN Jun, et al. Application of geomechanical model test technology[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(22): 3785—3789.
- [3] 冯文凯, 石豫川, 柴贺军, 等. 缓倾角层状高边坡变形破坏机制物理模拟研究[J]. 中国公路学报, 2004, 17(2): 32—36.  
FENG Wen-kai, SHI Yu-chuan, CAI He-jun, et al. Study on mechanism of deformation failure of a low-angle bedded high slope with physical simulation method[J]. **China Journal of Highway and Transport**, 2004, 17(2): 32—36.
- [4] 石豫川, 冯文凯, 冯学纲, 等. 国道 108 线某段缓倾角顺层边坡变形破坏机制物理模拟研究[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2003, 30(4): 350—355.  
SHI Yu-chuan, FENG Wen-kai, FENG Xue-gang, et al. Study on mechanism of deformation failure of a low-angle dip bedding slope of national highway No.108 by physical simulation method[J]. **Journal of Chengdu University of Technology (Science and Technology Edition)**, 2003, 30(4): 350—355.
- [5] 郑治, 曾忠. 西部地区高填方路堤沉降病害调查与分析[J]. 公路交通科技, 2005, 22(9): 107—110.  
ZHENG Zhi, ZENG Zhong. High fill embankment settlement disease investigation and analysis of western region[J]. **Journal of Highway and Transportation Research and Development**, 2005, 22(9): 107—110.
- [6] 蒋泽锋, 朱大勇. 强降雨条件下具有张裂缝边坡临界滑动场[J]. 岩土力学, 2016, 37(增刊 2): 25—34.  
JIANG Ze-feng; ZHU Da-yong. Critical slip field of slope with tension crack under intensive rainfall[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(Supp.2): 25—34.
- [7] 李天斌. 拱坝坝肩稳定性的地质力学模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(6): 1670—1676.  
LI Tian-bin. Geomechanical modeling study on stability of arch dam shoulder[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(6): 1670—1676.
- [8] 杨旭, 苏定立, 周斌, 等. 红层软岩模型试验相似材料的配比试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(8): 2231—2237.  
YANG Xu, SU Ding-li, ZHOU Bin, et al. Experiment study on similarity ratio of similar material for model test on red-bed soft rock[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(8): 2231—2237.
- [9] 罗先启, 葛修润. 滑坡模型试验理论及其应用[M]. 北

京: 中国水利水电出版社, 2008.

LUO Xian-qi, GE Xiu-run. Theory and application of landslide model test[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2008.

- [10] 冯文凯, 石豫川, 柴贺军, 等. 斜坡填筑路堤变形破坏物理模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增刊 1): 2861—2867.

FENG Wen-kai, SHI Yu-chuan, CHAI He-jun, et al. Deformation and failure of filling embankment slope physical model test research[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(Supp.1): 2861—2867.

- [11] 赵炼恒, 王志斌, 李亮, 等. 斜坡地基高填方路堤模型试验极限承载力数值分析[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2010, 34(3): 488—491.

ZHAO Lian-heng, WANG Zhi-bin, LI Liang, et al. Ultimate bearing capacity numerical analysis of high fill embankment slope model test[J]. **Journal of Wuhan University of Technology(Transportation Science & Engineering)**, 2010, 34(3): 488—491.

- [12] 张倬元, 王士天, 王兰生, 等. 工程地质分析原理[M]. 北京: 北京地质出版社, 1981.

ZHANG Zhuo-yuan WANG Shi-tian WANG Lan-sheng, et al. Principles of engineering geology[M]. Beijing: Beijing Geological Publishing, 1981.

- [13] 罗先启, 程圣国, 牛恩宽. 滑坡物理模型试验畸变修正及应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增刊1): 3082—3088.

LUO Xian-qi, CHENG Sheng-guo, NIU En-kuan. Research on aberration correction and application in landslide geo-mechanical model test[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(Supp.1): 3082—3088.

- [14] 史本山, 吴敬业. Fuzzy 评价机理与 Fuzzy 综合评价[J]. 西南交通大学学报, 1992, 27(5): 33—40.

SHI Ben-shan, WU Jing-ye. Fuzzy appraising mechanism and fuzzy synthetical appraisal[J]. **Journal of Southwest Jiaotong University**, 1992, 27(5): 33—40.

- [15] 李广信. 高等土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2016.

LI Guang-xin. Advanced soil mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2016.

- [16] 马俊伟, 唐辉明, 胡新丽, 等. 三维激光扫描技术在滑坡物理模型试验中的应用[J]. 岩土力学, 2014, 35(5): 1495—1505.

MA Jun-wei, TANG Hui-ming, HU Xin-li, et al. Application of 3D laser scanning technology to landslide physical model test[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(5): 1495—1505.

- [17] 黄志全, 陈贤挺, 姜彤, 等. 小浪底水库 1# 滑坡体非饱和土强度特性试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(3): 640—644.

HUANG Zhi-quan, CHEN Xian-ting, JIANG Tong, et al. Experimental study of strength characteristics of unsaturated soil of landslide 1# in Xiaolangdi Reservoir[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(3): 640—644.

#### 上接第 2932 页

- [19] 郭惟嘉, 王勇义. 采空区上方修建大型建筑物地基稳定性评价[J]. 岩土力学, 2004, 25(增刊 1): 57—59.

GUO Wei-jia, WANG Yong-yi. Stability evaluation of constructing large-scale building-toft above mine goaf[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(Supp.1): 57—59.

- [20] 王军保, 刘新荣, 刘小军. 开采沉陷动态预测模型[J]. 煤炭学报, 2015, 40(3): 516—521.

WANG Jun-bao, LIU Xin-rong, LIU Xiao-jun. Dynamic prediction model for mining subsidence[J]. **Journal of China Coal Society**, 2015, 40(3): 516—521.

- [21] 中国建筑科学研究院. GB50007-2011 建筑地基基础设

计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.

China Academy of Building Research. GB50007-2011 Code for design of building foundation[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.

- [22] 谢和平, 周宏伟, 王金安, 等. FLAC 在煤矿开采沉陷预测中的应用及对比分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 5(4): 397—401.

XIE He-ping, ZHOU Hong-wei, WANG Jin-an, et al. Application of FLAC to predict ground surface displacements due to coal extraction and its comparative analysis[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1999, 5(4): 397—401.