

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2016.01.13

# 基于红外热成像技术的滑坡破坏过程 温度场变化分析

金 林,胡新丽,谭福林,章 涵,何春灿,夏 鹏  
(中国地质大学(武汉),湖北 武汉 430074)

**摘要:**采用模型试验是研究滑坡的一种有效方法,红外热像仪在滑坡模型试验中的应用是基于红外检测和热成像原理,利用红外热像仪对滑坡模型坡表温度进行有效、准确、实时地检测并记录,有助于分析滑坡破坏过程中坡表温度场的变化规律,从能量的角度对滑坡破坏过程及其机理进行研究。试验结果表明:滑坡温度场在其破坏过程中呈一定规律的改变,温度总体上呈现逐渐上升,随后逐渐下降,再迅速上升,迅速下降的变化规律,整个过程中温度随时间变化曲线有两个峰值;滑坡纵向从坡肩至坡趾坡表温度逐渐增大;滑坡横向从滑坡边界到中部坡表温度逐渐减小。红外热成像技术的应用为滑坡破坏机理研究提供了一种新的研究方法,使得从能量的角度研究滑坡成为可能,其可行性和可靠性在模型试验中得到了验证。

**关键词:**红外热像仪;模型试验;温度;检测

中图分类号: TH76;P642.22

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2016)01-0077-08

## Research on the temperature field variation in the process of landslides failure based on the infrared thermal imaging technology

JIN Lin, HU Xinli, TAN Fulin, ZHANG Han, HE Chuncan, XIA Peng  
(China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China)

**Abstract:** The physical model test is an effective method for landslide research. The infrared thermal imager in the application of landslide physical model test is based on infrared detection and thermal imaging principle. With the infrared thermal imager, the surface temperature of the landslide model can be effectively, accurately and real-timely detected and recorded, which helps to analyze the temperature field variation of the landslide. It is shown that the temperature field of the landslide has a certain regular variation during the landslide failure. The temperature as a whole experiences two ebb and flow, and the temperature change curve over time has two peak. The temperature gradually increases from slope shoulder to Slope toe in the longitudinal direction of a landslide while temperature gradually decreases from boundary to central in the transverse direction of it. The application of infrared thermal imaging technology presents a new research method to study the failure mechanism of the landslide, which makes it possible to study landslides from the aspects of energy, and its feasibility and reliability has been proved in the physical model test.

**Keywords:** infrared thermal imager; physical model test; temperature; detection

收稿日期: 2015-05-05; 修订日期: 2015-07-13

基金项目: 国家重点基础研究发展计划“973”项目(2011CB710604); 国家自然科学基金项目(41272305)

第一作者: 金 林(1990-),男,湖北黄冈人,土木工程专业,硕士研究生,研究方向为滑坡及其防治结构相互作用机理。E-mail: jaley1083682524@163.com

通讯作者: 胡新丽(1968-),女,博士,教授,主要从事岩土工程稳定性评价,地质灾害防治设计的教学与科研工作。E-mail: huxli2000@163.com

## 0 引言

滑坡是一种严重的地质灾害,研究滑坡的方法多种多样,其中滑坡物理模型试验是对滑坡发生规律进行研究的有效手段之一<sup>[1]</sup>。国内外的学者设计了大量的模型试验开展滑坡形成机制、发展演化过程、破坏机理、滑坡与防治工程相互作用等方面研究<sup>[2-5]</sup>。传统滑坡研究方法主要是从应力场与位移场方面着手<sup>[6-8]</sup>,研究滑坡破坏过程,分析滑坡稳定性及其破坏机理,而未能从能量场方面解释滑坡破坏过程和机理一直是滑坡研究领域的一大缺陷。

红外热像仪是通过非接触探测红外热能,并将其转化为电信号,进而在显示器上生成热图像,计算出温度值的一种检测设备,它能快速、准确实时地捕捉任意时刻物体各部分的能量并计算出温度值,从而达到高精度探测物体表面温度场微小变化情况的目的。

红外热成像技术因其能快速、准确、实时、方便地检测出物体的温度变化而广泛应用于国民经济,涵盖军事、医疗、能源、农业、交通、建筑等各行各业<sup>[9-14]</sup>,并展示出了巨大的发展潜力。然而,到目前为止,红外热成像技术在国内土木工程行业的工程应用案例亦为数不多,目前还只是处于研究阶段。鉴于红外热成像检测技术的特点,根据对混凝土等建筑材料进行无损检测来检查建筑物结构受损情况以及控制建筑物施工质量方面的研究相对较多<sup>[15-22]</sup>,而将红外热成像技术应用于由岩土体组成的复杂地质体的研究相对很少,工程应用几乎没有,从温度场角度对滑坡等地质灾害发生过程的研究更是一片空白。岩土体在受力变形过程中伴随着能量的积累与释放,其能量变化过程与滑坡破坏过程之间的联系仍不得而知,鉴于岩土体材料的复杂性,从能量场对滑坡等地质灾害进行研究仍然是一个难点,也是一个有待探索的领域。

本文通过大型框架式滑坡模型试验来模拟滑坡破坏过程,结合红外热像仪无损检测设备对滑坡物理模型试验中坡体表面局部温度进行检测,获得了滑坡破坏过程中各检测点的温度变化情况,分析了斜坡失稳过程中坡表温度场的演化规律,从而对滑坡破坏机理进行研究。

## 1 红外热像仪应用原理

红外线是一种电磁波,波长介于  $0.76 \sim 1000 \mu\text{m}$  之间,自然界中任何处于绝对零度 ( $-273.15^\circ\text{C}$ ) 以上的物体,都会因自身分子的运动产生红外辐射,而物体

所承受的应力越大,其温度也就越高,其产生的红外辐射也就越强。物体红外辐射的总功率与其绝对温度间的关系为:

$$E = \varepsilon \sigma T^4 \quad (1)$$

式中:  $E$ ——辐射能;

$\varepsilon$ ——物体的辐射率,  $0 < \varepsilon < 1$ ;

$\sigma$ ——斯蒂芬-玻尔兹曼常数;

$T$ ——物体表面的热力学温度。

红外热像检测技术是一种非接触探测红外热量技术,红外热像仪是通过利用红外辐射对物体或材料表层进行检测、测量,将不可见的红外辐射转化为电信号,并且在显示器上生成可见热图像和计算温度值的一种检测设备。该检测仪器主要由配备了一系列可变光学系统的照相机和微型计算机组成。照相机的核心部件是红外探测器,用来吸收被检测物体辐射出的红外线能量,并转化为电子电压或电流,从而得到物体表面的热分布,再经图像处理系统,最终以热像图的形式在显示器上显现。红外热像仪显示的热像图能很好的反映被检测物表面的热分布及温度的差异,其工作原理见图 1。

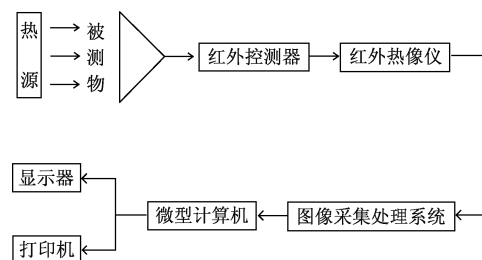


图 1 红外热像仪检测系统示意图

Fig. 1 Sketch of infrared thermal imaging system

岩土体材料的不均匀性特点使岩土体在外力持续作用下由变形发展到破坏的过程,局部会有应力集中以致诱发微破裂,同时会伴随有声、电、磁、振动等信号的产生,这些微破裂的产生将会改变物体的热传导性能,造成物体表面的温度产生差异,为红外热成像技术应用于滑坡等地质灾害研究中提供了依据。在滑坡物理模型试验中,对滑坡模型进行加载,滑坡土体局部变形直至破坏过程中同样会产生微破裂、滑坡体内会有应力的集中、以致进一步变形破坏,整个过程中会伴随着能量的积累与释放,而且应力越大,能量积累也越多,分子和原子的运动越剧烈,所产生的红外辐射就越强,在红外热像仪中就显示为局部温度相对升高。由此我们在滑坡模型的加载变形过程中用红外热像仪对滑坡模型坡表进行实时检测,以期根据拍摄的红外热

像图来分析滑坡模型坡表的温度变化、对滑坡体在加载过程中滑坡模型土体中的应力变化进行分析,从而得以从能量的角度对滑坡破坏过程进行研究。

2 模型试验设计

2.1 模型试验相似性

相似理论作为滑坡模型试验的理论基础之一,在模型试验中占有举足轻重的地位,模型试验的成功很大程度上取决于模型试验的相似性。根据相似理论可知,相似性主要包括几何相似性,运动相似性及动力相似性三个方面。滑坡模型试验的相似性主要体现在滑坡的空间条件相似性,物理条件相似性和边界条件相似性。空间条件相似性主要指模型与原型的空间相对位置和几何尺寸相似,物理条件相似性主要指模型材料的物理力学性质与原型相似,边界条件相似性主要指模型受力状态,约束条件以及初始条件与原型相似。

此次模型试验以马家沟滑坡为原型,采用框架式模型,模型主要包括滑体、滑带、滑床三个部分。模型尺寸长 200 cm,宽 90 cm,后部高度 125 cm,后部滑体厚度 35.2 cm,滑面倾角约 15°,后部稍陡,前缘呈反翘状,模型空间形态基本与马家沟滑坡较为一致。滑坡模型见图 2。



图 2 马家沟滑坡模型  
Fig. 2 The model of Majiagou landslide

2.2 相似材料的确定

为了真实模拟滑坡的产生以及变形机理,相似材料须具有高表观密度、低强度、低弹模的性质。要求材料所涉及到的包括几何参数、力学参数、材料特性参数在内的大量参数,满足相似定理的要求。但是要找到这种满足参数相似要求、与原型完全相似的材料十分困难,当前的解决方法多是通过正交试验或均匀试验,寻找满足主要因素相似而忽略次要因素影响的相似材料。

为放宽试验对相似材料的要求,增强试验的可操作性,寻求一种既能放宽试验条件、简化试验流程又可

以更好的用模型预测原型采用尽可能满足相似理论要求的配比方案。

马家沟滑坡滑床基岩强度较高,滑床较稳定,采用砖石砌体来构筑,并以砂浆抹面并辅以薄层石膏模拟坚固、光滑且透水性较弱的滑面,保证模拟的滑床在受力和对地下水的影响方面与原型都较为一致。

滑体和滑带材料的模拟借鉴了三峡大学罗先启等人制作的千将坪滑坡模型试验等方法,经过配比试验后最终选定,主要由江砂、滑体土、自来水、膨润土组成。其中,江砂主要用来增加内摩擦角和渗透系数,对水起到很好的吸附作用,易于滑体成型;滑体土用来增加粘聚力、减小渗透系数;膨润土则用来减小内摩擦角和变形模量。鉴于滑带粘聚力和内摩擦角相对滑体要小,采用玻璃珠和滑体土的混合材料来模拟滑带,该材料既能模拟出滑带的透水性质,又能模拟滑带较弱的抗剪强度,符合滑带物理性质。因此,整个模型材料满足物理条件相似性要求,滑体和滑带材料配比方案见表 1。

| 表 1 模型试验中坡体材料配比                                   |        |      |     |     |      |
|---------------------------------------------------|--------|------|-----|-----|------|
| Table 1 Materials and mixing ratios of model test |        |      |     |     |      |
| 坡体结构                                              | 材料配比/% |      |     |     |      |
|                                                   | 滑体土    | 江砂   | 膨润土 | 玻璃珠 | 自来水  |
| 滑体                                                | 49.1   | 39.0 | 0.9 | —   | 11.0 |
| 滑带                                                | 32     | —    | —   | 60  | 8    |

为了使模型边界条件与马家沟滑坡相似,在滑坡模型左右两侧设置钢化玻璃,两侧边界限制了滑体侧边的横向位移,仅使滑坡有纵向位移,其受力状态,约束条件以及初始条件与原型均较为一致,并且模型试验过程中开展了土体与钢化玻璃摩擦系数测定工作,研究边界效应对物理实验的影响程度。滑坡体前缘为自由端,下部受到库水浸泡影响,底部为模拟滑动面。滑坡模型的边界条件相似性符合相似理论要求。

2.3 加载方案

滑坡模型后缘推力通过 MTS 伺服加载系统进行模拟,加载荷载的大小参考了马家沟滑坡剩余下滑力并进行了调试,符合力学相似比。

本次试验采用 MTS-505.60 电液伺服系统加载来模拟滑坡后缘推力,该系统控制精度小于 0.5%,可以对滑坡模型后缘推力进行精确控制,采用分级加载方式,每级荷载分为两个阶段:加荷阶段和荷载维持阶段(图 3)。设计施加的推力大小参考了马家沟滑坡相应区段条块剩余推力折减值,一共设计了十九级荷载,第一级荷载 250N,最后一级 7250N,历时约 12 个小时,详细加载方案见图 4。

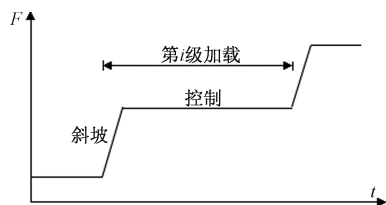


图3 MTS加载方式

Fig.3 MTS loading method

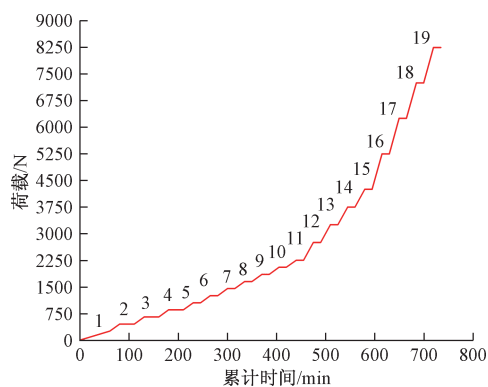


图4 MTS加载曲线

Fig.4 MTS loading curve

## 2.4 试验装置及测试方法

本次试验采用的是 NEC 公司生产的红外热像仪（图 5,型号:H2630,测温度范围:  $-40^{\circ}\text{C} \sim 120^{\circ}\text{C}$ ,精度:  $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ ,温度分辨率: $0.04^{\circ}\text{C}$ ,红外图象分辨率:  $640(\text{H}) \times 480(\text{V})$  像素)。该型号红外热像仪数据精准,图象清晰,可以探测小目标异常点,可以获得组合图象,清晰定位检测区。



图5 红外热像仪实体照片

Fig.5 Entity photo of infrared thermal imager

红外热像仪组装好后,将红外热像仪镜头置于滑坡模型坡表之上,调整其距离、角度及焦距,使成像效果达到最佳后固定仪器设备(图 6)。试验过程中对滑坡模型左半部分区域坡表土体的温度进行检测,为了能对滑坡模型表面局部检测点温度变化情况进行对



图6 红外热像仪设备安装

Fig.6 Infrared thermal imaging equipment installation

比,一共在滑坡坡表检测了 16 个点和 8 条线段的平均温度变化情况,红外热像仪检测区域具体见图 7、图 8。试验开始后,打开红外热像仪设备,对滑坡模型坡表温度进行实时检测并记录,直至滑坡破坏,试验结束。



图7 红外热像仪检测区位置

Fig.7 Infrared thermography detection area

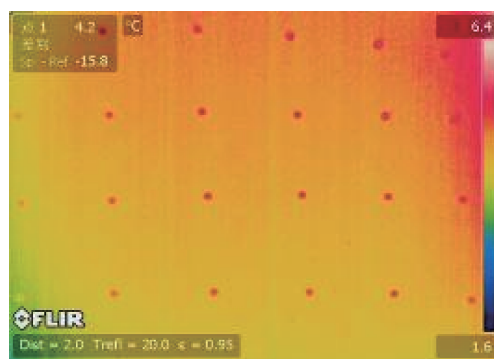


图8 红外热像仪检测区热红外图

Fig.8 Thermal infrared image of detection area

## 3 试验结果

### 3.1 检测点温度数据

本次物理模型试验从 2014 年 12 月 22 日上午 10:

00 开始,22:00 结束,历时约 12h。为了研究滑坡在破坏过程中各位置温度变化情况,对热红外图像数据进行了较详细的统计和处理,部分检测点每隔半小时采集的温度值见表 2。

表 2 加载过程中各检测点温度(℃)

Table 2 The temperature of each point in the process of loading test(℃)

| 检测点<br>时间 | SP01 | SP02 | SP03 | SP04 | SP05 | SP06 | SP07 | SP08 |
|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 10:03     | 4.6  | 4.6  | 4.4  | 4.2  | 4.8  | 4.8  | 4.5  | 4.2  |
| 10:33     | 4.9  | 4.8  | 4.7  | 4.5  | 5.1  | 4.9  | 4.9  | 4.7  |
| 11:03     | 5.2  | 5.1  | 4.9  | 4.7  | 5.3  | 5.2  | 5    | 5    |
| 11:33     | 5.3  | 5.3  | 5.1  | 5    | 5.5  | 5.4  | 5.2  | 5.1  |
| 12:03     | 5.5  | 5.5  | 5.4  | 5.2  | 5.7  | 5.6  | 5.5  | 5.4  |
| 12:34     | 5.7  | 5.7  | 5.6  | 5.3  | 5.8  | 5.9  | 5.7  | 5.6  |
| 13:02     | 5.9  | 5.9  | 5.7  | 5.4  | 6    | 6    | 5.9  | 5.7  |
| 13:34     | 6    | 5.9  | 5.8  | 5.5  | 6.2  | 6    | 5.9  | 5.8  |
| 14:03     | 6.1  | 6    | 5.8  | 5.6  | 6.4  | 6.1  | 5.9  | 5.9  |
| 14:33     | 6.2  | 6.1  | 6    | 5.6  | 6.5  | 6.3  | 6.1  | 5.9  |
| 15:03     | 6.3  | 6.2  | 6    | 5.8  | 6.5  | 6.4  | 6.1  | 5.9  |
| 15:32     | 6.3  | 6.2  | 6    | 5.9  | 6.4  | 6.3  | 6.2  | 6    |
| 16:03     | 6.2  | 6.1  | 6.1  | 5.9  | 6.4  | 6.3  | 6.2  | 6    |
| 16:33     | 6.1  | 6    | 6    | 5.8  | 6.3  | 6.2  | 6    | 5.9  |
| 17:04     | 6.1  | 6    | 5.9  | 5.7  | 6.3  | 6.1  | 6    | 5.9  |
| 17:32     | 6    | 5.9  | 5.8  | 5.7  | 6.2  | 6.1  | 5.9  | 5.8  |
| 18:02     | 5.9  | 5.9  | 5.7  | 5.6  | 6.1  | 6    | 5.9  | 5.7  |
| 18:34     | 5.8  | 5.7  | 5.6  | 5.5  | 6    | 6    | 5.8  | 5.7  |
| 19:03     | 5.8  | 5.7  | 5.6  | 5.5  | 6    | 5.9  | 5.7  | 5.6  |
| 19:34     | 5.7  | 5.6  | 5.5  | 5.4  | 5.9  | 5.8  | 5.7  | 5.6  |
| 20:04     | 5.6  | 5.5  | 5.4  | 5.3  | 5.8  | 5.7  | 5.6  | 5.5  |
| 20:34     | 5.6  | 5.5  | 5.5  | 5.4  | 5.8  | 5.7  | 5.6  | 5.5  |
| 21:01     | 5.8  | 5.6  | 5.6  | 5.5  | 5.9  | 5.8  | 5.7  | 5.6  |
| 21:43     | 5.8  | 5.7  | 5.6  | 5.4  | 5.9  | 5.8  | 5.7  | 5.6  |
| 21:52     | 5.7  | 5.6  | 5.5  | 5.4  | 5.8  | 5.7  | 5.6  | 5.5  |
| 21:53     | 5.6  | 5.5  | 5.4  | 5.3  | 5.7  | 5.6  | 5.5  | 5.5  |
| 21:55     | 5.5  | 5.4  | 5.3  | 5.3  | 5.7  | 5.6  | 5.4  | 5.4  |
| 22:00     | 5.4  | 5.3  | 5.3  | 5.2  | 5.6  | 5.5  | 5.4  | 5.3  |

### 3.2 实验数据分析

为了研究滑坡模型在受力破坏过程中温度场的变化规律,将各检测点时间-温度变化曲线进行整体分析以及横向和纵向对比分析。

#### (1) 滑坡检测点温度变化整体分析

对各检测点温度(表 2)及其变化曲线(图 9)整体进行分析知,滑坡坡表温度有较大幅度的变化,变化范围在 4~7℃之间,各点温度变化幅度较大,且变化趋势比较一致。在开始加载后,各检测点温度迅速上升,13:00 后,各检测点温度仍然逐渐上升,但其上升速率较 13:00 之前小,并在 16:00 左右达到峰值。随后在很长一段时间内,温度逐渐平稳下降,大约在 20:00 后,温度又迅速上升,并在 21:00 前后达到峰值,随后各点温度又逐渐下降,直到试验结束,这与试验中滑坡

表面于 21:30 左右开始出现裂缝,应力得到释放的现象相吻合。整体上,滑坡体的温度呈先逐渐上升,随后逐渐下降,再迅速上升,迅速下降的变化过程。这可能是滑坡受推力后,应力迅速集中导致温度上升,由于应变滞后于应力,随着滑坡体变形,应力得到逐渐释放,以致温度又降低,当变形达到极限值时便不再增加,随着应力进一步积累,致使温度又迅速上升,直到滑坡体发生整体滑移破坏时,应力得到释放,温度又迅速下降。整体上,各点温度变化规律与实验加载方案及滑坡体变形破坏情况基本吻合。

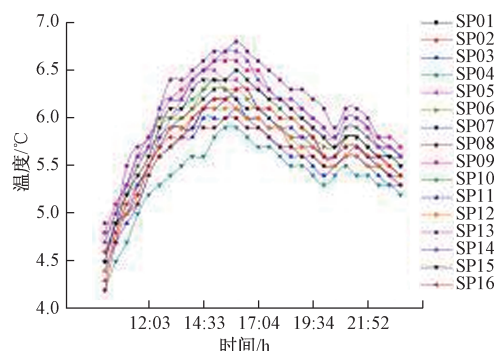


图 9 各检测点温度变化曲线

Fig. 9 Temperature change curve of each points

#### (2) 滑坡横向方向温度变化分析

根据图 10~12 检测点温度随时间变化曲线知,在 12:00 之前,四监测点温度均处于迅速上升阶段,各监测点的温度十分接近,无较明显的规律;但在 12:00 之后,检测点 1-4,检测点 5-8,检测点 9-12 的温度均有明显的变化规律,每行四检测点温度从滑坡边界向中部呈逐渐减小的趋势,图 13 表示了每一行四检测点平均温度大小关系,同样反映了滑坡体温度从边缘向中央逐渐减小的趋势。总体来看,在滑坡横向方向,温度从滑坡边界向中央有逐渐降低的变化规律,这可能是边界效应导致,或是在滑坡边界处更容易造成应力集中,能量积累更明显的缘故。

#### (3) 滑坡纵向方向温度变化分析

根据图 14~16 温度随时间变化曲线可知,12:00 之前,各检测点温度均处于一个迅速上升阶段,每列四检测点温度值较接近,无较明显规律;但 12:00 后,从图 14 至图 16 四幅图中均可得出,从滑坡上部向下部的一系列检测点,其温度呈逐渐上升的变化规律,虽然局部点位处温度值相等,但整体上是呈逐渐增大趋势。综合分析可得,在纵向方向上,滑坡从上到下坡表温度依次增加。这可能是越往下,滑坡土体应力集中越大,

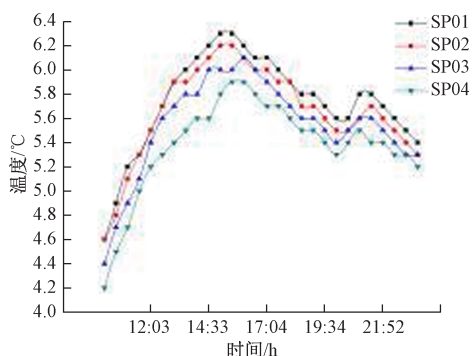


图 10 SP01,SP02,SP03,SP04 四检测点温度变化曲线

Fig. 10 SP01,SP02,SP03,SP04 temperature change curves

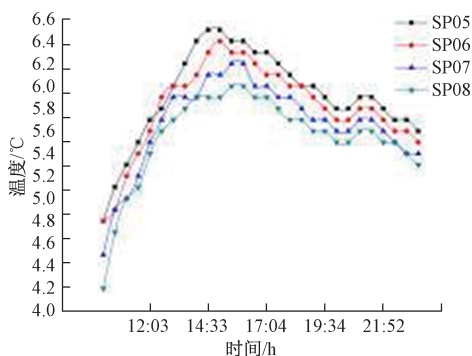


图 11 SP05,SP06,SP07,SP08 四检测点温度变化曲线

Fig. 11 SP05,SP06,SP07,SP08 temperature change curves

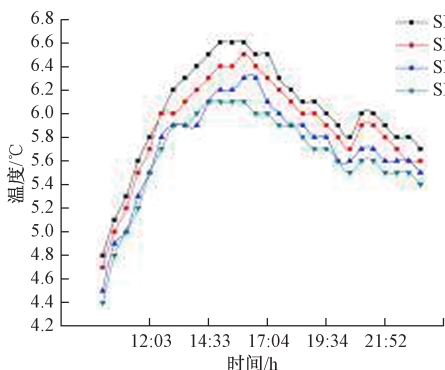


图 12 SP09,SP10,SP11,SP12 四检测点温度变化曲线

Fig. 12 SP09,SP10,SP11,SP12 temperature change curves

能量积累越明显,导致温度越高,从纵向方向各行检测点平均温度(图 17)来看,具有同样的变化趋势。相对来说,图 16 反映的检测点温度变化规律没有图 14 和图 15 所示规律明显,这说明滑坡中央部位温度变化规律没有边缘部位明显,滑坡边缘处因受力引起温度变化更加迅速。

此外,根据对滑坡模型温度检测区的 8 条线段平均温度进行分析,同样可得滑坡横向方向上,从边缘到中部温度逐渐减小;纵向方向,从坡肩到坡趾温度逐渐

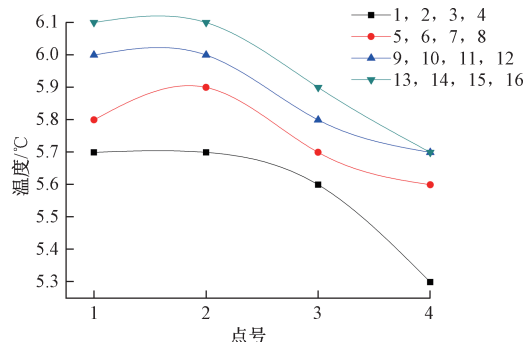


图 13 横向方向各行检测点温度

Fig. 13 The temperature of the transverse direction

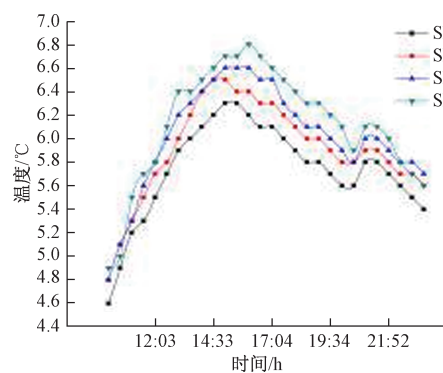


图 14 SP01,SP05,SP09,SP13 四检测点温度变化曲线

Fig. 14 SP01,SP05,SP09,SP13 temperature change curves

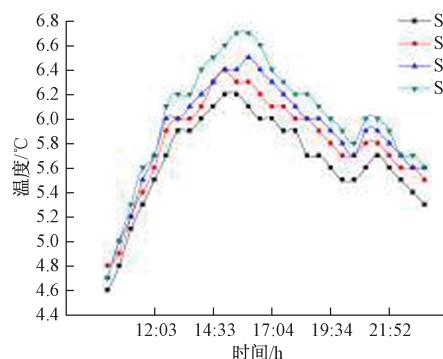


图 15 SP02,SP06,SP10,SP14 四检测点温度变化曲线

Fig. 15 SP02,SP06,SP10,SP14 temperature change curves

升高的结果。这与通过各个检测点温度变化情况分析结果相一致。

#### 4 实验结论

本文将红外热成像技术应用于滑坡物理模型试验,根据试验中红外热像仪检测的温度数据分析可知,在滑坡变形破坏过程中,滑坡体温度场并非恒定不变的,而是随着滑坡模型破坏过程呈一定规律性的变化,这些温度变化规律反映出滑坡在破坏过程中应力积累

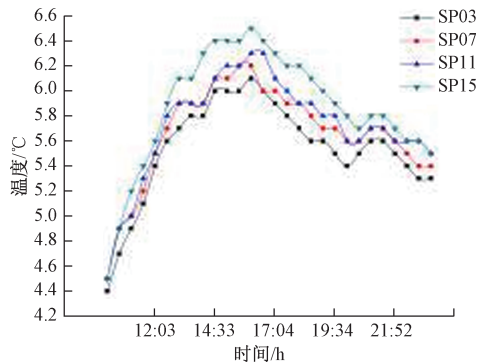


图 16 SP03,SP07,SP11,SP15 四检测点温度变化曲线

Fig. 16 SP03,SP07,SP11,SP15 temperature change curves

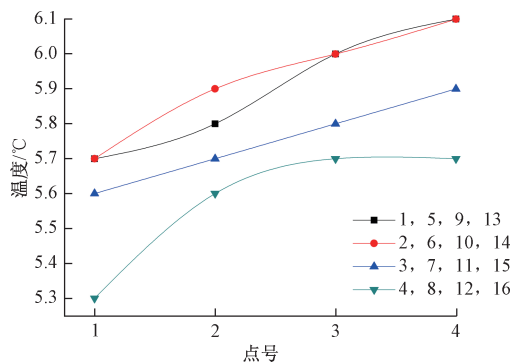


图 17 纵向方向各行检测点温度

Fig. 17 The temperature of the longitudinal direction

和释放的过程,从而反映出岩土体结构破坏情况,为从能量的角度研究滑坡发生过程提供了依据。根据此次滑坡模型试验结果,我们将其与实际滑坡破坏过程进行类比,得出滑坡在破坏过程中,其坡表温度场的变化规律如下:

(1) 滑坡在发生过程中,其坡表温度场并非恒定不变,而是随着时间呈先逐渐上升,随后逐渐下降,再迅速上升,迅速下降的变化规律,整个过程中温度变化曲线有两个峰值;

(2) 滑坡发生过程中,横向方向上,滑坡体坡表温度从边界向中部逐渐减小,说明在模型边界处应力集中更为明显,边界效应显著;

(3) 滑坡发生过程中,纵向方向上,滑坡体温度从坡肩至坡趾逐渐增大,应力在坡趾积累相对较大。

此外,试验结果表明,热红外技术在滑坡模型试验中的应用是可行的。与传统滑坡研究方法不同,这种非接触探测热能技术为滑坡研究工作提供了一种全新的方法,使得从能量的角度分析滑坡发生机理成为可能,并对研究滑坡新方法的提出有一定的引导作用。总之,热红外技术在滑坡研究工作中的应用对深入研

究滑坡发生机理有一定的积极意义,也为其它地质灾害的研究与防治工作提供了借鉴和指导意义。

致谢:本论文是在 973 计划第四课题“滑坡-防治结构体系相互作用与长期安全性”的研究平台上完成的,滑坡模型试验是第四课题组全体成员的共同努力才得以顺利完成,红外热像仪技术的应用得益于武汉大学李双晨学长的技术支持。在论文的编写过程中,我得到了胡新丽老师的悉心指导以及各位同门的热心帮助。

#### 参考文献:

- [1] 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 Xianqi, GE Xiurun. Landslide model test theory and its application [M]. Beijing: China Water & power press, 2008.
- [2] Schnellmann R, Busslinger M, Schneiderh R, et al. Effect of rising water table in an unsaturated slope [J]. Engineering Geology, 2010, 114(1): 71-83.
- [3] Montrasio L, Valentino R. Experimental analysis and modelling of shallow landslides [J]. Landslides, 2007, 4(3): 291-296.
- [4] 冯振, 殷跃平, 李滨, 等. 斜倾厚层岩质滑坡视向滑动的土工离心模型试验 [J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(5): 890-897.  
FENG Zhen, YIN Yueping, LI Bin, et al. Centrifuge modeling of apparent dip slide from oblique thick bedding rock landslide [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(5): 890-897.
- [5] 胡修文, 唐辉明, 刘佑荣. 三峡库区赵树岭滑坡稳定性物理模拟试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(12): 2089-2095.  
HU Xiuwen, TANG Huiming, LIU Yourong. Physical model studies on stability of Zhaoshuling landslide in area of Three Gorges Reservoir [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(12): 2089-2095.
- [6] 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(5): 1495-1505.  
MA Junwei, TANG Huiming, HU Xinli, et al. Application of 3D laser scanning technology to landslide physical model test [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014(5): 1495-1505.
- [7] 罗先启, 陈海玉, 沈辉, 等. 自动网格法在大型滑坡模型试验位移测试中的应用 [J]. 岩土力学, 2005, 26(2): 231-234.

- LUO Xianqi, CHEN Haiyu, SHEN Hui, et al. Application of automatic mesh methods to landslide model test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(2):231-234.
- [8] 朱鸿鹄,殷建华,张林,等. 大坝模型试验的光纤传感变形监测[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(6):1188-1194.
- ZHU Honghu, YIN Jianhua, ZHANG Lin, et al. Deformation monitoring of dam model test by optical fiber sensors[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(6):1188-1194.
- [9] 王瑞凤,杨宪江,吴伟东. 发展中的红外热成像技术[J]. 红外与激光工程, 2008(S2):699-702.
- WANG Ruifeng, YANG Xianjiang, WU Weidong. In the development of infrared thermal imaging technology[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008(S2):699-702.
- [10] 陈丽. TTM 红外热成像技术及其在经络现象研究中的应用[D]. 福建师范大学, 2007.
- CHEN Li. TTM Infrared thermal imaging technology and its application in the study of meridian phenomenon[D]. Fujian Normal University, 2007.
- [11] 朱琦. 基于红外热成像技术的寒热证哮喘患者相关经穴皮肤温度变化的研究[D]. 北京中医药大学, 2013.
- ZHU Qi. The cold and heat syndrome in patients with asthma related based on infrared thermal imaging technology point skin temperature change research [D]. Beijing University of Chinese Medicine, 2013.
- [12] 周建民,周其显,刘燕德. 红外热成像技术在农业生产中的应用[J]. 农机化研究, 2010(2):1-4+51.
- ZHOU Jianmin, ZHOU Qixian, LIU Yande. The application of infrared thermal imaging technology in agricultural production [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2010(2):1-4+51.
- [13] 徐小龙. 基于红外热成像技术的植物病害早期检测的研究[D]. 浙江大学, 2012.
- XU Xiaolong. Plant disease early detection based on infrared thermal imaging technology research [D]. Zhejiang University [D], Zhejiang University, 2012.
- [14] 冯剑飞,王臻卓. 红外诊断检测技术在输电线路中的应用[J]. 中国高新技术企业, 2015(1):60-61.
- FENG Jianfei, WANG Zhenzhuo. Infrared diagnostic testing technology in the application of transmissionline [J]. China High Technology Enterprises, 2015(1):60-61.
- [15] 贺虎. 基于红外热成像技术在支挡结构无损检测中的应用研究[D]. 重庆大学, 2012.
- HE Hu. Based on infrared thermal imaging technique in study on retaining engineering structures application of non-destructive detection [D]. Chongqing University, 2012.
- [16] 吴慧萍,杜红秀,成聪慧,等. 高强混凝土高温后的红外热像检测[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2015(1):87-92.
- WU Huiping, DU Hongxiu, CHENG Conghui, et al. High strength concrete after high temperature of the infrared thermal image detection [J]. Journal of Guangxi University, 2015(1):87-92.
- [17] 代博洋. 红外热成像技术在震后房屋损坏快速鉴定中的应用研究[D]. 中国地震局地质研究所, 2009.
- DAI Bouyang. Infrared thermal imaging technology in the building after an earthquake damage to quickly identify the application of the research[D]. Institute of Geology, China Earthquake Administration, 2009.
- [18] 谢春霞. 红外热像检测技术在土木工程中的应用[D]. 西南交通大学, 2009.
- XIE Chunxia. Application of infrared thermal image detection technology in civil engineering [D]. Southwest Jiaotong University, 2009.
- [19] 冯力强,王欢祥,晏大玮,等. 红外热像法检测建筑外墙饰面层内部缺陷试验研究[J]. 土木工程学报, 2014(6):51-56.
- FENG Liqiang, WANG Huanxiang, YAN Dawei, et al. Infrared thermal image method to detect the building exterior wall act the role of internal defects on the surface experimental study [J]. Journal of Civil Engineering, 2014(6):51-56.
- [20] 李强,钟燕辉,张蓓,等. 红外热像仪在沥青路面质量控制中的应用研究[J]. 中外公路, 2007(4):102-105.
- LI Qiang, Zhong Yanhui, Zhang Bei, et al. Application of infrared in asphalt pavement quality control[J]. Foreign Highway, 2007(4):102-105.
- [21] 王杨洋. 红外热像仪在建筑结构热工缺陷检测上的应用[J]. 门窗, 2014(5):102-103.
- WANG Yangyang. Infrared applied research on the corner outside the building condensation problem[J]. Building Energy Efficiency, 2014(5):102-103.
- [22] 曹喜承,邓书辉,郭涛,等. 红外热像仪在建筑节能检测中的应用[J]. 节能技术, 2008(1):92-94.
- CAO Xicheng, DENG Shuhui, GUO Tao, et al. Infrared applications in building energy detection[J]. Energy-efficient Technologies, 2008(1):92-94.