

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20231218002

## 降雨条件下冰碛土滑坡模型试验研究\*

金建立<sup>1,2</sup>, 曹志翔<sup>1,2</sup>, 宗永臣<sup>1,2</sup>, 陈亮<sup>1,2,3</sup>, 王康宇<sup>4</sup>

(1. 西藏农牧学院水利土木工程学院, 西藏 林芝 860000; 2. 西藏土木水利电力工程技术研究中心, 西藏 林芝 860000; 3. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 4. 浙江工业大学土木工程学院, 浙江 杭州 310014)

**摘要:** 实践指出降雨是引发边坡破坏的重要外部因素之一。为研究降雨作用下冰碛土滑坡规律和导致滑坡的内在因素, 本次研究制作了3种坡度的冰碛土边坡模型, 进行了3种降雨强度下的共9组降雨作用下的冰碛土滑坡试验, 通过试验观测边坡土含水率、土压力变化及边坡变形数据, 从而揭示降雨条件下冰碛土边坡破坏的机制。通过对冰碛土边坡降雨试验过程的观测发现, 边坡模型坡脚位置的含水率最先稳定, 各观测点的土压力没有观测到明显变化规律。实验过程中降雨入渗导致的滑坡变形大致可以划分为4个阶段, 首先为局部性土颗粒滑落, 其次为边坡表面形成冲蚀沟, 然后小范围的冲沟逐渐扩展为中部和上部连片滑动, 最后冰碛土边坡浅层形成贯通性滑动体, 滑动的泥水混合物流动一段距离后在坡脚处形成堆积体。3种暴雨工况下各坡度边坡主要特征表现为边坡表层土体产生小范围坡面径流, 径流逐渐增强形成冲蚀沟, 其后发生滑坡破坏。3种大雨工况下坡度超过45°的边坡发生了滑坡破坏。3种中雨工况下仅60°边坡产生了滑坡破坏。结果表明降雨强度和边坡坡度是影响冰碛土滑坡发生的主要因素。

**关键词:** 冰碛土; 边坡模型; 降雨强度; 坡度; 滑坡变形

**中图分类号:** TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)03-0672-08

## Experimental Study on Moraine Soil Landslide Model under Rainfall Conditions

JIN Jianli<sup>1,2</sup>, CAO Zhixiang<sup>1,2</sup>, ZONG Yongchen<sup>1,2</sup>, CHEN Liang<sup>1,2,3</sup>, WANG Kangyu<sup>4</sup>

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xizang Agricultural and Animal Husbandry University, Linzhi 860000, China; 2. Research Center of Civil, Hydraulic and Power Engineering of Tibet, Linzhi 860000, China; 3. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 4. College of Civil Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

**Abstract:** Practical experience shows that rainfall is one of the key external factors triggering slope failure. To investigate the mechanisms of moraine soil landslides under rainfall and the internal factors causing landslides, this study established moraine soil slope models with three slope gradients and conducted nine sets of landslide tests under three rainfall intensities. Through experimental observation of soil moisture content of slopes, soil pressure variations, and slope deformation data, this study revealed the failure mechanisms of moraine soil slopes under rainfall conditions. Observations during

\* 收稿日期: 2023-12-18; 修回日期: 2024-05-21

基金项目: 冰碛土滑坡-泥石流-堰塞湖灾害链发展过程的机理与模拟(U20A20111)、西藏土木水利电力工程技术研究中心项目(XZA202305CHP2005B)资助

作者简介: 金建立(1981—), 男, 讲师, 硕士。主要从事降雨渗流及边坡稳定性方面研究。E-mail: 495688405@qq.com

rainfall tests on moraine soil slopes showed that the moisture content at the slope toe stabilized first, and no obvious variation patterns were observed in earth pressure at monitoring points. The landslide deformation caused by rainfall infiltration during the experiment could be divided into four stages: local soil particle slippage, formation of erosion gullies on the slope surface, gradual expansion of small-scale gullies into interconnected sliding areas in the middle and upper sections, and formation of a continuous shallow sliding mass in the moraine soil slope. The flowing mud-water mixture traveled a certain distance before depositing at the slope toe. Under three rainstorm scenarios, slopes of different gradients exhibited small-scale surface runoff that gradually intensified into erosion gullies, ultimately triggering landslides. Under heavy rainfall scenarios, slopes with gradients greater than  $45^\circ$  experienced landslides. Under three moderate rainfall scenarios, only the  $60^\circ$  slope suffered from landslides. The results show that rainfall intensity and slope gradient are the main factors influencing the occurrence of landslides in moraine soils.

**Keywords:** moraine soil; slope model; rainfall intensity; slope gradient; landslide deformation

## 0 引言

冰碛土是冰川运动过程中形成的组成复杂的混杂堆积体<sup>[1]</sup>。随着全球气候变暖,高原冰川和永久性冻土融化,冰碛土边坡大量发生失稳,对区域未来发展带来较大的影响<sup>[2-4]</sup>。青藏高原分布有大量的冰碛土边坡<sup>[5]</sup>,水的入渗是引起边坡不稳定的最常见因素<sup>[6-8]</sup>,如2000年4月9日20时05分,由于冰雪融水与雨水的叠加作用导致西藏自治区波密县易贡乡扎木弄沟冰碛土发生大体积滑坡<sup>[4]</sup>,充沛的降雨等因素综合作用导致2014年以来色东普流域内发生的8次冰碛土滑坡堵塞雅鲁藏布江事件<sup>[9]</sup>,降雨入渗作用下冰碛土边坡产生一系列的灾害形式,形成一个复杂的灾害链:冰碛土滑坡→冰碛土堵江形成堰塞湖→冰碛坝堰塞湖溃决等复合灾害事件<sup>[10-15]</sup>。

降雨与边坡破坏密切相关,科研人员针对降雨作用下的边坡破坏展开研究,主要利用试验数据探究滑坡发生的机理或基于气象统计数据对滑坡发生的机率进行预测。研究降雨引起滑坡的常用方法有灾害数据分析、现场试验、模型计算和室内试验。赵宏昱等<sup>[16]</sup>、陶伟<sup>[17]</sup>利用有限元模拟研究了降雨作用下的滑坡机理;刘伟<sup>[4]</sup>、童立强等<sup>[9]</sup>利用现场灾害数据对滑坡的发生机理和未来发展进行了预测;陈宁生等<sup>[18]</sup>利用现场试验研究了入渗作用下冰碛土滑坡的机理;T.Y. Wu等<sup>[19]</sup>利用室内模型试验对不同降雨条件下的边坡稳定性进行了研究。降雨作用下边坡表层发生土颗粒迁徙、渗流、侵蚀,引

起坡体内部含水率和土压力变化,坡体变形机制较为复杂。由于土体组成的复杂性,不同区域的土体存在极大差异,模型计算很难准确解决降雨作用下的边坡失稳问题。利用仪器实地测量边坡的破坏工况相对困难,研究条件限制现场试验很难实施。基于边界条件等因素的可控性,测量数据的可选性,实验室模型试验仍然是目前研究降雨作用下边坡变形破坏最常用的方法。

为探索不同降雨工况下冰碛土边坡的渗流特性、变形响应、滑坡机理,制作了不同坡度的冰碛土边坡室内模型,进行了不同降雨强度和坡度条件下的边坡降雨模型试验,观测了土压力、体积含水率及边坡浅层土体位移数据,分析了边坡破坏机理。

## 1 冰碛土边坡降雨模型试验

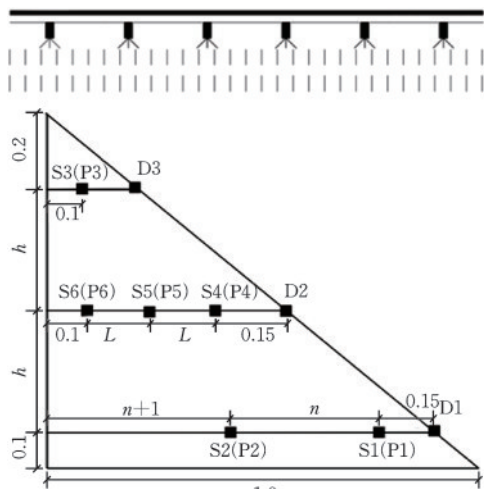
试验用冰碛土采自西藏林芝地区易贡滑坡体,位于易贡湖下游右岸。为减少气候条件对表层土体的影响,取10 cm以下土体作为试验用土。试验土样参数:黏聚力 $C=0.42$  kPa,内摩擦角 $\varphi=31.6^\circ$ ,土体容重 $\gamma=20.3$  kN/m<sup>3</sup>,最优含水率为10.85%,最大干密度为2.13 g/cm<sup>3</sup>。

### 1.1 模型设计

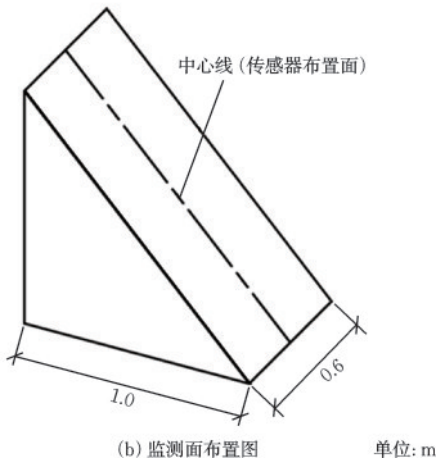
设计了冰碛土边坡降雨模型,如图1所示。边坡降雨模型包括模拟降雨系统和冰碛土边坡模型。模拟降雨系统采用PVC板制成降雨水箱,在底板上打孔,将注射器端部固定在孔中,通过注射器针头实现降雨,针头间距5 cm,通过针头数量和型号控

制降雨强度,可模拟中雨至特大暴雨的工况,雨强依据国家气象局的相关标准划分。试验时水箱内保持5 cm 恒定水头,以保证降雨的稳定性。采用20 cm 雨量器和20 cm 直径雨量器专用雨量杯对降雨强度标定,如图2所示。冰碛土边坡模型外框架用方钢焊接制成,采用1.5 cm 厚亚克力透明板组成箱体,板上绘制10 cm×10 cm 的方格,以便观测坡体变形。冰碛土边坡模型底宽0.6 m,水平长度1.0 m,分别制作了30°、45°、60° 3种坡度的边坡进行降雨试验。模型底部设置有2°的排水坡度,并在底部间隔黏贴长10 cm、厚0.5 cm 的PVC条,减小雨水囤积对于试验结果的影响;装土前在竖直的PVC侧板上均匀涂抹凡士林,以减小模型槽侧面的边界效应。在边坡模型中间剖面位置处布设一个监测面,埋设CYY-SF 含水率传感器、CYY6 土压力传感器,用于量测降雨入渗过程的体积含水率、水平土压力

数据,使用CYY-3055数据采集仪采集数据,采集频率为1次/5秒。土压力传感器传感面与水平方向垂直,只能测量水平方向土压力。用高尔夫球埋设在监测面的表面用于测量位移,监测面及传感器的布置如图1所示。图2、图3分别为模型槽、降雨水箱、雨量标定仪器图和数据采集器、传感器图。



(a) 传感器埋设位置



(b) 监测面布置图

图1 监测面及传感器布置示意  
Fig.1 Schematic diagram of monitoring surface and sensor arrangement

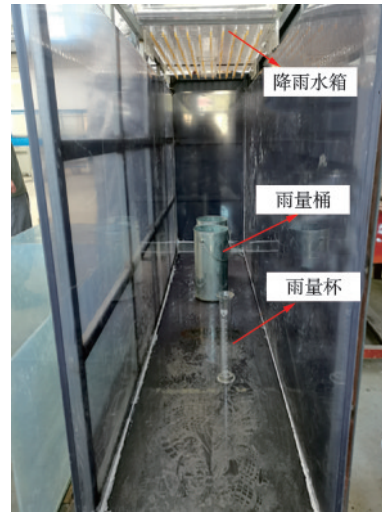


图2 模型槽、降雨水箱、雨量标定仪器

Fig.2 Model tank, rainfall water tank, and rain gauge calibration instrument



图3 数据采集器、传感器

Fig.3 Data collector and sensors

## 1.2 试验方案

为了研究降雨作用下冰碛土边坡的破坏特性和变形演变规律,设置降雨强度和边坡坡度两种变量,实验室条件下进行了9种不同降雨工况下的滑坡试验,冰碛土模型边坡土体初始含水率为2%,干密度为1.7 g/cm<sup>3</sup>,渗透系数为11.03×10<sup>-3</sup> cm/s。试验工况坡度共设置了30°、45°和60° 3种,降雨量依据国家气象局关于降雨量等级的划分标准,选择中雨(24 h降雨量22 mm)、大雨(24 h降雨量

49 mm)和暴雨(24 h降雨量 90 mm)3种,具体试验方案见表1。为减小不同边坡模型土体的压实状态对试验结果的影响,模型装样过程分层填筑土体,每层土填筑之前对上一层填土表层进行拉毛处理,降低由于填筑造成土体分层。严格控制每层的填筑厚度及填土质量,保证填筑土体总高度达到设计要求,减小压实状态对试验结果的影响。

表1 试验方案  
Table 1 Test schemes

工况	1	2	3	4	5	6	7	8	9
坡度	30°	30°	30°	45°	45°	45°	60°	60°	60°
雨强	中雨	大雨	暴雨	中雨	大雨	暴雨	中雨	大雨	暴雨
结果	未滑	未滑	滑坡	未滑	滑坡	滑坡	滑坡	滑坡	滑坡

## 2 试验结果分析

### 2.1 滑坡变形演化特征分析

根据试验方案,将冰碛土边坡降雨模型试验结果列于表1。表1显示工况3、5、6、7、8、9发生了滑坡,工况1、2、4未发生明显的滑坡。以下重点介绍发生滑坡时边坡变形的典型过程,图4为工况8滑

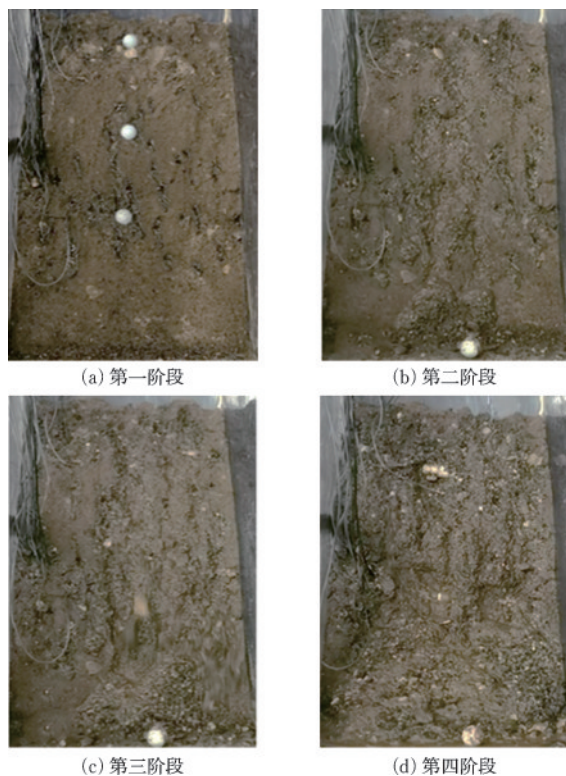


图4 典型滑坡变形过程示意

Fig.4 Schematic diagram of typical landslide deformation process

坡的变形过程,通过分析可以将边坡变形大致归纳为4个阶段:

第一阶段,边坡的中部及上部出现少量土颗粒的滚落,没有明显的拉伸裂缝。如图4(a)所示。

第二阶段,边坡中部及下部出现明显的冲沟,冲下的土水混合物迅速向下流动,并在坡脚处堆积,坡脚处出现浑浊的水体。如图4(b)所示。

第三阶段,边坡中部表层出现明显连片的滑动体。随着降雨入渗,表层滑动的土水混合体面积逐渐扩大,下切深度也在加深,土水混合体在向下滑动的过程中,带动边坡前缘土体形成大体积的滑动。随着滑动体的不断滑移,边坡的中上部出现有一定落差的坎,坡脚堆积体逐渐扩大。如图4(c)所示。

第四阶段,边坡顶部和坡脚之间某处形成横向贯通的滑动区,大量的滑坡土下滑堆积在坡脚处,形成较大体积的堆积体。如图4(d)所示。

### 2.2 边坡含水率变化分析

冰碛土滑坡破坏受到降雨强度和坡度的影响,雨水的入渗引起边坡土体含水率、土压力等方面的变化,以下从坡度和降雨强度两个方面入手,对边坡土体的含水率、土压力的变化规律展开分析,从而揭示降雨作用下冰碛土边坡破坏机理。

根据试验观测数据,绘制边坡土体含水率变化趋势图,如图5所示。从图5各工况可以看出,降雨开始后,各监测点的含水率短期内未发生变化,均稳定在2%的初始含水率附近。随着雨水入渗,坡面表层土体含水率迅速升高,工况4、7、9中的浅层监测点S1或S2的土体含水率均在5 min后发生明显变化,且增长趋势近乎直线,工况9的土体含水率在6 min时增长到30%,随后边坡深层土体S4、S5、S6各监测点含水率也迅速升高,工况5的S4点在15 min后迅速升高,在36 min时为24%,随后各监测点含水率趋近稳定。发生这种现象主要是由于土为粗颗粒组成,土体孔隙率大、渗透性强,雨水下渗快,造成土体的含水率迅速升高。从图5可以看出,除工况4、7、8外,各工况下坡脚处S1监测点的含水率最终均最大,分别为11.83%(工况1)、14.78%(工况2)、30.12%(工况5)、28.31%(工况6)、30.26%(工况9),发生以上现象的原因是在雨水的垂直入渗和土体内部的斜向下渗流作用下,雨水在坡脚处聚集,导致此位置含水率最大。经后期检

查工况4、7和8雨水冲蚀作用引起表层细颗粒流局部大颗粒含量增多导致了S2监测点雨水聚集,含水率稳定时最大。工况3(图5(c))的S2监测点传感器随着土体发生滚动,最终从土中脱落,导致该点含水率在比较大范围内反复波动,所测数据不具备代表性。工况5降雨后期S2和S5监测点突然下降,S2由18.76%下降到8.32%,S5由16.21%下降到12.89%,可能是由于土颗粒在水的浸润和渗流作用下发生局部位移,传感器周边土体密实度增加,导致了含水率突降。

选取工况2、5、8对比分析中雨强度下不同坡度的土体含水率变化规律。降雨发生后各坡度边坡浅层的S1、S2、S3点含水率变化启动时间点相近,由于各坡度下浅层监测点传感器埋置深度相同,雨

水到该点的渗径相同,虽降雨强度不同,含水率变化启动时间点相近,说明坡度变化对雨水在土体浅层中的渗透影响不大。工况5(图5(e))在115 min时S2和S5两处含水率突然下降,主要是因为S2点处在雨水冲刷作用和土的滑动共同作用下,含水率传感器裸露在土体外部导致了含水率的迅速下降;S5点的含水率突然下降可能是由于该处土体在水的渗透作用下,细颗粒发生位移填充了传感器所在位置的空隙,从而导致含水率的下降。工况8(图5(h))S1和S2降雨20~30 min时段,S1和S2两监测点含水率反复波动,主要是因为暴雨作用下浅层土体受到的直接影响,土体的颗粒运动反复变化,导致了含水率的不断改变,后期S1监测点的含水率下降,主要是因为上部雨水的冲击作用下该点传感器

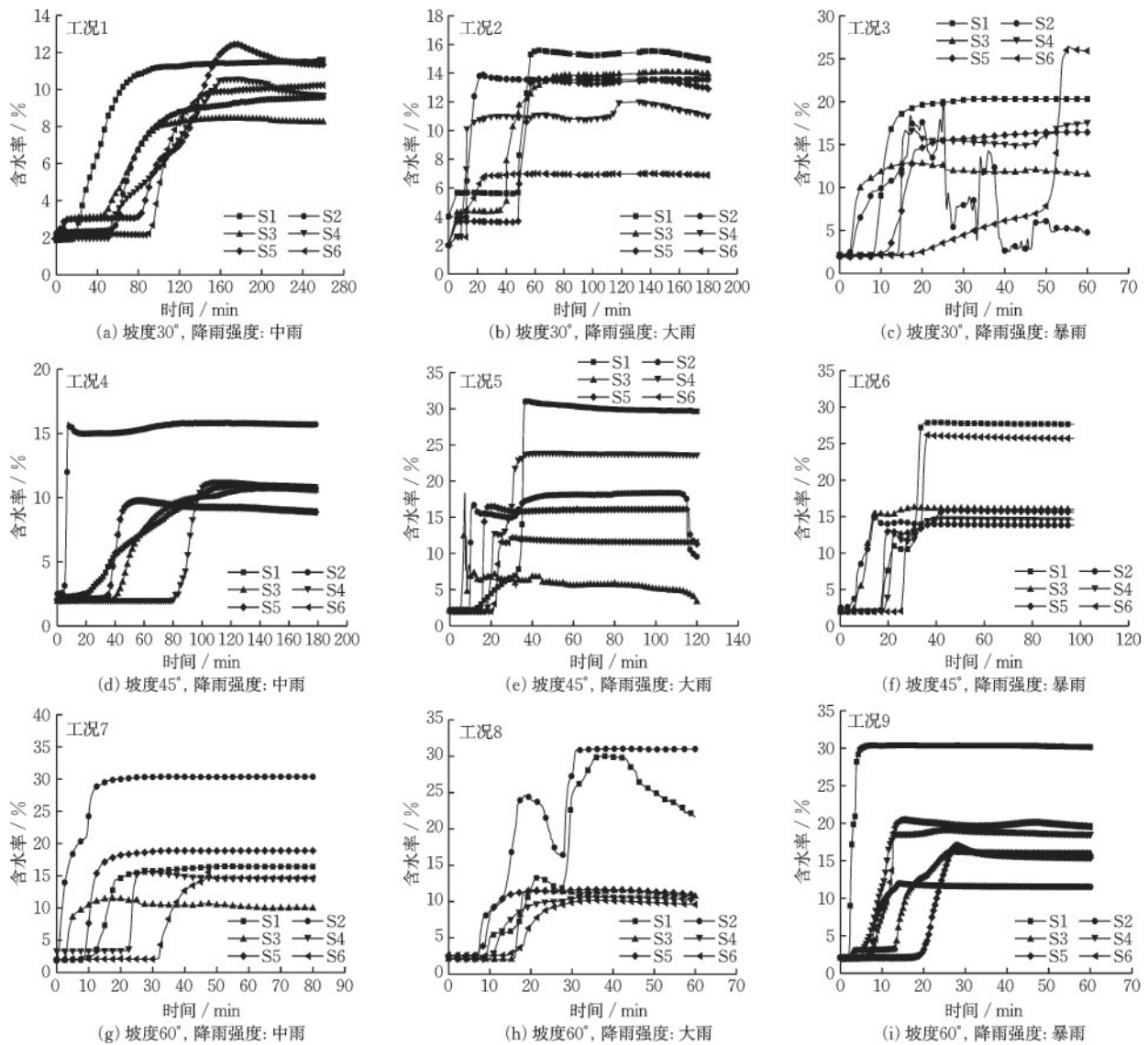


图5 土体含水率变化趋势

Fig.5 Trends of soil water content

出露于土体之外所致。

分别对比工况1、4、7、2、5、8、3、6、9三组图,在降雨强度相同坡度不同的情况下,随坡度增大,边坡表层含水率与深层含水率差值增大。分别对比工况1、2、3、4、5、6、7、8、9三组图,在坡度相同降雨强度不同的情况下,随降雨强度的增加,边坡浅层含水率增加。

### 2.3 边坡土压力变化分析

根据试验观测数据,绘制土压力变化趋势图,如图6所示。坡体在降雨入渗后,土颗粒发生位移导致边坡局部或整体变形。由图知,P1、P2监测点土压力变化较为剧烈,浅层土体的土压力变化较为剧烈,随着降雨的持续发生,坡脚处的土压力下降

至最低值后迅速增长,达到一定高位后,土压力再次迅速下降,然后逐渐趋于稳定。初期土压力下降,主要是由于该时间段传感以下的土体发生的滑动较大,土压力传感器受到的压力减小,随着降雨时长的延续,土的含水率由坡脚向上逐渐增加,导致土压力传感上部的土体滑动大于下部土体的滑动量,土压力值表现为增长。出现上述的变化过程,说明降雨入渗引起土体含水率变化是影响土体变形的主要因素,土体的变形表现为局部性和分段性。30°坡中雨情况下,P2点(坡体中间部位)土压力变化比较大,呈升高趋势,由3.12 kPa迅速升高至5.82 kPa后趋于稳定,说明降雨入渗和边坡变形均趋于稳定;P4点(坡体底部中间部位)有土压力波动,由初期1.08 kPa迅速升高到3.63 kPa,然后急速

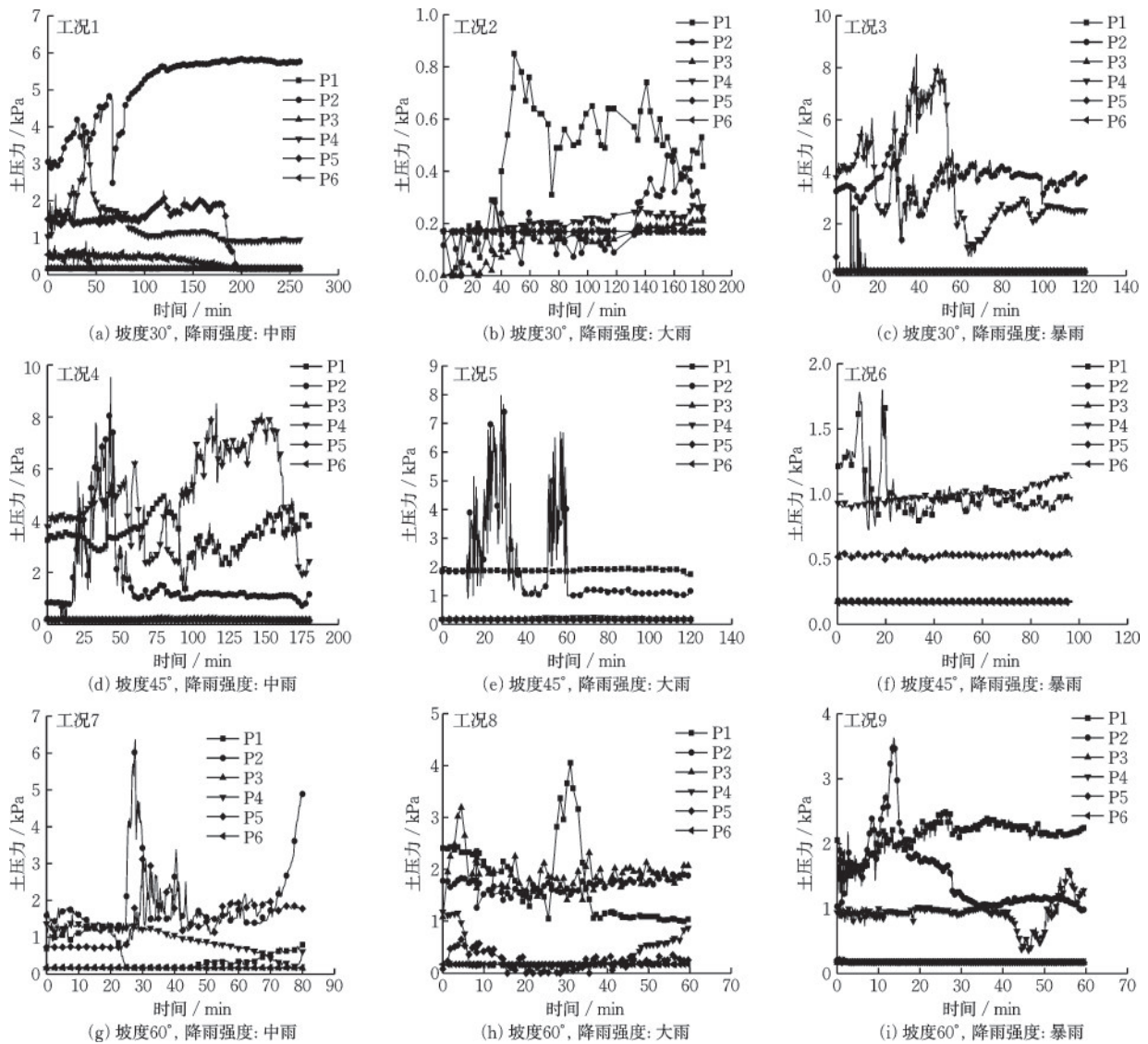


图6 模型土压力变化曲线

Fig.6 Variation curves of model soil pressure

下降至 1.02 kPa, 发生上述现象主要是降雨过程中先发生上层土体的向下挤压导致土压力增大, 随后下层土体发生向下滑动, 引起土体压力降低。其余各监测点, 变化不明显。大雨工况下, 坡脚处的土压力变化比较明显, P2 后期变化比较明显。发生以上变化的原因主要是因为土体是由松散颗粒组成, 各部位的滑动变形并不保持完全的一致性, 当传感器上部土体位移大于下部土体位移时, 土压力表现为增长, 当传感器上部土体位移小于下部土体位移时, 土压力表现为下降趋势。

图 6 不同降雨强度下土压力的变化曲线, 可以看出 P1、P2、P4 监测点观测到的土压力数据随时间变化波动较为剧烈。土压力变化的程度反映了边坡内土体位移的变化, 位移的变化反应了滑坡变形的边界点, P1、P2、P4 分别代表坡脚、坡中和坡脚水平方向的中间部位, 与观测到的滑坡体边界一致。此现象表明, 研究区域土体黏聚力较低, 降雨过程中边坡土体变形以局部变形为主, 没有明显的整体性变形发生。

从图 6 中的 3、5、7、9 滑坡工况土压力变化曲线图可以看出, P2 监测点土压力工况 3 变化范围为 1~5 kPa、工况 5 变化范围为 1~8 kPa、工况 7 变化范围为 1~6.5 kPa、工况 9 变化范围为 1~4 kPa, 土压力的反复波动说明该点处土体变形剧烈, P2 点位于坡中, 该处在滑坡体前缘部位附近, 土体变形较大造成土压力变化剧烈, 与观察结果相符。S1 监测点 6 和 8 两种工况下土压力剧烈, P2 处土压力变化不大, 主要是由于 P2 点附近土体发生了整体性滑移。由上述分析可知, 滑坡发生时滑坡体前缘土压力变化比较敏感, 因此在滑坡监测过程中应重点观测坡中部位土压力变化情况。

#### 2.4 降雨强度与坡度对滑坡的影响

根据试验观察, 边坡坡度和坡高较低时坡体变形量很小, 当坡度大于 45° 时, 坡体的变形较为显著, 土体发生向下的滑移是最主要的表现形式。前期滑移变形主要集中在边坡的中部上缘, 边坡后缘变形启动时间相对较晚且呈现间歇性滑移特征。滑坡工况下, 观察到降雨强度越大, 滑坡启动时间越短, 土体滑出坡脚的距离越长。未产生滑坡的工况, 观测到的边坡竖向沉降量和水平滑移量均较小, 坡脚处土体呈现微隆起特征, 边坡表层由低处向高处位移变形量逐渐增大。

对表 1 冰碛土边坡降雨模型试验结果进行分析可知, 降雨强度和边坡坡度是影响边坡稳定性的重要因素。当降雨强度为暴雨时, 各坡度边坡均发生滑坡; 当降雨强度为大雨时除 30° 边坡外均发生滑坡; 当降雨强度为中雨时, 只有 60° 边坡发生了滑坡。说明降雨强度越大, 边坡发生滑坡的概率越大。在边坡坡度为 60° 时, 三种降雨强度下均发生了滑坡; 当边坡坡度为 45° 时, 只有中雨工况未发生滑坡; 当边坡坡度为 30° 时, 仅暴雨工况发生了滑坡。说明边坡坡度越大, 边坡发生滑坡的概率越大。

### 3 结 论

(1) 降雨作用下冰碛土边坡滑坡变形大致可以划分为 4 个阶段, 首先为局部性土颗粒滑落, 其次为边坡表面形成冲蚀沟, 然后逐渐扩展为中部和上部连片滑动, 最后形成贯通性滑动并在坡脚处形成堆积体, 边坡变形整体表现为表层土体由低处向高处位移变形量逐渐增大, 坡脚处土体呈现隆起特征。

(2) 降雨强度和边坡坡度是影响冰碛土边坡稳定性的重要因素。较大的降雨强度对边坡产生较强的表层冲刷, 坡面表层土体含水率迅速升高, 引起浅层土体的冲蚀和剥落。较大的坡度增加了土体的下滑力, 滑坡体前缘部位附近变形较大造成土压力变化剧烈, 促进了土体颗粒的下滑趋势, 雨强为中雨以下时, 降雨强度小于土体入渗能力, 雨水迅速向深层土体渗入, 滑坡发生时坡脚处土体含水率最大。

#### 参考文献:

- [1] 邱恩喜, 何巧玲, 孙希望, 等. 冻融循环作用下西藏东南冰碛土剪切力学特性试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2022, 42(6): 1267-1279.  
Qiu E X, He Q L, Sun X W, et al. Experimental study on shear mechanical properties of moraine soil in south-east tibet subjected to freeze-thaw cycles[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(6): 1267-1279. (in Chinese)
- [2] 杨兴国, 曹志翔, 邢会歌, 等. 冰碛土滑坡—泥石流—堰塞湖灾害链发展过程机理与模拟技术研究构想[J]. 工程科学与技术, 2022, 54(3): 1-13.  
Yang X G, Cao Z X, Xing H G, et al. Research framework of the program: dynamic evolution mechanism and simulation of moraine landslide—debris flow—

- dammed lake disaster chain (invited contribution)[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2022, 54(3): 1-13. (in Chinese)
- [3] 袁浩,郭长宝,吴瑞安,等. 西藏易贡高位远程滑坡研究进展与展望[J]. *地质通报*, 2023, 42(10): 1757-1773.  
Yuan H, Guo C B, Wu R A, et al. Research progress and prospects of the giant Yigong long run-out landslide, Tibetan Plateau, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 2023, 42(10): 1757-1773. (in Chinese)
- [4] 刘伟. 西藏易贡巨型超高速远程滑坡地质灾害链特征研析[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2002, (3): 11-20.  
Liu W. Study on the characteristics of huge scale-super highspeed-long distance landslide chain in Yigong, Tibet[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2002, (3): 11-20. (in Chinese)
- [5] Chen H N, Wang Y, Zhang Y, et al. Surface deformation of Kangding airport, Qinghai-Tibet plateau, China using insar techniques and multi-temporal sentinel-1 datasets [C]//IGARSS 2018-2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Piscataway, N.J.: IEEE, 2018: 3059-3062.
- [6] Juang C H. BFTS-Engineering geologist's field station to study reservoir landslides[J]. *Engineering Geology*, 2021, 284: 106038.
- [7] Gong W P, Juang C.H, Janusz W. Geohazards and human settlements: Lessons learned from multiple relocation events in Badong, China-Engineering geologist's perspective[J]. *Engineering Geology*, 2021, 285: 106051.
- [8] Li C D, Robert E C, Fu Z Y, et al. Evolution characteristics and displacement forecasting model of landslides with stair-step sliding surface along the Xiangxi River, three Gorges Reservoir region, China[J]. *Engineering Geology*, 2021, 283: 105961.
- [9] 童立强,涂杰楠,裴丽鑫,等. 雅鲁藏布江加拉白垒峰色东普流域频繁发生碎屑流事件初步探讨[J]. *工程地质学报*, 2018, 26(6): 1552-1561.  
Tong L Q, Tu J N, Pei L X, et al. Preliminary discussion of the frequently debris flow events in Sedongpu Basin at Gyalaperi peak, Yarlung Zangbo River[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2018, 26(6): 1552-1561. (in Chinese)
- [10] Zou Q, Cui P C, Jiang H, et al. Analysis of regional river blocking by debris flows in response to climate change[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 741: 140262.
- [11] Fan Y Y, Song L, Wei X L. Analysis of the start-up mechanism of moraine debris flow based on flume test: A case study of the Aierkuran Gully along the Sino-Pakistan highway [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2021, 32(1): 1-9.
- [12] Felip U, Mertin B, Idoia A. After the 2017 disaster: Villa Santa Lucia And iits surrounding Glaciers. a Contribution to resilience from a glaciological view at Chilean northern patagonia[C]//Agu Fall Meeting Abstracts. SanFrancisco: [s.n.], 2020.
- [13] Robin N, Chen H Y, Cao C R. Review of moraine dam failure mechanism[J]. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2019, 10(1): 1948-1966.
- [14] Zhang C, Yao L K. Study on earthquake-induced sloshing waves in moraine-dammed lakes[J]. *Journal of Earthquake and Tsunami*, 2022, 16(1): 2250001.
- [15] Wang J, Cui Y F, Clarence E C, et al. The effect of climate change on alpine mountain hazards chain: a case study in Tianmo Ravine, Tibet, China[C]//The International Congress on Environmental Geotechnics; Springer. Hangzhou: Springer Singapore, 2018: 461-470.
- [16] 赵宏昱,王国义,杨兵,等. 雨后不同时长基覆型边坡动力失稳破坏研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 2024, 44(4): 933-939,951.  
Zhao H Y, Wang G Y, Yang B, et al. Dynamic instability failure of slope with bedrock in different duration after rain[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2024, 44(4): 933-939,951. (in Chinese)
- [17] 陶伟. G318波林段典型砂性土边坡稳定性与降雨阈值研究[D]. 拉萨: 西藏大学, 2022.  
Tao W. Study on stability and rainfall threshold of typical sandy soil slope in G318 Bomi-Nyingchi Section [D]. Lhasa: Tibet University, 2022. (in Chinese)
- [18] 陈宁生,王政,田树峰,等. 冰碛土体起动泥石流的特征研究[J]. *第四纪研究*, 2019, 39(5): 1235-1245.  
Chen N S, Wang Z, Tian S F, et al. Study on debris flow process induced by moraine soil mass failure [J]. *Quaternary Sciences*, 2019, 39(5): 1235-1245. (in Chinese)
- [19] Wu T Y, Jia J H, Jiang N, et al. Model test of deformation evolution and multi factor prediction of anchorage slope stability under rainfall condition[J]. *Journal of Earth Science*, 2020, 31(6): 1109-1120.

(本文编辑:苏泽云)