



## 黄土-泥岩滑坡渐进滑动失稳的模型试验研究

李拴虎, 亓越, 王晓荣, 高瑜, 邢渊浩

### Physical modelling of progressive sliding instability of loess-mudstone landslide

LI Shuanhu, QI Yue, WANG Xiaorong, GAO Yu, and XING Yuanhao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2022082501>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 基于模型优化的广义自由表面多次波压制技术在印度洋深水海域的应用

Generalized free surface multiple suppression technique based on model optimization and its application to the deep water of the Indian Ocean

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 221

#### 南海北部陆坡神狐海域SH-CL38站位的粒度特征及沉积记录

Sediment grain size characteristics of the Core SH-CL38 in the Shenhu area on the northern continental slope of the South China Sea

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 90

#### 马里亚纳弧前Quaker蛇纹岩泥火山自生烟囱生长模式

Formation model of authigenic chimneys on the Quaker serpentinite mud volcano in the Mariana forearc

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 15

#### 海洋天然气水合物储层蠕变行为的主控因素与研究展望

Controlling factors and research prospect on creeping behaviors of marine natural gas hydrate-bearing-strata

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 3

#### 西太平洋弧后盆地的热液系统及其岩浆环境研究

Seafloor hydrothermal system and its magmatic setting in the western Pacific back-arc basins

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 12

#### 华南下扬子区早寒武世幕府山组沉积环境：来自于全岩地球化学的启示

Sedimentary environment of the Lower Cambrian Mufushan Formation in the Lower Yangtze region: Evidence from whole-rock geochemistry

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 82



关注微信公众号，获得更多资讯信息

李拴虎, 亓越, 王晓荣, 等. 黄土-泥岩滑坡渐进滑动失稳的模型试验研究 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2023, 43(2): 200-207.

LI Shuanhu, QI Yue, WANG Xiaorong, et al. Physical modelling of progressive sliding instability of loess-mudstone landslide[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2023, 43(2): 200-207.

# 黄土-泥岩滑坡渐进滑动失稳的模型试验研究

李拴虎<sup>1,2,3</sup>, 亓越<sup>4</sup>, 王晓荣<sup>1,2,3</sup>, 高瑜<sup>1,2,3</sup>, 邢渊浩<sup>2,3</sup>

1. 内蒙古工业大学土木工程学院, 呼和浩特 010051
2. 内蒙古工业大学沙旱区地质灾害与岩土工程防御自治区高等学校重点实验室, 呼和浩特 010051
3. 内蒙古工业大学地质技术与岩土工程内蒙古自治区工程研究中心, 呼和浩特 010051
4. 浙江大学海洋学院, 舟山 316021

**摘要:**西北地区的黄土-泥岩滑坡灾害逐渐受到关注,其失稳机理和力学模型成为岩土工程方向的研究热点。以滑动变形为指标来研究黄土-泥岩滑坡的渐进失稳模型,能更好地服务于黄土-泥岩滑坡的监测预警工作。采用土-岩滑动界面处直接渗水的方法,模拟降雨入渗作用下黄土-泥岩滑坡渐进滑动失稳的特征;采用在滑动界面处布置微型孔隙水压力和土压力传感器、在滑坡侧面和表面布置宏观变形观测点的方案,研究黄土-泥岩滑坡的渐进滑动失稳特征。结果显示,黄土-泥岩滑坡在顶部或中部某个位置优先形成拉张式裂缝,随后裂缝逐渐贯通并分割滑坡体,形成“滑移-拉裂-推挤”三段式的失稳模型。黄土-泥岩滑坡渐进滑动失稳模型的建立,对其监测预警和工程防御等方面具有重要科学价值。

**关键词:**黄土-泥岩滑坡;渐进滑动失稳;物理模型试验;变形特征;失稳模型

中图分类号:P55;TU444 文献标识码:A DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2022082501

## Physical modelling of progressive sliding instability of loess-mudstone landslide

LI Shuanhu<sup>1,2,3</sup>, QI Yue<sup>4</sup>, WANG Xiaorong<sup>1,2,3</sup>, GAO Yu<sup>1,2,3</sup>, XING Yuanhao<sup>2,3</sup>

1. School of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China
2. Key Laboratory of Geological Hazards and Geotechnical Engineering Defense in Sandy and Drought Regions at Universities of Inner Mongolia Autonomous Region, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China
3. Inner Mongolia Engineering Research Center of Geological Technology and Geotechnical Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China
4. Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan 316021, China

**Abstract:** Loess landslide hazards in Northwest China is gradually gaining attention, especially loess-mudstone landslides, their destabilization mechanism and mechanical model have become a hot spot for research in the direction of geotechnical engineering. Using sliding deformation as an indicator, we studied the progressive instability model of loess-mudstone landslides, which can better serve the monitoring and early warning of loess-mudstone landslides. Direct water infiltration at the sliding interface was used to simulate the characteristics of progressive sliding instability of loess-mudstone landslides under the action of rainfall infiltration. Miniature pore water pressure and soil pressure sensors were arranged at the sliding interface and macroscopic deformation observation points were arranged at the sides and surface of landslide, to reveal the progressive sliding instability characteristics of the loess-mudstone landslide. The results show that the loess-mudstone landslide forms tension cracks at the top or middle of the landslide, and then the cracks gradually expand and divide the landslide, forming a three-stage instability model of "sliding - pulling - pushing". The modelling for progressive sliding instability of loess-mudstone landslides provided important scientific value for its monitoring, early warning, and engineering defense.

**Key words:** loess-mudstone landslide; progressive sliding instability; physical model test; deformation characteristics; instability model

资助项目:内蒙古工业大学科研项目“土体滑坡灾变力学机理研究及其工程预警”(DC220000913);内蒙古自治区科技计划项目“呼包鄂经济区黄土-泥岩型滑坡变形指标的动态追踪技术及其风险防控方案的靶向设计”(2022YFSH0047)

作者简介:李拴虎(1985—),男,博士,讲师,主要从事工程地质灾害研究, E-mail: lishuanhu@imut.edu.cn

通讯作者:王晓荣(1983—),女,博士,副教授,主要从事岩土工程方向的研究, E-mail: wangxiaorong@imut.edu.cn

收稿日期:2022-08-25; 改回日期:2022-11-25. 张现荣编辑

常见于西北地区的黄土-泥岩滑坡是一种灾害频发的滑坡类型, 其灾变机理或变形特征与降雨有直接的关系。西北地区降雨较少, 黄土-泥岩滑坡处于稳定状态, 但是, 当降雨量较大或较集中的时候, 黄土-泥岩滑坡就极易发生失稳<sup>[1]</sup>。一般的黄土-泥岩滑坡从局部滑动到整体失稳破坏是一个缓慢渐进的过程, 在受到降雨、地震或工程活动等突发的外力作用时, 滑坡体在整体失稳之前, 表现出局部变形与破坏<sup>[2]</sup>。

典型的黄土-泥岩滑坡具有双层结构, 上层为覆盖黄土, 下层为泥岩, 一般会在界面处夹杂有大量风化的破碎泥岩<sup>[3]</sup>。近年来, 通过现场监测数据和室内物理模型试验, 认为降雨和地震对黄土-泥岩滑坡的稳定性有最直接的影响, 直接或间接控制着滑坡灾害的孕育、潜伏、发生、爆发、持续、衰减和终止等各个阶段<sup>[4-6]</sup>。黄土的渗透性较好, 泥岩的渗透性较差, 降雨入渗后在滑动带滞留累积, 软化滑动带的黄土和泥岩, 形成潜在的滑动面, 这即是黄土-泥岩滑坡总是发生在降雨期间的原因<sup>[7]</sup>。目前, 国内外学者主要通过黄土-泥岩滑动带土体的强度测定<sup>[8-11]</sup>、室内物理模型试验<sup>[12-13]</sup>和数值模拟<sup>[14-15]</sup>等方法研究降雨对黄土-泥岩滑坡失稳的作用机理。研究认为, 黄土-泥岩滑坡的失稳模式具有规律性, 一般是在坡顶由于拉张作用产生微裂隙, 微裂隙不断扩展成贯通性的裂缝, 这时滑动带开始出现局部滑动破坏, 当滑动带贯通到一定长度时发生整体滑动失稳。因此, 众多滑坡失稳模型被应用到黄土-泥岩滑坡失稳的研究中<sup>[16-19]</sup>, 用来解决降雨作用下的黄土-泥岩滑坡失稳问题。

一般土体的室内大型直剪实验或模型试验中, 滑动带土体表现出明显的应变软化特征。滑动带局部土体由于应力集中而逐渐达到峰值强度, 随后发生应变软化直到剪切破坏。此过程不断向滑动带土体未软化的区域移动, 直到形成贯通性的滑动带, 最终导致滑坡失稳<sup>[20-21]</sup>。传统的极限平衡理论在计算土体滑坡的稳定性系数时, 往往统一采用土体的峰值剪切强度或残余剪切强度, 并假设整个滑动面同时达到剪切破坏状态。现有滑坡模型多数没有同时考虑应变软化和渐进失稳的条件, 或是对滑动失稳模式进行了过度的简化。因此, 针对黄土-泥岩滑坡的渐进失稳特征, 不能简单地利用现有滑坡模型进行直接计算分析, 这样无法体现黄土-泥岩滑坡的渐进失稳特征和变形特征。

本文针对黄土-泥岩滑坡, 综合张龙飞<sup>[1]</sup>和杨丽平等<sup>[22]</sup>的研究思路, 考虑滑动带土体的应变软化效

应, 将推挤式黄土-泥岩滑坡的渐进失稳过程分为不同的阶段, 建立了相应的渐进滑动失稳模型, 并利用缩尺物理模型试验进行验证。物理模型试验较好地体现了黄土-泥岩滑坡的渐进滑动失稳过程及其失稳过程中滑动带土体的抗剪强度变化特性, 这将为深入研究黄土-泥岩滑坡失稳机理提供研究思路。

## 1 渐进滑动失稳机制

室内剪切试验以及滑坡现场取样试验均表明, 滑动带土体具有明显的应变软化特征, 黄土-泥岩滑坡的渐进滑动失稳模型采用如图 1 所示。随着剪切应变的增加, 滑动带土体的抗剪强度分为增加、减小和稳定 3 个阶段。当滑动带受到雨水作用时, 土体发生软化, 其渐进滑动失稳模型曲线发生整体偏移, 峰值强度( $\tau_p$ )和残余强度( $\tau_r$ )均减小, 应变率( $\delta_p$ 和 $\delta_r$ )均增大。

## 2 试验材料与方法

### 2.1 试验材料

模型试验所用黄土的取样地点位于呼和浩特市清水河县(40.06°N、111.62°E), 位于广义黄土高原北部的边界区域。取样点黄土覆盖层较厚, 黄土塬、梁、峁、沟等典型的黄土地貌都有分布, 出露的黄土主要是 Q<sub>4</sub>、Q<sub>3</sub> 和 Q<sub>2</sub> 黄土。本次取样的 Q<sub>3</sub> 黄土天然密度为 1.4 g/cm<sup>3</sup> <  $\rho$  < 1.6 g/cm<sup>3</sup>, 属于黄土高原中等密度土体区域。土样以粉土粒级(0.05~0.005 mm)为主, 其含量约占总质量的 50%~70%, 黏土颗粒(<0.005 mm)成分约占总质量的 10%~25%, 砂土颗粒(>0.05 mm)成分约占总质量的 10%~30%。取样黄土的干密度为 1.56 g/cm<sup>3</sup>, 孔隙比为 0.55, 渗透系数为 1.4×10<sup>-4</sup> cm/s, 内摩擦角为

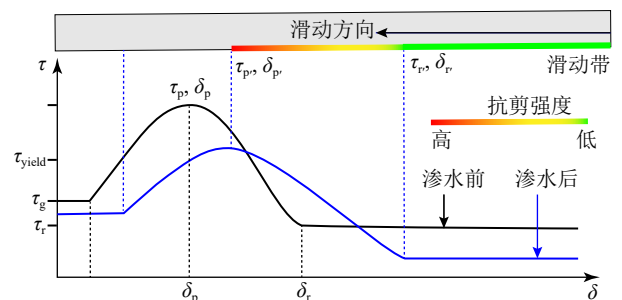


图 1 雨水作用下的黄土-泥岩滑坡渐进滑动失稳模型  
Fig.1 The model for progressive sliding instability of loess-mudstone landslides under the action of rainfall

30°。随着取土的位置不同、地貌单元不同、黄土年代不同和地层不同,黄土颗粒组分的构成百分比会存在一定差异。

数据采集设备为MYJ-1型静态数字电阻应变测试仪,监测传感器为电阻应变式的微型孔隙水压力传感器(HCYB-25)和微型土壤压力传感器(HCYB-16),辅助设备采用了武汉中岩测控技术有限公司生产的振弦式土压力计和振弦式水压力计,其量程较大,但是精度略低,因此在试验中作为对比参考使用。彩色薄木片和彩色塑料球作为变形标记物放置在滑坡体的内部和表面,用来观察坡体的宏观变形特征。

## 2.2 缩尺物理模型装置

综合已有文献中相关黄土滑坡模型箱的优点,设计了本试验缩尺模型箱的几何参数(图2),并遵循了如下几方面的基本设计原则:

(1)灵活性原则。物理模型箱的尺寸或体积越小,灵活性越高,但是,尺寸较小的模型箱无法模拟出黄土滑坡渐进破坏或失稳的局部特征。因此,模型箱的最终设计长宽高分别为2000 mm×300 mm×480 mm,既考虑了试验操作的灵活性问题,又兼顾了模拟结果的科学性。

(2)实用性原则。如果模型箱无法调节倾斜角度,仅依靠土体堆积达到所需的坡度角,需要消耗大量的土体材料。因此,试验模型箱采用了角度可调的双支架结构,两个支架可以独立进行高度调节,从而实现坡度角的任意调整。

(3)可视化原则。土体滑坡模型试验的过程中,需要利用传感器监测土体滑坡内部各项物理参数的变化,也需要具备较好的可视化效果,方便观

察滑坡体局部变形或失稳的动态过程。因此,本试验模型箱除底板外,其余5个面都具有可视性,其中沿长度方向两侧装配了2000 mm×480 mm×8 mm的透明钢化玻璃。

模型试验开始前,先固定好支架和模型箱,参考实际滑坡和相关文献,调整滑坡角为 $\theta=18^\circ$ 。底层由混凝土和黄土加水混合搅拌而成(简称混合土),两者比例大约为2:1,凝固后的干密度约2.0~2.3 g/cm<sup>3</sup>,孔隙率0.2~0.3,渗透系数小于 $5.0\times 10^{-6}$  cm/s,模拟泥岩层厚度为50 mm。混合土能兼顾泥岩的硬度和遇水软化的特性,其物理性质可以随着两者的混合比例不同而改变,是比较理想的经验性尝试。

## 2.3 供水系统设置

受降雨控制的黄土-泥岩滑坡模型,供水系统的设计较为关键。本次试验采用的是直接向滑动带渗水的方法,目的是快速让滑动带土体遇水软化,迅速地进入到动态失稳期,缩短整体的试验时间。渗水管采用直径为20 mm的硬质PVC水管,铺设在混合土层和黄土层的界面处,其中混合土层50 mm,黄土层250 mm(图3a)。整个滑动带预铺设2根渗水管,管之间距离14 cm,管与两侧玻璃边界距离均为8 cm。坡顶处为0 cm标志点,从坡顶开始每隔20 cm对称打孔,孔径为4 mm的圆形孔,在160 cm处停止打孔,160~200 cm处模拟不渗水的界面(图3b)。渗水管设置注水口和出水口,用来调节注水量和渗水速度。

## 2.4 传感器布设方案

在黄土-泥岩滑动带上共布设4种监测传感器,分别为6个微型孔隙水压力传感器,10个微型土压

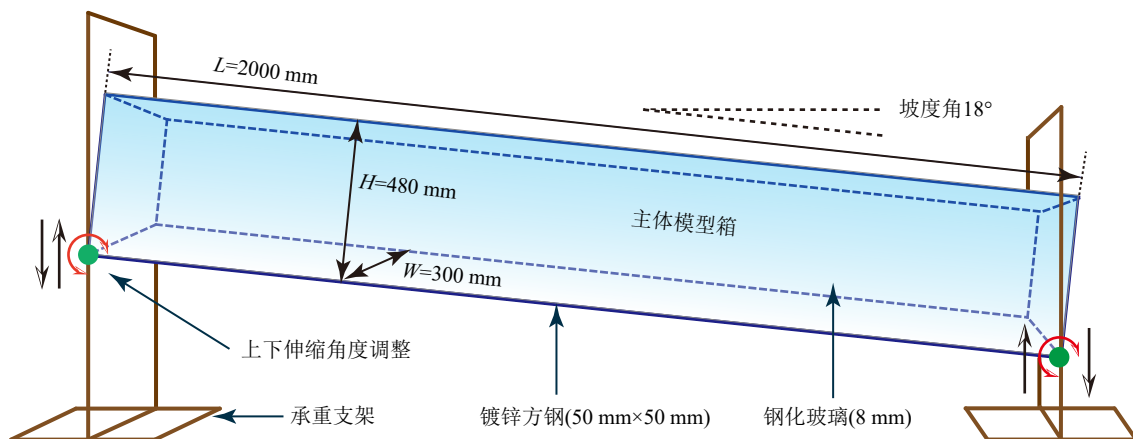


图2 黄土-泥岩滑坡物理模型试验的主体结构及其几何尺寸

Fig.2 Main structure and geometry of the physical model test of loess-mudstone landslide



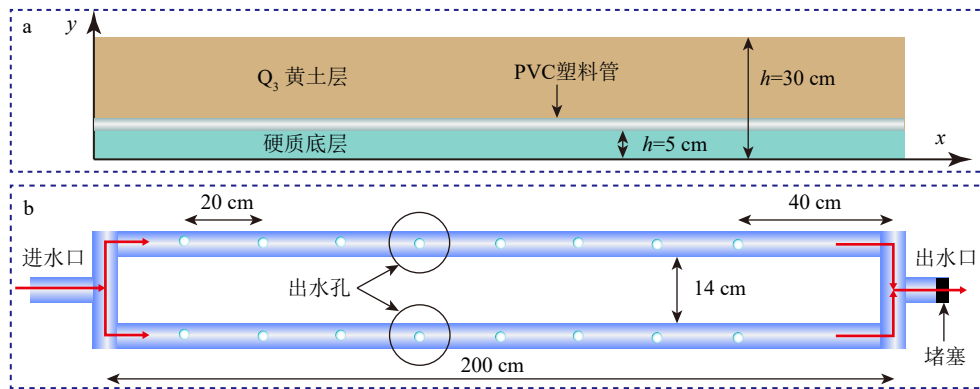


图 3 黄土-泥岩滑坡模型滑动带的供水系统

Fig.3 Water supply system for the sliding zone of loess-mudstone landslide model

力传感器, 1 个振弦式土压力传感器和 1 个振弦式水压力计。微型孔隙水压力传感器布设方案为从坡顶 10 cm 处开始, 每隔 30 cm 放置 1 个; 微型土压力传感器的布设方案为从顶部 20 cm 处开始, 每隔 20 cm 放置 1 个; 振弦土压计和振弦水压力计都布设在 160 cm 的位置(图 4)。

### 2.5 宏观变形标记点设置

为了更好地观察黄土-泥岩滑坡的失稳过程, 在滑坡体上布设了不同类型的宏观标记, 宏观标记材料为彩色薄木条和直径为 2 cm 的彩色塑料球, 目的是观察和测量标记物之间的绝对或相对位移, 从而定量或半定量地研究滑坡体的变形特征。

沿滑坡与侧面玻璃接触部位, 在距离滑动界面约 15 cm 的位置插入彩色薄木片, 每片之间距离为 15 cm; 同样在滑坡表面与玻璃接触的位置插入薄木片, 薄木片的一半长度在土体中, 另一半出露, 每片之间距离为 15 cm。彩色塑料球放置在滑坡体的表面, 横向并列放置 3 个同颜色的小球, 小球之间距离为 10 cm, 小球与两侧玻璃的距离为 5 cm, 纵向为颜色不同的小球, 每排小球之间的距离为 10 cm,

共设置 9 排(图 5)。从注水开始, 实时对滑坡体的动态变形特征和标记物的位置变化特征进行绝对位移, 相对位移或角度倾斜等方面的记录。

## 3 结果及讨论

### 3.1 数据结果分析

监测数据是每隔 10 min 记录一次, 滑坡体在注水后 60 min 的时候失稳破坏(图 6)。开始注水前, 把所有传感器的数值都归零, 因此传感器记录到的数值是相对变化值。由于使用 PVC 管直接在滑动带注水, 孔隙水压力呈逐渐上升的趋势。6 号孔隙水压力传感器数据一直较大, 因为此处前方土体没有注水, 坡体后方的渗水逐渐向 6 号点汇集。4 号和 5 号点孔隙水压力随注水量的增加而逐渐增加, 因为每次注水, 都会使滑动带土体的含水率增加, 孔隙水压力随之增加。

但是, 1、2 和 3 号孔隙水压力监测点在 40~50 min 时开始出现转折下降的态势, 尤其是 3 号点的下降幅度较大, 这是因为黄土-泥岩滑坡并非从顶

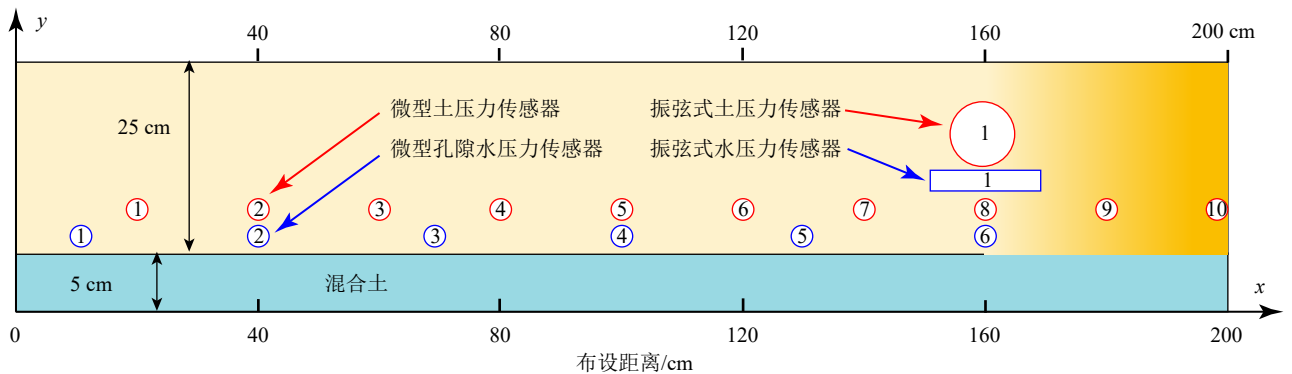


图 4 黄土-泥岩滑坡模型的监测传感器布设方案

Fig.4 Monitoring sensor deployment scheme for loess-mudstone landslide model

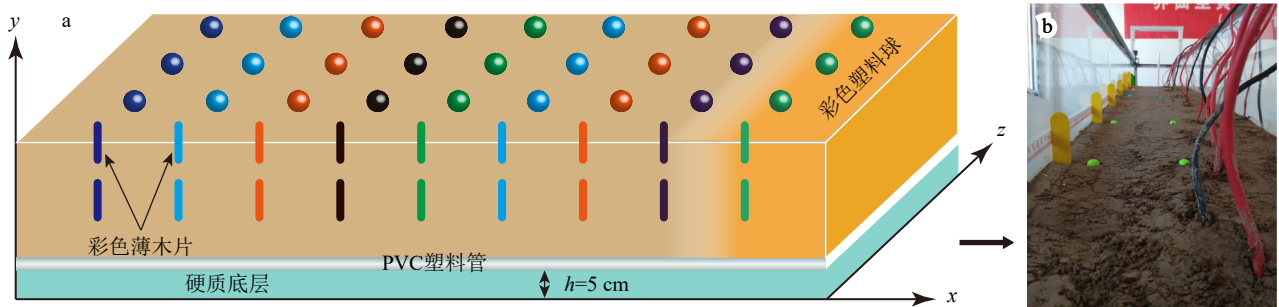


图5 黄土-泥岩滑坡模型变形标记点设置

Fig.5 Deformation marker point setting for loess-mudstone landslide model

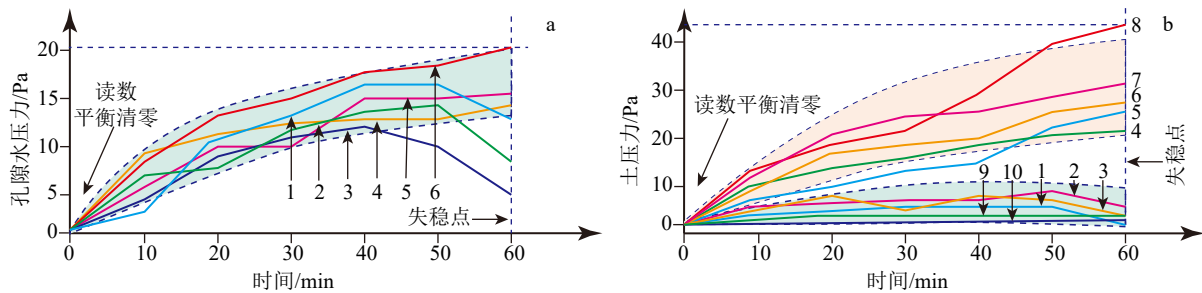


图6 土压力和孔隙水压力数据的相对变化曲线

Fig.6 Relative variation curve of soil pressure and pore water pressure

部开始推挤式下滑,而是从2号和3号点之间的位置拉张形成拉张裂纹或拉张空洞,水体在此很难停留,因此孔隙水压力会降低。1号点由于最先达到饱和状态,土体向后方塌陷,因此其孔隙水压力在后期也略有下降。

微型土压力传感器的数据表现出了一定的规律性,8号点最后达到了最大值,因为在滑坡渐进失稳的后期,滑坡体后方土体的压力逐渐传递到此处。而位于前方的9号和10号点的数值没有显著上升甚至没有变化,因为此处滑动带土体未受到渗水作用,土体抗剪强度较大,剪切变形较小,应力传递逐渐衰减。1号点在滑坡体最顶部,没有其他的应力传导,数值基本没有变化。2和3号点之间最先形成了拉张裂纹,释放了部分的应力,总应力无法累积增加。4、5、6和7号点在滑坡中间位置,受到渗水作用,土体逐渐下滑,应力逐渐向下传导,因此其应力曲线是呈非线性逐渐增大的趋势。布设在160 cm处的振弦式土压力计和孔隙水压力计是一组对照传感器,目的是与微型土压力和孔隙水压力传感器记录的数据进行对照参考,总体来看,振弦式土压力传感器和水压力传感器记录到的数据和微型传感器记录到的数据值具有一致的变化趋势。

### 3.2 渐进滑动失稳模型

注水时,渗水沿着滑动带软化黄土,滑坡体下

滑力逐渐传导到坡脚处,在冲破坡脚土体的阻挡时发生整体失稳,因此,对黄土-泥岩滑坡渐进失稳模型的具体分析如下。

(1)黄土湿陷沉降阶段(图7b)。由于渗水直接作用在滑动带上,且很难向下渗透到混合土内部,因此会在毛细力或压力作用下向上方反渗透,使得一定厚度的黄土发生湿陷性沉降,沉降值为 $v_1$ (约2 cm)。此时的滑动带仅有少量的剪切滑动,主要是垂直方向的沉降变形。

(2)坡体裂隙发展阶段(图7c)。随着渗水量的逐渐增大,滑动带逐渐软化,但滑动带的抗剪强度并非处处相等,局部区域的抗剪强度小于下滑力,因此就产生了拉张型的垂直裂纹。随着裂纹的逐渐扩展,形成小规模拉张沉陷区(滑动亏损),其值为 $v_2$ (约2 cm)。在坡脚处,由于后方土体的推挤力作用,迫使坡面发生局部的鼓丘现象,鼓起高度值为 $v_3$ 。

(3)裂隙贯通阶段(图7d)。随着渗水的持续,坡体内部的裂隙逐渐向滑坡表面扩展并最终形成贯通裂缝,然后多条裂缝将坡体切割为几个独立块体。此时滑动带的土体趋于饱和状态,抗剪强度较低,且坡体大部分的下滑力都传递到坡脚处,最终导致滑坡体整体失稳。由于土体含水率较高,坡脚的土体趋于流塑状态,整个坡体都在缓慢地同步下滑,整体下滑了10 cm左右。

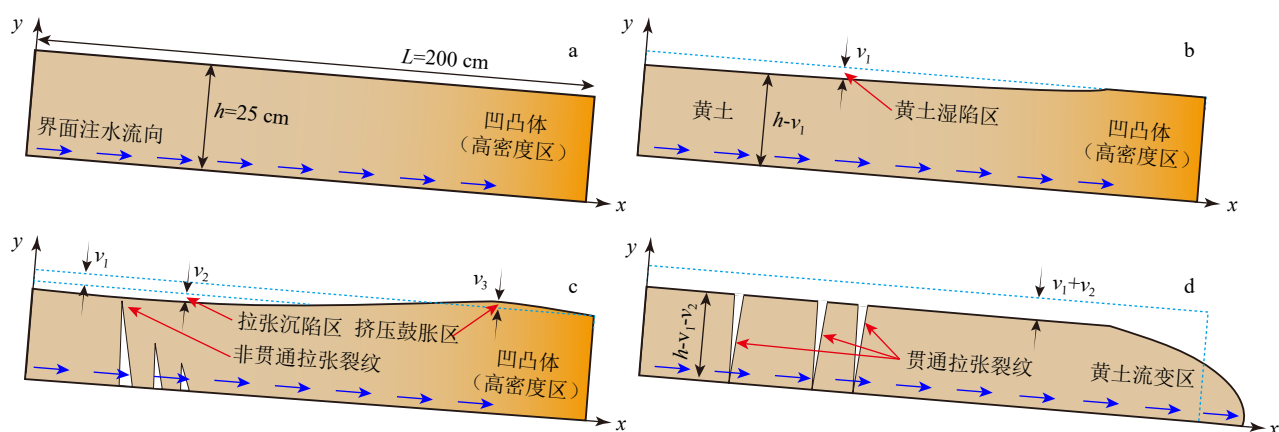


图 7 界面型黄土滑坡的模型试验的失稳模式

Fig.7 Instability model of interface loess landslide

上述黄土-泥岩滑坡渐进滑动失稳模型是推挤式为主、拉断式为辅的混合模式。滑坡体在水的作用下先拉张破坏, 随后挤压破坏, 典型特征是在滑坡后缘有比较明显的陡坎, 即拉断面。通过分析宏观变形标记物的数据可以发现, 其表面的变形特征与理论推测的变形特征基本一致。

### 3.3 降雨和入渗方式

(1) 间断降雨和自然入渗条件。黄土-泥岩滑坡失稳经历了 4 个阶段<sup>[23]</sup>, 分别为①坡面及前缘侵蚀阶段。降雨开始后, 降雨强度远大于入渗系数而形成的坡面流对前缘及坡面产生侵蚀; ②裂隙发展阶段。降雨间隔期间, 坡体表面土体收缩开裂, 坡体前缘发生蠕变变形, 并伴有局部失稳<sup>[24]</sup>; ③裂隙贯通阶段。坡体表面局部裂隙在雨水的入渗作用下逐渐扩展并贯通, 坡体被多条贯通的裂隙切割为独立的小块体; ④失稳阶段。雨水沿裂隙直接入渗到黄土-泥岩界面, 软化了接触面的土体, 降低了土体的抗剪强度, 致使坡体沿贯通的裂隙从前缘至后缘发生逐级滑动破坏。在间断降雨模式下, 边坡变形破坏的失稳模式为滑移-拉裂。

(2) 连续降雨和自然入渗条件。黄土-泥岩滑坡模型试验最大的特征是坡体表面冲刷侵蚀明显, 形成大量的不规则侵蚀槽, 坡体蠕变特征显著<sup>[23]</sup>。其失稳过程经历的 4 个阶段为: ①坡面及前缘侵蚀阶段。坡面发生侵蚀, 侵蚀程度由后缘至前缘逐渐减小; ②坡体蠕变阶段。随着降雨的增加, 坡体土体逐渐处于饱和状态并发生蠕变, 并在坡体的后缘产生拉张裂纹; ③坡体后缘拉裂。坡体发生持续性的蠕变变形, 滑坡后缘最终形成贯通性的拉裂缝; ④失稳阶段。部分土体在饱和状态下处于流塑状

态, 最后在自身重力的作用下发生失稳。在持续降雨模式下, 土体一直处于饱和蠕变状态, 边坡呈现的主要失稳模式为蠕滑-拉裂<sup>[25]</sup>。

(3) 一般降雨和直接入渗条件。本次模型试验是通过界面直接注水的方案研究黄土-泥岩的失稳特征, 模拟黄土-泥岩滑坡中存在落水洞或拉张裂缝发育的情况, 是对现有黄土-泥岩模型试验的一个补充和完善。不同的降雨和入渗条件会引发黄土-泥岩滑坡不同的失稳模式, 目前已有的研究中, 降雨条件主要分为模拟连续降雨或间断降雨, 入渗条件主要为模拟自然入渗<sup>[26]</sup>。本试验采用了界面直接渗水的方案, 模拟水体对黄土-泥岩滑坡界面处的作用模式, 试验结果发现, 雨水入渗方式不同, 坡体裂缝的扩展方式也不同(图 7)。当雨水自然入渗时, 裂缝的扩展方式为从坡表面到黄土-泥岩界面逐渐贯通。当雨水直接入渗时, 裂缝的扩展方式为从黄土-泥岩界面到坡表面逐渐贯通, 边坡的主要失稳模式为滑移-拉裂-推挤。

## 4 结论

(1) 通过黄土-泥岩滑坡物理模型试验, 建立了黄土-泥岩滑坡渐进滑动失稳模型。结果表明, 渐进滑动失稳模型不仅通过了埋设在滑坡体内部的微型传感器监测数据的验证, 而且通过了坡体表面变形标记物的验证, 这将为黄土-泥岩滑坡的监测预警工作开展提供参考。

(2) 渗水形式对黄土-泥岩滑坡的失稳特征具有重要影响, 滑动带直接渗水模式下表现为“滑移-拉裂-推挤”的失稳形式。渗水作用降低了滑动带的抗剪强度, 坡体局部向下滑移, 在滑移差异大的区域

优先形成了拉张裂缝,裂缝逐渐贯通后把滑坡切割为独立的部分,最终会以推挤的形式滑动失稳。

(3)黄土-泥岩滑坡在滑动失稳过程中,滑动带沿坡向的滑动位移和滑坡表面的宏观位移具有一致性,滑坡以近似条状刚性块体的形式向下滑移。随着渗水的位置不同,滑坡体的失稳形式也不同,可以是单纯的推挤式、拉断式或牵引式的失稳形式,也可以是其中的两种或三种的混合形式,本试验的黄土-泥岩滑坡渐进滑动失稳模式是拉断和推挤的混合模式。

### 参考文献 (References)

- [1] 张龙飞, 吴益平, 苗发盛, 等. 推移式缓倾浅层滑坡渐进破坏力学模型与稳定性分析[J]. *岩土力学*, 2019, 40(12): 4767-4776. [ZHANG Longfei, WU Yiping, MIAO Fasheng, et al. Mechanical model and stability analysis of progressive failure for thrust-type gently inclined shallow landslide [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(12): 4767-4776.]
- [2] 苗发盛, 吴益平, 谢媛华, 等. 水位升降条件下牵引式滑坡离心模型试验[J]. *岩土力学*, 2018, 39(2): 605-613. [MIAO Fasheng, WU Yiping, XIE Yuanhua, et al. Centrifugal test on retrogressive landslide influenced by rising and falling reservoir water level [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(2): 605-613.]
- [3] 吴玮江, 宿星, 刘伟, 等. 黄土-泥岩接触面滑坡的特征与成因[J]. *冰川冻土*, 2014, 36(5): 1167-1175. [WU Weijiang, SU Xing, LIU Wei, et al. Loess-mudstone interface landslides: Characteristics and causes [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(5): 1167-1175.]
- [4] Wen B P, Wang S J, Wang E Z, et al. Deformation characteristics of loess landslide along the contact between loess and neocene red mudstone [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2005, 79(1): 139-151.
- [5] Zhang Z L, Wang T, Wu S R, et al. Seismic performance of loess-mudstone slope in Tianshui - Centrifuge model tests and numerical analysis [J]. *Engineering Geology*, 2017, 222: 225-235.
- [6] Chen J C, Wang L M, Wang P, et al. Failure mechanism investigation on loess-mudstone landslides based on the Hilbert-Huang transform method using a large-scale shaking table test [J]. *Engineering Geology*, 2022, 302: 106630.
- [7] Wang H J, Sun P, Zhang S, et al. Rainfall-induced landslide in loess area, Northwest China: a case study of the Changhe landslide on September 14, 2019, in Gansu Province [J]. *Landslides*, 2020, 17(9): 2145-2160.
- [8] 辛鹏. 陕西宝鸡市渭河北岸大型黄土滑坡形成机理与危险性评估研究[D]. 北京: 中国地质科学院, 2013. [XIN Peng. Research on the formation mechanism and hazards assessment of large loess landslide on the north bank of Weihe River Baoji city, Shaanxi province[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2013.]
- [9] 李媛, 吴奇. 孟家山黄土-红层接触面滑坡破坏机理研究[J]. *水文地质工程地质*, 2001, 28(1): 52-54. [LI Yuan, WU Qi. The study of deformation mechanism on loess-red mudstone sliding surface in Mengjiashan landslide [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2001, 28(1): 52-54.]
- [10] 封凯强. 黄土-泥岩切层滑坡带泥岩强度特性及滑坡变形破坏机理研究: 以兰州市某滑坡为例[D]. 西安: 西北大学, 2019. [FENG Kaiqiang. Study on shear strength characteristics of mudstone of slip zone and deformation failure mechanism of loess-mudstone cutting layer landslide: A case study of landslide in Lanzhou[D]. Xi'an: Northwest University, 2019.]
- [11] 杨晨. 黄土-基岩接触面特性的环剪试验研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019. [YANG Chen. Ring shear test study on characteristics of loess-bedrock interface[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2019.]
- [12] Li S H, Li C, Yao D, et al. Multiscale nonlinear analysis of failure mechanism of loess-mudstone landslide [J]. *Catena*, 2022, 213: 106188.
- [13] Li S H, Li C, Yao D, et al. Interdisciplinary asperity theory to analyze nonlinear motion of loess landslides with weak sliding interface [J]. *Landslides*, 2020, 17(12): 2957-2965.
- [14] Wang X G, Wang J D, Zhan H B, et al. Moisture content effect on the creep behavior of loess for the catastrophic Baqiao landslide [J]. *Catena*, 2020, 187: 104371.
- [15] 周琪, 许强, 周书, 等. 基于数值模拟的突发型黄土滑坡运动过程研究: 以黑方台陈家8#滑坡为例[J]. *山地学报*, 2019, 37(4): 528-537. [ZHOU Qi, XU Qiang, ZHOU Shu, et al. Movement process of abrupt loess flowslide based on numerical simulation: a case study of Chenjia 8# on the Heifangtai terrace [J]. *Mountain Research*, 2019, 37(4): 528-537.]
- [16] Urciuoli G, Picarelli L, Leroueil S. Local soil failure before general slope failure [J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2007, 25(1): 103-122.
- [17] Tang H M, Zou Z X, Xiong C R, et al. An evolution model of large consequent bedding rockslides, with particular reference to the Jiweishan rockslide in Southwest China [J]. *Engineering Geology*, 2015, 186: 17-27.
- [18] 卢应发, 黄学斌, 刘德富. 推移式滑坡渐进破坏机制及稳定性分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(2): 333-345. [LU Yingfa, HUANG Xuebin, LIU Defu. Mechanism and stability analyses of progressive failure of thrust-type landslides [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(2): 333-345.]
- [19] 王振, 叶晓明, 刘永新. 考虑滑坡渐进破坏的改进简布条分法[J]. *岩土力学*, 2018, 39(2): 675-682. [WANG Zhen, YE Xiaoming, LIU Yongxin. Improved Janbu slices method considering progressive destruction in landslide [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(2): 675-682.]
- [20] 杜毅, 晏鄂川, 蔡静森, 等. 直线型复合式滑坡渐进破坏力学模型及稳定性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40(3): 490-502. [DU Yi, YAN Echuan, CAI Jingsen, et al. A mechanical model of progressive failure of linear complex landslides [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(3): 490-502.]
- [21] 李凯. 基于应变软化的滑坡三维稳定性分析与三维可视化建模[D]. 重庆: 重庆大学, 2016. [LI Kai. Three-dimensional landslide stability



- analysis based on strain softening and three-dimensional visual modeling[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.]
- [22] 杨丽平. 一种黄土滑坡渐进破坏过程分析[J]. *岩土力学*, 2018, 39(7): 2591-2598. [YANG Liping. Analysis of progressive failure of a loess landslide [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(7): 2591-2598.]
- [23] 朱建东, 鄢好, 李绍红, 等. 黄土-泥岩接触面滑坡的两种雨型模型试验[J]. *工程地质学报*, 2019, 27(3): 623-631. [ZHU Jiandong, YAN Hao, LI Shaohong, et al. Laboratory model experiment of landslides along loess-mudstone interface induced by rainfall patterns [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2019, 27(3): 623-631.]
- [24] 白玉锋. 黄土试样开裂机理试验研究[D]. 西安: 长安大学, 2014. [[BAI Yufeng. Experiment study on the cracking mechanism about loess ground under the environment of the cave[D]. Xi'an: Chang'an University, 2014.]
- [25] Li C, Yao D, Wang Z, et al. Model test on rainfall-induced loess-mudstone interfacial landslides in Qingshuihe, China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(9): 835.
- [26] 王新刚, 刘凯, 连宝琴, 等. 黄土-泥岩滑坡诱发因素及形成机理研究进展[J]. *西北大学学报: 自然科学版*, 2021, 51(3): 404-413. [WANG Xingang, LIU Kai, LIAN Baoqin, et al. Recent advance in understanding inducing factors and formation mechanism of loess-mudstone landslides [J]. *Journal of Northwest University: Natural Science Edition*, 2021, 51(3): 404-413.]