

DOI: 10.11779/CJGE2019S2047

# 基于透明土技术土岩边坡滑移机理的模型试验研究

王 壮<sup>1</sup>, 李 驰<sup>\*1, 2</sup>, 丁选明<sup>2, 3</sup>

(1. 内蒙古工业大学土木工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010051; 2. 重庆大学山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045;  
3. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045)

**摘要:** 随着工程技术的飞速发展, 土岩边坡滑移机理的研究具有重要的意义和工程应用价值。通过透明土模型试验研究坡顶荷载作用下土岩界面接触滑移机理和规律, 实现了土岩边坡内部滑移变形的可视化。考虑了岩体 Barton 节理粗糙度系数、坡体角度和坡体高度等因素对土岩边坡稳定性的影响。利用粒子图像测速 (PIV) 和激光散斑技术, 获得了土岩边坡在坡顶荷载作用下内部变形的特征。试验分析表明, 土岩边坡的滑动可分为 3 个阶段: 初始阶段、匀速阶段和加速阶段; 在土岩边坡滑移过程中减小岩体 Barton 节理粗糙度系数、增大坡体高度、增大坡趾角度将引起边坡土体内部较大的位移, 进而引发土岩边坡的失稳。采用双排抗滑桩的边坡防护措施后, 有效地延缓边坡土体内部位移的发展, 提高土岩边坡的稳定性。文中研究成果为揭示土岩边坡滑移机理及其工程防护的有效性提供了重要的理论依据, 通过跟踪透明土颗粒的运动轨迹实现土体内部变形可视化的土岩边坡滑移提供了试验依据。

**关键词:** 边坡工程; 透明土; 模型试验; 界面滑动机理

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2019)S2-0185-04

作者简介: 王 壮(1992—), 硕士研究生, 研究方向为透明土, 边坡稳定性。E-mail: cflzwzzz@163.com。

## Model tests on sliding mechanism of soil-rock slopes based on transparent soil technology

WANG Zhuang<sup>1</sup>, LI Chi<sup>1, 2</sup>, DING Xuan-ming<sup>2, 3</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Huhhot 010051, China; 2. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area of Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, China;  
3. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

**Abstract:** With the development of engineering technology, it is of great significance and engineering application value to study the sliding mechanism of soil-rock slopes. The transparent soil model tests are used to study the contact mechanism of soil-rock interface and the internal movement law of slope soils under external force, and the visualization of internal deformation of soil-rock slopes is realized. The influences of Barton joint roughness coefficient, slope angle and soil thickness on slope stability are considered. Using the particle image velocity (PIV) and the laser speckle technique, the internal deformation characteristics of soil-rock slopes under external force are obtained. It is shown that the sliding of soil-rock slopes can be divided into three stages: initial stage, uniform stage and acceleration stage. In the sliding process, reducing the Barton joint roughness coefficient of rock mass, increasing the thickness of soil layer and increasing the slope angle will cause larger displacement in the soil body of the slopes, and then lead to the loss of soil-rock slopes. After adopting the slope protection measures of double-row anti-slide piles, the development of the internal displacement of slope soils is effectively delayed, and the stability of soil and rock slope is improved. The research results may provide an important theoretical basis for revealing the sliding mechanism of soil-rock slopes and the effectiveness of Engineering protection as well as an important experimental basis for visualizing the sliding of soil-rock slopes by tracking the trajectory of transparent soil particles.

**Key words:** slope engineering; transparent soil; model test; inter-facial sliding mechanism

## 0 引言

边坡稳定性一直是岩土工程领域一个重要的研究方向。目前, 针对边坡失稳破坏, 学者们采用的研究手段囊括了理论研究、数值模拟、模型试验和现场监

测等多重手段<sup>[1-5]</sup>。对于模型试验, 研究人员很早开始

基金项目: 内蒙古自然科学基金重大项目 (2012ZD0602); 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室开放课题 (0902071812102/011)  
收稿日期: 2019-04-29

利用各种模型试验方法探索边坡失稳破坏机制；通过对反倾岩质边坡研究揭示岩质边坡的破坏规律<sup>[6]</sup>；通过相似试验研究变形破坏机制和加固效果<sup>[7]</sup>；研究不同坡趾对边坡失稳的作用效果<sup>[8]</sup>；建立堆积块体研究其破坏模式<sup>[9]</sup>等多种方式。然而这些方法普遍存在无法从边坡内部的角度了解边坡发生破坏过程。

近年来，随着 PIV (particle image velocimetry) 技术发展，Iskander 等<sup>[10]</sup>追踪示踪点绘制散斑位移测量桩周土体的位移场；White 等<sup>[11]</sup>对砂土中半模桩沉桩效应测定沉桩过程的位移场。

综合上述，基于以上各种室内测试方法的优势和不足，本文使用透明土技术并结合粒子图像测速法，针对土岩边坡开发了相应的内部位移测量系统。运用 PIV 技术处理后得到边坡中心切面相邻时间间隔内变形前后的二维位移场，获取无支护土岩边坡土体内部变形的整体位移场的规律特性，继而探讨岩体节理粗糙度、坡体高度以及坡趾角度对土岩边坡土体运动轨迹的影响；同时对边坡设置双排抗滑桩作为对比分析，为理解土岩边坡的滑移机理和土体内部的运动规律提供依据。

## 1 透明土的基本工作原理

透明土是利用透明颗粒材料和具有相同折射率的孔隙液体混合制备而成。因折射率相同激光穿过土体内部不会发生折射，实现对土体内部的实时观测。

## 2 透明岩土边坡模型试验

### 2.1 试验材料和装置

试验所采用的人工合成透明土由透明颗粒材料和孔隙流体组成。透明颗粒材料是熔融石英砂，基本物理性质：粒径范围为 0.5~1 mm，颗粒相对密度为 2.186，内摩擦角为 35°，最大干密度为 1.464 g/cm<sup>3</sup>，最小干密度为 0.944 g/cm<sup>3</sup>，孔隙比为 0.663。试验中孔隙液体选用正十二烷和#15 白油按质量比 1:4 配制而成。模型箱尺寸 320 mm×250 mm×200 mm。模型的岩体模型部分的高度为 80 mm，为圆形截面，如图 1 所示。

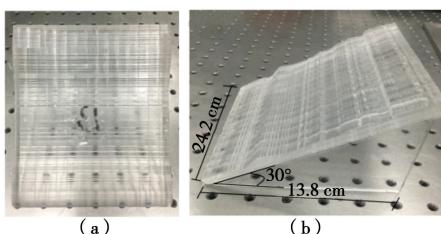


图 1 透明模型岩体

Fig. 1 Rock mass of transparent model

### 2.2 试验方法和过程

试验步骤为：①筛分获得粒径为 0.5~1.0 mm 熔融石英砂并做洁净烘干处理；②选取正十二烷和#15 白油按照质量比 1:4 制配孔隙流体，保证 2WAJ 型阿贝折射仪测量孔隙液体的折射率为 1.4585；③将处理后的熔融石英砂缓慢倾倒入配置好的孔隙液体中，确保二者充分融合去除内部气泡；④将熔融石英砂分层压实至密实。

板式激光灯放置在模型箱的正前方距离模型箱 1.8 m，发射的片状激光垂直通过模型箱的中心。CCD 相机放置在试验模型箱 0.6 m 的右侧方。模型装置如图 2 所示。加载装置的截面尺寸为 210 mm×25 mm。

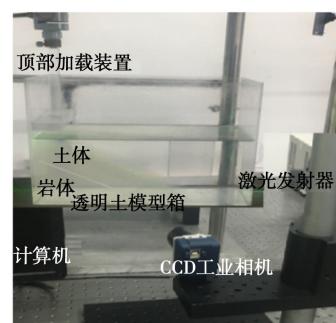


图 2 土岩边坡的透明土模型装置

Fig. 2 Transparent soil model devices for soil-rock slopes

加载装置材料为有机玻璃，加载速率为 0.5 mm/s。CCD 相机设定每间隔 0.5 s 自动拍摄一张图片并储存。排桩按照平行方式排列，间距保持 4 cm。

### 2.3 试验变量

为了研究模型试验中土岩边坡的滑移机理，土岩边坡的试验变量如表 1 所示，双排桩的平面布置如图 3 所示。

表 1 土岩边坡的试验变量

Table 1 Experimental variables of soil-rock slopes

编号	岩体 Barton 节理 糙率系数	土坡高度 /cm	坡体 倾角/(°)	备注
A 组	11	2	30	
B 组	11	4	30	
C 组	11	6	30	
D 组	9	4	30	无支护
E 组	13	4	30	
F 组	11	4	20	
G 组	11	4	40	
H 组	11	4	30	有支护

## 3 无支护形式的土岩边坡

### 3.1 典型位移场的滑移机理

选取表面粗糙度为 11，坡体倾角为 30°，土坡高度为 4 mm 为特征模型，得到了土体变形的二维位移场。将滑坡位移发展过程分为初始变形、匀速变形和加速变形 3 个阶段。边坡顶部在 4 s 开始滑动，顶部

区域的位移随加载时间继续扩大。此时, 边坡中部和底部的位移变化不大。在位移矢量图(图4)中, 箭头方向表示颗粒运动方向, 这一阶段称为初始变形。

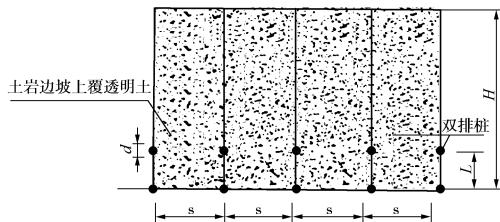


图3 土岩边坡中的双排桩的平面布置

Fig. 3 Layout of double-row piles in soil-rock slopes

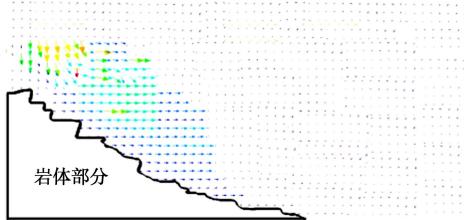


图4 无支护形式下的初始位移矢量图

Fig. 4 Initial displacement vectors without support

荷载继续作用于边坡顶部, 9 s时边坡中部发生滑动, 显示土体位移从边坡顶部向边坡中部延伸, 位移矢量图中的进一步展开(图5)。坡顶和坡中部已覆盖了混合坡。这个阶段称为匀速变形。

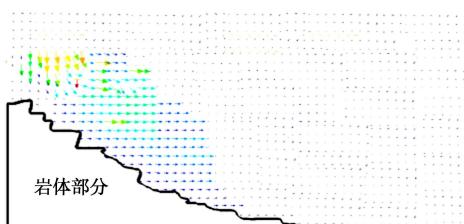


图5 无支护形式下的均匀变形矢量图

Fig. 5 Uniform displacement vectors without support

继续施压, 11 s时在底部发生大位移, 如图6所示。矢量图表明土颗粒的运动方向沿着土和岩体之间的界面滑动, 这一阶段称为加速变形。

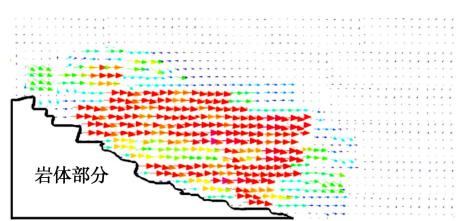


图6 无支护形式下的加速变形矢量图

Fig. 6 Accelerated displacement vectors without support

### 3.2 边坡位移场的滑动描述

土岩边坡在荷载持续作用下颗粒被压实, 外荷载从坡顶向坡中部传递, 边坡内的位移和变形将继续扩大。加载后期, 颗粒间的摩擦力和岩体表面之间的摩擦力过低, 导致边坡整体坍塌。各阶段的时间间隔不

同, 表明滑坡是随着位移的增加而累积的过程。发生不同变形位移曲线急剧增大, 反映了滑坡的瞬时性。

### 3.3 土岩边坡滑移的影响因素

试验分析岩体Barton节理粗糙度系数、坡体角度和土体高度, 最大滑动位移如图7~9所示。

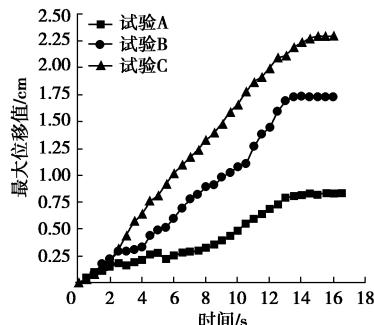


图7 无支护形式下的最大初始位移

Fig. 7 Maximum initial displacements without support

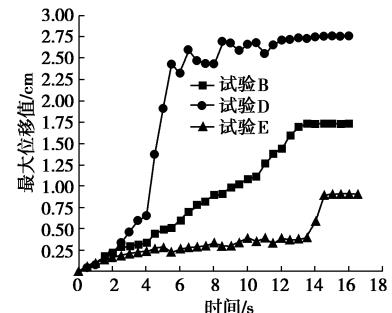


图8 无支护形式下的最大匀速位移

Fig. 8 Maximum uniform displacements without support

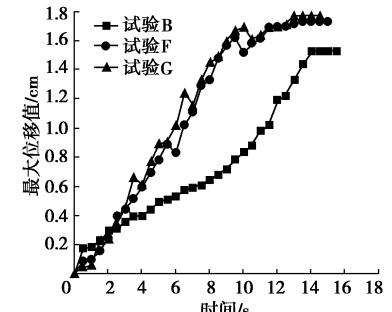


图9 无支护形式下的最大加速位移

Fig. 9 Maximum accelerated displacements without support

试验A、试验B和试验C对应于岩体Barton节理粗糙度系数的变化, 滑坡发生的时间分别为5.0, 9.5, 10.5 s, 最大位移为1.236, 1.735, 2.298 cm。土颗粒的紧密排列为边坡提供了较高的承载能力。

试验B、试验D和试验E的试验结果表明, 当土体角度和岩体角度同时变化时, 模型边坡的最大位移分别为1.632, 1.735, 1.849 cm。减小岩体Barton节理粗糙度系数、增大土层厚度、增大坡角可导致较大的滑动位移。

## 4 双排桩支护形式的土岩边坡

试验中还设置了没有任何防护措施的裸坡作为参

考。以第 3 阶段为例, 从位移矢量图(如图 10)中可知, 同样在坡顶加载至 22 s, 没有设置任何防护措施的裸坡的坡体内部位移发生了明显的滑动, 设置有双排桩的边坡由于排桩的作用, 土拱效应的发挥延缓了边坡溃散, 提高了边坡的承载能力。

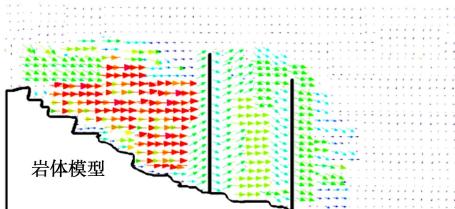


图 10 支护形式下的最大加速位移

Fig. 10 Maximum accelerated displacements with support

## 5 结 论

本文基于透明土材料和 PIV 技术, 对土岩边坡滑移机理进行了模型试验研究, 可以得到以下 3 点结论。

(1) 本文试验条件下, 滑坡过程可以分为 3 个阶段包括: 初始变形、匀速变形和加速变形阶段, 不同变形阶段位移矢量图反映了坡体从挤压到溃散的全过程, 记录了土颗粒的运动轨迹。

(2) 土岩边坡界面粗糙度对土岩边坡稳定性影响最大。减小岩体 Barton 节理粗糙度系数、增大土体高度、增大坡趾角度导致较大的滑动位移。

(3) 增加双排抗滑桩可提高原边坡的稳定性。边坡的位移由顶部向底部延展, 在土滑坡岩界面形成滑裂带。在这一过程中土颗粒紧密排列, 双排桩的在桩间产生土拱效应, 从边坡内部的角度找到了推迟的滑动时间的原因。

需要指出的是, 本文中的模型试验所涉及的尺寸效应、边界条件, 激光的光照强度等方面的影响, 需要进一步研究。

## 参 考 文 献:

- [1] 陈祖煜, 弥宏亮, 汪小刚. 边坡稳定三维分析的极限平衡方法[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(5): 525 – 529. (CHEN Zu-yu, MI Hong-liang, WANG Xiao-gang. A three-dimensional limit equilibrium method for slope stability analysis[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(5): 525 – 529. (in Chinese))
- [2] 郑颖人, 赵尚毅. 有限元强度折减法在土坡与岩坡中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 23(19): 3381 – 3388. (ZHENG Ying-ren, ZHAO Shang yi. Application of strength reduction fem in soil and rock slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 23(19): 3381 – 3388. (in Chinese))
- [3] 贾官伟, 詹良通, 陈云敏. 水位骤降对边坡稳定性影响的模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(9): 1798 – 1803. (JIA Guan-wei, ZHAN Liang-tong, CHEN Yun-min. Model test study of slope instability induced by rapid drawdown of water level[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(9): 1798 – 1803. (in Chinese))
- [4] 黄润秋. 岩石高边坡发育的动力过程及其稳定性控制[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(8): 1525 – 1544. (HUANG Run-qiu. Geodynamical process and stability control of high rock slope development[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(8): 1525 – 1544. (in Chinese))
- [5] 李驰, 王东栋, 乌力吉那顺, 等. 黄土泥岩接触地带边坡的土工织物防护模型试验[J]. 防灾减灾工程学报, 2017, 37(3): 442 – 448. (LI Chi, WANG Dong-dong, WULIJI Na-shun, et al. Model experimental research on disaster prevention of slope stability in loess mudstone contacted zones using geotextile[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2017, 37(3): 442 – 448. (in Chinese))
- [6] 左保成, 陈从新, 刘小巍, 等. 反倾岩质边坡破坏机理模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(19): 3505 – 3511. (ZUO Bao-cheng, CHEN Cong-xin, LIU Xiao-wei, et al. Modeling experiment study on failure mechanism of counter-tilt rock slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(19): 3505 – 3511. (in Chinese))
- [7] 任伟中, 陈浩. 滑坡变形破坏机理和整治工程的模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(12): 2136 – 2141. (REN Wei-zhong, CHEN Hao. Model testing research on deformation and fracture mechanism of landslide and its harnessing engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(12): 2136 – 2141. (in Chinese))
- [8] CHENG Y M, LANSIVAARA T, WEI W B. Two-dimensional slope stability analysis by limit equilibrium and strength reduction methods[J]. Computers and Geotechnics, 2007, 34(3): 137 – 150.
- [9] 孔纲强, 刘璐, 刘汉龙, 等. 玻璃砂透明土变形特性三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(6): 1140 – 1146.
- [10] ISKANDER M G, SADEK S, LIU J. Optical measurement of deformation using transparent silica gel to model sand[J]. International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, 2002, 2(4): 13 – 26.
- [11] WHITE D J, TAKE W A, BOLTON M D. Soil deformation measurement using particle image velocimetry (PIV) and photogrammetry[J]. Géotechnique, 2003, 53(7): 619 – 631.

(责编: 孙振远)