

# 隧道开挖对滑坡体稳定影响试验研究

周琪, 杨钦

兰州交通大学, 土木工程学院, 甘肃 兰州

收稿日期: 2022年2月25日; 录用日期: 2022年3月17日; 发布日期: 2022年3月24日

## 摘要

近年来,我国公路建设的重心从东部平原地区逐渐延伸到西北地区,西北地区的地形地貌以及地质情况复杂,而复杂的地质环境会导致公路不可避免穿越滑坡体。在老滑坡体中开挖隧道往往会引起新的斜坡滑动变形,导致一系列的隧道病害。本文拟采用模型试验和数值模拟相结合的方法,模拟出滑坡隧道体系,通过在坡体后部加载促使滑坡体发生蠕动,并在滑坡体表面设置百分表来监测滑坡体的位移变形情况;用有限元软件建立滑坡隧道模型,观察不同开挖深度时的坡体位移情况,探索隧道开挖对滑坡体稳定性的影响。结合模型试验和数值模拟得出以下结论:隧道的开挖会引起滑坡体的位移变形,隧道洞口与基岩的中间位置竖向位移最大,而滑坡体与基岩的交界处水平位移最大;隧道开挖过程中,越接近滑带,沉降量越大,隧道进入基岩后变逐渐趋于稳定,这是因为开挖进尺较大时,隧道的受力情况更接近悬臂结构,容易在隧道与滑带交界处产生集中应力,导致隧道变形,严重时可发生破坏。

## 关键词

滑坡隧道, 模型试验

# Experimental Research on the Influence of Tunnel Excavation on the Stability of Landslide

Qi Zhou, Qin Yang

School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu

Received: Feb. 25<sup>th</sup>, 2022; accepted: Mar. 17<sup>th</sup>, 2022; published: Mar. 24<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

In recent years, the focus of highway construction in China has gradually extended from the east-

ern plain to the northwest. The topography and geological conditions of the northwest are complex, and the complex geological environment will inevitably lead to the highway passing through the landslide. Excavating tunnel in old landslide will often cause new slope sliding deformation and a series of tunnel diseases. In this paper, the landslide tunnel system is simulated by the combination of model test and numerical simulation. The creep of the landslide is promoted by loading at the rear of the slope, and the displacement and deformation of the landslide is monitored by setting a dial indicator on the surface of the landslide; the landslide tunnel model is established with finite element software; the slope displacement at different excavation depths is observed; and the influence of tunnel excavation on the stability of landslide is explored. Combined with model test and numerical simulation, the following conclusions are drawn: the excavation of tunnel will cause the displacement and deformation of landslide mass, the vertical displacement in the middle of tunnel portal and bedrock is the largest, and the horizontal displacement at the junction of landslide mass and bedrock is the largest; In the process of tunnel excavation, the closer it is to the sliding zone, the greater the settlement, and the tunnel will gradually become stable after entering the bedrock. This is because when the excavation footage is large, the stress condition of the tunnel is closer to the cantilever structure, which is easy to produce concentrated stress at the junction of the tunnel and the sliding zone, resulting in tunnel deformation and damage in serious cases.

## Keywords

Landslide Tunnel, Model Test

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着我国公路建设的重心逐渐转移到西北地区, 由于西北地区的复杂的地形地貌以及地质情况, 常有滑坡等地质灾害的发生, 选线的过程中也会遇到难以避免的滑坡, 形成滑坡隧道体系。吴红刚通过模型试验对隧道-滑坡的平行体系和斜交体系的变形机理进行了深入的研究, 并总结了隧道-滑坡体系的类型以及隧道变形模式[1] [2] [3]; 牌立芳研究了刷方减重对隧道-滑坡的平行体系的影响, 通过模型试验, 对刷方减重的效果进行了分析[4]; 邵江通过模型试验和数值模拟相结合的方法, 对不同滑带角度滑坡作用下的隧道衬砌结构受力特征进行了分析[5]。

由于隧道开挖对滑坡体稳定性影响的研究较少, 所以本文通过模型试验和有限元分析软件, 模拟了滑坡隧道体系和隧道开挖的过程, 研究分析隧道开挖对滑坡体稳定性的影响, 为施工提供了参考。

## 2. 工程背景

阳湾隧道进口 H33 滑坡, 定西至临洮高速公路工程 H33、H32 滑坡位于定西市临洮县窑店镇阳湾村附近, 滑坡起讫桩号为: ZK50 + 720 - YK50 + 840, 线路以路基及隧道形式横穿滑坡。滑坡区属侵蚀堆积黄土地貌, 冲沟斜坡地形, 斜坡坡度约为 30°~35°, 滑坡前缘高程约为 2090.0 m, 后缘高程约为 2175.0 m, 滑坡后缘可见拉裂缝(如图 1 所示), 坡面植被稀疏, 多为杂草, 滑坡外貌特征清晰, 整体呈马蹄形, 滑动方向约 45°, 横宽 80 m, 纵长约 135 m。

### 3. 模型试验

#### 3.1. 试验的目的

先通过在滑坡顶面分级加载, 不埋设隧道模型, 得出滑体失稳时的外加荷载。再重新填筑模型箱并埋设隧道, 施加荷载, 对隧道进行开挖, 分析隧道开挖对滑坡体稳定性的影响。

#### 3.2. 试验材料的选择

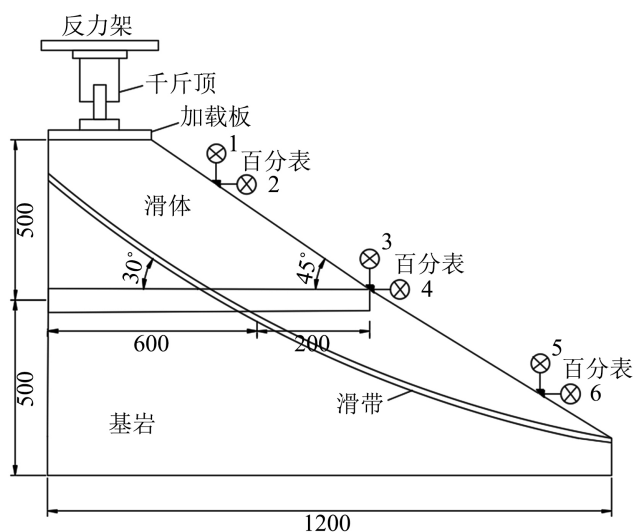
以定临高速公路阳湾村某段“滑坡-隧道”斜交体系为原型, 其与模型几何相似比 1:100。模型试验采用材料如下表 1 所示: 1) 以原状黄土添加石灰并分层夯实模拟滑坡的基岩, 其中黄土与石灰的掺合比为 8:2; 2) 用细筛黄土模拟滑体; 3) 在塑料薄膜表面铺设砂、黏土、滑石粉与水的混合物模拟滑带[5], 其中砂:黏土:滑石粉:水 = 32:52:30:12, 滑带厚 2 cm; 4) 隧道采用直径为 100 mm 的 pvc 管模拟。

**Table 1.** Test material proportioning table  
**表 1.** 试验材料配比表

| 模型 | 材料            | 规格              |
|----|---------------|-----------------|
| 滑体 | 黄土            | 细筛黄土            |
| 滑带 | 砂, 黏土, 滑石粉, 水 | 比例: 32:52:30:12 |
| 基岩 | 黄土, 石灰        | 比例: 8:2         |
| 隧道 | PVC 管         | 直径 100 mm       |

#### 3.3. 试验模型的设计

本次试验在兰州交通大学三号实验楼岩土大厅进行。模型箱的尺寸为长 1200 mm, 宽 800 mm, 高 1000 mm, 坡面为 30°的单面斜坡。模型箱采用钢架和 1.5 cm 厚的亚克力板拼接而成, 并用角钢固定, 方便拆卸。隧道长 800 mm, 有 600 mm 埋在基岩中, 有 200 mm 埋在滑体中。模型制作简图如图 1 所示, 模型填筑完成并安装测试原件和仪器后如图 2 所示。



**Figure 1.** Model diagram  
**图 1.** 模型简图



Figure 2. Filling model completion drawing  
图 2. 模型填筑完成图

### 3.4. 试验监测仪器及加载系统的设置

在与坡顶、坡底竖直距离 100 mm 处分别布设两个百分表(如图 3 所示), 人工记录百分表读数变化, 对滑坡水平方向和竖直方向的位移进行监测。为了更好的监测效果, 在预定位置的表面放置一个角钢作为百分表监测滑体位移的载体。

在坡顶放置一块长 600 mm, 宽 300 mm, 厚 15 mm 的钢板作为加载板, 并在加载板中间放置一个千斤顶, 把荷载传感器放在反力支架和千斤顶中间, 千斤顶连接着油压泵, 用油压泵加压, 通过荷载传感器上的读数来计算出滑坡顶部施加的荷载大小, 加载系统如图 4 所示。



Figure 3. Dial indicator layout diagram  
图 3. 百分表布置图

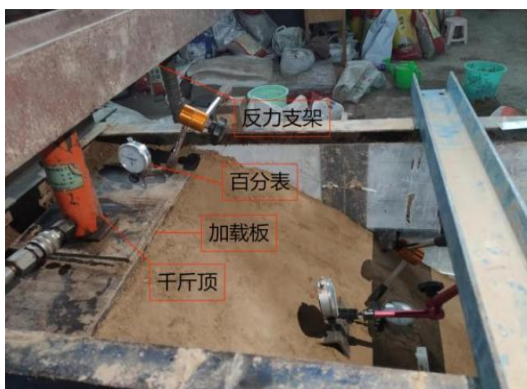


Figure 4. Jack loading system layout diagram  
图 4. 千斤顶加载系统布置图

### 3.5. 试验的过程

1) 本次模型试验采用在滑坡后部均匀加载的方法促使坡体蠕动, 在模型填筑后先静置一天, 再对坡体加载, 为体现滑坡体逐渐被加载破坏的过程, 将荷载分为三个阶段进行均匀地加载: 初始阶段(荷载 0~3 KN), 中期阶段(荷载 3~6 KN), 后期阶段(荷载 6~8 KN)。每级增加 1 KN, 加载后静置 30 分钟, 待各个百分表读数稳定后, 观察坡体情况并记录百分表读数, 直至坡体破坏。2) 根据 1) 得出滑坡体失稳时的外加荷载, 然后将该荷载加载在重新装填并埋设了隧道的模型箱上, 随后开挖隧道, 分 10 次开挖, 每次开挖进尺 5 cm, 静置 30 分钟, 观察百分表变化。

## 4. 试验结果的分析

### 4.1. 坡体位移变形

试验开始加载前, 先把各个百分表的读数调零, 开始加载后, 每半小时记录一次数据, 直至试验完成, 滑坡体破坏。下面将根据 S (位移)-P (荷载) 数据曲线(如图 5、图 6), 对加载过程中坡体位移的变化进行分析。

初始阶段加载过程中, 坡顶的竖直位移缓慢减小, 水平位移缓慢增大; 而坡脚的竖直位移和水平位移无明显变化。这是因为在初始阶段, 坡体的抗滑力大于滑坡推力, 滑坡体处于应力分布阶段; 随着荷载的不断增加, 滑坡体上部原本较松的土被挤密压实, 从而产生一定的沉降位移。

中期阶段加载过程中, 随着荷载的增加, 坡顶的竖直和水平位移均有不同程度的增大, 同时坡脚的竖直和水平位移也逐渐开始出现轻微变化, 但坡顶的位移变化量要明显大于坡脚处的变化量。这是由于在此阶段, 坡体受到的滑坡推力逐渐接近抗滑力, 且上部荷载通过岩土体不断缓慢地向下部坡体传递, 使坡脚处土体受到挤压, 产生位移变形。在此阶段, 坡体后缘先出现细微裂缝, 随后裂缝不断加宽、加长。

后期阶段加载过程中, 坡顶和坡脚的竖直和水平位移继续增大; 且荷载达到 7 KN 时, 坡顶竖直和水平位移迅速变大, 裂缝加宽并贯通滑坡体; 随着荷载的增加, 基岩与滑坡体产生错动, 滑坡体前缘滑出, 坡顶、坡脚百分表读数急剧增大; 坡体破坏坍塌, 坡脚竖直位移又急剧减小。

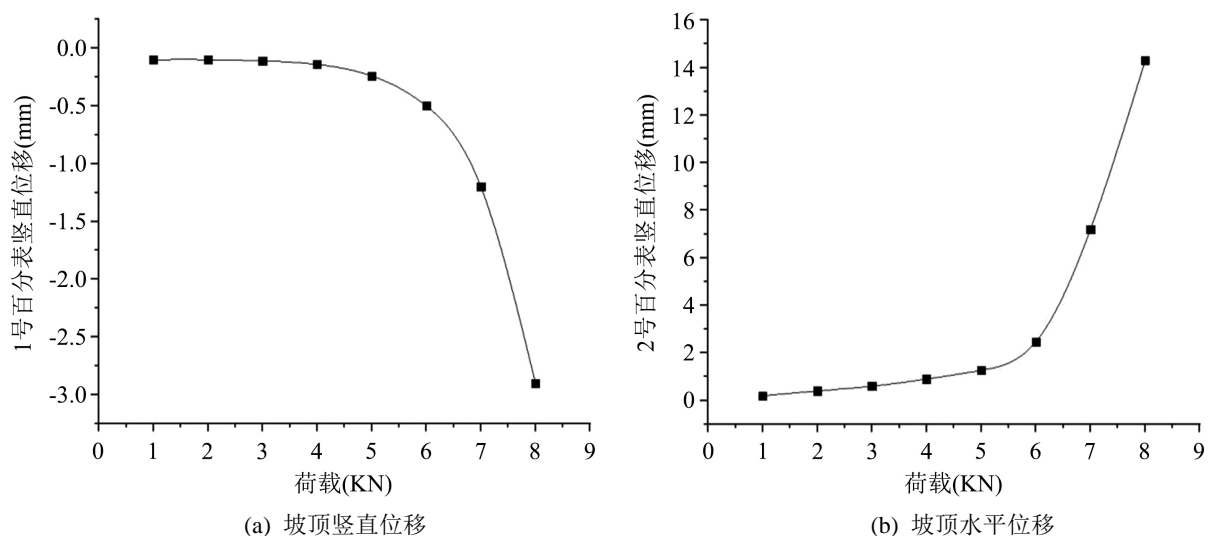


Figure 5. S-P curve of slope top displacement

图 5. 坡顶位移 S-P 曲线

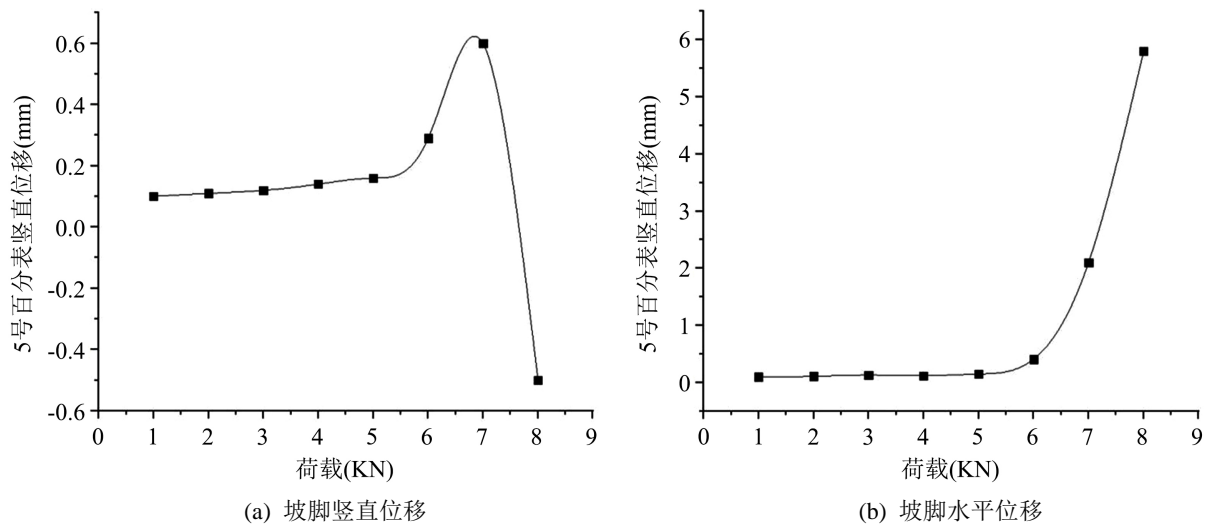


Figure 6. S-P curve of slope toe displacement  
图 6. 坡脚位移 S-P 曲线

## 4.2. 隧道开挖

隧道开挖后, 每半小时记录一次数据, 直至隧道开挖完成。下面将根据 S-T 数据曲线(如图 7), 对开挖过程中滑坡后缘位移的变化进行分析。

由图 7(a)可以看出随着隧道的开挖, 隧道的截面被上覆压缩后逐渐变小后趋于稳定, 所以滑坡后缘产生了沉降; 由图 7(b)可以看出, 随着隧道的开挖, 滑坡顶部的水平位移也逐渐变大。

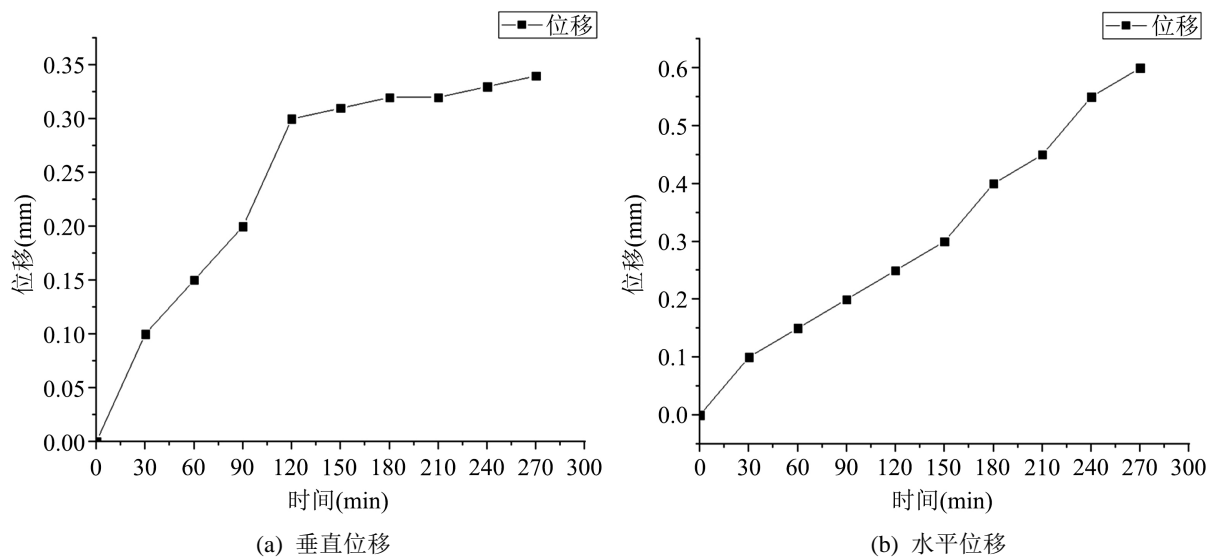


Figure 7. S-T curve of slope top displacement  
图 7. 滑坡顶部位移 S-T 曲线

## 5. 数值模拟

### 5.1. 模型的建立

用 MIDAS-GTS 软件来数值模拟, 模型尺寸为  $120\text{ m} \times 100\text{ m} \times 60\text{ m}$ , 网格划分后有 65,993 个节点和

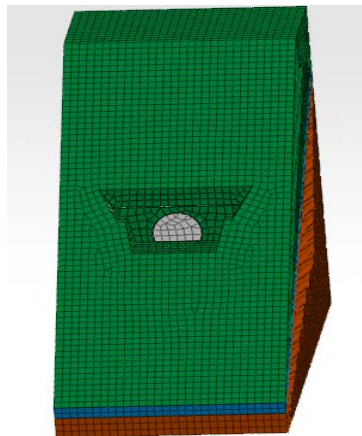


74,665 个单元, 模型主要由基岩、滑带、滑体、隧道衬砌、锚杆、洞口支护这几个部分组成。采用全断面开挖的方法, 隧道两米一挖, 各材料结构参数如表 2 所示, 建立的模型如图 8、图 9 所示。

**Table 2.** Material parameter selection

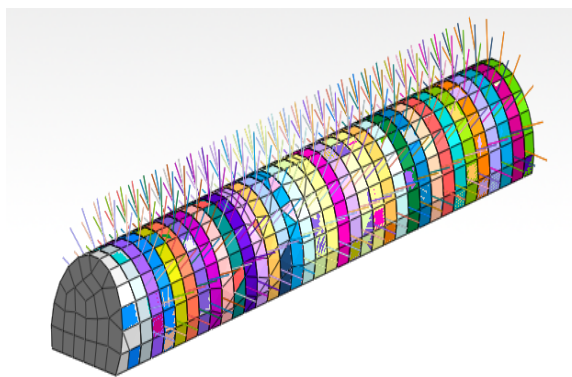
**表 2.** 材料参数选取

| 材料名称 | 弹性模量(MPa) | 泊松比  | 容重(kN/m <sup>3</sup> ) | c (kPa) | $\phi$ (°) | 本构选取 |
|------|-----------|------|------------------------|---------|------------|------|
| 基岩   | 2000      | 0.26 | 20                     | 200     | 38         | 摩尔库伦 |
| 滑带   | 180       | 0.34 | 18                     | 10      | 28         | 摩尔库伦 |
| 滑体   | 800       | 0.3  | 19                     | 100     | 32         | 摩尔库伦 |
| 衬砌   | 30,000    | 0.2  | 25                     | —       | —          | 弹性   |
| 锚杆   | 210,000   | 0.3  | 78.5                   | —       | —          | 弹性   |



**Figure 8.** Model panorama

**图 8.** 模型全景图



**Figure 9.** Tunnel and bolt model diagram

**图 9.** 隧道和锚杆模型图

## 5.2. 数值模拟结果分析

通过对比隧道不同开挖深度时滑坡体的位移变形, 来分析隧道开挖对滑坡体的影响(如图 10)。

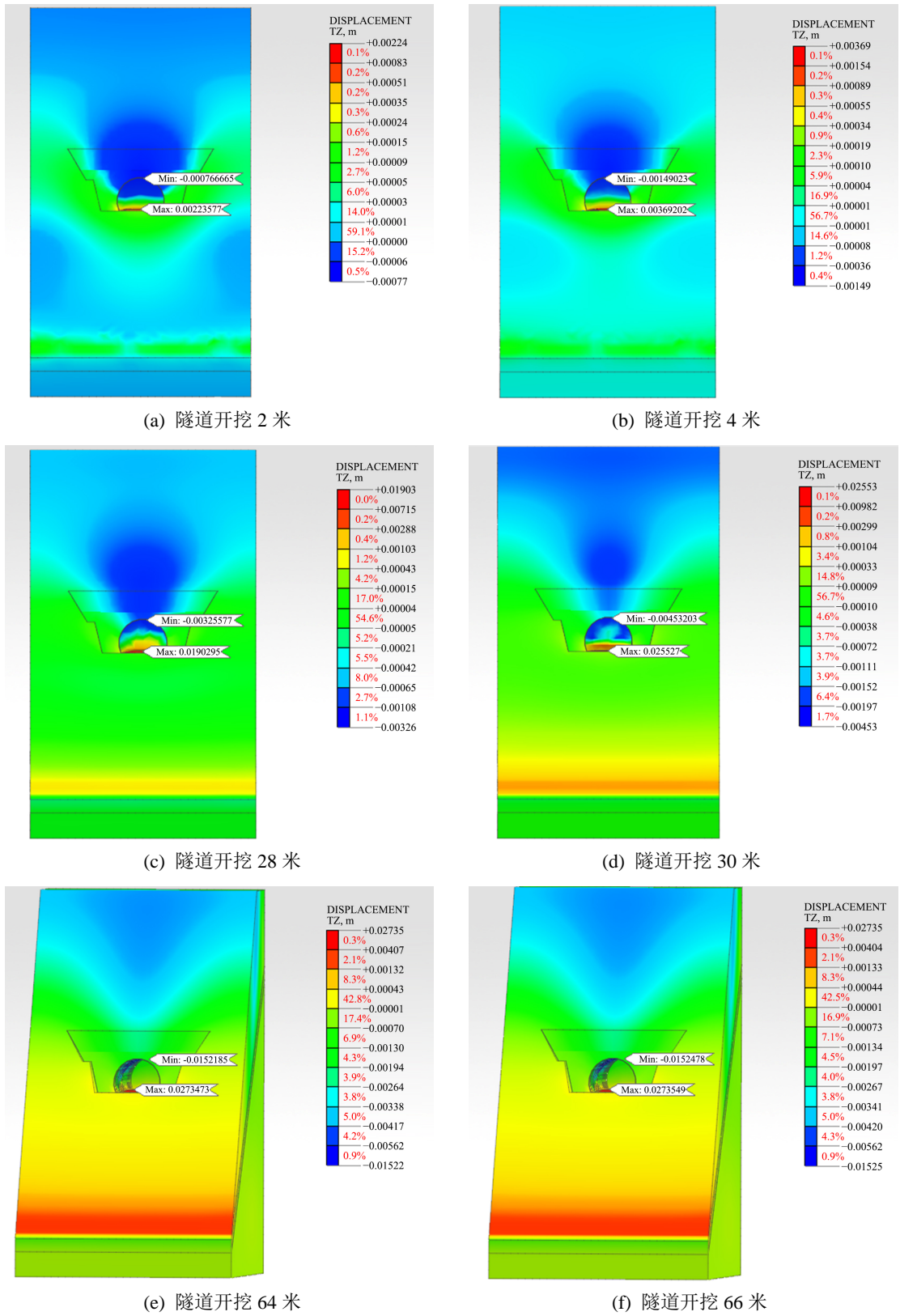


Figure 10. Cloud map of landslide mass deformation  
图 10. 滑坡体变形云图



由图 10 可知,随着开挖的深度不断加大,滑坡体的沉降变形也逐渐加大,同时隧道底部也出现隆起,这是由于隧道的开挖,隧道内的土逐渐被掏空,但上覆土压力却逐渐增大,会导致隧道截面逐渐缩小,滑坡体便出现迅速沉降的现象。当隧道开挖越接近滑带和基岩的时候,沉降速率也逐渐变大,这是因为上部荷载在滑体与基岩交界处有应力集中,隧道受到了较大的剪应力,导致滑坡体的沉降有较大变化。等到隧道开挖进入基岩后,滑坡的沉降速率也逐渐减小,趋于稳定。

## 6. 结论

1) 在对未埋设隧道的模型进行加载,可以看出滑坡体的破坏过程主要是滑坡后缘先出现细微裂缝,随后裂缝逐渐变大,导致坡体破坏。

2) 在对隧道开挖的过程中可以看出,滑坡顶部的水平位移要大于垂直位移,且两个方向都产生了变形,容易引起滑坡。

3) 通过数值模拟可以发现随着隧道的开挖,滑坡体的沉降变形逐渐加大,且开挖时越靠近滑带附近,坡体的沉降变形越大;刚开始进洞开挖对滑坡体的影响较小,但相对大于隧道开挖进入基岩后的变形。这是因为开挖进尺较大时,隧道的受力情况更接近悬臂结构,容易在隧道与滑带交界处产生集中应力,导致隧道变形,严重时可发生破坏。

## 参考文献

- [1] 吴红刚, 吴道勇, 马惠民, 等. 隧道-滑坡体系类型和隧道变形模式研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012(A2): 3632-3642.
- [2] 吴红刚, 陈小云, 艾挥. 隧道-滑坡平行体系变形机理的模型试验研究[J]. 铁道工程学报, 2016, 33(11): 6.
- [3] 牌立芳, 赵金, 吴红刚, 等. 刷方减重下隧道-滑坡平行体系变形演化试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2019, 39(5): 9.
- [4] 邵江, 朱宝龙, 李涛. 不同滑带角度滑坡作用下隧道衬砌结构受力特征[J]. 西南交通大学学报, 2021, 56(6): 9.
- [5] 张少龙. 降雨条件下堆积层滑坡变形机理及防治技术研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州交通大学, 2021.