

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2016.02.05

# 基于模型试验和数值模拟的采高对顺层 边坡稳定性影响分析

江 君<sup>1,2,3</sup>, 魏世玉<sup>1,2,3</sup>

(1. 重庆市地质灾害自动化监测工程技术研究中心, 重庆 400042; 2. 重庆地质矿产研究院, 重庆 400042;  
3. 重庆华地工程勘察设计院, 重庆 400042)

**摘要:** 以重庆市某铁矿山顺层边坡为研究对象, 利用山体实际地质情况, 运用 UDEC 软件对进行地下开挖后坡体滑面形变呈现凸形的模型进行数值模拟计算, 得到在不同采高情况下开挖后滑面的位移变化情况及坡体的应力应变变化规律; 利用可变滑面进行相似模型实验, 结合数值计算结果调节可变滑面, 通过观察模型体裂隙变化情况和采集各测点测线应力及位移变化情况, 分析不同采高对顺层边坡稳定性的影响。试验结果表明, 滑面下沉量随采高增大而增大, 坡体中部出现压应力集中; 坡体中部出现垂直大裂隙, 且随采高增大发育程度增大; 坡脚处发生小范围垮塌, 但坡体并未发生整体滑动; 由于采高的增大, 坡体向采空区及坡体下方的变形破坏增大, 坡体稳定性降低。

**关键词:** 顺层滑坡; 相似模型实验; 数值模拟; 可变滑面; 稳定性

中图分类号: TU457

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2016)02-0033-06

## Correlation between stability of bedding slope and mining height based on model experiment and numerical simulation

JIANG Jun<sup>1,2,3</sup>, WEI Shiyu<sup>1,2,3</sup>

(1. Chongqing Engineering Research Center of Automatic Monitoring for Geological Hazards, Chongqing 400042, China; 2. Chongqing Institute of Geology and Mineral Resources, Chongqing 400042, China;  
3. Chongqing Huadi Design Institute of Engineering Investigation, Chongqing 400042, China)

**Abstract:** On the basis of bedding slope of the Mountain in Chongqing, according to its actual geology condition, numerical simulation calculation of slope model with the convex slip surface after underground mining was performed by UDEC to obtain displacement change of slip surface and stress-strain change regulation of slope under different mining heights. Applying the adjustable slip surface, a similarity simulation experiment was finished, and combining with the numerical calculation result, the adjustable slip surface was adjusted to simulate the mining influence on slope. Through observing crack variation of slope model, collecting stress and displacement values of measuring points and lines, influence on slope stability under different mining heights was analyzed. The test result indicates that the sinkage of slip surface increases as the mining height grows, and stress concentration appears in the middle part of slope body. Besides, big vertical fractures develop in the middle part of slope body and the development degree becomes higher as the mining heights increases. Meanwhile, the collapse in a small area appears in the slope toe while there is no whole slide for slope body. As a result, increasing mining height leads to more obvious deformation and destroy towards goaf and lower part, and slope stability decreases.

收稿日期: 2015-08-10; 修订日期: 2015-09-11

基金项目: “研究生科技创新基金”优秀新生科研培育项目(CDJXS12 24 11 06); 重庆市国土资源和房屋管理局科技计划项目(CQGT-KJ-2014045)

第一作者: 江 君(1989-), 女, 助理工程师, 硕士, 主要研究方向为地质灾害智能监测。E-mail: jiangjun\_dyy@163.com

**Keywords:** bedding landslide; similarity simulation experiment; numerical simulation; adjustable slip surface; stability

## 0 引言

在具有滑坡地形地质条件的山体下采矿而诱发的采动滑坡是山区地表采动损害的主要形式之一<sup>[1]</sup>。采动破坏了采区周围岩体内部的原始应力平衡状态,使岩层产生移动、变形和破坏,引起地表变形、沉降,造成山体滑坡等其它灾害问题。

早期对采动滑坡多从滑坡学的角度去研究,主要从地层、构造、岩性结构以及地下水的作用等方面分析其机理,而对地下矿层开采方式、开采引起上覆岩体的应力应变关系及对坡体稳定性的影响没有进行深入研究<sup>[2]</sup>。随着对采动滑坡认识的逐步深入,许多学者应用物理模拟和数值模拟方法对采动滑坡进行研究<sup>[3-8]</sup>。

本文基于相似模拟原理建立边坡模型,结合数值模拟计算结果,模拟采高为 0.8 m、1.2 m、1.8 m、2.4 m 以及 3.0 m 情况下,滑面形态为凸形的边坡体变形破坏情况,分析采动诱发顺层滑坡的成灾模式及机理。

## 1 工程概况与实验模型

### 1.1 工程概况

试验区选取重庆市某铁矿山体发生大规模滑坡的尾山斜坡东侧临空陡崖,陡崖走向近南北向,陡崖高差 50 ~ 150 m,产状为 N0°E ∠ 85°E,岩层产状为 N75°E ∠ 20° ~ 32°NW,层面与陡崖面斜交内倾。试验区山体具有上硬下软、上陡下缓的二元结构特征,属于典型的煤系地层山体。山体从上到下依次为上部厚层状微晶石灰岩,中部中厚层状含沥青质灰岩,下部水云母粘土岩,以及基座粉砂质泥页岩。下部岩层中含有厚 0.96 ~ 1.35 m,平均厚度为 1.12 m 的铁矿石。边坡体由上部岩层与中部上段岩层组成,通过含炭质和沥青质页岩的软弱夹层与山体分离,沿软弱夹层滑动。图 1 为鸡尾山山体底层结构图。

### 1.2 实验模型

对于地下采动对顺层边坡的影响,相似模拟试验所需考虑的主要参数有:几何尺寸  $l$ 、容重  $\gamma$ 、泊松比  $\mu$ 、弹性模量  $E$ 、抗拉强度  $\sigma_t$ 、抗压强度  $\sigma_c$ 、时间  $t$  等。

因此,包括上述物理量的完全方程可表示为:

$$F(l, \gamma, \mu, E, \sigma_t, \sigma_c, t) = 0 \quad (1)$$

几何相似比  $C_l$ , 位移相似比  $C_\delta$ , 应变相似比  $C_\varepsilon$ , 泊松比相似比  $C_\mu$ , 时间相似比  $C_t$ , 容重相似比  $C_\gamma$ , 应力

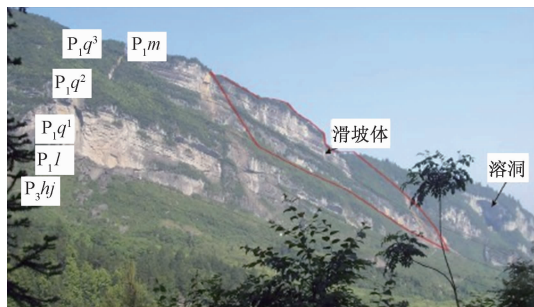


图 1 山体地层结构

Fig. 1 Stratigraphic structure of the mountain

相似比  $C_\sigma$ , 弹性模量相似比  $C_E$  等。根据相似定理以及力学原理,结合弹性力学方程或量纲分析方法可以推导出相似模拟试验应满足的基本相似判据<sup>[9-11]</sup>为:

$$C_\sigma = C_l C_\gamma; C_E = C_\sigma; C_\delta = C_l; C_t = \sqrt{C_l}; C_\varepsilon = C_\mu = 1 \quad (2)$$

除满足上述关系式外,还要求材料的各项强度指标的相似比一致,即:

$$C_\sigma = C_E = C_{\sigma_c} = C_{\sigma_t} \quad (3)$$

模型架要求有足够的刚度和宽度以保证模型的稳定性,根据现有试验条件,本次模拟使用重庆大学可变滑面顺层滑坡相似模拟试验台,该试验台能模拟不同滑面形态、不同滑面挠曲程度、滑面的不同变形速度和分布不同抗剪强度等条件下各种形态滑体的变形破坏及稳定性,能方便地测定滑面及滑体各点的应力及位移。

模型架的有效尺寸为 3.0 m × 2.0 m × 0.3 m,可变滑面宽度为 29.9 cm。两侧固定作为侧向边界条件,约束水平方向位移;下部为可变滑面,通过调节其下螺母改变滑面形态;上部地表为自由面。本试验原型采用简化之后的山体地表形态,岩层物理力学参数参考试验区岩层参数。

考虑到试验室现有模型架尺寸条件,本模型采用几何相似比  $C_l = C_p / C_m = 100$ ,表面茅口组灰岩  $C_{\gamma_1} = \gamma_{p1} / \gamma_{m1} = 1.78$ ,滑面上层栖霞组灰岩  $C_{\gamma_2} = \gamma_{p2} / \gamma_{m2} = 1.76$ 。根据(2)、(3)式可得出以下相似比关系:

$$\begin{aligned} C_{\sigma_1} &= C_l C_{\gamma_1} = 178 \\ C_{\sigma_2} &= C_l C_{\gamma_2} = 176 \end{aligned} \quad (4)$$

$$C_l = \sqrt{C_l} = 10; C_\varepsilon = C_\mu = 1$$

模拟对象主要为沉积岩地层,选用河砂、石灰、石膏、碳酸钙来配置相似材料,以硼砂作为缓凝剂。河砂为骨料,上层茅口组以石灰和石膏作胶结物,下层栖霞组的胶结物采用石膏和碳酸钙。通过调整相似材料配比,选出

本次试验所用的相似材料配比见表 1,用量见表 2。

表 1 相似模型材料配比

| Table 1 The proportioning table of similar model |         |         |
|--------------------------------------------------|---------|---------|
| 岩层                                               | 茅口组灰岩   | 栖霞组灰岩   |
| 原型厚度/m                                           | 40      | 20      |
| 模型厚度/cm                                          | 40      | 20      |
| 配比号                                              | 437     | 537     |
| 所需抗压强度/kg·cm <sup>-2</sup>                       | 2. 5852 | 1. 8144 |
| 材料抗压强/kg·cm <sup>-2</sup>                        | 2. 98   | 1. 97   |
| 所需抗拉强/kg·cm <sup>-2</sup>                        | 0. 3057 | 0. 292  |
| 材料抗拉强/kg·cm <sup>-2</sup>                        | 0. 27   | 0. 30   |

表 2 相似模型材料用量

| Table 2 The amount table of similar model |         |         |
|-------------------------------------------|---------|---------|
| 岩层                                        | 茅口组灰岩   | 栖霞组灰岩   |
| 体积/m <sup>3</sup>                         | 0. 27   | 0. 15   |
| 石灰/kg                                     | 21. 93  | —       |
| 碳酸钙/kg                                    | —       | 10. 12  |
| 石膏/kg                                     | 51. 17  | 23. 62  |
| 河砂/kg <sup>2</sup>                        | 292. 40 | 168. 71 |
| 水/kg                                      | 40. 61  | 25. 31  |
| 硼砂/g                                      | 4. 06   | 2. 53   |

通过剪切试验,选定值与炭质页岩软弱夹层最接近的黄油作为相似材料,作为试验中模拟软弱夹层的材料。

2 相似材料模拟实验

2.1 实验过程及现象

试验前,在模板内表面涂上机油,安装固定在模型架两侧,并在模型架可变滑面表面涂上黄油;根据相似配比材料,将混合材料逐层装入模型架,捣固压实;在第一层材料内按 25 cm 间隔安设 10 个土压力传感器作为应力测点;随着材料的不断装填,模板也随之向上安装,直至模型制作完成。干燥 5 天后拆去固定长板,挂上筛网作为测点坐标系;打入直径为 2 mm 的钢丝作为位移测点并进行标号,共 33 个测点 4 条测线,从下至上分别为测线一至测线四。待模型再通风干燥 2 天后开始进行可变滑面的调节和模型形态及应力应变的观测。模型制作完成后的实物见图 2。

采用钢尺和五十分度(精度 0.02 mm)的游标卡尺测量位移测点的变化;采用 BX-1 型土压力传感器和 WS3811-J12/24 型静态应变仪,将埋设好的土压力传感器与静态应变仪采用全桥的方式连接好,再将静态应变仪与计算机连接起来,启动 Vib’ SYS 和静应变采集程序软件记录下模型变滑面处应力随滑面变化而产生的变化。

完成模型测点的布置检查无误后即可进行试验,按照数值模拟的计算结果,对可变滑面下部螺母进行竖直方向的位移调节,共计五次,从左至右 14 个螺母



图 2 实物模型

Fig. 2 The practicality model

调节量见表 3,分别模拟地下开挖厚度为 0.8 m、1.2 m、1.8 m、2.4 m 及 3.0 m 时滑面竖直位移的变化,用以观察不同采高对边坡体的影响。

表 3 竖直位移调节量

| Table 3 The vertical displacement of slip surface |         |         |         |         |         |
|---------------------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 采高                                                | 0. 8 m  | 1. 2 m  | 1. 8 m  | 2. 4 m  | 3. 0 m  |
| 螺母                                                | /cm     | /cm     | /cm     | /cm     | /cm     |
| 1 号                                               | 0. 0691 | 0. 0624 | 0. 0916 | 0. 0725 | 0. 0794 |
| 2 号                                               | 0. 0715 | 0. 0538 | 0. 0799 | 0. 0618 | 0. 0714 |
| 3 号                                               | 0. 0791 | 0. 0869 | 0. 1253 | 0. 1042 | 0. 0640 |
| 4 号                                               | 0. 0976 | 0. 1360 | 0. 1938 | 0. 1693 | 0. 1013 |
| 5 号                                               | 0. 1378 | 0. 1672 | 0. 2417 | 0. 2176 | 0. 2584 |
| 6 号                                               | 0. 1714 | 0. 2029 | 0. 3006 | 0. 2717 | 0. 3469 |
| 7 号                                               | 0. 2059 | 0. 2423 | 0. 3683 | 0. 3295 | 0. 4313 |
| 8 号                                               | 0. 2507 | 0. 2948 | 0. 4448 | 0. 4141 | 0. 5351 |
| 9 号                                               | 0. 3533 | 0. 4121 | 0. 5326 | 0. 6534 | 0. 7378 |
| 10 号                                              | 0. 4569 | 0. 5289 | 0. 7153 | 0. 8602 | 0. 9000 |
| 11 号                                              | 0. 5505 | 0. 6635 | 0. 9124 | 1. 1288 | 1. 2085 |
| 12 号                                              | 0. 6271 | 0. 8280 | 1. 0817 | 1. 5185 | 1. 7835 |
| 13 号                                              | 0. 7183 | 1. 0769 | 1. 5225 | 2. 0770 | 2. 5131 |
| 14 号                                              | 0. 7751 | 1. 1669 | 1. 6907 | 2. 2927 | 2. 7807 |

试验过程中,坡体中部出现两条竖直方向的大裂隙,中下部裂隙较中上部裂隙发育更明显。随着模拟采高的增加,两条裂隙发育程度均明显增大,同时可观察到地表的张拉裂缝逐渐贯穿整个坡体见图 3。



图 3 坡体中部裂隙

Fig. 3 The fractures in the middle part of slope body

此外,当模拟采高为 2.4 m 时,坡脚处发生小范围垮塌,斜坡中上部观察到一条竖向裂隙见图 4。停止调节可变滑面后,模型坡体仍处于相对稳定状态,除发生小范围垮塌外并未发生滑坡见图 5。



图 4 坡脚垮塌

Fig. 4 The collapse of slope toe



图 5 坡体裂隙

Fig. 5 The fractures of slope body

## 2.2 试验结果及分析

图 6 为相似材料模拟试验的滑面应力变化图。模拟不同采高情况下,滑面的应力变化趋势基本相同,应力值均呈现出逐渐减小的整体趋势。在坡体中上部(75 m)及坡顶附近(175 m)出现压应力集中,而在坡体中下部(125 m)压应力减小至 2000 Pa 以内。同时,靠近坡脚处由于滑面上覆岩层的减少,压应力逐渐减小。但由于应力测点布置过少,该应力曲线并不能很好的反映滑面的应力变化趋势。

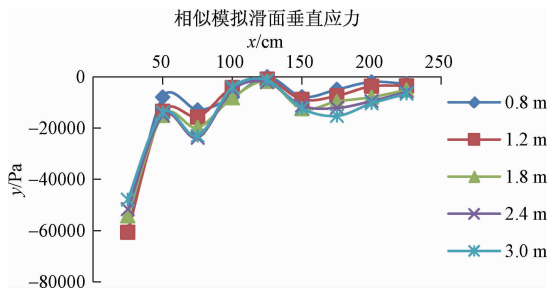


图 6 相似材料模拟试验应力

Fig. 6 The vertical stress curve of sip surface by similar material simulation experiment

图 7 为各测线下沉变化量。四条测线的下沉量变化均呈现出逐渐增大的趋势,坡脚处下沉量最大。同时,四条测线的下沉量数值均随着采高的增大而增大。其中,测线一与测线二的凸形趋势较明显,在部分测点处曲线出现轻微上凸的趋势,表明此处压应力较两侧较小。而测线三与测线四的下沉量曲线近似呈线性减小。

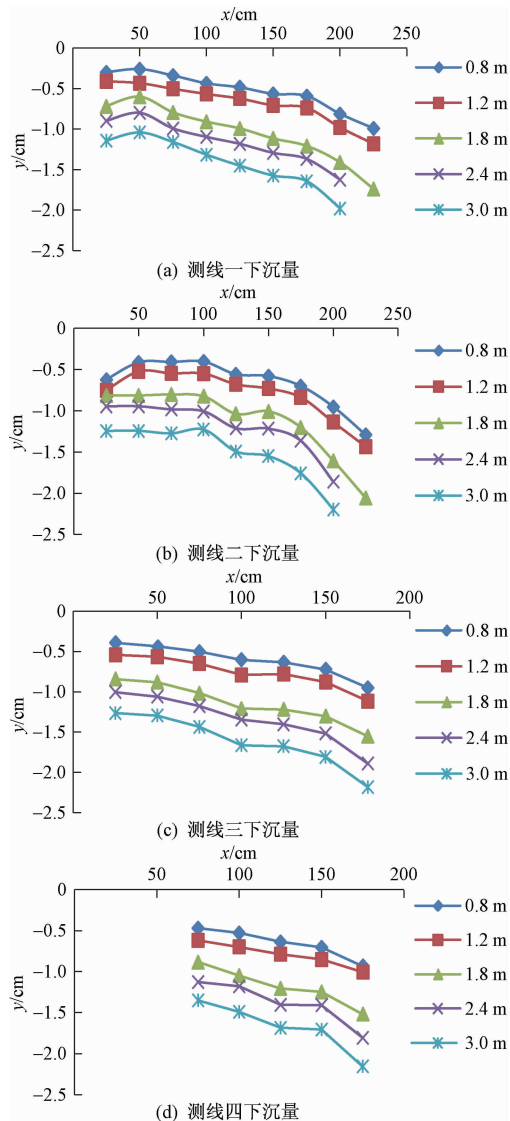


图 7 各测线下沉变化量

Fig. 7 The sinkage of each seismic line

## 3 基于 UDEC 的数值模拟分析

### 3.1 UDEC 原理

通用离散元程序(UDEC, Universal Distinct Element Code)是一个处理不连续介质的二维离散元程序。在 UDEC 中,将节理岩体看做由离散的岩块和岩块间的节理面所组成,同时将非连续性作为块体之间的边界条件,允许岩块平移、转动和变形<sup>[12-14]</sup>。UDEC 对研究不

连续特征的潜在破坏模型是十分理想的工具,它能够分析研究不连续特征相关的岩体破坏方式及煤层开挖后顶板冒落、垮落、离层的过程,可以较准确地分析条带开采后覆岩层的移动和地表的沉降。

3.2 模型建立

根据试验区具体地质条件,简化地表地形边界后,确定模型尺寸:模型长为 600 m,高为 564.85 m,滑面斜长 622.03 m,坡体全长 331.01 m;模型倾角为 25°,底部边界固定,即底部水平、垂直位移为零;左右边界水平方向固定,即水平位移为零;顶部地表为自由边界;滑面至开挖煤层距离为 120 m,开挖煤层厚度分别为 0.8 m、1.2 m、1.8 m、2.4 m、3.0 m,开挖边界至模型左边界水平距离为 190 m,以此模拟滑面形态为“凸”形情况下采高的变化对边坡稳定性的影响。建立的数值模型见图 8。

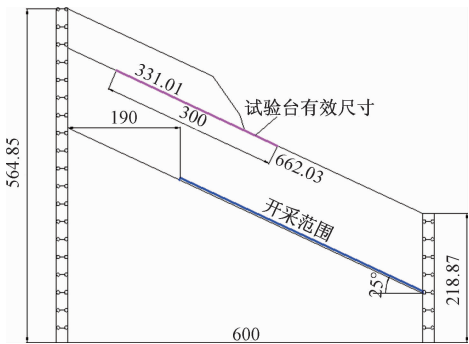


图 8 数值模拟模型

Fig. 8 The numerical simulation model

通过查阅该地区相关地质资料,得出该山体岩石物理力学参数见表 4。

表 4 岩层物理力学参数

| Table 4 Rock physical and mechanic parameter |                               |                    |                   |              |              |                   |
|----------------------------------------------|-------------------------------|--------------------|-------------------|--------------|--------------|-------------------|
| 岩层                                           | 密度<br>d/(kg·m <sup>-3</sup> ) | 体积<br>模量 K/<br>GPa | 剪切<br>模量<br>G/GPa | 摩擦角<br>f/(°) | 粘结力<br>C/MPa | 抗拉<br>强度<br>t/MPa |
| 茅口组灰岩                                        | 2670                          | 4.87               | 3.14              | 60.8         | 1.69         | 5.44              |
| 栖霞组上段灰岩                                      | 2647                          | 4.38               | 1.27              | 40.6         | 4.92         | 5.15              |
| 栖霞组中下段灰岩                                     | 2830                          | 16.00              | 8.10              | 29.0         | 1.30         | 1.20              |
| 粘土岩                                          | 2680                          | 19.00              | 10.20             | 34.0         | 3.80         | 3.00              |
| 细砂岩                                          | 2590                          | 20.00              | 11.00             | 36.0         | 4.00         | 3.00              |
| 粉砂岩                                          | 2830                          | 16.00              | 8.10              | 29.0         | 1.30         | 1.20              |
| 煤                                            | 1400                          | 8.54               | 5.67              | 32.0         | 1.10         | 2.00              |
| 基岩                                           | 2620                          | 34.8               | 9.81              | 14.4         | 3.84         | 6.76              |

3.3 模拟结果分析

按照模型试验台的有效尺寸,得到模型试验台范围内的滑面应力及下沉量的数值模拟结果。

图 9 为数值模拟垂直应力图。随着开挖的水平延伸和开采范围的扩大,滑面的应力受采动影响而重新分布和调整。不同采高情况下滑面上的垂直应力变化整体趋势基本相同。坡体左边界处受边界影响压应力最大,随后逐渐减小并出现波动。在坡体中部 150 m 处,滑面上的压应力出现极大值,且随着采高的增加,极大值的数值也随之增大,采高为 3.0 m 时的极大值达到 2.1 MPa。随后,由于越靠近坡脚处滑面上覆岩体逐渐减少,滑面应力曲线在经过数次波动后,在 250 m 处开始大幅减小,坡脚处压应力趋于 0。

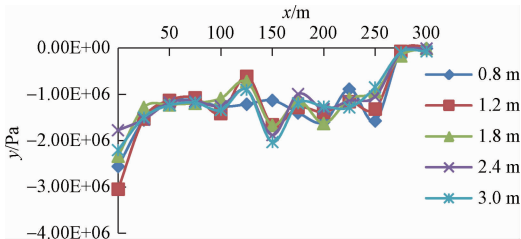


图 9 滑面数值模拟垂直应力曲线

Fig. 9 The vertical stress curve of slip surface

图 10 为数值模拟滑面下沉量曲线图。在不同采高情况下,滑面下沉量曲线整体趋势相同,呈现出“凸”形的变化趋势。0 ~ 150 m 范围内坡体受开挖影响较小,滑面下沉量不大;随后滑面下沉量开始逐渐增大,到坡脚处达到最大下沉值。随着采高的逐渐增大,下沉量数值随之逐渐增大,在开采厚度从 0.8 m 增加到 3.0 m 的过程中,坡体向采空区方向的变形不断增加,采高为 3.0 m 时的最大下沉量达到 2.0 m,是采高为 0.8 m 时最大下沉量的大约 5 倍,说明采高的增大导致坡体在竖直方向上的移动变形增大。

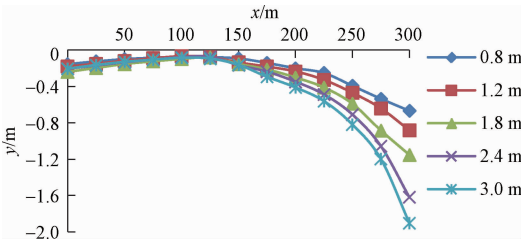


图 10 滑面数值模拟下沉量曲线

Fig. 10 The sinkage curve of slip surface

4 结论

(1) 试验区山体的数值模拟结果表明,随着矿层的开采,坡体中部出现压应力集中,采高越大,压应力数值越大;滑面下沉量曲线呈现出“凸”形的变化趋势,采高越大下沉量越大。

(2) 根据相似模拟试验,坡体中下部产生两条明

显的垂直大裂隙,坡体表面出现张拉裂隙,坡脚处出现裂缝,且随采高的不断增大,此现象逐渐明显,坡体稳定性降低,但坡体并未发生滑坡,只在坡脚处发生小范围垮塌。

(3)相似模拟试验所测得的可变滑面应力曲线与数值模拟计算得出的滑面应力趋势大体一致。由各测线下沉量曲线可知,各测线均呈现出逐渐增大的变化趋势,下沉量值随采高增大而增大。

(4)由此可见,采高的增大导致坡体变形破坏愈发明显,坡体向采空区及坡体下方的移动变形增大,滑面抗剪强度降低,坡体稳定性降低。

### 参考文献:

- [ 1 ] 尹志明. 马桑湾采动滑坡稳定性分析[D]. 重庆大学, 2010.  
YIN Zhiming. Stability analysis of MaSangWan landslide influenced by underground mining [ D ]. Chongqing University, 2010.
- [ 2 ] 李腾飞, 李晓, 苑伟娜, 等. 地下采矿诱发山体崩滑地质灾害研究现状与展望[J]. 工程地质学报, 2011, 19(6): 831 - 838.  
LI Tengfei, LI Xiao, YUAN Weina, et al. Current status and prospects of studies on mechanism of landslide geohazards induced by underground mining[J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19(6): 831 - 838.
- [ 3 ] JONES DB, REDDISH DJ, SIDDLE HJ, et al. Slope stability interaction with mining[C]. Proceed-ings of the 7th International Society of Rock. Mechanics Congress, Aachen, 1992.
- [ 4 ] BENKO B. Numerical modelling of complex slope deformations[D]. The Doctor Degree Dissertation of Department of Geological Science, University of Saskatchewan, 1997.
- [ 5 ] 刘书贤, 魏晓刚, 麻凤海, 等. 深部采动覆岩移动变形致灾的试验分析[J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(4): 88 - 92.  
LIU Shuxian, WEI Xiaogang, MA Fenghai, et al. Experiment analysis of disaster-causing movement and deformation of overlying strata by deep mining[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2013, 40(4): 88 - 92.
- [ 6 ] 高杨, 殷跃平, 邢爱国, 等. 鸡尾山高速远程滑坡——碎屑流动力学特征分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2013, 24(4): 46 - 51.  
GAO Yang, YIN Yueping, XING Aiguo, et al. Analysis on mechanical characteristics of crumb flow—Jiwei mountain landslide with high speed and long distance[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2013, 24(4): 46 - 51.
- [ 7 ] 陈从新, 黄平路, 卢增木. 岩层倾角影响顺层岩石边坡稳定性的模型试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(3): 476 - 482.  
CHEN Congxin, HUANG Pinglu, LU Zengmu. Study on correlation between stability of consequent rock slope and obliquity of rock layer by simulation experiment[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(3): 476 - 482.
- [ 8 ] 徐廷甫, 尹志明, 邓月华. 地下采动条件下顺层岩质边坡稳定性分析[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(6): 1241 - 1246.  
XU Tingfu, YIN Zhiming, DENG Yuehua. Stability analysis of bedding rock slope at underground mining conditions [ J ]. Chinese Journal of Under-ground Space and Engineering, 2011, 7(6): 1241 - 1246.
- [ 9 ] 蒋黔生. 相似理论与模型试验[J]. 工程机械, 1982.  
JIANG Qiansheng. Similarity theory and model experiment[J]. Construction Machinery, 1982.
- [ 10 ] 李化云, 张志强, 王志杰, 等. 浅埋大跨隧道预加固措施相似模型试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(2): 133 - 138.  
LI Huayun, ZHANG Zhiqiang, WANG Zhijie, et al. Similarity model test study of pre-reinforcement measures of shallow tunnel with large cross-section[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(2): 133 - 138.
- [ 11 ] 肖慧, 侯克鹏, 陈冲, 等. 层状岩质边坡开挖过程相似模型试验[J]. 工程勘察, 2014(6): 29 - 33.  
XIAO Hui, HOU Kepeng, CHEN Chong, et al. Similarity model experiment of excavation in bedding rock slope [ J ]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2014(6): 29 - 33.
- [ 12 ] 周维恒, 杨强. 岩石力学数值计算方法[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.  
ZHOU Weiheng, YANG Qiang. Numerical method of rock mechanics[M]. Beijing: China Power Press, 2005.
- [ 13 ] 王勖成, 邵敏. 有限单元法基本原理和数值方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 1994.  
WANG Maocheng, SHAO Min. Fundamental principle and numerical method of finite element method[M]. Beijing: National Defence of Industry Press, 1994.
- [ 14 ] 谢文兵, 陈晓祥, 郑百生. 采矿工程问题数值模拟研究与分析[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2005.  
XIE Wenbing, CHEN Xiaoxiang, ZHENG Baisheng. Research and analysis of numerical simulation of mining engineering [ M ]. Xuzhou: University of Mining & Technology Press, 2005.