

陡倾煤层开采条件下上覆山体变形 破坏物理模型试验研究

贺凯^{1,2}, 高杨^{1,2}, 王文沛³, 朱赛楠³

(1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;

2. 国土资源部新构造运动与地质灾害重点实验室, 北京 100081;

3. 中国地质环境监测院, 北京 100081)

摘要: 大型岩质滑坡是中国西南岩溶矿区的主要地质灾害类型, 其破坏和成灾过程具有复合性。以我国重庆武隆鸡冠岭滑坡为例, 通过离心物理模型试验研究了地下开采条件下陡倾灰岩斜坡的变形失稳机制。试验时随着煤层模型板被拔出, 上覆岩层在拟重力作用下开始出现位移与层间错动, 当煤层模型被拔出 150 mm 时, 模型山体发生显著破坏。试验结果表明: 陡倾灰岩斜坡在长期重力作用下, 会出现弯曲倾倒的变形, 随着地下煤层逐渐采空, 上覆陡倾层状岩体失去支撑, 岩层层面分离并产生拉张裂缝, 岩体变形加剧发生倾倒破坏, 并对煤层下部的稳定岩体形成挤压, 下伏稳定岩体发生剪切破坏, 最终导致鸡冠岭以倾倒—滑移的复合模式整体失稳。这一研究对中国西南山区大型岩质滑坡的早期识别与失稳机制分析具有指导意义。

关键词: 陡倾层状山体; 地下采空; 失稳破坏; 离心模型; 倾倒—滑移

中图分类号: P642.22

文献标识码: A

PHYSICAL MODEL EXPERIMENTAL STUDY ON DEFORMATION AND FAILURE OF OVERLYING ROCK SLOPE UNDER THE CONDITION OF STEEP COAL SEAM MINING

HE Kai^{1,2}, GAO Yang^{1,2}, WANG Wenpei³, ZHU Sainan³

(1. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;

2. Key Laboratory of Neotectonic and Geohazard, Ministry of Land Resources, Beijing 100081, China;

3. China Institute for Geo-Environment Monitoring, Beijing 100081, China)

Abstract: Major rockslide is the main type of geological hazards in the mining mountainous areas of southwestern China. The failure modes and behaviors of this kind of rockslides are complex. Taking the Jiguanling landslide as an example, centrifuge modelling was taken to analyze the failure mechanism of a steep-dip carbonate slope which was induced by goaf in this study. With the model plate of coal seam was pulling out, the overlying strata began to move and dislocate under centrifugal acceleration. The model rock slope failed completely when the model plate was pulled out about 150mm. The experimental results show that the deformation tendency of bending and toppling appeared in steep-dip and layered limestone

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41702342, 41472295); 中国地质科学院地质力学研究所基本科研业务费专项经费资助项目 (DZLXJK201610); 中国地质调查局地质调查项目 (DD20160268-4)

作者简介: 贺凯 (1986-), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事地质灾害与工程地质等方面的研究。E-mail: hekai2005@163.com

收稿日期: 2018-01-15; 修回日期: 2018-04-15

范二平编辑

slopes by gravity. With the underground mining of coal seams, overlying steep-dip and layered rock slope lost its support, then strata got separated and tension fissures were generated. These rock strata were toppled due to severe deformation. The underlying stable rock mass was squeezed by the toppled overlying strata, and shear failure occurred. In the end, the Jiguangling rock slope was failed with the composite mode of toppling-sliding. This study could be a guide of early identification and failure mechanism analysis for major rockslides in mountainous area of southwestern China.

Key words: steep-dip and layered slope; underground goaf; failure; centrifuge model; toppling-sliding

0 引言

我国西南地区多发育大型褶皱山体,地质条件复杂,二叠系、三叠系厚层灰岩、白云岩等碳酸盐岩广泛分布。受沉积环境影响,这一地区的厚层碳酸盐硬岩地层中常见多层泥质或碳质软弱层与含煤、铁或铝土矿的粘土岩地层,如二叠系龙潭煤系等含矿地层。随着能源需求量剧增,矿层开采规模和范围不断扩大,地下采空导致上覆厚层碳酸盐岩山体变形强烈,大型滑坡灾害尤为易发,给山区人居安全与社会经济发展带来巨大损失^[1-3]。

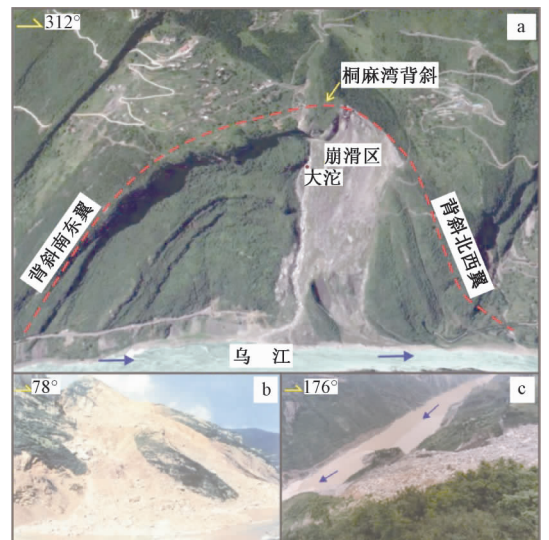
研究认为,地下采矿会引起大量的地质环境与地质灾害问题^[4-6]。受地质因素和采矿技术的影响,地下采矿诱发山区地表破坏的主要形式就是山体变形^[7-8],在地表临空、地下采空和软弱夹层等条件下,变形山体可以进一步转化为滑坡、崩塌、碎屑流等地质灾害^[9-10]。地下采矿导致山体内部应力条件与工程地质条件的改变是采矿区山体变形的内部机制^[11-13]。由于矿层开采致使山体应力重分布,进而引起采空区上覆岩体变形,改变了山体原有结构性与地下水运移环境,大大加剧了山体的变形破坏进程^[14-15]。

对于层状沉积岩(碳酸盐岩)山体而言,目前取得的研究共识是采矿活动对山体应力调整具有很大影响,引起“悬臂效应”或顶板冒落^[16],产生平行陡崖走向的深大裂隙。裂隙与山体结构面组合,将岩体切割成块体从而形成潜在滑体。对陡倾层状山体而言,地下开采时上覆岩体会发生渐进破坏,陡倾角结构面走向与矿体走向相近,且延展性良好时,容易引起上覆岩体倾倒破坏^[17-19]。近年来不少学者关注到了山区地下开采对山体变形甚至致灾的影响,综合研究了陡倾层状斜坡的倾倒破坏模式和稳定性分析方法,推动

了这类灾害的深入研究^[20-22]。但仍需指出的是,地下采矿引发陡倾层状山体斜坡变形破坏的研究多采用解析计算或数值模拟等手段,尚缺乏具有针对性的试验或监测数据作为可靠理论支撑^[23-24]。基于此,文章以重庆武隆鸡冠岭滑坡为例,在现场调查与资料分析基础上,通过离心模型试验,研究地下采空对陡倾层状斜坡变形失稳的破坏启动机制,为西南采矿山区层状山体斜坡防灾减灾提供重要参考与依据。

1 滑坡基本情况

鸡冠岭大型岩质滑坡位于中国重庆乌江下游武隆段左岸桐麻湾背斜翼部(见图1),体积约 $400 \times 10^4 \text{ m}^3$,山体失稳后形成高速碎屑流,约 $30 \times 10^4 \text{ m}^3$ 碎屑流体流入乌江后堵塞航道,堵江时间长达30 min。造成17人死亡,重伤19人,击沉船只5艘,乌江水运中断3个月,直接损失近亿元^[25]。

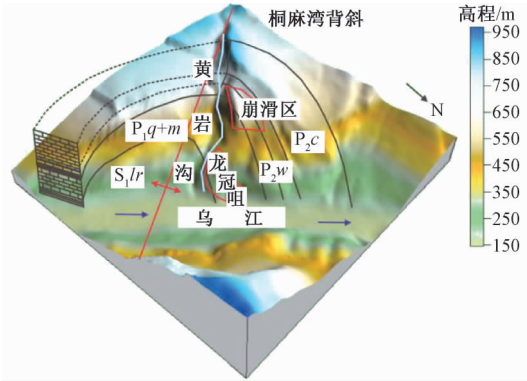


a—鸡冠岭滑后遥感影像; b—滑后全貌; c—阻断乌江

图1 重庆市鸡冠岭山体滑坡滑后地貌形态
Fig. 1 Topographic feature of the Jiguangling rockslide in Chongqing

1.1 地形条件

鸡冠岭山体属于岩溶中山地貌,滑坡区峰顶高程为 897 m,呈北西—南西向岭脊地形。乌江在此段强烈垂直切割桐麻湾背斜,形成峡谷,乌江由南东流向北西,水面标高 152 ~ 158 m,江面宽约 150 ~ 200 m,切割深度大于 750 m,两岸形成对称的高陡岩质斜坡(见图 1、图 2)。



P_{2c} —二叠系长兴组; P_{2w} —二叠系吴家坪组;
 P_{2q+m} —二叠系栖霞茅口组; S_{1lr} —志留系罗惹坪组

图 2 重庆市鸡冠岭山体滑前桐麻湾背斜地形及地层结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of topography and geologic structure of Tongmawan anticline before the Jiguanling rockslide

鸡冠岭滑坡处于桐麻湾背斜核部西翼。桐麻湾背斜核部受到强烈的褶皱作用,应力集中,核部地层在张拉应力环境下易形成破碎岩体。背斜东翼的二叠系长兴组(P_{2c})与吴家坪组(P_{2w})地层在长期地质作用下被侵蚀剥离,二叠系栖霞

组与茅口组($P_{1q}-P_{1m}$)厚层灰岩裸露于地表。背斜东翼在侵蚀过程中,与西翼完整地层形成倒“V”断面,具备良好的集水条件,因此逐渐形成深切冲沟(黄岩沟)(见图 2)。

1.2 地层结构

鸡冠岭滑坡区北东 45°与南东 135°两侧临空,北东 45°坡向平均坡度 40°~45°,南东 135°向坡度 60°~70°,临空条件良好。岩层产状为 295°~310°∠70°~80°,岩层倾角大于 65°,为陡倾岩层。根据层状斜坡的坡形结构分类,鸡冠岭滑坡区岩层倾向与斜坡倾向间的夹角为 95°~120°,在 60°~120°之间,岩层倾角在 0°~90°之间,斜坡破坏属于陡倾层状横向斜坡的失稳,是一类最可能发生弯曲倾倒变形的斜坡结构(见图 3)。鸡冠岭出露地层主要以二叠系灰岩和志留系页岩为主,由新到老为:(1)二叠系中统长兴组坚硬灰—浅灰色中厚层状灰岩(厚度大于 100 m);(2)二叠系吴家坪组薄层—中厚层灰岩夹页岩(厚大于 90 m),下部含 0.1~1.2 m 厚煤层;(3)二叠系下统栖霞组与茅口组厚—巨厚层状灰岩(厚度大于 300 m);(4)二叠系下统梁山组铝土质页岩夹薄层灰岩(厚度大于 10 m);(5)志留系罗惹坪组页岩夹薄层粉砂岩(厚度大于 100 m)。不难发现二叠系吴家坪组下段页岩夹煤层为软弱地层,力学性质与灰岩相差大,由于受到灰岩的挤压,软弱层易发生压缩变形,使得上覆层状岩体受拉,并发生蠕动变形。下伏栖霞组为厚层灰岩,力学性质较为稳定,起阻滑作用。

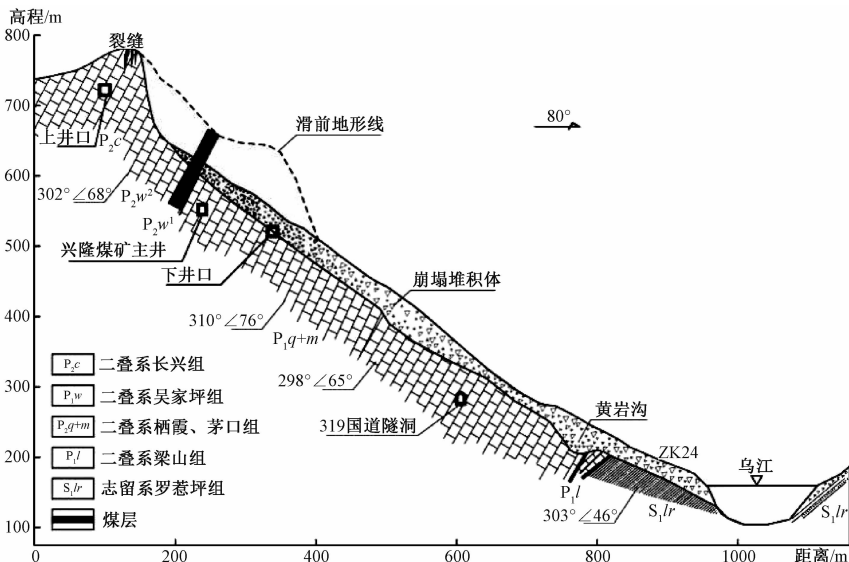


图 3 鸡冠岭滑坡滑前滑后地形与地层结构剖面图

Fig. 3 Profile of topography and geologic structure before and after the Jiguanling rockslide

1.3 采矿活动

鸡冠岭采矿层是二叠系吴家坪组含煤地层,该煤层斜穿整个滑坡区,煤层厚约 0.1 ~ 1.2 m,平均 0.65 m。前期资料显示鸡冠岭的采矿活动非常活跃。由于该煤层进行大面积开采,采空深度达 950 m。1992 年 2 月,兴隆煤矿新建动工,主井掘进深度 1100 m,掘进方向与煤层走向夹角约为 25°,风井标高为 631.6 m。兴隆煤矿开采方式为掩护支架采煤法,沿矿层走向布置采煤工作面,用掩护支架将采空区和工作空间隔开进行回采^[25-27]。长期地下煤层采空诱发鸡冠岭斜坡变形逐渐加大直至失稳崩塌。崩塌发生前一天,兴隆煤矿主井洞底板有鼓胀现象和铁轨错位现象,后缘裂缝进一步加宽、加深、规模变大。迹象表明含煤地层的大量开采造成斜坡内大面积临空,上覆层状岩体呈现出“悬臂效应”,地下采空的附加应力加剧了上覆岩层的倾覆变形。随时间推移,斜坡层状岩体往 135°方向临空面发生倾覆大变形,地表出现密集的拉裂缝,与下部临空面贯通,瞬间失稳,从而形成大规模的崩塌。

2 模型试验方案

为了验证鸡冠岭山体滑坡的破坏模式与启动机制开展了离心模型试验。通过概化的鸡冠岭斜坡模型,在离心机上还原陡倾层状斜坡弯曲倾覆的破坏过程,分析重力和煤层开挖作用下层状斜坡的变形特征。

试验使用的土工离心机有效容量 200 g · t,有效半径 3.7 m,模型箱尺寸为 85 cm (长) × 64 cm (宽) × 87 cm (高),试验离心机加速度选定为 80g。通过模型与原型的抗弯强度相似选择模型材料的配比以及开缝率。各物理量参数相似比如表 1 所示。离心机加速按初期每级 10g、后期每级 20g 逐级增大至设计加速度,保持设计加速度运行,待监测系统测量结果稳定后,开展煤层开挖模拟。若离心机加速过程中模型发生破坏,即停止运行。

2.1 试验模型

鸡冠岭离心模型三维效果如图 5 所示,模型由共 17 块岩层粘贴而成,岩层之间为结构面 I,滑体与后部基岩之间为结构面 II。模型岩层按倾角为 70°通过界面材料连接在一起,岩层通过开缝模拟原型岩层的裂隙。离心机加速度逐级增大,分析斜坡在自重作用下的变形破坏情况;采用相似材

表 1 鸡冠岭滑坡离心模型试验主要物理量比尺关系

Table 1 Scale relation of physical model experiment on the Jiguangling rockslide

物理量	原型与模型比例关系	原型与模型比例数值
长度	1:1/C _L	800
加速度	1:n	1:80
容重	1:n/q	1:1248
位移	1:1/C _L	800
弹性模量	1:n/qC _L	15.6
粘聚力 c	1:n/qC _L	15.6
内摩擦角 φ	1:1	1:1
泊松比 ν	1:1	1:1
抗拉强度	1:n/qC _L	15.6

注:表中 C_L 为离心试验几何相似比; n 为试验离心加速度; q 为离心试验容重相似比

料模拟煤层,当离心机达到目标加速度并运行稳定后,利用机械手系统将煤层模型材料取出模拟煤层开挖,分析鸡冠岭山体在煤层开挖作用下的破坏情况(见图 6)。

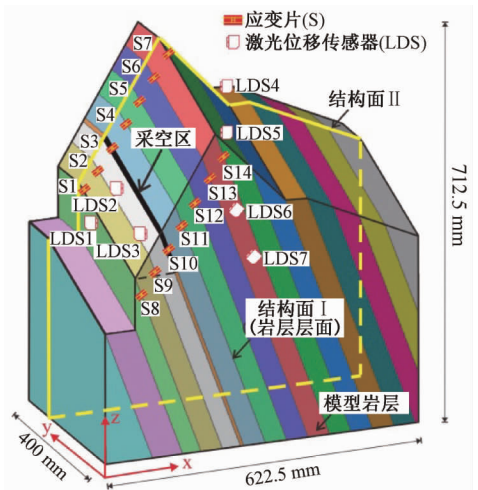


图 5 鸡冠岭崩滑体离心模型及监测点

Fig. 5 Centrifuge model and its monitoring points for the Jiguangling rockslide

2.2 模型材料与监测系统

鸡冠岭崩滑体主要由灰岩构成,容重为 25 kN/m³,抗拉强度为 950 kPa。通过试验对比,相似材料选用水膏比 0.8 的石膏模型材料,容重为 16 kN/m³,抗拉强度为 61 kPa。原型结构面主要有结构面 I 和结构面 II 两种,分别代表层面和后缘裂缝。由直剪试验可测得结构面的抗剪强度:结构面 I 通过土工布模拟,内摩擦角 23.3°,粘聚力 26.5 kPa;结构面 II 通过凡士林模拟,内摩擦角 3°,粘聚力 16 kPa。

红色部分为煤层,形状为梯形,最长为 200.3 mm,

采用复合塑胶板进行模拟,如图6所示。煤层开挖模拟:采用离心机专用机械手系统,将钢丝绳固定在煤层模拟材料上部,钢丝绳绕过两个定滑轮固定于机械手系统。通过机械手向上提拉,将煤层材料逐级拉出以模拟开挖。

模型监测系统主要由应变、位移与影像三部分量测设备组成(见图5、图7)。在滑动坡体的顶面和侧面设置应变片14个,监测岩层间相对变形情况;激光位移传感器设置7个,坡体下部3个(LDS1、LDS2、LDS3)、坡体上部2个(LDS4和LDS5)和坡体侧面2个(LDS6和LDS7),以监测斜坡的位移变化情况;高速摄像机记录模型在试验全过程的变形和破坏情况,采用顶部与侧部双机位布设。

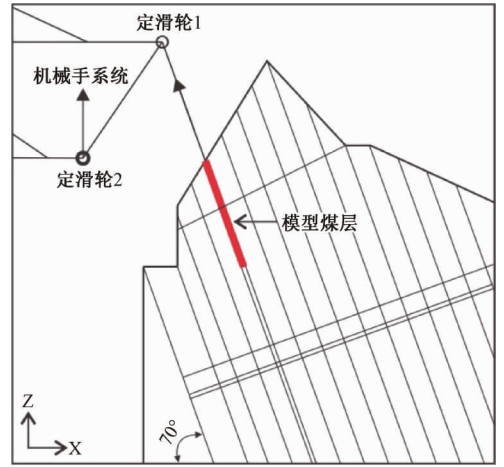


图6 鸡冠岭模型试验模拟煤层开挖原理图
Fig.6 Schematic diagram of the coal seam excavation simulation

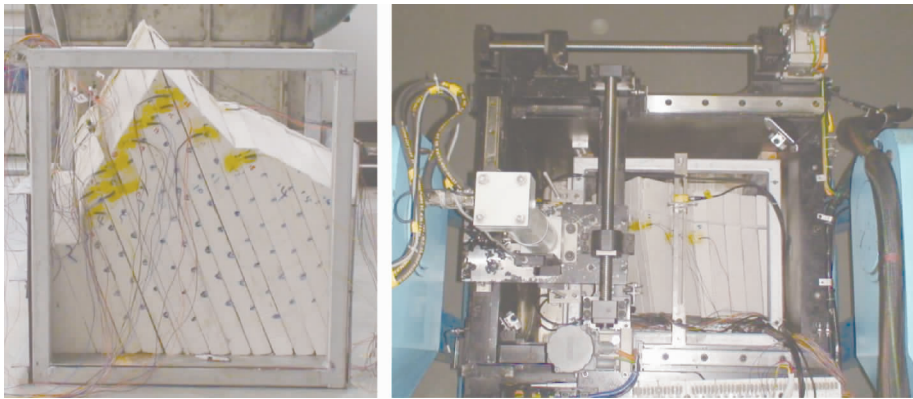


图7 试验前鸡冠岭山体离心模型及监测装置
Fig.7 Centrifuge model and monitoring device before the test

3 试验结果分析

试验过程中顶部监测机位的视频截图(见图8)可见,随着模拟煤层的模型板慢慢被拔出,位于鸡冠岭山体顶部的两个位移测点LDS4和LDS5在视频画面中出了较为明显位移,说明煤层上覆岩层出现层间错动,山体逐渐产生变形,但未出现整体破坏;

当采空区继续扩大,煤层模型板被拔出3/4板长(150 mm)时,测点位移显著增大,山体发生显著破坏。从试验完成后鸡冠岭模型的破坏情况可以看出(见图9),采空区上方的4层岩体产生了倾覆破坏,最高的板状岩体底部在模拟节理裂隙的部位产生了近乎贯通的横向裂纹,但未发生倾覆,在后部沿层理形成深大拉裂隙。采空区下方的岩层受到上覆岩体倾覆的挤压也出现剪切压裂破坏。

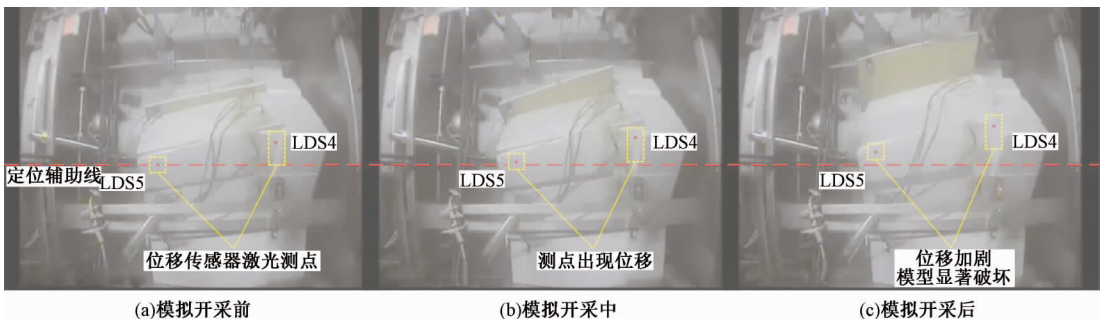


图8 鸡冠岭离心模型煤层开采条件下变形破坏过程

Fig.8 Process of deformation and failure of the centrifugal model under coal seam mining for the Jiguanling model

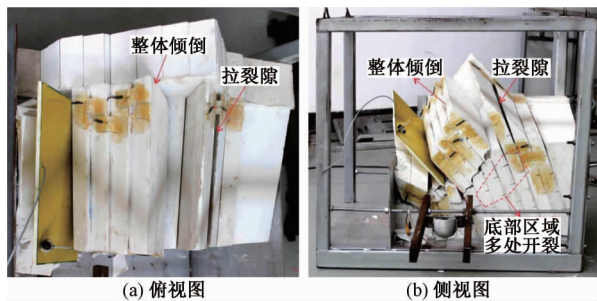


图9 试验后鸡冠岭模型破坏情况

Fig. 9 Damage of the Jiguanling centrifugal model after the test

由位移监测结果可以看出(见图10),随着加速度逐级增大,LDS4、LDS5测点与LDS1、LDS2、LDS3测点的位移分别向正向与负向缓慢增大,表明模型在离心加速度作用下层间压密,变形协调后逐渐趋于稳定。当离心加速度达到80g并稳定运行后,煤层上部与下部各测点位移绝对值均轻微增大,说明在长期重力作用下,软弱煤层受压变形致使上部岩层出现弯曲倾倒的变形趋势,但模型仍保持整体稳定。缓慢将煤层模型板拔出以模拟煤层开采,当拔出150mm时各测点位移瞬间产生突变,如LDS3测点,位移值从-3.25mm增至34.06mm,变化量超过10倍。结合监控视频可知,此时鸡冠岭斜坡已产生倾倒破坏。可见鸡冠岭山体的稳定性是受地质环境条件和地下陡倾煤层开采复合影响的,采矿活动大大加速了山体的失稳进程。

离心模型岩体层间应变监测结果显示,随着离心加速度的逐级增大,位于模型顶部的各测点

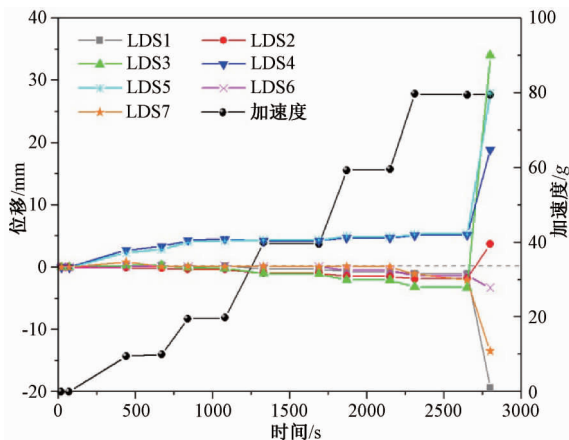


图10 鸡冠岭离心机模型测点位移和加速度时程曲线

Fig. 10 Curves of the measuring point displacements and acceleration of the Jiguanling centrifugal model

应变值均逐渐减小(见图11a),表明在离心力作用下岩层夹缝逐渐被压缩。当达到设定加速度80g运行稳定时,开展煤层开挖模拟,此时应变产生突变,表明此时模型岩层间产生破坏。模型前部的各测点应变值变化更具代表性(见图11b),随着加速度的逐级增大应变监测点S10、S11和S12缓慢增大,表明采矿层上部层状岩体之间为拉应变,岩层间隙增大;而S8和S9应变值呈负增长,表明层状岩体之间为压应变,岩层间隙逐渐减小。当模拟煤层开挖后,模型的所有监测点应变产生突变,结合监测视频以及位移监测结果可知,鸡冠岭山体模型瞬间产生破坏。试验中S2、S13和S14测点的监测结果因应变片失效而舍去。

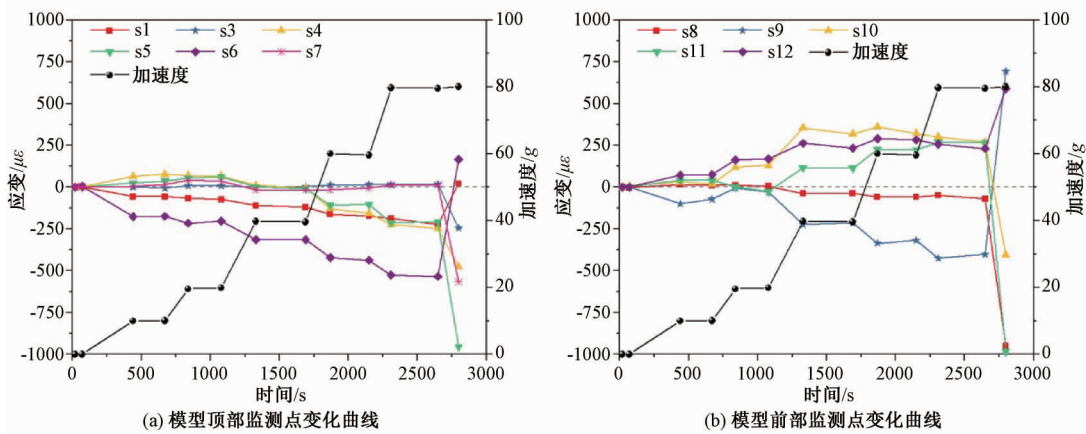


图11 鸡冠岭离心机模型岩体层间应变和加速度时程曲线

Fig. 11 Curves of interlayer strain and acceleration of the Jiguanling centrifugal model

对比分析发现,模拟煤层开挖后,模型采矿

层上部岩体发生倾倒变形,岩层间隙增大,并挤

压采矿层下部岩层,导致下部坡脚处岩体层间间隙被压密。这一现象说明,倾覆岩体在长期重力作用下往往会挤压下部的阻滑岩体,阻滑岩体的强度是山体是否可能发生破坏滑动的主要因素。一旦阻滑岩体受剪破坏,整个山体就会随之失稳。

4 滑坡失稳启动机制分析

离心模型试验表明,鸡冠岭山体滑动受地质环境条件和采矿活动等因素共同控制。陡倾地层

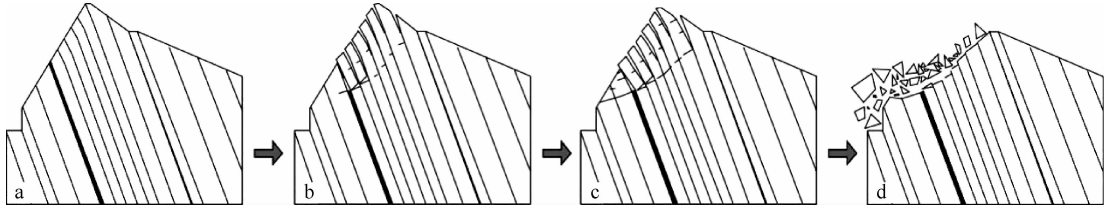


图12 鸡冠岭滑坡失稳启动模式

Fig. 12 Schematic diagram of failure mode of the Jiguanling rockslide

5 结论

通过对鸡冠岭滑坡地质环境条件进行详细分析,获取典型地质模型,并开展离心模型试验,再现了陡倾层状山体在地下开采条件下的失稳启动过程。通过试验定量化分析了鸡冠岭山体关键部位的位移变化情况与陡倾岩层间的应变变化特征,并揭示了地下采空引起陡倾碳酸盐岩山体层间错动,矿层上部岩体倾覆破坏,矿层下部岩体剪断,山体发生弯曲倾覆—滑移剪出的失稳启动模式。这类失稳模式在中国西南岩溶矿区较为常见,且当具备地形地貌条件时,往往可转化为影响范围更广、移动速度更快、破坏力更强的坡面碎屑流灾害,对山区群众人居安全与山区城镇建设发展造成更大威胁。因此,对于类似鸡冠岭的陡倾层状山体而言,加强基于动力学的危险区划分析与高速远程灾害链转化生成研究将具有重要的防灾减灾意义。

致谢:感谢长江科学院岩土力学与工程重点实验室对本试验的支持和建议,感谢李滨、冯振、王国章等在试验过程中给予的细致指导和帮助。

参考文献/References

[1] Yin Y P. Recent catastrophic landslides and mitigation in China

在长期重力作用下,上覆厚层灰岩岩体压覆在软弱煤层上,软弱层变形致使上覆岩体出现弯曲倾覆之势,加之该地区节理裂隙发育,煤层上覆岩体受多组结构面切割整体性进一步降低。当煤层开采后,层状岩体后缘拉裂缝快速延伸,上覆岩层失去有效支撑向临空侧即黄岩沟方向倾覆,并挤压煤层下伏岩层,下伏岩层受到的倾覆力矩增大,倾覆变形加速发展,强度进一步降低,当下伏岩层无法承受上覆岩层的荷载发生剪切破坏时,宣告山体整体失稳,这就是陡倾层状岩体的倾覆—滑移复合失稳启动模式(见图12)。

[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2011, 3 (1): 10 ~ 18.

[2] Yin Y P, Sun P, Zhang M, et al. Mechanism on apparent dip sliding of oblique inclined bedding rockslide at Jiweishan, Chongqing, China [J]. Landslides, 2011, 8 (1): 49 ~ 65.

[3] Yin Y P, Sun P, Zhu J L, et al. Research on catastrophic rock avalanche at Guanling, Guizhou, China [J]. Landslides, 2011, 8 (4): 517 ~ 525.

[4] Li W X, Mei S H, Zai S H, et al. Fuzzy models for analysis of rock mass displacements due to underground mining in mountainous areas [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2006, 43 (4): 503 ~ 511.

[5] Marschalko M, Fuka M, Třeslín L. Influence of mining activity on selected landslide in the Ostrava-karviná coalfield [J]. Acta Montanistica Slovaca, 2008, 13 (1): 58 ~ 65.

[6] Marschalko M, Hofrichterova L, Lahuta H. Utilization of geophysical method of multielectrode resistivity measurements on a slope deformation in the mining district [C] // 8th International Scientific Conference on Modern Management of Mine Producing, Geology and Environmental Protection. Sofia, 2008, 315 ~ 324.

[7] Altun A O, Yilmaz I, Yildirim M. A short review on the surficial impacts of underground mining [J]. Scientific Research and Essays, 2010, 5 (21): 3206 ~ 3212.

[8] Tang F Q. Research on mechanism of mountain landslide due to underground mining [J]. Journal of Coal Science and Engineering (China), 2009, 15 (4): 351 ~ 354.

[9] 宋彦辉, 聂德新, 陈龙. 采动斜坡变形破坏模式分析及预测 [J]. 灾害学, 2003, 18 (2): 32 ~ 37.

- SONG Yanhui, NIE Dexin, CHEN Long. Analysis on deformation and failure model of excavating slope and prediction [J]. *Journal of Catastrophology*, 2003, 18 (2): 32 ~ 37. (in Chinese with English abstract)
- [10] 梅松华, 盛谦, 李文秀. 地表及岩体移动研究进展 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23 (S1): 4535 ~ 4539.
- MEI Songhua, SHENG Qian, LI Wenxiu. Research advances in surface and rock-mass movement [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23 (S1): 4535 ~ 4539. (in Chinese with English abstract)
- [11] 范士凯. 采空区上边坡稳定问题 [J]. *资源环境与工程*, 2006, 20 (S1): 617 ~ 627.
- FAN Shikai. A discussion on the slope stability on the goaf [J]. *Resources Environment & Engineering*, 2006, 20 (S1): 617 ~ 627. (in Chinese with English abstract)
- [12] Brady B H G, Brown E T. *Rock mechanics: for underground mining* [M]. 3rd ed. India: Springer, 2006, 484 ~ 517.
- [13] Zhang D S, Fan G W, Wang X F. Characteristics and stability of slope movement response to underground mining of shallow coal seams away from gullies [J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2012, 22 (1): 47 ~ 50.
- [14] Marschalko M, Yilmaz I, Bednárík M, et al. Influence of underground mining activities on the slope deformation genesis: doubrava vrchovec, doubrava ujala and staric case studies from Czech republic [J]. *Engineering Geology*, 2012, 147 ~ 148: 37 ~ 51.
- [15] Lana M S. Numerical modeling of failure mechanisms in phyllite mine slopes in Brazil [J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2014, 24 (6): 777 ~ 782.
- [16] 孙玉科, 姚宝魁. 盐池河磷矿山体崩坍破坏机制的研究 [J]. *水文地质工程地质*, 1983, (1): 1 ~ 7.
- SUN Yuke, YAO Baokui. Mechanism research on the collapse of Yanchi river mining area [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 1983, (1): 1 ~ 7. (in Chinese)
- [17] Hoek E. Progressive caving induced by mining an inclined ore body [J]. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Section A: Mining Technology*, 1974, 83 (815): 33 ~ 39.
- [18] 赵建军, 肖建国, 向喜琼, 等. 缓倾煤层采空区滑坡形成机制数值模拟研究 [J]. *煤炭学报*, 2014, 39 (3): 424 ~ 429.
- ZHAO Jianjun, XIAO Jianguo, XIANG Xiqiong, et al. Failure mechanism numerical simulation of mining landslide with gentle bedding coal strata [J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39 (3): 424 ~ 429. (in Chinese with English abstract)
- [19] Brown E T, Ferguson G A. Progressive hanging wall caving at Gath's mine, Rhodesia [J]. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy*, 1979, 88: A92 ~ 105.
- [20] Alejano L R, Ferrero A M, Ramírez-Oyanguren P, et al. Comparison of limit-equilibrium, numerical and physical models of wall slope stability [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2011, 48 (1): 16 ~ 26.
- [21] Majdi A, Amini M. Analysis of geo-structural defects in flexural toppling failure [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2011, 48 (2): 175 ~ 186.
- [22] Agliardi F, Crosta G B, Meloni F, et al. Structurally-controlled instability, damage and slope failure in a porphyry rock mass [J]. *Tectonophysics*, 2013, 605: 34 ~ 47.
- [23] 李滨, 王国章, 冯振, 等. 地下采空诱发陡倾层状岩质斜坡失稳机制研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34 (6): 1148 ~ 1161.
- LI Bin, WANG Guozhang, FENG Zhen, et al. Failure mechanism of steeply inclined rock slopes induced by underground mining [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34 (6): 1148 ~ 1161. (in Chinese with English abstract)
- [24] 李滨, 王国章, 冯振, 等. 陡倾层状岩质斜坡极限平衡稳定分析 [J]. *岩土工程学报*, 2015, 37 (5): 839 ~ 846.
- LI Bin, WANG Guozhang, FENG Zhen, et al. Limit equilibrium and stability analysis of steep stratified rock slope [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, 37 (5): 839 ~ 846. (in Chinese with English abstract)
- [25] 陈自生, 张晓刚. 1994 ~ 04 ~ 30 四川省武隆县鸡冠岭滑坡 → 崩塌 → 碎屑流 → 堵江灾害链 [J]. *山地研究*, 1994, 12 (4): 225 ~ 229.
- CHEN Zisheng, ZHANG Xiaogang. A hazard-chain of landslide → collapse → debris flow → river stoppage in Wulong county, Sichuan province on April 30, 1994 [J]. *Mountain Research*, 1994, 12 (4): 225 ~ 229. (in Chinese with English abstract)
- [26] 殷跃平, 康宏达, 何思为, 等. 乌江鸡冠岭危岩体整治爆破工程方案 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 1994, 5 (S1): 324 ~ 331.
- YIN Yueping, KANG Hongda, HE Siwei, et al. Explosive engineering of Jiguanling dangerous rockmass prevention of the Wu River [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 1994, 5 (S1): 324 ~ 331. (in Chinese with English abstract)
- [27] 刘传正, 黄学斌, 黎力. 乌江鸡冠岭山崩堵江地质灾害及其防治对策 [J]. *水文地质工程地质*, 1995, (4): 6 ~ 11.
- LIU Chuansheng, HUANG Xuebin, LI Li. Landslide dam in Wu River and its control counter measure in Jiguanling Mt [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 1995, (4): 6 ~ 11. (in Chinese with English abstract)