

钟祖良,王南云,李滨,等.采动作用下上硬下软型缓倾岩质高边坡变形机理试验研究[J].中国岩溶,2020,39(4):509-517.
DOI:10.11932/karst20200406

采动作用下上硬下软型缓倾岩质高边坡变形机理试验研究

钟祖良^{1,2},王南云¹,李滨³,刘新荣^{1,2},崔芳鹏⁴,杨忠平^{1,2}

(1. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 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. 中国地质科学院地质力学研究所/新构造运动与地质灾害重点实验室, 北京 100081; 4. 中国矿业大学(北京), 地球科学与测绘工程学院, 北京 100083)

摘要:我国西南岩溶山区地质环境复杂,地下开采活动频繁,大型崩滑灾害频发。为了了解上硬下软缓倾岩质边坡下覆矿层开采时坡体的沉降与地裂缝发育规律,以贵州普洒崩塌为例,通过相似模型试验,研究采动作用下,坡体的地表沉降、内部位移、层间压力变化规律、以及采动诱发的地裂缝发育情况。研究表明:在地下开采情况下,坡体地表沉降和内部位移随开采宽度增加呈线性增大;当开采宽度约为采高的16倍时,地表沉降突增,并伴随裂缝出现;测点越靠近地裂缝,沉降变化率越大,地裂缝发生位置与地表沉降变化率最大的测点大致出现在同一区域;掘进工作面推进时,采空区上方顶板岩层出现卸荷区域,压应力减小,而采动工作面煤层上方岩体出现层间挤压区域,压应力增加;采空区上方大于20倍采高范围以外,岩体层间压力受地下开采活动的扰动影响微弱。本研究为西南岩溶山区在地下采动作用下,对山体崩滑的早期识别与破坏机制分析具有一定的参考意义。

关键词:岩溶山区;岩质边坡;采动作用;模型试验;地裂缝;层间压力

中图分类号:TU435 **文献标识码:**A

文章编号:1001-4810(2020)04-0509-09 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



0 引言

随着我国城镇化建设的推进,城镇人口密度也在不断增加,城市及周边环境发生了很大的改变,自然灾害随着城镇的发展而不断地发生,山体崩滑灾害逐渐出现在人类居住区内^[1]。我国西南岩溶地区地质构造复杂,广泛地分布着碳酸盐类的岩质边坡,坡体岩溶发育强烈且节理、裂隙密布,地形“上陡下缓”,岩层“上硬下软”,极易发生大型山体崩滑灾害。

大量工程实例表明^[2],岩质山体发生崩滑灾害常伴随着地下矿产资源的开采活动。地下矿层的采动导致山体应力重新分布^[3],引发上覆岩体变形,进而改变山体内原有的地下水运移环境,从而加剧了山

体的变形破坏进程^[4-6]。尤其是当斜坡下覆地层为采空区时,地下开采活动极易造成采空区顶板塌落,使岩层形成“悬臂梁效应”,在坡体内侧产生深大裂隙^[7-8]。鸡尾山滑坡^[9]因其特殊的视倾向滑动机制,吸引了不少的学者对其进行研究。Zhen Feng等^[10]通过物理模型试验,模拟了鸡尾山滑坡变形过程,认为该滑坡产生的原因为山体地质构造、采矿活动和岩溶发育的共同作用。赵建军等^[11-12]采用模型试验方法,研究了马达岭山体在采矿与降雨耦合作用下边坡的破坏过程,总结了其变形破坏机制。代张音等^[13]以重庆鸡尾山滑坡为原型,对不同开采方式下顺层岩质斜坡变形破裂响应进行模型试验。Zheng等^[14]通过底摩擦试验研究了开阳磷矿崩塌的形成机

基金项目:国家重点研发计划(2018YFC1504802);国家自然科学基金项目(52074042)

第一作者简介:钟祖良(1980—),男,博士,副教授,博士生导师,主要从事隧道与地下工程的试验与理论研究。E-mail:haiou983@126.com。

通信作者:王南云(1996—),男,在读博士生,主要从事地下工程、地质灾害防治研究。E-mail:2864049750@qq.com。

收稿日期:2020-05-10

理,并提出了3种破坏模式。另有不少学者^[15-16]结合物理模型试验研究了采动边坡的变形破坏过程,也验证了通过模型试验方法研究采动边坡变形机理的有效性。

以上学者采用不同方法研究了采动边坡的变形破坏特征,但研究内容大多从坡体的变形、裂缝的开裂发展角度来探讨滑坡的破坏模式,较少研究采空区对坡体层间压力状态变化的影响,且因高陡岩质边坡结构不同、影响因素的差异,采动作用对边坡的变形破坏特征也不同。鉴于此,本文以贵州纳雍县张家湾镇普洒村老鹰岩山体崩塌为例,通过相似模型试验,研究采动作用下缓倾层状岩质边坡变形破坏特征与层间压力变化规律,为该类边坡失稳机制的研究提供参考依据,同时也对高位崩塌灾害的防治有一定的指导意义。

1 普洒崩塌概况

2017年8月28日,贵州省纳雍县张家湾镇普洒村老鹰岩山体发生特大高位崩塌地质灾害^[17],崩塌堆积体体积为 $82.3 \times 10^4 \text{ m}^3$,造成26人遇难,9人失踪,8人受伤,崩塌区范围如图1所示。

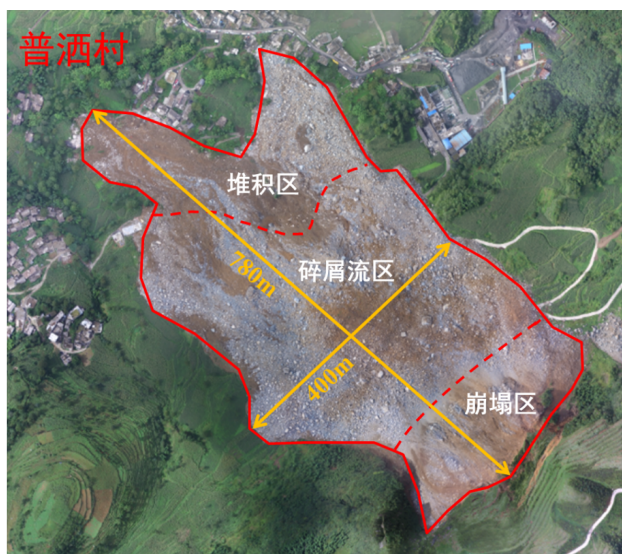


图1 普洒村老鹰岩山体崩塌范围

Fig. 1 Range of Pusa avalanche

1.1 地形地貌

普洒村老鹰岩山体崩塌调查区(后文简称“调查区”)内地势北低南高,为构造侵蚀、剥蚀型低中山地貌(图2)。山体总体走向为南西向,最高点位于南面

的山峰顶(小老鹰岩),标高为+2 180 m,最低点位于北西面鸽子冲,标高为+1 800 m,相对高差380 m,地形坡度 $10^\circ \sim 25^\circ$,局部地段坡度达到 75° ,三叠系飞仙关组第一、二段地层形成陡峭山脊,小老鹰岩一带有陡崖存在,高差200 m左右,宽度约280 m。



图2 普洒村老鹰岩山体崩塌前地貌

Fig. 2 Landform before Pusa avalanche

1.2 地层岩性与构造

调查区位于张维背斜东南翼,整体为一单斜构造(图3)。岩层产状 $180^\circ \angle 8^\circ$,区域内发育有 F_1 、 F_2 、 F_3 共3条断层,3条断层对崩塌源区无直接影响^[17]。

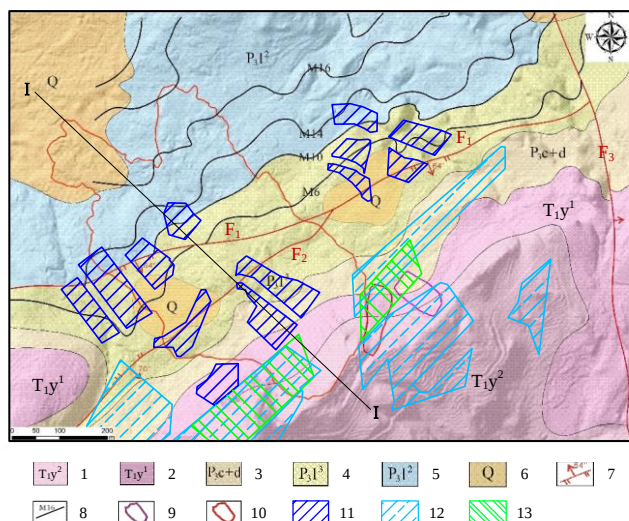


图3 普洒村老鹰岩山体崩塌区附近地质构造及采空区分布

Fig. 3 Geological structure and goaf distribution near Pusa avalanche

1—下三叠统夜郎组二段 2—下三叠统夜郎组一段 3—上二叠长兴一大隆组 4—上二叠统龙潭组三段 5—上二叠统龙潭组三段 6—第四系 7—断层 8—煤层露头及编号 9—历史崩塌 10—崩塌边界 11—M16煤层采空区 12—M14煤层采空区 13—M10煤层采空区

调查区内出露地层以三叠系和二叠系为主,由新至老地层发育如下:①第四系(Q)发育的黏土夹砂岩转块;②三叠系下统夜郎组(T_{1y})发育的灰岩、泥灰岩、泥岩和粉砂岩等;③二叠系上统长兴—大隆组(P_{3c+d})发育的粉砂质泥岩、灰岩、泥质粉砂岩夹煤线;④二叠系上统龙潭组(P_3l)发育的泥质粉砂岩、碳质泥岩和煤层。

调查区地下采煤活动强烈,纳雍县普洒村张维煤矿井田含煤地层为二叠系上统龙潭组,煤系地层厚 375.8 m,含煤 35 层,可采煤层从上至下依次为 M6、M10、M14、M16、M18、M20,在矿界范围内,此 6 个煤层厚度变化不太大,6 层煤厚总计 8.06 m。

1.3 地下开采情况

张维煤矿主采煤层为 M6、M10、M16、M20 煤层(表 1)。

表 1 普洒主采煤层信息统计表

Table 1 Information statistics of main coal seams in Pusa

煤层	厚度/m	顶板岩性	底板岩性
M6	2.01	粉砂质泥岩	粉砂质泥岩,
M10	2.08	巨厚层状细粒砂岩	粉砂质泥岩
M16	1.49	泥质粉砂岩	灰色泥岩
M20	0.84	泥质粉砂岩	泥岩、炭质泥岩

2010 年前,张维煤矿主要开采 M16 煤层,2009 老鹰岩顶开始出现了张拉裂缝;2011 年后主要开采煤层为 M16 和 M10,此时上部山顶裂缝不断扩大,形成沉陷槽,斜坡面偶尔发生小型崩塌,截至山体崩塌前图 4 所示 M16 煤层的采空区已基本采空,老鹰岩后缘拉裂缝与 M16 煤层的开采存在一定的时间对应性及因果关系。

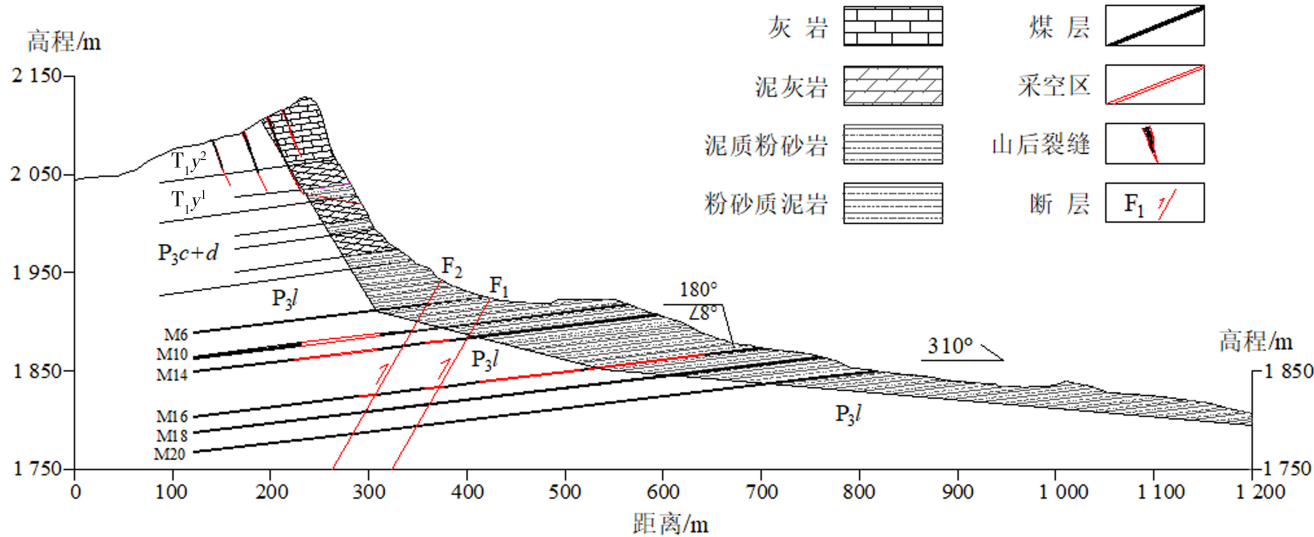


图 4 普洒老鹰岩山体崩塌主滑方向地质剖面图

Fig. 4 Geological profile of main sliding direction of Pusa avalanche

2 模型试验方案

2.1 相似材料的选取

将普洒老鹰岩崩塌模型进行概化(图 5),进一步了解山体下覆采空区时坡体的沉降分布、层间压力变化和地裂缝发育规律。模型将赋存煤层情况简化为两层,采动煤层为下部煤层,煤层采用长壁式开采方式,采空区自坡体外侧向内推进,不留煤柱。试验采用自主加工制作的简易二维模型试验台,长 3 m,宽 0.3 m,高 2 m。试验采用长度 L 、密度 ρ 和弹性模

量 E 作为基本量纲, $C_L=1/200$ 、 $C_\rho=1$ 、 $C_E=1/200$,相似基本定理、各物理量间相似关系如表 2。

由于山体崩塌区主要为灰岩,煤层顶底板主要为粉砂岩,将岩层岩性简化为两种,即灰岩与粉砂岩。试验基本材料为石英砂、硫酸钡、石膏和水,材料 1 模拟灰岩,材料 2 模拟粉砂岩,煤层采用河砂模拟,岩层与相似材料的力学参数及配比如表 3 所示。

2.2 试验监测项目及测点布置

将普洒老鹰岩崩塌地质模型简化(图 5),布设压

表2 模型试验主要物理量相似关系

Table 2 Similarity relation of main physical quantities in model tests

力学量	相似关系	相似比
密度, ρ	C_ρ	1
长度, L	C_L	1/200
弹性模量, E	C_E	1/200
应力, σ	$C_\sigma = C_E$	1/200
位移, u	$C_u = C_L$	1/200
抗力系数, K	$C_K = C_E / C_L$	1

表3 岩层与相似材料的力学参数

Table 3 Mechanic parameters of rock and similar materials

岩层	重度 /(kN m^{-3})	弹性模量 /(GPa)	材料配比 (石英砂:硫酸钡:石膏:水)
灰岩	27	30	/
粉砂岩层	20	20	/
材料1	25.64	0.161	0.297:0.458:0.153:0.091
材料2	19.70	0.093	0.358:0.398:0.153:0.091

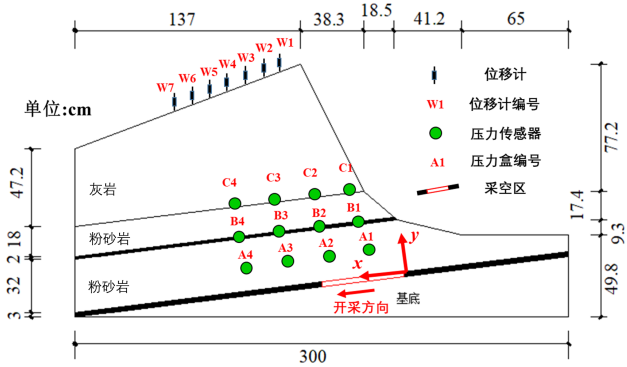


图5 模型实验监测点布置图

Fig. 5 Layout of model monitoring points in model experiments

力盒、位移计和散斑,以初始采动位置为坐标原点建立坐标系(图5),监测项目及测点布置为:

(1) 地表沉降监测,在地表布置7组测点,采用直线位移传感器观测沉降,相邻传感器的水平间距约为8 cm。

(2) 坡体位移监测,将采空区上覆大部分岩层喷涂上白底黑斑的散斑涂料,采用XTDIC光学散斑系统^[18]对坡体内部位移进行测量。

(3) 岩层间压力监测,在岩层层间埋设12个土压力盒,分A、B、C三组,组间垂直间距约为18 cm,每

组4个压力盒,水平间距约为20 cm,其中A1测点的坐标为($x=20\text{ cm}, y=15\text{ cm}$)。

模型制作时每4~5 cm分一岩层,层间用2 mm厚的河沙薄层隔开,灰岩分14层,M10上部粉砂岩分为4层,M10和M16间的粉砂岩分为6层,基底部分岩体不分层。浇筑完成后的模型如图6。选取上部煤层层面作为XTDIC光学散斑系统的位移测线。通过将河砂逐步挖出模拟煤层的开采过程,每次采动10 m后暂停,进行数据采集。

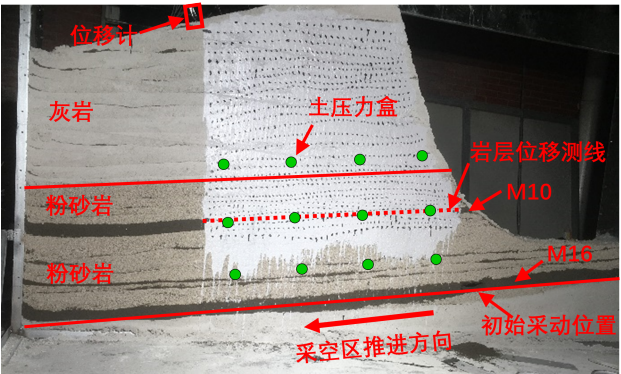


图6 浇筑完成的模型

Fig. 6 Model after pouring

3 试验结果分析

3.1 顶板断裂特征与地裂缝发育规律

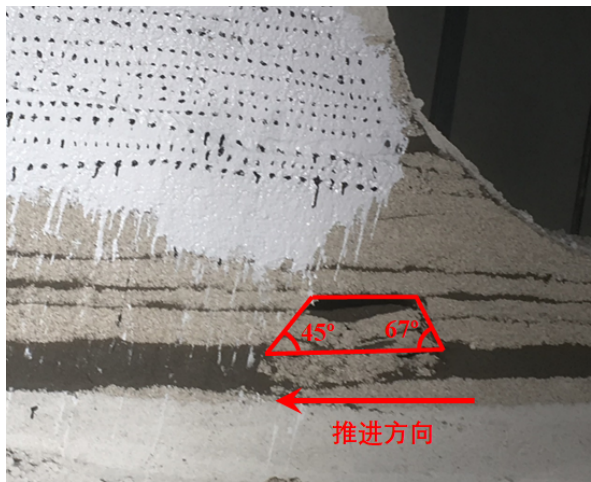
根据相似原理,将试验中采集的应力、位移与几何尺寸等参数乘以对应的相似常数后进行分析。

采动工作面推进10 cm(实际开采20 m)时,直接顶开始垮落,岩层断裂位置位于采空区边界处(图7)。

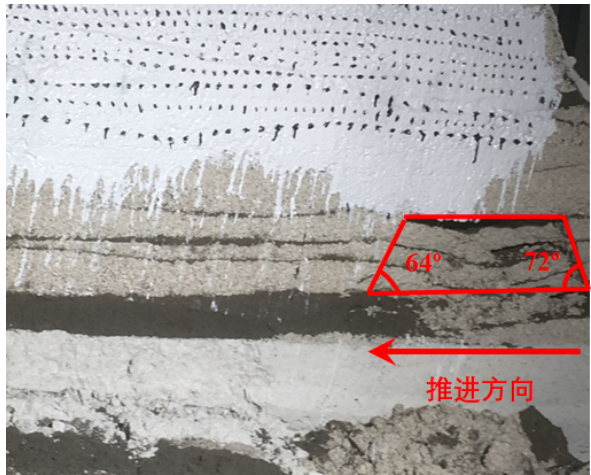
采动10 cm(20 m)时,2层岩层发生离层断裂,采空区左侧的岩层断裂角约为47°,采空区右侧的岩层断裂角约为65°;采动20 cm(40 m)时,3层岩层发生离层断裂,采空区左侧的岩层断裂角约为64°,采空区右侧的岩层断裂角约为72°。顶板受上覆岩层的非均匀分布压力作用,采空区内侧顶板岩层断裂角整体上小于外侧;随着开采宽度的增大(采动40 cm),采空区两侧岩层断裂角均增大,且两者的差异在减小。

煤层开采55 cm(110 m)后,通过高速摄像机的捕捉,发现山体顶部开始出现拉裂缝(图8)。

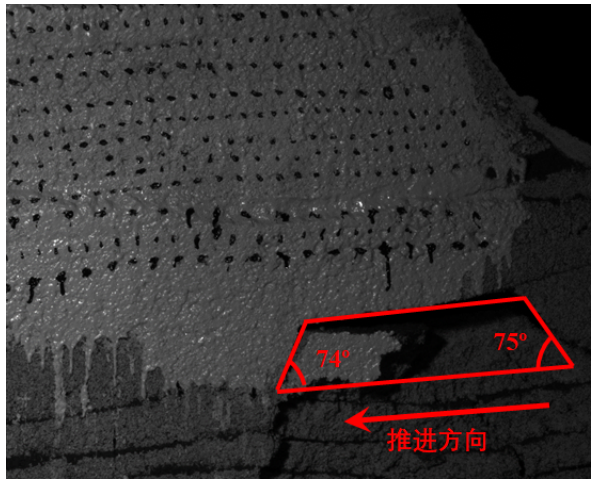
模型试验中,拉裂缝基本垂直于岩层层面向下发育,发育深度约44.9 cm(89.8 m),初始开裂位置



a. 采动 10 cm



b. 采动 20 cm



c. 采动 40 cm

图 7 顶板断裂特征

Fig. 7 Fracture characteristics of roof

距离坡体顶部边缘约 76.1 cm(152.2 m),而坡顶距离初始开采位置约 49.2 cm(98.4 m)。图 4 实际山体

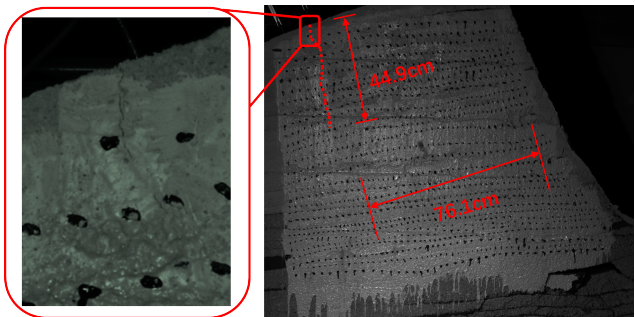


图 8 地表拉裂缝开展特征

Fig. 8 Development characteristics of surface tensile fractures

距离坡体边缘最远的地裂缝约为 142 m,发育深度约为 50 m,模型试验与依托工程山体后缘采动地裂缝位置基本一致,但模型试验所测得的裂缝发育深度比实际山体的裂缝发育深度大。

3.2 地表沉降规律

位移计 W1、W2、W3、W4、W5、W6、W7 的 x 坐标(初始开采点为坐标原点)分别为 55 cm(110 m)、63 cm(126 m)、71 cm(142 m)、79 cm(158 m)、87 cm(174 m)、95 cm(190 m)、103 cm(206 m)。选取开采宽度 30~55 cm(60~110 m)之间各测点位移如图 9。

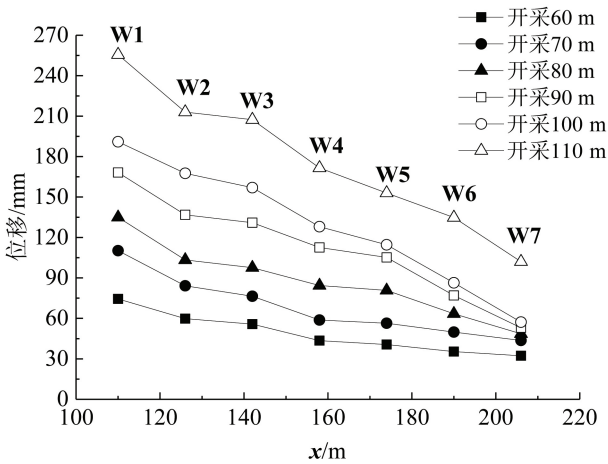


图 9 地表沉降分布

Fig. 9 Distribution of surface subsidence

由图 9 可知,开采宽度在 60~110 m 期间,地表各测点的沉降值均呈增长趋势;当开采宽度达到 110 m 时(约为 16 倍采高),各测点沉降值均发生突变,尤其是 W7 测点沉降位移由 57.2 mm 陡增至 102 mm,这与图 8 模型试验中拉裂缝产生的时间基本一致,且模型试验中的地裂缝开展位置位于 W7 测点附近。

地裂缝的出现使坡体成为非连续体,各处沉降变化率出现明显差异,为分析不同区域的沉降变化

率与开采宽度及采动裂缝发育特征之间的联系,计算不同开采宽度下,各地表测点的沉降变化率(图 10),沉降变化率由每推进 5 cm(10 m)所产生的沉降变化值除以推进前的沉降值所得。

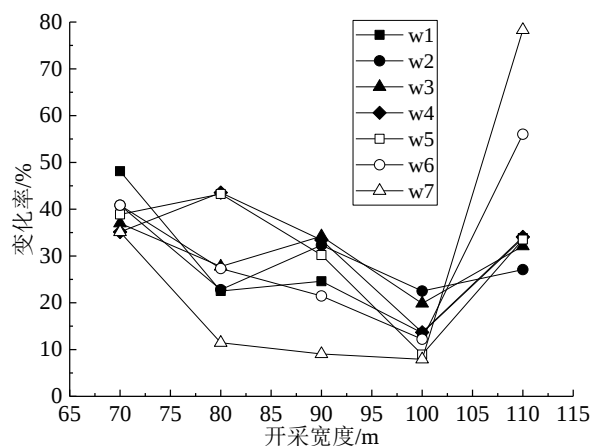


图 10 不同开采宽度下地表测点沉降变化率

Fig. 10 Change rates of ground settlement at different lengths

由图 10 可以看出,地裂缝产生前(开采宽度为 110 m 前),各测点的变化率相差不大,但 W6 和 W7 测点沉降值的变化率因地裂缝的出现较明显的变化,尤其是 W7 测点,由 20% 左右增大到 78%。由此证明,实时动态分析地表不同测点沉降变化率将有助于因采动引起地裂缝位置的预测,这对高陡岩质边坡稳定性的分析具有重要的参考意义。

3.3 坡体内部位移变化规律

利用 XTDIC 系统提取到 17 个散斑测点的沉降值,各测点在开采宽度 60~110 m 时的沉降变化如图 11 所示。

开采宽度在 60~100 m 时,测线岩层的沉降值呈线性增加;开采宽度为 110 m 时,各位置沉降均出现增大,但距离采空区越远处的沉降值增幅越显著,增幅最大的为 $x=225$ m 处的散斑点,该点与图 8 中地裂缝开展位置大致位于同一区域。

3.4 岩体层间压力变化规律

受压力盒测量精度的限制,当开采宽度小于 90 m 时,压力盒数值较小,因此,本文选取开采宽度为 100 m、110 m、120 m 时,岩体层间压力变化值进行分析。以“A-120”表示开采宽度 120 m 时,A 组压力盒所测的层间压力变化值;其它以此类推。各组压力变化值的水平分布规律如图 12,图中应力为正表示

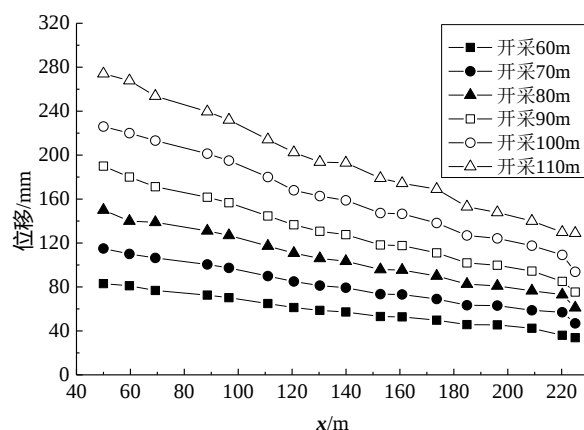


图 11 测线沉降分布

Fig. 11 Settlement distribution along survey line

层间压力增大,反之则为减小。

由图 12 可知:

(1) A、B、C 三组的层间压力变化分布规律基本一致,靠近坡体内侧(即 x 越大)的层间压力变化幅度均减小,说明在采空区附近不同高程岩层的层间压力变化规律相近;

(2) A、B、C 三组压力值彼此呈近 10 倍递减,该模型试验中,采空区顶板岩层上方每隔 36 m 左右,岩层层间压力变化值递减一个数量级;

(3) 第 3、4 列(A4、B4、C4 与 A3、B3、C3)的层间压力出现增大,其余 2 列的层间压力均在减小,说明采动作用下,采空区上方出现层间卸荷区域,而煤层上方岩体出现层间挤压区域,压应力增加。

图 13 为开采宽度在 100~120 m 时,各层间压力值沿垂向的分布规律。

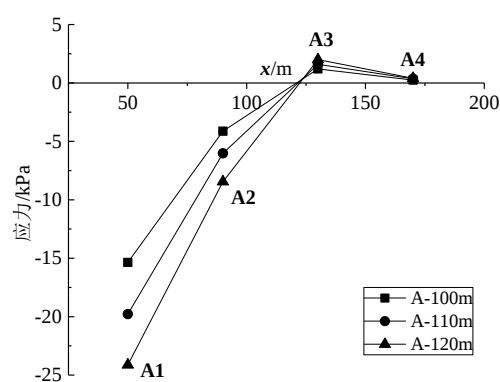
由图 13 可以看出:

(1) 距采空区垂直距离超过 75 m 时(约 20 倍采高),岩体层间压力受地下开采活动的扰动影响微弱;

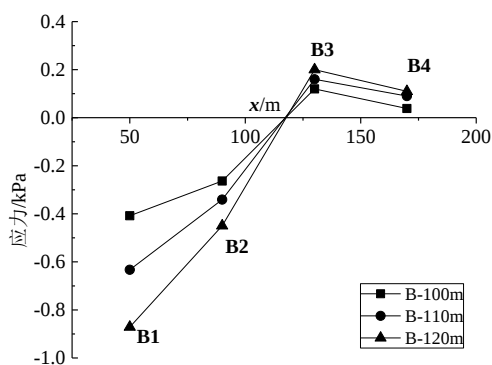
(2) 采空区周围岩体应力重分布规律明显,采空区正上方(A1、B1、C1、A2、B2、C2)岩体层间压力减小幅度比掘进工作面煤层上方的层间压力增大幅度更大。

3.5 采动作用下高边坡变形演化机制

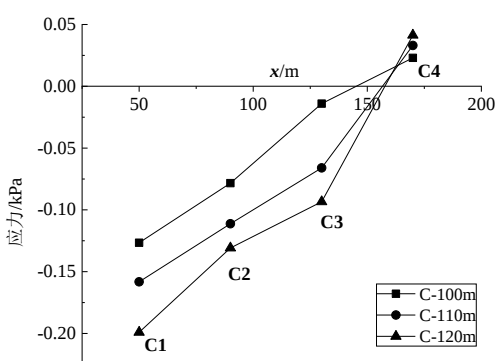
如图 14 所示,煤层开采后,下部粉砂岩层在重力作用下产生塑性变形,顶板不断垮落,顶板上覆岩层不断沉降,出现应力重分布现象,采空区正上方岩体压力不断减小,出现层间卸荷区域,采空区内侧埋设的岩体压力测点出现层间增压区域。随着开采宽度



(a) A1-A2-A3-A4变化规律



(b) B1-B2-B3-B4变化规律



(c) C1-C2-C3-C4变化规律

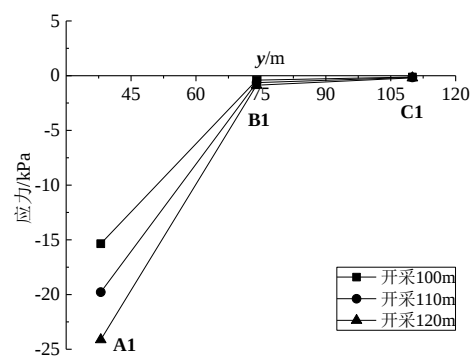
图 12 不同开采宽度下土压力变化值水平分布

Fig. 12 Horizontal distribution of earth pressure variations with different mining lengths

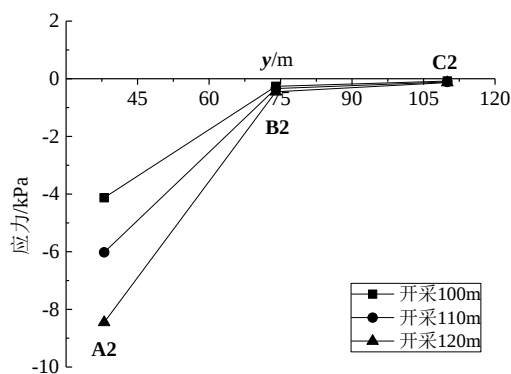
的增大和时间的推移,采空区上部的岩层卸荷区域向坡体内侧扩张,在坡顶的硬岩层形成一种类似悬臂梁的卸荷效应,使顶部硬岩层上部的拉应力不断增大,最终在地表出现了张拉裂缝。

4 结 论

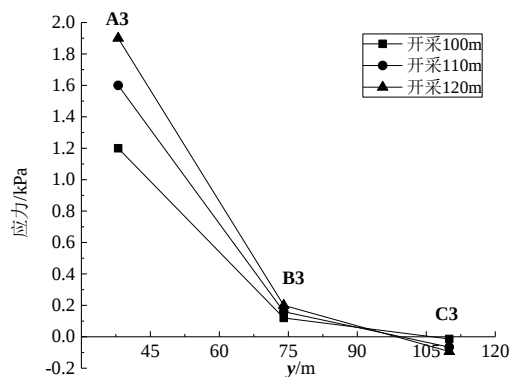
以贵州普洒老鹰岩崩塌山体为背景,通过模型



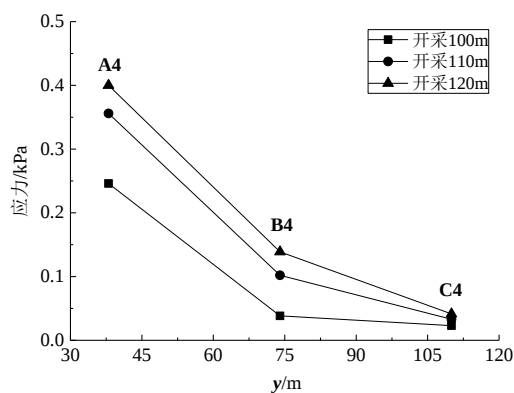
(a) A1-B1-C1变化规律



(b) A2-B2-C2变化规律



(c) A3-B3-C3变化规律



(d) A4-B4-C4变化规律

图 13 不同开采宽度下土压力垂向变化值

Fig. 13 Vertical distribution of earth pressure variations with different mining depths

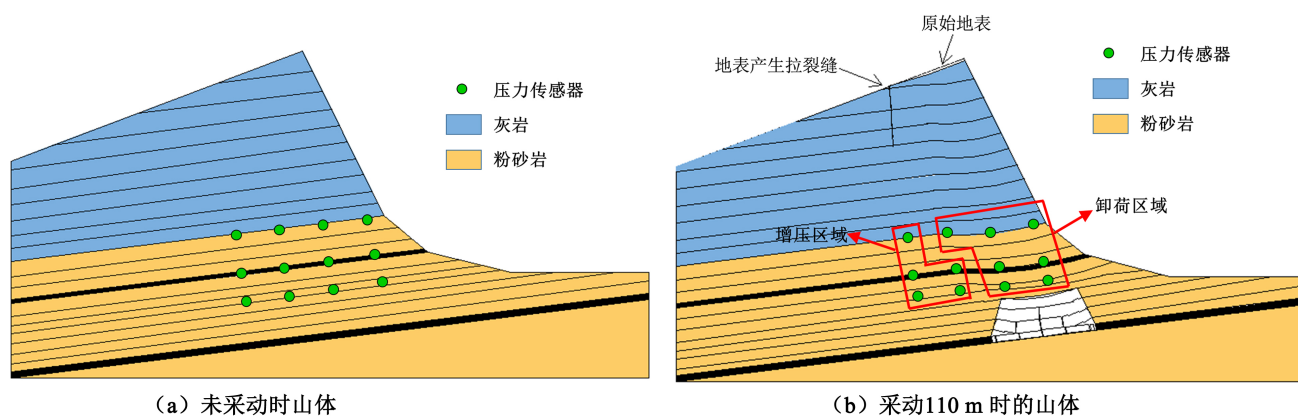


图 14 采动作用下山体变形破坏示意图

Fig. 14 Sketch showing deformation and failure of slope body under mining disturbance

试验,研究了采动作用下“上硬下软”缓倾岩质坡体顶板断裂特征、地裂缝发育、坡体垂直位移与层间压力变化规律,获得结论如下:

(1)由于山体岩质边坡上覆荷载的非均匀性,在地下采动作用下,采空区内侧顶板岩层断裂角整体小于外侧;随着开采宽度的增大,顶板两侧岩层断裂角均增大,且两者的差异在减小;

(2)本模型试验过程中,山体地表沉降随着开采宽度的增加,整体呈增长趋势,当开采宽度为采高的16倍时,模型地表沉降突增,并伴随裂缝出现;在地裂缝产生前后,地表沉降与坡体内部位移均明显增大;测点越靠近地裂缝,沉降变化率越大;

(3)掘进工作面推进时,采空区上方顶板岩层出现卸荷区域,层间压力减小,而掘进工作面煤层上方岩体出现层间挤压区域,压应力增加。距离采空区垂直距离75 m以上时(约20倍采高),岩体层间压力受地下开采活动的扰动影响微弱。

参考文献

- [1] Yin Yueping. Recent catastrophic landslides and mitigation in China[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2011(1):14-22.
- [2] 张建永. 滑坡研究现状综述[J]. 中国岩溶, 1999(3):85-91.
- [3] 李为乐, 许强, 陆会燕, 等. 大型岩质滑坡变形历史回溯及其启示[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(7): 1043-1053.
- [4] Lana, Sabino M. Numerical modeling of failure mechanisms in phyllite mine slopes in Brazil[J]. International Journal of Mining Science & Technology, 2014, 24(6):777-782.
- [5] Marschalko M, Yilmaz I, Bednárík M, et al. Influence of un-

derground mining activities on the slope deformation genesis: Doubrava Vrchovec, Doubrava Ujala and Staric case studies from Czech Republic[J]. Engineering Geology, 2012, 147: 37-51.

- [6] Salmi E F, Nazem M, Karakus M. Numerical analysis of a large landslide induced by coal mining subsidence[J]. Engineering Geology, 2017, 217: 141-152.
- [7] 刘传正. 重大地质灾害防治理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 287-493.
- [8] 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.
- [9] Xu Q, Fan X, Huang R, et al. A catastrophic rockslide—debris flow in Wulong, Chongqing, China in 2009: background, characterization, and causes[J]. Landslides, 2010, 7(1): 75-87.
- [10] Zhen F, Bin L, Peng C Q, et al. Initiation Mechanism of the Jiweishan Landslide in Chongqing, Southwestern China[J]. Environmental & Engineering Geoscience, 2016, 22(4):341-351.
- [11] 赵建军, 蔺冰, 马运韬, 等. 缓倾煤层采空区上覆岩体变形特征物理模拟研究[J]. 煤炭学报, 2016, 41(6):1369-1374.
- [12] 赵建军, 李金锁, 马运韬, 等. 降雨诱发采动滑坡物理模拟试验研究[J]. 煤炭学报, 2020, 45(2):760-769.
- [13] 代张音, 唐建新, 江君, 等. 地下采空诱发含软弱夹层顺层岩质斜坡变形破裂的相似模拟[J]. 煤炭学报, 2016, 41(11): 2714-2720.
- [14] Zheng D, Frost J D, Huang R Q, et al. Failure process and modes of rockfall induced by underground mining: A case study of Kaiyang Phosphorite Mine rockfalls[J]. Engineering Geology, 2015, 197:145-157.
- [15] 崔杰, 王兰生, 王卫, 等. 采空区边坡变形破裂演化机制研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2008, 25(4):409-414.
- [16] 贺凯, 高杨, 王文沛, 等. 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[J]. 地质力学学报, 2018, 24(3): 399-406.

- [17] 郑光,许强,巨袁臻,等.2017年8月28日贵州纳雍县张家湾镇普洒村崩塌特征与成因机理研究[J].工程地质学报,2018,26(1):223-240.
- [18] 张丹,吴志坚,梁庆国,等.黄土斜坡坡面位移和加速度响应特性的振动台试验研究[J].土木工程学报,2019,52(S2):162-169.

Experimental study on the deformation mechanism of upper-hard and lower-soft gently dipping rock on high slopes under the mining effect

ZHONG Zuliang^{1,2}, WANG Nanyun¹, LI Bin³, LIU Xinrong^{1,2}, Cui Fangpeng⁴, YANG Zhongping^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 3. Key Laboratory of Neotectonic Movement and Geohazard, Institute of Geomechanics, CAGS, Beijing 100081, China; 4. School of Geoscience & Surveying Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China)

Abstract Complex geological environments characterize karst mountainous areas in southwest China with frequent underground mining activities and large-scale landslide hazards. The purpose of this work was to understand the law of slope subsidence and ground fissure development during mining activities under the upper-hard and lower-soft gently dipping rock slopes. Taking the Pusa collapse in Guizhou Province as an example, using similar-model experiments, we studied the surface settlement, internal displacement, interlayer pressure variation rule and features of mining ground fissure development of the slope body under mining activities. The results show that under the action of underground mining, the surface settlement and internal displacement of the slope body increase linearly with the growth of mining length. When the mining length is about 16 times of the mining height, the surface settlement of the test model increases sharply with cracks appearing. The closer the measurement point to the ground fissure, the greater the settlement change rate. The location of ground fissures and the maximum change rate of surface settlement appear roughly in the same area. When the driving face is advancing, the unloading area appears in the roof rock above the goaf where the compressive stress decreases, while the rock mass above the mining face has the interlayer compression area where compressive stress increases. Outside the mining height range of about 20 times above the goaf, the interlayer pressure in the test model is less affected by the disturbance of underground mining activities. The research in this paper has a certain reference significance for the early identification and failure mechanism analysis of landslides under underground mining activities in karst mountainous areas of southwest China.

Key words karst mountainous area, rock slope, mining activities, model test, ground fissure, interlayer pressure

(编辑 张玲)