

兴仁县新龙场镇“采空”结构型滑坡变形机制与监测预警

朱要强^{1,2}, 邹银先², 张鸿晶², 张大权²

(1. 成都理工大学环境与工程学院, 成都 610059; 2. 贵州省地质环境监测院, 贵州 贵阳 550004)

[摘 要] 本文以兴仁县新龙场镇大洼村映山红“采空”结构型滑坡隐患为研究对象, 基于现场调研, 分析此类发育模式滑坡的变形机制。结合我省以往研究项目, 初步建立了此类发育模式的岩质滑坡地质灾害监测预警技术方法, 提供了研究区“采空”结构型滑坡隐患的自动化监测预警方案建议, 为开展“采空”结构型滑坡监测预警工作提供技术方法参考。

[关键词] 监测预警; “采空”结构型滑坡; 变形机制; 方案建议

[中图分类号] P642. 22 [文献标识码] A [文章编号] 1000-5943(2018)03-233-07

1 引言

贵州每年发生地质灾害的次数、人员伤亡和直接经济损失在全国一直处于前几位, 因地质灾害造成的人员伤亡和经济损失不可小视, 地质灾害日渐成为影响和制约贵州社会发展的重要因素之一^[1](郭振春等 2003)。贵州煤炭资源丰富, 井工开采历史较长, 形成了较多的“采空”结构型滑坡地质灾害隐患^[5](杨胜元等 2012), 且已造成了较大人员伤亡。2004 年 12 月 3 日凌晨 3 时许, 贵州省纳雍县鬃岭镇左家营村岩脚组发生一起特大山体滑坡^[3](谭宁等 2013), 44 人死亡或失踪, 受灾房屋 25 间, 受灾群众 108 人。2017 年 8 月 28 日, 纳雍县张家湾镇普洒村突发高位山体滑塌, 造成 35 人死亡的重大灾害损失。

本文通过对兴仁县新龙场镇大洼村映山红“采空”结构型滑坡地质灾害隐患的发育特点及其变形机制分析, 结合“贵州省地质灾害监测预警与决策支持平台研究”项目中“采空”结构型滑坡地质灾害监测示范研究成果, 探讨“采空”结构型滑坡的监测预警技术方法, 为贵州省开展地质灾害监测预警项目提供一定的技术方法参考。

2 “采空”结构型滑坡变形机制分析

2.1 “采空”结构型滑坡变形阶段划分

“采空”结构是指由采矿形成的地下采空区及其导致的直接塌陷区, 范围较大的“采空”结构区对坡体变形和破坏具有明显的控制性意义。“采空”结构可以产生塌陷变形, 具有较大的垂向变形空间, 并因此提供了较大的水平向可压缩性。这类斜坡宏观上具有上硬下软结构特征, 下部软层中有单层或多层可采煤层。研究区山体变形是由采矿诱发形成, 其变形特征符合地下采矿诱发斜坡变形破坏的基本特征。根据现有研究成果, 采空区上斜坡变形可总结为三个阶段。

(1) 采动裂隙扩展阶段。走向长臂采煤法活动过程中, 随着工作面的推进, 地下空间逐渐形成。上覆岩体产生应力调整, 采空区边界外侧一定范围内的上覆岩体中形成竖向裂隙, 这种裂隙具有向采空区内倾倒的特征; 采空区中部顶板产生向下方空间的弯折, 所形成的裂隙具有下宽上窄的特点。这个阶段产生的裂隙一般集中在采空区顶板以上一定范围内, 变形以岩体结构松动为

[收稿日期] 2018-05-18 [修回日期] 2018-08-08
[基金项目] 黔科合平台人才[2017]5402; 黔科合支撑[2017]2814。
[作者简介] 朱要强(1981—), 男, 高工, 长期从事地质灾害调查评价及预测工作。

主,变形一般没有延伸到地表。

(2)采空区上覆岩体变形发展阶段。采矿工作面活动结束后,采空区形成,采矿活动转入下一个工作面或停采,工作面缺少维护,顶板开始向采空区垮塌,上部岩层出现向下的弯曲离层,采动裂隙向上发展,地表产生沉陷,对缓倾角($<10^\circ$)煤层来讲,逐渐形成以采空区中部为中心的沉陷盆地,这个区域内地表产生沉降变形,采动裂隙向上扩展,受岩体内裂隙发育的影响,采空区边界接近正上方的地表形成边界裂缝,该裂缝向采空区方向形成明显的地面沉陷特征。这种变形导致斜坡产生边界裂缝处倾倒式拉张变形、中部板梁弯曲式弯曲沉陷、采空区外侧山体向坡外的剪切变形;边界裂缝部位产生向采空区方向的水平位移和向下的沉降变形;中部以沉降变形为主。一般情况下,随着变形充分发育、应力充分调整,这种变形会趋于稳定。

(3)斜坡变形演化阶段。变形持续发展,导致采空区上覆岩体松动、地表形成连续发育的裂缝,形成具有显著变形的变形体。这种变形山体由于发育大量裂缝、岩体松动、裂隙张开,降雨使雨水进入采空区软化岩体,导致变形体内岩体物理力学性能降低,斜坡变形加剧。若地形地质条件不利,这种变形将持续发展,加上降雨等外部条件影响,潜在滑面从后缘裂缝处自上向下扩展,由于顶板的弯曲变形,采空区顶板山内侧的层面变为倾山外,加上采动裂隙的发育,组合形成折线状滑面向下发育,并最终在斜坡中部或采空区煤层出露部位形成剪出口,导致滑坡发生。这类滑坡一般靠内侧岩体破碎,外侧相对完整,破坏时需剪断外侧的相对完整岩体,具有较大的能量释放,容易形成高速远程滑坡。

以上三个阶段并没有严格的时、空界限,各类变形可能同步发展。

2.2 研究区变形现象与变形阶段划分

研究区地表变形现象主要有 2016 年干涉雷达监测发现映山红山山体出现多条沿 NE 走向的裂缝,裂缝宽度 5~100 cm,错距 10~120 cm,横向展布近 600 m,局部存在垮塌、坡面溜滑等现象。裂缝总体特征表现为斜坡内外两条主干裂缝之间山体产生显著的沉陷,局部形成小规模

的滑坡。裂缝所在斜坡高差近 300 m,距居民区水平距离近 500 m,变形山体南东侧斜坡中下部有大洼、半坡和院子 3 组超过 1000 名群众居住。因为在高陡的山体上部发育大量张开宽度与下错距离较大的裂缝,作为后缘边界,一旦持续变形形成滑坡灾害,该区居民生命财产安全将受到严重威胁。总体来讲,映山红山体目前处于采空区山体变形第二阶段。根据现有资料不能排除滑坡演化同步发展的可能,应加强监测斜坡上裂缝的发展趋势。

2.3 地形地貌与地质条件

2.3.1 研究区地形地貌

映山红山位于兴仁县新龙场镇北西约 5 km 处的大洼村,区内为中山地形,最高点海拔 1 889 m,最低点海拔标高为 1 386 m,相对高差最高达 503 m,平均高差约 300 m。映山红山体走向大体为北东南西向,倾向南东,受区域地质构造、地层结构及地表河流等控制,地貌特征以侵蚀成因形成的斜坡沟谷地貌为主,地貌条件较复杂。

2.3.2 研究区地层岩性

映山红山体变形斜坡上出露的地层岩性主要为龙潭组(P_3l)的浅灰色、灰色及深灰色,薄至中厚层状细砂岩、粉砂岩、石灰岩、泥灰岩、泥质粉砂岩、粉砂质泥岩、泥岩、炭质泥岩及煤,长兴组和大隆组(P_3c+d),飞仙关组(T_1f)钙质粉砂岩及泥质粉砂岩,及第四系(Q)崩坡积物,地层总体产状倾向 $270^\circ\sim 340^\circ$,倾角 $6^\circ\sim 14^\circ$,缓倾坡内,这种结构地层易形成上陡下缓的地形,地层剖面图详见图 1。

2.3.3 研究区采空区分布

本次调查收集到 2006 年以来的采空区分布图,2006 年之前开采情况不详,采空区分布详见图 2。现有的国保煤矿于 2006 年 4 月取得采矿许可证,国保煤矿矿区内有可采煤层 17、18、19、24、25、26 共 6 层,现主采 17(K1)、18(K2)煤层。K1 煤层位于龙潭组上段上部,为本矿区最上一层可采煤层,地表有出露,最大埋深超过 350 m,下距 K2 煤平均 14.27 m,煤层全层真厚度 0.89~5.50 m,平均厚度 2.88 m,平均采用厚度 2.42 m。K2 层位于龙潭组上段上部,上距 K1 煤平均 14.27 m,全层真厚度 0.83~3.26 m,平均厚度 1.87 m,平均采用厚度 1.79 m。

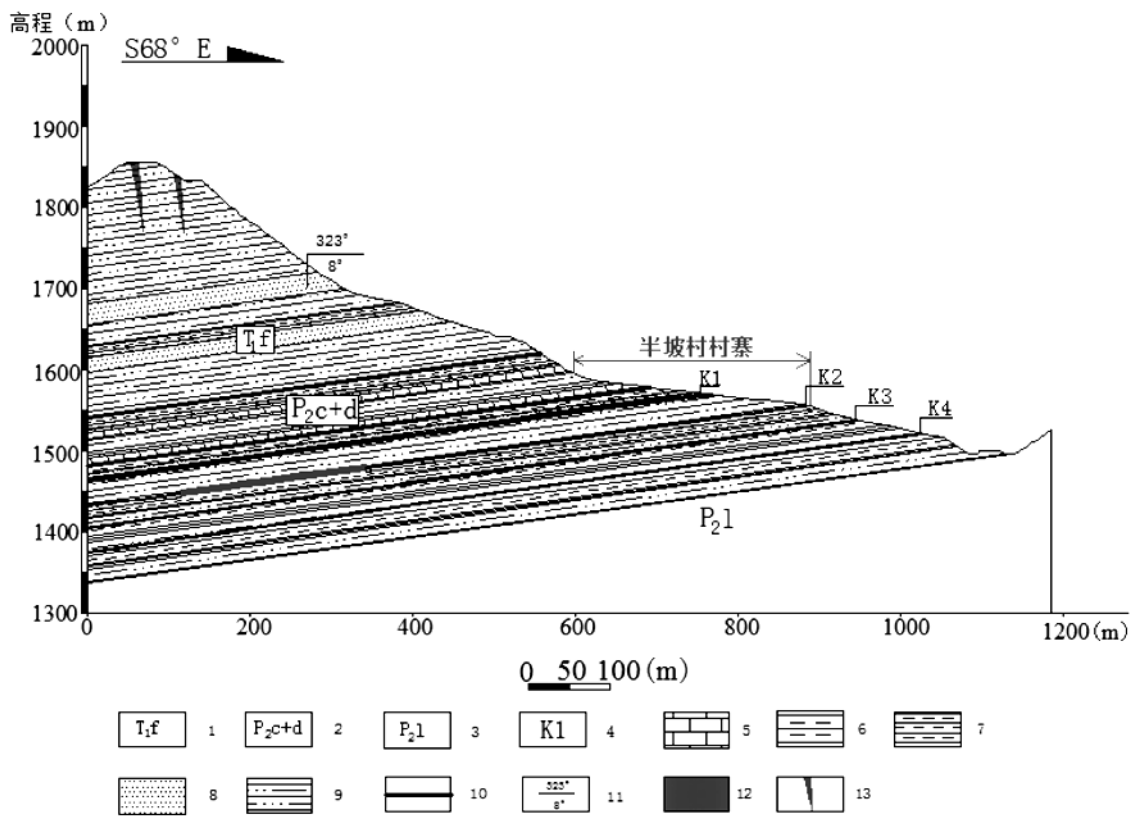


图 1 研究区典型工程地质剖面图

Fig. 1 Typical engineering geological section of the study area

1—三叠系下统飞仙关组;2—二叠系上统长兴—大隆组;3—二叠系上统龙潭组;4—煤层及编号;5—灰岩;6—泥岩;7—粘土岩;
8—粉砂岩;9—泥质粉砂岩;10—岩层年代界限;11—产状;12—采空区;13—裂缝

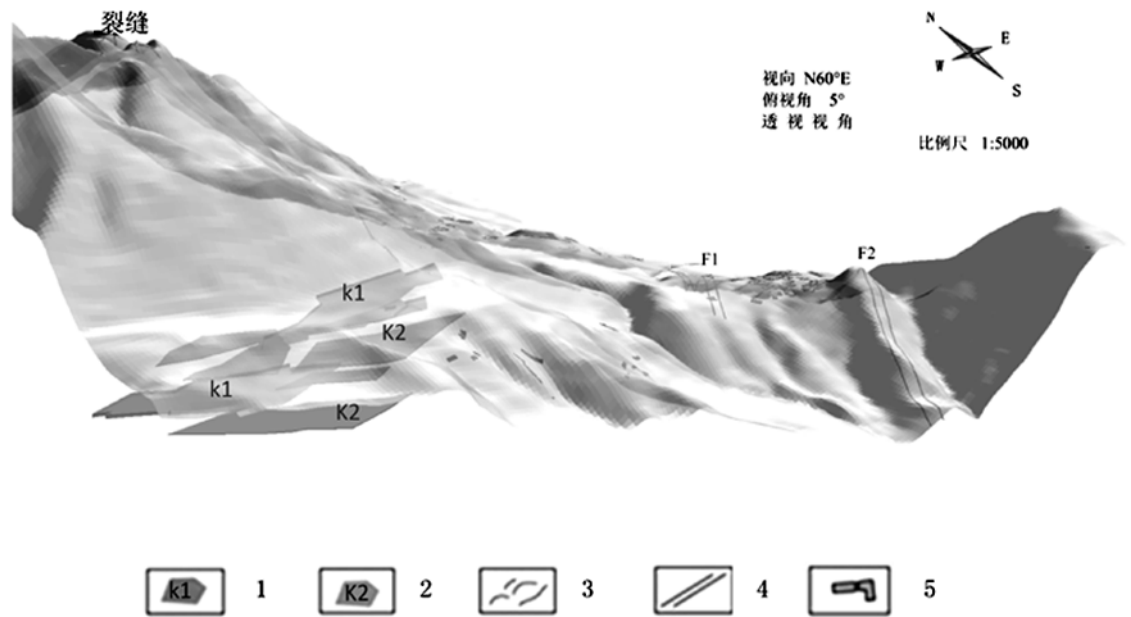


图 2 采空区分布三维视图

Fig. 2 3D views of goaf distribution

1—采空区 K1;2—采空区 K2;3—山顶裂缝;4—断层;5—居民区

3 滑坡监测预警方案设计

3.1 监测预警系统建设总体思路

地质灾害监测系统建设应根据地质灾害的类型和发育模式有针对性地进行。贵州地灾监测系统建设的总体思路(见图3)为:

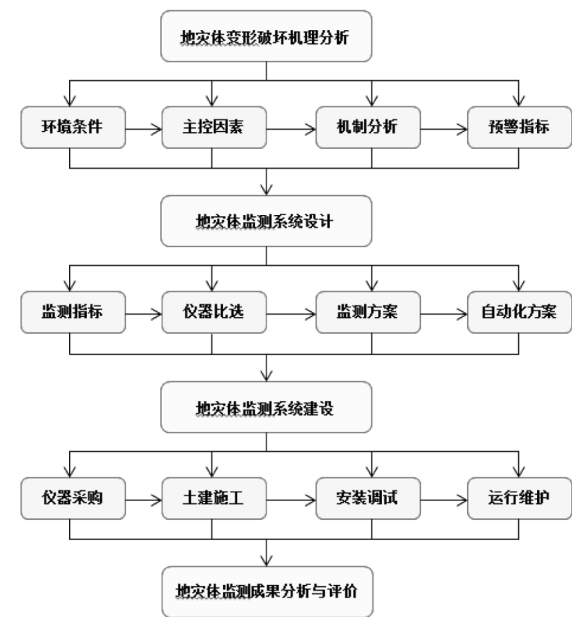


图3 监测预警系统建设总体流程

Fig. 3 Overall process of monitoring and warning system construction

(1)在综合分析每一类地灾形成条件、诱发因素、前兆表现出的变形破坏迹象等因素的前提下,提出监控指标。

(2)综合考虑性能可靠、技术先进、经济许可以及现场可行的基础上,结合具体的地灾点自身的特点,包括地质条件、地形地貌特征、影响因素以及表现出的变形破坏特征,确定该地灾点的监测内容。

(3)根据确定的监测内容,进行系统的监测方案设计。

(4)根据设计方案进行仪器设备选型。

(5)监测系统现场实施,包括安装、调试以及运行维护。

(6)室内数据控制平台接收现场通过自动化采集、传输装置发送回来的数据,并进行成果分析,结合确定的预警预报指标,进行地灾预警预报。

3.2 监测预警指标选择

依据地质灾害的发育程度、地质灾害的类型、

监测站所处位置的重要性等因素,可将滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害按灾害规模、变形破坏程度各自划分为3个等级,对应不同类型、不同级别、不同发育模式的地质灾害建立相应的监测指标,确定相应的监测手段,见表1。

3.3 监测预警方案设计

3.3.1 监测内容

滑坡的监测技术方法主要有变形监测、地下水监测、诱发因素监测、宏观前兆监测等。通过对滑坡的特征分析,结合变形趋势分析和变形阶段,确定监测内容,进而选取相应的监测方法。(1)研究区现处于斜坡变形的第二阶段,山顶出现大量裂缝,坡体中部存在相对隔水的飞仙关组粉砂岩组,大量降雨能够在后缘形成静水压力,作为诱发因素的区域降雨监测应首要考虑。(2)研究区表现出大变形,所以变形监测以不受量程限制的地表相对位移监测为主,考虑到需要实现自动化采集传输,因此选取自动化程度较高且能满足精度要求的GNSS测量系统。此外,根据坡体上面裂缝发育特征及块体切割情况,可以以地表相对位移监测和倾斜监测作为补充。

3.3.2 监测预警方案建议

根据前述变形特征和监测内容、监测方法分析,建议在滑坡后缘顶部布置自动降雨监测站1套,用于监测该区域降雨量。在坡体后缘顶部布置表面位移监测站1套,用于监测滑坡后缘顶部裂缝的开合情况。变形体位移较大、裂缝较宽,常规内观监测仪器无法形成有效监控,因此应用GNSS监测技术,GPS基站布置在外围稳定岩体、GPS移动站布置在各变形体区块顶部,以便掌握变形特征及变形规律,作为预测预报的数据支撑。

3.3.3 监测预警判据

3.3.3.1 斜坡变形预警判据

通过对S-t坐标系作适当的变换处理,使其纵横坐标的量纲一致,见图5。

根据T-t曲线,见图6。可以得到改进的切线角的表达式:

$$\alpha_i = \arctan \frac{T(i) - T(i-1)}{t_i - t_{i-1}} = \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad (\text{式 } 1)$$

α_i —改进的切线角;

t_i —某一监测时刻;

Δt —与计算S时对应的单位时间段(一般采用一个监测周期,如1天、1周等);

表 1 岩溶山地地质灾害监测指标选取建议表

Table 1 Suggestions for indicator selection for monitoring geological hazards in karst mountains					
地灾类型	灾害分级	发育模式	监测指标选取	监测手段	监测位置
滑坡	一般变形	采空区控制型滑坡	雨量、裂缝变形、地表变形	雨量计、固定测斜仪、表面位移计、GNSS 等	变形体顶部、前缘裂缝、外围稳定基岩等
		弱面控制型滑坡	雨量、深部变形、地下水位、土体含水率、等	雨量计、固定测斜仪、滑动测斜仪、表面位移计、渗压计、土体含水率计、等	滑坡前缘、坡体中部、坡体前缘等
	大变形	关键块体型滑坡	雨量、深部位移、地下水位、土体含水率、等	雨量计、固定测斜仪、滑动测斜仪、渗压计、土体含水率计、等	滑坡前缘、坡体中部、坡体前缘、坡体后缘等
		复合型滑坡	雨量、裂缝、岩土体倾斜、等	雨量计、表面位移计、GNSS、倾角计等	滑坡前缘、裂缝处、坡体中部、开裂岩体等
崩塌	一般变形	软弱基座型崩塌	地表位移、岩体裂缝、岩体倾角、等	倾角计、表面位移计、等	裂缝处、崩塌体中部、开裂岩体等
	大变形	采空区结构控制型崩塌	雨量、岩体倾角、岩体裂缝、等	雨量计、倾角计、表面位移计、钢筋计、等	崩塌体下稳定区域、岩体裂缝处、开裂岩体等
	特大变形				
泥石流	小规模			雨量计	
	大规模			雨量计、水位计、次声仪	
	特大规模			雨量计、物位计、次声仪、视频仪、等	

注:由崩滑灾害形成的泥石流物源区的监测参照滑坡、崩塌监测指标及设备选取。

表 2 研究区监测仪器布置建议汇总表

Table 2 Summary of landslide monitoring instrument layout in the study area				
仪器名称	仪器数量	仪器单位	监测对象	布置位置
自动降雨监测站	1	套	降雨量	滑坡隐患后缘顶部
表面位移监测站	1	套	裂缝开合	滑坡后缘顶部裂缝
GNSS 基站(1 机 1 天线)	1	套	坡体变形	山顶稳定基岩区
GNSS 移动站(1 机 4 天线)	1	套	坡体变形	各变形区块中上部

ΔT —单位时间段内 $T(i)$ 的变化量。
显然,根据上述定义:
当 $\alpha_i < 45^\circ$,斜坡处于初始变形阶段;
当 $\alpha_i \approx 45^\circ$,斜坡处于等速变形阶段;
当 $\alpha_i > 45^\circ$,斜坡处于加速变形阶段。
根据上述改进切线角的计算方法在计算切线角时,S-t 曲线的监测数据应采用累计位移—时间资料。

3.3.3.2 坡顶裂隙水位深度判据

岩质滑坡的失稳模式与土质滑坡具有较大的区别。新鲜完整的岩石具有较高的强度,切穿完整岩石下滑是困难的,因此岩质斜坡滑动的滑动面是受结构面的产状控制的。基于这一基础,把岩质斜坡概化为如图 7 所示的概化模型。由于在岩质斜坡的后缘经常存在着张开的裂隙,大气降水从张裂隙进入后,沿滑动面渗透并在坡角 A 点出露。而滑动体和不动岩体几乎不透水。

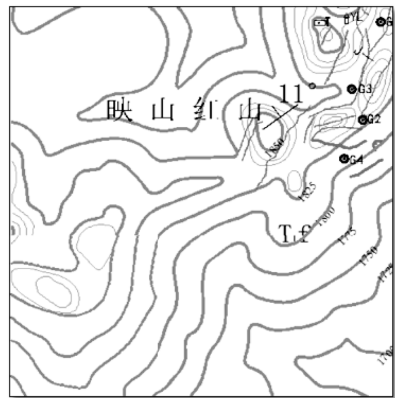


图 4 研究区监测仪器布置建议平面图

Fig. 4 Layout plan of landslide monitoring instrument in the study area

1—J 测量计;2—YL 雨量计;3—G GNSS 移动站;4—T GNSS 基站

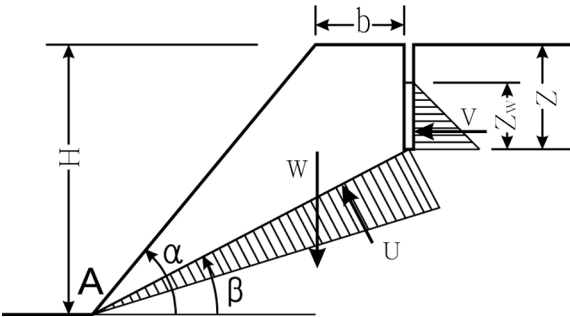


图 7 平面滑动滑坡稳定性分析图

Fig. 7 Stability analysis of plane sliding landslide

由图 7 可以得到岩质斜坡的稳定系数公式：

$$K = \frac{(W \cos \beta - U - V \sin \beta) \tan \varphi + cL}{W \sin \beta + V \cos \beta} \quad (\text{式 } 2)$$

式中： $V = \frac{1}{2} \gamma_w Z_w^2$

$$U = \frac{1}{2} \gamma_w \cdot Z_w \cdot L$$

$$L = \frac{H - Z}{\sin \beta}$$

为了简化起见,将方程(式 2)重新整理为下列无量纲的形式：

$$K = \frac{(2c / \gamma H) P + [Q \text{ctg} \beta - R(P + S)] \text{tg} \varphi}{Q + RS \text{ctg} \beta} \quad (\text{式 } 3)$$

式中： $P = (1 - Z / H) \text{ctg} \beta$

$$Q = \{ [1 - (Z / H)^2] \text{ctg} \beta - \text{ctg} \alpha \} \sin \beta$$

$$R = \frac{\gamma_w Z_w Z}{\gamma Z H}$$

$$S = \frac{Z_w Z}{Z H} \sin \beta$$

P、Q、R、S 均为无量纲量,即它们只取决于边坡的几何要素,而不取决于边坡的尺寸。对特定斜坡,当已知岩层面或软弱夹层的 c、φ 值时,K=f(Zw)。K=1.0 时斜坡处于极限状态。据此计算极限状态条件下的坡体顶部裂隙水位深度 Zw,当 Z<Zw 时,滑坡处于稳定状态;当 Z=Zw 时,斜坡处于极限稳定状态,此时应该发出预警;当 Z>Zw 时,斜坡处于欠稳定状态,即将失稳。

4 结论

本文以兴仁县新龙场镇大洼村映山红“采空”结构型滑坡地质灾害隐患为研究对象,基于现场调研,分析了该类型地质灾害隐患的变形机

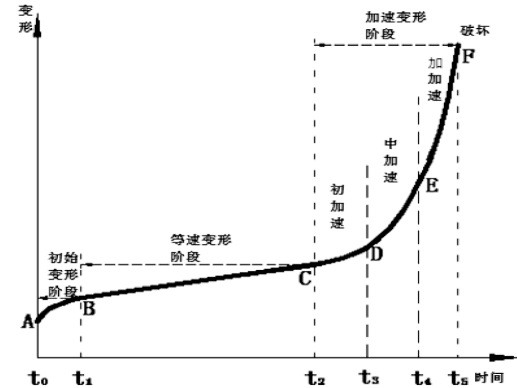


图 5 渐变型滑坡变形—时间曲线及其阶段划分^[3]
(谭宁等 2013)

Fig. 5 Deformation-time curve and its periods division of gradual deformation landslide

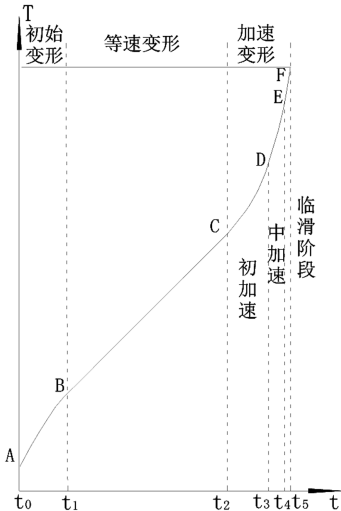


图 6 经坐标变换后的滑坡 T—t 曲线^[6]
(张倬元等 2009)

Fig. 6 T-t curve of landslide after coordinate transformation

制,结合以往研究项目,建立了此类发育模式的岩质滑坡地质灾害监测预警技术流程,主要获得以下结论:

(1)“采空”结构型滑坡变形一般分为采动裂隙扩展阶段、采空区上覆岩体变形发展阶段、斜坡变形演化阶段;监测预警方案设计前期应详细分析其所处的变形阶段,以选择合理的监测内容和设置适宜的监测位置。

(2)滑坡隐患点监测预警建设总体工作阶段划分为地质灾害体变形破坏机理分析、地灾体监测系统设计、地灾体监测系统建设、地灾体监测成果分析与评价等四个阶段。

(3)依据地质灾害的发育程度、地质灾害的类型、监测站所处位置的重要性等因素,初步建立了基于不同发育模式和变形阶段的地质灾害监测预警内容和监测方法。

(4)根据调研分析,提供了研究区“采空”结

构型滑坡地质灾害隐患的自动化监测预警方案建议。为今后开展“采空”结构型滑坡监测预警工作提供技术参照。

[参考文献]

郭振春. 2003. 贵州地质灾害的主要类型和诱因及其预防建议[J]. 贵州地质. 20(2):103-105.
李禹霏,陈世昌,徐湘涛. 2013. 贵州都匀马达岭地质灾害链的自动化监测[J]. 工程地质学报. 22(3):482-488.
谭宁. 2013. 贵州省纳雍县鬃岭镇中岭高边坡变形破坏机制及稳定性评价[硕士学位论文][D]. 成都. 成都理工大学.
王玉川,巨能攀,赵建军,等. 2013. 缓倾煤层采空区上覆山体滑坡形成机制分析[J]. 工程地质学报. 21(1):61-68.
杨胜元,张建江,等. 2012. 贵州矿山地质环境[M]. 贵阳:贵州科技出版社.
张俾元,王士天,王兰生. 2009. 工程地质分析原理[M]. 北京:地质出版社.

Study of ‘Goaf’ Structural Landslide Deformation Mechanism and Monitoring Program

ZHU Yao-qiang, ZHOU Yin-xian, ZHANG Hong-jing, ZHANG Da-quan

(1.College of Environment and Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 10059, Sichuan, China; 2.Guizhou Institute of Geo-environment Monitoring, Guiyang 550004, Guizhou, China)

[Abstract] In this paper, Yingshanhong ‘goaf’ structural landslide hazard in Dawa village of Xingren is taken as the study object, based on the field investigation, the deformation mechanism of this developed mode landslide are analyzed. According to the former studied programs of Guizhou province, the monitoring and warning technique for geological hazard of rock landslide in this kind of developed mode is established primarily, the proposal of automatic monitoring and warning program for the hazards of ‘goaf’ structural landslide in the study area is provided, so it will afford technical reference for the future work of monitoring and warning of ‘goaf’ structural landslide.

[Key words] Monitoring and warning; ‘Goaf’ structural landslide; Deformation mechanism; Proposal