

斜倾厚层山体弯曲-侧滑机理分析

易朋莹, 林军志, 陈涛, 吴志勇

Mechanism of bending-sideslip of inclined thick bedding slope: A case study of Qingkou landslide in Wulong, Chongqing

YI Pengying, LIN Junzhi, CHEN Tao, and WU Zhiyong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202212014>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

三峡库区大型斜倾顺层滑坡失稳机理分析

Instability mechanism of massive oblique bedding rock landslide in the Three-Gorges Reservoir: A case study of the Longjing landslide in Shizhu County of Chongqing City

王平, 朱赛楠, 张枝华, 吴晓宾, 杨柳, 赵慧 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(4): 24-32

中等倾角岩层顺向坡滑坡发育特征及形成机制分析

Development characteristics and formation mechanism of the medium-dip bedding slopes: A case study of the landslide on the left bank of Tuodan reservoir dam

王玉川, 郭其峰, 周延国 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(4): 17-23

三峡库区典型顺斜向岩质滑坡变形破坏特征及失稳机制分析

Deformation characteristics and failure mechanism of large-scale obliquely dip rock landslide in the Three Gorges Reservoir Region

蒋先念, 张晨阳 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 36-42

溯源侵蚀引发的拉裂-倾倒型黄土崩塌形成机制

The mechanism of bending-toppling loess collapse caused by headward erosion

成玉祥, 张卜平, 唐亚明 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 86-91

甘肃舟曲岷豁口滑坡复活机理及成因探讨

Mechanism and causal analysis on the Yahuokou landslide reactivation and causes (Zhouqu County, Gansu, China)

窦晓东, 张泽林 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 9-18

三峡库区巫峡剪刀峰顺层岩质岸坡破坏模式分析

An analysis on the destruction mode of Wuxia scissors peak down the shore slope in the Three-Gorges Reservoir area

王平, 胡明军, 黄波林, 张枝华, 郑涛, 吴坤达, 毛博 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 52-61



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202212014

易朋莹, 林军志, 陈涛, 等. 斜倾厚层山体弯曲-侧滑机理分析——以重庆武隆庆口滑坡为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2024, 35(3): 36-42.

YI Pengying, LIN Junzhi, CHEN Tao, et al. Mechanism of bending-sideslip of inclined thick bedding slope: A case study of Qingkou landslide in Wulong, Chongqing[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2024, 35(3): 36-42.

斜倾厚层山体弯曲-侧滑机理分析

——以重庆武隆庆口滑坡为例

易朋莹¹, 林军志², 陈涛¹, 吴志勇³

(1. 重庆市高新工程勘察设计院有限公司, 重庆 400021; 2. 重庆交通大学河海学院, 重庆 400074; 3. 四川省达州市达川区自然资源局, 四川达州 635006)

摘要: 重庆武隆庆口滑坡发育在斜倾厚层陡崖带上, 下方数百年的煤矿开采形成了大面积的采空区。基于对地质条件、采空区现状和山体变形特征的分析, 发现该滑坡既有弯曲张拉变形又有侧向滑移变形, 提出了弯曲-侧滑破坏模式。根据山体变形历史, 分弯曲变形和滑移变形两个阶段, 分析了滑坡变形特征, 研究了岩层面产状变化。并根据层面与临空面组合关系, 将山体破坏分为弯曲张拉破坏、楔形体破坏和平面滑动破坏 3 个阶段, 建立了各破坏阶段的判据, 揭示了弯曲-侧滑型滑坡演变规律和形成机理, 为该类滑坡防灾减灾提供了科学依据。

关键词: 弯曲变形; 侧向滑动; 弯曲张拉破坏; 楔形体破坏; 平面滑动; 演变规律; 形成机理

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2024)03-0036-07

Mechanism of bending-sideslip of inclined thick bedding slope: A case study of Qingkou landslide in Wulong, Chongqing

YI Pengying¹, LIN Junzhi², CHEN Tao¹, WU Zhiyong³

(1. Chongqing High-tech Engineering Survey and Design Institute Co. Ltd., Chongqing 400021, China; 2. School of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 3. Natural Resources Bureau of Dachuan District, Dazhou City, Sichuan Province, Dazhou, Sichuan 635006, China)

Abstract: The Qingkou landslide in Wulong, Chongqing, has developed on an inclined thick abrupt cliff, with a large area of goaf formed due to hundreds of years of coal mining below. Based on the analysis of the geological conditions, current goaf situation, and deformation characteristics of the mountain, it is identified that the landslide exhibits both bending-tension and sideslip deformations, suggesting a bending-sideslip failure mode. The deformation history of the mountain is examined, and the deformation characteristics of the landslide are analyzed in two stages: bending deformation and sideslipping deformation. Change in the rock surface occurrence are studied accordingly. Considering the combination relationship between bedding and the free face, the mountain failure is divided into bending-tension failure, wedge failure and plane-sliding failure. Criteria for each failure stage are established, revealing the evolution rules and formation mechanism of the bending-sideslip landslide. This study provides a scientific basis for the disaster prevention and mitigation of such landslides.

收稿日期: 2022-12-26; 修订日期: 2023-08-16

投稿网址: <https://www.zgdzhyfzxb.com/>

第一作者: 易朋莹(1977—), 男, 四川平昌人, 博士, 正高级工程师, 主要从事地质灾害防治设计及研究工作。E-mail: 25488609@qq.com

通讯作者: 陈涛(1982—), 男, 山西平遥人, 硕士, 正高级工程师, 主要从事岩土工程勘察设计及研究工作。E-mail: chent_82@163.com

Keywords: bending deformation; lateral sliding; bending-tension failure; wedge failure; plane-sliding; evolution rules; formation mechanism

0 引言

国内外学者对滑坡失稳机理的研究由来已久,根据变形破坏地质力学模式的形成、演变将滑坡破坏模式分为蠕滑拉裂、滑移压致拉裂、滑移弯曲、弯曲拉裂(倾倒)、流塑拉裂等类型^[1-5],形成了较为完备的理论系统。其中,岩质滑坡以顺层滑移为主已是共识,对于侧向边界控制的切向滑移模式也有一些研究^[6-7]。

在重庆武隆羊角镇庆口滑坡研究中,刘传正^[8]、陈涛^[9]、王磊等^[10]主要分析了庆口滑坡的形成过程及影响因素,评价了滑坡的稳定性状态,而对其破坏机理的认识比较缺乏。笔者对庆口滑体的变形历史进行了研究,发现该滑坡呈现出一种与切向滑移破坏相近但又不完全相同的破坏特征,其破坏模式具有复合性,即滑坡既有向临空面的弯曲张拉变形,又有侧向滑移变形,为弯曲-侧滑破坏模式。

目前,对弯曲张拉变形^[1,11-12]和侧向滑移^[13-17]模式的滑坡研究较多,尤其在重庆武隆鸡尾山滑坡发生后,由于其位移方向及破坏模式与最初的判断存在较大的差异,许多学者对其成因机理进行了深入研究。刘传正^[12]根据采空区的“悬板张拉效应”分析认为山体拉裂导致了滑坡的形成,侧滑力是山体失稳的主要动力。Xu等^[13]、殷跃平^[14]从滑坡失稳模式、滑动方向、规模和运动距离等4个方面分析了传统理论和实际情况的差异。因鸡尾山滑坡在顺层面滑移的同时又有侧向滑移变形,即主滑方向与岩层倾向存在明显的夹角,殷跃平将其定名为视向滑移模式^[14]。近年来,在三峡库区及高速公路建设中,也陆续发现了视向滑移模式的滑坡,得到越来越多的行业人士重视^[15-17]。上述研究为张拉、侧滑模式的理论完善做出了贡献,但张拉与侧滑复合型破坏模式尚未见相关研究成果。

目前庆口滑坡正处于变形发展阶段,对其变形特征进行研究有利于认识厚层山体弯曲-侧滑破坏机理,对我国重庆、云南、贵州等西南地区厚层山体弯曲-侧滑的滑坡防灾减灾具有重要意义。

1 地质环境

1.1 地质条件

我国西南部的石灰岩地区存在大量的厚层山体,具有典型的上硬下软、上陡下缓的“二元结构”特征^[9]。尤

其在乌江中下游,褶皱密集分布,向斜两翼往往为比较宽缓的斜坡,乌江近垂直这些构造深切,使得两岸形成大量切向陡崖。上部硬质灰岩多呈巨厚层状,厚度达100 m以上,其间夹数层炭质或泥质页岩,厚度一般10~20 cm,为软弱较连续层面,岩体内一般发育2组陡倾裂隙面,受构造裂隙、地下水溶蚀和卸荷裂隙等切割成体积达数万立方米的柱状块体,形成高度80~150 m,坡度为70°~85°的陡崖。下部软层一般为8~15 m的泥质页岩,该层含煤、铁或铝土矿,数百年的矿产开采形成了大量的采空区,为大型地质灾害的形成提供了条件。

羊角庆口陡崖为吴家坪组地层组成的西南高东北低的单斜坡(图1)。山体呈上硬下软、上陡下缓的组合特征:上部陡崖高58~95 m,陡崖走向305°,坡度约85°,岩体为厚层状较完整的上二叠统吴家坪组中段坚硬灰岩(P_2w^2),该层底部为薄—中厚层状灰岩,层间夹炭质或沥青质页岩,层厚30~80 mm,滑体易沿该软弱层滑动(图2)。

下部为缓斜坡,坡度15°~30°,岩体为吴家坪组底部上段灰黑色粉砂泥岩(P_2w^1),厚度约12 m。岩层产状沿从东南—西北由315°∠15°逐渐转变为281°∠11°,总体为281°∠13°。如图3所示,岩体内发育两组陡倾裂隙:LX1裂隙产状42°∠85°,大致与岩层走向一致,裂面起伏较大,为张拉裂隙,张开度0.8~3.5 m,最大延伸长度约496 m,间距6~10 m,见图4、5;LX2裂隙产状325°∠85°,与岩层倾向大致一致,裂面较平直,间距5~10 m,裂缝微张至闭合。

1.2 采空区特征

陡崖底部的灰黑色粉砂泥岩中距离底面2 m处含煤层,厚度0.45~0.65 m。据调查,20世纪初到20世纪末在庆口陡崖底座一带断续采煤,形成了多处小煤窑,间距100~200 m,开采方式极不规范,进洞后随即向两侧由外到内开采,留设少量安全柱或木柱支撑。采空区如图1所示,滑坡体位于采空区上部,东北侧边界为陡崖面,西南侧边界为张拉裂隙;采空区顶部岩体厚60~180 m,距离炭质页岩夹层(软弱层)24 m(图3),滑体为软弱层以上的岩体,厚度45~155 m,改变了自然山体的应力状态,诱发了山体变形,改变了上部滑体的稳定性。

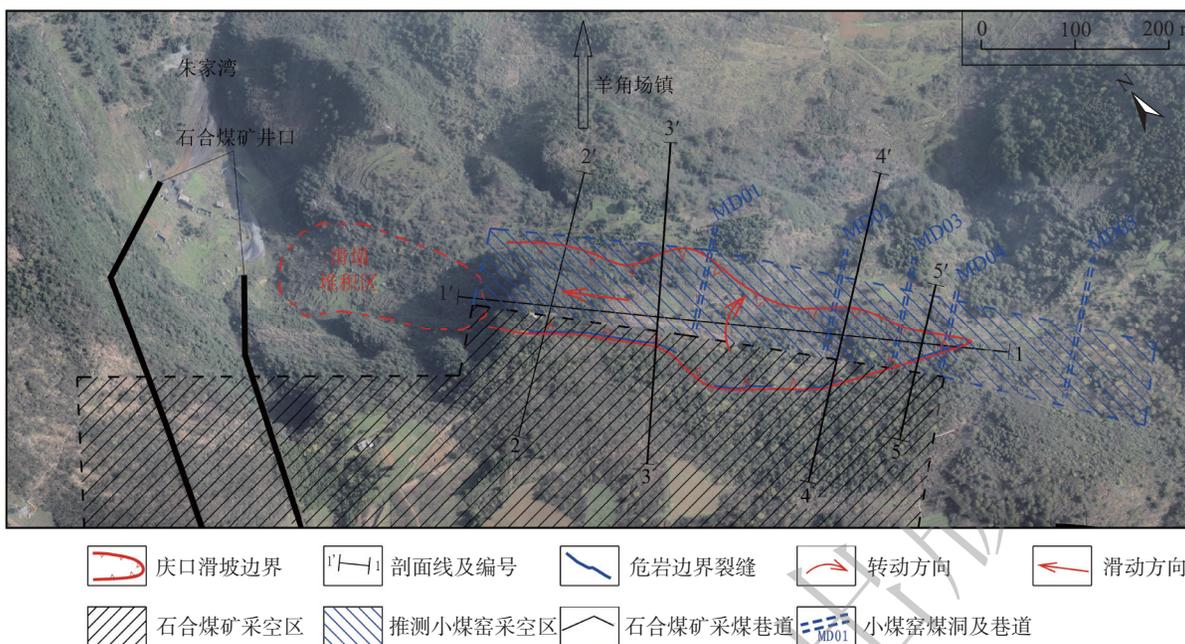


图 1 庆口滑坡全貌图

Fig. 1 Overall view of the Qingkou landslide



图 2 底部软弱易滑层

Fig. 2 Soft and slippery layer at the bottom

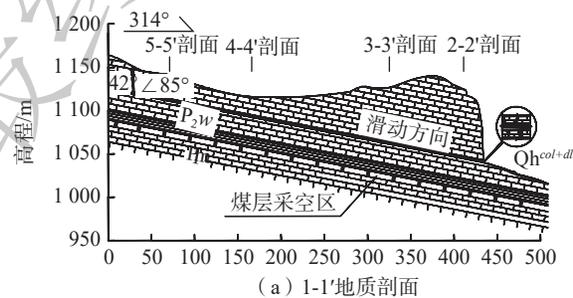
2 变形特征与形成条件分析

根据庆口滑坡和鸡尾山滑坡的变形历史特征,将弯曲-侧滑型滑坡变形分为 2 个阶段:弯曲变形阶段和侧向滑动变形阶段。

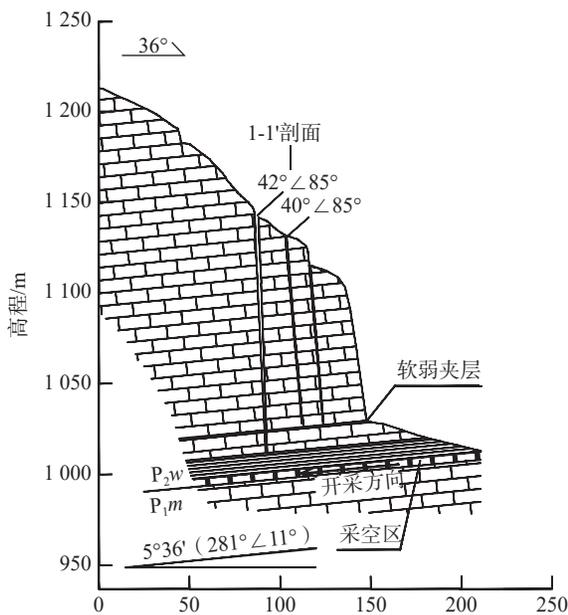
2.1 弯曲变形特征

在高陡临空地形条件下深部采矿影响了山体变形和应力调整^[11-12],诱发的山体严重开裂有湖北秭归链子崖、巫山望霞危岩和武隆鸡冠岭危岩等,采矿诱发山体开裂的影响因素较多,主要有岩体强度和完整性、上部岩体厚度、采空区大小及开采方式,文献[12]中研究了采矿诱发山体开裂的三个关键因素:(1)地形高陡临空,具备开裂倾倒或发生滑移的自由空间;(2)厚层状沉积岩层;(3)山脚存在顺层的采空区。

庆口滑坡基本具备了上述条件,弯曲变形如图 6 所示,上部岩层厚约 120 m,主要变形体宽约 50 m。当采



(a) 1-1'地质剖面



(b) 2-2'地质剖面

图 3 典型工程地质剖面图

Fig. 3 Typical engineering geological profile



图 4 前缘临空面

Fig. 4 Front edge overhanging surface



图 5 尾部张拉裂缝

Fig. 5 Tail tension cracks

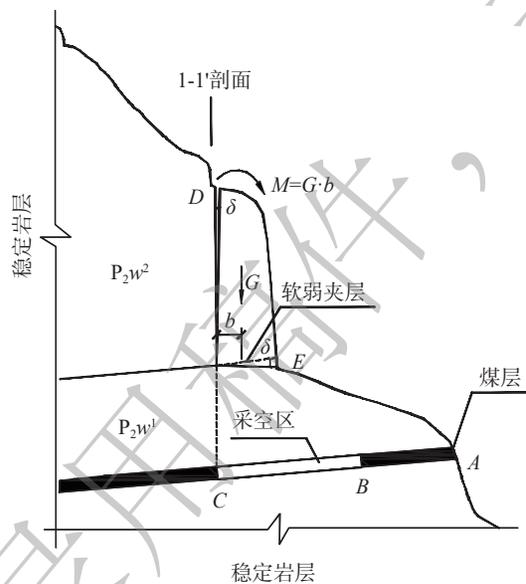


图 6 滑体弯曲变形示意图

Fig. 6 Schematic diagram of bending deformation of the landslide body

空区具备一定规模时,安全柱和采空区边界受上部岩体重力作用应力集中产生压缩变形,甚至压溃和岩爆,上

部岩体产生“悬板张拉效应”^[11-12],在山顶 D 点位置拉应力最大而发生开裂。随着采空区范围增大,悬板张拉效应越强烈,弯矩(M)增大促使岩体 $BCDE$ 发生弯曲偏转(δ),山顶裂缝逐渐扩张延伸(图 7)。

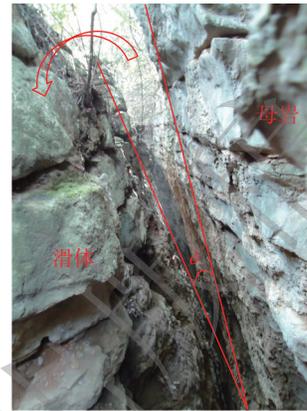


图 7 滑体弯曲偏转

Fig. 7 Bending deflection of the landslide body

2.2 滑移特征

随着图 6 中悬臂段岩体弯曲变形发展,滑体沿 C 点转动时改变了滑体侧面边界约束条件和底层滑面的形态特征:(1) CD 面附近张拉裂缝向下延展,岩体侧面约束大大削弱,抗剪强度迅速衰减,裂缝在平面上和剖面上的逐渐贯通,如图 1 中西南侧裂缝和图 3(b)中的竖向裂缝,将滑体与稳定岩体完全割离;(2)采空区上部岩体整体发生转动,使滑面(软弱页岩夹层)发生偏转,由于采空区通常是从外到内的开采顺序,偏转后滑动面略向临空侧倾斜,使原本略向山体内倾的岩层产状逐渐转变为侧向顺层或略向外倾的新层面。被弯曲裂缝切割后的滑体沿新层面滑动变形时将不再向山体内侧滑动,而是沿新层面顺层滑动。

庆口滑坡目前变形主要为弯曲变形:20 世纪 30 年代末庆口陡崖发生岩体轰鸣声响后在陡崖顶部出现了宽约 3~10 mm 的裂缝(LX1),裂缝连续性差;随着采空区的进一步扩展,在 1996—2002 年期间,裂缝宽度进一步扩展,逐渐形成长约 496 m,宽 0.8~3.5 m 的裂缝,山体弯曲偏转 $1^{\circ} \sim 8^{\circ}$,通过现场测试,裂缝宽度和弯曲转动见表 1。

同时在滑坡中前部的 LX2 裂缝受后侧滑体推移挤压闭合,前缘滑动拖移滑床的现象,见图 8。

表明滑体目前存在较小的侧向滑动变形。岩层原产状为 $285^{\circ} \angle 13^{\circ}$,偏转后产状为 $281^{\circ} \sim 315^{\circ} \angle 11^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 。在陡崖东南部,小煤窑分布较密集,采矿活动较强烈,地表裂缝张开 4.3~4.5 m,且采深较浅,岩体偏转角度较

表 1 滑体变形统计表

Table 1 Statistical table of deformation for the land slide body

剖面位置	裂缝总宽度/m	采深/m	偏转角度/(°)
2-2'剖面	1.6	114.5	0.8
3-3'剖面	2.6	99.8	1.7
4-4'剖面	4.3	45.4	5.4
5-5'剖面	4.9	44.5	6.3



图 8 前缘滑床拖移现象

Fig. 8 Dragging phenomenon of the leading edge sliding bed

大;往西北部小煤窑分布较少,采矿活动较弱,裂缝逐渐变窄,且采深较大,岩体偏转角度较小。

2.3 形成条件分析

通过对处于不同变形阶段的庆口滑坡过程分析,弯曲-侧滑式滑坡破坏应具备以下 3 个条件:

(1) 斜倾厚层山体

岩层面倾向与陡崖走向的夹角一般小于 30°,一般为内倾,也有可能略向外倾。山体为厚层状沉积岩山体,特别是其间分布有较贯通的软弱夹层,可能发生顺层滑动。如中国西南部的石灰岩层,山体重力作用对下部采空区压缩作用显著,为弯曲变形和侧向滑出提供动力。

(2) 弯曲变形条件

地形上高陡临空,具有弯曲变形空间;山体下部存在可压缩的采空区,在上部厚重山体作用下发生下沉弯曲变形,使后侧山体发生开裂,解除了岩体向层面滑动的侧向约束,改变了滑动面的形态,使滑面逐渐向有利于滑动的趋势演化。

(3) 侧向滑动条件

斜倾岩层山体侧向具有一定的临空条件,为侧向滑出提供变形空间。当滑体的侧面约束作用逐渐弱化,滑面逐渐演变为斜倾或斜外倾时,具备了滑动的动力条件,只有当滑坡动力能够克服滑面倾向前缘的约束条件,如鸡尾山滑体前部的“关键块体”。

3 滑面变形分析

弯曲变形阶段完成后,在上部岩体发生弯曲变形的同时,滑面也随之发生了变形,原层面倾向和倾角发生了改变,由原岩层的倾向 α_1 、倾角 β_1 变为倾向 α_2 、倾角 β_2 ,为侧向滑动变形创造了条件。其变形模式如图 9 所示。面 O_{xy} 为水平面,原层面 $OABC$ 为平面 Π_1 ,采空区 OBC 由 C 向 B 的方向逐渐形成, OB 线为采空区的内边界线, $BC \perp OB$,受重力作用, OBC 上部岩体向下产生偏移角度为 δ ,形成的新层面 OBD 为平面 Π_2 ,即 Π_1 与 Π_2 的夹角为 δ 。

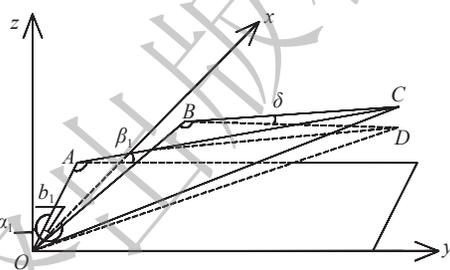


图 9 层面偏转变化示意图

Fig. 9 Schematic diagram of bedding deflection changes

为了与结构面产状的表示相吻合,假定坐标系的 x 轴与正北方向、 y 轴与正东方向、高程与 z 轴一致。

根据几何关系,可得:面 Π_1 法向量 $n_1=(\sin\alpha_1, -\cos\alpha_1, \cot\beta_1)$,面 Π_2 法向量 $n_2=(\sin\alpha_2, -\cos\alpha_2, \cot\beta_2)$; OA 向量 $L_1=(\cos\alpha_1, \sin\alpha_1, 0)$ 。

Π_1 和 Π_2 的夹角可表示为:

$$\cos\delta = |\cos(\alpha_1 - \alpha_2) + \cot\beta_1 \cot\beta_2| \sin\beta_1 \sin\beta_2 \quad (1)$$

Π_1 和 Π_2 交线 OB 的向量 L_2 可表示为:

$$L_2 = n_1 \cdot n_2 = \begin{vmatrix} i & j & k \\ \sin\alpha_1 & \cos\alpha_1 & \cot\beta_1 \\ \sin\alpha_2 & \cos\alpha_2 & \cot\beta_2 \end{vmatrix} = [(\cos\alpha_2 \cot\beta_1 - \cos\alpha_1 \cot\beta_2), (\sin\alpha_2 \cot\beta_1 - \sin\alpha_1 \cot\beta_2), \sin(-\alpha_1 + \alpha_2)] \quad (2)$$

式中: i, j, k ——分别为 x, y, z 轴正向的单位向量。

L_1 和 L_2 的夹角可表示为:

$$\cos b_1 = |(\cos(\alpha_1 - \alpha_2) \cot\beta_1 - \cot\beta_2) / [(\cot^2\beta_1 + \cot^2\beta_2 - 2 \cot\beta_1 \cot\beta_2 \cos(\alpha_1 - \alpha_2) + \sin^2(\alpha_1 - \alpha_2))^{0.5}]| \quad (3)$$

式中: b_1 —— L_1 和 L_2 的夹角/(°)。

联立式(1)和(3)可以求得 α_2, β_2 , 其求解较复杂,可借助计算机求解。

庆口滑坡中 $\alpha_1=195^\circ, \beta_1=13^\circ$, 通过式(1)(3)求得滑体层面产状见表 2, 计算值与现场测试值基本相符。

表 2 层面变形计算值

剖面位置	b_1	δ	α_2	β_2	α_2^*	β_2^*
2-2'剖面	64	0.8	198.3	12.7	191	11
3-3'剖面	82	1.7	202.6	12.9	202	12
4-4'剖面	82	5.4	218.8	13.4	216	14
5-5'剖面	85	6.3	222.0	13.9	230	15

注: 1. 陡崖走向约305°, 失稳临空面走向约40°; 2. 带*为现场实测值。

4 失稳机理分析

斜内倾厚层山体在采空区的影响下发生弯曲变形, 逐渐演变为斜外倾, 山体出现宏观张拉裂缝, 形成了侧向滑动和平面滑动的边界。滑体破坏模式演变顺序为弯曲破坏→楔形体破坏→平面破坏。

4.1 弯曲张拉裂缝形成

庆口滑坡下部采矿活动极不规范, 安全柱的形状和分布随意性大, 绝大部分区域未设置安全柱, 为便于研究, 其简化模型如图 10 所示, 在裂缝形成前采空区上部陡崖山体受力如图 10(b)虚线部分所示, 近似悬臂梁, 其单位长度的弯矩为:

$$M = 0.5\gamma hl^2 \quad (4)$$

式中: γ ——岩体重度/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$);

h ——采空区上部岩体厚度/m;

l ——变形体宽度/m。

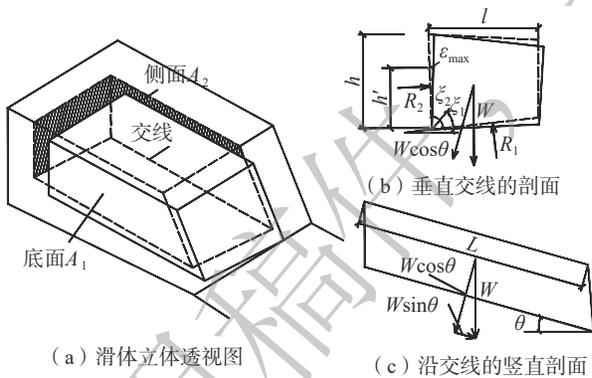


图 10 稳定性计算简图

Fig. 10 Simplified stability calculation diagram

当顶部的弯拉应力 $\sigma = \frac{6M}{h^2} \geq [\sigma_t]$ 时岩体发生开裂。山体开裂后, 裂缝未贯通段 h' 逐渐减小, h' 处的张拉应变为 ε_{\max} 。

4.2 楔形滑动稳定性分析

在裂缝未张开前, 滑体沿底面和侧面的交线滑动, 根据楔形体破坏模式, 滑体稳定系数为:

$$F_s = \frac{R_1 \tan \theta_1 + R_2 \tan \theta_2 + A_1 c_1 + A_2 c_2}{W \sin \theta} \quad (5)$$

其中:

$$R_1 = \frac{W \cos \theta \sin(\xi_1 + 0.5\xi_2)}{\sin \xi_2} \quad (6)$$

$$R_2 = \frac{W \cos \theta \sin(\xi_1 - 0.5\xi_2)}{\sin \xi_2} \quad (7)$$

式中: R_1 、 R_2 ——分别为底面 A_1 和侧面 A_2 上的法向反作用力/kN;

c_1 、 φ_1 ——底面 A_1 上黏聚力/kPa 和内摩擦角/(°);

c_2 、 φ_2 ——侧面 A_2 上黏聚力/kPa 和内摩擦角/(°);

W ——重力/kN, $W = \gamma h l l$;

其他符号如图 10 所示。

当滑体沿 A_1 和 A_2 交线转动时, 当 A_2 面上岩体的弯拉应变为达到 ε_{\max} (ε_{\max} 参考值为 0.000 1 ~ 0.000 15) 时将产生开裂, 转动角度为 $\delta = \xi_1' - \xi_1$ 时, 裂缝未张开段的高度为:

$$h' = \frac{\varepsilon_{\max}}{\tan \delta} \quad (8)$$

弯曲变形后的滑体稳定系数为

$$F_s' = \frac{\cot \theta [\sin(\xi_1' - 0.5\xi_2) \tan \varphi_1 + \sin(\xi_1' + 0.5\xi_2) \tan \varphi_2] + lc_1 + \frac{\varepsilon_{\max} c_2}{\tan \delta}}{rhl \sin \theta} \quad (9)$$

4.3 平面滑动稳定性分析

随着采空区上部岩体弯曲变形得加剧, 图 10(b)中的 A_1 面由内倾逐渐变为水平甚至外倾, 即 $(\xi_1 - 0.5\xi_2) \leq 0$, 滑体失稳模式由楔形体破坏演变为沿弯曲后的 A_1 面滑动破坏, 其稳定系数:

$$F_s = \frac{hr \cos a_2 \tan \varphi_1 + c_1}{hr \sin a_2} \quad (10)$$

根据表 2, 4-4'剖面的岩层产状为 $306^\circ \angle 14^\circ$, 变形体与陡崖西北端临空面(产状 $306^\circ \angle 85^\circ$)构成顺层临空组合; 5-5'剖面处岩层产状为 $320^\circ \angle 15^\circ$, 变形体与该临空面为斜外倾临空组合, 变形体可能沿层面滑塌失稳。

根据鸡尾山滑坡滑塌后的现场调查表明, A_1 面由 $320^\circ \angle 21^\circ$ 偏转为 $345^\circ \sim 15^\circ \angle 21^\circ \sim 23^\circ$, 在危岩体西侧形成的张拉裂缝弱化了岩体的侧向约束, 并使岩层面倾向与陡崖走向的夹角减小, 甚至在中前部发展为斜外倾, 为山体滑动提供了动力条件, 最终克服了东北侧关键块体阻滑支撑后沿弯曲偏转后的 A_1 面顺层滑动。

5 结语

本文以武隆庆口滑坡为例,通过地质条件、采矿影响等分析,将弯曲-侧滑式滑坡变形分为弯曲变形阶段、楔形体破坏阶段、滑动阶段,分析了滑面形态变化,进一步研究了弯曲破坏条件,楔形体稳定系数的变化和平面破坏稳定系数,并提出了弯曲-侧滑式滑坡的形成条件,为该类滑坡的防治提供了科学依据。

参考文献(References):

- [1] 张倬元,王士天,王兰生,等.工程地质分析原理[M].3版.北京:地质出版社,2009. [ZHANG Zhuoyuan, WANG Shitian, WANG Lansheng, et al. Principles of engineering geological analysis [M]. 3rd ed. Beijing: Geological Publishing House, 2009. (in Chinese)]
- [2] 王恭先,徐峻龄,刘光带,等.滑坡学与滑坡防治技术[M].北京:中国铁道出版社,2004. [WANG Gongxian, XU Junling, LIU Guang, et al. Landslide science and landslide prevention technology [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2004. (in Chinese)]
- [3] 黄润秋,许强.中国典型灾难性滑坡[M].北京:科学出版社,2008. [HUANG Runqiu, XU Qiang. Catastrophic landslides in China [M]. Beijing: Science Press, 2008. (in Chinese)]
- [4] GEERTSEMA M, CLAGUE J J, SCHWAB J W, et al. An overview of recent large catastrophic landslides in northern British Columbia, Canada [J]. *Engineering Geology*, 2006, 83(1/2/3): 120-143.
- [5] GUTHRIE R H, EVANS S G, CATANE S G, et al. The 17 February 2006 rock slide-debris avalanche at Guinsaugon Philippines: A synthesis [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2009, 68(2): 201-213.
- [6] 程谦恭,张倬元,黄润秋.侧翼与滑床复合锁固切向层状岩质滑坡动力学机理与稳定性判据[J].*岩石力学与工程学报*, 2004, 23(11): 1874-1882. [CHENG Qiangong, ZHANG Zhuoyuan, HUANG Runqiu. Dynamics and stability criterion of oblique layered rocky landslide under lockup with combination of flank and bedding plane [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(11): 1874-1882. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 柴波,殷坤龙.顺向坡岩层倾向与坡向夹角对斜坡稳定性的影响[J].*岩石力学与工程学报*, 2009, 28(3): 628-634. [CHAI Bo, YIN Kunlong. Influence of intersection angle between trend of slope and strata on stability of bedding slope [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(3): 628-634. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 刘传正.重庆武隆羊角镇工程地质环境初步研究[J].*水文地质工程地质*, 2013, 40(2): 1-8. [LIU Chuanzheng. Primary research on the geological environment around Yangjiaotown in Wulong County, Chongqing, China [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2013, 40(2): 1-8. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 陈涛.重庆武隆庆口危岩形成机制及失稳模式探讨[J].*中国地质灾害与防治学报*, 2020, 31(3): 50-57. [CHEN Tao. Discussion on formation mechanism and instability mode of Qingkou dangerous rock in Wulong District, Chongqing City [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2020, 31(3): 50-57. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 王磊,李滨,高杨,等.西南山区大型危岩体灾害地震稳定性数值模拟分析[J].*华北科技学院学报*, 2019, 16(5): 51-56. [WANG Lei, LI Bin, GAO Yang, et al. Stability analysis of largeperilous rock in southwest mountains under earthquake action by numerical simulation [J]. *Journal of North China Institute of Science and Technology*, 2019, 16(5): 51-56. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 刘传正.我国采矿诱发的山体开裂崩滑地质灾害,工程地质环境[M].长春:长春出版社,1999. [LIU Chuanzheng. Geological hazards of mountain cracking, collapse and sliding induced by mining in China, Engineering geological environment [M]. Changchun: Changchun Publishing House, 1999. (in Chinese)]
- [12] 刘传正.重庆武隆鸡尾山危岩体形成与崩塌成因分析[J].*工程地质学报*, 2010, 18(3): 297-304. [LIU Chuanzheng. Mechanism analysis on the jiweishan rockfall disaster happened in Wulong, Chongqing, June 5, 2009 [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2010, 18(3): 297-304. (in Chinese with English abstract)]
- [13] XU Qiang, FAN Xuanmei, HUANG Runqiu, et al. A catastrophic rockslide-debris flow in Wulong, Chongqing, China in 2009: background, characterization, and causes [J]. *Landslides*, 2010, 7(1): 75-87.
- [14] 殷跃平.斜倾厚层山体滑坡视向滑动机制研究——以重庆武隆鸡尾山滑坡为例[J].*岩石力学与工程学报*, 2010, 29(2): 217-226. [YIN Yueping. Mechanism of apparent dip slide of inclined bedding rockslide: A case study of Jiweishan rockslide in Wulong, Chongqing [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(2): 217-226. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 蒋先念,张晨阳.三峡库区典型顺斜向岩质滑坡变形破坏特征及失稳机制分析[J].*中国地质灾害与防治学报*, 2021, 32(2): 36-42. [JIANG Xiannian, ZHANG Chenyang. Deformation characteristics and failure mechanism of large-scale obliquely dip rock landslide in the Three Gorges Reservoir Region [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2021, 32(2): 36-42. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 陈全明,方琼,罗冠枝,等.缓倾顺层岩质斜坡破坏条件和变形机制分析——以常吉高速公路朱雀洞滑坡为例[J].*中国地质灾害与防治学报*, 2020, 31(2): 18-23. [CHEN Quanming, FANG Qiong, LUO Guanzhi, et al. Failure conditions and mechanism of the gentle dip bedding slopes: A case study of the Zhuquedong Landslide [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2020, 31(2): 18-23. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 王佳运,王根龙,石小亚.陕西山阳特大型滑坡视向滑移-溃屈破坏力学分析[J].*中国地质*, 2019, 46(2): 381-388. [WANG Jiayun, WANG Genlong, SHI Xiaoya. Mechanical analysis of apparent dip creep-buckling failure of Shanyang Super large-scale rockslide in Shaanxi Province [J]. *Geology in China*, 2019, 46(2): 381-388. (in Chinese with English abstract)]