

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

殷跃平

(中国地质调查局, 北京 100045)

摘要: 以武隆鸡尾山滑坡为例, 通过地质条件、采矿扰动等分析, 运用FLAC^{3D}模拟, 研究在重力、岩溶、底部采矿活动等因素下山体的变形破坏特征, 认为斜倾厚层山体滑坡视向滑动应具备5个条件: (1) 层状块裂结构, 滑坡体被多组不连续面切割, 呈积木块体, 离散性好; (2) 山体倾向阻挡, 受下部稳定山体阻挡, 迫使滑坡体沿真倾角方向顺层滑动偏转为视倾角方向滑动; (3) 临空视向剪出, 滑坡体视倾角方向斜坡被河流、沟谷深切, 为滑坡体提供了转向滑动的临空面; (4) 驱动块体下滑, 山体后部的积木块体沿软弱层面长期蠕动, 抗剪强度由峰值逐渐趋向残余值, 下滑力逐渐增加; (5) 关键块体阻滑, 下滑驱动块体沿视倾角方向滑动前缘存在一相对稳定的块体, 随下滑推力增大和内部强度降低, 沿损伤带瞬时脆性剪断, 形成整体滑动, 因此, 对这类斜倾层状结构的山体地质灾害的监测和防治必须以前缘阻滑的关键块体为重点。在此类斜倾厚层山体中, 矿层大都位于滑带100 m之下, 因此, 采矿活动主要通过应力环境的调整和层状块裂岩体的差异沉降2种方式对滑坡构成扰动。

关键词: 边坡工程; 斜倾山体; 视向滑动; 关键块体; 层状滑坡; 碎屑流

中图分类号: P 642.22

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2010)02 - 0217 - 10

MECHANISM OF APPARENT DIP SLIDE OF INCLINED BEDDING ROCKSLIDE—A CASE STUDY OF JIWEISHAN ROCKSLIDE IN WULONG, CHONGQING

YIN Yueping

(China Geologic Survey, Beijing 100045, China)

Abstract: Taking Jiweishan rockslide in Wulong for example, based on analyzing of geological conditions and mining exploitation, the new failure pattern of inclined thick bedding slope under gravity, karst and mining processing is simulated with the fast Lagrangian analysis of continua in 3-dimension(FLAC^{3D}). The results show that the apparent dip slide of inclined thick bedding slope has 5 principal characters: (1) Bedding block-broken body, rock mass is split into obvious distinct blocks with several groups of joints, similar to toy bricks; (2) Incline rock mass support, the sliding rock mass along dip angle is supported by inclined stable rock mass, then sliding direction is changed from dip angle to apparent dip angle; (3) Apparent dip exiting, the valley and cliff provide a free space in the apparent dip exiting; (4) Driving-rock mass sliding, the toy brick rock mass is long-term creeping with the shear strength decreasing from peak to residual value and the sliding force increasing; (5) Key-block resisting, the pressure on the key-block is increasing by driving-rock mass and inner strength is decreasing due to karstification; the key block is suddenly broken with shear rupture that triggers rockslide. The mining activity of iron-layer 100 m underneath sliding belt induces stress field change and different subsidences between bedding blocks.

Key words: slope engineering; inclined bedding slope; apparent dip slide; key block; bedding rockslide; fragment flow

收稿日期: 2009 - 10 - 27; **修回日期:** 2009 - 12 - 10

作者简介: 殷跃平(1960 -), 男, 1990 年于中国地质科学院研究生部获工程地质专业博士学位, 现任副总工程师、研究员、国际滑坡协会副主席, 主要从事地质灾害和防治等方面的研究工作。E-mail: yyueping@mail.cgs.gov.cn

1 引言

2009年6月5日,重庆武隆鸡尾山发生大型滑坡——碎屑流,长2 150 m,体积 $700 \times 10^4 \text{ m}^3$,造成74人死亡,8人受伤的特大灾难,震惊全国^[1]。这类厚层灰岩构成的斜倾山体在我国重庆、湖北、贵州、云南、四川等西南灰岩山区分布较广^[2]。1985年长江三峡秭归新滩滑坡发生以来,刘雄^[3]对这类山体滑坡进行了研究,认为失稳模式具有复合性,通常上部基岩发生侧向崩落,堆积于次级斜坡上,在崩塌不断堆积加载和暴雨等因素作用下,转化为堆积层滑坡体。1994年,调查发现鸡尾山山体存在地质灾害隐患并采取了监测预警措施;2005年,当地政府和专业部门果断地搬迁了位于危岩体下方200 m范围内的铁矿乡场镇;滑坡发生前数天,临滑征兆明显,又采取了断路设立警戒线阻止客车和路人从危岩下路过等措施,避免了约1 000人重大伤亡。但是,很难预测判定出会发生如此巨大规模的基岩顺层滑动,并转化为高速远程碎屑流。与原调查判定相比,出现了4个偏差:(1)在失稳模式上,原定为崩塌,实际为崩滑,并转化成远程碎屑流;(2)在方向上,原定为向东,实际为北东至北西,相差 $70^\circ \sim 90^\circ$;(3)在体积上,原定危岩体体积为 $20 \times 10^4 \text{ m}^3$,实际崩滑堆积体体积达 $700 \times 10^4 \text{ m}^3$,相差35倍;(4)在距离上,原定危岩体威胁范围100 m,实际滑动距离达1 500 m,相差15倍(见表1)。

表1 鸡尾山山体地质灾害预测与实际对比

Table 1 Comparison of the real state with forecast of geological hazard of Jiweishan rockslide

内容	失稳模式	成灾范围/m	成灾方向	滑坡体积/(10^4 m^3)
预测	崩塌	100	向东	20
实际	滑坡	1 500	向北	700

不少学者从关键块体的角度对厚层状岩体的稳定性评价进行过研究,例如E. Hoek和J. Bray^[4]在研究厚层板状岩体倾倒变形破坏时,提出了“塞缝石”的概念,强调关键块体对整个岩体稳定的控制作用;石根华^[5]采用集合理论和岩体结构相结合的方法,提出了岩体稳定的关键块体的数学判据;殷跃平等^[6]在长江三峡链子崖危岩体预应力锚固工程

设计中,提出了以关键块体为加固重点的思路与方法。但是,这些研究大都将关键块体作为分离的楔形体进行研究,实际上,鸡尾山滑坡体存在脆性瞬时剪断的视向滑动破坏特征。因此,本文以鸡尾山滑坡为例,通过地质、采矿分析,采用FLAC^{3D}模拟,研究斜倾厚层山体的视向滑动——高速远程碎屑流失稳模式,并与三峡链子崖危岩体等进行类比分析,提出这类层状结构的山体地质灾害是防治必须关注的重点。

2 地质条件及采矿活动

斜倾厚层山体指滑移面介于顺向和逆向之间,且其倾角缓于地形坡度的斜切向坡体(见图1)。

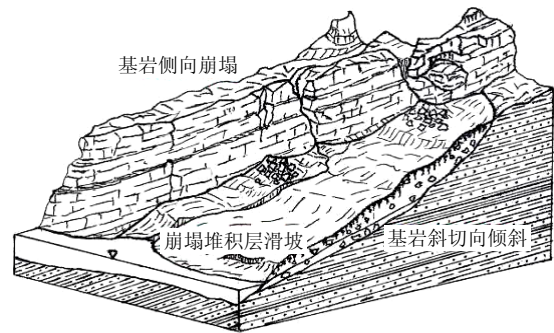


图1 典型斜倾层状山体斜坡示意图

Fig.1 Schematic diagram of apparent inclined bedding slope

斜倾厚层山体最初顺岩层真倾角方向倾向发生变形蠕动,因被位于前缘的稳定基岩阻挡而被迫沿临空的视倾角方向偏转滑动(见图2)。具有典型的上硬下软、上陡下缓的“二元结构”特征。上部硬岩厚度达100 m以上,下部软层厚度一般小于15 m。在地质上,斜坡主要位于扬子地台晚古生代盖层形成的北东向褶皱轴两翼,地层倾角 $15^\circ \sim 35^\circ$ 。殷跃平^[7]对长江三峡链子崖危岩体进行了研究,指出常常被称为“煤系地层”的山体具有如下特征:上覆硬岩岩性为巨厚层的灰岩,在厚层灰岩中,分布有4~6层碳质或泥质页岩,厚度一般为10~30 cm,形成了软弱不连续结构面,厚层岩体中还普遍分布有2组近于直交的大型陡倾节理,厚层灰岩往往形成体积达几立方米至上万立方米的积木状六面块体;下伏软岩为含煤、铁或铝土矿的页岩地层,自数百年来,沿江和沟谷两岸一直在此软层中开采矿产,形成采空区(见图3)。

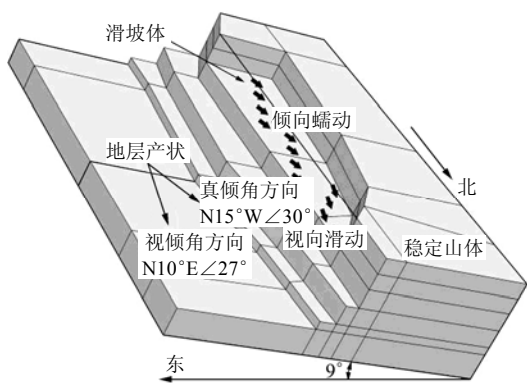


图 2 斜倾厚层山体视向滑动概化图

Fig.2 Concept model of apparent sliding of oblique inclined bedding rockmass



图 3 三峡链子崖斜倾厚层山体

Fig.3 Apparent inclined bedding slope of Lianziya in the Three Gorges

下部为二叠系下统梁山组(P₁l): 为水云母黏土岩, 含赤铁矿。厚度 10~14 m, 矿石厚约 2 m。地形上位于崩滑区陡崖坡脚斜坡部位。

基座为志留系上统韩家店组(S₃hj): 为灰绿色粉砂质泥页岩。

陡崖高差 50~150 m, 为北东低南西高单面山斜坡, 地形坡度为 20°~40°, 高差 450 m。岩层产状为 N75°E/345°∠21°~35°, 沿岩层层面分布有多层软弱夹层。山体存在 2 组优势节理: (1) 与岩层走向近于平行的纵向陡倾节理(产状 N85°W/185°∠75°), 裂面平整, 间距 1~3 m, 延伸 10~20 m, 多呈闭合状; (2) 与岩层走向近于直交的横向拉张陡倾节理(产状 N13°W/77°∠80°), 间距 0.8~2.5 m, 延伸 3~5 m, 现场调查发现, 裂缝微张至闭合状, 裂面平整。受沿层面软弱夹层及二组构造节理的组合将山体切割为类似于堆砌在倾斜软垫上的积木块体。



图 5 武隆鸡尾山斜倾岩层(滑后残留)

Fig.5 Apparent inclined bedding slope of the Jiweishan hill (after sliding)

武隆鸡尾山山体呈硬、软岩层组成上部陡峻、下部宽缓特征(见图4, 5)。

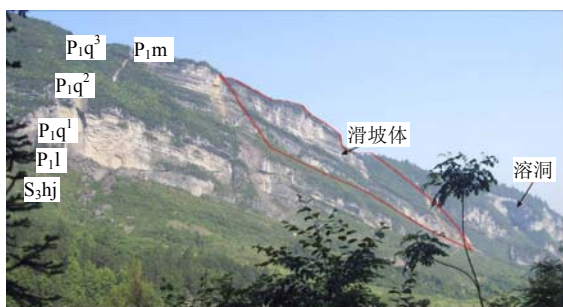


图 4 武隆鸡尾山山体地层结构(滑前 5 h 照片)

Fig.4 Overview of formation of the Jiweishan hill in Wulong (5 hours before sliding)

上部为二叠系下统茅口组(P₁m): 为灰色厚层状微晶石灰岩, 厚约 50 m。

中部为二叠系下统栖霞组(P₁q): 为深灰色中厚层状含沥青质灰岩, 厚 90~130 m。分为上、中、下 3 段(P₁q³, P₁q², P₁q¹)。被含炭质和沥青质页岩软弱夹层分离, 滑坡体沿软弱夹层滑动。

山体中岩溶发育, 在上部茅口组(P₁m)中分布有直径达数十米的溶洞、串珠状落水洞和岩溶缝隙(见图 5), 在西侧壁下游侧的壁面还附着大量褐黄色的次生夹泥, 表明崩滑体失稳之前构成崩滑体后缘和西缘边界的裂缝已张开并长期暴露于地表, 地下水活动强烈。

调查表明, 鸡尾山山体自 20 世纪 20 年代以来就一直有采矿活动, 开采位于陡崖下部二叠系下统梁山组(P₁l)的含铁矿层。铁矿层厚 0.96~1.35 m, 平均厚 1.12 m。采矿在坡体下部一定范围之内形成了面积达 5×10⁴ m² 以上的采空区, 对山体的变形和应力调整具有一定的影响。

3 鸡尾山滑坡形成过程分析

3.1 滑坡分离界面特征

鸡尾山滑坡体北部前缘和东部侧壁两面临空，西侧和南侧被 2 组大型裂缝切割分离，下伏软弱结构面(见图 6)。



图 6 武隆鸡尾山滑坡体结构

Fig.6 Geologic model of Jiweishan rockslide structure, Wulong

T0 裂缝: 裂缝长 152 m, 深 60~70 m, 构成滑坡体南侧分离面。裂缝总体走向为东西向, 追踪原有构造结构面平直展布, 沿茅口组灰岩和栖霞组灰岩形成 2 级台阶状, 长期牵引拉张作用明显。裂缝影响带宽约 2 m, 岩溶发育, 形成 3 处溶蚀裂缝带, 反映该分离面形成年代在万年之久。

T1 裂缝: 裂缝长 530 m, 深 60 m, 构成滑坡体西侧分离面。裂缝总体走向为 SN 向, 追踪原有构造结构面平直展布。裂缝影响带宽约 2 m, 岩溶发育, 分布有带状展布的小型落水洞和溶蚀空洞。滑坡发生后, 由于卸荷牵引作用, 沿裂缝形成串珠状下沉带, 下沉错距达 0.5~1.5 m。裂缝表面较为平直, 由于受滑坡体的下滑摩擦作用, 形成数十条长达 50~100 m 的近乎水平大型擦痕, 并出现反阶步。裂缝下部分布有由滑坡铲刮形成的大型凹槽。

R2 软层: 构成滑坡体底部滑带。由栖霞灰岩上、中段之间的含炭质和沥青质页层间夹层长期蠕变形成。滑带厚约 30~50 cm, 呈片理化, 并被方解石细脉充填, 说明具多期蠕滑和错动特征。滑带含炭质和沥青质均较高, 亮黑色, 残痕和镜面特征明显。

3.2 滑体结构特征

顺倾向层状岩体边坡中大型滑坡通常具有受控于坡体层间软弱层夹层的“滑移-剪断”模式, 黄润秋^[8]将这种斜坡分为上部顺层“主动传力区”(I 区)和坡脚“被动挤压区”(II 区)。I 区坡体在自重下滑力驱动下, 沿坡体内的层间软弱夹层产生顺层滑移, 坡脚的 II 区由于岩层不出露, 故产生被动挤压,

最终被剪断而导致滑坡发生。鸡尾山滑坡体也具有类似特征, 但其滑动方向具斜倾性, 即沿视倾角方向滑动。滑坡体形如组合的“棱型体”, SN 最大长度 720 m, 东西最大宽 152 m, 厚达 60 m, 体积约 $500 \times 10^4 \text{ m}^3$, 同样, 可划分为中后部“长方体”和前部“三棱柱体”两部分, 在滑动特征上, 分别形成了下滑驱动块体和阻滑关键块体(见图 6):

(1) 下滑驱动块体

从平面上看, 驱动块体为准四边形状, EW 长约 480 m, 后缘 EW 宽最大 152 m, 前缘 EW 宽 130 m, 平均宽 141 m, 厚度 60 m, 体积 $406.1 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

关键块体由厚层块状的茅口灰岩和栖霞灰岩组成, 东侧和北侧两面临空, 南侧和西侧分别被 T0 和 T1 缝完全切割, 底部被 R2 软层分离, 成为驱动滑坡体的整体滑动的主动下滑块体。

(2) 阻滑关键块体

从平面上看, 关键块体为三角形, SN 长约 240 m, EW 底宽 130 m, 厚度 60 m, 体积为 $93.6 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

关键块体由厚层块状的茅口灰岩和栖霞灰岩组成, 东北侧为临空面, 底部被 R2 软层分离。T1 裂缝向北延伸后灭失, 关键块体与基岩山体未被完全切割分离, 但 T1 裂缝端部向东转折, 形成了走向 N21°E, 长达 273 m 的强烈溶蚀带。溶蚀带垂直岩溶管道、溶蚀裂缝非常发育。管道直径 1~3 m, 被溶蚀残积土褐黄色土充填。溶蚀孔洞水平累积长度达 165 m, 即水平溶蚀孔洞率达 60%以上(见图 7)。



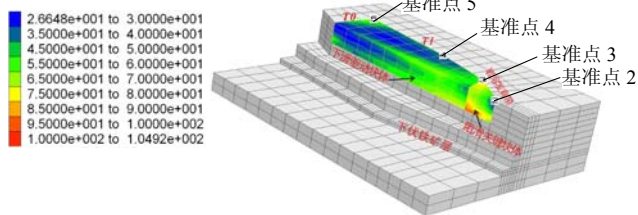
图 7 前缘关键块体侧壁岩溶发育带及脆性剪断面

Fig.7 Karst belt and brittle rupture surface at the side of front key block

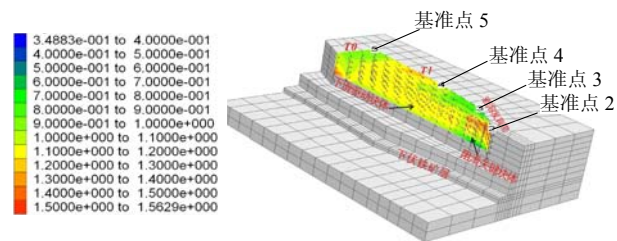
关键块体主要通过 2 种方式对后部下滑驱动块体进行阻挡: (1) 溶蚀带存留的约 40%未被完全溶蚀的脆性岩体提供的抗剪断力, 水平累积长度达 108 m; (2) 岩体自重沿下部底滑面形成的抗滑力。

3.3 滑坡变形破坏模拟模型

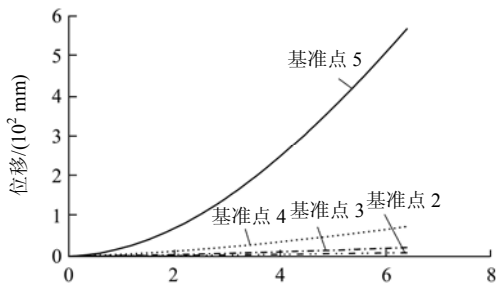
有限元、离散元、有限差等数值分析方法已成为模拟斜坡变形破坏的重要工具，本文将采用 Itasca 研发的 $FLAC^{3D}$ 软件对滑坡变形破坏过程进行模拟^[9, 10]，包括自然演化(岩溶和长期蠕变)、下伏矿层采空扰动、关键块体瞬时剪断失稳和大变形高速滑动 4 个阶段，并沿滑坡体西部边缘设立了 2, 3, 4, 5 四个基准点以分析不同部位的位移特征，图 8~10 为危岩体 $FLAC^{3D}$ 模拟结果。



(a) 滑坡剪切应变增量云图



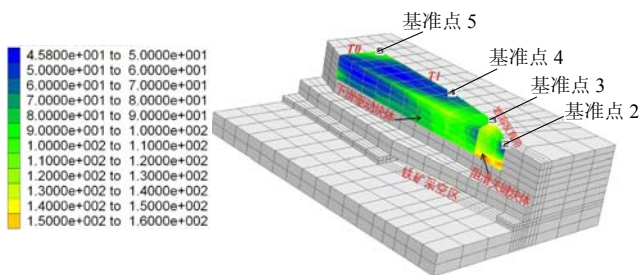
(b) 滑坡位移速度云图(单位: $mm \cdot s^{-1}$)及位移矢量



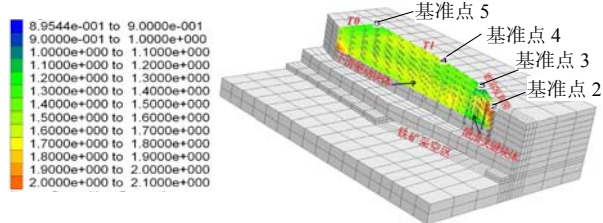
(c) 滑坡基准点 2~5 位移曲线

图 8 鸡尾山滑坡变形破坏 $FLAC^{3D}$ 模拟结果——自然重力状态

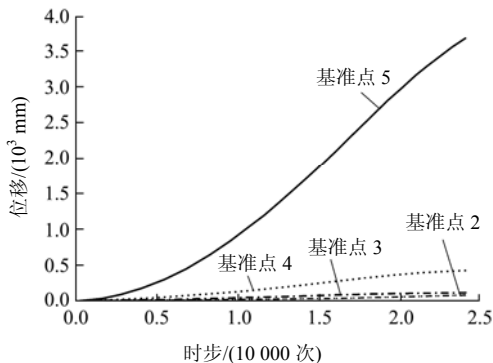
Fig.8 Stimulation results of Jiweishan rockslide shear strain increment and velocity under nature condition



(a) 滑坡剪切应变增量云图



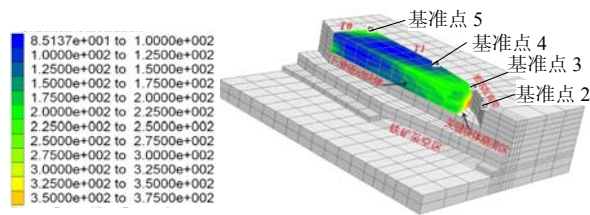
(b) 滑坡位移速度云图(单位: $mm \cdot s^{-1}$)及位移矢量



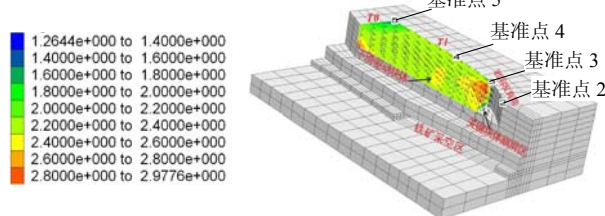
(c) 滑坡基准点 2~5 位移曲线

图 9 鸡尾山滑坡变形破坏 $FLAC^{3D}$ 模拟结果——下部采空状态

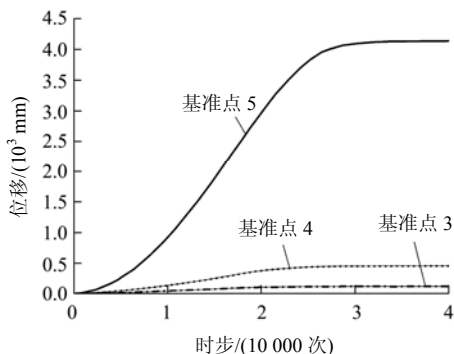
Fig.9 Stimulation results of Jiweishan rockslide shear strain increment and velocity under mining condition



(a) 滑坡剪切应变增量云图



(b) 滑坡位移速度云图(单位: $mm \cdot s^{-1}$)及位移矢量



(c) 滑坡基准点 3~5 位移曲线

图 10 鸡尾山滑坡变形破坏 $FLAC^{3D}$ 模拟结果——关键块体瞬时失稳状态

Fig.10 Stimulation results of Jiweishan rockslide shear strain increment and velocity under key block sudden failure condition

采用了 Mohr-Coulomb 准则。鸡尾山滑坡未开展专门岩体物理力学试验，在此采用了类比和反演分析法，参考并引用了与其工程地质条件非常相似的三峡链子崖危岩体^[7]。其中，分为滑坡下滑驱动块体、阻滑关键块体、边界分离面(包括滑面)和滑床基岩 4 类材料组，下伏采空区按 Null 模型处理(见表 2，3)。

表 2 鸡尾山山体岩石物理力学参数建议表
Table 2 Physico-mechanical parameters of rocks of Jiweishan rockmass

序号	岩体类型	容重 γ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	内摩擦角 φ ($^{\circ}$)	黏聚力 c /kPa	泊松比 μ	剪切模量/MPa	体积模量/MPa
1	茅口灰岩	26	25~30	200~500	0.24	100	200
2	栖霞灰岩	26	25~30	200~500	0.24	100	200
3	滑坡体	26	20~25	100~300	0.24	100	200
4	关键块体	20	20~25	100	0.24	100	200
5	矿层	15	22	45	0.15	50	200

表 3 鸡尾山山体滑坡边界软层力学参数建议表
Table 3 Mechanical parameters soft layers of Jiweishan rockmass

序号	软层类型	内摩擦角 φ ($^{\circ}$)	黏聚力 c /kPa	法向刚度 E ($\text{MPa} \cdot \text{m}^{-1}$)	切向刚度 G ($\text{MPa} \cdot \text{m}^{-1}$)
1	T0 裂缝	8	0	100	10
2	T1 裂缝	8	20	1 500	10
3	岩溶发育带	20	50	2 500	100
4	底滑面	20	200	2 000	50

3.4 自然状态状况下FLAC^{3D}模拟

图 8 反映了山体在重力和岩溶作用早期，主要沿 R2 软层形成的底滑面向岩层真倾角方向(N15°W \angle 21°~35°)蠕滑变形。根据链子崖危岩体的研究，类似软层的峰值抗剪强度内摩擦角 $\varphi = 30.1^{\circ}$ ，黏聚力 $c = 280 \text{ kPa}$ 。滑坡体最大剪切应变增量集中在前缘关键块体底滑面，数值达 100~105(见图 8(a))；在前缘关键块体上部和后缘近 T0 裂缝的滑体底部出现明显的速度高值区，速度云图最大值为 1.50~1.56 mm/s(见图 8(b))；滑坡位移场总体由沿 N15°W 的真倾角方向偏转为 NNE~NE 向；分别位于关键块体和后缘下滑块体前、中、后的 2, 3, 4, 5 四个基准点对应的位移量分别为 10, 25, 100 和 600 mm，其中，下滑块体后缘的位移量是关键块体的 60 倍，显示出位移量有由前向后逐渐增加，后部块体下滑驱动，前缘关键块体阻滑的特点(见图 8(c))。

3.5 陡崖下采空状况下FLAC^{3D}模拟

图 9 反映了山体陡崖下因长期开采铁矿层，形成采空区的变形特征。根据 FLAC^{3D} 软件的特点，对底滑面 150 m 之下的采空区采用了 Null 模型概化。滑坡体最大剪切应变增量仍集中在前缘关键块体底滑面，但数值明显增高，达 150~160(见图 9(a))，比自然状态状况下增加了 150%；仍在前缘关键块体上部和后缘近 T0 裂缝的滑体底部出现明显的速度高值区，速度云图最大值已达 2.0~2.1 mm/s(见图 9(b))；滑坡位移场总体为 NNE~NE 向，但是，与自然状态状况下相比较，垂向(向下)的位移分量显著增加，特别是在关键块体前缘，位移矢量几乎垂直向下，有崩落的特征；分别位于关键块体和后缘下滑块体前、中、后的 2, 3, 4, 5 四个基准点对应的位移量分别为 50, 100, 450 和 3 600 mm，其中，下滑块体后缘的位移量是关键块体的 72 倍，同样显示出位移量有由前向后逐渐增加，后部块体下滑驱动，前缘关键块体阻滑的特点，但是，与自然状态状况相比，后缘的下滑位移量由 600 mm 增大到了 3 600 mm，增加了 3 000 mm，但是，前缘关键块体的位移仍然不显著，说明下滑力不断增加下，关键块体内部的应变能逐渐增大(见图 9(c))。

3.6 前缘关键块体瞬时失稳状况下FLAC^{3D}模拟

图 10 反映因受后部驱动力的作用，前缘关键块体受沿岩溶发育带瞬时脆性剪断，后部 $480 \times 10^4 \text{ m}^3$ 下滑块体变形失稳特征。由于关键块体突然发生崩滑，后缘滑坡体前缘临空，致使沿 T1 裂缝边界前缘一带形成最大剪切应变增量集中，数值明显增高，达 350~375(见图 10(a))，比自然状态状况下增加了 350%；在下滑块体前缘部位出现明显的速度高值区，速度云图最大值已达 2.80~2.98 mm/s(见图 10(b))；滑坡位移场总体以 NNE 向为主，NE 向不明显，同时，与关键块体失稳前相比较，垂向(向下)的位移不明显，位移矢量主要沿滑动面方向整体滑动为主；分别位于后缘下滑块体前、中、后的 3, 4, 5 三个基准点对应的位移量分别为 200, 480 和 4 500 mm，其中，下滑块体后缘的位移量是前缘的 25 倍，同样显示出位移量有由前向后逐渐增加，后部块体下滑驱动前缘块体的特点(见图 10(c))。现场调查表明，滑坡发生前数天，关键块体内部已出现明显压裂鼓胀和数千立方米的局部崩落，与模拟结果非常吻合(见图 11)。

3.7 大变形失稳状况下FLAC^{3D}模拟

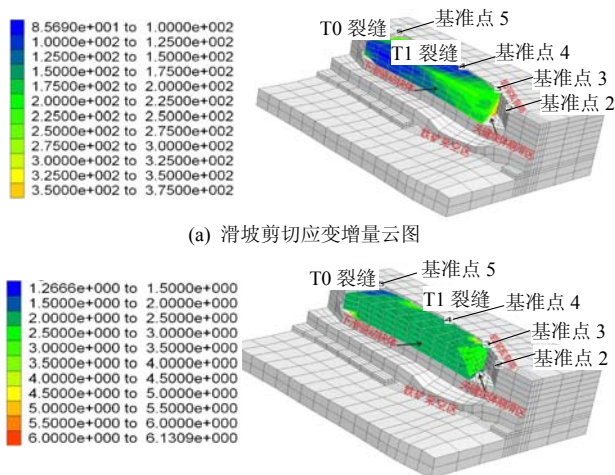
反映前缘关键块体瞬时脆性剪断突然发生崩滑



图 11 武隆鸡尾山滑坡阻滑关键块体前缘鼓胀崩落(大滑动前 5 h)

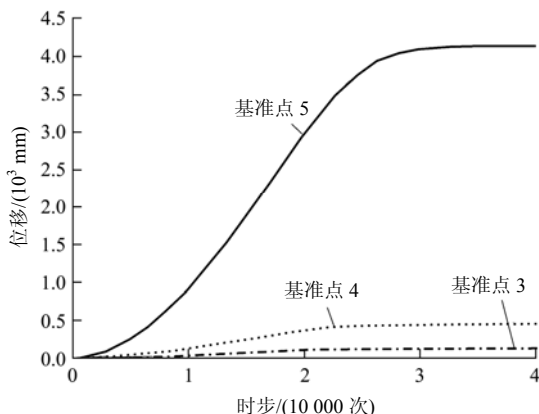
Fig.11 Front bulge and fall of key block of Jiweishan rockslide (5 hours before sliding)

后, 后部 $480 \times 10^4 \text{ m}^3$ 下滑块体快速下滑, 牵引导致前缘底板发生沉陷垮塌, 而导致了山体转变为高位崩滑体。后缘滑坡体前缘临空条件良好, 迅速解体, 剪切应变增量变化不明显, 仍为 350~375(见图 12(a)); 速度云图发生明显变化, 未形成明显的速度高值区



(a) 滑坡剪切应变增量云图

(b) 滑坡位移速度云图(单位: $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)及位移矢量



(c) 滑坡基准点 3~5 位移曲线

图 12 鸡尾山滑坡变形破坏 FLAC^{3D} 模拟结果——大变形滑动状态

Fig.12 Stimulation results of Jiweishan rockslide shear strain increment and velocity under large sliding condition

(见图12(b)); 滑坡位移场总体以NNE向为主, 垂向(向下)的位移明显, 位移矢量主要沿滑动面向下整体滑动。现场调查表明, 关键块体底滑面下部至矿层采空区之间岩层发生了明显的沉陷垮塌, 与模拟结果非常吻合(见图6)。

3.8 侧向阻滑下滑坡平面稳定系数(FOS)分析

上述 4 种工况下, 滑坡变形破坏模拟结果表明, 滑坡沿 T1 裂缝滑移变形, 以及沿关键块体边缘岩溶发育带的剪断现象非常明显。侧向摩阻作用对这种斜倾厚层滑坡的变形破坏起到非常重要的作用, 这与常见滑坡主要由底滑面起控制作用明显不同, 为了进一步研究这种侧向阻滑特征, 即假定底滑面对滑坡整体的控制作用相同, 采用 FLAC^{3D} 的强度折减方法, 将 3D 问题简化为平面问题, 因此, 可分析侧向摩阻条件下的沿 T1 裂缝和岩溶发育带的斜面稳定系数(FOS)。显然, 作用在该面上的重力加速度应按岩层倾角进行分解, 若取岩层倾角为 30° , 因此, 作用在 T1 裂缝和岩溶发育带上的重力加速度分量 $g_h = \sin 30^\circ g = 0.5 g$ 。

按照 T. Matsui 等^[11~13]通过数值模拟方法将斜坡的失稳定义为: 通过不断降低 c, ϕ 值, 使斜坡体剪切应变由前缘坡脚贯通到后缘坡顶, 对应的折减系数即为斜坡的稳定系数。FLAC^{3D} 用户手册^[10]认为“强度折减技术”是通过逐步降低材料的抗剪强度达到极限平衡状态安全系数计算的典型应用, 它采用了“极限平衡状态”这一术语, 使强度折减法与常规的滑坡稳定性计算方法更具可比性。通过 FLAC^{3D} 上 SOLVE 进行求解, 并对侧向阻滑面的 c, ϕ 值按如下公式不断折减: (1) 折减的摩擦角 ϕ_r : $\phi_r = \arctan(\tan \phi / FOS)$; (2) 折减的黏聚力 c_r : $c_r = c / FOS$ 。

4 种工况侧向稳定系数反映了 T1 裂缝和关键块体对滑坡体侧向阻滑规律, 特别是关键块体瞬时剪断时, 滑坡体滑动方向发生向 NE 方向偏转, T1 裂缝提供的阻力几乎为 0(见图 13, 表 4)。值得指出的是, 由于忽略了底滑面阻滑作用(其重力加速度与滑面交角为 60° , 法向加速度 $g_v = \sin 60^\circ g = 0.866 g$, 因此, 在模拟分析时, 对滑带的抗剪强度取值仅依据反演结果, 所得稳定系数值不代表滑坡体实际的稳定系数。

4 滑坡高速远程滑动特征

滑坡堆积区的平面形态为斜长的喇叭形, 顺沟

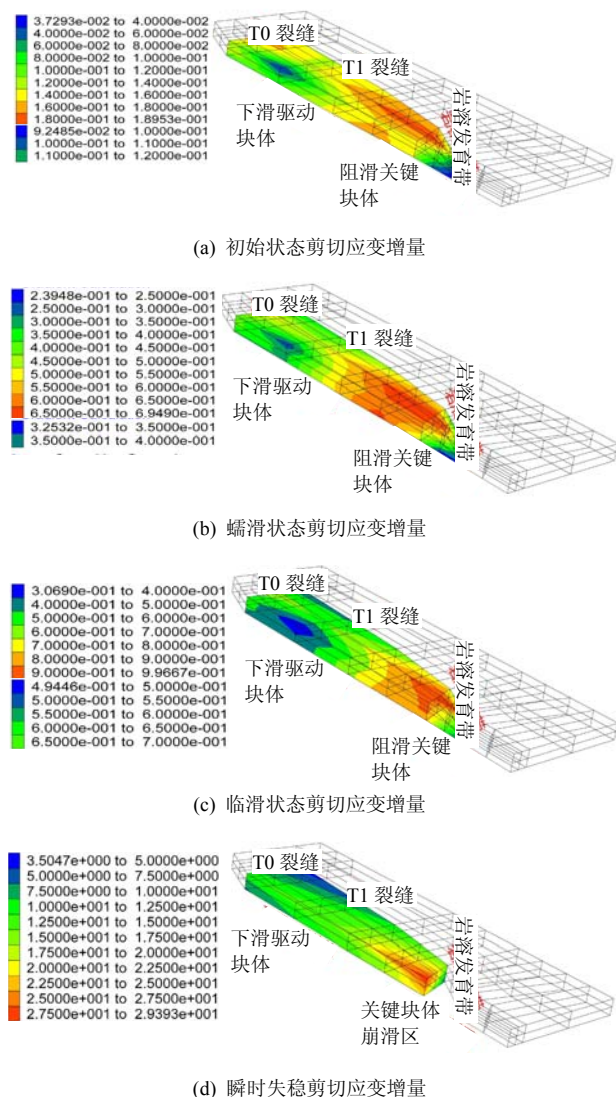


图 13 鸡尾山滑坡侧向阻滑平面模拟剪切应变增量结果

Fig.13 Stimulation results of Jiweishan rockslide shear strain increment under 2D sidesliding condition

表 4 T1 缝侧向阻滑稳定系数计算结果(不考虑底滑面阻滑)

Table 4 Factors of stability resisted by T1 interface and key-block without considering to sliding layer plane

工况	滑带抗剪强度		稳定系数	备注
	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa		
初始状态	下滑块体	35	150	1.71 峰值强度
	关键块体	35	200	
蠕滑状态	下滑块体	23	100	1.13 2/3峰值强度
	关键块体	23	140	
临滑状态	下滑块体	23	100	0.96 关键块体破坏, 约1/3峰值强度
	关键块体	13	70	
瞬时失稳	下滑块体	23	100	0.15 关键块体为Null 模型
	关键块体	0	0	

谷长约 2 170 m, 横沟谷最大宽度 470 m, 面积约 $46.8 \times 10^4 \text{ m}^2$, 总体积约 $700 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。堆积区可划分滑坡主堆积区、碎屑流堆积区、滑坡铲刮区及碎块石散落区(见图 14, 15)。

主堆积区位于滑源区前缘的 NE 侧, 为滑体沿 NE 方向高位、高速滑动后的堆积物。高速滑动的滑体物质在越过谷底后, 冲向对岸, 因受到对岸陡峻斜坡的阻挡, 转向沿沟谷向下游运动, 在沟道里形成平均厚 30~40 m, 最大厚度 60 m, 长度约 800 m, 最大宽度约 470 m 主堆积区。主要由 P_{1q} 和 P_{1m} 灰岩大块石构成。最大块石长轴方向长度可达 30 m, 体积超过 $1.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。在主堆积区的大块石中, 岩溶较为发育, 随处可见被溶蚀的岩溶壁面、岩溶孔洞, 表明滑源区岩体裂隙发育、地下水活动强烈。

高速运动的滑体物质在到达对岸山体后, 与对岸山体形成强烈的碰撞, 滑体物质进一步解体破碎, 强烈冲击和铲刮对岸山体, 形成气浪摧覆植被。

滑动块体碰撞解体后, 转化为碎屑流以近似于流体的形式继续高速运动。随着能量的耗散, 大块石在主堆积区逐渐停积, 粒径相对较小的滑体物质在强大的惯性力作用下继续顺沟谷呈流体状向前运动, 形成碎屑流堆积区, 具有显著的流线构造。

崩滑体在突然启动和高速运动的过程中, 将其剪出口下游侧相对突出的山包铲刮带走, 并在相应位置留下了明显的痕迹。同时, 还将剪出口前缘坡下一条 NE 走向的山脊也一起铲刮携带进入滑坡堆积区。由于沿途铲刮和岩体散体扩容作用, 实际堆积体方量应大于滑源区崩滑岩体的方量。

撒落区位于滑源区的正东侧陡崖下, 为崩滑体在突然启动并高速滑动过程中, 向右侧(东侧)陡崖下撒落了一定量的碎块石和岩屑。主要堆积物为零星孤立大块石和遍布的碎块石和岩屑, 总体堆积厚度较薄。受高速滑动过程强大气流的影响, 撒落区植被被吹倒呈定向排列。

5 讨论

通过上述分析, 鸡尾山巨厚层状灰岩被 2 组陡倾结构面及顺层发育的炭质软弱夹层切割成积木块状; 斜倾层状岩体沿 NW 真倾角方向顺向蠕动, 形成下滑驱动块体, 下滑力逐渐增加; 由于前缘稳定山体阻挡, 致使驱动块体下滑方向偏转为 NNE 视倾角方向, 直接挤压前部(北侧)起支撑作用的岩体,

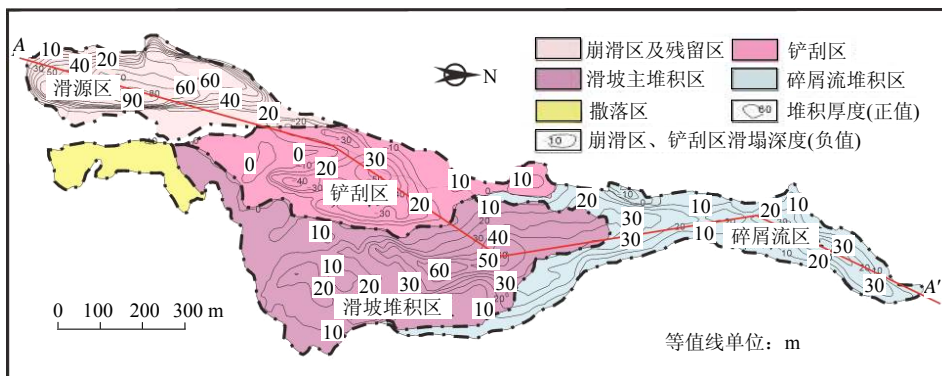


图 14 鸡尾山滑坡——碎屑流平面分布及堆积等厚图

Fig.14 Map of layout and thickness contour of Jiweishan rockslide—fragment flow

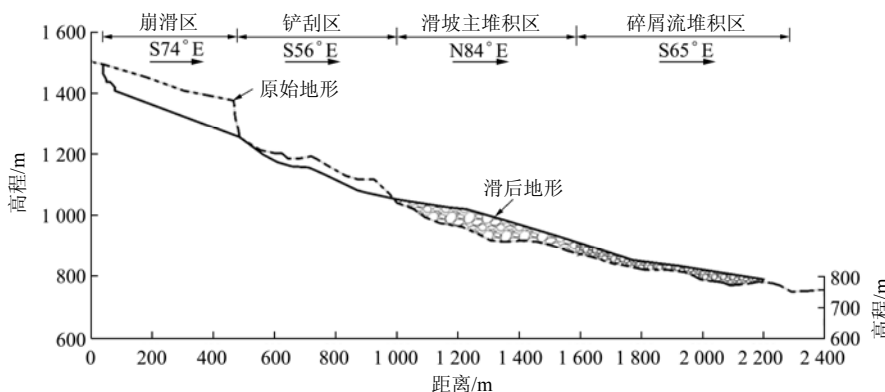


图 15 鸡尾山滑坡——碎屑流 A-A'纵剖面图

Fig.15 Profile map of cross-section A-A' Jiweishan rockslide—fragment flow

形成阻滑关键块体；关键块体剪切应力不断增大，加之长期岩溶溶蚀作用对岩体强度和采矿活动对应力环境的影响，导致首先失稳崩落，并沿岩溶发育带快速剪断，沿软弱层面形成连锁式的滑动破坏。刘传正等^[14]以长江三峡链子崖危岩体为例，对这种变形破坏模式进行了深入研究，提出了斜倾层状岩体的视滑力概念；柴波等^[15]提出了这样滑坡体的“积木状块体”结构特征；G. H. Shi^[16]近年又取得了一般自由面上多面节理生成、节理块切割与关键块搜寻方法研究的新成果。因此，综合这些研究成果，作者认为，斜倾厚层山体滑坡视向滑动应具备 5 个条件(见图 16)：

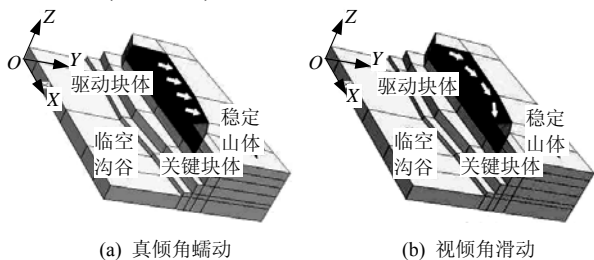


图 16 斜倾厚层山体滑坡视向滑动概念模型

Fig.16 Conceptual models of apparent dip sliding of inclined bedding rockslide

(1) 层状块裂结构条件：平面上被陡倾近于直交的结构面切割，竖向上被多层软弱夹层分离，形成六面体状的巨大块体，沿不连续面岩溶发育，这样，形成了呈架空结构的积木块体，离散性好。在积木块状结构的层状块裂岩体中，其力链结构由网络状转变为向北东方向偏转的曲线状，稳定状态明显降低。

(2) 山体倾向阻挡条件：滑坡体侧部边界为大型节理或断裂，下部山体完整性好，因此，为阻止滑坡体沿真倾角方向顺层滑动提供了阻挡，迫使向视倾角方向转向滑动。

(3) 临空视向剪出条件：滑坡体视倾角方向斜坡被河流、沟谷深切，因此，为滑坡体提供了转向滑动的临空面。FLAC^{3D} 模拟表明，沿 T1 裂缝一带，滑坡体位移矢量具有顺北向移动特征，但是，在外侧临空地带，位移矢量向 NE 方向偏转，特别是前缘关键块体失稳后，后缘驱动块体出现明显的垂直向下的滑落分量。

(4) 驱动块体下滑条件：山体后部的积木块体沿软弱层面长期蠕动，抗剪强度由峰值逐渐趋向残

余值, 因此, 随着时间的演变, 特别是, 在降雨、岩溶的作用下, 下滑力逐渐增加。

(5) 关键块体阻滑条件: 在下滑驱动块体沿视倾角方向滑动前缘存在一相对稳定的块体, 随着下滑力的增大以及块体在岩溶、地下水等作用下内部强度逐渐降低, 导致沿损伤带瞬时脆性剪断, 形成了整体滑动。如果不存在具有一定体积的稳定块体阻挡, 将转变为小型的崩塌倾倒地破坏模式。

FLAC^{3D}模拟表明, 后部滑体(基准点 5)的滑移量是前缘滑体(基准点 2)的是数十倍以上, 说明在后部驱动块体下滑推挤作用下, 前缘关键块体的具有弱变形的阻滑特征, 导致了其内部剪切应变增量集中值逐渐积累。

值得指出的是, 在此类斜倾厚层山体中, 矿层大都位于滑带 100 m 之下, 因此, 采矿活动主要通过应力环境的调整和层状块裂岩体的差异沉降 2 种方式对滑坡构成扰动。

6 结 论

本文以武隆鸡尾山滑坡为例, 通过地质条件、采矿扰动等分析, 运用 FLAC^{3D}模拟, 研究了西南山区分布较广的斜倾厚层山体视向滑动并转化为高速远程碎屑流的新型失稳模式。提出了倾厚层山体滑坡视向滑动应具备的 5 个条件。因此, 对这类斜倾层状结构的山体进行防治必须以前缘阻滑的“关键块体”为重点。

致谢 本文得到了黄润秋教授、许强教授、李进才副总工程师、彭光泽处长、童立强教授、侯圣山博士、李滨博士、孙萍博士和张明博士的帮助, 特此致谢!

参考文献(References):

- [1] 许强, 黄润秋, 殷跃平, 等. 2009年“6·5”重庆武隆鸡尾山崩滑灾害基本特征与成因机制初步研究[J]. 工程地质学报, 2009, 17(4): 432 - 444.(XU Qiang, HUANG Runqiu, YIN Yueping, et al. The Jiweishan landslide of June 5, 2009 in Wulong, Chongqing: characteristics and failure mechanism[J]. Journal of Engineering Geology, 2009, 17(4): 432 - 444.(in Chinese))
- [2] 殷跃平. 中国典型滑坡[M]. 北京: 大地出版社, 2008.(YIN Yueping. Typical landslides in China[M]. Beijing: China Land Press, 2008.(in Chinese))
- [3] 刘雄. 新滩大滑坡机制探讨[J]. 岩石力学, 1986, 7(2): 53 - 60.(LIU Xiong. Discussion on the mechanism of Xintan landslide[J]. Rock and Soil Mechanics, 1986, 7(2): 53 - 60.(in Chinese))
- [4] HOEK E, BRAY J. 岩石边坡工程[M]. 卢世宗, 李成村, 夏继祥, 等译. 北京: 冶金工业出版社, 1983.(HOEK E, BRAY J. Rock slope engineering[M]. Translated by LU Shizong, LI Chengcun, XIA Jixiang, et al. Beijing: China Metallurgical Industry Press, 1983.(in Chinese))
- [5] 石根华. 岩体稳定的几何分析方法[J]. 中国科学(A辑), 1981, (4): 487 - 495.(SHI Genhua. Method of geometry analysis of rock mass stability[J]. Science in China(Series A), 1981, (4): 487 - 495.(in Chinese))
- [6] 殷跃平, 康宏达, 张颖. 链子崖危岩体稳定性分析及锚固工程优化设计[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(5): 599 - 603.(YIN Yueping, KANG Hongda, ZHANG Ying. Stability analysis and optimal anchoring design on Lianziya dangerous rockmass[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(5): 599 - 603.(in Chinese))
- [7] 殷跃平. 地质工程及链子崖锚固设计[M]. 北京: 地质出版社, 1994.(YIN Yueping. Geoenvironment and anchoring design on Lianziya dangerous rock mass[M]. Beijing: Geologic Press, 1994.(in Chinese))
- [8] 黄润秋. 20世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 433 - 454.(HUANG Runqiu. Large-scale landslides and their sliding mechanisms in China since the 20th century[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(3): 433 - 454.(in Chinese))
- [9] GRIFFITH D V, LANE P A. Slope stability analysis by finite elements[J]. Geotechnique, 1999, 49(3): 387 - 403.
- [10] Itasca Consulting Group, Inc.. FLAC(fast Lagrangian analysis of continua) slope user's guide(Version 5.0)[R]. Minneapolis: Itasca Consulting Group, Inc., 2005.
- [11] MATSUI T, SAN K C. Finite element slope stability analysis by shear strength reduction technique[J]. Soils and Foundations, 1992, 32(1): 59 - 70.
- [12] DAWSON E M, ROTH W H, DRESCHER A. Slope stability analysis by strength reduction[J]. Geotechnique, 1999, 49(6): 835 - 840.
- [13] 赵尚毅, 郑颖人, 时卫民, 等. 用有限元强度折减法求边坡稳定安全系数[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(3): 343 - 346.(ZHAO Shangyi, ZHENG Yingren, SHI Weimin, et al. Analysis of safety factors of slope by strength reduction FEM[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(3): 343 - 346.(in Chinese))
- [14] 刘传正, 施韬, 张明霞. 链子崖危岩体T8~T12缝段开裂变形机制的研究[J]. 工程地质学报, 1995, 3(2): 29 - 41.(LIU Chuazheng, SHI Tao, ZHANG Mingxia. On the mechanism of deforming-cracking on the segment of cracks T8 - T12 of Lianziya cliff dangerous rock body[J]. Journal of Engineering Geology, 1995, 3(2): 29 - 41.(in Chinese))
- [15] 柴波, 殷坤龙, 陈丽霞. 岩体结构控制下的斜坡变形特征[J]. 岩石力学, 2009, 30(2): 521 - 525.(CHAI Bo, YIN Kunlong, CHEN Lixia. Analysis of slope deformation under control of rock mass structure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(2): 521 - 525.(in Chinese))
- [16] SHI G H. Producing joint polygons, cutting joint blocks and finding key blocks for general free surface[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(11): 2 161 - 2 170.