

DOI: 10.11779/CJGE201811007

武隆鸡尾山滑坡形成机理数值模拟研究

许强¹, 邓茂林^{1, 2}, 李世海³, 王杰³

(1. 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室(成都理工大学), 四川 成都 610059; 2. 三峡大学三峡库区地质灾害教育部重点实验室, 湖北 宜昌 443002; 3. 中国科学院力学研究所, 北京 100190)

摘要: 2009年发生的重庆武隆鸡尾山滑坡, 因滑源区斜坡岩层整体缓倾山内, 缺乏有效的临空面和滑移空间, 因此, 在滑坡孕育过程中存在前缘岩溶带压缩变形、底部剪切滑移、后缘拉裂以及最终前缘关键块体(岩溶带)侧向剪断滑出等一系列的复杂动力学行为。这一过程存在显著连续变形向非连续变形的过渡与转化, 单纯用连续介质的有限元和离散介质的离散元来分析模拟都很难取得较好的效果。为探究鸡尾山滑坡的孕育过程和失稳机理, 运用将连续-非连续单元有机耦合的大型数值模拟软件 CDEM, 模拟鸡尾山滑坡的失稳过程和形成机制。研究表明: 滑体前方岩溶发育带具有“可压缩性”, 为滑体运动提供了一定的变形空间; 滑源区下方的采矿活动产生应力重分布, 滑带抗剪强度降低, 滑体沿其底部软弱带发生剪切蠕滑, 并逐渐形成滑体后缘拉裂缝; 滑动块体在向前滑移过程中不断挤压向前缘“易压缩带”, 坡体应力自组织调整, 并逐渐在前部三角区形成垂直的第二破裂面, 前缘抗力体(关键块体)形成, 最后剪断岩溶带个别与稳定山体咬合岩块, 整体失稳破坏。数值模拟结果较好地揭示了武隆鸡尾山滑坡前缘视倾向展布岩溶带“软基效应”所提供“准临空面”, 重现了鸡尾山滑坡“蠕滑-拉裂-压缩(压碎)-剪切滑出”的致灾机理。
关键词: 前缘岩溶带; 采矿; 滑带; 软岩; 周界裂缝; 视倾向滑移

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2018)11-2012-10

作者简介: 许强(1968-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事地质灾害预测评价及防治处理方面的教学与研究工作。
E-mail: xuqiang_68@126.com。

Numerical simulation for formation of Jiweishan landslide in Wulong County, Chongqing City of China

XU Qiang¹, DENG Mao-lin^{1, 2}, LI Shi-hai³, WANG Jie³

(1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. Key Laboratory of Geological Hazards in Three Gorges Reservoir Area of Ministry of Education, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 3. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Because of the gently-inclined rock in the hill sliding source area and the lack of the effective free surface and sliding space, there were a series of complicated dynamic behaviors during the process of Jiweishan landslide in Wulong County, Chongqing City of China in 2009, such as compression deformation, bottom shear sliding, trailing edge rupture and lateral cutting and sliding of the leading key blocks (karst zone). There exists a remarkable transition and transformation from continuous deformation to discontinuous one. It is difficult to obtain good results simply by using the finite elements of continuous media or the discrete elements of discrete media. The instability process and formation mechanism of Jiweishan landslide are simulated by use of the large numerical simulation software CDEM with the organic coupling continuous-discontinuous elements. The results show that the bottom sliding surface is cut through and the shearing creep occurs along the bottom surface in the process of the formation of landslide. The stresses on the slope concentrate towards the "easy compression zone" at the leading edge of the slope, and they are slope stress automatically adjusted. The slope along the "easy compression zone" creeps, and the second fracture face perpendicular to the slope (cliff) is formed. Finally, the karst rock is cut to induce instant instability of land slide and high-speed remote debris flows. The numerical results reveal the "quasi free surface provided by soft foundation effects" in karst zone in the viewpoint of apparent dip distribution, and the disaster-causing mechanism of "creep-crack-

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2013CB733200); 国家杰出青年科学基金项目(41225011); 国家自然科学基金重点项目(41630640); 国家自然科学基金青年科学基金项目(41502291)

收稿日期: 2016-03-11

*通讯作者(E-mail: dmltop@163.com)

compressive (crushing)-shear” of Jiweishan landslide is reproduced.

Key words: front karst zone; mining; sliding zone; soft rock; perimeter crack; apparent dip sliding

0 引 言

滑坡形成机理是指滑坡孕育和滑动的物理力学过程, 因此滑坡的形成机制和斜坡岩土体的结构类型存在一定的成生关系^[1-4]。2009年6月5日发生的武隆鸡尾山滑坡位于斜向内倾的单斜灰岩山体, 岩层倾向与山体主临空面(陡崖)方向呈大角度相交, 一般条件下稳定性较好。由于受到倾向方向阻挡, 坡体滑出方向与倾向有明显偏转, 产生视倾向滑移。Mauldon等^[5]、Goodman等^[6]针对“Block Torsion”单块体的旋转进行了研究和讨论。Goodman等^[7]对块体理论及应用进行了深入研究。Hoek等^[8]认为, 倾倒破坏的边坡前部岩块起到“塞缝石”的作用, 对边坡的支撑作用强。Wibowo^[9]分析了secondary blocks的主导作用。在三峡链子崖变形体的研究中, 刘传正等^[10]提出视滑力的概念, 加深了视倾向滑移型滑坡的成因机制研究的理解。殷跃平等^[11]在对三峡链子崖的治理研究中提出了对“关键块体”理念。由于地质条件和诱发因素的多样性, 滑坡形成机理也具有多样性和复杂性^[12-13]; 武隆鸡尾山滑坡不仅仅是块体旋转和“关键块体”的概念, 演化全过程更加复杂。殷跃平^[14]认为该滑坡发生实际情况与原调查判定相比, 在失稳模式、运动方向、滑体体积和运动距离等4个偏差。当然最根本的判断偏差是失稳模式的判定。

针对武隆鸡尾山滑坡失稳模式和形成机理研究, 许强等^[15-16]对鸡尾山滑坡的形成条件和基本特征等作了较全面的阐述和分析, 认为不利的“积木块”状的岩体结构和滑坡体前缘起阻挡作用的“关键块体”被剪断、突破是鸡尾山滑坡失稳的主要原因。Xu等^[17]通过数值模拟分析证明, 鸡尾山滑坡是因底滑面蠕滑渐变而失稳, 同时采矿是重要的诱发因素。Yin等^[14, 18-19]、冯振等^[20-22]总结了斜倾厚层岩质滑坡视向滑动应具备的5个条件, 通过离心模型试验、数值模拟等分析, 认为鸡尾山滑坡具有后部块体驱动—前缘关键块体瞬时失稳的特征, 改为下部采矿使上覆岩体应力发生重分布。刘传正^[23]认为, 鸡尾山地形高陡临空、山体下部铁矿大面积采空形成的“张拉悬板效应”是山体拉裂形成大规模危岩体的主要原因。李腾飞等^[24]分析了采矿作用导致的坡体移动变形, 认为地下采矿是坡体失稳的主要原因。邓茂林等^[25]通过离心模拟试验认为, 前部岩溶带的“易压缩性”为滑源区的蠕滑提供了“准临空面”作用, 第二破裂面的形成是失稳的前提; 重现了武隆鸡尾山滑坡“蠕滑→拉裂→压缩(压

碎)→剪切滑出”的致灾机制。不少学者认为该滑坡为“关键块体”控制, 实际上武隆鸡尾山滑坡“关键块体”为逐渐演化形成, 也为“抗力体”的概念, 在文中对关键块体和抗力体不作区分。滑坡存在前缘岩溶带压缩变形、底部剪切滑移、后缘拉裂以及最终前缘关键块体(岩溶带)侧向剪断滑出等一系列的复杂动力学行为。前缘岩溶带的“易压缩性”是坡体演化的基础, 而前部三角转弯处裂缝的形成是坡体失稳的必要条件。因此, 利用中科院力学研究所自主开发的将连续-非连续单元有机耦合的大型数值模拟软件CDEM, 对武隆鸡尾山滑坡的自然状况、底滑面蠕滑、下部采矿这3种工况进行分析, 以期重现滑体前部抗力体的形成、演化、岩溶带剪切效应及滑动中块体转向特征等过程, 深入分析了武隆鸡尾山滑坡的孕育—演化—启动的全过程。

1 鸡尾山滑坡基本特征

2009年6月5日14:51, 重庆市武隆县铁矿乡鸡尾山山体, 地理坐标为107°26′1.46″E, 29°14′14.85″N, 约 $500 \times 10^4 \text{ m}^3$ 完整性很高的厚层二叠系茅口组灰岩山体经漫长的蠕滑突然发生大规模崩滑破坏, 滑体在跃下超过200多米高的陡坎后, 获得巨大的动能并迅速解体, 产生高速—远程碎屑流^[15]。武隆鸡尾山滑坡位于赵家坝背斜北西翼, 为倾向NW的单斜构造, 附近未发现断层, 各地层呈整合接触, 滑坡区地质构造简单。附近岩层产状 $332^\circ \sim 355^\circ \angle 15^\circ \sim 35^\circ$, 研究区南部倾角 $20^\circ \sim 27^\circ$ 北部倾角 $30^\circ \sim 35^\circ$ 。

1.1 滑坡宏观变形历史

据调查访问, 在图1a处位置被称为“垮山”, 就是因为该地经常发生小型垮塌而得名, 20世纪20年代前, 在后缘边界对应位置的东侧陡崖壁面上和滑源区西侧就已发现明显的张开裂缝, 并伴由拉裂而经常出现侧向掉块现象。2005年以后, 崩塌落石从图1a处位置逐渐向下游图1b转移。2008年7月—8月, 在滑体前部关键块体(抗力体)位置图1c处出现宽约1m、长约100m裂缝并伴有零星掉块, 裂缝将前部抗力体与后部驱动块体分离。2009年3月—4月, 在前部剪出口图1d(岩溶带靠近临空面位置)处, 压裂而出现岩体崩落。许强等^[26]研究认为滑坡发展一般都具有时空演化规律; 武隆鸡尾山滑源区山体变形具有较长的历史, 且变形具有较明显的时空演化特征。

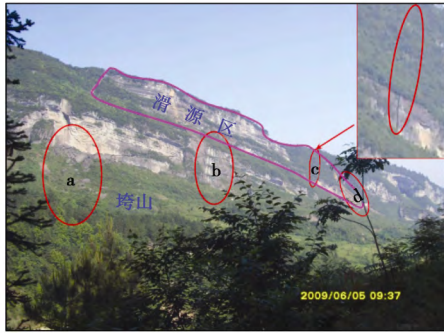


图1 滑前局部破坏时空演化特征

Fig. 1 Temporal evolution characteristics of local failure before sliding

1.2 滑坡区地层岩性

滑坡附近范围内出露的地层有二叠系下统茅口组、栖霞组、梁山组，志留系中统韩家店组（图2，3）。

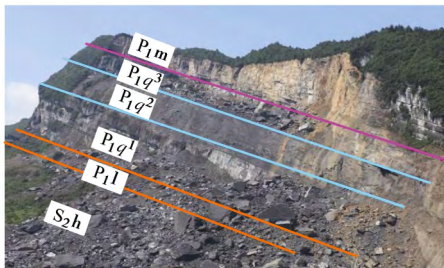


图2 滑源区出露地层及分布

Fig. 2 Strata and their distribution in Jiweishan

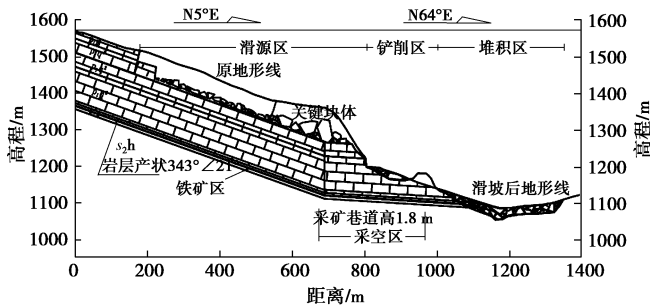


图3 武隆鸡尾山滑坡工程地质剖面图

Fig. 3 Engineering geological profile of Jiweishan landslide

P_{1m}系二叠系下统茅口组，由厚层状灰岩组成，溶蚀十分发育，竖向发育的溶槽、溶缝将岩体切割呈条柱状，岩体的整体性遭到破坏，溶槽、溶缝内充填0.2~2.0 m厚的黄色黏土，分布在山顶处，层厚约30~50 m。P_{1q}系二叠系下统栖霞组，主要为深灰色、灰色中厚层状含沥青质灰岩，含泥质灰岩和炭质、钙质页岩夹层。P_{1l}系二叠系下统梁山组，主要由紫红色、暗紫色的泥岩、泥质粉砂岩构成，中厚层状，泥质胶结为主，岩质较软，泥岩中含豆状的铁质结核（铁矿）或铝土，该地层埋深一般在山顶200 m以下，属铁矿

富含铁矿石或铝土的层。S_{2h}系志留系中统韩家店组，主要由灰绿色、灰色的页岩夹泥质灰岩构成，强度较低。

1.3 滑源区特征

武隆鸡尾山滑坡为深层顺层基岩滑坡。许强等^[15-16]对滑坡的基本特征有详细的阐述，分区特征等见图4。本文仅对滑源区通过后来勘查和试验得到的一些结果作一些补充。滑坡发生前，滑体东侧（滑体外侧）为200多米高的陡崖；西侧（滑体内侧）边界为走向近南北、产状近直立的T1岩溶裂缝，该裂缝壁面；走向近东西、产状近直立的T0裂缝为鸡尾山滑坡南侧边界（后缘拉裂缝）；北侧边界为岩溶强烈发育、岩溶带视倾向展布走向为35°展布，滑坡发生后岩溶带与稳定山体接触带呈现条柱状灰岩；滑体底部滑带为具有明显流变特性的炭质泥质灰岩，底部滑带与近正交的T0、T1两组近直立裂缝和前缘视倾向展布的岩溶带将鸡尾山滑体与稳定山体基本分离^[15, 27]。

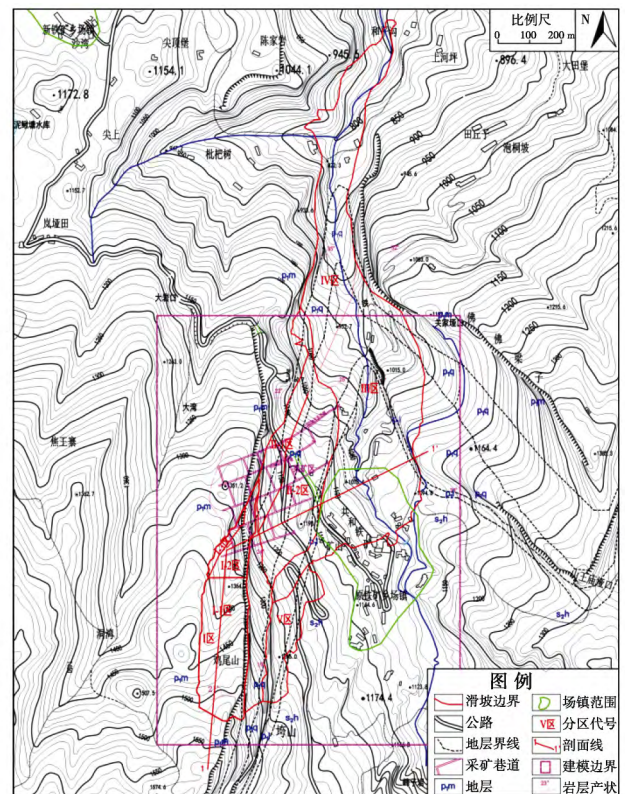
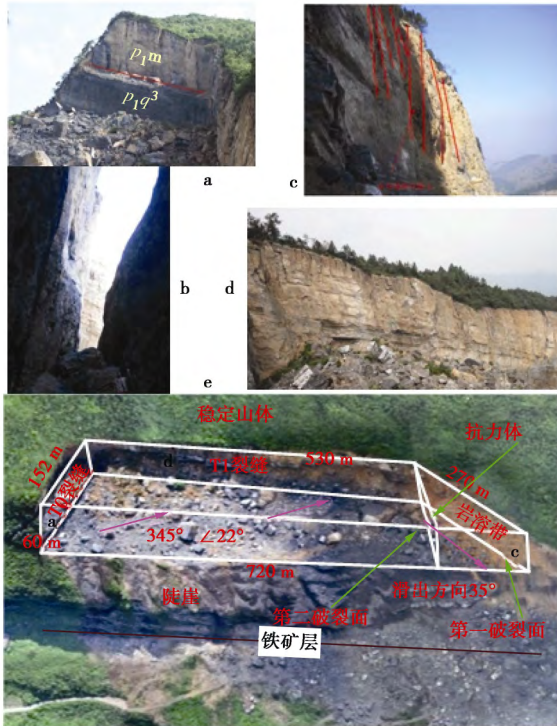


图4 武隆鸡尾山滑坡工程地质平面图

Fig. 4 Engineering geological plan of Jiweishan landslide

据野外现场调查及高清航拍影像（图5e）可以看出，滑源区平面形态为一个巨大梯形，可以视为后部近似长方体和前部近似三角形楔体的块体组合。顺东侧陡崖最大长度约720 m，其中四边形段长约480 m，三角形段长约240 m；滑源区南侧后缘T0裂缝宽约152 m，北侧岩溶剧烈发育区区长约125 m，滑源区西侧边界

T₁裂缝长约530 m。崩滑体厚度约50~80 m, 其平面面积约8.4×10⁴ m², 体积约500×10⁴ m³[9]。



a 南侧后壁; b 后缘中下部裂缝; c 被大型溶槽切割呈“条柱状”的岩溶带壁; d 西侧壁 (T₁裂缝面); e 滑源区坡体结构全貌

图 5 鸡尾山滑坡滑源区坡体结构示意图

Fig. 5 Slope structure of Jiweishan landslide

T₀ 裂缝总体走向 N50°~70° W, 长约 152 m, 深 60~70 m, 近于直立, 构成滑坡体南侧边界面^[9, 19]。据现场调查发现: T₀ 裂缝 P_{1m} 段岩溶剧烈发育, 而 P_{1q³} 灰岩部分岩溶不发育, T₀ 裂缝面的中下部为新鲜的拉裂面。在滑坡蠕滑启动后, 在后壁面上产生拉应力, 所以在后缘遗留了 2 级台阶状岩体 (见图 5a, b)。T₁ 裂隙面产状为 80°~105°/78°~82° 的结构面发育而成, 该结构面也形成了东侧陡崖, T₁ 裂缝面长约 480 m, 深 60~70 m^[9, 19]。裂缝壁面上的竖向溶槽、串珠状溶缝和次生黄泥多, 未见新鲜岩体 (见图 5 中 d, e)。测年结果显示, T₀ 裂缝 P_{1m} 段形成年代在 2.6~5.3 万年前, T₁ 裂缝的形成年代是 4.1~13.9 万年前, T₁ 裂缝的形成明显先于 T₀ 裂缝的形成年代。T₀ 裂缝 P_{1m} 段部分和 T₁ 裂缝都为卸荷裂隙。

岩溶带位于前缘北部滑体与稳定山体的交界处, 岩溶带北东向展布走向为 35°, 沿其走向方向岩溶带长约 150 m, 宽 20~60 m, 其间有一 20 m×50 m 深达 20~60 m 的大型溶洞。由于地形地貌的影响, 岩溶带处的汇水条件好, 为岩溶的发育提供了条件 (见图 5c, e)。据滑后现场调查, 岩溶带与稳定山体交界

面处的岩体存在多处大型竖向发育、全充填黄色黏土的溶槽, 溶槽宽 0.4~2.7 m 不等, 自山顶向下发育, 深 4~60 m 不等, 这些竖向发育的溶槽将岩体切割成了相对孤立石柱 (图 5c), 造成岩体的整体抗剪强度大幅度降低。因此, 岩溶带所发生的破坏应属于延性破坏。

滑坡的滑带是 P_{1q²} 顶面与 P_{1q³} 砾状灰岩底面的交界面构成, 顺着岩层面发育, 大体产状 345°/23°, 武隆鸡尾山滑带软岩为一层 5~30 cm 厚的炭质泥质灰岩, 见图 6。邓茂林等^[28]对鸡尾山滑坡软弱带微观特征进行了研究, 认为滑带为滑坡的发展演化提供了物质条件。



图 6 滑带软岩

Fig. 6 Soft rock in sliding zone

2 鸡尾山滑坡 CDEM 数值模拟

2.1 CDEM 数值模拟方法简介

中科院力学研究所自主开发的连续-非连续单元方法 (CDEM) 是一种将有限元与离散元进行耦合计算, 通过块体边界的断裂来分析材料渐进破坏过程的数值模拟方法^[29]。CDEM 中包含块体及界面两个基本概念 (图 7), 块体由一个或多个有限元单元组成, 用于表征材料的连续变形特征; 界面由块体边界组成, 通过在块体边界上引入可断裂的一维弹簧可实现材料中裂纹扩展过程的模拟; 块体内多个有限元单元之间是通过数学弹簧链接。

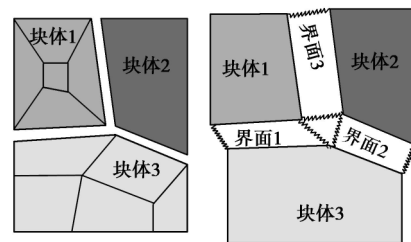


图 7 CDEM 中的块体及界面图

Fig. 7 Blocks in CDEM and interface

表1 鸡尾山滑坡岩体物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of rock mass

岩层名称	弹性模量/GPa	泊松比	密度/(kg·m ⁻³)	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	抗压强度/MPa
茅口组灰岩	82	0.20	2710	17.3	45	90
岩溶带	23	0.36	1750	5.0	15	15
滑带	34	0.25	1750	1.2	8	10
栖霞组灰岩	66	0.22	2670	10.7	43	80
梁山组矿层	59	0.28	2640	4.0	28	70
韩家店页岩	46	0.23	2630	4.5	25	20

2.2 鸡尾山滑坡 CDEM 数值模型

鸡尾山滑坡是一个长期蠕滑、失稳启动直至远离的运动破坏过程。根据现场地质信息和工程地质剖面，建立滑动前鸡尾山滑坡的三维几何模型如图 8 所示，模型宽度（X 方向）为 958 m，长度（Y 方向）为 1350 m。图 8a, b 分别为滑体、岩溶带和开挖矿体，岩溶带为长条状，在滑体前缘范围内的岩溶带长度为 150 m，平均宽度为 20~60 m，岩溶带长边的延伸方向近 NE—SW 向；开挖矿体厚度约为 2 m，见图 3。

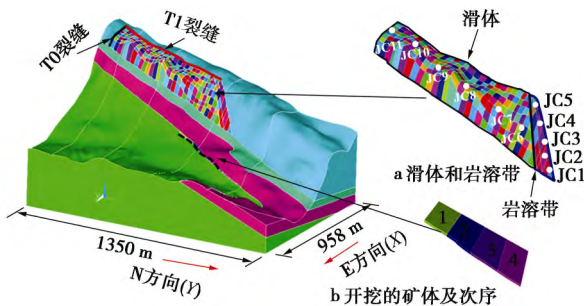


图8 滑源区考虑节理切割几何模型及监测点的布设

Fig. 8 Geometrical model considering joint cutting and layout of monitoring points

图 8 所示为滑体和岩溶带的节理切割数值模型示意图。滑体被三组节理切割，第一组节理与 T0 裂缝面平行，第二组节理与 T1 裂缝面平行，第三组节理与滑带平行，节理间距约为 20~30 m。滑体前方的岩溶带也被这三组节理切割。

数值计算模型如图 8 所示，网格划分过程中的控制尺寸分别为岩溶带 10 m、滑体 30 m、开挖矿体 1 m、周围山体 50 m、基岩 100 m。数值模型划分为六面体单元，共包含单元数 68350 个、节点数 12677 个，其中岩溶区单元数为 4021、滑体单元数为 16707 个、开挖矿体单元数为 5955 个。与无节理切割情况不同的是，该模型只允许 3 组节理上通过准则判断发生破坏，对于节理切出的“积木块体”，内部通过四面体单元进行变形和应力计算，并认为是完整岩石，运动过程中不发生破坏。

根据现场勘查和试验结果，获取滑坡岩体物理力

学参数见 1。数值模型中除滑体、岩溶带之外，共有 4 个地层和一个开挖矿体，4 个地层由上到下分别为茅口组灰岩、栖霞组灰岩、梁山组矿层、韩家店页岩，开挖矿体赋值为梁山组矿层材料参数。模拟过程中，节理强度结合岩石试验结果并参考文献[14]得出，具体参数见表 2。矿体开挖过程模拟通过逐步设置空单元模型实现。

表2 鸡尾山滑坡结构面力学参数表

Table 2 Mechanical parameters of structural plane

结构面类型	法向刚度 /(MN·m ⁻¹)	切向刚度 /(MN·m ⁻¹)	黏聚力 /kPa	内摩擦 角/(°)	抗拉强 度/kPa
石灰岩节理	6000	2000	28	18	90
滑带节理	2500	180	2	10	0.4
T0 裂缝	10	10	0	5	0
T1 裂缝	10	10	0.01	5	0

2.3 滑坡自然状况的模拟分析

利用上述鸡尾山数值模型，对自然状态（仅重力作用下）下滑坡稳定性进行分析。数值模型底部截断边界采用固定约束，周围截断边界采用法向约束。首先获得重力作用下的应力场，然后进行破坏计算，获得各个节理面的破裂运动状态；最后计算滑坡体中各块体的运动过程。数值计算过程中，在前部岩溶带和滑体设立若干监测点，如图 8 所示，岩溶带为监测点为 JC1~JC5，滑体监测点为 JC6~JC11。

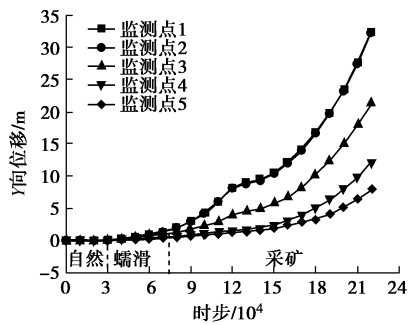
鸡尾山滑坡在启动之前已处于长期蠕滑状态，这表明滑带强度已发生较大幅度的折减。按莫尔-库仑准则通过黏聚力和内摩擦角表征滑带强度，可以认为黏聚力仅剩残余值，数值模拟过程中，主要考虑滑带的内摩擦角对失稳和启动过程的影响。图 9, 10 是岩溶带和滑体监测点在自然状态、底面蠕滑以及下部采矿 3 个阶段的位移和应力曲线。

在时步 0~3×10⁴ 步间，坡体为自然状况阶段，底滑面摩擦系数较大，基本没有下滑力，岩溶带和滑体的位移小于 10 mm。

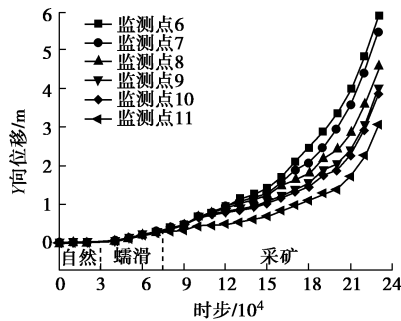
2.4 滑体底滑面蠕滑状况的模拟分析

考虑到鸡尾山滑坡体的蠕滑特征，采用 Burger 模

型描述滑带的蠕变特性, 分析的滑体滑前变形特征。数值计算假设 Burger 中的 Maxwell 体和 Kelvin 体黏度系数相同, 据文献[30]其值为 5×10^{18} Pa·s。



(a) 岩溶带监测点Y方向位移-时步曲线



(b) 主滑体监测点Y方向位移-时步曲线

图 9 监测点位移曲线

Fig. 9 Curves of displacement at monitoring points

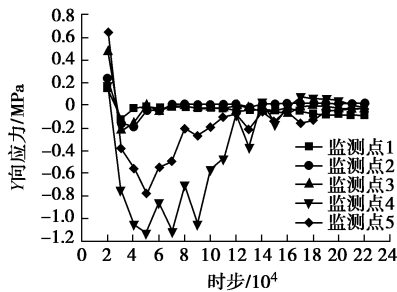


图 10 岩溶带应力-时步变化曲线

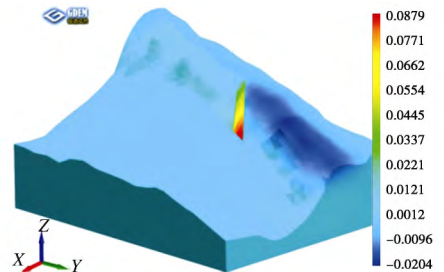
Fig. 10 Stress-time curves of karst zone

在时步 $3 \times 10^4 \sim 7.5 \times 10^4$ 步间, 坡体为底滑面蠕滑阶段, 图 9 为岩溶带和滑体监测点的位移, 图 9 (a) 为岩溶带各点发生较大位移, 最大约为 1.5 m。滑体前端位移较大、后缘较小, 见图 9 (b); 在蠕滑阶段岩溶带提供压缩空间, 但变形较小。图 10 为岩溶带各监测点应力图, 根据 Y 向应力曲线分析, 岩溶区内侧监测点 4, 5 处于受压状态, 压力最大, 这是因为监测点 4, 5 位于真倾向最大主应力方向。外侧单元监测点 1, 2, 3 应力几乎为零, 因外侧围压小, 在前部剪出口位置处于破坏状态。图 11 为滑带蠕滑状态下滑体的 X 向位移云图, 位移较自然状况下有明显增加, 岩溶带的位移最大达 0.27 m。

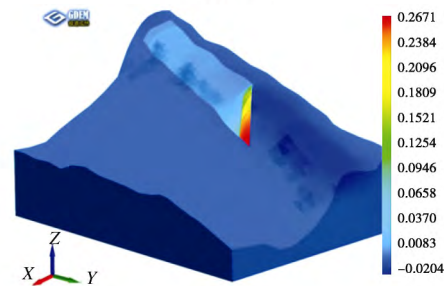
2.5 采矿对滑坡稳定性影响的模拟分析

在底滑面蠕滑状态计算的基础上, 模拟下伏矿层

采空扰动对坡体稳定性影响, 在时步 7.5×10^4 步以后, 坡体为下部开挖阶段, 开挖次序见图 8b, 按 1—2—3—4 顺次进行。滑坡在自然状态下处于稳定状态, 在底滑面蠕滑条件下坡体明显挤压岩溶带, 矿体的开挖加剧了岩溶带块体剪切破坏过程, 由图中可得各方向的位移达最大达 30 m 左右。



(a) 时步1万

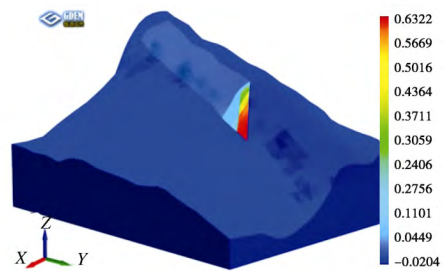


(b) 时步2万

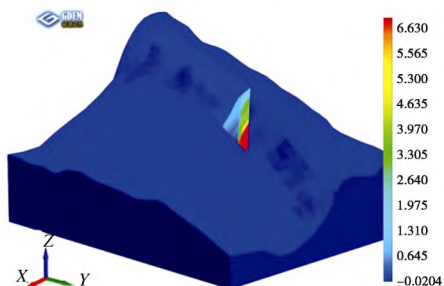
单位: m

图 11 蠕滑状态的滑体 X 向位移云图

Fig. 11 Displacements of sliding body in creeping state in X direction



(a) 时步3万



(b) 时步9万

单位: m

图 12 下部铁矿开挖状况岩溶带剪切过程

Fig. 12 Shearing process under excavation of iron ore in karst zone

随着采矿的进行, 滑体的位移急剧增加, 监测点 1, 2, 3 应力变大后很快降为零, 在前部剪出口位置

处于破坏状态,部分块体已经剪出。监测点4,5下滑力增大,达到最大值后,坡体前缘滑动产生,下滑力有所减小。图11所示为滑体上各个监测点的位移曲线,从曲线斜率可以得出各点运动速度大致相等,说明矿体开挖之后,滑体滑动产生处于整体向下运动。

图12所示结果,可以清晰看出岩溶带块体被滑体挤出过程,岩溶块体向临空面运动释放了滑体向前滑动的空间,从中可以明显看出抗力体形成过程。

2.6 抗力体演化及岩溶带锁固效应

前部岩溶带使得滑体转向,从而导致抗力体形成。图11,12分别为蠕滑状态到下部采矿不同计算时步和运动破坏状态下,滑体的X向位移云图,从中可以清楚的观察视倾向滑移型滑坡抗力体形成过程。通过滑坡运动的计算,再现抗力体的形成过程。由于岩溶带的易压缩特性和滑带蠕滑特性,滑体沿着滑面向下滑动,滑体前端受挤压作用,变形及应力不断增加,最终使得主滑体与前部抗力体在前部三角形衔接处平行于T0裂隙的节理面发生剪切破坏,形成第二破裂面,见图13。

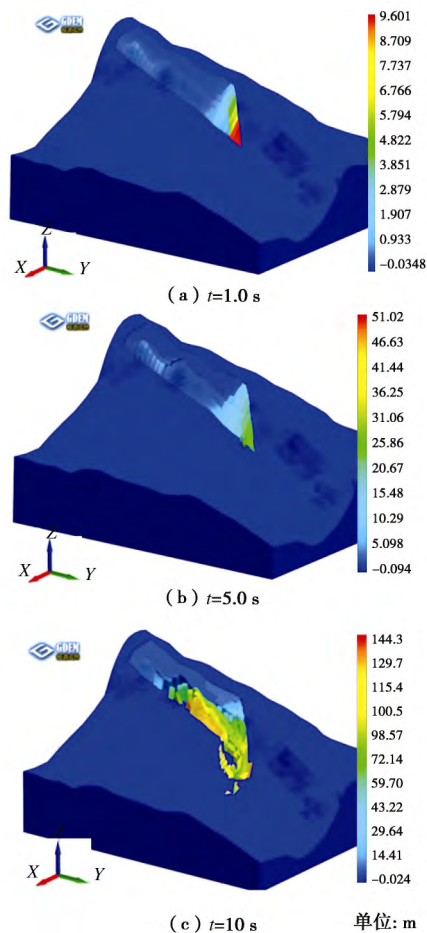


图13 滑体模型运动破坏特征(Y向位移云图)

Fig. 13 Failure characteristics of sliding rock mass (Y-direction displacement)

2.7 滑动过程块体转向特征

滑体运动的过程中,这种转向现象也是很明显的。据图14可清楚的看出这6个块体由初始的向N方向运动转变为NE方向运动的过程,就整个滑体而言,在三角转角处的上部滑体基本整体下滑,没有解体,也没有明显的转向现象;之后滑体受前部视倾向展布的稳定山体阻挡而沿节理面解体后转向视倾向方向滑移。图11是通过Y向(N向)位移云图显示的转向特征。

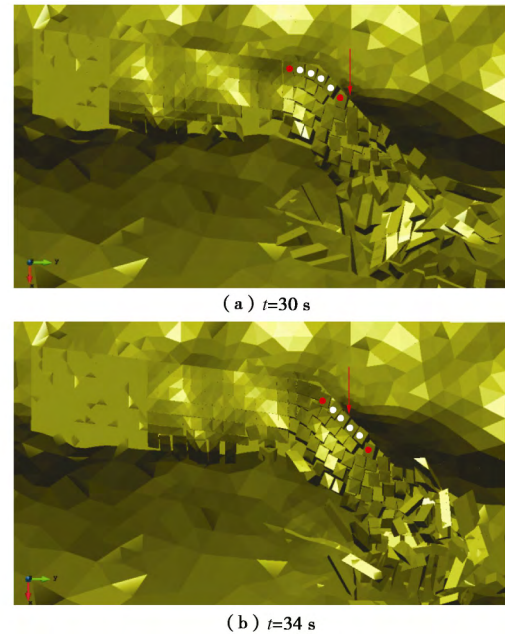


图14 滑动过程中块体转向示意图

Fig. 14 Turning of sliding blocks

2.8 数值模拟的滑坡形成过程分析

在自然、蠕变、下部开挖等条件下,从底滑面蠕滑—后缘拉裂、压缩岩溶带—岩溶带破碎、岩溶带剪切破坏—整体失稳3个阶段以及坡体结构、滑(带)面蠕滑、岩溶带阻挡和准临空面因素方面分析了鸡尾山滑坡形成机制,得出如下结论:

(1) 滑坡自然状况

在自然状况下,坡体受重力作用,坡体处于基本稳定状态,最大位移小于10 mm。鸡尾山滑坡初始的变形和周界形成由于沟谷下切演化经卸荷回弹而松动,卸荷带内形成平行于临空面的裂隙。坡体进入表生改造阶段,周界裂缝在水的长期溶蚀作用下,形成竖向岩溶柱、岩溶槽等。

(2) 滑体底滑面蠕滑—后缘拉裂阶段

岩溶带各点发生较大位移,最大约为1.5 m。滑体前端位移较大、后缘较小,在蠕滑阶段岩溶带提供压缩空间,但变形较小。

鸡尾山山体初始沿软弱带炭质泥质灰岩岩层真倾

向蠕滑, 沿岩溶发育的陡倾东西向节理裂隙逐渐拉开形成后缘 T0 裂缝。这样坡体由两组正交的陡倾节理面追踪形成滑坡的周界, 滑体成为积木状, 这阶段为蠕滑—拉裂阶段。岩溶带部分岩体可能发生压缩变形, 滑体有向下运动的趋势, 并引起后缘拉张裂缝沿南侧拉开; 滑坡体与稳定山体有相对滑动。滑坡体演化继续发展, 进入时效变形阶段, 即滑坡形成演化阶段。由于流变和多期滑动等因素使软弱带强度变低, 滑体的下滑力增大。

(3) 滑体前缘岩溶带剪切破坏—大滑动

底部采矿促进滑动, 滑体前缘岩溶带剪切破坏—大滑动, 采矿作用促进了坡体的破坏和演化进程。采矿形成的采空区导致山体的应力调整, 在滑体前缘的山体下方出现了应力集中。

在后部滑体提供的下滑力的挤压作用下, 孤立石柱逐渐被压缩、压碎; 在下滑力的剪切作用下, 脆弱的岩溶带被横向剪断, 岩溶带为坡体的蠕滑提供了空间, 具有“准临空面”效应。

据 CDEM 模拟再现了滑体块体在第二破裂面上部时, 初始基本沿层面真倾向方向滑移; 在第二破裂面下部, 块体由 N 方向运动转变为 NE 方向运动, 就整个滑体而言, 在三角转角处的上部滑体基本整体下滑, 没有解体, 也没有明显的转向现象; 之后滑体受前部视倾向展布的稳定山体阻挡而沿节理面解体后转向视倾向方向滑移。

因此, 将鸡尾山滑坡的形成过程分为底滑面蠕滑—后缘拉裂、压缩岩溶带—第二破裂面形成、岩溶带剪切破坏—坡体整体失稳 3 个破坏阶段, 见图 15。武隆鸡尾山滑坡前部岩溶带的“可压缩性”为滑体的蠕滑提供了“准临空面”的作用, 导致坡体产生“软基效应”破坏模式, “软基效应”中涉及到的抗力体与前人的“关键块体”不作严格的区分, 岩溶带为“软基”的软带进行分析。

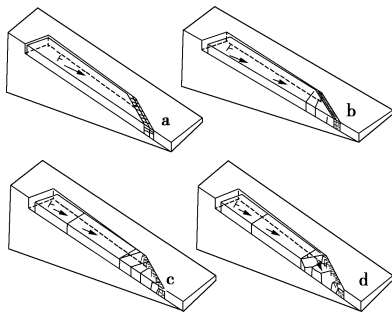


图 15 视倾向滑移型滑坡破坏机制模式演化

Fig. 15 Mode evolution of failure mechanism of apparent dip sliding landslide

3 结论与讨论

(1) 武隆鸡尾山滑坡滑块前部的“三角形”关键块体对滑坡的发生起到了控制作用, 若没有这个关键块体该滑坡应更容易发生。但关键块体的存在仅是该滑坡在失稳破坏前的表现形式, 并不是失稳机理本身。视倾向滑移特征一般表现为坡体整体滑移, 而武隆鸡尾山滑坡坡体是第二破裂面后部基本沿倾向滑移, 前部“三角形”(抗力体)转向与倾向呈 40° 以上夹角。通过对武隆鸡尾山的滑移特征深入分析, 拓展“关键块体”内涵, 也丰富了视倾向滑移的外延。

(2) 从斜坡变形模式的空间组合和转换角度, 岩质斜坡因其坡体结构和地貌的复杂性、多样性, 斜坡往往表现为多种变形破坏模式组合, 或者在发展演化过程中不同模式间的转化。武隆鸡尾山滑坡的形成过程包括了蠕滑—拉裂, 岩溶带压缩—形成第二破裂面和岩溶带剪切破坏—整体失稳 3 种模式; 这 3 种模式在时间和空间上顺次转化, 其中一种模式在对应的阶段起主导作用。斜坡演化过程中, 由于变形发展、应力集中—迁移和坡体累进性破坏, 新的拉裂面、破碎带和坡体结构等可能导致斜坡演化的条件发生改变, 多种模式在不同时间和空间上转化。再次证实了, 模式转化的发生往往是坡体进入累进性破坏的重要标志之一, 这个标志具有很大的隐蔽性, 也为这类滑坡的识别提供依据。

(3) 从滑坡学的角度, 视倾向滑移型滑坡在分类、识别等方面作深入研究必将在滑坡类型、识别等有纵深拓展, 具有重要的科学意义和实践价值, 是将来值得深入探讨的课题和方向。

参考文献:

- [1] TERZAGHI K. Mechanism of landslides[J]. Application of Geology to Engineering Practice, 1950: 83 - 123.
- [2] SELBY M J. Landslides: causes, consequences and environment[J]. Journal of the Royal Society of New Zealand, 1986, 18(3): 343 - 343.
- [3] 许 强. 滑坡的变形破坏行为与内在机理[J]. 工程地质学报, 2012, 20(2): 145 - 151. (XU Qiang. Theoretical studies on prediction of landslides using slope deformation process data[J]. Journal of Engineering Geology, 2012, 20(2): 145 - 151. (in Chinese))
- [4] 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: 367 - 380. (ZHANG Zhuo-yuan, WANG Shi-tian, WANG Lan-sheng. Principles of engineering geology[M]. 3rd ed. Beijing: Geological

- Publishing House, 2009: 367 - 380. (in Chinese))
- [5] MAULDON M, GOODMAN R E. Vector analysis of keyblock rotations[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1996, **122**(12): 976 - 987.
- [6] GOODMAN R E, KIEFFER D S K. Behavior of rock in slope[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2000, **126**(8): 675 - 684.
- [7] GOODMAN R E, SHI G H. Block theory and its application to rock engineering[M]. New Jersey: Prentice-Hall, Inc, 1985.
- [8] HOEK E, BRAY J D. Rock slope engineering[M]. London: Institution of Mining and Metallurgy, 1981.
- [9] WIBOWO J L. Consideration of secondary blocks in key-block analysis[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1997, **34**(3): 508 - 520.
- [10] 刘传正, 施 韬, 张明霞. 链子崖危岩体 T_8-T_{12} 缝段开裂变形机制的研究[J]. *工程地质学报*, 1995, **3**(2): 29 - 41. (LIU Chuan-zheng, SHI Tao, ZHANG Ming-xia. On the mechanism of deforming-cracking on the segment of cracks T_8-T_{12} of Lianzi cliff dangerous rock body[J]. *Journal of Engineering Geology*, 1995, **3**(2): 29 - 41. (in Chinese))
- [11] 殷跃平, 康宏达, 张 颖, 等. 长江三峡链子崖危岩体防治锚固工程方案[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 1994, **5**(增刊): 351 - 359. (YIN Yao-ping, KANG Hong-da, ZHANG Ying, et al. Anchoring engineering for lianzi cliff dangerous rockbody controlling in the three gorges of the Changjiang River[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 1994, **5**(S0): 351 - 359. (in Chinese))
- [12] HUNGR O, LEROUEIL S, PICARELLI L. The varnes classification of landslide types, an update[J]. *Landslides*, 2014, **11**(2): 167 - 194.
- [13] 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 Run-qiu. 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))
- [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 Yue-ping. Mechanism on apparent dip sliding 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))
- [15] 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理初步研究[J]. *工程地质学报*, 2009, **17**(4): 217 - 226. (XU Qiang, HUANG Run-qiu, YIN Yue-ping, et al. The Jiweishan landslide of June 5, 2009 in Wulong, Chongqing: characteristics and failure mechanism[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2009, **17**(4): 217 - 226. (in Chinese))
- [16] XU Qiang, FAN Xuan-mei, HUANG Run-qiu, et al. A catastrophic rockslide debris flow in Wulong, Chongqing, China in 2009: background, characterization, and causes[J]. *Landslides*, 2009, **7**(1): 75 - 87.
- [17] XU Tao, XU Qiang, DENG Mao-lin, et al. A numerical analysis of rock creep-induced slide: a case study from Jiweishan Mountain, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, **72**(6): 2111 - 2128.
- [18] YIN Y, SUN Ping, ZHANG Ming, et al. Mechanism on apparent dip sliding of oblique inclined bedding rockslide at Jiweishan, Chongqing, China[J]. *Landslides*, 2011, **8**(1): 49 - 65.
- [19] YIN Y. Recent catastrophic landslides and mitigation in China[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2011, **3**(1): 10 - 18.
- [20] 冯 振. 斜倾厚层岩质滑坡视向滑动机制研究[D]. 北京: 中国地质科学院, 2012. (FENG Zhen. Research on mechanism of apparent dip slide from oblique inclined thick layered rock slope failure[D]. Beijing: Chinese Academy of Geologic Sciences, 2012. (in Chinese))
- [21] 冯 振, 殷跃平, 李 滨, 等. 重庆武隆鸡尾山滑坡视向滑动机制分析[J]. *岩土力学*, 2012, **33**(9): 2704 - 2712. (FENG Zhen, YIN Yue-ping, LI Bin, et al. Mechanism analysis of apparent dip landslide of Jiweishan in Wulong, Chongqing[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, **33**(9): 2704 - 2712. (in Chinese))
- [22] 冯 振, 殷跃平, 李 滨, 等. 斜倾厚层岩质滑坡视向滑动的土工离心模型试验[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, **31**(5): 890 - 897. (FENG Zhen, YIN Yue-ping, LI Bin, et al. Centrifuge modeling of apparent dip slide from oblique thick bedding rock landslide[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, **31**(5): 890 - 897. (in Chinese))
- [23] 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 Chuan-zheng. 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))

- [24] 李腾飞, 李 晓, 李守定, 等. 地下采掘诱发斜坡失稳破坏机制研究——以武隆鸡尾山崩滑为例[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **31**(增刊 2): 3803 - 3810. (LI Teng-fei, LI Xiao, LI Shou-ding, et al. Mechanism of slope failure induced by undermining—a case study of Jiweishan rockslide in Wulong[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(S2): 3803 - 3810. (in Chinese))
- [25] 邓茂林, 许 强, 郑 光, 等. 基于离心模型试验的武隆鸡尾山滑坡形成机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, **35**(增刊 1): 3024 - 3035. (DENG Mao-lin, XU Qiang, ZHENG Guang, et al. Study on the formation mechanism of Jiweishan landslide in Wulong ,Chongqing, China-based on centrifugal model test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, **35**(S1): 3024 - 3035. (in Chinese))
- [26] 许 强, 汤明高, 徐开祥, 等. 滑坡时空演化规律及预警预报研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(6): 1104 - 1112. (XU Qiang, TANG Ming-gao, XU Kai-xiang, et al. Research on space-time evolution laws and early warning-prediction of landslides[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(6): 1104 - 1112. (in Chinese))
- [27] 彭国喜. 西南山区“关键块体”控制型滑坡的形成条件与失稳机理研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2011. (PENG Guo-xi. The research of the formative condition and instability mechanism of the landslide controlled by the key blocks in southwest mountainous-the cocktail mountain landslide in Chongqing Wulong, for example[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011. (in Chinese))
- [28] 邓茂林, 许 强, 蔡国军, 等. 重庆武隆鸡尾山岩质滑坡软弱带微观特征[J]. 工程勘察, 2012, **40**(4): 5 - 10. (DENG Mao-lin, XU Qiang, CAI Guo-jun, et al. Micro-characteristics of weak-soft zone of Jiweishan Rockslide in Wulong County, Chongqing, June 5, 2009[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2012, **40**(4): 5 - 10. (in Chinese))
- [29] LI S H, Z M, WANG Y N. A new numerical method for DEM-block andparticle model[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, **41**(3): 436 - 436.
- [30] 邓茂林, 许 强, 韩 蓓, 等. 武隆鸡尾山滑坡滑带软岩流变试验研究[J]. 工程勘察, 2013, **41**(7): 7 - 11. (DENG Mao-lin, XU Qiang, HAN Bei, et al. Experimental study on the rheology of soft rocks in the slip zone of Jiweishan rockslide[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2013, **41**(7): 7 - 11. (in Chinese))

本期广告索引

- 封 2 北京理正软件股份有限公司
封 3 重庆地质仪器厂
封 4 南瑞集团水利水电技术分公司