

文章编号: 1008-2786-(2015)1-94-06

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000013

基于非连续变形分析的贵州典型崩塌研究

刘 宇, 刘明鑫, 徐湘涛

(成都理工大学 地质灾害防治与环境保护国家重点实验室/环境与土木工程学院 四川 成都 610059)

摘 要: 非连续变形分析(DDA)方法考虑了岩体结构面对稳定的影响,融入了变形的不连续性和时间概念,更加符合崩塌体变形破坏的复杂过程。应用 DDA 对贵州山区典型的软硬岩互层构造+不合理采矿形成的崩塌进行了模拟,效果非常接近真实情况。结果表明,研究区崩塌体变形破坏演化过程分为山体下陷、拉裂缝扩展和失稳倾倒 3 个阶段,山体破坏形态与张拉裂缝相互影响,共同作用,是具有代表性的“拉裂-倾倒式”崩塌;根据模拟测点的数据,给出崩塌体变形破坏各阶段的变形量化参考值,可为该类崩塌体监测与预警指标体系研究提供重要参考依据。

关键词: 非连续变形分析;崩塌;变形破坏机制;演化过程

中图分类号: P642.21

文献标志码: A

山地是贵州分布面积最大的地貌类型^[1],成因各异,在褶皱断裂基础上由流水侵蚀而成,并且深受地质构造控制,喀斯特发育分布广泛,多层性显著。在这种特殊地形条件下,贵州境内崩塌主要分布在中低山地区,崩塌大多发生在坡度大于 50°的斜坡,尤其是近于直立以斜向或反向顺层构成的陡崖最易产生崩塌隐患。一方面,容易形成高陡斜坡的岩体大多为硬质岩层,若其下伏软弱岩层,就为崩塌发育提供了重要的内在条件;另一方面,人类不合理的工程活动,特别是矿产资源开发,使脆弱的地质环境进一步恶化,更加剧了崩塌的产生。

拉裂-倾倒是贵州地区高陡岩质边坡较为普遍的一类斜坡变形破坏模式。国内众多学者对该模式的形成条件和演变过程进行了详细分析,根据其变形的发展可划分为陡倾面拉裂、板梁弯曲-拉裂面扩展、板梁折裂-倾倒等 3 个阶段^[2]。贵州省威宁县猴场镇么岩脚崩塌的变形破坏过程,可划分为山体下陷、拉裂缝扩展、失稳倾倒等 3 个阶段,是一类较为典型的因矿层采空引起的典型“拉裂-倾倒式”崩塌。本文基于非连续变形分析(DDA)对么岩

脚崩塌的变形破坏机制与演化过程进行了研究。

1 研究区工程地质特征

么岩脚崩塌发育于贵州西部高原山地,威宁县猴场镇南侧 NW 走向的陡崖部位。出露地层为中二叠统梁山组、栖霞组、茅口组和第四系松散覆盖层。梁山组岩性为灰、深灰色薄至中厚层粉砂岩、石英砂岩、粉砂质泥岩、铝土质泥岩、泥岩夹煤层;栖霞组岩性为深灰色中厚层状灰岩;茅口组岩性为厚层至块状灰岩,局部夹燧石灰岩;第四系覆盖层为残坡积粘土,厚 0~3 m。地层产状为 SN/W \angle 8°,无断层发育,有 2 组构造节理:J1 产状 N57°W/SE \angle 89°,与陡崖延伸方向基本一致,控制灰岩中的溶沟主方向,间距 40~80 cm,平均延伸长度在 10 m 以上;J2 产状 N32°E/SE \angle 72°。陡崖上部浅表部 2~5 m 不均匀发育有平行坡面的卸荷裂隙,构成灰岩以化学风化为主,其中沿 NW 向裂隙溶蚀明显;陡崖底部中厚层石英砂岩,风化较强烈,形成凹槽,弱化了底部岩石的支撑能力。

收稿日期(Received date): 2013-12-19; 修回日期(Accepted): 2014-04-09。

作者简介(Biography): 刘宇(1988-),女,湖北荆门人,硕士研究生,主要从事岩土体稳定性及工程环境效应方面的研究工作。[Liu Yu (1988-), female, was born in Jingmen, Hubei province, master graduate student, mainly engaged in the rock mass stability and engineering environment effect research.]E-mail: liumingxin29@126.com

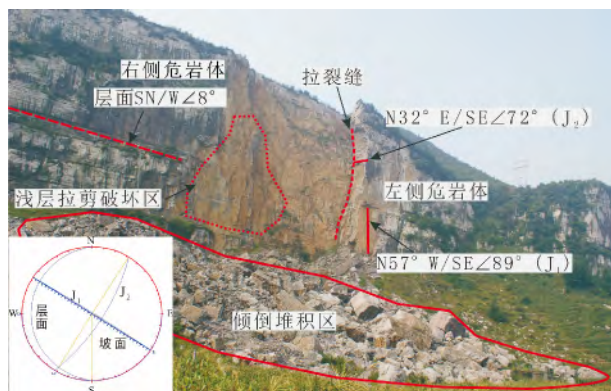


图1 研究区崩塌岩体结构图

Fig. 1 Structure graphics of collapses in research area

陡崖下有3处采煤洞口,以大角度斜向下进入陡崖,由于过度回采,2006-01-27研究区发生崩塌。根据崩塌后崩塌腔和崩塌堆积体特征分析,判断崩塌启动及失稳过程为:陡崖崩塌段喀斯特作用强烈,由于控制结构面垂直发育,陡崖前缘形成厚板状的不稳定岩体,地下不合理采煤影响,引起厚板状不稳定岩体根部应力逐步积累,失稳进入累进性破坏,导致倾倒破坏。崩塌后,各采煤洞口关闭,但崩塌腔两侧残留危岩体仍处于缓慢变形中,特别是图1中左侧危岩体,紧邻崩塌发育,变形破坏特征明显,在幺岩脚崩塌变形破坏演化过程中具有重要的参考价值。

2 变形破坏数值分析

2.1 DDA 计算模型的建立

选取图1中崩塌体左侧危岩体以 $N32^{\circ}E$ 切出剖面(图2),建立DDA计算模型(图3)。计算模型主要考虑层面和节理面 J_1 的组合关系,由上而下分别为灰岩层、石英砂岩层、粉砂质泥岩层、煤层和泥岩层。该模型(1:2000)高230 m,宽320 m,陡崖面距离右边界190 m,陡崖高81 m,由5种物理材料385个块体组成。在现场调查情况和历史数据的基础上设定煤层采空区,采空率为75%。

2.2 计算初始条件和参数的选取

崩塌研究区位于威水背斜的NE翼上的次级缓背斜核部,无区域性断裂通过,在发耳菱形构造周缘构造应力场较小^[3]。为了简化模型,在天然工况条件下,不考虑构造应力场,只考虑自重应力场,方向为垂直向下。边界条件方面,左侧和底部设置约束,右侧低地平台设置约束,崩塌体上部和临空面

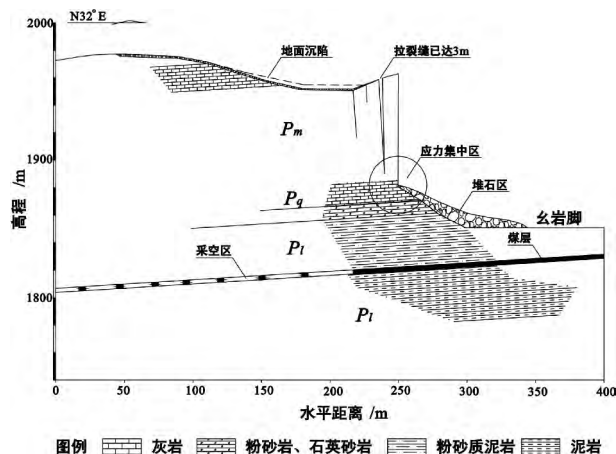


图2 崩塌体左侧危岩体工程地质剖面图

Fig. 2 Engineering geological profile of the left unstable rock of collapse

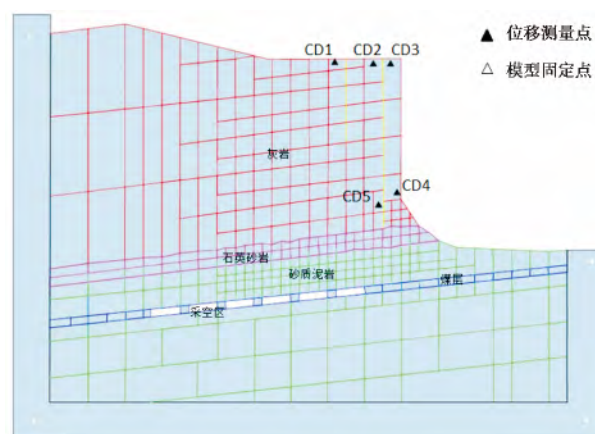


图3 DDA 计算模型图

Fig. 3 DDA calculation model

为自由边界。根据研究区域前期勘察资料和室内试验成果,参考文献[4-5]获得模型的物理力学参数,见表1。

2.3 DDA 模型变形破坏过程分析

计算时,使用DDA软件动力学模式迭代1000步,时步0.01 s,每时步最大位移0.001 m。DDA模型的变形破坏过程详见图4。

从DDA模拟演化过程中变形破坏特征与崩塌现场实际破坏特征对比(图5)来看,DDA方法的数值模拟结果非常接近真实情况,可以作为崩塌变形破坏机制的分析依据。

整个DDA模拟演化过程可以分为山体下陷、拉裂缝扩展、失稳倾倒3个阶段。

1. 山体下陷阶段: 煤层顶部为石英砂岩和砂质页岩的软硬互层结构,层间结合力差,易于滑动,抗弯能力也差^[6]。当煤层被采空后,在山体重力作用下

表 1 DDA 模型物理力学参数表
Table 1 Physical mechanics parameter value of DDA model

岩层类型 Rock type	弹性模量 Elastic modulus /(GPa)	泊松比 Poisson's ratio	密度 Density /(g/cm ³)	内聚力 Cohesion /(MPa)	内摩擦角 Internal friction angle/°	抗拉强度 Tensile strength /(MPa)
石灰岩	15.0	0.20	2.6	15.3	40	4.4
石英砂岩	5.5	0.19	2.2	8.40	35	2.8
砂质泥岩	11.2	0.35	2.3	0.33	22	2.5
煤层	0.1	0.39	1.3	0.15	20	0.3
层面	—	—	—	0.10	25	0.1
节理面	—	—	—	0.06	15	0.1

应力重新调整,矿柱处应力集中产生压缩变形。由于采空率过大、回采过深等因素,采空区顶板支撑岩层受沉弯曲,进而张裂、折断、形成塌落,其上覆硬质石灰岩移动,引起山体表部下陷。

2. 拉裂缝扩展阶段:研究区崩塌体在构造裂隙J1的基础上,经溶蚀作用形成裂隙,山体下陷产生的拉应力使裂隙错动张开。母岩体在应力应变调整过程中,产生挤胀作用,使拉裂缝张开越来越大。由

于裂缝的扩展方向垂直、岩体层面反倾和石灰岩的力学特性,拉裂缝一直延伸到崩塌体底部下石炭统祥摆组石英砂岩层。

3. 失稳倾倒阶段:随着裂缝不断扩展,分离岩体重心偏移,在陡崖脚部(祥摆组和旧司组过渡段)软弱层形成应力集中区,导致临空面底部岩体压剪破坏,进一步减弱了应力集中区的岩体强度,分离岩体加速变形,最后倾倒破坏,崩塌发生。

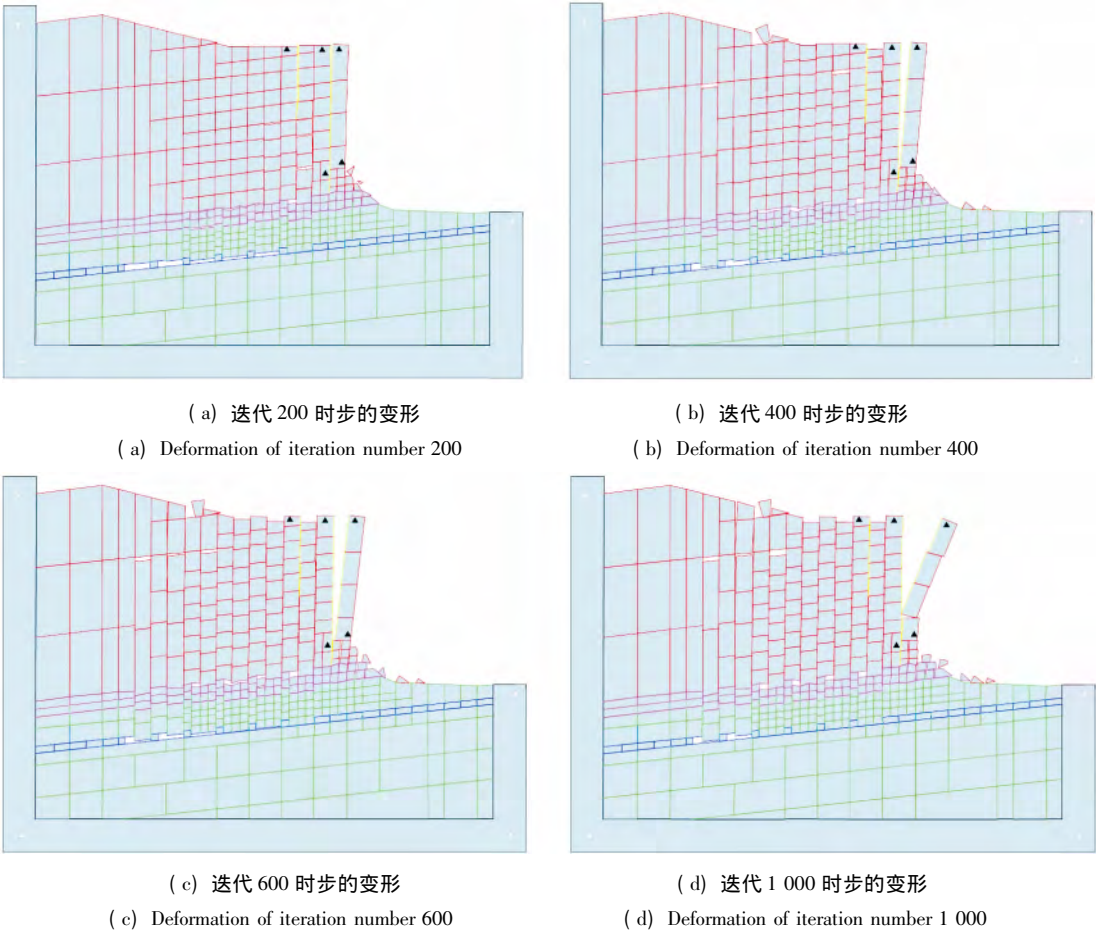
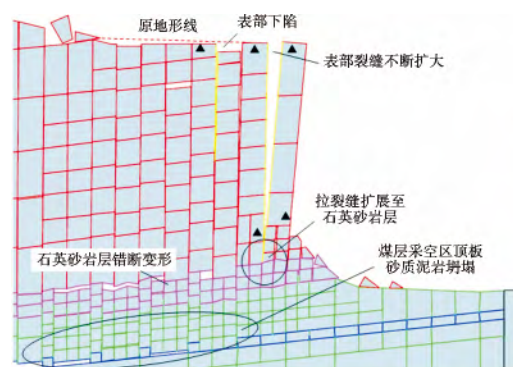
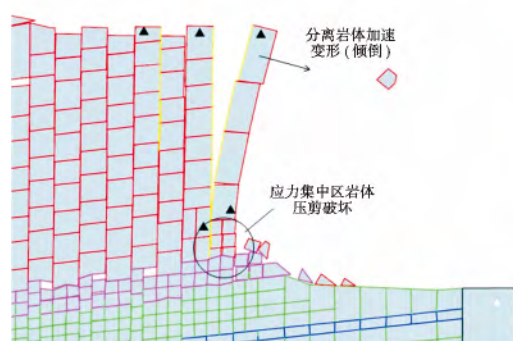


图 4 DDA 计算模拟变形过程
Fig. 4 Deformation process of DDA calculation and simulation



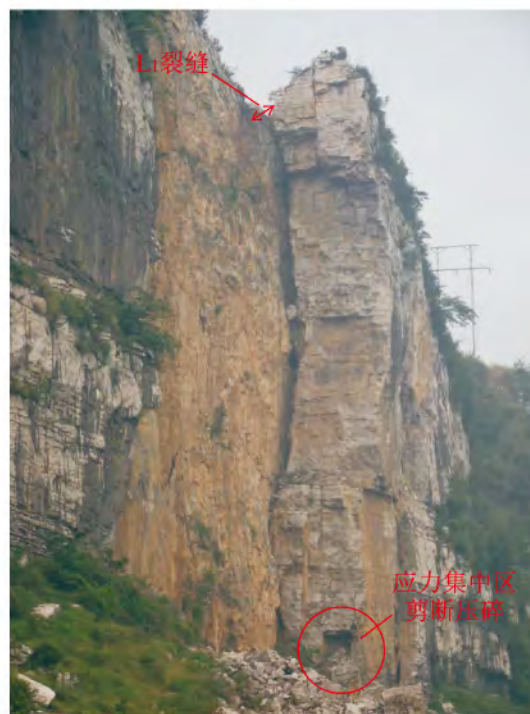
(a) 迭代 400 时步的局部变形破坏特征

(a) The local deformation characteristics of iteration 400



(b) 迭代 800 步的局部变形破坏特征

(b) The local deformation characteristics of iteration 800



(c) 危岩体现场实际变形破坏特征

(c) The spot failure characteristics of collapse

图5 模拟局部变形特征与现场实际对比

Fig.5 Simulation of contrast of local deformation characteristics

在这一过程中,山体变形形态以及裂缝的张拉形成相辅相成,相互影响,共同作用于崩塌体的变形破坏。由此可以判断,研究区崩塌体是贵州西部山区碳酸质硬岩高陡崖山体因矿层采空引起的典型“拉裂-倾倒式”崩塌。

3 崩塌体变形量化参考值分析

岩体位移(裂缝分割块体的位移变化)、裂缝相对位移(缝张开、闭合、错位、下沉变化)和危岩体倾斜度是崩塌变形监测的主要内容,是崩塌体监测预警指标的重要判断依据。

由 DDA 模拟测点的绝对位移变化情况(图 6、7)可得出:分离岩体表面 CD1 位移量最大,迭代 1 000 时步后达到 25.2 m; CD2 开始随 CD1 增大,在母岩体挤胀作用后回弹摆动; CD3 的变化主要为山

体下沉的位移量;底部内侧 CD4 小幅位移后回弹,说明受采空区影响山体内部岩层结构应力调整后向临空面释放;陡崖底部临空面 CD5 位移量很小,是悬臂梁弯曲破坏结构^[5]的板梁根趾部位。

若把岩体表面 CD2 和 CD3 之间的相对位移设为 L1, CD1 和 CD2 之间的相对位移设为 L2,则 L1 和 L2 变化可以表示拉裂缝张开闭合关系。通过 L1 的变化可以划分出拉裂缝形成、缓慢扩展和加速扩大 3 个过程(图 8),对应崩塌体失稳破坏的 3 个阶段。相应时段 L2 的变化则能体现出母岩体和分离岩体过渡段的变形特征,见图 9。山体下陷首先形成拉裂缝 L2,后影响逐步到临空面而形成 L1;随后其内部应力应变调整,产生挤胀作用,使 L1、L2 缩小;山体应力应变在临空面释放后,母岩体和分离岩体过渡段产生回弹, L2 摆动变化后趋于稳定,而分离岩体继续向临空面位移, L1 不断扩大。

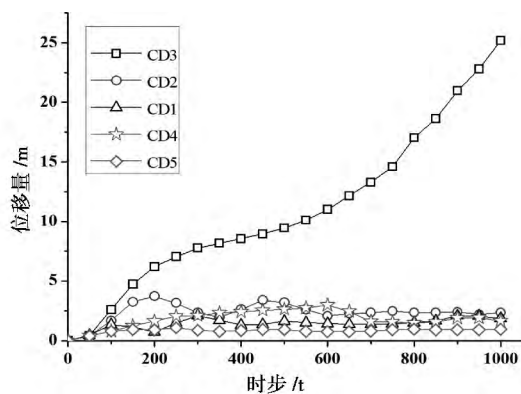


图6 模型监测点位移量-时间曲线

Fig. 6 Displacement-time curve of model monitoring point

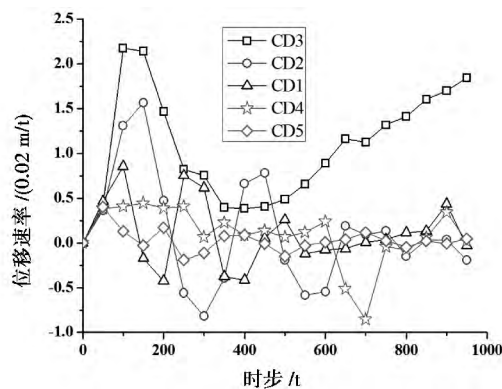


图7 模型监测点位移速度-时间曲线

Fig. 7 Displacement velocity-time curve of model monitoring point

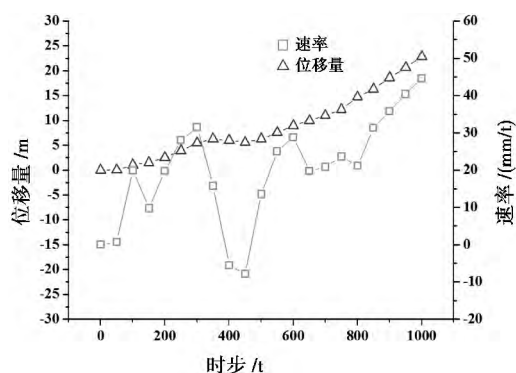


图8 L1 变化曲线

Fig. 8 The variation curve of L1

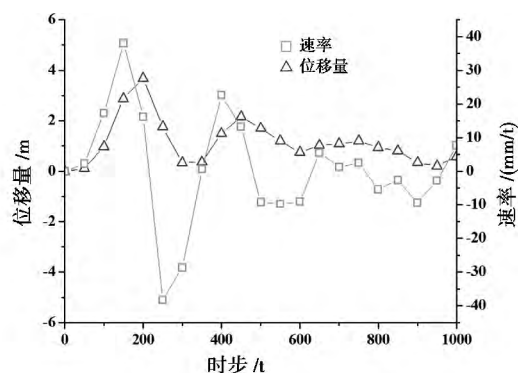


图9 L2 变化曲线

Fig. 9 The variation curve of L2

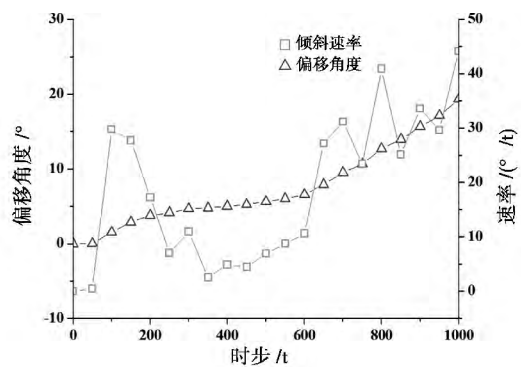


图10 CD3-CD4 与垂线夹角变化

Fig. 10 The angle variation of CD3-CD4 and perpendicular

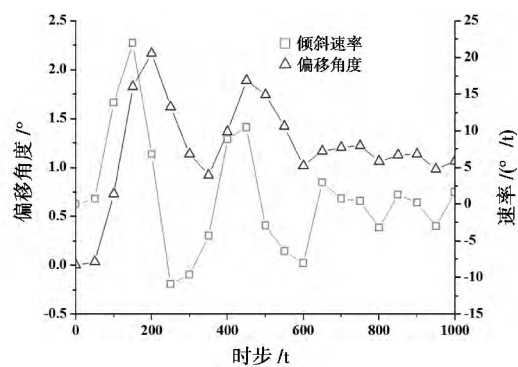


图11 CD2-CD5 与垂线夹角变化

Fig. 11 The angle variation of CD2-CD5 and perpendicular

通过测点间连线与垂线夹角的变化,可以体现出分离危岩体倾斜变形情况。CD3-CD4 与垂线夹角一直增大(图10),结合位移数据,说明分离危岩体以底部软弱区域为原点转动,最大偏移角超过 16° ,角速度达到 $0.044^\circ/\text{时步}$,进入加速变形过程,符合典型“拉裂-倾倒式”崩塌的悬臂板梁弯曲破坏机理^[2]。CD2-CD5 与垂线夹角在 $-2^\circ \sim 1^\circ$ 之间

小幅波动后趋于稳定(图11),说明分离危岩体后缘岩体受前缘变形破坏影响,结构面松动,但整体未完全失稳。

4 结论

1. 崩塌变形破坏是一个复杂的过程,极限平衡

计算和有限元分析均无法描述其动力学特征和变形破坏过程,而非连续变形分析(DDA)可以考虑岩体结构面对稳定的影响,融入了变形的不连续性和时间概念,更加符合实际情况。

2. DDA 模拟的结果表明,幺岩脚崩塌在煤层实际采空条件和自重应力场下变形破坏过程分为3个阶段:煤层采空范围过大引起山体下陷;山体内部应力应变调整,拉裂缝不断扩展;分离岩体重心偏移,应力集中区压剪破坏,最后失稳倾倒。揭示了贵州西部碳酸盐硬岩高陡崖因下伏软弱基座中煤层采空而引起的典型“拉裂-倾倒式”崩塌的变形破坏机制和演化过程。

3. 通过 DDA 模拟监测点的数据分析,给出了幺岩脚崩塌变形破坏各阶段的变形量趋势特征,可以作为该类崩塌体监测与预警指标体系的重要参考依据。

参考文献(References)

- [1] Guizhou Regional Geographic Information Project Leading Group Office. Guizhou geographic information data set [M]. Guiyang: Guizhou People's Publishing House, 1996: 169 - 172 [贵州省区域地理信息项目领导小组编. 贵州省地理信息数据集 [M]. 贵阳: 贵州人民出版社, 1996: 169 - 172]
- [2] Zhang Zhuoyuan, Wang Shitian, Wang Lansheng. Engineering geology analysis principle [M]. Beijing: Seismological Press, 1994: 331 - 335 [张倬元, 王士天, 王兰生. 工程地质分析原理 [M]. 北京: 地质出版社, 1994: 331 - 335]
- [3] Yue Guangyu, Zhang Shijun, Yang Wunian. Structural deformation patterns and tectonic stress field in west - central Guizhou [J]. Scientia Geologica Sinica, 1994, 29(1): 11 - 12 [乐光禹, 张时俊, 杨武年. 贵州中西部的构造格局与构造应力场 [M]. 地质科学, 1994, 29(1): 11 - 12]
- [4] China Institute of Water Resources and Hydropower Research. Rock mechanics parameters of the manual [M]. Beijing: China Water Power Press, 1991: 463 - 485, 502 - 509, 513 - 529, 536 - 537 [水利水电科学研究院. 岩石力学参数手册 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1991: 463 - 485, 502 - 509, 513 - 529, 536 - 537]
- [5] Manual of Engineering Geology Editorial Board. Manual of engineering geology [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2007: 280 - 284, 518 - 521 [《工程地质手册》编委会. 工程地质手册 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007: 280 - 284, 518 - 521]
- [6] Li Linzhong, Ouyang Dao, Xiao Rongjiu et al. Mine engineering geological mechanics of rock mass [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1987: 115 - 130 [李林中, 欧阳道, 肖荣久, 等. 矿山岩体工程地质力学 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1987: 115 - 130]

Research on the Typical Collapse of Guizhou Based on the Discontinues Deformation Analysis

LIU Yu, LIU Mingxin, XU Xiangtao

(National Specialty Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection/College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China)

Abstract: The method of DDA considered the influence of stability from rock mass structure, involved the conception of discontinues of deformation and time, this are more conform to the complicated process of the deformation of collapse. The discontinuous deformation analysis program was applied to simulate the deformation process of collapse masses that formed by hard rock, high diffis terrain and mining, the results close to the reality circumstance. The failure deformation and the tension fissure influence each other and work together. This is the typical collapse masses of fracture-toppling type. This paper comes up with the displacement variation characteristics of collapse masses in each deformation stage based on the simulated data, provides important theoretical basis for the precaution monitoring of this collapse masses.

Key words: discontinuous deformation analysis; collapse; deformation mechanism; evolution