

袁志辉, 倪万魁, 陈志新. 拉裂式崩塌的运动特征分析——以陕西延长县为例[J]. 灾害学, 2014, 29(4): 111–115. [Yuan Zhihui, Ni Wangkui and Chen Zhixin. Analysis on movement characters of Pull-splitting Collapses——Taking Yanchang County of Shaanxi Province [J]. Journal of Catastrophology, 2014, 29(4): 111–115.]

拉裂式崩塌的运动特征分析

——以陕西延长县为例*

袁志辉, 倪万魁, 陈志新

(长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 利用离散元法对延长县拉裂式岩质崩塌进行了数值模拟, 研究了拉裂式崩塌的运动过程, 分析了其运动规律。根据崩塌的受力形式和运动特点, 拉裂式崩塌的运动过程分为岩体原有节理的开裂变形、崩塌体与基岩碰撞的落体运动、崩塌体相互碰撞与堆积、坡体的二次变形破坏四个阶段。由于影响崩塌运动的因素很多, 其运动形式也非常复杂, 数值模拟得出崩塌的运动速度小于理论计算结果, 运动距离与实际调查结果基本一致。因此数值模拟结果可用于预测该类型崩塌的影响范围, 同时对工程实践具有指导意义。

关键词: 拉裂式; 崩塌; 运动过程; 运动规律; 影响范围; 离散元; 陕西延长

中图分类号: P642; X4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000–811X(2014)04–0111–05

doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2014.04.021

崩塌是较陡斜坡上的岩土体在重力或其他外力的作用下突然脱离母体崩落、滚动、堆积在坡脚(或沟谷)的地质现象。陡峭的斜坡地形是危岩形成并造成崩塌坠落的必要条件, 大量存在的岩体或土体结构面是崩塌发育的地质构造特征, 软硬相间的地层组合是形成崩塌的主要地层组合, 重力、降雨、地震和人工开挖等是崩塌发育破坏的动力作用。崩塌是一种规模不大但突发性和破坏性强的地质灾害, 是三大地质灾害常见灾害之一。

目前对崩塌的初始速度、运动形式和运动规律的研究也越来越多, 1990年曾廉将崩塌落石的运动形式分为坠落、跳跃、滚动和滑动, 多数情况下为跳跃和滚跳的组合^[1]; 赵旭根根据运动学原理结合工程实例将崩塌落石分为坠落、滑动、滚动和弹跳等阶段^[2]; 唐红梅将崩塌下落分为四个阶段, 即初始位移阶段, 碰撞阶段, 滑动阶段和滚动阶段^[3]; 对于崩塌的运动路径研究主要是通过运动学原理、牛顿的碰撞理论和瞬间摩擦作用理论等来进行理论计算, 但崩塌体是一个包含崩落、倾倒、碰撞、滚动、碰撞回弹、滑动和崩塌体之间的相互作用等复杂的运动^[4–16], 因此为了能够对崩塌的运动过程和运动规律等进行合理的分析和判断, 本文运用2D-Block离散元对拉裂式崩塌进行数值模拟, 研究崩塌脱离母体后块体与块体和块体与坡面的相互碰撞及其运动过程,

分析其运动规律和运动特征。

1 拉裂式崩塌的概况

该崩塌位于陕西省延长县中村延延公路路旁, 地理位置为 $36^{\circ}37'58''N$, $109^{\circ}53'21''E$, 为修建公路形成的岩质人工破碎高陡边坡, 边坡坡度近乎直立, 局部区域形成鹰嘴岩, 坡长3~5 m, 坡高15~30 m, 坡宽300 m, 坡面凹凸不平, 坡向 290° , 出露地层为三叠系中统铜川组砂岩夹泥质页岩, 上部为 Q_3 黄土覆盖, 砂岩厚度一般为1.2~2 m, 泥质页岩厚度一般为0.1~0.6 m, 岩体产状为 $300^{\circ}\angle 2^{\circ}$ 。虽然岩层近水平状产出, 但由于河流的切割、人类工程活动的开挖、薄层泥质页岩的风化剥蚀和植物根系的破裂等影响, 使得斜坡岩体破碎, 节理裂隙发育, 主要发育有两组节理裂隙, 分别为 $300^{\circ}\angle 88^{\circ}$, $70^{\circ}\angle 85^{\circ}$ 。根据岩体结构分析法, 发育的两组节理与岩层的组合关系可定性得出, 该斜坡是不稳定的; 同时通过调查发现, 该斜坡坡脚时有崩塌体堆积, 并通过询问养路工人, 该崩塌落石的崩塌距离多集中在距坡脚4 m, 最远距离坡脚5.5 m, 部分小岩块在坠落后与公路的碰撞、破碎和回弹, 可抛出公路外, 掉落于延河中。

* 收稿日期: 2014–03–24 修回日期: 2014–05–06

基金项目: 中国地质调查局项目(1212010640402)

作者简介: 袁志辉(1983–), 男, 江西高安人, 博士研究生, 主要从事岩土体稳定性研究。E-mail: 306246737@qq.com

表 1 数值模拟采用的力学参数

名称	岩土体物理力学参数							
	重度/ (kN/m^3)	摩擦角/ ($^\circ$)	接触法向 刚度/ Pa	接触切向 刚度/ Pa	节理摩 擦角/($^\circ$)	节理法向 刚度/ Pa	节理切向 刚度/ Pa	块体间 粘聚力/ Pa
黄土	1 800	20	8.0×10^6	3.2×10^6	10	4.0×10^6	2.0×10^6	3.0×10^3
泥质页岩	2 500	30	3.0×10^9	1.2×10^9	15	1.5×10^9	7.0×10^8	0
砂岩	2 600	40	6.0×10^9	2.4×10^9	25	3.0×10^9	1.5×10^9	0

2 拉裂式崩塌的运动过程

离散元法是一种建立在经典力学基本运动定律基础上,研究离散的单元之间相互作用及其变化规律的学科分支。1970 年代初由 Cundall 等人首先提出该思想,后经过不断地改进和完善,成为专门用于解决不连续介质的变形和运动问题。该方法把发育有节理裂隙的破碎岩体作为离散的单元来处理,允许岩块滑动、转动和变形,通过微小变形的求解来实现模拟模型的大变形,因此可以比较真实地模拟岩土体在受力状况下渐进性的大变形破坏过程。本文研究的是岩体崩落时和崩落后的运动过程,因此只考虑岩体结构面已贯通的情况。

2.1 模型建立和边界条件

模型剖面采用实测工程地质剖面,模型范围与实测工程地质剖面相一致,即宽 18 m,高 19.7 m,选定层面、各节理面作为结构面划分单元(图 1),划分出 6 192 个块体单元。模型边界采用固定位移边界,模型的左边界和下边界均为固定边界,在模拟过程中不发生横向和竖向位移,其余边界为自由边界。为了更清楚的分析崩塌块体的运动速度、运动轨迹和位移,在软件中指定两个块体作为跟踪块体,跟踪块体为图 1 中所标示的两个块体,块体号分别为 4460 和 4463。

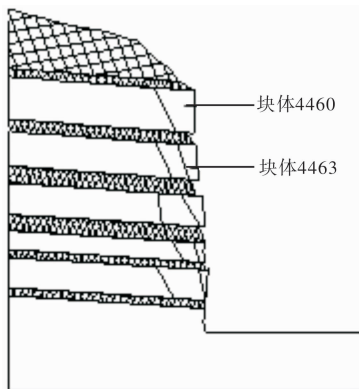


图 1 中村延延公路崩塌地质模型

2.2 参数选取

离散元法提供两种本构模型均与速度无关的接触模型,岩土体的物理力学参数由块体和节理的本构关系来确定,结合该崩塌的试验数据和前

人的经验,选取表 1 中参数进行数值模拟。

2.3 模拟结果分析

模拟结果如图 2、3、4、5、6 所示,根据崩塌的受力形式和运动过程中的特点,将拉裂式崩塌的运动分为四个阶段:岩体原有节理开裂变形,岩体与基岩碰撞的落体运动,崩塌体的碰撞与堆积,坡体的二次变形破坏。

(1) 岩体原有节理开裂变形阶段

由图 2 可以看出,岩体原有的节理裂隙在自身的重力作用下逐渐张开并开始脱离母岩;同时由于坡体为砂岩和泥质页岩互层,并且泥质页岩风化破碎,使得砂岩存在临空面,因此在岩体原有节理裂隙张开的情况下产生拉裂并开始下坠。

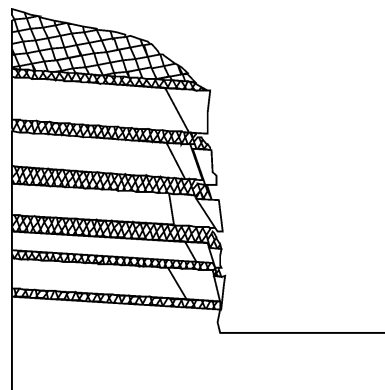


图 2 岩体原有节理裂隙的开裂变形

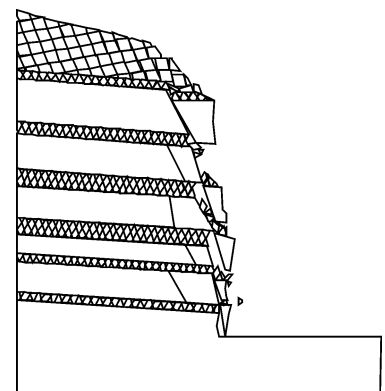


图 3 岩块与基岩碰撞的落体运动

(2) 岩块与基岩碰撞的落体运动阶段

由图 3 可以看出,斜坡上岩体在重力的作用下做落体运动,但岩体在下坠过程中与下部岩体可能发生摩擦、碰撞,因此运动轨迹并不是很理想的自由落体运动轨迹。岩体在开始运动时基本呈

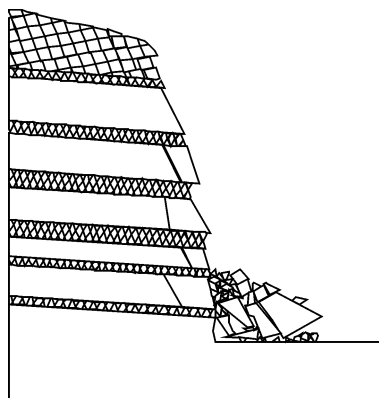


图4 崩塌体的碰撞与堆积

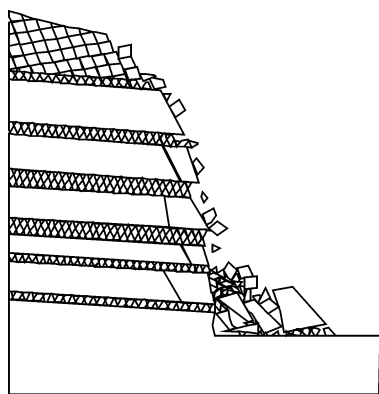


图5 坡体的二次变形破坏

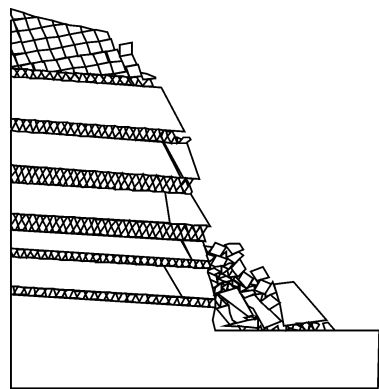


图6 崩塌体的堆积

现自由落体运动轨迹,在碰撞岩体后出现斜抛、倒转运动;而基岩上部的黄土体由于岩体的下坠使得其失去了支撑,因此上部黄土体会产生应力重分布,并在局部区域产生变形开裂,致其掉块、下坠。

(3) 崩塌体的碰撞与堆积阶段

由图4可以看出,即使岩块在下坠过程中会与

地面发生碰撞产生斜抛或倒转运动,但崩塌体主要堆积在坡脚,崩塌体形状不规则,大小不一,小块体大都充填于大块岩体中。崩塌体在坡脚堆积比较厚,远离坡脚崩塌体的厚度逐渐变薄。这与实际崩塌体的堆积情况是吻合的。

(4) 坡体的二次变形破坏阶段

由图5和图6可以看出,斜坡顶部的黄土体由于下部岩体的掉落使得坡度变陡,并在坡体前部产生了变形开裂,但并没有开始下坠并掉落(图4),同时坡体中下部砂岩由于坡体内部的节理裂隙有进一步开裂、变形增大的趋势。这可以认为是黄土体在下部砂岩下坠之后顶部的黄土体在失去支撑之后产生了应力重分布的现象,使得局部黄土体产生了变形开裂,并在外界作用和自身重力的作用下下坠掉块;而斜坡中的砂岩由于存在节理裂隙,加之互层的泥质页岩的强烈风化破碎,剥蚀比砂岩快,致使砂岩临空,在自身重力的作用下,斜坡中的砂岩块体随着节理裂隙的扩大,会产生进一步的剥蚀掉块,但形成的岩堆给斜坡坡脚以侧向压力,使得发生崩塌的突破处往上移,斜坡逐渐后退、规模变小的趋势,直至整个斜坡达到稳定,当然这也许需要几千几万年的时间。

运用离散元法模拟,生动地展示了拉裂式崩塌的破坏和运动全过程,能够有效地补充和解释斜坡的变形、破坏过程;拉裂式崩塌的特点是岩块体积不大,脱离母体突然,基本为自由落体运动,并且在斜坡上还存在部分裂隙有张开的趋势,在达到临界条件时会拉裂坠落。

3 崩塌的运动特征

岩块从母体分离后,岩块的运动形态最初与崩塌的分类有关,第一次落地的运动状态基本相似,即先弹跳、后滚动再滑动,后者是后两者^[4]。该拉裂式崩塌主要为脱离岩块后以一定加速度的落体运动和与地面碰撞后弹跳为主,由于崩塌下部为平坦的公路,因此不存在滑动形式。对崩塌落石运动特征进行分析,主要是分析崩塌落石的运动速度、运动轨迹和影响范围。

通过对块体4460和块体4463在拉裂坠落过程的跟踪,可以得到这两个块体运动前的形心坐标,块体运动后的形心坐标和形心位移,同时可跟踪到块体几乎接触地面或接触崩塌体时的速度,具体见表2。

表2 跟踪块体坐标、速度和位移

块体编号	块体运动前		块体运动后				
	形心 X 坐标	形心 Y 坐标	形心 X 坐标	形心 Y 坐标	形心 X 位移	形心 Y 位移	块体速度/(m/s)
4460	-1.362	11.548	3.404	1.356	4.766	-10.192	9.89
4463	-0.789	8.832	2.054	0.856	2.838	-7.976	7.54

3.1 崩塌运动速度

理论计算上来讲,由于拉裂式崩塌临空条件好,岩体在自身重力作用下基本不受阻挡便失稳而破坏,其初始运动速度为在重力加速度下的自由落体运动,初始速度为 0,重力加速度为 $g = 9.80 \text{ m}^2/\text{s}$,因此其运动轨迹方程为:

$$H = gt^2/2, \quad (1)$$

$$v = \sqrt{2gh}。 \quad (2)$$

式中: v 为崩塌体崩落速度(m/s); g 为自由落体加速度,为 $9.80 \text{ m}^2/\text{s}$; H 为崩塌体崩落高度(m)。

根据式(2) 计算跟踪块体 4460 和块体 4463 的速度分别为 $v_{4460} = 15.05 \text{ m/s}$, $v_{4463} = 13.16 \text{ m/s}$ 。

而从表 2 可以看出,块体 4460 和块体 4463 的速度比理论计算的速度要小,分别为 9.89 m/s 和 7.54 m/s ,主要原因是块体在下坠的过程中与坡体下部基岩碰撞所导致,且在碰撞后块体在 X 和 Y 方向上均有了速度,因此通过数值模拟可以很好的得到块体的运动速度,且考虑了块体与斜坡基岩碰撞的问题,但数值模拟所得到的速度是否与实际情况相符,需要现场试验的进一步验证。

3.2 崩塌的运动轨迹和距离

根据跟踪块体 4460 和块体 4463 的运动情况,可以得出块体的运动轨迹,由图 7 看出,块体的运动轨迹是不规则的,大致可以分为三个阶段:第一阶段基本为加速度下的自由落体运动;第二阶段为岩块与岩块、岩块与坡体基岩下的相互碰撞后改变方向的减速运动;第三阶段为岩体与下部崩塌体的相互碰撞后的弹跳或倒转运动。这与理论计算结果存在较大差异,主要是因为理论计算很难考虑到岩体与岩体、岩体与坡体基岩的相互碰撞,在碰撞的过程中岩体的加速度、速度和方向均会发生改变,因此导致了崩塌落石在下落过程中运动轨迹的不规则性,这种不规则运动轨迹是无法通过理论计算得到的。

崩塌的运动距离受岩体的形状、大小、地形等因素的影响,从模拟图可以看出,岩块 4460 的高度最高,因此其运动时速度和距离应为最远,通过跟踪其运动过程,依据表 2 和图 8 均可以得出块体 4460 形心的坐标、位移,块体 4460 形心 X 方向的位移可以通过形心坐标得到,也可以直接通过形心位移得到,即为图 7 中 S 的距离, $S = 4.77 \text{ m}$,在形心位移 S 的基础上应考虑崩塌体的形状、大小和崩塌体堆积的形态,才能够得出真正的崩塌距离 S' ,因此 $S' = 6.46 \text{ m}$;而通过现场调查崩塌体距离坡脚的最远距离为 5.50 m ,因此需要在此基础上加上该崩塌体崩塌前的形心 X 的坐标即为该崩塌体的距离,因此其实际距离应为 6.86 m 。

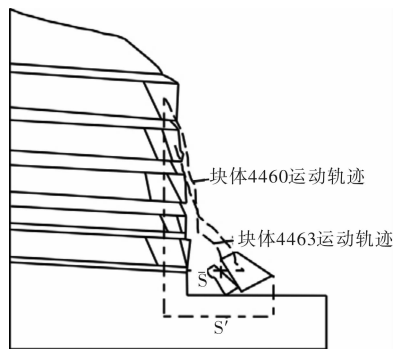


图7 崩塌体的运动轨迹示意图

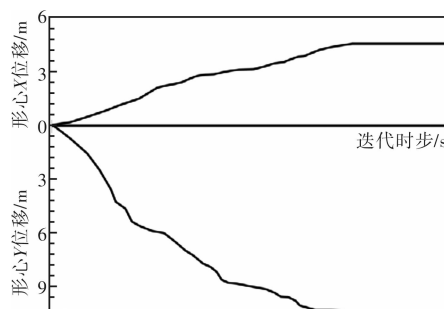


图8 块体 4460 的形心位移

通过对比两者数据得出,崩塌的实际运动距离比数值模拟结果稍大,这可能是因为数值模拟的力学参数取值偏大,同时在数值模拟中未考虑崩塌的诱发因素,如降雨、地震和振动等,在诱发因素下,岩体上应存在水压力和地震力等力的影响;因此数值模拟结果小于实际调查结果,但两者基本一致。

4 结论

(1) 通过对拉裂式崩塌的数值模拟,再现了该崩塌的破坏和运动全过程,并得到了该崩塌的运动速度、运动轨迹和运动距离。

(2) 拉裂式崩塌的破坏和运动过程可分为岩体原有节理开裂变形,岩体与基岩碰撞的落体运动,崩塌体的碰撞与堆积,坡体的二次变形破坏四个阶段。

(3) 由于影响崩塌运动的因素很多,其运动形式也非常复杂,但在数值模拟中地质模型一般较为理想,同时岩土体物理力学参数的选取也存在主观经验,因此数值模拟结果所得到的崩塌的运动速度小于理论计算结果;其运动距离比实际调查结果稍小,但基本一致。

(4) 数值模拟结果还可以预测斜坡上岩体的开裂和变形,斜坡上部分裂隙存在开裂变形的趋势,在临界状态下可能会拉裂坠落。

参考文献:

- [1] 曾廉. 崩塌与防治[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1990.
- [2] 赵旭, 刘汉东. 运动学在边坡落石计算中的应用[J]. 华北水利水电学院学报, 2004, 25(2): 46 – 50.
- [3] 唐红梅, 易朋莹. 危岩落石运动路径研究[J]. 重庆建筑大学学报, 2003, 25(1): 16 – 21.
- [4] 于国新, 周安荔. 张集铁路玄武岩崩塌落实特征研[J]. 铁道工程学报, 2008, 123(12): 10 – 13.
- [5] 陈洪凯, 王蓉, 唐红梅. 危岩研究现状及趋势综述[J]. 重庆交通学院学报, 2003, 22(3): 80 – 88.
- [6] 陈明东. 链子崖危岩体变形破坏机制及整治对策[J]. 地质灾害与环境保护, 1999, 2(1): 33 – 42.
- [7] 张奇华, 彭光忠, 付少兰, 等. 链子崖危岩体变形破坏系统辨识[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(5): 544 – 551.
- [8] 胡厚田. 崩塌落石研究[J]. 铁道工程学报, 2005(Supp. 1): 387 – 392.
- [9] 孙志云, 任自民, 王立, 等. 奉节李子垭危岩体稳定性研究[J]. 人民长江, 1994, 25(9): 48 – 53.
- [10] 叶四桥, 唐红梅, 祝辉. 基于落石运动特征分析的拦石网设计理念[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(4): 566 – 571.
- [11] 王念琴, 张倬元. 黄土滑坡灾害研究[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 2004.
- [12] 赵晓颜, 胡厚田. 万县长江三峡库区塌岸的数值模拟分析[J]. 水土保持学报, 2003, 17(5): 158 – 160.
- [13] 吴谨, 黄仁熊, 邹启学, 等. 贵州开阳磷矿区崩塌及其防治[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2011, 22(3): 27 – 32.
- [14] Bozzolo D, Pamini R. Simulation of rockfalls down a valley side[J]. Acta Mech, 1986, 63: 113 – 130.
- [15] Day R W. Case studies of rockfall in soft versus hard rock[J]. Environmental and Engineering Geoscience, 1997, 3(1): 133 – 140.
- [16] 甘建军, 吴晗, 黄润秋, 等. 汶川地震区典型堆积体成灾模式研究[J]. 灾害学, 2013, 28(4): 40 – 44, 88.

Analysis on Movement Characteristics of Pull-splitting Collapses ——Taking Yanchang County of Shaanxi Province as an Example

Yuan Zhihui, Ni Wangkui and Chen Zhixin

(College of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: Pull-splitting collapses in Yanchang City is simulated numerically by using discrete element method. According to bearing forms and movement characteristics of the collapses, movement process of a pull-splitting collapse is divided into four stages as cracking and deformation of rock mass joints, falling of collision between collapse bodies and bedrock, collision and accumulation of collapse bodies and the secondary deformation and failure of slope. Because there are many factors affecting the movement of collapse and its movement form is very complicated, the velocity of collapse from numerical simulation is less than the result of theoretical calculation, and movement distance of numerical simulation is consistent with the result of actual survey. Therefore, the results of numerical simulation can be used to influence scope of this type of collapse, and are of significant guiding value to engineering practice.

Key words: pull-splitting; collapse; movement process; movement law; influence scope; discrete element; Yanchang County of Shaanxi Province