

基于离散元的滑塌式危岩体失稳机理研究

王禄洲, 薛新华, 郭志元, 黄浩, 张芮棕

(四川大学 水利水电学院, 四川 成都 610065)

摘要: 为了研究滑塌式危岩体在地震动作用下的响应规律和失稳机理。以大渡河双江口水电站 27# 危岩体为例, 利用离散单元法对滑塌式危岩体在地震作用下的动力破坏情况进行数值模拟。结果表明: 滑塌式危岩体在地震荷载作用下发生破坏后, 失稳块体的运动主要分为三个阶段: 启动准备阶段、加速下滑阶段、滞留稳定阶段。结论揭示了地震作用下块体以滑动为主, 滚动为辅的失稳规律, 为危岩防灾减灾提供参考和借鉴。

关键词: 滑塌式危岩体; 离散单元法; 数值模拟; 地震荷载

中图分类号: U41

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2020)05—0132—05

Instability Mechanism of Sliding Dangerous Rock Mass Based on Discrete Element

WANG Luzhou, XUE Xinhua, GUO Zhiyuan, HUANG Hao, ZHANG Ruiliang

(School of Water Resources and Hydropower, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China)

Abstract: In order to analyze the response law and instability mechanism of the collapsed dangerous rock mass under the action of ground motion. By taking the 27# dangerous rock mass of the Shuangjiangkou Hydropower Station on the Dadu River as an example, the discrete element method was used to numerically simulate the dynamic damage of the collapsed dangerous rock mass under the action of earthquake. The results are as follows. After the collapse of the dangerous rock mass under earthquake load, the motion of the unstable block is mainly divided into three phases: start-up preparation phase, accelerated glide phase, and stabilization phase. The conclusion reveals the instability of the block under the action of earthquakes, with sliding as the main component and rolling as the auxiliary component, which can provide reference for the disaster prevention and mitigation of dangerous rocks.

Keywords: sliding dangerous rock mass; discrete element method; numerical simulation; earthquake load

近年来我国于西部工程建设的投资力度加大, 越来越多的工程难题不断涌现。环境危岩体的稳定性问题就是其中之一, 它严重威胁着我国山区居民生命与工程施工的安全。因此, 开展危岩体变形破坏机理的研究, 实现环境危岩的防灾减灾, 具有极大的实用价值。

国内许多学者对危岩的稳定性和破坏机理进行了深入的研究^[1-6]。而最常见的是研究手段是数值

建模分析, 主要可分为有限元法和离散元法等。有限单元法一般适用于连续体, 对于裂隙发育的危岩效果不是很理想。因此早在 20 世纪 90 年代, 徐卫亚等^[7-8]首次将离散单元法用于模拟危岩体破坏, 结合链子崖工程, 发现危岩破坏机制是以崩为主, 同时辅以以滑带崩、以崩诱滑。后来又有学者利用不同的离散元软件做了进一步研究, 例如, 袁志辉等^[9]利用 2D-Block 离散元软件模拟了倾倒式危岩

体的崩塌运动过程,发现结果与实际调查基本一致。田耘等^[10]发现 PFC 离散元仿真技术能较好地模拟岩质陡坡危岩崩落过程。薛新华等^[11]利用 UDEC 离散元模拟了地震作用下倾倒式危岩体的动力响应,揭示了落石运动的三个阶段——启动准备阶段、倾倒、翻滚阶段和减速滞留阶段。另外,研究人员发现危岩体易沿软弱面发生剪切破坏;坠落式危岩在重力作用下,裂隙、裂缝会不断加深变宽;地震作用下,危岩体稳定系数减小;水平地震力对危岩体的危害高于垂直地震力;并提出了相应的加固措施^[12-16]。由此可看出,基于数值分析方法研究危岩的稳定性已经相当成熟。

本文根据已有的研究,以大渡河双江口水电站 27#危岩体为例,运用离散单元法研究滑塌式危岩体在地震作用下的动力破坏机理,简单给出失稳块体的运动阶段和运动形式,可为类似工程的防灾减灾提供理论依据。

1 工程概况

选取大渡河双江口水电站 27#危岩体为典型滑塌式危岩体(如图 1 所示)。27#危岩体位于大坝左坝肩上游侧陡崖上,分布高程 2 483 m ~ 2 558 m。主要裂隙有三组,分别是:① N70° ~ 80°W/SW ∠40° ~ 50°,顺向坡面;② N30° ~ 40°E/SE ∠80° ~ 85°,形成临空面;③ N30° ~ 40°W/NE ∠50° ~ 60°,逆向坡面。裂隙张开 5 cm ~ 10 cm,充填碎屑和泥。顺坡裂隙形成底滑面,临空面与河谷平行形成近直立的陡崖,逆向坡面裂隙形成侧向切割,三组裂隙互相切割,局部风化形成空腔,稳定性差,在暴雨、地震等因素影响下容易发生失稳破坏,失稳后主要威胁大坝安全。



图 1 双江口水电站 27#危岩体

2 计算模型与参数

图 2 是以大渡河双江口水电站 27#危岩体为典型滑塌式危岩体其计算简图。图中顺坡结构面①与

陡倾结构面②相互切割,构成了危岩体的主控结构面。研究区岩性为块状、弱风化、强卸荷花岗岩,岩体完整性差,呈次块状结构,受风化卸荷作用,稳定性较差。危岩体围岩力学参数与结构面力学参数分别见表 1 和表 2。

表 1 主要岩体基本物理力学参数表

岩体分类	密度 / (kg · m ⁻³)	体积模量 / GPa	变形模量 / GPa	内聚力 / kPa	摩擦角 / (°)	抗拉强度 / kPa
IV类	2700	41.2	30.2	4200	35	880

表 2 节理与裂隙基本力学参数

节理或裂隙	法向刚度 / GPa	切向刚度 / GPa	黏聚力 / kPa	摩擦角 / (°)
主要结构面	8	2.2	95.0	23
岩体节理	10	3.3	1.2	30

图 2 中布置 A、B、C 三个监测点,用以监测在隙地震作用下,危岩体的位移变化情况。

图 3 是利用通用离散元程序 UDEC 建立数值模型,简化后的模型采用三角形单元进行网格划分,模型共有 14 个块体,2 600 个单元,1 450 个节点。为了使模型更接近真实情况,将其底边采用固定铰链约束,左右边界采用水平支座约束。

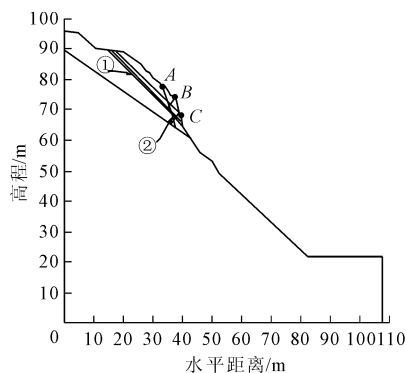


图 2 典型滑塌式危岩体简图

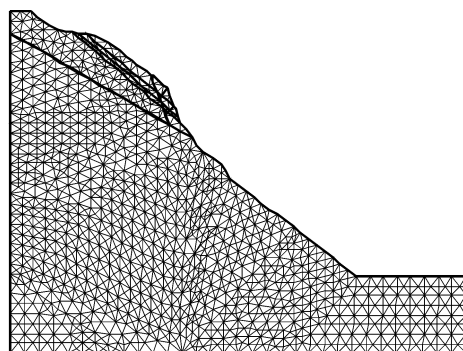


图 3 滑塌式危岩体计算模型

3 数值分析

3.1 地震荷载

双江口水电站坝址地震基本烈度为Ⅶ度,地震动峰值加速度为 $0.10g$ 。采用峰值加速度为 $0.10g$ 的人工地震波进行加载,峰值加速度对应时刻为 2.81 s ,地震波平均频率为 4 Hz 。而 UDEC 动力计算时,无法给模型直接施加加速度时程,故本文将加速度进行积分得到速度时程曲线进行输入。速度时程曲线见图 4。

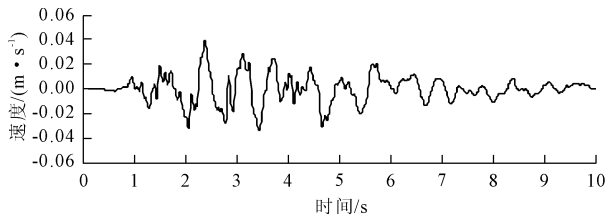


图 4 修正后的速度时程曲线

为了使边界能够有效吸收应力波,在模型左右两侧及底部设置自由区域,并将底部赋予黏性边界属性,利用图 4 的速度时程给模型底部施加切向应力波,来模拟地震作用下剪切波对危岩体的稳定性影响程度。

3.2 结果分析

图 5 为不同地震时刻模型块体的位置变化及块体位移矢量图。可以看出,第 1 s 时,危岩体位移方向表现为斜向下方,此刻危岩体尚未发生明显破坏,第 2 s 时,危岩体上部发生明显滑移,脱离母边坡,第 4 s 时,危岩体中部块体也发生了沿母边坡坡面向下的滑移,第 6 s 时,底部块体也发生了滑移,之后,震落的危岩体块体沿着边坡呈滑动或跳动状态运动向下运动,直至遇到坡面阻挡物或在平坦的坡脚减速停止,脱离母岩发生滑移的危岩体块体在坡脚堆积,与后续边坡形成的危岩体或其他滚落岩块形成坡脚堆积物。

图 6 为危岩体在地震作用下发生滑移破坏后,3 个监测点水平位移和竖向位移随时间的变化曲线,从图中看出,滑塌式危岩体破坏后,落石的主要运动可分为三个阶段:启动准备阶段、加速下滑阶段、滞留稳定阶段。

在启动准备阶段(见图 6 中 $0\sim 3\text{ s}$)危岩体主控结构面在地震作用下开始发生明显滑移开裂,结构面力学抗剪抗拉强度降低,最后彻底丧失强度。该阶段的持续时长主要跟结构面强度和地震时程对应的加速度大小有关,在同一地震加速度时程下,结构

面强度越高,持续时间越长;在同一结构面强度时,地震加速度越大,对危岩体的震动效应就越明显,结构面发生破坏所需时间也就越短,启动准备阶段的持续时间也就越短。

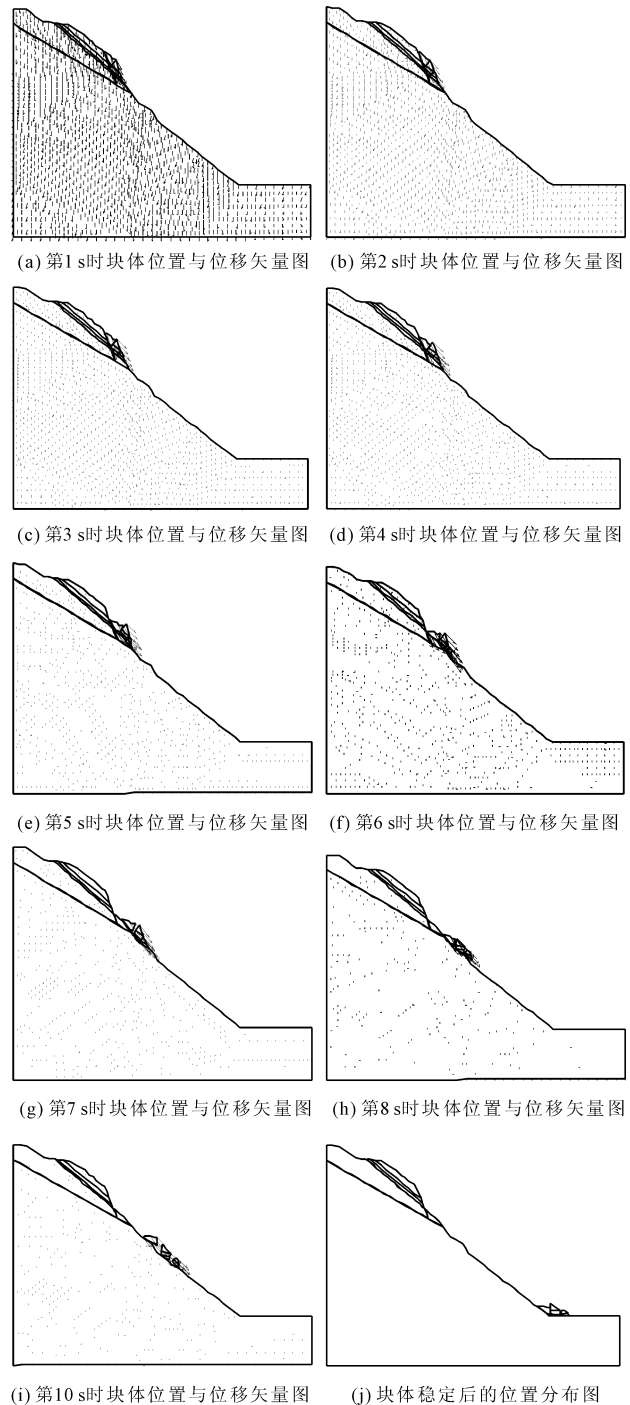


图 5 不同地震时刻块体位置变化与位移矢量图

图 7—图 9 为各监测点的速度变化曲线。从图 7—图 9 也可以看出,在启动准备阶段,3 个监测点速度均有小幅度振荡,但较加速下滑阶段来说其振荡可以忽略,这个阶段主要是危岩体结构面处于由

稳定向破坏开裂发展的状态,结构面上的应力不稳定,在地震作用下结构面所受外力不断得到积累和扩展,裂缝开度的大小也得到了积累和发展,从而导致监测点速度出现小振幅振荡,整体增大的趋势。

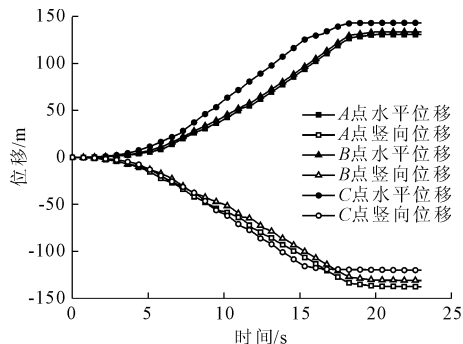


图 6 监测点 A、B、C 位移变化曲线

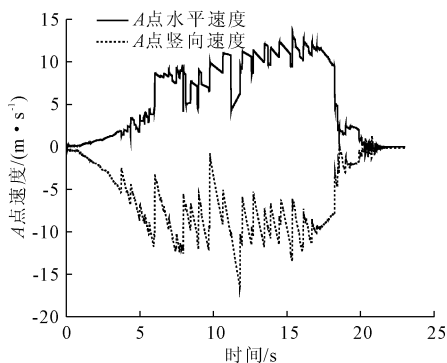


图 7 监测点 A 的速度变化曲线

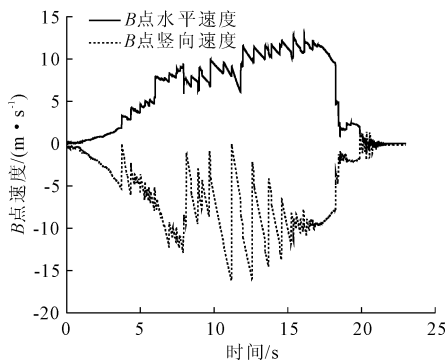


图 8 监测点 B 的速度变化曲线

加速下滑阶段(见图 6 中 3 ~ 18 s),危岩体在主控结构面开裂后失去稳定性,开始脱离母岩,发生沿坡面向下的位移。该阶段是落石运动的主要阶段,主要运动形式表现为滑动、滚动、跳动,具体运动形式视块体体积、母边坡的坡面形状和坡面覆盖物而定,若块体体积较大,坡面又较平整,则多以滑动形式向下滑移;若块体体积较小,坡面坡度变化较大,则以跳动形式为主;若块体体积较小,坡面又较粗糙,块体可能以滚动运动为主;另外,落石的运动形

式比较复杂,大多数都是上述三种运动形式的复合运动。

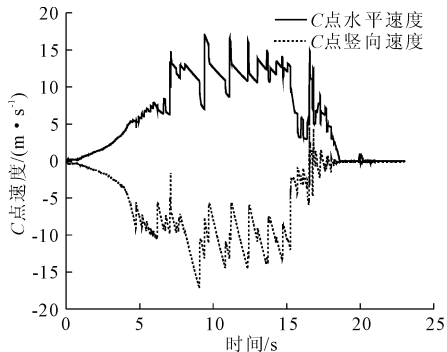


图 9 监测点 C 的速度变化曲线

从监测点速度变化曲线来看,在该阶段,三个监测点的水平速度和竖向速度均有大幅度的振荡,主要是因为危岩体彻底脱离了母岩,破裂的块体在向下运动时相互发生碰撞、坡面不光滑等因素造成的。在加速下滑阶段,运动的块体具有很大的速度,动能和冲击力都较大,对坡面建筑物的危害也最大。

滞留稳定阶段(见图 6 中 18 ~ 23 s),运动的块体在坡面植被、覆盖层的阻挡下速度发生改变,有可能被截留在半坡中,大部分落石在抵达坡脚后由于坡脚地形平坦或有沟壑地形,运动速度逐渐减小,最后停止运动,在坡脚形成松散堆积物。在加速下滑阶段后期,块体速度逐渐趋于稳定,到滞留稳定阶段,由于障碍物的拦阻作用,块体速度急剧下降,经短期小振荡后最终停止运动。如果坡面修建有建筑物或正在进行施工,为了防止落石对工程安全造成影响,可在适当位置拉弹性钢丝网对落石进行拦截。

4 结 论

本文选取双江口 27#危岩体为典型滑塌式危岩体,利用离散元程序 UDEC 建立数值分析模型,研究了地震作用下危岩体的滑塌式破坏情况,主要得出以下结论:

(1) 在地震作用下,危岩体发生失稳破坏,破坏后块体的运动主要分为三个阶段:启动准备阶段、加速下滑阶段、滞留稳定阶段,块体运动形式是以滑动为主、滚动为辅。

(2) 随着地震加速度的增大和荷载的持续,危岩体主控结构面开始发生明显滑移开裂,结构面力学抗剪抗拉强度降低,直至彻底丧失强度。地震作用下结构面损伤不断累积,裂缝开始逐渐扩展,导致监测点速度出现小振幅振荡,且整体呈增大的趋势。

(3) 加速下滑阶段,危岩体在主控结构面开裂后失去稳定性,开始脱离母岩,发生沿坡面向下的位移。此阶段是块体运动的主要阶段,其运动形式为滑动、滚动、跳动。块体的运动形式主要受其体积、坡面平整度和破面坡度影响,致使块体在此阶段速度大振幅振荡尤为明显,运动形式比较复杂,大多数情况下都是上述三种运动形式的复合运动。

(4) 滞留稳定阶段,运动的块体由于坡面障碍物的阻挡以及地形的影响下,运动速度逐渐减小,经短期小振荡后最终停止运动。3 个监测点都有多次振荡最终归零的现象。如果坡面修建有建筑物或正在进行施工,为了防止落石对工程安全造成影响,可在适当位置拉弹性钢丝网对落石进行拦截。

参考文献:

- [1] 阿发友,孔纪名,倪振强,等. 滑塌式危岩体稳定性影响因素敏感性分析[J]. 勘察科学技术,2011(2):1-5.
- [2] 李 部,黄润秋,吴礼舟. 滑塌式危岩体剪切断裂过程中的启动分析[J]. 水电能源科学,2015,33(9):143-147.
- [3] 陈 涛. 滑塌式危岩尖点突变模型研究[J]. 宁夏大学学报(自然科学版),2015,36(4):346-350.
- [4] 湛玉萍. 滑塌式危岩体稳定性分析[J]. 水利水电快报,2019,40(7):23-26.
- [5] 张广甫,吴 琦,崔孝飞,等. 危岩主控结构面抗剪强度参数取值研究[J]. 水利与建筑工程学报,2018,16(1):164-167.
- [6] 陈爱云,曾唯恐,王 哲,等. 基于三维激光扫描技术的危岩体特征快速识别方法及稳定性评价[J]. 水利与建筑工程学报,2019,17(6):60-64,176.
- [7] 徐卫亚,孙广忠. 链子崖 T₈-T₁₂ 缝段危岩体非线性离散单元法块体运动数值模拟分析[C]//自然边坡稳定性分析暨华蓥山边坡变形趋势研讨会论文集. 四川重庆水土保持办公室:中国岩石力学与工程学会,1991:233-238.
- [8] 徐卫亚,黄运飞,孙广忠. 链子崖危岩体 T₀-T₆ 缝段变形破坏机制离散单元法块体运动数值模拟[C]//第四届全国工程地质大会论文集(二). 中国地质学会工程地质专业委员会:工程地质学报编辑部,1992:186-192.
- [9] 袁志辉,陈志新,倪万魁,等. 倾倒式岩质崩塌运动过程数值模拟分析[J]. 中国地质灾害与防治学报,2014,25(2):26-31.
- [10] 田 耘,王林峰. 基于 PFC 离散元的多层岩质陡坡危岩崩落序列[J]. 科学技术与工程,2019,19(19):301-309.
- [11] 薛新华,樊 旭,郭志元,等. 地震荷载作用下倾倒式危岩体动力失稳机理研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2017,33(2):259-265.
- [12] 冷洋洋,徐 凯. 基于 UDEC 下溶洞控制危岩体变形过程[C]//中国地质学会 2015 年学术年会/中国地质学会 2015 年学术年会论文集,西安,2015,中国地质学会:中国地质学会地质学报编辑部,2015:587-593.
- [13] 张 研,吴康丽,王 伟,等. 月牙山坠落式危岩稳定性离散元数值分析[J]. 水利与建筑工程学报,2019,17(4):26-31.
- [14] 黄波林,陈小婷,彭轩明. 三峡库区巫山县廖家坪危岩体倾倒机制数值模拟分析[J]. 水文地质工程地质,2008,35(5):24-27,32.
- [15] 肖圣亮. 基于最大周向应力准则的滑塌式危岩稳定性分析[J]. 江西水利科技,2019,45(5):346-351,390.
- [16] 黄 达,黄润秋,裴向军,等. 溪洛渡水电站某危岩体稳定性及加固措施研究[J]. 岩土力学,2008,29(5):1425-1429.