

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2019.05.05

基于 Trajec 3D 的硬岩人工路堑边坡滚石运动范围预测

陈 涛, 陈志坚, 孟子耀

(河海大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 211100)

摘要: 滚石的运动范围包括横向运动距离和纵向偏移范围, 是滚石防护设计工作的依据。本文基于 Trajec 3D 软件, 以连云港某硬岩人工路堑边坡为计算模型, 通过数值模拟的方法探讨了滚石运动范围在不同滚石质量、形状以及平台铺设条件下的变化规律。结果表明: (1) 对于硬岩边坡而言潜在的不稳定岩体一旦启动即可形成滚石并构成滚石灾害, 可采用数值模拟和现场试验相结合的方法研究滚石运动范围, 从而针对性的设计防护网达到减少滚石灾害带来的损失; (2) 文中设定的五个质量水平中, 中等质量的滚石其横向威胁范围大, 纵向偏移比则随着质量的增大而减小; (3) 近球状滚石横向运动距离大, 棱角突出的滚石纵向偏移范围大, 防护设计工作应具有针对性; (4) 不同平台铺设条件对滚石运动范围具有显著的影响, 平台碰撞恢复系数越小滚石的运动范围越小。

关键词: 滚石; 横向运动距离; 纵向偏移范围; Trajec 3D

中图分类号: P642.21

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2019)05-0037-05

Movement prediction of falling boulders in artificial cutting slope of hard rock based on Trajec 3D

CHEN Tao, CHEN Zhijian, MENG Ziyao

(College of Geoscience and Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 211100, China)

Abstract: The influence range of rolling stones includes the range of lateral movement and the range of longitudinal offset, which is the basis for rolling stone protection design. Based on Trajec 3D software, this paper takes the artificial cutting slope of a hard rock in Lianyungang as the calculation model, and discusses the variation law of the influence range of the rolling stone under the quality, shape and slope condition of different rolling stones through numerical simulation. The results show that: (1) For the hard road slope, if the potential unstable rock mass starts up, it will form rolling stones and form a rolling stone disaster. The combination of active and passive protection can be adopted. (2) In the four quality levels set up in this paper, the lateral threat scope of medium quality rolling stones is large, and the longitudinal offset ratio decreases with the increase of mass; (3) The vertical movement range of the nearly spherical rolling stones is large and the longitudinal migration range of the rolling stones with a sharp angle is large, so the protection design work should be targeted; (4) Different slope conditions have a significant impact on the influence range of rolling stones, and the smaller the collision recovery coefficient of the slope is, the smaller the influence range of rolling stones will be.

Keywords: rockfall; lateral movement; longitudinal offset; Trajec 3D

收稿日期: 2018-11-29; 修订日期: 2019-01-07

基金项目: 江苏省政策引导类计划(产学研合作)(BY2015002-05)

第一作者: 陈 涛(1995-), 男, 江西赣州人, 硕士研究生, 主要研究方向为岩土体安全监测。E-mail: 1918473732@qq.com

0 引言

滑坡、崩塌、坍塌、剥落、差异风化、水流冲刷、根劈作用、冻融循环、地震以及人类活动等因素都可直接或间接地引起一个或多个块石在重力作用下向下运动,进而形成滚石^[1]。滚石在下落过程中动能不断增大,对其运动范围内的人类活动、基础设施和正在进行的工程建设等的安全极为不利,往往导致人员伤亡,带来巨大的经济损失^[2]。因此,通过科学的手段对滚石运动范围的变化规律进行系统的研究,对滚石灾害的防治及减少滚石灾害带来的损失具有重要意义。

随着计算机技术的发展,数值模拟的方法在各领域的研究中发挥着越来越重要的作用。在滚石方面的研究上,Guangqi CHEN 等^[3]开发了三维 DDA 滚石运动程序;周晓宇、罗祥等^[4-5]对滚石防护措施的作用进行了模拟;贺咏梅、熊剑等^[6-7]采用 Rockfall 软件模拟了滚石运动特征、运动轨迹以及冲击动能;PALMA B 等^[8]采用 GeoRock、Rotmap、Stone 等软件对滚石沿边坡的运动轨迹进行了二维以及三维的数值模拟研究;黄雨、余波等^[9-10]通过数值模拟软件列举了若干滚石冲击力的典型计算方法。但滚石运动范围的研究目前还较少。

滚石在实际的运动过程中不仅存在与边坡走向垂直的横向运动,还包括纵向的偏移。由滚石的横向运动与纵向偏移所组成的区域即滚石的运动范围。其中横向运动距离此处定义为滚石停止后在垂直边坡走向方向上的位移;纵向偏移范围通过偏移比来表示,Azzoni 等^[11]定义偏移比 η 为滚石停止点偏移的距离与等效坡长的比值,表达式为:

$$\eta = D/2L \quad (1)$$

式中: D ——沿边坡走向方向滚石偏移量/m;

L ——等效坡长/m。

本文以连云港某硬质岩人工路堑边坡为研究对象,考虑滚石运动范围的不同影响因素,通过 Trajec 3D 对滚石运动轨迹进行数值模拟,并对滚石运动范围的变化规律做出系统地探讨。

1 工程概况

连云港港东疏港高速公路连接南侧港区进港道路,以路堑方式穿过中云台山,全长 12.85 km。在中云台山段公路采用明挖方式进行施工,在公路两侧形成总长近 1 km 的人工路堑边坡,东西两侧坡高分别为 200 m 和 150 m。通过地质复核发现,两侧边坡岩体结

构面发育并存在不利组合,且分布有绿泥石片岩软弱夹层,容易产生滚石。此外,东坡相对来说坡高更高、坡度更大、开挖梯级更多,在爆破作业或者大开挖条件下更易发生滚石,因此本文将东坡作为研究对象(图 1)。



图 1 本文研究区域

Fig.1 The study area of this paper

2 Trajec 3D 数值模型

Trajec 3D 是由 BasRock 公司提供的一款用于滚石运动模拟的三维数值分析软件,可以同时考虑到滚石的形状、质量及边坡的平台铺设条件,能针对不规则滚石在坡面上的运动情况做出系统的分析。

在本文的数值模拟中,边坡模型以连云港港东疏港高速公路中云台山某硬质岩人工路堑边坡东坡为原型,该边坡台阶分为 20 级,总体坡率为 1:1.096,坡角为 42.4°。各台阶除了第五、九、十三、十五级外,宽度均为 3 m,其中第五级台阶宽 8.5 m,第九级台阶宽 8.85 m,第十三级及第十五级台阶宽度为 9 m(图 2)。

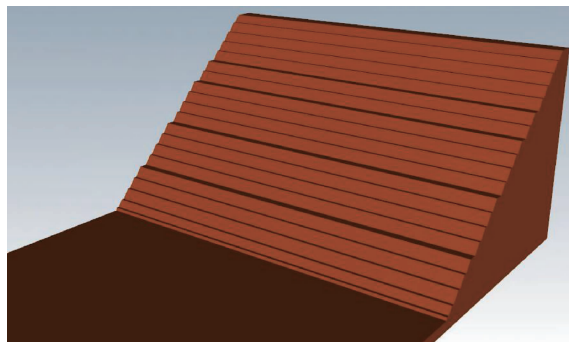


图 2 边坡模型示意图

Fig.2 Schematic diagram of slope model

模型中边坡坡体材料设定为硬岩;根据现场编录资料第十四级台阶上部坡面处存在不稳定体,更易产生滚石,因此将此处设为滚石的起始高程,为 154 m;

碰撞恢复系数取值参考叶四桥等^[12]在落石碰撞法向恢复系数的模型试验研究中的结论(表 1)。

2.1 滚石质量

研究滚石的质量对滚石运动的影响时,根据现场滚石体积大小的差异,滚石质量取 1 000 kg、2 000 kg、4 000 kg、6 000 kg、8 000 kg 五个水平,分别对各水平进行 50 次模拟计算。考虑到工程区滚石大多因节理面相互切割而以块状的形式存在,模拟计算时滚石的形状取为正方体。地质勘查资料显示坡体地层主要为前震旦系海洲群云台组变粒岩,因此模拟时坡体材料选为硬岩,坡角为 42.4°,按照表 1 的结论碰撞恢复系数此处取 0.48。

表 1 落石碰撞法向恢复系数取值表^[12]

坡面特征	不同坡度范围的法向恢复系数取值			
	0° ~ 15°	15° ~ 30°	30° ~ 45°	45° ~ 60°
松散松软土层	0 ~ 0.23	0 ~ 0.25	0.02 ~ 0.28	0.05 ~ 0.30
黏土类残、坡积层表面	0 ~ 0.24	0.02 ~ 0.26	0.02 ~ 0.29	0.05 ~ 0.30
草丛、矮灌木覆盖岩堆	0.01 ~ 0.26	0.03 ~ 0.28	0.03 ~ 0.31	0.03 ~ 0.33
软岩、强风化岩表面	0 ~ 0.30	0.01 ~ 0.31	0.01 ~ 0.36	0.02 ~ 0.41
硬岩及圬工结构表面	0 ~ 0.45	0.02 ~ 0.46	0.02 ~ 0.48	0.15 ~ 0.48

2.2 滚石形状

Trajec 3D 中提供不同形状的滚石模型,本文选取其中的近球状(整体趋于球体但表面不光滑)、近圆盘状(横截面为不规则圆)、正方体、板状(扁平状长方体)四种水平,分别对各水平进行 50 次模拟计算。现场统计结果显示质量接近 4 000 kg 的滚石居多,因此模拟时滚石的质量取 4 000 kg,碰撞恢复系数取 0.48。

2.3 平台铺设条件

本文所研究的平台铺设条件主要考虑滚石与边坡平台相互作用时碰撞恢复系数的大小不同,通过 Trajec 3D 对边坡平台的恢复系数进行单独调整。根据表 1 的结论考虑四种不同的坡面情况,硬岩及圬工结构表面、软岩或强风化岩表面、草丛及矮灌木覆盖岩堆和黏土类残坡积层表面,对应的碰撞恢复系数取值分别为 0.48、0.36、0.31、0.29。模拟时滚石的质量取 4 000 kg,滚石的形状取为正方体。

3 结果分析

不同因素下滚石运动范围的变化规律主要通过对横向运动距离与纵向偏移比这两个指标来进行分析。通过模拟计算及对数据的处理分析,可以得到以下结果。

3.1 滚石质量的影响

通过滚石停止运动后的位置分布可以看出,平台对滚石具有明显的停积作用(图 3)。其中第十三级平台为滚石运动过程中最先接触的宽平台,停积作用最为突出。五个质量水平中,滚石质量取 4 000 kg 和 6 000 kg 时,停滞在边坡上的滚石比例最小,为 16%;1 000 kg 和 2 000 kg 时此比例分别约为 21% 和 22%;8 000 kg 时此比例最大,为 26%。不同质量的滚石在平台停积难易程度是不一样的,滚石继续往下滚动时需要下落时增加的动能超过滚石起动所需能量。可以看出,质量偏大或偏小时平台对滚石的停积作用更明显。

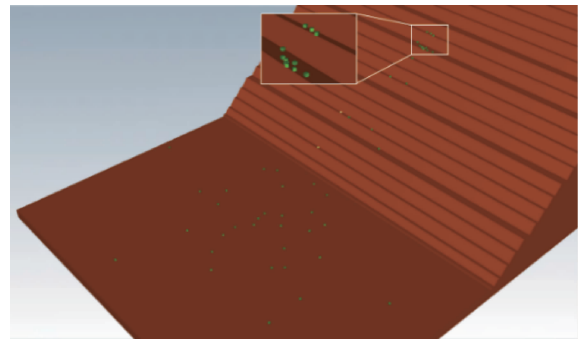


图 3 滚石位置分布图

Fig.3 Distribution of rolling stone location

质量对滚石横向运动距离的影响如图 4 所示,从最大值和平均值来看,质量为 4 000 kg 和 6 000 kg 时,滚石横向运动的距离相较于质量为 1 000 kg、2 000 kg 和 8 000 kg 时更大,同时考虑到此水平下滚石更容易运动到坡底,对于此类中等体积的潜在危岩应提高滚石防护设计等级。

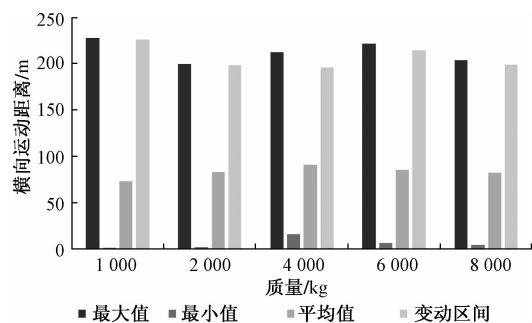


图 4 不同质量条件下的滚石横向运动距离

Fig.4 Transverse motion distance of rolling stone

不同质量条件下滚石运动的纵向偏移统计如表 2 所示,随着质量的增加滚石的偏移比呈现出明显的减小趋势。但模拟结果偏移比的数值均偏高,这是因为

模拟中碰撞恢复系数取的是最大值,加上没有考虑边坡表面岩体风化影响,而且滚石均假设为正方形,这些因素均会使模拟结果偏于保守。而目前工程建设中常采用多重防护网,取滚石偏移比 0.1 来计算纵向的运动范围,例如连云港中云台山人工硬质岩路堑边坡采用了 3 重防护网的设计方案。若只在坡底处设一道防护网,建议在防护设计中滚石偏移比可以放大一些,取 0.3 更符合安全标准。

表 2 不同质量条件下滚石偏移比
Table 2 Migration ratio of rolling stone

滚石质量/kg	D/m	L/m	偏移比
1 000	211.42	219.21	0.48
2 000	221.29	219.21	0.50
4 000	210.18	219.21	0.48
6 000	203.55	219.21	0.46
8 000	181.54	219.21	0.41

3.2 滚石形状的影响

不同滚石形状条件下停滞在边坡上的滚石比例差异较大,板状滚石此比例达到了 72%;近圆盘状次之,为 60%;近球状和正方体较小,分别为 26% 和 16%。

形状对滚石横向运动距离的影响如图 5 所示,从最大值和平均值来看,近球状的滚石横向运动距离最大,正方体次之,其次是板状,近圆盘状的滚石横向运动距离最小。滚石越趋于扁平状,其运动过程中与坡面接触后越容易发生滑动的情况,滑动方式下落消耗的能量更多,因而横向运动距离更小。

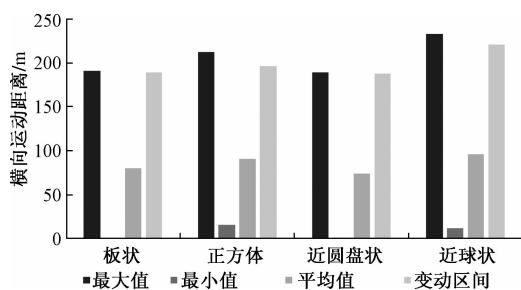


图 5 不同形状条件下的滚石横向运动距离

Fig.5 Transverse motion distance of rolling stone

不同形状条件下滚石运动的纵向偏移统计如表 3 所示,正方体滚石偏移比最大,近圆盘状次之,其次是板状,近球状的滚石偏移比最小。偏移机理和横向运动相近,正方体滚石由于棱角突出,运动过程中发生碰撞弹跳的可能性更大,偏移比要大于近球状和扁平状的滚石;近圆盘状滚石相较于板状滚石发生滚动的可能性更大,偏移比也就更大。

表 3 不同形状条件下滚石偏移比

Table 3 Migration ratio of rolling stone

滚石形状	D/m	L/m	偏移比
板状	150.84	219.21	0.34
正方体	237.18	219.21	0.54
近圆盘状	201.21	219.21	0.46
近球状	46.14	219.21	0.11

3.3 平台铺设条件的影响

随着不同平台铺设条件对应的碰撞恢复系数逐渐减小,停滞在边坡上的滚石比例依次为 16%、64%、74%、90%,呈现出明显的递增规律,不同铺设条件下平台对滚石的停积作用区别明显。

平台铺设条件对滚石横向运动距离的影响如图 6 所示,从最大值和平均值来看,平台铺设条件对应的碰撞恢复系数越大,其横向运动距离越大。硬岩及圬工结构表面其横向运动距离的变动区间最大,随机性也最大。

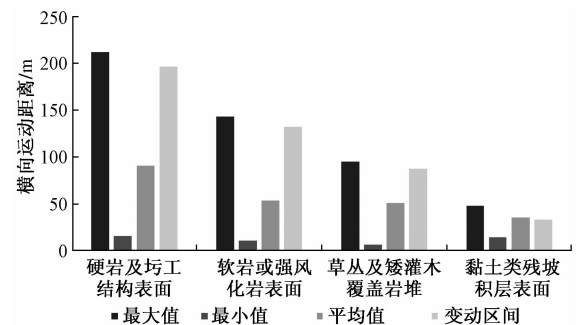


图 6 不同平台铺设条件下的滚石横向运动距离

Fig.6 Transverse motion distance of rolling stone

不同平台铺设条件下滚石运动的纵向偏移统计如表 4 所示,与不同平台铺设条件对横向运动距离的规律相似,坡面的碰撞恢复系数越大其纵向偏移比越大,滚石纵向威胁的范围也越大。

表 4 不同平台铺设条件下滚石偏移比

Table 4 Migration ratio of rolling stone

平台铺设条件	D/m	L/m	偏移比
硬岩及圬工结构表面	237.18	219.21	0.54
软岩或强风化岩表面	201.8	219.21	0.46
草丛及矮灌木覆盖岩堆	137.56	219.21	0.31
黏土类残坡积层表面	80.72	219.21	0.18

4 结论

(1)在不同的条件下,滚石一旦受到外力作用开始运动,对于连云港硬质岩人工路堑边坡这类硬质岩边坡而言均有可能形成滚石灾害。在滚石防护设计中

可采用模拟和现场试验结合的方法研究可能产生滚石的运动范围,另外,可选择合理的平台铺设条件以减小滚石的运动范围。根据得到的运动范围针对性的设计防护网以同时达到减少滚石灾害带来的损失和节约工程成本的目的。

(2)不同质量的滚石运动范围是不一样的,本文设定的五个质量水平中,中等质量的滚石运动到坡底所占的比重更大且横向运动距离大,在滚石防护设计中可通过现场或者数值模拟确定其质量范围,并重点考虑此类危岩的横向威胁范围;偏移比则随着质量的增加逐渐减小,由于模拟中碰撞恢复系数取的是最大值,加上没有考虑边坡表面岩体风化影响,而且滚石均假设为正方形,这些因素均会使模拟结果偏于保守,另外如果边坡中设置多重防护网,设计时偏移比可以适当取低一些。

(3)滚石的形状越趋于扁平状,运动过程中停滞在平台上的滚石所占比例越大。近球状的滚石横向运动距离最大,在花岗岩发育地区应重点考虑球状风化所形成的滚石的横向运动范围;棱角突出的滚石纵向偏移比大,在岩体节理裂隙发育的地区应重点考虑此类岩体坠落后形成的滚石在纵向范围的影响。

(4)不同平台铺设条件能够显著影响滚石的运动范围,随着不同坡面对应的碰撞恢复系数减小,滚石停滞在平台上的比例显著增大,到达坡底后的横向运动距离与纵向偏移范围也不断减小。

参考文献:

- [1] 张路青,杨志法,许兵. 滚石与滚石灾害[J]. 工程地质学报,2004(3):225-231.
ZHANG Luqing, YANG Zhifa, XU Bing. Rock falls and rock fall hazards [J]. Journal of Geology, 2004 (3):225-231.
- [2] 沈均,何思明,吴永. 滚石灾害研究现状及发展趋势[J]. 灾害学,2008(4):122-125.
SHEN Jun, HE Siming, WU Yong. Present research and development trend of rock fall hazards[J]. Journal of Catastrophology, 2008(4):122-125.
- [3] CHEN G, ZHENG L, ZHANG Y, et al. Numerical simulation in rockfall analysis: a close comparison of 2D and 3D DDA [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2013, 46(3):527-531.
- [4] 周晓宇,陈艾荣,马如进. 滚石柔性防护网耗能规律数值模拟[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2012, 32(6):59-66.
- ZHOU Xiaoyu, CHEN Ai'rong, MA Rujin. Numerical simulation of energy dissipation mechanism on falling rocks protection nets[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2012, 32(6):59-66.
- [5] 罗祥,石少卿,严庆平,等. 利用废旧轮胎防治滚石的数值模拟分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2011, 22(4):36-40.
LUO Xiang, SHI Shaoqing, YAN Qingping, et al. Numerical analysis of rock fall prevention using discarded tires [J]. The Chinese Journal of Geology Hazard and Control, 2011, 22(4):36-40.
- [6] 贺咏梅,阳友奎. 崩塌落石 SNS 柔性防护系统的设计选型与布置[J]. 公路, 2001(11):14-20.
HE Yongmei, YANG Youkui. Design selecting type and arrangement of SNS flexible protection system in rockfall field [J]. Highway, 2001(11):14-20.
- [7] 熊剑,邓辉. 滚石运动模拟分析与危险性评价[J]. 路基工程, 2015(3):51-54.
XIONG Jian, DENG Hui. Simulation analysis and risk assessment of rockfall movement [J]. Subgrade Engineering, 2015(3):51-54.
- [8] PALMA B, PARIS M, REICHENBACH P, et al. Rockfall hazard assessment along a road in the Sorrento Peninsula, Campania, southern Italy [J]. Natural Hazards, 2012, 61(1):187-201.
- [9] 黄雨,孙启登,许强. 滚石运动特性研究新进展[J]. 振动与冲击, 2010, 29(10):31-35.
HUANG Yu, SUN Qideng, XU Qiang, et al. New development of rockfall kinematics study [J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(10):31-35.
- [10] 余波,李珂. 滚石碰撞冲击数值模拟分析[J]. 中国水运, 2014, 14(7):112-113.
YU Bo, LI Ke. Numerical simulation analysis of rolling stone impact [J]. China Water Transport, 2014, 14(7):112-113.
- [11] AZZONI A, BARBERA G L, ZANINETTI A. Analysis and prediction of rockfalls using a mathematical model [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1995, 32(7):709-724.
- [12] 叶四桥,巩尚卿. 落石碰撞法向恢复系数的模型试验研究[J]. 中国铁道科学, 2015, 36(4):13-19.
YE Siqiao, GONG Shangqing. Research on normal restitution coefficient of rockfall collision by model tests [J]. China Railway Science, 2015, 36(4):13-19.