

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.05.001

基于3D DDA方法滚石平台防护作用研究*

刘国阳¹, 李俊杰^{2,3}, 康飞²

(1. 沈阳工业大学建筑与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110870; 2. 大连理工大学建设工程学部水利工程学院, 辽宁 大连 116024; 3. 西藏大学工学院, 西藏 拉萨 850000)

摘要: 采用三维非连续变形分析(3D DDA)方法输出滚石动能和运动轨迹, 其结果与现有室内实验和数值模拟方法进行比较, 验证了3D DDA方法的准确性。通过分析滚石平台对不同坡高、不同坡角、不同折点位置的岩质边坡滚石动能、运动轨迹的影响, 研究了滚石平台对滚石运动的影响规律。最后, 以青藏高原朗村复杂坡形岩质边坡为工程背景, 分析了坡底平台对滚石灾害的防护作用。结果表明: 滚石平台可降低滚石动能, 改变滚石运动轨迹, 减小滚石对坡底防护结构或交通线路等结构物的冲击作用。同时, 给出不同边坡特征下滚石运动及相应的平台设计宽度总体规律, 为滚石平台设计提供依据。

关键词: 三维非连续变形分析; 滚石平台; 动能; 运动轨迹

中图分类号: V212 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2020)05-0679-11

Study on the Protective Effect of Rockfall Platform Based on 3D DDA Method

LIU Guoyang¹, LI Junjie^{2,3}, KANG Fei²

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China; 2. School of Hydraulic Engineering, Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 3. School of Engineering, Tibet University, Lhasa 850000, China)

Abstract: A three-dimensional discontinuous deformation analysis (3D DDA) method was used to output the kinetic energy and motion trajectory of rolling blocks. Compared with the results of the existing laboratory experiment and numerical simulation method, the accuracy of the 3D DDA method was verified. By analyzing the influence of the rockfall platform on the kinetic energy, motion trajectory and movement law of blocks along rock slopes with different slope heights, slope angles and folding point positions, the influence law of the rockfall platform on the block movement was studied. Finally, the rockfall slope with a complex slope shape at Lang village in Tibet was simulated, and the protective effect of the rockfall platform on rockfall disaster was analyzed. The results show that the rockfall platform can decrease the kinetic energy of the rolling block, change the block motion trajectory, and reduce the impact of the rolling block on the protection structure or the traffic line at the slope bottom. Meanwhile, the general laws including the block movement and the corresponding platform de-

* 收稿日期: 2018-06-25; 修回日期: 2018-08-05

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0401600, 2017YFC0404906)、国家自然科学基金项目(51769033, 51779035)、中央高校基本科研业务费重大项目科研专项项目(DUT17ZD205)资助

作者简介: 刘国阳(1989-), 男, 讲师, 博士。主要从事岩质边坡稳定性试验与数值模拟研究。Email: liuguyang@163.com

sign width under different slope characteristics are given, and they provide a basis for the design of rockfall platform.

Keywords: three-dimensional discontinuous deformation analysis; rockfall platform; kinetic energy; motion trajectory

引 言

滚石作为高陡边坡的一种浅表部破坏方式,是危岩体与母岩分离、失稳、运动直至在较平缓地带或障碍物附近静止下来的动力演进过程^[1],已成为典型的工程地质灾害之一。滚石灾害具有点多、面广、爆发突然等特点,通常规模较小,但致灾严重,对水利水电工程、交通线路、基础设施建设及安全运营等构成极大威胁^[2]。因此,研究滚石失稳特征和运动规律,并采取有效的防护措施,具有重要的现实意义。滚石防护措施常分为主动防护和被动防护两类。主动防护主要包括锚固、支撑、嵌补等,在危岩尚未启动时采用,对施工条件要求较高。被动防护主要包括落石槽、滚石平台、拦石墙等,方便施工,但要求与坡脚存在足够的距离^[3]。例如,当采用拦石墙时,须在坡脚与墙体之间留有适当的滚石平台,才能更好的发挥防灾作用。黄润秋等^[4]通过现场试验,发现滚石平台可阻碍滚石运动,对滚石起到停积作用。然而,目前滚石平台对滚石灾害防护作用及平台设置宽度等方面的研究较少。同时,滚石平台对滚石动能和轨迹的影响也需进一步研究。

在滚石灾害预测和防护中,滚石动能和轨迹是两个重要的参考指标^[5]。动能是滚石能量的主要部分,可描述滚石在不同时刻的能量增加或损失,以及到达防护位置的冲击能;轨迹可描述滚石在不同时刻的位置(包括横向偏移)、弹跳高度及着落点距坡脚距离等信息。二者为防护设施的选型和最佳位置、尺寸及强度的设计等提供依据。国际上常用于计算滚石冲击能量与轨迹的商业软件有 Roscince 公司开发的 RocFall 软件和瑞士布鲁克公司开发的 RockFall 软件^[6],国内有中铁二院开发的 RFA 滚石分析软件^[6]、滚石运动路径按区间分段算法^[7]、分段循环算法^[8]等,它们在工程实践和理论研究中取得了良好效果。滚石运动是一种典型的非连续块体系统大位移和大变形动力问题,存在着复杂形状块体与复杂地形坡面间的接触变换。G.H.Shi^[9]

于 1988 年提出了模拟节理岩体变形行为的非连续变形分析方法(DDA)。此方法问世以来,在滚石运动研究与灾害防护方面取得了长足发展^[10-12]。同时,DDA 方法本身也得到了改进。例如,Y.Zhang 等^[13]通过修正边一边接触,实现边一边接触简化为两个点一边接触的统一接触状态,并应用于边坡稳定分析。学者们还基于 DDA 方法施加地震荷载,开展了地震条件下危岩崩塌诱发机制及滚石运动特征研究^[14-15]。实践表明,DDA 可准确分析滚石的运动特征,在灾害预测和防护方面具有突出的优势和广泛的应用前景^[12]。

特别是基于三维 DDA(3D DDA)理论^[16],DDA 可由二维扩展到三维,能够考虑边坡的三维地形特征和滚石形状^[17]。吴建宏等^[18]将 3D DDA 模拟与现场监测影像相结合,分析了日本天鸟桥西某边坡崩塌滚石的复杂动态过程;L.Zheng 等^[5]基于地理信息系统(GIS)建模工具,建立某公路沿线岩质边坡 3D DDA 模型,分析了滚石事件运动特征;G.Y.Liu 等^[19]研制崩塌滚石 3D DDA 数值程序,研究了边坡不同几何特征条件下的滚石运动规律。上述研究表明了 3D DDA 分析滚石运动的有效性,能模拟滚石运动的空间弹跳、横向偏移偏转等空间运动行为。

本文基于 3D DDA 方法,输出滚石动能和运动轨迹,研究不同坡高、坡角、折点位置等条件下,滚石平台对滚石运动规律的影响及其对滚石灾害的防护作用,并采用工程实例,分析复杂地形特征下滚石平台的防灾作用。

1 滚石动能与轨迹

1.1 3D DDA 基本理论

在 DDA 求解中,大位移是每一时步位移增量和变形增量的累加。每一时步内,所有点的位移增量很小,可以使用位移的完全一阶近似^[9]。DDA 方法与有限元法相似,均以位移为未知量,个数是所有块体自由度的总和。假设块体系统由 n 个块体组成,每一块体的通体有常应力和常应变,则块体 i 任

一点 (x, y, z) 的位移 (u, v, w) 可由 12 个位移变量表示:

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} = \mathbf{T}_i \mathbf{D}_i \quad (1)$$

$$\mathbf{T}_i = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & \tilde{z} & -\tilde{y} & \tilde{x} & 0 & 0 & 0 & \tilde{z}/2 & \tilde{y}/2 \\ 0 & 1 & 0 & -\tilde{z} & 0 & \tilde{x} & 0 & \tilde{y} & 0 & \tilde{z}/2 & 0 & \tilde{x}/2 \\ 0 & 0 & 1 & \tilde{y} & -\tilde{x} & 0 & 0 & 0 & \tilde{z} & \tilde{y}/2 & \tilde{x}/2 & 0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{D}_i = (u_c \ v_c \ w_c \ r_x \ r_y \ r_z \ \epsilon_x \ \epsilon_y \ \epsilon_z \ \gamma_{yz} \ \gamma_{zx} \ \gamma_{xy})^T \quad (3)$$

式中, \mathbf{T}_i 和 \mathbf{D}_i 分别为块体 i 的形函数和位移变量。 $\tilde{x} = x - x_c$, $\tilde{y} = y - y_c$, $\tilde{z} = z - z_c$ (u_c, v_c, w_c) 是块体 i 重心 (x_c, y_c, z_c) 的刚体平移; (r_x, r_y, r_z) 是块体 i 绕 x 、 y 和 z 轴转动的转角; $(\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z)$ 和 $(\gamma_{yz}, \gamma_{zx}, \gamma_{xy})$ 分别是块体 i 的三个法向应变和三个切向应变。

DDA 块体系统总势能来源于块体系统弹性应力、初始应力、体积力、点荷载、惯性力、固定点荷载和接触力的总和。假设块体系统中有 n 个块体, 通过最小总势能原理得到总体平衡方程的矩阵形式^[16]:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{K}_{11} & \mathbf{K}_{12} & \cdots & \mathbf{K}_{1n} \\ \mathbf{K}_{21} & \mathbf{K}_{22} & \cdots & \mathbf{K}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{K}_{n1} & \mathbf{K}_{n2} & \cdots & \mathbf{K}_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{D}_1 \\ \mathbf{D}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{D}_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{F}_1 \\ \mathbf{F}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{F}_n \end{pmatrix} \quad (4)$$

因每个块体有 12 个自由度, 所以式(4)中每个 \mathbf{K}_{ij} 和 \mathbf{F}_i 分别为 12×12 刚度子矩阵和 12×1 荷载子矩阵。系数矩阵对角项 \mathbf{K}_{ii} 取决于块体 i 的材料特性和几何尺寸; 非对角项 \mathbf{K}_{ij} ($i \neq j$) 由块体 i 与 j 之间的接触条件决定。块体 i 与 j 若不接触, 则有 $\mathbf{K}_{ij} = \mathbf{0}$; 若接触, 则 $\mathbf{K}_{ij} \neq \mathbf{0}$, 与两块体的材料特性和几何形状有关。块体间的接触计算见文献[9, 20]。

1.2 滚石动能

从母岩分离下来的滚石, 粒径大小从几厘米到几米, 甚至十几米, 有的滚石重量高达几百吨, 冲击速度高达几十米每秒, 具有高速、高能等特点, 对坡上与坡底的结构物和构筑物有很强的冲击破坏能力^[21]。滚石沿坡面向下运动, 是一个由重力势能向动能和其它形式能量的转化过程。其它形式能量即为滚石滚落过程所损失的能量, 如因碰撞、摩擦和空气阻力而损失的能量。对于边坡防护而言, 滚石能量损失越多, 到达坡底的动能越小。动能演进

过程是滚石能量分析的重点。滚石动能 (E_k) 由平动动能 (E_{kt}) 和转动动能 (E_{kr}) 组成:

$$E_k = E_{kt} + E_{kr} \quad (5)$$

若滚石简化为质量均匀分布的球体, 且在运动过程无破碎, 则有:

$$E_{kt} = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} m (v_x^2 + v_y^2 + v_z^2) \quad (6)$$

$$E_{kr} = \frac{1}{2} J \omega^2 = \frac{1}{2} J (\omega_x^2 + \omega_y^2 + \omega_z^2) \quad (7)$$

$$J = J_x = J_y = J_z = \frac{2}{5} m r_b^2 \quad (8)$$

式中, m 和 r_b 分别为滚石的质量和半径; v_x, v_y 和 v_z 分别为滚石平动速度 v 沿 x 、 y 和 z 轴的分量; ω_x, ω_y 和 ω_z 分别为滚石角速度 ω 绕 x 、 y 和 z 轴的分量; J_x, J_y 和 J_z 分别为滚石转动惯量 J 绕 x 、 y 和 z 轴的分量。

滚石与坡面或滚石平台等碰撞, 滚石动能损失, 速度减小, 此过程是滚石研究的难点, 与碰撞实体的几何物理条件有关。滚石碰撞前后的速度如图 1 所示。通常采用碰撞恢复系数 (COR) 来描述滚石碰撞前后的动能或速度变化:

$$\text{COR} = v_r / v_i \quad (9)$$

式中, v_i 和 v_r 分别是滚石入射和反弹的合速度。

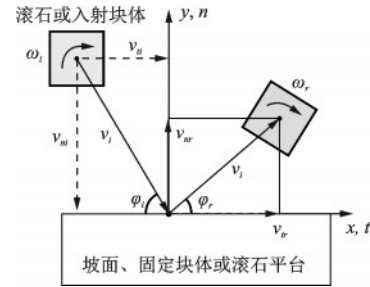


图 1 滚石碰撞前后的速度

Fig. 1 Velocities of the block before and after a collision

滚石碰撞引起的动能损失可理解为沿坡法向和切向的两部分动能耗散, 法向部分源于滚石与坡面的变形, 切向部分源于滚石与坡面间的摩擦作用。因此, 滚石碰撞恢复系数可由沿坡法向和切向的速度分别定义:

$$\text{COR}_n = v_{nr} / v_{ni} \quad (10)$$

$$\text{COR}_t = v_{tr} / v_{ti} \quad (11)$$

式中, n 和 t 分别表示垂直于坡面的法向方向和沿坡面的切向方向。

1.3 滚石运动轨迹

滚石运动轨迹一般被视为自由落体、碰撞弹

跳、滚动和滑动四种基本运动形式的混合^[22],是能量转化的外在体现。滚石坠落,在空中仅受重力作用(不计空气阻力),运动轨迹处于竖直平面当中。当滚石与坡面碰撞,由于二者的接触作用,使得滚石反弹,运动方向发生变化,产生新的抛物线型轨迹。此过程可多次发生,并转化成或伴随着滚动、滑动等混合运动形式。DDA作为块体系统完全动力学计算方法,可模拟滚石复杂的运动行为和运动特征。对于运动轨迹的计算,最重要的是获取每一时步滚石的位移(平移、转动)、变形和位置信息。引入初始条件,在DDA每一时步求解总体平衡方程,获得滚石的位移和变形,进而得到滚石新的位置和几何特征等信息,并记录到中间结果文件中;根据研究需要,每隔几个时步提取一次中间结果文件中的数据;使用AutoLISP语言,将提取的数据输入到AutoCAD中,可直观的绘制出滚石的运动轨迹。滚石运动轨迹输出流程如图2所示。基于滚石运动轨迹,可得到滚石到达平台的着落点坐标,从而计算平台的设计宽度 w :

$$w = b_{\max} + b \quad (12)$$

式中, b_{\max} 为滚石到达平台的着落点与坡脚的距离, b 为滚石平台宽度的安全值,一般取1 m。

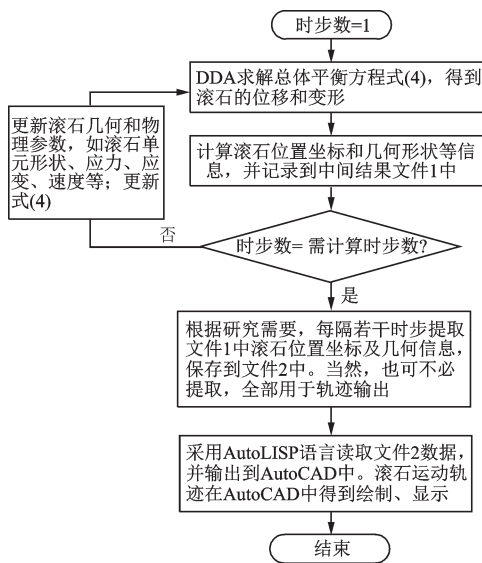


图2 滚石运动轨迹输出流程

Fig. 2 Flowchart of outputting motion trajectory of blocks

2 3D DDA方法验证

2.1 恢复系数比较

滚石碰撞恢复系数是研究滚石动能转化和运

动轨迹的重要参数,与边坡坡度、坡面覆盖层力学性质、滚石形状大小等有关^[1]。滚石动能分析的复杂之处在于碰撞弹跳后速度的确定。本节采用立方体斜抛实验^[23]与3D DDA结果比较,验证3D DDA模拟滚石碰撞的正确性。

立方体由高强水泥制成,棱长为3 cm,平均容重 21.9 kN/m^3 。实验中,立方体被置于一适当高度的倾斜管一端,在管中经过滑动、滚动,到达管的另一端,产生平动速度和角速度,经斜抛运动后以一定角度与固定块体碰撞,如图1所示。尽管立方体释放条件相同,但由于人为因素影响,每次实验中,倾斜管抛出立方体的姿态稍有差别,导致其与固定块体碰撞前的入射特征(如入射角、速度、角速度等)不是定值。碰撞前,立方体的入射特征见表1。共进行50组重复实验,相应地,采用3D DDA建立斜抛实验数值模型,确保与实验中入射特征一致,模拟50次,尽可能减小抛出姿态造成的结果偏差。3D DDA计算参数:重力加速度为 9.8 m/s^2 ,时间步长为 0.0001 s ,法向和切向弹簧刚度分别为 k_n 和 k_t 。法向弹簧刚度 $k_{n1} = 1.0 \times 10^6 \text{ kN/m}$ 、 $k_{n2} = 0.5 \times 10^6 \text{ kN/m}$,切向弹簧刚度 $k_{t1} = 1.0 \times 10^5 \text{ kN/m}$ 、 $k_{t2} = 0.5 \times 10^5 \text{ kN/m}$ 。取不同弹簧刚度组合,即 k_{n1}/k_{t1} 、 k_{n1}/k_{t2} 、 k_{n2}/k_{t1} 、 k_{n2}/k_{t2} ,用于3D DDA模拟。碰撞后,由实验和3D DDA得到的反弹特征见表1。由式(9)~(11)获得滚石碰撞的各恢复系数,并分别计算各恢复系数的平均值、标准差、最小值和最大值,见表2。从表1和表2可以看出,3D DDA计算结果与实验接近,且3D DDA计算的反弹特征和恢复系数较大,标准差较小。分析两种方法得到的法向恢复系数(COR_n)和切向恢复系数(COR_t)可知, COR_t 远大于 COR_n ,即碰撞后切向速度减小量较小,法向速度减小量较大。就块体碰撞而言,动能损失主要源于法向动能耗散,即由碰撞实体间的变形引起;切向动能耗散较小,即切向摩擦力影响较小。在所有弹簧刚度组合中, k_{n1}/k_{t2} 组合使3D DDA更接近于实验结果。3D DDA模拟结果受弹簧刚度影响较大,可通过调整弹簧刚度进行修正,使其更接近真实的运动特征。本节弹簧刚度值是根据在50次试验中,每次3D DDA结果与立方体斜抛试验结果的吻合程度来选取的。若以入射和反射特征误差作为参考指标,对弹簧刚度做敏感性分析,反演出最优弹簧刚度,也是十分必要的。

表1 立方体的入射特征和反弹特征(平均值/标准差)

Table 1 Incidence and rebound characteristics of cubical blocks (mean value/ standard deviation)

方法	入射			反射		
	角度	速度	角速度	角度	速度	角速度
	$\phi_i / (^\circ)$	$v_i / (m \cdot s^{-1})$	ω_i / s^{-1}	$\phi_r / (^\circ)$	$v_r / (m \cdot s^{-1})$	ω_r / s^{-1}
实验	61.2/4.2	3.4/0.2	12.4/10.4	22.9/10.2	1.5/0.4	53.4/21.4
3D DDA (k_{n1}/k_{s1})	61.2/4.2	3.4/0.2	12.4/10.4	23.7/6.2	1.8/0.3	56.1/15.2
3D DDA (k_{n1}/k_{s2})	61.2/4.2	3.4/0.2	12.4/10.4	23.1/9.5	1.6/0.3	54.0/19.2
3D DDA (k_{n2}/k_{s1})	61.2/4.2	3.4/0.2	12.4/10.4	24.3/8.4	2.0/0.2	58.3/16.8
3D DDA (k_{n2}/k_{s2})	61.2/4.2	3.4/0.2	12.4/10.4	25.7/7.2	1.9/0.4	55.1/20.2

表2 碰撞恢复系数的比较

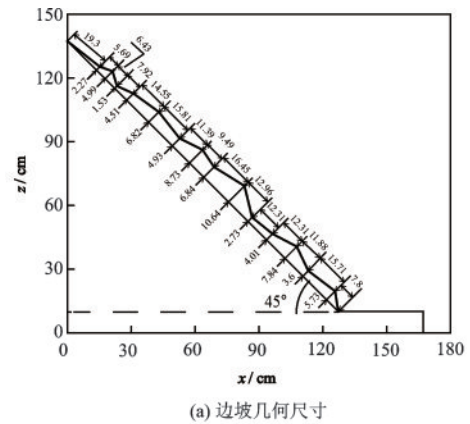
Table 2 Comparison of CORs obtained from the experiment and the 3D DDA

方法	COR		COR _n		COR _t	
	Mean/std	Min/max	Mean/std	Min/max	Mean/std	Min/max
实验	0.45/0.10	0.19/0.59	0.20/0.10	0.02/0.40	0.85/0.15	0.44/1.13
3D DDA (k_{n1}/k_{s1})	0.54/0.05	0.24/0.75	0.32/0.07	0.05/0.55	0.88/0.10	0.55/1.20
3D DDA (k_{n1}/k_{s2})	0.48/0.08	0.21/0.62	0.23/0.08	0.03/0.45	0.86/0.13	0.48/1.12
3D DDA (k_{n2}/k_{s1})	0.56/0.06	0.19/0.80	0.39/0.07	0.04/0.60	0.89/0.11	0.62/1.31
3D DDA (k_{n2}/k_{s2})	0.52/0.05	0.27/0.77	0.35/0.08	0.07/0.65	0.88/0.14	0.60/1.28

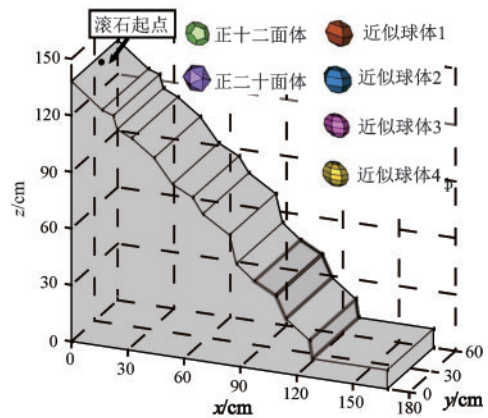
2.2 动能和运动轨迹比较

滚石运动过程中,多种运动方式并存,且互相转化,多以滚动和弹跳为主。处于滚动的滚石遇到岩石露头等障碍,因接触碰撞而弹跳,在空中运动后又落回坡面回弹、飞跃。这一过程滚石动能和运动轨迹发生急剧变化,是滚石研究的重点。3D DDA可充分考虑滚石与坡面的几何特征和接触关系,是研究任意形状块体动力位移和变形的有效工具。为了验证3D DDA分析滚石动能和运动轨迹的准确性,本节采用室内模型实验^[8]与3D DDA模拟结果进行比较分析。

室内模型边坡由混凝土制成,几何尺寸如图3(a)所示,选用质地坚硬且近似球状的鹅卵石为滚石。在3D DDA计算中,采用3种块体来模拟滚石,分别为正十二面体、正二十面体、近似球体。其中近似球体经线和纬线个数($m \times n$)分别为 4×4 、 5×5 、 6×6 、 7×7 。3D DDA边坡模型如图3(b)所示,滚石密度为 2610 kg/m^3 ,质量为 44.8 g ,摩擦角为 10° 。文献[8]中滚石滚落50次,与数值软件 Rocfall 50次模拟结果相比较,二者轨迹近似。如图4(a)所示,3D DDA得到了6个滚石的6条运动轨迹,均可在滚石实验和 Rocfall 模拟中找到相吻合的若



(a) 边坡几何尺寸



(b) 3D DDA边坡模型及近似滚石

图3 室内模型边坡

Fig. 3 Model slope in laboratory

干条轨迹。但这6条运动轨迹各不相同,主要原因是滚石形状不同,即滚石形状是影响滚石运动轨迹的原因之一。根据文献[8],将此模型边坡放大10倍,落石质量增加到10 kg,来分析滚石的动能变化。如图4(b)所示,3D DDA程序与Rocfall数值模拟软件得到的滚石总动能演进趋势基本相同,动能的每一次衰减都代表着滚石与坡面的碰撞。每一次碰撞后,3D DDA滚石总动能的衰减较Rocfall更加明显。图4(b)亦给出了由3D DDA计算的滚石平动动能和转动动能的演进过程,可知平动动能与总动能在数值上大小接近且变化趋势一致,而转动动能占总动能的比例很小。3D DDA可以考虑滚石形状,而不像Rocfall等其它数值软件仅将滚石简化为质点,这是3D DDA研究滚石运动规律的优势之一。同时,滚石动能与其运动轨迹相对应,当滚石与坡底平台碰撞时,滚石动能明显降低。

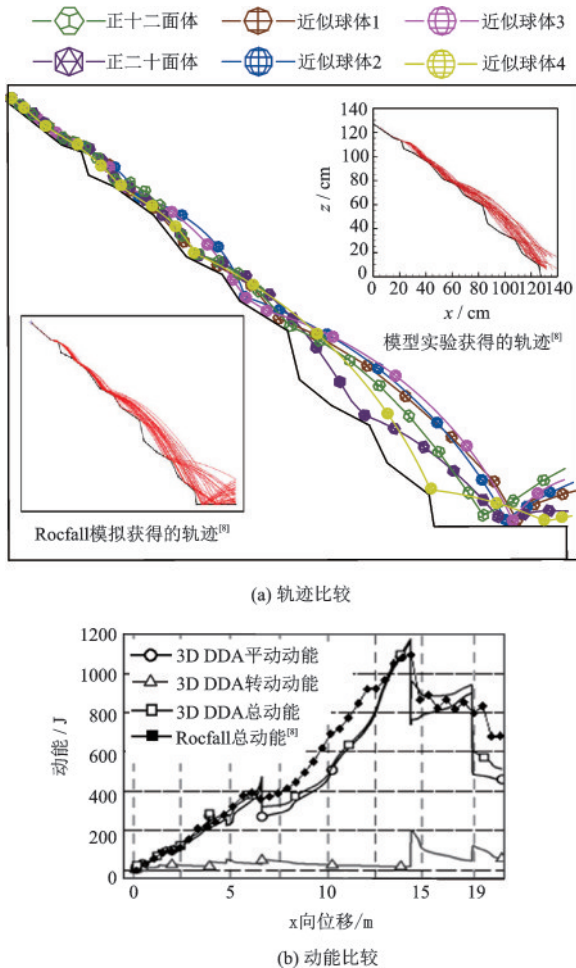


图4 滚石动能与运动轨迹

Fig.4 Kinetic energies and motion trajectories of rolling blocks

3 算例分析

3.1 不同边坡特征下滚石平台防护作用

滚石平台的防护作用受边坡特征、平台表面条件和滚石自身特点等综合因素影响。黄润秋等^[4]通过一系列滚石试验,分析了滚石质量、形状、进入平台时的初始速率及平台表面粗糙度对滚石在平台上停留位置和阻力系数的影响。在实际工程中,平台设置与边坡特征密切相关。边坡特征主要概括为:坡高、坡角、坡形。建立坡角为 α 、坡高为 h 的3D DDA边坡模型,如图5所示,以研究不同边坡特征下平台对滚石灾害的减灾作用。滚石采用半径 $r_b = 0.5\text{ m}$ 、密度 $\rho = 2500\text{ kg/m}^3$ 、经线和纬线个数为 6×6 的近似球体。滚石质量 $m = \rho \times 4\pi r_b^3 / 3 = 2500 \times 4\pi \times 0.5^3 / 3 = 1309\text{ kg}$,绕 x 、 y 和 z 轴的惯性矩 $J = J_x = J_y = J_z = 130.9\text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 。界面间摩擦角为 40° ,时间步长为 0.001 s ,滚石由静止开始运动,其它计算参数同2.1节。为了施工方便,滚石平台一般设置于坡脚与拦挡结构(如拦石墙)之间,但因自然条件和公路宽度影响,平台宽度有一定限制。图5中,公路与平台宽度合计为 8.5 m 。不同边坡特征每一种工况计算50次,得到相应的平台设计宽度平均值。

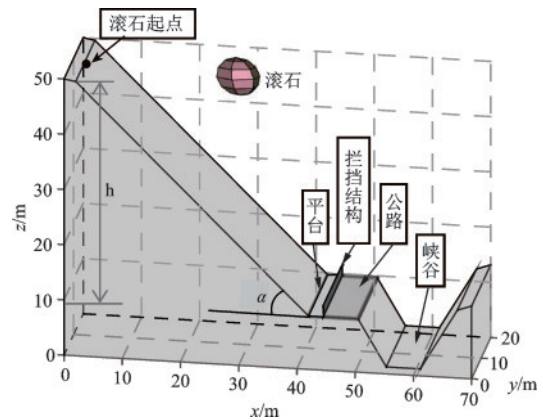
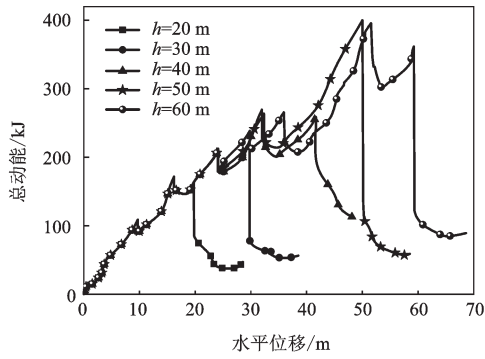


图5 3D DDA边坡模型

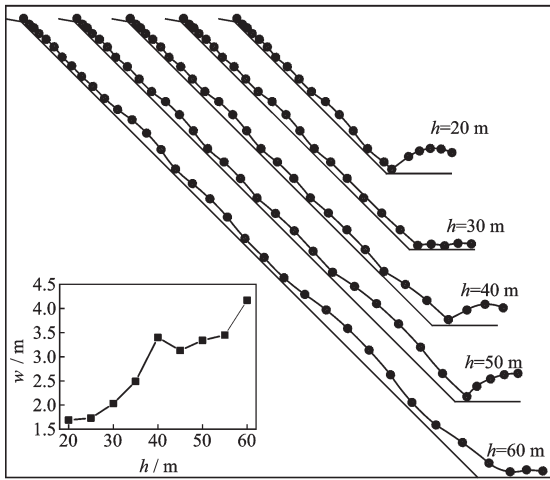
Fig.5 Slope model of 3D DDA

3.1.1 坡高

在坡角 $\alpha = 45^\circ$ 情况下,取不同坡高 $h = 20 \sim 60\text{ m}$,每隔 5 m 计算一次。由图6给出其中5个有代表性的滚石动能演进过程和运动轨迹。图6(a)可见平台对滚石动能起到显著衰减作用,有利于坡底防护和减小对结构设施的冲击作用。坡高越大,滚



(a) 动能演进过程



(b) 运动轨迹及平台设计宽度

图6 不同坡高滚石运动分析

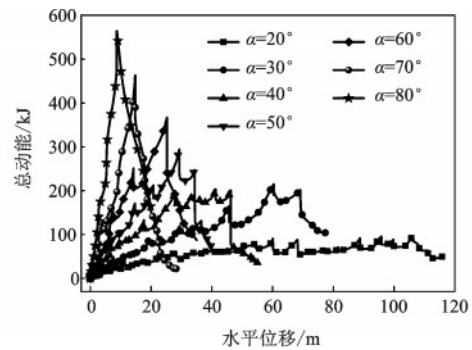
Fig. 6 Analysis of the rolling block movement under different slope heights

石起始时刻的重力势能越大,到达坡底的动能越大,但其明显小于这个重力势能,原因是滚石与坡面碰撞损失了大量的能量。如坡高 $h=60\text{ m}$ 时,最大动能仅接近于 $h=50\text{ m}$ 的最大动能,滚石到达坡底前与坡面碰撞,随后又立即与平台碰撞,动能损失较多。图6(b)表明平台明显改变滚石运动轨迹,根据滚石运动轨迹可以获得滚石到达平台的着落点位置,由式(12)得到滚石平台的设计宽度。每一坡高计算50次,进而得到平台设计宽度平均值。平台设计宽度(平均值)总体趋势为:随坡高的增大而增大。在自然和施工条件允许的情况下,平台宽度可适当增大,滚石将在平台上多次弹跳,减小滚石动能,从而降低对拦挡结构的强度和尺寸要求。若条件有限,平台宽度增大,可能占用公路宽度,因此,平台宽度有一定限制。滚石与平台碰撞后产生的弹跳有所不同,这与其在坡面上的运动状态和起跳点(即到达坡底前滚石与坡面碰撞点)密切相关。一般滚石平台需与拦挡结构配合使用,有关拦挡结

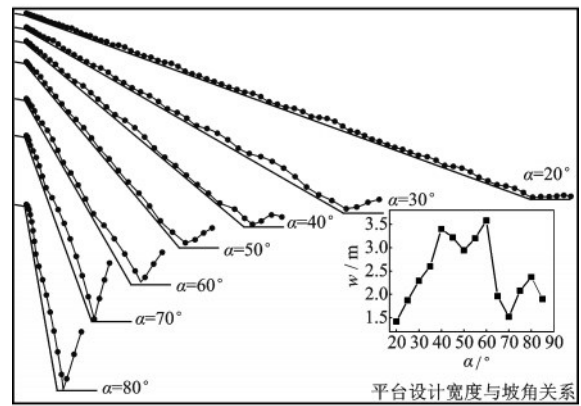
构的设计需进一步研究。

3.1.2 坡角

当坡高 $h=40\text{ m}$ 时,取不同坡角 $\alpha=20^\circ\sim 85^\circ$,每隔 5° 计算一次。其中7个有代表性的滚石动能演进过程及相应的运动轨迹如图7所示。随着坡角增大,滚石运动轨迹逐渐发生变化。当 $\alpha<50^\circ$ 时,滚石滚动、滑动、弹跳三种状态不断转化,其中弹跳次数较为频繁,且幅度较小,动能耗散较多,到达平台的动能较小;当 $\alpha=50^\circ\sim 70^\circ$ 时,滚石起初以滑动和滚动为主,最后以弹跳状态进入平台;当 $\alpha>70^\circ$ 时,滚石趋近于自由落体状态,对平台冲击作用很大,且碰撞后趋于竖直向上反弹,位移很大,不利于防护结构布置,可在相应位置开挖落石槽,以降低弹跳高度,便于拦挡。如图7(b)所示,平台设计宽度(平



(a) 动能演进过程



(b) 运动轨迹及平台设计宽度

图7 不同坡角滚石运动分析

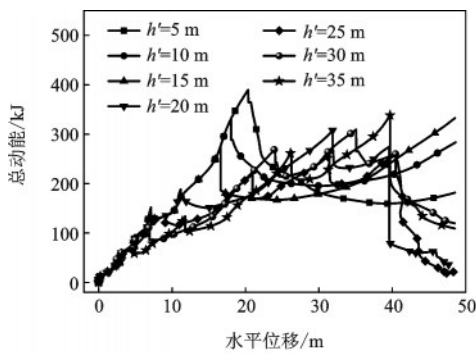
Fig. 7 Analysis of the rolling block movement under different slope angles

均值)随着坡角增大的变化趋势为:增大—减小、增大—减小、再增大—减小。从运动轨迹上看,随着坡角增大,滚石与平台碰撞后弹跳高度增大;从动能上看,随着坡角增大,滚石到达平台的总动能增大,平台对滚石动能衰减作用增大。因此,坡角较

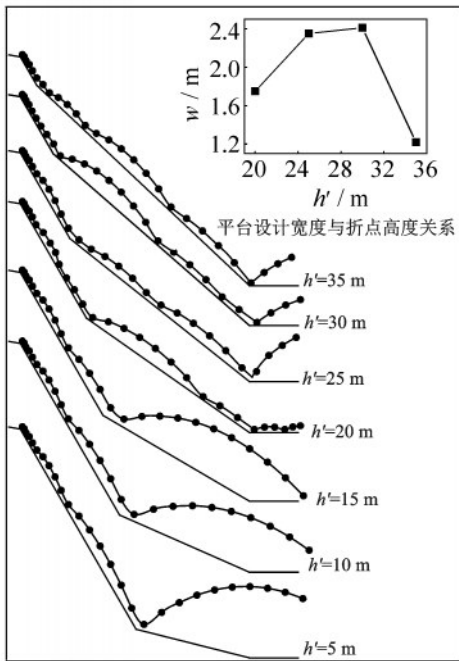
小的边坡,有利于在平台宽度外布置拦石墙等防护设施。而且,从运动时间角度出发,坡角减小,滚石到达坡底的时间增长,有利于坡底过往车辆的快速撤离。

3.1.3 坡形

坡形是坡面的几何形态,它在自然界中的复杂断面可以简化为有多个折点的折坡。采用坡高 $h=40\text{ m}$ 、坡角 $\alpha=45^\circ$ 的单折点折坡研究平台对滚石的防护作用。首先,分析上陡下缓边坡。取折点距坡底高度 $h'=5\sim 35\text{ m}$,每隔 5 m 得到一种坡形,滚石沿边坡的动能变化和运动轨迹如图 8 所示。当 $h'=5\sim 15\text{ m}$ 时,滚石未落到坡底平台及公路上,而直接落入峡谷中,虽然动能很大,但不会对交通线路产



(a) 动能演进过程

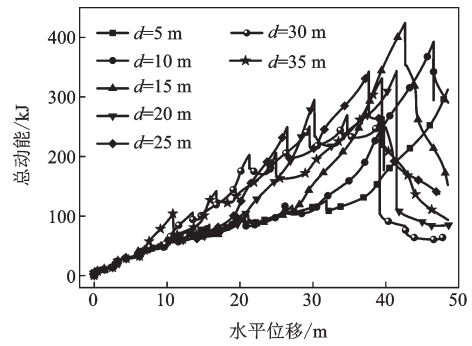


(b) 运动轨迹及平台设计宽度

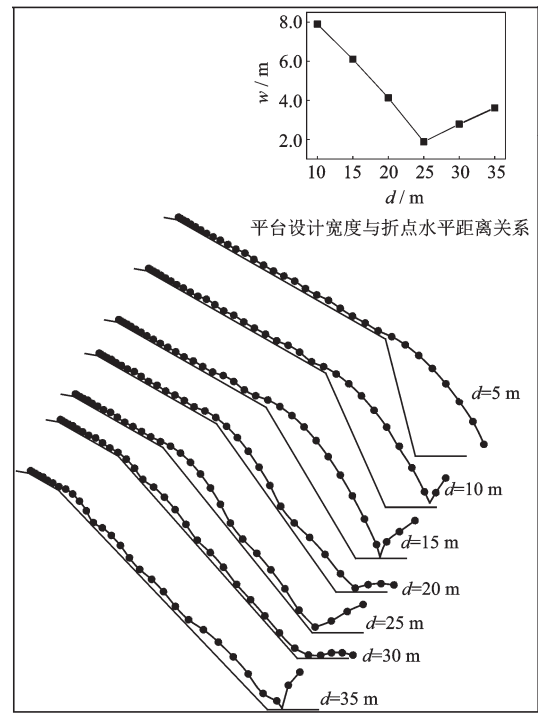
图 8 折点不同高度滚石运动分析

Fig. 8 Analysis of the rolling block movement under different heights of folding points

生威胁;当 $h'=20\sim 35\text{ m}$,坡底平台使滚石动能衰减,其平台设计宽度(平均值)随折点高度先增后减,与拦挡结构配合使用可起到边坡防护作用。同样地,取折点距坡脚水平距离 $d=5\sim 35\text{ m}$,分析上缓下陡边坡,滚石运动轨迹及动能变化如图 9 所示。当 $d=5\text{ m}$ 时,滚石落入峡谷,不与交通线路碰撞;当 $d=10\sim 35\text{ m}$ 时,平台使得滚石动能显著减小,平台设计宽度(平均值)随折点水平距离先减后增。对于 $d=10\text{ m}$ 、 15 m ,平台过宽,致使公路狭窄,不利于交通运输,因此这种情况不宜使用平台及拦石墙等防护措施,可采用棚洞等遮挡建筑物进行防护。从折坡分析



(a) 动能演进过程



(b) 运动轨迹及平台设计宽度

图 9 折点不同水平距离滚石运动分析

Fig. 9 Analysis of the rolling block movement under different horizontal distances of folding points

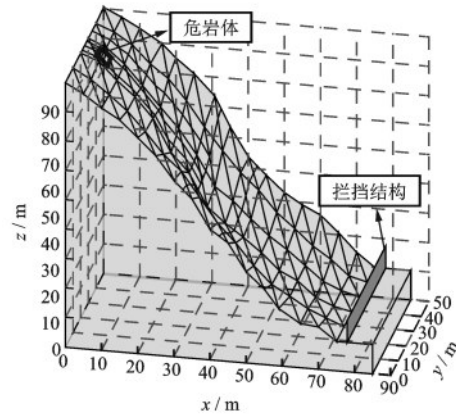
中可以看出,并非所有滚石都会落到平台或公路上,而可能直接落入峡谷中,某些防护设施起不到防护作用。

3.2 工程实例分析

实际工程中,边坡和滚石均呈现出三维空间特征,如形状各异的滚石在复杂地形边坡发生侧向碰撞和横向移动。为了表现这一特征,采用3D DDA分析青藏高原朗村滚石边坡实例,并研究滚石平台的防护作用。青藏高原朗村滑坡^[24]位于G318国道工布江达县城以西,公路南侧,尼洋河右岸,里程桩号K4361+700,地理坐标:93°13'52.90"E,29°53'0.91"N。滑坡前缘公路高程约3420m,后缘高程约3500m。2009年8月发生滑坡,造成交通瘫痪,已被清理。滑坡之后,原有边坡又形成新的高陡边坡如图10(a)所示,坡度约为60°,基岩裸露,坡顶存在危岩体,岩性以砂质板岩为主,岩层产状10°∠25°,局部产状不稳定。在降雨、冻胀、地震、人为因素等作用下,可能发生崩塌滚石灾害。边坡三维模型如图10(b)所示。3D DDA计算参数:重力加速度为10.0 m/s²,密度2500 kg/m³,摩擦角30°,时间步长0.00001 s,法向和切向弹簧刚度分别为10⁵ kN/m和10⁴ kN/m。图11(a)~(c)分别给出危岩体初始状态、失稳后与母岩分离的滑动状态及沿坡面的运动状态。图11(d)~(f)分别给出无拦挡结构、



(a) 朗村滑坡^[24]



(b) 三维模型

图10 青藏高原G318国道K4361+700典型边坡

Fig. 10 3D model of K4361+700 typical slope of G318 national road in Tibet Plateau

有拦挡结构无平台、有拦挡结构有平台三种情况下滚石的最终状态。可以看出,无拦挡结构时,滚石运动经过公路,极大威胁坡底行人和车辆;有拦挡结构无平台时,滚石大部分被拦截,小部分经过公

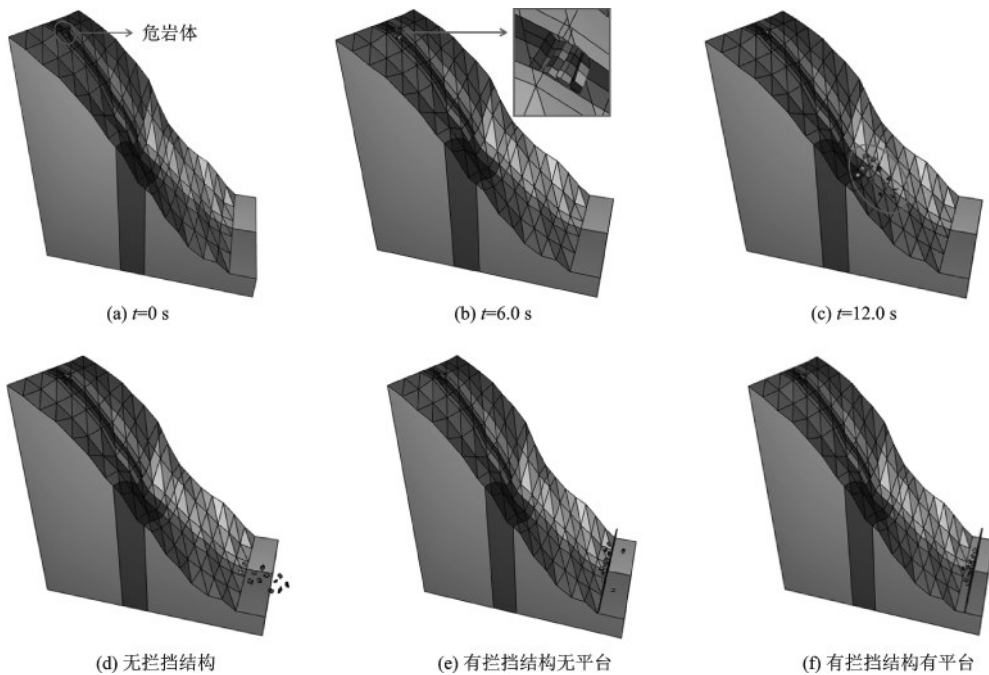


图11 危岩体失稳运动过程及最终状态

Fig. 11 Process and final states of the unstable rock movement

路;有拦挡结构有平台时,滚石系统全部被拦截,避免了滚石灾害发生。可见,平台对滚石灾害具有较强的防护作用,尤其是与拦挡结构联合使用,大大降低了滚石灾害的发生。

4 结 论

3D DDA方法可考虑滚石三维形状和边坡的三维地形特征,能准确输出滚石动能和运动轨迹,是模拟滚石运动的有效工具。采用3D DDA方法研究不同边坡特征下滚石平台对滚石灾害的防护作用,得到以下结论:

(1) 滚石与坡面每一次碰撞,动能均有所衰减,其中平动动能与总动能大小接近,变化趋势一致,而转动动能所占比例很小。切向摩擦力对动能衰减影响较小,动能衰减主要源于法向碰撞的动能耗散。

(2) 滚石平台显著衰减滚石动能,改变滚石运动轨迹。在条件允许情况下,可适当加宽平台,增加滚石弹跳次数,降低滚石动能,减小对拦挡结构或交通线路的冲击作用。

(3) 坡高增大,滚石到达坡底的动能不一定明显增加,这与其在坡面上的起跳点和碰撞次数有关。坡角增大,滚石运动轨迹及进入平台的运动状态和动能逐渐变化。对于坡角较小的边坡,滚石到达平台动能较小且运动时间较长,有利于坡底防护结构布置和车辆安全撤离;对于坡角趋于直角的边坡,滚石以自由落体状态进入平台,动能很大,尽管平台衰减大量动能,但回弹位移依然较大,不利于边坡防护。

(4) 折坡折点的不同位置对滚石运动规律影响较大。值得注意的是,折点高度较低或折点位置靠近坡脚时,滚石会越过滚石平台、拦挡结构和公路,对交通运输不造成危害。

(5) 得到不同条件下滚石平台设计宽度变化规律,为平台设计和边坡防护提供参考。复杂坡形的工程实例表明滚石平台对滚石灾害有重要防护作用,滚石平台和拦挡结构配合使用可有效避免滚石灾害。滚石平台、落石槽、棚洞、拦石墙等联合使用及其设计需要进一步研究。

参 考 文 献:

[1] 何思明,吴永,杨雪莲. 滚石坡面冲击回弹规律研究

[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增1): 2 793-2 798.

He S M, Wu Y, Yang X L. Study of rock-fall motion on slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(Sup1): 2 793-2 798. (in Chinese)

[2] 章广成,唐辉明,吕庆,等. 斜坡落石研究[M]. 北京: 科学出版社, 2016.

Zhang G Ch, Tang H M, Lyu Q, et al. Study on rock-fall of slope[M]. Beijing: Science Press, 2016. (in Chinese)

[3] 崔晓光. 汶马高速公路崩塌灾害风险评估与防治措施分析[D]. 成都: 成都理工大学, 2015.

Cui X G. The risk assessment and measures analysis of rockfall in Wenchuan-Marekang highway [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2015. (in Chinese)

[4] 黄润秋,刘卫华. 平台对滚石停积作用试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(3): 516-524.

Huang R Q, Liu W H. Platform resistant test on rolling rock blocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(3): 516-524. (in Chinese)

[5] Zheng L, Chen G, Li Y, et al. The slope modeling method with GIS support for rockfall analysis using 3D DDA[J]. Geomechanics and Geoengineering: An International Journal, 2014, 9(2): 142-152.

[6] 王 珣,李建国,孙立勋. RFA落石分析软件开发与工程应用[J]. 铁道工程学报, 2014, 187(4): 57-62.

Wang X, Li J G, Sun L X. RFA rockfall analysis software development and engineering application[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2014, 187(4): 57-62. (in Chinese)

[7] 邹维勇,王金梅,王 潘. 落石运动路径按区间分段算法[J]. 防灾减灾工程学报, 2017, 37(1): 79-84.

Zou W Y, Wang J M, Wang P. The algorithm to calculate the rockfall motion path with the partitioning interval computation method[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2017, 37(1): 79-84. (in Chinese)

[8] 朱 彬. 岩质边坡滚石运动特性及防护研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.

Zhu B. Study on motion characteristic and protection of rockfalls on rock slope [D]. Chongqing: Chongqing University, 2010. (in Chinese)

[9] Shi G H. Discontinuous deformation analysis-a new numerical model for the statics and dynamics of block system [D]. Berkeley: Department of Civil Engineering, University of California, 1988.

[10] Chen G. Numerical modeling of rock fall using extended

- DDA[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(6): 926-931.
- [11] Chen G, Zheng L, Zhang Y, et al. Numerical simulation in rockfall analysis: a close comparison of 2-D and 3-D DDA[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2013, 46(3): 527-541.
- [12] Ma G C, Matsuyama H, Nishiyama S, et al. Practical studies on rockfall simulation by DDA[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 3: 926-931.
- [13] Zhang Y, Xu Q, Chen G, et al. Extension of discontinuous deformation analysis and application in cohesive-frictional slope analysis [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2014, 70(9): 533-545.
- [14] 赵兴权,张迎宾,陈光齐,等. 非连续变形分析方法及其在灾害防治研究中的应用[J]. 西南交通大学学报, 2016,51(2):300-312.
Zhao X Q, Zhang Y B, Chen G Q, et al. Discontinuous deformation analysis method and its applications to disaster prevention [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2016, 51(2): 300-312. (in Chinese)
- [15] 黄小福,张迎宾,赵兴权,等. 地震条件下危岩崩塌运动特性的初步探讨[J]. 岩土力学, 2017, 38(2): 583-592.
Huang X F, Zhang Y B, Zhao X Q, et al. A preliminary study of kinetic characteristic of rock-fall under seismic loading [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(2): 583-592. (in Chinese)
- [16] Shi G H. Three-dimensional discontinuous deformation analysis[C]// Proceedings of the 4th International Conference on Analysis of Discontinuous Deformation. Scotland, 2001, 1-21.
- [17] Wang W, Zhang H, Zheng L, et al. A new approach for modeling landslide movement over 3D topography using 3D discontinuous deformation analysis[J]. Computers and Geotechnics, 2017, 81: 87-97.
- [18] 吴建宏,大西有三,石根华,等. 三维非连续变形分析(3D DDA)理论及其在岩石边坡失稳数值仿真中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(6): 937-942.
Wu J H, Ohnishi Y, Shi G H, et al. Three dimensional discontinuous deformation analysis (3D DDA) and its application to the rock slope toppling[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(6): 937-942. (in Chinese)
- [19] Liu G Y, Li J J. A three-dimensional discontinuous deformation analysis method for investigating the effect of slope geometrical characteristics on rockfall behaviors [J]. International Journal of Computational Methods, 2019, 16(8): 1850122.
- [20] Shi G H. Contact theory[J]. Science China Technological Sciences, 2015, 58(9): 1 450-1 496.
- [21] 何思明,庄卫林,张雄,等. 都汶公路彻底关大桥桥墩抗滚石冲击防护研究[J]. 岩石力学与工程学报. 2013,32(增2):3 421-3 427.
He S M, Zhuang W L, Zhang X, et al. Research on rockfall impact prevention of Chediguan bridge pier, DuWhen road[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(Sup2): 3 421-3 427. (in Chinese)
- [22] Descoedres F, Zimmermann T H. Three-dimensional dynamic calculation of rockfalls [C]// In 6th ISRM Congress, International Society for Rock Mechanics. Montreal, 1987.
- [23] Asteriou P, Tsiambaos G. Empirical model for predicting rockfall trajectory direction[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016, 49(3): 927-941.
- [24] 沈力. 西藏境内G318国道沿线路堑边坡坡体结构研究[D]. 成都:西南交通大学, 2016.
Shen L. Study on along highway cutting slope structure of G318 state road in Tibet [D]. Chengdu: Southwest Jiao tong University, 2016. (in Chinese)

(本文责编:周小潭)