

DOI: 10.16285/j.rsm.2021.0663

基于三维非连续变形分析的巨石崩塌运动研究

刘国阳¹, 孟海怡¹, 宁宝宽¹, 李石宝²

(1. 沈阳工业大学 建筑与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110870; 2. 西藏大学 理学院, 西藏 拉萨 850000)

摘 要: 巨石作为一种大体积、大质量的滚石, 其崩塌失稳及高速、高能远程运动往往导致沿途建筑物和交通线路的毁灭性灾难。以西藏自治区 G318 国道 K4580 典型滑坡为工程背景, 基于三维非连续变形分析 (three-dimensional discontinuous deformation analysis, 简称 3D-DDA) 方法研究巨石崩塌失稳及运动全过程的特征与现象。分别建立该边坡未滑坡、浅层滑坡后和深层滑坡后 3 种坡形的巨石崩塌 3D-DDA 数值模型。采用滚石运动横向偏移经验模型, 验证 3D-DDA 巨石运动模拟的准确性。在此基础上, 分析巨石崩塌失稳机制及破坏后沿 3 种不同坡形边坡的运动轨迹和动能演进等运动特征。结果表明, 3D-DDA 能够有效模拟巨石崩塌失稳、运动发展、剧烈冲击碰撞直至最终静止等整个动力学过程。巨石崩塌表现为滑动→倾倒→滑动→倾倒→翻转→下落的失稳模式转换; 巨石运动表现为碰撞、弹跳、飞跃、滚动、滑动等多种运动形式以及横向偏移、侧向偏转等三维空间运动特征, 经过道路并与高架桥发生碰撞, 引发巨石灾害。不同坡面几何特征下的巨石运动偏移量、弹跳高度、运动至坡底碰撞时间、最终稳定时间等均随着未滑坡、浅层滑坡后、深层滑坡后 3 种坡形变化而减小。通过 3D-DDA 巨石崩塌运动分析, 预测巨石运动全过程、影响范围、冲击能量、停积位置等, 可为巨石防灾减灾对策或措施制定提供依据。

关 键 词: 边坡巨石; 崩塌失稳; 运动特征; 3D-DDA; 冲击碰撞

中图分类号: P 642.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2022) 01-0246-11

Study on collapse and movement of a boulder based on 3D discontinuous deformation analysis

LIU Guo-yang¹, MENG Hai-yi¹, NING Bao-kuan¹, LI Shi-bao²

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang, Liaoning 110870, China;

2. School of Science, Tibet University, Lhasa, Tibet 850000, China)

Abstract: As a kind of rolling stone with large volume and mass, collapse, instability and long-distance movement with high-speed and high-energy for a rock boulder often lead to destructive disasters of the buildings and traffic lines along the runout pathway. The K4580 typical landslide along the G318 national road in Tibet Autonomous Region was taken as the engineering background, the characteristics and phenomena of the entire process of the collapse, instability and movement of the rock boulder were studied using 3D discontinuous deformation analysis (3D-DDA) method. The 3D-DDA numerical models of the rock boulder collapse were built for three slope shapes: slope shape without landslide, slope shape with shallow landslide, and slope shape after deep landslide. The accuracy of the 3D-DDA simulation results for the boulder movement was then verified based on an empirical model of transverse offset for the block movement. In addition, the instability mechanism of the boulder collapse was investigated; the movement trajectory and kinetic energy evolution were analyzed for the three slope shapes after failure. The results show that the 3D-DDA has the capacity to effectively simulate the whole dynamic process of the boulder collapse and instability, movement development, violent impact, collision, and terminate stages. The boulder collapse presents an instability mode that including the mode transformation of sliding→toppling-sliding→toppling→overturning-falling. The rock boulder movement is manifested by various movement forms such as collision, bouncing, flying, rolling and sliding, as well as 3D spatial movement characteristics such as transverse offset and lateral deflection. The boulder disaster may be induced once the rock boulder passing through the road and colliding with the viaduct. Under different slope geometric shapes from no landslide, to shallow landslide, and to deep landslide, the main factors all decrease as the slope shape changes such as the movement deviation, bouncing height, colliding time to the slope

收稿日期: 2021-04-30

修回日期: 2021-09-10

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 42007241); 辽宁省教育厅科学研究经费项目 (No. LQGD2020003)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (42007241) and the Scientific Research Fund of Education Department of Liaoning Province (LQGD2020003).

第一作者简介: 刘国阳, 男, 1989 年生, 博士, 副教授, 主要从事岩质边坡非连续变形分析等方面的教学和研究工作。E-mail: liugyang@163.com

First Author: Guo-yang Liu, male, born in 1989, Ph.D, Associate Professor, mainly engaged in teaching and research in the field of discontinuous deformation analysis of rock slopes. E-mail: liugyang@163.com

bottom, and final stability time of the boulder. Through the 3D-DDA analysis of the collapse and movement of the boulder, the whole movement process, influence range, impact energy, and terminate location of the boulder can be then predicted, which can provide a reference for the boulder disaster prevention and mitigation and measurement policy.

Keywords: slope boulder; collapse and instability; movement characteristics; 3D-DDA; impact and collision

1 引言

崩塌滚石是我国山区和道路交通沿线常见的地质灾害之一^[1]。尽管崩塌滚石涉及的岩体方量较小,但其具有分布范围广、爆发突然、速度快、能量高、运动距离远、监测预警难度大等特点,对生命财产和交通线路等基础设施的建设及安全运营构成严重威胁^[2]。特别是随着西部大开发战略和“一带一路”倡议的实施和推进,我国西南地区及丝绸之路经济带沿线在建或已建的很多大型基础设施都可能存在着崩塌滚石灾害风险。如正在规划建设的川藏铁路,由于沿线地貌陡峻,地质环境条件复杂,活动断裂带、高地应力等不良地质发育,在其建设与运营过程中将面临边坡浅表层崩塌滚石工程地质问题^[3-4]。可以说,崩塌滚石灾害是岩质边坡工程中不可避免的一项重要挑战,近年来受到了广大科研工作者和工程技术人员的高度关注^[5]。

崩塌形成的滚石粒径尺寸可从几厘米到几米,甚至是十几米^[6]。即使滚石尺寸较小,但在滚落过程中若能获得足够的动能,亦可具有像子弹一样的威力,不仅可以击穿人体某个部位,还可能击穿车辆金属外壳而造成人员伤亡^[7]。当滚石粒径尺寸达几米至十几米时,质量可能达到数十吨、数百吨乃至上千吨^[8],这样的巨石具有极大的惯性力和冲击动能。典型的巨石灾害事件举例如下:2009年7月25日,汶川地震后重建的都汶公路映秀段彻底关大桥处,山体高位危岩崩塌,一块体积约50 m³、重约200 t的巨石从近500 m高处滚落,击断大桥第3根桥墩,引起桥面垮塌,造成6人死亡、12人受伤、7辆车损毁,且阻断阿坝州交通主干道近1周^[9];2013年2月25日,陕西省镇巴县境内315县道一辆正在行驶的越野车,被山崖上滚落下来的一块直径约1.5 m的巨石砸中,挡风玻璃破碎,车辆引擎盖严重变形,导致车内三人被困,驾驶员死亡。可以看出,巨石作为一种大体积、大质量的滚石,其致灾能力极强,危害程度巨大,往往引发沿途建筑物和运输线路的毁灭性灾难。因此,开展巨石灾害评价与防治具有重要意义。

巨石滚落现象可分为两个阶段,一是巨石失稳启动的崩塌破坏阶段,二是巨石脱离母岩后沿边坡的运动破坏阶段^[10]。巨石崩塌运动特征主要体现在

巨石崩塌失稳模式、运动轨迹、能量演进、速度变化、崩落或停留位置等多个方面,是开展巨石灾害评价与防治的基础。所采用的研究方法可借鉴前期边坡滚石运动特征研究手段,如现场调研、理论计算、现场试验、模型试验、数值模拟等^[11]。这些方法针对小体积滚石研究效果显著,但直接应用于巨石灾害研究,可能存在一些不足之处。例如,现场调研限于研究人员的主观作用,一般难以定量分析巨石动能和轨迹演进规律;理论计算需对边坡和巨石采用较多的模型简化条件,如将巨石简化为质点或球体,计算结果偏于保守;现场试验因巨石体积大,不易于搬动和释放,一般准备周期长、试验费用昂贵,且试验设备与人员安全难以保障;模型试验受边坡巨石比尺效应及试验材料选择限制,所得结果可能与巨石实际运动特征差异较大。相比之下,合适的数值模拟方法更能考虑边坡和巨石实际尺寸、形状,试验过程简便快捷,费用低廉,可能更适于定量研究巨石崩塌运动^[12]。

巨石崩塌运动是一种涉及大块体、大位移、大转动及剧烈冲击碰撞的典型动力学过程,存在着复杂形状块体与复杂地形坡面间的接触变换及相互作用。针对以上特点,由Shi^[13]提出的非连续变形分析(discontinuous deformation analysis,简称DDA)方法具有将真实时间变量和岩块(系统)大位移问题统一于一体计算的优势^[14],在分析崩塌失稳及滚石运动全过程方面有着较大潜力。Ohnishi等^[15]为助力滚石防护栅栏设计,最先将DDA应用于崩塌滚石运动研究;Chen^[16]和Ma等^[17]考虑碰撞、摩擦及植被阻力等引起的能量损失,改进初始DDA程序并开展日本实际边坡滚石运动分析;Wu等^[18]提出后期接触调整方法(post-contact adjustment method,简称PAM),克服大转动导致的块体错误膨胀误差,并计算了日本九州某边坡滚石运动过程。实践表明,DDA可准确分析滚石运动特征,已成为崩塌滚石研究的有效数值工具^[16]。然而,目前DDA崩塌滚石模型还大多局限于二维情形,不能考虑危岩体结构面空间分布以及边坡地形和滚石形状的三维(3D)几何信息,难以定量获取滚石横向偏移、侧向偏转等实际空间运动特征^[19]。尽管Chen^[20]、Zheng^[21]、Liu^[5, 22-23]等试图采用3D-DDA方法^[24]开展三维崩塌滚石运动研究,并取得了一些初步成果,

但针对巨石崩塌失稳及运动全过程的研究较少, 尚缺乏巨石崩塌运动特征的规律性认识。

因此, 本文以西藏自治区 G318 国道 K4580 典型滑坡为例, 基于 3D-DDA 方法开展巨石崩塌失稳及运动全过程的特征与现象研究, 分别建立该边坡未滑坡、浅层滑坡后和深层滑坡后 3 种坡形的巨石崩塌 3D-DDA 数值模型, 采用滚石运动横向偏移经验模型, 验证 3D-DDA 巨石运动模拟的准确性, 分析巨石崩塌失稳机制及破坏后沿 3 种不同坡形边坡的运动轨迹和动能演进等运动特征及规律。研究结果有助于认识巨石成灾过程及机制, 可为边坡巨石灾害预测和防灾减灾措施制定提供支撑。

2 工程概况

西藏自治区 G318 国道沿线 K4580 典型滑坡位于拉萨市达孜县(区)章多乡拉姆村与尊木采村交界处、拉萨河左岸, 且 G318 国道、拉林高速公路(高架桥)经过边坡前缘, 如图 1 所示。边坡前缘海拔约为 3 762 m, 地理坐标为东经 $91^{\circ}59'28''$ 、北纬 $29^{\circ}36'59''$ 。整个坡体属上土下岩型, 上部为碎块石土含粉质黏土覆盖层, 岩性疏松, 透水性好; 下部为喜山期晚期的变质块状花岗闪长岩, 节理发育, 岩体完整性差, 比较破碎。图 2(a)为边坡的现场整体情况, 可以看出滑坡趋势明显, 且滑坡体上部形成较清晰的滑坡壁。大高差、高陡地形地貌特征为边坡岩体卸荷带的形成提供了巨大的势能条件。



图 1 边坡位置
Fig.1 Slope location

多年以来, 边坡持续发展变形, 在地下水和地表水作用下边坡岩体结构面弱化, 地表岩石和土体逐渐剥落, 威胁公路长度约达 160 m。边坡顶部存在节理发育的裸露岩体, 形成大型潜在危岩体, 如图 2(b)所示。在过去的几十年里, 尤其是在夏季降雨和季节更替时, 坡顶危岩体局部崩塌时有发生, 部分滚石冲击公路或者停积于路面(见图 2(a)), 构

成 G318 国道此路段的主要地质灾害。现场调查过程中, 发现大量因坡顶危岩体崩塌而停留在坡面上的滚石, 特别是在边坡顶部以下的坡度较缓地带, 堆积着大量滚石或巨石(见图 2(b))。

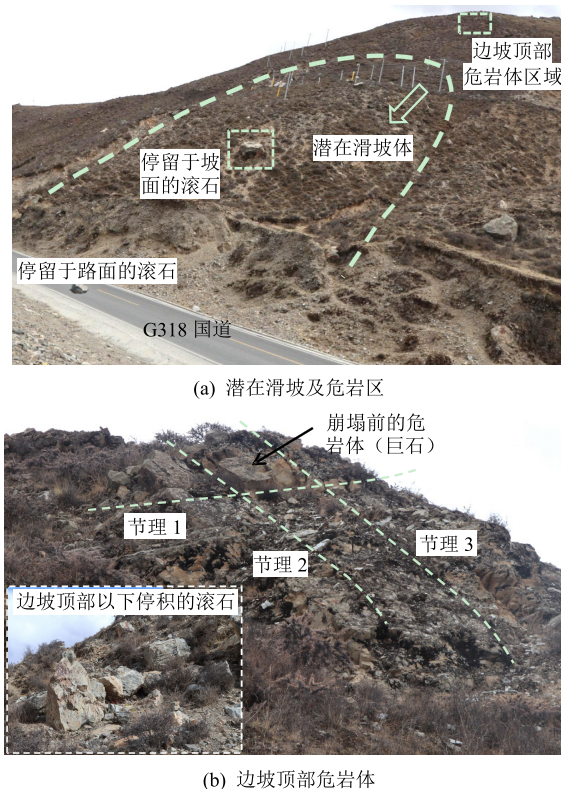


图 2 边坡现场照片
Fig.2 Slope photos

在边坡上布置监测点, 已有监测数据表明^[23]:

①在自然状态下, 边坡处于缓慢变形的欠稳定状态; ②在大量降雨条件下, 滑坡体有一定变形。这些说明了该边坡变形和失稳破坏的可能性。由于边坡陡峭, 且长期受风化、冻融、降雨、地震等复杂环境条件的影响, 该边坡稳定性差, 易发生滑坡。经实地勘察及 3D-DDA 数值模拟分析表明^[11], 边坡岩体以块状结构为主, 破坏模式主要受控于结构面产状及分布, 滑坡体后缘与基岩之间发生张拉破坏, 表现为裂缝; 前缘与基岩之间发生剪切破坏, 表现为向下错动。滑坡后, 大量的岩土体将滑向边坡底部, 直接造成 G318 国道交通瘫痪, 同时边坡地形(包括坡角)与滑坡前相比, 将发生显著变化。

3 三维 DDA 方法基本理论

3.1 块体位移及变形

3D-DDA 方法作为一种非连续动力学隐式求解方法, 遵循最小总势能原理, 以块体的位移和变形为基本未知量, 研究对象可以是任意形状(如凹面

体、凸面体或带孔洞的多面体)、不同大小的块体及块体间相互作用形成的块体系统。对每个块体, 允许位移和变形; 对整个块体系统, 允许块体间有滑动、转动、张开和闭合等运动形式^[25]。求解中, 块体大位移和大变形是每一时步位移和变形增量的累加。每一时步内, 所有点的位移增量很小, 块体的位移函数采用一阶近似表示^[13]。假设各块体内为常应力和常应变, 则块体 i 任一点 (x, y, z) 的位移可由以下 12 个位移变量表示:

$$[D_i] = [u_0 \ v_0 \ w_0 \ r_x \ r_y \ r_z \ \varepsilon_x \ \varepsilon_y \ \varepsilon_z \ \gamma_{yz} \ \gamma_{zx} \ \gamma_{xy}]^T \quad (1)$$

式中: (u_0, v_0, w_0) 为块体 i 重心 (x_0, y_0, z_0) 的刚体位移; (r_x, r_y, r_z) 为块体 i 绕 x 、 y 和 z 轴的转动角 (弧度); $(\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z)$ 和 $(\gamma_{yz}, \gamma_{zx}, \gamma_{xy})$ 分别为块体 i 的轴向和剪切应变。块体 i 任一点 (x, y, z) 的位移 (u, v, w) 表示为

$$[u \ v \ w]^T = [T_i][D_i] \quad (2)$$

式中: $[T_i]$ 为块体 i 位移转换矩阵, 并表达如下:

$$[T_i] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & \hat{z} & -\hat{y} & \hat{x} & 0 & 0 & 0 & \frac{\hat{z}}{2} & \frac{\hat{y}}{2} \\ 0 & 1 & 0 & -\hat{z} & 0 & \hat{x} & 0 & \hat{y} & 0 & \frac{\hat{z}}{2} & 0 & \frac{\hat{x}}{2} \\ 0 & 0 & 1 & \hat{y} & -\hat{x} & 0 & 0 & 0 & \hat{z} & \frac{\hat{y}}{2} & \frac{\hat{x}}{2} & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $\hat{x} = x - x_0$, $\hat{y} = y - y_0$, $\hat{z} = z - z_0$ 。

巨石崩塌运动不可避免地涉及到块体转动。但由于 3D-DDA 使用线性位移函数, 当块体发生刚体大转动时容易出现不合理的体积膨胀现象, 导致应变场和速度场畸变等问题^[26-27]。为避免这样不合理的结果, 每个时步计算完成后, 利用下式重新修正所有块体的点的位移^[28]:

$$[u \ v \ w]^T = [T_i][D_i] - \begin{bmatrix} 0 & \hat{z} & -\hat{y} \\ -\hat{z} & 0 & \hat{x} \\ \hat{y} & -\hat{x} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_x \\ r_y \\ r_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos r_y + \cos r_z - 2 & -\sin r_z & \sin r_y \\ \sin r_z & \cos r_x + \cos r_z - 2 & -\sin r_x \\ -\sin r_y & \sin r_x & \cos r_x + \cos r_y - 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \\ \hat{z} \end{bmatrix} \quad (4)$$

3.2 运动方程建立及求解

块体间接触和位移约束形成块体系统。块体系统总势能包括块体单元应变能、初始应力势能、体积力势能、点荷载势能、惯性力势能、块体间的接触力势能和摩擦力引起的势能等。通过总势能最小化, 得到 3D-DDA 块体系统的运动方程^[29]:

$$[M][\ddot{D}] + [K][D] = [F] \quad (5)$$

式中: $[M]$ 和 $[K]$ 分别为质量和刚度矩阵; $[\ddot{D}]$ 和 $[D]$ 分别为加速度和位移矩阵; $[F]$ 为外力矩阵。

如果块体系统中有 n 个块体, 则总体平衡方程组可写成如下子矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} [K_{11}] & [K_{12}] & \cdots & [K_{1n}] \\ [K_{21}] & [K_{22}] & \cdots & [K_{2n}] \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ [K_{n1}] & [K_{n2}] & \cdots & [K_{nn}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [D_1] \\ [D_2] \\ \vdots \\ [D_n] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [F_1] \\ [F_2] \\ \vdots \\ [F_n] \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: $[D_i]$ 和 $[F_i]$ ($i = 1, 2, \dots, n$) 为 12×1 子矩阵, 此处 $[D_i]$ 代表块体 i 的位移变量; $[F_i]$ 为在块体 i 上分配给 12 个位移变量的荷载; 每个 $[K_{ij}]$ 为 12×12 刚度子矩阵, 此处系数矩阵对角项 $[K_{ii}]$ 取决于块体 i 的材料特性和几何尺寸; 非对角项 $[K_{ij}]$ 由块体 i 与 j 之间的接触条件决定。

在每一加载增量或时间增量上, 建立并求解总体平衡方程组。求解总体平衡方程组的基本流程可以概括如下: 首先求解式 (6), 之后通过式 (2) 计算出块体变形后的位移和位置, 考虑无张拉和无嵌入条件, 接触界面上滑动满足摩尔-库仑强度准则; 在相应接触位置施加或移除接触弹簧, 修正总体平衡方程组; 对修正后的方程组再求解, 直至所有块体边界面满足无张拉和无嵌入条件, 则迭代计算完成^[30]。也就是说, 如给定每个块体的几何形状、荷载、材料常数以及块体接触的摩擦角、黏聚力等, 即可对上述式 (6) 求解, 得到块体应力、应变、接触力及块体滑动、转动位移等。值得指出的是, 在建立总体平衡方程组时, 上述系统总势能包含了惯性力势能, 即在系数矩阵中引入了惯性力子矩阵, 使得速度和惯性在前后时步间具有继承性。惯性力的引入, 为 3D-DDA 分析巨石崩塌运动的动力学问题奠定了理论基础, 且时间变量为真实的时间变量。

4 边坡数值模型及验证

4.1 三维 DDA 数值模型及参数

根据边坡地质条件、潜在滑坡趋势和边坡地形等^[23], 建立边坡三维数学模型, 如图 3 所示。从坡体滑坡趋势分析, 可以推断边坡滑坡有两种可能情况: 一种为近似平面滑动的浅层滑坡, 另一种为弧形滑动的深层滑坡, 两种滑坡的滑裂面见图 3。边坡顶部潜在危岩体区域存在多组结构面, 其中最为典型的结构面产状为 $2^\circ \angle 29^\circ$ 、 $3^\circ \angle 89^\circ$ 、 $267^\circ \angle 87^\circ$ 和 $92^\circ \angle 88^\circ$ 。危岩体受结构面切割作用, 在危岩体区域形成一巨石, 其放大后的形状及尺寸示于图 3, 体积约为 115 m^3 。该巨石崩塌运动是本文研究的重点。

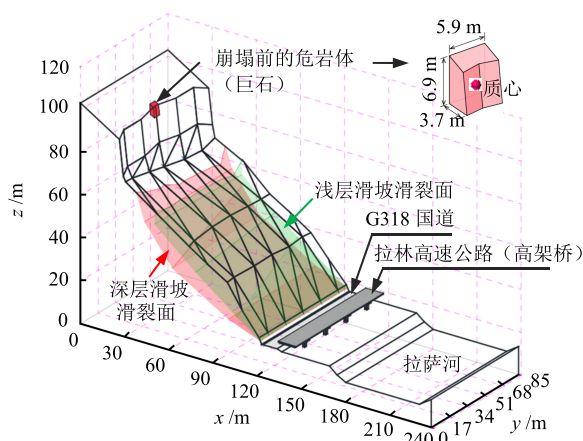


图3 边坡三维数学模型

Fig.3 Three-dimensional mathematical model of slope

为了确保坡面对巨石崩塌运动的约束条件,即巨石应在坡面范围内运动,将图3所示的边坡数学模型分别向其两侧加宽38 m。将坡面简化为若干三角形子面, G318 国道、拉萨河及沿河平地地带等简化为矩形子面。根据数学模型,得到各子面倾向、倾角、位置等拓扑信息,并将其输入到三维块体切割程序^[31]。经块体切割程序计算,得到3D-DDA建模所需的几何信息,从而建立未滑坡、浅层滑坡后和深层滑坡后的边坡3D-DDA数值模型,如图4所示,即三维块体切割程序是3D-DDA的前处理程序。此处,未滑坡的坡形以现场勘察地形数据为依据,浅层滑坡后和深层滑坡后的坡形以地质勘察和3D-DDA(浅层/深层)滑坡模拟后的地形数据为依据^[11, 23]。关于三维块体切割方法的介绍和程序实现参见文献^[31]。

3D-DDA 巨石崩塌运动模拟的物理和数值参数列于表1。泊松比、杨氏模量、摩擦角、黏聚力等物理参数由西藏G318国道沿线边坡地质调查数据、

现场回弹试验和现场取样后的室内岩石力学试验获取^[11]。巨石与基岩及边坡界面间不存在张拉强度。关于弹簧刚度、时间步长等数值参数取值,应确保不出现异常的巨石嵌入或跳跃等现象。本文弹簧刚度和时间步长取值遵循文献^[32]提出的“上下限原则”:①弹簧刚度上限应使总体刚度矩阵不是线性相关或者严重病态;下限应使块体间相互嵌入,但嵌入深度不宜过大,以确保弹簧位移可以忽略;②时间步长上限应满足位移-时间积分的二阶无穷小而可以忽略,能向下一时步传递所有几何和物理参数,确保计算稳定;下限应使块体间有足够的相互嵌入来发展接触力,使计算较快收敛。

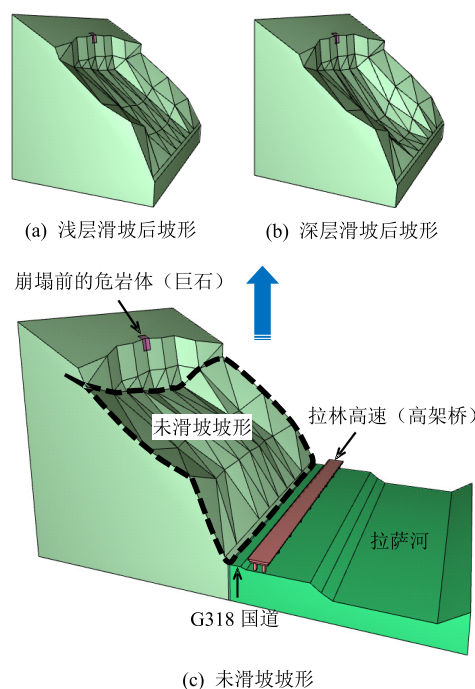


图4 边坡3D-DDA数值模型

Fig.4 3D-DDA numerical model of slope

表1 巨石崩塌运动3D-DDA模拟的物理和数值参数

Table 1 Physical and numerical parameters for 3D-DDA simulation of boulder collapse and movement

密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	泊松比 ν	杨氏模量 E / GPa	摩擦角 $\varphi / (^{\circ})$	黏聚力 c / Pa	重力加速度 $g / (\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	时间步长 $\Delta t / \text{s}$	法向弹簧刚度 $k_n / (\text{GN} \cdot \text{m}^{-1})$	切向弹簧刚度 $k_s / (\text{GN} \cdot \text{m}^{-1})$
2 500	0.3	3.0	28.0	0.0	-9.8	0.000 1	30.0	3.5

4.2 验证分析

巨石崩塌运动3D-DDA模拟的精度验证是一个难点,关系到3D-DDA方法巨石运动特征及规律研究的可信性。Asteriou等^[33]根据大量试验结果回归分析,提出了滚石运动横向偏移(lateral migration)经验模型。运动角度偏差 e (deviation)定义为滚石与坡面碰撞前后轨迹所在平面间的二面角,如图5(a)

所示。相对于坡向,滚石与坡面斜向碰撞(oblique impact)的轨迹方向如图5(b)所示,碰撞前的方向差(direction difference)由 $\Delta\psi$ 表示。与坡角 α 相关的运动角度偏差5%、95%,即 $e_{5\%}$ 和 $e_{95\%}$,分别如下:

$$e_{5\%} = \alpha \Delta\psi / 100 + 0.13\alpha - 10.8 \quad (7)$$

$$e_{95\%} = 12e^{\Delta\psi / (0.000\ 2\alpha + 0.01)} \quad (8)$$

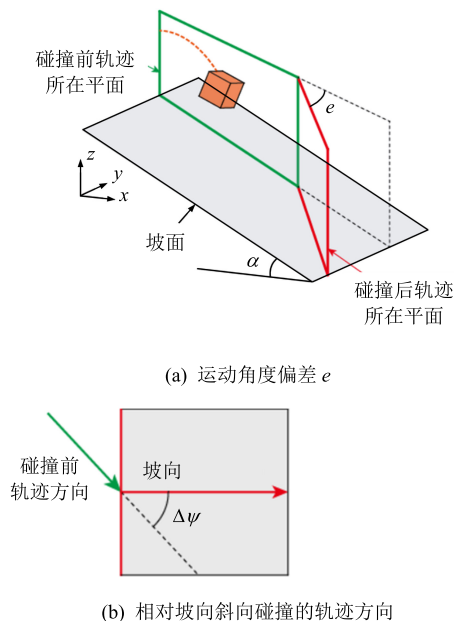


图 5 滚石运动横向偏移经验模型参数定义

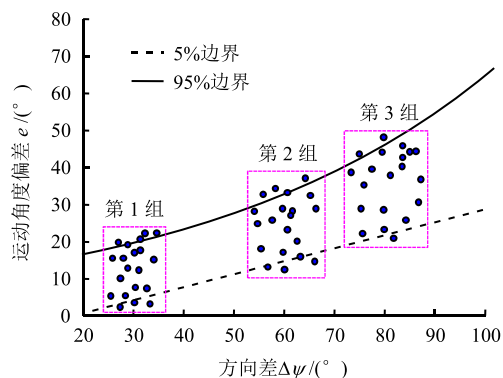
Fig.5 Parameter definition of an empirical model for transverse offset of rolling rock movement

理论上, 该经验模型 (式 (7) 和式 (8)) 同样适用于巨石运动分析。未滑坡、浅层滑坡后、深层滑坡后 3 种坡形的边坡坡角 α 平均值分别近似为 35° 、 39° 、 45° 。对于每一坡角, 采用拟研究的巨石做 3 组测试, 每组测试重复进行 20 次。3D-DDA 模拟的巨石入射特征列于表 2。分别由经验模型计算出不同坡形巨石运动角度偏差 $e_{5\%}$ 和 $e_{95\%}$, 并总结了每一组测试的 3D-DDA 模拟结果, 如图 6 所示。3 种坡形边坡得到的运动角度偏差 e 基本处于 $e_{5\%}$ 和 $e_{95\%}$ 范围内或者边界附近, 表明 3D-DDA 与经验模型结果吻合较好, 验证了 3D-DDA 巨石模拟结果的精度和合理性。同时, 说明该经验模型也适用于大体积的巨石运动分析。3 种坡形巨石运动角度偏差 e 落在分位数边界外的个数比较为: 未滑坡坡形 > 浅层滑坡后坡形 > 深层滑坡后坡形。巨石运动偏移量也呈此规律: 未滑坡坡形 > 浅层滑坡后坡形 > 深层滑坡后坡形, 即未滑坡坡形的巨石横向偏移最为明显。

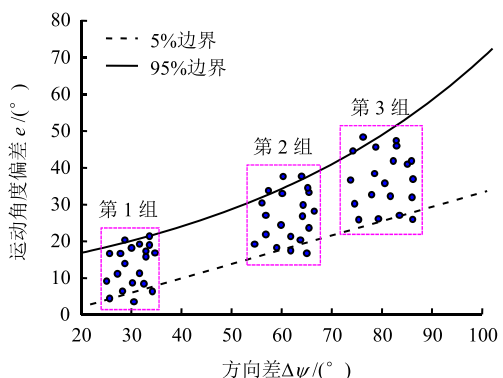
表 2 3D-DDA 模拟的巨石入射特征 (平均值/标准差)

Table 2 Incidence characteristics of the boulder for 3D-DDA simulation (mean value/standard deviation)

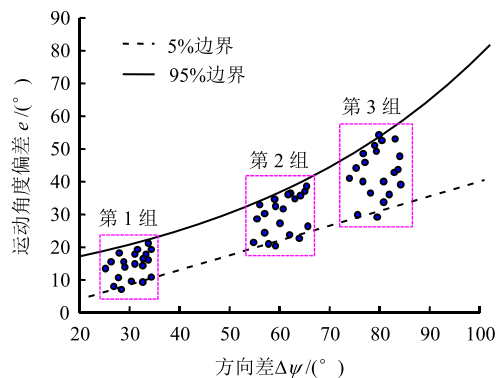
分组	测试次数/次	方向差 $\Delta\psi/(^\circ)$		入射角 $\phi/(^\circ)$		入射速度 $v_i/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	
		平均数	标准差	平均数	标准差	平均数	标准差
1	20	30.0	4.1	24.5	3.3	4.5	2.5
2	20	60.0	4.5	35.1	3.2	4.8	2.9
3	20	80.0	8.2	38.5	2.5	7.0	2.4



(a) 未滑坡的边坡巨石运动角度偏差



(b) 浅层滑坡后的边坡巨石运动角度偏差



(c) 深层滑坡后的边坡巨石运动角度偏差

图 6 3D-DDA 与经验模型预测结果比较分析

Fig.6 Prediction result comparison between 3D-DDA and empirical model

5 巨石崩塌运动分析

危岩体区域形成的巨石存在崩塌失稳风险, 崩塌后巨石沿边坡向下发生高速、高能远程运动。考察 K4580 边坡坡顶巨石崩塌失稳及其破坏后沿未滑坡、浅层滑坡后和深层滑坡后 3 种不同坡形边坡的运动特征。3 种坡形边坡巨石崩塌失稳及运动过程 (即轨迹), 包括立面图和平面图, 分别如图 7~9 所示。巨石崩塌失稳可描述如下: ①首先, 危岩体与母岩间的界面摩擦力不足以抵抗其滑动驱动力, 失稳模式为滑动, 形成一巨石; ②随着滑动位移持续增加, 巨石由滑动变为倾倒-滑动模式, 再

变为倾倒模式；③最后，巨石边翻转边下落，运动至坡顶下边坡坡面，并与之冲击碰撞。

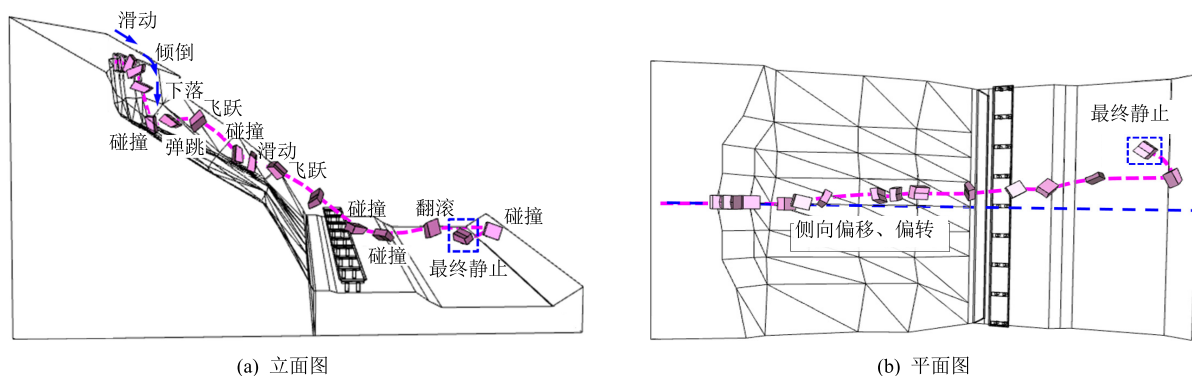


图 7 未滑坡的边坡巨石崩塌运动轨迹

Fig.7 Collapse and movement trajectory of boulder along slope without landslide

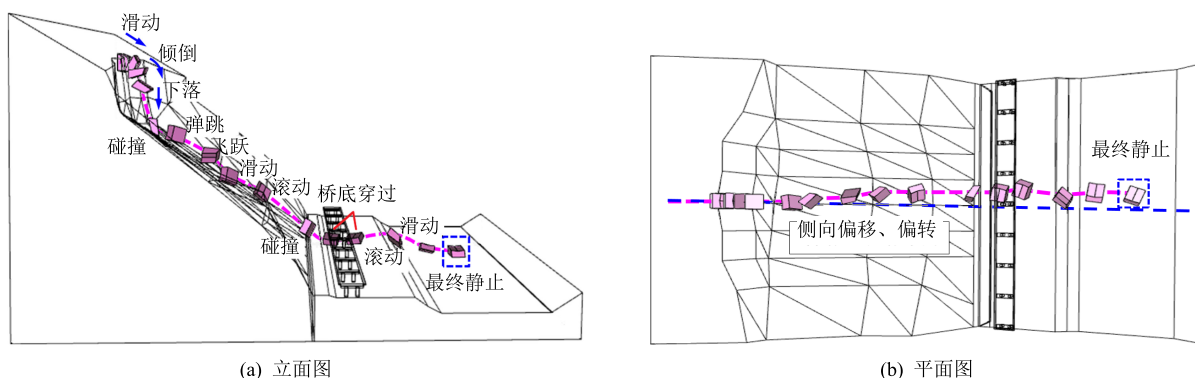


图 8 浅层滑坡后的边坡巨石崩塌运动轨迹

Fig.8 Collapse and movement trajectory of boulder along slope after shallow landslide

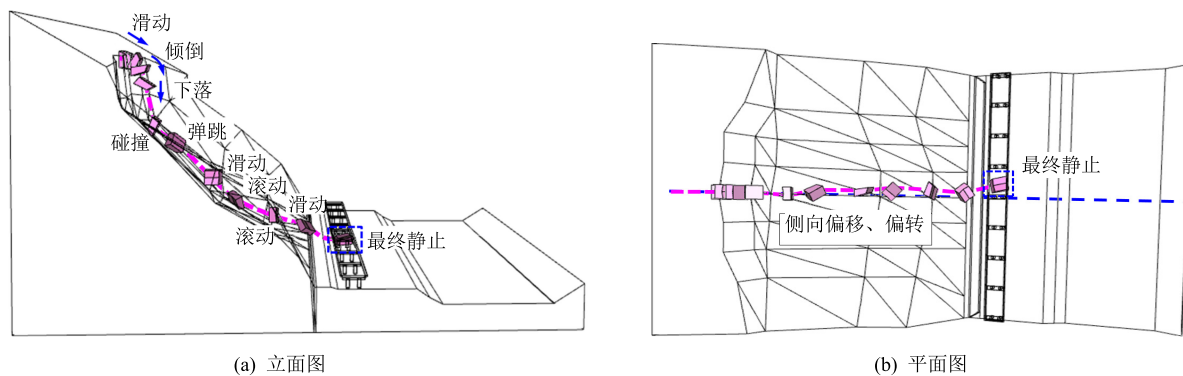


图 9 深层滑坡后的边坡巨石崩塌运动轨迹

Fig.9 Collapse and movement trajectory of boulder along slope after deep landslide

巨石沿边坡的运动表现为碰撞、弹跳、飞跃、滚动、滑动等多种运动形式，威胁 G318 国道和拉林高速公路（高架桥）交通运输。3 种坡形边坡巨石运动总体情况分别论述如下：①在未滑坡边坡上，巨石从坡面飞跃，越过高架桥，运动至坡底；此阶段，巨石与高架桥桥面边缘发生碰撞；随后，经过碰撞、弹跳、滚动、滑动，进入拉萨河，并与其岸坡冲击碰撞、反弹，最后静止于拉萨河中（见图 7）。②在浅层滑坡后的边坡上，巨石与坡面碰撞后，滑

入并穿过高架桥底部；此阶段，巨石与高架桥桥墩发生碰撞；经过滚动、滑动，进入拉萨河，最终稳定于拉萨河中（见图 8）。③在深层滑坡后的边坡上，巨石滑入高架桥底部，并稳定于桥底。此阶段，巨石与高架桥桥墩发生多次碰撞（见图 9）。从整个运动过程可以看出，巨石受其自身形状和边坡形状影响，运动过程中发生横向偏移和侧向偏转。其中，巨石横向偏移-时间曲线如图 10 所示。总体上，偏移量大小比较为： $d_1 > d_2 > d_3$ ，这与 Asteriou 等^[33]

提出的经验模型所得结果完全一致。这里， d_1 、 d_2 和 d_3 分别为沿未滑坡、浅层滑坡后和深层滑坡后的边坡巨石运动偏移量。巨石静止时， $d_1=40.69$ m， $d_2=14.16$ m， $d_3=11.87$ m，即未滑坡的边坡巨石横向偏移显著，分别约为浅层和深层滑坡后的边坡巨石横向偏移量的 2.87 倍和 3.23 倍。

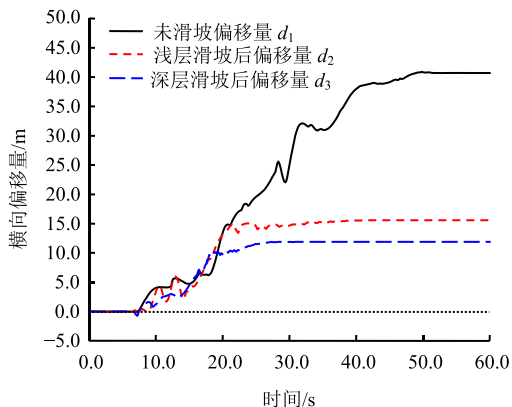


图 10 不同坡形的边坡巨石横向偏移-时间曲线
Fig.10 Transverse offset-time curves of boulder under different slope shapes

为描述巨石在运动形式转变时刻的落点位置信息，将图 7~9 中巨石与不同坡面接触（包括碰撞、沿坡面滚动和滑动以及最终静止）时的巨石质心（见图 3）空间位置提取出来，如图 11 所示。与图 7~9 相对应，巨石与未滑坡、浅层滑坡后、深层滑坡后的坡面接触次数分别为 7、8、5 次，分别对应巨石质心编号 $W_1 \sim W_7$ 、 $S_1 \sim S_8$ 、 $D_1 \sim D_5$ 。这些巨石质心位置坐标列于表 3。此外，图 11 亦展示了巨石崩塌失稳至与坡面首次碰撞过程中滑动、倾倒、下落和碰撞 4 种运动形式的巨石质心空间位置，质心分别为 C_1 (19.87, 42.50, 117.93)、 C_2 (24.66, 42.50, 117.05)、 C_3 (30.73, 42.67, 111.13)、 C_4 (30.88, 43.12, 87.41)。巨石与坡面接触后，一般会产生弹跳高度（尽管可能很小），且灾害防护技术人员较为关心巨石最大弹跳高度。因此，记录了巨石与不同坡面每一次接触后的最大弹跳高度，即不同坡面巨石沿 x 向位移的最大弹跳高度如图 12 所示。这里，最大弹跳高度是指巨石弹跳时其底部与坡面的竖向距离。未滑坡、浅层滑坡后、深层滑坡后的边坡巨石最大弹跳高度分别记为 H_1 、 H_2 、 H_3 ，总体上比较为 $H_1 > H_2 > H_3$ 。3 种坡面巨石最大弹跳高度平均值分别记为 $\overline{H_1}$ 、 $\overline{H_2}$ 、 $\overline{H_3}$ ，三者比较为 $\overline{H_1} > \overline{H_2} > \overline{H_3}$ ，即未滑坡的巨石最大弹跳高度平均值最大。结合巨石运动轨迹，分析巨石横向偏移、落点位置及弹跳高度等信息，可为防护设施位置（一般避免发生最

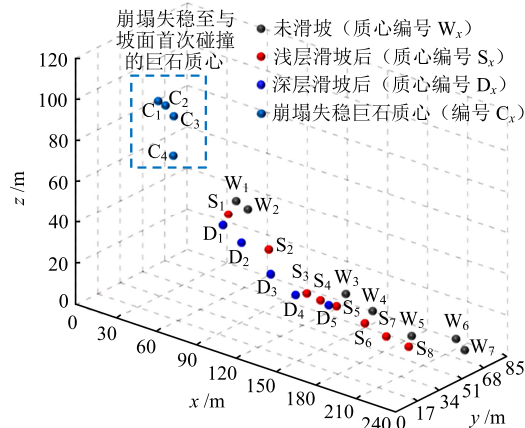


图 11 巨石与不同坡面接触时的质心空间位置
Fig.11 Spatial positions of mass center when the boulder is in contact with different slope locations

表 3 巨石与不同坡面接触时的质心坐标
Table 3 Coordinates of mass center when the boulder is in contact with different slope locations

坡形	质点编号	坐标/m	运动形式
未滑坡	W_1	(76.03, 49.88, 68.07)	碰撞
	W_2	(78.72, 52.49, 66.52)	滑动
	W_3	(147.86, 61.23, 26.32)	碰撞
	W_4	(167.35, 62.51, 20.83)	碰撞
	W_5	(194.18, 65.82, 13.18)	滚动
	W_6	(234.18, 67.46, 14.53)	碰撞
	W_7	(218.46, 83.19, 13.78)	最终静止
浅层滑坡后	S_1	(69.18, 51.17, 58.82)	滑动
	S_2	(95.79, 53.57, 43.12)	滚动
	S_3	(122.13, 56.23, 21.79)	碰撞
	S_4	(134.35, 55.89, 20.68)	碰撞、桥底穿过
	S_5	(145.98, 58.63, 20.37)	滑动、桥底穿过
	S_6	(170.84, 53.21, 17.68)	滚动
	S_7	(186.22, 58.40, 13.61)	滑动
	S_8	(205.18, 56.66, 13.73)	最终静止
深层滑坡后	D_1	(64.56, 44.49, 50.79)	滑动
	D_2	(78.67, 46.93, 43.52)	滚动
	D_3	(101.49, 47.88, 30.08)	滚动
	D_4	(121.23, 46.56, 23.58)	滑动
	D_5	(140.37, 54.37, 20.33)	最终静止

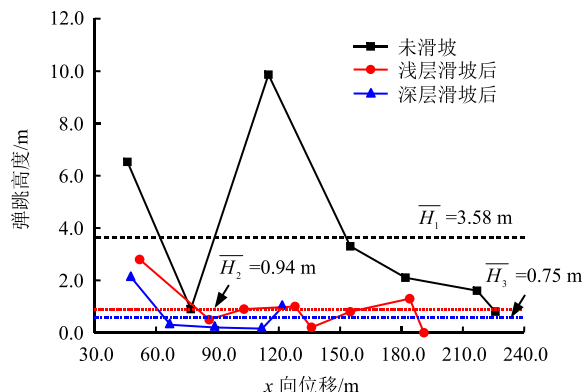


图 12 巨石与不同坡面接触后的最大弹跳高度
Fig.12 The maximum bouncing heights of boulder after impacting with slope of different shapes

大弹跳高度的位置)和尺寸(长、宽、高)选择提供依据。

巨石崩塌失稳及其沿不同坡形边坡运动的动能-时间曲线如图 13 所示。巨石运动至坡底并发生冲击碰撞的时间比较为: $t_1 > t_2 > t_3$ 。这里, t_1 、 t_2 和 t_3 分别为沿未滑坡、浅层滑坡后和深层滑坡后的边坡巨石运动至坡底并发生冲击碰撞的时间。发生滑坡后的边坡巨石运动至坡底的时间明显减小。巨石最终稳定时间比较为: $t_{s1} > t_{s2} > t_{s3}$ 。其中, t_{s1} 、 t_{s2} 和 t_{s3} 分别为沿未滑坡、浅层滑坡后和深层滑坡后的边坡巨石最终稳定时间。沿未滑坡的边坡巨石动能较大, 不易稳定。沿深层滑坡后的边坡巨石进入高架桥底部后, 动能发生多次突变, 表明巨石与桥身或桥墩发生多次碰撞, 这会使桥梁发生严重损坏。

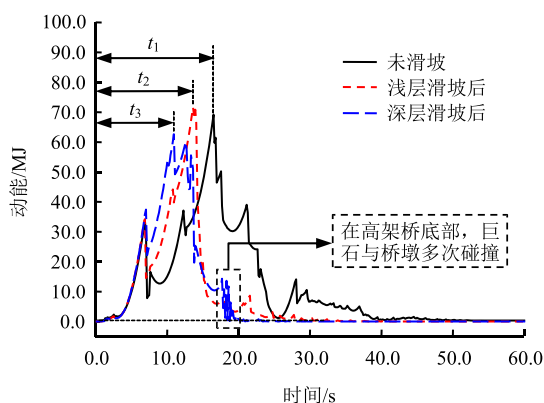


图 13 不同坡形的边坡巨石动能-时间曲线

Fig.13 Kinetic energy-time curves of the boulder along the slopes with different shapes

上述表明, 边坡形状对巨石运动轨迹和动能等运动特征影响显著, 其规律可初步参考坡面几何特征对滚石运动特性影响的有关研究^[23]。当然, 巨石形状也直接影响其运动特征, 3D-DDA 可以考虑巨石三维形状, 而非将巨石简化为质点或球形, 这是 3D-DDA 研究巨石运动的优势之一^[34]。关于巨石形状对其运动特征的影响, 将在后续研究中采用大量数值试验进行(统计)分析, 目前可参考小尺度滚石形状对滚石运动的影响研究^[34-35]。巨石冲击碰撞可能引发桥墩与桥面损伤, 甚至是高架桥垮塌, 这是一个由连续向非连续发展的动态过程, 因此, 将连续方法与非连续方法相结合, 分析巨石对结构物的冲击破坏作用, 是下一步亟需开展的研究工作。

6 结 论

本文以西藏自治区 G318 国道 K4580 典型滑坡为工程背景, 分别建立未滑坡、浅层滑坡后和深层

滑坡后的 3 种坡形边坡巨石崩塌 3D-DDA 数值模型, 研究巨石崩塌失稳机制及破坏后沿 3 种不同坡形边坡的运动轨迹和动能演进等运动特征。主要结论如下:

(1) 该边坡具有浅层和深层滑坡趋势, 将显著改变边坡地形, 未滑坡、浅层滑坡后、深层滑坡后 3 种坡形的边坡坡角平均值分别近似为 35°、39°、45°, 在坡顶形成一体积约 115 m³ 的巨石。采用滚石运动横向偏移经验模型, 验证了 3D-DDA 巨石运动模拟的准确性, 说明了该经验模型同样适用于大体积的巨石运动。3 种坡形巨石运动角度偏差 e 落在横向偏移经验模型边界外的个数能够表现出巨石运动偏移量的基本规律, 即未滑坡 > 浅层滑坡后 > 深层滑坡后。

(2) 巨石与母岩间的界面摩擦力不足以抵抗其滑动驱动力, 随着巨石位移发展, 其失稳模式由滑动、倾倒-滑动向倾倒转变, 最终边翻转边下落, 与母岩分离、崩塌, 运动至坡顶下的坡面, 并与之冲击碰撞。崩塌失稳是一个动能由小及大的动态启动过程, 这一过程的认识有助于工程技术人员将巨石灾害消灭于萌芽状态。

(3) 巨石沿边坡的运动表现为碰撞、弹跳、飞跃、滚动、滑动等多种运动形式。沿未滑坡边坡的巨石越过高架桥, 但与桥边缘发生碰撞, 最后与拉萨河岸碰撞反弹而静止于河中; 沿浅层滑坡后边坡的巨石滑入并穿过高架桥底, 与桥墩碰撞后, 经过滚动、滑动, 进入拉萨河而稳定于河中; 沿深层滑坡后边坡的巨石滑入高架桥底, 与桥墩发生多次碰撞后, 稳定于桥底。3 种坡面几何特征下的巨石运动偏移量、弹跳高度、运动至坡底并发生碰撞时间、最终稳定时间等均有如下关系: 未滑坡 > 浅层滑坡后 > 深层滑坡后。

(4) 巨石崩塌运动涉及大块体、大位移、大转动及剧烈冲击碰撞的动力学过程, 具有横向偏移、侧向偏转等显著的三维空间运动特征, 对 G318 国道和拉林高速公路(高架桥)交通运输构成极大威胁。3D-DDA 能够分析巨石失稳模式、剧烈冲击碰撞、运动轨迹、动能演进等运动特征, 进而预测巨石运动全过程、停积位置、影响范围、冲击能量等, 可为巨石防灾减灾对策制定提供依据。

值得提出的是, 巨石灾害程度与巨石形状、大小、质量以及边坡地形特征等息息相关, 关于巨石尺寸和质量仍需进一步界定。因此, 应在本文初步研究基础上, 采用 3D-DDA 方法进一步开展不同巨石和边坡条件下的巨石崩塌运动研究, 将为边坡(如

川藏铁路等沿线边坡)崩塌巨石灾害研究及防护奠定基础。

参考文献

- [1] 何思明, 沈均, 吴永. 滚石冲击荷载下棚洞结构动力响应[J]. 岩土力学, 2011, 32(3): 781-788.
HE Si-ming, SHEN Jun, WU Yong. Rock shed dynamic response to impact of rock-fall[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(3): 781-788.
- [2] EVANS S G, HUNGR O. The assessment of rockfall hazard at the base of talus slopes[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1993, 30(4): 620-636.
- [3] 薛翊国, 孔凡猛, 杨为民, 等. 川藏铁路沿线主要不良地质条件与工程地质问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(3): 445-468.
XUE Yi-guo, KONG Fan-meng, YANG Wei-min, et al. Main unfavorable geological conditions and engineering geological problems along Sichuan-Tibet railway[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2020, 39(3): 445-468.
- [4] 徐华, 周廷宇, 王歆宇, 等. 川藏铁路红层改良路基填料压缩试验与颗粒流模拟研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(8): 2259-2268.
XU Hua, ZHOU Ting-yu, WANG Xin-yu, et al. Compression test and numerical simulation research on improved red beds subgrade fillers in Sichuan-Tibet Railway[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2021, 42(8): 2259-2268.
- [5] LIU G Y, LI J J. Research on the effect of tree barriers on rockfall using a three-dimensional discontinuous deformation analysis method[J]. **International Journal of Computational Methods**, 2020, 17(8): 1950046.
- [6] AGLIARDI F, CROSTA G B. High resolution three-dimensional numerical modelling of rockfalls[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2003, 40(4): 455-471.
- [7] 张路青, 杨志法, 许兵. 滚石与滚石灾害[J]. 工程地质学报, 2004, 12(4): 225-231.
ZHANG Lu-qing, YANG Zhi-fa, XU Bing. Rock falls and rock fall hazards[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2004, 12(4): 225-231.
- [8] SPANG R M. Protection against rockfall-stepchild in the design of rock slopes[C]//The 6th International Congress on Rock Mechanics. Rotterdam: A A Balkema, 1987: 551-557.
- [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 Qi-deng, XU Qiang. New development of rockfall kinematics study[J]. **Journal of Vibration and Shock**, 2010, 29(10): 31-35.
- [10] ASTERIOU P, SAROGLU H, TSIAMBAOS G. Geotechnical and kinematic parameters affecting the coefficients of restitution for rock fall analysis[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2012, 54: 103-113.
- [11] 刘国阳. 三维 DDA 接触模型与边坡滚石破坏规律研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
LIU Guo-yang. Three-dimensional DDA contact model and failure law investigation of rockfall[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.
- [12] GUZZETTI F, CROSTA G, DETTI R, et al. Stone: a computer program for the three-dimensional simulation of rock-falls[J]. **Computers and Geosciences**, 2002, 28(9): 1079-1093.
- [13] 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.
- [14] 郭爱清, 丁秀丽, 李会中, 等. 非连续变形分析方法模拟千将坪滑坡启动与滑坡全过程[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(7): 1297-1303.
WU Ai-qing, DING Xiu-li, LI Hui-zhong, et al. Numerical simulation of startup and whole failure process of Qianjiangping landslide using discontinuous deformation analysis method[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(7): 1297-1303.
- [15] OHNISHI Y, YAMAMUKAI K, CHEN G Q. Application of DDA in rockfall analysis[C]//Proceedings of the 2nd North American Rock Mechanics Symposium. Montreal: [s. n.], 1996: 2031-2037.
- [16] CHEN G Q. Numerical modelling of rock fall using extended DDA[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(6): 926-931.
- [17] MA G C, MATSUYAMA H, NISHIYAMA S, et al. Practical studies on rockfall simulation by DDA[J]. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, 2011, 3(1): 57-63.
- [18] WU J H, OHNISHI Y, NISHIYAMA S. A development of the discontinuous deformation analysis for rock fall

- analysis[J]. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 2005, 29(10): 971-988.
- [19] LI Z J, LIU S G, ZHANG H, et al. Simulating the damage extent of unreinforced brick masonry buildings under boulder impact using three-dimensional discontinuous deformation analysis (3-D DDA)[J]. **Engineering Failure Analysis**, 2018, 93: 122-143.
- [20] CHEN G Q, ZHENG L, ZHANG Y B, 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.
- [21] ZHENG L, CHEN G Q, LI Y G, et al. The slope modeling method with GIS support for rockfall analysis using 3D DDA[J]. **Geomechanics and Geoengineering**, 2014, 9(2): 142-152.
- [22] LIU G Y, LI J J, KANG F. Failure mechanisms of toppling rock slopes using a three dimensional discontinuous deformation analysis method[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2019, 52(10): 3825-3848.
- [23] 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.
- [24] SHI G H. Three-dimensional discontinuous deformation analysis[C]//Proceedings of the 4th International Conference on Analysis of Discontinuous Deformation. Scotland: [s. n.], 2001: 1-21.
- [25] 石根华. 数值流形方法与非连续变形分析[M]. 裴觉民译. 北京: 清华大学出版社, 1997.
- SHI Gen-hua. Numerical manifold method and discontinuous deformation analysis[M]. Translated by PEI Jue-min. Beijing: Tsinghua University Press, 1997.
- [26] FAN H, ZHENG H, ZHAO J. Three-dimensional discontinuous deformation analysis based on strain-rotation decomposition[J]. **Computers and Geotechnics**, 2018, 95: 191-210.
- [27] 巩师林, 凌道盛, 胡成宝, 等. 非连续变形分析中块体大转动问题研究[J]. **岩土力学**, 2020, 41(11): 3810-3822.
- GONG Shi-lin, LING Sheng-dao, HU Cheng-bao, et al. Study on large rotation problem of a block in discontinuous deformation analysis[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2020, 41(11): 3810-3822.
- [28] JIANG Q H, YEUNG M R. A model of point-to-face contact for three-dimensional discontinuous deformation analysis[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2004, 37(2): 95-116.
- [29] YAGODA-BIRAN G, HATZOR Y H. Benchmarking the numerical discontinuous deformation analysis method[J]. **Computers and Geotechnics**, 2016, 71: 30-46.
- [30] 邬爱清, 丁秀丽, 卢波, 等. DDA 方法块体稳定性验证及其在岩质边坡稳定性分析中的应用[J]. **岩石力学与工程学报**, 2008, 27(4): 664-672.
- WU Ai-qing, DING Xiu-li, LU Bo, et al. Validation for rock block stability and its application to rock slope stability evaluation using DDA method[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(4): 664-672.
- [31] SHI G H. Producing joint polygons, cutting rock blocks and finding removable blocks for general free surfaces using 3-D DDA[C]// Proceedings of the 7th International Conference on Analysis of Discontinuous Deformation. Hawaii: [s. n.], 2005: 1-24.
- [32] 江巍, 郑宏. 非连续变形分析方法中人为参数的影响[J]. **岩土力学**, 2007, 28(12): 2603-2606.
- JIANG Wei, ZHENG Hong. Influences of artificial parameters in DDA method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(12): 2603-2606.
- [33] ASTERIOU P, TSIAMBAOS G. Empirical model for predicting rockfall trajectory direction[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2016, 49(3): 927-941.
- [34] 刘国阳, 李俊杰, 康飞. 基于 3D DDA 方法滚石平台防护作用研究[J]. **防灾减灾工程学报**, 2020, 40(5): 679-689.
- LIU Guo-yang, LI Jun-jie, KANG Fei. Study on the protective effect of rockfall platform based on 3D DDA method[J]. **Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering**, 2020, 40(5): 679-689.
- [35] MA K, LIU G Y, XU N W, et al. Motion characteristics of rockfall by combining field experiments and 3D discontinuous deformation analysis[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2021, 138: 104591.