

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20230904003

# 柱状危岩体失稳运动三维 DDA 方法数值模拟分析\*

刘国阳<sup>1</sup>, 赵晟泽<sup>1</sup>, 钟智瑞<sup>1</sup>, 杨春雨<sup>2</sup>, 薄 雾<sup>3</sup>,  
刘俊杰<sup>1</sup>, 罗首益<sup>1</sup>, 于 群<sup>1</sup>

(1. 沈阳工业大学建筑与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110870; 2. 大连太平洋湾协同创新区规划建设局,  
辽宁 大连 116326; 3. 西藏大学工学院, 西藏 拉萨 850000)

**摘要:** 柱状危岩体是边坡稳定性分析中一种重要的危岩体类型, 其失稳破坏常引起高能量和破坏性的大规模岩崩灾害, 具有普遍性、突发性和高频性等特点, 是制约山区建设和发展的主要地质灾害之一。非连续变形分析(DDA)作为一种基于非连续介质力学的数值计算方法, 具有完整的运动学理论及可靠的块体接触处理方案, 非常适合模拟节理岩体系统的失稳破坏与运动过程。文章采用三维(3D)DDA方法对柱状危岩体的失稳破坏机理与破坏后的运动过程进行研究。研制了基于双目立体视觉原理的危岩体失稳破坏实验装置, 开展了柱状块体系统室内实验研究, 验证了3D DDA方法在分析柱状危岩体失稳运动方面的准确性。以望霞边坡柱状危岩体为例, 建立边坡及危岩体3D DDA数值模型, 分析柱状危岩体失稳运动全过程、动能及位移演化特征, 讨论块体系统运动特性及崩塌滚石成灾机制。结果表明, 柱状危岩体以滑动模式失稳, 运动过程中直接与其沿途公路冲击碰撞, 引发崩塌滚石地质灾害, 具有高速高能等运动学特性。

**关键词:** 柱状危岩体; 3D DDA; 崩塌滚石; 失稳运动; 室内试验

**中图分类号:** V212 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)01-0179-09

## Numerical Simulation Analysis of Instability Movement of Columnar Dangerous Rock Mass Using 3D DDA

LIU Guoyang<sup>1</sup>, ZHAO Shengze<sup>1</sup>, ZHONG Zhirui<sup>1</sup>, YANG Chunyu<sup>2</sup>, BO Wu<sup>3</sup>,  
LIU Junjie<sup>1</sup>, LUO Shouyi<sup>1</sup>, YU Qun<sup>1</sup>

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

2. Dalian Taipingwan Collaborative Innovation Zone Planning and Construction Bureau, Dalian 116326, China;

3. School of Engineering, Tibet University, Lhasa 850000, China)

**Abstract:** Columnar dangerous rock mass is an important type of dangerous rock mass in slope stability analysis. Its instability and failure often results in large-scale, high-energy rockfall disasters with destructive power. These events are characterized by their prevalence, sudden occurrence, and high frequency, making them one of the main geological hazards that restrict the construction and development of mountainous areas. Discontinuous deformation analysis (DDA), a numerical method based on the mechanics of discontinuous media, provides a comprehensive kinematic theory and reliable block

\* 收稿日期: 2023-09-04; 修回日期: 2023-12-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(42007241)、辽宁省科技计划联合计划项目(2023-MSLH-259)、辽宁省教育厅高校基本科研课题(LJ232410142029)资助

作者简介: 刘国阳(1989—), 男, 副教授, 博导, 博士。主要从事边坡稳定性研究。E-mail: liuguyang@163.com

contact handling schemes, making it highly suitable for simulating the instability, failure, and movement processes of jointed rock mass systems. This study used the three-dimensional (3D) DDA method to investigate the instability failure mechanisms and post-failure movement of columnar dangerous rock mass. An experimental setup based on binocular stereovision principles was developed to study the instability and failure of dangerous rock mass. Laboratory experiments on columnar block systems were conducted, validating the accuracy of the 3D DDA method in analyzing the instability movement of columnar dangerous rock mass. Using the columnar dangerous rock mass of Wangxia slope as an example, a 3D DDA numerical model for the slope and dangerous rock mass was established. The entire instability movement process, kinetic energy, and displacement evolution characteristics of the columnar dangerous rock mass were analyzed. The movement characteristics of the block system and mechanisms of the collapse and rockfall-induced disasters were discussed. The results showed that the columnar dangerous rock mass became unstable through sliding, and it directly collided with the highway along its path during its movement, causing rockfall geological disasters. This movement exhibited kinematic characteristics such as high speed and high energy.

**Keywords:** columnar dangerous rock mass; 3D DDA; rockfall; instability movement; laboratory experiment

## 0 引言

岩质边坡失稳一直是影响人们生活和工程建设的安全隐患。塔柱状或近似塔柱状危岩体是一种重要的岩质边坡危岩体类型,一般长宽比介于1到3、高径比大于3,可能发生整体倾倒、剪切滑移或底部溃屈崩解破坏<sup>[1]</sup>,常分布于褶皱的核部或近核部区域,岩层产状平缓,倾角小于 $10^\circ$ ,主要由厚层状碎屑岩及碳酸盐岩,如砂岩、灰岩与白云岩等硬岩以及黏土岩组成,具有软硬相间或上硬下软的坡体结构<sup>[2]</sup>。该类危岩体多存在于悬挑边坡或陡峭的悬崖上,并被多个构造面切割,常诱发崩塌滚石灾害<sup>[3-4]</sup>。例如,位于奥地利阿尔卑斯山东北部的Pulverhörnndl柱状石灰岩,体积为 $23\ 774\ \text{m}^3$ ,已遭受失稳崩塌破坏,形成的碎石撞击脆弱的页岩,引发约1 000万立方米的岩屑,沿着峡谷内的缓坡推进,堵塞了沟口<sup>[5]</sup>;重庆市金佛山景区甑子岩危岩带的W12危岩体于2004年8月12日发生了大规模崩塌,崩塌体结构破碎,在坠落撞击基底层时与空气相互作用剧烈,形成显著的超前空气冲击效应,激起扬尘高度近 $150\ \text{m}$ <sup>[6]</sup>。柱状危岩体失稳破坏引起的岩崩灾害分布广泛,具有普遍性、突发性和高频性等特点<sup>[1]</sup>。因此,迫切需要对其进行系统的研究。到目前为止,许多学者已经采用了各种理论、实验和数值模拟的方法来研究危岩体的崩塌<sup>[7]</sup>。理论方法

一般以极限平衡法为基础,涉及数学和力学计算,如L.W. Liu等<sup>[3]</sup>计算了不同条件下危岩体倾倒的稳定系数和风险概率,对潜在破坏风险较大的危岩体稳定性进行了评价。实验是一种常用的物理模拟方法,Q. Zhang等<sup>[8]</sup>开展了一系列颗粒柱室内试验,研究了崩塌破坏模式下柱状危岩体的运动;Y. Tian等<sup>[9]</sup>采用常规和动态循环三轴实验完成了岩层参数 $\beta$ 敏感性分析,从而确定了危岩体稳定性。

近几十年来,随着计算机技术的进步,数值模拟变得更加普及和可靠<sup>[10]</sup>。为了分析危岩体稳定性,G.H. Shi等<sup>[11]</sup>创造性地提出了非连续变形分析(DDA)方法。该方法涉及任意形状多面块体接触力学和求解的完整算法<sup>[12]</sup>,是一种基于运动学理论的离散型数值方法<sup>[13]</sup>,不仅可以模拟单个块体的平移、转动和变形,还可以模拟非连续块体间接触界面的张开、滑动和闭合<sup>[14]</sup>。DDA方法以块体位移和变形为基本未知量,是一种隐式求解方法,其在任意时步都是无条件稳定的,所以可以采用相对较大的时间步长而不会造成数值失稳<sup>[15]</sup>,这使得DDA计算所需的时步数较少,所需计算时间较短,计算效率较高<sup>[16]</sup>。DDA计算一般不需要接触阻尼,而是引入了与时间积分有关的算法阻尼<sup>[17]</sup>,当接触块体间存在滑动,库仑摩擦也可以耗散能量。也就是说,DDA可以不采用接触阻尼来实现计算收敛,较具物理意义<sup>[18]</sup>。因此,DDA被认为在模拟块体失稳及运动学过程方面具有较突出的优势,非常适合危

岩体崩塌运动研究<sup>[19]</sup>。

DDA 二维方法已经在危岩体崩塌运动方面有了较多的工程应用。例如, Y. Ohnishi 等<sup>[20]</sup>首次将 DDA 方法应用于岩崩分析并设计护栏以防止滚石灾害发生; G.Q. Chen<sup>[21]</sup>解决了 DDA 刚体转动误差引起的块体膨胀问题, 并将改进的 DDA 方法应用于日本某边坡岩崩模拟研究。在二维 DDA 的基础上, 三维(3D)DDA 也取得了一定进展并在实际危岩体崩塌模拟方面得到了应用<sup>[14]</sup>。例如, 吴建宏等<sup>[16, 22]</sup>将 3D DDA 应用于日本 Amatoribashi-Nishi 边坡倾倒破坏和崩塌过程模拟, 其结果与现场监测影像对比, 验证了 3D DDA 模拟岩质边坡失稳破坏的有效性。郑路等<sup>[23]</sup>基于 GIS 建模工具, 建立某道路沿线岩质边坡 3D DDA 模型, 分析了崩塌滚石运动特征。李俊杰等<sup>[24]</sup>以青藏高原朗村复杂坡形岩质边坡为工程背景, 采用 3D DDA 方法输出崩塌滚石动能和运动轨迹, 总结了危岩体崩塌运动的基本特征。这些工程应用充分说明了 3D DDA 方法分析危岩体崩塌运动的可靠性。

文章将 3D DDA 方法应用于柱状危岩体崩塌运动研究。采用室内实验验证 3D DDA 模拟柱状块体系统失稳运动的有效性, 以望霞边坡危岩体为例, 通过 3D DDA 分析柱状危岩体失稳运动的全过程、动能及位移演化特征, 讨论块体系统运动特性及成灾机制。

## 1 3D DDA 基本理论

3D DDA 方法块体系统的大位移或大变形是基于单个块体的小位移或小变形的逐渐累积。在块体接触位置法向上, 使用罚函数法来保证块体之间不相互嵌入; 在切向上, 须符合摩尔-库仑准则的接触条件。假设任意形状的块体具有均匀分布的应力和应变, 则每个块体具有 12 个自由度, 其中任一快体  $i$  的位移变量可表示为:

$$d_i = (u_c, v_c, w_c, r_x, r_y, r_z, \epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}, \gamma_{xy})^T \quad (1)$$

式中,  $(u_c, v_c, w_c)$  为第  $i$  个块体在  $x, y, z$  方向上的平移;  $(r_x, r_y, r_z)$  分别为块体  $i$  以  $(x_0, y_0, z_0)$  为转动中心绕  $x, y, z$  轴的刚体转动;  $(\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z)$  和  $(\gamma_{yz}, \gamma_{zx}, \gamma_{xy})$  分别为块体  $i$  的三个法向应变和三个切向应变。块体  $i$  中任意一点  $(x, y, z)$  处的位移  $(u, v, w)$  可以写成:

$$(u, v, w)^T = T_i(x, y, z) d_i \quad (2)$$

$$T_i(x, y, z) =$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & \dot{z} & -\dot{y} & \dot{x} & 0 & 0 & 0 & \dot{z}/2 & \dot{y}/2 \\ 0 & 1 & 0 & -\dot{z} & 0 & \dot{x} & 0 & \dot{y} & 0 & \dot{z}/2 & 0 & \dot{x}/2 \\ 0 & 0 & 1 & \dot{y} & -\dot{x} & 0 & 0 & 0 & \dot{z} & \dot{y}/2 & \dot{x}/2 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

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

通过总势能最小化, 对于由  $n$  个块体组成的块体系统, 总体平衡方程可写成子矩阵形式如下:

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & \cdots & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & \cdots & K_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{n1} & K_{n2} & \cdots & K_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \vdots \\ q_n \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中,  $K_{ij} (i, j = 1, \dots, n)$  为  $12 \times 12$  刚度子矩阵, 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  $K_{ij} (i \neq j)$  由块体  $i$  与  $j$  之间的接触和约束条件决定;  $q_i$  是  $12 \times 1$  子矩阵, 表示块体  $i$  上分配给 12 个位移变量的荷载。

在 3D DDA 方法中, 每个块体被视为一个独立的多面体, 与相邻块体相互作用。处理块体之间的接触是 3D DDA 的一个基本问题。计算块体单元可以是任意凸状或凹状, 并且有任意数量的多边形表面<sup>[25]</sup>。多面体块可以用它们的边界顶点、边和面来表示, 多面体块之间的接触只发生在它们的边界, 接触关系包括顶点与顶点(V-V)、顶点与边(V-E)、顶点与面(V-F)、交叉边与边(E-E)、平行 E-E、边与面(E-F)、面与面(F-F)等 7 个基本接触类型<sup>[26]</sup>。在岩体失稳及失稳后的块体运动过程中, 块体之间、块体与坡面之间、块体与防护结构之间不断发生接触、碰撞和约束<sup>[15]</sup>。为了处理两个一般块体之间的复杂接触, G.H. Shi<sup>[27]</sup>发展了一种全局接触理论, 可以检测接触发生的时间和位置, 并通过集合理论进行了严格的证明。如果步位移足够小, 则所有接触都是独立的和局部的<sup>[28]</sup>。为了解决块体间接触约束问题, G.H. Shi<sup>[29]</sup>采用了罚弹簧法, 在基于罚函数的接触模型中, 接触状态包括张开、滑动和锁定。根据变形后的块体位移及其新的界面位置, 由无张拉和无嵌入条件, 在相应接触位置施加或移除接触弹簧, 修正总体平衡方程。对修正后的方程再求解, 直到满足所有界面无张拉和无嵌入条件, 迭代完成。

## 2 室内试验

柱状危岩体的破坏形式包括破碎破坏、滑动破坏、倾倒破坏等。针对柱状危岩体破坏,多研究底部崩塌破坏,包括颗粒柱体崩塌实验<sup>[30]</sup>或采用损伤力学与实验相结合的方法开展研究,如贺凯等<sup>[1]</sup>运用灰岩三轴声发射实验与损伤力学理论,并与有限元数值模拟相结合对岩崩进行研究。然而,对于岩柱底部无破碎的柱状危岩体,可能仅由非连续结构面切割,发生倾倒或者滑移所引起的失稳破坏及其破坏后块体的运动模式与动能、位移等演化过程,以及其致灾结果的研究尚不充分。因此,本节考虑柱状块体的非连续面切割,将实验结果与3D DDA数值模拟结果比较,验证3D DDA的有效性,同时分析理想模型的失稳破坏机制。

### 2.1 实验装置

如图1所示,实验装置主要包括斜坡和数据采集系统。坡面为底部固定在地面的 $150 \times 30 \times 5$  cm的木板,一端由预制混凝土试块堆起相应的实验高度,可调节坡角度数,采用角度尺测量坡角,精度为 $0.1^\circ$ 。为减少块体碰撞所引起的边坡振动,采用5 cm的厚木板。同时, $150 \times 30$  cm的坡面范围足够块体完成其运动过程。由一 $5 \times 5 \times 20$  cm柱状木块进行不同产状结构面切割后获得由三个子块组成的块体系统,如图2所示。木块材料为松木(密度为 $0.5 \times 10^3$  kg/m<sup>3</sup>),便于不同产状结构面的切割,形成拟采用的实验模型。为了释放块体系统且避免手动操作直接接触块体系统影响实验结果,采用薄亚克力挡板作为启动门,在实验开始时快速抬起,使块体柱自由失稳运动。通过倾斜试验,块体间、块体与坡面间的平均摩擦角约为 $24^\circ$ 。界面黏聚力较小,可以忽略不计。

数据采集系统基于双目立体视觉测量原理,如图3所示。系统由两台相同性能的高速相机组成,其帧率为545帧/秒,分辨率为 $800 \times 600$ 像素。工作原理上类似人类的双眼视觉,通过运用两个相机对同一个景物从不同位置成像,从视差中恢复待测目标的坐标信息。将两台相机的夹角(拍摄角度)控制在 $60^\circ \sim 120^\circ$ ,通过双目相机拍摄块体上的编码标志从而获取块体运动的位移、速度等数据。该系统具有速度快、非接触、精度高、操作简单以及自动

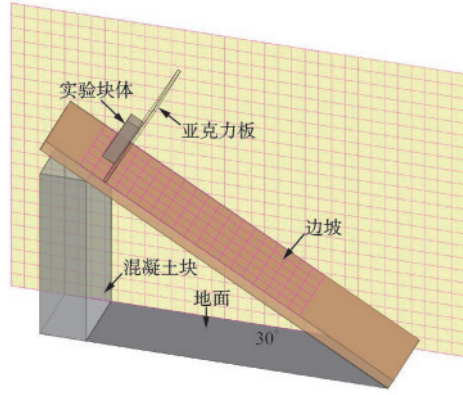


图1 实验装置

Fig.1 Experimental setup

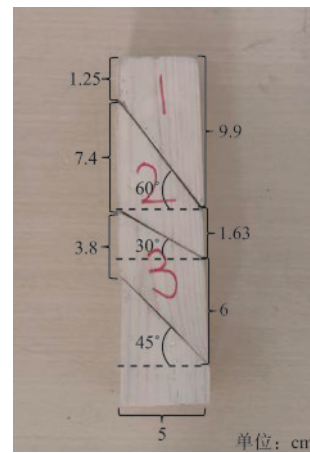


图2 实验块体

Fig.2 Experimental block

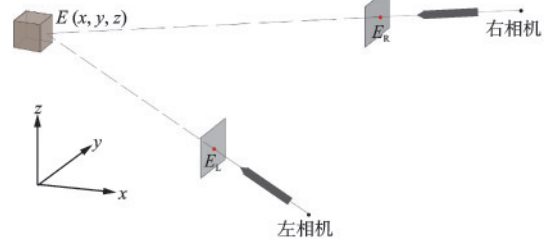


图3 双目视觉测量原理

Fig.3 Principle of binocular stereovision measurement

化程度高等优点。系统操作基本步骤如下:(1)编码标志布置;(2)拍摄标定图像;(3)全站仪测量编码标志坐标,构造全站仪坐标文本文件;(4)载入标定图像、全站仪数据进行标定;(5)拍摄测量视频并进行筛选;(6)输出并显示测量结果曲线。

### 2.2 实验结果

如图4所示,将块体柱放在距坡顶30 cm处,在重力作用下从静止状态沿倾角为 $30^\circ$ 的坡面失稳运

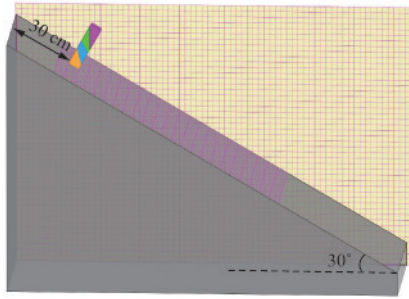


图4 3D DDA数值模型

Fig.4 3D DDA numerical model

动。选择图2中的3号块体进行监测分析。3D DDA计算参数:重力加速度 $g=9.8\text{ m/s}^2$ ,时间步长 $\Delta t=0.001\text{ s}$ ,法向和切向接触弹簧刚度分别为 $k_n=10^5\text{ kN/m}$ 和 $k_t=10^4\text{ kN/m}$ 。表1和表2分别为实验

和3D DDA得到的块体柱失稳运动过程,可以看出实验与3D DDA数值模拟的块体柱失稳及三个块体(1-3号)脱离母体后的整个运动过程基本相同。

整个运动过程中,3号块体的数据采集结果较为完整。实验与数值模拟得到的位移、速度的对比曲线如图5所示,即图5(a)和(b)分别是由实验和数值模拟得到的3号块体失稳运动的X向、Y向和Z向的位移与速度演进过程的对比。结合表1和表2,块体柱失稳运动可主要分为4个阶段。

(1)第一阶段( $T=0.00\sim 0.20\text{ s}$ )。3号块体由静止状态开始滑动,由于其初始高度相比1-2号块体距离坡面更近,在未完成滑动过程且没有完全脱离母体的情况下,先与坡面发生碰撞,发生边-面接触,所以速度发生了急剧衰减。此时1号和2号块体仍

表1 实验得到的块体运动过程

Table 1 Block movement process from experimental results

视图	$T = 0.00\text{ s}$	$T = 0.20\text{ s}$	$T = 0.65\text{ s}$	$T = 1.72\text{ s}$	$T = 2.83\text{ s}$
正视图					
侧视图					

表2 3D DDA数值模拟得到的块体运动过程

Table 2 Block movement process from 3D DDA numerical simulation

视图	$T = 0.00\text{ s}$	$T = 0.20\text{ s}$	$T = 0.65\text{ s}$	$T = 1.72\text{ s}$	$T = 2.83\text{ s}$
正视图					
侧视图					

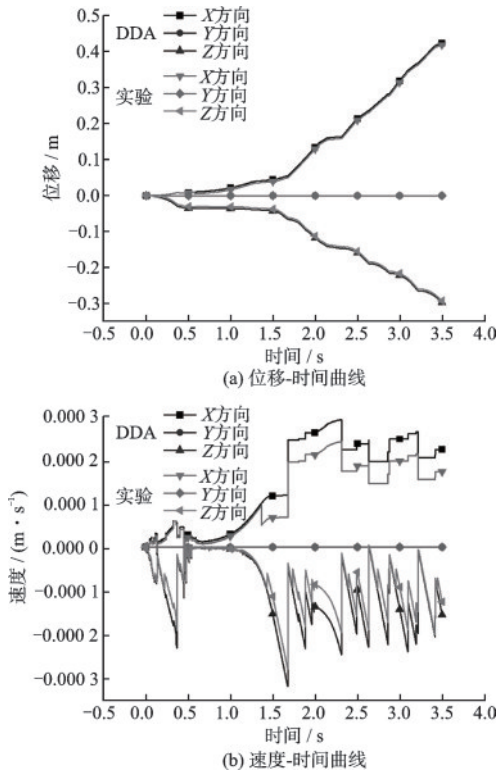


图5 块体柱失稳运动过程的监测块体位移和速度时程曲线  
Fig.5 Displacement and velocity time history curves of monitored block during instability movement of columnar blocks

处于滑动阶段,但由于块体质量、倾角不同等原因,导致块体速度产生差异,块体间发生交错现象。

(2)第二阶段( $T=0.21\sim 0.65$  s)。在 $T=0.65$  s时,三个块体基本分离,完成了所有块体滑动下落的运动过程。然而,由于3号块体受到1-2号块体运动的影响,为3号块体提供向下运动的反作用力,且3号块体受自身重力和形状的影响,最终向下翻转运动。

(3)第三阶段( $T=0.66\sim 1.72$  s)。3号块体完成翻转,与坡面间由边-面接触转换为面-面接触。1-2号块体也与坡面发生了碰撞,并发生侧向偏移。

(4)第四阶段( $T=1.73$  s以后)。3号块体在其速度、重力和形状的影响下,发生第二次翻转;之后为持续下滑过程,一直处于面-面接触状态。同时,1-2号块体也处于向下滑动过程。

数值模拟得到的块体柱失稳运动过程也同样存在4个阶段。然而,实验与数值模拟得到的3号块体位移与速度时程曲线存在差别,这主要是由于实验过程中的块体初始释放条件、块体间接触界面粗糙度以及块体与坡面碰撞产生声能等因素对块体运动结果造成影响。将采用抛光打磨方法提高

块体表面平整度,并研发块体系统自动释放装置以保证实验初始条件的可靠性。

### 3 工程应用

#### 3.1 工程背景

望霞边坡位于重庆市巫山县梁平乡,属亚热带湿润气候区,年降雨量分布不均,经长期风化、雨水侵蚀和构造断裂切割形成斜坡地貌。该边坡西侧存在孤立的柱状危岩体,如图6所示,其上部已与边坡母岩分离。边坡及危岩体数学模型如图7所示。

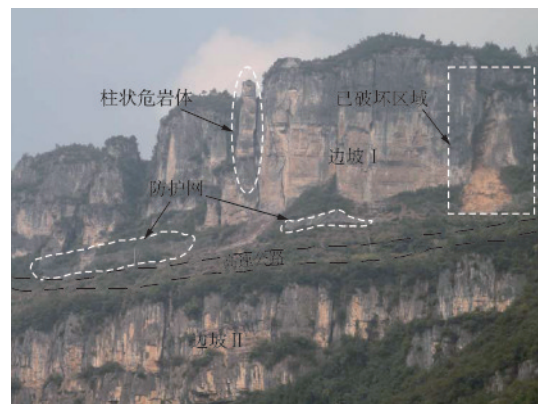


图6 望霞边坡柱状危岩体

Fig.6 Columnar dangerous rock mass at Wangxia slope

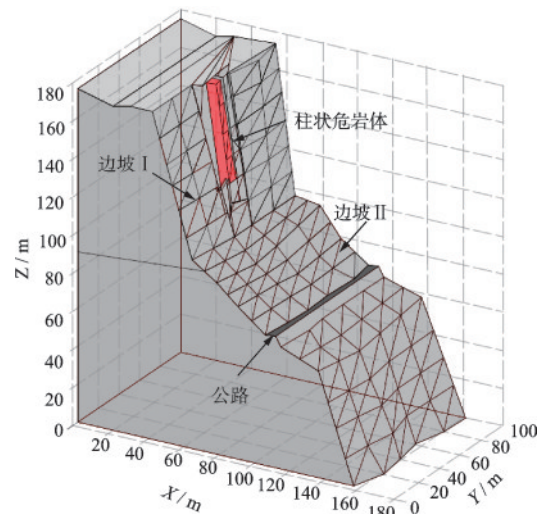


图7 望霞边坡数学模型

Fig.7 Mathematical model of Wangxia slope

危岩体主要由晶质灰岩和燧石灰岩等组成,高约65 m,长约8 m,宽约6 m,体量约 $3\ 200\text{ m}^3$ ,陡壁倾向 $197^\circ$ ,坡角约 $90^\circ$ ,高度约60~80 m,呈条带状分布。二级陡崖上方为公路,位于倾向为 $205^\circ$ 、坡角为 $30^\circ$ 的缓坡上。公路外侧亦为二级陡崖,陡壁高约

60 m,倾向为 $197^{\circ}$ ,坡角约为 $73^{\circ}$ ,由于石灰岩由碳酸钙组成,容易被酸雨腐蚀。对于柱状危岩体,柱顶存在若干穿透性裂缝,裂缝的主要产状分别为 $200^{\circ}/\angle 26^{\circ}$ 、 $202^{\circ}/\angle 5^{\circ}$ 和 $295^{\circ}/\angle 77^{\circ}$ 。因此,由于裂缝的切割作用,存在不稳定的块体。如果受到外界条件的干扰,就会造成失稳破坏。

### 3.2 3D DDA 数值模拟分析

边坡3D DDA数值模型如图8(a)所示,即为危岩体破坏之前的初始状态,共存在6个结构面,故有7个欠稳定块体,图中F块体上的标记点为3D DDA模拟的监测位移点。危岩体失稳运动过程描述如下:如图8(b)所示,所有块体均发生滑动,即危岩体以滑动模式失稳,并且块体之间均存在剪切错动破坏。如图8(c)所示,顶部4个块体下落并与坡面发生碰撞,因E块体滑动速度高于F、G块体,其滑动

的距离更大,引发的滑动破坏程度更大。如图8(d)所示,率先与坡面碰撞的A、B、C、D块体先后在公路的上方飞过。如图8(e)~(g)所示,F、G块体在滑动一段距离之后发生倾倒破坏,可以看出两个块体在未离开母岩之前,F块体的滑动距离大于G块体的滑动距离,而在共同倾倒的过程中未发生分离;但G块体的下落速度大于F块体的下落速度,两个块体之间的相对位置发生变化,最后G块体先于F块体下落而与坡面发生碰撞。如图8(f)所示,E块体第一次与坡面发生碰撞,其碰撞点的位置距离坡面顶部约为40 m;如图8(h)所示,G块体第一次与坡面发生碰撞时,其碰撞点的位置距离坡面顶部约为20 m;而F块体并未与坡面发生碰撞,而是直接与公路发生碰撞而引发滚石灾害,碰撞点的位置距离坡面顶部约50~60 m,并且3个块体均发生了绕不同方向的翻转。

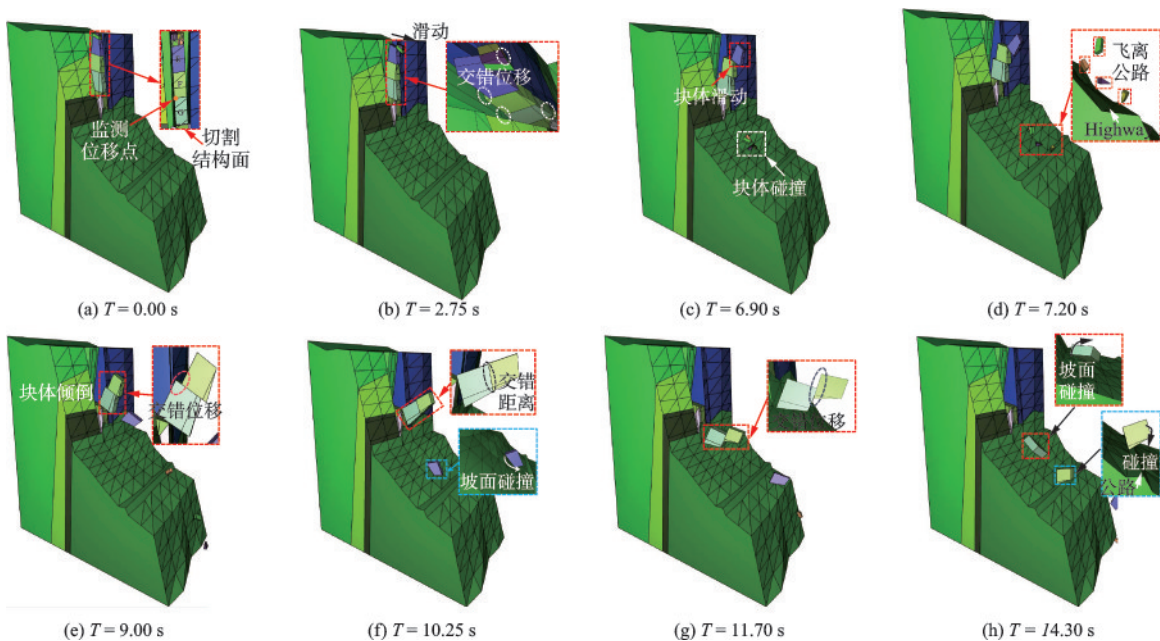


图8 柱状危岩体崩塌运动过程

Fig.8 Collapse movement process of columnar dangerous rock mass

图9(a)为F块体的动能-时间曲线,可以表征出块体滑动-斜抛-碰撞-斜抛-碰撞-斜抛的运动状态。整个过程中,X和Z方向的动能较大,Y方向的动能非常小,在块体运动过程中没有明显变化。总之,总动能主要是由X和Z方向的动能贡献的。在滑动阶段,X和Z方向动能增大幅度较小,总动能也呈小幅增加的趋势。在斜抛阶段,X方向的动能变化不大,但是Z方向的动能变化大幅度增加,总动能也呈大幅增加的趋势。在第一次碰撞后的斜抛阶段,X

方向的动能瞬间增大,同时Z方向瞬间减少,之后X方向变化幅度不大,Z方向呈上升趋势,总动能也呈先瞬间变小而后增加的趋势。在第二次碰撞后的斜抛阶段,X方向的动能瞬间减小,同时Z方向动能也瞬间减小,之后X方向变化幅度不大,Z方向呈大幅度上升趋势,总动能也呈先瞬间变小而后大幅度增加的趋势。相应地,F块体位移监测点位移-时间曲线如图9(b)所示。F块体的X方向位移均为正,Z方向位移均为负,但从碰撞后的位移改变量可以

看出块体发生了不同方向的转动。然而, Y方向的位移在碰撞前基本保持不变, 在碰撞后发生改变, Y方向的位移为正, 说明块体向 Y方向偏移。F块体作为直接形成公路滚石地质灾害的块体, 其运动动能、轨迹及(转动、平动)位移特征等直接关系到滚石灾害特征和防灾减灾方案设计, 因此有必要进一步开展滚石运动特征及其成灾机理研究。

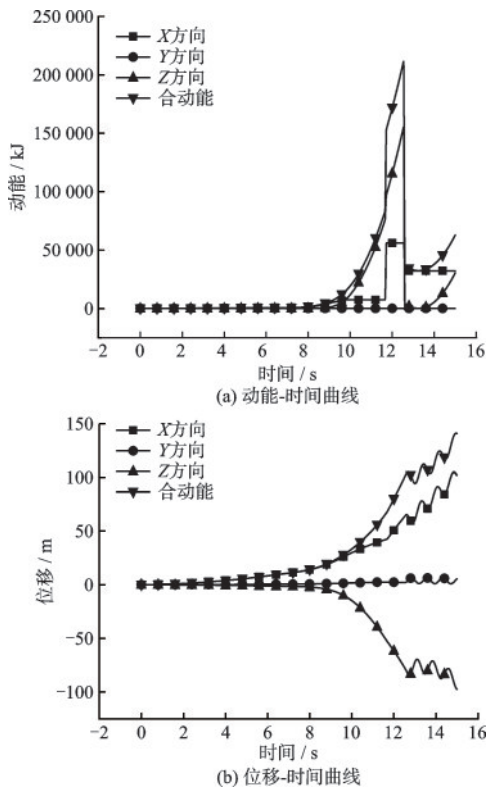


图9 危岩体失稳运动的动能和位移时程曲线  
Fig.9 Kinetic energy and displacement time history curves of dangerous rock mass instability movement

## 4 结 语

采用3D DDA方法对柱状危岩体的失稳破坏机理、破坏后运动和成灾全过程进行了研究。研制了基于双目立体视觉的危岩体失稳破坏研究室内实验装置, 开展了柱状块体系统室内实验, 验证了3D DDA方法在模拟柱状危岩体失稳运动方面的有效性。以望霞边坡为研究背景, 采用3D DDA数值模拟分析了柱状危岩体失稳运动, 研究了柱状危岩体失稳运动全过程, 讨论了三维块体系统动能、位移演化特征, 初步揭示了高陡边坡柱状危岩体崩塌滚石成灾机制, 为边坡危岩体灾害防治提供依据。

## 参考文献:

- [1] 贺凯, 陈春利, 冯振, 等. 塔柱状岩体崩塌灾害研究现状[J]. 地质力学学报, 2016, 22(3): 714-724.  
He K, Chen C L, Feng Z, et al. A review on the collapse hazards of tower-shaped rock[J]. Journal of Geomechanics, 2016, 22(3): 714-724. (in Chinese)
- [2] 赵志男, 李滨, 贺凯, 等. 西南山区柱状危岩体基座压裂溃屈断裂力学解析[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(增2): 3132-3140.  
Zhao Z N, Li B, He K, et al. Fracture mechanics analysis of fractured and collapsed pillar rock foundation in Southwest mountainous area [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41 (Sup2): 3132-3140. (in Chinese)
- [3] Liu L W, Dong J X, Sui S G, et al. Stability assessment of dangerous rock mass of an overhanging slope in Puerdu Town, Southwestern China [J]. Advances in Civil Engineering, 2021: 6526417.
- [4] 周云涛, 蔡强, 谢忠胜, 等. 基于岩腔后退的危岩断裂破坏分析—以重庆市万州区太白岩危岩为例[J]. 防灾减灾工程学报, 2023, 43(1): 138-148.  
Zhou Y T, Cai Q, Xie Z S, et al. Fracture failure analysis of unstable rocks due to rock-cell retreating—A case study of unstable rocks in Taibaiyan, Wanzhou District, Chongqing Municipality, China [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023, 43(1): 138-148. (in Chinese)
- [5] Terzaghi K. Mechanism of landslides [M]. New York: Geological Society of America, 1950: 83-123.
- [6] 任幼蓉, 陈鹏, 张军, 等. 重庆南川区颞子岩W12#危岩崩塌预警分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2005, 16(2): 28-31.  
Ren Y R, Chen P, Zhang J, et al. Early warning analysis of W12# dangerous rock collapse in Nanchuan City, Chongqing [J]. China Journal of Geological Hazards and Control, 2005, 16(2): 28-31. (in Chinese)
- [7] 张继旭, 王林峰, 夏万春. 基于模糊失效准则的危岩稳定可靠度计算[J]. 防灾减灾工程学报, 2022, 42(4): 695-704.  
Zhang J X, Wang L F, Xia W C. Reliability calculation of perilous rock stability based on fuzzy failure criterion [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(4): 695-704. (in Chinese)
- [8] Zhang Q, Huang B L, Zhao H L, et al. Channelized and unchannelized collapses of granular columns on a horizontal surface [J]. Journal of Mountain Science, 2020, 17(12): 2982-2996.
- [9] Tian Y, Wang L F, Zeng B, et al. Analysis of rock  $\beta$ -dynamic parameters and the stability of earthquake dan-



- gerous rocks based on PFC[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2020: 1-17.
- [10] Ghabraie B, Gang R, Smith J, et al. Application of 3D laser scanner, optical transducers and digital image processing techniques in physical modelling of mining-related strata movement[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2015, 80: 219-230.
- [11] Shi G H, Goodman R E. Generalization of two-dimensional discontinuous deformation analysis for forward modelling[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 1989, 13(4): 359-380.
- [12] Zheng L, Wu Y, Wu W, et al. Efficient investigation of rock crack propagation and fracture behaviors during impact fragmentation in rockfalls using parallel DDA[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2021: 5901561.
- [13] Yu P C, Chen G Q, Peng X Y, et al. Extension and application of Discontinuous Deformation Analysis with a damped contact spring model[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2019, 123: 104123.
- [14] Zhang H, Chen G Q, Zheng L, et al. Detection of contacts between three-dimensional polyhedral blocks for discontinuous deformation analysis[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2015, 78: 57-73.
- [15] Liu G Y, Li J J, Wang Z Z. Experimental verifications and applications of 3D-DDA in movement characteristics and disaster processes of rockfalls[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2021, 54: 2491-2512.
- [16] Wu J H, Ohnishi Y, Shi G H, et al. Theory of three-dimensional discontinuous deformation analysis and its application to a slope toppling at Amatoribashi, Japan[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2005, 5(3): 179-195.
- [17] Wu J H, Ohnishi Y, Nishiyama S. Simulation of the mechanical behavior of inclined jointed rock masses during tunnel construction using Discontinuous Deformation Analysis (DDA)[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, 41(5): 731-743.
- [18] Tang C A, Tang S, Gong B, et al. Discontinuous deformation and displacement analysis: From continuous to discontinuous[J]. *Science China-Technological Sciences*, 2015, 58(9): 1567-1574.
- [19] Zhang H, Liu S G, Wang W, et al. A new DDA model for kinematic analyses of rockslides on complex 3-D terrain[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2015, 72(22): 555-571.
- [20] Ohnishi Y, Yamamukai K, Chen G Q. Application of DDA in rockfall analysis[C]//*Proceedings of the Second North American Rock Mechanics Symposium*. Montreal, Canada: [s.n.], 1996: 2031-2037.
- [21] Chen G Q. Numerical modelling of rockfall using extended DDA[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2023, 22(6): 926-931.
- [22] 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)
- [23] 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.
- [24] 李俊杰, 刘国阳, 叶唐进, 等. 基于三维非连续变形分析的西藏高原岩质边坡失稳破坏研究[J]. *高原科学研究*, 2018(1): 1-13. Li J J, Liu G Y, Ye T J, et al. Research on rock slope failure of Tibetan plateau based on three-dimensional discontinuous deformation analysis[J]. *Plateau Scientific Research*, 2018(1): 1-13. (in Chinese)
- [25] 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.
- [26] Zhang H, Liu S G, Han Z, et al. A new algorithm to identify contact types between arbitrarily shaped polyhedral blocks for three-dimensional discontinuous deformation analysis[J]. *Computers and Geotechnics*, 2016, 80: 1-15.
- [27] Shi G H. Contact theory[J]. *Science China-Technological Sciences*, 2015, 58(9): 1450-1496.
- [28] Liu S G, Li Z J, Zhang H, et al. A 3-D DDA damage analysis of brick masonry buildings under the impact of boulders in mountainous areas[J]. *Journal of Mountain Science*, 2018, 15(3): 657-671.
- [29] Shi G H. Discontinuous deformation analysis-a new numerical model for the statics and dynamics of block system[D]. Berkeley: University of California, 1988.
- [30] 张全, 黄波林, 郑嘉豪, 等. 柱状危岩体压溃式崩塌产生涌浪预测分析[J]. *岩土力学*, 2021, 42(10): 2845-2854. Zhang Q, Huang B L, Zheng J H, et al. Prediction and analysis of surge induced by collapse of columnar dangerous rock mass[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(10): 2845-2854. (in Chinese)

(本文编辑: 苏泽云)