# 基于运动学三维模拟的山区公路崩塌灾害损伤评价及治理

张乐[1,2]，陈沛[1]，向波[1*]，张俊云[2]，何云勇[1]，叶尚其[1]，龚臻[1]，徐鸿彪[1]，李颖[1]

1. 四川省公路规划勘察设计研究院有限公司，成都 610041；
2. 西南交通大学土木工程学院，成都 610031

第一作者，E-mail：if_1996@126.com

* 通信作者，E-mail：xiangbo@schdri.com

2024-02-29 收稿；2024-06-07 修回；2024-06-11 接受

基金项目：交通运输部重点科技项目(2021-ZD1-019)；四川省交通运输科技项目(2021-A-02；2024-ZL-02)

中图分类号：U416.14　　文章编号：2096-8523(2025)02-0104-12　　doi：10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240068

**摘　要：**考虑斜坡地貌特征的运动学三维模拟是山区公路危岩崩塌灾害损伤评价的重要依据，其计算结果亦可支撑崩塌灾害治理。基于实地调查和无人机航测，分析了研究区危岩分布、物质组成和灾变特征，并采用 RocPro3D 软件进行危岩崩塌运动学三维模拟，对灾害损伤情况进行评价，并计算不同粒径落石和防护设施下的工程治理效果。结果表明，构造挤压和临空卸荷产生的组合节理切割形成了危岩，底部风化凹腔降低了危岩稳定性，后缘裂隙静水推力和裂隙渗水是危岩崩塌的典型诱因；危岩崩塌后运动速度和冲击能量先增大后减小，弹跳高度起伏波动且整体趋于降低；研究区危岩带对坡脚管理用房具有重大威胁，清方至危岩直径低于 0.8 m，并采用高 6.0 m、防护能级 1 000 kJ 的被动防护网是有效的处置措施；危岩崩塌运动迹线空间分布局部集中位置应适当增强防护。运动学三维模拟能够获取危岩崩塌运动迹线、速度、能量、弹跳高度和单元密度等信息，突破了二维剖面计算在空间上的局限性，对灾害损伤评价和地质灾害防治具有重要意义。

**关键词：**山区公路；崩塌；运动学；三维模拟；RocPro3D；灾害损伤评价；工程治理

崩塌指陡坡或陡崖上岩土体脱离母体下落的现象，其垂直位移明显大于水平位移，具有运动时间短、破坏性强等特征。四川盆地由龙门山断裂带、米仓山构造带、大巴山推覆构造带、齐岳山断阶带和大凉山等形成菱形盆周，使得该区域生态脆弱、地形陡峻、风化作用强烈、新构造运动活跃、地震频发，危岩崩塌灾害频现[1-5]。如：2020 年 9 月 20 日 11 时 50 分，雅西高速石棉段成都至西昌方向姚河坝特大桥右侧发生高位山体崩塌，约 $2\times10^4$ m$^3$ 落石砸断右幅桥梁并波及左幅桥墩，高速公路及桥下的国道 108 交通中断；2022 年 6 月 1 日芦山地震后，国道 351 宝兴至硗碛段共发生 30 余处危岩崩塌，威胁抢险区救援公路生命线；2022 年 9 月 5 日泸定地震后海螺沟景区道路 K14 段发育体积 $3.05\times10^4$ m$^3$ 危岩群，损毁景区道路[6-8]。显然，山区公路危岩崩塌灾害研究具有必要性。

危岩稳定性主要受与母体间连接关系控制，多因底面和后壁的抗拉、抗剪强度不足而发生倾倒、滑移或坠落式崩塌。危岩崩塌后顺坡向下的运动主要受地貌特征影响，如：斜坡坡度、地表起伏程度、坡表岩土体坚硬程度等[1, 7-8]。刘洪博等[9]针对 S303 公路边坡崩塌灾害进行了调查统计，认为降雨诱发危岩体失稳崩塌的作用体现在增大危岩体自重、浸润裂隙充填物并降低其抗滑性能、侵蚀剥落岩体进

**著录信息：**张乐，陈沛，向波，等. 基于运动学三维模拟的山区公路崩塌灾害损伤评价及治理［J］. 地质科技通报，2025，44(2)：104-115.
ZHANG Le，CHEN Pei，XIANG Bo，et al. Rockfall damage evaluation and treatment suggestions for mountain highways based on three-dimensional kinematic simulations［J］. Bulletin of Geological Science and Technology，2025，44(2)：104-115.

© Editorial Office of Bulletin of Geological Science and Technology. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.　https://dzkjqb.cug.edu.cn

而扩展裂隙等方面。何宇航等[10]采用 Rocfall 软件计算了九寨沟景区悬沟危岩体的运动特征，并针对承灾体抗灾能力进行了风险评价。王翔等[11]运用 Rocfall 软件计算了同一结构面不同坡面倾角岩体崩塌落石运动的平均速度、弹跳高度、总动能等，并分析了其对桥梁结构的破坏作用。张涛等[12]采用 Rocfall 软件分析了四川茂县新磨村高位滑坡滑体的运动路径、速度和能量，并据此分析了滑坡的铲刮作用效应。SENGANI 等[13]采用 Rocfall 软件探讨了危岩初始高度和速度对崩塌撞击位置和停积点的影响，并对公路沿线崩塌灾害进行了等级划分。LIU 等[14]采用 Rocfall 软件分析了危岩崩塌运动轨迹，并指出其不能完全符合实际情况。吕权儒等[15]运用 Rocfall 软件模拟了最不利工况下危岩崩塌滚落运动特征，进而评价了连云港市某矿区岩质边坡的崩塌影响区。然而，上述研究对危岩崩塌的分析评估均依据最危险二维地质剖面进行，这限制了崩塌运动路径，未能考虑三维地貌空间的重要影响，难以准确评估崩塌运动特征及影响范围。

近年来，国内外学者致力于危岩崩塌的三维运动学研究，并取得了一定成果。卢彦丞等[16]采用 RocPro3D 软件分析了不同粒径块石崩塌后被动防护网的拦截率，为贵州省小岩屯崩塌灾害防治提供了参考。张先林等[17]采用 RAMMS Rockfall 软件分析了西藏樟木口岸扎美拉山崩塌，发现危岩在起讫点附近以滚动为主，运动中期以跳跃为主，且弹跳高度与速度上下起伏并具衰减趋势。文献 [18-23] 采用 Rocky for3D 软件分析了崩塌落石的优势运动路径和能量，计算了危岩到达交通工程的概率，有效评估崩塌运动特征及影响范围。SARRO 等[21, 24]、FANOS 等[2]通过 RocPro3D 软件建立了三维地貌模型，研究了危岩崩塌后的运移过程，并结合能量、速度、高度、撞击位置等进行了危险性评价。文献 [25-28] 采用 RocPro3D 软件分析了不同粒径典型落石的随机性数值仿真，获得相应的运动轨迹、能量、频率、加速度和弹跳高度等特征，据此进行了危险性评价。理论上，危岩崩塌的三维运动模拟能够充分考虑斜坡地貌空间对运动轨迹的影响，其计算结果对崩塌灾害损伤评价和工程防治应更具指导意义。

基于此，本研究以 G4216 沿江高速岩脚互通管理用房段斜坡危岩崩塌为例，通过现场调查、无人机航测和 RocPro3D 软件数值模拟，总结危岩特征及崩塌灾变机制；以落石运动轨迹、冲击能量、弹跳高度和迹线密度等为指标，从灾害损伤评价和工程防治 2 个方面研究危岩崩塌空间特征，旨在为山区公路崩塌灾害损伤评价和工程治理提供借鉴。

## 1 工程地质背景

G4216 沿金沙江高速公路新市至金阳段地处云贵高原与四川盆地的交界地带，区内地形起伏，以高山峡谷为主，支沟林立，地形起伏大，出露地层主要包括红层、岩浆岩、碳酸盐岩等，构造运动强烈，且以大面积、整体性、间歇性抬升为主，穿越峨边−金阳断裂、莲峰断裂、马路断裂等多个区域性断裂带，临近大凉山、则木河等全新世活动断裂，构造作用强烈，坡体岩体完整性差，节理裂隙极为发育，且以构造节理裂隙为主。

岩脚互通管理用房及收费站是该项目的重要节点，其位于四川省西南部雷波县岩脚乡，处于大凉山向川中盆地过渡地段，属强烈侵蚀高中山地貌类型。研究区山高谷深，河谷狭窄，多形成“V”型谷，斜坡植被稀疏，陡坡地带基岩出露，缓坡地带多为覆盖层，覆盖层以碎块石为主，靠近河沟内为泥石流堆积层，如图 1，2。

场区处于拉租断裂与马路断裂交界，斜坡陡崖段相对高差达 10 ~ 50 m 以上，长期应力释放、自然风化及重力等因素耦合作用下，坡面向内 1 ~ 10 m 范围的浅表岩体结构面卸荷张拉明显，宏观表征为平行陡崖延伸方向裂隙张开，充填岩屑或无充填，卸荷裂隙张开宽度一般为 0.5 ~ 5 cm，卸荷裂隙多为 1 ~ 5 条，岩体结构极不均一，卸荷裂隙面多强风化锈染。

此外，受坡体结构影响，岩体卸荷作用表现形式、卸荷深度等也存在差异。从卸荷裂隙发育特征看，危岩中多表现为集中出现的空缝，张开宽度 0.5 ~ 5 cm，少量充填岩屑及次生泥，卸荷裂隙两侧的岩块相对完整，使得卸荷带岩体在宏观上呈结构极不均一的块裂状或板裂状。

2021−2022 年雨季殷家沟左岸高位岩体多处发生崩塌，部分滚落至管理用房后临时设置的被动网内。危岩体在降雨、地震作用下易诱发结构面切割岩体失稳崩塌，落石将沿坡面滚动弹跳运动，威胁坡脚人员生命财产安全，因此有必要研究危岩崩塌运动特征及危害范围，以支撑防护设计，进而保障场区人员及设备安全。

## 2 研究区危岩特征

### 2.1 危岩分布特征

场区危岩沿殷家沟岸呈条带状分布，一般具崖、坡相间分布的地貌特征。如图 3，斜坡坡向 141°，危




图 1　研究区地形模型

Fig. 1　Topography model of the study area

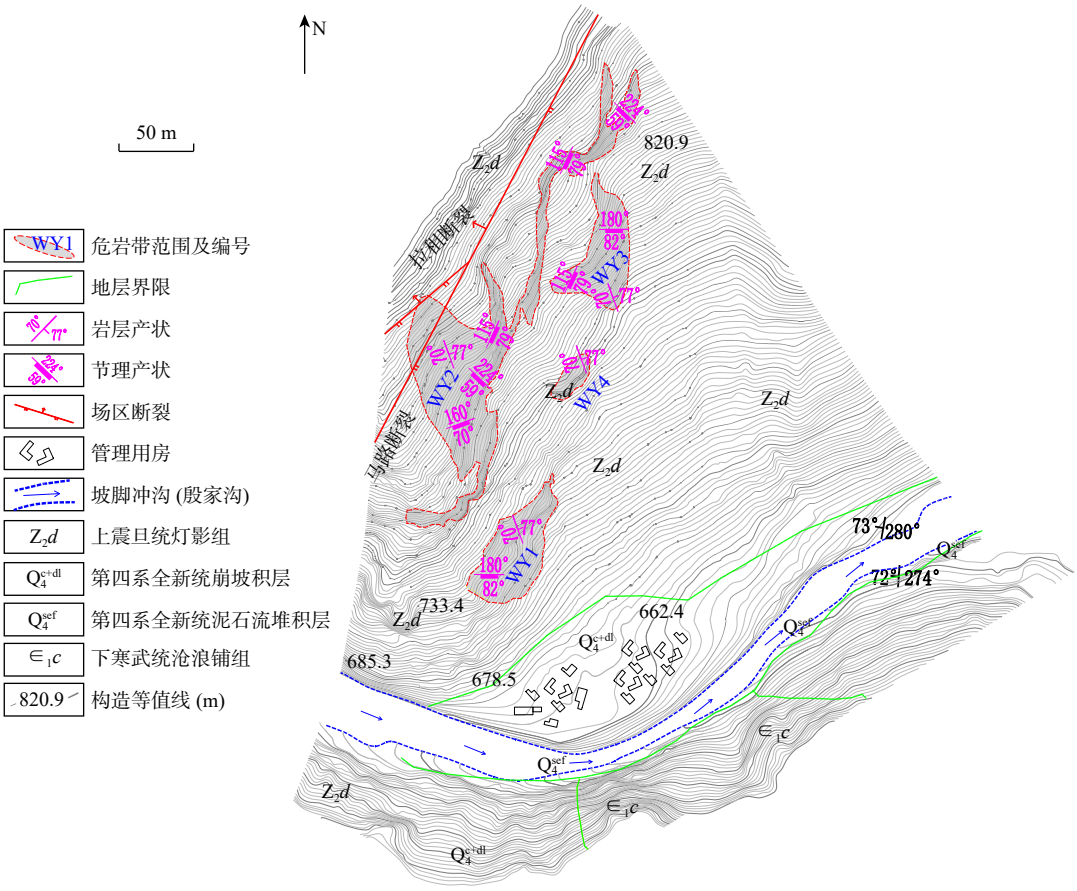



图 2　研究区工程地质平面图

Fig. 2　Engineering geological plan of the study area

岩带分布高程 680 ~ 830 m, 至坡底殷家沟的相对高差 50 ~ 200 m, 该范围内斜坡陡峭, 一般坡度 40° ~ 60°, 按区域可划分为 4 个危岩带(WY1 ~ WY4)共 22 处典型危岩。其中, WY1 区共分布 9 处典型危岩, 分别为 W01 ~ W09; WY2 区共分布 11 处典型危岩, 分别为 W10 ~ W20; WY3 区共 1 处典型危岩, 为 W22; WY4 区共 1 处典型危岩, 为 W21。

通过无人机数码摄影测量生成的三维模型测得危岩体尺寸[29-31], 结合现场调查统计 22 处危岩基本特征如表 1。其中, 危岩 W06, W17 和 W19 体积均超 100 $m^3$, 其落石冲击能量及弹跳高度等难以拦截, 建议清除。针对其余 19 个危岩进行了三维数值计

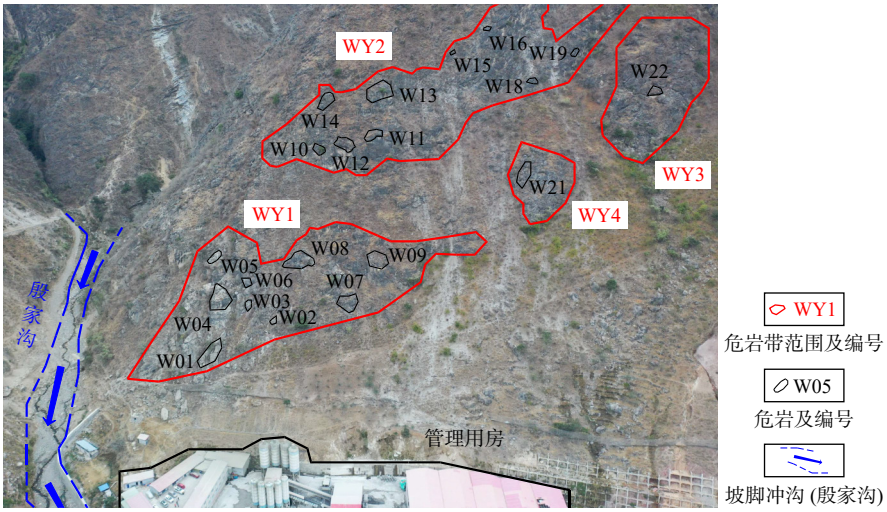



图 3　研究区危岩分布

Fig. 3　Dangerous rock distribution of the study area

**表 1　研究区 22 处危岩基本特征统计**

Table 1　Statistics of the basic characteristics of 22 dangerous rocks in the study area

| 危岩带 | 危岩编号 | 分布高程/m | 危岩尺寸（长×宽×厚）/ $m^3$ | 体积/ $m^3$ | 变形破坏模式 |
|---|---|---|---|---|---|
| WY1 | W01 | 697 ~ 703 | 6×6×2 | 72 | 拉裂–滑移 |
| | W02 | 705 ~ 707 | 2×2×1 | 4 | 拉裂–滑移 |
| | W03 | 718 ~ 720 | 2×1.5×1.5 | 4.5 | 拉裂–滑移 |
| | W04 | 718 ~ 722 | 6×4×4 | 96 | 拉裂–滑移 |
| | W05 | 738 ~ 740 | 4×4×4 | 64 | 拉裂–滑移 |
| | W06 | 723 ~ 731 | 8×8×4 | 256 | 拉裂–滑移 |
| | W07 | 718 ~ 722 | 2×3×1.5 | 9 | 拉裂–滑移 |
| | W08 | 725 ~ 729 | 5×4×1 | 20 | 拉裂–滑移 |
| | W09 | 720 ~ 725 | 6×5×1.5 | 45 | 拉裂–滑移 |
| WY2 | W10 | 775 ~ 780 | 4×5×2 | 40 | 拉裂–滑移 |
| | W11 | 777 ~ 780 | 8×3×1 | 24 | 拉裂–滑移 |
| | W12 | 802 ~ 814 | 3×12×2 | 72 | 拉裂–滑移 |
| | W13 | 840 ~ 843 | 3×3×2 | 18 | 拉裂–滑移 |
| | W14 | 843 ~ 845 | 1×2×1 | 2 | 拉裂–滑移 |
| | W15 | 843 ~ 846 | 4×3×1 | 12 | 拉裂–滑移 |
| | W16 | 840 ~ 843 | 6×3×2 | 36 | 拉裂–滑移 |
| | W17 | 885 ~ 910 | 5×25×2 | 250 | 拉裂–滑移 |
| | W18 | 885 ~ 910 | 2×3×2 | 12 | 滑移 |
| | W19 | 820 ~ 832 | 5×12×2 | 120 | 拉裂–滑移 |
| | W20 | 820 ~ 825 | 5×5×2 | 50 | 拉裂–滑移 |
| WY4 | W21 | 760 ~ 765 | 4×5×2 | 40 | 滑移 |
| WY3 | W22 | 760 ~ 763 | 3×3×2 | 18 | 拉裂–滑移 |

算，以支撑该段危岩崩塌防治。

## 2.2　危岩物质特征

以危岩带 WY1 位置为例，斜坡工程地质剖面如图 4，可见陡坡地段出露新元古界上震旦统灯影组（$Z_2d$）白云岩，灰白色，隐晶质结构，块状、厚层状构造，含燧石条带及团块，岩溶弱发育，未见明显溶蚀现象，裂隙发育，岩心较破碎，岩质硬，锤击声响，颜色新鲜，强风化厚度较小，岩层产状 70°∠77°。危岩主要成分为白云岩。坡脚较缓位置地表覆盖新生界第四系全新统崩坡积体（$Q_4^{c+dl}$）含碎石粉质黏土，层厚 0 ~ 2.1 m。

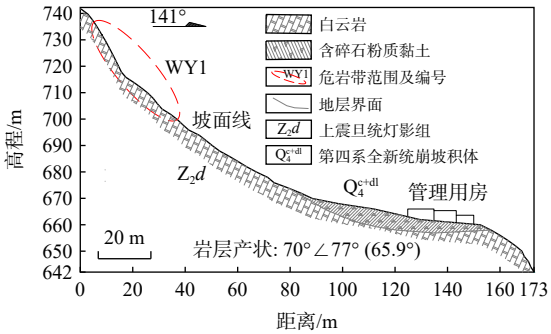



图 4　斜坡工程地质剖面

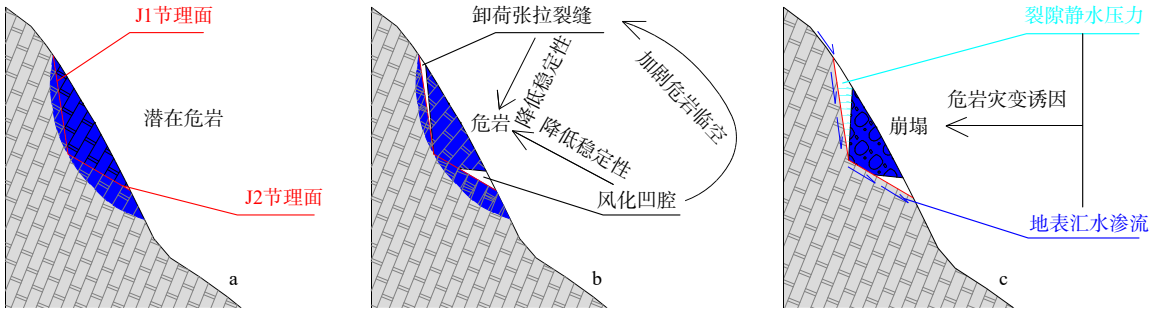
Fig. 4　Engineering geologic profile of the slope

## 2.3　危岩灾变特征

结合研究区危岩分布特征及物质组成，将危岩崩塌灾变历程划分为 3 个阶段，具体如下：

（1）*危岩形成阶段*　如图 5a，构造挤压作用下，岩层单层厚 2 ~ 10 m，明显发育 2 组近正交节理，J1：160° ~ 190°∠67° ~ 86°，与坡向近于正交；J2：224° ~ 288°∠59° ~ 82°，与坡向近于平行。此外，少部分地段发育节理 J3：115°∠79°。岩体受节理 J1、J2 及其他卸荷裂隙控制，被切割为立面尺寸 1 ~ 10 m 不等，厚 1 ~ 5 m，倾向坡脚的楔形或板裂危岩。

（2）*危岩稳定性降低阶段*　如图 5b，差异风化作用下，受断层挤压的极破碎危岩易于风化剥蚀，在相对完整的基岩下部形成凹腔，降低了危岩底部承载




a. 危岩形成阶段; b. 危岩稳定性降低阶段; c. 危岩崩塌灾变阶段

图 5　研究区崩塌灾变特征

Fig. 5　Damage formation characteristics of rockfalls in the study area

力; 同时, 凹腔加剧了临空卸荷效应, 使得危岩后缘张拉裂隙扩展延伸。

(3)危岩崩塌灾变阶段　如图 5c, 强降雨后坡面汇水沿节理面渗入, 后缘节理裂隙充水形成静水压力, 渗水通道饱水后岩土体强度降低, 诱发危岩失稳崩塌。

此外, 强震、爆破扰动或变形累进亦是危岩崩塌的主要诱因, 其本质均为结构面强度降低至失稳临界值[32-34]。

场区多年平均降雨及气温月份分布如图 6, 可知, 场区多年平均降雨量为 788.1 mm, 5-9 月为降雨集中分布时段, 累计降雨量为 647.9 mm, 占全年降雨量的 82.21%; 同时, 该时段温度相对较高, 降雨−蒸发循环作用下坡表风化作用加剧, 催化了图 5 所示的崩塌灾变过程。这解释了近年雨季场区崩塌频现的原因。

## 3　危岩崩塌运动学三维模拟

### 3.1　数值模型

将数字高程模型导入 RocPro3D 软件进行危岩体三维崩塌运动学模拟, 以获取其落石运动轨迹、能量和弹跳高度等信息[1, 4, 16, 18]。采用狄洛尼三角单元依据地形信息点划分网格, 形成含 68 393 个节点、49 518 个面单元的三维数值模型, 如图 7。其中, 底边界取坡脚殷家沟河道, 顶边界取 918 m 等高线, 侧边界取收费站管理用房 50 m 外。

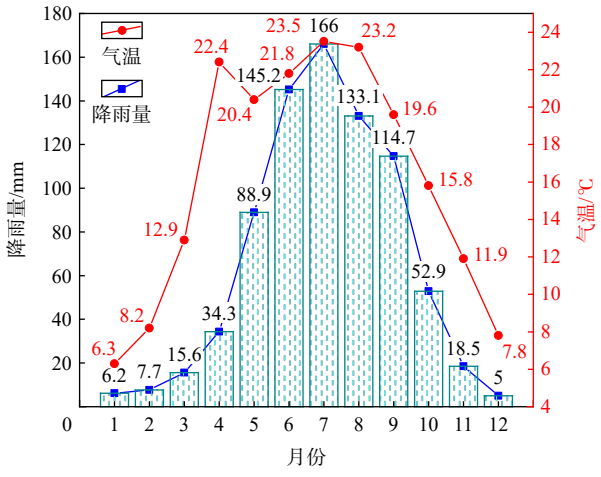



图 6　场区多年平均降雨量及气温月份分布

Fig. 6　Monthly distributions of rainfall and temperature in the study area

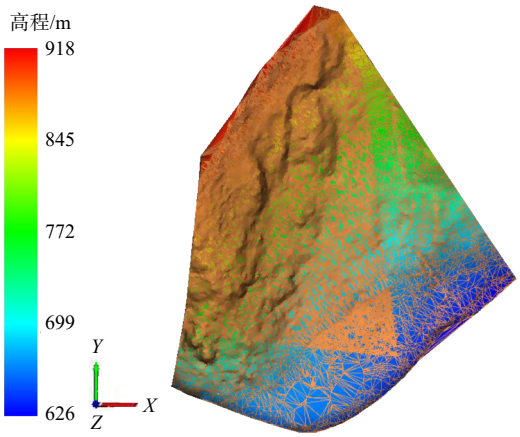



图 7　三维地形网格模型

Fig. 7　Three-dimensional topography mesh model

### 3.2　材料参数

根据地勘报告及现场调查, 拟定危岩体特征参数如表 2。为简化计算, 模型采用如下假定: ①忽略坡表植被影响; ②假定危岩质量均匀分布; ③落石和坡面视为刚体, 始终保持完整, 忽略碰撞破裂影响; ④不考虑运动过程中落石间的相互作用。危岩带 WY1 和 WY2 分别取危岩 W04 和 W12 尺寸为代表

表 2　危岩体特征参数

Table 2　Characteristics parameters of the dangerous rock mass

| 危岩带 | 代表性危岩 | 块石密度/(kg·m$^{-3}$) | 形状 | 直径/m | 危岩数量/个 |
|---|---|---|---|---|---|
| WY1 | W04 | 2 700 | 球体 | 5.68 | 9 |
| WY2 | W12 | 2 700 | 球体 | 5.16 | 11 |
| WY3 | W22 | 2 700 | 球体 | 3.25 | 1 |
| WY4 | W21 | 2 700 | 球体 | 4.24 | 1 |

进行计算，并采用球体几何形状(sphere)模拟落石，其直径由表 1 中对应体积换算，以获取危岩崩塌的最不利危害结果[35-36]。

计算中，仅考虑重力与坡面摩擦，忽略空气阻力等其他因素对运动过程的影响，简化崩塌落石为自由落体、滑/滚动、碰撞坡面的过程结合[16]。依据《崩塌防治工程设计规范(试行)》(T/CAGHP032-2018)和工点地勘专项报告，依照文献 [37-40] 所述方法试算，最终拟定斜坡表层岩土体恢复系数、偏差、摩擦系数及转换参数等计算参数如表 3。三维数字模型坡面岩土体计算参数赋值结果如图 8。运动过程中的能量耗散，通过法向恢复系数 $R_n$ 和切向恢复系数 $R_t$ 表征，这与现行规范所推荐的崩塌落石运动学计算是相一致的。

**表 3　斜坡地表岩土体计算参数**

Table 3　Calculation parameters of the rock and soil on the slope surface

| 参数分类 | 参数 | 岩土体 | |
|---|---|---|---|
| | | 白云岩 | 崩坡积体 |
| 恢复系数 | 法向值$R_n$ | 0.44 | 0.32 |
| | 切向值$R_t$ | 0.88 | 0.82 |
| | 变化范围△_$R$/% | 4 | 3 |
| | 极限速度$V$_$R$(lim)/(m·s$^{-1}$) | 10 | 10 |
| | 极限变化范围△_$R$(lim)/% | 2 | 1 |
| 恢复系数的横向偏差 | 变化范围△_ $\theta_h$ /(°) | 20 | 12.5 |
| | 极限速度$V$_ $\theta_h$ (lim)/(m·s$^{-1}$) | 10 | 10 |
| | 极限变化范围△_ $\theta_h$ (lim)/% | 10 | 6.25 |
| 恢复系数的竖向偏差 | 变化范围△_ $\theta_v$ /(°) | 2 | 2 |
| | 极限速度$V$_ $\theta_v$ (lim)/(m·s$^{-1}$) | 10 | 10 |
| | 极限变化范围△_ $\theta_v$ (lim)/% | 4 | 4 |
| 摩擦系数 | $k$值 | 0.45 | 0.6 |
| | 变化范围△_$k$/% | 12 | 12 |
| | 极限速度$V$_$k$(lim)/(m·s$^{-1}$) | 10 | 10 |
| | 极限变化范围△_$k$ (lim)/% | 10 | 10 |
| 转换参数 | 角度$\beta$_lim/(°)[锐角] | 2 | 5 |
| | 角度$\beta$_lim/(°)[钝角] | 25 | 40 |

## 3.3　计算结果分析

### 3.3.1　崩塌灾害损伤评价

依据表 2，首先基于坡体单元的高程与倾角初定危岩体范围，再结合三维空间坐标进行精确定位，坡面危岩分布如图 9。采用刚性块体确定性分析模式[1, 35]计算危岩崩塌影响范围，如图 10，可见管理用房与 W21、W22 危岩崩塌运动迹线无交叉，即 WY3 和 WY4 危岩带对工程场区基本无影响；WY1 及其上部 WY2 部分区域的危岩块石崩塌后堆积于管理用房区域，严重威胁场区安全，需进行工程治理。

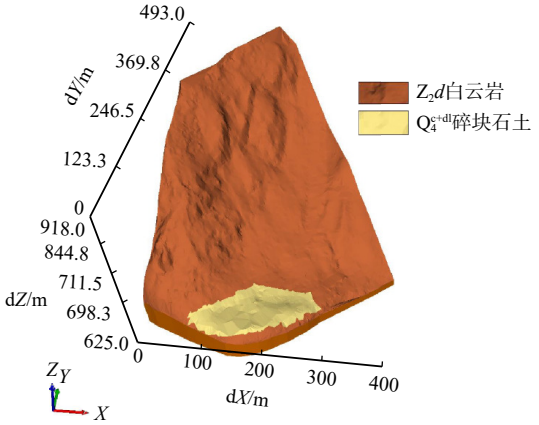



图 8　斜坡数值模型地层划分

Fig. 8　Stratigraphic lithologic area division of the slope simulation model

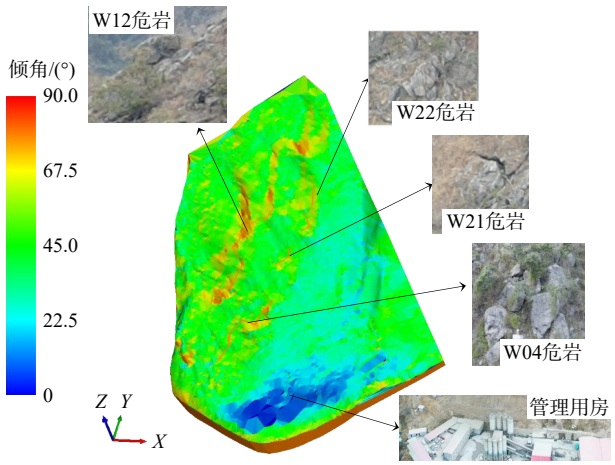



图 9　基于坡体单元高程与倾角的危岩源设置

Fig. 9　Setting of dangerous rock sources based on slope unit elevation and dipangle

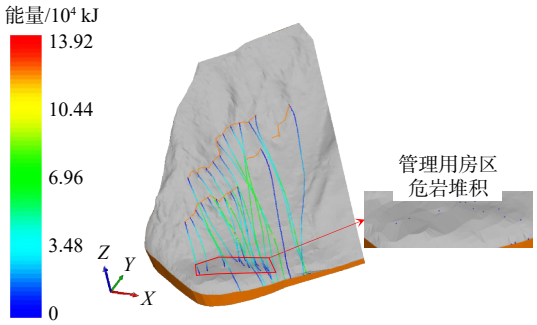



图 10　自然斜坡危岩崩塌迹线、能量及场区堆积

Fig. 10　Rockfall trace, energy, and field accumulation of dangerous rock in natural slope

以危岩 W12 为例，其崩塌轨迹剖面如图 11，可见危岩崩塌后，落石能量沿迹线先增高后降低。这是因为落石在自重作用下顺坡向下翻滚跳跃，其重力势能转化为动能；同时，落石在向坡脚运移过程中

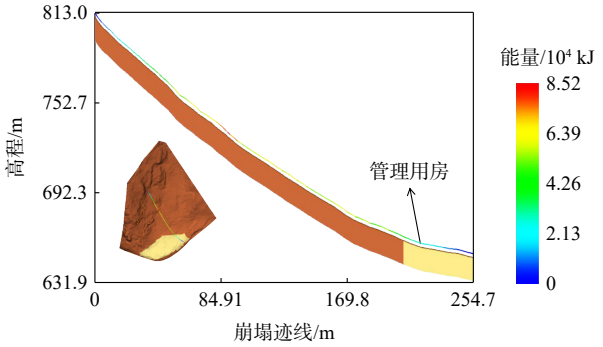



图 11　典型落石运动能量迹线分布

Fig. 11　Energy trace distribution of typical rockfall movements

不断摩擦、撞击坡面，因而产生能量损耗[10, 19]。因此，落石运动迹线上表征为坡体中部能量最大，起讫点能量趋于 0。

针对 WY1 和 WY2 危岩带中直接威胁管理用房的危岩，绘制危岩 W04 和 W12 崩塌后落石运动过程中的能量、弹跳高度、速度和高程如图 12，可见落石沿运动轨迹的能量与运动速度均呈先增大后减小的特征，且二者具有一致性。这是因为该工点坡面物质主要由相对单一的白云岩和崩坡积层组成（图 8），落石运动过程中因碰撞发生的能量损耗相对稳定，因此冲击能量与运动速度的变化规律基本相同。

由图 12 还可得，落石弹跳高度沿运动迹线起伏波动，且危岩 W12 的弹跳迹线有明显的降低趋势。这是因为危岩 W12 的体积小于危岩 W04，其崩落位置较危岩 W04 高 80 m，运动距离较危岩 W04 长 120 m，使得落石在翻滚、跳跃的过程中能量损耗更明显，故弹跳迹线整体有降低的特征[14]。

从停止位置来看，危岩 W04 和 W12 在管理用房区段弹跳高度大于 2.6 m，冲击能量大于 $2\times10^4$ kJ，运动速度大于 10 m/s，严重威胁人员及设备安全。

### 3.3.2　崩塌防治工程建议

根据 3.3.1 节灾害损伤情况，建议采取“清除+防护网”组合措施进行治理。首先，清除现场调查统计的大型危岩（表 1），以降低崩落块石的危害；然后，在管理用房靠山侧设置柔性防护网，拦截剩余危岩崩塌产生的落石。

为确定危岩清方下限尺寸及柔性防护网设置高度、能级，拟定计算工况共 4 种，如表 4。其中，针对 WY1 区域赋予球状危岩 100 处，针对 WY2 区域赋予球状危岩 200 处；危岩清除下限直径设置 1.2，1.0，0.8 m 共 3 个水平；管理用房与靠山侧斜坡变坡点间

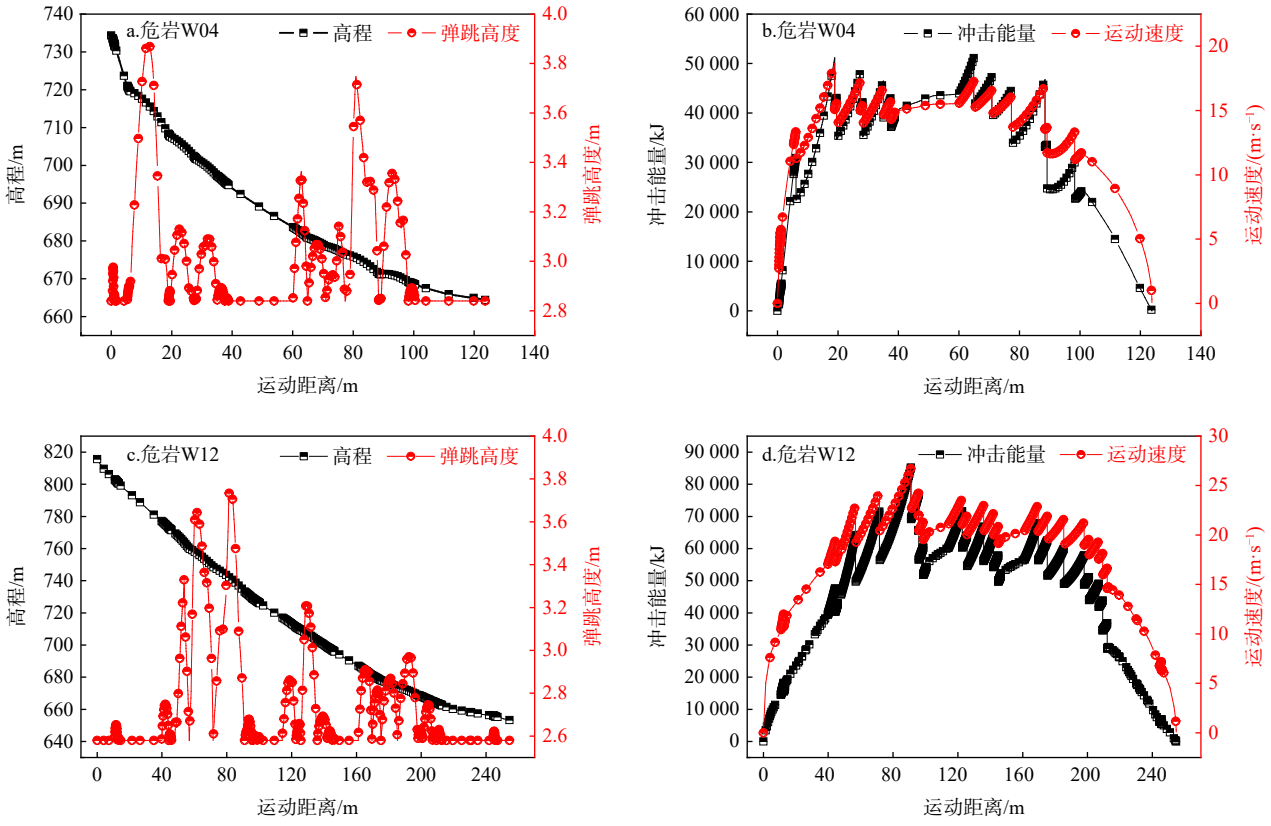



图 12　落石运动特征曲线

Fig. 12　Rockfall characteristic curves of rockfall movement

**表 4　场区崩塌防治模拟计算**

Table 4　Simulation calculations of rockfalls in the study area

| 工况编号 | 危岩规模 | | 被动防护网 | | 防护位置计算结果 | | 防护效果 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 清方下限直径$D_{max}$/m | 数量 | 高度/ m | 能级/ kJ | 最大弹跳高度/ m | 最大冲击能量/ kJ | |
| 1 | 1.2 | 危岩带WY1设置100处<br>危岩带WY2设置200处 | 5.0 | 1 000 | 5.13 | 952 | 无效 |
| 2 | 1.0 | | 5.0 | | 5.03 | 551 | 无效 |
| 3 | 0.8 | | 5.0 | | 4.93 | 254 | 有效 |
| 4 | 0.8 | | 4.5 | | 4.93 | 282 | 无效 |

设置被动防护网，其初始水平设置高 5.0 m、防护能级 1 000 kJ，工况 4 降低防护网高度进行试算。表 4 中防护效果的无效、有效，判定依据为防护位置落石弹跳高度、冲击能量与被动网高度、防护能级间的相对大小关系，即最大弹跳高度小于防护网高度、最大冲击能量小于防护网防护能级，则防护有效；反之，则无效。

4 种工况下危岩崩塌运动能量如图 13，可见同等防护高度和能级下，随危岩清除下限尺寸的降低，崩塌后落石运动能量显著减小，被动网防护效果更好。其中，工况 1、工况 2 和工况 4 落石运动至防护位置时能量均低于 1 000 kJ 的防护能级，但有多处落石运动迹线越过防护网，剖面获取防护位置弹跳高度如表 4。显然，工况 3 所示措施理论上是保障场区安全的有效措施，依照《崩塌防治工程设计规范（试行）》(T/CAGHP032-2018)，被动防护系统高度在计算最大弹跳高度的基础上增加 1.0 m 做安全储备，故推荐方案为：危岩清方下限设置为直径 0.8 m，设置高 6.0 m、防护能级 1 000 kJ 的被动防护网进行防治。

值得注意的是，表 4 中防护位置的最大弹跳高度明显高于图 12。这是因为，工程防护模拟计算中赋予危岩带共 300 处危岩，所得计算结果较 3.3.1 节覆盖面更广，以保证防护设施长期有效。

以图 13 中翻越被动防护网的危岩块石为例，其在工况 1 ~ 3 中崩塌后落石弹跳高度和运动速度如图 14。由图 14a 可见，落石弹跳高度波状起伏，总体呈先增大后降低的规律，与图 12 基本一致；随落石粒径的降低，其弹跳高度有所下降，且工况 2 与工况 1、工况 3 的差值基本相同。由图 14b 可见，落石

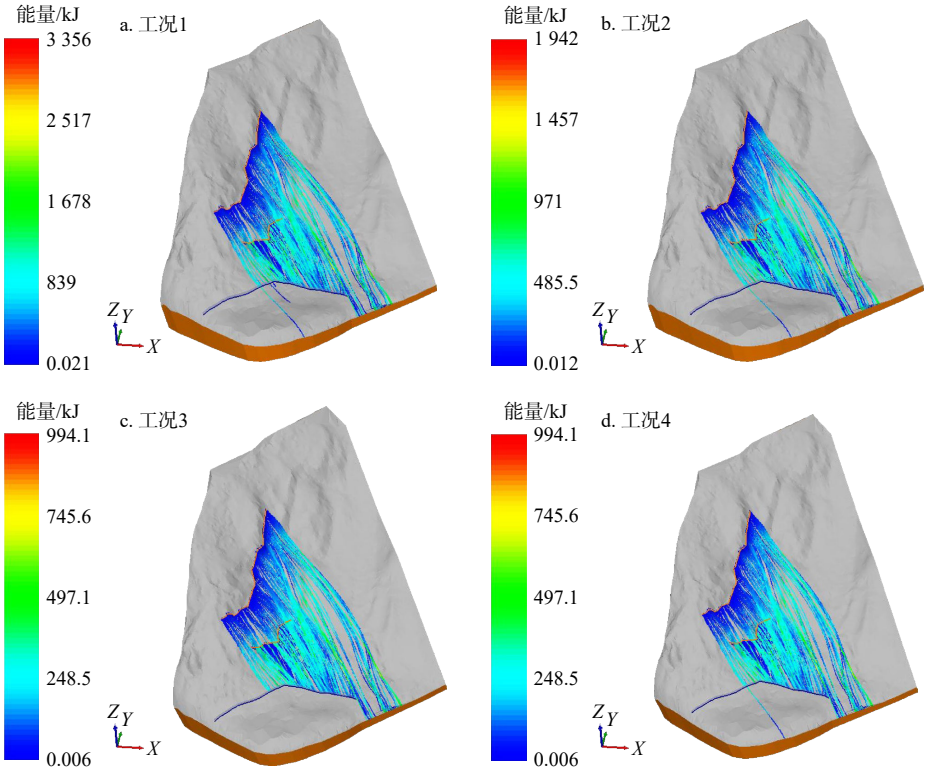



图 13　工程防护后危岩崩塌运动能量空间分布

Fig. 13　Spatial distribution of the rockfall movement energy of dangerous rock after engineering protection

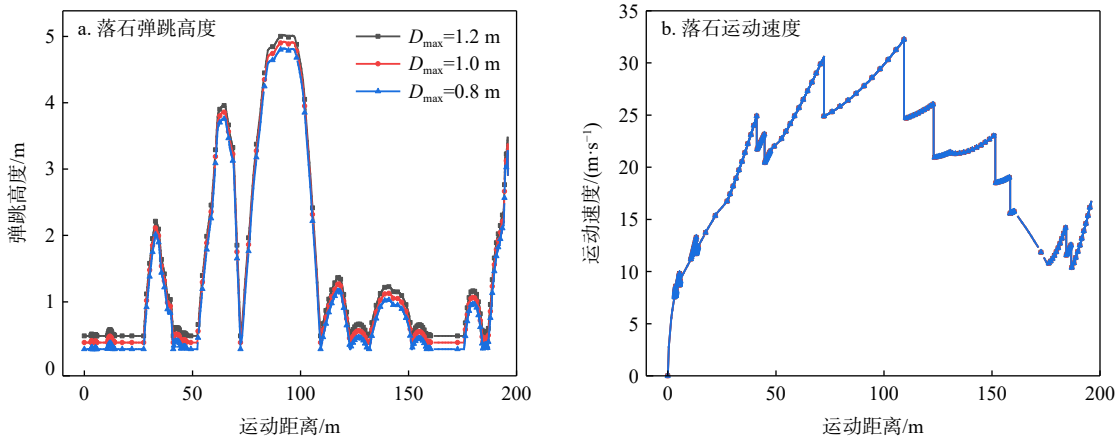



图 14　不同粒径（$D_{max}$）落石运动特征

Fig. 14　Motion characteristics of rockfalls with different particle sizes

运动速度与图 12 相近，且不同粒径危岩的运动速度基本一致。这是因为，本仿真计算中落石仅受坡面摩擦和重力作用，其初始速度相同，加速度相同，故运动过程中速度基本一致。需要说明的是，图 14 中落石运动速度和弹跳高度在运动距离 200 m 附近有升高，是因为其运动至殷家沟岸，地形显著落差导致的。

由图 14 还可见，落石运动迹线空间分布并不均匀，即可能存在集中撞击某一位置的情况，需加强局部设计[20]。为解决这一问题，取危岩崩塌后落石运动迹线密度分布如图 15，可见，不同粒径落石迹线分布具有一致性，即崩塌运动轨迹主要受斜坡地貌空间特征控制，危岩尺寸的影响较弱；场区崩塌运动迹线主要集中于 2 个防护区域，图 15 对应工程坐标系中的相应节点坐标为：*A*(3 081 219.8, 498 293.67, 674.39)，*B*(3 081 221.4, 498 307.63, 671.53)，*C*(3 081 221.8, 498 343.35, 661.82)，*D*(3 081 225.3, 498 358.94, 657.26)。据此可针对相应区域适当增强被动防护网能级。

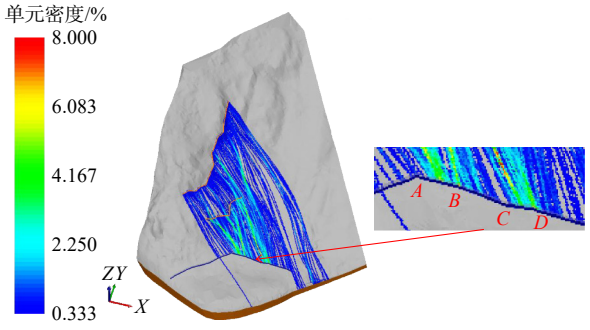



图 15　工程防护后危岩崩塌迹线单元密度空间分布

Fig. 15　Spatial distribution of the rockfall trace unit density of dangerous rock after engineering protection

## 4　结　论

（1）研究区岩体受构造挤压发育 2 组近正交节理，在坡体结构优势组合下切割岩体，临空面卸荷作用下滑移拉裂的楔形或板裂块体，为危岩崩塌的形成提供了基本条件；坡表差异风化下危岩底部凹腔的形成加剧了卸荷效应，降低了危岩稳定性；区域强降雨后裂隙充水，节理面强度大幅降低，后缘裂隙形成静水压力，是危岩崩塌的突出诱发因素。

（2）基于坡体网格单元的高程和倾角，结合空间坐标可准确定位危岩位置。危岩崩塌运动过程中发生机械能转换和摩擦碰撞导致的能量损耗，其运动速度和能量沿运动迹线先增高后降低，坡表物质单一条件下二者具有一致性。

（3）WY1 和 WY2 区域危岩崩塌后将撞击管理用房，其弹跳高度大于 2.6 m，冲击能量大于 $2\times10^4$ kJ，运动速度大于 10 m/s，难以直接防治；其中，WY2 的危岩体崩落起始位置高，运动距离长，翻滚、跳跃等运动过程中能量损耗更大，弹跳迹线整体降低特征更明显。

（4）通过三维模拟计算可优选防护方案，“坡表危岩清除+柔性防护网”组合措施能有效防治危岩崩塌。大粒径危岩清除后，崩塌运动能量显著降低；弹跳高度是限制被动网高度的重要因素；崩塌运动迹线空间分布不均，存在局部集中撞击现象，应适当增强防护能级。

相较于二维简化分析，危岩崩塌三维数值模拟能够充分考虑地貌特征对危岩运动轨迹、能量损耗和弹跳高度等因素的影响，其计算结果对自然灾害损伤评价和工程治理更具借鉴意义。

所有作者声明不存在利益冲突。

The authors declare that no competing interests exist.

## 参考文献：


[1] 黎尤, 何坤, 胡卸文, 等. 震裂山体崩塌形成特征及运动学三维模拟: 以汶川县三官庙村崩塌为例 [J]. 工程地质学报, 2022, 30(2): 542-552.
LI Y, HE K, HU X W, et al. Formation characteristics and kinematics 3D simulation of rockfall evolved from shattered mountain: Case study of Sanguanmiao Village rockfall in Wenchuan Country[J]. Journal of Engineering Geology, 2022, 30(2): 542-552 (in Chinese with English abstract)

[2] FANOS A M, PRADHAN B. A novel rockfall hazard assessment using laser scanning data and 3D modeling in GIS[J]. Catena, 2019, 172: 435-450.

[3] 向波, 罗晗玲, 邬凯, 等. 山区公路顺层边坡首次失稳长度影响因素及确定方法 [J]. 自然灾害学报, 2024, 33(5): 48-60.
XIANG B, LUO H L, WU K, et al. Influencing factors and determination method of the initial instability length of bedding slope along mountainous highways[J]. Journal of Natural Disasters, 2024, 33(5): 48-60. (in Chinese with English abstract)

[4] 王炎. 基于 ROCPRO3D 的大华桥水库坝肩危岩体风险性评价 [D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2023.
WANG Y. Risk evaluation of dangerous rock mass at dam abutment of Dahuaqiao reservoir based on RocPro3D[D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2023. (in Chinese with English abstract)

[5] 王忠福, 罗干, 杨晓洁. 基于 RocPro3D 的大华桥水电站危岩体数值模拟研究 [J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2025, 46(1): 152-160.
WANG Z F, LUO G, YANG X J, et al. Rockfall simulation study at Dahua Qiao hydropower station using RocPro3D[J/OL]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (natural science edition), 2025, 46(1): 152-160.(in Chinese with English abstract)

[6] 张蕴灵, 傅宇浩, 李为乐, 等. 2020 年 9 月 20 日雅西高速姚河坝崩塌调查 [J]. 山地学报, 2021, 39(3): 450-460.
ZHANG Y L, FU Y H, LI W L, et al. Preliminary investigation on the Yaoheba rockfall along the Ya'an-Xichang Highway on september 20, 2020, Sichuan, China[J]. Mountain Research, 2021, 39(3): 450-460 (in Chinese with English abstract)

[7] 邬凯, 易雪斌, 付晓东, 等. 泸定地震震中海螺沟景区道路地质灾害发育规律及灾后重建对策 [J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(8): 1909-1922.
WU K, YI X B, FU X D, et al. Geohazard development rules and post disaster reconstruction strategies of Hailuogou scenic road in the epicenter of Luding earthquake[J], Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(8): 1909-1922. (in Chinese with English abstract)

[8] WANG X, FU X D, WU K, et al. Analysis of historical evolution characteristics and collapse process on July 18, 2023, of a dangerous rock mass at Guanyinyan in Baoxing Country, Sichuan Province, China[J]. 2024, 21(6): 1367-1383.

[9] 刘洪博, 佟磊, 张龙, 等. S303 公路边坡崩塌灾害体发育特征及其危险性评价 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(4): 34-38.
LIU H B, TONG L, ZHANG L, et al. Slope collapse hazard development characteristics and risk assessment of S303 Highway[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(4): 34-38. (in Chinese with English abstract)

[10] 何宇航, 裴向军, 梁靖, 等. 基于 Rockfall 的危岩体危险范围预测及风险评价: 以九寨沟景区悬沟危岩体为例 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(4): 24-33.
HE Y H, PEI X J, LIANG J, et al. Risk assessment and range prediction of dangerous rockmass based on Rockfall: A case study of the Xuangou Collapse[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(4): 24-33. (in Chinese with English abstract)

[11] 王翔, 牌立芳, 吴红刚. 拉林铁路变坡面倾角崩塌落石对桥梁结构破坏作用的模拟分析与试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(8): 1622-1633.
WANG X, PAI L F, WU H G. Simulation analysis and experimental study on the damage of bridge structure caused by tilt collapse and rockfall on the slope of Lalin Railway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(8): 1622-1633. (in Chinese with English abstract)

[12] 张涛, 杨志华, 张永双, 等. 四川茂县新磨村高位滑坡铲刮作用分析 [J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(3): 138-145.
ZHANG T, YANG Z H, ZHANG Y S, et al. An analysis of the entrainment of the Xinmo high-position landslide in Maoxian County, Sichuan[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(3): 138-145. (in Chinese with English abstract)

[13] SENGANI F, MULENGA F. An improved hazard assessment chart for rock falls in near vertical blocky rock environments[J]. Environmental Earth Sciences, 2021, 80(18): 647.

[14] LIU L W, DONG J X, XU H H, et al. Trajectory analysis and risk evaluation of dangerous rock mass instability of an overhang slope, southwest of China[J]. Advances in Civil Engineering, 2021, 2021(1): 7153535.

[15] 吕权儒, 曾斌, 孟小军, 等. 基于无人机倾斜摄影技术的崩塌隐患早期识别及影响区划分方法 [J]. 地质科技通报, 2021, 40(6): 313-325.
LÜ Q R, ZENG B, MENG X J, et al. Early identification and influence range division method of collapse hazards based on UAV oblique photography technology[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2021, 40(6): 313-325. (in Chinese with English abstract)

[16] 卢彦丞, 李军, 梁风, 等. 岩溶典型区崩塌落石被动防护网失效概率模拟 [J]. 地质科技通报, 2024, 43(3): 240-250.
LU Y C, LI J, LIANG F, et al. Failure probability simulation of passive protection net for collapses and rockfalls in typical karst area[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2024, 43(3): 240-250. (in Chinese with English abstract)

[17] 张先林, 张继, 刘桃, 等. 基于三维数值模拟的单体崩塌风险评价: 以西藏樟木口岸扎美拉山为例 [J]. 自然灾害学报, 2023, 32(4): 61-69.
ZHANG X L, ZHANG J, LIU T, et al. Risk assessment of monomer rockfall based on 3D numerical simulation: A case study

of Zhameila Mountain at Zhangmu port, Tibet[J]. Journal of Natural Disasters, 2023, 32(4): 61-69. (in Chinese with English abstract)

[18] 王颂, 张路青, 周剑, 等. 青藏铁路设兴村段崩塌特征分析与运动学模拟 [J]. 工程地质学报, 2020, 28(4): 784-792.
WANG S, ZHANG L Q, ZHOU J, et al. Characteristic analysis and kinematic simulation of rockfall along Shexing Village section of Qinghai-Tibet Railway[J]. Journal of Engineering Geology, 2020, 28(4): 784-792. (in Chinese with English abstract)

[19] DUPIRE S, BOURRIER F, MONNET J M, et al. The protection effect of forests against rockfalls across the French Alps: Influences of forest diversity[J]. Forest Ecology and Management, 2016, 382: 269-279.

[20] SAROGLOU C, ASTERIOU P, ZEKKOS D, et al. UAV-based mapping, back analysis and trajectory modeling of a coseismic rockfall in Lefkada Island, Greece[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2018, 18(1): 321-333.

[21] SARRO R, RIQUELME A, CARLOS J, et al. Rockfall simulation based on UAV photogrammetry data obtained during an emergency declaration: Application at a cultural heritage site[J]. Remote sending, 2018, 10(12): 1923.

[22] GUERRIERO L, CORONA M A, MARTIRE D D, et al. Rockfall susceptibility analysis of the "San Michele Arcangelo" historic trail (Central Italy) based on virtual outcrops and multiple propagation models[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2024, 83: 263.

[23] 黄军朋, 邓睿, 凌斯祥, 等. 映秀 2 号隧道出口高陡斜坡落石运动学模拟和危险性评估 [J]. 自然灾害学报, 2023, 32(3): 216-229.
HUANG J P, DENG R, LING S X, et al. Kinematic simulation and hazard assessment of rockfalls at the Yingxiu No. 2 Tunnel exit high-steep hillslope[J]. Journal of Natural Disasters, 2023, 32(3): 216-229. (in Chinese with English abstract)

[24] SARRO R, MATEOS R M, GARCíA-MORENO I, et al. The Son Poc rockfall (Mallorca, Spain) on the 6th of March 2013: 3D simulation[J]. Landslides, 2014, 11(3): 493-503.

[25] 王军义, 梁风, 彭雄武, 等. 基于 GIS 技术的单体崩塌危险范围评价方法研究 [J]. 工程地质学报, 2023, 31(1): 188-198.
WANG J Y, LIANG F, PENG X W, et al. Study on assessment method of single collapse risk range based on GIS technology[J]. Journal of Engineering Geology, 2023, 31(1): 188-198. (in Chinese with English abstract)

[26] 凌斯祥, 李乐, 石奥博, 等. 上木江坪高陡斜坡危岩特征与定量风险评估 [J]. 工程地质学报, 2024, 32(3): 1083-1097.
LING S X, LI L, SHI A B, et al. Development characteristics and quantitative risk assessment of dangerous exit high-steep Shangmujiangping hillslope at mountain transportation corridor[J]. Journal of Engineering Geology, 2024, 32(3): 1083-1097. (in Chinese with English abstract)

[27] GUZZETTI F, REICHENBACH P, GHIGI S, et al. Rockfall hazard and risk assessment along a transportation corridor in the Nera valley, central Italy[J]. Environment Management, 34(2): 191-208.

[28] OTHMAN A, SHAABAN F, ABOTALIB A Z, et al. Hazard assessment of rockfalls in mountainous urban areas, western Saudi Arabia[J]. Arabian Journal for Sciences and Engineering, 2021, 46: 5717-5731.

[29] 庞鑫, 袁明, 卢渊, 等. 基于无人机 LiDAR 仿地飞行技术的高陡边坡危岩体快速识别方法 [J]. 地质科技通报, 2023, 42(6): 21-30.
PANG X, YUAN M, LU Y, et al. Rapid identification method for the dangerous rock mass of a high-steep slope based on UAV LiDAR and ground imitation flight[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(6): 21-30. (in Chinese with English abstract)

[30] JI Z M, CHEN T L, WU F Q, et al. Assessment and prevention on the potential rockfall hazard of high-steep rock slope: A case study of Zhongyuntai Mountain in Lianyungang, China[J]. Natural Hazards, 2023, 115(3): 2117-2139.

[31] DUAN S Z, JIN W, SUN J L, et al. Trajectory analysis of the rockfall based on the effect of rotating angular velocity[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2022, 40(1): 121-131.

[32] 柳万里, 晏鄂川, 戴航, 等. 南漳保康两县碳酸盐岩崩塌发育特征及影响程度分区 [J]. 地质科技通报, 2020, 39(2): 104-112.
LIU W L, YAN E C, DAI H, et al. Development characteristics and influence degree zoning of carbonate rock collapse in Nanzhang and Baokang Counties[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2020, 39(2): 104-112. (in Chinese with English abstract)

[33] 黄生根, 何铭健. 浙江嵊州−新昌地区红层软岩崩解能量耗散研究 [J]. 地质科技通报, 2024, 43(4): 235-243.
HUANG S G, HE M J. Energy dissipation during disintegration of red-bed soft rock in the Shengzhou-Xinchang area of Zhejiang Province, China[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2024, 43(4): 235-243. (in Chinese with English abstract)

[34] 邓日朗, 张庆华, 刘伟, 等. 基于改进两步法采样策略和卷积神经网络的崩塌易发性评价 [J]. 地质科技通报, 2024, 43(2): 186-200.
DENG R L, ZHANG Q H, LIU W, et al. Collapse susceptibility evaluation based on an improved two-step sampling strategy and a convolutional neural network[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2024, 43(2): 186-200. (in Chinese with English abstract)

[35] GARDEZI H, LI X Y, HUANG Y. Effect of geometric obstructions, particle size distribution, and release angle on the mobility and deposit distribution along the runout zone of rock avalanches[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2025, 84: 24.

[36] ZHANG Y F, HE J Y, YUAN K, et al. Investigation on deformation behavior of unstable rock belt based on multi-source data analysis[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2025, 84: 5.

[37] 龚学强, 蹇代君, 胡卸文, 等. 九寨沟强震区熊猫海-五花海段震裂山体发育特征及崩塌动力学分析 [J]. 灾害学, 2024, 39(4): 192-199.
GONG X Q, JIAN D J, HU X W, et al. Development characteristics and kinematic analysis of rockfall from shattered mountain in the Panda Lake to Five-Flower Lake, Jiuzhaigou strong earthquake area[J]. Journal of Catastrophology, 2024, 39(4): 192-199. (in Chinese with English abstract)

[38] JIANG N, LI H B, ZHOU J W. Quantitative hazard analysis and

mitigation measures of rockfall in a high-frequency rockfall region[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021, 80(4): 3439-3456.

[39] 吴建利. 高位崩塌落石冲击桩板墙-缓冲层材料消能机理研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2022.
WU J L. Research on the energy dissipation mechanism of high-level falling rock impacting on pile-slab wall with cushion layer[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2022. (in Chinese with English abstract)

[40] CLEMENTE, J A, SPIZZICHINO, D, LEONI, G. et al. Rockfall susceptibility analysis through 3D simulations in marine protected areas of the Portofino coastline: Case studies of San Fruttuoso and Paraggi bays[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2023, 82: 122.

Summary for “基于运动学三维模拟的山区公路崩塌灾害损伤评价及治理”

# Rockfall damage evaluation and treatment suggestions for mountain highways based on three-dimensional kinematic simulations

ZHANG Le[1,2], CHEN Pei[1], XIANG Bo[1*], ZHANG Junyun[2], HE Yunyong[1], YE Shangqi[1], GONG Zhen[1], XU Hongbiao[1], LI Ying[1]

1. Sichuan Highway Planning, Survey, Design and Research Institute Ltd., Chengdu 610041, China;
2. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China

First author, E-mail: if_1996@126.com

* Corresponding author, E-mail: xiangbo@schdri.com

**Abstract**: [**Objective**] Three-dimensional kinematic simulation, which takes into account the characteristics of slope topography, serves as a crucial foundation for assessing rockfall risks in mountainous highways. Additionally, its computational outcomes can significantly enhance management strategies for rockfall mitigation. [**Methods**] Leveraging field investigations and Unmanned Aerial Vehicle (UAV) aerial surveys, we conducted a detailed analysis of the distribution, material composition, and disaster characteristics of hazardous rocks within the study area. Using RocPro3D software, we simulated the three-dimensional kinematics of rockfall to evaluate the disaster's impact and assess the effectiveness of engineering interventions for rockfalls of various particle sizes, complemented by protective measures. [**Results**] Our findings indicate that joints formed due to tectonic compression and stress relief from unloading segment the precarious rock masses, while weathering cavities at their bases diminish stability. Hydrostatic thrust exerted by trailing edge cracks, along with water seepage through these fractures, are identified as typical triggers of rockfall events. Post-collapse, the velocity and impact energy of falling rocks initially increase and then decline, while bounce height exhibits variability before showing a decreasing trend. Hazardous rock zones within the study area pose a significant threat to management facilities situated at the foot of the slope. An effective remedial measure involves clearing areas adjacent to dangerous rocks with diameters less than 0.8 meters and implementing a passive protection net measuring 5.0 meters in height, designed to withstand an energy level of 1 000 kJ. Localized concentration areas within the spatial distribution of rockfall movement traces should be appropriately reinforced. [**Conclusion**] Three-dimensional kinematic simulation provides detailed information on rockfall movement traces, velocity, energy, bounce height, and unit density. This approach transcends the spatial limitations inherent in two-dimensional cross-sectional analyses, proving immensely valuable for evaluating disaster damage and enhancing geological disaster prevention efforts.

**Key words:** mountain highway; rockfall; kinematics; three-dimensional simulation; RocPro3D; damage evaluation; engineering treatment

Received: 2024-02-29; Revised: 2024-06-07; Accepted: 2024-06-11

doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240068