

# 沟道交汇处山区公路危岩崩塌发育特征及灾损评价

——以宝兴县炳羊沟口为例

李颖<sup>1</sup>, 张乐<sup>1</sup>, 易显彬<sup>1</sup>, 龚臻<sup>1</sup>, 徐鸿彪<sup>1</sup>, 郭胜<sup>2</sup>, 李良熹<sup>3</sup>, 刘正威<sup>4</sup>

(1. 四川省公路规划勘察设计研究院有限公司, 成都 610041; 2. 四川省交通运输重点项目工作中心, 成都 610041;  
3. 中铁五局集团成都工程有限责任公司, 成都 610041; 4. 四川公路桥梁建设集团有限公司, 成都 610041)

**摘要:** 川西山区地形地质条件复杂多变, 高陡斜坡路段多发育危岩, 其崩塌后对公路行车安全造成严重威胁。以雅安市宝兴县联新村危岩为例, 通过无人机航测、现场调查等技术手段分析危岩基本特征; 采用 RocPro3D 软件进行三维运动学模拟, 以进行崩塌灾损评价; 最后, 针对工作区危岩给出处治建议。结果表明: 工作区危岩的形成是河流下切、构造挤压、降雨冲刷和风化卸荷等因素综合作用导致的, 强降雨和强震是危岩崩塌的典型灾变诱因; 工作区危岩崩塌后冲击能量最大值超 10 000 kJ, 清除大粒径危岩能有效降低冲击能量值; 工作区危岩崩塌后, 呈沿坡面滚动→撞击国道 351 路面附近后弹跳→东河河床及岸坡停积的阶段性运动特征, 可采用“危岩清除+主动防护网+明洞+垫墩锚索”的处治方案进行防治。

**关键词:** 公路; 危岩崩塌; 运动学模拟; 发育特征; 灾损评价; 地质灾害治理

**中图分类号:** U416 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2025)12-0180-07

川西山区处于青藏高原与四川盆地过渡带, 受地壳运动影响, 地质构造显著发育。以宝兴县为例, 其县域具有龙门山断裂带南段的双石-大川断裂、盐井-五龙断裂和耿达-陇东断裂等多条大型构造带, 致使斜坡山体构造结构面显著发育<sup>[1-3]</sup>。同时, 发源于夹金山的东河、西河下切河床, “雨城”之称的雅安全年降雨丰沛且集中于 5~9 月, 为地质灾害的形成提供极其有利的自然地理条件<sup>[4]</sup>。

此外, 2022 年 6 月 1 日芦山 Ms<sub>s</sub> 6.1 级地震、宝兴 Ms<sub>s</sub> 4.5 级地震后, 地震荷载进一步对山体产生震裂松动效应, 加剧了结构面的扩展和延伸<sup>[5]</sup>。因此, 近两年来宝兴县内崩滑流等地质灾害显著发育, 尤其是短时强降雨后斜坡在地表汇水冲刷、结构面饱水软化、裂隙充水鼓胀贯通等多尺度综合影响下, 受多组结构面切割的岩体易于形成危岩, 存在脱离母岩形成崩塌的隐患<sup>[5-8]</sup>。尤其是河流交汇处的岸

坡, 危岩发育更为显著。受河流下切影响, 岸坡应力状态发生分异, 易出现顺坡向的拉张应力, 若叠加其他方向的河流下切作用, 则岸坡处于多向受拉状态, 节理裂隙往往更为发育<sup>[9-11]</sup>。

相较于滑坡, 崩塌灾害多具有高位发育、识别困难、成灾时间短等典型特征。对于植被覆盖茂密的高陡斜坡, 工程师们难以抵达相应位置进行踏勘, 而无人机航测能够在一定程度上解决这一问题。危岩崩塌后, 落石沿斜坡的运动特征是地质灾害防治的重要信息, 尤其是冲击能量、弹跳高度、运动速度和堆积位置等, 直接决定了防护措施、能级设置和防护位置的选择<sup>[12-16]</sup>。

近年来, 三维运动学模拟不断被应用于地质灾害防治领域, 如 UDEC3D、PFC3D、FLAC3D、ABAQUS 等离散元、有限差分 and 有限元程序, 其计算结果对工程设计具有重要意义<sup>[17-19]</sup>。相对而言,

**收稿日期:** 2024-12-12

**基金项目:** 中铁五局集团有限公司科研项目(2024JHKJ10553); 四川省交通运输科技项目(2021-A-02)

**作者简介:** 李颖(1993—), 男, 四川开江人, 硕士, 工程师, 研究方向为公路特殊路基与地质灾害防治; 张乐(1996—), 男, 河南三门峡人, 博士研究生, 助理工程师, 研究方向为公路特殊路基与地质灾害防治; 易显彬(1972—), 男, 四川成都人, 工程师, 研究方向为高速公路互通立交设计; 龚臻(1979—), 男, 四川成都人, 正高级工程师, 硕士, 研究方向为道路桥梁工程勘察设计; 徐鸿彪(1985—), 男, 广东潮州人, 硕士, 高级工程师, 研究方向为公路特殊路基设计与地质灾害防治; 郭胜(1977—), 男, 四川成都人, 高级工程师, 研究方向为道路桥梁工程设计及项目前期全过程管理; 李良熹(1983—), 男, 四川苍溪人, 高级工程师, 研究方向为道路工程施工; 刘正威(1990—), 男, 四川达州人, 工程师, 研究方向为公路路基边坡和地质灾害治理。

RocPro3D 是一款基于概率统计分析的落石运动学分析三维软件,其能够充分考虑斜坡地貌特征,获取随坡表起伏波动的运动轨迹,进而确定承灾体的灾损特征<sup>[20-22]</sup>。

基于此,本文以雅安市宝兴县联新村危岩崩塌为例,通过无人机航测和现场调查,总结归纳危岩发育特征,并采用 RocPro3D 软件进行运动学模拟计算,以评价其灾损特征;最后,针对国道 351 提出危岩崩塌防护设计措施。研究成果可供沟道交汇处崩塌破坏的防灾减灾工程进行参照。

## 1 工程概况

国道 351 线 K3062+350~K3062+760 段边坡(自然灾害综合风险公路承灾体普查库内二级灾害风险点),位于宝兴县穆坪镇联新村,斜坡高陡,危岩崩塌频发频现。

该段既有道路为双向两车道二级公路,按设计时速 40 km/h 技术标准设计建设,路基宽度为 8.5 m,沥青混凝土路面。危岩体发育于道路左侧,崩塌后落石堆积国道 351 线及新民村村道,对应线路长约为 410 m,与路面的相对高差最高约为 130 m,危岩分布广泛,如图 1 所示。

该段以构造剥蚀高中山地貌为主,东河及其支流形成的冲沟切割强烈,自然斜坡坡度较大。受东河及炳阳沟下切叠加影响,岸坡高差大,且处于多向受拉状态,利于危岩崩塌地质灾害的发育。区内地层主要为二叠系下统茅口组+栖霞组的灰岩和

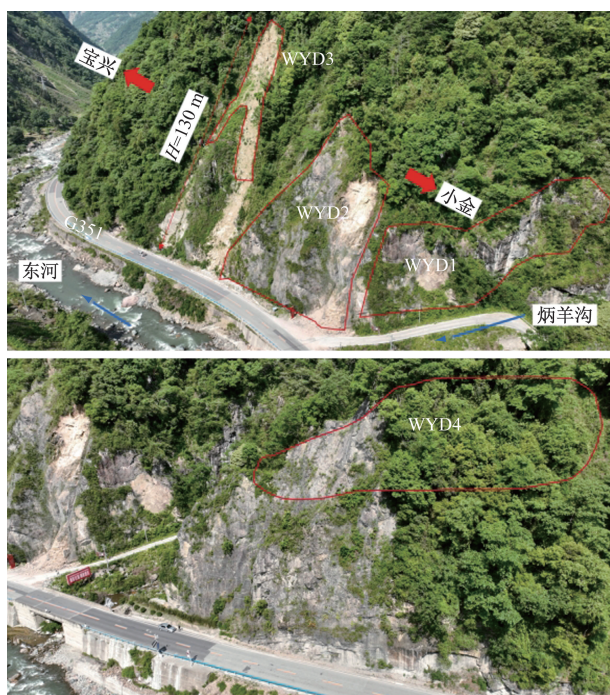


图 1 工作区概况

元古界第三/四期的闪长岩,危岩在两类岩性中均有发育。

2022 年 6 月 1 日芦山、宝兴先后发生 Ms<sub>6.1</sub> 级地震、Ms<sub>4.5</sub> 级地震,震后调查发现国道 351 线 K3062+350~K3062+760 段有石块崩落至公路路面,最大落石粒径为 0.5 m×0.8 m×1.2 m,大部分堆积于下方公路上,部分落入东河,最远的落石停留在公路外侧东河河道中心处,未发生人员伤亡。

## 2 危岩发育特征

### 2.1 分布、类型和形态特征

区内崩塌分布于 G351 线 K3062+350~K3062+760,左侧中上部斜坡地带,以中部公路为界,斜坡内共发育 4 处崩塌,依次命名为 WYD1、WYD2、WYD3、WYD4,整个崩塌体影响区长约为 450 m(图 1)。崩坡所处斜坡以陡坡、陡崖微地貌为主,分布标高为 1 188~1 350 m。坡向整体较为一致,约为 110°,坡度 65°~75°。

针对 WYD1~WYD4 分别研究其分布、类型和形态特征如下。

#### 2.1.1 WYD1

该区主要位于斜坡中上部,崩塌坐标为 X: 34 583 301.024 4, Y: 3 370 956.850 4, 高程分布多为 1 204~1 282 m,整个危岩带长度约为 100 m,岩性主要为坡表松散碎石及闪长岩,危岩总方量为 2 000~5 000 m<sup>3</sup>。闪长岩,岩质较软~较硬,以强~中风化为主。区内岩层中主要发育三组节理: L1: 297°∠20°,延伸为 8~9 m,切深为 2~3 m,面较光滑,平均间距为 3 m,微张,结合差~较差; L2: 195°∠63°,延伸为 5~10 m,切深为 1~3 m,面较平,平均间距为 5 m,微张~张开,结合差~较差,近地表裂隙中充填有少量砂土; L3: 58°∠69°,延伸为 5~10 m,切深为 3~5 m,面较平,平均间距为 4 m,微张~张开,结合差~较差,近地表裂隙中充填细碎砂土石。斜坡面较平整,整体坡度约为 60°,植被不发育,构造发育,岩体破碎,竖向裂缝发育,局部见基岩裸露,风化卸荷、基岩倾倒变形现象明显,影响深度多为 0.5~2 m。

目前多因基岩倾倒变形发生崩塌,崩塌体多为碎块石,主要沿节理面崩落,单体粒径一般为 0.2 m×0.2 m×0.2 m~1 m×1 m×1 m,距路面高差为 20~100 m,目前坡脚多见碎石、块石,因坡度较陡,崩塌体发育较强对过往车辆和形成安全造成威胁,亟须进行处治,防止强风化岩体崩塌及局部土体发生浅表滑塌。

### 2.1.2 WYD2

该区主要位于斜坡中上部,崩塌坐标为 X:34 583 323.120 6,Y:3 370 875.051 5,高程分布多为 1 188~1 270 m,整个危岩带长度约为 40 m,岩性主要为坡表松散碎石及闪长岩,危岩总方量为 2 000~5 000 m<sup>3</sup>。

其余特征与 WYD1 相同。

### 2.1.3 WYD3

该区主要位于斜坡中上部,崩塌坐标为 X:34 583 201.702 1,Y:3 370 820.081 0,高程分布多为 1 244~1 318 m,整个危岩带长度约为 20 m,岩性主要为坡表松散碎石及闪长岩,危岩总方量为 1 000~3 000 m<sup>3</sup>。

其余特征与 WYD1 相同。

### 2.1.4 WYD4

该区主要位于公路小金端一侧的斜坡中上部,崩塌坐标为 X:34 583 323.120 6,Y:3 370 875.051 5,高程分布多为 1 224~1 312 m,整个危岩带长度约为 110 m,岩性主要为灰岩,危岩总方量为 4 000~8 000 m<sup>3</sup>。灰岩,岩质较软~较硬,以强~中风化为主。区内岩层层产状为:305°/15°,切向坡,主要发育有两组节理;L1:204°/66°,延伸为 5~10 m,切深为 1~3 m,面较平,平均间距为 5 m,微张~张开,结合差~较差,近地表裂隙中充填有少量砂土;L2:61°/78°,延伸为 5~10 m,切深为 3~5 m,面较平,平均间距为 4 m,微张~张开,结合差~较差,近地表裂隙中充填细碎砂土石。斜坡面较平整,整体坡度约为 70°,植被不发育,构造发育,岩体破碎,竖向裂缝发育,局部见基岩裸露,风化卸荷、基岩倾倒变形现象明显,影响深度多为 0.5~1.5 m。

目前多因基岩倾倒变形发生崩塌,崩塌体多为碎块石,见基岩裸露,主要沿节理面崩落,单体粒径一般为 0.5 m×0.5 m×0.5 m~3 m×2 m×1.7 m,距路面高差为 10~30 m,目前坡脚多见碎石、块石,因坡度较陡,崩塌体发育较强对过往车辆和形成安全造成威胁,亟须进行处治,防止强风化岩体崩塌及局部土体发生浅表滑塌。

## 2.2 崩塌破坏模式

区内崩塌体破坏模式特征明显,WYD1、WYD2、

WYD3 主要为倾倒变形体失稳崩塌体发生倾倒破坏和浅表基岩的风化掉块,运动过程中崩塌体极易解体,单体粒径小,对公路的影响主要表现为崩塌岩体对公路的破坏,WYD4 的主要为倾倒变形体失稳崩塌体发生倾倒破坏,对公路的影响主要表现为崩塌岩体对公路的破坏,如表 1 所示。

## 2.3 危岩稳定性分析

经调查,联新村崩塌 2024 年 7 月降雨造成山体松动发生崩塌,山体大面积表层滑落,常有落石掉落在路面上,落石方量较大,最大尺寸为 0.5 m×0.8 m×1.2 m,掩埋道路造成道路中断。该地灾点,对车辆行人通行存在极大安全隐患,尤其是汛期强降雨作用下极易发生崩塌落石,现有主动防护网及护栏已更换多次,且公路路面仍有落石持续冲击损毁,如图 2 所示。

根据《崩塌防治工程勘查规范(试行)》(T/CAGHP011—2018),对崩塌稳定性进行评价。选取 WYD1 所在闪长岩区危岩断面,分别对天然工况(自重)、暴雨工况(自重+暴雨)、地震工况(自重+暴雨+地震)进行稳定性计算。

由于该崩塌边坡岩性为闪长岩/灰岩,岩体破碎,岩体天然状态下容重取 2.75 g/cm<sup>3</sup>,饱和状态下综合取 2.85 g/cm<sup>3</sup>,由于现场较难取得完整岩样,岩体物理力学参数主要根据野外宏观判断,通过稳定性反演计算,并结合附近工程类比,综合确定岩体在天然状态下  $c=20.0$  kPa, $\varphi=55.0^\circ$ ;饱和状态下  $c=18.0$  kPa, $\varphi=53.0^\circ$ 。据此,计算结果如表 2 所示。

由以上计算可知,该崩塌在天然工况处于基本稳定状态,暴雨工况处不稳定状态,地震工况处于不稳定状态。

## 3 崩塌灾损评价及治理

### 3.1 崩塌灾损评价

RocPro3D 为模拟落石运动学特征的三维软件,自 2021 年引入国内,广泛应用于危岩崩塌的风险性评价及工程防治领域。该软件可将落石块体和坡面岩土体材料的物理参数用概率变量表示,以概率算法反映落石形状、坡面岩土体特性和地形起伏的变化,从而模拟危岩体从崩塌启动、崩落直至

表 1 各危岩带危岩单体失稳模式统计

崩塌体名称	预测失稳崩塌体一般块径/m	预测失稳最大危岩单体块径/m	失稳模式	对公路的危害形式
WYD1、WYD2、WYD3	0.1×0.1×0.1~1.5×1×2	1.5×1×2	倾倒式为主,局部坠落式	浅表基岩掉块、崩塌岩体
WYD4	0.5×0.5×0.5~3×2×1.7	0.5×0.5×0.5~3×2×1.7	倾倒式为主,局部坠落式	浅表基岩掉块、崩塌岩体



图 2 工作区危岩变形现状

表 2 危岩稳定性计算结果

变量	断面编号:4-4'		
	天然	暴雨	暴雨+地震
稳定系数	1.12	1.05	0.91
稳定性	欠稳定	欠稳定	不稳定

最终堆积的运动全过程。模拟时,需输入落石特征参数及岩土体特征参数<sup>[23-24]</sup>。本文在现场勘察的基础上,通过 RocPro3D 三维运动软件进行落石运动学特征的模拟分析,量化评价工作区危岩崩塌后落石的运动轨迹、冲击能量、弹跳高度等灾损信息,以精确评价灾害对公路及周边建筑物的危害。

综合现场调查及工作区地勘成果,采用狄洛尼三角单元依据地形信息点划分网格,形成含 7 477 个节点、14 235 个面单元,建立三维数字模型如图 3 所示。其中,赋予东河及其支沟为 water surface 材料(恢复系数均为 0),坡表赋予 sand rock 材料(法向恢复系数为 0.35,切向恢复系数 0.84)。

结合现场调查及地勘成果,设置坡面 4 处危岩带信息如表 3 所示,灾损评价过程中为提高效率,并获取最不利的损坏结果,设定 WY1~WY4 各 100 处危岩,其粒径均设置最大落石尺寸为 1.6 m×1.95 m×1.40 m。

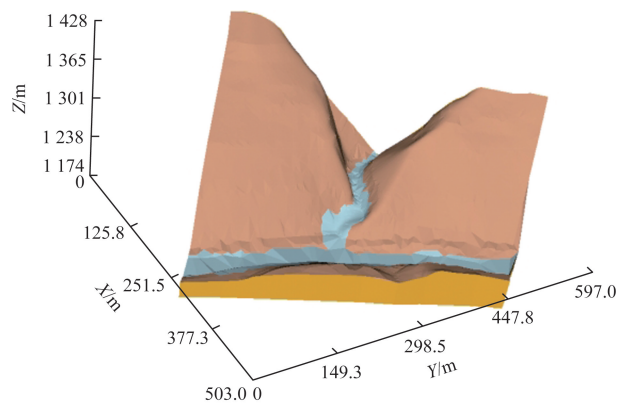
由图 3(b)可知,工作区危岩设置主要为电塔下部凸出危岩体(计算中设置 WY1~WY3 危岩带表示)、电塔上部边坡危岩体(计算中设置 WY4)危岩带表示)和大桩号侧公路边坡危岩体(WY5)。

图 4 为无支护状态下危岩崩塌后落石运动轨迹及能量分布。可知,处治前工作区危岩崩塌后最不利条件下冲击能量可达  $1.522 \times 10^4$  kJ,坡表能量分布图中位于国道 351 左侧东河岸坡位置,这与图 1 影像所得位置基本一致。

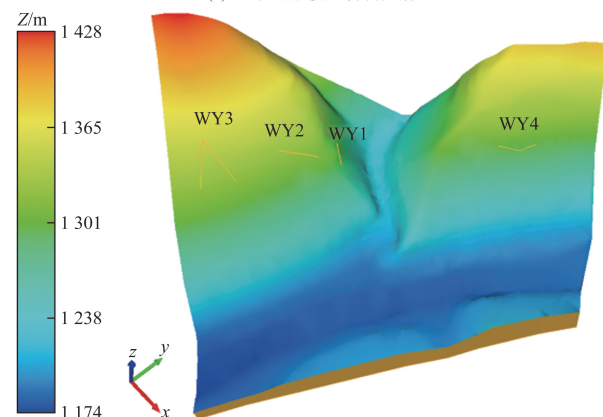
图 5 为工作区落石冲击能量最大位置的运动迹线。结合图 4 可知,工作区危岩崩塌后,落石沿坡面以翻滚为主,直至撞击G351路面后发生弹跳,但高

表 3 工作区坡表危岩参数

危岩带	危岩数量/个	块石密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	危岩尺寸/( $\text{m} \times \text{m} \times \text{m}$ )
WY1	100	2 500	1.6×1.95×0.8
WY2	100	2 500	2.0×1.6×0.8
WY3	100	2 500	2.0×1.6×0.8
WY4	100	2 500	2.0×1.6×0.8



(a) 三维地形模型材料赋值



(b) 高程视角下坡体模型及危岩设置

图 3 工作区三维数字模型

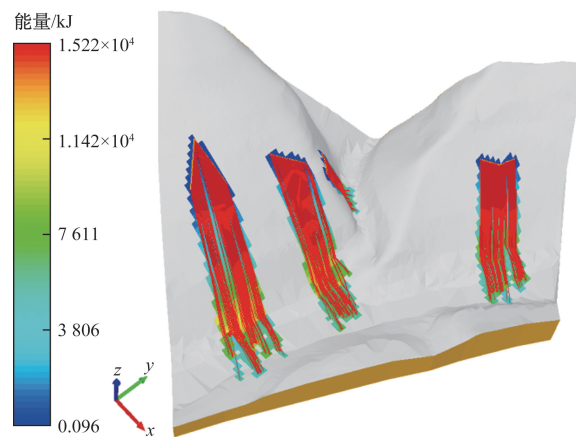


图 4 自然斜坡危岩崩塌后落石运动轨迹及能量

度较低,且最终停积多处于东河河床及岸坡坡脚,部分落石及其破碎物停积路面,如图 6 所示。

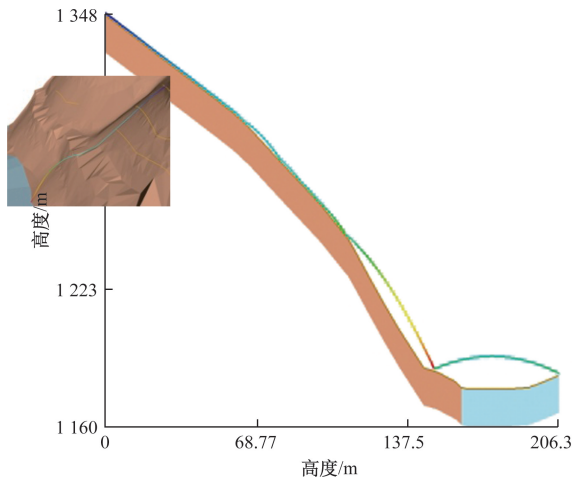


图 5 落石冲击能量最大位置运动迹线



图 6 危岩崩塌后落石停积位置

综上所述,工作区危岩崩塌会对公路路面和路基造成直接破坏。路面受冲击后出现裂缝、凹陷、隆起等现象,路基则会受到落石的冲击和掩埋,导致公路的通行能力严重受损。特别是 G351 作为近断层强震多雨区的山区公路,受地形条件限制,灾后清理崩积物和恢复交通需要耗费大量时间、人力和物力,修复过程中将阻断交通,运营养护成本高。

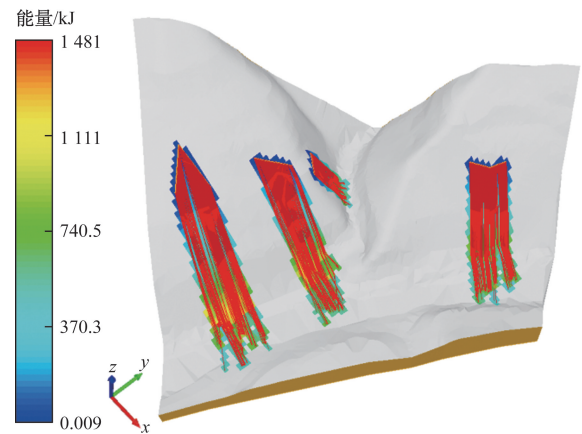
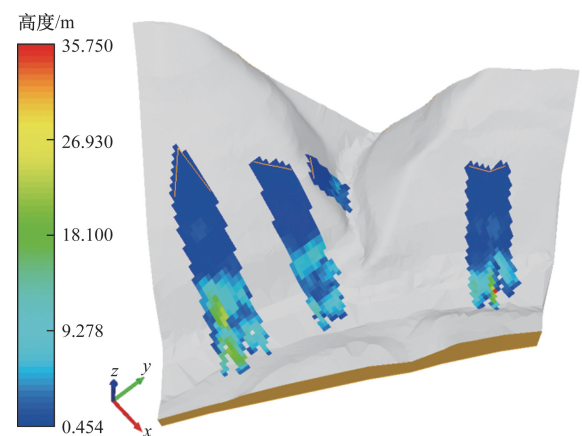
### 3.2 崩塌处治建议

#### 3.2.1 危岩清除

针对危岩稳定性分析和崩塌灾变机制进行分析,并通过运动学三维模拟获得自然斜坡危岩崩塌后的落石最大冲击能量为  $1.522 \times 10^4$  kJ。这一计算结果表明,在针对工作区危岩进行防治设计时,坡表清危是首要的<sup>[19]</sup>。

将尺寸大于  $0.40 \text{ m}^3$  的危岩清除后,工作区落石运动学计算如图 7 所示。可见,落石最大冲击能量为 1 481 kJ,其位置处于 G351 路面。

如图 8 所示,从弹跳高度来看,清除大于  $0.40 \text{ m}^3$  危岩后工作区落石沿运动轨迹呈“沿坡面滚动→撞击国道 351 路面附近后弹跳→东河河床及岸坡停积”的

图 7 大于  $0.40 \text{ m}^3$  危岩清除后落石运动能量计算图 8 大于  $0.70 \text{ m}^3$  危岩清除后落石弹跳高度计算

阶段性运动特征,弹跳高度最大值为 35.75 m,在 G351 路面位置弹跳高度为 0.4~18.0 m。

显然,大粒径危岩清除后,落石冲击能量及弹跳高度均已处于工程措施可防可控范畴。

#### 3.2.2 被动防护网+明洞+框架锚杆

山区公路危岩崩塌防治,应综合发育规律、分布位置、成灾特征和构筑物布设空间等因素确定。针对图 1 所示的 4 处危岩带,清危后处置措施分别如下。

(1)WYD1、WYD2。该段斜坡危岩高陡,岩体发育顺倾结构面,原位清除方量大、锚固耐久性差。综合原路利用改造、防灾要求与正常使用功能,在原有的主动网基础上,推荐采用垫墩锚索进行处治,在减少治理时间成本与经济成本的同时,可满足 K3062+350~K3062+550 段灾害防治需求。

(2)WYD3。考虑场区危岩高位发育且规模较大,场区受构造挤压、自然风化和地震等内外动力扰动明显,危岩难以彻底清除;危岩锚固高程、面积使得施工难度偏大,且不符合工作区绿美生态本底

的保护和发展。建议坡表清危后,设置主动防护网覆盖 WYD1,并增设拱形明洞防护。

(3)WYD4。类比工作区斜坡灰岩裸露位置既有处治,针对 K3061+630~K3061+760 段未防护边坡的灰岩危岩区 WYD4,建议采用 APS-150/P 系列主动防护网进行加覆盖,固网锚杆采用 2 $\phi$ 16 mm 锚杆,顶排 3.0 m 长,下部 2.0 m 长,以避免落石及崩塌后新鲜面对临近已加固边坡的扰动破坏。

#### 4 结论

本文以雅安市宝兴县国道 351 线联新村危岩崩塌为例,探讨川西山区公路危岩崩塌发育特征,采用 RocPro3D 软件模拟分析落石三维运动学特征,并进行灾损评价,最后结合工程地质条件探讨综合防治措施。所得主要结论如下。

(1)构造侵蚀高中山区,受河流下切、构造挤压、降雨冲刷、风化卸荷等因素影响,研究区发育 4 处危岩带,其危岩形成特征具有一致性。经计算,强降雨和强震是诱发工作区危岩失稳的典型因素,稳定系数将明显降低。

(2)RocPro3D 软件直观地再现落石的运动特征,更科学地量化评价崩塌灾害影响,为灾害防治提供支撑。

(3)运动学模拟计算表明,研究区危岩崩塌后冲击能量为  $1.522 \times 10^4$  kJ,落石主要停积国道 351 路面和东河岸坡,严重影响公路通行安全。

(4)大粒径危岩清除后研究区崩塌落石的冲击能量显著降低,最大值约为 1 481 kJ;落石沿运动轨迹呈“沿坡面滚动→撞击国道 351 路面附近后弹跳→东河河床及岸坡停积”的阶段性运动特征,弹跳高度最大值为 35.75 m,在 G351 路面位置弹跳高度为 0.4~18.0 m。

(5)建议分区段因地制宜采用“危岩清除+主动防护网+明洞+垫墩锚索”的综合方案,能够有效治理川西山区公路危岩崩塌地质灾害。

#### 参考文献

- [1] 许乐红,谭捍东,吴萍萍,等. 龙门山断裂带南段地壳电性特征:来自速度结构约束下大地电磁反演的证据[J]. 地球物理学报, 2022, 65(9): 3434-3450.
- [2] 魏正发,严慧珺,应忠敏,等. 西宁北山山前崩塌形成机理及防治[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(20): 8597-8605.
- [3] 何云勇,郭成超,张乐,等. 名山组泥岩顺层边坡原位直剪试验及开挖模拟[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(36): 15634-15641.
- [4] 徐金霞,郭海燕,邓国卫,等. 山洪灾害临界雨量确定方

法对比研究——以雅安名山河流域为例[J]. 自然灾害学报, 2024, 33(3): 89-99.

- [5] 牟家琦,庄建琦,王世宝,等. 基于深度神经网络模型的雅安市滑坡易发性评价[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34(3): 157-168.
- [6] MAHMOOD S, ATIQUÉ F, REHMAN A, et al. Rock-fall susceptibility assessment along M-2 Motorway in Salt Range, Pakistan [J]. Journal of Applied Geophysics, 2024, 222: 105312.
- [7] YIN Y P, WANG L Q, ZHANG W G, et al. Research on the collapse process of a thick-layer dangerous rock on the reservoir bank [J]. Bulletin of Engineering Geology and Environment, 2022, 81(3): 109.
- [8] 张致伟,龙锋,石富强,等. 2022年6月1日四川芦山 M<sub>S</sub>6.1 地震的发震构造与力学机制探讨[J]. 地球物理学报, 2023, 66(10): 4095-4110.
- [9] 祁生文,伍法权. 高地应力地区河谷应力场特征[J]. 岩土力学, 2011, 32(5): 1460-1464.
- [10] 黄润秋. 岩石高边坡发育的动力过程及其稳定性控制 [J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(8): 1525-1544.
- [11] 黄润秋. 中国西部岩石高边坡应力场特征及其卸荷破裂机理[J]. 工程地质学报, 2004, 12(S1): 7-13.
- [12] MASTRANTONI G, SANTICCHIA G, COSENTINO A, et al. Automatic photo monitoring analysis for spatio-temporal evaluation of rock fall failure hazard [J]. Engineering Geology, 2024, 339: 107662.
- [13] 王睿,阿发友,黄胜东,等. 高陡边坡危岩体运动学参数与防治措施研究[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(15): 62-68.
- [14] MU Y Q, SONG Q T, LU Z, et al. Evaluation of the collapse susceptibility of loess using machine learning [J]. Transportation Geotechnics, 2024, 48: 101327.
- [15] GUO J, ZHANG Y, LI Y, et al. Model experimental study on the mechanism of collapse induced by leakage of underground pipeline [J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): 17717.
- [16] 杜岩,张洪达,谢谟文,等. 大型危岩体崩塌灾害早期监测预警技术研究综述[J]. 工程科学与技术, 2024, 56(5): 10-23.
- [17] ZHANG J, FENG X, WU A, et al. Critical early warning of underground debris flows in mines based on rainfall-collapse characteristics [J]. Natural Hazards, 2024, 121(1): 423-445.
- [18] NASRULLA H, KIAN I L, KHAN S, et al. Land subsidence resulting from reservoir overexploitation and karez collapse in Mastung and Quetta Districts, Baluchistan, Pakistan [J]. Environmental Earth Sciences, 2024, 83(16): 455.
- [19] MUTLUHAN A, İSMAIL D, ÖZGÜN A O, et al. Assessment of the effectiveness of a rock fall ditch through 3-D probabilistic rock fall simulations and automated image processing [J]. Engineering Geology, 2021,

- 283; 106001.
- [20] 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.
- [21] 张乐, 陈沛, 向波, 等. 基于运动学三维模拟的山区公路崩塌灾损评价及治理[J]. 地质科技通报, 2025, 44(2): 104-115.
- [22] 贺铮, 谢谟文, 吴志祥, 等. 基于 MEMS 技术的拉裂型边坡危岩体临崩倾斜变形特征现场实测研究[J]. 岩土力学, 2024(11): 1-16.
- [23] 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.
- [24] 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): 10-19.

## Development Characteristics and Damage Assessment of Hazardous Rockfalls at the Intersection of Mountain Roads: A Case Study of Bingyang Gulch in Baoxing County

LI Ying<sup>1</sup>, ZHANG Le<sup>1</sup>, YI Xianbin<sup>1</sup>, GONG Zhen<sup>1</sup>, XU Hongbiao<sup>1</sup>,  
GUO Sheng<sup>2</sup>, LI Liangxi<sup>3</sup>, LIU Zhengwei<sup>4</sup>

(1. Sichuan Highway Planning, Survey, Design and Research Institute Ltd., Chengdu 610041, China;

2. Sichuan Provincial Transportation Key Project Work Center, Chengdu 610041, China

3. Chengdu Engineering Co. Ltd., China Railway Fifth Bureau Group, Chengdu 610041, China;

4. Sichuan Road and Bridge Group Co. Ltd., Chengdu 610041, China)

**Abstract:** The terrain and geological conditions in the mountainous area of western Sichuan are complex and changeable. Dangerous rocks are mostly developed in high and steep slope sections, which pose a serious threat to the safety of highway traffic after collapse. Taking the tail perilous rock of Qiaoqi Reservoir in Baoxing County of Ya'an City as an example, the basic characteristics of perilous rock were analyzed by means of UAV aerial survey and field investigation. Rocpro3 D software was used to simulate the three-dimensional kinematics to evaluate the collapse damage. Finally, the treatment suggestions are given for the dangerous rock in the working area. The results show that the formation of dangerous rock in the working area is caused by the combined action of tectonic compression, rainfall erosion and weathering unloading. Strong rainfall and strong earthquake are the typical causes of dangerous rock collapse. The maximum impact energy after the collapse of dangerous rock in the working area is more than 5000 kJ, and the removal of large-size dangerous rock can effectively reduce the impact energy value. After the collapse of the dangerous rock in the working area, it shows the stage motion characteristics of rolling along the slope → bouncing after hitting the road surface near the surface of the 351 national highway → stopping the accumulation of the riverbed and bank slope of the East River. The treatment scheme of dangerous rock removal+passive protection network+open hole+frame anchor rod can be used for prevention and control.

**Keywords:** highway; dangerous rock collapse; kinematics simulation; developmental characteristics; disaster damage evaluation; geological disaster management