

公路高位崩塌成因及防治

陈松¹, 杨旭¹, 邵江², 周擎², 赵海松²

(1. 阿坝州建设投资有限公司, 四川 汶川 623000; 2. 四川省公路规划勘察设计研究院有限公司, 成都 610041)

摘要: 随着山区公路建设的快速发展, 高位崩塌灾害频发, 严重威胁公路交通安全。基于川西高原雅西公路典型高位崩塌案例, 通过地质调查、数值模拟分析, 揭示了高位崩塌的成因机制, 分析了崩塌能量, 提出了分级被动防护+监测的防治方法。结果表明, 不利的地形地质条件是基础因素, 长期风化加剧了结构面劣化, 降雨是诱发因素, 雨水入渗导致危岩体蠕变进而发展为崩塌; 采用被动网+明洞+智能监测系统的防治方法可有效对崩塌进行治理, 防护方案可在峡谷地貌区推广使用。

关键词: 高位崩塌; 成因; 防治方法

中图分类号: U416 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2025)14-0173-06

高位崩塌是指发生在地形高陡的斜坡或悬崖顶部的岩土体突然失稳, 脱离母体并以高速崩落、滚动或跳跃形式向下运动的自然灾害现象。其核心特征在于崩塌源区位于高位, 垂直高差达数十米至数百米, 具有高势能、突发性强、破坏力大的特点^[1]。山区公路多沿河谷展布, 两岸山高坡陡, 受地质构造、风化卸荷等影响, 常形成高位崩塌, 如2019年成昆线埃岱站位置抢险期间突发高位岩崩, 瞬间掩埋坡脚的临时工棚, 造成24人遇险、13人死亡; 2020年9月20日, 四川省石棉县境内雅西高速姚河坝大桥右侧山体发生崩塌, 砸塌姚河坝大桥右幅两孔桥梁, 造成全线交通中断^[2]; 2017年6月24日四川省茂县叠溪镇新磨村新村组后山约 $450 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的山体发生高位崩滑, 导致10人死亡和73人失踪, 并导致1500 m道路中断^[3-5]。

高位崩塌成因多样, 黄海韵^[6]探讨了水城县鸡场镇岩脚组崩塌成因机制, 认为影响崩塌体的内在因素主要包括地质构造、岩体结构特征、地形地貌, 外在因素主要包括降雨和人类工程活动工程; 魏芊惠等^[7]表明断层对上盘岩体崩塌有一定控制作用; 魏荣誉等^[8]分析了石泉县公路崩塌灾害成灾机制, 认为崩塌主要是受风化卸荷及雨水入渗诱发; 魏正发等^[9]认为崩塌的形成是多方面作用的结果, 互层

岩组是崩塌发育的物质基础, 构造及风化作用提供、加剧了崩塌的形成; 吕艳等^[10]认为峡谷区崩塌机理表现为多样的地层岩性组合孕崩、高陡的地形地貌育崩、复杂的岩体结构面控崩、岩溶和集中降水诱崩的四要素耦合; 刘东泽等^[11]研究认为水位骤降与强降雨同时作用下对新田崩塌体的变形影响很大; 李洪涛等^[12]对软硬互层地质条件下分析得出崩塌更容易发生在上部陡崖, 而下部陡崖主要发生局部剪切破坏。现阶段高位崩塌的治理措施常采用主动及被动的防护措施, 并结合排水及监测综合治理, 主动防护包括清危、主动网、锚固等, 被动防护包括拦石墙、落石槽、被动网、钢架格栅、明洞等^[13-18]。

目前大量的学者研究了崩塌的成因机制及防治方法, 取得较为丰硕的成果。由于高位崩塌能量大、地形陡峭, 主动防护困难, 本文结合高位崩塌特征, 提出多级被动防护+智能监测系统的防治方法, 并以川西高原雅西高速公路典型高位崩塌为案例进行了验证, 说明了防治方法的可靠性。

1 高位崩塌特征与破坏模式

1.1 崩塌特征

1.1.1 地形特征

高位崩塌通常发生在坡度大于 45° 的陡崖或

收稿日期: 2025-03-05

基金项目: 四川省交通运输科技项目(2021-A-02; 2021-A-07); 四川省公路规划勘察设计研究院有限公司自立项目(2022-YL-02)

作者简介: 陈松(1985—), 男, 四川大竹人, 硕士, 工程师, 研究方向为公路勘察设计与建设管理及灾害治理; 通信作者杨旭(1987—), 男, 四川安岳人, 工程师, 研究方向为公路管理及灾害治理; 邵江(1972—), 男, 四川巴中人, 博士, 正高级工程师, 研究方向为公路勘察设计及相关领域; 周擎(1979—), 男, 四川成都人, 高级工程师, 研究方向为公路勘察设计及相关领域; 赵海松(1989—), 男, 云南宣威人, 高级工程师, 研究方向为公路勘察设计及相关领域。

斜坡上部,垂直高差达数十米至数百米,能为崩塌提供较高势能条件。崩塌体周围临空较好,多位于陡崖、山脊、凸出山嘴、凹岩腔上部或人工切坡顶部。

1.1.2 地质特征

场地周边一般搞槽发育,常见于软岩互层及裂隙发育的岩层,或存在软弱夹层、断层破碎带的区域,岩体完整性差,存在一组或多组外倾不利结构面。

1.2 破坏模式

崩塌的失稳破坏模式比较复杂,一般是以一种形式为主,几种形式复合进行的,并且某些组合模式在发展过程中也可转化为另一种组合模式。一般可分为以下五种模式。

1.2.1 倾倒式

该类危岩体后缘受反倾结构面切割贯通,因底部支撑丧失,发生向前倾倒并碎裂。力学机制表现为力矩失衡导致岩体绕底部支点旋转倾倒,比较典型的如鄂西赵家岩崩塌等^[19]。

1.2.2 滑移式

后缘拉裂与前缘滑移联合作用,岩体分段破坏,崩落过程分阶段:先拉裂后滑移,最后整体崩落,多发育于高陡斜坡且存在多组结构面交叉区域。力学机制为结构面抗剪强度不足,剪切破坏引发滑动失稳,比较典型的如四川省 S303 线卧龙至巴郎山段 K70+340~K70+388 处崩塌^[20]。

1.2.3 坠落式

该种模式通常未见有倾向坡外的结构面,主要是受自重引起的剪切力和拉张力的作用,剪应力高度集中的部位,上部有突出的悬崖岩体,岩体下部悬空。力学机制为在重力长期作用下,当危岩体重心偏移至倾覆点之外后,在暴雨、地震等外力作用下,下部岩体可能被剪断时,发生坠落式崩塌。

2 高位崩塌诱发因素

2.1 降雨

高位崩塌区域内一般地形陡峭且节理裂隙发育,雨期形成的裂隙水由于岩体内裂隙发育,贯通性好,降水易沿裂隙下渗,渗水集聚易软化结构面,降低了危岩与稳定岩体之间的摩擦力,加速了裂隙的扩展与贯通,在雨季还要产生暂时性水效应,充满裂隙中的水及其流动对潜在的危岩产生动水和静水压力,更易于危岩失稳,促进危岩体向崩塌破坏产生。

2.2 地震

由于地震的强烈震动,降低了边坡岩体中各种结构面强度,其岩体的稳定性也会降低,危岩体在地震面波的反复振动冲击下发生位移、错动,直至完全脱离母岩,发生崩塌,地震为危岩形成破坏的突发因素。

2.3 工程扰动

由于是高位崩塌,因此工程开挖后边坡高度大,开挖中破坏了原有的岩体质量和完整性,并使边坡岩体原有的应力状态发生变化,岩体应力重分布,原来岩体也随之发生变形与破坏,在变形发展与破坏过程中,除岩体内部结构与外形不断发生变化外,岩体的应力状态也随之调整,并引起弹性能的积存和释放等效应,卸荷回弹明显,产生卸荷蠕变,在高陡临空下,易发生高位崩塌。

2.4 风化卸荷

在长期风化动力作用下,不仅引起危岩切割面中未贯通的岩体物理力学性质逐步降低,而且导致切割面趋于贯通,当未贯通岩体抗拉、抗剪强度不足以抵消危岩自身重力产生的下滑分力时,危岩即产生崩塌,风化作用为决定危岩稳定的长期诱发因素。

3 防治方法

3.1 崩塌能量计算方法

Rocfall 是一款专为岩崩风险评估设计的统计分析软件,广泛应用于地质工程、土木工程及环境科学等领域。该软件能够帮助用户对斜坡进行详尽的分析,包括落石的动能、速度、弹跳高度以及滚动终点的位置预测。通过 Rocfall 软件,工程师和研究人员可以更准确地评估潜在的岩崩风险,从而制定更为有效的防护措施。

3.2 防治措施

高位崩塌山高坡陡,崩塌点至公路一般高差大,冲击能量大,大多情况下,由于地形陡峭,主动治理困难,且辅助措施工程费用高。本文针对公路工程提出多级被动防护+智能监测系统的防治方法。针对公路设置明洞进行保护,上部设置多级被动网或拦石墙进行防护,并对危岩稳定性及明洞结构受力性能进行监测。高位崩塌典型防治断面如图1所示。

4 工程案例

4.1 场地工程地质条件

研究区处于川西高原与四川盆地之间的剥蚀、

侵蚀构造高中山区。受地质构造及岩性的制约,区域内山脉水系多顺构造迹线呈南北向展布,山高坡陡,沟谷深切。区内晋宁期花岗岩(γ_2),呈暗紫红色,主要矿物成分为石英、斜长石及钾长石,中~粗粒等粒结构,块状构造,为硬质岩。

区域性断裂为尖顶山断裂、宰羊断裂、金坪断裂、相家沟断裂,其中金坪断裂属活动性断裂,受构造影响主要发育3组节理,岩体被切割成块状、碎块状结构。典型节理面照片如图2所示。

J1:产状为 $315^\circ\sim 344^\circ\angle 55^\circ\sim 85^\circ$,可见延伸为10~20 m,发育间距为0.5~3 m;裂面较平直,浅部微张-张开,最大开度为5 cm,见泥质或风化碎屑物松散充填,结构面结合程度为差-很差;深部呈微张状,结构面结合程度一般,多倾向坡外。

J2:产状为 $250^\circ\sim 270^\circ\angle 60^\circ\sim 78^\circ$,可见延伸长度为10~40 m,发育间距为0.5~3 m。裂面大多平直,局部呈波状起伏,浅部微张-张开,最大开度为20 cm,局部见黏土或风化碎屑物充填,结构面结合程度为差-很差;深部闭合-微张,局部见方解石

脉充填,结构面结合程度为差-一般,为主控结构面,多倾向坡外。

J3:产状为 $180^\circ\sim 210^\circ\angle 20^\circ\sim 45^\circ$,可见延伸一般为2~15 m,切割深度一般为2~5 m,发育间距为0.5~2 m。裂面平直,微张~张开,多无充填,结构面结合程度为差-一般。

研究区处于四川盆地与川西高原过渡的较强活动断裂区,晚近期断裂活动与地震活动性均较强,区域稳定性为一般-较差。据史料记载,该区曾发生5级以上地震15次,其中高达7.5级以上的有两次,震中大都呈带状分布,震级等值线延伸方向与区域主要构造线基本一致。工作区地震基本烈度为7度,地震动峰值加速度为 $0.15g$ (g 为重力加速度),地震动反应谱特征周期为0.45 s。

场地内花岗岩位于开采区内,形成高为50~100 m的高边坡,开采方法以爆破为主,开采区内花岗岩岩质新鲜,但普遍存在厚为3~5 m的爆破松动带和裂隙发育带。场区内主要人类工程活动有花岗岩采石场以及高速公路修建,其中花岗岩采石场采石后形成陡崖,受原有节理裂隙切割,加之爆破松动影响,陡崖形成危岩带。整体上人类活动强烈,对地质环境的影响、破坏严重。场地内地貌照片如图3所示。

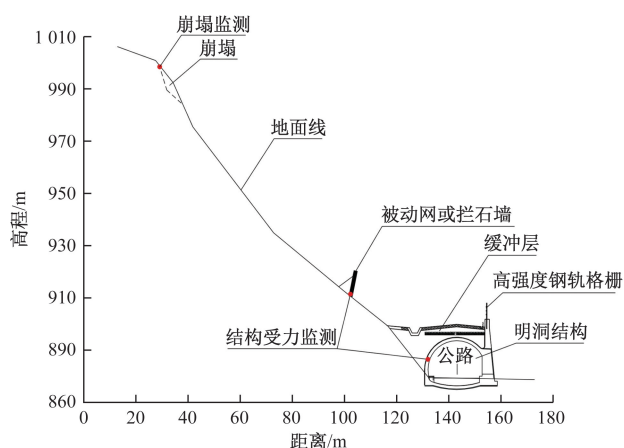


图1 高位崩塌典型防治断面



图2 典型节理面图片



图3 场地地貌照片

4.2 崩塌概况

2020年9月14日雅西高速公路小堡明洞段左侧约130 m处部分危岩在J1、J2、J3节理切割下发生崩塌破坏,破坏模式为滑移式崩塌,如图4所示。崩塌方量为 $15\text{ m}\times 16\text{ m}\times 4\text{ m}$,共计 960 m^3 ,最大崩塌单体为 $2.4\text{ m}\times 2\text{ m}\times 3.5\text{ m}$ (图5)。崩塌体距离公路高差约为113 m,最远崩落水平距离为131 m。

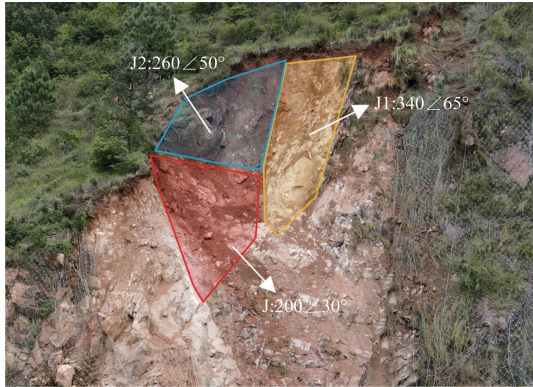


图 4 滑移式崩塌



图 5 最大崩塌单体(2.4 m×2 m×3.5 m)

4.3 崩塌成因

崩塌区受采石等工程影响,地形高陡,地面坡度为 $55^{\circ} \sim 70^{\circ}$;岩体受多期构造影响,岩体破碎,在多组结构面组合下形成外倾不利结构面,加之采石切坡后受爆破影响结构面松动,岩体完整性差。

采石切坡后至本次崩塌间隔约为 15 年,其间外倾结构面不断差异风化,强度逐渐降低。

崩塌期间正值雨季,崩塌成因为受降雨影响,降水沿裂隙下渗,软化结构面,加之 J1 与 J2 裂面局部冲水,结构面劣化加之水压力作用下,危岩体在自重作用下沿软弱结构面发生蠕变,当变形达到阈值时,危岩体发生滑移式崩塌。

综上,不利的地形地质条件是基础因素,长期风化加剧了结构面劣化,降雨是诱发因素,雨水入渗导致危岩体蠕变进而发展为崩塌。

4.4 失稳后运动

采用 RocFall 软件分析计算危岩失稳后的运动情况,主要包括危岩崩塌后的运动距离、弹跳高度及动能。落石和坡面碰撞系数如表 1 所示。岗岩天然密度取 2.45 g/cm^3 。危岩崩落轨迹模拟如图 6

所示,模型结果与实际相符。总能量包络线如图 7 所示,公路附近最大能量约为 $1.3 \times 10^4 \text{ kJ}$ 。

4.4 防治方案

由于崩塌体附近斜坡高陡,主动防护困难,采用多级被动防护+监测的综合防治方案。根据计算明洞最大防护能级 $8.55 \times 10^3 \text{ kJ}$,明洞不能承受全部冲击能量,因此需在上方设置防护措施,消减能量。拟增设两道防护能级 $3 \times 10^3 \text{ kJ}$ 的被动防护网。综合治理方法为两道被动防护网+明洞+危岩稳定性及明洞结构受力性能监测。具体参数如表 2 所示。

表 1 落石和坡面碰撞系数

碰撞系数	强风化花岗岩表面	沥青路面	人工堆积块石表面	有少量植被的块石表面
法向弹性系数 R_n	0.35	0.33	0.28	0.30
切向摩擦系数 R_t	0.85	0.83	0.79	0.81

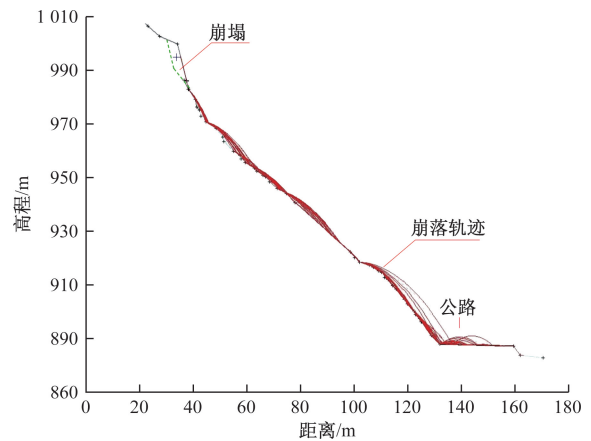


图 6 危岩崩落轨迹模拟

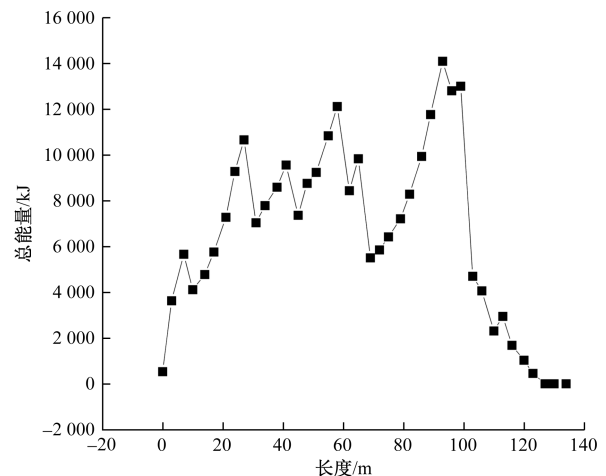


图 7 崩塌总能量包络线

表2 明洞结构参数

结构类型	拱墙衬砌	仰拱	回填坡率
明洞结构	60 cm 钢筋砼 ($\phi 25@15$)	60 cm 钢筋砼 ($\phi 25@15$)	1:5/1:20

注:钢筋砼采用C40砼。

4.5 治理效果

如图8所示,治理完成至今已3年,未见明洞出现变形破坏现象,治理效果良好。



图8 治理后运行情况

5 结论

基于川西高原雅西公路典型高位崩塌案例,通过地质调查、数值模拟分析,分析了高位崩塌成因机制,提出了相应防治方法,主要得到以下结论。

(1)高位崩塌诱发因素主要包括地震、工程扰动、风化卸荷,在一种或多种因素诱发下导致了高位崩塌的发生。

(2)高位崩塌区山高坡陡,冲击能量大,由于地形陡峭,主动治理困难,且辅助措施工程费用高。本文针对公路工程提出多级被动防护+智能监测系统的综合防治方法。

(3)不利的地形地质条件是基础因素,长期风化加剧了结构面劣化,降雨是诱发因素,雨水入渗导致危岩体蠕变进而发展为崩塌。

(4)针对雅西高速公路高位崩塌采用 RocFall 软件分析计算危岩失稳后的运动情况,公路附近最大能量约为 1.3×10^4 kJ,采用两道被动防护网+明洞+危岩稳定性及明洞结构受力性能监测的综合防治方案,治理效果良好,防护方案可在峡谷地貌区推广使用。

参考文献

[1] 李元灵,刘建康,张佳佳,等. 藏东察达高位崩塌发育特征及潜在危险[J]. 现代地质, 2021, 35(1): 74-82.
[2] 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.
[3] 殷跃平,王文沛,张楠,等. 强震区高位滑坡远程灾害特征研究:以四川茂县新磨滑坡为例[J]. 中国地质, 2017, 44(5): 827-841.
[4] 许强,李为乐,董秀军,等. 四川茂县叠溪镇新磨村滑坡特征与成因机制初步研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(11): 2612-2628.
[5] ZHAO S Y, CHIGIRA M, WU X Y. Buckling deformations at the 2017 Xinmo landslide site and nearby slopes, Maoxian, Sichuan, China [J]. Engineering Geology, 2018, 246: 187-197.
[6] 黄海韵. 水城县鸡场镇岩脚组崩塌成因机制及稳定性分析[J]. 科技和产业, 2021, 21(2): 269-273.
[7] 魏芊惠,王洪建,王永博,等. 控制断层作用下高陡岩质边坡稳定性分析——以昭通市红石岩边坡为例[J]. 科技和产业, 2024, 24(13): 279-285.
[8] 魏荣誉,柴利娜,王念秦,等. 石泉县公路崩塌灾害调查及防治技术探讨[J]. 公路, 2023, 68(10): 325-328.
[9] 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.
[10] 吕艳,马瑞霞,王祚鹏,等. 太行山青龙峡景区崩塌灾害发育特征及防治对策[J]. 地球科学与环境学报, 2022, 44(4): 593-604.
[11] 刘东泽,谭燕,卢应发. 基于库水位涨落与降雨耦合作用下新田崩塌体变形分析[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(31): 13238-13247.
[12] 李洪涛,吴勇,冷洋洋,等. 贵州软硬互层地质条件下典型崩塌稳定性分析[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(2): 465-472.
[13] 谭捍华. 明洞在高等级公路崩塌治理中的应用[J]. 公路, 2007(5): 16-19.
[14] 徐伟,冯文凯,郭少文,等. 彝良县大石盘组崩塌机理及防治对策[J]. 安全与环境工程, 2018, 25(4): 33-40.
[15] 孙莹洁,潘尚涛,田静成. 林海-宏图公路崩塌灾害成因及其防治措施[J]. 公路, 2014, 59(6): 17-21.
[16] 李壮,杨志全,朱颖彦,等. 溜石坡崩塌体运动过程与防治措施研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2021, 17(6): 173-179.
[17] 杨岚峣,易武,黄晓虎,等. 基于数值模拟的危岩崩塌特征及防治研究[J]. 水电能源科学, 2023, 41(3): 132-135.
[18] 金鹏,梅本强,何恩怀,等. 川西山区公路危岩发育特征及崩塌防治措施[J]. 科技和产业, 2025, 25(1): 56-61.
[19] 曾芮,姜明顺,孙琳旭,等. 强降雨条件下岩质边坡倾倒崩塌破坏机理——以鄂西赵家岩崩塌为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2018, 29(3): 12-17.
[20] 李鹏,苏生瑞,黄宇,等. 震裂-滑移式崩塌形成机制及变形规律研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(12): 3576-3582.

Causes and Prevention of High-position Collapse in Highways

CHEN Song¹, YANG Xu¹, SHAO Jiang², ZHOU Qing², ZHAO Haisong²

(1. Aba Prefecture Construction Investment Co. Ltd., Wenchuan 623000, Sichuan, China;

2. Sichuan Highway Planning, Survey, Design and Research Institute Ltd., Chengdu 610041, China)

Abstract: With the rapid development of mountain highway construction, frequent high-positioned collapse disasters have posed serious threats to road traffic safety. Based on a typical high-positioned collapse case along a highway in the western Sichuan Plateau, geological surveys and numerical simulation analysis were employed to reveal the formation mechanisms of high-positioned collapses, analyze collapse energy, and propose a hierarchical passive protection combined with monitoring prevention method. The results indicate that unfavorable topographic and geological conditions serve as fundamental factors, with long-term weathering exacerbating structural plane deterioration. Rainfall acts as a triggering factor, where rainwater infiltration induces creep deformation of unstable rock masses leading to collapse development. The prevention method utilizing passive nets, open-cut tunnels, and intelligent monitoring systems proves effective for collapse control. This protection scheme can be promoted for application in canyon geomorphological regions.

Keywords: high-position collapse; formation mechanism; prevention and control methods