

基于生态协调的景区崩塌地质灾害综合治理

——以北京石门山景区为例

刘文清

(北京市矿产地质研究所, 北京 101500)

摘要: 景区地质灾害不仅对自然景观和生态环境造成破坏, 还严重威胁游客的生命安全。本文对北京石门山景区崩塌地质灾害特征进行介绍, 对危岩体的规模、破坏模式和稳定性进行系统分析, 结合景区位置、灾害规模和内部交通条件, 对多种治理方法进行比选分析, 通过采用上部清理危岩浮石、底部挡墙防护及避让的综合治理措施, 最大程度地保护景区的自然景观、自然资源和游客人身安全, 探索出与景区风景相协调且经济合理的治理方案, 以期对类似景区地质灾害治理提供一定借鉴。

关键词: 地质灾害; 崩塌; 综合治理; 自然景观; 挡墙; 避让

中图分类号: P642.21; TU753 **文献标识码:** B **文章编号:** 2096-9686(2025)04-0146-08

Comprehensive management of collapse geological hazards in scenic areas based on ecological coordination: A case study of Shimenshan scenic area, Beijing

LIU Wenqing

(Beijing Institute of Mineral Geology, Beijing 101500, China)

Abstract: Geological disasters in scenic areas not only damage natural landscapes and ecological environments but also pose serious threats to tourists' safety. This paper introduces the characteristics of collapse geological hazards in Beijing Shimenshan scenic area, systematically analyzes the scale, failure modes, and stability of unstable rock masses. By comparing various treatment methods while considering the scenic area's location, hazard scale, and internal traffic conditions, comprehensive management measures were proposed including upper-level clearance of loose rocks, bottom retaining walls and hazard avoidance. These integrated solutions aim to maximally protect the scenic area's natural landscape, ecological resources, and tourist safety while exploring an economically reasonable treatment scheme harmonized with the scenic environment. The research outcomes are expected to provide valuable references for geological hazard management in similar scenic areas.

Key words: geological hazards; collapse; comprehensive treatment; natural landscape; retaining wall; avoidance

0 引言

北京作为中国的历史文化名城和国际旅游胜地, 境内山区分布广泛, 山谷型风景区资源丰富。近年来, 北京山区地质灾害频发, 对自然景观和生态环境造成破坏, 更严重威胁游客的生命安全, 给景区管理带来巨大挑战。山谷型风景区地质条件复杂, 地质岩体在长期风化剥蚀、雨水冲刷和冻融

等条件下, 极易发生地质灾害^[1]。风景区的地质灾害治理需兼顾与当地自然风景相统一, 综合考量景区内交通条件及施工运输成本等因素, 在保留景区的自然景观和特色的同时, 最大程度的消减地质灾害隐患, 因此治理方法的选择极为重要^[2]。

国内外在崩塌地质灾害治理方面已取得诸多研究成果, 目前国内崩塌灾害治理技术主要有主动

收稿日期: 2025-03-16; 修回日期: 2025-04-21 DOI: 10.12143/j.ztgc.2025.04.019

作者简介: 刘文清, 女, 汉族, 1979年生, 高级工程师, 水文地质与工程地质专业, 主要从事水工环地质工作, 北京市密云区园林东路6号, 17219437@qq.com。

引用格式: 刘文清. 基于生态协调的景区崩塌地质灾害综合治理——以北京石门山景区为例[J]. 钻探工程, 2025, 52(4): 146-153.

LIU Wenqing. Comprehensive management of collapse geological hazards in scenic areas based on ecological coordination: A case study of Shimenshan scenic area, Beijing[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(4): 146-153.

防护、被动防护以及其他辅助技术等相结合的联合技术^[3],例如,长江三峡库区巫峡多处危岩体采用了“基座岩体加固+板肋式锚杆挡墙+预应力锚索”,“清危+锚固+主动防护网”的组合治理方案^[4]。FAST(中国天眼)工程台址区崩塌地质灾害综合治理工程采用了“清理、支撑、锚固、防护、拦截、封填、灌浆、抗滑桩、排水”等综合治理措施,对台址区排查出的危岩及崩塌堆积体进行了有效治理^[5]。北京百泉山景区崩塌治理采用了“清危+格构锚固+裂隙灌注+警示护栏”等综合治理措施^[1]。这些工程在治理过程中都兼顾了自然景观。

本文以北京石门山景区的崩塌地质灾害典型实例进行分析,以期类似地质灾害治理提供参考。

1 崩塌灾害基本特征

1.1 景区概况

石门山景区位于北京市怀柔区怀北镇干河峪村东侧,G111国道东侧一自然沟谷内。景区距怀柔城区约30 km,距北京城区约80 km,交通较便利。地

处燕山南麓,属暖温带大陆性季风气候区,年平均气温 $6\sim 12^{\circ}\text{C}$,年降水量 $450\sim 850\text{ mm}$,多集中在6—8月。景区总面积约 2.0 km^2 ,海拔 $200\sim 920\text{ m}$,山谷相对高差 $200\sim 400\text{ m}$,地势东高西低,沟底纵坡约 13° ,山坡上陡下缓,沟谷下部、底部植被较茂密。地下水主要为基岩裂隙水和松散岩类孔隙水。岩性多为燕山晚期片麻状二长花岗岩,虽岩体坚硬,但节理裂隙极为发育,局部破碎,极易形成危岩体^[6]。

1.2 危岩体组成及规模

灾害点处于石门山景区问天石景点附近,岩性为微风化片麻状二长花岗岩,坡体走向近东西,坡向近正南,长约95 m,最大高差约46 m,平均坡度 $40^{\circ}\sim 55^{\circ}$,坡面腰部平缓,腰部及山顶部植被覆盖较好^[7]。

山坡基岩裸露,岩体节理裂隙极为发育,存在3处危岩体(WY-1、WY-2、WY-3),坡脚及谷底处堆积大量崩塌堆积物。危岩体WY-1位于山坡中上部,WY-2位于山坡中下部,WY-3位于山坡中部。本灾害点3处危岩体总体积约 368.5 m^3 ,为小型崩塌。详见图1、表1、图2。

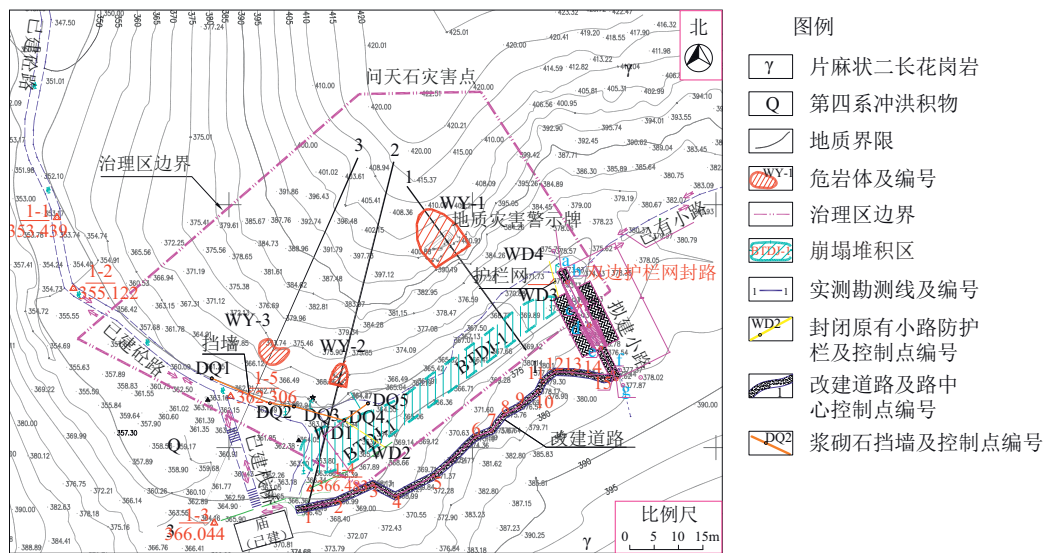


Fig.1 Geological sketch of exploration and engineering treatment of collapse disaster sites

1.3 危岩体结构特征及破坏模式

3处危岩体偶有碎块掉落,尚未发生大规模崩塌,但均呈现显著的潜在失稳特征,其危险性源于节理结构的不利组合与滑移式崩塌的潜在机制。

(1)WY-1危岩体:危岩体及其边界发育3组优势节理(图3)。①外倾节理:产状 $142^{\circ}\angle 46^{\circ}$,密度

2~3条/m,长度10~20 m,极为发育;②内倾节理:产状 $20^{\circ}\angle 10^{\circ}$,密度3~4条/m,长度1~5 m,较发育;③侧向节理:产状 $260^{\circ}\angle 80^{\circ}$,密度1~2条/m,长度5~10 m,发育一般。外倾节理自危岩体下端沿坡面向上完全贯通,并在危岩体上下两端经风化淋沥后均已发育成“楔形缝”,其稳定性主要靠两侧未

表 1 3处危岩体基本情况
Table 1 General conditions of the 3 dangerous rock mass

编号	分布高程/ m	顶底高 差/m	水平宽 度/m	沿坡面 长度/m	最大厚 度/m	规模/ m ³	沿坡面 面积/m ²	坡面产状	岩性
WY-1	394~409	15	8	19	4	292	152	顶:144°∠44°;底:144°∠55°	燕山晚期片麻
WY-2	369~373.5	4.5	3.5	6	1.5	31.5	21	顶:170°∠37°;底:170°∠50°	状二长花岗
WY-3	371~375	4	6	5	1.5	45	30	上部:220°∠36°;下部:220°∠66°	岩

注:腰部略缓,并堆积少量残坡积物,且草木旺盛。

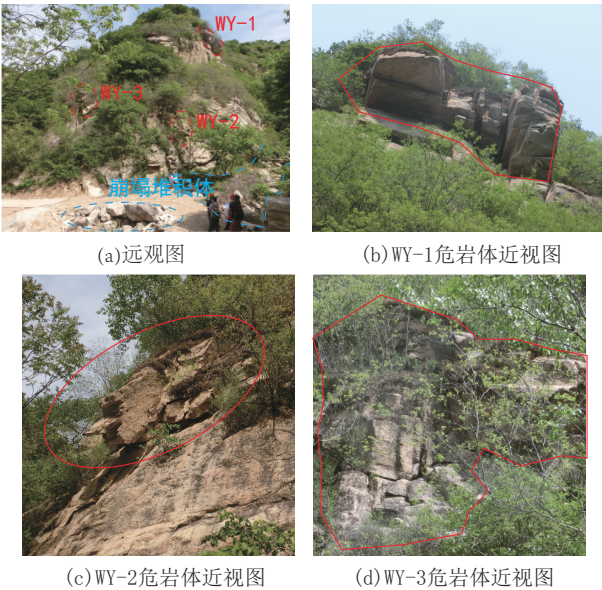


图 2 地质灾害隐患点
Fig.2 Remote view of potential geological hazard points

贯穿节理支撑,崩塌破坏模式为滑移式崩塌^[8]。

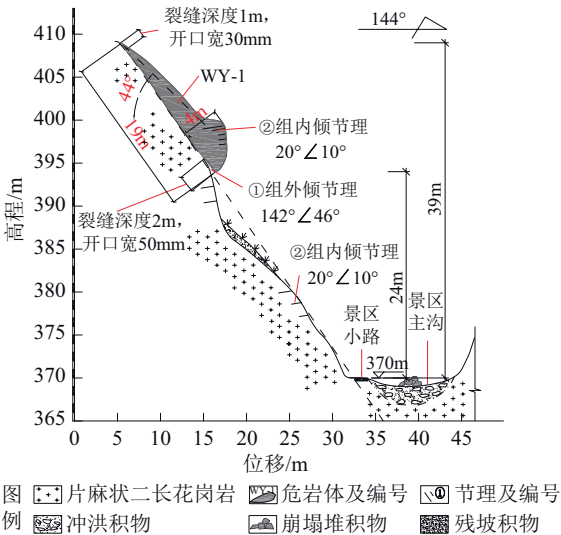


图 3 WY-1 危岩体地质剖面(1-1 剖面)
Fig.3 Geological profile of dangerous rock mass WY-1 (section 1-1)

(2)WY-2 危岩体:危岩体及其边界发育 3 组优势节理(图 4)。①外倾节理:产状 170°∠42°,密度 7~10 条/m,长度 10~15 m,极为发育;②内倾节理:产状 0°∠40°,密度 2~3 条/m,长度 1~5 m,较发育;③侧向节理:产状 85°∠80°,密度 5~9 条/m,长度 5~10 m,发育一般。外倾节理自危岩体下端沿坡面向上完全贯通,破坏模式与(WY-1)相同,为滑移式崩塌。

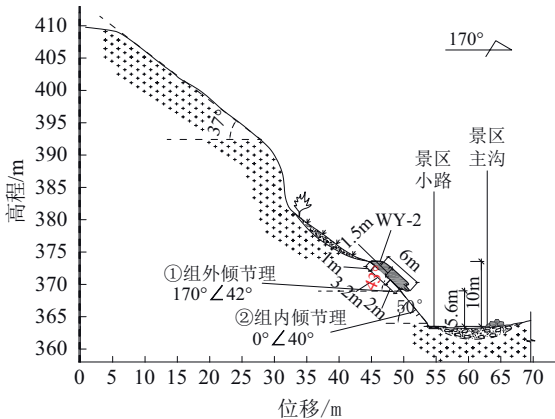


图 4 WY-2 危岩体地质剖面(2-2 剖面)
Fig.4 Geological profile of dangerous rock mass WY-2 (section 2-2)

(3)WY-3 危岩体:危岩体及其边界发育 3 组优势节理(图 5)。①外倾节理:产状 200°∠60°,密度 2~3 条/m,长度 0.5~1.0 m,发育一般;②内倾节理:产状 5°∠45°,密度 3~5 条/m,长度 2~3 m,较发育;③侧向节理:产状 260°∠76°,密度 2~3 条/m,长度 1~2 m,发育一般。外倾节理产状与坡面基本一致,危岩体与坡面接触部位的两端可见短节理,无贯通现象,破坏模式为滑移式崩塌。

2 崩塌地质灾害成因分析

本灾害点崩塌的形成主要包括地形地貌、地层

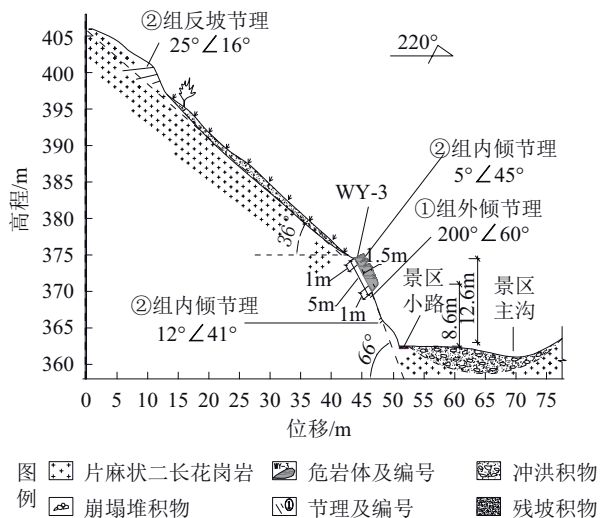


图 5 WY-3 危岩体地质剖面(3-3 剖面)
Fig.5 Geological profile of dangerous rock mass WY-3 (section 3-3)

岩性、地震、降雨、风化与根劈等因素^[9]。

(1)地形地貌:景区海拔 200~920 m,谷内相对高差 200~400 m,半山腰以上坡段陡峻,形成显著重力梯度,为崩塌提供驱动力。沟底略平缓,沟谷下部、底部植被覆盖率较高。上部陡岩裸露,沟底纵坡降约 13°,雨水冲刷严重,高角度陡倾节理发育,造就多处陡倾山体、峭壁,在凹凸不平的陡峻斜坡上易形成高陡临空面危岩体^[9]。

(2)地层岩性:景区以燕山晚期片麻状二长花岗岩为主,属单一硬质岩,多呈块状,因节理裂隙发育,局部岩体破碎,在重力作用下,被裂隙切割贯通,极易形成崩塌。

(3)地震:由于地震促使坡体裂隙扩展,岩体松动、破裂、解体,山体稳定性遭受巨大破坏,而导致崩塌。据走访,在 1976 年唐山大地震时,本景区山坡陡壁掉块严重。

(4)降雨:降雨是坡体变形发展主要因素,景区沟底纵坡降约 13°,雨水冲刷严重,雨水沿入渗,软化裂隙结构面,形成孔隙水压力,导致坡体重力加大,固结力减小。坡体饱水后自重加大,雨水浸润滑动面,加速危岩体的变形滑动。

(5)风化与根劈:本景区属于温带季风气候,危岩体受风化与根劈作用协同影响。风化作用为根劈作用创造初始裂隙条件。植被根系沿风化裂隙楔入生长,同时水分入渗,危岩体稳定性逐渐下降,尤其在凸形陡坡段,易诱发崩塌。

3 危岩体稳定性计算

3.1 理论公式计算

本灾害点危岩体失稳方式均为滑移式,本次采用“后缘无陡倾裂隙”(图 6)模型进行计算^[1]。危岩体物理力学参数见表 2。

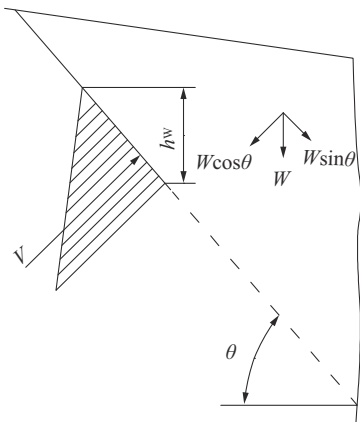


图 6 滑移式危岩稳定性计算示意(后缘无陡倾裂隙)
Fig.6 Schematic diagram for stability calculation of slipping dangerous rock (no steep fracture at the back edge)

表 2 崩塌源物理力学参数建议值
Table 2 Suggested values of physical and mechanical parameters of collapse source

参数	天然状态工况			饱和状态工况		
	重度/ (kN·m ⁻³)	c/kPa	φ/(°)	重度/ (kN·m ⁻³)	c/kPa	φ/(°)
结构面	26.4	67	30	26.7	63	28
岩体	26.4	1500	40.9	26.7	1300	40

稳定性系数按以下公式计算:

$$K = \frac{(W \cos \theta - Q \sin \theta - V) \operatorname{tg} \varphi + cl}{W \sin \theta + Q \cos \theta}$$

式中:K——危岩稳定性系数;Q——地震力,kN/m,按公式 $Q = \xi_e W$ 确定; ξ_e ——地震水平作用系数,依据《建筑边坡工程技术规范》(GB50330—2013),表 5.2.6 水平地震系数中根据地震烈度和地震峰值加速度选取,本区取 0.038;W——危岩体自重,kN/m³;V——裂隙水压力,kN/m, $V = 1/2 \gamma_w h_w^2$; h_w ——裂隙充水高度,m,本次在自然工况下取裂隙深度的 1/3,在暴雨工况下取 1/2; γ_w ——取 10 kN/m³;c——后缘裂隙黏聚力标准值,kPa,当裂隙未贯通时,取贯通段和未贯通段黏聚力标准值按长度加权和加权平均

值,未贯通段黏聚力标准值取岩石黏聚力标准值的0.4倍; θ ——软弱结构面倾角,(°),外倾取正,内倾取负; φ ——后缘裂隙内摩擦角标准值,kPa,当裂隙未贯通时,取贯通段和未贯通段内摩擦角标准值按长度加权和加权平均值,未贯通段内摩擦角标准值取岩石内摩擦角标准值的0.95倍; l ——滑移面长度,m。

稳定性计算结果见表3和表4。

表 3 滑移式危岩稳定性计算

Table 3 Stability calculation of slipping dangerous rock

危岩体 编号	工况 条件	后缘隙深 度/m	h_w /m	l /m	c /kPa	$\varphi/(^{\circ})$	滑移面倾角 $A/(^{\circ})$	$W/$ (kN·m ⁻¹)	$Q/$ (kN·m ⁻¹)	$V/$ (kN·m ⁻¹)	K
WY-1	现状	17.40	5.80	17.40	67.0	30	46	4012.8	0.00	164.84	0.93
	暴雨	17.40	8.70	17.40	63.0	28	46	4058.4	0.00	370.88	0.82
	地震	17.40	8.70	17.40	63.0	28	46	4058.4	154.22	370.88	0.77
WY-2	现状	3.00	1.00	3.00	67.0	30	35	554.4	0.00	4.90	1.45
	暴雨	3.00	1.50	3.00	63.0	28	35	560.7	0.00	11.03	1.33
	地震	3.00	1.50	3.00	63.0	28	35	560.7	21.31	11.03	1.24
WY-3	现状	1.00	0.34	5.00	408.0	36	60	792.0	0.00	0.57	3.39
	暴雨	1.00	0.50	5.00	352.0	34	60	801.0	0.00	1.23	2.93
	地震	1.00	0.50	5.00	352.0	34	60	801.0	30.44	1.23	2.84

表 4 不同工况下危岩体稳定系数及稳定性评价结果

Table 4 Stability coefficient and stability evaluation results of dangerous rock mass under three working conditions

工况	WY-1		WY-2		WY-3	
	稳定 系数	稳定性 评价	稳定 系数	稳定性 评价	稳定 系数	稳定性 评价
现状	0.93	不稳定	1.45	稳定	3.39	稳定
暴雨	0.82	不稳定	1.33	稳定	2.93	稳定
地震	0.77	不稳定	1.24	基本稳定	2.84	稳定

WY-1危岩体在现状、暴雨、地震工况下均不稳定;WY-2危岩体在现状、暴雨工况下,稳定,在地震工况下,基本稳定;WY-3危岩体在现状、暴雨、地震工况下均稳定。结合危岩体节理裂隙、坡面产状、发育程度及坡底崩塌物堆积情况分析,3处危岩体稳定性与计算结果基本一致。

3.2 数值模拟

通过综合分析灾害点崩塌危岩体特征,选取WY-1危岩体的高位危岩进行运动轨迹计算。采用Rockfall软件模拟,WY-1危岩体松动岩块崩落的最大总动能为7228.41 kJ,最大弹跳高度为1.29 m,最大影响距离为27.3 m。本灾害点南侧坡脚下沟谷谷底宽度仅10 m,一旦发生危石崩落就会危及到景区步道及游人的安全^[10-11],见图7、表5。

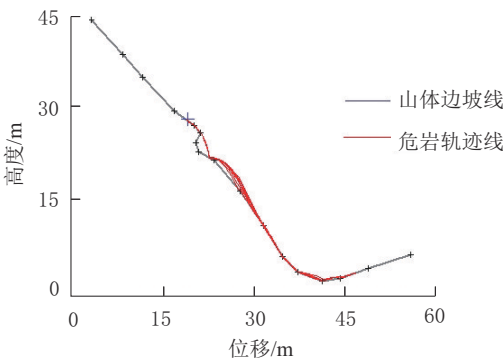


图 7 WY-1 危岩体崩塌落石运动轨迹

Fig.7 Movement trajectory of the rockfall from WY-1 dangerous rock mass

表 5 危岩体(WY-1)危岩崩落运动计算结果

Table 5 Calculation results of rockfall movement

岩块运动特征	参数
岩块直径/m	4.0
滑移坠落高度/m	27.4
最大平动速度/(m·s ⁻¹)	11.96
最大转动速度/(rad·s ⁻¹)	5.76
滚石最大平动动能/kJ	5627.0
滚石最大转动动能/kJ	1650.69
滚石最大总动能/kJ	7228.41
最大弹跳高度/m	1.29
最大运动距离/m	27.3

4 治理方法比选分析及计算

4.1 治理方法比选

依据灾害点地质条件、景观融合需求及岩体稳定性情况,需要对危岩体 WY-1、WY-2 进行治理,

WY-3 虽然稳定,但景区考虑到游客的安全因素,要求一并治理,因此本次治理 3 处危岩体。结合岩体破碎及节理发育情况,筛选出 2 种治理方案^[12-14],详见表 6。

表 6 崩塌隐患点治理方案比选分析
Table 6 Comparison and selection of treatment schemes for potential collapse points

方案	治理思路	优点	缺点
方案一	①对 WY-1 危岩体采取锚杆+钢筋网+混凝土锚喷措施进行支护;②WY-2 危岩体、WY-3 危岩体采取清理危岩+主动防护网治理防护;③对崩塌堆积物进行清理	安全性高,治理比较彻底	①治理成本高、材料人工成本大;②过度治理与景点环境不协调;③需严格安全防护措施,施工风险高
方案二	①对 WY-1 危岩体采取避让措施,在谷底小路两端设置护栏网,禁止游人进入崩落危险区,改建景区小路(优化景区步道);②对 WY-2 危岩体、WY-3 危岩体采用在下方坡脚小路旁修建浆砌石挡墙,防止落石对游人的危害;③对崩塌堆积物进行彻底清理,改建景区小路(优化景区步道),利于游人安全	最大程度保护景点资源,与景区环境相协调;治理成本费用较少;减少大型机械的搬运和使用	①地质灾害没有彻底治理;②危岩体有可能会发生崩塌,但不会伤及游客和行人

从经济、技术、生态协调性对比分析:

(1)经济成本分析:方案一需投入锚杆、钢筋网、混凝土等大量工程材料,且景区内道路狭窄,大型机械搬运困难,需人工运输,成本高;方案二以被动防护(护栏网、浆砌石挡墙)和优化景区步道为主,浆砌的块石可以在景区内就地取材,总造价比方案一低,且无需大规模封闭景区,兼顾安全与运营。

(2)技术可靠性分析:方案一中的锚杆钻孔、混凝土喷射、清理危岩等均需要高空作业,施工难度较大;方案二中的护栏网、浆砌石挡墙及优化景区步道均依托现有景区内地形砌筑,无需高难度支护技术。

(3)生态协调性分析:方案一中的混凝土锚喷和主动防护网虽能加固岩体,但会形成大面积人工痕迹,破坏岩体的表层植被,与景区“陡倾山体、峭壁”的自然景观特色冲突;方案二中的浆砌石挡墙可以采用景区内沟底块石砌筑,石材颜色、纹理与周边岩体一致。优化改建步道可以有效躲避危岩体崩塌,通过空间转移风险直接提升对游客的安全保护,且对原生自然景观无影响。

经过比选分析,最终选定方案二的治理思路。

4.2 治理工程设计

本次危岩体治理工程中,充分考量景区的生态协调性,针对不同危岩体采取相应措施:对于受 WY-1 危岩体崩落影响的区域,采取避让措施,设置与周边自然环境相融合的双边护栏网及警示牌,同

时封闭该段景区道路,禁止游人进入崩塌影响区;在危岩体对面山坡平缓区段,另建一条顺应地形的游园步道,实现工程建设与自然生态的和谐统一。WY-2、WY-3 危岩体当前处于稳定状态,在暴雨及地震条件下也能保持稳定或基本稳定,仅存在小块落石的可能性。考虑到景区景观要求和生态协调性,采取坡面清危、坡脚景区道路旁设置挡墙与警示牌相结合的综合治理措施。坡面清危时,遵循最小干预原则,精准清除浮动危石,最大程度保护原有植被和生态地貌;坡脚设置挡墙采用本土石材,与周边景观浑然一体,既有效阻挡小块落石,又成为景区生态景观的一部分;同时,设置警示牌,在提醒游人注意安全的同时,与周围环境和谐共生。

4.2.1 防护栏网及设计

护栏网总长 17.5 m,高 1.6 m,其中封闭小路东端双边护栏网长 7.5,封闭小路西端双边护栏网长 10 m;浸塑丝经 5.0 mm,网孔 80×160 mm,四周双边丝;立柱 Ø48 mm×2.0 mm,钢管浸塑处理,高度 1.6 m,间距 2.5 m;立柱下基础尺寸为 300×300×400 mm,混凝土强度等级为 C25。

4.2.2 改建景区步道设计

改建优化景区步道全长为 102.64 m,跨越沟谷段(a~g 段)道路设计宽度为 2.0 m,b~e 段道路两侧设置栏杆,路面设置宽度为 2.4 m,沟谷南侧段(1~15 段)道路宽度分 1.2 m 和 1.5 m 2 个宽度,其中 1~

5段、7~10段道路宽度为1.5 m,5~7段、10~15段道路宽度为1.2 m(参见图1)。

4.2.3 浆砌石挡墙设计

挡墙距离坡脚1 m,I型挡墙位于WY-3危岩体下方的DQ1~DQ3段,长度约18.0 m;II型挡墙位于WY-2危岩体下方的DQ3~DQ5段,长度约16.7 m。墙面坡比为1:0.35;墙背坡比为1:0.10,挡墙基础底部铺砂浆垫层,垫层厚度10 cm;挡墙顶部采用20 cm厚C20混凝土压顶抹平,地基承载力 ≥ 150 kPa。详见表7。

表7 浆砌石挡墙尺寸

Table 7 The dimensions of the mortar rubble retaining wall

挡墙 型号	顶宽/ m	底宽/ m	高度/ m	埋深/ m	长度/ m	水泥 砂浆
I型	1.20	2.77	2.60	1.00	18.0	M10
II型	0.9	2.28	2.40	0.9~1.10	16.7	M10

4.3 治理工程计算

4.3.1 落石弹跳高度及运动速度计算^[15]

采用RocFall软件,落石等效球体半径为0.098 m,岩石密度为2640 kg/m³,岩块质量为10.41 kg。法向回弹系数取0.35,切向回弹系数0.85,坡脚地面材料的概化分类为植被稀少的土质边坡,法向回弹系数取0.3,切向回弹系数取0.80。结果见表8。

表8 挡墙位置落石计算成果

Table 8 Calculation results table of rockfall at the retaining wall location

计算剖面	落石等效 半径/m	拦墙距坡 脚距离/m	拦墙位置最大 腾跃高度/m	最大平动速度 $V_{\max}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
WY-2	0.098	1.0	0.794	5.815
WY-3	0.098	1.0	1.005	10.108

4.3.2 落石撞击挡墙的冲击力计算

基于Hertz碰撞理论的危岩正向冲击力计算公式为:

$$P_{\max} = \left(\frac{4E_2}{3(1-\mu_2^2)} \sqrt{r_1} \right)^{\frac{2}{5}} \times \left(\frac{2}{5} m_1 (e_n v_n)^2 \right)^{\frac{3}{5}}$$

式中: $P_{\max}$ ——最大冲击力; E_2 ——挡墙的弹性模量,取5650 MPa; μ_2 ——挡墙的泊松比,取0.2; m_1 ——落石的质量; e_n ——落石撞击挡墙石的法向恢

复系数取0.3, v_n ——落石正向冲击挡墙的速度,即落石撞击挡墙的法向速度。

切向力为撞击摩擦力, $P_t = P_{\max} f$, f ——撞击瞬间的摩擦系数,取0.1。计算结果见表9。

表9 落石撞击挡墙的冲击力计算成果

Table 9 Calculation results of impact force of rockfalls hitting the retaining wall

挡墙 型号	落石撞击速 度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	撞击速度与墙 面的夹角/ $(^\circ)$	法向速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	法向 力/kN	切向力/ kN
I型	10.108	57.71	8.545	41.90	4.19
II型	5.815	118.71	5.100	22.554	-2.255

4.3.3 挡墙的稳定性计算

按天然、暴雨、地震工况分别对挡墙的抗滑稳定性、抗倾覆稳定性、抗剪能力、地基承载力进行了计算。其中,天然工况:荷载取墙后的土压力+落石冲击力;暴雨工况:荷载取墙后的土压力+水压力+落石冲击力;地震工况:荷载取墙后的土压力+地震力+落石冲击力。计算结果见表10。

表10 挡墙稳定性计算成果

Table 10 Calculation results of retaining wall stability

挡墙 型号	计算 工况	抗滑安 全系数	抗倾覆安 全系数	基底压力/kPa		最大切应 力/kPa
				最大	最小	
I型	天然	1.554	2.553	73.712	14.55	12.197
	暴雨	1.384	1.851	71.561	3.457	13.154
	地震	1.469	2.471	75.912	12.386	11.253
II型	天然	1.858	2.522	58.991	16.205	20.010
	暴雨	1.546	1.620	50.788	3.856	21.180
	地震	1.757	2.529	58.376	16.172	15.214

经计算:I型、II型挡墙在3种工况下,抗滑安全系数均 >1.30 ,抗倾覆安全系数均 >1.50 ,满足要求。

5 治理效果

在景区地质灾害综合治理中,通过科学避让、设置挡墙、优化步道的组合式治理方案,既有效阻隔崩塌落石,又通过优化步道,使游客安全感与游览舒适度显著增强,实现“安全防护与生态景观协调统一”的治理目标。治理效果见图8。

6 结语

本文以石门山景区崩塌灾害综合治理项目为



(a) 竣工后的挡墙

(b) 改建的步道

图8 治理效果

Fig.8 Effect after treatment

例,通过分析危岩体结构特征、破坏模式、稳定性及影响范围,从经济、技术及生态3方面分析,确定了“避让+优化游园步道+清危+挡墙”的治理方案。治理后,有效实现了景区地质灾害治理与自然生态和谐统一,为同类景区灾害防治提供实践参考。

参考文献(References):

- [1] 赵云峰,张涛,刘文清,等.北京某景区崩塌灾害隐患点治理方案设计思路[J].钻探工程,2021,48(5):96-105.
ZHAO Yunfeng, ZHANG Tao, LIU Wenqing, et al. Design of the treatment plan for rockfall hazards in a scenic spot in Beijing [J]. Drilling Engineering, 2021, 48(5): 96-105.
- [2] 刘伍,樊金桂,郑小体,等.北京飞云瀑景点崩塌地质灾害分析及防治方法研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(10):9-15.
LIU Wu, FAN Jingui, ZHENG Xiaoti, et al. Analysis on collapse geological disaster in Feiyun waterfall scenic spot and the study on prevention and control methods[J]. Drilling Engineering, 2016, 43(10): 9-15.
- [3] 周云涛,吴波,蔡强,等.危岩崩塌防治技术体系及工程选型分析[J].钻探工程,2024,51(2):108-118.
ZHOU Yuntao, WU Bo, CAI Qiang, et al. Analysis of control and prevention technology system and engineering selection for unstable-rock[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(2): 108-118.
- [4] 杨树宝,陈安军,雷瑞新,等.高陡峡谷区危岩防治技术:以三峡库区巫峡典型危岩为例[J].水利水电技术(中英文),2023,54(S1):341-347.
YANG Shubao, CHEN Anjun, LEI Ruixin, et al. Prevention of dangerous rock mass in high-steep gorge area: cases study of typical dangerous rock mass in Wu Gorge in the Three Gorges Reservoir Area[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2023, 54(S1): 341-347.
- [5] 翟龙象,宋小庆,朱博勤,等.FAST保护区地质灾害发育特征及形成机理与防治建议[J].钻探工程,2023,50(5):52-59.
ZHAI Longxiang, SONG Xiaoqing, ZHU Boqin, et al. Characteristics of the development, formation mechanism and prevention suggestions of the geological disasters in FAST protected areas[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(5): 52-59.
- [6] 北京市地质矿产勘查开发局,北京市地质研究所.北京地质灾害[M].北京:中国大地出版社,2008.
Beijing Bureau of Geological Exploration and Development, Beijing Institute of Geology. Geological Hazards in Beijing[M]. Beijing: China Land Press, 2008.
- [7] 刘伍,田志君,徐林山.旅游景区地质灾害治理工程勘察设计项

目(怀柔区)石门山风景区崩塌地质灾害勘察报告[R].北京:北京市地质工程设计研究院,2015.

- LIU Wu, TIAN Zhijun, XU Linshan. Investigation and design report on collapse geological hazards in Shimen mountain scenic area (Huairou District) of geological hazard control project for tourist attractions [R]. Beijing: Beijing Institute of Geological Engineering Design, 2015.
- [8] 龚诚,黄海,陈龙,等.藏东地区冻错曲流域崩塌发育特征与链式成灾模式研究[J].钻探工程,2023,50(5):1-10.
GONG Cheng, HUANG Hai, CHEN Long, et al. Characteristics of collapse development and geohazard chain model in the Dongcuoqu Basin, eastern Tibet [J]. Drilling Engineering, 2023, 50(5): 1-10.
- [9] 李强,伍剑波,孙东,等.四川省地形起伏度与斜坡地质灾害空间分布关系研究[J].钻探工程,2024,51(4):125-134.
LI Qiang, WU Jianbo, SUN Dong, et al. Study on the relationship between the topographic relief amplitude and the spatial distribution of slope geological hazards in Sichuan Province [J]. Drilling Engineering, 2024, 51(4): 125-134.
- [10] 赵书锋.九寨沟景区某崩塌落石运动轨迹的理论预测[J].自然灾害学报,2024,33(6):48-58.
ZHAO Shufeng. Theoretical prediction of rockfall movement trajectory in Jiuzhaigou scenic area[J]. Journal of Natural Disasters, 2024, 33(6): 48-58.
- [11] 梁世川,王占和,魏贤程,等.新疆温宿县天山大峡谷景区崩塌危岩体破坏机制及运动学特征分析[J].新疆地质,2024,42(3):437-443.
LIANG Shichuan, WANG Zhanhe, WEI Xiancheng, et al. The destroy mechanism and kinematic characteristics of collapse dangerous rock mass in Tianshan Grand Canyon scenic area, Wensu county, Xinjiang [J]. Xinjiang Geology, 2024, 42(3): 437-443.
- [12] 王美华,李小龙,杨文峰,等.浙江临安大明山景区崩塌灾害特征及防治[J].化工矿产地质,2022,44(4):335-341.
WANG Meihua, LI Xiaolong, YANG Wenfeng, et al. Characteristics and prevention of collapse disaster in the Damingshan mountain scenic area of Lin'an, Zhejiang [J]. Geology of Chemical Minerals, 2022, 44(4): 335-341.
- [13] 刘伍,樊金桂,郝龙,等.斜撑内支撑环在高陡危岩崩塌治理工程中的应用[J].钻探工程,2025,52(1):152-160.
LIU Wu, FAN Jingui, HAO Long, et al. Application of inclined bracing inner support ring in high and steep dangerous rock treatment engineering [J]. Drilling Engineering, 2025, 52(1): 152-160.
- [14] 贾长军.基于环境治理和公共安全浅析红石峡景区地质灾害发育类型与防治措施[J].社会与公益,2024(12):198-200.
JIA Changjun. Analysis on the development types and prevention measures of geological hazards in Hongshixia scenic area based on environmental governance and public safety [J]. Society & Public Welfare, 2024(12): 198-200.
- [15] 杨迪惠,杨啡.九寨沟景区某崩塌点稳定性分析及治理方案[J].四川地质学报,2019,39(4):608-611,638.
YANG Dihui, YANG Fei. Stability analysis and control program of some collapse site in the Jiuzhaigou scenic spots [J]. Acta Geologica Sichuan, 2019, 39(4): 608-611, 638.

(编辑 王文)