

# 基于岩体结构特征的崩塌防治 锚杆施工工艺研究

杨 健

(四川省第十一地质大队, 四川 达州 635000)

**摘要** 锚杆支护是崩塌防治的重要手段之一, 其有效性高度依赖对岩体结构特征的精准识别与其适配性施工工艺。本文以雅安市宝兴县灵关镇青山坪崩塌治理工程为研究对象, 系统分析该区灰岩边坡岩体结构特征, 提出分级差异化锚杆设计施工工艺; 重点阐述了基于岩体破碎程度的锚杆分区布设密度、自由段与锚固段长度确定方法、岩体破碎剧烈区段跟管钻进技术应用、注浆控制要点。工程实践表明, 该工艺有效提升了锚杆与岩体的协同工作性能, 明显增强了边坡整体稳定性。

**关键词** 锚杆支护; 岩体结构; 崩塌防治

中图分类号: TU753

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.02.014

## 0 引言

雅安市宝兴县灵关镇青山坪一带属典型灰岩陡坡地貌, 此类灰岩陡坡地貌在构造与风化双重作用下, 使得岩体结构面发育、完整性不良。而在岩体结构加固过程中采用常规化的强支撑等加固方式, 不能达到复杂岩体结构强度要求, 不仅会导致锚固力下降, 还会产生材料浪费的情况。近年来, 岩土工程领域日益强调“地质适配”理念, 主张支护设计与施工应紧密响应岩体结构特征。在此背景下, 亟需构建一种以岩体结构精细解译、施工参数动态调整为基础的锚杆支护技术方式。

## 1 工程概况

雅安市宝兴县灵关镇青山坪崩塌体位于省道S308改建工程规划线东侧, 属典型高陡灰岩自然边坡。前期勘查表明, 该边坡岩体受构造与风化作用影响, 节理裂隙发育, 岩体完整性差异明显。本文依托该工程, 深入剖析岩体结构特征对锚杆设计与施工的关键影响, 提出一套“岩体结构识别—锚杆参数分区—精细化施工控制”的技术体系, 利用锚杆支护的科学性与可靠性对节理裂隙发育、岩体完整性差异明显的崩塌体进行有效防治。

## 2 工程区岩体结构特征分析

### 2.1 地层岩性与构造背景

青山坪崩塌区出露地层主要为泥盆系中统养马坝组( $D_{2y}$ )灰岩, 岩性坚硬, 呈薄至中厚层状, 块状构

造, 项目区位于宝兴背斜南东翼, 受小关子断裂与双石断裂夹持, 构造应力集中, 岩体节理裂隙发育; 岩层产状陡立, 优势产状为 $170^{\circ} \angle 85^{\circ} \sim 90^{\circ}$ , 层面近于直立, 与边坡走向( $250^{\circ} \sim 270^{\circ}$ )呈切向关系, 对边坡整体稳定性影响较小。

### 2.2 结构面发育特征

现场调查与三维激光扫描揭示了边坡岩体主要发育两组优势节理。

J1节理, 产状 $70^{\circ} \sim 85^{\circ} \angle 25^{\circ} \sim 40^{\circ}$ , 逆向坡面, 间距 $0.3 \sim 2.5$  m, 闭合或微张, 结合一般, 主要起切割作用。

J2节理, 产状 $250^{\circ} \sim 260^{\circ} \angle 48^{\circ} \sim 60^{\circ}$ , 顺向坡面且倾角小于坡角( $70^{\circ} \sim 85^{\circ}$ ), 为控制边坡稳定性的主导不利结构面, 属外倾卸荷裂隙, 易在降雨、地震等诱因下贯通失稳。此外, 风化裂隙呈网状不规则发育, 尤其在坡面浅表层, 形成厚度 $2 \sim 6$  m的卸荷松弛带, 局部岩体呈碎裂状。

### 2.3 岩体完整性分区

依据《建筑边坡工程技术规范》(GB 50330—2013), 结合岩体结构面组合、岩层厚度及现场揭露情况, 将边坡划分为两个岩体结构分区<sup>[1]</sup>。

AB段, 岩层厚度 $0.1 \sim 0.4$  m, 岩体较完整, 结构面结合一般, 岩体类别为III类; BC段( $9-9' \sim 14-14'$ ), 岩层厚度仅 $0.05 \sim 0.15$  m, 节理密集, 岩体

作者简介: 杨健(1984-), 男, 专科, 工程师, 研究方向: 地灾施工。

破碎，结构面结合差，岩体类别为Ⅳ类，该分区结果直接决定了锚杆设计参数的差异化取值。

### 3 基于岩体结构的锚杆差异化设计

#### 3.1 锚杆参数分区设计

根据勘查成果及《建筑边坡工程技术规范》(GB 50330—2013)<sup>[2]</sup>，青山坪边坡灰岩天然重度 28.3 kN/m<sup>3</sup>，饱和重度 29.0 kN/m<sup>3</sup>，结构面粘聚力 C=115~130 kPa，内摩擦角 φ=32°~35°，岩体与锚固体粘结强度标准值为 900 kPa。结合岩体完整性分区(Ⅲ类~Ⅳ类)，为确保锚杆有效穿越潜在滑裂面并锚固于稳定岩体，据此作为锚杆参数分区设计的力学依据。根据岩体结构分区及边坡分级(共 8 级)，确定锚杆参数。

#### 3.2 自由段与锚固段长度确定

1. 自由段。根据勘查资料，边坡岩体因构造与风化作用形成明显分区。Ⅲ类岩体区松弛带厚度约 2~4 m，锚杆自由段应完全穿越潜在滑动面及卸荷松弛带，并在此基础上预留不少于 1~2 m 的安全冗余长度；Ⅳ类岩体区岩层薄、节理密集，松弛带厚度为 5~6 m，自由段长度取不小于 8 m。综合考虑滑面深度、岩体破碎程度及施工安全裕度，本工程锚杆总长按 6~11 m 分级设置，其中自由段占比显著。

2. 锚固段长度。锚杆长度由自由段与锚固段两部分构成，其设计需紧密结合青山坪边坡岩体结构特征及潜在破坏模式。锚固段长度依据《岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范》(GB 50086—2015)要求，按一级边坡抗拔安全系数 2.6 进行验算。

$$l_a \geq \frac{KN_{ak}}{\pi D f_{rbk}} \quad (\text{锚固体与地层的锚固长度}) \quad (1)$$

$$l_a \geq \frac{KN_{ak}}{n\pi d f_b} \quad (\text{锚杆与锚固砂浆的锚固长度}) \quad (2)$$

以上公式中， $l_a$  为锚固长度(m)； $K$  为锚杆抗拔安全系数，一级工程取 2.6； $N_{ak}$  为锚杆轴向拉力值 70 kN；

表 1 锚杆参数分区及长度设计

边坡区段	岩体类别	锚杆间距 (m×m)	锚杆长 度(m)	自由段 长度(m)	锚固段 长度(m)	施工工艺	设计轴向 拉力(kN)	要求抗拉拔值 (≥ kN)
第 1 级边坡	Ⅲ类	3.0×3.0	6.0	≥ 3.0	3.0	常规钻进	70	≥ 84 (70×1.2)
第 2~3 级边坡	Ⅲ类	4.0×4.0	7.0	≥ 4.0	3.0	常规钻进	70	≥ 84 (70×1.2)
第 4~5 级边坡	Ⅲ类	4.0×4.0	8.0	≥ 5.0	3.0	常规钻进	70	≥ 84 (70×1.2)
第 6~8 级边坡 (一般区)	Ⅲ类	4.0×4.0	9.0	≥ 6.0	3.0	常规钻进	70	≥ 84 (70×1.2)
第 6~8 级边坡 (破碎区)	Ⅳ类	2.0×4.0/ 3.0×3.0	11.0	≥ 8.0	3.0	跟管钻进	70	≥ 84 (70×1.2)

$D$  为锚固段钻孔直径，取 0.11 m； $d$  为钢筋直径，取 0.025 m； $n$  为钢筋根数，取 1； $f_b$  为钢筋与砂浆间的粘结强度设计值，取 2 400 kPa； $f_{rbk}$  为岩土层与锚固体的粘结强度标准值，取 900 kPa。

经计算，当锚固段长度为 3.0 m 时，可满足岩体与锚固体间粘结强度、钢筋与砂浆间握裹力的双重控制要求，确保锚杆在极限荷载下不发生拔出或滑移破坏，故锚固段统一 ≥ 3.0 m。

最终确定锚杆参数分区及长度设计如表 1 所示。

### 4 锚杆施工工艺

#### 4.1 钻孔工艺

1. 常规钻进。该工艺适用于Ⅲ类岩体区。采用潜孔锤干钻法作业，钻孔前先核对锚杆孔位标记，调整钻机倾角至设计要求<sup>[3]</sup>。钻进过程中控制钻速为 0.5~1 m/min，确保孔径稳定控制在 110 mm。成孔后立即采用高压风清孔，直至孔内无岩粉、碎屑排出。

2. 跟管钻进。该工艺专门针对Ⅳ类破碎岩体区。施工单位采用 40 型全液压锚固钻机，选用同心跟管钻进系统，完成 Φ108 mm 套管同步跟进钻进，同心跟管钻进系统主要由锚固钻机、空压机、同心钻头、冲击器、管靴、套管组成。空压机压缩气体通过钻杆中心进入冲击器，完成对钻头的冲击做功，而后废气从钻头处排出，带出成孔过程中产生的弃渣。在钻进过程中同心钻头捶打管靴带动套管跟进，实现跟管作业。

#### 4.2 锚杆安装与注浆控制

1. 锚杆制作。在钢筋加工过程中，按设计要求在钢筋上设置对中支架，对中支架采用 Φ8 钢筋制作，沿锚杆长度方向以 2 m 间距均匀布置，通过焊接方式与锚杆主筋固定<sup>[4]</sup>。

2. 注浆工艺。采用孔底反向注浆法进行注浆作业。注浆材料选用 M30 水泥砂浆，由试验室根据原材料性

能确定配合比。注浆作业采用注浆泵加压注浆，注浆压力稳定控制在0.2~0.4 MPa。

3. 质量控制。注浆前，施工人员将注浆管插至距孔底50~100 mm处，确保注浆管始终埋入浆液内。当孔口开始溢浆后，保持注浆压力稳定稳压30秒，确保浆液充分填充孔内间隙。针对长度超过5 m的长锚杆，采用二次补浆工艺，首次注浆完成24小时后，对孔口进行检查，若发现浆液下沉，立即采用相同配比的水泥砂浆进行补浆<sup>[5]</sup>。

## 5 缺锚杆测试结果分析

### 5.1 锚杆抗拔试验结果

为验证锚杆设计参数与施工工艺的可靠性，工程在共计3 469根锚杆中，于工程在III类与IV类岩体代表性

表2 锚杆拉拔试验统计

边坡区段	岩体类别	锚杆长度(m)	设计拉拔值(≥kN)	实验值(kN)	实验值与设计值比值
第1级边坡	III类	6.0	84	118	1.40
第2~3级边坡	III类	7.0	84	118	1.40
第4~5级边坡	III类	8.0	84	118	1.40
第6~8级边坡(一般区)	III类	9.0	84	118	1.40
第6~8级边坡(破碎区)	IV类	11.0	84	118	1.40

坡稳定性进行综合评估，边坡各监测点累计位移均小于8 mm，无新增裂缝或局部剥落现象。对比治理前稳定性计算结果(暴雨工况下K<sub>f</sub>=1.041，欠稳定)，分级放坡+差异化锚杆支护后，边坡整体稳定性系数提升至1.498以上，达到《建筑边坡工程技术规范》(GB 50330—2013)一级边坡安全储备要求。特别在BC段9~14剖面(IV类岩体区)，加密布设与跟管工艺有效抑制了卸荷松弛带进一步扩展。

## 6 结论

本文以青山坪崩塌治理工程为实践依托，针对高陡破碎岩质边坡的支护难题，系统构建了“岩体结构识别→锚杆参数分区→精细化施工”的技术体系。经工程实践验证，该体系兼具科学性与可行性，主要结论如下：(1)青山坪边坡岩体结构呈现显著分区特征，其中J2外倾节理构成控制性不利结构面，经勘察确定卸荷松弛带厚度分布在2~6 m，为后续支护设计提供了精准地质依据；(2)基于岩体类别划分结果及边坡分级情况，实施差异化锚杆参数设计，将锚杆间距控制在2~4 m、长度设定为6~11 m，同时按区域需求设计≥3~8 m的自由段，该设计思路大幅提升

区段共布设175组检测锚杆(按锚杆总数5%取)，按《岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范》(GB 50086—2015)开展现场抗拔试验。试验采用分级加载方式，最大加载值为设计轴向拉力70 kN的1.5倍(即105 kN)。试验结果显示：所有检测锚杆在加载至105 kN时，位移稳定、无明显滑移或拔出现象，实测抗拔力均值达118 kN，满足一级边坡抗拔安全系数2.6的要求(见表2)。

### 5.2 支护效果与边坡稳定性验证

本项目工程施工完成后，结合施工期(6个月)及运行期(12个月，含一个完整雨季)的边坡位移监测数据(采用GNSS自动化监测系统，监测频率为施工期1次/天、运行期1次/3天)，对锚杆支护效果及边

支护结构的适配性与效能；(3)采用“跟管钻进+孔底注浆”组合工艺，通过自上而下分级开挖、破碎区跟管成孔及孔底反向注浆等关键技术，有效规避了施工坍塌风险，保障了锚杆施工质量。

### 参考文献：

- [1] 黄春晖,赵春晨,王扶义.空间交错隧道施工围岩应力影响范围及粘接锚杆作用机理的研究[J].粘接,2022,49(07):21-27.
- [2] 朱忠钱.岩土工程中抗浮锚杆施工技术的研究与分析[J].居舍,2023(36):67-70.
- [3] 赵常青,樊占东,冉黎明,等.破碎岩土高边坡锚索锚杆框架梁支护施工工艺[J].公路,2023,68(05):50-53.
- [4] 王晓卿.锚杆预紧对破碎岩体锚固与承载特性的影响[J].煤炭学报,2024,49(S2):606-615.
- [5] 丁潇,王睿,屈永龙,等.岩体离层作用下全长黏结型锚杆受力分析[J].西安工业大学学报,2023,43(04):341-346.