

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 ~ 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 ~ 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^[1]。

AB 段, 岩层厚度 0.1 ~ 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 ~ 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

根据勘察成果及《建筑边坡工程技术规范》(GB 50330—2013)^[2], 青山坪边坡灰岩天然重度 28.3 kN/m^3 , 饱和重度 29.0 kN/m^3 , 结构面粘聚力 $C=115 \sim 130 \text{ kPa}$ 、内摩擦角 $\phi=32^\circ \sim 35^\circ$, 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。根据勘察资料, 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 $2 \sim 4 \text{ m}$, 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 $1 \sim 2 \text{ m}$ 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 $5 \sim 6 \text{ m}$, 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 $6 \sim 11 \text{ m}$ 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 ;

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 2400 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 $\geq 3.0 \text{ m}$ 。

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^[3]。钻进过程中控制钻速为 $0.5 \sim 1 \text{ m/min}$, 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 $\phi 108 \text{ mm}$ 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 $\phi 8$ 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^[4]。

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

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)

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^[5]。

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

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

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 $K_{\text{暴雨}}=1.041$ ，欠稳定），分级放坡 + 差异化锚杆支护后，边坡整体稳定系数提升至 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了

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.