孟底沟水电站枢纽区危岩体综合治理施工技术与应用

马万军
中国水利水电第四工程局有限公司　青海　西宁　810000

摘　要：山地水电站枢纽区危岩体地质结构复杂，不良地质构造与特殊场地环境，会大幅增加边坡治理施工难度。本文结合孟底沟水电站枢纽区工程条件，系统梳理区域危岩体地质特征与现场施工环境，拆解清理、锚固、喷射防护、排水布设等核心施工工艺。针对高处作业、复杂坡面、临近构筑物及恶劣工况等特殊场景，搭建专项施工技术体系，从工序排布、参数调整、质量管控、技术优化多个维度完善现场管控体系，有效提升峡谷区域危岩体治理施工的规范性与适配性。

关键词：孟底沟水电站；枢纽区；危岩体；综合治理；施工技术

引言：高山峡谷地带水电站枢纽区多存在大量裸露危岩体，岩体结构破碎、裂隙发育，受构造运动与地下水长期作用，整体稳定性能偏弱。特殊的山地地形与多变气候条件，让危岩体治理施工面临作业空间受限、施工风险偏高、工序组织困难等诸多问题。依托常规边坡治理工艺开展施工，难以适配复杂场地的个性化治理需求。依托现场地质与施工环境特征，梳理成套专项施工技术，完善现场施工管控模式，能够切实提升危岩体治理施工质量，保障水电站枢纽边坡整体稳定性。

1 枢纽区危岩体地质特征与施工条件

1.1 枢纽区危岩体赋存地质环境

孟底沟水电站枢纽区岩体形成年代久远，区域地质构造运动塑造了场地基础岩体形态。区域地层岩性分布具备明显分段性，不同区段岩体硬度、风化程度存在明显区别，构成危岩体发育的基础载体。场地内部褶皱、断裂构造分布广泛，构造运动产生的应力作用改变岩体原始结构状态，让局部岩体出现结构松动、层理发育等现象[1]。地下水循环活动贯穿岩体表层与内部孔隙，长期侵蚀弱化岩体结构强度，加速危岩体的形成与发育，为边坡岩体失稳提供了基础地质诱因。

1.2 危岩体结构与岩体力学特性

枢纽区危岩体多呈现碎裂状、块状结构，岩体内部节理、裂隙交错分布，切割完整岩体形成大小不一的独立岩体块体。各类结构面无序发育，极大降低岩体整体完整性与连续性，造成岩体整体稳定性处于较低水平。岩体力学参数存在明显差异化特征，表层风化岩体结构松散，抗压、抗剪强度偏低，深部完整岩体力学性能相对稳定。结构面的存在大幅削弱岩体抗变形能力，外界扰动作用下，岩体易出现开裂、滑移、坠落等结构性破坏，直接影响施工开展。

1.3 枢纽区现场施工环境条件

水电站枢纽区坐落于山地峡谷地段，整体地势起伏悬殊，边坡坡度普遍偏大，施工作业空间相对狭窄。区域山地气候特征显著，降水集中在特定时段，空气湿度、场地温度随季节变化明显，直接影响露天岩体施工推进。场地周边山体植被分布不均，裸露岩体面积较大，高空临空作业场景居多。场内交通线路布局受限，大型施工机具转运、布设存在一定限制，物料堆放、设备作业的可用场地较为有限。

1.4 危岩体施工重难点分析

枢纽区危岩体分布零散且无规律，不同位置岩体结构状态、风化程度差异较大，施工需要适配差异化作业方式。高陡边坡作业高度大，临空作业风险突出，作业操作难度远高于常规边坡施工。破碎岩体稳定性极差，施工扰动极易引发岩体松动坠落，作业过程需严格把控施工强度与作业节奏。场地有限的作业空间制约多类型施工设备同时布设，单一作业面施工工序衔接紧凑，施工组织与工序排布存在较大难度。复杂地质与环境条件叠加，大幅提升危岩体综合治理施工的整体难度。

2 危岩体综合治理核心施工工艺

2.1 危岩体清理施工工艺

危岩体清理是边坡治理施工的前置工序，主要针对坡面松动岩块、风化碎屑及表层松散覆盖层开展作业。施工按照由上至下的作业顺序推进，单次清理竖向层高控制在1.5m，逐层清除坡面不稳定岩体，杜绝残留松散结构遗留安全隐患。针对体量较小的松散碎石，采用人工清理方式处理，精准剔除表层风化碎屑。体量偏大的危岩块体，借助小型机具辅助剥离，严控作业扰动范围，剥离施工预留20cm保护层，避免对周边完整岩体造成结构性损伤。清理作业全程把控坡面平整度，为后续

防护加固施工提供规整的作业基面。

2.2 岩体锚固施工工艺

岩体锚固用于加固深层稳定岩体，提升边坡整体承载能力与抗滑移能力。施工依托坡面岩体分布状态确定钻孔点位，严格把控钻孔孔径、孔深及角度，保障钻孔成型质量。钻孔完成后清理孔内粉尘与杂物，保证孔内洁净度满足锚固施工标准。按照施工设计安装锚杆、锚索构件，规范完成注浆、封孔等系列工序。浆液充盈岩体内部裂隙，可让锚固构件与原生岩体形成整体受力结构，有效约束岩体变形，抑制岩体开裂、滑移等问题。

2.3 喷射混凝土防护施工工艺

喷射混凝土作业用于封闭裸露岩体坡面，阻隔外界环境对岩体的风化侵蚀。施工前检查坡面基底状态，处理残留凸起岩块与凹陷区域，保障坡面基底平整均匀。严格配比混凝土原材料，调控喷射风压与喷射距离，保证混凝土物料均匀附着坡面。分层开展喷射作业，单层喷射厚度控制在5cm，总防护厚度根据坡面病害调整为8～12cm，规避厚度不均、空鼓、开裂等施工问题。混凝土凝固成型后做好养护作业，标准养护周期不少于7d，提升表层防护结构的密实度与整体性，形成稳定的坡面防护体系。

2.4 排水系统布设施工工艺

排水系统布设用于疏导坡面地表水与岩体内部渗水，削减水体对岩体结构的破坏作用。施工根据坡面走势、岩体渗水点位规划排水沟、泄水孔排布位置。按照设计尺寸开挖沟槽、钻孔造孔，规整沟槽线型与孔道角度。完成沟槽砌筑、孔道安装作业后，清理排水通道内部杂物，保障水体流通顺畅[2]。整套排水结构贴合坡面走势布设，可高效排出积水，降低水压力对边坡岩体的持续破坏。

2.5 局部封堵与嵌固施工工艺

局部封堵与嵌固针对岩体宽大裂隙、结构缝隙开展专项处理。施工清理缝隙内部松散碎屑与淤积杂物，保证缝隙内部洁净。针对宽度大于5mm的贯通裂隙，采用专用封堵填料填充裂隙空腔，逐层压实捣固，消除岩体内部空洞与通透缝隙。对局部悬空、嵌固薄弱的岩体质点，通过嵌固结构填充加固，衔接零散岩体结构。单处嵌固加固深度不低于30cm，工艺可补齐岩体结构缺陷，提升岩体整体完整性，强化危岩体治理后的结构稳定性。

3 综合治理专项施工技术体系

3.1 高处危岩体精细化施工技术

高处危岩体多分布于边坡上部悬空区域，作业面狭窄、竖向落差大，常规粗放施工模式无法处理细微结构隐患。精细化施工技术针对高空岩体作业特点建立成套作业方法，依据坡面实际走势划分独立作业单元。施工人员依托可靠高空作业平台定点就位，对悬空岩块、松动夹层、细微裂隙逐一开展排查处置。小型轻便机具用于局部凿除、清缝、钻孔作业，能够精准作用于病害部位，减少大范围机械扰动对完整岩体的损伤。施工环节逐层推进、逐点管控，细化每道操作步骤的作业标准，消除高空隐蔽性安全隐患，有效提升高处危岩体治理的精细度与完整性。

3.2 复杂坡面岩体加固施工技术

枢纽区边坡存在大量转折、陡坎、凹凸变异坡面，岩体破碎程度分布不均，风化损伤层次多样，统一施工工艺难以适配复杂场地条件。复杂坡面岩体加固技术根据坡面形态、岩体完整程度及结构缺陷类型调整施工方案。破碎程度较高的松散坡面，优先完成整体固结处理，通过锚固与表层封闭组合方式提升整体稳定性。结构突变、受力薄弱的坡面节点，增设嵌固补强工序，填补结构空缺位置。针对性的施工调整可以补齐不同区域岩体的受力短板，优化坡面整体受力状态，让加固施工适配各类复杂坡面形态。

3.3 临近枢纽构筑物保护性施工技术

部分危岩体治理作业区域紧贴枢纽主体结构、引水设施及边坡防护工程，施工产生的振动、碎石冲击与岩体剥离作用会对既有构筑物造成损伤。临近构筑物保护性施工技术以降低施工扰动、保护既有设施为核心目标。施工前期划定防护范围，明确各类作业的安全作业边界。选用低振动、轻量级施工设备开展钻孔、清岩及加固作业，削弱机械作业带来的振动传递。施工顺序由远及近逐层推进，弱化近距离施工对构筑物的影响。设置硬质遮挡与拦护结构，阻挡岩屑飞溅与坠石冲击，为枢纽构筑物提供稳定防护条件。

3.4 恶劣工况下常态化施工保障技术

峡谷山地环境气象条件复杂，降雨、大风、高湿等天气状态都会干扰常规施工流程，影响结构成型质量。恶劣工况常态化施工保障技术针对各类不良环境制定稳定作业方案。降雨天气暂停露天钻孔、注浆及喷射作业，对新鲜施工面采取遮盖防护，抵御雨水冲刷破坏。大风天气调整高空作业排班，稳固作业平台与机具设备，规避高空作业风险。高湿环境优化浆液配比与养护周期，适配潮湿环境的凝固成型规律。整套技术手段应对多变环境干扰，维持施工秩序稳定，保障治理施工持续有序开展。

4 施工技术现场应用管控与优化

4.1 施工工序统筹与流程管控

危岩体综合治理涉及坡面清理、岩体加固、表层防护、裂隙处理和排水布设多类作业，施工内容繁杂，作业环节存在较强关联性。山地枢纽施工场地狭窄，坡面作业区域分散，无序施工会造成作业面混乱、工序穿插冲突，影响整体施工推进效率。现场施工统筹工作依托场地空间特征与岩体病害分布规律，梳理各工艺的先后逻辑，构建层次清晰的施工流程体系。坡面清理作为首要施工环节，彻底清除表层松散岩体与风化碎屑，为后续加固作业提供稳定基面。加固工序完成后开展坡面防护与缺陷封堵，最后完成排水系统布设，形成完整闭环治理流程[3]。施工期间划分独立作业区块，合理排布各工种作业时段，规避交叉作业带来的施工干扰。落实分段检查、分层管控的作业模式，每完成3个作业单元开展一次阶段性自检，单段施工内容完成自检后，方可进入下一施工环节，保障整体施工节奏稳定有序。

4.2 施工参数适配与动态调整

水电枢纽区危岩体地质条件不均匀，岩体完整程度、裂隙发育状态、风化深度存在明显区域差异。固定不变的施工参数无法适配全部坡面施工场景，容易造成加固不足或施工冗余等问题。现场施工以基础设计参数为参照，结合现场实际工况完成动态修正。核心调控指标包含锚固孔孔径、钻孔深度、锚杆布设间距、注浆压力与喷射混凝土厚度等关键内容。完整度较高的硬质岩体，可适度调整钻孔布设密度，优化施工效率。破碎程度较高、裂隙贯通性强的岩体，调整注浆压力与浆液配比，强化裂隙填充效果，提升岩体整体固结程度。坡面起伏较大、局部存在陡坎的位置，微调喷射施工风压与作业距离，保证防护层厚度均匀、附着牢固。动态化的参数调整模式，让施工工艺深度适配复杂多变的现场地质条件。

4.3 施工质量过程控制要点

危岩体治理工程的结构稳定性依靠全过程质量管控保障，阶段性验收无法覆盖施工全程的隐性质量隐患。质量管控体系贯穿施工准备、现场作业、成型核查全部阶段。前期阶段重点核查原材料性能指标、施工设备运行状态，排查机具故障与材料性能缺陷，杜绝不合格施工条件投入现场作业。作业阶段聚焦各核心工序的操作精度，规范钻孔角度、注浆流程、喷射作业、裂隙封堵的标准化操作，减少人为操作偏差带来的质量问题。锚固、深部注浆、隐蔽排水孔道等隐蔽施工内容，安排专人全程跟踪监管，记录施工实施状态，把控隐蔽工程施工质量。施工成型后系统排查坡面防护完整性、加固结构密实度、排水通道通畅性，及时处理表层开裂、局部空鼓、填充不密实等缺陷，从源头把控工程施工品质。

4.4 成套施工技术的适配性优化

常规边坡治理技术体系通用性较强，针对高陡峡谷边坡、临近枢纽构筑物、复杂破碎岩体的专项适配性不足，无法完全匹配本工程的特殊施工场景。结合孟底沟水电站枢纽区施工环境与地质特点，对原有零散施工工艺进行整合优化，形成适配现场工况的成套治理技术体系。梳理各类单一工艺的应用优势，建立清理、加固、防护、排水、封堵相互配合的组合式施工模式，补齐单一工艺治理能力不足的短板。针对高空临空作业、场地受限作业、构筑物防护作业等特殊场景，删减低效施工步骤，强化核心加固防护工序。结合区域气候特征与岩体变化规律调整工艺实施细节，提升整套技术体系对复杂地质、狭小场地、恶劣环境的适应能力。优化后的技术体系更适配山地水电站危岩体治理需求，可为同类山地水利工程边坡治理提供可靠的技术参考。

结束语

峡谷水电站枢纽区危岩体治理属于综合性边坡工程，地质条件与施工环境的复杂性，对施工工艺及现场管控提出严苛要求。通过梳理各类核心施工工艺，匹配适配特殊工况的专项施工技术，建立完整的工序管控、参数调整与质量控制体系，完成施工技术的针对性优化。整套技术与管控模式贴合山地水电站危岩体治理的实际场景，能够有效解决复杂坡面治理的施工难题，为同类型水利边坡治理工程提供成熟的技术参考。

参考文献

[1]彭明.卡拉水电站高边坡危岩体治理支护成孔方法研究[J].四川水力发电,2024,43(6):63-67.

[2]姚行,汪海雁.杨房沟水电站危岩体治理工程监理实践[J].水利水电快报,2023,44(z1):36-39.

[3]李静,张敬,唐忠敏,等.浅谈危岩体治理多源信息融合及数字移交[J].水电站设计,2024,40(3):103-107.