

复杂地质条件下拱坝坝基软弱夹层处理方案

周凌峰

浙江中水工程技术有限公司 浙江 杭州 310000

摘要：本文针对复杂地质条件下拱坝坝基软弱夹层的安全隐患，结合其定义分类与力学特性，系统阐述勘察技术、处理方案设计、施工技术及质量控制要点。通过钻探、物探结合室内试验获取基础数据，针对泥化、破碎等不同类型夹层及高应力、地下水富集等特殊工况，设计针对性处理方案，优化施工工艺与参数，建立全流程质量控制及风险防范体系，有效解决夹层导致的承载力不足、滑动失稳等问题，保障拱坝长期安全稳定运行，为同类工程提供技术参考。

关键词：复杂地质条件；拱坝坝基软弱夹层；处理方案

引言：拱坝作为经济性与安全性优越的坝型，对坝基地质条件要求严苛，而软弱夹层作为坝基核心隐患，在深切峡谷、高应力等复杂地质作用下，易软化、变形，降低坝基承载力，引发不均匀沉降及滑动破坏，威胁工程安全。随着拱坝建设向复杂地质区域延伸，夹层处理难度大幅提升。因此，开展复杂地质条件下拱坝坝基软弱夹层处理研究，优化勘察、设计与施工技术，对规避工程风险、保障拱坝安全运行具有重要现实意义与工程价值。

1 复杂地质条件下拱坝坝基软弱夹层基础理论与勘察技术

1.1 拱坝坝基软弱夹层基础理论

（1）软弱夹层定义与分类：软弱夹层是拱坝坝基中力学强度低、变形量大、遇水易软化的薄弱层状岩体，界定标准为抗压强度低于周围岩体30%且变形模量显著偏低。按成因、物质组成及力学性质，分为泥化夹层、破碎夹层、节理密集带等，其中泥化夹层以黏土矿物为主，遇水软化明显；破碎夹层由破碎岩体碎屑充填，整体性差；节理密集带由密集节理切割形成，力学性能不均。（2）软弱夹层力学特性：其关键力学参数远低于完整岩体，抗压强度多为5-20MPa，黏聚力、内摩擦角小，变形模量仅为周围岩体的1/5-1/10。这会大幅降低坝基承载力，引发不均匀沉降，削弱抗滑稳定性，易导致沿夹层滑动破坏，是坝基安全的核心隐患。（3）复杂地质条件对软弱夹层的影响：深切峡谷加剧岩体应力集中，促使夹层挤压变形；高应力导致夹层颗粒重组、强度下降；岩体卸荷使夹层裂隙张开、渗透性增强，进一步软化其性状，加剧对坝基稳定性的不利影响。

1.2 复杂地质条件下软弱夹层勘察技术

（1）勘察原则与内容：遵循全面性、针对性、科

学性原则，全面覆盖坝基范围，针对复杂地质重点区域重点勘察，采用科学方法保障数据准确性。勘察核心内容包括软弱夹层的分布范围、埋藏深度、厚度、物质组成、结构特征及力学参数，为坝基处理提供基础数据。

（2）现场勘察方法：采用钻探、物探、平硐揭露相结合的方式，针对复杂地质特点优化方案。钻探采用加密钻孔、斜孔钻进等方式，精准控制夹层揭露精度；物探结合地质雷达、地震反射法，快速排查夹层分布；平硐揭露直观观察夹层性状，补充验证钻探、物探结果^[1]。

（3）室内试验分析：采集现场夹层试样，开展土工试验、岩石力学试验，测定含水量、密度、抗压强度、抗剪强度等物理力学参数，通过试验数据拟合分析，明确夹层力学特性规律，为后续坝基处理方案设计提供可靠的数据支撑。

1.3 勘察数据整理与评价

（1）勘察数据整理：对现场勘察记录、钻孔数据及室内试验结果进行系统梳理、校验，剔除异常数据，建立软弱夹层勘察数据库，明确数据异常处理方法，通过重复试验、交叉验证等方式，确保数据的真实性和可靠性。（2）软弱夹层危害评价：结合拱坝受力特点，建立包含夹层厚度、力学参数、分布位置等指标的危害等级评价体系，量化分析夹层对坝基承载力、抗滑稳定性的影响程度，划分轻微、中等、严重三个危害等级，为坝基处理优先级划分提供依据。

2 复杂地质条件下拱坝坝基软弱夹层处理方案设计

2.1 处理方案设计原则与目标

（1）设计原则：严格遵循安全性、经济性、适用性、可施工性四大核心原则，结合深切峡谷、高应力、地下水富集等复杂地质条件，匹配拱坝工程等级及受力特点，避免过度处理造成成本浪费，同时杜绝处理不到

位留下安全隐患,确保处理方案科学合理、切实可行,实现安全与效益的平衡。(2)设计目标:明确处理后坝基承载力需满足拱坝设计荷载要求,抗滑稳定性安全系数达到规范规定标准,坝基不均匀沉降控制在允许范围之内,有效消除软弱夹层对坝基的不利影响,阻断夹层软化、渗透变形等隐患,确保软弱夹层处理后,拱坝能够长期安全、稳定运行,抵御各类复杂地质工况的影响。(3)设计依据:以《混凝土拱坝设计规范》《水利水电工程地质勘察规范》等相关行业规范为核心准则,结合前期软弱夹层勘察数据、室内试验成果,借鉴同类复杂地质条件下拱坝软弱夹层处理的成功工程案例经验,明确方案设计的核心依据,确保设计过程合规、设计成果可靠,符合工程实际需求。

2.2 不同类型软弱夹层处理方案设计

(1)泥化软弱夹层处理方案:针对泥化夹层强度极低、遇水易软化崩解、渗透性强的特点,采用“挖除置换+防渗排水”相结合的综合处理方案。对浅层泥化夹层,彻底挖除软弱物质,采用强度匹配的混凝土塞或浆砌石进行置换;对深层泥化夹层,铺设防渗板、布设排水孔,阻断地下水渗透路径,同时对周边岩体进行浅层灌浆,强化夹层与岩体的结合,提升整体稳定性。

(2)破碎软弱夹层处理方案:针对破碎夹层岩体松散、完整性差、力学强度低的特点,设计“固结灌浆+预应力锚固”协同处理方案。优化灌浆参数,采用高压固结灌浆方式,向夹层及周边破碎岩体注入浆液,胶结破碎颗粒,提升岩体整体性和强度;合理布置预应力锚杆或锚索,施加预拉力,约束岩体变形,增强夹层区域的抗滑、抗变形能力,确保坝基受力均匀^[2]。(3)缓倾角软弱夹层处理方案:针对缓倾角夹层(倾角小于 30°)易引发坝基深层滑动的风险,重点设计深挖齿墙、传力洞塞相结合的处理方案。沿夹层走向深挖齿墙,截断软弱夹层,阻断滑动路径;在夹层关键受力部位设置传力洞塞,采用高强度混凝土浇筑,将坝体推力有效传递至下部完整岩体,规避夹层滑动隐患,保障坝基深层抗滑稳定性。

2.3 复杂地质条件下特殊处理措施设计

(1)高应力区软弱夹层处理:结合高应力环境下岩体易松弛、夹层易挤压变形的特点,设计深层高压固结灌浆、预应力锚索强化处理措施。采用深层高压灌浆,深入夹层及下部岩体,提升岩体密实度和抗变形能力;布设高强度预应力锚索,施加足够预拉力,抵消部分地应力,防止岩体松弛和夹层变形,确保坝基在高应力作用下长期稳定。(2)地下水富集区软弱夹层处理:针

对地下水富集导致夹层软化、产生渗透变形的问题,设计“防渗帷幕+排水孔幕”联合处理措施。在坝基上游布设防渗帷幕,阻断地下水渗透通道;在夹层区域及坝基下游布设排水孔幕,加速地下水排出,削减坝基扬压力,降低地下水对软弱夹层的软化作用,防止渗透变形破坏。(3)多夹层叠加区处理:针对多类型、多层面软弱夹层叠加的复杂情况,设计协同处理方案,优化各处理措施的衔接顺序与参数。优先处理影响坝基安全的核心夹层,采用“先固结、后防渗、再锚固”的顺序,统筹衔接挖除置换、灌浆、锚固等措施,避免不同处理方式相互干扰,确保处理效果叠加,全面提升坝基整体稳定性^[3]。

2.4 处理方案优化设计

(1)优化方法:采用数值模拟法,优先选用局部加密有限元法,构建复杂地质条件下拱坝坝基三维力学模型,模拟不同处理方案下坝基及软弱夹层的受力、变形特性,对比分析各方案的安全性、经济性和可行性,排查方案存在的不足,为方案优化提供科学依据。(2)参数优化:针对灌浆压力、灌浆材料配比、锚固深度、置换厚度等关键设计参数,通过室内试验、现场试施工及数值模拟分析,开展多组参数对比试验,确定最优参数组合。在保障坝基安全的前提下,合理优化参数,降低施工成本,实现安全性与经济性的双重提升,确保处理方案既可靠又经济。

3 拱坝坝基软弱夹层处理施工技术与质量控制

3.1 施工技术选择与工艺流程

(1)施工技术选择:结合前期确定的软弱夹层处理方案及深切峡谷、高应力、地下水富集等复杂地质条件,针对性选择适配的施工技术,确保技术可行性与处理效果。对浅层软弱夹层,选用预裂爆破开挖技术配合混凝土置换工艺;对深层破碎、泥化夹层,采用高压灌浆技术加固岩体;对缓倾角及高应力区夹层,搭配预应力锚固技术提升抗滑、抗变形能力,明确各技术适用范围,避免技术与地质条件不匹配导致施工隐患或处理失效。(2)总体工艺流程:严格制定“勘察复核—开挖清理—处理施工—质量检测”的总体施工流程,明确各环节衔接要求与时间节点,确保施工有序推进。施工前首先对软弱夹层分布、性状进行二次勘察复核,验证前期勘察数据准确性;再开展开挖清理,清除表层松散岩体及软弱夹层物质;随后按照设计方案实施针对性处理施工;最后通过全面质量检测,合格后方可进入下一工序,形成闭环管理。

3.2 关键施工技术要点

(1) 开挖与置换施工: 针对复杂地质条件下开挖易坍塌、超欠挖控制难度大的问题, 采用预裂爆破+光面爆破组合工艺, 精准控制爆破参数, 减少爆破对周边完整岩体的扰动, 将超欠挖控制在规范允许范围内。优化混凝土置换施工工艺, 置换前对开挖面进行彻底清理、凿毛, 铺设界面剂, 采用分层浇筑、振捣密实的方式, 确保置换体与基岩结合紧密, 提升置换体承载能力与整体性。(2) 灌浆施工: 明确固结灌浆、帷幕灌浆的核心施工参数, 根据软弱夹层类型调整灌浆压力、灌浆量及灌浆速度。优化制浆工艺, 采用超细水泥浆液, 提升浆液渗透能力, 适配破碎、泥化夹层的灌浆需求; 灌浆过程中做好压力监测与记录, 采用分段灌浆、循环灌浆方式, 及时处理灌浆中断、漏浆等问题, 确保灌浆饱满, 提升夹层及周边岩体的力学强度与防渗性能^[4]。(3) 锚固施工: 严格规范锚孔钻孔、钢筋笼安装、混凝土浇筑等全流程操作, 根据地质条件与设计要求, 精准控制锚孔间距、倾角及深度, 钻孔完成后及时清理孔内岩粉与积水。钢筋笼安装确保位置准确、固定牢固, 混凝土浇筑采用高压泵送方式, 确保锚固段填充密实, 避免出现空洞、断桩等质量缺陷, 保障锚固效果, 有效传递坝体推力。

3.3 施工质量控制体系

(1) 施工前质量控制: 严格审核施工方案的科学性、可行性与合规性, 结合复杂地质条件优化施工细节; 对混凝土、水泥、锚杆等原材料进行抽样检验, 确保原材料质量符合设计标准; 对施工设备进行调试与校验, 保证设备运行稳定; 做好施工人员技术交底, 明确施工要点、质量标准及安全注意事项, 提升施工人员操作规范性。(2) 施工过程质量控制: 建立现场质量检查机制, 安排专业质检人员全程值守, 对开挖尺寸、灌浆压力、锚固深度、混凝土浇筑质量等关键指标进行实时监测与抽查, 做好检查记录。针对施工中出现超欠挖、灌浆压力异常、锚固质量不达标等问题, 及时停工整改, 明确整改措施与整改时限, 确保施工质量符合设计要求^[5]。(3) 施工后质量检测: 采用井下电视、声波测试、压水试验等多种检测手段相结合的方式, 对软弱夹层处理效果进行全面检测。通过井下电视直观观察夹层处理情况, 声波测试检测岩体完整性与力学强度, 压

水试验验证防渗性能, 对检测不合格区域及时采取补灌浆、补锚固等补救措施, 确保处理后坝基满足拱坝长期安全运行的设计要求。

3.4 复杂地质条件下施工风险防控

(1) 风险识别: 结合复杂地质条件, 全面识别施工过程中可能面临的各类风险, 建立详细风险清单。主要包括高应力区岩体坍塌、地下水富集区突涌、灌浆失效导致夹层强度不达标、锚固施工偏差引发结构失稳等风险, 明确各类风险的发生概率、影响范围及危害程度, 为防控措施制定提供依据。(2) 防控措施: 针对风险清单中的各类风险, 制定针对性防控措施。对岩体坍塌风险, 施工中设置临时防护支护, 控制开挖进度, 避免一次性开挖深度过大; 对地下水突涌风险, 提前布设排水孔幕, 加强地下水监测, 及时排出积水; 对灌浆失效风险, 优化灌浆参数, 加强灌浆过程控制, 做好灌浆质量复检; 对锚固偏差风险, 采用精准定位设备, 加强锚孔施工过程监测, 确保施工质量, 全方位保障施工安全。

结束语

复杂地质条件下拱坝坝基软弱夹层处理是保障拱坝安全的关键环节, 需兼顾勘察精准性、设计科学性、施工规范性与质量可控性。本文结合软弱夹层特性与复杂地质工况, 构建了“勘察-设计-施工-质控”一体化处理体系, 通过针对性方案与防控措施, 有效消除夹层隐患, 满足拱坝运行要求。后续可结合工程实际, 进一步优化数值模拟与施工参数, 积累同类工程经验, 为复杂地质区域拱坝坝基处理提供更完善的技术支撑。

参考文献

- [1] 宋子亨, 刘耀儒, 杨强. 高拱坝基础不对称性及其加固效果研究[J]. 岩土力学, 2021, 38(02): 507-516.
- [2] 杨智超. 水利工程中大坝加固的施工技术[J]. 建材与装饰, 2021, 7(20): 279-280.
- [3] 刘义祥, 郭志军. 水库主坝防渗加固设计与施工技术分析探讨[J]. 四川建材, 2022, 8(04): 145-147.
- [4] 傅亮. 浅谈水库大坝除险加固技术[J]. 建材与装饰, 2021, 16(08): 267-268.
- [5] 唐燕芳. 组合防渗技术在新安水库除险加固中的应用[J]. 水利科技, 2023, 14(03): 40-43.