

临河厂房水利工程边坡稳定性及支护措施研究

徐志祥

新疆水利水电勘测设计研究院有限责任公司 新疆 乌鲁木齐 830000

摘 要: 临河水利厂房所处岸坡地质条件复杂, 长期受河道水流冲刷、水位周期性涨落、地下水渗流浸泡、岩土体风化软化以及厂房荷载、施工扰动等多重因素共同影响, 边坡极易出现滑移、崩塌、塌岸、渗漏变形等安全隐患, 严重威胁厂房结构安全、设备正常运行与工程整体防洪安全。本文结合临河水利厂房边坡工程特点, 系统分析岸坡岩土结构、水文地质条件、水岩耦合作用、外界荷载扰动等边坡失稳主控因素, 采用极限平衡分析法开展边坡稳定性计算评价, 总结临河边坡典型破坏模式, 针对性提出排水防渗、坡面防护、锚固抗滑、坡脚防冲、动态监测一体化综合支护治理方案。研究成果可为同类临河水利厂房边坡设计、施工加固、安全运维提供理论依据与工程参考, 有效提升临水水工建筑物边坡长期稳定安全水平。

关键词: 临河厂房; 水利边坡; 渗流作用; 边坡稳定性; 支护加固; 岸坡防护

引言

水利水电工程是国民经济基础性、战略性工程, 临河厂房作为水利枢纽重要组成部分, 承担发电、防洪、供水、调蓄等核心功能, 建筑物安全等级高、运行年限长、安全风险管控严格。大量水利厂房依河而建, 紧邻河道岸坡布置, 边坡既是厂房基础围护结构, 又是河道与建筑物之间重要过渡载体。河道水流长期冲刷坡脚、汛期洪水水位急剧上升、枯水期水位快速消落, 使得岸坡岩土体反复干湿循环、强度持续衰减, 地下水与河水水力连通密切, 渗流场不断变化, 极易诱发边坡失稳破坏。

1 研究背景与意义

同时厂房基坑开挖、山体卸荷、结构自重荷载、运营振动、雨水入渗等进一步打破坡体原有应力平衡, 临河边坡滑坡、坍塌、岸线坍塌、渗流破坏事故频发。一旦水利厂房边坡失稳, 不仅会造成厂房开裂、基础沉降、设备损毁, 还会堵塞河道、影响行洪安全, 引发重大安全事故与巨大经济损失。因此深入开展临河厂房水利边坡稳定性分析, 科学选用合理支护加固措施, 精准防控水致边坡灾害, 对保障水利工程安全长效运行、防范地质灾害、降低工程风险具有十分重要的理论价值与工程现实意义。

1.1 国内外研究现状

国外岩土工程与边坡稳定性研究起步较早, 长期围绕岩土强度理论、极限平衡理论、渗流力学、数值模拟技术开展大量研究。早期以瑞典条分法、毕肖普法为代表极限平衡理论广泛应用于土质边坡稳定计算, 后续逐

步考虑孔隙水压力、动水压力、水位变动影响, 完善临水边坡稳定性评价体系。随着计算机技术发展, 有限元、有限差分、离散元等数值模拟方法不断成熟, 能够精准模拟水位升降、渗流耦合、开挖卸荷全过程边坡应力应变变化, 清晰展现滑坡破坏演化规律。

国内水利工程、岩土工程行业针对江河岸坡、水库库岸、临河水工建筑物边坡开展大量工程实践研究。众多学者认识到水是临河边坡失稳核心诱因, 水位骤降产生强大渗透力、水流淘蚀掏空坡脚、岩土遇水软化泥化是主要致灾原因。国内逐步形成库岸塌岸预测、临河边坡渗流稳定计算、软硬互层边坡破坏模式、综合防护加固成套技术。在水利厂房边坡领域, 结合水工结构特点, 兼顾防洪、抗冲、抗滑、防渗多重要求, 广泛应用锚杆框架、锚索格构、抗滑桩、浆砌石护坡、混凝土挡墙、排水廊道等组合支护形式。

但目前临河厂房边坡仍存在针对性不足问题, 多数通用边坡理论未充分结合厂房永久荷载、高频水位变动、长期水流冲刷、干湿循环劣化等特殊工况, 多工况耦合稳定性分析不够全面, 支护措施耐久性、抗冲刷能力、防渗排水协同设计不完善, 依旧存在边坡后期变形、渗漏、局部滑塌等病害, 相关系统性综合研究仍有待进一步深化完善。

1.2 研究内容与技术路线

本文主要研究内容包括: 第一, 梳理临河厂房边坡工程地质、地形地貌、水文气象、河道水文特征, 总结边坡岩土物理力学性质; 第二, 分析影响临河边坡稳定性内部地质因素与外部诱发因素, 重点研究水位涨落、

渗流作用、水流冲刷、施工荷载对边坡稳定影响机理；第三，采用极限平衡法计算不同工况下边坡稳定安全系数，判定边坡稳定状态，归纳边坡典型失稳破坏模式；第四，结合工程实际，提出边坡防渗排水、坡面防护、抗滑锚固、坡脚防冲加固、长期安全监测综合支护治理措施；第五，总结工程应用要点，提出临河水利厂房边坡安全管控建议。

研究技术路线：资料收集整理 → 工程地质水文分析 → 边坡影响因素梳理 → 多工况稳定性计算

2 临河厂房边坡工程地质及水文特征

2.1 地形地貌条件

临河水利厂房边坡地处河道岸坡地带，整体地形起伏明显，岸坡坡度较陡，上部山体完整性一般，下部紧邻河道，临空面发育。河道蜿蜒曲折，岸坡冲刷岸明显，坡脚长期受主流冲刷侵蚀，岸线持续后退。厂房区域地势相对平缓，开挖后形成人工高边坡，边坡高度较大，坡体上部覆盖土层，下部为基岩，整体呈上覆土层、下伏基岩二元结构地貌。

边坡地表植被分布不均，坡面风化强烈，降雨极易沿地表入渗。河道宽窄变化明显，汛期洪水流速快、冲刷能力强，枯水期水流平缓，岸坡水位变化幅度大，岸坡应力与渗流环境交替变化频繁，不利于边坡长期稳定^[1]。

2.2 岩土体工程地质性质

边坡上部多为粉质黏土、粉土、残坡积土，结构松散，孔隙较大，透水性中等，遇水易软化、湿陷、强度下降，抗冲刷能力极差，雨水入渗后极易发生表层溜塌、坡面冲刷破坏。土层黏聚力较低，抗剪性能差，是浅层边坡滑动主要介质。

边坡下部基岩多为泥岩、砂岩、页岩互层岩体，岩体层理分明，节理裂隙发育，岩体完整性较差。泥岩遇水极易泥化、崩解、软化，长期干湿循环后岩体强度大幅衰减；砂岩强度相对较高，但裂隙发育易导水，形成贯通渗流通道。

同时边坡存在风化分层现象，强风化岩体破碎松散，中风化岩体相对完整，微风化岩体稳定性较好。开挖卸荷后表层岩体进一步松弛破碎，裂隙张开扩展，地下水更容易渗入坡体，加剧坡体失稳风险^[2]。

2.3 水文气象与河道水文条件

工程区域降雨季节分布不均，汛期降雨集中、暴雨频发，大量地表雨水快速入渗边坡，抬高地下水位，增大孔隙水压力，降低岩土有效抗剪强度。气温季节变化

明显，岩土反复冻融循环、干湿循环，长期劣化岩土结构，持续降低边坡整体稳定性。

河道水位具有显著季节性变化特征，汛期高水位持续时间长，河水浸泡坡体，坡脚土体饱和和软化；汛期过后水位快速下降，坡体内地下水滞后排泄，形成指向河道的强大动水渗透压力，推动坡体下滑。

2.4 厂房工程荷载作用特点

水利厂房为永久性水工建筑物，基础长期承受结构自重、设备荷载、上部构筑物静荷载，荷载持续稳定作用于边坡上部区域，增大坡体下滑推力。厂房运行过程中存在持续性振动荷载，振动会扰动岩土结构，降低岩体节理面摩擦力，促使裂隙扩展贯通，加速边坡变形累积。

3 临河厂房边坡稳定性影响因素及失稳机理

3.1 边坡稳定性内在影响因素

岩土体物理力学性质是边坡稳定内在基础。土体黏聚力、内摩擦角越小，边坡抗滑能力越弱，稳定性越差。软弱土层、泥化夹层、破碎岩体分布直接控制滑动面位置与规模，顺层岩层边坡稳定性远低于逆向岩层边坡。

地质结构面决定边坡破坏形式，节理、裂隙、断层、层理倾向河道时，极易形成顺层滑移通道。结构面倾角越小，滑动阻力越小，边坡越容易整体失稳。边坡坡高、坡角直接影响力分布，坡越高、坡越陡，下滑力越大，应力集中越严重，稳定安全系数越低^[3]。

岩体风化程度决定坡体整体完整性，强风化、全风化岩体整体性差、强度低、透水性强，极易发生浅层坍塌与表层冲刷破坏，同时为地下水渗流提供便捷通道，进一步诱发深层滑动。

3.2 边坡稳定性外部诱发因素

3.2.1 河道水位变动作用

水位长期升降循环是临河边坡最关键外部诱因。高水位工况下，坡体岩土饱和，孔隙水压力升高，有效应力降低，抗剪强度衰减；水位骤降时，坡内水位下降缓慢，内外水头差巨大，产生巨大指向临空面渗透力，显著增大下滑力。反复水位变动不断劣化岩土结构，边坡安全系数持续下降，逐步从稳定状态转向极限平衡、失稳破坏状态^[4]。

3.2.2 水流冲刷淘蚀作用

河道主流持续冲刷边坡坡脚，不断掏空下部土体与岩体，边坡下部支撑缺失，坡体重心外移，临空面高度增加。坡脚坍塌后上部岩体相继失去约束，逐级向上牵

引滑动,形成牵引式滑坡。

3.2.3 降雨入渗与地下水渗流

暴雨入渗快速抬高地下水位,增大静水压力与浮托力,弱化滑动面摩擦阻力。地下水持续渗流产生渗透力,带动土体颗粒移动,引发管涌、流土破坏。渗流不断冲刷裂隙充填物,扩大裂隙通道,形成贯通滑动面,最终诱发大规模边坡整体失稳。

3.2.4 施工与运营扰动

基坑开挖卸荷造成应力重分布,坡体松弛开裂;爆破施工振动扰动岩体结构,降低结构面强度;厂房长期静荷载增大边坡推力;多种扰动叠加,大幅降低边坡安全储备,诱发边坡失稳^[5]。

3.3 临河厂房边坡典型破坏模式

3.3.1 表层冲刷溜塌破坏

多发生土体边坡,雨水冲刷、河水浸泡导致表层土体饱和松散,沿坡面发生小规模溜滑、冲刷沟槽、坡面剥落,分布范围广、发生频率高,长期发展会扩大边坡破坏范围,诱发深层滑坡。

3.3.2 坡面顺层滑动破坏

软硬岩层互层边坡沿软弱岩层层面滑动,滑动面平缓贯通,滑坡规模大、整体性强,破坏突发性强,危害厂房主体安全。

3.3.3 坡脚坍塌牵引滑坡

坡脚被水流淘蚀掏空,下部先行坍塌,向上逐步牵引上部坡体滑动,属于临河边坡特有破坏模式,发展速度快,治理难度大。

3.3.4 渗流变形破坏

地下水渗流引发管涌、流土、潜蚀,土体结构破坏松散,边坡整体沉降滑移,伴随渗漏、塌陷等病害。

3.4 边坡稳定性评价方法

本次采用水利工程通用极限平衡瑞典条分法、毕肖普法计算边坡稳定安全系数。按照正常蓄水位、洪水位、水位骤降、暴雨工况、施工临时工况五种典型工况分别计算。根据水利边坡安全规范,永久性水工边坡正常工况安全系数不低于 1.25,非常工况不低于 1.15。安全系数大于限值边坡稳定,小于限值边坡不稳定,处于危险失稳状态。

4 临河厂房边坡综合支护防护措施

4.1 支护设计总体原则

结合临河厂房水利工程特点,坚持排水优先、防渗为辅、固坡抗滑、防冲护脚、综合治理、长效耐久原

则。兼顾渗流稳定、抗滑稳定、抗冲刷稳定、防洪安全,适配水位变动环境,抵抗干湿循环、水流侵蚀、风化劣化,做到主动加固与被动防护结合,坡面防护与坡脚加固结合,工程支护与长期监测结合,全面提升边坡整体稳定性。

4.2 防渗排水系统措施

水是边坡失稳核心诱因,排水防渗是临河边坡治理首要措施。

坡面设置截水沟,拦截地表雨水,避免雨水大量入渗坡体;坡体内部布置排水盲沟、排水廊道、仰斜排水孔,快速排出坡内地下水,降低孔隙水压力,减小渗透力。坡体临水侧设置防渗铺盖、土工膜防渗结构,阻隔河水渗入坡体,减小内外水头差。

4.3 坡面防护加固措施

浅层土体边坡采用浆砌石护坡、混凝土预制块护坡,封闭坡面,防止雨水冲刷、风化剥落、表层溜塌。岩土混合边坡采用锚杆框架梁+格构植草防护,锚杆深入稳定岩体,锚固松散坡体,框架约束坡面变形,格构内植草绿化兼顾生态与稳固效果。

4.4 坡脚防冲抗滑加固措施

针对河道水流淘蚀问题,坡脚修建混凝土挡墙、浆砌石护脚、石笼防护,加固边坡下部支撑结构,抵抗水流冲刷掏蚀。深层不稳定边坡设置钢筋混凝土抗滑桩,深入稳定地层,阻挡坡体整体滑移,承担巨大下滑推力。

结束语

抗滑桩布置在坡脚关键受力位置,有效控制牵引式滑坡、顺层滑坡发展,保障厂房基础安全。同时河道岸线修整平顺,优化水流流向,减少主流直冲坡脚,降低冲刷破坏频次,延长边坡使用寿命。

参考文献

- [1] 李涛. 阳泉矿区铁路隧道下覆岩隔离注浆充填开采实践 [J]. 煤矿安全, 2020,51 (2):155-158.
- [2] 张书勤. 石壕煤矿覆岩隔离注浆充填减沉技术研究与应用 [J]. 能源与环保, 2025,47 (5):155-160.
- [3] 许家林, 朱卫兵, 王晓振. 基于关键层位置的导水裂隙带高度预计方法 [J]. 煤炭学报, 2012,37 (5):762-769.
- [4] 沈传波. 新义煤矿覆岩离层注浆充填开采技术研究 [J]. 煤炭与化工, 2022,45 (10):31-33,70.
- [5] 江大伟. 覆岩离层注浆充填技术在矸石处置中的创新应用与实践 [J]. 中国矿业, 2025,34 (S2):1-7.