

地下水对水工建筑物的影响及稳定性分析

耿立军 王金伟

江苏省水利建设工程有限公司 江苏 扬州 225000

摘要: 本文聚焦地下水对水工建筑物的影响及稳定性分析。阐述地下水通过物理化学作用影响建筑物耐久性与安全性,引发渗透变形等典型工程地质问题。分析地质、水文、工程等因素对建筑物稳定性的影响。介绍理论计算与数值模拟等稳定性分析方法,以及防渗处理、排水减压等地下水控制与加固措施。强调动态监测与预警对保障建筑物稳定运行的重要性,为水工建筑物设计与维护提供全面参考。

关键词: 地下水;水工建筑物;渗流破坏;稳定性分析

1 地下水对水工建筑物的作用机制

1.1 地下水物理化学作用

地下水对水工建筑物的物理化学作用贯穿工程全生命周期,直接影响结构耐久性与安全性。物理作用中,渗透作用最为显著,水流通过建筑物地基或坝体孔隙产生渗透压力,改变结构受力状态,长期渗透还会引发土体颗粒流失,导致地基渗透变形。冻融循环作用同样关键,当水温降至冰点时,孔隙水结冰体积膨胀,对建筑物混凝土或岩体产生膨胀应力,融化后水分重新分布,反复循环使结构出现裂缝甚至剥落^[1]。化学作用主要表现为侵蚀与溶蚀,地下水中的碳酸根、硫酸根等离子与混凝土中的氢氧化钙、水化硅酸钙等成分发生反应,生成易溶或松软物质,降低混凝土强度。同时,地下水携带的盐分在结构表面结晶,产生结晶压力,加剧表层剥落,地下水的pH值异常还会加速钢筋锈蚀,破坏结构内部整体性,这些作用相互叠加,显著增加工程病害风险。

1.2 典型工程地质问题

地下水引发的典型工程地质问题直接威胁水工建筑物安全运行,需重点防控。渗透变形是最常见问题,包括管涌和流土两种形式,管涌发生在颗粒级配不均的土层中,地下水携带细颗粒通过粗颗粒孔隙流失,形成管状通道,导致地基承载力下降;流土则发生在黏性土或均匀细颗粒土层,当渗透力超过土体自重时,土体整体浮动破坏。基坑突涌也是重大隐患,当基坑开挖至地下水位以下,若下部存在承压水层,承压水压力超过上部覆盖层重量,会导致覆盖层突然破坏,地下水大量涌入基坑。地下水升降会引发地基沉降与不均匀变形,水位上升使土体饱和和软化,强度降低,水位骤降则导致土体有效应力增加,产生压缩沉降,这种变形会使建筑物出现裂缝、倾斜等病害。同时,地下水与岩体裂隙共同作用,会加剧岩体风化,降低岩体完整性,对闸坝、隧洞

等建筑物地基稳定性造成严重影响。

2 水工建筑物稳定性影响因素分析

2.1 地质条件

地质条件是决定水工建筑物稳定性的核心基础因素,其影响贯穿工程设计、施工及运行全过程。岩土性质直接主导稳定性,坚硬完整的花岗岩、石英岩等岩体抗压强度高、抗剪性能好,作为地基时能有效承载建筑物荷载,减少变形;而松散砂土、软黏土等土体孔隙比大、压缩性高,受荷载后易产生不均匀沉降,若遇地下水浸润,强度会大幅降低,增加失稳风险。地质构造同样关键,断层、节理等构造面会破坏岩体整体性,形成软弱结构面,当结构面与建筑物受力方向一致时,易发生滑动破坏;褶皱构造会使岩层产生弯曲变形,核部岩层破碎,承载力较低,需针对性采取加固措施。地形地貌也有重要影响,河谷狭窄地段两岸山体陡峭,易发生边坡崩塌、滑坡,威胁建筑物安全;而河谷宽阔平坦地段,地基土层分布相对均匀,但需关注沉积层厚度及分层情况,避免因土层分布不均导致建筑物受力失衡。

2.2 水文条件

水文条件通过水体动态变化直接作用于水工建筑物,对其稳定性产生持续影响,是工程设计必须重点考量的因素。地表水位变化是主要影响因素之一,水库蓄水后水位升高,会对坝体产生巨大静水压力,同时使坝基及两岸岩土体饱和,降低抗剪强度,若水位骤降,坝体上下游水位差增大,渗透压力急剧变化,易引发坝体裂缝或滑坡^[2]。地下水动态变化同样关键,地下水位上升会使地基土体软化,承载力下降,增加建筑物沉降量;水位下降则可能导致地基土固结压缩,引发不均匀沉降,同时地下水的流动会产生渗透力,长期作用易引发地基渗透变形。此外,水流速度与含沙量也会产生影响,高速水流会对建筑物迎水面产生冲刷作用,破坏混

凝土表面保护层,加剧结构磨损;含沙量高的水流会在建筑物进出口、泄洪道等部位产生淤积,改变水流状态,增加建筑物受力复杂度,若淤积严重还会影响工程正常运行功能,进一步间接影响结构稳定性。

2.3 工程因素

工程因素涵盖设计、施工及材料选用等多个环节,直接决定水工建筑物的先天质量与运行稳定性,任何环节的疏漏都可能引发安全隐患。设计方案合理性是首要保障,结构选型需适配工程地质与水文条件,若坝型选择与地基岩土体性质不匹配,会导致荷载传递不均,增加失稳风险;设计中若未充分考虑地下水渗透路径,防渗排水系统设计不足,会加剧渗透变形问题。施工质量控制至关重要,地基处理不到位,如软土地基未进行充分换填或加固,会导致地基承载力不足;混凝土浇筑时若出现振捣不密实、养护不当等问题,会使结构内部产生蜂窝、裂缝,降低抗渗性与强度;施工过程中若未严格遵循开挖顺序,随意扰动地基岩土体,会破坏其原有结构,降低稳定性。材料性能是结构安全的基础,混凝土强度等级、钢筋抗拉强度未达到设计要求,会导致结构承载能力不足;防渗材料如土工膜、止水带质量不合格,会引发渗漏问题,长期作用下加剧结构破坏,影响建筑物整体稳定性。

3 稳定性分析方法与模型构建

3.1 理论计算方法

理论计算方法是水工建筑物稳定性分析的基础手段,通过建立力学模型与数学公式,量化评估结构受力状态与稳定安全度,为工程设计提供核心依据。刚体极限平衡法在边坡、坝体稳定性分析中应用广泛,该方法将不稳定岩土体视为刚体,通过分析滑动面上的法向应力与剪应力,计算抗滑力矩与滑动力矩的比值,即稳定安全系数,判断结构是否稳定,其计算过程简便,能快速获取初步稳定评估结果,但未考虑岩土体变形特性,适用于初步设计阶段。有限元法基于弹性力学理论,将结构或地基划分为大量微小单元,通过建立单元平衡方程并求解整体方程组,得到应力、应变分布规律,可精准反映结构内部受力状态,考虑岩土体非线性特性与地下水渗流场耦合作用,适用于复杂地质条件下的精细化分析。另外,渗流理论计算是地下水相关稳定性分析的关键,通过达西定律计算渗透流速、渗透压力,结合流网法确定渗流路径与逸出坡降,评估渗透变形风险,这些理论方法相互配合,构成稳定性分析的基础框架。

3.2 数值模拟方法

数值模拟方法依托计算机技术,构建与工程实际高

度契合的虚拟模型,实现水工建筑物稳定性的动态、精细化分析,弥补理论计算的局限性。有限差分法通过将计算区域离散为差分网格,将偏微分方程转化为差分方程求解,能高效处理复杂边界条件,在坝体应力变形、地下水渗流模拟中应用广泛,可直观呈现荷载作用下结构内部应力变化过程,预测可能出现的破坏区域^[1]。离散元法适用于分析岩体等不连续介质的稳定性,将岩体视为由离散颗粒或块体组成,通过模拟块体间的接触、滑动与分离,揭示断层、节理等结构面对岩体稳定性的影响,精准预测边坡崩塌、隧洞围岩失稳等灾害发生过程。耦合模拟技术是当前发展趋势,将渗流场、应力场、温度场等多物理场进行耦合分析,如模拟水库蓄水过程中地下水渗流与坝体应力的相互作用,或冻融循环下温度变化对结构强度的影响,为工程设计优化与风险防控提供更全面、可靠的数值依据。

4 地下水控制与加固措施

4.1 防渗处理

防渗处理作为控制地下水对水工建筑物危害的核心举措,意义重大。混凝土防渗墙技术应用极为广泛。在坝基或基坑开挖完成后,利用冲击钻或抓斗进行成槽作业,随后浇筑混凝土,形成连续且稳固的墙体。这种墙体渗透系数极低、抗压强度高,能切实切断深层地下水渗流通道,尤其适用于深厚覆盖层地基防渗。依据工程实际需求,可选用塑性混凝土或刚性混凝土。塑性混凝土具备良好的变形能力,能适应地基的微小变形;刚性混凝土则以高强度著称,可增强结构的稳定性,二者兼顾了防渗与抗变形能力。帷幕灌浆通过在坝体或地基中钻孔,向孔内灌注水泥浆或化学浆液,形成连续的灌浆帷幕。浆液在岩土体孔隙或裂隙中扩散、凝固,填充渗透通道,显著提高岩土体抗渗性。灌浆材料的选择需紧密结合地质条件,裂隙发育的岩体适宜采用水泥浆,其成本较低且强度较高;细小孔隙土层则可采用化学浆液,能更好地渗透并增强防渗效果。土工合成材料防渗技术具有施工便捷、成本较低的优势。将土工膜铺设于坝体表面或地基表层,并结合土工布进行保护,形成复合防渗层。

4.2 排水减压

排水减压通过主动疏导地下水,有效降低地基或坝体内部的渗透压力,消除渗透变形隐患,与防渗处理形成协同防控体系,共同保障水工建筑物的安全。坝基排水系统是关键组成部分。在坝基趾部设置排水孔幕,钻孔需深入地基透水层。地下水通过排水孔汇集后,导入集水沟排出。这一过程可有效降低坝基扬压力,减少坝

体倾覆风险。排水孔间距与深度需根据渗流计算结果精确确定,确保排水效率达到最优。若排水孔间距过大或深度不足,会导致排水不畅,无法有效降低扬压力;反之,若间距过小或深度过大,则会造成资源浪费。反滤层设置是排水减压的重要保障,在排水体周边铺设由粗砂、砾石等组成的反滤层级配,可阻止地基土颗粒随水流流失,同时保证排水通畅。反滤层的颗粒级配需严格遵循设计要求,若滤料级配不合理,会出现滤料堵塞或土体流失问题。滤料堵塞会导致排水不畅,影响排水减压效果;土体流失则可能引发地基沉降,危及水工建筑物的安全。基坑排水在施工阶段至关重要。采用集水明排结合井点降水的方式,在基坑周边设置排水沟与集水井,通过水泵抽排降低地下水位。同时,针对承压水层采用管井降水,防止基坑突涌。排水过程中需实时监测地下水位变化,避免因水位骤降引发周边地面沉降,确保施工安全与地基稳定性。

4.3 结构加固

结构加固通过增强水工建筑物自身承载能力与抗变形能力,抵御地下水及其他因素引发的病害,保障工程长期稳定运行。混凝土结构加固中,外包混凝土加固法适用于坝体或闸墩等结构强度不足的情况,在原结构表面凿毛后,浇筑新的混凝土层,必要时配置钢筋,提高结构整体承载能力,施工中需确保新旧混凝土结合紧密,通过植筋等方式增强粘结性。预应力锚固技术广泛应用于岩体边坡或坝体加固,通过在岩体或结构中钻孔,植入预应力锚杆或锚索,施加预应力使岩体或结构处于受压状态,提高抗滑稳定性与整体性,锚索长度与预应力值需根据稳定性计算结果确定,确保加固效果。此外,裂缝修补技术是处理混凝土结构病害的关键,针对不同宽度裂缝采用相应措施,细小裂缝采用压力灌浆填充,宽度较大裂缝采用环氧砂浆嵌补,同时在裂缝表面粘贴碳纤维布,增强结构抗裂性能,防止地下水通过裂缝渗入内部加剧破坏。

4.4 动态监测与预警

动态监测与预警是保障水工建筑物稳定性的重要环节,通过实时采集关键数据,深入分析结构运行状态,及时预警潜在风险,为工程运维提供科学依据。监测内容涵盖多个维度。渗流监测通过布设渗压计、渗流量观

测堰,实时监测坝基、坝体的渗透压力与渗流量变化。当渗流量突然增大或渗透压力超过阈值时,提示可能存在渗透变形风险。例如,若渗流量在短时间内急剧增加,可能意味着防渗体系出现破损,地下水渗透通道扩大,需及时排查并处理。变形监测采用全站仪、水准仪、位移计等设备,监测坝体、边坡的沉降、水平位移及裂缝开合度,精准捕捉结构变形趋势,避免出现不均匀变形引发破坏^[4]。不均匀变形会导致结构内部应力集中,当应力超过结构承载能力时,就会引发裂缝甚至破坏。监测数据通过无线传输系统实时上传至监控中心,采用数据处理软件进行分析,建立稳定性评估模型。结合历史数据与实时数据,判断结构运行状态。若模型显示结构运行状态异常,需进一步分析原因并采取相应措施。预警系统根据风险等级设定不同预警阈值,当监测数据达到预警值时,通过短信、声光报警等方式及时通知运维人员。同时自动生成应急处置建议,为及时采取加固、排水等措施争取时间,最大限度降低灾害损失。例如,当渗流监测数据达到预警值时,预警系统会立即发出警报,运维人员可根据应急处置建议,迅速组织人员对防渗体系进行检查和修复,防止渗透变形进一步发展。

结束语

地下水对水工建筑物的影响复杂且深远,涉及物理化学作用、工程地质问题等多方面,稳定性受地质、水文、工程等多种因素制约。通过理论计算与数值模拟方法可有效分析其稳定性,采取防渗、排水、加固等措施能降低地下水危害。同时,动态监测与预警不可或缺。未来,需持续深入研究,不断优化防控措施,提升水工建筑物对地下水影响的能力,保障其长期安全稳定运行。

参考文献

- [1]陈雄,黄莉.地下水对地质工程稳定性的影响及对策研究[J].地下水,2023,35(3):45-52.
- [2]高飞,赵华.地下水开采对地质工程影响的数值模拟分析[J].工程地质学报,2022,30(4):89-95.
- [3]胡智,柳喆文.水工建筑物设计中的水文分析与水力计算[J].2024(18):157-159.
- [4]马绍云.水工建筑物对下游水文测验的影响[J].居舍,2021,(22):170-171.