

# Structural Design and Safety Analysis of Hydraulic Structures in Water Conservancy Engineering

Xiaohua Zhang<sup>1</sup> Sheng Bi<sup>2</sup>

1. China South-North Water Transfer Group New Energy Investment Co., Ltd., Beijing, 100073, China
2. Construction Management and Quality Safety Center of the Ministry of Water Resources, Beijing, 100038, China

## Abstract

Water conservancy engineering, as a key infrastructure, is crucial for flood control and drought resistance, water supply and irrigation, and hydropower generation. With the advancement of technology and social development, frequent extreme weather events have raised higher requirements for the safety and reliability of water conservancy projects. New materials and technologies provide new ideas for improving design levels. This article explores the structural design and safety analysis of hydraulic structures, sorts out current problems, elaborates on design principles, material selection, and load calculation, and proposes countermeasures based on case studies, including the application of new materials, the introduction of new technologies, and preventive maintenance strategies, in order to improve safety and look forward to future development trends, provide scientific basis for policy formulation, ensure engineering quality and safety, promote technological innovation and sustainable development.

## Keywords

water conservancy engineering; Hydraulic structures; Structural design; Security

## 水利工程中水工建筑物的结构设计与安全性分析

张晓华<sup>1</sup> 毕生<sup>2</sup>

1. 中国南水北调集团新能源投资有限公司, 中国·北京 100073
2. 水利部建设管理与质量安全中心, 中国·北京 100038

## 摘要

水利工程作为关键基础设施, 对防洪抗旱、供水灌溉和水力发电至关重要。随着科技进步和社会发展, 极端天气频发, 对水利工程的安全性和可靠性提出更高要求。新材料和新技术为提升设计水平提供了新思路。本文探讨水工建筑物的结构设计与安全性分析, 梳理现状问题, 阐述设计原则、材料选择及荷载计算, 并结合案例提出应对措施, 包括新材料应用、新技术引入及预防性维护策略, 以提高安全性并展望未来发展趋势, 为政策制定提供科学依据, 保障工程质量和安全, 促进技术创新和可持续发展。

## 关键词

水利工程; 水工建筑; 结构设计; 安全性

## 1 引言

水利工程在现代社会中发挥着不可替代的作用, 从防洪、灌溉到供水、发电, 展示了巨大价值。中国现有水库 9.8 万多座, 年供水量约 6000 亿立方米, 有效缓解水资源短缺并提高农业生产效率。全球许多国家将水利工程建设视为发展战略的重要部分, 如荷兰通过堤坝系统抵御海水倒灌。水工建筑物如大坝、溢洪道等对水利系统的正常运行至关重要, 三峡大坝和胡佛大坝是典型代表。然而, 气候变化带来的极端天气和城市化进程加快使水利工程面临新的挑战, 需更灵活应对复杂气候环境, 提升水资源循环利用, 并注重生

态保护, 平衡经济效益与社会效益。

## 2 水工建筑现状概述

全球范围内, 水工建筑物在防洪、灌溉、供水、发电等领域发挥着重要作用。古代文明如古埃及和中国已有早期水利工程, 为现代水利建设奠定基础。20 世纪后, 随着工程技术进步和需求增长, 水工建筑物数量和规模迅速增加, 尤其二战后, 许多国家启动大规模水利项目以满足人口和经济发展需求。美国修建大量水库和水电站, 中国三峡大坝成为标志性工程, 提升了区域防洪和电力供应能力。然而, 气候变化导致极端天气频发, 老旧设施难以应对, 城市化进程加快使水资源需求增加, 部分地区出现短缺现象。环保意识增强促使新建或改造项目更加注重生态平衡, 设计鱼道等设施, 并采用环保材料。未来水利工程建设需要创新和完善,

【作者简介】张晓华(1981-), 女, 中国河南安阳人, 本科, 高级工程师, 从事抽水蓄能工程防汛减灾技术研究。

以应对多重挑战,实现水资源高效利用与环境保护的平衡。

### 3 结构设计基础理论

#### 3.1 设计原则

在水利工程结构设计中,首要原则是安全性,确保建筑物在各种工况下稳定运行,如大坝需抵抗洪水、地震等自然灾害。过去十年,全球因水工建筑失稳导致的直接经济损失高达数十亿美元,凸显安全设计的重要性。功能性也是关键,不同设施有不同的功能需求,如水电站需满足发电要求,灌溉渠道需保证水流顺畅均匀分布。经济性同样重要,在保证安全与功能的前提下应尽可能降低建设成本,某大型水库通过优化设计方案节省了约15%的工程预算。可持续性原则日益受到重视,材料选择和施工过程中应减少对环境的影响,并考虑建筑的长期维护和使用寿命。

#### 3.2 材料选择

材料的选择直接关系到水工建筑物的安全性、耐久性和经济性。对于混凝土而言,它是最常用的建筑材料之一,具有强度高、可塑性强等优点。但在水利工程中,对混凝土的抗渗性能有较高要求。例如,在地下隧道衬砌结构中,若混凝土抗渗性能差,地下水可能会渗透进来,造成结构内部钢筋锈蚀等问题。为此,通常会添加防水剂来提高混凝土的抗渗性。钢材也是重要的结构材料,主要用于制作预应力构件。在桥梁建设中,采用高强度低松弛预应力钢绞线可以有效减小截面尺寸,减轻自重。另外,新型复合材料逐渐应用于水工建筑领域。比如玻璃纤维增强塑料(GFRP),这种材料重量轻、耐腐蚀性好,特别适合用于海水环境中的闸门结构。在一些小型水利工程中,已经尝试使用GFRP替代传统金属材料,取得了较好的效果。

#### 3.3 荷载计算

荷载计算是结构设计的基础,包括静力荷载和动力荷载。静力荷载如建筑物自重和设备重量,以大坝为例,其重量可达数百万吨,对地基产生巨大压力。动力荷载包括水流冲击力、风荷载等,洪水流经溢洪道时,流速达10m/s可产生数千牛顿的动水压力。地震荷载在地震多发区尤为重要,如日本水利工程需按当地烈度进行抗震分析,7级以上地震可能造成严重破坏,需合理设置抗震措施。温度荷载也不容忽视,水工建筑物内外温差引起变形,寒冷地区冬季气温骤降可能导致裂缝,威胁大坝安全性。设计过程中需充分考虑并精确计算各种荷载因素的影响<sup>[1]</sup>。

### 4 当前设计面临的问题

#### 4.1 技术难题

水利工程中,水工建筑物设计面临诸多技术挑战。地质条件复杂性是重大障碍,如山区水库大坝需应对复杂岩层和断层,增加基础处理难度并可能导致不均匀沉降,约30%大坝事故与此相关。水流动力学影响也不容忽视,洪水冲击力对建筑物破坏巨大,但气象多变性和地形特殊影响

使参数难以准确预测。科技进步带来新材料、新工艺,合理选择应用成难题,高性能混凝土配比复杂施工要求高,新型复合材料长期性能缺乏实验数据支持,限制其广泛应用。

#### 4.2 环境挑战

环境问题制约水工建筑物设计,生态保护要求严格,许多水利工程位于生态敏感区,建设可能破坏当地生态系统,如拦河大坝影响鱼类洄游和生物多样性。气候变化带来的极端天气频发也带来挑战,海平面上升使沿海防潮闸、海堤需重新评估设计标准,暴雨增加内陆水库泄洪压力。合理分配水资源同样重要,设计时需平衡上下游用水需求,不合理设计可能导致下游水资源短缺和社会矛盾,如干旱地区上游修建水库未考虑下游需求,导致农作物减产和居民饮水困难。

#### 4.3 经济成本

水工建筑物设计需考虑经济成本,从规划到运营维护各环节资金投入大。设计阶段采用高标准材料和技术增加成本,如大型混凝土拱坝原材料成本占总造价60%以上,人工费用也逐年上升。此外,征地拆迁、土地补偿和安置费用高昂,尤其在大城市或风景区内更为显著,通货膨胀和利率波动影响总投资。运营维护成本同样重要,需定期检查、维修和更新设备,如水电站大坝每年需数十万元用于监测和防腐处理。若设计时未充分考虑后期维护需求,可能导致过高维护成本,影响项目可持续发展<sup>[2]</sup>。

### 5 安全性影响因素分析

#### 5.1 自然灾害影响

自然灾害对水利工程中的水工建筑物安全影响深远。地震可导致坝体位移、裂缝甚至坍塌,如2011年日本福岛第一核电站及附近堤坝受损。强地震波产生的剪切力和拉力若超出坝体抗震设计能力,易引发安全事故。洪水因气候变暖频发,暴雨强度和洪水流量增加,中国南方某水库曾因暴雨入库流量剧增,漫过坝顶冲毁部分设施并侵蚀坝体。泥石流携带泥沙石块冲击水工建筑物,堵塞泄洪通道,降低泄洪效率,危及工程安全运行。风暴潮是沿海地区主要威胁,强台风引发的海水异常上升形成巨浪冲击海堤,如2018年台风“山竹”登陆广东珠海,海堤溃堤造成严重经济损失,长期侵袭使海堤混凝土剥蚀、钢筋锈蚀,削弱整体稳定性。

#### 5.2 人为因素干扰

在水利工程中,人为因素对水工建筑物安全性影响显著。施工过程中,施工单位为赶工期或节省成本,可能偷工减料,如混凝土振捣不密实导致坝体内部缺陷,基础处理不当引发沉降不均。此外,水库周边未经处理的工业废水和生活污水直接排入,改变水体化学性质,加速混凝土老化并腐蚀金属结构部件。航运交通方面,船舶航行产生的波浪和水流冲击桥梁、船闸等结构物,特别是在航道拥挤时,更加明显。例如某大型船闸因船只超速行驶导致水流紊乱,增加闸

门操作难度并磨损结构,缩短使用寿命。这些因素共同威胁着水利工程的安全运行。

### 5.3 结构老化问题

水工建筑物随着时间推移会出现结构老化,混凝土材料老化体现在物理和化学方面。物理上,温度变化和干湿循环导致混凝土变形和裂缝,降低整体性和承载能力;化学上,水泥石碳化使钢筋失去保护而锈蚀,膨胀后进一步加剧开裂。金属结构如钢结构易在潮湿环境下腐蚀,导致强度下降,影响稳定性;橡胶止水带则因老化变脆失去止水功能。例如,某老旧水库大坝表面出现细小裂缝,某服役50年的水闸因钢筋锈蚀导致混凝土脱落,某水电站拦污栅严重锈蚀,均需大规模维修或更换<sup>[3]</sup>。

## 6 提高安全性的方法

### 6.1 新材料应用

随着科技发展,新材料在水利工程水工建筑物设计中广泛应用。纤维增强复合材料(FRP)因高强度、轻质和耐腐蚀性能,在桥梁和堤坝加固中表现突出,某大型水库大坝加固项目使用FRP提高了坝体抗拉强度并延长使用寿命。高性能混凝土(HPC)逐渐成为主流选择,其优异力学性能和耐久性有效抵抗恶劣环境影响,采用HPC建造的泄洪道比传统混凝土寿命提升约30%。新型防水材料如聚脲弹性体涂层,柔韧性强,能封闭微小裂缝并适应变形,使用后渗透系数降低两个数量级。自愈合混凝土内含特殊胶囊,自动修复裂缝,增强安全性。

### 6.2 新技术引入

现代科学技术为水工建筑物安全性提供了多种新技术手段。BIM技术通过建立三维数字模型,实现从设计、施工到运营维护的信息集成管理,如在大型水利枢纽工程中利用多专业协同设计,提前发现并解决碰撞冲突问题,降低工程变更率约40%,提高施工效率和质量。无人机航测技术则快速获取高分辨率影像资料,及时发现坝体表面异常情况,在某山区小型水库巡检中工作效率提高近十倍。光纤传感技术提供高精度监测方案,传感器埋设于混凝土结构或粘贴于表面,实时监测应力、应变、温度等参数。例如,某跨海大桥通过安装光纤传感器实现对桥墩的长期健康监测,及时预警保障安全运行。这些技术共同提升了水工建筑物的安全性和管理效率。

### 6.3 预防性维护策略

预防性维护是确保水工建筑物长期安全运行的关键措施,定期检查制度为其基础。每年对坝体、溢洪道、闸门等关键部位进行全面检查,如某水电站大坝每三年进行地质勘探和结构检测,掌握坝基岩体稳定性变化并提前制定应对措施。发现问题及时修复,轻微裂缝采用环氧树脂灌浆材料修补,老化设备如启闭机应及时更换为新型液压式以提高稳定性。加强周围环境治理同样重要,清理河道淤积物保持过水

断面畅通,山区河流清淤疏浚使过流能力提高20%~30%,降低洪水威胁。做好植被防护工作,土石坝上游坡面种植适合草皮,减少雨水冲刷对坝坡侵蚀,保障坝体安全。

## 7 政策法规支持

### 7.1 行业标准

水利工程中的水工建筑物设计与施工需严格遵循行业标准,如《水利水电工程等级划分及洪水标准》(SL252-2017)和《混凝土重力坝设计规范》(SL319-2018)。这些标准详细规定了防洪要求、设计原则和应力分析等内容,确保工程安全性和可靠性。例如,大型水库设计洪水频率达百年一遇,某大型水库大坝建设严格按照规范进行,从地质勘察确定坝基承载能力到有限元分析模拟坝体应力分布,再到施工中严格执行混凝土配合比和浇筑工艺,确保各环节符合规范要求,最终保障坝体质量与安全。

### 7.2 法律保障

国家制定《防洪法》和《水法》等法律法规,以加强水利工程管理,保障水工建筑物安全。《防洪法》明确了各级政府和建设单位的职责,要求地方政府加大堤防加固等投入,工程建设单位不得擅自降低防洪标准。《水法》规定水资源开发应优先满足居民生活用水,并兼顾农业、工业和生态环境需求,在规划建设供水工程时需进行水资源论证。《建设工程质量管理条例》则对各方主体的质量责任进行了明确规定,确保工程质量。这些法律规定为水利工程的安全运行提供了坚实基础,如某跨流域调水工程中各参与方严格遵守条例,确保了工程高质量完成并顺利投入使用。

## 8 结语

随着科技的进步,水利工程中的水工建筑物设计与施工迎来新机遇。新型高性能混凝土和3D打印技术提升了结构稳定性和空间利用效率。物联网和大数据分析实现了精准监测,自动化设备提高了施工精度,VR和AR技术优化了设计方案。在可持续发展方面,生态影响被充分考虑,如设置鱼类洄游通道保护生态系统。绿色建筑材料如竹材、木材及建筑废弃物再利用减少了环境污染。高效发电设备如三峡水电站提升了能源效率,节能灯具和泵站优化降低了能耗。公众参与和社会责任意识的提高也促进了水利工程的可持续发展,政府加强宣传教育,鼓励社会各界共同监督和管理项目,推动水利事业健康有序发展。

### 参考文献

- [1] 郑泽棉.水工建筑物类水利工程项目施工风险影响因素评价与管理研究[J].水利科技与经济,2024,30(12):103-107.
- [2] 于海涛.基于《水工建筑物设计与水利工程管理》分析BIM技术在水利工程建筑设计中的应用[J].人民黄河,2022,44(11):173-174.
- [3] 李泽华,王歌.水利工程专业图书信息系统设计——评《水工建筑物》[J].灌溉排水学报,2022,41(10):148.