

水工结构工程的耐久性设计分析

王子豪 周钰棋

中水东北勘测设计研究有限责任公司

DOI:10.32629/hwr.v9i12.6685

[摘要] 水工结构工程是水利水电建设的核心组成部分,其耐久性设计直接关系到工程的长期安全与经济效益。当前水工结构工程在长期运行过程中面临着复杂的水环境侵蚀、荷载反复作用以及材料老化多重考验,使得耐久性问题日益凸显。本文系统阐述了水工结构工程耐久性的基本概念、设计原则与评价体系,深入分析了影响水工结构工程耐久性的主要因素。包括水环境侵蚀导致的材料劣化、荷载作用引起的结构疲劳损伤以及施工质量与运行维护管理的影响,并从材料选择与配合比优化、结构形式与防护措施设计、耐久性监测与寿命预测技术方面提出系统的实践策略。通过加强耐久性设计研究与实践应用,可以有效延长水工结构工程使用寿命,降低全生命周期成本。

[关键词] 水工结构工程; 耐久性设计; 材料劣化; 疲劳损伤; 寿命预测

中图分类号: TV1 **文献标识码:** A

Durability design analysis of hydraulic structure engineering

Zihao Wang Yuqi Zhou

Zhongshui Northeast Survey Design Research Co., Ltd.

[Abstract] Hydraulic structure engineering is the core component of water conservancy and hydropower construction, and its durability design is directly related to the long-term safety and economic benefits of the project. At present, the hydraulic structure is facing multiple tests of complex water environment erosion, repeated loads and material aging in the long-term operation process, and the durability problem is increasingly prominent. This paper systematically expounds the basic concepts, design principles and evaluation system of the durability of hydraulic structures, and deeply analyzes the main factors affecting the durability of hydraulic structures. Including material deterioration caused by water environment erosion, structural fatigue damage caused by load and the influence of construction quality and operation and maintenance management, and puts forward systematic practical strategies from the aspects of material selection and mixture ratio optimization, structural form and protective measures design, durability monitoring and life prediction technology. By strengthening the research and practical application of durability design, the service life of hydraulic structures can be effectively extended and the life cycle cost can be reduced.

[Key words] hydraulic structure; Durability design; Material deterioration; Fatigue damage; Life prediction

引言

水工结构工程是水利水电建设的重要基础设施,承担着防洪减灾、水资源调配、水力发电等关键功能,对国民经济发展和社会安全稳定具有重要意义。随着我国水利水电事业的快速发展,大量水工建筑物相继建成投入运行,但随着服役时间的延长,许多水工结构工程出现不同程度的耐久性问题,混凝土开裂、钢筋锈蚀、结构劣化现象频繁发生,不仅影响工程的正常运行,还可能带来严重的安全隐患和巨大的经济损失,水工结构工程长期处于复杂的水环境中,承受着水流冲刷、泥沙磨蚀、冻融循环、化学侵蚀等多种不利因素的作用。同时还要承受持续变化的荷

载,使得其耐久性问题更为突出,因此,深入研究水工结构工程的耐久性设计,对于提高工程质量、延长使用寿命、保障工程安全具有重要的理论价值和现实意义。

1 水工结构工程耐久性设计的理论基础

1.1 水工结构工程耐久性的基本概念与内涵

水工结构工程耐久性是指结构在设计使用年限内,在正常维护条件下抵抗各种环境作用和荷载作用而保持其安全性、适用性和外观完整性的能力。这一概念涵盖结构材料的抗劣化性能、结构体系的整体稳定性以及功能持续性等多个层面。耐久性设计不仅要考虑结构的初始强度和刚度,更要关注结构在长

期使用过程中性能的衰减规律。水工结构工程的耐久性内涵包括材料耐久性、结构耐久性和功能耐久性三个方面,它们相互关联、相互影响,共同决定结构的整体耐久性水平^[1]。

1.2 耐久性设计的基本原则与目标要求

水工结构工程耐久性设计应遵循预防为主、综合治理、全寿命设计的基本原则,预防为主要求在设计阶段就充分考虑各种可能影响耐久性的因素,采取有效措施防止或延缓结构劣化。综合治理强调从材料选择、结构设计、施工控制到运行维护的全过程管理,全寿命设计理念要求在设计时不仅考虑初期建设成本,更要综合考虑运行维护成本和报废处置成本。耐久性设计的目标是确保结构在设计使用年限内满足安全性、适用性和经济性要求,实现工程效益最大化和资源利用最优化^[2]。

2 影响水工结构工程耐久性的主要因素

2.1 水环境侵蚀与材料劣化作用

水工结构工程长期处于复杂的水环境中,承受着多种形式的侵蚀作用,这是导致结构材料劣化的首要因素,水流对混凝土表面的长期冲刷作用会造成表层材料的磨损和剥落,特别是在高流速区域^[3]。这种作用更为显著,泥沙磨蚀则进一步加剧表面的损伤,使混凝土保护层逐渐减薄,为其他侵蚀因素的深入创造条件,水中溶解的硫酸盐、氯离子等化学物质会渗透进入混凝土内部,与水泥水化产物发生化学反应,导致混凝土结构疏松、强度降低。氯离子的侵入还会破坏钢筋表面的钝化膜,引发钢筋锈蚀,锈蚀产物体积膨胀进而导致混凝土保护层开裂剥落,形成恶性循环。在寒冷地区,混凝土孔隙中的水分冻融循环作用会产生膨胀应力,反复的冻融循环导致混凝土内部微裂缝不断扩展,最终造成表层混凝土剥落,此外,碱骨料反应等内部化学作用也会引起混凝土膨胀开裂。这些水环境侵蚀作用往往同时存在、相互叠加,使得材料劣化过程更加复杂,对结构耐久性构成严重威胁^[4]。

2.2 荷载作用与结构疲劳损伤

水工结构工程在服役期间需要承受复杂多变的荷载作用,这些荷载的反复作用会导致结构产生疲劳累积损伤,这是影响结构耐久性的重要因素。水位变化引起的水压力周期性变化使结构承受反复的拉压应力,特别是在水位变动区,混凝土易产生疲劳裂缝。波浪荷载的周期性冲击作用对沿海或大型水库的水工结构工程影响显著,长期的波浪拍击会导致结构表面损伤和内部疲劳,泥沙淤积和冲刷引起的荷载变化也会影响结构的受力状态,使结构产生附加应力和变形,温度变化引起的温度应力同样不可忽视,日照、气温变化以及水温变化都会在结构内部产生温度梯度,引发温度应力。在约束条件下可能导致结构开裂,地震偶然荷载虽然发生频率较低,但可能对结构造成严重的损伤累积,这些荷载作用具有长期性、反复性的特点,即使单次荷载作用的应力水平不高,但经过长期累积也会导致结构性能退化,承载力下降,裂缝发展,最终影响结构的安全性和耐久性^[5]。

2.3 施工质量与运行维护管理

施工质量和运行维护管理水平对水工结构工程的耐久性具有直接而深远的影响,在施工阶段,混凝土配合比设计不当、原材料质量不合格、拌和不均匀、振捣不密实、养护不到位等问题都会导致混凝土密实度不足、孔隙率增大,为各种侵蚀介质的渗入创造条件。施工缝和变形缝处理不当容易形成薄弱环节,成为渗漏和劣化的起点,钢筋保护层厚度不足或不均匀会降低钢筋的防锈能力,模板支护体系不稳定可能导致结构尺寸偏差和表面质量问题,施工期间的温度控制措施不到位会引发温度裂缝。在运行维护阶段,缺乏系统的检测监测会使结构病害得不到及时发现,维修加固措施不及时或方法不当会导致小问题演变成大隐患,运行管理不规范可能使结构承受超设计荷载,定期的检查维护、及时的缺陷处理、科学的运行调度是保证结构耐久性的重要环节。只有建立完善的施工质量控制体系和运行维护管理制度,才能从根本上保证水工结构工程的长期耐久性。

3 水工结构工程耐久性设计的实践策略

3.1 材料选择与配合比优化设计

材料选择与配合比优化是提高水工结构工程耐久性的基础环节。在水泥选择方面,应根据工程所处环境条件选用抗侵蚀性能好的水泥品种,对于受化学侵蚀作用严重的部位应采用特种水泥,骨料的选择要注重其物理力学性能和化学稳定性,避免使用含有活性成分的骨料以防止碱骨料反应。在配合比设计中,应适当降低水胶比以提高混凝土密实度和抗渗性能。掺加适量的矿物掺合料如粉煤灰、矿渣粉、硅灰,既可改善混凝土的工作性能,又能优化孔结构、提高抗渗性和抗侵蚀性,合理使用减水剂、引气剂等外加剂可以改善混凝土性能,对于钢筋混凝土结构,应选用耐蚀性能好的钢筋,必要时可采用特殊防护钢筋。

例如,在某大型水利枢纽工程的泄洪闸设计中,针对闸室长期承受高速水流冲刷和泥沙磨蚀的工况。设计团队首先选用低热硅酸盐水泥作为胶凝材料主体,并复合20%的粉煤灰和8%的硅灰,形成三元胶凝体系,在配合比设计时,将水胶比严格控制在零点四以下,单方混凝土胶凝材料用量达到四百公斤,骨料方面选用质地坚硬、级配良好的玄武岩碎石,细骨料采用中砂并严格控制含泥量,为提高混凝土的抗冲磨性能。在易磨损部位的混凝土中掺加适量的钢纤维,掺量控制在体积比1.5%左右,同时配合使用高效减水剂和引气剂,使混凝土在保持良好工作性的同时,含气量控制在4%到6%之间,既提高抗冻性又改善抗渗性。通过这种优化的材料配置方案,该工程混凝土的抗压强度达到设计要求的同时,抗渗级提高两个级,抗冻级也显著提升,为结构的长期耐久性提供可靠保障。

3.2 结构形式与防护措施设计

合理的结构形式设计和有效的防护措施是保证水工结构工程耐久性的关键。在结构形式设计方面,应充分考虑结构所处的环境条件和受力特点,采用有利于耐久性的结构布置和构造措施,对于承受复杂应力的部位,应优化结构形式以降低应力集中,减少裂缝产生的可能性,合理设置变形缝和施工缝,并做好接缝防护处理,增加混凝土保护层厚度是防止钢筋锈蚀的有效措施,

对于侵蚀环境严重的部位应适当加大保护层厚度。在防护措施方面,表面防护是最直接有效的手段,可采用涂层防护、表面封闭剂、贴面防护方法形成保护层,阻隔侵蚀介质的渗入,对于受冲刷磨蚀严重的部位,应采用耐磨材料进行表面加固或设置防护结构。

例如,在某沿海地区的排涝泵站工程设计中,针对海水环境氯离子侵蚀严重的特点,设计采取系统的防护措施。首先在结构设计上,将迎水面混凝土保护层厚度由常规的三十五毫米增加到五十毫米,并在钢筋网外侧增设一层细石混凝土保护层,对于水位变动区这一最薄弱环节,专门设计分层防护体系:最内层采用高性能混凝土作为基体,水胶比控制在零点三五;中间层在混凝土表面涂刷两层渗透型防水涂料,形成深度防护;外层则采用环氧树脂砂浆进行面层防护,厚度达到十毫米。对于水下部位,在混凝土浇筑完成养护后,采用水下不分散混凝土技术增设一层保护层,对于闸门槽特殊部位,还嵌装耐腐蚀的合金材料衬板,此外,在泵站底板下方设置完善的排水系统。通过导水管和集水井及时将渗水排出,避免长期浸泡,这种多层次、多手段的防护体系建立后,经过十余年的运行检验,结构未出现明显的劣化现象,钢筋锈蚀检测结果显示保护效果良好,验证综合防护措施的有效性。

3.3 耐久性监测系统的建立与寿命预测方法的科学应用

建立完善的耐久性监测系统和应用科学的寿命预测方法是实现水工结构工程全寿命管理的重要技术手段,耐久性监测应覆盖结构的关键部位和薄弱环节,监测内容包括混凝土表面状况、裂缝发展、变形情况、钢筋锈蚀程度、渗漏情况。采用先进的监测技术可以实现对结构状态的实时或定期监测,建立监测数据管理系统,对监测数据进行系统分析和趋势判断,及时发现异常情况。在寿命预测方面,应建立基于劣化机理的预测模型,考虑材料劣化、疲劳累积、环境作用等多种因素的综合影响,常用的预测方法包括经验统计方法、数值模拟方法,实际应用中可综合运用多种方法以提高预测精度,基于监测数据和寿命预测结果,可以制定科学的维修加固计划。

例如,在某运行多年的水电站大坝安全监测项目中,建立一套完整的耐久性监测与寿命评估体系。首先在坝体的关键部位布设综合监测系统,在迎水面水位变动区每隔五米设置一个监测断面,每个断面布置表面状况摄像头、裂缝宽度测量仪和混凝

土电阻率测试电极,在坝体内部埋设光纤传感器监测应变和温度分布,在钢筋密集区安装电化学传感器监测钢筋锈蚀电位,监测频率根据部位重要性设定,水位变动区每月监测一次。其他部位每季度监测一次,所有监测数据通过无线传输汇集到监控中心的数据库系统,技术人员利用三年累积的监测数据,结合氯离子扩散理论建立该大坝混凝土劣化预测模型,通过反演分析确定模型参数,预测结果显示。在现有维护条件下,水位变动区混凝土保护层预计还能维持二十年左右,而钢筋锈蚀达到临界状态还需要约三十五年,基于这一预测,制定分阶段的维护方案:近期对表面出现细微裂缝的部位进行封闭处理,五年后对保护层劣化较严重的区域实施修复加固,从而实现从被动维修到主动预防的转变,大大降低维护成本,保障大坝的长期安全运行。

4 结语

水工结构工程的耐久性设计是一项系统性、综合性的工作,关系到工程的长期安全和经济效益。通过深入研究耐久性设计的理论基础,全面分析影响耐久性的各种因素,采取科学合理的设计和防护措施,可以有效提高水工结构工程的耐久性水平。在今后的工作中,应继续加强耐久性基础理论研究,完善设计规范和标准,推广应用新材料、新技术、新工艺,建立全寿命周期管理理念,为水利水电事业的可持续发展提供坚实的技术保障。

【参考文献】

- [1]赵新瑞.水工结构工程裂缝成因及防治探讨[J/OL].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2024(9)[2024-09-01].
- [2]张开军,鲁航线.耐久性设计在电厂水工结构工程中的应用探讨[J].城市道桥与防洪,2014,(4):242-244.
- [3]李飞.水工结构工程的耐久性设计分析[J/OL].中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,2017(4)[2017-05-13].
- [4]黄奕方.探讨水工建筑物结构设计中的相关问题[J/OL].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2019(12)[2019-12-12].
- [5]李旭.水工结构工程的耐久性设计分析[J].中国新技术新产品,2016,(24):89-89.

作者简介:

王子豪(1992--),男,汉族,吉林通化人,硕士,工程师,主要从事水利水电工程设计工作。