

# 强震作用下水工混凝土结构损伤演化机理与抗震加固技术研究

王昶力 胡剑超

中水北方勘测设计研究有限责任公司

DOI:10.12238/hwr.v9i7.6497

**[摘要]** 水工混凝土结构在地震影响下容易受损,因此研究损伤机理和加固技术对于提高建筑物的抗震性能至关重要。本文分析了水工混凝土结构在地震作用下的主要损伤机理,包括裂缝扩展、钢筋屈服和混凝土压碎等方面。同时,讨论了碳纤维加固、粘钢加固和预应力加固等加固技术的应用,以及它们在提升结构抗震性能方面的作用。研究结果显示,结合结构特点和地震环境,合理选择加固方法,能有效提高水工混凝土结构的抗震能力。

**[关键词]** 水工混凝土结构; 地震作用; 损伤机理; 加固技术; 抗震性能

中图分类号: TV331 文献标识码: A

## Research on Damage Evolution Mechanism and Seismic Strengthening Technology of Hydraulic Concrete Structures under Strong Earthquake Action

Changli Wang Jianchao Hu

China Water North Survey, Design and Research Co., Ltd.

**[Abstract]** Hydraulic concrete structures are prone to damage under seismic effects, so studying the damage mechanism and strengthening technology is crucial for improving the seismic performance of buildings. This paper analyzes the main damage mechanisms of hydraulic concrete structures under earthquake action, including crack propagation, steel bar yielding, and concrete crushing. Meanwhile, the applications of strengthening technologies such as carbon fiber reinforcement, steel bonding reinforcement, and prestressed reinforcement are discussed, as well as their roles in enhancing the seismic performance of structures. The research results show that reasonably selecting reinforcement methods according to structural characteristics and seismic environment can effectively improve the seismic capacity of hydraulic concrete structures.

**[Key words]** Hydraulic concrete structure; Earthquake action; Damage mechanism; Strengthening technology; Seismic performance

### 引言

地震是突发自然灾害,给人们的生活和社会经济带来了极大的损害。而水工程混凝土构件则是当今主要的建设方式,它在地震中受到的影响程度与人们的生命安全密切相关。本文致力于深度探索水工程混凝土构件在地震环境下受损的原因,以期阐明其损坏的过程,从而为其强化提供理论基础。此外,文章还将讨论目前普遍采取的增强措施,并对其实施后对于改善结构抗震能力的实际效果进行评估。透过更深层次地了解损毁机制及合理的运用加强手段,为提升水工程混凝土构件的防震能力带来新颖的角度和策略。

### 1 研究意义及重要性

作为水利工程中重要的一部分,水工混凝土结构在大坝、水闸、泵站和渡槽等多种类型的水利设备上留下了显著的印记。例如,混凝土重力坝能经受住强大的水压并阻断水流,从而达到

防止洪水和储存水的核心作用;而拱坝则是通过运用拱形的构造来把水压转移到两侧的山体,以此方式实现了更有效的防水效果。此外,在水闸内,混凝土闸室的设计可以精确控制开启和关闭的过程,进而调节水位和流量,确保了对农业、交通等方面用水的合理分配。所有这些水工混凝土结构的正常运转,不仅有助于维持地区水资源的均衡状态,保护人民的生命安全及财产,而且也为社会经济发展提供了稳定的动力源泉。

但是,对于水工混凝土结构来说,由自然灾害——强震所带来的挑战是巨大的。历史上,我们看到许多的水工混凝土建筑物受到严重的损害。比如,在一个特定的地震事件里,一栋大型混凝土重力坝出现大量穿透性的裂痕,使得混凝土脱落并引发了大规模的泄漏问题,这直接降低了它的防洪功能,因此必须立即实施应急救援行动来避免可能发生的溃坝事故。另外,还有一些混凝土渡槽因为地震的影响而遭到毁灭性的打击,整个渡槽结

构失去稳定性, 不再能胜任输送水的职责, 从而导致周围的大面积农田失去了供水来源, 这对当地的农业发展和生活质量产生了极大的负面影响。所有这一切都表明, 当面临强震时, 水工混凝土结构表现出非常弱势的一面, 同时也突出了对其受损过程及抗震强化技术的研究的重要性<sup>[1]</sup>。

深入探究了强震对水工混凝土建筑物的影响及其损伤发展机制, 有助于我们在微观与宏观层面上全面掌握其在地震压力影响下的破损进程。透过观察混凝土物质中的细小裂纹产生及扩张, 并结合结构部件在多次地震负荷冲击后的形变积累和刚度减弱等问题, 可以精确预估出各种地震强度条件下的损坏水平和破坏方式。此举为我们对抗震设计的理论支持提供更深层次的支持, 使工程师能在结构规划初期就能充分考虑到地震效应的多样性, 有效地调整结构构造和钢筋布置策略以增强结构的防震弹性。

## 2 水工混凝土结构损伤演化机理概述

水利工程建筑物中的混凝土构件损坏的过程是一种逐步发展的复杂和多元化的现象, 它主要表现为由内外的各种影响共同导致了物质及构造功能的逐渐减弱。由于这类设施长时间地置身于特殊的地理位置中, 它们需要面对多种外部的压力, 比如水质的腐蚀、气候的变化、冰冻-融解的反复循环以及持续的水流冲刷等。这种环境条件会引发混凝土材质内的物理化学变化, 从而推动细小裂纹的发生、扩大并最终连接起来。

从力的视角来看, 当水工混凝土结构面临多维度的应力状况, 它的内部分布的应力显示出明显的异质性。比如, 在水的压迫、砂石撞击和自身重量等多种负荷的影响下, 关键区域容易产生应力聚集的现象。初期的小瑕疵经过多次施加压力后, 会逐步转变为应力聚焦点, 从而加快损害的积累和扩大。相比普通建筑物, 水工混凝土结构的损坏进程还会被水泥化的热量、碱-矿物质反应等材料特性的变化所深刻影响, 这种深层次的变化与外界条件相结合, 推动了破坏过程的非线性进展<sup>[2]</sup>。

## 3 损伤演化的影响因素分析

### 3.1 环境因素

水工混凝土建筑物面临的环境挑战构成了损坏发展的关键驱动力之一。尤其是其中的水化学腐蚀现象, 如酸性水、含盐溶液及具有侵蚀性的离子影响下的水对混凝土的侵蚀效应。酸性水中和了混凝土中的碱性环境, 打破了其内的化学稳定状态, 从而引发了水泥石的分裂和溶解过程。而对于盐溶液的侵害来说, 它主要是以结晶压迫和化学反响两个途径来伤害混凝土。一旦盐溶液渗入混凝土内, 随着水分的挥发, 盐会形成结晶并扩张, 这会导致极大的内部压力, 进一步加速混凝土构造的破损。

### 3.2 荷载作用

承载各种复杂荷载的水工混凝土构筑物, 如静态水压力、动态水压力、砂石冲撞力和建筑物的自身重量等。其中, 静态水压力是一种长时间施加于其上的静态负担, 它会引起混凝土内的持久压应力并推动微裂纹的逐步扩展。而另一方面, 动态水压力以瞬间性和冲击力的特征存在, 尤其是在洪水和水流波动的环

境下, 对构件造成重复性的冲击负荷, 从而加快了损害的积累过程。比如, 某些排洪渠的混凝土护壁构造上, 因为排洪过程中水的快速冲击, 使得护壁表层产生了大量的裂痕, 这不仅降低了防护功能和整个系统的稳固程度。

### 3.3 材料特性

混凝土材料的属性对其损坏过程有着重要的影响。混凝土的类型和强度级别会对初始阶段的强度增长及后期的耐用性产生重要影响。尽管使用高级别的水泥可以带来更高的初期强度, 但是它的高水化热量可能引发早期的破损。此外, 骨料的品质及其匹配程度也至关重要, 高质量的骨料能提升混凝土的密度和机械性质, 然而如果搭配不当则会导致混凝土内空洞增多, 从而创造出损害产生的环境<sup>[3]</sup>。

## 4 损伤演化过程分析

### 4.1 初始损伤阶段

在水利工程建筑物刚投入使用的时候, 因为无法完全避免的建设过程中产生的瑕疵和早期使用的条件所带来的最初效应, 其内部分子已经产生了一些细微的损害。这种初级损坏主要是以微型空洞、小规模裂痕及钢筋与水泥间的黏合问题为主。这个时期的破坏程度相对于其他来说较为温和, 但是它却成为了后期破坏发展的起源。

### 4.2 损伤扩展阶段

随着使用年限的增长, 最初的损害会在环境和负载的影响下逐步扩大。细小的裂纹沿着混凝土中的脆弱路线持续扩散, 使得空洞比例逐级上升, 从而导致了混凝土密度减少。当受到压力时, 结构中应力集聚区损坏扩张速率提升, 其局部强度减小, 形变加大。在这个过程中, 钢铁腐烂开始出现, 腐烂产生的物质会对周边混凝土产生压缩效应, 这反过来又推动了裂缝的加深发展, 形成了伤害积累引发后续伤害扩大的良性循环过程。

### 4.3 损伤稳定阶段

当时间推移并逐渐扩大时, 破坏过程已步入较为稳定的状态。此刻, 水泥内的细小裂纹网路几乎构建完毕, 损坏扩张速率有所下降, 然而其建筑功能却明显受损。在这个过程中, 尽管构件的承重力并未彻底消失, 但是它的安全保障度已被大大削弱, 对外部环境变动和负载波动变得更加敏感了<sup>[4]</sup>。

### 4.4 损伤加速阶段

一旦建筑物遭受了极限的环境冲击(比如洪涝灾害或者地震等)或是其长时间积累的损坏达到了关键点时, 它便会步入损害加剧期。在这个时期, 损害的扩散速率显著提升, 细小的裂痕能够快速贯穿并发展成大型裂口, 从而使建筑物的强度和承载力大幅降低, 有可能引发部分区域的倒塌或者是整个系统的崩溃。举例来说, 某些年久失修的水利设施, 如果未能得到适当的保养, 可能会在一次罕见的暴雨之后瞬间发生大规模的破损, 这会对水利系统的工作效率产生重大影响。

## 5 水工混凝土抗震加固技术

各种的水工混凝土结构抗震强化方法各具特色, 每个方案都拥有特定的运作机制、适用的领域及优势与劣势。扩大截面

的加强方式是通过增强结构承受压力的部分区域的大小来提升强度和刚性,适合于载荷过低、刚性欠缺或者有明显裂痕的建筑物,例如混凝土堤岸、水闸基座等等,这种办法的效果非常突出并且已经相当完善了,但是它也会导致资源的使用增多和结构自身的重量加重,而且它的建设时间也相对比较久一些,对于建筑物的视觉形象和实用空间也有一定的干扰<sup>[5]</sup>。

采用粘贴纤维复合材料强化技术,通过使用树脂型连接剂把纤维复合材料覆盖到建筑物表层,从而构成新的复合体形状,依赖其强大的韧性和优秀的抗拉特性来增大建筑物的抗压、抗撕扯力和弹性,进而改善地震防护功能。此种方式适合用于加强梁、板、柱等各种构造元素的防震措施,特别是在管理建筑外壳开裂及提升抗扭曲、抗撕裂力上表现出色。这种处理手段拥有低质量、无需额外加重建筑负荷、操作方便、耐腐蚀度高等优势,然而对于施工技巧的要求很高,且所需的原料价格相比较昂贵。

采用预应力强化技术是在关键区域内实施预应力处理以调整压力的分配状况,从而增强对开裂及承重的抵抗力。这种方式可以利用预应力来减缓由地震引发的拉伸应力,降低裂痕的发生与扩展。该策略特别适合于大型水渠或大坝等重大水利工程的重要节点处使用。它的优势是能够明显提升防裂能力和承受负荷的能力,同时也能增加安全保障,然而,它也有一些缺点,如操作流程较为繁琐,必须依赖专业的团队和装备,并且对于预应力的应用要精确把控,另外,锚点等相关材料的价格也比较昂贵。

增加抗震部件强化策略是针对建筑物的关键部分或者易受破坏的部分添加抗震部件,比如剪切墙、支架和梁柱等等,这些新加入的部件能与原始构造一起协作抵御地震的影响。这种方式适合于那些原本的全局防震能力不够或是需要调整其防震系统的状况,比如说在水利工程的水泥框架里增添剪切墙可以提升横向刚度。这个方案具有很强的针对性,能够显著地改进抗震效果,加强稳健性和安全性,但是可能会对最初的设计布置和实际应用造成一些干扰,并且必须特别注意如何把新的部件与旧的构造相连,以保证连接的品质。

采用基本隔震强化技术时,会在建筑物的基础和土壤间插

入阻尼器,例如弹性阻尼器或滑动阻尼器等,从而使其能够独立于地震引起的地面波动,并延长大约1/3的自然频率,减少地震力的传递。这种方法既可以用于新建筑物的规划阶段,也可以应用到已经存在并且处于地震强烈区域的建筑物改良中。此种技术的抗震性能非常明显,可大幅度减轻建筑物对于地震加速响应、移动回应及内部压力反馈的影响,同时也能有效管理各类振动情况,然而,它的实施需要高度的专业知识和精密工具,而且使用隔音材料也会对建筑物的力量转移路线和基础设计带来一定的变化,因此必须经过深入细致的结构研究和设计修改。

## 6 结束语

总而言之,对地震影响下的水工混凝土结构损害变化过程的研究及抗震强化技术的深层理解具有重要价值。本文详细阐述了损坏机制,并讨论了一系列增强措施及其适用的环境条件,为实际操作提供理论支持和技术参考。预计将来,随着科学进步,这些研究成果和技术运用会逐步优化,从而提高水工混凝土结构的防震能力,确保水利设施的安全可靠运作,为社会的持续繁荣打下稳固的基础。

## [参考文献]

- [1]苏信智,刘伯权.基于应变能消耗的钢筋混凝土框架结构地震损伤演化研究[J].震灾防御技术,2021,16(3):533-543.
- [2]欧晓英.强震作用下混凝土结构的整体损伤演化与倒塌安全储备[D].大连理工大学,2025.
- [3]王建.地震作用下路基工程破坏机理及抗震技术研究[D].西南交通大学,2010.
- [4]刘帅杨.黏滞阻尼器在某框架结构抗震加固中的应用研究[D].河北工程大学,2025.
- [5]崔士梅.强震作用下桥梁的抗震性能和加固效果研究[D].青岛理工大学,2025.

## 作者简介:

王昶力(1991--),男,汉族,天津静海人,硕士,工程师,水工结构。

胡剑超(1990--),男,汉族,山东临沂人,硕士,工程师,水工结构。