

# 水工混凝土结构耐久性研究

刘耀飞

新疆兵团勘测设计院集团股份有限公司 新疆 乌鲁木齐 830000

**摘要:** 本文聚焦水工混凝土结构耐久性。首先阐述其核心内涵,指出是结构在特定环境抵抗侵蚀、保持性能外观且无需过度维修的特性,关键性能指标包括抗渗、抗冻等。接着分析影响耐久性的内部材料、外部环境、施工与运维因素。然后探讨耐久性损伤成因与表现,涵盖钢筋锈蚀、冻融破坏、化学侵蚀。最后提出提升耐久性的技术措施,材料优化方面科学选配原材料与优化配合比;施工质量控制贯穿搅拌、浇筑等环节;表面防护与修复针对新建与既有结构采取不同措施。通过这些研究,为保障水工混凝土结构长期稳定运行提供参考。

**关键词:** 水工混凝土; 结构耐久性; 影响因素; 防护措施

引言: 水工混凝土结构作为水利工程的重要基础,其耐久性直接关系到工程的安全与稳定运行。在复杂多变的水环境下,水工混凝土结构面临着诸多挑战,如物理、化学和生物作用的侵蚀,这些因素可能导致结构性能劣化,缩短其使用寿命。因此,深入研究水工混凝土结构耐久性,明确其核心内涵、影响因素、损伤成因与表现形式,并探索有效的提升技术措施,具有重要的理论意义和实际应用价值。本文将围绕这些方面展开详细探讨,以期水工混凝土结构的设计、施工与维护提供科学依据。

## 1 水工混凝土结构耐久性的核心内涵

水工混凝土结构耐久性是水利工程领域的关键研究内容。它指的是水工混凝土结构在既定的设计服役环境条件下,具备抵抗各类物理、化学以及生物作用侵蚀的能力,能够长久保持自身的设计功能、力学性能和使用外观,并且在整个服役期间无需进行过度维修养护,就能满足预定使用要求的一种特性。(1)从本质上讲,水工混凝土结构耐久性的核心在于混凝土材料以及整个结构体系在复杂水环境中的长期稳定性。这种稳定性通过多个关键性能指标来体现,包括抗渗性,即阻止水和其他液体渗透到混凝土内部的能力;抗冻性,指混凝土在反复冻融循环作用下抵抗破坏的能力;抗侵蚀性,是混凝土抵抗环境中化学物质侵蚀的能力;抗碳化性,即防止混凝土中氢氧化钙与二氧化碳反应导致性能劣化的能力;以及抗钢筋锈蚀能力,避免钢筋因周围环境因素而发生锈蚀,进而影响结构安全。(2)这些性能并非孤立存在,而是相互关联、相互影响,共同决定了水工混凝土结构的服役寿命。与普通混凝土结构所处的环境相比,水工混凝土结构面临更为严苛的耐久性要求,它需要同时应对水环境带来的多重劣化作用,如水流冲刷、溶蚀、冻

融破坏等。而且,水工混凝土结构一旦建成,对其进行维修改造的难度极大,所涉及的成本也非常高昂。因此,耐久性设计与防护必须贯穿于水工混凝土工程的全生命周期,从规划设计阶段就要充分考虑各种影响因素,采取有效的措施确保结构在长期使用过程中具备良好的耐久性<sup>[1]</sup>。

## 2 影响水工混凝土结构耐久性的关键因素

### 2.1 内部材料因素

影响水工混凝土结构耐久性的内部材料因素众多,混凝土材料自身性能是决定其结构耐久性的根本基础。水泥作为混凝土的关键胶凝材料,其品种与用量对混凝土性能影响显著。不同品种水泥在化学成分和矿物组成上存在差异,这直接决定了它们的水化反应程度、孔隙结构特征以及强度发展规律。例如,某些水泥具有更好的抗侵蚀性和抗冻性,能更好地适应水工环境的严苛要求。若水泥用量不足,混凝土内部无法充分填充,会导致密实度降低,为外界侵蚀介质提供可乘之机,形成渗透通道。

骨料的性能也不容忽视,其级配、强度、杂质含量以及与水泥石的粘结性能,共同影响着混凝土的整体密实度和抗裂性。级配不合理或骨料含泥量过高,会破坏混凝土内部的紧密结构,降低其力学性能和抗渗能力。此外,混凝土的水胶比是核心控制指标,水胶比过大,内部孔隙率增加,结构变得疏松,侵蚀介质更易侵入。而合理掺入粉煤灰、矿渣粉等掺合料,可改善混凝土内部微观结构,提升其耐久性。

### 2.2 外部环境因素

水环境作为影响水工混凝土结构耐久性的关键外部因素,其作用机制复杂且影响深远。干湿循环现象在水位变动区域极为常见,混凝土在反复的吸水与失水过程

中,内部孔隙水压力持续变化,这种应力波动会促使表层砂浆逐渐剥落,并引发裂缝的产生与扩展,进而对结构的整体完整性构成严重威胁。在寒冷地区,冻融交替作用成为另一大挑战。混凝土内部孔隙中的水在结冰时体积膨胀,产生显著的膨胀应力。随着冻融循环的持续进行,孔隙结构不断劣化,最终导致混凝土出现疏松、剥落现象,强度显著降低。此外,水中的侵蚀介质也不容忽视。氯离子能穿透混凝土保护层,直接引发钢筋锈蚀;硫酸盐与水泥水化产物反应,生成膨胀性物质,导致混凝土开裂、酥化;碳酸根离子则引发混凝土碳化,降低内部碱度,破坏钢筋表面的钝化膜,进一步加速结构劣化进程<sup>[2]</sup>。

### 2.3 施工与运维因素

施工与运维因素对水工混凝土结构耐久性起着至关重要的作用。在施工环节,若混凝土搅拌不充分、振捣不密实,其内部便会形成蜂窝、麻面、孔隙等缺陷,这些缺陷会成为侵蚀介质侵入结构的便捷通道。养护工作同样关键,养护不及时或不到位,混凝土水化反应难以充分进行,表面易出现干缩裂缝,进而降低结构的致密性与抗裂性能。模板安装若存在偏差,钢筋保护层厚度不足,会直接影响结构的受力性能,削弱其抗侵蚀能力,致使钢筋过早锈蚀。

在运维阶段,不当操作也会对结构耐久性造成损害。结构表面长期堆积污物未及时清理,会促使局部侵蚀现象加剧。此外,结构若承受过度荷载或遭受外力冲击,会产生结构性裂缝,这些裂缝为侵蚀介质提供了快速渗透的路径,从而加速结构的劣化进程。

## 3 水工混凝土结构耐久性损伤成因与表现形式

### 3.1 钢筋锈蚀损伤的成因与表现

钢筋锈蚀是水工混凝土结构极为常见的耐久性损伤类型。其产生根源在于钢筋在特定侵蚀介质影响下发生电化学腐蚀反应。(1)在水工环境中,氯离子、二氧化碳等侵蚀介质具有较强渗透性,当它们穿透混凝土保护层后,会直接破坏钢筋表面原本起保护作用的钝化膜。(2)一旦钝化膜被破坏,钢筋便处于活化状态,在阳极发生氧化反应生成铁离子,在阴极发生还原反应生成氢氧根离子,二者结合形成铁锈。由于铁锈体积比钢筋本身大很多,会在钢筋周围产生极大的膨胀应力。这种膨胀应力会致使混凝土保护层出现开裂、剥落现象,让钢筋直接暴露在复杂的水环境中,进而加速锈蚀速度。(3)钢筋锈蚀的损伤表现较为明显,混凝土表面会出现顺筋裂缝、锈胀裂缝,表层砂浆逐渐剥落。随着锈蚀持续发展,钢筋截面不断被损耗,结构的承载力显著下降,刚

度也随之减弱,严重时甚至会引发整个结构的破坏。

### 3.2 冻融破坏的成因与表现

冻融破坏是水工混凝土结构面临的重要耐久性损伤问题,其核心成因在于混凝土内部孔隙水经历结冰膨胀与融化收缩的反复过程,进而引发孔隙结构劣化。(1)混凝土内部天然存在大量毛细孔隙和凝胶孔隙,这些孔隙为水的存在提供了空间。当环境温度降低至冰点之下,孔隙中的自由水便会结冰,此时体积会发生膨胀,对孔隙壁产生显著的膨胀应力。而当温度回升,冰块融化成水,孔隙水排出,结构随之产生收缩。(2)在反复的冻融循环作用下,混凝土内部应力持续累积,原本微小的孔隙逐渐扩大且相互连通。这一变化导致表层砂浆与内部骨料之间的粘结力不断下降。最终,混凝土结构出现表层剥落、起砂、疏松以及裂缝等一系列损伤现象。(3)冻融损伤的表现具有鲜明的区域特征,在水位变动区以及寒冷地区的外露结构部位,冻融破坏现象更为严重。并且,损伤程度会随着冻融循环次数的增多而显著加剧,最终致使混凝土强度大幅降低,结构的完整性遭到严重破坏,影响水工混凝土结构的正常使用与安全<sup>[3]</sup>。

### 3.3 化学侵蚀损伤的成因与表现

化学侵蚀损伤是水工混凝土结构面临的一种重要损伤形式,它源于各类化学介质与混凝土水化产物发生化学反应,致使材料性能逐渐劣化。不同化学侵蚀介质,其作用成因与引发的损伤表现各不相同。(1)在硫酸盐侵蚀场景中,水中的硫酸盐离子会与混凝土内的氢氧化钙、水化铝酸钙等水化产物发生反应,生成钙矾石、石膏等具有膨胀性的物质。这些膨胀性物质在混凝土内部不断积聚,产生膨胀应力,最终导致混凝土出现开裂、酥化现象,强度大幅丧失。(2)氯离子侵蚀不仅会引发钢筋锈蚀,还会与水泥水化产物反应,降低混凝土的密实程度以及粘结性能。(3)碳酸侵蚀(碳化)是空气中的二氧化碳或水中的碳酸根离子渗透到混凝土内部,与氢氧化钙反应生成碳酸钙。这会降低混凝土内部的碱度,破坏钢筋表面的钝化膜,同时使混凝土的强度和弹性模量下降,表面出现起砂、粉化的情况。化学侵蚀损伤具有隐蔽性强、发展缓慢的特点,初期往往难以察觉,但后期损伤一旦形成便不可逆,严重影响水工混凝土结构的耐久性。

## 4 提升水工混凝土结构耐久性的技术措施

### 4.1 材料优化措施

材料优化作为提升水工混凝土结构耐久性的基石,关键在于科学选配原材料并优化配合比,以此改善混凝土的微观结构,增强其抵抗各类侵蚀、冻融以及渗透的

能力。(1) 水泥是混凝土的重要组成部分,其选择需紧密结合服役环境。对于存在硫酸盐侵蚀风险的环境,应选用抗硫酸盐水泥;在有低热要求的场景中,低热矿渣水泥是更优选择,而要避免使用水化热高且抗侵蚀性欠佳的普通水泥。(2) 骨料的质量对混凝土性能影响显著。应挑选强度高、杂质少且与水泥石粘粘性能良好的骨料,严格控制含泥量和针片状含量。通过优化骨料级配,采用连续级配方式,能够有效提高混凝土的密实程度。(3) 水胶比的控制至关重要,同时要合理掺入粉煤灰、矿渣粉、硅灰等掺合料。这些掺合料可以填充混凝土内部孔隙,优化微观结构,进而提升混凝土的抗渗性与抗侵蚀性。此外,掺入高效减水剂能在保证混凝土具备良好工作性的前提下,减少用水量,进一步增强混凝土的密实度与力学性能,为水工混凝土结构的耐久性提供坚实保障。

#### 4.2 施工质量控制措施

严格的施工质量控制是保障水工混凝土结构耐久性的核心要点,必须全面贯穿于混凝土搅拌、浇筑、振捣以及养护的每一个环节。(1) 在混凝土搅拌阶段,要精确把控各类原材料的用量,保证配比的准确性。同时,适当延长搅拌时间,确保混凝土各组分充分混合、搅拌均匀,为后续施工及结构性能奠定基础。(2) 浇筑过程中,需严格控制分层厚度,防止因分层过厚影响浇筑质量。采用插入式振捣器进行振捣时,要保证振捣密实,杜绝出现漏振、欠振的情况,以此消除混凝土内部可能存在的蜂窝、孔隙等缺陷,提升结构的密实性。(3) 钢筋保护层厚度的控制也不容忽视。通过合理设置垫块、精准调整模板位置等有效手段,确保钢筋保护层厚度严格符合设计要求,避免钢筋外露或者保护层过薄而引发钢筋提前锈蚀问题。(4) 要高度重视混凝土养护工作。浇筑完成后,及时覆盖保湿材料,严格控制养护的温度与湿度条件,适当延长养护时间,促使水泥水化反应充分进行,有效减少干缩裂缝的产生。并且,要规避在低温、高温、雨雪等恶劣天气条件下施工,若因特殊情况必须施工,则要采取具有针对性的防护措施,切实保障混凝土浇筑质量。

#### 4.3 表面防护与修复措施

表面防护与修复是保障水工混凝土结构耐久性的关键举措,既可用于新建结构的防护,也能对既有结构的损伤进行有效处理。(1) 针对新建结构,在其混凝土表面实施防护处理十分必要。可涂刷防腐涂层,像聚氨酯涂层、环氧树脂涂层等,它们能在混凝土表面形成一层致密的防护膜,有效阻挡水、氯离子、硫酸盐等侵蚀介质的渗透。同时,渗透结晶型防水材料也是不错的选择,它能深入混凝土内部,与混凝土中的物质发生反应形成结晶,堵塞混凝土内部的渗透通道,增强结构的抗渗性能。(2) 对于已出现耐久性损伤的既有结构,首先要对损伤部位进行细致修复。清除疏松、锈蚀的部分,对锈蚀钢筋进行彻底的除锈和防锈处理,防止钢筋进一步锈蚀影响结构安全。然后,采用高性能修补砂浆、聚合物混凝土等材料对损伤部位进行修补,恢复结构的完整性。此外,还可以在结构表面铺设防护面层,如水泥砂浆面层、沥青防水层等,进一步增强结构表面的抗侵蚀能力,有效延缓损伤的进一步发展,延长结构的使用寿命。

#### 结束语

水工混凝土结构耐久性是一个复杂且关键的问题,关乎水利工程的长期稳定运行。从核心内涵的明确,到影响因素的剖析,再到损伤成因与表现的研究,以及提升技术措施的探索,每一步都至关重要。材料优化为结构耐久性奠定基础,施工质量控制确保建设质量,表面防护与修复则针对不同阶段的结构提供保障。未来,随着水利工程不断发展,对水工混凝土结构耐久性的要求会更高。我们需持续深入研究,不断优化技术措施,提高结构耐久性,以应对日益复杂的环境和工程需求,保障水利工程的安全与效益,推动水利事业持续健康发展。

#### 参考文献

- [1] 张飞. 干湿-盐浸作用下水工混凝土耐久性研究[J]. 江西建材, 2024, (06): 71-74.
- [2] 周环宇. 水工混凝土耐久性试验及提高途径探析[J]. 东北水利水电, 2024, 42(04): 43-46+70.
- [3] 郭旭, 袁朝庆, 张宇. 混凝土动态耐久性研究进展[J]. 城市建筑, 2022, 19(08): 135-137.