

水工混凝土结构耐久性研究

陈精卫 聂章博

黄河勘测规划设计研究院有限公司 河南 郑州 450003

摘要：水工混凝土结构耐久性直接关系到水利工程安全与寿命。研究发现，外部环境侵蚀、材料性能缺陷、结构设计不足及施工质量隐患等多因素交互作用，加速结构劣化。通过优化材料选择与配比、改进结构设计、加强施工质量管控、构建完善维护监测体系等措施，可显著提升结构耐久性。研究成果为水工混凝土结构全寿命周期管理提供理论依据与技术支持，对保障水利工程长期稳定运行、降低维护成本具有重要现实意义。

关键词：水工；混凝土结构；耐久性

引言

随着水利工程建设规模扩大与服役年限增长，水工混凝土结构耐久性问题日益凸显。长期受冻融循环、盐类侵蚀、水流冲刷等复杂环境作用，加之材料性能不稳定、设计施工缺陷等因素，导致结构裂缝、钢筋锈蚀、冻胀破坏频发，威胁工程安全运行。本文针对水工混凝土结构耐久性展开系统研究，深入剖析影响因素，提出科学有效的提升措施，旨在为水利工程建设与运维提供技术参考，推动行业可持续发展。

1 水工混凝土结构耐久性概述

水工混凝土结构耐久性是指在长期服役过程中，混凝土结构抵抗环境因素作用，保持其结构安全、使用功能及外观完整性的能力，是关乎水利工程全寿命周期效益的关键性能指标。水利工程运行环境复杂，水工混凝土结构长期承受水压力、冻融循环、水流冲刷、化学侵蚀等多种作用，这些复杂环境因素相互耦合，加速混凝土材料性能劣化和结构功能退化，使耐久性问题成为水工结构领域的核心研究方向。混凝土作为水工结构的主要建筑材料，其耐久性受自身材料特性与环境作用的双重影响。水泥水化产物的微观结构决定混凝土的初始性能，孔隙率、孔径分布、胶凝材料水化程度等因素直接影响混凝土的抗渗性与抗侵蚀性。环境中的硫酸盐、氯离子、碳酸等化学物质可通过混凝土孔隙渗透，与水泥水化产物发生化学反应，生成膨胀性物质或破坏水化产物结构，导致混凝土体积膨胀、开裂，降低结构承载能力。冻融循环下孔隙水结冰膨胀产生的冻胀应力，水流携带泥沙、砾石对混凝土表面的磨蚀作用，都会加剧混凝土结构的损伤破坏。在实际工程中，水工混凝土结构耐久性不足会引发渗漏、裂缝、强度降低等病害，严重时甚至威胁工程安全运行。例如，大坝混凝土因耐久性问题出现裂缝，可能导致渗漏量增加，削弱坝体有效应

力，影响大坝整体稳定性；输水渠道混凝土遭受冻融破坏，会使渠道过水能力下降，影响灌溉、供水效益。深入研究水工混凝土结构耐久性，通过优化材料配合比设计、采用合理的防护措施、完善结构构造等手段，提升混凝土结构耐久性，对保障水利工程长期安全稳定运行，发挥工程综合效益具有重要的现实意义。

2 影响水工混凝土结构耐久性的因素

2.1 外部环境因素

水工混凝土结构长期暴露于复杂多变的自然环境中，多种环境因素协同作用显著影响其耐久性。水体环境是首要作用因素，在水工建筑物服役过程中，长期接触的河水、海水等含有大量侵蚀性离子，如氯离子、硫酸根离子等。氯离子能够穿透混凝土表面钝化膜，引发钢筋锈蚀，锈蚀产物膨胀导致混凝土开裂剥落；硫酸根离子与水泥水化产物发生化学反应，生成钙矾石或石膏，产生体积膨胀效应，致使混凝土结构内部产生裂缝，降低结构整体性与承载能力。干湿循环作用同样不可忽视，混凝土在干湿交替过程中，水分反复迁移导致孔隙结构不断变化，加速有害物质侵入，同时干缩湿胀产生的应力循环加剧混凝土损伤。温度变化也是重要影响因素，昼夜温差、季节温差引发混凝土热胀冷缩，当温度应力超过混凝土抗拉强度时，便会产生温度裂缝，裂缝形成后又为外界侵蚀性介质提供通道，进一步加速结构劣化。冻融循环对水工混凝土结构耐久性危害极大，在寒冷地区，混凝土孔隙中的水在低温下结冰膨胀，产生冻胀压力，融化时又产生渗透压力，反复冻融使混凝土内部孔隙不断扩展、连通，最终导致混凝土剥落、强度降低，严重威胁结构安全^[1]。

2.2 材料性能因素

混凝土材料自身性能直接决定水工混凝土结构耐久性水平。水泥作为混凝土胶凝材料，其品种和质量至关

重要。不同品种水泥的矿物组成与水化特性存在差异,例如,低热水泥水化热较低,可有效减少大体积混凝土因水化热过高产生的温度裂缝;普通硅酸盐水泥早期强度发展快,但抗硫酸盐侵蚀能力相对较弱。水泥强度等级和安定性不达标,会导致混凝土强度不足、体积稳定性差,进而影响结构耐久性。骨料在混凝土中起骨架作用,骨料的品质对耐久性影响显著。骨料的坚固性、级配、含泥量等指标直接关系到混凝土的密实性和抗渗性。坚固性差的骨料在环境因素作用下易发生破坏,导致混凝土性能劣化;骨料级配不良会使混凝土孔隙率增大,降低其抗渗能力,为侵蚀性介质侵入创造条件;含泥量过高会吸附水泥浆体,降低混凝土的粘结强度,还会增加混凝土干缩变形,引发裂缝。混凝土中的掺合料和外加剂对耐久性影响也不容忽视。适量的粉煤灰、矿渣粉等掺合料可改善混凝土工作性能,提高其抗渗性和抗侵蚀性;外加剂选择不当,如减水剂引气性能不足或缓凝剂掺量过高,可能导致混凝土凝结时间异常、强度发展缓慢,甚至产生质量缺陷,降低结构耐久性。

2.3 结构设计因素

合理的结构设计是保障水工混凝土结构耐久性的重要前提。结构形式与构造措施对耐久性有着深远影响。不合理的结构形式可能导致应力集中,在荷载和环境因素共同作用下,应力集中部位极易产生裂缝,为侵蚀性介质侵入提供通道。例如,结构中尖锐的转角、突变的截面尺寸等部位,容易出现应力集中现象,加速混凝土劣化。构造措施不完善也会降低结构耐久性,如伸缩缝设置不合理,无法有效释放混凝土因温度变化、收缩徐变产生的应力,导致结构开裂;钢筋保护层厚度不足,不能为钢筋提供足够的防护,使得钢筋易受外界侵蚀性介质影响而锈蚀;止水带设置不当,则会导致水工结构出现渗漏,进一步加速结构破坏。结构设计中对环境作用考虑不充分也是重要问题。未根据工程所处环境特点,如水质条件、气候条件等,合理选择混凝土抗冻、抗渗等级和抗侵蚀措施,使得混凝土结构在实际服役过程中难以抵御环境侵蚀,缩短结构使用寿命。结构设计中结构耐久性的重视程度不够,缺乏系统性的耐久性设计理念和办法,也是影响水工混凝土结构耐久性的关键因素之一^[2]。

2.4 施工质量因素

施工过程质量控制水平直接影响水工混凝土结构的最终耐久性。混凝土配合比控制是施工质量的关键环节。配合比设计不合理,如胶凝材料用量不足、水胶比过大,会导致混凝土强度和抗渗性降低,孔隙率增大,

使侵蚀性介质更容易侵入混凝土内部。在实际施工中,若未严格按照设计配合比计量投料,随意调整用水量,会进一步恶化混凝土性能。混凝土搅拌与运输过程也对其质量产生重要影响。搅拌不均匀会导致混凝土各组分分布不均,部分区域强度不足;运输时间过长或方式不当,会使混凝土坍落度损失过大、离析分层,影响混凝土的浇筑质量。混凝土浇筑与振捣工艺直接关系到结构密实性。浇筑过程中,若下料高度过高、速度过快,易造成混凝土离析;振捣不密实会使混凝土内部存在蜂窝、孔洞等缺陷,形成渗水通道;过度振捣则会导致混凝土分层、泌水,降低混凝土均匀性和强度。混凝土养护是保证其强度增长和耐久性的重要环节。养护时间不足、养护方法不当,如早期缺水干燥,会使混凝土强度发展受阻,收缩裂缝大量产生;冬季施工时,若未采取有效的保温措施,混凝土受冻后内部结构遭到破坏,严重影响其耐久性。施工过程中的模板质量、钢筋加工与安装质量等,也会通过影响混凝土成型质量和结构受力性能,间接影响水工混凝土结构的耐久性。

3 提高水工混凝土结构耐久性的措施

3.1 优化材料选择与配比

(1)在胶凝材料选择上,应依据工程环境特点,优先选用低热硅酸盐水泥或中热硅酸盐水泥,此类水泥水化热较低,可有效降低混凝土内部温升,减少因温度应力引发的裂缝风险,进而提升结构耐久性。合理掺加优质矿物掺合料如粉煤灰、矿渣粉等,能够改善混凝土的工作性能,填充水泥石孔隙,增强混凝土的密实性和抗渗性。(2)骨料的品质对混凝土耐久性影响显著,粗骨料应选择质地坚硬、级配良好且含泥量低的碎石或卵石,其坚固性和压碎指标需满足规范要求,以确保混凝土具备足够的力学性能和抗风化能力;细骨料宜采用洁净、级配合理的中粗砂,严格控制其泥粉含量和有害物质含量,避免对混凝土耐久性造成不利影响。(3)合理控制水胶比是保证混凝土耐久性的关键因素,较低的水胶比能够减少混凝土内部孔隙率,形成更为致密的微观结构,有效抵御外界侵蚀性介质的侵入。选择性能优良的减水剂,在保证混凝土工作性能的前提下降低用水量,进一步优化混凝土的孔隙结构,提高混凝土的抗冻性、抗渗性和抗化学侵蚀性能。

3.2 改进结构设计

(1)水工混凝土结构设计时,需充分考虑环境因素对结构耐久性的影响,合理确定结构形式和尺寸,避免结构出现应力集中区域。例如,在结构转角、孔洞等部位设置合理的倒角和加强筋,改善结构的受力状态,减

少裂缝产生的可能性；优化结构的排水系统设计，确保结构表面的积水能够及时排出，防止水分长期滞留导致混凝土的侵蚀破坏。（2）设置合理的伸缩缝和沉降缝，能够有效释放混凝土因温度变化和地基不均匀沉降产生的应力，避免裂缝的扩展。缝宽、缝的间距以及止水材料的选择需根据工程实际情况进行精确计算和设计，止水材料应具有良好的弹性、耐老化性和抗渗性，确保在长期运行过程中能够有效阻止水分和侵蚀性介质的渗透。（3）增加混凝土保护层厚度是提高结构耐久性的重要措施之一，适当加厚钢筋表面的混凝土保护层，能够为钢筋提供更有效的防护屏障，延缓外界有害介质对钢筋的侵蚀，延长结构的使用寿命。保护层厚度也不宜过大，否则会导致混凝土表面与内部的约束差异增大，增加混凝土表面开裂的风险，因此需在设计中综合考虑结构受力和耐久性要求，确定合理的保护层厚度^[3]。

3.3 加强施工质量控制

（1）混凝土的拌制过程是保证其质量的基础环节，需严格控制原材料的计量精度，确保水泥、骨料、水和外加剂等原材料按照设计配合比准确称量。合理控制搅拌时间和搅拌速度，使混凝土各组分充分混合均匀，保证混凝土的和易性和匀质性，避免因搅拌不充分导致混凝土强度和耐久性下降。（2）混凝土的浇筑工艺直接影响其密实性和整体性，浇筑过程中应避免出现离析、漏振等现象。采用合适的振捣方式和振捣时间，使混凝土内部气泡充分排出，达到密实状态；对于大体积混凝土，需采用分层浇筑、分层振捣的施工方法，并控制每层浇筑厚度和浇筑速度，防止因浇筑过快导致混凝土内部产生较大的温度梯度和收缩应力。（3）混凝土的养护是保证其强度增长和耐久性的关键工序，浇筑完成后应及时进行养护，根据环境条件和混凝土特性，选择合适的养护方式，如洒水养护、覆盖养护或喷涂养护剂等。在养护期间，需保持混凝土表面湿润，使混凝土在适宜的温度和湿度条件下进行水化反应，确保混凝土强度正常增长，减少干缩裂缝的产生，提高混凝土的抗渗性和耐久性。

3.4 完善维护与监测体系

（1）建立常态化的检查制度，定期对水工混凝土结构进行外观检查和内部检测，通过目视检查混凝土表面是否存在裂缝、剥落、露筋等缺陷，采用无损检测技术如超声检测、雷达检测等探测混凝土内部的密实性、缺陷及钢筋锈蚀情况，及时发现结构潜在的耐久性问题。

（2）针对检查和检测中发现的问题，需制定科学合理的修复方案。对于细微裂缝，可采用表面封闭法进行处理；对于较宽裂缝或内部缺陷，需根据具体情况选择压力灌浆、嵌补等修复技术，恢复混凝土结构的完整性和耐久性。对修复后的部位进行跟踪监测，评估修复效果，确保结构安全稳定运行。（3）利用先进的监测技术，如光纤传感技术、应变计、渗压计等，对水工混凝土结构的关键部位进行长期实时监测，获取结构的应力应变、裂缝发展、渗流等数据信息。通过对监测数据的分析和处理，掌握结构性能的变化趋势，预测结构的耐久性退化情况，提前采取针对性的维护措施，实现对水工混凝土结构耐久性的动态管理和有效控制^[4]。

结语

综上所述，水工混凝土结构耐久性受多因素综合影响，需从材料、设计、施工、运维等多环节协同管控。通过优化材料性能、创新结构设计、严格施工工艺、构建智能化监测体系，可有效延缓结构劣化进程。未来，应进一步深化耐久性劣化机理研究，结合新型材料与智能技术，推动水工混凝土结构耐久性研究向精细化、智能化方向发展，为水利工程高质量建设筑牢技术根基。

参考文献

- [1]吴有宝.水工混凝土结构耐久性研究[J].珠江水运,2020(23):71-72.
- [2]樊建丽.水工混凝土结构耐久性研究[J].中国房地产业,2021(5):257.
- [3]冯起超.水工混凝土结构耐久性研究[J].建筑工程技术与设计,2021(16):2167.
- [4]刘振家.水工混凝土结构耐久性研究[J].城镇建设,2021(12):77.