

混凝土结构耐久性提升技术及工程应用研究

李月肖

中土大地国际建筑设计有限公司, 河北 石家庄 050000

[摘要]混凝土结构在现代工程建设中的应用十分广泛,其耐久性问题直接影响工程安全性、可靠性与使用寿命。在长期服役过程中,由于环境侵蚀、材料劣化、结构细部构造不合理以及施工质量缺陷等因素,混凝土结构会不同程度地产生碳化、钢筋腐蚀、硫酸盐侵蚀、冻融破坏及疲劳损伤等劣化现象,从而降低结构性能。随着绿色发展与可持续理念的提出,提升混凝土结构耐久性已成为工程建设的重要研究主题。文中在系统分析混凝土结构耐久性内涵与影响因素的基础上,重点探讨耐久性提升的材料技术、结构设计方法、施工质量控制技术以及基于性能退化预测的维护策略。文章还结合工程应用需求,从耐久性评价体系建立、性能监测与养护管理等方面提出综合性建议。研究认为,通过全过程耐久化设计与全生命周期管理,可显著延缓混凝土结构的劣化过程,提高使用寿命,降低维护成本。本研究为未来混凝土结构的耐久性提升提供技术参考与理论依据。

[关键词]混凝土结构; 耐久性; 材料性能; 腐蚀机理; 全生命周期管理

DOI: 10.33142/ucp.v3i1.19218

中图分类号: TU378

文献标识码: A

Research on Durability Enhancement Technology and Engineering Application of Concrete Structures

LI Yuexiao

Zhongtu Dadi International Architectural Design Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

Abstract: Concrete structures are widely used in modern engineering construction, and their durability directly affects the safety, reliability, and service life of the project. During long-term service, due to factors such as environmental erosion, material degradation, unreasonable structural details, and construction quality defects, concrete structures will experience varying degrees of deterioration phenomena such as carbonization, steel corrosion, sulfate corrosion, freeze-thaw damage, and fatigue damage, thereby reducing structural performance. With the introduction of green development and sustainable concepts, improving the durability of concrete structures has become an important research topic in engineering construction. On the basis of systematically analyzing the connotation and influencing factors of durability of concrete structures, this article focuses on exploring material technology, structural design methods, construction quality control technology, and maintenance strategies based on performance degradation prediction for durability improvement. The article also proposes comprehensive suggestions from the establishment of durability evaluation system, performance monitoring, and maintenance management based on engineering application requirements. Research suggests that through full process durability design and whole lifecycle management, the deterioration process of concrete structures can be significantly delayed, the service life can be improved, and maintenance costs can be reduced. This study provides technical reference and theoretical basis for the durability improvement of future concrete structures.

Keywords: concrete structure; durability; material properties; corrosion mechanism; whole lifecycle management

引言

混凝土结构以其高强度、耐火性好、施工便捷等特点,被广泛应用于工业与民用建筑、桥梁、交通系统、水利工程等领域。然而在长期服役过程中,其耐久性问题逐渐显现,成为影响工程安全和使用寿命的重要因素。耐久性不足不仅会造成结构功能退化,还可能导致维护成本增加、结构安全隐患加剧,甚至引发严重工程事故。随着工程建设水平不断提高,传统的以承载能力为主的结构设计理念已难以适应现代工程耐久性需求,工程界逐渐认识到材料性能、环境适应性、施工质量以及运营管理对结构耐久性的共同影响。近年来,材料科学、检测技术和耐久性设计方法的进步为结构耐久性提升提供了新思路,但实际工程

中仍存在耐久性不足的普遍现象。为此,有必要从理论机制、工程技术与应用策略等方面系统研究混凝土结构耐久性提升方法,构建全过程耐久化技术体系。本文将在前人研究基础上,对混凝土结构耐久性提升技术及其工程应用进行深入探讨。

1 混凝土结构耐久性的基本内涵与影响因素

1.1 混凝土耐久性的内涵及性能评价体系

混凝土结构耐久性是指结构在使用寿命内保持功能与性能不出现明显下降的能力,其本质是结构在不同环境作用下抵抗损伤与退化的综合能力。耐久性评价体系通常从抗渗性、抗冻性、抗腐蚀性、抗疲劳性以及抗化学侵蚀能力等方面进行综合判断。为提高评价科学性,现代耐久

性评价方法逐渐从经验型向性能型转变,强调基于环境作用的寿命预测模型与性能退化曲线,通过定量指标评价结构剩余寿命。耐久性不仅体现在材料性能,还体现在结构整体性、构造合理性与维护体系有效性,是一个多因素耦合的复杂概念。

1.2 环境作用对混凝土结构耐久性的影响机理

混凝土结构服役环境复杂,环境因素是其劣化的主要诱因。碳化作用导致混凝土碱性下降,使钢筋保护层失效;氯盐侵蚀加速钢筋腐蚀,是海工结构和道路结构的主要劣化机制;冻融循环破坏混凝土内部毛细孔结构,造成表层剥落与强度降低;硫酸盐侵蚀会使混凝土膨胀、开裂甚至粉化。此外湿干循环、温度变化、酸雨侵蚀等因素也会加速结构退化。环境作用往往是多种因素同时发生,其耦合作用使结构劣化过程复杂且不可逆,因此环境适应性是耐久性设计的关键。

1.3 材料缺陷、设计不足与施工缺陷的内部影响因素

混凝土本身具有多孔结构,若配合比不合理或水胶比偏高,会导致密实度不足、孔隙率增加,降低抗渗性能;粗骨料级配不当会影响界面过渡区强度;外加剂掺量控制不准确可能导致性能不稳定。在设计阶段,若未充分考虑使用环境与耐久性需求,如保护层厚度不足、构造细部薄弱、裂缝控制措施不足,均可能引发耐久性隐患。施工质量影响更为关键,如振捣不实、模板漏浆、养护不足等,会造成缩短裂缝、蜂窝麻面、强度不足等问题,使结构在早期就出现耐久性缺陷。因此,耐久性提升需贯穿全过程控制。

2 混凝土材料性能提升技术研究

2.1 高性能混凝土材料体系的优化方法

高性能混凝土(HPC)通过降低水胶比、优化骨料级配、添加活性矿物掺合料等方式提高耐久性。粉煤灰、矿渣粉、硅灰等矿物掺合料可显著改善混凝土微结构,减少毛细孔,提高抗渗性与抗腐蚀能力;纳米材料如纳米二氧化硅、纳米碳酸钙等可充填微孔、提高胶凝材料反应程度,进一步增强材料密实性与强度。此外,高性能混凝土材料体系不断发展,如超高性能混凝土(UHPC)具有极高密实性与抗渗能力,适用于耐久性要求极高的工程场景。未来材料体系的发展将更加注重低碳环保与智能化功能,通过替代部分水泥用量、发展绿色胶凝材料等方式减少材料生产阶段的碳排放。

2.2 功能型外加剂在耐久性提升中的作用

外加剂在改善混凝土性能方面具有关键作用。减水剂可提高混凝土流动性,使其在保持强度的情况下减少用水量,从而提升密实度;引气剂可形成微小封闭气泡,提高混凝土抗冻性能;阻锈剂通过在钢筋表面形成保护膜降低腐蚀速率;憎水剂可减少水分渗透,提升抗渗性;渗透结晶型外加剂可在混凝土内部形成结晶体,提高抗腐蚀性能。

近年来,自修复外加剂受到广泛关注,通过微胶囊或细菌技术能够自动修补细微裂缝,使混凝土在长期服役中保持高耐久性。

2.3 新型耐久性材料技术的发展方向

新型材料技术的快速发展为混凝土耐久性提升提供了更丰富的手段。纤维增强混凝土通过加入钢纤维、聚丙烯纤维或玄武岩纤维等可有效抑制裂缝发展,提高抗冲击性能;地聚合物混凝土作为绿色材料,具有抗酸性、抗腐蚀性、耐热性强等优点;自愈混凝土可通过化学反应自动修补裂缝;纳米复合材料可显著改善混凝土的微观结构,提高整体耐久性。新材料未来将更多地强调性能可控性、绿色性和功能复合化,以满足复杂环境下的工程需求。

3 结构耐久性设计优化技术

3.1 耐久性导向的结构设计理念

传统结构设计偏重承载能力,而现代耐久性设计强调结构在整个使用周期内的性能变化。耐久性设计需明确环境类别、设计寿命与失效模式,采用性能化设计方法将耐久性指标量化。例如,通过计算碳化深度、氯离子扩散系数等指标预测保护层寿命,并据此优化设计参数。耐久性导向的设计强调材料、构造与环境之间的协调,通过合理的设计确保结构具有良好的抗腐蚀性、抗渗性能与裂缝控制能力。

3.2 结构防腐构造措施与细部构造优化

结构细部是耐久性薄弱的关键区域,如节点处、角部、连接部位等,若未进行适当处理,容易产生裂缝与渗水问题。为提高防腐能力,可采用加厚保护层、提高混凝土密实度、增设附加钢筋、采用抗裂砂浆等措施。此外,合理设置排水坡度、防水层与构造缝可避免积水渗透。对于海工结构,可采用涂层钢筋、不锈钢筋或纤维增强复合筋等耐腐蚀材料。优化细部构造可有效延缓结构劣化进程,提升整体耐久性。

3.3 环境适应性的结构设计与可持续性理念

不同环境中的结构劣化机制不同,因此设计需具备环境适应性。例如,在寒冷地区需增强抗冻性能,在高温高湿环境需提高抗渗性和抗腐蚀性,在化工环境中需使用抗化学侵蚀材料。可持续性理念要求结构具有可维护性、可修复性与低全生命周期成本。通过引入耐久性模拟模型可对结构未来性能进行预测,形成更加科学的寿命设计,促进结构在安全性与经济性之间取得平衡。

4 施工质量控制技术在耐久性提升中的作用

4.1 施工阶段混凝土质量形成机理与风险点分析

混凝土耐久性在施工阶段形成并受其控制。模板安装不牢固会导致漏浆;振捣不足会使气泡残留,形成孔洞与蜂窝;浇筑过程中温差较大可能造成温度裂缝;养护不到位会影响水化反应,使混凝土早期强度不足。钢筋保护层偏差、钢筋油污未清理等也会严重影响耐久性。施工阶段

的任何不规范操作都可能成为结构长期开裂、渗漏与腐蚀的诱因，因此施工质量控制必须严格执行。

4.2 关键施工工艺与质量控制技术

为保证混凝土施工质量，可采取以下措施：合理控制水胶比，避免混凝土过稀影响强度与抗渗性；严格执行分层浇筑与充分振捣，减少孔洞；采用自动喷雾养护或湿麻袋覆盖确保早期水化充分；控制浇筑温度与环境温差，避免产生温度裂缝；利用无损检测技术对密实性与保护层厚度进行检查。施工机械化与智能化施工设备应用可减少人为误差，提高施工质量稳定性。

4.3 全过程施工管理与质量保证体系建设

施工管理需要构建由组织体系、技术体系与质量监督体系共同支撑的运行框架，以保障工程建设过程的规范性与可控性。通过完善管理架构与岗位分工，可明确各参与主体的职责边界，为施工顺利推进提供制度保障。施工准备阶段开展充分的技术交底与样板引路，有助于统一技术标准与施工做法，减少理解偏差。施工实施过程中，通过加强现场巡检、过程记录与关键工序控制，可及时发现质量隐患并进行调整。工程完成后，严格的质量验收程序能够确保各项指标满足设计与规范要求。依托数字化施工管理平台，对施工参数、材料流向与质量检测结果进行实时记录，可提升管理透明度与数据可靠性。配合责任追溯制度与风险预警机制的运行，可形成闭环管理模式，为工程耐久性与整体质量提供持续保障。

5 混凝土结构耐久性评价与工程应用策略

5.1 耐久性评价方法与检测体系构建

结构耐久性评价由实验室试验、现场检测与长期监测等多种手段共同构成，是掌握结构服役状态的重要基础。实验室试验通过渗透性能、碳化过程与氯离子扩散等测试方法，对材料本构特性与耐久性性能进行定量分析，为耐久性设计与材料选择提供科学依据。现场检测技术可在不破坏结构的前提下获取内部信息，雷达检测与超声检测能够识别构件内部缺陷、空洞及损伤情况，提升评估结果的可靠性。长期监测系统借助传感器持续采集温度、湿度与钢筋腐蚀电位等关键参数，实现结构状态的动态掌握。通过多源数据的综合分析，可全面反映结构性能随时间变化的规律。构建系统、连续的耐久性评价体系，有助于提前识别潜在风险，制定合理的维护与加固方案，使结构在长期使用过程中保持安全与稳定，为工程可持续运行提供技术保障。

5.2 基于性能退化预测的维护与加固策略

通过建立性能退化模型，对结构在长期服役条件下的性能变化进行分析，可对未来劣化趋势作出较为准确的预测，并据此确定合理的维护与干预时机。模型结果为制定科学的养护计划提供依据，有助于将维护工作由被动修复

转变为主动管理。在结构性能下降初期，采取裂缝修补、表面防护涂层与阻锈剂应用等措施，可有效减缓病害发展速度，改善耐久性能。当结构承载能力或使用功能受到影响时，采用碳纤维加固、外包钢加固或增大截面等技术手段，可提升结构整体性能，恢复或增强安全储备。针对不同结构类型与服役环境，合理选择维护与加固技术，有利于控制工程成本并延长结构使用寿命。以性能预测为基础的技术决策模式，使结构在全生命周期内保持稳定可靠状态，降低安全风险，为工程长期安全运行提供保障。

5.3 工程耐久性管理的综合应用机制

在工程实践中，构建涵盖材料、设计、施工、检测与维护的耐久性综合管理机制，有助于将耐久性要求贯穿于工程建设的全过程。通过系统化管理，不同阶段形成连续的信息链条，使关键数据能够顺畅传递并为后续决策提供依据。在设计阶段预留结构监测接口与检测条件，可为后期状态评估创造基础条件。施工阶段针对耐久性目标开展专项质量控制与验收，有助于确保设计意图在实体结构中得到有效落实。工程投入使用后，依托监测数据库对结构性能变化进行长期跟踪，可及时发现潜在风险并采取维护措施。各环节协同运行的综合机制，使耐久性技术由理论转化为可操作的实践路径，保障结构性能的长期稳定，为工程安全运行与资源高效利用提供支撑，推动工程建设向可持续发展目标稳步迈进。

6 结论

混凝土结构的耐久性受到材料性能、结构设计、施工工艺与服役环境等多方面因素的共同影响，是贯穿建筑全生命周期的系统性课题。通过提升混凝土材料的抗渗、抗裂与抗侵蚀能力，并在设计阶段引入耐久性导向理念，可有效降低结构早期劣化风险。施工过程中，对原材料质量、配合比控制与施工工艺实施精细化管理，有助于保证结构实体性能的稳定性。在结构投入使用后，建立科学的检测、评估与维护机制，可及时发现潜在病害并采取针对性措施，延缓性能衰减过程。随着新型材料、先进施工技术与数字化监测手段的不断应用，混凝土结构耐久性研究正朝着智能化、绿色化与精细化方向发展。

[参考文献]

- [1]刘振华,王伟.混凝土结构耐久性设计与改进措施研究[J].土木工程学报,2020,53(6):112-120.
- [2]张蕾,李强.高性能混凝土耐久性影响因素与提升技术[J].建筑材料学报,2021,24(3):55-62.
- [3]陈浩.混凝土结构服役性能退化机理及耐久性提升策略[J].工程建设与管理,2019,35(8):91-98.

作者简介：李月肖（1983.5—），女，汉族，毕业院校：河北工业大学，现就职单位：中土大地国际建筑设计有限公司。