混凝土结构的耐久性评估与修复技术

黄少微

陕西鼎羽豪建设工程有限公司 陕西省 西安市 712000

摘　要：混凝土结构因其广泛应用而面临耐久性挑战，这不仅影响结构安全，还带来经济负担。本文综合探讨了影响混凝土耐久性的因素，包括材料特性、施工质量、环境条件、使用荷载和维护管理，并介绍了耐久性评估方法，如实地检查、非破坏性检测技术、破坏性测试和多层次模糊综合评价模型。针对耐久性问题，文中还讨论了多种修复技术，包括表面修补、碳纤维增强聚合物加固、钢筋混凝土结构加固和快速修复技术。展望未来，纳米技术、多功能材料、高性能混凝土和先进施工技术的应用将进一步提升混凝土结构的耐久性和可持续性。

关键词：混凝土；耐久性；修复技术

Durability Assessment and Repair Techniques of Concrete Structures

Shaowei Huang

Shaanxi Dingyuhao Construction Engineering Co., Ltd., Xi'an City, Shaanxi Province 712000

Abstract: Concrete structures, due to their extensive application, face durability challenges that not only affect structural safety but also bring economic burdens. This paper comprehensively discusses the factors affecting the durability of concrete, including material properties, construction quality, environmental conditions, service loads, and maintenance management. It introduces durability assessment methods such as on-site inspections, non-destructive testing techniques, destructive testing, and multi-level fuzzy comprehensive evaluation models. The paper also discusses various repair techniques for durability issues, including surface patching, carbon fiber-reinforced polymer strengthening, reinforced concrete structure reinforcement, and rapid repair techniques. Looking to the future, the application of nanotechnology, multifunctional materials, high-performance concrete, and advanced construction techniques will further enhance the durability and sustainability of concrete structures. Through scientific assessment and effective repair, the service life of concrete structures can be extended, maintenance costs can be reduced, and contributions can be made to the sustainable development of society.

Keywords: Concrete; Durability; Repair Techniques

引言

混凝土作为现代建筑和基础设施建设中不可或缺的材料，因其优异的力学性能和经济性被广泛应用于桥梁、大坝、高层建筑和海港码头等工程中。然而，混凝土结构在服役过程中，不可避免地会受到环境侵蚀、荷载作用和材料老化等因素的影响，导致耐久性能下降，进而影响结构的安全性和使用寿命。因此，对混凝土结构进行耐久性评估和修复，已成为工程界和学术界关注的热点问题。耐久性是指混凝土结构在预定使用期限内，抵抗环境作用和荷载影响，保持其性能和功能的能力。混凝土结构的耐久性问题主要表现为钢筋锈蚀、裂缝扩展、保护层脱落和化学介质侵蚀等，这些问题不仅影响结构的外观和使用功能，还可能导致结构性能的急剧下降，甚至引发安全事故。因此，对混凝土结构进行耐久性评估，及时发现和处理耐久性问题，对于确保结构安全、延长使用寿命和降低维护成本具有重要意义。

1 混凝土结构耐久性的影响因素

1.1 环境条件

环境条件对混凝土结构的耐久性影响显著，主要包括温度、湿度、腐蚀介质等因素。

1.1.1 温度和湿度

温度变化会导致混凝土内部产生温度应力，进而引起裂缝和剥落。在高温环境下，混凝土的水分蒸发加速，导致内部空隙增加，密实度下降，强度减弱。相反，低温环境下，水分冻结会引起冰胀效应，对混凝土结构造成破坏。此外，湿度变化也会影响混凝土的内部水分迁移，引起干缩和湿胀现象，进而导致结构变形和开裂。因此，在设计和施工过程中，应考虑温度和湿度的变化对混凝土结构的影响，采取适当的温控和湿控措施。

1.1.2 腐蚀介质

腐蚀介质是影响混凝土结构耐久性的主要外部因素之一。混

凝土结构长期暴露在含有氯离子、硫酸盐、二氧化碳等腐蚀介质的环境中，会导致混凝土的化学侵蚀和物理破坏。氯离子侵入混凝土内部，会破坏钢筋的钝化膜，引起钢筋锈蚀和体积膨胀，进而导致混凝土开裂和剥落。硫酸盐侵蚀会引起混凝土内部形成膨胀性物质，如石膏和硫酸钙，导致混凝土膨胀和开裂。二氧化碳侵蚀会引起混凝土碳化，使其碱性降低，保护钢筋的能力减弱。因此，在防止腐蚀介质侵蚀方面，应采取适当的防护措施，如使用耐腐蚀材料、涂刷防护层和定期检查维护等。

1.2 材料特性

1.2.1 混凝土组成

混凝土的组成材料包括水泥、骨料、水和外加剂等。水泥的种类和质量直接影响混凝土的强度和耐久性，高性能水泥可以提高混凝土的抗压强度和抗腐蚀能力。骨料的种类和粒径分布对混凝土的密实度和力学性能有重要作用，优质骨料有助于提高混凝土的耐久性。水灰比是影响混凝土结构耐久性的关键参数，合理的水灰比可以提高混凝土的密实度和抗渗性，减少孔隙和裂缝的产生。

1.2.2 掺合料

掺合料是提高混凝土耐久性的重要材料，包括粉煤灰、硅灰、矿粉和高炉矿渣等。这些掺合料通过物理填充和化学反应，可以改善混凝土的孔结构，提高其密实度和抗渗性，从而增强耐久性。粉煤灰具有良好的火山灰效应和填充效应，可以提高混凝土的抗压强度和耐久性。硅灰具有极高的细度和活性，可以填充混凝土中的微小孔隙，提高其密实度和抗腐蚀能力。矿粉和高炉矿渣可以通过水化反应，生成大量的水化硅酸钙凝胶，增强混凝土的密实度和抗渗性。因此，在混凝土配合比设计中，合理使用掺合料，可以显著提高混凝土结构的耐久性。混凝土材料在长期服役过程中会发生老化现象，导致其耐久性逐渐下降。材料老化主要表现为碱骨料反应、碳化、氯离子侵蚀和硫酸盐侵蚀等。碱骨料反应会引起混凝土内部膨胀和开裂，降低其强度和耐久性。碳化作用使混凝土的碱性下降，保护钢筋的能力减弱，导致钢筋锈蚀和结构破坏。

1.3 施工工艺

混凝土的养护工艺是影响其耐久性的重要因素之一。养护的目的是保持混凝土表面的湿润，促进水泥的水化反应，提高混凝土的强度和密实度。养护不当会导致混凝土表面失水，产生收缩裂缝，降低其抗压强度和耐久性。常见的养护方法包括洒水养护、覆盖养护和膜养护等。洒水养护可以保持混凝土表面的湿润，促进水化反应，适用于大面积混凝土结构。覆盖养护是使用湿麻布、塑料薄膜等覆盖混凝土表面，防止失水，适用于复杂形状的混凝土结构。膜养护是使用专用养护膜覆盖混凝土表面，保持其湿润和温度稳定，适用于高性能混凝土结构。因此，合理选择和实施养护工艺，可以显著提高混凝土结构的耐久性。混凝土的浇筑工艺直接影响其密实度和力学性能，进而影响其耐久性。浇筑过程中，混凝土的坍落度、振捣和振动时间等参数对混凝土的密实度有重要影响。坍落度过大会导致混凝土产生离析和泌水现象，降低其密实度和强度；坍落度过小会影响混凝土的流动性，导致振捣不均匀，产生蜂窝和空隙，降低其耐久性。振捣是消除混凝土内部气泡，增加其密实度的重要工艺环节，振捣不足会导致混凝土内部残留气泡，影响其强度和耐久性；振捣过度会引起混凝土离析，降低其均匀性和密实度。因此，在混凝土浇筑过程中，应根据工程实际情况，合理控制坍落度和振捣时间，确保混凝土的密实度和耐久性。振捣工艺是影响混凝土结构密实度和力学性能的重要环节，对其耐久性有重要影响。振捣的目的是消除混凝土内部气泡，增加其密实度，提高强度和耐久性。振捣不当会导致混凝土产生离析和泌水现象，降低其均匀性和密实度。振捣时间过短会导致混凝土内部残留气泡，影响其强度和耐久性；振捣时间过长会引起混凝土离析，降低其均匀性和密实度。常见的振捣方法包括机械振捣和手工振捣等。机械振捣是使用振动器对混凝土进行振动，适用于大面积混凝土结构；手工振捣是使用钢筋或木棍对混凝土进行振动，适用于复杂形状的混凝土结构。

2 混凝土结构耐久性评估方法

2.1 耐久性评估的重要性

混凝土结构的耐久性评估是确保其长期性能和安全性的关键环节。随着科技的进步，评估方法也在不断发展，包括人工智能的应用、基于性能的设计方法、非破坏性评估技术等。这些方法提高了诊断的准确性，减少了评估过程中的破坏，为混凝土结构的长期安全运营提供了有力保障。混凝土结构的耐久性评估对于确保其在预定使用期限内的安全性和功能性至关重要。通过评估，可以及时发现结构的损伤和退化，采取适当的维护和修复措施，从而延长结构的使用寿命、提高安全性，并降低维护成本。此外，关注混凝土耐久性还有助于推动可持续建筑和基础设施的发展，因为耐久性良好的结构可以更好地满足未来的需求，减少资源消耗和环境影响。

2.2 评估方法

实地检查和外观评估是最基础的耐久性评估方法。通过直接观察混凝土表面和结构，可以发现明显的损伤，如裂缝、鼓包等。这种方法简单直观，可以迅速发现明显的问题。然而，这种方法无法检测到混凝土内部的隐蔽损伤，如微小裂缝、腐蚀等，且评估结果很大程度上依赖于评估者的经验和判断。非破坏性检测（NDT）技术利用物理或机械性能参数来评估混凝土的耐久性，常用的方法包括超声波测厚、冲击回波、红外热像等。这些方法无需对混凝土结构进行破坏性采样，具有较低的成本和时间消耗。非破坏性检测方法可以提供定量数据，并在一定程度上评估

混凝土的质量和耐久性。然而，这些方法受到混凝土材料特性的限制，如密度、湿度等，对于隐蔽缺陷的检测能力有一定的局限性。破坏性测试方法需要取样并在实验室环境中进行测试，以获取直接的混凝土性能参数。常用的破坏性测试方法包括压缩强度测定、开裂宽度测量等。这些方法可以提供准确的混凝土性能参数，并对混凝土的耐久性进行定量评估。然而，破坏性测试方法需要取样破坏试件，对结构造成一定损伤，并且测试过程通常较为耗时。多层次模糊综合评价模型结合保护层厚度、碳化深度、氯离子质量分数等多个耐久性指标，采用模糊综合评判法对混凝土结构的整体耐久性进行评估。这种方法可以综合多个因素，提供更全面的评估结果。评估标准为耐久性评估提供了规范和指导。例如，中国国家标准《混凝土结构耐久性设计标准》（GB/T 50476–2019）提供了详细的耐久性设计要求，包括环境作用类别与等级的划分、设计使用年限要求、材料与构造的基本要求等。这些标准有助于确保混凝土结构的耐久性评估科学、规范，为结构的长期性能提供保障。混凝土耐久性的评估与保护对于建筑物和基础设施的可持续发展至关重要。通过确保混凝土结构的长期可靠性和安全性，我们可以延长其使用寿命，减少维护成本，并为未来的建筑和基础设施发展创造更可持续的条件。

3 混凝土结构修复技术

混凝土结构修复技术是确保建筑物安全性和延长使用寿命的重要手段。随着时间的推移，混凝土结构可能会因环境影响、荷载变化或材料老化等原因出现裂缝、剥落、蜂窝等缺陷。这些缺陷不仅影响结构的美观，更重要的是可能削弱其承载能力，甚至导致结构失效。因此，及时有效的修复措施显得尤为重要。一种常见的修复技术是裂缝修补。对于细小的裂缝，通常采用表面处理法，使用聚合物修补材料填充裂缝，以防止水分和空气的渗透。对于较宽的裂缝，则可能需要采用压力注浆技术，通过注入环氧树脂或其他粘合剂来恢复裂缝区域的结构强度。例如，在某大型商业建筑的地下车库中，由于长期的水渗透，混凝土出现了多条裂缝。工程师首先对裂缝进行清理，然后采用低压注浆法，将环氧树脂注入裂缝内部，确保其完全填充，最终有效地恢复了混凝土的整体性和承载能力。除了裂缝修补，混凝土表面缺陷的修复也十分重要。对于蜂窝和麻面等表面缺陷，通常采用修补砂浆或聚合物改性砂浆进行修复。这些材料具有良好的粘结性和抗裂性，可以有效改善混凝土表面的密实度和耐久性。在施工过程中，需确保修补区域的清洁和湿润，以增强修补材料与原有混凝土的粘结力。例如，在某桥梁的维护中，发现桥面出现了严重的蜂窝现象。施工团队对受损区域进行凿毛处理后，使用聚合物改性砂浆进行修补，确保修补层与原混凝土的良好结合，从而延长了桥梁的使用寿命。对于更为复杂的缺陷，如孔洞和剥落，修复过程则更为繁琐，可能需要局部剔除受损混凝土并重新浇筑。在剔除受损区域时，需要谨慎操作，避免对周围结构造成进一步损害。重新浇筑的混凝土应与原有混凝土具有相似的力学性能和收缩特性，以确保修复后结构的整体性和协调性。例如，在某老旧住宅楼的外墙修复中，发现由于水侵蚀导致部分混凝土剥落。施工团队首先对剥落区域进行清理和剔除，确保基底坚固后，再进行混凝土的重新浇筑，最终使得外墙恢复了原有的强度和美观。近年来，随着技术的发展，混凝土修复技术也不断创新。例如，聚合物注浆技术通过注入具有良好渗透性和粘结性的聚合物，填充混凝土的微裂缝和孔隙，提高其密实度和耐久性。此外，微生物诱导碳酸钙沉淀（MICP）技术也逐渐应用于混凝土修复中。该技术利用特定微生物的代谢活动产生碳酸钙，从而在混凝土内部形成新的晶体，增强其结构强度。总之，混凝土结构修复技术的有效应用不仅能够恢复结构的功能和安全性，还能延长建筑物的使用寿命。在实际工程中，选择合适的修复方法和材料至关重要，工程师需根据具体情况进行综合评估，以确保修复效果的持久性和可靠性。通过不断的技术创新和实践经验积累，混凝土结构的修复技术将会更加完善，为建筑行业的发展提供有力支持。

4 结语

混凝土结构的耐久性评估与修复技术是确保建筑物和基础设施长期可靠性和安全性的关键。通过采用科学的评估方法和有效的修复技术，可以延长混凝土结构的使用寿命，减少维护成本，并为社会的可持续发展做出贡献。未来的研究应致力于进一步完善评估技术和修复方法，以提高混凝土结构的可持续性。

参考文献：

[1] 金伟良 . 腐蚀混凝土结构学 [M]. 北京 : 科学出版社 , 2011.

[2] 孙龙佳 . 混凝土裂缝自修复技术研究与进展 [J]. Civil Engineering, 2024.

[3] 徐至钧 . 混凝土结构裂缝预防与修复 [M]. 机械工业出版社 , 2011.

[4]JONKERS H M, THIJSSEN A, MUYZER G, et al. Application of bacteria as self–healing agent for the development of sustainable concrete[J]. Ecological Engineering, 2010, 36(2): 230–235.

[5]Lu Zhang, Meng Zheng, Dongqi Zhao, Yakai Feng. 新型自修复混凝土技术综述 [J]. Journal of Building Engineering, 2024, 109331.