

混凝土桥梁耐久性提升的现代技术

千红钢

浙江交工地下工程有限公司

摘要：混凝土桥梁作为关键的交通基础设施，其耐久性能是影响城市运行的重要因素之一。本文对提高混凝土桥梁的耐久性现代技术与工艺进行了全面的分析。首先，研究环境因素对桥梁耐久性的影响，介绍了采用高性能混凝土、防护涂层及智能感知等方法，改善桥梁的耐腐蚀性能。其次，本文从可持续发展观点出发，探讨了如何利用绿色建材，提高节能效率，实现绿色建筑的可持续发展。另外，本文还从国内、国际标准组织的影响、政府政策的扶持和行业组织的积极参与等方面对我国桥梁耐久性起到了积极的推动作用。本文还对目前面临的挑战及今后的发展趋势进行了综述，并提出了多学科交叉研究对促进我国桥梁结构耐久性提高具有重要意义。希望通过本文的研究，能够为我国桥梁行业的可持续发展和安全发展，以及相关政策的制订和完善，提供有价值的参考。

关键词：混凝土桥梁；耐久性；高性能混凝土；环境因素；可持续发展；政策与规范；现代技术

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2024.10.017

一、引言

随着经济社会的快速发展以及交通量的不断增长，使得桥梁耐久性能日益受到工程界的重视。其耐久性不但决定着桥梁的服役年限与安全，而且也决定着养护费用与运营效益。受环境污染、气候变化及材料性能退化等诸多因素的作用，我国的桥梁工程建设面临着严峻的挑战，需要进行大规模的养护与加固，这给社会带来巨大的经济压力。研究和应用现代技术提升混凝土桥梁的耐久性，对于保障行车安全，延长桥梁使用寿命，降低养护费用，有着重要的现实意义。

二、混凝土桥梁耐久性的基本概念

（一）混凝土桥梁的构造与特点

混凝土桥梁是一种以水泥为主的结构形式，在各种桥梁施工中得到了普遍的使用。其主要特征是耐久性好，承载能力强，维修费用相对低廉。混凝土桥梁一般由桥墩、桥台、梁体和桥面板组成。在结构的设计与建造阶段，混凝土配合比、补强方法及预应力施加方式，直接关系到整个结构的整体性能及耐久性。同时，混凝土桥梁的设计须考虑到抗震、抗风、耐腐蚀等多种需求，确保其在不同气候下的稳定与安全。

（二）耐久性的定义与评价标准

混凝土桥梁的耐久性是指在规定的服役年限之内，在不同的外界条件及载荷的共同影响下，其性能不发生劣化的能力。评价混凝土桥梁耐久性的标准主要包括抗压强度、抗渗性、抗冻融性能、抗化学腐蚀能力等方

面。采用室内试验与现场检测相结合的方式，采用混凝土碳化深度测试、氯离子渗透试验等对其耐久性进行评价。在对整个桥梁进行长期的寿命评估中，采用应力传感器和裂缝监测器对其进行实时监测。

（三）影响耐久性的主要因素

混凝土桥梁耐久性受多种因素的影响，主要包括环境因素、材料特性、设计和施工质量。气象（温湿度）、化学侵蚀（盐、酸）以及力学（交通荷载、风力）等多方面的作用会导致桥梁结构的破坏。混凝土配合比、养护工艺和添加剂等的性能对其耐久性也有很大的影响。另外，在结构的设计与施工过程中的荷载估算、施工过程中的浇筑与维护等，都会对桥梁的耐久性产生长远影响。为此，必须综合分析各种影响因素，制定合理的结构设计与施工措施，才能有效地改善混凝土桥梁的耐久性能。

三、现代技术在提升桥梁耐久性中的应用

（一）高性能混凝土的应用

高强度、高耐久性、高工作性、高密实度等特性的高性能混凝土（HPC），是一种新型的通过优化配料和添加特殊材料的混凝土。高性能混凝土的使用极大地提高了其耐久性。采用低水胶比，掺加硅灰、粉煤灰等矿物掺合料，能有效降低氯离子等侵蚀，达到增强结构耐久性的目的。另外，在高性能混凝土中加入高效减水剂，可以提高其流动性，使其变得更密实，降低空隙率，改善了其耐低温、低温、磨损性能。高性能混凝土在预应力砼桥梁中的使用，对改善预应力保持性、降低其长期变形具有重要意义。近年来，随着纳米技术和新型材料的发展，HPC的性能正在不断提升，为桥梁耐久性的进一步提升提供了更多可能性。

（二）纤维增强混凝土技术

纤维增强混凝土（FRC）是一种利用纤维来改善其力学性质的新型材料。纤维类型有钢纤维、玻璃纤维、碳纤维、高分子纤维等，可改善混凝土的抗裂性，抗冲击，抗疲劳等。在桥梁建设中，采用纤维加固混凝土能有效地改善桥面及桥面结构的耐久性能。钢纤维增强混凝土（SFRC）具有良好的抗裂性、承载力等性能，已被广泛应用于钢桥面板及桥梁工程。在苛刻的使用条件下，碳纤维布、玻纤等材料的抗侵蚀能力较强。同时，由于加入了大量的纤维，使得其具有较好的抗冲击性能，因此，在超过设计载荷作用下，可以保证其整体性能。随着纤维复合材料制造工艺的发展，其在提高桥梁结构的耐久性能方面具有广阔的发展前景。

（三）自愈合混凝土技术

自愈合混凝土技术是一种革命性的创新，其目的在

于实现对混凝土内部微观裂纹的自我修补。该方法是将特定的自修复物质（如细菌、微胶囊、形状记忆合金等）引入到混凝土中，从而达到修复效果。一旦发生裂纹，这种物质就会被激发，在裂纹周围形成新的晶体，填充裂纹，并重新获得其最初的构造。采用自愈性混凝土能够有效降低养护与维修工作量，提高其服役年限，降低养护造成的运输中断。另外，该工艺对环保污染更少，为可持续发展做出了贡献。随着科研的不断进展，自愈混凝土的效率和可靠性正在不断提高，为桥梁耐久性的提升提供了新的解决方案。

（四）防腐蚀技术与涂层

钢筋锈蚀是导致混凝土结构长期使用性能下降的一个重要因素。因此，许多先进的防护方法与涂料被开发出来，用以防止桥梁的腐蚀。其中包括电化学防护、阴极保护、表面镀覆、防腐等。采用外加电流的电化学防护方法，例如阴极防护等，可避免钢筋锈蚀。采用环氧树脂涂料、聚合物涂料等材料作为涂层材料，能够防止有毒化学品及水的渗入，对混凝土及钢筋起到一定的防护作用。此外，采用抗腐蚀材料如不锈钢钢筋和腐蚀抑制剂对改善结构的耐久性具有重要意义。采用上述方法，既可提高桥梁的使用寿命，又可减少其长期维修费用，保证其稳定与安全。新的材料、新工艺的出现，使钢结构的防腐维护得到了更大范围、更高效的发展。

四、结构加固与维护技术

（一）预应力技术在桥梁加固中的应用

采用预张拉的钢筋或钢丝来增强其承载能力和耐久性能，是目前国内外研究的热点。该工艺能显著降低混凝土开裂率，改善其抗弯和剪切性能。在桥梁改造中，经常采用预应力来改善既有桥梁的服役状态，尤其对提高桥梁的跨度和改善其动态性能具有重要意义。同时，采用预应力施工对降低桥梁的总造价具有重要意义。近年来，随着材料及工程科技的进步，越来越多的更高效、更经济的预应力技术出现在人们的视野中。

（二）桥梁监测与健康评估技术

桥梁监测与健康评估技术是指在桥梁中设置应变、加速度、位移等多种传感器，对其进行在线检测，实现对其进行应力、位移和振动等关键指标的在线检测。通过对监测结果的统计分析，可以有效地检测出桥梁存在的裂缝、变形、锈蚀等隐患。随着以物联网为代表的新型信息科技的快速发展，桥梁监控的工作效率与精度得到大幅提升。通过对桥梁结构进行检测和维修，可以有效预防事故的发生，延长桥梁的使用寿命。

（三）损伤修复与维护策略

损伤修复与维护策略包括定期检查、损坏评估、修理及加固。对于破损部位的修补，通常采用裂缝灌浆、补强加固和更换破损部位等措施。为改善养护工作的效果和施工品质，采用碳纤维加固、高性能混凝土等新型加固方法得到了越来越多的应用。从维修策略上看，除常规的检修与及时修理外，预防维修已成为人们关注的

焦点。在此基础上，结合实际工程中的实际状况，制订相应的维修保养方案，以最低的费用取得最好的维修效益。桥梁结构的损坏维修是保证桥梁安全和延长其服役寿命的关键。

五、环境因素对混凝土桥梁耐久性的影响

（一）气候变化的影响

环境因素是导致水泥砼桥面板耐久性性能变化的主要因素。高温、强降雨和冻融循环等恶劣气象环境对结构的损伤是非常大的。温度升高会造成混凝土的干缩和裂缝，而在长期的冻融作用下，混凝土的结构将发生损伤。另外，暴雨及洪涝灾害不但会使桥梁结构受到一定程度的破坏，而且会引起桥梁的冲蚀及地基失稳。考虑气候变化因素，采用高性能混凝土、改善排水系统等，是提升其耐久性的关键。

（二）化学侵蚀与生物侵蚀

化学腐蚀主要是由于大气中含有大量的腐蚀物质造成的，例如酸雨、盐碱、工业污染等。这些化学物质会渗入到混凝土中，从而使它的结构性失效。生物腐蚀与微生物的活性有关，比如一些可以腐蚀水泥建筑的细菌和真菌。要想抵御这种腐蚀，必须使用防腐涂料，使用具有抗化学和抗微生物作用的物质，并对桥梁进行经常性的清洗和维修。

（三）机械磨损与负载效应

机械磨损和负载效应是由桥梁的日常使用和外部力量引起的。长时期内，汽车、行人不断通过对桥梁结构造成了一定程度的损伤。另外，重型汽车及不规则荷载等因素也会给桥梁带来附加荷载，从而引发开裂等结构性损伤。针对上述问题，我们提出采用加强材料抗磨损性能、定期检测以及加强桥梁的强度等措施来提升其耐久性。在此基础上，采取合理的荷载控制措施，比如对重载汽车的控制等，对保证桥梁的安全起到了很大的作用。

六、可持续发展视角下的桥梁设计与施工

（一）绿色建筑材料的应用

在可持续发展理念下，采用环保建材已是我国桥梁工程建设中不可忽视的一环。由于常规的水泥中含有一些对生态环境不利的物质，因此，选用新型的环保建材可以有效地减轻对天然资源的依赖，从而达到减少温室气体排放的目的。比如，混凝土，可再生的建材，以及可生物分解的材料，都可以帮助减少对环境的冲击。这样做也与人们对可持续发展越来越多的全球性关切相一致，有助于实现桥梁的长远可持续发展。

（二）能源效率与环境影响

节能的施工工艺，例如：先进的施工设备，智能化的施工管理体系等，有助于降低能耗，减少对能源的需求。另外，利用清洁能源提供动力，优化交通流，减少施工废弃物排放量，也是实现可持续发展的关键。通过在设计 and 施工阶段综合考虑能源效率和环境影响，可以有效减少桥梁的生命周期环境足迹。

（三）循环经济在桥梁建设中的应用

运用循环经济原理进行桥梁施工，其可持续发展的优越性是显而易见的。这就是在桥梁设计、建造及维修期间，使用可循环使用的物料，尽量降低垃圾的排放量。通过对垃圾进行高效处理与回收，可以减轻工程对资源的消耗，减轻对生态系统的负面冲击。同时，由于“循环经济”概念的提出，使得设计人员在进行结构设计时，应充分重视可拆解性与物料重复使用的可行性，从而达到一种更为可持续的建造与运行方式。

基于可持续发展理念，在我国的桥梁建设中，必须兼顾材料选用、节能减排、环保效应和利用循环经济原理。这些方面的综合考虑，将有助于建设更具耐久性、更环保和更符合可持续发展目标的桥梁工程。

七、政策与规范在桥梁耐久性提升中的作用

（一）国内外相关标准与规范

在提高桥梁结构的耐久性能中，国内外相关标准与规范发挥了重要的作用。这些标准对桥梁的设计、施工、养护及评估提出了明确的要求和准则。如 ISO、ASTM等国内外标准化机构颁布的有关材料、设计及建造的规范，为我国的桥梁建设提供了可靠的保障。遵循这些标准和规范，可以帮助工程师和建筑师采用最佳的设计和施工方法，提高桥梁的耐久性和可靠性。

（二）政府政策与资金支持

提升桥梁的耐久性，需要国家的政策与财政扶持。通过制订促进桥梁耐久性的政策，提供财政资助，以及税务上的奖励，来促进新的科技和更具可持续性的建材。同时，国家也将加大研发资金投入，促进新材料、新工艺和新工艺的推广，提升其使用寿命。在保证公众的安全与长远的基建可靠度的前提下，政府的投资帮助了桥梁工业的革新。另外，通过制定一项长远的维修与检查方案，保证桥梁的连续使用与安全性。

（三）行业协会与标准化组织的角色

行业协会、标准化机构对提高桥梁的耐久性发挥了关键作用。他们往往承担着制订工业标准、进行职业训练和促进最佳做法的任务。同时，他们也可以在政府、企业、科研院所等方面起到沟通和桥梁的作用。通过上述机构的工作，将有助于提升全产业的规范水平，促进新工艺的推广，保证桥梁的设计与建设。同时，通过行业协会、标准化组织等机构的认证，保证了工程技术和专业技术水平的不断提升，从而提高桥梁工程的整体质量。

八、结束语

在对混凝土桥梁的耐久性研究中，各种新型的创新技术与施工工艺不断涌现。从研发高性能混凝土到采用智能化监控体系，从新型建材到节能增效，既是科技发展的必然趋势，又是环保与可持续发展的必然要求。文章对目前国内外的一些新的发展动向及今后的发展进行了综合的探讨，以期对我国的桥梁建设有一定的借鉴意义。

可见，提高桥梁的耐久性既是一个技术难题，也是一个政策制定、行业标准制定以及人才培养的重要课题。在此基础上，应加强政府与产业机构之间的合作，建立并实施高品质的标准和规范，保证桥梁施工与养护工作的品质。而要提高其耐久性，还必须依靠多个学科的协同合作，才能使该学科的前沿研究成果向工程实践转化。

今后，对混凝土桥梁耐久性的提升，将更加注重跨学科、多学科的交叉协作。通过材料、结构、环境等多学科的交叉融合，促进我国桥梁设计和施工技术的创新。在此期间，要本着以人为本的原则，保证桥梁的安全性、可靠性和经济性，促进经济社会的可持续发展。

综合各学科的优势与资源，使钢筋混凝土桥梁的耐久性能得以提高成为可能。我们期待在不远的将来，能够看到更加坚固、智能和环境友好的桥梁，它们将是人类智慧和科技进步的象征。

参考文献

- [1] 谢荣飞. 海洋环境下桥梁高性能混凝土耐久性控制研究[J]. 江苏建材, 2023, (05): 53-55.
- [2] 张绩. 辽宁地区混凝土桥梁耐久性检验与评价研究[J]. 北方交通, 2023, (09): 1-6.
- [3] 向敬. 跨海混凝土桥梁耐久性评价中的赋权值研究[D]. 浙江海洋大学, 2023.
- [4] 张清海. 影响桥梁混凝土结构耐久性的因素及设计优化[J]. 工程建设与设计, 2023, (10): 67-69.
- [5] 周超民, 张辉, 卢开艳. 混凝土结构耐久性的公路桥梁变形安全控制方法[J]. 建筑技术, 2023, 54(08): 900-903.
- [6] 王荣, 王华伟. 潍坊沿海桥梁混凝土耐久性调查分析[J]. 潍坊学院学报, 2023, 23(02): 68-72.
- [7] 李昌昊. 桥梁结构耐久性影响因素及优化设计研究[J]. 交通科技与管理, 2023, 4(06): 147-149.
- [8] 周静. 公路桥梁混凝土结构的耐久性设计研究[J]. 工业建筑, 2023, 53(01): 247.
- [9] 丁伟锐, 黄维莉. 桥梁混凝土结构耐久性现场检测探讨[J]. 交通世界, 2022, (36): 99-101.
- [10] 阮静, 左新黛, 张德龙等. 国内外混凝土桥梁寿命与耐久性设计进展[J]. 城市道桥与防洪, 2022, (09): 1-4+325.
- [11] 张进. 海洋环境下混凝土桥梁耐久性评估方法研究[D]. 西南交通大学, 2022.
- [12] 宋承哲. 混凝土桥梁盐冻腐蚀及耐久性提升技术[J]. 北方交通, 2022, (03): 1-3+7.
- [13] 陈敬轩. 基于南方湿度变化的混凝土桥梁结构耐久性提升技术[J]. 工程技术研究, 2021, 6(09): 89-90.
- [14] 许春荣, 郭慧乾, 刘光严等. 桥梁混凝土的盐冻损伤与耐久性提升技术[J]. 公路, 2020, 65(04): 192-196.