

桥梁加固工程中高性能混凝土的应用及性能优化

陈闪闪

江苏梦联桥科技有限公司, 江苏省南京市, 210000;

摘要: 随着桥梁使用年限的增加, 桥梁结构老化、病害频发等问题日益突出, 对桥梁进行加固维修成为保障交通安全的必要措施。高性能混凝土凭借其高强度、高耐久性、高工作性等优异性能, 在桥梁加固工程中展现出巨大的应用潜力。本文深入探讨高性能混凝土在桥梁加固工程中的应用方式, 分析了影响其性能的关键因素, 并提出了针对性的性能优化策略, 旨在为桥梁加固工程提供理论支持与实践指导。

关键词: 桥梁加固; 高性能混凝土; 应用方式; 性能优化

DOI: 10.69979/3029-2727.26.03.016

引言

桥梁作为交通基础设施的重要组成部分, 其安全性和耐久性直接关系到交通运输的顺畅与安全。然而, 随着时间的推移, 许多桥梁在长期车辆荷载、自然环境侵蚀等因素的作用下, 出现了混凝土破损、开裂、钢筋锈蚀等病害, 导致桥梁承载能力下降, 存在严重的安全隐患。传统的桥梁加固方法, 如增大截面加固法、粘贴钢板加固法、粘贴纤维复合材料加固法等, 虽然在一定程度上能够提高桥梁的承载能力, 但也存在一些局限性, 如自重增加较大、耐久性不足、施工工艺复杂等。高性能混凝土作为一种新型的建筑材料, 具有高强度、高耐久性、高工作性等优异性能, 能够有效克服传统加固方法的不足, 为桥梁加固工程提供一种更加理想的解决方案。因此, 深入研究高性能混凝土在桥梁加固工程中的应用及性能优化具有重要的理论意义和实际应用价值。

1 高性能混凝土的特性

1.1 高强度特性

高性能混凝土展现出卓越的抗压与抗拉强度性能, 其抗压强度普遍可达 100MPa 以上, 部分超高性能混凝土 (UHPC) 的抗压强度更是惊人地突破 150MPa 大关, 较普通混凝土强度提升幅度可达 50% - 100%。如此高强度特性, 赋予高性能混凝土承受更大荷载的能力。在桥梁加固工程中, 这一优势得以充分发挥, 可有效提升结构承载能力, 实现结构尺寸的优化缩减, 进而降低自重。以预应力混凝土桥梁加固为例, 采用高性能混凝土后, 桥墩承载能力可提升 20% - 30%, 能够应对更大荷载, 有力保障桥梁的安全稳定运行。

1.2 高耐久性优势

高性能混凝土具备出色的耐久性, 对各类环境因素 (如温度波动范围在 -20°C 至 50°C 、湿度变化在 30% - 90%、盐雾环境等) 引发的混凝土侵蚀作用, 展现出强大的抵御能力。其低渗透系数 (通常小于 $1 \times 10^{-11} \text{ m/s}$) 和高抗渗性, 如同坚固的屏障, 有效阻止水分和化学物质侵入混凝土内部, 将钢筋锈蚀和混凝土碳化的发生概率降低 60% - 80%, 从而显著延长桥梁的使用寿命。在沿海地区桥梁加固工程中, 采用高性能混凝土后, 桥梁在海水腐蚀环境下的使用寿命可延长 30 - 50 年, 极大提升了桥梁的耐久性。

1.3 高工作性表现

高性能混凝土拥有良好的流动性、可塑性和易浇筑性, 完美契合桥梁加固工程中复杂多样的施工工艺要求。其自密实性能尤为突出, 在浇筑过程中无需振捣, 混凝土凭借自身特性自动填充模板内的每一处空间, 确保混凝土的密实性和均匀性, 密实度可达 98% 以上。以大跨度桥梁加固为例, 采用高性能混凝土可轻松实现薄壁结构设计, 使结构自重减轻 15% - 25%, 有效降低工程造价, 提升工程经济效益。

1.4 良好的体积稳定性特征

高性能混凝土在硬化过程中, 收缩变形小, 徐变变形也处于较低水平, 能够维持良好的体积稳定性。这一特性对减少混凝土结构裂缝意义重大, 可提升结构整体性和耐久性。在桥梁伸缩缝加固工程中, 采用高性能混凝土后, 温度裂缝的产生得到有效控制, 裂缝数量减少 70% - 80%, 有力保障伸缩缝的正常使用功能。

2 高性能混凝土在桥梁加固工程中的应用方式

2.1 受弯构件加固

对于桥梁的受弯构件，像梁、板这类结构，在其受拉区增设高性能混凝土层是有效的加固手段。依据高性能混凝土的轴拉性能，可划分为应变软化型与应变硬化型。在承载能力加固场景中，优先选用应变硬化型高性能混凝土，因其能在受力过程中持续提供稳定抗拉力。考虑高性能混凝土层抗拉贡献，基于平截面假定，可推导出增设该层后构件抗弯承载能力计算公式。在实际工程中，多采用在梁底面及侧面包覆高性能混凝土的方式提升受弯承载力。一般而言，经此加固后，受弯构件的承载能力可提升 20% - 30%，有效恢复或增强桥梁的受弯性能。

2.2 受压构件加固

桥墩作为桥梁结构中典型的受压构件，长期受水流冲击、磨损以及钢筋锈蚀等因素影响，底部混凝土磨损严重，承载能力大幅下降。高性能混凝土具备极高的抗压强度（可达 100MPa 以上）和良好韧性，是受压构件加固的理想材料。通常采用在桥墩周边包覆高性能混凝土的方式加固。包覆厚度根据桥墩受损程度和承载需求确定，一般为 10 - 30cm。经加固后，桥墩的承载能力可提升 25% - 35%，同时耐久性显著增强，可有效抵御水流冲刷和化学侵蚀，延长桥墩使用寿命。

2.3 整体刚度提升

对于跨度较大、整体偏柔的桥梁结构，如钢箱梁悬索桥等，钢箱梁挠度较大，易产生疲劳裂缝。此时，在钢箱梁上浇筑高性能混凝土薄层是提升刚度的有效方法。浇筑的高性能混凝土薄层厚度一般在 5 - 15cm，通过剪力钉将钢筋网片与钢箱梁牢固连接。加固后，钢箱梁的刚度可提升 15% - 25%，挠度减少 20% - 30%，有效防止疲劳裂缝的产生，增强桥梁的整体稳定性和安全性。

2.4 耐久性加固

因混凝土耐久性欠佳，桥梁结构在水下环境或恶劣气候条件下易受腐蚀破坏。高性能混凝土凭借出色的耐久性，成为桥梁耐久性加固的优选材料。其低渗透系数（通常小于 1×10^{-11} m/s）和高抗渗性，能有效阻止水分和有害物质侵入。经高性能混凝土修复和防护后，桥梁

结构的抗腐蚀能力可提升 30% - 40%，使用寿命延长 20 - 30 年，大大降低后期维护成本，保障桥梁长期安全运营。

3 影响高性能混凝土在桥梁加固工程中性能的因素

3.1 原材料质量

高性能混凝土的原材料包括水泥、矿物掺合料、细集料、粗集料以及外加剂等，原材料的质量直接影响高性能混凝土的性能。例如，水泥的强度等级、矿物掺合料的种类和活性、集料的粒径和级配以及外加剂的性能等，都会对高性能混凝土的强度、耐久性和工作性产生影响。

3.2 配合比设计

高性能混凝土的配合比设计是决定其性能的关键因素。合理的配合比设计应综合考虑强度、耐久性、工作性和经济性等多方面要求。水胶比是影响高性能混凝土性能的重要参数，适当的水胶比不仅能确保混凝土具有足够的流动性，还能提升其硬化后的强度和耐久性。此外，矿物掺合料的种类和用量、砂率等也会对高性能混凝土的性能产生显著影响。

3.3 施工工艺

高性能混凝土的施工工艺对其性能也有重要影响。施工过程中，应严格控制混凝土的搅拌、运输、浇筑和养护等环节。例如，搅拌时间和搅拌速度会影响混凝土的均匀性；运输过程中的振动和颠簸可能导致混凝土离析；浇筑过程中的振捣方式和养护条件会影响混凝土的密实性和强度发展。

3.4 界面性能

在桥梁加固工程中，高性能混凝土与原构件界面的可靠连接是保证两者协同受力的关键。目前，对结合面凿毛、植筋或布置剪力键等单一连接方式研究较多，但对复合连接的研究相对不足。实际工程中，布置剪力键较困难，仅进行凿毛不能保证结合面的连接效果，而植筋则需要植入的钢筋具有较大的锚固长度，会对原梁体造成较大损伤。因此，界面结合性能是影响高性能混凝土加固效果的重要因素之一。

4 高性能混凝土在桥梁加固工程中的性能优化策略

4.1 优化原材料甄选

优质且性能稳定的原材料是保障高性能混凝土性能的基石。水泥作为关键胶凝材料,应选用高强度等级产品,如 P·O52.5 或 P·O62.5 水泥,其强度指标较普通水泥提升 20% - 30%,能为混凝土提供坚实强度支撑。矿物掺合料方面,活性较高的硅灰、矿粉和优质粉煤灰是理想之选,其中硅灰的活性指数可达 105% - 115%,可显著提升混凝土强度与耐久性。集料需级配良好、粒形规则,含泥量控制在 1%以内,以确保混凝土内部结构致密。外加剂选用性能优良的高效减水剂、引气剂等,高效减水剂减水率可达 25% - 35%,能有效改善混凝土工作性。

4.2 优化配合比设计

科学的配合比设计需综合考量强度、耐久性、工作性和经济性等多维度要求。合理确定水胶比、矿物掺合料用量、砂率等关键参数,水胶比一般控制在 0.25 - 0.35 之间,直接影响混凝土强度与耐久性。采用模糊数学、响应面法、遗传算法等优化方法,构建配合比与混凝土性能的数学模型,精准分析各因素影响。如在 C50 - C70 高性能混凝土配制中,20% - 50%的水泥可用 15% - 30%的矿渣或优质粉煤灰替代;C80 以下混凝土,矿渣(优质粉煤灰)用量为 15% - 35%,二氧化硅灰用量为 5% - 10%,可有效降低成本并提升性能。

4.3 改进施工工艺

严格把控施工过程质量,依规范操作。搅拌时,控制搅拌时间 120 - 180s、搅拌速度 45 - 60r/min,确保混凝土均匀性,强度离散系数可控制在 5%以内。运输中采取防离析措施,如罐车转速保持在 2 - 4r/min。浇筑时,根据结构特点选合适振捣方式与时间,一般振捣时间 15 - 30s,保证混凝土密实性,孔隙率可降低至 3%以下。养护依混凝土性能与环境条件,采用洒水、覆盖或蒸汽养护,养护时间不少于 14d,确保混凝土达最佳硬化状态,强度增长稳定。

4.4 加强界面处理

妥善处理高性能混凝土与原构件结合面,提升新旧混凝土界面粘结能力,采用凿毛、植筋、布置剪力键或复合连接等方式,增强连接效果。优化植筋直径、间

距等参数,植筋直径一般 16 - 25mm,间距 200 - 300mm,减少对原梁体损伤。经处理后,结合面抗剪承载能力可提升 30% - 50%。

4.5 严格检测与评估

构建严格检测体系与评估标准,对原材料、配合比、施工过程和成品质量全面检测评估。施工时及时检测混凝土强度、耐久性等性能,强度检测频率不少于每 100m³一次,发现问题及时调整。工程竣工后,对加固桥梁结构长期监测评估,监测周期不少于 5 年,确保安全性与耐久性达标。

5 结论

高性能混凝土凭借其高强度、高耐久性、高工作性等优异性能,在桥梁加固工程中具有广阔的应用前景。通过合理选择应用方式,如受弯构件加固、受压构件加固、刚度加固和耐久性加固等,可以有效提高桥梁的承载能力和使用寿命。然而,高性能混凝土在桥梁加固工程中的性能受到原材料质量、配合比设计、施工工艺和结合面性能等多种因素的影响。为了优化高性能混凝土的性能,应采取优化原材料选择、优化配合比设计、改进施工工艺、加强结合面处理和严格检测与评估等策略。未来,随着材料科学和施工技术的不断发展,高性能混凝土在桥梁加固工程中的应用将更加广泛和深入,为保障桥梁的安全运营提供更加可靠的保障。

参考文献

- [1]张威.高性能混凝土配合比设计及在桥梁工程中的应用[J].交通科技与管理,2025,6(18):143-145.
- [2]何占伟,卢欣欣.高性能纤维增强混凝土在桥梁工程中的应用研究[J].城市建设理论研究(电子版),2025,(15):142-144.
- [3]王文勇.高性能混凝土在桥梁工程中的应用及其耐久性研究[J].工程机械与维修,2024,(11):15-17.
- [4]芦向晶,袁芬,赵鹏,等.高性能混凝土在预制装配式桥梁工程中的应用[J].混凝土世界,2023,(09):68-72.
- [5]刘青臣.高性能混凝土在桥梁工程中的应用[J].交通世界,2021,(34):137-138.