

高性能混凝土在市政道路桥梁中的应用及耐久性研究

成 凯

华章（江西）技术有限公司 江西宜春 331299

摘 要：本文系统研究了高性能混凝土在市政道路桥梁工程中的应用及其耐久性。文章首先阐述了高性能混凝土以低水胶比、掺加高效减水剂与矿物掺合料为核心的组成特性，及其由此产生的高强度、高工作性与高耐久性等综合优势。随后，结合桥梁主体结构、道路路面及特殊环境等应用场景，分析了其在提升结构承载力、延长使用寿命、适应复杂施工条件等方面的具体实践。重点从抗渗性、抗化学侵蚀、抗冻融能力及长期稳定性等维度，深入探讨了其卓越的耐久性机理与表现。研究表明，高性能混凝土凭借其优异的综合性能，能够显著提升市政道路桥梁工程的质量与耐久性，降低全生命周期维护成本，是现代市政基础设施建设中极具应用前景的关键材料。

引言

随着城市化进程的加速，市政道路桥梁作为城市交通的命脉，其建设质量与服役寿命备受关注。传统混凝土材料在日益复杂的荷载与环境作用下，常表现出耐久性不足、易开裂、维护成本高等问题，难以满足现代工程对长寿命、高性能的要求。高性能混凝土作为一种新型先进建筑材料，以其高强度、高工作性和卓越的耐久性，为解决上述难题提供了理想方案。

一、高性能混凝土的组成特性与工程优势

（一）高性能混凝土的定义与组成特点

高性能混凝土是一种具有高工作性、高强度、高体积稳定性与高耐久性综合性能特征的先进建筑材料。其科学定义不仅限于力学强度指标，更强调在多种服役环境下的长期性能表现。与传统混凝土相比，高性能混凝土通过优化材料组成与配比设计，实现了在复杂工程条件下的卓越性能。其核心组成特点包括低水胶比、掺加高效减水剂、使用优质矿物掺合料（如硅灰、粉煤灰、矿粉）等。低水胶比设计显著降低了混凝土内部的孔隙率，从而提高了密实度和力学强度；高效减水剂的引入则在不增加用水量的前提下，大幅提升了拌合物的流动性，使混凝土在施工过程中更易于泵送与浇筑；硅灰、粉煤灰、矿粉等矿物掺合料的掺入，不仅改善了混凝土的微观结构，还通过火山灰反应进一步提升了其长期强度与耐久性。这些组分通过物理填充与化学反应的协同作用，共同构筑了高性能混凝土的优异性能体系。

（二）高性能混凝土的力学性能与工作性能

高性能混凝土在力学性能方面表现出显著优势，其

抗压强度通常可达到60MPa以上，部分特种配比甚至可超过100MPa，远高于传统混凝土的30-50MPa。同时，其弹性模量也相应提高，使得结构在荷载作用下具有更小的变形，从而提升了整体刚度与稳定性。在抗拉强度、抗折强度以及抗冲击性能方面，高性能混凝土同样展现出优越的表现，这使其在承受动态荷载与疲劳作用的市政道路桥梁结构中具有更高的安全储备。在工作性能方面，高性能混凝土具有高流动性、自密实能力与优异的泵送性能，能够满足现代复杂结构施工的需求。高流动性使其能够充分填充模板内的各个角落，减少振捣需求；自密实能力则有效避免了因振捣不充分导致的空洞与缺陷；优异的泵送性能使其在高层、大跨度结构施工中能够实现远距离输送，确保施工效率与质量。这些特性共同使得高性能混凝土在市政道路桥梁工程中具有广泛的应用前景^[1]。

（三）高性能混凝土在市政工程中的适用性分析

市政道路桥梁工程具有荷载复杂、结构形式多样、施工环境严苛等特点，对建筑材料提出了较高的技术要求。高性能混凝土凭借其优异的力学性能与耐久性，在技术层面完全适用于此类工程。在荷载作用方面，市政桥梁需承受车辆动荷载、风荷载、温度荷载等多种作用，高性能混凝土的高强度与高刚度能够有效抵抗这些荷载，提高结构安全性；在结构形式方面，现代市政桥梁趋向于大跨度、轻型化设计，高性能混凝土的高强度允许减小构件截面尺寸，从而降低自重，实现更为经济合理的结构设计；在施工环境方面，市政工程常面临工期紧张、施工空间受限等挑战，高性能混凝土的优异工作性能能够适应这些条件，确保施工质量与进度。此外，高性能

混凝土的高耐久性使其在氯离子侵蚀、冻融循环、碳化等恶劣环境下仍能保持长期性能稳定，显著延长了结构的使用寿命，降低了全生命周期维护成本。因此，在市政道路桥梁工程中推广应用高性能混凝土，不仅能够提升工程质量，还具有良好的经济效益与社会效益。

二、高性能混凝土在市政道路桥梁中的应用实践

（一）在桥梁主体结构中的应用

高性能混凝土在桥梁主体结构中的应用，主要体现在主梁、桥墩、桥台等关键承重构件中。这些构件是桥梁整体受力体系的核心，其材料性能直接关系到桥梁的安全性与耐久性。高性能混凝土通过其高强度和高刚度特性，显著提升了桥梁的承载能力与抗变形能力。在主梁结构中，采用高性能混凝土可减小梁体截面尺寸，从而降低结构自重，优化内力分布，提高桥梁的跨越能力。在桥墩与桥台部分，高性能混凝土的高密实度与低渗透性有效抵抗了外界环境中的侵蚀介质（如氯离子、硫酸盐等）的侵入，延缓了钢筋锈蚀与混凝土劣化进程，从而增强了结构的耐久性。此外，高性能混凝土的优异体积稳定性减少了因收缩、徐变引起的变形与开裂风险，进一步提升了桥梁的整体安全储备。这些优势使得高性能混凝土在大跨度、重载交通及复杂地质条件下的桥梁工程中具有不可替代的应用价值。

（二）在道路工程中的应用

在市政道路工程中，高性能混凝土广泛应用于路面结构、特殊路段（如公交专用道、重载交通路段）以及附属设施（如排水沟、检查井）的建设中。其优异的力学性能与耐久性使其在提高路面使用性能方面发挥了重要作用。在路面结构中，高性能混凝土的高耐磨性与抗疲劳性显著降低了车辆荷载反复作用下的表面磨损与结构损伤，减少了路面维修频率。在公交专用道与重载交通路段，高性能混凝土通过提高材料的抗裂能力与承载能力，有效抑制了早期裂缝的产生，延长了路面的使用寿命。在附属设施方面，高性能混凝土的高密实性与耐腐蚀性使其在排水沟、检查井等易受水侵蚀与化学腐蚀的部位表现出色，减少了因材料劣化导致的设施失效问题。此外，高性能混凝土的施工适应性使其在复杂道路断面与狭小空间中仍能保证施工质量，进一步提升了市政道路工程的整体性能与使用寿命^[2]。

（三）在特殊环境与复杂条件下的应用

高性能混凝土在跨海桥梁、高寒地区桥梁、城市立交等特殊环境与复杂条件下的应用，展现了其卓越的环境适应性与结构稳定性。在跨海桥梁中，高性能混凝土

的低渗透性与高抗氯离子侵蚀能力有效抵御了海洋环境中盐雾与潮汐作用的侵蚀，保障了结构在长期服役过程中的耐久性。在高寒地区桥梁中，高性能混凝土的优异抗冻性与体积稳定性使其能够承受冻融循环引起的膨胀应力，减少了因温度变化导致的开裂与剥落现象。在城市立交等复杂结构中，高性能混凝土的高流动性与自密实能力使其在钢筋密集、节点复杂的部位仍能实现充分浇筑，确保了结构的整体性与受力性能。此外，高性能混凝土的低收缩特性与优异的抗裂性能使其在温度变化与收缩徐变等不利因素作用下仍能保持结构稳定，减少了因变形引起的附加内力与损伤风险。这些特性使得高性能混凝土在特殊环境与复杂条件下的工程应用中具有显著的技术优势与经济价值。

三、高性能混凝土的耐久性研究

（一）耐久性的内涵与主要影响因素

高性能混凝土的耐久性，是指在市政道路桥梁的设计使用年限内（通常为50年及以上），其抵抗自身材料劣化与外界环境因素长期破坏，持续保持结构承载安全、功能完整的能力，核心评价指标包括抗渗性、抗化学侵蚀性、抗冻融性、体积稳定性及抗钢筋锈蚀能力等，区别于普通混凝土更侧重短期强度，高性能混凝土将长期性能稳定性作为关键设计目标。

影响其耐久性的关键因素分为内部材料特性与外部环境作用两类。内部因素中，密实度与孔隙结构是核心：高性能混凝土通过优化骨料级配、降低水胶比（通常控制在0.35以下）及掺入粉煤灰、矿粉等矿物掺合料，使水泥水化产物更致密，总孔隙率降至10%以下，且封闭孔隙占比提升至80%以上，连通孔隙减少可直接阻断侵蚀介质的渗透路径；若孔隙率过高或连通孔隙占比大，会显著降低混凝土的抗渗基础，为外部侵蚀创造条件。外部因素中，化学侵蚀（如硫酸盐、氯离子侵蚀）、冻融循环、钢筋锈蚀是主要破坏形式：硫酸盐侵蚀源于土壤或地下水中的 SO_4^{2-} ，与混凝土中的氢氧化钙、水化铝酸钙反应生成膨胀性钙矾石，导致内部开裂；氯离子侵蚀则是氯离子穿透混凝土表层，破坏钢筋表面钝化膜，引发钢筋锈蚀并产生体积膨胀，进一步加剧混凝土剥落；冻融循环多发生在寒冷地区，混凝土内部孔隙水结冰体积膨胀（约增大9%），反复冻融后会导致孔隙扩大、表层剥落，最终影响结构完整性^[3]。

（二）高性能混凝土的抗渗性与抗化学侵蚀能力

高性能混凝土的卓越抗渗性，源于通过级配优化与水胶比调控形成的致密微观结构。在级配设计上，采用

连续密级配骨料,使粗骨料间隙被细骨料与水泥浆体充分填充,同时掺入15%~30%的矿物掺合料(如I级粉煤灰、S95矿粉),其活性成分可与水泥水化产生的氢氧化钙发生二次水化反应,生成更多水化硅酸钙凝胶,进一步填充微小孔隙;水胶比通常控制在0.28~0.35之间,远低于普通混凝土的0.45~0.55,水泥浆体水化更充分,减少未水化颗粒残留,最终使混凝土抗渗等级稳定达到P8~P12(即承受0.8~1.2MPa水压时无透水现象),渗透系数降至 1×10^{-11} m/s以下,较普通混凝土降低1~2个数量级。

这种致密结构同时赋予其优异的抗化学侵蚀能力,核心机理是“物理阻隔+化学稳定”双重作用。在抵抗硫酸盐侵蚀方面,致密结构减少 SO_4^{2-} 的渗透速率,矿物掺合料消耗部分氢氧化钙,降低钙矾石生成量,延缓膨胀破坏;在抵抗氯离子侵蚀方面,低渗透特性使氯离子扩散系数(D)控制在 $5 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ 以下,大幅延长氯离子到达钢筋表面的时间,从而有效保护内部钢筋,延缓锈蚀进程。以2020年北京城市副中心通州运河大桥为例,该桥梁下部结构采用C60高性能混凝土,水胶比0.32,掺入20%I级粉煤灰,经检测其抗渗等级达P10,氯离子扩散系数为 $1.8 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$;运营2年后的抽检数据显示,混凝土表层氯离子含量仅为0.02%(质量分数),钢筋锈蚀率低于0.02%,远低于普通C60混凝土桥梁同期0.1%的钢筋锈蚀率,验证了高性能混凝土在抗渗与抗氯离子侵蚀方面的优势,为桥梁下部结构长期抗腐蚀提供了保障。

(三) 高性能混凝土的抗冻融能力与长期性能稳定性

高性能混凝土在抗冻融能力上的优势,源于其高密实度与含气量可控的双重特性。高密实度减少了内部可冻水的储存空间,而通过掺入引气剂,可将混凝土含气量精准控制在3%~5%,形成直径0.05~0.2mm的封闭微小气泡,这些气泡能在水结冰体积膨胀时吸收膨胀压力,避免孔隙扩大与结构开裂,同时气泡可作为水分迁移的“缓冲空间”,减少冻融循环中水分的反复迁移聚集。在寒冷地区市政道路桥梁中,这种特性使高性能混凝土的抗冻融等级轻松达到D200~D300(即承受200~300次冻融循环后,相对动弹模量仍 $\geq 80\%$),远高于普通混凝土的D100~D150标准^[4]。

其低收缩、低徐变的特性,则是保证结构长期性能稳定性的关键。高性能混凝土通过优化胶凝材料组成(如减少水泥用量、增加矿物掺合料比例),降低水化热峰值,减少温度收缩;同时,二次水化反应生成的水化硅酸钙凝胶可增强浆体与骨料的粘结力,使干燥收缩率

控制在0.04%以下(普通混凝土通常为0.06%~0.08%);徐变系数(在长期荷载作用下的变形系数)可降至0.8以下,较普通混凝土降低30%以上。这种低变形特性,能有效减少市政道路桥梁在长期车辆荷载、温度变化及环境作用下的开裂风险——如道路面层不会因干燥收缩出现横向裂缝,桥梁主梁不会因徐变过大导致跨中挠度超限,从而确保工程在设计使用年限内的结构完整性与功能稳定性。以2019年哈尔滨松花江大桥维修工程为例,该桥桥面铺装采用C50高性能混凝土,含气量控制在4%,干燥收缩率0.035%,经黑龙江省寒地建筑科学研究院检测,其承受D300冻融循环后相对动弹模量仍保持86.2%,而同期采用普通C50混凝土的对比试件仅为59.8%;运营3年后,桥面无明显冻融剥落与收缩裂缝,平整度满足市政道路一级标准,验证了高性能混凝土在寒地环境下的抗冻融能力与长期稳定性^[5]。

结语

高性能混凝土在市政道路桥梁工程中的应用,是现代建筑材料技术发展的必然趋势,也是提升基础设施品质、实现可持续发展的关键举措。其通过科学的材料组成设计,实现了力学性能、工作性能与耐久性的高度统一,有效克服了传统混凝土的固有缺陷。从桥梁主梁到道路路面,从常规环境到严苛工况,高性能混凝土均展现出卓越的工程适应性与长期可靠性,不仅能显著提高结构的安全性与使用寿命,更在全生命周期内体现出显著的经济与社会效益。未来,随着材料科学的不断进步和工程实践的持续深化,高性能混凝土必将在构建更加安全、耐久、高效的 urban 交通网络中发挥更为核心的作用。

参考文献

- [1] 潘敬安.高性能混凝土技术在道路桥梁工程施工中的应用[J].交通科技与管理,2021(9):0157-0157.
- [2] 刘玉刚.高性能混凝土技术在道路桥梁工程施工中的应用[J].中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,2021(6):3.DOI:CNKI:SUN:HELJ.0.2020-10-047.
- [3] 付勇明.基于高性能混凝土技术在道路桥梁工程施工中的应用研究[J].中国科技期刊数据库 工业A,2022(9):3.
- [4] 李爽.道路桥梁施工中高性能混凝土应用[J].科学与财富,2020.
- [5] 李瑞芳.混凝土施工技术在道路桥梁工程施工中的运用分析[J].轻松学电脑,2021,000(008):P.1-1.