

饰面高性能混凝土在地铁工程中的技术运用研究

张 骞

中国水利水电第三工程局有限公司, 陕西 西安 710000

[摘要]随着城市化进程的加快和城市交通需求的不断增长, 地铁作为城市主要的公共交通方式, 其建设和发展日益成为城市规划和交通基础设施建设的重要组成部分。在地铁工程中, 饰面高性能混凝土(HPC-SF)作为一种技术先进、性能优越的建筑材料, 因其在耐久性、抗裂性和施工效率等方面的显著优势, 逐渐成为地铁车站、隧道及相关结构中的首选材料之一。本文通过对HPC-SF在地铁工程中的应用实例和技术探讨, 探索其优化应用的途径和策略, 为地铁工程的可持续发展提供理论支持和实际指导。

[关键词]饰面高性能混凝土; 地铁工程; 配合比; 抗裂防渗控制; 耐久性能

DOI: 10.33142/sca.v7i9.13404

中图分类号: TU921-6

文献标识码: A

Research on the Technical Application of High Performance Concrete in Metro Engineering

ZHANG Qian

Sinohydro Bureau 3 Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi, 710000, China

Abstract: With the acceleration of urbanization and the continuous growth of urban transportation demand, the construction and development of subway, as the main public transportation mode in cities, has become an important component of urban planning and transportation infrastructure construction. In subway engineering, as a kind of building material with advanced technology and superior performance, HPC-SF has gradually become one of the preferred materials in subway stations, tunnels and related structures due to its remarkable advantages in durability, crack resistance and construction efficiency. This article explores the ways and strategies to optimize the application of HPC-SF in subway engineering through practical examples and technical discussions, providing theoretical support and practical guidance for the sustainable development of subway engineering.

Keywords: high performance concrete for decorative surfaces; metro engineering; mix proportion; crack resistance and anti-seepage control; durability performance

引言

在地铁工程中, 材料的选择和施工质量直接影响到地铁线路、车站及相关结构的安全性、耐久性和运行效率。传统的混凝土材料虽然在强度和耐久性方面有一定优势, 但在抗裂性能、表面质量和施工效率等方面存在一定局限性。因此, 随着科技的进步和工程技术的发展, 高性能混凝土(High Performance Concrete, HPC)作为一种新型建筑材料, 逐渐受到了广泛关注和应用。

1 饰面高性能混凝土的材料组成与性能分析

1.1 原材料选择

高性能混凝土的优良性能在很大程度上取决于其原材料的选择。以下是HPC-SF常用的几种原材料: ①水泥: 水泥是高性能混凝土的重要组分, 对其性能影响显著。常用的水泥类型包括: 普通硅酸盐水泥: 常用于一般高性能混凝土的配制, 具有良好的强度和耐久性。热硅酸盐水泥: 适用于大体积混凝土, 能够有效降低水化热, 减少温度裂缝。抗硫酸盐水泥: 适用于具有较强化学腐蚀环境的工程, 如地下水位高、酸性土壤等。饰面高性能混凝土中, 水泥选择需考虑其对表面色泽的影响, 同时确保混凝土的力学性能和耐久性。②骨料: 骨料是混凝土的骨架材料, 对混

凝土的强度、耐久性和施工性能都有重要影响。选择合适的骨料可以提高HPC-SF的整体性能。常用骨料有: 粗骨料: 一般选用粒径均匀、级配合理的碎石或卵石, 常用粒径为5~20mm。对于饰面混凝土, 要求粗骨料的表面光滑, 减少对表面饰面的影响。细骨料: 通常使用中砂或细砂, 粒径为0.15~4.75mm。细骨料的质量对混凝土的表面光滑度和致密性有直接影响。在饰面高性能混凝土中, 骨料的颜色、质地和级配直接影响到混凝土的饰面效果。③外加剂: 外加剂是改善混凝土性能的重要手段, 常用的外加剂包括: 减水剂: 提高混凝土的流动性和强度, 减少用水量。高效减水剂如聚羧酸系减水剂常用于HPC-SF中。引气剂: 通过引入微小气泡提高混凝土的抗冻性和耐久性。防裂剂: 如聚丙烯纤维或聚乙烯醇纤维, 可以提高混凝土的抗裂性能^[1]。矿物掺合料: 如粉煤灰、硅灰、矿粉等, 可以提高混凝土的工作性、强度和耐久性, 同时降低水化热。④水: 水是混凝土的重要组成部分之一, 直接影响混凝土的和易性和最终性能。用于HPC-SF的水应符合混凝土用水标准, 不含有害物质。水灰比的控制是关键, 较低的水灰比有助于提高混凝土的强度和耐久性。

1.2 饰面高性能混凝土的配合比设计

HPC-SF 的配合比设计需要在满足力学性能和耐久性的前提下,确保其饰面效果。适量使用高标号水泥,保证混凝土的强度和耐久性。优化粗细骨料的级配,提高混凝土的密实度和表面光滑度。水灰比通常控制在 0.3~0.4 之间,确保混凝土的高强度和低渗透性。高效减水剂、引气剂和防裂剂,改善混凝土的施工性能和耐久性。适量添加粉煤灰、硅灰和矿粉,改善混凝土的工作性和耐久性。

1.3 饰面高性能混凝土的力学性能

力学性能是 HPC-SF 的重要指标,主要包括抗压强度、抗拉强度和弹性模量等:①抗压强度: HPC-SF 的抗压强度通常在 50MPa 以上,甚至可以达到 100MPa 以上。高抗压强度使得混凝土能够承受较大的荷载。②抗拉强度: HPC-SF 的抗拉强度较高,通过掺加防裂纤维和优化配合比,可以显著提高其抗拉性能,减少裂缝产生。③弹性模量: HPC-SF 具有较高的弹性模量,使得其在荷载作用下变形较小,保证了结构的刚度和稳定性。

1.4 饰面高性能混凝土的耐久性

耐久性能是确保 HPC-SF 在复杂环境下长期使用的关键,主要包括抗渗性、抗冻性和耐化学腐蚀性等:①抗渗性: HPC-SF 具有极低的渗透性,水灰比的降低和掺合料的使用使其孔隙率大大降低,增强了抗渗性能。在地下工程中,这一特点尤为重要,能够有效防止水分和有害物质的侵入。②抗冻性:通过引入引气剂, HPC-SF 形成微小气泡,提供了缓冲空间,显著提高了抗冻性。在寒冷地区地铁工程中,抗冻性是保障混凝土耐久性的关键因素。③耐化学腐蚀性: HPC-SF 对化学腐蚀有很好的抵抗能力,尤其是在地下水位高、酸性或碱性环境中。通过使用高抗硫酸盐水泥和适当的矿物掺合料,可以进一步提高其耐化学腐蚀性。

2 饰面高性能混凝土在地铁工程中的技术应用

2.1 地铁工程对饰面高性能混凝土的需求分析

地铁工程通常位于地下,受到高湿度、地下水、酸碱环境等因素的影响,要求混凝土具有优异的耐久性和抗渗性。HPC-SF 以其低孔隙率和高密实度,能有效阻止水分和有害化学物质的渗透,显著提高结构的抗腐蚀能力,延长使用寿命。高性能混凝土的高强度和抗裂性能对于地铁结构的安全性和稳定性至关重要,能够有效承受地面荷载、地下水压力以及地震等突发应力。HPC-SF 以其平整光滑的表面和均匀一致的色泽,为地铁站的内饰和外观提供了高质量的装饰效果。高性能混凝土的饰面效果能够减少后续装饰材料的使用,降低维护成本,提升整体美观度和耐用性。

2.2 饰面高性能混凝土在地铁工程中的应用实例

在某地铁工程中,饰面高性能混凝土(HPC-SF)被广泛应用于车站主体结构、隧道衬砌以及出入口等关键部位,取

得了显著的效果。以下是该工程中 HPC-SF 的具体应用实例。

2.2.1 车站主体结构

车站主体结构是地铁工程的核心部分,承载着巨大的地面荷载和地下水压力。某地铁工程采用 HPC-SF 浇筑车站主体结构,通过优化混凝土配合比设计,提高了混凝土的抗压强度和耐久性。在施工过程中,使用高效减水剂和引气剂,使混凝土在低水灰比条件下仍具有良好的流动性和可操作性,确保了混凝土的均匀性和密实度^[2]。经过严格的养护和质量控制,车站主体结构混凝土的抗压强度达到 80 MPa 以上,抗渗等级达到 P10,确保了结构的长期使用性能。

2.2.2 隧道衬砌

隧道衬砌是地铁工程中另一个重要应用领域,要求混凝土具有高耐久性和抗裂性能。某地铁工程在隧道衬砌施工中,采用了 HPC-SF,通过添加防裂纤维和调整矿物掺合料比例,显著提高了混凝土的抗裂性能和耐久性。在施工过程中,利用高效减水剂和矿物掺合料,降低混凝土的水化热,减少了温度裂缝的产生。隧道衬砌混凝土的抗拉强度和抗裂性能显著提升,确保了隧道结构在地面沉降和地下水压力作用下的稳定性。

2.2.3 出入口及装饰性结构

地铁出入口是连接地面与地下的通道,不仅要承受结构荷载,还需要具备良好的装饰效果。某地铁工程在出入口和装饰性结构中,广泛应用了 HPC-SF,通过精细的配合比设计和严格的施工工艺控制,实现了混凝土表面的优良饰面效果。采用恒温恒湿养护技术,使混凝土表面光洁、色泽均匀,满足了高标准的装饰要求。出入口的混凝土表面无裂缝、无污染,整体效果美观大方,提升了地铁站的视觉品质。

2.2.4 温控措施及裂缝控制

针对大体积混凝土施工过程中水化热引起的温度裂缝问题,工程中采取了一系列有效的温控措施。在侧墙内部布设冷却管,通过循环冷却水降低混凝土的内部温度。同时,在混凝土浇筑过程中,使用无线测温系统实时监测混凝土内部温度和表面温度,确保温度梯度在安全范围内。

2.2.5 效果评估

经过严格的施工和质量控制,某地铁工程中应用 HPC-SF 的各项结构均达到了预期效果。车站主体结构和隧道衬砌混凝土的抗压强度和抗裂性能显著提高,耐久性得到了有效保障。出入口和装饰性结构的表面效果美观,满足了高标准的装饰要求。通过科学的温控和裂缝控制技术,施工过程中混凝土裂缝数量显著减少,确保了结构的整体性和安全性。

2.3 饰面高性能混凝土施工技术

2.3.1 模板与支撑体系

模板与支撑体系是饰面高性能混凝土施工的基础,直

接影响混凝土表面的平整度和美观性。模板的设计应符合混凝土结构的形状和尺寸要求，确保模板安装牢固、拼缝严密、无渗漏。常用的模板材料包括钢模板、木模板和组合模板。钢模板具有强度高、耐久性好、周转次数多等优点，适用于大面积使用。木模板轻便灵活，适用于复杂形状的部位。组合模板则结合了钢模板和木模板的优点，适应性强。模板安装过程中，应严格控制模板的垂直度和平整度，确保模板拼缝严密，防止漏浆。模板的接缝处应采用密封条或胶带密封，以确保混凝土表面的完整性和美观性。支撑体系的设计应确保模板的稳定性和承载能力，避免模板变形或倒塌。在混凝土浇筑过程中，应定期检查和调整模板的垂直度和平整度，确保混凝土表面的质量。模板拆除时间应根据混凝土的强度增长情况和结构特点确定，确保混凝土具有足够的强度和刚度，避免表面损伤。通常情况下，侧模板在混凝土强度达到设计强度的 70% 以上时方可拆除。拆模时应轻拿轻放，避免对混凝土表面造成损伤。

2.3.2 浇筑与振捣

在混凝土浇筑过程中，首先应采用分层浇筑的方式，每层厚度控制在 30cm 左右，以确保混凝土的密实性。浇筑时应尽量避免混凝土的离析和泌水，保证混凝土的均匀性。对于大面积的混凝土浇筑，应合理安排浇筑顺序，以确保施工的连续性和混凝土的整体性。混凝土浇筑完成后，应立即进行振捣，以确保混凝土的密实性和均匀性。高频振捣棒适用于厚度较大的混凝土结构。振捣操作时，振捣棒应垂直插入混凝土中，插入深度需超过上一层混凝土的 5~10cm。振捣时间应根据混凝土的实际情况控制，一般为 20~30s，直至混凝土表面不再冒气泡和泛浆。振捣过程中，应确保振捣均匀，避免漏振和过振，以保障混凝土的密实性和表面平整度。特别需要注意的是，在使用高频振捣棒时，应避免振动器碰撞模板，以防止模板变形和混凝土表面损伤。总之，采用高频振捣棒进行混凝土振捣能有效提升混凝土施工质量，确保混凝土结构的坚固和持久。

2.3.3 养护技术

养护是确保混凝土性能和质量的重要环节，对混凝土的强度增长和耐久性有着重要影响。自然养护适用于气候条件较好的地区，通过保持混凝土表面的湿润状态，促进水泥水化反应。洒水养护适用于大面积混凝土结构，通过定期洒水保持混凝土表面的湿润状态，防止表面干裂。覆盖养护适用于温度和湿度变化较大的地区，通过覆盖湿麻袋或塑料薄膜，保持混凝土表面的湿润状态和温度稳定。养护周期应根据混凝土的强度增长情况和环境条件确定，通常为 7~14 天。在早期强度增长阶段，应加强养护，保持混凝土表面的湿润状态，促进水泥水化反应。在后期强度稳定阶段，应适当减少养护频率，防止混凝土表面干裂。在某地铁工程中，采用了智能恒温恒湿养护系统，通过蒸汽发生器、电子加湿器和无线温湿度传感器等设备，实现

对混凝土养护过程的自动控制。系统通过 PLC 控制器，对混凝土中心温度、表面温度、环境温度和湿度等参数进行实时监测和调控，确保混凝土养护环境的稳定性和适宜性。智能化养护系统的应用，提高了混凝土的养护质量和施工效率，确保了混凝土的性能和质量。

3 饰面高性能混凝土在地铁工程中应用的技术难点与解决方案

3.1 技术难点分析

3.1.1 原材料及配合比控制

在地铁工程中，由于地铁工程的特殊性，混凝土需要在保证强度的前提下，具备良好的抗裂性和防渗性。常规混凝土中，水泥的水化热和砂率过高会导致混凝土内部温度升高，从而增加裂缝产生的风险。因此，需要优化水泥、砂、粉煤灰和矿粉的比例，采用高性能的低水化热材料，控制混凝土的收缩和温度变化，确保其在复杂施工条件下的稳定性和耐久性。

3.1.2 抗裂防渗控制

混凝土裂缝是影响结构安全性和耐久性的关键问题。裂缝的产生主要由于混凝土收缩和温度变化引起的应力不均匀。在地铁工程中，因施工条件复杂、环境变化大，混凝土的水化热和环境温度的变化容易导致内部和表面温差过大，从而产生裂缝。此外，混凝土在硬化过程中，因干缩、温度收缩和外部荷载等因素，导致混凝土出现纵横交错的裂缝，影响结构的整体性和耐久性。地铁工程通常需要保证混凝土结构的防水性，以防止地下水渗透对结构的影响。混凝土中的水分渗透可能导致钢筋腐蚀，降低结构的耐久性。防渗控制需要应对混凝土在浇筑、硬化及长期使用中的防水性能保持问题。

3.1.3 施工质量控制

地铁工程中的施工环境复杂，施工难度大，施工质量控制至关重要。模板的安装质量、混凝土的浇筑和振捣工艺，以及养护过程中的温湿度控制，都是影响混凝土质量的重要因素。如果施工工艺不当，可能导致混凝土表面出现气泡、蜂窝、孔洞等质量缺陷，影响饰面效果和结构性能。同时，施工过程中的工序衔接、人员配合等也需要严格管理，以确保施工质量。

3.1.4 成本控制

饰面高性能混凝土的材料成本较高，施工工艺复杂，导致整体成本较高。在地铁工程中，需要在保证质量的前提下，合理控制施工成本。材料的选用、施工工艺的优化，以及现场管理的高效性，都是影响成本的重要因素。此外，如何减少材料浪费、提高施工效率，也是成本控制的关键。

3.2 解决方案

3.2.1 原材料及配合比控制技术

降低水泥用量和砂率，增加二级级配，调整粉煤灰和矿粉的用量，减少混凝土的水化热，从而降低裂缝产生的

风险。使用中联 52.5 高标号水泥更换为海螺 42.5 低标号水泥,进一步优化混凝土配比,提高其抗裂性能。在混凝土侧墙内部增加冷却管,通过循环冷却水加快内部降温速率;在侧墙外部设置蒸汽养护装置,控制混凝土表面的温度,减少内外温差,防止温度裂缝的产生。采用无线测温系统,通过 PLC 控制系统,对混凝土的温度进行自动调控,确保温度变化平稳,避免温度应力集中导致裂缝的产生。

3.2.2 抗裂防渗控制技术

降低水泥用量和砂率,增加二级级配,调整粉煤灰和矿粉的用量,减少混凝土的水化热,从而降低裂缝产生的风险。使用中联 52.5 高标号水泥更换为海螺 42.5 低标号水泥,进一步优化混凝土配比,提高其抗裂性能。在混凝土侧墙内部增加冷却管,通过循环冷却水加快内部降温速率;在侧墙外部设置蒸汽养护装置,控制混凝土表面的温度,减少内外温差,防止温度裂缝的产生。采用无线测温系统,实时监测混凝土内部和表面的温度变化。通过 PLC 控制系统,对混凝土的温度进行自动调控,确保温度变化平稳,避免温度应力集中导致裂缝的产生。

为确保高性能混凝土在地铁工程中的防渗效果,应使用低渗透性的高性能混凝土配方,增加掺合料如超细粉煤灰或硅灰,这些掺合料能够显著提高混凝土的致密性和抗渗性能。在混凝土结构表面,涂抹防水涂料或者使用防水膜和防水卷材,可以有效增强混凝土的防水效果。在施工管理方面,必须确保混凝土浇筑时的接缝和施工缝得到良好的处理。应使用防水剂和防渗添加剂以进一步提高混凝土的防水性能。确保所有接缝处的处理符合规范,并采取适当措施防止施工过程中出现的缝隙或孔洞影响防水效果。要定期对混凝土结构进行检查和维护,及早发现并修复渗漏问题,确保结构的防渗控制始终保持有效。

3.2.3 施工质量保障措施

设计合理的模板和支撑体系,确保模板安装的平整度和牢固性,防止漏浆和变形。使用钢模板和组合模板,提

高模板的耐久性和施工效率。采用高频振捣棒和机械振捣器,严格控制振捣间距和分层厚度,确保混凝土的密实性和均匀性。通过科学的浇筑顺序和振捣工艺,减少混凝土内部的气泡和孔洞,提高混凝土的表面质量^[3]。在混凝土施工的各个环节,实施全面化、精细化管理。对混凝土生产、运输、浇筑、振捣和养护等工序,进行全过程的质量监控,确保每个环节的施工质量。

3.2.4 成本优化措施

在保证质量的前提下,合理选择经济适用的原材料。通过与供应商建立战略合作关系,确保材料的稳定供应和合理价格,降低采购成本。优化施工工艺和施工流程,提高施工效率,减少人工和机械成本。使用智能化养护系统,提高养护效果,减少材料浪费和返工率。加强现场管理,提高施工组织和协调能力,减少工序衔接的时间和材料浪费。通过精细化管理,提高施工效率和质量,降低整体施工成本。

4 结语

在地铁工程中,饰面高性能混凝土(HPC-SF)的应用具有重要的工程意义和挑战。在未来的地铁工程实践中,我们需要进一步探索和应用新技术、新材料,不断提升HPC-SF在地铁工程中的应用水平和技术标准。通过持续创新和技术积累,共同推动地铁工程建设朝着更安全、更可靠、更高效的方向发展,为城市交通发展贡献力量。

【参考文献】

- [1]赵厚然,徐艳杰,赵恒.叶巴滩堆石混凝土二道坝温度应力仿真分析及温控措施研究[J].水资源与水工程学报,2024,35(2):167-173.
 - [2]张同杰.建构视野下清水混凝土在地铁站建筑中设计研究[D].山东:山东建筑大学,2021.
 - [3]康悦.沿海地铁车站清水混凝土耐久性及其饰面性能演变研究[D].山东:青岛理工大学,2018.
- 作者简介:张骞,单位:中国水利水电第三工程局有限公司。