

高性能混凝土配合比优化设计及性能影响因素分析

赵贵健¹ 李增志²

1. 广西柏林达企业管理服务有限公司, 广西 南宁 530000

2. 广西中旭房地产开发集团有限公司, 广西 南宁 530000

[摘要]随着交通需求的日益增长, 高速公路建设的规模不断扩大。在这一过程中, 混凝土材料面临着更为严格的性能要求。尤其是路面、桥梁以及隧道等关键结构中, 混凝土作为主要建筑材料, 需承受重载交通、温度波动、冻融循环及化学腐蚀等极端环境条件的考验。传统混凝土在面对这些严苛的挑战时, 通常表现出较差的耐久性, 早期病害频发, 导致使用寿命缩短。为应对这一问题, 高性能混凝土逐渐成为新型建筑材料, 广泛应用于高速公路建设中。该材料不仅展现出较高的抗压强度, 还具备出色的耐久性、低渗透性及优异的施工性, 成为公路建设中至关重要的组成部分。此文将深入探讨高性能混凝土的配合比优化设计及其性能影响因素, 以期为其在高速公路建设中的应用提供理论依据和技术支持。

[关键词]高性能混凝土; 配合比优化; 耐久性; 高速公路; 矿物掺合料

DOI: 10.33142/ec.v8i4.16306

中图分类号: TU3

文献标识码: A

Optimization Design of High-performance Concrete Mix Proportion and Analysis of Performance Influencing Factors

ZHAO Guijian¹, LI Zengzhi²

1. Guangxi Bolinda Enterprise Management Service Co., Ltd., Nanning, Guangxi, 530000, China

2. Guangxi Zhongxu Real Estate Development Group Co., Ltd., Nanning, Guangxi, 530000, China

Abstract: With the increasing demand for transportation, the scale of highway construction continues to expand. In this process, concrete materials face stricter performance requirements. Especially in key structures such as roads, bridges, and tunnels, concrete, as the main building material, needs to withstand extreme environmental conditions such as heavy traffic, temperature fluctuations, freeze-thaw cycles, and chemical corrosion. Traditional concrete often exhibits poor durability, frequent early damage, and shortened service life when facing these harsh challenges. To address this issue, high-performance concrete has gradually become a new type of building material and is widely used in highway construction. This material not only exhibits high compressive strength, but also has excellent durability, low permeability, and excellent workability, making it a crucial component in highway construction. This article will delve into the optimization design of the mix proportion of high-performance concrete and its performance influencing factors, in order to provide theoretical basis and technical support for its application in highway construction.

Keywords: high performance concrete; optimization of mix proportion; durability; highway; mineral admixture

高速公路作为现代交通系统的关键组成部分, 建设质量要求日益严格, 尤其是在桥梁、路面等关键结构中, 混凝土材料的性能直接影响到工程的安全性和稳定性。传统混凝土在暴露于严苛环境下, 容易出现龟裂、剥落等问题, 进而降低结构的使用寿命。随着高性能混凝土逐步成为研究热点, 该材料凭借其高抗压强度、良好的耐久性和低渗透性, 成为应对复杂环境的理想选择。然而, 优化高性能混凝土的配合比、选择合适的原材料, 并控制施工工艺, 仍是提升其性能的核心难题。尽管如此, 学术界与工程界已经开展了大量的研究, 提出了许多有效的优化设计方法及改进施工技术。尽管如此, 在实际应用中, 高性能混凝土仍面临技术性挑战, 尤其是在材料选择和成本控制方面。基于此, 进一步研究高性能混凝土的配合比优化及其性能影响因素, 显得尤为重要, 有助于提升其应用效果, 促进高速公路建设质量的进一步提升。

1 高性能混凝土概述

1.1 高性能混凝土的定义与特点

高性能混凝土 (High Performance Concrete, 简称 HPC) 不仅仅是传统混凝土的改良, 而是一种基于耐久性优先设计理念的创新材料。它通过精心挑选原材料、严格控制生产工艺及质量管理, 在每个环节中都力求完美^[1]。所选原材料质量优异, 水泥具有出色的性能, 骨料粒度精准且强度高, 矿物掺和料具有强大的活性, 而外加剂则表现出优良的功能。生产过程中, 严格遵循工艺要求, 精准计量配料, 均匀充分搅拌, 规范操作浇筑, 精心养护, 确保混凝土性能稳定且卓越。

高性能混凝土具有多项突出特点: 首先, 其强度极高, 能够承受巨大的荷载, 适用于高层建筑和大跨度桥梁等结构, 为其提供坚实的支撑。其高强度来源于优化的配合比、改善的骨料级配及矿物掺和料的活性激发等多个因素的

协同作用。其次,其卓越的耐久性为核心优势,能够在酸雨、海水侵蚀、冻融循环等恶劣环境下长期保持结构的完整性和性能稳定。低渗透性也是其一大亮点,混凝土微观结构紧密,孔隙率低且孔隙小,能够有效阻挡水分、气体及有害物质的渗透,从而增强抗渗透性和抗化学侵蚀能力。此外,高性能混凝土还具有良好的工作性,施工中表现出色,具有适宜的坍落度、扩展度和流动性,能够自流平、自密实,提升施工效率,减少人为操作误差和质量波动。

1.2 高性能混凝土的性能要求

对于高速公路工程的特殊需求, HPC 的性能要求极为严格。在力学性能上,混凝土的 28 天抗压强度必须达到 50MPa 以上,弹性模量应不低于 35GPa,以确保能够应对长期重载交通所带来的疲劳荷载。在耐久性方面, HPC 需要通过抗硫酸盐腐蚀测试及碱骨料反应抑制测试,确保其在各种极端环境下都能保持优异的性能^[2]。施工性能同样至关重要,要求混凝土的初始坍落度在 180~220mm 之间,且坍落度损失率不应超过 10%,以确保长距离泵送及振捣过程中混凝土的良好流动性与密实性。根据《公路高性能混凝土技术规范》的规定,还对抗裂性指标提出了具体要求,干燥收缩值应不超过 $400 \mu \varepsilon$,从而有效降低路面龟裂的发生概率。

2 高性能混凝土配合比优化设计

2.1 原材料优选与质量控制

高性能混凝土的性能高度依赖于其组成材料的选择及严格控制。选用水泥时, P·II 52.5 级低碱硅酸盐水泥是一种理想选择,其碱含量应控制在 0.6% 以下,同时, C₃A 含量必须保持在 5%~8% 之间,以平衡混凝土的早期强度与抗硫酸盐性能。此水泥的成分在优化混凝土的强度及耐久性方面起到关键作用。骨料的选择直接影响混凝土的力学性质与耐久性。为了优化混凝土的密实性,粗骨料的压碎指标必须小于 12%,同时细骨料的细度模数应控制在 2.6 到 3.0 之间,含泥量不超过 1%。这种严格的骨料选取标准有助于提高混凝土的抗渗透性与耐久性,避免因骨料质量问题导致的性能下降。

在矿物掺合料的选择上,推荐使用粉煤灰(FA)、矿粉(GGBS)及硅灰(SF)等三元复掺体系。粉煤灰的掺量一般设置为 15%~25%,其作用在于改善混凝土的工作性与流动性;矿粉的掺量应为 30%~40%,其主要作用是提升混凝土的后期强度;硅灰则以 5%~8% 的比例掺入,用以细化混凝土的孔隙结构,从而提升其密实性与抗渗透性。在外加剂方面,推荐使用聚羧酸系减水剂。其减水率应不低于 25%,并与水泥体系有良好的相容性。该减水剂的使用能显著提升混凝土的工作性,尤其是在施工过程中,确保混凝土在保持高强度的同时,仍能具备适当的流动性。

2.2 水胶比与浆骨比调控

水胶比(W/B)是影响高性能混凝土强度的核心因素。为了确保混凝土既有足够的强度,又不影响其施工性能,水胶比应控制在 0.30 至 0.35 之间。通过调节减水剂的掺量,可以在不牺牲强度的情况下,优化混凝土的工作性。浆骨比

(C/S)同样是影响混凝土密实性与工作性的关键参数。浆骨比过高会导致收缩增大,从而影响后期强度;而浆骨比过低,则会影响混凝土的密实性,降低其耐久性。理想的浆骨比应控制在 0.32 至 0.38 之间,以确保混凝土具备良好的流动性与密实度^[3]。在 2022 年沪昆高速江西段桥墩工程中,水胶比由 0.38 降低至 0.32 后,混凝土的 56 天强度提升了 18%,电通量降低至 800C 以下。这一变化显著提高了混凝土的抗渗透能力,为高速公路桥墩的长期使用提供了保障。

2.3 多目标协同优化方法

为了在混凝土的强度、耐久性与经济性之间实现最优平衡,采用响应面法(RSM)或基因算法(GA)进行多目标优化。这些方法能够考虑多个性能指标,最终确定出最佳的配比方案。以某高速公路预应力箱梁 C60 混凝土为例,通过中心复合设计法,最终确定了粉煤灰、矿粉与硅灰的最佳掺量分别为 20%、35%与 6%。在这一配比下,56 天混凝土的强度达到了 68.5MPa,氯离子迁移系数为 $1.8 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$,同时单方成本降低了 12%。该配比在确保混凝土强度的同时,显著降低了成本。此外,优化设计过程中,必须特别关注早期强度发展与温升控制之间的平衡。通过掺入 5% 的缓凝型减水剂,混凝土的温升峰值可推迟至 24 小时后,从而有效避免温度过高引发的裂缝问题,进一步提高了混凝土的耐久性。

3 高性能混凝土性能影响因素分析

3.1 材料组成的影响

混凝土的整体性能与其原材料的选择密切相关。胶凝材料的活性指数应大于 1.05,以确保水化产物致密并提升混凝土的耐久性。骨料的选择直接影响混凝土的力学性能。为了优化应力传递路径,粗骨料的粒径应控制在 25mm 以下,且其针片状颗粒的含量应小于 8%。这些标准的执行可确保混凝土在承受外力时具有更好的韧性与抗裂性。在细骨料的选择上,优选球形度大于 0.8 的机制砂。研究表明,采用这种机制砂能有效降低混凝土的塑性黏度,提升其泵送效率,并改善其流动性。机制砂的优异性能使其成为现代高性能混凝土配合比设计中不可或缺的成分之一。粉煤灰的质量对混凝土的耐久性同样具有显著影响。具有较高 CaO/Al₂O₃ 摩尔比(大于 2.5)的粉煤灰有助于钙矾石的生成,从而增强混凝土的抗硫酸盐侵蚀能力。

3.2 环境作用机制

高性能混凝土的耐久性与环境因素的相互作用不可忽视。在海洋环境或除冰盐区域,氯离子渗透深度与湿度呈指数关系。在相对湿度超过 80% 的情况下,氯离子的渗透速率会急剧增加,这要求混凝土具备较强的抗氯离子渗透能力,以应对这些恶劣环境的挑战。

冻融循环对混凝土的破坏也至关重要。在冻融过程中,孔隙水结冰膨胀时会产生巨大的内应力,导致混凝土的破裂。研究表明,当混凝土的含气量低于 4% 时,每增加一次冻融循环,动弹性模量的损失率将增加 0.8%。为提高混凝土的抗冻性能,应适当增加其气孔率或掺入抗冻剂。在干旱地区,昼夜温差较大,导致热应力的产生,这种温差变

化可能导致表面微裂纹的扩展。研究发现,掺入 $0.6\text{kg}/\text{m}^3$ 的聚丙烯纤维可以有效抑制裂缝的扩展,将裂缝宽度控制在 0.05mm 以下,从而显著提高混凝土的抗裂性能。

3.3 施工工艺控制

在施工过程中,搅拌时间和温度的控制对混凝土质量至关重要。搅拌时间必须达到 120 秒以上,以确保矿物掺合料充分分散,避免出现团聚现象。入模温度应控制在 5°C 至 30°C 之间,避免高温引起假凝或低温延缓强度发展。

振捣过程中,应使用高频插入式振捣器,振捣间距不超过 400mm ,确保混凝土的密实性。养护阶段,保持湿度超过 95%,并至少持续 7 天,以促进水化反应的充分进行。在使用蒸汽养护时,应将升温速率控制在 $15^\circ\text{C}/\text{h}$ 以下,以避免温度过高导致毛细孔结构的劣化。

4 高性能混凝土在高速公路中的综合应用策略

4.1 结构设计与材料性能的协同优化

高性能混凝土的有效应用必须与结构设计紧密结合,以确保混凝土的力学性能与耐久性得以优化。在进行有限元分析时,通过精确识别不同构件的应力分布特征,可以确保结构设计的合理性。对于拉压比大于 0.6 的区域,纤维增强技术的应用能够显著提高这些区域的抗裂性能,避免应力集中导致的裂缝扩展^[4]。根据损伤力学理论,建立了材料韧性指标与结构延性系数之间的关系,量化了二者之间的相互影响,这有助于优化配筋率与混凝土极限应变的匹配,进一步提升结构的承载力与长期使用性能。同时,拓扑优化技术的引入在确保结构承载力的前提下,减少了混凝土的使用量,有效实现了轻量化设计。

4.2 施工工艺创新与过程控制

随着智能化施工技术的不断发展,混凝土施工过程已实现了更加精确与高效的控制。通过物联网传感器的实时监测,混凝土的流变参数可以得到精确控制,确保其坍落度在设定范围内。自感知模板系统的研发,使压电陶瓷传感器能够实时检测混凝土的浇筑密实度,并能及时定位振捣盲区,确保浇筑质量均匀。此外,推广真空脱水与低频振捣的复合工艺,有效降低了混凝土表层的水胶比,显著改善了混凝土的耐磨性。对于大体积混凝土施工,分布式光纤测温技术的应用,可以实时监测三维温度场,从而有效控制内外温差,使其保持在 20°C 以内,避免因温差过大而导致的裂缝形成。

4.3 全生命周期质量管理体系构建

高性能混凝土的质量管理应贯穿其全生命周期,从原材料采购到施工过程再到后期运维,每一环节都需要进行精确的质量控制。利用基于 BIM 技术的数字孪生平台,混凝土的材料性能、环境数据与结构响应信息被实时整合与监控,从而实现对混凝土性能退化的提前预警,确保了结构的长期稳定性。在质量控制方面,制定了详细的四阶段标准:原材料阶段对粉煤灰等活性组分的含量进行检测,确保其达到标准;生产阶段监控胶凝材料比表面面积的波动;施工阶段评估振捣能量与气泡间距系数;运维阶段则通过

电化学阻抗谱技术监测氯离子渗透的前沿。通过这一系列措施,能够确保混凝土的性能在整个生命周期内得到持续保障。同时,通过采用马尔可夫链模型对不同维护策略的生命周期成本进行预测,为混凝土结构的维护提供了科学决策依据,进一步优化了生命周期内的成本管理。

4.4 环境适应性设计与可持续性提升

高性能混凝土在不同环境条件下的适应性设计,对于延长结构使用寿命至关重要。通过构建区域环境因子谱系图,研究了冻融循环次数、盐雾沉降速率等关键参数对混凝土性能的影响,从而制定出差异化的配合比设计指南。这一方法能够确保在不同环境条件下,混凝土仍能保持良好的力学性能与耐久性。针对干旱地区的特殊气候,开发了内养护技术,掺入超吸水聚合物后,混凝土内部的相对湿度得以长期维持在 80% 以上,显著降低了自收缩的影响,提升了混凝土的体积稳定性。在海洋环境中,研究者设计了梯度功能混凝土,通过表层掺加 8% 的纳米 SiO_2 ,形成致密的防护层,使孔隙率降低至 8% 以下,大大提高了混凝土的抗氯离子渗透能力,增强了耐腐蚀性。此外,采用钢渣与赤泥复合掺合料技术,使工业固废得到了高效利用。通过将 30%~40% 的钢渣-赤泥复合掺合料替代传统水泥,不仅有效降低了碳排放强度,还解决了碱激发与体积稳定性等技术难题,从而推动了绿色建材的应用及可持续发展。

5 结语

随着高速公路建设对质量的要求不断提高,高性能混凝土凭借其卓越的性能,已成为关键结构材料之一。然而,如何合理设计高性能混凝土的配合比、选择合适的原材料并优化施工工艺,仍是提升其应用效果的关键问题。本文通过分析配合比优化、材料选择及施工工艺,提出了适用于高速公路建设的高性能混凝土设计方案,既为工程实践提供了理论支持,也为技术实现提供了实践指导。随着新型添加剂及智能化施工技术的不断发展,高性能混凝土的性能将持续提升,应用领域亦将进一步扩展。未来研究可更加注重低碳环保胶凝材料的研发、智能养护技术的应用及全生命周期性能预测模型的构建,推动高性能混凝土在高速公路建设中的广泛应用,为建筑行业的可持续发展贡献力量。

【参考文献】

- [1] 刘万涛. 建筑工程水泥混凝土配合比设计及优化[J]. 全面腐蚀控制, 2024, 38(5): 111-114.
 - [2] 王砚海, 殷德胜, 陈博夫. 坝体混凝土碳化影响下的拱坝工作性态研究[J]. 江淮水利科技, 2024, 12(4): 6-10.
 - [3] 韦建立. 粉煤灰混凝土轴心抗压强度及碳化性能可靠性研究[J]. 福建建材, 2025, 11(2): 4-6.
 - [4] 杨千葶, 刘明, 王志强. 冻融循环和硫酸盐侵蚀作用下混凝土碳化性能研究[J]. 混凝土, 2025, 11(2): 69-73.
- 作者简介: 赵贵健(1983.11—), 毕业院校: 广西大学, 所学专业: 化学化工学院无机非金属材料专业, 职务: 试验员, 职称级别: 初级工程师。