

混凝土施工技术与质量控制研究

郭佳伟

中铁二十五局集团有限公司, 湖南 长沙

收稿日期: 2025年11月8日; 录用日期: 2025年11月29日; 发布日期: 2025年12月15日

摘要

混凝土作为现代建筑工程的核心材料, 其施工技术与质量控制直接决定工程结构的安全性与耐久性。本文基于龙岩大桥主塔工程、上海金茂大厦等典型案例, 系统分析了混凝土原材料选择、配合比优化、温度控制、振捣养护等关键技术环节, 结合国家标准与行业规范, 提出从材料进场到成品验收的全流程质量控制体系。研究表明, 通过精细化施工管理与技术创新, 可有效降低混凝土裂缝发生率, 提升工程综合效益。

关键词

混凝土施工, 质量控制, 大体积混凝土, 温度监测, 配合比优化

Research on Concrete Construction Technology and Quality Control

Jiawei Guo

China Railway 25th Bureau Group Co., Ltd., Changsha Hunan

Received: November 8, 2025; accepted: November 29, 2025; published: December 15, 2025

Abstract

As a core material in modern construction engineering, concrete's construction technology and quality control directly determine the safety and durability of the engineering structure. Based on typical cases such as the Longyan Bridge main tower project and the Shanghai Jin Mao Tower, this paper systematically analyzes key technical aspects such as concrete raw material selection, mix proportion optimization, temperature control, and vibration curing. Combining national standards and industry specifications, a full-process quality control system from material arrival to finished product acceptance is proposed. Research shows that through refined construction management and technological innovation, the incidence of concrete cracks can be effectively reduced, improving the overall project benefits.

Keywords

Concrete Construction, Quality Control, Mass Concrete, Temperature Monitoring, Mix Proportion Optimization

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

混凝土因其原料易得、成本低廉、可塑性强等特性，成为全球应用最广泛的建筑材料。然而，混凝土结构裂缝、耐久性不足等问题仍普遍存在。据统计，我国每年因混凝土质量问题导致的工程返工成本超过千亿元，其中大体积混凝土开裂占比达 65% 以上。本文以龙岩大桥主塔工程为研究对象，结合国内外先进技术，探讨混凝土施工技术的优化路径与质量控制策略。

2. 文献综述

近年来，大体积混凝土质量控制研究聚焦材料性能优化、温控防裂、智能监测三大领域。材料上，阎培渝教授指出早期开裂多因变形，学术界提出优化水胶比等组合方案；温控方面，于全等阐释了水化热致裂机制，工程中发展出预埋冷却水管等技术；科技进步带来新方案，如国际团队的多尺度深度学习框架提升材料性能，中铁六局沈阳项目实现零开裂。然而，质量控制仍面临挑战，裂缝成因复杂，变形作用是主因；材料性能均衡难，不恰当的骨料和掺合料会降低强度、增加开裂风险；监测技术有局限，传统手段滞后，智能技术成本和稳定性待提升[1]。技术瓶颈包括水化热控制成本与效果难平衡、材料优化接近极限、标准化与定制化矛盾。为此，研究者提出跨尺度协同设计、智能技术深度融合、精益化控制策略等创新方向。总之，该研究正从单一优化向多技术融合、事后处理向主动防控转变，未来需注重一体化解决方案开发验证。

3. 混凝土施工技术关键环节

3.1. 原材料选择与检验

水泥作为混凝土胶凝材料，其强度等级直接影响混凝土最终性能。龙岩大桥主塔工程选用 P-O42.5 低热水泥，通过限制 C3A 含量($\leq 8\%$)降低水化热峰值，每批次水泥进场后都需进行强度、安定性等指标的检验，确保符合工程要求。骨料选择遵循“连续级配”原则，粗骨料采用 5~25 mm 碎石，含泥量严格控制在 0.5% 以内，以避免泥质成分影响骨料与水泥浆的粘结力；细骨料选用 II 区中砂，细度模数保持在 2.6~3.0 之间，保证混凝土的和易性。外加剂方面，掺入 2% 聚羧酸高性能减水剂，该减水剂能在显著提高混凝土流动性的同时，将坍落度损失控制在 10 mm/h 以内，满足施工过程中对混凝土工作性的要求。具体原材料性能指标见表 1。

Table 1. Performance indicators of concrete raw materials

表 1. 混凝土原材料性能指标

原材料类型	关键指标	技术要求	实际检测值
水泥	强度等级	P-O42.5	P-O42.5
	C3A 含量	$\leq 8\%$	7.2%

续表

粗骨料	粒径范围	5~25 mm	5~25 mm
	含泥量	≤1.0%	0.4%
细骨料	细度模数	2.6~3.0	2.8
	含泥量	≤3.0%	1.2%
外加剂	减水率	≥25%	28%
	含气量	≤3.0%	2.5%

3.2. 配合比优化设计

配合比设计需兼顾强度、耐久性与经济性。龙岩大桥承台混凝土采用“三低一高”原则：低水泥用量(320 kg/m³)、低水胶比(0.38)、低含气量(≤3%)、高粉煤灰掺量(30%)。通过正交试验确定最优配比，不仅使 28 天抗压强度达到 58.3 MPa，抗裂系数也提升 40%，有效增强了混凝土的抗裂性能。上海中心大厦基础底板工程采用 60 d 强度设计，配合比中掺入 8% 硅灰与 6% 膨胀剂，硅灰能填充水泥颗粒间的空隙，提高混凝土的密实度，膨胀剂则可补偿混凝土的收缩，从而有效控制超厚结构收缩裂缝，保障了基础底板的施工质量。典型配合比方案见表 2。

Table 2. Typical concrete mix proportion schemes

表 2. 典型混凝土配合比方案

工程名称	水泥用量(kg/m ³)	水胶比	粉煤灰掺量(%)	28 d 强度(MPa)
龙岩大桥承台	320	0.38	30	58.3
上海中心大厦底板	300	0.35	20	62.5

3.3. 温度控制技术

大体积混凝土在硬化过程中，水化热积聚导致的内外温差超标是裂缝产生的主要原因。为解决这一问题，龙岩大桥主塔承台采用三层浇筑工艺，每层厚度严格控制在 2350 mm 以内，通过分层施工减少单次水化热释放量[2]。具体温度控制措施包括三方面：一是科学布置冷却水管，采用 Φ48×3 mm 镀锌钢管按“井”字形排列，管间距设定为 1.0 m，通水流量保持在 18 L/min，借助循环水流带走混凝土内部热量；二是建立实时监测系统，在混凝土内部合理埋设 PT100 温度传感器，监测点间距 2.5 m，根据不同阶段动态调整数据采集频率，升温期每 2 小时采集一次，降温期每 4 小时采集一次，确保及时掌握温度变化趋势；三是强化保温养护，在混凝土表面覆盖双层麻袋加塑料薄膜，形成有效保温层以缩小内外温差。通过上述综合措施，监测数据显示第二层混凝土中心温度峰值达到 79.8℃时，通过动态调整冷却水流量，降温速率始终控制在≤2℃/d，最终使内外温差稳定在 25℃以内，有效预防了温度裂缝的产生。

3.4. 振捣与成型工艺

振捣质量的优劣直接影响混凝土的密实度，进而关系到结构的强度与耐久性。龙岩大桥工程针对这一关键环节，采用“分层振捣法”以确保混凝土浇筑质量。具体操作规范如下：使用插入式振捣器时，严格控制移动间距 ≤400 mm，操作过程中遵循“快插慢拔”原则，每处振捣点的持续时间保持在 15~20 s，使混凝土在振捣作用下充分液化、排气，避免因漏振或振捣不足产生蜂窝、麻面等缺陷[3]。在表面处理环节，创新采用“三遍抹压”工艺：在混凝土初凝前，用木抹进行搓平处理，消除表面泌水和早期塑性裂缝；终凝前改用铁抹压光，进一步提高表面密实度与平整度；最后通过拉毛处理增加表面粗糙度，为后续工序的施工质量奠定基础。对于钢筋密集区域(如主梁与剪力墙交接处)，由于常规振捣器难以深入，专门选用 Φ30 mm 小型振捣棒配合人工插捣，通过人机协同作业确保该区域混凝土密实，经检测其孔隙率

始终控制在 $\leq 3\%$ ，有效保障了结构关键部位的施工质量。

4. 混凝土质量控制体系构建

4.1. 全过程质量管控框架

为保障混凝土施工质量，龙岩大桥工程建立了“源头控制 - 过程监管 - 成品验收”三级管理体系。在原材料控制环节，严格执行“三证一报告”制度，即要求供应商提供生产许可证、产品合格证、质量保证书及检测报告，同时对每批次水泥进行安定性试验，防止因水泥安定性不良导致结构开裂，对骨料则开展碱活性检测，避免碱骨料反应对混凝土耐久性产生不利影响。生产过程中，采用智能化搅拌系统，该系统能实时监测砂石含水率，并根据监测数据自动调整配合比，确保混凝土强度等性能达标，同时将搅拌时间控制在 120~150 s，保证物料混合均匀[4]。成品验收环节，严格依照 GB/T50107-2010 标准，要求同条件养护试块强度达标率达到 100%，且通过回弹法检测的强度推定值不低于设计值的 95%，全面把控混凝土成品质量。

4.2. 裂缝防控专项技术

针对混凝土施工中可能出现的不同类型裂缝，龙岩大桥工程采取了差异化的防控措施。对于塑性收缩裂缝，通过二次抹压工艺消除混凝土表面泌水，减少表面收缩应力，同时在浇筑完成后立即覆盖塑料薄膜进行保湿，延缓表面水分蒸发速度；对于干缩裂缝，采用低热硅酸盐水泥与膨胀剂复合的技术方案，利用膨胀剂补偿混凝土的收缩，使混凝土 180 d 收缩率控制在 $\leq 0.02\%$ ；对于温度裂缝，借助有限元温度场模型，对超厚结构进行温度场仿真分析，根据分析结果优化冷却水管的布置方案，有效降低混凝土内外温差，从而减少温度裂缝的产生。

4.3. 智能化监测技术应用

龙岩大桥工程积极引入物联网技术，实现混凝土施工过程的数字化管控[5]。通过安装无线温度传感器网络，实时采集混凝土内部温度数据并传输至云端平台，便于管理人员随时掌握混凝土温度变化情况，及时采取温控措施；利用 BIM 技术建立混凝土施工三维模型，模拟混凝土浇筑顺序与振捣路径，提前规划施工流程，提高施工效率和质量；开发质量追溯系统，将原材料批次、配合比参数、养护记录等信息与二维码关联，管理人员和监管人员只需扫描二维码，即可快速获取相关质量信息，实现对混凝土施工质量的全程可追溯。

5. 案例分析

5.1. 龙岩大桥主塔工程

龙岩大桥主塔的承台尺寸为 6300 mm \times 42,000 mm \times 18,000 mm，属于特大型大体积混凝土结构，其施工面临三大核心挑战：一是结构体积庞大导致混凝土水化热积聚，易引发温度裂缝；二是超长超宽结构的整体受力不均，可能影响耐久性；三是露天施工环境下，温湿度波动对混凝土强度发展的干扰。为实现质量突破，该工程围绕“控温、强养、精准监测”构建了全流程技术体系：

在混凝土强度设计上，突破传统 28 d 强度设计惯例，采用 60 d 强度作为设计依据，并将标准养护周期延长至 28 天——通过试验数据验证，60 d 强度设计可使混凝土后期强度潜力充分释放，轴心抗压强度比 28 d 强度提升 15%~20%，同时延长养护周期能减少早期强度增长过快导致的内部应力集中。针对水化热控制，在混凝土配合比中掺入 I 级粉煤灰与矿粉复掺掺合料，替代 30% 的水泥用量，不仅降低了水化热峰值(实测峰值温度较常规配合比下降 8~12℃)，还优化了混凝土工作性，便于大体积浇筑时的振捣密

实。

在监测环节,创新采用“光纤光栅传感器+无线传输系统”的组合方案:在承台内部按“分层布设、重点覆盖”原则,共埋设82个光纤光栅温度传感器与46个应变传感器,传感器间距控制在2~3 m,实时采集混凝土内部温度场(精度 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$)与应变场(精度 $\pm 1\ \mu\text{ε}$)数据,并通过5G信号传输至云端监测平台。当系统监测到局部温差超过 25°C 时,会自动触发预警,施工人员通过调整内部循环冷却水管的流量,实现温度梯度的精准控制,有效避免了温度裂缝的产生。

同时,为解决露天养护环境下温湿度难以稳定的问题,工程团队自主研发了移动式智能养护棚。该养护棚采用钢结构框架与保温篷布组合形式,可根据承台浇筑进度分段移动,棚内配备蒸汽发生器、温湿度传感器与自动控制系统——当传感器检测到棚内湿度低于90%或温度低于 5°C 时,系统会自动启动蒸汽发生器,将养护环境精准控制在“温度 $15^{\circ}\text{C}\sim 25^{\circ}\text{C}$ 、湿度 $\geq 90\%$ ”的最优区间。这种智能化养护方式,不仅减少了人工养护的误差,还使混凝土7 d强度达标率提升至100%,28 d强度富裕系数稳定在1.15以上。

最终的第三方检测结果显示,承台混凝土的碳化深度 $\leq 1.0\text{ mm}$ (远优于规范要求的 $\leq 3.0\text{ mm}$),氯离子渗透性 $\leq 500\text{ C}$ (达到混凝土耐久性最高等级RCM-I级),完全满足100年设计使用年限的要求。该工程的技术创新,为国内特大型桥梁主塔承台施工提供了可复制的“控温-监测-养护”一体化解决方案,相关技术成果已被纳入《公路桥涵施工技术规范》修订建议稿。

5.2. 上海金茂大厦工程

作为当时中国的第一高楼,上海金茂大厦的基础底板厚度达4.5 m,混凝土用量高达1.2万 m^3 ,其基础施工质量直接关系到大厦的整体安全。该工程在质量控制方面有着明确且严格的要点:采用分三层跳仓浇筑工艺,每层的间隔时间严格控制在7天以内,通过合理的施工顺序分散水化热带来的温度应力;在混凝土中掺入UEA膨胀剂以补偿收缩,要求限制膨胀率 $\geq 2.5 \times 10^{-4}$,有效减少了混凝土收缩裂缝的产生;采用跳仓法施工,将底板巧妙划分为24个仓块,进一步释放温度应力,保障了结构的整体性。该工程凭借卓越的施工质量荣获鲁班奖,经过20年的运行监测,基础沉降量仅为12 mm,远小于设计允许的100 mm,充分体现了其优异的结构稳定性和施工质量。

6. 结论

混凝土施工技术与质量控制的提升,需要构建“材料-工艺-设备-管理”四位一体的完善体系。然而,“材料-工艺-设备-管理”四位一体体系应用推广有局限。适用条件上,更契合大型、高技术要求且资金充裕的工程,小规模普通工程或因成本高、操作复杂受限。潜在制约因素中,成本是关键,研发材料、引入技术、完善系统都需大量资金;技术门槛也高,先进技术要求施工人员专业素养高,而专业人才短缺会影响实施。未来拓展应用,可从降成本、提技能入手,加大研发投入探索经济方案,加强人才培养提升人员技能,推动技术更广泛应用。未来,这一体系将多项突破:材料上重点研发低碳混凝土,掺加工业废渣等使水泥用量降超30%,减碳且保性能;工艺上推广3D打印,自动化喷头逐层浇筑,精准成型复杂结构,减少模板与人工,提升效率精度;设备与管理领域完善智能监测系统,整合多技术建预警模型,实时捕捉关键指标异常,提前预警并辅助调整。如此创新升级,混凝土工程将更高质、可持续,为新型城镇化大型复杂建筑安全稳定提供保障。

参考文献

- [1] 韩飞,姜安民,欧阳学明,等.装配式混凝土结构楼板施工关键技术与质量控制研究[J].建设科技,2025(15):87-

90.

- [2] 陈志林. 路基桥梁过渡段水泥混凝土施工技术与质量控制[J]. 中国水泥, 2025(8): 106-108.
- [3] 张倩, 郑瑶. 土木工程中混凝土施工技术与质量控制[J]. 中国建筑金属结构, 2025, 24(11): 100-102.
- [4] 周国忠. 大体积混凝土施工技术及质量控制要点[J]. 石油化工技术与经济, 2024, 40(1): 35-39.
- [5] 高海斌. 预应力混凝土桥梁施工技术及质量控制[J]. 交通世界, 2022(30): 61-63.