

高层建筑混凝土结构施工质量控制要点与优化策略

刘海运

江西天丰建设集团有限公司 江西 宜春 330800

摘要: 随着城市化进程加速,高层建筑数量激增,其混凝土结构施工质量控制成为保障建筑安全与耐久性的关键。高层建筑混凝土结构施工具有大体积混凝土应用严苛、高空作业风险高、结构复杂协调难等特点,质量控制面临材料性能波动、工艺控制缺陷、环境干扰等难点。需从原材料、配合比、浇筑工艺、养护及裂缝防治等方面严格把控,并采取材料性能优化、工艺改进、监测技术升级等策略,以提升施工质量。

关键词: 高层建筑;混凝土结构;施工质量;控制要点;优化策略

引言:高层建筑作为现代城市发展的核心载体,其混凝土结构施工质量直接关乎工程安全性、耐久性及经济性。随着建筑高度与结构复杂度的不断提升,大体积混凝土温控、超高层泵送、复杂节点施工等技术难题日益凸显,加之材料性能波动、环境干扰等因素,传统质量控制模式面临严峻挑战。本文系统梳理高层建筑混凝土施工特点与难点,从原材料管控、工艺优化、智能监测及管理创新等维度提出针对性策略,为提升施工质量提供理论支撑与实践指导。

1 高层建筑混凝土结构施工特点与质量控制难点

1.1 施工特点

(1) 大体积混凝土应用广泛且要求严苛:高层建筑核心筒、筏板基础等关键部位普遍采用大体积混凝土,单层浇筑量常超千立方米。此类混凝土因水泥水化热集中释放,易产生内外温差,若温差超过 25°C ,极易引发温度应力裂缝,不仅影响结构外观,还会削弱整体承载能力,因此需通过优化配合比、分层浇筑、预埋冷却水管等方式精准控制温差。(2) 高空作业风险突出且技术要求高:混凝土泵送高度普遍超百米,部分超高层项目甚至达300米以上。超高泵送过程中,管道内混凝土流速快、压力大,需选用高压耐磨管道,并严格检查管道连接密封性与支撑稳定性,防止管道爆裂或移位;同时,高空布料机操作受风力影响显著,需实时监测风速,确保布料精准度与施工安全。(3) 结构复杂性增加施工协调难度:高层建筑多采用“框架-剪力墙”或“核心筒-框架”结构体系,核心筒、剪力墙与框架柱交叉施工频繁。节点部位钢筋密集,如梁柱节点处纵筋、箍筋与预埋件交错排布,混凝土浇筑空间狭窄,易出现振捣盲区;且各结构构件施工顺序需精准衔接,若协调不当,易导致工序冲突,延误工期并影响结构整体性^[1]。

1.2 质量控制难点

(1) 材料性能波动影响混凝土质量稳定性:水泥品种(如硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥)的水化热速率、强度发展规律差异较大;外加剂(减水剂、缓凝剂)的掺量精度、与水泥的适应性,会直接改变混凝土的工作性(流动性、保水性)与凝结时间。若材料选用或配比控制不当,易导致混凝土坍落度损失过快、离析等问题,影响浇筑质量。(2) 工艺控制缺陷易引发结构性隐患:混凝土振捣环节若振捣棒插入深度不足、振捣时间过短或漏振,会导致局部混凝土密实度不足,形成蜂窝、麻面甚至空洞;浇筑过程中若因设备故障、材料供应中断导致间断时间超过混凝土初凝时间,会产生冷缝,割裂混凝土整体结构,降低抗渗性与承载力。(3) 环境干扰加剧养护难度:高温天气下,混凝土表面水分蒸发过快,易出现塑性收缩裂缝;低温施工时,混凝土水化反应减缓,强度发展缓慢,若未采取保温措施,易受冻害影响;大风天气会加速混凝土表面散热与水分流失,破坏养护环境稳定性,导致混凝土强度增长不足,影响结构耐久性。

2 高层建筑混凝土结构施工质量控制要点

2.1 原材料质量控制

(1) 水泥精准选型与核验:优先选用低水化热、高强度的P·O42.5普通硅酸盐水泥,其3天抗压强度 $\geq 17\text{MPa}$ 、28天抗压强度 $\geq 42.5\text{MPa}$,水化热峰值比P·O52.5水泥低15%~20%,可减少大体积混凝土温差裂缝风险。进场时需查验厂家提供的化学成分报告,重点核对三氧化硫含量($\leq 3.5\%$)、烧失量($\leq 5.0\%$)等指标,每批次随机抽样送检,确保性能达标。(2) 骨料严格筛选与级配管控:细骨料选用中砂,含泥量必须 $\leq 1\%$,泥块含量 $\leq 0.5\%$,若含泥量超标会降低混凝土和易性与强度;粗骨料采用5~31.5mm连续级配碎石,针片状颗粒含量 $\leq 10\%$,压碎指标 $\leq 12\%$,级配连续可减少胶

凝材料用量,提升混凝土密实度。进场前需通过筛分试验验证级配曲线,不符合要求的骨料严禁入场。(3)外加剂适配性试验与掺量控制:减水剂选用高效聚羧酸系产品,掺量控制在1.5%~2.0%(按胶凝材料总量计),需提前与水泥、掺合料进行适配试验,确保混凝土坍落度经时损失(1h) $\leq 50\text{mm}$;膨胀剂选用钙矾石型,掺量8%~12%,可补偿混凝土收缩,提高抗裂性,适配时需检测混凝土限制膨胀率(水中7天 $\geq 0.025\%$),确保满足设计要求^[2]。

2.2 配合比设计

(1)强度等级设计依托科学试验:针对C40~C60不同强度等级混凝土,需通过正交试验确定最优配比,试验中需考虑水胶比、胶凝材料用量、骨料级配等变量对强度的影响。例如C60混凝土水胶比需控制在0.32~0.38,确保28天抗压强度 $\geq 60\text{MPa}$,同时兼顾施工可操作性,避免因配比过强导致混凝土流动性不足。(2)抗裂性优化注重掺合料应用:掺入30% I级粉煤灰与10% S95矿粉替代部分水泥,不仅能降低胶材总量至 $420\text{kg}/\text{m}^3$ (常规配比胶材总量约 $450\sim 480\text{kg}/\text{m}^3$),减少水化热产生,还能改善混凝土微观结构,提升抗渗性与耐久性。掺合料需控制活性指数,粉煤灰28天活性指数 $\geq 70\%$,矿粉28天活性指数 $\geq 95\%$,确保不影响混凝土强度发展。(3)流动性控制满足泵送需求:混凝土坍落度设计为 $180\sim 220\text{mm}$,扩展度 $\geq 500\text{mm}$,以适应超高层百米以上泵送需求,避免因流动性不足导致堵管。需通过调整减水剂掺量与砂率优化流动性,同时确保混凝土黏聚性良好,无离析、泌水现象,保障浇筑质量。

2.3 浇筑工艺控制

(1)分层浇筑严格把控厚度与间隔:采用分层连续浇筑方式,每层浇筑厚度 $\leq 600\text{mm}$,通过标尺杆实时监测厚度,避免因分层过厚导致振捣不密实。相邻两层浇筑间隔时间 \leq 混凝土初凝时间(通常控制在2~3小时,具体根据环境温度调整),若间隔超时需按施工缝处理,涂刷界面剂并清理浮浆,防止产生冷缝。(2)振捣密实规范操作参数:使用插入式振捣器,遵循“快插慢拔”原则,振捣器插入间距 $\leq 400\text{mm}$ (不超过振捣器作用半径1.5倍),插入深度至下层混凝土50mm,确保上下层混凝土结合紧密。振捣时间以混凝土表面出现浮浆、不再下沉为宜(通常15~30秒),避免过振导致骨料离析或漏振产生空洞^[3]。(3)泵送管理强化设备与管道管控:选用超高压混凝土泵机,工作压力 $\geq 35\text{MPa}$,满足超高层泵送压力需求。管道布置时,垂直段底部设置 90° 缓冲弯,减少混凝土对管道的冲击,降低堵管风

险;泵送前需用同配比砂浆润滑管道,泵送过程中实时监测泵压变化,若压力骤升需及时排查堵管位置并清理,确保泵送连续顺畅。

2.4 养护与裂缝防治

(1)全程温度动态控制:混凝土入模温度通过冷水拌合、骨料遮阳等措施控制 $\leq 32^\circ\text{C}$;大体积混凝土内部预埋冷却水管,通入 $15\sim 20^\circ\text{C}$ 循环水,外部覆盖保温棚(阻燃棉被+塑料膜),实时监测内外温差,确保 $\leq 25^\circ\text{C}$ 。降温速率控制在 $2^\circ\text{C}/\text{d}$ 以内,防止温度应力引发裂缝。(2)多维度保湿养护:浇筑完成后12h内覆盖塑料膜+阻燃棉被,采用自动喷淋系统保湿养护,养护时间不少于14天;柱体拆模后缠裹双层保鲜膜,确保表面湿度 $\geq 90\%$,避免水分过快蒸发导致干缩裂缝。养护期间定期检查覆盖层完整性,破损处及时修补。(3)裂缝分级修补处理:表面裂缝(宽度 $\leq 0.2\text{mm}$)采用环氧浆液低压注浆,注浆压力 $0.2\sim 0.3\text{MPa}$,确保浆液填满裂缝;结构裂缝(宽度 $> 0.2\text{mm}$)先沿裂缝开凿V型槽,清理后植入碳纤维布(抗拉强度 $\geq 3400\text{MPa}$),用环氧胶黏剂粘贴加固,固化后涂刷防护涂层,恢复结构整体性与耐久性。

3 高层建筑混凝土结构施工优化策略

3.1 材料性能优化

(1)新型功能混凝土研发与应用:针对高层建筑混凝土抗裂、耐久需求,研发低热、高强、自修复一体化混凝土。在混凝土中掺入纳米 SiO_2 (掺量 $0.5\%\sim 1.0\%$),其纳米级颗粒可填充水泥水化产物间隙,细化孔径结构,使混凝土抗渗等级提升至P12以上,同时增强界面黏结强度,28天抗压强度提高 $15\%\sim 20\%$;引入微生物自修复组分(如巴氏芽孢杆菌),当混凝土产生微裂缝(宽度 $\leq 0.4\text{mm}$)时,微生物遇水激活并代谢产生碳酸钙,自主填充裂缝,延长结构使用寿命。(2)再生骨料混凝土推广与适配:以建筑废弃物破碎加工的再生骨料替代部分天然骨料,用于非承重结构或次要承重部位(如填充墙、楼板找平层)。通过优化再生骨料预处理工艺(如两阶段破碎、筛分除杂、碳化改性),降低其吸水率(控制在 8% 以内)与压碎指标($\leq 16\%$),并调整配合比(增加胶凝材料用量 $5\%\sim 10\%$ 、优化外加剂掺量),使再生骨料混凝土强度达到C30~C40,满足设计要求,同时减少天然骨料开采与固废填埋,实现资源循环利用,每万平方米建筑可减少碳排放约80吨。

3.2 施工工艺改进

(1)3D打印模板技术革新:针对核心筒、异形柱等复杂构件,采用3D打印混凝土模板技术,通过BIM模型切片生成打印路径,利用特种打印混凝土(掺入玻璃

纤维增强韧性)现场打印整体式模板,无需传统木模拼接,拼缝数量减少90%以上,彻底解决拼缝漏浆问题;打印模板强度可达C30,施工完成后可作为结构外保护层保留,省去拆模工序,工期缩短15%~20%。(2)跳仓法施工破解收缩难题:对于大体积混凝土筏板、楼板,采用跳仓法分块浇筑,将结构划分为若干独立浇筑块(块体尺寸控制在20m×20m以内),间隔3~7天交替浇筑,利用块体间的施工缝释放早期收缩应力,替代传统后浇带;浇筑前在施工缝处设置止水钢板与膨胀止水条,确保抗渗性能,同时通过加强带(提高一个强度等级、掺入膨胀剂)连接各块体,实现结构整体连续性,裂缝发生率降低60%以上^[4]。

3.3 监测技术升级

(1)物联网智能监测系统部署:在混凝土结构关键部位(核心筒转角、框架梁柱节点、大体积混凝土内部)预埋无线物联网传感器(温度传感器、应变传感器、湿度传感器),传感器精度达±0.1℃(温度)、±1με(应变),通过LoRa无线传输技术实时上传数据至云端平台;管理人员可通过手机APP查看监测曲线,当温度差超25℃、应变值超设计限值时,系统自动推送预警信息,及时调整养护措施,监测效率提升80%,人工成本降低50%。(2)BIM+VR技术风险预判:施工前基于BIM模型搭建三维可视化场景,导入施工进度计划形成4D模拟,结合VR设备让管理人员“沉浸式”查看施工流程,提前识别管道碰撞、浇筑盲区等风险点;针对混凝土泵送过程,通过BIM模拟管道压力分布,优化管道布置方案,避免堵管;对复杂节点施工,制作VR操作指引,指导工人规范作业,施工失误率降低40%,技术交底时间缩短30%。

3.4 管理机制创新

(1)EPC总承包模式协同增效:推行设计-采购-施工一体化EPC总承包模式,由总承包单位统筹设计、材料供应、施工环节,在设计阶段提前与材料供应商沟通,

根据市场材料性能优化设计方案(如选用新型低热水泥调整配合比);施工前组织设计、监理、施工三方开展图纸会审,解决材料与施工工艺匹配问题,减少设计变更;建立协同管理平台,实现材料采购计划、施工进度、质量检测数据实时共享,各环节衔接时间缩短25%,工程成本降低8%~12%。(2)质量追溯系统精准管控:构建“原材料-施工-验收”全流程质量追溯系统,为每批次原材料(水泥、骨料、外加剂)分配唯一二维码,记录生产厂家、检测报告、进场时间等信息;施工时通过扫码关联浇筑部位、施工班组、振捣时间等数据,形成可追溯的电子档案;验收阶段可通过二维码快速调取该部位原材料信息与施工记录,若发现质量问题,10分钟内定位责任环节,实现“问题可查、责任可追”,质量整改效率提升50%,返工率降低30%。

结束语

高层建筑混凝土结构施工质量控制是保障建筑安全与长寿命的核心环节。面对大体积混凝土开裂、高空泵送风险及复杂结构协调等挑战,需从材料优选、配合比科学设计、工艺精细化管控及智能监测技术应用等多维度协同发力。未来,随着新型功能混凝土研发、3D打印模板及BIM+VR技术的深度融合,施工质量将实现更高效、精准的管控。持续创新与管理升级是推动行业高质量发展的关键所在。

参考文献

- [1]任传儒.高层建筑钢与混凝土组合结构设计浅析[J].砖瓦,2024,(08):93-95.
- [2]陈欣.高层建筑施工过程中的混凝土徐变分析[J].砖瓦,2024,(14):131-133.
- [3]王上玮.分析高层建筑混凝土结构设计[J].建材发展导向,2024,(04):41-43.
- [4]牛天晨.高层住宅建筑结构设计的关键技术研究[J].居舍,2024,(05):46-48.