

数字化技术赋能超高层建筑混凝土施工全过程 质量追溯与管控

麦广仙, 李泽威, 陈泽然

广东建科建设咨询有限公司, 广东 广州 510599

DOI:10.61369/ERA.2026010024

摘要 : 本文聚焦数字化技术赋能超高层建筑混凝土施工全过程质量追溯与管控, 解析超高层混凝土施工6大核心阶段及各环节可量化质量控制点, 进而构建“原材料溯源-生产运输监控-浇筑振捣管理-养护监测-检测验收集成”的全流程数字化实施路径, 通过BIM、传感器、AI、二维码等技术实现各环节参数实时采集、风险预警与闭环管控。在此基础上, 设计包含数据中心与数字孪生的数字化平台, 集成溯源、监控、分析、协同四大核心功能模块, 打通全链条数据壁垒, 实现施工过程可视化、操作参数可追溯、质量缺陷可预警与多方协同高效化。方案有效破解了超高层混凝土施工质量管控难题, 为工程质量安全提供可靠技术支撑, 提升了施工效率与管控精准度。

关键词 : 超高层建筑; 混凝土施工; 数字化技术; 质量追溯

Digital Technology Empowers Full-Process Quality Traceability and Control in Concrete Construction of Super High-Rise Buildings

Mai Guangxian, Li Zewei, Chen Zeran

Guangdong Jianke Construction Consulting Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510599

Abstract : This paper focuses on the quality traceability and control throughout the entire process of concrete construction in super high-rise buildings enabled by digital technologies. It analyzes the six core stages of super high-rise concrete construction and quantifiable quality control points at each stage, thereby constructing a digital implementation pathway for the entire process that includes "raw material traceability - production and transportation monitoring - pouring and vibration management - curing monitoring - inspection and acceptance integration." Through technologies such as BIM, sensors, AI, and QR codes, real-time parameter collection, risk early warning, and closed-loop control across various stages are achieved. On this basis, a digital platform comprising a data center and digital twin is designed, integrating four core functional modules: traceability, monitoring, analysis, and collaboration. This platform breaks down data barriers across the entire chain, enabling visualization of the construction process, traceability of operational parameters, early warning of quality defects, and efficient multi-party collaboration. The proposed solution effectively addresses the challenges of quality control in super high-rise concrete construction, providing reliable technical support for project quality and safety while enhancing construction efficiency and management precision.

Keywords : super high-rise building; concrete construction; digital technology; quality traceability

引言

随着城市化进程的加速, 超高层建筑已成为城市空间高效利用的重要载体, 其工程规模与技术复杂度持续提升。混凝土作为超高层建筑的核心结构材料, 不仅用量巨大, 且需满足高强度、高耐久性等严苛要求, 其施工质量直接决定建筑结构安全与使用寿命。然而超高层混凝土施工面临垂直运输协调难、高空环境恶劣、多专业交叉作业频繁、大体积混凝土温控复杂等多重挑战, 传统“人工记录+线下巡检”的管控模式已难以适配。在此背景下, 数字化技术成为破解超高层混凝土施工质量管控难题的关键抓手。基于此, 本文聚焦超高层建筑混凝土施工全流程, 系统解析各阶段质量关键点与传统管控痛点, 构建数字化技术赋能的质量追溯与管控体系, 探索从原材料到检测验收的全链条数字化实施路径, 并设计适配超高层施工特点的数字化管控平台。

一、超高层混凝土施工全过程解析与质量关键点

(一) 施工全过程阶段划分

超高层建筑是现代建筑工程施工的主要方向，具有施工量大的特点，同时由于超高层建筑的楼层较高、自身重量较大，楼层整体结构的质量要求也较高。所以，在现代超高层建筑施工过程中，都开始应用高强度混凝土施工。一般选择为 C60 及以上级别的混凝土，而高强度混凝土施工，需要对其施工工艺进行有效把控，确保施工技术应用合理^[1]。超高层建筑混凝土施工可划分为环环相扣的6个核心阶段，并需同步协调“垂直运输”与“多专业交叉”。前期筹备的核心是“方案落地+资源匹配”，需编制结合 BIM 模拟的专项方案以规避冲突，并完成供应商审核与设备调试。原材料管控针对数万方用量，实施全流程分批次管理，严防质量波动。生产与运输阶段需精准协调搅拌站与现场节奏，通过泵管高效完成“地面-高空”转运，避免供料中断或积压初凝^[2]。现场浇筑则需根据核心筒、柱等不同构件特点差异化作业，如大体积混凝土需分层浇筑以控制水化热防裂。养护阶段针对高空恶劣环境，采取覆盖、喷淋等措施并差异化控制时长。

(二) 各阶段质量关键控制点

超高层混凝土施工需全程聚焦“可量化、可监测”指标，前期筹备须确保专项方案三方审批通过、BIM 模拟管线冲突规避率 $\geq 95\%$ 及设备调试 100% 合格^[3]。原材料管控核心是水泥强度达标、砂石含泥量（砂 $\leq 3\%$ 、石 $\leq 1\%$ ），外加剂兼容性测试与原材料复检率均须 100%，大体积混凝土另需检测水化热。生产运输阶段，配合比偏差 $\leq \pm 2\%$ ，搅拌 ≥ 90 秒，运输时长 ≤ 90 分钟（高温 ≤ 60 分钟），坍落度损失 $\leq 20\text{mm/h}$ ，且泵管需保温/降温以控制温波动 $\leq \pm 5^\circ\text{C}$ ^[4]。现场浇筑要控制分层厚度 $\leq 500\text{mm}$ （大体积 $\leq 300\text{mm}$ ）、振捣时间 10-15 秒/点，并确保核心筒水化热内外温差 $\leq 25^\circ\text{C}$ 。养护阶段须维持温度 $\geq 5^\circ\text{C}$ 、湿度 $\geq 90\%$ ，大体积混凝土养护 ≥ 14 天且每日温降 $\leq 2^\circ\text{C}$ 。最终检测验收要求试块强度离散系数 $\leq 15\%$ ，外观缺陷面积 $\leq 0.5\%$ ，关键构件须回弹与钻芯双重检测，结构尺寸偏差严格控制在毫米级。

(三) 传统管控模式的痛点分析

超高层建筑混凝土施工的传统“人工记录+线下巡检”模式弊端丛生，由于数据分散于多方形成孤岛，导致追溯链条断裂，问题排查耗时费力；人工巡检的滞后性使得对高空温变、泵管堵塞等风险响应迟缓；关键指标依赖人工记录，易出现错漏篡改，数据真实性存疑，引发质量隐患；多方协同依赖低效的会议和函件，沟通内耗严重，延误工期；更无法适配超高层垂直运输协调、大体积混凝土水化热实时监控等特需场景，易导致供料失衡或结构裂缝，严重制约工程效率与安全。

二、全过程数字化质量追溯与管控实施路径

(一) 原材料数字化溯源

超高层建筑混凝土施工的传统“人工记录+线下巡检”模式弊端丛生，由于数据分散于多方形成孤岛，导致追溯链条断裂，问题排查耗时费力；人工巡检的滞后性使得对高空温变、泵管堵塞等风险响应迟缓；关键指标依赖人工记录，易出现错漏篡改，数据真实性存疑，引发质量隐患；多方协同依赖低效的会议和函

件，沟通内耗严重，延误工期；更无法适配超高层垂直运输协调、大体积混凝土水化热实时监控等特需场景，易导致供料失衡或结构裂缝，严重制约工程效率与安全。

(二) 生产运输数字化监控

为保障超高层建筑混凝土质量，数字化监控需实现生产可控、运输可视与风险预警。在生产端，搅拌站根据平台指令自动执行精准的配合比，并实时监控投料、温度等参数，超差即报警停机；在运输端，通过车载 GPS 与传感器实时追踪车辆位置、罐体转速及混凝土状态，对超时或质量波动进行预警；针对高空垂直运输，则在泵管上布设传感器监测压力，提前预警堵管风险^[5]。这套全流程数字化体系旨在主动管控各环节，确保混凝土在严苛的时间窗口内安全、高质量地完成浇筑。

(三) 浇筑振捣数字化管理

为应对超高层混凝土浇筑的高空作业、同步施工与温控难题，数字化管理通过构建 BIM 模型进行可视化施工规划与交底，并部署 AI 监控系统实时捕捉浇筑画面，联动模型追踪进度、识别违规并即时预警^[6]。在振捣环节，采用内置传感器的智能振捣棒，对频率、深度和时间进行实时监测与数据上传，不合格时现场声光报警，平台则生成质量报告以形成“振捣-监测-整改-复核”的闭环管理^[7]。同时，针对大体积混凝土，通过布设温度传感器实时监控内外温差，一旦超标便自动预警并提示温控措施，从而全面实现施工过程可视化、操作参数可追溯与质量缺陷可预警。

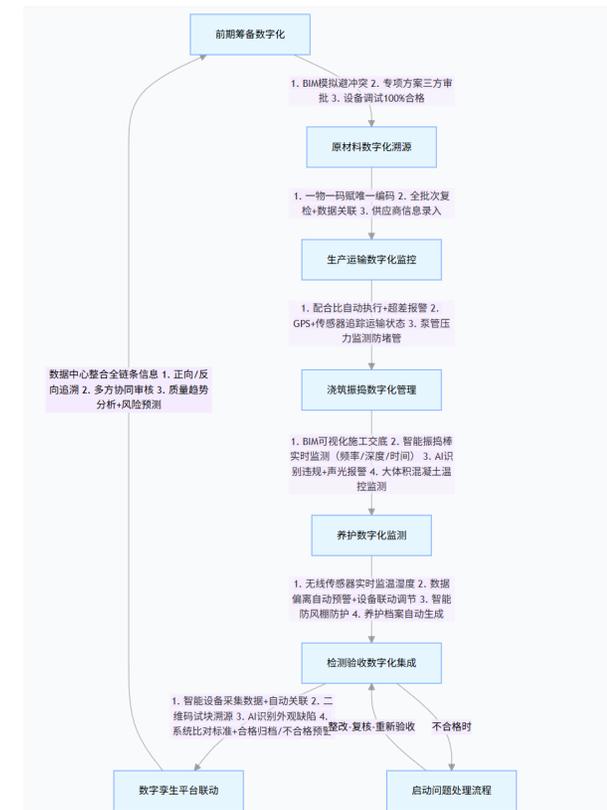


图1 全过程数字化质量追溯与管控实施路径流程图

(四) 养护数字化监测

为应对超高层高空恶劣环境，数字化养护系统通过在构件关键部位布设无线传感器实时监控温湿度，当数据偏离动态养护标准时，平台能自动预警并联动启动电伴热或喷淋设备进行调节，同时结合智能防风棚应对强风，并将所有设备运行数据与构件信

息关联,形成完整的养护档案,从而实现环境实时感知、措施自动联动与数据持续追踪,确保混凝土强度稳定增长。

(五) 检测验收数字化集成

为实现超高层混凝土检测验收的全流程数字化闭环管理,需打通数据孤岛^[8]。方案核心在于通过智能设备自动采集并上传过程检测数据,系统自动关联施工段、原材料等前期信息;最终检测环节利用二维码实现试块信息溯源,系统自动比对设计标准,合格则自动归档,不合格则立即预警并启动处理流程,同时结合 AI 自动识别外观缺陷;所有数据最终在平台生成一体化数字验收报告,支持多方在线协同,形成从原材料到验收的完整数据链,实现质量全程可追溯。

三、数字化质量追溯与管控平台功能设计

(一) 数据中心与数字孪生

该平台通过数据中心和数字孪生两大核心,实现对超高层混凝土施工的全流程智能管理。数据中心作为“数据底座”,打通各环节“数据孤岛”,自动采集并清洗整合从原材料到验收的全维度数据,形成可追溯的完整信息链条,并通过“本地+云端”的混合存储模式与多重安全策略保障数据安全^[9]。数字孪生作为“实景映射中枢”,基于 BIM 构建与物理实体实时同步的动态模型,将所有数据可视化呈现,不仅能直观监控现场状态,更能模拟分析施工风险、预判质量问题,并支持点击任意构件即可回溯其全生命周期数据,最终实现高效、精准、可视化的智能决策与质量管控。

(二) 核心功能模块

核心功能模块围绕超高层混凝土施工的管控需求设计,涵盖“溯源、监控、分析、协同”四大核心场景,各模块既独立运行又相互联动,形成完整的管控闭环。溯源管理模块是实现“全链条可追溯”的核心,旨在解决传统模式下质量问题难以定位的痛点。模块以“一物一码”为核心逻辑,为每批次原材料、每车混凝土、每个施工构件赋予唯一追溯编码,编码关联全流程数据。管理人员通过模块可发起多维度追溯,正向追溯可从原材料批次号出发,查询该批次材料用于哪些混凝土生产、运输至哪个施工段、对应构件的检测结果;反向追溯可从某一不合格构件出发,快速定位其使用的混凝土生产单号、运输车辆、原材料供应商,甚至追溯到原材料出厂检测报告中的具体指标。同时,模块支持生成可视化追溯图谱,以时间轴或流程图形式展示数据关联关系,让责任定位更直观、更高效。监控预警模块聚焦“实时管控与风险前置”,覆盖超高层混凝土施工的关键环节。在原材料环节,模块实时监控智能料仓的温湿度与料位,当水泥存储湿度

超过 65% 或料位低于预警线时,自动推送提醒至材料管理员;在生产运输环节,实时显示搅拌站每盘混凝土的配合比执行情况、运输车辆的实时位置与罐车转速,若运输时长即将超过 90 分钟阈值,提前通知现场调度人员准备接收;在浇筑振捣环节,通过 AI 可视化监控与智能振捣棒数据联动,实时查看各浇筑分区的进度与振捣合格情况,若识别到漏振区域或振捣时间不足,立即弹窗预警并标注位置;在养护环节,实时展示各构件的温湿度曲线,当大体积混凝土内外温差接近 25℃ 时,自动触发预警并建议开启冷却水管。数据分析模块通过挖掘数据价值,为超高层混凝土施工质量管控提供“决策支持”^[10]。模块内置多维度分析模型,质量趋势分析模型会按周、按月统计混凝土强度达标率、外观缺陷率等指标,生成趋势曲线,帮助管理人员识别质量波动规律;风险预测模型基于历史数据,预测未来施工环节可能出现的风险;效率分析模型则统计各环节耗时,找出流程瓶颈。协同管理模块针对超高层项目“多参与方、多环节协同”的特点,解决沟通效率低、信息不对称的问题。模块搭建了统一的协同工作台,建设单位、设计单位、监理、施工、供应商可在平台内实现信息共享与业务流转,例如搅拌站需调整混凝土配合比时,可在平台提交变更申请,附上原材料短缺证明与新配合比计算书,监理与设计单位在线审核并签署意见,审核通过后自动同步至施工单位与检测机构,避免纸质函件传递延误;施工单位发现浇筑过程中出现结构尺寸偏差时,可在平台上传现场照片与偏差数据,发起问题整改任务,指定责任人与完成时限,监理在线跟踪整改进度,整改完成后上传验收照片,形成“问题发起-整改-验收”的闭环。同时模块支持在线会议与文档管理,各方可基于数字孪生模型召开远程协调会,标注问题位置;施工图纸、检测标准等文档上传后自动版本管理,避免使用过时文档导致的施工失误,切实提升超高层项目多方协同的效率与准确性。

四、结束语

超高层建筑混凝土施工质量管控是关乎建筑结构安全与长期使用性能的核心命题,其高空作业复杂性、多环节协同要求与严苛的质量标准,决定了传统管控模式的局限性难以通过局部优化突破。本文立足超高层混凝土施工全流程,以数字化技术为核心赋能手段,系统构建了覆盖“原材料-生产-运输-浇筑-养护-验收”的全链条质量追溯与管控体系,通过技术集成与流程重构,有效解决了传统模式下数据割裂、追溯困难、响应滞后等关键痛点。

参考文献

- [1] 肖平, 史健宇, 严云跃, 等. 超高层建筑高强度混凝土施工及质量管控要点 [J]. 江苏建材, 2022(6): 39-41. DOI: 10.3969/j.issn.1004-5538.2022.06.015.
- [2] 段鸿斌. 超高层建筑混凝土泵送施工技术 [J]. 中国建筑装饰装修, 2022(11): 65-67. DOI: 10.3969/j.issn.1672-2167.2022.11.013.
- [3] 黄钰涵, 陈龙, 曾少林. 超高层建筑大体积混凝土底板施工质量控制技术 [J]. 建筑与装饰, 2023(10): 109-111.
- [4] 王忠华. 超高层钢管混凝土结构建筑的关键技术 [J]. 河南建材, 2023(8): 42-44.
- [5] 王鼎鑫, 黄丽名, 张晨, 等. 超高层建筑超厚基础底板大体积混凝土施工关键技术 [J]. 建筑技术, 2023, 54(16): 1965-1968. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4726.2023.16.008.
- [6] 殷伟. 超高层建筑大体积混凝土底板施工质量控制技术探析 [J]. 工程质量, 2022, 40(12): 7-10. DOI: 10.3969/j.issn.1671-3702.2022.12.003.
- [7] 李乐. 超高层建筑混凝土泵送施工工艺分析 [J]. 大众标准化, 2022(16): 80-82. DOI: 10.3969/j.issn.1007-1350.2022.16.029.
- [8] 李党义, 黄政宇. 超高层建筑大体积混凝土施工技术分析 [J]. 科技通报, 2013, 29(4): 53-54, 57. DOI: 10.3969/j.issn.1001-7119.2013.04.020.
- [9] 乔磊. 超高层建筑基础大体积混凝土施工技术 [J]. 建筑技术开发, 2021, 48(7): 50-51. DOI: 10.3969/j.issn.1001-523X.2021.07.022.
- [10] 丁晓. 超高层建筑大体积混凝土施工技术 [J]. 建材与装饰, 2021, 17(1): 19-20. DOI: 10.3969/j.issn.1673-0038.2021.01.010.