

土木工程建筑中混凝土结构的施工工艺分析

周 波

宁夏中宁工业园区管理委员会 宁夏 中卫 755103

摘 要：土木工程建筑中，混凝土结构施工工艺是保障工程质量的核心环节。该工艺涵盖原材料选择与配比设计、模板与支撑系统搭建、浇筑振捣及养护等多个步骤。科学选择低热水泥、再生骨料等材料，优化配合比以提升混凝土性能；通过铝合金模板、盘扣式脚手架等先进技术强化施工稳定性；采用分层浇筑、泵送技术确保密实度；结合覆盖保湿、蒸汽养护等措施控制裂缝。智能化监测与绿色施工工艺的应用，进一步推动了混凝土结构施工向高效、环保方向发展。

关键词：土木工程建筑；混凝土结构；施工工艺

引言：混凝土结构作为土木工程建筑的核心载体，其施工质量直接影响工程安全性、耐久性与经济性。随着建筑规模扩大化、结构复杂化及环保要求提升，传统施工工艺面临效率低、能耗高、裂缝控制难等挑战。近年来，材料科学进步与智能化技术融合为混凝土施工带来革新，如高性能外加剂、智能监测系统及3D打印技术的应用，显著提升了结构性能与施工精度。本文从原材料配比、模板支撑、浇筑养护到质量监测等环节，系统分析混凝土结构施工工艺的关键技术及创新趋势，为推动行业技术升级提供参考。

1 土木工程建筑中混凝土结构施工工艺分析

1.1 原材料选择与配比设计

(1) 水泥与骨料的科学选用是混凝土质量的基础：针对大体积混凝土工程，优先采用低热水泥（如矿渣硅酸盐水泥），其7d水化热可控制在270kJ/kg以下，能有效减少混凝土硬化过程中的温升，降低温度裂缝产生概率；同时，再生骨料（由废旧混凝土破碎筛分制成）的应用比例持续提升，目前在非承重结构中替代率已达30%-50%，不仅减少建筑垃圾污染，还能降低天然骨料开采依赖，符合绿色施工理念。(2) 外加剂技术优化混凝土工作性能：高效减水剂以聚羧酸系为主流，掺量仅为0.1%-0.3%水泥用量，即可使混凝土坍落度提升150mm以上，且能减少20%左右的拌合用水，在提升流动性的同时保证强度；对于超长结构或易开裂部位，掺入膨胀剂（如硫铝酸盐型），可使混凝土在硬化阶段产生适度膨胀（膨胀率0.02%-0.04%），抵消收缩变形，控制收缩裂缝^[1]。(3) 配合比优化需平衡多维度性能：通过正交试验设计不同水泥、骨料、外加剂用量组合，结合抗压强度试验（标准养护28d）、工作性测试（坍落度、扩展度）及耐久性检测（抗渗、抗冻），确定最优配比。例

如，在桥梁工程中，通过优化配合比可使混凝土28d抗压强度达C60，坍落度保持180±20mm，同时抗渗等级提升至P12，满足结构承载与服役环境需求。

1.2 模板与支撑系统

(1) 模板材料创新提升施工效率与质量：铝合金模板凭借高强度（抗拉强度 $\geq 260\text{MPa}$ ）、轻量化（重量较钢模轻30%）优势，周转次数可达300次以上，远超木模板（5-10次），且拆模后混凝土表面平整度误差 $\leq 2\text{mm}$ ，减少后期抹灰工序；塑料模板（主要为PP材质）重量更轻（每平方米约15kg），安装便捷，适合复杂造型构件，在住宅产业化项目中应用逐渐广泛。(2) 支撑体系升级强化结构稳定性：盘扣式脚手架采用承插式连接，节点刚度大，承载力较传统扣件式脚手架提升50%以上，且搭设效率提升40%，能有效保障高支模（高度 $\geq 8\text{m}$ ）施工安全；早拆体系通过在支撑顶部设置早拆装置，在混凝土强度达到设计值50%时即可拆除部分模板（如楼板模板），保留立杆支撑，使模板周转时间缩短30%-50%，加快施工进度。(3) 智能监测预防模板安全风险：在支撑立杆底部、横杆节点等关键部位安装压力传感器（量程0-50kN，精度 $\pm 1\%$ ），实时监测支撑体系的应力变化，数据传输至监控平台，当应力超过设计限值的80%时自动发出预警，及时调整支撑布置，避免因荷载集中导致模板坍塌事故。

1.3 浇筑与振捣工艺

(1) 分层浇筑技术保障混凝土密实度：采用薄层浇筑方式，每层厚度控制在 $\leq 30\text{cm}$ ，浇筑间隔时间不超过混凝土初凝时间（一般4-6h），同时在下层混凝土初凝前进行二次振捣（振捣棒插入深度较第一次深5-10cm），可有效排出混凝土内部气泡，消除蜂窝、麻面等缺陷，使混凝土密实度提升15%左右。(2) 泵送技术满足超高

层施工需求：超高压混凝土泵车最大输送压力可达40MPa以上，输送高度超过200m，能将混凝土稳定输送至超高层核心筒、楼板等部位；为防止堵管，需控制混凝土坍落度在160-220mm，且骨料最大粒径不超过输送管内径的1/3，同时在泵管出口设置布料机，实现均匀布料。（3）真空脱水工艺提升路面混凝土性能：在路面混凝土浇筑振捣完成后，铺设真空吸水垫（渗透率 $\geq 1 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ ），通过真空泵（真空度 $\geq 0.08 \text{MPa}$ ）抽取混凝土内部多余水分，使混凝土水灰比降低0.05-0.1，28d抗压强度提升20%以上，且表面平整度误差 $\leq 3 \text{mm}$ ，开放交通时间缩短至7-10d（传统工艺需14-21d）^[2]。

1.4 养护与裂缝控制

（1）养护方法需根据工程类型精准选择：1）覆盖养护适用于一般混凝土结构，采用土工布（吸水率 $\geq 200\%$ ）+塑料膜双层覆盖，保持混凝土表面湿度在90%以上，养护时间不少于7d（高强混凝土不少于14d），可有效防止表面水分过快蒸发产生干缩裂缝。2）蒸汽养护多用于预制构件生产，通过控制蒸汽温度（升温速率 $\leq 15^\circ\text{C/h}$ ，最高温度 $\leq 60^\circ\text{C}$ ）与湿度，使混凝土在3-5d内达到设计强度80%以上，同时严格控制内外温差 $<25^\circ\text{C}$ ，避免温度应力导致裂缝。（2）裂缝防治需结合结构特性采取综合措施：1）预应力技术广泛应用于大跨度结构（如桥梁、厂房），通过施加预压应力（有粘结预应力张拉控制应力 $\sigma_{\text{con}} = 0.75 f_{\text{ptk}}$ ，无粘结预应力 $\sigma_{\text{con}} = 0.7 f_{\text{ptk}}$ ），抵消混凝土使用阶段的拉应力，减少结构变形与裂缝产生。2）纤维增强技术通过在混凝土中掺入钢纤维（体积率0.5%-2%）或聚丙烯纤维（体积率0.1%-0.3%），纤维随机分布形成三维支撑体系，阻碍裂缝扩展，使混凝土抗裂性能提升30%-50%，尤其适用于路面、隧道衬砌等易开裂部位。

2 土木工程建筑中混凝土结构施工工艺质量控制要点

2.1 质量检测技术

2.1.1 无损检测

（1）超声波检测广泛应用于混凝土内部缺陷排查，采用低频超声波检测仪（频率50-200kHz），通过双探头对测法检测构件内部密实度，其内部缺陷定位精度可达 $\pm 5 \text{mm}$ ，能精准识别空洞、夹层、裂缝等问题，检测范围覆盖梁、柱、板等关键结构，且对构件无损伤，检测完成后不影响后续施工进度。（2）回弹法测强是混凝土强度检测的常用手段，使用回弹仪（示值误差 ± 1 ）按规范布置测区（每构件 ≥ 10 个），通过回弹值与混凝土强度的对应关系估算强度；为提升准确性，需结合钻芯修正，钻取芯样（直径 $\geq 100 \text{mm}$ ）进行抗压试验，修正后

检测误差可控制在 $<8\%$ ，确保强度检测结果符合设计要求（C30-C60）。

2.1.2 智能监测

（1）物联网传感器实现混凝土全周期监测，在浇筑前预埋应变传感器（量程 $\pm 3000 \mu\epsilon$ ）、温度传感器（精度 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ ）与湿度传感器（量程0-100%RH），实时采集混凝土硬化过程中的应变变化、内部温度及表面湿度数据，数据通过无线传输至云端平台，当温度梯度超过 25°C 或湿度低于90%时自动预警，及时调整养护措施。

（2）无人机倾斜摄影建模用于结构外形检测，采用多旋翼无人机（搭载高清相机，像素 ≥ 2000 万）对混凝土结构进行多角度拍摄，通过摄影测量技术构建三维模型，与设计图纸进行比对分析，计算构件尺寸偏差率（如垂直度偏差、截面尺寸偏差），偏差率超规范（ $\leq 3\%$ ）时及时整改，保障结构外形符合设计标准^[3]。

2.2 常见质量问题与对策

（1）针对蜂窝麻面问题，从施工工艺入手优化控制：振捣时采用插入式振捣器（振捣棒直径50-70mm），确保振捣时间控制在每点20-30s，以混凝土表面泛浆、不再下沉为宜，避免漏振或过振；同时严格控制混凝土坍落度在160-200mm范围内，坍落度损失过大时及时调整外加剂掺量，保证混凝土和易性，减少蜂窝麻面产生。

（2）温度裂缝防治需结合材料选择与施工措施：大体积混凝土施工中，提前在构件内部埋设冷却水管（管径50-80mm，间距1-1.5m），通循环水（进水温度 $\leq 25^\circ\text{C}$ ）降低内部温升，控制内外温差 $<25^\circ\text{C}$ ；材料选用低热硅酸盐水泥（3d水化热 $\leq 240 \text{kJ/kg}$ ），减少水泥水化放热，从源头降低温度裂缝风险。（3）钢筋锈蚀问题采用双重防护方案：钢筋加工前涂刷环氧涂层（厚度50-100 μm ，附着力 $\geq 5 \text{MPa}$ ），隔绝空气与水分接触；混凝土拌制时掺加阻锈剂（掺量1%-3%水泥用量），抑制钢筋电化学腐蚀；同时严格控制混凝土中氯离子含量 $<0.1\%$ （按水泥重量计），避免氯离子加速钢筋锈蚀，保障结构耐久性（设计使用年限50-100年）。

3 土木工程建筑中混凝土结构施工工艺创新趋势

3.1 智能化施工技术

（1）3D打印混凝土技术颠覆传统施工模式，凭借自由造型能力实现异形结构一次成型，如曲面墙体、镂空构件等复杂造型无需拆分浇筑，大幅减少模板用量与施工工序。该技术通过计算机控制喷头逐层喷射混凝土（打印速度50-100mm/s），材料利用率显著提升，相比传统浇筑工艺材料浪费减少60%以上；同时可根据结构受力需求实现梯度材料打印，在关键部位增强强度，非

关键部位减重,兼顾结构安全与经济性,目前已在小型景观建筑、装配式构件生产中广泛应用,未来有望向超高层核心筒施工突破。(2)机器人施工推动混凝土工程自动化升级,喷涂机器人搭载高精度传感器(定位误差 $\pm 1\text{mm}$),可均匀喷涂混凝土保护剂或界面剂,表面处理均匀性达 $\pm 2\%$,避免人工喷涂的厚薄不均问题;砌筑机器人通过视觉识别系统(识别精度 0.1mm)抓取混凝土砌块,按设计参数精准砌筑,砌筑精度控制在 $\pm 1\text{mm}$,且施工效率较人工提升3-5倍。此外,振捣机器人可根据混凝土坍落度自动调节振捣频率(50-100Hz)与插入深度,确保振捣密实度一致,减少人为操作差异对施工质量的影响^[4]。

3.2 绿色施工工艺

(1)低碳混凝土技术助力“双碳”目标实现,地质聚合物水泥以工业废渣(粉煤灰、矿渣)为主要原料,通过碱激发反应形成胶凝材料,生产过程 CO_2 排放较传统硅酸盐水泥降低80%以上;同时优化混凝土配合比,将粉煤灰、矿渣等掺合料掺量提升至50%,不仅减少水泥用量(降低20%-30%),还能改善混凝土工作性与耐久性,目前已在道路、桥梁等工程中规模化应用。(2)废弃物循环利用构建施工闭环体系,建筑垃圾经破碎、筛分、强化处理后制成再生骨料,在混凝土中的替代率可达30%,用于基础垫层、非承重墙体等结构,每年可减少数千万吨建筑垃圾填埋;施工污水通过絮凝沉淀(添加聚合氯化铝等药剂)、过滤、消毒处理后,回用率达80%以上,可用于混凝土搅拌、养护、降尘等环节,降低新鲜水消耗,实现资源循环利用。

3.3 性能提升技术

(1)超高性能混凝土(UHPC)突破传统材料性能极限,其抗压强度超过 150MPa ,抗拉强度达 $8-12\text{MPa}$,延性较普通混凝土提升5倍,且具有优异的抗渗性(抗渗等级P20以上)与抗疲劳性能。通过掺入钢纤维(体积率

2%-3%)或碳纤维,UHPC可应用于桥梁节点加固、超高层外挂板、海洋工程结构等场景,如在旧桥加固中,采用UHPC修补可使结构承载能力提升40%-60%,延长使用寿命20-30年。(2)自修复混凝土实现结构“自我愈合”,在混凝土拌制时掺入微生物胶囊(直径1-5mm),胶囊内包裹芽孢杆菌与营养物质,当结构产生裂缝(宽度 $\leq 0.5\text{mm}$)时,雨水或湿气渗入触发胶囊破裂,芽孢杆菌苏醒并代谢产生碳酸钙沉淀,填充裂缝实现自修复,修复效率达80%以上。此外,还可通过掺入微胶囊型修复剂(如环氧树脂),在裂缝处自动释放修复剂,形成粘结层,使混凝土结构寿命延长至100年,减少后期维护成本。

结束语

混凝土结构施工工艺的优化与创新是推动土木工程高质量发展的关键。通过科学选材、精准配比、智能化模板支撑及精细化浇筑养护,可显著提升结构性能与施工效率。同时,融入物联网监测、3D打印等新技术,实现了施工过程的可视化管理与异形结构的精准成型。未来,随着低碳材料与自修复技术的普及,混凝土施工将向更环保、耐久的方向迈进。行业需持续探索工艺革新,强化全生命周期质量控制,以适应超高层、大跨度等复杂工程需求,为可持续城市建设奠定坚实基础。

参考文献

- [1]刘晓远.浅谈土木工程建筑中混凝土结构的施工技术[J].中国住宅设施,2024,(11):130-132.
- [2]李自.土木工程建筑中混凝土结构的施工技术探讨[J].四川建材,2024,(07):125-127.
- [3]牟青贺,张婷.土木工程建筑中的混凝土结构施工技术[J].新城建科技,2024,(05):103-105.
- [4]尚同悦.土木工程建筑中混凝土结构的施工工艺分析[J].价值工程,2025,(02):24-26.