

市政道路与桥梁工程中高性能混凝土泵送施工技术研究

文 / 李小青 梅州市市政建设集团有限公司

摘要：随着我国城市化进程的加速，市政道路与桥梁工程作为城市交通网络的核心组成部分，其建设规模与技术要求不断提升。高性能混凝土凭借优异的强度、耐久性及工作性能，在大跨度桥梁、高填方道路等市政工程中应用日益广泛，而泵送施工技术作为实现高性能混凝土高效浇筑的关键手段，直接影响工程质量与施工效率。本文以某市环城南路快速化改造工程中的跨铁路立交桥施工为背景，系统阐述市政工程中高性能混凝土的原材料选型、配合比设计、搅拌控制、泵送设备选配、输送管布置及现场泵送作业等核心技术要点，为同类市政道路与桥梁工程提供实践参考。

关键词：市政；道路与桥梁；高性能混凝土；泵送施工

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.23.056

引言

当前工程建设对材料性能与施工工艺的要求不断提高，兼具力学稳定性与施工适应性的高性能混凝土成为关键材料。然而，高性能混凝土的特性使其浇筑作业对施工技术提出更高要求，泵送施工作为核心环节，其技术应用效果直接决定工程能否顺利推进。面对复杂工程场景下的泵送难题，亟需通过技术研究突破现有瓶颈，为行业提供更具针对性的施工解决方案。

一、项目概况

某市环城南路快速化改造工程是当地“六横六纵”交通网重要部分，西起环城西路交叉口，东至环城东

路互通立交，全长6.8km，含道路、桥梁等子项目。核心节点跨铁路立交桥，全长520m，为(40+60+120+60+40)m五跨连续梁，主梁是单箱三室预应力箱梁，宽34m。工程用C50高性能混凝土约1.2万m³（主梁、墩柱），C40混凝土约0.8万m³（桥台、基础）。因跨铁路，施工窗口期仅每日0:00-4:00，需高空泵送（最大高度38m、水平距离180m），且对混凝土可泵性等要求极高。

二、高性能混凝土原材料的技术要求

项目中各原材料具体技术要求及控制指标如下表1所示，关键品类的技术特性分析如下：

表1 高性能混凝土原材料技术要求及控制指标

原材料类别	选用品种	控制要求	工程适配性
水泥	普通硅酸盐水泥（P042.5R）	比表面积350-380m ² /kg；初凝≥150min、终凝≤300min；28d抗压≥48.0MPa、抗折≥7.5MPa；氯离子≤0.02%、碱含量≤0.6%	适配预应力张拉工期（7天达设计强度80%），防钢筋锈蚀与碱-骨料反应
粗骨料	三级配碎石（5-10mm、10-20mm、20-31.5mm）	连续级配（占比25%、50%、25%）；含泥量≤1.0%、泥块≤0.5%；针片状≤8%；压碎指标≤12%	反击破碎提升粒形，降低空隙率，减少泵送阻力
细骨料	中砂（水洗除泥）	细度模数2.3-3.0；315μm筛余≥18%；含泥量≤3.0%、泥块≤1.0%；石粉（0.075mm）5%-10%	改善粘聚性与保水性，避免泌水堵管
矿物掺合料	双掺（I级F类粉煤灰+S95级矿渣粉）	粉煤灰：烧失量≤5.0%、45μm筛余≤12%、需水量比≤95%；矿渣粉：比表面积≥400m ² /kg、28d活性≥95%；总掺量≤35%	双掺降低水化热、改流动性，提升后期抗渗性
外加剂	缓凝型聚羧酸高效减水剂（液体，固含量30%）	减水率≥25%；初凝延长60-90min；1h坍落度损失≤30mm；与水泥/掺合料相容性合格	适配夏季高温与4小时施工窗口期，防浇筑中断
拌合水	市政自来水	氯离子≤0.005%；pH值6.5-8.5；无悬浮杂质、油污	防钢筋锈蚀，确保与外加剂协同稳定

三、高性能混凝土配合比设计与性能验证

（一）配合比设计原则

本工程C50高性能混凝土配合比设计以“满足强度、保证可泵性、控制水化热”为核心，遵循以下原则：水胶比：0.32-0.38（根据规范要求，C50混凝土水胶比≤0.40，本工程取中下限以提升耐久性）；胶凝材料总

量：380-420kg/m³（确保混凝土具备足够浆体量，包裹骨料，减少泵送阻力）；砂率：38%-42%（结合三级配碎石特性，通过试验确定最优砂率，平衡流动性与粘聚性）；坍落度：入泵坍落度180-220mm（适配38m泵送高度及180m水平距离，参考规范推荐值调整）；外加剂掺量：1.2%-1.5%（根据坍落度损失情况动态调整，

避免掺量过高导致混凝土离析)^[1]。

(二) 基准配合比与调整

通过正交试验设计,初步确定 C50 高性能混凝土基准配合比(每 m³ 用量),并根据混凝土拌合物性能测试结果(如坍落度保留值、压力泌水率)及力学性能验证(7d、28d 抗压强度)进行多轮调整优化,最终确定的 C50 高性能混凝土每 m³ 用量如下:水泥 260kg、I 级 F 类粉煤灰 70kg、S95 级矿渣粉 50kg、中砂 780kg、三级配碎石(5-10mm 规格 210kg、10-20mm 规格 420kg、20-31.5mm 规

格 210kg)、市政自来水 150kg、缓凝型聚羧酸高效减水剂 6.72kg,此配合比对应的水胶比为 0.35,砂率为 40%,既满足 C50 混凝土的强度与耐久性要求,又能通过合理的浆骨比与级配设计,确保混凝土具备良好的流动性与可泵性,适配本工程高空长距离泵送场景^[2]。

(三) 混凝土拌合物性能验证

为确保配合比满足现场泵送要求,对 C50 高性能混凝土拌合物进行性能测试,测试环境模拟现场施工条件(夏季高温 35℃、冬季低温 5℃),结果如表 2 所示。

表 2 C50 高性能混凝土拌合物性能测试结果

测试项目	标准要求	夏季高温(35℃)实测值	冬季低温(5℃)实测值	结论
入泵坍落度(mm)	180-220	200	190	满足要求
1h 坍落度保留值(mm)	≥ 150	175	180	满足要求,高温下损失较小
扩展度(mm)	≥ 500	550	530	流动性良好,无离析
压力泌水率(10s,%)	≤ 40	28	25	可泵性优异,不易堵管
初凝时间(min)	≥ 180	240	300	适配施工窗口期
终凝时间(min)	≤ 480	360	420	满足后续工序衔接
28d 抗压强度(MPa)	≥ 50.0	56.8	58.2	远超设计要求

从测试结果可见,该配合比在不同温度条件下均具备良好的流动性、保水性及强度发展特性,可满足本工程跨铁路立交桥的泵送施工要求。

四、混凝土搅拌与运输控制

(一) 搅拌设备与参数

本工程用 2 台 HZS180 型双卧轴强制式搅拌机(生产能力 180m³/h)集中搅拌,配全自动计量系统(水泥等计量精度 ±1%,骨料等 ±2%)。投料按骨料→水泥+粉煤灰+矿渣粉→干拌 30s→加水+减水剂→湿拌 150s 的顺序操作,总搅拌 180s^[3]。夏季气温 ≥ 30℃ 时,向骨料喷淋冷水(≤ 25℃)、用冰水搅拌(≤ 10℃),控制出机温度 ≤ 30℃;冬季气温 ≤ 5℃ 时,用热水搅拌(≤ 80℃)、骨料仓设保温层,确保出机温度 ≥ 10℃。

(二) 运输控制

混凝土从搅拌站(距现场约 5km,车程 15-20min)用 8 台 12m³ 搅拌运输车运输,途中搅拌筒保持 2-4r/min 慢速搅拌。每车到场后检测坍落度及扩展度,损失超 50mm 时,由专业人员加适量减水剂(≤ 0.2%)并搅拌 2min,合格后方可入泵;且混凝土出机到入泵总时间 ≤ 45min(夏季 ≤ 30min)。

五、混凝土泵送施工技术

(一) 泵送设备选配

工程需将混凝土泵送至 38m 高度并水平输送 180m,且 4h 内连续浇筑不少于 80m³,据此配置两台

HBT90.22.375RS 拖式混凝土泵,一用一备。单台泵理论输出 90m³/h,最大泵压 22MPa,已按 20% 安全系数预留,电机功率 375kW;36m 布料机覆盖整个浇筑面。现场另备高压水枪、手动振捣棒及 10m 备用管 5 根,堵管时可立即切换并疏通。

(二) 输送管布置

输送管按“短路径、少弯头、强固定”原则布置:水平段用 Φ150mm 无缝钢管沿施工便道铺设,支架间距 3m、每 10m 设伸缩节;垂直段沿墩柱用 Φ150mm 高压耐磨管,每 2m 设锚环固定、底部装 90° 弯头;桥面段用 ≤ 10m 的 Φ125mm 软管;所有接口用丁腈橡胶密封圈密封并螺栓紧固,水平管最高点与垂直管顶部各设排气阀。

(三) 泵送前准备

该阶段决定泵送能否连续平稳,必须把住设备、管道与混凝土三道关口。设备环节先令拖泵空转五分钟,确认电机运行平稳、油泵压力正常、液压油温适中,并试反泵,以便堵管时及时回抽、防止混凝土滞留凝固^[4]。润滑管道时,按水灰比 2:1 配制约 2m³ 水泥浆,泵送后在管壁形成完整润滑膜,降低混凝土与管壁摩擦,避免压力突升或堵管。首车混凝土到场即测坍落度、扩展度与含气量,含气量控制在 3%-5% 以提高抗冻性,三项指标均达标方可入泵,从源头排除隐患。

(四) 泵送过程控制

该阶段需在效率与安全之间持续权衡,通过多维度

动态调控，重点把控速度、压力、布料及间歇处理。泵送遵循“先慢后快”原则：初速 3 - 5m³/h，待管道充满混凝土后逐级升至 15 - 20m³/h，既防止效率过低，又抑制管道振动与拌合物离析。压力须实时监控，正常区间 12 - 18MPa；一旦骤升至 22MPa 上限，立即停泵并反泵，反向输送 3 - 5m 后排查堵点。布料时，操作员与指挥保持即时通讯，按“分层、对称”方式由跨中向两端推进，主梁单层厚度严格控制在 30cm，避免局部堆料和离析^[5]。若泵送中断，每 5min 交替正反泵各 30s；若停顿超过 30min，必须清洗管道（下图 1 展示了桥梁混凝土泵送施工）。

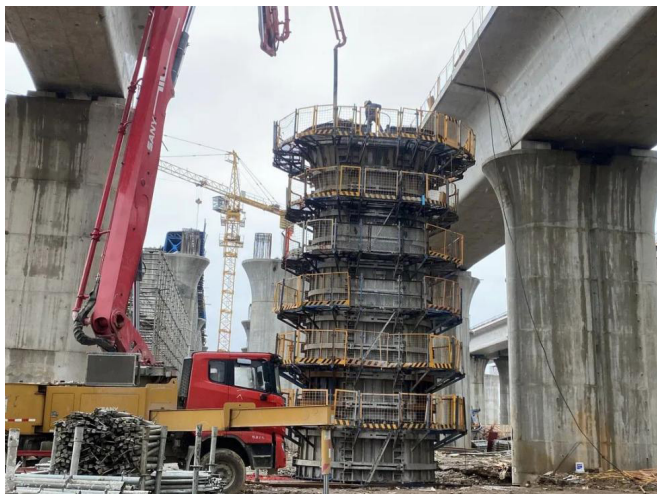


图 1 桥梁混凝土泵送施工图

（五）泵送后处理

收尾阶段需同步完成管道清洁、设备养护与废料处置，形成闭环。混凝土初凝后立即启动管道清洗：先用高压水冲掉残留浆体，再塞入略大于内径的海绵球往复清壁，确保无积料，为下次作业提供洁净通道。设备侧重点清理拖泵料斗黏结混凝土，逐件检查活塞磨损及液压密封，更换失效零件，并对运动副补油，降低磨耗以延长服役周期。环保方面，将清洗废水与废弃混凝土汇入沉淀池，废水经静置后回用，固化块体破碎后用作路基填料，既杜绝污染又回收资源，实现质量与环保双赢。

六、施工质量检测与验收

（一）施工过程检测：实时把控质量，筑牢施工根基

施工过程检测是保障混凝土泵送质量的关键环节，需从性能、参数、外观三方面同步推进。混凝土性能检测需严格按频次执行，每浇筑 50m³ 混凝土，制作 3 组 150mm×150mm×150mm 标准养护试块，分别检测 7d、14d、28d 抗压强度，同时制作 1 组同条件养护试块，为预应力张拉时间提供精准依据。泵送参数记录需安排专人负责，详细记录泵送压力、速度、浇筑量及中断时间，

形成可追溯的《混凝土泵送施工日志》，便于后续质量复盘。外观质量检查需在浇筑完成后及时开展，重点排查主梁表面是否存在裂缝、蜂窝、麻面等缺陷，轻微缺陷用同配合比水泥砂浆修补，严重缺陷立即上报并制定专项处理方案，确保过程质量可控^[6]。

（二）实体质量检测：第三方核验，确保结构达标

桥梁主体结构完工后，业主委托独立第三方对实体质量做一次系统性体检，重点锁定强度、几何尺寸、抗渗与裂缝四项指标。混凝土强度先回弹、后钻芯，双法互校：主梁 C50 实测平均 57.2MPa，最低值 52.5MPa，合格率 100%，富余幅度明显高于设计基准；尺寸复核显示，主梁轴线偏差控制在 5mm 以内，标高误差不超过 3mm，精度满足规范要求；耐久性方面，墩柱芯样抗渗试验结果 ≥ P8，达到设计预期；裂缝扫描仪走遍梁面，最大缝宽 0.15mm，未见有害裂缝，综合判定实体质量一次达标。

结语

本工程通过把控高性能混凝土原材料选型、配合比优化等关键环节，成功完成跨铁路立交桥 C50 高性能混凝土高空长距离泵送，无堵管离析问题，实体质量达标，积累了宝贵经验。实践表明，市政工程需关注原材料适配性、配合比动态调整、设备管道管理及现场协同管理。未来，随着市政工程向大跨度发展，需结合智能化手段提升施工效率与质量，为城市基础设施建设提供更强技术支持。

参考文献

- [1] 赵永龙. 高层建筑全机制砂高性能混凝土制备及泵送施工技术要点 [J]. 上海建材, 2025, (03): 85-87+95.
 - [2] 何倍, 郑鹏鹏, 张乙彬, 等. 超长跨距猫道泵送机制砂高性能混凝土的制备与工程应用 [J]. 建筑材料学报, 2025, (07): 635-645.
 - [3] 刘长卿. 高性能混凝土泵送流动特性控制研究 [C]// 中国建筑学会. 2024 中国建筑学会学术年会论文集. 中铁北京工程局集团第五工程有限公司; 2024: 511-515.
 - [4] 王泽平. 高强高性能机制砂混凝土配比与超高泵送试验研究 [J]. 砖瓦, 2023, (10): 60-62+66.
 - [5] 陈军法. 大桥工程用高性能 C50 泵送混凝土配合比优化设计 [J]. 建筑技术, 2023, 54(10): 1225-1229.
 - [6] 赵科. 泵送高性能混凝土配合比设计和变形性能研究 [J]. 中国新技术新产品, 2023, (03): 78-80.
- 作者简介：李小青(1989-), 男, 广东梅州人, 汉族, 本科, 工程师, 主要研究市政路桥工程施工技术、工程管理、工程造价。