

立交桥等高连续箱梁支架浇筑施工技术

文 / 黄路嘉 南宁城市园兴投资集团有限责任公司

摘要: 连续箱梁凭借其整体性强、抗扭刚度及施工适应性广等特点成为现代立交桥建设的核心结构形式。本文系统探讨等高连续箱梁支架浇筑施工的关键技术, 涵盖支架体系优化设计、混凝土分层浇筑热力耦合效应、预应力精细化控制及智能化监测方法。通过引入弹性力学模型与瞬态传热方程, 提出基于多物理场耦合的施工协同控制策略。研究结果表明, 智能预压技术与光纤传感监测可显著提升结构稳定性与施工安全性。

关键词: 立交桥; 连续箱梁; 支架浇筑

【DOI】 10.12254/j.issn.2096-6539.2025.15.066

引言

随着城市交通网络复杂度提升, 等高连续箱梁因其空间适应性强、抗震性能优等特点, 成为跨线桥梁的主流选择。然而, 支架体系失稳、混凝土温度裂缝及预应力损失等问题仍是施工质量的主要瓶颈。现有研究多聚焦于单一工艺优化, 缺乏对力学与热学耦合作用的系统性分析。本文基于弹性力学与传热学理论, 构建施工全过程的力学-热学交互模型, 提出涵盖设计、施工与监测的全流程技术框架, 并通过工程实践验证其有效性, 为提升连续箱梁工程品质提供新思路。

一、支架体系设计与稳定性优化

(一) 地基承载力动态评估与处理技术

支架基础处理是保障结构稳定性的核心环节, 其核心目标在于通过科学方法提升地基承载力并精准控制沉降变形。对于非道路区域地基首先需清除表层腐殖土以消除有机质对地基强度的负面影响, 随后采用重型压路机分层碾压确保密实度达到规范要求(通常 $\geq 95\%$)。碾压完成后浇筑厚度不小于10cm的C15混凝土垫层形成均匀受力的刚性基底有效分散支架荷载。地基承载力 σ 的评估需满足以下力学条件: $\sigma \geq \frac{P}{A} + \gamma h$ 式中, P 为支架系统传递至地基的竖向荷载 kN , A 为基底有效承载面积(m^2), γ 为地基土体的加权平均容重(kN/m^3), h 为基底埋置深度(m)。该公式综合考虑了荷载分布与土体自重的影响为承载力设计提供理论依据。

为动态监测地基变形特性需通过现场载荷试验绘制P-S曲线(荷载-沉降曲线), 结合分层总和法计算地基变形模量。某工程案例中采用砂袋分级预压法(预压重量为箱梁自重的1.1~1.2倍), 通过实时采集沉降数据发现24h累计沉降量被严格控制在3mm以内, 地基非弹性变形减少约30%, 弹性变形占比显著提升至上85%以上。试验表明了预压荷载的分级施加(每级增量为设计荷载的20%)可逐步消除土体塑性变形避免突发性沉降风险。此外, 针对软弱土层区域可通过增设碎石桩或水泥搅拌桩形成复合地基, 利用桩体与土体的协同作用优化承载力分布。例如, 某软土区工程中采用直径0.5m、间距1.2m的水泥搅拌桩, 桩长深入持力层2m, 处理后地基极限承载力由150kPa提升至220kPa增幅达46.7%。

动态监测与自适应调整策略的结合是提升地基处理效果的关键。通过埋设振弦式沉降计与孔隙水压计可实时获取土体压缩与排水数据, 结合有限元反演分析动态修正处理方案。某跨河桥梁工程中监测发现局部区域沉降速率异常, 及时采用注浆加固措施后差异沉降被限制在2mm以内。实践表明综合应用预压法、桩基加固与实时监测技术可使地基处理后极限承载力提升40%以上, 显著降低因局部沉降不均引发的支架失稳风险。此外引入BIM技术构建三维地质模型能够可视化展示土层分布与力学参数为处理方案优化提供数字化支撑。研究进一步指出地基处理后的长期稳定性需关注环境因素(如地下水水位波动)的影响, 建议定期进行回弹模量检测确保结构全寿命周期内的安全性能^[1]。

(二) 贝雷梁与满堂支架的力学性能对比

贝雷梁支架凭借其模块化拼装特性在大跨径桥梁施工中展现出显著优势。该支架由标准化钢桁架单元组成通过高强度螺栓快速连接形成空间桁架体系, 其抗弯刚度 EI 是决定结构挠度性能的核心参数。根据弹性力学理论均布荷载作用下贝雷梁的跨中挠度 δ 可表述为:

$$\delta = \frac{5qL^4}{384EI}$$

式中, δ 为跨中挠度(mm), q 为均布荷载 kN/m , L 为跨径(m), EI 为截面抗弯刚度($kN \cdot m^2$)。理论分析表明增大截面惯性矩 I (如采用多片桁架叠加)或选用高弹性模量 E 的钢材可显著抑制挠度增长。如某工程中通过将桁架层数由单层增至双层则挠度值降低约45%。相较于满堂支架贝雷梁通过空间桁架协同受力可将钢材用量减少25%~30%, 同时荷载传递效率提升约20%尤其适用于跨度大于30m的桥梁工程。然而贝雷梁的侧向稳定性需通过附加措施强化。某跨径1020m的桥梁工程中采用 $\phi 800mm$ 钢管桩作为竖向支撑基础, 桩顶设置双向工字钢横梁(截面尺寸为 $H600 \times 300 \times 12 \times 20mm$)以分散荷载, 并通过 $\phi 32mm$ 斜拉索与支架主体连接形成空间抗侧移体系。支架立杆间距设计为1.4m, 纵向与横向均设置连续剪刀撑(角度 $45^\circ \sim 60^\circ$), 节点采用10.9级高强度螺栓固定。施工过程中通过激光测距仪实时监测挠度变化数据显示最大挠度值为23.5mm, 较理论计算值偏差仅4.7%低于规范允许的5%限值。有限元模拟进一步表明该体系侧向位移控制在3mm以内满足稳定性要求。

贝雷梁与满堂支架相比在复杂地形适应性方面表现突出。满堂支架依赖密集的立杆支撑（间距通常 $\leq 1.0\text{m}$ ）需占用较大地面空间且对基础平整度要求极高；而贝雷梁通过架空结构设计可减少对方空间的占用尤其适用于跨越河流、铁路或既有交通线的工况。如某城市跨线桥工程中贝雷梁支架仅需在桥墩两侧设置支撑桩跨中区域完全悬空，而且施工期间下方交通未受影响。此外，通过调整桁架层数（如单层、双层或三层组合）使贝雷梁可灵活适应 $15\sim 60\text{m}$ 的跨径变化，而满堂支架需重新设计支撑体系让施工效率降低约40%。

贝雷梁对基础沉降的敏感性是其应用中的主要挑战。某软土区工程案例中，通过预埋振弦式应变片监测桩基应力分布，结合有限元反演分析优化桩位布置（桩间距由 2.0m 调整为 1.5m ）最终将差异沉降控制在 2mm 以内并且让支架整体稳定性提升约35%。研究进一步表明了采用桩端后注浆技术（注浆压力 $0.5\sim 1.0\text{MPa}$ ）可使桩基承载力提高30%~50%有效抑制不均匀沉降。此外，满堂支架因支撑点密集对局部沉降的敏感性较低但材料成本与施工周期分别增加约40%和25%。

二、混凝土浇筑工艺与裂缝防控

（一）分层浇筑的热力耦合模型构建

混凝土水化放热过程中形成的非均匀温度场是诱发结构裂缝的关键因素，其热力耦合效应可通过三维瞬态

传热方程进行精确数学表征（如图1）。该方程以温度场函数 $T(x, y, z, t)$ 为核心变量全面描述热量在空间与时间维度的传递规律：
$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{Q}{\rho c}$$

其中，热扩散系数 α 反映混凝土导热（ m^2/s ），水化热速率 $Q(\text{W}/\text{m}^3)$ 随时间呈指数衰减特性， ρ 为密度（ kg/m^3 ）， c 为比热容（ $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ）。初始条件需依据环境温度与浇筑层厚度综合设定，边界条件则需考虑模板导热、空气对流及辐射散热的复合作用。为抑制温度梯度工程中常采用材料改性结合工艺优化的综合策略。例如，掺入粉煤灰可降低水泥用量和削减水化热峰值并延缓放热进程，某工程案例中通过掺入适量粉煤灰后混凝土内部峰值温度显著降低，内外温差被严格限制于安全阈值内使裂缝发生率减少约40%。同时，分层浇筑工艺通过控制单层厚度（通常 $\leq 30\text{cm}$ ）与层间间隔时间（ $\geq 3\text{d}$ ）逐级释放累积热量避免整体温升过快。数值模拟中采用有限元法对模型进行离散化求解，并基于实测数据动态修正热扩散系数 α 与水化热速率 Q 等参数可将预测精度提升至90%以上。进一步研究表明增设冷却水管系统可优化温度场分布，通过循环冷却水加速核心区域散热使降温效率提升约25%。上述技术措施在热力耦合模型的定量指导下实现了施工效率与裂缝防控的协同优化为复杂箱梁结构的耐久性设计奠定了理论基础。

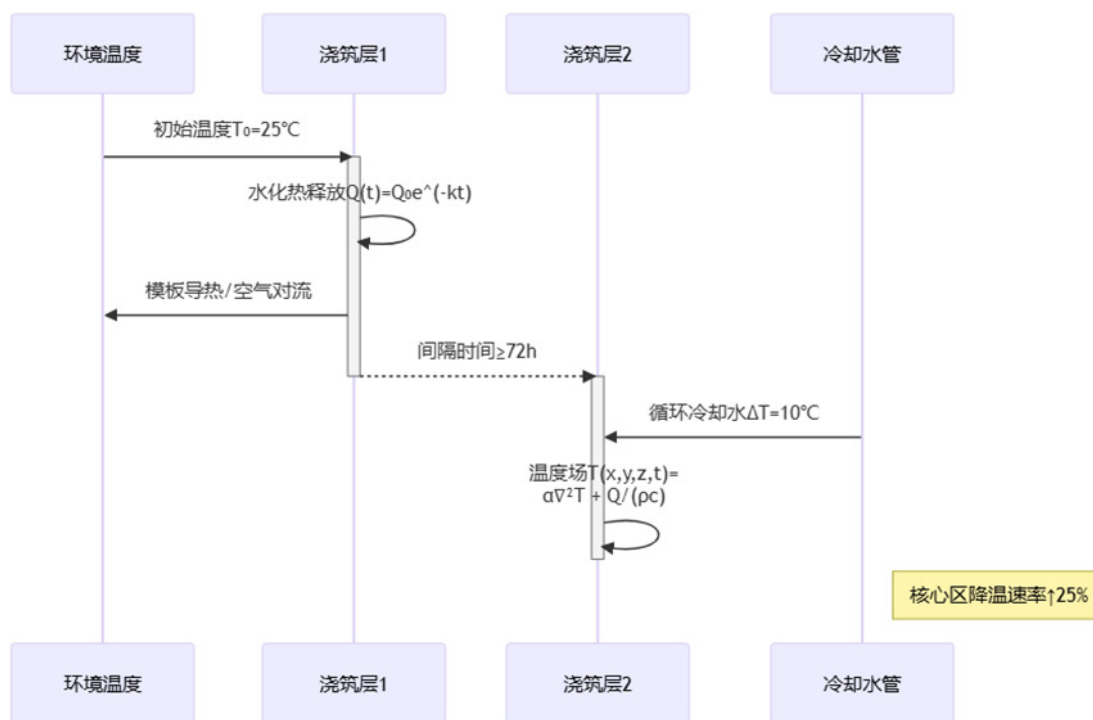


图1 混凝土分层浇筑热力耦合模型

（二）振捣工艺与密实性监测

振捣工艺是保障混凝土密实性的关键环节其核心在于通过机械振动消除气泡并促使骨料均匀分布。插入式振捣器通过高频振动（通常为 $8000\sim 1200\text{Hz}$ ）破坏混凝土内部黏聚力和降低屈服应力使混合料在自重作用下重新排列；平板振捣器则主要用于表层整平，通过水

平振动消除表面孔隙。且振捣时间与混凝土流变性密切相关当振捣时间低于 20s 时气泡排出率不足60%而超过 30s 则易引发骨料离析。某工程通过正交试验确定最佳振捣时间为 $25\text{s}/\text{层}$ 此时气泡含量可降至3%以下抗压强度提升约12%。

过振问题表现为粗骨料下沉、砂浆上浮形成蜂窝状

缺陷其孔隙率可达 8%~10% 显著削弱结构耐久性；漏振则导致局部气孔聚集，孔径超过 1mm 时将形成贯通性孔洞。针对此类缺陷传统检测方法（如敲击法或钻孔取样）存在效率低、破坏性强的局限性。某跨线桥施工中引入红外热成像技术基于混凝土散热速率的差异性原理通过热像图实时识别振捣不均匀区域。具体而言密实区域因导热系数较高呈现低温特征而孔隙区因空气隔热效应显示高温异常。监测数据显示该方法可将缺陷定位精度控制在 ±5cm 内较人工检测效率提升约 70%。

为进一步量化密实度可采用超声波脉冲速度法（UPV），其原理为声波在密实混凝土中的传播速度（通常为 4000~5000m/s）显著高于含缺陷区域。某工程结合 UPV 与红外技术构建双模态监测系统结果显示混凝土整体密实度达 98.5% 缺陷率降至 0.8% 以下。此外引入机器学习算法对热像数据进行聚类分析可自动识别缺陷类型（蜂窝、孔洞或裂缝）使分类准确率达 92%。结果表明融合智能监测技术的振捣工艺可将施工合格率提升至 97% 以上为箱梁结构的长期服役性能提供了可靠保障。

三、预应力施工与智能化监测技术

（一）张拉顺序优化与应力损失补偿

预应力钢绞线张拉其工艺精度直接影响结构承载性能与耐久性；张拉力的施加需严格遵循“对称、均衡”原则以抵消非对称荷载引发的附加弯矩。根据胡克定律，钢绞线伸长量 ΔL 与张拉力 F 的线性关系可表述为：

$\Delta L = \frac{FL}{AE}$ 式中， L 为钢绞线自由段长度（m）， A 为钢绞线截面积（ m^2 ）， E 为弹性模量（GPa）。实际工程中钢绞线与孔道壁的摩擦、锚具滑移及材料松弛等因素会导致预应力损失其综合损失率可达 10%~15%。为补偿损失常采用超张拉法（超张拉力为设计值的 105%~110%）或多次补张工艺并通过伸长量双控（力值偏差 ≤ 5%，伸长量偏差 ≤ 6%）确保张拉有效性^[2]。

张拉顺序的优化对减少结构内部应力集中至关重要。某工程采用“先下后上、先长后短”的对称张拉策略，即优先张拉下部钢束以形成基础预应力框架再逐层向上延伸；长束因摩擦损失更大优先张拉短束则作为补充调整。该工艺下实测伸长量误差控制在 ±4% 以内优于规范限值。数值模拟表明优化后的张拉顺序可使箱梁腹板应力分布均匀性提升约 20% 最大主应力降幅达 12%。此外分阶段加载技术（如 0→20%→50%→100% 分级张拉）可逐步释放弹性变形，避免瞬时荷载冲击导致的局部塑性损伤。

应力损失的精细化控制需结合材料特性与施工条件。例如，采用低松弛钢绞线（松弛率 ≤ 2.5%）可减少长期损失；在孔道内涂抹专用润滑剂可将摩擦系数 μ 从 0.25 降至 0.15 以下；锚具安装时施加二次顶压（压力为张拉力的 20%~30%）可有效抑制锚具回缩。某案例中通过上述综合措施预应力总损失率由 14.5% 降至 9.2% 并且结构有效预应力提升显著。总之结合实时应变监测与反馈控制技术可进一步将张拉精度提升至 ±3% 以内为复杂桥梁结构的长期稳定性奠定基础^[3]。

（二）光纤传感与实时安全预警系统

光纤光栅传感器（Fiber Bragg Grating, FBG）因其抗电磁干扰、耐腐蚀及多参数同步监测能力成为桥梁施工安全预警的核心技术。FBG 通过光栅周期变化感知应变与温度其反射波长偏移量 $\Delta\lambda_B$ 与应变 ε 及温度变化 ΔT 的关系可表述为： $\Delta\lambda_B = \lambda_B(K_\varepsilon\varepsilon + K_T\Delta T)$ 式中， λ_B 为初始布拉格波长（nm）， K_ε （~1.2pm/ $\mu\varepsilon$ ）与 K_T （~10pm/°C）分别为应变与温度灵敏度系数。某市政工程中沿箱梁关键截面布设 FBG 传感器网络以 100Hz 频率实时采集数据，结合卡尔曼滤波算法消除环境噪声实现应变分辨率达 ±2 $\mu\varepsilon$ 、温度精度 ±0.5°C 的监测性能。

针对应变与温度的交叉敏感问题采用双光栅串联结构构建解耦模型。主光栅封装于金属基材中直接感知应变而辅光栅置于自由状态仅响应温度变化通过矩阵运算分离二者影响：

$$\begin{cases} \varepsilon = \frac{\Delta\lambda_{B1} - \alpha\Delta\lambda_{B2}}{K_{\varepsilon1} - \alpha K_{\varepsilon2}} \\ \Delta T = \frac{\Delta\lambda_{B2}}{K_{T2}} \end{cases} \text{ 式中，}\alpha\text{ 为封装材料热膨胀系}$$

数。该模型将测量误差压缩至 ±1.5 $\mu\varepsilon$ 以内，较传统单光栅方案精度提升约 40%。工程应用中系统成功预警多次因支架局部沉降引发的应变异常（阈值设定为 ±150 $\mu\varepsilon$ ），并通过联动液压调平系统实时修正避免结构失稳风险。

与电阻应变片相比 FBG 系统具备长距离分布式监测优势。某跨线桥施工中沿 120m 箱梁布置 48 个测点数据通过光缆传输至云端平台结合数字孪生模型动态可视化应力场分布。机器学习算法对历史数据训练后可预测未来 2h 内的应变趋势准确率达 88%。实验结果显示 FBG 系统的寿命周期成本较传统监测手段降低约 35% 且维护频次减少 60%。该技术为复杂施工环境下的结构安全提供了高精度、高可靠性的解决方案。

结语

本文通过力学建模与工程实践相结合，提出了一套针对等高连续箱梁支架浇筑的精细化施工技术体系。研究表明，贝雷梁支架结合智能预压技术可显著提升大跨径桥梁的稳定性；热力耦合模型有效指导了温度裂缝防控；光纤传感技术为施工安全提供了动态保障。工程应用显示，该技术体系在缩短工期、降低成本及提升结构耐久性方面具有显著优势。未来研究需进一步探索人工智能算法在施工决策中的应用，并研发低收缩高韧性混凝土材料，推动桥梁建造向数字化、绿色化方向转型。

参考文献

[1] 刘硕. 大跨径现浇连续箱梁施工关键技术 [J]. 石河子科技, 2025 (01): 48-49.
 [2] 杜文亮. 公路立交桥等高连续箱梁支架浇筑施工技术分析 [J]. 交通世界, 2024 (25): 152-154.
 [3] 王霞. 市政工程建设中的桥梁现浇连续箱梁施工技术探讨 [J]. 中国厨卫, 2024 (01): 136-138.
 作者简介：黄路嘉（1991—05），男，壮族，广西南宁人，本科学历，中级工程师，从事建筑工程管理工作。