

市政桥梁大体积混凝土施工技术研究

文 / 宋直 广州工程总承包集团有限公司

摘要：市政桥梁大体积混凝土施工中，水化热引发的温度裂缝是影响结构耐久性的核心问题之一。本文结合某跨河桥梁主墩承台（36m×20m×7.5m，C40混凝土）工程实例，通过有限元模拟与实测数据比对，分析大体积混凝土水化热温度分布规律，研究冷却水管布置对降温效果的影响，提出基于参数优化的温度控制技术体系。实测表明，合理布置冷却水管最高可降低温度峰值31%；通过材料优化、分层浇筑及动态监测，可将内外温差控制在20℃以内，避免温度裂缝。为市政桥梁大体积混凝土防裂提供了实践参考。

关键词：市政桥梁；大体积混凝土；水化热；温度控制；冷却水管参数

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.24.068

引言

市政桥梁作为城市交通网络的“骨架”，其主墩承台、锚碇等结构多为大体积混凝土（最小截面≥1m）。以某城市跨河桥梁为例，主墩承台尺寸达36m×20m×7.5m，混凝土方量超5000m³，属典型大体积混凝土结构。大体积混凝土浇筑后释放大量化热，内部温度可达70℃，与其表面将形成30℃温差，易引发温度裂缝。此类裂缝不仅降低结构承载力，还可能导致钢筋锈蚀，缩短桥梁使用寿命，严重时甚至威胁公共安全。

现有研究多基于大坝混凝土提出温控措施，桥梁承台与大坝结构差异显著（如承台约束更强、分层浇筑更频繁），直接套用大坝经验易导致温控措施针对性不足。本文依托跨河桥梁主墩承台工程，通过有限元模拟与现场实测，探索水化热温度场分布规律，优化冷却水管参数对降温效果的影响，为同类大混凝土工程施工提供技术支撑。

一、大体积混凝土水化热温度场特性

（一）温度场模拟方法与边界条件

建立承台三维有限元模型，模型包含封底混凝土（1m厚C20）、一级承台（分2层浇筑，总厚5m）、二级承台（2.5m厚C40）。为简化计算，假设封底混凝土与地基接触界面为绝热边界（因混凝土导热系数低，热量向地基扩散可忽略）；承台表面与空气接触部分施加第三类边界条件（对流换热系数取10W/(m²·K)，环境温度15℃）。

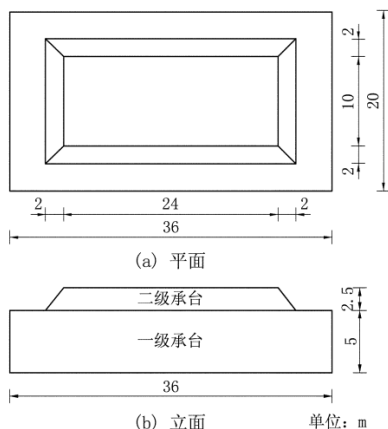


图1 承台布置及模型

混凝土热力学参数基于实测数据确定：导热系数2.3W/(m·K)，比热容960J/(kg·K)，密度2400kg/m³。水化热释放速率采用指数函数模型：

$$Q(t) = Q_0(1 - e^{-mt})$$

式中：Q₀为最终绝热温升（C40混凝土取60℃），m为水化热释放速率系数（取0.35d⁻¹），t为龄期（d）。

（二）温度场分布规律（结合实测与模拟）

通过模拟与现场监测（埋设电子测温仪，精度±0.3℃），得出核心规律如下：

1. 温升阶段（0～3d）

混凝土浇筑后，水泥（C₃S、C₃A）快速水化，释放大热量。因混凝土导热系数低（约2.3W/(m·K)），内部热量难以扩散，温度急剧上升。一级承台中心测点（A点）入模温度25℃，28h达峰值65℃（模拟值），实测峰值63℃（误差3%），温升速率约14℃/d。此阶段，表面测点（B点）因与空气对流换热，温度仅升至43℃（模拟值），内外温差达22℃。

2. 温降阶段（3～14d）

水化热释放速率减缓（τ>3d）时，Q(τ)达最终值的85%，内部热量通过表面（占比60%）和冷却水管（占比40%）扩散，温度缓慢下降。A点3d后日均降温1.5℃，14d时温度降至43℃（模拟值），实测41℃；B点因表面散热快，14d时温度降至27℃，内外温差缩小至14℃。

3. 稳定阶段 (14d 后)

混凝土水化反应基本完成, 内部温度趋近环境温度 (15℃), 表面温度随昼夜温差波动 (±5℃)。30d 时, A 点温度 18℃ (模拟值), B 点 16℃, 内外温差 ≤ 2℃, 混凝土进入稳定状态。

4. 二次温升现象

一级承台第一浇筑层 (厚 2m) 在 168h (7d) 时出现微幅温升 (约 2℃), 源于第二浇筑层 (厚 3m) 水化热传导。因两层间隔 7d (第一浇筑层已降温至 35℃), 且层间界面涂覆界面剂 (导热系数 0.8W/(m·K)), 热量传递有限, 二次温升未对结构产生不利影响。

(三) 冷却水管的降温效果量化

对比布置与不布置冷却水管的温度场, 发现冷却水管显著改善了温度分布:

温度峰值降低: 一级承台中心 (A 点) 峰值由 65℃ 降至 60℃ (降低 7.8%), 二级承台中心 (E 点) 峰值由 72℃ 降至 50℃ (降低 30.7%); 实测 A 点峰值 63℃ → 58℃ (降低 7.9%), E 点 70℃ → 48℃ (降低 31.4%), 模拟与实测吻合良好^[1]

总热量减少: 30d 内, 布置冷却水管的承台总热量 (积分温度-时间曲线) 为不布置时的 48% (模拟值), 实测为 52%, 验证了冷却水管的高效散热能力。

降温速率提升: 不布置水管时, A 点 3~14d 日均降温 0.8℃; 布置后日均降温 1.5℃, 速率提升 87.5%, 有效缩短了高温持续时间, 降低了温度应力累积风险。

二、大体积混凝土施工关键技术优化

(一) 材料与配合比优化 (基于水化热控制)

1. 水泥与掺合料选择

水泥是水化热的主要来源, C₃A (铝酸三钙) 含量每增加 1%, 7 天水化热约提高 5J/g。本工程选用 425 号矿渣硅酸盐水泥 (C₃A 含量 6%, 7 天水化热 240J/g), 较普通硅酸盐水泥 (C₃A 含量 8%, 水化热 280J/g) 降低 14%^[2]。

粉煤灰 (II 级, 需水量比 95%) 通过“三效应”降低水化热^[3]:

形态效应: 球形颗粒填充孔隙, 减少胶凝材料用量 (掺量 25% 时, 水泥用量减少 85kg/m³);

2. 外加剂与骨料优化

复配缓凝高效减水剂 (PJ-41 型, 减水率 25%) 可延缓水泥水化, 使水化热释放峰值推迟至 30h 后 (未掺时为 20h), 避免早期温升过急^[4]。骨料选用 5~31.5mm 连续级配碎石 (含泥量 0.8%, 压碎值 8%), 较单一级配骨料减少胶凝材料用量 15kg/m³ (空隙率降低 5%)^[5]。

优化后 C40 混凝土配合比如表 1 所示, 7d 绝热温升 58℃ (未优化时 65℃), 28d 抗压强度 45MPa (设计

值 40MPa), 抗裂性 (极限拉伸值) 由 1.2×10⁻⁴ 提高至 1.5×10⁻⁴^[6]。

表 1 优化后 C40 大体积混凝土配合比 (kg/m³)

材料	水泥	粉煤灰	砂	碎石	水	外加剂
用量	340	85	573	1219	200	PJ-41 (0.8%)

(二) 冷却水管参数优化

1. 质量流率的影响

模拟质量流率 800~1200kg/h (管径 20mm, 水温 15℃) 对 E 点温度场的影响^[7]:

升温阶段 (0~3d): 质量流率变化对温升速率影响极小 (峰值差异 ≤ 2℃), 因水化热释放速率远大于冷却水带走热量的速率;

降温阶段 (3~14d): 质量流率 1200kg/h 时, E 点 30d 总热量较 800kg/h 减少 7.4% (模拟值), 降温速率提高 0.3℃/d (实测 0.25℃/d);

工程建议: 兼顾经济性 (1200kg/h 需增加水泵功率 20%) 与降温效果, 推荐质量流率 1000~1200kg/h。

2. 初始温度的影响

模拟水温 5~15℃ (质量流率 1000kg/h, 管径 20mm) 对 A 点温度场的影响^[8]:

冷却速率: 水温 15℃→5℃ 时, A 点 30d 总热量减少 21.3% (模拟值), 但后期 (14d 后) 降温速率提升幅度趋缓 (由 1.5℃/d → 1.6℃/d);

温差风险: 水温 5℃ 时, 水管附近混凝土 (距管 10cm) 与中心温差达 28℃ (模拟值), 超过规范允许的 25℃, 易引发局部拉应力;

工程建议: 冷却水优先采用环境水 (15℃), 避免额外制冷成本 (制冷至 5℃ 需增加成本 30 元/m³), 且温差可控 (≤ 22℃)。

3. 管径与间距的影响

对比管径 20mm 与 25mm (质量流率 1000kg/h, 水温 15℃), 25mm 管径因过流面积增大 (流量增加 56%), E 点峰值降低 5℃ (模拟值), 但水管成本增加 25%。综合考虑, 推荐 20mm 管径 (兼顾成本与降温效果)^[9]。

水管平面间距 1.0m 与 1.5m: 间距 1.0m 时, E 点峰值降低 8℃ (模拟值), 但水管用量增加 50%; 间距 1.5m 时, 峰值仅降低 3℃。结合规范 (《大体积混凝土施工标准》GB 51449-2019), 推荐间距 1.0m^[10]。

(三) 施工过程精细化控制

1. 分层浇筑与间歇期

一级承台分 2 层浇筑 (2m+3m), 二级承台一次浇筑 (2.5m), 层间间歇期 7d (规范要求 ≥ 5d)。实测表明,

间歇期 7d 时, 下层混凝土温度已降至 35℃ (较 5d 时低 8℃), 上层浇筑后下层二次温升仅 2℃ (\leq 规范允许的 5℃), 避免了层间温差过大 (\leq 20℃) [11]。

2. 入模温度控制

夏季施工时, 采用“三控”措施降低入模温度 [12]:

骨料降温: 砂、石堆高 4m (减少阳光直射), 覆盖遮阳网 (降低表面温度 8℃);

拌和水降温: 采用冰水拌和 (水温 5℃), 替代部分自来水 (25℃), 降低混凝土出机温度 5℃;

运输保温: 罐车包裹保温棉 (导热系数 0.04W/(m·K)), 减少运输过程温升 (每小时 \leq 1℃)。

实测入模温度 23℃ (规范 \leq 25℃), 较未控制时降低 5℃, 有效减少了初始热量积累。

3. 振捣与表面养护

采用“快插慢拔”振捣工艺 (插入式振捣棒, 直径 50mm), 振捣时间 30s/点, 确保混凝土密实度 (孔隙率 \leq 4%)。浇筑后 2h 内, 用木抹子搓平表面 (2~3 遍), 减少收缩裂缝。养护采用“蓄水+覆盖”法: 表面蓄水 10cm (水温 20℃), 覆盖双层土工布 (保水率 90%), 养护期 21d (规范 \geq 14d)。实测表面失水率 \leq 0.1kg/(m²·h) (规范 \leq 0.2kg/(m²·h)), 未出现干缩裂缝。

(四) 温度监测与动态调整

1. 监测系统布设

按“对称布点、重点覆盖”原则, 在 1/4 截面布设 24 个测点: 平面分底 (Y=1m)、中 (Y=3.5m)、顶 (Y=6m) 3 层, 每层设中心 (X=0, Z=0)、距边 1m (X=0, Z=-10)、表面下 5cm (X=0, Z=-10, Y=表面-0.05m)、表面 (X=0, Z=-10, Y=表面) 4 个测点。采用电子测温仪 (精度 \pm 0.3℃), 数据每 2h 自动上传至云端平台。

2. 动态调整策略

温差超限 ($>$ 20℃): 当 A 点与 B 点温差达 22℃ 时, 将冷却水质量流量率由 1000kg/h 提升至 1200kg/h, 24h 后温差降至 18℃;

表面骤冷: 某日环境温度骤降 (15℃ \rightarrow 5℃), 表面测点 B 点降温速率达 2.5℃/h (规范 \leq 2℃/h), 立即加盖 5cm 厚保温棉 (导热系数 0.03W/(m·K)), 48h 后降温速率降至 1.8℃/h;

二次温升预警: 一级承台第一浇筑层在 7d 时出现 2℃ 温升, 通过延长第二层冷却水管通水时间 (由 7d \rightarrow 10d), 控制温升 \leq 3℃ (规范 \leq 5℃)。

三、程应用与效果验证

某跨河桥梁主墩承台 (36m \times 20m \times 7.5m) 采用上述技术后:

温度控制: 最高温度 56℃ (设计控制 \leq 60℃), 内外温差最大 18℃ (\leq 20℃);

防裂效果: 未出现可见裂缝, 28d 抗压强度 45MPa (达标率 100%);

经济性: 冷却水管成本降低 15% (水温采用环境水, 未额外制冷)。

结语

市政桥梁大体积混凝土施工中, 水化热温度控制是防裂的核心。通过优化配合比、冷却水管参数及动态监测技术, 可有效降低温度峰值 (7%~31%), 减少总热量约 50%, 避免温度裂缝。未来可进一步结合智能监测 (如无线测温系统), 实现水化热实时预警与精准调控, 提升施工智能化水平。

参考文献

- [1] 陈开桥, 杨秀娟. 控制混凝土沉井开裂的施工控制关键技术研究 [J]. 桥梁建设, 2015, 45 (4): 113-118.
- [2] 朱伯芳. 大体积混凝土绝热温升试验新方法 [J]. 水利水电技术, 2010, 41 (3): 37-39.
- [3] 朱伯芳. 论混凝土坝的水管冷却 [J]. 水利学报, 2010, 41 (5): 505-513.
- [4] 朱为勇, 娄宗科. 大体积混凝土浇筑后温度变化的计算 [J]. 建筑技术, 2013, 44 (5): 402-404.
- [5] 刘森. 基于差分法计算混凝土水化热温升 [J]. 黑龙江水利科技, 2015, 43 (12): 21-22.
- [6] 邓寿昌. 非大体积混凝土冬季施工温度场计算理论 (俄) Б. Г. С к р а м т а е в 公式及其诱导公式的分析与随想 [J]. 惠州学院学报 (自然科学版), 2011, 31 (6): 5-12.
- [7] 吴乾坤, 南飞. 基于实测数据的大体积混凝土温控分析评价 [J]. 世界桥梁, 2017, 45 (4): 74-78.
- [8] 戴公连, 唐宇, 刘勇, 等. 高铁圆端形空心高墩日照温度场数值分析 [J]. 桥梁建设, 2016, 46 (6): 67-72.
- [9] 张永健, 李鸥. 洞庭湖大桥承台大体积混凝土温控试验研究 [J]. 桥梁建设, 2016, 46 (4): 45-50.
- [10] 杨秀娟. 宜昌庙嘴长江大桥大江桥桥塔实心段混凝土温度控制技术 [J]. 世界桥梁, 2016, 44 (1): 30-34.
- [11] 秦煜, 刘来君, 张柳煜, 等. 混凝土箱梁水化热温度徐变应变分析 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2012, 43 (8): 3250-3256.
- [12] 汪建群, 方志, 刘杰. 大跨预应力混凝土箱梁水化热测试与分析 [J]. 桥梁建设, 2016, 46 (5): 29-34.