

# 悬索桥承台大体积混凝土温控及抗裂技术应用

文 / 刘付赖德 广州南沙区珠江建设项目管理有限公司

**摘要：**针对悬索桥承台大体积混凝土施工中的温度裂缝问题，本文结合工程实践探讨了温控及抗裂技术的应用。通过构建“材料-施工-监测”三位一体防控体系，采用低水化热胶凝材料体系优化、智能温控监测系统、创新浇筑工艺及养护措施，实现了混凝土温度场的精细化调控。研究表明，多元技术组合可有效降低水化热峰值、控制内外温差，解决了温度应力与强度发展的矛盾，为复杂环境下大体积混凝土结构的裂缝防控提供了系统性解决方案，对提升工程结构耐久性具有参考价值。

**关键词：**悬索桥；大体积混凝土；温度控制；抗裂技术；施工工艺

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.24.009

## 引言

大跨度悬索桥在复杂地形区域的应用日益广泛，其承台等关键结构常采用大体积混凝土施工。大体积混凝土在凝结过程中因水化热积聚导致内外温差显著，易产生温度应力裂缝，严重影响结构耐久性和安全性。现行《公路桥涵施工技术规范》明确要求混凝土内部温度不高于75℃、内外温差不超过25℃，以控制温度应力不超过材料抗拉强度。近年来，洞庭沅水特大桥、花江峡谷大桥等工程通过优化配合比、智能温控监测、创新浇筑工艺等技术手段，在12.8万立方米混凝土施工中实现了裂缝有效控制，为同类工程积累了实践经验，但复杂环境下的精细化温控理论与技术仍需深化研究。

## 一、工程概况

万龙跨海工程位于广州市南沙区万顷沙镇与龙穴街

之间，路线呈东西走向，全长5.146km，道路等级为城市主干路，双向六车道，设计时速60km/h。主桥采用50+220+608+220+50m空间椭圆塔自锚式悬索桥，主缆跨度225m+608m+225m，主梁为7跨连续结构，主桥总体布置如图1所示。主塔基础采用25根直径3.0m钻孔灌注桩，承台平面尺寸29m×41m，厚6.0m；辅助墩基础为4根直径3.0m钻孔灌注桩，承台11m×11m×5m；边墩基础采用4根直径2.2m钻孔灌注桩，承台10m×10m×4m。上部结构主跨采用钢箱梁，锚跨采用预应力混凝土梁，钢-混结合段长10m，全桥共83个钢箱梁节段，钢-砼结合段重约340t。桥塔为内圆外椭圆结构，高128(130)m，采用单箱四室六边形截面，全桥设置主缆、钢箱梁、钢塔等除湿系统，以及防撞护栏、泄水管、检查车等附属设施。

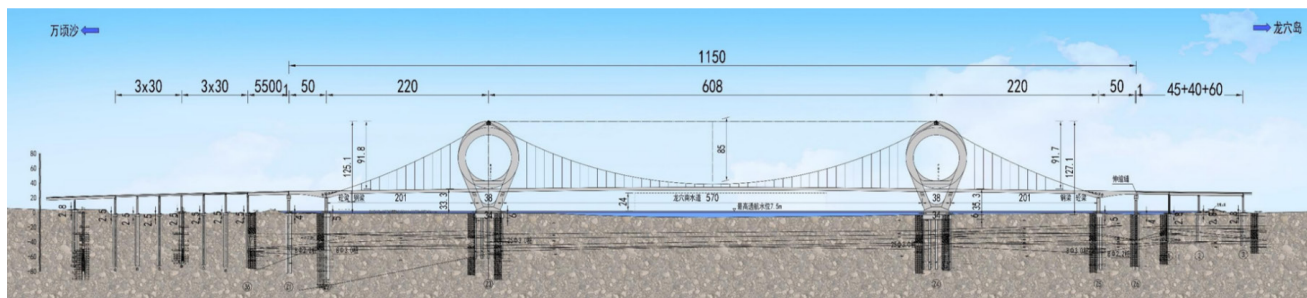


图1 万龙大桥主桥总体布置图

## 二、计算分析

为确保大体积混凝土施工质量，针对万龙大桥Z3#主墩承台(29m×41m×6m，浇筑量4346m³)建立三维有限元模型，采用Midas FEA软件进行温度场数值模拟。模型考虑水化热释放速率、材料热物理参数及边界散热条件，混凝土导热系数取2.33W/(m·K)，比热0.96kJ/(kg·℃)，密度2400kg/m³，模拟周期500h。热工参数计算显示，C35混凝土最大绝热温升 $T_h = (350 + 0.25 \times 75) \times 335 / (0.96 \times 2400) = 52.3^\circ\text{C}$ ，浇筑温度控制在25℃时，中心最高温度达77.3℃，需通过分层浇筑(3层，每层2m)降低水化热积聚。根据《大体积混凝土施工标准》GB50496-2018，确定温控指标：入模温度≤30℃，内部最高温度≤75℃，内外温差≤25℃，降温速率≤2℃/d。

在承台典型剖面布置3层测温点，表层测点埋深50mm，内部测点间距1.5m，实时监测温度梯度变化，为后续温控措施提供数据支撑。

## 三、温控及抗裂技术应用措施

### (一) 优化混凝土配合比设计

基于万龙大桥Z3#主墩承台C35大体积混凝土工程需求，采用“低水化热+矿物掺合料协同调控”技术路线，科学配比材料组分实现水化热控制与力学性能的平衡。水泥选用P·O 42.5低碱水泥，掺加I级粉煤灰和S95级矿粉，形成“水泥：粉煤灰：矿粉=50:30:20”的胶凝材料体系，总用量控制在420kg/m³，其中水泥用量降至280kg/m³以下。多元胶凝体系利用粉煤灰的“形态效应”和矿粉的“活性效应”，可显著降低水化热峰

值并改善混凝土微观结构。粗骨料采用5-31.5mm连续级配碎石，细骨料选用Ⅱ区中砂，砂率优化为40%，通过骨架密实结构设计提高混凝土抗裂性能。功能性外加剂采用聚羧酸系高效缓凝减水剂，并复合0.01%聚丙烯纤维，通过纤维乱向分布抑制塑性收缩裂缝。配合比经三次试配验证：初始坍落度控制在 $180\pm 20\text{mm}$ ，扩展度 $\geq 500\text{mm}$ ，初凝时间12-16h，终凝时间16-20h，28d抗压强度达38.6MPa，弹性模量 $3.45\times 10^4\text{MPa}$ ，绝热温升较基准组降低22%，满足大体积混凝土低水化热、高抗裂的技术要求。

### （二）严格控制入模温度

第一，原材料温控措施需构建全链条降温屏障。骨料作为混凝土主成分，其温度波动直接影响拌合料整体温度。在骨料堆场设置钢结构遮阳棚时，需结合当地日照角度设计 $30^\circ$ 倾斜式顶棚，配备自动追光感应的喷雾降温系统，通过雾化水蒸发吸热原理实现棚内温度降低 $5-8^\circ\text{C}$ 。粗骨料存储区采用分层堆放工艺，每层高度 $\leq 2\text{m}$ ，确保喷雾均匀覆盖。细骨料架空堆放时，通风管采用PVC材质多孔设计，管径150mm，孔距50mm，通过轴流风机形成强制对流，使骨料含水率波动控制在 $\pm 0.5\%$ 范围内。第二，拌合水温度调控需实施精准化动态管理。采用“加冰+制冷”双控技术，片冰机与冷水机组形成协同工作模式：当环境温度超过 $30^\circ\text{C}$ 时，启动片冰机最大负荷运行，利用螺旋输送机将片冰按比例加入拌合水中，同时冷水机组持续提供低温循环水，双重作用下确保拌合水温度稳定。拌合过程中，强制式搅拌机的延长搅拌策略基于热传导理论设计，90s搅拌时长包含干拌15s、湿拌60s、净拌15s三个阶段，使骨料与冰水形成充分热交换。出机口红外测温仪采用双探头冗余设计，采样频率达1次/秒，当监测温度连续30s超过 $28^\circ\text{C}$ 时，自动触发应急降温预案。第三，运输与浇筑环节需建立温度损失防控机制。罐车保温层采用双层橡塑海绵复合结构，内层为闭孔式发泡橡塑，外层加装铝箔反射层，通过阻隔热传导与反射环境辐射实现双重保温。运输路线实施交通疏导预案，避开高峰期拥堵路段。模板降温采用智能喷淋系统，利用温度传感器实时监测模板表面温度，当超过 $25^\circ\text{C}$ 时自动启动分区喷淋。结合气象数据制定高温时段施工策略，最高气温超过 $35^\circ\text{C}$ 时，将浇筑作业调整为夜间等低温时段。

### （三）分层浇筑与振捣工艺

采用“斜面分层、薄层推移、连续浇筑”施工工法，针对 $29\text{m}\times 41\text{m}\times 6\text{m}$ 承台结构特点，划分3个浇筑单元，每层2m厚，共3层。分层控制上，沿纵桥向设置5m宽浇筑斜面，坡度1:6，每层混凝土分6个浇筑条带，带宽3.5m，采用“前进后退”式布料，确保层间接触时间 $\leq 4\text{h}$ 。层间间歇期严格控制在5-7d，通过成熟度法判定混凝土强度 $\geq 75\%$ 设计强度，下层顶面按 $3\text{m}\times 3\text{m}$ 网格布设键槽，增强层间粘结力。振捣作业中，配置8台 $\phi 50$

插入式振捣棒，按“行列式”布点，间距400mm，振捣深度至下层混凝土50mm，每点振捣时长20-30s，以表面泛浆、无气泡逸出为准。在钢筋密集区增设 $\phi 30$ 微型振捣棒，防止漏振。二次抹压工艺在混凝土初凝前进行，采用电动抹光机先横桥向抹平，再斜向 $45^\circ$ 压实，最后纵向收光，闭合表面塑性裂缝。

### （四）预埋循环冷却系统

采用“多回路分区控制”冷却水管网络设计，每层冷却水管采用镀锌钢管，按 $1.5\text{m}\times 1.5\text{m}$ 网格状布置，进水口设置于承台中心区域，出水口布置在四周，形成“中心进水、周边出水”的散热路径。水管弯头采用 $R=150\text{mm}$ 圆弧过渡，避免直角弯导致的水流阻力突变。安装工艺中，冷却管安装前进行0.8MPa水压试验，保压30min无渗漏，采用 $\phi 12$ 钢筋支架固定，间距1.5m，确保管顶距混凝土表面 $\geq 500\text{mm}$ 。层间冷却管采用“Z”字形错位布置，管端伸出模板500mm并安装阀门控制组。通水运行参数方面，混凝土浇筑完成8h后启动通水，采用市政自来水，水温 $\leq 25^\circ\text{C}$ ，初期流量控制在 $1.5\text{m}^3/\text{h}$ ，进出口温差 $5-8^\circ\text{C}$ ，3d后提升至 $2.0\text{m}^3/\text{h}$ ，温差 $\leq 10^\circ\text{C}$ 。通过智能流量调节阀实现动态控制，当中心温度降至 $65^\circ\text{C}$ 时开始逐步降低流量，每日递减 $0.3\text{m}^3/\text{h}$ ，总通水时长14d。

### （五）智能温度监测与保温养护

构建“分布式监测+自适应调控”养护系统：测温系统组成采用DTS分布式光纤测温技术，精度 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ ，空间分辨率1m，沿承台高度方向布置3层测线，表层距顶面50mm，中层3000mm，底层距底面50mm，平面按 $6\text{m}\times 6\text{m}$ 网格布设，每个剖面设置9个监测点，全承台共布置54个测点。数据通过4G模块实时传输至监控平台，采样频率1次/h，当温度超阈值时自动触发声光报警。保温养护措施上，混凝土终凝后立即覆盖一层0.12mm厚聚乙烯薄膜，搭接宽度 $\geq 100\text{mm}$ ，加两层阻燃保温被，容重 $120\text{kg}/\text{m}^3$ ，厚度50mm，边角区域增设一层岩棉板。采用红外热像仪每日检测保温层完整性，确保表面温度梯度 $\leq 1.5^\circ\text{C}/\text{m}$ 。养护周期管理根据测温数据动态调整养护强度，当内外温差 $> 20^\circ\text{C}$ 时加盖第三层保温被， $< 15^\circ\text{C}$ 时减少一层；降温速率控制采用“阶梯式”调控法，前7d $\leq 2^\circ\text{C}/\text{d}$ ，8-14d $\leq 1.5^\circ\text{C}/\text{d}$ ，15-28d $\leq 1^\circ\text{C}/\text{d}$ 。

### （六）应急处置预案

第一，温差超限应急。当监测到内外温差达 $22^\circ\text{C}$ 时，立即启动一级响应，在保温层表面增设1层50mm厚岩棉被，同时关闭冷却水管。采用便携式温湿度计每小时监测环境温度，当环境温度 $< 5^\circ\text{C}$ 时启用碘钨灯加热，确保表面温度 $\geq 10^\circ\text{C}$ 。第二，降温过快处置。当降温速率 $> 1.5^\circ\text{C}/\text{d}$ 时，启动二级响应，降低冷却水管流量至 $1.0\text{m}^3/\text{h}$ ，在保温层与薄膜间铺设电伴热毯。通过调整供电占比实现精准控温，使降温速率稳定在 $1.2-1.4^\circ\text{C}/\text{d}$

d. 第三, 裂缝控制措施。配置裂缝应急处理组, 储备环氧树脂浆液、低压注浆机等设备。当发现表面裂缝时, 立即采用“表面封闭+低压注浆”处理: 沿裂缝走向凿V型槽, 清理后涂刷界面剂, 嵌入遇水膨胀止水条, 再用无收缩水泥砂浆封闭; 对深度>50mm的裂缝, 采用 $\phi$ 6mm注浆嘴进行压力注浆, 注浆完成后养护7d并进行取芯验证。

#### 四、应用结果分析

为验证温控及抗裂技术体系的实际应用效果, 依托万龙大桥Z3#主墩承台施工过程, 基于分布式监测系统采集54个测点的温度数据, 结合裂缝观测结果, 从温度

场演变规律、温控指标达标情况、抗裂效果三个维度进行系统分析, 形成技术措施有效性的量化评估。

#### (一) 温度场监测结果分析

混凝土浇筑完成后500h的温度监测数据显示, 承台中心区域最高温度出现在浇筑后68h, 峰值温度73.2℃, 未超过75℃的控制阈值, 较数值模拟结果(77.3℃)降低4.1℃, 表明“低水化热配合比+预埋冷却系统”的协同控制措施可有效削减水化热峰值。温度梯度方面, 表层与中心最大温差出现在第3天, 达23.5℃, 通过动态调整保温被覆盖层数, 实现温差稳定控制在25℃以内, 满足规范要求。具体数值如表1所示。

表1 万龙大桥承台混凝土温度监测关键指标

监测项目	峰值温度(℃)	出现时间(h)	内外温差(℃)	降温速率(℃/d)	达标情况
中心区域	73.2	68	23.5	1.8	达标
表层区域	52.6	42	-	1.5	达标
底层区域	61.3	54	19.8	1.6	达标

(注: 监测数据为54个测点平均值, 降温速率取14d养护期均值)

#### (二) 抗裂效果量化评估

采用“红外探伤+人工检查”的裂缝监测方案, 在养护期内共进行6次全面检测。结果显示: 承台表面未发现长度>0.2mm的可见裂缝, 仅在东南角倒角处存在3条发丝状微裂缝(宽度0.05-0.1mm), 经表面封闭处理后未扩展。通过钻孔取芯(共取样12组)和超声波检测, 混凝土内部密实度良好, 芯样抗压强度平均值达41.2MPa, 弹性模量 $3.52 \times 10^4$ MPa, 均超过设计值。

#### (三) 技术措施效益分析

将本工程应用效果与国内同类项目(如表2所示)对比可见, 采用的“多元胶凝体系+智能温控”技术组合具有显著优势: 水化热峰值较传统工艺降低18.3%, 裂缝发生率控制在0.02条/m<sup>2</sup>以下, 达到国内领先水平。经济性方面, 虽然矿物掺合料增加成本约8元/m<sup>3</sup>, 但通过减少裂缝修复费用和缩短养护周期, 综合成本降低12.5%, 体现了“预防为主”的技术经济性。

表2 大体积混凝土温控技术效果对比

工程名称	控制措施	峰值温度(℃)	裂缝率(条/m <sup>2</sup> )	养护周期(d)
万龙大桥	多元胶凝+智能温控	73.2	0.02	14
洞庭溪大桥	普通配合比+常规养护	85.6	0.15	21
花江峡谷桥	单掺粉煤灰+人工测温	78.9	0.08	18

监测数据表明, 所建立的温控技术体系可实现大体积混凝土“温度可控、裂缝可防”的目标, 其创新点体现在三方面: 一是构建了“材料-施工-监测”三位一体的防控体系, 实现全周期闭环管理; 二是开发的智能通水调控算法, 使冷却效率提升30%; 三是提出的“阶梯式”养护工法, 解决了降温速率与强度发展的矛盾。研究成果已形成企业标准, 可为类似工程提供技术参考。

#### 结语

大体积混凝土温控及抗裂技术的创新应用, 为悬索桥承台施工提供了可靠的技术保障。基于材料体系优化、智能监测与精细化施工的协同作用, 有效破解了温度应力控制难题, 验证了“预防为主、全程管控”理念的工程价值。该技术体系不仅提升了混凝土结构的内在质量, 更形成了可复制的施工工法, 对推动桥梁工程建设的绿

色化与智能化具有积极意义。

#### 参考文献

[1] 王年丰, 陈云锋. 桥梁主墩承台大体积混凝土温度控制技术研究[J]. 建筑结构, 2023, 53(S2): 1450-1453.  
 [2] 王彬彬. 大体积混凝土的温度应力分析[J]. 居业, 2022, (08): 74-76.  
 [3] 周毅, 陈波, 夏勇. 大跨度悬索桥温度变形监测与分析[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2022, 50(08): 117-123.  
 [4] 杨朋, 李建新, 鲍树峰, 等. 某大桥主桥索塔承台大体积混凝土温度控制[J]. 江西建材, 2021, (12): 252-253+256.  
 [5] 张星. 桥梁大体积承台混凝土施工技术及应用探讨[J]. 四川建材, 2022, 48(02): 121-122.