

公路桥梁施工中大体积混凝土温控技术研究

孙 勇

新疆北新路桥集团股份有限公司 新疆 乌鲁木齐 830000

摘 要:公路桥梁施工中,大体积混凝土因水化热积聚易产生温度应力,导致结构开裂,影响耐久性。温控技术核心在于控制内外温差(一般 $\leq 25^{\circ}\text{C}$)、降低绝热温升峰值及延缓降温速率。通过选用低热水泥、掺加粉煤灰与矿渣粉优化配合比,结合分层浇筑与冷却水管系统,配合保温保湿养护,可有效缩小温差、减少热应力。同时,利用实时温度监测与数值模拟技术,动态调整温控参数,实现裂缝风险预警与控制,保障桥梁结构安全与耐久性。

关键词:公路桥梁施工;大体积混凝土;温控技术

引言:在公路桥梁建设中,大体积混凝土应用广泛,如桥梁墩台、基础等关键部位。然而,大体积混凝土在浇筑后,水泥水化热大量释放,内部温度急剧上升,与表层形成较大温差,进而产生温度应力,极易引发裂缝,严重影响桥梁结构的安全性与耐久性。这不仅会增加后期维修成本,还可能缩短桥梁使用寿命。因此,开展大体积混凝土温控技术研究迫在眉睫。通过科学有效的温控措施,可降低温度应力、减少裂缝产生,对保障公路桥梁建设质量具有重要意义。

1 公路桥梁施工中大体积混凝土温控基础理论

1.1 大体积混凝土定义与特性

(1) 尺寸标准与热工参数:公路桥梁工程中,大体积混凝土通常指浇筑体最小几何尺寸不小于1m,且因水化热积聚易产生温度应力的混凝土结构。其关键热工参数包括导热系数、比热容量、体积热膨胀系数等,其中导热系数一般为 $1.5\text{--}2.5\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,比热容量约 $900\text{--}1100\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$,这些参数直接影响温度场演化规律,是温控方案设计的核心依据。(2) 水化热释放规律与温度场分布:水泥水化热释放呈现“先快后慢”的特征,浇筑后3-7天达到峰值,随后逐渐衰减。温度场分布呈非线性变化,核心区域温度最高,向表层逐步递减,形成明显的温度梯度。在桥梁墩台、基础等构件中,往往出现中心与表面温差达 30°C 以上的情况,易引发结构损伤。

1.2 温度裂缝形成机理

(1) 内因:水泥水化热产生大量热量导致内部温度急剧升高,而混凝土硬化过程中会发生干缩、徐变等收缩变形,当变形受到抑制时,内部产生拉应力。当拉应力超过混凝土抗拉强度极限,便会引发裂缝。(2) 外因:环境温度骤降会加剧内外温差;桥梁结构的支座约束、钢筋约束等限制变形的约束条件,会放大温度应力;浇筑速度过快、振捣不密实等施工工艺缺陷,会降低

混凝土密实度和抗拉性能,为裂缝产生创造条件。

1.3 温控技术核心目标

(1) 控制内外温差(一般 $\leq 25^{\circ}\text{C}$):通过保温养护、分层浇筑等措施,缩小混凝土内部与表层的温度差值,避免温差过大产生的热应力超过混凝土抗拉强度。(2) 降低绝热温升峰值:采用低热水泥、掺加矿物掺合料等方式,减少水泥水化热总量,降低混凝土内部的最高温升,从源头控制温度应力。(3) 延缓降温速率:通过合理的养护措施延长降温时间,使混凝土有足够的时间完成徐变变形,释放部分温度应力,防止降温过快导致裂缝产生。

2 公路桥梁施工中大体积混凝土温控关键技术

2.1 原材料选择与配合比优化

(1) 低热水泥、粉煤灰、矿渣粉等掺合料应用:低热水泥(如低热矿渣硅酸盐水泥)水化热释放速率慢、总量低,3d水化热可控制在 $230\text{kJ}/\text{kg}$ 以下,能有效降低混凝土绝热温升。粉煤灰需选用II级及以上优质灰,按胶凝材料总量20%-30%掺加,可替代部分水泥减少水化热,同时改善混凝土和易性;矿渣粉掺量通常为30%-50%,能优化胶凝材料颗粒级配,提升混凝土密实度,延缓温度上升速度。在桥梁墩台施工中,采用“低热水泥+粉煤灰+矿渣粉”复合胶凝体系,可使混凝土7d绝热温升降低20%-25%。(2) 骨料级配与含泥量控制:粗骨料优先选用连续级配的碎石,粒径 $5\text{--}31.5\text{mm}$,空隙率 $\leq 40\%$,以减少胶凝材料用量,降低水化热;细骨料采用中砂,细度模数2.3-3.0,含泥量 $\leq 3\%$,泥块含量 $\leq 1\%$ 。若含泥量过高,会吸附外加剂降低其效能,还会增加混凝土收缩变形,加剧温度裂缝风险。某跨江大桥基础施工中,通过严格控制骨料含泥量(碎石 $\leq 1\%$ 、砂 $\leq 2\%$),混凝土收缩率降低15%,温控效果显著提升^[1]。(3) 外加剂的作用机理:缓凝剂(如葡萄糖酸钠)可延长水泥水

化诱导期,使水化热释放峰值推迟至浇筑后5-7d,避免短时间内温度骤升,缓凝时间通常控制在4-8h,确保混凝土浇筑施工连续性。高效减水剂(如聚羧酸系)减水率 $\geq 25\%$,在保证混凝土工作性的前提下,可减少单位用水量15%-20%,间接降低水泥用量,减少水化热产生;同时能改善混凝土内部微观结构,提高密实度和抗拉强度,增强抗裂性能。

2.2 施工工艺控制

(1) 分层分段浇筑与间歇时间设计:采用分层浇筑法,每层厚度30-50cm,层间间歇时间控制在混凝土初凝前(一般4-6h),避免出现施工冷缝。分段浇筑时,根据结构尺寸划分施工段,段间设置后浇带,宽度80-100cm,待两侧混凝土浇筑完成28d后,采用补偿收缩混凝土浇筑,释放部分温度应力。某高速公路桥梁承台施工中,分3层浇筑,每层厚度40cm,层间间歇5h,成功控制了浇筑过程中的温度累积。(2) 预埋冷却水管系统设计:冷却水管选用 $\Phi 40-50\text{mm}$ 的镀锌钢管,采用梅花形或行列式布置,管间距1.0-1.5m,距结构边缘 $\geq 50\text{cm}$ 。浇筑完成后24h内通循环水,进水温度 $\leq 25^\circ\text{C}$,流量根据混凝土温度动态调整,初期流量1.5-2.0 m^3/h ,当内部温度超过 60°C 时,增大流量至2.5-3.0 m^3/h ,使混凝土内部温度匀速下降,降温速率 $\leq 2^\circ\text{C}/\text{d}$ 。某跨海大桥塔柱施工中,通过优化冷却水管布置与流量控制,混凝土内外温差始终控制在 25°C 以内。(3) 保温保湿养护措施:混凝土浇筑完成后,表面及时覆盖土工布+阻燃棉被+塑料膜的三层保温层,保温层厚度根据环境温度调整,冬季 $\geq 5\text{cm}$ 、夏季 $\geq 3\text{cm}$,确保表层温度缓慢下降。同时采用自动喷淋系统,每隔2-3h喷淋一次,保持混凝土表面湿润(含水率 $\geq 90\%$),防止干缩裂缝。在严寒地区施工时,还可在保温层内设置电伴热装置,维持混凝土表面温度 $\geq 5^\circ\text{C}$ ^[2]。

2.3 温度监测与预警系统

(1) 传感器选型:热电偶传感器响应速度快($\leq 1\text{s}$),测量范围-50-300 $^\circ\text{C}$,精度 $\pm 0.5^\circ\text{C}$,适用于单点温度监测,常用于混凝土表层、内部及环境温度测量。光纤传感器(如分布式光纤)可实现连续测温,测量长度可达数千米,精度 $\pm 0.3^\circ\text{C}$,能实时获取混凝土温度场分布情况,适合大体积混凝土整体温度监测。实际应用中常采用“热电偶+光纤”组合监测方式,兼顾单点精度与整体分布。(2) 监测点布置原则:在混凝土中心、距表面5cm处、距边缘10cm处及冷却水管附近设置监测点,每个监测断面不少于3个点,确保覆盖高温区、温差变化大区域。监测点需避开钢筋密集区和预埋件,便于传感

器安装与数据采集,同时做好防护措施,防止施工过程中损坏。某铁路桥梁墩身施工中,每10m高度设置1个监测断面,每个断面布置5个监测点,全面掌握了混凝土温度变化规律。(3) 实时数据分析与预警阈值设定:通过数据采集仪实时传输监测数据,当出现内部温度 $\geq 65^\circ\text{C}$ 、内外温差 $\geq 25^\circ\text{C}$ 或降温速率 $\geq 2^\circ\text{C}/\text{d}$ 时,系统自动发出预警(声光报警+短信通知),管理人员及时采取加强保温、调整冷却水流速等措施。同时每日生成温度变化报告,分析温度趋势,为后续温控方案优化提供依据。

2.4 数值模拟与预测技术

(1) 有限元软件应用:MIDASCivil可建立桥梁结构整体模型,模拟混凝土浇筑、养护全过程的温度场变化,计算精度高,能快速输出各时段温度云图;ANSYS可通过热-结构耦合分析模块,模拟温度应力分布,预测裂缝风险区域。在某斜拉桥主塔施工前,采用MIDASCivil模拟温控过程,提前发现塔柱根部易出现高温区,通过调整冷却水管布置成功规避风险。(2) 温度场-应力场耦合分析:将温度场计算结果作为荷载输入应力场分析,考虑混凝土弹性模量、徐变、收缩等参数随龄期的变化,计算不同施工阶段的温度应力。通过耦合分析,可准确判断混凝土是否产生拉应力超过抗拉强度,为温控措施制定提供量化依据。某特大桥基础施工中,通过ANSYS耦合分析,优化了分层浇筑厚度,使最大温度应力降低18%^[3]。(3) 施工过程动态模拟与参数优化:根据施工进度计划,动态模拟不同浇筑速度、冷却水流速、保温措施下的温控效果,对比分析各方案的温度指标(绝热温升、内外温差等),优化参数取值。例如模拟显示,当冷却水流速从1.5 m^3/h 提升至2.5 m^3/h 时,内部最高温度降低 8°C ,据此确定最优流量参数,确保施工过程温控达标。

3 公路桥梁施工中大体积混凝土温控技术优化与创新

3.1 新材料与新技术应用

(1) 相变材料(PCM)控温:相变材料可在特定温度区间吸收或释放热量,将其以微胶囊形式掺入混凝土(掺量一般为胶凝材料总量的5%-10%),当混凝土内部温度升高至相变温度(通常40-50 $^\circ\text{C}$)时,PCM吸收热量发生相变,抑制温度骤升;当温度下降时,PCM释放热量,减缓降温速率。在某跨河大桥承台施工中,掺入石蜡基PCM微胶囊,混凝土绝热温升峰值降低 12°C ,降温速率控制在 $1.5^\circ\text{C}/\text{d}$ 以内,有效缩小内外温差,减少裂缝风险。此外,将PCM封装于钢管中预埋于混凝土内部,可重复利用,降低材料成本,进一步提升温控灵活性。

(2) 智能温控混凝土: 通过在混凝土中掺入碳纤维、纳米传感器等功能材料, 实现自感知功能, 实时监测内部温度、应力变化, 数据可通过无线传输至管理平台。同时, 该类混凝土具备自调节能力, 当监测到温度过高时, 内置的温控组件(如可降解温控微球)自动释放降温剂, 或通过改变自身导热性能调节温度。某高速公路桥梁墩身施工中应用智能温控混凝土, 成功实时捕捉到3处局部高温点, 并通过自调节功能将温度控制在安全范围, 大幅减少人工干预成本。

3.2 绿色施工与节能措施

(1) 冷却水循环利用: 传统冷却水管系统的冷却水多直接排放, 造成水资源浪费。通过构建“冷却用水-沉淀池-过滤装置-冷却塔-循环泵-冷却水管”的闭环系统, 将使用后的冷却水经沉淀、过滤去除杂质, 再通过冷却塔降温至25℃以下, 重新用于混凝土冷却。某跨海大桥施工中, 该系统使冷却水重复利用率达90%以上, 单日节约用水300m³, 同时减少污水排放, 符合绿色施工要求。此外, 可在循环水中添加缓蚀剂, 降低管道腐蚀风险, 延长冷却水管使用寿命。(2) 太阳能辅助温控系统: 在桥梁施工区域搭建太阳能集热板与储能装置, 冬季利用太阳能加热保温层内空气或循环水, 提升混凝土表层温度, 避免低温冻害; 夏季通过太阳能驱动喷淋系统, 增加表层散热效率。某山区公路桥梁施工中, 采用太阳能辅助温控系统, 冬季混凝土表层温度提升5-8℃, 夏季喷淋频率提高至每1.5h一次, 内外温差控制效果提升20%, 且全程无额外电力消耗, 实现节能降耗。

3.3 基于BIM的温控管理平台

(1) 三维模型集成温度数据: 在BIM三维模型中关联温度监测传感器信息, 将实时采集的混凝土内部温度、表层温度、环境温度等数据, 按监测点位置同步映射至模型对应区域, 形成可视化温度场分布。通过模型可直

观查看不同部位温度差异, 快速定位高温区或温差超标区域。某特大桥主塔施工中, 借助该功能, 管理人员在BIM平台上发现塔柱顶部一处监测点温差达28℃, 立即调整保温措施, 24h内将温差降至23℃^[4]。(2) 施工过程动态可视化: 将温控施工流程(如分层浇筑、冷却水管通水、保温养护)与BIM模型时间维度关联, 模拟施工全过程温度变化趋势, 同时实时更新现场施工进度与温控措施执行情况。通过动态可视化功能, 可提前预判施工过程中可能出现的温控问题, 如模拟显示某施工段若延迟24h覆盖保温层, 温差将超标, 据此及时调整施工计划。此外, 平台支持多方协同, 建设、施工、监理单位可实时共享温控数据与模型信息, 提升管理效率。

结束语

公路桥梁施工中, 大体积混凝土温控技术是保障结构质量与耐久性的关键。通过合理选材、优化配合比、精细施工工艺以及完善的温度监测与数值模拟, 能有效控制内外温差、降低绝热温升并延缓降温速率, 显著减少温度裂缝风险。未来, 随着新材料(如相变材料)、新技术(如智能温控混凝土、BIM管理平台)及绿色节能措施的应用, 温控技术将更加高效、智能与环保, 为公路桥梁建设的高质量发展提供坚实的技术支撑。

参考文献

- [1] 吴仕鹏. 花江峡谷大桥主塔承台大体积混凝土温控技术研究[J]. 公路交通技术, 2025, 41(1): 81-83.
- [2] 张志涛. 公路桥梁承台大体积混凝土施工关键技术[J]. 石河子科技, 2025, (05): 44-45.
- [3] 李良平. 大体积混凝土抗裂技术在桥梁承台施工中的应用[J]. 工程技术研究, 2024, 9(13): 66-68.
- [4] 毕进安. 高速公路桥梁承台大体积混凝土配合比设计与温控防裂研究[J]. 交通科技与管理, 2024, 5(03): 45-47.