

# 大体积混凝土温控技术及裂缝控制方法分析

薄幕长

(中交二公局第五工程有限公司, 陕西 西安 710119)

**摘要** 大体积混凝土在浇筑和早期硬化过程中, 水化热迅速累积、散热速度受结构体积限制而滞后, 极易形成内外温差超过材料允许拉应力的情况, 导致早期温裂、后期收缩裂缝及渗水、耐久性衰减等问题。基于此, 本文围绕温控措施与裂缝治理技术展开分析, 从原材料配合比优化、分层分段浇筑、预埋冷却水管、设置伸缩缝、表面保温养护及裂缝修复等方面探讨温控抗裂策略, 旨在为提升大体积混凝土施工质量提供参考。

**关键词** 大体积混凝土; 温控技术; 裂缝控制

**中图分类号**: TU755.7

**文献标志码**: A

**DOI**: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.03.016

## 0 引言

随着基础设施建设规模不断扩大, 大体积混凝土在桥梁承台、深基坑底板、跨河基础等领域广泛应用, 但其固有缺陷同样突出, 水化热集中释放、散热过程迟滞、温度应力难以自然释放, 一旦温差控制不当即会产生贯穿裂缝, 成为影响工程结构安全的关键隐患。因此, 系统性温控与防裂设计成为大体积混凝土施工管理的核心内容。传统温控依赖保温与延迟卸模, 然而在体量更大、环境波动更强的工程中, 该方法已无法完全满足应力释放节奏。基于此, 从配合比、分块浇筑、冷却系统与应力调控等角度入手, 梳理可操作、量化的全过程控温技术, 同时补充裂缝发生后的分级修复方案, 可为大体积混凝土工程提供参考。

## 1 工程概况

本标段为 G309—S101 连接线工程二标, 由济南城鲁建设工程有限公司负责建设, 设计单位为上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 监理由北京铁城建设监理有限责任公司承担, 施工由中交二公局第五工程有限公司实施。工程起点位于美里北路交叉口以北, 路线跨越黄河后接入国道 G309, 路线全长 3 070.18 m, 跨越段所处河道南北大堤距离约 0.8 km, 桥位与京沪高铁桥间距约 1.2 km, 与建邦黄河大桥约 3.1 km, 整体与河道走向基本正交, 施工环境具有较强水力与通航适应要求。在结构方面, 主桥采用网状系杆拱跨结构, 跨径布置为 (95+280)+420+(280+95)=1 170 m, 为整幅形式, 兼具造型与受力优势; 北岸引桥及匝道按预应力现浇连续梁设计, 南岸引桥采用预制小箱梁。

## 2 大体积混凝土温控技术

### 2.1 优化原材料配合比设计

在本项目中, 选用 P·II 42.5 水泥作为基础胶凝材料, 其 3 d 抗压强度可达 27 MPa, 28 d 强度提升至 49 MPa, 从而为结构提供稳定的强度发展曲线<sup>[1]</sup>。在确保结构承载性能的同时, 可降低水泥熟料比例来减弱放热峰值, 因此需加入 20% 矿渣微粉与 10% 粉煤灰, 在改善浆体致密性的同时降低绝热温升。粗细骨料采用 5~20 mm 连续级配碎石及细度模数 2.8 河砂, 使拌和物内部空隙率下降、导热能力增强, 以促进内部热量均匀扩散, 使整体密实度处于可控区间。外加剂体系采用聚羧酸高性能减水剂, 减水率可达 25%, 既降低用水量, 又提升流动性; 同步引入葡萄糖酸钠延缓凝结, 使初凝推迟至 8 h, 为持续散热、分层浇筑创造时间窗口。此外, 对混凝土配合比进行确定: 矿渣微粉 0.4、粉煤灰 0.2、砂 2.2、碎石 3.6、水 0.45、外加剂 0.01, 从而在保证强度与耐久性的同时抑制水化热上升, 降低温度梯度, 为后续温控线路布设奠定基础。

### 2.2 分层分段浇筑

本工程现场气候、水位变化与地质条件均较复杂, 故采用 Leica Disto X4 激光测距仪进行前期测量, 将整个浇筑体分隔为 10 层, 每层厚度控制在  $1.5 \pm 0.1$  m, 使散热过程逐级释放, 内部热量不致持续堆积, 从源头上缓解温度峰值。为进一步提升施工节奏可控性, 每层再依据 Trimble S9 全站仪测绘网格划分浇筑区块, 单段长度设定在 15~20 m 之间, 累计分为约 100 段, 使工序灵活拆分, 单次浇筑持续时间明显缩短, 以降低水

**作者简介**: 薄幕长(1983-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 混凝土工程。

泥水化放热集中造成的温度应力、干缩开裂等风险。在施工过程中,采用 Schwing S58X 输送泵连续供料,使混凝土以 60 m<sup>3</sup>/h 的稳定流量进入作业面,避免断料或停机导致层间冷接;同时使用 Wacker Neuson IRFU 80 插入式振动器进行振捣,频率控制在 9 000 次/min,单点振捣时间 20~30 s,确保浆体均匀包裹骨料并排除多余气泡,从而提升密实度<sup>[2]</sup>。为确保每一层、每一段浇筑过程均处于监控范围内,现场布设 GeoSIG SMC 位移传感器 50 个及 Vishay EPS-100 应变计 50 个,监测点以 5 m 为间距布网,实现应力变化与形变动态采集,并将数据实时传输至监控端,为后续施工提供依据。

### 2.3 预埋冷却水管

本工程在浇筑同步预埋冷却水管,使内部温度释放呈可控状态。冷却管采用 DN50、壁厚 4 mm 的 20# 无缝钢管,按 1.2 m×1.2 m 矩形网格布置,使冷水循环路径均匀覆盖核心区,避免局部过热。系统外接威乐 PH-123E 冷却装置,基础流量为 12 m<sup>3</sup>/h、扬程 40 m,可维持稳定输水压力。运行流程为冷水经进水管入过滤箱,杂质去除后进入循环水槽,在混凝土内部吸热升温,再由出水管回至水箱完成沉淀与热交换,随后重新回流至水槽降温,实现闭式循环<sup>[3]</sup>。控温过程中布置 Pt100 热电阻传感器实时监测核心温度,每 1.5 h 记录一次并生成变化曲线。当温度接近 65 °C 控制值时,系统即将流量提升至 15 m<sup>3</sup>/h,以加速内部热量带出,防止温升突破应力阈值。

### 2.4 应用温控设备

#### 2.4.1 循环冷却系统主动控温

在本工程的大体积混凝土施工中,循环冷却系统作为核心温控设备,用于对混凝土内部水化热进行主动调节。由于中墩承台厚度达到 5 m,单个承台混凝土方量为 3 712 m<sup>3</sup>,且单次浇筑最大方量可达 3 860 m<sup>3</sup>,混凝土内部热量集中释放明显,若仅依靠自然散热,极易造成内部温升过快并形成较大的温度梯度。基于上述特点,施工过程中在混凝土浇筑完成后及时启动循环冷却系统,通过预埋冷却水管在结构内部形成稳定的散热通道,使混凝土水化热释放过程始终处于可控状态。冷却水管按结构高度分层布设,中墩基础设置 7 层,次中墩基础设置 5 层,边墩基础设置 4 层,上下层及同层冷却水管间距均控制为 1 000 mm,距混凝土表面控制在 500 mm 以内,从空间布置上保证冷却作用覆盖混凝土核心区域。为确保系统运行稳定,每根冷却水管的连接总长度控制在 200 m 以内,避免因管路过长导致循环阻力增大、换热效率下降。通过持续循

环冷却,混凝土内部最高温度被控制在 75 °C 以内,实际温升控制在入模温度基础上不大于 50 °C,从而缓解大体积混凝土早期因水化热集中引起的温度应力问题。

#### 2.4.2 温度监测设备动态调控

在循环冷却系统运行的同时,温度监测设备在大体积混凝土温控过程中发挥着关键的调控支撑作用。施工现场通过温度巡检仪和热敏电阻传感器,对混凝土内部不同深度位置、距混凝土表面 50 mm 处以及冷却水进出水温度进行连续监测,温度采集精度可达 0.1 °C,能够较为准确地反映混凝土内部温度场变化情况。监测点布置以结构对称性和温度场分布特征为依据,在混凝土几何中心附近布设内部测点,以及温度梯度变化较为明显的表层区域适当加密测点,确保监测数据具有代表性。根据对水化热发展规律的分析,混凝土浇筑完成后约 70 h 为水化热集中释放阶段,因此在该阶段内监测频率控制为每 1 h 采集一次,以便及时掌握温升趋势;当混凝土温度达到峰值并进入降温阶段后,监测频率调整为每 2 h 一次,使温度变化过程保持平稳。当混凝土中心温度与外界温差稳定小于 25 °C 后,再逐步降低监测和冷却强度。通过持续监测与数据反馈,施工人员根据温度变化情况及时调整冷却设备运行状态,使降温过程更加均匀可控,从而降低大体积混凝土早期温度裂缝的发生风险。

## 3 大体积混凝土裂缝控制方法

### 3.1 设置伸缩缝

本工程根据混凝土构件尺寸、形状及内部温度场的分布特点,依托 ANSYS 有限元分析软件开展模拟试验,通过改变伸缩缝间距对受力与变形影响进行多轮运算,最终筛选出应力分布更为合理的间距范围。模拟建模中,伸缩缝接触行为采用 CONTAC174 与 TARGE170 单元定义,以法向接触刚度、切向摩擦系数为变量,重现伸缩缝处混凝土在温度梯度与干湿循环作用下的受力特征。法向接触刚度采用公式(1)进行评价:

$$K_n = \frac{E_c A_c}{L_s} (1 + \alpha \Delta T) (1 + \beta \frac{\Delta \omega}{\omega_0}) (1 + \gamma \frac{\sigma_t}{\sigma_0}) \quad (1)$$

式(1)中, $E_c$ 为弹性模量, $A_c$ 为混凝土截面积, $L_s$ 为伸缩缝间距, $\alpha$ 为温度膨胀系数, $\Delta T$ 表示温度变化值, $\beta$ 表示混凝土干缩的影响系数, $\Delta \omega$ 表示混凝土干燥过程的水分变化量, $\omega_0$ 表示混凝土初始含水量, $\gamma$ 表示混凝土应力影响系数, $\sigma_t$ 表示混凝土实际承受应力, $\sigma_0$ 表示混凝土初始应力。通过多次计算结果显示,当伸缩缝间距控制在 20~25 m 时,结构内部温度应力分布较为均匀,可削弱温度梯度带来的收缩变形影响,降低混凝土早期开裂概率<sup>[4]</sup>。在切缝时间安排上,

选择混凝土浇筑完成后3~5 d实施伸缩缝切割,此时材料强度一般达到设计值30%~50%,既能确保切缝过程顺利,不致崩边断裂,又可避免强度过高导致切缝失去应力释放效果。

### 3.2 加强表面保温养护

本工程在混凝土收面完成后的第一时间实施表面保温养护,使降温过程缓和、湿度持续可控。具体做法为:先覆盖厚度0.6~0.9 mm的针刺无纺土工布,使其迅速吸收表面自由水,减少初始蒸发并减缓热量散失;待表层收浆稳定后再铺设0.1 mm塑料薄膜形成阻水隔层,使混凝土表面始终处在高湿环境下,避免失水干缩引发早期拉应力。随后再加设同规格土工布作为第三层包覆材料,使保温与保湿形成叠层效应,进一步延长水化热向环境扩散的时间,提高表面温度变化的稳定性。在整个养护周期内安排专人巡查,每4 h检查土工布与薄膜的紧贴度及完整性,破损处立即使用同材质材料修复<sup>[5]</sup>。土工布裂口可采用缝合机处理,塑料薄膜则通过热合机焊补,以保证整体覆盖连续无缺口,不为水分蒸发或冷空气侵入提供通道。同时,在表面布设温湿度记录仪,持续监控温度与RH变化,使表面温度与内部温度差稳定在25℃以内,相对湿度保持90%以上,并控制养护期限不少于14 d,让混凝土在低温差、低干缩的环境下完成硬化。

### 3.3 做好裂缝修复

在本工程中,对于宽度小于0.2 mm的微细表裂,采用表面封闭法作为第一道修复措施。施工时先以钢丝刷清理裂纹部位,去除浮浆与灰尘后再以丙酮或酒精擦洗,使表面完全干净,并确保孔隙无油污残留,随后在裂缝处均匀涂刷环氧胶泥或聚合物砂浆,涂层控制在1~2 mm,使细微裂隙被整体封堵,阻断水分及氯离子侵入路径,从而实现表面抗渗密封与耐久性修补的双重效果。若裂缝宽度扩展至0.2~0.5 mm,并具备一定深度时,需采用压力灌浆法使修补材料深入结构内部。其施工流程为:在裂缝两侧每隔10~15 cm钻孔,孔深约为构件厚度的1/3~1/2,并在孔口布置灌浆嘴后以环氧胶泥封闭裂缝表层,使注浆压力集中向裂缝内部传递。实际灌注过程中将压力控制在0.2~0.4 MPa,注入环氧树脂并持续观察浆液流动情况,直至浆体沿裂缝连续外溢,视为填充饱满,即可封闭注浆口并养护固化,通过内灌方式使裂缝得到深层粘结,恢复整体性。当裂缝宽度超过0.5 mm,或裂纹穿透构件、对承载能力产生影响时,需在灌浆基础上增加外贴加固措施,以提升抗拉抗弯能力。

### 3.4 接缝处理

本工程在仓块接缝位置采用企口嵌接方式,使新旧混凝土形成机械咬合,提高剪力传递效率。在先浇仓块成型后,于侧壁预留深150 mm、宽100 mm凹槽,后浇段混凝土填入后可自然嵌锁,从几何构造上避免接缝滑移。同时,缝区钢筋在浇筑前预留搭接,并在计算搭接长度基础上额外提高20%,以补偿由缝体削弱导致的承载影响,使跨缝受力保持连续。为增强后浇料与基底间的界面咬合性能,施工前对凹槽表面进行凿毛处理并清洗干净,再涂刷界面剂,使水泥浆液渗入毛糙表层,建立可靠粘结桥<sup>[6]</sup>。在正式浇筑前,于企口槽内铺设与主体混凝土相同配合比但减石子处理的砂浆过渡层,厚度控制于30~50 mm,有助于填平细微段差并提升界面密实度。后浇混凝土灌注时加强振捣,使浆体能充分进入凹槽底角与钢筋周围空隙,避免形成隐性夹层。接缝施工完成后进入养护阶段,通过覆盖薄膜并连续湿养7 d,使水化反应稳定推进,最终使接缝与整体结构形成均匀连续体。对于接缝防水,本工程采用复合防渗体系:在凹槽内侧预埋止水钢板以切断潜在渗流路径,在外侧完成后再涂刷聚合物水泥基防水涂料作为二次屏障,提高防渗效果。

## 4 结束语

通过对大体积混凝土温控与抗裂技术的系统研究可知,温度控制应是跨越设计、施工与后期维护的全过程工程。各技术环节相辅相成,使混凝土在强度增长与体积稳定中取得平衡,从而实现长期使用状态下的结构安全性与耐久性。未来,对于大体积混凝土施工中的温控调节,施工单位可进一步与智能监测、数据驱动算法联动,以实现大体积混凝土温度及裂缝的智能化控制,从而为更大体量、更复杂环境下的混凝土施工提供参考。

### 参考文献:

- [1] 肖洪. 大体积混凝土施工中温控与裂缝控制一体化技术研究[J]. 水泥, 2025(12):83-85.
- [2] 张志光. 大体积混凝土温控技术及裂缝控制方法研究[J]. 水泥, 2025(10):104-106.
- [3] 苗田, 唐靖武. 大体积混凝土温度裂缝控制及温控效果有限元分析[J]. 四川水泥, 2024(01):189-191.
- [4] 王珏, 刘利军, 郑楠, 等. 大体积混凝土温控技术措施分析[J]. 中国建材科技, 2022, 31(01):44-46.
- [5] 林茂. 大体积混凝土智能温控技术探讨[J]. 福建交通科技, 2021(05):57-60, 117.
- [6] 陈逸群, 房霆宸, 朱敏涛, 等. 徐家汇中心大体积混凝土温控技术研究[J]. 科技视界, 2021(07):11-14.