

高支模宽幅多箱室预应力现浇梁裂缝防控措施

毛磊¹ 桂惠斌¹ 何兴国² 杨秀兵¹ 李思义¹

1. 中国水利水电第四工程局有限公司 浙江 杭州 310000

2. 中电建路桥集团有限公司 浙江 杭州 310000

摘要: 依托杭州大江东S211钱塘段(江东大道—红十五线)公路高架工程,针对高支模、大跨径、宽幅多箱室、超宽截面、施工周期长等技术特点,结合钱塘区软土地基、亚热带季风气候条件,系统分析温度效应、内箱室约束、两次浇筑间隔、天气环境对混凝土收缩开裂的影响。从支架稳定、材料配比、浇筑工艺、温控养护、预应力施工、监测预警等方面提出全过程裂缝防控技术,有效解决高支模宽幅多箱室现浇梁早期裂缝、收缩裂缝、温度裂缝及施工缝开裂问题,保障结构安全与耐久性,可为同类工程提供参考。

关键词: 高支模;宽幅箱梁;多箱室;预应力现浇梁;裂缝防控;混凝土收缩;温度应力

0 引言

城市快速路与一级公路高架工程中,宽幅多箱室预应力现浇箱梁应用广泛。该类结构具有截面超宽、箱室数量多、刚度大、约束强、水化热集中、收缩变形大等特点,在高支模施工条件下,支架变形、温度变化、两次浇筑间隔不合理、内箱室散热不畅、天气干湿交替等因素极易诱发混凝土塑性裂缝、温度裂缝、干燥收缩裂缝及施工缝裂缝。

杭州钱塘区地处杭嘉湖平原,地基以填土、砂质粉土、淤泥质粉质粘土为主,承载力低、压缩性高;气候属亚热带季风气候,梅雨期长、夏季高温、台风暴雨频繁,进一步提升裂缝控制难度。本文以S211钱塘段高架工程为实例,开展高支模宽幅多箱室预应力现浇梁裂缝成因分析与防控技术研究,形成一套可复制、可推广的综合防裂技术体系。

1 工程概况与裂缝风险特征

1.1 项目与结构特点

S211钱塘段(江东大道—红十五线)公路工程采用一级公路兼城市道路标准,高架段为地面道路+高架桥双层结构,地面道路及主线高架桥均为双向6车道。结构主要特点:

1. 最大跨径75m,最大梁高4.5m,最大桥宽42.379m;
2. 断面以单箱三室、单箱五室、单箱六室为主,截面复杂、约束效应显著;
3. 支架最大高度22.216m,属超过一定规模危大工程^{[1][2]}
4. 采用C50混凝土,纵、横、竖三向预应力体系,分两次浇筑施工,周期长、温控难度大。

1.2 地质与环境条件

地质:以杂填土、素填土、砂质粉土、淤泥质粉质粘土为主,地基易产生不均匀沉降;

气候:年降水量大,梅雨期(4—6月)、台风雨期(7—10月)降水集中;夏季高温、冬季低温,昼夜温差大,干湿交替频繁。

1.3 主要裂缝类型与诱因

温度裂缝:箱室封闭散热差,内外温差过大产生拉应力开裂;

收缩裂缝:宽幅截面与多箱室强约束分层浇筑导致收缩不协调开裂;

施工裂缝:支架沉降、分层浇筑不当、振捣不密实引发裂缝;

环境裂缝:高温、大风、暴雨、骤冷导致表面失水或温度骤变开裂。

2 裂缝关键影响因素分析

2.1 温度效应

宽幅多箱室截面内部水化热积聚,散热缓慢,内外温差易超过25℃,形成温度应力;顶板浇筑完成后因昼夜温差与季节温差使顶板、腹板变形不同步,加剧开裂风险。高支模大跨度结构横梁部位温度变形受支座及支架作用约束,应力相对集中明显。

2.2 内箱室与内箱室支架影响

内箱室隔墙及腹板数量多、整体刚度大,对混凝土收缩形成强烈的约束作用,且顶板截面厚度较薄,抗裂性能相对薄弱;同时箱室内部空间封闭,通风换气条件较差,湿度难以精准控制,导致混凝土干燥收缩与温差应力相互叠加,显著提升开裂风险。此外,内箱室支架的弹性变形、非弹性变形及支撑约束效应,在大跨度纵坡工况与多箱室温度效应的耦合作用下,顶板混凝土受内箱室支架支撑进而诱发顶板横向裂缝。

2.3 两次浇筑时间间隔

底板腹板与顶板分两次浇筑, 间隔时间直接影响收缩协调性:

间隔时间过长: 先浇段收缩基本完成, 后浇段收缩受约束, 在内箱室、腹板、横梁等约束下, 顶板厚度相对较薄弱, 在混凝土收缩徐变下易开裂;

结合面处理不到位, 形成薄弱界面, 受拉后易产生贯通裂缝。

2.4 天气与环境因素

高温大风导致混凝土表面水分蒸发过快, 形成塑性收缩裂缝; 暴雨冲刷使表面温度骤降, 产生温差应力; 低温寒潮影响强度发展, 易出现冻胀与收缩裂缝。

3 裂缝防控总体原则

以控温差、减收缩、释约束、强养护、稳支架为核心, 实施“设计优化—材料优选—工艺严控—温控精准—监测预警”全链条防控, 控制指标如下:

混凝土内外温差 $\leq 25^{\circ}\text{C}$, 降温速率 $\leq 2^{\circ}\text{C}/\text{d}$;

两次浇筑间隔控制在7~14d, 最大不宜超过20d, 具备一次浇筑条件的建议一次性浇筑;

混凝土入模温度 $\leq 30^{\circ}\text{C}$, 夏季 $\leq 28^{\circ}\text{C}$;

支架监测沉降差 $\leq 2\text{mm}/24\text{h}$, 总沉降 $\leq 5\text{mm}$ 。

4 裂缝防控关键技术措施

4.1 高支模体系稳定控制

1. 地基处理

清表后分层填筑宕渣或水泥土, 压实度 $\geq 94\%$, 路床 $\geq 96\%$; 浇筑20cm厚C25混凝土硬化层, 设置0.5%排水横坡与30cm \times 30cm排水沟, 防止路基基础遭受雨水浸泡。软弱地基、暗浜、泥浆池采用换填宕渣+级配碎石处理, 地基承载力 $\geq 200\text{kPa}$ 。

2. 支架搭设与预压

按1.1倍设计荷载分级预压(60% \rightarrow 80% \rightarrow 100%), 当支架全部预压荷载施加完毕后, 各监测点最初24h的沉降量平均值小于1mm或各监测点最初72h的沉降量平均值小于5mm时, 可进行支架卸载。底板安装时根据监测成果设置预拱度抵消弹性变形, 支架与墩柱每3个步距拉结, 提升整体稳定性^[3]。

4.2 混凝土材料与配合比优化

1. 原材料选用

采用低水化热P·II52.5水泥, 高温季节建议选用P·II42.5水泥; 粗骨料5~31.5mm连续级配碎石, 含泥量 $\leq 1\%$; 细骨料选用中砂, 细度模数2.3~3.0; 掺加I级粉煤灰与S95矿渣粉, 降低水化热与干燥收缩。

2. 配合比设计

现浇梁C50混凝土水胶比 ≤ 0.32 , 坍落度控制在

160~200mm。较低的坍落度虽有利于控制混凝土收缩裂缝, 但现浇梁梁体钢筋布设密集、大跨度、多箱室预应力管道密集, 且受天气条件、振捣工艺等施工环境因素影响, 混凝土入模难度较大, 易因坍落度偏低导致混凝土浇筑不密实, 进而产生空洞、蜂窝等质量缺陷。为优化施工性能并提升抗裂能力, 混凝土中掺加缓凝高效减水剂, 将初凝时间控制在3~4h; 同时适量掺加膨胀剂, 以补偿混凝土硬化过程中的收缩变形, 增强结构抗裂性能。

4.3 浇筑工艺控制

两次浇筑控制

根据项目总结, 便于箱室内内膜支架安装及控制腹板外观质量, 第一次浇筑至腹板与顶板交接部位; 第二次浇筑顶板及翼缘板, 间隔7~14d, 大于14d顶板横向收缩明显增加; 箱室顶板厚度变截面部位支架应加密加强^[4]。

分层分段对称浇筑

混凝土浇筑分层厚度严格控制在 $\leq 30\text{cm}$, 结合本项目施工总结, 纵向分段长度严格控制在5~8m, 浇筑顺序遵循由低向高、由梁体中线向两侧对称推进的原则, 可有效避免宽幅多箱室超宽梁体浇筑过程中因超高度泵送混凝土初凝时间不足形成施工冷缝。浇筑前需对混凝土生产、供应能力、运输效率及现场浇筑速度进行精准核算, 若供应能力无法满足分段浇筑需求, 应及时缩短纵向浇筑分段长度, 确保浇筑过程连续不间断。振捣作业采用插入式振捣器, 操作遵循“快插慢拔”的规范要求; 针对腹板部位混凝土振捣难点, 采用“振捣+敲击”相结合的方式, 通过敲击腹板外侧模板辅助排出混凝土内部未振捣彻底的气泡, 确保混凝土密实度及腹板外观质量。振捣器布设间距严格控制在 ≤ 1.5 倍振捣器有效作用半径, 振捣时间控制在20~30s, 直至混凝土表面泛浆、无明显气泡溢出为止, 严禁出现漏振、过振现象。

顶板浇筑布料长度纵向应控制在2~3m, 纵向由高到低、横向由翼缘板向道路中心浇筑, 禁止来回布料方式进行布料。全覆盖振捣, 整平设备可采取振捣水平尺或激光三滚轴整平机, 根据总目总结激光三滚轴整平机对平整度控制效果较好, 浇筑前需准确安装好轨道, 轨道焊接高度应与设计梁高一致。采用震动水平尺浇筑焊接轨道宽度应根据水平尺宽度匹配, 确保整平精度; 浇筑完成后根据初凝情况进行收面磨光, 部分无法电动磨光机无法磨光部位采用人工木抹子二次收面, 确保表面无泌水、无浮浆; 终凝前进行拉毛处理, 纹路均匀、深度适中, 满足后续沥青铺装层的黏结要求。拉毛后喷雾洒水, 采用塑料薄膜搭接式满铺养护, 同步覆盖土工布并定时洒水, 确保混凝土表面始终处于湿润状态, 养护周

期不少于14天；针对春季昼夜温差大特点，需在薄膜与土工布之间增设保温层，防止早期温度应力引发微裂缝；养护期间严禁踩踏或施加任何荷载，待混凝土强度达到设计强度100%且弹性模量满足要求后方可拆除内模及支架。

顶板混凝土浇筑时，布料长度纵向严格控制在2~3m，浇筑顺序遵循纵向由高向低、横向由翼缘板向道路中心线推进的原则，严禁采用来回折返布料方式，避免混凝土因振捣离析、分层，确保浇筑质量均匀。振捣作业采用全覆盖式振捣，确保混凝土密实度符合设计及规范要求。整平作业可选用振捣水平尺或激光三滚轴整平机，结合本项目施工总结，激光三滚轴整平机对顶板平整度的控制效果更优，浇筑前需精准安装整平轨道，轨道焊接高程需与设计梁高保持一致，确保整平精度。若采用振捣水平尺进行整平作业，轨道焊接宽度需与振捣水平尺宽度精准匹配。混凝土浇筑完成后，根据混凝土初凝状态及时进行收面磨光作业，对于电动磨光机无法覆盖的部位，采用人工木抹子进行二次收面，确保顶板表面无泌水、无浮浆、无错台，平整度符合规范要求。混凝土终凝前，需对顶板表面进行拉毛处理，拉毛纹路需均匀一致、深度控制适中（一般为2~3mm）。

施工缝处理

先浇段混凝土凿毛至新鲜骨料，清理并湿润；必要时预埋抗裂钢筋或型钢，提高接缝抗裂性能。

4.4 温度与收缩控制

入模温度控制

夏季骨料洒水降温、拌和水加冰，根据天气温度在浇筑过程中对钢筋、模板随浇筑进度分阶段降温，入模温度 $\leq 28^{\circ}\text{C}$ ；冬季采取保温措施，入模温度 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ ，避开低温时段施工。

内箱室散热通风

箱室设置临时通风口，配备风机强制散热，降低内部温度峰值。高温时段每2h测温，内外温差接近 25°C 时立即加强通风与表面保温。

4.5 全周期养护措施

表面养护

顶板收面后喷雾洒水覆盖塑料薄膜（搭接全覆盖）+土工布，终凝后洒水保湿，养护时间 $\geq 14\text{d}$ ，保持表面持续湿润。

内箱室养护

封闭箱室并放置水盆或散水增湿，高温时喷雾、低温时保温封闭，减少干缩与温差应力。

特殊天气防护

高温大风土工布设置压重，并喷雾保湿；暴雨覆盖

防雨布；寒潮采用双层保温覆盖，确保温度稳定。

4.6 预应力精细化施工

张拉条件

混凝土强度 $\geq 90\%$ 设计值，龄期 $\geq 7\text{d}$ ，弹性模量达标后方可张拉。

张拉顺序

主线：50%横梁 \rightarrow 纵向腹板 \rightarrow 剩余横梁 \rightarrow 底板 \rightarrow 纵向顶板 \rightarrow 横向顶板；

变截面联：对称分段张拉，先中间后两侧，防止偏心受拉。

采用“张拉力+伸长量”双控，实测伸长量误差控制在 $\pm 6\%$ 以内。

真空辅助压浆

张拉后48h内完成真空压浆，浆体强度 $\geq 50\text{MPa}$ ，水胶比0.28，保证孔道密实，减少预应力损失。

4.7 信息化监测与预警

布设温度、沉降、应变传感器，实时监测内外温差、支架沉降、混凝土应力变化。温差超 25°C 、沉降超 2mm/d 、应力超预警值时立即启动应急处置，实现全过程可控。

5 应用效果

通过上述技术实施，S211钱塘段高架现浇梁实现：

无结构性裂缝，表面微裂缝 $\leq 0.1\text{mm}$ ，可有效控制现浇梁顶板裂缝控制；

内外温差稳定 $\leq 23^{\circ}\text{C}$ ，降温速率均匀可控；

支架总沉降 $\leq 4\text{mm}$ ，无不均匀沉降。

6 结论

高支模宽幅多箱室预应力现浇梁裂缝由温度、收缩、约束、环境、施工等多因素耦合产生，必须实施全过程系统防控。

支架稳定、低水化热配合比、合理浇筑间隔、精准温控、长效保湿养护是防裂关键控制点。

内箱室强制散热、施工缝强化处理、预应力对称张拉可显著降低开裂风险。

本套防控技术实用性强、效果可靠，可为软土地区高支模宽幅多箱室现浇梁施工提供参考。

参考文献：

- [1]住房和城乡建设部.危险性较大的分部分项工程安全管理规定[S].2018.
- [2]浙江省交通运输厅.浙江省交通建设危险性较大的分部分项工程专项施工方案管理办法[S].2019.
- [3]JTG/T3650-2020,公路桥涵施工技术规范[S].
- [4]加巴次称.支架现浇混凝土梁桥早期抗裂性分析及其承载能力计算方法研究2022年3月.