

# 船闸大体积混凝土温度场数值模拟及裂缝控制技术研究

徐陈龙

广东水电二局股份有限公司

**摘要：**大体积混凝土工程质量受温度因素影响较大，通过温度场数值模拟，可以了解船闸上闸首、下闸首等区域的温度应力分布，预测温度与应力之间的变化规律，采取相应的措施，实现对结构裂缝的控制。研究表明，按照结构和温度应力分布，结合温度场数值模拟结果，能够对船闸大体积混凝土温度科学控制，从而降低裂缝的出现概率，确保船闸大体积混凝土施工质量。

**关键词：**大体积混凝土；温度场；数值模拟；裂缝控制

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2023.16.028

**引言：**温度场数值模拟将仿真技术融入工程项目建设，基于混凝土材料的热传导性能，把握混凝土材料特性，帮助设计、施工人员预测混凝土的温度分布，评估温度应力变化情况，科学控制温度场，避免施工过程中因温度控制不当出现裂缝，影响工程质量。温度场数值模拟在裂缝控制中的应用效果良好，有利于减少混凝土温度差异和收缩应力，控制裂缝的生成和扩展。

## 一、工程概述

广东省韩江高陂水利工程建设船闸，位于河床的左侧区域，规模等级为IV级，需支持500t以上的船舶通行。船闸闸室长度200m、宽度18m、门揽最小水深3m，引航道底部宽度40m，长度290m。船闸上闸首最大高程49m，使用钢筋混凝土施工方式，闸门为人字钢构成，净宽为16m，浇筑单体混凝土量28938m<sup>3</sup>。下闸首最大高程43.2m，为钢筋混凝土结构，浇筑单体混凝土量21387m<sup>3</sup>。船闸闸底位置建设长廊、泄水廊道，用于输水、泄水，廊道中心高程为16.6m。工程项目建设需要完成土方开挖、基础换填、灌浆、浇筑等工序，为严格控制工程质量，实现大体积混凝土工程建设的裂缝控制，建立仿真模型模拟温度场情况，采用相应的裂缝控制技术进行施工作业。

## 二、混凝土温度场仿真模型构建

### （一）模型构建

船闸温度场仿真模型构建包括底板、边墙、廊道等，模拟地基范围内的温度点，建立共计16.2万个温度模型单元，涉及节点数量共计19.9万。考虑到沿程的水温变化影响，模拟实际地基环境、排管方式、通水流

程。工程项目建设底板浇筑温度为20℃，输水廊道温度为18摄氏度。特征点基于水流中心截面提取，分析混凝土的内部、外部温度差异以及温度变化应力。输水廊道的特征点提取基于墙体中心截面，分析混凝土墙体的内部温度和外部温度之间的差异及应力变化。为确保可通过仿真模型准确把握混凝土浇筑后的温度变化及应力分布情况，根据工况设计三种仿真模型，分别采用不保温措施、使用通冷水温度控制、吊控模板等措施进行温度控制<sup>[1]</sup>。

### （二）温度、应力及裂缝分布

为进一步了解船闸工程中大体积混凝土结构中容易开裂的区域和风险较大的区域，在不同工况下进行仿真模型计算，得出混凝土内部峰值温度最高可达到60摄氏度以上，最大温度情况下，底板混凝土内部应力可以达到2.6MPa左右，应力较大很容易产生裂缝。输水廊道的最大应力在3.4左右，上闸首区域通水后抗裂安全系数在0.8以下，不满足标准1.65的开裂要求。在温度峰值状态下，混凝土结构的裂缝产生风险较大。

### （三）底板温度、应力与时间变化规律

利用温度场仿真模型，进一步确定混凝土结构的易裂区域，分析应力在不同时间下的变化趋势，将其作为后续混凝土施工的依据。依据模拟工况，可以得到内外温差随时间变化的历程，在浇筑时间达到7d左右，特征点内的温度差最大可以达到32℃，随着时间延长表面位置逐渐散热，混凝土结构的内部和外部温差会有所降低，直至浇筑第17d后，温差值达到最低值6.8℃。随着时间的变化，输水廊道的混凝土温度会经过热传导效应会传输到底板为止，散热较慢特征点温度开始逐渐升高，且达到15摄氏度左右。在夏季、冬季不同环境下，随着外界气温变化，大体积混凝土温差会随着环境变化呈现出周期性变动，且在冬季内温差最大。

在温度场模型之中，船闸底板的表面应力和外部应力计算有所差异。模拟结果显示混凝土的允许应力值在浇筑6h后系数在0.8左右，未达到标准的1.65，混凝土结构的抗裂性能较差，当水热化现象产生之后，温差也会有所增加，由温差产生的应力会使得混凝土表面出现裂缝。其原理是水热化现象会使得混凝土的温度升高，膨胀效应产生后混凝土内部承受一定的压力，随后温度达到峰值后降低，应力由压力转变为拉力，内部的开裂

风险有所增加。

### （四）输水廊道温度、应力与时间变化规律

在大体积混凝土分层浇筑施工过程中，提取模型之中输水廊道隔墙层内的特征，分析温度及应力在不同时间点内的变化规律。数值模拟结果显示，混凝土内外温差呈现出先提升、后降低、提升、稳定的变化规律。在浇筑时间达到3天左右时，混凝土的内外温差达到最大值，温度为30.1摄氏度，随后因表面散热温差降低，在顶板区域浇筑完成之后，温差快速下降，达到负值，最低温差达到-13.9℃，在上部浇筑完成之后，温差逐步趋于平稳。提取仿真模型中特征点的应力变化情况，在浇筑时间达到3d左右时，混凝土内部的拉应力值达到0.9MPa，在温差降低的同时，拉应力逐步转化为压应力，数值达到1.5MPa，完成顶部浇筑后，压应力增加2.7MPa，温差平稳之后，混凝土的压应力稳定在1.2MPa左右，可能产生裂缝。在早期浇筑过程中，混凝土内部会因水热化反应应力发生变化，温度升高的同时导致了混凝土内部受压，在散热后温差降低，压应力会转化为拉应力，持续降低，最终拉应力会增加到1.6MPa左右，当顶层浇筑之后，拉应力会增加到2.5MPa左右，最终超过混凝土材料的抗拉强度，使得混凝土结构具备一定的裂缝风险<sup>[2]</sup>。

### （五）温度场数值模拟结果

根据工况下温度场数值模拟结果，部分区域大体积混凝土的最小抗裂安全度无法达到标准值，混凝土的抗裂风险较大。在大体积混凝土浇筑施工过程中，需要采取相应的技术控制措施，做好温控和防裂工作。通过温度场数值模拟结果，对特征点的温度、应力等变化规律进行分析，如果不采取相应的保温措施，则底板在浇筑时间达到1d之后，产生裂缝的风险极大，输水廊道在浇筑2d后产生裂缝的风险较高。通过对特征点的分析，顶板浇筑前输水廊道的拉应力较大，受河流约束影响，且新浇混凝土因水热化现象，导致温差过大，拉应力会随之增加，使得混凝土的开裂风险增加。因此，根据温度场数值模拟结果，施工人员需要在模板施工、钢筋施工、混凝土浇筑施工过程中优化施工方案，以控制裂缝和提高混凝土质量，减少水热化现象对混凝土产生的影响，实现对混凝土裂缝的科学控制<sup>[3]</sup>。

## 三、船闸大体积混凝土裂缝控制技术

### （一）模板施工技术应用

#### 1. 模板类型选择

模板施工技术控制应根据工程需求和混凝土结构形状，合理设计和制作模板。施工人员应确保模板的刚性和稳定性，能够承受混凝土浇筑过程中的荷载，确保模

板表面平整。模板施工期间，将模板正确安装在施工位置上，并使用适当的支撑系统来支持和固定模板，施工人员需要确保模板对混凝土施工产生足够的支撑力，能够避免变形和不均匀沉降等问题的产生。对于模板之间的接缝和边缘，使用橡胶密封条或特殊防渗漏涂料，以阻止混凝土浆从模板漏出。本次工程项目建设考虑到船闸混凝土结构的复杂性，根据各部位特点分别使用异性模板、定型模板、木模板进行作业，在混凝土脱离基岩面之前，使用钢模板配合木模板施工，固定方案采用外支撑方法，避免因模板浇筑使得混凝土出现裂缝。

#### 2. 模板材料控制

在模板材料选择上，优先选择对混凝土应力影响较小的钢板、胶合板，确保选用的模板材料质量等级可以达到Ⅱ级和Ⅲ级，所使用的木模板的湿度应保持在20%左右。使用的钢模板表面应光滑、平整，确保投入施工的钢模板不存在相应的缺陷，护面钢板的厚度应控制在0.3cm以上，使用螺栓和钉头连接模板时，应保持其处于平头的状态，确保混凝土可以在模板内振捣密实<sup>[4]</sup>。

#### 3. 模板制作与安装

大体积混凝土浇筑使用大块钢模板，使用定型模板进行安装，模板制作应严格控制误差在允许的范围之内。大块模板安装过程中，采用吊装作业方式，在安装前，将模板表面打磨干净，保持模板表面的光滑、平整，随后在模板表面位置涂抹一层脱模剂，确保后续模板拆除施工的便捷性。模板吊装使用履带吊安装方式，预先进行模板的试吊工作，考虑地面以及其他区域的受力情况。模板安装需要严格按照拉线测量结果，并在安装过程中检查表面的水平度和垂直度是否符合要求，达标后方可进行模板的加固，模板拉筋使用 $\Phi 14$ 的钢筋，加固使用锥头螺丝。安装后对模板进行固定，按照侧面位置确定孔位，保持模板的紧固性，避免出现漏装、歪斜等现象。在第二层模板加高翻转施工后，需要将原模板的表面清理干净，确保模板连接缝隙在0.1cm以内。

#### 4. 模板拆除

模板拆除之前，检查吊装索具、元件等是否良好，确保钢丝绳与模板之间的平稳连接，将拆除的模板吊运至指定地点之后，在模板下层位置放置方木垫层，调节支撑体，确保模板的稳定性。模板拆除应按照顺序进行，吊运过程中应保持平稳性，避免对已经浇筑的混凝土产生影响，使其出现碰撞裂缝。

### （二）钢筋工程施工技术应用

每批钢筋需要严格按照质量标准，确保同一截面尺寸的钢筋重量在60t以下，并对钢筋进行物理性能试验，满足要求的钢筋方可投入使用。钢筋施工期间，严

格按照设计要求和详图进行钢筋加工和预制，确保钢筋尺寸、长度和弯曲符合要求，并检查钢筋的质量和表面状态。钢筋表面位置应洁净无损伤，并将钢筋表面的锈蚀等处理干净，不得使用带有颗粒状的钢筋材料。根据设计要求，在模板槽口或支撑结构中设置钢筋，并确保各个钢筋的间距和位置符合规范要求。钢筋连接主要使用电弧焊施工方式，严格按照操作流程，对钢筋进行安装、绑扎、焊接，在浇筑混凝土前，使用适当的钢筋支撑系统将钢筋固定在正确的位置上，以避免受力不均或移位。施工过程中，应保持钢筋与模板之间的距离适当，以确保混凝土完全包覆钢筋，必要时可以采取适当的防锈措施，通过涂抹防锈剂或覆盖塑料薄膜，防止钢筋生锈。混凝土浇筑施工期间，应避免对钢筋造成碰撞，影响混凝土浇筑的均衡性，并避免钢筋在浇筑过程中出现变形问题，使得混凝土出现裂缝<sup>[5]</sup>。

钢筋安装应确保位置准确，严格控制钢筋网之间的间隔。闸室底板、钢板等间隔应控制在2m左右，使用框架支撑固定，钢筋连接使用“人”字形的连接方式，确保钢筋的整体性良好，钢筋保护层厚度应根据水泥砂浆确定，控制间隔在1m左右。在钢件安装过程中，梁、柱位置的钢筋直径偏差应控制在0.5cm上下，墙中得到钢筋偏差应控制在0.1cm左右，同一排分布的钢筋间距应控制在0.1cm左右。

### （三）混凝土浇筑施工技术应用

混凝土浇筑过程是裂缝控制的关键，通过控制浇筑温度可以有效减少因温度差所引发的混凝土收缩、裂缝问题，使用适当的水泥种类和妥善的水化热控制措施，可以降低混凝土的内部温度并减缓硬化过程。在浇筑期间，将大体积混凝土分成若干个较小的浇筑段进行连续浇筑，而不是一次性浇筑整个区域，可使每段混凝土的体积变小，有利于更好地控制温度和收缩，从而减少裂缝的发生。同时，在混凝土浇筑过程中，在混凝土表面覆盖绝热材料，或通过冷却系统进行降温，可以减缓热应力的产生，均匀分散和释放混凝土产生的热应力。

混凝土浇筑速度也是控制裂缝的核心关键，合理控制混凝土的浇筑速度和时间，避免过快或过慢浇筑造成温度梯度大和收缩不均匀。在浇筑期间，根据浇筑量调整混凝土的输送方式、使用合适的浇筑设备，确保浇筑过程的均匀、稳定。确保浇筑过程混凝土的快速入仓、平仓和振捣，避免在浇筑过程中出现温度回升的情况。此外，在大体积混凝土结构中引入温度补偿措施，采取预留伸缩的措施可以吸收混凝土在收缩过程中产生的变形及应力，减缓裂缝的发生和扩展。将纤维增强材料

（如纤维混凝土）加入混凝土中，也可增加混凝土的韧性和抗裂能力，有效地分散和阻止裂缝的扩展，提高混凝土的整体性能。同时，为了加强混凝土的温度控制，在浇筑过程中如果舱面的温度超过标准，使用炮雾机造雾降温。

### （四）混凝土养护技术应用

混凝土养护在初凝后开始进行，混凝土养护期间，保持混凝土暴露表面的湿润状态，以防止水分过快蒸发和收缩产生的裂缝，条件允许的情况下可以使用覆盖物（如湿布、膜材料）或喷水等方法来持续湿润混凝土表面。在天气较热的环境下，施工人员用遮阳帐篷、遮挡网或其他遮阳设施来降低温度和控制温度梯度差异，能够起到减少裂缝问题的作用。为了进一步混凝土的温度变化，减少大温差对混凝土质量产生的影响，在混凝土区域安装温度传感器网络，定期监测混凝土的温度变化。通过实时监测和记录温度数据，可以及时发现异常情况并采取措施进行调整，以控制裂缝的发生。养护期间控制相邻两块混凝土高差在10m以内，通过通水的方式可以控制温度，使筑块在施工中均匀上升。

结论：综上所述，环境、混凝土结构、材料特性、施工技术、温度控制措施等均会对大体积混凝土施工质量产生影响。基于仿真模型的构建可以了解混凝土实际的温度应力变化，通过在模板工程、混凝土工程施工中加强温度控制，合理配置工程资源，能够起到控制裂缝的作用。在混凝土浇筑施工阶段，需要采取相应的技术控制措施，预防裂缝的产生和扩展，提升船闸大体积混凝土施工质量。

### 参考文献

- [1]周希圣,方从启,杨江超,等.大体积混凝土温度场及温度应力的数值模拟[J].山西建筑,2023,49(09):46-50.
- [2]刘博韬,陈勇,帅斌财.激光微熔NiCr多弧离子镀涂层温度场数值模拟研究[J].现代机械,2023,(02):47-52.
- [3]王中琳,李权,龚志华,等.丝杠用1Cr15Ni4Mo2CuN不锈钢热处理温度场的有限元数值模拟[J].金属热处理,2023,48(04):245-252.
- [4]刘利,张丙航,潘振.农田地区埋地输气管道三维温度场数值模拟分析[J].化工设备与管道,2023,60(02):79-87.
- [5]刘威,伍红平,江海生,等.基于CFD的辊道炉锂电正极材料烧结温度场的数值模拟与优化设计[J].现代制造技术与装备,2023,59(03):1-4.