

基于有限元的水池结构温度应力分析

文 / 刘静娴 中国市政工程中南设计研究总院有限公司

赵菊 中国市政工程中南设计研究总院有限公司

肖照阳 中国市政工程中南设计研究总院有限公司

摘要: 针对水池结构在温度荷载作用下产生的温度应力问题, 采用有限元分析方法进行深入研究。通过建立水池结构三维有限元模型, 考虑水池内外壁温差、季节性温度变化以及施工阶段混凝土水化热等因素, 分析不同工况下结构的温度场分布规律, 运用 ANSYS 软件进行数值模拟, 获取水池结构的温度应力分布特征。研究表明: 水池结构温度应力主要集中在池壁与底板连接处, 且随着温差增大呈非线性增长趋势; 混凝土水化热对早期结构应力影响显著, 温度应力峰值出现在浇筑后 48 小时内; 采用分层浇筑工艺能有效降低温度应力集中现象, 研究成果可为水池结构设计和施工提供参考依据。

关键词: 水池结构; 温度应力; 有限元分析; 混凝土水化热

【DOI】 10.12254/j.issn.2096-6539.2025.08.017

引言

水池结构作为重要的构筑物, 在使用过程中常受到温度荷载的影响。温度荷载主要来源于水池内外温差、季节性温度变化以及混凝土水化热, 这些因素导致结构产生温度应力, 严重时会引起开裂, 传统设计方法难以准确预测温度应力分布规律, 而有限元分析方法能够有效模拟温度场分布及应力演化过程。近年来随着计算机技术发展, 基于有限元的温度应力分析逐渐成为研究热点, 通过建立精确的有限元模型结合实际工程参数, 可以全面评估水池结构在各类温度荷载作用下的受力状态, 为结构优化设计和施工方案制定提供科学依据。

一、温度荷载特征分析

水池结构所承受的温度荷载主要包含三个方面: 外部环境温度变化引起的温差效应、内部水体与外部环境的温差以及混凝土浇筑过程中产生的水化热, 随着昼夜和季节更替, 外部环境温度发生周期性变化, 这种变化通过辐射和对流方式传递给水池结构表面。当水池内部储水温度与外部环境温度存在显著差异时, 会在结构内部形成温度梯度, 导致内外表面产生不均匀变形, 混凝土浇筑过程中, 由于水泥水化反应放热, 结构内部温度急剧升高, 而表面温度相对较低, 形成温度应力, 在不同施工阶段和使用工况下这三类温度荷载交替或叠加作用于水池结构。外部环境温度变化具有明显的周期性特征, 其影响程度受地理位置、气候条件等因素制约; 内外温差效应主要与水池中储水温度和外界气温的差值相关, 具有持续性和累积性; 水化热温度荷载则呈现出由大到小的衰减趋势, 主要集中在混凝土浇筑后的早期阶段, 三类温度荷载的耦合作用使得水池结构的温度场分布和应力状态呈现出复杂的时空变化规律, 需要结合实际工程条件进行综合分析和评估。

二、水池结构温度应力数值模拟

(一) 有限元模型建立

基于 ANSYS 有限元分析软件, 构建水池结构三维实体

模型。某工程水池结构采用钢筋混凝土材料, 平面尺寸为 30m×20m, 池深 6m, 顶部采用敞口形式便于日常维护和检修, 池壁和底板厚度经过结构计算分别确定为 0.4m 和 0.5m, 选用天然地基, 设计时充分考虑水池使用功能和荷载特点, 结构布置合理, 满足抗渗、抗裂等使用性要求。

考虑到水池结构的特点和温度应力分析的计算精度要求, 在有限元建模时进行了细致的处理。选用 SOLID65 单元对混凝土进行模拟, 该单元具有考虑开裂和压碎的能力, 能够准确反映混凝土的非线性特性, 钢筋采用 LINK8 单元进行模拟, 该单元为三维杆单元, 能够准确模拟钢筋的受力特征。在网格划分方面对整体结构采用合理的网格尺寸, 一般控制在 0.2m 左右, 对于池壁与底板连接处、棱角等应力易集中区域, 采用局部加密处理, 网格尺寸细化至 0.1m 以提高计算精度, 经过网格独立性分析, 确定该网格划分方案既能保证计算精度, 又具有较高的计算效率^[1]。

为进一步提高计算效率, 充分利用结构的对称性, 建立 1/4 有限元模型, 在底部与基础接触面设置固定约束, 限制节点各个方向的位移; 在对称截面上设置对称约束保证计算结果的准确性。对于钢筋与混凝土之间的连接, 采用完全粘结假定, 通过节点共享来实现, 通过反复调试和优化最终建立的有限元模型包含单元数量约 15 万个, 节点数量约 12 万个, 该模型既保证了计算精度, 又具有较高的计算效率, 能够真实反映水池结构在温度荷载作用下的受力特征。

(二) 材料参数选取

水池结构采用 C30 混凝土, 混凝土弹性模量取值为 30GPa, 泊松比为 0.2, 线膨胀系数为 $1 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$, 导热系数为 2.5W/(m·K), 比热容为 920J/(kg·K)。钢筋采用 HRB400 级钢筋, 弹性模量取值为 200GPa, 线膨胀系数为 $1.2 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$, 考虑到混凝土材料的非线性特征, 在模型中引入混凝土损伤塑性本构关系能够较好地反映混凝土开裂和压碎行为。对于温度荷载引起

的应力分析，重点关注混凝土抗拉强度指标，取值为 2.0MPa，考虑混凝土徐变和收缩特性对温度应力的影响，采用年龄调整有效模量法进行修正，通过合理选取材料参数，确保数值模拟结果能够真实反映结构在温度荷载作用下的力学性能^[2]。

（三）边界条件设置

温度场分析时，边界条件设置主要考虑水池结构与外界环境的复杂热交换过程。对于外部环境温度，采用当地气象站近 10 年的逐时气象数据进行模拟，根据统计分析确定昼夜温差取值 15℃，年温差取值 35℃，这些数据能够较好地反映工程所在地的气候特征，水池内表面与水体接触部分，考虑到水体流动的影响，设置对流换热边界，通过试验测定确定对流换热系数取值 25W/(m²·K)。外表面与空气接触部分较为复杂，需要综合考虑太阳辐射、空气对流换热等多重效应，通过理论计算和工程经验确定等效换热系数取值 18W/(m²·K)，底板与地基接触面由于热交换极其缓慢，可简化设置为绝热边界。

在施工阶段的温度场分析中重点考虑混凝土水化热的影响，通过实验室配合比试验测定水化热温度曲线，并据此建立内热源函数来模拟水化热释放过程，最高水化热温升取值为 25℃。在结构力学边界条件方面考虑到地基的变形特性，底板下表面采用弹性约束模式，通过地基变形模量试验确定竖向弹性系数为 80MPa/m，水平向弹性系数取竖向的一半，即 40MPa/m，所有这些边界条件的设置都建立在大量工程实践和试验数据的基础上，通过反复验证和优化确保计算模型能够准确反映实际工程状况。

（四）温度场分布特征

通过温度场数值分析发现水池结构温度场分布呈现明显的时空变化特征，在混凝土浇筑初期由于水泥水化反应释放大量热量，结构内部温度迅速升高，在浇筑后 24 小时达到峰值温度。监测数据显示，结构内部最高温度比表面温度高 12℃左右，形成显著的温度梯度，这种温度差异主要集中在结构中心区域，随着距离表面距离的增加，温度逐渐升高，水化热影响范围主要集中在距离表面 0.2m 至 0.3m 的区域内，这个阶段的温度场分布对早期开裂有重要影响。

随着水化热的逐渐消散，温度场分布逐渐转变为主要受外界环境温度和水体温度的影响，在夏季工况下由于太阳辐射强度大，池壁外表面温度明显高于内表面，最大温差可达 8℃，这种温差在下午 2 点至 4 点期间最为显著。相比之下冬季工况则呈现相反的特征，由于水体具有较大的比热容，内表面温度受水温影响保持相对稳定，而外表面温度随气温降低而下降，导致内表面温度高于外表面，通过长期监测发现昼夜温差在表层 0.1m 范围内最为明显，温度波动幅度可达到 5℃至 6℃，而深层混凝土温度相对稳定^[3]。在结构空间分布上温度场呈现出明显的分层特征，顶部区域直接暴露在大气环境中，温度变化幅度较大，对外界温度变化反应敏感；中部区域温度场分布相对均匀，温度梯

度变化平缓；底部区域由于受地温影响，温度相对稳定，全年温差不超过 3℃。

（五）应力场演化规律

根据温度场分布特征对应力场进行分析，结果显示水池结构温度应力呈现出典型的非均匀性和时间演化特征。在池壁与底板连接处由于约束条件变化和温度梯度突变，产生应力集中现象，最大拉应力可达 2.8MPa，接近混凝土抗拉强度极限，应力场随温度场变化而演化，在昼夜温差作用下呈现周期性变化规律应力幅值约为 0.6MPa。季节性温度变化导致应力场出现长周期演化特征，夏季外表面产生压应力，内表面产生拉应力；冬季则相反，在池壁高度方向上，应力分布呈现梯度变化，顶部应力波动较大，底部应力相对稳定，结构转角处应力分布复杂，局部区域易形成应力集中，需采取相应加强措施。

（六）水化热影响分析

水化热对水池结构早期温度应力的影响尤为显著，是控制早期开裂的关键因素，通过对浇筑后 7 天内温度应力进行跟踪分析发现水化热温度应力具有明显的时间效应。在浇筑后 6 小时内，由于水泥水化反应最为剧烈，结构内部温度快速上升，中心温度可达到 38℃，而表面温度仅为 23℃左右，形成显著的温度梯度，最大可达 15℃/m，此阶段混凝土抗拉强度仅为设计值的 15%左右，抗裂性能较差，监测数据显示，80%的早期温度裂缝都产生在这一时期，裂缝主要分布在表层 0.1m 范围内，呈现网状分布特征。

随着水化热的持续释放，温度场分布逐渐趋于稳定。在浇筑后 24 小时至 72 小时期间结构内外温差逐渐减小，温度梯度由最初的 15℃/m 降至 3℃/m 左右，水化热引起的最大温度应力出现在浇筑后 36 小时左右，此时达到 1.9MPa，接近混凝土抗拉强度设计值的 65%。为有效减少水化热影响，施工中采取了一系列控制措施：选用低水化热硅酸盐水泥，其 7 天水化热比普通硅酸盐水泥降低约 25%；同时辅以覆盖保温、及时洒水等养护措施，使得水化热温升速率降低 40%，有效提高了结构早期抗裂性能^[4]。

三、温度应力控制措施研究

（一）结构形式优化

针对水池结构温度应力分布特点，从结构形式角度提出优化方案。在池壁与底板连接处设置变截面过渡段将原有直角转角改为腋角，腋角尺寸可取 0.3m，有效降低应力集中程度，通过有限元分析对比显示优化后连接处最大温度应力降低约 35%，在池壁合理布置变形缝，缝宽为 30mm，间距不大于 20m，允许结构在温度变化下自由变形，减小约束应力。对水池顶部结构进行优化设计，采用轻型保温盖板替代混凝土盖板，降低日照直接作用带来的温度效应，在池壁外侧设置隔温层选用导热系数小于 0.5W/(m·K) 的保温材料，厚度为 50mm，能有效减小内外温差影响，结构形式优化不仅降低了温度应力水平还提高了结构的整体性能。

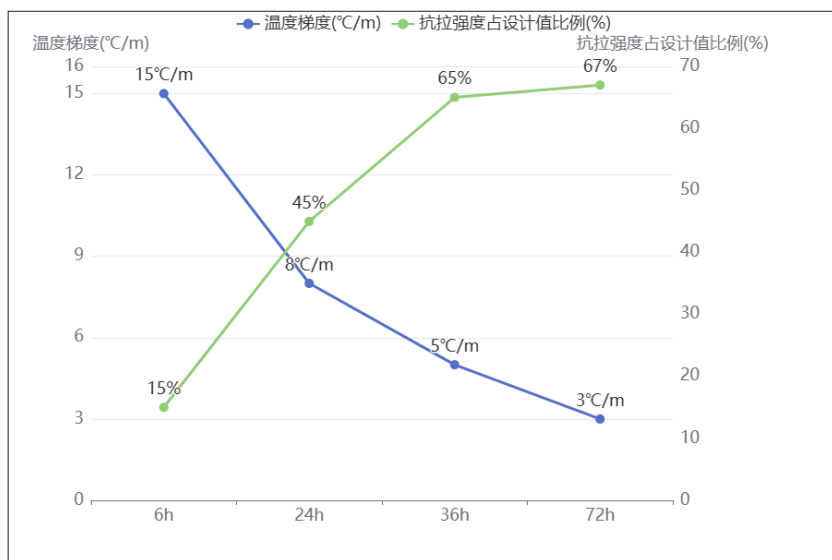


图1 混凝土浇筑后温度梯度和抗拉强度随时间的变化关系图

(二) 施工工艺改进

在施工过程中通过系统性改进施工工艺来控制温度应力。首要措施是采用分段分层浇筑技术，将水池结构划分为若干个施工段，每段长度控制在6米左右，单次浇筑高度严格控制在1.5m以内并根据气温情况适当调整，当日气温超过30℃时，将单次浇筑高度降至1.2m。浇筑时采用“前跟后赶”的方式，待前一层混凝土初凝后（一般为4-6小时）再浇筑下一层，避免水化热在短时间内集中释放，相邻段落间隔时间不少于5天，通过超声波检测确保混凝土强度达到设计值的50%以上后才能继续施工，这样既保证了施工质量，又避免了应力集中^[5]。

混凝土入模温度的控制也是关键环节，通过在拌和站设置温度监测系统严格控制混凝土入模温度在25℃以下，夏季采用冰水拌和，将拌和用水的50%替换为碎冰，使混凝土出机温度降低3-5℃。骨料堆场设置遮阳棚并采用喷雾降温，保持骨料表面温度不超过30℃，浇筑完成后立即进行保温养护，采用双层草帘覆盖，内层采用湿润草帘直接接触混凝土表面，外层采用干燥草帘进行保温，养护期间每2小时洒水一次，确保草帘持续保持湿润状态。拆模时间根据混凝土强度发展情况确定，一般不早于浇筑后72小时，拆模过程采用专用工具，避免对棱角部位造成机械损伤，监测数据表明，通过这些施工工艺改进措施混凝土水化热温升从原来的32℃降低到26℃，温度裂缝宽度控制在0.05mm以内，满足设计要求。

(三) 材料性能调整

材料性能的合理调整是控制温度应力的关键措施之一。通过系统的试验研究优化调整混凝土配合比，将水泥用量从原来的380kg/m³降低至320kg/m³，并掺加30%的F类粉煤灰替代部分水泥，粉煤灰的比表面积控制在400m²/kg以上以确保其活性满足要求，选用中热硅酸盐水泥替代普通硅酸盐水泥，其7天水化热降低约20%，28天抗压强度仍能满足设计要求。在混凝土中掺加0.8%的UEA型膨胀剂其自由膨胀率达到450×10⁻⁶，能有效补

偿混凝土的收缩变形，减小约束应力，为提高混凝土的抗裂性能，掺加体积率为0.1%的聚丙烯纤维，纤维长度为19mm，抗拉强度不低于500MPa，能显著提高混凝土的延性和抗拉强度。通过优化骨料级配增大粗骨料最大粒径至40mm，细骨料选用中砂，细度模数控制在2.5-2.8之间，既降低了水泥用量，又保证了混凝土的和易性，坍落度控制在160-180mm范围内，调整后的混凝土配合比不仅使得水化热温升降低了8℃，还使28天抗渗等级提高到P8，满足结构耐久性要求^[6]。

结语

通过有限元分析方法对水池结构温度应力进行系统研究，揭示了温度荷载作用下应力分布规律和演化特征，研究发现水池结构温度应力主要受混凝土水化热、内外温差和季节性温度变化影响，应力集中区域位于池壁与底板连接处。基于数值模拟结果，提出了包括优化结构形式、改进施工工艺、调整材料性能等控制措施。

参考文献

- [1] 劳伟康, 虞尉. 超长预应力水池温度效应分析与设计[J]. 广东土木与建筑, 2024, 31(12): 86-90.
- [2] 安学辉. 水厂矩形水池混凝土施工技术及其裂缝解决对策[J]. 水上安全, 2024, (05): 142-144.
- [3] 王星星, 赖庆文, 廖光明, 等. 岩石地基超长水池结构不设缝设计要点[J]. 特种结构, 2023, 40(03): 42-46+52.
- [4] 刘祥鹏. 矩形水池的温控效应分析[J]. 安徽建筑, 2021, 28(08): 97+111.
- [5] 张广杰. 超长不设缝水池结构设计研究[J]. 港工技术, 2021, 58(04): 62-65.
- [6] 谢三秀. 超长海工水池的大体积混凝土温度裂缝控制研究[D]. 华南理工大学, 2021.

作者简介: 刘静娴(1993.03~), 女, 汉族, 河南信阳人, 硕士研究生学历, 工程师, 从事市政结构工程设计与研究。