

DOI: 10.7672/sgjs2025220090

大体积混凝土温度场数值分析与温控技术 *

董红刚,郝鹏鑫,郭亮,俞晓亮,马炳烈,王文刚,高新龙
(陕西建工第二建设集团有限公司,陕西宝鸡 721000)

[摘要]国鸿中心项目塔楼基础区域大体积混凝土结构尺寸庞大,采用一次性整体浇筑方案。在大体积混凝土施工过程中,因水化热导致温度升高和不均匀冷却可能会引发温度裂缝,进而影响混凝土的结构强度和耐久性。结合有限元软件 MIDAS/GEN 对基础筏板进行温度场与应力场分析,采取温度控制、大体积混凝土测温、温度试验以及蓄水处理等措施,保证了混凝土的质量,取得了良好的效果。

[关键词]高层建筑;混凝土;有限元分析;温控技术;耐久性

[中图分类号] TU758 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 2097-0897(2025)22-0090-04

Numerical Analysis of Temperature Field and Temperature Control Technology of Large-volume Concrete

DONG Honggang, HAO Pengxin, GUO Liang, YU Xiaoliang, MA Bingyan,
WANG Wengang, GAO Xinlong

(Shaanxi Construction Engineering No. 2 Construction Group Co., Ltd., Baoji, Shaanxi 721000, China)

Abstract: The foundation area of the Guohong Center project tower has a large volume of concrete structure with large dimensions, and a one-time overall pouring scheme is adopted. During the construction of large volume concrete, temperature rise and uneven cooling caused by hydration heat may lead to temperature cracks, which in turn affect the structural strength and durability of the concrete. By combining MIDAS/GEN finite element software to analyze the temperature and stress fields of the foundation raft, measures such as temperature control, temperature measurement of large volume concrete, temperature testing, and water storage treatment were taken to ensure the quality of the concrete and achieve good effect.

Keywords: tall buildings; concrete; finite element analysis; temperature control technology; durability

1 工程概况

国鸿中心项目位于温州市三江商务区,包含1栋超高层塔楼、裙房及3层地下室,总建筑面积为199 428.92m²。底板面积约15 040m²,混凝土浇筑总量约29 400m³。浇筑量最大施工段为塔楼基础区域,面积约4 640m²,厚4 100~6 450mm,混凝土强度等级为C50,抗渗等级为P8,一次浇筑完成,如图1所示。

1.1 混凝土配合比设计

混凝土配合比设计试验如图2所示。考虑水化热最小原则,最终选用水泥掺量为260kg,水泥综合

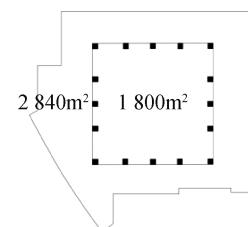


图1 塔楼基础施工

Fig. 1 Tower foundation construction

细度模数为3.0、水灰比为0.32、砂率为36%。C50混凝土配合比:P·O 42.5水泥为260kg,S95矿粉为115kg,II级F类粉煤灰为115kg,机制砂中砂为312kg,机制砂粗砂为312kg,5~25mm碎石为750kg,10~15mm碎石为200kg,5~10mm碎石为170kg,高性能聚羧酸外加剂为6.9kg,自来水164kg,SY-K膨胀剂为39kg。

* 国家自然科学基金(51978213);国家重点研发计划(2017YFC0703605,2016YFC0701106)

[作者简介] 董红刚,高级工程师,E-mail:445662384@qq.com

[收稿日期] 2025-02-05



a 坍落度检测



b 混凝土试样制作

图 2 混凝土适配试验

Fig. 2 Concrete mix proportion trial

1.2 蓄水厚度计算

根据《建筑施工计算手册》得出混凝土表面所需热阻系数为 $0.07(m \cdot K^2)/W$, 混凝土表面蓄水厚度为 4.1cm, 但考虑到预测温度有差异, 蓄水厚度受气候影响较大, 最终确定蓄水厚度为 5cm, 以起到保温效果。

2 大体积混凝土温度场数值分析

依据 GB 50496—2018《大体积混凝土施工标准》对蓄水厚度进行试算, 并探讨采取蓄水保温措施的效果。

2.1 计算参数

1) 环境温度函数

根据实测气温变化, 采用正弦函数表示环境温度函数的周期变化, 温度设置为 $10\sim20^{\circ}\text{C}$ 。

2) 混凝土绝热温升

绝热状态下混凝土水化热绝热温升值为 44.22°C 。根据绝热温升计算, 最高温度 $\leq 80^{\circ}\text{C}$, 计划不设置冷却水系统, 并严格控制混凝土到场温度 $\leq 25^{\circ}\text{C}$, 故采用冰水降低出罐温度。

3) 传热系数

根据实际覆盖层情况, 对流系数的大小决定了混凝土表面的放热速率, 假定混凝土承台表面光滑, 考虑施工期当地风速, 不考虑保温保湿的混凝土承台四周传热系数为 $63.021\text{kJ}/(m^2 \cdot h \cdot ^{\circ}\text{C})$ 。

混凝土承台顶面采用塑料薄膜与毛毡覆盖保温, 塑料薄膜厚 0.05mm, 毛毡厚 2mm, 塑料薄膜和毛毡的传热系数分别为 0.2, $0.042\text{kJ}/(m^2 \cdot h \cdot ^{\circ}\text{C})$, 水层厚度取 50mm, 水的传热系数为 $2.12\text{kJ}/(m^2 \cdot h \cdot ^{\circ}\text{C})$, 蓄水厚度考虑 0cm (不蓄水) 和 5cm, 不计保温材料之间发热容量, 现场风速设为 3m/s 。不蓄水情况下, 混凝土传热系数为 $15.83\text{kJ}/(m^2 \cdot h \cdot ^{\circ}\text{C})$, 蓄水厚度 5cm 情况下的混凝土传热系数为 $11.53\text{kJ}/(m^2 \cdot h \cdot ^{\circ}\text{C})$ 。

2.2 模型建立

利用有限元软件 MIDAS 对蓄水、塑料薄膜和棉毡联合保温下的大体积混凝土温度场进行数值分析。考虑结构平面形式及计算效率, 筏板几何模型

简化后, 分析模型如图 3 所示。

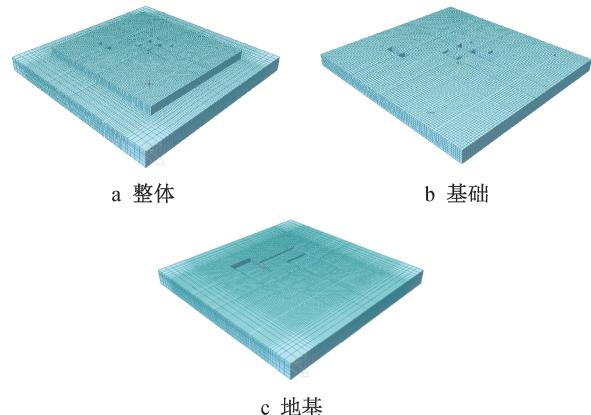


图 3 数值模型

Fig. 3 Numerical model

2.3 分析点选取

基础混凝土温度及应力分析点如图 4 所示。每个分析点分别提取上、中、下节点的温度及应力曲线, 各分析节点位置及编号如表 1 所示, 测点 1 为筏板 6.45m 厚度位置、测点 2 为筏板 4m 厚度位置、测点 3 为电梯井墙体位置、测点 4 为电梯井和集水坑墙体位置。



图 4 分析点位置

Fig. 4 Location of analysis point

表 1 分析节点编号

Table 1 Node numbers of analysis points

测点	上	中	下
1	N31851	N32574	N4085
2	N32774	N32771	N4287
3	N33491	—	N5384
4	N62876	N62880	N20083

2.4 分析结果

本工程各分析点温度及应力分析结果如图 5, 6 所示, 其中 S-N31851-0 对应不蓄水条件下节点 N31851 的真实应力; A-N31851-50 对应蓄水 5cm 条件下节点 N31851 的容许应力。除测点 3 由于深度较浅选择上下位置记录数据外, 其余测点均记录了上、中、下位置的结果数据。3 条曲线分别为测点厚度方向上(绿)、中(红)、下(蓝)位置的数据。应力曲线包含了 3 个测点的应力结果与相应的抗拉强度发展包络曲线(其中正为拉应力, 负为压应力), 各测点中间位置普遍处于压应力状态, 上下位置为拉应力状态, 上部拉应力普遍大于下部拉应力。

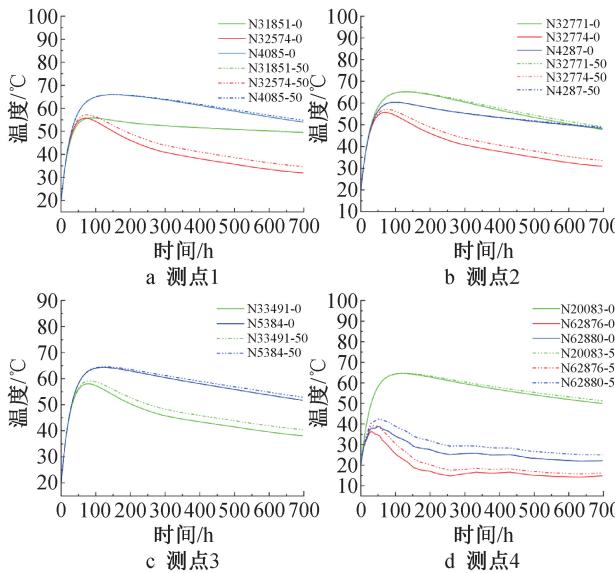


图 5 不同养护条件下的温度对比曲线

Fig. 5 Temperature comparison curves under different curing conditions

1) 2 种养护条件下,混凝土表面与内部最大温差分别约为 29, 23°C。蓄水养护能够有效减小混凝土内外温差,达到规范要求。

2) 温度最高值均出现在筏板 6.45m 厚度方向中间位置,温度峰值出现在混凝土浇筑后 80~90h 之间,峰值约 65°C。2 种条件下水坑中间墙体混凝土(测点 4)最大温升值约 45°C,符合规范要求。

3) 比较各测点位置的拉应力可知,蓄水养护条件下,厚度为 6.45m 与 4m 位置筏板拉应力均较小,出现裂缝的风险较小。不蓄水条件下集水坑墙体位置最大拉应力值达到 4.5MPa,具有较大开裂风险,蓄水养护条件下拉应力有一定减小,但仍超过对应的抗拉强度值。最大拉应力出现时间为浇筑混凝土后 6d 左右,但考虑到混凝土抗拉强度的发展趋势,最危险时间节点在 70h 左右,应重点关注。

分析结果表明:在本工程养护条件下,2 个集水坑中间的墙体由于双面散热,降温快,温差较大,温度应力出现最大值,后续施工应重点关注。

3 大体积混凝土现场温控技术

3.1 温度控制

3.1.1 降低混凝土入模温度的措施

原材料温度和运输过程中的升温对混凝土的入模温度有显著影响。砂、石料储存在室内,温度通常比外界气温低约 4°C;搅拌站提前采购水泥、粉煤灰和矿粉,使这些材料在使用前能够从出厂时的高温逐渐冷却至接近大气温度;搅拌用水选用温度较低的饮用水。

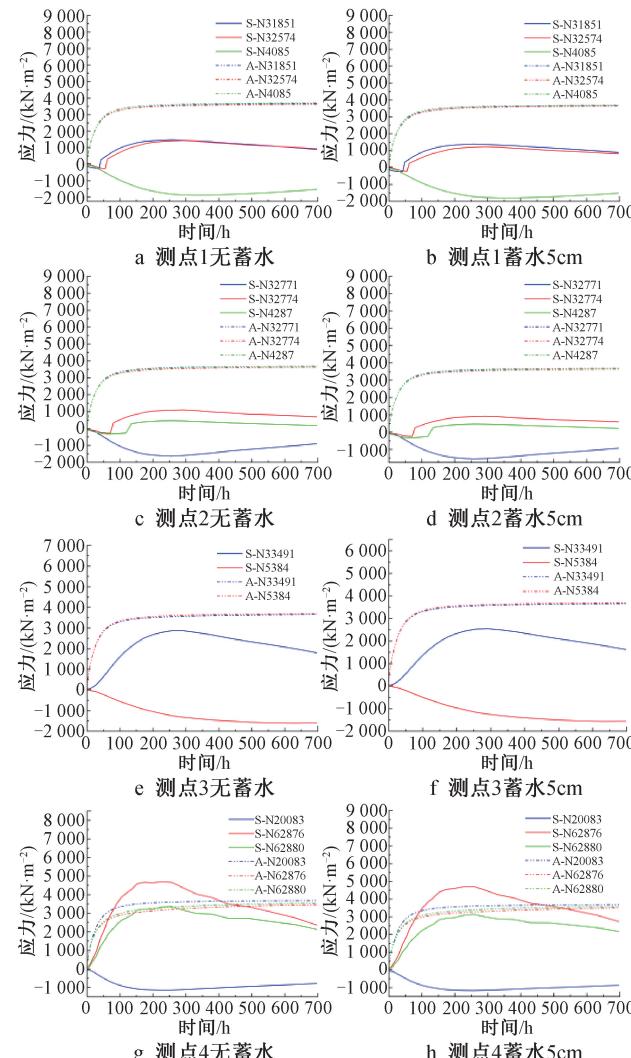


图 6 不同养护条件下的应力曲线

Fig. 6 Stress curves under different curing conditions

3.1.2 降低水泥水化热的措施

使用普通硅酸盐水泥,在混凝土中掺加适量优质粉煤灰,因为粉煤灰释放的水化热极低,又能增加混凝土的和易性,同时掺加粒化高炉矿渣粉,可以减少水泥用量,从而降低混凝土产生的水化热。掺入高效减水剂,缓凝组分能延长凝结时间,从而延缓温度峰值时间。

3.2 大体积混凝土测温

在本工程养护条件下,混凝土表面最大拉应力值出现在底层混凝土中心最厚位置的表面,同时变截面阴角位置也出现了应力集中现象。

3.2.1 测温方式

本工程底板共布置 43 个测温点(其中塔楼范围 12 个点),地下室 800mm 厚底板预埋测温线采用手持测温仪进行测温记录,塔楼范围内采用自动测温设备采集测温数据,及时反映混凝土的温度变化。

3.2.2 测温点布置

1) 平面布置

超长超厚大体积混凝土浇筑体内监测位置必须能够真实反映混凝土内最高温升、里表温差、降温速率及环境温度,具体布置如图 7 所示。

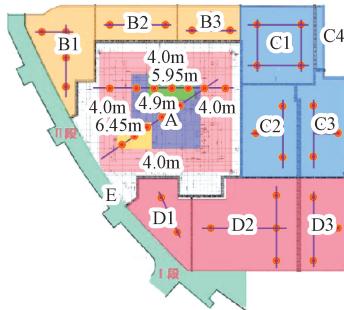


图 7 底板测温点布置

Fig. 7 Layout of temperature measurement points of bottom plate

2) 立面布置

测温点布置按照规范布设。800mm 厚底板及 1 500mm 厚承台竖向设置上、中、下部温度感应器, 4.4.9.5.95m 厚底板设置上、中、下部温度感应器。6.45m 处按照每处最大间距 500mm 共设置 14 个测温点。各处测温点立面布置如图 8 所示。

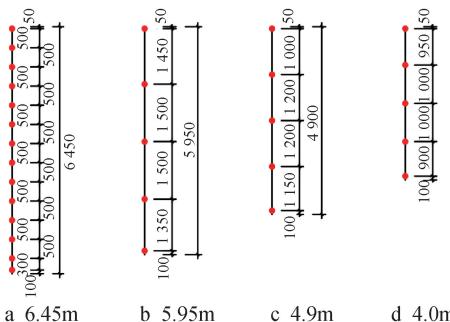


图 8 不同厚度筏板立面测温点布置

Fig. 8 Layout of temperature measurement points on raft elevations of different thicknesses

3.2.3 温度感应器预埋

温度感应器安装前, 必须在水下 1m 浸泡 24h 且未损坏, 然后将温度感应片固定在竖向支撑钢筋骨架上, 位置要求准确。在浇筑混凝土前, 将带温度感应器的支撑钢筋骨架插入到位, 使用铁丝绑扎固定, 且与结构钢筋及固定架金属体绝热。

3.2.4 混凝土测温频率

混凝土入模温度的测量频次每台班 ≥ 2 次。混凝土浇筑后, 内部升温恒温阶段每半小时测温

1 次, 进入降温阶段后调整为每小时 1 次。

3.3 温度试验

依据最终确定的配合比及温升计算数据, 大体积混凝土适配及测温试验如图 9 所示。采用烧结砖砌筑内部尺寸 900mm(长) \times 900mm(宽) \times 800mm(高) 模具, 模具内配 50mm 厚挤塑聚苯板, 内配钢筋笼居中放置。模具内设 2 组测温线, 分别设在模具中心和紧邻模具边部, 每组 3 根, 分别设在上、中、下处, 上部测温点距离混凝土表面 50mm, 下部测温点距离混凝土底面 100mm。经测量, 最高温度为 23h 后中心中部温度, 为 45.8℃。



图 9 大体积混凝土测温试验

Fig. 9 Large-volume concrete temperature measurement test

4 结语

本文基于 MIDAS 有限元软件, 对国鸿中心超厚大体积混凝土基础进行了温度场与应力场的精细化数值分析。分析结果表明:采取蓄水养护措施可有效调节混凝土内外最大温差并显著降低基础厚板内部的拉应力, 成功抑制了温度裂缝的产生。现场监测数据与模拟结果吻合良好, 验证了数值分析指导下温控方案的有效性。

参考文献:

- [1] 张明,喻雷雯.超高层建筑基础大体积混凝土施工控制研究[J].中国建筑装饰装修,2024(10):184-186.
ZHANG M, YU P W. Study on construction control of mass concrete for super high-rise building foundation [J]. Interior architecture of China, 2024(10):184-186.
- [2] 赵云波.无缝连续浇筑大体积混凝土温度控制及应变分析[D].西安:西安建筑科技大学,2015.
ZHAO Y B. Temperature control and strain analysis for seamless continuous placement of massive concrete structures [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2015.
- [3] 潘金龙,齐长雨,黄毅方,等.超长大体积混凝土地下结构温度效应的确定及仿真[J].浙江大学学报(工学版),2011,45(9):1680-1687.
PAN J L, QI C Y, HUANG Y F, et al. Determination and simulation of temperature effect on super-long and underground mass concrete structure [J]. Journal of Zhejiang University (engineering science), 2011, 45(9):1680-1687.