

# 保温措施下大体积混凝土冷却管温控温度场和应力场分析\*

冉毅

(贵州路桥集团有限公司, 贵州 贵阳 550001)

**摘要:** 以一个悬索桥承台大体积混凝土构件为例, 采用 MIADS/Civil 有限元软件对无保温措施情况下施工方案进行计算, 对比实测温度数据和理论计算温度数据, 结果显示两者基本吻合, 数值模型的可靠性良好; 优化承台表面保温措施和内部冷却管通水, 对比分析优化前后承台的计算温度场和应力场, 结果表明, 施加保温措施、改变冷却管通水参数可控制承台的里表温差, 降低承台表面出现温度裂缝的风险。

**关键词:** 桥梁; 大体积混凝土; 保温措施; 冷却管; 温度场; 应力场

**中图分类号:** U445.7

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1671-2668(2024)01-0136-05

大体积混凝土构件浇筑后混凝土凝结产生热量, 构件内部产生的热量容易积聚, 而构件表面与空气或模板直接接触, 接触面积大, 散热较快, 导致大体积混凝土构件浇筑后容易出现较大的内外温差。当混凝土构件内温度应力大于混凝土相应龄期的抗拉强度时, 大体积混凝土构件出现裂缝, 从而降低结构的耐久性。目前大体积混凝土最普遍的温控措施是预埋冷却管, 通过冷却管通水带走混凝土内部集聚的热量, 降低混凝土内外温差, 防止产生温度裂缝。实际施工中, 通常采用混凝土表面保温及调节冷却管通水参数等措施改变大体积混凝土温度场、应力场分布, 防止产生温度裂缝。

## 1 工程概况

某高速公路上的一座钢桁梁悬索桥, 主跨为 650 m, 属于特大桥。该悬索桥主塔承台为大体积混凝土构件, 单个承台平面尺寸为 13.6 m × 21.1 m, 高度为 7 m。承台采用 C40 混凝土分两次浇筑, 浇筑厚度分别为 3 m、4 m。承台底部设置 30 cm 厚 C30 混凝土调平层。承台混凝土配合比见表 1。

## 2 水化热计算原理及模型建立

### 2.1 计算原理

#### 2.1.1 对流边界条件确定

大体积混凝土水化热分析的对流边界条件根据

表 1 承台混凝土配合比 单位: kg/m<sup>3</sup>

混凝土类型	水泥	砂	碎石	水	粉煤灰	矿粉	减水剂
C40	240.00	879.00	951.00	170.00	100.00	80.00	4.20
C30	140.00	952.00	952.00	156.00	140.00	80.00	2.88

接触情况不同分为四类, 承台浇筑过程中与空气或模板直接接触时的对流边界属于第三类边界条件。根据边界条件确定混凝土表面温度  $T$  的函数如下:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \beta(T - T_a) \quad (1)$$

式中:  $\lambda$  为导热系数 [kJ/(m · h · °C)];  $n$  为混凝土表面外法线方向;  $\beta$  为混凝土表面放热系数 [kJ/(m<sup>2</sup> · h · °C)];  $T_a$  为对流介质温度 (°C)。

#### 2.1.2 温度场计算原理

承台浇筑后的水化热温度场是对流边界和水管冷却共同作用下的不稳定温度场, 须根据水管冷却作用下大体积混凝土的等效热传导方程确定实际情况下的温度场, 公式如下:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + (T_0 - T_w) \frac{\partial \phi}{\partial t} + \theta_0 \frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{\partial \eta}{\partial t} \quad (2)$$

式中:  $T$  为混凝土温度 (°C);  $a$  为导温系数 (m<sup>2</sup>/h);  $T_0$  为混凝土初始温度 (°C);  $T_w$  为冷却管入水口温

\* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52278139)

度( $^{\circ}\text{C}$ ); $\partial\phi/\partial t$ 表示考虑初始温差 $T_0-T_w$ 的影响; $\theta_0$ 为混凝土最终绝热温升; $\partial\psi/\partial t$ 表示考虑混凝土绝热温升的影响; $\partial\eta/\partial t$ 表示考虑外界温度的影响。

导温函数如下:

$$a = \frac{\lambda}{c\rho} \quad (3)$$

式中: $c$ 为比热容 $[\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})]$ ; $\rho$ 为混凝土密度 $(\text{kg}/\text{m}^3)$ 。

## 2.2 有限元建模

### 2.2.1 模型热力学参数

混凝土浇筑时的环境温度与入模温度均为 $20^{\circ}\text{C}$ ,混凝土表面对流系数取 $50.232 \text{ kJ}/(\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot^{\circ}\text{C})$ ,冷却管外径为 $48 \text{ mm}$ ,管壁厚度为 $2.5 \text{ mm}$ ,冷却管进水口温度为 $15^{\circ}\text{C}$ ,水流量为 $2.5 \text{ m}^3/\text{h}$ ,此时冷却管的对流系数为 $1130.83 \text{ kJ}/(\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot^{\circ}\text{C})$ ,承台和地基材料的热力学参数见表2。

表2 材料的热力学参数

构件	密度/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	比热容/ $[\text{kJ}\cdot$ ( $\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})^{-1}]$	热传导率/ $[\text{kJ}\cdot$ ( $\text{m}\cdot\text{h}\cdot^{\circ}\text{C})^{-1}]$
承台	2 424.20	0.963	9.628
地基	2 422.88	0.837	7.116

### 2.2.2 水化热模型建立

根据承台结构和冷却管布置的对称性,建立 $1/4$ 承台模型,模型尺寸为 $10.55 \text{ m}\times 6.80 \text{ m}\times 7.00 \text{ m}$ 。考虑地基传热效应,扩大地基平面尺寸。有限元模型采用八节点实体单元,承台共计9 996个单元,地基共计3 800个单元,整体模型共计13 796个单元。有限元模型见图1,冷却管布置见图2。

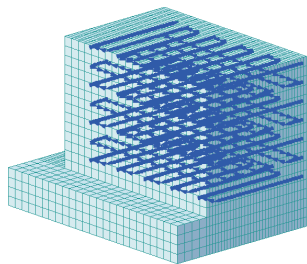


图1 承台水化热分析模型

## 3 水化热温度监控

### 3.1 温度传感器布置

该桥一岸主塔右幅承台第一次浇筑从2021年

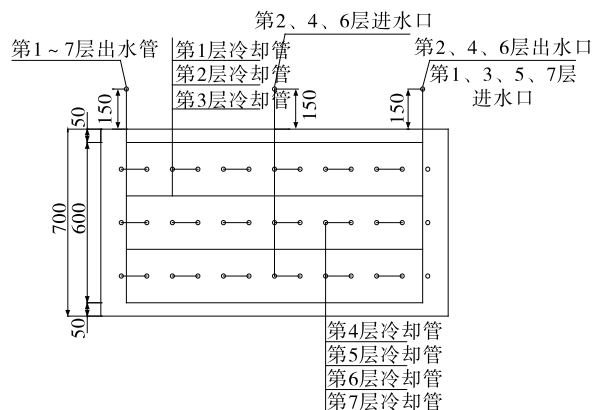


图2 冷却管布置示意图(单位:cm)

5月1日22:00开始,5月3日22:00结束,共浇筑3 m,浇筑期间温度为 $19.0\sim 23.4^{\circ}\text{C}$ ;第二次浇筑从2021年5月18日22:00开始,5月22日2:00结束,共浇筑4 m,浇筑期间温度为 $18.5\sim 22.6^{\circ}\text{C}$ 。

根据承台结构形式和冷却管布置情况,将承台温度传感器设置在冷却管布置截面,以承台第一次浇筑3 m为例,下、中、上三层混凝土从下至上编号为A、B、C,每层各布置6个温度传感器,集中布置在承台平面的 $1/4$ 区域内。温度测点布置见图3。

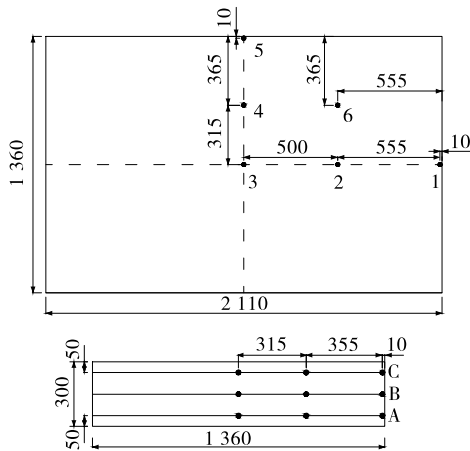


图3 温度传感器布置示意图(单位:cm)

### 3.2 实测温度分析

承台两次浇筑的时间间隔为15 d,第二次浇筑时第一次浇筑的混凝土内部温度场已基本稳定,第一次浇筑混凝土的温控已基本完成。因此,主要分析承台第一次浇筑时混凝土的温控过程,分析大体积混凝土冷却管的温控效果。根据承台第一次浇筑时的实测温度,绘制下、中、上三层混凝土里表温差时程曲线(见图4)。

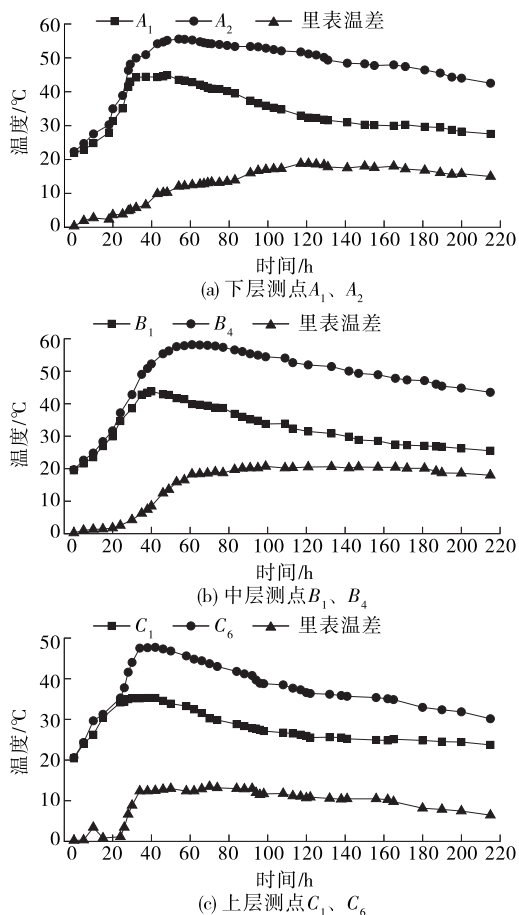


图 4 各层混凝土里表温差时程曲线

由图 4 可知:1) 混凝土浇筑完成 40~60 h 后, 承台内部温度达到峰值, 各层最高温度分别出现在测点  $A_2$ 、 $B_4$ 、 $C_6$  位置, 第一次浇筑后承台温度峰值为 57.9 °C, 出现在中层混凝土浇筑 61 h 后的  $B_4$  测点, 最大温升为 38.3 °C, 小于 50 °C。下层混凝土内部升温速率最快, 这是由于与混凝土接触的地基传热速度慢, 同时积聚的热量会加快水化放热反应, 造成内部温度急速上升。2) 从下至上三层混凝土内部降温速率分别为 2.3 °C/d、2.6 °C/d、3.5 °C/d, 均大于 2 °C/d。中、下层混凝土最高降温速率都发生在降温前期的冷却管通水阶段, 承台第一次浇筑完成 80 h 后冷却管开始间歇性通水, 此时降温速率均低于 2 °C/d; 降温速率最快的上层混凝土, 其内部最大温度为 47.5 °C, 且维持时间较短, 这是由于上层混凝土浇筑完成后, 其上表面没有设置保温措施进行养护, 导致混凝土上表面直接和空气对流, 在空气和冷却管对流的综合作用下内部热量被迅速带走。3) 各层测点 1 的温度即为表面温度, 测点 1 温度通常在浇筑 40 h 后开始下降。各层混凝土测点 1 的

降温速率均显著大于内部降温速率, 这是由于混凝土侧表面与模板对流, 对流面积大, 散热较快。最大里表温差出现在中层混凝土浇筑 99 h 后, 温差为 20.6 °C, 小于 25 °C, 中层混凝土里表温差长时间维持在 20 °C 左右, 这是由于冷却管连续通水降温持续时间较短, 造成混凝土内部后期降温速率减慢, 而混凝土表面降温速率快, 导致混凝土里表温差长时间维持在较高水平。

综上所述, 冷却管过早结束连续通水会导致混凝土降温后期长时间维持较大的里表温差; 相对于中、下层混凝土, 上层混凝土内部最大温度较小, 且降温速率较大, 导致与空气直接接触的上表面的温度更低, 降温速率更大, 且上表面与内部高温区的距离较近, 因而形成较大的温度梯度, 混凝土开裂风险增大。

### 3.3 理论计算与实测值对比分析

选取测点  $B_1$ 、 $B_4$  进行温度计算并与实测温度对比, 结果见图 5。由图 5 可知: 混凝土浇筑 0~25 h 后计算温度比实测值大, 这是由于采用的混凝土放热函数与实际有偏差, 且实际施工过程中中、上层混凝土连续浇筑, 上层刚浇筑的混凝土水化程度不高, 相对于中层混凝土, 刚浇筑的混凝土相当于进行热传递的对流边界, 数值模拟中很难模拟这一过程的热传递, 造成水化初期温度计算值与实测值相差较大。其余各阶段计算温度和实测温度相差均不超过 3 °C。

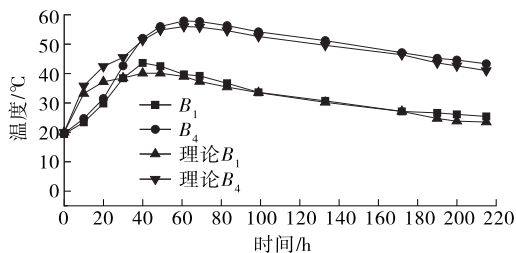
图 5  $B_1$ 、 $B_4$  测点的计算温度与实测温度对比

图 6 为混凝土浇筑 60 h 后承台温度分布。由图 6 可知: 峰值温度出现在中层混凝土浇筑 60 h 后的  $B_4$  测点附近, 与实测值相差 1.9 °C; 计算最大降温速率为 2.8 °C/d, 大于 2 °C/d, 与实测值 2.6 °C/d 接近。有限元模型计算温度与实测温度相差不大, 模型的可靠性较好, 可根据模型计算结果分析承台温控过程中的温度场和应力场。

混凝土浇筑后承台应力和容许拉应力见图 7, 混凝土浇筑 115 h 后承台应力分布见图 8。由图 7、

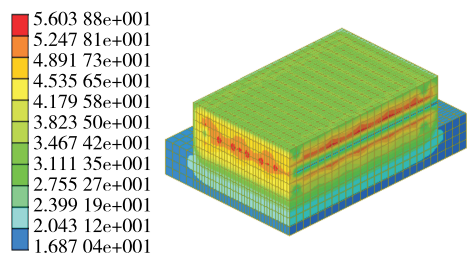


图 6 混凝土浇筑 60 h 后承台温度分布(单位:℃)

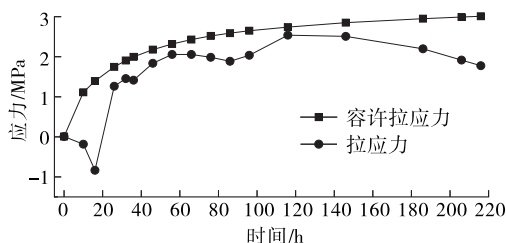


图 7 混凝土浇筑后承台拉应力和容许拉应力

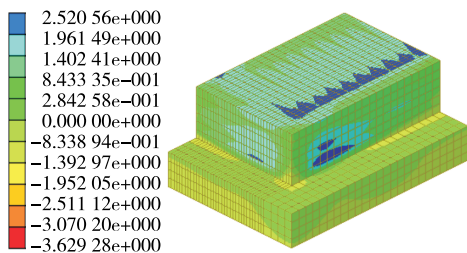


图 8 混凝土浇筑 115 h 后承台应力分布(单位:MPa)

图 8 可知:下层混凝土浇筑 115 h 后,在下层节点 N5332 处出现拉应力峰值,为 2.52 MPa,该节点各时段水化热产生的表面拉应力均小于容许拉应力,说明结构整体安全。节点 N5332 拉应力长期处于增长阶段,下层混凝土的里表温差也长期维持在较大值,表面拉应力与温差变化规律基本相同。大拉应力区主要分布在承台上表面,这是由于混凝土上表面散热较快,而内部散热较慢,导致上表面与内部温度之间形成较大的温度梯度,与实测结果相符。

结合分析,混凝土里表温差越大,混凝土表面的拉应力越大,可通过降低里表温差控制结构表面拉应力。可采取对结构表面进行保温,加快结构内部散热速率的方式降低结构里表温差。

#### 4 优化前后温度和应力对比分析

根据上述实测温度和理论应力分析结果,对承台浇筑进行温控优化:对浇筑后的承台上顶面进行保温处理,降低上表面散热速率;延长承台内部冷却管连续通水的时间,加快混凝土降温后期的降温速

率,同时降低冷却管的通水速率,防止通水过程中内部温度降低过快,连续通水后采用间歇性通水。

具体优化方法:在混凝土顶面加盖 1 cm 厚土工布,冷却管通水量降低为  $2 \text{ m}^3/\text{h}$ ,将连续通水时间延长至浇筑完成后 100 h,此时混凝土上顶面对流系数为  $12.246 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$ ,冷却管对流系数为  $940.661 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$ 。优化前后承台温度场、应力场见图 9~13。

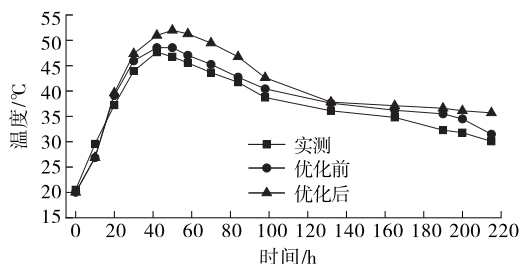
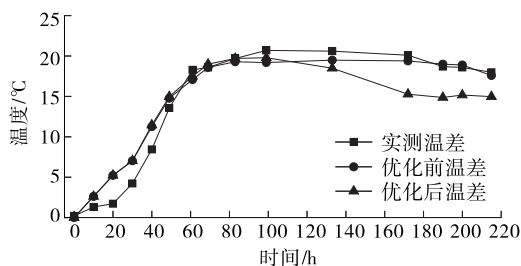
图 9 优化前后 C<sub>6</sub>测点温度时程曲线对比

图 10 优化前后中层混凝土里表温差曲线对比

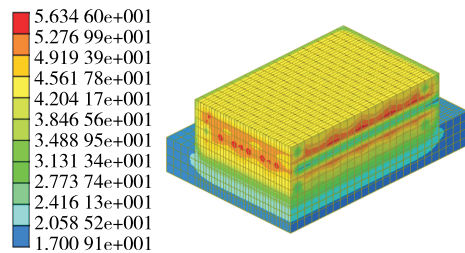


图 11 优化后混凝土浇筑 60 h 后承台温度分布(单位:℃)

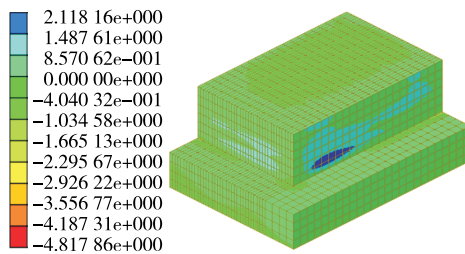


图 12 优化后混凝土浇筑 65 h 后应力分布(单位:MPa)

由图 12 可知:优化后承台峰值拉应力出现的位置没有改变,峰值拉应力为 2.12 MPa,出现在下层混凝土浇筑 65 h 后;与优化前的应力分布(见图 8)

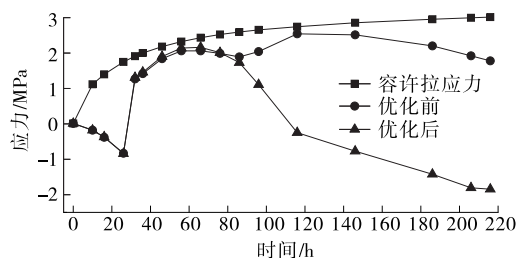


图 13 优化前后承台拉应力与容许拉应力对比

相比,优化后承台上表面大拉应力区面积明显减小,且拉应力分布较均匀,表明设置保温措施可显著降低承台里表温差。

由图 13 可知:优化后承台侧表面拉应力峰值减小,且较大拉应力维持时间由优化前的 35~145 h 缩短为 35~85 h,表明延长连续通水时间有助于缩短表面较大拉应力的维持时间,降低混凝土表面产生温度裂缝的风险。

## 5 结论

(1) 大体积混凝土温控过程中结构的里表温差越大,混凝土表面拉应力越大。可通过控制混凝土里表温差控制温度裂缝。

(2) 大体积混凝土温控过程中对与空气有大面积接触的混凝土表面进行保温处理,可有效提高表面温度,降低里表温差;改变冷却管通水速率对大体积混凝土内部温度峰值的影响很小;延长冷却管连

续通水时间可有效减少较大里表温差的持续时间,降低混凝土表面产生温度裂缝的风险。

(3) 大体积混凝土浇筑时间长,浇筑过程中已初凝水化的混凝土与刚浇筑的混凝土之间存在热传递现象,而这一热传递过程很难用有限元软件进行模拟,因此数值模拟的混凝土前期升温过程温度场与实测数据存在偏差。这一过程的简化分析还有待研究。

## 参考文献:

- [1] 朱伯芳.考虑外界温度影响的水管冷却等效热传导方程[J].水利学报,2003,34(3):49-54.
- [2] 李之达,孙绪涛.考虑管冷的大体积混凝土水化热初期温度场研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2018,37(6):1-7.
- [3] 何贝贝,王亚西,赵娟.冷却管在大体积混凝土裂缝控制中的应用研究[J].建材世界,2021,42(3):47-51.
- [4] 杨懿杰,王建兴,郭洪超,等.考虑管冷的大体积混凝土温度场分析与监控[J].四川建材,2019,45(5):12-16.
- [5] 孙维刚,倪富陶,刘来君,等.大体积混凝土水化热温度特征数值分析[J].江苏大学学报(自然科学版),2015,36(4):475-479.
- [6] 刘家奎,陈斌.大体积混凝土承台水化热监测及数值分析[J].山西建筑,2012,38(11):175-177.

收稿日期:2022-10-27

(上接第 135 页)

速、波幅严重异常、波形明显畸变的情况,声测线位置存在严重缺陷。该方法可有效降低因首波位置判读不准引起的临界值变化的影响,是一种快速精确判读基桩超声波法检测结果的方法。

## 参考文献:

- [1] 吴庆曾.基桩声测与动测技术[M].北京:中国电力出版社,2009.
- [2] 刘雨岚,周茗如.超声波透射法检测基桩完整性常见缺陷对应声参量特性分析[J].中国建材科技,2016,25(3):13-14+47.
- [3] 张宏,杭纲领.多元综合判据在基桩质量评价中的应用[J].中外公路,2010,30(5):204-207.
- [4] 邹兰林,叶知秋.小波分析结合神经网络的桩基缺陷检

测[J].无损检测,2022,44(7):50-54.

- [5] 赵明阶,汪魁,彭爱红.混凝土结构隐伏缺陷的超声波成像识别技术及其应用[M].北京:人民交通出版社股份有限公司,2016.
- [6] 广东省建筑科学研究院集团股份有限公司,广东省建筑工程集团有限公司.建筑地基基础检测规范:DBJ/T 15-60—2019[S].广州:广东省住房和城乡建设厅,2019.
- [7] 浙江省交通工程管理中心.公路工程基桩检测技术规范:JTG/T 3512—2020[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2020.
- [8] 向子明.基于超声波透射法的大直径桩基缺陷检测研究[J].公路与汽运,2020(5):129-133+144.

收稿日期:2023-07-25