

# 大跨度悬索桥索塔承台施工水化热优化控制研究

李昀峰<sup>1</sup>, 杨秀刚<sup>2</sup>, 潘权<sup>1</sup>, 许红胜<sup>1</sup>

(1.长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114; 2.贵州路桥集团有限公司, 贵州 贵阳 550001)

**摘要:** 厚度较大的大体积砼在施工过程中通常采用分层浇筑的方法, 费时费工, 对施工进度产生不利影响。为保证结构的良好受力性能、整体性, 并方便施工, 拟采用一次性浇筑的方法。文中结合有限元程序对大跨度悬索桥承台大体积砼一次性浇筑进行水化热分析, 从砼原材料选择、砼配合比设计、施工技术优化、冷却水管优化布置等方面分析该工艺的可行性。

**关键词:** 桥梁; 大跨度悬索桥; 大体积砼承台; 水化热; 优化控制

中图分类号: U443.25

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2019)06-0099-04

大体积砼施工浇筑过程中由于砼水化热反应导致砼内表温差较大, 引起砼体积膨胀或收缩, 砼在内外约束的作用下产生温度应力, 导致砼产生温度裂缝, 影响结构安全性、整体性及耐久性。因此, 大体积砼浇筑中应严格控制内表温差。常采用低热水泥、分层分块浇筑、预冷骨料、布置水管冷却等措施。

某悬索桥索塔承台为 14.1 m × 19.8 m, 厚 6 m, 原设计采用 C40 砼分层浇筑, 每一浇筑层布置 2 层冷却水管, 每层浇筑 2 m, 施工工期刚好跨越冰冻期, 砼浇筑施工需中断 2 个月, 导致现场设备利用率低、砼凿毛和钢筋施工等重复工序较多, 新老砼边界处理较多, 施工成本提高。为保证结构的良好受力、整体性, 同时方便施工, 节省工期, 适应当地气候条件变化, 采用一次性浇筑砼承台的施工方案。

## 1 一次性浇筑大体积砼优化措施

### 1.1 砼原材料选择和配合比设计

为改善砼的抗裂性能, 改用低水化热水泥, 优化砼配合比; 优选组分均匀、性能稳定的矿物掺合料和 TKAS 型高效减水剂, 降低砼用水量, 提高砼和易性。优化后 C40 砼的材料用量见表 1。

表 1 承台 C40 砼每立方米材料用量

材料名称	材料用量/kg	相对用量/%	材料名称	材料用量/kg	相对用量/%
水泥	286.00	11.80	水	155	6.39
砂	910.00	37.54	外加剂	4.28	0.18
碎石	947.00	39.06	掺合料	122.00	5.03
合计				2 424.28	100.00

### 1.2 施工技术优化

(1) 该悬索桥索塔承台砼浇筑高度 > 2 m, 为减

小砼落差, 防止砼离析, 在模板顶设置串筒和溜槽, 使砼倾倒下落落差小于 2 m, 解决 6 m 高模板砼浇筑问题。

(2) 砼浇筑温度控制在 20 °C 以下。

(3) 砼按横向水平分层浇筑, 每层厚度以 30 cm 控制, 如此循环, 直至浇筑完成。

(4) 加强砼养护, 砼表面采用蒸汽养护及双层土工布覆盖, 模板拆除后的承台侧面也采用土工布覆盖, 并对砼表面洒水使其具有较大湿度。

### 1.3 冷却水管布置优化

冷却水管的降温原理是把管道埋设在结构体内, 在砼浇筑过程中及时通冷却水, 利用水管的导热性能进行热量传递(循环在管道内的低温流体与管道表面之间的对流产生热量交换, 而循环在管道内的流体温度上升, 热量随着冷却水的流动而散失), 降低因砼水化热反应引起的温度攀升。冷却水的对流系数因冷却水的流动速度发生变化, 流速为 20~60 cm/s 时对流系数  $h_p$  按下式计算:

$$h_p = 4.75v + 43.0$$

式中:  $v$  为流速(cm/s)。

冷却水管规格为  $\phi 40 \times 2.0$ , 外径为 40 mm, 壁厚 2.0 mm。冷却水管布置 6 层, 平面上冷却水管中心距由原 1 m 优化为 0.5 m, 高度方向上每 1 m 设一层, 顶层各 50 cm, 每层均交叉布置, 层与层之间冷却水管走向垂直, 即上下层冷却水管呈井字形布置。承台砼开始浇筑后, 施工至冷却水管位置即开始通水, 冷却水管中的冷却水流量为 2.5 m<sup>3</sup>/h, 现场根据实际情况进行调整, 1~7 d 采用 2.5 m<sup>3</sup>/h 的流量, 7~14 d 根据需要间断性通冷却水, 并根据温度监控数据调整冷却水流量。冷却水管的基本参数

见表2。

表2 冷却水管的基本参数

项目	参数值
导热系数/[kJ·(m·h·°C) <sup>-1</sup> ]	0.56
比热/[kJ·(kg·°C) <sup>-1</sup> ]	4.18
密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	1 000
流入温度/°C	15
管径/mm	40
流量/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	2.5
对流系数/[kJ·(m <sup>2</sup> ·h·°C) <sup>-1</sup> ]	1 279.07

## 2 建模分析及测点布置

### 2.1 绝热温升和热传导方程

通过热源模拟水化热过程发生的热量, 砼绝热温升可通过水泥水化热公式计算:

$$\Delta T = \frac{m_c Q(t) + m_a Q_a}{c\rho}$$

式中:  $m_c$  为水泥用量(kg/m<sup>3</sup>);  $Q(t)$  为水泥水化热(kJ/kg);  $m_a$  为混合料用量(kg/m<sup>3</sup>);  $Q_a$  为混合料水化热(kJ/kg);  $c$  为砼比热[kJ/(kg·°C)];  $\rho$  为砼密度(kg/m<sup>3</sup>)。

砼设计标号为C40, 根据水泥及掺合料的水化热量计算砼绝热温升, 其中P.O42.5水泥水化热量为346 kJ/kg, 混合料的水化热量为155 kJ/kg, 砼绝热温升值为:

$$\Delta T = \frac{m_c Q(t) + m_a Q_a}{c\rho} = \frac{286 \times 346 + 122 \times 155}{0.96 \times 2\,422} = 50.7 \text{ } ^\circ\text{C}$$

热传导可定义为接触良好的两物体间或同一个物体的不同部位之间因温差引起的热量交换, 固体中热传导方程为:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{Q}{c\rho}$$

式中:  $t$  为时间(h);  $a$  为导热系数(m<sup>2</sup>/h);  $Q$  为单位时间内单位体积中的热量[kJ/(m<sup>3</sup>·h)]。

### 2.2 边界条件

按以下3种温度边界条件进行计算模拟:

(1) 绝热边界条件。砼表面的热流量不随时间而变化, 即表面绝热。在1/4承台模型的对称面上采用该类边界条件。

(2) 环境温度单元对流边界条件。承台顶面、外侧面和地基与空气接触的顶面偏安全地取为与大气接触的环境温度单元对流边界条件。砼与空气接

触时, 假定从砼内部经过表面流出的热量与砼表面温度  $T_1$  和  $T_2$  之差成正比, 即:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \beta(T_1 - T_2)$$

式中:  $\lambda$  为导热系数[kJ/(m·h·°C)];  $n$  为外法线方向;  $\beta$  为表面放热系数[kJ/(m<sup>2</sup>·h·°C)]。

(3) 固定温度边界条件。承台下设20 cm垫层, 垫层与地基接触良好。由于施工时垫层实际不足20 cm, 根据实际情况忽略垫层, 设为地基。为描述砼块体与地基的热量传递情况, 真实模拟实际砼浇筑过程, 将地基模拟为具有一定比热和热传导率的结构。承台与地基接触良好, 则温度连续, 热流量连续, 按照固定温度边界条件模拟, 边界条件如下:

$$T_1 = T_2, \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial n} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial n}$$

式中:  $T_1$ 、 $T_2$  分别为承台和地基接触面上的温度;  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  分别为承台和地基的导热系数。

### 2.3 计算参数确定

承台、地基材料和热特性计算参数见表3。

表3 计算参数

参数名称	承台	地基
比热/[kJ/(kg·°C) <sup>-1</sup> ]	0.961 4	0.836
热传导率/[kJ/(m·h·°C) <sup>-1</sup> ]	9.614	9.614
容重/(kN·m <sup>-3</sup> )	25	18
对流系数/ [kJ/(m <sup>2</sup> ·h·°C) <sup>-1</sup> ]	外表面 钢模板	50.16 50.16
外界温度/°C	15	—
入模温度/°C	20	—
28 d 抗压强度/MPa	40	—
28 d 弹性模量/kPa	3.25×10 <sup>7</sup>	1.0×10 <sup>6</sup>
强度发展系数	$a=4.5; b=0.95$	—
热膨胀系数/°C <sup>-1</sup>	1.0×10 <sup>-5</sup>	1.0×10 <sup>-5</sup>
泊松比	0.2	0.2
水泥用量/(kN·m <sup>-3</sup> )	2.86	—
热源函数系数	$K=50.7; a=0.605$	—

### 2.4 模型的建立

考虑到模型的对称性, 为提高计算效率, 利用有限元软件MIDAS/Civil建立1/4设计方案承台模型, 将承台模拟为简单的板式基础进行砼水化热分析。为精确模拟温度变化的作用, 将基础下的地基考虑在内, 地基尺寸为13 m×9 m×2 m。模型共划分为5 820个节点、4 832个单元(见图1)。

### 2.5 温度测点布置

按照实心段对称性的特点, 取实心段的1/4块

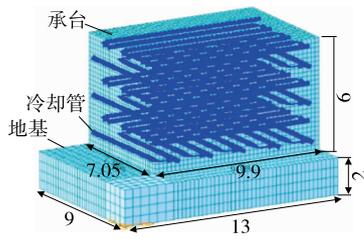


图1 承台施工水化热分析1/4模型(单位:m)

布置温度测点,中下、中上和表层各布设温度测点10个,共计30个(见图2)。

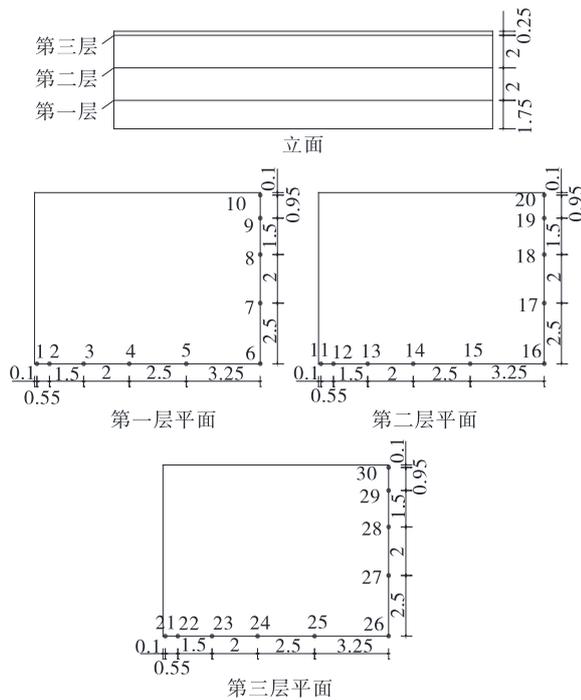


图2 承台温度测点布置(单位:m)

### 3 计算结果分析

#### 3.1 优化冷却水管布置的计算结果

在材料参数和边界条件相同的情况下,对优化冷却水管布置的承台进行水化热分析,分析其温度场和应力场分布。结果如下:60 h时,砼内部温度达到峰值,为46.2℃(见图3);80 h时,砼拉应力达到峰值,为2.03 MPa(见图4);拉应力最大处为节点N2038(见图5),最大拉应力小于容许抗拉应力,因水化热引起的砼表面拉应力小于允许抗拉强度,结构安全。冷却水管优化布置方案合理、可行。

#### 3.2 实测值与理论计算值比较分析

为分析承台内部最大温升和内表最大温差,取具有代表性的测点1#、6#、11#、16#、21#、26#进行分析,其中1#、11#、21#测点温度代表承台表面温

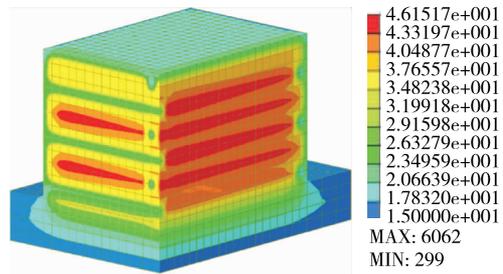


图3 60 h时温度分布(单位:℃)

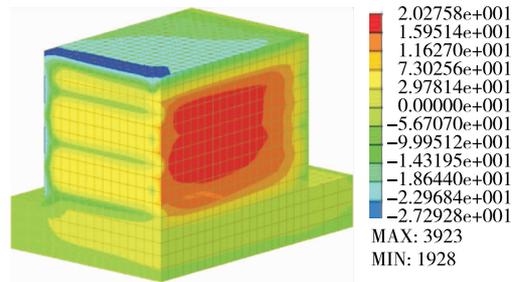


图4 80 h时应力分布(单位:MPa)

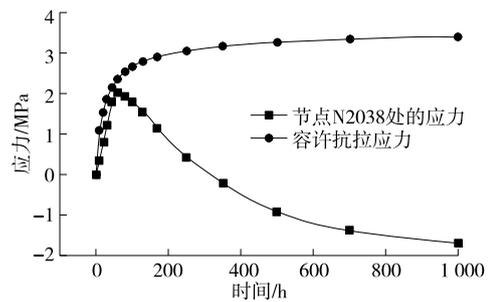


图5 节点 N2038 处的应力与容许抗拉应力分布

度,6#、16#、26#测点温度代表承台内部温度。承台各层内表温度时程变化见图6,承台特征点实测内表温度、温度场与理论值时程变化见图7。

由图6、图7可知:实测温度与理论温度时程变化(砼温峰、温峰时间、变化趋势)基本吻合,但有差别。实测砼温度峰值出现在55 h左右,内部最高温度为49.0℃,高于理论值2.8℃,且实测峰值出现时间比理论值早5 h。其原因是砼的实际浇筑时间长,冷却水管通水时间较晚,先浇筑的砼已开始水化热反应而积累了大量热量。砼内表最大温差出现在

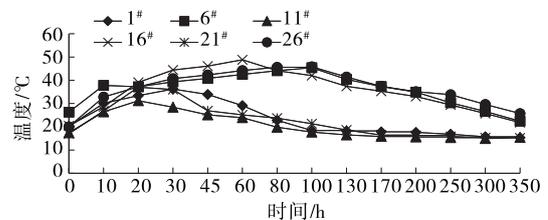


图6 实测承台特征点内表温度时程曲线

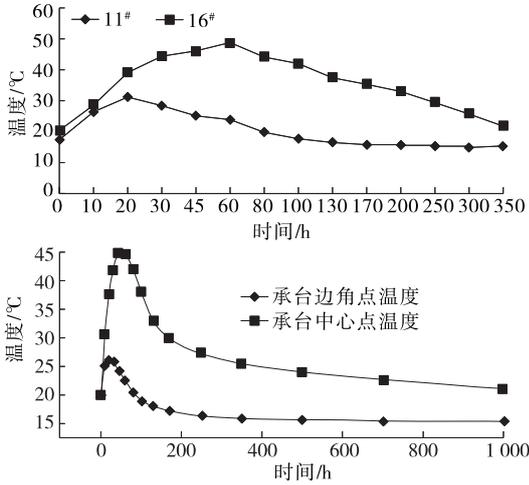


图7 砼内表温度实测值、温度场与理论值时程曲线

60 h, 为 24.9 °C, 濒临限值, 持续时间达 35 h。其主要原因是气温骤降、保温措施不及时。在砼覆盖后初期温度上升缓慢, 14 h 后水化热反应速率及升温速率加快, 至 45 h 后砼水化热反应逐渐减慢, 且受冷却管的影响温度上升逐渐减慢。水化热降温阶段至 100 h 后砼降温速率为 0.10~0.2 °C/h, 至 168 h 冷却管停止通水, 此后砼降温速率低于 0.1 °C/h, 砼后期降温速率平缓。在表面温度与大气温度最大温差低于允许值 20 °C 时拆除模板, 模板拆除后承台砼表面平整、棱角平直, 未出现蜂窝麻面和肉眼可见的温度应力裂缝。

### 4 结语

对某悬索桥承台大体积砼进行一次性浇筑, 从砼原材料选择和砼配合比设计、优化施工技术、冷却水管优化布置等方面分析该工艺的可行性, 利用有

限元计算结果和实测数据进行分析, 得如下结论: 1) 温度计算值与实测值吻合较好, 理论计算分析结果可靠, 可以 MIDAS/Civil 水化热分析结果为依据控制大体积砼的裂缝开展。2) 承台砼一次性浇筑工艺可行, 优化后的方案合理。

由于理论分析边界条件和实际施工边界条件存在差异, 实测数据与理论值存在差别, 而目前的有限元分析软件无法模拟动态变化的边界条件, 需进一步研究和优化。

### 参考文献:

- [1] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
- [2] 朱伯芳. 考虑水管冷却效果的混凝土等效热传导方程[J]. 水利学报, 1991(3).
- [3] 美国内务部垦务局. 混凝土坝的冷却[M]. 侯建功, 译. 北京: 水利电力出版社, 1958.
- [4] 田洋. 大体积混凝土水化热温度场有限元分析[J]. 交通世界, 2018(19).
- [5] 吴永红, 黄元文. 悬索桥重力式锚碇大体积混凝土温度分析与控制[J]. 中国水运, 2011(1).
- [6] 熊华飞. 一次性浇筑厚尺寸承台大体积混凝土温控防裂研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.
- [7] 张桂芳, 梁天贵, 曾有艺, 等. 大体积砼水化热分析及温控措施[J]. 公路与汽运, 2018(5).
- [8] 毛家宽, 杨晓东. 大体积混凝土水化热的控制方法及效果[J]. 黑龙江交通科技, 2015(6).
- [9] 陈应波, 李秀才, 张雄. 大体积混凝土浇筑温度场的仿真分析[J]. 华中科技大学学报: 城市科学版, 2004, 21(2).

收稿日期: 2019-05-30

\*\*\*\*\*  
(上接第 98 页)

砼腹板箱梁具有一定积极效果, 波形钢腹板箱梁自重减小的正面效果大于腹板刚度降低的负面效果, 波形钢腹板截面的受弯性能提高, 整体刚度大于砼腹板。

(2) 连续刚构桥、部分斜拉桥、传统斜拉桥的动力特性依次降低, 部分斜拉桥的动力特性介于连续刚构和传统斜拉桥之间; 波形钢腹板部分斜拉桥及传统斜拉桥主梁弯曲刚度比连续刚构桥大, 部分斜拉桥主梁面外刚度比其他桥型大, 多箱室波形钢腹板部分斜拉桥和连续刚构桥的抗扭刚度大于传统斜拉桥。

### 参考文献:

- [1] 姚玲玲, 郭理学. 大跨度波形钢腹板矮塔斜拉桥[J]. 公路交通科技: 应用技术版, 2016(9).
- [2] 陈水生, 钟汉清, 桂水荣, 等. 波形钢腹板多塔斜拉桥动力特性分析[J]. 桥梁建设, 2016, 46(2).
- [3] 李广夏. 波形钢腹板 PC 组合箱梁连续刚构桥动力特性及抗震性能分析[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2015.
- [4] 吴兴邦, 吕云. 三塔斜拉桥动力特性影响参数分析[J]. 公路工程, 2015, 40(6).

收稿日期: 2018-09-29