

# 浉河大桥承台大体积混凝土施工与温控分析

冯仲仁<sup>1</sup>, 王 凯<sup>1</sup>, 黄 勇<sup>2</sup>

(1. 武汉理工大学土木工程与建筑学院, 湖北武汉 430070; 2. 中港第二航务工程局航联公司, 湖北武汉 430080)

**摘 要:**河南信阳浉河大桥为独塔双索面斜拉桥, 主塔承台混凝土总量为  $386\text{m}^3$ 。该文分析了混凝土裂缝产生的机理, 进行了主塔承台大体积混凝土的温度应力计算, 提出了防止温度裂缝产生的混凝土施工及温度控制措施。

**关键词:**斜拉桥; 承台; 大体积混凝土; 温度控制; 施工

**中图分类号:** U445.559 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-7716(2005)01-0051-04

## 1 引言

近年来, 大体积混凝土越来越多地被应用到桥梁工程领域中。许多斜拉桥的主塔承台均属于大体积混凝土结构。由于一些承台工程要求采用一次性连续浇筑, 同时必须满足强度、刚度和抗渗等级的要求, 因此对施工准备、组织设计和现场监控都提出了较高的要求, 特别是严格控制大体积混凝土在硬化过程中水化热而引起的内外温差(规范要求控制在  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  以内), 防止由于过大的温度应力而导致温度裂缝的产生。本文结合浉河大桥主塔承台大体积混凝土的工程实践, 分析了混凝土裂缝产生的机理, 进行了主塔承台大体积混凝土温度应力的计算, 提出了防止温度裂缝产生的混凝土施工及温度控制措施。

## 2 工程概况

浉河大桥位于河南信阳市市内, 是连接民权路与河南路的城市主干道, 为独塔斜拉式桥梁, 全长  $280\text{ m}$ , 包括主桥、南北引桥(跨线桥), 桥宽  $24\text{ m}$ 。主桥采用  $32\text{ m}+78\text{ m}+136\text{ m}$ , 主梁采用  $\Pi$  形板式边主梁截面, 南、北跨线桥为预应力混凝土大孔板梁。主塔为 H 形, 高  $72.19\text{ m}$ , 独塔双索面, 其中主塔南侧为双排双索面, 北侧为单排双索面。全桥 1 号~4 号墩均采用上下游分离式墩身与基础, 基础结构为钻孔灌注桩及承台。3 号墩主塔承台位于砂砾层上, 单幅承台平面尺寸为  $10.5\text{ m}\times 10.5\text{ m}$ , 厚度为  $3.5\text{ m}$ , 混凝土设计强度等级为 C30, 全部混凝土浇筑量为  $386\text{ m}^3$ , 按照规范要求该承台施工属于大体积混凝土。

## 3 混凝土水化热温度裂缝产生的机理

在承台承受荷载之前, 混凝土水化热、干缩、施工原因等等均会导致承台裂缝出现。由混凝土水化热产生的温度裂缝主要分为自由板收缩的水化热温度裂缝和受基础约束产生的水化热温度裂缝两种, 浉河大桥主塔 3 号墩承台嵌固在 9 根灌注桩基础上, 其温度裂缝属于第二种情况。承台混凝土浇筑在刚性基础上, 受到基础的刚性约束, 温度沿厚度方向变化。混凝土浇筑后, 在水化热作用下, 板内温度迅速上升、体积膨胀, 受刚性接触面的约束, 板内出现压应力。由于初期弹性模量较小, 压应力数值相应较小。当浇筑体温度下降, 混凝土逐渐冷却收缩, 其弹性模量较初期有较大增长, 使冷却收缩产生的拉应力超过早期的压应力, 混凝土处于受拉状态。板的底面和表面散热较快, 温度较低, 相应的应力较小, 板中心温升最高, 冷却后的拉应力也最大。

综上所述, 对于此次承台施工, 浇筑厚度较大, 内部水化热温升值也大。由于约束作用, 冷却收缩的拉应力也大, 当其超过混凝土的抗拉强度时, 将产生内部裂缝, 部分地切断了结构断面, 具有一定的危害性; 表面温度骤降和干缩也将产生拉应力。二者叠加, 可能导致表面裂缝发展为贯穿裂缝, 对结构的整体性和稳定性产生不良影响。因此, 这类裂缝必须加以预防和控制。

## 4 混凝土原材料及配合比

### 4.1 原材料

水泥采用信阳金龙 325 号普通硅酸盐水泥, 其特点是水化热低, 初凝时间长, 适用于大体积混凝土; 砂采用游河中砂, 细度模数  $M_x=2.82$ ; 石子采用游河石灰岩碎石, 粒径  $16\sim 31.5\text{ mm}$ , 压碎值  $9.7$ ; 掺合料采用粉煤灰; 外加剂采用 FDN-4 高效

收稿日期: 2004-06-21

作者简介: 冯仲仁(1962—), 男, 湖北武汉人, 副教授, 从事桥梁与隧道工程的科研教学工作。



泵送剂。

#### 4.2 混凝土配合比

|                         |       |
|-------------------------|-------|
| 水泥(kg/m <sup>3</sup> )  | 376   |
| 砂(kg/m <sup>3</sup> )   | 761   |
| 石(kg/m <sup>3</sup> )   | 1 051 |
| 水(kg/m <sup>3</sup> )   | 180   |
| 外掺料(kg/m <sup>3</sup> ) | 41.86 |
| 外加剂(kg/m <sup>3</sup> ) | 4.0   |
| 坍落度(cm)                 | 16~20 |

### 5 温度应力计算

为了有效控制承台混凝土内部温升,防止混凝土表面出现强度裂缝,对承台进行温控设计,计算施工期温度场和应力场分布特征。温控计算采用“大体积混凝土施工期温度场及仿真应力场分析程序包”进行。该计算能够模拟混凝土的实际施工过程,考虑了混凝土的分层分块浇筑、分层厚度、浇筑温度、施工间歇期、混凝土水化热的散发规律、养护方式、冷却水管降温、外界气温变化、混凝土及基岩弹模变化、混凝土徐变等复杂因素。

#### 5.1 计算模型及假定

(1)据承台结构特点,均取 1/4 进行网格剖分计算。模型的单元总数为 3 275,节点总数为 4 210。

(2)承台混凝土受钻孔桩的约束,计算弹性模量取  $2.7 \times 10^4$  MPa。

(3)承台混凝土一次浇筑,浇筑温度 24℃。

(4)计算时,承台顶面及四周为第三类边界条件(向空气散热)。

(5)计算时考虑徐变对混凝土应力的影响。

(6)混凝土物理热学性能参数:

|                        |                       |
|------------------------|-----------------------|
| 容重(kg/m <sup>3</sup> ) | 2 380                 |
| 弹模增长指数                 | 0.15                  |
| 最终弹模(MPa)              | $3.4 \times 10^4$     |
| 热胀系数(1/℃)              | $6.96 \times 10^{-6}$ |
| 比热(kJ/kg · ℃)          | 1.0                   |
| 混凝土绝热温升(℃)             | 40.0                  |

(7)温度及应力计算从 2004 年 4 月上旬开始,计算时间历时半年。

#### 5.2 温控计算结果

##### 5.2.1 温度场特征

承台内部最高温度计算结果:

|             |      |
|-------------|------|
| 混凝土标号       | C30  |
| 最高温度        | 55.0 |
| 最高温度出现时间(d) | 2~3  |

浇筑时间 4 月上旬

浇筑温度(℃) 24.0

##### 5.2.2 仿真应力场特征

表 1 承台混凝土各龄期的最大温度主拉应力 MPa

|                 |      |      |      |      |      |      |      |
|-----------------|------|------|------|------|------|------|------|
| t(d)            | 3    | 7    | 14   | 28   | 60   | 90   | 120  |
| $\sigma_{\max}$ | 0.56 | 0.85 | 1.10 | 1.35 | 1.61 | 1.87 | 2.46 |

表 2 C30 混凝土劈裂抗拉强度试验表 MPa

|      |      |      |      |      |      |
|------|------|------|------|------|------|
| t(d) | 7    | 14   | 28   | 60   | 120  |
| C30  | 1.49 | 2.57 | 3.21 | 3.38 | 3.50 |

由表 1、表 2 可以看出,承台混凝土一次浇筑,混凝土内部主拉应力均小于混凝土劈裂抗拉强度,混凝土抗裂安全系数  $K \geq 1.4$ 。项目部在采取有效的温控措施,严格控制施工质量后,可以防止承台混凝土有害温度裂缝的产生。

#### 5.3 温控标准

根据温控计算结果,制定温控标准如下:

(1)控制混凝土浇筑温度:承台浇筑温度  $T_v \leq 24.0$ ℃;

(2)控制混凝土内部最高温度:承台内部最高温度  $T_{\max} \leq 55$ ℃;

(3)控制混凝土内表温差:承台混凝土内表温差  $\leq 25.0$ ℃;

(4)控制混凝土降温速率: $\Delta U \leq 2.0$ ℃/d。

### 6 混凝土施工

#### 6.1 混凝土浇筑

承台混凝土采用一座混凝土搅拌站集中拌制,混凝土输送泵泵送入模。为保证前后浇筑的混凝土没有冷缝,混凝土浇筑采用“分段定点、一个坡度、薄层浇筑、逐渐覆盖、一次到顶、局部补充”的连续薄层推移式浇筑方法,要求在初凝时间内上层混凝土必须覆盖下层混凝土,每层浇筑混凝土厚度为 30 cm。泵送混凝土坍落度大,在浇筑中自然流淌形成一个坡度,保持这一坡度层层浇筑,逐渐覆盖,一次到顶,加强全面振捣,保证上、下层在初凝时间内连续浇筑。实际施工中混凝土从高处向低处流速缓慢,并没有发现离析现象。

#### 6.2 混凝土振捣

混凝土振捣采用  $\phi 50$  插入式振动器振捣,振捣器操作“快插慢拔”,由于采用斜向分层方案,严格控制振捣顺序,振捣应从浇筑层的下端开始,逐渐上移。且应控制振捣时间、移动距离和插入深度,每个浇筑带配专人振捣,上、下层振捣搭接 5~10 cm,以二次振捣后混凝土仍能塑性闭合为原则。振捣时应



避免碰撞钢筋及模板,保证混凝土振捣密实,但以不过振为原则,严禁出现漏振现象。在混凝土振捣后 2 h 左右,进行二次振捣,二次振捣要掌握好振捣时间,避免过振。

### 6.3 对混凝土泌水、浆水的处理

由于混凝土采用分层浇筑,在各层之间会产生泌水层,可通过设立人工“水潭”,用软轴水泵或人工的方法将水排出,在实际施工中泌水很少,几乎没有采用抽水的办法。

混凝土的表面处理是减少表面收缩裂缝、控制承台标高及平整度的重要措施。混凝土浇筑至设计标高后,采用铝合金刮尺刮除多余的浮浆,在混凝土初凝前,用滚筒滚压混凝土表面数遍。表面有大量浮浆处,在表面均匀洒 1 层 5~10 mm 石子拍压密实。

## 7 混凝土温度控制措施

### 7.1 混凝土原材料选择及质量控制

合理选择混凝土原材料,选择级配良好的砂、石料,外掺料和外加剂,以降低水泥用量,控制混凝土水化热温升,是大体积混凝土温控的重要环节。

### 7.2 优化混凝土配合比,降低水化热温升

优化配合比,掺入掺合剂粉煤灰,减少水泥用量,降低混凝土的水化热温升;使用缓凝型高效泵送剂推迟温峰的出现。

掺粉煤灰的混凝土有良好的粘聚性,不离析、不泌水、和易性好,有利于泵送,浇注振捣容易密实;掺粉煤灰的混凝土 28 d 强度比不掺粉煤灰的混凝土强度有所降低,但 60 d 强度相近;掺粉煤灰的混凝土的抗渗、抗透气性能得到改善,即混凝土密实性有所提高;掺粉煤灰的混凝土的抗碳化能力较普通混凝土差,但在规范允许范围之内,所以掺粉煤灰对混凝土的耐久性几乎无不利影响。

### 7.3 降低混凝土的浇筑温度

混凝土开拌之前,试验室要测量混凝土原材料(水、水泥、砂、石)的温度及环境温度,专门记录,计算混凝土出机温度,并估算浇筑温度。计算方法如下:

混凝土的出机温度  $T_0$ :

$$T_0 = \frac{(0.2 + Q_s)W_s T_s + (0.2 + Q_g)W_g T_g}{0.2(W_s + W_g + W_c) + W_w} + \frac{0.2W_c T_c + (W_w - Q_s W_s - Q_g W_g) T_w}{0.2(W_s + W_g + W_c) + W_w}$$

式中: $Q_s$ 、 $Q_g$  分别为砂、石的含水量,以%计; $W_s$ 、 $W_g$ 、 $W_c$ 、 $W_w$  分别为每方混凝土中砂、石、水泥

和水的重量; $T_s$ 、 $T_g$ 、 $T_c$ 、 $T_w$  分别为砂、石、水泥和水的温度。

混凝土的浇筑温度  $T_p$ :

$$T_p = T_0 + (T_a - T_0)(\theta_1 + \theta_2 + \dots + \theta_n)$$

式中: $T_a$  为混凝土运输和浇筑时的气温; $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 、 $\theta_n$  为系数,其数值如下:混凝土装、卸和转运,每次  $\theta = 0.032$ ;混凝土泵送时  $\theta = 0.0018 \tau$ ,  $\tau$  为运输时间,以 min 计;浇筑过程中  $\theta = 0.003 \tau$ ,  $\tau$  为浇捣时间,以 min 计。

当浇筑温度超过控制标准时,立即采取降温措施:砂石料尽量堆高并采取遮阳措施;水泥提前进场,停滞降温;当气温高于入仓温度时,提高浇筑强度,尽量缩短混凝土运输时间和暴晒时间;混凝土泵管外用草袋覆盖,浇水降温。

### 7.4 冷却水管埋设及其控制

根据混凝土内部温度分布特征,承台埋设冷却水管。冷却水管采用  $\phi 32$  mm 的薄壁钢管,沿高度范围内布置 3 层,最上层距顶 1.0 m,最底层距底 0.9 m,其它每层间距 0.8 m,水平间距 1 m,水管在同一平面、不同位置转弯时采用弯头进行连接。在混凝土浇筑前应对冷却水管进行闭水试验,防止混凝土浇筑过程中漏水、阻水现象的发生。混凝土浇筑到各层冷却水管标高后即开始通水,通水流量达到 25 L/min,通水时间持续到混凝土养生 7 d 左右。为了防止因冷却水温度过低与混凝土温度过高而引起裂缝,所以冷却水管进水温度一般在 20 °C 左右。待通水冷却全部结束后,采用同标号水泥浆或砂浆封堵冷却水管。

### 7.5 混凝土养护

在顶层混凝土开始降温时先在表面覆盖一层薄膜,不使其透风漏气、水份蒸发、散失并带走热量,以此来保持混凝土表面的温度;同时在塑料薄膜上盖以草袋,用草袋湿水来保证混凝土的湿润。采取这些措施后,可减少混凝土表面的热扩散,延长散热时间,减少混凝土中心与表面及外部环境的温差,防止温度应力大于同期混凝土抗拉强度而产生温差裂缝和表面干缩裂缝,同时也保证了水泥的水化作用在良好潮湿环境下进行,使混凝土早期抗拉强度较快上升。

### 7.6 混凝土测温

对大体积混凝土施工进行温度监控,是为了掌握混凝土内部的最高温升及中心与表面的温度差,以便采取积极的技术措施,降低并控制混凝土内外温差,实现信息化施工。



# 漕俞路淀浦河大桥施工控制

曹海顺

(同济大学建筑设计研究院, 上海 200092)

**摘 要:**淀浦河大桥是一座主跨 75 m 的连续箱梁桥, 采用挂篮对称悬臂浇注。该文介绍了该桥施工控制的目的和内容、工作方法、结构分析及监测内容和成果。

**关键词:**连续箱梁桥; 施工控制; 结构分析; 监测; 上海青浦区

**中图分类号:**U445.466 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-7716(2005)01-0054-03

## 1 工程概况

漕俞路淀浦河大桥位于上海市青浦区漕俞路线与淀浦河交点, 属漕俞路互通式立交的主体工程。其主桥上部结构为三跨(43 m+75 m+43 m)变截面预应力混凝土连续箱梁, 总长 161 m, 桥梁与河道斜交 13°。桥面纵坡以主桥中点为变坡点, 南侧 0.35% 升坡, 北侧 3.83% 升坡, 竖曲线半径 2 500 m。主桥桥面宽 31.0 m, 分两幅修建, 共六车道。每幅桥箱梁设计为单箱单室断面, 箱梁顶面宽 13.0 m, 底面宽 7.5 m, 为满足桥面横向布置及减轻铺装层重量, 箱梁顶面设置 2.0% 向外侧的单向横坡。箱梁主墩处梁高为 4.00 m, 各跨跨中和边跨现浇段梁高为 2.00 m, 其间梁底下缘按二次抛物线变化。设计荷载为城—A 级。

收稿日期: 2004-08-05

作者简介: 曹海顺(1978—), 男, 江西东乡人, 硕士, 助工, 从事桥梁设计与施工控制。

根据大体积混凝土基础早期升温较快, 后期降温较慢的特点, 测温采取先频后疏的原则。主要测量混凝土入模温度、进水管口温度、各层降温水管出水口温度、承台中心温度及混凝土表面温度。承台中心在浇筑前竖直埋设一根钢管, 埋深 2.5 m, 灌入冷水便于测温。测温从混凝土浇筑后的 3 h 开始, 每 2 h 测 1 次。混凝土浇筑后 3~4 d, 每 4 h 测 1 次, 5~7 d 每 8 h 测 1 次, 降温结束即各部位温差进入安全范围后撤除保温措施。

每天的测温数据出来后, 及时对数据进行分析, 并和理论计算值相比较, 绘制温度—时间曲线。现场根据测量结果随时调整冷却水管的出水流量, 防止混凝土由于降温过快而出现裂缝。从总体测温情

况看, 该工程大体积混凝土养生是比较成功的, 混凝土表面温度与内部温度, 表面温度与环境温度之间的温度梯度差基本上未超过规定的 25℃。

## 2 施工控制的目的和内容

连续梁桥是一种超静定结构, 理想的几何线形与合理的内力状态不仅与设计有关, 而且还依赖于科学合理的施工方法。如何通过对施工过程的控制, 在建成时得到预先设计的内力状态和几何线形, 是施工中非常关键的问题。

对于悬臂施工的预应力混凝土连续梁桥, 施工控制就是根据施工监测所得的结构参数进行施工阶段的实时结构分析, 确定出每个悬臂浇注节段的立模标高, 并在施工中根据施工监测的成果对误差进行辨识、修正结构参数, 利用修正后的计算模型重新

况看, 该工程大体积混凝土养生是比较成功的, 混凝土表面温度与内部温度, 表面温度与环境温度之间的温度梯度差基本上未超过规定的 25℃。

## 8 结语

漕俞路大桥主塔承台大体积混凝土的浇筑任务经连续作业 20 h 于 2004 年 4 月 11 日顺利完成了, 并通过系统的降温措施、养护及测温监控, 防止了裂缝的产生, 取得了承台施工的成功。

从漕俞路大桥主墩承台大体积混凝土的温度应力分析到施工的圆满完成, 得到如下体会: 只要经过周密的理论计算、精心组织、协同配合, 采取得当的施工措施, 大体积混凝土施工质量是能得到保证的。