

# 大体积砼水化热分析及温控措施

张桂芳<sup>1</sup>, 梁天贵<sup>2</sup>, 曾有艺<sup>3</sup>, 张鑫宇<sup>3</sup>

(1.贵州路桥集团有限公司, 贵州 贵阳 550001; 2.贵州公路局, 贵州 贵阳 550003;

3.长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410004)

**摘要:** 针对贵州省余安(余庆—安龙)高速公路平塘—罗甸段大小井特大跨拱桥拱座施工中大体积砼水化热问题,采用有限元软件 MIDAS/Civil 建立施工阶段仿真模型模拟施工过程,对大体积砼水化热进行计算分析,得出施工和养护过程中温度场、力场分布和水化热规律,据此制定合适的大体积砼表面养护和内部降温措施,并在实施过程中进行温度采集,实时调整和改进温控措施,将温度控制在规范要求范围内。

**关键词:** 桥梁;拱座;大体积砼;水化热;温度场

中图分类号: U441

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2018)05-0102-04

随着施工技术的发展和满足工程实际的需要,大型化的砼结构越来越常见,其中桥梁拱座是一种典型的大体积砼结构。水泥水化过程中产生水化热,会导致砼体积膨胀或收缩,结构受到内、外部约束时将产生温度应力,使大体积砼结构产生裂缝,大大降低结构的防水性能、承载力、耐久性等。水化热是结构耐久性、稳定性降低的重要原因。文献[6]~[9]采用 MIDAS、ABAQUS 对大体积砼温度场进行数值模拟,分析了水化热分布规律、结构开裂机理并提出了控制措施;文献[10]采用理论与有限元分析相结合的方法分析了水化热的成因;文献[11]采用理论与实测相结合的方法研究了重力式锚碇散索鞍支墩基础在有无冷却管情况下的水化热温度场;文献[12]采用理论计算和实测的方法对大体积砼水化热温度场和应力场耦合效应进行分析,评估了服役前砼的抗裂性能;文献[13]分析了管却冷情况下大体积砼水化热的温度场。该文以贵州省余安(余庆—安龙)高速公路平塘—罗甸段大小井特大拱桥拱座为研究背景,采用有限元软件建立模型模拟其施工过程,研究施工养护阶段温度场、应力场分布规律,制定大体积砼拱座降温措施。

## 1 工程背景

大小井特大桥主桥拱座采用整体式钢筋砼结构,宽 30 m、高 20.649 m、长 28.7 m,底面设计成阶梯形,拱座基础及基桩采用 C30 砼,拱座和封胶砼采用 C40 砼。由于拱座砼体积过大,采用分层分块浇筑,浇筑方式见图 1。

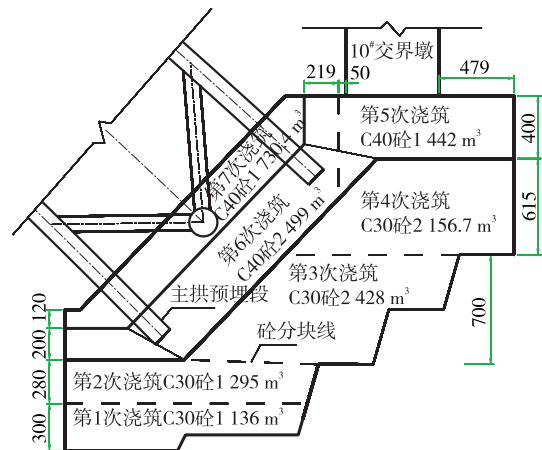


图 1 大小井特大桥拱座分层分块浇筑示意图(单位:cm)

## 2 理论计算

以该桥拱座第 6 层浇筑砼为研究对象,根据砼配合比、热传导系数及施工方法、约束边界条件和对流边界条件等建立有限元模型,通过模拟计算得出大体积砼施工和养护过程中温度场和应力场,据此采取适当的大体积砼表面养护和内部降温措施。

### 2.1 水化热计算参数

(1) 砼配合比。根据该桥拱座砼配合比(见表 1)计算得 C40 水泥换算重量  $W_c' = 296 + 0.25 \times 160 = 336 \text{ kg}$ 。

表 1 大小井拱座 C40 砼配合比 kg

材料	用量	材料	用量
水泥	296.00	砂	772.00
粉煤灰	160.00	碎石	1 067.00
水	155.00	外加剂	4.56

(2) 砼导热系数。由 C40 砼组成成分的重量百分比按加权平均计算砼导热系数,结果见表 2。

(3) 砼比热。按 C40 砼组成成分体积权重计算比热,结果见表 2。

表 2 C40 砼换算配合比、导热系数和比热

材料	重量/kg	所占百分比/%	导热系数/[ $(\text{kJ} \cdot (\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})^{-1})$ ]	比热/[ $(\text{kJ} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1})$ ]
水泥、粉煤灰、外加剂	460.56	18.7	4.446	0.456
水	155.00	6.3	2.160	4.187
砂	772.00	31.5	11.129	0.699
碎石	1 067.00	43.5	14.528	0.749
砼	2 454.56	100.0	10.793	0.940

(4) 环境气温。采用余弦表达式模拟,取日最高气温与最低气温的平均值 26 ℃。

(5) 砼浇筑温度。浇筑温度主要受原材料温度、气温等影响,在砼浇筑前测量水泥、粉煤灰、矿粉、砂、石、水的温度,考虑环境温度估算浇筑温度。该桥拱座在 10 月施工,平均气温为 26 ℃,砂、碎石温度以平均温度 27 ℃取值,水泥、粉煤灰温度以 27 ℃计,搅拌水温取 25 ℃。砂含水率取 2%,碎石含水率取 0.3%,C40 砼出机温度  $T_0=24.6\text{ }^\circ\text{C}$ 。考虑上述因素,得到 C40 砼浇筑温度  $T_p=25.4\text{ }^\circ\text{C}$ 。

2.2 水化热计算

该桥拱座第 6 层 C40 砼水泥最大用量为 296 kg,粉煤灰用量为 160 kg,得:

$$\theta_0 = \frac{m_{ce}Q}{C_p} = \frac{350 \times 296}{2\,474.5 \times 1.011} = 41.4\text{ }^\circ\text{C}$$

拱座第 6 块厚度折合散热系数为 0.89,其理论最高温度为:

$$T_{\max} = 25.4 + 41.4 \times 0.89 + 160/50 = 65.4\text{ }^\circ\text{C}$$

2.3 有限元计算

取拱座的一半结构,利用有限元软件 MIDAS/Civil 按其尺寸建立三维空间模型,考虑强度发展规律、约束条件、对流系数等因素的影响对施工阶段进行水化热分析。图 2 为拱座第 6 层砼有限元模型,共 45 657 个节点、43 230 个单元。材料和热特性参数见表 3。

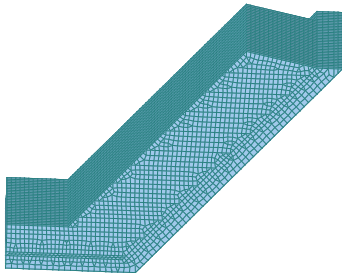


图 2 拱座第 6 层砼有限元模型

表 3 计算参数

参数名称	参数值
比热/( $\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$ )	0.94
容重/( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	25
热传导率/( $\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$ )	10.793
对流系数/( $\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$ )	12.42
外界温度/ $^\circ\text{C}$	26
浇注温度/ $^\circ\text{C}$	25.4
28 d 抗压强度/MPa	40
28 d 弹性模量/( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	$4 \times 10^7$
强度发展系数	$a=4.5;b=0.95$
热膨胀系数	$1 \times 10^{-5}$
泊松比	0.2
水泥用量/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	296
热源函数系数	$K=40;a=0.362$

冷却管采用外径 40 mm、壁厚 2.5 mm 的钢管,冷却管中冷却水流入温度为 24 ℃,流量为 4 m<sup>3</sup>/h,流入时间为浇注 5 h 后,结束时间为浇注 720 h 后。对流系数为 320,共布置 11 层冷却管。第 6 层砼浇筑后的最高温度场及温度时程分别见图 3、图 4。温度时程中的 4 个节点分别为中心最高温度处及各温度梯度处。

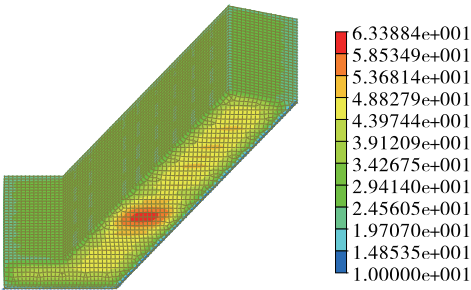


图 3 拱座第 6 层砼的最高温度场云图(单位:℃)

根据计算结果,入模温度为 25.4 ℃时,拱座第 6 层砼水化热温度峰值 63.4 ℃出现在浇筑后 140 h 左

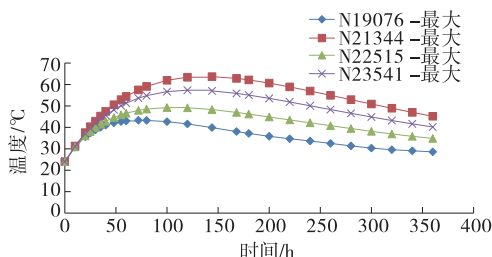


图4 拱座第6层砗中心处温度时程曲线

右,比入模温度高 $38^{\circ}\text{C}$ ,砗内外温差最大为 $22^{\circ}\text{C}$ 。砗拉应力虽能满足规范要求,但由于砗体积较大,浇筑后水泥水化过程中释放大量的水化热,部分表层拉应力较大易引起砗开裂,建议适当降低砗入模温度,控制砗内外温差,并及时对砗进行保温保湿养护,保湿养护持续时间不少于14 d。

### 3 现场温控措施

影响砗开裂的因素很复杂,往往不是单一因素造成的。砗施工的各个环节对于控制早期裂缝、减小后期开裂倾向、实现砗结构耐久性都至关重要,需对砗的原材料选择、配合比设计、拌和、运输、浇筑、振捣、通水、养护等全过程进行控制。

#### 3.1 温控测点布置

该桥拱座第6层砗共布置测温元件9个(见图5)。其中:6-1测量砗上表面温度,6-9测量砗前表面温度,6-1、6-9均离砗表面5 cm;其余测温元件测量砗内部温度。在竖向,6-4~6-9离第6层砗底面695 cm,6-3离第6层砗底面935 cm,6-2离第6层砗底面1 175 cm。另外布置4个温度传感器分别测量大气温度、进水温度、出水温度和砗入模温度。

#### 3.2 温控方法

冷却水流量根据测温结果确定,升温时段通水流量应使流速达到 $0.6\text{ m/s}$ ;降温时段通过水阀控制减缓通水,使流速减半,并在降温阶段通水保证降温速率。建议在适当位置设置温水蓄水库,将砗流出的温水流入蓄水池,掺加适量河水达到适当温度后回流进砗冷凝管循环利用。对于大体积砗,由于水化放热会使温度持续升高,在升温的一段时间内应加强内部散热,如加大通水流量、降低通水温度等。在降温阶段,则对表面进行保温覆盖减小降温速率。除侧壁采用钢模板、透水模板布保温保湿外,上表面待砗初凝后覆盖塑料薄膜并加盖帆布或草袋进行保温。砗保温应充分、时间足够长,让砗慢慢冷

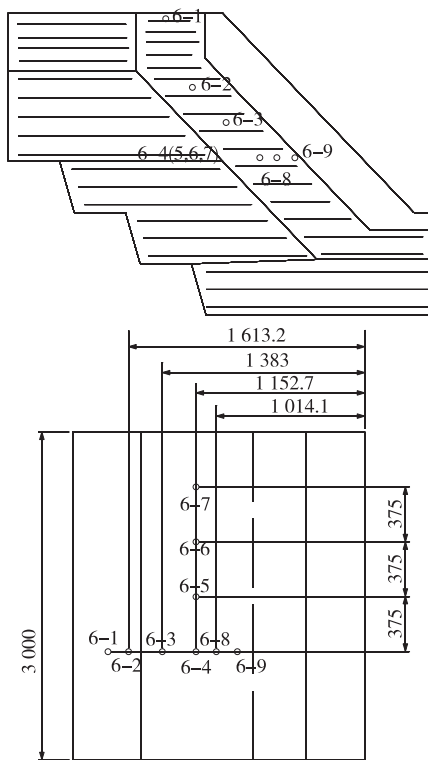


图5 拱座第6层砗测温元件布置示意图(单位:cm)

却,直到温差达到允许范围,使温度应力在砗内部分松弛掉,从而控制有害裂缝的产生。

砗浇筑时,重点防止升温过快。该桥拱座第6层砗施工中,10月15日0:00~4:0时现场测温数据显示砗平均温度从 $52.74^{\circ}\text{C}$ 上升到 $55.65^{\circ}\text{C}$ ,升温过快,通过增大通水流量,在8:00时将温度上升速度控制下来,使升温速率维持在 $1^{\circ}\text{C}$ 左右。实测温度见表4。

表4 10月15日温控实测数据  $^{\circ}\text{C}$

时刻	砗内部 温度	砗外部 温度	砗内外 温差	砗平均 温度	最高 温度
0:00	58.28	36.13	22.15	52.74	62.01
4:00	60.55	40.93	19.62	55.65	63.50
8:00	62.28	46.42	15.86	57.75	64.61
12:00	62.39	48.67	13.72	58.47	65.48

砗浇筑完成后,重点做好保温措施,防止砗温度下降过快,将每日9:00时的降温速率控制在 $1.5^{\circ}\text{C/d}$ 。18—19日,降温速率达到 $2.22^{\circ}\text{C/d}$ ,降温速率过快,除采用透水模板布和循环水保温外,还用从砗中流出的温水覆盖砗表面,将降温速率成功控制在 $1.5^{\circ}\text{C/d}$ 。实测温度见表5。

表 5 10 月 18—21 日温控实测数据 °C

时刻	砼内部 温度	砼外部 温度	砼内外 温差	砼平均 温度	最高 温度	降温 速率
18 日 9:00	58.69	46.01	12.68	55.06	66.12	2.22
19 日 9:00	58.17	42.05	16.12	53.56	63.84	1.50
20 日 9:00	57.62	38.31	19.31	52.10	61.55	1.46
21 日 9:00	56.30	36.85	19.45	50.74	59.53	1.36

3.3 检测结果

该桥拱座第 6 层砼最高温度为 67.83 °C,入模最低温度为 27.5 °C,符合砼浇筑体在入模温度基础上的温升值 $\leq 50$  °C的温控标准;砼的最大内表温差为 19.97 °C,符合最大内表温差 $\leq 25$  °C的温控标准;冷凝管进出水温差为 0.5~13.4 °C,符合 $\leq 15$  °C的温控标准;降温速率基本控制在 2 °C/d,符合降温速率 $\leq 2$  °C/d的温控标准。

拱座砼内部平均温度、外部温度、整体平均温度均呈先快速上升后缓慢下降的趋势。前期砼水化较慢,自浇筑起前 36 h 内温度发展平缓;36 h 后受早期水化放热较剧烈的影响,温度快速发展,36~94 h 温度上升快速,于浇筑后 116~124 h 达到峰值;108~132 h 砼内部温度较平稳,之后匀速下降,降温速率为 1.0~2.0 °C/d,约 384 h(浇筑后第 16 d)后内部温度渐趋平稳,平均温度约 51.26 °C。自砼覆盖起 118 h 左右监测到温峰,内部最高温度 67.83 °C,最高断面平均温度 59.18 °C。根据图 6,表面温度与内部温度发展趋势基本一致,最大内表温差为 19.97 °C,在温控设计方案 $\leq 25$  °C 范围内。

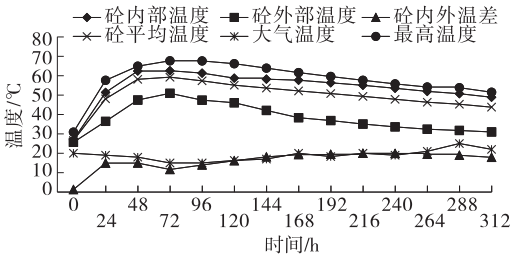


图 6 拱座第 6 层砼温度特征值历时曲线

3.4 水化热仿真计算结果与实测结果对比

根据砼配合比、热传导系数和浇筑温度等参数,以最理想状态计算得到该桥拱座第 6 层砼水化热最高温度为 65.4 °C。有限元模拟计算得到入模温度为 25.4 °C 时拱座第 6 层砼水化热温度峰值 63.4 °C 出现在浇筑后 140 h 左右,比入模温度上升 38 °C,砼内外温差最大为 22 °C。实际浇筑时,入模温度为

29.15 °C,砼水化热温度峰值 67.83 °C 出现在浇筑后 118 h,比入模温度高 38.68 °C,砼内外温差最大为 19.97 °C。拱座第 6 层砼内部最高温度与温控方案计算值相差不大,在温控标准范围内。

4 结语

该文根据大小井特大桥主桥拱座大体积砼的特点,通过仿真模拟砼水化热过程,预测峰值温度及温度时程,进而制定温控标准和温控措施。温度监测结果显示,拱座各构件内部最高温度、浇筑温度、内表温差和降温速率等指标基本在温控标准要求范围内,未出现明显有害裂缝,达到了预期温控目标。

参考文献:

[1] 康省桢.承台大体积混凝土水化热分析与施工控制[J].世界桥梁,2008(2).

[2] 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.

[3] 朱伯芳,王同生.水工混凝土结构的温度应力与温度控制[M].北京:水利电力出版社,1976.

[4] 王晓明,刘薇,罗娜.大跨径连续刚构桥零号块水化热作用的预测分析方法[J].公路,2013(2).

[5] 苟季.大体积混凝土水化热对结构的影响研究[D].南宁:广西大学,2008.

[6] 岳著文,孙学锋,张德财,等.大体积混凝土底板水化热数值计算研究[J].施工技术,2017,46(4).

[7] 王强,霍延威,夏菲,等.基于 ABAQUS 的大体积混凝土水化热温度场的数值分析[J].混凝土,2015(7).

[8] 刘伟.矮塔斜拉桥承台大体积混凝土水化热分析与裂缝预防[J].施工技术,2014,43(增刊 2).

[9] 罗庚,胡宝生,辛国平.桥梁承台大体积混凝土水化热分析及温控措施[J].公路交通技术,2013(3).

[10] 刘庆阳,张立永.大体积混凝土桥台水化热开裂分析与对策[J].重庆交通大学学报:自然科学版,2013,32(增刊).

[11] 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).

[12] 朱钊,陈英昊,陈欣,等.大体积混凝土水化热温度场和应力场耦合效应分析[J].市政技术,2017,135(2).

[13] 宋福春,刘策.考虑管冷的大体积混凝土水化热分析[J].沈阳建筑大学学报:自然科学版,2015,31(1).

[14] 南进江.大体积砼施工过程关键控制因素分析[J].公路与汽运,2016(6).