

文章编号: 0451-0712(2006)05-0090-06

中图分类号: U445.55

文献标识码: B

苏通大桥南塔墩承台超大体积混凝土 施工温控关键技术

贺茂生, 任回兴, 聂青龙, 刘艳芳

(路桥集团第二公路工程局 西安市 710065)

摘 要: 苏通大桥南主塔墩承台为超大体积混凝土, 为防止出现温度裂缝, 施工中采取了合理分层、双掺技术、内散外蓄、温度应力监测等温度控制措施, 有效地控制了混凝土的最高温升和内外温差, 施工后的承台质量, 达到内实外美, 未产生温度裂缝, 并根据实际监测数据与温控理论计算进行了对比分析。

关键词: 苏通大桥; 南塔墩承台; 温度控制; 关键技术

1 工程概况

苏通大桥为主跨 1 088 m 的世界第一大跨径斜拉桥, 南塔墩承台为哑铃形, 总的平面尺寸为 113.75 m×48.1 m。每个塔柱下平面尺寸为 51.35 m×48.1 m, 厚度由边缘的 5 m 变化到最厚处的 13.324 m, 两承台之间采用 11.05 m×28.1 m 系梁相连, 系梁厚度为 6 m。承台表面为八面棱台形结构, 采用 C35 混凝土, 总方量高达 42 271 m³, 为典型的超大体积混凝土, 施工中必须采取合理有效的温控措施, 抑制温度裂缝, 保证混凝土质量。

结合以往工程经验, 该承台施工温度控制主要应从以下几个方面着手:

- (1) 优化配合比, 采用双掺技术, 尽可能地减小水泥用量;
- (2) 合理分层分块, 减小单次混凝土浇筑体积 (尤其是厚度);
- (3) 采用冷却水管, 内散外蓄降低内表温差;
- (4) 选择浇筑时机, 降低混凝土的入模温度, 控制好上下层的间隙期。

2 混凝土配合比确定及“双掺”技术

根据边墩 6~8 号承台大体积混凝土温控经验, 水泥用量对最高温升、最大内表温差的影响是相当大的, 为此如何利用双掺技术优化配合比, 在保证混凝土耐久性的基础上, 降低水泥用量显得至关重要。

2.1 主 7、主 8 号承台混凝土配比及温控情况

主桥辅助墩主 7 号、8 号承台结构相同, 分层方案及冷却管布置也相同, 仅在施工中采用了不同水泥用量的混凝土配比, 各层最大实测温升对比见表 1。

表 1 主 7、主 8 号墩承台实测温升

墩位	7 号承台		8 号承台		备注
分层厚度/m	3	2.3	3	2.3	入模温度有 较大差别
水泥用量/(kg/m ³)	251	251	288	288	
最高温升/℃	29.2	28.3	33.2	32.8	

从表 1 中明显可以看出, 水泥用量减少 37 kg, 最高温升降低了 4℃左右。

2.2 优化南塔墩承台配合比

承台大体积混凝土的设计强度等级为 C35, 由于承台大部分区域处于水下及浪溅区, 混凝土的耐久性、抗腐蚀性要求较高, 而一味降低水泥用量、增加粉煤灰用量, 虽然强度可能满足设计要求, 但耐久性、抗腐蚀性却受到严重削弱。综合考虑上述因素, 经过试配确定每方混凝土水泥用量为 227 kg, 粉煤灰用量为 155 kg。

3 分层方案的制定及温控计算

3.1 分层分块方案的比选

合理的分层、分块可以减小混凝土最大温升, 进而降低混凝土内表温差。承台分层、分块主要考虑以下因素。

- (1) 结构设计要求: 如斜面倒角线、承台钢筋布

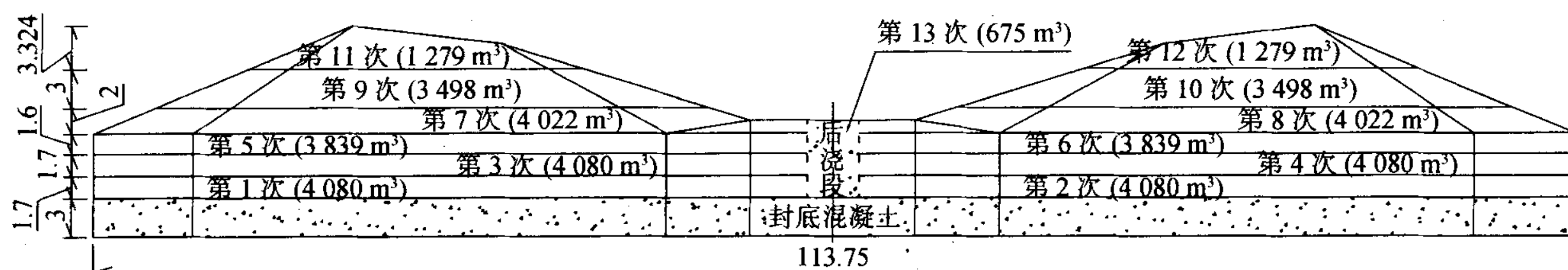
置、塔柱预埋钢筋底标高等。

(2)混凝土浇筑能力要求:经过前阶段大体积混凝土封底施工,现有的 $150 \text{ m}^3/\text{h}$ 的拌和船及 $2 \times 75 \text{ m}^3/\text{h}$ 的拌和站连续浇筑能力可达到 $8\,000 \text{ m}^3$ 左右,浇筑速度可达到 $160 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

(3)混凝土收缩影响:后浇段应尽可能减小宽度。

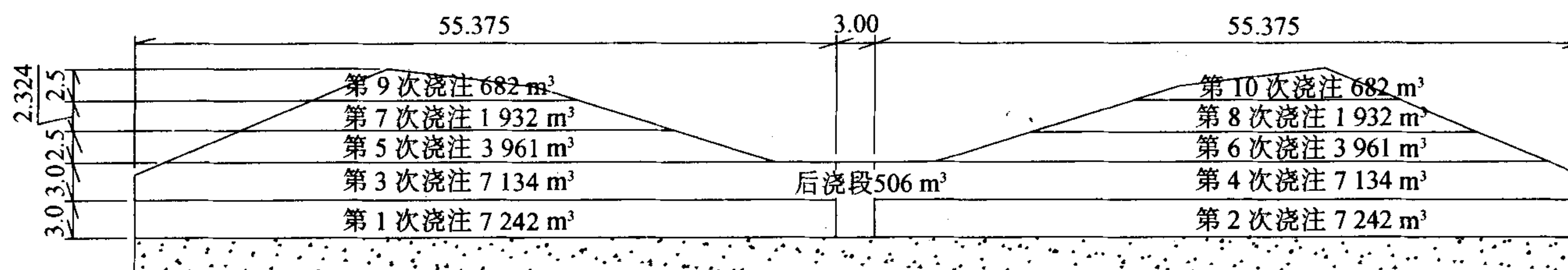
(4)温控及承台斜面施工要求:分层厚度不宜太厚。

鉴于上述因素的考虑,对3种方案,即分6层、分5层和分4层。各分层方案见图1~图3所示,3种方案比较见表2。经研究最终确定选用方案三。



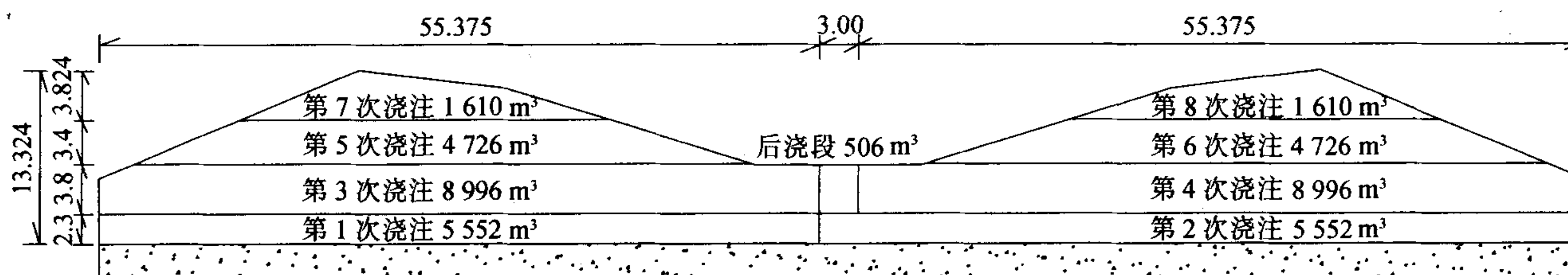
单位:m

图1 方案一:分6层



单位:m

图2 方案二:分5层



单位:m

图3 方案三:分4层

表2 三种方案比较

方 案	优 点	缺 点
方案一	分层薄、浇筑方量小。	分层面较多,对承台整体性影响较大,凿毛等辅助工作量大,后浇段过宽。
方案二	分层面较少、对承台整体性影响较小,凿毛等辅助工作较小。各层承台混凝土方量较为均衡。	塔柱预埋钢筋底面悬于第一层混凝土中间,定位难度大;首层承台钢筋密集,混凝土方量大,质量不易保证。
方案三	分层面最少、对承台整体性影响最小;凿毛等辅助工作量最小;接缝避开倒角。 首层承台钢筋密集,混凝土方量小,质量更易保证。	第2层混凝土一次性浇筑方量太大,施工设备要求高、组织管理要求高。

对于推荐的方案三,一次性浇筑方量大的缺点,通过临时租用相邻标段的拌和船,加大供应设备及供应效率,进行有效解决。

3.2 温控计算

混凝土浇筑后的温度与水泥的水化热温升、混

凝土的浇筑温度和浇筑进度、外界气温、表面保护等多种因素有关。温度计算结果的准确性除了选择恰当的计算方法以外,还有赖于与上述因素有关的基本条件和材质参数的正确选取。以下参数均通过实验及相关规范资料选取。

3.2.1 主要计算参数

(1) 混凝土弹性模量。

混凝土 4 d 和 8 d 的弹性模量分别为 1.62×10^4 MPa 和 2.20×10^4 MPa, 根据该试验结果, 不同龄期的弹性模量 E 可按式计算:

$$E = 3.9 \frac{\tau + 0.885}{\tau + 7.75} \quad (1)$$

混凝土弹性模量随龄期增长的曲线如图 4 所示。

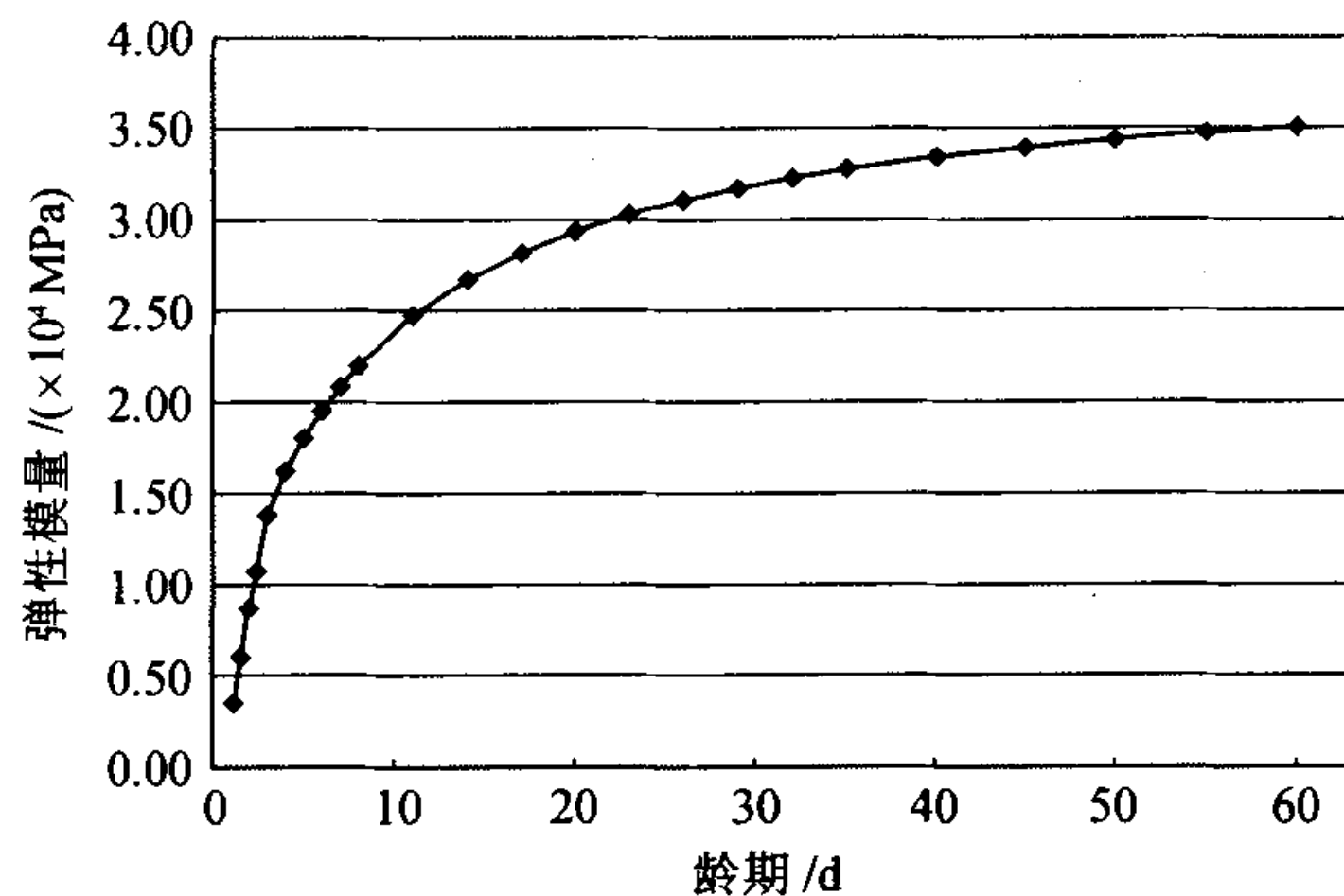


图4 弹性模量变化曲线

(2) 混凝土抗压强度。

混凝土 7 d 和 28 d 的抗压强度分别为: $R_7 = 31.8$ MPa, $R_{28} = 45$ MPa。

(3) 混凝土的绝热温升。

根据水化热计算, 堡垒牌 42.5(R) 水泥 3 d 和 7 d 的水化热分别为 270 J/g 和 292 J/g, 据此可估算混凝土的绝热温升, 取 $\theta_0 = 42.0$ °C。混凝土不同龄期的绝热温升计算式为:

$$\theta = 42.0 \frac{\tau - 0.682}{\tau - 0.325} \quad (\tau \geq 1.0) \quad (2)$$

式中: τ 为龄期, d; θ 为在龄期 τ 的绝热温升。

混凝土的绝热温升曲线如图 5 所示。

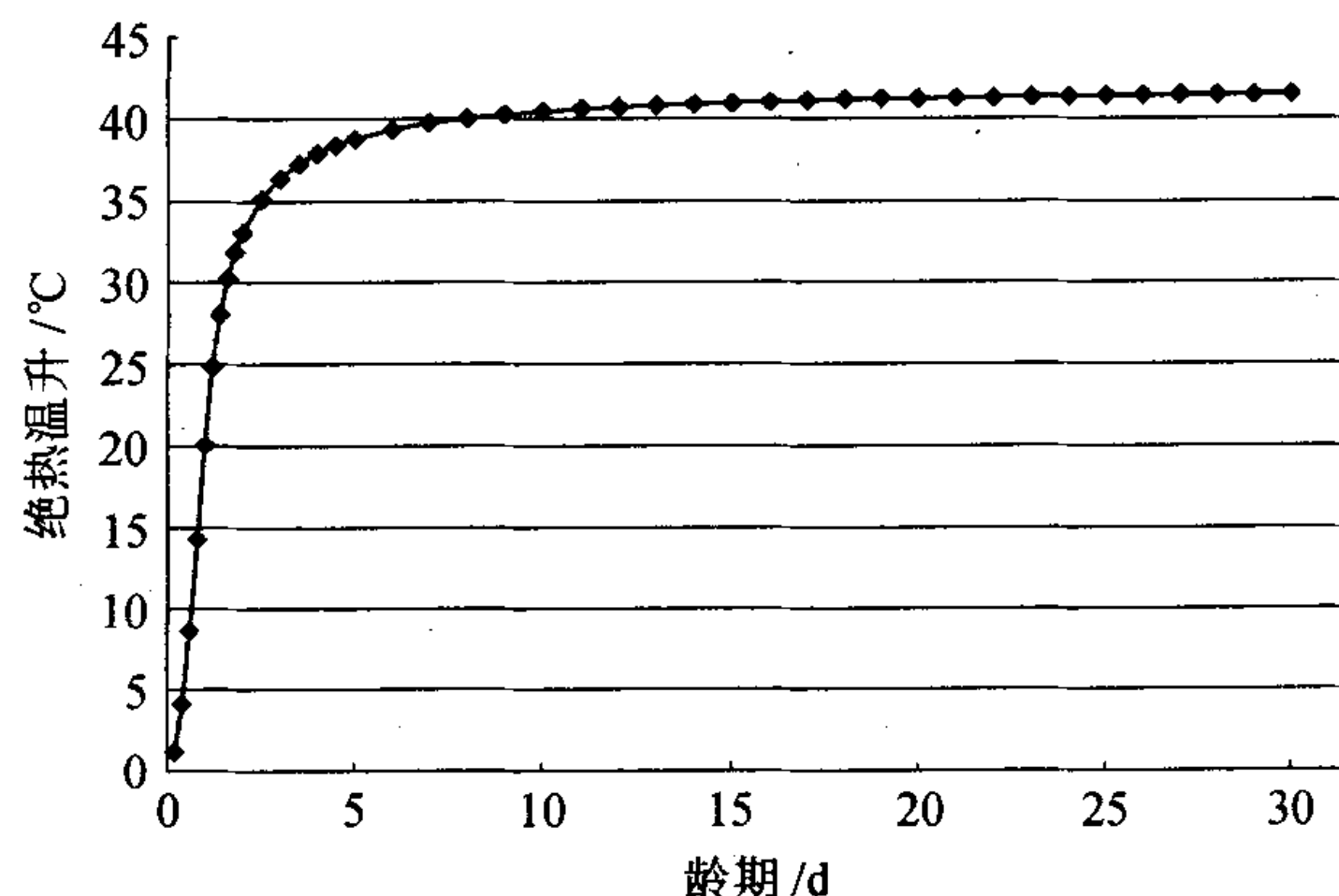


图5 混凝土绝热温升曲线

(4) 混凝土导温系数。

混凝土的导热系数 λ 依据上面配合比计算取值: $\lambda = 11.02$ kJ/m · h · °C, 进一步算出导温系数 $\alpha = 0.0048$ m²/h。

(5) 混凝土的泊松比系数取为 0.167, 线膨胀系数根据 6 号承台的实测结果取值 $\alpha = 8.5 \times 10^{-6}$ (1/°C)。

3.2.2 计算方法

计算温度时, 由于主墩承台的厚度与平面尺寸相比较小, 可简化为一维问题计算, 考虑到封底混凝土和下部结构的影响以及应力计算的方便, 仍采用三维有限元法计算, 将温度场和应力场纳入一个统一的网格和程序计算, 计算方法参照文献[1]。

计算温度时, 考虑了冷却水管的作用, 方法是沿水管取一系列垂直截面, 在两截面间按平面温度场考虑冷却水与混凝土之间的热量平衡, 算出冷却水吸热后的温度上升, 得到下一单元的初始水温, 再计算下一单元的混凝土温度和水温上升, 如此重复计算即可得到每个时段的温度场。

3.2.3 主要计算成果

根据以上原则, 计算得出的温度特征值见表 3。

表3 理论计算温度特征值

层次	特征项目	最高温度 °C	最高平均温度 °C	最高温升 °C	上下层温差 °C	最大内外温差 °C
1	特征值	42.89	36.55	30.89		21.59
	龄期/d	2.4	2.0	2.4		2.4
2	特征值	47.78	42.38	33.78	18.05	22.99
	龄期/d	3.2	2.4	3.2		3.0
3	特征值	52.63	47.46	33.63	13.37	23.92
	龄期/d	3.0	2.4	3.0		3.0
4	特征值	56.69	51.39	33.69	12.64	23.77
	龄期/d	3.2	2.4	3.2		3.0

表中结果说明,各层中的最高温升在 $30.89\sim 33.78^{\circ}\text{C}$ 之间,内外温差在 $21.59\sim 24.92^{\circ}\text{C}$ 之间,上下层温差在 $12.64\sim 18.05^{\circ}\text{C}$ 之间。上下层温差第2层最大,达 18.05°C 。内外温差以3、4层最大,但2、3、4层的最高温升和上下层温差都比较大。

3.2.4 温控标准

根据上述温度与应力计算结果,提出以下温控标准:

- (1) 混凝土的内表温差应小于 25°C ;
- (2) 混凝土的上下层温差应小于 19°C ;
- (3) 混凝土的浇筑温度应小于 $T+4^{\circ}\text{C}$ (T 为浇筑期旬平均气温),混凝土最高温升不超过 35°C 。

4 施工温控措施

4.1 冷却管通水及表面保温

4.1.1 冷却管通水

(1) 冷却水管的水平间距和上下层间距应小于 0.85 m ,各层的水管间距按温控要求设计。水管布置见图6所示,水管的间距误差不得超过 $\pm 5\text{ cm}$ 。

(2) 单根水管长度小于 250 m 。

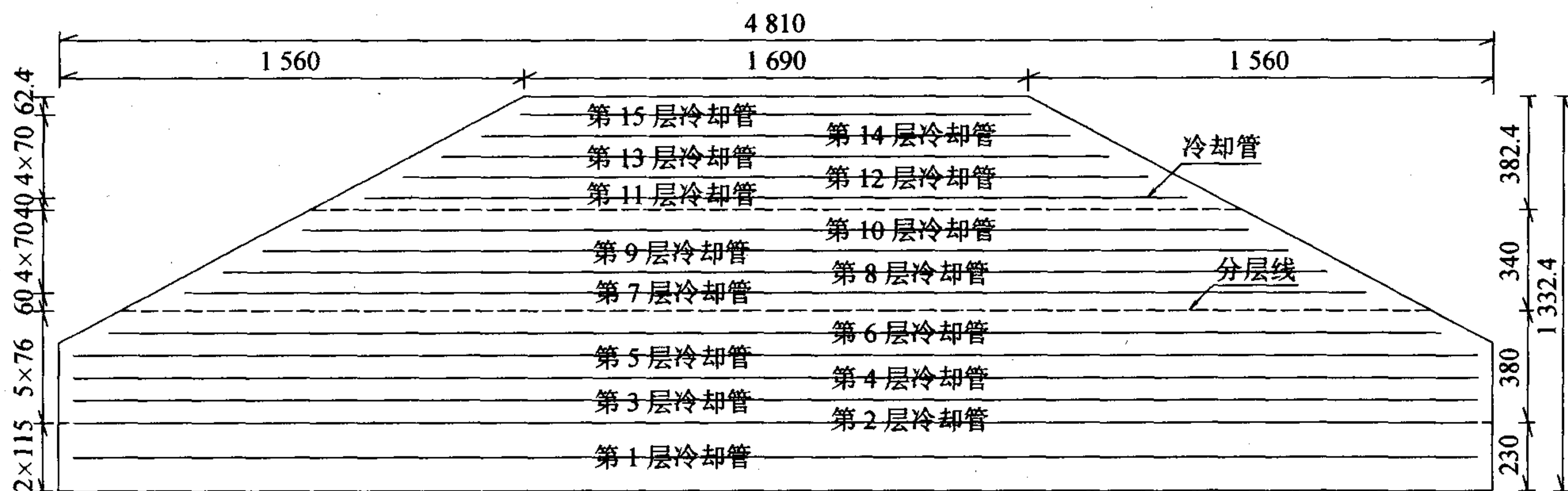
(3) 水管内通水流量为 $16\sim 20\text{ L/min}$ 。冷却水的进水口水温以 $10\sim 20^{\circ}\text{C}$ 为宜。现场通过高于承台 14 m 的 120 m^3 的水箱保持供水,并通过设置于进水口的阀门调节通水量大小。

(4) 冷却通水从水管被混凝土覆盖后开始,覆盖一层通水冷却一层,根据温度监测情况,核心温度过了峰值开始下降时,适当减小流量,以控制降温速度在 2°C/d 左右,直到核心温度降低到 30°C 以内再结束通水,避免相邻层间温差过大。

(5) 冷却水管采用导热性能好的公称直径为 32 mm 的黑铁管,安装后通水检查,防止管道漏水或阻塞。

4.1.2 表面保温

混凝土浇筑完毕待初凝后,立即在上表面及承台的四周,采用覆盖保温与洒水养护。上表面覆盖麻袋保温;侧面通过延迟拆模及表面覆盖大块土工布的方式保温。



单位:cm

图6 冷却水管布置

4.2 混凝土入模时机的选择

混凝土入模温度应尽可能低,适当地选择入模时机对温控是十分有利的。

南塔墩承台混凝土的总体浇筑时间在3月上旬~5月中旬,对大体积混凝土浇筑较为有利。同时,在每一层混凝土浇筑时应密切注意短期天气预报,尽可能利用阴天降温天气及夜间浇筑,混凝土浇筑完成后,随着内部温度升高,外界气温也升高,混凝土内表温差可得到有效控制。混凝土的层间期尽可能控制在 15 d 以内。

4.3 温度应力监控及信息化施工

仪器的布点按照突出重点、兼顾全局的原则。根据结构的对称性和温度变化的一般规律,测温仪器主要布置在相互垂直的两个中心断面上,每个中心断面又以其中半个断面为重点;应变计和无应力计主要布置在最大拉应力可能产生的部位。

(1) 温度监测,测温仪器选择电阻温度计,每 2 h 自动采集一次数据。

(2) 应变监测,应变监测即在混凝土内埋入应变计和无应力计,测量混凝土的应变,通过混凝土的应变测值可进一步计算温度应力和收缩应力。掌握了应力就能直接判断混凝土应力状态和抗裂能力,预

料是否有产生裂缝的可能,以便及时采取适当的防护措施。应变计和无应力计选用差动电阻式应变计比较可靠。

(3)检测频率:正式观测从仪器被埋入开始,5 d 前每 4 h 一次,5~10 d 每 6 h 一次,11~15 d 每 8 h 一次,16~30 d 每 24 h 一次,30 d 以后每 2 d 一次。总的观测时间最少为 60 d。

(4)信息化施工:根据采集的温度数据,综合分

析后,调整冷却管通水流量等温养措施,专人负责,及时通报,统一指令,坚持以温度数据说话,严禁施工随意化。

5 温控成果及分析

对承台大体积混凝土温控测试结果进行了总结,见表 4、表 5。

表 4 南塔承台大体积混凝土温控测试结果汇总

工程部位	第 1 层		第 2 层		第 3 层		第 4 层		后浇段
	上游	下游	上游	下游	上游	下游	上游	下游	
入仓温度/℃	8.0	14.0	20.0	18.0	21.5	22.5	24.0	25.0	25.0
中心最高温度/℃	35.5	39.3	50.0	45.7	50	51.6	50.0	50.8	54.5
表面最高温度/℃	24	31.5	37.5	29.3	32.8	33.1	39.6	35.6	
温升值/℃	27.8	25.3	30.0	28.7	28.5	29.1	26	25.8	30.1
最大内外温差/℃	17.5	15	21	19.3	20	22.5	17	20.3	
中心温峰值龄期/d	3	4	4	3	3	4	3	4	3
表面温峰值龄期/d	3	4	4	3	3	4	3	4	

表 5 各项温控成果实际值与理论值比较

℃

分层		最高温度		最高温升		上下层温差		最大内外温差	
		实际	理论	实际	理论	实际	理论	实际	理论
1	上游	35.5	42.9	27.8	30.9			17.5	21.59
	下游	39.3		25.3				15.0	
2	上游	50.0	47.8	30.0	33.8	10.0	18.1	21.0	22.99
	下游	45.7		28.7		13.9		19.3	
3	上游	50.0	52.6	28.5	33.6	15.0	13.3	20.0	23.89
	下游	51.6		29.1		15.4		22.5	
4	上游	50.0	56.7	26.0	33.7	6.9	12.6	17.0	23.77
	下游	50.8		25.8		1.5		20.3	
后浇段		54.5		30.1					

通过以上数据的总结,结合施工情况,经过分析得出以下结论。

(1)混凝土温控效果良好,实际各层最大内表温差、最大温升值均控制在既定的标准以内。由于层间歇期较长,相邻层间温差较大,接近标准值;实际成果与理论结果对比可知实际值与理论值基本吻合,最大温升及内外温差计算值略高于实际值 3~5℃,偏安全。

(2)混凝土配合比及分层厚度是混凝土最高温升的内因,水泥用量和分层厚度的减小都能降低混凝土最高温升。由于配合比水泥用量的进一步减小

及分层厚度合理,温升值较低且波动不大,在 25~30℃之间波动。

(3)冷却水管作为降低最高温升的外因,也起到了一定的作用,进出水口温差高峰期达到 15℃左右。根据实际施工情况进行热量交换计算显示,在混凝土内部温度达到峰值的 72 h 以内,及时有效地通水可以将峰值削掉 5℃左右。

(4)相邻层之间的浇筑影响较大,后一层浇筑通常会造成前一层混凝土自上向下递减升温,表面最大温度反弹可达 15℃,40 d 以后基本趋于正常。因此调整进度,控制层间期十分重要。

(5)相邻层之间的浇筑影响较大,后一层浇筑通常会造成前一层混凝土自上向下递减升温,表面最大温度反弹可达 15°C ,40 d以后基本趋于正常。因此调整进度控制层间期十分重要。

(6)混凝土分层厚度相差不宜太大,均匀的分层厚度有利于层间温差的控制。

(7)内部水化热温升和表面热量散失是造成内表温差的直接原因。因此和冷却管通水一样,表面通过延迟拆模和覆盖保温材料同样十分重要,尤其是气温变化复杂时期。实际效果表明,通过表面保温,混凝土表面平均温度比气温可以高出 5°C 左右。

(8)选择低温入模很关键,密切关注天气预报,降温阶段浇筑混凝土,而在混凝土浇筑后3~5 d的关键时期内外界环境升温,对减小内表温差、抑制温度裂缝是十分有利的。

6 结语

苏通大桥南塔墩承台于2005年5月18日提前顺利浇筑完成,施工中采取了优化配比、合理分层、内散外蓄、选择适宜的浇筑时机等措施,并进行温控效果监测,做到信息化施工,有效地控制了混凝土的最高温升和内外温差。经过监测,各项指标均控制在温控标准范围以内。浇筑完成的承台,内实外美,未产生温度裂缝。实践证明,施工中的各项温控关键技术值得同类工程参考和借鉴。

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] 交通部干坞设计规范[S].
- [3] SDJ21-78,混凝土重力坝设计规范[S].

Key Temperature Control Techniques of Super-volume Concrete Casting Used in Pile Cap of South Pylon of Sutong Bridge

HE Mao-sheng, REN Hui-xing, NIE Qing-long, LIU Yan-fang

(RBG Second Highway Engineering Bureau, Xi'an 710065, China)

Abstract: With the pile cap construction of the south pylon of Sutong Bridge the key temperature control techniques of the super-volume concrete casting used in the pile cap of the cable-stayed bridge are discussed and the temperature control measures adopted in the construction which include the reasonable layering, the double mixture technique, the dispersion inside and the cumulation outside, the temperature stress monitoring etc. The compare and the analysis are done from the datas of the factual monitoring and the results of the theory calculation.

Key words: Sutong Bridge; pile cap of south pylon; temperature control; key techniques

成金(成青)快速通道开工

双向六车道、设计时速80 km、不缴纳过路、过桥费……明年年底,随着一条全新跨区(县)城市干道——成金(成青)快速通道的建成,成都市民驱车前往新都、青白江、金堂的车程将大大缩短,而且分文不收。2006年3月29日,成金(成青)快速通道正式全面开工,它将连通成华、金堂、新都、青白江4个区县,率先实现成都三圈层的“半小时交通圈”。

成金快速通道按一级公路技术标准建设,不封闭,项目总投资约8.45亿元,由成都至青白江的成青路和成都至金堂的成金路构成。