

文章编号:1674-2869(2010)01-0065-05

桥梁大体积混凝土浇筑过程的温度场及温度应力

徐行军¹, 黄树榕²

(1. 福建交通职业技术学院, 福建 福州 350007; 2. 中交一公司厦门工程有限公司, 福建 厦门 361021)

摘要:桥梁大体积混凝土质量控制的一个重要方面是温度控制, 本文通过对宁波甬江特大桥承台大体积混凝土在施工过程中的温度场与温度应力进行仿真分析, 计算了大体积混凝土内部温度场及仿真应力场, 从而采取了相应温控措施, 并对分析计算结果与实测结果进行对比分析, 表明该温控措施有效地控制了混凝土的最高温升和内外温差, 对类似工程具有一定的借鉴作用。

关键词:大体积混凝土; 温控措施; 温度场; 温度应力; 仿真分析

中图分类号: TU528.01 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1674-2869.2010.01.020

0 引言

桥梁大体积混凝土工程质量控制的一个重要方面是温度控制。混凝土是一种不良的导热材料, 对于大体积混凝土而言, 浇筑的初期, 大量的水化热聚集在混凝土内部不易散发, 内外温差使混凝土内部产生压应力, 外部产生拉应力, 当拉应力超过允许应力时导致混凝土开裂。在降温过程中, 温度应力主要是由于混凝土的冷却及外界气温变化所引起的, 此时的非均匀降温使混凝土受到自身约束和外部约束。自身约束是混凝土内部的相互约束, 产生自生应力; 外部约束是来自旧混凝土或基础的约束, 如桥梁承台混凝土在温差作用下受到下部桩和封底混凝土约束, 产生约束应力。自生应力和约束应力都是由变温产生的温度应力^[1]。大体积混凝土温度应力超过允许应力而导致结构产生温度裂缝。温度裂缝的产生不但影响到结构的承载力和设计效果, 而且对结构的安全性和耐久性也有重要影响^[2]。为此, 本文结合甬江特大桥对桥梁大体积混凝土的温度控制、防止裂缝的产生等问题进行了研究分析, 对于由于不均匀非稳定温度场产生的非均匀温度应力对现场混凝土结构产生裂缝的类似工程, 具有工程应用价值的实际意义。

1 温度场理论模型

1.1 热传导方程^[2]

根据热传导理论, 三维非稳态导热微分方程为:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] + \frac{\partial \theta}{\partial \tau} \quad (1)$$

式(1)中: a 为导温系数, 按 $a = \lambda / c\rho$ 计算。 T 为温度, θ 为绝热温升, λ 为导热系数, τ 为时间, c, ρ 分别为混凝土比热、容重。

热传导方程建立了问题的温度与时间、空间的关系, 但满足热传导方程的解有无限多, 为了确定需要的温度场, 还必须知道初始条件和边界条件。由此, 可计算出混凝土内部瞬态温度场 $T(x, y, z, t)$ 。

1.2 初始条件和边界条件

初始条件为在初始瞬时物体内部的温度分布规律, 边界条件为混凝土表面与周围介质(如空气或水)之间温度相互作用的规律, 初始条件和边界条件合称边值条件^[2]。

在混凝土浇筑温度计算过程中, 初始温度即为浇筑时的混凝土温度。

边界条件在混凝土建筑物中广泛适用的是第三类边界条件, 即当混凝土与空气接触时, 表面热流量与混凝土表面温度 T 与气温 T_a 之差成正比, 表示成:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial z} = \beta(T_a - T) \quad (2)$$

式(2)中: β 为表面放热系数。

2 工程概况

甬江特大桥是浙江省宁波市在建的国道主干线宁波绕城公路东段一座特大型桥梁, 桥梁全长 1.478 km。全桥设双塔, 塔高 141.5 m, 主

桥为钢—砼叠合梁双菱形联塔四索面半漂浮体系斜拉桥,主跨 468 m,索塔基础为 2.2 m 大直径钻孔灌注桩,钻孔深度约 130 m,入岩深度约 15 m,实体钢筋混凝土承台,承台为矩形,索塔承台尺寸为 62 m×33.0 m×5.5 m(厚),C35 海工耐久性混凝土,单个承台方量为 11 253 m³ 属大体积混凝土。

3 温度控制的内容

温度控制的内容主要包括:a. 控制混凝土内部最高温度,使其在施工规范允许的范围之内,以防混凝土内部因温度过高,温差过大而产生贯穿性裂缝;b. 控制混凝土的内外温差及混凝土表面与大气的温差,使其也在施工规范允许的范围之内,以防混凝土产生表面裂缝^[3]。

4 混凝土的温度特性及温控措施

水泥品种、配合比、温控措施、施工时的外界温度等都直接影响块体混凝土的温度特性。混凝土块体的温度特征值主要指混凝土入模温度、最高温度和温变速率等主要温度指标,是检验温控指标和温控效果的主要参数。

4.1 混凝土原材料质量控制

大体积混凝土中水泥用量是决定水化热大小的主要因素,混凝土水化热主要来自水泥胶

凝材料,因此应尽量选择 C₃A、C₃S 含量少、水化热低的水泥。同时在符合规范要求及海工耐久混凝土的水胶比要求的前提下,为尽量降低水泥用量,必须发挥活性掺合料与高效减水效的叠加效应,在保证混凝土的强度的同时,降低发热量并且改善混凝土的和易性与可泵性,初凝时间 12~14 h。

原材料:水泥采用宁波海螺牌 P.O 42.5 普通硅酸盐水泥,其指标满足国际标准要求;粗集料采用富家岭采石场(5~16 mm):(16~25 mm)=40:60,经掺配成 5~25 mm 连续级配碎石。这样可以获得较小的空隙率及表面积,从而减少水泥的用量,降低水化热,减少干缩及混凝土裂缝的开展;细集料采用福建闽江中砂;粉煤灰采用北仑电厂 II 级粉煤灰;矿渣粉采用北仑港新建材 S95 级矿渣粉;外加剂采用山西凯迪建材的 KDSP 聚羧酸系高效缓凝减水剂,减水率大于 25%。

4.2 配合比优化设计

本工程采用 42.5 普通硅酸盐水泥配置 C35 泵送混凝土,为提高混凝土的抗裂性,对 C35 承台已确定的混凝土配合比参数,进行粉煤灰、矿渣粉不同掺量的混凝土配合比的优化及 7 d 的水化热试验,确定基准配合比及其水化热值见表 1。测得该混凝土的物理、热性能参数如表 2。

表 1 C35 承台混凝土配合比
Table 1 C35 cap concrete mixture

组成材料/(kg·m ⁻³)					水化热值/(J·g ⁻¹)			抗压强度/MPa		
水泥	粉煤灰	矿渣粉	砂	碎石	水	KDSP(%)	1d	3d	7d	7d 28d 56d
166	166	83	693	1083	145	1.1	60	209	268	33.7 44.6 50.8

注:绝热温升根据水化热试验估算。

表 2 C35 混凝土物理和热性能参数

Table 2 C35 concrete physics, thermal properties parameters

物理特征	材料参数取值
弹模增长指数	0.17
最终弹模/MPa	3.8×10 ⁴
热胀系数/(1/℃)	8.1×10 ⁻⁶
比热/(kJ/kg·℃)	1.1
混凝土绝热温升/℃	36.4

4.3 温控措施

目前国内对大体积混凝土的温度控制主要有以下两种方法:第一是外保法。所谓外保法就是对大体积混凝土结构采取相应保温保湿措施,控制混凝土结构表面温度和湿度不受散失,从而控制混凝土内外温差在规范允许范围内;第二是内降法。内降法就是在大体积混凝土结构中采取布设冷却水管的方式进行降温,来降低混凝土结构内部的最高温升值,使混凝土内外温差在规范允许

范围内^[4]。综合考虑质量、造价、进度并结合本工程的实际情况,本工程大体积混凝土施工温控方法采用外保法和内降法同时进行。

4.3.1 混凝土外部保水保温养护 大体积混凝土外部保温的目的主要是为了减少混凝土的内表温差,避免出现温度应力裂缝,故应根据内部温升情况对其外表面采用不同的保温措施。本工程采取综合保温养护的方式,主要措施有:混凝土入模温度控制小于 15℃;混凝土初凝后,在其顶面覆盖土塑料薄膜保水养生,并在塑料薄膜上覆盖两层土工布及一层彩条布保温;对承台侧面的保温,施工时在承台与围堰之间覆盖土工布,形成临时保温棚保温,同时,将冷却水管排出的温水灌入其间,保温效果良好;同时为了确保混凝土表面温度,拆模时间可以适当顺延,当其内部断面均温与环境

温度之差小于 20°C 方可拆模,拆除模板后,及时用海砂回填间隙进行自然保温。

4.3.2 混凝土的内部降温 根据混凝土内部温度分布特征及控制最高温度的要求,混凝土内部降温主要采取冷却水管通水的方式进行,承台埋设六层冷却水管,水管水平和垂直间距为 0.8 m ,冷却水管内径 40 mm ,通水安排专人负责。通水时间从冷却水管被混凝土覆盖后逐层开始,冷却水温不宜高于 30°C ,升温时段通水流量应使流速达到 0.65 m/s 以上,流量应大于 45 L/min ,形成紊流,降温时段,可通过水阀控制减缓通水,流速减半,使水流以层流状态冷却混凝土;至 3 天左右混凝土内部温度达到峰值,出水口水温可达 $18\sim 20^{\circ}\text{C}$ 之后,通水流量应逐渐降低,直至出水口水温与进水口水温基本一致为止。

5 温控的仿真分析

甬江特大桥承台结构尺寸为 $62\text{ m}\times 33\text{ m}\times 5.5\text{ m}$,承台分两层浇筑,分层厚度为下层 3.0 m 、上层 2.5 m ,拟在 10 月中旬浇筑第一层混凝土,承台浇筑温度可控制在 30°C 以下。

5.1 模型及边界处理

5.1.1 仿真计算模型的建立

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》详细计算索塔承台施工期内部温度场及仿真应力场,并根据计算结果制定了不出现有害温度裂缝的温控标准和相应的温控措施进行分析。

大体积混凝土浇筑温度场仿真的实现,首先是 ANSYS 内部函数的宏要能正确反映每个增量步中各种时变参数的变化规律;其次要求真实模拟施工过程中结构的逐步增长,相应的计算模型和边界条件逐渐改变的情况,还要考虑施工环境和施工措施的逐渐改变等。在计算的过程中主要通过运用单元的生与死和宏命令来实现各项参数即边界条件和初始条件的变化。首先杀死所有单元组,再通过单元组的激活表示一个浇筑层的完成,并记下混凝土的龄期,同时以循环过程来实现顺序浇筑过程的仿真。在温度场的计算过程中,水泥的水化热作为主要温度载荷施加在已激活的各个节点上,记录下每一时刻每一节点的温度,便可得到瞬态温度场。

然后,重新进入前处理器,将热单元转换为相应的结构单元,设置结构分析中混凝土的材料属性,包括随时间变化的弹性模量。读入每一时刻热分析结果,将节点温度作为体载荷施加到结构应力分析

中^[2]。

5.1.2 模型参数

a. 根据甬江特大桥承台的结构对称性,取 $1/4$ 模型进行有限元剖分计算。承台计算网格剖分图见图 1。

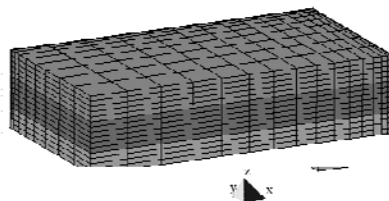


图1 承台 $1/4$ 网格剖分图(附带等效约束基础)

Fig.1 Cap $1/4$ mesh subdivision picture(In passing equivalent constraint basis)

b. 混凝土物理热学参数取值见表 2,绝热温升值 36.4°C ,浇筑温度 27°C ,混凝土导热系数估算为 $206.35\text{ kJ}/(\text{m}\cdot\text{d}\cdot^{\circ}\text{C})$ 。

c. 承台混凝土受 66 根 $\Phi 2.2\text{ m}$ 的钻孔灌注桩和封底混凝土约束,估算基础弹模为 $3.0\times 10^4\text{ MPa}$ 。

d. 计算时考虑混凝土施工边界条件,承台侧面考虑处于地面线以下,风速较小,参考气候资料,平均风速按 5 m/s 考虑。顶面考虑覆盖塑料薄膜加土工布保温保湿。经热工计算侧面等效散热系数为 $1268\text{ kJ}/(\text{m}^2\cdot\text{d}\cdot^{\circ}\text{C})$,顶面等效散热系数 $985\text{ kJ}/(\text{m}^2\cdot\text{d}\cdot^{\circ}\text{C})$ 。

e. 计算时考虑冷却水管降温效果。承台共布设六层冷却水管,冷却水管水平和垂直间距按 0.8 m 考虑。

f. 计算时考虑徐变对混凝土应力的影响,混凝土的徐变取值按经验数值模型^[4]:

$$C(t, \tau) = \left(C_0 + \frac{A_1}{\tau} \right) [1 - e^{-k(1-\rho)}] = C(\tau) [1 - e^{-k(1-\rho)}] \quad (3)$$

其中: $C(t, \tau)$ 为徐变度 ($1/\text{MPa}$); t 为混凝土龄期 (d); τ 为徐变加荷龄期 (d)。

5.2 仿真计算

按施工顺序,大桥承台分两次浇筑,通过计算可得出每一时刻各部位的温度和各方向上的应力。根据计算所得第 1 层混凝土浇筑后温升峰值时刻温度分布包络图见图 2,承台第一层内部最高温度为 61.1°C ,第二层内部最高温度为 61.0°C ,温峰出现时间为 $2\sim 3$ 天龄期。承台温度应力计算结果见表 3。

结合表 3 温度应力结果、表 1 中 C35 混凝土抗拉强度可知,承台温度应力危险点主要是在早期,早期安全系数相对较小。同时通过理论计算分析表明,在承台施工及养护期间,混凝土内部及表

面的拉应力均未超过相应龄期混凝土的抗拉强度,承台不会产生裂缝。结合计算结果,温控施工的关键点是:①浇筑温度的控制;②冷却水管通水的及时、稳定和持续;③早龄期内表温差的控制;④混凝土的持续养护。

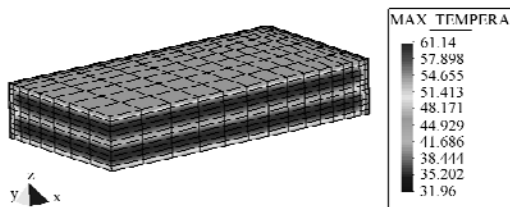


图 2 承台最高温度包络图

Fig. 2 Cap maximum temperature envelope picture

表 3 承台温度应力场结果

Table 3 Cap temperature stress field values

	3d	7d	28d	一年
承台第一层	1.19	1.13	2.10	2.18
承台第二层	1.12	1.06	1.45	1.36
最小安全系数	1.18	1.86	1.52	1.48

5.3 温控指标

温度控制的目的是控制温度应力,避免温度

裂缝,因此大体积混凝土的施工中应对混凝土的最高温度和内外温差、相邻层温差进行控制,同时要求混凝土内部的温度梯度缓和,并作为温控的主要内容。由于桥梁中大体积混凝土的尺寸和所受约束各不相同,其应采取的温控标准也有所不同。温控标准是由温度和温度应力计算得出并在施工过程中进行调整。本工程中为使大体积混凝土内部的温度场变化按照预想的目标发展,主要温控指标如下:①混凝土内外温差控制小于 25°C ;②混凝土表面与外界空气最低温度之差小于 20°C ;③控制其温度梯度(既混凝土降温速率)不宜大于 $3^{\circ}\text{C}/\text{d}$;④承台混凝土内部最高温度控制不超过 62°C 。

6 承台监测成果及分析

为了解承台混凝土内部温度分布规律,同时给温控施工提供可靠的数据,根据承台的结构特点,在承台共布设 4 层测温点共计 60 个。承台测温点布置示意图见图 3。

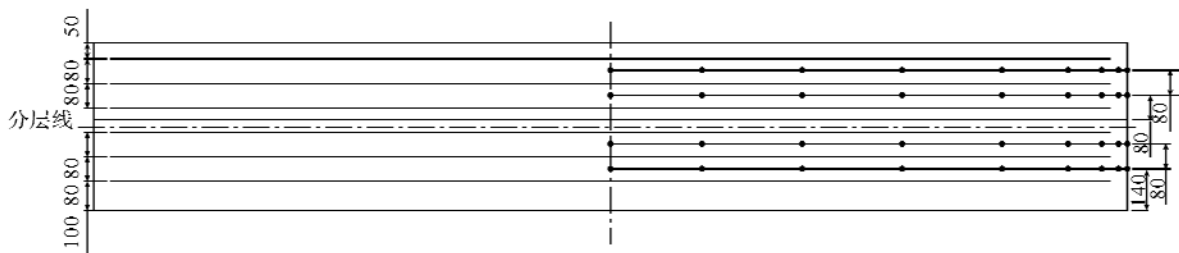


图3 承台测温点立面布置示意图(单位:cm)

Fig. 3 Cap temperature measurement detail arranging picture (Unit: cm)

6.1 承台监测成果

承台各层温度变化趋势曲线大致相同,见图4(仅示出第二层的温度变化趋势曲线)。承台大体积混凝土温控测试结果汇总见表4。

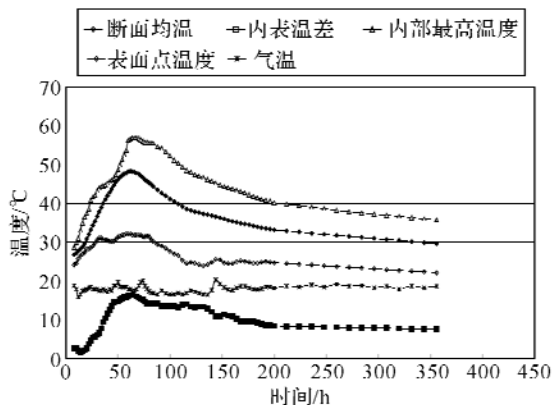


图 4 第二层温度变化趋势曲线

Fig. 4 Second layer temperature change trend curve

表 4 承台大体积混凝土温控测试结果汇总表

Table 4 Cap massive concrete temperature control testing values itemized table

工程部位	第一层		第二层	
	上层	下层	上层	下层
最高断面均温度/℃	47.8	47.2	40.9	46.8
最高内表温差/℃	14.2	16.4	14.9	20.5
内部最高温度/℃	52.3	56.8	45.7	49.2
表面最高温度/℃	34.5	31.8	27.2	26.9
最高水化热温升/℃	30.2	32.0	24.9	28.7
最高气温/℃	22.8	20.3	18.9	18.1
中心温峰值龄期/d	3	3	3	4
表面温峰值龄期/d	2	3	3	3

6.2 承台监测成果分析

6.2.1 混凝土内部各层测点区断面平均温度及表面温度变化规律 从温度变化曲线图可以看出,各层测点区域断面平均温度随时间的变化规律基本一致.温度变化温度曲线从左至右第一段是由于水化放热作用的升温段,因在冬季施工,水化较快,一般3天左右即达到峰值,持续几小时后

温度开始下降.曲线第二段是强制降温段,在冷却水管的持续作用下,混凝土温度快速下降,这段时间混凝土降温速率约为 $3.0\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{d}$.曲线第三段是自然降温段,曲线平缓下降趋向水平,表明该时间段混凝土降温平缓,达到准稳定态.此外,受上层混凝土放热影响,下层混凝土温度会有一定程度的回升.混凝土表面测点温度曲线规律也呈现出一定的一致性.混凝土表面温度在浇筑后经历一个升温期后在冷却水管的作用下开始降温至气温态.由于测温期间气温变化及昼夜温差趋于平缓,所以混凝土表面温度受影响较小,表现在图中的曲线呈平稳形,但总体是逐渐降低的.从图中可以看到,混凝土断面平均温度和混凝土表面温度均逐渐缩小,温度场趋于均匀,温度梯度减小,有利于防止温度应力裂缝的产生.

6.2.2 混凝土内表温差变化规律 实际测量显示测温结束时,各测点区域温差稳步下降,温度分布均匀,最大内表温差 $20.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,最小内表温差 $1.6\text{ }^{\circ}\text{C}$.

从温度曲线图可以看出,测点区域内表温差随时间的变化规律有以下几个特点:内表温差随断面均温升高不断扩大,混凝土断面平均温度峰值出现时,内表温差尚未达到最大值,因为在温度达到峰值后开始降温时,表面点受外界气温影响,在降温初期表面点降温速度比内部降温速度快,所以内表温差在达到峰值的一段时间以后才逐渐降低.内表温差早期下降快,后期下降缓慢,并且在气温较低时出现反弹,且两层混凝土在测温后期出现不同程度的内表温差反弹,这是因为施工期间出现一次寒潮,使表面点降温速度超过内部降温速度,引起内表温差反弹.由于采取了保温措施,内表温差始终控制在许可范围内,并在反弹后缓慢回落.温度场达到准稳态后,下降速度甚微.

6.3 温度监测结果与理论计算的对比分析

混凝土施工过程及养护期间,第一层核心混凝土的龄期为3d时的计算温度场与温度现场监测对比分析见表5.根据以上计算与实测结果及文献[5]可得到以下结论:

a. 实测混凝土核心最高温度、内部和表面最大温差、表面和外界气温的最大温差、最大降温速率,均能满足根据仿真计算的由温度和温度应力所得的温控标准的限值范围内.说明施工中采用的温控措施是合理的、有效的.

b. 由于参数的复杂性和实验室测定热力学参数与现场存在一定的差异,给有限元仿真分析中采用的边界条件和水化热公式带来了一定的误差.例如仿真计算假设混凝土浇筑温度为 $27\text{ }^{\circ}\text{C}$,内部最高温度为

$66\text{ }^{\circ}\text{C}$,实际浇筑温度在 $11.3\sim 22.9\text{ }^{\circ}\text{C}$,中心最高温度为 $56.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,实测值比理论计算值有较大减小,但两者温度变化总趋势基本上是一致的.

c. 在现场的温度测试中难免受到施工工艺的影响,也导致了现场测试的误差,如在大体积混凝土中埋设水管和进行通水降温情况比较复杂,测试值的取得存在一定的误差.但并不影响两者温度的总的趋势基本上是一致的.

表5 混凝土3d的计算温度场与温度
现场监测对比分析表(单位: $^{\circ}\text{C}$)

Table 5 Concrete 3d calculation temperature field and scenc monitors contrast analysis

比较	中心最高 温度	最大水化 热温升	表面最高 温度	内外最大 温差
计算值	61.1	36.2	36.8	23.98
实测值	上层	52.3	30.2	34.5
	下层	56.8	32.0	31.8

以上是对第一层水泥混凝土的温度和温度应力的计算分析,第二层水泥混凝土的计算方法与之相似.通过计算和分析,认为本工程所采取的温控措施可以满足温度裂缝的控制要求.

7 结 语

深入分析大体积水泥混凝土浇筑过程的温度场和应力场的发展过程,是合理进行大体积水泥混凝土浇筑过程温控的依据.同时结合实际监测的温度场分布及采取的温控措施,适时调整相应的保温措施,使得承台混凝土在施工及养护期间内部的温度场变化按照预期的目标发展.承台在浇筑施工中历经多次寒潮的袭击,承台均未出现温度裂缝.实践证明,本工程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] 刘京红,梁钰,刘晓华,等.大体积混凝土施工中的温度监测及裂缝控制[J].河北农业大学学报:自然科学版,2008,31(2):106-109.
- [2] 唐兴伦.ANSYS二程应用教程:热与电磁学篇[M].北京:中国铁道出版社,2003.
- [3] 陈友治,孙涛,马富奎,等.支井河大桥C20大体积混凝土冬季温控施工研究[J].武汉理工大学学报,2007,29(3):111-113.
- [4] 赵曼,工新敏,高静.预应力混凝土结构徐变效应的有限元分析[J].国防交通工程与技术,2004,38:1.
- [5] 袁广林,黄方意,沈华,等.大体积混凝土施工期的水化热温度场及温度应力研究[J].混凝土,2005(2):86-88.
- [6] 贺茂生,王业义,杨红.苏通大桥南塔墩承台超大体积混凝土施工温控关键技术[J].公路,2006(8):90-95.

(下转第73页)

- [2] 徐东强. 土力学[M]. 北京:中国建材工业出版社, 2006: 62-63, 139-144, 210-211. 262.
- [3] GB50007-2002 建筑地基基础设计规范及条文说明 [S]. 北京:中国建筑工业出版社: 187-190, 261-262.
- [4] 胡德华, 曹希. 砂垫层设计[J]. 武汉化工学院学报, 2002, 24(4): 56-60.

Research on the economy and security of cushion

HU De-hua, CHANG Yu-feng, JIA Pei, LEI Ke-jiang, QIU Dan-dan

(School of Environmental and Civil Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Under the action of the external load, the cushion foundation is affected by lateral restraint from peripheral soft soil. Moreover, it has an obvious characteristic, that is to say, the stress distribution of two-layer foundation. So, it is quite conservative to use the traditional design method of dispersion angle when the thickness of cushion is 0.5 times wider than the width of foundation. The study on economy and security of the cushion design is based on these two aspects and engineering example.

Key words: cushion; sidewise restraint; double-layer foundation; modulus of deformation; economy and security

本文编辑: 龚晓宁



(上接第 69 页)

Study on temperature field and stress and the influence of massive concrete in bridge

XU Xing-jun¹, HUANG Shu-rong²

(1. Fujian Communication Technology College, Fuzhou 350007, China;

2. CCCC First Highway Engineering CO., Ltd, Xiamen 361021, China)

Abstract: The temperature control is the important aspect of quality control for massive concrete in bridge. The paper made simulation analysis and calculates the massive concrete temperature fields and temperature stress in the construction process of cap to Ningbo Yongjiang bridge, had adopted the corresponding temperature control measures, and compared the calculation results with measuring result. Result indicates that the adopted measures had controlled effectively the most increasing temperature and the difference between inside and outside temperatures, which were of certain guidance to the construction of similar concrete works.

Key words: massive concrete; temperature control; temperature field; temperature stress; simulation analysis

本文编辑: 龚晓宁