

大体积混凝土的温控原理

吴志明 (浙江省钱塘江管理局 浙江杭州 310016)

潘广强 (浙江省水电建筑安装有限公司 浙江杭州 310051)

0 前言

大体积混凝土在港口、桥梁工程中应用广泛,但施工期产生的水化热及温度变化对大体积混凝土的影响甚大。要减少因温度变化及温度应力而产生的裂缝,应科学分析,采取恰当的温度控制防裂措施。

研究大体积混凝土施工期的温度变化及温度应力是进行温度控制的基础。

1 大体积混凝土的温度应力场及其计算

1.1 边界条件

根据热传导原理和能量守恒定律,混凝土内部温度场的变化是由下述热传导方程及其初始、边界条件确定的。

热传导方程:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a (\frac{\partial^2 T}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2}) + \frac{\partial \theta}{\partial \tau} \quad (1)$$

初始条件: 在 $\tau=0$ 时,

$$T(X, Y, Z, 0) = T_0(X, Y, Z); \quad (2)$$

其中 $T_0(X, Y, Z)$ 为初始温度分布;

(1) 第一类边界条件: 混凝土表面温度 T_b 是时间 τ 的已知函数, 即

$$T_b = f(\tau) \quad (3)$$

(2) 第二类边界条件: 混凝土表面的热流量是时间 τ 的已知函数, 即

$$-\lambda (\frac{\partial T}{\partial n}) = f(\tau) \quad (4)$$

式中: n - 混凝土表面的法线方向

λ - 混凝土导热系数, $\text{kJ/m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$

若表面热流量等于零, 则 $\partial T / \partial n = 0$, 该表面就是绝热的。

(3) 第三类边界条件: 当混凝土与空气接触时, 表面热量与混凝土表面温度 T 和气温 T_a 之差成正比, 即:

$$-\lambda (\frac{\partial T}{\partial n}) = \beta (T - T_a) \quad (5)$$

式中: β - 放热系数, $\text{kJ/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$ 。

显然, 当 $\beta \rightarrow \infty$ 时, $T = T_a$, 第三类边界条件即转化为第一类边界条件; 当 $\beta = 0$ 时, $\partial T / \partial n = 0$, 又转化为绝热条件。

工程中通常遇到的边界条件就是这几类。

1.2 计算方法

根据变分学原理, 上述问题等价于下列泛函的极值问题:

$$I(T) = \int \int \int \{ 1/2 [(\frac{\partial T}{\partial x})^2 + (\frac{\partial T}{\partial y})^2 + (\frac{\partial T}{\partial z})^2] + 1/a (\frac{\partial T}{\partial \tau} - \frac{\partial \theta}{\partial \tau}) T \} dx dy dz + \int \int (\beta_1 T^2 / 2 - \beta_1 T_a) ds = \min \quad (6)$$

式中 $\beta_1 = \beta / \lambda$ 。

泛函 $I(T)$ 的极值问题可用有限单元法解决, 将求解区域 R 及时间 τ 离散后, 经过反复推导, 可得到求解非稳定温度场的有限单元法方程。

$$[H + t - 2P/\Delta\tau] \{T\}_\tau + [H - 2/\Delta\tau] \times \{T\}_{\tau - \Delta\tau} + \{Q\}_{\tau - \Delta\tau} + \{Q\}_\tau = 0 \quad (7)$$

其中, $\{H\}$, $\{P\}$, $\{Q\}$ 由形函数 N 及混凝土热性能、边界条件可直接积分确定, 因此, 只要确定 $\tau - \Delta\tau$ 时刻温度场分布 $\{T\}_{\tau - \Delta\tau}$, 解方程组 (7) 即可得到 τ 时刻的温度场 $\{T\}_\tau$ 。这样, 已知 $\tau=0$ 时刻结构内的温度分布, 即可依次求出各时刻的温度分布。

形函数 N 是局部坐标 ξ, η, ζ 的显函数, 在不同的单元中取不同的形式。为适应建筑物的复杂结构和计算的灵活性要求, 我们在空间问题中采用了两种基本单元: (8~20) 变节点六面体等参单元和 (6~15) 变节点五面体等参单元; 在平面问题中, 采用 (4~8) 变节点四边形单元, 只要将某一节点码重写, 即可退化成三角形等参单元; 对轴对称空间问题, 单元剖面为矩形, 空间为环形单元。

温度场算出以后, 即可根据温差按初应变法求解变温应力, 用有限单元法离散后, 即可求解温度应力场。

2 大体积混凝土施工期温度场及温度应力场分析程序

2.1 程序功能

为了适应港口和桥梁工程的需要,近年来,已开发了大体积混凝土施工期温度场及温度应力场分析程序,该程序包括了大型结构分析的前后处理及计算分析部分。

1) 前处理。包括网格自动剖分,整体网格与各层网格的显示与绘制程序。

2) 计算分析部分。本部分为该程序的主体部分,用于计算分析大体积混凝土结构的温度场和温度应力场。

3) 后处理。用于绘制各水平面或垂直面的温度及应力等值线和各种计算成果的整理与分析。

2.2 计算程序特点

以下简述该程序中温度场及温度徐变应力场计算程序 SAPTS 的主要特点。

1) 该程序可用于结构施工期累积温度场及仿真应力场的计算,可模拟实际施工过程。

2) 可考虑混凝土层浇筑方式、入仓温度、浇筑层厚度、施工间歇期、冷却水管的埋设与否、混凝土及基础的弹模变化、水化热温升、外界水温及气温的变化、边界条件的不定期变化、混凝土自生体积变形及徐变影响等各种复杂因素。

3) 程序采用入仓温度按单元输入的处理方法,经与实际工程实测结果比较,效果良好。

4) 程序提供 4 种单元类型:(8~20) 变节点六面体等参单元,(6~15) 变节点五面体等参单元,(4~8) 变节点四边形等参单元及空间轴对称环单元,可模拟各种复杂的结构型式。

5) 刚度集成采用半带宽分块集成,略去约束方程,方程组按高斯消去法分块求解,故使用一般微机即可求解大型结构问题。

6) 应力输出方式有高斯点应力和节点应力两种,节点应力是据高斯点应力插值外推后绕节点平均而得。

7) 程序具有独特的初级数检和高级数检功能。

8) 节点优化功能可使计算工作量尽可能减少。

9) 为减少大型结构问题庞大的计算输出量,程序允许选择是否输出原始信息和位移值,以方便后处理工作。

10) 对于大型结构问题,为进一步减少后处理

工作量,程序只需提供一个输入输出文件名表,即可得到满意的结果。

11) 允许在计算过程中中断计算后,再重新接着计算下去。

3 温控原理

混凝土在浇筑后,其温度将发生复杂的变化,混凝土的体积亦随之伸缩,若各块体受到约束或限制不能自由伸缩,就要产生温度应力。当温度应力为拉应力且超过混凝土的抗裂能力时就要开裂。对混凝土进行温度控制的主要目的,就是防止产生裂缝。

为便于进行应力分析和温度控制,对于复杂的温度变化可以分解出 3 种情况。

1) 混凝土从最高温度降到稳定温度,从而体积产生收缩,在这个过程中,当受到某种约束时,就要产生拉应力。受约束最严重的部位是靠近基础或老混凝土处,因此,对混凝土浇筑块最高温度和最终稳定温度之差常称为基础温差。由于这个降温过程较长,约束作用是逐渐增加的,因此裂缝发生的时间较迟。温差越大,基岩(或老混凝土)弹模越高,浇筑块越薄时越易开裂。

2) 混凝土块体在冷却过程中,其温度分布一般是中心高,表层低,边界外介质温度越低,混凝土靠近边界处的温度梯度也越大,当这种内表温差达到一定值后,混凝土将发生裂缝。

3) 受到气温骤降(寒潮)的影响,表层混凝土的温度梯度突然增大,混凝土开裂。

一般来说,基础温差引起的裂缝多为贯穿性裂缝,内表温差引起的裂缝多为深层或表面裂缝,而寒潮引起的则主要是表面裂缝。要控制以上 3 种情况,尽量避免开裂,必须进行温度控制。一般工程仅需按工程近似方法对其温度及应力进行估算,并参照有关规范、规程或技术标准,借鉴类似工程的经验,采取恰当的温控措施;而对于重要工程或重要部位,则需采用更为精确的数值计算方法(常用有限单元法)研究其温度场及温度应力场,探讨合适的温控标准,经技术经济综合分析,提出技术上可靠、经济上合理的温控防裂措施,并在现场施工中加强温度监测工作,确保不出现温度裂缝。 ■

吴志明(1954-),男,主要从事水利工程管理工作。

潘广强(1974-),男,工程师,主要从事水电工程建设工作。

责任编辑 曹丽军