

Research on Heat Dissipation of Mass Concrete in Super High-Rise Buildings

Gang Wang

Beijing Engineering Company Limited of China Railway Urban Construction Group, Beijing, 100024, China

Abstract

The rapid development of China's national economy construction and the large-scale construction of super high-rise buildings will surely make the speed of mass concrete pouring become the future development trend. From the viewpoint of basic heat transfer, the paper derives the partial differential equation of the mass concrete temperature field distribution and gives the solution. The results show that if the thickness $\delta \geq 2\sqrt{a\tau}$, the instantaneous temperature calculation of the mass concrete before the time can adopt the semi-infinite slab model, and its inert time is $\frac{x^2}{16a}$. There are two fundamental ways to make the mass concrete stabilize as soon as possible to prevent the concrete surface from cracking: one is to reduce the source of heat: use mixed materials, increase the particle size of the aggregate in a reasonable interval, and use dry concrete as much as possible to reduce the amount of cement in the concrete; The second is to strengthen heat dissipation, such as controlling the pouring thickness in summer construction; developing and researching aggregates with high thermal conductivity.

Keywords

super high-rise; large volume; concrete; heat dissipation

超高层建筑大体积混凝土散热研究

王刚

中铁城建集团北京工程有限公司, 中国 · 北京 100024

摘要

中国国民经济建设的迅速发展, 超高层建筑的大规模建设必将使大体积混凝土的浇筑速度成了未来发展趋势。论文从基本传热学观点出发, 推导出了大体积混凝土温度场分布偏微分方程并给出了求解途径。结果表明, 若大体积混凝土厚度 $\delta \geq 2\sqrt{a\tau}$, 则在时刻之前该大体积混凝土瞬时温度计算可采用半无限大平板的模型, 其惰性时间为 $\frac{x^2}{16a}$ 。使大体积混凝土尽快趋于稳定以防止混凝土表面的开裂最根本的途径就是两条: 一是减少热量来源: 用混合材料, 在合理的区间增大骨料的粒径, 尽量使用用干硬混凝土等, 以减少混凝土里的水泥的用量; 采用水化热低的水泥; 二是强化散热, 如夏季施工注意控制浇筑厚度; 开发研究导热系数大的骨料等。

关键词

超高层; 大体积; 混凝土; 散热

1 引言

随着中国国民经济建设的迅速发展和城市住宅用地日益紧张, 高层住宅的建设将是中国建筑行业的主流, 高层住宅的大规模建设必将使大体积混凝土的浇筑速度成了未来发展趋势。伴随着这个趋势, 就要解决混凝土的散热问题^[1]。混凝土在浇筑时, 水泥发生水化反应放出大量的温度, 致使大体积混凝土温度增高^[2]。在使用普通水泥的情况下, 混凝土里的温度一般要增加 25℃左右^[3]。

混凝土的热传导性能很差, 集聚在混凝土内部的热量不易散失。包尔特坝底部厚 152 公尺处的混凝土, 倘要散失原始热量的 90%, 就需要 128 年。由于大体积混凝土内部的温度在长时间里还处在变化之中, 因此其体积也在不断地收缩^[4]。如果我们忽略了这一个事实, 在浇筑后不久就向预留的灌浆管里进行灌浆, 时间一长, 原来灌过灌浆的缝又因混凝土的收缩而裂开^[5]。因此, 如何使大体积混凝土内部的热量尽快降低以及防止热量过多聚集在混凝土内部成了工程界迫切需要解决的问题^[6]。

2 混凝土所含热量计算

混凝土作为一种混合物,其有着普通物质的一般属性。任何物质的热量都由两部分组成,即显热和潜热^[7]。因此混凝土内部的热量可分为两种:一是存在于构成混凝土原料里的热量,表现为浇筑温度;二是混凝土用的水泥在发生化学变化时所释放的水化热,表现为断热上升温度。浇筑温度用以下公式求得:

$$t_j = \frac{\sum_i^n m_i \cdot C_i \cdot t_i}{\sum_i^n m_i \cdot C_i} \quad (1)$$

式中:
 t_j -浇筑温度,℃。

m_i -混凝土第*i*种原料的质量,kg。

C_i -混凝土第*i*种原料的热量,kJ/kg。

t_i -混凝土第*i*种原料的温度,℃。

混凝土用的水泥在发生化学变化时所释放的水化热目前还没有确定的公式计算,据文献实验结果数据,可以按(2)式计算:

$$h_t = h_0(1 - e^{-mT}) \quad (2)$$

式中:

h_t -混凝土中单位质量的水泥在材龄*t*时的累计水化发热量,kJ。

h_0 -混凝土中单位质量的水泥在材龄总的水化发热量,kJ。

T -材料的材龄,天。

m -以浇筑温度为变量的常数。

根据(1)和(2)可以计算的已知混凝土中的所有热量,这为研究混凝土散热建立热的传导方程奠定了基础^[8]。

3 大体积混凝土内部温度的变化过程

因为浇筑大体积混凝土时刻都和外界进行着热交换,所以其温度场是一个非定常温度场,其内部任何瞬时、任何点的温度,都在进行变化^[9]。为了更清楚地了解混凝土内部的变化,需要给出混凝土内各点坐标和温度、时间的关系。这就须要推导满足大体积混凝土中热传导的偏微分方程,在具体工程实际中,只要根据给定边界条件求解该偏微分方程,即可得到具体浇筑混凝土内部温度因时间变化的方程^[10]。

3.1 建立混凝土内温度变化微分方程

为了简化问题,假定混凝土为一无限大的平板,*x*周方

向温度梯度远大于*y*轴与*z*轴方向的温度梯度^[11]。现假设在这个无限大平板中取出一个单元体,边长分别为*dx*、*dy*和*dz*,其体积*dx·dy·dz*,暂时忽略混凝土中水泥的水化热^[12]。若在*∂τ*时间内沿着*x*轴方向流入单元体*dx·dy·dz*内的热量为*qx*,流入单元体*dx·dy·dz*内的热量为*qx+dx*,单元体在时间内的温度变化应为

$$\rho \cdot c \frac{\partial t}{\partial \tau} dx dy dz = q_x dy dz - q_x - dx dy dz \quad (3)$$

式中:

ρ -混凝土的密度,kg/m³;

c -混凝土的比热;

依据高等数学中的泰勒级数,对微分量*qx-dx*展开后截取前两项,则(3)式可简化为:

$$\rho \cdot c \frac{\partial t}{\partial \tau} dx dy dz = (q_x - \frac{\partial q_x}{\partial x} dx) dy dz - q_x dy dz \quad (4)$$

由于无限大的平板的导热问题可以看做是一维导热,因此有:

$$q_x = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \quad (5)$$

式中:

λ -混凝土的导热系数。

对(5)式两边求偏导,则可得:

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} = -\lambda \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \quad (6)$$

把(6)式带入到(4)中化简,可得:

$$\rho \cdot c \frac{\partial t}{\partial \tau} = \lambda \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \varphi \quad (7)$$

(7)式就是在假定混凝土为一无限大的平板的条件下求得的满足大体积混凝土中热传导的偏微分方程。该方程式在具体工程实际中,只要根据给定边界条件求解该偏微分方程,就可得到该混凝土内部温度因时间变化的规律^[13]。一般情况下,大体积混凝土中每块的边长都在15米左右,远大于比浇筑厚度,所以上述假设热量只向一个方向流动是合理的^[14]。

3.2 大体积混凝土内部温度的计算

大体积混凝土内部温度的计算就是求解上述建立的混凝土内温度变化微分方程。随着计算机计算能力的增强和数学科学的发展,对偏微分方程的解法越来越多,目前最流行的是数值计算。但考虑到工程实际,在高层住宅建筑施工过程对温度求解精度要求不高,这里只介绍两种简单近似的求解方法^[15]。

3.2.1 差分法求解

为了便于计算,在空间维度上,把大体积混凝土在厚度方向分成若干等厚的薄层,每一层层厚记为 Δx ;在时间维度上,把时间分成许多相等的时间间隔,时间间隔记为 $\Delta \tau$ 。在分好层的混凝土中任取连续 4 层,分别记为 $k-2, k-1, k$ 和 $k+1$ 层来研究,研究开始时的时间为 m ,研究结束时的时间为 $m+1$,时间间隔为 $\Delta \tau$ 。以第 k 层为中心,则 k 层左右两侧侧的温降可分别用式(8)和(9)表示:

$$\left(\frac{\Delta t}{\Delta x}\right)_{-} = \frac{t_{k,m} - t_{k-1,m}}{\Delta x} \quad (8)$$

$$\left(\frac{\Delta t}{\Delta x}\right)_{+} = \frac{t_{k+1,m} - t_{k,m}}{\Delta x} \quad (9)$$

式中:

$t_{k-1,m-k-1}$ 薄层在 m 时刻的温度, $^{\circ}\text{C}$;

$t_{k,m-k}$ 薄层在 m 时刻的温度, $^{\circ}\text{C}$;

$t_{k+1,m-k+1}$ 薄层在 m 时刻的温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

k 层温度的二次偏导数

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \approx \frac{1}{\Delta x} \left(\left(\frac{\Delta t}{\Delta x}\right)_{+} - \left(\frac{\Delta t}{\Delta x}\right)_{-} \right) = \frac{t_{k+1,m} + t_{k-1,m} - 2t_{k,m}}{\Delta x^2} \quad (10)$$

k 层温度对时间的偏导数

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{t_{k,m+1} - t_{k,m}}{\Delta \tau} \quad (11)$$

把式(10)和式(11)带入式(7)中化简并整理可得

$$\frac{t_{k,m+1} - t_{k,m}}{\Delta \tau} = a \frac{t_{k+1,m} + t_{k-1,m} - 2t_{k,m}}{\Delta x^2} + \frac{\varphi}{\rho c} \quad (12)$$

式中的 $a = \frac{\lambda}{\rho c}$, 是混凝土的导热系数, 此值可根据实验得到, 为常数。应用此式就可从 m 时段混凝土里的温度分布求解 $m+1$ 时段的混凝土温度的分布^[6]。从 $m+1$ 时段时的温度的分布计算出 $m+2$ 时段的温度分布。由此类推, 通过反复迭代, 即可求出整个温度场的温度分布。此法计算相对繁琐。

3.2.2 解析法求解

由上述差分法求解过程可知, 差分法的本质是通过建立完善的差分等式和边界条件, 用数值迭代的方式来求取温度场内某些关键点的温度, 方法本身并不复杂, 但所涉及的数据量非常庞大, 在建筑工程上大范围推广应用仍存在一定的困难。解析法和差分法相比较, 在求解过程和使用便捷性上都有很大的提高, 下面详细介绍解析法求解^[7]。

根据论文对大体积混凝土导热问题的假设, 其温度控制方程及条件如下:

$$\begin{cases} \frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \\ \tau = 0, t(x, \tau) = t_0 \\ -\lambda \frac{\partial t}{\partial x} = h[t_{\infty} - t(0, x)] \end{cases} \quad (13)$$

对带有初始条件和边界条件的偏微分方程(13)求解, 得到一下解:

$$\frac{t(x, \tau) - t_0}{t_{\infty} - t_0} = \text{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}}\right) - \exp\left(\frac{hx}{\lambda} + \frac{h^2 a \tau}{\lambda^2}\right) \text{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}} + \frac{h\sqrt{a\tau}}{\lambda}\right) \quad (14)$$

式(14)中 $\text{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}}\right)$ 成为误差函数, $\text{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}}\right) = 1 - \text{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}}\right)$ 称为余差函数, 误差函数的值已经根据时间和导热系数制成可供工作人员查询的表格, 工程工作人员只需根据相关表格查询到误差函数的值, 便可求解大体积混凝土内部的温度分布。

4 结语

根据上述对大体积混凝土散热问题的分析与讨论可知, 为了使大体积混凝土内部的温度尽快趋于稳定以防止混凝土表面的开裂, 最根本的途径就是减少热量来源和强化散热方面找办法^[18]。减少热量来源需要用混合材料, 在合理的区间增大骨料的粒径, 尽量使用用干硬混凝土, 用加气剂或塑化剂, 以减少混凝土里的水泥的用量; 采用水化热低的水泥。强化散热方面, 则需要夏季施工注意控制浇筑厚度, 开发研究导热系数大的骨料, 强化大体积混凝土的传热^[19]。

在上面研究结果中包含一个量纲一的参数 $\frac{x}{2\sqrt{a\tau}}$ 及误差函数, 这个大体积混凝土传热的一个特点。由(14)式可知, 当 $\frac{x}{2\sqrt{a\tau}} \geq 2$ 时, 大体积混凝土在 x 处的温度可以认为仍等于(无量纲过余温度的变化小于 0.5%)。由此可以得出两个重要结论。

(1) 从几何位置看, 若 $\frac{x}{2\sqrt{a\tau}} \geq 2$, 则可认为时刻大体积混凝土 x 出的温度仍未发生变化。因而对一块初始温度均匀的大体积混凝土, 当其一个侧面的温度突然变化到另一恒定温度时, 如果其半厚度 $\delta \geq \frac{x}{2\sqrt{a\tau}}$, 则在时刻之前该大体积混凝土瞬时温度计算仍可采用半无限大平板的模型。

(2) 从时间上看, 如果 $\tau \leq \frac{x^2}{16a}$, 则此时 x 处的温度可认为完全不变, 因而可以把 $\frac{x^2}{16a}$ 视为该大体积混凝土的惰性时间, 即当 $\tau \leq \frac{x^2}{16a}$ 时 x 处的温度可认为等于 t_0 的局部 Fo 数 0.06 时物体中的稳态导热可以作为半无限大物体处理。

参考文献

- [1] 管大庆. 高温下大体积混凝土温度的计算[J]. 施工技术, 1996(02):26-27+32.
- [2] 陆阳, 陆力. 大体积混凝土后期冷却优化控制[J]. 水力发电, 1995(06):42-46+75.
- [3] 莫良舜. 大体积混凝土施工技术的商讨[J]. 施工技术, 1994(11):12-14.
- [4] 莫良舜. 对“大体积混凝土裂缝的控制”一文的几点看法[J]. 工业建筑, 1992(10):48-55.
- [5] 林钦生. 大体积泵送混凝土的配比与施工[J]. 混凝土, 1990(06):36-41.
- [6] 刘宁. 大体积混凝土泵送施工[J]. 公路, 1990(06):35-37.
- [7] 吴一匡. 宽缝回填混凝土的散热计算[J]. 水力发电学报, 1988(02):62-66.
- [8] 孙梅琦. 大体积混凝土温升规律及养护[J]. 电力建设, 1987(09):15-21.
- [9] 朱伯芳. 大体积混凝土表面保温能力计算[J]. 水利学报, 1987(02):18-26.
- [10] 藤泽彦, 长山伊索, 曾宪康, 等. 混凝土坝温度应力引起裂缝的原因及其控制[J]. 水利科技, 1986(02):28-36.
- [11] 朱伯芳. 寒潮期间大体积混凝土两面散热与棱角保温[J]. 水力发电, 1986(08):19-22.
- [12] 叶元骞. 葛洲坝工程大体积混凝土温度应力几个问题[J]. 人民长江, 1982(06):1-11.
- [13] 长办施工设计处混凝土温控小组. 大体积混凝土初期温度实用算法(二)[J]. 人民长江, 1980(02):54-62.
- [14] 廖家煌, 汪安华. 大体积混凝土初期温度实用算法(一)[J]. 人民长江, 1980(01):48-60.
- [15] 长办施工设计处混凝土温控小组. 糠灰可降低大体积混凝土的温度[J]. 人民长江, 1979(03):99-100.
- [16] 华中师范学院数学系“长办”科研小组. 大体积混凝土块顶面散热温度计算[J]. 华中师范大学学报:人文社会科学版(1期):72-77.
- [17] 响洪甸水库工程局. 响洪甸重力拱坝大体积混凝土的冷却[J]. 中国水利, 1958(07):25-33.
- [18] 朱伯芳. “上犹水电站水工结构中大体积混凝土浇制的初步经验介绍”读后[J]. 水力发电, 1956(12):42-46.
- [19] 汪胡楨. 混凝土的散热问题和计算方法[J]. 中国水利, 1956(11):3-7.