

气温骤降时大体积混凝土的温度应力计算

张子明 王嘉航 姜冬菊 宋智通

(河海大学土木工程学院 江苏 南京 210098)

摘要 研究气温骤降引起大体积混凝土温度变化和温度应力的计算方法 给出气温骤降引起的温度变化规律及温度应力情况 进一步论证了采取适当的保温措施是抵御寒潮的有效途径这一结论 并得出温度和温度应力计算的简化公式.

关键词 寒潮 混凝土 温度应力

中图分类号 :TU528.01 文献标识码 :A 文章编号 :1000-198X(2003)01-0011-05

调查研究表明 ,大多数混凝土坝的裂缝都是在浇筑过程中由于温度变化而引起的 .起初 ,混凝土表面温度的骤降只引起表面裂缝的产生 .之后 ,由于各种原因 ,原来微小的表面裂缝会进一步发展成为深层裂缝或贯穿性裂缝等 ,从而导致坝体的破坏 .因此 ,在混凝土坝浇筑过程中如何有效地减少混凝土表面裂缝的形成是一个重要的研究课题 .经验表明 ,根据混凝土表面的温度应力及允许应力 ,采取适当的保温措施是减少表面裂缝的一种有效方法 ,所以寻求寒潮期间温度应力的有效、简便的计算方法具有重要的实际意义 .

1 气温骤降期间大体积混凝土的温度计算

图 1(a)表示气温骤降期间的气温变化情况 ,即 $T_a = mt$,其中 m 为降温速度 .设一厚度为 $2l$ 的无限大平板 ,在气温骤降期间 ,由于气温下降快、时间短 ,温度梯度大 ,混凝土徐变不能充分发挥 ,因而产生很大的温度应力 .

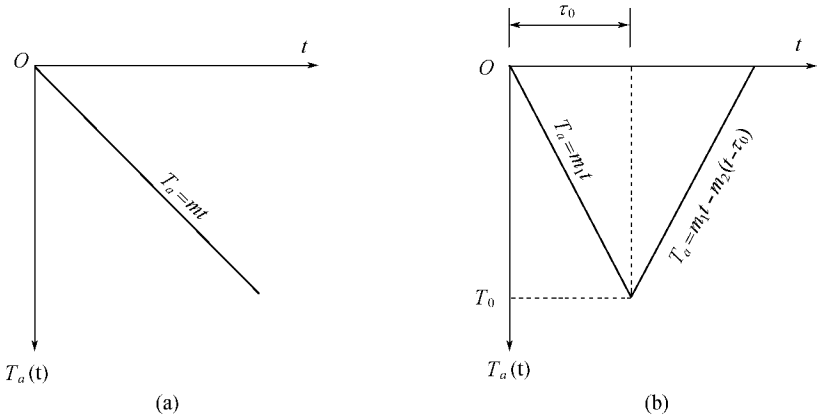


图 1 线性降温曲线

Fig.1 Linear temperature drop

在气温 $T_a = mt$ 作用下 ,混凝土的温度分布可以表示为^[1]

$$T_{\text{lin}}(x, m, t) = mt - \frac{m}{2a} \left[l^2 \left(1 + \frac{2\lambda}{\beta l} \right) - x^2 \right] + \frac{ml^2}{a} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n}{\mu_n^2} \cos \left(\mu_n \frac{x}{l} \right) \exp \left(- \mu_n^2 \frac{at}{l^2} \right) \quad (1)$$

其中

$$a = \frac{\lambda}{c\rho} \quad A_n = \frac{2\sin\mu_n}{\mu_n + \sin\mu_n \cos\mu_n} \quad (2)$$

式中 : x ——计算点到板中心的距离 ; l ——混凝土板厚度的一半 ; a ——混凝土导温系数 ; λ, c, ρ ——混凝土

导热系数、比热容和密度; β ——混凝土表面热交换系数; $i\mu_n$ ——超越方程 $\mu_n \tan \mu_n = \beta l / \lambda$ 的根.

应用叠加原理,可以求出图 1(b)所示的三角形降温曲线.图中 τ_0 为降温历时.情况下混凝土的温度,即

$$T_{\text{tri}}(x,t) = T_{\text{lin}}(x,m_1,t) + H(t-\tau_0)T_{\text{lin}}(x,m_2-m_1,t-\tau_0) + H(t-2\tau_0)T_{\text{lin}}(x,-m_2,t-2\tau_0) \tag{3}$$

式中 $H(t)$ 是 Heaviside 函数,可以表示为

$$H(t) = \begin{cases} 1 & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases} \tag{4}$$

对于图 2(a)所示的正弦降温曲线,将寒潮降温历时 τ_0 分为 n 段(如图 2(b)所示),在每一时段,应用式(1),可得混凝土温度解答为

$$T_{\text{sin}}(x,t) = T_{\text{lin}}(x,m_1,t) + \sum_{i=1}^{2n-1} H(t-t_i)T_{\text{lin}}(x,m_{i+1}-m_i,t-t_i) + H(t-2\tau_0)T_{\text{lin}}(x,-m_{2n},t-2\tau_n) \tag{5}$$

式中 $m_1, m_2, \dots, m_n$ 为各相应时段的降温速度.

根据式(3)和式(5),可以求出三角形降温和正弦降温情况下混凝土表面最大降温值,从而进一步求出表面最大拉应力.

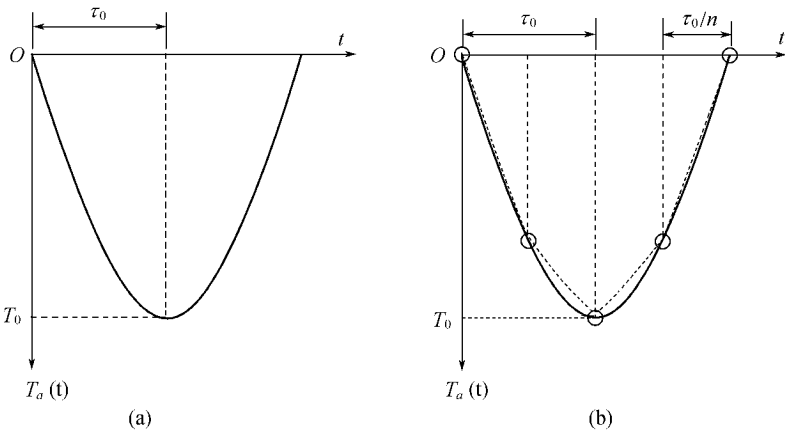


图 2 正弦降温曲线
Fig.2 Sinusoidal temperature drop

为了验证所采用方法的精度和收敛性,现给出两个算例.

算例 1 大体积混凝土,在气温骤降期间的气温变化 $T_a = T_0 \sin(\pi t / (2\tau_0))$ (图 2),混凝土热学特性和有关参数为:导热系数 $a = 0.096 \text{ m}^2/\text{d}$,寒潮降温历时 $\tau_0 = 1 \text{ d}$,保温层有效厚度 $\lambda/\beta = 0.1 \text{ m}$,混凝土厚度 $2l = 10 \text{ m}$.

应用叠加原理,将 τ_0 分为 n 等分,用折线降温代替正弦曲线降温,当 $n = 1, 2, 4, 8, 16$ 时,混凝土表面最高温度 T_{max} 与最大降温 T_0 之比如表 1 所示.从表中结果可以看出,对于正弦降温曲线, $n = 8$ 和 $n = 16$ 的计算结果非常接近,因此取 $n = 16$ 能够保证计算结果有足够的精度.对于任意形状的降温曲线可以用折线代替,进而计算混凝土的温度分布情况.

表 1 混凝土最大降温系数

Table 1 Ratio of maximum temperature drop					
n	1	2	4	8	16
T_{max}/T_0	0.729	0.760	0.776	0.786	0.787

算例 2 大体积混凝土导热系数 $a = 0.096 \text{ m}^2/\text{d}$,保温层有效厚度 $\lambda/\beta = 0.0 \text{ m}$ (相当于第一类边界条件), $\lambda/\beta = 0.1, 0.2, 0.4, 0.8, 5.0 \text{ m}$ (相当于良好的混凝土表面保护条件).图 3、图 4 给出了寒潮期间气温变化为正弦函数、寒潮降温历时 τ_0 分别为 24 h 和 120 h 情况下,混凝土的表面温度和温度分布曲线.

从图 3、图 4 可以看出,最大降温发生在混凝土表面,并且与外界气温有一相位差.随着 λ/β 值增大,相位差也随之增大.由于降温历时短,其影响深度一般不超过 1 m,当降温历时 τ_0 增加时,其影响范围稍有增加.混凝土表面热交换系数对混凝土最大降温有显著影响,当 λ/β 较大时,表面降温明显减少.为了防止气温骤降引起的温度裂缝,可根据允许应力决定混凝土表面所需要的保温力度和保温层厚度.

应用叠加原理分析气温骤降时大体积混凝土的温度和温度应力是一种行之有效的方法,本文算例表明,该方法具有收敛性好、精度高的优点.对于任意降温曲线,都可以用等效折线降温曲线代替,并使计算结果具

有足够的精度. 应该指出, 当材料进入非线性时, 叠加原理不再适用.

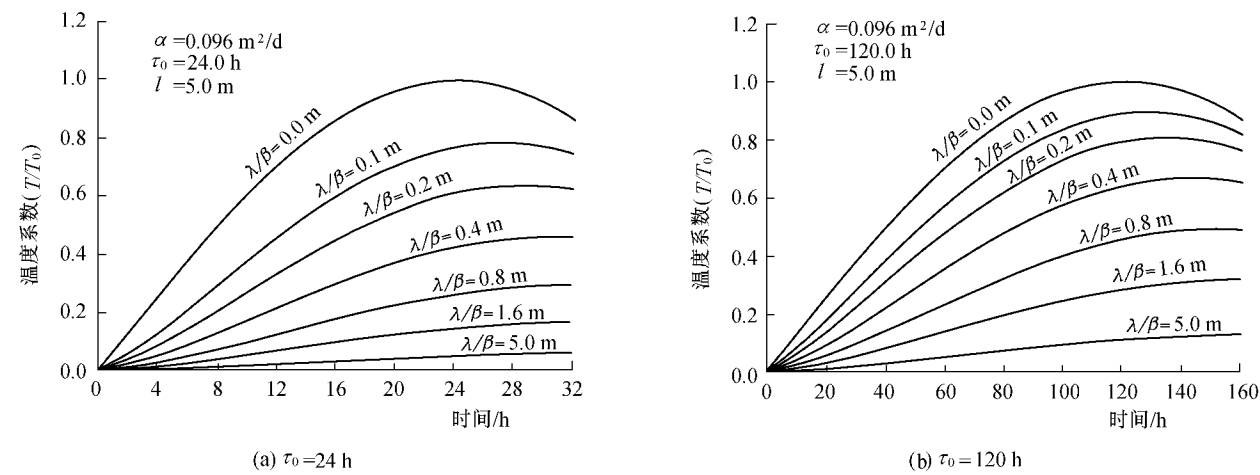


图 3 混凝土表面温度
Fig.3 Concrete surface temperature

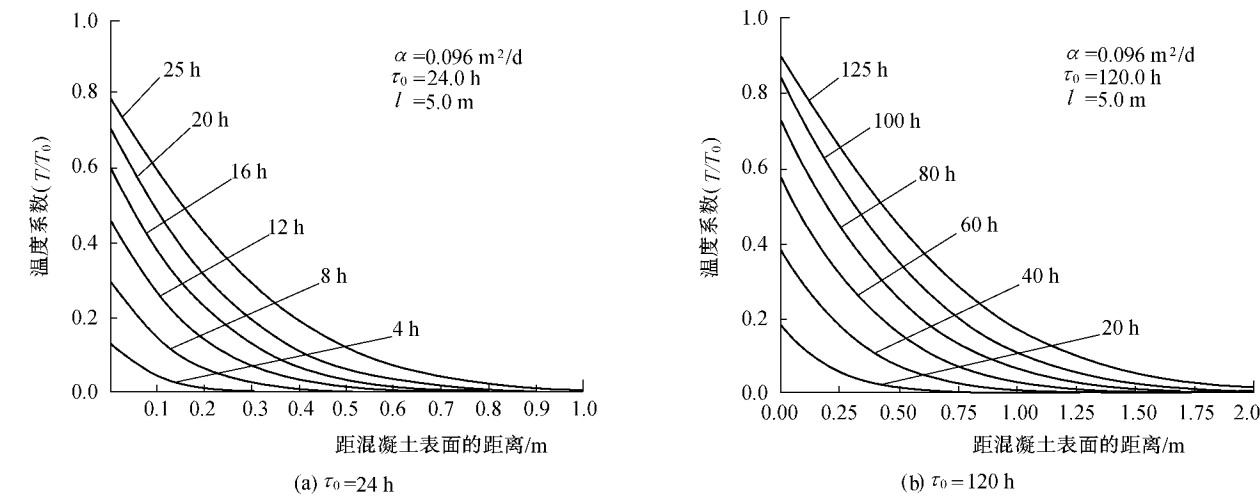


图 4 混凝土温度分布曲线
Fig.4 Temperature distribution of concrete

2 气温骤降期间大体积混凝土温度应力的计算

在一般情况下, 降温历时 2~5 d, 影响深度 1 m 左右, 而坝块厚度往往在 10 m 以上, 所以仍然可以按半无限体分析混凝土的温度场.

气温日变化呈周期性时(可认为按正弦函数变化) 坝块的准稳定温度场可表示为^[1]

$$\pi(x,t) = f_1 T_0 \exp\left(-x\sqrt{\frac{\pi}{ap}}\right) \sin\left[\frac{2\pi t}{p} - \left(x\sqrt{\frac{\pi}{ap}} + m\right)\right] \tag{6}$$

其中

$$f_1 = \frac{1}{\sqrt{1 + 2u + 2u^2}} \quad u = \frac{\lambda}{\beta} \sqrt{\frac{\pi}{ap}} \quad m = \tan^{-1}\left(\frac{u}{1 + u}\right)$$

此时混凝土表面的最高温度为

$$T_{\max} = f_1 T_0 \tag{7}$$

混凝土表面的最大温度应力为

$$\sigma = \frac{f_1 K_p E \alpha T_0}{1 - \mu} \tag{8}$$

式中: K_p ——应力松弛系数(气温日变化时取 0.9); μ ——混凝土泊松比; α ——混凝土线膨胀系数;

$E(\tau)$ ——龄期为 τ 时的弹性模量.

若将式(6)中的气温变化周期 p 用 $4\tau_0$ 代替,则不能满足 $t=0$ 时寒潮降温的初始条件.由于初始条件的影
响随着时间迅速衰减,加之人们感兴趣的是混凝土表面的最低温度(而不是时间过程),为了应用方便,混
凝土表面的最大降温仍然可以写成式(7)的形式,即

三角形降温

$$T_{\max}=f_2T_0$$

(9)

正弦降温

$$T_{\max}=f_3T_0$$

(10)

其中

$$f_2=\frac{1}{\sqrt{1+c_2u+c_3u^2}}\quad f_3=\frac{1}{\sqrt{1+c_4u+c_5u^2}}\quad u=\frac{\lambda}{2\beta}\sqrt{\frac{\pi}{a\tau_0}}$$

(11)

式(11)中参数 c_2, c_3, c_4, c_5 可根据 f_2 和 f_3 的大量精确值,应用式(3)和式(5),取 $n=16$,用最小二乘法确定.
经计算得

$$c_2=2.443\quad c_3=0.885\quad c_4=1.840\quad c_5=1.132$$

则式(11)前两项变为

三角形降温

$$f_2=\frac{1}{\sqrt{1+2.443u+0.885u^2}}$$

(12)

正弦降温

$$f_3=\frac{1}{\sqrt{1+1.840u+1.132u^2}}$$

(13)

这两种气温骤降时的混凝土表面最大温度应力仍可以按式(8)计算,只要将其中的 f_1 换为 f_2 或 f_3 即可.

为了说明公式(12)和(13)的精确程度,现给出两个算例.

算例3 大体积混凝土,在气温骤降期间气温变化如图1(三角形降温),混凝土导温系数 $a=0.096$
 m^2/d .寒潮降温速度 $m=10\text{ }^\circ\text{C}/\text{d}$ 、降温历时 $\tau_0=1\text{ d}$ 和降温速度 $m=5\text{ }^\circ\text{C}/\text{d}$ 、降温历时 $\tau_0=3\text{ d}$ 两种情况下 f_2
的计算结果比较如表2所示.

表2 f_2 计算结果

Table 2 Calculated value of f_2

$m=10\text{ }^\circ\text{C}/\text{d}, \tau_0=1\text{ d}$				$m=5\text{ }^\circ\text{C}/\text{d}, \tau_0=3\text{ d}$			
λ/β	u	近似解	精确解	λ/β	u	近似解	精确解
0.1	0.286	0.751	0.748	0.1	0.165	0.837	0.833
0.5	1.430	0.398	0.401	0.5	0.826	0.525	0.529
1.0	2.860	0.256	0.257	1.0	1.651	0.366	0.369
2.0	5.719	0.151	0.150	2.0	3.303	0.231	0.232
3.0	8.579	0.107	0.105	3.0	4.954	0.169	0.169
4.0	11.438	0.083	0.081	4.0	6.606	0.134	0.132
5.0	14.298	0.068	0.065	5.0	8.257	0.111	0.109

算例4 大体积混凝土,在气温骤降期间气温变化如图2(正弦降温),混凝土导温系数 $a=0.096\text{ m}^2/\text{d}$.
寒潮降温历时分别为 $\tau_0=1\text{ d}$ 和 $\tau_0=5\text{ d}$ 时 f_3 的计算结果比较如表3所示.

表3 f_3 计算结果

Table 3 Calculated value of f_3

$\tau_0=1\text{ d}$				$\tau_0=5\text{ d}$			
λ/β	u	近似解	精确解	λ/β	u	近似解	精确解
0.1	0.286	0.786	0.787	0.1	0.128	0.893	0.895
0.5	1.430	0.410	0.409	0.5	0.639	0.616	0.615
1.0	2.860	0.254	0.254	1.0	1.279	0.438	0.437
2.0	5.719	0.144	0.144	2.0	2.558	0.276	0.276
3.0	8.579	0.100	0.101	3.0	3.837	0.201	0.201
4.0	11.438	0.077	0.078	4.0	5.116	0.158	0.158
5.0	14.298	0.062	0.064	5.0	6.394	0.130	0.131

从以上计算结果可以看出 ,近似式 (12) 和 (13) 有足够的精度 ,可以用于工程设计.

算例 5 设龙滩碾压混凝土坝在龄期 7 d 时气温骤降 (1980 年 3 月型寒潮). 该寒潮降温历时 3 d ,降幅 $T_0 = 15.5^{\circ}\text{C}$,可看作三角形降温. 混凝土 7 d 龄期时的弹性模量为 19.01 GPa ,泊松比 $\mu = 0.167$, $\alpha = 0.7 \times 10^{-5}^{\circ}\text{C}^{-1}$, $\lambda = 8.594 \text{ kJ}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C})$, $a = 0.1 \text{ m}^2/\text{d}$, $\beta = 34.727 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C})$, $\sigma_0 = 0.4 \text{ MPa}$,允许拉应力 $[\sigma] = 1.27 \text{ MPa}$ (安全系数 $K = 1.5$). 假定采用泡沫塑料板保温 ,其厚度 $h = 0.01 \text{ m}$,导热系数 $\lambda_s = 0.13 \text{ kJ}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C})$. 试求该时刻由于气温骤降引起的温度应力.

解 采用保护层后混凝土表面的等效热交换系数为

$$\beta' = \frac{1}{\frac{h}{\lambda_s} + \frac{1}{\beta}} = 9.418 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C})$$

将上述参数代入式 (11) 的最后一项 ,以及式 (12) 和式 (8) ,得

$$\begin{aligned} u &= 1.476 & f_2 &= 0.391 & \sigma &= 0.87 \text{ MPa} \\ \sigma + \sigma_0 &= 0.87 + 0.40 = 1.27 \text{ MPa} \end{aligned}$$

计算结果表明 ,总拉应力 $\sigma + \sigma_0$ 等于允许拉应力 $[\sigma]$,说明采用人工保护后能保证混凝土具有抵御寒潮的能力.

3 结 束 语

- a. 气温骤降期间最大温降发生在混凝土表面 ,并且与外界气温有一相位差 ,混凝土表面热交换系数对混凝土最大降温有显著影响. 当 λ/β 较大时 ,表面降温和温度应力明显减小.
- b. 气温骤降期间 ,混凝土坝表面产生较大的拉应力 ,是引起表面裂缝的主要原因. 在混凝土坝表面采取保温措施后 ,可有效地降低表面温度应力. 因此 ,为了防止裂缝 ,应十分重视混凝土表面的保温措施.
- c. 利用本文所采取的方法和简化计算公式计算温度及温度应力 ,具有收敛性好、精度高、使用方便等特点.

参考文献 :

[1] 朱伯芳 ,王同生 ,丁宝瑛. 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. 142—145.

Study on cold wave-induced temperature stresses of mass concrete

ZHANG Zi-ming , WANG Jia-hang , JIANG Dong-ju , SONG Zhi-tong
(College of Civil Engineering , Hohai Univ. , Nanjing 210098 , China)

Abstract : A study was performed on the method for calculation of cold wave-induced temperature variation and temperature stresses of mass concrete , and the regularity of temperature variation and distribution of temperature stresses were given. It was verified that the adoption of a certain measure for temperature preservation was an effective way to resist cold waves. Besides , A simplified formula for determination of the temperature and temperature stress was given.

Key words : cold wave ; concrete ; temperature stress