

水化热引起的大体积混凝土墙应力与开裂分析

张子明 郭兴文 杜荣强

(河海大学土木工程学院,江苏 南京 210098)

摘要 应用基于 Arrhenius 理论的混凝土绝热温升和徐变模型,考虑温度对早期混凝土水化热化学反应速率和徐变特性的影响,研究了大体积混凝土墙的温度应力和温度开裂问题,并提出了求解非线性微分方程的半解析法.研究中采用 Bazant 教授提出的裂缝带模型计算温度裂缝.采用半解析迭代法逐步加载计算温度、应力和裂缝的产生与扩展.研究结果表明,浇筑温度极大地影响材料的热力学性质和结构的温升、温度应力和开裂.研究还揭示了不同养护条件对温度、应力和开裂的影响.

关键词 水化热;裂缝带模型;混凝土徐变;有效时间;裂缝扩展;半解析法;混凝土结构;断裂特性
中图分类号 :TU528.01 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-198X(2002)05-0012-05

水泥水化热引起大体积混凝土结构裂缝是一种普遍现象.为了避免混凝土大坝和其他大体积混凝土结构产生这样的裂缝,人们通过使用低热水泥、减少水泥用量、采用粗骨料、冷却混凝土材料、限制浇筑高度和水管冷却等多种方法来降低水化热.

本文根据水化热引起早期混凝土温度场的新理论^[1]和温度场分析方法^[2],研究了大体积混凝土墙的温度应力和温度开裂问题,分析了基于 Arrhenius 理论的混凝土绝热温升和徐变模型,并采用 Bazant 教授提出的裂缝带模型^[3]计算温度开裂.其中裂缝区剖分为等距离区域,在每一计算步长中,采用解析迭代逐步加载计算温度、应力和裂缝的产生与扩展.

1 应力和裂缝计算的材料模型

1.1 一般假定

在混凝土墙(图1)早期水化热产生的过程中, x 方向的正应力 $\sigma_x = 0$, y 和 z 方向的正应力 $\sigma_y = \sigma_z = \sigma$.由于 y 方向长度和 z 方向宽度趋于无穷, y 和 z 方向总正应变(包括弹性正应变、温度正应变、徐变正应变和累积裂缝正应变)等于零,即 $\epsilon_y = \epsilon_z = \epsilon = 0$.

假定各种应变互相独立,混凝土墙的开裂可以简化为一维问题,在 t 时刻的总应变率可以分解为

$$\dot{\epsilon}(x,t) = \dot{\epsilon}_E(x,t) + \dot{\epsilon}_C(x,t) + \dot{\epsilon}_T(x,t) + \dot{\xi}(x,t) = \dot{\epsilon}_\sigma(x,t) + \dot{\epsilon}_T(x,t) + \dot{\xi}(x,t) \tag{1}$$

式中:字母上一点表示对时间 t 求导数; $\dot{\epsilon}_E(x,t)$ ——瞬时弹性应变; $\dot{\epsilon}_C(x,t)$ ——徐变应变; $\dot{\epsilon}_T$ ——温度应变; $\dot{\xi}(x,t)$ —— y 或 z 方向累积裂缝正应变.在加荷瞬间卸载, ϵ_E 是可逆的;但稍后,由于水化热的化学反应, ϵ_E 变为不可逆.

1.2 柔度函数和叠加原理

在结构运行期,应力通常为材料强度的0.4倍,应力与应变之间的关系可以表示为

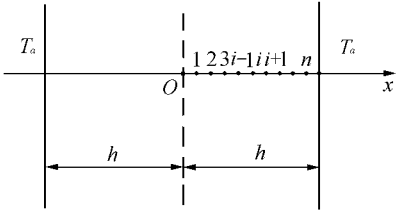


图1 混凝土墙的计算模型
Fig.1 Analytic model

收稿日期 2001-02-09
基金项目:十五'国家科技攻关项目(KJ00-03-23-02)
作者简介:张子明(1951—),江苏姜堰人,教授,博士生导师.主要从事工程力学和水工结构工程方面的研究.

$$\varepsilon_{\sigma}(x,t)=\sigma(x)J(t,t') \tag{2}$$

式中： $\sigma(x)$ ——常量应力； $\varepsilon_{\sigma}(x,t)$ ——应力产生的应变； $J(t,t')$ ——柔度，表示在混凝土龄期 t' 加载后单位常量应力产生的 t 时刻的应变（弹性应变 + 徐变应变）。

应力 $\sigma(x,t)$ 产生的应变可以将该应力分成许多增量 $d\sigma(x,t')$ ，由式 (2) 得该增量所产生的应变为 $J(t,t')d\sigma(x,t')$ ，经叠加得到应力 $\sigma(x,t)$ 产生的应变

$$\varepsilon_{\sigma}(x,t)=\int_0^t J(t,t')d\sigma(x,t') \tag{3}$$

将式 (3) 关于时间 t 求导，应变率可用积分表示为

$$\dot{\varepsilon}_{\sigma}(x,t)=J(t,t')\dot{\sigma}(x,t)+\int_0^t \frac{\partial J(t,t')}{\partial t}\sigma(x,t')dt' \tag{4}$$

1.3 基本徐变公式

考虑温度对基本徐变影响的双幂函数

$$J(t,t')=\frac{1}{E_0}+C_0(t,t') \tag{5}$$

$$C_0(t,t')=\frac{\varphi_T}{E_0}(t_e'^{-m}+\alpha)(t-t')^{n_T} \tag{6}$$

$$t_e'=\int_0^{t'}\beta_T(\tau)d\tau \quad \beta_T(\tau)=\exp\left\{Q\left[\frac{1}{T_r}-\frac{1}{T(x,\tau)}\right]\right\} \tag{7}$$

$$\varphi_T=\varphi_0(1+C_T) \tag{8}$$

式中： $C_0(t,t')$ 、 E_0 、 φ_T 、 α 、 m 、 n_T ——材料参数， $m\approx 1/3$ ； t_e' ——基于 Arrhenius 理论的有效时间，它定义为在 t' 时刻，当温度为 T 时达到的水化热化学反应程度，在参考温度 T_r 情况下所需要的时间。式 (7) 表示温度对水化热化学反应的影响由常数 Q 控制。式 (7) 中的 T_r 和 $T(x,\tau)$ 必须是绝对温度。常数 $Q=4774\text{ K}$ （化学活动能 E 除以气温常数 R ）由试验数据拟合确定^[1]。

函数 C_T 可根据试验确定：

$$C_T=c_T\cdot\tau_T\cdot c_0 \tag{9}$$

$$c_T=\frac{19.4}{1+[100/(T-253.2)]^{1.5}}-1 \tag{10}$$

$$\tau_T=\frac{1}{60t_T'^{-0.69}}+0.78 \tag{11}$$

式中： c_0 ——综合系数； t_T' ——温度为 T 时混凝土的龄期。应该指出， C_T 不仅是温度 T 的函数，而且是龄期 t_T' 的函数。

根据拟合曲线，得到 n_T 的经验公式

$$n_T=B_Tn \quad B_T=\frac{0.25}{1+[74/(T-253.2)]^2}+1 \tag{12}$$

式中 $n\approx 1/6$ 。

式 (9) (10) 和 (11) 适用于温度 $-20.0\sim 120.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的情况。从函数 B_T 可以看出，指数 n_T 随着温度的升高而增加。其原因是温度升高加速了早期混凝土的硬化过程。 C_T 随温度的变化比较平缓。

当温度超过 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，混凝土弹性模量 $E(t')$ 开始降低，温度为 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，弹性模量降低了 20%。双幂函数能够较好地描述混凝土早期弹性模量随温度变化的过程，如式 (5) (6) 所示。弹性模量可表示为

$$\frac{1}{E(t')}=J(t'+0.1,t')=\frac{1}{E_0}+\frac{\varphi_T}{E_0}10^{-n_T}(t'^{-m}+\alpha) \tag{13}$$

1.4 裂缝带模型

考虑混凝土产生的裂缝，采用 Bazant 教授提出的裂缝带模型。该模型假定分布裂缝为有一定间距 s 的离散裂缝。因为相邻裂缝带不能重叠，所以这些裂缝的可能最小间距应等于裂缝带宽度 w_c 。裂缝带宽度可认为是一个材料性质参数，可近似地取为 $w_c=3d_a$ ， d_a 为骨料最大粒径。

当平行的温度裂缝伸长时，其中一些裂缝闭合，其余裂缝的间距增加。由平行温度裂缝系统平衡路径分

又分析可知,主要裂缝的间距为

$$s = 0.69a \tag{14}$$

式中 a 为裂缝长度.

考虑裂缝带模型对裂缝带宽度的限制和对应的最小间距,主要裂缝间距可近似地表示为

$$s = \max(3d_a, 0.69a) \tag{15}$$

用 ξ 表示混凝土墙 y 和 z 方向的累积裂缝正应变,根据裂缝带模型或粘性裂缝模型,裂缝桥应力(Cracking-Bridge Stress) 为累积裂缝应变的减函数,可表示为

$$\xi = \Psi(\sigma) \quad \xi \geq 0 \tag{16}$$

可求出式(16)的反函数

$$\sigma = \varphi(\xi) = f(\delta) = f(s\xi) \tag{17}$$

式中: $s\xi$ ——实际裂缝张开宽度, $s\xi = \delta$; s ——裂缝间距;
 $f(\delta)$ ——粘性裂缝模型的软化函数,可取为从 $\sigma = f_t'$ 开始,到 $\sigma = 0, \delta_f = s\varepsilon_0$ 结束的双线性函数(图2).

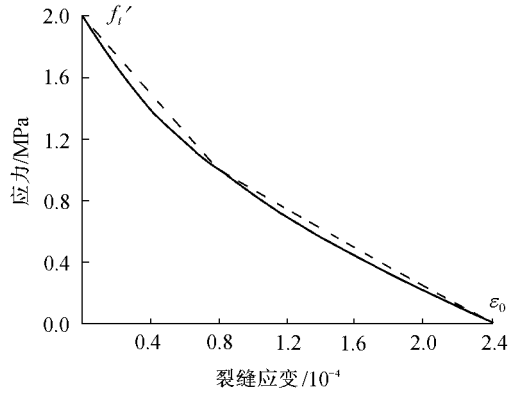


图2 裂缝开展区应力-应变关系
Fig.2 Stress-strain relationship for cracking development zone

裂缝应变增量可表示为

$$\Delta \xi_{i,j} = c_i \Delta \sigma_{i,j} \quad i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots \tag{18}$$

式中: c_i ——裂缝结点 i 的切线柔度; $\Delta \xi_{i,j}$ ——结点 i 在时间增量 $\Delta t_j = t_{j+1} - t_j$ 内产生的累积裂缝应变增量; $\Delta \xi_{i,j} = \xi_{i,j+1} - \xi_{i,j}$; $\Delta \sigma_{i,j}$ ——结点 i 在时间增量 Δt_j 内产生的正应力增量; $\Delta \sigma_{i,j} = \sigma_{i,j+1} - \sigma_{i,j}$.

2 应力和裂缝的迭代公式

将式(4)和 $\varepsilon_T = \alpha [T(x,t) - T_0]$ 代入式(1),总应变率可表示为

$$\dot{\varepsilon}(x,t) = \mathcal{K}(t,t) \dot{\alpha}(x,t) + \int_0^t \frac{\partial \mathcal{K}(t,t')}{\partial t} \dot{\alpha}(x,t') dt' + \alpha \dot{T}(x,t) + \dot{\xi}(x,t) \tag{19}$$

式中 α 为混凝土热膨胀系数,本文研究取 $\alpha = 14 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

用 $\Delta \varepsilon, \Delta \sigma, \Delta T, \Delta \xi$ 和 Δt 代替式(19)中的 $d\varepsilon, d\sigma, dT, d\xi$ 和 dt ,考虑增量 $\Delta t_j = t_{j+1} - t_j, \Delta T_{i,j} = T_{i,j+1} - T_{i,j}, \Delta \sigma_{i,j} = \sigma_{i,j+1} - \sigma_{i,j}, \Delta \varepsilon_{i,j} = \varepsilon_{i,j+1} - \varepsilon_{i,j}$ 和式(18),并用 Δt_j 乘式(19)两边,得到关于总应变增量的差分表达式

$$\begin{aligned} \Delta \varepsilon_{i,j} = & J_{j+1/2,j+1/2} \Delta \sigma_{i,j} + \sum_{q=1}^j \Delta t_q J_{j+1/2,q+1/2} \Delta \sigma_{i,j} + \alpha \Delta T_{i,j} + c_{i,j} \Delta \sigma_{i,j} = \\ & (J_{j+1/2,j+1/2} + \Delta t_j J_{j+1/2,j+1/2} + c_{i,j}) \Delta \sigma_{i,j} + \sum_{q=1}^{j-1} \Delta t_q J_{j+1/2,q+1/2} \Delta \sigma_{i,q} + \alpha \Delta T_{i,j} \end{aligned} \tag{20}$$

式中:缩写 $J_{j,q} = \mathcal{K}(t_j, t_q)$;下标 $j+1/2$ 表示时间 $(t_j + t_{j+1})/2$.

因为任一时刻的总应变 ε 和总应变增量 $\Delta \varepsilon$ 等于零,并用 $J_{j+1/2,j+1/2} = \frac{J_{j+1,j+1/2} - J_{j,j+1/2}}{\Delta t_j}$ 和 $J_{j+1/2,q+1/2} = \frac{J_{j+1,q+1/2} - J_{j,q+1/2}}{\Delta t_j}$ 代入式(20),得到正应力增量的迭代公式

$$\Delta \sigma_{i,j} = \frac{\sum_{q=1}^{j-1} \frac{\Delta t_q}{\Delta t_j} (J_{j+1,q+1/2} - J_{j,q+1/2}) \Delta \sigma_{i,q} + \alpha \Delta T_{i,j}}{J_{j+1/2,j+1/2} + J_{j+1,j+1/2} - J_{j,j+1/2} + c_i} \quad i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots \tag{21}$$

从式(21)可以看出,在求解未知量 $\Delta \sigma_{i,j}$ 之前,右端除了 $c_{i,j}$ 以外的所有参数的值都已求得,而 $c_{i,j}$ 取决于 $\Delta \sigma_{i,j}$.

3 混凝土墙应力与开裂计算结果

考虑厚度为 $2h$ 、无限长和无限宽的混凝土墙受水化热温度作用,浇筑温度 T_p 等于外界气温 T_a ($T_p = T_a$)

$=0, 10, 20, 30, 40\text{ }^{\circ}\text{C})$; $\lambda/\beta=0.01\text{ m}$; $\theta_{eq}=\frac{39.0t_e}{5.09+t_e}$; $Q=4774\text{ K}$; $f_t'=2.0\text{ MPa}$; $\epsilon_0=2.4\times 10^{-4}$; 式(5)(6)(8), (9)和(12)中的有关参数值如下: $1/E_0=0.18\times 10^{-4}\text{ MPa}^{-1}$, $\varphi_1=3.511$, $m=0.307$, $n=0.156$, $\alpha=0.060$, $c_0=0.097$. 用迭代法求解了 360 个非线性微分方程. 由于对称性, 取混凝土墙厚度一半进行分析. 计算应力与温度采用相同的网格, 网格结点均匀分布. 裂缝的应力应变关系如图 2 所示.

在计算的每一步输出混凝土墙各点的应力和累积裂缝正应变, 某些结点应力时程曲线如图 3 4 所示.

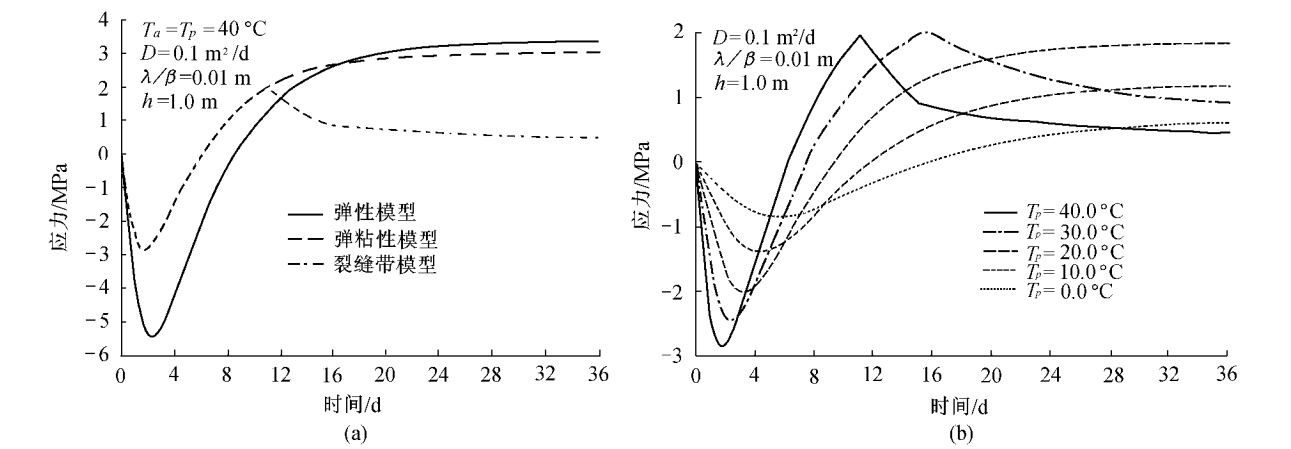


图 3 混凝土墙中心正应力时程曲线

Fig.3 Normal stress at wall center versus time

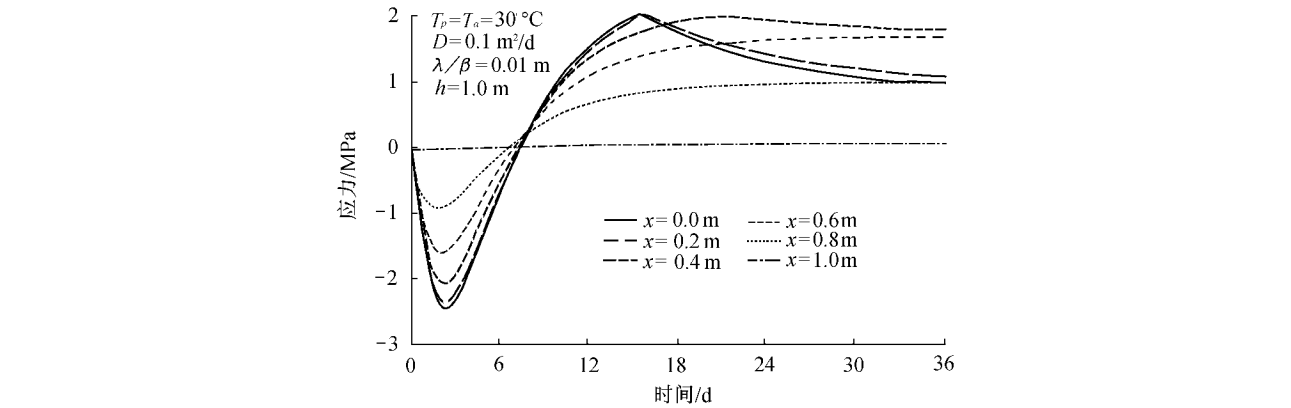


图 4 混凝土墙各点正应力时程曲线

Fig.4 Normal stress at different points versus time

4 结 论

- a. 现场浇筑混凝土结构的温度、应力和裂缝的变化可以预测. 在一维分析中, 采用了 30 多个参数, 如浇筑温度、环境条件、材料热学和力学性质、养护条件和养护周期, 这些参数对结构的温度分布、温度应力和开裂有极大的影响. 研究结果还揭示了不同养护条件对温度、应力和开裂的影响.
- b. 水泥水化热产生的速率远远大于热扩散率, 因此会使混凝土墙内部温度升高. 然而, 内部混凝土随时间冷却并收缩, 这种收缩在某种程度上受到周围介质(混凝土或地基)的约束, 从而产生拉应力. 当这种拉应力超过材料强度时, 产生裂缝. 当大体积混凝土的内外温差大于 20 °C 时, 混凝土可能产生裂缝. 为了消除这些温度裂缝, 必须严格控制混凝土结构的温升.
- c. 温度升高有两种相互对立的影响. 首先, 它加速徐变, 也就是增加徐变速率, 使混凝土缓凝或松弛时间减少. 其次, 温度升高加速水化热化学反应速率, 从而减少徐变. 这两种完全不同的温度效应可以进一步解释不同试验中观察到的不同的温度影响结果. 在后期混凝土中, 温度升高加速徐变总是占优势, 由于水泥水化热化学反应已经基本完成, 温度升高引起的徐变减少是很有限的. 然而, 对于早期混凝土, 水泥水化热化学反应仍在进行, 温度升高减少的徐变能够大大抵消增加的徐变.

参考文献：

[1] 张子明 , 宋智通 , 黄海燕 . 混凝土绝热温升和热传导方程的新理论 [J]. 河海大学学报(自然科学版) , 2002 , 30(3) : 1 ~ 6 .
[2] 张子明 , 张 研 , 宋智通 . 水化热引起的大体积混凝土墙温度分析 [J]. 河海大学学报(自然科学版) , 2002 , 30(4) : 22 ~ 27 .
[3] Bazant Z P , Oh B H . Crack band model theory for fracture of concrete [J]. Materials and Structures , 1983 , 16 : 155 ~ 177 .
[4] Bazant Z P , Panula L . Practical prediction of time-dependent deformations of concrete [J]. Materials and Structures , 1978 , 11 : 424 ~ 434 .

Analysis of hydration heat-induced stresses and cracks in massive concrete walls

ZHANG Zi-ming , GUO Xing-wen , DU Rong-qiang

(College of Civil Engineering , Hohai Univ . , Nanjing 210098 , China)

Abstract: By use of the Arrhenius theory-based concrete adiabatic temperature rise and creep models , and in consideration of the influences of temperature on hydration heat chemical reaction rate and creep property of concrete in the early age , an analysis is performed of the temperature-induced stresses and cracks in massive concrete walls . In the analysis , a semi-analytical method is proposed to solve nonlinear differential equations , and Bazant 's crack band model is used to calculate the temperature-induced cracks . The cracks are divided into equal strips , and the semi-analytical iteration method with stepwise loading is developed to calculate the relationships between temperature , stresses , and propagation of cracks . The results show that the cast temperature of concrete is of great effects on the thermodynamic property of materials and on temperature rise and temperature-induced stresses and cracking of concrete structures . Besides , the influences of different curing conditions on temperature , stresses , and cracking of concrete are also revealed .

Key words : hydration heat ; crack band model ; concrete creep ; effective time ; crack propagation ; semi-analytical method ; concrete structure ; fracture property

.....

《中国农村水利水电》征订启示

《中国农村水利水电》 是由中国灌溉排水发展中心、水利部农村水电及电气化发展局、武汉大学、中国国家灌排委员会主办的水利电力专业性技术期刊 , 内容包括水利水电研究、设计、建设和管理的各个方面 , 信息量大 , 读者面广 , 且注重应用技术的研究和推广 , 是全国优秀科技期刊 , 并荣获“ 首届国家期刊奖 ” , 是“ 中国期刊方阵 ” 的双高期刊 , 是全国中文核心期刊、中国科学引文数据库来源期刊、中国科技论文统计源期刊、中国学术期刊综合评价数据库来源期刊 .

月刊 , 大 16 开 , 64 码 , 每月 10 日出版 , 定价 8.00 元 , 全年 96 元 . 国内订阅 : 全国各地邮局 邮发代号 38 - 49 ; 国外订阅 : 中国国际图书贸易总公司(北京 399 信箱) , 国内代号 : M4211 .

地址 : 武汉大学内 , 邮编 430072 , 电话 (027) 87643133 , 传真 (027) 87652781 .