

研究报告

大体积混凝土受寒潮袭击时 半无限平面问题的无限平面化

黄达海, 王从峰

(三峡大学土木水利学院, 湖北宜昌 443002)

[摘要] 在分析混凝土表面裂缝特点的基础上, 针对受寒潮袭击中的大体积混凝土, 提出表面裂缝问题的半无限平面假设。利用混凝土传热的延迟性质, 研究了任意降温过程中半无限平面问题无限平面化的条件。采用叠加原理, 提出了环境温度任意下降时混凝土表面温度及表层温度计算的新方法。利用 $400\text{ mm} \times 400\text{ mm} \times 220\text{ mm}$ 块状试件, 构造了混凝土表面开裂问题的半无限平面模型。在室外环境下, 对混凝土表面温度与表层温度进行了连续测量, 并对该方法进行了验证。试验结果表明, 在环境温度单调下降的条件下, 对混凝土受寒潮袭击时的半无限平面问题进行无限平面化处理是可行的。

[关键词] 混凝土; 表层温度; 半无限平面问题; 降温过程; 条件等价性; 模型试验

[中图分类号] TU528.7 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2002)07-0033-07

1 问题的提出

大体积混凝土裂缝绝大多数是表面裂缝, 深层裂缝和贯穿性裂缝也多由表面裂缝发展而成^[1]。混凝土表面裂缝的形成与混凝土自身的物理力学性质有关, 但更主要受环境条件, 特别是受拆模后不久的环境条件, 包括环境温度、湿度、风速、日照情况等所控制^[2,3], 寒潮袭击是其中最危险的因素。在炎热的夏季, 混凝土拆模后, 如果没有恰当的表面养护, 混凝土表面会因过度蒸发而干缩开裂^[4]; 在寒冷的冬季, 一般情况下混凝土是停止浇筑的。如果为了加快工程施工进度, 混凝土的模板最好不要拆除。否则, 混凝土会因过大的内外温差导致表面开裂^[5]。即使在气候适宜的春秋季节或环境温度较暖和的冬季, 拆模后的混凝土也可能因环境温湿度的综合作用, 出现肉眼可察的表面裂缝^[6]。

当环境条件发生改变后, 有的表面裂缝可以自行愈合; 有的表面裂缝则会加深加宽。对于钢筋混凝土结构, 由表面裂缝侵入的水和酸性物质、气体

等会加速钢筋的锈蚀。对大体积混凝土结构, 表面裂缝的影响有限。但当上游面的压力水进入裂缝中, 混凝土结构的受力特性有可能发生明显改变, 直至影响工程的安全。因此, 研究混凝土表面裂缝, 特别是早龄期混凝土的表面裂缝, 对提高混凝土的质量, 保证结构的耐久性能, 延长工程的使用寿命, 具有重要意义。

笔者针对寒潮袭击过程中的大体积混凝土表层开裂问题, 提出表层温度计算的半无限平面假设; 其次, 采用叠加原理, 提出任意环境温度下混凝土表面温度及表层温度计算的新方法; 利用 $400\text{ mm} \times 400\text{ mm} \times 220\text{ mm}$ 块状试件, 构造了混凝土表面开裂问题的半无限平面模型。在室外环境下, 对混凝土表面温度与表层温度进行了连续测量, 并对新方法进行了验证。最后讨论了开展大体积混凝土表面开裂问题模型试验应注意的温度边界设计问题。

2 无限平面问题与半无限平面问题

当大体积混凝土处于双面散热状态, 且其厚度方向尺寸不足其他方向尺寸的 $1/10$ 时, 传热问

[收稿日期] 2002-01-16; 修回日期 2002-03-14

[基金项目] 中国博士后科学基金项目, 教育部“985”项目, 湖北省自然科学基金项目

[作者简介] 黄达海(1964-), 男, 湖北洪湖市人, 博士后, 三峡大学土木水利学院教授

题可以近似地处理为无限平面问题。参见图1, 其数学表示方法为^[7]

控制方程:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad (1)$$

初始条件:

$$\begin{aligned} t = 0, T(x, 0) &= T_0, \\ t = 0, T(0, 0) &= T(L, 0) = T_1(0), \end{aligned} \quad (1a)$$

边界条件:

$$\begin{aligned} t > 0, \partial T(L, t) / \partial t &= 0, \quad (1b) \\ \partial T(0, t) / \partial x &= (-\beta / \lambda) [T(0, t) - T_1(t)] \quad (1c) \\ \partial T(L, t) / \partial x &= (-\beta / \lambda) [T(L, t) - T_1(t)] \quad (1d) \end{aligned}$$

式(1)中, T 为任意时刻混凝土板的温度; $T_1(t)$ 为任意时刻大气的温度; a 为混凝土的导热系数; λ 为导热系数; β 为混凝土表面与大气的热交换系数; L 为无限平面混凝土板厚度的一半, 见图1。

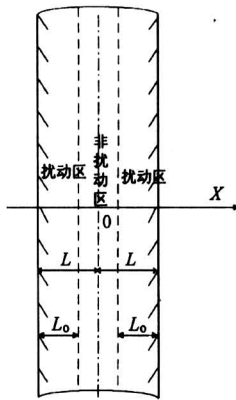


图1 无限平面模型

Fig.1 Infinite plate model

当 $T_1(t)$ 为常数, 或时间的线性函数、时间的正弦或余弦函数时, 文献 [7]、文献 [8] 上均能查到相应的解析解。特别是, 当 $T_0 = T_1(0)$, $T_1(t) = kt$ 时, 方程 (1) 的解为^[9]

$$T_{\text{line}}(x, k, t) = T_0 + kt - \frac{k}{2a} \left[L^2 \left(1 + \frac{2\lambda}{\beta L} \right) - x^2 \right] +$$

$$\frac{kL^2}{a} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n}{\mu_n^2} \cos\left(\mu_n \frac{x}{L}\right) \exp\left(-\mu_n^2 \frac{at}{L^2}\right), \quad (2)$$

$$\text{ctg} \mu_n - \mu_n / B_i = 0, \quad (2a)$$

$$A_n = 2 \sin \mu_n / (\mu_n + \sin \mu_n \cos \mu_n), \quad (2b)$$

$$B_i = \beta L / \lambda \quad (2c)$$

式中: μ_n 为特征方程 (2a) 的第 n 个正根; k , A_n , B_i 为系数。

当大体积混凝土表面处于单面散热状态, 如大体积混凝土表面受寒潮袭击时, 无限平面问题转变为半无限平面问题, 见图2。其控制方程同式 (1), 但初始条件与边界条件改为:

$$\begin{aligned} t = 0, T(x, 0) &= T_0, \quad t = 0, T(0, 0) = T_1(0), \\ \partial T(0, t) / \partial t &= (-\beta / \lambda) [T(0, t) - T_1(t)]. \end{aligned} \quad (3a)$$

$$t > 0, \lim_{x \rightarrow \infty} T(x, t) = T_0, \quad t > 0,$$

$$\partial T(0, t) / \partial t = (-\beta / \lambda) [T(0, t) - T_1(t)]. \quad (3b)$$

当 $T_1(t)$ 为时间的线性函数: 即 $T_1(t) = kt$, 利用拉普拉斯变换得到的解为

$$\begin{aligned} T(x, t) &= L[\bar{T}(x, s)] = \\ L \left[\frac{kH\sqrt{a}}{s^2(H\sqrt{a} + \sqrt{s})} \exp\left(-x\sqrt{\frac{s}{a}}\right) \right], \end{aligned} \quad (4)$$

其中, $\bar{T}(x, s) = L[T(x, t)]$, 为原函数 $T(x, t)$ 的拉普拉斯变换。 s 为拉普拉斯变量。 $H = \beta / \lambda$ 为混凝土空气的热交换系数与混凝土导热系数之比。由于式 (4) 难以显示表达, 只能通过数值积分。而绝大部分混凝土表面开裂问题, 特别是在环境温度单调下降时, 是由式 (3) 所控制的。所以, 有必要探讨利用已有无限平面问题解答求解半无限平面问题的途径与条件。

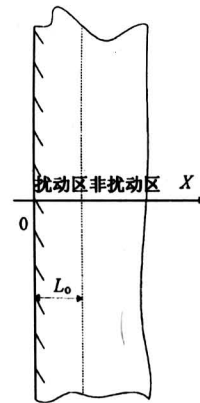


图2 半无限平面模型

Fig.2 Semi-infinite model

3 半无限平面问题无限平面化的条件

混凝土在拆模后, 如果没有恰当的养护, 几小时后就可能产生表面裂缝^[6]。如果主要讨论拆模

后几小时或十几小时之内的混凝土表层温度的变化情况，研究区域将只限定在扰动区 L_0 以内，见图1与图2，就可以使半无限平面问题与无限平面问题完全统一起来。

设 L_0 ($L_0 < L$) 为环境温度对混凝土表面的最大扰动深度，那么，当 $0 < t < t_f, \lim_{x \rightarrow L_0} T(x, t) = T_0$ or $\lim_{x \rightarrow L_0} T(x, t) = T_0$ ，即当 $t \geq t_f$ 时 (t_f 为相应的扰动时间)，外界的温度变化将渗透到图1与图2所示的非扰动区边界。从物理概念上讲，混凝土表层 ($0 < x < L_0$) 的温度变化过程仅与其材料性质、外温变化过程有关，而不会因采用的计算模型不同而发生变化。也就是说，当 $0 \leq x \leq L_0$ 时，对混凝土表层温度而言，无限平面问题与半无限平面问题等价。下面将根据不同的边界条件与气温变化条件，利用解析成果验证两种无限平面模型的“条件等价性”，并根据相应的公式，建立 $t_f - L_0$ 关系。

3.1 气温维持 $T_1(0)$ 不变

不失一般性，令 $T_0 = 0$ ，由文献[8]，半无限平面问题的解为：

$$T(x, t) = T_1(0) \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{x}{\sqrt{4at}} \right) - \exp(Hx + H^2at) \times \operatorname{erfc} \left(H\sqrt{at} + \frac{x}{\sqrt{4at}} \right) \right]. \quad (5)$$

在扰动区与非扰动区边缘，当 $T(L_0, t_f) = 0$ ，则有

$$\operatorname{erfc} \left[\frac{L_0}{\sqrt{4at_f}} \right] - \exp(HL_0 + H^2at_f) \times \operatorname{erfc} \left[H\sqrt{at_f} + \frac{L_0}{\sqrt{4at_f}} \right] = 0. \quad (6)$$

对于无限平面模型，问题的解为

$$T(x, t) = T_1(0) \left[1 - \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos \frac{\mu_n x}{L} \cdot \exp(-\mu_n^2 at / L^2) \right], \quad 0 \leq x \leq L \quad (7)$$

在非扰动区边缘， $T(L_0, t_f) = 0$ ，所以

$$1 - \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos \frac{\mu_n L_0}{L} \exp(-\mu_n^2 at_f / L^2) = 0. \quad (8)$$

当设定 t_f ，需要求 L_0 或设定 L_0 ，求 t_f ，式(6)和式(8)均需要通过数值方法求解。在数值计算中，式(6)和(8)不可能严格成立。需要对扰动的标准进行定义。对于恒温边界定义扰动幅度： $\delta = T(x, t) / T_1(0)$ ；对于线性温降边界，定义

计算时段末的扰动幅度： $\delta = T(x, t) / kt$ 。

对比较干燥的混凝土， $a = 0.0035 \text{ m}^2/\text{h}$ 。分析了 $H = \beta/\lambda = 10, 5, 1$ ； $L = 0.50 \text{ m}, 1.0 \text{ m}$ 等几种情况下，扰动区深度与扰动时间的关系。(见图3~图5)。数值计算中所采用的标准为：扰动幅度 $\delta \leq 1/1000$ 。

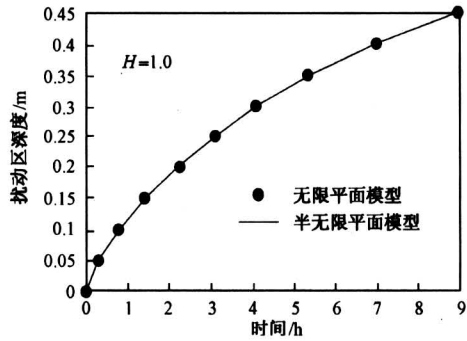


图3 两种计算模型下寒潮扰动深度比较
Fig.3 Disturbed depth under the two models

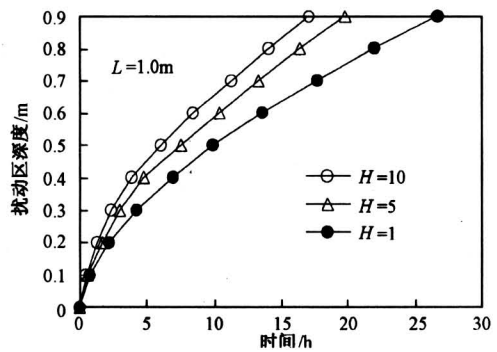


图4 不同表面保护方式下寒潮扰动深度比较 (L=1 m)
Fig.4 Effect of surface protection to disturbed depth (L=1 m)

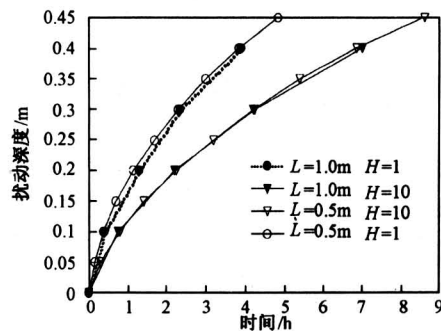


图5 相同表面保护方式、不同厚度下寒潮扰动深度
Fig.5 Disturbed depth under different model thickness

由图3, 当 $0 < t < t_f$, 基于无限平面模型与半无限平面模型公式计算的“扰动深度” L_0 与 t_f 的关系完全相同。不仅如此, 利用无限平面公式且 $0 < t < t_f$ 时, 扰动深度与厚度 L 无关, 见图5。当混凝土表面采取不同保护措施时, 扰动深度与扰动时间的关系明显发生变化。保护措施好的混凝土结构, 受外界温度变化的影响速度明显减缓。图6比较了混凝土在不同含湿率下扰动时间与扰动深度的关系。刚拆模的混凝土, 含湿率比较高, 当降温时间相同时, 其寒潮扰动比较深, 利用无限平面公式对厚度 L 的要求也要严格些。图6还显示了不同扰动标准下扰动深度的变化情况。当标准放宽5倍, 相同扰动深度下的扰动时间要大大延长。

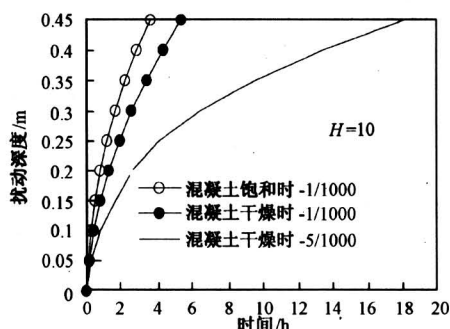


图6 不同含湿状态与扰动标准下寒潮扰动深度比较

Fig.6 Comparison between different disturb standard and moisture content

总之, 数值计算表明, 当大体积混凝土的厚度在1 m以上, 计算时间不超过10 h, 半无限平面问题可以安全地借用无限平面下的解答。当气温线性下降时, 由于式(4)不能显示表达, 混凝土表面温度可以利用式(2)计算。

3.2 气温 $T_1(t)$ 直线变化

一般情况下, 即使日平均温度下降比较明显, 气温在24 h也要上下波动。图7为笔者在室外进行混凝土表面保护效果试验时, 测到的北京地区2001年11月13日至11月22日的气温变化过程。从中可以明显看出: a. 日际温度变化周期性较差, 不能假定为正弦或余弦周期函数; b. 24 h内, 降温时间明显长于升温时间; c. 气温下降过程可以近似地处理为分段线性。应用叠加原理, 利用式(2), 可以求解混凝土表面温度过程。

对于无限平面问题或半无限平面问题, 只要 $0 < t < t_f$, 混凝土表面至内部的一定区域, 必然存

在扰动区与非扰动区。在非扰动区边缘, 理论上, $T(L_0, t_f) = 0$, 所以, 利用式(2)有

$$kt_f - \frac{k}{2a} \left[L^2 \left(1 + \frac{2\lambda}{\beta L} \right) - L_0^2 \right] + \frac{kL^2}{a} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n}{\mu_n^2} \cos\left(\mu_n \frac{L_0}{L}\right) \exp\left(-\mu_n^2 \frac{at_f}{L^2}\right) = 0. \quad (9)$$

在实际数值计算中, 常以扰动幅度 δ 为标准。对于线性降温边界, $\delta = T(x, t) / kt$ 。那么式(9)就变成

$$\left| kt_f - \frac{k}{2a} \left[L^2 \left(1 + \frac{2\lambda}{\beta L} \right) - L_0^2 \right] + \frac{kL^2}{a} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n}{\mu_n^2} \cos\left(\mu_n \frac{L_0}{L}\right) \exp\left(-\mu_n^2 \frac{at_f}{L^2}\right) \right| \leq \delta. \quad (10)$$

根据式(10), 可以由气温下降的时间预测气温下降的影响深度。在混凝土拆模后, 笔者感兴趣的区间是气温持续下降的一段。当气温下降到最低点, 混凝土表层的温度将略有滞后地下降到最低点, 见图7。

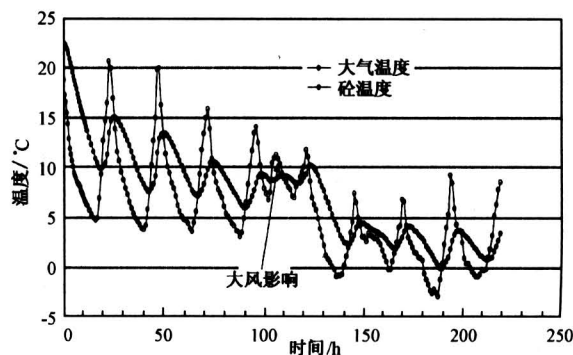


图7 经历寒潮前后混凝土表层温度与大气温度过程的实测

Fig.7 Records of the temperature of air and concrete under cold wave process

3.3 任意环境温度下表层混凝土温度计算

为简单起见, 只讨论混凝土初温均匀, 且与环境初温相同(如均设为0)的情况。对于任意环境温度的下降, 如图8所示, 可以概化为 n 条直线的近似, 不妨设第 i 条直线的起始时间为 t_{i-1} , 终点时间为 t_i , 直线的斜率为 k_i 。由于考虑的时间域非常有限, $n = 3 \sim 4$ 即可较好地逼近任意的温降过程。在计算时刻末, $t_n \leq t_f$ 。在每一小段时间 $(t_i - t_{i-1})$, 环境温度线性变化, 可以利用式(2)求解。根据线性方程的特点, 利用叠加原理, 任意时刻 $(0 < t < t_f)$ 混凝土表层的温度可以表示为^[8]

$$T(x, t) = T_{\text{line}}(x, k_1, t) + H(t - t_1) T_{\text{line}}(x, k_2 - k_1, t - t_1) + H_e(t - t_2) T_{\text{line}}(x, k_3 - k_2, t - t_2) + \dots + H_e(t - t_n) T_{\text{line}}(x, k_n - k_{n-1}, t - t_{n-1}) = \sum_{i=1}^n H_e(t - t_i) T_{\text{line}}(x, k_i - k_{i-1}, t - t_{i-1}), \quad (11)$$

其中, $H_e(t) = \begin{cases} 1, & t \geq 0 \\ 0, & t < 0 \end{cases}$, 为 Heaviside 函数。如果混凝土与环境的初始温差为 $T_0 - T_1(0)$, 拆模后气温又呈折线下降, 则混凝土表层温度可以表示为

$$T(x, t) = [T_0 - T_1(0)] \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot \cos \frac{\mu_n x}{L} \exp(-\mu_n^2 a t / L^2) + \sum_{i=1}^n H_e(t - t_i) \cdot T_{\text{line}}(x, k_i - k_{i-1}, t - t_{i-1}). \quad (12)$$

如果在初始状态混凝土表层的温度并不均匀, 如 $T_0 = T_0(x)$ ($x < L_0$), 鉴于混凝土表面裂缝的深度一般很浅, 我们只关心距表面 100 ~ 200 mm 薄层的温度状况, 可以用初温平均值修正公式 (12) 中的 T_0 , 即 $T_0 = \bar{T}_0(x)$ 。

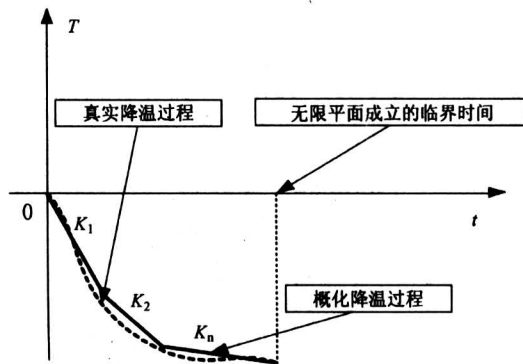


图 8 气温下降过程的分段线性化

Fig.8 Simulating the air temperature declining process before the critical time

4 半无限平面问题及混凝土表面保护效果的模型试验

为了验证本文方法的合理性, 利用 400 mm × 400 mm × 220 mm 试件 (室内干燥近 1 年), 在室外自然降温条件下, 用有表面保护和无表面保护两种方式, 进行了表面开裂问题的物理模型试验。除待研究的一个面外, 试件的其他 5 个面进行多层保

护, 以构造绝热绝湿条件。这种构造边界条件的方法, 只是相对有效。长期试验证明, 绝湿效果较好, 绝热效果较差。即仍有少量热量交换在该 5 面发生。

试验前, 将混凝土试件按规定要求包装, 并放置在恒温箱中养护, 以使其内部温度充分均匀。选择恰当的季节, 连续记录室外温度。当室外温度与养护箱中的温度基本接近时, 将试件移出室外, 最开始每隔 15 min 记录混凝土内部、表面、大气的温度。1 h 后, 每 0.5 h 记录一次。12 h 后记录间隔时间改为 1 h, 连续记录了 10 d。

由于常温下所用仪表的精度为 ±0.5℃, 所用的最大试件厚度只有 220 mm, 在划分扰动区与非扰动区时, 扰动幅度标准 δ 可以适当放宽, 如 $\delta \leq 5/1000$ 。这样, 对于无表面保护的混凝土试件, 无限平面化的临界时间可由原标准的 1.8 h 延长到 5.7 h (参见图 6)。对有保护试件, 在扰动时间相同的条件下, 扰动区范围明显变小。但综合起来, 只有试验刚开始的前 6 h 满足前文所述两种模型的等价性条件。所以, 半无限平面问题无限平面化, 只对整个试验过程的前 6 h 有意义。

无表面保护试件的混凝土表面温度用红外测温仪测量, 其他部位温度用 HMP41 高精度温湿度仪测量。试验面混凝土表面保护材料为 1 层厚为 9 mm 的聚苯乙烯泡沫塑料, 其导热系数为 $\lambda_s = 0.15$ kJ/mh℃。在无风的条件下, 固体表面放热系数取 $\beta_0 = 40$ kJ/mh℃。通过常功率平面热源法测到的混凝土导温系数与导热系数分别为^[10] $a = 0.0035$ m²/h, $\lambda = 4.12$ kJ/mh℃。有表面保护的混凝土试件与大气的等效热交换系数为^[1]

$$\bar{\beta} = 1 / \left(\frac{h}{\lambda_s} + \frac{1}{\beta_0} \right). \quad (13)$$

将实际降温过程概化为三段, 每段直线的斜率与持续时间, 及数值模拟中所用的其他参数见表 1。外温线性下降, 在临界时间内可以套用无限平面模型公式。由于 $T_0 = T_1(0)$, 只有式 (12) 中的第 2 项需要考虑。对两种表面方式的数值模拟成果见图 9。

由图 9 可以看出, 实测结果与模拟温度符合较好。有表面保护的试件, 其混凝土表层温度下降过程明显滞后于大气温度的下降过程; 与无保护的试件相比, 在 6 h 之内, 相同位置测点的温度相差约 3℃。这说明寒潮来临前, 做好混凝土表面保护十

分重要。需要说明的是,当试验时间超过6 h后,数值模拟的温度要略高于试验值,且随时间的延长有加剧的趋势。由此,进一步说明半无限平面问题无限平面化需要预先计算扰动时间与扰动深度的关系,否则,数值模拟后出现原理上的误差。笔者认为,由于实验室中难以在模型中构造出与原型完全

相似的温度边界,目前我国很少有温度及温度应力方面的模型试验成果。图9的试验结果提示:将试验时间控制在试验原理所容许的范围内,经过处理后的温度边界,可以在某种程度上达到原型标准,为在人工环境下模拟寒潮袭击、拆模影响等提供了新的研究途径。

表1 混凝土表面温度数值模拟参数*

Table 1 Some parameters used in the numerical simulation for the surface temperature of mass concrete

混凝土龄期 /d	混凝土导热 系数/ $\text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$	H		半平板 厚度/m	分段数	$k_1/\text{C} \cdot \text{h}^{-1}$		$k_2/\text{C} \cdot \text{h}^{-1}$		$k_3/\text{C} \cdot \text{h}^{-1}$	
		无保护 / m^{-1}	有保护 / m^{-1}			$\Delta t/\text{h}$	$\Delta t/\text{h}$	$\Delta t/\text{h}$	$\Delta t/\text{h}$		
320	0.0035	9.72	2.51	0.22	3	-3.0	1	-2.25	3	-1.0	2

* 实测点离混凝土表面 17.5 mm, $\delta = 5/1000$

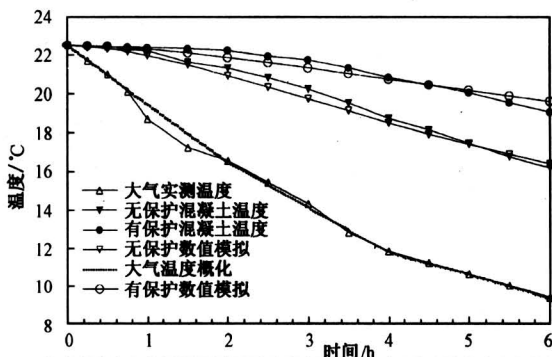


图9 寒潮过程中混凝土表面温度的模型试验与数值模拟比较

Fig.9 Comparison between measured temperature and simulated temperature when hit by cold wave

5 结束语

通过对大体积混凝土受寒潮袭击时的半无限平面问题的理论与试验研究,提出了半无限平面问题无限平面化的新方法。根据外部单调降温过程在短时间内可以分段线性化的特点,在第三类边界条件下,给出了分段线性降温过程的无限平面解答,此解答得到了试验资料的初步验证。综合全文,可以归纳以下几点:

1) 大体积混凝土表面受到寒潮袭击时,必然存在一个连续的降温过程。在24 h内不会形成周期函数。现有的温度计算理论要么将外温简化成阶梯状,要么简化成周期函数,难以准确计算混凝土表面的温度。对混凝土表面应力状态最不利的因素之一是连续温降(如冬季混凝土拆模)。因此,将

大气降温过程分段线性化,会取得比传统方法高一阶精度的结果。

2) 对于厚度在1 m以上的大体积混凝土结构,如要计算其在寒潮作用下表层混凝土的温度,将计算时间限制在10 h以下,可以安全地利用无限平面模型的解答。利用混凝土的延迟导热性质,可以在室内构造出与原型基本相似的温度边界条件,为研究大体积混凝土结构表面裂缝问题提供新的途径。

3) 混凝土表面保护对缓冲寒潮对混凝土的袭击作用明显。本文研究发现:当气温以平均 $2 \text{C} / \text{h}$ 的速度下降时,离表面17.5 mm的测点温度,在无保护的条件下,其降温速度约为 $1 \text{C} / \text{h}$;对有表面保护的试件,其降温速度只有 $0.5 \text{C} / \text{h}$ 。

4) 扰动区与非扰动区的划分与扰动标准密切相关。由于线性传热理论固有的缺陷,如果以扰动幅度 $\delta = 1/1000$ 为标准,那么扰动边界向混凝土内部推进的速度远高于标准为 $\delta = 5/1000$ 时的推进速度。鉴于实际温度测量工具的精度,建议以 $\delta = 5/1000$ 为标准,划分扰动区与非扰动区的边界。

参考文献

- [1] 朱伯芳. 大体积混凝土的温度应力与温度控制 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1998. 733~734, 68~69
- [2] Kaplia D, Falkowsky J, Plawsky J L. Thermal effects during curing of concrete pavements [J]. ACI Material Journal, 1997, 94(March-April): 118~128
- [3] Chanvillard G, Aloia L D. Concrete strength estimation at early-ages: modification of the method of equivalent

- age [J]. ACI Material Journal, 1997, 94 (Nov-Dec): 520~530
- [4] Eric A, Bruno M. Modeling the thermal stresses at early ages[J]. ACI Material Journal, 1997, 94(March-April):577~587
- [5] Chengju Guo, Early-age behavior of Portland cement [J]. ACI Material Journal. 1997, 91(Jan-Feb):118~128
- [6] Huang Dahai, Liu Guangting. Surface cracking of early-age concrete by solar radiation [A]. ACMSM17, Proceedings of Australia Conference on Material and Structure Mechanism [C]. Griffith University, Australia, 2002, June:12~14
- [7] 朱伯芳. 大体积混凝土的温度应力与温度控制[M]. 北京:中国电力出版社, 1998. 251~252, 114~117
- [8] 奥齐西克 M N. 热传导[M]. 俞昌铭译. 北京:高等教育出版社, 1983. 299~305
- [9] 张子明, Garga V K. 寒潮袭击时大体积混凝土的温度应力[J]. 河海大学学报, 1994, (11): 94~97
- [10] 刘光廷, 黄达海. 混凝土湿热传导与湿热扩散特性的试验研究[J]. 三峡大学学报, 2002, (1): 15~23

Infinite Complation for Semi-infinite Problem when Mass Concrete Hit by Cold Wave

Huang Dahai, Wang Congfeng

(Department of Civil Engineering, Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China)

[Abstract] Almost all the cracks in mass concrete are surface cracks. Full-section cracks and deep-level cracks are mainly developed from early surface cracks. This paper describes the characteristics of the surface cracks of mass concrete firstly. Then a semi-infinite plane model for surface temperature calculation is compared with infinite model. The temperature of surface zone in mass concrete under different boundaries is controlled by semi-infinite model, and is transferred to and calculated by an equivalent infinite model under certain conditions. If the temperature declining duration of air is no more than the critical time when the disturbed front perforates half-thickness of the infinite plate, it may be expressed as multi-line process approximately, and most importantly the temperature in surface zone of concrete can be calculated with the formula educed by infinite model. With 400 mm × 400 mm × 220 mm concrete specimens, the temperatures in surface zone are experimentally researched under outside environment, which has attested the method presented. It is also found that the new method to describe declining process of air temperature is more accurate than the method prevailing, and there does exist an opportunity to develop a physical model for the temperature process of mass concrete within a short period of time.

[Key words] concrete; temperature in surface zone; semi-infinite model; temperature declining process; equivalent conditionally; model test