

水化热引起的大体积混凝土墙温度分析

张子明 张 研 宋智通

(河海大学土木工程学院,江苏 南京 210098)

摘要 根据已提出的考虑混凝土化学反应速率的热传导方程新理论,分析了水化热引起的大体积混凝土墙的温度场,给出了该问题非线性热传导方程的解析迭代公式.研究中,绝热温升采用了基于 Arrhenius 理论的有效时间的函数,从而导致求解非线性热传导方程.从计算结果得出如下结论:(a)浇筑温度对大体积混凝土墙的最高温升有显著影响.浇筑温度越高,混凝土墙的内外最大温差越大.(b)由于混凝土的导热系数低,墙中心的温度高于其表面温度,这将导致混凝土墙横断面上不同位置在不同时刻具有不同的水化热化学反应速率.(c)水化热化学反应速率随温度升高而加快,从而使混凝土硬化速率加快,初凝和最终凝固时间缩短.因此,在炎热气候条件下宜采用低热水泥.

关键词 水化热;温度场;早期混凝土;有效时间;数学模型;化学反应速率;混凝土结构

中图分类号:TU528.01

文献标识码:A

文章编号:1000-198X(2002)04-0022-06

设计和施工人员预测早期混凝土温度场是为了控制并预防温度裂缝、温度变形和预估混凝土早期强度变化.近年来,温度对早期混凝土影响的重要性已经引起全世界科学技术人员的高度重视.

温度改变是产生温度应力和温度裂缝的原因.在混凝土结构中,普通水泥的水化学反应是一个放热过程,每克普通水泥可释放出高达 350 J 的热量,而混凝土较低的导热系数延迟了热向周围介质的传播,导致在早期大体积混凝土内部产生较高的温度.另外,在浇筑过程中,混凝土还从太阳辐射和养护过程中获得热量.当混凝土达到一定的硬化程度时,任何温度改变都将在混凝土内部产生应力、应变和开裂.因此,为了估计混凝土结构的温度应力、应变以及预防温度开裂,必须预测早期混凝土结构的温度历史和温度分布.

水泥水化热化学反应与所有的化学反应一样,温度越高,化学反应越快.在混凝土浇筑后,其强度增长的唯一因素是温度.在混凝土硬化过程中,在任何时刻,混凝土结构的不同位置具有不同的温度.对于早期大体积混凝土,由于存在内外温差,中间部位混凝土的强度发展比表面混凝土快得多,在确定拆模时间时,正确地估计混凝土的强度变化也需要预知混凝土结构的温度历史和温度分布.在施工中,若不能正确地确定混凝土的强度,就可能会贻误工期,或者会造成结构的局部损坏和倒塌.

本文研究了大体积混凝土墙由于水化热引起的温度场,提出了该问题非线性热传导方程的解析迭代公式,分析采用了基于 Arrhenius 理论的混凝土绝热温升和对应的非线性热传导方程,并考虑了混凝土和周围介质的热交换边界条件.因为有效时间取决于温度历史、水化热化学反应速率和热交换边界条件,问题的解答需要在时间域逐步积分迭代求解.

1 热传导方程和边界条件

混凝土结构截面上的温度分布处于动态热平衡状态,混凝土内部产生的热量与从周围介质获得或损失的热量平衡.在早期混凝土中,内部产生的热量是水泥水化热.对于长度和宽度远远大于其厚度的实际混凝土结构(如大体积混凝土墙和原子核反应容器),可以假定温度分布沿长度和宽度方向不变化,其温度分析可以简化为一维问题.根据化学反应中的 Arrhenius 理论, x 方向的热流量和热平衡条件可以由下式表示^[1,2]:

收稿日期:2001-02-09

基金项目:国家“十五”科技攻关项目(KJ00-03-23-02)

作者简介:张子明(1951—),男,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的教学与科研工作.

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} + \frac{\partial \theta_{eq}(t_e)}{\partial t} \tag{1}$$

$$t_e = \int_0^t \beta_T dt = \int_0^t \exp\left[Q\left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T(x,t)}\right)\right] dt \tag{2}$$

式中: t ——时间(混凝土实际龄期); x ——笛卡尔坐标; T_r ——参考温度, 本研究中取 $T_r = 20^\circ\text{C}$ (68°F); $T(x,t)$ ——温度场; D ——混凝土导温系数, $D = \lambda / (c\rho)$, λ 为混凝土导热系数, c 为混凝土比热容, ρ 为混凝土质量密度; $\theta_{eq}(t_e)$ ——基于 Arrhenius 理论的有效绝热温升; β_T ——Arrhenius 类比函数, $\beta_T = \exp\left[Q\left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T(x,t)}\right)\right]$; Q ——常数, 定义为化学活动能 (E) 除以气体常数 (R). 使用气体常数需要将 T_r 和 $T(x,t)$ 表示为绝对温度. 根据对水灰比 $W/C = 0.45$ 的混凝土绝热温升试验数据分析, 得 $Q = 4774\text{ K}$.

对于非线性微分方程 (1), 存在两种类型的边界条件. 第 1 类边界条件是, 在边界或部分边界上温度已知. 第二类边界条件是, 通过边界的能量传递为已知, 即热交换边界条件. 对于普通的工程结构, 通常为第 2 类边界条件. 也就是说, 为了求出截面上的温度分布, 需要知道混凝土与周围环境之间的热交换规律. 试验表明, 离开物体的热流量与物体表面和外界温度的温差成正比. 对于图 1 所示的混凝土厚板, $x = h$ 时的边界条件可以表示为

$$\lambda \frac{\partial T(h,t)}{\partial x} + \beta [T(h,t) - T_a(t)] = 0 \tag{3}$$

式中: β ——热交换系数; λ ——混凝土导热系数; $T_a(t)$ —— $x = h$ 处外界气温.

同样, 图 1 所示厚板左端 ($x = -h$) 边界条件为

$$\lambda \frac{\partial T(-h,t)}{\partial x} - \beta [T(-h,t) - T_a(t)] = 0 \tag{4}$$

式中: $T_a(t)$ —— $x = -h$ 处外界气温.

热交换系数 β 由试验确定, 它取决于混凝土的表面粗糙程度和外界风速. 如果 β 很小, 则有很少的热量流过边界. 当 $\beta \rightarrow 0$ 时, 热交换边界条件转化为绝热边界条件. 例如, 如果混凝土墙和外界温度都是对称的 (图 1), 在 $x = 0$ 处, 没有热量通过, 则 $x = 0$ 处为绝热边界, 即

$$\frac{\partial T(0,t)}{\partial x} = 0 \tag{5}$$

2 有效绝热温升

混凝土绝热温升取决于水泥的类型和含量. 对于某种水泥, 在任一时刻的水化热化学反应速率取决于那一时刻的温度^[1]. 温度对水泥水化热化学反应速率的影响可用类比函数 β_T 描述 (图 2). 进一步研究表明^[1], Arrhenius 函数和双曲函数都能很好地拟合试验数据.

根据不同初始温度情况下的混凝土绝热温升试验结果, 可以得到参考温度和任意温度时的水泥水化热化学反应速率的数学模型. 基于 Arrhenius 理论的有效绝热温升可以表示为有效时间的函数:

$$\theta_{eq}(t_e) = \frac{\theta_u t_e}{M + t_e} \tag{6}$$

式中 $\theta_{eq}(t_e)$ ——有效绝热温升, $^\circ\text{C}$; θ_u ——最高绝热温升, $^\circ\text{C}$; t_e ——相对于参考温度 T_r 的有效时间, d , 由式 (2) 表示; M ——常数, d , 可用最小二乘回归分析确定. 在本研究中, 根据混凝土和砂浆试件得到 $\theta_u = 39^\circ\text{C}$ 和 $M = 5.09\text{ d}$. 以上结果是基于 Arrhenius 类比函数得到的.

从式 (2) 和图 2 可以看出, 当温度为 20°C 时, 有效时间等于实际时间. 由于采用了类比函数 β_T , 可以得到任何温度时的混凝土水化热化学反应速率. 应该指出, 在截面

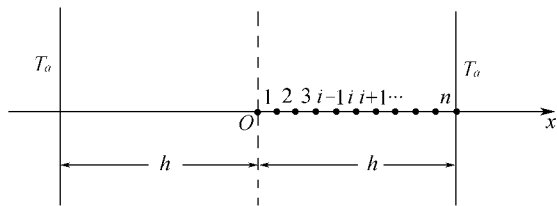


图 1 混凝土墙的计算模型

Fig.1 Calculation model for concrete wall

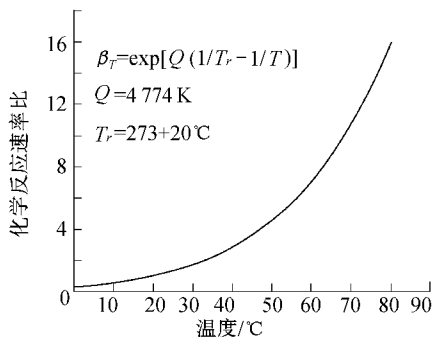


图 2 混凝土化学反应速率比

Fig.2 Chemical reaction rate versus temperature

的不同位置,具有不同的水化热化学反应速率和不同的有效时间。

3 混凝土墙温度分布迭代公式

根据文献[1]和[3]的研究结果,可得出大体积混凝土墙温度分布计算的3个解析迭代公式。将混凝土墙半厚度 h 分为 n 等分($\Delta h_i = h/n = h_i - h_{i-1}$, $i = 1, 2, \dots, n$),假定在时间增量 Δt_j ($j = 1, 2, \dots$)内每部分的温度为常量,而绝热温升为时间 t 的线性函数,其斜率为 $m_{i,j}$,得到时间增量 Δt_j 内温度增量 ΔT_j 的迭代公式:

a. 混凝土水化热产生的温度增量为

$$\Delta T_{1j} = \sum_{i=1}^n \frac{m_{i,j}}{D} \sum_{k=1}^{\infty} \left(\frac{h}{\mu_k} \right)^2 \frac{2 \sin \left(\mu_k \frac{x}{h} \right) \Big|_{x=h_{i-1}}^{x=h_i} \cos \left(\mu_k \frac{x}{h} \right)}{\mu_k + \sin \mu_k \cos \mu_k} \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{\mu_k}{h} \right)^2 D \Delta t_j \right] \right\} \quad (j = 1, 2, \dots) \quad (7)$$

b. $t = t_j$ 时刻的初始温度 $T_{i,j}$ ($i = 1, 2, \dots, n$)产生的温度增量为

$$\Delta T_{2j} = \sum_{i=1}^n T_{i,j} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{2 \sin \left(\mu_k \frac{x}{h} \right) \Big|_{x=h_{i-1}}^{x=h_i} \cos \left(\mu_k \frac{x}{h} \right)}{\mu_k + \sin \mu_k \cos \mu_k} \exp \left[- \left(\frac{\mu_k}{h} \right)^2 D \Delta t_j \right] \quad (j = 1, 2, \dots) \quad (8)$$

c. Δt_j 时段内,外界气温 $T_{a,j}$ 产生的温度增量为

$$\Delta T_{3j} = T_{a,j} \left\{ 1 - \sum_{k=1}^{\infty} \frac{2 \sin \mu_k \cos \left(\mu_k \frac{x}{h} \right)}{\mu_k + \sin \mu_k \cos \mu_k} \exp \left[- \left(\frac{\mu_k}{h} \right)^2 D \Delta t_j \right] \right\} \quad (j = 1, 2, \dots) \quad (9)$$

式中 μ_k 是超越方程 $\mu_k \tan \mu_k = \beta h / \lambda$ 的根。

为了考虑水化热与温度历史之间复杂的相互作用关系,根据 Arrhenius 理论建立了水化热化学反应速率与有效时间之间的关系,并按文献[1]提出的方法求解非线性热传导方程。由于混凝土较低的导热性能,结构中心的温度将高于表面温度,这将导致截面上不同位置具有不同的水化热化学反应速率。因为任一时刻混凝土内任意一点的水化热化学反应速率是当前温度和已产生水化热的函数,计算机程序必须跟踪结点温度、已产生水化热总量和前一个时间步长的有效时间。该程序还根据温度历史计算本时段结束时的“有效时间”,考虑水化热过程中混凝土材料性质的变化,计算温度应力。

本程序可被用来研究不同施工方案对温度场的影响,以便采取措施控制温度和温度梯度。此外,该程序还可以考虑已知边界条件和热交换边界条件。

4 混凝土墙温度分析结果

考虑厚度为 $2h$ 、长度为无限的混凝土板,导温系数 $D = 0.1 \text{ m}^2/\text{d}$,浇筑温度 T_p (初始温度)等于外界气温($T_p = T_a = 0^\circ\text{C}, 10^\circ\text{C}, 20^\circ\text{C}, 30^\circ\text{C}, 40^\circ\text{C}$), $\lambda/\beta = 0.01, 0.1, 0.2, 0.4 \text{ m}$, $\theta_{eq} = 39.2^\circ\text{C} (5.09 + t_e)$,如图3所示。在时间域用迭代法求解了180个非线性微分方程。由于对称性,取板厚一半($0 \leq x \leq h$)计算。计算温度场时,网格节点均匀分布。

计算机程序输出每一计算步长各结点温度和有效时间。通过程序后处理得到某一特定时间混凝土墙截面上的温度分布和任一结点的温度历史。

因为混凝土与基础的最大允许温差及混凝土浇筑块的最大允许内外温差是温控的重要指标,图4给出混凝土墙截面上各点温度和浇筑温度的最大温差。计算中假定热交换系数 $\lambda/\beta = 0.01 \text{ m}$,浇筑温度在 0.0°C 到 40.0°C 之间。

图5为不同浇筑温度($T_p = 0^\circ\text{C}, 10^\circ\text{C}, 20^\circ\text{C}, 30^\circ\text{C}, 40^\circ\text{C}$)情况下,混凝土墙中心温度与浇筑温度的温差时程曲线,计算中取 $\lambda/\beta = 0.01 \text{ m}$ (接近于已知温度边界条件)。图6为不同浇筑温度下混凝土墙中心有效时间的时程曲线。

图7为浇筑温度 $T_p = 40^\circ\text{C}$ 时,混凝土墙截面上不同位置处($x = 0.0 \text{ m}, 0.2 \text{ m}, 0.4 \text{ m}, 0.6 \text{ m}, 0.8 \text{ m}, 1.0 \text{ m}$)内部温度和浇筑温度的温差时程曲线,计算假定浇筑温度等于外界气温、 $\lambda/\beta = 0.01 \text{ m}$ 。

图8为混凝土墙截面上各点有效时间的时程曲线。有效时间代表混凝土的成熟度和水化热化学反应程度。

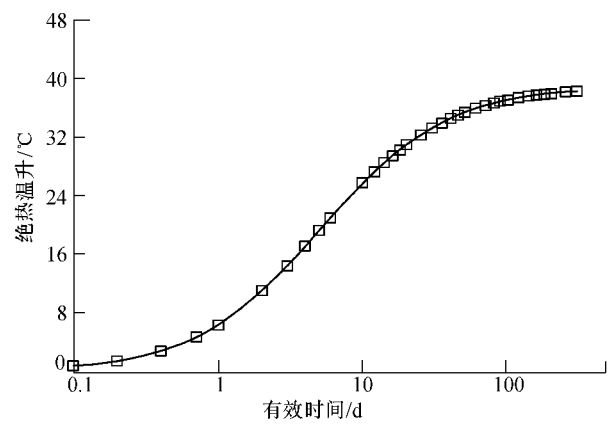


图 3 基于有效时间的绝热温升

Fig.3 Adiabatic temperature rise versus effective time

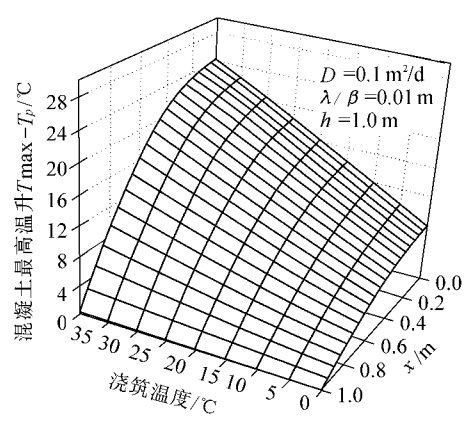


图 4 不同浇筑温度时的最高温升

Fig.4 Maximum temperature rise versus different placement temperatures

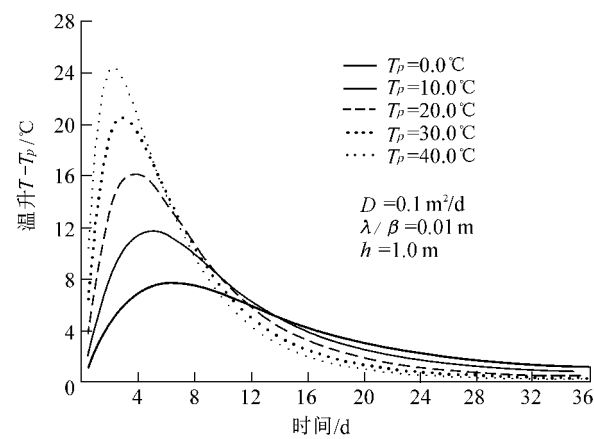


图 5 不同浇筑温度时墙中心温升时程曲线

Fig.5 Temperature rise at wall center versus time under different placement temperatures

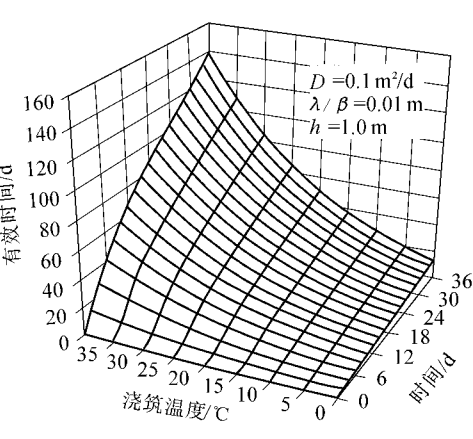


图 6 不同浇筑温度下混凝土墙中心的有效时间

Fig.6 Effective time for wall center versus elapsed time under different temperatures

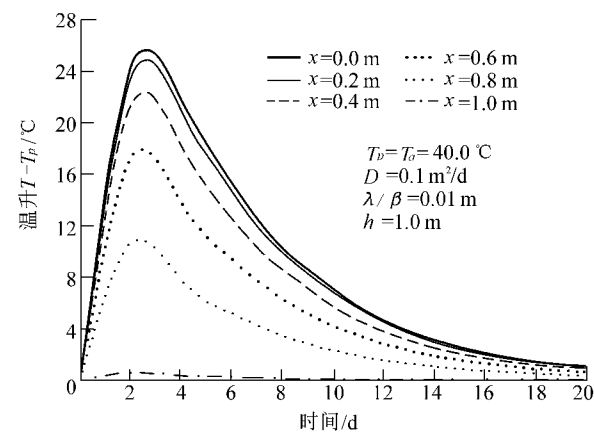


图 7 混凝土墙各点的温升时程曲线

Fig.7 Temperature rise at different points versus time

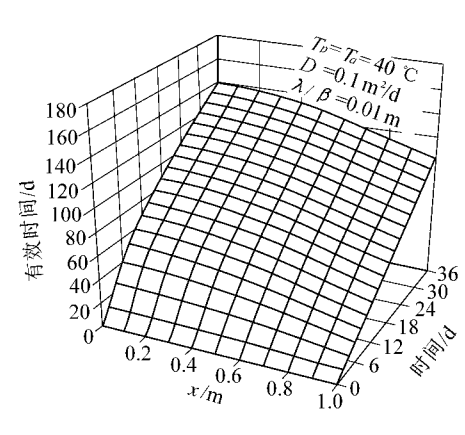


图 8 混凝土墙各点的有效时间

Fig.8 Effective time at different points versus time

5 结 论

a. 大体积混凝土墙早期不稳定温度场计算模型和温度分析研究表明,可以预测现场早期混凝土的温度变化.因此,人们可以估计混凝土结构不同位置处的成熟度和抗拉及抗压强度随时间的变化规律.早期混凝土

土的温度分布和温度历史是评估混凝土温度开裂和温度变化的重要依据,因此,对于设计者来说,大体积混凝土的计算模型是一个有用的工具.它有助于施工规划,例如,为了防止寒冷气候条件下混凝土开裂而设计养护措施,或在早期达到需要的强度,或控制结构内的温差.

b. 早期混凝土的瞬时温度分析是一个非常复杂的过程,它包含材料性质和环境条件的许多不确定性因素.在实际问题中,20%~30%的误差通常被认为是可以接受的.误差主要来源于输入数据、计算模型和计算过程.像混凝土绝热温升、化学活动能、混凝土和模板材料的导温系数、热交换系数和外界温度变化等重要参数均在很大范围内变化.不同风速情况下,不同混凝土表面的热交换系数也有很大差异.

c. 基于有效时间的混凝土绝热温升速率、最高绝热温升和化学活动能与水泥性质紧密相关.不同生产厂家生产的同一种水泥,其最高绝热温升和水化热化学反应速率也很不相同.因此,对于重要工程,为了可靠地预测混凝土温度变化,需要通过试验准确地确定水泥水化热特性(包括化学活动能等参数).在参考其它工程或已有的试验研究结果时,要根据工程现场条件有选择地使用这些参数.

d. 混凝土水化热化学反应速率随着温度升高而加快,从而使混凝土内部温度升高加快(图4),混凝土硬化速率加快,最终凝固时间缩短(图5,图6).因此,可以得出这样的结论,在炎热的气候条件下,应使用低热水泥而避免使用快速硬化水泥.图4表明,炎热气候条件(浇筑温度 $T_p = 40^\circ\text{C}$)下浇筑时,混凝土墙最高内外温差(24°C)比寒冷气候条件(浇筑温度 $T_p = 0^\circ\text{C}$)下浇筑时,混凝土墙内外温差(8°C)高达 16°C .若按传统理论计算,这两种情况下的混凝土温差($T - T_p$)时程曲线完全相同.

e. 混凝土是一种不良导热体,水泥水化热速率远远大于热扩散率.因此,混凝土内部温度升高.然而,内部混凝土随时间冷却并收缩.由于这种收缩在某种程度上受到周围混凝土约束,将产生拉应力.当拉应力大于混凝土的抗拉强度时,将产生裂缝.经验表明,大体积混凝土内外温差大于 20°C 时,可能产生裂缝.这就意味着,为了减少混凝土开裂,必须控制混凝土结构内部温升.

f. 一般来说,只要有足够的化学反应物质,化学反应的速率将随着温度升高而加快.因此,混凝土内部温度通常高于混凝土表面的温度.这将导致混凝土截面上不同位置具有不同的水化热反应速率、不同的有效时间和不同的绝热温升(图8),从而进一步增加了分析的复杂性.

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] ZHANG Zi-ming, Garga V K. State of temperature and thermal stresses in mass concrete structure subjected to thermal shock[J]. Dam Engineering, 1996, 7(4):336~350.
- [3] ZHANG Zi-ming, Garga V K. Temperature and temperature induced stresses for RCC dam[J]. Dam Engineering, 1996, 7(2):129~154.
- [4] Tank R E, Carino N J. Rate constant function for strength development of concrete[J]. ACI Material Journal, 1991, 88(1):74~83.
- [5] Bazant Z P. Constructive equation for concrete creep and shrinkage based on thermodynamics of multi-phase system[M]. RILEM, Paris: Materials and Structures, 1970.3~36.

Analysis of hydration heat induced temperature rise in massive concrete walls

ZHANG Zi-ming, ZHANG Yan, SONG Zhi-tong

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

Abstract: On the basis of the new theory of heat conduction equation considering the chemical reaction rate of concrete, the temperature field caused by hydration heat in massive concrete walls is analyzed, and the analytical iterative solution to the nonlinear heat conduction equation is presented. In the analysis, the adiabatic temperature rise is taken as a function of effective time based on the Arrhenius theory, resulting in a non-linear differential equation. Then 180 nonlinear equations are solved by the iteration method, and the following conclusions are drawn: (1) placement temperature has a great effect on the maximum temperature rise in massive concrete walls, and the higher the placement temperature, the larger the maximum temperature difference between the inside and the surface of a concrete wall;

(2) owing to the low thermal conductivity of concrete, the temperature at the center of a concrete wall is higher than that of the surface, resulting in different chemical reaction rates of hydration heat and different effective time at different points of the cross section of a concrete wall; (3) the increase of chemical reaction rate with temperature leads to the acceleration of hardening of concrete and the reduction of its initial and final setting time, so low heat cement is preferred under hot weather conditions.

Key words: hydration heat; temperature field; early aged concrete; effective time; mathematical model; chemical reaction rate; concrete structure

· 简讯 ·

第 6 届全国土动力学学术会议在河海大学召开

由中国振动工程学会土动力学专业委员会、中国土木工程学会土力学及岩土工程分会、中国水利学会岩土力学专业委员会、中国力学学会岩土力学专业委员会、中国建筑学会工程勘察分会和地基基础分会、中国地震学会地震工程专业委员会、中国工程建设标准化协会建筑振动标准委员会联合主办,河海大学岩土工程研究所和南京水利科学研究所土工研究所联合承办的第 6 届全国土动力学学术会议于 2002 年 5 月 25 ~ 27 日在南京河海大学隆重举行,来自全国各系统从事土动力学与岩土地震工程科研、教学、设计、管理及施工等工作的专家和代表共 160 多人出席了大会。

大会组委会主席、河海大学岩土工程研究所所长刘汉龙教授主持了开幕式。各级领导非常关心和支持大会工作,有关方面的领导同志专程赴大会祝贺,他们是:江苏省建设厅厅长、长江学者特聘教授黄卫同志,河海大学党委书记林萍华教授、南京水利科学研究所所长张瑞凯教授、河海大学副校长严以新教授、国家自然科学基金委员会水利学科主任李万红教授、中国振动工程学会秘书长陈国平教授等。主办本次会议的 7 家全国性学会对本次会议非常重视,分别派代表参加了开幕式。中国科学院沈珠江院士参加了会议,德高望重的土动力学前辈汪文韶院士为大会致辞,勘测大师张在明教授向大会发来了贺信,徐志英、卢盛松、殷宗泽等教授出席了开幕式。

本届会议是继先后于蚌埠、西安、上海、杭州和大连召开的前 5 届系列会议之后的又一次土动力学界学术盛会。目的是给从事土动力学与岩土地震工程科技工作者提供一个相聚的机会,交流新思想、新理论、新成就和新经验,讨论学科的新进展,互相启发,共同提高,从而推动我国土动力学研究工作的进一步发展。本次会议是新世纪初全国土动力学与岩土地震工程科技工作者的第一次盛会。代表面广,组织形式新,内容丰富,论文质量高。共有 115 篇学术论文收入会议论文集。这些论文涉及到土的动力特性与本构关系、地基和土工建筑物及生命线工程抗震分析、砂土液化与地震永久变形、土工动力测试技术及应用、土与结构动力相互作用、土工抗震加固技术与减震隔振措施、岩土地震工程及环境工程、震源机制与波动传播、动力机器基础、爆炸防护工程、海洋岩土工程、工程实录等内容,基本上反映了我国土动力学和岩土地震工程科技工作者近年来的最新科研成果和进展。

大会特邀了 8 位国内外知名专家作了主题报告,它们是“流动液化和反复流动的本构模型”(李相菘教授),“黄土动力学研究新进展与需求展望”(王兰民研究员);“SEISMIC ANALYSIS AND DESIGN OF MUNICIPAL SOLID LANDFILLS”(钱学德博士);“海床与海洋地基的动力分析理论与设计方法研究进展”(栾茂田教授);“高烈度地震环境下城市地铁抗震设计的基本研究课题”(张建民教授);“桩基动力学及其工程应用”(陈云敏教授);“饱和多孔介质土动力学理论与分析方法”(黄茂松教授);“计算土动力学研究现状与展望”(刘汉龙教授)。

大会分 4 大专题共 12 个分组报告,共有 80 多位代表发言。其专题为(1)土的动力特性与本构关系;(2)土工建筑物及地基的动力分析与抗震设计;(3)土工动力测试技术及应用;(4)土工抗震加固技术和工程实录分析;(5)计算机技术应用及其他。

大会期间召开了各主办单位代表和土动力学专业委员会委员联席会议,对本次大会组织工作、今后学会的工作及其学术交流活动开展等问题进行了深入讨论。

(周云东供稿)