

文章编号 :1000-582X(2007)10-0073-04

桥墩混凝土水化热温度有限元分析

张亮亮, 赵亮, 袁政强, 陈天地

(重庆大学 土木工程学院 重庆 400030)

摘要 根据三维热传导理论,采用大型有限元软件 ANSYS,考虑外界气温条件、水泥水化热等热力学参数以及分层浇筑(定义单元的“生死”来准确模拟施工中的分层浇筑)对温度场的影响,运用瞬态热分析法进行温度场的仿真计算。通过计算结果与实测结果的对比分析,得出桥墩沿截面厚度方向的温度分布和其随时间变化的规律及特点,为施工提供一定的参考。

关键词 桥墩;水化热;温度场;有限元

中图分类号: TU375

文献标志码: A

随着混凝土的广泛应用,像厚壁桥墩这类大体积混凝土中水泥在水化硬结过程中产生的水化热效应问题,越来越受到工程界的重视。混凝土是热的不良导体,具有很大的热延迟性和热惰性,当混凝土浇筑后,因水泥水化反应产生的水化热,在新浇筑的混凝土结构中不断的积贮热量,形成短期的内部温度高、外表面温度低的水化热分布状态。这种温差将产生温度应力,有可能在混凝土表面引起巨大的拉力和出现开裂。而且体积越大,这种温差越大,产生的温度应力也就越大。从水化热产生温度应力的角度考虑,它与结构形状、尺寸、混凝土的配合比、掺合物、施工工艺、混凝土结构的内外部约束等有关,由此可见由水化热引起的温差分析是十分复杂的,因而,确定其温差,对于控制温差应力引起的开裂是非常关键的。本文结合某实际工程,运用大型有限元程序 ANSYS 来模拟施工期间桥墩混凝土的温度场。

1 工程概况

某桥主桥为空心薄壁连续三跨刚构桥,其跨径布置为(100 + 192 + 100 m)。矩形空心墩高度分别为 98.00 m 和 69.00 m,是典型的高墩大跨桥梁结构。桥墩采用就地搅拌就地浇筑的办法,模板采用瑞典进口

模板。桥墩采用分节段浇筑,一次浇筑 4.5 m 高,历时 2 天,与此同时,采用预埋温度传感器进行水化热的现场监测。

2 有限元计算的理论基础

空间不稳定温度场区域 R 内,温度场 $T(x, y, z)$ 满足热传导方程^[1]

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{1}{\alpha} \left(\frac{\partial \theta}{\partial \tau} - \frac{\partial T}{\partial \tau} \right) = 0, \quad (1)$$

式中 T 为温度, α 为导温系数, θ 为绝热温升, τ 为时间。

在初始瞬时, T 应等于给定的温度,即

$$T = T_0(x, y, z). \quad (2)$$

在边界 C 上满足第一类边界条件,即在作用边界上固体表面温度是时间的已知函数,表示为^[1]:

$$T = T_b, \quad (3)$$

式中 T 为温度, T_b 为已知边界气温。

在边界 C' 上满足第三类边界条件:当 $\tau > 0$, 在 C' 上:

$$l_x \frac{\partial T}{\partial x} + l_y \frac{\partial T}{\partial y} + l_z \frac{\partial T}{\partial z} + \frac{\beta}{\lambda} (T - T_a) = 0, \quad (4)$$

式中 τ 为时间, l_x, l_y, l_z 为边界向外法线方向的方向余

收稿日期 2007-05-08

基金项目:高等学校博士学科专项科研基金资助项目(2005061102)

作者简介:张亮亮(1956-),男,重庆大学教授,博士生导师,主要从事桥梁抗风、抗震、结构动力特性分析等方面的研究,

(E-mail) mrlzhang@163.com。

弦, T 为温度, β 为表面放热系数, λ 为导热系数, T_a 为气温。

将求解区域划分有限单元后, 当温度 T 在 $\tau=0$ 时取给定的初始温度 T_0 , 在边界 C 上取给定的边界温度 T_b , 然后将泛函 $\chi(T)$ 取极小值, 并在边界 C' 上满足第三类边界条件, 进行求解, 从而得到所需要的不稳定温度场。

3 计算模型与计算参数

3.1 三维有限元模型

根据实际现场施工, 在计算中考虑混凝土分层浇注、层厚、水化热温升变化、徐变、材料不同分区、浇注温度、对流边界条件等条件和因素, 按照实际施工顺序, 合理选取荷载步长, 考虑施工间歇的影响。气温采用实测气温的日平均值。

按照实际施工顺序, 将一个浇注块作为一个部分, 本次分析对于浇筑单元采用单元生死法进行处理。采用 SOLID70 热单元, 该单元是一个具有导热能力的单元, 它共有 8 个节点, 每个节点只有一个温度自由度, 运用此单元建立实体模型进行瞬态热分析。

施工中分 2 层浇筑, 本次计算则将按实际浇筑情况分为两个部分, ANSYS 模型见图 1。边界上存在空气和混凝土的热对流, 属于热分析中的第三类边界条件, 对流边界条件可以作为面荷载(具体输入参数为

对流系数和空气温度)施加于实体模型的表面, 来计算固体和流体间的热交换。对于模板的影响则单独建立模板单元, 选择合适的放热系数来考虑。对于水泥水化热, 则根据 ANSYS 提供的函数功能, 采用 APDL 方式设定水泥的热生成率, 并生成水泥水化热生成率文件, 将热生成率作为体荷载加于单元上来模拟水泥的化学反应。确定计算时间为 10 天, 与实测大致相一致。

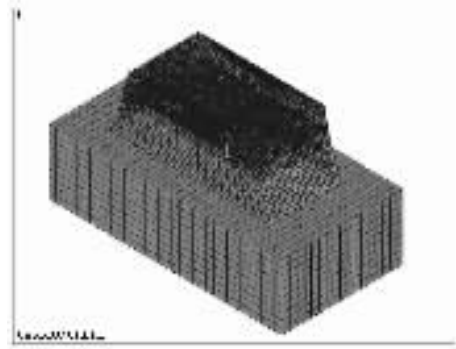


图1 ANSYS 有限元模型

3.2 计算参数的选取

混凝土的热学性能包括导温系数、导热系数、比热和密度。这些参数是计算水化热的重要参数, 应由试验确定。

混凝土的级配见表 1。

表1 计算部位 C40 混凝土的配合比

种类	种类						总计
	水泥	砂	粉煤灰	碎石	水	减水剂	
重量/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	465	563	60	1 143	205	15	2 451
百分比/%	18.97	22.97	2.45	46.63	8.36	0.62	100

根据混凝土各组成成分的重量百分比进行估算, 并采用加权平均法可得到当时温度下的热性能参数:

$$\lambda = (\lambda_1 \cdot \gamma_1 + \lambda_2 \cdot \gamma_2 + \dots + \lambda_i \cdot \gamma_i) \\ = 8.479 \text{ kJ}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C});$$

$$c = (c_1 \cdot \gamma_1 + c_2 \cdot \gamma_2 + \dots + c_i \cdot \gamma_i) \\ = 0.948 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C});$$

$$\rho = 2\,400 \text{ kg}/\text{m}^3;$$

$$a = \lambda/c\rho = 0.003\,605 \text{ m}^2/\text{h}.$$

水泥的水化热是影响混凝土温度应力的一个重要因素。水泥水化热是依赖于龄期的。在此采用复合指数式来表示^[2]:

$$\chi(\tau) = Q_0(1 - \exp(-a\tau^b)), \quad (5)$$

式中 $\chi(\tau)$ 为在龄期 τ 时积累的水化热; Q_0 为水泥水化热总量; 系数 a 、 b 为常数; τ 为龄期。

对于混凝土绝热温升的表达式可由水泥水化热的表达式导出, 用下式表示^[1]:

$$\alpha(\tau) = (\chi(\tau)W + kF)/c\rho, \quad (6)$$

式中 $\alpha(\tau)$ 为混凝土绝热升温; $\chi(\tau)$ 为水泥水化热; W 为水泥用量; k 为折减系数, 对于粉煤灰 $k=0.25$; F 为混合材用量; ρ 为混凝土比热; ρ 为混凝土密度。

4 计算结果与分析

4.1 水化热温度随时间的发展

通过 ANSYS 瞬态热分析及实测结果, 可以得到图 2 和图 3 所示的桥墩中心温度与表面温度随时间变化的曲线。所取实测点是预埋在浇注的第二层混凝土中的测点。

从图 2 和图 3 可以看出, 计算曲线和实测曲线变

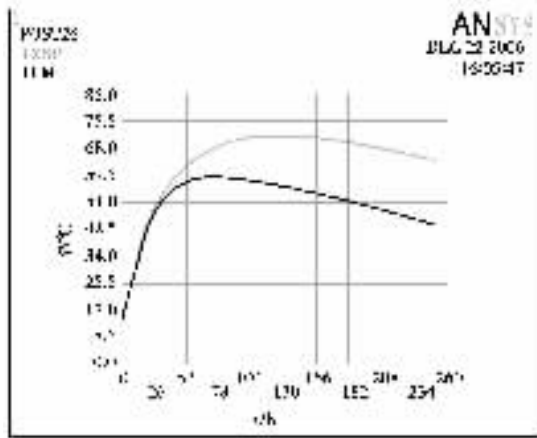


图 2 ANSYS 计算温度随时间发展曲线

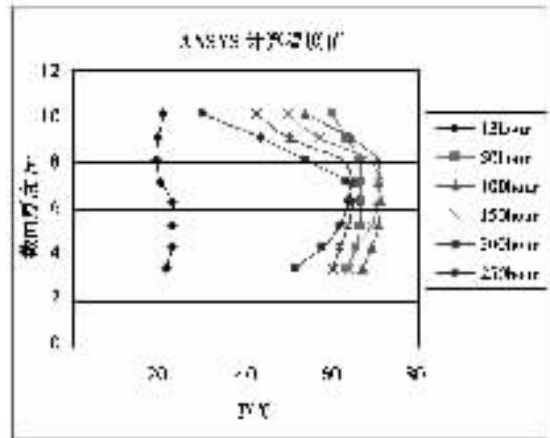


图 4 ANSYS 计算各点在同一时刻的温度

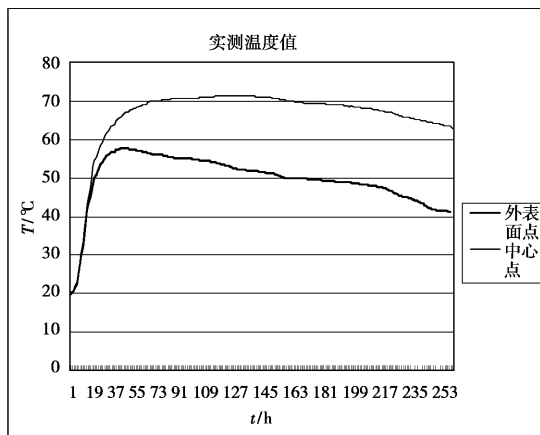


图 3 实测温度随时间发展曲线

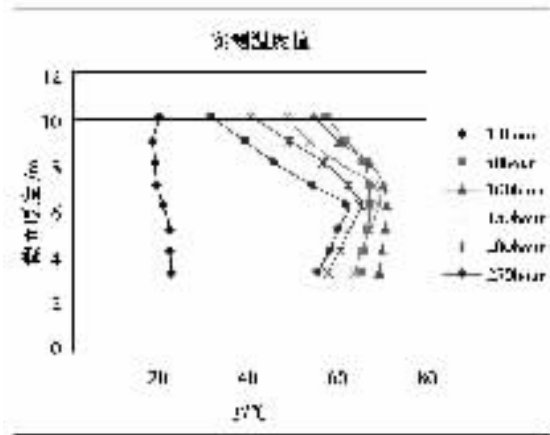


图 5 实测各点在同一时刻的温度

化趋势相吻合,二者峰值出现的时间也是基本一致的。在温度值为 20 °C 左右处有一个转折,这是因为该时刻开始浇筑第二层混凝土,而测点布置在浇筑的第二层混凝土中,温度发生微小突变。实测中心点的最高温度为 71.325 °C,发生在浇筑第二层混凝土后的第 82 h。而理论计算中心点的最高温度值为 71.696 °C,发生在浇筑第二层混凝土后的第 83 h;实测表面点的最高温度为 56.550 °C,发生在浇筑第二层混凝土后的第 48 h,而理论计算表面点的最高温度值为 55.895 °C,发生在浇筑第二层混凝土后的第 50 h;中心点和表面点的温度曲线的发展规律大致相同,但混凝土表面的水化热温度最高值明显低于混凝土内部最高温度。实测与理论计算结果基本一致。

从图 2 和图 3 中也可以看出,温度上升段陡,而下降段平缓。入模时的温度平均为 19.675 °C,最高升温约为 51.63 °C,升温过程中温变速率在 0.82 °C/h 以内,降温过程中温变速率在 0.12 °C/h 以内。

4.2 温度沿截面厚度的变化

为了便于比较混凝土表面与内部的温差,作出水化热温度沿截面厚度方向的变化曲线见图 4 和图 5。

由上图可以看出计算温度与实测温度在同一时刻

沿截面厚度方向的变化趋势一致,而且相差小。最大的内外温差达到 22.58 °C。混凝土表面与中心点最大温差出现在浇筑第二层混凝土后的 238 h,其差值为 22.58 °C,而且当地环境温度为 12 °C 左右。在表面点进入下降阶段后,中心点仍然处于缓慢升温阶段,这就进一步加大了中心和表面的温度差值,造成较大的温度应力,从而加大了表面开裂的可能性。因此合理控制拆模的时间对于控制内外温差有较大的影响。

5 结论

采用 ANSYS 有限元软件,根据工程和现场环境的特点,准确地模拟了桥墩的施工过程,计算中考虑了外界气温条件、施工工艺等各种因素,并与实测结果进行对比分析,得到以下结论:

1)通过现场监测和计算机模拟计算结果的对比,可以看出采用 ANSYS 模拟桥墩混凝土施工期间水化热所得到的温度场和实测温度变化规律比较吻合。因此在进行大体积混凝土施工方案设计时,可以采用有限元对其先进行模拟分析,然后以此得到的结果为依据,采取合适的降温措施,防止墩体内外温差过大导致混凝土开裂。

2)合理控制拆模时间,对于控制内外温差有一定的作用。晚拆模对于防止温度裂缝有较好的效果。

3)合理的选择分层,分段浇筑以减缓温升。

参考文献:

- [1] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.
- [2] 彭立海, 阎士勤, 张春生, 等. 大体积混凝土温控与防裂[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2005.
- [3] 王铁梦. 工程结构裂缝控制[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- [4] 蒋家茂, 周水兴. 试验梁砼水化热温度测试及其控制[J]. 重庆交通学院学报, 2006, 25(2): 46-48.
- [5] ELBADRY M M, GHAIL A. Temperature variations in concrete bridges[J]. Journal of the Structural Engineering, 1983, 109(10): 2355-2374.
- [6] 季日臣, 夏修身, 陈尧隆. 承台大体积混凝土温度场计算与温控防裂措施[J]. 混凝土, 2006(9): 92-93, 95.
- [7] CHURCHWARD A, SOKAL Y J. Prediction of temperatures in concrete bridges[J]. Journal of the Structural Division, 1981, 107(1): 2163-2176.
- [8] 向敏, 杨从娟. 高强混凝土水化热规律研究[J]. 混凝土, 2003(3): 27-29.
- [9] 孔祥谦. 有限单元法在传热学中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1998.

Temperature Field Finite Element Analysis of Pier Concrete

ZHANG Liang-liang, ZHAO Liang, YUAN Zheng-qiang, CHEN Tian-di

(College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: The temperature difference aroused by the heat of hydration in the process of hydration and hardening of the cement is connected with various factors such as the external atmosphere temperature condition, construction technology, mixture ratio of concrete, admixture and so on. According to three-dimension thermal conductivity theory, the large-scale finite element analysis software ANSYS was employed to emulate the temperature field using transient thermal analysis method, and the thermodynamic parameter such as the external atmosphere temperature condition, the heat of hydration of the cement, and the influence of laminar pouring (through definition of the "life and death" of the element to simulate the laminar pouring in the construction accurately) on temperature field are taken into account. Through the comparison of the calculated results with the measured results, the temperature distribution of the bridge pier along the thickness direction of the cross-section and its regularity and features changing with time are obtained, which supplies reference for the construction.

Key words: pier; hydration heat; temperature field; finite element method

(编辑 吕建斌)