

混凝土建筑结构温度荷载研究^{*}

刘荣¹, 徐晓城²

(1. 南京师范大学动力工程学院, 南京, 210042)

(2. 东南大学建筑系, 南京, 210096)

[摘要] 高层建筑长期暴露在室外大气中, 承受冷暖气流、太阳热辐射以及地面反射热和周围建筑群辐射热等, 室内则有空调, 内外热源作用形成建筑物的温度荷载。和其它荷载如震动、风力一样, 温度荷载会使建筑结构产生内力, 是导致建筑裂缝的主要因素。参考气象学和传热原理, 并结合实验分析, 提出混凝土建筑结构温度荷载的计算方法及设计建议。

[关键词] 温度荷载; 混凝土结构; 建筑

[中图分类号] TU973+.256; [文献标识码] A; [文章编号] 1008-1925(2001)02-0058-06

0 引言

近年来, 我国建筑业发展迅速, 尤其高层建筑在设计理论和施工工艺上都发生了根本变化。不过在建筑物温度效应方面的研究还刚开始, 在实际工程中, 不时出现的温度和收缩裂缝, 已是建筑工程界关注的重要课题。

一般认为建筑物产生的宏观裂缝, 大部分是温度变化和材料收缩所致, 但裂缝的产生和发展, 它与温度效应间的力学关系, 以及温度裂缝对整体结构安全度的影响, 在我国现行建筑规范中, 都还没有一个完整的定量描述。首先是如何定量确定建筑结构的温度作用, 现称“温度荷载”。国外有一些专门研究建筑温度荷载的文献, 例如: FazLar R Khan 与 Mark Fintel 对美国北部芝加哥市的外落式结构, 曾采用 40 年一遇的最低气温研究结构温度作用; Viadlimir 对中东炎热地区建筑物温差引起开裂的研究; Mark Fintel 提出在一个完整的季节内, 存在着一个相对最高和最低的有效温度, 且可以同时维持一个相当长的时间, 导致结构物处于一个稳定温度场下受力; Khan 等却建议利用 40 余年多次循环的日平均气温, 作为有相当尺寸的外露柱的温度。上述的各假定与事实很难相符, 也缺乏合理的实验论证。我国在水工结构和水电站建设方面, 有不少大块体混凝土温度裂缝方面的卓越成果; 在低温区冻土基础及桩基、核电站的高温防护墙等局部结构也都有专项研究; 但在建筑结构整体温度荷载方面尚未见有文献。

本文主要介绍混凝土建筑材料的传热性质、钢筋混凝土结构温度荷载计算和设计方法, 是“高层建筑结构温度应力研究与规范编制”课题中的一个专题。研究内容是理论和实验结合, 并将上海市地方规范中初步试用。不过, 文内所述并不限于高层, 对于多层或单层同样适用。

* 收稿日期: 2000-11-15

基金项目: 上海市建委《规范》课题(97-0413-16)

作者简介: 刘荣, 1965-, 女, 南京师范大学动力工程学院讲师, 主要从事工程材料学的教学和研究。

1 原理

1.1 建筑结构的温度荷载

建筑使用期的温度状态与该建筑建成封闭时的温度状态相比已有变化,如气候变更和太阳辐射等,产生温度作用.如果温度作用使结构内部材料的温度变化处处相同(包括基础结构),则结构伸缩自由,不会产生热应力,温度荷载为零;假使结构各处的温度变化不同,各处胀缩不均匀而受到约束,因而产生热应力和热变形.这种温度状态的变化就是温度荷载,通常习惯以“温差”一词来衡量热荷载,这并不确切,应该定义为:建筑结构某一时刻的温度荷载是该时刻结构的温度场与结构的原始温度场之差,场的梯度则表示温度荷载集度.以下将按此定义讨论温度荷载.

1.2 钢筋混凝土结构的热传导方程

对于钢筋混凝土结构,可认为是一种正交各向异性非均匀材料.在直角坐标系中,时刻 t 结构内材料的任一点温度为 $T(x, y, z, t)$,当无内热源,又不考虑“力-热”耦合时的热传导方程可近似表示为:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_{11} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda_{22} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \lambda_{33} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - T_0 \left[\beta_{11} \frac{\partial \epsilon_{xx}}{\partial t} + \beta_{22} \frac{\partial \epsilon_{yy}}{\partial t} + \beta_{33} \frac{\partial \epsilon_{zz}}{\partial t} \right] \quad (1)$$

式中: c 为比热; ρ 为密度; λ_i 为导热系数; β 为与弹性有关的常数; 1、2、3 分别代表主轴方向.

对于由大量梁、柱、板连接而成的空间结构,每一个构件的钢筋配制密度都不一样,要确定材料 λ_i 比较困难.在不失工程精度要求下,可将结构近似为各向同性均匀材料.则式(1)简化为:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] \quad (2)$$

结构的温度场虽属非稳态场,但随时间变化很慢,可视为准稳定场,即将整个时间过程划分成多个时间间隔,每个时间间隔内的温度场是稳定场,但每个场的边值条件不同.一般,视气温和阳光辐射的变化情况,时间间隔取 0.5 ~ 12h 不等.如已知全过程的边值条件,则任一时间间隔内的温度场可用如下与时间无关的拉氏方程连续求解^[1]:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0 \quad (3)$$

由于建筑结构的边值条件甚为复杂,目前尚无法用解析法求解,可应用的是在给定边值条件下,用离散法进行数值计算.

1.3 初始条件

初始条件也就是整体结构的初始温度场,因为结构中的任一单个梁、柱、板都是比较细或薄的构件,施工期间,又全都长期敞露,只要施工符合规程,不计及水泥初凝水化热,则可认为在建造期整体建筑物的温度基本均匀,并等于当时的环境温度,温度荷载为零.封闭时的环境温度即为初始条件,可称其为基准温度场.

1.4 边界条件

方程(3)定解的边界条件是指结构全部构件自由表面的温度值.建筑物封闭使用后,室内外环境温度有了不同变化,促成整体结构边界条件的变化.尤其是室外的温度变化较大,是导致温度荷载的主要因素,至于建筑物内部有大型制冷、发热设备时,也应考虑其对局部结构温度的影响.引起室外环境温度变化的因素很多,其中具有决定作用的是大气温度和太阳辐射强

度,气象学称之为空气综合温度^[2].它与地区、季节、时间等有关,其原理及推导可参阅ASHRAE(美国采暖制冷和空气调节工程师学会)推荐的算法^[3,4],有关数据也可在气象部门查询到.作为边界条件的表面温度不等于环境温度而有滞后,按准稳定场假设由下式计算:

$$\text{室外表面温度: } T_{\text{ext}} = T_{\text{ext}} + q/\alpha_{\text{ext}} \quad (4)$$

$$\text{室内表面温度: } T_{\text{int}} = T_{\text{int}} - q/\alpha_{\text{int}}$$

$$\text{式中构件的导热量: } q = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{ext}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{int}}} + \frac{1}{\lambda}} (T_{\text{int}} - T_{\text{ext}}) \quad (5)$$

T_{ext} 、 T_{int} 分别是室内外的空气综合温度,构件内外表面放热系数 α_{ext} 、 α_{int} 按参考文献[5]取值.

由此可见,要确定任一时刻结构的边界温度,必须从建筑物封闭使用后连续记录环境温度变化,再进行计算,工作量较大.当然也可从春、秋季节某个时期,室内外环境温度长时间保持了稳定的相同,即认为该建筑物的整体结构已达到均匀温度场,并以该环境温度为初始温度场开始记录.

2 混凝土材料温度场实测研究

由上所述,在气象记载的基础上,进行连续运算可获得任一时刻建筑结构的温度荷载.但有时这种方法并不能实行,例如在进行建筑设计时,尚无法预知建筑物使用后环境温度的变化情况,也就无法预先计算结构真实承受的温度作用.与其它作用(如风力、地震)一样,温度作用也可采取某个极端值来作设计,取值原则是确保其在可能使用期内的安全性.现建议在以往 50 年中,取该建筑物所在地区的最高或最低极端温度(可在气象部门查询)作为大气温度,来计算结构室外表面的极端温度.室内空气温则取固定值 20 .至于两表面间混凝土材料的温度场是用实测温度来研究其分布规律.

2.1 温度分布测试台

为测量环境温度变化对建筑结构内部温度分布曲线的影响,建立了混凝土结构模拟试验台进行长期监测.试验台建于室外离地面约 15m 高,前左右三方皆是空旷.如图 1 的示意图,

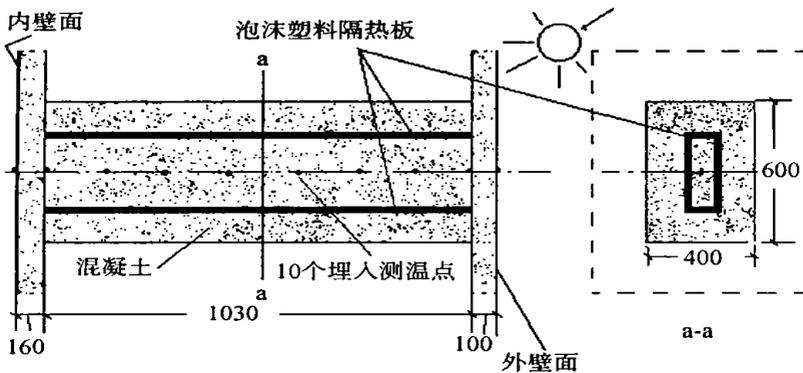


图 1 混凝土结构温度荷载测试台

中部是一矩形混凝土块体,块体右端是试验台的混凝土外墙,左端是混凝土内墙,内墙左边就是室内,备有冷暖空调以控制内壁面温度.外墙面积远大于块体的截面积,起均匀吸、散热量作用.在块体两端表面及内部,沿中心轴预埋 10 个测温传感器,为使内外壁面温度改变时的热量不向周围扩散而只沿着轴线传递,在块体内预埋了方形泡沫塑料隔热腔板,以确保单

向传热.

2.2 温度测量设备

温度测量是将 $\Phi 0.2\text{mm}$ 的铜-康铜组成热电偶埋入混凝土,各测点热电偶的另一端用导线连接到室内转换开关,再集中到电位差计进行测量.另外在室内、外配置温、湿度计,以同时测取气温及湿度(见图2).

2.3 数据选录^[6]

测试台的工作已历时2年,现将夏、冬两段记录如表1、表2所示(表中已删去原记录中有关天气、风速、湿度等项)

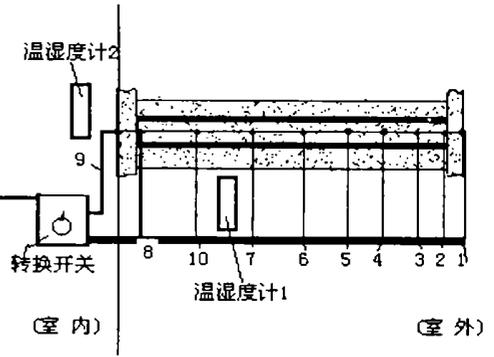


图2 多点温度湿度测量设备示意图

表1 夏季温度测量数据

()

日期	时刻	室外温度	室内温度	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1999.09.08	6:30	30	30	30.0	30.0	30.8	30.8	30.8	30.8	30.6	30.5	30.5	0
	9:50	34	28	40.3	32.5	30.7	30.7	30.9	31.4	31.1	30.5	30.8	0.4
	11:55	36	29	42.5	35.7	30.3	30.8	30.8	30.9	30.9	30.9	31.7	-0.3
	17:45	34	29	36.5	37.5	34.5	33.7	33.7	33.7	33.6	32.5	32.4	-0.1
	19:45	32	31	33.5	35.4	33.7	33.4	33.4	33.5	33.3	31.4	33.2	-0.3

表2 冬季温度测量数据

()

日期	时刻	室外温度	室内温度	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2000.01.25	9:00	-3	2	-0.4	-3.5	0	-2.5	0	-1.2	-	-0.4	0.4	-0.6
	13:30	1	5	3.0	-3.4	-1.1	-0.9	-1.1	-0.9	-	-0.4	3.0	1.3
	16:45	2	5	5.5	6.2	3.0	2.5	2.5	3.6	-	3.4	6.7	0.1
	20:00	-4	6	-2.7	-0.8	-1.3	-1.9	-1.9	-1.3	-	-1.1	3.4	0
	22:30	-4	7	-3.4	-1.9	-1.5	-1.8	-1.8	-1.7	-	-1.4	5.2	0

表1与表2中测点1~10的温度曲线如图3、图4.

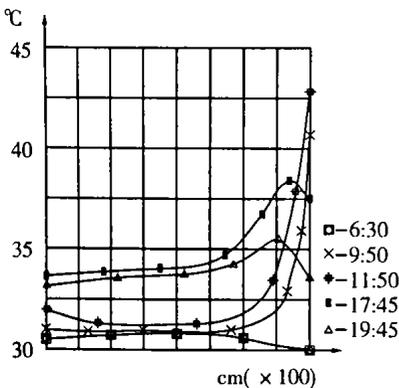


图3 夏季温度曲线图

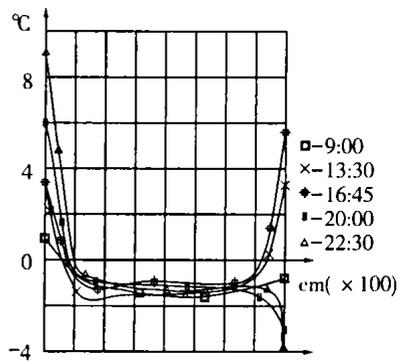


图4 冬季温度曲线图

2.4 实验温度曲线分析

从大量测量记录可见,短时间(1~2h)表面温度有变化时,只有靠近表面的那些测点受影响,处于轴线中部的测点,温度则比较接近。当环境温度骤降时,例如夏季傍晚日落后,或炎热天气突降阵雨时,还有初冬突来寒潮,都会使表面的浅层内产生较大的降温梯度,使结构外表面产生热拉应力,导致构件开裂。

为配合热应力有限元素法计算程序^[7],并结合工程设计人员取用方便,将所有沿外露杆件横截面都等距离划分 3 或 5 个节点,参照不同类型(如图 5 所示)在节点上设置温度值,以形成总体建筑结构的温度荷载。

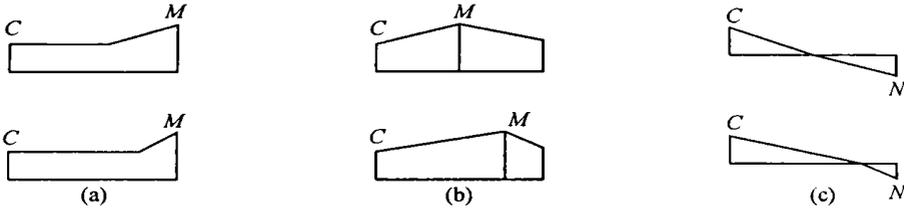


图 5 节点温度值示意图

图 5 中, (a) 表示夏季晴天午后最热天气阳光照射处结构的温度分布状态, 上图为有限元采用三个节点, 下图为采用五个节点. (b) 表示夏天最热天气结构外表面突然降温, 如傍晚及阵雨. (c) 表示寒潮突袭. 图中室内温度一律取 $C = 20$, M 、 N 分别是最高和最低极端温度, 由式(5)计算. 这种准稳定温度场是一种极端温度荷载设置, 快捷方便, 适宜设计规范使用。

2.5 实测值与计算曲线的比较

图 6 中曲线 1 是 1999 年夏季 9 月 8 日 11:55 实测值, 曲线 2 是以同日 9:50 的温度分布为初始条件, 按(3)~(5)式进行计算, 有关参数选取于参考文献[4]~[6], 由图可见二者基本吻合。

3 总结

本文按气象学、传热学原理及建筑材料传热性质, 提出一种建筑钢筋混凝土结构温度荷载的计算方法, 可提供不同地区、各种建筑在任意时间的温度荷载的工程计算。

在建筑物上建立了混凝土构件内材料温度分布测试台, 进行了长期不间断监测, 根据大量实测数据, 归纳了气象变化与温度分布变化的基本规律, 拟定了极端温度下几种温度荷载的设计曲线, 供《建筑结构温度作用设计规范》设计试用。

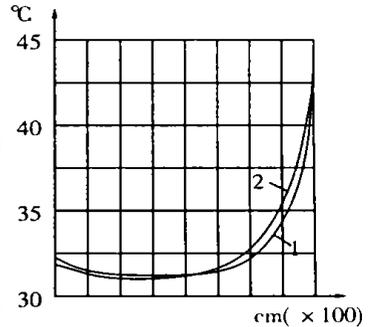


图 6 温度实测值与计算值比较图

[参考文献]

- [1] 杨世铭. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1987
- [2] 曹叔维. 房间热过程和空调负荷[M]. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1991
- [3] GBJ19-87 采暖通风和空气调节设计规范[S]. 1989
- [4] W M 罗森诺. 传热学应用手册[M]. 谢力译. 北京: 科学出版社, 1992
- [5] GB50176-93 民用建筑热工设计规范[S]. 1989
- [6] 刘荣, 徐晓城. 混凝土结构的温度荷载实测研究[J]. 工程力学(增刊), 2000
- [7] 徐晓城, 刘荣. 高层建筑温度效应的设计原理和方法[J]. 工程力学(增刊), 2000

Research of Concrete Structure Thermal Load for Buildings

Lu Rong¹, Xu Xiaocheng²

(1. College of Power, Nanjing Normal University, Nanjing, 210042, PRC)

(2. Department of architecture, Southeast University, Nanjing, 210096, PRC)

Abstract: Buildings are chronically exposed to the atmosphere, bearing solar irradiation and heat convection as well as the reflection from the ground and heat from the buildings around. Inside the building, there are artificial heating, refrigeration and air conditioning. These external and internal factors contribute to the buildings' thermal load, which will make structure produce a certain extend internal force like other loads, such as tremor and wind load. This article brings forward calculational method and design procedures of thermal load with reference to the theory and methods of meteorology and heat transfer and in combination with the experimental analysis.

Key words: thermal load, concrete structure, architecture

[责任编辑: 刘健]