

Chengshi Tumugongcheng Jishu  
De  
Yanjiu  
Yu Yingyong

# 城市土木工程技术的研究与应用

胡曙光 主编

武汉理工大学出版社



# 城市土木工程技术的研究与应用

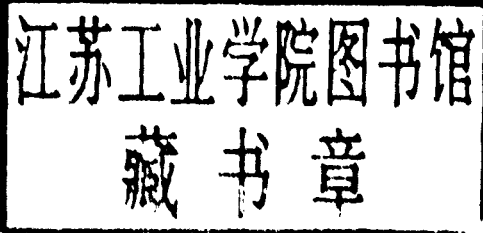
顾 问 唐昌海 何克农 刘广润 刘祖德 包承纲

主 编 胡曙光

副主编 冯晓腊 谢先启 王爱勋 张 琨

编 委 (以姓氏笔画为序)

王 宇 王才权 邓能兵 石汉梅 李 霆 李汉章 汪 浩  
张杰青 杨 凡 金志宏 商正海 黄 刚 彭 波 温四清



武汉理工大学出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

城市土木工程技术的研究与应用/胡曙光主编. —武汉:武汉理工大学出版社,2003.2  
ISBN 7-5629-1910-0

I. 城… II. 胡… III. 城市-土木工程-工程技术-武汉市-文集 IV. TU984

中国版本图书馆(CIP)数据核字(2002)第 107075 号

## 内容提要

近些年来中国经济的迅速发展大大加快了城市建设的步伐,现代化城市土木工程建设新理念、新技术、新方法与新材料的应用,提高了城市建设的水平。

本书展示了近些年来武汉市城市土木工程研究和技术方面所取得的成就。包括建筑结构设计施工,建筑材料的研究与应用,基坑工程技术研究与应用,市政工程等方面的最新研究成果与实际工程经验。本书可供从事土木工程工作的科研、勘察、设计、施工和教学人员学习参考。

武汉理工大学出版社出版发行

(武昌珞狮路 122 号 邮编:430070)

武汉理工大印刷厂印刷

开本:880×1230 1/16 印张:24.75 字数:800 千字

2003 年 2 月第 1 版 2003 年 2 月第 1 次印刷

印数:1~1000 册 定价:52.00 元

(本书如有印装质量问题,请向承印厂调换)

## 序

2003年,我国经济建设进入“十五”计划的攻坚阶段,国家重点建设项目及城市建设将进入一个新的发展时期。而土木工程作为与经济建设密切相关的科学技术领域,其研究与应用水平需要随之进步与提高,以更好地为经济建设服务。

武汉市作为九省通衢的特大城市,近几年来,城市建设高速发展,城市面貌日新月异。只看摩天大楼鳞次栉比、长江汉水七桥飞跨、轻轨一期主体基本形成、长江四桥、过江隧道立项完成,就足以证实武汉市土木工程技术的研究与应用已取得了长足的发展。而武汉中青年土木工程师作为武汉市城市建设的中坚力量,为此作出了突出的贡献。

身处武汉,目睹武汉中青年土木工程师不断成长与进步、并组织编写出版本书,颇感欣慰。遍览全书,作者大都是武汉市长期从事设计、施工、科研、教学、管理等方面工作的中青年土木工程师或教授学者,对城市土木工程技术的研究与应用有着丰富的经验;每篇论文均取材可靠、资料齐全、内容翔实,其中不乏城市土木工程建设的新技术、新方法与新思路。例如疏桩理论、超长无缝结构、大跨度钢桁架、预应力基础、基坑数值模拟、大体积混凝土温度场数值模拟、环保混凝土等,对这些土木工程技术研究与应用中的难点和热点,论文作者们结合工程实践及理论研究,提出了自己的独到见地,具有相当的参考和借鉴价值。

中国工程院院士

刘广钧

2003年2月15日

## 前 言

随着我国国民经济迅速发展,城市建设进程加快,一些新技术、新结构、新材料与新工艺不断涌现。为了推动城市土木工程技术的交流和发展,在武汉市建设管理委员会的支持下,武汉市部分从事土木工程技术与应用的中青年科技工作者编写了这本《城市土木工程技术的研究与应用》。本书的作者大都工作在城市建筑设计、施工、科研、教学、管理的第一线,书中取材可靠、内容翔实,由四个部分组成:1)建筑结构设计 with 施工;2)建筑材料的研究与应用;3)基坑工程技术与应用;4)市政工程。全书共有 72 篇文章,这些文章展示了近几年来武汉市城市土木工程技术方面所取得的成就。可供从事城市土木工程工作的同行参考、借鉴,它同时也是一本反映武汉城市建设的历史性技术资料。

本书介绍了建筑结构设计 with 施工技术方面的发展与理论方面的分析、探讨,内容涉及到索膜结构、预应力结构、轻钢结构等多种结构型式。如武汉市跨世纪标志性工程——国际会展中心,其主楼大跨度钢桁架的设计和施工难度很大,设计师和施工技术人员在设计施工过程中进行了许多新的尝试,这些工作为类似钢结构工程设计与施工起到了借鉴作用。

随着工程建设规模的迅猛发展,结构型式日趋大型化、复杂化。对混凝土的高性能、耐久性以及环保性的研究;大体积混凝土温度控制;混凝土的施工性能等都是当今的重要课题。本书介绍了混凝土和其他建筑材料方面的理论研究新进展和工程应用方面的新成果,这对提高混凝土工程质量和水平具有重要意义。

随着高层建筑的兴建和地下空间的开发利用,基坑工程在城市建设中越来越重要。由于城市中建筑物和道路密集、地下管网复杂、地面设施繁多以及地下水位较高,因此不仅要进行基坑的支护及地下水的防治,而且还要严格控制基坑的变形。本书不仅选编了基坑支护及地下水防治、基坑监测及基坑工程事故分析处理的工程实例,而且选编了有关基坑工程数值模拟分析的试验、研究方面的内容。

随着城市建设的现代化和国际化,市政工程的复杂性和重要性日益凸现。本书选编了部分市政道路、桥梁的设计与施工技术方面的论文,并在市政建设与环境、城市规划的关系方面进行了研究探讨。

本书在编辑出版过程中,得到了武汉市建筑科技专家委员会的指导和大力支持,还得到了武汉市有关勘察、设计、施工、科研、高校等单位 and 政府有关管理部门的热情支持,在此谨表感谢!

由于受篇幅所限,文章中的一些细节难以更多的展开。同时,本书内容涉及专业面广,受编者学识、经验、水平所限,书中难免有不当之处,敬请读者批评指正。

编 者

2003 年 1 月

# 目 录

## 建筑结构设计及施工

|                                 |       |
|---------------------------------|-------|
| 武汉体育中心体育场结构设计 .....             | ( 1 ) |
| 大体积混凝土温度场数值模拟分析方法 .....         | ( 5 ) |
| 武汉国际会展中心主楼上部大跨度钢桁架设计及安装 .....   | (10)  |
| 大跨度重型钢桁架高空吊装施工技术 .....          | (20)  |
| 武汉国际会展中心预应力施工技术 .....           | (28)  |
| 超长结构无缝设计在武汉科技会展中心设计中的应用 .....   | (34)  |
| 湖北出版文化城主楼预应力箱基设计与分析 .....       | (38)  |
| 湖北出版文化城裙楼预应力筏基设计与分析 .....       | (43)  |
| 湖北出版文化城预应力混凝土结构施工技术 .....       | (48)  |
| 湖北出版文化城大跨度全焊接钢桁架整体安装技术 .....    | (58)  |
| 疏桩基础设计方法与工程实践 .....             | (64)  |
| 建筑结构分析程序的新发展 .....              | (68)  |
| 碳纤维在砖砌体结构抗震加固中的试验和应用 .....      | (76)  |
| 停建复工工程结构质量检测及加固处理技术 .....       | (84)  |
| 武汉·中国光谷光电子(核心)市场轻钢屋盖设计与分析 ..... | (89)  |
| 海南千年塔结构设计与分析 .....              | (95)  |
| 9 度抗震设防地区应用隔震技术结构设计 .....       | (102) |
| 计算机仿真技术在广州体育馆预应力施工中的应用 .....    | (109) |
| 建造超高太阳能烟囱的可行性研究 .....           | (117) |
| 预应力混凝土管桩在工程实践中的应用 .....         | (122) |
| 锚杆静压桩在高层建筑病害工程桩加固中的应用 .....     | (126) |

## 建筑材料的研究与应用

|                            |       |
|----------------------------|-------|
| 混凝土安全性专家系统的结构与设计 .....     | (130) |
| 中低强度等级混凝土高性能化与低成本化研究 ..... | (136) |
| 高耐久性普通混凝土的制备技术 .....       | (140) |
| 高性能混凝土构筑 21 世纪的桥梁 .....    | (146) |
| 超细高性能灌浆水泥的性能及其微观结构研究 ..... | (154) |
| 特细砂自密实混凝土试配研究 .....        | (160) |
| 含再生混凝土集料的混凝土的性能 .....      | (164) |
| 掺合料对轻集料混凝土抗渗性能影响的研究 .....  | (169) |
| 高吸水率轻骨料混凝土的泵送性能研究 .....    | (173) |
| 高强轻集料混凝土干燥收缩的试验研究 .....    | (177) |
| 绿色高性能商品混凝土的研究 .....        | (181) |
| 绿色高性能混凝土的耐久性能研究 .....      | (185) |
| 磷渣制备高性能混凝土的研究及应用 .....     | (192) |



|                                                                           |       |
|---------------------------------------------------------------------------|-------|
| 矿物掺合料对水泥浆体流变性能的影响·····                                                    | (197) |
| 混凝土冻融循环破坏过程的力学模型·····                                                     | (201) |
| 调凝型外加剂对水泥凝结硬化性能的影响·····                                                   | (207) |
| 高性能阻裂抗渗外加剂的研制及其机理研究·····                                                  | (212) |
| 硅丙乳液建筑防水涂料的制备、性能与应用·····                                                  | (217) |
| HAS 固化剂固化粉煤灰石屑作公路路面材料的研究及应用·····                                          | (222) |
| NaNO <sub>2</sub> 型防冻剂组分对水泥砂浆抗 SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 盐侵蚀性的影响····· | (226) |
| 建筑节能材料——PCM 复合材料·····                                                     | (232) |
| 钢管高强膨胀混凝土收缩机理及膨胀模型的研究·····                                                | (237) |

### 基坑工程技术研究与应用

|                                    |       |
|------------------------------------|-------|
| 土钉支护数值模拟·····                      | (240) |
| 基坑三维数据模型的研究·····                   | (247) |
| 软土深基坑工程的数值模拟分析与变形机理研究·····         | (252) |
| 复合地基承载机理的数值试验研究·····               | (257) |
| 武汉某深基坑工程事故原因分析及处理·····             | (261) |
| 武昌某深基坑工程滑塌事故分析与加固处理·····           | (266) |
| 武汉地区基坑支护中不同类型锚杆的对比·····            | (271) |
| 基于局部变形的土层锚杆内力计算与分析·····            | (275) |
| 土层钢管锚杆加固试验研究及设计计算方法·····           | (280) |
| 双液注浆加固技术在沉井止水帷幕施工中的应用·····         | (284) |
| 中保人寿保险有限公司湖北省分公司培训综合楼岩土工程勘察实录····· | (290) |
| 基坑喷锚支护工程实例分析·····                  | (297) |
| 停建复工工程深基坑监测及边坡加固处理技术措施·····        | (302) |
| 汉口荷花池小区 92 号住宅楼纠倾加固的成功实践·····      | (311) |
| 武汉第二长途电信枢纽工程深基坑开挖监测实录·····         | (314) |

### 市政工程

|                                     |       |
|-------------------------------------|-------|
| 城市拆除爆破技术现状及发展趋势和发展战略·····           | (320) |
| 混凝土徐变与收缩对轻轨交通现浇预应力混凝土箱梁影响之对策研究····· | (325) |
| 武汉天兴洲公铁两用长江大桥设计方案比选·····            | (330) |
| 武汉机场路过渡段路面裂缝成因分析与防治·····            | (337) |
| 旧混凝土路面加铺沥青混凝土面层的反射裂缝处置技术·····       | (341) |
| 城市高架轨道交通设计与环境的探讨·····               | (347) |
| 市政道路沥青面层建设中应注意的几个问题·····            | (352) |
| 土体固结剂(HEC)在道路工程建设中的应用·····          | (356) |
| 武汉市中央空调节能对策的探讨·····                 | (360) |
| 中国大城市郊区化的合理发展与规划对策研究·····           | (365) |
| 外墙外保温技术应用研究·····                    | (372) |
| 逐层渐变柔性抗裂控制外保温墙面裂缝·····              | (375) |
| 浅析施工现场不安全因素及对策·····                 | (378) |
| 工程保险在我国建筑业中的应用研究·····               | (381) |

# 武汉体育中心体育场结构设计

郭必武 李 治

(武汉市建筑设计院)

**摘 要** 武汉体育中心 6 万人体育场结构设计采用钢筋混凝土框架-筒-索膜整体结构体系。结构受力分析采用空间非线性计算程序。通过风洞试验确定风载取值。通过局部模型试验检查关键部位的受力特点和设计计算结果。根据索膜篷盖特点的特殊结点设计保证了安装、使用的安全可靠。框-筒-索膜结构在大型体育场的设计中是一种先进的效果良好的结构型式。

**关键词** 框-筒-索膜结构 风洞试验 节点设计

## 1 概述

武汉市体育中心是武汉市规模最大的体育建筑群,包括 6 万人体育场、游泳馆、水上娱乐中心等一组现代化的体育建筑。体育中心位于武汉沌口经济开发区腹地,318 国道从其西侧经过,与占地 1600 亩的新江汉大学遥遥相对,形成武汉市又一现代特色的大型文化中心。开发区是武汉市改革开放的硕果之一,轿车产业发达,近 20 年的新型建筑规划合理、布局有致、交通四通八达,这座现代化的体育中心坐落在该区是十分相宜的。

体育场是体育中心的主体工程,建筑面积 8 万  $\text{m}^2$ ,投资约 3.7 亿元,设有总高 45m 的二层看台,可容纳 6 万观众,一流的场地设施,可以承担国内国际的一流大型比赛。

体育场由四个花瓣形看台组成椭圆形平台,长轴 277m,短轴 245m,周长约 800m,竞技场设于其中,从任意位置均可清楚的观看场内项目比赛。看台采用框架结构体系,设置四个角筒,框-筒为篷盖支座,篷盖采用目前国际上流行的索膜张拉结构,施加预应力后与框-筒共同受力,形成框-筒-索膜结构体系(图 1)。

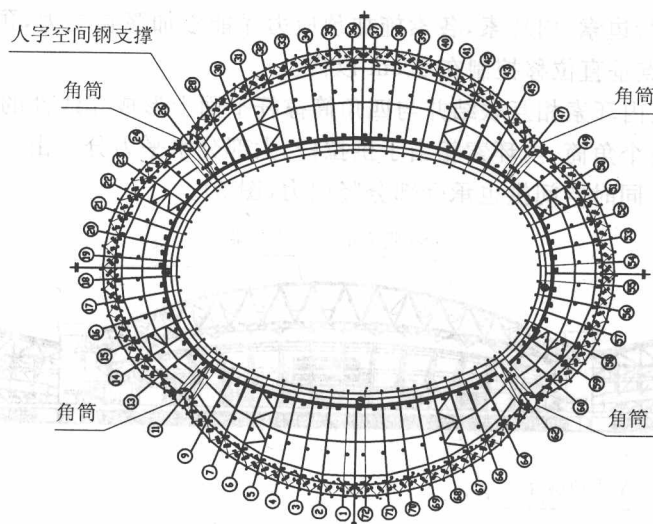


图 1 体育场平面图



## 2 结构体系

### 2.1 框架结构体系部分

篷盖以下部分为体育场看台及办公辅助用房,采用框架结构体系。径向框架为主要受力方向。承受看台及楼盖荷重,并承受篷盖荷载。框架共 56 榀,东西区悬挑过大,为减小端点位移,采用 Y 形框架立柱(图 2)。

径向框架悬臂端为篷盖 Y 形大悬挑桁架钢伸臂支座。设计为钢筋混凝土 L 形刚臂。顶点根据篷盖反力和计算简图设计为铰支座, L 形角部为篷盖下拉杆支座,形成篷盖伸臂的平衡系统。

横向框架由径向框架柱、连梁、楼盖梁组成。看台座采用现浇预应力「形梁,整体性较好。

花瓣形平面四角交汇处设计高约 40m、直径 10m 的钢筋混凝土筒体,承受拱形外环梁巨大的水平推力,保证篷盖索膜系统形成空间稳定结构。

### 2.2 篷盖索膜体系

篷盖由伞状膜结构单元组成。东西侧看台每侧 18 个膜单元,南北侧看台每侧 14 个膜单元,总共 64 个膜单元。每个膜单元承担结构自重、屋面荷重、检修荷重和音响、灯光、马道等悬挂荷重。风载是篷盖结构的主要荷载,通过风洞试验取值。抗震设防烈度为 7 度。

伞状膜单元由钢臂、索、膜组成。钢臂为 Y 形平面。钢管空间桁架。臂伸最大长度 52m,后部通过钢管下拉杆平衡。钢管下拉杆组成空间三角形,锚固节点为钢筋混凝土刚臂。钢臂与刚臂采用铰接支座。内环索施加预应力后起弹性支点作用。铰接支座处设立柱,立柱与上拉索形成篷盖膜需要张拉成形的高度和预张力,满足篷盖的铺设要求。

索膜部分包括谷索、脊索、边索、内环索,各索施加预应力才能参加篷盖受力,预应力值根据膜找形和使用条件计算确定,内环、索各点垂直位移控制在 20cm 以内。

各膜单元通过上下环梁、内环索相互联结并与四角筒撑杆平面上形成非线性的整体受力体系。上下环梁是一个空间拱,拱脚支座为四个角筒,内环索相当于拱拉杆。大部分水平力分力由空间拱承受,垂直力主要由钢臂通过挑台框架传给基础,同时空间拱也承受部分竖向力(图 3)。

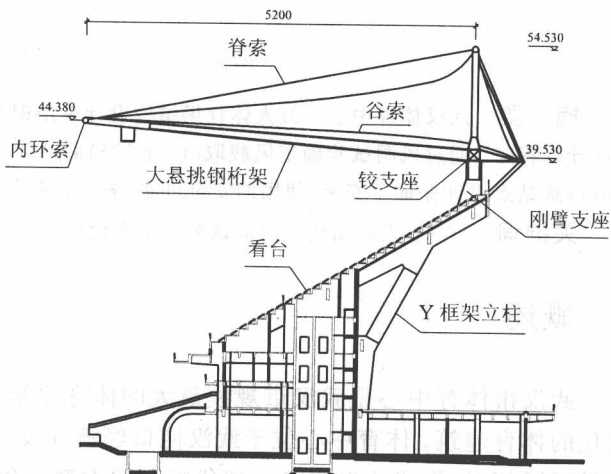


图 2 腰单元及径向框架

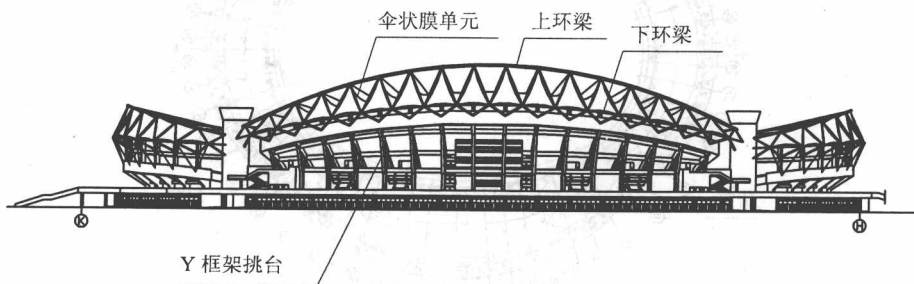


图 3 框-筒-索膜分析

## 3 内力分析

由于体系的非线性特点,采用非线性专用程序进行内力分析。

根据体系建立三维空间有限元模型整体分析求解,从而得到杆件单元的设计内力。

设计考虑了包括地震作用组合的 17 个工况,进行荷载不利组合。起控制的工况为上拔风工况及 XY 风荷载与活载组合的工况。属于由可变荷载效应控制的组合。东西看台铰支座内力最大值其竖向力为 7000kN,水平力为 5000kN(表 1)。

表 1 控制工况内力计算结果

| 工况 | 组 合          | 杆件最大内力(kN) | 杆件最小内力(kN) |
|----|--------------|------------|------------|
| 1  | 上拔风工况        | 4492       | -3806      |
| 2  | X 方向风载       | 2791       | -3844      |
| 3  | Y 方向风载       | 2640       | -3453      |
| 4  | XY 方向风载和活载组合 | 3635       | -4853      |

注: + 表示拉力; - 表示压力。

## 4 节点设计

索与钢臂、立杆、拉杆采用销接。钢臂与框架支座采用空间铰。空间铰的设计是保证索桁受力和框架支座安全的关键。

在进行整体力学分析时在索桁平面内设计为铰。目的是不传递弯矩,避免框架支座产生很大的柱端弯矩,使钢筋混凝土 L 形刚臂立柱截面配筋很大而难以满足设计和施工要求。索膜安装时预应力张拉的不平衡力形成水平弯矩及安装偏差的次弯矩,造成刚臂立柱的扭矩,也是必须避免的。在使用阶段风载会产生水平不平衡力,其力由内外环索和水平支撑承受,在该节点处不产生扭矩。

空间铰接触面为一球冠,球面半径按接触面承受水平力和垂直力的最不利内力数值设计, $N_{\max}=7000\text{kN}$ , $V_{\max}=5000\text{kN}$ ,不同工况水平力与垂直力的夹角不同,该球面半径形成的球冠能在所有工况的夹角下保证相适应的合力点位于球面之内并使接触面的抗压满足要求。

球冠的矢高不宜太高,虽然矢高大对钢铰设计有利,但对立柱和铰底面的设计不利,水平力作用点或合力点形成附加弯矩较大,矢高和半径必须经过各种组合后优化确定,最终取用东西区为  $r=375\text{mm}$ ,  $f=171.5\text{mm}$ ;南北区  $r=375\text{mm}$ ,  $f=158\text{mm}$ 。

## 5 风洞试验

由于大型体育场索膜结构风载取值无规范可循,因此通过风洞试验确定。风洞试验由北京大学、清华大学共同完成。根据风洞试验结果设计取值:风压最大值 1.15kPa(压力),最小值 -1.65kPa(体型系数最大值 1.4(压力),最小值 -2.7(吸力)),风振系数根据设计部位不同分别取值 1.25~2.5。

风洞试验为刚性模型,模型比例 1:150,压力由模型每转动 15°角测量内、外表面一次,当模型旋转 360°即 24 次后,即获取内、外表面各自的全篷盖压力分布。

主要测点数据如表 2(风压值为经过换算后设计可直接采用值)。

表 2

| 部 位 | 50 年重现期风压(kPa) |       |
|-----|----------------|-------|
|     | 压力最大值          | 吸力最大值 |
| 东区  | 0.9            | -1.4  |
| 南区  | 1.0            | -0.8  |
| 西区  | 0.9            | -1.3  |
| 北区  | 1.0            | -0.9  |

## 6 节点试验

为了确保支座节点的安全,根据设计图作了补充试验,由华中科技大学结构试验室完成。试验采用 1:4 比例,模拟静动力对节点加载,试验结果表明,试验数据均满足设计要求,节点设计是安全可靠的。

## 7 材料

钢材采用 Q345C 级钢,膜材采用法拉利 120ZT 型 PVC,辅材选用不锈钢紧固件、铝合金压条等标准件。膜面投影面积 29844m<sup>2</sup>,展开面积 39400m<sup>2</sup>,索用量约 120t,杆件桁架由焊接钢管和无缝钢管组成。

节点均采用对接焊缝,不同部位采用熔透焊和角焊缝。角焊缝用于次要受力部位和超声探伤不便进行处,并通过检测保证焊接质量,达到设计要求。

## 8 结语

通过武汉体育中心 6 万人体育场设计和施工,可以认为:

(1)大型体育场容纳观众越来越多,场地越来越大,成为其建设趋势。索膜结构具有自重轻,覆盖灵活,覆盖面积大,造型美观的优势,是当代大型体育场的合理先进的首选型式。

(2)风载是索膜结构的主要荷载,应通过风洞试验确定并应考虑风振作用。

(3)索膜篷盖应与下部支承形成整体受力体系,设计的重点要选择好整体受力模式,整体受力应该是稳定的、简捷的、可靠的从而是最经济和合理的。

(4)特殊的节点设计必须加强,要考虑多种可能的受力状况,既需要考虑不利组合,同时又要考虑施工过程及可能发生的非常规复杂内力,确保安全。

武汉体育中心 6 万人体育场的设计和施工,是湖北省首次采用索膜结构的大型体育场。该工程的成功实施,为今后类似工程的设计和施工提供了宝贵的经验和借鉴。在设计和施工过程中,我们始终坚持技术创新,不断优化设计方案,确保工程质量和安全。同时,我们也注重与业主和施工单位的沟通与协作,确保工程顺利推进。未来,我们将继续秉承“精益求精、追求卓越”的宗旨,为更多大型体育场馆的设计和施工贡献智慧和力量。

武汉体育中心 6 万人体育场的设计和施工,是湖北省首次采用索膜结构的大型体育场。该工程的成功实施,为今后类似工程的设计和施工提供了宝贵的经验和借鉴。在设计和施工过程中,我们始终坚持技术创新,不断优化设计方案,确保工程质量和安全。同时,我们也注重与业主和施工单位的沟通与协作,确保工程顺利推进。未来,我们将继续秉承“精益求精、追求卓越”的宗旨,为更多大型体育场馆的设计和施工贡献智慧和力量。

武汉体育中心 6 万人体育场的设计和施工,是湖北省首次采用索膜结构的大型体育场。该工程的成功实施,为今后类似工程的设计和施工提供了宝贵的经验和借鉴。在设计和施工过程中,我们始终坚持技术创新,不断优化设计方案,确保工程质量和安全。同时,我们也注重与业主和施工单位的沟通与协作,确保工程顺利推进。未来,我们将继续秉承“精益求精、追求卓越”的宗旨,为更多大型体育场馆的设计和施工贡献智慧和力量。

# 大体积混凝土温度场数值模拟分析方法

张 琨

(中建三局)

**摘 要** 本文介绍了采用有限单元法模拟大体积混凝土温度场的方法,对计算所需基本参数的取值及计算方法进行了探讨。并通过工程实例证明分析结果能够较准确地反映大体积混凝土在浇筑养护全过程的温度变化情况。

**关键词** 大体积混凝土 温度场 有限元 数值模拟 水化热

## 1 前言

混凝土是当前应用最广泛的工程材料。随着工程建设规模的日益扩大,大体积混凝土也越来越广泛地应用到各类建设工程中。

在大体积混凝土施工中,由于体积相对厚大,混凝土中水化热的传导散失相对缓慢,因此混凝土中心部位温升较大,而混凝土表面却暴露在自然环境中。尽管施工中常采取一些保温覆盖措施,同时也采取多种措施尽可能减少水化热的产生,但因控制不当而出现温度裂缝的情况仍时有发生。因此大体积混凝土温度控制成为工程界长期关注的一个重大课题。

大体积混凝土温度裂缝的原因主要是人们对混凝土中产生温度梯度的因素缺乏足够的研究,对温度梯度的分析预测缺乏必要的手段,因此确定施工措施时有一定的盲目性。近年来不少施工单位采用计算机测温这一手段,通过测温实时监控混凝土温度变化情况,为控制温差、调整保温措施提供依据,从一个方面解决了这一问题(见图 1、图 2)。但这种手段仍不能在事先分析预测温度变化情况,对确定施工方案的指导作用有限。

随着计算机技术和计算方法的发展,复杂的工程问题可采用离散化的数值方法并借助计算机得到满足工程要求的数值解,数值模拟技术是现代工程学形成和发展的重要推动力之一。

在工程领域中应用最广泛的数值模拟方法是有限单元法,它不但可以解决工程中的结构分析问题,也成功地解决了传热学、流体力学、电磁学和声学等领域的问题,有限元计算结果已成为各类工程设计和产品性能分析的可靠依据。

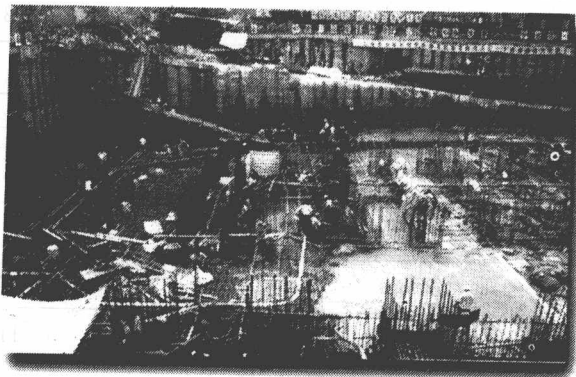


图 1 大体积混凝土施工

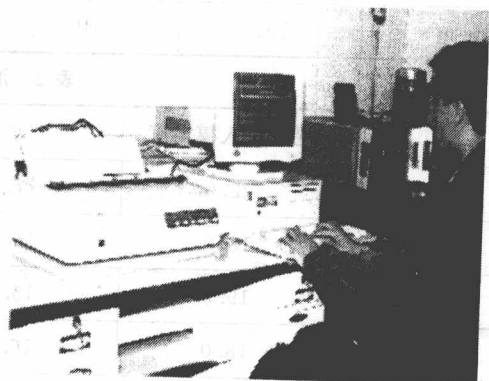


图 2 计算机测温

2 模拟方法

大体积混凝土水化过程的热分析也可以采用有限单元法进行模拟。其混凝土入模温度作为自由度约束施加于温度的已知边界上,水化热的产生作为体荷载施加于单元上,空气对流边界条件作为面荷载施加于实体的外表面(与空气接触的面),混凝土表面保温覆盖材料可以作为模型的一部分建模,其热性能参数根据试验测试结果输入。基础工程中的地基土层也可作为模型的一部分建模,通常取一定的厚度(1.5~2.0m)即可达到分析要求的精度,地基土层和混凝土的热性能参数可以根据测试结果输入,考虑到混凝土中配筋的影响,可对参数作适当调整。环境温度的变化可根据施工期间昼夜气温变化情况输入不同的环境温度,昼夜温差较小时也可输入平均温度。

在上述若干参数中,混凝土水化热是一个较为特殊的参数。以往由于研究目的不同,人们对水泥水化热的测试局限于发热总量的测试,对水泥发热强度随时间的变化情况测试重视不够,特别是对于掺加了不同外加剂后水化热的发生曲线变化研究较少。为此,我们对一定条件下混凝土水化热的发生曲线进行了初步测试。按照水化热发生曲线特征,将水化热分若干荷载步进行输入,以准确地输入热荷载。

分析类型选用瞬态热分析,分析所需时间根据单元规模、约束条件、荷载步设置和计算机性能等条件有所不同。为了保证工程所需的计算精度同时减少计算时间,需运用一些简化技巧,将计算时间控制在10~20h为宜。

进行数据后处理,数据后处理是将分析结果按照所需的形式进行处理、输出,可以用彩色云图显示或以数据形式进行输出。通常可对特定的点位的温度结果按一定的时间间隔进行提取,也可以根据不同的需要任意进行提取处理。

3 工程分析实例

3.1 工程情况

珠海某工程基础混凝土底板,长64.4m,宽47.8m(八角形,见图3),厚3.0m,混凝土量约8092m<sup>3</sup>,混凝土强度等级C35/S8。混凝土配合比见表1,施工期间混凝土及原材料温度记录见表2,环境温度记录见表3。

表1 混凝土配合比

|                   | 水   | 水泥      | 砂   | 石    | 外加剂 | UEA  |
|-------------------|-----|---------|-----|------|-----|------|
| 规格                | 自来水 | 矿渣 525# | 中粗  | 碎石   |     |      |
| kg/m <sup>3</sup> | 181 | 340     | 820 | 1044 | 3.4 | 37.4 |

表2 混凝土及原材料温度(℃)

| 日期  | 混凝土入模温度 | 水    | 水泥   | 砂    | 石    |
|-----|---------|------|------|------|------|
| 2.1 | 22.0    | 17.0 | 20.0 | 14.0 | 15.5 |
| 2.2 | 18.0    | 16.5 | 16.0 | 15.0 | 14.0 |
| 2.3 | 19.5    | 15.0 | 16.0 | 14.0 | 12.0 |
| 2.4 | 18.0    | 16.0 | 15.0 | 14.5 | 11.5 |
| 2.5 | 19.0    | 15.5 | 16.5 | 15.5 | 12.5 |

注:混凝土入模温度及原材料温度均为每日上午10:00测得。



表 3 施工期间环境温度(℃)

|            |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|            | 2.1  | 2.2  | 2.3  | 2.4  | 2.5  | 2.6  | 2.7  | 2.8  | 2.9  | 2.10 | 2.11 | 2.12 | 2.13 |
| $T_{\max}$ | 22.0 | 21.0 | 21.0 | 22.5 | 24.5 | 20.5 | 18.0 | 24.5 | 23.5 | 21.0 | 20.5 | 23.5 | 24.5 |
| $T_{\min}$ | 14.5 | 12.0 | 11.0 | 10.0 | 15.0 | 12.5 | 14.0 | 15.5 | 16.0 | 12.5 | 13.0 | 14.0 | 15.0 |
| $\Delta T$ | 7.5  | 9.0  | 10.0 | 12.5 | 9.5  | 8.0  | 4.0  | 9.0  | 7.5  | 8.5  | 7.5  | 9.5  | 9.5  |

3.2 有限元模型的建立

根据混凝土底板的几何尺寸建立三维有限元模型如图 4。为减少运算时间,同时又保证计算精度,根据经验,将温度变化较敏感的高度方向和边缘的局部区域设置为较小的单元尺寸;将表面覆盖物和地基土层做为模型的一部分(地基土层厚度取 2.0m)。建立模型的过程中,输入(定义)混凝土、覆盖物、地基土层的热工参数(采用的热工计算参数见表 4)。

表 4 采用的热工计算参数

| 参数名称    | 单位                | 取值   | 参数名称    | 单位                   | 取值   |
|---------|-------------------|------|---------|----------------------|------|
| 混凝土水化热  |                   | (略)  | 地基土比热容  | J/kg · K             | 880  |
| 混凝土表观密度 | kg/m <sup>3</sup> | 2420 | 保温层表观密度 | kg/m <sup>3</sup>    | 200  |
| 混凝土导热系数 | W/m · K           | 1.28 | 保温层导热系数 | W/m · K              | 0.4  |
| 混凝土比热容  | J/kg · K          | 840  | 保温层比热容  | J/kg · K             | 110  |
| 地基土表观密度 | kg/m <sup>3</sup> | 2160 | 空气传热系数  | W/m <sup>2</sup> · K | 4.33 |
| 地基土导热系数 | W/m · K           | 1.86 |         |                      | </   |



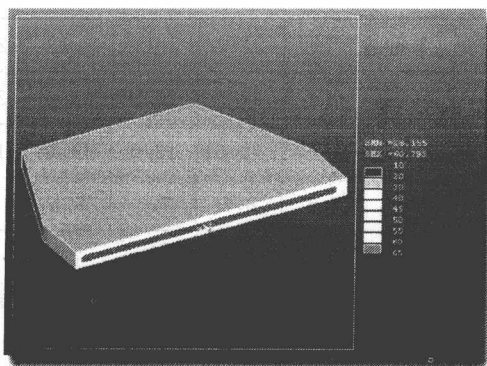


图5 温度场模拟结果

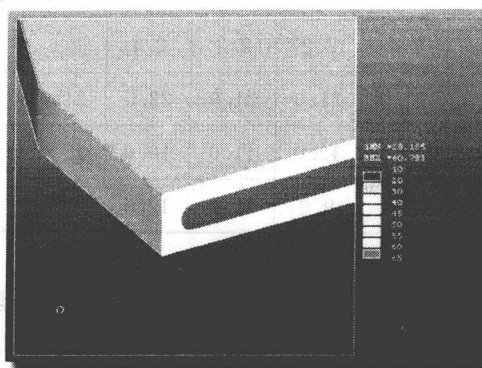


图6 温度场模拟结果局部显示

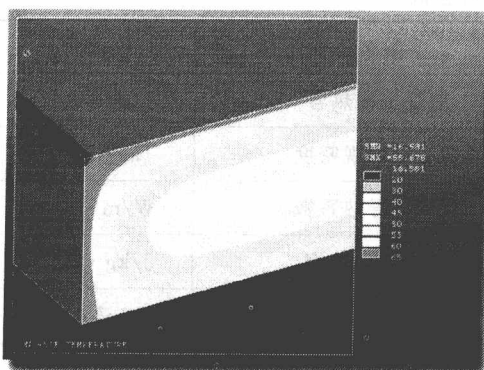


图7 混凝土温度场彩色云图显示

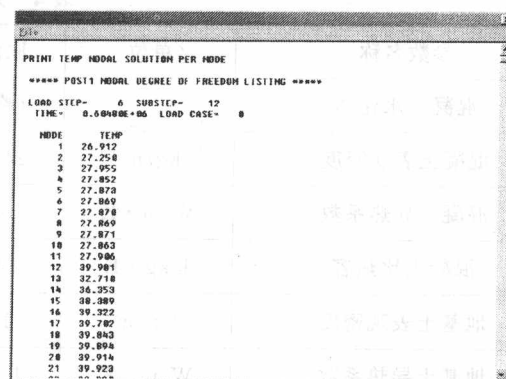


图8 计算结果数值输出

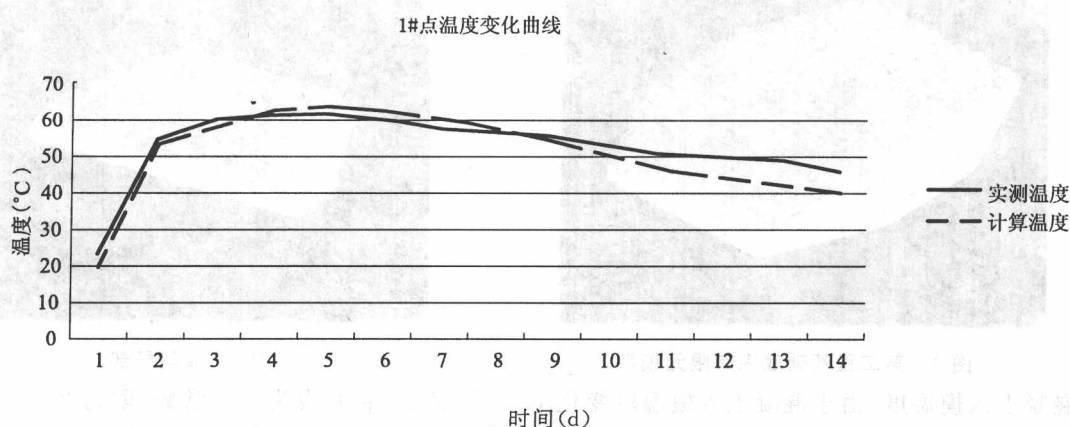


图9 计算结果与实测结果对比

#### 4 结论

由于我局从1994年起就已经开始进行大体积混凝土计算机测温工作,积累了一批完整的工程测温记录资料,这些资料加上当时的施工记录成为我们对照研究的理想样本。经过多个工程的模拟分析与实际记录对比,证明数值模拟分析方法是可靠的,其计算数值与实测数值虽然存在微小差异,但已经不影响我们利用其确定施工方案的应用目的。

目前我们正积极进行更大范围的基础数据试验和有针对性的工程实测对比试验,以期在取得更多工程

实践的基础上,形成成熟和相对简化的计算模式,便于推广应用。

## 5 结束语

对大体积混凝土温度场进行模拟分析研究的最终目的是预防温度裂缝。有了温度场分析结果,以此为已知条件,进一步运算就可以得出温度应力场的变化情况,结合混凝土强度增长情况,从理论上可以预测混凝土的抗裂性能。

但是,温度应力只是大体积混凝土产生裂缝的因素之一,同时还存在其他多种因素。加之混凝土内外约束条件的多变性,对其进行精确的模拟计算研究就更为复杂。相信随着各方面工作的推进,对其进行综合分析的条件在不久的将来会趋于成熟。

## 参考文献

- 1 王国强主编. 实用工程数值模拟技术及其在 ANSYS 上的实践. 西安:西北工业大学出版社,1999
- 2 傅秦生等编著. 热工基础与应用. 北京:机械工业出版社,2001

# 武汉国际会展中心主楼上部大跨度钢桁架设计及安装

周德良

(中南建筑设计院)

**摘 要** 本文详细介绍了武汉国际会展中心主楼位于标高为 39.100~42.900 之间跨度为 59.5m 具有较小竖向刚度的上部空间钢桁架的设计和安装,该钢桁架的节点及桁架支撑体系的设计均具独特性。

**关键词** 空间钢桁架 节点 钢骨柱

## 1 概述

武汉国际会展中心主楼长 237.5m(纵向),宽 64m(横向),地上 5 层,地下 1 层,建筑面积约 8 万  $\text{m}^2$ ,框架结构。它集大型展览、会议于一体,建筑及结构布置均极为复杂,结构方面尤其以具有特大跨度并同时承受极大活载而最具特色。主楼结构构件种类较多,其中有特大跨度钢桁架、大跨度钢挑檐、钢网架等钢结构、大截面且连接复杂的钢骨结构、大跨度预应力结构、钢筋混凝土结构。根据建筑布置要求,在主楼纵向中部的中庭区域处轴 Y11-Y18 交轴 X5-X6、X12-1/X13 范围内在标高 38.850~43.150 之间各设置一既作受力又作建筑装饰用的水平构件,构件跨度为 59.5m,而建筑要求结构构件外包铝板且外包后构件的高度为 4.3m,构件下部在轴 X6、X12 处,与中庭中心六根圆柱周围外形为圆台形的玻璃幕墙的鱼腹型钢架龙骨用支撑相连,为该幕墙的骨架提供平面外支撑,详平面图 1。支撑与各水平构件的连接点有 7 个,作用于水平构件上各点的集中力均为三维的,大小各不相同,各点集中力的合力值在 358~411kN 之间,同时水平构件还要承受自重、风载、温度作用及地震作用等,因此在构件设计时主要考虑以下几点:①由于构件在竖向平面内跨高比较大,刚度较小,因此应尽可能地减小构件自重,同时提高构件的弹性模量;②与幕墙钢架的侧向钢支撑相连,在连接尺寸和连接材料上均有一定要求;③该构件在施工安装上有一定难度,可用于构件安装的最近平台为标高 16.000 的三楼屋顶花园,构件底部距平台面 22.85m,设计时必须考虑安装条件;④构件上、下面标高与两侧楼层标高有一定的错位,设计时应充分考虑构件与楼层结构连接方式及其对楼层使用性能的影响且应使这种影响减至最小,而这正是本构件设计的难点之一。以上四条要求基本上确定该构件为一空间钢桁架结构。该桁架结构的节点及桁架与主体结构的连接均具独特性,现介绍如下。

## 2 结构布置与分析

### 2.1 结构布置

根据上述各项要求,经综合比较,最后确定采用构件为焊接工字形截面的空间钢桁架结构,其平面、立面图分别详图 1、图 2。该桁架由分别位于轴 X5、X6 或轴 X12、1/X13 上的两榀竖向钢桁架和位于竖向钢桁架上、下弦平面内的水平钢桁架组成,水平钢桁架和竖向钢桁架具有共同的弦杆,见图 1、图 2。空间钢桁架布置时考虑以下几个因素:

#### (1) 竖向钢桁架

①竖向钢桁架上、下弦杆均为焊接工字形截面,为了便于与幕墙骨架的侧向支撑相连,上、下弦杆在竖向平面内呈 H 形放置。由于弦杆主要受轴力作用,决定桁架在竖向平面内的整体刚度的主要因素是弦杆的截面积而非弦杆在竖向平面内对弦杆自身中性轴的惯性矩,因此这种弦杆截面布置方法对钢桁架的整体刚度影响不大。