



高层建筑 结构优化、 动力和稳定的 实用计算

王全凤 著 福建科学技术出版社

73
38

高层建筑 结构优化、 动力和稳定的 实用计算

王全凤 著 福建科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

高层建筑结构优化、动力和稳定的实用计算/王全凤
著. —福州:福建科学技术出版社, 2002. 10
ISBN 7-5335-2017-3

I. 高... II. 王... III. ①高层建筑—结构分析
②高层建筑—建筑结构—计算方法 IV. TU973

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 051537 号

书 名	高层建筑结构优化、动力和稳定的实用计算
编 著	王全凤 著
出版发行	福建科学技术出版社(福州市东水路 76 号, 邮编 350001)
经 销	各地新华书店
印 刷	福建地质印刷厂
开 本	850 毫米 × 1168 毫米 1/32
印 张	3.5
插 页	2
字 数	80 千字
版 次	2002 年 10 月第 1 版
印 次	2002 年 10 月第 1 次印刷
印 数	1—1000
书 号	ISBN 7-5335-2017-3/TU·28
定 价	10.00 元

书中如有印装质量问题,可直接向本社调换



前 言

随着我国经济的增长,高层建筑作为一个国家城市的象征,正在蓬勃发展起来。由于高层建筑结构的特殊性,在其向大跨度和高耸方向发展的同时,一些关键的理论问题和特殊的力学问题也突现出来。例如,结构的非线性分析、地震作用下的结构反应问题,为减轻自重的优化理论及基于模糊可靠度的设计理论等。本书是作者在十年时间跨度内的科研成果,主要介绍高层建筑结构的力学分析原理和计算方法。全书围绕优化、动力和稳定三个问题及计算机在结构工程中的运用进行阐述,这些问题都是当前“结构工程”学科的前沿研究课题。书中侧重于这些复杂问题的解决和工程应用,特别是所提出来的计算方法。2000年福建省教育厅曾组织国内专家对其中“高层建筑结构特征值的计算理论”进行评审,认为:“该成果的创造性及先进性在于把复杂的工程问题采用连续离散再连续的新颖构思,循环应用解析与数值相结合的数学技巧,归结提炼出一种便于在投标核心阶段初步设计时采用的新算法。该成果绝大多数学术论文在国际核心期刊上发表,并被三大检索系统所收录和引用,已经基本上形成具有中国特色的高层建筑结构特征值计算理论。该成果比较完整、深入地进行高层建筑结构特征

值计算理论的创建工作,立论新颖,方法严谨、合理,创新意义大,实用价值高,填补了我国在这方面研究的空白,达到国际同类研究的先进水平。”

全书共分六章。第一章绪论,系统介绍本领域国内外研究动态。第二章用结构优化的方法,对地震区框架-剪力墙高层建筑结构中剪力墙的最优刚度,在已知材料及结构形式条件下进行分析。第三章严格证明了按等代筒体法推导出来的筒中筒高层结构自由振动方程是四阶 Sturm-Liouville 微分方程,把该结构的固有频率问题归结为求解该微分方程特征函数的特征值问题。第四章用加权余量 Galerkin 法,探讨高层双肢剪力墙的稳定问题。第五章提出了一个用标准的常微分方程求解器,求解筒中筒高层建筑结构自由振动和高层双肢剪力墙结构的临界荷载参数。第六章用数值分析方法,详细研究钢筋混凝土剪力墙在侧向交互荷载作用下的非线性性能。最后还以附录的形式介绍了本书有关公式的推导过程。

该书把大多数工程技术人员不太熟悉、深奥难解的高层建筑结构力学分析方法实用化,希望对土木工程专业的研究生,高年级大学本科生,从事工程结构的教学、科研和工程技术人员有所启迪和帮助。

由于水平有限,书中不尽如人意之处在所难免,敬请读者批评指正。

王 全 凤

2002 年 6 月于华侨大学

作者简介

王全凤 清华大学博士,华侨大学土木工程系教授、主任,华侨大学土木与环境工程研究所所长。中华人民共和国一级注册结构工程师、国家监理工程师、福建省审查工程师(结构)。中国力学学会理事、中国基本建设优化专家委员会专家;“工程力学”核心期刊编委、“基建优化”核心期刊编辑委员会编委和“基建管理优化”编委。国际模型与模拟技术协会(AMSE 法国)会员、纽约科学院现任院士(ID #:478434 美国)、入选 Marquis 世界名人录 1999 年第 16 版(美国)。曾为荷兰王国 Delft 理工大学高级访问学者(1988 年)、访问教授(2001 年)和香港理工大学研究员(1994 ~ 1997 年),兼任天津大学土木工程系兼职教授、天津大学合作博士生导师和清华大学博士生副导师。

曾主持或参加 10 多项国际合作、国家及有关省、部、委课题或攻关项目,10 项科研成果通过省、部级鉴定[5 项达到国际先进水平(1994 年、1996 年、2000 年、2001 年和 2002 年),5 项达到国内先进水平(1988 年、1993 年、1993 年、1994 年和 1996 年)]。获省、部级以上的科技奖 15 项[其中科技进步奖 6 项(1994 年、1994 年、1998 年、1998 年、1999 年和 2002 年)];著书 2 部,公开发表学术论文 107 篇,有 15 篇被科学引文索引《SCI》所引证,有 16 篇被工程索引《EI》所引证,有 2 篇被国际科学会议索引《ISTP》所引证。1993 年因为发展我国“结构工程”事业作出突出贡献而获国务院政府特殊津贴。1998 年被评为国务院侨办部属学校优秀教师,2001 年被评为“九五”期间福建省建设技术创新先进工作者。

内 容 提 要

本书主要介绍高层建筑结构的力学分析原理和计算方法,围绕优化、动力和稳定三个问题及计算机在结构工程中的运用进行阐述。这些问题都是当前“结构工程”学科的前沿研究课题。本书理论与实践并重,作者在深入理论研究的基础上提出了简便实用的计算方法,可供高等院校土木工程专业研究生,高年级大学本科生,以及从事工程结构的教学、科研和工程技术人员参考。

目 录

第一章 绪论

§ 1.1 高层建筑结构的发展	(1)
§ 1.2 高层建筑主要结构体系及其力学分析	(3)
1.2.1 框架结构体系	(3)
1.2.2 剪力墙结构体系	(4)
1.2.3 框架-剪力墙结构体系	(4)
1.2.4 筒体结构体系	(5)
§ 1.3 高层建筑结构力学分析最近的一些进展	(6)
1.3.1 分区广义变分原理与分区混合有限元在高层结构 分析中的应用	(6)
1.3.2 解析——微分方程求解器法	(7)
1.3.3 半解析法(有限条法和样条函数法)在高层建筑结 构分析中的应用	(7)
1.3.4 半连续半离散法在高层建筑结构分析中的应用 ...	(8)
1.3.5 结构最优化理论在高层建筑结构中的应用	(9)
1.3.6 时程法在高层建筑结构抗震设计中的进一步应用 ...	(10)
§ 1.4 近期高层建筑结构分析部分研究课题	(11)
1.4.1 高层建筑结构优化设计方法	(12)
1.4.2 高层建筑结构的动力特性和直接动力分析	(13)
1.4.3 高层建筑结构的稳定	(13)
1.4.4 高层建筑结构构件的数值分析	(14)

§ 1.5 高层建筑结构设计的展望	(14)
-------------------------	------

第二章 框架-剪力墙高层建筑剪力墙的最优刚度

§ 2.1 剪力墙最优刚度数学模型的建立	(16)
§ 2.2 数学模型的解	(19)
2.2.1 约束条件——结构的变位和内力	(19)
2.2.2 目标函数——水平地震作用	(25)
2.2.3 解数学模型	(30)
§ 2.3 工程实例	(32)
§ 2.4 结论	(34)
2.4.1 对数学模型解的分析	(34)
2.4.2 高振型对剪力墙最优解的影响	(34)
2.4.3 分析方法的通用性	(34)

第三章 筒中筒高层建筑结构自由振动

§ 3.1 筒体结构自由振动方程	(36)
§ 3.2 自由振动方程满足变分解的证明	(38)
§ 3.3 结构固有频率的变分解	(42)
§ 3.4 对解的评论	(44)
§ 3.5 与试验研究比较	(45)
§ 3.6 结论	(46)

第四章 高层双肢剪力墙结构整体稳定

§ 4.1 稳定特征方程的建立	(47)
§ 4.2 稳定特征方程的解	(50)
§ 4.3 结果比较	(53)
§ 4.4 解的收敛性	(55)

§ 4.5 结论	(56)
----------------	------

第五章 常微分方程求解器求解高层建筑结构 动力和稳定的特征值问题

§ 5.1 常微分方程的数值解法及求解器方法	(57)
5.1.1 常微分方程数值解法	(57)
5.1.2 常微分方程边值问题的求解器解法	(58)
5.1.3 常微分方程特征值问题的求解器解法	(58)
§ 5.2 常微分方程特征值问题及其变换	(59)
5.2.1 筒中筒高层建筑结构自由振动方程	(59)
5.2.2 高层双肢剪力墙结构稳定特征方程	(61)
§ 5.3 纯化初始特征函数向量的技术措施	(62)
5.3.1 逆幂迭代法	(62)
5.3.2 正交化	(63)
5.3.3 特征值移位	(64)
§ 5.4 常微分方程特征值问题求解器法的求解步骤	(65)
§ 5.5 应用算例	(67)
§ 5.6 结论	(69)

第六章 钢筋混凝土剪力墙非线性性能的数值分析

§ 6.1 剪力墙试件	(71)
§ 6.2 计算模型	(72)
§ 6.3 计算程序和材料模型	(74)
§ 6.4 结果和比较	(75)
6.4.1 荷载-顶部位移的滞回关系	(75)
6.4.2 裂缝	(77)

§ 6.5 结论	(78)
----------------	------

参考文献	(79)
------------	------

近 8 年来作者公开发表与本书有关的论文及收录情况	(84)
---------------------------------	------

附录 1 关于第三章试函数的选择、边界条件问题及变分极值条件中有关系数计算

一、试函数选择	(87)
---------------	------

二、二阶试函数(附 1.13)式的边界条件问题	(89)
-------------------------------	------

三、变分极值条件中有关系数的计算	(90)
------------------------	------

附录 2 第四章稳定特征方程的边界(4.8)式中第二式推导和它的矩阵元素 a_{jk}, b_{jk} 计算

一、边界条件(4.8)式中第二式推导	(94)
--------------------------	------

二、矩阵元素 a_{jk} 和 b_{jk} 的计算	(95)
--------------------------------------	------

第一章 绪 论

§ 1.1 高层建筑结构的发展

最早的高层建筑结构可追溯到古代。古罗马于 3 世纪末到 4 世纪初就修建了 10 层高的房屋;意大利人于 12 世纪建造的 Lasinli 塔高达 98 米;我国现存的不少塔楼,如嵩岳寺塔 10 层、高 40 米,建于 6 世纪初。这些高层建筑建造较早,由于都是采用砖、石及木料建成,直接影响了建筑高度的发展和内部空间的利用。

从 19 世纪开始,由于西方城市的发展以及人口过密,使得随罗马帝国衰亡而消失了的高层房屋又重新兴盛起来,承重墙结构的原理又被采用了。但这种结构体系不太合理,随着高度的增加,墙厚必然增大。如 1891 年美国芝加哥建造的 16 层高莫纳德诺克大厦(Monadock Building),下部几层砖墙厚度竟达 1.83 米,从而可知这种结构体系的建造局限。

使用自重小的框架体系似乎是很自然的事。早在 1801 年,英国曼彻斯特就建造了一座 7 层铁框架的纺织厂。实际上,它的建造,为威廉·詹尼(William Jenny)于 1893 年在芝加哥进一步将框架体系用于 11 层的住宅保险大楼(Home Insurance Building)奠定了基础,这是第一个全部用金属骨架来支承高层房屋的例子。伯纳姆(Burnham)和鲁特(Root)的 9 层兰德·麦克纳利大楼(Rand McNally Building)(1889 年,芝加哥)是首次全部采用钢框架的结构,他们还把垂直剪力墙的概念推广应用于 20 层的共济会神殿(Masonic

Temple)(1891年,芝加哥),当达到这一高度时,风荷载就成为一个重要的设计依据。为了提高钢框架的侧向刚度,设计师们在外围框架上还采用了斜向支撑,这样就形成了垂直桁架和剪力墙理论^[1]。1890年混凝土开始成为普遍采用的建筑材料。法国的佩雷特(Auguste Perret)最早把钢筋混凝土骨架应用于高层房屋,用在他1903年设计的法国巴黎富兰克林(Franklin)街公寓中;与此同时,在辛辛那堤(Cincinnati)建造了一幢16层的英戈尔大厦(Ingall Building),那是世界上最早采用钢筋混凝土框架的大楼。这些结构体系的采用以及设计理论的发展,使高层建筑结构飞速发展,如1931年美国纽约建成有名的102层帝国大厦(Empire State Building),保持了最高建筑的记录达41年之久。这些建筑一般只适用于非地震区,结构自重大大,材料用量多。

到了20世纪50年代,由于轻质高强材料研究成功,抗风抗震体系得到了发展,新的设计理论进一步完善,电子计算机的应用以及新的施工机械的涌现,为大规模、较经济地建造高层建筑提供了先决条件,全世界范围内差不多有35个国家建造了100米以上的高层建筑。以后,美国S.O.M.事务所的坎恩(Fazlur Khan)首次提出筒体作用的概念,并于1971年首次成功地用于美国休斯顿市52层的贝壳广场大厦(One Shell Plaza)(外筒用轻混凝土建造)。20世纪70~80年代,高层建筑结构广泛采用筒体结构体系。随着高层建筑功能、造型要求的提高,建筑师对大空间的要求越来越迫切,要求结构工程师提出新颖的巨型结构体系。这种体系的主要特点是布置若干个“巨大”的竖向支承结构(组合柱、角筒体,边筒体等),并与梁式或桁架式转移楼层相结合,形成一种巨型框架或巨型桁架的结构体系。随着新结构体系和高速电梯的出现,150~200层的超高层建筑的建造在技术上已成为可能。

我国发展高层建筑是近30年来的事,自20世纪50年代开始

自行设计、建造;至 70 年代发展很快;进入 80 年代发展更为迅速,且数量多、层数高、体系更为复杂。钢结构最近开始应用,特别是在钢筋混凝土高层建筑结构方面有较明显的进展^[2]。北京的京广大厦,楼高 53 层,它是我国第一幢突破 200 米高度的建筑。

§ 1.2 高层建筑主要结构体系及其力学分析

在高层建筑结构中,高宽比增大,水平荷载产生的侧移和内力成为确定结构体系、材料用量和造价的决定因素,其基本原因是侧移和内力随着结构高度增加而急剧增加。高层建筑达到一定高度时,侧向位移很大。参考文献 1 中指出,是刚度而不是结构材料的强度控制设计。刚度的大小取决于结构体系。如何选择经济而有效的结构体系,并对它进行有效的力学分析,一直是高层建筑结构设计的主要内容。在钢筋混凝土高层建筑中,框架结构、剪力墙结构和框架-剪力墙结构仍是目前量多面广的高层建筑结构形式。在高层和超高层建筑中,要求高效的结构体系已在新一代的高层建筑研究中提出来。它不仅要求经济,而且还应有最大的潜在能力以满足结构的牢固和超高层建筑表现的要求。现在,以空间受力为特征的筒体结构得到较多的应用。

1.2.1 框架结构体系

框架一般是同一平面内由水平横梁和竖柱用刚性结点连接在一起,形成矩形网络的形式,属杆系结构。框架结构应用最广泛的计算方法,是竖向荷载作用下的分层法,及水平荷载作用下由日本学者武藤清提出的考虑转角影响的广义反弯点法^[3],修改后的侧移刚度改用 D 表示,故又称 D 值法。 D 值法将每层的总剪力按各柱的抗推刚度 D 值比例分配后,求得各柱剪力。由柱的反弯点

高度可计算柱端弯矩,再由结点平衡条件计算梁端弯矩,从而计算梁的剪力和柱的轴力。

随着微型计算机的应用,许多较为精确的计算方法陆续产生。参考文献 4 中提出的无剪力分配法就是典型的方法。它在位移法方程中,先消去侧移未知量,仅保留结点转角未知量,使未知量数目大大减少,便于用微型计算机求解而保持位移法的精确性。框架分析方法同样可以推广应用到带刚域的壁式框架中,从而使开口较大的剪力墙可以很方便地计算。

1.2.2 剪力墙结构体系

剪力墙结构体系是由一系列纵向、横向剪力墙及楼盖所组成的空间结构。在水平荷载作用下,简化分析时认为剪力墙在其自身平面内的刚度很大,可忽略平面外刚度。这样,把纵、横向的剪力墙分别考虑,化空间结构为平面结构。其次,可认为楼盖在其自身平面内刚度无穷大,在水平荷载下,只产生刚体运动,而不发生变形,于是整个结构所承受的水平荷载就可按各片剪力墙的等效抗弯刚度分配给各片剪力墙。最后,根据每一片剪力墙的洞口大小、形状和位置的不同,分别进行位移和内力计算^[3]。

对于双肢剪力墙,一般采用罗斯曼(Rosman)方法分析^[5]。采用微分方程的方法,将连系梁简化为连续弹性薄片,使连系梁的剪力连续化,由力法原理建立连系梁中点处位移协调方程。

1.2.3 框架-剪力墙结构体系

当框架体系的强度和刚度不能满足要求时,需要在框架结构平面的适当部位设置剪力墙来抵抗水平荷载,也便形成了框架-剪力墙体系。框架主要作为体系中承受垂直荷载的结构,而大部分水平荷载由剪力墙承担。对于该结构体系一般是按前苏联安东

诺夫(АИТОНОВ)微分方程法来分析^[6]。将剪力墙平面结构视为竖向悬臂受弯杆件或剪弯杆件,将框架平面结构作为悬臂剪切梁,考虑框架与剪力墙之间的协同工作,并把连杆连续化。这类方法都是将问题归结为常微分方程及其边界条件来处理。其优点是简便实用;缺点是计算简图较简略,很难考虑其他较复杂的变形规律。

1.2.4 筒体结构体系

在高层建筑中,将密排的外柱布置于建筑物的四周,组成一个外框筒体系,而内筒常常是由实体剪力墙构成蕊墙体系,内、外筒共同支承楼盖荷载。在水平荷载作用下,内外筒协调工作,内筒承担大部分水平剪力,而外筒则承担大部分弯矩。该结构体系力学分析与普通框架-剪力墙结构体系有所区别,应该满足筒中筒结构主要的受力和变形特征。在筒中筒结构中,外框筒的剪力滞后影响较为明显^[33]。因此无论采用哪一种分析方法,都应在一定程度上反映这一现象。在筒体结构体系中,倘若进行较准确的分析,应进行空间计算。目前,常用的是空间矩阵分析方法,即将外框筒离散为空间杆系有限元,考虑刚域长度和杆件剪切变形的影响,把内部剪力墙筒体看做是空间开口薄壁杆件。这种类型单元,除了空间实体杆单元的各端结点本身有6个自由度外(3个线位移和3个角位移),还需考虑对应于双力矩的截面翘曲自由度。这种分析方法在工程中得到应用,但偏于繁杂,费用也高。

在静力分析方法发展、完善的同时,各种结构体系动力特性和动力反应的研究有了很大的发展,取得了底层大空间剪力墙结构和筒体结构自振特性的计算方法和实测资料等一批成果。