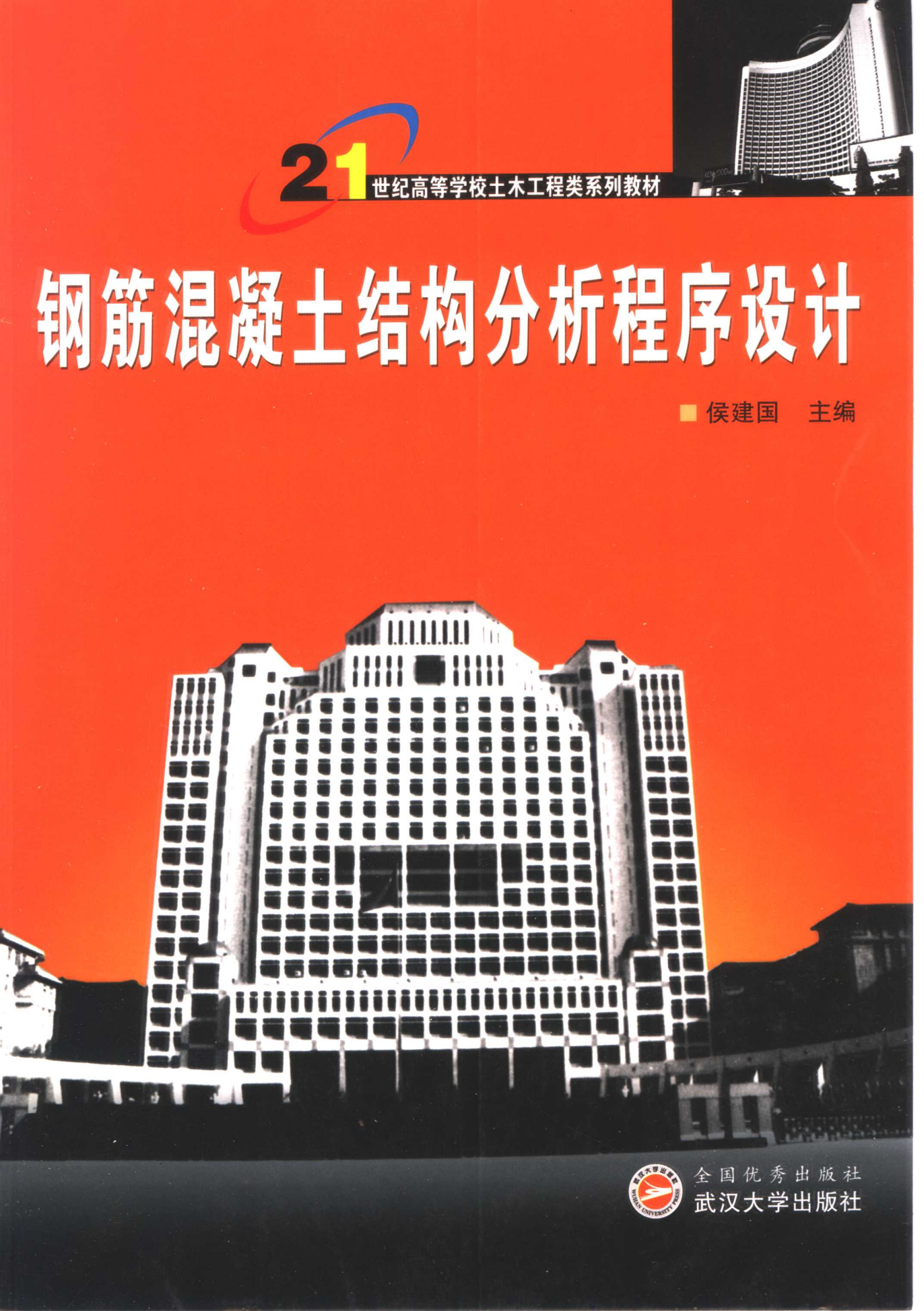




21

世纪高等学校土木工程类系列教材

钢筋混凝土结构分析程序设计

■ 侯建国 主编



全国优秀出版社
武汉大学出版社



世纪高等学校土木工程类系列教材



钢筋混凝土结构分析程序设计

■ 侯建国 主编



全国优秀出版社
武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

钢筋混凝土结构分析程序设计/侯建国主编. —武汉: 武汉大学出版社,
2004. 9

21 世纪高等学校土木工程类系列教材

ISBN 7-307-04255-X

I. 钢… II. 侯… III. 钢筋混凝土结构—结构分析—程序设计 IV.
TU375.04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 049668 号

责任编辑: 夏炽元 责任校对: 程小宜 版式设计: 支 笛

出版发行: 武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件: wdp4@whu.edu.cn 网址: www.wdp.whu.edu.cn)

印刷: 华中科技大学印刷厂

开本: 787×1092 1/16 印张: 17.5 字数: 418 千字

版次: 2004 年 9 月第 1 版 2004 年 9 月第 1 次印刷

ISBN 7-307-04255-X/TU·46 定价: 25.00 元

版权所有, 不得翻印; 凡购我社的图书, 如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 请与当地图书销售门联系调换。

内 容 提 要

本书介绍利用有限单元法进行框架结构的内力分析(包括静、动力分析),并按我国现行结构设计标准 GB 50009—2001《建筑结构荷载规范》、GB 50010—2002《混凝土结构设计规范》和 GB 50011—2001《建筑抗震设计规范》的有关规定,进行荷载及荷载效应组合与配筋计算的程序设计方法和编制技巧。书中结合作者编制的框架结构分析程序 FSAP(Frame Structures Analysis Program),对 FSAP 程序的主要功能模块进行了详细的讲解,并给出了相应的源程序。

本书主要作为高等院校土建类专业高年级学生和硕士研究生结构分析程序设计选修课的教材,亦可供从事工程结构设计的技术人员和土建类院校的教师和学生参考。

前 言

本书是在李传才、侯建国 1990 年为土建类专业的本科生和研究生编写的《结构分析程序设计》讲义的基础上修订而成的,主要介绍利用有限单元法进行框架结构的内力分析,并按我国现行结构设计标准的有关规定进行荷载及荷载效应组合和配筋计算的程序设计方法与编制技巧。全书共分五章和一个附录,第一章简要介绍平面杆系结构有限元程序的编制原理;第二章至第四章以作者编制的 FSAP 程序(Frame Structure Analysis Program)为对象进行逐段讲解,借以说明框架结构分析程序的编制方法,并给出了相应的源程序。其中第二章主要介绍框架结构内力分析程序的编制方法(包括静力分析和动力分析);第三章和第四章主要介绍按照我国现行结构设计标准 GB 50009—2001《建筑结构荷载规范》、GB 50010—2002《混凝土结构设计规范》和 GB50011—2001《建筑抗震设计规范》的有关规定,进行荷载及荷载效应组合和配筋计算的程序设计;第五章给出了 FSAP 程序的使用说明及各种工程实例;附录中给出了 FSAP 程序中有关的其他子程序。在编写过程中,我们力求贯彻少而精的原则,对于读者较为熟悉的有限元原理只作一般性介绍,而把重点放在程序(尤其是荷载及荷载效应组合和配筋计算程序)的编制原理和具体方法上。

本书主要作为高等院校土建类专业高年级学生和硕士研究生结构分析程序设计选修课的教材,亦可供从事工程结构设计的技术人员和土建类院校的教师和学生学习与参考。

本书绪论、第一章和第二章由侯建国编写;第三章由侯建国、杨冬梅编写;第四章和第五章及附录由安旭文编写;按原规范进行结构设计的 FSAP 程序由侯建国、李传才编制;安旭文、宋础对 FSAP 程序按新规范的规定进行了全面修订,并增加了很多新的功能;整个程序的上机调试由安旭文负责完成。全书由侯建国修改定稿。

由于水平所限,尽管我们尽了很大努力,但书稿中仍难免有缺点和疏漏之处,欢迎广大读者批评指正。

侯建国

2004 年 5 月于珞珈山

目 录

前 言	1
绪 论	1
第一节 结构分析程序的发展与应用	1
第二节 结构分析程序设计的一般方法和基本要求	2
第三节 结构分析程序的主要内容	4
第一章 框架结构内力分析程序的编制原理	6
第一节 概 述	6
第二节 平面杆系结构有限元法的基本原理及求解步骤	7
第二章 框架结构内力分析程序设计	24
第一节 框架结构分析程序 FSAP 简介	24
第二节 输入数据程序设计	33
第三节 节点位移未知量编号和单元定位向量的形成	46
第四节 形成单刚程序设计	51
第五节 结构刚度矩阵的形成	61
第六节 组装整体荷载列向量	72
第七节 解方程程序设计	83
第八节 杆端力和指定截面内力计算	90
第九节 动力分析程序设计	98
第三章 荷载及荷载效应组合的程序设计	117
第一节 我国现行结构设计规范关于荷载及荷载效应组合的有关设计规定	117
第二节 荷载及荷载效应组合程序的总体设计	125
第三节 吊车荷载组合	129
第四节 风荷载组合	146
第五节 一般活荷载的组合	148
第六节 静力组合的最终结果	152
第七节 地震作用效应组合及其调整	158
第八节 支座弯矩削减	167
第四章 配筋计算程序设计	170

第一节	配筋计算程序的总体设计	170
第二节	配筋计算有关参数的确定	171
第三节	梁、柱纵筋计算的总体程序	178
第四节	梁的正截面受弯承载力计算	184
第五节	偏心受压构件的正截面受压承载力计算	188
第六节	偏心受拉构件的正截面受拉承载力计算	201
第七节	梁、柱配箍计算的总体程序	203
第八节	斜截面受剪承载力计算的截面限制条件	207
第九节	受弯构件的斜截面受剪承载力计算	210
第十节	偏心受力构件的斜截面受剪承载力计算	212
第十一节	框架梁柱节点核心区受剪承载力校核	216
第五章	程序使用说明及工程实例	217
第一节	原始数据的输入说明	217
第二节	计算结果的输出说明	222
第三节	工程实例	229
附录	FSAP 的其他子程序	268
参考文献		271

绪 论

第一节 结构分析程序的发展与应用

随着电子计算机的飞速发展和广泛应用,有限单元法和相应的结构分析程序已成为工程结构数值分析的有力工具。特别是在固体力学和结构分析领域内,有限单元法和相应的结构分析程序已取得了巨大的进展,利用它们已成功地解决了一大批有重大意义的课题,很多通用程序和专用程序也已投入到实际应用中。目前,有限单元法仍是一个在快速发展的学科领域,它的理论、特别是结构分析程序的研发与应用方面的文献,经常而大量地出现在各种专著、教材和刊物当中^[1~15]。

有限单元法是以电子计算机为手段的“电算”方法,它以大型工程问题为对象,未知数的个数可以成千上万,因而为解决复杂的力学问题提供了一个有效的工具。掌握了这个工具,结构工程师就变得艺高胆大了。过去的一些计算难题现在已成为常规问题,过去不得已而采用的一些过于简化的计算模型已经为更加符合实际的复杂模型所代替。计算工作的高速度与高精度,使某些实验手段开始成为过时的东西;优化设计方法的发展使结构设计从单纯的验算过程变成为真正的设计过程;建筑结构 CAD(Computer Aided Design)的出现,使广大设计人员从繁琐的手工计算和绘图工作中解脱出来,这确实是设计工作中的一个飞跃。

从工程应用角度来看,在杆系结构方面,目前虽已有很多程序可供使用,但这些程序有的还停留在内力分析阶段,而按照我国现行建筑结构设计规范的有关规定,对钢筋混凝土结构构件在各种荷载作用下的内力进行最不利内力组合,然后进行配筋计算的程序还为数不多。杆系结构 CAD 方面的软件,目前国内应用较多的有 PKPM 系列、TBSA、广厦 CAD、GT Strudu、PSD(Plant Steel Design)等,但这些软件在应用中仍有一些不尽如人意的地方。例如,PKPM 用于火力发电厂主厂房的结构设计就存在很多问题;GT Strudu 及 PSD 等是从美国引进的软件,由于结构设计标准的不同,难以直接用于国内的工程结构设计。在非杆系结构方面,目前国内外虽然已编制了许多大型通用有限元程序,如 SAP、Super SAP、ADINA、ANSYS、ABAQUS 等,但这些大型通用程序由于其通用性,无所不包,因而也带来一些问题。例如,数据准备十分复杂,有些专门问题、新发展的课题,它们无法包括。所以,掌握结构分析程序的编制方法,根据不同的需要编制一些专用的、单项的小型结构分析程序是工程计算所必需的。而且,为了借鉴已有的许多程序,也需要学习程序设计的方法和技巧,这样才有可能读懂别人的程序,然后再移植、改造和增加新的功能。同时,为了推进计算机辅助设计的发展,要求结构分析进一步与工程结构数据库、网格自动剖分、图形处理、人工智能、专家系统、计算机绘图等相结合,而这些问题又更多地依赖于计算机程序设计的能力。

上述情况要求正在从事和即将参加工程建设的技术人员,特别是担负着开发和研究任

务的科学技术工作者,能够较好地掌握有限单元法的基本原理和程序设计方法,以便一方面能够有效地利用现有的成果和计算程序,另一方面能够具有改进现有计算方法和计算程序的能力,并为发展新的方法、编制新的结构分析程序,掌握必需的基础理论。

本书正是为了适应上述要求,为工科院校土建类专业高年级学生及硕士研究生学习钢筋混凝土结构分析程序设计提供一本教材,同时也可作为土建类专业的工程技术人员和教师的参考读物。

本书除了介绍杆系结构有限元程序的设计方法和编制技巧外,还对结构设计中的最不利内力组合和钢筋混凝土结构构件的配筋计算等内容的程序设计方法与编制技巧也作了详细介绍,虽然这部分内容已不属于有限单元法的内容,但进行结构设计则是必不可少的,因而这部分内容也是本书的重点和特点之一。

第二节 结构分析程序设计的一般方法和基本要求

一、结构分析程序设计的步骤和方法

编制一个结构分析程序,一般应遵循如下的一些方法和步骤。

(1) 提出问题,确定计算模型。根据工程需要将实际结构归结为某种结构计算问题,如杆系结构计算问题、弹性力学平面问题及空间问题等。

(2) 提出有关数学公式和力学公式。选择适当的计算方法,把有关数学、力学公式化成适于计算机解题的方法。

(3) 确定变量符号及其意义。变量名宜尽量采用数学、力学中或实际问题中相同或相近的名称,如 α 用 ALF 表示, θ 用 CT 表示,周期用 T 表示等。

(4) 绘制总框图。按照解决问题的流程,把想要编写的程序分成几个大的功能模块,原则性的指出计算过程的几个大的步骤,并将各功能模块用框图形式连接起来即构成总框图,以便有条不紊地编写程序。

对于钢筋混凝土框架结构分析程序,其总框图如图 1 所示。总框图中一些大的程序模块还可进一步细分为若干个子块,每一子块完成某一特定功能(参见图 1)。

(5) 用算法语言写程序。常用语言有 BASIC、FORTRAN 等。

(6) 上机调试。首先将已写好的程序输入计算机,进而检查所编制的程序是否符合语法规则,然后试算。这时往往用一个小题目,最好每一步都有结果核对。如试算正确,再用中型、大型考题考核,各种类型问题的考题都通过了,才能投入使用。

(7) 程序维护。一个程序投入使用后,还有不少维护工作。例如,继续考题,因编制一个程序,常常不可能把所有问题都弄清楚,难免有考虑不周之处,程序越大,这个问题就越突出。再就是扩充功能、改进方法等。

二、程序设计的基本要求

编制一个程序,特别是对于较大型的程序系统,一般应该达到以下几点基本的要求。

(1) 要保证程序的正确性,即程序应能如实地反映计算模型的要求。通常采用各种各样的考题来检验程序的正确性。

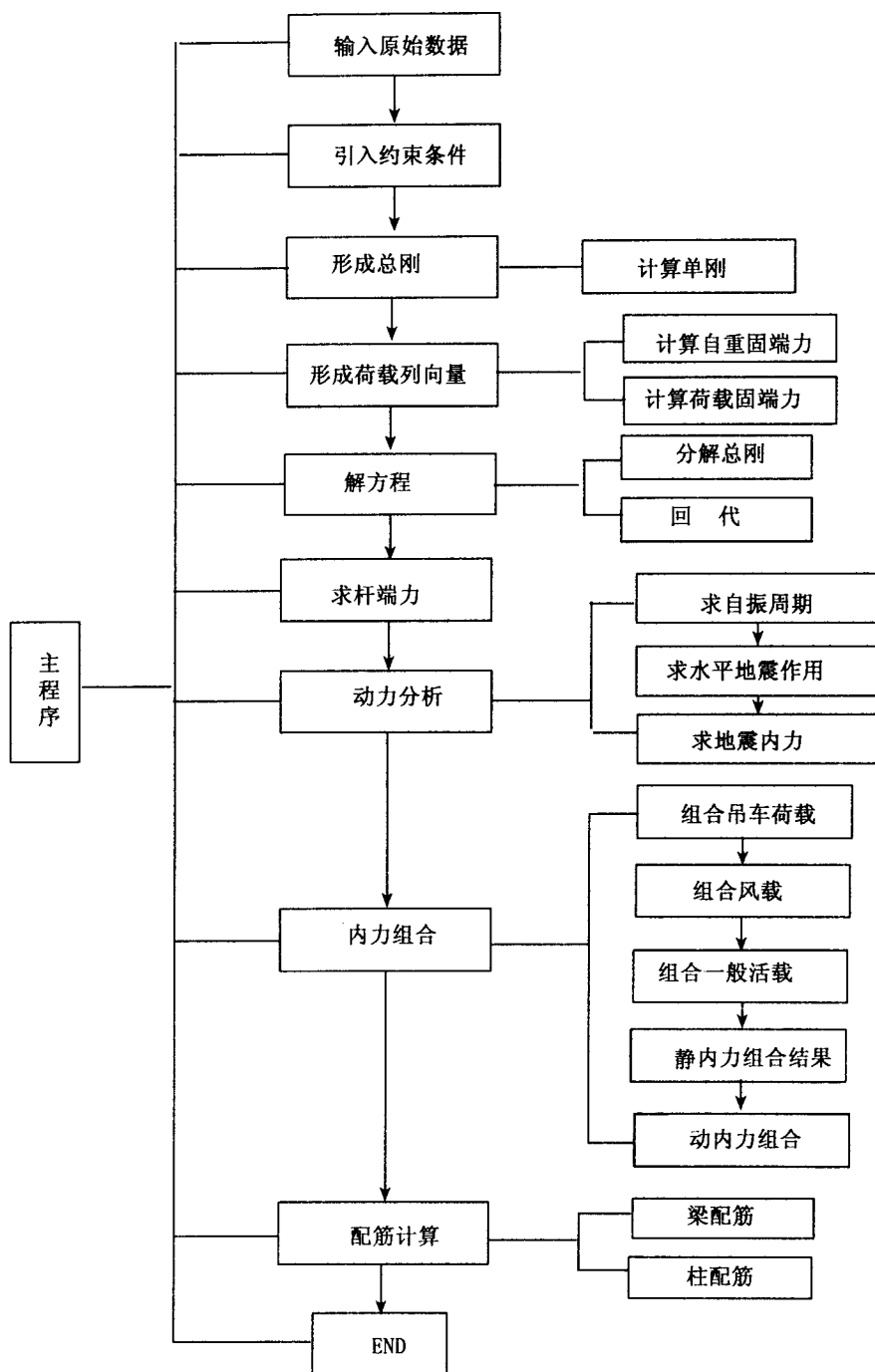


图1 钢筋混凝土框架结构分析程序总框图

(2) 要使程序具有高效率,加快运算速度,节约机时。作者在近几年编制和调试程序的

过程中,尝试了几种加快运算速度的技巧,现列出如下,供读者编程时参考。

① 能用加法的不用乘法,能用乘法的不用除法,能用乘法解决的不用乘方。

② 能放在循环体外计算的应尽量提到循环体外,从而消除重复运算,必要时设工作单元存放中间结果。

③ 能用一维数组的不用二维数组。因为一维数组的存取要比二维数组快得多。

④ 根据 FORTRAN 语言数组元素按列存放的特点,最左边的下标变化最快,因此,有关数组的运算,最内层的循环均设计成从第一个下标(即最左边的下标)开始,最外层的循环为最末一个下标。这样就大大节省了数组元素的存取时间。

⑤ 各程序块之间的数据传递宜采用开辟有名公用区即 COMMON 语句的方式。这是因为不同程序块之间利用公用区交换数据的速度要比虚实结合的方式快得多。

⑥ 对于在微机上运行的程序,为了充分利用内存,还可采用在主程序中开辟两个很大的公用数组(一个整型数组、一个实型数组),而将其他子程序中的数组则设计成动态数组,然后以数组元素作为实在变元,将主程序中的两个公用常界数组分段提供给各动态数组作为实元。

(3) 要使程序便于调试和维护。国外曾对一些大型程序的研制和使用周期所花的费用进行了调查,结果表明大约有 75% 的费用花在调试与维护上。从经验知道,大多数程序在交付使用后,总是在不断地进行修改和完善。因此,在程序设计中应很好地注意一个程序便于调试和维护的问题。这就要求在编制程序时,最好采用模块化结构,体现结构化程序设计思想。各模块间相互独立,每一个子程序只完成某一特定的功能,总体程序作为一个主程序和若干个子程序的集合体,子程序执行该程序的全部功能,主程序只是用来控制解题规模和求解进程。采用模块化程序结构,程序的来龙去脉清楚,段落层次分明,可读性强,既便于调试,又便于补充、修改或增加新的功能,从而避免“牵一发而动全身”的弊端。

程序的调试一般采用“自底向顶”的策略,即先调试各子块,重点放在一些影响大而复杂的关键模块上,如数据前处理、计算单刚、形成总刚、处理荷载及约束、解方程、特征值计算等,先对它们作相对独立的调试,然后再联调,当调试到顶(即调试到主程序)时,整个调试也就完成了。

第三节 结构分析程序的主要内容

任何一个用有限单元法编制的结构分析程序,一般都包括三个基本内容,见图 2。

一、数据输入阶段——前处理

数据输入阶段,通常也称为前处理,主要是输入计算课题所必需的原始数据和生成数据,以便形成有限元计算模型,如框架结构分析中的计算简图、弹性力学有限元法中的计算网格图等,为有限元矩阵的计算及其他计算作好准备。对于有限元计算程序,输入数据可归结为:

(1) 控制参数。它包括节点总数、单元总数、问题类型、材料组数、荷载组数等。控制参数用来控制解题范围、数组规模、循环语句的终止点和求解进程等。一般说来,程序的通用性越大,这类数据就越多。

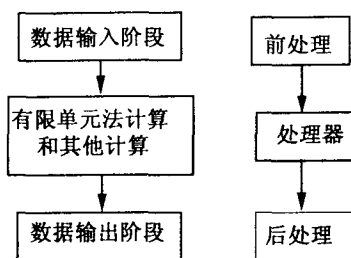


图 2 结构分析程序的基本内容

(2) 几何信息。确定结构的几何形状、单元的几何形状和结构的边界支承条件的数据统称为几何信息,它包括单元信息、节点坐标、边界约束信息等。

(3) 材料信息。输入单元的几何特性和物理特性,如截面尺寸、弹性模量或混凝土强度等级等数据。

(4) 荷载信息。输入每一个荷载作用的单元号或节点号及方向号、荷载值等。

(5) 其他信息。如抗震计算时需输入结构抗震等级、特征周期、重力荷载代表值的组合值系数等;配筋计算时梁的支座弯矩有时要考虑削减,因而需要输入支座弯矩削减信息等。

二、有限单元法计算和其他计算

这一阶段主要是计算单元刚度矩阵(简称单刚)、单元荷载列阵,再组集成整体刚度矩阵(亦称总刚度矩阵,简称总刚)、整体荷载列阵,然后进行求解。对于动力问题,还需计算质量矩阵、特征值及特征向量、自振周期等,还有荷载效应组合及配筋计算等。

三、数据输出阶段

数据输出主要包括两部分,一是输出原始数据,以便存档和核对;二是输出最终的计算结果,包括位移、单元内力或应力等,对于动力问题一般输出特征值、特征向量和自振周期等;配筋计算时输出最不利组合内力和相应的钢筋面积及配筋率等,抗震验算还要输出地震组合的最不利内力及配筋结果、轴压比等。有时为了检查计算过程中的问题,常需设计一些中间结果的输出语句。例如,节点位移未知量编号数组,单刚、总刚等。另外,当解方程溢出时,常输出结构刚度矩阵的主对角元等。这种类型的输出,在调试程序时会设计得多一些,一旦程序被证实是正确的,就可以减少,甚至完全取消。

目前,后处理的发展很快,主要增加了图形输出,如计算简图、网格图、内力图或应力图、振型图和结构施工图等。

第一章 框架结构内力分析程序的编制原理

第一节 概 述

有限单元法(Finit Element Method)是20世纪50年代中期发展起来的,它是电子计算机时代的产物。电子计算机为这一方法提供了特殊的方便,而电子计算机的发展,又使这一方法得到了广泛的应用。利用有限单元法及相应的电子计算机程序进行结构的设计计算,引起了结构分析领域的深刻变化,它比之原有的结构分析方法具有速度快,精度高,便于解决复杂的、大型的难题的优点。进入20世纪80年代以后,由于微机在我国的普及,使得这一方法应用得更加广泛。目前几乎所有的工程设计单位和每一个工程师都熟悉并乐于采用这一方法来解决工程结构的分析计算问题。

本章结合作者编制的框架结构分析程序FSAP(Frame Structures Analysis Program),简要介绍平面杆系结构有限元法的基本原理和求解步骤。

用有限元法对平面杆系结构进行分析时,通常采用位移法,即把各节点的位移作为基本未知量来求解。平面框架中的每一刚节点都有三个未知位移(水平线位移 u ,竖向线位移 v ,转角位移 θ)。有的铰结点则有四个或四个以上的位移(二个线位移 u 和 v ,各杆端的转角位移 $\theta_1, \theta_2, \dots$)。在一般的结构力学位移法中,常常不考虑杆件的轴向变形,以便减少未知位移的数目,达到简化计算的目的。在有限元法中,为了提高计算的精度,而又不增加太多的计算时间,特别是为了增加程序的通用性,往往是把轴向变形也考虑进去的。

用有限单元法求解平面框架结构时,首先把整体结构离散成有限个单元(杆件),这些单元以有限个节点相联结,承受着等效节点荷载(直接作用于节点的荷载和由单元荷载移置到节点的荷载),再根据节点的变形协调条件,建立节点的静力平衡方程,通过求解线性方程组得到所有节点的位移,最后再由节点位移求得各杆端的内力,进而求出杆中各截面的内力。这就是有限元法分析平面框架的基本思路,其具体内容可归结为:

(1) 结构离散化,对单元和节点进行编号,即确定有限元计算简图。

(2) 确定节点位移未知量编号 $\{\Delta\}$,同时引入约束条件。

(3) 计算单元刚度矩阵 $[k]$ 。

(4) 组装整体刚度矩阵 $[K]$ 。

(5) 组装整体荷载列向量 $\{F\}$ 。

(6) 解方程求位移。

(7) 计算杆件内力。

(8) 动力分析,包括特征值和特征向量及自振周期计算、水平地震作用计算、地震内力分析等。

结构设计时,还需根据现行结构设计规范的有关规定,对已求得的内力进行最不利内力组合和配筋计算等。

第二节 平面杆系结构有限元法的基本原理及求解步骤

一、平面杆系结构有限元法的基本原理

在有限单元法进行结构分析时,首先要将结构离散化,即把整体结构作为有限个单元的集合体来考虑。平面框架结构由梁和柱所组成,因而把梁和柱作为单元是很自然的。如图 1-1 所示的平面框架,是由 2 根梁和 4 根柱用 4 个节点联结而成的,这些单元和节点按照一定的原则进行编号。在外荷载的作用下,各节点产生位移 u_i 、 v_i 、 θ_i 。用位移法进行分析时,首先用一些链杆和刚臂把所有的线位移和角位移加以约束,使之成为“固定状态”。固定状态在外荷载作用下,在节点处不产生任何位移。但链杆和刚臂这些附加约束却产生了约束反力 X_{gi} 、 Y_{gi} 、 M_{gi} 。这些约束反力可以由两端固定杆(在 FSAP 程序中将两端固定杆作为基本杆件)在相应荷载作用下用载常数表求得。由于原结构上并没有这些约束力,因此必需在各节点上再作用与约束反力大小相等方向相反的“放松力” X_{fi} 、 Y_{fi} 、 M_{fi} ,借以取消这些约束,恢复其原有的节点位移。这样一来,原结构就变成了“固定状态”与“放松状态”的叠加。

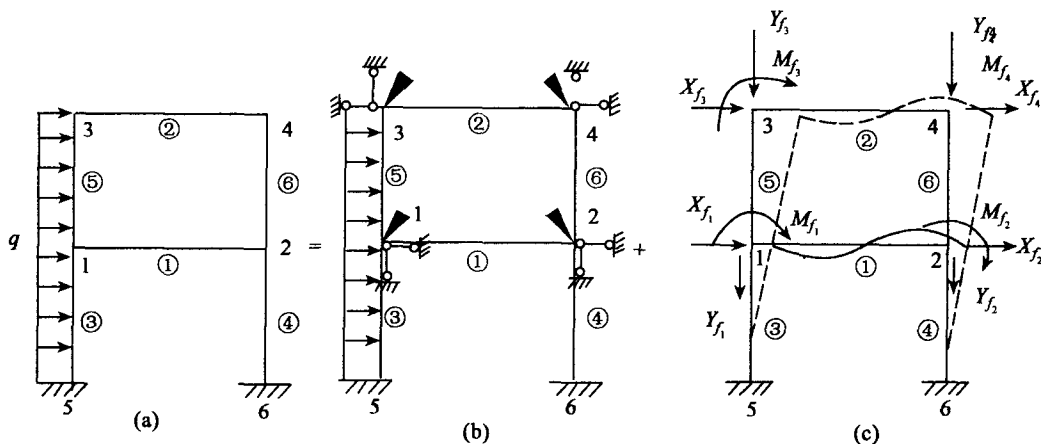


图 1-1 有限元法计算原理

对于固定状态的计算,由于所有的位移都被控制,所以基本杆件都是两端固定杆,各杆固端力可查载常数表求得,再由节点平衡条件求得各节点的约束反力 X_{gi} 、 Y_{gi} 、 M_{gi} 。

对于放松状态,所有的放松力(亦称等效节点力) X_{fi} 、 Y_{fi} 、 M_{fi} 都作用在节点上: $X_{fi} = -X_{gi}$, $Y_{fi} = -Y_{gi}$, $M_{fi} = -M_{gi}$ 。汇交于节点上的各单元的杆端位移是相同的,即满足变形协调条件;而各杆端对节点的作用力的总和也应与作用在节点上的放松力大小相等、方向相反,即满足力的平衡条件。如果能够建立杆端位移和杆端力的关系,就可以建立以节点位移为未知量的力的平衡方程组,平衡方程的个数等于结构所有节点位移的总数,通过求解方程

组就能得到各节点的位移。反之,根据变形协调条件,求得了节点位移,亦即求得了杆端位移,再利用杆端位移与杆端力的关系,就能求得各杆的杆端力。

最后,把放松状态与固定状态的杆端力叠加起来,就得到了原结构的杆端力,根据杆中荷载的情况还可进一步求出各截面的内力;而放松状态下各节点的位移即是原结构的节点位移。

这里,问题的关键在于两个方面,一是如何建立杆端力与杆端位移的关系,二是如何建立各节点的平衡方程,这将在后面加以说明。

如上所述,平衡方程的个数等于结构的所有节点位移的总数,也就是结构的总自由度数。简单的结构自由度数仅几个,复杂的结构则有几十、几百个乃至上千个。这样的线性方程组,用手工的方法求解显然是十分困难的,甚至是不太可能的。如用电子计算机则可以在短时间内解出。因此,有限单元法是以计算机的应用为前提的。

二、有限元法的求解步骤

无论对什么样的结构,有限元分析过程都是程序化了的,其典型的求解步骤如下。

1. 离散化——确定有限元计算简图

首先将结构的梁、柱离散为有限个单元的集合体。对于杆系结构,通常采取自然离散的形式,就是把结构的梁、柱作为单元,梁、柱的交点取为节点,然后对单元和节点进行编号,同时选定坐标系和内力及位移的符号。

(1) 单元及节点编号

编号是按单元和节点分别进行的,既不能遗漏,也不能重复。为了与节点编号相区别,单元号外面加上小圆圈。图 1-2 所示框架共有 15 根杆件,一根杆件作为一个单元,因此,单元编号从①号编到⑮号;在它的 12 个节点中,有 3 个为支座节点,且为固定端。节点编号既可从支座节点开始进行编号,亦可将支座节点编号放在最后。

在进行单元和节点编号时,应按一定的次序进行。对于单元编号,为了配筋计算方便,FSAP 程序约定:先编梁,后编柱,最后编刚性杆。同类杆(例如梁)一般说来编号次序可以任意,但为了避免出错,可按“从左至右,自下而上”的顺序进行编号(参看图 1-2)。

对于节点编号,原则上应该使相邻节点的最大“节点号差”尽可能地小。因为相邻节点的节点号差越大,总刚度矩阵的带宽就越大,所需的存储容量也就越大。所谓带宽是指总刚度矩阵每一行中最左非零元素到该行主对角元素之间(包括它们自身)的元素个数,称为该行的半带宽,简称带宽。例如,式(1-1)所示的 6 阶总刚度矩阵,各行的带宽分别为 1、2、3、2、1、4。

$$[K] = \begin{matrix} & \text{带宽} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 2 \\ 1 \\ 4 \end{matrix} & \left[\begin{array}{cccccc} 4.5 & & & & & \\ 0.2 & 5.3 & & & & \\ -1.3 & 0 & 10.2 & & & \\ 0 & 0 & 5.1 & 8.4 & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.6 & \\ 0 & 0 & -1.7 & 0 & 0 & 3.1 \end{array} \right] \end{matrix} \quad \begin{matrix} \\ \\ \\ \text{对称} \\ \\ \end{matrix} \quad (1-1)$$

总刚度矩阵的最大带宽与相邻节点的最大节点号差有关(支座除外),而每个节点有 3

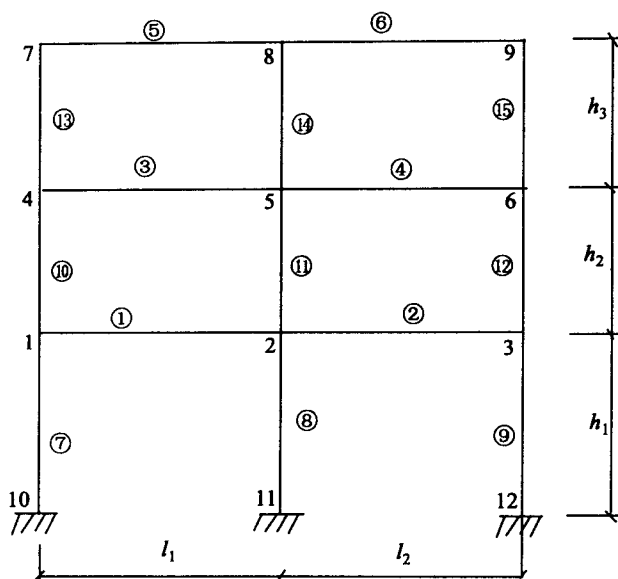


图 1-2 框架结构有限元计算简图

个平衡方程,故总刚度矩阵的最大带宽可按式确定:

$$m = 3(d + 1) \quad (1-2)$$

式中 d ——相邻节点的最大节点号差。

带宽小的总刚度矩阵,非零元素集中在主对角线两侧;带宽过大,不仅浪费存储单元,有时还会影响计算精度。对于图 1-3 所示框架,图 1-3(a)所示的节点编号较好,图 1-3(b)的节点编号则较差,这可从各自对应的总刚度矩阵看出(参看式(1-3)和式(1-4))。在式(1-3)及式(1-4)中,“ $\times$ ”表示非零元素,它们是 3×3 的子阵,因为每个节点有 3 个平衡方程;“ $\circ$ ”表示经运算后可能变为非零的零元素;空格表示零元素。对于图 1-3(a), $d = 2$,故 $m = 9$;对于图 1-3(b), $d = 5$,故 $m = 18$ 。当总刚采用变带宽一维压缩存储时,图 1-3(a)及图 1-3(b)需要存储的总刚元素个数分别为 117 及 135 个。可见,图 1-3(a)的编号,相应的总刚度矩阵的带宽较小,所需的内存数也较少。

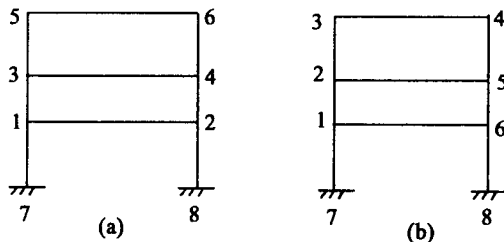


图 1-3 同一框架结构两种不同的节点编号方式

根据前述节点编号原则,且为了方便实际应用,节点编号一般可按下列规则进行:

节点号	1	2	3	4	5	6
1	X	X	X			
2	X	X	○	X		
3	X	○	X	X	X	
4		X	X	X	○	X
5			X	○	X	X
6				X	X	X

(1-3)

图 1-3(a) 对应的总刚度矩阵

节点号	1	2	3	4	5	6
1	X	X				X
2	X	X	X		X	○
3		X	X	X	○	○
4			X	X	X	○
5		X	○	X	X	X
6	X	○	○	X	X	X

(1-4)

图 1-3(b) 对相应的总刚度矩阵

当层数 $\geq$ 跨数时,可按“从左至右,自下而上”的顺序编号(图 1-4(a));

当层数 $<$ 跨数时,可按“自下而上,从左至右”的顺序编号(图 1-4(b))。

(2) 坐标系的选择

为讨论问题的需要,需要建立两套坐标系,第一套坐标系是联系整个结构的整体坐标系,通常把水平、竖直方向的两条直线分别取作整体坐标系的 x 轴和 y 轴,坐标原点可任意取,如图 1-5 所示。由于外荷载的作用方向一般是向下的,故本书及 FSAP 程序中取 y 轴向下为正。另一套坐标系是属于每个单元的局部坐标系,它的 $\bar{x}$ 轴和杆轴重合,并按顺时针方向转 90° 的规则定出 $\bar{y}$ 轴。确定了单元的局部坐标系,也就确定了单元的始、终节点号,例如图 1-5 中的 $\{\bar{o}_1 \bar{x}_1 \bar{y}_1\}$ 是①号单元的局部坐标系,其坐标原点 $\bar{o}_1$ 与节点 1 重合; $\{\bar{o}_9 \bar{x}_9 \bar{y}_9\}$