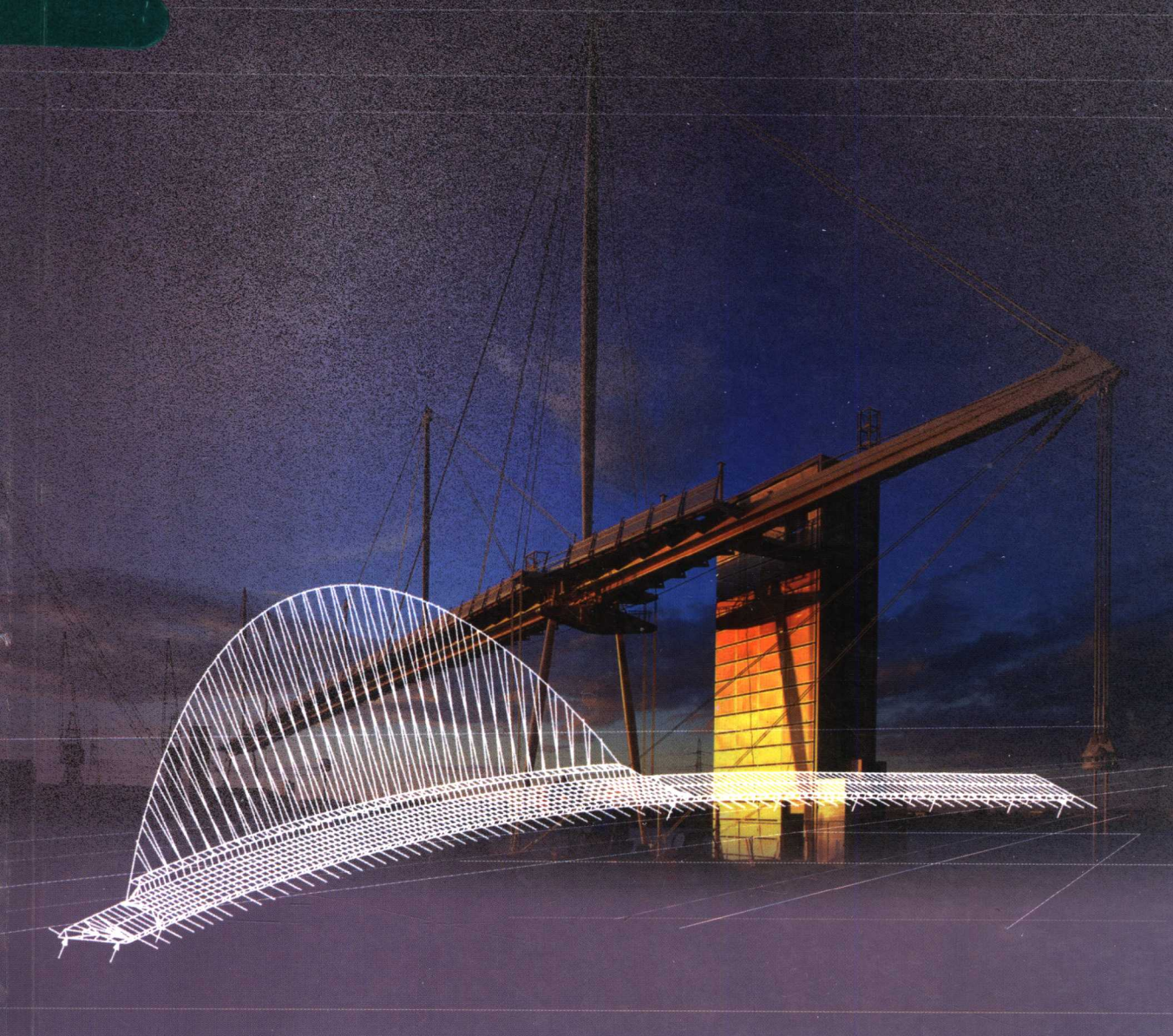




桥梁结构分析方法及 LUSAS软件实现（基础篇）

主 编 汪劲丰
副主编 吴光宇

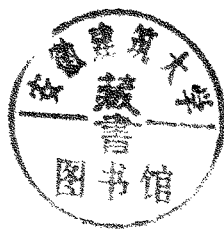
U443/16

:1

2007

桥梁结构分析方法及 LUSAS 软件实现 (基础篇)

主 编 汪劲丰
副主编 吴光宇
编著者 汪劲丰(浙江大学)
吴光宇(南昌大学)
王金昌(浙江大学)
宋 雨(厦门大学)
陈页开(华南理工大学)
亓兴军(山东建筑大学)
廖 娟(浙江大学城市学院)
康俊涛(武汉理工大学)
陈 伟(石家庄铁道学院)
程晓东(杭州市城市基础设施建设发展中心)



浙江大學出版社

图书在版编目(CIP)数据

桥梁结构分析方法及 LUSAS 软件实现. 基础篇/汪劲丰
主编. —杭州:浙江大学出版社, 2007. 9
ISBN 978-7-308-05574-1

I. 桥... II. 汪... III. 桥梁结构—结构分析—应用软件,
LUSAS IV. U443-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 148624 号

桥梁结构分析方法及 LUSAS 软件实现(基础篇)

汪劲丰 主 编
吴光宇 副主编

责任编辑 石国华
封面设计 宋纪浔
出版发行 浙江大学出版社
(杭州天目山路 148 号 邮政编码 310028)
(网址: <http://www.zjupress.com>)
排 版 星云光电图文制作工作室
印 刷 富阳市育才印刷有限公司
开 本 787mm×1092mm 1/16
印 张 18.75
字 数 468 千字
版 次 2007 年 9 月第 1 版 2007 年 9 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-308-05574-1
定 价 38.00 元

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换
浙江大学出版社发行部邮购电话 (0571)88072522

前 言

随着计算机技术和数值计算方法的进步,有限元方法已经发展成为土木工程领域中一门不可或缺的技术,同时也是科技工作者进行科学研究的有力工具,学习并掌握有限元分析技术对今后的学习及工作非常有益。由于 LUSAS 软件兼具通用软件和桥梁专用软件的分析功能,已在欧美众多大型桥梁上使用过,且操作简单、方便易学,因此将其作为本书的教学软件。

本书是为土木工程专业学生学习有限元方法而编写,也可作为 LUSAS 软件初学者的参考书。在内容安排上,将理论方法和软件应用紧密结合,以增加读者的感性认识,更好地理解有限元理论。

本书的内容共分十二章,前面两章主要讲述桥梁结构分析及有限元方法的基础知识;第三章至第六章分别讲述了连续体的平面问题、空间问题及杆系结构分析的有限元方法,每章均包括基本理论、有限元方法及 LUSAS 算例等三部分;第七章至第十一章重点介绍了桥梁结构分析中各种效应(如温度、收缩、徐变、预应力、活载及分阶段施工等)的具体计算方法;第十二章主要介绍了如何用 LUSAS 软件进行分阶段施工桥梁的模拟分析。建议读者在学习过程中,将理论学习与软件使用相结合,多操作、多实践,这对提高分析实际问题的能力,会大有帮助。

英国 FEA 公司(LUSAS 软件)及杭州劲创科技发展公司,为本书的写作提供了大量技术资料,在此表示衷心感谢。读者可从网站(<http://www.lusas.com> 或 <http://www.lusas.net>)下载 LUSAS 软件的试用版,供学习使用。

由于编者水平有限,时间仓卒,书中难免有许多缺点甚至错误,热忱欢迎专家和读者批评指正。

编者

2007 年 9 月

目 录

第一章 绪 论

- 1.1 桥梁结构分析..... (1)
- 1.2 桥梁上的作用及其组合..... (6)
- 1.3 本书的内容和目的..... (8)

第二章 有限元法基础知识

- 2.1 能量原理..... (9)
- 2.2 矩阵及运算..... (12)
- 2.3 线性代数方程组求解方法..... (17)
- 2.4 本章小结..... (28)

第三章 有限元法及 LUSAS 软件

- 3.1 概 述..... (29)
- 3.2 有限元法基本过程..... (29)
- 3.3 LUSAS 软件介绍 (38)
- 3.4 LUSAS 基本操作 (41)
- 3.5 LUSAS 应用举例——2D 框架的线性分析 (53)
- 3.6 本章小结..... (62)

第四章 平面问题的有限单元法

- 4.1 基本理论..... (63)
- 4.2 三角形单元..... (70)
- 4.3 矩形单元..... (77)
- 4.4 单元元素矩阵..... (79)
- 4.5 整体分析..... (82)
- 4.6 等效节点力..... (85)
- 4.7 LUSAS 算例 (90)
- 4.8 本章小结 (102)

第五章 空间问题的有限单元法

5.1 基本理论	(104)
5.2 四面体单元	(109)
5.3 四面体单元元素矩阵	(114)
5.4 空间轴对称问题及三角形环单元	(117)
5.5 LUSAS 算例	(126)
5.6 本章小结	(136)

第六章 杆系结构的有限单元法

6.1 概 述	(138)
6.2 直梁基本理论	(139)
6.3 等截面直梁单元分析	(140)
6.4 等截面直梁单元整体分析	(146)
6.5 空间杆件系统	(148)
6.6 等效节点力计算	(151)
6.7 LUSAS 算例	(154)
6.8 本章小结	(166)

第七章 杆系结构预应力效应分析

7.1 概 述	(168)
7.2 预应力效应的三种概念	(169)
7.3 预应力效应分析方法	(170)
7.4 预应力的等效荷载计算	(175)
7.5 LUSAS 算例	(177)
7.6 本章小结	(184)

第八章 杆系结构收缩徐变效应分析

8.1 概 述	(185)
8.2 徐变基本理论	(186)
8.3 徐变效应分析的有限单元法	(190)
8.4 混凝土收缩分析理论	(194)
8.5 杆系结构收缩徐变效应的有限元分析方法	(196)
8.6 LUSAS 的收缩徐变效应分析算例	(198)
8.7 本章小结	(205)

第九章 杆系结构温度效应分析

9.1 概 述	(206)
---------------	-------

9.2 温度场分析理论	(207)
9.3 温度作用效应的计算方法	(217)
9.4 杆系结构温度效应的有限元分析法	(219)
9.5 LUSAS 温度场分析算例	(221)
9.6 LUSAS 温度效应分析算例	(230)
9.7 本章小结	(235)
第十章 活载效应分析	
10.1 概 述	(236)
10.2 活载效应分析理论	(236)
10.3 影响面分析理论	(238)
10.4 LUSAS 软件的自动布载功能介绍	(243)
10.5 LUSAS 算例	(247)
10.6 本章小结	(255)
第十一章 分阶段施工过程分析	
11.1 概 述	(256)
11.2 正装分析法	(257)
11.3 倒拆分析法	(261)
11.4 LUSAS 分阶段施工算例	(263)
11.5 本章小结	(275)
第十二章 LUSAS Bridge 在桥梁分析中的实际应用	
12.1 概 述	(276)
12.2 建 模	(277)
12.3 运行分析	(290)
12.4 查看结果	(290)
12.5 本章小结	(291)
主要参考文献	(292)

第一章 绪 论

对于现代桥梁结构,基于有限元法的数值分析技术是了解结构受力特性的重要途径,可为桥梁结构的设计及评估提供更为科学的依据。许多大型通用和专业有限元分析软件的出现,使得有限元方法在桥梁结构分析中得到非常广泛的应用,这不仅极大地提高了分析效率,而且确保了分析结果的准确性和可靠性。

本章从桥梁结构分析的基本内涵、数值方法、常用软件等方面进行综述,以使读者对桥梁结构分析及其基本方法有个全面的认识。其中,本章第二节对桥梁上的作用和作用组合的概念进行了介绍,为后续相关章节内容的理解奠定基础。

1.1 桥梁结构分析

桥梁结构作为一个系统,人们对其有众多方面的要求,如美观程度、工程造价、交通地位、技术条件及受力性能等。就结构受力而言,主要有强度、刚度及稳定性等三类评价指标方面的规定。在设计阶段,是要根据拟定的工作条件和指标范围来确定系统的结构及其组成;在运营阶段,是要根据实际的工作条件及系统结构来计算各评价指标值,以评定桥梁的技术状况。所以,不论是目前的结构设计还是将来的状态评估都离不开桥梁结构分析工作。近现代桥梁结构的快速发展与桥梁结构分析技术的发展密不可分。

1.1.1 基本内涵

桥梁结构分析是确定已知条件、建立结构物理力学模型并运用相应的分析理论和方法进行计算,最后对计算结果进行判断和审核的这样一个复杂过程。

结构分析的已知条件包括自然环境、技术标准和结构设计三个部分。自然环境是指桥址处的气象、水文及地质等,对于具体的桥梁结构,自然环境是客观存在的。技术标准是由主管建设部门通过全面统筹考虑,作为设计任务书的内容下达的,一般包括荷载等级、行车速度、车道布置及车道数等,技术标准带有一定主观性,同人为决策有关。结构设计是指具体的结构组成、构造尺寸、建筑材料及支承条件等。风荷载、地震作用、年温差等一般是由自然环境确定;结构局部温差则由外界环境和结构构造共同决定;车辆荷载由相应技术标准决定;自重荷载由结构的具体设计确定。

建立分析模型是将复杂的桥梁结构系统简化为目前可解的力学问题的过程,它是结构分析工作的关键步骤,分析模型与分析方法是相互对应的。对此,一般要求根据拟定的已知条件和已有的分析经验,在认真分析结构复杂程度及具体的分析目的基础上,综合确定结构模式、边界条件及工作状态等。如采用有限元方法对某一混凝土桥梁结构进行分

析时,若分析是为进行配筋设计,杆系模型即可满足要求;若要了解整体空间受力情况,可建立板壳单元模型;若进行局部受力分析,则要用三维实体单元进行结构建模。

结构分析中对计算结果的审核和判断包含两个方面:一是计算结果本身正确与否的判断;二是计算结果是否满足相应的指标要求,如强度、刚度、稳定性等。计算结果正确与否主要同选用的分析模型及分析方法有关,对此的分析判断是结构分析工作中非常重要的一个环节,绝不可忽略,一般要求分析者具有扎实的力学和结构设计理论基础。计算结果是否满足指标要求,则主要是依据相应的国家标准和技术规范进行判断。

桥梁结构分析的基本过程如图 1.1 所示。

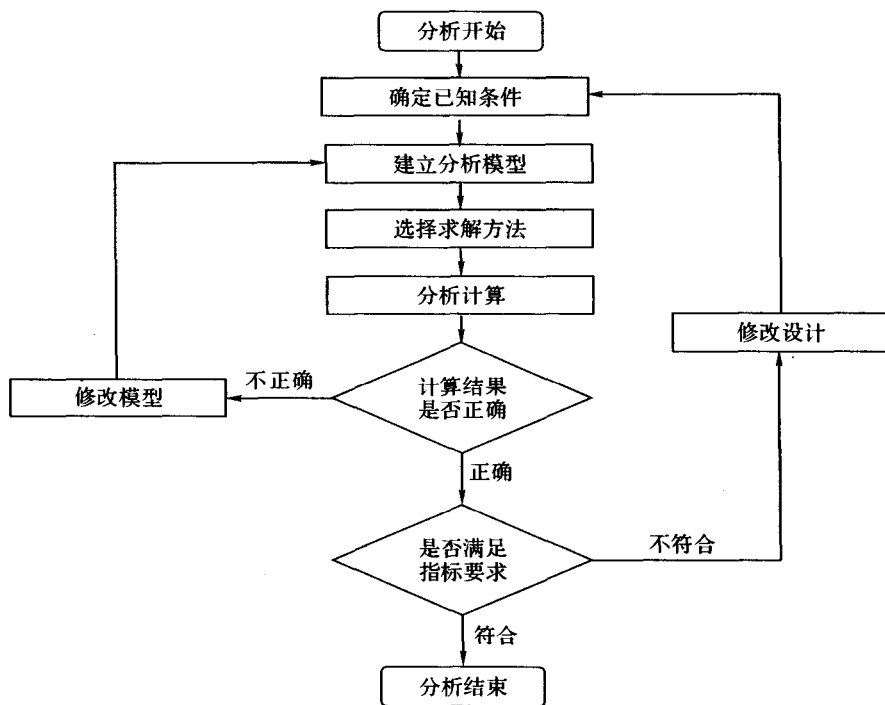


图 1.1 桥梁结构分析的基本过程

在常规的桥梁结构分析中,基本上都是基于线弹性假定的,叠加原理适用,这也是大部分设计分析工作所遵循的假定。而对于大跨、复杂桥梁结构的受力分析,最显著的三个特点是非线性、时间依存性和规模庞大,这直接决定了桥梁结构分析计算工作量大、技术难度高。

1.1.2 问题种类

桥梁结构的计算分析一般包括静力分析、动力分析、稳定性分析和疲劳分析等。

(1) 静力分析

静力分析的任务是计算在固定不变的载荷作用或可以近似为等价静力作用的随机荷载作用下结构的效应,它不考虑惯性和阻尼的影响。静力分析中要求载荷作用点恒定、加载速度缓慢或者为零、加载量值缓慢变化或保持恒定。

静力分析是整个结构分析工作的基础,也是我们最为熟悉的问题。一般包含三个层次的分析,即全桥结构的整体分析、主要构件的结构分析、复杂细节和局部构造的结构分析。对于桥梁结构,主要有:施工过程计算、活载效应分析、静风效应分析、局部受力分析、二次效应分析等。

(2) 动力分析

与静力分析相对,动力分析是计算结构对于随时间变化的荷载所产生的响应,包括振动特性和动力响应分析。如车桥耦合振动、风荷载响应、地震响应等的分析均属于动力分析的范畴。

(3) 稳定性分析

稳定问题是桥梁工程中经常遇到的一个问题,与强度问题有着同等重要的意义。结构失稳是指结构在外力增加到某一量值时,稳定性平衡状态开始丧失,稍有扰动,结构变形迅速增大,使结构失去正常工作能力的现象。结构稳定性分析实际上就是寻求失稳荷载的过程。

结构失稳共有两种形式:第一类稳定为分支点失稳,第二类稳定为极值点失稳问题。第一类稳定问题是特征值问题,第二类问题是极限承载能力问题。两类稳定问题的求解思路相同,但分析问题的深度不同,两者都是结构在失稳荷载作用下的切线刚度矩阵奇异,导致平衡方程有无数多个解,从而结构处于一种不稳定的状态。但第一类稳定问题假定结构失稳前小变形、材料线弹性,而第二类稳定问题则考虑了结构的材料非线性和几何非线性,实际工程中的稳定问题一般多表现为第二类失稳。

(4) 疲劳分析

疲劳分析主要是针对钢结构而言的。疲劳现象是钢材在反复荷载和由此引起的脉动应力作用下,由于其内部缺陷或疵点处局部微细裂纹的形成和发展直到最后发生脆性断裂的进行性破坏过程。钢材的疲劳破坏不同于局部拉应力高峰所造成的脆断破坏,它是拉应力、压应力反复作用和塑性损伤累积的结果。

1.1.3 数值方法

在工程技术领域中,有许多力学问题或场问题(温度场、电磁场),虽然人们已经得到了它们的基本方程和边界条件,但是能用解析方法求解的仍只是少数问题,而绝大多数工程问题没有解析解。这类问题的解决通常有两种途径:一种是引入简化假设,使达到能用解析法求解的地步,求得问题在简化状态下的“解析解”,这种方法并不总是可行的,不恰当的假定,通常将导致不正确的解析解。另一种途径是保留问题的复杂性,利用数值计算方法求得问题的近似数值解。

随着电子计算机的飞速发展和广泛应用,对于桥梁结构的计算分析,多采用离散化的数值分析方法,即在已建立的物理模型和数学模型的基础上,采用一定的离散化的数值方法,用有限个未知量去近似待求的连续函数,从而将微分方程问题转化为代数方程问题,并利用计算机求解。在固体力学领域应用最广泛的数值方法是有限元法,可用于复杂形状和非均匀物性的力学问题的求解。其他数值方法还有有限差分法、边界元法、有限条法等。前者的特点是直接对微分方程进行离散,但尚不能用于复杂几何形状的力学问题的

求解。后两者区别于有限元法的是分别只在边界上或域内某些方向上离散,而在域内或域内其他方向上仍解析地满足微分方程,从而使未知量减少,可方便地应用于一定类型的问题。

1.1.4 分析软件

有限单元法是最常用、最广泛的桥梁结构数值分析方法,在此所论述的分析软件是指有限元分析软件。

有限元分析方法属于大型数值计算方法,要求有一定的软件和硬件支持。硬件部分即电子计算机。近些年随着计算机运行速度及存储容量的不断增长,有限元方法的分析计算规模不断增大,速度不断加快,其实际分析能力得到了很大的增强。软件部分即目前种类繁多的通用和专用有限元分析软件,一般包含三个基本模块:前处理、求解器及后处理等,其中求解器是软件的核心。桥梁专用程序与通用有限元分析程序是使用范围不同的两种分析工具。

(1) 通用软件

对于桥梁结构分析而言,通用程序主要用于对特定桥梁结构做某一特定目的的分析,如空间受力的整体分析、局部效应分析及动力性能分析等。它可以处理各类桥型繁琐、复杂的分析,但建模过程较为复杂繁琐,且一般只用于激励到响应的正问题分析。

目前常用的通用有限元软件均为国外开发的,主要有 ANSYS, ABAQUS, SAP2000, MARC, ADINA, DIANA, NASTRAN, DASAULT 等。可以说,每个通用软件都有其优缺点,如 ANSYS 软件的建模方便, SAP2000 便于初学者使用, ABAQUS 支持用户功能的二次开发, MARC 的非线性分析功能强大等。以下对使用相对较多的软件进行简要介绍。

ANSYS 是世界著名的有限元分析软件,由美国 SWANASON 分析公司开发研制,为用户提供了 100 多种单元,具有完善的前后处理功能,可以方便地进行有限单元的网格划分。它的功能能够满足有限元分析中的大部分需要,被广泛应用于电子技术、核工业、铁道、石油化工、航空航天、机械制造、能源、汽车交通、国防军工、电子、土木工程、造船、生物医学、轻工、地矿、水利、日用家电等行业的科学研究,是目前中国高校在科学研究方面应用最广泛的通用有限元软件。

ABAQUS 是一种功能强大的有限元分析软件,在通用有限元软件中占有非常重要的位置。从简单的线弹性问题到复杂的几何非线性问题均获得了广泛应用,其有效性不论是在工程应用还是在科学研究方面均得到了验证。ABAQUS 包含了丰富的单元库和材料库,能够模拟各种材料受力和变形行为,特别是其提供了 UMAT(用户材料)和 UEL(用户单元),为研究者提供了开发平台。

SAP2000 是美国计算机和结构公司(CSI)研制的工程分析通用有限元程序系统,在国外是最受用户欢迎的大型通用有限元程序之一,该系统广泛用于建筑土木工程领域,该程序技术先进、功能选项完善、灵活性大,实用性很强,具有参数化、运算、条件判断处理能力。其使用操作也简单易学,一旦用户进入 SAP2000,只需按逻辑运行所要的功能进行操作即可。

MARC 软件是处理高度组合非线性结构、热及其他物理场和耦合场问题的高级有限元软件,由 MARC 公司(MARC Analysis Research Corporation)生产。MARC 公司是全球第一家非线性有限元软件公司,在非线性有限元软件行业中名列前茅。1999 年 6 月,该公司被 MSC 公司收购。

ADINA 软件是由美国麻省理工学院研制开发的,它的最大特点是具有十分丰富的材料库,可以处理各种各样的材料非线性问题。例如,在它所提供的混凝土模式中,可考虑混凝土在拉伸与压缩时有不同的性能,以及拉断、压碎和软化等现象。

NASTRAN 是世界最著名、最可靠的大型通用结构有限元分析软件,是由美国宇航局开发研制的。它是集几何访问、有限元建模、分析及数据可视化于一体的新一代框架式软件系统,特别是提供虚拟应变片测量,即提供直接贴到有限元分析模型上的虚拟应变片,可读出此应变片各方向的应力与应变,从而方便实验与分析结果的对比。此外,程序还提供了开放式用户开发环境和 DMAP 语言及 10 余种 CAD 接口,以满足用户的特殊需要。

(2) 专用软件

桥梁专用程序紧密结合桥梁设计分析需要,不仅可用于分析桥梁结构在施工过程中的性能,并能实现对桥梁结构特有的预应力及徐变、活载效应的分析,而且还能用于确定桥梁成桥内力状态等反问题的分析,如斜拉桥调索、施工阶段拉索的初始张力、预应力布束优化、预拱度设置等。桥梁专用程序使用方便,易于和 CAD 技术相结合,注重于解决桥梁设计中的共性问题。

对于桥梁结构分析,专用软件种类很多,国外开发的主要有 LUSAS Bridge, TDV, Midas 等;国内开发的主要有 GQJS, Dr. Bridge 等。其中 LUSAS 和 TDV 已被众多国际著名顾问公司用于大型桥梁的设计与评价,Midas, Dr. Bridge 及 GQJS 是目前我国桥梁结构设计分析中应用最多的软件,对推动我国桥梁建设事业的发展具有重大意义。

TDV RM2006 是基于杆系理论的 2D 和 3D 框架分析系统,通过类似于 CAD 的前处理器实现 3D 结构的模拟功能,可直接定义桥梁结构的平曲线和竖曲线,可实现三维空间与关联时间轴的 4D 分析计算。该软件几乎适用于所有桥型和常见施工顺序的模拟分析,且提供了十多种桥梁设计标准下的正常使用和极限承载状态分析与验算,如欧洲标准、奥地利、德国、英国、美国、日本、韩国、澳大利亚、印度、中国现行公路规范等。TDV RM2006 除具备常规的静力分析、动力与稳定分析功能外,还有索力优化、非线性效应、组合结构分析等功能,是与桥梁结构设计与施工结合得最为紧密的杆系类分析软件。

LUSAS(London University Stress Analysis System)软件能为各种线性和非线性的应力、动力及温度场分析问题提供准确的解决方案,由保罗·里昂(Paul Lyons)博士主持开发,它包括多种商业产品,其中 LUSAS Bridge 最为著名。LUSAS Bridge 提供了非常丰富的单元类型及本构模型,能满足各种桥梁结构的初端及高端分析要求,能模拟各种施工顺序;包含多种桥梁设计标准;支持用户对非线性本构模型的二次开发,如混凝土的三维收缩、徐变等;为用户提供了用 VBscript 脚本语言开发特定的前后处理功能,如建模助手、后处理分析验算等。LUSAS Bridge 分析精度值得信赖,是能同时满足基本设计分析和特定目的高端分析的软件,兼具通用软件和专用软件的优点。

一般而言,专用软件操作简单、使用方便、针对性强,通用软件功能强大、适应性强、结

果可信度高,对于桥梁结构分析工作者,同时掌握一两个通用和专用结构分析软件是必要的,可以达到在结构分析中互补、互校的目的。

1.2 桥梁上的作用及其组合

引起结构产生反应的原因称为荷载,如自重、温度、混凝土收缩、徐变等。在具体的桥梁结构分析中,确定作用于桥梁上的荷载种类、大小及如何对这些荷载进行组合,是结构分析中非常关键的一步,它直接影响到结构的安全性及经济性。

目前国际上普遍用名词“作用”代替“荷载”,来表述引起结构产生反应的原因。“荷载”现一般仅限于表达施加于结构上的直接作用。实际上引起结构反应的原因分为两类:一类是施加于结构上的外力,如结构自重、车辆及人群等;另一类是间接作用于结构上的,它产生的效应与结构本身的特性、所处的环境等有关,如温变、地震、混凝土收缩及徐变等。在我国《公路桥涵设计通用规范(JTG D60—2004)》中,已用名词“作用”来表述引起结构反应的原因。本节将主要讨论桥梁上的作用及其组合。

1.2.1 作用分类及组成

对于公路桥梁,按作用量值随时间变化的情况,可将其分为永久作用、可变作用及偶然作用三类。

(1) 永久作用

在结构使用期间,其量值不随时间而变化,或其变化值与平均值比较可忽略不计的作用,即为永久作用。

对于桥梁结构,永久作用包括:结构自重、土重力与主动土压力、水浮力、混凝土收缩与徐变、基础变位及预加力。

(2) 可变作用

结构在使用期间,其量值随时间变化,其变化值与平均值比较不可忽略的作用,即为可变作用。

可变作用一般包括汽车荷载、汽车冲击力、汽车离心力、汽车引起的土侧压力、人群荷载、风荷载、流水压力、冰压力、温变作用及支座摩阻力。

(3) 偶然作用

在结构使用期间出现的概率很小,一旦出现其值很大且持续时间很短的作用即为偶然作用。其一般包括地震作用、船舶或漂流物的撞击作用、汽车撞击作用等。

1.2.2 作用效应及组合

作用效应即结构对所受作用的反应,如弯矩、位移、应力等。将结构上几种作用效应的随机叠加称为作用效应组合,一般包括基本组合、偶然组合、短期效应组合及长期效应组合。其中基本组合和偶然组合是针对桥梁承载能力极限状态而言的,短期和长期效应组合是针对正常使用极限状态而言的。有关各种组合的具体组成及作用取值将在本节的

第3和4部分(第1.2.3和1.2.4节)介绍。

1.2.3 作用取值

结构或构件设计时,针对不同设计目的所采用的各种作用的取值也有所差异,将针对不同设计目的所采用的各种作用的规定值称为作用代表值,包括作用标准值、准永久值和频遇值三种,这三种取值是按照作用出现的频率来区分与确定的。

对于公路桥涵设计,作用标准值是各种作用的基本代表值,其值是根据作用在设计基准期内最大值概率分布的某一分位值来确定的。作用频遇值是结构或构件按正常使用极限状态短期效应组合设计时,采用的一种可变作用代表值,其值可根据在足够长观测期内作用任意时点概率分布的0.95分位值来确定的。作用准永久值是结构或构件按正常使用极限状态长期效应组合设计时,采用的另一种可变作用代表值,其值可根据在足够长观测期内作用任意时点概率分布的0.5(或略高于0.5)分位值来确定的。

在各种效应组合计算时,对于永久作用,采用标准值作为其代表值。对于可变作用,应根据不同的极限状态分别采用标准值、频遇值或准永久值作为其代表值。承载能力极限状态设计及按弹性阶段计算结构强度时采用标准值作为可变作用的代表值。正常使用极限状态按短期效应(频遇)组合设计时,应采用频遇值作为可变作用的代表值;按长期效应组合设计时,应采用准永久值作为可变作用的代表值。

当结构或构件需要进行弹性阶段截面应力计算时,各作用效应的分项系数及组合系数一般均取1.0。

1.2.4 作用效应组合的基本原则

(1)作用效应基本组合

基本组合是用于承载能力极限状态设计的,是永久作用设计值效应与可变作用设计值效应的组合。

其中作用效应设计值是指作用标准效应与作用分项系数的乘积;分项系数是为保证所设计的结构具有规定的可靠度而在设计表达式中采用的系数,分作用分项系数和抗力分项系数两类。

(2)作用效应偶然组合

偶然组合是针对承载能力极限状态设计而言的,是永久作用标准值效应、可变作用某种代表值效应与一种偶然作用标准值效应的组合。

(3)作用短期效应组合

短期效应组合是指在正常使用极限状态设计时,永久作用标准值效应与可变作用频遇值效应的组合。

(4)作用长期效应组合

长期效应组合是指在正常使用极限状态设计时,永久作用标准值效应与可变作用准永久值效应的组合。

对于每一类荷载组合,一般都有多种情况,在结构分析时,一般要根据具体工程的环境条件来确定。

1.3 本书的内容和目的

本书作为有限元理论及应用的基础教程和学习参考书,主要介绍有限元法的基本过程及各类常见问题的有限元方法,其中重点介绍桥梁结构分析中各种效应(如温度、收缩、徐变、预应力及活载等)的具体计算方法,旨在使读者对有限元方法有个较为全面的认识和掌握,对桥梁结构分析方法有个深刻的领会。本书还有一个重要的目的,就是提高读者对有限元分析方法的实际应用能力,将理论方法与软件操作紧密结合。

本书的内容主要包括:绪论、有限元方法及 LUSAS 软件、连续体和结构的有限元方法、基于梁单元的桥梁结构分析方法及工程应用等五大部分。

(1) 绪论

该部分对桥梁结构分析的基本内涵、问题种类、数值方法及常用软件进行了简述,同时还对桥梁结构分析中所涉及的作用及作用效应组合等进行了介绍。该部分内容安排在本书的第一章。

(2) 有限元方法及 LUSAS 软件

该部分对有限元的基础知识(如能量原理、线性代数方程组求解方法等)、有限元方法及 LUSAS 软件的基本情况和操作进行了介绍。该部分内容安排在本书的第二、三章。

(3) 连续体和结构的有限元方法

该部分对平面应力、平面应变、一般空间等连续体分析问题以及杆系结构分析问题的有限元方法进行了介绍。该部分内容安排在本书的第四章至第六章。

(4) 基于梁单元的桥梁结构分析方法

该部分基于梁单元,对桥梁结构分析中所碰到的预应力、温度、收缩、徐变及移动荷载等效应的分析方法进行介绍,并对桥梁结构分阶段分析方法进行了阐述。该部分的内容安排在本书的第七章至第十一章。

(5) 应用实例

该部分是将本书所述的理论方法进行综合运用,以一实际桥梁为背景,对其施工过程进行了正装分析。该部分内容安排在本书的第十二章。

第二章 有限元法基础知识

能量原理是有限元方法的力学基础,矩阵运算及线性代数方程组的求解是有限元法的数学基础。因此本章首先介绍了虚功原理与最小势能原理,然后对矩阵及其运算、线性代数方程组的常用求解方法进行了阐述。

2.1 能量原理

2.1.1 最小势能原理

物体的势能 Π_p 定义为物体的应变能 U 与外力势能 V 之差,即

$$\Pi_p = U - V \quad (2-1)$$

其中,应变能 U 可按式(2-2) 计算:

$$U = \frac{1}{2} \iiint \{\epsilon\}^T \{\sigma\} dx dy dz \quad (2-2)$$

将应力应变关系 $\{\sigma\} = [D]\{\epsilon\}$ 代入式(2-2),得:

$$U = \frac{1}{2} \iiint \{\epsilon\}^T [D] \{\epsilon\} dx dy dz \quad (2-3)$$

外力势能由下式计算:

$$V = \sum F\delta + \iiint \{f\}^T \{q\} dx dy dz + \int_{S_s} \{f_b\}^T \{\bar{p}\} ds \quad (2-4)$$

式中,右端第1项为对应于集中力 f 的势能;第2项为对应于体积力 $\{q\}$ 的势能;第3项为对应于面力 $\{p\}$ 的势能; S_s 为面力作用的表面; $\{f_b\}$ 为表面 S_s 上的位移; $\{\bar{p}\}$ 为给定的面力。

最小势能原理可叙述如下:在所有满足位移边界条件的协调位移中,那些满足平衡条件的位移使物体势能取驻值,即

$$\delta \Pi_p = \delta U - \delta V = 0 \quad (2-5)$$

对于线性弹性体,势能取最小值,即

$$\delta^2 \Pi_p = \delta^2 U - \delta^2 V \geq 0 \quad (2-6)$$

2.1.2 虚功原理

首先对虚位移的概念进行阐述。所谓虚位移可以是任何无限小的位移,它在结构内部

必须是连续的,在结构的边界上必须满足运动学边界条件。例如对于悬臂梁来说,在固定端处虚位移及其斜率必须等于零。

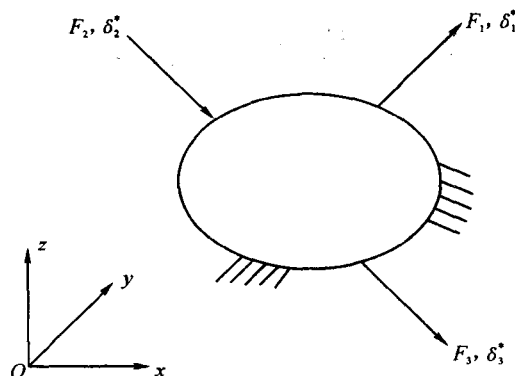


图 2.1 物体受力及其边界条件

考虑图 2.1 所示的物体,它受到外力 $F_1, F_2, \dots$ 的作用,记

$$\{F\} = \{F_1, F_2, F_3, \dots\}^T \quad (2-7)$$

在这些外力作用下,物体的应力为:

$$\{\sigma\} = \{\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}\}^T \quad (2-8)$$

现在假设物体发生了虚位移,在外力作用处与各个外力相应方向的虚位移为 $\delta_1^*, \delta_2^*, \delta_3^*, \dots$, 记

$$\{\delta^*\} = \{\delta_1^*, \delta_2^*, \delta_3^*, \dots\}^T \quad (2-9)$$

上述虚位移所产生的虚应变为:

$$\{\epsilon^*\} = \{\epsilon_x^*, \epsilon_y^*, \epsilon_z^*, \gamma_{xy}^*, \gamma_{yz}^*, \gamma_{zx}^*\}^T \quad (2-10)$$

在产生虚位移时,外力已作用于物体,而且在虚位移过程中,外力保持不变。因此,外力在虚位移上所做的虚功是:

$$\delta V = F_1 \delta_1^* + F_2 \delta_2^* + F_3 \delta_3^* + \dots = \{\delta^*\}^T \{F\} \quad (2-11)$$

在物体的单位体积内,应力在虚应变上的虚应变能为:

$$\sigma_x \epsilon_x^* + \sigma_y \epsilon_y^* + \sigma_z \epsilon_z^* + \tau_{xy} \gamma_{xy}^* + \tau_{yz} \gamma_{yz}^* + \tau_{zx} \gamma_{zx}^* = \{\epsilon^*\}^T \{\sigma\} \quad (2-12)$$

整个物体的虚应变能为:

$$\delta U = \iiint \{\epsilon^*\}^T \{\sigma\} dx dy dz \quad (2-13)$$

虚功原理表明,如果在虚位移发生之前,物体处于平衡状态,那么在虚位移发生时外力所做虚功等于物体的虚应变能,即

$$\{\delta^*\}^T \{F\} = \iiint \{\delta^*\}^T \{\sigma\} dx dy dz \quad (2-14)$$

以平面应力问题为例来证明上述论断。考虑单位厚度的平板,为简化起见,假定没有体积力和初应力(推广到一般情况并不困难)。如图 2.2 所示,边界可分为两部分。在 S_u 上,位移等于零。在 S_σ 上,作用着边界力 p , 其分量为 p_x 和 p_y 。在这一部分的边界条件可写为:

$$\sigma_x l_x + \tau_{xy} l_y = p_x, \quad \sigma_y l_y + \tau_{xy} l_x = p_y \quad (2-15)$$