

基于ANSYS的 桥梁结构分析

葛俊颖 王立友 编

JIU ANSYS DE
QIAOLIANG JIEGOU FENXI



中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

基于 ANSYS 的桥梁结构分析

葛俊颖 王立友 编



中国铁道出版社

2007·北京

内 容 简 介

本书结合有限元的基本理论和数值计算方法,通过一系列的相关例题和讨论,介绍了 ANSYS 软件在结构分析中的应用。书中除简单介绍 ANSYS 软件的功能外,主要较系统地介绍了利用 ANSYS 解决土木工程特别是桥梁工程中的数值计算问题。

● 本书基本涵盖了结构分析的主要内容,包括桥梁整体结构静力分析、局部应力分析、桥梁施工过程仿真模拟、动力分析、线性与非线性稳定分析、钢筋混凝土与预应力混凝土结构弹塑性分析和 ANSYS 二次开发的相关内容。各种实际问题首先从理论要领上加以解释,然后通过实例说明如何应用 ANSYS 的实现使读者真正能从分析入手直至解释实际工程问题。

本书目供土木工程专业高校教师、科研人员、工程技术人员以及高年级本科和研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

基于 ANSYS 的桥梁结构分析/葛俊颖编. —北京:
中国铁道出版社, 2007. 8
ISBN 978-7-113-08170-6

I. 基… II. 葛… III. 桥梁结构-结构分析-应用程序,
ANSYS IV. U443-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 116809 号

基于 ANSYS 的桥梁结构分析

作 者:葛俊颖 王立友 编

责任编辑:许士杰

电话:(010)51873065

电子信箱:syxu99@163.com

封面设计:崔丽芳

责任校对:汤淑梅

责任印制:李 佳

出版发行:中国铁道出版社

地 址:北京市宣武区右安门西街 8 号

邮政编码:100054

网 址:www.tdpress.com

电子信箱:发行部 ywk@tdpress.com

总编办 zbb@tdpress.com

印 刷:北京鑫正大印刷有限公司

版 次:2007 年 8 月第 1 版 2007 年 8 月第 1 次印刷

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16 印张:13.75 字数:343 千
(印 数:1~3 000 册)

书 号:ISBN 978-7-113-08170-6/TU·894

定 价:26.00 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社读者服务部调换。

电 话:市电(010)51873170,路电(021)73170(发行部)

打击盗版举报电话:市电(010)63549504,路电(021)73187

全桥结构仿真分析技术(Structural simulation for Entire Bridge, SSEB)在计算机高速发展、有限元理论及软件逐步完善的前提下,势必掀起桥梁设计理论的一场革命,如何把握这一机遇,成为桥梁工作者面临的问题。鉴于目前很多大型有限元分析软件都有开放的二次开发平台,与其花大量人力、物力来从头开发有限元分析软件,不如利用这些有限元分析软件成熟、功能强大、稳定的计算内核,开发出自己的大型有限元分析软件。ANSYS在桥梁工程仿真分析中的应用可以替代一些费用昂贵的试验,同时节省大量的人力和时间,其优势显而易见。实践证明,ANSYS强大的功能在桥梁仿真分析过程中可以起到很重要的作用。如何利用诸如此类的大型有限元软件,充分应用于实际,而又从实际工程中来不断完善和提高有限元分析软件的质量和效率,使其高效经济地投入到国家建设中去,是摆在我们桥梁工作者面前的课题。本书的编写就是希望对刚刚用 ANSYS 进行桥梁结构分析的人员有所帮助,起到抛砖引玉的作用。

本书是在石家庄铁道学院土木专业课程《桥梁结构分析的计算机方法》讲义的基础上编写的,囊括了桥梁结构分析的大部分内容。在编写的过程中参考了许多出版教材和傲雪论坛、中华钢结构论坛和仿真论坛中的帖子,在此表示深深的谢意。本书由石家庄铁道学院仿真实验室葛俊颖和天津市铁路集团勘察设计院有限公司院长王立友共同执笔完成。

由于写作时间仓促以及作者理论水平有限,本书难免有诸多不足之处,敬请各位读者批评指正,交流切磋。请将好的建议发到作者的电子邮箱 SJZQLX@163.com,我们将不胜感激。

编 者

2007 年 6 月

目录

Mu Lu

第一章 ANSYS 使用	1
第一节 有限元分析基本概念	1
第二节 ANSYS 的使用	9
第三节 ANSYS 常用技巧	18
第二章 杆系结构分析	31
第一节 三维桁架单元	31
第二节 三维梁单元	33
第三章 板系和实体结构分析	62
第一节 网格划分	62
第二节 shell 单元应用	66
第三节 梁 格 法	70
第四节 实体结构应用	73
第四章 钢筋混凝土和预应力混凝土结构分析	81
第一节 钢筋混凝土有限元分析	81
第二节 ANSYS 中的混凝土单元及使用	87
第三节 预应力混凝土结构分析	118
第五章 结构屈曲分析	120
第一节 概 述	120
第二节 线性稳定	120
第三节 非线性稳定	123
第六章 结构动力分析	129
第一节 概 述	129
第二节 模态分析	132
第三节 谱 分 析	134
第四节 Tacoma Narrows 吊桥倒塌模拟	137
第七章 桥梁结构模拟	141
第一节 单元生死的应用	141

第二节	混凝土徐变问题·····	142
第三节	预应力损失及预应力效应·····	146
第四节	结构温度效应·····	148
第五节	活载加载·····	150
第八章	ANSYS 二次开发 ·····	155
第一节	APDL 基础·····	155
第二节	宏·····	189
第三节	APDL 应用实例·····	196
第四节	对话框与 GUI 的交互 ·····	200
第五节	TCL/TK 在 ANSYS 中的应用介绍 ·····	207

第一节 有限元分析基本概念

有限元分析是计算机辅助设计、制造和工程分析的基本组成部分,由于它提供了更快捷和低成本的方式评估设计的概念和细节,所以人们越来越多地应用有限元仿真的方法代替模型试验甚至足尺试验。随着计算机技术的发展,仿真分析产生了巨大的经济效益。

有限元分析软件的出现使工程师没有必要自己花费大量的时间去编程,去重复低水平的软件开发,而可以集中精力在现有的优秀软件的基础上开发和研究自己更专业的问题。但是,应用和开发有限元程序的工程师必须理解有限元分析的基本概念,否则有限元程序就只是一个提供仿真的黑匣子。若不理解软件所包含的内容和一些程序中提供的选项内涵,分析者将非常被动。也就是说,精通软件本身非常重要,同时要求分析者重视对线性、非线性有限元方法的理解。

有限元法是用于求解工程中各类问题的数值方法。有限元方法的基本步骤如下:

1. 预处理阶段

(1)建立求解域并将之离散化成有限元,即将问题分解成节点和单元。每一个单元代表这个实际结构的一个离散部分,这些单元通过节点连接起来,不存在线或面的连接。节点和单元的集合称为网格,网格构成有限元模型。

(2)假设代表单元物理行为的形函数,即假设代表单元解的近似连续函数。

(3)对单元建立方程。

(4)构造总体刚度矩阵。

(5)应用边界条件、初值条件和负荷。

2. 求解阶段

(6)求解线性或非线性微分方程组,以得到节点的值,例如得到不同节点的位移。在应力分析中,每个节点的位移是计算的基本变量,一旦解出节点的位移,每个单元的应力和应变就很容易被导出。这部分内容会有许多的求解选择,一种不恰当的选择会导致不正确的结果。

3. 后处理阶段

(7)得到其他重要信息,比如结构工程师关心的应力、内力和支反力等。分析者最重要的任务之一就是结果的表述,也就是有限元分析的第三步。一个优秀的分析软件会在这里给你许多的帮助,一般可以让你得到想要的结果,但是有时也需要对结果进行必要的整理。

一般来说,用公式描述有限元问题有几种方法:直接公式法、最小总势能公式法和加权余数法。无论怎样产生的有限元模型,有限元分析的基本步骤都与上述步骤相同。

结构分析的最终目的是使用最简单的方法得到最精确的结果,因此分析者就要预见和评价简化后的结果。对结构进行简化并进行降维分析时,需要做许多假设。最好是对要分析的结构在荷载作用下的结构行为有一个比较清楚的认识,再去做假定。有时候简化方法不一定

正确,例如一些文献中介绍将剪力墙等效为格子梁模型。

由于有限元分析的理论比较复杂,实践性比较强,而且有限元理论和工程结构都是不断发展和变化的,所以许多结构行为和模拟方法要不断去认识和提高。

如果计算结果和平时经验的差别比较大,要仔细分析结构在不同荷载下的行为,找到计算结果和平时经验的差别究竟在哪里;是模型有问题,还是对复杂结构的行为认识不够。

一、一个桁架的简单算例

下面通过一个简单的桁架问题,来回顾有限元分析的基本过程与内容。

如图 1—1 所示一个简单的桁架,一端约束而另一端加载,分析桁架自由端的位移,桁架的应力及桁架约束端的反作用力。

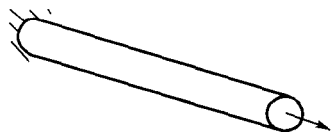


图 1—1 桁架问题

任何有限元模拟的第一步总是用有限单元来离散结构的实际几何形状。每个单元都代表结构的一个离散部分。有限单元通过共用节点来连接。将有限单元和节点的组合称为网格。在一个特定网格中的单元数与网格密度有关。在应力分析中节点位移是程序计算的基本参量。一旦节点位移已知,每一个单元的应力应变均能很容易地求出。

在图 1—1 所示的模型中,将圆杆离散成两个桁架单元。桁架单元只能承受轴向载荷。在图 1—2 中用节点和单元的编号表示了离散模型。

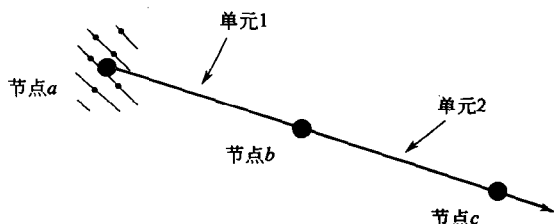


图 1—2 桁架问题的离散化模型

图 1—3 所示为模型中每个节点的分离体图。在通常情况下,模型中的每个节点将承受外载荷 P 和内部载荷 I ,后者是由单元应力引起而附加到节点上。由于模型处于静平衡状态,每个节点的合力一定为零;例如,每个节点的外载荷和内部载荷必须相互平衡。对于节点 a 的平衡方程描述如下。

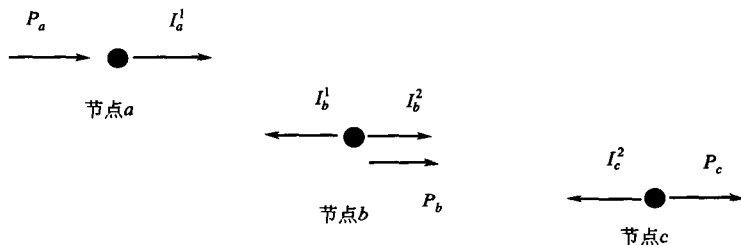


图 1—3 每个节点的分离体图

假设圆杆的长度改变是很小的,给出单元 1 的应变为:

$$\epsilon_{11} = \frac{u^b - u^a}{L}$$

其中 u^a 和 u^b 分别是节点 a 和 b 的相应位移, L 是单元的原始长度。

假设材料是弹性的,圆杆的应力可以通过应变乘以杨氏模量 E 给出:

$$\sigma_{11} = E\epsilon_{11}$$

作用在端部节点的轴向力等于圆杆的应力乘以其截面积 A 。因此,内部载荷、材料性能和位移的关系表达式为:

$$I_a^1 = \sigma_{11} A = E \epsilon_{11} A = \frac{(EA)}{L} (u^b - u^a)$$

在节点 a 处的平衡方程因此可以写成

$$P_a + \frac{(EA)}{L} (u^b - u^a) = 0$$

节点 b 的平衡必须考虑到该节点联结的相邻单元的内力。单元 1 的内力作用在反方向上,因此变为负值。平衡方程为

$$P_b - \frac{EA}{L} (u^b - u^a) + \frac{EA}{L} (u^c - u^b) = 0$$

节点 c 平衡方程为

$$P_c - \frac{EA}{L} (u^c - u^b) = 0$$

这些平衡方程可联立求解,以便获得所有节点的位移。以上求解最好采用矩阵方法,因此,将内力和外力写成矩阵形式。如果两个单元的性质和维数相同,平衡方程可以化简成如下形式:

$$\begin{Bmatrix} P_a \\ P_b \\ P_c \end{Bmatrix} + \left(\frac{EA}{L} \right) \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 \\ 1 & -2 & 1 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u^a \\ u^b \\ u^c \end{Bmatrix} = 0$$

通常情况下,每个单元的刚度 EA/L 项是不同的,因此,将模型中的两个单元刚度分别写成 K_1 和 K_2 。我们感兴趣的是获得平衡方程的解答,使施加外力 P 与生成内力 I 达到平衡。当讨论这个方程时,若考虑到问题的收敛性和非线性,我们可以把它写成

$$\{P\} - \{I\} = 0$$

对于完整的双单元三节点结构,我们改变其符号且重写平衡方程为

$$\begin{Bmatrix} P_a \\ P_b \\ P_c \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} K_1 & -K_1 & 0 \\ -K_1 & (K_1 + K_2) & -K_2 \\ 0 & -K_2 & K_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u^a \\ u^b \\ u^c \end{Bmatrix} = 0$$

由此方程组能够解得三个未知变量: u^a , u^b 及 u^c (在该问题中, u^a 确定为 0.0)。一旦知道了位移,就能用其计算桁架单元的应力。

二、一些基本概念

(一) 自由度

自由度(DOF)是分析中计算的基本变量。对于壳和梁单元的应力/位移模拟分析,自由度是每一节点处的平动和转动。对于热传导模拟分析,自由度为每一节点处的温度,因此,热传导分析要求应用与应力分析不同的单元,因为它们的自由度不同。

自由度一般包括:1 方向的平动、2 方向的平动、3 方向的平动、绕 1 轴的转动、绕 2 轴的转动、绕 3 轴的转动、开口截面梁单元的翘曲、梁和壳厚度方向上点的温度等。

轴对称单元是一个例外,比如 ABAQUS 轴对称单元的位移和转动自由度指的是: r 方向的平动、 z 方向的平动和 $r-z$ 平面内的转动。

约束是把节点所具有的自由度在指定的坐标系基础上固定,约束的自由度成分能独立选

择。因而能够仅仅约束位移,或者约束所谓的某一方向以外的所有自由度。静力分析的模型如果没有正确地约束时,通常不能求解。所谓的没有约束,是指结构以无重力状态悬浮着。在某方向加载荷,如不阻止,则不停地飞扬。另外即使在加载荷方向阻止它,别的方向不阻止的话,也许要向那个方向运动。总之,不稳定是不行的,在静力分析时必须在约束中去除不稳定因素。

强迫把某节点向特定方向移动并固定,叫“强迫位移”,这也是约束条件的一种。同约束条件一样,在特定的坐标系的基础上能够给予特定的位移量。换句话说,所谓约束是在强迫位移时,考虑位移量为 0 的特殊场合就行了。

一般的桥梁结构的模拟很少只用一种单元,往往需要几种单元组合建模。比如斜拉桥的平面模型可以有梁单元(模拟主梁、桥塔和桥墩)、桁架单元(模拟斜拉索)、刚臂单元(用于模拟索与梁的连接)和支撑单元等,三维模型还可以用板壳单元模拟主梁。虽然使用多种单元类型会使计算更精确,但由于单元的维数、节点数和节点的自由度数等不可能相同,因此在使用多种单元类型时就有可能出现自由度不协调。例如把板单元或梁单元如果不作处理就与实体单元连接,这样就不传递转角成分等于只能作为铰结合处理。要改变这种情况,不同的有限元程序有不同的处理方法。

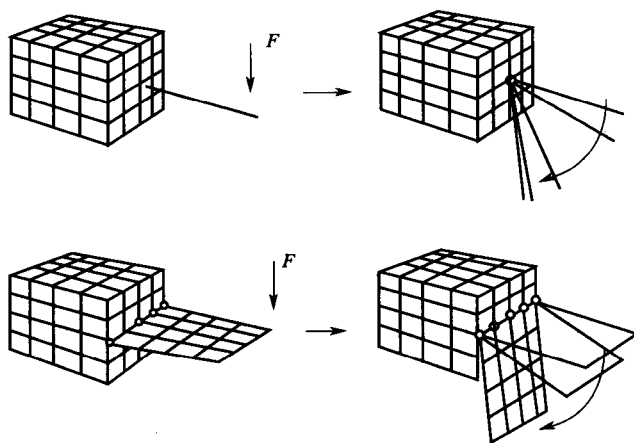


图 1—4 梁与板分别与实体单元结合

根据节点自由度变量的性质,有限元的单元类型大致可以分为传弯单元和非传弯单元两种。如果节点既包括平动自由度也包括转动自由度,那么称为传弯单元,传弯单元可以传递弯矩,如梁单元和板壳单元等。如果节点只有平动自由度,那么称为非传弯单元,非传弯单元不能传递弯矩,如桁架单元等。

如图 1—5 所示的单元类型连接时不会出现自由度不协调,但当传弯单元和非传弯单元相连时,经常会出现自由度不协调。例如,图 1—6 所示的实体单元和梁单元连接时(只有一个点接触),在图中梁单元和实体单元的接触点就会出现自由度不协调。在实际结构中出现自由度不协调的情况是比较多的,例如膜单元和板壳单元的连接,实体单元和板壳单元的连接,平面应变(应力)单元和板壳或梁单元的连接等,都有可能出现自由度不协调。

自由度不协调是有限元分析中的一个难点,处理的方法也比较多。具体可以使用过渡单元、罚单元和虚拟单元等方法模拟,对于过渡单元和罚单元理论可以参见有关文献。下面只简单介绍用虚拟单元处理自由度不协调。

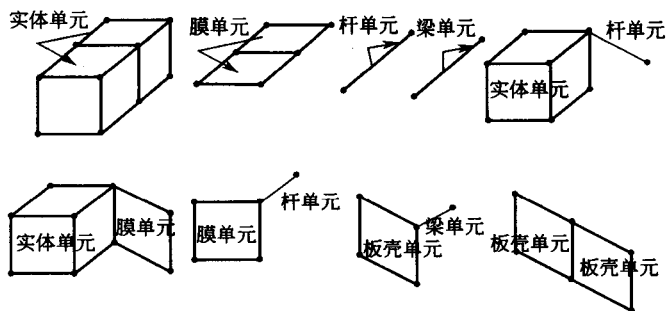


图 1—5 不会出现自由度不协调的不同单元类型的连接

例如,对图 1—6 所示的结构,可以设置两个虚拟的梁单元,伸到两个分离的节点上,并释放这两个虚拟梁单元的转动自由度。梁单元中的弯矩就会以拉力和压力形成的力矩的方式传递到与之相连的节点上,如图 1—7 所示。在块体单元和梁单元重叠的位置处也许有不实际的额外刚度,因为此处的材料有双倍的强度和密度,建模时要注意将这种影响可以控制在一个可允许的范围内。比较明智的处理方法是不应把这些传递的单元设置在模型应力比较集中的区域。同样用虚拟梁单元也可以模拟板壳和实体单元的连接,如图 1—8 所示。

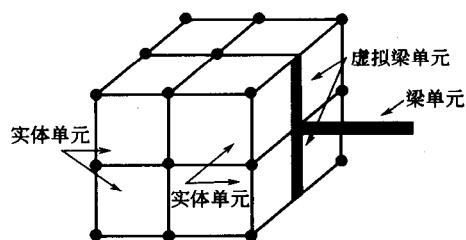


图 1—6 包括梁单元的实体单元模型

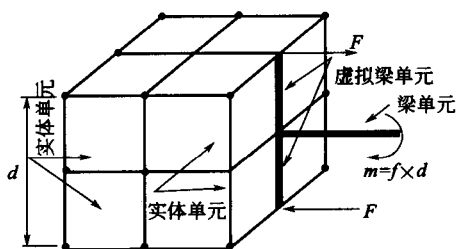


图 1—7 用虚拟梁单元消除自由度不协调

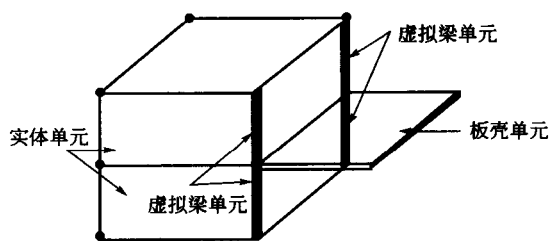


图 1—8 用虚拟梁单元处理板壳和实体单元的连接

(二) 一阶单元和二阶单元

若单元仅以所对应的顶点作为节点则为一阶单元,若在边上另有一中间节点则为二阶单元,有 2 个中间节点则为三阶单元。这里对一阶单元和二阶单元进行说明。

一阶单元的边的形状是直线,单元的位移用 1 次插值函数来表示。二阶单元的边的形状是直线或 2 次曲线,单元的位移用 2 次插值函数来表示。所谓单元位移的插值函数的含义是:位移法中,对于节点的位移和单元内部各点处的位移是用广义坐标的插值函数来表示的,此插值函数也称形状函数。

与一阶单元相比,二阶单元有以下这些特征:

(1) 形状的定义可以用 2 次曲线,这对于有着曲线形状边界的结构是很有效的。

(2) 二阶单元如果使用一阶单元一样的单元划分程度,则它的分析精度要来得更高。使用二阶单元即使一条边的长度放长到原来得 2~3 倍,也可以得到一阶单元一样的精度,所以如果允许所得的精度一样,则使用二阶单元来划分单元的话,网格粗一点也没关系。但是如果在

集中载荷处或应力集中处网格分得太粗,就要产生不合理的应力分布。

例如,ABAQUS 仅在单元的节点处计算位移或任何其他自由度。在单元内的任何其他点处,位移是节点位移插值获得的。通常插值的阶数由单元采用的节点数决定。仅在角点处在节点的单元,例如图 1—9(a)所示的 8 节点实体单元,在每一方向上采用线性插值,因此常常称这类单元为线性单元或一阶单元。具有边中点节点的单元,如图 1—9(b)所示的 20 节点实体单元,采用二次插值,因此常常被称为二次单元或二阶单元。

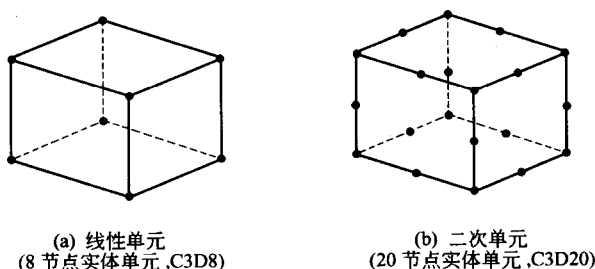


图 1—9 线性实体单元和二次实体单元

一阶单元内的位移按线性变化,因此(大多数时候)单个单元上的应力状态是不变的。二次单元内的位移是二阶变化的,因此单个单元上的应力状态是线性变化的。 p 单元内的位移是从 2 阶到 p 阶变化的,而且具有求解收敛自动控制功能,自动分析各位置上应当采用的阶数。

采用越来越高阶的单元,给曲线结构划分越来越稀疏的单元网格,ANSYS 会向你发出警告,甚至发出由于单元扭曲变形超过单元允许范围而引起网格划分失败的信息。其原因是,由于模型表面单元的弯曲度过大,使部分中节点偏离了自身位置,这最终决定了你能划分单元网格的稀疏程度。一般建议采用尽可能稀疏的单元网格,而又不至于出现形状检查警告。

(三)形函数

形函数是定义于单元内部的、坐标的连续函数,可以使用形函数和相应的节点值(比如位移)来表示给定单元上的任意未知变量的空间变化。形状函数在有限元法中是非常重要的一个概念,它定义了单元内部位移的分布。单元中有几个节点,就有几个形状函数。形状函数有个特点:考虑第 n 个形状函数,若代入第 n 个节点的坐标,其函数值为 1;若代入其他节点的坐标,则函数值为 0。

形函数阶次越高,单元的形状就越复杂,单元的适用能力也越强,求解应力问题时所需要的单元数量也越少;但是形函数的阶次提高后,建立刚度矩阵的运算较复杂。

对一维单元比如 BEAM188 有两个节点,属于线性单元(一次),而 BEAM189 有三个节点,属于二次单元。对于 ANSYS 中的三维实体单元, SOLID45 没有中间节点,是线性单元,而 SOLID95 有中间节点,就是二次单元。对线性单元,只要把相邻节点加以合并,就可以得到退化单元(比如从六面体退化成四面体单元),形函数不必做任何修改,而高次单元退化就必须更改单元形函数。

(四)积分点

有时在求刚度矩阵和节点荷载时,需要计算被积函数很复杂的积分,这种积分很难求得解析解,一般都用数值积分方法计算积分值,即在单元内选出某些点,称为积分点,求出被积函数在这些积分点的数值,然后根据这些数值求出积分值。若积分点是不等间距的,就是高斯数值

积分方法。若积分点是等间距的,就是辛普生(Simpson)积分数值积分方法。

(五) 完全积分

所谓“完全积分”是指单元具有规则形状时,全部高斯积分点的数目足以对单元刚度矩阵中的多项式进行精确积分。对六面体和四变形单元而言,所谓“规则形状”是指单元的边是直线,并且边与边相交成直角,在任何边中的节点都位于边的中点上。

(六) 剪力锁定(shear locking)

传统的基于位移的单元有两个问题即剪切锁定和体积锁定。剪切锁定导致弯曲行为过分刚化(寄生剪切应力)。当细的构件承受弯曲时会发生剪切锁定,这是一种几何特性。体积锁定导致过度刚化响应,当泊松比接近或等于 0.5 时会发生,这是一种材料特性。

剪力锁定是存在于所有完全积分、一阶实体单元中的问题,会引起单元在弯曲时过于刚硬。考虑受纯弯结构中的一小块材料,如图 1—10 所示。材料产生弯曲,变形前平行于水平轴的直线成为常曲率的曲线,而沿厚度方向的直线仍保持为直线,水平线与竖直线之间的夹角保持为 90° 。

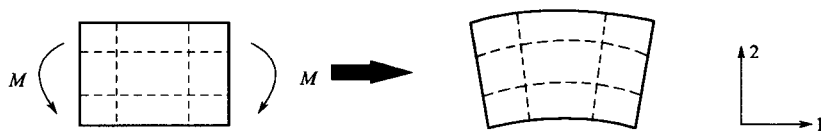


图 1—10 受弯矩 M 作用下材料的变形

线性单元的边不能弯曲,所以,如果应用单个单元来模拟这一小块材料,其变形后的形状如图 1—11 所示。



图 1—11 受弯矩 M 作用下完全积分、线性单元的变形

为清楚起见,图中 1—11 画出了通过积分点的虚线。显然,上部虚线的长度增加,说明 1 方向的应力(σ_{11})是拉伸的。类似地,下部虚线的长度缩短,说明 σ_{11} 是压缩的。竖直方向虚线的长度没有改变(假设位移很小)。因此,所有积分点上的各项为零。所有这些都与受纯弯曲的小块材料应力的预期状态是一致的。但是,在每一个积分点处,竖直线与水平线之间的夹角开始时为 90° ,变形后却改变了,说明这些点上的剪应力 σ_{12} 不为零。显然,这是不正确的:在纯弯曲时,这一小块材料中的剪应力应该为零。产生这种伪剪应力的原因在于单元的边不能弯曲,这意味着应变能正在产生剪切变形,而不是产生所希望的弯曲变形,因此总的挠度变小,即单元过于刚硬。

剪力锁定仅影响受弯曲载荷的完全积分线性单元的行为。在受轴向或剪切载荷时,这些单元的功能表现很好。而二次单元的边界可以弯曲(见图 1—12),故它没有剪力锁定的问题。二次单元预测的自由端位移接近于理论解答,但是,如果二次单元发生扭曲或它的弯曲应力有梯度,那么也将有可能出现某种程度的自锁,这两种情况在实际问题中是可能发生的。

只有当确信载荷只会在模型中产生很小的弯曲时,才可以采用完全积分的线性单元。如果对载荷产生的变形类型有所怀疑,则应采用不同类型的单元。在复杂应力状态下,完全积分的二次单元也有可能发生自锁;因此,如果在模型中应用这类单元,应仔细检查计算结果。然

而,对于模拟局部应力集中的区域,应用这类单元是非常有用的。

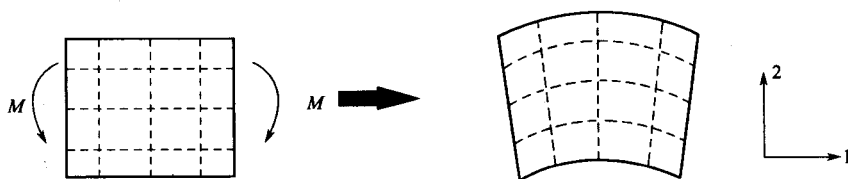


图 1—12 受弯矩 M 作用下完全积分、二次单元的变形

(七)减缩积分

只有四边形和六面体单元才能采用减缩积分;而所有的楔形体、四面体和三角形实体单元只能采用完全积分,尽管它们与减缩积分的六面体或四边形单元可以在同一网格中使用。减缩积分单元比完全积分单元在每个方向少用一个积分点。减缩积分的线性单元只在单元的中心有一个积分点。

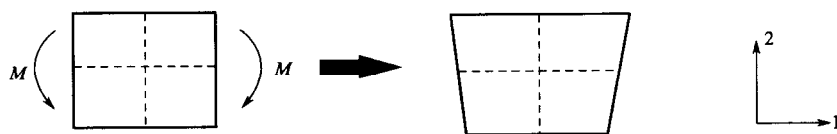


图 1—13 受弯矩 M 的减缩积分线性单元的变形

线性的减缩积分单元由于存在来自本身的所谓沙漏(Haourglassing)数值问题而过于柔软。为了说明这个问题,再次考虑用单个减缩单元模拟受纯弯曲载荷的一小块材料(见图 1—13)。单元中虚线的长度没有改变,它们之间的夹角也没有改变,这意味着在单元单个积分点上的所有应力分量均为零。由于单元变形没有产生应变能,这种弯曲的变形模式是一个零能量模式。由于单元在此模式下没有刚度,所以单元不能抵抗这种形式的变形。在粗糙的网格中,这种零能量模式会在网格中扩展,从而产生无意义的结果。

只要合理地采用细划的网格,线性减缩积分单元就能够给出可接受的结果。对多数问题而言,采用线性减缩积分单元的细划网格所产生的误差在一个可接受的范围之内。当采用这类单元模拟承受弯曲载荷的任何结构时,建议沿厚度方向上至少采用四个单元。当沿梁的厚度方向采用单个线性减缩积分单元时,所有的积分点都位于中性轴上,该模型是不能抵抗弯曲载荷的。线性减缩积分单元能够很好地承受扭曲变形;因此,在任何扭曲变形很大的模拟中都可以采用网格细划的这类单元。

ANSYS 中三维实体单元的这部分内容在单元手册和理论手册中有介绍。

三、单元选择

选择合适的单元不仅仅要对单元特性有充分了解,还要对材料力学、弹性力学等基础理论有一定的熟悉。以 2D 单元模拟工程梁问题为例,选用哪种单元比较好? 我们知道梁的问题,基本上是受到弯曲作用,因此轴向应力沿着横向的分布为线性。因此我们不会选用三节点三角形单元以及四节点四边形单元,采用八节点四边形单元是比较恰当的选择。当然我们可以选择线性单元,然后网格密一点。这对简单几何形状的模式而言,虽然行得通,但若针对较复杂的模型,在前处理建网格时,会比较花时间。一般而言,要看使用者的情形而定。

针对同一个题目,使用相同大小的网格,但一个采用低阶单元,另一个则采用高阶单元。

一般而言,低阶单元的模型位移较小,高阶单元的位移较大。因为高阶单元采用较高阶的形状函数,单元在变形方面,显得较为自由,容易变形。这个特性也会反映在模态分析上。一般而言,越硬的东西,自然频率较高,因此,高阶单元的模型,算出来的自然频率较高。以上两个模型,若单元数量够多,基本上结果不会有太大差异(即单元够多,计算结果收敛)。除此之外,形状函数还会影响到分布力、体力(body force)在有限单元法中的输入、高斯积分等。

结构中的构件能否简化为用梁单元或桁架单元模拟,取决于结构分析的要求和目的。如果分析整个系统(整个龙门吊、塔架、桥梁和房屋结构等),则可以用梁单元模拟。如果分析的目的是分析桥梁或房屋某一位置处的细部应力,则必须用二维或三维单元模拟。对于梁单元而言,程序中要求输入的扭转常数指的是扭转惯性矩,而不是截面的极惯性矩,这个需要注意。

对应于不同的分析目的,即使同一个结构,其模型化处理也有不同的地方。分析目的不同时,可以选择不同的单元和计算规模。对桥梁结构来讲,还有其他很多的问题需要考虑,比如是否考虑非线性问题、稳定问题,需要计算结构的动力效应吗?需要考虑混凝土的收缩徐变吗?考虑施工过程吗等等。因此说,对一个工程师而言,对专业知识的理解程度,会决定其分析质量。

为了减小数值分析的误差,刚度的比值最好不超过 10 000,这种情况一般可以解决。人为因素会造成的刚度特别大或特别小,导致刚度比的增大。例如,梁单元的刚度涉及到 $12EI/L^3$ 和 $6EI/L^2$ 这两个参数,其中 L 为单元的长度。如果梁单元的弹性模量和惯性矩相同,一些单元的长度为 0.1 m,其刚度矩阵的元素之一 $12EI/L^3 = 12EI \times 10^3$,一些梁单元的长度为 10 m,则 $12EI/L^3 = 12EI \times 10^{-3}$,刚度矩阵中这两个元素的比值就会达到 1 000 000,容易导致病态的方程,利用计算机求解代数方程时误差增大甚至出现错误。

实体单元可以用来模拟三维实体和厚壳结构。四面体单元建议只作为过渡单元,分析实体时一般用六面体单元较好。块体单元的计算结果只给出应力,而没有力和弯矩,而且不能用块体单元来模拟薄壳,否则会导致单元形状和方程组的病态。

第二节 ANSYS 的使用

一、ANSYS 功能

ANSYS 是一种广泛的商业套装工程分析软件。通过工程分析软件,可以让我们知道结构系统受到外力负载时所出现的反应,例如应力、位移、温度等,根据该反应可知道结构系统受到外力负载后的状态,进而判断是否符合设计要求。实际结构系统的几何结构相当复杂,受的负载也相当多,理论分析往往无法进行。想要解答,必须先简化结构,采用数值模拟方法分析。由于计算机行业的发展,相应的软件也应运而生,ANSYS 软件在工程上应用相当广泛,在机械、电机、土木、电子及航空等领域的使用,都能达到某种程度的可信度,颇获各界好评。使用该软件,能够降低设计成本,缩短设计时间。ANSYS 作为工程数值模拟软件的优秀代表,是一个多用途的有限元法分析软件,它从 1971 年的 2.0 版本与今天的版本已有很大的不同,起初它仅提供结构线性分析和热分析,现在可用来求结构、流体、电力、电磁场及碰撞等问题的解答。它包含了前置处理、解题程序以及后置处理,将有限元分析、计算机图形学和优化技术相结合,已成为现代工程学问题必不可少的有力工具。

1. ANSYS 主要技术特点:

- 能真正实现多场及多场耦合分析

- 实现前后处理、求解及多场分析统一数据库的一体化
- 具有多物理场优化功能
- 界面可以按用户的习惯被改变
- 强大的非线性分析功能
- 多种求解器分别适用于不同的问题及不同的硬件配置
- 支持异种、异构平台的网络浮动,在异种、异构平台上用户界面统一、数据文件全部兼容
- 强大的并行计算功能,支持分布式并行及共享内存式并行
- 多种自动网格划分技术
- 良好的用户开发环境

2. 与 CAD 软件的接口

ANSYS 接口提供了一个界面,通过该界面可以将 CAD 几何模型从 CAD 软件包输入到 ANSYS 系统。可以利用 ANSYS 接口产品输入到 ANSYS 系统中的 CAD/CAE 文件格式如下:

- ◇ CATIA 5. x 或 4. x
- ◇ Parasolid
- ◇ Pro/ENGINEER
- ◇ SAT/ACIS
- ◇ Unigraphics

ANSYS 接口支持许多附加的 CAD 软件包。表 1—1 列出了一些可以通过 ANSYS 接口产品将 CAD 文件输入到 ANSYS 中的 CAD 软件包。

表 1—1 CAD 软件包及其被推荐的接口产品

CAD 软件包	文件类型	首选的接口产品
CATIA 4. x 和更低的版本	. model or . dlv	适合于 CATIA 软件的 ANSYS 接口
CATIA 5. x	. CATPart	适合于 CATIA 5 版本的 ANSYS 接口
Parasolid	. x_t 或 . xmt_txt	适合于 Parasolid 文件的 ANSYS 接口
Pro/ENGINEER	. prt	适合于 Pro/ENGINEER 软件的 ANSYS 接口
SAT	. sat	适合于 SAT 文件的 ANSYS 接口
AutoCAD	. sat	适合于 SAT 文件的 ANSYS 接口
Mechanical Desktop	. sat	适合于 SAT 文件的 ANSYS 接口
Solid Designer	. sat	适合于 SAT 文件的 ANSYS 接口
Solid Edge	. x_t 或 . xmt_txt	适合于 Parasolid 文件的 ANSYS 接口
SolidWorks	. x_t	适合于 Parasolid 文件的 ANSYS 接口
Unigraphics	. prt	适合于 Unigraphics 文件的 ANSYS 接口
Unigraphics	. x_t 或 . xmt_txt	适合于 Parasolid 文件的 ANSYS 接口

另外 ANSYS 接口工具允许用户从 Pro/ENGINEER、Unigraphics CAD 系统中进入 ANSYS 环境,通过该接口用户可以利用 ANSYS 对在 CAD 软件中设计的零件进行分析,从而加速了产品的设计开发过程和测试过程。

二、ANSYS 高性能计算

现代 CAE 计算的发展方向主要有两个：系统级多体耦合计算和多物理场耦合计算，前者摒弃了以往只注重零部件级 CAE 仿真的传统，将整个对象的完整系统（如整机、整车）一次性纳入计算范畴；后者在以往只注重单一物理场分析（如结构力学、流体力学）的基础上，将影响系统性能的所有物理因素一次性纳入计算范畴，考虑各物理因素综合起来对分析对象的影响。因此可以说，高性能并行计算也是 CAE 的发展方向，因为它是大规模 CAE 应用的基石。

高性能并行计算机中的计算机集群系统，由于几乎全采用商业化的非定制系统，具有极高的性能价格比，因而成为现代高性能并行计算的主流系统。它通过各种互联技术（目前主要是 Giganet、Myrinet、Infiniband、SCI 和 Quadrics 等）将多个计算机系统连接在一起，利用所有被连接系统的综合计算能力来处理大型计算问题，所以又通常被称为高性能计算集群。高性能并行计算的基本原理就是将问题分为若干部分，而相连的每台计算机（称为节点）均可同时参与问题的解决，从而显著缩短解决整个问题所需的计算时间。

1. 使用多 CPU 并行计算

对双核心或多核心的 CPU 或使用多个 CPU 的用户，需要设置 CPU 的数目。下面是在 ANSYS 中使用多 CPU 的设置方法，如图 1—14 所示：

- (1) 启动 ANSYS Product Launcher；
- (2) 按图 1—14 中的①首先选择 Add-on Modules 中的第一项；
- (3) 按图 1—14 中的②选择 Distributed Solver Setup；
- (4) 按图 1—14 中的③选择 MPI Type 为 MPI(native)；
- (5) 按图 1—14 中的④填写 CPU 数目，比如 8 个（目前 ANSYS 最多支持 8 个 CPU）。

2. 选择求解器

求解器的功能是求解关于结构自由度的联立线性方程组。

ANSYS 通过读取有限元模型及其上的荷载信息，来建立联立方程，然后使用不同的求解器，求解计算结果。作为一个使用者而言，主要任务是建立模型，在程序求解完成后分析结果，程序自动完成大部分的求解设置及求解任务。但理解求解过程及 ANSYS 的处理方法可以正确地设置求解选项，特别是在大型分析中，理解求解器及其设置、优缺点对于查找求解失败原因、保证计算结果精度、缩短计算时间，加快结果收敛很有好处。求解器涉及到较深入的理论知识。

选择求解器的菜单（需要打开完整菜单）：

GUI: Main Menu > Solution > Analysis Option

ANSYS 提供 5 个求解器：

- (1) 波前求解器(Frontal solver)；
- (2) 稀疏矩阵直接求解器(Sparse solver)；
- (3) 雅可比共轭梯度求解器；
- (4) 预置条件共轭梯度求解器(PCG solver)；
- (5) 不完全乔列斯基共轭梯度求解器。

前两种为直接求解器，适用于自由度在 5 万或 50 万以内的求解器；后 3 种为迭代求解器，能够处理自由度在 5 万~100 万以上的大模型。程序默认的求解器类型为波前直接求解器，关闭 SOLCONTROL 时，程序采用稀疏矩阵直接求解器。