

ABAQUS/Explicit
有限元软件入门指南

Hibbitt, Karlsson & Sorensen, INC.

庄 茁 等译

清华大学出版社

1999 年

(京)新登字 158 号

内 容 简 介

ABAQUS 是国际上最先进的大型通用有限元计算分析软件之一,具有惊人的广泛的模拟性能。它拥有大量不同种类的单元模型、材料模型、分析过程等。无论是分析一个简单的线弹性问题,或者是一个包括几种不同材料、承受复杂的机械和热载荷过程和变化的接触条件的非线性组合问题,应用该软件计算分析都会得到令人满意的结果。

本书是 ABAQUS 软件初学者的入门教材,结合有限元的基本理论和力学数值计算方法,通过一系列的相关例题和讨论,介绍了 ABAQUS 软件的主要内容,系统地讲解了编写输入数据文件的要领,对输出文件进行分析和后处理的方法。因此,本书是工程师们应用有限元软件进行力学分析和结构设计的手册,也可以作为力学和工程专业研究生和本科生的有限元数值计算课的参考教材。

ABAQUS/Explicit 有限元软件入门指南

Getting Started with ABAQUS/Explicit

Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc.

本书中文版由 Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc. 授权清华大学出版社出版。

北京市版权局著作权合同登记号 图字: 01-98-1482

书 名: ABAQUS/Explicit 有限元软件入门指南

作 者: 庄茁 等译

出版者: 清华大学出版社(北京清华大学校内,邮编 100084)

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>

印刷者: 清华大学印刷厂

开 本: 787× 1092 1/16 印张: 15.25 字数: 361 千字

版 次: 1999 年 7 月第 1 版 1999 年 7 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-302-03193-2/O · 203

印 数: 0001 ~ 1050

定 价: 40.00 元

中文版前言

固体力学从本世纪 30~40 年代 Timoshenko 与 Southwell 等只能解少数简单的实际问题,发展到今天可以解决工程实际中大量的复杂问题,除了计算机技术的突飞猛进以外,更要靠功能强大的有限元计算软件。半个世纪以来的历史表明,不仅固体力学的工程应用需要计算,固体力学本身的发展也需要有效的计算技术和功能强大的计算软件。许多对固体力学学科作出的重要贡献充分说明了这一点。

但是,要不断地发展和完善这样一个功能强大的有限元计算软件绝非易事。它需要有一个高水平的、强大的工作集体,以及相当长的时间积累。ABAQUS 通用有限元程序系统正是满足了这两个条件,以它广泛而先进的模拟功能,强大的线性与非线性分析能力,优良的质量与技术服务,在世界各地工程界和学术界中赢得了声誉和信赖。不但许多大型工程项目是用 ABAQUS 程序分析模拟的,而且许多高水平的学术论文都声明所用的是 ABAQUS 程序。本来使用其它通用软件的用户转而使用 ABAQUS 软件的事例,屡见不鲜。

在 ABAQUS 的许多优点中,值得特别指出的是它解决非线性问题(几何、材料和边界)的能力和效率,这是学术界中已达成的共识。我们相信,把 ABAQUS 程序系统引入我国,必将有助于我国的经济建设和科学研究事业的发展。

黄克智 院士
清华大学工程力学系 教授
清华大学工程力学研究所 所长
1998 年 3 月

前 言

ABAQUS 是国际上最先进的大型通用有限元计算分析软件之一, 是美国 HKS 公司 (Hibbitt, Karlsson & Sorensen, INC.) 的产品。特别是它的非线性力学(几何、材料、接触)分析功能具有世界领先水平, 受到世界上许多著名公司、大学和研究部门的青睐, 在北美、欧洲和亚洲许多国家的机械、化工、土木、水利、材料、航空、船舶、冶金、汽车和电气工业设计中得到广泛的应用。它可以进行结构的静态和动态分析, 如应力、变形、振动、冲击、热传导和对流、质量扩散、声波、力电耦合分析等, 它具有丰富的单元模式, 如杆、梁、刚架、板壳、实体、无限体元等, 可以模拟广泛的材料性能, 如金属、橡胶、塑料、钢筋混凝土、弹性泡沫、岩石和土壤等。

ABAQUS 软件的发展是与科学研究和工程实际紧密结合的, 前者不断提高软件的质量, 发展了许多材料本构和单元模型, 丰富了软件的内容, 使科学研究达到更高的水平; 后者不断取得经济效益, 使困难的分析简单化, 使复杂的过程层次化, 节省了大量的时间以避免低水平重复的工作, 使工程分析和优化设计更快和更好。

工程力学分析的软件是商品, 科学和技术是直接的生产力。ABAQUS 等软件反映了有限元数值计算的最新研究成果; ABAQUS 等软件是沟通理论分析与工程实际的桥梁; ABAQUS 等软件对工程力学工作者提出更高的要求。

本书是 ABAQUS 有限元软件初学者的入门教材, 经美国 HKS 公司授权翻译成中文版, 由清华大学出版社出版发行。在我们将 ABAQUS 软件引入中国的过程中, 始终得到清华大学工程力学系黄克智院士和杨卫教授的鼓励和帮助。对于本书的翻译和出版, 也得到了清华大学出版社的支持。在此, 我们表示诚挚的谢意。

参加本书翻译工作的有: 第 1 章和第 2 章由庄茁翻译, 第 3 章由孙东超翻译, 第 4 章由小川翻译, 第 5 章由黄东平翻译, 第 6 章由刘广松翻译, 第 7 章由郭永进翻译。庄茁负责本书的翻译工作, 翻译了中文版序言, 并且审校和修改了全部译文。限于译校者水平, 难免有错误和不妥之处, 对于读者的批评指正我们将不胜感激。

译者 庄 茁等
清华大学工程力学系
1998 年 12 月

中文版序言

ABAQUS 是一套先进的通用有限元程序系统,发展软件的目的是对固体和结构的力学问题进行数值计算分析。Hibbitt, Karlsson & Sorensen 公司 (HKS) 的全部业务范畴就是致力于发展和技术上支撑 ABAQUS。HKS 创立于 20 年前的 1978 年 2 月 1 日,今天,在位于美国罗德岛州的 Pawtucket 市的公司总部,有工作人员 150 多名,其中 65 人具有工程或计算机科学的博士学位(Ph. D), 35 人具有硕士学位(MSc),这可能是世界上最大的计算固体力学团体。在北美、欧洲、日本和韩国, HKS 拥有 11 个分公司或子公司,在其它国家和地区有 12 个代理处,包括隶属于清华大学工程力学系的“先进有限元服务中心”——Advanced Finite Element Services (AFES),这个中心的建立为 ABAQUS 软件在中国提供了技术支持和服务。

ABAQUS 被广泛地认为是功能最强的有限元软件,可以分析复杂的固体力学和结构力学系统,特别是能够驾驭非常庞大的问题和模拟非线性的影响。ABAQUS 有两个主要的分析模块: ABAQUS/Standard 提供了通用的分析能力,如应力和变形、热交换、质量传递等; ABAQUS/Explicit 应用对时间进行显式积分的动态模拟,提供了应力/变形分析的能力(这种显式积分的应用使得 ABAQUS/Explicit 为处理复杂接触条件的问题提供了强有力的工具,例如在加工过程中经常发生的冲压和锻压)。软件系统还包括其它的几个部分。ABAQUS/Aqua 扩展了 ABAQUS/Standard 的功能,应用于海洋采油结构系统的分析,包括高柔韧性的系统,如深水下的升降器和管道系统。对于在声音介质中振荡波的传播和对变形结构的冲击问题, ABAQUS/USA(Underwater Shock Analysis) 提供了完全耦合的分析功能。ABAQUS/Post 提供了对力学模型和计算结果的后处理功能,绘图、动画、X- Y 平面绘图、时间历程绘图等。ABAQUS/Pre 提供了包括单元生成的前处理功能。HKS 与 CAD 系统的主导开发者保持紧密的合作,以确保他们的 CAD 软件界面与 ABAQUS 的结合效果,它们中的两个——Dassault Systemes CATIA 系统和 Parametric Technology's Pro/ Mesh 系统已经与 ABAQUS 共同进入了市场。其它的 CAD 软件,如 MSC's PATRAN 系统和 SDRC's I- DEAS 系统,也与 ABAQUS 组合携手走进了市场。

ABAQUS 有着令人惊奇的广泛的模拟性能,它拥有大量不同种类的有限元公式,材料模型与分析过程等。然而,应用起来又是非常简单,无论是分析一个简单的线弹性问题,还是一个包括几种不同材料、承受复杂的机械和热载荷过程和变化的接触条件的非线性组合问题,应用的概念是相同的。在这本软件使用指导手册中,通过一系列的相关例题,讨论解释了这些概念,使得读者可以迅速且容易地学会如何应用 ABAQUS。其它的 ABAQUS 文集——参考手册、算例手册和理论手册,以及各种相关软件应用命题的 HKS's 讲义,为对 ABAQUS 感兴趣的读者提供了良师益友。

我们, HKS 公司的宗旨是提供给世界各地的用户值得信赖的软件和完善的技术支

持,我们始终不渝地强调优良的质量和服务。为此,ABAQUS 和 HKS 赢得了良好的声誉。我们希望由于 AFES 的建立和《ABAQUS 有限元软件入门指南》中文版的出版,会使更多的中国用户了解 ABAQUS 功能的先进性,为达此目的,我们期待着与 AFES 的中国朋友和同仁紧密合作。

Hibbitt 博士
HKS 公司总裁
Pawtucket, Rhode Island, USA
December, 1997

Preface

ABAQUS is a general purpose finite element program system designed for use in the advanced analysis of solids and structures. The development and support of ABAQUS are the entire activities of Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc. ("HKS"). HKS was established 20 years ago, on February 1, 1978. Today, at its headquarters office in Pawtucket, Rhode Island, USA, the company employs over 150 people, of whom 65 have PhD degrees and 35 have MSc degrees in engineering or computer science-perhaps the largest computational solid mechanics group anywhere. HKS also has 11 branch or subsidiary offices in North America, Europe, Japan and Korea, as well as 12 Representative offices in other countries, including Advanced Finite Element Services ("AFES"), a company closely affiliated with the Department of Engineering Mechanics at Tsinghua University, which has been established to provide support of ABAQUS in China.

ABAQUS is widely accepted as the most capable finite element system for sophisticated analysis of solid and structural systems. It is particularly strong for handling very large problems, and especially for simulating nonlinear effects. ABAQUS has two principal analysis modules: ABAQUS/Standard, which offers general analysis capabilities for stress and deformation analysis, heat transfer, mass transfer, etc.; and ABAQUS/Explicit, which provides stress/deformation analysis using dynamic simulation with explicit time integration (this use of explicit integration makes ABAQUS/Explicit particularly powerful for cases involving complex contact conditions, such as often occur in manufacturing processes like stamping or forging). The software system contains several other components. ABAQUS/Aqua extends ABAQUS/Standard for use in the analysis of offshore structures and systems, including highly flexible systems, such as deep water risers and pipelines. ABAQUS/USA ("Underwater Shock Analysis") provides fully coupled analysis of shock waves propagating in an acoustic medium and impacting on a deformable structure. ABAQUS/Post offers post-processing for the analysis modules: contour plots, animations, X-Y plots, time history plots, etc. ABAQUS/Pre provides pre-processing, including mesh generation. HKS works closely with the vendors of leading CAD systems to ensure that effective interfaces are available between their CAD software and ABAQUS. Two of those interfaces -with Dassault Systemes'CATIA system, and with Parametric Technology's Pro/ Mesh system-are marketing by HKS. Others, such as the interfaces with MSC's PATRAN system and with SDRC's I-DEAS system, are marketed by the

CAD system, are marketed by the CAD system vendors.

ABAQUS has a remarkably wide range of simulation features. It has many different finite element formulations, material models, analysis procedures, etc. Yet it is quite simple to use-the same concepts apply whether the user is studying a simple, linear, elastic problem or an assembly of components containing several different materials and subjected to a complicated history of mechanical and thermal loading, with changing contact conditions. This introductory tutorial manual explains these concepts through the discussion of a series of relatively simple, educational examples. It makes it fast and easy to learn how to use ABAQUS. The remaining volumes of ABAQUS documentation-reference manuals, example problems manuals, and the theoretical manual, as well as HKS's lecture notes on topics related to the use of ABAQUS-are more readily approached after reading this book.

We, at HKS, have built our company on the basis of supplying reliable software and offering excellent support to customers around the world. We have always emphasized quality and service. As a result, ABAQUS and HKS have outstanding reputations. We hope that the establishment of AFES, and the publication of this introductory volume of tutorial documentation in Chinese, will permit many organizations in China to take advantage of the power of our software system. We look forward to working closely with our friends and colleagues at AFES to this end.

Dr. Hibbitt

President

Pawtucket, Rhode Island, USA

December, 1997

目 录

第 1 章	简介.....	1
1.1	ABAQUS 模块	1
1.2	ABAQUS 入门指南	3
1.2.1	本指南的目的.....	3
1.2.2	如何使用指南.....	3
1.2.3	本指南的使用约定.....	3
1.3	ABAQUS 手册	4
1.3.1	HKS 公司提供的其它文集	5
1.4	技术支持	5
第 2 章	ABAQUS 基础	7
2.1	ABAQUS 模型的组成	8
2.2	输入文件的格式化	9
2.2.1	关键字行	10
2.2.2	数据行	11
2.3	生成一个输入文件.....	11
2.3.1	量纲	12
2.3.2	坐标系统	12
2.3.3	网格	13
2.3.4	模型数据	14
2.3.5	过程数据	16
2.4	检验输入数据.....	21
2.5	运行分析过程.....	27
2.6	结果转换.....	28
2.7	应用 ABAQUS/ Post 后处理	28
2.8	小结.....	32
第 3 章	显式动态分析概述	33
3.1	ABAQUS/Explicit 适用的问题类型	33
3.2	显式动态分析的有限元方法.....	34
3.2.1	应力波传播的描述	34
3.2.2	时间积分	35

3.2.3	显式时间积分方法的优越性	37
3.3	自动时间增量和稳定性.....	37
3.3.1	显式方法的条件稳定性	37
3.3.2	稳定极限的定义	37
3.3.3	ABAQUS/Explicit 的自动时间增量	38
3.3.4	质量缩放控制时间增量	38
3.3.5	材料对稳定极限的影响	38
3.3.6	网格对稳定极限的影响	39
3.3.7	数值不稳定性	39
3.4	例子: 棒中的应力波传播	39
3.4.1	节点和单元集	41
3.4.2	考察输入文件——模型数据	41
3.4.3	考察输入文件——过程数据	43
3.4.4	运行分析	44
3.4.5	后处理	45
3.4.6	网格对稳定时间增量和 CPU 时间的影响	47
3.4.7	材料对稳定时间增量和 CPU 时间的影响	49
3.5	显式和隐式程序比较.....	49
3.5.1	总体比较	49
3.5.2	考察 ABAQUS/Standard 中的隐式程序	49
3.5.3	ABAQUS/Explicit 的优越性	50
3.5.4	隐式和显式算法中网格精度的耗费	50
3.6	动态振动的阻尼.....	51
3.6.1	体粘性	51
3.6.2	粘滞压力	52
3.6.3	材料阻尼	53
3.6.4	离散减振器	53
3.7	能量平衡.....	53
3.7.1	能量平衡表述	53
3.7.2	能量平衡的输出	54
3.8	弹簧和减振器的潜在不稳定性.....	55
3.8.1	确定稳定时间增量	57
3.8.2	识别非稳定性	58
3.8.3	消除不稳定性	61
3.9	小结.....	64

第 4 章	有限单元和刚体	65
4.1	有限元.....	65

4.1.1	单元特征	65
4.1.2	实体单元	67
4.1.3	壳单元	69
4.1.4	梁单元	71
4.1.5	桁架单元	72
4.1.6	质量和转动惯量单元	73
4.1.7	弹簧和减振器单元	73
4.2	刚体.....	74
4.2.1	确定何时应用刚体	75
4.2.2	生成刚体	75
4.2.3	刚体单元	76
4.3	例子: 橡胶块体的沙漏问题	76
4.3.1	节点和单元集	77
4.3.2	10x 10 均匀网格: 考察输入文件——模型数据	78
4.3.3	10x 10 均匀网格: 考察输入文件——过程数据	79
4.3.4	运行分析过程	81
4.3.5	结果	81
4.3.6	改善网格的效果	86
4.4	小结.....	89
第 5 章	材料	91
5.1	在 ABAQUS 中定义材料	91
5.2	延性金属的塑性.....	92
5.2.1	延性金属的塑性性能	92
5.2.2	有限变形中的应力- 应变度量	93
5.2.3	在 ABAQUS 中定义塑性	93
5.3	例子: 爆炸荷载作用在加强板上	97
5.3.1	坐标系	98
5.3.2	网格设计	98
5.3.3	节点与单元设置	98
5.3.4	考察输入文件——模型数据	99
5.3.5	考察输入文件——过程数据.....	103
5.3.6	输出.....	104
5.3.7	后处理.....	106
5.3.8	考察分析.....	112
5.4	超弹性	114
5.4.1	应变势能.....	114
5.4.2	用实验数据定义超弹性性能.....	115

5.5	材料阻尼	118
5.6	小结	119
第6章	接触问题.....	120
6.1	接触功能概述	120
6.2	定义接触	120
6.2.1	定义表面.....	120
6.2.2	定义表面之间的相互作用.....	124
6.3	接触算法	125
6.3.1	接触搜寻算法.....	125
6.3.2	施加法向接触约束.....	127
6.3.3	接触面相互作用的模式.....	129
6.4	建立模型	130
6.4.1	正确定义表面.....	130
6.4.2	模型的过度约束.....	136
6.4.3	网格细划.....	136
6.4.4	接触开始时的过盈接触.....	137
6.5	例子: 电路板下落试验.....	137
6.5.1	坐标系.....	138
6.5.2	网格设计.....	138
6.5.3	节点和单元集.....	140
6.5.4	模拟自由落体.....	141
6.5.5	考察输入文件——模型数据.....	141
6.5.6	考察输入文件——过程数据.....	145
6.5.7	运行分析.....	146
6.5.8	后处理.....	148
6.6	例子: 筒的挤压.....	155
6.6.1	网格划分.....	155
6.6.2	节点集和单元集.....	156
6.6.3	前处理——建立模型.....	156
6.6.4	考察 ABAQUS/Standard 屈曲分析的输入文件 ——模型数据.....	157
6.6.5	考察 ABAQUS/Standard 屈曲分析的输入文件 ——过程数据.....	160
6.6.6	运行 ABAQUS/Standard 屈曲分析	160
6.6.7	屈曲分析的结果.....	161
6.6.8	考察 ABAQUS/Explicit 挤压分析的输入文件 ——模型数据.....	162

6.6.9	考察 ABAQUS/Explicit 挤压分析的输入文件 ——过程数据.....	164
6.6.10	运行 ABAQUS/Explicit 挤压分析	165
6.6.11	挤压分析的结果	165
6.7	小结	168
第 7 章	准静态分析.....	169
7.1	显式动态问题类比	169
7.2	加载速率	170
7.2.1	光滑幅值曲线.....	170
7.2.2	结构问题.....	170
7.2.3	金属成型问题.....	172
7.3	质量放大	173
7.4	能量平衡	174
7.5	例子: 盆底的深冲压.....	175
7.5.1	坐标系.....	176
7.5.2	网格设计.....	177
7.5.3	节点集和单元集.....	177
7.5.4	定义合适的步骤时间.....	178
7.5.5	考察输入文件——模型数据.....	180
7.5.6	设计过程定义.....	182
7.5.7	成型阶段 1 的一般方法.....	182
7.5.8	成型阶段 1 中尝试的综述.....	184
7.5.9	成型阶段 1——第 1 次尝试	185
7.5.10	成型阶段 1——第 2 次尝试	188
7.5.11	成型阶段 1——第 3 次尝试	188
7.5.12	三次成型尝试的讨论	190
7.5.13	加速分析的方法	194
7.5.14	退火和第 2 个成型阶段	199
7.5.15	应用 ABAQUS/Standard 进行第 2 个成型阶段后的回弹分析	204
7.6	小结	205
附录 A	例子输入文件.....	206

第 1 章 简 介

ABAQUS 是一套功能强大的模拟工程的有限元软件,其解决问题的范围从相对简单的线性分析到许多复杂的非线性问题。ABAQUS 包括一个十分丰富的、可模拟任意实际形状的单元库。并与之对应拥有各种类型的材料模型库,可以模拟大多数典型工程材料的性能,其中包括金属、橡胶、高分子材料、复合材料、钢筋混凝土、可压缩有弹性的泡沫材料以及类似于土和岩石等地质材料。作为通用的模拟计算工具,ABAQUS 能解决结构(应力/位移)的许多问题。它可以模拟各种领域的问题,例如热传导、质量扩散、电子部件的热控制(热电耦合分析)、声学分析、岩土力学分析(流体渗透/应力耦合分析)及压电介质力学分析。

ABAQUS 为用户提供了广泛的功能,使用起来又非常简单。对 ABAQUS 的输入数据赋值后进入选项块。每一个选项块的开头都冠以一个描述名,例如 * PLASTIC,这个选项块被定义为具有塑性特性。因而,对于查找 ABAQUS 的输入数据是很容易的,并且可以基本了解问题的模型。

大量的复杂问题都可以通过选项块的不同组合很容易地模拟出来。例如,对于复杂的多构件组合问题的模拟是通过把定义每个构件的几何尺寸的选项块与相应的材料性质选项块结合起来。在大部分模拟中,甚至在高阶非线性问题中,用户只需提供一些工程数据,像结构的几何形状、材料性能、边界条件及载荷工况。在一个非线性分析中,ABAQUS 能自动选择相应载荷增量和收敛精度。它不仅能够选择合适参数,而且能连续调节参数以保证在分析过程中有效地得到精确解。用户通过准确地定义参数就能很好地控制数值计算结果。

1.1 ABAQUS 模块

ABAQUS 由两个主分析模块——ABAQUS/ Standard 和 ABAQUS/ Explicit,以及与 ABAQUS/ Standard 组合的两个特殊用途的分析模块——ABAQUS/ Aqua 和 ABAQUS/ USA 构成。ABAQUS 也包含两个交互作用的图形模块——ABAQUS/ Pre 和 ABAQUS/ Post,它们提供了 ABAQUS 图形界面的交互作用工具,从建模的前处理(ABAQUS/ Pre)到显示模拟计算结果的后处理(ABAQUS/ Post)。这些模块之间的关系显示在图 1-1 中。

ABAQUS/ Pre(前处理)

ABAQUS/ Pre(前处理)是一个交互的图形处理器,它通过定义或者输入几何形状,然后离散成有限元网格,使用户很容易地建立模型。材料特性、载荷、和边界条件能够与几何构形相连系。在几何形状定义之后,可以使用 ABAQUS/ Pre 中强大的网格生成功能生成网格。一旦有限元模型完成,就生成了一个 ABAQUS 输入文件。

图 1-1 ABAQUS 模块

这本指南中没有介绍 ABAQUS/ Pre。如果你想知道如何使用 ABAQUS/ Pre,但又不能参加有关的培训班,你可以获得一份 ABAQUS/ Pre 的培训资料。

ABAQUS/ Standard(通用程序)

ABAQUS/ Standard(通用程序)是一个具有通用功能的分析模块,它能够求解广泛的线性和非线性问题,包括结构的静态、动态、热和电反应等。这本指南中没有讨论 ABAQUS/ Standard,感兴趣的读者请参阅 *Getting Started with ABAQUS/ Standard* (ABAQUS/ Standard 有限元软件入门指南,清华大学出版社,1998)。

ABAQUS/ Explicit(显式积分)

ABAQUS/ Explicit(显式积分)是一个具有通用功能的分析模块,利用对时间的显式积分求解动态有限元方程。它适合于分析像冲击和爆炸这样短暂、瞬时的动态事件,对高度非线性问题也非常有效,包括模拟加工成形过程中改变接触条件的问题。这一分析模块是本指南的主要内容。

ABAQUS/ Post(后处理)

ABAQUS/ Post(后处理)是一个交互的图形后处理器,它支持 ABAQUS 分析模块的所有功能,并且对计算结果的描述和解释提供了范围很广的选择。这本指南将介绍 ABAQUS/ Post。

ABAQUS/ Aqua(波动载荷)

ABAQUS/ Aqua(波动载荷)模块的一系列功能可以附加在 ABAQUS/ Standard 上应用。它的目的是模拟海上结构,例如海洋石油平台。其中某些功能包括模拟波浪、风载荷及浮力的影响。在本指南中没有介绍 ABAQUS/ Aqua。

ABAQUS/ USA(水下冲击分析)

ABAQUS/ USA 是 ABAQUS/ Standard 与应用于水下震动冲击分析的唯一软件 USA 的组合模块。这本指南中没有介绍 ABAQUS/ USA。

1 2 ABAQUS 入门指南

1 2 1 本指南的目的

本指南的目的是指导新用户应用 ABAQUS/ Explicit 分析连续体、壳体和刚架问题和利用 ABAQUS/ Post 显示所得到的结果。除了必要的有限元方法知识之外,不需要有任何 ABAQUS 的预备知识就可以得益于这本指南。

1 2 2 如何使用指南

这本指南共有 7 章,每一章都介绍一个或多个主题。大部分章节都包括围绕主题所展开的简短讨论或思考以及一两个指导性的例题。由于在这些例题中包含许多使用 ABAQUS 的实用性忠告,请读者务必细心地阅读。通过这些例题,介绍了 ABAQUS 后处理中观察计算结果所必需的功能。

本章是对 ABAQUS 和应用指南的一个简短介绍。第 2 章的讨论将集中围绕一个简单的桁架算例,包含 ABAQUS 输入文件的基本使用。当第 2 章结束时,你将理解如何准备 ABAQUS 模拟的输入文件、检验数据、分析解答、在后处理中观察结果。第 3 章介绍了显式动态分析的概念,应用波传播的例题解释了“稳定性”的概念,以及给出了一个简单振动弹簧的例题。在第 4 章里展示了 ABAQUS/ Explicit 中所提供的主要单元库,所包括的例题中描述了网格中的沙漏问题。在第 5 章中展示了材料模型,主要强调了弹 - 塑性金属和超弹性橡胶,其例题为加强钢板上受爆炸载荷的问题。在第 6 章中用两个例题解释了接触模型:一块安装在保护泡沫坐垫中的电路板,受到来自地面的冲击;一个吸能方管被挤压在两块刚性板中。在第 7 章中介绍了应用 ABAQUS/ Explicit 求解准静态的问题,所描述的例题为多步骤薄板加工成型模拟,这一模拟需要在 ABAQUS/ Explicit 和 ABAQUS/ Standard 中进行数据交换,更有效地进行薄板成型和弹性回弹的分析。

1 2 3 本指南的使用约定

在指导例子中所用各种字符类型如下:

由 COURIER FONT 字符表示的内容,应当完整不变地键入到输入文件、ABAQUS/ Post 或计算机中,例如:

```
* SOLID SECTION, ELSET = LUG, MATERIAL = STEEL
```

将被键入一个输入文件,以及

```
abaqus job = skew. nl
```

将被键入计算机去运行 ABAQUS。

尖括号中的字符选项表明由用户提供的数据,例如一个名字或数值将被代入:

```
* SOLID SECTION, ELSET = 单元集 ,  
MATERIAL = 材料名
```

Avant - Garde 字符选项是由 ABAQUS 产生的信息：

```
Element 1000 does not exist .
```

1 3 ABAQUS 手册

ABAQUS 手册的内容是广泛的,特别是当使用 ABAQUS 时将要经常使用这些手册。在下文中简要介绍了 ABAQUS/ Explicit 和 ABAQUS/ Post 手册。其他的 ABAQUS/ Standard 和 ABAQUS/ Pre 手册也可以得到。

ABAQUS/ Explicit User 's Manual(用户手册)

该手册有印刷出版和随计算机内的 ABAQUS 软件阅读两种形式。这是经常使用的 ABAQUS 手册,分为两卷,包含了 ABAQUS/ Explicit 的所有功能。由于这本指南经常涉及到 ABAQUS/ Explicit 用户手册,因此,当进行算例时,必须具备一份手册。

ABAQUS/ Explicit Example Problem Manual (例题手册)

这卷手册包括范围广泛的例题,有大的算例问题和小的检测问题。通过例题表明如何将 ABAQUS/ Explicit 应用于广泛的一般问题的分析中。每个例子的描述都包括对进行一个有意义分析的方法的讨论和确定。当采用一个从前没有用过的功能时,可以查找一个或多个例子来操作,以便熟悉和正确地使用这个功能。

检测问题用来验证所有 ABAQUS/ Explicit 的性能产生正确的结果。这些问题趋向于小型化,包含一个或者少数单元。类似于例题的作用,当首次使用这些性能时,检测问题提供了有用的信息。

对所有列入手册的输入文件,在手册的末尾附有所使用的单元及关键词的索引。作为 ABAQUS 软件安装的一部分,同时提供了所有的输入文件。所有版本的 ABAQUS 都提供一公用程序 ABAQUS/ Fetch,以便灵活地提取这些文件。其实用句法是：

```
abaqus fetch job= <文件名>
```

用户可以从装入软件的目录中读取任何例题或者检测输入文件,因此,可自行模拟计算并显示其结果。

ABAQUS Theory Manual (理论手册)

这本手册包括 ABAQUS 理论方面的详尽的讨论,但没有要求作为程序的依据。

ABAQUS/ Post User 's Manual (后处理用户手册)

这本手册描述了 ABAQUS/ Post 全部的可执行命令。

ABAQUS/ Post Quick Reference Guide (后处理快速参考指南)

这本小册子包含 ABAQUS/ Post 命令的摘要。

1 3 1 HKS 公司提供的其它文集

下面是 HKS 公司提供的与 ABAQUS 有关系的其它文集：

- 公司主页——HKS 的公司主页在国际互联网上 (www.abaqus.com), 包含一系列 ABAQUS 软件的有关信息。
- 安装指南——这个文本提供给每位 ABAQUS 用户, 向用户说明如何安装 ABAQUS 和如何形成软件安装时的特殊环境。在用户手册中也包含了一些这方面的信息。
- 质量保证计划——这个文本描述了 HKS 公司的质量保证(QA)程序。
- 讲义——教学笔记和专题培训班可以帮助用户理解许多 ABAQUS 的使用性能, 如金属加工成型或热传导。教学笔记用于技术报告会, HKS 公司在技术报告会上帮助用户改进他们对 ABAQUS 软件的理解和使用。某些用户通常对其使用的软件非常了解, 因此, 讲义并不作为必备的学习参考材料。HKS 可以提供的讲课笔记目录包括在文件价格表中, 或者可以在网址 www.abaqus.com 中看到。
- 定期出版物——HKS 公司定期出版 ABAQUS/ News(新闻)和 ABAQUS/ Answers(问答)。ABAQUS/ News 包括诸如发布 ABAQUS 软件版本更新, 培训班专题等信息。ABAQUS/ Answers 中包括涉及 ABAQUS 软件使用的具体专题技术文章。如果读者想将这些出版物列在邮购清单上, 请与 ABAQUS 当地的办公室联系。

1 4 技术支持

HKS 公司通过遍及世界各地的办公室和代理处对 ABAQUS 软件提供广泛的技术支持。我们将这种技术支持作为所提供服务的的一个重要部分。欢迎就 ABAQUS 软件的任何疑问及所关心的方面与我们联系。可以通过电话、传真、电子邮件或通信与我们的办公室取得联系。

我们的技术支持工程师可以解释 ABAQUS 软件的特点, 并对单元、材料或分析过程的正确选择提出建议。他们也能就特定模拟问题中的使用程序提供一般的指导性的信息。如果你关心一个分析过程, 我们建议当你在建立模型时, 而不是在庞大的、复杂的模拟临近完成, 且遇到了较大问题时再与我们取得联系。除了技术支持工程师之外, 我们也有专人负责帮助用户解决与计算机系统相关的问题。如软件安装和 ABAQUS 运行环境调试。

当呼叫 HKS 公司技术支持热线或者在书面联系中, 请准备好下列信息:

- 你正在使用的 ABAQUS 软件版本, 版本号在数据文件的开头已注明。
- 你正在运行 ABAQUS 软件的计算机型号。
- 发生问题的特征, 包括尽可能详细的错误信息。
- 你已经做过的工作或测试。

当你打电话就特定的问题请求帮助时, 请看一下 ABAQUS 输出文件, 这样就能够回答技术支持工程师可能询问你的任何问题。

技术支持工程师将会从模型描述和你所介绍的错误信息两方面诊断所发生的问题。工程师常常会要求你提供模型构图,以便能理解你的模型。你的问题及 ABAQUS 软件所发生的问题描述得越清楚,工程师就越容易帮助你,并迅速地给你回答。如果工程师不能利用你所提供的信息对遇到的问题作出诊断,你可以通过电子邮件、录音带或软盘传送输入数据文件。

我们欢迎人们就改善该软件或手册所提出的任何建议。在更新版本时,我们会考虑加强和改进这方面的工作。

对学术版本的技术支持

根据学术版本协议的条款,除非学术机构购买了技术支持,我们一般不对其提供技术支持。欲知详情,请与我们联系。

第 2 章 **ABAQUS 基础**

一个完整的 ABAQUS 分析过程,通常由三个明确的步骤组成:前处理、模拟计算和后处理。这三个步骤的联系及生成的相关文件如下:

前处理(**ABAQUS Pre**)

在这个步骤中必须确定物理问题的模型和生成一个 ABAQUS 输入文件。尽管一个简单分析可直接应用 ABAQUS 字符输入文件,但是通常的作法是由 ABAQUS Pre 或其它前处理把问题的模型图形化。

模拟计算(**ABAQUS Explicit**)

此步骤是应用 ABAQUS Explicit 求解输入文件所确定的数值问题,模拟计算通常在内存中运行。一个应力分析的算例包括输出位移和应力,并存储在文件中准备进行后处理。完成一个求解过程所需要的时间可以从几秒到几天,这取决于所模拟问题的复杂程度和计算机的运算能力。

后处理(**ABAQUS Post**)

当模拟分析完成后,你可以使用 ABAQUS Post 或者其它后处理对结果进行评估。后处理一般是由 ABAQUS Post 或其它的后处理程序来实现的。ABAQUS Post 提供了各种各样的方法显示结果,包括彩色等值线图、动画、变形形状图,以及 $x - y$ 平面图。

2.1 ABAQUS 模型的组成

ABAQUS 模型包括一系列不同的组成部分,他们共同描述所分析的物理问题。一个最小的模型也包括如下信息:几何形状、单元截面特性、材料数据、载荷和边界条件、分析类型和输出要求。

几何形状

有限单元、节点和刚体确定了模型的基本几何形状。模型中的每一个单元都代表结构的离散部分,依次地,许多单元相互连接组成了结构,单元之间通过公共节点彼此相互连接,节点坐标和单元连接,即哪些节点属于哪个单元,构成了几何模型。在模型中所有的单元和节点的集合叫做网格。通常,网格仅仅近似于实际结构的几何形状。

在网格中所采用的单元类型、形状及位置以及单元的总数,在模拟过程中都会影响计算的结果。网格的密度越高(例如,在网格中有大量的单元),结果的精度越高。当网格密度增加时,分析的结果将收敛到唯一解,但用于分析计算所需的时间将增加。虽然从数值模型所获得的解答可以是唯一的,但它一般仍是所模拟物理问题的近似解答。近似的程度取决于模型的几何形状、材料特性、边界条件和载荷工况,即这些数值模拟在多大程度上与实际物理问题趋于一致。

单元截面特性

在 ABAQUS/ Explicit 中许多单元的几何形状不能完全由它们的节点坐标来定义。例如,复合材料壳的叠层或 I 字型截面梁的尺度划分就不能通过单元节点来定义。这些附加的几何数据由单元的物理特性定义,而且对于定义模型整体的几何形状是非常必要的。第 4 章将描述每一单元类型的必要截面特性。

材料数据

对于所有单元必须确定其材料特性。然而高质量的材料数据是很难得到的,尤其是对于一些比较复杂材料模型。ABAQUS/ Explicit 计算结果的有效性受材料数据质量的限制。

加载和边界条件

ABAQUS/ Explicit 提供各种加载选择,最一般的加载形式包括:

- 集中载荷
- 压力和表面载荷
- 体力,例如重力
- 热载荷

边界条件是约束模型的某一部分保持固定不变(零位移)或移动规定量的位移(非零位移)。

输出要求

一个有限元的分析能产生大量的输出数据。你可以要求仅输出合理解释分析结果的必要数据。

2 2 输入文件的格式化

ABAQUS 的输入文件是把前处理 (ABAQUS/ Pre) 和求解器 (ABAQUS/ Explicit) 沟通起来的手段。输入文件包括对数值模型的完整描述, 是一个直观的、基于由关键词格式组成的字符文件, 因此很容易应用字符编辑改动。事实上, 通过直接的输入文件可能更容易处理小型问题的模拟分析。

我们利用图 2-1 所示起重机桥式吊架的例子说明 ABAQUS 输入文件的基本格式。吊架是一个简单的铰接桁架, 其左端点为固定铰支座、右端点设置在辊轴上, 各构件可以绕节点自由地转动。由于吊架是一个二维模型, 它没有离面的位移。当一个 10kN 载荷加在吊架上, 如图 2-1 所示, 模拟计算是确定结构的挠度和构件上的峰值应力。

既然这个问题非常简单, 那么其 ABAQUS 输入文件也是简洁和易懂的。对于这个算例的 ABAQUS 完整输入文件如程序表 2-1 所示, 也可以参考附录 A .1。例如, 输入文件分成两个明确的部分, 第一部分模型数据 (model data) 包括定义结构分析中所有必要的信息。第二部分分析过程 (history data) 包括定义模型的加载历程。分析过程可能被进一步分解为一些子步骤, 每一子步骤代表模拟过程的分开部分。

材料参数 一般性质: $\rho = 7800\text{kg/ m}^3$; 弹性性质: $E = 200 \times 10^9\text{Pa}$, $\nu = 0.3$
所有单元均为 5 mm 直径的圆形钢杆

图 2-1 桥式吊架的受力图

输入文件是由一定数量的选项块组成, 并包括对模型局部数据的说明。每一个选项块开始时都有一行关键字行, 然后通常紧跟一行或多行数据行。每一行不能超过 132 个字符。

表 2-1 桥式吊架的数据文件

2 2 1 关键字行

关键字(或选项块)通常由一个星号(*)开始。例如, * NODE 是确定节点坐标的关键字, * ELEMENT 是确定单元编码的关键字。关键字后面通常是跟随一些必要的或可选的参数,在 * ELEMENT 选择块中需要参数 TYPE,因为在定义单元时总是必须要确定单元类型。例如,

```
* ELEMENT, TYPE = T2D2
```

表明我们定义的是 T2D2 单元(两个节点的二维桁架单元)。许多可选的参数仅在特定

的环境下定义。例如，

```
* NODE, NSET = PART1
```

表明将把在这个选项块中所定义的全部节点送入标志为 PART1 的节点集中。尽管在许多情况下这样作是很方便的,但这不是基本的要求。

关键字和参数事实上是相互独立的并且必须用足够多的字符来确定其唯一性。参数用逗号分开。如果参数要赋值,必须用等号(=)将参数和赋值连接起来。

偶尔地,由于所需要的参数太多无法在一行内用字符来完成,在这种情况下用一个逗号结束这行,接下一行可作为继续行。例如，

```
* ELEMENT, TYPE = T2D2,  
ELSET = FRAME
```

是一个有效的关键字行。

2 2 2 数据行

关键字行下面通常紧接数据行,和关键字行中的参数不同,所提供的数据用表格定义更为容易。这些数据的例子包括节点坐标、单元或材料性能表,例如应力 - 应变曲线。在 ABAQUS/ Explicit 用户手册中特别说明了所要求数据的选项块。例如,定义桥式吊车桁架模型的节点的选择项是:

```
* NODE  
101,0 .,0 .,0 .  
102,1 .,0 .,0 .  
103,2 .,0 .,0 .  
104,0 5,0 866,0 .  
105,1 5,0 866,0 .
```

每一数据行的第 1 个数是定义节点号的整型量。第 2,3,4 的数据是定义节点坐标 x_1, x_2, x_3 的浮点数。

这些数据可以包括由整型数、浮点数或字母数字混合而成。浮点数值可以用多种不同的方法输入;例如,ABAQUS 辨认以下数据为数值 4:

```
4 .0      4 .      4      4 .0E + 0  
4E + 1   40 .E - 1   .4 + 1   40 . - 1
```

通常数据组由逗号分开,如前所述和程序表 2-1 所示,在数据行中允许输入数据有一定的任意间隔。输入数据也可以定义成固定格式,即在这行中的每一组数有一个特定的位置,像 ABAQUS/ Explicit 用户手册中定义的那样。通过一些前处理生成的输入数据文件行使用了固定格式。

2 3 生成一个输入文件

利用图 2-1 给出的桥式吊架模型来描述如何建立 ABAQUS 输入数据文件。通过这

一部分的阅读,你必须用计算机内的一种编辑器把数据敲入一个文件。ABAQUS 输入文件必须是一个以 inp 为扩展名的文件。文件标识符被选择用于标识所分析的问题,叫做工作名。在本算例中使用文件名为“ 构架 ”,因此其输入文件名为 frame inp。

在这本指南中的所有其它算例都假定用前处理 (ABAQUS/ Pre) 去生成网格。然而,这个算例的目的是帮助你理解 ABAQUS 输入文件的结构和格式,你必须亲手敲入这个输入文件,而不是应用前处理。

2 3 1 单位

在开始定义这个或任何模型之前,需要决定所使用的单位系统。ABAQUS 没有固定的单位系统。所有输入数据都必须确定一致的单位。一些通用的单位系统列在下面表 2-1 中:

表 2-1 通用的单位系统

量词	SI	SI (mm)	US 单位 (ft)	US 单位 (inch)
长度	m	mm	ft	in
载荷	N	N	lbf	lbf
质量	kg	tonne(10 ³ kg)	slug	lbf s ² / in
时间	s	s	s	s
应力	Pa (N/ m ²)	MPa(N/ mm ²)	lbf/ ft ²	psi (lbf/ in ²)
能量	J	mJ (10 ⁻³ J)	ft lbf	in lbf
密度	kg/ m ³	tonne/ mm ³	slug/ ft ³	lbf s ² / in ⁴

这本指南全部采用的是 SI 单位系统。

2 3 2 坐标系统

你也需要确定所采用的坐标系统。在 ABAQUS 中的整体坐标系统遵守右手直角坐标法则。对于本算例定义整体坐标 1—轴为桁架的横轴, 2—轴为竖轴(图 2-2), 3—轴垂直于桁架的平面。原点($x_1 = 0, x_2 = 0, x_3 = 0$)在桁架的左下角。

图 2-2 模型的坐标系统和原点

2 3 3 网格

你必须选择单元的类型并设计网格。对于给定的问题生成一个合适的网格需要一定的经验。对于本算例你将用单一的桁架单元去模拟构架的每一部分,如图 2-3 所示。

图 2-3 有限元网格

一个桁架单元只能承受轴向的拉压载荷,这对于模拟铰接桁架结构是理想的,例如桥式吊架。在这本指南中的第 4 章说明了桁架单元,同时在 ABAQUS/ Explicit 用户手册中说明了每一种 ABAQUS 所提供的桁架单元。在 ABAQUS 用户手册的单元类型索引中,可以很容易地查找任何一个特殊单元。每当你首次使用一个单元,你必须阅读这些说明,其中包括单元连接和需要定义单元几何形状的任何单元截面性质。

应用在桥式吊架上的桁架单元如图 2-4 所示。

图 2-4 两节点桁架单元(T2D2)

节点和单元的编号仅是识别标志,它们通常由 ABAQUS/ Pre 或其它前处理程序自动生成。对于节点和单元编号的唯一要求是它们必须是正整型量。允许编号出现间断,且与节点和单元的序号无关。如果任何已经定义的节点与单元不相联系,就将自动被删除,自动删除的节点将不包括在模拟计算中。

在本例中,我们使用的节点和单元编号如图 2-5 所示。

图 2-5 桥式吊架模型中的节点和单元编号

2 3 4 模型数据

输入文件的首要部分必须包括所有的模型数据。这些数据定义了将被进行分析的结构。吊车桁架算例的模型数据包括以下内容：

- 几何图形：节点坐标
 单元连接
 单元截面特性
- 材料性能

标题

任何 ABAQUS 输入文件的开始必须冠以 * HEADING。在 * HEADING 下面的数据行用字符来说明所模拟的问题,它将提供对输入文件的准确描述以便日后对该文件进行识别。此外,最好是明确地定义单位系统,整体坐标系的方向等。例如,对吊车桁架问题的 * HEADING 程序块包含如下内容：

```
* HEADING
Two-dimensional overhead hoist frame,SI Units
```

节点坐标

一旦选择了网格设计和节点编号方案就能确定每一个节点的坐标。对于这个问题使用的编号如图 2-5 所示。使用 * NODE 来定义节点坐标,NSET 参数的赋值定义了节点集的名字和确定了属于该节点集的节点。该选项块的每一数据行的格式为

```
< 节点号 > , <  $x_1$  - 坐标 > , <  $x_2$  - 坐标 > , <  $x_3$  - 坐标 >
```

吊车桁架模型的节点属于节点集 NALL,定义如下：

```
* NODE
101,0 .,0 .,0 .
102,1 .,0 .,0 .
103,2 .,0 .,0 .
104,0 5,0 .866,0 .
105,1 5,0 .866,0 .
```

单元

吊车桁架的构件被模拟成桁架单元。对于桁架单元每一数据行的格式是

```
< 单元编码 > , < 节点 1 > , < 节点 2 >
```

其中节点 1 和节点 2 分别为单元的端点(见图 2-4),例如,单元 16 连接节点 103 和 105(见图 2-5),因此定义这个单元的数据行是

```
16,103,105
```

在 * ELEMENT 中参数 TYPE 是选择被定义单元的类型。在本算例情况下,将采用

T2D2 桁架单元。

在 ABAQUS 中最有用的特色之一是通过名称来引用已经定义了的节点和单元集。在 * ELEMENT 选项中通过使用参数 ELSET, 将已定义在选项中的所有单元附加到称为 FRAME 的单元集中。这个单元集名最多不得超过 8 个字符且必须以字母开头。由于单元截面特性是通过单元集名来赋值, 在模拟过程中的所有单元必须至少属于某个单元集。

对于吊车桁架模型完整的 * ELEMENT 选项(见图 2-5)表示如下:

```
* ELEMENT, TYPE = T2D2, ELSET = FRAME
11,101,102
12,102,103
13,101,104
14,102,104
15,102,105
16,103,105
17,104,105
```

单元截面特性

每个单元都必须引入一个单元截面特征参数。为此,在 ABAQUS/ Explicit 用户手册中描述了每个单元所需要的适当的单元截面选项以及其它的几何数据(如果有)。

对于 T2D2 单元必须采用 * SOLID SECTION 语句, 并且给出一个包括单元截面积的数据行。如果给出的是空数据行, 截面积就被默认为 1.0。

在本算例中的所有单元为圆杆, 直径为 5mm, 截面积为 $1.963 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ 。

大部分单元截面选项需要 MATERIAL 参数, 由材料性能定义的名字将被单元参考。这个名字最长为 8 个字符且必须以字母开头。

在本算例中的所有单元都具有相同的截面特性并且由相同的材料制造。一般来说, 在一个分析过程中单元可以有各自不同的单元截面特性; 例如, 模型中不同的部件可以由不同的材料制造。通过单元集使单元和材料性质联系起来。对于桥式吊架模型的单元被设置到一个叫 FRAME 的单元集中, 然后, 在单元截面选项中的单元集 FRAME 被用来作为 ELSET 参数的值。在输入文件中将写入如下的选项语句:

```
* SOLID SECTION, ELSET = FRAME, MATERIAL = STEEL
* * diameter = 5mm --> area = 1.963E - 5 m^2

1.963E-5,                                     输入文件的任意行若
桁架单元的截面积                             以 * * 开始即为注释行
```

材料

使得 ABAQUS 成为真正通用的有限元程序的特征之一是几乎任何材料模型都能用于任何单元。一旦网格生成, 网格中的单元就能适当地与材料模型结合。

ABAQUS 拥有大量的材料模型, 其中许多包含有非线性性质。在这个桥式吊架算例中我们采用材料特性的最简单形式: 线弹性。在 ABAQUS/ Explicit 用户手册中提供了关于所有可能在 ABAQUS/ Explicit 中使用的材料模型的讨论。

在小应变条件下线弹性适用于许多材料,特别是对于达到屈服点前的金属材料。它的特点是应力和应变呈线性关系(胡克定律),如图 2-6 所示:
用两个常数表示材料的特性:杨氏模量 E , 和泊松比 ν 。

图 2-6 线弹性材料

在 ABAQUS 输入文件中,材料定义起始于 * MATERIAL 选项。参数 NAME 被用于结合材料和单元截面特性。例如,

材料的子选择项直接跟随 * MATERIAL 选项。对于材料的完整定义采用一些子选择项是必要的。直到重新给定其它的 * MATERIAL 选项或一个非材料选项,与材料有关的所有子选择项被列在最新的 * MATERIAL 选项中。
不考虑热膨胀影响(它将被定义在 * EXPANSION 材料选项中),两个材料选项 * ELASTIC 和 * DENSITY 用来定义线弹性材料。其格式是:

```
* ELASTIC
< E > , <  $\nu$  >
* DENSITY
<  $\rho$  >
```

因此,对于钢制桥式吊架,完整的、各向同性的、线弹性材料的定义将输入到你的输入文件中,如:

```
* MATERIAL, NAME = STEEL
* ELASTIC
200 .E9, 0.3
* DENSITY
7800 .,
```

由于结构各个部分的描述都已给出,这个问题的模型定义部分现在已经完成。

2 3 5 过程数据

过程数据是定义问题模拟过程发生的顺序。加载过程被分解为一系列的步骤,每一

步骤定义一个结构加载的不同阶段。每个步骤包含以下信息：

- 模拟的类型(动态或者热处理)
- 载荷和约束
- 输出要求

在这个算例中,我们感兴趣的是桥式吊架对于突然加在其中心 10kN 力所引起的动态响应,其左端点固定而右端点为滚轴约束(见图 2-1)。这种加载是一个单一的事件,因此在模拟中只需要一个步骤。

* STEP 选项被用作一个步骤开始的标志,类似 * HEADING 选项,可以在其后跟随包含步骤题头的一些数据行。在分析中通过设置 NLGEOM 参数等于 YES 或者 NO,可以选择是否包括几何非线性的影响,默认值为 YES。在你的桥式吊架模型中,使用如下 * STEP 选项:

```
* STEP
10kN central load
```

分析过程

紧接 * STEP 选项,必须立刻定义分析过程(模拟类型)。在 ABAQUS/ Explicit 中的两种选项为 * DYNAMIC, EXPLICIT 和 * ANNEAL。程序 * ANNEAL 模拟在金属加热到高温时发生的应力松弛和塑性应变。在本算例中,我们希望确定结构在 0.01s 时期的动态响应。因此,我们应用 * DYNAMIC, EXPLICIT。在输入文件中增加如下语句:

```
* DYNAMIC, EXPLICIT
, .01
```

在步骤中余下的输入文件是定义边界条件、载荷和输出要求,其输入的先后顺序视方便而定。

边界条件

边界条件被用于给定模型中某些部分的已知位移。这些部分在模拟过程中可以被约束而保持固定(有零位移)或可以指定非零位移量。无论那一种情况,约束都是直接加到模型的节点上。

在某些情况下节点可以被完全约束以至在任何方向上都不能移动(例如在我们模型中的 101 节点)。而在另外一些情况下节点在某些方向上受到约束但在其它方向上可以自由移动,例如,节点 103 在垂直方向上被约束而在水平方向上可以自由移动。节点可以移动的方向叫自由度(dof)。在我们的二维吊车桁架算例中,每个节点都能在整体坐标 1 - 轴和 2 - 轴方向上移动,因此在每个节点上有两个自由度。如果桁架有离面位移,问题将变成三维问题,每个节点将有三个自由度。由于梁和壳单元的节点还有代表转动部分的自由度,因此,自由度可以高达六个。

在 ABAQUS 中对于自由度的约定标注如图 2-7 所示。

1 1-方向的平动

图 2-7 对于自由度的约定标注

- 2 2-方向的平动
- 3 3 - 方向的平动
- 4 绕 1 - 方向上的转动
- 5 绕 2 - 方向上的转动
- 6 绕 3 - 方向上的转动

在节点上的运动自由度取决于连接于该节点的单元类型。二维桁架单元 T2D2 在节点上有两个运动自由度:1 - 和 2 - 方向上的平动(自由度 1 和自由度 2)。

通过应用 * BOUNDARY 选项可以定义节点的约束和指定被约束的自由度。每个数据行的格式是:

< 节点号 > , < 第一个自由度 > , < 最后一个自由度 > , < 位移的量值 >
用第一个自由度和最后一个自由度来表示所给出被约束自由度的范围,例如,

101,1,3,0.0

在节点 101 上约束自由度 1、2 和 3,即有零位移(节点不能在整体坐标 1 - ,2 - 和 3 - 方向上移动)。

如果在数据行上没有指定位移的量值,那么它就假设为零。如果仅约束节点的一个方向,数据行中的第三项可以是空白或等于第二项。例如,只在 2 方向上约束 103 节点(自由度 2),下面数据行中的任何一种格式都可以使用:

103,2,2,0.0

或者

103,2,2

或者

103,2

节点边界条件可以累加输入。因此,节点 101 在 1 和 2 方向的约束可以有如下输入格式:

101,1
101,2

一些常用的组合约束可以直接用下面约束名称的形式给出,而不必说明每一个自由度的约束:

ENCASTRE	在节点上约束所有的位移和转动
PINNED	约束所有的平动自由度
XSMM	对 x_1 平面的对称约束
YSMM	对 x_2 平面的对称约束
ZSMM	对 x_3 平面的对称约束
XASMM	对 x_1 平面的反对称约束
YASMM	对 x_2 平面的反对称约束
ZASMM	对 x_3 平面的反对称约束

因此,在桥式吊架模型中约束 101 节点上所有自由度的另外表示方法是

101, ENCASTRE

对于我们的吊架模型,完整的 * BOUNDARY 语句块是

```
* BOUNDARY
101, ENCASTRE
103, 2
```

在本算例中的所有约束都是在整体坐标系 1 或 2 方向。而在许多情况下确定约束的方向与整体坐标方向无关。

加载

荷载是引起结构产生位移或变形的任何因素,包括:

- 集中载荷
- 分布载荷
- 非零边界条件
- 体力
- 温度(引起材料热膨胀)

事实上没有真正意义上的集中或点加载,载荷总是施加在一定的有限面积上。然而,如果承载的面积相似或小于这个区域中单元的面积,则可以近似地理想化视其为施加在节点上的集中载荷。

集中载荷的说明可用 * CLOAD 选项,其数据行格式为:

< 节点号 > , < 自由度 > , < 荷载量值 >

在本算例模拟中,载荷 - 10kN 施加在 102 节点 2 方向上,选项为:

```
* CLOAD
```

```
102,2, - 10 .E3
```

默认情况下,ABAQUS/ Explicit 假设载荷是在分析开始时突然施加的。

输出请求

有限元分析总是能够产生大量的输出信息。ABAQUS 允许你控制和管理这些输出,这样只需要输出那些用于解释模拟分析结果的信息。ABAQUS/ Explicit 提供了三种形式的输出:

- 重新启动输出(.res 文件)。写入完整的模型状态,作为 ABAQUS/ Post 的数据库和进行继续分析。
- 文件输出(.fil 文件)。用于输出大量的模型数据,类似于重新启动文件。该输出的输出频率较小。
- 过程输出(.sel 文件)。适用于少量的模型数据,和高频率的输出,以获得某变量在分析的过程中高分辨率曲线。

ABAQUS 重新启动文件有两个功能。它用于重新启动模拟,允许模拟计算分阶段运行。它也是 ABAQUS/ Post 用于图形显示结果的数据库。在 * RESTART 选项中,参数 NUMBER INTERVAL 设置分析过程中间隔的数量,以此间隔记录模型的状态。ABAQUS/ Explicit 总是在步骤的开始和结束时记录重新启动数据。例如,如果 NUMBER INTERVAL = 10,ABAQUS/ Explicit 将记录 11 次重新启动状态:一次在步骤的开始,另外 10 次按间隔平均分配整个步骤。在你的输入文件中关于整个步骤记录 11 次模型状态,包括如下的输入命令:

```
* RESTART, WRITE, NUMBER INTERVAL = 10
```

ABAQUS/ Explicit 有两种方式获得特殊的输出变量:文件输出和过程输出。文件输出比重启动输出内容少,因为文件输出仅包括所需要的输出变量,而重新启动输出包括整个模型的状态。因为很高的输出频率,过程输出一般需要仅输出模型的小的子集。对于本模型分析我们感兴趣的是节点的位移 U;在约束节点上的反作用力 RF;和在构件上的应力 S。应用下面的选项,在计算步骤中将这此变量写入输出文件 21 次:

```
* FILE OUTPUT, NUMBER INTERVAL = 20
```

```
* NODE FILE, NSET = NALL
```

```
U, RF
```

```
* EL FILE, ELSET = FRAME
```

```
S
```

在 * HISTORY OUTPUT 选项中,参数 TIME INTERVAL 用来记录过程输出中经历的时间。时间间隔越小,记录的过程输出越频繁。为了获得加载节点(节点 102)的竖向位移的高分辨率过程,应用下面的选项:

```
* HISTORY OUTPUT, TIME INTERVAL = 1 .E - 6
```

```
* NSET, NSET = NLOAD
```

```
* NODE HISTORY, NSET = NLOAD
```

```
U2
```

现在,由于已经完成了对分析步骤中所有数据需要的定义,用 * END STEP 选项结束这个步骤:

```
* END STEP
```

至此,输入文件已经全部完成。可以将已经生成的输入文件与程序表 2-1 中列出的完整输入文件进行比较。数据存入在 frame .inp,然后退出编辑器。

2.4 检验输入数据

对模拟问题生成了输入文件后,就准备运行程序和分析。遗憾的是,由于打字错误、或不正确的输入、或数据的遗失,在输入文件中经常出现错误。因此运行程序计算之前,应该进行数据检查 (datacheck) 分析。做此分析,确信输入文件 frame .inp 在当前的目录里,并且键入如下命令:

```
abaqus job=frame datacheck interactive
```

如果这个命令执行结果出现一个错误信息,说明安装在计算机里的 ABAQUS 已经被修改过了。你将与系统管理员取得联系找出适当的命令去运行 ABAQUS。在本分析中 job = frame 参数指定的工作名是 frame,这个分析中涉及到的所有文件将如同标识符一样有这个共同的工作名,这样就很容易识别它们。

分析过程将是交互式的运行,类似于下面的信息将显示在计算机的屏幕上:

```
ABAQUS JOB frame
BEGIN USER INPUT PROCESSING
Mon Feb 2 14 06 21 EST 1998
Run / usr/ abaqus/ bin/ pre x
ABAQUS/ EXPLICIT is running on a Category B machine .
ABAQUS License Manager checked out 5 Network Tokens
Mon Feb 2 14 06 36 EST 1998
END OF USER INPUT PROCESSING
Run PACKAGE
Mon Feb 2 14 06 36 EST 1998
Run / usr/ abaqus/ bin/ package x
ABAQUS/ EXPLICIT is running on a Category B machine .
ABAQUS License Manager checked out 5 Network Tokens
.
.
.
```

```

Mon Feb 2 14 06 42 EST 1998
END OF PACKAGE
BEGIN EXPLICIT ANALYSIS
Mon Feb 2 14 06 42 EST 1998
Run / usr/ abaqus/ bin/ explicit x
ABAQUS/ EXPLICIT is running on a Category B machine .
ABAQUS License Manager checked out 5 Network Tokens
Mon Feb 2 14 06 47 EST 1998
END OF ANALYSIS
RUN EXTRACT
Mon Feb 2 14 06 47 EST 1998
Run / usr/ abaqus/ bin/ extract .x
.
.
.
Mon Feb 2 14 06 48 EST 1998
END OF EXTRACT
ABAQUS JOB frame COMPLETED

```

当完成数据检查分析之后,你会发现 ABAQUS 已经生成了一些附加的文件。数据检查分析的过程如果遇见任何错误,信息将被写入 frame .dat 数据文件。这个数据文件是文本文件,能在编辑器中显示和打印出来,数据文件的部分内容将在下一页给出。

尝试在编辑器中阅读数据文件。文件行有 132 个字符长度,因此,要保证显示窗口的宽度足以容纳字符长度。在文件的开始是首页,显示正在对问题进行运算分析的 ABAQUS 版本信息。首页也包括你所在地区 ABAQUS 办公室或代理处的电话号码、地址及联系信息,他们能够为你提供技术支持和帮助。

接着首页是显示输入文件的记录。在输入文件里若加入 * PREPRINT, ECHO = NO 选项可以取消这些显示信息。

接着输入文件显示的是 ABAQUS 可选择处理项目的清单。这是错误和警告信息首先出现的地方。所有错误信息都有一个 * * * ERROR 字头,而警告信息有一个 * * * WARNING 字头。由于这些信息总是以相同的方式开头,搜寻数据文件中的警告和错误信息是简单明了的。当错误是一个语法问题时(例如: ABAQUS 遇到无法辨认的输入),错误信息的下面一行内容来自引起错误的输入文件。

数据文件的其余部分是一系列包含所有模型数据和过程数据的表格,它们将被用来检查是否有任何明显的错误或遗漏。对于大规模问题的模型来说这些表格占据了大量的磁盘空间,为了避免上述情况可以在输入文件中加入选项 * PREPRINT, MODEL = NO, HISTORY = NO。

任何警告和错误信息记录在数据文件, frame .dat 或者状态文件 frame .sta 中。带有注释的数据文件表如下所示:

2 5 运行分析过程

退出编辑器并对输入文件作必要的修改。当完成数据检查分析且没有发现错误信息后,可以发出运行分析的命令

```
abaqus job=frame continue interactive
```

如下这些信息将显示在屏幕上:

```
ABAQUS JOB frame
Wed Dec 3 13 54 40 GMT 1997
BEGIN EXPLICIT ANALYSIS
Run / usr/ abaqus/ bin/ explicit .x
END OF ANALYSIS
```

在运行一个模拟之前,总要执行一个数据检查分析过程,以确保输入数据的正确性。然而,可以通过下面命令使数据检查分析和模拟计算结合起来

```
abaqus job=frame interactive
```

如果模拟计算过程需要可观的运行时间,通过省略 interactive 参数可以使计算很方便地在计算机内部运行:

```
abaqus job=frame
```

(以上命令可以应用在符合 ABAQUS 安装标准的计算机工作站上。ABAQUS 的任务可以在某些计算机上进行批处理排队运行。如果有任何问题,请向计算机系统管理员咨询如何在你的系统上运行 ABAQUS。)

2.6 结果转换

在分析过程完成之后,通过完整分析的所有状态信息将被压缩存储在状态文件(.abq)和集成文件(.pac),当前的重新启动文件(.res)仅包含模型的未变形状态。同样,可选择的结果文件(.sel)包含文件输出和过程输出。应用下面的命令,使输出成为格式化,这样 ABAQUS/ Post 可以阅读需要转换的文件:

```
abaqus job=frame convert=all
```

另外,在提交作业时,你也可以要求同时进行转换,应用下面的命令:

```
abaqus job=frame analysis convert=all
```

使用这一方法,ABAQUS/ Explicit 运行作业,一旦运行成功即转换文件。

当文件被转换之后,你可以应用 ABAQUS/ Post 对结果进行后处理。

2.7 应用 ABAQUS/ Post 后处理

由于在模拟过程中生成了大量的数据,所以图形后处理很重要。ABAQUS/ Post 允许你用各种不同方法显示图形化的结果,包括绘制变形图形,轮廓线图形,动画和绘制 $x-y$ 图形。对于这个算例你可以用 ABAQUS/ Post 做一些基本的模型检验和显示该桁架的变形图形。

运行 ABAQUS/ Post

运行 ABAQUS/ Post ,键入下面命令:

```
abaqus post
```

在屏幕的左下角即出现一个带 * 标识符的浅灰色窗口。当你键入命令,它们出现在窗口的底部。欲打开在模拟过程中所生成的重新启动文件,需键入如下命令:

```
* RESTART, FILE=frame
```

除了敏感的文件名外,命令的字母可以大写或小写。当指定一个重新启动文件的名字时,扩展名 .res 可以省略。ABAQUS/ Post 自动地把扩展名加在你所指定的文件名后面。

绘制模型

绘制模型的未变形状态(图 2-8),用命令:

```
* DRAW
```

在 ABAQUS/ Post 里,命令 * SET 可用来选择控制图形显示的参数。例如,用命令:

图 2-8 未变形状态

```
* SET, N NUMBERS = ON  
* DRAW
```

把节点编号加到所绘制的模型图上(图 2-9)。

图 2-9 节点编号图

通过使用命令 * SHOW 可以检查一个参数的当前设置。例如,下面能查看是否节点编号将被画出:

```
* SHOW, N NUMBERS
```

对于 ABAQUS/ Post 中的任何命令或参数只需要敲入足以使其相互区别的字符就可以了。例如,在上述情况中

```
* SH, N N
```

其效果将相同。空格也可以省略,因此命令将变得更加简短

```
SH, NN
```

当你继续使用 ABAQUS/ Post, 你可能想尽量缩写所使用的命令。
从所画图形中删除节点编号,重复命令 * SET, 给定参数为 OFF

```
* SET, N NUMBERS = OFF
```

如果没有数值赋予一个参数,就默认为其值为 OFF, 因此如下命令将与上面命令形

式有同样效果：

```
* SET, N NUMBERS
```

一个单一 * SET 命令可以有多个参数赋值。例如，既画单元也画节点编号 (图 2-10), 用命令

```
* SET, N NUMBERS = ON, EL NUMBERS = ON
```

```
* DRAW
```

单元编号以下画线格式标注出来以区别于节点编号 (见图 2-10)。

图 2-10 节点和单元编号图

通过使用上移箭头按键，你可以重新调出以前的命令来继续 ABAQUS/ Post。这些命令可以进行编辑，你所键入的字符将覆盖掉现有的字符。

画位移形状

画吊架位移形状的图形 (图 2-11)，在 * DRAW 命令中使用 DISPLACED 参数，但是不能显示节点和单元编号。默认情况下，位移形状是不放大缩小的。对于此分析，设置放大系数 (DMAG) 为 100，因此位移形状是明显的。

图 2-11 未变形前 (虚线) 和位移后的图形 (实线)

```
* SET, N NUMBERS = OFF, EL NUMBERS = OFF
* SET, D MAGNIFICATION = 100
* DRAW, DISPLACED
```

返回到自动比例,应用命令

```
* SET, D MAGNIFICATION = off
* DRAW, DISPLACED
```

记住不必要再键入命令 * DRAW, DISPLACED。在 * 标识符后面简单键击 2 次向上箭头(`<<`), 先前的命令 * DRAW, DISPLACED 会再次出现。现在, 键击回车键, 一个新的变形图形就会显示出来。未变形图默认用红色表示, 而变形图在其前面由白色显示。为防止画出未变形的图(图 2-12), 用命令:

```
* SET, UNDEFORMED = OFF
* DRAW, DISPLACED
```

图 2-12 省略未变形图的位移形状图

用 ABAQUS Post 检查过程数据

在数据检查 (datacheck) 阶段, 模型数据和过程数据都被写入重新启动文件。因此, 在模拟运行之前, 你可以用 ABAQUS Post 检查输入数据是否正确。你已经学会如何画模型和显示节点及单元编号图, 这些对于检查 ABAQUS 是否正确使用网格是有用的工具。

施加在模型上的边界条件和集中载荷也能用 ABAQUS Post 来显示。下列命令生成一个图形, 显示了在桥式吊架模型上(图 2-13)的边界条件(小三角形)和集中载荷(一个箭头):

```
* SET, BC DISPLAY = ON, LOAD DISPLAY = ON
* DRAW
```

退出 ABAQUS Post

退出 ABAQUS Post, 用命令:

图 2-13 在桥式吊架模型上的施加载荷和边界条件

* END

2.8 小结

- ABAQUS 输入文件是前处理(ABAQUS/ Pre)和求解器(ABAQUS/ Explicit)之间的交流工具。它包含了对分析模型的完整描述。
- 输入文件包括两个部分:定义结构的模型数据和定义荷载的过程数据。
- 输入文件的每个部分由一定量的选项组成,每个选项包括关键字行和可能接下来的几个数据行。
- 一旦生成了输入文件,就可以进行数据检查分析。连同 ABAQUS/ Explicit 是如何对你的模型进行翻译的描述,以及错误和警告信息均被打印在数据文件(.dat)中和状态文件(.sta)中。
- 应用 ABAQUS/ Post 和数据检查阶段生成的重新启动文件,可以用图形检验模型的几何形状、载荷及边界条件。
- 通常在数据文件(.dat)中最容易查出材料性能方面的错误。
- 在数据检查分析获得通过后,运行 ABAQUS 分析程序,没有必要重复数据检查阶段,应用如下的命令:abaqus job = <输入文件名> continue。
- 在 ABAQUS/ Post 从重新启动文件(.res)或(.fil)能够阅读分析结果之前,你必须应用下面的命令转换输出:abaqus job = <输入文件名> convert = all。
- 重新启动文件是二进制文件,并且包含结果,将利用 ABAQUS/ Post 做图形后处理。
- ABAQUS/ Post 允许以多种不同的方法使图形结果可视化。

第 3 章 显式动态分析概述

显式动态分析程序对于求解广泛的、各种各样的非线性固体和结构力学问题是一个非常有效的工具。隐式求解器如 ABAQUS/ Standard 常常得到好评。从用户的观点来看,显式与隐式方法的不同特性为:

- 显式方法需要一个只依赖于模型的最高自然频率,而与荷载类型及持续时间无关的微小时间增量。一般取 10 000 至 100 000 个步长来模拟,但是每步所花费的机时是比较小的。
- 隐式方法并没有时间增量步长的限制,增量的大小通常参考精度和收敛情况来决定。通常隐式模型所用的增量步数要比显式模型小几个数量级。然而,由于在每个步长中必须求解一整套平衡方程,所以隐式方法的每一步骤成本比显式方法要大得多。

了解了两个程序之间的这些特性,能帮助你更好地选择适合你的问题的方法。

3.1 ABAQUS/ Explicit 适用的问题类型

在讨论显式动态分析程序如何运行之前,先了解一下哪几类问题适合于 ABAQUS/ Explicit 是有必要的。通过这个手册我们已经归纳了以下几类一般适用于 ABAQUS/ Explicit 的问题。

高速动力学事件

最初发展显式动力学方法就是为了分析那些用隐式方法(如采用 ABAQUS/ Standard)分析起来极端费时的高速动力学事件。作为此类模型的例子,将在第 5 章中分析一块钢板在爆炸荷载下的反应。因为荷载非常短而且非常大,结构反应变化非常快。精确追踪通过板的应力波对于获得动力反应的结果是非常重要的。因为应力波与系统的最高阶频率相关联,要得到精确解答需要许多微小的时间增量。

复杂接触问题

用显式动力学方法叙述接触的条件比用隐式方法容易得多,结果是 ABAQUS/ Explicit 能迅速地分析包括许多独立物体相互作用的复杂接触问题。ABAQUS/ Explicit 特别适合于分析受冲击荷载和随后在复杂接触条件下结构内部相互作用的结构瞬间动力反应。第 6 章介绍的电路板跌落试验就是此类的问题。在这个例子中,一块封装在泡沫塑料中的电路板从一米的高度掉到地板上。这个问题包括封装与地板之间的冲击,以及电路板与封装之间接触条件的快速变化。

复杂的后屈曲问题

ABAQUS Explicit 很容易解决不稳定的后屈曲问题。在此类问题中随着荷载的施加,结构的刚度剧烈地变化。后屈曲问题常常包括接触相互作用的影响。这两种情况可以用第 6 章方筒受挤压的例子予以说明。当方筒受挤压时,它产生严重屈曲和自身折叠,在内侧和外侧都会引起自我接触。

高度非线性准静态的问题

由于各种各样的原因,ABAQUS/ Explicit 常常在解决本质上是静态的某些类型问题时是非常有效的。类似锻造、滚压以及薄板成型等准静态过程模拟问题通常属于这一类。薄板成型通常包括非常大的膜变形、褶皱和复杂的摩擦接触条件。屈曲成型问题有如下特性:大扭曲、瞬间变形和接触相互作用。在第 7 章介绍了一个准静态的薄板成型模拟。

材料失效和破坏

在隐式分析程序中,材料的失效和破坏常常导致严重的收敛困难。但是 ABAQUS Explicit 能很好地模拟此类材料。混凝土开裂模型是一个材料失效的例子,其拉伸裂缝引起材料的刚度变为负值。金属模型延性破坏是一个材料破坏的例子,其材料刚度能够降低一直到零,此时这个单元从模型中彻底去掉了。

3 2 显式动态分析的有限元方法

3 2 1 应力波传播的描述

本节试图让读者从概念上理解应用显式动态算法时应力是如何在模型中传播的。在描述的例子中,我们考虑应力波沿着一个包含三个单元的杆件模型传播的过程,如图 3-1 所示。我们研究杆件随着时间增长的各个状态。

图 3-1 自由端作用有集中力的杆件的初始状态

在第一个时间增量段,施加在节点 1 的集中力 P 的作用结果是使节点 1 具有一个加速度 \ddot{u}_1 。这个加速度引起节点 1 产生速度 \dot{u}_1 ,接着在单元 1 内引起应变速率 $\dot{\epsilon}_{e1}$ 。沿第一个时间增量段内对应变速率进行积分获得了单元 1 的应变增量 $d\epsilon_{e1}$ 。总应变 ϵ_{e1} ,是初始应变 ϵ_0 ,和应变增量的和。此问题中初始应变为零。一旦单元的应变求出之后,可以通过材料的本构关系求出单元的应力 σ_{e1} 。对于线弹性材料,应力就是弹性模量与总应变的乘积。这个过程如图 3 - 2 中所示。在第一个时间增量段,节点 2 和 3 因为没有力

作用其上,所以没有移动。

$$\ddot{u}_1 = \frac{P}{M_1} \quad \dot{u}_1 = \ddot{u}_1 dt \quad \dot{\epsilon}_{e1} = \frac{\dot{u}_1}{l} \quad d\epsilon_{e1} = \dot{\epsilon}_{e1} dt$$
$$\epsilon_{e1} = 0 + d\epsilon_{e1} \quad \sigma_{e1} = E \epsilon_{e1}$$

图 3-2 自由端作用有集中力的杆件在第一时间增量段结束时的状态

在第二个时间增量段,由单元 1 的应力得到内力,施加到与单元 1 相连的节点上,如图 3-3 所示。这些单元应力随后用于计算节点 1 和节点 2 的动力平衡方程。

$$\ddot{u}_1 = \frac{P - F_{e1}}{M_1} \quad \dot{u}_1 = \dot{u}_1^{old} + \ddot{u}_1 dt$$
$$\ddot{u}_2 = \frac{F_{e1}}{M_2} \quad \dot{u}_2 = \ddot{u}_2 dt$$
$$\dot{\epsilon}_{e1} = \frac{\ddot{u}_2 - \ddot{u}_1}{l} \quad d\epsilon_{e1} = \dot{\epsilon}_{e1} dt \quad \epsilon_{e1} = \epsilon_{e1}^{old} + d\epsilon_{e1} \quad \sigma_{e1} = E \epsilon_{e1}$$

图 3-3 杆件在第二时间增量段开始时的状态

这个过程继续下去,到第三个时间增量段开始时,单元 1 和 2 已存在应力,以及节点 1、2、和 3 存在了作用力,如图 3-4 所示。这个过程继续下去,直到总的分析时间结束。

图 3-4 杆件在第三时间增量段开始时的状态

3.2.2 时间积分

应用一个时间段的运动学条件去计算下一个时间段的运动学条件, ABAQUS/ Explicit 用中心差分方法对时间进行积分求解显式运动方程。在时间段开始时,程序求解动

力平衡方程,即用节点质量矩阵 M ,乘以节点加速度 \ddot{u} ,等于节点的合力(外力 P 与单元内力 I 之间的差):

$$M\ddot{u} = P - I$$

在当前时间段开始时(t 时刻)的加速度用下面公式求解:

$$\ddot{u}|_{(t)} = (M)^{-1} (P - I)|_{(t)}$$

因为显式算法常采用一个对角的、或者块状的质量矩阵,所以求解加速度是不麻烦的,不必同时求解联立方程。任何节点的加速度完全取决于节点质量和作用在节点上的力,致使节点计算成本很低。

加速度是由中心差分法的时间积分得到的,即假定加速度为常数以求得速度的变化,用这个速度的变化值加上前一个时间段中点的速度来确定当前时间段的中点速度:

$$\dot{u}|_{t+\frac{t}{2}} = \dot{u}|_{t-\frac{t}{2}} + \frac{(t|_{(t+\frac{t}{2})} + t|_{(t-\frac{t}{2})})}{2} \ddot{u}|_{(t)}$$

速度沿时间积分的结果加上此时间段开始时的位移,确定了时间段结束时的位移。

$$u|_{(t+\frac{t}{2})} = u|_{(t)} + t|_{(t+\frac{t}{2})} \dot{u}|_{t+\frac{t}{2}}$$

这样,在时间段开始时,提供了满足动力学平衡条件的加速度。知道了加速度,通过对时间的“显式”求解,可以进一步求出速度和位移。所谓“显式”是指时间段结束时的状态仅取决于此时间段开始时的位移、速度和加速度。此方法精确积分常值加速度。为了应用该方法产生更精确的结果,时间增量段必须分得足够的小以保证加速度在时间段中近似为常数。由于时间增量段必须很小,因此,一般的分析需要成千上万个时间段。幸运的是,由于不必同时求解联立方程,每一个增量计算成本较低。大部分的计算机资源消耗于计算确定作用在节点上的单元内力。单元计算包括确定单元应变和应用材料本构关系(单元刚度)确定单元应力,然后计算内力。

下面是显式动力学方法的运算法则总结:

1. 节点计算

a. 动力平衡方程

$$\ddot{u}_{(t)} = M^{-1} (P_{(t)} - I_{(t)})$$

b. 对时间显式积分

$$\dot{u}|_{t+\frac{t}{2}} = \dot{u}|_{t-\frac{t}{2}} + \frac{(t|_{(t+\frac{t}{2})} + t|_{(t-\frac{t}{2})})}{2} \ddot{u}$$

$$u|_{(t+\frac{t}{2})} = u|_{(t)} + t|_{(t+\frac{t}{2})} \dot{u}|_{t+\frac{t}{2}}$$

2. 单元计算 .

a. 根据应变速率 $\dot{\epsilon}$, 计算单元应变增量 $d\epsilon$.

b. 根据本构关系计算应力 σ .

$$\sigma_{(t+\frac{t}{2})} = f(\sigma_{(t)}, d\epsilon)$$

c. 汇集节点内力 $I_{(t+\frac{t}{2})}$.

3. 设置 $t+\frac{t}{2}$ 为 t , 返回到步骤 1。

3 2 3 显式时间积分方法的优越性

显式方法特别适用于求解需要分成许多小的时间增量来达到高精度解的高速动力学事件。如果事件经历的时间较短,求解的效率较高。

接触问题和其它一些极度非连续事件在显式方法中很容易表达清楚并且能够一个节点一个节点地进行求解而不必迭代。节点加速度能够用来调整外力和内力在接触中的平衡。

显式方法最显著的特性是没有整体切线刚度矩阵,而这是隐式方法所需要的。因为模型的状态为显式求解,不需要迭代和收敛准则。

3 3 自动时间增量和稳定性

3 3 1 显式方法的条件稳定性

基于时间段开始时刻 t 的模型状态,应用显式方法求解,模型的状态通过时间的增量 Δt 发生变化。状态能够发生变化而且要保留对问题的精确描述,一般的时间增量非常短。如果时间增量比最大的时间增量长,此时间增量就是所谓超出了稳定极限。超过稳定极限的可能后果就是数值不稳定,会导致解答不收敛。一般不可能精确地确定稳定极限,而是采用保守的估计值。稳定极限对可靠性和精确性有很大的影响,所以必须一致和保守地确定。为了计算的有效性,ABAQUS/ Explicit 选择尽可能接近而且不超过稳定极限的时间增量。

3 3 2 稳定极限的定义

稳定极限是依据系统的最高频率(ω_{max})来定义的。无阻尼时稳定极限由下式定义

$$t_{stable} = \frac{2}{\omega_{max}}$$

有阻尼时由下式定义

$$t_{stable} = \frac{2}{\omega_{max} \sqrt{1 + \zeta^2}}$$

ζ 是具有最高频率的模型的临界阻尼比。(为了控制高频振动,ABAQUS/ Explicit 常常引入一些体积粘性形式的小量阻尼。)也许与工程直觉相反,阻尼通常是减小稳定极限的。

系统的实际最高频率是基于复杂的一组相互作用的因素,要计算出确切的值是不大可行的。代替的办法是应用一个有效、保守的简单估算。不考虑模型整体,我们估算模型中每个单独构件的最高频率,它常常与扩展的模态有关。可以观察到由一个个单元为基础确定的最高频率常常比有限元组合模型的最高频率要高。

基于一个个单元的估算,稳定极限可以用单元长度 L^e 和材料波速 C_d 重新定义:

$$t_{stable} = \frac{L^e}{C_d}$$

因为没有明确怎么确定单元的长度,对于多数单元类型,例如,一个扭曲的四边形单元,上

述方程只是实际一个个单元的的稳定极限的估算。作为近似值,可以采用最短的单元尺寸,但是结果估算并不一定总是保守的。单元长度越短,稳定极限越小。波速是材料的一个特性:

$$C_d = \frac{E}{\rho}$$

其中 E 是杨氏模量, ρ 是密度。材料的刚度越大,波速越高,结果是稳定极限越小。密度越高,波速越低,结果是稳定极限越大。

我们的简单的稳定极限定义提供了一些直觉的理解。稳定极限是扩展波通过由单元特征长度定义的距离的短暂时间。如果我们知道最小的单元尺寸和材料的波速,我们就能估算稳定极限。例如,如果最小单元尺寸是 5mm,扩展波速是 5 000m/ s,稳定的时间增量就在 1×10^{-6} s 量级。

3 3 3 ABAQUS/ Explicit 的自动时间增量

ABAQUS/ Explicit 用类似前一节讨论过的那些方程在分析的过程中调整时间增量的大小,致使基于当前模型状态的稳定极限永不越界。时间增量是自动的,不需用户干涉,甚至不需要建议初始的时间增量。稳定极限是从数值模型得来的数学概念。因为有限元程序包含所有的相关细节,所以能够确定出一个有效并且保守的稳定极限。然而,ABAQUS/ Explicit 容许用户在必要时可不考虑自动时间增量。第 3.9 节简要的讨论了人工时间增量控制。

3 3 4 质量缩放控制时间增量

因为质量密度影响稳定极限,在某些环境下,缩放质量密度能够潜在地提高分析的效率。例如,因为许多模型的复杂的离散性,有些区域常常包含着控制稳定极限的非常小或者形状极差的单元。这些控制单元常常数量很少并且可能存在于局部区域。通过只增加这些控制单元的质量,稳定极限可以显著的增加,同时对模型整体动力学行为的影响是可以忽略的。

ABAQUS/ Explicit 的自动质量缩放功能可以保证这些单元不影响稳定极限。质量缩放采用了两种基本方法:直接定义一个缩放因子或者给那些质量需要缩放的单元逐个定义稳定的时间增量。这两种方法容许对稳定极限附加用户控制,详细介绍请参考 ABAQUS/ Explicit 用户手册。然而,使用质量缩放时要小心,因为模型质量的显著变化也许反而会影响结果。

3 3 5 材料对稳定极限的影响

材料模型通过其扩展波速的效果影响稳定极限。在线性材料中,波速是常数;所以,在分析过程中稳定极限的唯一变化来自于此分析中最小单元尺寸的变化。在非线性材料中,例如带有塑性的金属,波速随着材料屈服和材料刚度的变化而变化。在整个分析中,ABAQUS/ Explicit 监督材料中有效的波速,并且在稳定性估算时用到了每个单元的当前材料状态。刚度在屈服之后下降,减小了波速并且相应地增加了稳定极限。

3 3 6 网格对稳定极限的影响

因为稳定极限大致与最短的单元尺寸成比例,所以使单元的尺寸尽可能大是非常有益的。不幸的是,对于精确的分析采用一个精细的网格常常是必要的。为了能够获得最高的稳定极限,在要求的网格精度水平下,最好的方法是采用一个尽可能均匀的网格,因为稳定极限是以模型中最小单元的尺寸为基础的,甚至一个单独的微小单元或者形状极差的单元都能够迅速降低稳定极限。为了查找错误,ABAQUS/ Explicit 在状态文件 (.sta)中提供了网格中具有最低稳定极限的 10 个单元的一个清单。如果在模型中包含一些单元,其稳定极限比网格中其它单元小得多,将模型网格重新划分得更加均匀,或许是值得的。

3 3 7 数值不稳定性

在大多数情况下,ABAQUS/ Explicit 对于大多数单元保持了稳定性。但是,有可能需要定义弹簧和减振器单元,这样它们在分析过程中变为不稳定的。因此,如果在你的分析过程中发生了数值不稳定,能够认识到它是非常有用的。如果此情况真的发生了,结果通常是无界的、动荡的和没有物理意义的。在本章的最后例题中,应用简单的弹簧和减振器问题来说明不稳定性。

3 4 例子:棒中的应力波传播

通过展示应力沿棒的扩展情况,本例题说明了前面描述过的显式动态分析的一些根本思想,它还说明了在求解时稳定极限以及网格细划和材料的影响。

棒的尺寸如图 3-5 所示。为了使问题成为一维应变问题,所有四个侧面都由滚轴支撑,这样,用这个三维模型模拟一个一维问题。材料为钢材,其特性如图 3-5 所示。棒的自由端承受一个大小为 1.0×10^5 Pa 的爆炸荷载,如图 3-6 所示,爆炸荷载的持续时间为 3.88×10^{-5} s。

图 3-5 波在棒中传播问题描述

应用材料特性,利用前一节介绍过的方程我们能够计算材料的波速。

图 3-6 爆炸荷载 - 时间曲线

$$\begin{aligned} C_d &= \frac{E}{\rho} = \frac{207 \times 10^9 \text{ MPa}}{7800 \text{ kg/m}^3} \\ &= 5.15 \times 10^3 \text{ m/s} \end{aligned}$$

以这个速度,波在 $1.94 \times 10^{-4} \text{ s}$ 时通过了棒的固定端。因为我们希望看到应力随着时间沿着棒的长度传播,我们需要一个足够精细的网格来精确捕捉应力波。看起来使爆炸荷载发生在 10 个单元的跨度内是适合的。因为爆炸荷载持续了 $3.88 \times 10^{-5} \text{ s}$,也就是说我们希望爆炸持续时间乘以波速等于 10 个单元的长度:

$$L_{10\text{el}} = (3.8 \times 10^{-5} \text{ s}) C_d = 0.2 \text{ m}$$

10 个单元的长度为 0.2m。因为棒的长度为 1.0m,这意味着我们要在长度方向上划分 50 个单元。为了使网格统一,我们在每个横向上划分了 10 个单元,建立起一个 $50 \times 10 \times 10$ 的网格。如图 3-7 所示。

图 3-7 $50 \times 10 \times 10$ 网格

应用图 3-7 所示的坐标系统,在你的前处理中建立这个网格。

3 4 1 节点和单元集

为了施加荷载和边界条件以及观察输出结果,需要定义节点和单元集。在各个面上定义相应的节点集,如图 3-8 所示。

图 3-8 节点集

定义如图 3-9 所示的单元集。并且定义一个包括在棒中间 3 个单元的单元集。所选择的这些单元,其靠近自由端的面距自由端的距离分别为 0.25m,0.5m,0.75m,如图3-10所示。这些单元用于后处理。

图 3-9 模型的单元集

图 3-10 后处理用的单元集

3 4 2 考察输入文件——模型数据

应用你的前处理,我们假定现在已经建立了基本的网格。本节将考察你的输入文件并包括附加信息。

模型描述

在 * HEADING 选项中,下面是适合于这个模拟的描述:

* HEADING

stress wave propagation in a bar - $50 \times 10 \times 10$ elements
SI units (kg , m , s , N)

单元

检查和确信你是正确使用了单元类型(C3D8R)。前处理有可能指定不正确的单元类型。在你的模型中 * ELEMENT 选项块应该以如下语句开始：

* ELEMENT, TYPE = C3D8R , ELSET = BAR

在你的模型中,给定的 ELSET 参数也许不是 BAR。如果需要,将它改成 BAR。

截面性质

所有单元的截面性质都是相同的。用单元集 BAR 来连接单元的材料性质。

* SOLID SECTION, ELSET = BAR, MATERIAL = STEEL

材料性质

这是一根钢制的棒,我们假定它为线弹性,杨氏模量为 207×10^9 Pa,泊松比为 0.3,密度为 7800 kg/m^3 。在你的模型中采用以下的材料选项块：

* MATERIAL,NAME = STEEL
* ELASTIC
207.0E9, 0.3
* DENSITY
7800.0

固定端边界条件

在棒的右端,固定所有的平移自由度。约束棒的上下前后四个表面,使这些面为辊轴支撑而且只有轴向应变。应用你前面定义的节点集,在模型中加入以下边界条件：

* BOUNDARY
NFIX, 1, 3
NFRONT, 3, 3
NBACK, 3, 3
NTOP, 2, 2
NBOT, 2, 2

定义幅值

爆炸荷载在最大值瞬间施加并且维持恒定达 3.88×10^{-5} s。然后,荷载突然撤销,保持常值为零。 * AMPLITUDE 选项用来定义荷载和边界条件的倍数变化。在 * AMPLITUDE 选项的下一数据行,数据对用下面形式给出：

< 时间 > , < 幅值 > , < 时间 > , < 幅值 > , 等。

每个数据行最多可以输入四对数据。ABAQUS 认为幅值在最后一次给定后是不变

的。定义爆炸荷载的幅值如下：

```
* AMPLITUDE, NAME = BLAST
0., 1., 3.88E-5, 1., 3.89E-5, 0, 3.90E-5, 0.
```

3.4.3 考察输入文件——过程数据

步骤定义

步骤定义指出这是一个历时 2.0×10^{-4} s 的显式动态分析。对于这个步骤,还可以给出一个描述性的标题。

```
* STEP
Blast loading
* DYNAMIC EXPLICIT
2.0E-4
```

荷载

在棒的自由端施加 1.0×10^5 Pa 的压力荷载,就是加在前面定义过的叫做 ELOAD 的单元集上。在任意给定时间,压力荷载是在 * DLOAD 选项下指定的值乘以荷载曲线上的插值而得到的值。为了正确施加荷载,你需要确定单元所有自由面的表面标识。对于附录 A 中定义的单元,自由表面为与压力标识符 P3 相应的面 3。面标识取决于 * ELEMENT 选项中的节点定义顺序,如图 3-11 所示。当施加荷载时,应用名为 BLAST 的幅值。

```
* DLOAD,AMPLITUDE = BLAST
ELOAD, < P1,P2,P3,P4,P5,or P6 >,1.0E5
```

如果你在前处理中定义压力荷载,会自动生成正确的面标识。

图 3-11 C3D8R 单元面的标识

体粘性

为了使应力波尽可能地保持尖锐,设置二次体粘性(在本章的后面节段里讨论)为零。

```
* BULK VISCOSITY  
,0.0
```

输出要求

删除任何默认的由前处理生成的输出要求。四个重新启动状态足够显示应力波在网格中的传播。另外,通过设定时间间隔为零,要求输出 EOUT 单元集每一个增量步的应力(S11)历史。

```
* RESTART, WRITE, NUMBER INTERVAL = 4  
* HISTORY OUTPUT, TIME INTERVAL = 0.0  
* EL HISTORY, ELSET = EOUT  
S11,  
* END STEP
```

3.4.4 运行分析

在将你的输入存储到文件 wave-50 × 10 × 10.inp 之后,用以下命令运行分析并且转换结果:

```
abaqus job=wave-50 × 10 × 10 analysis convert=all
```

如果你的分析没有完成,检查数据文件 wave-50 × 10 × 10.dat 和状态文件 wave-50 × 10 × 10.sta 中的错误信息。修改输入文件去掉错误信息。如果在运行分析时还遇到一些问题,将你的输入文件与附录 A 中的一个文件进行比较。

状态文件

状态文件 wave-50 × 10 × 10.sta 包括惯性力矩信息,接着是有关初始稳定极限的信息。10 个具有最低稳定时间限制的单元按列排列:

状态文件的后面是有关求解过程的信息。

3 4 5 后处理

启动 ABAQUS/ Post, 键入如下命令使它从工作中读入重新启动文件:

```
abaqus post restart = wave. 50 × 10 × 10
```

我们希望观察沿着棒的长度分布的应力是怎样随着时间变化的。为了实现这个目的,在分析过程中,我们将观察三个不同时间的应力分布。

对于每前三个重新启动时间间隔,近似地沿着棒的中心建立一条 1 - 方向的应力 (S11) 曲线。用带有 NODE LIST 和 GENERATE 参数的 * PATH 命令定义一个直线的路径。按照附录 A 的输入数据,下面的节点号沿棒中心形成一条直线。在你的模型中的节点号很有可能与此不同。在 * RESTART 命令中应用 NUMBER INTERVAL 参数选择适当的重新启动状态。(因为格式的限制,下面的输入将关键词分成了两行显示。因为 ABAQUS/ Post 不能从一行继续输入至下一行,每条命令事实上必须单独在一行中。)

```
* RESTART, NUMBER INTERVAL = 1
* PATH, VARIABLE = S11, NAME = S - 1, NODE LIST, GENERATE,
ABSOLUTE, DISTANCE, UNDEFORMED
> 100011, 105011, 100
>
* RESTART, NUMBER INTERVAL = 2
* PATH, VARIABLE = S11, NAME = S - 2, NODE LIST, GENERATE,
ABSOLUTE, DISTANCE, UNDEFORMED
> 100011, 105011, 100
>
* RESTART, NUMBER INTERVAL = 3
* PATH, VARIABLE = S11, NAME = S - 3, NODE LIST, GENERATE,
ABSOLUTE, DISTANCE, UNDEFORMED
> 100011, 105011, 100
>
```

现在我们就有了三条名为 S - 1, S - 2 和 S - 3 的曲线。设置线形,使三条曲线能够较清晰的在同一幅图中显示。

```
* CURVE STYLE, NAME = S - 1, LINE TYPE = SOLID, LABEL = S11 - T1
* CURVE STYLE, NAME = S - 2, LINE TYPE = DOTTED, LABEL = S11 - T2
```

```
* CURVE STYLE, NAME = S - 3, LINE TYPE = DASHED, LABEL = S11 - T3
```

用以下命令改变图线的外观：

```
* GRAPH AXES, YTICKMARK = 20E3, YMAX = OFF,  
XTITLE = DISTANCE ALONG BAR, YTITLE = STRESS - S11
```

现在用下面的命令画出如图 3-12 所示的 3 条曲线：

```
* DISPLAY CURVE  
> S - 1, S - 2, S - 3  
>
```

图 3-12 在 3 个不同时间内应力(S11)沿着棒传播

在三条曲线的每一条,我们能够看到应力波对棒长度的影响大约均为 0.2m。这个距离必须对应于爆炸波在作用时间内传播的距离,可以通过简单计算来验证。如果波前长度为 0.2m 并且波速为 $5.15 \times 10^3 \text{ m/s}$,波传播 0.2m 所用的时间为 $3.88 \times 10^{-5} \text{ s}$ 。正如所预料的,这就是所施加爆炸荷载作用的时间。应力波沿棒传播时并不是严格的方波。特别在应力突然改变之后有回复和摆动。本章后面要讨论的线性体粘性,对回复有阻尼,所以并未对结果有负面的影响。

另一种研究结果的方法是观察棒中三个不同点的应力时间历史。对于给定点的应力在应力波通过时增长,一旦应力波完全通过,此点的应力就会在零附近反复振荡。

设定 ABAQUS/ Post 从选定的结果文件中阅读历史曲线：

```
* SELECTED RESULTS FILE, FILE = WAVE. 50 x 10 x 10
```

从前面建立的单元集 EOUT 中读入曲线。这个单元集包括棒中心沿棒长度方向 0.25m, 0.5m, 0.75m 位置处的单元。

```
* READ CURVE, VARIABLE = S11, ELEMENT = EOUT, NAME = S11
```

这个命令建立了一个包括三条曲线的曲线集 S11, 每一条曲线对应于单元集 EOUT 中的一个单元。各条曲线的名字分别为 S11 - 1, S11 - 2, S11 - 3。设置这三条曲线的每一条曲线形式。

```
* CURVE STYLE, NAME = S11 - 1, LINE TYPE = SOLID, LABEL = S11 - 0 .25
* CURVE STYLE, NAME = S11 - 2, LINE TYPE = DOTTED, LABEL = S11 - 0 .5
* CURVE STYLE, NAME = S11 - 3, LINE TYPE = DASHED, LABEL = S11 - 0 .75
```

用下面的命令设置曲线的外观：

```
* SET, XY REPORT = OFF
* GRAPH AXES, YTICKMARK = OFF, YMAX = OFF, XTITLE = TOTAL TIME,
YTITLE = STRESS - S11
```

用下面的命令画出图 3-13 中的三条曲线：

```
* DISPLAY CURVE
> S11
>
```

图 3-13 沿棒长方向三点(0 .25m,0 .5m,0 .75m)的应力(S11)的时间历史

3 4 6 网格对稳定时间增量和 CPU 时间的影响

在第 3 3 节,我们讨论过网格细划如何影响稳定极限和 CPU 时间。这里我们将以波扩展问题为例来说明这些影响。我们从方形单元的一种合理的精细网格开始,沿长度方向分为 50 个单元,两个横向方向各分为 10 个单元。为了达到说明问题的目的,我们将用一种粗糙的 25 × 5 × 5 网格,然后说明在各种方向上细划网格如何改变 CPU 时间。四种网格如图 3-14 所示。

图 3-14 从粗到精的网格划分

表 3-1 显示了本问题的 CPU 时间随着网格细划的改变。基于在这本指南中介绍的简化方程,表格的前一半提供了期望值;表格的后一半给出了在计算机工作站上由 ABAQUS/ Explicit 运行分析得到的结果。

表 3-1 网格细划和求解时间

网 格	简 化 理 论			实 际		
	$t_{stable} (s)$	单元数	CPU 时间 (s)	最大 $t_{stable} (s)$	单元数	CPU 时间(s)
$25 \times 5 \times 5$	A	B	C	$6.06e-6$	625	3
$50 \times 5 \times 5$	$A/2$	$2B$	$4C$	$3.14e-6$	1250	12
$50 \times 10 \times 5$	$A/2$	$4B$	$8C$	$3.12e-6$	2500	25
$50 \times 10 \times 10$	$A/2$	$8B$	$16C$	$3.11e-6$	5000	50

对于理论解答,我们选择 $25 \times 5 \times 5$ 的最粗网格为基础状态,并且定义了稳定的时间增量、单元数和 CPU 时间分别为变量 A 、 B 和 C 。随着网格的细划,发生了两件事:最小的单元尺寸减小了,网格的单元数增加了。它们都影响到 CPU 时间的增加。在后一级别的细划网格 $50 \times 5 \times 5$ 中,最小单元尺寸减小了一半,但是单元的数目增加了一倍,致使 CPU 时间比前一个网格增长了四倍。然而,进一步加倍网格数目至 $50 \times 10 \times 5$,没有改变最小单元的尺寸;而仅仅是加倍了单元数。因此,CPU 时间比 $50 \times 5 \times 5$ 的网格只是增长了一倍。再进一步的细划网格为 $50 \times 10 \times 10$,使单元形式统一为方形的,又一次把单元数和 CPU 时间加倍。

简单理论非常好地预测了网格细划如何影响稳定时间增长极限和 CPU 时间的趋势。但是,为什么我们没有将预测的和实际的稳定时间增量进行比较?这里是有原因的。首先回忆一下我们大致估计的稳定时间增长值为:

$$t_{stable} = \frac{L^e}{C_d}$$

然后我们假定特征单元长度 L^e 是最小的单元尺寸,而 ABAQUS/ Explicit 实际上是根据单元的整体尺寸和形状来确定特征单元长度。另外一个因素是 ABAQUS/ Explicit 使用了一个整体的稳定估算器,允许使用一个更大的稳定时间增量。这些因素使得在运行分析之前实际上很难准确预测稳定时间增量。然而,因为变化的趋势与简单的理论符合得很好,一旦开始运行分析,就可以直接预测稳定时间增量如何随着网格的变化而变化。

3.4.7 材料对稳定时间增量和 CPU 时间的影响

在不同材料中,同一个波的扩展分析所需要的计算机时间大不相同,这取决于材料的波速。例如,如果我们将材料由钢换成铝,波速将从 $5.15 \times 10^3 \text{ m/s}$ 变为:

$$C_d = \frac{E}{\rho} = \frac{70 \times 10^9 \text{ Pa}}{2700 \text{ kg/m}^3} = 5.09 \times 10^3 \text{ m/s}$$

从铝换成钢对稳定时间增量有微小的影响,因为它们刚度和密度的差别是在同一个量级上。对于铅,差别是非常大的,其波速减为:

$$C_d = \frac{E}{\rho} = \frac{14 \times 10^9 \text{ Pa}}{11240 \text{ kg/m}^3} = 1.11 \times 10^3 \text{ m/s}$$

这大约是钢材波速的五分之一。铅棒的稳定时间增量是钢棒的五倍。

3.5 显式和隐式程序比较

3.5.1 总体比较

对于显式和隐式两个时间积分过程,平衡是以外力 \mathbf{P} 、单元内力 \mathbf{I} 和节点加速度的形式定义的:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} = \mathbf{P} - \mathbf{I}$$

其中 \mathbf{M} 为质量矩阵。为了确定单元内力,两个程序都求解节点加速度并且应用相同的单元计算。它们的最大区别在于计算节点加速度的方式。在隐式程序中用直接法求解一系列的线性方程组,与相对低成本的显式方法节点计算比较,求解这一系列方程组的计算耗费很高。

3.5.2 考察 ABAQUS/ Standard 中的隐式程序

基于完全牛顿迭代求解方法,ABAQUS/ Standard 采用自动增量。牛顿方法在时间 $t + \Delta t$ 增量结束时,寻找满足动力平衡并且同时计算位移。因为隐式方法为无条件稳定的方法,因此比显式方法采用相对大的时间增量 Δt 。对于一个非线性问题,为了得到一个在预想误差范围内的解,每个增量一般需要迭代几次。每次牛顿迭代都为位移增量 \mathbf{u}_j 求解一个修正系数 \mathbf{c}_j 。每次迭代需要一系列瞬时方程组的解,

$$\mathbf{K}_j \mathbf{c}_j = \mathbf{P}_j - \mathbf{I}_j - \mathbf{M}_j \ddot{\mathbf{u}}_j,$$

对于求解大型问题,这是一个费时的过程。有效刚度矩阵 \mathbf{K}_j 为切线刚度矩阵和迭代用的质量矩阵的线性组合。直到残余荷载、位移修正等值在预想误差范围内,迭代才结束。对于一个光滑的非线性响应,牛顿法以二次速率收敛,描述如下:

迭代	相对误差
1	1
2	10^{-2}
3	10^{-4}
.	.
.	.
.	.

但是,如果模型包含高度非连续过程,例如接触和滑动摩擦,二次收敛可能会消失并且可能需要一个大量的迭代过程。为了满足平衡条件,减小时间增量可能是必要的。在个别问题中,隐式算法最后的时间增量可能与一般显式算法的稳定时间增量在同一量级上,但是依然担负着隐式迭代求解的高耗费。在某些问题中应用隐式方法可能不会收敛。

隐式方法中的每一步迭代都要求解大量的线性方程,这一过程需要一定的计算量、磁盘空间和内存。对于大型问题,这些方程的求解要求比单元和材料计算更主要,这类似于在 ABAQUS/ Explicit 中的分析。随着问题的增大,对方程求解器的需求迅速增加,因此在实际中,在给定机器上隐式算法所能求解问题的最大尺寸常常取决于磁盘空间的大小和可用内存的数量,而不是取决于需要的计算时间。

3 5 3 ABAQUS/ Explicit 的优越性

对于许多分析,是否选用 ABAQUS/ Standard 或者 ABAQUS/ Explicit 是很明显的。例如,在本章的前部分,我们看到 ABAQUS/ Explicit 是求解波扩展问题的明智选择;另一方面,ABAQUS/ Standard 对于求解光滑非线性问题更有效。不过,对于某些能够模拟的静定或准静定的问题,两个程序效果都很好。一般地,有些通常用 ABAQUS/ Standard 求解的问题,可能由于接触和材料的复杂性而难以收敛,导致大量的迭代过程。因为每一步迭代都是费时的并且需要求解一系列的线性方程组,所以这样的问题用 ABAQUS/ Standard 是非常昂贵的。

通过从前一个时间增量显式发展动力学状态,ABAQUS/ Explicit 无需迭代即可确定结果,而 ABAQUS/ Standard 必须通过迭代来确定一个非线性问题的结果。尽管用显式方法求解一个静态分析需要大量的时间增量,如果同一个分析应用 ABAQUS/ Standard 要经历多次昂贵的迭代,应用 ABAQUS/ Explicit 分析则效率能提高许多。

ABAQUS/ Explicit 的另一个优越性在于相同模拟条件下比 ABAQUS/ Standard 需要的磁盘空间和内存少得多。对于一些采用两种方法的机时耗费相差不多的问题,磁盘空间和内存的大量节省使 ABAQUS/ Explicit 更有吸引力。

3 5 4 隐式和显式算法中网格精度的耗费

使用显式方法,机时消耗与单元数量成正比,并且大致与最小单元的尺寸成反比例。所以网格细划因增加了单元数量和减小了最小单元的尺寸而使机时增加。作为一个例子,考虑带有均匀的、方形单元的一个三维模型。如果网格沿三个方向都以 2 倍的比例细划,机时耗费因单元数目增加而增加了 $2 \times 2 \times 2$ 倍,又因最小单元尺寸减小而增加了 2

倍。整个分析成本因网格细划而增加了 2^4 , 即 16 倍。磁盘空间和内存需求与单元数目成正比, 与单元尺寸无关; 因此, 这些需求就增加了 8 倍。

应用显式方法, 应用网格细划带来的费用增长可以很直接地预测, 当采用隐式方法时预测成本则困难得多。困难来自于单元连接与求解费用的关系, 这是在显式方法中所没有的。用隐式方法时, 经验表明对于许多问题的计算成本大致与自由度数的平方成正比。设想同样一个带有均匀的、方形单元的三维模型, 如果网格沿三个方向都以 2 倍的比例细划, 使得自由度数大致增长 2^3 倍, 导致计算成本增加 $(2^3)^2$ 倍, 即 64 倍。尽管实际增长难以预测, 磁盘空间和内存的需求也以同样的方式增长。

只要网格是相对统一的, 随着模型尺寸的增长, 显式方法比隐式方法大量节省成本。图 3-15 说明了显式方法与隐式方法的计算成本与模型尺寸的比较。对于这个问题, 自由度数与单元数成比例。

图 3-15 隐式和显式方法中耗费 - 模型尺寸图

3 6 动态振动的阻尼

在模型中加入阻尼有两个原因: 限制数值振荡或者给系统增加物理阻尼。ABAQUS/ Explicit 提供了几种在分析中加入阻尼的方法。

3 6 1 体粘性

体粘性引入的阻尼与体积应变有关。它的目的是改进高速动力学事件的模型。ABAQUS/ Explicit 包括体粘性的线性和二次形式。通过一步一步的应用 * BULK VISCOSITY 选项, 你可以设置体粘性为非默认值, 尽管很少需要这么做。因为仅仅作为一个数值影响, 在材料点的应力之中不包括体粘性压力。所以, 它不作为材料本构反应的一部分考虑。

线性体粘性

总是默认包括线性体粘性来阻尼减震最高阶单元频率。它生成一个与体积应变速率成线性的体粘性压力, 方程如下:

$$p_1 = b_1 \cdot c_d L^e \dot{\epsilon}_{vol},$$

其中 b_1 是一个阻尼系数,默认值为 0.06, ρ 是当前的材料密度, c_d 是当前扩展波速, L^e 是单元特征长度, $\dot{\epsilon}_{vol}$ 是体积应变速率。

二次体粘性

二次体粘性只包括在实体单元中(除了平面应力单元 CPS4R),并且只有体积应变速率可压缩时才采用。根据如下的方程,体粘性为应变速率的二次函数:

$$p_2 = (b_2 L^e)^2 / \dot{\epsilon}_{vol} / \min(0, \dot{\epsilon}_{vol}),$$

其中 b_2 是阻尼系数,默认值为 1.2。

二次体粘性抹去一个穿过几个单元的正面冲击并用以防止单元在非常大的速度梯度下破坏。设想一个简单的一个单元的问题,一边的节点固定,另一边的节点具有一个指向固定节点方向的初始速度,如图 3-16 所示。稳定时间增量精确地等于一个扩展波穿过单元的瞬间。因此,如果初始节点速度等于材料的波扩展速度,在一个时间增量里,这个单元崩溃,其体积为零。二次体粘性压力引入一个反力以防止单元被压溃。

图 3-16 具有固定节点和预加速度的单元

基于体粘性的临界阻尼比

体粘性压力只是基于每个单元的波扩展模式。最高单元模式的临界阻尼比由如下公式给出:

$$\zeta = b_1 + b_2^2 \frac{L^e}{c_d} \min(0, \dot{\epsilon}_{vol}),$$

其中 ζ 是临界阻尼比。线性项单独代表临界阻尼的 6%,而二次项常常还要小得多。

3.6.2 粘滞压力

粘滞压力荷载作为分布荷载(* DLOAD)施加,有如下公式定义:

$$p = -c_v (\dot{u} \cdot \vec{n}),$$

其中 p 是物体所受压力; c_v 为粘度,在数据行作为荷载的量值给出; \dot{u} 是粘滞压力在作用面上点的速度; \vec{n} 是同一点处表面的单位外法向。在结构问题和准静态问题中,这些荷载

通常用于阻尼掉低频动力影响, 这样, 用最少数目的时间增量就可以达到静平衡。对于典型的结构问题, 不能指望吸收掉所有的能量。典型地, 设置 c_v 等于一个很小的百分数, 可能是数量 c_d 的 1% 或 2%, 作为一个使当前动力影响最小的有效方法。

3.6.3 材料阻尼

材料模型本身可能以塑性耗散或者粘弹性的形式提供阻尼。对于许多应用, 这样的阻尼可能是足够的。另一选择是通过 * DAMPING 选项定义瑞利阻尼, 这是 * MATERIAL 选项块的一部分。瑞利阻尼有两个因子: 质量比例阻尼 R 和刚度比例阻尼 R 。

质量比例阻尼

对于一个单元的质量矩阵, R 因子定义了阻尼贡献比例。引入的阻尼力来源于模型中节点的绝对速度。可以把结果影响比作模型在做穿越粘性介质的运动, 这样, 模型中任何点的任何运动都能引起阻尼力。

刚度比例阻尼

对于弹性材料刚度, R 因子定义了阻尼比例。“阻尼应力” σ_d 与所用的总体应变速率成比例, 应用如下公式:

$$\sigma_d = R \sigma^{el} \dot{\epsilon},$$

式中 $\dot{\epsilon}$ 为应变速率。对于超弹性和超泡沫材料, σ^{el} 被定义为初始弹性刚度。对于所有其它材料, σ^{el} 是材料的当前弹性刚度。这一阻尼应力是加到在动力平衡方程形成时积分点处由本构反应引起的应力上, 但是在输出应力中并不包括它。对于任何非线性情况都可以引入阻尼; 对线性问题可提供标准的瑞利阻尼。对于一个线性问题, 刚度比例阻尼恰好等同于定义一个等于 R 乘以刚度矩阵的阻尼矩阵。刚度比例阻尼必须慎重使用, 因为它可能明显地降低稳定极限。

3.6.4 离散减振器

另外一种选择是定义单独的减振器单元。每个减振器单元提供一个与它两点相对速度成正比的阻尼力。这种方法的优点是使你能够在你认为有必要时仅在点上施加阻尼。减振器应当总是与其它单元并行使用, 例如弹簧或者桁架, 以不引起稳定极限的大幅降低。

3.7 能量平衡

3.7.1 能量平衡表述

整体模型的能量平衡可以表示为:

$$E_I + E_V + E_{FD} + E_{KE} - E_W = E_{total} = \text{constant}$$

其中 E_I 为内能; E_V 为粘滞耗散能; E_{FD} 是摩擦耗散能; E_{KE} 是动能; E_W 是外力做的功。这些能量部分的总和为 E_{total} , 它应该是常数。在数值模型中 E_{total} 只是近似的常数, 一般

有小于 1 % 的误差。

内能

内能是可恢复的弹性能量 E_E 、非弹性过程的能量耗散(如塑性 E_p)、粘弹性能量耗散 E_{CD} 和伪应变能 E_A 的总和:

$$E_I = E_E + E_P + E_{CD} + E_A$$

在壳和梁单元中伪应变能包括沙漏反力和横向剪力的能量存储。非常高的伪应变能值表明必须对网格进行细划或其它改变。

粘滞能量

粘滞能量是指阻尼机制的能量耗散,包括体粘性阻尼和材料阻尼,作为整体能量平衡中的一个基本变量。粘滞能量不是在粘弹性或非弹性过程中能量耗散的部分。

摩擦能量

摩擦能量是在接触过程中由摩擦力造成的能量耗散。摩擦能量是整体能量平衡中的一个基本变量。

动能

动能是直接从集中质量(转动惯量)和节点速度(角速度)计算得到的。动量是守恒的,但是动能在冲击过程中不守恒。

外力做的功

外力功是向前连续积分,完全由节点力(弯矩)和位移(转角)决定。规定的边界条件也对外力功有贡献。

3.7.2 能量平衡的输出

ABAQUS 能够根据要求输出每种能量的值,并且能够作为相对于时间历史的总体变量画出,包括在整个模型上、特殊的单元集上、单独的单元上,或者作为每个单元的能量密度。在整个模型或者单元集上与能量值有关的变量名称,如表 3-2 所列。

表 3-2 整个模型能量输出变量

变量名	能 量 值
ALLIE	内能, E_I : $ALLIE = ALLSE + ALLPD + ALLCD + ALLAE$
ALLKE	动能, E_{KE}
ALLVD	粘滞耗散能, E_V
ALLFD	摩擦耗散能, E_{FD}

变量名	能 量 值
ALLCD	粘弹性耗散能, E_{CD}
ALLWK	外力功, E_W
ALLSE	存储应变能, E_E
ALLPD	非弹性耗散能, E_P
ALLAE	伪应变能, E_A
ETOTAL	能量总平衡: $E_{TOT} = E_I + E_V + E_{FD} + E_{KE} - E_W$

另外,ABAQUS/ Explicit 能够作出单元级的能量输出和能量密度输出,如表 3-3 所列。

表 3-3 整个单元能量输出变量

变量名	整个单元能量值
ELSE	弹性应变能
ESPD	塑性耗散能
ELCD	蠕变耗散能
ELVD	粘性耗散能
ELASE	伪能量 = 孔洞能 + 沙漏能
EKEDEN	单元动能密度
ESEDEN	单元弹性应变能量密度
EPDDEN	单元塑性耗散能量密度
EASEDEN	单元伪应变能量密度
ECDDEN	单元蠕变应变能量耗散密度
EVDDEN	单元粘滞能量耗散密度

3 8 弹簧和减振器的潜在不稳定性

某些单元类型落在了 ABAQUS/ Explicit 执行的稳定计算之外。下面的单元具有使分析不稳定的潜在因素：

- 弹簧单元
- 减振器单元

如下单元不能使分析过程不稳定,只能有助于分析过程的稳定性：

- 质量单元
- 转动惯量单元
- 静水压力流体单元
- 作为刚体的一部分的单元

我们将用简单的模型来说明 ABAQUS/ Explicit 中的不稳定问题。当程序设计对几乎所有的问题都提供有效和稳定的解答时,存在一些不寻常的情况,包括弹簧和减振器,结果可能成为不稳定的。当这些问题发生时,如果能够识别这些不稳定性则是非常有益的。

下面的例子用一个非常简单的模型说明稳定性问题也可能发生在非常大的复杂的模型中。一旦你懂得了如何确定这些简单的分析是否已经变成非稳定,你就能用同样的方法判断你自己的工程分析是否已经成为非稳定。对于较大的模型,由于在弹簧和减振器上荷载位置成了一个影响因素,必然更难于提前判断分析过程是否将成为非稳定。例如,一个可能转化为非稳定的分析,为了避免非稳定的发生,可以加一个接触约束。

弹簧像实体单元那样的某些单元一样,在分析过程中强加一个稳定性要求。每个单元自己都有基于本单元刚度和质量的最大的稳定时间增量。因为一个弹簧单元本身只有刚度没有质量,其相关质量是通过与其连接的其它有质量的单元而确立的。例如,如果一个弹簧单元连接到实体单元上,一般不可能确定出什么质量与弹簧单元连接。因此,ABAQUS/ Explicit 不可能计算弹簧单元的稳定性时间增量。如果弹簧要求的稳定性时间增量比模型其它单元的最小稳定性时间增量还小,则弹簧定义了模型的控制稳定性时间增量,因此分析可能成为不稳定。

图 3-17 所示的模型由两个分开的简单部分组成:一个单独的桁架单元和一个在自由端带有质量单元的弹簧单元。两个部分都是左端固定,右端受力。因为桁架单元既有质量又有刚度,ABAQUS/ Explicit 为桁架单元确定了一个稳定性时间增量。因为弹簧单元只有刚度没有质量,ABAQUS/ Explicit 没有给弹簧单元计算出一个稳定性时间增量。同样,ABAQUS/ Explicit 也没有给只有质量没有刚度的质量单元计算出一个稳定性时间增量。

图 3-17 由桁架、弹簧和质量单元组成的模型

然而,在这个简单的例子中,我们可以解析地计算出弹簧 - 质量系统的稳定要求,因为附在弹簧上的质量只是简单为质量单元的质量。由于弹簧刚度和附加质量在分析中是

恒定的,弹簧 - 质量系统的最大稳定时间增量也是恒定的。然而,在分析中桁架的长度是变化的,引起桁架的刚度发生变化,桁架的稳定时间增量也随着变化。在分析开始时,桁架比弹簧 - 质量系统所需要的稳定时间增量小。随着桁架的伸长,它的稳定时间增量增加,弹簧 - 质量系统的稳定时间增量最终成为分析过程的控制因素。当由桁架所决定的稳定时间增量变得比弹簧 - 质量系统的要求大时,分析就变得不稳定了。稳定时间增量与时间的关系如图 3-18 所示。

图 3-18 桁架单元和弹簧 - 质量系统的稳定时间增量对时间曲线

3 8 1 确定稳定时间增量

弹簧 - 质量系统承受恒定的动力荷载 1000N,引起质量产生加速度,弹簧伸长。由于力是作为步骤函数施加的,弹簧将根据所受的荷载、质量和弹簧的刚度进行振动。弹簧刚度为 $1 \times 10^5 \text{ N/m}$,荷载为 $1 \times 10^3 \text{ N}$,弹簧的平均位移为 0.01m,最大位移为 0.02m。像对待其它单元一样,我们可以计算弹簧 - 质量系统的稳定时间增量。回顾单元与频率有关的稳定时间增量,依照下面的关系:

$$t_{\text{stable}} = \frac{2}{\omega_{\text{max}}} \text{ s} \tag{3-1}$$

为了计算弹簧 - 质量系统无阻尼的自然圆频率,我们用如下方程:

$$\omega_{\text{spring}} = \frac{k_{\text{spring}}}{m} = \frac{1.0 \times 10^5}{5} = 141 \text{ rad/s} \tag{3-2}$$

因此,弹簧的稳定时间增量为:

$$t_{\text{spring}} = \frac{2}{\omega_{\text{spring}}} = 0.0141 \text{ s} \tag{3-3}$$

对于桁架单元 ABAQUS/ Explicit 应用下式计算稳定时间增量:

$$c_d = \frac{E}{\rho} = \frac{10000}{10} = 31.62 \text{ m/s} \tag{3-4}$$

$$t_{\text{stable}} = \frac{L^e}{c_d} \text{ s}$$

其中 c_d 是材料的波速, L^e 是单元特征长度。在分析开始时 $L^e = 0.1 \text{ m}$,生成的稳定时间增量为:

$$t_{\text{stable}} = \frac{0.1}{31.62} = 0.00316 \text{ s} \tag{3-5}$$

然而,由于桁架以 1.0m/ s 的速度伸长,桁架的稳定时间增量与长度的增加成比例的增长。因为桁架单元长度在任何给定时间为:

$$L^e = (0.1 + 1.0t) \text{ m} \tag{3-6}$$

稳定时间增量为:

$$t_{\text{stable}} = \frac{0.1 + 1.0t}{31.62} \tag{3-7}$$

在分析中确信与桁架的稳定时间增量相一致的稳定时间增量,在 $t = 0.346\text{s}$ 时开始超出了弹簧 - 质量系统的稳定时间增量。由于 ABAQUS/ Explicit 在计算稳定时间增量时并不考虑弹簧 - 质量系统,一旦桁架的稳定时间增量超过了弹簧 - 质量系统的稳定时间增量,则弹簧 - 质量系统变成了非稳定。

3.8.2 识别非稳定性

从分析的输出中给我们提供了分析过程不稳定的几个指示,特别有用的是状态文件:

对于这个分析,我们预先猜测弹簧 - 质量系统会成为非稳定;因此,我们选择弹簧右边的节点作为观察节点。这样,在状态文件 monitor 列中的数据就是质量单元的位移。

初始的少数几个增量表明质量有位移,正如所预料的那样,在 - 0 .02m 和 0 .02m 之间。然而在第 54 个增量中,节点 2 的位移在 0 .420s 内变成了 - 0 .121m,落在了正确范围之外。我们预期弹簧 - 质量系统在时间超过 0 .346s 时能够变成非稳定,在状态文件中,第 54 个增量是第一个在 0 .346s 以外的增量。在第 54 个增量以外,质量的位移迅速增长,在第 74 个增量时达到了 6.305×10^{15} m。

位移历史

弹簧自由端的位移历史如图 3-19 所示。注意在位移历史图上符号之间的距离增加,表明 ABAQUS/ Explicit 使用的时间增量在分析中是增加的。从不切实际的位移很清楚地看出弹簧 - 质量系统已经变为不稳定。

TOTAL TIME

图 3-19 弹簧自由端的位移历史(节点 2)

用能量来确定不稳定性

在一个更加复杂的分析中,你事先不一定知道模型的哪一部分可能不稳定。除了监视一个单独节点的位移外,你必须用其它方法确定是否解答已经变成了不稳定的。在状态文件中,每个增量步的动能显示提供了另一种简单的稳定性指示。和监视的一个特定自由度的动能相比,其优越性在于在状态文件中的动能显示是整个模型的动能总和。动能的不切实际的增长可能指示着分析已经变为不稳定,但是不指示产生问题的区域。在这个例子中,动能与弹簧伸长同时开始变得不现实,表明两种影响有着相同的原因。

能量对于指示解答的稳定性是非常有用的,最一般的方法观察能量是在 ABAQUS/ Post 中建立历史图。图 3-20 显示了能量平衡的历史(ETOTAL)、动能和内能(ALLKE, ALLIE),以及外力功(ALLWK)。

直到大约 0 .35 秒时能量平衡几乎保持常数为零。一个常值的能量平衡表明解答的

图 3-20 从选择的结果文件中画出的总模型能量图

稳定性;相反,一个明显的非恒定的能量平衡明确地建议解答是不稳定的。由能量图表明当时间达到 0.35 秒时能量平衡显著地增长,其它能量也一样。如果你所绘制的能量图一直到分析失败,你看到的能量平衡将达到 35×10^{33} 。

在 log 文件中(log)也可以指示不稳定性。如果由不稳定性产生了超过计算机存储限制的实数,log 文件可能会提示分析已经不幸地结束了。

```
ABAQUS JOB spring
Current version is 5 - 7
BEGIN USER INPUT PROCESSING
Mon Jul 28 14 57 34 EDT 1997
Run / usr/ abaqus/ bin/ pre x
Mon Jul 28 14 57 39 EDT 1997
END OF USER INPUT PROCESSING
RUN PACKAGE
Mon Jul 28 14 57 39 EDT 1997
Run / usr/ abaqus/ bin/ pac x
Mon Jul 28 14 57 41 EDT 1997
END OF PACKAGE
BEGIN EXPLICIT ANALYSIS
Mon Jul 28 14 57 41 EDT 1997
Run / usr/ abaqus/ bin/ xpl x
Bus error (core dumped)
ABAQUS Error: Error during analysis - see status file .
```

3.8.3 消除不稳定性

增加质量

消除由弹簧引起的不稳定性的较好方法是增加与弹簧连系的质量。一般地,弹簧用以模拟刚度,而不是模拟更复杂的相关连续体的反应。弹簧能够精确地模拟刚度,但是它们不计算质量。随着与弹簧相连质量的增加,弹簧 - 质量系统的自然频率下降;相应地,弹簧 - 质量系统的稳定时间增量增加。如果在与弹簧连接的节点上附加足够的质量,弹簧 - 质量系统的稳定时间增量可以提高,这样,它将总是大于在模型中其余部分的稳定时间增量。在此水平上,弹簧将对结构行为具有理想的效果而不用控制分析过程的稳定性。

我们能够计算出需要加在弹簧右端节点上的质量,以便使弹簧 - 质量系统在历时 2s 的整个分析过程中保持稳定。从公式 3-7 可知,这个步骤结束时桁架的稳定时间增量增长为:

$$t_{stable} = \frac{0.1 + 1.0t}{31.62} = 0.0664 \text{ s}$$

然后我们就能确定一个为桁架最大稳定时间增量的四倍安全系数所需要的弹簧 - 质量系统的自然频率。设公式 3-3 等于桁架最大稳定时间增量的四倍,我们能够求出在弹簧自由端所需要的质量:

$$4 \cdot t_{spring} = \frac{2}{\omega_{spring}} = 2 \cdot \frac{m}{k} \quad m = 4k(t)^2 \tag{3-8}$$

把 $t = 0.0664\text{s}$ 代入,求得质量为 $m = 1760\text{kg}$,这意味着要增加 1755kg。对于这个简单的弹簧 - 质量系统,附加质量显著地改变了结构的反应。但是,对于一个更大的、更厚重的模型,附加质量对结构产生的影响可能很小;质量只是影响数值解的稳定性。弹簧自由端的位移如图 3-21 所示。

在实际分析中,弹簧不仅是如前所示用来把结构连接到大地上(固定边界条件),而且还用来将结构的一部分连接到另一部分。在这样的模型中,弹簧的两端都可以自由移动,如图 3-22 所示。为了数值稳定,每一端都需要附加质量。这种情况的自然频率为:

$$\omega = \frac{k(m_1 + m_2)}{m_1 m_2} = \frac{k}{m_{eff}} \tag{3-9}$$

其中

$$m_{eff} = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \tag{3-10}$$

m_1 为弹簧一端附加的质量, m_2 为另一端的附加质量。如果两端节点的附加质量相同,有效质量和自然频率简化为:

$$m_{eff} = \frac{m}{2} \tag{3-11}$$

和

图 3-21 右端节点附加 1760kg 质量的弹簧 - 质量系统反应

图 3-22 两端自由的弹簧 - 质量系统

$$= \frac{2k}{m} \tag{3-12}$$

对于弹簧 - 质量系统,如果我们希望指定一个稳定极限,我们对质量再一次求解公式 3-3 来确定在两端所需要附加的质量。如果我们包含一个四倍的安全系数,方程变为:

$$4 \ t_{spring} = \frac{2}{\frac{m}{2k}} = 2 \ \frac{m}{2k} \quad m = 8k(t)^2 \tag{3-13}$$

阻尼的影响

减振器单元常常与弹簧单元联合运用,对模型中离散的点提供阻尼。使用减振器单元需要注意一些事项并要理解阻尼对稳定性的影响。如使用弹簧一样,减振器单元影响分析的稳定时间增量,不过 ABAQUS/ Explicit 在计算稳定时间增量时不考虑减振器。实际上,与弹簧并列使用的减振器总是降低弹簧的实际稳定时间增量。另一方面,ABAQUS/ Explicit 考虑材料阻尼对稳定时间增量的影响。

没有阻尼时

i)

$t_{\text{stable}} = \frac{2}{\zeta}$

有阻尼时

ii)

$t_{\text{stable}} = \frac{2}{\zeta} \sqrt{1 - \zeta^2}$

其中 ζ 是施加阻尼与临界阻尼之比。

第 ii 种情况的稳定时间增量总是比第 i 种情况要小。一般地,不可能计算出 t_{stable} , 因为你不知道临界阻尼值。因此,很难事先知道 t 为何值时,分析变得不稳定。

表 3 -4 总结了为确保到达预期时间增量时弹簧和弹簧 - 减振器系统所需附加的质量。为了简化,弹簧 - 减振器系统求解的是 t 而不是质量 m 。

表 3-4 确保稳定所加质量

情 况	附加质量 (4 倍安全系数)
(i)	$m = 4 k (t)^2$
(ii)	$m = 8 k (t)^2$
(iii)	$t = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{m}{k}} \sqrt{1 + \frac{c^2}{4 km}} - \frac{c}{2 km}$
(iv)	$t = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{m}{2 k}} \sqrt{1 + \frac{c^2}{2 km}} - \frac{c}{2 km}$

控制时间增量

如果在弹簧节点上附加质量实际上是不太合适的,你可以通过控制时间增量来保持稳定。 * DYNAMIC, EXPLICIT 选项提供了几个有用的参数。参数 FIXED TIME INCREMENTATION 能促使 ABAQUS/ Explicit 一直使用分析过程初始时计算得到的稳定时间增量。在这个例子中,使用 FIXED TIME INCREMENTATION 参数可以消除解的不稳定性,因为稳定时间增量不允许超过初始的稳定水平。为了包括其它的安全系数,你可以设置参数 SCALE FACTOR 为所要求的值。

3 9 小结

- ABAQUS/ Explicit 使用中心差分法对时间显式积分求解运动方程。
- 显式方法需要许多小的时间增量。因为不必求解联立方程, 每个增量都很省时。
- 随着模型尺寸的增加, 显式方法比隐式方法大量地节省计算成本。
- 稳定极限是运动状态能够进行并且能够保持准确的最大时间增量值。
- ABAQUS/ Explicit 在整个分析过程中自动控制时间增量来维持稳定。
- 随着材料刚度增加, 稳定极限下降; 随着材料密度的增加, 稳定极限增加。
- 对于单一材料的网格, 稳定极限大致与最小单元的尺寸成比例。
- 在一些情况下, ABAQUS/ Explicit 分析可能会成为不稳定的。本章的例题描述了怎样识别和矫正不稳定。

第 4 章 有限单元和刚体

有限单元和刚体是 ABAQUS/ Explicit 模型的基本组成部分。有限元是可变形的,而刚体在空间位移时不会改变形状。当有限元分析软件的用户进一步理解什么是有限元时,对在有限元程序中理解刚体的一般概念可能会有所启发。

ABAQUS 所提供单元之广泛会使初学者感到困难。然而强大的单元库提供了一整套用于解决不同问题的工具。本章介绍影响单元行为的五个方面问题。

为了提高计算效率,ABAQUS/ Explicit 具有广义刚体的性能。由任何单元类型组成的任何物体或者部分物体均可定义为刚体。刚体比变形体的优越之处在于其运动可以完全由在参考点处的至多六个自由度描述。相比之下,变形单元有更多的自由度,需要昂贵的计算以确定变形。当这些变形可以忽略或者不重要时,将构件模拟成为刚体可以在不影响结果的前提下大大节约计算量。

4.1 有限元

4.1.1 单元特征

每种单元都具有如下特征:

- 单元族
- 自由度(与单元族直接相关)
- 节点数目
- 数学描述
- 积分方式

在 ABAQUS 中的每一种单元有唯一的单元名,例如 T2D2, S4R, 或 C3D8R。正像在第 2 章吊架例子中看见的那样,在输入文件中,单元名应作为 * ELEMENT 选项的 TYPE 参数值。单元的名称标识了它的五个方面的每一种。本章将解释单元的命名约定。

单元族

在应力分析中最常用的单元族如图 4-1 所示。单元族之间的主要区别之一是单元族各自假定的几何类型不同。

在本指南中使用的单元族包括实体、壳、梁、桁架、刚体和特殊目的的单元,这些将在本章中详细讨论。其余的单元族,本书没有涉及;如果您有兴趣在模型中使用相关的单元,请查阅 ABAQUS/ Explicit 用户手册。

单元名的第一个或者头几个字母表示它所属的单元族。例如:S4R 是壳单元,C3D8R 是实体单元,而CINPE4 是无限元。

图 4-1 常用单元族

自由度

在分析中自由度是计算的基本变量。对于应力/ 位移模拟, 自由度为平动; 对于壳和梁单元, 还包括各节点的转动。

在二维和三维模型中, 自由度的编号规则如下:

- 1 1 方向的平动
- 2 2 方向的平动
- 3 3 方向的平动
- 4 绕 1 轴的转动
- 5 绕 2 轴的转动
- 6 绕 3 轴的转动

除非在节点处已用 * TRANSFORM 选项定义局部坐标, 方向 1, 2, 3 分别对应于整体坐标中的 1 - , 2 - , 3 - 方向。

当采用轴对称单元, 位移和转动自由度为:

- 1 r 方向的平动
- 2 z 方向的平动
- 6 在 $r - z$ 平面内的转动

除非在节点处已用 * TRANSFORM 选项定义了局部坐标, 方向 r (径向) 和 z (轴向) 分别对应于整体坐标中的 1 - 和 2 - 方向。

插值阶数

位移和转角只在单元节点处计算。在单元内的任何其它点的位移, 需要通过节点位移的插值获得。单元的节点全部位于角点处, 例如图 4-2 所示的 8 节点实体单元, 在每一方向上采用线性插值, 因此这类单元常称为线性单元或一阶单元。在 ABAQUS/ Explicit 中的所有单元均为一阶单元。

一般来说, 单元的节点数目清楚地标明于单元名之中。前面的 8 节点实体单元名为

C3D 8R; 而 4 节点一般壳单元称作 S 4R。梁单元族的约定有所不同, 单元名中同时包含插值阶数。因此, 一阶三维梁单元记作 B3 1。

数学描述

单元的数学描述是指用来定义单元行为的数学理论。在 ABAQUS/ Explicit 中, 所有的变形单元都建立在拉格朗日或者物质行为的描述之上: 在整个分析中, 构成单元的物质保持不变, 单元之间无物质运动。(与之对应的欧拉或空间描述要求单元固定在空间中, 物质在单元间运动。欧拉方法常用于流体力学的数值模拟。)

图 4-2 六面体或实体单元

积分方式

ABAQUS 应用数值方法在每个单元体上积分各种变量。对于大多数单元, ABAQUS 运用高斯积分方法, 在每一单元的每一积分点上计算物质的响应。ABAQUS 在单元名的末尾用字母“ R ”来表示减缩积分单元。例如, CAX4R 是 4 节点、减缩积分、一阶、轴对称实体单元。

4.1.2 实体单元

在各种单元族之间, 用途最为广泛的是实体或者连续体单元, 它们可以模拟各种构件。顾名思义, 实体单元是简单模拟构件中的小块材料。由于它们可以用其任意表面与其它单元连接, 实体单元就像建筑中的砖瓦和用于镶嵌的瓷砖, 几乎能够建造出任意形状、承受任意载荷的模型。

ABAQUS 中的实体单元名字以字母“ C ”开头。随后的两个字符表示单元的维数和有效的自由度。如字符“ 3D ”是指三维单元; “ AX ”是指轴对称单元; “ PE ”是指平面应变单元; “ PS ”则表示平面应力单元。

二维实体单元库

ABAQUS 定义了离面力学行为各不相同的几种二维实体单元。二维单元可以是四边形 (CPE4R、CPS4R 和 CAX4R) 或三角形 (CPE3、CPS3 和 CAX3)。最常用的三类如图 4-3 所示。

平面应变单元假设离面应变 ϵ_{33} 为零; 它们可以用来模拟厚壁结构。

平面应力单元假设离面应力 σ_{33} 为零; 它们适用于模拟薄壁结构。

轴对称单元, 即“ CAX ”类单元 (CAX4R 和 CAX3), 模拟 360° 的环; 它们适用于分析具有轴对称几何形状, 并承受轴对称荷载的结构。

二维实体单元必须定义在 1 - 2 平面内, 节点编号沿单元周界逆时针方向排列, 如图 4-4 所示。当用前处理生成网格时, 要保证所有节点处的单元法线方向一致, 沿整体坐标 3 - 轴的正向。单元节点不正确的编号次序会导致 ABAQUS 出现单元体积为负的错误

图 4-3 平面应变、平面应力和轴对称单元

图 4-4 二维单元节点的正确编号次序

信息。

三维实体单元库

三维实体单元可以是六面体(C3D8R),楔形体(C3D6),或四面体(C3D4)。

在可能的情况下,应尽量使用六面体单元(C3D8R)。一阶四面体(C3D4)的常应变的公式非常简单;在需要精确求解的情况,应使用非常精细的网格。

自由度

所有的实体单元的每一节点具有平动自由度。相应的,三维单元的有效自由度为 1、2 和 3,而在平面应变单元、平面应力单元和轴对称单元中,只有 1 和 2 是有效自由度。

单元性质

* SOLID SECTION 选项定义材料和任何其它的与一组实体单元集相关的附加几何数据。对于三维和轴对称单元,不需要附加几何信息:节点坐标可以完全定义单元的几何

形状。对于平面应力和平面应变单元,必须在数据行指定单元厚度。例如,如果单元厚度为 0.2m,单元性质应定义如下:

```
* SOLID SECTION, ELSET= < 单元集名 > ,  
MATERIAL= < 材料名 >  
0.2,
```

积分方式

每一实体单元有一个单个积分点。对于有一个积分点的三角形、四面体和楔形体单元即认为是完全积分,而对于有一个积分点的四边形和六面体(砖形)单元,单个积分点则认为是减缩积分。

单元输出变量

在默认情况下,单元输出变量,如应力和应变,是指在整体笛卡儿坐标系下的值。因此,积分点处的应力分量 σ_{11} 作用于整体坐标 1 - 轴方向,如图 4-5(a)所示。即使单元在模拟过程中发生了转动,如图 4-5(b)所示,仍默认采用整体笛卡儿坐标系作为定义单元变量的基础。然而,ABAQUS 允许使用 * ORIENTATION 选项为单元变量定义局部坐标系。这种局部坐标系在模拟中随着单元运动而转动。如果模拟物体具有自身的材料方向,如复合材料中的纤维方向,局部坐标系可能会非常实用。

图 4-5 实体单元中默认的材料方向

4.1.3 壳单元

应用壳单元模拟一维尺寸(厚度)远小于另外两维尺寸,并且在厚度方向上的应力可以忽略的结构。

ABAQUS 中壳单元的名字以字母“S”开始。轴对称壳单元以字母“SAX”开始。在壳单元名字中的第一个数字表明在单元中的节点数目,而轴对称壳单元例外,第一个数字表明插值的阶数。如果单元的名字以字母“S”结束,单元使用小应变公式。如果单元的名字以字母“SW”结束,单元使用小应变公式,并且考虑翘曲。

壳单元库

三角形和四边形单元采用了线性插值和所选择的大应变和小应变公式。也适用于线性轴对称壳单元。

对于大多数分析,标准的大应变壳单元(S4R、S3R 和 SAX1)是合适的。但如果在分析中包括小的膜应变和任意的大转动,小应变壳单元(S4RS、S3RS 和 S4RSW)计算效率更高。

自由度

三维的壳单元(S3R、S4R、S3RS、S4RS 和 S4RSW)在每个节点上有 6 个自由度(3 个平动和 3 个转动)。

轴对称壳单元(SAX1)在每个节点上有 3 个自由度:

- 1 r 方向的平动
- 2 z 方向的平动
- 6 在 $r - z$ 平面内的转动

单元性质

使用 * SHELL GENERAL SECTION 或者 * SHELL SECTION 选项定义壳单元集的厚度和材料性质。这两种选项有类似的格式:

```
* SHELL SECTION, ELSET = < 单元集名 >  
MATERIAL = < 材料名 >  
< 厚度 > , < 截面上积分点数目 >
```

或者

```
* SHELL GENERAL SECTION, ELSET = < 单元集名 >  
MATERIAL = < 材料名 >  
< 厚度 >
```

如果指定 * SHELL SECTION 选项,ABAQUS 应用数值积分方法沿壳厚度方向计算每一个截面点处的行为,如图 4-6 所示。MATERIAL 参数指的是材料性质定义,可以是线性或者是非线性。你可以在壳的厚度方向上指定任意奇数个截面点。

图 4-6 壳单元厚度方向上的截面积分点

选项 * SHELL GENERAL SECTION 允许用很多一般的方法定义横截面行为来模拟线性或非线性问题。由于 ABAQUS 在此选项中直接通过截面的几何量(面积, 惯性矩等等)来模拟横截面的行为, 因而不需要在单元横截面上对任何量进行积分。所以, * SHELL GENERAL SECTION 选项的计算量要少于 * SHELL SECTION 选项。响应是通过合力和合力矩来计算的, 只有在需要输出的时候, 才会计算应力和应变值。

参考面的偏置

壳单元的参考面是通过节点和法线定义的。当应用壳单元模拟时, 参考面一般与壳体的中面保持一致。然而, 在很多情况下将参考面定义为偏离壳的中面更方便。例如, 在计算机辅助设计软件中生成的表面一般表示壳体的外表面或内表面。在这种情况下, 定义参考面与 CAD 表面一致可能更容易, 这样就与中面产生了偏置。

这种偏置还用于接触问题中表面几何精度要求较高的情况, 这时壳的厚度非常重要。默认情况下, 在 ABAQUS/ Explicit 接触约束中已经考虑了壳的偏置与厚度, 其在接触问题中的影响已被消除。

壳的偏置在模拟厚度连续变化的壳体时同样有用。这时, 在壳的中面上定义节点比较困难。如果某一表面光滑而其它表面粗糙, 如某些飞行器中的结构, 用壳体的偏置定义光滑表面的节点是最简便的方法。

偏置量可以用 * SHELL SECTION 或 * SHELL GENERAL SECTION 选项的 OFFSET 参数给出。其数值等于在壳体的厚度上从中面到参考面的距离。

壳体的自由度与参考面相关。所有和运动有关的变量, 包括单元的面积, 都是在参考面上计算的。曲壳体的偏置量太大会导致表面积分的误差, 影响壳截面的刚度、质量和转动惯量。为了提高解的稳定性, ABAQUS/ Explicit 也常常自动增大壳单元的转动惯量, 其值为偏置量的二次方量级, 对于具有大偏置的动力问题, 这可能导致一定的误差。当壳体的参考面与中面之间必须有大的偏置时, 可以采用多点约束或刚体约束来代替。

单元输出变量

壳单元的输出变量根据每一个壳单元表面上的局部材料方向定义。这些轴随着单元的变形而发生转动。

4.1.4 梁单元

梁单元模拟的构件, 其一维尺寸(长度)远大于另外二维尺寸, 且只有长度方向的应力比较显著。

在 ABAQUS 中, 梁单元的名字以字母“B”开头。下一个字符表示单元的维数: “2”是指二维梁单元, “3”是指三维梁单元。第三个字符表示插值的阶数: “1”表示线性插值。线性梁单元(B21 和 B31)有二维和三维两种。

自由度

三维梁单元的每个节点有 6 个自由度: 3 个平动自由度(1 ~ 3)和 3 个转动自由度(4

~ 6)。

二维梁单元的每个节点有 3 个自由度:2 个平动自由度(1 和 2)和 1 个绕模型所在平面法线的转动自由度(6)。

单元性质

应用 * BEAM SECTION 选项来定义梁截面的几何参数,节点坐标仅仅定义了长度。梁的横截面以几何方式定义,MATERIAL 参数提供了材料性质定义。通过在横截面上的数值积分,ABAQUS 计算梁的横截面行为,并允许有线性和非线性的材料行为。

数学描述和积分

梁具有剪切变形,并考虑了有限轴向应变,因此,它们既适合于模拟厚截面梁,也适合于模拟薄截面梁。

单元输出变量

三维梁单元的应力分量为轴向应力(σ_{11})和由于扭转引起的剪应力(τ_{12})。在薄壁截面中剪应力沿截面的壁作用,同时可测量相应的应变,以及计算截面上的横向剪力。

二维梁单元只有轴向的应力和应变。

根据用户需要也可以输出轴向力、弯矩和绕局部梁轴的曲率。至于哪种单元提供哪些分量的详细情况,可以查阅 ABAQUS/ Explicit 用户手册。

4.1.5 桁架单元

桁架单元是只能承受拉伸和压缩载荷的杆。它们不能承受弯曲,因此,适合于模拟铰接框架结构。而且桁架单元还可以近似地模拟线缆和弹簧(如网球拍)。桁架单元有时还用来代表其它单元里的加强构件。

桁架单元的名字以字母“ T ”开头。随后的两个字符表示单元的维数,“ 2D ”表示二维桁架单元和“ 3D ”表示三维桁架单元。最后一个字符表示单元中的节点数。线性桁架单元(T2D2 和 T3D2)包括二维和三维单元。

自由度

桁架单元的每个节点只有平动自由度。三维桁架单元有自由度 1、2 和 3,而二维桁架单元有自由度 1 和 2。

单元性质

选项 * SOLID SECTION 用来指定与桁架单元集相关的材料性质定义的名字。在数据行给出横截面面积:

```
* SOLID SECTION, ELSET = < 单元集名 > , MATERIAL = < 材料名 >  
< 横截面面积 >
```

单元输出变量

输出变量为轴向应力和应变。

4.1.6 质量和转动惯量单元

这些单元(MASS 和 ROTARYI)在离散点处定义质量和转动惯量。

自由度

质量单元的每个节点具有三个平动自由度。转动惯量单元的每个节点具有三个转动自由度。

单元性质

用 * MASS 选项定义质量单元的性质：

```
* MASS, ELSET = < 单元集名 >  
< 质量大小 >
```

用 * ROTARY INERTIA 选项定义转动惯量单元的性质：

```
* ROTARY INERTIA, ELSET = < 单元集名 >  
< I11 > , < I22 > , < I33 >
```

单元输出变量

这些单元没有输出变量。

4.1.7 弹簧和减振器单元

弹簧和减振器单元 (SPRINGA 和 DASHPOTA) 用于在毋需详细模拟整体的情况下建立两节点间的有效刚度或阻尼。在变形过程中两节点间的作用线保持不变。

自由度

弹簧和减振器单元的每个节点具有三个平动自由度。

单元性质

用 * SPRING 选项定义线性或非线性弹簧单元的性质。为了与 ABAQUS/ Standard 中的 SPRINGA 和 DASHPOTA 单元保持一致，* SPRING 和 * DASHPOT 选项下面的第一行为空白。如定义线性弹簧如下：

```
* MASS, ELSET = < 单元集名 >  
  
< 弹簧刚度 >
```

如果定义非线性弹簧,应用下面的命令,常常根据需要重复第二条数据行：

* SPRING, ELSET = < 单元集名 > , NONLINEAR

< 力 > , < 相对位移 >

用 * DASHPOT 选项定义线性或非线性的减振器单元的性质。如定义线性减振器,应用下面命令:

* DASHPOT, ELSET = < 单元集名 >

< 阻尼系数 >

如果定义非线性减振器,应用下面的命令,常常根据需要重复第二条数据行:

* DASHPOT, ELSET = < 单元 > , NONLINEAR

< 力 > , < 相对速度 >

单元输出变量

对于弹簧单元来说,S11 是弹簧中的力,E11 是弹簧的相对位移。对于减振器单元来说,S11 是减振器中的力,E11 是减振器的相对位移。

4.2 刚体

在 ABAQUS/ Explicit 中,刚体是节点和单元的集合体,它们的运动由单一节点控制,该节点称作刚体参考节点,如图 4-7 所示。刚体的形状可以通过旋转或者挤压二维几何构型来定义(解析刚性表面,* RIGID SURFACE),或者将物体划分成由节点和单元组成的网格(离散刚体)。在模拟的过程中,刚体单元的形状不能改变,但是可以承受大的刚体位移。离散刚体的质量和转动惯量可由各单元的贡献而求得或直接赋值。

图 4-7 单元形成刚体

刚体运动可以通过刚体参考节点的边界条件来描述。刚体承受的载荷由作用在节点上的集中力和作用在部分刚体单元上的分布载荷生成。通过节点与变形单元连接或通过变形单元接触,刚体与模型中的其余部分发生相互作用。

4 2 1 确定何时应用刚体

在动力学分析中,无论是固定还是承受动态大位移,刚体常常用于模拟非常坚硬的部分。刚体还用于模拟变形构件之间的约束,并为指定的某些接触作用提供简便的方法。当 ABAQUS/ Explicit 用于准静态成型分析时,采用刚体模拟加工工具(如冲头、砧、抽拉模具、夹具、辊轴等等)是非常理想的,将其作为一种约束办法也可能是很有效的。

使模型的一部分成为刚体可能有助于达到验证模型的目的。例如,在复杂的模型中,所有潜在的接触条件均难以预见,可以将远离冲击区域的单元包含成为刚体的一部分,其结果是在模拟的过程中大大加快了计算速度。当用户对模型和接触对的定义感到满意时,可以消除那些刚体定义,然后,展现在模拟全过程中的是一个可精确变形的有限元。

将部分模型表示成为刚体而不是用变形的有限单元体,其最主要的优点在于提高了计算效率。离散刚体中的单元不必进行单元内部的计算。为了改善离散刚体的节点运动和调整集中与分布载荷,尽管需要某些计算的尝试,但是刚体的运动完全由参考节点处的至多六个自由度所确定。

刚体特别有效于模拟模型中相对比较坚硬的部分,它们的波动轨迹和应力分布不很重要。在刚性区域内的单元稳定时间增量值可能导致很小的整体时间增量。由于刚体和作为刚体部分的单元并不影响整体时间增量,在刚性区域内,用刚体取代变形的有限单元体可以导致更大的整体时间增量,而不会显著影响整体求解的精度。

由解析刚性表面定义的刚体比离散刚体的计算量略小。在接触问题中,因为解析刚性表面可以十分光滑,而离散刚体本身含有很多小平面,所以解析刚性表面比离散刚体的麻烦要少一些。然而,只有有限的形状能被定义成解析刚性表面。

4 2 2 生成刚体

生成一个离散的刚体,用 * RIGID BODY 选项作为形成刚体的单元的性质参考。用参数 REF NODE 联系刚体的参考节点。参考节点具有平动和转动的自由度,每个刚体必须定义相应的参考节点。

```
* RIGID BODY, REF NODE = <节点>, ELSET = <单元集> ,  
PIN NSET = <节点集>, TIE NSET = <节点集>  
<厚度>
```

除了刚体参考节点之外,离散刚体还包含由定义刚体单元和节点时生成的节点集。这些节点提供了与其它单元之间的连接。刚体中的节点类型为下面二者之一:

- 销钉节点,只具有平动自由度。
- 束缚节点,具有平动和转动自由度。

刚体节点的类型取决于节点从属的刚体单元的类型。当节点直接定义在刚体上的时候,还可以对其类型进行指定或修改。对于销钉节点,属于刚体的部分仅是平动自由度,刚体参考节点的运动约束了这些自由度。而对于束缚节点,平动与转动自由度均属于刚

体,刚体参考节点的运动也约束了这些自由度。

4 2 3 刚体单元

截止到 5.7 版之前,刚体只能用刚体单元来定义。而现在的刚体功能实际上能允许任何单元,并非只有刚体单元,成为刚体的组成部分。例如,如果 * RIGID BODY 选项指明了组成刚体所用的单元,那么这些单元是用壳单元还是用刚体单元的效果相同。控制刚体的规定,如施加的载荷和边界条件,对于刚体单元和其它单元类型来说也是一致的。

所有刚体单元的名字都以字母“ R ”开头。随后的字符是指单元的维数。例如,“ 2D ”表示刚体单元为平面;而“ AX ”表示刚体单元为轴对称。最后一个字符表示单元中的节点数。

刚体单元库

三维四边形(R3D4)和三角形(R3D3)刚体单元用来模拟一个三维刚体的二维表面。

两节点刚体单元可以用来构造平面应变和平面应力(RD2D)以及轴对称模型(RAX2)。

物理性质

所有刚体单元必须指定 * RIGID BODY 选项。对于平面和梁单元,可以在数据行上定义横截面面积。对于轴对称和三维单元,可以在数据行上指定其厚度。默认的厚度值为零。另外,基于节点处的厚度,用参数 NODAL THICKNESS 定义平均的表面厚度。当存在体力作用或接触定义中要求厚度时才需要这些数据。

4 3 例子:橡胶块体的沙漏问题

在某些载荷条件下,线性减缩积分单元可能会出现所谓沙漏(hourglassing)的非物理变形。考虑一个一阶减缩积分单元,模拟一小片承受纯弯载荷的材料的情况,如图 4-8 所示。图中显示的虚线通过了单元的单个积分点。

图 4-8 承受弯曲变形的一阶减缩积分单元

当单元变形时,单元中虚线的长度没有改变,并且它们之间的夹角也未改变。因此,在单元单个积分点上的所有应力和应变分量都为零。因为这种方式的单元扭曲并不产生应变能,所以这种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,因而不能

阻止这种形式的变形。在粗网格中,这种零能量模式可以通过网格扩展,从而产生不正确的结果。

在 ABAQUS/ Explicit 中,仅一阶减缩积分四边形和六面体单元具有沙漏模式。沙漏有时可能扩展到整个网格。ABAQUS/ Explicit 包含比较严密的控制以防止由沙漏现象导致大多数实际分析出现问题。然而,控制沙漏的工作是通过校正作用力的大小实现的,有可能要通过几个增量步才能控制沙漏。在一些比较严重的情况下,在沙漏控制能够纠正问题以前,沙漏现象可能已经扩展到了整个网格。下面的例子说明了这种模拟情况。

在本例中,考虑一个厚橡胶块在沿其对角线方向被一刚体表面缓慢压缩,如图 4-9 所示。你将看到怎样确定沙漏是否会成为问题,如果它成为问题,怎样修正模型以防止这个问题发生。

材料性能
一般性能:
密度 = 1500kg/ m³
弹性性能:
由 $N = 1$ 阶多项式应变势能表示的超弹性材料
 $C_{10} = 3.2 \times 10^6 \text{ Pa}$
 $C_{01} = 0.8 \times 10^6 \text{ Pa}$

图 4-9 橡胶块被刚体表面沿对角线压缩

4 3 1 节点和单元集

用前处理生成二维橡胶块模型,采用 10×10 网格的二维平面应变单元(CPE4R),或应用附录 A 中的命令。

需要对图 4-10 所示的节点集施加荷载和边界条件,并显示输出。将橡胶块单元定义成名为 EALL 的单元集,将刚体单元定义成名为 ERIGID 的单元集。你可以用刚体单元或解析刚性表面定义刚体。在本例中我们假设采用刚体单元。不论采用哪种情况定义刚体表面法线,刚体的表面要朝向橡胶块的方向。定义在节点集 NREF 中的参考节点可以放在任何位置,然而,将该点靠近刚体比较方便。

图 4-10 节点集 NBOT, NRHS 和 NREF

4 3 2 10 × 10 均匀网格:考察输入文件——模型数据

模型描述

在本例中,由于你将研究几种不同的网格,选择能够描述分析以及网格的模型标题,如下所示:

```
* HEADING
Hourglassing example
10 × 10 regular mesh
```

定义橡胶块

确认单元类型为 CPE4R。用下面的截面性质选项给出块的厚度为 0 .10m,并指出材料名为 RUBBER:

```
* SOLID SECTION, ELSET = EALL, MATERIAL = RUBBER
.10,
```

定义刚体

用刚体单元(单元类型 R2D2)定义以 45 °角压缩橡胶块的刚体。确保刚体表面足够大,以使能够压缩橡胶块达到所需要的大小。刚体单元的节点必须与定义橡胶块的节点分离。定义刚体单元,使其单元法线指向橡胶块。定义控制刚体运动的刚体参考节点。用下面的截面性质定义刚体:

```
* RIGID BODY, ELSET = ERIGID, REF NODE = < 节点号 >
```

材料特性

本例中的实体材料由橡胶制成,因此,在模拟中应使用超弹性材料模型。超弹性常数按典型合成橡胶以 Pa 给出。定义超弹性材料的更多信息请参考第 5 章。

```
* MATERIAL, NAME = RUBBER
* * hyperelastic constants in Pa
* HYPERELASTIC, POLYNOMIAL, N = 1
3 .2E6, .8E6
* * density is 1500 kg/ m^3
* DENSITY
1500 .,
```

固定边界条件

固定边界条件可以在输入文件的模型部分或过程部分进行定义。橡胶块的底部和右端定义辊轴约束。固定刚体的转动自由度。

```
* BOUNDARY
NBOT,2
NRHS,1
NREF,6
```

定义荷载幅值

通过在刚体参考节点处描述节点位移以达到逐步压缩橡胶块的目的,你必须首先在模型定义中定义荷载的幅值。在过程定义中所描述的位移将参照此荷载幅值。定义一个线性荷载幅值,当起始时间步时(时间为 0 .0s)荷载为零,在终止时间步时(时间为 0 .1s)荷载为 1 .0。如下所示:

```
* AMPLITUDE, NAME = CRUSH
0 ., 0 ., .1, 1 .
```

4 3 3 10 × 10 均匀网格:考察输入文件——过程数据

步骤定义

下面是这一步骤的适当标题:

```
* STEP
Compress the rubber block
```

选择时间的目的是为了缓慢压缩橡胶块,不让动力学影响占主导地位。因为模型相当小,不必担心计算时间。对于这个问题,0 .1s 的时间足够大以使橡胶块在压缩的过程中接近静止状态(准静态分析将在第 7 章里详细讨论)。因此,这一步所需的总时间定为 0 .1s。

```
* DYNAMIC, EXPLICIT  
, 0.1
```

接触定义

接触问题将在第 6 章中详细讨论。由于刚体单元的法线指向橡胶块,所以接触会发生在其正(SPOS)面。用以下语句定义刚体和橡胶块的接触:

```
* SURFACE DEFINITION, NAME = RIGID  
ERIGID, SPOS  
* SURFACE DEFINITION, NAME = SOLID  
EALL,  
* CONTACT PAIR, INTERACTION = INTER  
SOLID, RIGID  
* SURFACE INTERACTION, NAME = INTER
```

荷载

本分析中的荷载是施加在刚体参考节点上的强制位移边界条件。当刚体运动时,它压缩橡胶块。为了沿 45°角方向使刚体移动 0.017m 的距离,相当于在 1 - 方向和 2 - 方向强制作用 0.012m 的相等位移边界条件。

```
* BOUNDARY, TYPE = DISPLACEMENT, AMPLITUDE = CRUSH  
NREF, 1, 1, .012  
NREF, 2, 2, - .012
```

输出要求

设置写重新启动状态的间隔步为 20。

```
* RESTART, WRITE, NUMBER INTERVAL = 20
```

另外,还需要输出各种模型能量总值的变化历史。能量的历史曲线对于研究沙漏现象是很有帮助的。比较有用的输出变量之一是 ALLAE,它是与沙漏控制有关的伪应变能。

```
* HISTORY OUTPUT, TIME INTERVAL = 0.0  
* ENERGY HISTORY  
ALLAE, ALLKE, ALLIE, ALLVD, ALLKL,  
ALLFD, ALLWK, ETOTAL,  
* END STEP
```

在 * HISTORY OUTPUT 选项中,应用时间值 0.0 意味着对于每一次时间增量,都将输出写入选定的结果文件中,这样允许后处理更加详细。然而,这样做的代价是如果需要大量的数据,则选定的输出文件可能很大。

4 3 4 运行分析过程

在将你的输入存储在一个名为 `hourglass.square.inp` 的文件之后,运行分析过程,并用以下的命令对结果进行转化:

```
abaqus job=hourglass.square analysis convert=all
```

如果分析过程没有顺利完成,检查文件 `hourglass.square.dat` 和 `hourglass.square.sta` 中的错误信息。修改输入文件直至清除一切错误信息。如果在运行分析中仍然有问题,请将你的输入文件与附录 A 中提供的例子进行比较。

4 3 5 结果

将重新启动文件读入 ABAQUS/ Post 进行后处理。

```
abaqus post restart=hourglass.square
```

用如下命令画出图 4-11 所示的最终变形网格:

```
* DRAW, DISPLACED
```

图 4-11 网格 1 的最终变形图

仔细观察变形,你会发现很多网格呈交错的不规则四边形,表明沙漏现象在网格中已发生扩展。这种现象在角部受冲压的区域表现得最为明显。在本例中,沙漏现象如此剧烈以致于我们能够很容易地通过观察变形网格来看到。一般来说,如果从变形网格中看不出沙漏效应的话,就认为它造成的影响不大。一个更为量化的途径是研究伪应变能,它是控制沙漏变形所耗散的主要能量。如果伪应变能过高,说明过多的应变能可能被用来控制沙漏变形。

判断伪应变能何时达到临界值,最有效的途径是比较伪应变能和其它内部能量的值。

在本例中,材料是弹性的;因此,在此情况下与弹性应变能比较是适合的。

在 ABAQUS/ Explicit 中,变量 ALLAE 是伪应变能的能量耗散总和。ALLAE 包括粘性和弹性两项;然而,由于粘性项通常占主要地位,因此大部分转化为伪应变能的能量是不可恢复的。当 ALLAE 的变化曲线斜率非常陡时,耗散的伪应变能也相应很多;反之,若 ALLAE 的变化曲线趋于平缓,伪应变能的耗散则很少。我们最感兴趣的是理解为什么曲线变得陡峭。

用 ABAQUS/ Post 观察伪应变能的历史和弹性(或可恢复性)应变能(ALLSE)。令 ABAQUS/ Post 从选择的结果文件中读取包含所感兴趣的能量历史输出的 x - y 曲线,然后选定结果文件绘 x - y 曲线。

```
* SELECTED RESULTS FILE, FILE = hourglass. square
* SET, HISTORY = SELECTED RESULTS FILE
```

生成并画出伪应变能 ALLAE 的曲线如图 4-12 所示。

```
* READ CURVE, VARIABLE = ALLAE
* DISPLAY CURVE
> ALLAE
>
```

图 4-12 网格 1 中伪应变能(ALLAE)的历史曲线

类似地,生成并画出弹性应变能 ALLSE 的曲线如图 4-13 所示。

```
* READ CURVE, VARIABLE = ALLSE
* DISPLAY CURVE
> ALLSE
>
```

图 4-13 网格 1 中弹性应变能 (ALLSE) 的历史曲线

现在,可以生成一条新的曲线,即伪应变能和弹性应变能的比值与时间的变化关系曲线,如图 4-14 所示。

```
* DEFINE CURVE , NAME = AESE , OPERATION = DIVIDE  
> ALLAE  
> ALLSE  
>
```

图 4-14 伪应变能与弹性应变能比值的历史

这幅曲线表明在分析的早期伪应变能与弹性应变能的比值就达到了 15.7% 的最大值。在达到峰值之后,随着弹性应变能的持续增长,耗散的伪应变能很小,说明沙漏现象没有恶化。在分析的结尾,该比值下降到约为 2%。由该图可确认在模拟过程的大部分时间内,伪应变能与实际应变能的能量耗散比率超过了 10%,而一般的规律希望控制这个比率低于 5%。针对 10% 的比率,我们有必要考虑可能引起伪能量过高的原因以及如何通过降低比率来改善结果。

在沙漏现象最严重的时刻附近,考虑网格的变形情况有助于理解沙漏严重的成因。用 * REPORT XY VALUES 命令,然后单击图 4-14 中所示 AESE 曲线的最大值。ABAQUS/ Post 会输出该点的 x 和 y 坐标,显示最大值发生在 0.044s。对于每一个可能的重新启动状态,应用 * SHOW, RESTART 命令得到时间和重新启动序号的清单。读取离 0.044s 最近的重新启动状态,其重新启动序号为 9,在时间为 0.045s 时。

用如下命令设置序号为 9 的重新启动状态:

```
* RESTART, NUMBER INTERVAL = 9
```

画出变形图,并用鼠标放大角部区域,如图 4-15 所示。在黑白颜色输出图中,去掉变形前的网格可以使网格的变形情况更加清晰。

```
* SET, UNDEFORMED = OFF
```

```
* DRAW, DISPLACED
```

```
* ZOOM, CURSOR
```

< 用光标获取所选定放大的箱形角域 >

图 4-15 网格 1 中角部区域的沙漏现象

为使节点的位置清楚,用实心圆圈标在变形网格上。(默认值 N SIZE = 0.0。)

```
* SET, N SIZE = 0.005
```

* DRAW, DISPLACED

变形网格显示了典型的沙漏图形,邻近的单元皆变为不规则四边形。可以观察到以下几点:第一,开始只有一个节点与刚体接触的角部单元过度变形。第二,沙漏图形在靠近角部的单元表现得最为严重。第三,具有自由边界的单元相对于内部单元的沙漏效应更加严重。由于这些观察仅仅是基于变形形状,因而多少有点片面。

伪应变能密度 EASEDEN 的等值线图有助于量化这些观察结果。用以下命令得到 EASEDEN 的等值线图,如图 4-16 所示:

* CONTOUR, VARIABLE = EASEDEN

这种等值线图显示了网格的变形形状,也显示了每个单元的伪应变能密度。非常明显的是角部单元的伪应变能密度最高。与角部单元对角相邻的内部单元的伪应变能密度次之,它比有自由边界且与角部单元相邻的单元高出的伪应变能并不明显。EASEDEN 的等值线图帮助提供了在网格中沙漏的更完整图象。

图 4-16 伪应变能密度 (EASEDEN) 的等值线图

由此看来,沙漏现象产生于角部单元,此处单点接触的作用类似一个沿对角线的集中力。沙漏现象易于沿着块体的无约束边界以及沿对角线扩展。随着分析过程的进行,自由边界进一步被刚体接触所约束,沙漏效应的严重程度有所减轻。表 4-1 列出了引起沙漏现象的三个常见原因以及补救的办法。

表 4-1 过度沙漏现象的常见原因及补救办法

原 因	补 救 措 施
单个节点上作用集中力	将力分布到多个节点或应用分布荷载
单个节点上作用边界条件	将边界约束分布到多个节点
单个节点上作用接触	将接触约束分布到多个节点

总之,作用在单独的节点上的荷载、边界条件或者接触约束易于促使产生沙漏现象,如图 4-17 所示。另一方面,将荷载或约束分布在两个或更多节点上则大大减轻了沙漏问题,如图 4-18 所示。

图 4-17 集中的力或约束促进沙漏变形

图 4-18 分布的力或约束改善变形图形

- 能使橡胶块网格降低沙漏效应的专门途径有两种:
- 1 . 细划网格,当网格细划时总能降低沙漏。
 - 2 . 角部圆滑过渡,使接触不会在某一单独节点处发生。将接触约束分散在多个节点上,消除沙漏变形形状的起因。

4 3 6 改善网格的效果

为了说明细划网格以及分散接触约束于多个节点的影响,我们建立了另外三个网格,如图 4-19 所示。网格 2 和 4 统一作了最简单的圆角:在接触的点处用一个三角形单元取代了方形单元。使用这些网格,接触不会发生在一个单独的角点上,如图 4-20 所示,初始接触点为两个节点,因而减小了沙漏效应。这样改变网格,显然在模型的角点处去掉了一些物质。然而,应用细划网格,对模型的变化影响很小。

应用前面同样的方法并利用这些新网格,通过能量的 $x - y$ 曲线和变形图形,我们研究其结果的特性。图 4-21 显示了原来网格和三种新网格的弹性应变能历史。由于橡胶块被持续压缩,因而应变能也应随之单调递增,如图所示。平角模型中的最大应变能比起尖角模型要低一些,因为平角模型在角部的物质少了一些,而受压的物质减少,储存的应变能也相应减小。随着网格的细划,平角和方形网格的结果差异有所缩小。

图 4-22 给出了四种网格的伪应变能历史,其趋势十分明显。网格 1(粗糙方形网格)

图 4-19 从左至右:粗糙平角网格(网格 2);精细方形网格(网格 3);精细平角网格(网格 4)

图 4-20 刚体与精细平角网格(网格 4)之间的初始接触

的伪应变能远远高出其它几种;网格 3(精细方形网格)次之,尽管它的水平远低于粗糙网格。对于它们的每一种情况,伪应变能在初始阶段迅速增长,直到达到一个稳定的平台值,并且几乎保持为常数。当只有一个节点单独接触时,伪应变能迅速增加;当两点接触之后,伪应变能的最大值几乎没有增加。由这一观察结果导致的结论是两点或多点接触发生得越快,沙漏将减弱得越快。平角网格在开始时就有两个接触节点;因此,伪应变能并不显示初始的平台值。粗糙平角网格(网格 2)的伪应变能甚至比精细方角网格更低,说明把接触作用力分布到两个节点上比细划网格更能减小沙漏效应。精细平角网格保持非常低的伪应变能,它比方形网格优越的是兼有细划和分布接触约束。

图 4-23 显示了在分析过程中所耗散的伪应变能和弹性应变能的比值如何变化。其趋势与伪应变能单独曲线类似。能量比值的优点是允许我们使用简单的近似准则来判断是否沙漏会成为问题。对于粗糙和精细的方形网格,在整个分析过程中其比值介于 10% 和 15% 之间,超过了 5% 的准则。只有在橡胶块被高度约束之后,比值才会降到 5% 以下。对于平角网格,在整个分析过程中其比值保持低于 2%,表明沙漏的影响不很重要。

在本例中,通过平展橡胶块的角域,我们展示了分散转角处接触力的最基本的方法。

图 4-21 四种网格的弹性应变能历史

图 4-22 所有四种网格的伪应变能历史

对于治疗过度的沙漏,这种方法显示出明显的效果,一个更为一般的方法是用平缓内圆角来圆滑角域,而不是用一个三角形单元来替换角部单元。图 4-24 所示为粗糙的内圆角网格和精细的内圆角网格。尽管它们的行为比起相应的平角网格更复杂一些,但这些网格能够通过同样的方法减轻沙漏问题。只要在角部多于一个节点发生接触,沙漏问题就会减轻。由于圆角网格能更好地表示物理问题,因而在实际工程模拟中的应用更为广泛。

图 4-23 所有四种网格的伪应变能与弹性应变能比值的变化历史

图 4-24 左:粗糙圆角网格(网格 5);右:精细圆角网格(网格 6)

4.4 小结

- ABAQUS 拥有强大的单元库,能够广泛应用于各种结构。单元类型对模拟计算的精度和效率有重要的影响。
- 节点的有效自由度取决于节点所在单元的类型。
- 单元名完全确定了单元族、数学描述、节点数目和积分方式。
- 所有的单元必须使用单元性质选项。单元性质选项提供了所需定义单元几何形状的任何附加数据,并也确定相关的材料性质定义。
- 对于实体单元,ABAQUS 定义的单元输出变量,如应力和应变,定义在笛卡儿整体坐标系。可以用 * ORIENTATION 选项将其定义成局部坐标系。
- 对于三维壳单元,ABAQUS 定义的单元输出变量对应基于壳表面的坐标系。可以应用 * ORIENTATION 选项改变坐标系。

- 为了提高计算效率,模型的任意部分可以被定义成刚体,仅在其参考节点上具有自由度。
- 作为约束的方法,刚体比多点约束计算成本更低。
- 沙漏可能由于集中力、边界条件、或接触作用在单个节点上所致。细划网格以及将力或约束分布到多个节点上常常能够防止沙漏问题的发生。

第 5 章 材 料

ABAQUS/ Explicit 的材料库允许模拟绝大多数的工程材料,包括金属、塑料、橡胶、泡沫塑料、复合材料、岩土、素混凝土和钢筋混凝土等。本指南讨论四种最常用的材料模型:线弹性,金属塑性,橡胶弹性和泡沫塑性。在 ABAQUS/ Explicit 用户手册中详细讨论了所有材料的模型。

5.1 在 ABAQUS 中定义材料

在 ABAQUS 模型中可以定义任意多种材料。每一种材料的定义都要以 * MATERIAL 选项开始。参数 NAME 标识所要定义的材料名称。这个名称将在建模中用来定义单元的材料性质。

在 ABAQUS 输入文件的选项块中,有几种情况的位置很重要,材料定义就是其中之一。所有选项块定义指定材料行为的某一方面,比如弹性模量或者密度,必须直接放在 * MATERIAL选项之后。尤其是,定义特殊材料行为的材料选项块不能被任何非材料的选项中断。如果不能与前面某一材料性质选项块相联系,比如 * ELASTIC, ABAQUS 将发出了一条错误信息。

例如,考虑一种弹塑性金属材料的描述,为了提供必要的数据则需要若干材料行为选项块。除了弹塑性性能选项块之外,ABAQUS/ Explicit 总是需要材料的密度。这样,完整的材料描述为:

```
* MATERIAL, NAME = STEEL
* ELASTIC                                弹性性质
2 .1E11, 0 3
* PLASTIC                                塑性性质
2 .0E8, 0 0
3 .0E8, 0 2
* DENSITY                                密度
7800 0
```

如果有介于 * PLASTIC 和 * DENSITY 选项之间的非材料选项块,如下所示,将导致 ABAQUS 停止分析并且给出错误信息。

```
* MATERIAL, NAME = STEEL
* ELASTIC
2 .1E11, 0 3
* PLASTIC
```

2.0E8, 0.0
3.0E8, 0.2
* BOUNDARY
101, 1, 3,
* DENSITY
7800.0

因为这是非材料选项块, ABAQUS
不知道 * DENSITY 属于哪个材料选项块

5 2 延性金属的塑性

许多金属在小应变时表现出近似线弹性性质,如图 5-1 所示。称为杨氏模量或者弹性模量的常数刚度定义了材料行为。在高应变水平情况下,金属展现出非线性、塑性的性质,如图 5-2 所示。

图 5-1 线弹性材料的应力 - 应变行为,如在小应变情况下的钢材

图 5-2 在拉伸实验中弹塑性材料的名义应力 - 应变特性

5 2 1 延性金属的塑性性能

材料的塑性性能可以用它的屈服点和后屈服硬化来描述。图 5-2 展示了一种延性金属的应力 - 应变曲线,标出了所有的重要区段。在应力 - 应变曲线上从弹性转变为塑性的一个点称为弹性极限或屈服点。大多数金属在屈服点处的应力,称为屈服应力,是材料

弹性模量的 0.05% ~ 0.1%。

金属在到达屈服点之前的变形只产生弹性应变,卸载后可以完全恢复。然而,一旦在金属中的应力超过了屈服应力,便开始产生永久或者塑性变形。与这种永久变形相关的应变称为塑性应变。即使在屈服之后,弹性应变仍然根据最初的弹性模量继续增加,因此,任何增加的应变都包括弹性和塑性两部分。

一旦材料屈服,加载刚度将大大降低,而杨氏模量仍旧定义为卸载刚度。如果材料是卸载后再加载,材料的刚度等于杨氏模量,直到应力 - 应变曲线重新插入硬化曲线,在插入点处,材料屈服并且沿硬化曲线继续加载。通常塑性变形将增加后继加载的屈服应力,这种性能称为工作硬化。

在拉伸荷载作用下,金属塑性变形在达到强度极限之后可能经历高度的局部变形,称为颈缩。在颈缩时,其名义应力(每单位未变形面积上的力)将下降到远低于强度极限,作为名义应变(每单位未变形长度的长度改变)将继续增加。这种材料特性是由试件几何形状、实验本身特点,以及应力 - 应变测量方法引起的。比如,在压缩过程中实验相同材料,应力 - 应变曲线就不会出现颈缩区域,因为试件在承受压缩时不会变细。因此,描述金属塑性行为的数学模型必须考虑拉伸和压缩的不同特性,并独立于结构的几何形状和施加载荷的性质。用变化的应力 - 应变度量替代名义应力 F/A_0 和名义应变 V/l_0 ,在有限变形中允许考虑面积的改变。

5 2 2 有限变形中的应力 - 应变度量

如果在仅考虑极限 $l \rightarrow dl \rightarrow 0$ 的情况下,拉伸和压缩应变是相同的,例如:

$$\begin{aligned} d &= \frac{dl}{l} \\ &= \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln \frac{l}{l_0} \end{aligned}$$

式中 l 是当前长度, l_0 是原始长度, 为真实应变或对数应变。

与真实应变对应的应力是真实应力,它定义为:

$$= \frac{F}{A}$$

式中 F 是材料所承受的力, A 是当前面积。如果画真实应力 - 真实应变的曲线,在拉伸和压缩时,承受有限变形的延性金属的应力 - 应变行为应是一致的。

5 2 3 在 ABAQUS 中定义塑性

在 ABAQUS 中定义塑性数据,必须使用真实应力和真实应变。ABAQUS 需要这些数值并相应地在输入文件中解释这些数据。然而,大多数实验数据常常是用名义应力和名义应变给出的。这样,就必须将塑性材料的数据从名义应力和名义应变转化为真实应力和真实应变。

通过考虑塑性变形的不可压缩性,真实应力和名义应力之间的关系为:

$$l_0 A_0 = lA$$

然后,形成了当前面积和原始面积的关系表达式为:

$$A = A_0 \frac{l_0}{l}$$

将当前面积 A 代入真实应力的定义式中,得到:

$$= \frac{F}{A} = \frac{F}{A_0} \frac{l}{l_0} = \sigma_{nom} \frac{l}{l_0}, \text{ 其中 } \frac{l}{l_0} \text{ 也可以写作 } 1 + \epsilon_{nom}。$$

做最后的代换,下面公式提供了真实应力和名义应力 - 名义应变之间的关系:

$$\sigma = \sigma_{nom} (1 + \epsilon_{nom}) \quad (5-1)$$

我们很少涉及真实应变和名义应变之间的关系,在开始时就将名义应变表达为:

$$\epsilon_{nom} = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{l}{l_0} - 1$$

在这个表达式的两边各加 1,然后两边取自然对数,就得到了真实应变和名义应变二者之间的关系:

$$\epsilon = \ln(1 + \epsilon_{nom}) \quad (5-2)$$

在 ABAQUS 中应用 * PLASTIC 选项定义大多数金属的后屈服特性。* PLASTIC 选项中的数据对将真实应力定义为真实塑性应变的函数。第一对数据定义初始屈服应力和相应的初始塑性应变,这个塑性应变必须赋值为 0。ABAQUS 用一系列直线段连接给定的应力 - 应变数据对来形成连续的、分段线性的塑性曲线。你可以用任意多的数据对来逼近实际的材料行为,要得到非常近似于实际材料的行为是可能的。

在用来定义塑性性能的材料实验数据中,提供的应变不仅仅是材料的塑性应变,而可能是材料的总体应变。你必须将总体应变分解为弹性应变和塑性应变分量。弹性应变等于真实应力与杨氏模量的比值,从总体应变中减去弹性应变,就得到了塑性应变(见图 5-3),其关系式为:

$$\epsilon^p = \epsilon^t - \epsilon^e = \epsilon^t - \sigma / E \quad (5-3)$$

图 5-3 总体应变分解为弹性和塑性应变分量

其中 ϵ^p 是真实塑性应变, ϵ^t 是总体真实应变, ϵ^e 是真实弹性应变, σ 是真实应力, E 是杨氏模量。

实验数据转化为 ABAQUS 输入的示例

图 5-4 中的应力 - 应变曲线可以作为一个例子,用来示例如何将定义材料塑性性能的实验数据转化为适用于 ABAQUS 的输入格式。名义应力 - 应变曲线上的 6 个点将成为 * ABAQUS 选项中的数据。

```
* 弹性
210 .E9,0 .3
* 塑性
200 .2E6,0 .0
246 .E6,0 .0235
294 .E6,0 .0474
374 .E6,0 .0935
437 .E6,0 .1377
480 .E6,0 .18
```

图 5-4 弹-塑性材料性能和相应的 ABAQUS 输入数据

第一步是应用公式 (5-1) 和 (5-2) 将名义应力和名义应变转化为真实应力和真实应变。一旦得到这些数值,可以用公式 (5-3) 来确定与每一个屈服应力值相关联的塑性应变。转化后的数据由表 5-1 给出。在小应变时,真实应变和名义应变之间的差别很小;而在大应变时,二者之间有明显的差别。因此,如果在模拟中的应变比较大,就一定要向 ABAQUS 提供准确的应力 - 应变数据,这是非常重要的。在图 5-4 中给出了定义这种材料性能的输入数据格式。

表 5-1 转换名义应力和应变为真实应力和应变

名义应力	名义应变	真实应力	真实应变	塑性应变
200E6	0 .00095	200 .2E6	0 .00095	0 .0
240E6	0 .025	246E6	0 .0247	0 .0235
280E6	0 .050	294E6	0 .0488	0 .0474
340E6	0 .100	374E6	0 .0953	0 .0935
380E6	0 .150	437E6	0 .1398	0 .1377
400E6	0 .200	480E6	0 .1823	0 .1800

用户自定义数据的规则化

在分析过程中,ABAQUS/ Explicit 可能不能正确使用用户定义的材料数据,为了有效性,所有以表格形式给出的材料数据将自动地被规则化。材料数据可以是温度、外场以及内部状态、如塑性应变的函数。在每一个材料计算点上,材料状态必须通过插值确定,为了计算效率,ABAQUS/ Explicit 用等距分布的点组成的曲线拟合用户定义的曲线。这些规则化的材料曲线是在分析中的材料数据。理解在分析中所用的规则化的材料曲线与输入文件中给定的曲线间可能存在的差别是很重要的。

为了说明规则化材料数据的含义,考虑下面两种情形。图 5-5 演示了用户定义的非规则化数据的情况。在该例中,ABAQUS/ Explicit 生成了所示的 6 个规则数据点,再一次正确地产生了用户数据。图 5-6 演示了用户已经定义的数据难以准确规则化的情形。在这个例子中,通过将区域分成 10 间隔,假设 ABAQUS/ Explicit 已经规则化了数据,但是不能准确地再产生用户数据点。

* 塑性
200,0 .0
260,0 .2
300,0 .8
300,1 .0

图 5-5 能够将用户数据准确规则化的示例

ABAQUS/ Explicit 试图用足够多的间隔使得规则化数据与用户定义数据之间的最大误差小于 3 %。你可以用 * MATERIAL 选项中的 RTOL 参数改变这个误差限。如果需要应用多于 200 个间隔才能得到一条可接受的规则曲线,在数据检测中分析将中止并给出一个出错信息。通常情况下,如果用户定义的最小间隔小于独立变量的区间,规则化将更加困难。在图 5-6 中,应变大小为 1 .0 的数据点使得应变值的范围大于在低应变水平下定义的较小间隔。消除这最后一个数据点可以使得数据更容易规则化。

在数据点之间插值

为了获得材料响应,ABAQUS/ Explicit 在规则化数据点之间线性插值,并假定在输入数据定义的范围之外的响应为常数。因此,图 5-5 和图 5-6 所示材料的应力绝不会超过

300MPa;如果材料的应力达到了 300MPa,硬化曲线的斜率被假定为 0。

* 塑性
100,0 .0
260,0 .02
300,0 .12
300,1 .0

图 5-6 用户数据难以规则化的示例

5 3 例子:爆炸荷载作用在加强板上

材料性能
一般性能:
= 7800kg/ m³
弹性性能:
 $E = 210 \times 10^9 \text{ Pa}$
= 0 .3

塑性性能:	
真实应力(Pa)	真实塑性应变
300E6	0 .000
350E6	0 .025
375E6	0 .100
394E6	0 .200
400E6	0 .350

图 5-7 一平板受爆炸荷载问题的描述

在本例中,你将评估受到爆炸荷载的有加强肋的方板的响应。板的四周被坚实地固定,并且等间距地焊接三条加强肋。板为 25mm 厚和 2m 见方的钢板。肋条由厚 12.5mm 和宽 100mm 的板做成。图 5-7 更详尽的给出了板的几何形状和材料参数。

本例的目的是确定板的响应,并且观察当材料模型的复杂程度增加时板的响应是如何变化的。开始,我们分析标准弹-塑性材料模型的行为。接着,我们研究包括材料阻尼和率相关材料性能的影响。

5.3.1 坐标系

采用默认的直角坐标系,将板放置在 1 - 2 平面内。由于板的厚度明显的小于其它总体尺度,你可以使用 SR4 型壳单元处理这个模型。

5.3.2 网格设计

根据设计生成网格如图 5-8 所示,所划分的网格相对比较粗糙,板为 20×20 个单元,而每一条肋为 2×20 个单元。这个网格与附录 A 中 A.5 节所示的输入文件相对应。这个方案能够提供中等的精度而使运算时间较少。定义网格使板单元的法线全部指向 1-轴的正方向。这样确保肋位于板的 SPOS 面,这对于后面定义单元性质和中面偏移是非常重要的。

5.3.3 节点与单元设置

图 5-9 所示是所有需要引入单元参数、荷载和边界条件的集合。在一个称作 EDGE 的节点集中包括板周边上的所有节点。这些节点将给出一个完全固定的边界条件。定义一个为输出而设置的节点集 NOUT 来包含板中心的节点。将

图 5-8 加强肋板的网格设计

图 5-9 节点和单元设置

板单元放入一个称为 PLATE 的单元集中,并将肋单元放入 STIFF 单元集中。另外,定义一个为输出而设置的 STIFFMAX 单元集,包括在肋板中央的四个中心单元。这些单元将承受肋板上的最大弯曲应力。

5 3 4 考察输入文件——模型数据

模型描述

在输入文件中,* HEADING 选项包括题目和模型描述。这个标题用作将来参考,而且可以包括模型修改和复杂模型演化的信息。它可能有几行长,但只有第一行将在输出文件中作为标题打印出来。下面是在这个分析中可能使用的 * HEADING 定义:

```
* HEADING
Blast load on a flat plate with stiffeners
S4R elements (20 x 20 mesh)
Normal stiffeners (20 x 2)
SI units (kg, m, s, N)
```

节点坐标和单元

使用你的前处理生成图 5-8 所示的网格和图 5-9 所示的集合。

单元性质和壳中面偏置

给每个单元设置如下所示的截面参数。在每个 * SHELL SECTION 选项中包括适当的 MATERIAL 参数,以便为每个单元集提供材料定义。

```
* SHELL SECTION, MATERIAL = STEEL, ELSET = PLATE, OFFSET = SPOS
0 .025,
* SHELL SECTION, MATERIAL = STEEL, ELSET = STIFF
0 .0125,
```

名为 STEEL 的材料将在下一节定义。设置 OFFSET 为 SPOS,将板的中面沿离开节点的方向平移半个壳厚,其作用是使得 PLATE 节点位于 SPOS 壳表面而不是在壳中面。在此情况下,壳偏置的目的是允许肋板能够与板相搭接而不与板的任何材料重叠。图 5-10显示了应用了 OFFSET 参数时肋与板连接的剖面。

如果肋和板单元在中面上的一般节点处相连接,将有一定区域的材料发生重叠,如图 5-11 所示。如果板和肋的厚度与结构的总体尺度相比很小,这个重叠面积和额外刚度将对分析结果的影响很小。但是,如果肋板相对于本身宽度或基板厚度比较短,重叠材料的附加刚度将影响整个结构的响应。

材料性质

假设板和肋都是钢制的(杨氏模量 210 .0GPa,泊松比 0 .3)。在这个阶段我们尚不知道是否会发生任何塑性变形,但是我们知道这种钢材屈服应力的值和屈服后行为的详细

图 5-10 板的中面偏置节点时的肋板连接

图 5-11 如果不用 OFFSET 的材料重叠

情况。在材料定义的 * PLASTIC 选项中,我们将加入这些信息。初始屈服应力为 300 MPa,在达到 35 % 的塑性应变时,屈服应力增至 400MPa。塑性数据如下所示,其塑性应力 - 应变曲线如图 5-12 所示。

```
* MATERIAL, NAME = STEEL
* ELASTIC
210.0E9, 3
* PLASTIC
300.0E6, 0.000
350.0E6, 0.025
375.0E6, 0.100
394.0E6, 0.200
400.0E6, 0.350
```

```
* DENSITY
7800 0,
```

图 5-12 屈服应力与对数塑性应变的关系

在分析的过程中, ABAQUS 利用塑性应变的当前值计算屈服应力的值。正如前面所讨论的, 当数据被规则化了, 即应力 - 应变数据为等间隔地分布塑性应变值, 查找和插值的过程都是相当高效的。为避免让用户输入规则数据, ABAQUS/ Explicit 自动地规则化这些数据。在本例中, 数据通过扩展到 15 个间隔为 0.025 的等间距点, 被 ABAQUS/ Explicit 规则化。

为了说明当 ABAQUS/ Explicit 不能正确规则化材料数据时产生的出错信息, 让我们试一下建立规则化允许误差, RTOL 为 0.001, 并且附加一个数据对, 如下所示:

```
* MATERIAL, NAME = STEEL, RTOL = 0.001
* ELASTIC
210 0E9, 3
* PLASTIC
300 0E6, 0.000
349 0E6, 0.001          附加数据对
350 0E6, 0.025
375 5E6, 0.100
394 0E6, 0.200
400 0E6, 0.350
```

用户定义数据的低允许误差值和小间隔的组合将导致难以规则化材料定义。下面的错误信息产生在状态文件 .sta 中:

```
* * * ERROR:Failed to regularize material data ..
```

```
* * * ERROR:Try regularizing the independent variable intervals .
```

边界条件

应用前面定义的节点集 EDGE 完全约束板的边界。

```
* BOUNDARY
```

```
EDGE , ENCASTRE
```

或者,你可以用数字指定自由度。

```
* BOUNDARY
```

```
EDGE , 1 , 6
```

爆炸荷载幅值的定义

由于板将承受随时间变化的荷载,必须定义一个相应的幅值曲线来描述这种变化。定义如图 5-13 所示的幅值曲线:

```
* AMPLITUDE, NAME = BLAST
```

```
0.0, 0.0, 1.0E - 3, 7.0E5, 10E - 3, 7.0E5, 20E - 3, 0.0
```

```
50E - 3, 0.0
```

在 1ms 内,压力迅速地从分析开始时的零值增大至最大值 7.0×10^5 N,在这点上,压力将保持为常数达 9ms,在此之后的 10ms 内,压力下降为零。压力将在以后的分析中保持为零。

图 5-13 作为时间函数的压力荷载

5 3 5 考察输入文件——过程数据

过程数据由 * STEP 选项开始,紧接着是这一步骤的标题。在标题之后,指定 * DYNAMIC, EXPLICIT 过程为 50ms 的时间段。

```
* STEP
Apply blast loading
* * Explicit analysis with a time duration of 50 ms
* DYNAMIC, EXPLICIT
, 50E - 03
```

施加爆炸荷载

用 * DLOAD 选项在板上施加爆炸荷载。保证这个压力荷载施加在正确的方向上是很重要的。正压力定义为沿着壳的正法线方向作用。对于壳单元,正法线方向通过运用绕单元节点的右手规则得到,如图 5-14 所示。由于荷载的大小已经在 BLAST 幅值定义中定义过,你仅需要在 * DLOAD 选项下施加一个单位压力。施加压力,使得它推压板的顶部(肋在板的下面)。这样的压力荷载会导致肋板的外部纤维处于拉伸状态。在你的输入文件中应用以下选项:

```
* DLOAD, AMPLITUDE = BLAST
PLATE, P, 1 .0
```

图 5-14 正向压力荷载的定义

输出要求

为了检验计算过程,在分析中使用 * MONITOR 选项监视板中间节点的挠度。在输入文件中加入以下命令来监视中心节点的离面位移:

```
MONITOR, NODE = < 中间节点编号 > , DOF = 1
```

因为这一步骤的总时间为 50ms,设置写重新启动状态的数量为 25,这将保证每 2ms 输出一 次重新启动状态。一般情况下,在分析中你应该尽量限制写重新启动状态的次数,保持重新启动文件的规模是合理的。在这个分析中,每 2ms 存储一次信息将为直观地研究结

构的响应提供足够详细的资料。

```
* RESTART, WRITE, NUMBER INTERVAL=25
```

通过使用 * HISTORY OUTPUT 选项,为模型的选定部分存储一个更为详尽的输出设置。在分析中设置 TIME INTERVAL 参数为 1 .0E - 4 秒,在 500 个点上输出所要求的数据。对于单元集 STIFFMAX 中的单元,输出 Mises 应力 (MISES)、等效塑性应变 (PEEQ)和体积应变率 (ERV)。因为将要经历最大位移的节点在板的中心,用节点集 NOUT 为板的中心输出位移和速度历史。另外,存储如下能量变量:动能 (ALLKE)、可恢复应变能 (ALLSE)、外力功 (ALLWK)、塑性耗散能 (ALLPD)、总内能 (ALLIE)、粘滞耗散能 (ALLVD)、伪能量 (ALLAE)、能量平衡 (ETOTAL)。

```
* HISTORY OUTPUT, TIME INTERVAL= 1 .0E - 4
* EL HISTORY, ELSET= STIFFMAX
PEEQ, MISES, ERV
* NODE HISTORY, NSET= NOUT
U, V
* ENERGY HISTORY
ALLKE, ALLSE, ALLWK, ALLPD, ALLIE, ALLVD, ALLAE, ETOTAL
* END STEP
```

将你的输入文件存储在一个名为 blast . base .inp 的文件中,因为这些结果将用作比较后面分析的基本状态。运行分析,并用以下命令转换结果:

```
abaqus job=blast . base analysis convert=all
```

5 3 6 输出

状态文件

在状态文件的开始部分可以找到有关的模型信息,例如总体质量和质心,以及初始稳定时间增量。10 个最为关键的单元(比如,那些导致最小时间增量的单元)也按顺序显示出来。如果在你的模型中包含几个单元远小于模型中的其它单元,这些小单元将是最关键的单元并且控制稳定时间增量。状态文件中的稳定时间增量信息可以显示出那些对稳定时间增量有不利影响的单元,如果必要,允许你改变网格以改善状况。有一个大致均匀尺寸的单元网格是较为理想的。在这个例子中,网格是均匀的;因此,10 个最关键的单元具有相同的最小时间增量。状态文件的开始部分如下所示:

```
-----
MODEL INFORMATION ( IN GLOBAL X - Y COORDINATES)
-----

Total mass in model (unscaled)= 838 .50
Center of mass of model = (3 .488360E - 03,9 .999977E - 01,9 .999990E - 01 )
About Center of Mass          About Origin
```

I(XX)	5 557794E + 02	2 232779E + 03
I(YY)	2 750539E + 02	1 .113565E + 03
I(ZZ)	2 849024E + 02	1 .123411E + 03
I(XY)	9 052661E - 06	2 925000E + 00
I(YZ)	4 294889E - 04	8 385000E + 02
I(ZX)	3 435961E - 06	2 924998E + 00

STABLE TIME INCREMENT INFORMATION

The stable time increment estimate for each element is based on linearization about the initial state .The stable time increment estimates do not account for mass scaling .

Initial time increment = 6 .99621E - 06

Statistics for all elements:

Mean = 1 .01237E - 05

Standard deviation = 3 .90626E - 05

Most critical elements:

(rank)	(element number)	(time increment)	(increment ratio)
1	1033	6 .996213E - 06	1 .000000E + 00
2	1038	6 .996213E - 06	1 .000000E + 00
3	2033	6 .996213E - 06	1 .000000E + 00
4	2038	6 .996213E - 06	1 .000000E + 00
5	3033	6 .996213E - 06	1 .000000E + 00
6	3038	6 .996213E - 06	1 .000000E + 00
7	1013	6 .996214E - 06	9 .999999E - 01
8	1018	6 .996214E - 06	9 .999999E - 01
9	1022	6 .996214E - 06	9 .999999E - 01
10	1024	6 .996214E - 06	9 .999999E - 01

在分析中,可以观察状态文件以监视分析的进程。下面给出的是在状态文件中求解过程部分的开始。注意到所执行的增量数比你从 ABAQUS/ Standard 分析中预测的多得多,并且间隔每 2ms 输出一次重新启动文件。

SOLUTION PROGRESS

step 1 origin .00000E + 00

Global time estimation algorithm will be used .
Scaling factor: 1 .0000

STEP	TOTAL	CPU	STABLE	CRITICAL	KINETIC		
INCREMENT	TIME	TIME	INCREMENT	ELEMENT	ENERGY	MONITOR	
0	.000E + 00	.000E + 00	00 00 00	6 .996E - 06	1033	.000E + 00	.000E + 00
235	2 .000E - 03	2 .000E - 03	00 00 05	8 .573E - 06	2035	4 .539E + 03	4 .183E - 03
Restart Number 1 at 2 .00007E - 03							
469	4 .006E - 03	4 .006E - 03	00 00 11	8 .572E - 06	2018	1 .139E + 04	2 .525E - 02
Restart Number 2 at 4 .00587E - 03							
702	6 .003E - 03	6 .003E - 03	00 00 17	8 .572E - 06	2031	6 .192E + 03	4 .610E - 02
Restart Number 3 at 6 .00301E - 03							
935	8 .000E - 03	8 .000E - 03	00 00 23	8 .572E - 06	2031	1 .892E + 03	5 .050E - 02

这个文件中还包括了 * MONITOR 选项参考节点的输出。

5 3 7 后处理

键入以下命令将结果载入 ABAQUS/ Post:

```
abaqus post restart = blast . base
```

用如下命令画出没有变形的网格:

```
* DRAW
```

结果是一个不太清晰的板的图像。为了更好的视觉效果,使用带有 VIEWPOINT 选项的 * VIEW 命令,应用如下输入以确定模型的方位:

```
* VIEW, VIEWPOINT(0 3,1,1), UP = (1,0,0)
* DRAW
```

或者,你可以用鼠标转动模型。默认情况下,如果你按下鼠标键 1 并且移动鼠标,模型将会转动。相应地,你可以用鼠标键 2 和 3 平移和放大或缩小模型。

改变设置之后再画模型以生成填充图,比例没有任何再变化。关闭位移图中的标题和坐标轴。

```
* SET, FILL = ON, UNDEFORMED = OFF, RESCALE = OFF
* SET, D TITLE = OFF, AXES = OFF
* DRAW
```

动画显示结果

动画显示结果可以为爆炸荷载作用下板的动态响应提供一个总体的认识,生成动画的第一步是开始收集动画文件中的一系列图片。

```
* SET, CAPTURE = blast . base flc
```

一旦打开动画文件,直至关闭这个动画文件,所有后面的图片将存储在文件中。在分析中,在不同时间生成同一图的最方便的方法是使用 * SEQUENCE, TIME 命令,对于每一个可能的重新启动状态,它将执行所有后继命令直至 END 命令。对每一个重新启动状态,用如下命令绘制和存储变形网格图:

```
* SEQUENCE, TIME
&DRAW, DISPLACED
&END
```

当绘制出所有状态的变形形状后,用下面的命令关闭动画文件:

```
* SET, CAPTURE = CLOSE
```

现在你可以用 * ANIMATE 命令在任何时候显示动画文件。

```
* ANIMATE, FILE = blast . base flc
```

你将从动画中看到,当爆炸荷载施加以后,板开始挠曲。在加载期间,板开始振动,并且持续振动直到爆炸荷载衰减至零。在大约 0.1ms 时发生最大位移,这种状态的位移图如图 5-15 所示。

图 5-15 在 0.1ms 时的位移形状图

历史输出

由于很不容易从位移图中看出板的变形,最好是以图形的形式观察中心节点(节点集 NOUT)的挠度响应,从选定的结果文件(.sel)中,用以下命令设置 ABAQUS/ Post 读取历史数据:

```
* SELECT, FILE = blast . base
```

用下面的命令演示中心节点的位移历史,如图 5-16 所示的以 mm 为单位的位移。(由于格式限制,下面输入的 * DEFINE CURVE 命令分为两行显示。因为 ABAQUS/ Post 的输入不能一行一行地连接,每个命令实际上必须用一单行完成)。

```
* READ CURVE, NAME = DISP, NODE = NOUT, VARIABLE = U1
* GRAPH AXES, YTITLE = Displacement (mm), XTITLE = Time
* DEFINE CURVE, NAME = U . BASE2, OPERATION = MULTIPLY,
CONSTANT = 1000
> DISP
```

```

* GRAPH LEGEND, OFF
* DISPLAY CURVE
> U- BASE2
>

```

图 5-16 作为时间的函数的中心位移

图中演示了在 7.4ms 时位移达到了 50.1mm 的最大值,并且在爆炸荷载卸除之后发生振荡。

存储在历史结果文件中的其它数值是模型的总能量。能量历史能够帮助识别模型中可能存在的缺陷和有显著意义的物理影响。采用下面的命令显示五种不同能量输出变量的历史-ALLKE, ALLSE, ALLPD, ALLIE, 和 ALLAE,如图 5-17 所示:

```

* READ CURVE, NAME = ALLKE, VARIABLE = ALLKE
* READ CURVE, NAME = ALLSE, VARIABLE = ALLSE
* READ CURVE, NAME = ALLPD, VARIABLE = ALLPD
* READ CURVE, NAME = ALLAE, VARIABLE = ALLAE
* READ CURVE, NAME = ALLIE, VARIABLE = ALLIE
* CURVE STYLE, NAME = ALLKE, LINE TYPE = SOLID
* CURVE STYLE, NAME = ALLSE, LINE TYPE = DASHED
* CURVE STYLE, NAME = ALLPD, LINE TYPE = DOTTED
* CURVE STYLE, NAME = ALLAE, LINE TYPE = LONG DASHED
* CURVE STYLE, NAME = ALLIE, LINE TYPE = CHAIN DASHED
* GRAPH AXES, YTITLE = Energy, XTITLE = Time
* GRAGH LEGEND, ON ORIGIN = (0.05,0.85)
* DISPLAY CURVE
> ALLKE, ALLSE, ALLPD, ALLAE, ALLIE
>

```

图 5-17 作为时间函数的能量组

我们可以看出一旦荷载卸除且板自由振动,随着应变能的减少,动能将相应地增加。当板处于最大挠度时,有最大的应变能,板几乎完全静止,致使动能为最小值。

注意塑性应变能升至一个平直段后接着再升高。从动能曲线中可以看出塑性应变能的第二次升高发生在板从最大位移处弹回并向相反方向运动时。因此,在爆炸脉冲之后,我们看到了回弹的塑性变形。

即使这里没有说明沙漏在分析中会成为问题,也要认真分析伪应变能。正如在第 4 章所讨论的,伪应变能是用以控制沙漏变形的能量,输出变量 ALLAE 是累加的伪应变能。因为当板变形时,能量在塑性变形中耗散,总的内能远远大于单独的弹性应变能。所以,分析中最有意义的是将伪应变能与包括耗散能和弹性应变能的能量量值相比较。后者是总应变能 ALLIE,它是所有内能的数量和。伪应变能约为总应变能的 1%,说明沙漏不是一个问题。

我们可以从变形形状中注意到的一件事是中间肋板受到的几乎是纯粹的面内弯曲,在肋板厚度方向上仅用两个一阶减缩积分单元不足以模拟弯曲行为。由于沙漏很小,用这种粗糙网格得到的结果已是足够的,为了更加完善,我们将研究当细划肋板的网格时结果将如何变化。记住必须很小心地细划网格,因为网络细划将增加单元数量,减小单元尺寸,从而增加了运算时间。

用 4 个单元取代 2 个单元模拟肋板将导致单元数量的增加,而运算时间增加了约为 20%。另外,作为肋板最小单元尺寸减小的结果,稳定时间增量约减小了 2 倍。因为运算时间的总体增加是两种影响之和,细划网格的运算时间将增加为原始网格的 1.2×2 ,即 2.4 倍。

图 5-18 显示了原始网格和肋板网格细划后的伪能量历史。不出所料,细划网格的伪能量低些。然而,从原始网格到细划网格,重要的问题是其结果是否有显著的变化。图

图 5-18 模型的原始网格和细划网格的等值线图

5-19 说明了两种情形下板的中心节点的位移几乎相同,说明最初的网格已经足够精确地反映了全体的响应。而细划网格的优点之一是它更好地反映了通过肋板的应力和塑性应变的变化。用如下的命令相应地作出 Mises 应力和等效塑性应变的等值线:

图 5-19 原始网格和细划网格的中间位移历史

* CONTOUR, VARIABLE = MISES, SECTION = 5

和

```
* CONTOUR, VARIABLE = PEEQ, SECTION = 5
```

图 5-20 画出了截面点 5 上 Mises 应力的等值线图,而图 5-21 给出了截面点 5 上等效塑性应变的等值线图。

图 5-20 Mises 应力的等值线图

图 5-21 等效塑性应变的等值线图

5 3 8 考察分析

这个分析的目的是研究当板受到爆炸荷载作用时板的变形和结构不同部分的应力情况。为了判断分析的精确度,你将需要考虑作出假定和近似,并确认模型的限制条件。

阻尼

无阻尼的结构将以常值的振幅持续振动。在这个模拟达到 50ms 时,可以看到的振动频率约为 214Hz。等振幅的振动不是实际上期望得到的响应,因为这种类型结构的振动将随着时间增加而趋于停止,实际上在 5 至 10 次振动后便消失了。一般地,由于各种机理产生能量损失,包括支撑的摩擦效果和空气的阻尼。

接下来,在分析中我们需要考虑阻尼的存在,以模拟这些能量的损失。由于粘性影响而耗散的能量 ALLVD 为非零值,表明分析中已有某种阻尼存在。默认时,体粘性阻尼(在第 3 章中讨论过)已经存在,引入它以改进高速情形的模型。

在这个壳模型中只存在线性阻尼。使用默认值,这个振动将最终停止,由于体粘性阻尼很小,振动将会持续很长一段时间。材料阻尼用以引起一个更为真实的结构响应。修改材料数据块以引入阻尼,设置质量比例阻尼为 50.0。

* DAMPING, ALPHA = 50.0, BETA = 0.0

BETA 是控制肋板刚度比例阻尼的参数,在这一阶段我们设置它为零。

板的振动时间周期约为 10ms,于是我们需要增加分析时间的周期以允许足够的时间使振动衰减掉。因而,将分析时间增加为 150ms。

有阻尼分析的结果清楚地显示了质量比例阻尼的作用。图 5-22 显示了有阻尼和无阻尼分析的中心节点的位移历史。(我们将无阻尼模型的分析时间扩展到 150ms 以便更加有效地比较数据。)峰值响应也因阻尼而衰减。在有阻尼分析的后面,振动已经退化到接近静态条件。

率相关

一些材料,比如低碳钢,随着应变速率的增加表现出增加屈服应力。在本例中,加载速率高,于是应变率相关性是很重要的。* RATE DEPENDENT 选项与 * PLASTIC 选项同时作用,以便引入应变率相关。

加入下面的材料选项块:

* RATE DEPENDENT
40.0, 5.0

有了这个率相关行为的定义,根据方程 $\sigma^{pl} = D(\dot{\epsilon} - 1)^n$, 动态与静态屈服应力的比值 ($\dot{\epsilon}$) 由等效塑性应变率 ($\dot{\epsilon}^{pl}$) 给出。式中 D 和 n 为材料常数(本例中为 40.0 和 5.0)。

当包括了 * RATE DEPENDENT 选项,随着应变速率的增加,屈服应力有显著

图 5-22 有阻尼和无阻尼的位移历史

的增加。由于弹性模量比塑性模量大,因此,在分析中我们希望应用率相关得到较刚硬的响应。图 5-23 给出了有、无率相关情况下板中间的位移历史,图 5-24 给出了塑性应变历史,确认了当包括率相关时其响应确实变得刚硬了。当然,结果对于材料数据是敏感的。在本例中, D 和 n 为低碳钢的典型值,但在具体的设计分析时,将要求更为精确的数据。

图 5-23 有、无率相关情况下中间节点的位移

图 5-24 有、无率相关情况下的塑性应变能

5.4 超弹性

典型橡胶材料的应力 - 应变行为如图 5-25 所示,表现出高度非线性弹性。这种材料特性称作超弹性。像橡胶这样的超弹性材料的变形可以保持弹性直至大应变值(通常可以超过 100%)。ABAQUS/ Explicit 在模拟超弹性材料时作如下假定:

- 材料为弹性
- 材料为各向同性

材料几乎不可压缩 (默认泊松比为 0.475)

弹性泡沫是另一类高度非线性的弹性材料。它们与橡胶不同,在承受压力荷载时具有高度的可压缩性。在 ABAQUS/ Explicit 中用超泡沫模型模拟。

5.4.1 应变势能

ABAQUS 不是采用杨氏模量和泊松比,而是采用应变势能(U)来表达超弹性材料的应力 - 应变关系。有两种应变势能可以利用:多项式模型和奥根模型。

最普遍应用的一种模型是多项式形式的应变势能,它的形式为:

$$U = \sum_{i+j=1}^N C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j + \sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i} (J_{el} - 1)^{2i} \tag{5-4}$$

其中 U 为应变势能; J_{el} 是弹性体积比; I_1 和 I_2 是材料中的变形度量;而 N , C_{ij} 和 D_i 是材料参数,它们可能是温度的函数。参数 C_{ij} 描述了材料的剪切特性,而参数 D_i 引入了可压缩性。如果材料是完全不可压缩的(在 ABAQUS/ Explicit 中不允许出现这种情况),所有的 D_i 值为零,公式(5-4)的第二项可以忽略。如果项数 N 为 1,初始剪切模量 μ_0 与体积

图 5-25 橡胶的典型应力 - 应变曲线

模量 K_0 由如下公式给出:

$$\mu_0 = 2(C_{01} + C_{10})$$

和

$$K_0 = 2/ D_1$$

奥根模型在概念上与此相似,将在 ABAQUS/ Explicit 用户手册中介绍。

为了使用超弹性材料,你必须向 ABAQUS 提供有关材料参数。对于多项式模型,它们是 N , C_{ij} 和 D_i 。当模拟超弹性材料时,你可能已经提供了这些参数;然而,更多的情况是你将提供所必须模拟的材料的实验数据。幸运的是,ABAQUS 可以直接接受实验数据并计算材料参数(应用最小二乘拟合)。

5.4.2 用实验数据定义超弹性性能

定义超弹性材料的一种方便途径是向 ABAQUS 提供实验数据。然后,ABAQUS 采用最小二乘法计算这些常数。ABAQUS 可以拟合的实验数据有:

- 单轴拉伸和压缩
- 等双轴拉伸和压缩
- 平面拉伸和压缩(纯剪)
- 体积拉伸和压缩

在这些实验中所观察到的变形模式和用来定义每一模式数据的 ABAQUS 输入选项如图 5-26 所示。不像塑性数据,超弹性材料的实验数据必须以名义应力值和名义应变值提供给 ABAQUS。

从数据中获取最好的材料模型

应用超弹性材料的模拟,其结果的质量很大程度上依赖于你提供给 ABAQUS 的材料实验数据。你可以通过以下几点帮助 ABAQUS 计算出可能的最好材料参数。

如果可能,尽量从多于一种变形状态的模式中获得实验数据,以帮助 ABAQUS 形成一个更为准确和稳定的材料模型。然而,对于不可压缩材料,图 5-26 中所示的某些实验

图 5-26 为了定义超弹性材料特性采用的各种实验的变形模式和 ABAQUS 输入选项

可产生等效的变形模式。下面是对于不可压缩材料的等效实验：

- 单轴拉伸 \ 等双轴压缩
- 单轴压缩 \ 等双轴拉伸
- 平面拉伸 \ 平面压缩

如果你已经从模拟相同变形模式的另一个实验中得到了数据，没有必要再从一个特殊实验中获得数据。

此外，下面可以改进你的超弹性材料模型：

- 获得类似于你的模拟中发生的变形模式的实验数据。比如，如果你的试件承受压缩荷载，在你的实验数据中就要确实包含压缩荷载，而不是拉伸荷载。
- 拉伸和压缩数据均可使用，但压缩应力和应变采用负值。如果可能，根据应用，使用压缩或者拉伸数据，因为对单一材料模型同时进行拉伸和压缩数据的拟合，一般

要比每一个单独实验的精度低。

- 在模拟中,在你预期的材料所承受的应变幅值内提供更多的数据。例如,若材料只有很小的拉伸应变 ϵ 如低于 50 % ,那么就不要再提供大量的(如果有的话)高应变的实验数据(超过 100 %)。
- 对实验数据进行一个单元的模拟,与 ABAQUS 对实验数据的计算结果比较。如果对于某个特殊的对你又很重要的变形模式,其计算结果很差,则对此变形模式要尽可能获得更多的实验数据。

材料模型的稳定性

通常,从实验数据中得到的材料模型可能在某个应变量级上不稳定。ABAQUS 将进行一次稳定性检查,确定可能发生不稳定的应变量级,并在数据文件(.dat)中打印一条警告信息。因为,如果模拟实验应变的任何部分超出了稳定极限,你的模拟可能是不真实的,你要仔细检查这条警告信息。

可压缩性

与材料的剪切柔度相比,大多数固体橡胶材料有非常小的可压缩性。这一性能在平面应力、壳或者膜单元中不存在问题。然而,当使用其它单元时它将成为问题,例如平面应变、轴对称和三维实体单元。例如,在实用上材料没有被高度约束,假设单元完全不可压缩将是令人相当满意的:除非发生热膨胀,则材料的体积不会改变。在材料被高度约束的情况下(例如用作密封垫的圆圈),为了获得准确的结果,必须正确模拟可压缩性。

除非是平面应力情况,在 ABAQUS/ Explicit 中假设材料完全不可压缩是不可能的,因为在每个材料计算点上的程序没有施加这种约束的机制。不可压缩材料也有无限大的波动速度,导致时间步长为零。因此,你必须给出某种可压缩性。在许多情况下,困难在于实际材料性能提供的可压缩性太小,以致算法不能有效地工作。因此,为了有效的计算,除非平面应力,用户必须提供足够的可压缩性,可知这将使得模型的体积性能比实际材料软。由于这个数值限制,因此,需要应用某种判断以确定 ABAQUS/ Explicit 的结果是否足够精确或者可能存在着模拟的问题。通过材料初始体积模量 K_0 与初始剪切模量 μ_0 的比值,我们可以评估材料的相对可压缩性。泊松比 ν 也提供了可压缩性的度量,因为它定义为:

$$\nu = \frac{3(K_0/\mu_0) - 2}{6(K_0/\mu_0) + 2}$$

表 5-2 提供了一些代表性的值:

表 5-2 可压缩性与泊松比的关系

K_0/μ_0		K_0/μ_0	
10	0.452	100	0.495
20	0.475	1000	0.4995
50	0.490	10000	0.49995

在超弹性选项中,如果没有给出材料可压缩性的值,ABAQUS/ Explicit 假设默认值为 $K_0/\mu_0 = 20$,对应的泊松比为 0.475。因为典型的未填充弹性体 K_0/μ_0 的比值范围在 1 000到10 000之间($\nu = 0.4995$ 到 $\nu = 0.49995$),而填充弹性体的 K_0/μ_0 比值范围在 50 到 200 之间($\nu = 0.490$ 到 $\nu = 0.497$),对于大多数可使用的弹性体,这些默认值提供了更多的可压缩性。但如果弹性体是相对无约束的,材料体积特性的这种软化模型通常提供了相当精确的结果。在材料被很好地约束的情况下,比如它与刚性金属部件接触,并且有非常小量的自由表面,特别是在高度压缩荷载作用下,不大容易由 ABAQUS/ Explicit 得到精确的结果。

如果你定义可压缩性而不是接受默认值,建议 K_0/μ_0 比值的上限为 100。更大的比率将在动态结果中引入高频的振荡,并且要求应用极小的时间增量。

5.5 材料阻尼

一个 ABAQUS/ Explicit 模型常常包括有能量耗散机制,如阻尼器和非弹性材料特性等,作为基本模型的一部分。在这种情况下,一般没有必要引入附加的“结构的”或者通常的阻尼,因为这种阻尼与这些其它的耗散效果相比不重要。然而,某些模型没有这种粘性能量耗散源,除了模型其它部分提供的以外,某些模型需要附加的能量耗散。在这种情况下,可能理想的是应用材料阻尼。材料阻尼在第 3.6.3 节中也做了讨论。

在 ABAQUS/ Explicit 中的材料阻尼是用 * DAMPING 选项定义的瑞利(Rayleigh)阻尼,* DAMPING 选项是 * MATERIAL 选项块的子选项。有两个与瑞利阻尼有关的阻尼系数:质量比例阻尼系数 α_R 和刚度比例阻尼系数 β_R 。通常,质量比例阻尼系数用以衰减低频响应,而刚度比例阻尼系数用以衰减高频响应(使振荡的结果平滑)。

质量比例阻尼

对于单元的质量矩阵,系数 α_R 定义了阻尼贡献比例。引入的阻尼力来源于模型中节点的绝对速度。计算的效果可以等同于模型通过粘性“以太”运动,于是在模型中任何点的任何运动都引起阻尼力。

刚度比例阻尼

系数 β_R 定义了阻尼与弹性材料刚度的比例。应用如下公式,“阻尼应力” σ_d 与引入的总体应变速率成比例:

$$\sigma_d = \beta_R \dot{\epsilon}^{el},$$

其中 $\dot{\epsilon}$ 是应变速率。对于超弹性和超泡沫材料, ϵ^{el} 定义为初始弹性刚度。对于所有的其它材料, ϵ^{el} 是材料的当前弹性刚度。当建立动力平衡方程时,这个阻尼应力加到了在积分点上由本构响应引起的应力上,但是它没有被包括在应力输出中。在任何非线性情况下,可以引入阻尼,而且对于线性情况,提供标准的瑞利阻尼。对于线性情况,刚度比例阻尼正好与所定义的阻尼矩阵相一致,而后者等于 β_R 乘以刚度矩阵。为了避免稳定时间增量减小过快,刚度比例阻尼系数 β_R 与无阻尼的初始稳定时间增量相比,应小于或者是

相同的数量级。

5.6 小结

- ABAQUS 包含一个广泛的材料模型库,包括金属塑性和橡胶弹性的模型。
- 金属塑性模型的应力 - 应变数据必须用真实应力和真实塑性应变定义。名义应力 - 应变数据可以很容易的转化成真实应力 - 应变数据。
- 一旦材料屈服,金属塑性模型假设近似不可压缩性质。
- 为了提高计算效率,通过采用等间距分布点组成的曲线拟合方式,ABAQUS/Explicit 规则化用户定义的材料曲线。
- 多项式和奥根应变能函数可应用于橡胶弹性(超弹性)。
- 超弹性模型允许直接用实验数据来确定材料的系数。实验数据必须用名义应力和名义应变的值给出。
- 在超弹性材料模型中,稳定性警告可能说明你所分析的应变范围是不合适的。
- 在 ABAQUS/Explicit 中超弹性材料的泊松比的默认值是 0.475。某些分析可能要求增加泊松比以便更精确地模拟不可压缩性。
- 通常,质量比例阻尼用以衰减低频振动,而刚度比例阻尼用以衰减高频振动。
- 为了避免稳定时间增量减小过快,刚度比例阻尼系数 γ_R 与无阻尼的初始稳定时间增量相比,应小于或者是相同的数量级。

第 6 章 接 触 问 题

ABAQUS/ Explicit 中的许多分析问题涉及到分离构件之间的接触。当物体进行接触的时候,它们相互之间会产生法向压力和摩擦剪切力。接触分析的目的就是精确地确定模型的接触面积和由于接触引起的应力。

接触与大多数约束的区别在于接触是不连续的,也就是说,只有在物体接触的时候才能引入接触约束。有限元软件必须能够确定物体之间是否发生接触,并且施加相应的约束。如果接触被移开,相应的约束也应被解除。

6 1 接触功能概述

ABAQUS/ Explicit 的接触模型是基于一个表面与另一个表面发生接触的概念。用户必须根据模型中的单元定义表面,并定义表面之间的相互作用。接触功能是很广义的。几乎任何类型的表面之间都可以定义接触:一个可变形的表面可以和另一个可变形的表面接触;一个可变形的表面可以和一个刚性表面接触;一个可变形的表面可以和它本身接触;或者一个节点集合可以与一个可变形或刚性的表面接触。

一旦物体间接触时,需要定义表面相互作用的性能,例如摩擦系数。另一个选项是定义“点焊接”,它的刚度可以不断减弱,直至破坏,引起接触面脱离。

6 2 定义接触

ABAQUS/ Explicit 中对接触的定义分为两部分:可能接触的表面的定义和表面之间相互作用的方式的定义。应用 ABAQUS/ Explicit 可以定义任何数目的表面,并且在模拟的过程中可以增加或修改表面(在 ABAQUS/ Standard 中,所有的接触必须在加载过程之前定义)。在 ABAQUS/ Explicit 中,接触作为一种约束被引入,就好像一种边界条件,并且可以在模拟运行的过程中被随意引入或解除。与此相反,ABAQUS/ Standard 在内部产生分离的接触单元,而这些接触单元只能在模型定义部分定义。

6 2 1 定义表面

可以应用以下三种选项的任何一种建立表面:

- * SURFACE DEFINITION 选项通过列出组成表面的单元面来建立表面。
- * CONTACT NODE SET 选项创建一个由接触节点集里的节点组成的单纯的从属表面。任何单元上的节点都可能是接触节点集里的节点。在可能的情况下,最好是使用 * SURFACE DEFINITION 选项,而不是使用 * CONTACT NODE SET 选项定义接触面,如此做法的理由是可以得到更加精确的摩擦力,并且能够使用平衡

的主控 - 从属算法。

- * RIGID SURFACE 选项建立一个解析刚性表面,此表面的运动完全取决于和它相对应的刚体参考节点的运动。

实体单元的表面

一个二维、一阶实体单元,比如 CPE4R,有四个面,这些面包含分别由节点 1 - 2,2 - 3,3 - 4 和 4 - 1 定义的线段,如图 6-1 所示。面的标识包括在面编号前面加上字母“S”。通过指定单元编号和组成表面的所有面的标识定义一个表面。例如,通过下面的选项块,将图 6-1 所示单元中的面 2 加入到一个叫做 FLANGE1 的表面中:

```
* SURFACE DEFINITION, NAME = FLANGE1  
5, S2
```

图 6-1 二维一阶(4 节点)单元上的面编号

在 ABAQUS 的许多选项中,可以用单元编号和单元集,应用单元集可以更容易地定义大的表面。在同一个 * SURFACE DEFINITION 选项块中,指定单元集和单独单元均是有效的。例如,表面 TOPSURF 由图 6-2 所示的单元面组成,通过下面的命令建立:

图 6-2 组成接触面 TOPSURF 的单元及单元面号

```
* ELSET, ELSET = TOP, GENERATE  
5, 8  
* SURFACE DEFINITION, NAME = TOPSURF  
TOP, S3  
5, S4  
8, S2
```


ABAQUS 可以自动确定二维和三维实体单元的自由面,并用它们来创建表面。为了应用这种功能,只需在 * SURFACE DEFINITION 选项中的数据行里将所有其自由面将组成接触面的单元包括进来就行了。可以使用单元集和单独的单元号。ABAQUS 将忽略那些不含自由面的任何单元。例如,图 6-2 中的表面也可以按如下方式定义:

```
* SURFACE DEFINITION, NAME = TOPSURF
TOP,
```

另一种方法,实体单元的表面也可以用接触节点集来定义但一般不是必须的。为了定义接触节点集,在 * CONTACT NODE SET 选项的数据行中,指定节点编号或者节点集。

壳单元、膜单元和刚体单元中的表面

可以用三种方法定义壳单元、膜单元和刚体单元中的表面:采用单面表面、双面表面和接触节点集。

使用单面接触面的时候,选用两个有效表面中的一个作为接触表面。法线指向单元正法线方向的面叫做 SPOS,而法线指向单元负法线方向的面叫做 SNEG,如图 6-3 所示。采用右手法则,按节点编号顺序来定义正的单元法线。默认情况下,考虑单元的当前厚度,接触面就是实际的单元面。当使用壳单元时,应用 * SURFACE DEFINITION 中的 NO THICK 参数,可以指定壳的参考表面(由节点定义的表面)作为接触面。下面的选项块将单元集 SHELLS 中所有的 SPOS 面定义为表面 SURF1:

```
* SURFACE DEFINITION, NAME = SURF1
SHELLS, SPOS
```

图 6-3 二维和三维壳单元、膜单元及刚体单元的表面

单面接触面只考虑单元面上的接触,而不是在边界上。在单面接触面模型中使用接触节点集可以定义在单元面和边界上都存在着接触。下面的选项块定义一个名为 EDGE 的接触节点集,将边界节点包括在节点集 NEDGE 中,如图 6-4 所示:

```
* CONTACT NODE SET, NAME = EDGE
NEDGE,
```

图 6-4 壳单元边界上的接触节点集

双面接触面的使用比单面接触面更加广泛,因为 SPOS 和 SNEG 面和所有的自由边界将自动作为接触面的一部分。接触可能发生在形成双面表面的单元面上或者边界上。例如,在分析过程中,从属节点可能开始从双面表面的一边沿着周边移动到另一边。在定义双面接触时,不必指明接触面的标志,因为两个面已经自动地包含其中。目前,双面接触只对三维单元有效。下面的选项块定义表面 SURF2 包括单元集 SHELLS 中单元的两个表面:

```
* SURFACE DEFINITION, NAME = SURF2
SHELLS,
```

刚性表面

刚性表面是刚体上的表面,它们可以定义成一个解析的形状,或者可以用基于和刚体相关联的单元表面来定义。

通过定义一系列的连接线、圆弧或抛物线,建立解析刚性表面。* RIGID SURFACE 选项里的 REF NODE 参数把解析刚性表面和在模型定义中必须事先定义的 * RIGID BODY 选项联系起来。参数 TYPE 定义表面的维数,它有三个可能的值:

- 用 TYPE = SEGMENTS 定义一个二维刚性表面。
- 用 TYPE = CYLINDRICAL 定义沿离面方向无限伸出的三维刚性表面。
- 用 TYPE = REVOLUTION 定义三维旋转表面。

以下是如图 6-5 所示的一个叫 SRIGID 的二维解析刚性表面的输入例子:

```
* RIGID SURFACE, TYPE = SEGMENTS, NAME = SRIGID,
REF NODE = 10000
START, 5.0, 0.0
LINE, 10.0, 10.0
CIRCL, 15.0, 5.0, 10.0, 5.0
```

这里编号为 10000 的节点是必须事先定义的刚体的参考节点。

图 6-5 解析刚性表面

离散的刚性表面是基于组成刚体的单元,因此,可以定义比解析刚性表面更加复杂的几何形状。应用 * SURFACE DEFINITION 选项定义离散刚性表面的方法和定义变形体表面的方法是完全相同的。

一维、可变形单元的表面

对一维、可变形单元接触面的定义必须用接触节点集,例如梁和桁架。为了定义一个接触节点集,只需在 * CONTACT NODE SET 的数据行中加入所需的节点编号和节点集,例如:

```
* CONTACT NODE SET, NAME = SNODE  
101, 102, NSET1, NSET2
```

6 2 2 定义表面之间的相互作用

接触对

通过在 * CONTACT PAIR 选项里指定的接触面名字,在 ABAQUS 模拟中定义两个面的可能接触。一个表面可以出现在任意多个接触对中。在定义接触对时,你必须决定是否采用小滑移公式还是采用更普遍的有限滑移公式。当两个接触面之间的相对滑移比单元面的特征长度小得多时,小滑移是合适的。通过在 * CONTACT PAIR 选项中包括 SMALL SLIDING 参数,选择采用小滑移公式。小滑移接触的搜寻算法可以比有限滑移方法节约更多的计算机时。

每个接触对都必须参照一个表面相互作用的定义,就像每个单元都要有一个单元性能的定义一样。在 * CONTACT PAIR 选项中,用 INTERACTION 参数参照 * SURFACE INTERACTION 选项,这样可以定义不同的表面间相互作用的模型,例如 * FRICTION。

在下面的例子中,接触面 FLANGE1 和 FLANGE2 发生相互作用,其相对滑移量很小:

```
* CONTACT PAIR, INTERACTION = FRIC, SMALL SLIDING  
FLANGE1, FLANGE2
```

如果在 * CONTACT PAIR 选项里只给出一个表面, 这个面可能与它本身接触, 例如:

```
* CONTACT PAIR, INTERACTION = FRIC
TUBE,
```

单面接触比双面接触更费时。然而, 如果在分析过程中一个面出现折叠并和它本身接触, 单面接触是有用的。在这种情况下, 分析之前无法预见表面的哪一部分将会发生相互作用。

指定相互作用模型

每个接触对必须参照一个 * SURFACE INTERATION 选项块, 通过它来指定接触面间相互作用的模型。两种可能的模型为 * FRICTION 和 * BOND。 * FRICTION 定义表面的摩擦性质, 而 * BOND 定义了一个指定节点可以衰减直至失效的点焊接。如果两种方式中的任何一个也不选择, 默认模型是无摩擦和无粘着接触。摩擦模型将在 6.3.3 节讨论。下面的 * SURFACE INTERATION 选项块定义了一个名为 FRIC 的相互作用, 摩擦系数为 0.1:

```
* SURFACE INTERATION, NAME = FRIC
* FRICTION
0.1
```

6.3 接触算法

6.3.1 接触搜寻算法

在任意给定时刻确定接触表面中相互接触的部分是接触分析中花费最为昂贵的部分。

两面接触

因为一个接触面上的节点可能接触到对面接触面上的任意一个面, ABAQUS/ Explicit 必须采用先进的搜寻算法来追随接触面的运动。虽然接触搜寻算法对用户是透明的, 并且一般不会存在问题, 但是个别情况下还是需要特殊的考虑和对这种方法的深刻理解。在默认情况下, ABAQUS/ Explicit 采用平衡的主控 - 从属算法, 在讨论时, 我们用单纯的主控 - 从属算法(两种算法的区别在于, 平衡算法对同一个接触做两次搜寻, 在第二次把主从接触面颠倒一下。)

在每一步开始的时候, 进行一个彻底的、全面的搜寻以决定每个接触对上与每一个从属节点相距最近的主控接触面上的面。由于全局的搜寻认为每一个从属节点都可能和主控接触面上的任一个面接触, 这种搜寻方法是十分费时的, 因而在默认状态下, 每 100 个时间步长才执行一次。图 6-6 显示全面搜寻以确定离从属节点 50 最近的主控接触面上的面的示例。由搜寻确定最近的主控面是单元 10 的一个面。节点 100 被认为是在主控

面上离从属节点 50 最近的节点;因此,节点 100 被称为主控面追踪节点。全面搜寻的目的就是确定距离每个从属节点最近的主控面和一个主控面追踪节点。

图 6-6 二维全局接触搜寻

由于全局搜寻耗时过大,对大多数时间步长执行低成本的局部搜寻。在局部搜寻中,一个从属节点仅仅搜寻与前一个主控面追踪节点相连的面以确定最近的接触面。在图 6-7 中,由于前一个时间步长使图 6-6 所示模型的从属面有了少许移动。因为前一个主控面追踪节点是 100,那些联结节点 100 的(面 9 和 10)最近主控面将被确定。在此情况下,面 10 最接近节点 50。下一步就是从与面 10 相连的节点中找出当前的主控面追踪节点。此时,最接近节点 50 的节点是面 10 上的 101。直到相邻两次迭代的主控面追踪节点保持为相同节点,局部搜寻才会停止。在此例中,主控面追踪节点从 100 变为 101,所以局部搜寻会继续进行。现在要从与节点 101 相连的面中,此例为面 10 和 11,再一次从主控面中确定最近的主控面。经确定面 11 是最近的面,节点 102 是新的主控面追踪节点。由于 102 是对应于从属节点 50 的真实的主控面追踪节点,进一步的搜寻不会改变主控面追踪节点,局部搜寻到此结束。

图 6-7 二维局部接触搜寻

由于时间步长很短,在多数情况下,接触物体从一个时间步长到另一个时间步长的移动是很小的量,因此局部接触搜寻对于追踪接触面的运动是合适的。但是,在某些情况下可能引起局部搜寻失败。如图 6-8 所示的一种情况,主控表面上包含有一个洞。带阴影的单元面已经被标识作为属于分开的、接触物体中的从属节点的最近的主控面。这样,在下一个时间步长内,ABAQUS/ Explicit 执行一个主控面和与它接触的相邻面的局部搜寻。在另一次全面搜寻之前,如果从属节点后来移过空洞并到达另一边,局部搜寻方法将仍然仅检查阴影面和它的相邻面。在局部搜寻中,从属节点和空洞另一边的主控面之间可能的潜在接触是不能发现的。解决这一问题方法,是让 ABAQUS/ Explicit 经常执行全局接触搜寻,因为全局搜寻可以识别跨越空洞的接触。要迫使更多次地执行全局接触搜寻,而不是仅在每一步的开始时执行,在 * CONTACT PAIR 选项中设置 TRACT 参数等于两次全局接触搜寻的合适的时间间隔。应当谨慎使用 TRACK 参数,因为频繁的全局搜寻会耗费很多机时。

图 6-8 局部搜寻可能失败的示例

单面接触

另一个选项是允许一个面和它本身接触。例如,一个管子的内表面可以定义为一个单一表面,当管被挤压时,内表面就和它本身接触。由于单面接触的一般性和复杂性,每几个时间步长都要执行全局搜寻,致使单面接触比双面接触要费时得多。

6 3 2 施加法向接触约束

采用预测器/校正器算法,ABAQUS/ Explicit 应用一种能获得精确一致接触条件的动态接触公式。在一增量步的开始时假设接触没有发生。在这一步结束时,如果存在过盈接触,则必须修正相应从属节点的运动,以与接触情况相符合。需要利用每一节点侵入的深度、它的质量和 时间步长来计算防止侵入发生所需的阻力。

单纯主控 - 从属算法

在单纯主控 - 从属算法里,两个表面中的一个为主控面,另一个是从属面。当两个物体接触的时候,从属节点的阻力分配到主控面的节点上。这些力和节点的质量用来计算主控面节点的加速度修正。应用每个主控面节点预计的侵入深度、时间步长和加速度修正来确定从属节点的加速度修正。应用这些加速度修正可以获得施加接触约束的修正图形。在从属节点被严格限制不侵入主控面的情况下,除非网格被充分细划,主控面都可能侵入从属面。在默认情况下,壳单元与单纯主控面的实体单元之间的接触,以及变形体与单纯主控面的刚体之间的接触均使用单纯主控 - 从属算法。单纯主控 - 从属接触约束如图 6-9 所示。

图 6-9 单纯主控 - 从属接触约束

平衡主控 - 从属算法

平衡主控 - 从属接触比单纯主控 - 从属接触更费机时,但是它最大程度的减少了接触物体间的相互侵入,从而,在多数情况下提供了更精确的结果。平衡算法两次简单地应用单纯主控 - 从属算法,第二次执行时把主控 - 从属面颠倒一下。面 1 作为从面时,得到一组加速度修正,而面 2 作为从面时,得到另一组加速度修正。采用这两个加速度修正的加权平均就获得了最终的加速度修正。这里平均的加权由用户通过 * CONTACT PAIR 选项中 WEIGHT 参数指定。对多数单元类型而言,默认的权重值为 0 .5,所以每一种加速度修正采用了相同的权重。通过设置 WEIGHT 的值为 1 .0 指定一个单纯的主控 - 从属关系使第一个面作为主控面。相反地,设置权重为零意味着使第二个面作为主控面。平衡主控 - 从属接触约束如图 6-10 所示。

图 6-10 平衡主控 - 从属接触约束

6 3 3 接触面相互作用的模型

接触建立后,表面相互作用的模型可以有多种选择。

摩擦模型

如果应用 * FRICTION 选项, ABAQUS/ Explicit 应用库仑 (Coulomb) 摩擦模型来阻止两接触面间的相互切向运动。如果不用 * FRICTION 选项, 默认的摩擦系数为零。直至表面上的力达到临界切应力值才发生切向运动。这个临界值取决于法向接触压力, 由下式确定:

$$\tau_{crit} = \mu p$$

式中 μ 是摩擦系数, p 是法向接触应力。图 6-11 是剪应力随切向移动 (变化的曲线。如果需要, 可以利用 * FRICTION 选项中的 TAUMAX 参数指定摩擦应力的极限值 (当接触对中的一个接触面被定义为接触节点集时, 不能利用 TAUMAX 参数。)

图 6-11 库仑摩擦模型

* FRICTION 选项是 * SURFACE DEFINITION 选项中的子选项。在下面的例子中, 指定了摩擦系数为 0.1, 摩擦应力极限为 80MPa。

```
* SURFACE INTERACTION, NAME = INTER
* FRICTION, TAUMAX = 80.0E6
0.1
```

利用预测器/校正器算法引入摩擦约束很类似于将这种算法应用于法向接触约束。利用和节点相关的质量、节点滑移的距离和时间步长计算在预计图形中维持该节点在相对接触面上的位置不变所需的力的大小。如果应用这个力计算的节点剪应力大于 τ_{crit} , 表面就会滑动, 并会施加相应于 τ_{crit} 的力。在任一种情况下, 该力会导致在从属节点及与它相接触的主控面节点处的表面的切向加速度的修正。

束缚接触

束缚接触是指在初始时乃至在整个分析过程中接触的面不发生切向和法向移动的接触。转动自由度没有被约束。束缚接触只能在第一步骤中用 * CONTACT PAIR 选项中的 TIED 参数指定。如果 * CONTACT PAIR 指定的接触面在分析开始时没有发生接触,将不引入束缚接触,并且在整个分析过程中,这两个表面也再不发生相互作用。如迫使表面在分析开始时就产生接触,需要使用 * CONTACT PAIR 选项中的 ADJUST 参数。参数 ADJUST 迫使所有开始时过于闭合的节点和指定间隙的任何非闭合节点都恰好处于接触面上。在不同网格间实行快速网格细划时,束缚接触是非常有用的。

点焊和脱离

利用 * SURFACE INTERACTION 选项下的 * BOND 子选项,可以把节点和距它最近的主控面上的节点“点焊连接”。从属节点和主控面之间的连接会屈服、衰减,直至按照一个特定准则发生破坏。一旦这种连接发生破坏,从属节点和主控面之间的关系就和没有连接的单纯主控 - 从属接触对中从属节点和主控面之间的关系一样了。由于在 * BOND 中指定了节点集,此选项只能用于联系单纯主控 - 从属接触对中的从属节点集。在 * CONTACT PAIR 选项中用 WEIGHT 参数强迫产生单纯主控 - 从属连接的关系。除非连接不完全和可能产生屈服和破坏以外,这种接触约束和束缚接触的结果是十分相似的。在分析开始时,如果从属节点并没有与主控面刚好发生接触,就要用无应变方法加以调整,使之发生接触。

连接包含一个切向力和一个法向力,屈服准则应用了这两个力的合力。后屈服行为由以下两种模式之一定义:时间失效模式和损伤失效模式。时间失效模式在一段时间内使屈服面逐渐收缩至零,而损伤失效模式则是基于模型 I 和模型 II 中耗散的所有能量的总和定义破坏行为。进一步的信息参看 ABAQUS/ Explicit 用户手册。

6 4 建立模型

6 4 1 正确定义表面

当定义接触面时必须遵循一定的规则。有效的接触面可以是敞开的,也可以是闭合的,但它必须是连续的和单连通的。连续性要求隐含了怎样构成有效或者无效表面的多重要求。

在二维尺度内,表面必须是一条简单的、无交叉点的带有两个端点的曲线,或者是一个闭合的环。图 6-12 是有效和无效二维表面的示例。在三维尺度内,属于一个有效表面上的单元面的边,可能在这个接触面的周界上,也可能连接着另一个单元面的边。组成接触面的两个单元面,不能只享有一个公共节点;而必须通过单元一条公共边界来连接。一条单元边界不能与两个以上的表面共享。图 6-13 展示了有效和无效的三维表面。

另外,也可能定义二维或三维双面表面。在这种情况下,在同一表面定义中,包含了同一个壳单元、膜单元或实体元的两个面,如图 6-14 所示。

图 6-12 有效和无效的二维表面

图 6-13 有效和无效的三维表面

图 6-14 有效的双面表面

延伸表面

ABAQUS/ Explicit 不会自动延伸由用户定义的表面超过表面的周界。如果一个面上的节点和另一个面发生接触,并且沿着该面移动直至边界,它可能“跳出边界”。这种情况可能引起麻烦,因为该节点很可能不久又从接触面的反面重新进入,使运动约束变得不稳定并引起该节点加速度的急剧变化。因此,良好的模拟实践要使得延伸表面多少超过实际上的接触区域。

图 6-15 所示是由长方体单元组成的两个简单箱型体。在上面的箱型体上所定义的接触面仅仅是它的上表面。虽然这是 ABAQUS/ Explicit 允许的表面定义方法,但是这种缺少超过物体棱角边界的延伸定义方法可能会带来麻烦。在下面的箱型体中,接触面沿着边壁又向下卷曲了一段距离,从而使接触面延伸出了平面。如果只在箱型体的上表面发生接触,延伸表面的定义可以防止任何接触节点运动到接触表面的后面,从而最大程度的减少了接触中可能出现的问题。

图 6-15 表面的周界

双节点网格

在同一个坐标点上定义两个节点(双节点)可能使貌似连续的表面上产生缝隙或裂纹,如图 6-16 所示。在此表面上移动的节点可能会通过这一裂纹滑出接触面,落到接触表面的后面。一旦检验出这种侵入,接触计算中就会引起较大的、不具有物理意义的加速度修正。应用 ABAQUS/ Post,可以通过画模型的边界点轮廓图来检验网格中的裂纹。不在所要求周界的部分的任何裂纹可以位于双节点区域。

图 6-16 双节点单元网格示例

定义完整表面

图 6-17 所示是两个部分之间有简单连接的二维模型。对于模拟这种连接,图中的接触定义是不恰当的,因为定义的表面不能代表物体几何形状的完整描述。在分析开始时,表面 3 的一些节点躲在表面 1 和 2 的后面。图 6-18 显示这一连接的恰当的表面定义。即表面是连续的,并且描述了接触物体的完整几何特性。

图 6-17 不正确表面定义的例子

接触面法向的一致性

表面的法线方向必须和下面的壳单元、膜单元或实体元的法向一致。面的标识 SPOS 表示该面具有正向外法线,面的标识 SNEG 与之相反。用户必须定义这些类型的单元表面,以防止表面转动时其法线方向翻转。图 6-19 所示为 SAX1 单元的网格,从一个单元到另一个单元的法向不连续。如果应用 SPOS 面定义所有单元的表面,ABAQUS/

图 6-18 正确的表面定义

Explicit 会给出表面定义非法的警告。如果采用同时使用 SPOS 和 SNEG 面标识的表面定义,如图 6-19 所示,协调不一致的单元法线,应用这种网格才能定义有效表面。

```
* ELEMENT, TYPE = SAX1 ,ELSET = SHELL
1 ,101,102
2 ,102,103
3 ,104,103
4 ,105,104
5 ,105,106
6 ,106,107
.
.
.

* SURFACE DEFINITION, NAME = WALL
1 ,SPOS
2 ,SPOS
3 ,SNEG
4 ,SNEG
5 ,SPOS
6 ,SPOS
```

图 6-19 不一致的表面法向

高度翘曲的表面

如果一个表面的相邻面间存在着高度翘曲,就必须使用比不存在高度翘曲时更昂贵的搜寻算法。为了尽可能保持结果的有效性,ABAQUS 监视表面的翘曲程度,并在表面翘曲过大时给出警告信息。尤其是,如果一个面附近的法线方向相差超过 20° ,ABAQUS 将发出警告信息。一旦一个表面被认为已高度翘曲,ABAQUS 会从一个更有效的接触搜寻算法转到一个更精确的搜寻算法,以克服高度翘曲带来的困难。

为了提高效率,ABAQUS 并不是在每一个时间增量都检查表面的高度翘曲。因为刚性表面在分析中不改变形状,所以仅在每一步开始的时候对刚性表面高度翘曲进行检查。默认的情况下,对变形表面高度翘曲的检查每 20 个时间增量进行一次。在十分偶然的情况下,某些分析中的表面会增加严重的翘曲,这时默认的每 20 步检查一次的频率就不够了。用户可以通过改变 * CONTACT CONTROLS 中的参数 WARP CHECK PERIOD 的值,获得满意的翘曲检查频率。某些问题中,虽然表面翘曲值小于 20° ,但仍需要和高度翘曲表面相应的更精确的接触搜寻算法。这时要利用 * CONTACT CONTROLS 选项中的 WARP CUT OFF 参数来重新定义那些高度翘曲的角度。

刚体单元的离散

应用刚体单元,可以定义几何形状复杂的刚性面。与 ABAQUS/ Standard 的刚体单元不同,ABAQUS/ Explicit 中的刚体单元是不平滑的,它们严格保持用户定义的表面形状。不光滑表面的优点是 ABAQUS 所用的表面和用户定义的表面是完全一致的;缺点是必须使用高度细划的网格才能精确定义平滑的物体。一般说来,使用大量的刚体单元来定义刚性表面,不会显著增加 CPU 费用。然而,大量的刚体单元确实占用了大量内存。

在任何情况下,用户必须保证刚体上曲线几何离散是合适的。如果刚体离散得过于粗糙,变形物体上的接触节点可能会“触礁”,导致错误的结果,如图 6-20 所示。撞到尖角上的节点会在一段时间内被阻止,不能沿刚性面继续滑行。当尖角以外的区域释放了足够多的能量之后,该节点在接触相邻面之前迅速滑出。这样会产生振动的结果。刚性表面划分越细致,从属接触节点的运动就越平滑。

图 6-20 粗糙刚体离散的潜在影响

解析刚性表面很平滑且计算效率也很高。当刚体的形状是外凸的轮廓或旋转面时,

应优先选择使用解析刚性表面。

6.4.2 模型的过度约束

就像不能在一个节点上定义几个相互矛盾的边界条件一样,一般说来,也不能在同一个节点上定义多点接触或多点约束条件,因为这样可能产生矛盾的运动约束。除非这些约束是相互正交的,这时模型就会是过度约束的;当 ABAQUS/ Explicit 试图满足这些矛盾的约束条件时,运算结果会相当混乱。

6.4.3 网格细划

不论是接触还是其它类型的分析,当网格细划时,结果都会得到改进。应用单纯主控 - 从属方法的接触分析,从属表面的网格适当细划显得更加重要,这样,主控表面上的单元面不能过多地侵入从属表面。默认情况下,当两个可变形面采用平衡主控 - 从属方式接触时,在从属表面上不需要高度的网格细划以实现充分的接触。当刚体和变形体接触时,网格细划是特别重要的,因为变形体往往是单纯的从属表面,必须充分细划以适应刚体的任何形状。如果从属表面的离散与主控面特征尺寸相比较粗糙时,主控面上的单元可以发生侵入从属表面,如图 6-21 所示。如果变形表面的网格越细划,刚性表面的侵入程度越低。

图 6-21 从属表面离散不充分的例子

束缚接触的网格细划

在 *CONTACT PAIR 选项中使用 TIED 参数,可防止表面在初始状态下的相对侵入、分离或滑动。因此,束缚接触是网格细划的捷径。由于两个接触面间的任何缝隙,即使是很小的缝隙,都会使节点和它所对应的接触边界脱离束缚,你必须使用 ADJUST 参数以保证两个表面在分析开始时的严格接触。

束缚接触公式仅约束平动自由度,任何的转动自由度都不能约束。例如,如果你使用束缚接触把一个由壳单元组成的肋板垂直地连接到一块壳单元组成的平板上,肋板可以绕着接触边自由转动。因此,当应用束缚接触于结构单元时,你必须保证没被约束的转动自由度不会带来问题。

6.4.4 接触开始时的过盈接触

ABAQUS/ Explicit 不允许接触表面存在初始过盈接触,因而,接触表面上未变形的节点坐标会被调整以消除初始过盈接触。当使用平衡主控 - 从属接触方法时,两个接触表面均被调整;而当使用单纯主控 - 从属方法时,仅调整从属接触表面。由于调整表面以消除过盈接触所引起的位移,在第一步分析中不会给定义的接触对带来任何初始的应力或应变。当使用平衡主控 - 从属方法时,初始过盈接触不能被精确地修正,从而在第一个时间增量中产生应力。转而使用单纯主控 - 从属方法可以减小这种应力。

在随后的时间步里,由于对所有节点进行的调整发生在一个单一、简短的时间增量里,任何节点的初始过盈接触的调整可能引起足以使网格扭曲的应变。例如,如果一个节点的过盈接触量是 $1.0 \times 10^{-3} \text{ m}$,时间增量是 $1.0 \times 10^{-7} \text{ s}$,该节点处调整过盈接触的加速度是 $2.0 \times 10^{11} \text{ m/s}^2$ 。如此大的加速度应用到单一节点上,可能引起变形速度大于该材料中的波速的警告,几个时间步长之后,一旦如此大的加速度使单元明显变形,将引起网格严重扭曲的警告。由于时间增量很小,即便是很小的初始过盈接触也可能引起极大的加速度。非常重要的结论是在第二步及以后所定义的任何新接触面,都不应有过盈接触。

图 6-22 所示是一种常见的引起两个接触表面初始过盈接触的情况。所有接触面上的节点刚好位于同一段圆弧上。但是由于内面的网格比外面网格更密,并且由于单元边界是直线,内面上的某些节点开始的时候侵入了外表面。假定使用是单纯主控 - 从属方法,图 6-23 所示为 ABAQUS/ Explicit 施加到主控 - 从属节点上的初始的、无应变位移。在不加外力的情况下,图示几何构形是没有应力的。如果默认使用平衡主控 - 从属方法,就会得到一组不同的初始位移场,导致网格中不是完全无应力的。

图 6-22 两个接触面之间的初始过盈接触

图 6-23 正确的接触表面

6.5 例子:电路板下落试验

在这个例题中,你将观察到一块装在防止压坏的泡沫封装内的电路板,以一定的角度落到一刚性面上的行为。当电路板从 1 米的高度下落时,你的目的是要看一下泡沫封装能否足以保护电路板不被损坏。图 6-24 中标出了电路板和泡沫封装的尺寸(单位:mm),

并给出了材料参数。

材料性能

电路板材料(塑性): $E = 45 \times 10^9 \text{ Pa}$, $\nu = 0.3$, $\rho = 500 \text{ kg/m}^3$

泡沫封装材料: $E = 3 \times 10^6 \text{ Pa}$, $\nu = 0.0$, $\rho = 100 \text{ kg/m}^3$

(泡沫的塑性特征在 6.5.5 节给出。)

图 6-24 电路板和泡沫封装的材料性能和尺寸标注(单位:mm)

6.5.1 坐标系

当电路板以一定的角度下落时,最简单的方法是利用 * SYSTEM 选项沿一个局部直角坐标系定义网格,如图 6-24 所示。 * SYSTEM 选项把节点坐标从局部坐标系转换到整体坐标系。这个选项允许你在局部坐标系的 x - z 平面中定义电路板,该局部坐标系通过绕整体坐标系旋转需要的角度而得到。

通过给定三个点在 * SYSTEM 选项中定义一个新的坐标系:局部坐标系的原点、局部坐标系 x 轴上的一点以及局部坐标系中 x - y 平面上的一点。在定义电路板上的节点之前,先使用下面的选项使网格倾斜,从而在一个顶点处首先着陆:

```
* SYSTEM
0., 0., 0., .5, .707, .25
- .5, .707, - .5
```

下面所有节点的定义都是在此局部坐标系中进行的。如果使坐标系重新回到默认状态,可再一次使用 * SYSTEM 选项而不写数据行。

6.5.2 网格设计

这个问题的总体网格划分如图 6-25 所示。定义电路板上壳单元的法线如图所示。

定义泡沫封装的一个底角作为模型的原点,可以保证电路板和泡沫封装的正确定位。因为电路板下落将要撞到的地板刚性是相当大的,对模型的这一部分,只使用单一 R3D4 单元。封装是一个三维实体结构应该采用 C3D8R 单元模拟。电路板本身可以看作是一个附着许多芯片的薄平板。因此,模拟电路采用 S4R 单元,模拟芯片用 MASS 单元。

图 6-25 电路板和泡沫封装的网格

由于在电路板中使用了壳单元,默认情况下,ABAQUS/ Explicit 在检查接触时将使用当前的壳单元厚度。由于电路板和封装中狭槽的厚度都是 2mm,它们两个恰好装配在一起。在本例中,电路板的网格是 10×10 个 S4R 单元,泡沫封装的网格是 $6 \times 7 \times 15$ 个单

图 6-26 泡沫封装网格细节

元,如图 6-26 所示。MASS 单元的位置如图 6-27 所示。封装的这种网格划分在碰撞顶点处太粗以至于不能提供高精度的结果,但是对于低成本的初步研究,这种划分已经足

够了。

图 6-27 电路板上质量单元的位置基于在电路板左下角的局部坐标原点, (x , y) 中的数值是相应位置的坐标, 其单位是 mm

图 6-28 必要的节点和单元集合

6 5 3 节点和单元集

图 6-27 和图 6-28 标出所有必要的集合, 用于给定单元性质、荷载、初始条件和边界

条件,以及后处理所需要的输出。将电路板上的所有单元放入一个名为 BOARD 的单元集,相应的电路板上的节点定义为一个叫 BOARD 的节点集。类似地,定义泡沫封装中的所有单元为单元集 PACK,所有节点为节点集 PACK。利用单元集来提供材料性质和定义接触条件,利用节点集来提供初始条件。为了定义接触,将电路板最下面一行单元放入称为 LOWBOARD 的单元集。将地板上的刚体单元定义为单元集 FLOOR,将模拟地板刚性表面用到的参考节点放入一个叫 REF 的节点集。芯片上所有质量单元的集合为 CHIPS。

6 5 4 模拟自由落体

可以用两种方法模拟电路板从 1m 的高度下落的过程。你可以把电路板和泡沫封装放在距刚性表面 1m 高地方,让 ABAQUS/ Explicit 计算模型在重力作用下的运动;然而,这种方法显然是不现实的,因为需要大量的时间增量模拟“自由落体”的运动。最有效的办法是把电路板和泡沫封装置于离刚性面很近的初始位置,并赋予它们下落 1m 时所具有的初速度(4.439m/ s)。

6 5 5 考察输入文件——模型数据

模型描述

利用 * HEADING 选项,为模型提供适当的标题,如下面所示的例子。注明在模型中使用国际单位制。

```
* HEADING
Circuit board drop test
1.0 meter drop
SI unit (kg, m, s, N)
```

节点坐标和单元

使用前处理程序在局部坐标系中生成网格。如前面所述,在节点定义之前,应用 * SYSTEM选项把节点转换到一个倾斜的坐标系中。模型中电路板和封装的节点定义,在形式上和下面所述类似:

```
* SYSTEM
0., 0., 0., .5, .707, .25
- .5, .707, - .5
* NODE
1,      0.005,      - 0.010,      0.012
11,     0.005,      - 0.010,      0.162
.
.
.
* *
```

```
* *      Reset coordinate system
* *
* SYSTEM
```

当你在旋转的局部坐标系中完成节点定义之后,再一次使用 * SYSTEM 选项,而不在数据行里写任何数据,这样,将在整体坐标系给出其它的节点编号。定义刚性表面的节点使刚性表面足够大,以防止下落的变形体滑出刚性面的任何边界。在泡沫封装的底角处定义 0.1mm 的竖向缝隙,以保证接触表面没有初始过盈接触。

单元性质

赋予每个单元集合适的截面性质,在每个截面性质选项中包括合适的 MATERIAL 参数,这样,每个单元集与材料定义连接起来。我们取泡沫封装的材料名为 FOAM,并在下一节中给出定义。

```
* SOLID SECTION, ELSET = ALLPACK, MATERIAL = FOAM
```

对电路板而言,沿板边界横向和纵向的应力输出是很有意义的。因此,我们需要指定电路板网格的局部材料方向。我们可以使用前面用 * SYSTEM 选项定义的一套局部坐标系。理想的材料方向可通过 * ORIENTATION 中的 DEFINITION = COORDINATES 参数获得。在第一数据行里,给出 a 点和 b 点的 x - , y - 和 z - 坐标,从而定义一个局部坐标系。在第二数据行里,给定绕局部坐标系 z - (或 z -)轴的零度附加转角。ORIENTATION 的名字由 * SHELL SECTION 选项引用。

```
* SHELL SECTION, ELSET = BOARD, MATERIAL = PCB,
ORIENTATION = OR1
0.002,
* ORIENTATION, NAME = OR1, SYSTEM = RECTANGULAR,
DEFINITION = COORDINATES
0.5, 0.707, 0.25, -0.5, 0.707, -0.5
3, 0.0
```

用 * MASS 选项,指定电路板上每个芯片的质量为 0.005kg。

```
* MASS, ELSET = CHIPS
0.005,
```

通过在 * RIGID BODY 选项中引用单元集 FLOOR 和刚体参考节点,来定义刚体。你必须指定参考节点的实际节点号,而不是节点集的名称。

```
* RIGID BODY, ELSET = FLOOR, REF NODE = < 参考节点号 >
```

材料性质

现在需要定义电路板和泡沫封装的材料性质。对于电路板使用 PCB 塑性材料,其杨氏模量 45GPa,泊松比 0.3,密度 500kg/m^3 。

```
* MATERIAL, NAME = PCB
* ELASTIC
45 E9, 0.3
* DENSITY
500.0,
```

模拟泡沫封装材料使用可挤压的泡沫塑性模型。用 * ELASTIC 选项定义杨氏模量 3GPa 和泊松比 0.0。该材料的密度是 100.0kg/ m³。

```
* MATERIAL, NAME = FOAM
* ELASTIC
3 E6, 0.0
* DENSITY
100.0,
```

可挤压泡沫材料在 $p - q$ (压应力——Mises 等效应力) 面中的屈服面, 如图 6-29 所示。* FOAM 选项用三个数据项定义初始屈服特性。第一个数据项是初始体积塑性应变 ϵ^p , 指定为 1.0, 如图 6-30 所示。这个值有一定的任意性, 这个值可以简单选取使得材料的硬化数据包含材料可承受的整个材料屈服表面尺寸的范围。第二个数据项是材料的拉伸强度 p^t , 它的值为 0.02MPa, 以正值的形式给出。第三个数据项是单轴压缩情况下的初始屈服应力 p_o , 它的值为 0.22MPa, 以一个正值的形式给出。对于给定体积塑性应变的屈服面尺寸为 $p_c | \epsilon^p - p_t$ 。

图 6-29 可挤压泡沫模型: $p - q$ 平面里的屈服面

```
* FOAM
1.0, 0.02E6, 0.22E6,
```

在 * FOAM HARDENING 选项中包含硬化效果。每一行的第一个数据是屈服面的尺寸, 第二个数据为相应的体积塑性应变的绝对值。泡沫的硬化模型曲线如图 6-30 所示。

图 6-30 泡沫硬化材料的数据

* FOAM HARDENING

0 .20745E5, 0 .0
0 .42916E5, 0 .2
0 .75427E5, 0 .4
0 .11738E6, 0 .6
0 .16653E6, 0 .8
0 .22000E6, 1 .0
0 .24745E6, 1 .1
0 .27494E6, 1 .2
0 .30217E6, 1 .3
0 .32890E6, 1 .4
0 .35492E6, 1 .5
0 .38006E6, 1 .6
0 .40418E6, 1 .7
0 .42720E6, 1 .8
0 .44905E6, 1 .9
0 .46969E6, 2 .0
0 .50729E6, 2 .2
0 .54008E6, 2 .4
0 .56834E6, 2 .6
0 .59247E6, 2 .8
0 .61291E6, 3 .0
0 .65083E6, 3 .5
0 .67484E6, 4 .0
0 .70810E6, 6 .0

0.71340E6, 11.0

边界条件

通过对前面已经定义的参考节点集 REF 施加固定边界条件,实现对刚性表面(地板)的完全约束。

```
* BOUNDARY
REF, ENCASTRE
```

初始条件

在整体坐标系 3 - 方向上给电路板和封装一个初始速度。在自由落体 1m 结束时的速度为 - 4.43m/ s。

```
* INITIAL CONDITIONS, TYPE = VELOCITY
BOARD, 3, - 4.43
PACK, 3, - 4.43
```

6.5.6 考察输入文件——过程数据

应用 * DYNAMIC, EXPLICIT 选项,选择显式积分的动态应力/ 位移分析,并用下面的语句定义步的时间周期为 0.02s:

```
* STEP
* DYNAMIC, EXPLICIT
, 0.02
```

表面定义

在分析中定义表面将经历接触。必须不仅确定初始接触的表面,而且也要定义在分析中可能产生接触的表面。最简单也是最常用的方法是定义如下的表面:

- 电路板的底部
- 地板
- 泡沫封装

在表面定义中只需省略面标志(SPOS 和 SNEG),就可以将电路板的两个面包含在同一个双面表面定义中。只需指定单元集 PACK 和让 ABAQUS 确定自由表面,就能把整个泡沫封装都包含在表面定义中。定义刚性地板的接触表面使它的法线指向泡沫封装。使用 SPOS 或者 SNEG 为正确的表面标识,取决于你如何定义地板的刚性单元。

```
* SURFACE DEFINITION, NAME = LOWBOARD
LOWBOARD,
* SURFACE DEFINITION, NAME = PACK
PACK,
* SURFACE DEFINITION, NAME = FLOOR
FLOOR, < SPOS 或 SNEG >
```


创建接触对

应用 * CONTACT PAIR 选项指明在分析中发生接触的表面。每个接触对都必须通过 INTERACTION 参数与一个相应的 * SURFACE INTERACTION 选项相联系。在每对接触表面之间指定 0.3 的摩擦系数。默认情况下, ABAQUS/ Explicit 在壳单元和实体单元之间使用单纯主控 - 从属接触方式。然而, 对这个分析更适合用平衡主控 - 从属接触, 在 * CONTACT PAIR 选项中的设置 WEIGHT 参数为 0.5。

```
* CONTACT PAIR, INTERACTION = FRIC, WEIGHT = 0.5
PACK, LOWBOARD

* CONTACT PAIR, INTERACTION = FRIC
PACK, FLOOR

* SURFACE INTERACTION, NAME = FRIC

* FRICTION
0.3,
```

输出要求

在分析中通过在输入文件中包含下面的语句, 等间隔地写 20 次重新启动文件:

```
* RESTART, WRITE, NUMBER INTERVAL = 20
```

使用 * NODE HISTORY, * EL HISTORY 和 * ENERGY HISTORY 选项, 在分析中更频繁地输出结果。输出每个附着芯片的节点位移(U)、速度(V)和加速度(A)。另外, 在有芯片的电路板上选择部分的表面(截面积分点 1 和 5)输出单元应力值(S)、主应力(PS)和对数主应变(LEP)。选择输出时间间隔为 0.1ms。

```
* HISTORY OUTPUT, TIME INTERVAL = 0.1E - 3

* NODE HISTORY, NSET = CHIPS
U, V, A

* EL HISTORY, ELSET = PARTS, SECTION = 1
E, S, SP, LEP

* EL HISTORY, ELSET = PARTS, SECTION = 5
E, S, SP, LEP
```

输出整个模型的总能量。特别是输出动能(ALLKE)、内能(ALLIE)、弹性应变能(ALLSE)、伪能量(ALLAE)和塑性变形耗散能(ALLPD)。

```
* ENERGY HISTORY

ALLIE, ALLKE, ALLPD, ALLAE, ALLSE
```

6.5.7 运行分析

将输入文件存入名为 circuit.inp 的文件。用下述命令运行分析并转换结果:

```
abaqus job=circuit analysis convert=all
```

这个分析比本书中前面提到的分析稍微复杂一点,大概需要 45 分钟或更长的时间才能运行完毕,这取决于你的计算机功能。

状态文件

可以在状态文件的顶端看到有关初始稳定时间步长的信息。接着按重要性列出 10 个最关键的单元(比如那些计算出最小时间步长的单元)。

6 5 8 后处理

用下面命令启动 ABAQUS/ Post:

```
abaqus post restart = circuit
```

检查材料方向

在 ABAQUS/ Post 中使用下面的命令可以产生材料方向的矢量图,并可以检查从这些方向定义中获得的材料方向:

```
* VECTOR PLOT, MATERIAL DIRECTION
```

动画显示结果

通过动画显示将帮助观察电路板和泡沫封装在撞击过程中的运动和变形。用 * SET, CAPTURE 和 * SEQUENCE 命令创建动画文件。首先,画出未变形的模型形状。

```
* DRAW
```

画出的图形是从板的正上方观察的投影。改变视角,以清楚地观察封装上撞击的顶点。可以用鼠标转动模型,也可以用下述命令来实现视角的改变:

```
* VIEW, VIEW = ( - 1, - 2, 0)
```

为了防止图形转换时比例改变,需要运行以下语句:

```
* SET, RESCALE = OFF
```

用下面的命令使隐藏线和变形前的网格不再显示,用绿色画出变形后的网格。

```
* SET, HIDE = ON, UNDEFORMED = OFF, D COLOR = GREEN
```

通过设置刚体参考节点和质量单元的尺寸为零,可以把它们的符号从图形中去掉。

```
* SET, SYMBOL = 0 .0
```

现在画一下变形后的模型,看是否正确。

```
* DRAW, DISPLACED
```

动画显示的第一幅图是 * CAPTURE 命令键入时屏幕上的图形。因此,你需要在键入 * CAPTURE 命令前运行 * DRAW 命令。

```
* DRAW
```

打开一个动画文件,用下面的命令将每次重启动状态的变形网格写入这个文件。

```
* SET, CAPTURE = circuit .flc
```

```
* SEQUENCE, TIME
```

键入 * SEQUENCE, TIME 命令后, ABAQUS/ Post 会提醒你输入后面的命令,来生成相应每个时间点的图形。用下述命令生成变形后的图形:

```
&DRAW, DISPLACED
```

```
&END
```

ABAQUS/ Post 现在把随后的图形写入动画文件。当这个过程结束时,用下面的命令结束动画文件:

```
* SET, CAPTURE = OFF
```

可以在任何时候键入下述命令回放动画:

```
* ANIMATE, FILE = circuit .flc
```

封装和电路板在撞击后约 4ms 时的变形状态如图 6-31 所示。

图 6-31 4ms 时的变形网格

能量输出

画出各种形式的能量随时间变化的图形,应该使用可选择结果输出文件(这里指 circuit.sel),而不是应用重新启动文件。因为加速度和支反力在相邻的时间步里可能有较大的变化,从选择结果输出文件里,而不是应用重新启动文件,画出这些变量随时间变化的历史是十分重要的。重新启动文件不能提供充分反映它们随时间变化的数据。用下面的命令指定选择结果输出文件的名称:

```
* SELECTED RESULTS FILE, FILE = circuit
```

下面用 * READ CURVE 命令创建各种能量变化的曲线。

```
* READ CURVE, NAME = SE, VARIABLE = ALLSE
* READ CURVE, NAME = AE, VARIABLE = ALLAE
* READ CURVE, NAME = PD, VARIABLE = ALLPD
* READ CURVE, NAME = IE, VARIABLE = ALLIE
* READ CURVE, NAME = KE, VARIABLE = ALLKE
```

用 * CURVE STYLE 命令改变这些曲线的线型和标记。(因为输出格式限制,下面显示命令行的输入分为两行书写。由于 ABAQUS/ Post 从一行到另一行的输入不能连续进行,每条命令在实际操作中必须在一行内写完。)

```
* CURVE STYLE, NAME = SE, LABEL = Strain Energy,
LINE TYPE = DASHED
* CURVE STYLE, NAME = IE, LABEL = Internal Energy,
LINE TYPE = DOTTED
* CURVE STYLE, NAME = KE, LABEL = Kinetic Energy,
LINE TYPE = CHAIN DOTTED
* CURVE STYLE, NAME = AE, LABEL = Artificial Energy,
LINE TYPE = CHAIN DASHED
* CURVE STYLE, NAME = PD, LABEL = Plastic Dissipation,
LINE TYPE = LONG DASHED
```

设置坐标轴的名称,接着在 * DISPLAY CURVE 命令后面键入相应曲线的名称,生成的图形如图 6-32。

```
* GRAPH AXES, YTITLE = Energy, XTITLE = Time
* DISPLAY CURVE
> SE, IE, KE, PD, AE
>
```

首先看一下动能的历史。在模拟开始时,各部件都处于自由下落状态,因此动能很大。初始的撞击使泡沫封装变形,从而使动能减小。接着,各部件绕着撞击的顶点转动,直至约 7ms 之后泡沫封装的侧面与地面撞击,这样,动能又进一步减弱。在大部分模拟过程中,各个部件是保持接触的。

图 6-32 能量随时间变化的结果

泡沫封装在撞击变形的过程中,把动能转化为其自身和电路板的内能。从图 6-32 可以看出,系统内能随着动能的减少而增加。事实上,内能是弹性能与塑性耗散能之和,这两种形式的能量也显示在图 6-32 中。弹性能增加到一个峰值后随着变形的恢复而下降,但是塑性耗散能却随着泡沫封装的变形持续增加。

另一个能量输出变量是伪能量,在本分析中,它是内能的重要组成部分(约占 15%)。现在你应该已经清楚,如果伪能量在总内能中减少到一个很小的比例,解的质量将得到改进。

在这个问题中什么因素引起如此高的伪应变能呢?

在第 4 章的例子中,我们看到单节点接触会引起沙漏现象,就像本例中的撞击顶点,特别是比较粗糙的网格。那个例子采用两种方法降低伪应变能:细划网格或使撞击节点更圆滑。不过,本例中还是使用了原始的网格,但是认识到改进网格将导致解的质量的改进。

电路板中的应力

下面要检查的结果是电路板上芯片附近区域的应力和应变。如果在芯片下面的这些应力或应变超过某个极限值,芯片和电路板之间的焊接就会失效。考察单元集 BOTPARTS 的顶面(截面上第 5 个积分点)的横向和纵向应力历史,大部分的芯片附着在该单元集所包含一个单元的下面。

```
* READ CURVE, NAME = S11, ELEMENT = BOTPARTS, VARIABLE = S11,
SECTION = 5
* READ CURVE, NAME = S22, ELEMENT = BOTPARTS, VARIABLE = S22,
SECTION = 5
```

用 * CURVE STYLE 和 * GRAPH AXES 命令设置线型和标志。

```
* CURVE STYLE, NAME = S11, LABEL = Lateral,  
LINE TYPE = SOLID  
* CURVE STYLE, NAME = S22, LABEL = Longitudinal,  
LINE TYPE = DOTTED  
* GRAPH AXES, YTITLE = Stress, XTITLE = Time
```

显示图 6-33 所示的曲线。

```
* DISPLAY CURVE  
> S11  
> S22  
>
```

图 6-33 电路板上表面的应力

应力图显示芯片下面区域的纵向应力在 - 2MPa 和 2MPa 之间变化,也有一些峰值达到 - 6MPa,横向应力的变化趋势和纵向应力差不多,只是峰值小一些。在 7ms 左右,横向和纵向应力都达到峰值。在前面的动能图中已经得到了这一点,在后处理动画中,这一点就是封装撞击到地板的时刻。

我们希望得到任一方向的应变峰值。所以,我们感兴趣的是最大和最小主应变。应用下面的命令阅读曲线、设置标识、并展示结果,如图 6-34 所示。

```
* READ CURVE, NAME = ESPMAX, ELEMENT = BOTPARTS,  
VARIABLE = LEP1, SECTION = 5  
* READ CURVE, NAME = ESPMIN, ELEMENT = BOTPARTS,  
VARIABLE = LEP2, SECTION = 5  
* CURVE STYLE, NAME = ESPMAX, LABEL = Maximum,
```

```
LINE TYPE = SOLID
* CURVE STYLE, NAME = ESPMIN, LABEL = Minimum,
LINE TYPE = DOTTED
* GRAPH AXES, YTITLE = Principal Strain, XTITLE = Time
* DISPLAY CURVE
> ESPMAX
> ESPMIN
>
```

应变曲线和应力曲线有相近的峰值和衰减特性,并在 7ms 左右时达到峰值。其峰值约为 0.016% 的压应变和 0.012% 的拉应变。

图 6-34 主应变值随时间变化的曲线

芯片的速度和加速度历史

另一个有助于我们设计泡沫封装的结果是附着在电路板上的那些芯片的速度和加速度。在撞击过程中加速度过大会损坏芯片,虽然它们可能还一直附着在电路板上。因此,我们需要画出 3 个芯片的加速度历史。因为我们预计在 3 - 方向上有最大的加速度,所以画出 A3 变量,如图 6-35 所示。

```
* READ CURVE, NAME = A3 , NODE = CHIPS, VARIABLE = A3
```

由于节点集 CHIPS 包括三个节点,上述命令画出相应的三条曲线 A3 - 1、A3 - 2 和 A3 - 3。规定三条加速度曲线中每一条的线型和标识,并显示出这些曲线。

```
* CURVE STYLE, NAME = A3 - 1 , LABEL = Chip 6001 ,
LINE TYPE = SOLID
```



```

* CURVE STYLE, NAME = A3 . 2 , LABEL = Chip 6002 ,
LINE TYPE = DASHED
* CURVE STYLE, NAME = A3 . 3 , LABEL = Chip 6003 ,
LINE TYPE = DOTTED
* GRAPH AXES, YTITLE = Vertical Acceleration, XTITLE = Time
* DISPLAY CURVE
> A3
>

```

位于电路板顶部的芯片 6001 的加速度,与其它的芯片相比,更平滑,在约 2ms 时达到一个峰值。但在 7ms 时芯片 6002 和 6003 的加速度的峰值达到 2000mm/s^2 ,此时封装的一边撞击到地板上。电路板在初始碰撞后的旋转会加大这一结果。

图 6-35 三个芯片在 z - 方向的加速度

最终的图形,见图 6-36,显示出撞击过程中三个芯片如何改变速度。在模拟开始时,三个芯片在下落 1m 后向下的速度是相同的。在刚刚碰撞时,三个芯片的速度都在减小,但随着电路板的旋转,它们速度变化迅速离散。只有靠近电路板底部的那块,即芯片 6003 在模拟结束的时候速度接近 0。(因为输出格式限制,下面显示命令行的输入分为两行书写。由于 ABAQUS/ Post 从一行到另一行的输入不能连续进行,每条命令在实际操作中必须在一行内写完。)

```

* READ CURVE, NAME = V3 , NODE = CHIPS, VARIABLE = V3
* CURVE STYLE, NAME = V3 . 1 , LABEL = Chip 6001 , LINE TYPE = SOLID
* CURVE STYLE, NAME = V3 . 2 , LABEL = Chip 6002 ,
LINE TYPE = DASHED
* CURVE STYLE, NAME = V3 . 3 , LABEL = Chip 6003 ,

```

```
LINE TYPE = DOTTED
* GRAPH AXES, YTITLE = Vertical Velocity, XTITLE = Time
* DISPLAY CURVE
> V3
>
```

图 6-36 三个芯片在 z - 方向的速度曲线

6.6 例子：筒的挤压

分析处于两个刚性板之间的方形钢筒的挤压问题,如图 6-37 所示。方筒一端自由,另一端固定在一个质量为 500kg 的刚性板上。在筒的自由端将要撞击到另一静止的刚性表面之前,方筒和带质量的刚性板具有 8.9408m/s 的初速度。在撞击过程中,方筒将大量的初始动能耗散为塑性变形,而我们主要感兴趣的问题就是评估方筒吸收动能的能力。当方筒屈曲时会产生自身折叠,所以重要的是能正确地模拟筒的自我接触。这一分析的一种应用就是设计汽车车架的缓冲部分。

6.6.1 网格划分

图 6-38 是本模拟建议的网格划分。因为厚度(0.001m)只是板最小平面尺度(0.1m)的 1%,所以使用壳单元是合适的。尽管初始模型具有两个对称面,因为不能肯定最小屈曲模态是否对称,所以要对模型整体结构进行模拟是非常重要的。由于方筒的变形过程将涉及屈曲,为了得到光滑的后屈曲响应,有必要寻求使方筒具有最小屈曲模态的网格。使用 ABAQUS/Standard 运行方筒特征值屈曲分析,将得到前 10 个屈曲模态,并将它们存入结果文件(.fil)。你接着使用 ABAQUS/Explicit 中的 *IMPERFECTION 选项读取屈

曲模态,将它们放大并使用它们扰动节点坐标。

6.6.2 节点集和单元集

图 6-39 所示是全部必要的节点集和单元集。将壳单元放入单元集 TUBE。将顶部和底部的刚体单元分别置入各自的单元集合: RIGTOP 和 RIGBOT。质量单元属于 MASS 的单元集中。将方筒顶部的节点(最大 1 - 坐标)放入节点集 TOP,并将底部的节点(最小 1 - 坐标)放入节点集 BOT。在定义方筒和刚性板的相互作用时,会用到这些节点集合。建立一个包括方筒上所有节点的集合 ALL。在定义方筒的初始速度时,会用到该节点集。

<div>材料性质</div> <div>壳厚度 = 1 mm</div> <div>$E = 207 \times 10^9 \text{ Pa}$</div> <div>$\nu = 0.3$</div> <div>$\rho = 7800 \text{ kg/m}^3$</div> <div>底部刚体质量 = 500 kg</div>	塑性数据:	
	真实应力 (Pa)	对数塑性应变
	158.7×10^6	0.000
	163.1×10^6	0.015
	186.3×10^6	0.033
	193.2×10^6	0.044
	202.0×10^6	0.062
	207.0×10^6	1.500

图 6-37 问题描述:方形钢筒在两板间的挤压问题

6.6.3 前处理——建立模型

使用前处理生成图 6-38 所示的网格,宽度方向有 8 个单元,长度方向有 32 个单元。使用 S4R 单元模拟方筒和 R3D4 单元模拟刚性板。每个壳单元的尺寸是 0.0125m × 0.0125m,刚体单元的尺寸为 0.2m × 0.2m。定义壳单元时,使其法向全部朝外。在底部刚性板的刚性参考节点处定义一个 500kg 的质量单元。在 ABAQUS/ Explicit 的分析中,

图 6-38 方筒的网格划分

图 6-39 必要的节点集和单元集

将赋予质量单元和方筒一个初速度,它的动量将使方筒挤压顶部刚性板。这个质量单元在 ABAQUS/ Standard 分析中是不需要的,因为它是静止的,然而,在两个输入文件里均含有质量单元并没有什么坏处。

6.6.4 考察 ABAQUS/ Standard 屈曲分析的输入文件——模型数据

在创建 ABAQUS/ Explicit 输入文件之前,必须建立 ABAQUS/ Standard 屈曲分析输入文件。屈曲分析与挤压分析将尽可能包含相同的网格和边界条件。在 ABAQUS/ Standard 中,下面是 * HEADING 选项中屈曲分析的较为合适的描述:

```
* HEADING
Tube crush (x - drection) - - buckling analysis
Tube dimensions: 0.4m x 0.1m x 0.1m
SI units (kg, m, s, N)
```

截面性质

模型中的所有壳单元具有相同的材料和相同的厚度 0.001m(1mm)。为了提高效率,使用默认的 Simpson 积分规则,就是在壳厚度方向取最少三个积分点。更多的积分点会提高计算费用和解的精度。对壳单元使用下述截面性质:

```
* SHELL SECTION, ELSET = TUBE, MATERIAL = STEEL
0.001, 3
```

刚体单元也需要赋予截面性质,使用如下语句。

```
* RIGID BODY, ELSET = RIGTOP, REF NODE = < 顶部参考节点号 >
* RIGID BODY, ELSET = RIGBOT, REF NODE = < 底部参考节点号 >
```

质量单元也需要截面性质。应用下面的截面性质定义附在底部刚体参考节点上的 500kg 质量。

```
* MASS, ELSET = MASS
500.0,
```

材料性质

方筒由钢材制成,将被模拟成各向同性弹 - 塑性材料。塑性数据和密度在屈曲分析中不是必需的,它只用到材料的线性性质。但是,为了和 ABAQUS/ Explicit 的输入文件兼容,还是应该包括这些数据。ABAQUS/ Standard 忽略任何不相干的材料数据。用下面的选项块定义材料性质:

```
* MATERIAL,NAME = STEEL
* ELASTIC
207.E9, 3
* PLASTIC
1.587E8, 0.0
1.631E8, 0.015
1.863E8, 0.033
1.932E8, 0.044
2.020E8, 0.062
2.070E8, 1.500
* DENSITY
7800. ,
```

初始条件

因为不需要在屈曲分析中引入初始速度,所以没有初始条件。

边界条件

通过约束参考节点实现对顶部刚性板的完全约束。

```
* BOUNDARY
REFTOP, 1, 6
```

通过约束参考节点,使底部刚性板除第一个自由度外全被约束。

```
REFBOT, 2, 6
```

定义接触

定义顶部和底部刚体单元的表面。表面必须是面向方筒的一面,可能是 SPOS 或者 SNEG 面,取决于定义刚性面的方式。

```
* SURFACE DEFINITION, NAME = TOPSU
RIGTOP, < SPOS 或 SNEG >
* SURFACE DEFINITION, NAME = BOTSU
RIGBOT, < SPOS 或 SNEG >
```

定义一个接触节点集包含方筒顶部的节点。

```
* CONTACT NODE SET, NAME = TOP
TOP,
```

定义方筒顶部节点和顶部刚性面之间的接触。在一个线性扰动步骤里,譬如 * BUCKLE,从这一步骤的开始到结束,接触条件始终保持不变。因而,如果你能肯定方筒的顶部节点和顶部刚性板在开始的时候处于接触状态,在整个模拟过程中,它们都保持有效的接触。为确保紧密地接触,使用 ADJUST 参数,把那些在指定容许范围(0.01m)内的节点恰好移到接触表面上。

```
* CONTACT PAIR, ADJUST = 0.01, INTERACTION = TUBE
TOP, TOPSU
```

把方筒底部的节点定义为一个接触节点集。

```
* CONTACT NODE SET, NAME = BOT
BOT,
```

定义方筒底部节点和底部刚性表面之间的接触。正如前面为了接触顶部刚性表面所做的那样,用 ADJUST 参数来确保从属节点在步骤开始的时候就进入接触状态。另外,使用 TIED 参数把方筒的从属节点“粘”在底部刚性表面上。在束缚接触中的从属节点不允许脱离主控面或存在沿主控面的切向滑动。

```
* CONTACT, TIED, ADJUST = 0.01, INTERACTION = TUBE
BOT, BOTSU
```

每一个接触对都必须与一个 * SURFACE INTERACTION 选项相对应,这个选项里还可以有一些接触面间相互作用的信息,例如摩擦模型。在本例中,我们假设在方筒和顶部刚性表面之间为零摩擦。 * SURFACE INTERACTION 选项块仅包含下面一个关键字行:

```
* SURFACE INTERACTION, NAME = TUBE
```

对于底部和顶部的接触对,可以参照同一个 * SURFACE INTERACTION 选项。

6.6.5 考察 ABAQUS/Standard 屈曲分析的输入文件——过程数据

步骤定义

为了得到前 10 个屈曲模态,使用如下的计算步骤定义:

```
* STEP
Buckling analysis of the tube
* BUCKLE
10,
```

荷载

在挤压分析中,采用与方筒实际加载经历相类似的方式施加荷载。实际的荷载量值并不重要,因为 ABAQUS/Standard 会将屈曲荷载作为施加荷载的比率记录。在底部刚性表面的参考节点上加一个沿正 1 - 方向的 500N 集中力:

```
* CLOAD
REFBOT, 1, 500.0
```

输出要求

必须要求节点位移的文件输出,以便将来应用屈曲分析的结果寻求 ABAQUS/Explicit 的网格。另外,还要求重新启动输出,并要避免在数据文件(.dat)中写入不必要的结果:

```
* NODE FILE
U,
* RESTART, WRITE, FREQUENCY = 1
* NODE PRINT, FREQUENCY = 0
* EL PRINT, FREQUENCY = 0
* END STEP
```

6.6.6 运行 ABAQUS/Standard 屈曲分析

当在文件 tube_buckle.inp 中保存输入之后,键入如下命令运行分析:

```
abaqus job= tube.buckle
```

因为这是一个 ABAQUS/ Standard 分析,所以无需转化结果。如果分析不能结束,在 tube.buckle.dat 中检查错误信息,改正输入文件以便修改错误。

6.6.7 屈曲分析的结果

在屈曲分析运行完毕后,查看数据文件里输出的特征值。输出显示了 10 个特征屈曲模态和 10 个相应的特征值。为了确定实际的屈曲荷载,将特征值和所施加的荷载相乘即可;例如,第一个模态的屈曲荷载为 $35.377 \times 500.0 = 17689\text{N}$ 。

```
EIGENVALUE      OUTPUT
BUCKLING LOAD ESTIMATE = ( DEAD LOADS ) + EIGENVALUE * ( LIVE LOADS ) .
DEAD LOADS = TOTAL LOAD BEFORE      * BUCKLE STEP .
LIVE LOADS = INCREMENTAL LOAD IN    * BUCKLE STEP
```

MODE NO	EIGENVALUE
1	35.377
2	47.315
3	47.315
4	60.431
5	61.724
6	65.038
7	71.521
8	76.964
9	83.751
10	83.752

在 ABAQUS/ Post 中观察变形后特征模态的形状,并确定此变形是否为 ABAQUS/ Explicit 里挤压分析提供了较好的缺陷起因。用如下 ABAQUS/ Post 命令:

```
* RESTART, FILE = tube.buckle
* DETAIL, ELSET = TUBE
* SET, D TITLE = OFF, AXES = OFF, UNDEFORMED = OFF, HIDE = ON
* SET, D MAGNIFICATION = 0.03
* SET, EIGENMODE = 1
* VIEW, VIEWPOINT = (0.36, 0.75, -0.55), UP = (0.9, -0.43, 0)
* DRAW, DISPLACED
* SET, EIGENMODE = 2
* DRAW, DISPLACED
```

如图 6-40 所示的,特征模态 1 和 2 说明特征模态相似于挤压分析中预期的变形。通过对其余的 8 个模态检验表明,它们也是与预计的变形相似。

既然使用 ABAQUS/ Standard 获得了屈曲模态,准备建立 ABAQUS/ Explicit 的输入

图 6-40 特征模态 1(左)和特征模态 2(右)

文件。

6.6.8 考察 ABAQUS/Explicit 挤压分析的输入文件——模型数据

ABAQUS/Standard 屈曲分析和 ABAQUS/Explicit 挤压分析的模型数据大部分是相同的。具体来说,节点、单元和材料性质是完全一样的。方筒和质量单元的截面性质是相同的,但是,定义刚体时则稍有不同,以使方筒的底部节点集成为底部刚体定义的一部分。接触定义中的唯一不同点就是:在 ABAQUS/Standard 中,接触定义是模型数据的一部分;而在 ABAQUS/Explicit 中,接触定义则是过程数据的一部分。另外,ABAQUS/Explicit 输入文件中包括一条命令,用于从屈曲分析中读取缺陷数据,并相应地修改网格。ABAQUS/Explicit 中还要给出初始速度,以使方筒撞击顶部的刚性板。将屈曲输入文件 tube.buckle.inp 拷入另一个文件 tube.crush.inp,并按下一节所讲的内容修改 tube.crush.inp。

把方筒底部的节点包含在底部刚体中

在 ABAQUS/Explicit 中,把方筒底部和底部刚体连接起来的最有效的方法是:在定义时,将方筒底部的节点包含在刚体中。这种方法比定义一个接触节点集并通过束缚接触实现的连接更有效。改变底部刚体的 *RIGID BODY 选项,在节点集 BOT 上使用参数 TIE NSET。

```
* RIGID BODY, ELSET = RIGBOT, TIE NSET = BOT,
```

```
REF NODE = < 底部参考节点号 >
```

使用屈曲特征模态扰动网格

当选择扰动量时,目标是寻求一种能正确实现后屈曲变形的网格。一般来讲,不同特征模态的扰动量分别是相应结构尺寸的几个百分点,比如壳的厚度。因为最小特征模态

和挤压分析关系最密切,相应的扰动量应该取最大。增大缺陷因子可以使挤压过程更加平滑,另一方面,过大的缺陷因子也是不现实的。

具有许多间隔很近的特征值的结构的后屈曲响应对所选择的网格缺陷可能是高度敏感的。在这种情况下,网格缺陷的微小改变会引起后屈曲行为的很大变化,因此,需要敏感性研究以确定实际的网格缺陷。在方筒挤压分析中,第一个特征值比第二个明显小的多,所以我们可以确切地认为第一个特征模态是主要的。虽然第二个和第三个特征值相差较小,但它们与第一个特征值差别很大,对后屈曲的响应没有太大的影响。一个结构,比如薄壁短圆筒,可能有几个相距很近的小特征值。对于这种结构,不能肯定最小的特征模态是主要的。

引入不超过壳厚度 2% 的网格缺陷。由于 ABAQUS/ Standard 放大了屈曲分析中得到的特征值输出,所以每个模态的最大变形均为 1.0m,选择缺陷因子为 1.0 将恰好用 ABAQUS/ Standard 输出的位移扰动网格。为了获得网格缺陷,对于第一个特征模态取壳厚度的 2% ($0.001\text{m} \times 0.02 = 2.0 \times 10^{-5}\text{m}$),并随特征模态编号的增加降低百分比,使用如下缺陷因子:

```
* IMPERFCTION, FILE = tube.buckle, STEP = 1
1, 2.0E - 5
2, 0.8E - 5
3, 0.4E - 5
4, 0.18E - 5
5, 0.16E - 5
6, 0.10E - 5
7, 0.10E - 5
8, 0.08E - 5
9, 0.02E - 5
10, 0.02E - 5
```

初始条件

顶部的刚体是固定不动的。方筒和底部的刚体,包括质量,都有一个 8.9408m/ s (20mph)的初速度。用下面的选项块定义初速度:

```
* INITIAL CONDITIONS, TYPE = VELOCITY
* * 1 mph = 0.44701m/ s
* * 20 mph = 8.9408m/ s
REFBOT, 1, 8.9408
ALL, 1, 8.9408
```

边界条件

边界条件和屈曲分析时完全相同。

输出节点集

定义一个用于结果输出的节点集。

```
* NSET, NSET = PRIN
TOP, REFTOP, BOT, REFBOT
```

6.6.9 考察 ABAQUS/Explicit 挤压分析的输入文件——过程数据

步骤定义

总共用 0.03 秒的时间运行显式动态分析：

```
* STEP
Impact of square tube with free deceleration
Initial velocity = 8.9408 m/s (20mph)
* DYNAMIC, EXPLICIT
,0.03
```

接触定义

在 ABAQUS/Explicit 中,使用自我接触和双面接触,挤压分析和屈曲分析的接触定义多少有所不同。因而,要删除所有已存在的表面定义、接触对和表面间相互作用。当方筒挤压时,它反复屈曲,从而使方筒许多内部和外部的区域存在相互接触。由于我们无法预知哪些区域会存在相互接触,所以必须允许以非常普遍的方式发生接触,即任何一个区域都可能和另外一个区域接触,无论这个区域是在方筒内部还是外部。自我接触允许一个物体,例如方筒,和其自身接触表面的任何一个部位接触。如果自我接触的表面同时又是一个双面接触表面,接触表面就包括内外两个面。

用名为 TUBE 的单元集定义壳表面,而不指定面的标识,就可以将方筒完整的内外表面定义为一个双面接触表面。

```
* SURFACE DEFINITION, NAME = TUBE
TUBE,
```

为了说明方筒内面和外面的自我接触,定义一个含双面接触表面 TUBE 作为唯一表面的接触对。

```
* CONTACT PAIR, INTERACTION = SELF
TUBE,
```

另外,定义面间相互作用 SELF,其摩擦系数为 0.1。

```
* SURFACE INTERACTION, NAME = SELF
* FRICTION
0.1,
```

在分析中将发生的另一个接触是方筒和顶部刚性板之间的接触。首先是定义顶部刚性板的下表面。

```
* SURFACE DEFINITION, NAME = TOPSU
RIGTOP, < SPOS 或 SNEG >
```

开始时, 仅仅方筒顶部边界的节点上存在接触; 但随着挤压的进行, 方筒上越来越多的面开始和刚性板接触。我们通过指定双面接触表面 TUBE 和顶部刚性板表面 TOPSU 之间的接触来定义这种接触情况。由于双面表面在定义时自动包括了在表面定义中的边线, 所以接触对按如下方式定义:

```
* CONTACT PAIR, INTERACTION = IMPACT
TUBE, TOPSU
```

另外, 定义表面间相互作用 IMPACT 为零摩擦。

```
* SURFACE INTERACTION, NAME = IMPACT
```

输出要求

因为这次分析的主要目的是要确定方筒挤压过程中吸收的能量, 所以最重要的输出就是能量历史输出。输出要求如下:

```
* HISTORY OUTPUT, TIME INTERVAL = 0 .00008
* ENERGY HISTORY
ALLWK, ALLKE, ETOTAL, ALLPD, ALLIE, ALLVD, ALLAE, ALLSE
```

节点过程变量和一个监视节点, 以及重新启动输出在研究方筒的变化行为时也是十分有用的:

```
* NODE HISTORY, NSET = PRIN
U, V, A, RF1, RF2, RF3
* MONITOR, NODE = < 底部刚体参考节点号 >, DOF = 1
* RESTART, WRITE, NUMBER INTERVAL = 20
* END STEP
```

6.6.10 运行 ABAQUS Explicit 挤压分析

在将输入存入名为 tube.crush.inp 文件后, 用下面的命令运行分析和转换结果:

```
abaqus job=tube.crush analysis convert=all
```

与电路板下落试验的模拟类似, 运行该程序也需要一段时间。如果你的分析不能结束, 检查数据文件 tube.crush.dat 和状态文件 tube.crush.sta 中的错误信息, 修改输入文件以便改正任何错误。

6.6.11 挤压分析的结果

在成功地运行了模拟之后, 使用和电路板问题中相同的方法, 用动画显示方筒的变形过程。动画将会显示重新启动文件里存放的 20 种网格变形状态中的每一种情况。观看变形过程, 有助于你确定方筒挤压过程中的变形是否正确。最终的变形网格如图 6-41 所示。当你查看位移的网格时, 应注意 ABAQUS Explicit 在接触计算时包括了壳的厚度, 在接触的区域之间出现了一条狭缝。

图 6-41 最终的变形网格

为了理解在进行后屈曲分析之前扰动网格的重要性,图 6-42 为不存在初始缺陷时一个分析的最终变形网格形式。与扰动网格的光滑屈服形状相比,这种未经扰动的网格,变形形成尖锐的折叠;这种形状显然是不符合实际的。即使在扰动网格时引入很小的缺陷,也足以使后屈服的行为进行得很光滑。

图 6-42 当没有施加初始缺陷时的变形网格

状态文件

对一些表面上存在的离面严重翘曲,状态文件几次给出警告信息。考虑到如图 6-41 所示的严重变形网格,存在几条警告信息是不足为奇的。这种挤压分析的特点是需要高度细划的网格来消除某些单元中存在的高度翘曲。对于这道练习题目,不用再进一步细

划网格,我们可以只接受运算的近似结果。

STEP 1 ORIGIN .00000E+00

Global time estimation algorithm will be used .

Scaling factor : 1.0000

STEP		TOTAL		CPU		STABLE		CRITICAL		KINETIC	
INCREMENT	TIME	TIME	TIME	TIME	INCREMENT	ELEMENT	ENERGY	MONITOR			
0	0.000E+00	0.000E+00	00 00	00 00	1.392E-06	1	2.003E+04	.000E+00			

Results number 0 at increment zero .

* * * WARNING: Master surface TUBE of contact pair # 1 contains facets with out-of-plane warping of at least 20.000 degrees in increment 260 . Large warping that develops during an analysis often corresponds to severe distortion of the underlying elements . It may be appropriate to rerun the analysis with a refined mesh .

能量历史

确定方筒所吸收能量的方法之一是查看相关的能量输出曲线,如图 6-43 所示。由于大部分能量以塑性变形能的形式耗散,画出塑性耗散的历史 ALLPD。为了显示方筒变形过程中模型改变的总体动能情况,也画出了动能 ALLKE。作为网格质量的信息,画出伪应变能 ALLAE 也是很有用的。在下面的命令中,你会注意到,如果在 * READ CURVE 选项中省略了 NAME 参数,默认曲线名称为变量名。

```
* SELECTED RESULTS FILE, FILE = tube - crush
* SET, XY REPORT = OFF
* READ CURVE, VARIABLE = ALLPD
* READ CURVE, VARIABLE = ALLKE
* READ CURVE, VARIABLE = ALLAE
* CURVE STYLE, NAME = ALLPD, LINE STYLE = SOLID
* CURVE STYLE, NAME = ALLKE, LINE STYLE = DOTTED
* CURVE STYLE, NAME = ALLPD, LINE STYLE = DASHED
* DISPLAY CURVE
> ALLPD, ALLKE, ALLAE
>
```

在分析结束时,有 3600J 的能量以塑性变形的形式耗散,模型的总动能相应减少了 4400J。在分析结束时的伪应变能是 800J,为塑性耗散的 22% (译者注:原书有误)。理想情况下,伪应变能是总能量或塑性耗散的很小百分数。(在前一个例子里,我们曾引入 5% 的一般标准。)在这个例子中,高百分比的伪应变能说明网格应该被进一步细划以提高解的质量。因为分析结束时的变形是如此严重,以至于需要高度细划的网格使结果中沙

漏刚度的影响变得最小。然而,即便没有进一步细划网格,我们也可以接受计算的近似结果。

图 6-43 ALLPD 和 ALLKE 的能量输出曲线

6.7 小结

- 接触是定义在输入文件的过程定义部分。
- ABAQUS/ Explicit 中的接触定义分为两部分:定义可能产生接触的表面和表面间的相互作用。
- 用 * SURFACE DEFINITION 和 * RIGID SURFACE 选项定义表面。使用 * CONTACT NODE SET 选项可以把分离的节点包括在接触对中。
- 接触可以是两个表面之间,也可以是一个表面与其自身的接触。
- 所有的表面都必须是连续的和单连通的。壳或膜表面可以跨过单元的两个面。
- 对于壳单元、膜单元或实体单元,如果是一个单面表面,从这个表面到下一个表面的表面法线必须一致。当表面翻转的时候,法线不能翻转。
- ABAQUS/ Explicit 不会自动平滑刚性表面;其表面形状是基于单元的形状。
- 施加束缚接触是一种有效的网格细划方式。
- 为了消除第一步骤之前的初始过盈接触,ABAQUS/ Explicit 会在不引起应变的情况下调整节点坐标。
- 在以后的各步骤里,为了消除初始过盈接触而进行的节点坐标调整可能会引起应变,并会引起严重的网格变形。

第 7 章 准静态分析

显式求解方法是真正的动态程序,其设计的初衷是用来模拟惯性发挥主导作用的高速冲击事件。在求解动力平衡状态的过程中,非平衡力以应力波的形式在相邻单元间传播。由于最小稳定时间增量通常很小,大部分的问题需要大量的时间增量。

显式求解方法证明其对求解静态问题也很有价值——ABAQUS/ Explicit 对于某些类型的静态问题的求解比 ABAQUS/ Standard 更容易。相对于隐式程序而言,显式程序的优点之一是它处理复杂的接触问题很方便。优点之二是求解花费的时间在显式程序中与问题的自由度数成正比;而在应用波前求解器的隐式程序中,求解所花费的时间与波前的平方成正比,求解时间随着问题的规模会迅速增长。因此,当模型变得越来越大时,显式程序更见其优越性。隐式程序与显式程序的详细对比请参见第 3 章。

应用显式动态程序求解准静态问题需要考虑一些特殊问题。由于静态解答根据定义是长时间结果,所以在其固有时间尺度上分析问题在计算中常常是不实际的,因为它将需要大量的小的时间增量。为了获得成本较低的解答,必须采用某种方式以加速模拟的过程。随着计算过程的加速,静态平衡状态的问题会逐渐地演变成惯性力占主导地位的动力平衡状态。目标是在最短的时间内模拟这个过程,在整个过程中惯性力的影响保持很小。

7.1 显式动态问题类比

我们利用图 7-1 所示的比拟使您更直观地理解缓慢、准静态的加载情况和快速加载情况的差别。图中所示为两个载满乘客的电梯。

图 7-1 缓慢和快速加载情况的类比

在缓慢的情况中,电梯门打开您走了进去。为了腾出空位,靠近门边的人缓慢地挤动他们邻近的人,这些人又会挤动他们邻近的人……。这个扰动在电梯中进行,直到靠墙的人指出他们不能够挪动为止。一系列的波通过电梯传递直到每一个人都到达新的平衡位置。如果您稍稍提高您的速度,您就会比以前更加用力地推挤和您靠近的人,但最后每一个人都会到达和停止在和缓慢的情形中一样的位置。

在快速的情况中,电梯门打开您高速冲了进去,使得电梯里的人没有时间挪动自己来容纳您。这样您就会撞伤正对门的两个人,而其他的人不受影响。

同样的思考对准静态分析也是正确的。常常可以很大地提高分析的速度而不会严重降低准静态解的质量;缓慢情形中的最终结果和稍微加速情形中的最终结果基本一致。然而,如果分析速度提高到惯性效应占主导地位时,解就会变得局部化,而且结果也和准静态解大不相同。

7 2 加载速率

物理过程实际所占的时间称为该过程的固有时间。一般而言,可以很安全地假定,对一个准静态过程用其固有时间进行分析会得到准确的静态结果。如果实际发生的真正事件在其固有时间范围内最终速度为零,那么动态分析应该能够捕捉到实际上分析已经达到稳态的事实。只要解答仍保持和真正的静态解近似一致且动态效应不明显,就可以提高荷载速率使得同样的物理事件在更短的时间内发生。

7 2 1 平滑幅值曲线

准确高效的准静态分析要求加载尽可能地平滑。突然、急促的运动会引起非真实的应力波,这种应力波会产生噪声和不准确的解。以可能最平滑的方式施加荷载要求加速度从一个增量到下一个增量只改变很小的量。如果加速度是平滑的,那么速度和位移的变化也同样是平滑的。

ABAQUS/ Explicit 有一个称作 SMOOTH STEP 的简单的固定的幅值类型,这个幅值类型自动地产生可能的最平滑的加载幅值。当应用 * AMPLITUDE, DEFINITION = SMOOTH STEP 选项定义时间 - 幅值数据对时,ABAQUS/ Explicit 会自动地用一条一阶导数和二阶导数均平滑的曲线将每一个数据对连接起来,而且这条曲线在每一个数据点处的斜率均为零。由于一阶、二阶导数均平滑,所以可以只用初始和最终的数据点就可以应用 SMOOTH STEP 施加位移荷载,中间的运动插值是平滑的。应用这种类型的加载幅值能够在尽可能的最短时间里进行准静态分析。例如,ABAQUS/ Explicit 会为下面的幅值定义产生图 7-2 所示的幅值曲线:

```
* AMPLITUDE,DEFINITION= SMOOTH STEP
0.0,    0.0,    1.0E-5,    1.0
```

7 2 2 结构问题

在静态分析中通常是结构的最低模态控制着结构响应。如果已知最低模态的频率和

图 7-2 应用 * AMPLITUDE,DEFINITION= SMOOTH STEP 进行幅值定义

对应的周期,就可以估计出获得适当的静态响应所需的时间。为了说明确定适当的荷载速率的问题,让我们思考如图 7-3 所示的汽车门中的一根梁被一个刚体圆柱从侧面侵入时的变形。实际的实验是准静态的。

图 7-3 刚体圆柱撞击梁

梁的响应随荷载速率变化很大。在撞击速度非常高,达到 400 m/s 时,梁的变形如图 7-4 所示呈现出高度的局部化。为了获得更好的准静态解,应该考虑最低模态。最低模态的频率大约为 250 Hz ,对应的周期为 4ms 。可以用 ABAQUS/ Standard 中的 * FREQUENCY 方法很容易地计算出自然频率。为使梁在 4ms 中发生所想要的 0.2 m 的变形,圆柱的速度应为 50 m/s 。尽管 50 m/s 看起来仍然是一个高撞击速度,惯性力相对于结构的整体刚度变成了第二位的,而且梁的变形显示出更好的准静态响应,如图 7-5 所示。

尽管整体的结构响应显得像我们所期盼的准静态解,但通常最好将加载时间增大到

图 7-4 撞击速度 400 m/ s

图 7-5 撞击速度 50 m/ s

最低模态周期的 10 倍,以确保解确实是准静态的。为了进一步改善结果,刚体圆柱的速度应该逐渐的加大,例如,应用一个 SMOOTH STEP 幅值定义,从而减轻初始的冲击。

7 2 3 金属成型问题

人为地提高金属成型模拟过程的速度对获得低成本的解答是必要的,但是我们能够提高多快的速度而且仍然能够得到可接受的静态解答呢?如果金属板毛坯的变形对应于最低模态的变形,那么结构最低模态的周期可以指导确定成型速度。在成型过程中刚体冲模和冲头可以约束冲压使得其变形可以和结构的模态无关。在这种情形中一个一般的建议是限制冲头的速度使它不超过金属板波速的 1%。对于一般成型过程冲头速度的量级为 1 m/ s,而钢的波速大约为 5000 m/ s。由此,这个建议推荐的冲头速度的加速上限倍数为 50。

以上推荐的是用来确定一个合适的冲头速度的方法,它包括运行一系列冲压速度在 3 ~ 50 m/ s 范围内的分析。由于求解所花费的时间与冲压的速度成反比,所以应该按照从最高速度到最低速度的顺序进行这些分析。检查分析的结果,感觉一下变形后的形状、应力和应变是如何随冲压速度而变化的。非真实的局部过分拉伸、变薄,以及对起皱的抑制说明了某些冲压的速度过高。如果从一个冲压速度(如 50 m/ s)开始,并逐渐降低速度,到某一点时解答从一个冲压速度到下一个冲压速度变得相似,这说明解正收敛于一个稳态解。随着惯性效应变得越来越不明显,模拟结果之间的差别也越来越小。

随着人为的增大加载速率,以渐增而且平滑的方式施加荷载变得越来越重要。例如,加载冲头的最简单方法是整个成型过程中均施加常冲压速度。这样的加载方式会在分析开始时引起对金属板毛坯的突发冲击荷载,会使应力波在毛坯中传播而且可能引起意想不到的结果。当加载速率变大时冲击荷载对结果的影响变得更为明显。应用一个 SMOOTH STEP 幅值从零逐渐加大冲压速度可以将这些不利效应减到最小。

回弹

因为回弹分析确定部件卸载后的最终形状,因此回弹常常是金属成型的一个重要组成部分。尽管 ABAQUS/ Explicit 很适合于成型模拟,但回弹分析仍遇到了一些特殊困难。用 ABAQUS/ Explicit 进行回弹模拟的主要问题是获得稳态解所需要花费的时间。一般地,荷载必须非常小心地卸除,而且必须引入阻尼以使求解时间比较合理。幸运的是,ABAQUS/ Explicit 和 ABAQUS/ Standard 之间的密切关系提供了一种效率更高的方法。

由于回弹是在非接触状态且一般仅包含中度的非线性,ABAQUS/ Standard 可以求解回弹问题,并且比用 ABAQUS/ Explicit 求解的速度更快。因此,对于回弹分析的优选方法是将 ABAQUS/ Explicit 形成的完整加工模型输入 ABAQUS/ Standard 你必须建立一个 ABAQUS/ Standard 输入文件,它将输入加工结果和进行回弹分析。在 ABAQUS/ Standard 输入文件中应用 * IMPORT 选项,你指定希望输入的单元集。一般地,输入完全变形了的网格,节点、单元和截面性质自动输入,但是,必须再定义材料和边界条件。一旦回弹分析完成,你可以将模型返回输入 ABAQUS/ Explicit,继续进行下一个加工过程分析。

7 3 质量放大

通过质量放大可以不借助人为了提高加载速率也能够低成本地运行分析。在包含率相关材料或率相关阻尼的模拟分析中,如减振器,质量放大是用于缩短求解所需时间的唯一选择。在这类模拟分析中由于材料的应变率会随加载速率增大相同的倍数,因此提高加载速率不是可供选择的方案。当模型的材料性能随应变率改变时,人为的提高加载速率也就会人为地改变过程。

下面的公式显示了稳定的时间增量与材料密度之间的关系。像在第 3 章中讨论的那样,模型的稳定极限是所有单元的最小稳定时间增量。此稳定极限可以表示为:

$$t = \frac{L^c}{c_d}$$

式中 L^c 为特征单元长度, c_d 为材料的扩展波速。扩展波速由下式给出:

$$c_d = \frac{E}{\rho}$$

式中 ρ 为材料密度。

根据上面的方程,人为地将材料的密度增大为原来的 f^2 倍将使得波速降低 f 倍,而稳定的时间增量增大 f 倍。当整体的稳定极限提高时,运行同样的分析就只需要较少

的增量,而这正是质量放大的目的所在。然而,放大质量对惯性效应的影响与人为提高加载速率时完全一样。因此,过大的放大质量,就像过高的提高加载速率一样会导致错误的解。因此,用来确定合适的质量放大比例的推荐方法与确定合适的加载速率放大比例的方法类似。这两种方法的唯一差别是质量放大所产生的提速是质量放大比例的平方根,而提高加载速率所产生的提速与加载速率放大倍数成比例。例如,质量放大 100 倍准确地对应于加载速率提高 10 倍。

有若干种方法可以在输入文件的过程定义中应用 * MASS SCALING 选项来为模型加入质量放大。由于这个选项是过程定义的一部分,所以可以很灵活地在步骤与步骤之间进行更改。详细资料请参考 ABAQUS/ Explicit 用户手册。

7.4 能量平衡

评价一个模拟是否产生合适的准静态响应的最一般方法是研究模型的各种能量。在 ABAQUS/ Explicit 中的能量平衡方程如下所示:

$$E_I + E_V + E_{KE} - E_W = E_{total} = \text{constant},$$

式中 E_I 为内能(包括弹性和塑性应变能), E_V 为粘性耗散所吸收的能量, E_{KE} 为动能, E_W 为外力所作的功, E_{total} 为系统的总能量。

为了用一个简单的例子说明能量平衡,考虑图 7-6 所示的单轴拉伸实验。这个准静态实验的能量历史如图 7-7 所示。如果一个模拟是准静态的,那么外力所作的功近似地等于系统的内能。除非使用了粘弹性材料、离散阻尼器,或者材料阻尼,粘性耗散能一般很小。由于模型中材料的速度很小,准静态分析中的惯性力可以忽略。由此两个条件得到的推论是动能也很小。作为一个一般的规律,变形材料的动能在分析的大部分过程中不能超过其内能的一小部分(一般地为 5% ~ 10%)。

图 7-6 单轴拉伸实验

图 7-7 准静态拉伸实验的能量历史

当进行能量比较时,要记住 ABAQUS/ Explicit 报告的是整体的能量平衡,包括任何含有质量的刚体的动能。由于在评价结果时只对变形体感兴趣,因此当评价能量平衡时应该从 E_{total} 中扣除刚体的动能。

举例而言,如果在模拟一个有滚动的刚体模具的传送问题,刚体的动能可能占模型总动能的很大一部分。在这种情形中,只有在扣除与刚体运动相关的动能后,才能进行动能与内能的有意义的比较。

7 5 例子:盆底的深冲压

模拟一个盆底的深冲压问题。假定惯性效应相对于刚度效应不重要,按准静态事件来分析这个两阶段的金属成型过程。图 7-8、图 7-9 和图 7-10 提供了用于建模的必要、详细的模型信息。由于这个成型过程是轴对称的,可以用轴对称壳单元来模拟毛坯,用轴对称刚体表面来模拟模具。用轴对称单元而不用更一般的三维壳单元的后果是轴对称的模拟在环向压应力比较大时不能够预测出环向起皱。

图 7-8 成型阶段 1 的详细成型描述(单位:m)

生产最终所期望的盆底形状需要两个独立的成型阶段。在第一个成型阶段一个薄金属碟(毛坯),在冲头和静止的模具间被冲压 0.015 m,形成杯状。一旦形成杯状后就从第一套模具中取出毛坯让其“回弹”至卸载后形状。然后进行退火来释放在第一个成型阶段中产生的冷作硬化塑性应变。

退火后,将毛坯放置到第二套刚体模具之间再冲压 0.010 m,形成最终的盆底形状。在这个成型阶段中,压模 2 安放在一个弹簧和一个减振器上;这样就允许压模 2 在轴向即 2 方向运动。当冲头压下时,冲头将毛坯往压模 2 上挤压,挤得毛坯和冲模都往下移动。毛坯向下移动时就会接触到固定的“拱顶”冲模以让盆的底部形成圆顶形状。第二个成型阶段完成后,将毛坯从模具中取出让其回弹至最终的卸载后形状。

图 7-9 成型阶段 2 的详细成型描述(单位:m)

材料性质

壳厚度 = 0.5 mm

$E = 210 \times 10^9 \text{ Pa}, \nu = 0.3, \rho = 7800 \text{ kg/m}^3$

塑性数据：

真应力 (Pa)	对数塑性应变
91×10^6	0.0
131×10^6	0.159×10^{-2}
171×10^6	0.649×10^{-2}
211×10^6	0.177×10^{-1}
251×10^6	0.395×10^{-1}
291×10^6	0.776×10^{-1}
331×10^6	0.139
391×10^6	0.295

图 7-10 毛坯的材料性质

7.5.1 坐标系

模型在整体坐标系中的取向如图 7-8 和图 7-9 所示。由于物理过程是轴对称的,而且也是这样模拟的,所以整体的 1 -、2 - 和 3 - 方向分别对应于径向、轴向和环向。

7 5 2 网格设计

毛坯

由于毛坯在开始时是平碟状,所以用轴对称壳单元(SAX1)将其模拟成从对称轴开始的一条直线。唯一没有明确答案的问题是应该用多少个单元。检查成型过程,考虑毛坯在分析过程中要经历的变形,网格应该能够精确地捕捉刚体模板的所有细节。

使用均匀网格,像这个例子里那样,单元尺寸必须足够小,以能够捕捉刚体模板的最小细节 - 成型阶段 2 中冲头 0.002 m 的半径。我们要采用的一般准则是应该用 10 个单元模拟半径,这要求最大单元尺寸为 0.00125 m。如果我们用 50 个单元来模拟这个半径为 0.045 m 的碟状毛坯,那么单元尺寸为 0.0009 m,是足够精细的。压模和冲头由连接起来的直线段构成相当平缓过渡的圆角。由于不存在尖锐的弯曲,所以不需要特别精细的网格。毛坯也没有严重的卷曲。假定毛坯由 50 个单元构成已足够精确。

刚体压模和冲头

用轴对称刚体单元(RAX2)来模拟刚体压模和冲头。由于 ABAQUS/Explicit 不对由刚体单元构成的刚体进行平滑处理,所以您必须将刚体表面的网格划分得足够精细以能够准确地表示实际的刚体模具。每一个直线段用一个刚体单元,每一个圆角用 30 个刚体单元。

一个可以用来替代刚体单元定义刚体压模和冲头的方法是采用解析刚性表面,这一刚性表面是由弧和线段定义的。对于这个特殊例子,刚体部件可以直接用解析刚体表面来模拟,这样可以生成一个平滑的刚体表面而不像刚体单元生成的分段线性刚体表面。然而,大多数的三维压模和冲头要求总体的刚体表面用刚体单元来划分网格。

在成型阶段开始时,刚体应该和毛坯足够接近而又不会发生任何过盈接触。请记住 ABAQUS/Explicit 在确定接触时考虑壳的厚度,因此,毛坯的中面必须至少离开上面和下面的刚体模具有 half 壳厚度的距离。在成型第一阶段以前,ABAQUS/Explicit 尝试以应变自由的方式解决过盈接触问题,结果是节点局部位置变化可能会使单元发生畸变。在这个例子里,如果过盈接触的足够大,那么初始的过盈接触就会改变毛坯的初始形状。

7 5 3 节点集和单元集

为了施加单元性质、荷载和边界条件以及满足后处理的输出要求,所有必需的单元集和节点集显示在图 7-11 中。薄金属碟毛坯属于单元集 BLANK。第一个成型阶段的刚体模具分别属于单元集 PUNCH1 和 DIE1。分别为每个刚体参考节点生成独立的节点集。包含单元集 PUNCH1 的参考节点的节点集名为 REFP1,而包含单元集 DIE1 的参考节点的节点集名为 REFD1。包含位于对称轴上的毛坯节点的节点集叫作 BSYM,而包含位于毛坯自由端节点的节点集叫作 BEND。

另外,为后处理生成一个包含两个节点的节点集 NHIST。选择这两个节点是为了提供毛坯平底部分的一点和毛坯自由端处的详细速度历史。研究毛坯上典型节点处的速度

历史有助于设计加载定义和修正分析。对于 50 个单元的网格,选择对称轴处的第 21 节点和自由端处的节点放到节点集 NHIST 中。

第二个成型阶段需要刚体模具 PUNCH2、DIE2 和 DOMER,它们对应的单元集名字和模具名一样。包含对应的参考节点的节点集分别为 REFP2、REFD2 和 REFDOMER。为弹簧单元和阻尼单元分别定义单元集 SPRING 和 DASHPOT。

图 7-11 必要的节点集和单元集

7 5 4 定义合适的步骤时间

在第 7.2 节中讨论了为准静态过程确定合适的步骤时间的方法。如果我们知道毛坯的最低自然频率即基频,那么就可以大致地确定一个步骤时间的下限。获得这些信息的一个方法是运用 ABAQUS/ Standard 进行频率分析。在这个成型分析中冲头使得毛坯变形成和最低模态相似的形状。因此,如果你希望模拟结构的变形而不是局部的变形,那么

非常重要第一个成型阶段的时间就必须大于最低模态的周期。

生成一个命名为 draw_freq.inp 的 ABAQUS/Standard 输入文件。毛坯中的单元是频率分析唯一需要的单元,其定义和成型分析中的完全一样。节点集和单元集也一样。基于第 7.5.2 节和第 7.5.3 节中提供的网格构成,用前处理生成网格。

频率分析的一个合适的标题如下所示:

```
* HEADING
Deep drawing of a can bottom - - frequency analysis
ABAQUS/Standard
SI units (kg, m, s, N)
```

单元性质

为每一个单元集定义合适的截面性质。为毛坯生成壳截面性质,材料参考命名为 STEEL 的材料(将在后面定义),采用 5 点高斯积分,厚度为 0.5 mm。

```
* SHELL SECTION, ELSET = BLANK, MATERIAL = STEEL,
SECTION INTEGRATION = GAUSS
0.0005, 5
```

材料性质

由于 *FREQUENCY 分析是线性扰动步,因此,忽略材料的非线性性质,毛坯只用弹性材料模拟。下面的数据用来定义钢的弹性和质量性质:

```
* MATERIAL, NAME = STEEL
* ELASTIC
210.0E9, 0.3
* DENSITY
7800.,
```

边界条件

对节点集 BSYM 施加对称边界条件,而对节点集 BEND 在轴向,或 2 - 方向上施加固定约束。

```
* BOUNDARY
BSYM, 1
BSYM, 6
BEND, 2
```

过程定义

过程定义指定应用 *FREQUENCY 分析类型来求一阶特征模态。要求 *RESTART 输出并屏蔽其它的输出。

```
* STEP
```

```

* FREQUENCY
1,
* RESTART, WRITE
* EL PRINT, FREQUENCY = 0
* NODE PRINT, FREQUENCY = 0
* END STEP

```

运行 * **FREQUENCY** 分析

将您的频率分析输入数据存入文件 draw - freq .inp, 然后用下面的命令运行分析:

```
abaqus job=draw.freq
```

后处理

分析完成后, 在 ABAQUS/ Post 中用下面的命令画出 1 阶模态的模态形状和频率:

```

* RESTART, FILE = draw.freq
* SET, EIGENMODE = 1
* DRAW, DISPLACED

```

频率分析表明毛坯的基频为 304 Hz, 对应的周期为 0 .0033 s。一阶模态的变形形状如图 7-12 所示。现在我们得到第一个成型阶段步骤时间的下限为 0 .0033 s。

图 7-12 由 ABAQUS/ Standard 频率分析给出的一阶模态的变形形状

7 5 5 考察输入文件——模型数据

第一个成型输入文件 draw - stage1 - attempt .inp 仅模拟第一个成型阶段, 因此, 这个输入文件只需要第一个成型阶段中用到的部件。采用和频率分析输入文件 draw . freq . inp 中相同的毛坯网格划分。用前处理生成 7 . 5 . 2 节和 7 . 5 . 3 节中提供的其它网格部分。在这一节中我们将重新考察模型定义, 做一些改动, 并包含附加的信息。

模型描述

模拟的一个恰当的描述如下:

```
* HEADING
```

Deep drawing of a can bottom - - stage 1, attempt 1
SI units (kg, m, s, N)

这个描述清楚地标明输入文件并说明所采用的单位。

单元性质

为每一个单元集定义合适的截面性质。为毛坯生成壳截面性质,因此材料参考命名为 STEEL(将在后面定义),采用 5 点高斯积分,厚度为 0.5 mm。壳厚度方向上采用五个截面积分点应该能够为发生显著塑性的物体提供准确的结果。

```
* SHELL SECTION, ELSET = BLANK, MATERIAL = STEEL,
SECTION INTEGRATION = GAUSS
0.0005, 5
```

定义两个刚体,分别对应于各自的单元集和参考节点号。

```
* RIGID BODY, ELSET = PUNCH1, REF NODE = < 参考节点号 >
* RIGID BODY, ELSET = DIE1, REF NODE = < 参考节点号 >
```

材料性质

在这个模拟中毛坯是唯一的变形体,采用弹塑性材料模型。采用如下的数据定义钢材的弹性和质量性质:

```
* MATERIAL, NAME = STEEL
* ELASTIC
210.0E9, 0.3
* DENSITY
7800. ,
```

在 * PLASTIC 选项下面加入塑性数据:

```
* PLASTIC
0.912E8, 0.0
0.131E9, 0.159E - 02
0.171E9, 0.649E - 02
0.211E9, 0.177E - 01
0.251E9, 0.395E - 01
0.291E9, 0.776E - 01
0.331E9, 0.139
0.391E9, 0.295
```

这个例子的塑性曲线如图 7-13 所示非常平滑。由于准静态问题的所有方面都期望是平滑的,所以有一个尽可能平滑的塑性曲线是有利的。平滑的塑性曲线使得当塑性应变发生时材料的刚度从一个增量到下一个增量改变得很小,这样有助于生成低振荡的解。

图 7-13 应力 - 塑性应变材料曲线

初始固定边界条件

初始固定边界条件可以是模型定义的部分,也可以是过程定义的部分。由于模型是轴对称的,所以必须约束每一个物体——毛坯、冲头 1 和压模 1——的径向(即 1 - 方向)的运动和面内的旋转(自由度 6)。另外,约束压模 1 在轴向(即 2 - 方向)上的运动。

```
* BOUNDARY
REFP1, 1
REFP1, 6
REFD1, 1, 6
BSYM, 1
BSYM, 6
```

7 5 6 设计过程定义

加载历史的若干方面在模型描述中没有清楚地定义。因此,必须进行一定量的试算和错误分析以确定怎样能够产生可接受的结果和怎样不能。和这本手册中的其它例子不同,我们将一次只讨论这个成型过程的一个阶段,直到对这一阶段的结果满意后再继续下一阶段的分析。

7 5 7 成型阶段 1 的一般方法

第一个成型阶段的目的是用冲头 1 和压模 1 形成一个 0.015 m 深的杯子。对于准静态分析而言,由于适当的冲压速度没有必要和实际的冲压速度一样大小,所以在问题描述中故意没有提供冲压速度。尽管实际的速度是变化的,但一般的冲压速度的量级为 0.1 ~ 1.0 m/s。

为了成功地分析第一个成型阶段,我们必须考虑下面的问题:

1. 合适的步骤时间是多少?
2. 我们应该怎样移动冲头?
3. 这个分析需要多少增量、多少计算时间?
4. 应该输出哪些结果?

确定合适的步骤时间

在 7.5.4 节中我们进行了频率分析,分析结果表明毛坯的基频为 304 Hz,相应的时间周期为 0.0033 s。这个时间周期为第一个成型阶段提供了步骤时间的下限。取步骤时间为基频时间周期的 10 倍,即 0.033 s,以确保得到一个优质的准静态解。这个时间周期对应于一个典型的 0.45 m/s 的金属成型常冲压速度。

移动冲头

即使冲头实际上近似地以常速度运动,但希望能采用一个允许毛坯更平滑地加速的不同幅值。当考虑用什么样的加载幅值时,要切记平滑对于准静态的所有方面都是重要的。最佳方法是在期望的时间里尽可能平滑地将冲头移动期望的距离。我们将采用两种方法来分析并比较第一个成型阶段的计算结果,即用 0.45 m/s 常冲压速度和用 SMOOTH STEP 定义的平滑上升冲压速度。

计算时间

在运行加工分析以前,希望知道这个分析将需要多少增量,也就是需要多少计算时间。您可以运行一个 datacheck(数据检查)分析来获得初始稳定时间增量的大概值,或者用 7.3 节中的关系式估计出来。如果知道了稳定时间增量,在这种情形中稳定时间增量不会在增量和增量之间改变很大,就可以确定完成这个成型阶段需要多少增量。一旦分析开始,就可以知道每一个增量需要多少 CPU 时间,这样也就知道整个步骤需要多少 CPU 时间。

由 7.3 节中的关系式可知这个分析的稳定时间增量大致为 1×10^{-7} s。因此,对于这个步骤时间为 0.033 s 的成型阶段大致需要 330 000 个增量。

输出

对于确定所进行的分析和准静态假定之间接近程度如何,各种能量历史是非常有用的。特别有用的是对比动能和内应变能。另外一个有用的是典型节点处的速度历史图。在前面已经生成了节点集 NHIST,它包含所希望获得的速度历史的节点。这样的输出给出在解中存在的任何速度峰值的严重性(程度)。也应让 ABAQUS 往重新启动文件中输出状态信息。对于第一次尝试,要求每隔 20 个时间间隔输出一次状态信息。一旦对第一个成型阶段有了更大的信心,就可以降低这个间隔值。定义刚体 PUNCH1 的参考节点作为监视节点。

7 5 8 成型阶段 1 中尝试的综述

对于第一个成型阶段,我们将进行三个渐进的尝试来获得一个合适的解。在第一次尝试中以常速度来移动冲头。为了减小第一次尝试中严重的振荡,在第二次尝试中我们通过将 * AMPLITUDE 选项中的 DEFINITION 参数设置为 SMOOTH STEP 来将冲头速度的幅值平滑化。为了进一步去除高频振荡,在第三次尝试中引入刚度比例阻尼。第三次尝试的结果是可接受的,所以后面将它用来作为与改变质量放大比例的分析对比的基本解。如果不想运行不能生成合适的解的分析,那就阅读关于第 1 和第 2 次尝试的讨论而只运行第 3 次尝试。

每一次尝试的过程定义包括同样的接触定义和输出要求。过程定义以 * STEP 选项、* DYNAMIC EXPLICIT 分析程序和总步骤时间为基频对应周期的 10 倍,即 0.033 s 开始。

```
* STEP
* DYNAMIC, EXPLICIT
, .033
```

刚体模具的表面必须朝向毛坯,而毛坯的上下表面必须分别朝向冲头 1 和压模 1。

```
* SURFACE DEFINITION, NAME = PUNCH1
PUNCH1, < SPOS 或 SNEG >
* SURFACE DEFINITION, NAME = DIE1
DIE1, < SPOS 或 SNEG >
* SURFACE DEFINITION, NAME = BLANK. TOP
BLANK, < SPOS 或 SNEG >
* SURFACE DEFINITION, NAME = BLANK. BOT
BLANK, < SPOS 或 SNEG >
* CONTACT PAIR, INTERACTION = INTER
PUNCH1, BLANK. TOP
DIE1, BLANK. BOT
```

将所有接触表面之间的摩擦系数均定义为 0.1。

```
* SURFACE INTERACTION, NAME = INTER
* FRICTION
.1,
```

将下面的一行加进输入文件中,从而让分析每 10 个时间间隔写一次重新启动文件:

```
* RESTART, WRITE, NUMBER INTERVAL = 10
```

每 1×10^{-5} s 输出一组节点集 NHIST 的速度和位移以及能量历史。

```
* HISTORY OUTPUT, TIME INTERVAL = 1.E - 5
* NODE HISTORY, NSET = NHIST
U, V
```

```
* ENERGY HISTORY  
ALLKE, ALLIE, ALLWK, ALLVD,  
* END STEP
```

7 5 9 成型阶段 1——第 1 次尝试

将下面模拟冲头以 0.45 m/s 的常速移动的幅值加进模型定义中：

```
* AMPLITUDE, NAME = FORM1  
0., 0., .033, 1.
```

将下面的给定位移边界条件加入到过程定义中：

```
* BOUNDARY, TYPE = DISPLACEMENT, AMPLITUDE = FORM1  
REFP1, 2, 2, -0.015
```

将输入数据存为文件 draw-stage1-attempt1.inp。运行分析并转换结果。完成分析可能需要 30 分钟或更多时间。

评价结果的策略

在观察最终感兴趣的结果如应力和变形形状之前,我们需要确定这个解是否足够接近可接受的准静态解答。一个好方法是将动能与内能的历史进行对比。在金属成型分析中绝大部分的内能是由塑性变形造成的。由于冲头 1 没有质量,而毛坯是唯一有质量的物体,所以动能仅是由毛坯的运动引起的。为了表明解是可接受的准静态解,毛坯的动能应该不超过内能的几个百分点。为了更精确,尤其是当对回弹应力感兴趣的时候,动能应该更低。由于这种方法适用于各种金属成型过程,不需要任何对模型应力的直观理解,而且很多成型过程可能很复杂而不可能产生直观的结果,所以这种方法特别有用。

尽管动能与内能的比值是检验准静态分析的一个好的主要的标准,但仅靠它还不足以确认解的质量。还应该单独地评价这两个能量以确定它们是否合理。由于回弹应力解的准确性高度依赖于塑性解的准确性,所以当需要准确的回弹应力解时这部分评价就更加重要。即使动能相当小,如果其振荡很利害,那么模型也可能经历显著的塑性。一般而言,我们期望平滑的加载以获得平滑的结果,如果加载是平滑的而能量结果是振荡的,结果可能就不准确。由于能量比不能显示这种行为,因此还应该研究动能历史本身,看它是平滑的还是振荡的。

如果动能不能表明是准静态的行为,那看一看一些节点处的速度历史,了解一下模型不同区域的行为是很有用的。这种速度历史可以说明模型的哪一部分是振动的,会使动能很高。

评价第 1 次尝试的结果

在 ABAQUS/ Post 中画出动能曲线(图 7-14)和内能曲线(图 7-15)。

```
* SELECTED RESULTS FILE, FILE = draw-stage1-attempt1  
* SET, HISTORY = SELECTED RESULTS FILE
```



```

* SET, XY REPORT = OFF
* GRAPH LEGEND, OFF
* READ CURVE, VARIABLE = ALLKE, NAME = KE, FREQUENCY = 5
* GRAPH AXES, YTITLE = KINETIC ENERGY, XTITLE = TIME
* DISPLAY CURVE
> KE
>
* READ CUEVE, VARIABLE = ALLIE, NAME = IE, FREQUENCY = 5
* GRAPH AXES, YTITLE = INTERNAL ENERGY, XTITLE = TIME
* DISPLAYCURVE
> IE
>

```

图 7-14 成型阶段 1 第 1 次尝试的动能历史

将 FREQUENCY 参数设置成等于 5 是为了防止图中的任何高频振荡仅仅是一块黑色区域。

对比图 7-14 和图 7-15, 可以看出除了分析刚刚开始的部分外, 分析的大部分过程中动能仅是内能的一小部分(小于 1%)。即使是在这个苛刻的加载情形中, 也满足了动能相对于内能必须很小的判据。

图 7-14 说明动能历史在变得平滑以前的前半步中振荡很严重。接近分析结束时动能历史又变成有振荡的了。动能历史和毛坯成型没有清楚的关系显示出分析的不准确性。在这个分析中冲头速度保持常数, 由于冲头没有质量, 动能完全是由毛坯引起的, 且远不是常数。

图 7-15 所示为内能历史。尽管不清楚为什么斜率在第 8 秒时改变, 但如果不需要对

图 7-15 成型阶段 1 第 1 次尝试的内能历史

内能进行任何进一步比较的话,内能历史看起来是合理的。

由于动能历史振荡很严重,所以看一看模型中某节点处的速度历史来了解一下毛坯的运动是有用的。画出节点集 NHIST 中的第一个节点即毛坯中间区域的一个节点处的竖直(V2)速度历史(图 7-16)。

图 7-16 成型阶段 1 第 1 次尝试中节点集 NHIST 中第一个节点处的速度历史

```

* READ CURVE, NAME = DISP, VARIABLE = V2, NODE = NHIST,
FREQUENCY = 5
* GRAPH AXES, YTITLE = VELOCITY, XTITLE = TIME
* DISPLAY CURVE
> DISP. 1
>

```

尽管冲头速度为常数,但节点速度振荡达 $\pm 10 \text{ m/s}$ 。在这个例子中由于材料具有塑性,所以这样高的振荡水平会对结果有很强的影响。这些结果说明我们必须通过某种方式改变模拟以获得更为平滑的响应。

7 5 10 成型阶段 1——第 2 次尝试

在第 2 次尝试中将冲头的速度幅值平滑化。用 SMOOTH STEP 幅值定义来取代常速移动冲头。关于这种幅值定义的解释请参阅 7.2.1 节。通过指定步骤开始时刻的幅值为 0.0 和步骤结束时刻的幅值为 1.0, ABAQUS/Explicit 生成一个一阶和二阶导数均平滑的幅值定义。因此,将 SMOOTH STEP 用于位移控制以保证使速度和加速度也均为平滑。将幅值定义作如下改变:

```

* AMPLITUDE, NAME = FORM1, DEFINITION = SMOOTH STEP
0., 0., 0.033, 1.

```

将修改后的输入数据存入文件 draw_stage1_attempt2.inp。运行分析并转换结果。完成这个分析可能需要 30 分钟或更长的时间。

评价第 2 次尝试的结果

图 7-17 所示动能历史尽管与第 1 次尝试中有所不同,但振荡仍然很大。在 20 ms 时振荡消失,动能降到零。

第 2 次尝试的内能如图 7-18 所示,和第 1 次尝试中的相似。内能历史有几个无法解释的拐点,而不是所期望的平滑地增大。这一次,动能和内能的比值也相当小,达到了可以接受的水平。

对很多成型分析而言,像第 2 次尝试中采用的那种平滑的加载速度足以产生准静态的成型步骤。然而,由于在这个特殊的成型过程中没有对毛坯进行夹持,因此其行为在某种程度上不如很多其它的成型过程好。图 7-19 所示为包含毛坯自由端节点的节点集 BEND 的速度历史。由于没有约束毛坯的末端,因此节点振动的特别利害。如果这个成型过程对毛坯进行夹持,第 2 次尝试很可能就会产生合适的结果。然而,由于这个过程缺少这种约束,我们必须做进一步的改动以产生一个合适的准静态解。

7 5 11 成型阶段 1——第 3 次尝试

为了降低主要是由于毛坯自由端的振动而引起的高频振荡,在毛坯的材料定义中加入刚度比例阻尼。由于增大刚度比例阻尼会降低稳定时间增量,进而增加计算时间,所以尽可能使用能获得期望解的最小量的阻尼。

图 7-17 成型阶段 1 第 2 次尝试的动能历史

图 7-18 成型阶段 1 第 2 次尝试的内能历史

（另外一种类型的材料阻尼是质量比例阻尼，这种阻尼一般用于降低低频振荡。加入质量阻尼类似于在粘性流体中进行成型过程。在金属成型分析中使用质量比例阻尼难以确定质量比例阻尼是否对解答有不利的影晌。因此，除非绝对必要，我们不鼓励在成型分析中使用质量比例阻尼。）

图 7-19 成型阶段 1 第 2 次尝试中节点集 BEND 的速度历史

为了避免明显减低稳定时间增量,刚度比例阻尼因子 β_R 应该小于无阻尼时的初始稳定时间增量或者在同一个量级。由于在状态文件中报告的第 2 次尝试的初始稳定时间增量为 $1.05E-7$,所以在第 3 次尝试中用下面的刚度比例阻尼:

* DAMPING, BETA = 1.E-7

选项 * DAMPING 必须形成这个问题的材料定义的一部分。

将修改后的输入数据存入文件 draw - stage1 - attempt3.inp,然后运行分析。

评价第 3 次尝试的结果

图 7-20 所示的动能历史尽管仍有一些高频振荡,但比前一次尝试中的结果平滑了许多,而且对应的冲头速度也大大优于前一次。

图 7-21 所示的内能历史从零平滑地增大到其最终值。而且动能与内能的比值也很小。这些结果看起来是可接受的。

7 5 12 三次成型尝试的讨论

在继续进行成型过程的回弹分析以前,我们先讨论一下从成型阶段 1 的三次尝试中学到了些什么。

我们评价结果是否合适的初始判据是动能与内能相比应该很小。我们发现即使是最苛刻的情形即第 1 次尝试中,这个判据也都能够满足。对于具有更好约束的许多成型分析而言——例如对毛坯进行夹持——动能跟内能的比值保持很小,可能是获得成型问题准确解的适当条件。然而,在这个模拟中高频振动对解有很强的影响,使毛坯的内能增大

图 7-20 成型阶段 1 第 3 次尝试的动能历史

图 7-21 成型阶段 1 第 3 次尝试的内能历史

了一倍,如图 7-22 所示。如果不对这些振动进行减振,解就不是准静态的解。

另外的非常有用而且必要的要求是动能和内能的历史必须合适而且合理,但是这也增加了评价结果的主观性。由于这些条件对成型过程的行为要求有直观的认识,因此对更复杂的成型过程强加这些条件一般会很困难。

图 7-22 成型阶段 1 三次尝试的内能比较

成型阶段 1 的结果

既然我们认为第一个成型阶段的准静态解已经合适,那么现在研究一下其它感兴趣的结果。图 7-23 所示的 SF1 等值线图是单元整个厚度上径向即局部 1 - 方向上力的和。

```
* RESTART, FILE = draw. stage1. attempt3
* SET, CTICKMARK = ON, AXES = OFF
* DETAIL, ELSET = BLANK
* CONTOUR, VARIABLE = SF1
```

图 7-23 成型阶段 1 第 3 次尝试的 SF1(径向截面力)等值线图

这个等值线图显示在接近对称线的平坦区域 SF1 基本上是常数, 约为 3.4×10^4 。由于是均匀的拉伸, 所以我们期望这个区域的 SF1 是较高的正值。由于毛坯是以一种平滑的方式进行成型, 所以我们期望 SF1 像图中的那样变化平滑。朝向毛坯的自由端 SF1 降得越来越低也是合理的。实际上, 在自由端处径向力必须像图中的那样降为零。

图 7-24 所示为壳厚度 STH 的等值线图。在分析开始时毛坯有一个均匀的壳厚度 0.5 mm。第 1 个成型阶段结束时, 由于这个区域产生了最大量的拉伸, 毛坯在圆角区域变薄了。平坦区域厚度变化很小的原因是由于这个区域拉伸很轻。有趣的是实际上壳在毛坯的竖直区域变厚了。这是由于毛坯的自由端在成型的过程中向对称线移动了许多的缘故, 这种行为是合理的。

图 7-24 成型阶段 1 第 3 次尝试中 STH(壳的厚度)的等值线图

图 7-25 成型阶段 1 第 3 次尝试中 SF2(环向的截面力)的等值线图

另外一个感兴趣的变量是环向合力 SF2。如果这个力是很强的压缩力,那完全三维的解可能会预测出起皱。图 7-25 显示毛坯的自由端环向力是数值为 1.85×10^5 N 很强的压缩,这说明在自由端附近可能会起皱。

7 5 13 加速分析的方法

既然我们已经得到第一个成型阶段合适的解,那么我们可以试着用更少的计算时间去获得类似的合适结果。由于成型事件的实际时间周期对显式动态标准而言很大,所以大部分的成型分析需要太多的计算时间以至于不能在其物理时间范围内运行,在合理计算的时间内运行分析常常需要改动输入文件以减少分析的计算花费。减少分析的计算花费有两种方法:

1. 人为地提高冲压速度以使同样的成型过程在较短的时间内发生。这种方法称为“加载速率放大”。
2. 人为地增大单元的质量密度以增大稳定性限制时间,从而使分析采用较少的增量。这种方法称为“质量放大”。

除非模型中有率相关材料或阻尼,这两种方法的效果是相同的。我们的模型中没有率相关材料,但在第二个成型阶段中由于用了阻尼器而引入了率相关阻尼。由于放大加载速率会改变速度,进而会改变阻尼器中的力,所以我们将改用质量放大的办法,这样不会影响阻尼器中的力。

确定合适的质量放大

在 7.2 节和 7.3 节中讨论了如何确定用于加速准静态分析的可接受的加载速率放大或质量放大。目的是在最短的时间周期内模拟惯性力保持不显著的过程。当能够获得有意义的准静态解时,对于求解所花费的时间能够增长多少是有限度的。

像在 7.2 节中讨论的那样,我们可以用类似于确定合适的加载速率放大因子同样的方法来确定合适的质量放大因子。这两种方法之间的差别是加载速率放大因子 f 和质量放大因子 f^2 具有相同的作用。最初时我们假定步骤时间为毛坯基频周期的 10 倍就足以产生准静态的结果。通过研究模型的能量以及其它的结果,我们满意地认为这些结果可以接受。这种技术产生的冲压速度大约为 0.5 m/s ,这是典型的实际冲压速度。现在我们用质量放大的方法加速求解时间,并与没有质量放大的解进行对比,以确定放大后的解是否可以接受。我们假定放大只能降低而不是改进结果的质量。目的是用放大减少计算时间但仍产生可接受的结果。

我们的目的是确定多大的放大值仍能产生可接受的结果,以及什么值使放大后的结果变得不能接受。将加载率放大 10 倍产生的步骤时间等于基频的时间周期,是我们前面假定的步骤时间的下限。为了看一看合适的放大因子和不合适的放大因子的效果,我们研究范围从 10 到 30 的放大因子;特别是,我们专门挑选 10、10 和 30,这些加速因子分别转换成质量放大因子 10、100 和 900。

将下面的选项加进过程定义来施加 10 倍的质量放大。

* FIXED MASS SCALING, FACTOR = 10

将更改过的输入数据存为文件 draw . stage1 . attempt3 . sqrt10 .inp, 运行质量放大因子分别为 100 和 900 的 draw . stage1 . attempt3 . 10 .inp 和 draw . stage1 . attempt3 . 30 .inp。

首先我们观察质量放大对应力结果和位移形状的影响。然后我们考察能量历史是否提供了分析质量的一般指示。

评价质量放大的结果

在这个分析中我们感兴趣的结果之一是径向截面力 SF1。由于我们已经看到过图 7-23所示的没有放大的分析结束时 SF1 的等值线图, 因此我们可以将每一个放大分析的结果与没有放大的分析结果进行对比。这些“点刻度”的等值线图以点刻度的形式沿着变形后的网格显示结果。因此, 这些 SF1 等值线图也提供了网格变形后的形状。图 7-26 所示为加速 10(质量放大为 10)倍时的 SF1, 图 7-27 所示为加速 10(质量放大为 100)倍时的 SF1, 而图 7-28 所示为加速 30(质量放大为 900)倍时的 SF1。这些图说明加速为 10 倍时产生的结果和没有放大时的结果很相似。加速为 10 倍时结果虽然也相似, 但对称轴处的应力有明显的下降。加速为 30 倍时的应力结果变得大不一样, 说明这样的加速水平非常明显地偏高。

图 7-26 加速为 10(质量放大为 10)倍时的截面力 SF1

既然已经知道质量放大如何影响一些应力结果, 那么我们现在观察能量历史是否能够提供同样的分析质量的指示。所有放大分析的动能和内能历史如图 7-29 所示。三种情况的内能几乎完全一致, 而动能从加速为 10 倍时近乎为零增大到加速为 30 倍时的最大值约为 10 .0。

加速方法讨论

随着质量放大的增加, 求解时间缩短。由于动态效应逐渐变得显著, 解的质量也下降, 但是通常有一些放大水平能改善求解时间而不牺牲结果。很明显, 对这个分析来讲 30 倍的加速太大, 不能产生准静态的结果。

图 7-27 加速为 10(质量放大为 100)倍时的截面力 SF1

图 7-28 加速为 30(质量放大为 900)倍时的截面力 SF1

较小的加速如 10 倍对结果的改动不大。这种结果适合于大部分的应用,包括回弹分析。放大因子为 10 时结果的质量开始降低,而结果的大体幅值和趋势没有变化,相应的,内能与动能的比值增大得很明显。这种情形的结果适合于大多数应用,但对准确的回弹分析不适用。值得提醒的是,放大因子为 10 使得成型的步骤时间减小到 0.0033,而这是我们前面由频率分析得到的这个成型阶段时间周期的下限。从这个研究可以看出这个时间周期是合适的加速和过高加速之间的分界线。用 ABAQUS/Standard 进行第 1 个成型阶段后的回弹分析。

尽管可以应用 ABAQUS/Explicit 进行回弹分析,但对于回弹分析 ABAQUS/Standard 的效率要高得多。由于回弹分析是没有外载或接触的简单静态模拟,ABAQUS/Standard 在几个增量内就可以得到回弹解。相反,ABAQUS/Explicit 必须在足够长的时间上运行分析,以使所得到的动态解达到稳态。为了提高效率,ABAQUS 具有在 ABAQUS/Explicit 和 ABAQUS/Standard 之间输入输出结果的功能,这使得我们能够应

图 7-29 加速为 10、10 和 30 倍(分别对应于质量放大因子为 10、100 和 900)
时动能和内能的历史

用 ABAQUS/ Explicit 进行成型分析而利用 ABAQUS/ Standard 进行回弹分析。

我们要生成一个从加速为 10 倍(质量放大为 10, draw- stage1- attempt3- sqrt10 .inp)的分析中输入结果的新输入文件, 然后进行回弹分析。

模型定义

* HEADING 后面的第一个选项是 * IMPORT, 用来从对应的 ABAQUS/ Explicit 分析中读入单元定义和状态。import 输入文件的开头部分应该和下面的一样:

```
* HEADING
Deep drawing of a can bottom - - first springback
ABAQUS/ Standard springback following
draw- stage1- attempt3- sqrt10 .inp
SI units (kg, m, s, N)
* IMPORT, STEP = 2, INTERVAL = 10, STATE = YES, UPDATE = NO
BLANK,
* IMPORT ELSET
BLANK,
* IMPORT NSET
BSYM, NHIST
```

将 STATE 参数设置成等于 YES 会输入模型的状态——应力、应变等。将 UPDATE 参数设置成等于 NO 使得应变和位移也输入进来而不是重置为零。* IMPORT 选项后的数据行提供包含要输入单元的单元集的名字。* IMPORT ELSET 选项后的数据行列

出了要输入的单元集名;而 * IMPORT NSET 选项后的数据行则列出了要输入的节点集名。

过程定义

边界条件是不能输入的,因此必须重新定义边界条件。施加和 ABAQUS/ Explicit 输入文件中相同的对称边界条件。

```
* BOUNDARY
BSYM, 1
BSYM, 6
```

对于输出,只将模型最终的状态写入重新启动文件。

```
* RESTART, WRITE, FREQUENCY = 999
```

由于没有施加任何荷载,所以过程定义十分简单。采用下面的过程定义:

```
* STEP, NLGEOM
* STATIC
.1, 1 .
* BOUNDARY, FIXED
BSYM, 2, 2
* NODE FILE, FREQUENCY = 999
U,
* EL FILE, FREQUENCY = 999
S,
* END STEP
```

在 * STEP 选项中使用了 NLGEOM 参数,因为我们不知道几何非线性是否会影响结果,加上 NLGEOM 参数使计算更加安全。为了去除刚体运动,将毛坯在 2 - 方向上固定是必要的。只需在一点上固定毛坯,例如节点集 BSYM 处,因此,引入了不必要的约束。在 * BOUNDARY 选项中使用 FIXED 参数是很重要的,这样就将 BSYM 固定在第 1 个成型阶段结束时该点所在的位置上。如果省略了 FIXED 参数,BSYM 就会回到它在变形前的初始位置。或者将 BSYM 固定在前一阶段结束时它的最终位置或是将它移回到其没有变形前的位置所产生的回弹结果是一样的,但将 BSYM 固定在它的最终位置可以使毛坯位置在这个模拟的各个阶段间保持必要的连续性。

将您的输入数据存成文件 draw - spring1 - std .inp,然后用下面的命令运行分析:

```
abaqus job= draw.spring1.std.inp oldjob=draw.stagel.attempt3.sqrt10
```

回弹分析的结果

图 7-30 所示为 ABAQUS/ Standard 中回弹分析结束时的 SF1 等值线图。这些结果必然依赖于前面成型阶段的精确性。实际上,回弹结果对成型阶段的错误非常敏感,这一点比成型阶段的结果本身的敏感性更强。

图 7-30 ABAQUS/ Standard 中回弹后的 SF1 等值线图

7 5 14 退火和第 2 个成型阶段

既然我们已经对加速为 10 倍(质量放大为 10)的第 1 个成型阶段的结果以及对应的回弹结果满意,那么我们就继续用 ABAQUS/ Explicit 进行退火和第 2 个成型阶段的模拟。我们将生成一个从 ABAQUS/ Standard 中输入最终回弹条件的新输入文件,然后从这一点继续进行分析。

模型定义

从回弹分析的最后一个增量输入模型。将 STATE 参数设置成等于 YES 以使得模型的应力、应变状态也输入进来。将 UPDATE 参数设置成等于 NO 以使位移连续。用下面的 * HEADING 和 * IMPORT 选项块开始重新启动文件:

```
* HEADING
Deep drawing of a can bottom - - stage 2
ABAQUS/ Explicit annealing and forming stage 2 following
draw.spring1.std.inp
SI units (kg, m, s, N)
* IMPORT, STEP = 1, INCREMENT = 6, STATE = YES, UPDATE = NO
BLANK,
```

由于从 ABAQUS/ Standard 分析中输入的只有毛坯,所以您必须定义图 7-11 所示的成型阶段 2 中所用的刚体模具和必要的节点和单元集。

```
* RIGID BODY, ELSET = PUNCH2, REF NODE = < 参考节点集 >
* RIGID BODY, ELSET = DIE2, REF NODE = < 参考节点集 >
* RIGID BODY, ELSET = DOMER, REF NODE = < 参考节点集 >
```

还必须定义安放压模 2 用的弹簧和阻尼器。将它们分别定义成一个 SPRINGA 单元和一个 DASHPOTA 单元,这两个单元的一端跟压模 2 的参考节点(节点集 REFD2)连接在一起,另一端和地面(节点集 SPEND)系在一起。

```
* ELEMENT, TYPE = SPRINGA, ELSET = SPRING
< 单元号 > , < REFD2 的节点号 > , < SPEND 的节点号 >
* SPRING, ELSET = SPRING
2
6 .3E6
* ELEMENT, TYPE = DASHPOTA, ELSET = DASHPOT
< 单元号 > , < REFD2 的节点号 > , < SPEND 的节点号 >
* DASHPOT, ELSET = DASHPOT
2,
1 .E4,
```

为压模 2 定义 10 kg 的质量。

```
* ELEMENT, TYPE = MASS, ELSET = MASS
< 单元号 > , < REFD2 的节点号 >
* MASS, ELSET = MASS
10 .,
```

必须定义后处理所需要的节点集：

```
* NSET, NSET = REF
REFP2, REFD2, REF'DOMER, SPEND
```

在过程进行之前,必须通过定义一个只包括模具刚体运动的简单步骤来确信刚体模具被放到了合适的位置。由于在这第一步中只有刚体运动,这一步骤的时间可以很短。我们选择步骤时间为 1×10^{-6} s。在输入文件的模型定义部分加入下面的幅值定义：

```
* AMPLITUDE, NAME = RIGID, DEFINITION = SMOOTH STEP
0 ., 0 ., 1 .E - 6, 1 .
```

另外,为成型阶段定义一个幅值：

```
* AMPLITUDE, NAME = FORM2, DEFINITION = SMOOTH STEP
0 ., 0 ., .033, 1 .
```

过程定义

由于 * ANNEAL 步骤不能作为 ABAQUS/ Explicit 输入分析中的第一步,所以通过刚体模具定位来开始过程定义。将模具移动到位是相当简单的,在不知道回弹后毛坯形状的情况下要将模具定位到合适的位置是很困难的。在第一个成型阶段结束时毛坯的位置是知道的:毛坯被冲压了 0 .015 m 的深度,并被夹持在位置已知的两个刚体模具之间。然而,在回弹过程中毛坯不再受刚体模具的约束而自由地变形,以使其内部应变能降到最小。回弹过程中的形状改变使得在为第二个成型阶段定位刚体模具以前用 ABAQUS/

Post 看一下回弹后的变形形状很有必要。

在第一步后强制接触对之间不能有过盈接触,如果有过盈接触存在,那么过盈接触就会在一个增量里被解除掉。解除过盈接触导致在发生过盈接触节点上施加一个大的速度,这使相关的单元发生畸变并且显著地增大动能。另一方面,如果在步骤开始时刚体和毛坯之间离得很远,就会因为在毛坯不发生变形时运行分析而浪费计算时间。

在 ABAQUS/ Post 中用 * REPORT NODE 命令确定回弹结束时毛坯上某些节点的坐标,目的是为了在第二个成型阶段中将刚体定位到和变形了的毛坯尽可能的接近而又不发生过盈接触。即使是最轻微的过盈接触也会引起分析中的问题。由于 ABAQUS/ Explicit 在进行接触计算时考虑当前的壳厚度,所以在定位刚体时必须考虑壳的厚度。在这个成型过程中,冲头 2 和压模 2 的弯曲部分设计成同心弧,将毛坯夹在中间。冲头 2 的半径为 0.006 m,它与毛坯的内圆角接触,回弹后此内圆角的半径也近似为 0.006 m。压模 2 的半径为 0.0065 m,它与毛坯的外圆角接触。已知毛坯厚度约为 0.0005 m,因此其半径也大致为 0.0065 m。* DIAGNOSTICS 选项和参数 CONTACT INITIAL OVERCLOSURE=DETAIL 和 DEFORMATION SPEED CHECK=DETAIL 用于提供可能的初始过盈接触和由此造成的过高变形速度的详细信息。

用名字为‘ RIGID ’的幅值定义和位移边界条件将刚体移动到位。由于定位步骤的最终速度就是第二个成型阶段的初始速度,所以定位步骤结束时速度为零很重要。用下面的步骤为第 2 个成型阶段定位刚体:

```
* STEP
* DYNAMIC, EXPLICIT
, 1.E - 6
* RESTART, WRITE, NUMBER INTERVAL= 1
* BOUNDARY, TYPE = VELOCITY
BSYM, 1, 2, 0.
BSYM, 6, 6, 0.
REFDOME, 1, 1, 0.
REFDOME, 6, 6, 0.
REFD2, 1, 1, 0.
REFD2, 6, 6, 0.
SPEND, 1, 1, 0.
REFP2, 1, 1, 0.
REFP2, 6, 6, 0.
* BOUNDARY, AMPLITUDE = RIGID
REFDOME, 2, 2, <用户定义的值>
REFD2, 2, 2, <用户定义的值>
SPEND, 2, 2, <用户定义的值>
REFP2, 2, 2, <用户定义的值>
* DIAGNOSTICS, CONTACT INITIAL OVERCLOSURE = DETAIL,
DEFORMATION SPEED CHECK = DETAIL
```



```

* HISTORY OUTPUT, TIME INTERVAL = 1.E - 5
* NODE HISTORY, NSET = REF
U,
RF,
* END STEP

```

在物理上,退火是将金属零件高温加热的过程,以使微结构重结晶从而去除由于材料的冷作硬化而引起的位错。 * ANNEAL 程序去除所有可变形单元的应力和塑性应变而不改变壳的厚度和变形形状。退火前后的材料性质假设一样。由于不允许有荷载和输出要求, * ANNEAL 步骤非常简单。整个 * ANNEAL 步骤如下所示:

```

* STEP
* ANNEAL
* END STEP

```

在第二个成型阶段中,变形了的毛坯夹持在冲头 2 和压模 2 之间,压模 2 安放在一个弹簧和一个阻尼器上。随着冲头 2 在负 2 - 方向上移动 0.010 m,毛坯被强制也在负 2 - 方向上移动,在毛坯的平坦区域对着静止拱顶压模进行挤压。在第二个成型阶段结束时毛坯以前平坦的区域变成了拱顶形状,而竖直的区域仍保持和第一个成型阶段一样。由于分析和第一个成型阶段类似,所以假定和第一个成型阶段一样的可接受的加载速率、阻尼和质量放大。

将下面的第 2 个成型阶段加入输入文件:

```

* STEP
* DYNAMIC, EXPLICIT
, .033
* RESTART, WRITE, NUMBER INTERVAL = 10
* DIAGNOSTICS, CONTACT INITIAL OVERCLOSURE = DETAIL,
DEFORMATION SPEED CHECK = DETAIL
* SURFACE DEFINITION, NAME = BLANK. TOP
BLANK, < SPOS 或 SNEG >
* SURFACE DEFINITION, NAME = BLANK. BOT
BLANK, < SPOS 或 SNEG >
* SURFACE DEFINITION, NAME = PUNCH2
PUNCH2, < SPOS 或 SNEG >
* SURFACE DEFINITION, NAME = DIE2
DIE2, < SPOS 或 SNEG >
* SURFACE DEFINITION, NAME = DOMER
DOMER, < SPOS 或 SNEG >
* CONTACT PAIR, INTERACTION = INTER
PUNCH2, BLANK. TOP
DIE2, BLANK. BOT
DOMER, BLANK. BOT

```

```

* SURFACE INTERACTION, NAME = INTER
* FRICTION
.1,
* BOUNDARY, TYPE = DISPLACEMENT, AMPLITUDE = FORM2, OP = NEW
REFP2, 2, 2, - 0.010
* BOUNDARY, TYPE = VELOCITY, OP = NEW
REFP2, 1, 1, 0.
REFP2, 6, 6, 0.
REFD2, 1, 1, 0.
REFD2, 6, 6, 0.
SPEND, 1, 2, 0.
REFDOMER, 1, 6, 0.
BSYM, 1, 1, 0.
BYSM, 6, 6, 0.
* MONITOR, NODE = < REFD2 的节点号 >, DOF = 2
* HISTORY OUTPUT, TIME INTERVAL = 1.E - 5
* NODE HISTORY, NSET = NHIST
V,
* NODE HISTORY, NSET = REF
U, V
RF,
* ENERGY HISTORY
ALLKE, ALLIE, ALLWE
* EL HISTORY, ELSET = SPRING
S11,
* EL HISTORY, ELSET = DASHPOT
S11,
* END STEP

```

将输入数据存成文件 draw - stage2 .inp。用下面的命令运行分析并转换结果：

```

abaqus job = draw - stage2 oldjob = draw - spring1 - std analysis convert = all

```

评价成型阶段 2 的结果

必须像第一个成型阶段后那样再一次评价结果的质量,以确保没有会对分析造成损害的严重的动态效应。由于所用的方法和检查第一个成型阶段的结果时的一样,在这里我们将不再讨论检查结果的细节。某些要检查的事情为动能、ALLKE 的历史和压模 2 参考节点的速度。

冲头 2 挤压着毛坯向下运动,而毛坯又挤压压模 2 使其向下移动。由于在步骤开始时物体之间可能没有精确地接触着,因此物体相互作用时可能会有一些冲击。由于压模 2 安放在弹簧和阻尼器上,因此当毛坯冲击压模 2 时,即使是很小的速度压模 2 也会振动。尽管最好尽可能地避免这些振动,但这些振动对结果影响不大,这是因为主要的变形

发生在拱顶区域。模型在第二个成型阶段后的形状如图 7-31 所示。

图 7-31 第 2 个成型阶段后的模型形状

7 5 15 应用 ABAQUS Standard 进行第 2 个成型阶段后的回弹分析

应用 ABAQUS/ Standard 进行第 2 个成型阶段后的回弹分析。应用 ABAQUS/ Standard 运行和第一次回弹分析一样的分析。实际上,您只需将 * IMPORT 选项块改动如下:

```
* IMPORT, STEP = 4, INTERVAL = 10, STATE = YES, UPDATE = NO
BLANK,
```

将回弹分析输入数据存成文件 draw - spring2 - std .inp, 然后用下面的命令运行回弹分析:

图 7-32 应用 ABAQUS Standard 进行最后的回弹分析后的 SF1 等值线图

```
abaqus job= draw- spring2- std oldjob= draw- stage2
```

图 7-32 所示为应用 ABAQUS/ Standard 进行最后回弹分析后的 SF1 等值线图。图 7-33 所示为回弹分析后盆底的最终形状。

图 7-33 盆底的最终形状

7 6 小结

- 如果在固有时间范围内进行准静态分析,那么结果应该和真正的静态结果非常接近。
- 采用加载速率放大或质量放大的方法来达到用较少的 CPU 时间获得准静态解常常是必要的。
- 只要解不发生局部化,加载速率常常可以提高一些。如果加载速率提高得过高,那么惯性力会对解产生不利的影响。
- 质量放大是提高加载速率的一种替代方法。当使用率相关材料时,由于加载速率会人为地改变材料性质,所以质量放大是首选的方法。
- 在静态分析中结构的最低模态控制着响应。如果知道最低的自然频率和对应的最低模态的周期,就可以估计出获得适当的静态响应所需的时间。
- 运行一系列加载速率不同的分析以确定一个合适的加载速率可能是必要的。
- 在模拟的大部分过程中变形材料的动能不能超过其内能的一个小的比例(一般地为 5% ~ 10%)。
- 使用带 DEFINITION = SMOOTH STEP 参数的 * AMPLITUDE 选项是描述准静态分析中的位移的最有效方法。
- 如果在除了第一步骤以外的任何步骤开始时存在着过盈接触,过盈接触就会在一个增量里被修正掉。这种修正可能会引起大的速度和严重的单元畸变。
- 将模型从 ABAQUS/ Explicit 输入到 ABAQUS/ Standard 中以进行有效的回弹分析。
- 将模型从 ABAQUS/ Standard 输入到 ABAQUS/ Explicit 中以进行回弹分析后的其它成型阶段的分析。

附录 A 例子输入文件

对于包含在本指南中的例子,本附录提供了完整的输入文件表。在本指南中所解释的其余输入文件,在这里虽然没有列出,但是在附录中每一段的末尾给出了说明。

Additional input files not listed in this appendix:

- draw . stage1 . attempt2 .inp
- draw . stage1 . attempt3 .inp
- draw . stage1 . attempt3 . sqrt10 .inp
- draw . stage1 . attempt3 . 10 .inp
- draw . stage1 . attempt3 . 30 .inp
- draw . stage2 .inp
- draw . spring2 . std .inp