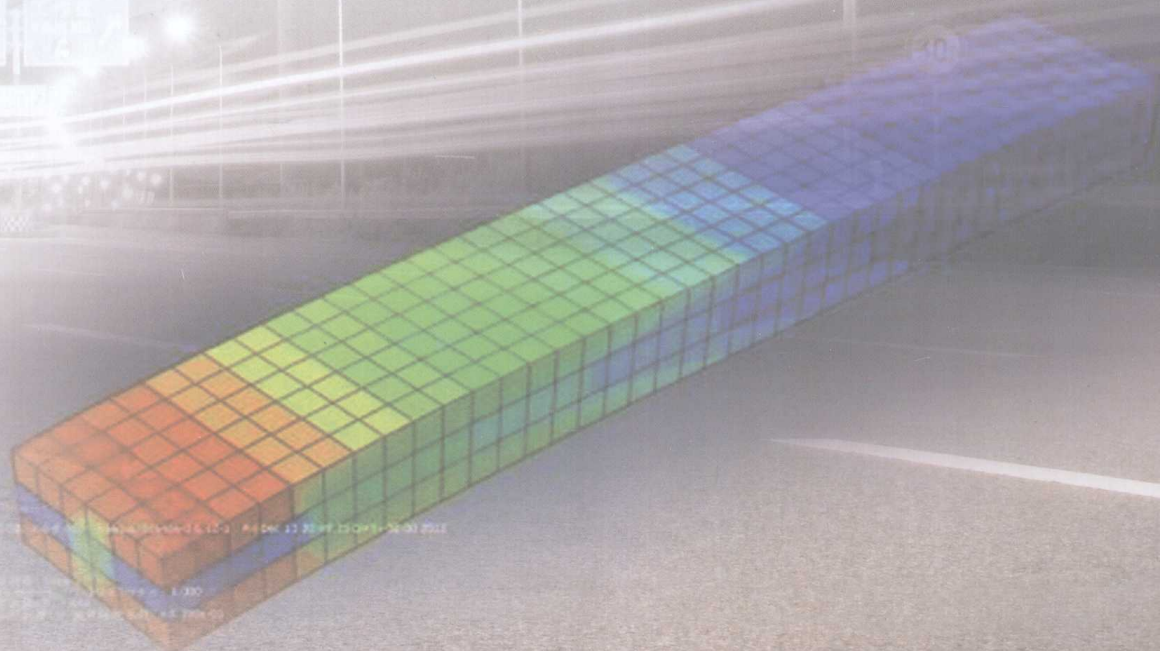


Application of ABAQUS Finite Element Software
in Pavement Structural Analysis

ABAQUS 有限元软件 在路面结构分析中的应用

严明星 王金昌 编著



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS
浙江大学出版社

ABAQUS 有限元软件 在路面结构分析中的应用

严明星 王金昌 编著



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS
浙江大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

ABAQUS 有限元软件在路面结构分析中的应用 / 严明星, 王金昌编著. —杭州: 浙江大学出版社, 2016. 12
ISBN 978-7-308-16201-2

I. ①A… II. ①严… ②王… III. ①路面—结构设计—有限元分析—应用软件 IV. ①U416.22-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 214536 号

ABAQUS 有限元软件在路面结构分析中的应用

严明星 王金昌 编著

责任编辑 石国华
责任校对 潘晶晶 汪淑芳
封面设计 刘依群
出版发行 浙江大学出版社
(杭州市天目山路 148 号 邮政编码 310007)
(网址: <http://www.zjupress.com>)
排 版 杭州星云光电图文制作有限公司
印 刷 富阳市育才印刷有限公司
开 本 787mm×1092mm 1/16
印 张 13.25
字 数 328 千
版 次 2016 年 12 月第 1 版 2016 年 12 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-308-16201-2
定 价 48.00 元

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换

浙江大学出版社发行中心联系方式 (0571)88925591; <http://zjdxcs.tmall.com>

前 言

道路在使用过程中受到环境因素、行车荷载、结构组合、路面材料等多种因素的影响,容易出现车辙、开裂等病害,进而影响道路通行和服务水平。而延缓或消除这些病害的产生,一方面要提高施工工艺水平,另一方面强化路面结构材料和结构一体化设计。ABAQUS 有限元软件为路面结构材料和结构一体化设计提供了良好的平台,其内置多种道路材料本构模型,可分析不同环境、荷载、结构、材料下路面结构受力行为。采用数值计算方法可以大大简化试验流程,减少人力、物力的消耗。

本书主要讲述 ABAQUS 有限元软件在路面结构分析中的应用,包括:路面结构分析常用本构模型、各项道路工程技术基础理论(内聚力模型、扩展有限元法)、沥青混凝土路面接触分析问题、运用扩展有限元法分析沥青混合料开裂问题、设置传力杆水泥混凝土路面结构整体与局部分析、玄武岩纤维沥青路面动态分析问题。

本书正文中提到的附件内容以作为资源提供下载,点击进入 <http://pan.baidu.com/s/1slLBUaD> 即可下载。

本书由武汉市政工程设计研究院有限责任公司严明星、浙江大学王金昌和温州市公路管理局陈亮编著。在本书编著过程中得到了大连海事大学周纯秀、郑州铁路职业技术学院孙丽娟等专家学者的支持。

本书的出版得到了国家重点研发计划(2016YFC0800204)、浙江省公路局科技项目(2016—2—8)、浙江省建设厅科技项目(2016K106 和 2016K123)和浙江省交通运输厅科技项目(2013H11 和 2014H27)的资助,在此表示感谢。

由于新技术不断涌现,加之编者学术水平和能力有限,书中错误在所难免,恳请读者提出宝贵意见,邮箱地址:mx1111111111@126.com,以供修改完善。

编 者

2016 年 9 月 26 日

目 录

1 绪 论	(1)
1.1 ABAQUS 发展介绍	(1)
1.2 ABAQUS 与路面结构分析	(1)
1.3 本书主要内容	(2)
2 ABAQUS 快速入门	(3)
2.1 ABAQUS 产品组成	(3)
2.2 ABAQUS/CAE 简介	(4)
2.3 ABAQUS/CAE 分析模块(Module)	(7)
2.4 ABAQUS/CAE 基本特征	(20)
2.5 ABAQUS 帮助文档	(23)
2.6 本章小结	(25)
3 ABAQUS/CAE 常用功能介绍	(26)
3.1 ABAQUS 功能模块常用功能	(26)
3.2 ABAQUS/CAE 任务管理	(47)
3.3 ABAQUS 中常用文件	(48)
3.4 本章小结	(53)
4 路面结构分析常用材料本构模型	(54)
4.1 应力不变量和应力空间	(54)
4.2 弹性模型	(55)
4.3 粘弹性材料本构模型	(57)
4.4 Mohr-Coulomb 塑性模型	(61)
4.5 土类材料 Duncan-Chang 本构模型	(63)
4.6 本章小结	(65)
5 沥青混凝土路面接触分析	(66)
5.1 接触对的定义	(66)
5.2 算例分析	(66)
5.3 本章小结	(81)
6 基于扩展有限元法的沥青混合料开裂分析	(85)
6.1 粘弹性力学基本理论	(85)
6.2 沥青混合料的断裂特征	(93)

6.3	内聚力本构模型·····	(94)
6.4	扩展有限元法·····	(99)
6.5	沥青混合料 DCT 试件开裂模拟 ·····	(104)
6.6	本章小结·····	(116)
7	设置传力杆水泥混凝土路面分析 ·····	(117)
7.1	路面温度场分布规律·····	(117)
7.2	混凝土材料的损伤塑性模型·····	(119)
7.3	接触本构模型·····	(122)
7.4	子模型基本知识·····	(123)
7.5	整体模型建立·····	(123)
7.6	子模型建立·····	(143)
7.7	本章小结·····	(151)
8	玄武岩纤维沥青路面动态有限元分析 ·····	(152)
8.1	路面交通荷载模拟方法·····	(152)
8.2	车轮荷载确定方法·····	(155)
8.3	动力学分析基本理论·····	(156)
8.4	周期荷载作用下玄武岩纤维沥青路面粘弹性响应·····	(162)
8.5	竖向移动荷载作用下沥青路面动力响应·····	(181)
8.6	本章小结·····	(201)
	参考文献·····	(202)

1 绪 论

1.1 ABAQUS 发展介绍

ABAQUS 软件公司创建于 1978 年,由 Hibbitt、Karlsson 和 Sorensen 博士组建成立,逐渐发展成为全球知名的有限元软件公司,在北美、欧洲和亚太地区有 40 多个分公司或代表处。2005 年 5 月,与世界知名的在产品生命周期管理软件方面拥有先进技术的法国索达计算合并,共同开发了新一代模拟真实世界的仿真技术平台 SIMULIA。目前,ABAQUS 是索达 SIMULIA 公司的产品。

SIMULIA 包括 ABAQUS 和 CATIA 分析模块等,它把人们从以往互不相关的仿真应用带入到协同的、开放的、集成的多物理仿真平台。通过卓越的技术、出众的服务,工程师和科学家可以方便地利用仿真结果去检验产品质量,加快产品的创新,并减少资源的消耗。索达公司不断吸取最新的分析理论和计算机技术,领导着全世界非线性有限元技术和仿真数据管理系统的发展。

1.2 ABAQUS 与路面结构分析

行驶在路面上的车辆,通过车轮把荷载传递给路面,由路面传递给路基,并在路基路面结构内部产生应力、应变及位移。早期的道路工程分析建立在观察和经验的基础上,经过长期的努力,逐渐由以经验为主的方法演变为以结构分析理论为主的方法。

随着沥青路面和水泥路面的大量使用,研究学者对沥青材料和水泥混凝土材料进行了较为系统的研究,形成了适用于沥青路面分析研究的柔性路面设计理论和方法、刚性路面设计理论和方法、半刚性路面设计技术等。

随着大型土木工程和现代工业的发展,很多先进的材料、路面结构在道路工程中得到应用,为了更加周全地考虑这些因素的影响,这就需要更加合理的分析,以便控制整个道路工程的设计、施工过程,对于新技术的推广应用也可以提出指导性意见。近年来道路工程得到快速发展,其工作环境也相对复杂,因此需要在路面结构分析内部考虑温度场、荷载场、水耦合等影响以及在各种因素耦合作用下分析路面结构变形和渐进破坏的过程,这就对道路工程分析提出了更为严峻的挑战。

早期路面结构分析往往通过半经验半理论分析方法,分析中对许多条件进行简化,计算结果也与实际情况存在一定差别,并且在实际工程进行分析时不大可能采用解析解完成分析,这就需要借助试验和数值模拟。试验研究可以提供大量宝贵的研究资料,虽然试验研究需要花费大量的人力、物力和财力,试验周期也往往相当长,而且得到的试验成果也具有一定局限性,需要进行大量的试验总结得到的数据才能用于宏观力学计算的参数,这也是数值计算的前提。采用数值计算方法可以大大简化试验流程,减少人力、物力的消耗。

ABAQUS 作为一款功能强大的有限元分析软件,它有丰富的适合道路材料分析的本构模型,可以处理简单到复杂的几何非线性、材料非线性分析,是道路工程分析强有力的手段。

1.3 本书主要内容

本书内容基于 ABAQUS 6.10 版本,从实际工程出发,对道路工程常用本构模型进行总结,提出一种适用于沥青混合料开裂研究的本构模型——改进的内聚力本构模型,并对目前国内外沥青混合料最新研究技术——扩展有限元法(Extended Finite Element Method, XFEM)进行介绍,通过实例详解让更多的人了解这项研究技术;路面结构分析中引入子模型建模方法,对路面结构中的局部作精确分析,解决路面结构分析精度问题。学习本书有助于深入了解路面结构分析常用的工具和方法,从而提高利用 ABAQUS 有限元软件分析解决路面结构受力分析问题的能力。

2 ABAQUS 快速入门

2.1 ABAQUS 产品组成

ABAQUS 包含一个全面支持求解器的前后处理模块——ABAQUS/CAE, 同时还包括 ABAQUS/Standard 和 ABAQUS/Explicit 两个核心求解器模块, 这两个模块是相互补充、集成的分析模块。此外, ABAQUS 还提供了其他专业模块用于解决其他特殊问题, 如 ABAQUS/Design、ABAQUS/Aqua、ABAQUS/Foundation、MOLDFLOW 接口、ADAMS 接口等。

ABAQUS/CAE 将分析模块集成于 Complete ABAQUS Environment, 用于建模、管理、监控 ABAQUS 的分析过程和结果的可视化处理。ABAQUS/Viewer 作为 ABAQUS/CAE 的子模块, 用于 Visualization 模块的后处理, 其中 ABAQUS 组成的分析模块关系可以用图 2.1 表示。

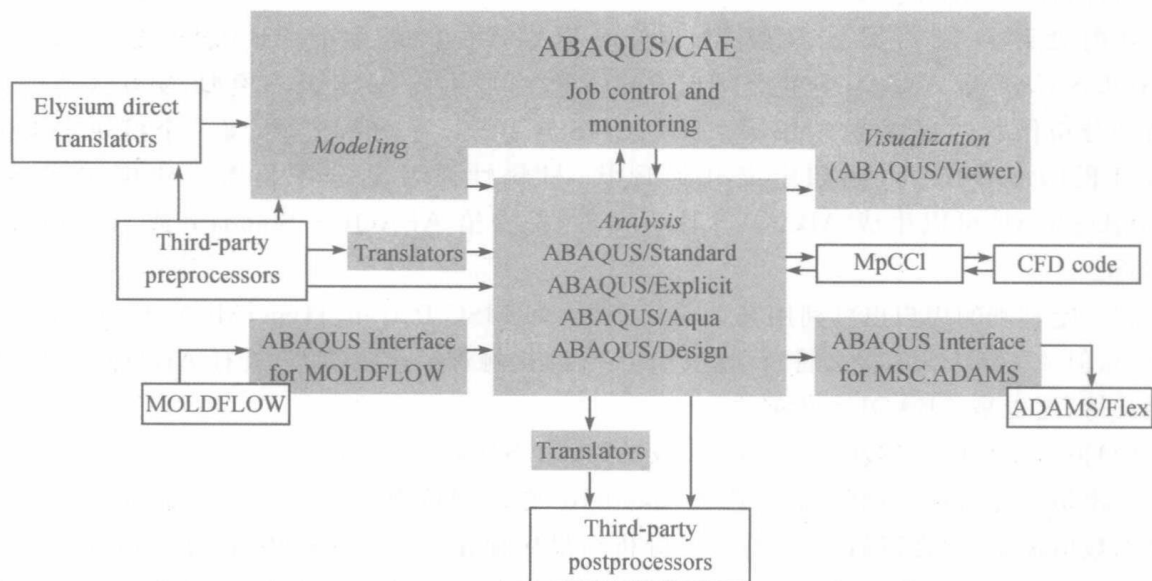


图 2.1 ABAQUS 的组成

2.1.1 ABAQUS/CAE

ABAQUS/CAE(Complete ABAQUS Environment)广泛支持 ABAQUS 分析功能, 并且为用户提供了一个人机交互式的使用环境, 可以将建模、分析、作业管理和结果评估无缝集成, 为可用的 ABAQUS 求解器提供最完整的界面。用户可以通过简单操作完成模型构建、材料特性、分析步、荷载、接触等定义, 并且可以通过后处理即可视化功能完成结果分析。

2.1.2 ABAQUS/Viewer

ABAQUS/Viewer 作为 ABAQUS/CAE 的子模块, 主要用于 Visualization 模块的后

处理。

2.1.3 ABAQUS/Standard

ABAQUS/Standard 是一个通用分析模块,它能够求解广泛领域的线性和非线性问题,包括静态分析、动态分析,以及复杂的非线性耦合物理场分析,在每一个求解增量步中,ABAQUS/Standard 隐式地求解方程组。

2.1.4 ABAQUS/Explicit

ABAQUS/Explicit 可以进行显式动态分析,它适用于求解复杂非线性动力学问题和准静态问题,特别是模拟短暂、瞬时的动态事件,如冲击、爆炸问题。此外,它对处理接触条件变化的高度非线性问题也非常有效,如模拟成型问题。

2.2 ABAQUS/CAE 简介

2.2.1 ABAQUS 分析步骤

ABAQUS 有限元分析包括三个分析步骤:前处理(ABAQUS/CAE)、模拟计算(ABAQUS/Standard 或 ABAQUS/Explicit)和后处理(ABAQUS/Viewer 或 ABAQUS/CAE)。三个分析步骤通过以下方法实现:

(1)前处理(ABAQUS/CAE)

在前处理阶段需要定义物理问题的模型,并生成一个 ABAQUS 输入文件。ABAQUS/CAE 是 ABAQUS 的交互式绘图环境,可以生成 ABAQUS 模型、交互式地提交和监控分析作业,并显示分析结果。ABAQUS 分为若干个分析模块,每一个模块定义了模拟过程的一个方面,例如定义几何形状、材料性质及划分网格等。建模完成后,ABAQUS/CAE 可以生成 ABAQUS 输入文件,提交给 ABAQUS/Standard 或 ABAQUS/Explicit。

有一定基础的用户也可利用其他前处理器(如 MSC Patran、HyperMesh、FEMAP 等)来建模,但 ABAQUS 的很多特有功能(如定义面、接触对和连接件等)只有 ABAQUS/CAE 才能支持,这也是 ABAQUS 优势之一。

(2)模拟计算(ABAQUS/Standard 或 ABAQUS/Explicit)

在模拟计算阶段,利用 ABAQUS/Standard 或 ABAQUS/Explicit 求解输入文件中所定义的数值模型,通常以后台方式运行,分析结果保存在二进制文件中,以便于后处理。完成一个求解过程所需的时间取决于问题的复杂程度和计算机的运算能力,可以从几秒到几天不等。

(3)后处理(ABAQUS/Viewer 或 ABAQUS/CAE)

ABAQUS/CAE 的后处理部分又称为 ABAQUS/Viewer,用于读入分析结果数据,并可以多种方式显示分析结果,包括彩色云图、动画、变形图和 XY 曲线等。

2.2.2 ABAQUS/CAE 简介

ABAQUS/CAE 主窗口如图 2.2 所示。由以下几部分组成。

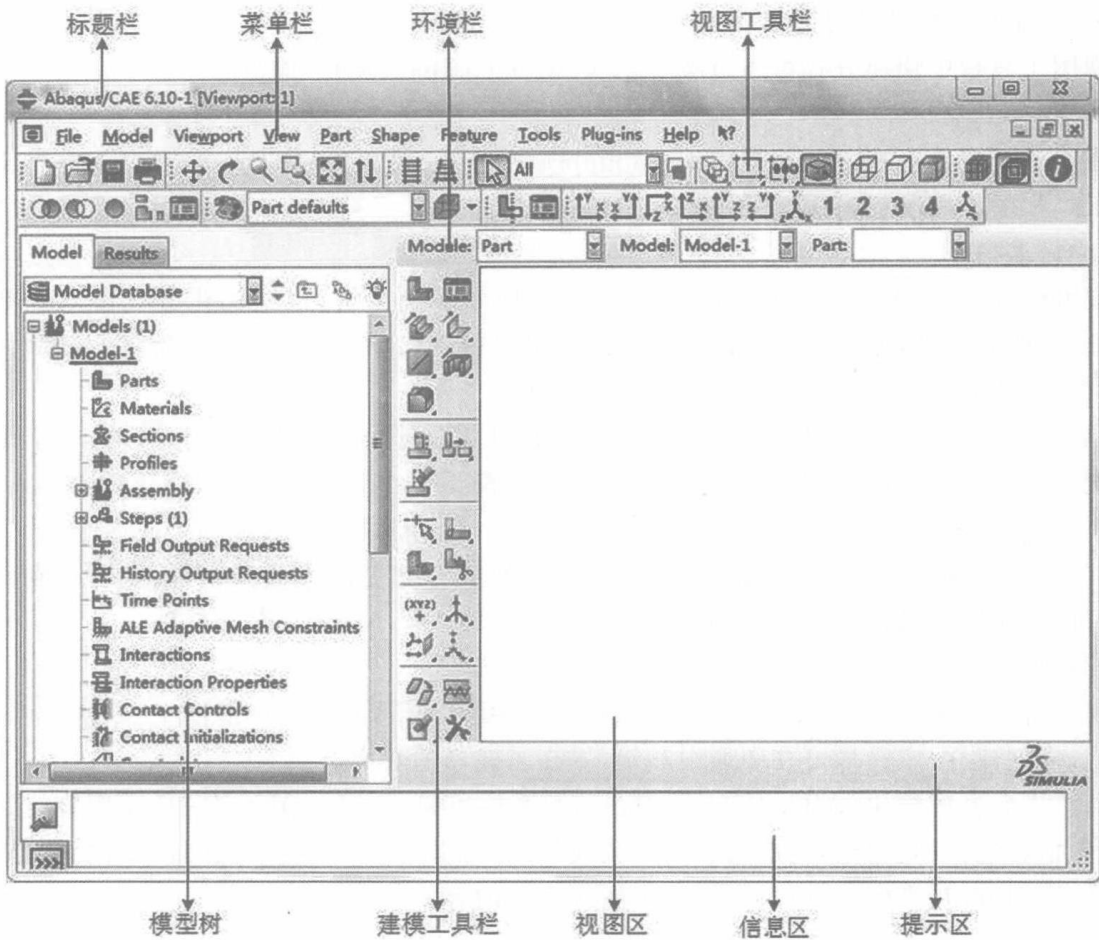


图 2.2 ABAQUS/CAE 主窗口

(1)标题栏

标题栏显示了正在运行的 ABAQUS/CAE 版本,当前模型所保存路径及模型数据库名称。

(2)菜单栏

ABAQUS/CAE 中每种功能模块所对应的建模内容不同,菜单栏内容也有所区别,通过对菜单栏的操作可实现所有功能,具体内容详见 ABAQUS/CAE 用户手册。

(3)环境栏

ABAQUS/CAE 环境栏包含了所有的功能模块,每一模块完成建模的一种特定功能,通过环境栏中的 Module 列表,可在各功能模块之间切换。一个 ABAQUS/CAE 模型中可包含多个模型,环境栏中 Model 选项即显示当前模型,Part 选项则是当前模型下的部件(一个模型可有一个或多个)。

(4)视图工具栏

视图工具栏提供了菜单栏访问的快捷方式,这些功能也可通过菜单栏直接访问,视图工具栏为用户提供视图区模型多个角度、多种方式的可视化操作。

如:  允许用户从不同角度、不同位置显示模型的全部或局部区域,方便用户进行模型定义和视图;  允许用户有选择地显示模型的区

域,方便复杂模型的边界条件及荷载定义。

视图工具栏中快捷方式可通过菜单栏 View→Toolbars 调用和隐藏。

(5) 建模工具栏

建模工具栏显示在当前功能模块(Module)下模型的建立、编辑、定义等操作,熟练掌握建模工具栏的应用可提高建模效率。

(6) 模型树

模型树(Model Tree)是 ABAQUS 6.5 以上版本新增内容,以结构化方式显示了整个 Module 的所有内容,通过模型树的展开和隐藏可以查阅整个模型的图形化描述,如部件、材料、分析步、荷载和输出定义等。

在一些特别的情况下,模型树将非常有用,如对部分部件进行删除操作后,可能会影响到装配体的状态,导致运算结果无法收敛,这时在模型树中依次点击[Model Database]→[Models]→[Model-1]→[Assembly]→[Instances],在子目录中将出现一个或多个红“×”,选中红“×”对应内容,右键删除,即可解决删除操作后计算无法收敛问题,由此可见利用模型树可以找出删除操作无法收敛的原因。

(7) 视图区

视图区是一个可无限放大和缩小的屏幕,ABAQUS/CAE 为用户提供了一种交互式绘图环境,模型建立、定义均可在图形中显示,提高了建模的效率。

当进入后处理模块(ABAQUS/Viewer),视图区可显示 ABAQUS/CAE 模型分析结果部分,包括彩色云图、动画、变形图和 XY 曲线等,如图 2.3 所示,其中视图区图例、状态栏、标题栏、视图方向(坐标)为后处理模块视图区主要内容。

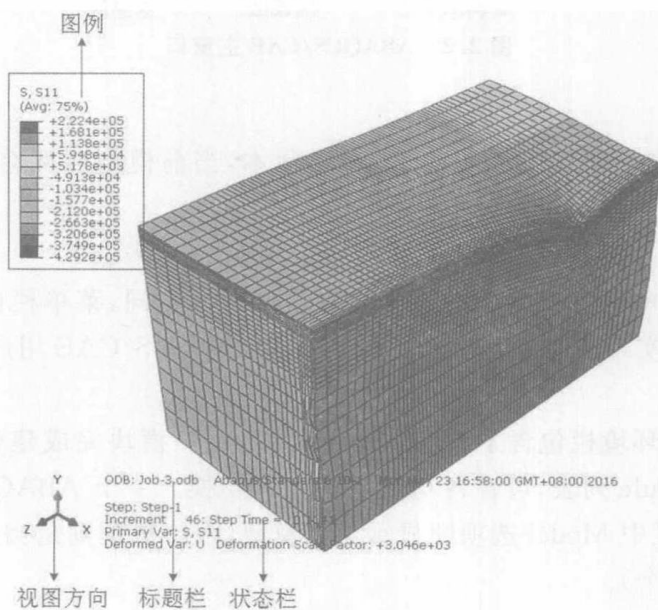


图 2.3 ABAQUS/CAE 视图区组成

(8) 提示区

提示区为用户下一步操作提供提示,提高建模的准确性。例如在创建一个集合(Set)时,提示区将提醒用户选择对应的对象;在分割一个部件时,提示区将提示用户选择切割方式,以便决定下一步操作。

(9) 信息区

信息区将显示状态信息和警告,这也是命令行接口(Command line interface)的位置,两者可通过主窗口左下角  (Message area)和  (Command line interface)图标相互切换。

ABAQUS/CAE 在信息区显示状态和警告信息,可采用鼠标拖拽操作改变其大小,也可采用滚动条查阅信息区信息。

2.3 ABAQUS/CAE 分析模块(Module)

一个 ABAQUS/CAE 模型中可以包含多个模型,一个模型 Module(模块)列表中包含 10 个功能模块,点击窗口顶部环境栏可查看相关模块,如图 2.4 所示,这些模块的次序也是 ABAQUS/CAE 推荐建模顺序,当然用户也可根据需要进行适当的建模次序。

一般情况下,材料、边界条件及荷载等直接定义在几何模型上,而不是定义在单元和节点上,这样在修改网格时,不必重新定义材料和边界条件等模型参数。当然用户可根据需要首先划分网格,用于优化几何模型,这种情况下如修改几何模型,之前定义好的边界条件、荷载及接触等均失效,需重新定义。

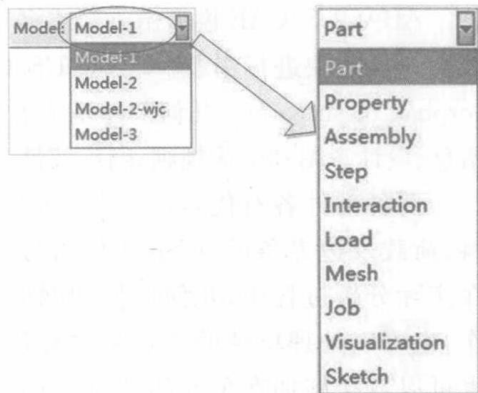


图 2.4 ABAQUS/CAE 分析模块

2.3.1 Sketch 模块

使用 Sketch 模块可以绘制部件二维平面,包括实体部件、梁、区域等,利用草图模块绘制的二维平面利用拉伸、旋转等功能可生成三维部件。

(1) Sketch 模块进入方式

1) 进入环境栏 Module 列表,选择 Sketch 模块,点击左侧工具栏  (Create Sketch),输入创建草图名称,即可进入绘图环境。

2) 进入环境栏 Module 列表,选择 Part 模块,点击左侧工具栏  (Create Part),设定 Part 创建参数,即可进入绘图环境。

3) 在 Part、Assembly 和 Mesh 模块中点击  (Partition Face: Sketch),也可进入 Sketch 模块进行某个面的切分。

(2) 草图绘制工具

进入草图绘制环境后,左侧绘图工具栏提供了以下绘图功能,用户可根据需要在右侧绘图区完成草图二维平面的绘制。

- 1) 绘制点、线、圆、矩形、倒角和样条曲线等基本图形单元。
- 2) 绘制水平线、垂直线、斜线和圆等用户绘图定位的辅助线。
- 3) 尺寸标注。
- 4) 通过移动顶点或改变尺寸修改平面。
- 5) 复制图形。

利用  (Partition Face: Sketch) 功能分割模型某个面,进入草图方式有两种:自动计

算(Auto-Calculate)和指定(Specify)。采用 Auto-Calculate 方式,选择模型从某个面进入草图环境坐标是通过软件自动计算而得的;采用 Specify 方式,用户可以指定进入草图环境的坐标位置和方向。推荐采用 Specify 方式进行草图绘制。

同许多 CAD 系统类似,ABAQUS/CAE 中也是基于部件和部件实体装配体的概念,在 Sketch 模块下点击主菜单[File]→[Import]→[Sketch],可以导入以下格式的二维 CAD 文件:AutoCAD(. dxf)、IGES(. igs)、ACIS(. sat)和 STEP(. stp)。

2.3.2 Part 模块

ABAQUS/CAE 模型由一个或多个部件构成,用户可在 Part 模块中创建和修改部件,进入 Assembly 模块进行组装。ABAQUS/CAE 中的部件有两种:几何部件(native part)和网格部件(orphan mesh part)。几何部件是基于“特征”的(feature-based),特征(feature)包含了部件的几何信息、设计意图和生成规则;网格部件不包含特征,只包含关于节点、单元、面、集合(Set)的信息。

两种部件各有优点,几何部件提高了几何模型的修改效率,修改网格时无须重新定义材料、荷载及边界条件;网格部件直接使用划分好的网格,便于用户对节点和单元进行编辑。在实际分析过程中,几何部件和网格部件往往均共存于模型中,用户可以对几何部件进行操作,也可以处理单纯的节点和单元数据,接触、荷载以及边界条件既可以施加在几何部件上,也可以直接施加在单元的节点、边或面上。这种允许几何部件与网格部件混合使用的建模环境,为用户分析特定问题提供了极大的方便。

(1)Part 模块的功能

在 Part 模块中可以创建、编辑和管理模型中的各个部件,具体包括以下功能。

1)主菜单 Part:可创建柔体部件(deformable part)、离散刚体部件(discrete rigid part)或解析刚体部件(analytical rigid part),对它们进行复制、重命名、删除、锁定和解除锁定等操作。

2)主菜单 Shape:通过创建拉伸(extrude)、旋转(revolve)、扫掠(sweep)、倒角(round/fillet)和放样(loft)等特征来定义部件的几何形状。

3)主菜单 Tools:定义集合、基准和刚体部件的参考点,用于分割部件。

(2)部件创建

在 Part 模块下点击菜单栏[Part]→[Create]可创建 3D、2D、轴对称(Axisymmetric)三种几何模型,类型可以为柔性部件(Deformable)、离散刚体(Discrete rigid)、解析刚体(Analytical rigid)和欧拉型(Eulerian),几何属性(Shape)可以为:实体(Solid)、壳体(Shell)、线(Wire)和点(Point),如图 2.5 所示。

(3)道路工程建模

对于道路工程常用的几何模型有 3D、2D 平面,对于某些具有对称性质的材料或路面结构,也可以采用轴对称模型进行建模;根据研究对象,路面结构材料中水泥混凝土、沥青混凝土、水泥稳定碎石、大粒径沥青碎石、土基一般采用 Solid 建模;对于传力杆、钢筋等单元根据模型分析部位不同可以采用 Solid 单元或 Wire 单元;对于路面结构中的初始裂纹可以通过 Wire 进行定义。

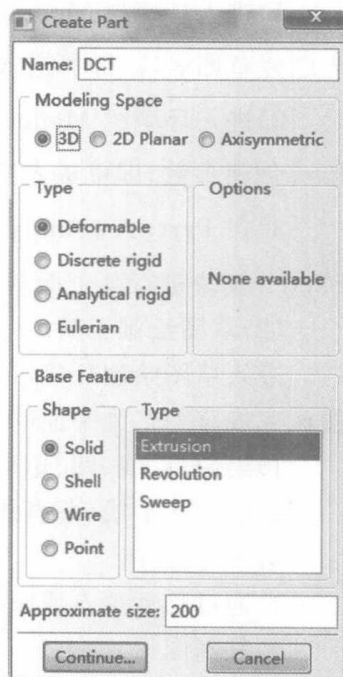


图 2.5 Create Part 对话框

在 Part 模块下可利用拉伸、旋转、倒角等功能对部件调整,这些工具运用见本书实例讲解。

2.3.3 Property 模块

该模块主要用于定义模型所使用的本构关系。ABAQUS/CAE 与其他软件不同,不能直接指定单元或几何部件的材料特性,而是要首先定义相应的截面属性(Section),然后指定截面属性的材料,再把此截面属性赋予相应的部件。注意这里的“截面属性”包含的是广义的部件特性,而不是通常意义上的梁或板的截面形状。下面简单介绍 Property 模块的主要内容。

1)主菜单 Material:创建和管理材料。

2)主菜单 Section:创建和管理截面属性。

3)主菜单 Profile:创建和管理梁截面。

4)主菜单 Special→Skin:在三维物体的某一个面或轴对称物体上的一条边上附上一层皮肤,这种皮肤的材料可以与物体原来的材料不同。

5)主菜单 Assign:指定部件的截面、取向(Orientation)、法线方向和切线方向。

ABAQUS 定义了多种材料本构关系及失效准则模型,主要包括以下内容。

(1)弹性材料模型

1)线弹性:可以定义弹性模型、泊松比等弹性特性。

2)正交各向异性:具有多种典型失效理论,用于复合材料结构分析。

3)多孔结构弹性:用于模拟土壤和可压缩泡沫的弹性行为。

4)亚弹性:可以考虑应变对模量的影响。

5)超弹性:可以模拟橡胶类材料的大应变影响。

6)粘弹性:时域和频域的粘弹性材料模型。

(2)塑性材料模型

1)金属塑性:符合 Mises 屈服准则的各向同性塑性模型,以及遵循 Hill 准则的各向异性塑性模型。

2)铸铁塑性:拉伸为 Rankine 屈服准则,压缩为 Mises 屈服准则。

3)蠕变:考虑时间硬化和应变硬化定律的各向同性和各向异性蠕变模型。

4)扩展的 Drucker-Prager 模型:适于模拟沙土等粒状材料的不相关流动。

5)Capped Drucker-Prager 模型:适于地质、隧道挖掘等领域。

6)Cam-Clay 模型:适于粘土类材料的模拟。

7)Mohr-Coulomb 模型:与 Capped Drucker-Prager 模型类似,但可考虑不光滑小表面情况。

8)泡沫类材料模型:可模拟高度压缩材料,可应用于消费品包装及车辆安全装置等领域。

9)混凝土材料模型:使用混凝土弹塑性破坏理论。

10)渗透性材料模型:提供了各向同性和各向异性材料的渗透性模型,其特性与孔隙比率、饱和度和流速有关。

(3)其他材料模型

包括密度、热膨胀特性、热导率、电导率、比热容、压电特性、阻尼以及用户自定义材料特性等。

对于道路工程材料,使用最多的为弹性模型、塑性材料模型、其他材料模型,如表 2.1 所示,在本书第 4 章节中对道路工程常用本构模型进行详细介绍。

表 2.1 道路工程常用本构模型

本构模型		内 容	定义路径
弹性模型	线弹性	定义弹性模量、泊松比	Mechanical→Elasticity→Elastic
	粘弹性	定义 Prony 级数或蠕变试验数据松弛试验数据等	Mechanical→Elasticity→Viscoelastic
塑性材料模型	蠕变	考虑时间硬化的各向同性蠕变模型	Mechanical→Plasticity→Creep
其他材料模型	热膨胀特性	用于温度荷载分析	General→Density
	热导率		Thermal→Conductivity
	比热容		Thermal→Specific

2.3.4 Assembly 模块

每个部件都被创建在自己的局部坐标系中,在模型中相互独立。使用 Assembly 模块可以为各个部件创建实体(Instance),并在整个坐标系中为这些实体定位,形成一个完整的装配体。

实体是部件在装配体中的一种映射,用户重复创建多个实体,并通过布尔运算为同一 Part 不同实体分别赋予材料参数,具体操作:Assembly→Instance→Merge/Cut。用户可以为一个部件重复地创建多个实体,每个实体总是保持着和相应部件的联系。如果在 Part 模块中修改了部件的形状尺寸,或在 Property 模块中修改了部件的材料特性,这个映射相应的实体也会自动修改,不能直接对实体进行上述修改。

整个模型只包含一个装配体,一个装配体可由一个或多个实体构成。如果模型中只有一个部件,可以只为这一个部件创建一个实体,而这个实体本身就构成了整个装配体。

在 Assembly 模块中主要包括以下内容:

1)主菜单 Instance:创建实体,通过平移和旋转来为实体定位,把多个实体合并(Merge)为一个新的部件,或者把一个实体切割(Cut)为多个新的部件。

2)主菜单 Constraint:通过建立各个实体间的位置关系来为实体定位,包括面与面平行(Parallel Face)、面与面相对(Face to Face)、边与边平行(Parallel Edge)、边与边相对(Edge to Edge)、轴重合(Coaxial)、点重合(Coincident Point)、坐标系平行(Parallel CSYS)等。

2.3.5 Step 模块

Step 模块主要完成以下操作:创建分析步、设定输出数据、设定自适应网格和控制求解过程。

(1)创建分析步

利用主菜单 Step 下各个子菜单可完成分析步的创建和管理。ABAQUS/CAE 的分析过程是由一系列分析步组成的,其中包括两种分析步。

1)初始分析步(Initial Step)

ABAQUS/CAE 中初始分析步只有一个,它不能被编辑、替换、复制和删除,但用户可对初始分析步中的边界条件和相互作用进行编辑和处理。

2)后续分析步(Analysis Step)

此分析步是由用户创建,位于初始分析步之后,用于持续分析某一特定的过程。后续分析步创建类型有以下两大类。

①通用分析步(General Analysis Step):用于线性及非线性分析,常用的通用分析步包括:Static, General;利用 ABAQUS/Standard 进行静力分析。

Dynamics, Implicit:利用 ABAQUS/Standard 进行隐式动力分析

Dynamics, Explicit:利用 ABAQUS/Explicit 进行显式动态分析。

②线性摄动分析步 (Linear Perturbation Step): 只能用于分析线性问题。在 ABAQUS/Explicit 中不能使用线性摄动分析步。包括:

Buckle:线性特征值屈服。

Frequency:频率提取分析。

Modal dynamics:瞬时模态动态分析。

Random response:随机响应分析。

Response spectrum:反应谱分析。

Steady-state dynamics:稳态动态分析。

后续分析步创建:

点击  (Create Step), 如图 2.6 所示。用户可根据建模需要选择分析步类型, 点击

Continue... 按钮, 进行分析步参数设定, 弹出 Edit Step 对话框, 进入 Basic 选项卡, 设定默认分析步时间 (Time period), 几何非线性开关 (Nlgeom) 将决定分析过程中是否考虑几何非线性对结果的影响, 若在某个分析步中出现大位移、大转动、初始应力、几何刚化或突然翻转等问题, 则需要在这个分析步中将几何非线性开关设置为 On。

提示:在静力分析中, 如果模型中不包含阻尼或与速率相关的材料性质, “时间”就没有实际的物理意义, 一般都把分析步时间设定为默认的 1。

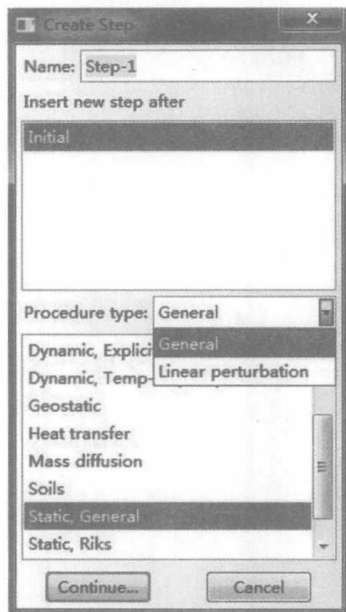


图 2.6 分析步类型选择

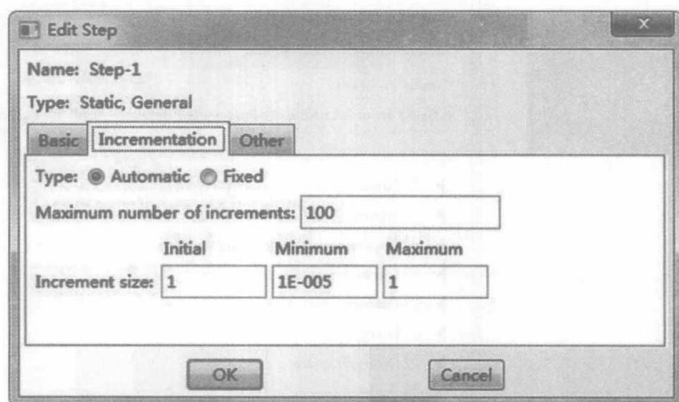


图 2.7 时间增量步设定

进入 Increment tation 选项卡, 如图 2.7 所示, 进行时间增量步设定。

a. Automatic(增量步类型): 增量步大小由软件控制, 根据分析结果收敛情况自动增大或减小增量步。

b. Maximum number of increments(允许增量步最大数目): 当分析达到最大增量步, 迭代结果不收敛, 则分析步中止。