

ABAQUS

在岩土工程中的应用

费 康 张建伟 编 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

万水 ABAQUS 技术丛书

ABAQUS 在岩土工程中的应用

费康 张建伟 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

地址：北京三里河路 66 号 邮编：100044 电话：(010) 68339068 传真：(010) 68339069
E-mail: mcsh@waterpub.com.cn 网址: www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书结合一系列应用实例,系统地介绍了 ABAQUS 软件用于岩土工程数值分析的功能和方法。全书分为两大部分共 16 章,即入门篇(第 1~5 章)和应用篇(第 6~16 章)。入门篇主要介绍软件的功能、岩土工程中常用的单元、本构关系和接触面理论等基本知识,通过阅读这些章节,读者可以达到快速入门的目的。应用篇中首先详细介绍用户子程序的编写注意事项和编写过程,然后通过岩土工程应用实例,对模型建立、问题求解和结果后处理中需考虑的关键问题进行了讨论,通过这部分的学习,读者可以掌握用户自定义材料和单元的二次开发、土体固结沉降分析、非饱和渗流与流固耦合分析、基桩低应变检测的数值模拟、桩基承载力分析、岩土开挖问题求解、岩土贯入问题求解、土石坝静力与动力分析和边坡稳定性分析等内容。

本书适合岩土工程、水利工程、结构工程等领域高校教师、工程技术人员和研究生阅读,也可作为岩土工程专业土工数值分析课程的参考教材。

本书提供了书中所有章节涉及到的 cae 文件、inp 文件及用户子程序文件,以供读者参考。读者可以从中国水利水电出版社网站或万水书苑免费下载,网址:
<http://www.waterpub.com.cn/softdown/>或 <http://www.wsbookshow.com>。

图书在版编目(CIP)数据

ABAQUS在岩土工程中的应用 / 费康, 张建伟编著

— 北京: 中国水利水电出版社, 2010.1

(万水ABAQUS技术丛书)

ISBN 978-7-5084-6955-3

I. ①A… II. ①费… ②张… III. ①岩土工程—应用
软件, ABAQUS IV. ①TU4-39

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第205370号

策划编辑: 杨元泓

责任编辑: 杨元泓

封面设计: 李 佳

| | |
|------|---|
| 书 名 | 万水 ABAQUS 技术丛书 ABAQUS 在岩土工程中的应用 |
| 作 者 | 费 康 张建伟 编著 |
| 出版发行 | 中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: mchannel@263.net (万水) sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)、82562819 (万水) |
| 经 售 | 全国各地新华书店和相关出版物销售网点 |
| 排 版 | 北京万水电子信息有限公司 |
| 印 刷 | 北京市天竺颖华印刷厂 |
| 规 格 | 184mm×260mm 16 开本 26.25 印张 652 千字 |
| 版 次 | 2010 年 1 月第 1 版 2010 年 1 月第 1 次印刷 |
| 印 数 | 0001—5000 册 |
| 定 价 | 55.00 元 |

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

言 序

岩土工程数值分析对有限元分析软件有特定的要求，如需拥有能够真实反应土体性状的本构模型、能够进行有效应力和孔压的计算、可以准确模拟接触面性状等等。ABAQUS 软件在这些方面具有很强的适用性。

全书内容丰富，首先介绍了软件的功能、岩土工程中常用的单元、本构关系和接触面理论等基本知识，然后结合一系列实例对岩土工程问题的建模、求解和后处理进行了详细介绍。这其中包括了自定义材料和单元的二次开发、土体固结沉降分析、非饱和渗流与流固耦合分析、基桩低应变检测的数值模拟、桩基承载力分析、岩土开挖问题求解、岩土贯入问题求解、土石坝静力与动力分析和边坡稳定性等，基本涵盖了岩土工程中的大部分领域。在这些实例的选择上，本书具有十分鲜明的特点，其并没有直接给出复杂的工程实例，而是首先提供大量简单却具有说明性的例子，通过这些简单算例的计算结果与岩土力学中基本的理论解答进行相互印证，这样可望帮助读者正确理解模型简化、参数选择、边界条件设置等对计算结果的影响。在此基础上，再逐次变动计算条件，引出工程实例，从而帮助读者循序渐进地学习。

该书的两位作者费康和张建伟都是我以前指导的博士生，他们在河海大学学习期间勤奋好学，品学兼优，通过博士期间的学习，对 ABAQUS 软件在岩土工程上的应用积累了一定的实践经验，该书是他们宝贵经验的总结。该书也是陈育民等编著的《FLAC/FLAC3D 基础与工程实例》一书后又一本介绍岩土工程数值软件理论与应用的著作，是我们创新团队在岩土工程软件应用领域的又一项重要成果。

该书还提供了书中所有章节涉及到的所有 cae 文件、inp 文件及用户子程序 for 文件，相信不管是初学者还是具有一定使用经验的用户，都将从该书中获益。

刘汉龙

国务院学科评议组成员

长江学者奖励计划特聘教授

国家杰出青年科学基金获得者

2009 年 12 月于江南文枢苑

前 言

ABAQUS 是国际上功能最强的大型通用有限元软件之一, 拥有能够真实反映土体性状的本构模型, 能够进行有效应力和孔压的计算, 具有强大的接触面处理功能来模拟土与结构之间的脱开、滑移等现象, 具备处理填土或开挖等岩土工程中的特定问题的能力, 可以灵活、准确地建立初始应力状态, 对岩土工程有很强的适用性。

本书结合一系列应用实例, 系统地介绍了 ABAQUS 软件用于岩土工程数值分析的功能和方法。全书分为两大部分共 16 章, 即入门篇(第 1~5 章)和应用篇(第 6~16 章)。入门篇主要介绍软件的功能、岩土工程中常用的单元、本构关系和接触面理论等基本知识, 通过阅读这些章节, 读者可以达到快速入门的目的。应用篇中首先详细介绍用户子程序的编写注意事项和编写过程, 然后通过岩土工程应用实例, 对模型建立、问题求解和结果后处理中需考虑的关键问题进行讨论, 通过这部分的学习, 读者可以掌握用户自定义材料和单元的二次开发、土体固结沉降分析、非饱和渗流与流固耦合分析、基桩低应变检测的数值模拟、桩基承载力分析、岩土开挖问题求解、岩土贯入问题求解、土石坝静力与动力分析和边坡稳定性分析等内容。

本书特色

- 注重岩土工程原理的讲解, 更注重对实际问题的 ABAQUS 求解, 使读者能够知其然, 更知其所以然。
- 案例丰富, 而且都是源自于科研和工程分析一线的实例, 通过工程实例的学习, 可以快速融入到应用情境, 学习效率更高。
- 注重对结果的解读, 因为这是能否用好有限元软件来进行分析的精华所在。
- 涵盖了岩土工程分析的各个方面, 大部分读者都能在本书中找到问题的参考求解方案。
- 免费提供书中所有章节涉及到的 cae 文件、inp 文件及用户子程序 for 文件, 免去输入代码的烦琐。

适合的读者对象

本书适合岩土工程、水利工程、结构工程等领域高校教师、工程技术人员和研究生阅读, 也可作为岩土工程专业土工数值分析课程的参考教材。

本书分工

全书编写分工如下: 全书章节安排及统稿由费康负责, 第 1、6、7、8、9、11、13、14、15、16 章由费康执笔, 第 2、3、4、5、12 章由张建伟执笔, 第 10 章由彭劼执笔。河海大学岩土工程研究所陈育民博士为本书的完成提供了大力支持和帮助, 在此深表感谢。参与本书工作的还包括: 王斌、万雷、张强林、张赛桥、陈鲲、李晓宁、丁佳、虞志勇、吴艳、杜英、王晓、余松、夏慧军、陶林、许志清、赵会春等。

需要指出, 本书力求详尽地解释利用 ABAQUS 软件进行岩土工程数值分析的步骤及需考虑的关键因素, 并提供所有实例的模型文件和用户子程序文件, 但由于时间仓促, 作者水平有限, 书中难免有错漏之处, 恳请广大读者批评指正。若有问题请发邮件到sharepub@126.com联系。

编 者

2009 年 10 月

目

| | |
|----------------------------------|----|
| 序 | |
| 前言 | |
| 第1章 ABAQUS 的功能与特点 | 1 |
| 1.1 认识 ABAQUS | 1 |
| 1.1.1 ABAQUS 软件产品 | 1 |
| 1.1.2 ABAQUS 产品的主要功能 | 2 |
| 1.1.3 ABAQUS 在岩土工程中的适用性 | 4 |
| 1.2 ABAQUS 基础 | 4 |
| 1.2.1 ABAQUS 的文件格式 | 4 |
| 1.2.2 ABAQUS 的一些基本约定 | 6 |
| 1.2.3 ABAQUS 的运行命令 | 7 |
| 1.2.4 ABAQUS/CAE 基础 | 9 |
| 1.2.5 ABAQUS 的任务 inp 输入文件构成 | 13 |
| 1.3 本章小结 | 15 |
| 第2章 ABAQUS 快速入门 | 16 |
| 2.1 ABAQUS/CAE 的功能模块 | 16 |
| 2.1.1 Part (部件) 模块 | 16 |
| 2.1.2 Property (性质) 模块 | 18 |
| 2.1.3 Assembly (装配) 模块 | 20 |
| 2.1.4 Step (分析步) 模块 | 21 |
| 2.1.5 Interaction (相互作用) 模块 | 23 |
| 2.1.6 Load (载荷) 模块 | 24 |
| 2.1.7 Mesh (网格) 模块 | 25 |
| 2.1.8 Job (任务) 模块 | 29 |
| 2.1.9 Visualization (可视化或后处理) 模块 | 30 |
| 2.1.10 Sketch (草图) 模块 | 31 |
| 2.2 ABAQUS/CAE 应用实例 | 32 |
| 2.2.1 问题的描述 | 32 |
| 2.2.2 创建部件 | 33 |
| 2.2.3 设置创建材料和截面特性 | 34 |
| 2.2.4 装配部件 | 36 |
| 2.2.5 定义分析步 | 37 |
| 2.2.6 定义载荷和边界条件 | 37 |
| 2.2.7 划分网格 | 39 |

录

| | |
|--|----|
| 2.2.8 提交任务 | 39 |
| 2.2.9 后处理 | 39 |
| 2.2.10 退出 ABAQUS/CAE | 41 |
| 2.3 本章小结 | 41 |
| 第3章 岩土工程中常用的单元 | 42 |
| 3.1 单元的特征 | 42 |
| 3.1.1 单元族 | 42 |
| 3.1.2 自由度 | 43 |
| 3.1.3 节点数目 | 43 |
| 3.1.4 数学公式 | 44 |
| 3.1.5 积分 | 44 |
| 3.2 岩土工程常用的单元 | 44 |
| 3.2.1 实体(连续体)单元 | 44 |
| 3.2.2 梁单元 | 49 |
| 3.2.3 杆单元 | 52 |
| 3.2.4 孔压单元 | 53 |
| 3.2.5 无限元 | 53 |
| 3.2.6 管土相互作用单元 | 57 |
| 本章小结 | 60 |
| 第4章 岩土工程中常用的本构模型 | 61 |
| 4.1 应力状态的描述 | 61 |
| 4.1.1 应力张量 | 61 |
| 4.1.2 应力张量的分解 | 61 |
| 4.1.3 应力张量不变量和偏应力不变量 | 62 |
| 4.1.4 应力空间 | 62 |
| 4.2 弹性模型 | 62 |
| 4.2.1 线弹性模型 | 62 |
| 4.2.2 多孔介质弹性模型 | 65 |
| 4.3 塑性模型 | 67 |
| 4.3.1 Mohr-Coulomb (摩尔库仑) 模型 | 67 |
| 4.3.2 扩展的 Drucker-Prager 模型 | 70 |
| 4.3.3 修正 Drucker-Prager 帽盖模型 | 77 |
| 4.3.4 临界状态塑性模型 (Critical state plasticity model) | 81 |

| | | | |
|---|-----|---|-----|
| 4.4 算例分析 | 83 | 6.2.3 Mises 弹塑性模型的 UMAT 子程序 编写实例 | 116 |
| 4.4.1 采用不考虑剪胀的 Mohr-Coulomb 模型 | 83 | 6.3 用户自定义接触面摩擦模型子 程序 FRIC | 126 |
| 4.4.2 考虑剪胀的分析 | 87 | 6.3.1 FRIC 子程序格式和变量说明 | 126 |
| 4.4.3 考虑初始应力的分析 | 87 | 6.3.2 如何在分析中使用自定义 接触面摩擦模型 | 127 |
| 4.5 本章小结 | 88 | 6.3.3 非线性弹性摩擦模型 | 128 |
| 第 5 章 接触面理论及应用 | 89 | 6.4 用户自定义单元子程序 UEL | 135 |
| 5.1 接触对 | 89 | 6.4.1 UEL 子程序格式和变量说明 | 135 |
| 5.1.1 基本特性 | 89 | 6.4.2 如何在分析中使用自定义单元 | 137 |
| 5.1.2 接触对定义中的关键问题 | 89 | 6.4.3 平面三节点线弹性梁单元 UEL 子程序编写实例 | 139 |
| 5.1.3 接触对的定义方法 | 92 | 6.5 其他几个常用的用户子程序 | 143 |
| 5.2 接触面相互作用力学模型 | 94 | 6.5.1 自定义边界条件子程序 DISP | 144 |
| 5.2.1 接触面的法向模型 | 94 | 6.5.2 自定义载荷子程序 DLOAD | 144 |
| 5.2.2 接触面的摩擦模型 | 95 | 6.5.3 自定义初始孔隙比分布的 子程序 VOIDRI | 144 |
| 5.2.3 接触面的计算输出结果 | 96 | 6.6 本章小结 | 145 |
| 5.2.4 接触面力学模型定义方法 | 97 | 第 7 章 用户自定义材料二次开发 | 146 |
| 5.3 接触面模拟中可能遇到的问题 | 100 | 7.1 邓肯模型的二次开发 | 146 |
| 5.3.1 接触面的初始相对位置 | 100 | 7.1.1 邓肯模型介绍 | 146 |
| 5.3.2 正确定义表面 | 101 | 7.1.2 邓肯模型的 UMAT 子程序编写 | 147 |
| 5.3.3 避免迭代次数过多 | 102 | 7.1.3 三种不同的应力积分算法 | 147 |
| 5.3.4 避免过约束 (Overconstraints) | 103 | 7.1.4 算例验证 | 152 |
| 5.4 算例分析 | 103 | 7.2 边界面模型的二次开发 | 158 |
| 5.4.1 问题的描述 | 103 | 7.2.1 边界面模型介绍 | 159 |
| 5.4.2 创建部件 | 103 | 7.2.2 边界面模型的应力积分算法 | 161 |
| 5.4.3 设置材料和截面属性 | 104 | 7.2.3 编程要点 | 164 |
| 5.4.4 装配部件 | 105 | 7.2.4 算例验证 | 165 |
| 5.4.5 定义分析步 | 105 | 7.3 本章小结 | 167 |
| 5.4.6 定义接触 | 105 | 第 8 章 土体固结沉降分析 | 168 |
| 5.4.7 定义载荷、边界条件 | 106 | 8.1 ABAQUS/Standard 中的固结计算功能 | 168 |
| 5.4.8 划分网格 | 106 | 8.2 ABAQUS/Standard 中与固结计算 相关的基本概念 | 168 |
| 5.4.9 提交任务 | 107 | 8.2.1 孔隙介质中的流体流动 | 168 |
| 5.4.10 结果处理 | 107 | 8.2.2 有效应力原理 | 169 |
| 5.5 本章小结 | 110 | 8.2.3 固结计算中的孔压 | 169 |
| 第 6 章 用户子程序 | 111 | 8.3 使用流体渗透/应力耦合分析步进行 固结计算 | 169 |
| 6.1 用户子程序总体介绍 | 111 | | |
| 6.1.1 用户子程序的基本知识 | 111 | | |
| 6.1.2 用户子程序编写注意事项 | 111 | | |
| 6.2 用户自定义材料子程序 UMAT | 112 | | |
| 6.2.1 UMAT 子程序格式和变量说明 | 113 | | |
| 6.2.2 如何在分析中使用自定义材料 | 114 | | |

| | | | | | |
|---------------|-----------------------------------|------------|---------------|------------------------------|------------|
| 8.3.1 | 分析类型 | 169 | 11.1 | 动力求解方法的简单介绍 | 250 |
| 8.3.2 | 增量步时间步长的选择 | 171 | 11.1.1 | 模态分析方法 | 250 |
| 8.3.3 | 单元选择 | 173 | 11.1.2 | 直接积分法 | 251 |
| 8.3.4 | 材料模型 | 173 | 11.1.3 | 动力分析中的阻尼 | 251 |
| 8.3.5 | 载荷和边界条件 | 174 | 11.2 | ABAQUS/Standard 中的隐式积分 算法 | 252 |
| 8.3.6 | 设置初始条件 | 174 | 11.2.1 | 隐式积分方法的特点 | 252 |
| 8.3.7 | 固结计算中的输出变量 | 176 | 11.2.2 | 隐式积分算法中的时间步长控制 | 252 |
| 8.3.8 | 固结计算中的单位 | 177 | 11.2.3 | 使用隐式积分算法求解动力问题 | 253 |
| 8.4 | 算例 | 177 | 11.3 | ABAQUS/Explicit 中的显式积分算法 | 255 |
| 8.4.1 | 太沙基 (Terzaghi) 一维固结 | 177 | 11.3.1 | 显式方法适用的问题类型 | 255 |
| 8.4.2 | 剑桥粘土地基固结分析 | 183 | 11.3.2 | 显式算法的条件稳定性 | 256 |
| 8.4.3 | 堆载预压模拟 | 198 | 11.3.3 | 隐式积分算法中的时间步长控制 | 257 |
| 8.5 | 本章小结 | 204 | 11.3.4 | 使用显式积分算法求解动力问题 | 258 |
| 第 9 章 | 非饱和渗流与流固耦合分析 | 205 | 11.4 | 隐式与显式求解方法的比较 | 259 |
| 9.1 | 非饱和渗流问题中的边界条件 | 205 | 11.4.1 | 一般比较 | 259 |
| 9.1.1 | 土坝渗流的典型边界条件 | 205 | 11.4.2 | 节点自由度增加对计算资源耗费的 影响 | 260 |
| 9.1.2 | ABAQUS/Standard 提供的特殊 渗流边界条件功能 | 206 | 11.5 | 算例分析 | 260 |
| 9.2 | 非饱和渗流问题中的材料模型 | 209 | 11.5.1 | 低应变动力检测方法原理简介 | 260 |
| 9.2.1 | 饱和度对渗透性能的影响 | 209 | 11.5.2 | 一维杆件内应力波的传递分析 | 261 |
| 9.2.2 | 饱和度与基质吸力之间的关系 | 209 | 11.5.3 | PCC 桩低应变检测中的三维效应 | 267 |
| 9.3 | 算例 | 211 | 11.6 | 本章小结 | 280 |
| 9.3.1 | 二维均质土坝的稳定渗流分析 | 211 | 第 12 章 | 桩基承载力分析 | 281 |
| 9.3.2 | 三维混合坝的稳定渗流分析 | 217 | 12.1 | 桩基承载力理论 | 281 |
| 9.3.3 | 边坡降雨入渗分析 | 222 | 12.1.1 | α 方法 | 281 |
| 9.4 | 本章小结 | 233 | 12.1.2 | β 方法 | 281 |
| 第 10 章 | 自定义排水板单元的二次开发 | 234 | 12.2 | 桩的加载速度 | 282 |
| 10.1 | 排水板地基固结的常规处理方法 | 234 | 12.3 | 算例分析 | 283 |
| 10.2 | 自定义排水板单元的开发 | 235 | 12.3.1 | 不排水条件下的竖直受载桩 | 283 |
| 10.2.1 | 排水板单元的构造 | 235 | 12.3.2 | 排水条件下的竖直受载桩 | 290 |
| 10.2.2 | 排水板单元的理论推导 | 236 | 12.3.3 | 管桩竖向载荷作用下的工作性状 | 292 |
| 10.2.3 | 排水板 UEL 子程序的编写 | 239 | 12.3.4 | 桩在水平载荷作用下的工作性状 | 294 |
| 10.3 | 自定义排水板单元的算例验证 | 241 | 12.4 | 本章小结 | 297 |
| 10.3.1 | 采用实体单元划分排水板的 算例 | 241 | 第 13 章 | 岩土开挖问题求解 | 298 |
| 10.3.2 | 采用自定义实体单元划分排水板的 算例 | 246 | 13.1 | ABAQUS 中的单元生死功能 | 298 |
| 10.3.3 | Hansbo 理论解答 | 248 | 13.1.1 | 单元的移除 | 298 |
| 10.4 | 本章小结 | 249 | 13.1.2 | 单元的激活 | 298 |
| 第 11 章 | 桩基低应变检测的数值模拟 | 250 | 13.1.3 | 接触对的移除和激活 | 299 |
| | | | 13.1.4 | 单元生死操作中的注意事项 | 299 |

| | | |
|---------------|------------------------------|------------|
| 13.2 | 算例分析 | 300 |
| 13.2.1 | 隧道开挖分析 | 300 |
| 13.2.2 | 内撑式基坑开挖模拟 | 308 |
| 13.3 | 本章小结 | 314 |
| 第 14 章 | 岩土贯入问题求解 | 315 |
| 14.1 | 岩土贯入问题的有限元处理思路 | 315 |
| 14.2 | ABAQUS 中的 ALE 方法 | 316 |
| 14.2.1 | 在 ABAQUS/Explicit 中激活 ALE 功能 | 317 |
| 14.2.2 | ALE 方法的网格划分方法及控制参数 | 318 |
| 14.2.3 | ALE 方法的解答传输方法 | 322 |
| 14.2.4 | ALE 分析中的结果分析 | 323 |
| 14.3 | 岩土贯入问题算例 | 323 |
| 14.3.1 | 静压桩挤土效应数值模拟 | 323 |
| 14.3.2 | 粘土地基中的 CPT 圆锥静力贯入试验模拟 | 334 |
| 14.4 | 本章小结 | 342 |
| 第 15 章 | 土石坝的静力与动力分析 | 343 |
| 15.1 | 基于 ABAQUS 的土石坝静力分析 | 343 |
| 15.1.1 | 邓肯模型的开发 | 343 |

| | | |
|---------------|--------------------|------------|
| 15.1.2 | 填方分层施工模拟及新填土层的位移修正 | 344 |
| 15.1.3 | 浸水湿化变形的处理 | 344 |
| 15.2 | 基于 ABAQUS 的土石坝动力分析 | 345 |
| 15.2.1 | 等效线性模型的开发 | 345 |
| 15.2.2 | 坝体材料的液化判别 | 347 |
| 15.2.3 | 永久变形分析 | 347 |
| 15.3 | 算例分析 | 348 |
| 15.3.1 | 理想均质土石坝的施工及蓄水过程模拟 | 348 |
| 15.3.2 | 一维场地地震反应模拟 | 363 |
| 15.3.3 | 三维心墙土石坝静、动力分析 | 373 |
| 15.4 | 本章小结 | 392 |
| 第 16 章 | 边坡稳定性分析 | 393 |
| 16.1 | 强度折减法的基本原理 | 393 |
| 16.2 | 强度折减法在 ABAQUS 中的实现 | 394 |
| 16.3 | 算例分析 | 394 |
| 16.3.1 | 二维均质土坡稳定性分析 | 394 |
| 16.3.2 | 抗滑桩加固土坡稳定性分析 | 404 |
| 16.4 | 本章小结 | 411 |
| 参考资料 | | 412 |

第 1 章 ABAQUS 的功能与特点

有限元法有几个突出的优点：①可以用于求解非线性问题，可以在计算中模拟各种复杂的材料本构关系；②易于处理非均质问题、模拟各向异性材料；③能适应各种复杂的边界条件；④前处理和后处理技术的发展，可较方便地进行大量方案的比较分析，并迅速用图形表示计算结果，有利于工程方案的优化。岩土工程恰恰存在这几个方面的问题，因此很适宜采用有限元法。

ABAQUS 是国际上功能最强的大型通用有限元软件之一，包含十分丰富的单元模式、材料模型以及分析过程，在求解高度非线性问题方面的能力十分优异，对岩土工程具有较强的适用性。本章将介绍 ABAQUS 的功能与特点。

本章要点：

- 认识 ABAQUS
- ABAQUS 基础

1.1 认识 ABAQUS

ABAQUS 是由达索 SIMULIA 公司（原 ABAQUS 公司）进行开发、维护及售后的有限元分析软件，是世界上最著名的非线性有限元分析软件之一，得到了全球工业界和学术界广泛接受和认可。经过多年的发展，2007 年 SIMULIA 公司推出了 ABAQUS 6.7 版本，其在网格生成功能、接触对的自动识别和设置及 CAD 建模工具的实时相关联等方面较之前版本有了很大程度的改善。因此，本书内容基于 ABAQUS 6.7.1 版本进行编写，本书中若不加说明，ABAQUS 都指代 ABAQUS 6.7.1。当然，本书的绝大多数内容也适合于 ABAQUS 的其他版本。

1.1.1 ABAQUS 软件产品

ABAQUS 的分析模块有两个：ABAQUS/Standard 和 ABAQUS/Explicit。针对某些特殊问题，ABAQUS/Standard 拥有四个额外的专用模块来加以解决，即 ABAQUS/Aqua、ABAQUS/Design、ABAQUS/AMS 和 ABAQUS/Foundation。针对模型的前后处理，ABAQUS 提供了一个全面支持求解器的图形用户界面，即人机交互前后处理模块 ABAQUS/CAE，在该模块中可以针对 ABAQUS/Standard 或 ABAQUS/Explicit 问题进行建模、提交任务、监控运算过程和结果的后处理。ABAQUS/Viewer 是 ABAQUS/CAE 的子模块，它只包含了结果后处理功能。另外，ABAQUS 还为 MOLDFLOW、MSC.ADAMS 和其他第三方 CAD 软件之间提供了相应的接口。各模块的特点简述如下：

1. ABAQUS/Standard

ABAQUS/Standard 是一个通用分析模块，可求解绝大多数线性和非线性问题，包括静力、动力、热传导、流体渗透/应力耦合分析等问题。

2. ABAQUS/Explicit

ABAQUS/Explicit 采用显式动态有限元格式, 适用于模拟短暂或瞬时动态问题, 如冲击和爆炸载荷作用下的结构响应等。另外, ABAQUS/Explicit 在分析由于复杂接触条件导致的高度非线性问题时也十分有效, 如板材锻压、冲压成型问题等。

3. ABAQUS/CAE

ABAQUS/CAE 是 ABAQUS 的交互式图形用户界面, 其具有强大的后处理功能, 如建立模型的几何形状、选择材料模型及设定材料参数、选择分析过程的类型、设定载荷、边界条件、考虑接触、网格划分、结果后处理问题。通过 ABAQUS/CAE 还可交互式提交任务进行计算, 并可对计算过程进行监视和控制。

4. ABAQUS/Viewer

ABAQUS/Viewer 是 ABAQUS/CAE 的子模块, 相当于 ABAQUS/CAE 中的 Visualization 功能模块。它只包含了结果后处理功能。

5. ABAQUS/Aqua

ABAQUS/Aqua 是专门用于模拟海岸结构的模块, 如海上石油平台等遭受波浪载荷、风载荷和浮力载荷作用下的结构。

6. ABAQUS/Design

ABAQUS/Design 是专门用于设计敏感度分析的模块。

7. ABAQUS/AMS

ABAQUS/AMS 是在基频提取分析中采用了自动多级子结构 AMS 技术 (automatic multi-level substructuring) 的模块。

8. ABAQUS/Foundation

ABAQUS/Foundation 为 ABAQUS/Standard 提供了处理线性静力和动力分析更有效的途径。

9. ABAQUS 的 Moldflow 接口

该接口可将 Moldflow 分析中的有限元数据转换到 ABAQUS 的输入文件中。

10. ABAQUS 的 MSC.ADAMS 接口

该接口可将 ABAQUS 中的有限元模型作为 MSC.ADAMS 产品中的一部分。

11. 几何数据交换接口

ABAQUS 提供了几何数据交换接口, 可与其他第三方 CAD 软件所生成的几何模型进行数据交换。目前支持的格式有 CATIA V4、CATIA V5、Pro/ENGINEER、I-DEAS、Parasolid、NASTRAN、PAM-CRASH RADIOSS 等。

1.1.2 ABAQUS 产品的主要功能

1. ABAQUS 可进行的分析过程

ABAQUS 提供了丰富的分析过程, 可用于多个领域中的不同问题, 主要的分析过程包括:

- 静态应力/位移分析。
- 动态分析。
- 稳态滚动分析 (如轮胎与地面的滑动、滚动接触)。
- 热传导分析和温度应力分析。
- 电场、热/电耦合, 压/电耦合分析。

- 流体渗透/应力耦合分析。

- 声场分析。

- 海洋工程结构分析。

- 退火成型过程分析。

2. ABAQUS 中的材料

ABAQUS 中包含了多种材料本构关系及失效准则模型，具体包括：

(1) 弹性模型。

- 线弹性，可以定义材料的模量、泊松比等弹性特性。

- 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。

- 多孔结构弹性，用于模拟土壤和可挤压泡沫的弹性行为。

- 亚弹性，可以考虑应变对模量的影响。

- 超弹性，可以模拟橡胶类材料的大应变影响。

- 粘弹性，时域和频域的粘弹性材料模型。

(2) 塑性模型。

- 金属塑性，符合 Mises 屈服准则的各向同性和遵循 Hill 准则的各向异性塑性模型。

- 铸铁塑性，拉伸为 Rankine 屈服准则，压缩为 Mises 屈服准则。

- 蠕变特性，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。

- 扩展的 Druker-Prager 模型，适合于砂土等粒状材料的不相关流动的模拟。

- 帽盖的 Drucker-Prager 模型，在基本 Drucker-Prager 模型的基础上增加了帽盖屈服面，反应受压导致的屈服特性。

- Cam-Clay 模型，适合于粘土类土壤材料的模拟。

- Mohr-Coulomb 模型，这种模型与 Druker-Prager 模型类似。

- 泡沫材料模型，可以模拟高度挤压材料，可应用于消费品包装及车辆安全装置等领域。

- 混凝土材料模型，这种模型包含了混凝土弹塑性破坏理论。

- 渗透性材料模型，提供了依赖于孔隙比、饱和度和流速的各向同性和各向异性材料的渗透性模型。

(3) 其他材料特性。

包括密度、热膨胀特性、热传导率和导电率、比热、压电特性、阻尼等。

(4) 用户自定义材料特性。

ABAQUS 提供了用户子程序接口，用户可以灵活地定义材料特性。

3. ABAQUS 中的单元

ABAQUS 提供了十分丰富的单元，具体包括实体单元、壳单元、薄膜单元、梁单元、杆单元、刚体元、连接元、无限元等。同时 ABAQUS 还包括针对特殊问题构建的特种单元，如针对钢筋混凝土结构或轮胎结构的加筋单元、针对海洋工程结构的反映土壤与管道相互作用的连接单元、锚链单元等，这些特殊单元对解决特定领域的特定问题十分便捷、有效。

另外，用户还可以通过用户子程序接口自定义单元种类。

4. ABAQUS 中的载荷条件和边界条件

ABAQUS 可模拟复杂的载荷条件和边界条件。可模拟的载荷包括均匀体力、不均匀体力、均匀压力、不均匀压力、静水压力、旋转加速度、离心载荷，集中力和弯矩，温度和其他场变

量, 速度和加速度等。

除了常规约束之外, ABAQUS 还提供了线性和非线性的多点约束 (MPC), 包括刚性链、刚性梁、壳体/固体连接、循环对称约束和运动耦合等。ABAQUS 强大的接触对定义与分析功能可方便地模拟不同物体之间的连接条件, 也属于约束边界条件的一类。

1.1.3 ABAQUS 在岩土工程中的适用性

与其他领域相比, 岩土工程中的数值分析有其本身的特点, 相应的有限元软件也需具备相应的功能, 简要分析如下:

(1) 拥有能够真实反映土体性状的本构模型, 如土体的屈服特性、剪胀特性等。ABAQUS 拥有摩尔库仑模型、Druker-Prager 模型、Cam-Clay 模型 (修正剑桥模型) 等, 可以真实反应土体的大部分应力应变特点。其中修正剑桥模型是很多其他通用有限元软件所没有提供的。另外, ABAQUS 还提供了二次开发接口, 用户可以灵活地自定义材料特性。

(2) 土体是典型的三相体, 普遍认为土体的强度和变形取决于有效应力, 因此软件必须能够进行有效应力计算。ABAQUS 中包含孔压单元, 可以进行饱和土和非饱和土的流体渗透 / 应力耦合分析 (如固结、渗透等), 可以满足这一要求。

(3) 岩土工程中经常涉及到土与结构的相互作用问题, 二者之间的接触特性需要得到正确的模拟。ABAQUS 具有强大的接触面处理功能, 可以正确模拟土与结构之间的脱开、滑移等现象。

(4) 岩土工程数值分析需要软件具有处理复杂边界、载荷条件的能力。这一点 ABAQUS 也是完全满足要求的, 如 ABAQUS 具有单元生死功能, 可以精确的模拟填土或开挖造成的边界条件改变; ABAQUS 还提供了无限元, 可以模拟地基无穷远处的边界条件。

(5) 岩土工程数值分析中必须考虑初始应力的作用, ABAQUS 专门提供了相应的分析步, 可以灵活、准确地建立初始应力状态。

综上所述, ABAQUS 可以求解绝大部分岩土工程问题, 在岩土工程中具有较好的适用性。

1.2 ABAQUS 基础

为了更好地掌握本书内容, 了解一些 ABAQUS 的基本知识和通用约定是十分必要和有益的。

1.2.1 ABAQUS 的文件格式

在 ABAQUS 的前、后处理及运算过程中, ABAQUS 会产生一系列的文件, 下面介绍常见的几种文件格式。

1. .cae 文件

.cae 文件是用户通过 ABAQUS/CAE 所生成的模型文件, 只能通过 ABAQUS/CAE 打开。其包含了模型几何形状、材料特性、载荷条件、边界条件、网格划分等一系列数据。

2. .dat 文件

.dat 文件通常包含了模型数据的检查信息, 如边界条件设置有无重叠、网格质量是否满足要求、问题的计算规模, 调用的内存大小等。另外, 用户也可将计算结果输出到 .dat 文件中。 .dat 文件可以用记事本、写字板或 UltraEdit 等文本编辑工具打开。

3. .fil 文件

fil 文件是 ABAQUS 的计算结果文件, 具体包含的结果数据可由用户自主控制。ABAQUS 用特定的格式对其进行读写操作, 用户可以通过 ABAQUS 提供的实用程序 (utility routines) 获得相关信息。

4. .inp 文件

inp 是 ABAQUS 的计算输入文件, 又称任务文件, 可以用记事本、写字板或 UltraEdit 等文本编辑工具打开。它包含了计算所需的所有信息, 可以由 ABAQUS/CAE 生成, 也可以由用户直接编写, 具体的 inp 文件构成会在下面专门介绍。

5. .lck 文件

lck 文件的存在是为了避免对结果数据库文件进行同时的写操作。当计算结束时或结果数据库文件关闭后, 该文件自动消失。一般来说, 用户无需理会, 但当由于停电等意外因素造成计算非正常终止之后, 若需重新提交运算, 需将该文件手工删除。

6. .log 文件

Log 文件是 ABAQUS 的日志文件, 包含各模块的起始时间和终止时间信息。可以用记事本、写字板或 UltraEdit 等文本编辑工具打开。

7. .msg 文件

msg 文件包含了计算过程中的非常有用的信息, 如各分析步的非线性计算收敛标准, 各增量步的步长、迭代次数、迭代过程等。通过 msg 文件, 用户可以了解运算中不收敛的因素, 可做出相应的调整。该文件可以用记事本、写字板或 UltraEdit 等文本编辑工具打开。

8. .odb 文件

odb 是 ABAQUS 的计算结果数据库文件。可以由 ABAQUS/CAE 或 ABAQUS/Viewer 打开。

9. .res 文件

res 是重启动文件, 包含了重启动所必需的模型信息。

10. .sta 文件

sta 文件是状态文件, 可以用记事本、写字板或 UltraEdit 等文本编辑工具打开。该文件包含各增量步的概要信息, 如当前分析步、当前增量步、当前增量步长、迭代次数等。在计算过程中打开该文件可以知道计算进度。

11. .stt 文件

stt 文件是 ABAQUS 自动生成的临时文件, ABAQUS 会对其进行读写操作。计算结束后, 如计算中没有指定重启动输出, stt 文件会自动消失。

12. .023 文件

023 也是由 ABAQUS 自动生成的临时文件, 计算结束后该文件自动消失。一般来说, 用户无须理会, 但当由于停电等意外因素造成计算非正常终止之后, 若需重新提交运算, 需将该文件手工删除。

13. .rpy 文件

在 ABAQUS/CAE 建模过程中, ABAQUS 会自动生成 abaqus.rpy 文件, 该文件中包含 CAE 建模过程中的命令。如果一个目录下已经存在 rpy 文件, ABAQUS 会自动增加一个数字后缀加以区别, 如 abaqus.rpy.1, abaqus.rpy.2 等。

1.2.2 ABAQUS 的一些基本约定

1. 自由度编号

这里主要介绍岩土工程分析中所可能涉及到的自由度。除了轴对称单元，ABAQUS 中的自由度编号意义如下：

- 1: x 向位移
- 2: y 向位移
- 3: z 方向位移
- 4: 绕 x 轴的转角, 弧度
- 5: 绕 y 轴的转角, 弧度
- 6: 绕 z 轴的转角, 弧度
- 8: 孔隙压力

注意: 这里的 x、y 和 z 分别对应于所选坐标系的 X 轴、Y 轴和 Z 轴。

对于轴对称单元, 自由度编号含义如下:

- 1: r 向位移
- 2: z 向位移
- 5: 绕 z 轴的转角, 弧度
- 6: r-z 平面内的转角, 弧度
- 8: 孔隙压力

注意: 这里的 r 和 z 分别对应于所选坐标系的 X 轴和 Y 轴。

2. 坐标系

ABAQUS 中的默认坐标系是右手笛卡尔直角坐标系。用户可以自己定义任意满足右手法则的局部坐标系。

3. 单位

在 ABAQUS 中, 旋转的单位是弧度, 角度的单位是度。除此之外, ABAQUS 中并不限制物理量的具体单位。因而, 用户必须保证所选用的单位是相互协调的。如国际单位制 (SI) 之间的单位就是协调的, 长度的单位是米 (m), 质量的单位是千克 (kg), 时间的单位是秒 (s), 力的单位是牛顿 (N) 等。表 1-1 给出了常用的单位。

表 1-1 常用量纲系统

| 量词 | SI | SI | US Unit(ft) | US Unit(inct) |
|----|-----------------------|-------------------------|----------------------|-------------------------------------|
| 长度 | m | mm | ft | in |
| 载荷 | N | N | lbf | lbf |
| 质量 | kg | Tonne(10^3 kg) | slug | Lbfs 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 |

4. 时间

ABAQUS 中的时间度量有两种，一是分析步时间，从各分析步的起始开始计算；二是总的的时间，起始为零，对除线性扰动分析步之外的所有分析步进行累计。

5. 应力和应变分量的约定

在定义材料本构关系时，ABAQUS 采用的是有效应力。应力存储的顺序和符号含义为：

σ_{11} ：1 方向的正应力

σ_{22} ：2 方向的正应力

σ_{33} ：3 方向的正应力

τ_{12} ：1-2 平面上的剪应力

τ_{13} ：1-3 平面上的剪应力

τ_{23} ：2-3 平面上的剪应力

应变的存储顺序和符号含义是相似的，需要注意 ABAQUS 中的剪应变是工程剪应变。

注意：这里的方向 1、2 和 3 取决于所选的单元类型，对于实体单元分别为坐标系的三个坐标轴方向。

1.2.3 ABAQUS 的运行命令

ABAQUS 有两种运行方式，一是在 ABAQUS 的命令行窗口键入各种命令来进行 ABAQUS 的各种操作，另外一种就是通过 ABAQUS/CAE 提供的交互功能执行各种操作。ABAQUS 提供了相当丰富的命令语句，这里介绍常用的几种。

提示：执行【开始】/【所有程序】/【ABAQUS 6.7-1】/【ABAQUS Command 命令】可以调出 ABAQUS 命令行窗口。

1. 运行 ABAQUS/Standard 和 ABAQUS/Explicit 的相关命令

执行 ABAQUS/Standard 和 ABAQUS/Explicit 的相关命令为：

abaqus **job**=*job-name*

[**analysis** | **datacheck** | **parametercheck** | **continue** | **convert**={select | odb | state | all} | **recover** | **syntaxcheck** | **information**={environment | local | memory | release | support | system | all}]

[**input**=*input-file*]

[**user**={*source-file* | *object-file*}]

[**oldjob**=*oldjob-name*]

[**fil**={append | new}]

[**globalmodel**={*results file-name* | *output database file-name*}]

[**cpus**=*number-of-cpus*]

[**parallel**={*domain* | loop}]

[**domains**=*number-of-domains*]

[**mp_mode**={mpi | threads}]

[**standard_parallel**={all | solver}]

[**memory**=*memory-size*]

[interactive | background | queue=[queue-name][after=time]]
[double]
[scratch=scratch-dir]
[output_precision={single | full}]
[active_topology={off | on}]
[madymo=MADYMO-input-file]
[port=co-simulation port-number]
[host=co-simulation hostname]
[timeout=co-simulation timeout value in seconds]

- 注意：** (1) 黑体字为可进行的操作选项关键字，其在命令语句中的前后次序不限。
 (2) 带下划线的字符为相应操作的默认选项。
 (3) 方括号 [] 内的为可选操作选项。
 (4) 括号 “{ }” 内用 “|” 分隔的选项相互排斥，必须选择且仅能选择其中的一个。
 (5) 斜体字符代表的选项由用户赋值。
 (6) 各操作选项之间用空格分隔。
 (7) ABAQUS 支持选项关键字的简写，如 interactive 可写成 int。

常用的操作关键字含义解释如下：

(1) job. job 选项为必选选项，它的值指定了任务名称，计算产生的所有文件都以任务名称开头，如 job=job-name，则计算结果文件会自动命名为 job-name.odb。

(2) analysis. analysis 选项意味着 ABAQUS 将进行完整的分析，若命令行中不包含 datacheck、parametercheck、continue 和 convert 选项，ABAQUS 将默认选用 analysis 选项。

(3) input. input 选项的值给出了计算所需的任务文件，带或者不带 inp 后缀名都可以。如果命令行中不包含 input 选项，ABAQUS 会在工作目录下搜索以任务名开头的 inp 文件 job-name.inp。

(4) user. user 选项的值指定了计算中所需要的用户子程序文件，可以包含路径名。

(5) interactive. 若命令行包含 interactive 选项，ABAQUS 会将计算过程中的一些信息输出到屏幕上，如 ABAQUS/Standard 会将 log 文件的信息输出到屏幕上，而 ABAQUS/Explicit 会将 sta 文件和 log 文件的信息输出到屏幕上。这样，用户就可以大致了解计算进程。

(6) background. 若命令行包含 background 选项，计算将在后台进行，该选项为默认选项。

在 ABAQUS 命令行窗口键入上述命令可以实现相应的操作，如下列语句将在后台进行任务名为 test，输入文件为 test.inp 的完整计算：

```
abaqus analysis job=test input=test background
```

或者，上述语句也可简化为：

```
abaqus job=test
```

其他关键字的含义读者可以参照 ABAQUS 帮助文档。

2. 运行 ABAQUS/CAE 的命令

```
abaqus cae [database=database-file]
```

```
[replay=replay-file]
```

```
[recover=journal-file]
```