



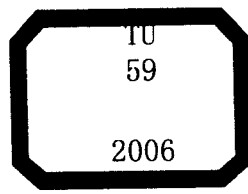
ABAQUS 在土木工程中的应用

王金昌 陈页开 编著



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS

浙江大学出版社



ABAQUS 在土木工程中的应用

王金昌 陈页开 编著

浙江大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

ABAQUS 在土木工程中的应用. 王金昌, 陈页开编著.
杭州: 浙江大学出版社, 2006. 11
ISBN 7-308-05072-6

I. A... II. ①王... ②陈... III. 土木工程—有限
元分析—应用软件. ABAQUS—教材 IV. TU-39

· 中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 142382 号

ABAQUS 在土木工程中的应用

王金昌 陈页开 编著

责任编辑 石国华

封面设计 俞亚彤

出版发行 浙江大学出版社

(杭州天目山路 148 号 邮政编码 310028)

(网址: <http://www.zjupress.com>)

排 版 浙江大学出版社电脑排版中心

印 刷 浙江省煤田地质局制图印刷厂

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 20.5

字 数 492 千

版 印 次 2006 年 11 月第 1 版 2006 年 11 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 7-308-05072-6

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部邮购电话 (0571)88072522

内 容 简 介

本书为 ABAQUS 软件在土木工程领域应用实例教材,在重点介绍岩土及混凝土材料本构模型理论及在 ABAQUS 软件中实现的基础上,通过一系列土木工程应用实例,介绍了土木工程分析在 ABAQUS 中的实现方法。在工程算例部分,介绍了 ABAQUS 软件在岩土工程及结构分析中的各种应用,具体包括土体强度、桩土共同作用、固结、开挖等问题分析、混凝土静动力开裂分析以及沥青混凝土方面的静动力分析。

本书可作为高校土木专业老师、研究生和本科生教学和学习用书,也可作为科研人员以及土木工程的工程师和技术人员的专业参考书或培训教材。

前 言

硕士阶段开始接触、学习和应用有限元,从最初应用有限元模拟分析变温及车辆荷载作用下沥青混凝土路面结构中裂纹的扩展过程,到后来采用有限元分析了很多土木工程问题诸如单桩承载力、复合地基、路基路面共同作用、上部结构与地基共同作用、飞机对机场跑道的冲击、桥梁工程等。宁波理工学院引进 ABAQUS 更促进了笔者进一步采用 ABAQUS 分析土木工程问题。学习应用 ABAQUS 也已经有 4 年光景。ABAQUS 最引起我关注的是它包含了丰富的材料本构模型,另一个更为重要的是它平易近人的开发平台,其提供了丰富的例程序,尤其是材料本构模型接口程序 UMAT 和单元库接口程序 UEL,从而我们可以站在“巨人”的肩膀上继续前进。

“工欲善其事,必先利其器”。我们对客观事物的认知程度很大程度上取决于我们采用的工具,所以必须提高使用工具的能力和水平。虽然随着网络等先进交流工具的发展而使知识和技能的传播和学习时间缩短,但由于 ABAQUS 对高校不提供技术支持以及其他一些原因,我们基本上还是需要实践中慢慢地掌握。庆幸的是,ABAQUS 软件中的帮助资料库相当丰富,为我们的实践平台提供了广泛的资源。但由于专业英语中专业词语的制约,我们很多使用者并不能方便灵活地使用它。而目前关于 ABAQUS 中文书籍比较欠缺,于是我鼓足勇气写了这本 ABAQUS 在土木工程应用的书籍,以此抛砖引玉,为更多使用者尽微薄之力。所幸得到 ABAQUS 在北京代表处的很大支持。书稿一拖再拖,ABAQUS 北京代表处也给予理解,让笔者甚是感激。

书籍将成之际,内心稍有不安。恐自己知识浅薄而误导读者,且因此而经多方检验、探讨但仍有担忧,恐笔者微薄之力尚不能挖掘此软件之精华或因笔者善意之过失而有误导之结果,但这些情绪并不能阻止自己继续工作的努力,并且强烈建议读者以批判的眼光读此书,对其中有异议的地方进行校验,也热情欢迎与笔者进行交流互动。实际上任何工具都必须进行有效性验证,在使用 ABAQUS 软件时,单元类型、单元尺寸、材料本构模型类型、材料本构模型的参数、还有模型的尺寸等等均必须进行有效性验证和标定。实践,只有实践才是我们前进的永不枯竭的动力。谨以此书献给广大读者,以期相互促进,相互提高。

与师兄陈页开的愉快合作,源远流长。特别感谢在成书之际彭从文老师对第三章内容的辛苦校对。

常林越、华爱娅绘制了部分图表工作,在此表示感谢。

特别感谢我的妻子金尔女士一直以来的理解、支持和鼓励。

本书在浙江大学王金昌和华南理工大学陈页开共同拟定编写大纲基础上进行编写,第 1 章由王金昌编写,第 2 章由陈页开、王金昌编写,第 3 章由王金昌编写,第 4 章由王金

昌、陈页开编写,第 5~7 章由陈页开编写,第 8 章由陈页开、王金昌编写,第 9 章由陈页开、彭从文编写,第 10~14 章由王金昌编写(其中 11.7 节由朱明双编写,13.1 节由朱越峰编写)。全书由王金昌统稿。

王金昌

2006 年 11 月于浙江大学玉泉校区

E-mail:wjc501@126.com

目 录

第 1 章 土木工程分析与 ABAQUS	(1)
1.1 ABAQUS 在中国的发展	(1)
1.2 ABAQUS 功能简介	(1)
1.3 ABAQUS 帮助文档	(6)
第 2 章 岩土的本构模型	(7)
2.1 应力不变量和应力空间	(7)
2.2 弹性模型	(10)
2.3 Mohr-Coulomb 塑性模型	(16)
2.4 扩展的 Drucker-Prager 模型	(20)
2.5 修正 Drucker-Prager/Cap 模型	(39)
2.6 修正剑桥模型	(47)
2.7 节理材料模型	(55)
2.8 用户自定义材料子程序 UMAT	(60)
第 3 章 混凝土本构模型	(68)
3.1 混凝土弥散开裂	(68)
3.2 混凝土开裂模型	(76)
3.3 混凝土和其他脆性材料的损伤塑性模型	(82)
3.4 与混凝土相关的关键命令介绍	(94)
第 4 章 土木工程分析中的几个关键问题	(98)
4.1 土木工程典型问题	(98)
4.2 渗流和变形的耦合分析	(98)
4.3 初始应力场	(101)
4.4 与场变量有关的材料参数	(105)
第 5 章 土体强度分析	(110)
5.1 地基极限承载力计算	(110)
5.2 土坡稳定分析	(113)
5.3 节理岩石边坡稳定性分析	(118)
5.4 抗滑桩加固土坡稳定性分析	(122)

第 6 章 土的渗流计算	(125)
6.1 坝基渗流计算	(125)
6.2 非饱和土的毛细现象分析	(127)
6.3 土体减饱和过程分析	(132)
6.4 土坝渗流自由面的计算	(136)
6.5 水库水位升降过程中土坝渗流分析	(141)
第 7 章 土体固结分析	(148)
7.1 一维固结问题分析	(148)
7.2 非饱和土的一维固结分析	(158)
7.3 三轴试样固结分析	(163)
7.4 二维大变形固结分析	(170)
7.5 砂井固结分析	(172)
第 8 章 桩土共同作用分析	(183)
8.1 单桩承载力特性分析	(183)
8.2 桩的负摩阻力分析	(188)
8.3 复合地基堆载过程数值模拟研究	(195)
第 9 章 岩土开挖分析	(201)
9.1 基坑开挖过程模拟分析	(201)
9.2 考虑渗流和变形耦合时基坑开挖分析	(204)
9.3 隧道开挖和支护过程二维模拟	(209)
9.4 隧道开挖过程三维模拟	(220)
第 10 章 混凝土材料力学性能分析	(225)
10.1 混凝土弥散开裂模型	(225)
10.2 混凝土损伤塑性参数的标定及验证	(227)
10.3 脆性开裂本构模型	(231)
第 11 章 混凝土静力分析	(234)
11.1 混凝土坍落分析	(234)
11.2 单向钢筋加强的混凝土板分析	(237)
11.3 混凝土板的崩塌分析	(239)
11.4 缺口混凝土梁三点弯曲分析	(244)
11.5 缺口混凝土梁混合模式破坏分析	(248)
11.6 考虑火灾影响的水泥混凝土梁分析	(252)
11.7 现浇薄壁筒桩水平受荷分析	(255)
第 12 章 混凝土结构动力分析	(261)
12.1 混凝土坝的地震响应分析	(261)
12.2 三维框架体系的地震响应分析	(267)

目 录

12.3	移动车辆对路侧防撞护墙的冲击响应分析·····	(269)
第 13 章	简支桥梁结构分析 ·····	(274)
13.1	新型桥梁结构——波形钢腹板箱梁桥的空间分析·····	(274)
13.2	钢挂桥梁分析·····	(282)
第 14 章	沥青混凝土分析 ·····	(285)
14.1	粘弹性基本理论·····	(285)
14.2	一维沥青混凝土杆的粘弹性分析·····	(288)
14.3	简单的沥青混凝土粘弹塑性分析·····	(289)
14.4	沥青混凝土路面粘弹塑性分析·····	(294)
14.5	含裂缝沥青混凝土路面动力分析·····	(304)
14.6	粘聚带模型在沥青混凝土路面中的应用·····	(310)
参考文献	·····	(315)

第 1 章 土木工程分析与 ABAQUS

1.1 ABAQUS 在中国的发展

作为一种功能强大的有限元分析软件,ABAQUS 在商业有限元软件中占有极其重要的位置。从简单的线弹性问题到复杂的几何非线性和材料非线性问题均获得了广泛应用。其有效性不论在工程应用还是在科学研究方面均得到了验证。ABAQUS 包含了丰富的单元库和材料库,能够模拟各种材料受力和变形行为,特别是其提供了 UMAT 和 UEL,为研究者提供了开发平台。

1.2 ABAQUS 功能简介

以 ABAQUS6.5 为例,ABAQUS 安装完成后,在程序菜单出现的 ABAQUS 工具条下有以下几个选项:

- ABAQUS CAE
- ABAQUS Command
- ABAQUS Documentation
- ABAQUS Licensing
- ABAQUS Verification
- ABAQUS Viewer
- My ABAQUS
- Uninstall ABAQUS

经常用到的主要是前三项,为了使 ABAQUS 计算所涉及的文件均存储到同一目录下,运行 ABAQUS Command 比较方便,在 ABAQUS Command 的 Dos 窗口下,运行批处理文件 abq651.bat,该文件存放在 C:\ABAQUS\Command 目录下(假定 ABAQUS 安装在 C 盘根目录下),为了方便可将该文件另外保存为 aba.bat。该文件所包含的内容为

```
@echo off  
C:\ABAQUS\6.5.1\exec\abq651.exe %*
```

接下来就可以运行 ABAQUS 不同模块了。如

Aba cae 进入 CAE 界面;

Aba viewer

进入后处理；

Aba job=wang interactive

交互式运行 wang.inp 文件；

Aba job=wang datacheck interactive 交互运行 wang.inp 文件,且仅对其进行数据检查；

Aba fetch job=terzaphi_cpe8p.inp 将 terzaphi_cpe8p.inp 解压释放到当前目录下,因为文件名字比较长,可以仿前面定义批处理文件的方式进行类似处理,如定义文件名为 f.bat,其内容为 Aba fetch job=terzaphi_cpe8p.inp,在当前目录下键入 f 并回车,即可完成文件的释放存储。

有限元软件主要由前处理、计算和后处理三部分组成,ABAQUS 有限元软件也不例外。图 1.2.1 为 ABAQUS/CAE 界面图,由图可知,ABAQUS/CAE 由十部分构成,分别为 Part、Property、Assembly、Step、Interaction、Load、Mesh、Job、Visualization 和 Sketch,界面左侧为与之部分对应的树状图,界面底部分别为输出窗口和 Python 脚本语言输入窗。

1. Part 模块

ABAQUS/CAE:Part module→Part→Create,可以创建 3D、2D Planar 和 Axisymmetric 三种类型几何模型,几何模型的类型可以是变形体和刚体,几何属性可以为实体、壳、线和点。这里值得注意的是轴对称问题被单独提出来进行分析,而平面应力和平面应变问题则被包含在 2D Planar 中。

生成 Part 后,为了对 Part 不同部分赋予不同材料参数、接触的定义、规则网格划分等原因,往往需要对 Part 进行切割,切割一般需要进行两步操作才能完成,首先是定义切割平面,定义方式:Part module→Tools→Datum 进行定义,对于切割平面很多时候是采用 Offset from principal plane(xy plane, xz plane 和 yz plane)、Offset from plane 和 3 points。工作平面定义完成后就可以进行切割了,切割的操作方式:Part module→Tools→Partition。

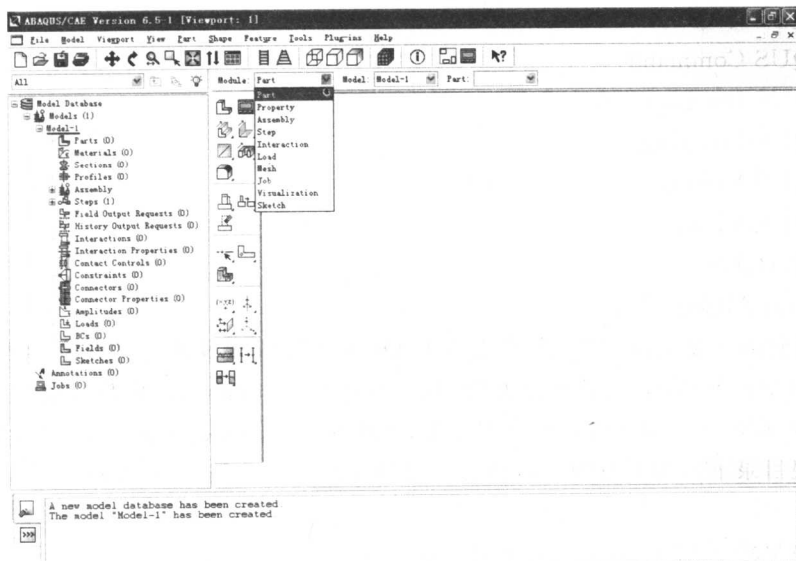


图 1.2.1 ABAQUS/CAE 界面

2. Property 模块

该模块主要用于定义材料的本构模型, ABAQUS 中封装了大量可用于土木工程的本构模型, 通过 Property→Material→Create→Mechanical 进行定义。其中 Elasticity 和 Plasticity 所包含的内容见图 1.2.2 和图 1.2.3 所示。本书所涉及的土木工程材料本构模型将在后面的章节中详细阐述。

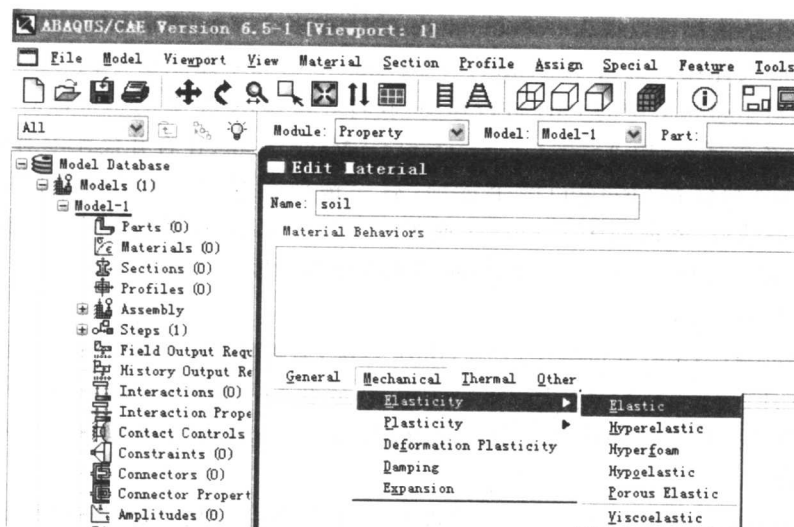


图 1.2.2 弹性部分所涵盖内容

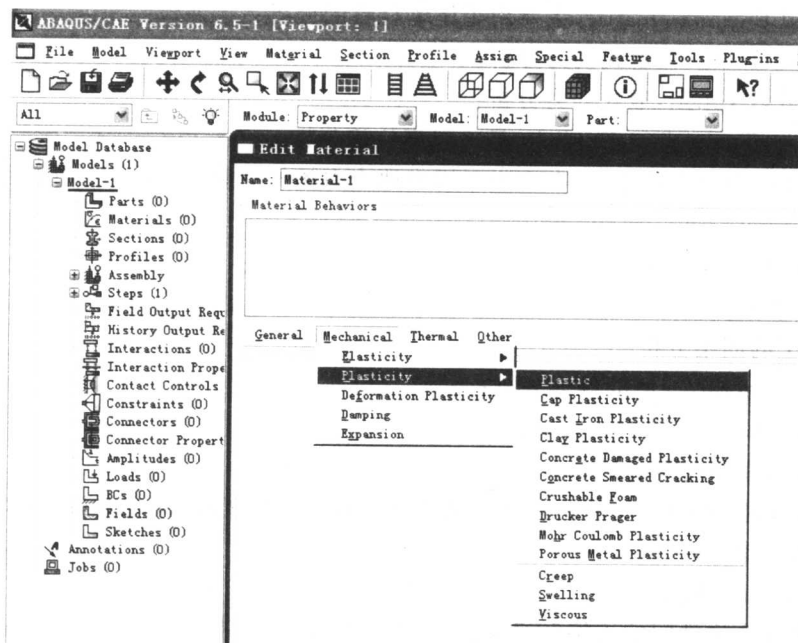


图 1.2.3 塑性部分所涵盖内容

完成定义材料力学行为并给定材料名称后, 接着通过 Property→Section→Create 定

义断面(section),建立与材料属性相关联的断面,然后通过 Property→Assign→Section 对不同 Part 或 Part 的不同部分(可定义为 set)进行材料赋值。这里需要强调的是对于梁单元需要通过 Property→Profile→Create 建立梁的几何断面,同时还要通过 Property→Assign→Beam Section Orientation 对梁单元断面方向进行定义。

3. Assembly 模块

任何一个结构都可以视为一个 Instance,它由很多个 Part 构成,Part 间连续、接触或通过螺栓等形式连接。通过 Assembly→Instance→Create 建立由不同 Part 构成的 Instance,可以对 Instance 中的 Part 进行移动、旋转等操作,更主要的是可以对 Instance 中的 Part 进行布尔运算,如 Assembly→Instance→Merge/Cut,在合并操作中对相交边界有删除(Remove)和保留(Retain)两个选项,后一选项在很多时候用得更多,因为进行 Merge/Cut 操作后,先前的多个 Part 生成了一个新的 Part,选择“保留”选项后可以进入到 Property 模块对同一 Part 不同部分赋予不同材料参数。

4. Step 模块

进入 Step→Create,分析类型(Procedure type)有两类,其一为 Linear perturbation,包括 Buckle, Frequency, Static, Linear perturbation 和 Steady-state dynamics, Direct 四部分,应用更多的是频率的计算和振型的提取;其二为 General,几乎包含了所有的分析类型,具体包含

Coupled temp-displacement,用于温度位移场的耦合分析,如热辐射使结构温度升高,因变温而使受约束结构产生温度应力;

Coupled thermal-electric,主要用于压电材料的分析;

Dynamic, Implicit,隐式动力分析;

Dynamic, Explicit,显式动力分析;

Dynamic, Temp-disp, Explicit,显式温度位移分析;

Geostatic,地应力场计算,在岩土工程中地应力场的准确确定决定了后继计算结果的有效性;

Heat transfer,热传导计算分析;

Mass diffusion;

Soils,土的固结分析;

Static, General,一般的静力分析;

Static, Riks,弧长法静力分析;

Visco,粘弹性及蠕变分析。

荷载步中增量步分为两种:自动增量法和固定时间增量法,同时在荷载步中要给出最大迭代次数等参量。

5. Interaction 模块

结构中各个构件间的连接形式千差万别,连接形式对结构在外荷载作用下响应的影响至关重要。在该模块中,主要包含四部分,具体为 Interaction, Constraint, Connector, Special。

Interaction→Interaction→Property,定义接触面间的接触属性,包括定义摩擦系数

等参量;由 Interaction→Interaction→Create 创建由接触面和目标面构成的接触对,应用最多的是 Surface-to-surface contact 接触问题,如结构物与土之间的接触问题。

由 Interaction→Constraint→Create 建立 Tie, Coupling, Shell-to-solid coupling, Embedded region, Equation 等约束条件,其中 Tie 约束适用于约束面间网格划分不一致但变形又连续的情况。而 Embedded region 功能可能模拟加筋对基体的增强功能,如钢筋混凝土实体结构(不是采用壳或梁进行模拟),分别创建钢筋和混凝土模型,然后将钢筋埋置到混凝土结构中去。

Interaction→Connector→Create,主要用于构件间的 U 型连接、焊接、铰接等连接的模拟,这一点在机械工程中具有重要的应用价值。

Interaction→Special→Inertia,用于定义结构中的集中质量和惯性矩,这主要应用在悬索桥梁及高层建筑的地震分析中。Interaction→Special→Crack,用于定义结构中的裂纹及裂尖,为后继网格划分生成奇异单元奠定基础。Interaction→Special→Spring/Dashpot,定义弹簧和阻尼器。

6. Mesh 模块

网格划分前需要对 Part 定义种子(Seeds),通过 Mesh→Seed→Edge By Number (Edge By Size, Edge Biased)完成种子的定义,对几何模型的边可以均匀划分,也可按等比数列进行划分。具体划分的数目和方法要通过数值模拟试验确定,最终与理论解或试验结果进行对比以确定经济合理的网格划分规模。

7. Job 模块

通过 Job→Job→Create 创建 Job 的名字,分析完成后存储的相关文件的主文件名均为该 Job 名字。在 Submission 中包含了 Job type, Run Mode 和 Submit Time;在 General 下主要是 User subroutine file 的选择;在 Memory 下主要是内存的划分;Parallelization 设置并行计算的一些内容;Precision 定义问题分析的精度。

8. Visualization 模块

后处理部分主要包括变形图显示(Visualization→Plot→Deformed shape),输出变量的云状图(Visualization→Plot→Contours)。

输出结果包括场变量输出(Visualization→Result→Field output)和与时间有关的变量的输出(Visualization→Result→History output)。

也可以将后处理结果导出到外部文件中去(Visualization→Report→XY, Field output),以便进一步编辑和处理。

9. Sketch 模块

通过该模块可以生成轮廓线或由外部文件导入生成轮廓线,对于土木工程来说,用得比较多的是 Autocad 绘图软件,在 Autocad 中生成的二维线转存为扩展名为 DXF 的文件,然后在 ABAQUS/CAE 下选择 File→Import→Sketch 就可导入到 Sketch 模块中。在创建 Part 时进入到 Sketch 界面下,由 Sketch→Add→Sketch 就可以将先前由 Autocad 导入的 Sketch 显示于当前界面下,进而创建所需要的 Part。

1.3 ABAQUS 帮助文档

典型的 ABAQUS Documentation 帮助功能模块如图 1.3.1 所示。可在图中的空白处输入关键词进行与之相关内容的查询,查询结束后在各个帮助模块前会显示与之相关的信息数,然后逐步点击查询即可。

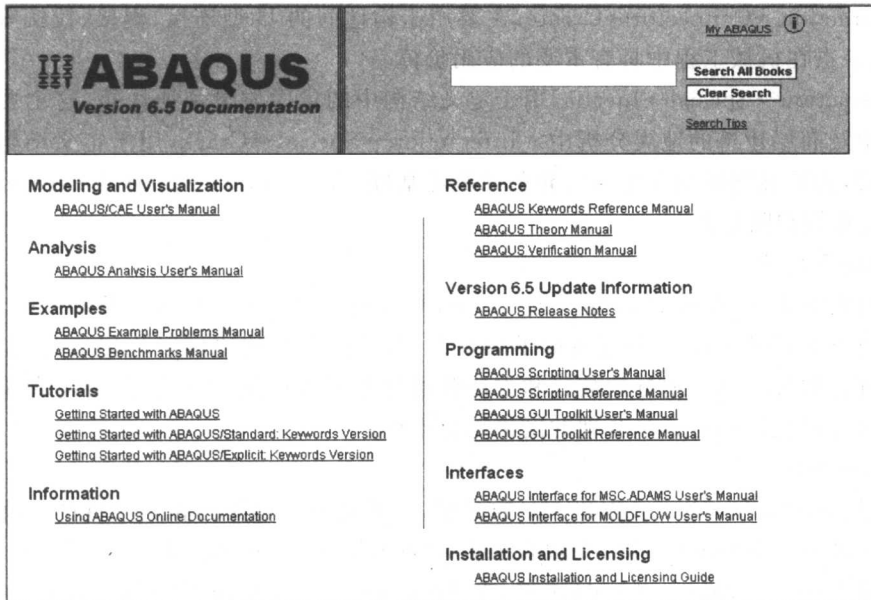


图 1.3.1 ABAQUS 典型帮助模块

ABAQUS Documentation 包含从简单到复杂的算例,分别为 Example、Benchmarks 和 Verification,在后面章节中均不同程度地引用了这三块内容中与土木工程有关的算例,为了方便起见将 Example 简记为 E,将 Benchmarks 简记为 B,将 Verification 简记为 V,这些字母后面的数字为 ABAQUS 中算例的编码,读者在进行这些算例的研究时,应结合帮助文档进行理解和掌握。

第2章 岩土的本构模型

岩土工程问题大体上可以分为两大类:变形问题和稳定问题。在传统的岩土工程设计计算方法中,对于变形问题,大多采用线弹性模型;对于稳定问题,采用基于理想刚塑性模型的极限平衡分析方法。

事实上,岩土工程的变形和稳定并不是完全割裂的两个问题,岩土体的强度和变形间存在密切的联系,本构模型即是描述其应力应变关系的数学模型,也称本构关系。岩土材料的真实应力应变关系特性十分复杂,具有非线性、弹塑性、粘塑性、剪胀性、各向异性等特性,同时应力路径,强度发挥度以及土的组成、结构、状态和温度等均对其有不同程度影响。

近几十年来,随着试验条件和计算手段的不断改善和发展,各国学者对土的应力应变特性的认识达到了前所未有的深度,建立了非常丰富的土体本构模型,为分析和解决实际岩土工程问题提供了理论指导和依据,其中部分本构模型得到了实践的检验,获得了国内外学者的认可。

ABAQUS 具有非常丰富的岩土材料本构模型,包括线弹性模型、多孔弹性模型、Mohr-Coulomb 塑性模型、扩展 Drucker-Prager 模型、Drucker-Prager 蠕变模型、修正剑桥模型、节理材料模型等,此外,ABAQUS 还提供了用户自定义材料模型的子程序 UMAT,方便用户添加自己的本构模型。

2.1 应力不变量和应力空间

土体中一点 $M(x, y, z)$ 的应力状态可以用该点的微元体上的应力分量来表示,如图 2.1.1 所示。这个立方微元体的 6 个面上作用着 9 个应力分量,即

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} \quad (2.1.1)$$

上式表示的是一个二阶对称张量,在右侧矩阵的 9 个分量中,由于对称性,剪应力成对相等见式 2.1.2 所示,故只有 6 个分量独立。

$$\sigma_{12} = \sigma_{21}, \sigma_{23} = \sigma_{32}, \sigma_{13} = \sigma_{31} \quad (2.1.2)$$

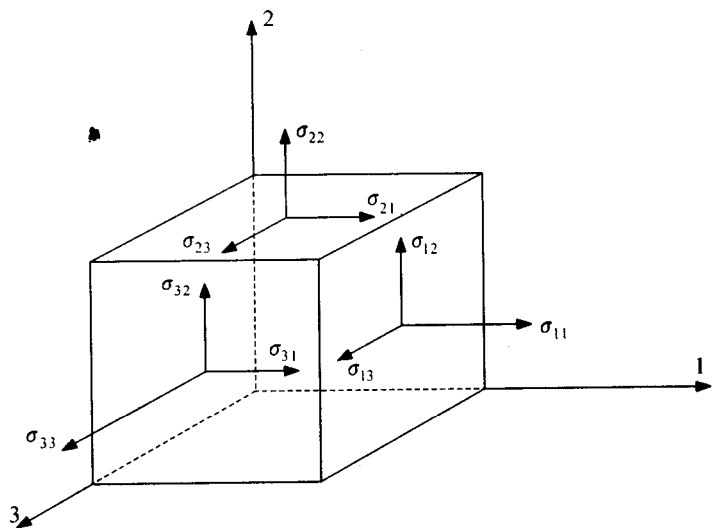


图 2.1.1 一般应力空间

ABAQUS 中,应力以拉应力为正,而在土力学中,正应力正方向规定以压为正,所以在计算岩土工程问题时,要注意应力的符号。

主应力:在应力作用面上,只有法向应力,没有剪应力,见图 2.1.2 所示。

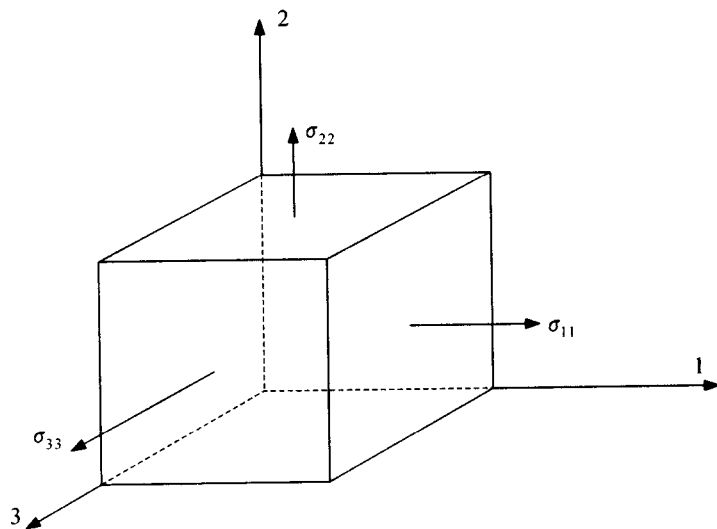


图 2.1.2 主应力空间

在二维空间中,应力张量的主应力可以通过 Mohr 圆来计算

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_{11} + \sigma_{22}}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_{11} - \sigma_{22}}{2}\right)^2 + \tau_{12}^2} \quad (2.1.3)$$