

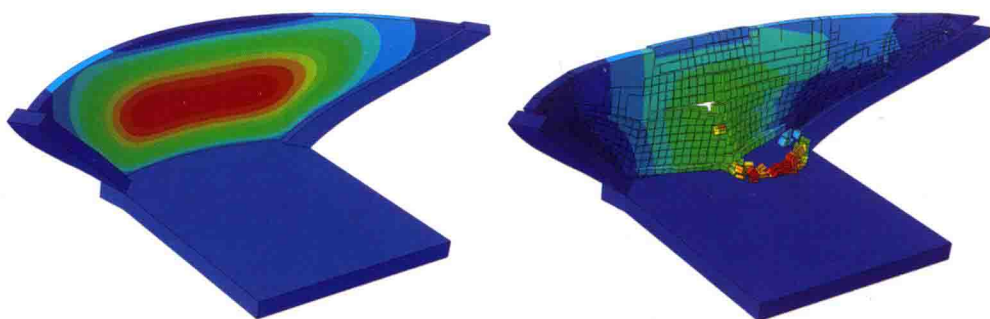
ABAQUS

水利工程应用

实例教程

APPLICATION OF
ABAQUS IN HYDROPOWER
ENGINEERING:
A TUTORIAL

潘坚文 编著



中国建筑工业出版社

ABAQUS 水利工程应用实例教程

潘坚文 编著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

ABAQUS 水利工程应用实例教程/潘坚文编著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2015. 2
ISBN 978-7-112-17592-5

I. ①A… II. ①潘… III. ①水利工程-有限元分析-应用软件-教材 IV. ①TV-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 290312 号

本书为 ABAQUS 有限元软件入门指导书, 通过水利工程中的常见结构分析实例, 按照建模、分析计算及后处理的步骤, 帮助初学者迅速熟悉软件的功能和应用。主要包括: 初识 ABAQUS; 混凝土重力坝静力分析; 混凝土重力坝抗震分析; 地下洞室开挖; 边坡稳定性分析; 拱坝静动力分析。

责任编辑: 辛海丽

责任设计: 张 虹

责任校对: 李欣慰 党 蕾

ABAQUS 水利工程应用实例教程

潘坚文 编著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

霸州市顺浩图文科技发展有限公司制版

北京市书林印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 14½ 字数: 351 千字

2015 年 2 月第一版 2015 年 2 月第一次印刷

定价: 49.00 元 (含光盘)

ISBN 978-7-112-17592-5

(26799)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

本人自 2005 年进入清华大学水利系振动组学习开始接触有限元分析软件 ABAQUS, 在近 10 年的学习和工作中, 利用 ABAQUS 进行了大量的课题研究和工程项目分析。课题研究方面主要包括准脆性材料的损伤断裂行为、高混凝土坝抗震安全和混凝土碱骨料反应对结构长期运行安全影响等, 工程项目包括混凝土坝施工期温度场和应力场仿真分析、高坝动力分析和抗震安全评价、高坝整体稳定性分析、高边坡稳定评价等方面的工作。我对 ABAQUS 在上述研究中的功能和适用性有一定的了解。回想初始使用 ABAQUS 时的生涩和学习的艰难, 决定写下这本书, 供刚刚开始学习 ABAQUS 的学生和工程师参考, 希望能对他们在使用 ABAQUS 分析水工结构工程的力学行为时提供帮助。

本书是 ABAQUS 在水工结构分析应用的入门指导书, 对 ABAQUS 软件已有一定基础或有很深造诣的前辈同行在翻阅后请莫取笑, 我写这本书的初衷是希望 ABAQUS 初学者按照书中内容学习后, 短时间内就能独立使用并熟练操作软件。书后配有光盘, 包含各章节的计算文件, 可复制到计算机参考和使用。

由于本人水平有限, 书中难免有错误的地方, 诚恳地希望前辈和同仁不吝赐教。

目 录

1 初识 ABAQUS	1
1.1 ABAQUS/CAE 工作界面简介	1
1.2 悬臂梁应力分析	3
1.2.1 建立部件 (Part)	3
1.2.2 建立材料 (Material)	3
1.2.3 定义 Section 和指定 Section	4
1.2.4 组装 (Assembly)	5
1.2.5 建立 Step 分析步	7
1.2.6 设置荷载和边界条件	12
1.2.7 用 Mesh 模块划分网格	17
1.2.8 生成 Job 并进行计算	20
1.2.9 结果后处理	22
1.3 小结	36
2 混凝土重力坝静力分析	37
2.1 建模	37
2.1.1 生成 Part	37
2.1.2 定义材料属性和 Section	37
2.1.3 划分网格	37
2.1.4 组装	40
2.1.5 荷载和边界条件	42
2.2 提交计算与结果整理	50
2.3 小结	55
3 混凝土重力坝抗震分析	56
3.1 Inp 输入文件	56
3.2 自振特性分析	59
3.3 振型分解反应谱法分析	63
3.4 时程反应分析	70
3.4.1 材料线弹性工况分析	70
3.4.2 材料非线性工况分析	76
3.5 小结	92
4 地下洞室开挖	93
4.1 建模	93
4.2 地应力平衡	95

4.3 洞室开挖与分析结果 96

4.4 小结 139

5 边坡稳定性分析 140

5.1 有限单元建模 140

5.2 摩尔-库仑模型与 Drucker-Prager 模型的材料参数转换 140

5.3 Inp 文件材料和分析步定义 140

5.4 降强法结果 141

5.5 小结 162

6 拱坝静动力分析 163

6.1 拱坝有限元网格 163

6.2 拱坝横缝模拟 170

6.3 动水附加质量 175

6.4 拱坝自振频率计算 188

6.5 模态叠加法计算拱坝地震响应 194

6.6 考虑横缝的拱坝非线性时程分析 204

6.7 小结 221

图表索引 222

1 初识 ABAQUS

这一章节是为第一次接触 ABAQUS 的读者准备的，如果你已经使用过 ABAQUS，可以快速浏览或略过。

要使用 ABAQUS 进行有限元分析，当然首先要安装好 ABAQUS 程序，ABAQUS 的安装过程可以在网络上通过搜索引擎很容易找到相关说明，按照这些说明的步骤，成功安装 ABAQUS 应该不是问题，这里对于程序的安装不做赘述。

1.1 ABAQUS/CAE 工作界面简介

打开 ABAQUS/CAE，可以看到 ABAQUS/CAE 交互界面如图 1-1 所示。在 ABAQUS/CAE 里可以进行有限元建模、提交计算、计算过程监测、结果后处理等。ABAQUS/CAE 包含以下几个部分：

Title Bar：显示 ABAQUS/CAE 的版本号和当前的模型数据文件的存储路径和文件名。

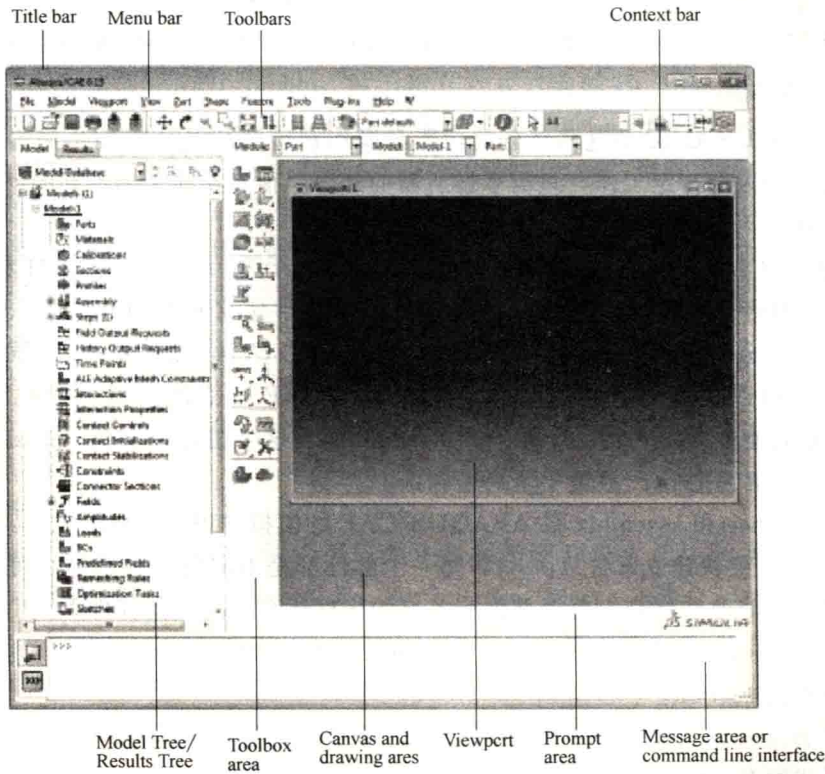


图 1-1 ABAQUS/CAE 交互界面

Menu bar: 包含所有可用的菜单 (menus), 这些菜单连接所有的功能。Menu bar 上根据你在 context bar 所选择的不同的模块 (module) 而显示不同的菜单。

Toolbars: 提供各种菜单的快捷方式。

Context bar: ABAQUS/CAE 分为一系列模块, 每一个模块可以对模型的一种特性进行设置。模块以下拉菜单形式列在 context bar 里。

Model Tree: 以大纲的形式显示你的模型 (model) 和模型所包含的对象, 比如: 部件 (parts)、材料 (materials)、分析步 (steps)、荷载 (loads)、输出要求 (output requests) 等。Model Tree 里还可集中便捷地在不同的模块间切换, 并处理不同的对象。如果你的模型数据文件包含多个模型, 还可通过 Model Tree 在不同模型间切换 (但是我还是建议一个数据文件只包含一个模型)。

Results Tree: 以大纲的形式显示结果数据和另外定义的数据 (如 X-Y plots)。如果同时打开了多个结果数据文件, 在 Results Tree 里可以很便捷地进行结果数据之间的切换。

Toolbox area: 当你进入一个模块时, toolbox 区会显示相应这个模块的工具, 可以快捷地实现模块的大部分功能。

Canvas and drawing area: 可以认为是无限大的屏幕用来放置视窗 (viewport)。

Viewport: 显示模型的窗口。

Prompt area: 在你进行操作时, 显示下一步操作的提示, 这个功能很有用处。

Message area: 输出状态和警告等信息。

Command line interface: 可以输入 Python 命令行进行程序化操作。Command line interface 和 Message area 共用同一个区域, 通过 ABAQUS/CAE 窗口左下角的  和  按钮进行切换。

以上 ABAQUS/CAE 的这些部分的功能和操作在后续的具体算例再慢慢熟悉, 因为对于我们每一个人的特定工作, 只需掌握所需的部分, 很多功能是用不到的, 因此, 为了节省篇幅, 这里不对这些功能和操作做详细的论述。

ABAQUS/CAE 分为几大模块: 几何模块 (Part 和 Assembly)、材料定义模块 (Property)、网格划分模块 (Mesh)、荷载和边界条件定义模块 (Interaction、Load 和 Optimization)、分析模块 (Step 和 Job) 和后处理模块 (Visualization)。不同模块, 根据各自的名字, 可以大概知道它的功能。ABAQUS/CAE 建立的模型可以包含很多部件 (part), 但是只能包含唯一的一个组合 (Assembly)。这个组合由实例 (instance) 组成, instance 可以理解为把 part 放置于全局坐标系上。

Part, instance 和 assembly 在 ABAQUS/CAE 的模拟过程中的概念如下:

(1) 在 Part 模块建立部件 (part), 每一个部件都是不同的独立实体, 可以不影响其他部件分别进行修改和操作。每个部件有各自的坐标体系, 与其他部件无关。

(2) 在 Property 模块定义 section, 同时把 section 和材料 (material) 进行关联, 并为每个部件指定 section。

(3) 在 Assembly 模块生成 instance, 在全局坐标中把每个 instance 放置到相应的位置, 从而形成组合 (assembly)。

(4) 使用 Interaction 和 Load 模块定义接触关系、荷载条件和边界条件等, 从而完成

模型的定义。Interaction 和 Load 模块作用在组合 (assembly) 上。

(5) 使用 Mesh 模块对组合 assembly 进行有限元网格划分, 可以对组合 assembly 每个独立的实例 instance 进行各自的网格划分, 也可以划分原始的部件 part, 后者将网格与相应的实例 instance 在 ABAQUS/CAE 里关联。

这样, 就完成了模型部分的工作。

1.2 悬臂梁应力分析

下面我们通过一个简单的有限元例子的计算和结果处理来初步了解 ABAQUS 的基本操作流程。这个例子是悬臂梁受均布荷载作用下的应力分布情况。同时, 结合悬臂梁分析的例子可以熟悉 ABAQUS/CAE 各个模块的功能。

悬臂梁的应力分析按照以下步骤实现:

1.2.1 建立部件 (Part)

ABAQUS/CAE 建立模型时, 往往将复杂的模型分解成很多小的部件 (Part), 然后再将这些部件进行组装 (Assembly) 形成最终的模型, 如机械设备的螺钉、螺母、齿轮等部件, 将螺钉、螺母和齿轮等组装起来得到所需的模型。这种建模思路在有标准件的模型中是很便捷的, 特别是对于在一个模型里存在很多标准件的时候, 只需要生成一个标准件部件, 组装时可以按照某种规则对部件进行复制, 大大节省时间。

在 Part 模块建立 part, 如图 1-2 所示, 每个 part 都可以定义各自的名字, 这里采用默认的名字 Part-1。我们先求解二维问题, Modeling Space 选项选择 2D Plane, 分析的类型是变形体, Type 选项选择 Deformable, 对于建立方式, 选择 Base Feature 的 Shell 选项。工作界面包含的范围可以通过 Approximate size 设置, 默认为 200, 这里不做修改, 这个值对建模没有影响, 仅反映在工作界面和真实模型尺寸之间的相对比例问题, 设置恰当的值, 建模时操作可以更方便。单击 Create Part 窗口的 Continue 按钮进入下一步。

这个例子的计量单位统一采用国际标准单位, 长度为 m, 质量为 kg, 时间为 s。

我们建立的悬臂梁尺寸假定为 $l \times h \times b = 5\text{m} \times 0.5\text{m} \times 0.3\text{m}$ 。图 1-3 中, 采用 Create Lines: Rectangular (4 Lines) 工具, 用鼠标选择矩形的第一个角点, 也可直接输入坐标, 这里选择坐标原点 (0, 0); 然后输入矩形的对角坐标 (5, 0.5), 使用键盘键 “Esc” 退出 Create Lines: Rectangular (4 Lines) 工具, 在 CAE 底部出现询问 “Sketch the section for the planar shell”, 单击 “Done” 即完成悬臂梁 part 的建立。

1.2.2 建立材料 (Material)

按照 Module 下拉菜单的顺序, 我们可以建立材料类型和设置相应的材料参数。在 Property 模块下, 选择 Create Material 工具, 会弹出 Edit Material 窗口, 在 Name 选项处填入材料的名字 Concrete, Description 选项可以填写对该材料的一些描述和解释, 这些描述性的文字在程序运行时不起作用。这里我们建立简单的线弹性模型, 在 General 选项中选择 Density, 在弹出的内容中的 Mass Density 中填入密度 2600.0; 在 Mechanical 选项中选择 Elasticity→Elastic, 在弹出的内容中 Yong’s Modulus 填入弹性模量 30e9, Poisson’s Ratio 填入泊松比 0.2。如图 1-4 所示, 单击 OK, 则建立好了材料 Concrete。

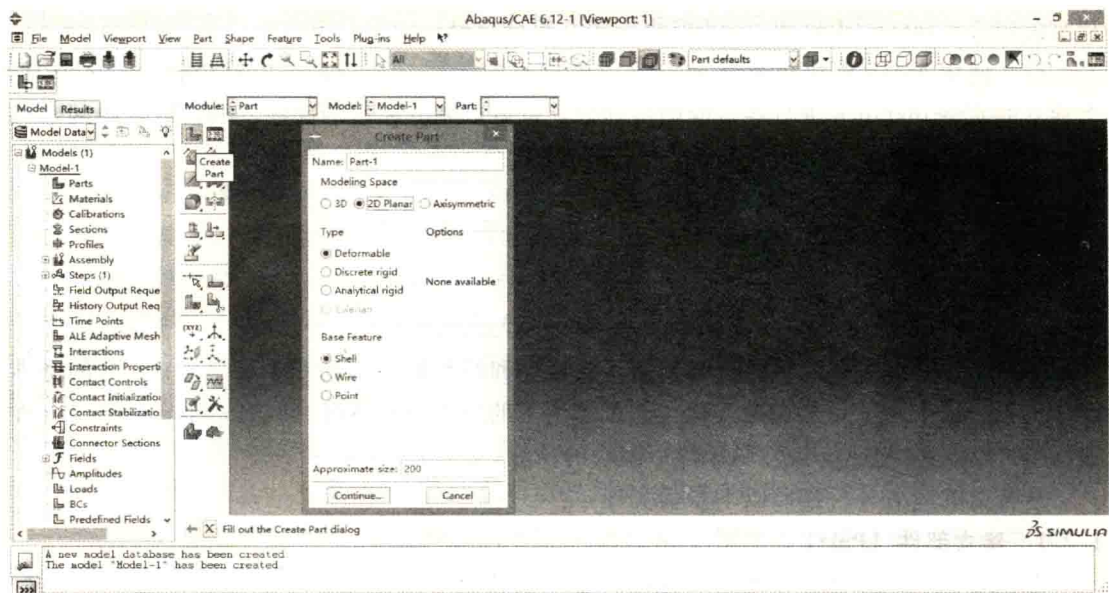


图 1-2 建立 part

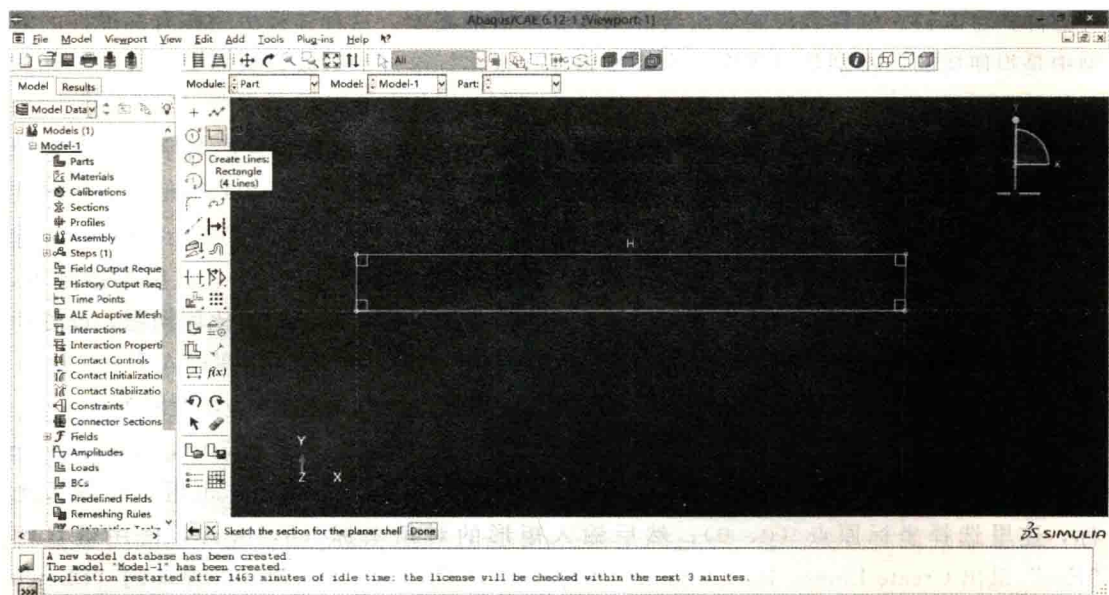
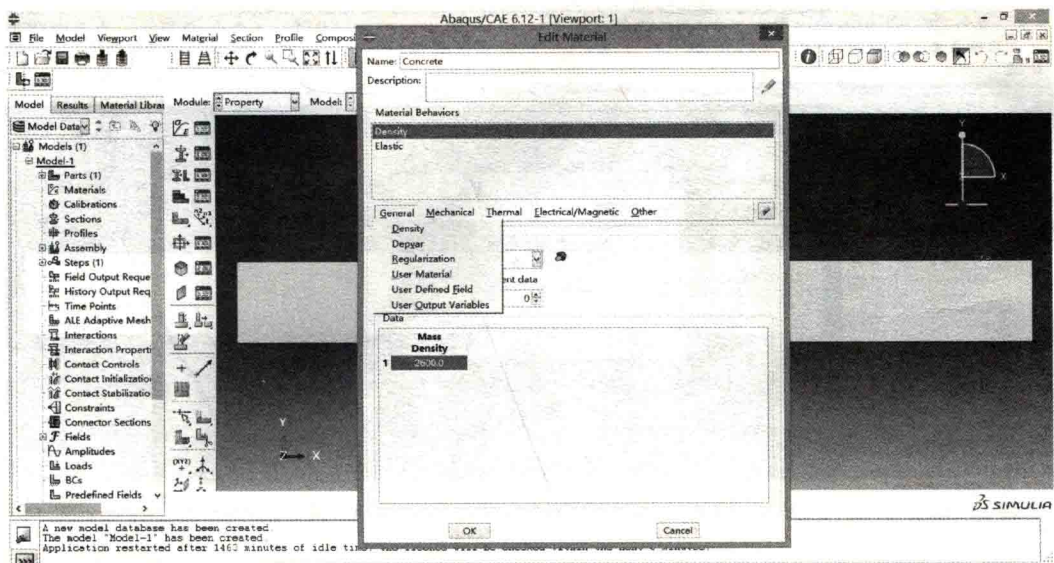


图 1-3 建立悬臂梁 part

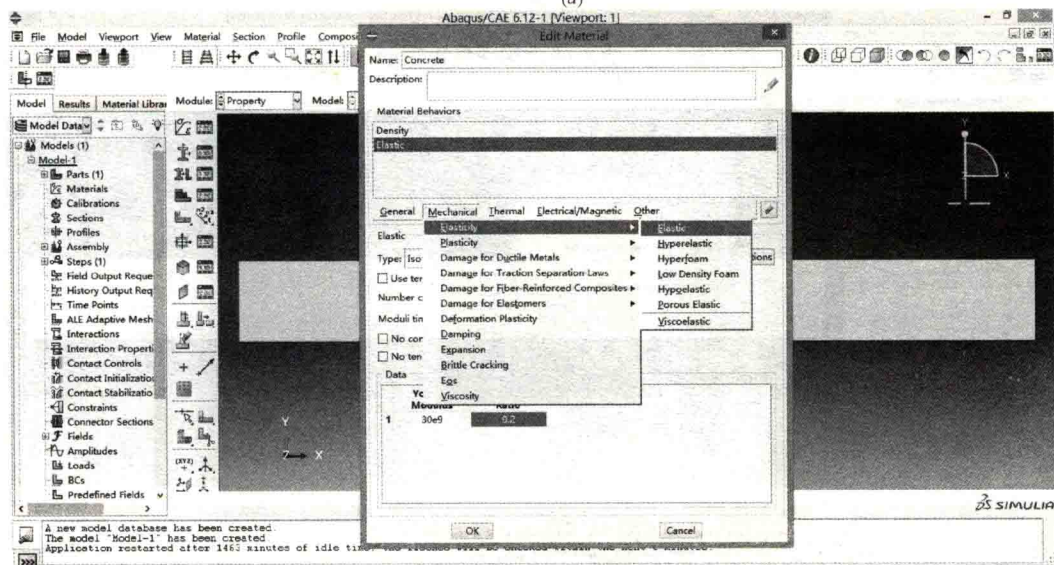
1.2.3 定义 Section 和指定 Section

Section 包含关于 part 属性的信息，如图 1-5 所示，在弹出的 Create Section 窗口中，选择实体 (Solid) 的均质 (Homogeneous) 选项，然后点击 Continue 按钮进入 Edit section 窗口。Section 需要和材料 (material) 关联，在 Edit Section 窗口，Material 下拉选项可以选择之前所建立的材料，这里选材料名为 Concrete 的材料与 section 关联。模型默认厚度为 1m，这里悬臂梁厚度为 0.3m，所以勾选 Plane stress/strain thickness，填入 0.3，点击 OK 即可完成 section 的定义。

接下来要为模型的各个部分指定 section，这个例子悬臂梁拟采用同一种单元类型和



(a)



(b)

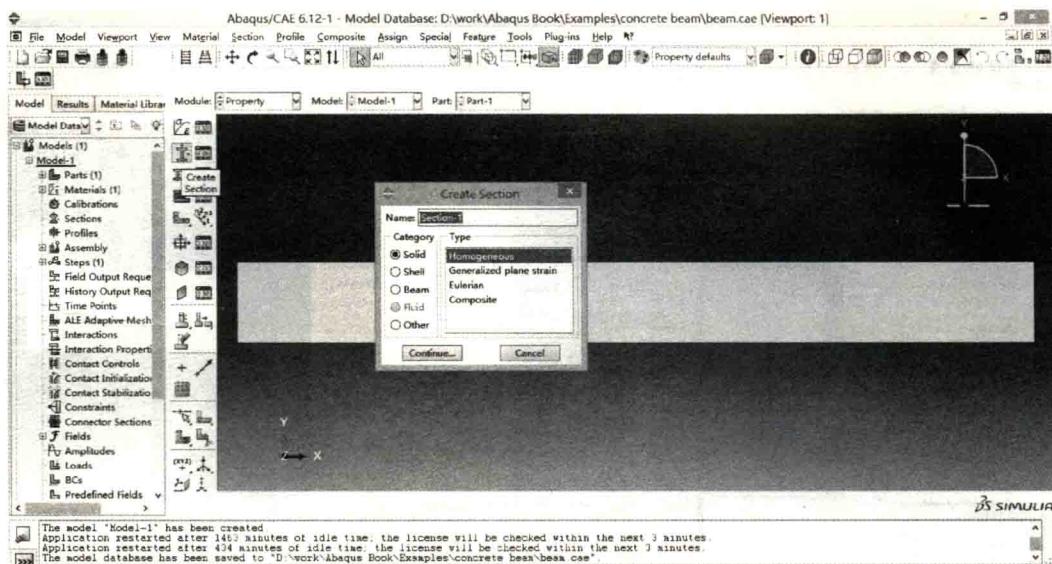
图 1-4 建立材料与设置材料属性

(a) 设置密度参数; (b) 设置弹性模量和泊松比

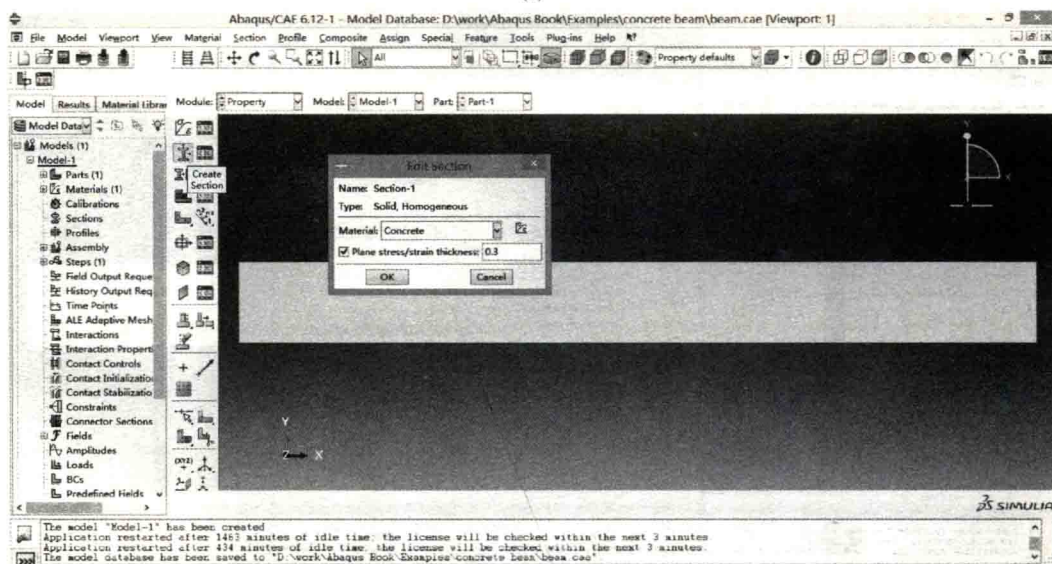
同一材料，所以整个悬臂梁只有一种 section。在 Toolbox area 点击 Assign Section，Prompt area 会出现让你选择需要指定 section 的区域的提示，选中悬臂梁，会显示为高亮红色，然后点击 Prompt area 的 Done，会弹出 Edit Section Assignment 窗口，在 Section 下拉选项中选择上述所定义的 section-1，厚度 (Thickness) 选项选择 From section，点击 OK，就完成了指定 section，如图 1-6 所示，指定 section 后的区域显示不同颜色。

1.2.4 组装 (Assembly)

组装 (Assembly)，顾名思义，是将各种部件进行整合起来形成最后的模型。在 Module 下拉菜单选择 Assembly 切换到组装状态 (图 1-7)。组装的对象不能直接是 part，



(a)

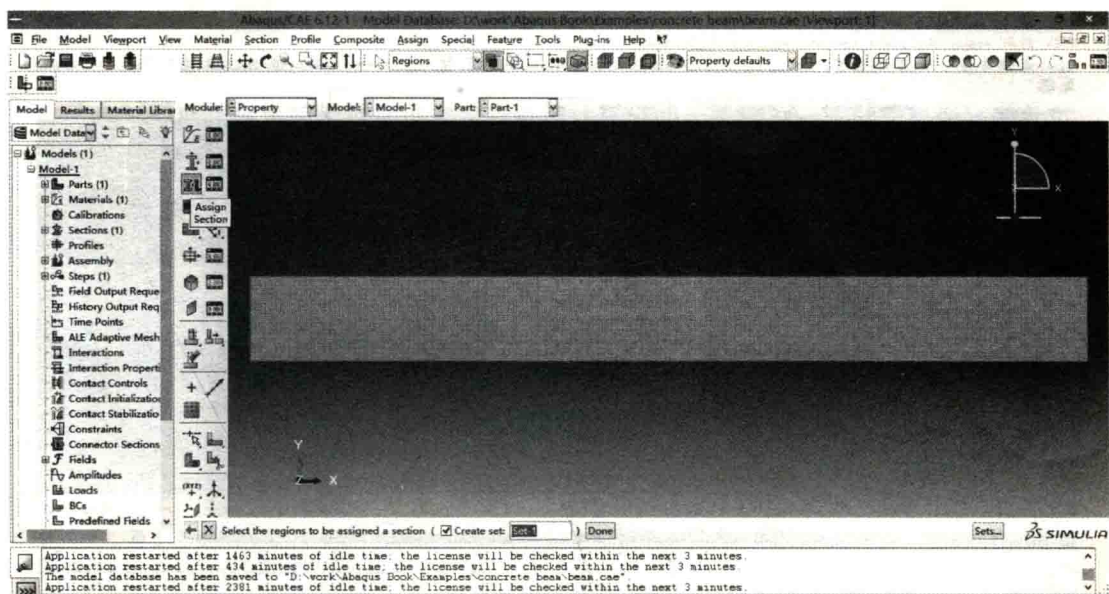


(b)

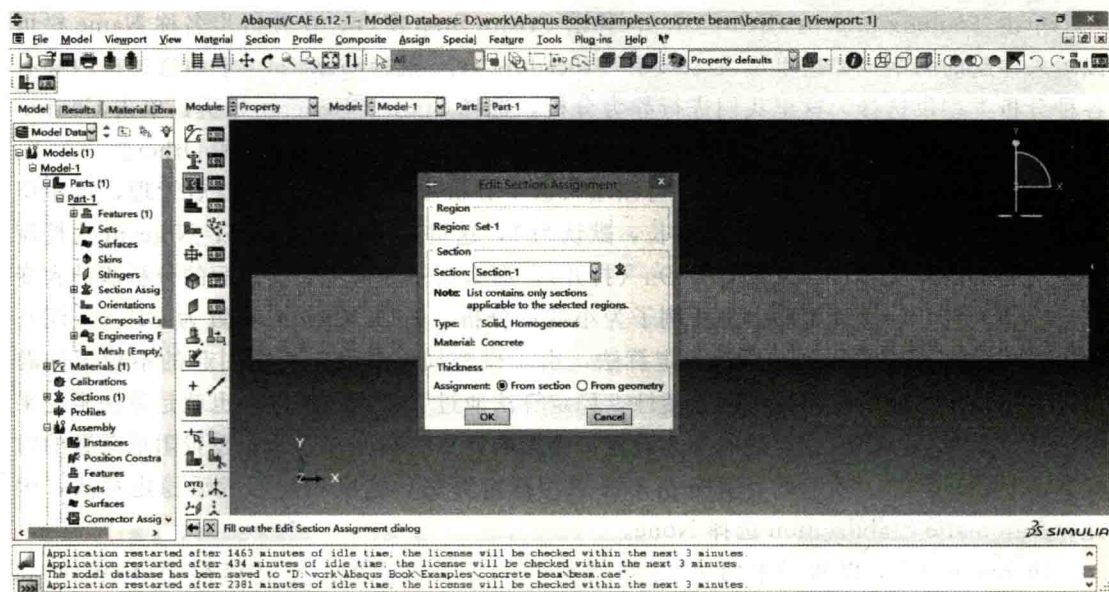
图 1-5 定义 section

(a) 选择 section 类型；(b) 编辑 section 参数

它的对象要求是实例 (instance)，所以要先基于 part 生成 instance。单击 Toolbox area 的 Instance Part，会弹出 Create Instance 窗口，选择要生成 instance 的所有 part，这里我们只有一个部件 Part-1，然后选择 instance 的类型，包括独立和依赖两个选项。如果选择独立选项，网格只能在实例 instance 划分；选择依赖选项，那么网格只能在部件 part 划分。我们这里选择依赖，然后单击 OK，即生成了实例 instance。在 Assembly 模块里，还可以对实例 instance 进行多项操作，如按一定规则复制、平移、旋转、合并和剪切等。悬臂梁这个例子可以认为部件 part 的坐标系和全局坐标系一致，所以不需进行平移和旋转等；这个例子也包含一个部件 Part-1，也不需要进行其他的操作。



(a)



(b)

图 1-6 指定 section

(a) 选定需指定 section 的区域；(b) 设置相应参数

1.2.5 建立 Step 分析步

ABAQUS/CAE 默认分析步为 Initial，以上对模型的设置都包含在分析步 Initial 里，但在进行计算分析时，必须建立新的分析步 step。

一个模型可以定义一个或者多个分析步。在分析步里，我们可以改变模型的边界条件和受力情况、更改模型的接触相互作用、删除或者生成模型的某部分。不同的分析步可以采用不同的分析方法，如静力分析后，接着进行动力分析等。分析步里，还可以进行结果输出的控制和计算收敛性和精度等参数的各种控制。

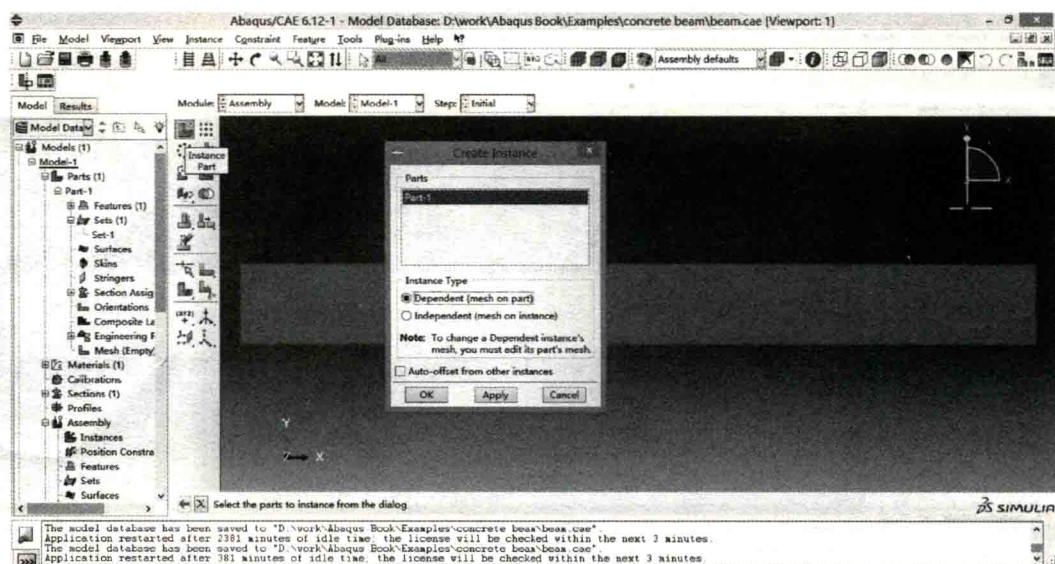


图 1-7 组装部件

单击 Toolbox area 的 Create Step，弹出 Create Step 窗口，在分析步名称 Name 栏可以填入你起的名字，如这里填入 Static；Procedure type 选择 General，下面选择框内会有各种分析类型供选择，这里我们进行静力分析，选择 Static，General 分析，单击 Continue 键进入 Edit Step 窗口。Edit Step 有三部分：Basic，Incrementation 和 Other。

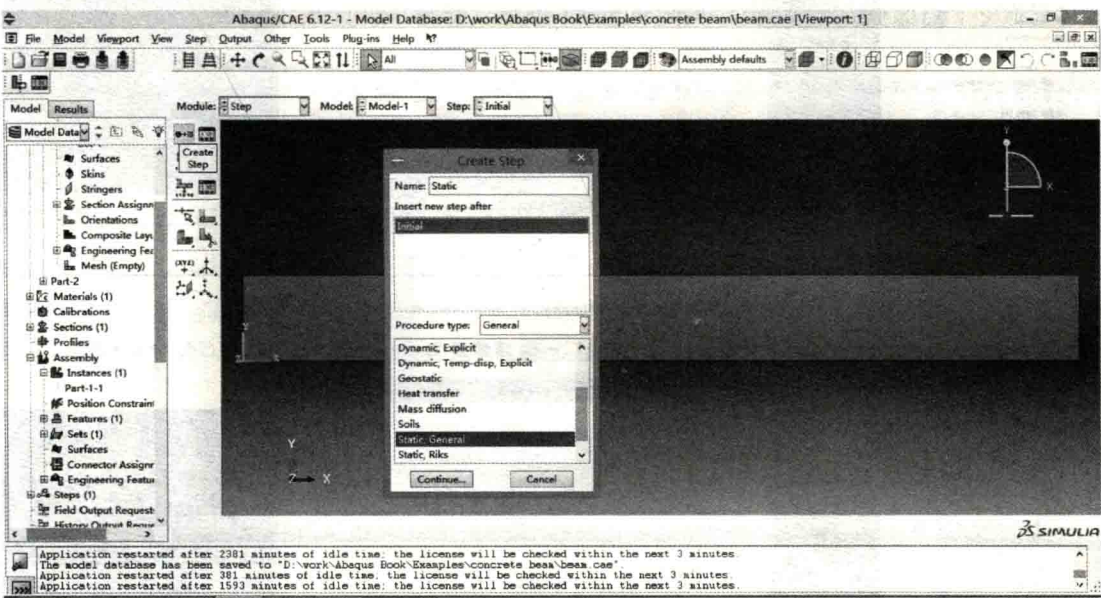
Basic 为基本设置，Description 可以填入这个分析步的描述，方便以后管理，这里留空白；Time period 为分析步的总时长，默认为 1，这里采用默认值即可；Nlgeom 为控制大变形分析的开关器，如果设置为 On（打开），那么这一分析步及其以后的分析步的大变形分析都为打开，悬臂梁静力分析例子为小变形分析，所以 Nlgeom 设置为 Off（关闭）；Automatic stabilization 用来激活稳定算法，由于模型局部非稳定可能引起的不稳定问题可以采用稳定算法来改善计算的收敛性，稳定算法通过引入能量耗散，也就是算法阻尼来保证计算的收敛，但能量耗散的人为设置，会影响计算的精度，因此在设置阻尼系数的时候，需要慎重评估。一般的计算分析不必采用稳定算法，这里我们不激活稳定算法，因此，Automatic Stabilization 选择 None。

Incrementation 设置分析步的时间增量步长。类型 Type 可以选择 Automatic 和 Fixed，选择 Automatic，分析时间增量步长会根据计算收敛性自动调整，如果当前时间增量步长计算不收敛，程序会自动减小时间增量步长，继续进行计算，直到收敛为止；如果选择 Fixed，即固定时间增量步长，计算过程中时间增量步长不能变化，如果当前时间增量步长情况下，计算不满足收敛准则，程序不会改变时间增量的大小，而是直接终止程序。一般分析我们都选择 Automatic。Maximum number of increments 为该分析步 step 的最大时间增量步数，这里采用默认值 100。Increment size 设置时间增量步长，Initial 为初始时间增量步长，对于线弹性分析，如果不关心加载过程结构的反应，而只关心最终的结构状态，初始时间增量步长可以设置为与分析步的总时长；为了得到加载过程的结果，我们设置较小的初始时间增量步长，这里设置为 0.1。Minimum 为最小时间增量步长，即在程序自动调整时间增量步长时所允许的最小值，这里采用默认值 $1e-5$ 。Maximum 为最

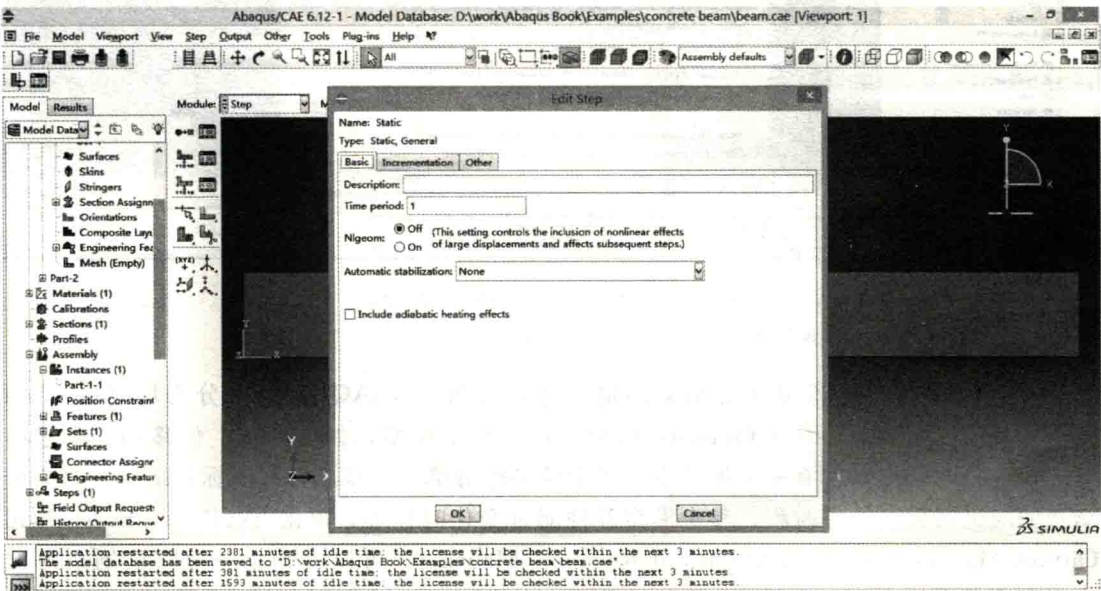
大时间增量步长，及在程序自动调整时间增量步长时所允许的最大值，在保证精度的前提下，程序会自动增大时间增量步长来减小总的计算机时，如果我们要得到加载过程的结构反应，最大时间增量步长如果设置过大，会错过计算中的一些细节，所以要根据问题分析的情况设置适当的值，这里设置最大时间增量步长为 0.1。

Other 里可以设置方程求解器、矩阵存储方式、计算技术、收敛准则和精度控制等方面的设置，一般情况采用 ABAQUS 的默认参数即可。

点击 OK，完成分析步的设置，过程如图 1-8 所示。

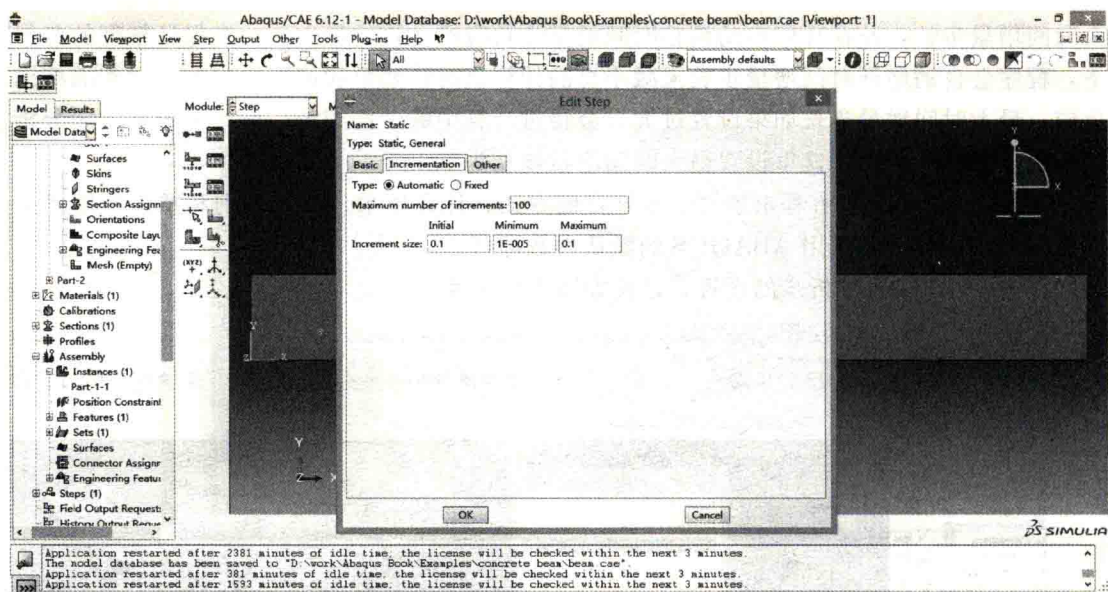


(a)

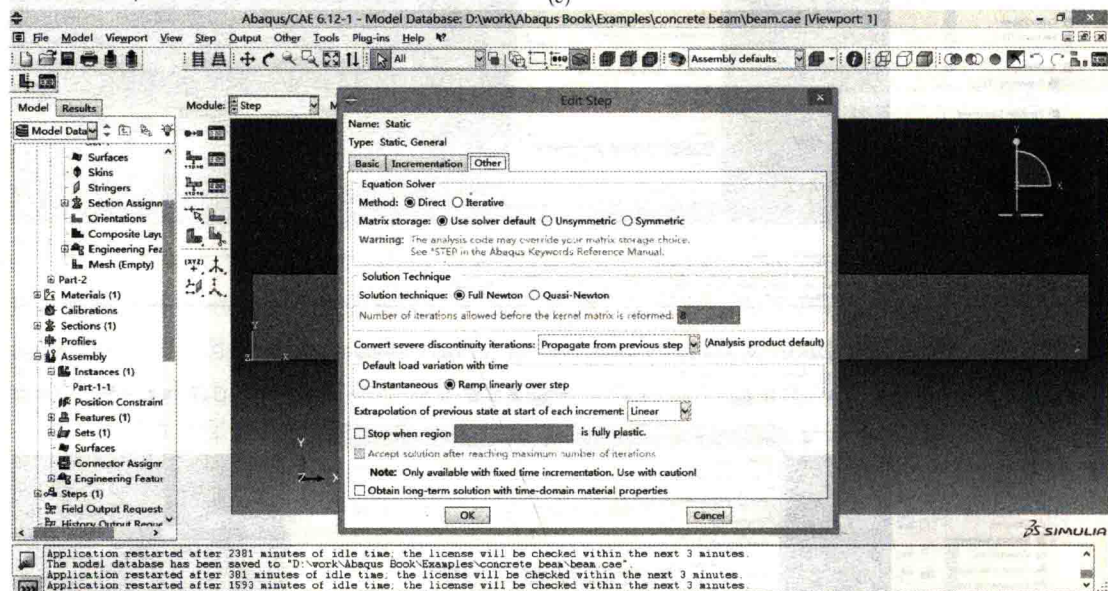


(b)

图 1-8 生成分析步和参数设置
(a) 生成分析步；(b) 设置分析步 Basic 参数



(c)



(d)

图 1-8 生成分析步和参数设置 (续)

(c) 设置分析步 Incrementation 参数; (d) 设置分析步 Other 参数

在 Step 模块中, 还可以对结果的输出进行设置。ABAQUS 结果分为场结果 Field Output 和历史结果 History Output, 场结果针对整个模型, 如应力场、位移场、温度场等, 每一个时间增量都有一个场结果; 历史结果针对单一结点或者某些标量结果, 如某个结点的应力时程、位移时程、整个模型各种能量变化时程等。单击 Toolbox area 的 Field Output Manager, 弹出 Field Output Requests Manager, 可以看到有一个默认场结果输出, 名为 F-Output-1。在 Field Output Requests Manager 窗口可以新建 (Create) 场结果输出, 还可以复制 (Copy)、重命名 (Rename)、删除 (Delete) 已有的场结果输出, 也可以对已有的场结果输出进行编辑 (Edit)。我们编辑默认的场结果输出, 单击 Edit, 会

弹出 Edit Field Output Request 窗口，Domain 选项下可以选择输出模型哪个部分的结果，可以是整个模型的，也可以是部分单元的（比如预先定义的单元组或结点组 set），这里输出整个模型的结果，选择 Whole model；Frequency 定义结果输出的频率，一般选择每 n 个时间增量步输出结果一次（Every n increments），这个例子设置每个增量步都输出，即 $n=1$ ；输出结果变量的设置，可以从列表中选择需要输出的量，点选 Select from list below，本例只输出应力、应变和位移场，分别选择 Stresses、Strains 和 Displacement/Velocity/Acceleration 列表的 S、E 和 U，在编辑框中即相应出现“S, E, U”，单击 OK，返回 Edit Field Output Request 窗口，单击 Dismiss 即可，编辑的过程如图 1-9 所示。同

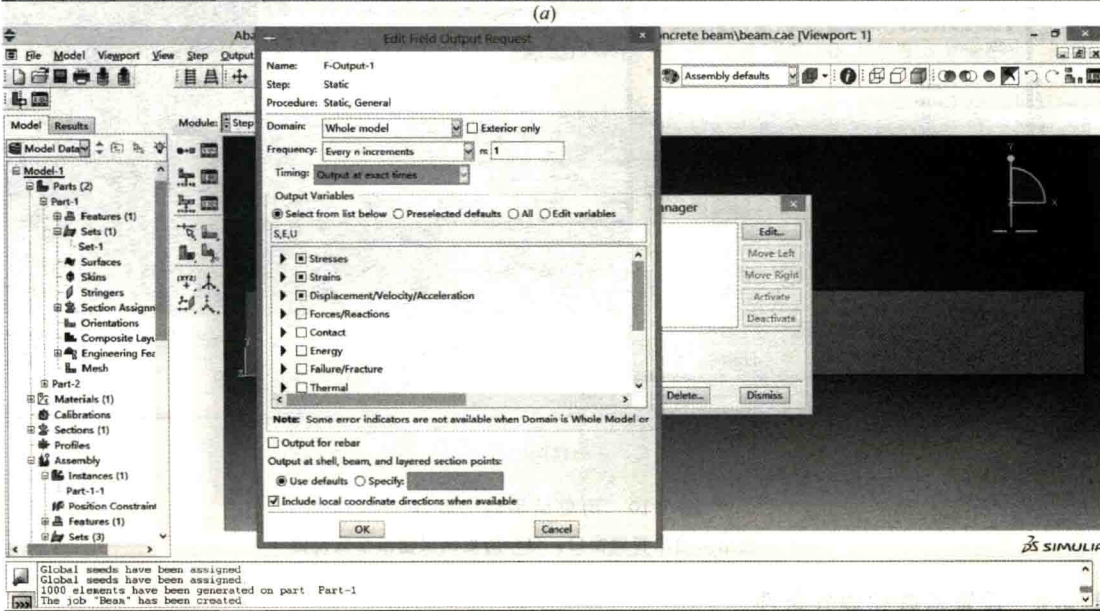
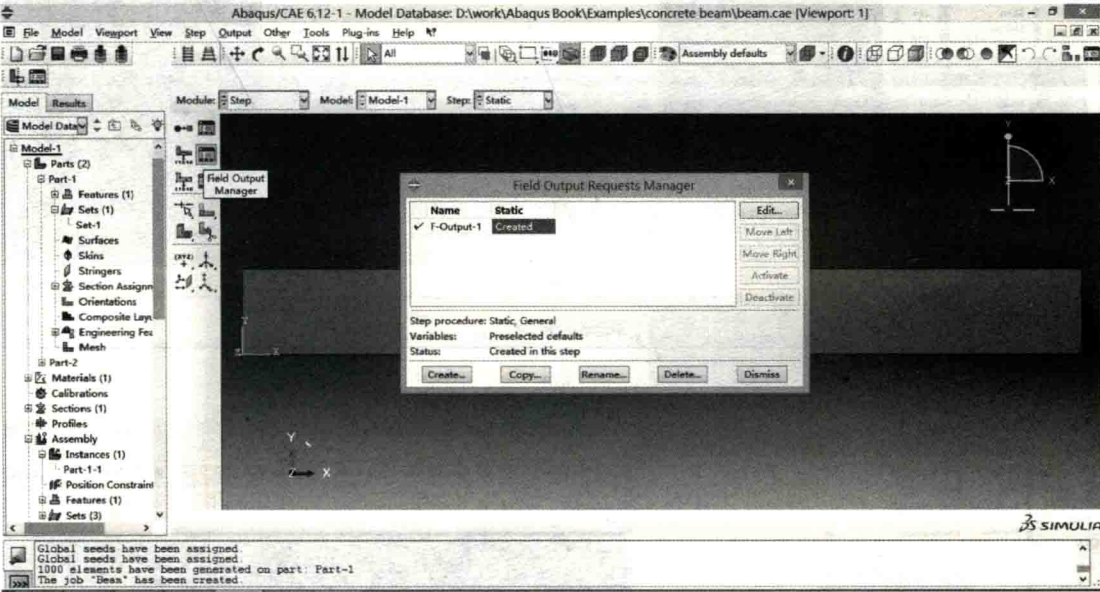


图 1-9 场结果输出设置
(a) 场结果输出管理窗口；(b) 场结果输出参数设置