



“十三五”普通高等教育规划教材

高等土木工程结构 (ABAQUS 模拟实验 / 实验室模型实验) 案例分析与讲解

徐亚丰 白首晏 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

016005834



“十三五”普通高等教育规划教材

高等土木工程结构 (ABAQUS 模拟实验 / 实验室模型实验) 案例分析与讲解

编 著 徐亚丰 白首晏
主 审 梁 力



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为土木工程专业研究生必修课“高等结构试验”的教学用书。

全书分为十章，其中前五章主要以 ABAQUS 模拟实验案例为主，主要讲授碳纤维钢筋—钢管混凝土组合柱受力性能分析，复式钢管混凝土柱与钢梁空间节点抗震性能分析，L 形钢管混凝土芯柱温度场及耐火性能分析，爆炸荷载作用下 T 形钢管混凝土芯柱动力响应模拟，十字形钢管混凝土芯柱侧向冲击作用的动力响应分析。后五章主要以实验室模型实验案例为主，主要讲授高强钢筋混凝土梁受力性能的试验研究，钢管混凝土异形柱轴心受压的试验研究和破坏机理，十字形钢管混凝土异形柱偏心受压试验研究，钢筋—钢管混凝土柱抗震试验设计及结果分析，钢筋高强混凝土框架节点抗震性能研究。

各类案例讲解详细，通过学习，读者能够很快掌握 ABAQUS 模拟实验/实验室模型实验方法。

本书可作为高等院校土木工程专业研究生教学用书，也可作为相关专业本科生教材，还可作为相关领域的科研和技术人员参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

高等土木工程结构 (ABAQUS 模拟实验/实验室模型实验) 案例分析与讲解/徐亚丰, 白首晏编著. —北京: 中国电力出版社, 2016. 1

“十三五”普通高等教育规划教材

ISBN 978-7-5123-8269-5

I. ①高… II. ①徐…②白… III. ①土木工程-工程结构-结构试验-有限元分析-应用软件-高等学校-教材 IV. ①TU317-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 221403 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2016 年 1 月第一版 2016 年 1 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 17.25 印张 421 千字

定价 35.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签，刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前 言

《中华人民共和国高等教育法》明确指出：“高等教育的任务是培养具有创新精神和实践能力的高级专门人才，发展科学技术文化，促进社会主义现代化建设。”同时，马克思主义哲学的认识论也告诉我们，教育要遵循“理论联系实际”的方法。研究生教学关键是要培养学生的创新能力，所以，单纯的理论说教是远远不够的。

本书结合我校研究生课程“高等结构实验”编写而成。该课程在2014年被评为沈阳建筑大学研究生优质课（YZ201401），但是多年来，没有一个合适的教材，使学生在在学习中有很多困难。

作者作为本课程的任课教师，从事该门课教学多年。在授课过程中，逐渐摸索授课方法。在授课之初，只是沿袭本科教学的方法。主要讲些基本理论等，后来逐渐增加了部分案例，但是总觉得没有脱离本科教学的模式。从2010年始，教学方法逐渐演变成主要讲解实验案例，并辅以穿插基本知识的介绍的教学方法，使学生感到上课生动、内容充实，受到了学生的欢迎。但是一直没有形成教材，因此也尝试着编写关于实验教学方面的一本教材。在不断的思索中，逐渐形成了现在的写作思路。即，主要以案例讲解为主，并结合案例讲解，领着学生重温过去的知识，了解未来的知识。基于此，作者结合多年教学经验，着手开始编写此书。

由于，实验的方式基本上有有限元模拟和实验室模型实验两类，所以，本书结合目前大家广泛应用的ABAQUS软件的应用和实验室的常规实验来讲解。通过本书的学习，力争使学生尽快地掌握ABAQUS软件的应用技术，并掌握实验室实验的技术。

本书的编写，得到了国家留学基金（201308210105）项目和沈阳建筑大学“高等结构试验”研究生优质课（YZ201401）的支持，在此表示感谢。东北大学梁力教授审阅了全书，提出许多宝贵意见，另外陈谦、王越参加了本书的编写工作，在此一并表示感谢！

由于编者水平所限，书中难免有疏漏和不妥之处，恳请读者批评指正。

编 者

2015年10月

目 录

前言

第一章 碳纤维钢骨—钢管混凝土组合柱受力性能分析	1
1.1 问题描述	1
1.2 有限元模拟步骤	1
第二章 复式钢管混凝土柱与钢梁空间节点抗震性能分析	32
2.1 复式钢管混凝土柱简介	32
2.2 ABAQUS应用实例	32
第三章 L形钢管混凝土芯柱温度场及耐火性能分析	66
3.1 问题描述	66
3.2 实例分析——L形钢管混凝土芯柱温度场分析	66
3.3 实例分析——L形钢管混凝土芯柱耐火性能分析	95
第四章 爆炸荷载作用下T形钢管混凝土芯柱动力响应模拟	111
4.1 问题描述	111
4.2 ABAQUS应用实例	111
第五章 十字形钢管混凝土芯柱侧向冲击作用的动力响应分析	135
5.1 问题描述	135
5.2 ABAQUS应用实例	135
第六章 高强钢筋混凝土梁受力性能的试验研究	163
6.1 实验概况	163
6.2 材料力学指标的测试	164
6.3 实验方案及实验测量内容	166
6.4 实验现象、实验结果与分析	167
第七章 钢骨混凝土异形柱轴心受压的试验研究和破坏机理	170
7.1 试件概况	170
7.2 材料力学性能试验检测	173
7.3 试验设备与加载制度	174
7.4 十字形异形柱试验全过程分析	179
7.5 L形异形柱试验全过程分析	181
7.6 钢骨混凝土异形柱轴心受压性能的影响因素	183
7.7 十字形钢骨混凝土异形柱轴心受压的破坏机理	184
7.8 L形钢骨混凝土异形柱轴心受压的破坏机理	192
第八章 十字形钢骨混凝土异形柱偏心受压试验研究	199
8.1 试件概况	199

8.2	材料力学性能试验检测	202
8.3	试验设备与加载制度	203
8.4	十字形异形柱试验全过程分析	206
8.5	对钢骨混凝土异形柱偏心受压性能的影响因素	209
8.6	单向偏心受压破坏机理	210
8.7	双向小偏心受压破坏机理	219
8.8	双向大偏心受压破坏机理	226
8.9	含钢率对高强钢骨混凝土十字形截面短柱承载力的影响	232
8.10	钢骨高强混凝土十字形截面短柱混凝土平截面假定的验证	232
第九章	钢骨—钢管混凝土柱抗震试验设计及结果分析	233
9.1	概述	233
9.2	试验设计及试件制作	234
9.3	试验装置及试验方法	237
9.4	试验量测及仪器布置	239
9.5	实验破坏	241
9.6	试验结果分析	241
9.7	应变分析	245
第十章	钢骨高强混凝土框架节点抗震性能研究	250
10.1	试验概况	250
10.2	试验的加载及量测	252
10.3	试验结果与分析	255
	参考文献	269

第一章 碳纤维钢骨—钢管混凝土组合柱受力性能分析

1.1 问题描述

钢管混凝土组合柱截面尺寸为 $200\text{mm} \times 200\text{mm}$ ，柱高 1000mm ；外部采用 CFRP 布和角钢复合加固，角钢尺寸为 $\angle 50 \times 3$ ，缀板高 30mm 、厚 3mm 以间距 200mm 沿柱纵向放置；采用强度等级 C60 的混凝土；钢管与外包角钢均采用 Q345 级钢材；钢管的直径为 133mm 、壁厚为 4.5mm ；用混凝土将角钢外侧抹平，并外包环向 CFRP，构件的截面尺寸如图 1-1 所示。

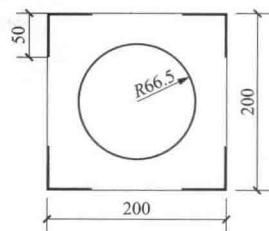


图 1-1 构件截面尺寸

试件的力学指标见表 1-1。

表 1-1

试件参数

材料	f_y (MPa)	泊松比	E
混凝土	—	0.2	33780
钢管	292	0.3	206000
角钢	342	0.3	206000
缀板	342	0.3	206000


注 其中 f_y 为钢材的屈服抗拉强度试验值； E 为材料的弹性模量；C60 混凝土 $f_{ck}=41\text{MPa}$ ， $f_c'=51\text{MPa}$ 。

1.2 有限元模拟步骤

1.2.1 创建部件

进入 ABAQUS/CAE 后，环境栏的模块列表中出现部件，如图 1-2 所示，即当前激活的是 Part（部件）功能模块。Part 模块用于创建分析模型的所有部件。

1.2.1.1 钢管内核心混凝土的创建

单击工具区的创建部件工具  弹出创建部件的对话框，在名称处输入 neihnt，核心混凝土截面为圆柱形，半径为 62.0mm ，在大约尺寸中输入 1000 ，ABAQUS 没有单位的概念，它通过有限元方法对矩阵进行数学运算得到结果，ABAQUS 建议用户使用一套众人公认的单位制进行单位定义，本文长度单位为 mm ，单位的一致性在保证结果有效性的前提。具体如图 1-3 所示。

单击继续进入草图绘制模块，如图 1-4 所示。



图 1-2 创建分析模型

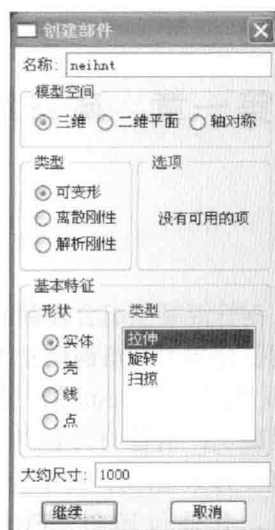


图 1-3 创建部件对话框



图 1-4 草图绘制模块

单击工具区的创建线命令 ，此时会出现  输入圆形坐标，输入“0，0”，按回车键，又出现  输入“62，0”，按回车，便得到钢管内部混凝土截面如图 1-5 所示。

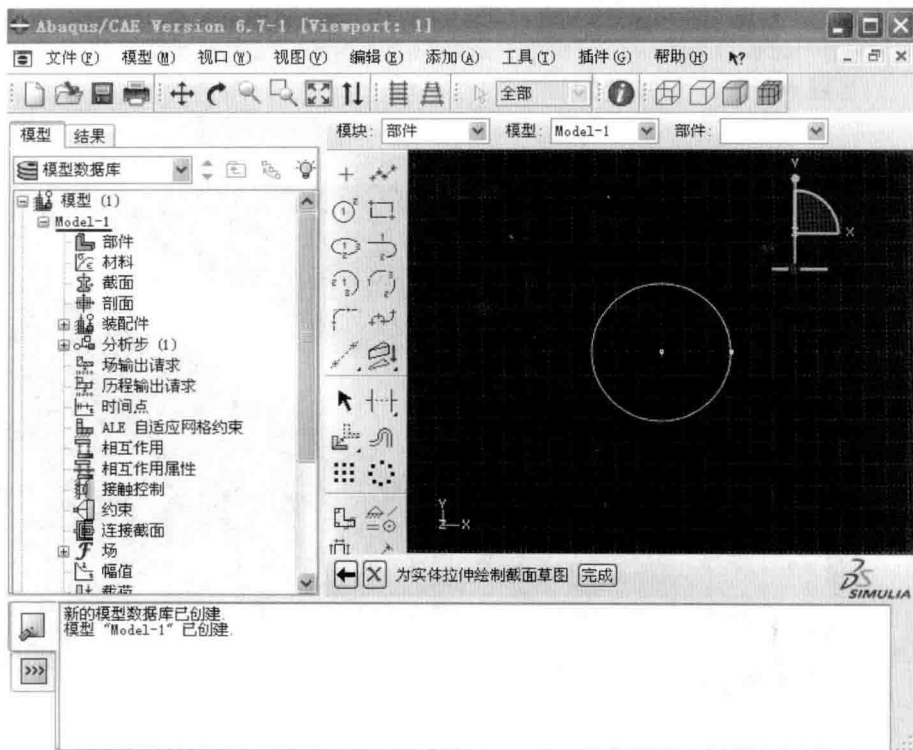


图 1-5 钢管内部混凝土截面

单击完成按钮，出现对话框如图 1-6 所示，在深度中输入 1000，表示钢管内混凝土的高度为 1000mm，单击 OK，这样就完成了钢管的创建，如图 1-7 所示。

钢管、缀板、外围混凝土的创建过程和各项的选择与钢管内混凝土基本相同，在此不再赘述。值得一提的是，在建外围混凝土时可以建成如图 1-8 所示截面，在拉伸时便可直接生成图 1-9 所示图形。钢管和缀板的部件成型图，如图 1-10、图 1-11 所示。

1.2.1.2 外包角钢的创建

对于外包钢的建模，涉及阵列的运用，这里详细说明一下。单击 创建部件，命名为 jiaogang，如图 1-12 所示。

单击继续进入草图绘制界面，单击 ，在提示栏 分别输入“-100, 100”“-50, 100”“-50, 97”“-97, 97”“-97, 50”“-100, 50”“-100, 100”最后得到图 1-13 所示图形。

单击环形阵列 ，然后选择刚做完的封闭图形（选择成功后线体的颜色由黄色变为红色如图 1-14 所示）。

单击左下角的完成按钮，出现如图 1-15 所示对话框。

按图 1-15 所示设置完成后单击确定便得到外包角钢的截面图，如图 1-16 所示。

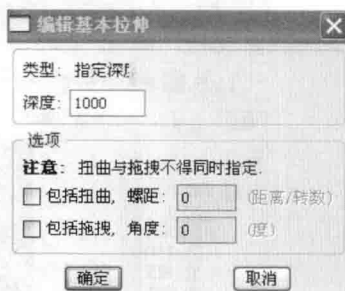


图 1-6 确定尺寸

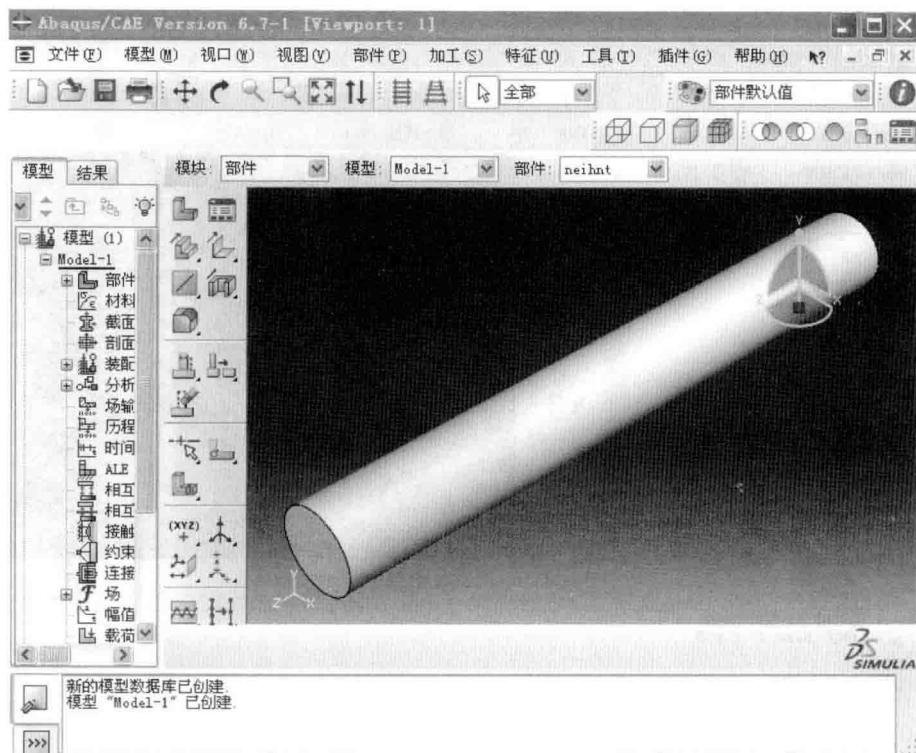


图 1-7 钢管的创作

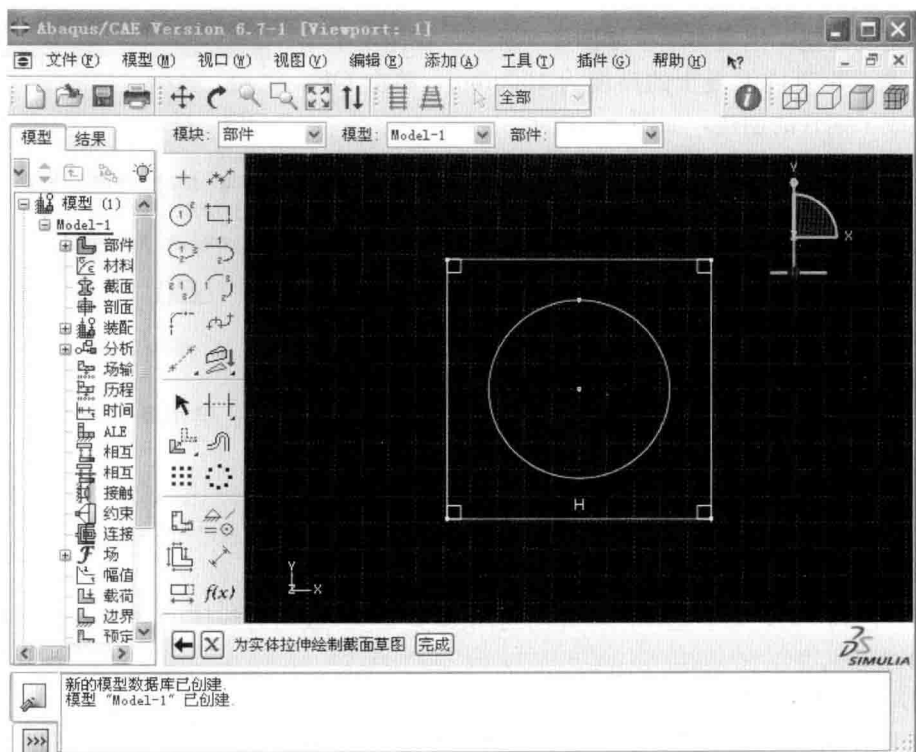


图 1-8 外侧混凝土的创作

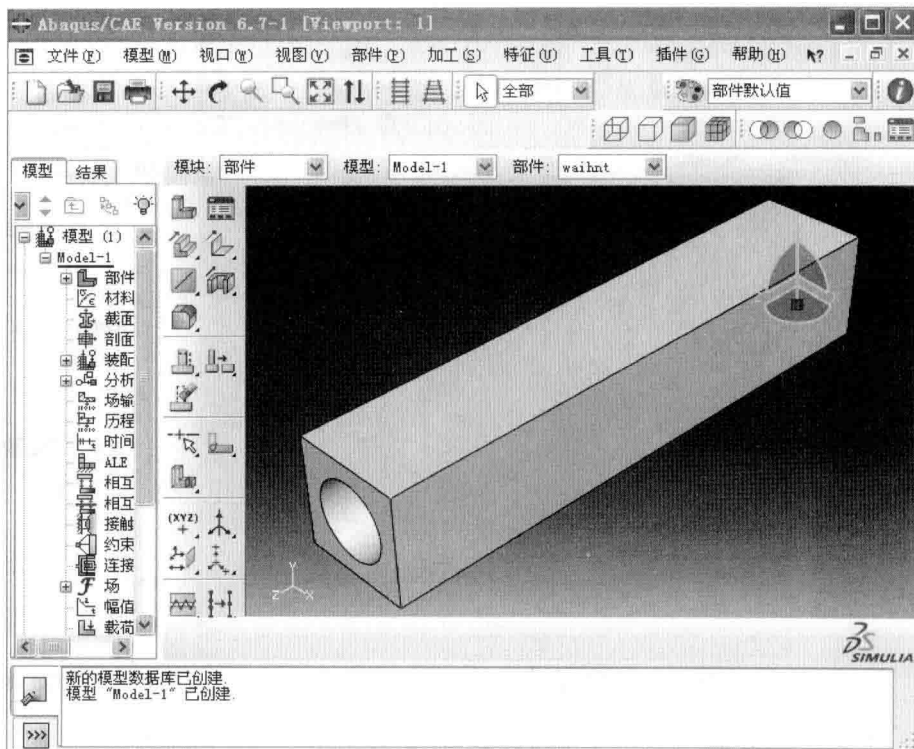


图 1-9 外侧混凝土的创建



图 1-10 钢管的创建

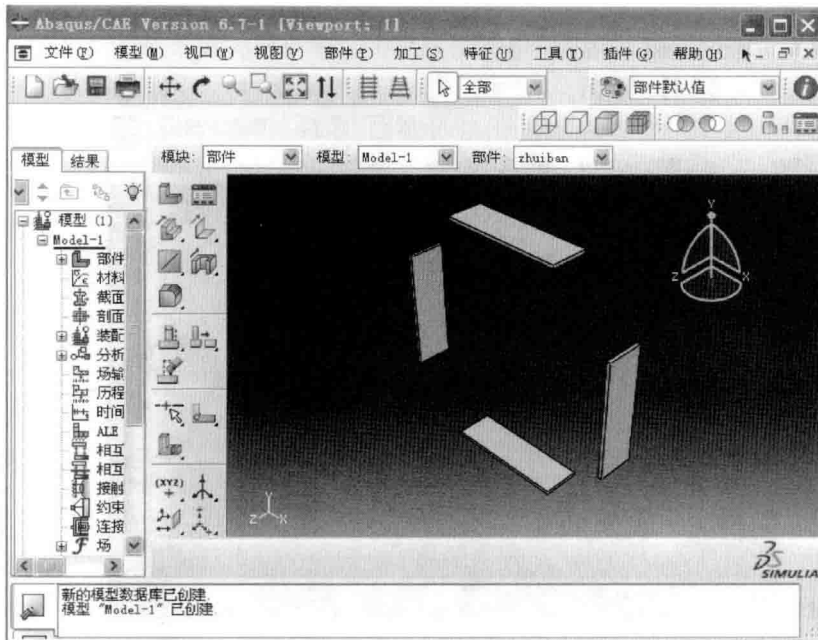


图 1-11 缀板的创建



图 1-12 创建部件对话框

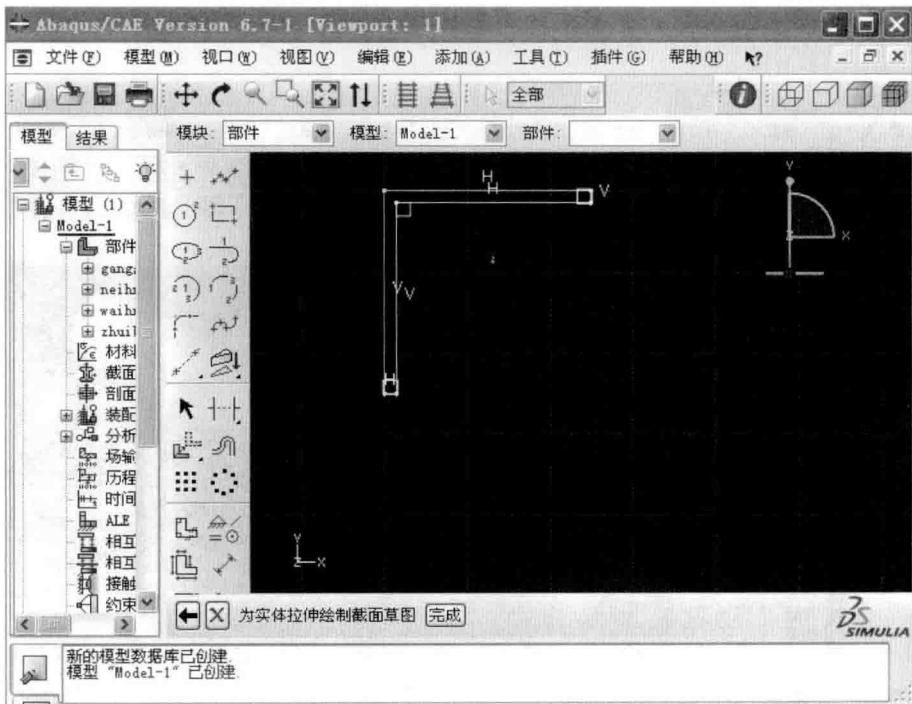


图 1-13 草图绘制界面

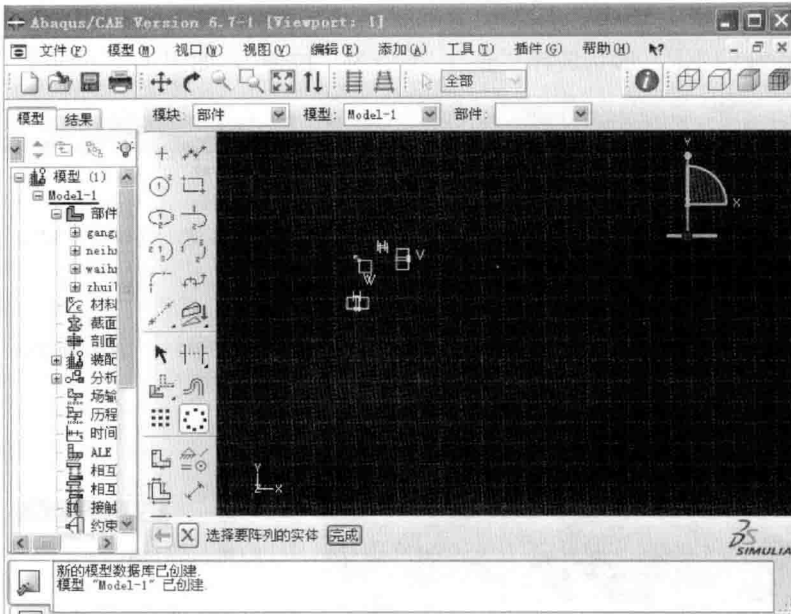


图 1-14 草图绘制界面

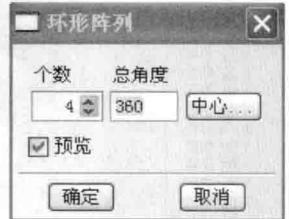


图 1-15 环形阵列对话框

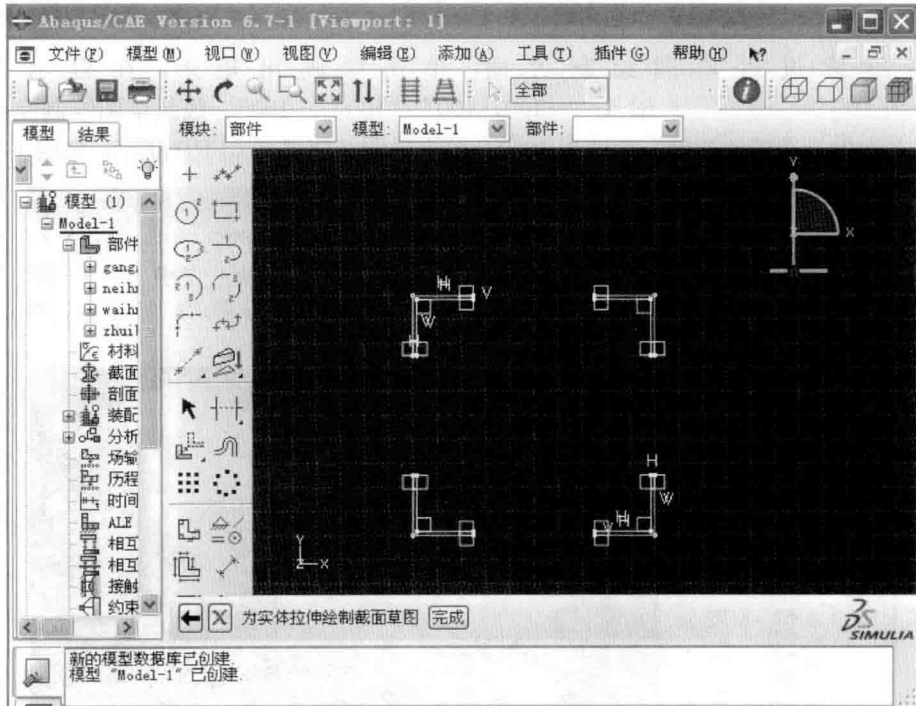



图 1-16 外包角钢的模型

单击完成，在弹出对话框的深度一栏填入 1000，单击确定，便得到外包角钢部件，如图 1-17 所示。

1.2.1.3 CFRP 部件的创建

单击  创建部件，命名为 CFRP，形状选择“壳”，类型为“拉伸”，如图 1-18 所示。

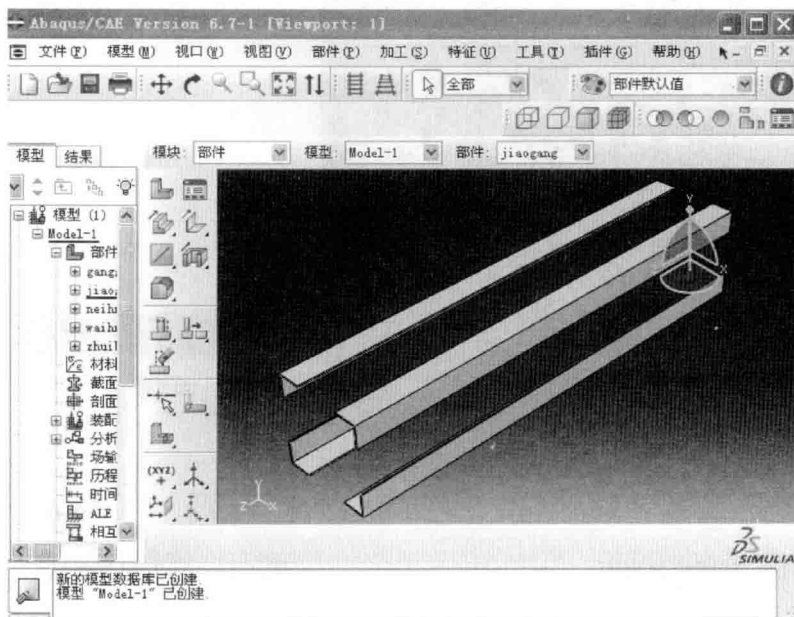


图 1-17 外包角钢部件

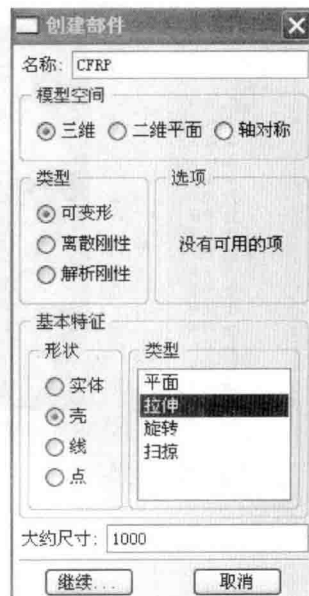




图 1-18 创建部件对话框

单击继续进入草图绘制界面，单击  画出矩形，在提示窗口处  拾取矩形的起始角点—或输入 X,Y: 输入“-100, 100”“100, -100”。截面草图绘制完成后，单击完成，在弹出对话框的深度一栏填入 1000，单击确定，便得到 CFRP 部件，如图 1-19 所示。

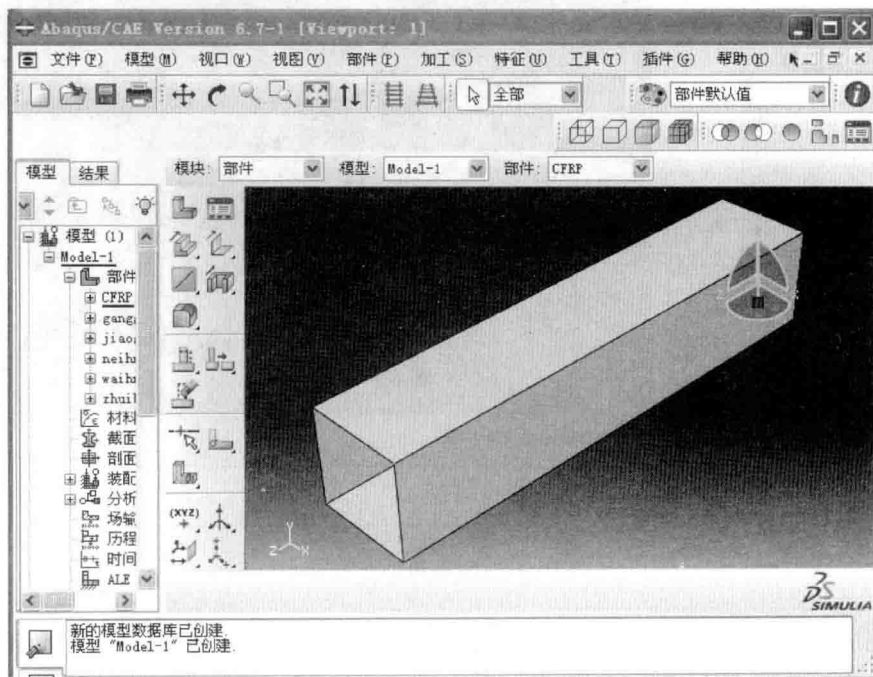


图 1-19 CFRP 部件

1.2.1.4 补充混凝土的创建

由于外包角钢和缀板的存在，需要创建用于代替抹灰的部件，建成后如图 1-20 所示。

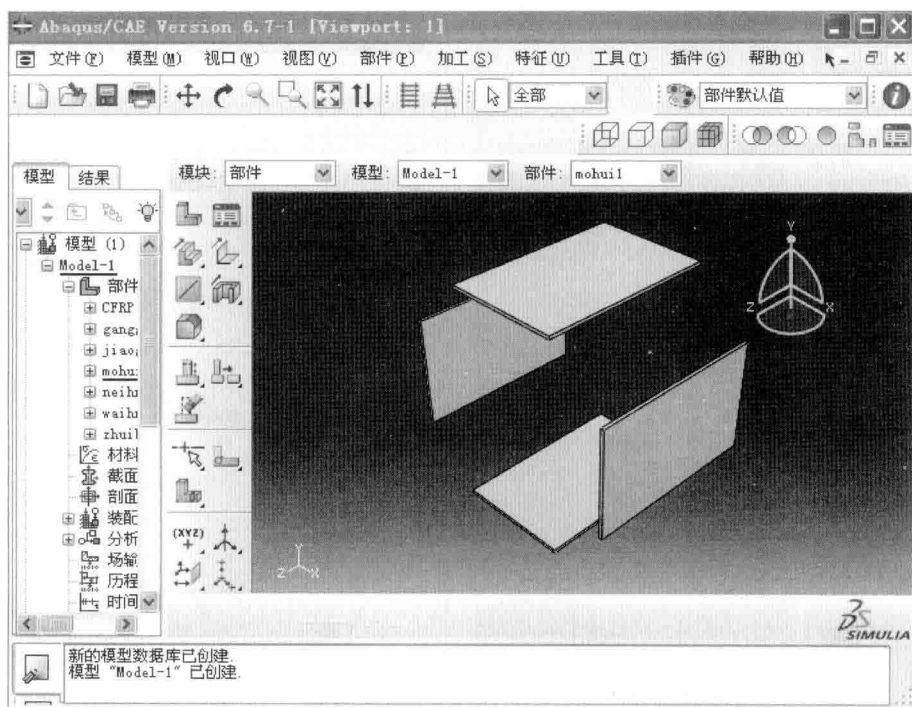



图 1-20 连接件模型

1.2.2 设置材料和截面特性

在环境栏的模块 (Module) 列表中选择特性 (Property) 功能模块。本例中，用户需要在此模块中设置材料和截面特性。

1.2.2.1 钢材的材料属性以及截面特性

1. 定义外包角钢的材料属性

钢管的本构关系模型采用斜直线加双直线的本构关系模型。单击工具区中的创建材料 (Create Material) 工具 ，弹出编辑材料 (Edit Material) 对话框，如图 1-21 所示。在 Name 栏输入 jiaogang 为截面名称。

(1) 定义弹性属性。在力学中选择弹性—弹性来定义材料的弹性属性，如图 1-22 所示。

在此有两项力学指标需要用户填写，杨氏模量为定义角钢的弹性模量，从试件力学指标的表格中可知其值为 206000；泊松比本文定义为 0.3。

(2) 定义塑性属性。单击力学，选择塑性—塑性来定义材料的塑性性能，如图 1-23 所示：定义角钢的屈服应力，从材料的力学指标的表格中可以得出其值为 342，塑性应变定义为 0。

2. 创建截面特性

单击工具区中的创建截面 (Create Section) 工具 ，弹出创建截面的对话框，如

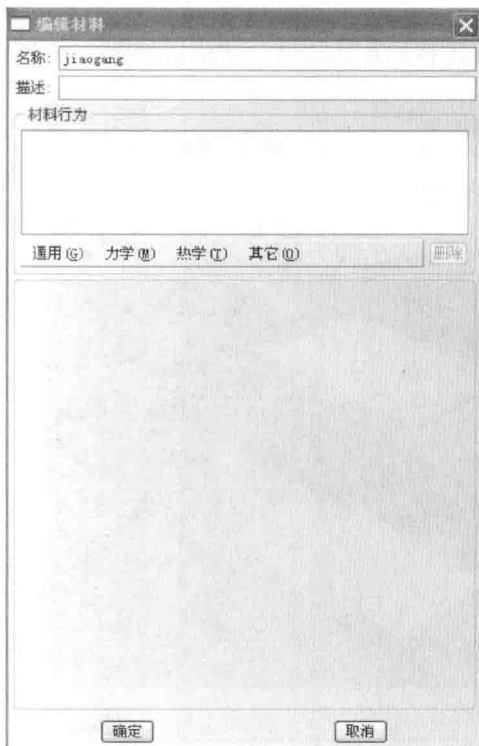


图 1-21 编辑材料对话框

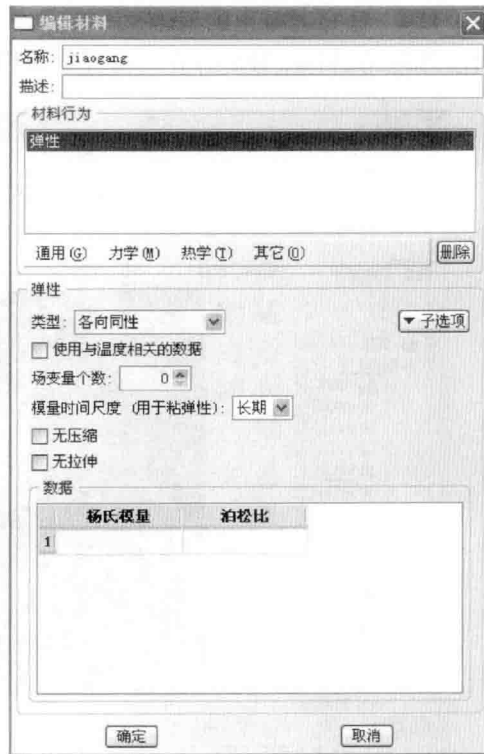



图 1-22 编辑材料对话框

图 1-24 所示, 在 Name 栏输入 jiaogang 为截面名称, 在类别 (Category) 栏内选择实体 (Solid), 在类型 (Type) 栏内选择均匀体 (Homogeneous)。单击继续, 弹出对话框如图 1-25 所示。

在材料中选择 jiaogang, 单击确定。

3. 分配截面属性

单击工具区中的分配截面 (Assign Section) 工具 , 在视图区用鼠标拖拽选择整个角钢的模型, 单击完成按钮, 弹出对话框如图 1-26 所示。

在截面中选择 jiaogang, 单击确定按钮, 完成截面特性的分配操作。钢管和缀板的材料属性的赋予与钢管相同, 这里不作介绍。

1. 2. 2. 2 混凝土的材料属性以及截面特性

混凝土的弹性属性部分与钢管的弹性属性定义方法相同, 这里不再赘述, 下面主要说明混凝土塑性性能的定义。

通过对核心混凝土的理论计算, 得出了核心混凝土的应力—应变曲线, 如图 1-27 所示。

试验中得到的材料的应力、应变为试件的名义应力和名义应变, ABAQUS 中需要将名义应力和名义应变转化为实际应力和实际应变, 这里不做详解。通过各个公式转化后, 将得到的数据填入到混凝土的塑性指标中, 本例中将经过计算得到的材料塑性输入到相应位置, 如图 1-28 所示。

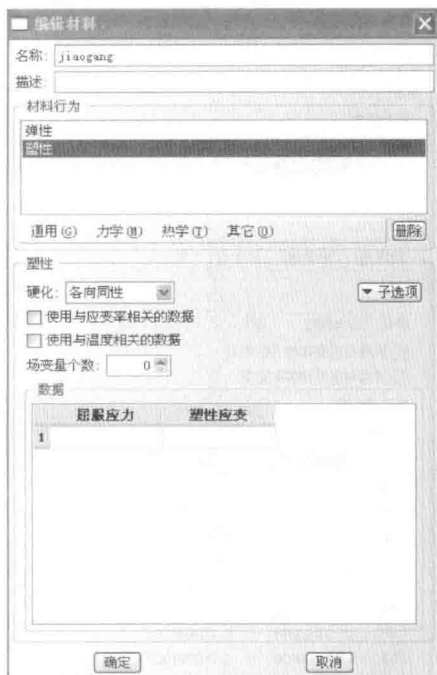


图 1-23 定义材料的塑性性能



图 1-24 创建截面对话框

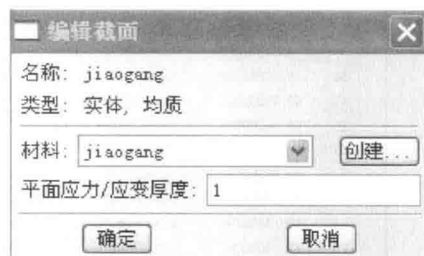


图 1-25 编辑截面对话框

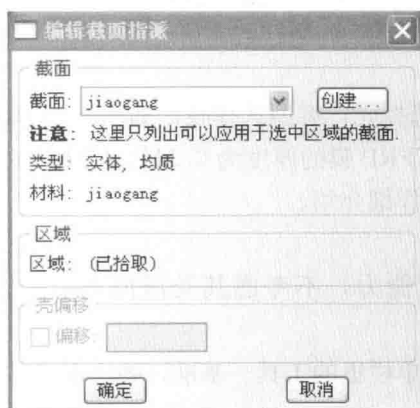


图 1-26 编辑截面对话框

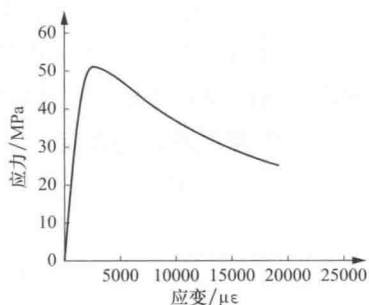


图 1-27 钢管内混凝土本构关系

对于外围混凝土及用于补充的混凝土为外包角钢与碳纤维复合加固状态下的混凝土，应综合考虑 CFRP 和角钢的作用，卢亦焱教授在前人研究的基础上提出了复合加固时混凝土的本构关系，本文就采用此种本构关系，通过计算，得出了夹层混凝土的应力—应变曲线数据，如图 1-29 所示。

1.2.2.3 CFRP 的材料属性以及截面特性

1. 材料属性

CFRP 材料属性的定义完成后如图 1-30 所示。