



跟高手学软件

土木工程常用软件应用入门丛书

# ADINA

## 在土木工程中的应用

崔春义 孟 坤 许成顺 编著

中国建筑工业出版社

土木工程常用软件应用入门丛书

# ADINA 在土木工程中的应用

崔春义 孟 坤 许成顺 编著

中国建筑工业出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

ADINA 在土木工程中的应用/崔春义等编著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2015. 1

(土木工程常用软件应用入门丛书)

ISBN 978-7-112-17521-5

I. ①A… II. ①崔… III. ①土木工程-有限元分析-应用软件  
IV. ①TU-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 269741 号

本书基于 ADINA8.9.0 程序数值平台, 并结合一系列典型应用算例, 是国内第一本系统介绍 ADINA 在土木工程及相关领域应用的专业书籍。全书共分为 13 章, 具体应用算例涉及钢筋混凝土构件、钢结构、桥梁结构、房屋建筑、大跨度空间结构、边坡支护与挡墙结构、水工坝与渡槽结构、隧道与地下建筑结构、库水坝耦合渗流体系、地基瞬态固结、深浅基础工程、石油储罐结构等典型工程问题和内容。

本书适合土木工程、水利工程、石油储备工程等领域的高校教师和科研院所研究人员, 以及设计单位工程技术人员阅读, 也可作为高年级本科生和研究生土木工程数值计算课程的参考教材。

\* \* \*

责任编辑: 王 梅 杨 允

责任设计: 李志立

责任校对: 李欣慰 赵 颖

土木工程常用软件应用入门丛书

**ADINA 在土木工程中的应用**

崔春义 孟 坤 许成顺 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

北京红光制版公司制版

北京市密东印刷有限公司印刷

\*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 21 $\frac{3}{4}$  字数: 540 千字

2015 年 1 月第一版 2015 年 1 月第一次印刷

定价: 60.00 元 (含光盘)

ISBN 978-7-112-17521-5

(26744)

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

ADINA 程序具有将近 40 年的应用历史, 经过自身不断的开发和完善而逐渐成为具有强大非线性求解和多场耦合计算功能的数值仿真平台。目前, 其作为一个大型通用有限元分析软件和多功能数值仿真平台, 已在世界范围内广泛地应用于土木建筑、交通运输、石油化工、机械制造、航空航天、汽车、国防军工、船舶等各个工业领域。

本书基于 ADINA8.9.0 程序数值平台, 并结合一系列典型应用算例, 是国内第一本系统介绍 ADINA 在土木工程及相关领域应用的专业书籍。全书共分为 13 章, 具体应用算例涉及钢筋混凝土构件、钢结构、桥梁结构、房屋建筑、大跨空间结构、边坡支护与挡墙结构、水工坝与渡槽结构、隧道与地下建筑结构、库水坝耦合渗流体系、地基瞬态固结、深浅基础工程、石油储罐结构等典型工程问题和内容。

## 本书特色

- 省略网络论坛和培训资料中常见的基本菜单和模块操作入门介绍部分, 节省篇幅, 避免内容重复;
- 经过精心设计和选取得出土木工程中多领域典型工程应用算例, 内容全面丰富, 具有良好的代表性, 专门性和可拓展性;
- 直接从具体算例入手, 能有的放矢地使读者快速融入到应用情境, 从而达到事半功倍的学习效果;
- 算例针对性强, 涵盖土木工程各个方面, 大部分读者可从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的算例 in 格式文件, 可免去读者建模操作或输入命令的麻烦, 同时亦可为读者学习提供建模参考标准。

## 本书适合的读者对象

本书适合土木工程、水利工程、石油储备工程等领域的高校教师和科研院所研究人员, 以及设计单位工程技术人员阅读, 也可作为高年级本科生和研究生土木工程数值计算课程的参考教材。

## 本书分工与致谢

大连海事大学土木工程系崔春义负责本书全面工作，并统筹全稿。全书章节分工如下：第3、5、6、8、11、12章由崔春义执笔，第2、4、7、9、13章由大连海事大学孟昆执笔，第1章由大连海事大学李晓飞执笔，第10章由北京工业大学许成顺执笔。参与本书图片和文字编辑工作的还有程学磊、朱江山、王春乐、张石平、韩秀、赵飞翔等，在此表示感谢。此外，还要对网络论坛中不知名诸多网友所提供有价值的学习资料表示诚挚谢意。

与此同时，本书的完成还要感谢以下基金项目的支持：国家自然科学基金青年基金（50809009）、国家自然科学基金面上项目（51278015）、北京市博士后基金（2014ZZ-49）、辽宁省教育厅一般项目（L2013305）。同时也感谢作者博士后在站单位北京工业大学建筑工程学院对本书完成和修订工作所给予的技术支持。

最后，特别地感谢 ADINA 公司中国代表处几年来免费提供的软件使用权，以及在软件应用和本书成稿过程中给予的各种帮助与支持。

由于时间紧迫和作者水平有限，本书难免有欠妥和错误之处，敬请读者批评指正。若有问题请发邮件到 [cuichunyi@dlmu.edu.cn](mailto:cuichunyi@dlmu.edu.cn) 联系，我们会及时更正以便再版时更好地为读者服务。



2014 年 10 月

于大连海事大学 西山校区 路桥楼

# 目 录

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| 第 1 章 大型通用有限元软件 ADINA 简介 ..... | 1   |
| 1.1 ADINA 软件概述 .....           | 1   |
| 1.2 ADINA 有限元分析的基本流程 .....     | 3   |
| 第 2 章 钢筋混凝土结构分析应用实例 .....      | 9   |
| 2.1 概述 .....                   | 9   |
| 2.2 钢筋混凝土梁分析 .....             | 13  |
| 2.3 预应力钢筋混凝土分析 .....           | 22  |
| 2.4 大体积混凝土浇筑模拟分析 .....         | 30  |
| 第 3 章 钢结构分析应用实例 .....          | 42  |
| 3.1 工字型钢梁屈服分析 .....            | 42  |
| 3.2 钢柱的屈曲分析 .....              | 48  |
| 第 4 章 桥梁工程应用实例 .....           | 56  |
| 4.1 桁架桥的受力分析 .....             | 56  |
| 4.2 移动荷载作用下桥梁动态响应分析 .....      | 63  |
| 4.3 混凝土连续刚构桥三维仿真分析 .....       | 68  |
| 4.4 斜拉桥静力与动力分析 .....           | 80  |
| 第 5 章 房屋建筑工程应用实例 .....         | 89  |
| 5.1 三角形屋架受力分析 .....            | 89  |
| 5.2 空间三层框架 Pushover 分析 .....   | 95  |
| 5.3 工业厂房牛腿柱受力分析 .....          | 101 |
| 5.4 单层厂房排架结构受力分析 .....         | 104 |
| 5.5 框架-剪力墙结构三维仿真分析 .....       | 111 |
| 第 6 章 大跨度空间结构应用实例 .....        | 116 |
| 6.1 空间刚架结构分析 .....             | 116 |
| 6.2 空间单层网壳结构分析 .....           | 122 |
| 第 7 章 边坡问题应用实例 .....           | 132 |
| 7.1 边坡问题的相关概述 .....            | 132 |
| 7.2 基于重度增加法的边坡稳定分析 .....       | 134 |
| 7.3 基于强度折减法的边坡稳定性分析 .....      | 141 |

|             |                                |            |
|-------------|--------------------------------|------------|
| 7.4         | 边坡滑动和锚固分析 .....                | 150        |
| 7.5         | 公路挡土墙支护结构分析 .....              | 161        |
| <b>第8章</b>  | <b>水工结构分析应用实例 .....</b>        | <b>172</b> |
| 8.1         | 重力坝二维地震动力时程分析 .....            | 172        |
| 8.2         | 重力坝三维地震反应谱分析 .....             | 179        |
| 8.3         | 多孔介质大坝三维流固耦合分析 .....           | 188        |
| 8.4         | 渡槽结构体系流固耦合动力特性分析 .....         | 196        |
| 8.5         | 埋地管道结构破坏分析 .....               | 208        |
| <b>第9章</b>  | <b>渗流分析应用实例 .....</b>          | <b>216</b> |
| 9.1         | 典型稳态渗流分析 .....                 | 216        |
| 9.2         | 基于 ADINA-T 模块的坝基渗流计算 .....     | 221        |
| 9.3         | 基于流固耦合方法的库水-土坝渗流分析 .....       | 229        |
| <b>第10章</b> | <b>土体固结分析应用实例 .....</b>        | <b>237</b> |
| 10.1        | 概述 .....                       | 237        |
| 10.2        | 一维固结问题分析 .....                 | 238        |
| 10.3        | 二维固结分析 .....                   | 245        |
| <b>第11章</b> | <b>隧道及地下建筑结构应用实例 .....</b>     | <b>255</b> |
| 11.1        | 概述 .....                       | 255        |
| 11.2        | 地铁站台地震响应动力时程分析 .....           | 258        |
| 11.3        | 地铁明挖隧道结构分析 .....               | 271        |
| 11.4        | 二维平行隧道施工阶段分析 .....             | 277        |
| 11.5        | 单线山体隧道开挖全过程三维仿真分析 .....        | 291        |
| <b>第12章</b> | <b>储罐-罐液体系地震动力响应分析实例 .....</b> | <b>301</b> |
| 12.1        | 储液罐流固耦合地震反应分析 .....            | 301        |
| 12.2        | LNG 储罐外壁地震响应分析 .....           | 307        |
| <b>第13章</b> | <b>地基基础工程应用实例 .....</b>        | <b>314</b> |
| 13.1        | 桥梁桩基础承台结构分析 .....              | 314        |
| 13.2        | 考虑接触效应的桩土相互作用分析 .....          | 321        |
| 13.3        | 桩土相互作用简化分析 .....               | 327        |
| 13.4        | 房屋建筑刚性独立式基础分析 .....            | 334        |
|             | 参考文献 .....                     | 340        |

# 第 1 章 大型通用有限元软件 ADINA 简介

## 1.1 ADINA 软件概述

ADINA 软件是基于有限元技术的大型通用仿真分析平台，广泛应用于各个工业领域、研究机构和教育机构。

### 1.1.1 ADINA 的发展历史

ADINA 最早是由 K. J. Bathe 博士及其研究小组在 1975 年开发出来的有限元分析软件。ADINA 的全称是 Automatic Dynamic Incremental Nonlinear Analysis 的首字母缩写。ADINA 除了求解线性问题外，还具备分析非线性问题的强大功能，即求解结构以及涉及结构场外的多场耦合问题。Incremental 增量法是数值求解非线性物理问题的最本质方法，对非线性物理问题，数值计算结果逼近真实解的过程是通过控制增量步逐步实现。

从 1975 年到 1985 年间，ADINA 还不是成熟的商业产品，但是由于其理论基础深厚、强大的功能，成为全球最先进的有限元分析程序，被工程界、科学研究、教育等众多用户广泛应用。ADINA 的源代码是 Public Domain Code，传播到全球各个地区，很多其他商业有限元程序都来自 ADINA 的基础代码。

1986 年，K. J. Bathe 博士在美国马萨诸塞州 Watertown 成立 ADINA 公司，开始其商业化发展的历程。ADINA84 版本已经具备基本功能的框架，ADINA 公司成立的目标是使 ADINA 成为被广泛应用的大型商业有限元求解软件，力求程序的求解能力、可靠性、求解效率全球领先。

一直以来，ADINA 在计算理论和求解问题的广泛性方面处于全球领先的地位，尤其针对结构非线性、流固耦合等复杂问题的求解具有强大优势，被业内人士认为是非线性有限元发展方向的先导。经过近 30 年的商业化开发，ADINA 已经成为全球最重要的非线性求解软件，被广泛应用于工业领域的工程仿真计算，包括土木建筑、交通运输、石油化工、机械制造、航空航天、汽车、国防军工、船舶以及科学研究等各个领域。

### 1.1.2 ADINA 软件的主要技术特点和功能

#### 1. ADINA 功能特点

ADINA 软件主要包括三个部分：前处理模块、分析计算模块和后处理模块。

### (1) 前处理模块

提供了强大的实体建模及网格划分工具,用户可以方便的构造有限元模型。ADINA 有 Parasolid 作为前处理的几何建模内核技术,这是全球 CAD/CAE 软件最为流行的建模技术。ADINA 一方面可以方便地创建各种复杂的几何模型,另一方面可以采用 Parasolid 核心的软件直接交换几何模型,由于数据结构完全相同,不存在信息失真或丢失的问题,可以实现无缝集成。

### (2) 分析计算模块

分析计算模块包括结构分析(可进行线性分析、非线性分析和高度非线性分析)、流体动力学分析、电磁场分析、声场分析、压电分析以及多物理场的耦合分析,可模拟多种物理介质的相互作用。

ADINA 具有完善的求解理论框架,同时具有隐式/显式时间积分算法、有限元/控制体积方法、时域/频域求解方法。ADINA 求解非线性问题采用自动时间步长技术,由程序根据问题稳定性自动判断时间步或荷载步大小;提供 Line Search 方式配合 Newton-Raphson 迭代处理循环加载卸载问题模拟,提供基于改进弧长法的 LDC 方法计算非线性屈曲和后屈曲问题,提供专用的固有频域求解器 Determinant-Search 用于流固耦合模态求解。

### (3) 后处理模块

可将计算结果以彩色等值线显示、梯度显示、矢量显示、立体切片显示、透明及半透明显示(可看到结构内部)等图形方式显示出来,也可将计算结果以图表、曲线形式显示或输出。

## 2. ADINA 软件提供的分析类型

### (1) 结构静力分析 (ADINA-Structure-Statics)

用来求解外荷载引起的位移、应力或反力。ADINA 程序中的静力分析不仅可以进行线性分析,而且可以进行非线性分析,如塑性、蠕变、膨胀、大变形、大应变及接触分析。

### (2) 结构动力分析 (ADINA-Structure-Dynamics)

结构动力学分析用来求解随时间变化的荷载对结构或部件的影响。与静力分析不同的是动力分析要考虑随时间变化的力荷载以及它对阻尼和惯性的影响。ADINA 动力分析包括频域分析、直接积分、随机振动三大部分。频域分析包括:模态分析、模态应力、振型参与因子和反应谱分析、模态叠加;直接积分包括:隐式直接积分瞬态动力分析和显式直接积分瞬态动力分析。

### (3) 线性屈曲分析 (ADINA-Structure-Linear Buckling)

线性屈曲分析即特征值屈曲分析是求解结构失稳的临界荷载。

### (4) 非线性屈曲分析 (ADINA-Structure-Collapse Analysis)

使用自动选择载荷增量的静力分析,非线性屈曲分析是求解结构失稳的极限荷载。

### (5) 热场分析 (ADINA-Thermal)

ADINA-Thermal 用来解决固体和结构中的热传递问题。它具有强大的功能,譬如:任意几何图形表面间的辐射、单元生死选项和高度非线性材料特性的功能。ADINA-Thermal 可以处理热传递的三种基本类型:传导、对流和辐射。热传递的三种类型均可进行稳态或瞬态、线性和非线性分析。热场分析还具有可以模拟热与结构应力之间的热-结

构耦合分析能力。

#### (6) 流体动力学分析 (ADINA-CFD)

ADINA-CFD 能进行流体动力学分析, 分析类型可以分为瞬态或稳态。

ADINA-CFD 为可压缩和不可压缩的流体提供了世界一流的有限元和控制流量的解决能力, 流体可包含自由表面和流体间以及流体与结构间的流动界面。程序运用一个任意拉格朗日欧拉 (ALE) 公式。ADINA-CFD 中使用的程序是基于有限元和有限体积离散图, 带有非常全面和高效的解决方法, 可解决任意几何学中的全部流动问题。具体包括可压缩流动的材料模型、不可压缩流动的材料模型、湍流模型、非牛顿模型和多孔材料模型。

#### (7) 结构-流体耦合分析 (ADINA-FSI)

ADINA-FSI 是用于带有结构相互作用的流体流动完全耦合分析 (多物理场) 的主要工具。它把 ADINA 与 ADINA-F 的所有功能全部整合成一个程序模块, 结构和流体流动理想化可使用截然不同的网格。它包含自由表面, 使用任意拉格朗日欧拉公式 (ALE)。

#### (8) ADINA-TMC

ADINA-TMC 程序可用于解决如下类型的问题:

- ①完全耦合的热机械分析;
- ②压电分析 (带用户定义子程序);
- ③土壤固结分析 (推荐使用 ADINA 程序中的多孔媒介方程来解决这类型的问题)。

#### (9) 电磁分析功能 (ADINA-EM)

ADINA-EM 模块提供基于 E-H 和 A- $\varphi$  计算理论方法求解各种电磁场以及电磁场与热、结构、流体的耦合问题。针对电磁场计算领域, 可计算例如电场分析、磁场分析、直流电场、时间相关简谐分析、涡流、交流电磁场、电磁产生洛伦兹力、电磁场产生热、气流对磁场的影响、波导等。

## 1.2 ADINA 有限元分析的基本流程

在 ADINA 入门学习中, 用心琢磨 ADINA 求解的基本流程是非常重要的, 这是快速入门从而进一步有效地解决实际问题的基础。

### 1.2.1 基本流程介绍

ADINA 分析过程包括三个主要的步骤: 创建有限元模型并划分网格、求解、后处理过程。

#### 1. 创建有限元模型并划分网格

一般包括: 建立几何模型、定义并施加边界条件、定义并施加荷载、定义材料、划分单元。

#### 2. 求解

选取适合的求解方式进行求解, 得到想要的结果。

#### 3. 后处理

在后处理可以查看结构的变形、应力和位移云图等计算结果。

### 1.2.2 ADINA 分析基本流程实例

前一节讲述了 ADINA 有限元分析的基本过程, 本节将以 AUI 操作方式分析 ADINA 的一个平板受力实例。

#### 1. 分析问题描述

已知: 薄板弹性模量  $E = 3\text{MPa}$ , 泊松比  $\nu = 0.25$ , 板厚为  $1\text{m}$ ,  $q = 50\text{kPa}$ ,  $P = 10\text{kN}$ 。

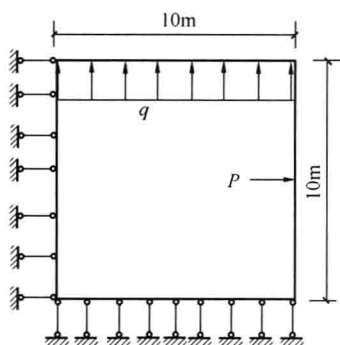


图 1-1 几何模型

#### 2. 操作步骤

(1) 启动 AUI, 选择分析模块

启动 AUI, 从模块选择工具条中的下拉式列表框中选择 ADINA Structure。

(2) 定义模型的控制数据

指定分析标题: 单击菜单 Control → Heading, 输入标题 “Plate Analysis”, 单击 **【OK】**。

选定主自由度: 单击菜单 Control → Degrees of Freedom, 退选 X-Translation, X-Rotation, Y-Rotation 和 Z-Rotation 选项, 单击 **【OK】**。

这样做是因为二维实体单元仅仅提供了 Y 方向和 Z 方向的平动自由度。如果忽略这一步, AUI 在生成 ADINA 数据文件时也会自动删除所有节点的 X 方向的平动自由度、转动自由度、Y 方向和 Z 方向的转动自由度, 因此这一步不是必须的。执不执行这一步, 不影响 ADINA 的最终求解, 但影响 ADINA 的运行效率, 执行这一步运行的要快一些。

#### 3. 建立几何模型

根据已知几何尺寸和建模规划逐步建立几何模型:

定义几何点: 单击菜单 Geometry → points 或者单击图标 , 将弹出定义几何点的对话框, 把建模规划中的 P1~P6 点的坐标信息输入到表的 X2、X3 列中 (X1 列为空白), 单击 **【OK】**。如图 1-2 所示。

定义几何面: 单击 **【Define surfaces】**

图标 , 单击 **【Add...】** 按钮定义 Surface Number 1, 确认 Type 为 Vertex, Vertices 中 Point1、Point2、Point3、Point4 分别填入 1、2、4、3, 单击

|   | Point # | X1 | X2 | X3 | System |
|---|---------|----|----|----|--------|
| 1 | 1       |    | 0  | 0  |        |
| 2 | 2       |    | 10 | 0  |        |
| 3 | 3       |    | 0  | 5  |        |
| 4 | 4       |    | 10 | 5  |        |
| 5 | 5       |    | 0  | 10 |        |
| 6 | 6       |    | 10 | 10 |        |

图 1-2 点坐标

**【Save】**; 单击 **【Add...】** 按钮定义 Surface Number 2, 确认 Type 为 Vertex, Vertices 中 Point1、Point2、Point3、Point4 分别填入 3、4、6、5, 单击 **【OK】**。

单击图标 ,  和  可以显示点号、线号和面号, 如图 1-3 所示。

#### 4. 定义并施加边界条件

该模型需要两个边界条件, 左边界约束 Y 方向位移, 底边界约束 Z 方向位移。单击

施加约束图标，在弹出的对话框中单击【Define...】按钮。在定义约束的对话框中输入约束名 UY，选中 Y-Translation，单击【Save】；再输入约束名 UZ，选中 Z-Translation，单击【OK】。

在施加约束对话框中，Apply to 设置为 Lines，按图 1-4 所示施加约束，单击【OK】。

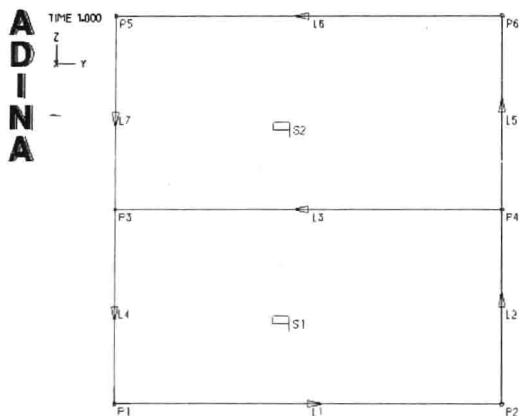


图 1-3 几何模型

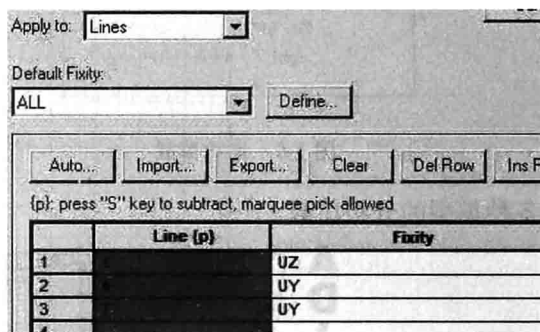


图 1-4 施加约束

对线 1 施加约束 UZ，对线 4、7 施加约束 UY。单击边界条件绘制图标，图形窗口如图 1-5 所示。

#### 5. 定义并施加荷载

定义集中荷载：单击施加荷载图标，把荷载类型设置为 Force，单击 Load Number 区域右侧的【Define...】按钮，在 Define Concentrated Force 对话框中单击【Add...】定义 Force Number 1，Magnitude 设置为 10000，Force Direction 中的 Y 设置为 1，单击【OK】。在施加荷载对话框中，Apply to 设置为 Point，然后在表中第一行 Site# 输 4，单击【OK】关闭对话框。

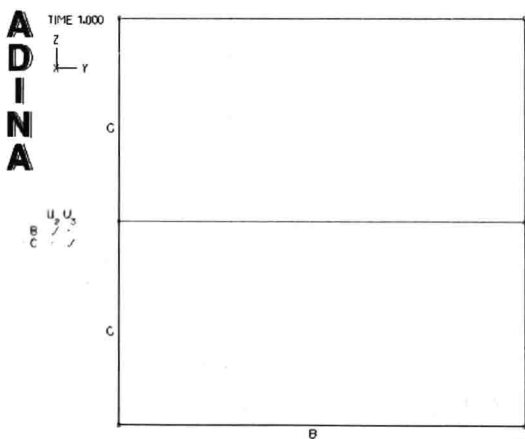


图 1-5 施加约束后的模型

定义均布荷载：单击施加荷载图标，把荷载类型设置为 Pressure，单击 Load Number 区域右侧的【Define...】按钮，在 Define Concentrated Force 对话框中单击【Add...】定义 Pressure Number 1，Magnitude 设置为 -50000，单击【OK】。在施加荷载对话框中，Apply to 设置为 Line，然后在表中第一行 Site# 输 6，单击【OK】关闭对话框。

单击荷载绘制图标，图形窗口如图 1-6 所示。

注：本实例演示的是均布荷载，若需要施加线性分布或二次分布的荷载则需要定义空间函数。具体的操作步骤如下：

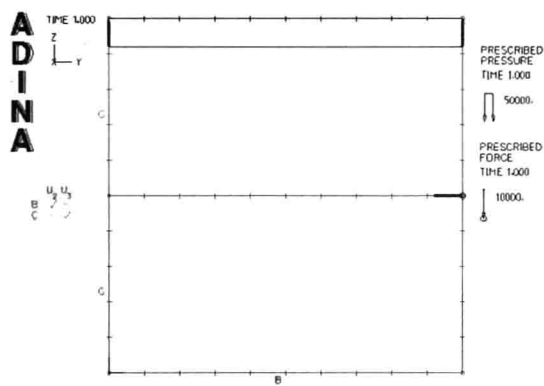


图 1-6 均布荷载

单击菜单 Geometry → Spatial Function→Line，在弹出的对话框中单击【Add...】定义 Function Number 1，线性荷载将 Type 设置为 Linear，在  $u=0$ 、 $u=1$  处分别输入 1、0，单击【OK】。

施加荷载时，在施加荷载对话框中，Apply to 设置为 Line，然后在表中第一行 Site# 输入 6，Spatial Function 设置为 1，单击【OK】关闭对话框。施加的线性分布荷载如图 1-7 所示。

同理，可以通过设置空间函数，施加

各种类型的分布荷载。

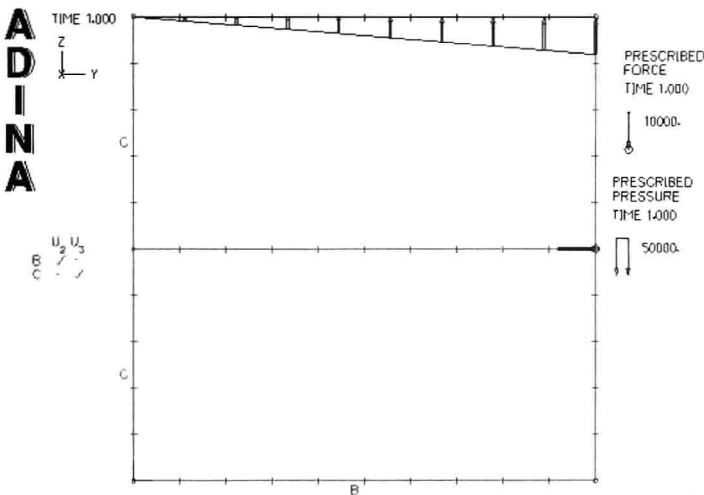


图 1-7 线性分布荷载

6. 定义材料

单击材料定义管理器图标 ，在弹出的对话框中单击 Elastic 框中的【Isotropic】按钮。在 Define Isotropic Linear Elastic Material 对话框中，单击【Add...】定义材料 1，把弹性模量设置为 3e6，泊松比设置为 0.25，然后单击【OK】。单击【Close】按钮关闭材料定义管理器对话框。

7. 定义单元

定义单元组：单击定义单元组图标 ，在弹出的对话框中单击【Add...】定义单元组 1，Type 设置为 2-D Solid，把单元子类型设置为平面应力，即 Element Sub-Type 设置为 Plane Strain，确认 Default Material 为 1，单击【OK】退出对话框。

网格控制：单击菜单 Meshing→Mesh Density→Complete Model，在弹出的对话框中 Subdivision Mode 设置为 Use Length，Element Edge Length 设置为 1，单击【OK】退出对话框。

生成单元：单击划分面网格图标 ，在弹出的对话框中将 Nodes per Element 设置



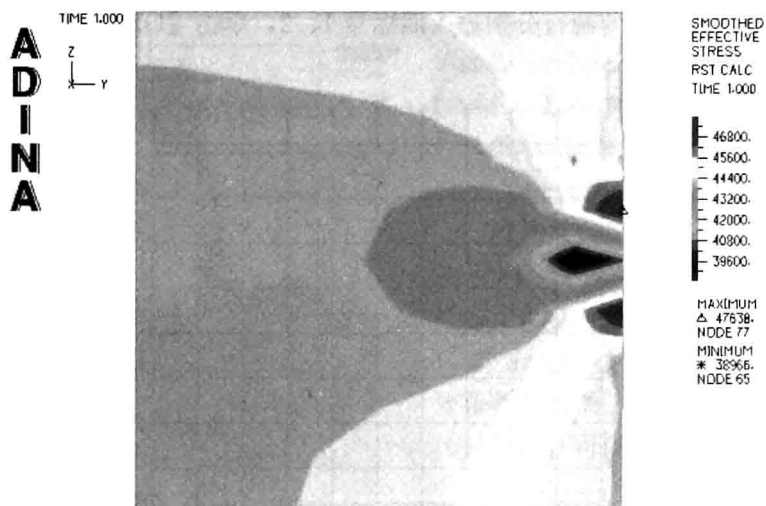


图 1-10 有效应力云图

# 第 2 章 钢筋混凝土结构分析应用实例

钢筋混凝土是指通过在混凝土中加入钢筋与之共同作用来改善混凝土力学性质的一种组合材料，是现在土木工程中应用最广泛的材料。钢筋混凝土力学问题分析是进行土木工程分析的基础。本章首先介绍 ADINA 中混凝土本构模型，然后详细阐述在 ADINA 中如何实现混凝土的开裂模拟及钢筋混凝土的建模分析。

## 2.1 概述

土木工程包括房屋、交通、水利等工程，钢筋混凝土作为一种常用的土木工程材料，在整个土木工程领域（房屋的梁、柱、板、基础、承台、桥墩和塔柱）起着非常重要的作用。目前，钢筋混凝土、预应力混凝土结构占整个结构工程材料的 80% 以上。用有限元软件进行钢筋混凝土结构力学行为的仿真模拟，对于结构设计的合理性和经济性是非常有意义的。

### 2.1.1 ADINA 混凝土材料本构模型简介

ADINA 中提供了专门用于混凝土结构分析的混凝土材料模型（Concrete Model），它是基于增量式正交本构理论的混凝土材料模型，理论基础是非线性弹性理论和断裂力学理论。这种本构模型可以模拟混凝土材料最基本的材料属性，例如：当主应力达到最大允许值时，材料拉坏；在较高压力作用下压溃，材料压溃后具有应变软化的特性，直到极限应变，材料完全破坏。

#### 1. 混凝土单轴应力-应变关系

典型的单轴应力-应变关系曲线为 Saenz 曲线，如图 2-1 所示。这个应力应变关系显示了三个应变阶段，分别为  $\epsilon > 0$ 、 $0 > \epsilon \geq \epsilon_c$  和  $\epsilon_c > \epsilon \geq \epsilon_u$ ，其中  $\epsilon_c$  是对应于最大压应力  $\sigma_c$  时的应变， $\epsilon_u$  是对应于最终应力  $\sigma_u$  时的应变。

当  $\epsilon > 0$  时，材料受拉，应力-应变关系为线性的，直到破坏应力  $\sigma_t$  时材料拉坏，弹性模量为  $E_0$ ，由式 (2-1) 确定：

$$\sigma = E_0 \epsilon$$

(2-1)

当  $\epsilon \leq 0$  时，假设应力-应变有如式 (2-2) 所示的关系：

$$\frac{\sigma}{\sigma_c} = \frac{\left(\frac{E_0}{E_s}\right) \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_c}\right)}{1 + A \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_c}\right) + B \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_c}\right)^2 + C \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_c}\right)^3}$$

(2-2)

因此：

$${}^t\tilde{E} = \frac{\tilde{E}_0 \left[ 1 - B \left( \frac{{}^t\tilde{e}}{\tilde{e}_c} \right)^2 - 2C \left( \frac{{}^t\tilde{e}}{\tilde{e}_c} \right)^3 \right]}{\left[ 1 + A \left( \frac{{}^t\tilde{e}}{\tilde{e}_c} \right) + B \left( \frac{{}^t\tilde{e}}{\tilde{e}_c} \right)^2 + C \left( \frac{{}^t\tilde{e}}{\tilde{e}_c} \right)^3 \right]^2}$$

(2-3)

其中：

$$A = \frac{\left[ \frac{\tilde{E}_0}{\tilde{E}_u} + (p^3 - 2p^2) \frac{\tilde{E}_0}{\tilde{E}_s} - (2p^3 - 3p^2 + 1) \right]}{[(p^2 - 2p + 1)p]}$$
$$B = \left[ \left( 2 \frac{\tilde{E}_0}{\tilde{E}_s} - 3 \right) - 2A \right]$$
$$C = \left[ \left( 2 - \frac{\tilde{E}_0}{\tilde{E}_s} \right) + A \right]$$

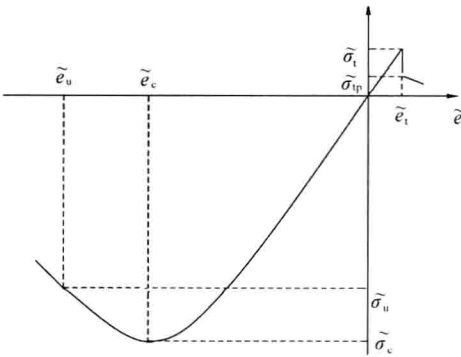


图 2-1 混凝土材料单轴应力应变关系

上述参数  $\tilde{E}_0, \tilde{\sigma}_c, \tilde{e}_c, \tilde{E}_s = \frac{\tilde{\sigma}_c}{\tilde{e}_c}, \tilde{\sigma}_u, \tilde{e}_u,$

$p = \frac{\tilde{e}_u}{\tilde{e}_c}$  和  $\tilde{E}_u = \frac{\tilde{\sigma}_u}{\tilde{e}_u}$  都由单轴试验获得。

值得注意的是，式（2-3）假设荷载是单调递增的，如果应力状态为卸载或加载到卸载的情况，应使用初始杨氏模量  $\tilde{E}_0$ 。对于超过  $\tilde{e}_u$  的应变状态，假设应力线性减小到 0，使用杨氏模量  $\tilde{E}_u$ ，按式（2-4）定义。

$$\tilde{E}_u = \frac{\tilde{\sigma}_u - \tilde{\sigma}_c}{\tilde{e}_u - \tilde{e}_c}$$

(2-4)

因此可以通过设定  $\tilde{\sigma}_u$  近似等于  $\tilde{\sigma}_c$  来模拟受约束的混凝土。

以上公式中用到符号的含义如表 2-1 所示。

公式中符号含义汇总表

表 2-1

| 符号            | 含 义                                                                   | 符号              | 含 义                                                | 符号                    | 含 义                                      |
|---------------|-----------------------------------------------------------------------|-----------------|----------------------------------------------------|-----------------------|------------------------------------------|
| ${}^tE$       | 时间 $t$ 的多轴切线杨氏模量（左上标 $t$ 表示时间）                                        | $e_{ij}$        | 应变增量                                               | ${}^t\tilde{\sigma}$  | 单轴应力                                     |
| $\tilde{E}_0$ | 单轴弹性模量（所有单轴性质都在上面加~号）                                                 | ${}^t\tilde{e}$ | 单轴应变                                               | $\tilde{\sigma}_t$    | 单轴取舍点拉力<br>( $\tilde{\sigma}_t > 0$ )    |
| $\tilde{E}_s$ | 达到相应的单轴最大应变的割线模量 $\tilde{E}_s = \frac{\tilde{\sigma}_c}{\tilde{e}_c}$ | $\tilde{e}_c$   | 相应于 $\tilde{\sigma}_c$ 的单轴应变 ( $\tilde{e}_c < 0$ ) | $\tilde{\sigma}_{tp}$ | 断裂后单轴取舍点拉力 ( $\tilde{\sigma}_{tp} > 0$ ) |
| $\tilde{E}_u$ | 达到单轴最终应变的割线模量 $\tilde{E}_u = \frac{\tilde{\sigma}_u}{\tilde{e}_u}$    | $\tilde{e}_u$   | 单轴极限压应变 ( $\tilde{e}_u < 0$ )                      | $\tilde{\sigma}_c$    | 最大单轴压应力<br>( $\tilde{\sigma}_c < 0$ )    |