

# ABAQUS

## 在隧道及地下工程中的应用

陈卫忠 伍国军 贾善坡 著



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

万水 ABAQUS 技术丛书

# ABAQUS 在隧道及地下工程中的应用

陈卫忠 伍国军 贾善坡 著



中国水利水电出版社  
[www.waterpub.com.cn](http://www.waterpub.com.cn)

## 内 容 提 要

本书系统地阐述地下工程数值模拟的基本原理和方法,通过一系列的工程实例,详细介绍 ABAQUS 在隧道及地下工程设计及施工中的应用,较充分地反映作者及国内外最新研究成果。

本书共分 11 章,前两章为入门介绍,主要包括 ABAQUS 基础知识、ABAQUS 模块简介、隧道及地下工程的设计施工方法;第 3~8 章介绍采用有限元法进行隧道及地下工程设计和施工过程力学分析的基本原理,给出采用 ABAQUS 软件进行隧道及地下工程数值模拟的工程实例,包括隧道施工工法优化、盾构隧道施工过程模拟、分岔隧道围岩稳定性计算、考虑渗流—应力耦合效应的隧道稳定性分析、隧道支护结构可靠性评价及深部岩体围岩稳定性分析;为了帮助二次开发,最后三章介绍 ABAQUS 软件二次开发的基本原理及使用方法,详细介绍如何使用用户子程序,包括常用用户子程序、用户子程序 UMAT 接口原理、用户材料子程序 UMAT 二次开发、岩土参数敏感性分析及岩土工程反演模型的数值实现。

本书主要立足于实际工程应用,将 ABAQUS 相关模拟功能和隧道及地下工程中的具体研究对象结合起来,背景性较强,属于 ABAQUS 软件分析的高级篇。

本书体系合理、内容丰富全面,深入浅出,实用性强,可供土木工程、岩土与隧道工程、地质工程、水利工程、石油工程的专业人员使用,还可作为以上专业研究生的教学参考书。

本书所有实例的命令流及相关文件可以从中国水利水电出版社网站及万水书苑下载,网址为 <http://www.waterpub.com.cn/softdown/>或 <http://www.wsbookshow.com>。

### 图书在版编目(CIP)数据

ABAQUS在隧道及地下工程中的应用 / 陈卫忠, 伍国军, 贾善坡著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2010. 1

(万水ABAQUS技术丛书)

ISBN 978-7-5084-6995-9

I. ①A… II. ①陈… ②伍… ③贾… III. ①隧道工程—应用软件, ABAQUS②地下工程—应用软件, ABAQUS  
IV. ①U45-39②TU94-39

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第212193号

策划编辑: 杨元泓 责任编辑: 宋俊娥 封面设计: 李 佳

|      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 书 名  | 万水 ABAQUS 技术丛书<br>ABAQUS 在隧道及地下工程中的应用                                                                                                                                                                                                                                                               |
| 作 者  | 陈卫忠 伍国军 贾善坡 著                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| 出版发行 | 中国水利水电出版社<br>(北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038)<br>网址: <a href="http://www.waterpub.com.cn">www.waterpub.com.cn</a><br>E-mail: <a href="mailto:mchannel@263.net">mchannel@263.net</a> (万水)<br><a href="mailto:sales@waterpub.com.cn">sales@waterpub.com.cn</a><br>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 32.75 印张 813 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  | 68.00 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

# 前 言

ABAQUS 是国际上最先进的大型非线性有限元计算分析软件之一，具有强健的非线性计算功能，拥有大量材料模型、单元模型和分析过程等。ABAQUS 软件在我国的土木工程、地矿、水利、石油、核工业等领域得到了广泛的应用，为各领域的工程设计、安全评价及科学研究做出了很大的贡献。随着计算机硬件和软件的飞速发展，该软件在不断改进，应用范围也在不断扩展。

本书共分 11 章，前两章为入门介绍，主要包括 ABAQUS 基础知识、ABAQUS 模块简介、隧道及地下工程的设计施工方法；第 3~8 章介绍采用有限元法进行隧道及地下工程设计和施工过程力学分析的基本原理，给出采用 ABAQUS 软件进行隧道及地下工程数值模拟的工程实例，包括隧道施工工法优化、盾构隧道施工过程模拟、分岔隧道围岩稳定性计算、考虑渗流—应力耦合效应的隧道稳定性分析、隧道支护结构可靠性评价及深部岩体围岩稳定性分析；为了使广大用户更好地使用软件的二次开发功能，最后三章介绍 ABAQUS 软件二次开发的基本原理及使用方法，详细介绍如何使用用户子程序及其二次开发，包括常用用户子程序、用户子程序 UMAT 接口原理、用户材料子程序 UMAT 二次开发、岩土参数敏感性分析及岩土工程反演模型的数值实现。

## 本书特色

- 本书的实例均来自科学研究和工程实践，很多实例读者稍微修改就能解决相关工程中类似的科研和工程问题。
- 针对该软件在具体使用方面的不足，详细介绍如何使用用户子程序及其二次开发，满足工程需要。
- 针对岩土介质损伤、渗流—应力耦合、可靠度计算、参数反演等复杂力学问题进行阐述，涵盖地下工程的众多方面，使读者都能在本书中找到复杂力学问题计算的参考。
- 主要针对 ABAQUS 在具体工程的数值实现，可学性非常强，有较大的实用价值。本书主要面向 ABAQUS 的中高级用户。

## 适合的读者对象

本书适合土木工程、岩土与隧道工程、地质工程、水利工程、石油工程的专业人员使用，还可作为以上专业研究生的教学参考书。

## 本书分工与致谢

本书是中国科学院武汉岩土力学研究所施工过程力学组的近几年的集体研究成果。中国科学院武汉岩土力学研究所陈卫忠研究员负责全面工作，并统筹全稿。全书各章分工如下：第 1、2、3、5、7、8 章由伍国军博士执笔；第 4、6、9、10、11 章由贾善坡博士执笔；杨建平博士为本书第 3 章的编写作了奠定性的工作。戴永浩博士、于洪丹博士、谭贤君博士、黄胜博士以及课题组曹俊杰、田洪铭、陈培帅、杨阜东、耿亚梅、王辉、赵武胜以及铁道部第四设计

院的陈立保高工和长江科学院的张计高工等为本书的出版做了大量工作。参与本书工作的还包括陈鲲、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、王斌、万雷、张强林、张赛桥等，在此深表感谢。

与此同时，本书的出版还要感谢以下基金的支持：“软弱岩体多场耦合与长期强度特性研究国家自然科学基金”（重大国际合作项目）、“地下工程软岩非线性流变机理及长期稳定性研究”（国家自然科学基金）、973 项目“能源储备地下库群灾变机理与防护理论研究”。

最后，需要特别指出的是：本书在编写过程中学习和借鉴了中国仿真论坛 ABAQUS 版的诸多网友的研究成果，这些成果丰富了本书的内容，本书的附录部分即是学习和借鉴上述成果的结晶，在此对不知实名的各位网友表示诚挚的谢意。

由于时间有限，作者水平有限以及伴随计算机的飞速发展，书中疏漏和不妥之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

作者

2009 年 12 月

# 目 录

前言

|                                  |    |                      |     |
|----------------------------------|----|----------------------|-----|
| 第 1 章 隧道工程与 ABAQUS 分析            | 1  | 3.1 概述               | 53  |
| 1.1 隧道的基本概念及工程概述                 | 1  | 3.2 新奥法              | 54  |
| 1.2 隧道的种类及其作用                    | 2  | 3.2.1 隧道施工应遵循的基本原则   | 54  |
| 1.2.1 交通隧道                       | 2  | 3.2.2 新奥法的分类及施工工序    | 55  |
| 1.2.2 水工隧道                       | 3  | 3.2.3 开挖方法           | 55  |
| 1.2.3 市政隧道                       | 3  | 3.3 ABAQUS 的数值模拟方法   | 60  |
| 1.2.4 矿山隧道                       | 4  | 3.4 隧道施工工法优化研究       | 60  |
| 1.3 隧道及地下工程的有限元分析                | 4  | 3.4.1 V 级围岩          | 61  |
| 1.4 ABAQUS 基础知识简介                | 5  | 3.4.2 IV 级围岩         | 68  |
| 1.4.1 ABAQUS 各模块简介               | 6  | 3.4.3 III 级围岩        | 74  |
| 1.4.2 ABAQUS 分析过程                | 7  | 3.4.4 II 级围岩         | 81  |
| 1.4.3 ABAQUS/CAE 简介              | 8  | 3.5 本章小结             | 86  |
| 1.4.4 ABAQUS 输入文件简介              | 12 | 第 4 章 隧道盾构施工方法及其应用   | 87  |
| 1.4.5 ABAQUS 帮助文档                | 16 | 4.1 盾构施工方法简介         | 87  |
| 1.4.6 ABAQUS 模型导入导出功能            | 17 | 4.2 盾构隧道施工过程的有限元模拟方法 | 89  |
| 1.5 本章小结                         | 20 | 4.2.1 盾构法隧道的施工过程     | 89  |
| 第 2 章 隧道的围岩分级及其计算模型              | 21 | 4.2.2 盾构隧道施工过程的模拟方法  | 90  |
| 2.1 隧道围岩分级及其应用                   | 21 | 4.3 反映施工质量的等代层模型     | 90  |
| 2.1.1 以岩石强度或岩石的物性指标为<br>代表的分级方法  | 22 | 4.4 盾构法施工的非线性有限元模型   | 91  |
| 2.1.2 以岩体构造、岩性特征为代表的<br>分级方法     | 24 | 4.4.1 材料性态的模拟        | 91  |
| 2.1.3 与地质勘探手段相联系的分级方法            | 25 | 4.4.2 有限元控制方程        | 92  |
| 2.1.4 以多种因素进行组合的分级方法             | 26 | 4.5 工程概述及有限元模型的建立    | 94  |
| 2.1.5 以工程对象为代表的分级法               | 27 | 4.5.1 工程概况           | 94  |
| 2.1.6 我国现行铁路隧道围岩分级               | 27 | 4.5.2 计算参数           | 97  |
| 2.2 计算模型                         | 30 | 4.5.3 初始条件和边界条件的定义   | 98  |
| 2.2.1 常用的设计模型                    | 30 | 4.6 施工过程描述           | 99  |
| 2.2.2 载荷—结构计算模型                  | 32 | 4.7 计算结果分析           | 107 |
| 2.2.3 地层—结构计算模型                  | 33 | 4.7.1 掘进过程中围岩稳定性分析   | 113 |
| 2.2.4 ABAQUS 在隧道计算模型中的应用         | 33 | 4.7.2 不同施工质量下围岩稳定性分析 | 118 |
| 2.3 本章小结                         | 52 | 4.8 本章小结             | 124 |
| 第 3 章 ABAQUS 在隧道中的应用——施工工<br>法优化 | 53 | 第 5 章 分岔隧道稳定性分析      | 126 |
|                                  |    | 5.1 分岔式隧道简介          | 126 |
|                                  |    | 5.2 ABAQUS 的模拟方法     | 128 |
|                                  |    | 5.2.1 地应力平衡          | 128 |

|            |                        |     |            |                              |     |
|------------|------------------------|-----|------------|------------------------------|-----|
| 5.2.2      | 喷锚支护                   | 129 | 6.6.1      | 模型描述                         | 276 |
| 5.2.3      | 多步骤开挖                  | 132 | 6.6.2      | 计算过程描述                       | 279 |
| 5.3        | 大拱段稳定性计算               | 133 | 6.6.3      | 计算结果分析                       | 282 |
| 5.3.1      | 大拱段平面计算                | 133 | 6.7        | 隧道围岩开挖扰动区数值模拟                | 285 |
| 5.3.2      | 大拱段三维计算                | 151 | 6.7.1      | 岩体渗透系数与塑性损伤之间的<br>关系         | 285 |
| 5.3.3      | 大拱段结果分析                | 159 | 6.7.2      | 模型描述                         | 287 |
| 5.4        | 连拱段                    | 159 | 6.7.3      | 计算结果分析                       | 293 |
| 5.4.1      | 连拱段平面计算                | 160 | 6.8        | 本章小结                         | 300 |
| 5.4.2      | 连拱段三维计算                | 175 | <b>第7章</b> | <b>隧道支护结构可靠性研究</b>           | 301 |
| 5.4.3      | 连拱段小结                  | 196 | 7.1        | 结构可靠性基本原理                    | 301 |
| 5.5        | 小间距拱段                  | 197 | 7.2        | 可靠指标的计算方法                    | 304 |
| 5.5.1      | 小间距拱段平面计算              | 197 | 7.2.1      | 哈一林(H-L)法                    | 305 |
| 5.5.2      | 小间距拱段三维计算              | 209 | 7.2.2      | 非正态变量的等效正态化(JC法)<br>及修正JC法   | 305 |
| 5.5.3      | 小间距段小结                 | 226 | 7.2.3      | 分位值法                         | 308 |
| 5.6        | 本章小结                   | 227 | 7.2.4      | 蒙特卡罗法(Monte-Carlo<br>method) | 310 |
| <b>第6章</b> | <b>地下工程渗流场和应力场耦合分析</b> | 228 | 7.2.5      | 响应面法                         | 310 |
| 6.1        | 岩土介质渗流—应力耦合理论          | 228 | 7.2.6      | 程序的编制                        | 311 |
| 6.1.1      | 渗流—应力相互耦合的力学机理         | 228 | 7.3        | ABAQUS 可靠性分析                 | 312 |
| 6.1.2      | 多孔介质中流体渗流规律            | 229 | 7.4        | 公路隧道衬砌结构可靠性计算                | 314 |
| 6.1.3      | 孔隙介质的有效应力原理            | 232 | 7.4.1      | V级围岩                         | 319 |
| 6.1.4      | 应力平衡方程和渗流连续方程          | 232 | 7.4.2      | IV级围岩                        | 328 |
| 6.1.5      | 有限元离散                  | 234 | 7.4.3      | III级围岩                       | 334 |
| 6.2        | 岩土介质渗透性演化模型            | 235 | 7.5        | 本章小结                         | 340 |
| 6.2.1      | 渗透系数与孔隙度的关系            | 235 | <b>第8章</b> | <b>深部岩体工程分析</b>              | 341 |
| 6.2.2      | 渗透系数与应力之间的关系           | 235 | 8.1        | 深部岩体工程简介                     | 341 |
| 6.2.3      | 渗透系数与应变之间的关系           | 236 | 8.2        | ABAQUS 数值模拟功能                | 342 |
| 6.2.4      | 渗透系数与损伤之间的关系           | 238 | 8.2.1      | 损伤                           | 342 |
| 6.3        | ABAQUS 渗流—应力耦合相关命令介绍   | 240 | 8.2.2      | 非线性蠕变岩体本构关系                  | 343 |
| 6.3.1      | ABAQUS 渗流和变形的耦合分析      | 240 | 8.2.3      | 考虑渗流的岩体本构关系                  | 346 |
| 6.3.2      | 相关命令介绍                 | 242 | 8.3        | 储气库的计算分析                     | 348 |
| 6.4        | 低渗透介质非排水卸载数值仿真分析       | 247 | 8.3.1      | 流变本构模型                       | 348 |
| 6.4.1      | 模型描述                   | 247 | 8.3.2      | 储气库的长期稳定性分析                  | 348 |
| 6.4.2      | 总应力分析法                 | 249 | 8.4        | 深埋引水隧洞的稳定性分析                 | 363 |
| 6.4.3      | 有效应力分析法                | 254 | 8.4.1      | 裂隙岩体应力渗流耦合本构模型               | 364 |
| 6.5        | 地下洞室开挖过程模拟             | 261 | 8.4.2      | 锦屏二级引水隧洞稳定性分析                | 366 |
| 6.5.1      | 模型描述                   | 262 | 8.5        | 本章小结                         | 378 |
| 6.5.2      | 施工过程描述                 | 270 |            |                              |     |
| 6.5.3      | 计算结果分析                 | 271 |            |                              |     |
| 6.6        | 油气储层注采过程模拟             | 275 |            |                              |     |

|                                |     |                             |     |
|--------------------------------|-----|-----------------------------|-----|
| 第 9 章 ABAQUS 二次开发基础            | 379 | 理论                          | 452 |
| 9.1 ABAQUS 二次开发概述              | 379 | 11.2.2 基于灰色关联法的岩土参数识别及灵敏度计算 | 455 |
| 9.2 ABAQUS 用户子程序接口             | 380 | 11.2.3 基于非参数统计的参数敏感性分析      | 456 |
| 9.3 ABAQUS 用户子程序               | 381 | 11.3 岩土工程常用反演模型             | 457 |
| 9.3.1 用户子程序分类                  | 381 | 11.3.1 地应力场反演模型             | 458 |
| 9.3.2 常用用户子程序简介                | 382 | 11.3.2 位移反演模型               | 461 |
| 9.4 应用举例                       | 394 | 11.3.3 渗流场反演模型              | 462 |
| 9.4.1 初始地应力场的定义                | 394 | 11.4 工程优化算法介绍               | 463 |
| 9.4.2 围岩蠕变分析                   | 400 | 11.4.1 回归分析方法               | 463 |
| 9.5 本章小结                       | 405 | 11.4.2 正交设计方法               | 466 |
| 第 10 章 ABAQUS 用户材料子程序二次开发及应用   | 406 | 11.4.3 遗传算法                 | 467 |
| 10.1 ABAQUS 材料模型库和单元库简介        | 406 | 11.5 考虑渗流—应力耦合效应的岩土参数敏感性分析  | 470 |
| 10.1.1 ABAQUS 材料库              | 406 | 11.5.1 工程概况                 | 470 |
| 10.1.2 ABAQUS 单元库              | 407 | 11.5.2 有限元模型                | 471 |
| 10.2 用户子程序 UMAT 接口原理           | 407 | 11.5.3 计算参数                 | 474 |
| 10.3 本构积分算法                    | 410 | 11.5.4 计算条件                 | 476 |
| 10.4 ABAQUS 对于材料非线性问题的处理       | 412 | 11.5.5 计算结果分析               | 477 |
| 10.5 UMAT 材料子程序实现及应用           | 414 | 11.6 基于遗传算法的岩土力学参数反演分析      | 481 |
| 10.5.1 修正 Mohr-Coulomb 模型      | 415 | 11.6.1 工程概况                 | 481 |
| 10.5.2 屈服函数和势函数的求导             | 418 | 11.6.2 反演方法的实现              | 481 |
| 10.5.3 UMAT 的 FORTRAN 程序       | 420 | 11.6.3 反演分析条件               | 483 |
| 10.6 D-P 模型与 M-C 模型参数之间的关系     | 436 | 11.6.4 反演结果分析               | 483 |
| 10.7 算例分析                      | 439 | 11.7 构造应力场反演算例验证            | 484 |
| 10.7.1 模型描述                    | 439 | 11.7.1 模型描述                 | 484 |
| 10.7.2 常规三轴压缩试验                | 443 | 11.7.2 反演条件                 | 487 |
| 10.7.3 拉伸试验                    | 445 | 11.7.3 反演结果分析               | 488 |
| 10.8 本章小结                      | 446 | 11.8 本章小结                   | 489 |
| 第 11 章 岩土工程反演理论及其在 ABAQUS 中的实现 | 447 | 附录 A 地下工程常用指令小结             | 490 |
| 11.1 岩土工程反分析方法简介               | 447 | 附录 B ABAQUS 的相关约定           | 503 |
| 11.1.1 反分析的概念与原理               | 447 | 附录 C ABAQUS 中对应力应变的部分理解     | 512 |
| 11.1.2 反分析的发展现状                | 449 | 参考文献                        | 514 |
| 11.2 岩土介质参数敏感性分析方法             | 451 |                             |     |
| 11.2.1 岩土力学参数反演中的灵敏度           |     |                             |     |



# 第 1 章 隧道工程与 ABAQUS 分析

知识要点:

- 隧道的基本概念和工程概述
- 隧道的种类及其作用
- 隧道及地下工程的有限元分析
- ABAQUS 基础知识简介

本章导读:

本章首先介绍隧道及地下工程的相关基本概念和隧道的种类及其作用, 接下来介绍隧道及地下工程的有限元分析特点, 并进一步介绍 ABAQUS 有限元分析方法在隧道及地下工程中的应用及注意事项。最后重点阐述 ABAQUS 的相关基础知识及 ABAQUS 的导入导出功能。

## 1.1 隧道的基本概念及工程概述

**地下工程:** 在山体内或地面下修建的建筑物。下面简要介绍隧道中常用的术语:

**隧道:** 以保持地下空间作为运输孔道的地下工程。

**导坑:** 在地下开挖出一个洞穴并延伸成为一个长形的孔道。

**衬砌:** 在坑道的周围修建的用于支撑洞室稳定的支护结构。

衬砌的内轮廓应能满足使用上的要求, 同时也无需无谓的放大。

衬砌的形状和尺寸, 应能使结构受力状态最为合理, 既不浪费又能稳固。通常以圆形、椭圆形、马蹄形和卵形为多。

衬砌的用料应适合施工和养护的要求。通常用坚固、耐久、少腐蚀、能防水、防火、价廉、便于就地取材的材料。

**洞门:** 在隧道端部外露面修建的为保护洞口和排放流水的挡土墙式结构。

**明洞:** 在洞门与洞身间用明挖法修筑的隧道。

洞身衬砌、洞门和明洞就组成了隧道的主体支护结构, 作用是保持岩体的稳定和行车安全, 见图 1-1。

为了保证隧道的正常使用, 还需设置一些附属建筑物。

隧道的附属建筑物是为了运营管理、维修保养、给水排水、供蓄发电、通风、照明、通信、安全等而修建的建筑物, 包括: 为工作人员在隧道进行维修或检查时, 能及时避让驶来的列车而在隧道两侧开辟的大小避车洞; 为了保证隧道洞口的稳定与安全而修建的边仰坡; 为了引导洞口边仰坡地表水流而修建的排水天沟; 为了排除隧道内渗入的地下水, 保证列车正常运行而设置的防水设备及排水设备; 为了净化隧道内机车所排出的烟尘和有害气体而设置的通风系统; 电力及通信设施; 消防设施等。

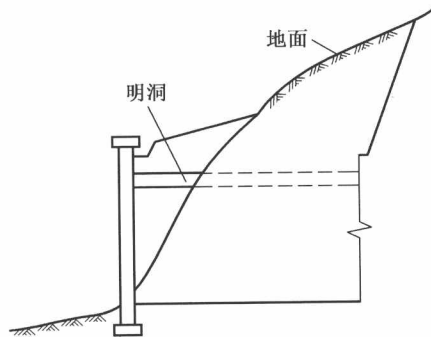


图 1-1 明洞示意图

隧道的主体支护结构和隧道的附属建筑物组成了隧道建筑物。

隧道工程的修建，首先是把施工地区的地质和水文的情况勘察清楚。将勘察到的资料结合工程使用的要求，进行结构设计和施工方法的抉择。通过施工组织设计的指导，有步骤地进行施工，并在施工的过程中，随时进行各种量测，不断有针对性地修正支护结构设计和施工方案，使之更趋于合理。

在隧道建成交付使用以后，还要定期检查，并按检查出的问题或病害，作出养护计划，分轻重缓急予以维修或大修，务使工程建筑物时刻处于良好状态，正常发挥它的工作效能。

## 1.2 隧道的种类及其作用

- 从隧道所处的地质条件来分，可以分为土质隧道和石质隧道。
- 根据隧道的长度可以分为短隧道（铁路隧道规定： $L \leq 500\text{m}$ ；公路隧道规定： $L \leq 500\text{m}$ ）、中长隧道（铁路隧道规定： $500 < L \leq 3000\text{m}$ ；公路隧道规定： $500 < L < 1000\text{m}$ ）、长隧道（铁路隧道规定： $3000 < L \leq 10000\text{m}$ ；公路隧道规定： $1000 \leq L \leq 3000\text{m}$ ）和特长隧道（铁路隧道规定： $L > 10000\text{m}$ ；公路隧道规定： $L > 3000\text{m}$ ）。
- 按国际隧道协会（ITA）定义的隧道的横断面积的大小划分标准，可以分为极小断面隧道（ $2 \sim 3\text{m}^2$ ）、小断面隧道（ $3 \sim 10\text{m}^2$ ）、中等断面隧道（ $10 \sim 50\text{m}^2$ ）、大断面隧道（ $50 \sim 100\text{m}^2$ ）和特大断面隧道（大于  $100\text{m}^2$ ）。
- 从隧道所在的位置来分，可以分为山岭隧道、水底隧道和城市隧道。
- 从埋深的深度来分，可以分为浅埋隧道和深埋隧道。
- 按照它的用途来分，可以分为交通隧道、水工隧道、市政隧道和矿山隧道。

### 1.2.1 交通隧道

作用是提供交通运输和人行的通道，以满足交通线路畅通的要求，一般包括以下几种：

#### 1. 铁路隧道

开挖隧道直接穿山而过，既可使线路顺直，避免许多无谓的展线，使线路缩短；又可以减小坡度，使运营条件得以改善，从而提高牵引定数，多拉快跑。

#### 2. 公路隧道

高速公路对道路的修建技术提出了较高的标准，要求线路顺直、坡度平缓、路面宽敞等。

隧道的修建在改善公路技术状态, 缩短运行距离, 提高运输能力, 以及减少事故等方面起到了重要的作用。

### 3. 水底隧道

当交通线路需要跨越江、河、湖、海、洋时, 一般可以选择的方案有架桥、轮渡和隧道。河道通航需要较高的净空, 而桥梁受两端引线高程的限制, 一时无法抬起必要的高度时, 采用水底隧道。

水底隧道方案的优点是不受气候影响, 不影响通航, 引道占地少, 战时不暴露交通设施目标等, 越来越受到人们的青睐。

### 4. 地下铁道

地下铁道是解决大城市中交通拥挤、车辆堵塞问题, 而能大量快速运送乘客的一种城市交通设施。

地下铁道可以使很大一部分地面客流转入地下而不占用地面面积。它没有平面交叉, 而各走上下行线, 因而可以高速行驶, 且可缩短车次间隔时间, 节省了乘车时间, 便利了乘客的活动。在战时, 还可以起到人防的功能。

### 5. 航运隧道

当运河需要越过分水岭时, 克服高程障碍成为十分困难的问题。如果修建航运隧道, 把分水岭两边的河道沟通起来, 既可以缩短船只航程, 又可以省掉船闸的费用, 迅速而顺直地驶过, 航运条件就大为改善了。

### 6. 人行地道

为了提高交通运送能力及减少交通事故, 除架设街心高跨桥以外, 也可以修建人行地道来穿越街道或跨越铁路、高速公路等。这样可以缓解地面交通互相交叉的混乱景象, 少占用地面空间, 同时也大大减少了交通事故。

## 1.2.2 水工隧道

水工隧道是水利工程和水力发电枢纽的一个重要组成部分。水工隧道包括以下几种:

- 引水隧道: 进行水资源的调动或把水引入水电站的发电机组, 产生动力资源。引水隧道有的内部充水, 因而内壁承压, 有的只是部分过水, 因而内部只受大气压力而无水压。分别称之为有压隧道和无压隧道。
- 排水隧道: 把发电机组排出的废水送出去的隧道。
- 导流隧道或泄洪隧道: 水利工程中的一个重要组成部分。由它疏导水流并补充溢洪道流量超限后的泄洪作用。
- 排沙隧道: 用来冲刷水库中淤积的泥沙, 把泥沙裹带运出水库。有时也用来放空水库里的水, 以便进行库身检查或修理建筑物。

## 1.2.3 市政隧道

市政隧道是城市中安置市政设施的地下孔道。

- 给水隧道。
- 污水隧道: 本身导流排送或由管道排污。一般排污隧道的进口处, 多设有拦渣隔栅, 把漂浮的杂物拦在隧道之外, 不致涌入造成堵塞。

- 管路隧道：供给煤气、暖气、热水等。
- 线路隧道：输送电力的电缆以及通信的电缆，都安置在地下孔道中。

在现代化的城市中，将以上四种具有共性的市政隧道，按城市的布局和规划，合建一个大隧道，称之为“共同管沟”。共同管沟是现代城市基础设施科学管理和规划的标志，也是合理利用城市地下空间的科学手段，是城市市政隧道规划与修建发展的方向。

- 人防隧道：为战时的防空目的而修建的防空避难隧道。人防隧道内除应设有排水、通风、照明和通信设备以外，还应考虑储备饮水、粮食和必要的救护设备，此外在洞口处还需设置各种防爆装置，以阻止冲击波的侵入。同时，要做到多口联通、互相贯穿，在紧急时刻，可以随时找到出口。

#### 1.2.4 矿山隧道

在矿山开采中，常设一些采矿服务的隧道，从山体以外通向矿床，并将开采到的矿石运输出来。

- 运输巷道：主巷道指向山体开凿通到矿床的隧道，是主要出入口和主要的运输干道。由主巷道通往各个开采面的巷道，分布如树枝状，分向各个采掘面。此种巷道多用临时支撑，仅供作业人员进行开采工作的需要。
- 给水隧道：送入清洁水为采掘机械使用，并将废水及积水，通过泵抽排出洞外。
- 通风隧道：净化巷道中的空气，创造良好的工作环境，用通风机及时把有害气体和污浊空气排除出去，并把新鲜空气补充进来。

### 1.3 隧道及地下工程的有限元分析

隧道施工的复杂性以及围岩条件的离散性等特有的性质使数学解析方法遭遇到无法克服的困难，这一客观现实促进了在隧道施工问题的数值模拟研究。由于电子计算机的更新和岩土本构关系的进展，计算方法进入到以有限元为代表的数值分析方法时代。近年来数值分析方法有了新的进展，有限差分法（FDM）、无网格法（Element-Freemethod）、边界单元（BEM）、离散单元（DEM）、半解析法、块体理论（BlockTheory）、反演分析（BackAnalysis）、流行元（MEM）等也在隧道的力学分析中得到广泛应用。国内外流行的大型计算机软件有：ANSYS、ABAQUS、MARC、NASTRAN、ANDIA、FLAC、UDEC、3DEC、2D- $\sigma$ 、3D- $\sigma$ 等，国内许多学者也开发了许多程序：刘怀恒的 NCAP，殷有泉的 NOLM，周维垣、杨若琼开发的 TFINE，李术才、陈卫忠、张强勇等学者开发的三维弹塑性损伤断裂有限元分析程序（3DEPDF）等。

总之，随着计算机的发展，以固体力学理论为基础，以数值方法为手段的有限单元法，由于其能方便地处理各种非线性问题，能灵活地模拟岩土工程中复杂的施工过程，因而成为岩石力学领域中应用最广泛的数值分析方法，在工程实践中至今应用得最为普遍、发展得最成熟。该方法以弹塑性力学作为理论基础，通过求解弹塑性力学方程（物理方程、几何力方程、平衡方程），计算岩土体在一定环境条件（自重、载荷等）下的应力场和变形场，然后根据岩土体的破坏准则，判断岩体在各个相应部位应力的作用下所处的状态，并据此对整个结构的稳定性做出定量的评价。在早期的数值模拟研究中，大量的研究成果均采用有限元方法。Annamaria

Cividini (1991)、E.c.kalkani (1991)、S.K.choi (1991) 等人的研究, 标志着 20 世纪 90 年代国际上在这方面的研究水平。随后国内也涌现了大量的研究者, 其中较为突出的有周维垣 (1989)、黄润秋 (1991)、黄运飞 (1994) 等。

有限元法可用于处理很多复杂的岩土工程问题, 如岩土材料的非线性问题、岩体中的节理、裂隙等不连续面对分析计算的影响、分步开挖施工对围岩稳定性的影响等。李术才、陈卫忠、张强勇等研究了断续节理岩体及加锚的本构关系及其损伤演化方程。自 20 世纪 70 年代以来, 有限单元法成为岩土力学分析的主要手段之一, 结合岩土力学新的研究成果, 使得有限单元法更趋完善, 内涵更加丰富。

应用有限单元法 (FEM) 解决岩土工程中的实际问题, 应注意和处理好以下几个方面的问题:

### 1. 正确划分计算范围与边界条件

大多数的岩土工程问题都涉及无限域或半无限域, 有限单元法 (FEM) 是在有限的区域进行离散化, 为使这种离散化不会产生较大的误差, 必须取足够大的计算范围, 但计算范围太大, 单元就不能划分得过小, 否则会付出很大的计算工作量, 经济上的负担太大; 计算范围太小, 边界条件又会影响到计算精度, 所以必须划定合适的计算范围。一般来说, 计算范围应不小于岩体工程轮廓尺寸的 3~4 倍。有两类边界条件: 位移边界与应力边界, 应根据工程所处的具体条件确定边界类型及范围。

### 2. 正确输入岩体参数及初始应力场

岩体各单元的物理力学参数直接涉及计算的正确性。由于尺度效应及岩体自然状态的离散性, 一般室内试验所取得的试验值不能直接用来输入计算, 一般是试验参数值与经验值相配合而选定参数, 必要时还要参考围岩分类及同类工程的比拟, 如有可能, 还可以参考反分析的结果。初始地应力的输入也是直接影响到计算精度的, 所以, 正确确定岩体的初始应力状态是有限单元分析法 (FEM) 中的一个重要问题, 但至今也未找到妥善解决的办法。一般地, 在没有现场测试资料的情况下, 按自重应力或静水压力输入。

### 3. 采用特殊单元来考虑岩体的非连续性和边界效应

岩体中如有明确的大结构面 (断层、大节理), 为了考虑岩体的非连续性, 可以采用特殊的“节理单元”来模拟平面问题的无厚度节理单元是由 R.E.Goodman (1976) 最先提出的。可以较好地解决节理单元两旁的非连续性和切向变形问题, 但节理单元的缺点是无厚度, 计算中可能会产生节理上下面相互“嵌入”的现象, 必须对这种嵌入面做人为的限制, 以免导致较大的误差。另一个特殊单元是无界元, 它最早是由 R.L.Ungless (1973) 提出, 后又由 Zienkiewicz, Bettles 等人发展, 其主要特点是单元的几何尺寸在某一方向上趋于无穷远, 满足无限域的边界条件。

## 1.4 ABAQUS 基础知识简介

数值模拟方法一般分为有限单元、有限差分和离散元等。在实际工程中应用最为广泛的为有限单元法, 随着 CAD 和 CAE 技术的发展, 有限元软件在各行各业的工程分析中获得了广泛应用。有限元软件商业化更促进了其在实际工程中的应用。

ABAQUS 是国际上最先进的大型通用有限元计算分析软件之一。美国 ABAQUS 公司于

1978年推出的 ABAQUS 有限元分析软件，在全球工业界中，已被公认是一套解题能力最强、分析结果最可靠的软件。ABAQUS 拥有丰富的可模拟任意形状的单元库和与之对应的各种类型的材料模型库，可以模拟大多数典型工程材料的性能，其中包括金属、橡胶、高分子材料、复合材料、钢筋混凝土、可压缩高弹性的泡沫材料以及类似于土和岩石等地质材料。作为通用的模拟计算工具，ABAQUS 除了能解决结构（应力/位移）的许多问题之外，还可以模拟其他各种领域的问题，例如热传导、质量扩散、电子部分的热控制（热电耦合分析）、声学分析、岩土力学分析（流体渗透/应力耦合分析）及压电介质分析。

和其他通用程序相比，ABAQUS 软件在岩土工程数值计算中有不可比拟的优势。它有丰富的适用于岩土材料的本构模型，如扩展的 Druker-Prager 模型（线性、非线性以及可以考虑和徐变相结合）Capped Drucker-Prager、Cam-Clay 模型、Mohr-Coulomb 模型、混凝土材料模型、渗透性材料模型（提供了依赖于孔隙比率、饱和度和流速的各向同性和各向异性材料的渗透性模型）、节理模型；除了常规的各种单元类型外，还有模拟无限边界的无限元，针对钢筋混凝土结构的加强筋单元、针对地下埋管的土壤/管柱连接单元；可进行开挖填筑分析，可自动生成自重应力场，可进行渗流/应力耦合分析，可进行饱和非饱和渗流分析。

#### 1.4.1 ABAQUS 各模块简介

ABAQUS 有两个主要的分析模块：ABAQUS/Standard 和 ABAQUS/Explicit。ABAQUS/Standard 还有两个特殊用途的附加分析模块：ABAQUS/Aqua 和 ABAQUS/Design。另外，还有 ABAQUS 分别与 ADAMS/Flex、C-MOLD 和 Mold flow 的接口模块：ABAQUS/ADAMS、ABAQUS/C-MOLD 和 ABAQUS/MOLDFLOW。ABAQUS/CAE 是完全的 ABAQUS 工作环境模块，它包括 ABAQUS 模型的构造，交互式提交作业、监控作业过程以及评价结果的能力。ABAQUS/Viewer 是 ABAQUS/CAE 的子集，它具有后处理功能，这些模块之间的关系如图 1-2 所示。

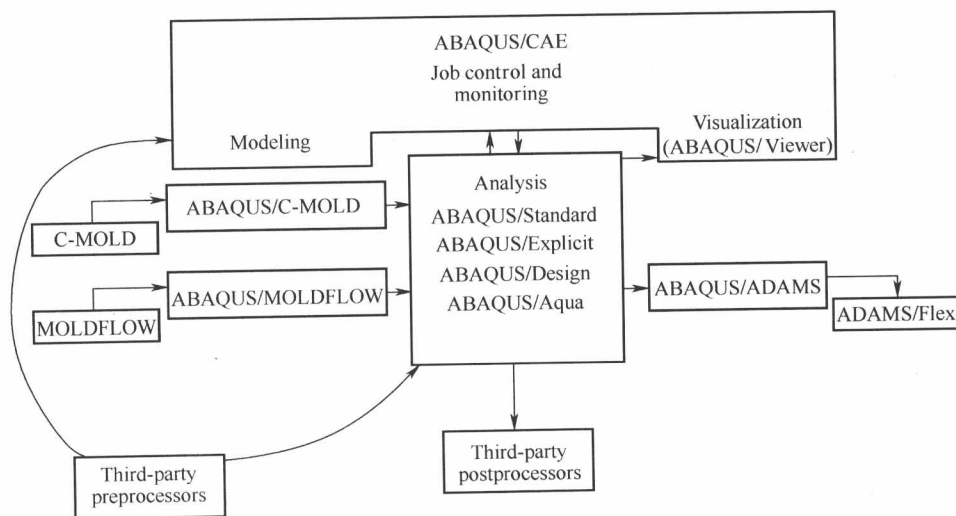


图 1-2 ABAQUS 产品

- ABAQUS/Standard: 是一个通用分析模块,它能够求解领域广泛的线性和非线性问题,

包括静力、动力、热和电问题的响应等，这个模块是本指南的主题。

- **ABAQUS/Explicit:** 是用于特殊目的分析模块，它采用显式动力有限元列式，适用于像冲击和爆炸这类短暂、瞬时的动态事件，对加工成形过程中改变接触条件的这类高度非线性问题也非常有效。在本指南中没有对它特别介绍，而在本指南的姐妹篇——Getting Started with ABAQUS/Explicit: Interactive Version 里进行介绍。两个分析模块的 ABAQUS/CAE 界面是一样的，两个模块的输出也是类似的，不论哪个模块都可以采用可视化图形进行后处理。
- **ABAQUS/CAE:** ABAQUS/CAE (Complete ABAQUS Environment) 是 ABAQUS 的交互式图形环境，用它可方便而快捷地构造模型，只需生成或输入要分析结构的几何形状，并把它分解为便于网格化的若干区域，并对几何体赋予物理和材料特性、载荷以及边界条件。ABAQUS/CAE 具有对几何体剖分网格的强大功能，并可检验所形成的分析模型。一旦模型生成，ABAQUS/CAE 可提交并监控要分析的作业，可视化模块就可用来显示结果。本指南中将对 ABAQUS/CAE 进行讨论。
- **ABAQUS/Viewer:** 是 ABAQUS/CAE 的子集，它只包含可视化的后处理功能。在本指南中对可视化模块的讨论都适用于 ABAQUS/Viewer。
- **ABAQUS/Aqua:** 一系列功能可以附加在 ABAQUS/Standard 中应用。它偏向于模拟海上结构，如海洋石油平台。它的功能包括模拟波浪、风载荷及浮力的影响。在本指南中不讨论 ABAQUS/Aqua。
- **ABAQUS/ADAMS:** 允许 ABAQUS 有限元模型作为柔性部件进入到 MDI ADAMS 产品族中进行分析。这个界面是基于 ADAMS/Flex 的部件模态综合公式的，本指南中不讨论 ABAQUS/ADAMS。
- **ABAQUS/C-MOLD:** 把注模分析软件 C-MOLD 中有限元网格、材料性质和初始应力数据转换成 ABAQUS 输入文件。本指南中不讨论 ABAQUS/C-MOLD。
- **ABAQUS/Design:** 一系列功能可附加在 ABAQUS/Standard 中进行设计敏感度计算。
- **ABAQUS/MOLDFLOW:** 把 MOLDFLOW 分析软件中的有限元模型信息转换成 ABAQUS 输入文件的一部分。

#### 1.4.2 ABAQUS 分析过程

一个完整的 ABAQUS 分析过程，通常由三个明确的步骤组成：前处理、模拟计算和后处理。这三个步骤的联系及生成的相关文件如图 1-3 所示。

##### 1. 前处理 (ABAQUS/CAE)

在前处理阶段需定义物理问题的模型生成一个 ABAQUS 输入文件。通常的做法是使用 ABAQUS/CAE 或其他前处理模块，在图形环境下生成模型。而一个简单问题也可直接用文件编辑器来生成 ABAQUS 输入文件。

##### 2. 模拟计算 (ABAQUS/Standard)

模拟计算阶段用 ABAQUS/Standard 求解模型所定义的数值问题，它在正常情况下是作为后台进程处理的。一个应力分析算例的输出包括位移和应力，它们存储在二进制文件中以便进行后处理。完成一个求解过程所需的时间可以从几秒钟到几天不等，这取决于所分析问题的复杂程度和计算机的运算能力。

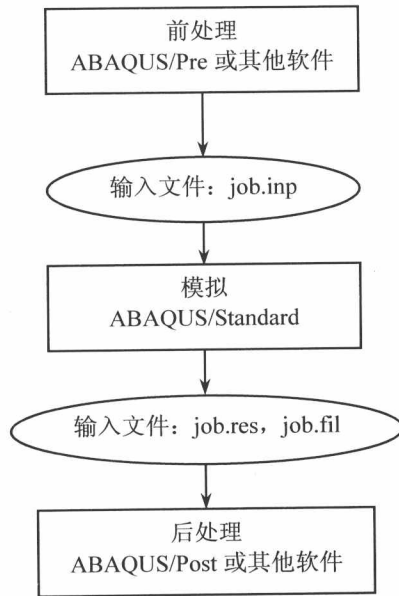


图 1-3 ABAQUS 分析过程

### 3. 后处理 (ABAQUS/CAE)

一旦完成了模拟计算得到位移、应力或其他基本变量，就可以对计算结果进行分析评估，即后处理。通常，后处理是使用 ABAQUS/CAE 或其他后处理软件中的可视化模块在图形环境下交互式进行，读入核心二进制输出数据库文件后，可视化模块有多种方法显示结果，包括彩色等值线图、变形形状图和 x-y 平面曲线图等。

#### 1.4.3 ABAQUS/CAE 简介

ABAQUS/CAE 是 ABAQUS 进行操作的完整环境，在这个环境中，可提供简明、一致的界面来生成计算模型，可交互式地提交和监控 ABAQUS 作业，并可评估计算结果。ABAQUS/CAE 分为若干个功能模块，每一个功能模块定义了建模过程中的一个逻辑方面，例如，定义几何形状、定义材料性质、生成网格等。通过功能模块到功能模块之间的切换，同时也就完成了建模。一旦建模完成，ABAQUS/CAE 会生成一个输入文件，用户可把它提交给 ABAQUS/Standard 或 ABAQUS/Explicit 求解器。求解器读入输入文件进行分析计算，同时发送信息给 ABAQUS/CAE 以便对作业的进程进行监控，并产生输出数据。最后，用户可使用可视化模块阅读输出数据，观察分析结果。用户与 ABAQUS/CAE 交互时，会产生一个命令执行文件，它用命令方式记录了操作的全过程。

##### 1. ABAQUS/CAE 的启动

欲启动 ABAQUS/CAE，只需在操作系统的命令提示符下给出命令：

```
ABAQUS cae
```

一旦启动，立即出现 Start Session 对话框，如图 1-4 所示。



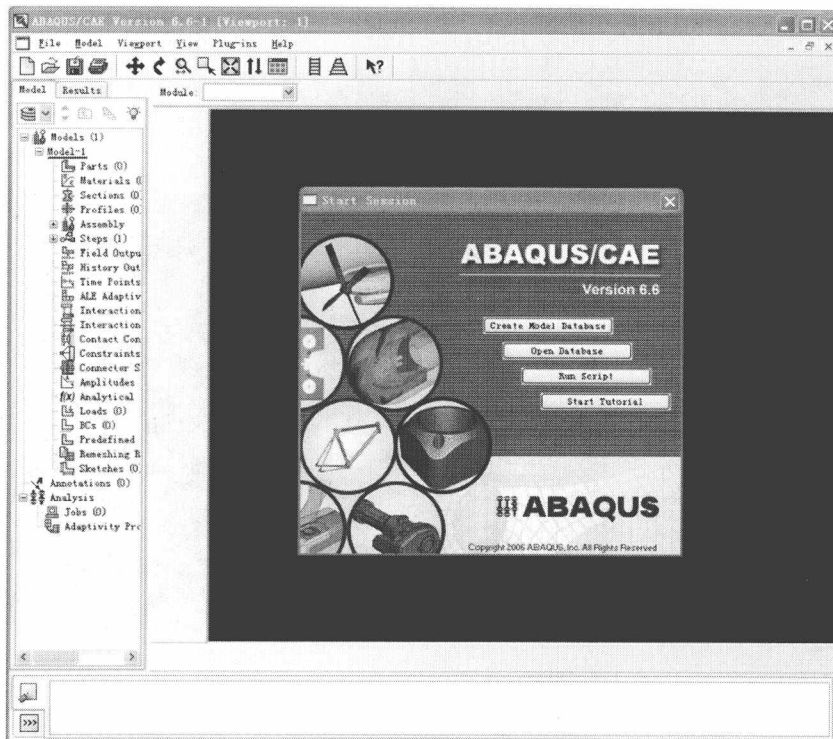


图 1-4 Start Session 对话框

在这个对话框中有四个选项：

- **Create Model Database:** 开始一个新的分析。
- **Open Database:** 打开一个以前存储过的模型或者输出数据库文件。
- **Run Script:** 运行一个 ABAQUS/CAE 命令文件。
- **Start Tutorial:** 从在线文件启动辅导教程。

## 2. 主窗口的组成部分

用户是通过主窗口与 ABAQUS/CAE 进行交互的。图 1-5 是刚打开 ABAQUS/CAE 时的主窗口状态。

主窗口由以下各个部分组成：

(1) **Title bar (标题条)。**Title bar 给出了正在运行的 ABAQUS/CAE 版本和当前的模型数据库的名字。

(2) **Menu bar (菜单条)。**Menu bar 中包含所有的菜单，通过对菜单的操作可调用 ABAQUS/CAE 的全部功能。当用户在 Context bar 中选择不同的模块时，就会在 Menu bar 得到不同的菜单系统。详情可见 ABAQUS/CAE 用户手册。

(3) **Toolbar (工具条)。**Toolbar 提供了一种快速操作途径来调用菜单中的常用命令。

(4) **Context bar (过渡条)。**ABAQUS/CAE 分为一系列功能模块，其中每一个模块只针对模型的某一方面。用户可以在 Context bar 的 Module 表中进行各模块之间的切换。Context bar 里的其他项则是当前模块的功能；例如，Context bar 允许用户在构造模型的几何形状时退出已存在的部件。