

土木工程软件应用系列

# MIDAS/GTS

## 岩土工程数值分析与设计

### ——快速入门与使用技巧

主 编 王海涛  
副 主 编 涂兵雄 纪文武 张会远  
丛书主编 易富民

- ◆ 基础理论透视
- ◆ 典型实例讲解
- ◆ 工程实战演练
- ◆ 视频导学同步

大连理工大学出版社



赠送超值光盘，内含  
实例模型+视频演示

TU4/130D

2013

土木工程软件应用系列

# MIDAS/GTS 岩土工程数值分析与设计

## ——快速入门与使用技巧

主 编 王海涛  
副 主 编 涂兵雄 纪文武 张会远  
丛书主编 易富民

北方工业大学图书馆



C00347983



大连理工大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

MIDAS/GTS 岩土工程数值分析与设计:快速入门与使用技巧 / 王海涛主编. —大连:大连理工大学出版社, 2013.9

(土木工程软件应用系列)

ISBN 978-7-5611-8142-3

I. ①M… II. ①王… III. ①岩土工程—数值分析—计算机辅助分析—应用软件②岩土工程—数值计算—计算机辅助设计—应用软件 IV. ①TU4-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 192481 号

大连理工大学出版社出版

地址:大连市软件园路 80 号 邮政编码:116023

发行:0411-84708842 邮购:0411-84703636 传真:0411-84701466

E-mail:dutp@dutp.cn URL:http://www.dutp.cn

大连美跃彩色印刷有限公司印刷 大连理工大学出版社发行

幅面尺寸:185mm×260mm 印张:20.5 字数:474 千字

附件:光盘一张

2013 年 9 月第 1 版

2013 年 9 月第 1 次印刷

责任编辑:裘美倩

责任校对:闫旭东

封面设计:温广强

ISBN 978-7-5611-8142-3

定 价:46.00 元

# 土木工程软件应用系列 丛书编委会

丛书主编/主任:易富民

副主任:沈 伟 韦 虹 赵 捷 刘 蓉 赵艳华 王海涛  
国 巍 范兴朗 钟宏林 卢鹏程 吴 熙 董 伟  
杨树桐 王建超

委 员:黄 涌 宋丽佳 董建熙 石 柱 田建平 徐庆钟  
赵宏明 徐 锋 张云国 张 宁 王显利 卜 丹  
国 振 涂兵雄 纪文武 荣 华 潘剑云 侯东序  
黄帮秀 王荣波 陈春雷 冯 华 董玲珑 李传林  
何 君 李 标 宋方闹 祁 伟 向华伟 鲁 昭  
杨 微 刘名君 刘忠平 王典斌 邱朝阳 李旭鹏  
尤志国 马永贺 宋志强 李庆华 钟亚伟 董晓刚  
蔡向荣 徐 磊 李学进 梁 猛 胡程鹤 李 珊  
沈 霞

# 前 言

MIDAS/GTS (Geotechnical and Tunnel Analysis System)是由 MIDAS IT 结构软件公司开发的岩土与隧道结构有限元分析软件。该软件将通用的有限元分析内核与岩土隧道结构的专业性要求有机地结合,集合了目前岩土隧道分析软件的优点。该软件包括非线性弹塑性分析、非稳定渗流分析、施工阶段分析、渗流—应力耦合分析、固结分析、地震、动力分析等。MIDAS/GTS 不仅具有岩土分析所需的基本分析功能,并为用户提供了包含最新分析理论的强大的分析功能,是岩土和隧道分析与设计的最佳解决方案之一。

MIDAS/GTS 软件以其全中文化的操作界面、直观亲和的前处理、多样的分析功能、丰富的材料本构模型、简洁全面的后处理,已在世界众多大型岩土和隧道工程上得到应用。2002 年 MIDAS IT 在中国成立北京迈达斯技术有限公司,目前 MIDAS/GTS 的用户已经遍及全国各大设计院、高校及科研院所,并在数百项工程中得到应用,相信在不久的将来 MIDAS/GTS 必将成为中国岩土工程师手中的分析利器。然而,目前国内还没有关于 MIDAS/GTS 的书籍出版,因此非常有必要出一本详细讲解 MIDAS/GTS 的操作及其工程应用的书籍。本书的撰写恰是弥补了这一空白,且书后附有 MIDAS/GTS 实例操作光盘,方便读者学习。

本书以 MIDAS/GTS 4.0 为平台,共分九章。具体内容安排如下:

**第 1 章 概述。**主要介绍了岩土工程问题的基本特点、有限元及其在岩土工程中的应用、MIDAS/GTS 的特点及工程应用、MIDAS/GTS 的硬件要求与安装启动、MIDAS/GTS 的用户操作界面。

**第 2 章 MIDAS/GTS 基础知识。**主要介绍了 MIDAS/GTS 的常用术语、几何体、单元、网格、本构模型、数据输入、符号约定、单位系统等。

**第 3 章 完成一个简单分析计算样例。**通过对一个沟渠的开挖支护模拟分析,介绍了使用 MIDAS/GTS 进行一般的数值模拟操作的过程,主要概括为设置材料属性、建立几何模型、划分网格、设置边界、定义施工阶段、求解分析、查看结果。

**第 4 章 MIDAS/GTS 模型建立。**详细介绍了 MIDAS/GTS 建立模型的操作环境及操作过程,重点介绍了模型建立过程中的常用操作工具的使用方法及注意事项。

**第 5 章 MIDAS/GTS 网格划分。**详细介绍了 MIDAS/GTS 定义材料属性及网格划分的全部流程、操作方法以及操作工具的具体功能。

**第 6 章 MIDAS/GTS 分析求解。**主要对 MIDAS/GTS 的分析求解方法及后处理进行了简要的介绍。包括所要解决问题的定义,以及计算完毕后,计算结果的提取。

**第 7 章 施工阶段分析样例。**主要通过两个隧道施工阶段分析样例,简单地介绍了使用 MIDAS/GTS 进行复杂隧道施工阶段分析的操作流程以及如何利用隧道建模助手进行

快捷建模的方法。

**第8章 渗流及渗流—应力耦合分析样例。**本章主要通过两个分析样例,简单地介绍了使用 MIDAS/GTS 进行渗流及渗流—应力耦合数值分析的操作流程。

**第9章 爆破振动分析样例。**主要通过一个爆破振动分析样例,简单地介绍了使用 MIDAS/GTS 模拟隧道施工爆破对既有建筑影响的数值分析,主要定义了不同的分析工况对模型进行特征值分析和时程分析。

本书中的所有样例模型均包含在书后所附赠的光盘中,书中所附的光盘中还包含各章学习样例的学习录像,使读者可以在熟悉基本理论的基础上参照视频教学同步演练,从而能够较快地掌握 MIDAS/GTS 岩土数值分析的基本思路及操作过程,并掌握相关使用技巧。

本书可作为工科院校土木、力学等专业高年级本科生、研究生学习 MIDAS/GTS 应用软件的学习教材,也可以作为岩土工程、隧道与地下工程技术人员学习 MIDAS/GTS 软件的参考用书。

本书由王海涛主编,涂兵雄、纪文武、张会远为副主编。同时参加本书编写的工作人员还有凌玲、黄江艳、彭丹、吴仁义、李娜、高洁、尤志国、吴会军、张云国、李培勇、余芳、孟刚、张丽华、姚大立、朱伟庆。

感谢北京迈达斯技术有限公司刘井学经理对本书的编写进行的指导,并提供了宝贵的资料。感谢大连交通大学土木与安全工程学院的领导及同事对本书的写作提供的帮助。感谢北京迈达斯技术有限公司对本书的写作提供的技术上的支持。本书在写作的过程中还参考了岩土在线(<http://www.yantubbs.com/>)及北京迈达斯技术有限公司官网(<http://cn.midasit.com/midasit/>)上的部分资料,在此,也一并表示感谢。感谢大连理工大学出版社刘蓉编辑,在本书的写作过程中,她的耐心和细心使本书的内容和格式更为完善。

由于编写时间较为仓促,书中疏漏在所难免,欢迎广大读者批评指正。

编者

2013年9月

# 目 录

第 1 章 概述 .....	1
1.1 岩土工程问题的基本特点 .....	1
1.2 有限元及其在岩土工程中的应用简介 .....	2
1.2.1 概述 .....	2
1.2.2 有限元法的实现过程 .....	3
1.3 MIDAS/GTS 的特点及工程应用 .....	5
1.3.1 MIDAS/GTS 的主要功能特点 .....	5
1.3.2 MIDAS/GTS 适用领域及工程应用 .....	9
1.4 MIDAS/GTS 的安装 .....	12
1.4.1 MIDAS/GTS 的硬件环境 .....	12
1.4.2 MIDAS/GTS 的安装 .....	13
1.4.3 MIDAS/GTS 的启动 .....	17
1.5 MIDAS/GTS 的用户操作界面 .....	17
第 2 章 MIDAS/GTS 基础知识 .....	21
2.1 初识 MIDAS/GTS .....	21
2.1.1 图形界面 .....	21
2.1.2 分析求解的基本组成部分 .....	22
2.2 MIDAS/GTS 基本术语 .....	23
2.3 几何体 .....	25
2.4 单元 .....	26
2.4.1 按维数划分 .....	26
2.4.2 按类型划分 .....	27
2.5 网格 .....	29
2.6 本构模型 .....	29
2.7 数据输入方式 .....	34
2.8 单位系统 .....	35
2.9 坐标系 .....	36
2.9.1 整体坐标系 .....	36
2.9.2 单元坐标系 .....	36
2.9.3 节点坐标系 .....	38
2.10 本章小结 .....	38

<b>第 3 章 完成一个简单分析计算样例</b> .....	39
3.1 样例概要 .....	39
3.2 定义材料特性 .....	40
3.2.1 材料构成及特性 .....	40
3.2.2 定义特性 .....	41
3.3 二维几何建模 .....	47
3.3.1 建立几何形状 .....	47
3.3.2 建立几何组 .....	48
3.4 生成二维网格 .....	49
3.4.1 映射网络 $k$ -线面 .....	49
3.4.2 生成支护网格 .....	50
3.5 生成三维网格 .....	51
3.6 设置边界条件 .....	52
3.6.1 模型边界 .....	52
3.6.2 支承边界 .....	53
3.7 定义荷载 .....	53
3.7.1 自重 .....	53
3.7.2 地面超载 .....	54
3.8 定义施工阶段 .....	54
3.8.1 初始阶段 .....	54
3.8.2 开挖阶段 .....	55
3.9 分析工况 .....	56
3.10 分析 .....	56
3.11 查看分析结果 .....	56
3.11.1 位移 .....	56
3.11.2 H-桩内力 .....	57
3.11.3 应力 .....	57
3.11.4 等值面 .....	58
3.11.5 剖断面 .....	58
3.11.6 剖分面 .....	59
3.11.7 图表结果 .....	59
3.12 本章小结 .....	61
<b>第 4 章 MIDAS/GTS 模型建立</b> .....	62
4.1 设定操作环境 .....	63
4.1.1 新建项目 .....	63
4.1.2 定制工具条 .....	64



4.2	建模基本注意事项	65
4.3	工作平面	66
4.4	基准	69
4.5	顶点	73
4.6	曲线	76
4.7	曲面	104
4.8	实体	112
4.9	标准几何体	114
4.10	生成几何体	119
4.11	编辑几何体	122
4.12	布尔运算	125
4.13	转换	127
4.14	检查	133
4.15	修补	135
4.16	删除	140
4.17	析取	143
4.18	分解	143
4.19	群	144
4.20	形状颜色	144
4.21	测量	145
4.22	本章小结	147
<b>第5章 MIDAS/GTS 网格划分</b> 148		
5.1	定义材料属性	148
5.1.1	直线单元	149
5.1.2	平面单元	154
5.1.3	实体单元	156
5.1.4	弹簧/连接单元	159
5.1.5	连接单元	164
5.2	网格划分	164
5.2.1	网格参数	164
5.2.2	网格尺寸控制	166
5.2.3	网格属性控制	172
5.2.4	删除网格控制数据	174
5.2.5	自动网格划分	174
5.2.6	映射网格	180
5.2.7	建立网格	184

5.2.8	重新划分网格	190
5.2.9	检查网格	193
5.2.10	检查网格质量	194
5.2.11	网格组	195
5.3	本章小结	198
<b>第 6 章 MIDAS/GTS 分析求解</b>		199
6.1	定义边界	199
6.1.1	支承边界	199
6.1.2	位移边界	201
6.1.3	应力边界	201
6.1.4	自重	203
6.2	运行分析	203
6.2.1	分析工况	203
6.2.2	一般分析控制	205
6.2.3	分析选项	206
6.2.4	分析	207
6.2.5	批量分析	207
6.2.6	参数优化	207
6.3	分析结果	207
6.3.1	结果查看	207
6.3.2	结果提取	209
6.3.3	后处理结果说明	211
6.4	本章小结	214
<b>第 7 章 施工阶段分析样例</b>		215
7.1	地铁隧道施工阶段分析	215
7.1.1	样例概要	215
7.1.2	定义材料特性	215
7.1.3	几何建模	225
7.1.4	生成网格	231
7.1.5	分析	237
7.1.6	查看分析结果	240
7.2	利用隧道建模助手建立隧道模型	243
7.2.1	定义材料特性	243
7.2.2	建模助手	243
7.2.3	分析数据	249

7.2.4 查看分析结果	249
7.3 本章小结	250
<b>第 8 章 渗流及渗流-应力耦合分析样例</b>	<b>251</b>
8.1 三维基坑开挖阶段地下水渗流分析	251
8.1.1 样例概要	251
8.1.2 定义材料属性	252
8.1.3 二维几何建模	259
8.1.4 分析	264
8.1.5 定义施工阶段	265
8.1.6 分析工况	267
8.1.7 分析	268
8.2 渗流-应力耦合分析	269
8.2.1 样例概要	269
8.2.2 材料特性	269
8.2.3 二维几何建模	278
8.2.4 生成二维网格	281
8.2.5 生成三维网格	282
8.2.6 荷载、边界条件	283
8.2.7 施工阶段	284
8.2.8 分析工况	289
8.2.9 分析	290
8.2.10 查看分析结果	290
8.3 本章小结	292
<b>第 9 章 爆破振动分析样例</b>	<b>293</b>
9.1 样例概要	293
9.2 定义材料特性	293
9.2.1 材料构成及特性	293
9.2.2 定义特性	294
9.3 二维几何建模	301
9.3.1 建立几何形状	301
9.3.2 建立几何组	303
9.4 生成二维网格	303
9.5 生成三维网格	304
9.6 特征值分析	307
9.6.1 建立桩边界	307

9.6.2	建立曲面弹簧	308
9.6.3	定义分析工况	309
9.6.4	运行分析	309
9.7	时程分析	309
9.7.1	建立桩边界	309
9.7.2	建立土体边界组	309
9.7.3	建立曲面弹簧	309
9.7.4	添加爆破荷载	310
9.7.5	定义分析工况	311
9.7.6	运行分析	311
9.8	结果处理	312
9.9	本章小结	315
	参考文献	316

# 第1章 概 述

## 1.1 岩土工程问题的基本特点

一般认为岩土工程学科是以工程地质学、土力学、岩体力学及基础工程学为理论基础的技术学科。岩土材料是一种地质体,是自然产物。在漫长的历史进程中,人类的生产生活所经历的工程建筑史是不停地与岩土体打交道的过程。人们以岩土体作为建筑物地基,将岩土作为建筑材料使用,岩土体也是某些类型建筑物的环境。岩土工程问题是多种多样的,因此也势必造成其多样性、复杂性。

### (1) 工程类型的多样性

多种行业涉及岩土工程学科的内容,交通、水利水电、矿山、能源、港口与航道、城乡建设、国防等相关专业都广泛应用岩土工程学科,其涉及的工程类型多种多样。这些行业可能会在各种地基上建造工程,且可能遇到各种类型的地基或地质环境。针对不同工程和不同地质条件又会选择不同形式的基础或结构形式,还会开挖隧道、开挖深基坑和建设地下工程,以及筑坝、筑路,河岸与边坡治理等,不胜枚举。

对于不同地基或地质环境和不同的工程类型,设计施工时在了解岩土体的基本性质和工程使用要求的基础上,原则上都必须同时考虑到:稳定或平衡问题;应力变形与固结问题;地下水与渗流问题;水与土(岩)相互作用问题;土(岩)与结构相互作用问题;土(岩)的动力特性问题等。不同地基或不同地质环境,不同的工程类型各有特点,所以它们的关键技术问题的侧重点可能不同。

### (2) 材料性质的复杂性

岩土体材料是一种地质体,是自然产物。它既可能以松散堆积物的土体形式存在,也可能以相对完整的岩体存在。而岩体一般存在各种裂隙,不同地质成因的岩块之间的裂隙面交错,往往比较复杂。当岩体很“破碎”时,有时很难区分其是属于岩体还是土体,这需要工程师根据地质体性质和经验作出判断和给予恰当描述。岩土体往往是非均匀介质,有时还呈现空间不连续性以及几何形状的任意性;岩土材料一般不是线性材料,其应力应变关系远比单纯的线弹性关系复杂,同时往往表现为强烈的区域性特征;岩土材料变形与强度还可能随时间变化,即流变性质;岩土材料一般是三相体,处于饱和或非饱和时又往往表现出性质的差异,尤其对于某些特殊土更是如此。为了如实地表达不同区域的岩土工程问题必须进行必要的勘察、试验,使用一些能够描述各种岩土体材料基本性质的非线性或弹塑性本构模型。当前,岩土体本构模型的建立和应用已经成为近代岩土工程的重要研究领域。

### (3) 荷载条件的复杂性

出于不同的使用目的,人们创造出多种多样的建筑物。不同的工程因其形式、使用要

求不同,或者施工方式不同等,其荷载条件不同且复杂多样,包括静力和动力荷载。例如,房屋建筑对地基的作用,以建筑物荷载、风荷载为主;基坑开挖、隧洞开挖主要是应力解除;土石坝施工是逐级加载,以自重为主,而土石坝运行期则是以水压力和渗流为主;地震、爆炸则是突加动力荷载等。

#### (4) 初始条件与边界条件的复杂性

工程地质和水文地质条件不同,周边环境不同,造成各种问题的初始条件和边界条件不同,有时甚至比较模糊。典型的例子是土体的初始应力或初始变形往往很难准确确定。边界条件的确定有时也难以完全符合实际,这就要求设计计算者进行适当的简化或近似处理。求解工程问题和进行数值模拟时应综合考虑各方面因素,要比较确切地反映各种复杂的初始条件与边界条件。

#### (5) 相互作用问题

相互作用课题其实应包括两种类型:一是土(岩)水相互作用;二是土(岩)与结构或颗粒(岩块)间相互作用。岩土体中水的存在和流动对其性质将产生影响,有时这种影响是巨大的,不可忽视的。水的存在除了产生浮力、水压力等静水力学特征外,当发生渗流时将对岩土体产生超静孔隙水应力和渗流力。对于细粒土,含水率的变化会使土的物理力学性质发生变化,对于某些特殊土的影响则更为显著。对于粗粒土,适当地洒水可以增加土的压实性,土石坝初次浸水,会使其产生湿化变形。岩体中水的存在和渗流现象,除了影响应力变形外还可能引起缓慢而持续的化学反应,如此又进一步影响岩体的渗流和应力变形。

除了少数堤坝类的“土工建筑物”外,一般建筑都存在结构物,分析时将岩土体与结构物视为一整体,即岩土体与结构处于一个共同作用系统。由于岩土体尤其是土体与结构的性质有很大不同,它们在共同作用的过程中相互间力图彼此变形协调,其间发生力的相互传递并最终达到变形协调,因此势必存在岩土体与结构的相互作用问题。例如,地基、基础、上部结构相互作用;土石坝防渗墙与地基及坝体的相互作用;桩、挡土墙、锚杆、加筋材料等与土的相互作用;裂隙岩体的岩块间的相互接触,在受力过程中发生相互作用等。

如前所述,岩土体作为一种地质体,其天然状态、性质使得材料的应力应变关系很复杂,其上的建筑物的荷载条件以及边界条件与初始条件等也往往比较复杂。为了尽可能求得问题的“精确”解答,人们理所当然期盼建立严格的控制物理方程(微分方程或微分方程组),根据初始条件和边界条件求得问题的严密理论下的解析解,但因为问题的复杂性,如愿的结果极少。幸运的是,数学和力学理论的发展、计算技术和计算机的快速发展为解决复杂岩土工程问题提供了有效的数值分析方法和手段。近年来许多数值方法应运而生并日趋完善,得到了广泛应用,从而解决了大量的工程问题。数值分析方法为进一步发展岩土工程学科提供了更广阔的空间,也为学者和工程师们拓宽了施展才华的舞台。

## 1.2 有限元及其在岩土工程中的应用简介

### 1.2.1 概述

有限单元法(FEM,简称有限元法)是将微分方程(组)简化为线性代数方程组从而求解问题的一种数值分析方法,是20世纪60年代发展起来的一种强有力的数值计算工具。它对非匀质、非线性、复杂边界问题具有很强的适用性。自1966年美国Clough和Woodward

首先将有限元法用于土坝的应力和变形分析以来,该方法在岩土工程问题的分析中得到了广泛应用。在水利水电、土木、港口等工程中,要使地基及土工结构的设计安全、可靠、经济,必须对其应力变形有准确认识。对复杂受力和边界条件的处理,有限元法是目前最有效方便的方法之一。如水利水电工程中常见的土石坝,随着筑坝技术的不断提高,土石坝已经向 300 m 级高坝发展。高土石坝一般不是匀质坝,如心墙堆石坝、混凝土面板堆石坝等。它们的受力变形与土体变形是联系在一起的,处于同一工作系统,应力变形相互作用、相互影响,不仅边界条件十分复杂,而且材料的应力应变表现为非线性,不可能得到解析解,只有依靠数值解。同样,如基坑开挖及其支护问题、土工结构的地震反应、地基加固、复杂地基的固结等,这些问题都依赖于有限元的数值解,才能给出相对准确的解答。

有限元法的主要优点有:

- (1) 可用于非匀质问题、多种土和材料。
- (2) 可用于非线性材料、各向异性材料。
- (3) 可适应复杂边界条件。
- (4) 可用于各种类型的问题。
- (5) 可用于计算应力变形、渗流、固结、复杂区域、流变、湿化变形,以及动力和温度问题等。

用于土体的有限元应力变形分析方法可分为总应力分析法和有效应力分析法。总应力分析法不区分土单元中由土颗粒骨架和孔隙水分别传递和承受的应力(即有效应力和孔隙水应力),而将土体作为一相介质考虑,其应力为总应力。因此,土体总应力有限元分析的方法原理与一般固体力学有限元法相同。

有效应力分析法则区分土体中的有效应力和孔隙水应力,将土骨架变形与孔隙水的渗透同步考虑,因而较总应力分析法能更真实地反映土体的自身特性,能更合理地计算土体在外荷载作用下的变形,应用范围也更广。由于这时土体是作为二相介质考虑,同时需考虑渗流对孔隙水应力变化的影响,因此,存在耦合作用。其有限元控制方程与一般固体力学有限元方程有所不同。

对透水性强的地基或土工建筑物,可用总应力法进行计算,但由于该法较简单,也常用于分析饱和土的应力变形。所以,对于饱和土等透水性较弱的地基或土工建筑物,较严密的方法为有效应力法。

由于土体的复杂变形特性,即使用总应力法对土体或土工建筑物进行有限元分析,实际应用时,也有其特殊性,需针对岩土体的特殊性作相应处理。例如,本构关系的选用,模型参数的确定,非线性分析方法的采用,特殊问题(单元破坏、湿化、分期施工、接触问题)的处理等。应该指出,本节虽然针对土体介绍有限元法的应用,对于岩体工程许多情况下也可以采用有限元方法。

岩土类问题进行有限元分析的目的是了解整个结构的位移场和应力场,包括位移的分布、大小,应力集中的部位,塑性区的大小、范围,从而科学合理地进行结构设计。

### 1.2.2 有限元法的实现过程

有限元法是把连续体结构离散,近似地用有限个离散体(单元)代替连续体结构。然后,将荷载、约束等边界条件简化或等效,利用应变位移关系和本构关系,将平衡方程转化

为线性方程组来求解。有限元法计算可概括为如下六个步骤。

### (1) 结构的离散化

结构离散化是将计算对象视为连续体后再划分成有限个单元体,并在单元体的指定点设置节点,相邻的单元体只在节点处相互连接。离散后的结构与原结构形状相同、材料相同、荷载和边界条件相同。常用于离散结构的单元形式有平面三角形单元、平面四边形等参单元、空间四面体单元、空间六面体等参单元等,每种形态的单元又可以有不同的节点数。为了有效地逼近实际连续体,应选择合适的单元类型、确定合适的单元数量和密度,这一过程称为建模。一般情况下,单元划分越细则表述变形情况越精确,即越接近实际,但计算量越大。

### (2) 形函数的选择

形函数(亦称位移函数)决定了单元内部的各点的位移模式,它的选择是有限元法分析中的一个关键问题,目前常选择多项式作为形函数。

根据所选择的形函数,就可导出用节点位移表示单元内任意点位移的关系式,其矩阵形式为

$$\{\omega\} = [N]\{\delta\}^e \quad (1-1)$$

式(1-1)中,例如平面3节点三角形单元,任意点的位移分量列阵 $\{\omega\} = [\omega_x, \omega_z]^T$ ;单元节点 $i, j, m$ 的位移列阵 $\{\delta\}^e = [\omega_{xi}, \omega_{zi}, \omega_{xj}, \omega_{zj}, \omega_{xm}, \omega_{zm}]^T$ ;形函数矩阵

$$[N] = \begin{bmatrix} N_i & 0 & N_j & 0 & N_m & 0 \\ 0 & N_i & 0 & N_j & 0 & N_m \end{bmatrix}$$

是节点坐标的函数,对3节点三角形单元可以假定线性模式。因此,式(1-1)为

$$\begin{cases} \omega_x(x, z) = N_i(x, z)\omega_{xi} + N_j(x, z)\omega_{xj} + N_m(x, z)\omega_{xm} \\ \omega_z(x, z) = N_i(x, z)\omega_{zi} + N_j(x, z)\omega_{zj} + N_m(x, z)\omega_{zm} \end{cases} \quad (1-2)$$

### (3) 建立单元应力和节点位移之间的关系

利用几何方程和式(1-1)导出用节点位移表示单元应变的关系式,即几何方程

$$\{\epsilon\} = [B]\{\delta\}^e \quad (1-3)$$

式中: $\{\epsilon\} = \{\epsilon_x, \epsilon_z, \gamma_{xz}\}^T$ ,为 $x, z$ 平面单元内任意点的应变列阵; $[B]$ 为应变矩阵,

$$[B] = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} & 0 & \frac{\partial N_j}{\partial x} & 0 & \frac{\partial N_m}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_i}{\partial z} & 0 & \frac{\partial N_j}{\partial z} & 0 & \frac{\partial N_m}{\partial z} \\ \frac{\partial N_i}{\partial z} & \frac{\partial N_i}{\partial x} & \frac{\partial N_j}{\partial z} & \frac{\partial N_j}{\partial x} & \frac{\partial N_m}{\partial z} & \frac{\partial N_m}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (1-4)$$

利用物理方程和式(1-3)可导出单元应力的关系式,即物理方程

$$\{\sigma\} = [D][B]\{\delta\}^e \quad (1-5)$$

式中: $\{\sigma\}$ 为单元内任意点的应力列阵; $[D]$ 为与单元材料性质有关的弹性矩阵或弹塑性矩阵。

对平面应变弹性问题,有



$$[D] = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 \\ \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \end{bmatrix} \quad (1-6)$$

式中:  $E$  为弹性模量;  $\nu$  为泊松比。

#### (4) 建立单元上的节点力和节点位移之间的关系

利用虚功原理, 单元节点力和节点位移之间的关系式可表示为单元平衡方程

$$\{F\}^e = [k]^e \{\delta\}^e \quad (1-7)$$

式中:  $\{F\}^e$  为单元等效节点力列阵, 对于任意单元的  $i, j, m$  每个节点都存在  $x$  方向和  $z$  方向的分力, 因此,  $\{F\}^e = [F_{xi}, F_{zi}, F_{xj}, F_{zj}, F_{xm}, F_{zm}]$ ;  $[k]^e$  为单元刚度矩阵。

$\{F\}^e$  和  $[k]^e$  分别为

$$\{F\}^e = \iiint [B]^T [\sigma] dx dz \quad (1-8)$$

$$[k]^e = \iiint [B]^T [D] [B] dx dz \quad (1-9)$$

#### (5) 建立整体平衡方程

集合所有单元的刚度矩阵, 得结构整体刚度矩阵  $[K]$ ; 同时, 集合作用于各单元的等效节点力列阵, 形成总体荷载列阵  $[R]$ , 从而, 整个结构的平衡方程表示为

$$[K] \{\delta\} = \{R\} \quad (1-10)$$

#### (6) 求解未知节点位移和单元应力

考虑一定的边界条件, 求解式(1-10)即可得到所有未知节点位移。在线性问题中, 可根据方程组的具体特点, 选择合适的计算方法, 一次求解式(1-10)即可得到解答。对于非线性问题, 则要通过一系列的步骤, 并逐步修正刚度矩阵或荷载矩阵, 或通过增量法, 才能获得各节点的正确位移。

最后, 利用式(1-3)、式(1-5)和已求出的节点位移计算各单元的应变和应力。

## 1.3 MIDAS/GTS 的特点及工程应用

MIDAS/GTS (Geotechnical and Tunnel Analysis System) 是由 MIDAS IT 结构软件公司开发的岩土与隧道结构有限元分析软件。该软件将通用的有限元分析内核与岩土隧道结构的专业性要求有机地结合, 集合了目前岩土隧道分析软件的优点。该软件包括非线性弹塑性分析、非稳定渗流分析、施工阶段分析、渗流—应力耦合分析、固结分析、地震、动力分析等。MIDAS/GTS 不仅具有岩土分析所需的基本分析功能, 并为用户提供了包含最新分析理论的强大的分析功能, 是岩土和隧道分析与设计的最佳解决方案之一。

### 1.3.1 MIDAS/GTS 的主要功能特点

MIDAS/GTS 可以对复杂的几何模型进行可视化的直观建模。另外, MIDAS/GTS 独特的 Multi-Frontal 求解器能为我们提供最快的运算速度, 这也是其强大功能之一。在后处