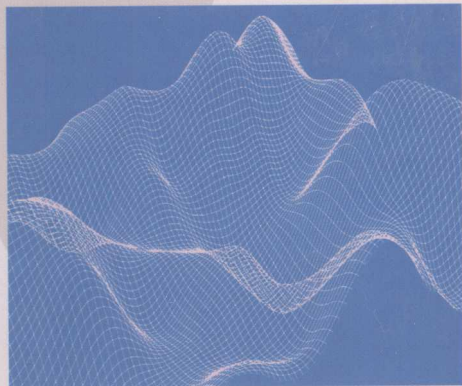


岩土工程国家重点学科专著系列

NATIONAL KEY SUBJECT GEOTECHNICAL
ENGINEERING MONOGRAPH SERIES

多尺度三维地质结构 几何模拟与工程应用

张发明 等著



科学出版社

www.sciencep.com

内 容 简 介

本书结合多尺度地质结构面的几何模拟理论,系统阐述了对工程建设有直接影响的工程尺度、统计尺度地质结构的几何模拟方法,着重介绍了多尺度结构几何模拟在工程岩体稳定分析与加固设计中的应用,讨论了基于多尺度地质体几何模拟的工程场地适宜性评价方法,简要介绍了有关地质结构几何建模在工程应用中的程序设计方法,并附有主要工程应用源程序。

本书可供水利、水电、地质、矿山、土木、交通、计算机信息技术等领域的科技人员和相关专业高等院校的师生参考,同时可作为地质工程专业研究生三维地质建模课程的教学用书或教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

多尺度三维地质结构几何模拟与工程应用/张发明等著. —北京:科学出版社, 2007

(岩土工程国家重点学科专著系列)

ISBN 978-7-03-019369-8

I. 多… II. 张… III. 几何—应用—三维—工程地质—地质构造—工程模拟 IV. P642

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 103737 号

责任编辑:童安齐 / 责任校对:刘彦妮

责任印制:吕春珉 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新蕾印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2007年7月第一版 开本:B5(720×1000)

2007年7月第一次印刷 印张:27 3/4

印数:1—2 000 字数:539 000

定价:60.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

销售部电话 010-62136131 编辑部电话 010-62137026(BA08)

前 言

伴随着我国经济建设的快速发展,大型工程项目与日俱增,人们对地质环境的认知程度不断加强,计算机应用技术在地质工程领域已得到了广泛的推广与应用。众所周知,工程建设离不开地质体,而地质体中的由内外动力地质作用所形成的不同尺度的地质结构面(不连续面)对地质体稳定性的影响一直是地质工程领域研究的核心与重点。由于受目前勘探技术与勘探成本的制约,地质人员还难以准确把握地质结构面在三维空间中的展布形态。因此,根据有限的钻探、物探或露头信息去跟踪地质结构面的分布,了解不同尺度结构面对工程建设的影响已成为现代地质工程领域的一个新的生长点,这就是计算机仿真技术在地质体三维建模中的应用。自 1988 年法国 Nancy 大学的 Mallet J L 教授提出地质目标的计算机辅助设计(GOCAD)以来,大尺度地质建模技术首先在我国油气田开发和地球物理行业得到发展和推广应用。进入 21 世纪以来,国内已有不少地质工程学工作者与计算机专家开始涉足水利水电、城市建设中的三维地质建模,可以预计,随着计算机信息技术的发展与顺应工程建设对地质环境的需求,多尺度地质建模必将为工程规划、设计提供重要的地质依据,此乃出版本书之初衷。

本书系统介绍了工程尺度与统计尺度计算机建模中的相关内容。本书第一章主要介绍了多尺度的涵义与尺度效应,多尺度地质结构三维仿真的背景及多尺度建模与工程应用现状;第二章着重讨论了获取多尺度地质结构面信息的方法,包括区域尺度、工程尺度和统计尺度结构面调查的方法;第三章系统介绍了工程尺度地质结构三维几何模拟的理论与方法,包括地形面、地层层面、褶皱构造与断裂构造的建模原理与方法;第四章着重讨论统计尺度结构面的几何模拟原理与方法,包含作者开发的结构面三维网络模拟程序;第五章则介绍了复杂地质体三维几何模拟的理论与算法,包含地质剖面的切取算法与三维地质体可视化开发环境等;第六章至第十章分别介绍了工程尺度和统计尺度结构面几何模

拟结果在水利水电工程中的应用,包括在岩体质量评价、岩体抗剪强度的确定、边坡稳定分析、地下洞室围岩稳定分析及系统锚固优化设计中的应用;第十一章简要介绍了岩体结构模拟在确定裂隙渗透张量与排水优化设计中的应用;第十二章结合江苏沿江开发带三维地质立体调查与数字化项目,介绍了应用地质体模拟结果去评价不同建设用地地质环境适宜性的理论与方法。

本书的内容主要来自于近年来作者已完成的与正在开展的一些科研项目研究成果。其中部分曾以论文的形式发表于国内外学术刊物上,但也有不少未曾发表过。这些内容主要取自于作者在中国水利水电科学研究院从事博士后研究期间参与完成的原国家电力公司重大科技项目(项目编号:T0042)、正在开展的江苏省自然科学基金(项目编号:BK2006171)、国家自然科学基金(项目编号:50579013)、华东电网有限公司科学技术项目(项目编号:T0402)及江苏沿江开发带三维立体地质调查等重大项目。科研项目的实施得到了华东天荒坪抽水蓄能有限公司、中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院、华东勘测设计研究院、北京勘测设计研究院、成都勘测设计研究院及江苏省地质矿产勘查局地矿生态环境研究中心等单位的大力支持。

本书撰写分工为:第二章 2.4 节、第四章 4.4 节及 4.5 节、第七章 7.2.2 节及 7.4 节、第八章 8.4.1 节由汪小刚、贾志欣撰写;第一章第 1.2 节、第三章第 3.2 节、第九章 9.3 节由庞正江撰写;第五章 5.8 节由石剑龙、王波撰写;第十二章 12.5 节由张发明、刘建东、王波、薛怀友、戴盛启撰写;其余章节均由张发明撰写,张发明还对全书进行统稿与校订。庞正江参与程序的编制。本书所反映的部分研究成果是基于国内外已有三维地质建模的研究成果所得到的,书中直接或间接地引用了国内外从事相关领域研究的学者、专家已发表的部分研究成果以及相关科研报告等,作者谨向相关作者表示衷心的感谢。在本书撰写过程中,始终得到了博士后们的大力帮助,他们是中国水利水电科学研究院的何传永高工、杨健高工、李新强博士及弥宏亮博士,同时也得到了作者课题组成员郭炳跃、李晶、董育烦、武霖、王小锋、曹建军、李轼等研究生的帮助。华东勘测设计研究院的李孙权高工、姚伟高工、施建敏高工、肖美荣工程师,昆明勘测设计研究院的汤献良高工以及江苏省地质矿产勘查局杨泉宁总工程师、贾学天教授级高工,他们提供了大量资料以帮助作者完成

本书的撰写。在书稿的撰写期间,始终得到了家人的理解、支持与帮助,蒯翠云女士帮助完成全书文稿的录入,作者亦在此特对她们表示诚挚的谢意。

此外,在撰写本书过程中,还得到了河海大学地质及岩土工程系全体老师的大力帮助,谨向他(她)们表示衷心的感谢。

本书由河海大学“十五”、“十一五”、“211 工程”项目及江苏省自然科学基金(项目编号: BK2006171)资助出版。

由于地质体建模与工程应用技术仍处于探索阶段,尚待更多的科技工作者去研究开发,本书的目的旨在抛砖引玉,为加快地质工程三维可视化与工程应用的步伐尽微薄之力。

由于作者水平所限,书中难免存在不妥之处,敬请读者不吝赐教。

张发明

2006 年国庆于南京

目 录

前言

第一章 绪论	1
1.1 多尺度的含义与尺度效应	1
1.2 多尺度地质结构三维计算机仿真的背景	3
1.3 多尺度地质结构建模技术现状	4
1.3.1 三维地质模型建模技术的研究现状	4
1.3.2 国外应用程序的开发现状	5
1.3.3 国内应用程序的开发现状	5
1.3.4 地质结构三维建模在水利水电工程中的应用现状	6
1.4 多尺度地质结构三维仿真的应用前景	9
参考文献	9
第二章 多尺度地质结构面信息获取方法	12
2.1 岩体结构的空間特征	12
2.2 区域尺度地质结构面信息获取方法	14
2.2.1 地质雷达测量技术	14
2.2.2 遥感测量技术	15
2.2.3 反射波法地震映像勘探	15
2.2.4 高密度电法勘探	16
2.2.5 磁法勘探	19
2.3 工程尺度结构面信息获取方法	19
2.3.1 野外地质露头调查方法	19
2.3.2 地质构造的调查	21
2.3.3 近景摄影测量法	23
2.3.4 工程地质钻探	24
2.4 统计尺度结构面信息获取方法	24
2.4.1 结构面调查统计均质区的确定	26
2.4.2 露头面的选择	26
2.4.3 结构面的野外测量方法及描述	27
参考文献	29

第三章 工程尺度结构面三维几何模拟理论与方法	30
3.1 概述	30
3.2 地质结构三维模拟模型	32
3.2.1 人工神经网络模型	32
3.2.2 地质体三维模拟方法	35
3.3 地形面与地质分界面拟合几何建模方法	37
3.3.1 三角 B-B 曲面的地形模拟	37
3.3.2 基于三维散乱数据地形面的构造	38
3.3.3 特殊地形的模拟	39
3.4 地层层面的模拟	40
3.4.1 层状结构面的建模	40
3.4.2 层面几何模拟的人工神经网络法	42
3.5 褶皱构造的模拟	46
3.5.1 褶皱构造建模的基本理论	46
3.5.2 褶皱构造建模的方法	47
3.6 单一断层的模拟	49
3.6.1 断层的空间表示方法	49
3.6.2 断层建模方法	50
3.6.3 基于钻孔数据的断层建模过程	51
参考文献	52
第四章 统计尺度地质结构面三维几何模拟	55
4.1 结构面自然特征的定量描述	55
4.1.1 结构面规模	55
4.1.2 结构面产状	56
4.1.3 结构面间距	56
4.1.4 结构面延展性	57
4.1.5 结构面粗糙度	57
4.1.6 结构面组数	57
4.1.7 结构面张开度和填充物	57
4.1.8 岩石块体大小	58
4.2 结构面发育规律的统计研究	58
4.2.1 结构面系统的特点	58
4.2.2 结构面分布的统计规律性	60
4.3 结构面实测数据的统计方法	61
4.3.1 结构面分组	61

4.3.2 结构面几何参数的统计	63
4.4 结构面几何参数误差的分类及来源	64
4.4.1 采样误差	64
4.4.2 统计误差	65
4.4.3 测量误差	66
4.4.4 结构面产状测量误差的纠正	66
4.4.5 结构面迹长的测量误差	67
4.4.6 结构面密度的取样误差及修正	68
4.5 裂隙岩体三维结构面网络模拟方法	69
4.5.1 结构面几何参数的概率分布统计特征	70
4.5.2 Monte-Carlo 随机模拟方法	71
4.5.3 结构面几何参数的模拟理论	74
4.5.4 结构面密度的确定	75
4.5.5 结构面位置的确定	77
4.6 结构面三维网络模拟的计算机实现	78
4.7 结构面三维网络图像的可视化方法	80
4.7.1 结构面三维网络模拟可视化方法	80
4.7.2 3DNET 程序简介	80
参考文献	87
第五章 复杂地质体三维几何模拟理论与算法	89
5.1 复杂地质体三维模拟的基本思路	89
5.2 断裂型地质体的三维建模技术	90
5.2.1 断层网络建模技术	90
5.2.2 断裂岩体的实体建模技术	91
5.2.3 长大结构面的模拟	92
5.3 褶皱型地质体的三维建模技术	94
5.3.1 常见的褶皱模型	94
5.3.2 褶皱实体建模技术	94
5.4 曲面与曲面求交算法	95
5.5 平面与曲面相交的算法	96
5.6 地质剖面切取算法	96
5.6.1 一般性剖面的切取算法	97
5.6.2 特殊剖面切取	98
5.6.3 统计尺度结构面在剖面上的求解	99
5.7 三维地质体可视化的开发环境简介	105

5.7.1	OpenGL 的基本功能	105
5.7.2	OpenGL 的开发环境	106
5.7.3	IDL 简介	107
5.8	复杂地质体三维可视化实现过程	108
5.8.1	基于钻孔数据的三维地质结构建模	108
5.8.2	建模基本原理	108
5.8.3	插密	110
5.8.4	钻孔数据的组织与管理	110
5.8.5	地质体模型的各种交互显示	111
5.8.6	地质体模型管理器	111
5.9	三维地质结构模拟可视化软件 3DGEOLGY 简介	111
5.9.1	数据库建立过程	111
5.9.2	钻孔数据输入	112
5.9.3	程序部分源代码	113
	参考文献	127
第六章	基于三维地质结构模拟的岩体质量评价	130
6.1	基于地质体三维模拟的 RQD 确定	130
6.1.1	RQD 的概念	130
6.1.2	从地质体三维模拟图上测量 RQD	131
6.2	岩体质量评价方法与标准	133
6.2.1	岩体质量分级方法的现状	133
6.2.2	岩体质量评价标准	136
6.3	基于三维地质结构图像的岩体质量综合评价	142
6.3.1	利用三维地质结构图像确定部分岩体质量评价因子的方法	142
6.3.2	坝基岩体的工程质量预测	144
6.3.3	工程岩体质量评价及分级程序 ROCKCLASS 编制	148
6.3.4	边坡岩体工程地质分类	150
6.4	三维地质结构模拟在坝基抗滑稳定分析中的应用	152
6.4.1	坝基滑动破坏的类型	152
6.4.2	坝基岩体抗滑稳定性评价的基本步骤	152
6.4.3	坝基抗滑稳定分析	153
6.4.4	工程实例——宜兴抽水蓄能电站上水库坝基抗滑稳定分析	154
6.5	基于结构面多尺度三维网络的岩体工程地质分类实例	166
6.5.1	围岩分类的基本依据和分类方法	166
6.5.2	围岩分类工程实例	166

参考文献	170
第七章 基于统计尺度结构面模拟的岩体强度确定	171
7.1 裂隙连通率的定义	171
7.1.1 传统工程地质学关于连通率的定义	171
7.1.2 考虑岩桥强度的连通率定义	172
7.1.3 结构面三维连通率的定义	172
7.2 基于岩体结构仿真图像的三维裂隙连通率确定方法	173
7.2.1 结构面三维网络图像的二维离散	173
7.2.2 根据岩桥破坏机理确定剪切面上的结构面	174
7.2.3 三维剪切面的曲面拟合方法	176
7.2.4 剪切面上三维连通率的计算	181
7.3 基于模拟退火算法的三维连通率计算	184
7.3.1 模拟退火算法简介	184
7.3.2 基于模拟退火算法确定连通率	185
7.4 裂隙岩体综合抗剪强度取值方法	186
7.5 工程应用实例	187
7.5.1 工程概况	187
7.5.2 心墙堆石坝方案溢洪道的工程地质条件	187
7.5.3 结构面现场调查及统计	190
7.5.4 糯扎渡工程边坡节理岩体的连通率	192
参考文献	194
第八章 基于地质结构模拟的边坡多尺度稳定分析	196
8.1 岩石高边坡多尺度稳定性评价方法	196
8.1.1 边坡变形破坏的模式及判别方法	196
8.1.2 岩质边坡稳定性分析的 Sarma 方法	203
8.1.3 裂隙边坡稳定性分析 EMU 方法	207
8.2 工程尺度边坡结构体稳定分析	208
8.3 基于三维地质结构模拟的随机楔体搜索方法	210
8.3.1 开挖面上结构面迹线的确定	210
8.3.2 随机楔体的搜索方法	211
8.4 随机楔体的稳定分析	212
8.4.1 随机楔体结构面力学指标的确定	212
8.4.2 随机楔体的稳定分析	213
8.4.3 基于统计尺度网络模拟的随机楔体稳定分析过程	217
8.4.4 边坡块体稳定分析程序 SLOPE-3D 简介	218

8.5 基于裂隙网络模拟的岩石高边坡潜在滑裂面的确定	219
8.5.1 模拟退火算法搜索滑裂面的过程	220
8.5.2 模拟退火算法搜索滑裂面通用程序 SlopeCut	221
8.6 小湾电站地下厂房进水口高边坡随机楔体稳定分析	222
8.6.1 工程概况	222
8.6.2 工程地质概况	222
8.6.3 边坡岩体结构面几何参数的统计与分析	224
8.6.4 边坡岩体结构面网络的三维随机模拟	236
8.6.5 开挖边坡结构面三维连通率确定	237
8.6.6 进水口开挖边坡三维随机块体稳定性分析	239
8.7 天荒坪“3.29 滑坡”三维地质结构模拟与滑动面搜索实例	243
参考文献	259
第九章 基于地质结构模拟的围岩块体稳定分析	260
9.1 概述	260
9.2 地下工程岩体结构的工程尺度三维几何模拟	262
9.2.1 洞室形状的几何模拟	262
9.2.2 工程尺度地质结构面的模拟	262
9.3 基于工程尺度结构面控稳的围岩稳定块体分析	264
9.3.1 块体的定义和分类	264
9.3.2 块体的有限性和可动性	265
9.3.3 力的平衡和运动学判别	267
9.3.4 定位块体和半定位块体的稳定性分析	270
9.4 基于统计尺度结构面模拟的随机块体稳定性评价	273
9.4.1 洞室围岩随机块体稳定分析	273
9.4.2 稳定分析结果的数据处理	275
9.5 多尺度地下工程围岩稳定分析可视化程序 3DBlock	276
9.5.1 程序开发的目的	276
9.5.2 3DBlock 程序的基本功能	276
9.5.3 3DBlock 程序介绍	276
9.6 西龙池抽水蓄能电站地下厂房围岩块体稳定分析实例	279
9.6.1 工程概况	279
9.6.2 厂房区工程地质概况	279
9.6.3 围岩块体稳定性分析资料的准备	283
9.6.4 围岩工程尺度块体稳定性分析结果	285
9.6.5 统计尺度随机块体稳定性分析	290

参考文献	304
第十章 锚固效应及基于地质结构模拟的锚固设计	306
10.1 概述	306
10.2 预应力锚固效应	309
10.2.1 预应力锚固的物理效应	309
10.2.2 岩质高边坡预应力群锚加固效应	316
10.3 工程尺度结构体预应力锚固优化设计理论	320
10.3.1 影响岩锚支护参数确定的因素分析	321
10.3.2 决策分析的概念和决策模型	323
10.3.3 风险损失的估算方法及锚固系统失效模式	325
10.3.4 岩锚支护参数的最优决策分析	327
10.3.5 预应力锚索加固决策系统	334
10.4 基于统计尺度结构面模拟的系统锚固设计	334
10.5 工程尺度块体锚固设计工程实例	336
10.5.1 工程尺度块体锚固设计的基本步骤	336
10.5.2 西龙池电站地下厂房围岩定位块体预应力锚索加固实例	338
10.6 统计尺度块体锚固设计工程实例	343
10.6.1 统计尺度随机块体锚固设计的基本过程	343
10.6.2 小湾水电站进水口高边坡随机楔体锚杆加固设计	343
10.6.3 西龙池抽水蓄能电站地下洞室群围岩随机块体锚固设计	345
参考文献	346
第十一章 基于岩体结构模拟的裂隙渗流与排水设计	349
11.1 裂隙岩体渗透张量计算的 Snow 方法	349
11.2 基于裂隙张量的渗透能量确定方法——Oda 法	350
11.3 基于裂隙网络的神经追踪法确定裂隙岩体的渗透张量	356
11.3.1 单条裂隙渗透流的描述	356
11.3.2 基于裂隙网络神经追踪的渗透张量求解	357
11.3.3 实例验证	359
11.4 基于裂隙网络的最优排水系统设计方法	360
11.4.1 排水孔方案	361
11.4.2 辐射井排水方案	362
11.4.3 排水廊道方案	362
参考文献	364
第十二章 基于地质结构模拟的工程场地适宜性评价	366
12.1 概述	366

12.2	地质环境评价的数据采集·····	366
12.2.1	建模范围及数据源·····	366
12.2.2	地质环境评价数据采集·····	366
12.3	地质环境工程适宜性评价方法·····	368
12.3.1	基本原理·····	368
12.3.2	评价单元的划分·····	368
12.3.3	评价因子的确定·····	370
12.3.4	工程场地适宜性评价态势分析·····	370
12.3.5	工程场地适宜性评价模糊层次决策分析·····	371
12.4	地质环境工程适宜性评价 AHP-R 软件开发·····	372
12.5	长江江苏段岸线地质环境工程适宜性评价实例·····	374
12.5.1	沿江地区地质环境概况·····	374
12.5.2	长江岸线稳定性·····	381
12.5.3	长江江苏段岸线带三维地质结构模拟·····	385
12.5.4	工程场地适宜性评价单元及因子的确定·····	386
12.5.5	岸线开发工程场地适宜性评价态势分析·····	395
12.5.6	岸线开发工程场地适宜性评价的层次分析法·····	401
12.5.7	基本结论·····	418
	参考文献·····	427

第一章 绪 论

1.1 多尺度的含义与尺度效应

当前,我国工程建设发展迅速,越来越多的水利水电工程、能源工程、矿产开采工程和国防工程建造在不良地质条件地区,如南水北调、西气东输工程、西电东送工程等工程建设中将不同程度地遇到复杂的、不同尺度的地质结构面,其工程设计、施工、稳定性评价和地质体加固等都依赖于对地质体多尺度特征的研究。众所周知,在漫长的地质作用过程中,地壳中形成了不同尺度、规模不等的构造形迹,这些形迹在不同的范围内对工程建设有着不同的影响,如区域地质结构面对区域稳定性的控制作用、工程区域中的工程尺度断层、层面及普遍发育的Ⅳ级和Ⅴ级结构面对工程稳定性和岩石工程性质的影响等,正是这些不同地质成因所形成的尺度不一、形态各异、分布错综的各类结构面强烈地影响着工程岩体的力学性质与稳定性,直接影响岩体的应力分布状态,并在很大程度上影响岩体的破坏方式。对该类岩体破坏机理的研究,必须考虑地质构造形迹的分布、尺度、力学效应,以找出相应的分析方法。通过运用地质调查所获取的地质信息建立地质体的三维结构,采用系统控制与决策理论对工程岩体的整体稳定性和局部稳定性进行分析与评价确定工程中的重点不稳定部位,就可以根据不稳定区的工程地质条件和可能失稳模式提出处理与治理方案。

地质结构面是地质发展历史时期在地质体中形成的具有一定产状、一定规模、一定几何形态和工程特性的地质分界面。这些地质分界面,包括无任何充填的岩块间的刚性接触面,如劈理面、节理面、层面、片理面等;也可以是具有充填物的裂隙面或明显存在上、下两个层面的软弱夹层以及具有一定厚度(宽度)的构造破碎带。地质结构面是控制地质体不连续性、不均匀性和各向异性的重要组分,也是控制地质体稳定性的重要因素。对地质结构面的研究,应考虑不同的尺度效应。如对于统计尺度的Ⅳ级、Ⅴ级结构面,因其发育的广泛性、分布的无确定性,很难用定量的方法局条进行描述与模拟,因此只能依赖于概率论与数理统计等统计理论与方法来研究。

尺度是一个相对的度量概念,具有时间与空间两重性质。在现代工程建设中,时间尺度通常是指工程稳定性的相对时期,包括短期、中期及长期三种尺度,如在描述断裂活动性时就需要有时间上的尺度,在描述滑坡体滑动时间时需要有时间

尺度。空间尺度是指三维空间中的规模,与人们所研究的对象有关,通常可以区分为区域尺度、工程尺度、统计尺度、标本尺度等。时间尺度可以同地质灾害的时间预报相联系,而空间尺度则与区域稳定性、工程范围内的建筑物稳定性相联系。

地质体的模拟,归结为地质结构面的模拟,要建立空间地质体的计算机模型,就需要对三维地质模型中的地表地形和地下地层、软弱夹层、断层及裂隙等地质界面的模拟。在自然界和工程实践中,许多现象和过程都具有多尺度特征或多尺度效应,同时,人们对现象或过程的观察及测量往往也是在不同尺度上进行的。因此,用多尺度系统理论来描述、分析这些现象或过程能够很好地表现这些现象或过程的本质特征,近年来它已成为许多学科领域研究的热点。由于不同的尺度对工程的影响程度不同,通常,对与工程稳定性有关的问题,影响其稳定性的是工程尺度范畴。

根据尺度在空间分布的相对大小(图 1.1.1),地质结构面的空间尺度可以划分为以下几类:

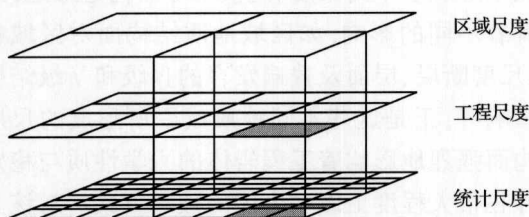


图 1.1.1 不同尺度的相关关系示意图

(1) 区域尺度

区域尺度一般是指延伸范围大,通常在数百平方千米以上,对区域稳定有影响的尺度。在工程选址阶段,地质工程师需要对区域稳定性进行研究,确定区域尺度内的稳定性,其中包含的地质不连续

面是指对区域地壳稳定性有影响的一级结构面,如区域断裂,延伸数千千米以上的结构面。区域尺度主要研究宏观地壳稳定性、水利水电工程中的库区稳定性、城市区域地面变形等。

(2) 工程尺度

工程尺度是指与工程建设规模相适应、对工程建设场地稳定性有关的区域,如水利水电工程中的坝址区与城市建设中的开发区场地等,范围通常在数平方千米以上。工程尺度是进行工程建设研究的主要对象,特别是水利水电建设中,主要研究工程尺度范围内建筑地基的稳定性,包含的地质不连续面是指在工程建设范围内,对工程稳定性有显著影响的结构面,一般延伸数百米,如通过建设场地的层面、断层等。在水利水电工程中,如对水工建筑物有影响的断层、层面、挤压破碎带等。

(3) 统计尺度

统计尺度的范围局限于数平方米以上,是指那些规模同工程建筑物的规模相比明显较小的区域,统计尺度结构面是指在工程实践中难以逐条分析的细小结构面,只能用统计的方法来研究其对工程稳定性的影响,或者仅对局部稳定性有影响的结构面,通常延伸数米,宽度数厘米的结构面。统计尺度结构面主要影响岩石开

挖工程的局部稳定性与岩石物理力学性质。

(4) 标本尺度

标本尺度是指与实验室取样标本相当的尺度,在地质工程中指的是岩块尺度。该类尺度通常是用于研究岩石的物理力学性质,而难以直接涉及岩体的稳定性。所包含的地质结构面是那些只有在实验室标本中出现的结构面,即通常延伸数厘米的结构面,这一类结构面仅对岩块的力学性质有一定的影响,但不直接构成岩块的稳定性。一般工程中很少考虑该类结构面对工程稳定性的影响。

1.2 多尺度地质结构三维计算机仿真的背景

在地质工程中,一直困扰着地质工程师的问题之一是地质结构的三维可视化。传统的工程地质资料的分析和解释一般局限于二维、静态的表达方式,它只能简单描述固有空间地质结构的起伏与变化,使人们难以直接、完整、准确地理解地下的地质构造情况,不能满足工程设计人员对空间分析的需求,而地质现象的三维复杂多变性更是阻碍地质体可视化的重要因素之一。因此,自20世纪80年代以来,不少学者在地质工程领域开始探索三维计算机建模工作,主要的目的是通过对大量地质信息进行处理、评价,从而预测矿产资源及场地工程地质问题(文成林和周东华,2002)。经过20余年的发展,目前在地质行业已广泛应用计算机仿真技术解决重大的工程地质问题。与传统集多位地质专家经验的评估方法相比,计算机三维建模可以直观地再现场地工程的地质条件,运用其一定的算法,实现评价潜在的工程地质问题,大大提高了地质工作人员的工作效率。

在地质体中,赋存着层面、断层、节理等结构面。工程勘探是获取地下三维空间地质信息的重要方法,但由于时间与经济原因,地质勘探和实验分析得到的是一系列空间分布不均的点式离散数据,工程技术人员不能很方便地了解它们。因此,如何用地质勘探和实验分析得到的一系列空间分布不均的离散数据来描述地质构造的空间展布情况,再把这种空间描述变成计算机所能显示的三维图形,并在此基础上实现人机可视化的交互分析与操作等问题,就构成了当前地质学研究的重要课题。由于地质工作者、工程勘察设计人员、城市规划人员等都迫切需要更加精确地了解地下各地质实体,从而需要创建三维图形,用更接近实际的方式去描述它,从各个不同角度观察它,三维可视化就是实现以上目标的有效手段。三维可视化技术不仅可以直观描述地下复杂的地质构造情况,形象地表达地质构造的形态特征,逼真地显示各构造要素的空间关系,最大限度地增强地质分析的直观性和准确性,而且结合三维模型的空间分析功能,为快速、适时地再现工程地质三维信息及其可视化综合分析开拓了一条有效的途径(王明华和白云,2006)。

随着计算机图形技术和地学研究的不断发展,空间地质信息的三维建模及可

视化分析是计算机在工程地质领域应用的一个必然趋势。工程地质信息的三维可视化就是以适当的数据结构建立地质特征的数学模型,并采用计算机图形学技术将数学描述以 3D 真实感图像的形式予以表现(芮小平等,2004;曹代勇等,2001;程朋根等,2004)。多年来,地质学家一直在关注地质体三维可视化建模技术的研究进展(Jessell,2001)。国际勘探地球物理学家协会和欧洲勘探地球物理学家协会于 1992 年成立了 SEG/EAGE 3D 建模委员会,并开展了 3D 建模工程(SEM)(Ehlen et al.,2001)。在 1996~1999 年间分别在英国 Leeds、新西兰 Otago、英国 Bristol、美国 Fredericksburg 举行了 4 次地质计算机会议(Marschallinger et al.,2001)。1997 年,在巴塞罗那召开的国际数学地质会议上,Graeme、Bonham、Carter 等强调了地质材料 3D 重建、建模及可视化的重要性(郑贵洲和申永利,2004)。

1.3 多尺度地质结构建模技术现状

1.3.1 三维地质模型建模技术的研究现状

科学可视化是 20 世纪 80 年代后期随着计算机图形学应用的拓广而发展起来的一个新的研究分支,受其推动,工程地质信息的三维可视化成为 20 世纪 90 年代地学领域的研究前缘。近年来,国内外学者吸收科学可视化、计算机图形图像学中的可视化理论与技术在三维地质建模理论与方法方面进行了许多有益的探索(Simon,1993);同时,吸收 3D GIS 的空间拓扑关系表达与描述方面的成果在地质体对象的空间拓扑关系表达与组织方面进行了有益的尝试(曾钱帮等,2005)。

地质结构的三维可视化技术包括空间数学建模和可视化显示两个方面。现已有 20 多种空间建模理论,这些理论可分为表面模型、实体模型和混合模型(齐安文等,2002;吴立新和沙从术,2003)。表面模型的构模方法侧重于 3D 空间实体的表面表示,如地形表面风化界面、地下水位面等。基于采样点的 TIN 模型和基于数据内插的 Grid 模型通常用于非封闭表面模拟,而 B_Rep(边界表示法)模型(Lirx,1994)和 Wire Frame 模型通常用于封闭表面或外部轮廓模拟,Section-TIN 混合模型及多层 DEM 模型通常用于地质建模(贺怀建等,2002;Samet,1989)。实体建模法则是用三维实体来构造三维地质体,即应用三维单元实体(如四面体或六面体等)来组装整个三维地质体。此外,人们还提出了混合模型,其目的是综合表面模型和实体模型的优点,取长补短,但程序实现困难,仍是一个有待完善的模型。

在三维地质信息可视化显示方面,除了采用面向对象的方法进行图形显示系统分析设计外,还可以直接使用商品化高品质的 3D 图形 API 予以实现。目前见到的大多数建模实例都是用 OpenGL 从底层开发做起(曹代勇和王占刚,2004;程