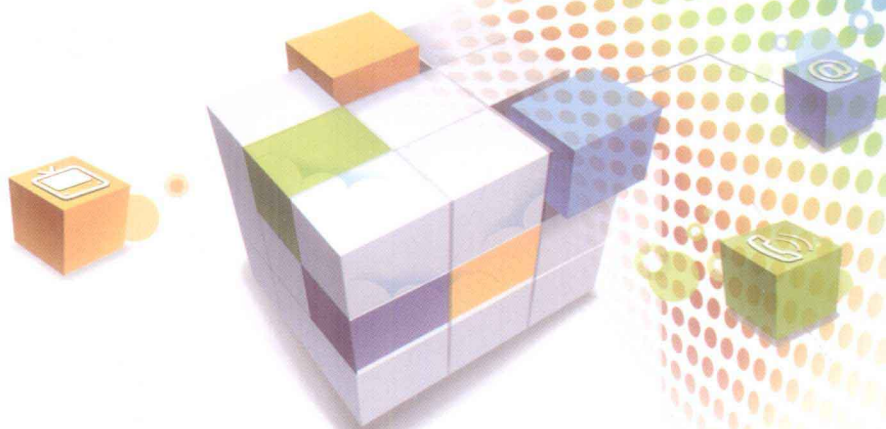




岩土应力变形分析软件



SIGMA / W

用户指南

GEO-SLOPE International Ltd. 著
中仿科技 (CnTech) 公司 译



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

岩土应力变形分析软件 SIGMA/W 用户指南

GEO-SLOPE International Ltd. 著
中仿科技 (CnTech) 公司 译

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2011

北京市版权局著作权合同登记号 图字：01-2011-5084 号

Copyright © 2010 by GEO-SLOPE International Ltd.

Thanks to CnTech Co., Ltd. for the translation of the Engineering Books into the Chinese version.

内 容 提 要

本书从岩土应力有限元的基本原理和模拟思路、几何与模型、材料模型与性质、边界条件、孔压-应力耦合分析、结构单元、分步施工等方面进行阐述，系统、详细地介绍了 SIGMA/W 软件分析应力变形的分析方法、基本原理及分析设定，为读者正确使用 SIGMA/W 软件进行岩土体应力变形分析提供参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

岩土应力变形分析软件 SIGMA/W 用户指南 / 加拿大 GEO-SLOPE 国际有限公司著；中仿科技 (CnTech) 公司译. —北京：冶金工业出版社，2011. 8

书名原文：Stress-Deformation Modeling with SIGMA/W2007, Fourth Edition

ISBN 978-7-5024-5694-8

I. ①岩… II. ①加… ②中… III. ①岩土力学—应力分析—应用软件，SIGMA/W—指南 IV. ①TU431-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 180412 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号，邮编 100009

电 话 (010) 64027926 电子信箱 yjchs@cnmip.com.cn

责任编辑 杨 敏 美术编辑 李 新 版式设计 孙跃红

责任校对 卿文春 责任印制 张祺鑫

ISBN 978-7-5024-5694-8

北京兴华印刷厂印刷；冶金工业出版社发行；各地新华书店经销

2011 年 8 月第 1 版，2011 年 8 月第 1 次印刷

787mm × 1092mm 1/16；11 印张；260 千字；163 页

35.00 元

冶金工业出版社发行部 电话：(010)64044283 传真：(010)64027893

冶金书店 地址：北京东四西大街 46 号 (100010) 电话：(010)65289081 (兼传真)

(本书如有印装质量问题，本社发行部负责退换)

• 前 言 •

GeoStudio (包括 SLOPE/W、SEEP/W、SIGMA/W、QUAKE/W、TEMP/W、CTAN/W、AIR/W、VADOSE/W) 是一套专业、高效而且功能强大的适用于岩土工程和岩土环境模拟计算的仿真分析、设计软件。

GeoStudio 软件为国际岩土界享有盛名的 Fredlund 教授从 20 世纪 70 年代开始研发, 经过 40 多年的发展, 它已经成为世界级的边坡稳定性分析和非饱和土渗流、地震动力响应方面的专业软件。作为优秀的岩土工程设计分析软件, GeoStudio 目前已经为上百万科学研究人员、工程技术人员、教育工作者以及学生提供了无与伦比的帮助。

SIGMA/W 是 GeoStudio 系列软件中非常重要的一个软件, 是岩土工程应力变形分析的专业有限元分析软件。本书从岩土应力有限元的基本原理和模拟思路、几何与模型、材料模型与性质、边界条件、孔压-应力耦合分析、结构单元、分步施工等方面进行阐述, 系统、详细地介绍了 SIGMA/W 软件分析应力变形的分析方法、基本原理及分析设定, 为读者正确使用 SIGMA/W 软件进行岩土体应力变形分析提供参考。

本书由中仿科技 (CnTech) 公司负责组织翻译。中仿科技 (CnTech) 公司的何燕云高级工程师负责统稿, 王刚博士、鲍伟高级工程师及王慧工程师也参与了书稿的校对及部分统稿工作。在翻译过程中, 得到了中仿科技 (CnTech) 公司各部门同事的积极支持和协助, 在此对大家的辛苦工作表示衷心的感谢。

特别感谢中科院武汉岩土所计算岩石力学课题组的尹小涛博士、李春光博士、吴振君博士、邓琴博士等人在书稿翻译、校对方面给予的大力支持。

由于译者水平有限, 书中不足之处在所难免。如有翻译错误和不当之处, 恳请各位读者随时联系我们: info@cntech.com.cn, 公司网址: www.CnTech.com.cn。

中仿科技 (CnTech) 公司

2011 年 6 月

• 目 录 •

1 绪论	1
1.1 应用	1
2 数值模型	5
2.1 概述	5
2.2 数值模型是什么	5
2.3 岩土工程建模	7
2.4 为什么建模	8
2.5 如何建模	13
2.6 不要这样建模	19
2.7 结束语	20
3 SIGMA/W 基本原理和模拟思路	21
3.1 概述	21
3.2 密度和容重	22
3.3 击实和密度	22
3.4 塑性	23
3.5 体积改变	24
3.6 强度参数	27
3.7 总应力、有效应力和孔隙水压力	30
3.8 增量形式	30
3.9 体积力——单位重量	31
3.10 适用性和稳定性	31
3.11 模拟思路	31
3.12 单位	32
4 几何与模型	33
4.1 概述	33
4.2 GeoStudio 中的几何对象	34
4.3 网格生成	38
4.4 表层	41
4.5 连接区域	43
4.6 瞬态分析的网格	44

4.7	有限单元	44
4.8	单元基本原理	45
4.9	无限区域	49
4.10	网格离散的通用准则	50
5	材料模型与性质	54
5.1	本构模型概述	54
5.2	线弹性模型	55
5.3	各向异性弹性模型	56
5.4	非线性弹性双曲线模型	58
5.5	弹塑性模型	60
5.6	剑桥模型	63
5.7	修正剑桥模型	70
5.8	关于剑桥模型的说明	71
5.9	接触面	71
5.10	用户自定义本构模型	72
5.11	E 模量函数	74
5.12	不排水强度函数	75
6	边界条件	76
6.1	多种类型边界条件	76
6.2	力或位移	76
6.3	体荷载	77
6.4	边界条件位置	77
6.5	节点边界条件	78
6.6	边的边界条件 (压力或应力)	79
6.7	瞬态边界条件	82
7	不同分析类型	84
7.1	研究问题的视图	84
7.2	原位初始应力	84
7.3	指定初始条件	88
7.4	荷载/变形分析	89
7.5	动力变形分析	89
7.6	应力重分布	89
7.7	分步/多步分析	92
8	孔压-应力耦合分析	93
8.1	土结构的本构方程	93

8.2	渗流方程	94
8.3	耦合分析的有限元公式	95
8.4	计算的材料参数	97
8.5	孔压响应比	98
8.6	耦合分析的数据	98
8.7	只在饱和区的耦合分析	98
8.8	非耦合分析	99
8.9	时间步序列	100
8.10	渗透系数的变化	100
8.11	水下沉积	101
8.12	验证	101
8.13	耦合分析例子	101
9	GeoStudio 中的函数	102
9.1	样条函数	102
9.2	线性函数	103
9.3	分段函数	103
9.4	含水量函数的已知曲线拟合	104
9.5	自定义函数	104
9.6	空间函数	106
10	结构单元	107
10.1	概述	107
10.2	梁单元	107
10.3	梁实例	109
10.4	杆单元	109
10.5	杆实例	111
11	分步施工序列	112
11.1	基本概念	112
11.2	填筑示例	112
11.3	开挖示例	114
11.4	有支撑的开挖	115
11.5	结束语	115
12	数值问题	116
12.1	非线性分析	116
12.2	收敛	117
12.3	极限荷载-使用增量加载	119

12.4	张拉区	119
12.5	方程求解器	120
13	结果可视化	121
13.1	概述	121
13.2	荷载步	121
13.3	可用于云图表示的数据类型	121
13.4	节点与单元信息	123
13.5	节点与高斯点数据绘图	123
13.6	“无”值	126
13.7	等值线	126
13.8	莫尔圆	126
13.9	动画	127
13.10	位移查看	127
13.11	映射高斯点至节点	128
13.12	云图数据	128
14	案例说明	130
14.1	SIGMA 教程	130
14.2	梁的案例	130
14.3	桁架	131
14.4	斜梁上的法向应力	131
14.5	梁与桁架验证	131
14.6	圆形基础	131
14.7	条形基础	133
14.8	双曲线本构模型三轴试验	133
14.9	弹塑性三轴试验	134
14.10	修正的剑桥模型	134
14.11	双曲线基础	135
14.12	弹塑性基础	135
14.13	接触面分析	135
14.14	桩拔出试验	136
14.15	一维固结	136
14.16	Cryers Ball	138
14.17	饱和-非饱和土柱试验	138
14.18	由地面入渗引起的土体膨胀	138
14.19	坝体堆筑模拟	139
14.20	土工织物加固的堤坝堆筑	140
14.21	水下开挖	141

14.22	连续的尾渣沉积	141
14.23	尾渣沉积与开挖	141
14.24	抽水沉降	142
14.25	软土地基耦合固结	143
14.26	强度折减法边坡稳定性	143
14.27	有支护的开挖	144
14.28	锚杆/板桩墙开挖支护	145
14.29	带有界面单元的板桩墙	145
14.30	排水板	146
14.31	地下管道的应力	147
14.32	Von Mises 外接模型	147
14.33	柏林基坑分析	147
14.34	Waba 大坝地震变形	148
14.35	永久冻土融化与变形的的外接模型	149
15	理论	150
15.1	概述	150
15.2	有限元方程	150
15.3	数值积分	154
15.4	组装和整体方程的求解	156
15.5	单元应力	156
16	附录：插值函数	157
16.1	坐标系统	157
参考文献		162

1 绪 论

SIGMA/W 是一款用来进行土结构应力和变形分析的有限元软件。它可以分析简单和高度复杂的问题。例如，SIGMA/W 可以分析简单的线弹性变形问题或高度复杂的非线性弹塑性有效应力问题。当与其他 GEO-SLOPE 软件产品耦合使用时，使用完全耦合或间接耦合的方法，也可以模拟土结构响应外部加载的孔隙水压力的产生和消散。SIGMA/W 可应用于岩土、土木和采矿工程的分析 and 设计。

1.1 应用

SIGMA/W 能用来进行有孔压改变或无孔压改变的应力和变形分析，可以使用梁或者杆来模拟土和结构的相互作用。下面是可以使用 SIGMA/W 分析的典型情况。

1.1.1 变形分析

SIGMA/W 经常被用于计算诸如基础、堤防、开挖和隧道土工作业导致的变形。图 1-1 是关于地基上建储油罐的典型示例，图片用放大比例尺的手法表现了网格变形的情况。图 1-2 展示了施加荷载导致的地下垂直应力分布。

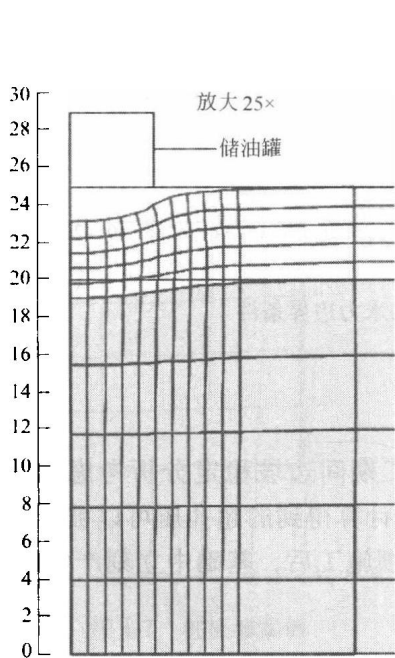


图 1-1 储油罐作用下的地基变形

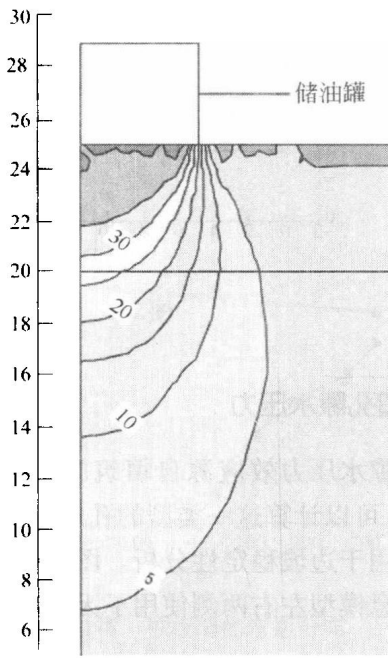


图 1-2 储油罐作用下的垂直应力分布

1.1.2 分阶段施工

在一个文件中，土区域可以是激活或者非激活状态，使得软件可以进行随时间推进的工况模拟。GeoStudio 2007 新思想是在一个项目文件中可以包含多个分析。按时间顺序可以自动将这些分析联系在一起，来模拟施工顺序。同样对于边界条件，也可以随工况推移进行新增或者移除。图 1-3 和图 1-4 展示的是关于开挖和降低渗流面位置的模拟。图 1-5 则展示了隧道开挖后，各向同性线弹性材料的变形情况。

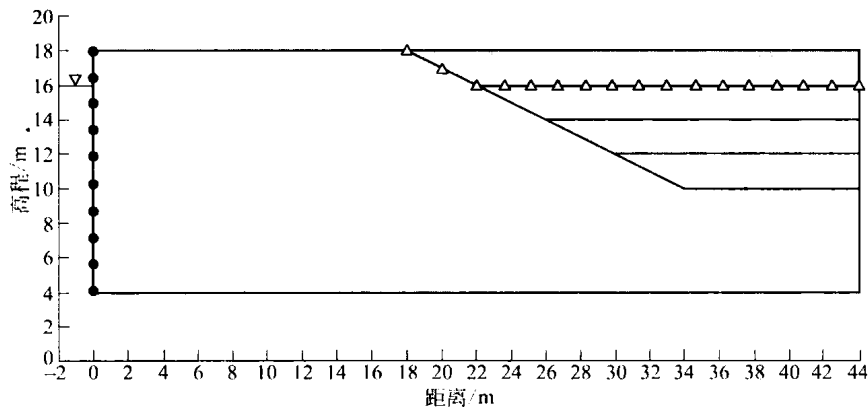


图 1-3 第一步开挖和降低的水力边界条件

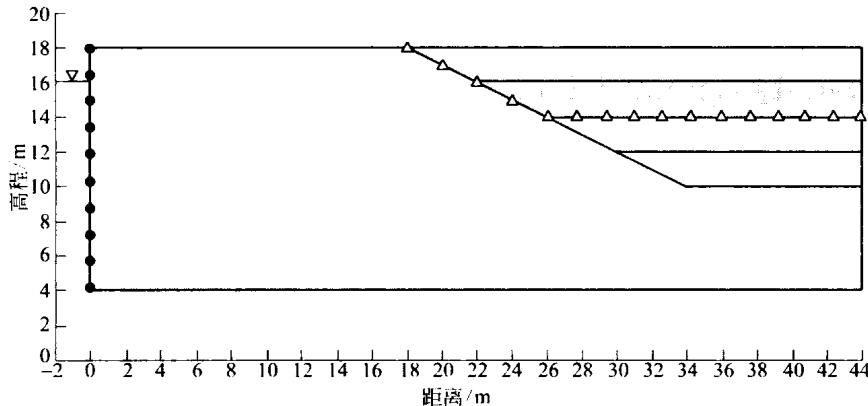


图 1-4 第二步开挖和降低的水力边界条件

1.1.3 超孔隙水压力

超孔隙水压力效应源自填筑施工，通常是施工期间边坡稳定分析考虑的主要因素。SIGMA/W 可以计算这一类型的孔压。用 SIGMA/W 计算得到的超孔压可以被 SLOPE/W 分析调用，用于边坡稳定性分析。图 1-6 展示了在堤坝施工后，基础中立刻产生的超孔隙水压力，注意模型左右两侧使用了无限单元模拟。

1.1.4 土和结构的相互作用

SIGMA/W 在二维平面应变问题中包含了结构单元来考虑土和结构的相互作用。这些

结构单元是有抗弯刚度的梁单元或有轴向刚度无抗弯刚度的杆单元。当分析诸如桩板墙等这一类型单元时相当有用。图 1-7 是关于桩板墙支护基坑的变形情况，图 1-8 展示了相应的桩板墙的弯矩分布。

1.1.5 固结分析

SIGMA/W 可以与 SEEP/W 一起使用，模拟完全耦合固结分析。当两者同时运行时，SIGMA/W 计算由于孔压变化导致的变形，而 SEEP/W 计算瞬态孔压变化，为其提供分析的基础数据。这个过程用于模拟饱和或非饱和土的固结过程。

一个完全耦合分析要求正确模拟作用荷载造成的

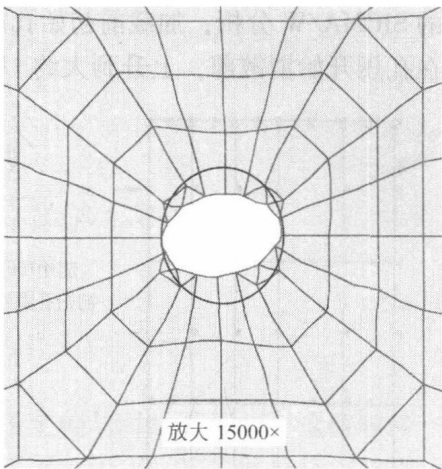


图 1-5 沿隧道的回弹变形

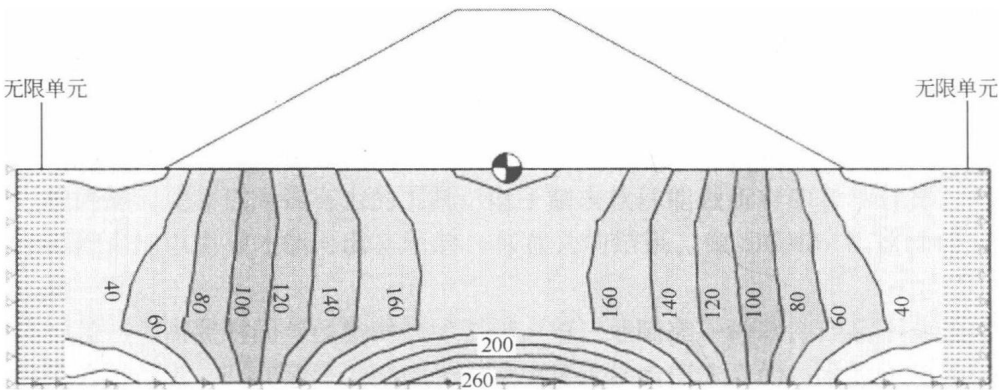


图 1-6 填筑导致的超孔隙水压力

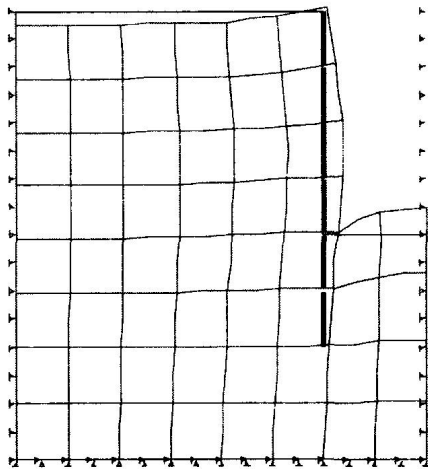


图 1-7 桩板墙案例

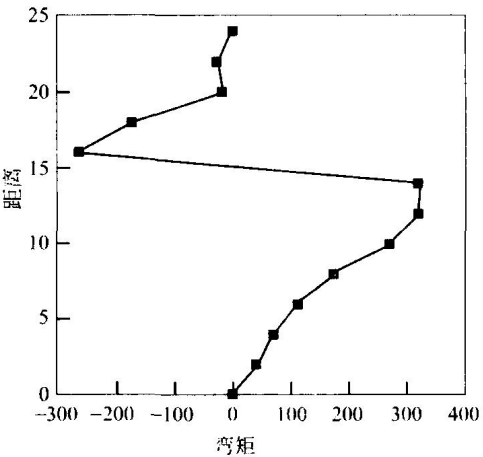


图 1-8 桩板墙的弯矩分布

孔压响应。在一些案例中，施加荷载作用下的孔压增加可能大于施加荷载，这个现象就是众所周知的 Mendel-Cryer 效应。图 1-9 展示了一个侧向荷载 100kPa 作用下的饱和三轴试样

的 SIGMA/W 分析, 加载前初始孔压是 0; 图 1-10 展示了试样中心位置孔压随时间的响应, 在孔压开始消散前, 上升到大约 110kPa (110% 的作用荷载)。

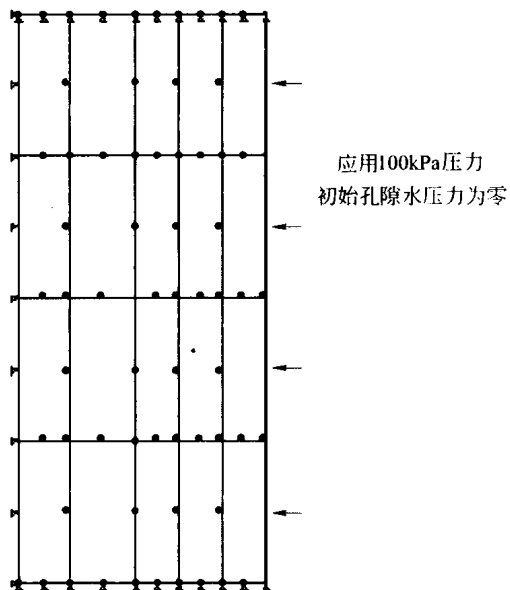


图 1-9 侧向荷载作用下的三轴试样

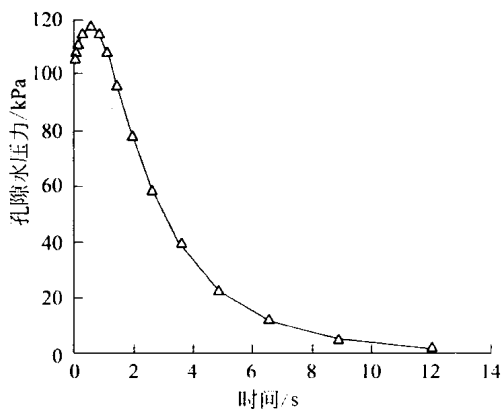


图 1-10 孔压随时间的变化

2 数值模型

2.1 概述

现在,前所未有的计算能力导致先进的软件产品可用于工程与科学分析中,这些软件产品的实用性和易操作性将有限元分析这样强大的技术应用于工程实际。这些分析方法现在已经从研究工具变成了实用工具,并由此开创了数值模拟的新纪元。

像 SIGMA/W 这样的软件工具并不会自行得出好的结果。而软件本身只是一个功能强大的计算器,只有在用户的引导下才能从这些工具中获得有用和有意义的结果。用户对输入数据的理解和他们对于结果的解读能力才能使得这一工具变得强大。总之,不是软件建模,而是用户在建模。软件只是提供了人力所不能及的,可以进行极复杂计算的能力。同样,现代电子制表软件程序也同样很强大,但是从中获取有用的结果就取决于用户。用户引导分析过程的能力使其成为强有力的工具。电子制表软件能做所有的数学计算,但只有用户对其计算能力加以引导才能得出有用的、有意义的结果。像 SIGMA/W 这样的有限元分析软件也是一样。

数值建模是一个需要时间与经验的技术工作,单一地瞄准一种软件产品不会让你马上成为一个熟练的建模者。时间和练习有助于用户理解软件内部涉及的技术和学习如何解读计算结果。

数值模拟在岩土工程中还是个相对比较新的实践领域,因此,关于数值模拟是什么,数值模拟如何进行和期望从中得到什么,一般人会对此缺乏理解。对这些基本问题的一个很好的理解是建立有效模拟的基础。像“分析的主要目标是什么”,“什么是需要解决的主要工程问题”,以及“什么是预期的结果”等这类基本问题,需要在开始用软件之前就先思考一下。应用软件只是建模练习的一部分,与之相关的脑力分析与在软件里点击按钮一样的重要。

本章讨论数值模拟“是什么”,“为什么”,“怎么做”,并且给出应用于实践的要点指导。现在需要注意的是,本章中给出关于应力变形分析的一些例子,而其他的则是渗流分析类型的例子。尽管这些实际分析的类型可能会不同,但说明的概念适用于所有的工程分析。

2.2 数值模型是什么

数值模型是对实际物理过程的数值模拟。SIGMA/W 是一个能对自身荷载或外部荷载的作用下引起地下岩土体体积变化这一实际物理过程进行数值模拟的数值模型。数值模拟是纯数学的方法,在这个意义上讲,它与实验室里的比例物理模拟或现场等比例模拟很不同。

Rulon (1985) 建立了一个内嵌不透水层和顶部洒水模拟淋滤和降水的土体边坡的比例模型。在多处点上通过边墙将仪器插入土中来量测孔隙水压力。试验的结果如图 2-1 所示。用 SEEP/W 模拟 Rulon 的实验室试验给出的结果如图 2-2 所示, 这个结果与原始实验室量测结果基本相同。等势线的位置稍有不同, 但水位位置是一样的。在这两个例子中, 边坡上有两个渗出区域, 这是这个案例的主要也是关键的观察现象。

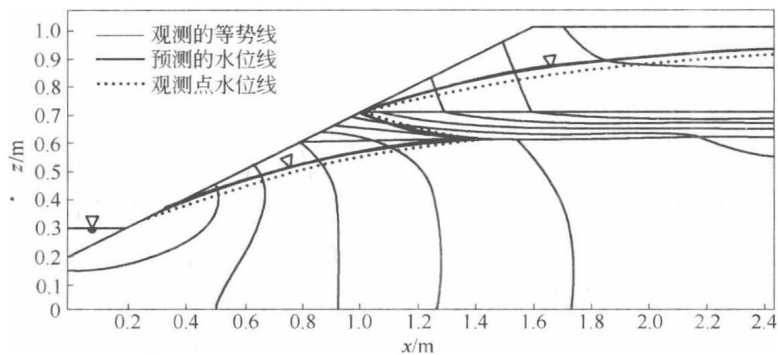


图 2-1 Rulon 的实验室比例模型结果

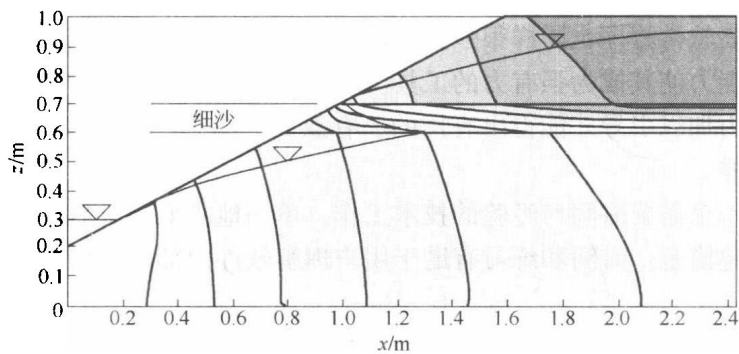


图 2-2 Rulon 试验的 SEEP/W 分析结果

数学可以用于实际物理过程的模拟是宇宙中的伟大奇迹之一。也许是物理过程遵循数学规律, 或者数学已经演变成描述物理过程的工具。很明显, 我们不知道何者第一位, 这也不是真正重要的。不管两者关系如何发展, 我们能够应用数学来模拟物理过程的事实导致对物理过程更深入的理解, 甚至能让我们理解或发现以前未知的物理过程。

数值模拟与物理模型试验相比有很多的优点, 下面是一些明显的特点:

- 相对于物理模型, 数值模型可以很快建立。物理模型的建立要花费几个月的时间, 而数值模型的建立只需要几分钟、几个小时或几天。
- 物理模型经常局限于很小范围的研究。数值模型可以用来调查研究很广泛的不同情况。
- 数值模拟可以设置不同的重力值。受制于实验室条件, 重力不能被按比例调整, 克服这一困难需要使用离心机。
- 数值模拟对人体不会产生伤害, 物理模拟有时会用到笨重的仪器, 试验人员的安全因此也需要关注。

- 数值模拟能够提供断面内任何位置的信息与试验结果。物理模拟只能提供外部可见区域的结果和离散的仪器监测点的数据。
- 数值模拟能够设定大范围的多种类型边界条件，而物理模拟经常只能设定几种有限的边界条件。

认为数值模型没有限制的想法是错误的。伴随着渗流的地方可能还有温度变化、体积变化和化学变化。在同一模型中包括这些所有的变化过程是不可能的，数值的简单引入可能使问题变得十分复杂。另外，由于其复杂性，用数学方法描述一个本构关系是不可能的。这些难题中的一些在计算机运行处理能力更强大、更快速的时候能够克服和将被克服。

了解像 SIGMA/W 这样的数值模拟软件的局限性很重要，这些局限性与当前计算机的硬件与软件的整合能力有关，因为这些硬件与软件都是为特定的条件而开发的。SIGMA/W 只是编制了用来解决小变形问题的，并且不适用于破坏后的变形（峰后阶段）。在很多情况下，模型中用到的本构方程没有定义破坏后的应力条件，所以想通过调查那些状态来开始一个分析是没有意义的。需要记住的关键点是，在 SIGMA/W 中用到的数值模型是模拟现实物理过程的一个强大的、多样的途径。

“数值模型是现实世界中的物体或系统的数学抽象。它是一种尝试，帮助我们理解这一过程（概念模型）并将其翻译成数学表达。” 国际研究协会报道（1990）。

2.3 岩土工程建模

John Burland 教授（伦敦皇家学院，英国）曾对岩土工程分析及数值建模的任务和重要性做过生动的解释，这就是 Burland 教授 1987 年所做的世界闻名的 Nash 演讲。这个演讲的题目是：土力学教学——个人观点。在这个演讲中，他倡导岩土工程包括三个基本要素：地层剖面、土的力学行为与模拟。他将这三个要素比喻成三角形的三个顶点，如图 2-3 所示，这就是业界周知的 Burland 三角（Burland, 1987; Burland, 1996）。

土的行为要素包括室内试验、原位测试和现场量测。地层剖面要素基本上涉及了现场特性：定义与描述现场条件。模拟可能是概念上的、分析的与物理化。

Burland 的观点认为很重要的是，这三个要素需要用经验与实例联系在一起，这是三角形内部的部分。

自从第一次被提出，Burland 三角的观点就被广泛地讨论并被大家提及。关于这个话题的一篇论文在《地面工程》（Ground Engineering）中发表（Anon, 1999）。2000 年在澳大利亚墨尔本召开的岩土工程学会上，Morgenstern 所做的“共同的地面”的主题报告用一定篇幅对其作了讨论。所有这些讨论，某种程度上使得“三角形”的知名度被提高和拓宽，如图 2-4 所示。

在新加的特征中，一个很重要的特点是在各要素之间考虑了所有的双向联系箭头。这

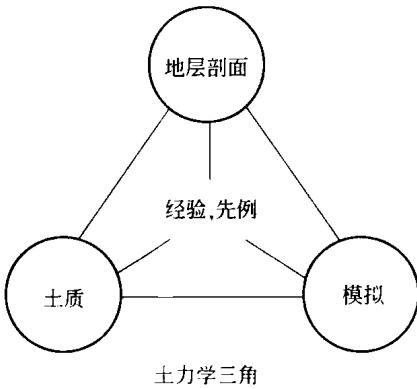


图 2-3 Burland 三角

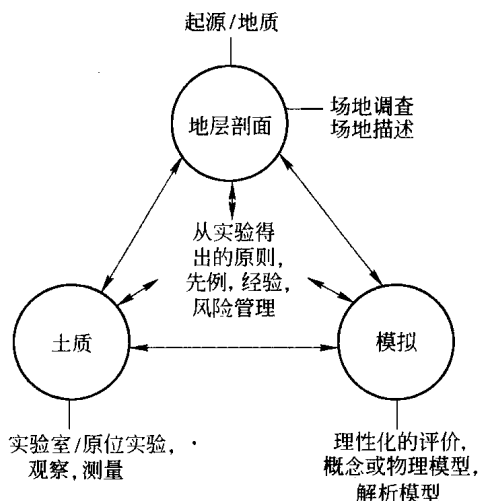


图 2-4 改进的 Burland 三角

个简单的增加，强调了各个部分是单独的，又与其他部分是相关的。

Burland 三角生动地说明了岩土工程中模拟的重要性，现场条件特征化和对其行为进行量测都做得不够充分。最终，有必要对现场信息与土的性质进行一些分析以完善“三角形”。

正如 Burland 指出的，模型可以概化、分析与物化。然而，通过现今可用的计算力量与软件工具，模拟通常被特指为数值模拟。Burland 三角体现了数值模拟在岩土工程中的重要性。

对现场条件进行量测与特性化经常要花费很多时间和金钱。如果做得正确，模拟也就是真实的。一个公认的假设是数值模拟要素只是在项目最后实施的一个小部分，而且可以被简单快速地完成。这样的观点是错误的。一个好的数值模拟，正如我们在下面的部分要看到的，需要时间并且要求仔细的计划，同样也需要花时间和计划收集现场量测结果与正确地抽象现场条件。

考虑到模拟的重要性，Burland 三角建议对于岩土工程，做模拟时要谨慎小心，并且要完全理解模拟过程，这一点对数值模拟尤其重要。本书的目的就是在岩土工程这方面提供帮助。

2.4 为什么建模

为什么进行数值模拟？对这个问题的第一反应似乎是显而易见的，目的是分析问题。更多地想一想，答案变得更复杂了。没有对模拟的原因有一个清晰的理解，或弄清楚模拟的目的是什么，数值模拟将会是一次挫败的经历和不确定的结果。正如在下面章节中将看到的，建立模型，计算求解，然后再来确定解的意义，这样的思想是错误的。在做模拟的开始就一定要弄清模拟的理由是很重要的：主要目的是什么，需要解决什么问题？

从一个更高更广阔的视角看，以下几点通常是模拟的主要因素：

- 做定量预测；
- 比较方案；
- 确定控制参数；
- 理解过程和训练思维。

2.4.1 定量预测

当被问及为什么模拟的时候，多数工程师会说想要作一个预测。例如他们想要预测基底变形，预测污染物从源头到排出处的渗流时间，或者水库首次注水直到堤坝中渗透稳定的时间。目的是了解研究对象未来行为和表现。

作定量预测是模拟的一个正当理由。不幸的是，由于定量值经常直接与材料性质有关，这也是模拟中最难的部分。例如，基础底部变形范围很大程度上受土体刚度的控制，而刚度是受侧向约束应力控制的。当我们真的获取了基础底部精确的应力分布的时候，就