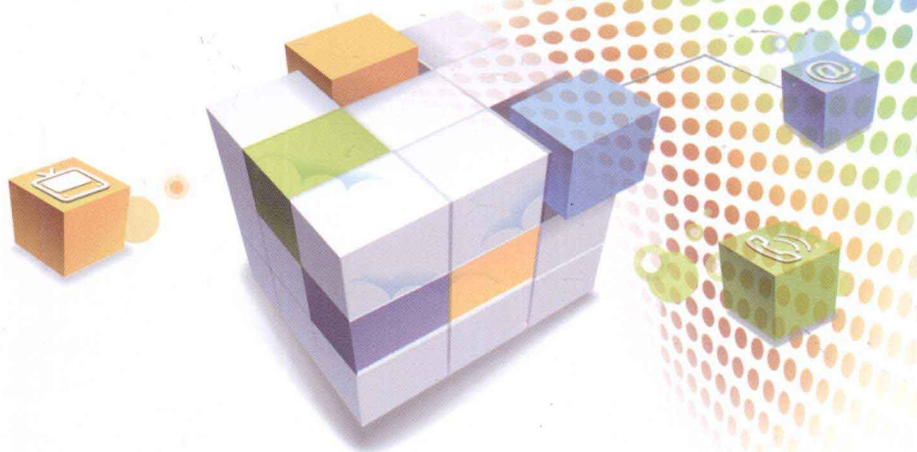




非饱和土体渗流分析软件



SEEP / 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

非饱和土体渗流分析软件 SEEP/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：01-2011-5083 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

本书是关于如何运用 SEEP/W 分析软件进行高效的岩土渗流分析的用户指南，内容包括与渗流数值分析相关的所有要素的理论讲解和说明，对什么是数值模型、为什么要进行数值模拟、怎样进行数值模拟，以及几何模型和网格、材料参数、边界条件、分析类型、函数、数值问题、结果解译等进行了详尽的说明，并给出了大量参考案例，对软件计算原理进行验证，以及提示用户如何模拟特定类型的问题。

图书在版编目 (CIP) 数据

非饱和土体渗流分析软件 SEEP/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：Seepage Modeling with SEEP/W 2007, Fourth Edition
ISBN 978-7-5024-5693-1

I. ①非… II. ①加… ②中… III. ①土渗透性—饱和渗流—数值模拟—应用软件，SEEP/W—指南 IV. ①TU411.4-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 180419 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 俞跃春 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 978-7-5024-5693-1

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；10.5 印张；253 千字；159 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、CTTRAN/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。

SEEP/W 是 GeoStudio 系列软件中非常重要的一个软件, 是非饱和土渗流方面的专业分析软件。土的渗透性是土力学的重要研究内容, SEEP/W 是基于有限元方法进行土体渗流分析的数值模拟软件, 广泛应用于岩土工程相关的渗流分析, 比如边坡、大坝、基坑、尾矿库等稳态或瞬态渗流。基于非饱和土力学的计算原理使得 SEEP/W 能够处理饱和和非饱和渗流。本书对应用 SEEP/W 程序进行渗流分析时, 影响计算结果的各分析要素进行了全面的说明, 帮助读者理解 SEEP/W 软件的计算原理和设定, 为读者正确使用 SEEP/W 软件进行渗流分析提供参考。

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, 如有翻译错误或不当之处, 恳请各位读者随时联系我们: info@cntech.com.cn, 公司网址: www.CnTech.com.cn。

• 目 录 •

1 绪论	1
2 数值模型：是什么，为什么，怎样做	3
2.1 概述	3
2.2 数值模型是什么	3
2.3 岩土工程建模	5
2.4 为什么建模	6
2.5 如何建模	11
2.6 不要这样建模	18
2.7 结束语	18
3 模型几何和网格	19
3.1 概述	19
3.2 GeoStudio 中的几何对象	20
3.3 网格生成	25
3.4 表层	27
3.5 连接区域	29
3.6 瞬态分析的网格	30
3.7 有限单元	31
3.8 单元基本原理	31
3.9 无限区域	35
3.10 网格离散的通用准则	36
4 材料模型和性质	40
4.1 土的渗流特性模型	40
4.2 土的储水-含水量函数	41
4.3 储水函数类型和估算方法	42
4.4 土渗透函数的测量	46
4.5 体积压缩系数 (m_v)	47
4.6 渗透系数	47
4.7 冻结区 (frozen ground) 渗透系数	49
4.8 渗透系数函数估计方法	51
4.9 界面模型参数	53

4.10	储水系数和导水系数	54
4.11	结果对材料性质的敏感性探讨	54
5	边界条件	62
5.1	概述	62
5.2	基本理论	62
5.3	边界条件位置	64
5.4	区域面边界条件	64
5.5	水头边界条件	65
5.6	给定边界流量	69
5.7	渗流面	71
5.8	自由排水（单位梯度）	73
5.9	地表面的入渗和蒸发	74
5.10	远场边界条件	75
5.11	边界函数	76
6	分析类型	82
6.1	稳态分析	82
6.2	瞬态分析	83
6.3	时步-与时步有关的积分	85
6.4	分步/多步分析	87
6.5	轴对称	89
6.6	平面视（只适合承压含水层）	89
7	GeoStudio 中的函数	91
7.1	样条函数	91
7.2	线性函数	92
7.3	分段函数	92
7.4	含水量函数的已知曲线拟合	93
7.5	自定义函数	93
7.6	空间函数	94
8	数值问题	96
8.1	收敛	96
8.2	瞬态分析的水平衡误差	99
8.3	材料特性函数的坡度	100
8.4	改善收敛	101
8.5	高斯积分阶次	102
8.6	方程求解（直接或并行）	102

8.7 时间步	103
9 流网、渗透力和溢出坡降	105
9.1 流网	105
9.2 渗透力	110
9.3 溢出水力梯度	110
9.4 结束语	114
10 可视化结果	116
10.1 瞬态与稳态结果	116
10.2 节点与单元信息	116
10.3 节点与高斯点数据绘图	118
10.4 “无”值	119
10.5 潜水面	119
10.6 等值线	120
10.7 高斯点值投影到节点	120
10.8 等高线	121
10.9 GeoStudio 2007 动画输出	121
10.10 速度矢量与流线	121
10.11 截面流量	123
11 模型的提示与技巧	126
11.1 概述	126
11.2 单位	126
11.3 流量监测截面的位置	127
11.4 疏干流量的值	127
11.5 单位流量与总流量	127
11.6 浸润线以上的流量	128
11.7 随深度变化的压力边界	129
11.8 图表数据求和	129
12 案例说明	132
12.1 具有坝址排水层的各向同性大坝	132
12.2 在隔水墙下的稳态流量	133
12.3 各向异性隔水墙下的稳态流量	133
12.4 心墙坝渗流分析	133
12.5 SEEP/W 中的分析结果应用于 SLOPE/W	134
12.6 Kisch-通过垫层和盖层的渗流	135
12.7 砂盒验证	135

12.8	水库快速蓄水和快速下降泄水	135
12.9	二维水塘渗透与潜水面抬升	136
12.10	水塘蓄水(水头-时间函数)	137
12.11	降雨公路沟渠积水	138
12.12	排水设施	138
12.13	流向井区的径向流量	139
12.14	超孔隙水压力的消散	139
12.15	测渗计的研究	139
13	原理	141
13.1	达西定律	141
13.2	渗流微分方程	141
13.3	有限元渗流方程	142
13.4	瞬态积分	143
13.5	数值积分	144
13.6	渗透系数矩阵	146
13.7	质量矩阵	146
13.8	流量边界矢量	147
13.9	密度依赖的渗流	148
14	附录	150
14.1	坐标系统	150
14.2	插值函数	151
14.3	无限元	155
	参考文献	158

1 绪 论

土中水的渗流是岩土工程和环境岩土工程研究的一个基本方面。如果土中没有水，岩土工程问题将不会如此复杂；如果土中没有水，生态系统将无法维持，地球上就没有人类，也就不需要岩土工程和环境岩土工程。这突出说明水在土和岩石中的重要性。

流量是定量分析水库的渗流损失和确定为民用或工业潜水供给的重要参数。岩土工程问题特别关心的是地下水孔隙水压力。无论孔压是正还是负，都用来组成土体应力状态，而且对土的抗剪强度和体积的改变有直接的影响。过去数十年的研究表明地表非饱和土渗流的重要性，这与覆土盖层设计有关。

历史上，地下水的流动的分析主要集中于饱和土，渗流问题被归纳为有限制的渗流和无限制的渗流。土工结构下部的流动是有限制的渗流问题，而通过各向同性的堤坝的渗流是无限制的渗流问题。无限制渗流问题经常被认为是更难于分析，因为难以确定潜水面（孔压正负转换面）的位置。潜水面曾被认为是一个上边界，存在于潜水位以上的毛细区域的流动都被忽略了。

将非饱和土中水的流动简单地忽略现在不再被接受。它不仅忽略了土中水的流动的重要部分，同时也极大地限制了可以分析问题的类型。对于上层滞水带的渗透和水分重分布，毛细区域或非饱和区是非常重要的。比如库区迅速蓄水坝体内湿润界面随时间变化的瞬态分析就是一种典型的工况，在这种情况下，没有正确考虑非饱和土的渗流是不可能模拟的。幸运的是，现在不需要忽略非饱和区域。使用 SEEP/W 分析软件，非饱和土的渗流被考虑进数值模型，所以可以模拟任何渗流问题。

通常，所有水的流动是由水力梯度驱动，水力梯度与由压力水头（或孔隙水压力）和高程组成的总水头相关。渗流这一术语常用来描述流动问题，主要的驱动能量是重力，例如渗流损失发生在蓄水区到下游的出口。其他的情况，例如固结，主要的驱动能量与由外部荷载产生的超静孔隙水压力有关。然而，这两种情形可以用一套普遍的数学方程来描述水的渗流。结果，这些用来分析渗流问题的公式也可以用来分析由于应力条件的改变，而产生的超静孔隙水压力的消散。在本书论述、案例说明，以及使用 SEEP/W 软件中，渗流这一术语用来描述土中水的各种运动，而不管驱动能量的产生和来源，也不论流动是通过饱和土还是非饱和土。

用一个数值模型来模拟土中水的流动是非常复杂的。土作为天然沉积物通常是高度非均质和各向异性，除此以外，边界条件经常随着时间改变，而且在分析开始时总是不能够准确地定义。在一些例子中，正确的边界条件本身是结果的一部分。而且，当土变成非饱和时，渗透系数或者水的传导性是土中负孔隙水压力的函数。由于孔隙水压力是主要的未知量，必须计算得到，迭代数值技术被用来计算孔隙水压力和材料性质的适当组合。这是一个非线性问题。这些复杂性使得必须使用一些形式的数值分析技术来分析所有而不是最

简单的渗流问题。

虽然本书有部分内容是关于 SEEP/W 软件如何做渗流分析，但也是对一般的数值模拟技术的说明。数值模拟，像生活中的大多数事物，是一种需要靠学习才能掌握的技术。当开始使用 SEEP/W 分析软件，想立刻变成一个数值分析高手几乎是不可能的。高效的数值分析需要仔细的思考和计划，它需要很好地理解基本理论和概念，逐步的学习诸如划分网格单元和施加边界条件，这在开始时并不是依靠直觉。这需要时间和实践来使它变得容易。

本书很大一部分内容是对有效的数值进行分析给出一般的指导。第 2 章专门讨论了什么是数值模拟、为什么要数值模拟，以及如何数值模拟，论述的准则适用于各种数值模拟情形，它们适用于渗流分析。

有限元分析 3 个主要的部分：第一部分是创建分析区域，包括选择合适的几何模型和创建离散网格；第二部分是定义并赋给各子区域材料参数；第三部分是指定合适的边界条件。

使用数值模拟对饱和与非饱和土的渗流进行分析是个高度非线性问题，需要迭代技术来获得解，数值收敛性经常是一个关键问题；同样，瞬态分析所需要的时间积分方案受与单元尺寸和材料性质有关的时间步的影响，这些和其他数值上的考虑在第 8 章的数值问题中论述。

第 11 章，模型的提示与技巧，包含一些提示和操作技巧，可以学习参考以提高建模，同时对分析结果获得信心和对有限元方法、SEEP/W 约定和数据结果有更深入的理解。

第 12 章是案例说明。各种实际工程案例的详细说明可以从资源安装光盘获得或者从网站下载得到。用户可以浏览该章，查看许多验证性的实例和个案研究来理解软件的功能。

第 13 章是关于饱和与非饱和土的偏微分方程的有限元解决方案的理论要点。在附录插值函数中，提供了涉及插值函数的有限元数值细节和无限单元法说明。

总之，本书不是一本讲解如何使用 SEEP/W 软件的书。而是一本关于如何建模、如何用 SEEP/W 这个强大的分析工具来计算工程渗流问题的书。SEEP/W 的在线帮助会提供关于 SEEP/W 的各种菜单功能和操作的细节。

② 数值模型：是什么，为什么，怎样做

2.1 概述

现在，可用的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，使得将有限元分析这样强大的技术应用于工程实际成为可能。这些分析方法现在已经从研究工具变成了实用工具。由此开创了数值模拟的新纪元。

像 SEEP/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及的、极复杂计算的能力。同样，现代电子制表软件程序也很强大，但是能否从中获取有用的结果取决于用户。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 SEEP/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。单一的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。

数值模拟作为一种实践在岩土工程是相对比较新的，因此，缺乏对数值模拟是什么，怎么做和期待从数值模拟中获得什么的理解。对这些基本要点的理解，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，一般人会对此缺乏了解。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”和“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重要。

本章论述数值模拟“是什么”，“为什么”和“怎样做”，并给出了建模实践中应该遵守的步骤和指导。

2.2 数值模型是什么

一个数值模型是对一个真实物理过程的一种数学描述。SEEP/W 是渗流分析数值模拟软件，它能够对水流过土体介质的真实物理过程进行数学模拟。数值分析是纯数学方法，从这个意义上讲，它不同于在实验室模拟或者现场等比例模型。

Rulon (1985) 建立了一个内嵌不透水层和顶部洒水模拟淋滤以及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（SEEP/W 分析这个例子的细节在 12 章，案例中说明）。

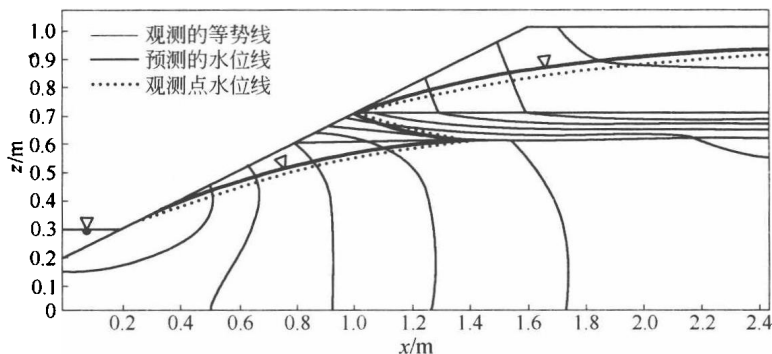


图 2-1 Rulon 的实验室比例模型结果

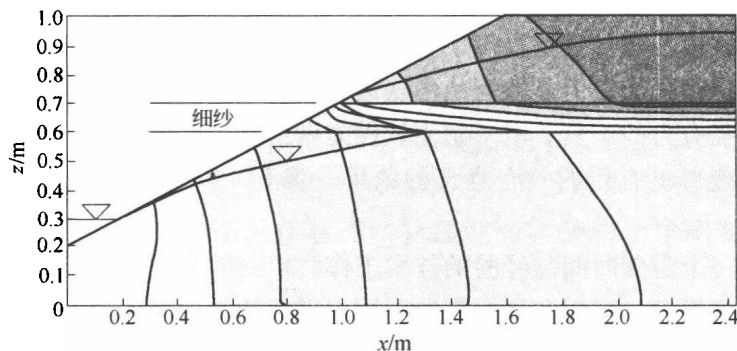


图 2-2 Rulon 试验的 SEEP/W 分析结果

将实际物理过程抽象成数学模型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。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，能够应用数学来模拟物理过程的事实，使得能对物理过程有更深入的理解，甚至能让人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，下面列出了一些显而易见的优点：

(1) 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。

(2) 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。

(3) 数值模拟可以设置不同的重力值。物理模型受制于实验室条件，重力不能被按比例调整，克服这一困难需要使用离心机。

(4) 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。

(5) 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。

(6) 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。

同样, 认为数值模拟没有局限性也是错误的认识。影响渗流的因素可能包括温度、体积以及化学成分的改变, 在同一个公式中包括所有这些过程是不可能的, 因为涉及的数学运算太复杂。除此以外, 因为它的复杂性, 对其进行数学描述是不可能的。一些困难可以通过更好更快的计算处理器加以克服。认识到像 SEEP/W 这样的数值模拟软件有一些局限性很重要, 这些局限性与当前硬件的容量或者软件的理论公式有关, 因为它是考虑特定条件开发出来的。SEEP/W 仅仅适用于服从达西定律的渗流。在地表附近的水分将以水气的形式离开地面, 这部分并不包括在 SEEP/W 公式中, VADOSE/W 分析软件可以对其进行分析。

因此, 当模拟地表水气离开系统时, SEEP/W 有局限性, 而真实的物理模型则没有这种类型的限制。

重要的是 SEEP/W 作为数值分析软件模拟真实物理过程非常强大和灵活。

“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) 和尝试将其翻译成数学形式表达。” 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 3 个基本要素: 地层剖面, 土的力学行为与模拟。他将这 3 个要素比喻成三角形的 3 个顶点, 如图 2-3 所示, 这就是业界周知的 Burland 三角 (Burland, 1987; Burland, 1996)。

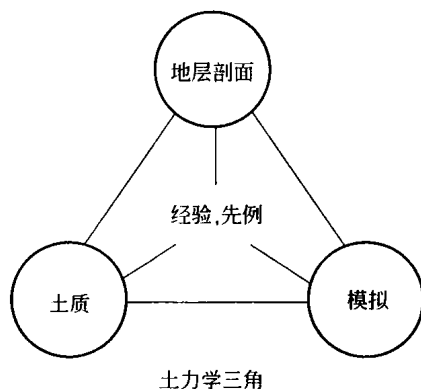


图 2-3 Burland 三角

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。

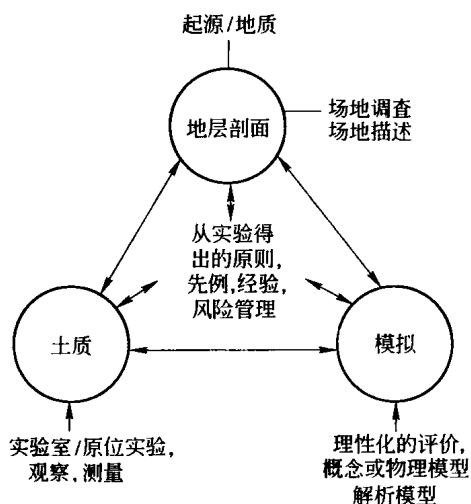


图 2-4 改进的 Burland 三角

Burland 的观点认为很重要是这 3 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的讨论并被大家提及。关于这个话题的一篇论文在地面工程中发表 (Anon, 1999)。2000 年在澳大利亚墨尔本召开的岩土工程学会会上, Morgenstern 所做的“共同的地面”的主题报告用一定篇幅对其作了论述。所有这些论述, 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, 一个很重要的增加的特点是在各要素之间考虑了所有的双向联系箭头。这个简

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 三角生动的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。可接受的模拟基本被认为是数值模拟，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。如果正确的做了，模拟也就是真实的。通常认为数值模拟只是在项目最后实施的一个小部分，而且可以被简单快速的完成。这样的观点是错误的。一个好的数值模拟，需要时间并且要求仔细的计划，同样也需要计划收集现场量测结果与正确的抽象现场条件。

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，对数值模拟这点尤其重要。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。更多的想一想，答案变得复杂了。没有对模拟的原因有一个清晰的理解或弄清楚模拟的目标是什么，数值模拟将会是一次挫败的经历和不确定的结果。正如在下面章节将会讲到，为了建立模型，计算求解和确定解的意义而做模拟是错误的。在做模拟的开始就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。

从一个高的角度来看，对于模拟有以下几点是主要因素。模拟是为了：

- (1) 做定量预测；
- (2) 比较方案；
- (3) 确定控制参数；
- (4) 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。例如他们想定量的预测渗流，或者污染物从污染源扩散至指定地点的时间，或者水库首次注水直到堤坝中渗透稳定的时间。他们想说目的是了解研究对象未来的行为和表现。

作定量预测是模拟的一个正当理由。但是，由于定量值经常直接与材料性质有关，这也是模拟的最难的部分。例如，流量主要由土的渗透性控制，结果，渗透性的改变将改变渗透量。定量预测的精确性直接和给定的渗透系数相关。然而，对于非均质地层，对于给定的渗透系数的精确性我们没有多少信心。有时定义渗透系数在一个数量级内被认为是合理的。对于渗透系数的信心取决于很多因素，但是定义这些土的参数普遍很困难，突出了模拟做出定量预测的困难性。

Carter 等人列举了在 2000 年的时候，德国岩土工程学会所做的一个竞赛的结果。工程师与大学研究组织分别拿到了竞赛信息，要求参加者预测在柏林深基坑开挖的连续支撑墙的侧面挠曲。在施工期间，用测斜仪对真实挠度做了实测。随后预测结果与实际量测结果

进行了比较。图 2-5 展示了提交的最好的 11 条预测曲线。其他的预测也提交了，但被认为是不合理的，因此也没有包含在总结里。

在图 2-5 中，有两条黑线。右边的虚线表示测斜计测得的没有修正的基于任何可能的移动位移，它可能是测斜仪和墙一起移动的结果。假定倾斜计移动了约 10mm，图 2-5 中的粗实线反映了测斜计移动的位移。

首先看上去，尤其当预测结果出现很大的离散性时，一个人可能会很快得出结论：预测结果与真实侧面运动的实测值的一致性相差很远。这个练习可以作为对无法做出精确量化预测的实例。

然而，当更仔细的观察这个图时，结果似乎又不那么不理想。开挖深度是 32m。最大预测的侧向移动仅刚超过 50mm 或 5cm。对于墙的长度而言，这仅是一个极小的位移，当然，还没大到肉眼可见。进而，当对基础位移修正时，真实测得的结果或多或少落在了预测结果中部。最重要的是大量预测结果揭示了这个趋势。他们中的很多预测的挠曲形状与实际量测结果相似。换句话说，预测模拟了正确的墙相对位移。

因此，无法做出精确的模拟，但是预测结果惊人的好。预测结果落在量测结果的两边，而挠曲形状吻合。最后，模拟给出了墙体行为的正确认识，这比模拟有多正确本身更有说服力，如随后将要看到的，这可能是数值模拟的最大优势。

由于定义材料特性的困难性，数值模拟结果有时会因为离散而变得无用。但仍有很多理由来进行数值分析。如果数值模拟的其他目标可以先期完成，随后的量化预测就会更有价值与意义。一旦，完全了解了物理机理，虽然不能准确的确定材料参数，但是更有信心去做定量预测，而不是先前认为的那样无用。

2.4.2 方案比选

数值模拟对于进行方案比选很有用。保持其他各项不变，改变一个参数，这使得它成为评价单一参数重要性的有力工具。对于方案选择和敏感性研究来说，准确定义某些参数的属性并不是最重要的，模拟结果的差异才是我们最感兴趣的。

考虑结构下面防渗墙的例子。用 SEEP/W 通过改变防渗墙的长度可以很容易的考察其优点。通过两个不同防渗墙深度的算例，评估结构底部扬压力的差异。图 2-6 是防渗墙为 10ft (3.05m) 深的分析结果。沿着基础压力跌落和扬压力，如图 2-7 (a) 所示。防渗墙横向压力从 24ft (7.32m) 跌落到 18ft (5.49m)。20ft (6.1m) 深的防渗墙分析结果，如图 2-7 (b) 所示。防渗墙横向压力从 24ft (7.32m) 跌落到 15ft (4.57m)。下游面坝趾部位的扬压力基本相同。

对于实际计算值的讨论并不重要。它只是一个如何用 SEEP/W 这样的软件来快速比选替换项的建模的例子。其次，这种类型分析可以通过一个很粗的渗透系数来完成，因为在

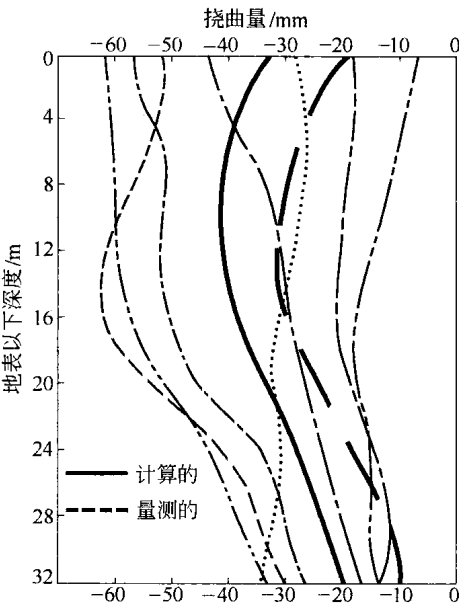


图 2-5 挡墙侧向位移的预测结果与实测结果比较

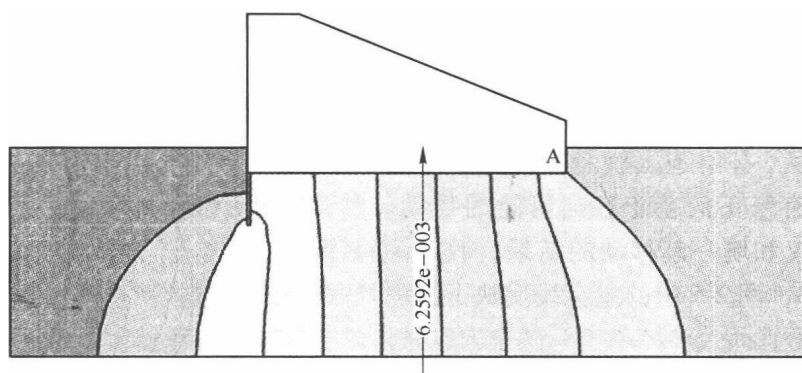


图 2-6 防渗墙渗流分析

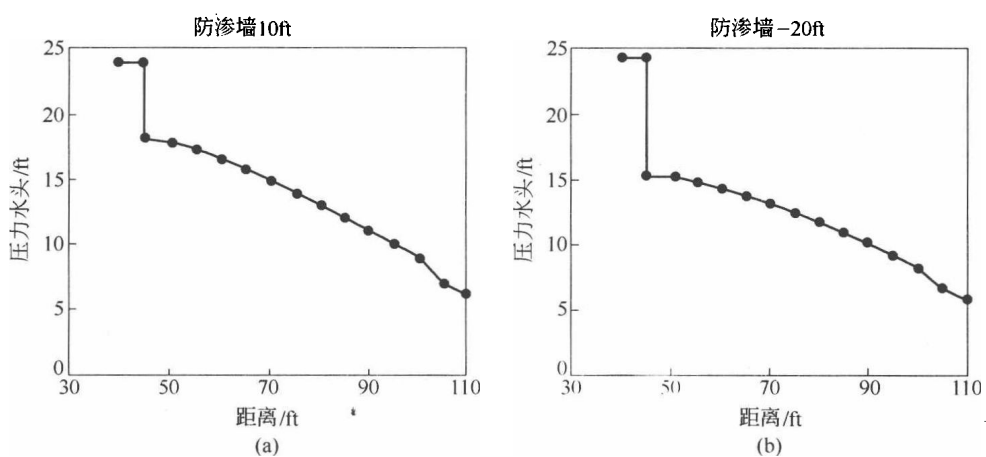


图 2-7 沿结构基础扬压力分配

这个例子中压力分布不受假设的渗透系数的影响。与认真的定义渗透系数来比较基础的压力分布比就没有多大意义了。

可以看流量的变化，绝对流量可能根本不精确，但不同深度的防渗墙的结果的改变就很有价值。10ft (3.05m) 的防渗墙的总流量为 $6.26 \times 10^{-3} \text{ ft}^3/\text{s}$ ，20ft (6.1m) 的防渗墙的总流量为 $5.30 \times 10^{-3} \text{ ft}^3/\text{s}$ ，有 15% 的差异。

2.4.3 确定控制参数

数值模拟对于确定影响设计的关键参数非常有用。考虑土层覆盖废料的情况，什么是覆盖层行为的最重要的控制参数，是降水、风速、净太阳辐射、植物种类，根的埋深还是土的类型。运行一系列 VADOSE/W 模拟，保持其他参数不变，使其中一个变化，可能会弄清哪个是控制参数。结果可以表示成如图 2-8 所示的龙卷风状图表。

一旦确定了关键要素，进一步的模拟以细化设计可以将注意力集中在主要问题上。例如，如果植物生长是主要影响因素，那么主要的精力就可以集中在需要做什么来加快植物生长上。

2.4.4 发现与理解物理过程—训练我们的思维

数值模拟最强大的一面就是它能帮助我们理解物理过程和训练我们的思维。如需要的

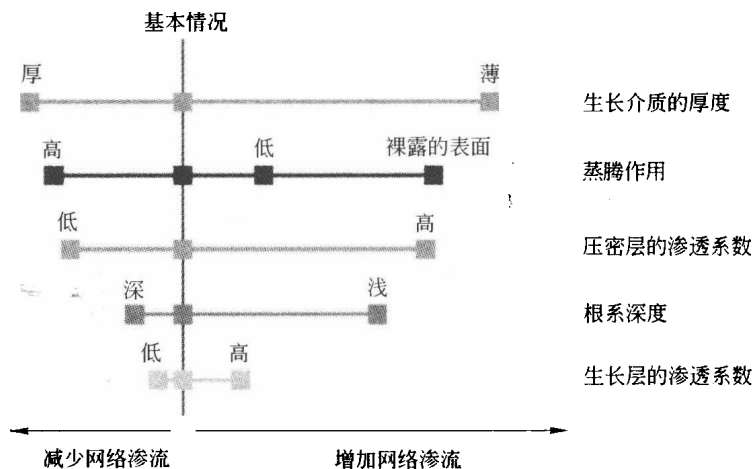


图 2-8 龙卷风状图表的算例 (O' Kane, 2004)

话，数值模型要么能够确认我们的想法，要么有助于修正我们的看法。

为了说明数值模拟这方面的作用，如图 2-9 所示的两种多层土盖层的例子作为案例。覆盖层的目的是降低水渗透进下层的废弃物。目的是利用土覆盖层作为一个淋滤路径，使降水下渗进入收集系统。我们知道，为实现这个，需要粗颗粒的土与细颗粒的土。问题是，粗颗粒的土应该覆盖在细颗粒土之上呢，还是细颗粒土应该覆盖在粗颗粒土之上，直觉上似乎是粗颗粒材料应该在上面；毕竟，它的渗透系数较高。用处理非饱和流问题的 SEEP/W 对这个状况进行的模拟可以解决这个问题，并且可以验证我们的想法是不是正确。

对于非饱和渗流，有必要定义渗透系数函数，这个函数是用来描述渗透系数是如何随着基质吸力的变化而变化的（负的孔隙水压力 = 基质吸力）。在第 4 章 SEEP/W 的材料特性中，详细的描述了渗透系数函数的性质。例如，如图 2-10 所示的相对渗透系数函数就足够了。在低的基质吸力情况下（接近饱和），在直觉上，一般认为粗粒材料的渗透系数比细粒材料的要高。在高的基质吸力下，粗颗粒材料有一个相对低的渗透系数，这通常与直觉相反。

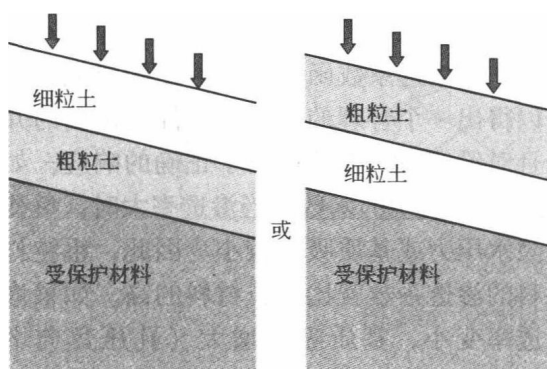


图 2-9 两种可能的盖层设置

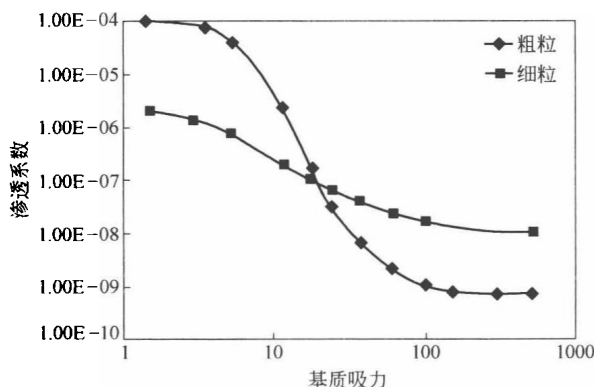


图 2-10 渗透系数函数

在做了不同分析和试算了不同的表面渗透率后，就会发现覆盖层系统的行为依赖于渗透率。在低的渗透率下，将细粒土层覆盖于粗粒土层之上的效果，导致如图 2-11 所示的渗