

非饱和土土力学

Soil Mechanics for Unsaturated Soils

〔加拿大〕 D·G 弗雷德隆德
〔印度尼西亚〕 H·拉哈尔佐 合著

陈仲颐 张在明 陈愈炯
蒋国澄 吴肖茗 石振华 合译



中国建筑工业出版社

非饱和土土力学

Soil Mechanics for Unsaturated Soils

(加拿大) D·G 弗雷德隆德 合著
(印度尼西亚) H·拉哈尔佐

陈仲颐 张在明 陈愈炯 合译
蒋国澄 吴肖茗 石振华

中国建筑工业出版社

(京)新登字 035 号

图字: 01-97-0414 号

责任编辑: 石振华 颜明志 (特约)

图书在版编目 (CIP) 数据

非饱和土土力学 / (加拿大) 弗雷德隆德 (Fredlund, D. G.), (印尼) 拉哈尔佐 (Rahardjo, H.) 著; 陈仲颐等译. —北京: 中国建筑工业出版社, 1997

书名原文: Soil Mechanics for Unsaturated Soils

ISBN 7-112-03246-6

I. 非… II. ①弗… ②拉… ③陈… III. 土力学, 非饱和土 IV. TU43

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 04922 号

Copyright ©1993 by John Wiley & Sons, Inc.

All rights reserved.

美国 John Wiley & Sons 出版公司正式授权中国建筑工业出版社出版发行本书中文版。

Soil Mechanics for Unsaturated Soils. / D. G. Fredlund, H. Rahardjo

John Wiley & Sons, Inc., 605 Third Avenue, New York, NY 10158-0012

非饱和土土力学

陈仲颐 张在明 陈愈炯 蒋国澄 吴肖茗 石振华 合译

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

新华书店经销

北京京勘地基基础咨询有限责任公司录排

北京市彩桥印刷厂印刷

开本 787 × 1092 毫米 1/16 印张: 40.75 字数: 978 千字

1997 年 8 月第一版 1997 年 8 月第一次印刷

印数: 1 — 1,500 册

定价: 58.00 元

ISBN 7-112-03246-6

TU·2495(8389)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

本书系统论述了非饱和土土力学的主要内容，包括土的相的性质与关系、应力状态变量、土的吸力量测、流动定律、渗透性量测、稳态流、孔隙压力参数、抗剪强度理论与参数量测、塑性与极限平衡、体积变化理论与指数量测、一维固结与膨胀、二维与三维非稳态流及非等温分析等。

本书可供岩土工程勘察、设计、科研和施工技术人员参考。亦可作为相关专业本科生、研究生的教材。

著者的话

——祝贺本书中文版的问世

《非饱和土土力学》这本书的编写，前后经历了大约 10 年时间。著者阅读了数以百计的有关研究论文。有时觉得这似乎是一项永远做不完的庞大任务。因此，当这本书终于在 1993 年出版时，我们感到莫大欣慰。

使著者倍受鼓舞的是，中国清华大学的陈仲颐教授认为，这本书应译成中文出版。我们的第一个反应是，这项任务太繁重了。但我们也能够理解中国的岩土工程师确实需要这样一本有关非饱和土性状的专著。

现在，在陈教授的组织、领导下，将《非饱和土土力学》译成中文的想法已经实现。对翻译小组做出的巨大努力和取得的卓越成果，我们深感敬佩。在此，我们对促成并支持此书中译本出版的全体中国朋友表示衷心的感谢。

岩土工程师一致认为，膨胀土、残积土、湿陷性黄土和压实土等这几类土是“难对付的土”。这几类土均落在非饱和土范畴之内。《非饱和土土力学》这本书正好为分析所有这几类“难对付的土”提供了有力的工具。解决与“难对付的土”有关的各种工程问题的任务现在刚刚开始。非饱和土土力学的理论为工程分析与实际解决方案的结合提供了“凝聚力”。

著者希望《非饱和土土力学》的中译本将成为中国与加拿大在非饱和土这一重要领域继续开展合作的基础。加拿大国际开发研究中心（IDRC）资助的中加膨胀土工程性质合作研究项目在过去几年中取得的丰硕成果，充分证明两国之间在非饱和土领域里有许多研究工作和工程实践经验可以互相学习、交流。我们对 IDRC 给予的大力支持和资助表示深切谢意。

人类在地球表面层的上部建造建筑物基础和各种地下结构。在此表面层中尚有许多“奥秘”有待揭露，并在工程实践中予以充分利用。这是一个富有挑战性的复杂课题，需要依靠人类的共同努力和密切合作来取得进展。本书中文版的出现就是这种合作的一个范例。

Delwyn G. Fredlund

Harianto Rahardjo

1997 年 5 月

译者的话

考虑到目前国内还没有一本有关非饱和土的土力学专著，我们在征得原著者和有关方面的同意后，决定将 Fredlund 和 Rahardjo 合著的这本《非饱和土土力学》译成中文，交由中国建筑工业出版社出版，以飨国内读者。

加拿大 Saskatchewan 大学的 D. G. Fredlund 教授是国际知名的岩土工程专家，20 多年来，他和 N. R. Morgenstern 教授以及由他建立并领导的非饱和土研究小组，在非饱和土领域开展了一系列开拓性的理论和试验研究工作，为非饱和土土力学的建立和发展做出了许多重要贡献。他们提出的双应力变量理论在描述非饱和土的力学性状方面具有明显的优越性，已为众多学者和工程技术人员所接受，并在工程实践中用于分析非饱和土的体变和强度问题。今天，他们代表着国际上非饱和土领域的一个学派，正在继续发挥着重要的作用。

本书是第一本系统论述非饱和土性状及其工程应用的专著。它的优点之一是，保留、继承了经典土力学的总构架，在此基础上将非饱和土的原理和概念作为饱和土有关原理和概念的延伸来编写，这样也就使学生和初接触非饱和土问题的岩土工程师能够很快就理解并掌握非饱和土土力学的真谛。

本书的另一优点是，理论密切联系实际，很实用，而且叙述深入浅出，容易看懂，十分适宜作为教科书和工程技术参考书。

本书由陈仲颐（第 1、2、3、11 章和附录 B）、蒋国澄（第 5、6、7 章）、陈愈炯（第 8、9、10 章）、张在明（第 12、13、14、15、16 章）和吴肖茗（第 4 章）翻译并互校；石振华翻译了索引、附录 A 和编制了中文索引并担任编辑。

本书的翻译及出版，得到加拿大国际开发研究中心（IDRC）、美国 John Wiley 出版公司和中国建筑工业出版社的大力支持，译者在此除了向原著者，亦向以上单位一并表示感谢。

1997 年 5 月

原序

岩土工程方面出现一本新书总是值得庆贺的，而在土力学的一个重要方面首次出现一本专著则格外令人高兴。由 Fredlund 教授和 Rahardjo 博士编写的这本书是专门讨论非饱和土性状的第一本教科书。它的出版，十分及时。

显而易见，由于大部分发达国家均位于温带，遇到的主要是饱和土，因此土力学方面的文献著作一直是以有关饱和土的问题为主。此外，了解非饱和土性状所需要的理论知识和试验技术要比了解饱和土性状所需要的复杂得多。因而，非饱和土土力学的发展落后于饱和土土力学，这点使学生和工程技术人员都深感困惑。

产生非饱和土的气候条件在各洲都存在。实际上，在有些国家里，非饱和土占主要地位。涉及非饱和土的工程问题，范围很广，例如在膨胀土上修建轻型房屋应当如何设计和施工的问题由来已久，每年由于膨胀土性状引起的损害所造成的经济损失比任何其它地基破坏事故都大。另一极端，在所有地下埋藏核废料的设计中几乎都采用非饱和土作为隔离材料。因此，从轻型房屋的建造到某些最复杂的近代环保问题，均需要对非饱和土的力学性状有所了解。

我预料这本书很快就会成为这个领域的经典著作。要进行有关非饱和土的教学、科研和生产而不参考 Fredlund 和 Rahardjo 编写的这本书是不可能的。他们明智地保持经典土力学的构架，然后设法加以延伸，以便将土的吸力现象作为一个可量测和计算的独立变量容纳进去。这就极大地方便了这本综合性著作的使用，并使人们能够较容易地深入了解非饱和土的性状。

通向这本非饱和土土力学著作的途径是艰难的。许多早期的土力学领路人指出了正确的方向，又经过 30 多年持续不断的努力，才到达以这本书的出版为标志的这段路程的终点。所有参加这一行程的人均将分享这一成果带来的喜悦。

加拿大 Alberta 大学

土木工程系教授 N. R. Morgenstern

1993 年 4 月

前 言

土力学方面已有许多教科书。从内容到编写次序，这些教科书虽然略有差异，但重点均放在土力学原理在涉及饱和土问题中的应用。

地球表面很大一部分是处于干旱或半干旱地带，因而，工程实践中遇到的土有许多是非饱和土。本教科书主要讨论与非饱和土性状有关的土力学问题，更具体地说，也就是讨论土中具有基质吸力或负孔隙水压力的这类土的土力学问题。

产生这类独特的土力学问题，起因于土中存在负的孔隙水压力，不论土是饱和的或是非饱和的。当孔隙水压力为负值时，用两个独立的应力状态变量来描述土的性状是适宜的，通常也是必要的。这点不同于饱和土土力学，在饱和土土力学问题中，可以用一个应力状态变量，亦即有效应力变量来描述土的性状。

饱和土土力学和非饱和土土力学这两个术语主要用于表示在所考虑的问题中孔隙水压力分别为正值和负值的两种情况。位于地下水位以上的土具有负孔隙水压力，涉及的工程问题很广，从膨胀土的胀缩变形到边坡土的抗剪强度下降。地区的微气候环境会产生一种表面流量边界条件，使上部土层中有水的渗流。

饱和土土力学中涉及的大部分问题在非饱和土中都能遇到。此外，土的重塑和压实是许多工程项目的重要内容，而压实土中的孔隙水压力是负值。涉及负孔隙水压力的问题很广，而且这类问题愈来愈多，尤其在干旱地区。

曾经试图将本书编写得简短些，但发现问题过于复杂而很难做到。世界各地的许多工程问题表明，十分需要这样一本教科书。在传统土力学方面受过良好训练的工程师，往往由于对非饱和土的知识不够而在涉及非饱和土的一些难题面前感到无所适从。

著者在本书中不去重新介绍或证明饱和土土力学中熟悉的各种概念，而是将本书作为经典饱和土土力学的延伸来编写。建立非饱和土的原理和概念时，尽可能将它们作为饱和土的有关原理和概念的延伸来对待。这样，也就使读者能够较容易领悟非饱和土土力学的实质。

本书的总构架同大多数经典土力学教科书相类似。首先介绍非饱和土土力学问题的范围。然后介绍非饱和土的：1) 体积-质量特性，2) 应力状态变量，3) 渗流性状和4) 孔压参数。在这之后，再介绍非饱和土的：5) 抗剪强度和6) 体变性状。最后介绍与岩土工程有关的瞬变分析方法。

本书各章的内容如下。第1章介绍有关非饱和土性状研究的发展简史；说明学习非饱和土土力学的必要性以及可能遇到的工程问题的性质和范围；描述非饱和土单元的性质，集中在饱和土与非饱和土的差别上。第2章介绍非饱和土各相的特性和土的体积-质量关系。本章内容同经典土力学有些重复，但重点放在理论的延伸上。详细介绍了各种推导步骤，以便读者较容易地进入这一相对新的领域。

第3章介绍在解决土具有负孔隙水压力的工程问题时需用的应力状态变量。对应力状态变量的概念做了详细介绍，因为它对理解本书后面各章的内容极为重要。只要理解有效应力概念在发展饱和土土力学中所起的重要作用，也就能领会需要有一种可用于描述非饱和土应

力状态的方法的重要意义。著者相信, 对应力状态的彻底了解是发展非饱和土土力学这门学科的重要基础。

应力状态的研究表明, 孔隙水压力量测是必不可少的。量测很高的负孔隙水压力和吸力十分困难。第 4 章总结了用于量测负孔隙水压力的各种技术和设备。

同各种土力学问题有关的土的基本性质有三个, 亦即: 1) 渗透系数, 2) 抗剪强度参数和 3) 体变系数。这三个性质分别在后面九章中介绍。每个性质均从三个方面进行介绍, 首先介绍与这个性质有关的理论, 然后介绍这个性质的测定方法及其典型数值, 最后介绍这个性质在具体土力学问题中的应用。这几章是这样安排的:

土的性质	理论	量测	应用
渗透	第 5 章	第 6 章	第 7 章
抗剪强度	第 9 章	第 10 章	第 11 章
体变	第 12 章	第 13 章	第 14 章

用于测定每个性质的仪器设备分别在各自的“量测”章中介绍。渗透性质的应用主要限于二维的土坝渗流分析。抗剪强度性质的应用包括侧向土压力、地基承载力和土坡稳定三个问题, 重点放在土坡稳定分析。体变性质的主要应用问题是轻型结构的地基隆起预测。

第 8 章介绍孔隙压力参数的理论及其典型试验结果。本章内容对不排水加荷和土的抗剪强度的讨论很重要, 这就决定了它在本书中的位置。

固结理论和非稳定流分析需要将土的体变特性和渗透特性结合起来。这方面的分析是饱和土土力学的重要构成部分, 它在帮助工程师了解土的性状方面起很大作用。第 15 章介绍一维固结理论, 第 16 章介绍非饱和土中的二维和三维非稳态流分析。表面流量边界条件和微气候之间关系的有关理论亦在第 16 章中简要介绍。

有关非饱和土性状的理论需要用大量的工程实录来加以验证。本书的主要目的之一就是总结已有的研究成果, 分析各种工程实录, 不断完善理论, 为进一步开展这一领域的研究奠定基础。

本书是著者多年教学和科研的成果, 也是得到许多人士帮助完成的成果。著者对众多学者和出版单位允许我们从他们发表的研究论文中摘录资料和复制图表表示感谢。

许多人士为本书的编写提供了大力支持。我们感谢加拿大 Saskatchewan 大学工程学院院长 P. N. Nikiforuk 教授和新加坡南洋理工大学土木与结构工程学院院长 Chen Charng Ning 教授给予的鼓励和支持; 感谢加拿大 Clifton Associates 工程公司的 A. N. Clifton 先生, 他为非饱和土的理论概念和计算公式能够在工程实践中直接应用提供了重要的意见和建议。许多学生和同事在本书原稿的评阅工作中提供了宝贵的帮助。S. L. Barbour 博士、G. W. Wilson 博士和匈牙利布达佩斯的 E. Imre 女士均评阅了若干章。D. E. Pufahl 博士评阅了第 2 章。D. Y. F. Ho 博士评阅了第 9 和第 10 章。我们尤其感谢 N. R. Morgenstern 教授, 他一直鼓励并指导我们进行非饱和土性状的研究。

我们也要感谢 G. Russell 女士、M. Vanstone 先生、T. Regier 小姐、K. Fischer 小姐和 L. Pavier 女士为承担本书原稿的打字工作所付出的辛勤劳动, 尤其是 L. Pavier 女士, 她组织有关人员完成了最后的打字版本。J. L. Loi 先生精心设计本书插图, 按国际标准单位对有些图进行重新点绘, 并校核了有关数据。K. Fischer 小姐和 D.S. Komarychka 女士极其细心地绘制

了全部插图。著者感谢 S.K. Vanapalli 先生、J. Gan 先生和 A. Xing 博士，他们出色地完成了全书各章的编辑和校样工作。L. Lam 先生分析了第 7 和 16 章中的若干例题。J. Lau 先生和 K. Fredlund 先生编排了本书大量参考文献的目录。最后，著者对其他研究生所做的工作亦在此一并深表感谢。

D. G. Fredlund

H. Rahardjo

Saskatchewan 大学

1993 年 4 月

目 录

著者的话——祝贺本书中文版的问世.....	3	2.2.3 溶解于水中的空气.....	31
译者的话.....	4	空气在水中的可溶性.....	32
原序.....	5	气体在水中的扩散.....	33
前言.....	6	2.3 体积-质量关系.....	34
第1章 绪论	1	2.3.1 孔隙率.....	34
1.1 气候的作用.....	2	2.3.2 孔隙比.....	35
1.2 问题的类型.....	4	2.3.3 饱和度.....	36
1.2.1 土坝的建造与运行.....	4	2.3.4 含水量.....	37
1.2.2 环境条件变化情况下的天然土坡.....	6	2.3.5 土的密度.....	37
1.2.3 废料池下面土层中的水位变化.....	7	2.3.6 基本体积-质量关系.....	37
1.2.4 竖直挖方的边坡稳定.....	7	2.3.7 体积-质量性质的变化.....	39
1.2.5 侧向土压力.....	8	2.3.8 气相压缩对混合物密度的影响.....	40
1.2.6 浅基承载力.....	8	活塞-透水石模型.....	41
1.2.7 膨胀土造成的地面隆起.....	9	质量守恒原理应用于混合物.....	42
1.2.8 湿陷性土.....	10	土粒-水-空气混合物.....	44
1.2.9 非饱和土问题小结.....	10	气-水混合物.....	44
1.3 非饱和土的典型地质剖面.....	10	第3章 应力状态变量	46
1.3.1 典型的热带残积土剖面.....	11	3.1 应力状态描述的历史.....	46
1.3.2 典型的膨胀土剖面.....	12	3.1.1 饱和土的有效应力概念.....	46
1.4 非饱和土土力学的需要.....	13	3.1.2 提出过的非饱和土有效应力公式.....	47
1.5 本书的内容范围.....	15	3.2 非饱和土的应力状态变量.....	50
1.6 非饱和土的相.....	16	3.2.1 非饱和土的平衡分析.....	50
1.6.1 相的定义.....	16	作用于土体单元的法向应力和剪应力.....	51
1.6.2 水-气分界面或收缩膜.....	16	平衡方程.....	52
1.7 术语与定义.....	17	3.2.2 应力状态变量.....	53
1.8 历史发展.....	17	应力状态变量的其他组合.....	53
第2章 相的性质与关系	22	3.2.3 饱和土作为非饱和土的特例.....	54
2.1 各个相的性质.....	22	3.2.4 干土.....	55
2.1.1 密度与比容.....	22	3.3 极限应力状态.....	56
2.1.2 粘滞性.....	26	3.4 应力状态变量的试验验证.....	57
2.1.3 表面张力.....	27	3.4.1 轴平移的概念.....	57
2.2 空气和水的相互作用.....	29	3.4.2 验证应力状态变量的零位试验.....	58
2.2.1 水的固态、液态和气态.....	30	3.4.3 支持所提应力状态变量的其他试验 资料.....	60
2.2.2 水蒸气.....	30	3.5 应力分析.....	62

3.5.1 现场各应力状态组成的剖面	62	喷射注入张力计	102
土的侧压力系数	63	小插头张力计	103
基质吸力剖面	64	快拔型张力计	104
地面状况	64	张力计的野外量测操作	104
环境条件	66	渗透张力计	107
植被	66	轴平移技术	108
地下水位	66	4.4.3 间接量测	110
土层的渗透性	66	热传导传感器	114
3.5.2 扩展的 Mohr 图	66	工作原理	115
Mohr 圆的方程	67	传感器的率定	116
Mohr 圆的作图法	69	典型的基质吸力量测成果	117
3.5.3 应力不变量	71	MCS 6000 传感器	117
3.5.4 应力点	72	AGWA-II 传感器	119
3.5.5 应力路径	73	4.5 渗透吸力的量测	124
3.6 渗透吸力的作用	76	4.5.1 挤液法	125
第 4 章 土的吸力量测	78	第 5 章 流动定律	126
4.1 土中吸力的理论	78	5.1 水的流动	126
4.1.1 土中吸力的组成	79	5.1.1 水相的驱动势能	127
4.1.2 吸力的典型值和吸力量测设备	80	5.1.2 非饱和土的 Darcy 定律	129
4.2 毛细作用	81	5.1.3 水相的渗透系数	130
4.2.1 毛细上升高度	82	流体及孔隙介质分量	130
4.2.2 毛细压力	83	渗透性与体积-质量性质的关系	130
4.2.3 毛细上升高度及半径效应	84	饱和度变化对渗透性的影响	131
4.3 总吸力的量测	85	渗透系数与饱和度的相互关系	132
4.3.1 湿度计	85	透水性系数与基质吸力的相互关系	133
Seeback 效应	85	透水性系数与容积含水量的关系	134
Peltier 效应	86	渗透性函数的滞后	137
Peltier 湿度计	86	5.2 空气流动	137
湿度计的率定	88	5.2.1 气相的驱动势能	139
湿度计的性能	90	5.2.2 气相的 Fick 定律	139
4.3.2 滤纸法	92	5.2.3 气相的渗透系数	141
量测原则(滤纸法)	93	透气性系数与饱和度的关系	142
量测与率定技术(滤纸法)	93	透气性系数与基质吸力的关系	142
滤纸法在实践中的应用	95	5.3 扩散	143
4.4 基质吸力的量测	97	5.3.1 空气通过水扩散	143
4.4.1 高进气值陶瓷板	97	5.3.2 通过水的化学扩散	145
4.4.2 直接量测	98	5.4 流动定律的总结	146
张力计	100	第 6 章 渗透性量测	147
张力计使用前的维护	101	6.1 透水性系数的量测	147
张力计装置后的维护	102	6.1.1 透水性系数的直接量测方法	147

实验室试验方法.....	147	一维渗流的解.....	181
稳态方法.....	147	有限差分法.....	182
稳态方法的试验设备.....	148	水头边界条件.....	183
用稳态方法计算.....	149	流量边界条件.....	185
透水性系数的表达.....	150	7.1.3 二维流.....	187
稳态方法的难点.....	150	二维流公式的推导.....	187
瞬态剖面法.....	151	二维渗流的解.....	189
Hamilton 等所建议的瞬态剖面法.....	151	应用有限元法的渗流分析.....	191
瞬态剖面法计算.....	152	二维问题的实例.....	193
现场原位方法.....	154	无限边坡.....	200
原位瞬态剖面法.....	154	7.1.4 三维流.....	202
原位瞬态剖面法计算.....	155	7.2 稳态空气流.....	204
6.1.2 计算透水性系数的间接方法.....	157	7.2.1 一维流.....	204
Tempe 仪及其试验过程.....	157	7.2.2 二维流.....	205
体积压力板仪仪器设备及其试验过程.....	158	7.3 通过水体的稳态空气扩散.....	207
体积压力板仪的试验过程.....	160	第 8 章 孔隙压力参数.....	208
土-水特征曲线的干燥段.....	160	8.1 孔隙流体的压缩性.....	208
土-水特征曲线的浸湿段.....	161	8.1.1 空气的压缩性.....	209
用土-水特征曲线计算 k_w	161	8.1.2 水的压缩性.....	210
6.2 透气性系数的测定.....	163	8.1.3 空气-水混合物的压缩性.....	210
量测透气性系数的三轴渗透仪.....	165	在压缩性公式中引用孔隙压力参数.....	212
用于量测透气性和透水性的三轴渗透仪.....	165	8.1.4 空气-水混合物的压缩性的组成部分.....	212
6.3 扩散量测.....	168	自由空气对混合物压缩性的影响.....	213
6.3.1 空气通过高进气值陶瓷板扩散的机理.....	169	溶解空气对混合物压缩性的影响.....	213
6.3.2 扩散系数量测.....	170	8.1.5 有关空气-水混合物压缩性的其它问题.....	214
计算扩散性质的过程.....	171	压缩性公式推导中 Kelvin 公式的局限性.....	214
6.3.3 扩散空气体积指示器.....	172	8.2 孔隙压力参数的推导.....	217
量测扩散空气体积的气泡泵.....	172	8.2.1 切线和割线孔隙压力参数.....	217
扩散空气体积指示器 (DAVI).....	172	8.2.2 必要的本构关系概述.....	219
量测扩散空气体积的过程.....	174	8.2.3 排水和不排水加荷.....	221
扩散空气体积的计算.....	174	8.2.4 总应力与土的各向异性.....	223
扩散空气体积指示器的精度.....	175	8.2.5 K_0 加荷.....	224
第 7 章 稳态流.....	177	8.2.6 Hilf 的分析.....	226
7.1 稳态水流.....	177	8.2.7 各向等压加荷.....	229
7.1.1 非饱和土渗透系数的空间变化.....	178	8.2.8 单轴加荷.....	231
非均质各向同性稳态渗流.....	178	8.2.9 三轴加荷.....	233
非均质各向异性稳态渗流.....	178	8.2.10 三向加荷.....	236
7.1.2 一维流.....	179	8.2.11 参数 α	237
一维流的推导.....	180	8.3 孔隙压力公式的求解及其与试验成果	

比较	238	高进气值陶瓷板的饱和方法	313
8.3.1 Hilf 分析中导得的割线孔隙压力		10.1.3 高进气值陶瓷板下面的压力反应	313
参数 B_h	238	10.1.4 孔隙气压力的控制或量测	320
8.3.2 Hilf 分析的图解方法	241	10.1.5 水体积变化量测	321
8.3.3 各向等压加荷条件下切线孔隙压力		10.1.6 空气体积变化量测	323
参数 B 的试验成果	241	10.1.7 总体积变化量测	324
8.3.4 各向等压加荷条件下孔隙压力参数		10.1.8 试件制备	325
B 的理论估算	244	10.1.9 用反压力饱和试件的方法	326
8.3.5 三轴加荷条件下的切线参数 B 和 A		10.2 三轴试验方法	329
的试验成果	252	10.2.1 固结排水试验	330
8.3.6 参数 α 的试验量测	253	10.2.2 常含水量试验	331
第 9 章 抗剪强度理论	256	10.2.3 量测孔隙压力的固结不排水试验	331
9.1 抗剪强度的历史	256	10.2.4 不排水试验	332
9.1.1 应力变量量测数据不完整的试验资料		10.2.5 无侧限压缩试验	332
.....	264	10.3 直剪试验方法	332
9.2 非饱和土的破坏包线	265	10.4 典型试验成果	334
9.2.1 破坏准则	265	10.4.1 三轴试验成果	334
9.2.2 抗剪强度公式	267	固结排水三轴试验	334
9.2.3 引伸的 Mohr-Coulomb 破坏包线	268	常含水量三轴试验	335
9.2.4 用 $(\sigma - u_w)$ 和 $(u_s - u_w)$ 定义		抗剪强度与基质吸力之间的非线性关系	336
抗剪强度	272	不排水和无侧限压缩试验	339
9.2.5 Mohr-Coulomb 包面和应力点包面	274	10.4.2 直剪试验成果	341
9.3 非饱和土的三轴试验	278	第 11 章 塑性与极限平衡	349
9.3.1 固结排水试验	280	11.1 土压力	349
9.3.2 常含水量试验	282	11.1.1 静止土压力	350
9.3.3 量测孔隙压力的固结不排水试验	284	11.1.2 开裂深度的估计	353
9.3.4 不排水试验	285	11.1.3 延伸的 Rankine 土压力理论	354
9.3.5 无侧限压缩试验	288	主动土压力	356
9.4 非饱和土的直剪试验	290	主动土压力系数	357
9.5 应变速率的选择	292	主动土压力分布 (基质吸力沿深度为常数)	357
9.5.1 三轴试验应变速率的背景材料	292	张拉区深度	357
9.5.2 三轴试验的应变速率	294	主动土压力分布 (基质吸力沿深度减小至	
9.5.3 直剪试验的位移速率	298	地下水水位)	358
9.6 多级试验	299	有张拉裂缝土体的主动土压力分布	360
9.7 破坏包线的非线性	301	被动土压力	361
9.8 ϕ^b 与 x 的关系	304	被动土压力系数	362
第 10 章 抗剪强度参数量测	306	被动土压力分布 (基质吸力沿深度为常数)	362
10.1 测试特点	306	被动土压力分布 (基质吸力线性减小至地	
10.1.1 轴平移技术	306	下水水位)	363
10.1.2 孔隙水压力的控制和量测	310	与产生主动、被动状态有关的变形	363

11.1.4 土的总侧向力	364	12.2.1 连续条件	410
土的主动侧向力	364	12.2.2 总体积变化	411
土的被动侧向力	366	12.2.3 水和空气体积变化	412
11.1.5 基质吸力变化对主动和被动土压力 的影响	367	12.3 本构关系	413
膨胀压力与土压力之间的关系	368	12.3.1 弹性形式	413
11.1.6 无支撑开挖	368	液相的本构关系	415
张拉裂缝对无支撑高度的影响	369	空气体积变化	416
11.2 地基承载力	370	各向等压加荷	418
11.2.1 Terzaghi 承载力理论	370	单轴加荷	418
11.2.2 抗剪强度参数和基质吸力设计值的 估计	373	三轴加荷	418
应力状态变量法	373	K_0 加荷	419
总应力法	374	平面应变加荷	420
11.2.3 分层系统的承载力	376	平面应力加荷	420
11.3 土坡稳定	377	12.3.2 压缩性形式	421
11.3.1 危险滑动面的位置	378	12.3.3 体积-质量形式 (用土力学术语)	421
11.3.2 普遍极限平衡法 (GLE)	379	12.3.4 用 $(\sigma - u_w)$ 和 $(u_a - u_w)$ 建立 本构关系	423
引发的抗剪力公式	380	12.4 本构面唯一性的实验验证	424
法向力公式	381	12.4.1 体积变形性质符号的定义	425
力矩平衡的安全系数	382	12.4.2 用微小应力变化来验证本构面的 唯一性	425
力平衡的安全系数	383	12.4.3 用应力状态变量的较大增量来验证 本构面	427
条间力函数	383	12.5 体积变形系数之间的关系	430
计算安全系数的步骤	386	12.5.1 孔隙比与含水量本构面的体积变形系 数之间的关系	430
孔隙水压力表示法	387	12.5.2 体积-质量形式的本构面体积变形系 数之间的关系	432
11.3.3 其他极限平衡方法	390	12.5.3 测定体积变形系数的室内试验方法	433
11.3.4 极限平衡条分法计算中的不收敛 情况	391	12.5.4 卸荷面上各体积变形系数之间的 关系	435
11.3.5 负孔隙水压力对土坡稳定的影响	392	12.5.5 加荷与卸荷本构面的体积变形系数 之间的关系	435
“总粘聚力”法	392	12.5.6 半对数坐标系中的本构面	436
采用“总粘聚力”法的两个实例	394	第 13 章 体积变化指数量测	441
实例 1	394	13.1 文献综述	441
实例 2	398	13.2 试验步骤和设备	444
“延伸抗剪强度”法	400	13.2.1 加荷本构面	445
总体布置和土的特性	401		
渗流分析中采用的初始条件	402		
暴雨情况下的渗流和边坡稳定分析	403		
第 12 章 体积变化理论	406		
12.1 文献综述	406		
12.2 体积变化和变形的概念	410		

固结试验.....	446	第 15 章 一维固结与膨胀	493
压力板干燥试验.....	446	15.1 文献综述	493
收缩试验.....	448	15.2 建立公式所需的物理关系	494
体积变化指数的确定.....	449	15.3 固结方程推导	496
与过渡平面有关的体积变化指数的确定.....	453	15.3.1 液相的偏微分方程	497
压力板试验的典型结果.....	455	饱和条件.....	499
用固结试验成果确定原位应力状态.....	458	干土条件.....	499
“常体积”试验.....	458	非饱和土条件的特殊情况	499
“自由膨胀”试验.....	460	15.3.2 气相的偏微分方程.....	500
仪器压缩性的校正.....	460	饱和土条件.....	502
对取样扰动的校正.....	461	干土条件.....	502
13.2.2 卸荷本构面.....	462	非饱和土条件的特定情况	503
压缩后的卸荷试验.....	462	15.4 用有限差分法求解固结方程.....	503
压力板浸湿试验.....	464	15.5 非饱和土的典型固结试验结果.....	505
自由膨胀试验.....	465	15.5.1 压实高岭土试验.....	506
体积变化指数的确定.....	465	试验结果.....	506
第 14 章 体积变化预测.....	468	理论分析.....	508
14.1 文献综述.....	468	15.5.2 粉质砂土试验.....	510
14.1.1 影响总隆胀量的因素.....	472	试验结果.....	510
14.2 过去、当前和将来的应力状态.....	475	理论分析.....	514
14.2.1 应力状态历史.....	475	15.6 无量纲固结参数.....	514
14.2.2 原位应力状态.....	476	第 16 章 二维和三维的非稳态流以及非	
14.2.3 将来的应力状态和地面位移.....	478	等温分析	519
14.3 隆胀预测理论.....	478	16.1 非耦合二维公式的建立.....	519
14.3.1 总隆胀公式.....	479	16.1.1 各向同性土中的非稳态渗流.....	519
14.3.2 最终孔隙水压力的预测.....	480	液相偏微分方程.....	520
14.3.3 隆胀计算实例.....	481	气相偏微分方程.....	520
14.3.4 工程实录.....	483	16.1.2 各向异性土中的非稳态渗流.....	521
加拿大 Saskatchewan 省 Regina 市整平地面的		渗透系数的各向异性.....	521
筏板基础.....	483	液相偏微分方程.....	523
加拿大 Saskatchewan 省 Eston 地区 Eston 学校.....	484	用有限单元法进行渗流分析.....	525
14.4 预测和减小隆胀的控制因素.....	484	二维问题及其求解举例.....	528
14.4.1 膨胀压力为常数时的闭式隆胀公式		水流通过土坝渗流举例.....	528
.....	485	污水塘底下地下水渗流举例.....	530
14.4.2 膨胀压力的校正对总隆胀预测的		水流通过层状土丘边坡渗流举例.....	542
影响.....	486	16.2 三维固结耦合公式.....	553
14.4.3 顶部浸湿到某一特定深度的例子.....	488	16.2.1 本构关系.....	553
14.4.4 挖除部分土层并回填非膨胀土的		土结构.....	553
例子.....	489	液相.....	554
14.5 关于湿陷性土的说明.....	491	气相.....	555

16.2.2 固结耦合方程.....	556	表 A.3	565
平衡方程.....	556	表 A.4	566
液相连续性.....	556	附录 B 应力状态变量的理论证明.....	568
气相连续性.....	557	B.1 非饱和土的平衡方程.....	568
16.3 非等温流.....	557	B.2 总体平衡.....	569
16.3.1 气相偏微分方程.....	557	B.3 独立相的平衡.....	570
16.3.2 液相流体和蒸汽的流动方程.....	558	B.3.1 水相的平衡.....	571
16.3.3 热流方程.....	559	B.3.2 气相的平衡.....	571
16.3.4 大气边界条件.....	560	B.3.3 收缩膜的平衡.....	571
空气与液态水流的地面边界条件.....	561	B.4 土结构(亦即土粒排列)的平衡.....	575
水蒸气流的地表边界条件.....	561	B.5 应力状态变量的其他组合.....	576
热流的地表边界条件.....	563	参考文献.....	578
附录 A 单位与符号.....	564	索引.....	596
表 A.1	564	著者简介.....	633
表 A.2	565		