

[英] Hai-Sui Yu 著
周国庆 赵光思 梁恒昌 等译

岩土介质小孔扩张理论

Cavity Expansion Methods
in Geomechanics



科学出版社

岩土介质小孔扩张理论

〔英〕 Hai-Sui Yu 著

周国庆 赵光思 梁恒昌 等 译

科学出版社

图字:01-2013-4360 号

内 容 简 介

小孔扩张理论是关于线性或非线性介质中小孔周围应力场和位移场的理论。本书对小孔扩张理论的基本假设、理论模型与求解程序进行阐述,总结小孔扩张理论的重要进展及其在岩土工程领域的应用。

全书分两部分,共 11 章。第一部分从第 2 章到第 7 章,阐述岩土介质中小孔扩张和收缩的基本解。第 2 章到第 6 章涉及弹性、弹塑性和黏弹性/黏塑性岩土材料中的小孔扩张解;第 7 章总结小孔扩张问题有限元分析的基本方程。第二部分从第 8 章到第 11 章,主要涉及小孔扩张理论在岩土工程领域的应用。结合典型工程实例,阐述小孔扩张理论在桩基础、地锚、隧道与地下工程开挖、土体原位测试和钻孔稳定等分析与设计方面的应用。

本书可供从事土木工程、矿业工程和石油工程等领域的工程技术人员参考,亦可作为从事岩土力学及其相关专业的科研工作者、高等院校师生的研究参考书。

Translation from English language edition;

Cavity Expansion Methods in Geomechanics

by Hai-Sui Yu

Copyright © 2000 Springer Netherlands

Springer Netherlands is a part of Springer Science+Business Media

All Rights Reserved

图书在版编目(CIP)数据

岩土介质小孔扩张理论/(英)余海岁(Hai-Sui Yu)著;周国庆等译. —北京:科学出版社,2013

ISBN 978-7-03-038044-9

I. ①岩… II. ①余…②周… III. ①土体-介质-结构动力分析 IV. ①TU43

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 136545 号

责任编辑:周 丹 杨 锐 / 责任校对:邹慧卿

责任印制:赵德静 / 封面设计:许 瑞

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>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013 年 6 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2013 年 6 月第一次印刷 印张:19

字数:384 000

定价:99.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

译者序

从 21 世纪初起,有幸与国际土力学界的杰出学者余海岁(Hai-Sui Yu)愉快并富有成效地合作了十余年时间。余海岁教授曾是岩土工程国家重点学科“长江学者”奖励计划特聘教授,在其特聘教授岗位上不仅培养了梁恒昌、商翔宇、周杰、蔡卫、徐宾宾、李亭等一批博士研究生,而且为岩土工程重点学科建设、团队建设、科学研究、国际合作与交流,为深部岩土力学与地下工程国家重点实验室的谋划、建设与发展作出了创造性的贡献。

作为余海岁教授主要学术成就之一的专著 *Cavity Expansion Methods in Geomechanics*,阐述了岩土工程,特别是地下工程中重要力学问题的分析方法。实践证明,体现在余海岁教授专著中的小孔扩张理论,不仅为桩基础、地锚、隧道和地下工程开挖、土体原位测试和钻孔稳定问题的分析提供了重要的理论体系,同时对深厚土的力学特性、深部矿井建设、深部岩土工程加固等问题的研究均具有重要的指导意义。*Cavity Expansion Methods in Geomechanics* 中译本的出版将激发国内更多学者,特别是青年学者对小孔扩张方法的兴趣,有助于小孔扩张理论的进一步发展以及在国内岩土工程领域更为广泛的应用,这是我们翻译这本专著的初衷。

特聘教授团队成员和博士、硕士研究生朱玉晓、别小勇、夏红春、梁化强、王建州、徐江、段全江、常立武、周杰等参与了本书的初译工作;博士研究生李瑞林认真校对了全书公式和部分文字;译著正式出版前,团队成员商翔宇副教授再次校对了全书。

本书在翻译过程中始终得到余海岁教授及其诺丁汉大学岩土力学研究中心同仁们的鼓励和帮助。本书出版得到“国家重点基础研究发展计划”课题(编号:2012CB026103)、国家自然科学基金重点项目(批准号:50534040)、国家自然科学基金项目(批准号:50974117,41271096)以及深部岩土力学与地下工程国家重点实验室自主研究课题重点研究项目的资助,在此深表谢意。

感谢科学出版社南京分社对本译著的支持,没有他们的努力,中译本难以面世。

译者

2012 年 5 月于徐州

作者中译版序

我的第一本岩土力学专著 *Cavity Expansion Methods in Geomechanics* 出版至今已 12 年了。在此期间,我很荣幸地收到了世界各地的许多岩土工程方面的专家、学者以及工程师对本书的积极评价。非常高兴地看到书中阐述和发展的一系列关于小孔扩张的分析方法和理论解已在岩土工程实践中得到了广泛的应用,并取得了很好的效果。

不过,据我所知国内的很多同行还不容易读到本书的英文版,为此有必要发行中文版。非常高兴地看到中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室的周国庆教授和他的团队近年来花费大量时间和精力把本书翻译成中文。对此我由衷地表示感谢,同时对他们的敬业精神也深表敬佩!

我深信,本书中文版的发行对中国岩土工程界是件有意义的事情。感谢科学出版社同仁的支持和帮助。衷心地希望它能进一步地促进小孔扩张理论的发展以及其在工程问题中的应用。

最后,再次感谢译者的辛勤劳动。相信本书的读者也会感谢他们!

余海岁

2012 年 12 月 31 日于

英国诺丁汉大学

序

岩土体中柱形孔和球形孔扩张理论为岩土工程领域许多重要问题的研究提供了多样而精确的力学分析方法。这一方法涉及的岩土工程问题包括：桩基础垂直和水平承载力确定、原位静力触探和锥形贯入试验中土体应力状态及性质的确定、与掘进和开挖相关的隧道稳定与变形分析等。利用小孔扩张理论对岩土力学中诸多问题进行定量分析，是岩土工程界一个里程碑式的标志。

围绕小孔扩张这一主题，余海岁教授为岩土工程领域的学生、研究人员和工程技术人员提供了一个全面、综合的解决方案。作者对小孔扩张理论的基本假设、理论模型与求解程序进行了全方位的阐述。在该书的第一部分，作者应用弹性理论、理想弹塑性理论、临界状态理论对应变硬化与应变软化材料的应力和位移解进行了分析；同时介绍了有限元数值求解方法。该书假设阐述清晰，问题分析详尽，推导过程严密，同时也指出了研究结果应用的局限性。像岩土力学所有理论一样，小孔扩张理论对问题的几何条件和土性进行了理想化假设，尽管如此，其研究所得土体应力场性质等同于甚至优于传统岩土力学理论的结果。

为了方便对理论推导及其应用感兴趣的读者，余海岁教授在每章末进行了总结，给出了该章的关键公式，并指出了这些解在该书第二部分岩土工程中的用途。同时，罗列齐全的参考文献也使读者能够快速找到文献来源。

该书第二部分阐述了小孔扩张理论在岩土工程中的应用，包括如何把理论解应用到解决原位实测、基础工程和地下工程中的实际问题，同时对理论预测和实测所得结果进行了比较。在分析处理砂土和黏土静力触探及锥形贯入试验方面，以小孔扩张理论为基础的分析方法在利用试验实测数据确定土体原位性质和相关力学性质方面显示了极大的优越性。

通过这本书，余海岁教授对小孔扩张问题进行了前所未有的完整、系统、明晰地阐述和分析。

James K. Mitchell

弗吉尼亚理工大学杰出教授

2000年4月28日

前 言

小孔扩张理论是关于线性或非线性介质中小孔周围应力场和位移场的理论。应用小孔扩张理论解决岩土工程实际问题的过程称为小孔扩张方法。由于没有一个数学理论能完全彻底地描述我们周围复杂的世界,因此每一种理论都只能解决某一类问题。一般采用理论来描述现象的基本特征,而忽略次要特征,但是当被忽略的次要特征上升为主要问题的时候,这种理论的结果就会不准确甚至无效。在过去的几十年中,小孔扩张理论在诸多岩土工程问题分析和设计中呈现了重要作用。本书的目的是对小孔扩张理论及其应用进行统一阐述,书中总结小孔扩张理论的重要进展以及在岩土工程领域的应用,其中许多内容是作者过去二十年研究的成果。

本书可以作为对小孔扩张方法及其应用感兴趣的土木工程、采矿工程和石油工程领域工程师的参考书。由于小孔扩张问题长期以来被作为弹性和塑性理论教科书中的经典实例,本书中所提出的解决办法对工程力学和机械工程领域的学生和研究者也有一定的帮助。

本书共分两部分。第一部分从第2章到第7章,阐述岩土介质中小孔扩张和收缩的基本解。第2章到第6章涉及弹性、弹塑性和黏弹性/黏塑性岩土材料中的小孔扩张解,第7章简要总结小孔扩张问题有限元分析的基本方程。

第二部分从第8章到第11章,主要涉及小孔扩张理论在岩土工程领域的应用。小孔扩张理论的应用领域在不断发展,由于篇幅所限,本书不可能涵盖各个方面。结合典型工程实例,本书详尽阐述了小孔扩张理论在桩基础、地锚、隧道和地下工程开挖、土体原位测试和钻孔稳定等分析与设计方面的应用。

本书反映了作者多年的研究工作和成果,在著写过程中,与许多同事的讨论与合作,使我受益匪浅,在此对他们的支持与帮助表示衷心感谢。

特别感谢 James K. Mitchell 教授多年来的支持,他对初稿提出了许多建设性建议,并为本书写了序言。

感谢已故的 Peter Wroth 教授,以及 Ted Brown 教授和 Guy Houlsby 教授把我带进具有挑战性的岩土力学与工程领域。感谢 Ted Brown 教授对初稿的部分章节给予的详细意见。

感谢 Scott Sloan 教授和 Ian Collins 教授,他们是我早期学术生涯的良师,他们给了我许多有价值的建议与鼓励。

感谢 Kerry Rowe 教授、W. F. Chen 教授、John Carter 教授、Bruce Kutter 教

授和 Mark Randolph 教授给我的鼓励。

书中部分内容是 1999 年夏天作者在麻省理工学院访问期间完成的,在此对 Andrew Whittle 教授的热情接待表示感谢。

感谢 Kylie Ebert 小姐对本书的校对工作。感谢 Mark Allman 博士和吴柏林博士对本书部分章节的评论。感谢 Kluwer 科学出版社 Petra van Steenberg 女士和 Manja Fredriksz 女士对此项目后期阶段给予的帮助。

最后,我要对我的妻子关秀丽、女儿余超和儿子余昊说声“谢谢”,没有他们的爱与支持,我不可能完成此书。

余海岁

2000 年 4 月于澳大利亚纽卡索

目 录

译者序

作者中译版序

序

前言

1 绪论	1
1.1 前言	1
1.2 小孔扩张理论	1
1.3 岩土力学中的应用	2
1.3.1 土体原位试验	2
1.3.2 桩基和地锚	2
1.3.3 隧道及地下开挖	3
1.3.4 钻孔失稳	3
1.4 符号规约	4
1.5 小结	4
参考文献	4
2 弹性解	7
2.1 概述	7
2.2 各向同性介质弹性解	7
2.2.1 空心球体扩张	7
2.2.2 厚壁圆筒扩张	9
2.2.3 受双向原位应力的柱形孔	11
2.3 各向异性介质弹性解	15
2.3.1 空心球体扩张	15
2.3.2 厚壁圆筒扩张	17
2.4 半无限空间弹性解	19
2.4.1 半空间柱形孔	19
2.4.2 半空间球形孔	21
2.5 小结	24
参考文献	24
3 理想弹塑性解	26
3.1 引言	26
3.2 Tresca 解	26

3.2.1 有限介质球形孔扩张	26
3.2.2 有限介质圆柱形孔扩张	30
3.2.3 有限介质小孔收缩	34
3.3 Mohr-Coulomb 解	39
3.3.1 有限介质球形孔扩张	39
3.3.2 有限介质柱形孔扩张	45
3.3.3 无限介质小孔扩张	51
3.3.4 无限介质小孔收缩	56
3.3.5 从零半径起的小孔扩张	64
3.4 小结	69
参考文献	71
4 临界状态解	73
4.1 引言	73
4.2 从有限初始半径起的小孔扩张	73
4.2.1 不排水条件下黏土小孔扩张	73
4.2.2 不排水条件下黏土小孔收缩	86
4.2.3 排水条件下正常固结黏土柱形孔扩张	88
4.2.4 排水条件下重度超固结黏土小孔扩张	92
4.3 零初始半径小孔扩张	96
4.3.1 排水条件下砂性土小孔扩张	96
4.3.2 不排水条件下亚弹性黏土柱形孔扩张	101
4.4 小结	105
参考文献	105
5 弹-塑性解的发展	108
5.1 引言	108
5.2 硬化/软化土小孔扩张	108
5.2.1 不排水条件下应变硬化/软化黏土柱形孔扩张	108
5.2.2 不排水条件下黏土从零半径开始的小孔扩张	111
5.3 脆/塑性岩石中小孔收缩	113
5.3.1 Mohr-Coulomb 准则脆/塑性岩石中小孔卸载	113
5.3.2 Hoek-Brown 准则脆/塑性岩石中小孔卸载	117
5.4 分段 Mohr-Coulomb 准则解	121
5.4.1 非线性屈服面的分段逼近	121
5.4.2 控制方程	123
5.4.3 塑性区划分	123
5.4.4 应力分析	124
5.4.5 位移分析	125

5.5 小孔扩张反问题	128
5.5.1 不排水条件下黏土小孔扩张	128
5.5.2 无黏性砂土小孔扩张	129
5.6 小结	131
参考文献	132
6 与时间相关的解	134
6.1 引言	134
6.2 黏弹性解	134
6.2.1 黏弹性模型和应力分析方法	134
6.2.2 两个简单小孔问题的解	137
6.3 弹-黏塑性解	139
6.3.1 弹-黏塑性应力-应变关系	140
6.3.2 初始塑性区的应力和位移	141
6.3.3 与时间相关的塑性区应力和位移	142
6.4 固结解	144
6.4.1 小孔扩张围土固结	144
6.4.2 小孔收缩围土固结	147
6.5 小结	149
参考文献	150
7 有限元解	151
7.1 概述	151
7.2 排水与不排水问题非耦合分析	151
7.2.1 有限元公式	151
7.2.2 土体塑性模型	153
7.2.3 有限元程序	160
7.3 耦合固结分析	160
7.3.1 有限元公式	160
7.3.2 修正剑桥模型	162
7.3.3 有限元程序	163
7.4 小结	163
参考文献	164
8 土工原位测试	166
8.1 概述	166
8.1.1 旁压测试原理	166
8.1.2 旁压仪种类	167
8.1.3 锥形贯入测试	167
8.2 黏土自钻式旁压测试	167

8.2.1	剪切模量	168
8.2.2	原位土水平总应力	168
8.2.3	不排水剪切强度	169
8.2.4	固结系数	175
8.2.5	有限旁压长度和初始应力状态的影响	175
8.3	砂土自钻式旁压试验	177
8.3.1	剪切模量	177
8.3.2	原位水平总应力	178
8.3.3	排水抗剪强度	178
8.3.4	状态参数	181
8.3.5	旁压长度的影响	187
8.4	黏土和砂中锥形旁压试验	188
8.4.1	黏土锥形旁压试验	188
8.4.2	砂土锥形旁压试验	189
8.5	土中锥形贯入试验	194
8.5.1	黏性土锥形贯入试验	194
8.5.2	无黏性土锥形贯入试验	197
8.5.3	结语	202
8.6	小结	202
	参考文献	202
9	桩基础和土锚	209
9.1	概述	209
9.2	黏土打入桩轴向承载力	209
9.2.1	桩侧承载力:桩的打入对土中应力的影响	209
9.2.2	打入桩的端承力	214
9.2.3	桩承载力随时间的增加:固结效应	215
9.3	砂土打入桩轴向承载力	216
9.3.1	砂土桩端承载力	216
9.3.2	可压碎砂桩端承载力	218
9.4	桩横向承载力	219
9.4.1	黏土桩横向极限压力	219
9.4.2	砂土桩横向极限压力	219
9.4.3	岩石中桩横向极限压力	220
9.5	受有附加荷载砂的承载力	221
9.6	土中板锚抗拔力	223
9.6.1	黏土中板锚	223
9.6.2	砂土中板锚	226

9.7 小结	228
参考文献	230
10 地下开挖及隧道工程	233
10.1 概述	233
10.2 完整岩体中的开挖设计	233
10.2.1 弹性应力分析	234
10.2.2 弹-塑性(断裂)应力分析	238
10.3 地下开挖中的围岩支护	241
10.3.1 围岩支护与加固原理	241
10.3.2 基本响应曲线	242
10.4 黏性土中的隧道	245
10.4.1 隧道掘进引起的沉降-总应力分析	247
10.4.2 掘进引起的沉降-有效应力关系分析	251
10.4.3 隧道稳定	262
10.5 黏性-摩擦土中隧道	263
10.5.1 掘进过程的沉降	263
10.5.2 隧道稳定性	267
10.6 小结	269
参考文献	270
11 钻孔失稳	273
11.1 概述	273
11.2 钻孔失稳弹性分析	274
11.2.1 用常弹性刚度进行应力分析	274
11.2.2 与压力相关的弹性分析法	276
11.2.3 应力诱发各向异性对钻孔失稳的影响	277
11.3 钻孔壁失稳的孔隙弹性分析	280
11.3.1 半解析解	280
11.3.2 钻孔失稳预测的应用	282
11.4 钻孔失稳的塑性分析	285
11.4.1 稳定准则	285
11.4.2 临界状态模型稳定分析	285
11.5 小结	287
参考文献	287

1 绪 论

1.1 前 言

小孔扩张理论是关于研究圆柱形或球形孔的扩张和收缩所引起的应力、孔隙水压力和位移变化的理论。由于小孔扩张理论提供了许多解决复杂岩土力学问题的简单、实用的方法,因此岩土介质中的小孔扩张问题是岩土力学理论研究的一个基本问题。

从 20 世纪五六十年代开始,特别是最近 20 年,小孔扩张理论研究取得了重大进展,主要表现在以下两个方面:

- (1) 岩土介质中小孔扩张基本问题的求解;
- (2) 小孔扩张理论在解决岩土工程问题方面的应用。

关于第一方面,基于各种岩土材料复杂的本构模型已进行了大量的解析分析,而且这些解析解已经广泛应用于解决岩土工程中包括桩基础和地锚承载力的估计、土体原位试验结果解释、隧道和地下开挖分析、钻孔失稳预测等许多实际工程问题。

尽管有很多问题的分析涉及小孔扩张理论,但是岩土工程师要理解和应用这些理论方法去解决具体岩土工程问题并非易事。因为这方面的主要研究成果往往记载于学术论文或学术会议报告中,不便推广应用。同时,许多文章的解析过程使用了不同符号,给不同方法之间的比较造成了困难。

本书旨在总结和阐述小孔扩张理论的研究成果,同时讨论其在岩土工程中的应用。为便于比较和理解,书中对不同孔扩张问题的解析采用了统一的符号。希望本书能对岩土工程中小孔扩张理论的发展与应用有所裨益。

1.2 小孔扩张理论

岩土介质中小孔扩张或收缩是一维边值问题。解决这类问题需要同时采用连续介质力学原理和能够描述岩土介质本构关系的基本数学模型。岩土体是最古老、最复杂的建筑材料之一,与钢或混凝土这类土木工程材料相比,岩土材料的力学特性更难以测定。本构模型的发展和测试技术的进步促进了土体性质的测定以及对其力学行为的描述。尽管某些情况下的岩土体本构模型还需进一步细化,但

迄今为止对土体本构模型的研究总体上取得了令人瞩目的进展。岩土体的试验是本构关系比较和研究的基础,过去 20 年中在这方面已取得长足进步,但目前试验研究水平尚不尽如人意。

弹性和塑性理论是最广泛使用的岩土本构理论。现有大部分岩土本构模型可分为三大类:

- (1) 弹性模型(线性或非线性);
- (2) 黏弹性或黏弹塑性模型;
- (3) 弹塑性模型(理想塑性或应变硬化/软化)。

这些模型均可用来描述岩土介质的应力-应变关系,但需根据具体研究问题和要求选用恰当的本构模型。

1.3 岩土力学中的应用

本书第 8 章到第 11 章将详细阐述小孔扩张理论在岩土工程土体原位测试、深基础、隧道和地下开挖以及石油钻孔稳定等领域的应用。

1.3.1 土体原位试验

旁压仪和锥形贯入仪是原位试验实测土体特性的两种常用仪器。前者可准确测出土体的刚度和强度,后者则可快速获得土体剖面的基本特性。自从 Menard (1957),Gibson 和 Anderson(1961)开始这方面研究,柱形孔扩张理论已成为岩土体中自钻式旁压试验结果最重要的解释方法(Clarke,1995),球形孔扩张也已成为确定锥形贯入试验(CPT)中锥尖阻力的简单方法(Yu,Mitchell,1998)。

锥形贯入旁压仪是原位土试验中相对较新的设备,它由标准贯入锥尖和位于锥尖后的旁压压力膜构成。把旁压压力膜置于锥尖后的构想始于 20 世纪 80 年代初,它集旁压仪和标准锥形贯入仪的优点于一体。锥形贯入旁压仪可用标准的 CPT 套筒设备来安装,使得锥形贯入旁压仪试验可按常规 CPT 方法操作。尽管锥形贯入旁压仪试验的分析难度大于自钻式旁压试验,但是近年来锥形贯入旁压仪试验的分析方法研究已取得了重大进步。利用大应变小孔扩张解,可以根据黏土(Houlsby,Withers,1988)和砂(Yu et al.,1996)的锥形贯入旁压仪试验结果来确定土体特性。

1.3.2 桩基和地锚

土体中打入桩的桩端和桩身承载力的预测一直是岩土工程中的一大难题,这主要是因为桩基打入土体的过程是一个强烈的材料非线性和几何大变形问题。对此的很多研究都集中在建立黏土打入桩打入过程的模型,例如,Baligh(1985)提出

的应变路径方法和 Yu 等(2000)提出的稳态有限元方法。相比之下,砂土中桩基承载力预测方面的研究成果较少。由于缺乏严密的分析方法,许多半解析或经验方法仍然广泛用于桩基设计和施工过程。实际上,按照 Bishop 等(1945), Hill (1950), Gibson(1950)早期的建议,可以采用球形孔和柱形孔极限压力解预测岩土中桩基的端阻和桩身承载力(Vesic, 1972; Randolph et al., 1992; Yu, Houlsby, 1991; Collins et al., 1992; Carter, Kulhawy, 1992, Randolph et al., 1994)。

除模拟桩基承载力,小孔扩张理论还可用来估算地锚的抗拉承载力(Vesic, 1971)。本书提出了利用小孔扩张解预测黏土和砂土中板锚承载力的一种新方法,结果表明这一简单求解方法类似于其他复杂的数值分析方法(Merifield et al., 2000)。

1.3.3 隧道及地下开挖

由于能够兼顾稳定性和实用性两个重要的因素,小孔扩张理论已经应用于隧道以及地下开工程的设计和施工中。稳定性要求隧道建造后不能破坏,在这一方面,小孔周围介质弹性和弹塑性应力解已广泛应用于地下围岩支护的分析和设计中(Terzaghi, Richart, 1952; Hoek, Brown, 1980; Brown et al., 1983; Brady, Brown, 1993)。本书将会详细阐述如何利用简单的小孔扩张理论来有效评价隧道稳定性。实用性要求隧道掘进时不会产生大的位移,避免邻近或上部建筑和设施遭受破坏,在大变形软土中开挖隧道时尤为重要。隧道开挖减小了开挖空间周围的原位应力,因此可通过从原位应力状态的卸载孔来模拟隧道开挖。越来越多的例证显示,可以用柱形孔收缩来准确模拟垂直于隧道轴平面土的性状,用球孔收缩理论能更好地预测隧道前方的位移。用小孔扩张解来预测开挖隧道引起的地面位移的例子有很多,例如 Rowe(1986), Mair 和 Taylor(1993), Verruijt 和 Booker(1996), Sagaseta(1998 年), Loganathan 和 Poulos(1998)以及 Yu 和 Rowe(1999)等。

1.3.4 钻孔失稳

钻井过程中钻孔失稳是岩石力学在石油工程应用中的一个主要问题。在世界范围内,每年因钻孔失稳造成的设备损失和由于时间浪费引起的经济损失高达 5 亿美元(Dusseault, 1994)。提高钻孔失稳的分析预测能力可在很大程度上降低这些损失。

Bradley(1979)和 Santarelli 等(1986)指出,应力诱导的钻孔失稳有三种类型:

- (1) 岩石的延性屈服导致孔径缩小;
- (2) 脆性岩石破裂导致孔径扩张;
- (3) 泥浆压力过高引起的钻孔水力劈裂。

通常可以调整内部压力(泥浆压力),以避免由于岩石破裂或断裂导致的钻孔失稳。

弹性、孔隙弹性和塑性模型的小孔扩张解已经开始应用于软岩中钻孔失稳问题的研究(Charlez, 1997),例如,钻孔失稳的弹性分析基本步骤为:

- (1) 确定钻孔周围岩石的弹性应力场;
- (2) 选择适当的岩石破坏准则;
- (3) 比较弹性应力和岩石破坏准则。

若任意位置的岩石达到了破坏准则,则钻孔失稳。

上述三种钻孔失稳的主要类型都可用小孔扩张理论来解决,本书将重点阐述与钻孔周围脆性岩石破裂导致钻孔扩张有关的失稳,同时也讨论由于岩石延性屈服所导致的钻孔收缩的失稳问题。

1.4 符号规约

通常情况下,本书采用常用的岩土力学符号注释,即压应力和压力均为正。但在第3章关于理想弹塑性解时例外,因为这一领域许多有影响的论文都采用拉应力为正的约定。尽管可以将张拉应力转换为压应力为正,但是转换过程比较麻烦且容易出错,所以本书也采用同样的约定。

1.5 小 结

(1) 小孔扩张理论是关于由柱形孔和球形孔扩张及收缩所引起的压力、孔隙水压力和位移变化的理论。

(2) 在岩土体中,基于各种复杂情况的本构模型,已经得到大量的小孔扩张解析解和数值解;其中大部分本构模型为弹性、塑性或黏弹性假定。

(3) 小孔扩张理论为岩土工程中很多问题的求解提供了简单而实用的方法,包括桩基和地锚的承载力分析、土体原位试验的解释、隧道和地下开挖行为的分析、钻孔失稳的预测等。

(4) 除第3章外,本书采用常规岩土力学符号表述方法,即约定压应力为正。

参 考 文 献

- Baligh, M. M. (1985). Strain path method. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 111(9), 1108-1136.
- Bishop, R. F., Hill, R and Mott, N. F. (1945). The theory of indentation and hardness tests. *Proceedings of Physics Society*, 57, 147-159.