



排水固结渗流理论及 工程技术创新实践

董志良 陈平山 等 著



科学出版社

排水固结渗流理论 及工程技术创新实践

董志良 陈平山 等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是软基处理技术领域的研究成果总结。本书共分为八章,第一章主要介绍国内外应用排水固结法加固软基时存在的问题;第二章主要阐述关于砂井地基的固结理论;第三章介绍砂井地基地下水位及渗流量计算方法,这是多年来国内外学者较少涉及的研究内容,也是作者早期的主要研究成果之一;第四~第六章叙述近10年来开发的系列软基处理技术及工程应用情况;第七章主要论述特殊条件下真空预压边界密封技术及对周围环境的防护技术,对实际工程极具指导意义;第八章介绍真空预压加固软基过程中的质量监控创新技术,这些技术均获得了国家专利,具有推广应用价值。

本书可供从事土木工程、地下结构、软基处理等领域研究的科研、设计人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

排水固结渗流理论及工程技术创新实践/董志良,陈平山等著. —北京:科学出版社, 2016

ISBN 978-7-03-050920-8

I. ①排… II. ①董… III. ①软土地基—排水—预压加固 IV. ①TU471
②TU472.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 291129 号

责任编辑:童安齐 / 责任校对:陶丽荣

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>

北京中科印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 12 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2016 年 12 月第一次印刷 印张: 14 1/4

字数: 187 000

定价: 75.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈中科〉)

销售部电话 010-62136230 编辑部电话 010-62135319

版权所有, 侵权必究

举报电话: 010-64030229; 010-64034315; 13501151303

序

排水固结渗流理论是软基处理技术领域的关键理论,其探讨天然地基或预先在地基中设置竖向排水体,利用分级逐渐加载或在建筑物建造前在场地先行加载预压,使土体中的孔隙水排出并逐渐固结,地基发生沉降,强度逐步提高的排水固结渗流过程,是一项涉及多个子学科领域并极富学术内涵且又具工程应用前景的科学研究。

本书是根据董志良教授级高级工程师与中交四航工程研究院有限公司及中交四航岩土工程有限公司岩土技术团队二十余年来在软基处理技术领域所取得的部分创新研究成果的基础上撰写而成的一本学术专著。20世纪90年代初,本书作者率先建立了正负压砂井地基固结理论,并基于该理论,先后提出了地下水位零压线高度及渗流量计算方法,解决了困扰软基处理工程界多年的技术难题。2000年之后,在作者的带领下,中交四航岩土技术团队结合大量的工程实践与理论研究,开发了一系列的软基处理技术,并在国内外多个工程中成功应用。

本书反映了作者及其研究团队在原有研究成果及学术论文的基础上,将核心技术成果提炼出来加以总结分析,既包含严密的理论体系,又有丰富的工程分析实例,涉及本学科领域许多难点和难题的研究,以及处理这些问题的工艺技术及创新方法。书中较全面地介绍了国内外应用排水固结法加固软基时存在的问题,并讨论了砂井地基的固结理论,对于砂井地基地下水位及渗流量计算方法也做了详细论述。另一方面,作者把理论与工程应用紧密结合,包括系列软基处理工艺技术及工程应用情况,以及真空预压加固软基过程中的质量监控创新技术,这对理论的工程应用将发挥有益的作用。

本书作者之一——董志良教授级高级工程师,理论功底扎实、工程经验丰富,获得水运港口学会等各方认可,其与华南理工大学等高校合作培养了大批硕士博士以及博士后,在众多学术刊物上发表了许多创新成果。董志良教授级高级工程师是我多年至交好友,其孜孜不倦、乐此不疲的科研精神让我感受颇深,我为其及研究团队的新作问世表示赞许和祝贺,相信本书的付梓问世对排水固结渗流理论及工程技术创新应用的进展将有很大助益,此是为序。

华南理工大学土木与交通学院,教授 莫海鸿

2016年5月28日于广州

前 言

本书是作者与中交四航工程研究院有限公司及中交四航岩土工程有限公司岩土技术团队二十余年来在软基处理技术领域方面所取得的部分创新研究成果的总结。20 世纪 90 年代初,本书作者率先建立了正负压砂井地基固结理论,并基于该理论,先后提出了地下水位零压线高度及渗流量计算方法,解决了困扰软基处理工程界多年的技术难题。21 世纪初,在作者的带领下,中交四航岩土技术团队结合大量的工程实践与理论研究,开发了一系列的软基处理技术,并在国内外多个工程中成功应用。本书反映作者及其研究团队在已有研究成果及学术论文的基础上提炼出来的核心技术成果,极具指导意义。

本书共分为八章,第一章主要介绍国内外应用排水固结法加固软基时存在的问题;第二章主要阐述关于砂井地基的固结理论,其目的旨在读者对本书的理论基础有所了解;第三章介绍砂井地基地下水位及渗流量计算方法,这是多年来国内外学者较少涉及的研究内容,也是作者早期的主要研究成果之一;第四~第六章主要介绍近 10 年来开发的系列软基处理技术及工程应用情况,即针对不同的地质条件,因地制宜地采用不同的技术,获得了事半功倍的效果,并成功地申报了国家级、省部级施工工法,其部分成果已列入了交通部的有关技术规范;第七章主要介绍特殊条件下真空预压边界密封技术及对周围环境的防护技术,对实际工程极具指导意义;第八章主要介绍真空预压加固软基过程中的质量监控创新技术,这些技术均获得了国家专利,具有推广应用价值。

本书主要反映了作者与张功新博士、殷静博士、刘嘉博士、周红星博士、邱青长博士、王婧博士的部分研究成果,以及中交四航工程研究院有限公司岩土技术团队自筹课题和科技部专项研究资助项目(编号:2008EG124222/2009EG124217/2010EG124227)的部分研究成果。本书由王婧博士负责编校。本书所反映的研究成果在天津滨海新区、连云港、温州、厦门、广州、珠海、深圳,以及越南、巴基斯坦等的软基处理工程中得到了广泛应用,社会效益和经济效益显著。

本书的出版得到了中交四航工程研究院有限公司的科研经费资助,并得到中交四航岩土技术团队全体成员以及刘家豪教授、莫海鸿教授、房营光教授、曹洪教授、刘曙光教授的支持、指导和帮助,在此深表感谢!

目 录

第一章 绪论	1
1.1 排水固结法简介	1
1.2 固结与渗流关系辨析	2
1.3 排水固结法加固软基解决的主要问题	2
1.4 本书主要内容及编写特点	2
参考文献	3
第二章 正负压砂井地基固结理论	4
2.1 概述	4
2.2 瞬时加载条件下正负压砂井地基固结理论	4
2.2.1 基本方程及假定条件	4
2.2.2 地基固结度求解	8
2.2.3 实例分析	11
2.3 分级加载条件下正负压砂井地基固结理论	12
2.3.1 基本方程及假定条件	12
2.3.2 地基固结度求解	13
2.3.3 实例分析	15
2.4 分级加载条件下半透水边界成层砂井地基固结理论	18
2.4.1 基本方程及假定条件	18
2.4.2 地基固结度求解	21
2.4.3 实例分析	22
2.5 考虑渗透系数变化的砂井地基固结理论	24
2.5.1 渗透系数与固结应力的关系推导	24
2.5.2 试验结果与公式计算对比分析	27
2.5.3 渗透系数变化下的单井计算模型	30
2.5.4 实例分析	32
参考文献	35
第三章 正负压砂井地基地下水位及渗流量计算方法	37
3.1 概述	37
3.2 正负压砂井地基地下水位变化机理	38

3.3 地下水位及测管水位高度计算方法	41
3.3.1 地下水位高度计算方法	41
3.3.2 测管水位高度计算方法	42
3.3.3 实例分析	44
3.4 正负压砂井地基渗流量计算	45
3.4.1 竖向排水通道渗流量	45
3.4.2 加固区内外渗流量	46
3.4.3 加固区渗流总量	50
3.4.4 实例分析	50
参考文献	51
第四章 超软弱土浅表层快速加固技术	52
4.1 概述	52
4.2 超软土浅表层快速加固技术	52
4.2.1 超软土地基加固难点	53
4.2.2 地基处理技术思路	54
4.2.3 浅表层快速加固技术工艺流程	55
4.3 自然晾晒结合抽排水快速加固技术	58
4.3.1 技术内容	58
4.3.2 实施方法	59
4.4 超软弱土浅表层空间排水固结快速处理技术	60
4.4.1 技术内容	60
4.4.2 实施方法	61
4.5 一种在超软弱土上快速修筑道路技术	65
4.6 工程实例	66
4.6.1 工程概况	66
4.6.2 软基加固要求和处理方案	70
4.6.3 超软弱土浅表层加固施工工艺	72
4.6.4 浅表层加固效果分析	79
参考文献	82
第五章 真空预压联合强夯加固技术	83
5.1 概述	83
5.2 真空预压联合强夯加固技术	84
5.2.1 技术原理	84

5.2.2	工艺技術流程	86
5.2.3	强夯时机的确定	93
5.2.4	真空加荷系统的优化方法	96
5.3	工程实例	98
5.3.1	浅表层预处理监测成果分析	98
5.3.2	真空联合堆载预压加固情况	109
5.3.3	强夯加固地基监测成果分析	110
	参考文献	117
第六章	深井降水联合强夯加固技术	118
6.1	概述	118
6.2	技术原理	119
6.2.1	深井降水法加固原理	120
6.2.2	强夯法加固原理	123
6.2.3	WDDC 软基加固技术特征	125
6.3	工艺技術流程	126
6.3.1	砂垫层施工	126
6.3.2	塑料排水板插设	127
6.3.3	泥浆搅拌墙施工	128
6.3.4	深井井点打设	130
6.3.5	深水潜水泵安装	132
6.3.6	强夯施工	133
6.3.7	小结	134
6.4	适用范围	135
6.5	工程实例	135
6.5.1	依托工程概况	135
6.5.2	工程地质条件	135
6.5.3	钻孔取样点位布置	137
6.5.4	监测仪器布置及监测频率	138
6.5.5	强夯振动测试	143
6.5.6	环境质最监测	145
6.5.7	加固效果检测	145
	参考文献	147

第七章 真空预压法边界密封技术及对周边环境的防护技术	149
7.1 概述	149
7.2 淤泥搅拌墙的宽度计算方法	150
7.2.1 土质指标分析	151
7.2.2 孔压分析	152
7.3 共用密封墙桩帽技术	155
7.3.1 工程概况	156
7.3.2 密封方案及效果	157
7.3.3 经济效益分析	159
7.4 真空预压对周围环境影响机理分析	159
7.4.1 真空预压影响区土体侧向位移	160
7.4.2 真空预压影响区地基不均匀沉降	166
7.5 格栅水泥搅拌桩和砂桩联合防护	167
7.5.1 表面沉降	167
7.5.2 表层位移	169
7.5.3 深层侧向位移	170
7.5.4 孔隙水压力	172
7.5.5 水位降	174
7.6 高压旋喷桩防护技术	175
7.6.1 表面沉降	176
7.6.2 表层位移	177
7.6.3 深层侧向位移	178
7.6.4 孔隙水压力	179
7.6.5 水位降	180
参考文献	181
第八章 真空预压加固软基的监控技术创新	182
8.1 概述	182
8.2 监控技术	182
8.2.1 一种新型的钻孔取样技术	182
8.2.2 地下水位测试技术	185
8.2.3 孔压计埋设技术	191
8.2.4 超孔压修正计算方法	192
8.3 加固效果评价指标	195
8.4 “双指标”卸载标准	201

8.5 实例分析	204
8.5.1 工程概况	204
8.5.2 地质条件	204
8.5.3 地下水实测结果	207
8.5.4 孔压理论计算与实测结果对比分析	210
参考文献	212

第一章 绪 论

1.1 排水固结法简介

顾名思义,排水固结法(Drainage Consolidation Method),是对天然地基或预先在地基中设置砂井(袋装砂井或塑料排水板)等竖向排水体,然后利用建筑物/构筑物本身重量分级逐渐加载;或在建筑物建造前在场地先行加载预压,使土体中的孔隙水排出并逐渐固结,地基发生沉降,同时强度逐步提高的方法。按照使用目的,排水固结法可以解决地基的沉降与稳定问题。

排水固结法由排水系统和加压系统两部分共同组合而成。设置排水系统主要在于改变地基原有的排水边界条件,增加孔隙水排出的通路,缩短排水距离。该系统由水平排水垫层和竖向排水体构成,当软土层较薄,或土体的渗透性较好而施工期较长时,可仅在地面铺设一定厚度的排水垫层,然后加载,土层中的孔隙水竖向流入垫层而排出;当遇到深厚、透水性很差的软黏土层时,可在地基中设置砂井或塑料排水板等竖向排水通道,地面连以排水砂垫层,构成排水系统。

加压系统即是施加起固结作用的荷载,使土中的孔隙水产生压差而渗流使土固结^[1]。排水固结法加载方式可分为静荷载和动荷载两类。静荷载加压系统主要包括真空预压法、降水预压法和堆载法等;动荷载主要指动力固结,如强夯法。

改革开放以来,随着我国经济建设的快速发展,传统的排水固结法如真空预压法、堆载预压法和真空联合堆载预压法等,在交通、水利、建筑、市政工程等多个领域得到了广泛应用,在大量工程实践基础上,理论研究相应地发展,工艺技术也相对成熟。近10年来,国内掀起了围海造地的热潮,吹填土是在整治和疏通江河行道时,用挖泥船和泥浆泵把江河和港口底部的泥砂通过水力吹填而形成的沉积土。在吹填过程中,泥沙结构遭到破坏,以细小颗粒的形式缓慢沉积,因而具有塑性指数大、天然含水量和孔隙比大、重度小、高压缩性、渗透性小、强度极低等特点。

吹填土作为一种特殊土质,受水力机械作用,其形成的地基有别于一般的海相、湖相以及河相沉积的软土地基,在传统排水固结法加固原理基础上,笔者所在的研究团队先后开发了浅表层地基加固技术、真空预压联合强夯加固技术及深井降水联合强夯加固技术,将在后面章节详细阐述,暂且不表。

1.2 固结与渗流关系辨析

在荷载作用下,土体中产生超孔隙水压力,在排水条件下,随着时间发展,土体中水被排出,超孔隙水压力逐步消散,土体中有效应力逐步增大,直至超孔隙水压力完全消散,这一过程称为固结^[2]。固结即在荷载或其他因素作用下,土体孔隙中水分逐渐排出、体积压缩、密度增大的现象。可见,产生固结必须具备两个条件:一是土体孔隙水要排出;二是土体有效应力增大。广义的固结指土的压缩过程,但大多数情况下,固结仅指饱和土的排水压密过程,分主固结与次固结。本书所提固结主要涉及主固结,即排水固结或受压引起的固结。

存在于地基中的地下水,在一定的压力差作用下,将透过土体孔隙发生流动,这种现象称为渗流^[3],这说明要发生渗流,首先必须有一定的压力差。

从逻辑上讲,土体产生渗流并不一定会发生固结,因为土体有效应力可能没有增加,如挡水土坝中的渗流,但是如果发生了固结,则一定会有渗流产生,否则孔隙水无法排出,这也是经典的比奥(Biot)固结理论中为什么会出现渗流方程的原因。因此可以认为,渗流是固结的必要而非充分条件。在本书中,提及“排水固结渗流”目的是凸显渗流现象在固结过程中的重要性,尤其是在含水率较高或自由水丰富的软黏土地基中,这一特点表现得更为明显,正是基于该出发点,本书的理论与工艺技术成果都与渗流现象密切相关,在后面的内容中将会着重体现。

1.3 排水固结法加固软基解决的主要问题

排水固结法可以有效地解决软基的沉降与稳定问题,因此现有的计算理论与工艺技术均围绕这两个问题展开。

(1) 沉降问题。地基的沉降在加载预压期间大部分或基本完成,使建筑物在使用期间不致产生不利的工后沉降和沉降差。

(2) 稳定问题。加速地基土体的抗剪强度的增长,从而提高地基的承载力和稳定性。

1.4 本书主要内容及编写特点

目前国内外对排水固结渗流问题的研究取得了不少的成果,但这些研究成果大都分散于各相关学科分支的学术刊物和会议资料中,而关于排水固结渗流方面的专著很少,不便于读者系统详尽地阅读和学习。本书是在作者及其学术团队已

有研究成果、研究报告及学术论文的基础上,将排水固结渗流的核心技术成果提炼汇总而成。

本书共分为八章,第一章为绪论,主要阐述排水固结法概念,以及国内外应用排水固结法解决软基存在的问题。第二章为正负压砂井地基固结理论,主要介绍瞬时加载、分级加载、半透水边界成层以及渗透系数变化的砂井地基固结理论。第三章为正负压砂井地基地下水位及渗流量计算方法,介绍砂井地基地下水位变化机理、地下水位及测管水位高度计算方法,以及正负压砂井地基渗流量计算。第四章为超软弱土浅表层快速加固技术,介绍超软弱土浅表层快速加固技术、自然晾晒结合抽排水快速加固技术、超软弱土浅表层空间排水固结快速处理技术、一种在超软弱土上快速修筑道路技术等几种工艺技术方法。第五章为真空预压联合强夯加固技术,具体介绍该法的工艺技術流程,强夯时机的确定,高效低耗的真空射流泵系统,以及真空加荷系统的优化方法。第六章为深井降水联合强夯加固技术,介绍该技术的技术原理、工艺技術流程、适用范围和工程实例。第七章为真空预压法边界密封技术及对周边环境的防护技术,主要介绍淤泥搅拌墙的宽度计算方法、共用密封墙桩帽技术、真空预压对周围环境影响机理分析、真空预压影响区土体侧向位移、地基不均匀沉降、格栅水泥搅拌桩和砂桩联合防护,以及高压旋喷桩防护技术。第八章为真空预压加固软基的监控技术创新,主要介绍新型监控技术、加固效果评价指标,“双指标”卸载标准。

参 考 文 献

- [1] 地基处理手册编写委员会.地基处理手册[M]. 2版. 北京:中国建筑工业出版社, 2000.
- [2] 龚晓南.高等土力学[M]. 杭州:浙江大学出版社, 2002.
- [3] 高大钊.土力学与基础工程[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 1998.

第二章 正负压砂井地基固结理论

2.1 概 述

排水固结法的关键工艺是先在地基中设置竖向排水体（如袋装砂井、塑料排水板），然后在地基表面设置水平排水系统（包括水平排水砂垫层和水平排水管路），最后逐渐施加外荷载（如真空荷载、堆载）。其中堆载预压法，在被加固地基上堆填土料或石块，进行加载预压，使地基沉降提前完成，地基土体发生固结的同时其承载力得到提高，然后卸去预压荷载、建造建筑物，以消除建筑物基础的部分均匀沉降，这种方法即为堆载预压法。为了加快地基的固结速度，常在地基中设置竖向排水体（如塑料排水板、袋装砂井等）和水平排水垫层，这种方法即为砂井联合堆载预压法。砂井联合堆载预压法适用于渗透性较差的软土地基^[1-6]。

正压及负压（堆载为正压、真空预压为负压）配合砂井加固软基技术，已在大量工程中应用，取得较多成功的经验。本章建立等应变条件下正负压砂井地基固结模型，给出一种简便适用的考虑井阻和涂抹的正负压砂井地基固结解析理论，建立考虑瞬时加载与分级加载条件下的正负压砂井地基固结模型，并通过工程实例验证该计算方法。

对深厚复杂地层中未打穿砂井的情况，可将未打穿的下卧层中位于砂井底面以下的（半径）视为“虚拟砂井”，其固结系数等效于下卧层的相应值，考虑其三维固结的实际情况以及地基上部砂垫层的排水作用，即半透水边界，建立分级加载半透水边界砂井地基固结模型。

从固结系数的定义出发，基于室内试验数据，考虑前期固结压力的影响，得出正常固结土在压缩过程中渗透系数与固结应力的关系式，将其应用于单井三维有限元计算中，进而分析真空预压下变渗透系数对固结的影响，建立考虑渗透系数变化的砂井地基固结模型。

2.2 瞬时加载条件下正负压砂井地基固结理论

2.2.1 基本方程及假定条件

2.2.1.1 模型的建立

砂井地基属三维固结问题，通常将整个地基固结转化成单井固结，如图 2-1

所示即为正负压砂井地基单井计算简图, 其中: H 为砂井计算长度; K_v 和 K_h 为地基竖向及水平向渗透系数; K_s 为涂抹区水平向渗透系数; r_s 为涂抹区半径; K_w 为砂井纵向渗透系数; r_e 为砂井影响区半径; $-P_0$ 及 P_l 为排水垫层中负压值及正压值, r 、 z 为径向及竖向坐标。

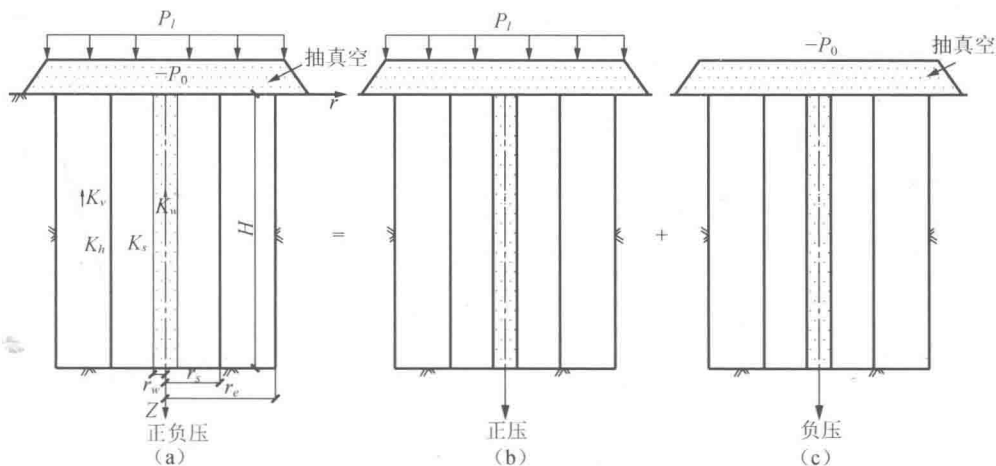


图 2-1 正负压单井计算简图

2.2.1.2 基本假定

(1) 等应变条件成立。砂井地基单井影响区内无侧向变形; 同一深度平面上任一点垂直变形相等; 孔隙水压力的减少等于有效应力的增加。

(2) 正压时砂垫层中超孔隙水压力为零, 负压时为 $-P_0$; 正负压条件下渗流符合达西定律。

(3) 径竖向渗流可分别考虑, 径向时 $K_v=0$; 竖向时 $K_h=K_s=0$ 。

(4) 砂井中超孔隙水压力在同一深度可认为相同, 任一深度 z 处土体沿井周围汇入砂井的流量等于砂井中向上的流量的增量。

(5) 砂井及涂抹区内除渗流外, 其余性质同于天然地基。

(6) H 深以下为不透水地基, 径向 r_e 以远为不透水区域。

2.2.1.3 基本方程及求解条件

1) 竖向固结

(1) 基本方程

$$\frac{\partial u}{\partial t} = C_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (2-1)$$

式中: C_v 为土体的竖向固结系数。初始与边界条件为

$$u|_{z=0} = -p_0 \quad \frac{\partial u}{\partial z}|_{z=H} = 0 \quad u|_{r=0} = 0$$

(2) 解析解。地基中某一深度的超孔压

$$u(z, t) = p_0 \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2}{M} \sin \frac{M}{H} Z e^{-\left(\frac{M^2}{H^2} C_v t\right)} - p_0 \quad (2-2)$$

地基中某一深度的固结度

$$U(z, t) = 1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2}{M} \sin \frac{M}{H} Z e^{-\left(\frac{M^2}{H^2} C_v t\right)} \quad (2-3)$$

整个地基的平均固结度

$$\bar{U}(t) = 1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2}{M^2} e^{-\left(\frac{M^2}{H^2} C_v t\right)} \quad (2-4)$$

且有

$$M = \frac{2m+1}{2} \pi \quad (m=0, 1, 2)$$

$$B_r = \frac{\lambda M^2}{\rho^2 H^2 + M^2} \pi \left[\lambda = \frac{8C_h}{d_e^2} F_a, \rho^2 = \frac{8K_h(n^2-1)}{K_w d_e^2 F_a} \right] \quad (d_e \text{ 为砂井影响直径})$$

$$F_a = \left(\ln \frac{n}{s} + \frac{K_h}{K_s} \ln s - \frac{3}{4} \right) \frac{n^2}{n^2-1} + \frac{s^2}{n^2-1} \left(1 - \frac{K_h}{K_s} \right) \left(1 - \frac{s^2}{4s^2} \right) + \frac{K_h}{K_s} \frac{1}{n^2-1} \left(1 - \frac{1^2}{4n^2} \right)$$

$$\left(n = \frac{r_e}{r_w}, S = \frac{r_s}{r_w} \right)$$

2) 径向固结

(1) 基本方程。仅考虑径向渗流, 根据砂井地基径向固结基本方程及上述假定得基本方程为

$$\frac{\partial \varepsilon_r}{\partial t} = -\frac{1}{E_s} \frac{\partial u_r}{\partial t} \quad (2-5)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{-K_s}{\gamma_w^0} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u_r}{\partial r} \right) &= \frac{\partial \varepsilon_r}{\partial t} & (r_w \leq r \leq r_s) \\ \frac{-K_h}{\gamma_w^0} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u_r}{\partial r} \right) &= \frac{\partial \varepsilon_r}{\partial t} & (r_s \leq r \leq r_w) \end{aligned} \right\} \quad (2-6)$$

$$\frac{\partial^2 u_w}{\partial z^2} = -\frac{2K_s}{r_w K_w} \frac{\partial u_r}{\partial r} \bigg|_{r=r_w} \quad (2-7)$$

式中: ε_r 为仅计径向渗流时影响区内任一点的体积应变 (与垂直应变相等); E_s 为地基的压缩模量; u_r 为加固区内任一点径向超孔隙水压力, $u_r = u_r(r, z, t)$; u_w 为

砂井中任一深度的超孔隙水压力, $u_w = u_w(z, t)$; γ_w^0 为水的容重; t 为加压历时。

式 (2-5) ~ 式 (2-7) 组成了砂井地基径向固结基本方程。

(2) 方程的求解条件。根据基本假定和图 2-1, 可得正负压求解的初始及边界条件如下。

正负压:

$$\left. \begin{aligned} a: u_w \Big|_{z=0} &= -P_0 \\ b: u_r \Big|_{r=r_w} &= u_w \\ c: \frac{\partial u_r}{\partial r} \Big|_{r=r_e} &= 0 \\ d: \frac{\partial u_w}{\partial z} \Big|_{z=H} &= 0 \\ e: \bar{u} \Big|_{t=0} &= P_1 \end{aligned} \right\} \quad (2-8)$$

正压:

$$\left. \begin{aligned} a': u_w \Big|_{z=0} &= 0 \\ b': u_r \Big|_{r=r_w} &= u_w \\ c': \frac{\partial u_r}{\partial r} \Big|_{r=r_e} &= 0 \\ d': \frac{\partial u_w}{\partial z} \Big|_{z=H} &= 0 \\ e': \bar{u} \Big|_{t=0} &= P_1 \end{aligned} \right\} \quad (2-9)$$

负压:

$$\left. \begin{aligned} a'': u_w \Big|_{z=0} &= -P_0 \\ b'': u_r \Big|_{r=r_w} &= u_w \\ c'': \frac{\partial u_r}{\partial r} \Big|_{r=r_e} &= 0 \\ d'': \frac{\partial u_w}{\partial z} \Big|_{z=H} &= 0 \\ e'': \bar{u} \Big|_{t=0} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2-10)$$