

卢萌盟
谢康和 著

复合地基固结理论



科学出版社

复合地基固结理论

卢萌盟 谢康和 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

广义的复合地基是指由增强体和土体共同组成的人工地基,其设计计算水平严重滞后于工程应用。复合地基固结理论是复合地基沉降计算的基础,本书结合作者近年来在该领域的研究成果,系统介绍复杂条件下广义复合地基固结解析理论的建立、解答及其应用。本书研究对象为广义复合地基,包括考虑应力集中的散体材料桩复合地基、不透水桩复合地基、砂井地基以及组合桩复合地基。研究内容涉及复杂加载方式、桩体高置换率、桩土二维变形、非线性固结、群井固结解析模型及组合桩复合地基固结解析模型。

本书可供土建、水利、交通、铁道等部门从事勘察、设计及施工和科研的科技人员参考,也可作为高等院校相关专业研究生和本科生的参考教材。

图书在版编目(CIP)数据

复合地基固结理论 / 卢萌盟, 谢康和著. —北京: 科学出版社, 2016. 3

ISBN 978-7-03-030325-7

I. ①复… II. ①卢…②谢… III. ①人工地基—固结理论 IV. ①TU472

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 039556 号

责任编辑: 杨向萍 张晓娟 / 责任校对: 胡小洁

责任印制: 张 倩 / 封面设计: 陈 敬

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>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 3 月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2016 年 3 月第一次印刷 印张: 11 1/2

字数: 232 000

定价: 98.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

复合地基是指天然地基在地基处理过程中部分土体被增强或被置换而形成的一种人工地基,复合地基最大的特点在于其地基本身是由土体和增强体组成的复合体,且外部荷载由土体和增强体共同承担。复合地基技术能够较好地发挥增强体和天然地基两者共同承担建筑物荷载时的潜能,因而具有良好的经济效益和社会效益。近年来,复合地基按沉降控制设计理论不断地得到了重视和认可。然而,由于现有复合地基沉降计算方法精度不足,导致设计中不能有效地控制沉降而发生工程事故。固结理论是经典土力学体系中的重要内容,贯穿于由渗流-变形-强度构成的土力学研究体系的各个环节。同时,固结理论也是计算软土地基固结沉降的主要理论依据,由于固结沉降是构成软土地基沉降的主导组成部分,因此,发展复合地基固结理论对提高复合地基的设计计算水平有着重要的理论价值和实用价值。

复合地基固结理论始于 1948 年 Barron 提出的砂井地基径向固结理论,至今已有近 70 年的发展历史。伴随着复合地基技术和工艺不断发展,复合地基固结理论的研究对象大致历经砂井地基、存在应力集中效应的散体材料桩复合地基、不透水桩复合地基以及近年来新兴的多桩型联合使用的组合桩复合地基。

为了全面反映复合地基固结理论的最新研究成果,提高复合地基设计计算水平,作者结合多年来的研究成果,以砂井地基、散体材料桩复合地基、不透水桩复合地基以及组合桩复合地基为研究对象,建立能够反映各类复合地基自身特点的固结解析理论模型,并推导复杂工况下的解析解,为复合地基沉降计算提供理论支撑。

全书共 10 章,按研究对象分为四部分。第 1 章为绪论;第 2~5 章为考虑应力集中效应的散体材料桩复合地基固结理论;第 6 章为不透水桩复合地基固结理论;第 7~9 章为砂井地基固结理论;第 10 章为不透水桩联合砂井的组合桩复合地基固结理论。

第 1 章绪论,简单介绍复合地基固结理论的研究现状以及目前存在的主要问题。

第 2 章给出考虑外部荷载随时间变化且地基中的附加应力沿深度变化的散体

材料桩复合地基固结的普遍解,并给出单级线性荷载及附加应力沿深度线性变化这种特殊情况下的详细解答。第3章以高置换率散体材料桩复合地基为对象,建立两种新的解析模型来修正以往理论中存在假设条件相互矛盾的缺陷;通过对两种模型解答的讨论发现,该章两种解析模型更具普遍性,同时适用于高置换率和低置换率散体材料桩复合地基。第4章给出桩体和土体在二维变形条件下,即同时存在竖向和径向变形时的散体材料桩复合地基固结解析解。第5章采用有效应力-孔隙比和渗透系数-孔隙比的对数模型来反映土体在固结过程中的非线性压缩和渗透特性,同时假定桩-土压缩模量在固结过程中保持不变,给出考虑应力集中效应的散体材料桩复合地基的非线性固结简化解析解。

第6章以工程中各类黏结材料桩为研究对象,假定黏结材料桩体不透水,给出不透水桩复合地基在单级线性荷载及附加应力沿深度线性变化时的解析解。

第7章给出外部荷载多级线性施加且附加应力沿深度线性变化时的砂井地基固结解析解。第8章考虑砂井的井阻作用,同时引入有效应力-孔隙比和渗透系数-孔隙比的对数模型,首次给出考虑井阻作用的任意荷载下砂井地基径向和竖向耦合的非线性固结简化解析解。第9章提出一种新的砂井地基群井固结解析模型,并给出群井固结模型的解析解。该解析模型经过改进可用于研究多桩型联合使用的组合桩复合地基固结问题。

第10章基于砂井地基群井固结解析模型的研究方法,建立两种不透水桩联合砂井的组合桩复合地基固结解析模型,分别为水流由内向外的模型A和水流由外向内的模型B,并给出各自的解析解。该章两种模型可覆盖工程中可能出现的各种桩、井布置方式,同时也具有较高的计算精度。

中国矿业大学力学与建筑工程学院为作者创造了良好的科研环境和学术氛围,在此对学院表示感谢。本书得到中国矿业大学基本科研业务费学科前沿科学研究专项(2015XKMS015)资助,部分内容源于作者主持的国家自然科学基金(51009135)、中国博士后科学基金特别资助(2012T50525)和中国博士后科学基金(20100481183),在此一并表示感谢。

本书是关于复合地基技术方面的理论专著,书中的内容为作者多年来研究成果的总结。由于作者水平所限,书中不足之处在所难免,恳请读者批评指正。

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 复合地基固结理论的研究进展	1
1.2 存在的问题及本书内容	5
第 2 章 任意荷载下散体材料桩复合地基固结解	7
2.1 引言	7
2.2 控制方程推导及定解条件	8
2.3 方程求解	12
2.3.1 孔压求解	12
2.3.2 地基固结度求解	14
2.4 特例求解	15
2.5 复合地基固结性状分析	18
2.5.1 固结度分析	19
2.5.2 孔压沿深度的分布	23
2.5.3 桩土应力比分析	24
2.6 本章小结	26
第 3 章 高置换率散体材料桩复合地基固结解	27
3.1 引言	27
3.2 控制方程推导	28
3.2.1 模型 A	28
3.2.2 模型 B	31
3.3 边界条件及方程求解	35
3.3.1 边界条件	35
3.3.2 方程求解	36
3.4 固结度求解及解的验证	38
3.4.1 固结度求解	38
3.4.2 模型 A 的验证	38

3.4.3 模型 B 的验证	40
3.5 高置换率散体材料桩复合地基固结性状分析	41
3.5.1 地基固结度分析	43
3.5.2 孔压分析	48
3.5.3 桩-土应力比的分析	53
3.6 本章小结	54
第 4 章 二维变形下散体材料桩复合地基固结解	56
4.1 引言	56
4.2 数学模型的建立及解的推导	56
4.3 固结度求解	63
4.3.1 按应力定义的固结度	63
4.3.2 按变形定义的固结度	64
4.4 二维变形的地基固结性状分析	65
4.5 本章小结	71
第 5 章 散体材料桩复合地基非线性固结解析解	72
5.1 引言	72
5.2 定解问题的描述及求解	73
5.3 地基固结度求解	79
5.3.1 按应力定义的平均固结度	79
5.3.2 按应变定义的平均固结度	79
5.4 复合地基非线性固结性状分析	80
5.5 本章小结	85
第 6 章 不透水桩复合地基固结解析解	87
6.1 引言	87
6.2 控制方程及解答	87
6.3 固结度及解的讨论	90
6.3.1 固结度求解	90
6.3.2 解的讨论	91
6.4 不透水桩复合地基固结性状的分析	92
6.5 本章小结	96
第 7 章 多级荷载下附加应力沿深度线性变化的砂井地基固结解析解	98
7.1 引言	98

7.2 基本假定和控制方程	100
7.3 控制方程的解	102
7.3.1 孔隙水压力的解	102
7.3.2 固结度的解答	103
7.4 固结性状分析	104
7.5 本章小结	107
第8章 考虑井阻的砂井地基非线性固结解	108
8.1 引言	108
8.2 控制方程及解答	109
8.2.1 基本假定	109
8.2.2 控制方程	109
8.2.3 方程解答	112
8.2.4 解的讨论	113
8.3 几种特殊荷载下的解答	113
8.3.1 瞬时荷载	114
8.3.2 线性荷载	114
8.3.3 多级线性荷载	115
8.4 地基固结性状分析	115
8.5 本章小结	121
第9章 砂井地基群井固结解析模型	123
9.1 引言	123
9.2 群井解析模型的建立及解答	124
9.2.1 群井解析模型的建立	124
9.2.2 方程求解	128
9.2.3 特殊荷载的解答	128
9.3 群井模型的 F_c 求解	132
9.4 群井理论和单井理论的关系	133
9.5 对比及讨论	134
9.6 群井理论的应用	138
9.6.1 室内试验对比	138
9.6.2 现场试验对比	139
9.7 本章小结	141

第 10 章 组合桩复合地基固结解析理论	143
10.1 引言	143
10.2 解析模型的建立	144
10.2.1 模型 A	148
10.2.2 模型 B	149
10.3 解析解答	151
10.3.1 任意荷载下的解答	151
10.3.2 特殊荷载下的解答	152
10.4 组合桩复合地基的 F_c 求解	154
10.4.1 模型 A	154
10.4.2 模型 B	155
10.5 固结性状分析	157
10.5.1 模型 A 和模型 B 比较	158
10.5.2 和以往解答的对比	158
10.5.3 桩、井布置形式的影响	160
10.5.4 桩、井扰动效应的影响	160
10.5.5 桩体压缩模量的影响	161
10.5.6 砂井井阻效应的影响	162
10.6 解的应用	163
10.7 本章小结	164
参考文献	166
附录 A F_c 的求解	171
附录 B 状态 B 的解答	174

第1章 绪 论

随着我国经济建设的发展和基础建设规模的扩大,地基处理技术在我国得到了迅猛发展。在众多的地基处理技术中,复合地基技术由于具有良好的经济效益和成熟的施工工艺,在土木工程各个领域得到了越来越广泛的应用。广阔的应用前景促进了复合地基理论的发展,而固结理论是复合地基沉降计算理论的基础,也是复合地基设计计算的难点和重点。

复合地基按桩体材料可以分为散体材料桩复合地基、柔性桩复合地基和刚性桩复合地基^[1]。散体材料桩复合地基包括碎石桩复合地基、砂石桩复合地基等。散体材料桩属于排水桩,能够显著加速地基土的固结从而起到减少工后沉降的作用。然而,由于散体材料桩只有通过土体的围箍作用才能形成桩体,因而地基承载力提高幅度较小。对应于散体材料桩,柔性桩和刚性桩也称为黏结材料桩,其渗透系数往往小于周边土体甚至不透水,不能为土体提供排水通道,因此也称为不透水桩。工程中常见的水泥土桩、灰土桩、钢筋混凝土桩、混凝土桩、CFG桩均可归为不透水桩。近年来,随着复合地基技术的发展以及施工工艺的进一步成熟,复合地基技术也呈现出由单一桩型向多桩型联合使用发展的趋势,并在工程中得到了大量的应用,例如:塑料排水板联合粉喷桩复合地基、刚柔性桩复合地基、长板-短桩-预压联合加固复合地基等。这类新型的复合地基均采用强度较高的不透水桩联合强度较低而排水性能较好的散体材料桩(砂井)共同使用加固软土地基,其中刚性桩主要用于提高土体承载力,而排水桩则用于加快土体固结,以达到减少工后沉降的目的。这类新型复合地基技术在道路、机场和码头等工程领域有广阔的应用价值^[2]。

1.1 复合地基固结理论的研究进展

目前,国内外对复合地基固结理论的研究主要以对单一桩型的散体材料桩复合地基固结理论的研究为主。复合地基固结理论的研究最早始于1948年 Barron^[3]提出的砂井地基径向轴对称固结理论。此后,众多学者不断对 Barron 固结理论中的假定进行修正,并取得了大量的研究成果,进一步推动了砂井地基固结理

论的发展。直到1979年, Yoshikuni^[4]针对碎石桩复合地基中应力逐渐向桩体转移的现象提出了应力集中效应,并将其引入到砂井地基固结理论中,从而提出了考虑应力集中效应的散体材料桩复合地基固结理论。在固结理论的研究中,文献中常见的散体材料桩复合地基一般指的就是考虑了应力集中效应的碎石桩和砂桩复合地基,而砂井地基固结理论一般不考虑砂桩应力集中效应。经过近几十年的发展,复合地基固结理论已取得了丰硕的成果,本章首先对复合地基的固结理论进行介绍。由于散体材料桩复合地基的固结理论的发展源于砂井地基固结理论,其研究方法和研究内容都借鉴了砂井地基的研究成果,因此,此处将散体材料桩复合地基和砂井地基的研究进展一并加以介绍。

1) 扰动效应的研究

对于砂井地基,扰动效应也称涂抹效应,指桩体施工时对周边土体产生一定程度的扰动,进而使得紧邻桩体周边一定范围内的土体渗透系数降低的现象。为了考虑扰动效应,通常将桩(井)周土体分为扰动区和未扰动区,并假定扰动区土体的渗透系数小于未扰动区土体。

根据扰动区土体渗透系数随位置变化模式的不同,考虑扰动作用的方法主要包括三种,即假定扰动区土体渗透系数保持不变(模式一)^[5]、渗透系数沿径向线性变化(模式二)^[6]和沿径向抛物线变化(模式三)^[7]。其中,模式一为最早考虑涂抹作用的常用方法,模式三则是通过大量的试验结果和实测结果^[8~11]拟合出的一种近似的变化模式,而模式二是一种理想的变化模式。

经过作者的研究^[12]对比发现,一般来讲,模式一考虑涂抹作用的方法造成的误差较大,适用于扰动区较小的情况;模式二和模式三相对于模式一误差较小,两者计算结果也较为接近。其中,模式三更为精确,但模式三计算时公式较为复杂,这两种模式都适用于扰动区较大的情况,当扰动区很大或者桩间距较小时,采用模式三则更为可取。

2) 应力集中效应研究

散体材料桩复合地基(如碎石桩)相比砂井地基或者塑料排水板地基,最大的特点是出现应力由周边土体向桩体转移的现象,即应力集中效应。应力集中效应最早由 Yoshikuni^[4]提出并将之引入到复合地基固结理论的研究中。其后,对复合地基固结理论的研究大多只是在砂井地基固结理论的基础上考虑了应力集中现象^[13~17],而对复合地基的其他特点则考虑不足。例如,桩体直径较大、桩体在固结过程中容易发生侧向变形以及散体材料桩由于直径较大造成自身固结对地基固结的影响等,这些特点将在后续的综述中进行论述。

3) 固结模型的改进

如前所述,现有的散体材料桩复合地基固结理论大多只是在砂井地基固结理论的基础上考虑了桩体的应力集中效应,对复合地基其他的特点则考虑不足或者没有考虑。而且,砂井地基中的许多假定条件在复合地基固结理论中仍在沿用,而有些假定条件已不再适用复合地基自身的特点,例如桩周流量相等的假定。该假定认为任一时刻从桩周流入桩体的水量等于从桩体流出的水量,这相当于认为桩体内的含水量始终保持不变,而固结变形(沉降)的本质则是孔隙水排出而导致的体积压缩,所以该假定暗指桩体的体积不发生变化(桩体不发生压缩变形),这显然和等应变条件互相矛盾,因为等应变条件假定桩体和土体均发生变形而且变形量相等。所以,这两个假定之间存在着矛盾之处。

鉴于此,作者通过两种不同的研究方法对复合地基固结模型进行了修正:一种是对桩周流量相等的假设进行了修正,认为从桩周流入桩体的水量不等于从桩体流出的水量,两者之间存在一个差值,这个差值即等于桩体的压缩变形量^[18];另一种则完全抛弃了桩周流量相等的假设,而同时考虑桩体内径向和竖向渗流,和土体一样,对桩体也直接采用固结方程求解^[19],这从根本上克服了桩周流量相等假设和等应变假设之间的矛盾。经过解的退化证明,这两种改进的固结模型比以往模型更为合理。

研究表明:沿用桩周流量相等的假定高估了地基的固结度,而且高估值随着桩体直径的增大而增大。对于塑料排水板和砂井地基来说,由于其直径较小,该假设造成的误差极小甚至可以忽略不计,但对碎石桩复合地基而言,由于其桩径较大,造成的误差不可忽略。

4) 径向变形的研究

以往散体材料桩复合地基固结理论存在的另一个不足就是沿用了桩体和土体均受侧向约束而只发生竖向变形的假定。如前所述,散体材料桩复合地基不同于砂井地基的一个很重要的方面就是,桩体由于周边土体对其围箍力不足而在固结的过程中产生较大的侧向膨胀变形,即复合地基的变形为既有竖向变形也有侧向变形的二维变形。基于此,部分学者对考虑桩体和土体发生二维变形情况下的固结理论进行了研究^[20~24],结果表明:传统的不考虑桩体的侧向变形的固结理论会高估地基的固结速率。

5) 加载方式的研究

由于加载方式对复合地基的固结有着直接影响,因此,不同加载方式下的地基固结的求解一直都是复合地基固结理论的研究热点,同时也取得了大量的研究成

果。最早的复合地基固结理论一般假定外部荷载瞬时施加,而且初始孔压沿深度均匀分布^[3~7],后来又演变为外部荷载单级施加^[16],到现在的考虑外部荷载单级施加和多级施加,同时又考虑初始孔压非均匀分布的特点^[17,25]以及通过数值解法而拟合的荷载随时间任意变化的解答^[26]。总之,不同加载方式下复合地基固结理论的研究成果较多,而且大多数简单加载情况下都能得到其解析解,这为各种工况下的数值解答提供了验证标准。

6) 黏结材料桩复合地基固结理论的研究

复合地基的桩体按材料性质可以分为散体材料桩(排水桩)和黏结材料桩(多为不透水桩)。散体材料桩复合地基的承载能力和周围土能提供的围箍力密切相关。一般来说,软土提供给桩体的围箍力较为有限,所以工程中采用散体材料桩加固软土地基时,地基承载能力提高幅度不大,而且工后沉降量大、历时久。和散体材料桩相比,各种形式的黏结材料桩由于其适用性强、承载力高、社会效益好而得到了越来越广泛的应用,其应用范围和数量已大大超过散体材料桩^[1]。

和散体材料桩不同,黏结材料桩的透水性一般小于周边土体甚至于不透水。软土地基中打入黏结材料桩并不能为土体的固结提供径向的排水通道,所以地基的排水方式和天然地基一样,仍然以竖向排水为主。但是,黏结材料桩复合地基的固结又不同于天然地基。黏结材料桩桩体压缩模量远远大于周围土体,从而使得桩体会在地基固结过程中承担很大比例的外部荷载,这也就是常说的桩体应力集中效应。由于桩体的应力集中效应,外部荷载在桩周土体内引起的超静孔压远小于在天然地基土体内引起的超静孔压,从而使黏结材料桩复合地基的固结速率远大于天然地基。

现有的关于黏结材料桩复合地基固结理论的研究较少。杨涛等^[27,28]将整个复合地基视为均质的复合材料,采用复合模量法对荷载瞬时施加和单级施加的黏结材料桩复合地基线弹性固结理论进行了研究。作者则采用轴对称固结模型,认为桩-土界面和影响区边界均为不排水界面,对外部荷载瞬时施加和单级施加^[29],以及外部荷载单级施加和初始孔隙水压力沿深度线性变化^[30]条件下的黏结材料桩复合地基固结理论进行了研究。研究表明:桩周土体的水平向渗透系数及其沿径向的变化对黏结材料桩复合地基固结没有影响,地基固结只和土体竖向渗透系数以及桩体压缩模量等有关,另外,黏结材料桩复合地基固结速率远大于天然地基,但又远小于散体材料桩复合地基。另外,Yang等^[31]在作者提出的轴对称固结模型的基础上,发展了未打穿不透水桩复合地基的固结解析解,使对不透水桩复合地基固结问题的研究又得以拓展。

7) 组合桩复合地基固结理论的研究

近年来,复合地基技术的发展呈现出由单一桩型向多桩型联合使用转变的趋势,并在工程中得到了大量的应用。伴随着多桩型复合地基的逐渐兴起,《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79—2012)^[32]也相应地新增了多桩型复合地基的设计施工要求和承载力、沉降的相关规定。然而该沉降计算方法和以往的单一桩型复合地基沉降计算类似,首先将复合地基按压缩模量转化为类似于天然地基的均质地基,再采用理想化的均质地基复合模量,结合经验系数利用分层总和法进行沉降计算。该方法未能考虑各桩体与土体间的相互作用以及桩体应力集中效应等重要特征,因而无法满足重大工程对沉降计算高精度的要求。固结理论是沉降计算方法的理论基础,因此,有必要对这种新型复合地基的固结理论展开研究以提高其设计计算精度。

由于组合型复合地基复杂的地基模型,对其固结特性的研究也大都采取简化的研究办法,例如,Zhang 等^[33]将塑料排水板和土体按照渗透系数等效为均质土体,利用 Terzaghi^[34]提出的天然地基一维固结模型计算组合桩复合地基固结度。陈蕾等^[35]假定不透水桩位于砂井的影响区边界上,利用砂井地基理论研究组合桩复合地基固结问题,给出的解答和考虑应力集中效应的散体材料桩复合地基相同。叶观宝等^[36,37]假定地基土体中水流沿径向由内向外发生渗流,在不考虑排水板涂抹作用和井阻作用的前提下,给出了该问题的固结解答。按照常识,土体中的水流通常呈汇聚状沿径向流向排水板,该研究的假定与实际工程中土体水流的实际流向不符,也没有对该假定的适用性做出合理的评价。刘吉福^[38]认为组合桩型复合地基内的排水桩和弱排水桩内均存在孔压,并假定复合地基内排水桩和弱透水桩内的孔压沿深度成比例变化,给出了水流由外向内和由内向外两种固结模型的固结解析解,但该假定并不符合实际,理论上也难以成立。以上研究对促进组合型复合地基加固机理的认识都有积极的作用。

1.2 存在的问题及本书内容

经过几十年的发展,尽管复合地基固结理论尤其是砂井地基固结理论已经取得了长足的发展,但仍存在以下问题:

(1)复杂加载方式下无法获取解析解。目前,大多数简单加载方式下复合地基的固结问题均已获得解析解,例如,瞬时加载、线性加载、多级瞬时荷载、多级线性加载等。然而,实际工程中的加载受到很多不确定因素的影响,加载过程往往随时间任意变化。另外,固结理论是建立在荷载大面积施加的假定之上,只有邻近荷载

中心下方的土体才符合附加应力沿深度均匀分布的特点,所以,基底附加压力在地基内引起的附加应力往往呈现沿深度变化的特点。目前,考虑附加应力随时间和深度同时变化的解答均建立在附加应力是一个可分离变量的假定之上,这样方能采用分离变量法求得其解析解,而对更为复杂的情况只能通过数值求解的方法进行计算。

(2)既有大多数固结模型不能考虑高置换率散体材料桩复合地基的固结。如前所述,现有的散体材料桩复合地基固结理论存在着等应变假设和桩周流量连续假设相矛盾的缺陷,而且由此产生的误差会随着桩体置换率的增大而增大,致使现有的固结模型不适用于高置换率散体材料桩复合地基的固结问题。因此,有必要对现有研究方法进行改进以反映桩体高置换率对复合地基固结的影响。

(3)复合地基的非线性固结研究成果较少。目前,对散体材料桩复合地基的非线性固结的研究无法考虑散体材料桩应力集中效应;另外,任意荷载形式下的砂井地基非线性固结以及考虑井阻的砂井地基非线性固结目前均无相应的解析解。和线性固结理论相比,非线性固结理论的研究成果明显偏少。

(4)无法考虑桩-土在固结过程中的侧向变形。桩体和土体的侧向变形是复合地基固结过程中一个显著特征。不管是普通砂井、塑料排水板地基、碎石桩地基还是组合桩地基,桩体和土体只有在荷载中心下方才不会发生侧向位移,除此以外,侧向变形在固结过程中都不可避免。然而,以往复合地基固结理论均是建立在一维变形假设之上,不考虑桩-土在固结过程中的侧向位移,这也导致计算得到的桩-土应力比明显偏高的现象。

(5)对新型的组合桩复合地基固结研究成果明显偏少。究其原因,一是组合桩复合地基是一种新兴的地基处理技术,工程领域往往存在着实践领先于理论的特点,一种新工法、新技术只有在实践中得到成功应用,才会促使其设计计算理论的发展;二是组合桩复合地基固结模型较为复杂,以往的单一桩型的复合地基只含有桩体和土体两种介质,即为二元介质的固结问题。而组合桩复合地基则是一种三元介质,其固结模型的建立比较复杂,边界条件以及荷载在多元介质内的分配都更为复杂,所以尽管《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79—2012)^[32]已经增加了沉降计算方法,但也只是一种近似的基于经验的简化方法。

总的来说,由于复合地基固结问题本身的复杂性,加之不断涌现的新工法、新工艺,复合地基固结理论的发展也面临着新的机遇和挑战。本书主要针对现有复合地基固结理论的不足,结合作者近年来的研究成果,给出了更能反映工程实际的砂井地基、散体材料桩复合地基、不透水桩复合地基以及组合桩复合地基的固结解析理论。

第2章 任意荷载下散体材料桩复合地基固结解

2.1 引言

近年来,复合地基固结理论得到了长足的发展。然而,现有理论都存在着不足之处。例如,很多复合地基固结理论都假设地基中的附加应力沿深度均匀分布。实际上,当桩体长度和地表堆载宽度比值较高或者靠近堆载边缘,地基中的附加应力沿深度并不是均匀分布的。另外,外部荷载的施加往往需要历经一段时间,而非瞬时施加。然而,现有复合地基理论不能同时考虑荷载非瞬时施加时和附加应力非均布的特点。有鉴于此,本章参考 Zhu 和 Yin^[39,40]对天然地基固结的研究方法,在复合地基固结研究中考虑外部荷载引起的附加应力同时随时间和深度变化的特点。

复合地基桩体的施工会对周边的土体产生一定的扰动,这种扰动作用会降低扰动区土体的渗透性。现有的固结理论考虑扰动作用的方法是把土体分为扰动区和未扰动区,并假设土体的水平渗透系数在这两个范围均保持不变。然而,Sharma 等^[41]、Hird 等^[42]的研究发现,由于桩体周边的土体受到的扰动程度不同,土体的渗透系数在扰动区是一个连续变化的量,而不是一个常量。针对这一点,Zhang 等^[6]给出了一种考虑土体水平渗透系数呈线性变化的复合地基固结解;Walker 和 Indraratna^[7]给出了一种考虑涂抹区水平渗透系数呈抛物线变化的砂井地基固结解,但只限于考虑土体的径向固结,而且砂井的排水效果采用单位排水量而非渗透系数来描述,不具有通用性。基于此,本章将考虑三种扰动区土体水平渗透系数的变化模式,即扰动区水平渗透系数保持不变(模式一)、线性变化(模式二)和抛物线变化(模式三)。

与砂井地基固结研究方法一样,现有的很多复合地基固结理论均假定初始时刻土体的超静孔压等于该时刻地基中的附加应力,即认为初始时刻土体中的超静孔压等于桩体内的超静孔压。然而,Han 和 Ye^[13,14]、Balaam 和 Booker^[20]的研究表明:由于土体的不排水压缩模量远大于桩体的不排水压缩模量,在初始时刻,土体内的超静孔压有可能大于桩体中的孔压。实际上,由于桩体和土体压缩性不同,

初始时刻土体和桩体中的超静孔压并不相等,所以,砂井的初始条件显然不再适合于复合地基固结。本章将根据复合地基共同承担外部荷载的特点,由平衡条件和等应变假设得到新的初始条件。和砂井地基初始条件相比,该初始条件可以考虑复合地基应力集中的特点。

综上所述,本章将针对复合地基应力集中的特点提出新的初始条件,并综合考虑扰动区土体的水平渗透系数的三种变化模式以及随时间和深度变化的附加应力,得到复合地基固结度的一个普遍解。在此基础上,对线性加载和附加应力沿深度梯形分布的特例给出详细解,并对复合地基的固结性状进行分析。

2.2 控制方程推导及定解条件

图 2.1 为本章采用的复合地基固结计算模型。和砂井地基的固结研究方法一样,散体材料桩复合地基的固结也取一个桩-土单元来研究。图中, H 为软土层厚度,也为桩长; r_c 为散体材料桩体半径; r_s 为扰动区半径; r_e 为影响区半径。

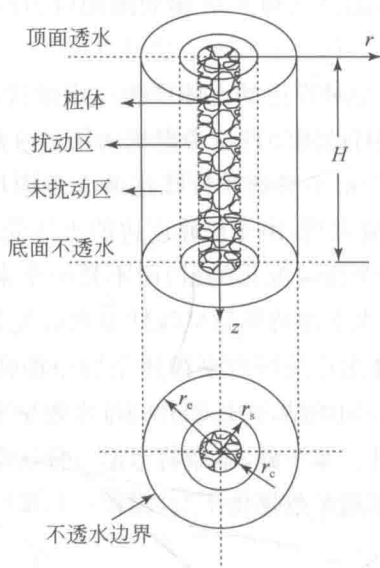


图 2.1 复合地基固结计算模型

本章的解答基于以下假定:

(1) 等应变条件成立,即同一深度处土体和桩体均只发生竖向变形而且竖向变形相等。