

软基处理施工过程的 数值模拟与应用

RUANJI CHULI SHIGONG GUOCHENG DE
SHUZHIMONI YU YINGYONG

刘 洋 著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

014035873

TU471.8
09

要對容內

软基处理施工过程的 数值模拟与应用

刘 洋 著



北 京

冶金工业出版社

2014

TU471.8
09



北航

C1723261

内 容 提 要

本书主要内容包括地基处理分析中的数值方法、天然软土堆载预压施工过程的数值模拟、复合振冲碎石桩施工过程的数值模拟、强夯加排水地基处理的数值模拟以及相关的工程实例分析。

本书可供土建、水利、交通等行业的科研、设计、施工和勘察工作人员阅读,也可供高等院校土建相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

软基处理施工过程的数值模拟与应用/刘洋著. —北京:
冶金工业出版社, 2014. 4
ISBN 978-7-5024-6558-2

I. ①软… II. ①刘… III. ①软土地基—地基处理—
工程施工—数值模拟—研究 IV. ①TU471. 8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 055494 号

出 版 人 谭学余

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 yjcs@cnmip.com.cn

责任编辑 杨秋奎 李维科 美术编辑 吕欣童 版式设计 孙跃红

责任校对 卿文春 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-6558-2

冶金工业出版社出版发行; 各地新华书店经销; 北京慧美印刷有限公司印刷

2014 年 4 月第 1 版, 2014 年 4 月第 1 次印刷

169mm×239mm; 11 印张; 225 千字; 166 页

42.00 元

冶金工业出版社投稿电话: (010)64027932 投稿邮箱: tougao@cnmip.com.cn

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

在工程建设中，常面临着天然地基很软弱，不能满足地基承载力和变形的设计要求，需要进行处理的问题。所谓地基处理是指对天然软弱地基进行人工处理再建造基础的过程，也称之为地基加固。我国幅员辽阔，地质条件复杂，在处理地基时需要因地制宜。加固地基的方法多种多样。传统的地基加固方法有排水固结法、挤密压实法、置换及拌入法、灌浆法、加筋法以及托换法等。随着我国岩土工程建设的不断发展，涌现了许多新的地基处理方法和工艺。地基处理发展的一个典型趋势就是在既有地基处理方法基础上，不断发展新的地基处理方法，特别是将多种地基处理方法进行综合使用，形成了极富特色的复合加固技术。

目前地基处理的方法和施工技术虽然取得了很大的进步，但在很多方面尚需开展进一步的研究工作，如组合型复合地基加固机理的研究、复合地基计算理论的研究以及计算机技术和数值方法在地基处理中的应用。譬如，虽然现在组合型复合地基应用较为广泛，且取得了较好的效果，但是对于其加固机理的研究还停留在两者作用机理或功能的简单叠加上，而对于其综合效应考虑较少。同时对于组合型复合地基的设计计算往往也是两者的叠加，例如对于碎石桩+排水井组合，一般都是在碎石桩复合地基的基础上设计排水井，对排水井的综合作用考虑较少，因此亟待加强这方面的研究工作。

地基处理的数值分析是计算机技术、数值方法和地基基础工程基本理论三者的结晶，针对各类处理后地基的承载力和沉降计算，国内外很多学者都提出了一些新的计算方法，但对于地基加固机理和施工过程的数值分析却不多见。因此扩大计算机技术和数值方法在地基处

理中的应用,进行地基处理加固机理的数值分析、施工过程的模拟、设计软件的开发等都是需要进一步研究的课题。

因此,本书选择了3种典型的地基处理方法进行数值分析,即堆载预压、复合振冲碎石桩和强夯加排水地基处理方法。其中,堆载预压法是软土地区最常用的地基处理方法,本书在分析中考虑了天然软土的结构性和非线性固结问题;复合振冲碎石桩和强夯加排水两种地基处理方法是在传统碎石桩和强夯法基础上发展起来的组合型复合地基,关于其加固机理尚不完全了解,本书通过对这两种地基处理方法的数值模拟和分析,初步建立了组合型复合地基的数值分析方法和思路,进一步探讨了其加固机理和加固效果。本书提出的数值模拟思路、方法对组合型复合地基的数值模拟有一定参考意义。

全书共分6章:第1章(刘洋)“地基处理方法概述”,简要论述了国内外地基处理方法及发展趋势;第2章(刘洋、汪成林)“地基处理分析中的数值方法”,论述了在地基处理分析中常用的数值方法,并重点介绍了本书采用的有限差分法的基本原理与算法;第3章(刘洋、宫志)“天然软土堆载预压施工过程的数值模拟”,在进行堆载预压施工模拟中考虑了天然软土的结构性和非线性固结问题;第4章(刘洋、闫鸿翔)“复合振冲碎石桩施工过程的数值模拟”,对近年来发展起来的复合振冲碎石桩的加固原理、施工过程及加固效果进行了数值模拟,编制了相应的程序,基于模拟结果详细讨论了排水井的存在对复合振冲碎石桩施工过程中孔隙水压力发展变化的影响,并与普通碎石桩的加固效果进行了对比分析;第5章(刘洋、张铎)“强夯加排水地基处理的数值模拟”,根据强夯能量耗散分析、土体密实机理和冲击荷载作用下孔隙水压力的发展模式,建立了强夯加排水地基处理的数值分析模型,分析了强夯过程中超孔隙水压力的发展变化过程和土体密实效果,讨论了多种设计、施工因素等对加固效果的影响;第6章(刘洋)“工程实例分析”,运用书中提出的3种地基处理数值模拟方法对3个有代表性的工程实例进行分析。

本书部分研究成果得到了国家自然科学基金(50808016、51178044)、新世纪优秀人才支持计划(NCET-11-0579)和中央高校基本科研业务费(FRF-TP-12-001B)的资助,在此表示衷心的感谢。同时也感谢研究生孙超、包德荣等在本书排版、整理和校阅过程中所付出的辛勤劳动。

由于作者水平所限,书中难免有不妥之处,恳请读者批评、指正。

著者

二零一四甲午马年春节于北京

1.1 概述	1
1.2 地基处理方法分类	1
1.2.1 排水固结法	1
1.2.2 挤密、压实法	2
1.2.3 地基加固的其他方法	2
1.3 地基处理方法研究新进展	3
1.4 本书分析的地基处理方法	6
参考文献	7
2 地基处理分析中的数值方法	8
2.1 概述	8
2.2 有限差分法	8
2.2.1 有限差分法公式	8
2.2.2 有限差分格式	12
2.2.3 土工问题分析的有限差分法	14
2.3 有限单元法	19
2.3.1 有限单元法的基本原理	19
2.3.2 土工问题分析的有限元方法	22
2.4 其他数值方法简介	23
2.5 本书采用的数值方法	24
参考文献	25
3 天然软土堆载预压施工过程的数值模拟	26
3.1 天然结构性软土研究概述	26
3.1.1 天然软土的结构性与堆载预压法	26

目 录

1 地基处理方法概述	1
1.1 概述	1
1.2 地基处理方法分类	1
1.2.1 排水固结法	1
1.2.2 挤密、压实法	2
1.2.3 地基加固的其他方法	2
1.3 地基处理方法研究新进展	3
1.4 本书分析的地基处理方法	6
参考文献	7
2 地基处理分析中的数值方法	8
2.1 概述	8
2.2 有限差分法	8
2.2.1 有限差分法公式	8
2.2.2 有限差分格式	12
2.2.3 土工问题分析的有限差分法	14
2.3 有限单元法	19
2.3.1 有限单元法的基本原理	19
2.3.2 土工问题分析的有限元方法	22
2.4 其他数值方法简介	23
2.5 本书采用的数值方法	24
参考文献	25
3 天然软土堆载预压施工过程的数值模拟	26
3.1 天然结构性软土研究概述	26
3.1.1 天然软土的结构性与堆载预压法	26

3.1.2	天然软土结构性研究综述	27
3.1.3	一维线性及非线性固结理论综述	30
3.1.4	软土抗剪强度随固结度增长的研究现状	35
3.1.5	软土地基稳定分析研究现状	36
3.2	任意固结度结构性软土的抗剪强度分析	38
3.2.1	固结条件下抗剪强度的增长	39
3.2.2	饱和软黏土任意固结度不排水强度	42
3.2.3	结构性天然软黏土任意固结度不排水强度	45
3.3	结构性软土一维非线性固结方程	47
3.3.1	分级加载时太沙基一维固结方程的推导	48
3.3.2	考虑结构应力比的土体非线性固结的推导	49
3.4	一维非线性固结求解与程序开发	51
3.4.1	Crank - Nicolson 差分法求解过程	51
3.4.2	非线性固结程序 3CCON 流程分析图	55
3.5	非线性参数对计算结果的影响分析	56
3.5.1	η/c 比值变化影响	56
3.5.2	进一步的讨论	59
3.6	结构性软土地基堆载施工模拟程序开发	60
3.6.1	地基稳定分析的极限平衡法	60
3.6.2	结构性软土地基的稳定性分析	67
3.6.3	结构性软土地基稳定性分析程序 3CCON&STAB	69
3.6.4	结构性软土路堤分级加载方案确定及 MFC 界面开发	73
3.7	结论和展望	83
3.7.1	主要结论	83
3.7.2	进一步工作展望	85
	参考文献	85
4	复合振冲碎石桩施工过程的数值模拟	92
4.1	概述	92
4.2	土中振动孔隙水压力计算模式	92
4.2.1	孔压的应力模型	93
4.2.2	孔压的应变模型	94
4.2.3	孔压的有效应力路径模型	95

4.2.4 孔压的内时模型	96
4.2.5 孔压的瞬态极限平衡模型	96
4.2.6 孔压的能量模型	96
4.3 复合振冲碎石桩施工模拟的理论构架	98
4.3.1 振动孔隙水压力的产生	98
4.3.2 土体密实机理	102
4.3.3 等效孔隙比和等效相对密度	103
4.3.4 孔隙水压力的消散	104
4.4 复合振冲碎石桩施工过程数值模拟程序	104
4.4.1 土体有限差分网格划分	104
4.4.2 差分格式及边界条件	106
4.4.3 数值分析过程及程序	107
4.5 复合振冲碎石桩施工过程数值模拟结果分析	109
4.5.1 模拟参数选择	109
4.5.2 普通振冲碎石桩数值模拟结果分析	110
4.5.3 复合振冲碎石桩数值模拟结果分析	111
4.5.4 进一步比较分析与讨论	113
4.6 结论和展望	115
参考文献	116
5 强夯加排水地基处理的数值模拟	119
5.1 强夯法及加固原理	119
5.1.1 强夯法概述	119
5.1.2 弹性半空间中的波体系	121
5.1.3 强夯法加固土体的原理	121
5.2 强夯法能量耗散分析与密实机理	127
5.2.1 强夯法能量耗散分析	127
5.2.2 强夯超孔隙水压力增长的能量模型	130
5.2.3 超孔隙水压力消散分析	131
5.2.4 强夯土体密实机理分析	132
5.3 强夯数值模拟程序开发	132
5.3.1 模拟程序设计	132
5.3.2 数据输入文件和程序输出文件	134

5.4 强夯加排水地基处理施工数值模拟结果与分析	136
5.4.1 数值算例与模拟结果分析	136
5.4.2 渗透系数对夯击结果的影响	140
5.4.3 夯击间隔时间对夯击结果的影响	142
5.4.4 砂井与夯点距离对加固效果的影响	145
5.4.5 夯击能量对夯击结果的影响	152
5.4.6 “重锤少夯”和“轻锤多夯”的讨论	152
5.5 结论	157
参考文献	158
6 工程实例分析	160
6.1 堆载预压工程实例分析	160
6.2 振冲碎石桩工程实例分析	163
6.3 强夯加排水地基处理工程实例分析	164
参考文献	166

1 地基处理方法概述

1.1 概述

地基土,特别是软弱地基土和特殊地基土常面临许多问题,如强度及稳定性问题、变形问题、渗漏问题以及液化问题,从而影响工程的质量和施工进度。要妥善解决地基土中可能出现的这些危险隐患,需进行地基处理。

所谓地基处理是指天然地基很软弱,不能满足地基承载力和变形的设计要求,需要经过人工处理后再建造基础的过程,亦称之为地基加固。我国地域辽阔,从沿海到内地,由山区到平原,分布着多种多样的地基土,其抗剪强度、压缩性以及透水性等,因土的种类不同可能会有很大差别。各种地基土中,不少为软弱土和不良土,主要包括:软黏土、人工填土(包括素填土、杂填土和冲填土)、饱和粉细砂(包括部分轻亚黏土)、湿陷性黄土、有机质土和泥炭土、膨胀土、多年冻土、岩溶、土洞和山区地基等。随着我国社会经济的不断发展,新建的工程越来越多地遇到不良地基,同时地基问题的处理又关系到整个工程的质量、投资和进度。因此,地基处理的要求也就越来越迫切和广泛。

1.2 地基处理方法分类

我国幅员辽阔,地质条件复杂,在处理地基时需要因地制宜,所以加固地基的方法也会有所不同。常见的地基加固方法有^[1~3]:(1)排水固结法;(2)挤密、压实法;(3)置换及拌入法;(4)灌浆法;(5)加筋法;(6)冷处理法;(7)托换法;(8)纠倾法等。

1.2.1 排水固结法

常见的排水固结法方法有^[4~6]:(1)堆载预压法,即在建造建筑物之前,通过临时堆填与设计荷载相当或稍大于设计荷载的土石等对地基加载预压,强迫地基压密沉陷,待强度达到设计强度后将预压荷载搬走。加载预压荷载的目的是使土体内部形成压差,则土体中的孔隙水会从孔隙水压力大的地方向孔隙水压力小的地方排出。如果需要加快孔隙水的排出速度可以在地基上打设一定深度的排水井(如砂井、塑料排水板等)。(2)排水井法,是指在软黏土地基中,设置一系列排水井,如砂井等,在砂井之上铺设砂垫或砂沟,人为地增加上层固结排水通

道,缩短排水距离,从而加速固结,提高地基强度。(3)真空预压法,是指在黏土层上铺设砂垫层,然后用薄膜密封砂垫层,用真空泵对砂垫及砂井抽气,使地下水位降低,在大气压力作用下加速地基固结。(4)降低地下水位法,是指通过降低地下水位减小孔隙水压力,使土体固结的方法。(5)电渗法。

1.2.2 挤密、压实法

挤密、压实法的施工方法包括^[7,8]:(1)表层压实法,是指通过夯实、碾压等方法使土体达到密实的效果,其适用于含水量接近于塑限的浅层疏松黏性土、松散砂性土、湿陷性黄土及杂填土。(2)重锤夯实法,利用重锤自由下落时的冲击能来夯实浅层土地基,使表面形成一层较为均匀的硬壳层。(3)强夯法,将重锤从高处自由落下,反复多次夯击地面,给地基土以冲击力和振动,从而提高地基土的强度并减小其压缩性。(4)振冲挤压法,一方面依靠振冲器的强力振动使饱和砂层发生液化,颗粒重新排列,孔隙比减小;另一方面依靠振冲器的水平振动力,形成垂直孔洞,然后在其中加入回填料,使砂层挤压密实,一般适用于砂性土。(5)土桩和灰土桩,土桩和灰土桩挤密地基是由桩间挤密土和填夯的桩体组成的人工“复合地基”。(6)砂桩,在松散砂土或人工填土中设置砂桩,能对周围土体产生挤密或振密作用,可以显著提高地基强度,一般适用于松砂地基或杂填土。

1.2.3 地基加固的其他方法

除了上述的排水固结、挤密压实法外,地基加固的其他方法还有置换及拌入法、灌浆法、加筋法、冷热处理法、托换法、纠倾法等,简述如下:

(1)置换及拌入法,包括:1)垫层法。垫层法是在天然地层上铺设垫层,作为人工填筑的持力层,其适用于浅层地基。2)开挖置换法。开挖置换法是将基底下一定深度的软弱土层挖除,然后回填较好的土石料,其适用于浅层地基。3)振冲置换法。振冲置换法利用一种能产生水平振动的管状机械设备在高压水流下边振边冲,在软弱黏性土地基中成孔,然后在孔内分批填入碎石或卵石等材料制成一根根桩体,其适用于软弱黏性土地基。4)高压喷射注浆法(旋喷桩)。高压喷射注浆法利用高压喷射直接冲击破坏土体,使水泥浆液或其他浆液与土拌和,凝固成为拌和柱体,其适用于黏性土、粉细砂、砂砾石等地基。5)石灰桩法。石灰桩法是用机械成孔,填入生石灰并搅拌或压实成桩体,石灰桩和周围土体一起形成复合地基,达到加固目的,其适用于软弱黏性土。6)褥垫法。褥垫法是在压缩性较低的地基上加上褥垫,使它与压缩性高的地基相适应,达到调整岩土交界处相对变形的目的,其适用于易发生不均匀沉降的地基。

(2)灌浆法,是用气压、液压或电化学原理,把某些能固化的浆液注入各

种介质的裂隙或孔隙,以改善地基的物理力学性质。灌浆材料常分为粒状浆材和化学浆材两个系统。灌浆方法按其依据的理论又可分为:渗入性灌浆法、劈裂灌浆法、压密灌浆法、电动化学灌浆法等。灌浆法可应用于砂及砂砾地基、湿陷性黄土地基、黏性土地基。

(3) 加筋法,常用的施工方法有:1) 土工聚合物;2) 锚固技术;3) 加筋土。

(4) 冷热处理法,常用的施工方法有:1) 冷冻法。冷冻法通过人工冷却,使地基温度降低到孔隙水的冰点以下,使孔隙水冻结,从而具有理想的截水性能和较高的承载能力,其适用于饱和的砂土或软黏土地层中的临时性措施。2) 烧结法。烧结法是在软弱黏土地基的钻孔中加热,通过焙烧使周围地基土减小含水量以提高强度,减小压缩性,其适用于软黏土、湿陷性黄土等。

(5) 托换法(或称基础托换),是指对原有建筑物地基和基础需要进行处理、加固或改建,在原有建筑物基础下需要修建地下工程以及邻近建造新工程而影响到原有建筑物的安全等问题的技术总称。常用的施工方法有:1) 基础加宽法;2) 墩式托换法;3) 桩式托换法;4) 地基加固法。

需要指出的是,上述地基加固方法的分类并不是严格的,如振冲碎石桩法也具有排水固结的作用,同时还具有挤密、压实的作用,能够很好地适用于地基加固,并有抑制孔隙水压力发展、防止液化、加快土体固结的作用。

地基处理中大多数处理方法都是将天然地基的一部分或全部进行人工置换或加强,加强体与原有地基共同承担外部荷载,这一整体被称为复合地基^[9]。复合地基又可分为散体桩复合地基和水泥土桩复合地基。如振冲碎石桩法加固地基就是复合地基的一种,振冲碎石桩由散体材料(碎石)组成,而散体材料最大的优点在于渗透系数较大,有利于加速地基土固结,使建筑物沉降发生在施工期间,从而减少了应用期间的沉降量。

1.3 地基处理方法研究新进展

我国地基处理技术经过多年的借鉴与发展已日趋成熟,尤其是近年来随着岩土工程建设的不断发展,涌现出了许多新的地基处理方法和工艺^[10]。近几年地基处理发展的一个典型趋势就是在既有地基处理方法的基础上,不断发展新的地基处理方法,特别是将多种地基处理方法进行综合使用,形成了极富特色的复合加固技术。这些复合加固技术发展特点主要体现在如下五个方面^[11]:

- (1) 由单一加固技术向复合加固技术发展;
- (2) 复合地基的加固体由单一材料向复合材料发展;
- (3) 复合地基加固技术与非复合地基加固技术相结合;
- (4) 静力加固与动力加固技术相结合;

(5) 机械加固与非机械加固相结合。

其中一些复合加固方法已得到较为广泛的应用，例如真空—堆载联合预压技术等，已取得了较为成熟的经验，并已经写入修订的《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79—2011) 中^[12]。

表 1-1、表 1-2 和表 1-3 摘自文献 [11]，列出了我国目前主要应用的地基处理方法、地基处理复合加固技术和主要柱状加固体，体现了我国地基处理方法发展的新趋势。

表 1-1 我国地基处理主要方法

地基处理分类	处理方法定义	主要方法
换填垫层	挖除基础底面下一定范围内的软弱土层或不均匀土层，回填其他性能稳定、无侵蚀性、强度较高的材料，并夯实形成的垫层	无筋垫层 加筋垫层
预压地基	在地基上进行堆载预压或真空预压，或联合使用堆载和真空预压，以形成固结压密后的地基	堆载垫层 真空预压 真空—堆载联合预压
压实地基	利用平碾、振动碾或其他碾压设备将填土分层密实处理的地基	平碾 振动碾
夯实地基	反复将夯锤提到高处使其自由落下，给地基以冲击和振动能量，将地基土夯实或形成密实墩体的地基	强夯法
挤密地基	利用横向挤压设备成孔或采用振冲器水平振动和高压水共同作用，将松散土层密实处理的地基	振冲法
复合地基	部分土体被增强或被置换，形成由地基土和竖向增强体共同承担荷载的人工地基	砂石桩复合地基 水泥粉煤灰碎石桩复合地基 夯实水泥土桩复合地基 水泥土搅拌桩复合地基 旋喷桩复合地基 灰土桩复合地基 柱锤冲扩桩复合地基 多桩型复合地基
注浆加固	将水泥浆或其他化学浆液注入地基土层中，增强地基土颗粒间的联结，使土体强度提高、变形减少、渗透性降低的地基处理方法	
微型桩	用桩工机械或其他小型设备在土中形成直径不大于 300mm 的钢筋混凝土桩或钢管桩	

表 1-2 地基处理复合加固技术

方法名称	方法原理
真空—堆载联合预压	可获得大于大气压力的固结压力
真空排水+强夯	强夯升高孔隙水压力，增大与排水板之间的压差；气体压力劈裂土体增大渗透性

续表 1-2

方法名称	方法原理
水下真空预压	膜上的水压力可转化为固结压力，可获得大于大气压力的固结压力
低位真空预压法	地下水渗流方向与土体压缩方向相同；提前开始真空固结
立体真空预压法	多层排水系统，减小排水路径长度
电渗－真空降水联合加固法	电渗－真空联合作用提高低渗透性土体的排水量；真空压力使土体向加固区产生压缩变形，减小电渗作用区域的裂缝，以减小电阻
电渗－真空降水－低能量强夯联合加固	兼具真空排水＋强夯电渗－真空降水联合加固法的特点
真空－注气加固法	注气提高孔压，增大被加固土体与排水板真空负压之间的压差
劈裂真空预压法	注气提高孔压，增大被加固土体与排水板真空负压之间的压差；气体压力劈裂土体提高渗透性利于排水
真空降水联合冲压法	真空降水后可进行浅层冲压加固，形成硬壳层
真空预压－石灰稳定联合加固法	石灰与超软土拌和后，采用真空预压加固可获得较高强度
刚－柔性桩复合地基	利用水泥土类桩提高桩间土承载力；利用砂桩、碎石桩加固桩间土并治理桩间土液化
长短桩复合地基	由于附加应力沿深度衰减，因此进行沿深度梯次变化的变刚度加固
多元复合地基	利用两种或两种以上的竖向加固体加固软弱地基和不良地基，形成竖向柱状加固体和水平加筋体的联合加固
粉喷桩复合地基＋排水板复合处理	设置排水板，加强粉喷桩施工期间引起的超静孔隙水压力的消散
长板－短桩－预压联合加固法	在加固区以下设置长排水板，加快预压荷载作用下加固区及加固区以下土体固结，减小施工后沉降；利用新奥法原理，桩间土首先承担荷载并产生固结
桩顶设置可压缩单元复合地基	降低桩顶应力集中效应，通过端承型柱状加固体设置，使桩间土可分担荷载，已有工程实例

表 1-3 我国地基处理主要柱状加固体

分类	第一类 (散体柱)	第二类（低－中 等黏结强度柱）	第三类 (刚性柱)	第四类 (组合柱)
强度特征	砂桩、 砂石桩	水泥搅拌桩、 石灰桩、 水泥－石灰桩、 夯实水泥土桩、 灰土桩、 浆固碎石桩、 旋喷桩、 袋装砂井、 土工织物袋装砂桩、 布袋注浆桩	CFG 桩、 预应力管桩、 预装方桩、 素混凝土桩、 钻孔灌注桩、 螺旋成孔灌注桩、 Y 形混凝土桩、 大直径筒桩、 PFC 桩、 X 形混凝土桩	水泥－预制混凝土 劲芯复合桩、 水泥土－型钢 劲芯复合桩、 水泥土－现浇混凝土 劲芯复合桩、 混凝土芯砂石桩、 水泥土芯砂桩
黏结强度	无	低－中	高	

续表 1-3

分类	第一类 (散体柱)	第二类(低-中 等黏结强度柱)	第三类 (刚性柱)	第四类 (组合柱)
抗剪强度	低-中	低-中	高	中-高
抗压强度	低	低-中	高	中-高
抗拉强度	无	无-低	低-高	低-高
抗弯强度	无	无-低	低-高	低-高

虽然目前地基处理的方法和理论研究取得了很大的进展，但在以下三个方面尚需要开展进一步的研究工作：

(1) 组合型复合地基的研究。虽然组合型复合地基现在应用较为广泛，且取得了较好的效果，但是对于其加固机理的研究还是停留在两者作用机理或功能的简单叠加上，而对于其综合效应考虑较少，同时对于组合型复合地基的设计计算往往也只是两者的叠加。如碎石桩+排水井组合时，一般都是在碎石桩复合地基的基础上设计排水井，对排水井的综合作用考虑较少，因此亟待加强组合型复合地基综合效应方面的研究。

(2) 复合地基计算理论。复合地基设计计算理论包括各类复合地基荷载传递机理，荷载作用下应力场、位移场的分布特性，各类复合地基承载力、沉降计算方法及计算参数的确定、复合地基的优化设计理论以及动力荷载作用下复合地基的性状分析等。目前复合地基承载力计算通常采用试验与半经验法、简化法、弹性理论法等，但普遍存在参数多、不易确定或实际工程中难以应用、不够准确的问题；而复合地基变形计算往往采用复合模量法、应力修正法或现场载荷试验等方法。其中，复合模量法按面积置换率进行复合；应力修正法则根据面积置换率和桩土应力比计算复合地基的桩、土各自分担的荷载，将桩、土分开考虑或简单复合，导致变形计算不太准确；而现场载荷试验虽然准确，但耗时较长且费用较高。因此，复合地基计算理论方面的研究也应该得到重视。

(3) 计算机和数值方法在地基处理中的应用。地基处理的数值计算分析是计算机技术、数值方法和地基基础工程基本理论三者的结晶。针对各类处理后地基承载力和沉降的计算，国内外学者都提出一些新的计算方法，我们在研究工作中要重视这些方法的验证和推广工作。此外，对于地基加固机理和施工过程的数值分析却不多，因此扩大计算机技术和数值方法在地基处理中的应用，如加固机理的数值分析、施工过程的数值模拟、软件设计等，都是需要进一步研究的课题。

1.4 本书分析的地基处理方法

地基处理方法繁多，本书选择了三种典型的地基处理方法进行数值分析，即

堆载预压、复合振冲碎石桩和强夯+排水三种地基处理方法。其中,堆载预压法是软土地区最常用的地基处理方法,本书在分析中考虑了天然软土的结构性和非线性固结问题;复合振冲碎石桩和强夯+排水两种地基处理方法是在传统碎石桩和强夯法基础上发展起来的组合型复合地基处理方法,关于其加固机理尚不完全了解,本书通过对于这两种地基处理方法的数值模拟和分析,初步建立了组合型复合地基的数值分析方法和思路,探讨了其加固机理和加固效果,书中提出的数值模拟思路和方法对组合型复合地基的数值模拟有一定参考意义。

参考文献

- [1] 叶书麟,叶观宝.地基处理与托换技术[M].北京:中国建筑工业出版社,2005.
- [2] 龚晓南.地基处理手册(第3版)[M].北京:中国建筑工业出版社,2008.
- [3] 龚晓南.地基处理新技术[M].西安:陕西科学技术出版社,1997.
- [4] 刘兴旺,谢康和.竖向排水井地基粘弹性固结解析理论[J].土木工程学报,1998,31(1):10~19.
- [5] 刘金韬,金晓媚.抗液化排水井(桩)间距确定方法的研究[J].岩土力学,2000,21(4):374~376.
- [6] 曹雪山,蔡亮.塑料插板排水井软基加固机理研究[J].工程勘察,2000(5):14~15.
- [7] 吴曙光,胡岱文.重锤夯实在松散砂卵石地基加固中的应用[J].重庆建筑大学学报,1999,21(3):82~85.
- [8] 胡瑞生,钟华.振冲置换法在粘性土地基加固中的应用[J].岩石力学与工程学报[J],2002,21(9):1425~1426.
- [9] 张爱军,谢定义.复合地基三维数值分析[M].北京:科学出版社,2004.
- [10] 彭第,潘殿琦,李海礁,等.地基处理新技术及发展趋势[J].长春工程学院学报(自然科学版),2007(3):1~3.
- [11] 郑刚,龚晓南,谢永利,等.地基处理技术发展综述[J].土木工程学报,2012,45(2):127~145.
- [12] 中国建筑科学研究院.JGJ 79—2011 建筑地基处理技术规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.