

Theory and Engineering Technology
of Ground Improvement

地基处理理论与工程技术

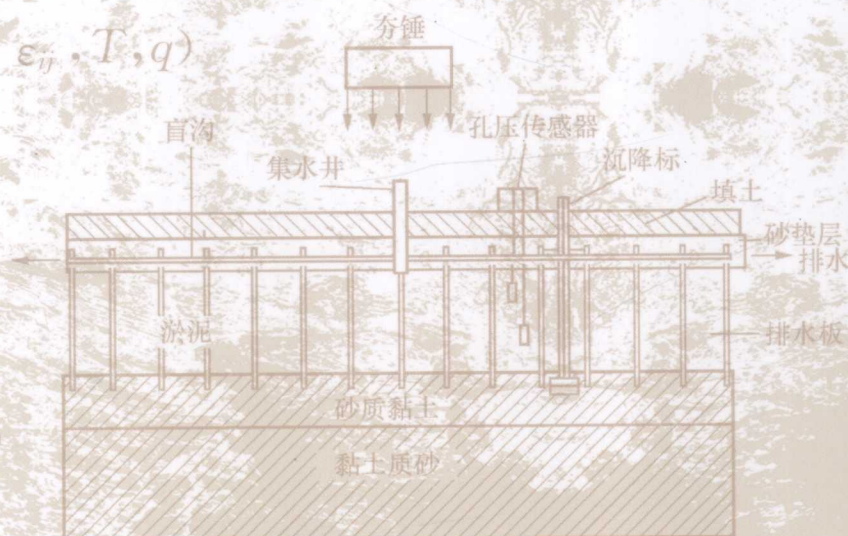
李彰明 著



$$L = f(\sigma_{ij}, T, q; \epsilon_{ij}, T, q)$$

$$\epsilon_{ij} = \frac{\partial G'}{\partial \sigma_{ij}}$$

$$\frac{\partial G'}{\partial L} \frac{\partial L}{\partial q} \frac{dq}{dt} \geq 0$$



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

014037207

TU472
37

Theory and Engineering Technology
of Ground Improvement

地基处理理论与工程技术

李彰明 著



TU472
37

中国电力出版社



北航

C1725470

内 容 提 要

基于作者在软土地基处理领域长期研究与大量工程实践及测试的心得体会和成果积累,本书阐述了软土地基加固基本理论及原理,全面介绍与讨论了地基加固常用的与近些年发展起来并应用前景好的技术方法,并提供了大量内容翔实的、由作者直接负责或指导的工程实例以及一些工法机理研究最新成果,可供借鉴参考及应用。本书共分为两篇共十五章,分别是地基处理理论与实践发展概况、变形体力学理论基础、土体工程基本性质与参数相互关系、土体工程原理与设计准则、土体工程基本理论及本构关系、地基处理原理及方法、静力排水固结法、动力固结法、静动力排水固结法、水泥搅拌桩与注浆法、水泥粉煤灰碎石桩、微型桩、其他常用地基加固方法、地基处理常用方法方案比选。

本书适合设计、施工、监测、监理、检测、研究、土木建筑业主及有关管理机构等人员参考使用,也适合高等院校土建类专业师生参考使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

地基处理理论与工程技术/李彰明著. —北京:中国电力出版社, 2014.3

ISBN 978-7-5123-5539-2

I. ①地... II. ①李... III. ①地基处理 IV. ①TU472

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 026192 号

中国电力出版社出版发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

责任编辑:梁 瑶 电话:010-63412605 E-mail: liangyao0521@126.com

责任印制:郭华清 责任校对:王小鹏

北京盛通印刷股份有限公司印刷·各地新华书店经售

2014 年 3 月第 1 版·第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16·41.25 印张·1020 千字

定价:98.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

本社购书热线电话 (010-88386685)

前言

由于土地有限性及不断扩张建设中选址的日益困难,地基处理问题从来没有像现在这样突出地摆在我们面前,成为工程建设中的技术及经济关键。科学有效地解决该方面问题,需要在自然科学与工程技术两个领域共同努力。一般而言,科学家着重解决“为什么”的问题,工程师则侧重于“怎么做”的问题;在地基处理方面也大致如此。然而,由于地基土体工程响应的十分复杂性及不确定性,以及理论分析及力学描述的困难,地基处理更需要将理论与工程技术紧密地相结合。在长期的工程实践与理论研究中,作者切身感受到,要做好地基处理,须在理论及原理、试验、计算分析、设计、施工、监测与检测等各方面全面把握好,要形成所谓的“一条龙”的系统知识及技术,互相加以弥补、验证及推进。本书正是这样一种努力。

本书分为两大部分,第一部分为地基处理理论及方法,第二部分为典型工法及实例,如目录所示由 15 章构成。系统阐述及介绍包含作者最新研究成果在内的基础理论、相关原理及工法机理与作者全面负责或指导的工程实例,其中包括对当前学术界与工程界特别关注及疑虑的一些关键问题的研究与工程应用。

在理论方法方面,首先从严格的理论体系上介绍目前广泛应用的基础理论知识,以便借以知晓及判断其前提条件、方法对于实际工程的适用性。接着着重阐述土体基本而重要的工程性质;同时,试图给出土体基本参数关系,尤其是原位测试力学参数之间的关系,以解答变形体力学中最基本问题中的一个问题(一个求解问题中独立量是几个?若存在非独立量,其相互关系又如何?),也为实际工程运用提供便利。接着,介绍土体工程一般原理与设计准则。此后,着重介绍与讨论了目前仍处于学术前沿的本构关系研究,其中包括作者创立的有限特征比理论与一般广义塑性理论等,以为进一步发展相关理论提供基础。最后,落脚于各类地基处理原理、方法、分析与质量评估检测,以及力学方式加固的微观机理,为地基处理方案适用性判断、选择及优化提供依据。

在工法实例方面,介绍、分析与讨论了应用广泛或发展势头强劲的各类典型工法及实施中应注意的问题,其中包括作者提出、系统形成(如确定了具有加固作用的几种基本因素、建立了关键设计参数之间定量关系)的静动力排水固结法等,并提供作者本人全面负责或指导的工程实例,以作借鉴参考或直接应用。

上述工作是作者本人长期在工程实践及相关理论方法研究的切身体会、经验与总结。这些源于第一线的切身体验及理解与成功经验付诸于公开出版,是该领域科学技术方面的一种共享及交流,希望有助于每一位看到本书的设计、施工、监测、

监理、检测、建（构）筑物业主、有关管理机构等人员，有助于相关学者、专家以及具有一定专业知识及判断能力的高年级本科生、硕士生与博士生。由于本书各部分相互关联又具有一定的独立性，对于时间或专业经历有限的读者，可按所需选择不同的阅读重点。

本书撰写得到冯强教授级高工以及作者诸多研究生刘锦伟、钱晓敏、黄文强、曾文秀、刘俊雄、张大军、林伟弟、罗智斌、温子奇、祁娜与孙海伦等同学的协助；得到国家自然科学基金项目（批准号：**51178122**）资助以及“广州市建设科技发展基金项目”支持；中国电力出版社与该社编辑梁瑶女士的热情相邀及高度负责任地编辑为本书出版及质量保障提供了基础；一并致以十分诚挚的感谢！同时，也谨向本书所有参考文献及资料的作者前期工作表示真挚敬意与谢意！

本书难免有遗漏、欠妥与错误之处，敬请读者指正。

联系 Email: ukzmli@163. com.

著者

2014 年 2 月

目 录

前言

第 1 篇 地基处理理论及方法

2 第 1 章 地基处理理论与实践发展概况

1.1 地基处理理论进展	2
1.2 地基处理工程实践发展	5
参考文献	14

15 第 2 章 变形体力学理论基础

2.1 弹性力学基本理论	15
2.2 经典塑性理论体系	19
2.3 流变力学理论基础	19
参考文献	28

29 第 3 章 软土工程性质及土参数相互关系

3.1 物理特性及多相特性	31
3.2 土的强度和变形性状	45
3.3 土参数的相互关系	59
3.4 珠三角地区软土特性	98
3.5 砂土扰动效应的细观机制分析	103
参考文献	105

114 第 4 章 软土工程原理与设计准则

4.1 概述	114
4.2 极限状态与可靠度	117
4.3 岩土参数的分析与选定	123
4.4 实体试验和反分析	126
4.5 技术文件	128
参考文献	131

133 第5章 土体工程基本理论及本构关系

5.1 土体工程基本理论及方法	133
5.2 广义塑性本构理论	135
5.3 临界状态与典型的土体塑性模型	140
5.4 高级塑性模型(描述超固结与循环荷载行为的模型)	153
5.5 其他几种代表性的本构关系理论	172
5.6 有限特征比理论	178
参考文献	192

198 第6章 地基处理原理及方法

6.1 静力荷载下软土的渗透与固结	198
6.2 动力荷载下软土渗透与固结	225
6.3 静、动荷载复合作用下软土渗透与固结	228
6.4 地基处理的基本方法与检测	233
6.5 不同典型荷载下土体加固微观机理研究	240
6.6 典型工况荷载下淤泥孔径分布特征核磁共振试验研究	247
参考文献	253

第2篇 典型工法及实例

258 第7章 静力排水固结法

7.1 排水固结法概述	258
7.2 排水固结法原理	259
7.3 排水固结法的设计与计算	260
7.4 排水体设计及施工	262
7.5 堆载预压法	278
7.6 真空预压	285
7.7 真空—堆载联合预压法	293
7.8 需要注意的问题	301
参考文献	302

310 第8章 动力固结法

8.1 动力密实法	310
8.2 强夯置换法	320
8.3 强夯法	328
工程实例1	381
工程实例2	382
参考文献	392

394 第9章 静动力排水固结法

9.1 静动力排水固结法的发展	394
9.2 静动力排水固结法原理	399
9.3 静动力排水固结法设计	420
9.4 静动力排水固结法试夯	431
9.5 静动力排水固结法施工要点	432
9.6 静动力排水固结法检验	438
9.7 静动力荷载与排水体系适应性关系及关键设计参数确定	454
9.8 高能量冲击作用下淤泥孔压特征规律试验研究	460
9.9 加固机理与加固深度问题——工程及监测实例	467
参考文献	472

476 第10章 水泥搅拌桩与注浆法

10.1 水泥土搅拌法	476
工程实例1	485
10.2 注浆法	486
工程实例2	495
参考文献	497

500 第11章 水泥粉煤灰碎石桩 (CFG 桩)

11.1 概述	500
11.2 CFG 桩的适用性	501
11.3 CFG 桩的作用机理	502
11.4 CFG 桩设计计算	503
11.5 CFG 桩的施工	515
11.6 CFG 桩效果检验	521
工程实例	522
参考文献	524

526 第12章 碎石桩和砂石桩

12.1 碎石桩	526
工程实例	545
12.2 砂石桩法	551
参考文献	569

571 第13章 微型桩

13.1 概述	571
---------------	-----

13.2	微型桩的分类	573
13.3	建筑物基础的微型桩设计	577
	工程实例 1	588
	工程实例 2	591
	参考文献	595

597 第 14 章 其他常用地基加固方法

14.1	加筋地基	597
14.2	换填法	605
14.3	侧向约束法与荷载分布调整法	610
	参考文献	614

616 第 15 章 工程实例——软基常见处理方案及比选

15.1	工程基本情况及条件	616
15.2	方案考虑与选择	620
15.3	进一步的问题	634

附 录

635 附录 1 张量初步

1.1	直角坐标系与单位向量	635
1.2	微积分运算中的公式	637
1.3	坐标变换	639
1.4	Descartes 张量、张量性质和张量演算	640
1.5	两种张量表示方法的说明	645
1.6	张量的代数运算	646
1.7	几种特殊张量	647
1.8	张量的主值和主方向	649
	参考文献	650

651 附录 2 计量单位换算表

第 1 篇

地基处理理论及方法

地基处理理论及方法

第 1 章

地基处理理论与实践发展概况

1.1 地基处理理论进展

1.1.1 地基与软土地基的基本概念

地基是指支承基础的土体或岩体。

地基处理又称地基加固,指承托建(构)筑物基础的岩土体(地基)很软弱,通过采取人工行为而提高其承载力、改善其变形或渗透性质的一种活动。我国的现行规范《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)中认为:软弱地基指“主要由淤泥、淤泥质土、冲填土、杂填土或其他高压缩性土层”构成的地基。而软土是淤泥、淤泥质土以及泥炭质土的总称,是在静水或非常缓慢的流水环境中沉积,经生物化学作用形成的物质。软土的天然含水量 w 大于液限 w_L ,天然孔隙比 e 大于或等于1.0,压缩系数 a_{1-2} 大于 0.5MPa^{-1} ,不排水抗剪强度 c 小于 20MPa 。上述现行规范做了进一步区分定义:“淤泥为在静水或缓慢的流水环境中沉积,并经生物化学作用形成,其天然含水量大于液限、天然孔隙比大于或等于1.5的黏性土。天然含水量大于液限而天然孔隙比小于1.5但大于或等于1.0的黏性土或粉土为淤泥质土。含有大量未分解的腐殖质,有机质含量大于60%的土为泥炭,有机质含量大于等于10%且小于等于60%的土为泥炭质土。”需要指出的是,在工程上,所谓的软基通常指此处的“软弱地基”,而软土地基是其中承载与变形性能差的淤泥和淤泥质土地基。软土地基加固就是提高淤泥和淤泥质土及泥炭质土的承载力、改善其变形或渗透性质的人工行为。目前在我国工程界,常常将软弱地基与软土地基统统简称为软基;鉴于加固机理、工法造价、处理难度都有所区别,故作者认为,随着科学技术的进步,应该将软土地基与软弱地基同其他地基加以必要的区分。

1.1.2 地基处理理论的基本问题

地基加固理论属于土体工程理论范畴,而后者基于以土力学(及土动力学)等为代表的基础理论及应用基础理论。如前言所叙,土力学与土体工程学科的理论及方法依然存在许多问题,就作者体会而言,概括起来大致可分为三个方面。

- (1) 物理力学方面——主要表现为对土体性质及加固机理认识远远不够。
- (2) 数学及分析工具方面——描述及分析方法依然存在难以克服的问题。

(3) 周围及外界条件的非确定性。

上述的问题(1)主要又包含两类问题:基本问题与特性问题。

基本问题主要指一般变形体力学中目前仍未解决的关于独立变量个数及非独立变量之间关系的问题,诸如:何种条件下可能影响结果的量中起控制性作用的是哪些?哪些量是独立的?独立的量在数量上是否确定?共有多少?非独立量之间存在何种关系?这些量是如何相互影响(本构)甚至导致本身发生质的变化的?在何种自然与外界条件下土体有何种物理(与化学)力学响应及演变?其中,关于独立变量个数的确定目前还做不到。特性问题则是土力学及土体工程学中的问题,即不同外界环境条件下土体本身性质(以及参数)及其变化如何,这一问题的回答通常是非确定的。

上述的问题(2)也主要包含两类问题:工具的不适合性与数学本身的困难。

求解工具的不适合性,其表现如下:

1) 非确定性问题用确定性数学方法处理——由于土的三相性与时空变异性特点,土体工程问题呈现明显的非确定性,但目前一般用确定性的求解方法来分析处理,自然存在由此带来的许多问题。

2) 非线性问题用线性方法及工具描述——土体的力学响应一般是物理非线性与几何非线性的,线性只是其特例,用线性方程描述非线性问题本身就带来了固有差别。

3) 非连续性问题用连续性方法处理——连续性对于土体来讲完全是相对的,在许多情况下关键力学量不存在足够高的连续性,甚至连应力与应变量的采用都存在概念上意义的丧失,求解结果的非客观性可想而知。

4) 非适定性问题用适定性理论处理——就变形体力学而言,除了弹性力学等少数学科分支外,对于大多数复杂条件下土体工程中的力学问题,目前尚未能从理论上证明是适定性的,而在许多情况下实际是非适定性的。

数学本身的困难,其表现如下:

1) 非适定性问题描述的困难——由于解的存在性、唯一性与稳定性都可能存在问题,如何求解分析是基本的困难。

2) 非连续性问题描述的困难——诸如连应力、应变等基本概念均基于连续性条件,非连续性问题的描述存在很大的局限性,更难以解决复杂的实际问题。

3) 非线性问题及联立微分方程组解析求解的困难——即使变形体力学中最简单的弹性力学空间问题,其15个基本未知量也要用15个基本方程在某一定解条件下求解,作为一个适定性问题,但往往还采用逆解法或半逆解法或数值近似解法(如有限元法等);而对于非弹性力学问题,解析求解的难度是可以想像的,其适定性没有保证,期望数值近似解也常常令人困惑。

上述的问题(3)主要是外界条件(特别是非自由面及非临空面处)的非确定性,包括荷载条件的非确定性,位移边界条件的非确定性,水力边界条件的非确定性,初始条件的非确定性。

上述这些困难给我们带来极大的挑战。然而,这些并不很妨碍土体工程建设的大力推进,其原因一方面是社会发展及需要的驱动;另一方面则来自本领域土力学等各学科,特别是对土体工程性质不断加深、了解及积累,在相当程度上帮了大忙。

1.1.3 地基处理理论发展

作为地基处理理论的基础学科,土力学的发展大致可分为三个阶段,一是以库仑(Charles Augustin de Coulomb, 1736—1806)贡献为标志的第一阶段;二是以太沙基(Karl von Terzaghi, 1883—1963)贡献为标志的第二阶段;三是太沙基后的现代发展阶段。作者深有感触的是,诸如太沙基这样的开拓者,其几乎所有的创造都与现场第一线切身体验与长期独立思考分析分不开。

地基处理理论的发展与土力学及地基处理技术的发展紧密相关,理论的主要构成及发展大致可以划分为以下几方面:

1) 考虑土体主固结变形的固结理论。

2) 考虑土体次固结的流变理论。

3) 各种地基加固工法技术相对应的作用机理,诸如真空与堆载联合作用下软土固结与力传递理论,冲击荷载下软土变形及固结与力传递理论,复合地基变形与力传递理论,搅拌桩固结机理,电渗固结机理,加筋土作用机理等。

4) 考虑瞬时变形的有关理论也可认为是地基加固理论的基本组成部分。

固结及流变理论包括:均匀地层的线弹性、黏弹性、弹塑性、黏弹塑性、黏弹黏塑性等变形(固结)理论,成层地基的各种固结理论,考虑软土结构性效应的固结理论,基于作者提出的有限特征比本构关系的固结理论等;其中,以考虑小变形的线弹性固结理论应用得最为广泛。

线弹性固结理论以1925年太沙基提出的一维固结理论为开创标志,以比奥(M. A. Biot) 1941年建立较为完备而作为代表的固结理论。而巴隆(R. A. Barron)于1948年在太沙基固结理论基础上,建立了轴对称固结基本微分方程并导出其解析解,其在砂井地基设计中得到了广泛应用。

太沙基固结理论与比奥固结理论的假定是基本一致的,即骨架线性弹性、变形微小、渗流符合达西定律等;但有一个很大的区别,即太沙基理论实际包含了一个假定——在固结过程中法向总应力和($\Theta = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z$)不随时间而变。比奥方程推导的方式与太沙基方程稍有不同,但若增加此假定,就会得出与太沙基方程完全一致的形式。由于这两种理论在假定上的差别,导致了建立的方程形式不同;太沙基方程中只含孔隙压力一个未知变量,与位移无关;比奥方程则是包含孔隙压力和位移的联立方程组。太沙基方程在推导过程中应用了有效应力原理、连续性方程式,对本构方程只用了与体积变形有关的表达式,在假定总应力和不变后就可将应力或应变从方程中消去;孔隙压力的消散仅仅决定于孔隙压力的初始条件和边界条件,与固结过程中位移的变化无关。而比奥固结理论没有做总应力和为常量的假定,在方程中不能将应力或应变消去,故需完整地引入本构方程,进而引入几何方程,最后把孔隙压力与位移联系起来。这就可以反映固结过程中位移与孔隙压力的相互影响,或者说反映了两者的耦合。

为了科学、合理地应用线弹性固结理论,在此将比奥固结理论的假定与主要结果做一简单介绍。在连续性、均质性与各向同性等线弹性力学基本假定基础上,比奥理论的附加假设如下:

(1) 土骨架为线弹性变形。

(2) 土体是饱和的,只有土骨架和水两相。

(3) 荷载作用下孔隙水的压缩量忽略不计(当考虑稳定渗流时,土粒本身压缩量也忽略

不计)。

(4) 水的渗透流动符合达西定律, 渗透系数为常量。

(5) 渗流速度很小, 不考虑动水压力。

(6) 不考虑温度效应。

有工程经验的读者不难看出, 上述假设(1)与(4)在大多数情况下与实际条件有大的偏差。

依据平衡方程、几何方程与线弹性本构方程(胡克定律), 同时利用有效应力原理、达西定律及渗流区孔隙流体平衡方程、渗流连续方程, 可得到以三个位移分量 w_x 、 w_y 、 w_z 与一个孔压量 u 共四个基本变量的偏微分方程组作为控制方程, 即比奥固结方程。

$$\left. \begin{aligned} G \nabla^2 w_x + \frac{G}{1-2\nu} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} \right) - \frac{\partial u}{\partial x} &= 0 \\ G \nabla^2 w_y + \frac{G}{1-2\nu} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} \right) - \frac{\partial u}{\partial y} &= 0 \\ G \nabla^2 w_z + \frac{G}{1-2\nu} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} \right) - \frac{\partial u}{\partial z} &= -\rho g \\ \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} \right) + \frac{1}{\gamma_w} (K_x \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1.1)$$

式中 ∇^2 —— $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$, 为拉普拉斯算子;

G 、 ν —— 分别是材料的剪切模量与泊松比;

K_x 、 K_y 、 K_z —— 分别为三个互交方向的渗透系数;

ρg —— 重力。

上述四个偏微分方程对应包含四个未知变量 u 、 w_x 、 w_y 、 w_z , 均是坐标 x 、 y 、 z 和时间 t 的函数, 在一定的边界条件及初始条件下, 可解出这四个基本变量, 并由此得到其他未知量。

当采用横观各向同性的线弹性本构方程并考虑土体惯性力时, 参照上述方法亦不难得到更一般的弹性固结方程。与次固结描述有关的流变学及黏弹力学基本状况可见本书的第2章以及相关文献。

本书也提供了作者的与有关地基加固工法技术相对应的作用机理与考虑瞬时变形的理论研究及讨论, 如第3、6、9章反映了作者及课题组近年来的部分相关探讨研究。

1.2 地基处理工程实践发展

1.2.1 地基处理工程实践发展历程

在国际上, 荷兰等欧洲国家的地基处理技术发展较早。然而, 近二十几年来, 我国基本建设规模不断扩大, 其建设规模及速度前所未有, 因而在诸如建筑、码头、水利、国防、市政、道路和铁道等土木工程建设中, 越来越多地遇到大量复杂的不良地基及地基加固问题。地基加固是否恰当关系到整个工程的质量、投资和进度。合理地选择地基加固方法和基础形式是降低工程造价的重要途径之一。人们日益重视地基的加固。

近30多年来, 在社会及建设需求不断的大力推动下, 我国在各种地基处理技术的普及和提高及综合利用等各方面都得到了较大的发展, 积累了丰富的经验。中国建筑科学研究院

会同有关高校和科研单位,组织编写了三版《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79—1991)、(JGJ 79—2002)、(JGJ 79—2012)。上海、天津、深圳、浙江、福建与广东等省市已经编制了地区性地基和地基处理规范,根据各自的情况,因地制宜,把一些地基处理方法编入规范;各种地基加固综合方法也在实际工程中大量应用。

这些年来,地基处理的发展主要表现在以下几个方面:

(1) 对各种地基处理方法的适用性和优缺点有了进一步的认识,在根据工程实际选用合理的地基处理方法上减少了盲目性。能够注意从实际出发,因地制宜,选用技术先进、确保质量、经济合理的地基处理方案。对有争议的问题,能够采取科学的态度,注意调查研究,开展试验研究,在确定地基方案时持慎重态度。能够注意综合应用多种地基处理方法,使选用的地基处理方案更加合理。

(2) 地基处理能力的提高。一方面,已有的地基处理技术本身的发展,如施工机具、工艺的改进,使地基处理能力得到了提高,高含水量软黏土地基处理方法诸如静动力排水固结法的发展就是一个例证;另一方面,近年来,各地在实践中因地制宜发展了一些新的地基处理方法或综合运用了一些处理技术优点而派生出的方法,取得了较好的社会效益。

(3) 复合地基理论的发展。随着地基处理技术的发展和各种地基处理方法的推广使用,复合地基概念在土木工程中得到越来越多的应用。工程实践要求加强对复合地基基础理论的研究。然而对复合地基承载力和变形计算理论的研究不够,复合地基理论正处于发展之中,还不够成熟。

复合地基指天然地基在地基处理过程中部分土体得到增强或被置换,或在天然地基中设置加筋材料,加固区是由基体(天然地基土体)和增强体两部分组成的人工地基,加固区整体是非均质和各向异性的。根据地基中增强体的方向,又可分为纵向增强体和横向增强体复合地基。纵向增强体复合地基根据纵向增强体的性质,可分为散体材料桩复合地基和柔性桩复合地基。复合地基的分类如图 1.1-1 所示。

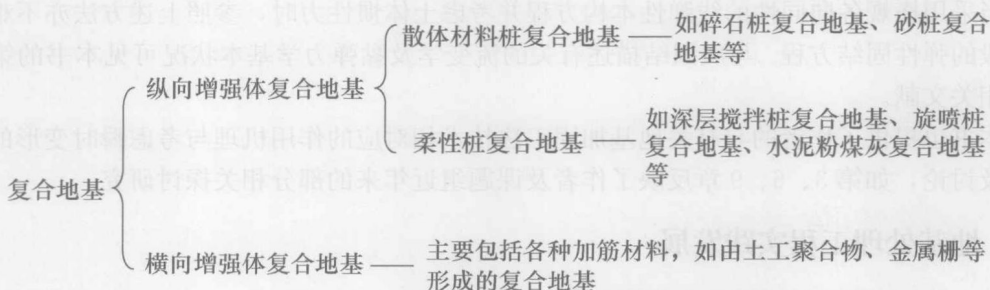


图 1.1-1 复合地基的分类

横向增强体复合地基、散体材料桩复合地基和柔性桩复合地基的荷载传递机理是不同的,应该分别加以研究。国内也有人狭义地将通过以桩柱形式置换形成的、由填料与地基土相互作用并共同承担荷载的地基,定义为复合地基。

复合地基有两个基本特点:它是由基体和增强体组成的,是非均质和各向异性的;在荷载作用下,基体和增强体共同承担荷载的作用。后一特征使复合地基区别于桩基础。一般来说,对于桩基础,荷载是先传给桩,然后通过桩侧摩擦阻力和桩底端承力把荷载传递给地基

土体的。若钢筋混凝土摩擦桩桩径较小、桩距较大,形成所谓的疏桩基础,由桩土共同承担荷载,则也可视为复合地基,应用复合地基理论来计算。

人工地基中有均质地基、双层地基和复合地基等。事实上,对人工地基进行精确分类是很困难的。大家知道,天然地基也不是均质、各向同性的半无限体,天然地基往往是分层的,而且对每一层土,土体的强度和刚度也是随着深度变化的。天然地基需要进行地基处理时,被处理的区域在满足设计要求的前提下尽可能小,以求较好的经济效益。各种地基处理方法在加固地基的原理上有很大差异。然而,上述分类有利于我们对各种人工地基的承载力和变形计算理论的研究。按照上述思路,常见的各种地基,包括天然地基和人工地基可粗略地分为均质地基、双层地基(或多层地基)、复合地基和桩基四大类。以往对均质地基和桩基础的承载力和变形计算理论研究较多,而对双层地基和复合地基的计算理论研究较少。特别是对复合地基,其承载力和变形计算的一般理论尚未形成,需加强研究。

各国学者对碎石桩复合地基研究较多,通过载荷试验积累了不少资料,并提出了多个碎石桩复合地基承载力计算公式。随着深层搅拌法和高压喷射注浆法形成的水泥土桩的应用,人们开始注意柔性桩复合地基的研究。微桩技术的应用还促使人们注意微桩复合地基设计计算方法的研究。复合地基承载力计算应以增强体和天然地基土体共同作用为基础。对于桩体复合地基,人们不仅注意散体材料桩和柔性桩的承载力研究,还注意桩间土承载力的研究。起初用天然地基承载力作为桩间土承载力,现在则已开始考虑由固结引起的强度增长、周围桩体的围护、成桩过程中的挤压以及扰动等因素对桩间土承载力的影响。近年来,对桩土应力比的确定及影响因素开展了大量研究。试验资料分析表明,桩土应力比与桩体性质、桩距、天然地基承载力、复合地基强度发挥度等因素密切相关,还与施工方法、质量控制等因素有关。桩土应力的确定通常采用现场载荷试验,其测定值也受荷载板尺寸的影响。近几年来,各类复合地基承载力与变形计算的研究工作越来越得到人们的重视。然而复合地基计算理论的发展,还远远不能满足工程实践的要求。

1.2.2 各类地基处理技术发展简况

(1) 排水固结法。传统的排水固结法又称预压法,适用于淤泥质土、淤泥、冲填土等饱和黏性土地基;20余年来该法得到了长足的发展,其主要的改进在于荷载或附加压力形式的多样性。饱和软黏土在附加压力作用下,孔隙中水慢慢被排出,土的孔隙比减小,随着超静孔隙水压力消散,有效应力提高,土的强度增加。通过排水固结法处理地基可以使地基沉降在加载预压期间大部或基本完成,减少建筑物在使用期间的沉降和沉降差,也可提高地基承载力。排水固结法是由排水系统和加压系统两部分共同组合而成的。排水系统通常有普通砂井、袋装砂井和塑料排水带等;加压系统通常有堆载预压法、真空预压法、降低地下水位法、电渗法和联合法。近二十年来,竖向排水系统采用塑料排水带和袋装砂井较多,加压系统采用堆载预压和真空预压法较多,也有的采用真空加堆载联合预压法以及建筑自重加载法;特别是,利用冲击荷载及软土上覆盖层共同作用形成残余作用力,使得冲击荷载作为加压系统组成部分,成为一种经济而有效的选择。

袋装砂井和塑料排水带的长细比大,井阻影响得到了人们的重视。为了消除地基在使用荷载下的主固结变形,减小或消除次固结变形,可以采用超载预压。所谓超载预压,就是在预压过程中采用比使用荷载大的预压荷载预压。

真空预压法一般能够取得相当于78~92kPa的等效荷载,为了进一步提高加固效果,

可采用真空-堆载联合预压法。据称,根据工程要求已可获得相当于 130kPa 的等效荷载。真空-堆载联合预压法先后在天津、上海、福州和广州等地得到应用。对于真空预压法的有效加固深度,学术界看法不一,有的学者认为真正的有效深度在 6m 以内,有的则认为在某种条件下可达十多米。真空预压的有效深度需引起重视和进一步研究,而真空预压与堆载联合预压的各种压力效果如何叠加更需要开展研究。袋装砂井也存在一个有效深度问题,某些日本学者认为袋装砂井有效深度在 15m 以内。对于超软弱地基,要注意防止地基固结过程中袋装砂井的折断问题。

(2) 强夯法和强夯置换法。强夯法处理地基首先由法国 Menard 技术公司于 20 世纪 60 年代末创用。我国于 1978 年引进该技术,交通运输部第一航务工程局科研所及协作单位在天津首先开展试验研究。由于该法设备简单、效果显著、经济和施工快,很快得到推广。除强夯法外,近 20 年来,强夯置换法也得到不少应用。强夯置换法和强夯法在加固机理上是不同的,应用范围也不相同。强夯法常用来加固碎石土、砂土、低饱和度的黏性土、素填土、杂填土、湿陷性黄土等各类地基。对于饱和度较高的黏性土等地基,如在一定措施基础上并取得工程经验或试验证明采用强夯法有加固效果的,也可采用。通常认为,强夯法只适用于塑性指数 $I_p \leq 10$ 的土。对于设置有竖向排水系统的软黏土地基,是否适用强夯法处理目前尚有不同看法。对于厚度小于 6m 的软黏土层,采用强夯置换法处理,边夯边填碎石等粗粒料,形成深度为 3~6m、直径较大(如 2m 左右)的碎石桩体与周围土体构成复合地基,也已取得较好的加固效果。

尽管业界做出了许多努力,强夯法至今依然没有一套被人们普遍接受的理论和计算方法,还需要在实践中总结和提高。

强夯施工主要设备包括夯锤、起重机、脱钩器和门架等。工程实践表明,施工机具和工艺会直接影响加固效果和经济效益。近些年来,人们较重视强夯机具装置的科学化、系列化和规格化的研究。强夯造成的振动、噪声等公害应引起足够的重视,有一定的应用限制。

(3) 振冲法。利用振动和水冲加固地基的方法,称为振冲法。振冲法由德国工程师 S. Steurman 在 1939 年提出,我国于 1977 年开始应用。由于大量工业民用建筑、水利和交通工程地基抗震加固的需要,该法得到迅速推广。振冲法早期用来振密松砂地基,后来也应用于黏性土地基。振冲法演变成两类:振冲密实法和振冲置换法。振冲密实法的加固原理是一方面依靠振冲器的强力振动,使饱和砂层发生液化,砂颗粒重新排列,孔隙减少;另一方面依靠振冲器的水平振动力,在加回填料情况下通过填料,使砂层挤压加密。振冲置换法的加固原理是利用振冲器在高压水流下边振边冲,在软弱黏性土地基中成孔,再在孔内分批填入碎石等坚硬材料,制成一根根桩体,碎石桩体和原地基构成碎石桩复合地基,以提高地基承载力、减小地基沉降。振冲密实法适用于颗粒含量小于 10% 的松砂地基;振冲置换法适用于不排水抗剪强度大于 20kPa 的黏性土、粉土和人工填土等地基,有时还可用于处理粉煤灰地基。

振冲法施工需要大量水,并会在施工过程中排放泥浆、污染现场。为了克服这一缺点,干法振动加固地基技术得到了应用。利用干法振动成孔器在软弱地基中设置碎石桩,干法振动加固地基技术主要适用于松散的非饱和黏土、杂填土和素填土,以及二级以上非自重湿陷性黄土。

另外,各地还因地制宜地应用了沉管干夯挤密碎石桩、干振道渣石屑桩、钢渣桩加固地