

# 复合地基三维数值分析

■ 张爱军 谢定义 著

 科学出版社  
www.sciencep.com

# 复合地基三维数值分析

张爱军 谢定义 著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书对复合地基承载力这样一个非常具有理论和实践意义的课题进行了系统的研究,在广泛分析影响复合地基承载力诸因素及各类复合地基承载机理的基础上,总结计算了复合地基承载力的解析计算方法,推导了能考虑井阻和涂抹作用的散体桩式复合地基固结计算解析公式,建立了计算复合地基承载能力的统一数值分析方法,重点介绍了反映主要影响因素、主要加固效应及实际承载特性的三维有限元-无界元耦合非线性分析程序 FNIJ3D。

用本书提出的数值方法对碎石桩复合地基  $P-S$  曲线的计算,得到与实测十分相符的结果,对柔体桩复合地基及刚体桩复合地基计算所得的结果,全面反映了各类复合地基的承载特性。本书的数值方法具有对土性参数进行反分析、模拟各种尺寸载荷试验以及优化设计参数等功能,它与实践经验的结合将为复合地基承载能力的进一步研究提供有效的途径。本书还提供了复合地基三维数值模拟研究计算源程序。

本书可供从事复合地基研究和实践的科学研究人员、工程技术人员和硕士、博士研究生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

复合地基三维数值分析/张爱军,谢定义著. —北京:科学出版社,2004

ISBN 7-03-012671-8

I. 复… II. ①张…②谢… III. 人工地基-三维-数值计算 IV. TU472

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 000040 号

责任编辑:童安齐/责任校对:柏连海

责任印制:刘士平/封面设计:东方上林工作室

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>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2004年2月第一版 开本:B5(720×1000)

2004年2月第一次印刷 印张:16

印数:1—3 000 字数:312 000

定价:32.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈杨中〉)

## 前 言

地基处理(或称人工地基)是岩土工程师在工程建设中发挥人的主观能动性改造和利用自然软弱岩土体作为建筑物地基的一种有效技术。它已有相当长的历史和相当丰富的实践经验。20世纪60年代以来,逐渐形成和完善起来的复合地基理论是长期地基处理技术的升华,为人类更加主动地发挥软弱岩土中的加强体与自然体共同承载、协调工作起到巨大的推动作用,它从广义上概括了当代地基处理的各种技术,将它们按加强体的几何特征和力学特征区分为层式复合地基(一般的垫层层、预压层、强夯层、加筋层等)技术和桩式复合地基(一般的碎石桩、旋喷桩、搅拌桩和树根桩等)技术,使各种地基处理方法在其基本工作特性的基础上实现了集合,并在工艺发展的基础上推动了理论的研究。尤其是桩式复合地基,因其具有广泛的适应性和大荷载深层传递上的优越性而得到迅速的发展。目前,桩式复合地基的承载能力从强度和变形两个方面已经有了一系列的计算或估算方法,在工程实践中起到了良好的作用。但应该注意到,现有的这些方法几乎都不例外地存在着不同的缺陷和难点,使人们仍然脱离不了一系列经验性的处理手段,仍然不得不冒不经济和不安全这两种潜在的危险。正是这种危险成了人们不断探索和研究的动力。在解决这些问题时,虽然可以采用多种思路和方法,以当前各种方法为基础做进一步的完善,本无可厚非,但是采用当代已经广为应用且非常成熟的数值模拟方法,似乎具有不可比拟的优越性。我们根据自己多年的工作与分析,认为有必要推荐这个既有广泛适用条件,又能同时揭示变形和强度特性、设计优化、参数反分析的数值模拟途径,以共同推进它的成熟与发展,这是撰写本书的根本目的所在。为此,本书包括两个方面的主要内容:一是广泛收集和分析现有复合地基承载能力分析计算的理论与方法,着重发掘它们理论上的依据和工程应用上的难点,这既便于认识它,又便于发展它;二是细致介绍和分析数值模拟的理论和技術,全面公开在研究基础上编制的适用不同类型桩式复合地基的计算机程序和算例,力图在理论与实用的结合上阐明问题的实质,以利于进一步研发和应用。

我们虽然初衷良苦,但是毕竟水平有限,只愿能够起到“抛砖引玉”的作用,希望得到有关专家的批评和指正。

本书配套的源程序与算例光盘已制作好,需要者请与作者联系,作者的电子邮箱:zaj@nwsuaf.edu.cn。

# 目 录

<b>第 1 章 概论</b> .....	1
1.1 复合地基研究的简要回顾 .....	1
1.1.1 地基处理技术的发展历史与复合地基理论 .....	1
1.1.2 复合地基的分类方面 .....	3
1.1.3 复合地基的承载力计算方面 .....	8
1.2 复合地基承载机理的分析.....	11
1.2.1 散体桩复合地基的工作机理 .....	11
1.2.2 柔体桩式复合地基的承载机理 .....	12
1.2.3 刚体桩式复合地基的承载机理 .....	14
1.3 复合地基三维数值分析的思路与任务.....	14
<b>第 2 章 复合地基承载能力的解析计算方法</b> .....	16
2.1 散体桩复合地基承载力计算.....	17
2.1.1 桩体承载力计算 .....	17
2.1.2 桩间土承载力计算 .....	22
2.1.3 散体桩复合地基承载力的计算 .....	26
2.1.4 讨论与小结 .....	27
2.2 散体桩复合地基沉降计算.....	28
2.2.1 下卧层沉降量计算 .....	28
2.2.2 加固区沉降量计算 .....	32
2.2.3 讨论与小结 .....	34
2.3 柔体桩复合地基承载力计算.....	34
2.3.1 承载力计算 .....	34
2.3.2 沉降计算.....	37
2.4 刚体桩复合地基的承载力与沉降量计算.....	41
2.5 柔性荷载作用下各类复合地基沉降计算.....	42
2.5.1 承载力的计算 .....	42
2.5.2 沉降量的计算 .....	42
2.6 考虑群桩效应时各类复合地基的承载力和沉降计算.....	45
2.7 《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79-2002、J 220-2002)承载力与沉降 计算介绍.....	46

2.7.1	散体桩复合地基方面 .....	46
2.7.2	柔体桩复合地基 .....	47
<b>第3章</b>	<b>复合地基的固结解析计算 .....</b>	<b>49</b>
3.1	径向固结度计算 .....	49
3.1.1	基本假定 .....	50
3.1.2	数学方程 .....	50
3.1.3	微分方程的求解 .....	53
3.1.4	公式的讨论 .....	56
3.1.5	公式的验证 .....	57
3.2	竖向固结度计算 .....	57
3.2.1	基本假定 .....	58
3.2.2	公式推导 .....	58
3.2.3	方程求解 .....	59
3.3	复合地基整体固结度的计算 .....	60
3.4	柔体、刚体桩复合地基的固结计算 .....	60
<b>第4章</b>	<b>复合地基数值分析数学原理 .....</b>	<b>62</b>
4.1	数学模型 .....	63
4.1.1	有限元法的基本原理 .....	63
4.1.2	无界元的基本原理 .....	69
4.1.3	接触单元的数学模型 .....	72
4.2	本构模型 .....	75
4.2.1	桩体与土体的本构关系 .....	75
4.2.2	桩土接触面本构关系 .....	77
4.3	非线性问题的有限元解析 .....	77
4.3.1	非线性分析的程序实现 .....	77
4.3.2	单元的破坏模式与应力修正 .....	78
4.3.3	应力迁移 .....	80
4.3.4	其他问题 .....	81
<b>第5章</b>	<b>复合地基三维数值分析程序 .....</b>	<b>83</b>
5.1	程序标识符的意义和命名原则 .....	83
5.2	程序的框架与主过程 .....	84
5.2.1	程序的运行 .....	84
5.2.2	程序包括的子过程及其作用 .....	86
5.2.3	模块程序 comm. for 清单 .....	91
5.2.4	程序的主框图 .....	93
5.2.5	程序的主过程源代码 .....	93

5.2.6	程序中的前后处理与错误检测	101
5.3	输入输出子过程	102
5.3.1	输入子过程	103
5.3.2	高斯点坐标和权系数	115
5.3.3	输出结果子过程	116
5.4	自由度指示矩阵和主元指示矩阵的形成子过程	123
5.4.1	自由度指示矩阵[NR]	125
5.4.2	主元指示矩阵[NA]	126
5.5	有限元、弹性元单元刚度矩阵的形成	130
5.5.1	形函数及其导数的求解子过程	130
5.5.2	雅可比矩阵和形函数对整体坐标的导数求解子过程	133
5.5.3	几何矩阵[B]求解子过程	137
5.5.4	物理矩阵[D]求解子过程	138
5.5.5	应力矩阵[S]求解子过程	145
5.5.6	单元刚度矩阵[K] <sup>e</sup> 的求解子过程	146
5.5.7	弹性元应力单元刚度矩阵形成	151
5.6	无界元单元刚度矩阵的形成	151
5.7	接触元单元刚度矩阵的形成	154
5.7.1	形函数形成子过程 SFR33	154
5.7.2	雅可比矩阵形成子过程 JCB02	155
5.7.3	几何矩阵形成子过程 BMATJ	157
5.7.4	物理矩阵形成子过程 DMATJ	159
5.7.5	单元刚度矩阵形成子过程 STIF2	162
5.8	整体刚度矩阵的形成	164
5.9	等效节点荷载向量的形成	165
5.9.1	体积力等效节点荷载向量的形成 (LOADG)	166
5.9.2	集中力等效节点荷载向量的形成 (LOADC)	169
5.9.3	面力等效节点荷载向量的形成 (LOADD)	170
5.9.4	总等效节点荷载向量的形成 (LOADS)	178
5.9.5	半载等效节点荷载向量的形成 (LOAD1)	179
5.9.6	全载等效节点荷载向量的形成 (LOAD2)	179
5.10	整体方程的求解	180
5.11	单元应力的求解	183
5.11.1	单元高斯点应力的求解	184
5.11.2	计算单元高斯点应力需要的几个辅助子过程	189
5.11.3	单元节点应力的求解	195



5.12	单元应力迁移过程的求解	198
5.12.1	应力迁移总计算子过程 STRMS	199
5.12.2	有限单元应力迁移计算子过程 STRMF	200
5.12.3	接触元应力迁移计算子过程 STRMJ	204
5.12.4	应力迁移计算辅助子过程	207
5.13	程序的验证	208
<b>第6章</b>	<b>各类复合地基承载能力的计算与承载特性分析</b>	<b>213</b>
6.1	复合地基承载能力的数值计算	213
6.1.1	复合地基承载力的计算	213
6.1.2	复合地基的沉降计算	216
6.2	各类复合地基承载特性计算成果分析	218
6.2.1	碎石桩复合地基承载特性分析	218
6.2.2	柔体桩复合地基承载特性分析	220
6.2.3	刚体桩式复合地基承载特性分析	222
	<b>参考文献</b>	<b>224</b>
	<b>附录 有限元网格图显示程序 GRAPH</b>	<b>226</b>
1	程序的编译、链接与运行	226
2	程序的原理	229
3	程序变量的意义	231
4	输入数据的格式	232
5	程序源代码与说明	233

# 第 1 章 概 论

复合地基(composite subgrade, composite foundation)的概念是日本学者在 20 世纪 60 年代初提出的。当时是指一种计算砂井地基的数学模型,随着地基处理技术的发展,复合地基的概念得到了很大的扩展。现在,复合地基一般指天然地基的一部分,或全部被人工置换或者加强,加强体与原有地基共同承担外部荷载的人工地基<sup>[1]</sup>。文献[2,3]对复合地基进行了较全面和准确的定义,即复合地基是指在地基处理过程中,部分土体得到增强或被置换,或在地基中设置加筋材料,加固区是由基体和增强体两个部分组成的人工地基;在荷载作用下,基体与增强体共同承担荷载的作用。因此,复合地基既不同于天然地基,也不同于桩基。绝大多数地基处理方法形成的人工地基属复合地基。

在地基基础理论分析中引入复合地基的概念是一个巨大的进步,复合地基理论研究的进步也大大促进了地基处理技术的发展。随着基础建设规模的不断扩大和地基处理技术的迅猛发展,尽管目前复合地基已在理论和实践中均取得了相当的进步,但复合地基的理论研究还远远不能满足实践的需要,仍然有大量的问题亟待解决。特别是复合地基承载能力计算分析方面,理论研究更不成熟。

地基的承载能力问题需要综合地基的强度和地基沉降量这两个相辅相成、相互联系的方面,这是一切地基设计应用的关键。复合地基也是这样,解决了它的承载能力问题就等于解决了复合地基设计的根本问题。因此,对复合地基承载能力的研究是非常必要的。本书在总结复合地基承载能力研究现状的基础上,主要介绍作者在该方面进行的一些工作成果。

## 1.1 复合地基研究的简要回顾

### 1.1.1 地基处理技术的发展历史与复合地基理论

地基处理技术是伴随着人类文明的起源而兴起的。从浙江余姚河姆渡出土的文物看,早在 7000 多年以前,人类先祖就懂得采用各种木桩来加固沼泽地基上的杆栏式建筑;甘肃东部大地湾遗址考古挖掘,史前人类早在五六千年前的仰韶文化时期就已在“房基”中采用夯实黄土地基;西安半坡村古代文明遗址上也发现了人类对建筑物地基进行夯实处理的遗迹。大量的考古发现表明,人类在 2000 年前,就懂得烧制石灰,并将之与土混合作为建筑物垫层材料应用于地基和路基处理中。古埃及曾用石灰、石膏和砂子来加固大金字塔的地基和尼罗河河堤;古印度也用石灰和黏土来建造挡水坝;古罗马帝国纳波里城的居民曾用当地大量堆积的火山灰掺

入不同比例的生石灰制成一种称为罗马水泥的固化剂,用来进行建筑和处理地基。我国祖先也早就掌握了石灰稳定土技术,春秋战国以前就用石灰、黏土和砂子拌和成三合土修筑驿道。

现代地基处理技术起源于欧洲。1835年,法国工程师设计了最早的砂石桩,设计桩长2m,直径20cm,每根桩的承载力为10kN。该桩应用于海湾沉积软土上建造兵工厂的地基工程中。由于19世纪科学技术水平的限制,地基处理技术在当时发展较缓慢。直到20世纪30年代,地基处理技术才得到较快发展。特别是第二次世界大战以后,由于科学的进步和大规模基础建设的兴起,地基处理技术才得到广泛重视,并得到迅猛发展。

砂石桩技术在第二次世界大战以后在前苏联得到了广泛应用,并在施工工艺、计算方法理论以及施工机械等方面均取得了较大成就,研究提出了振动和锤击等施工方法,以及土桩和挤密桩等新型桩型,并提出了相应的设计理论。日本于1958年提出了振动重复拔管的砂石桩新型施工方法,该方法的实行使砂石桩的应用水平提高到了一个新的水平。

1934年,苏联阿别列夫教授首创了土桩挤密法,对湿陷性黄土进行深层处理,取得了极大的成功。1936年,德国工程师S. Steuerman提出振冲法的原理。1937年,S. Steuerman供职的Johann Keller公司研制了第一台具有现代振冲器形式的锥形振冲器,用于处理柏林一幢建筑物的7.5m深的松砂地基,使地基的承载力提高了1倍。1957年,振冲器引入英国,英国工程师将Johann Keller公司的电动振冲器改为用水力驱动,将振冲器的作用进一步扩大。日本于20世纪50年代用振冲器加固油罐的松砂地基来提高地基的抗液化能力,加固效果得到地震的实际考验。

20世纪60年代,法国Menard技术公司首创了强夯法处理地基(也称动力固结法,dynamic consolidation method)。20世纪70年代,日本最早将高压喷射技术用于地基加固和防水帷幕,即CCP工法,也就是我们现在说的高压喷射法(jet grouting),也称为旋喷法。第二次世界大战以后的美国发明了深层搅拌法地基处理技术,当时称为MIP。20世纪70年代,MIP在日本得到了进一步的完善和推广。

我国的现代地基处理技术自20世纪50年代从苏联引进土桩挤密技术开始,经历了50~60年代和80年代以后两个繁荣发展的时期。特别是近10年来,我国地基处理技术发展非常迅速,许多技术、设备和工艺处于国际领先地位。

1959年,我国引进苏联砂石桩地基处理技术,首次在上海重型机器厂采用沉管挤密砂桩法进行地基处理,1978年又在宝山钢铁厂采用振动重复压拔管砂桩施工法处理原料堆场地基。近20年来,砂石桩地基处理技术在工业建筑、油罐、堤防、码头、原料堆场、路堤等领域里得到广泛应用。

20世纪60年代中期,我国对土桩挤密法进行了大量的试验研究,为解决西安地区的杂填土地基的深层处理问题发明了灰土挤密法,并用它进行湿陷性黄土地

基的处理。大量的工程实践表明,该法对消除黄土的湿陷性效果显著。目前,土桩挤密法和灰土桩挤密法已经在广大的黄土地区得到了广泛的应用,成为湿陷性黄土地区地基处理的主流方法,取得了很好的效果。

1977年,我国开始应用振冲法加固地基,水利部南京水利科学研究所和交通部水运规划设计研究院共同研制出我国第一台13kW的振动水冲器,1977年9月首先应用于南京船厂船体车间软黏土地基加固,加固深度达到13~18m。近年来,电力部北京勘测设计院研制了75kW的大功率振冲器,应用于四川省铜街子水电站工地穿过厚8m的漂卵石夹砂层对下面的细砂进行振密处理。近年来,振冲法在我国工业与民用建筑、水利水电、交通以及尾矿坝、灰场等领域得到广泛应用。

冶金部建筑研究总院和交通部水运规划设计研究院于1977年10月进行深层搅拌法的试验和设备研制工作,并于1980年在上海宝钢三座卷管设备基础软土地基加固工程中获得成功。

其余地基处理技术和地基处理设备均是在20世纪70年代末期开始在我国应用的,这里不一一介绍。

随着地基处理技术的发展和地基处理工程的大量开展,地基分析计算理论也得到很大提高。复合地基理论就是在地基处理技术长足发展的形势下诞生的,其最早见于20世纪60年代,由日本学者提出,用于解决砂井地基的承载能力问题。由于复合地基理论非常符合处理后的地基承载的实际,而在以后得到了广泛的推广应用。复合地基理论的诞生又极大地促进了地基处理技术的进步。在复合地基理论提出以前,只有天然地基、多层地基和桩基三种地基形式,在地基设计中要么地基土承担上部荷载,要么桩体承担上部基础的荷载。复合地基理论第一次提出桩土共同承担上部荷载的思想,非常符合处理后的地基承载的实际。大部分地基处理后的人工地基可以用复合地基理论研究。复合地基理论是解决人工处理后地基承载能力问题的有效手段,是进行地基处理设计的依据。

复合地基理论受到广大从事岩土工程科学研究、教学和工程人员的广泛重视,已经取得了大量的研究成果。据查阅,在中国期刊网(CNKI)上收录的我国期刊文章中,1994~2002年有关复合地基的文章就有989篇。中国土木工程学会土力学及地基基础学会地基处理专业委员会自1986年起到2000年,共举办了六次全国性的地基处理学术讨论会(第一届在上海宝钢,1986年;第二届在山东烟台,1989年;第三届在河北秦皇岛,1992年;第四届在广东肇庆,1995年;第五届在福建武夷山,1997年;第六届在浙江温州,2000年)。论文集中收录的论文均超过了100篇。这些数据反映了复合地基应用领域的广大。同时,也从另一个侧面反映出复合地基理论还处于发展阶段,远远没有成熟。

### 1.1.2 复合地基的分类方面

正确的分类有助于把握事物的本质,对复合地基的分类更是必须和重要的。最

初人们以不同的地基处理方法来区分复合地基。随着地基处理新技术的不断涌现和人们对问题认识的加深,发现这种分类方法并不科学。现今的分类已开始涉及各种复合地基承载的本质区别,逐渐走向合理。

文献[4]将地基分为散体桩复合地基和水泥土桩复合地基两种。散体桩复合地基桩体材料是由散状材料(碎石、砂及钢渣等)组成,桩体没有或有很小的凝聚力,桩体主要靠周围土体的握持力承载。水泥土桩复合地基是由水泥及石灰等胶结材料将软弱地基的部分土体胶结到一块形成桩体(如旋喷桩、搅拌桩等)与天然地基共同承载。这两类复合地基桩体材料的应力-应变曲线和侧限强度有明显的不同,复合地基内的应力、应变场也有明显的区别,但对于同一类地基,不论施工方法有多大的不同,其基本性质是一致的。

文献[5,6]将复合地基的概念进一步地拓宽,将土工织物、加筋土等组成的人工地基也看成复合地基,称为横向增强体复合地基。把一般意义上的桩式复合地基称为纵向增强体复合地基(也称桩式复合地基)。纵向增强体复合地基又可分为散体桩复合地基、柔体桩复合地基和刚体桩复合地基三种。其中,水平向增强体复合地基指用水平向的土工布、土工格栅等土工加筋材料对天然地基进行水平向增强的人工地基,而竖向增强体复合地基指对天然地基用垂直向或倾斜向的桩体(桩体可以是等长的也可以是不等长的)来增强的人工地基。

另外,由于上部基础形式的不同,对复合地基作用的荷载类型不同,对复合地基还可以分成刚性荷载下复合地基和柔性荷载下复合地基。这两种复合地基同样有截然不同的承载机理,也应该分别研究。

复合地基的分类如图 1-1 所示。

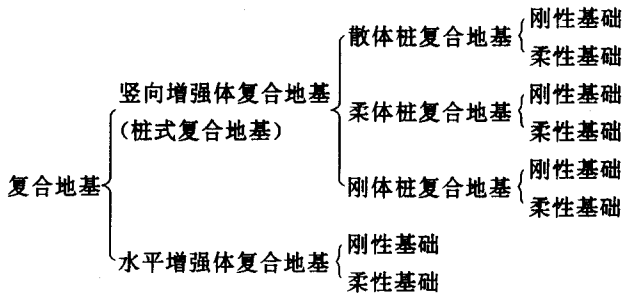


图 1-1 复合地基的分类

文献[7]认为,散体桩复合地基的桩体是由散体材料组成的,桩身材料没有黏结强度,单独不能形成桩体,只有依靠周围土体的围箍作用才能形成桩体。散体桩复合地基的承载力主要取决于散体材料内摩擦角和周围地基土体能够提供的桩侧侧限力。散体桩复合地基的桩体主要形式有碎石桩、砂桩等。柔体桩复合地基的桩体刚度较小,但桩体具有一定黏结强度。柔体桩复合地基的承载力由桩体和桩间共同承担,其中绝大多数情形为桩体的置换作用是主要组成部分。柔体桩复合地基

的桩体主要形式有土桩与灰土桩、石灰桩、水泥土桩等。刚体桩复合地基的桩体通常以水泥为主要胶结材料,有时由混凝土或由混凝土与其他掺和料构成,桩身强度较高。为保证桩土共同作用,通常在桩顶设置一定厚度的褥垫层。刚体桩复合地基比散体材料桩复合地基和柔性桩复合地基具有更高的承载力和压缩模量,而且对复合地基承载力具有较大的调整幅度。

以上文献的论述代表了目前复合地基分类的几种主要观点。有些学者还对复合地基分类标准的定量化方面做了许多有益的尝试。文献[8]认为,桩体刚度的大小对荷载传递规律有较大的影响,是区分柔性桩和刚性桩的关键,因此定义桩体的相对刚度为

$$K = \sqrt{\frac{2E_p(1 + \mu_s)}{E_s}} \frac{r}{L} \quad (1-1)$$

式中:  $E_p$ ——桩体弹性模量,MPa;

$L$ ——桩体长度,m;

$r$ ——桩体半径,m;

$E_s$ ——桩间土弹性模量,MPa;

$\mu_s$ ——桩间土的泊松比。

还可以对式(1-1)进行改进如下<sup>[55]</sup>:

$$K = \sqrt{\frac{\xi E_p}{2G_s}} \frac{r}{L} \quad (1-2)$$

其中

$$\xi = \ln \frac{2.5l(1 - \mu_s)}{r} \quad (l \text{ 取 } L \text{ 或临界桩长 } L_c)$$

根据相对刚度  $K$  的大小可以大致把桩分为两类:当  $K \leq 1$  时,称为柔性桩复合地基;当  $K > 1$  时,称为刚体桩复合地基。柔性桩复合地基还可以根据  $E_p/E_s$  值分为两类:当  $E_p/E_s > 10$  时,称为水泥土桩,包括深层搅拌水泥土桩、夯实水泥土桩和高压旋喷桩;当  $E_p/E_s < 10$  时,称为土桩,包括石灰桩、土桩和灰土桩。

笔者认为,尽管有的学者认为将土工织物地基包括在复合地基之内可能不利于对复合地基理论的研究,但从复合地基的发展来看,从复合地基增强体与土体共同承担荷载的本质定义上看,文献[5]方法是基本合适的,特别是将垂直增强体复合地基(也称桩式复合地基)区分为三类是合理的。笔者认为,对于散体桩复合地基虽然定义上认为是桩体材料无凝聚力的桩式复合地基,但是实际上对于桩体上有一定凝聚力的复合地基如灰土桩、石灰桩、土桩和水泥土桩等,其破坏形式仍然以侧向挤出破坏为主,因此还应该划到散体桩复合地基中。像 CFG 桩、高压旋喷桩等不以侧向挤出破坏为主的桩体(及通常称为半刚体桩)才应该划分在柔性桩复合地基中。刚体桩复合地基应该指以减少地基沉降量为目的的树根桩、疏桩基础等钢筋混凝土桩式复合地基,这类桩的桩体本身压缩量较少,且大部分承台与桩体刚性连

表 1-1 各种复合地基加固机理、破坏形式、传力机理汇总表

桩类	桩型	成桩工艺	个性特点	各桩的共性特点	各类的共性特点
散体桩复合地基	碎石桩	振冲、振密、挤密	① 适合于黏粒含量 $\leq 10\%$ 的砂土地基 ② 着重考虑挤密效应,忽略排水效应	1. 加固机理 ① 挤密作用 ② 置换作用 ③ 加速排水作用 2. 破坏形式 ① 破坏形式 ② 破坏形式 ③ 排水 3. 传力机理 ① 桩土相对位移小 ② 桩土轴向位移协调 ③ 上部荷载只能向下传播到 4~6 倍桩径深度	1. 加固机理 ① 挤密 ② 置换 ③ 排水 2. 破坏形式 ① 破坏形式 ② 破坏形式 ③ 其他 ④ 桩土位移协调(径向、竖向), 相对位移较小 ⑤ 桩身无或少凝聚力 ⑥ 极限承载力受侧向约束力控制 ⑦ 复合地基中,桩间土受力求 增强侧向约束力
		振冲置换	① 适用 $C_u \geq 20\text{kPa}$ 的软黏土地基 ② 不考虑挤密效应		
		干振法	① 适用于不宜用水的地基 ② 挤密效果比振冲好		
		沉管干夯	① 挤密效果好 ② 桩径不易控制 ③ 桩受到预夯,模量较大		
		沉管干振	与干振法基本一致		
	袋装碎石桩	① 适用于特别软的地基 ② 土工布的约束使承载力增大且有类似柔体桩的特性			
	石灰桩	石灰桩	① 挤密作用显著 ② 吸水固结作用显著 ③ 桩体强度不高,易软心 ④ 排水作用不大	1. 加固机理 ① 挤密作用 { 打桩挤密 ② 吸水固结作用 { 膨胀二次挤密 ③ 置换 { 离子交换形成 2~10cm 硬壳 桩体 2. 其他同碎石桩	
		双灰桩	① 削弱了挤密,吸水作用 ② 提高了桩身强度,即置换作用增强		
		—	与石灰桩基本一致,主要不同点在于桩身强度高和二次挤密吸水固结作用小		
	钢渣桩	—	—	与碎石桩一致,强调其加速排水固结作用	
砂桩		—	挤密效应好		
灰土桩	沉管挤密	—	挤密强度较上低一些	加固机理,破坏形式等与碎石桩相同	
	夯土桩	—	—		

柔体桩复合地基	高压旋喷桩	单管法	形成的桩径小,桩强度小	①削弱了挤密、吸水作用 ②其他同深层搅拌桩	1. 加固机理置换作用 2. 破坏形式 刺入破坏为主,有时出现桩身破坏 3. 其他 ①桩身可压缩,桩身压密与桩土相对位移逐段发展,同时摩阻力逐段发展到峰值 ②复合地基有四大作用 { 加强作用 削弱作用 遮拦作用 分担作用 }
		其他法	桩径大,强度高	①适用于承载力 $>30\text{kPa}$ 的淤泥地基 ②加固机理:置换作用 ③破坏形式:刺入破坏 ④传力机理 { 桩身变形与桩土相对位移逐段发展,同时,摩阻力逐段达到最大值 复合地基中,承台有四大作用 }	
	水泥系	桩径大,桩强度小	①加固机理:置换作用,成桩挤密作用 ②破坏形式:刺入破坏 ③传力机理:基本上是一个摩擦桩 单桩:有桩土相对位移 复合地基:三大作用,桩身压密量小	加固机理、破坏形式同上。传力方面主要有: ①桩身压缩可以忽略,桩土位移明显 ②四大作用不显著	
	石灰系	桩身强度高,且长期强度较高	①加固机理:置换作用,成桩挤密作用 ②破坏形式:刺入破坏 ③传力机理:基本上是一个摩擦桩 单桩:有桩土相对位移 复合地基:三大作用,桩身压密量小		
刚体桩复合地基	低标号混凝土桩	CFG桩	桩身强度高	①加固机理:置换作用,挤密作用 ②破坏形式:刺入破坏 ③传力机理:桩身基本无压缩,桩土相对位移明显	
		水泥碎石桩	有一定加速排水效应		
		赤泥混凝土桩	与CFG基本类似		
疏桩	群桩	灌注式	群桩效应不显著	①加固机理:置换作用,挤密作用 ②破坏形式:刺入破坏 ③传力机理:桩身基本无压缩,桩土相对位移明显	
		预制打入	施工工艺影响不大,可按灌注桩考虑		
		预制压入	施工工艺影响不大,可按灌注桩考虑		



接,其性质与柔性桩有较大的区别。按以上的分类可能更符合桩体的承载机理,更有利于按照类别建立复合地基承载能力的计算公式。笔者就不同形式的桩式复合地基加固机理、破坏形式、传力机理汇总于表 1-1 中。

散体桩复合地基、柔体桩复合地基和刚体桩复合地基,由于其作用机理不同,破坏模式不同,其承载特性及变形特性也不相同,其设计方法也有一些差异,因此应分别加以研究。同时,仅仅从定性的角度对复合地基进行分类已不能满足理论研究的需要,复合地基的广泛应用要求从定量上对复合地基进行分类,但目前这方面的研究还较少。

### 1.1.3 复合地基的承载力计算方面

为了解决复合地基承载力问题,国内外学者曾经进行了大量的研究。研究的方法包括原型试桩观测、模型模拟试验及数值模拟计算。这种研究在 1993 年以前主要集中在散体桩复合地基,近年来主要集中在柔体桩复合地基研究上,对于刚体桩复合地基而言,则借鉴桩基计算公式较多。

#### (1) 解析估算公式

对散体桩复合地基的承载力估算或用假定桩体挤扩破坏按极限平衡理论计算的方法,或者用圆孔扩张理论估算的方法。但主要思路是分别确定桩间土和桩体本身的极限承载力,再根据一定的原则叠加这两个部分承载力得到复合地基的极限承载力,复合地基的承载力  $p_{cf}$  普遍表达式可以用式(1-3a)表示:

$$p_{cf} = mp_{pf} + \lambda(1 - m)p_{sf} \quad (1-3a)$$

$$p_{cf} = [mn + \lambda(1 - m)]p_{sf} \quad (1-3b)$$

式中:  $p_{cf}$ ——复合地基的极限承载力;

$p_{pf}$ ——桩体极限承载力;

$p_{sf}$ ——桩间土极限承载力;

$m$ ——面积置换率(即桩面积和总面积之比);

$\lambda$ ——桩破坏时桩间土极限承载力发挥度系数;

$n$ ——桩土应力比(也就是桩体极限承载力与桩间土承载力的比)。

也有人引入桩土应力比的概念,将桩体承载力折算成桩间土的承载力,复合地基极限承载力的计算公式原理与式(1-3a)相同,只是变了一个表达的形式,其形式如式(1-3b)所示。这时要计算复合地基的极限承载力,先应该通过理论或是经验的方法确定出复合地基破坏时的桩土应力比,并计算或试验得到桩间土的极限承载力值即可以得到复合地基的极限承载力。

桩间土的极限承载力由浅基础地基承载力计算公式得到,或者由现场载荷试验得到,各种方法的不同点在于求解桩体承载力方法的不同。

式(1-3a)和式(1-3b)实际上是承台板(或基础)上的应力平衡的简单方程。它假定桩体先破坏,这时桩间土的承载力也得到一定程度的发挥,并且假设复合地基