

复合地基理论的 探索与解析

王凤池 著

FUHE DIJI LILUN DE TANSUO YU JIEXI



東北大學出版社
Northeastern University Press

复合地基理论的探索与解析

王凤池 著

东北大学出版社
· 沈 阳 ·

© 王凤池 2014

图书在版编目 (CIP) 数据

复合地基理论的探索与解析 / 王凤池著. — 沈阳: 东北大学出版社, 2014. 11
ISBN 978-7-5517-0833-3

I. ①复… II. ①王… III. ①人工地基—研究 IV. ①TU472

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 266517 号

出 版 者: 东北大学出版社

地址: 沈阳市和平区文化路 3 号巷 11 号

邮编: 110819

电话: 024-83687331(市场部) 83680267(社务部)

传真: 024-83680180(市场部) 83680265(社务部)

E-mail: neuph@neupress.com

http: //www. neupress. com

印 刷 者: 沈阳航空发动机研究所印刷厂

发 行 者: 东北大学出版社

幅面尺寸: 170mm × 240mm

印 张: 7.5

字 数: 150 千字

出版时间: 2014 年 11 月第 1 版

印刷时间: 2014 年 11 月第 1 次印刷

组稿编辑: 刘振军

责任编辑: 潘佳宁

封面设计: 刘江旸

责任校对: 图 图

责任出版: 唐敏志

ISBN 978-7-5517-0833-3

定 价: 30.00 元

序 言

复合地基是通过在土中设置散体材料（土、砂、碎石等）或胶结材料（石灰、水泥、粉煤灰等）构成加固桩（柱）体，使部分土体得到增强，或被置换，在桩土的协调工作下共同承担结构荷载的人工地基。复合地基伴随着土木建筑的发展而发展，特别是高层、超高层建筑的出现，极大地促进了复合地基技术的繁荣，也延伸了复合地基概念的内涵，拓宽了复合地基技术的应用范围。复合地基（Composite Foundation）概念的最初提出是在1962年，主要指碎石桩复合地基。随着碎石桩复合地基的巨大成功和明显的经济效益，复合地基也由原来的散体材料桩逐步扩展到柔性桩、半刚性桩、刚性桩等。复合地基技术符合“在工程设计与施工充分挖掘土体本身固有的强度潜能和自稳能力”的软基处理发展趋势，同时，使用粉煤灰、钢渣等工业废料符合环保要求，因此得到了广泛的工程应用。

在过去的几年里，作者有幸获得了国家自然科学基金项目（50778115）、辽宁省科技攻关计划（2011222006）、辽宁省自然科学基金（20102183）和沈阳市科技攻关计划（F11-264-1-23）等的资助，在复合地基的理论与实践等方面展开了较为系统的探究。本书反映的就是作者近几年在复合地基理论方面的一些研究成果。第一章绪论，主要叙述了复合地基的基本理论和研究现状；第二章复合地基褥垫技术，主要是褥垫层的破坏模式和褥垫层设计研究；第三章复合地基的承载力；第四章复合地基沉降的计算分析，主要是对复合加固区和下卧层沉降的理论探讨；第五章复合地基的沉降预测；第六章散体材料桩及三元复合地基，提出一种新型组合复合地基。

鉴于时间和作者水平，书中难免有错误和值得商榷之处，恳请专家和读者批评指正。在理论研究中得到了东北大学朱浮声教授、王明恕教授的指导和提携；成书过程中，得到了沈阳建筑大学周静海教授、康天蓓博士的帮助，在此表示真挚谢意。同时，本书参考了许多学术论文、规范、教材和著作等，并尽量将其列入参考文献中，但也难免疏漏，在此向有关文献的编著者表示衷心的感谢！

本书可供岩土及相关专业研究生参考，也可供相关学科的教师、科研及技术人员参考。

王凤池

2014 年 10 月
于沈阳建筑大学

目 录

第1章 绪 论	1
1.1 引 言	1
1.2 复合地基的发展历程	3
1.3 复合地基的基本理论	6
1.3.1 复合地基的二个基本概念	6
1.3.2 复合地基传力机理	8
1.3.3 位移协调条件	8
1.3.4 复合地基的破坏形式	9
1.4 复合地基理论研究现状	10
1.5 本书的工作	12
第2章 复合地基褥垫技术	14
2.1 引 言	14
2.2 褥垫层的作用	15
2.2.1 保证桩土协调工作	15
2.2.2 调节荷载分担比	16
2.2.3 缓解基础底面的应力集中	17
2.2.4 减小地震作用对复合地基的危害	18
2.3 褥垫层的破坏模式研究	19
2.3.1 研究现状	19
2.3.2 褥垫层基本破坏模式	20
2.4 褥垫层设计	21

2.4.1	褥垫层材料选择	21
2.4.2	褥垫层厚度确定	22
2.4.3	褥垫层宽度确定	25
2.4.4	褥垫层设计实例分析	26
2.5	复合地基褥垫层的减振作用分析	27
2.5.1	褥垫层的减振机理	27
2.5.2	褥垫层减振模型	30
2.5.3	动力方程的求解	32
2.5.4	算例	33
2.5.5	考虑减震作用的褥垫层设计	34
2.6	本章小结	35
第3章	复合地基的承载力	36
3.1	层状土中复合地基的形成条件	36
3.1.1	复合地基载荷试验结果分析	37
3.1.2	桩侧摩阻力的测定	38
3.1.3	关于复合地基形成条件的讨论	39
3.2	层状土中桩侧荷载传递函数的表达形式	40
3.2.1	凯兹迪方法	40
3.2.2	佐滕悟方法	40
3.2.3	克拉伏特方法	41
3.2.4	海丁格方法	41
3.2.5	其它方法	42
3.3	复合地基桩侧传递函数模式的选择	42
3.4	层状土复合地基的工作特性	44
3.4.1	荷载传递法基本方程的建立	44
3.4.2	竖向增强体的荷载——沉降关系	44
3.4.3	滑移系数的确定	46
3.4.4	褥垫层压缩量计算	46
3.4.5	桩间土的沉降	47
3.4.6	桩土应力比和荷载——沉降关系	48

3.4.7 实例分析	48
3.4.8 复合地基的承载力特征值	50
3.5 本章小结	51
第4章 复合地基沉降的计算分析	52
4.1 引 言	52
4.2 复合地基加固区变形计算	53
4.2.1 复合模量法(E_c 法)	53
4.2.2 应力修正法(E_s 法)	54
4.2.3 桩身压缩量法($\tau(z)$ 法)	54
4.2.4 其他加固区变形的计算方法	55
4.3 复合模量的计算方法	56
4.3.1 复合模量的定义与计算	56
4.3.2 面积比公式的缺点	57
4.4 复合模量的修正	59
4.4.1 复合模量计算的修正条件	59
4.4.2 实例分析	62
4.4.3 关于复合模量影响因素的讨论	63
4.5 复合地基下卧层沉降计算	65
4.5.1 下卧层的变形计算方法	65
4.5.2 复合地基的硬壳层效应	67
4.5.3 选择计算方法的判定条件	67
4.5.4 算例与分析	68
4.6 本章小结	69
第5章 复合地基的沉降预测	71
5.1 灰色系统理论	71
5.1.1 灰色微分方程模型	71
5.1.2 常用灰色模型	73
5.1.3 生成数	75
5.1.4 精度检验	75

5.2 复合地基沉降的 GM (2, 1) 预测模型	77
5.2.1 复合地基沉降的灰色性	77
5.2.2 复合地基沉降的发展特点	78
5.2.3 GM (2, 1) 预测模型建模与求解方法	78
5.2.4 不等步长的等步长化	79
5.3 灰色预测模型的程序实现	81
5.4 实例分析	82
5.5 本章小结	86
 第 6 章 散体材料桩及三元复合地基	 88
6.1 引 言	88
6.2 散体材料桩机理与布置	89
6.2.1 散体材料的加固机理	89
6.2.2 复合地基增强体的平面布置形式	90
6.3 散体材料桩沉降计算及算例	90
6.3.1 Hashin 模型建立及其求解	90
6.3.2 算例与分析	93
6.4 灌注锥型桩与碎石桩三元复合地基	93
6.4.1 锥形桩对碎石桩有效桩长的影响	93
6.4.2 碎石桩和锥形桩的共同工作	95
6.4.3 碎石桩和锥形型桩组合型复合地基设计	97
6.5 本章小结	98
 参考文献	 99

第1章 绪论

1.1 引言

地基处理是古老而又年轻的领域,许多现代的地基处理技术都可在古代找到它的雏形。我国在地基处理方面有着极其丰富的经验,在软土中夯入碎石等压密土层的夯实法在我国应用已有 2000 多年的历史,灰土、三合土垫层和短桩处理也是我国传统的建筑技术之一。大量的现代工程中广泛采用的地基处理技术是伴随着现代文明的发展而产生的,先进的施工机械和设计理论是复合地基技术发展的前提,如可变距双轴搅拌机的出现极大地促进了深层搅拌桩复合地基的发展,水平旋喷机械的成功应用扩大了高压旋喷注浆法的应用范围,等等^[1]。

目前在我国广泛采用的地基处理方法,就其加固机理不同大体可分为以下五大类。第一类为压密固结法,如重锤夯实法、强夯法、真空预压法、降水固结法、堆载预压法、电渗法、静力碾压法、振动碾压法等;第二类为换填垫层法,如砂石垫层、灰土垫层等;第三类为复合地基法,如砂桩、碎石桩、灰土桩、水泥搅拌桩、夯实水泥土桩、CFG 桩或素混凝土桩等;第四类为加筋法,如土工织物、加筋土等;第五类为浆液加固法,如水泥注浆、化学注浆等^[2]。其中复合地基技术已经成为我国地基处理方法中的主导方法。

竖向增强体复合地基是通过在土中设置散体材料(土、砂、碎石等)或胶结材料(石灰、水泥、粉煤灰等)构成加固桩(柱)体,使部分土体得到增强,或被置换,在桩土的协调工作下共同承担结构荷载的人工地基。复合地基的广泛应用与其良好的技术经济效果是分不开的。从可持续发展的角度讲,复合地基技术符合“在工程设计与施工充分挖掘土体本身固有的强度潜能和自稳能力”的软基处理发展趋势。同时,使用粉煤灰、钢渣等工业废料符合环保要求。从受力性能上看,复合地基与天然地基相比,具有承载力高、沉降和差异沉降小等优点,与桩基等深基础相比,节省费用。从适用范围上看,复合地基适用范围大,可根据土性、地下水位、承载力要求、地方材料和工业废料供应条件、施工环境等,选择不同类型、不同桩体强度的复合地基处理方法,已经被广泛地应用于土建、公路和铁路路基、水电地基处理工程中。复合地基由于上述特点受到学术界和工程界

的广泛关注。

由于复合地基的种类很多, 所以其分类的依据和分类方法也多种多样。根据增强体的性质, 将复合地基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]。也有的文献按照成桩后的强度, 将复合地基分为柔性桩复合地基、半刚性桩复合地基和刚性桩复合地基^[3,4]。由于复合地基的种类很多, 所以其分类的依据和分类方法也多种多样。根据增强体的性质, 将复合地基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。也有的文献按照成桩后的强度, 将复合地基分为柔性桩复合地基、半刚性桩复合地基和刚性桩复合地基。

上述分类容易引起人们的误解。如果按照成桩材料不同划分, 散体材料桩应与实体桩对应; 散体材料桩受力性能与柔性桩有一定的区别, 主要在于散体材料桩没有黏结强度, 承载力主要是依靠桩周土约束其侧向变形来提供的, 受力区主要集中在距离桩顶 4 倍桩径的范围内, 其地基承载力提高仅为 20% ~ 60%。由于软土抵抗变形能力较小, 对桩的约束作用也很小, 因此随着荷载的增加, 桩侧向变形也逐渐增大, 使地基产生了较大的沉降。且散体材料桩处理范围较窄, 如振冲碎石桩只适用于不排水抗剪强度大于 20kPa 的地基土。

柔性桩体本身具有一定的黏结强度, 桩体的特征比较明显。同时, 柔性桩复合地基由于桩体自身强度较小, 临界桩长成为限制柔性桩、半刚性桩复合地基发展的一个主要问题。临界桩长是区别散体桩和柔性桩最主要的问题之一。

半刚性桩复合地基和刚性桩复合地基中荷载沿桩身全长传递, 荷载能够传递到更深的土层。其承载力主要来源于桩间土和桩端土。由于桩身刚度不同, 造成其当承载力达到极限时, 刚性桩主要产生桩体刺入破坏, 而半刚性桩有时发生桩体剪切破坏。

根据上述分析, 复合地基的分类如图 1.1 所示。由于不同种类的复合地基, 增强体与土的共同作用机理不同, 设计人员应根据复合地基种类不同, 采用不同的设计方法, 以保证地基处理的效果。



图 1.1 复合地基的分类

我国地域辽阔,工程地质条件千差万别,各地的施工机械条件、技术水平、施工人员素质等也相差较大。在选用地基处理方法时应因地制宜、充分利用地方资源。由于复合地基的种类很多,每一种都有其适用范围^[1-5](见表1.1),因此在地基处理时,一定要对工程地质条件进行深入了解,以便根据工程地质勘测资料进行复合地基的合理选型和设计。

表 1.1 复合地基的适用范围

分 类		适用范围
散体材料桩	砂石桩	松散地基、粉土、黏性土、杂填土、素填土等
	振冲碎石桩	砂性土、粉土、粉质黏土、杂填土、素填土等
	土桩、灰土桩	湿陷性黄土、人工填土、非饱和黏性土
实体桩	水泥土搅拌桩、粉体喷搅桩	正常固结的淤泥与淤泥质土、粉土、饱和黄土、素填土、黏性土以及无流动地下水的饱和松散砂土
	石灰桩	饱和黏性土、淤泥、淤泥质土、杂填土、素填土等
	夯实水泥土桩	地下水位以上的粉土、黏性土、杂填土、素填土等
	水泥粉煤灰碎石桩、素混凝土桩	黏性土、粉土和素填土等

在我国,复合地基技术的理论研究严重落后于工程实践,因此利用复合地基进行地基处理有成功的例子,也有失败的典型^[6]。可见,理论落后于实践的局面如果不得到缓解,必然成为复合地基发展的桎梏。

1.2 复合地基的发展历程

复合地基伴随着土木建筑的发展而发展。特别是高层、超高层建筑的出现,极大地促进了复合地基技术的繁荣,这是因为高层、超高层建筑的体形复杂、自重大,天然地基已不能满足承载力等的要求。复合地基技术的迅速发展和推广,也延伸了复合地基概念的内涵,拓宽了复合地基技术的应用范围。复合地基(composite foundation)概念的最初提出是在1962年,当时主要指碎石桩复合地基。随着碎石桩复合地基的巨大成功和明显的经济效益,复合地基也由原来的散体材料桩逐步扩展到柔性桩、半刚性桩、刚性桩等。

据 Hughes 和 Withers(1974)引用 Moreau 等(1835)的资料,碎石桩最早在1835年由法国在 Bayonne 建造兵工厂车间时使用,但当时并未引起人们的重视^[6]。其原因在于当时没有合适的计算理论和先进的施工方法。1936年,德国的 Steuerman 提出利用振动和水冲加固土体的方法,即振冲法(Vibroflotation)^[7],碎石桩才开始广泛应用。伴随着各种不同施工工艺的产生,碎石桩的内涵也在不断扩大,只要是最后制成了以石料组成的柱体或桩体,就称为碎石桩,而不论其

施工方法如何。目前,碎石桩的施工方法有沉管法、振动气冲法、袋装碎石桩法、强夯置换法等。由于大量的工业和民用建筑、水利和交通工程的需要,振冲法被我国成功引进并得以迅速推广。1977年在南京船舶修造厂船体车间淤泥质亚黏土地基上首次应用,并取得了良好的处理效果^[8]。对于振冲碎石桩的应用范围,说法不一。Thorburn认为,振冲法适用于不排水抗剪强度大于20kPa的地基土^[9];Greenwood和Kirsch认为适用于不排水抗剪强度为15~50kPa的软黏土^[10]。我国《建筑地基处理技术规范》总结了振冲法在我国应用近40年的经验,认同了Thorburn的观点。

砂桩在19世纪30年代起源于欧洲,而前苏联的研究对其发展起到了关键作用。砂桩最初的施工采用冲孔捣实法,由于质量较差,处理深度有限。随后采用的水冲振动法也没有取得良好的效果。20世纪初,锤击式打拔管施工方法出现后,砂桩的处理深度得到增加。1957年,日本研究出振动式重复压拔管施工方法,并采用了自动记录装置,施工质量得到有效控制,处理深度可达30m。砂桩在20世纪50年代被我国引进,对其加固效果和应用范围的研究取得了突出成就,研制出振动逐步拔管成桩新工艺,取得了良好的处理效果。砂桩主要是用来处理松散砂土地基的,如我国上海宝钢原料堆场的地基处理、日本的人造陆地工程^[11],均取得了良好的处理效果。利用砂桩处理软弱黏性土既有成功的也有失败的,因此应谨慎应用。

土桩(或灰土、二灰桩)复合地基是由桩间土和填夯的桩体组成的人工地基。1934年,前苏联阿别列夫教授首创了土桩挤密法,用来处理湿陷性黄土地基。十几年后,我国兰州地区为了处理黄土地基开始了土桩挤密法的试验和应用。20世纪60年代,在土桩挤密法的基础上,西安市建筑设计院开发研制了灰土和二灰挤密桩,取得了显著的经济效益。土桩和灰土桩有各自不同的使用目的,如果以消除地基湿陷性为目的,宜选用灰土桩;如果以提高地基的承载力为目的,宜采用灰土桩。

利用石灰加固软弱地基已有2000年的历史,但直至20世纪中叶,大多利用石灰做表层或浅层处理。1953年,天津大学对石灰桩进行了系统的研究,但由于客观条件限制,工作未能继续。20世纪60年代,美、德、瑞典等国纷纷开始对石灰桩加固软土进行研究,深层搅拌石灰桩首先在瑞典研制成功,并在20世纪70年代投入使用。1965年,日本开始对石灰桩技术进行研究,并且开发了旋转套管式无振动无噪声的石灰桩专用机械,成为石灰桩技术最先进的国家。1981年后,我国江苏省开始采用生石灰和粉煤灰掺和料加固软土地基,取得了较好的经济效果。1983年湖北省建筑科研设计院和华中理工大学联合开发了一套人工铲成孔的简易施工方法,并首次成功地将石灰桩用于11层的高层建筑^[2]。1987年,湖北省建筑科研设计院等单位首次测得了石灰桩复合地基的变形场和桩体应力分布规律,并提出了承载力和变形的计算方法,极大地促进了石灰桩复合地基

在我国的发展。随着人们对深层搅拌桩加固机理认识的不断提高和深层搅拌石灰桩自身的弱点,水泥浆逐渐成为深层搅拌桩的固化剂。第二次世界大战后,水泥浆搅拌法在美国研制成功。该法是从不断旋转的中空轴端部向周围已被搅松的土中喷出水泥浆,经叶片搅拌形成水泥土桩。1953年日本引进此法后,深层搅拌水泥土桩获得了长足发展,先后出现了CMC法、DCM法、DMIC法、DCCM法等先进的施工机械和施工方法。1977年,我国制造出第一台SJB—1型深层搅拌机,在上海宝钢总厂软土地基加固中正式采用并获得了成功^[5]。

随着复合地基技术的广泛应用,散体材料桩、柔性桩和半刚性桩复合地基的弱点制约了复合地基技术的进一步发展。采用散体材料桩加固软土,受力区主要集中在距离桩顶4倍桩径的范围内,其地基承载力提高仅为20%~60%^[6]。由于散体材料桩没有黏结强度,其承载能力主要是靠桩周土约束其侧向变形来提供的。由于软土抵抗变形能力较小,对桩的约束作用也很小,因此随着荷载的增加,桩侧向变形也逐渐增大,使地基产生了较大的沉降。同时,石灰桩和水泥土桩复合地基由于桩体自身强度较小,临界桩长成为限制柔性桩、半刚性桩复合地基发展的一个主要问题。临界桩长的概念可从荷载传递和地基变形两方面来分析。当地基中的可压缩桩增加到某一数值时,存在着某一深度,在这个深度以下的桩侧摩阻力近似为零,即当桩长超过该深度时,桩长再增加不能再提高桩的竖向承载力。从变形考虑也存在临界桩长,达到临界桩长后,增加桩长基本上不能再减少沉降量。这两种定义的临界桩长概念是不同的。顾尧章、周焕乔^[12]从承载力的概念出发,对单桩顶部加荷条件下的水泥搅拌桩的临界桩长进行过研究;段继伟^[13]利用同心圆桩法,基于沉降变形的定义,导出过单桩加荷条件下的临界桩长计算公式。

复合地基的特点是桩与土共同承担上部荷载,并最大限度地发挥桩间土的承载能力。散体材料桩、柔性桩和半刚性桩复合地基的弱点提示人们,要想获得足够的承载能力,减小地基沉降,必须增加置换体自身的强度,使荷载传递到更深的土层。鉴于上述原因,我国岩土工作者对刚性桩复合地基进行了卓有成效的研究。1990年,中国建筑科学研究院地基所成功开发了水泥粉煤灰碎石桩(CFG桩),开辟了刚性桩复合地基在我国应用的先河。1991年,浙江省建筑科学研究所等单位联合研发的低强度水泥砂石桩复合地基起到了进一步的推动作用。1996年,龚晓南教授主持开发的二灰混凝土桩复合地基也属于低强度混凝土桩复合地基^[1]。目前,刚性桩复合地基正处在理论研究和实践经验积累阶段,许多岩土工作者正在对之进行研究。

复合地基技术是目前土力学与基础工程领域中较有生命力的分支。1981年6月召开的第十届国际土力学及基础工程会议上,有46篇论文讨论了“地基处理”技术,地基处理也成为大会的12个重要议题之一^[7]。1982年,在泰国曼谷召开了“地基加固技术新进展研讨会”;1983年,在芬兰赫尔辛基举办了“第八届欧

洲土力学与基础工程会议”，会议的主题就是“地基处理”。1983年英国召开的“桩基与地基处理新进展研讨会”和1984年日本召开的“复合地基强度与变形研讨会”也有很多论文讨论了关于复合地基的研究进展和设计计算方法^[14]。1983年，我国在江苏无锡召开了“振冲加固法经验交流学术会议”，对振冲加固法在我国的发展和研究进行了系统的总结。1986年，上海召开了“全国第一届地基处理学术讨论会”，第一次把地基处理列为会议主题。1987年，在厦门举办了“第五届全国土力学与基础工程学术讨论会”，也对包括复合地基技术等地基处理技术进行了交流。1989年，“全国第二届地基处理学术讨论会”又在山东烟台召开，进一步促进了地基处理技术在我国的发展。1990年，中国建筑学会地基基础专业委员会在黄熙龄院士主持下，在承德召开了第一次以复合地基为专题的学术讨论会，进一步促进了我国复合地基理论和实践的发展。1996年，中国土木工程学会土力学及基础工程学会地基处理学术委员会在浙江大学召开了复合地基理论和实践学术讨论会，对复合地基的未来发展进行了广泛的交流和探讨，更加促进了我国复合地基技术理论和实践水平的提高。

复合地基技术在我国经历了几十年的发展，目前已经成为地基处理的主流技术。我国软弱地基类别多、分布广，为了适应改革开放以来大规模的土木工程建设需要，软弱地基必须开发和利用。而我国又是发展中国家，建设资金短缺，如何在确保工程质量的同时节省资金是每一个工程建设者所面临的问题。由于复合地基充分利用了地基土的承载潜能，在未来的工程地基处理中必然会得到越来越多的应用。

1.3 复合地基的基本理论

复合地基是一个新概念，正在不断的发展之中。复合地基的理论研究更是远远落后于复合地基的实践应用，如何在理论上有所发展成为复合地基研究的一个关键问题。经过十几年的发展，这种落后局面虽未改观^[15-16]，但众说纷纭，莫衷一是的局面却似乎趋于统一，一些基本概念和基本理论趋于成型。

1.3.1 复合地基的二个基本概念

(1) 面积置换率

图1.2是复合地基的基本模式。桩间土被加固体置换。设 A_p 为加固体的断面积， A 为每根桩水平影响区域的面积，则

$$\left. \begin{aligned} A &= A_s + A_p \\ m &= A_p / A \end{aligned} \right\} \quad (1.1)$$

定义 m 为复合地基面积置换率。置换率体现了加固体的置换水平。

(2) 桩土应力比

由于软弱土层被加固体置换,复合地基可以看成是各向异性材料。由于竖向增强体复合地基加固体和桩间土的压缩模量不同,在荷载作用下,加固体的压缩明显比桩间土小,随着地基变形的增加,应力逐渐转移到加固体上,在加固体上会产生应力集中(见图1.3)。

设 p 为地表面平均荷载, p_s 和 p_p 分别为桩间土和加固体承受的荷载,则定义

$$\left. \begin{aligned} \delta_p &= \frac{p_p}{p} \\ \delta_s &= \frac{p_s}{p} \end{aligned} \right\} \quad (1.2)$$

分别为桩、土荷载分担比。

由式(1.2)得

$$\left. \begin{aligned} p_p &= \delta_p p \\ p_s &= \delta_s p \end{aligned} \right\} \quad (1.3)$$

桩顶应力和桩间土表面应力可以表示为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_p &= \frac{p_p}{A_p} = \frac{\delta_p p}{A_p} \\ \sigma_s &= \frac{p_s}{A_s} = \frac{\delta_s p}{A_s} \end{aligned} \right\} \quad (1.4)$$

式中: σ_p ——桩顶应力;

σ_s ——桩间土表面应力;

A_p ——加固体的断面积,由式(1.1)可得 $A_p = mA$;

A_s ——桩间土的断面积,由式(1.1)可得 $A_s = (1-m)A$ 。

则定义

$$n = \frac{\sigma_p}{\sigma_s} \quad (1.5)$$

为桩土应力比(或应力分担比)。将式(1.4)代入式(1.5)可得

$$n = \frac{(1-m)\delta_p}{m\delta_s} \quad (1.6)$$

可见,桩土应力比和桩土荷载分担比可互相转化。

桩土应力比体现了在复合地基受荷载作用时,桩的应力集中程度。 n 不能太大,否则由于加固体承担了大部分荷载,桩间土的承载能力没有得到充分发挥;

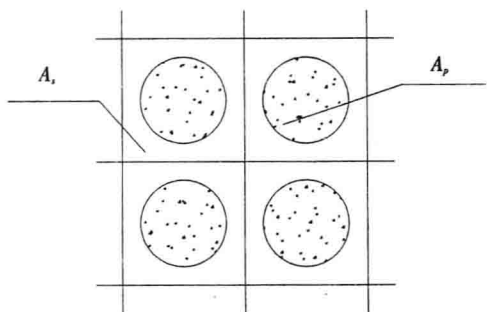


图 1.2 复合地基的基本模式

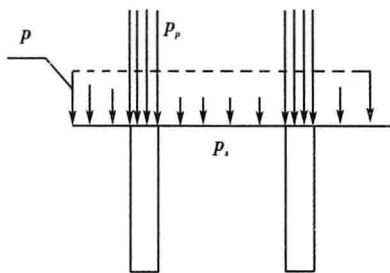


图 1.3 应力集中

n 也不能太小, 否则地基承载力提高程度太小。复合地基根本特点就是桩土共同承担荷载, 如果在地基破坏时, 桩土承载力能够同步发挥, 同时达到各自的极限承载力, 此时桩土应力比等于桩土极限承载力之比, 称为理想桩土应力比 n_d , 即

$$n_d = \frac{P_{pf}}{P_{sf}} \quad (1.7)$$

1.3.2 复合地基传力机理

实体桩复合地基与散体桩复合地基的传力机理是不同的。散体材料桩没有黏结强度, 它的承载能力主要靠桩周土约束其侧向变形来提供。由于软土抵抗变形能力较小, 对桩的约束作用也很小, 因此, 随着荷载的增加, 桩侧向变形也逐渐增大, 使地基产生了较大的沉降。因此采用散体材料桩加固软土, 受力区集中在距离桩顶 4 倍桩径的范围内, 其地基承载力提高仅为 20% ~ 60%。与散体桩相比, 实体桩复合地基中荷载沿桩身全长传递, 荷载能够传递到更深的土层。与无垫层带台单桩相比, 桩侧摩阻力从加荷开始在桩周上部土层即出现负摩阻力, 使得桩身轴力出现在中性点处^[17]。带有垫层的低强度混凝土桩复合地基中桩侧负摩阻力的大小随荷载加大而变小, 同时中性点位置逐渐上移, 相当一部分上部土层的摩阻力随着荷载的加大由负摩阻力逐渐变为正摩阻力, 使桩下部的摩阻力得到充分发挥。同时, 也使桩周土体的承载力得到了增强。

1.3.3 位移协调条件

低强度混凝土桩复合地基的加固机理实质就是桩、土共同作用机理。要保证桩、土能共同工作, 必须保证桩和桩间土的位移协调。

(1) 没有设置褥垫层的情况

桩体与桩间土协同工作的条件是基础与其下地基土保持接触。假设基础是绝对刚性的, 则桩顶沉降与基础下桩间土面的沉降相等。由于在一般情况下, 桩尖下土层压缩量 S_{p2} 和桩尖平面以下土层压缩量 S_{s1} 是相同的。故桩与桩间土共同工作的条件是:

$$S_{p1} + S_{p3} = S_{s2} \quad (1.8)$$

式中: S_{p1} ——桩身压缩量;

S_{p3} ——桩尖刺入量;

S_{s2} ——桩尖平面以上桩间土压缩量。

该式表明, 只有当桩尖刺入量与桩身压缩量之和等于桩间土压缩量时, 才能保证桩体和桩间土共同协调承载。

(2) 设置褥垫层的情况

设置褥垫层时, 桩顶将产生刺入, 这时桩土共同工作的条件是:

$$S_{p1} + S_{p3} = S_{s2} + S_{p4} \quad (1.9)$$