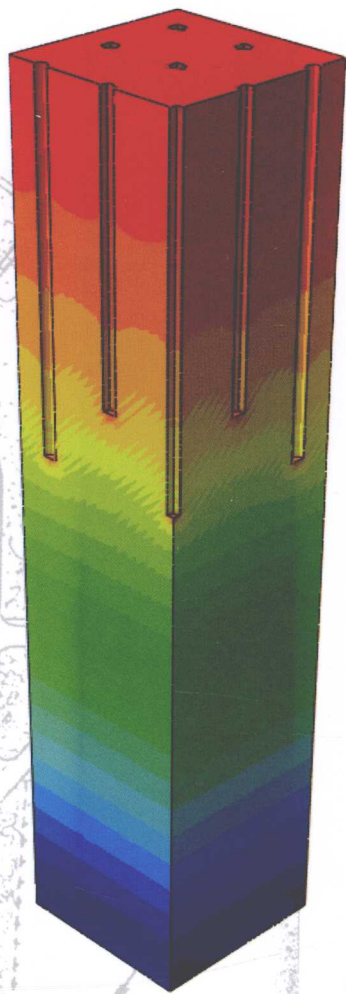
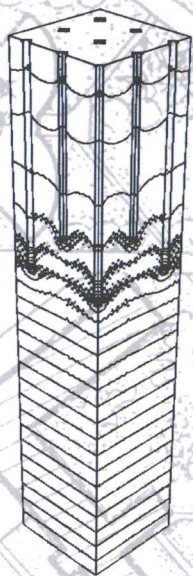
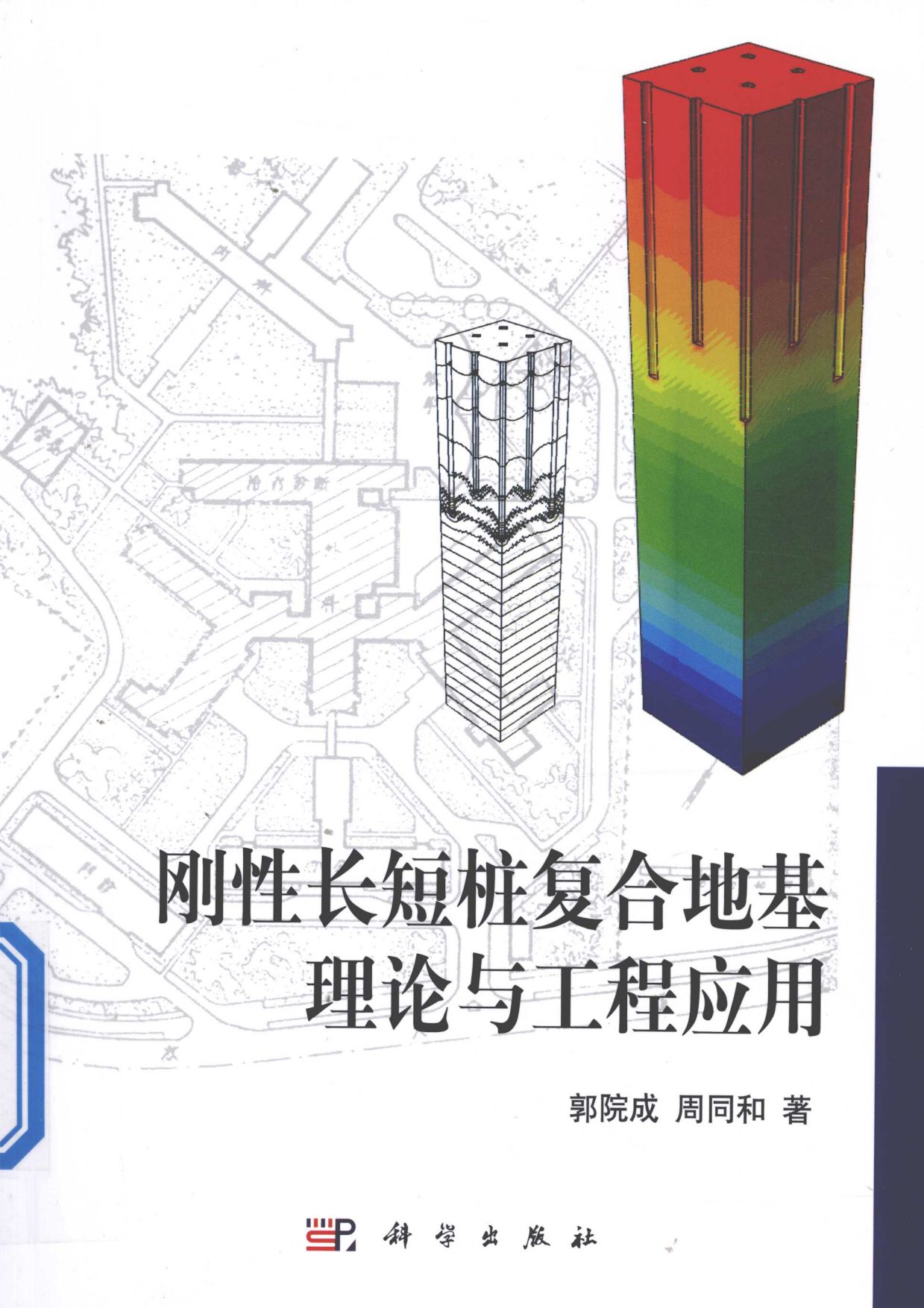




刚性长短桩复合地基 理论与工程应用

郭院成 周同和 著



科学出版社

刚性长短桩复合地基理论 与工程应用

郭院成 周同和 著

科学出版社
北 京

内 容 简 介

本书是作者多年研究成果的总结。全书以刚性长短桩复合地基基础体系为研究对象,采用基底沉降变形一致的基本假定,以单桩变形刚度、单桩复合地基变形刚度研究为基础,全面、翔实地介绍了长短桩复合地基中长桩、短桩及桩间土体的相互作用机制及其变形刚度计算理论。

本书可供岩土工程领域的科技人员及高等院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

刚性长短桩复合地基理论与工程应用/郭院成,周同和著. —北京:科学出版社, 2015

ISBN 978-7-03-043318-3

I.①刚… II.①郭… ②周… III.①复合桩基-研究 IV.①TU473.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第027607号

责任编辑:童安齐/责任校对:刘玉靖

责任印制:吕春珉/封面设计:耕者设计工作室

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

*

2015年3月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2015年3月第一次印刷 印张: 11 1/4

字数: 210 000

定价: 60.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈双青〉)

销售部电话: 010-62136131 编辑部电话: 010-62137026

版权所有, 侵权必究

举报电话: 010-64030229; 010-64034315; 13501151303

前 言

复合地基技术在中国土木工程建设中作为地基加固的一种方法已得到广泛应用,但直至目前对其概念尚无统一认识。复合地基一词最早源于 20 世纪 60 年代,最初主要是指碎石桩复合地基。随着深层搅拌法和高压喷射注浆法在地基处理中的广泛应用,人们逐渐开始关注水泥土桩复合地基。因水泥土为黏结材料,因此将复合地基的概念重新界定为散体材料桩复合地基和黏结材料桩复合地基。此后,考虑桩的刚度、桩的长度、桩型、褥垫层的作用、土工合成材料,以及作用机理等因素,又将复合地基的概念进一步扩展为刚性桩复合地基和柔性桩复合地基,等长桩复合地基和长短桩复合地基,单一桩型复合地基和多桩型复合地基,复合地基和复合桩基,水平增强体复合地基和竖向增强体复合地基,以及桩-网复合地基等。随着实际工程要求的不断提高,技术和理论水平的不断发展,如今复合地基理论已得到非常广泛的应用,但同时面对新的工程挑战,仍然有诸多问题有待解决。

本书是作者及其团队历经十几载工程实践和理论探索的结晶,经历两年精心撰写而成。全书从刚性长短桩复合地基的概念、类型至作用机理;从发展历程至国内外研究现状;从现存问题至发展意义;从承载性状与沉降分析至变刚度调平设计;从现场试验研究至实际工程反演分析;从实际工程探索至设计理论研究,再至工程实践,深入浅出地阐述了刚性长短桩复合地基理论与实践的发展过程。在兼顾理论分析的系统性和完整性的同时,本书注重总结现场试验和实际工程中获取的实践经验,是一本理论与实践紧密结合的专业著作。

本书所涉及的刚性桩复合地基理论与技术方面的最新研究成果受到了国家自然科学基金项目:长短桩复合地基协同工作机制及变形刚度计算理论研究(编号:50978235),以及校企合作开展的横向科研项目“基于非原位试验的刚性长短桩复合地基承载力确定方法及其工程应用研究”、“柔性基础条件下刚性桩复合地基工作性状试验研究”和“高层建筑地基基础变刚度设计的数值模拟及工程应用研究”的资助,其中“刚性长短桩复合地基设计理论及工程应用研究”项目获得 2008 年度河南省科技进步二等奖(证书编号:2008-J-054-R01),“柔性基础条件下刚性桩复合地基工作性状试验研究”获得 2008 年度华夏建设科技进

步三等奖”，“基于非原位试验的刚性长短桩复合地基承载力确定方法及其工程应用研究”项目获得 2012 年度河南省建设科技进步一等奖。

本书共分九章，撰写过程中得到了郑州大学岩土与地下工程研究所各位同事的帮助和大力支持，书中最新研究成果涵盖了张四化工学博士学位论文研究成果，以及李明宇、刘宁、张丽、王会杰、陆俊虎、刘云龙、王伟玲、许红、夏锦红等硕士研究生学位论文的核心研究成果，在此向他们卓有成效的科研工作表示衷心感谢！

著 者

2014 年 9 月

于郑州大学

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 复合地基的概念、类型及作用效应	1
1.1.1 复合地基的概念	1
1.1.2 复合地基的类型	1
1.1.3 复合地基的作用效应	3
1.2 长短桩复合地基的概念与分类	4
1.3 长短桩复合地基现有设计理论	5
1.3.1 长短桩复合地基的作用机理	5
1.3.2 长短桩复合地基设计理念	6
1.3.3 长短桩复合地基设计要求及原则	6
1.3.4 长短桩复合地基承载力计算方法	7
1.3.5 长短桩复合地基沉降计算方法	8
1.4 长短桩复合地基国内外研究现状	8
1.4.1 长短桩复合地基国外研究现状	9
1.4.2 长短桩复合地基国内研究现状	9
1.5 现存问题及研究意义	20
参考文献	21
第 2 章 刚性桩复合地基三维数值模拟	27
2.1 有限元法及 ABAQUS 简介	27
2.1.1 有限元方法简介	27
2.1.2 ABAQUS 简介	27
2.2 土体的本构模型	28
2.3 刚性单桩复合地基三维数值模拟分析	29
2.3.1 基本假定	29
2.3.2 数值建模	30
2.3.3 模拟分析结果	31
2.4 刚性多桩复合地基三维数值模拟分析	33
2.4.1 建模假定和参数	33
2.4.2 模拟分析结果	34
参考文献	40
第 3 章 单桩及多桩复合地基变形刚度	41
3.1 现有复合地基沉降计算方法	41
3.1.1 加固区土层压缩量 s_1 的计算方法	41
3.1.2 下卧层土层压缩量 s_2 的计算方法	43

3.2 变形刚度计算单元假定	45
3.2.1 刚性单桩复合地基计算单元假定	46
3.2.2 刚性多桩复合地基计算单元假定	47
3.3 刚性单桩复合地基变形刚度计算分析	50
3.3.1 理论计算假定	50
3.3.2 理论推导过程	51
3.4 刚性多桩复合地基变形刚度计算分析	55
参考文献	58
第4章 刚性长短桩复合地基模拟与计算理论	59
4.1 刚性长短桩复合地基三维数值模拟研究	59
4.1.1 建模假定和参数	59
4.1.2 模拟结果分析	60
4.2 刚性长短桩复合地基沉降计算研究	67
4.2.1 几种沉降计算方法	67
4.2.2 考虑变形刚度的沉降计算方法	70
参考文献	72
第5章 刚性长短桩复合地基承载性状现场试验	73
5.1 试验内容	73
5.2 水文地质条件	74
5.3 试验方法	75
5.3.1 单桩荷载试验方法	75
5.3.2 4桩复合地基载荷试验方法	76
5.4 试验结果分析	78
5.4.1 沉降规律	78
5.4.2 荷载-应力曲线	78
5.4.3 桩土应力比	83
5.4.4 荷载分担比	85
参考文献	87
第6章 刚性长短桩复合地基关键参数计算方法	88
6.1 桩土应力比计算方法研究	88
6.1.1 整体承载力极限状态下桩土应力比计算方法	88
6.1.2 基于 $p-s$ 曲线的桩土应力比计算方法	91
6.1.3 考虑褥垫层变形特征的桩土应力比计算方法	96
6.2 桩顶上刺入变形的 Boussinesq 解	105
6.2.1 单桩复合地基中桩的上刺入变形计算	105
6.2.2 多桩复合地基中桩的上刺入变形计算	107
6.2.3 长短桩复合地基中桩的上刺入变形计算	113
6.2.4 多桩型复合地基中桩的上刺入变形计算	115
6.3 复合地基桩土空间作用效应	116
参考文献	117

第 7 章 基于等沉降准则的刚性长短桩复合地基承载力计算方法	118
7.1 桩间土承载力发挥系数 β_s 分析	118
7.1.1 β_s 的影响因素分析	118
7.1.2 桩土相互作用	119
7.2 基于等沉降原则的长短桩复合地基承载力计算理论	122
7.3 现场试验分析与计算方法验证	124
7.3.1 工程简介	124
7.3.2 工程现场试验	130
7.3.3 长短桩复合地基承载力计算实例分析	134
参考文献	137
第 8 章 刚性桩复合地基的空间变刚度概念设计	138
8.1 复合地基变刚度调平设计理念和研究现状	138
8.1.1 设计理念	138
8.1.2 复合地基的变刚度调平设计的研究现状	139
8.2 基于载荷试验 $Q-s$ 曲线的复合地基数值建模分析	140
8.2.1 土体本构模型	140
8.2.2 模型简化假定	141
8.2.3 单元划分及材料选取	142
8.2.4 建模与计算过程	143
8.3 非均布荷载下变刚度复合地基的数值分析	144
8.3.1 等刚度复合地基及等间隔长短桩复合地基的沉降对比	145
8.3.2 筏板下“中心长桩边缘短桩”布桩沉降特征	149
8.3.3 变桩距复合地基的沉降特征	158
8.3.4 筏板下复合地基抽桩分析	161
8.4 非均布荷载下各变刚度复合地基沉降特征的对比分析	165
参考文献	168
第 9 章 刚性长短桩复合地基发展展望	169

第1章 绪 论

为了充分利用天然地基的承载力，降低工程成本，缩短施工工期，自 20 世纪 60 年代起，复合地基应运而生，并在全中国范围内得到迅速推广应用，产生了良好的社会效益和经济效益。

1.1 复合地基的概念、类型及作用效应

1.1.1 复合地基的概念

复合地基的概念分狭义和广义。广义复合地基的概念是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，加固区由基体（天然地基土体或被改良的天然地基土体）和增强体两部分组成的人工地基。在荷载作用下，基体和增强体共同承担荷载的作用。其中竖向增强体主要为桩，水平向增强体主要为土工织物，基体为桩间土。狭义复合地基的概念最早是指水泥土搅拌桩复合地基。

1.1.2 复合地基的类型

随着地基处理技术和复合地基理论的发展，其种类也日趋繁多。目前许多实际工程中同一场地内往往采用不同的地基处理技术和多种形式复合地基。

1. 按增强体设置方向分类

竖向增强体复合地基、水平向增强体复合地基及斜向增强体复合地基，分别如图 1-1(a)~(c)所示。

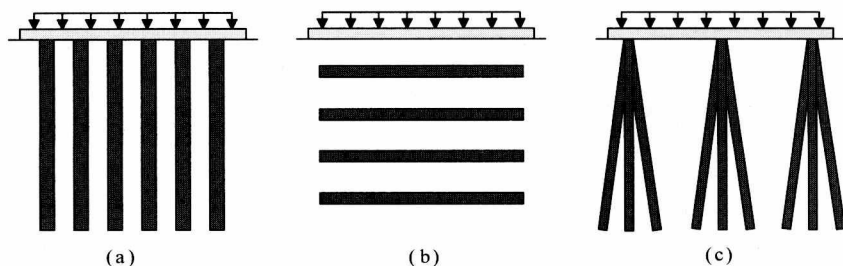


图 1-1 按增强体设置方向分类

2. 按增强体材料分类

水平向增强体主要为土工合成材料，如土工格栅、土工布等。

竖向或斜向增强体主要为桩。根据材料不同，竖向增强体桩复合地基分为散体材料桩复合地基和黏结材料桩复合地基两种。

散体材料桩：砂桩、碎石桩等。

黏结材料桩：水泥土桩、土桩、灰土桩、渣土桩、CFG 桩（水泥粉煤灰碎石桩）、混凝土桩、钢筋混凝土桩等。

3. 按桩长分类

等长桩复合地基、长短桩复合地基分别如图 1-2 (a)、(b) 所示。

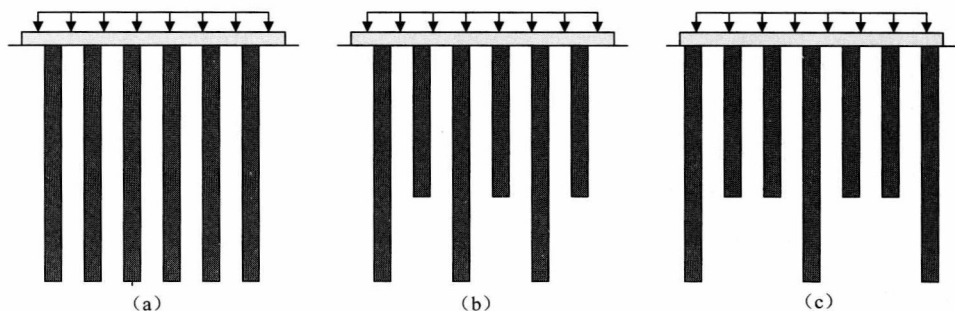


图 1-2 按桩长分类

4. 按桩身刚度分类

一般黏结材料桩复合地基分为刚性桩复合地基和柔性桩复合地基。

刚性桩：PC 桩（预应力混凝土管桩）、PTC 桩（薄壁管桩）、PHC 桩（预应力高强混凝土管桩）、CFG 桩、钻孔灌注桩等。

柔性桩：水泥土桩、灰土桩、石灰桩等。

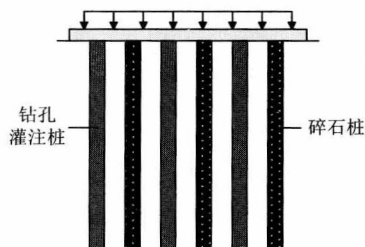


图 1-3 按桩型分类

5. 按桩型分类

单一桩型复合地基和多桩型复合地基，如图 1-3 所示。

6. 按基础刚度分类

柔性基础复合地基和刚性基础复合地基。柔性基础刚度小，小荷载作用下复合

地基的承载性状与刚性基础复合地基承载性状相同；大荷载作用下，基础与桩、土协同变形，复合地基承载性状及桩土间荷载传递机制与刚性基础复合地基不同。

现有研究中柔性基础一般指高填方路基；刚性基础一般指高层或多层建筑基础。

7. 按垫层分类

根据基础下或桩顶上是否设置垫层分为复合地基（有垫层）和复合桩基（无垫层）。

此外，根据垫层中或桩顶上是否设置水平向增强体，有桩-网复合地基（图 1-4），其一般为高填方复合路基。实际工程中，往往根据不同工程要求，复合地基形式变化多样，如柔性基础下多桩型长短桩复合地基，如图 1-5 所示。

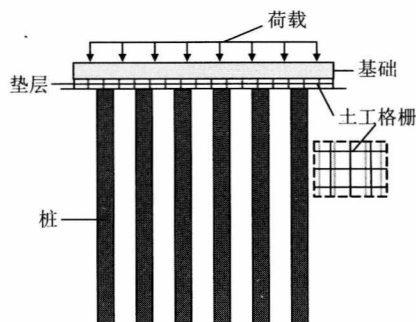


图 1-4 桩-网复合地基示意图

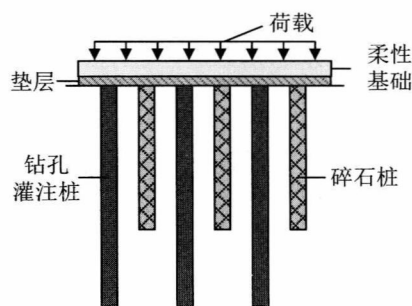


图 1-5 柔性基础下多桩型长短桩复合地基示意图

1.1.3 复合地基的作用效应

在复合地基中，桩型、沉桩工艺与复合地基加固效果密切相关。常用桩型的复合地基作用效应一般包括：①置换作用（桩体作用）；②挤密、振密作用；③加速固结作用；④约束作用。

1. 置换作用（桩体作用）

在复合地基中，竖向增强体（桩）的刚度一般大于桩间土。在荷载作用下，桩顶会产生应力集中，更多荷载由桩分担，并沿桩身向下传入深部土层，桩间土应力相应减小，复合地基承载力相比天然地基有所提高，沉降变形相应减小。实际工程中，增加桩长、桩径、桩的材料强度等都会不同程度地提升置换作用效果。

2. 挤密、振密作用

在复合地基中，振动或挤压沉桩会使松散土体孔隙比减小、密实度增加，

变形模量增大,承载力提高。在松散填土、砂土、粉土中,散体材料桩(砂桩、桩、碎石桩等)和黏结材料桩(PHC桩、PTC桩等)振动或挤压沉桩一定程度上会提高桩间土的承载力。但在饱和软黏土、粉土、硬黏土及密实砂土中,上述成桩方法会使土体强度降低,超孔隙水压力增大,密实度减小,承载力降低。

3. 加速固结作用

很多桩体(砂桩、碎石桩、CFG桩等)具有良好的透水性,是复合地基中良好的排水通道。在荷载作用下,桩间土中会产生超孔隙水压力,桩的存在缩短了桩间土排水泄压的路径,加快了土中超孔隙水压力的消散速度,使土的有效应力增加,桩间土强度和复合地基承载力提高,沉降变形减小。

4. 约束作用

在复合地基中,群桩一定程度上限制了荷载作用下土体的侧向变形,从而提高了土体的变形模量和承载力,减小了复合地基沉降变形。

此外,桩对桩间土的加固作用也有利于整体复合地基的抗滑移稳定。当桩体材料的密度小于天然土体的密度时,复合地基有减载作用。实际工程中,往往上述两种或两种以上的作用效应并存于同一工程中。

1.2 长短桩复合地基的概念与分类

长短桩复合地基理论是在等长桩复合地基(复合地基)理论上发展起来的。通过在天然地基内植入不同或同种类型不同长度的桩体组成长短桩复合地基,在荷载作用下,利用地基中附加应力随深度增加而减小的特征,充分发挥复合地基中各桩的承载力。长短桩复合地基适用于深厚淤泥、淤泥质土、黏性土、粉土、砂土、湿陷性黄土、可液化土等土层。

长短桩复合地基的竖向增强体由长桩和短桩组成,长桩和短桩可采用同一桩型或不同桩型。长桩常采用刚度桩,如钻孔或沉管灌注桩、钢管桩、大直径现浇混凝土筒桩或预制桩(包括预制方桩、先张法预应力混凝土管桩)等;短桩常采用散体材料桩或柔性桩,如深层搅拌桩、高压旋喷桩、石灰桩以及砂石桩等。长短桩的空间布置形式如图 1-6 所示。图 1-6(a)中长短桩相间,两长桩之间也可布置 2 根或更多的短桩;图 1-6(b)和(c)中,长桩和短桩常采用同一桩型;图 1-6 中(b)的布桩形式比(c)更有利于减小沉降,(c)的布桩形式可减小基础中的弯矩。

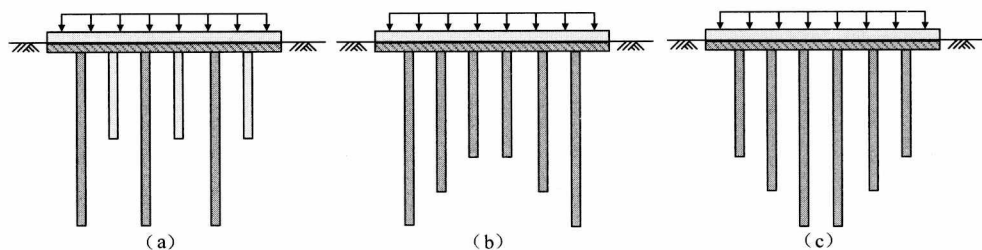


图 1-6 长短桩复合地基布桩示意图

1.3 长短桩复合地基现有设计理论

1.3.1 长短桩复合地基的作用机理

长短桩复合地基中长桩宜支承在较好的土层上，短桩宜穿过浅层最软弱土层。长短桩复合地基因长桩和短桩的间作设置，在复合地基中形成三个不同作用的工作区域，即以提高承载力为主的长、短桩联合工作区（Ⅰ区），以减少沉降为目的的长桩工作区（Ⅱ区）及承受桩体荷载的持力土层（Ⅲ区），三者共同作用，提高浅层地基承载力、减少地基沉降量，形成良好的长短桩复合地基，如图 1-7 所示。

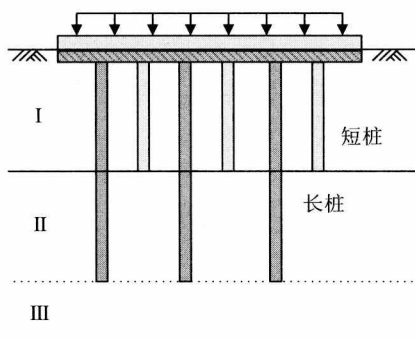


图 1-7 长短桩复合地基作用机理

1. 长桩的作用机理

在长短桩复合地基中，长桩的主要作用是提高承载力、控制沉降量，它将荷载通过桩身向地基深处传递，减少压缩层变形，同时对柔性短桩起到“护桩”作用，并与短桩一起抑制地基周围土体的隆起。在Ⅰ区深度范围内，各桩间具有较明显的“挟持”和“遮挡”效应，桩间土和桩共同沉降；而在Ⅱ区的长桩，由于土体和桩体不能同时沉降，其桩尖对桩端土体将有相当的刺入量。

2. 短柱的作用机理

当基底以下存在较厚的软弱土层时,采用短桩对该区域土层进行加固,可提高基底软弱土层的承载力;若基底以下存在上、下两层较为理想的桩端持力层,将长、短桩分别落在下、上两层桩端持力层,充分发挥上下两层桩端持力层的特性,利用短柱提高复合地基的承载力,通过长桩减少变形,在满足设计要求的同时减少地基处理的工作量,达到经济合理的效果。

3. 褥垫层的作用机理

褥垫层在复合地基中可以有效地调整复合地基的桩土荷载分配,充分发挥土体的承载能力特别是发挥浅层土体的承载作用。由于垫层的流动性,桩在荷载作用下产生的应力集中使垫层发生侧向流动而产生向上刺入,结果让桩土间的应力重新分配,从而提高地基的承载性能,调节变形。

1.3.2 长短桩复合地基设计理念

在长短桩复合地基承载力和沉降变形设计理论方面存在两种设计理念。一种是长桩协力形式的长短桩复合地基,当基底以下存在较厚的软弱土层时,采用短桩对该区域土层进行加固,减小地基上层的沉降变形,同时也可提高基底土层的承载力,而长桩的主要作用是弥补经短桩加固后的地基承载力的不足,同时长桩的设置也减小了复合地基的沉降。另一种是长桩控沉形式的长短桩复合地基。当基底以下存在上下两层较为理想的桩端持力层时,如采用短桩方案将桩端放在上层持力层,即使复合地基承载力能够满足设计要求,由于加固较浅,沉降变形将有可能偏大。采用长桩和短桩相结合的方案,将长桩、短桩桩端分别落在上、下两层桩端持力层上,充分发挥上、下两层桩端持力层的特性,长桩与短桩间隔设置,利用短桩提高复合地基的承载力,通过长桩不仅能够提高地基承载力,而且可将荷载通过桩身向地基深处传递,减少压缩层变形^[3]。

1.3.3 长短桩复合地基设计要求及原则

(1) 为充分发挥桩间土地基承载力和短桩竖向抗压承载力,长短桩复合地基与基础间应设置垫层。垫层厚度可根据桩底持力层、桩间土性质、场地载荷情况综合确定,宜为 100~300mm。垫层材料宜采用最大粒径不大于 20mm 的中砂、粗砂、级配良好的砂石等。

(2) 长短桩复合地基中桩的中心距应根据土质条件、复合地基承载力及沉降要求,以及施工工艺等综合确定,宜取桩径的 3~6 倍;当长桩或短桩采用刚性桩,且采用挤土工艺成桩时,桩的最小中心距应根据基础形式、复合地基承载力、土

性、施工工艺及周边环境条件等确定。短桩宜在各长桩中间及周边均匀布置。如果长短桩复合地基中长桩为刚性桩、短桩为柔性桩,为了充分发挥柔性桩的作用,使刚性长桩与柔性短桩共同作用形成复合地基,要合理选择刚性桩的桩距。对挤土型刚性桩,应严格控制布桩密度,特别是对于深厚软土地区,应尽量减少成桩施工对桩间土的扰动。

(3)长桩的持力层选择是复合地基沉降控制的关键因素,大量工程实践表明,选择较好土层作为持力层可明显减少沉降,但应避免长桩成为端承桩,否则不利于发挥桩间土及短桩的作用,甚至造成破坏。

(4)短桩桩端的复合地基承载力特征值可按公式(3-8)估算,其中 m 为长桩的置换率。当短桩桩端位于软弱土层时,应按公式(3-15)验算短桩桩端的复合地基承载力。在短桩的桩端平面,复合地基承载力产生突变,当短桩桩端位于软弱土层时,应验算此深度的软弱下卧层承载力,这也是确定短桩桩长的一个关键因素(另一关键因素是复合地基的沉降控制要求)。短桩桩端平面的附加压力值可根据短桩的类型,由其荷载扩散或传递机理确定。对散体材料桩或柔性桩,按压力扩散法确定,对刚性桩采用等效实体法计算。

(5)复合地基沉降采用分层总和法计算时,主要做了两个假设:

① 长短桩复合地基中的附加应力分布计算采用均质土地基的计算方法,不考虑长、短桩的存在对附加应力分布的影响。

② 在复合地基产生沉降时,忽略长、短桩与桩间土之间因刚度、长度不同产生的相对滑移,采用复合压缩模量来考虑桩的作用。上述假设带来的误差通过复合土层压缩量计算经验系数来调整。在计算时,需要根据当地经验,选择适当的经验系数。

1.3.4 长短桩复合地基承载力计算方法

《复合地基技术规范》(GB/T 50783—2012)规定长短桩复合地基承载力特征值公式为

$$f_{spk} = \beta_{p1} m_1 R_{a1} / A_{p1} + \beta_{p2} m_2 R_{a2} / A_{p2} + \beta_s (1 - m_1 - m_2) f_{sk} \quad (1-1)$$

式中: f_{spk} ——长短桩复合地基承载力特征值, kPa;

A_{p1} 、 A_{p2} ——长桩、短桩的单桩截面积, m^2 ;

R_{a1} 、 R_{a2} ——长桩、短桩的单桩竖向抗压承载力特征值, kN;

f_{sk} ——桩间土地基承载力特征值, kPa;

m_1 、 m_2 ——长桩、短桩的面积置换率;

β_{p1} 、 β_{p2} ——长桩、短桩的桩体竖向抗压承载力修正系数;

β_s ——桩间土地基承载力修正系数。

对 β_{p1} 、 β_{p2} 和 β_s 取值的主要影响因素有基础刚度,长桩、短桩和桩间土三者

间的模量比,长桩面积置换率和短桩面积置换率,长桩和短桩的长度,垫层厚度,场地土的分层及土的工程性质等。

当长短桩复合地基上的基础刚度较大时,长桩如采用刚性桩,其承载力一般能够完全发挥, β_{p1} 可近似取 1.0, β_{p2} 可取 0.70~0.95, β_s 可取 0.5~0.90。垫层较厚有利于发挥桩间土地基承载力和柔性短桩竖向抗压承载力,故垫层厚度较大时 β_s 和 β_{p2} 可取较高值。当刚性长桩面积置换率较小时,有利于发挥桩间土地基承载力和柔性短桩竖向抗压承载力, β_s 和 β_{p2} 可取较高值。长短桩复合地基设计时应注重概念设计。

对填土路堤和柔性面层堆场下的长短桩复合地基。垫层刚度对桩的竖向抗压承载力发挥系数影响较大。若垫层能有效防止刚性桩过多刺入垫层,则 β_{p1} 可取较高值。

1.3.5 长短桩复合地基沉降计算方法

当采用长短桩复合地基时,复合地基的沉降应由垫层压缩量、加固区复合土层压缩变形量(s_1)和加固区下卧土层压缩变形量(s_2)组成。加固区复合土层压缩变形量(s_1)应由短桩范围内复合土层压缩变形量(s_{11})和短桩以下只有长桩部分复合土层压缩变形量(s_{12})组成。垫层压缩量小,且在施工期已基本完成时,可忽略不计。长短桩复合地基的沉降宜按下述公式计算为

$$s = s_{11} + s_{12} + s_2 \quad (1-2)$$

长短复合地基中短桩范围内复合土层压缩变形量(s_{11})和短桩以下只有长桩部分复合土层压缩变形量(s_{12})可按《复合地基技术规范》(GB/T 50783—2012)中公式(5.3.2-1)计算,加固区下卧土层压缩变形量(s_2)可按《复合地基技术规范》(GB/T 50783—2012)中公式(5.3.3)计算。短桩范围内第*i*层复合土体的压缩模量(E_{spi}),可按下式计算为

$$E_{spi} = m_1 E_{pli} + m_2 E_{p2i} + (1 - m_1 - m_2) E_{si} \quad (1-3)$$

式中: E_{spi} ——第*i*层复合土体的压缩模量,kPa;

E_{pli} 、 E_{p2i} ——第*i*层长桩、短桩的桩体压缩模量,kPa;

E_{si} ——第*i*层桩间土压缩模量,kPa,宜按当地经验取值,如无经验,可取天然地基压缩模量。

1.4 长短桩复合地基国内外研究现状

随着长短桩复合地基技术的广泛应用及长短桩复合地基理论的深入研究,近年来涌现出大量丰富的实践和理论成果。

1.4.1 长短桩复合地基国外研究现状

目前国外对此的研究非常有限。McVay 等 (1989)^[8]提出了一种分析承受竖向荷载群桩的线性和非线性响应的方法,用有限元对群桩建模,通过荷载传递曲线分析桩土之间的相互影响,并通过 Mindlin 解法分析桩-土-桩之间的相互作用,用该法得到的弹性结果和已完成两个实地研究结果进行比较,获得了很好的一致性。

Wood 等 (2000)^[9]通过对碎石桩复合地基进行室内模型试验,分析了桩径、桩长、桩距等参数变化对其工作性状的影响,并用数值模拟验证了实验结论。

Francesco 和 Michele (2002)^[10]在某高层建筑中应用以钻孔桩为主、水泥土桩为辅有协调变形而共同工作的二元复合地基,达到结构的要求并取得了可观的经济效益。

Chow (2003)^[11]在某地基的设计中,采用预制桩加碎石桩结合的长短桩,预制桩振动挤密的施工过程加固了地基,同时碎石桩起到排水的作用,满足了深厚液化土地基的抗液化要求。

Alamgir 等 (2003)^[12]在分析柔性基础下端承桩复合地基时,假定桩和桩间土均为线弹性体,通过选择合适的典型单元体变形模式,利用典型单元体侧面零剪应力和桩土界面位移协调条件,通过各桩、桩间土单元的平衡分析给出了柔性基础下端承桩复合地基中桩和桩周土的附加应力和沉降计算的解析方法。

Stewart 等 (2004)^[13]以某工程为背景,采用对试验段采取现场测试和数值分析的方法,对复合地基性状进行了研究,分析了桩体模量和强度、土体模量、置换率对桩土应力比和地基土体侧向位移的影响。

Hiroshi 和 Mitsuo (2004)^[14]针对悬桩和端承桩两种情况,分别提出了路堤荷载下低置换率水泥搅拌桩复合地基设计计算方法。其中对于悬桩情况,仍采用刚性基础下复合地基的复合模量法;对于端承桩情况,则根据模型试验结果提出假设的桩顶和桩间土荷载分担比例,然后再分别计算桩顶沉降和桩间土沉降,并通过数值分析和工程实践对该方法进行了对比验证。

Stewart 和 Filz (2005)^[15]对桩承式路堤的土拱效应以及土拱比的计算方法进行了归纳总结,指出上述方法均未考虑桩间土的压缩性,并采用数值方法分析了桩间土压缩性对土拱比的影响。

1.4.2 长短桩复合地基国内研究现状

1. 长短桩复合地基承载性状研究

1) 理论计算方法研究

牛顺生 (2006)^[16]将置换率和桩长作为设计变量,承载力、沉降、下卧层强