

现浇混凝土大直径管桩 复合地基设计与施工

刘汉龙 丁选明 著

中国建筑工业出版社



014033016

TU472
36

现浇混凝土大直径管桩复合 地基设计与施工

刘汉龙 丁选明 著



中国建筑工业出版社



北航

C1721210

TU472
36

310880210

图书在版编目 (CIP) 数据

现浇混凝土大直径管桩复合地基设计与施工/刘汉龙, 丁选明著. —北京: 中国建筑工程出版社, 2013. 12
ISBN 978-7-112-15836-2

I. ①现… II. ①刘… ②丁… III. ①混凝土管桩-桩
基础-地基处理 IV. ①TU472

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 217355 号

现浇混凝土大直径管桩复合地基设计与施工

刘汉龙 丁选明 著

*

中国建筑工程出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京科地亚盟排版公司制版

北京云浩印刷有限责任公司印刷

*

开本: 850×1168 毫米 1/32 印张: 4 $\frac{3}{4}$ 字数: 120 千字

2014 年 1 月第一版 2014 年 1 月第一次印刷

定价: 25.00 元

ISBN 978-7-112-15836-2
(24573)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

本书作者为《现浇混凝土大直径管桩复合地基技术规程》
JGJ/T 213—2010 的主要起草人。全书共有 5 章内容,在详细介
绍了该技术规程的产生背景,以及现浇混凝土大直径管桩(简称
PCC 桩)复合地基技术的应用之外,还介绍了 PCC 桩复合地基
的设计、施工、质量检查与验收等内容。

本书适合从事土木工程、交通工程、水利工程和港口工程
的设计、施工、监理和工程质量监督人员参考使用。

* * *

责任编辑:张伯熙

责任设计:张 虹

责任校对:王雪竹 刘 钰

序

软土地基沉降变形控制是岩土工程领域的热点和难点课题之一。桩基复合地基技术是控制软土地基沉降变形的重要手段,是应用最为广泛的软土地基处理技术之一。寻求经济、高效、节能、减排的桩基复合地基新技术对促进岩土工程可持续发展具有重要的作用。现浇混凝土大直径管桩(简称PCC桩)及其复合地基技术正是由著者等人开发的一种具有自主知识产权的软土地基沉降变形控制新技术,该技术具有材料省、耗能低以及应用效果好等突出优点,开创了我国软基加固技术的新途径。目前,该技术已在江苏、浙江、上海、湖南、天津和河北等省市的高速公路、高速铁路、市政及港口工程中广泛应用,取得了显著的社会经济效益。

著者刘汉龙教授是我国岩土工程领域中青年学术带头人之一,近年来在土力学与岩土工程领域成就显著,他主要从事软土力学与地基基础工程、土动力学与岩土地震工程领域的教学与科研工作,多年来既重视基础理论研究又注重工程技术创新,在高速公路与高速铁路软土地基处理、高土石坝与堤防工程抗震等研究方面取得创新性成果,申请获得了38项国家专利,获国家及省部级科学技术奖11项,获何梁何利基金科学与技术创新奖。在PCC桩的技术开发、科学研究和工程应用中,成功地探索了一条产学研相结合的技术创新之路,主编了国家行业标准《现浇混凝土大直径管桩复合地基技术规程》(JGJ/T 213—2010)。

著者丁选明博士是河海大学岩土工程国家重点学科的优秀青年学者,入选教育部新世纪优秀人才支持计划,获全国优秀

博士学位论文提名奖。他主要从事桩基动力学理论、软土地基处理等方向的教学与科研工作,近年来在国家自然科学基金、江苏省自然基金等课题的资助下,取得了丰富的成果。获国家及省部级科学技术奖4项,发表SCI、EI收录论文近50篇,获授权国家发明专利10多项。

本书汇集了著者等人近年来关于PCC桩及其复合地基设计、施工和质量检测的研究成果,对国家行业标准《现浇混凝土大直径管桩复合地基技术规程》(JGJ/T 213—2010)的实施具有重要的指导作用,并且有利于促进该项新技术的应用发展和岩土工程学科进步。

中国工程院院士

周丰峻

2014年1月18日

前 言

现浇混凝土大直径管桩(以下简称 PCC 桩)复合地基技术是由著者等人研发的具有独立自主知识产权的地基处理新技术,已在江苏、浙江、上海、湖南、天津和河北等省市和地区推广应用。

根据住房和城乡建设部建标[2009]88号《关于印发〈2009年工程建设标准规范制订、修订计划〉的通知》的要求,由河海大学和江苏弘盛建设工程集团有限公司会同有关单位编制了《现浇混凝土大直径管桩复合地基技术规程》JGJ/T 213—2010,以下简称《PCC 桩复合地基规程》,并于2010年7月23日经住房和城乡建设部第704号文公告批准发布。

本书是针对《PCC 桩复合地基规程》的理解和实际应用而撰写的配套用书,为了使设计、施工、监理和工程质量监督单位的专业技术人员更好地理解和应用《PCC 桩复合地基规程》,本书分为以下五个章节:第1章为 PCC 桩复合地基技术,简要介绍了该技术的研发思路、科学研究及工程应用情况;第2章为 PCC 桩复合地基设计,详细讲述了设计计算的原则,介绍了材料和构造,给出了桩基复合地基承载力和沉降的计算方法,并提供了算例;第3章为 PCC 桩复合地基施工,介绍了 PCC 桩的施工机械和施工工法,并详细介绍了施工流程;第4章为 PCC 桩复合地基检查与验收,介绍了成桩过程中的质量检查、成桩后桩身的质量检测以及竣工后的工程质量验收;第5章为 PCC 桩复合地基设计与施工实例。

本书得到了国家自然科学基金重点项目(编号:U1134207)、教育部长江学者创新团队项目(编号:IRT1125)、国家外专局

111 引智计划(编号: B13024)等项目资助。

限于著者水平,有些问题研究尚浅,本书存在一些谬误在所难免,诚恳希望专家、读者批评指正,并敬请将宝贵意见反馈给著者,以便著者及时更正和继续研究。

刘汉龙 丁选明

2014年1月20日

目 录	
第 1 章 PCC 桩复合地基技术	1
1.1 PCC 桩技术研发	1
1.2 PCC 桩复合地基研究进展	2
1.3 PCC 桩复合地基工程应用	9
第 2 章 PCC 桩复合地基设计	11
2.1 PCC 桩复合地基设计一般规定	11
2.2 PCC 桩复合地基的材料与构造	13
2.3 PCC 桩复合地基的几何尺寸设计	15
2.4 PCC 桩复合地基承载力计算	21
2.5 PCC 桩桩身混凝土强度验算	25
2.6 PCC 桩复合地基沉降计算	26
2.7 PCC 桩复合地基稳定性计算	33
2.8 PCC 桩复合地基软弱下卧层承载力验算	40
第 3 章 PCC 桩复合地基施工	44
3.1 PCC 桩的施工机械和技术原理	44
3.2 PCC 桩复合地基施工工法	48
3.3 PCC 桩复合地基的施工改进技术	61
3.4 PCC 桩复合地基的现场施工监测与监控	72
第 4 章 PCC 桩复合地基检查与验收	83
4.1 承载力静载荷试验检测	83
4.2 桩身质量开挖直接检测	89
4.3 桩身质量低应变检测	95

第 5 章 PCC 桩复合地基设计与施工实例	111
5.1 概述	111
5.2 工程地质条件	112
5.3 PCC 桩复合地基设计	114
5.4 PCC 桩复合地基施工及质量检测	117
5.5 PCC 桩复合地基检查与验收	122
参考文献	126

目前,桩基广泛应用于土木工程于交通工程、水利工程、港口工程等软土地基加固中,具有施工进度快、加固处理深度大、适宜多种地质条件、可明显增加地基的稳定性、提高地基的承载力和减小变形等优点,长期以来,普遍受到工程界的青睐,其中主要包括预制混凝土桩和现浇混凝土桩等技术。随着桩基技术的大量应用寻求使用较少的混凝土方量,实现造价低、承载力高、沉降变形小、地基稳定性强的新型桩基技术成为岩土工程界迫切需要解决的问题之一。正是考虑到离心桩及预制管桩的不足,著者等人研发了现浇混凝土大直径管桩(Large diameter Pipe Pile Using Cast-in-place Concrete 简称 PCC 桩,见图 1-1)软土地基加固技术^[1-2],并已得到了推广应用,而以柔性桩的成本达到了刚性桩的加固效果。



图 1-1 现浇 PCC 桩头开挖图

第1章 PCC 桩复合地基技术

1.1 PCC 桩技术研发

目前,桩基广泛应用土木工程于交通工程、水利工程、港口工程等软土地基加固中,具有施工速度快、加固处理深度大、适宜多种地质条件、可明显增加地基的稳定性、提高地基的承载力和减小变形等优点,长期以来,普遍受到工程界的青睐。其中主要包括预制混凝土桩和现浇混凝土桩等技术。随着桩基技术的大量应用寻求使用较少的混凝土方量,实现造价低、承载力高、沉降变形小、地基稳定性强的新型桩基技术成为岩土工程界迫切需要解决的问题之一。正是考虑到实心桩及预制管桩的不足,著者等人研发了现浇混凝土大直径管桩(Large-diameter Pipe Pile Using Cast-in-place Concrete 简称 PCC 桩,见图 1-1)软土地基加固技术^[1,2],并已得到了推广应用,而以柔性桩的成本达到了刚性桩的加固效果。



图 1-1 现场 PCC 桩头开挖图

PCC 桩是一种高效经济的软土地基加固专利技术^[3-12]，主要采取振动沉模、自动排土、现场灌注混凝土而成管桩。具体步骤是：依靠沉腔上部振动锤的振动力，将由内外双层套管所形成的环形腔体，在活瓣桩靴的保护下，打入预定的设计深度。然后在腔体内现场浇注混凝土，边振动边拔管，拔管同时视情况添加混凝土，从而在环形空腔中形成混凝土管桩。根据设计要求，也可以在环形空腔内放入钢筋笼，以形成现浇钢筋混凝土大直径管桩。在形成复合地基时，为了保证桩、土共同承担荷载，调整桩与桩间土之间竖向荷载及水平荷载的分担比例，以及减少基础底面的应力集中，在桩顶设置褥垫层，从而形成现浇混凝土大直径管桩复合地基。

与其他桩型相比，PCC 桩具有很多突出的优点。由于采用双层套管护壁，能很好地保持两侧土体的稳定性，因此，PCC 桩能适合各种复杂的地质条件，且沉桩深度较大。双层钢管空腔结构可以形成较大桩径的管桩，且桩径和管桩壁厚可以根据需要进行调节，与相同有效截面积的实心桩相比，PCC 桩与桩周土接触面积较大，可大幅提高桩侧摩阻力，节省桩身混凝土用量，降低工程造价。PCC 桩桩机带有活瓣桩靴结构，克服了使用预制钢筋混凝土桩头的缺点，不仅能降低成本，而且可加快施工进度。可以通过设置桩靴的倾斜方向来调整沉模过程中的挤土方向。通过造浆器造浆，可以减小沉模时环形套模内外壁摩擦阻力，保护桩芯土和侧壁土稳定。采用振动双层套管成模工艺，施工质量稳定，且容易控制。由于现浇混凝土大直径管桩具有施工适应性强、适用范围广、施工质量易于控制、单位场地面积造价低、加固效果突出等优点，具有良好的推广应用价值。

1.2 PCC 桩复合地基研究进展

1.2.1 静荷载作用下 PCC 桩复合地基受力特性研究现状

PCC 桩广泛应用于高速公路、高速铁路、市政道路和港口

工程等软基处理,均采用复合地基的形式。因此,PCC 桩静力特性的研究大都围绕单桩和复合地基竖向承载特性、沉降变形规律等展开,这些研究工作主要集中在以下几方面:

(1) PCC 桩荷载传递机理研究

PCC 桩是一种大直径管桩,同时存在内、外摩阻力的作用,其荷载传递机理不同于一般的实心沉管灌注桩。费康等^[13]基于荷载传递法,考虑了土塞的作用,提出了一种 PCC 桩荷载-沉降关系的简化分析方法。利用该简化方法对桩的几何尺寸、桩身弹性模量、桩壁与桩周土之间的弹簧刚度、桩壁与土塞之间的弹簧刚度、桩壁与底部土体之间的弹簧刚度、土塞与底部土体之间的弹簧刚度等桩荷载传递关系的主要影响因素进行了分析。还采用有限元方法对 PCC 管桩荷载传递机理、破坏机理、影响因素进行了较深入的分析^[14,15]。针对内摩阻力的分布形式,建立了相应的计算公式。谭慧明等^[16]开展了大型模型槽足尺试验,在土芯内部埋设土压力盒,通过试验过程中土压力的变化实测内摩阻力的分布规律,得到 PCC 桩内摩阻力、外摩阻力和端阻力所占的百分比。

(2) 承载力计算方法研究

PCC 桩承载力由内、外摩阻力和端阻力组成。由于土塞效应的存在,内摩阻力并不能得到充分发挥,因此承载力并不是内、外摩阻力和端阻力的简单叠加。费康^[13]在荷载传递规律分析的基础上,提出了 PCC 桩单桩竖向极限承载力计算公式,认为 PCC 桩的单桩竖向极限承载力等于单桩总极限桩身端阻力、单桩总极限外侧摩阻力和极限状态时单桩的总内侧摩阻力的叠加,并给出了单桩的总内侧摩阻力的计算公式。通过工程中典型尺寸的 PCC 桩的算例分析验证了公式的正确性。杨寿松^[17]计算单桩极限承载力时考虑了桩芯土的有利影响,通过现场试验结果分析,认为管桩闭塞效应明显,因此在其下端作用于较好的持力层上时桩芯土体所提供的承载力可按桩芯土体的面积所

对应的下卧土层的承载力来考虑,现浇大直径管桩的极限承载力可参照端承摩擦桩的计算方式进行。

(3) 复合地基沉降计算方法

以往的沉降计算方法是在假定褥垫层顶面沉降相同,即受到刚性荷载作用下提出的,这个假定对于路堤等柔性荷载是不成立的。路堤荷载不同于理想刚性荷载和理想柔性荷载,基于“等应变假设”和“自由应变状态”假设的沉降计算方法对大直径、大间距的 PCC 桩复合地基不再适用,但这些方法对提出合适的简化方法有借鉴作用。已有成果利用差分法求解土体的沉降变形,但方法中没有考虑路堤荷载的特点和桩土间的接触特性,仅适合于柔性桩复合地基。参照这一思路,费康^[13,18]假设在路堤填土荷载作用下,刚性桩复合地基典型单元体的变形主要为垂直方向的沉降,但不假定其分布形式,而是从土体平衡方程出发,应用材料的几何、物理方程得到支配方程后直接采用有限差分法求解得到了复合地基沉降计算方法。分析中将填土与加固区、下卧层一起纳入分析,以此来反映填土与路基的相互作用,能反映桩的上下刺入变形,可解决成层土问题。同时,也考虑了桩、土间的接触滑移变形,更适用于路堤荷载作用下刚性桩复合地基的沉降计算。计算表明:刚性桩复合地基的沉降很大程度上取决于下卧层的变形,加固区的压缩变形主要发生在表层的桩周土。计算所得沉降及桩土应力比与现场基本一致,表明该简化方法具有一定的精度,是一种较为简便实用的工程设计方法。

温世清等^[19]在前人复合地基的沉降计算方法的基础上,考虑 PCC 桩在褥垫层和下卧层中的上、下刺入的情况,提出了 PCC 桩复合地基沉降简化计算方法。假定 PCC 桩复合地基沉降计算方法是基于 PCC 桩-土-垫层所组成的一个工作体系。综合考虑各部分的工作特性及相互影响,对 PCC 桩整体进行分析。考虑 PCC 桩在褥垫层及下卧层的上、下刺入量对复合模量的影

响,建立桩体平衡方程。引入 PCC 桩桩体模量发挥系数,并通过迭代的方法最后确定模量发挥系数,提出一种求解 PCC 桩复合地基复合模量的计算方法。最终得到 PCC 桩复合地基的沉降计算公式。根据上述计算方法进行 PCC 桩复合地基沉降计算,计算结果都是在较为合理的范围之内。对一工程实例进行了分析,利用上述沉降计算方法计算的沉降值基本接近现场实测沉降值,同时由该方法得到的桩土应力比和现场实测的桩土应力比比较一致,能够满足工程实际的要求。因此上面推求的桩土应力比和沉降简化计算公式能够满足工程需要,为实际工程提供了一种既简便又实用的方法。

(4) 负摩阻力作用下 PCC 桩工作性状

复合地基中土体表面沉降比桩顶大,因此在桩顶附近一定深度范围内土体对桩产生向下的作用力,即负摩阻力。张晓健^[20]针对有效应力法计算负摩阻力存在的不足,从负摩阻力产生的根本原因出发,分析得出了负摩阻力的产生过程是受有效应力和相对位移两种因素制约的结论。结合以往计算桩土相对位移的不足,从桩身单元的基本弹性微分方程出发,利用数学方法求出了该方程的通解,给出桩土相对位移的计算公式。该方法考虑了桩顶处桩土位移的差异,较以前的方法更为合理。通过算例中的参数进行验证,计算表明该方法符合实际,计算结果较为合理。同时指出负摩擦区的极限摩阻力是有效应力和相对位移相互作用的最佳结合点。在相对位移的基础上,利用数值计算方法,得出了最大负摩阻力出现的深度。利用桩顶、中性点,以及最大负摩阻力处三个边界条件,进行负摩阻力的简化计算,得到桩侧负摩阻力随深度变化关系。采用国内外进行的一些现场试验的实测数据进行了验证,验证结果表明本报告推导的负摩阻力计算值非常接近实测数据,说明了方法的可行性。

(5) 挤土效应研究

目前国内外对管桩挤土效应的研究还较少,费康等^[13]通过现场试验和数值模拟对此进行了分析。进行了软黏土地区 PCC 管桩挤土效应现场试验研究,对沉桩过程中地面隆起及地面水平位移、超孔隙水压力、深层水平位移和挤土土压力等观测结果进行了整理和分析。试验直观反映了 PCC 管桩打入过程对桩周土的影响,验证了桩间距设计的合理性。

(6) 水平承载特性研究

PCC 桩在基坑支护、边坡加固、港口码头及海堤工程中都会受到水平荷载的作用,研究水平荷载下 PCC 桩的受力特性可以为水平承载 PCC 桩的工程应用设计提供理论上的支持。所以,研究 PCC 桩水平承载特性具有重要的理论意义,同时也具有工程应用等现实意义。

马志涛等^[21,22]对 PCC 桩的水平承载特性进行了分析计算。根据 PCC 桩的成桩特点,在均质砂土中,开展了 PCC 桩室内模型试验,探讨分析了 PCC 桩桩身水平位移、桩身弯矩以及桩前土抗力分布等水平受力特性,定性地分析桩径、桩长以及分层土体对受力特性的影响;基于杭千高速公路软基处理工程,对 PCC 桩进行现场试验研究,分析了其水平承载性能。对单桩的极限承载力、不同加载方式的影响进行了分析;考虑土体的弹塑性变形性质以及桩土作用的非线性特性,建立一个静荷载下水平承载桩的弹塑性简化分析方法。

何筱进^[23]通过室内模型试验、现场试验、有限元数值模拟试验分析及弹性幂级数解析法分析等手段,对 PCC 桩水平承载的桩身受力性状,桩身挠曲位移,桩身弯矩分布,桩与桩周土相互作用的地基反力等几方面进行了初步的探讨和研究。

刘汉龙等^[24]、陆海源^[25]研究了 PCC 桩结构直立式海堤计算方法,在桩体作为刚性桩时,分析了不同位移模式下桩的受荷状态的不同。运用水平层分法,给出了被动土压力下各种位

移模式的土压力分布解析解,对库仑土压力进行了修正。

张建伟^[26]提出了一种基于双参数地基模型,应用变分原理和最小势能原理导出桩身位移控制微分方程,并利用有限差分法对方程进行求解。该方法与传统的弹性地基系数法相比,能够考虑土体的连续性和土层间的剪切相互作用。在该方法的基础之上进而给出了成层地基中 PCC 桩水平承载特性的弹塑性解答,该方法考虑了土体的塑性,较弹性分析法更为接近实际,通过与足尺模型试验结果和有限元计算结果进行对比,验证了该方法的准确性。利用三维有限元数值模拟对砂土和黏性土中的 PCC 桩的水平承载特性进行了分析,得到了在不同桩径、不同桩长、不同土体参数下的 PCC 桩的水平承载特性。

1.2.2 动荷载作用下 PCC 桩复合地基受力特性研究现状

实际工程中,PCC 桩可能承受各种动荷载的作用。PCC 桩应用最为广泛的是高速公路软基处理,路堤下 PCC 桩会受到交通荷载的作用,这是一种高频长时间的竖向动荷载;在海堤结构中,PCC 桩会受到波浪荷载的作用,这是一种低频长周期荷载;在民用建筑中,上部结构会受到风荷载的作用,PCC 桩基础也受到这种动荷载的影响;若 PCC 桩作为动力机器基础,会直接受到上部动荷载作用;地震区 PCC 桩可能受到地震作用;采用动力方法测桩时,PCC 桩会受到稳态或瞬态激振力的作用。研究各种动荷载作用下 PCC 桩的动力响应具有重要的理论意义和实用价值。与静力特性的研究相比,PCC 桩动力特性的研究正在展开,已经研究的主要集中在 PCC 桩复合地基的地震动力响应和低应变检测动力响应等方面,PCC 桩隔振效果研究也已经开展。

(1) 地震作用下 PCC 桩复合地基动力反应分析

研究刚性桩复合地基在地震作用下的动力反应对于抗震设