

塑料套管混凝土桩

技术及应用

陈永辉 王新泉 著

中国建筑工业出版社

塑料套管混凝土桩技术及应用

陈永辉 王新泉 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

塑料套管混凝土桩技术及应用/陈永辉, 王新泉著.

北京: 中国建筑工业出版社, 2011. 6

ISBN 978-7-112-13147-1

I. ①塑… II. ①陈…②王… III. ①混凝土桩

IV. ①TU473. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 060724 号

塑料套管混凝土桩 (简称 TC 桩) 是一种新型小直径刚性路堤桩, 已在国内多条高速公路和市政道路工程中应用并取得良好的技术经济效益。本书是作者将近年来对 TC 桩的研究成果, 结合近几年 TC 桩在公路软基处理中的应用情况编著而成, 从加固机理、现场试验、设计理论、施工工艺、数值模拟、质量检测、加固效果、经济指标等多方面对 TC 桩的进行了系统介绍。

全书共分 13 章, 第 1 章绪论介绍 TC 桩的研究背景及意义, 从第 2 章依次介绍 TC 桩技术开发及应用、TC 桩分析及计算、模型试验、低应变检测、单桩承载力、现场试验、挤土效应、荷载传递及稳定、数值模拟分析、设计计算方法、经济技术分析等。

本书适合从事地基处理的岩土工程技术人员使用, 也可供相关专业的科研、教学及施工技术人员参考。

* * *

责任编辑: 咸大庆 王 梅 杨 允

责任设计: 叶延春

责任校对: 王 颖 赵 颖

塑料套管混凝土桩技术及应用

陈永辉 王新泉 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京千辰公司制版

北京蓝海印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 17½ 字数: 420 千字

2011 年 6 月第一版 2011 年 6 月第一次印刷

定价: 42.00 元

ISBN 978-7-112-13147-1

(20565)

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)

序 言

我国地域广阔，地质条件复杂，软弱地基类别众多、分布广泛，特别是在沿海、沿江及内地湖河沉积相地区，该区域也多属我国经济发达、交通运输网建设的密集区。在复杂的软土地基上建设城际快（高）速铁路、高速公路、市政、水利等路基堤坝工程时必须进行适宜的加固处理，增加地基的稳定性和减小工后沉降。

随着我国建设事业的迅猛发展，技术先进、经济合理、施工方便、质量稳定且环保性强的软基处理方法成为目前岩土工程科技工作者研究的热点。由于刚性桩复合地基具有加固效果好、处理深度深、工期短等优点，在路堤软基加固工程中得到广泛应用。塑料套管混凝土桩（简称 TC 桩）是作者借鉴国外先进的软基处理理念，改进、完善、衍生开发而发展起来的一种新的刚性桩复合地基处理技术，目前在工程中已经推广应用。

河海大学陈永辉博士、浙江大学城市学院王新泉博士在查阅了大量国内外文献的基础上，结合 TC 桩现场试验和工程应用情况，对 TC 桩技术特点及目前理论研究成果进行了系统介绍，将多年对 TC 桩的研究成果编著成书，方便工程人员查阅学习，对于促进 TC 桩技术的应用和我国地基基础工程学科发展将起到积极作用。本技术也是近年来河海大学岩土工程国家重点学科技术创新成果之一，我乐为序。

刘汉龙

长江学者奖励计划特聘教授
国家杰出青年科学基金获得者
2010年12月于江南文枢苑

前 言

随着国民经济的持续高速发展,为满足经济日益增长的需求,我国公路建设也迎来了蓬勃发展的新时期。公路建设事业的迅猛发展,给软基处理技术的发展也注入了蓬勃生机,增添了无限活力。我国幅员辽阔,地质条件复杂且各地差别较大,软弱地基类别多、分布广,特别是在沿海地区及内地湖河沉积相地区存在着众多复杂的软土地基。在软土地基上修建高等级公(铁)路及建筑物都要首先进行软基处理,以增加地基的稳定性及减小沉降。随着我国公路建设事业的快速发展,大量高等级公(铁)路在软土地基上修建,探求技术先进、经济合理、施工方便、质量稳定、承载力高、材料省、环保性强的软基处理方式成为岩土工程界亟待解决的问题。

塑料套管混凝土桩(简称 TC 桩)是作者在消化吸收国外 AuGeo 技术的基础上,研制发展起来的一种新型小直径刚性路堤桩,已申请了多项国家专利。由于该桩型施工质量容易控制,具有较好的技术经济特性,目前该技术已在国内浙江、上海、江苏、广东、湖南等地区的高速公路和市政道路工程中应用,并取得良好的技术经济效益。作者根据近 5 年 TC 桩在公路软基处理中的应用情况,从加固机理、施工工艺、质量检测、现场试验、设计理论、数值模拟、加固效果、经济指标等多方面对 TC 桩的研究成果进行了介绍。力使 TC 桩在处理软土地基中的特点和适用性被更多工程人员认知和掌握,并吸引更多工程技术人员投入 TC 桩的研究和创新中。

本书作者在查阅大量国内外技术文献的基础上,将作者近年来对 TC 桩研究成果整理编著而成,全书共分 13 章,依次介绍 TC 桩的研究背景及意义,TC 桩技术开发及应用、TC 桩塑料套管分析及计算、TC 桩模型试验研究、TC 桩低应变瞬态波传播特性研究、TC 桩单桩承载性能试验研究、路堤荷载下 TC 桩现场试验研究、TC 桩挤土效应现场试验研究、TC 桩荷载传递特性及稳定性研究、TC 桩加固软基有限元数值模拟分析、TC 桩设计计算方法、TC 桩经济技术分析等内容。其中第四、八、九、十、十一章由浙江大学城市学院王新泉博士撰写,其余章节由河海大学岩土工程科学研究所陈永辉副教授撰写。

在研究过程中得到了浙江省交通规划设计研究院和浙北交通投资集团的大力协助,在此给予诚挚的谢意!

由于作者水平有限,书中难免会有不足之处,恳请各位专家和读者批评指正。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 TC 桩技术的背景及开发的意义	2
1.3 路堤桩或桩承式加筋路堤研究现状	3
1.4 TC 桩主要研究内容和框架	14
第 2 章 塑料套管混凝土桩技术开发及应用	19
2.1 TC 桩技术的开发	19
2.2 TC 桩施工工艺	27
2.3 TC 桩质量控制措施	31
2.4 TC 桩加筋路堤加筋材料的选择	34
2.5 TC 桩国内工程应用情况	34
2.6 目前正在试验的 TC 桩的拓展技术	35
2.7 结论	37
第 3 章 塑料套管混凝土桩塑料套管分析及计算	38
3.1 前言	38
3.2 计算原理、方法及材料参数	38
3.3 各计算方案计算结果及分析	40
3.4 优化波纹形状探讨	51
3.5 相邻桩打设对塑料套管影响的分析	52
3.6 塑料套管自重对变形的影响	58
3.7 不同桩长大直径塑料套管壁厚计算	59
3.8 结论	62
第 4 章 塑料套管混凝土桩模型试验研究	63
4.1 模型试验原理及要点	63
4.2 试验目的与内容	63
4.3 模型试验的准备	64
4.4 试验测试方案	66
4.5 试验成果整理分析	67
4.6 结论	73
第 5 章 塑料套管混凝土桩低应变瞬态波传播特性研究	74
5.1 概述	74
5.2 低应变检测中桩锤匹配问题的有限元研究	74
5.3 TC 桩现场低应变检测研究	86

5.4 本章结论	90
第6章 塑料套管混凝土桩单桩承载性能试验研究	91
6.1 概述	91
6.2 波纹管“套箍”效应的室内试验研究	93
6.3 练杭高速公路 TC 桩现场静载荷试验研究	94
6.4 南京 243 省道承载力试验情况	108
6.5 弱风化岩层持力层条件下单桩极限承载力	109
6.6 不同桩尖套管混凝土桩静载荷试验研究	110
6.7 基于尖点突变理论的 TC 桩极限承载力判定及预测	114
6.8 结论	120
第7章 路堤荷载下塑料套管混凝土桩现场试验研究	122
7.1 概述	122
7.2 路堤填筑荷载下应力分布的试验成果	124
7.3 路堤填筑荷载下桩土应力比及荷载分担比试验成果	126
7.4 路堤荷载下桩荷载传递性状观测结果分析	136
7.5 路堤荷载下 TC 桩复合地基固结性状现场试验研究	138
7.6 路堤荷载下 TC 桩沉降性状的现场试验研究	140
7.7 路堤荷载下 TC 桩复合地基侧向位移性状的现场试验研究	146
7.8 结论	148
第8章 塑料套管混凝土桩挤土效应现场试验研究	151
8.1 概述	151
8.2 TC 桩成桩机理及受力特性	151
8.3 TC 桩挤土效应现场试验研究	152
8.4 结论	167
第9章 塑料套管混凝土桩荷载传递特性及稳定性研究	169
9.1 桩土体系荷载函数法	169
9.2 基于荷载传递 TC 桩荷载—沉降曲线简化分析方法	170
9.3 TC 桩荷载—沉降规律的初步分析	176
9.4 考虑桩侧土体抗力时 TC 桩的稳定性验算	181
9.5 结论	185
第10章 塑料套管混凝土桩加固软基有限元数值模拟分析	186
10.1 概述	186
10.2 模拟方案	186
10.3 计算模型及参数	186
10.4 计算结果分析	188
10.5 结论	212
第11章 塑料套管混凝土桩设计计算方法	214
11.1 TC 桩承载力分析	214
11.2 TC 桩正截面受压承载力分析	230

11.3 TC 桩沉降分析	241
11.4 TC 桩加筋路堤稳定性验算	249
11.5 TC 桩其他内容设计	249
11.6 结论	251
第 12 章 塑料套管混凝土桩技术经济分析	253
12.1 TC 桩的技术特点和适用性分析	253
12.2 经济性分析	254
12.3 结论	256
第 13 章 结论	258
13.1 总结及主要结论	258
13.2 TC 桩技术的主要创新点	261
13.3 展望及有待于进一步研究的问题	262
参考文献	264

第 1 章 绪 论

1.1 概述

在国民经济的持续高速发展和国家拉动内需政策的推动下,为满足经济日益增长的需求,我国公路建设也迎来了蓬勃发展的新时期;高速公路以其车速高、行车安全、通行能力大、运输成本低、货物损耗低而成为我国公路发展的首要目标。高速公路在短短十几年里已经显示出巨大的优越性,许多资金流向已建成和拟建的高速公路沿线及腹地,使得沿线地区的经济得到迅猛发展。高速公路建设事业的迅猛发展,给地基处理技术的发展也注入了蓬勃生机,增添了无限活力。我国幅员辽阔,地质条件复杂且各地差别较大,软弱地基类别多、分布广;特别是在沿海地区及内地湖河沉积相地区存在众多复杂的软土地基,在软土地基上修建高等级公路及建筑物都首先要进行软基处理,以增加地基的稳定性及减小沉降。随着我国公路建设事业的快速发展,大量高等级公路在软土地基上修建;探求技术先进、经济合理、施工方便、质量稳定、承载力高、材料省、环保性强的软基处理方式成为岩土工程界亟待解决的问题。

我国桩基技术的大量开发始于 20 世纪 80 年代,刚性桩以其承载力高、稳定性好、随地质条件变化适应性强等特点得到日益广泛的应用。沉管灌注桩又称套管成孔灌注桩,按其成孔方法不同可以分为振动沉管灌注桩、锤击沉管灌注桩和振动冲击沉管灌注桩^[1]。沉管灌注桩以其施工设备简单、施工方便、造价低、施工速度快、工期短等优点,在我国得到广泛的应用;我国岩土工程界的前辈们对沉管灌注桩的设计、施工、检测等进行了不懈的努力和探索,自引入我国以来也获得了长足的发展。

由于刚性桩地基处理方法具有加固效果好、处理深度深、质量易保证、工期短等优点,在路堤软基加固工程中得到广泛应用^[2]。这种采用刚性桩方法处理软基加固路堤堤坝工程时又可称为路堤桩。在实际路堤工程应用时往往采用在桩顶面设置土工合成材料加筋垫层的方法。将上部路堤、桩顶土工合成材料加筋垫层、桩及桩帽、桩间土和下卧持力土层共同组成的体系称为桩承式加筋(GRPS)路堤系统^[3],如图 1-1 所示,其所采用的桩一般指刚性桩。常用的刚性路堤桩有各种沉管灌注桩(包括 CFG 桩、振动沉管素混凝土桩^[4]、Y 形等异形灌注桩^[5-6]、大直径现浇薄壁管桩^[7]、预应力管桩或浆固碎石桩^[8]等)。

塑料套管混凝土桩是一种新型的小直径刚性路堤桩,可简称为 TC 桩。它由预制桩尖、塑料套管、套管内混凝土、顶部桩帽等几部分组成,如图 1-2 所示。TC 桩是作者等在借鉴国外 Cofra 公司 AuGeo 桩技术^[9-10]基础上,开发的一项软土地基处理新技术。Cofra 公司自 1998 年开始将该技术用于试验路堤,随后成功应用于荷兰、马来西亚几项高速铁路和高速公路等路堤工程中,取得了很好的加固效果。Cofra 公司所用的套管为 PVC 或 HDPE 双壁波纹塑料管,外表面为螺纹、内表面光滑。

我国自 2005 年率先由河海大学等单位在借鉴 AuGeo 桩技术的基础上开始试验 TC 桩技术，对其材料、工艺和设备进行了重新开发和改进，使之成为更加适合我国国情、便于国内推广应用的新型地基加固方法，并申请了相应的国内专利。初步试验成功后便于 2006 年正式在实际工程——浙江申嘉湖杭高速公路练杭段开展试验研究，同时申请了浙江省交通科技计划项目。随后在国内的许多公路、市政、铁路等工程中采用了该项技术。TC 桩的主要优点在于先有套管成模，后集中现浇混凝土，这样与各类振动沉管桩相比其混凝土用量可控没有充盈、不会因为振动挤土而引起断桩，打设机械可以连续施工和混凝土可以连续浇筑而降低施工费用，采用现浇工艺后不需要像预制桩那样采用大量钢筋和大型运输以及打设机械，也不需要事先配桩等，而与柔性桩相比它又是刚性桩，承载力高且质量容易控制，其桩周又带有螺纹可以有较大的桩侧摩阻力，施工快速灵活，对施工的场地要求低。但它一般要求地基软土下部有硬土层或承载力相对较高硬土层时能够充分发挥其承载力较高的优势。

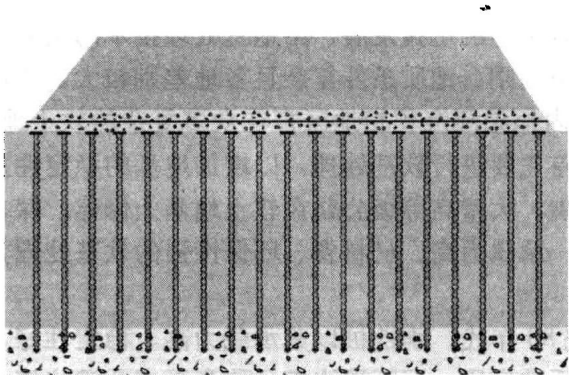


图 1-1 桩承式加筋路堤

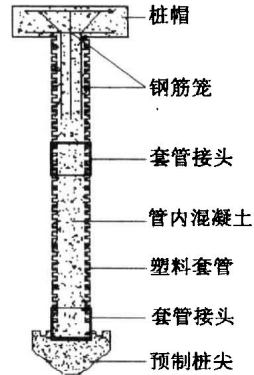


图 1-2 TC 桩组成示意

1.2 TC 桩技术的背景及开发的意义

目前 TC 桩主要应用于处理公路桥头深厚软基，作为柔性基础下的刚性桩复合地基应用于工程实践中。复合地基在土木工程中的广泛应用促进了复合地基理论的发展，目前复合地基的变形理论、强度理论多基于刚性基础下的研究成果，刚性基础下复合地基的研究取得了一些成果，理论框架已初步形成，也日臻完善，有效的指导着复合地基的工程实践。而关于柔性基础下复合地基的研究成果尚少，特别是柔性基础下复合地基沉降计算水平远低于柔性基础下复合地基承载力计算水平；更远远落后于工程实践的需要。基于刚性基础下复合地基理论，在柔性基础下复合地基中应用是不科学的；不同工法、不同桩身材料、不同桩身强度、不同地质条件等的复合地基会表现出不同的特性，柔性基础下复合地基沉降、承载力计算理论尚需进行更加深入的研究。

TC 桩与其他地基加固方法相比有自身的合理性、先进性及适用性；许多适宜的情况下因地制宜的采用，可以起到较好的经济效益和社会效益。目前对 TC 桩的特殊性及设计计算理论研究较少，TC 桩特殊性、工法及质量评定标准、外带塑料套管的“套箍”效应、承载力的时效性、单桩及复合地基的承载力、沉降分析计算等内容也研究较少；目前实际

工程应用中仍采用普通刚性桩的方法进行设计计算,许多在工程实践中被证明优越的特性,确未能从理论上进一步的分析和深化。基于普通圆形刚性桩的强度和变形理论,直接应用于 TC 桩的分析是不科学的,大量实际工程也表明其不足与不适,实际工程应用中实测数据与理论计算的不和谐表明建立 TC 桩设计计算理论的必要性和紧迫性。

目前 TC 桩的研究成果较少,除作者及所属课题组成员外,成果均是在本课题组申请专利技术基础上,对施工工艺的描述和介绍。从国内外研究情况来看,不同地质条件、不同桩型、不同加载方式下桩的荷载传递规律存在差别,TC 桩作为一种新桩型,对其荷载传递规律尚未开展研究。TC 桩压屈临界荷载的计算方法及与常用桩型的区别,TC 桩极限承载力的判定及预测等内容都需要进行深入研究。与天然地基相比,TC 桩加筋路堤中的应力场和位移场发生了较大变化,与其他刚性基础下的刚性桩复合地基及柔性基础下的刚性桩复合地基也存在一定差别。路堤荷载下 TC 桩地基内的应力分布性状、孔隙水压力消散规律、荷载传递机制、桩土应力比及沉降性状有别于传统桩型,需要进行深入分析。同时常规检测方法对 TC 桩的适用性,也需开展相关的研究,并制定相应的检测标准。

本书介绍了在室内模型试验、现场试验、数值模拟及工程应用经验基础上,对 TC 桩系统开展研究,研究内容在完善 TC 桩工法、研究其特殊性、检验其工程应用效果,从而形成 TC 桩成套技术,建立其实用设计计算理论,指导工程实践的同时,还有助于丰富和发展刚性桩及柔性基础下的刚性桩复合地基的试验和设计计算理论,具有一定的现实意义及理论意义。

本章对单桩极限承载力研究现状、柔性基础下复合地基理论研究现状、模型试验及现场试验方面的研究现状进行了综述,对本书中涉及的研究内容及技术路线进行了分析。

在设计理论方面,塑料套管混凝土桩这种新型地基处理技术,从加固机理上来说,属于小直径的刚性路堤桩或复合地基技术,对它的设计计算可以采用刚性桩复合地基或桩承式加筋路堤的设计理论进行。现有工程的设计也只是参照其他刚性桩的设计方法。目前国内外与 TC 桩相关的关于桩承式加筋路堤或刚性桩复合地基计算理论方面主要研究进展可以归纳如下。

1.3 路堤桩或桩承式加筋路堤研究现状

1.3.1 国外 AuGeo 桩的应用情况

(1) AuGeo 桩介绍

TC 桩作为一种新型软基加固技术,国外类似技术 AuGeo 桩已有所应用,AuGeo 桩最早由荷兰的 Cofra 公司开发并进行推广应用。其施工采用砂井打设机(a Cofra MY-200 stitcher),这种原本用于打设竖直砂井的机器经过改装,被用来打设 AuGeo 桩的塑料套管。塑料套管由具有波纹的高密度聚乙烯管等制造,常用的外管直径 174 mm、内管直径 150 mm。在套管的底部装备有不透水的桩尖,用来防止地下水的进入,封闭塑料套管。其优点:成桩速度快,监测设备可以记录打设钢套管时的沉管阻力,振动和噪声的干扰小等。

AuGeo 桩的工法有两种：一种是桩身套管材料采用双壁 PVC 管，因为 PVC 管为硬质且不可弯曲，施工时打设机需先沉管至设计深度，然后将套管吊起从沉管上部开口处放入沉管内，再立即向塑料套管内浇筑混凝土后才能将沉管拔出，完成一根桩施工。此种方法套管打设与混凝土浇筑连续进行，需要特别注意相互配合施工；另一种是采用 HDPE 双壁波纹管，其特点是可以弯曲，可事先将与预制桩尖连接好的套管从打设机竖直的沉管底部插入并打入地基中，该法将混凝土施工与套管打设分开进行，施工效率提高，但是 HDPE 材料的价格相当昂贵，工程造价大幅增加。

(2) AuGeo 桩的应用情况

AuGeo 桩自 1998 年开始用于试验路堤工程的软基处理中，随后成功应用于荷兰、马来西亚等国家的高速铁路和高速公路多项路堤工程之中，表 1-1 为 Cofra 公司 AuGeo 桩的应用情况。国外应用表明 AuGeo 桩取得了很好的加固效果。

AuGeo 桩工程应用情况		表 1-1
应用时间	工 程 名 称	地 点
2006	Motorway A15	Netherlands
2005	Railway HSL Hoogmade	Netherlands
2005	Motorway A15 Hardinxveld	Netherlands
2005	Motorway A15 Sliedrecht	Netherlands
2004	Motorway A 15 Wijngaarden	Netherlands
2004	Local road Nieuwerkerk	Netherlands
2003	TramPlus Rotterdam	Rotterdam
2001	Double Track Rawang-Ipoh	Malaysia

图 1-3 为国外 AuGeo 桩施工，沉管需要提升较大高度才可以放入塑料套管，图 1-4 ~ 图 1-8 为 AuGeo 桩及施工时的图片（均引自 Cofra 公司网站）。通过工程应用，国外对设计方案的不断改进和完善，它主要依据 BS8006 规范，基本参考刚性桩桩承式加筋路堤的设计方法设计 AuGeo 桩路堤，取得了一定研究成果。

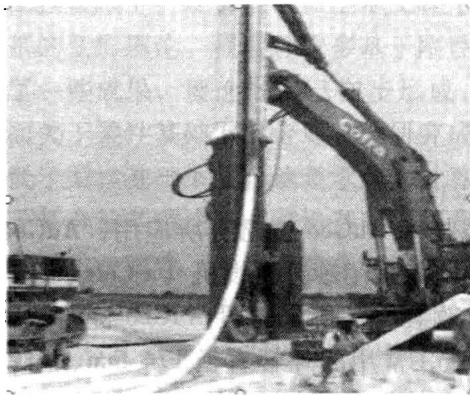


图 1-3 国外 AuGeo 桩施工

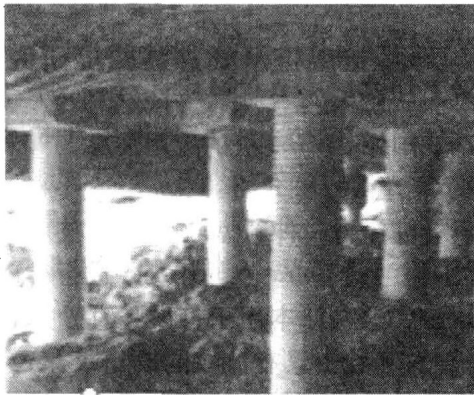


图 1-4 使用阶段 AuGeo 桩



图 1-5 现场 AuGeo 桩截桩



图 1-6 打设完成后 AuGeo 桩套管



图 1-7 安置塑料套管模子及放置钢筋

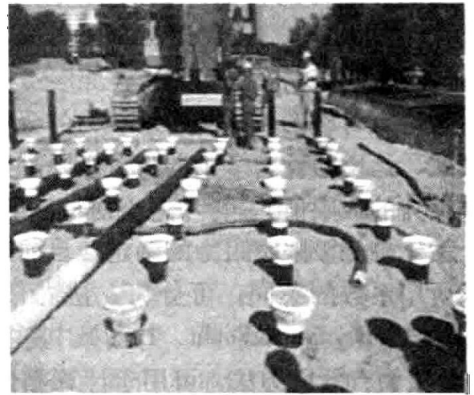


图 1-8 集中浇筑混凝土

TC 桩是在借鉴国外 AuGeo 桩及沉管灌注桩技术的基础上改进并发展起来的, 经过不断探索和研究, 通过设备及技术改进, 目前已不需要从国外引进施工设备和技术, 并使得该项新技术已在国内的工程中逐步得到推广和应用。

1.3.2 单桩极限承载力研究现状

桩定义为“垂直或微倾斜埋置于土中的受力杆件”^[11]。桩的主要目的, 通常是传递建筑物荷载到达基底以及桩身周围的土层。桩基础是一种古老、传统的基础形式, 又是一种应用广泛、发展迅速、生命力强大的基础形式。它不仅有效地承受竖向荷载, 还能承受水平荷载和上拔力, 并且能作为抗震地区的减震措施。同时由于桩基础具有承载力高、稳定性好、沉降量小、便于机械化施工、适应性强等突出特点, 受到了广泛的应用。随着桩基技术的发展, 桩的类型和成桩工艺, 桩的承载性能与桩体结构完整性的检测, 桩基的设计计算水平, 都得到了较大的提高和完善。由于土的变异性及桩与土相互作用的复杂性, 迄今成桩质量的控制与检测, 桩基的设计理论与计算方法等内容, 仍有待不断完善和提高。

1. 单桩极限承载力确定方法研究现状

单桩竖向承载力主要取决于三个方面^[12]: (1) 由土的侧摩阻力和端阻力决定的对桩的最大承载能力; (2) 由土的变形性质决定或上部结构容许变形约束的保证桩不发生过大沉降的最大承载能力; (3) 桩身材料强度和稳定性决定的最大承载能力。

确定桩承载力的方法很多,基本上可以分为两类:第一类方法称为间接法(理论公式法、经验公式法、原位试验法),是通过地区经验或其他手段(如静力触探),分别得到地基土参数或桩底端阻力和桩身侧阻力数值,然后由理论公式或经验公式计算求得,虽然比较简单,但因不是在具体桩上取得数据,可靠性不如直接法,如原位测试中的静力触探法和标准贯入法等,仅能反映土质的变化,而不能反映桩的状况对承载力的影响;第二类方法称为直接法(原型试验),是通过对桩进行现场试验来测定,它不仅可以反映场地地质条件变化对桩承载力的影响,而且也能反映试桩本身状况(如实际桩径、桩长、垂直度和嵌入持力层深度等)对承载力的影响,所以比较真实可靠。直接法中的静荷载试验,由于费用高,周期长,试桩数受到限制而难以反映出工程桩承载力的离散性。另外,随着桩径、桩长和桩承载力的提高,静荷载试验越来越难以满足试桩的需要。因此,直接法中的现场动测方法得到日益广泛的应用,许多国家的有关规定均推荐采用动测方法确定承载力^[13]。

1) 理论公式法

理论上对桩的单桩竖向承载力的分析,是将桩视为深埋基础,假定不同的地基土体破坏模式,运用塑性力学中的有关极限平衡等理论,求解出深基础下地基土的极限荷载(即桩端反力的极限值),再考虑土对桩侧的摩阻力求得桩的竖向极限承载力^[14]。

关于桩侧极限摩阻力的确定,目前可分为总应力法和有效应力法两大类。根据计算表达式所用系数的不同,可分为 α 法^[15](Tomlinson, 1977)、 β 法(Chandler, 1968)和 λ 法^[16](Vijayvergiya&Focht, 1972)。其中 α 法属总应力法,可用于计算饱和黏性土的侧阻力, β 法为有效应力法,可用于计算黏性和非黏性土中的侧阻力。 λ 法则综合了 α 法和 β 法的特点,用于黏性土的侧阻力计算。

确定桩端极限承载力的方法有借鉴浅基础的静力计算法^[17-18]、静力触探法^[19-20]、标准贯入法^[21-22]、有限元法^[23]等;其中静力法是假定土为刚塑体,在桩端以下发生一定形态的剪切破坏滑动面,假定不同的剪切破坏滑动面可得出不同的桩端阻力承载力计算表达式,常见的有太沙基法(1943)^[24]、梅耶霍夫法(1951)^[25]、别列赞捷夫法(1961)^[26]及德根诺格卢和米切尔法等^[27-28], Vesic^[29]利用条形基础地基极限承载力的理论解乘以形状修正系数得到方形和圆形基础的地基极限承载力计算公式,根据关于孔的扩张理论,提出了用刚度指标及修正刚度指标来判别地基土的破坏模式,并引入压缩性修正系数对局部剪切破坏和刺入剪切破坏进行修正。吴鹏等(2008)^[30]在 Mindlin 解的基础上,采用数值积分的方法,对钻孔灌注桩桩端破坏模式及极限承载力研究,为桩端极限承载力的计算提供了一种新的思路。

根据桩侧阻力、桩端阻力的破坏机理,按照静力学原理,采用土的强度参数分别对桩侧阻力和桩端阻力进行计算。理论公式法的可靠性依赖于土的强度参数的取值,一般只用于一般工程或重要工程的初步设计阶段,或与其他方法结合来确定桩的承载力。

有关竖向荷载作用下基桩受力性状的理论分析仍处在不断发展之中。赵建平(2005)^[31]指出软土地区预制桩施工具有较强的挤土效应,选用沉桩前土体参数估算预制桩单桩极限承载力和桩体最终受力状态相比有一定差异,计算结果通常偏于保守。陈兰云等(2006)^[32]指出随着时间增长,桩周被扰动土体强度逐渐恢复,侧摩阻力逐渐增加,桩竖向承载力呈现一定的时效性,时效性对桩可产生 10% 以上的影响。黄生根等(2004)^[33]

根据软土中应用后压浆技术的钻孔灌注桩的现场测试结果,考虑土体连续性所引起的变形,在对各桩段实测的摩阻力与位移关系进行修正的基础上,通过传递函数对摩阻力与位移关系进行拟合,得出各桩段的侧摩阻力极限值。张建新等(2008)^[34]通过嵌岩桩的室内模型试验,指出桩端岩层对桩侧阻力有较大影响,表现为随着桩端岩石强度提高,桩侧阻力增大,但这种桩侧阻力的增强效应只集中在桩端附近,同时较好的桩侧岩层也可使桩端阻力增大。

2) 经验公式法

根据桩的静载试验结果与桩侧、桩端土层的物理性质指标进行统计分析,建立桩侧阻力、桩端阻力与土的物理性指标间的经验关系,利用这种经验关系预估单桩承载力,规范中多采用此类方法^[35-36]。

3) 原位测试法

对地基土进行原位测试,利用桩的静载试验与原位测试参数间的经验关系,确定桩的侧阻力和端阻力。其中主要方法有:静力触探试验、标准贯入试验和旁压试验三种^[36]。

4) 原型试验法

原型静载试验是确定单桩承载力的传统方法。它不仅可确定桩的极限承载力,而且通过埋设各种测试元件可获得载荷传递、桩侧阻力、桩端阻力、桩身轴力、荷载—沉降关系等诸多资料。随着桩基的广泛应用,出现了检测桩的承载力和质量的原型动测法。虽然它以其快速、经济的优点得到了迅速的发展,但其取代静载试验还存在一定的问题。

单桩静载荷试验是各种确定单桩极限承载力方法中最直接、最基本、可靠度最高的方法,也是桩基质量检测中一项很重要的方法。我国各行业部门及地区基础设计规范中对试桩方法及极限承载力的确定标准有较明确的规定^[35-37],单桩静载荷试验在各类桩基检测中得到广泛应用。单桩静载试验中的荷载极限值就是桩的极限承载力,在试桩中由于客观条件限制,或试桩反力装置出现故障等原因,使得试桩压不到破坏,试桩未达到极限状态,给桩体极限承载力的评价和确定增加了困难。根据单桩初始加载阶段的实测数据,通过一定的数学手段模拟单桩的 $Q-s$ 曲线,预测单桩的极限承载力具有十分重要的工程意义和研究价值。静载试验费工、费时、费钱,在许多情况下,试桩并未达到极限荷载,如何充分利用试桩数据,进行桩基极限承载力的预测,已成为许多学者所关心的课题。

为解决这一问题,人们做了大量的理论研究、室内模拟试验和现场试验,提出了许多计算和确定承载力的方法。但迄今为止尚未找到求解桩基承载力问题的较为完善的方法。尽管已研究和提出的方法其数量庞大、途径多样,但都不够理想,都存在着这样或那样的不足和缺点。新的桩型及新工法的出现对桩基承载力计算提出了更高的要求。

2. 单桩极限承载力预测及判定方法研究现状

常采用的预测模型有双曲线模型^[38-39]、指数曲线模型、抛物线模型、神经网络法^[40-42],这些方法基本是采用外推法确定桩的极限承载力。这些方法总体上都是根据一个地区的大量试桩资料,结合本地区的工程地质条件来进行拟合的,其前提条件是需要正确描述本地区的 $Q-s$ 曲线。近些年发展起来的灰色预测法^[39],如等步长的灰色 GM(1,1)模型、非等步长的灰色 GM(1,1)模型,在正常情况下不需要预先知道 $Q-s$ 曲线的形状,就能确定单桩的极限承载力。

高笑娟等(2006)^[43]指出双曲线法能够比较好地预测 $Q-s$ 曲线为缓变型桩基的极限承

承载力,用双曲线法对支盘桩的极限承载力预测。张文伟等(2006)^[44]应用曲线拟合已达到极限承载力的静载荷试验数据,指出:指数法与双曲线法的精度主要取决于 $Q-s$ 曲线塑性区域的大小及该区域数据的多少,灰色预测法精度较高,对数曲线法应用有局限,精度较低。涂帆等(2006)^[45]以权重将指数和双曲线这两种预测方法的预测值进行组合,通过工程实例验证组合预测法的有效性和可行性,并对指数法和双曲线法的结果进行比较。张建新等(2002)^[46]基于粉喷桩单桩承载力随时间增长而提高的特点,建立了非等时距预测GM(1,1)灰色理论模型,对承载力进行预测,并取得了很好的效果。

采用突变理论对基桩极限承载力进行研究的较少,崔树琴等(2006)^[47-48]拟定了灌注桩受竖向荷载时的 $Q-s$ 曲线,并将其运用于突变理论,导出了单桩竖向承载力的计算公式,提出了延性破坏与脆性破坏的界定标准。张远芳等(2007)^[49]将尖点突变理论引入单桩竖向极限承载力的计算中,与静载荷试验和抛物线法相结合,推导出端承桩单桩竖向极限承载力的计算公式。

3. 桩压屈临界荷载研究现状

受桩顶承台、桩的入土深度、成桩工艺、桩周土体的约束情况、桩端嵌入持力层的性状、桩身截面形状及桩土本身材料等诸多因素的影响,基桩压屈稳定性状与理想轴压杆、压弯杆不同。桩基的压屈分析本身是一个十分复杂而又具有实际工程意义的课题。有关的试验研究及理论解答国内外已有不少,但这些解答由于其各自的局限性而难以运用于工程实践或计算精度欠佳,有待于深入和完善。近年来随着桩基础特别是自由长度较大的高承台桩、超长桩的广泛使用,有关竖向荷载下的桩身压屈稳定已受到桥梁、港口、建筑和矿业等工程领域进一步的重视,由于编制规范时所收集到的多种计算方法均有一定局限性,故各类规范中尚未明确指出压屈稳定验算的具体方法。

基桩的稳定性分析国内外许多学者已进行了相关的试验及理论研究,Toakley(1965)^[50]给出完全埋入桩的能量法解答。Davisson&Robinson(1965)^[51]等人的数值模拟解答。Reddy et al.(1970,1971)^[52-53]给出完全或部分埋入桩的能量法解答。Poulos et al.(1969,1980)^[54-55]的弹性理论法。Simo et al.(1992,1994)^[56-57]等考虑不同边界条件和假定地基比例系数为一般级数分布情况下对基桩进行压屈分析。国内研究多是基于势能驻值原理的特征值方法^[58-64]。

4. 桩侧土压力分布问题的研究现状

在土力学中,计算土体作用于结构上的作用力是一个古老的课题,经典的Coulomb(1776)^[65]和Rankine(1857)^[66]土压力理论,因其计算简单和力学概念明确,一直为工程设计所采用。经典土压力理论都基于以下假定:挡土结构视为刚性体,土体是理想刚塑性体,服从Mohr-Coulomb准则。依照经典土压力理论,得到的是极限平衡状态下的土压力值,土压力为直线分布。经典土压力理论存在着两个明显的弱点:一是要求土体变形达到极限状态的临界条件;二是经典土压力理论没有考虑挡墙的变位方式对土压力的影响。库仑土压力理论是根据墙后土体处于极限平衡状态并形成滑动楔体时,从楔体平衡条件得出的土压力理论,仅能用于计算极限状态的土压力。朗肯土压力理论是从土中一点的应力极限平衡条件出发,对墙后进入极限平衡状态的土体进行应力分析,从而得到作用于挡墙上的土压力,该理论仅考虑墙背垂直、光滑的情况,且只能用于计算极限状态的土压力。

管桩内摩阻力的发挥问题与管桩土芯土压力的分布问题有一定关系;近年来随着管桩研

究的深入,不少学者对管桩土芯的作用机理进行了研究。刘汉龙等(2004)^[67]通过对PCC桩内摩阻力的数值分析,得出内摩阻力沿土塞呈指数曲线分布,其分布形状主要由水平土压力系数比 K/K_0 和有效长度 Z_0 控制。文献^[68-69](2003, 2005)采用有限元方法分析表明管桩内摩阻力曲线基本呈指数函数分布。周建等(2006)^[70]指出内摩阻力采用从桩端部向上沿深度呈指数分布形式,来考虑内摩阻力对承载力的贡献所得到的结果偏于保守。

静止侧压力系数 K_0 是岩土工程中一个非常重要的参数,它是确定水平场地中的应力状态和计算静止土压力的基础,国内外学者进行了大量的室内和现场试验,并根据试验数据提出了若干计算静止土压力系数 K_0 的经验公式^[71-72]。Jaky(1948)^[73]就提出了可用于正常固结无黏性土的 K_0 计算公式。陈铁林等(2008)^[74]采用折减吸力代替真实吸力提出了一个计算膨胀土静止土压力的方法。

5. 基于弹性理论法的分析方法研究现状

弹性理论法是以弹性理论的方法和原理为基础,认为桩本身是弹性的,而土为另一类的弹性三维空间,即认为土体是均质,各向同性的弹性半空间体,并假定土体特性不因桩体的插入而发生变化。Mindlin(1936)^[75]给出了在均匀、各向同性的弹性半空间内作用单位竖向荷载的情况下,半无限空间内任一点处的应力、位移的积分形式。弹性理论法具体方法是采用弹性半空间体内部荷载作用下的Mindlin解计算土体位移,并采用桩体位移和土体位移的连续条件建立静力平衡方程式,以此求得桩体位移和桩身应力分布;对桩在竖向荷载作用下桩土荷载传递的特性进行分析。弹性理论法以弹性连续介质模拟桩周土体的响应,使用在半无限体内施加荷载的Mindlin方程求解。弹性理论法把土体看作线弹性体,用弹性模量 E_s 和泊松比 μ 两个变形指标表示土的性能。其中 μ 的大小对分析结果影响不大, E_s 是关键指标。但是 E_s 很难从室内土工试验取得精确的数值,在工程上大都都需要从单桩试验结果反求其值,这使得弹性理论法的应用受到限制。尽管这样,近几年采用该法计算单桩沉降的可靠性已得到工程技术界的重视。

弹性理论法在今天已发展成为一种可用于工程实践的、较为完整的理论体系。从20世纪60年代开始,许多研究者以弹性理论为基础对桩的性状进行了大量的研究。一般认为,弹性理论法最早是由Poulos提出的。其实,Poulos只是弹性理论法的集大成者,而不是首创者。早在Poulos之前,已有学者采用Mindlin解求解桩基问题。Nishida(1957)就采用Mindlin解求解了单桩的端阻力问题。其后,在1963年,D'Appolonia et al.(1963)^[76]用Mindlin解完整地研究了桩基础的沉降问题,并对下卧层是基岩的情况进行了修正。

Poulos及其合作者将Mindlin解推广至群桩情况,并将这种方法逐步完善起来。Poulos&Davis(1968)^[77-78]提出了刚性桩弹性理论解法,其基本方法是将桩身分段,利用Mindlin解求出土体的柔度矩阵,进一步可求出桩身摩阻力和桩端阻力。同年Poulos将刚性单桩推广至刚性群桩,在计算群桩沉降时,Poulos建议采用相互作用系数方法,即在单桩计算结果的基础上,运用弹性理论叠加原理,把在弹性介质两根桩的计算结果按相互作用系数方法扩展至群桩。随后,Mattes&Poulos(1969)^[79]将桩身基本微分方程用差分形式表示,从而将弹性半空间刚性群桩推广至可压缩性群桩。Poulos(1979)^[80-81]认为土体的非均质性不影响土体在荷载作用下的应力,求取位移解时采用位移求取点和荷载作用点之间弹性模量的平均值。随后Poulos et al.(1980、1983、1988、1989)^[82-85]将弹性理论法