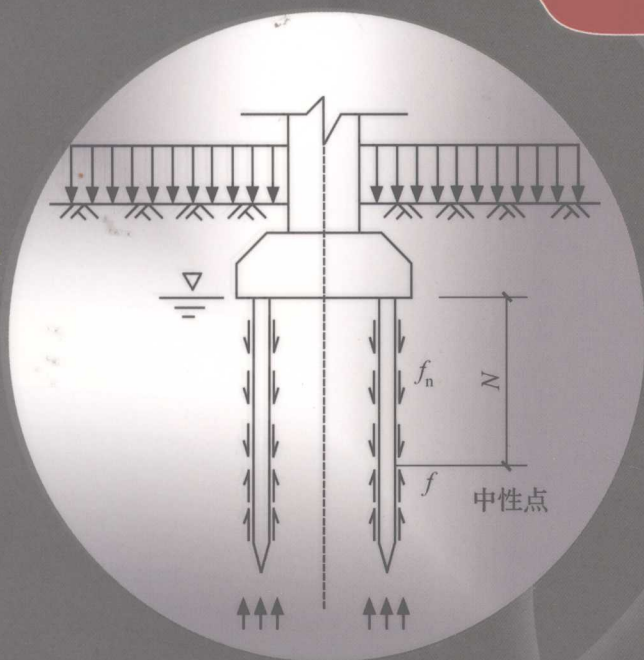




21世纪技术与工程著作系列·土木工程

桩基负摩擦力的 试验模拟和计算应用

肖俊华 袁聚云 赵锡宏 编著



科学出版社

www.sciencep.com

21 世纪技术与工程著作系列·土木工程



桩基负摩擦力的试验模拟 和计算应用

肖俊华 袁聚云 赵锡宏 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是国内外首次出版的一本关于桩基负摩擦力的著作,包括现场测试、室内试验、理论计算、数值模拟和工程应用等内容。

本书收集世界各地桩基负摩擦力的实测资料,通过综合分析对比,得出桩基负摩擦力数值、中性点位置及沥青涂层效果等方面的规律。书中提供的丰富数据,可用于相似工程。本书以上海软土为例,对结构材料与土的界面摩擦试验进行全面介绍,旨在探讨桩土界面处的剪力传递规律,求得界面剪力传递函数。本书重点是论述层状土的负摩擦力计算理论,用迭代方法寻找中性点的位置。此外,作者试图以在书中介绍的数值模拟多方面研究的一些成果阐述相关规范中尚未能反映的内容或实践中遇到的新问题,力求得到一些定性认识。

本书可供土木工程、交通工程和港口工程的研究和设计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

桩基负摩擦力的试验模拟和计算应用/肖俊华,袁聚云,赵锡宏编著. —北京:科学出版社,2009

(21世纪技术与工程著作系列·土木工程)

ISBN 978-7-03-024812-1

I. 桩… II. ①肖…②袁…③赵… III. 桩基础-桩表皮负摩擦-试验-研究 IV. TU473.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 101014 号

责任编辑:童安齐 陈 迅 / 责任校对:王万红

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

*

2009 年 7 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2009 年 7 月第一次印刷 印张: 13

印数: 1—2 000 字数: 248 000

定价: 38.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈双青〉)

销售部电话: 010-62134988 编辑部电话: 010-62137026(BA08)

序 言

讲起桩基负摩擦力,自然地把我带回到 20 世纪 70 年代的艰苦科研岁月中,与此同时,喜看当今科学春天里桩基负摩擦力的研究成果,真是悲欢交集,感慨万千。20 世纪 70 年代为援外需要,要我研究桩基负摩擦力的设计与计算,当时还算年轻的我,勇敢地承担下来。但是,脑子空空,我国有谁研究过桩基负摩擦力呢?又有什么国外的资料可供参考呢?有幸得到苍天爱惜,很快在图书馆找到冯国栋老教授(我国桩基负摩擦力研究的指路人)牵头翻译、整理的一本翻译资料,其中有一篇有关桩基负摩擦力的译文,如获至宝。经过一番艰辛的努力,终于在 1975 年写出一篇文章“桩基负摩擦力的计算”,以同济大学地基研究所署名,作为同济大学科技情报站的资料分发给有关单位。真想不到,这篇文章马上引起很大反响,十几个单位的同行来校讨论。更有意思的是上海有次会议,冯国栋老教授说:“同济大学有位同志提出一个确定桩基负摩擦力中性点的很好方法……”,就坐在他(我的很好的老乡和前辈)身旁的我却不敢吭一声啊!15 年后,我在日本任教,有幸获得一根直径 1m、长 60m 的钢管桩历时 3 年多的现场测试的宝贵资料,验证我提出的计算桩基负摩擦力方法的适用性,因而我的方法得到日本同行的赞许。时间飞逝 10 年,我和弟子合写一篇“承受负摩擦力的桩基沉降计算的迭代法”的文章。随后,我与北京理正软件设计研究院合作,研制成功“同济-理正桩基方案优化设计软件”,其中就包括桩基负摩擦力的应用。回想几十年研究桩基负摩擦力的历程,心潮澎湃,撰写一篇“科学春天的灿烂阳光——经历四分之一世纪的一篇论文”的文章,刊登在 2001 年 9 月 30 日的《同济报》上。

现在,让我感到庆幸的是,在国内(包括香港、台湾)进行桩基负摩擦力研究的学者中,很多是我的友人,也有我四十余年前的学生;在国外的研究学者中,同样也有我的友人。这样,可有许多向他(她)们学习的良机,丰富研究桩基负摩擦力的内容,使作者能够这么广泛地汇总国内外的桩基负摩擦力在理论上和室内外试验方面的丰硕研究成果,这

也是本书的最大特点,可供同行在实践和进一步的深入研究中参考。本书无不凝聚着上述友人们的心血,在此向他们表示诚挚的谢意。

本书还有两个特点:一是理论联系实践,提供桩基负摩擦力的比较完整的计算方法,以算例和实例进行检验,为工程设计创造有利条件;二是尝试采用先进 ABAQUS 有限元分析软件,对桩基负摩擦力这样复杂的问题进行数值模拟探讨,从而为进一步创新开辟途径。

本书的主要目的是将研究的成果应用于实践,期望在实践中能够进一步检验与完善。

本书的第一作者是一位年轻优秀的女博士,她勇挑重担,几年来对桩基负摩擦力研究倾注全部精力,在导师袁聚云教授指导下参与完成我国第一本有关桩基负摩擦力著作,这充分表明我国年轻一代攀登科学高峰的雄心壮志。作为长辈的我应予以大力扶持与襄助,让年轻人更快地成长。作为袁聚云导师的我,此时此刻,三代同堂共同研究,其乐无穷!

本书初稿得到共事半个世纪的同济大学高大钊教授和多年好友史佩栋教授,以及上海现代建筑设计(集团)公司教授级高工、我的弟子裴捷博士在百忙中抽空认真审阅并提出宝贵意见,实属难能可贵。

最后,特别要感谢上海港湾工程设计研究院院长、教授级高工、我的弟子周国然博士,在他的鼎力支持下,作者才有机会参加上海洋山深水港桩基负摩擦力现场试验资料的整理和分析工作,为本书增光添彩。

赵锡宏

2009年3月

目 录

序言

第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.1.1 桩基负摩擦力产生的原因及危害性	1
1.1.2 我国规范中有关桩基负摩擦力的规定	3
1.2 国内外桩基负摩擦力的研究现状	4
1.2.1 国外桩基负摩擦力的研究现状	4
1.2.2 国内桩基负摩擦力的研究现状	9
1.3 本书的指导思想及主要内容	12
1.3.1 指导思想	12
1.3.2 主要内容	13
第 2 章 桩基负摩擦力现场实测研究	14
2.1 世界各地桩基负摩擦力实测综述与综合分析	14
2.1.1 桩基负摩擦力现场实测综述	14
2.1.2 现场实测资料综合分析	35
2.2 中国黄土地区桩基负摩擦力现场实测与分析	46
2.2.1 中国黄土分布与负摩擦力问题	46
2.2.2 黄土地区桩基负摩擦力现场实测综述	47
2.2.3 黄土地区桩基负摩擦力现场实测综合分析	50
2.3 上海洋山深水港接岸结构桩基负摩擦力现场实测研究与分析	53
2.3.1 引言	53
2.3.2 场地情况	56
2.3.3 桩及测试元件	56
2.3.4 测试流程及进度	60
2.3.5 测试结果及分析	62
2.4 桩基负摩擦力现场实测研究中应重视的问题	70
2.4.1 桩顶荷载对负摩擦力影响问题	70
2.4.2 有效应力法与孔隙水压力消散问题	71
2.4.3 总应力法中不排水剪强度的取值问题	71

2.5	小结	72
第3章	桩基负摩擦力室内试验研究	75
3.1	桩负摩擦力室内试验的主要类型	75
3.2	国内外桩负摩擦力室内试验现状	76
3.3	上海土与结构材料的界面摩擦试验研究	77
3.3.1	引言	77
3.3.2	试验目的与试验步骤	77
3.3.3	试验结果的分析与整理方法	78
3.3.4	试验结果的综合分析	83
3.4	小结	88
第4章	桩基负摩擦力计算理论研究	89
4.1	桩基负摩擦力理论研究概述	89
4.1.1	弹性理论法	89
4.1.2	荷载传递法	90
4.1.3	剪切位移法	91
4.2	层状土中桩基负摩擦力计算方法	92
4.2.1	中性点的确定方法	92
4.2.2	均质土中单桩负摩擦力的理论计算	94
4.2.3	层状土中桩基负摩擦力的理论计算	98
4.2.4	层状土中桩基负摩擦力理论计算的参数研究	103
4.2.5	层状土中桩基负摩擦力的理论计算程序	108
4.3	群桩负摩擦力计算与群桩效应	110
4.3.1	泰沙基与佩克的方法	111
4.3.2	日本远藤的方法	111
4.3.3	理论方法中的负摩擦力群桩效应	112
4.3.4	其他方法	113
4.3.5	综合算例	114
4.4	下拉荷载(总负摩擦力)与时间的关系	119
4.4.1	负摩擦力随时间的发展过程	119
4.4.2	下拉荷载与时间的关系	119
4.4.3	实例验证	120
4.4.4	参数研究与数学模型	122
4.5	小结	123
第5章	桩基负摩擦力数值模拟研究	124
5.1	单桩负摩擦力参数研究	124
5.1.1	摩擦系数、超载及桩端土性质对负摩擦力的影响	124

5.1.2	桩周土中有硬夹层存在时对负摩擦力的影响	133
5.1.3	桩基负摩擦力随时间的变化	136
5.2	桩顶自由时的群桩负摩擦力数值模拟	140
5.2.1	模型描述	140
5.2.2	群桩负摩擦力的特点	141
5.2.3	桩间距、桩端土模量、超载、摩擦系数对群桩效应的影响	142
5.3	带桩帽的群桩负摩擦力数值模拟	146
5.4	小结	148
第6章	桩基负摩擦力研究的工程应用	150
6.1	承受负摩擦力的桩基承载力的确定	150
6.1.1	单桩承载力的确定	150
6.1.2	负摩擦力群桩承载力的确定	156
6.1.3	桩基承载力的时间效应	157
6.2	承受负摩擦力的桩基沉降计算	158
6.2.1	单桩沉降计算	158
6.2.2	群桩沉降计算	160
6.3	承受负摩擦力桩基的一般设计计算步骤和相应软件	165
6.3.1	承受负摩擦力桩基的设计计算步骤	165
6.3.2	承受负摩擦力桩基的计算软件	165
6.3.3	软件应用简介	167
6.4	承受负摩擦力桩基的优化设计	169
6.4.1	桩筏(箱)基础优化设计的影响因素	169
6.4.2	桩筏(箱)基础设计的优化方法	169
6.4.3	桩筏(箱)基础优化设计的数学模型	169
6.4.4	桩筏(箱)基础优化设计计算的简便方法——解析法	172
6.5	港口工程的桩基负摩擦力特点及削减措施	174
6.5.1	桩基负摩擦力引起的港口工程问题	174
6.5.2	港口桩基负摩擦力的特点	175
6.5.3	港口桩基竖向承载力的确定	177
6.5.4	港口桩基负摩擦力的削减措施	178
6.6	承受负摩擦力桩基设计理论方法在港口工程中的应用	178
6.6.1	工程概况	178
6.6.2	设计理论方法的试算过程	179
6.7	国外两种承受负摩擦力桩基的实用设计方法	183
6.7.1	Poulos 方法	183

6.7.2 Fellenius 方法	185
6.8 小结	186
参考文献	188
后记	195

第 1 章 绪 论

1.1 概 述

1.1.1 桩基负摩擦力产生的原因及危害性

在建(构)筑物的各种基础形式中,桩基础以其对地基土的适应性强、承载力大、沉降小等特点,尤其是沉降相当均匀的优点,而在工程实践中得到广泛应用。例如,20 世纪 30 年代建造的上海锦江饭店,由于建筑商偷工减料,引起的沉降达 2m,后有幸沉降已稳定,略作装饰,仍可使用。又如,正在建筑中的全国最高的 127 层的上海中心大厦,采用长度超过 80m 的灌注桩。随着桩基础的使用,新的问题随之出现,即桩基的负摩擦力问题。通常,桩在工作状态下,桩承受绝大部分的上部荷载,桩相对于土产生向下的位移,桩周土对桩侧提供向上的抗力,称之正摩擦力。然而,在有些情况下,桩周土会相对于桩产生向下的位移,对桩侧产生向下的侧摩擦力,称之负摩擦力,如图 1.1 所示。负摩擦力不仅在桩基中存在,对于其他形式的深基础,如沉井,由于某种原因也可能产生向下的负摩擦力。

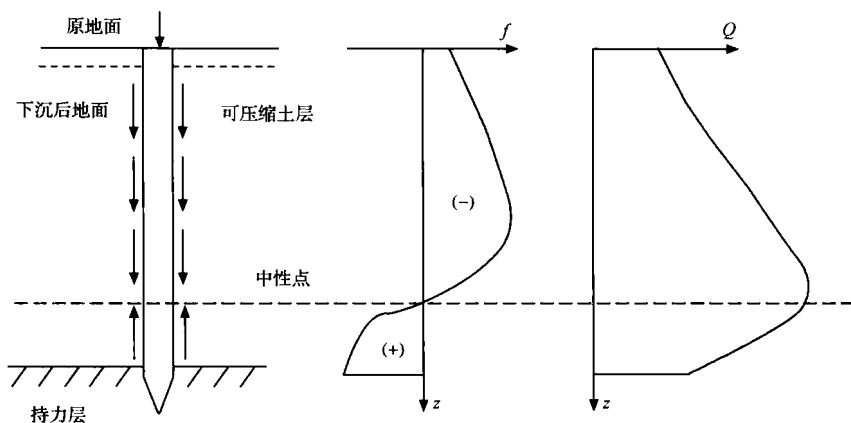


图 1.1 桩侧摩擦力 f 与桩身轴力 Q 的分布图

当桩基出现负摩擦力时,负摩擦力不仅不能为承担上部荷载做出贡献,反而对桩产生下拉作用。桩基负摩擦力可能发生在施工过程、使用前或使用过程中,其中以发生在使用过程中最为不利。对于摩擦桩,负摩擦力将引起桩的附加下沉,当建

筑物的部分基础或同一基础中部分桩上有负摩擦力作用时,基础可能出现不均匀沉降,导致上部结构中产生次应力,轻者影响其使用,重者结构物发生损坏;对于端承桩,负摩擦力导致桩身轴力增大,严重的可导致桩身强度破坏,或者桩端持力层破坏。

下面列举几种常见负摩擦力造成的危害:

(1) 大面积软土分布区。例如,我国沿海、挪威沿海和荷兰等地,地层为新近沉积的软土层,有的还处于欠固结状态,若在该软土地区采用桩基建造结构物,在填方整平时填土的作用下,桩周土沉降大于桩的沉降,产生负摩擦力。又如,珠海某局办公楼,场地填土厚度 2.5~2.8m(填土时间 3~6 个月),填土下面有 10.3~11.3m 厚的淤泥及淤泥质土(欠固结),采用沉管灌注桩,当时按《建筑桩基技术规范》(JGJ94—94)中的有关规定进行验算,设计确定的桩基承载力和桩身材料承载力均符合规范要求,单桩静载试验也表明桩基承载力达到设计要求。但是,在上部框架结构封顶和砌体工程完工后,却出现沉降过大的现象,造成后续工序无法施工。经多方调查表明:原因在于填土作用下场地土的自重固结产生较大的负摩擦力所致,而且在静载试验时未能考虑负摩擦力的影响。

(2) 对于大面积抽取地下水的地区。抽水引起地面大面积沉降,对建筑物桩基产生负摩擦力,这种情况在日本最为典型。例如,在 20 世纪 70 年代,为配合东京周围的交通系统建设,在现场进行负摩擦力测试^[1]。该工程的桩长为 43m、桩径 60cm 的钢管桩,穿过约 40m 厚的软土层,进入较为坚实的砂层,然后,在上面填筑约 4m 的填土,打桩后 150 天完成填筑。该地区由于长期抽取地下水,地面沉降为 10cm/年,打桩 1660 天后,负摩擦力竟近 7000kN 之大。

(3) 大面积填土地区。填土是一种超载,将引起下部软土的进一步固结,填土层本身即使经过压实,有时在上部荷载作用下,可能产生进一步的压缩,对桩基产生负摩擦力。例如,1989 年在国道 206 线改造工程中,某一桥台采用直径 1.2m 的钻孔灌注桩,桩长 19.5m,因对桥台的台后高达 5.3m 的填土产生的桩基负摩擦力考虑欠周,且在成桩之前未对地表以下 1.5~20m 的软土层进行处理,结果,桥台桩基施工完成后,桩基沉降量达 34cm^[2]。再如,哈尔滨市某建筑物坐落在深厚杂填土上,楼层仅为 1 层,采用桩基础,桩尖进入原状土持力层,却忽略杂填土对桩侧面产生的负摩擦力的影响。该桩基础完工后,曾进行单桩静载试验,表明单桩承载力能够满足设计和使用要求。可是,上部结构竣工和投入使用后的很短时间内,墙体上出现多处裂缝。经过调查,尽管单桩承载力满足设计要求,但杂填土产生的负摩擦力使桩基础产生较大的沉降。杂填土的极不均匀性、外界条件影响的不均匀性以及桩基础产生的不均匀沉降的综合结果,必然导致建筑物墙体产生裂缝^[3]。

(4) 对于黄土地区。世界上黄土堆积厚度之大,当属中国,而且湿陷性黄土地区的桩基负摩擦力问题在我国较为突出^[4]。例如,兰州市某 7 层住宅楼,场地既是

湿陷性黄土,又是人工填土地基,采用人工挖孔灌注桩,桩端持力层为泥质砂岩,楼房建成后,由于建筑物地基四周地坪均未进行硬化处理,或者仅进行浅层处理(40cm的换填),同时,受雨季天然降水影响,地基遇水软化,引起地基塌陷,使原具有正摩擦力的土层变为负摩擦力,进而拉动桩基整体下沉。因此,该住宅楼建成后第2年,楼房墙面开始出现多处裂缝,2年内桩的下沉量最大达27.8cm。为保证房屋安全使用,最后,采用注浆加固及加设防水帷幕进行补救,所需工期近50天,补救总费用达30多万元。

(5) 港口桩基工程。一般先在沿岸进行大面积吹填,然后,打桩建造港口平台,由于后方填土厚度大,桩基的负摩擦力大,往往在港口投入使用后产生向岸的反倾斜,负摩擦力产生的不均匀沉降使得港口工程桩帽拉裂(这种现象较为普遍)^[5]。已经建成的世界最深的上海洋山深水港,接岸结构为斜顶桩板桩承台结构,港区后方均为高填土陆域,填土高度平均为20m,靠近码头部位填土高度达25m。回填采用块石和粉细砂,尤其是为单面抛填,负摩擦力的分布及随时间的发展变化更为复杂,对深水港桩基负摩擦力可能造成的危害应予以防范。

(6) 其他。例如,矿井地区的疏排水和卸压,引起土体沉陷与固结,造成土体给矿井井壁施加类似桩基负摩擦力的附加力,结果导致我国黄淮、徐淮地区不少煤矿立井的井筒(相当于深长端部嵌固桩)发生一些破坏;又如,冻土融沉对沉井侧壁产生的负摩擦力等。

1.1.2 我国规范中有关桩基负摩擦力的规定

技术规范是技术人员工作实践的指南,规范应是成功的经验技术和理论基础的总结产物,但规范总是落后于先进技术的发展,而且修订一般相隔约10年,这样,可能使规范成为落后于成熟技术的产物。

我国规范,如《建筑地基基础设计规范》、《建筑桩基技术规范》、《湿陷性黄土地区建筑规范》和《港口工程桩基规范》等,尽管规范中有桩基负摩擦力的条文,但是,对负摩擦力的有关计算的规定尚难满足工程实践的需要。

(1) 在《建筑地基基础设计规范》(GBJ7—89)^[6]中,列有当桩周土层产生的沉降超过桩基沉降时应考虑负摩擦力影响的有关条文,但未给出相应的计算方法。在《建筑地基基础设计规范》(GB50007—2002)^[7]中,仅在条款8.5.12中规定:“软土地区的桩基应考虑桩周土自重固结、蠕变、大面积堆载及施工中挤土对桩基的影响”,但未提出具体的计算方法等。

(2) 《建筑桩基技术规范》(JGJ94—2008)^[8]与《建筑桩基技术规范》(JGJ94—94)^[9]相比,在负摩擦力取值方面并无变化,基本上是由有效应力法确定负摩擦力,直接根据桩周土类型给出负摩阻力系数 ξ_n ,考虑负摩擦力的群桩效应,中性点深度直接由桩端土持力层的性质确定。对确定负摩擦力的关键——中性点的确定以

及负摩擦力的计算仍然比较粗糙。

(3)《湿陷性黄土地区建筑规范》(GB50025—2004)^[10]规定采用桩基础时必须穿透湿陷性黄土层,还规定静载荷试验确定桩基承载力时的两种试验方法;当桩侧负摩擦力进行现场试验确有困难时,可用规范提供负摩擦力的经验值。这样,该规范与《湿陷性黄土地区建筑规范》(GBJ25—90)^[11]相比有不少改进,然而,经验值还是以前规范中仅有的三个现场试验所提供的值。

(4)《港口工程桩基规范》(JTJ254—98)^[12],至今尚未修订,该规范对负摩擦力的计算缺乏具体的规定,难以实施。

从上述可见,各种规范在制定时已经重视负摩擦力对桩基设计的重要影响,但是,对于中性点、负摩擦力的具体计算、负摩擦力对桩基承载力的影响及桩基沉降计算、负摩擦力桩基检测等问题仍需做进一步具体规定,各种工程在负摩擦力的桩基设计与计算时,大多凭各自的经验。在《桩基工程手册》^[13]的第九章也提出对《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)有关条文的认识和介绍国外研究负摩擦力的一些成果,因此,有必要对桩基负摩擦力问题做进一步的研究,广泛地吸收国内外有关研究桩基负摩擦力的现场实测、室内试验、理论和方法、数值模拟等的成功经验,以便为有关规范的修订和设计人员实践提供有益的借鉴。

1.2 国内外桩基负摩擦力的研究现状

负摩擦力的问题由来已久,早在1948年,泰沙基(Terzaghi)和佩克(Peck)合著的《工程实用土力学》(*Soil Mechanics in Engineering Practice*)一书中提出负摩擦力问题,并给出简单的计算公式^[14]。迄今为止,国内外学者对桩基负摩擦力已进行大量的室内外试验研究、理论研究以及数值模拟方面的研究,现作概述,提供信息,便于读者研究参考。

1.2.1 国外桩基负摩擦力的研究现状

下面就现场实测、室内试验、理论与方法和数值模拟分别加以论述。

1. 现场试验

现场实测属于定量研究,其成果是永恒的财富。

1965年,挪威Johannessen和Bjerrum根据两根直径为18in^①的钢管桩的负摩擦力实测数据^[15],相当准确地描述负摩擦力沿桩身荷载传递的大小和分布,提出有效应力计算负摩擦力的方法。1969年,Bjerrum、Johannessen和Eide对沥青

① 1in=2.54cm,下同。

涂层桩和无涂层桩上的负摩擦力情况进行对比研究^[16],进一步研究有效应力系数值以及采用涂层法降低负摩擦力的可行性。

1969年,瑞典 Fellenius 和 Broms 对两根混凝土打入桩的(“Herkules”桩)负摩擦力进行现场实测,侧重对软黏土重塑和重新固结引起的负摩擦力问题^[17]进行有益的研究。

1969年,加拿大 Bozozuk 和 Labrecque 等对 83m 长、99cm 直径的内填混凝土的钢管桩的负摩擦力观测资料进行分析^[18]。同时,Bozozuk 对一根在高速公路路堤的桩进行为期 10 年(1966 年 5 月至 1976 年 5 月)的详细研究,对在桩上负摩擦力的计算和桩的承载力方面提出一些新的观点,拓展和丰富负摩擦力的研究方法和内容^[19~21]。1985 年,Keenan 和 Bozozuk 将拔桩(pullout pile)试验数据和实测负摩擦力之间建立联系,为负摩擦力的估算提供一种新方法^[21]。

1974 年,荷兰 Horvat 和 Van der Veen 对某工程桩上的负摩擦力进行研究^[22]。三根桩均为工程桩,位于同一墙下,分别为无涂层桩、膨润土涂层桩及沥青涂层桩,对三根桩上负摩擦力的性状、桩的承载力及桩基沉降进行对比,研究桩顶荷载对负摩擦力的影响。

日本非常重视长期抽取地下水而引起的负摩擦力问题,曾多次进行负摩擦力的现场测试。1969 年,Endo 等对四根桩(开口端承桩、闭口端承桩、闭口摩擦桩和闭口斜桩)上实测负摩擦力值采用有效应力法和总应力法进行分析^[23],并给出中性比,其测试结果已被我国规范借鉴。1977 年,Okabe 通过实测,研究桩在填筑和地面自然沉降情况下,负摩擦力的发展情况以及施加桩顶荷载时对桩上负摩擦力的影响,同时,对两种降低负摩擦力的方法(围护桩法及套管法)进行检验^[1]。1982 年,Fukuya、Todoroki 和 Kasuga 利用现场实测数据,对日本专利产品 NF 桩和普通桩上负摩擦力进行对比研究,验证 NF 桩对降低负摩擦力的效果^[24]。1985 年,Takahashi 对地面沉降区的负摩擦力进行研究^[25]。1991 年,Takahashi 等在东京沿海的国际机场建设项目中,对 9 根桩进行测试^[26],其中三根桩采用载荷试验研究桩上的正摩擦力以及沥青涂层对正摩阻力的影响;对另外 6 根桩进行为期 3 年的观测对比,研究桩上负摩擦力以及涂层对负摩擦力的影响。根据这些测试数据,提出利用不排水剪强度 c_u 计算侧摩擦力取值时的建议。

1977 年,Inoue 和 Tamaoki 等研究一个由负摩擦力引起的建筑物下沉的实例,分析差异沉降与负摩擦力、差异沉降与可压缩层厚度之间的关系^[27]。

此外,墨西哥、夏威夷、泰国、新加坡、英国等也对桩基负摩擦力进行现场实测^[28~35]。

2. 室内试验

现场试验的投资大,风险性也大,需要室内试验配合。从不同的侧面研究负摩

擦力性状,属于定性研究。

1982年,Toru Shibata等通过一系列的模型试验研究竖向垂直受荷群桩和斜桩上的负摩擦力特性,通过试验研究沥青涂层对降低桩上负摩擦力的效果,同时,推导群桩效应系数,利用试验结果进行验证^[36]。

1989年,Little为配合苏格兰河口的炼油厂项目,利用模型试验研究超载作用下的负摩擦力^[37],根据试验结果估算有效应力系数和总应力系数。在总应力法分析中,首次采用与土的固结度相应的不排水剪强度以估算总应力系数。

1995年,Ergun利用模型试验研究桩间距对负摩擦力群桩效应的影响^[38]。

1999年,Lee等利用模型试验研究负摩擦力与土体的超孔隙水压力消散、土体的不排水剪强度、桩的粗糙度及桩土相对位移之间的关系^[39]。

2004年,Leung和Liao利用离心机试验,对仅承受负摩擦力的单桩及同时承受负摩擦力和桩顶荷载的单桩进行对比研究^[40]。

通过室内试验研究,可定性探讨负摩擦力的有关问题,成为现场实测的一个重要补充。

3. 理论与方法

根据现场实测和室内试验结果的研究与分析,上升为理论和方法,从而更好地对负摩擦力进行研究。

早在1948年Terzaghi和Peck提出负摩擦力问题,给出简单的计算公式^[14]。1965年,Johannessen和Bjerrum通过对实测负摩擦力进行分析,提出计算负摩擦力的有效应力法^[15]。1969年,Endo等利用四根桩的实测负摩擦力值,不但用有效应力法进行分析,还将实测负摩擦力与土的不排水剪强度 $q_u/2$ 进行对比,即用总应力法进行分析^[23]。此后,有效应力法和总应力法均可用于现场实测及室内试验数据分析的重要方法。

Zeevaert(1959)认为,桩上的负摩擦力存在会引起桩周土的竖向有效应力的减小^[41]。根据桩土界面负摩擦力值与桩周软土固结完成有效应力的减小值相等的条件,推导出均质土中桩上总负摩擦力的计算公式。1974年,Zeevaert在其著作*Foundation Engineering for Difficult Subsoil Conditions*(中译本为《难处理地基的基础工程》)^[42]中,对负摩擦力的力学理论和计算方法进行详细而全面的总结,对桩基负摩擦力研究做出重要贡献。

日本Endo通过将单位长度上作用于桩上的下拉荷载等效为桩周围筒的土重力以考虑群桩效应^[43]。Toru Shibata等(1982)根据群桩中土体竖向力的平衡,推导群桩效应系数的表达式^[36]。

迈耶霍夫在“桩基础的承载力和沉降”^[44]中提出软黏土中群桩负摩擦力的计算方法,并提出当砂土中的端承桩群受到处于固结过程中的上覆黏土或粉土层的

负摩擦力作用时,在沉降计算中应考虑同样的单位面积上的负摩擦力,包括在基底的净压力。

2004年,Fellenius探讨容许荷载与下拉荷载之间的关系、下拉荷载与桩身材料强度验算、考虑下拉荷载的桩基沉降计算等^[45],提出桩基设计的“统一”的方法。

对桩的传统研究方法有弹性理论法、荷载传递法和剪切位移法。该三种研究方法可扩展研究负摩擦力的桩基中,但由于求解困难,一般需要与数值求解方法相结合。

1969年,Poulos和Mattes基于地基中应力的Mindlin解,提出弹性理论计算负摩擦力的方法,其中采用镜像单元处理手段模拟刚性持力层,可是“镜像”技术强制桩端的竖向位移为零,故该方法只适用于端承桩^[46]。

1972年,Poulos和Davis在上述方法的基础上根据太沙基一维固结理论导出单桩负摩擦力与时间的关系^[47]。

1973年,Walker和Darvall对土采用非线性本构关系,运用有限元方法计算一个实例,计算的下拉力(负摩擦力)与实测结果相当吻合^[48]。

1975年,Poulos和Davis基于弹性理论的计算方法计算Bjerrum等的四个实例,并对Walker和Darvall等^[48]的计算实例进行计算,二者计算结果基本一致^[49,50]。

这样,可说明有限元和弹性理论方法用于分析桩基负摩擦力的有效性。

1984年,Alonso、Josa和Ledesma提出适用于非均质土层、桩在复杂受力历史情况下的负摩擦力的荷载传递法^[51]。将大量的加荷、卸荷的桩土界面模拟试验结果与作用于桩身上剪应力的非线性、塑性相联系,最终将荷载传递函数简化为双线性。对于外部荷载和孔隙水压的变化均用无量纲的形式表示,获得一般方程的表达式,能适用于任意地层和复杂的加荷过程,其中方程式采用有限差分方式求解。

1990年,Chow、Chin和Lee将弹性理论法对单桩的分析推广到群桩上的负摩擦力分析中^[52]。其中桩位于双层地基土中,上层为超载作用下会产生固结沉降的软土层,下层为具有一定刚度的持力层。该方法用刚性的梁单元迫使群桩顶部的位移相等模拟刚性的桩承台,可方便地用以分析各种参数 h/d 、 E_p/E_s 、 E_b/E_s 、 e/d 、 s/d (分别为上层固结土层与桩径之比、桩与土的刚度比、持力层土与桩周可压缩土层的刚度比、桩进入持力层的长度与桩径比、桩距与桩径比),对于单桩和群桩上负摩擦力和桩顶沉降的影响,采用归一化处理分析结果。

1993年,Lee在前人方法的基础上,提出桩土界面处用简化的双曲线模型模拟土的应力-应变关系^[53,54],桩与桩之间的相互作用仍采用点荷载作用下的改进的Mindlin解析解,这是一种结合弹性理论法和传递函数法的混合方法。

1993年,Lim、Chow和Karunaratner提出一个简单的离散元的方法分析单桩

上的负摩擦力^[55],对桩侧土和桩端土反力系数 k 采用不同的模式,这也是一种弹性理论法,能考虑桩土界面处产生滑移时的情况。

1995年,Teh和Wong提出一种新的迭代方法求解端承群桩上的负摩擦力^[56]。同年,Wong和Teh提出一种简化的方法分析成层地基土中的负摩擦力,桩土界面处的作用以非线性的土体弹簧来代替,其应力-应变关系以双曲线描述,用增量迭代法计算桩的轴力^[57],该方法已由Teh于1994年编制成计算程序NSFpile。

1996年,Poorooshasb等对刚性桩(混凝土桩)和柔性桩(碎石桩)上的负摩擦力进行研究,得到桩土界面处为非线性本构关系的时控方程。根据定解条件用有限差分法求解,编成计算程序,研究负摩擦力的分布规律^[58]。

1996年,Chow、Lim和Karunaratne用三种分析方法对群桩负摩擦力的计算结果进行广泛的对比^[59]。在三种分析方法中,均采用可产生轴向变形的杆单元模拟桩,土的性质用混合的模型描述,即在单桩周围土用反力系数法描述,在桩-土-桩的界面处用弹性理论分析。方法的不同之处在于考虑群桩相互作用时所采用的弹性理论不同:① 分层模型;② 运用Mindlin解的连续性模型;③ 运用Chan解的连续性模型^[60]。

因此,有上述计算单桩群桩的负摩擦力的各种方法以及相应的计算程序,可以比较方便地研究桩的负摩擦力问题。

4. 数值模拟

随着计算机技术的发展和大型通用软件的出现,开始采用大型通用软件对桩基负摩擦力进行数值模拟研究。

2005年,Emilios M Comodromos和Spyridoula V Bareka利用岩土分析软件FLAC3D对单桩和群桩中的负摩擦力进行三维非线性分析^[61]。

2006年,Adel M Hanna用CRISP程序对黏土中单桩上的负摩擦力进行分析^[62]。

2002年,Lee、Bolton和Al-Tabbaa首先用ABAQUS程序对群桩上的负摩擦力问题^[63]进行一系列的2D和3D分析、桩土界面采用滑动模型和弹性模型的对比分析以及参数研究。2004年,Jeong和Lee等利用ABAQUS程序研究允许桩土界面处产生滑动时对单桩上下拉荷载值的发展变化以及对群桩上下拉荷载值降低程度的影响,同时,对桩上轴向加载引起的下拉荷载值的变化进行研究^[64]。2006年,Lee C J、Lee J H和Jeong S又进一步对由桩帽连在一起的群桩进行分析^[65]。

从原则上而言,数值分析方法特别是有限单元法在计算中能同时考虑桩基摩擦力的诸多影响因素,但是分析结果的可信度还需依靠工程经验作出正确的