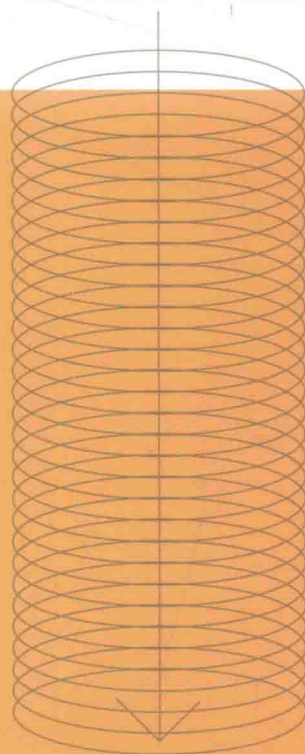
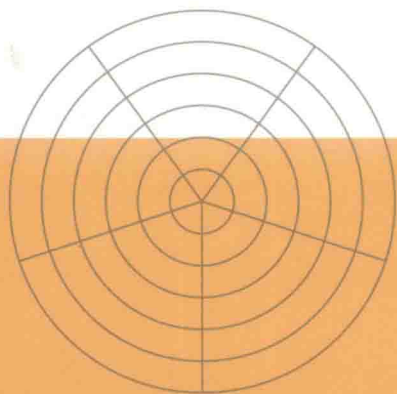


©寇海磊 著

Experimental Study on the Jacking Force and Bearing Capacity  
for Jacked Open-ended Concrete Pipe Piles

# 静压开口混凝土管桩沉桩阻力及承载力 全过程试验研究



中国建筑工业出版社

# 静压开口混凝土管桩沉桩阻力及承载力 全过程试验研究

寇海磊 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

静压开口混凝土管桩沉桩阻力及承载力全过程试验研究/寇海磊著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2018. 6  
ISBN 978-7-112-22058-8

I. ①静… II. ①寇… III. ①混凝土管桩-沉桩-阻力-承载力-试验研究 IV. ①TU473.1 ②TU753.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 069322 号

本书基于光纤光栅传感测试技术, 结合现场试验、室内物理力学试验及理论分析的方法, 对静压开口混凝土管桩贯入成层土地基过程中端阻力及侧摩阻力进行了分离, 揭示了桩身残余应力对静压桩贯入及静载荷阶段承载力的影响, 建立了桩端阻力、桩侧摩阻力及承载力随时间变化的关系式, 并通过静力触探指标对贯入过程中沉桩阻力进行了验证。本书的目的是给土木工程人员提供关于目前在一些区域已经使用且最新可获得的静压开口混凝土管桩相关知识及测试技术的全面性综述。

责任编辑: 辛海丽

责任校对: 王 瑞

静压开口混凝土管桩沉桩阻力及承载力全过程试验研究

寇海磊 著

\*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京海淀三里河路 9 号)

各地新华书店、建筑书店经销

北京红光制版公司制版

北京富生印刷厂印刷

\*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 7 $\frac{3}{4}$  字数: 190 千字

2018 年 6 月第一版 2018 年 6 月第一次印刷

定价: 35.00 元

ISBN 978-7-112-22058-8

(31956)

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)

# 前 言

静压开口混凝土管桩沉桩阻力及承载力变化全过程是静压桩研究的重点内容。沉桩过程中桩侧摩阻力及桩端阻力的分离是制约静压桩承载力研究的瓶颈，也是研究静压桩贯入机理及承载力的基础。本书基于静压桩身预埋准分布式 FBG 光纤传感器的开口混凝土管桩现场试验，结合室内物理力学试验，系统地揭示了静压桩贯入过程中沉桩阻力及休止期内承载力发展的变化规律。本书主要工作及成果如下：

沉桩过程中桩侧摩阻力及桩端阻力的分离是桩基承载力研究的关键。本书在总结分析不同土层地基静压桩贯入性状的基础上，通过桩身预埋准分布式 FBG 光纤传感器的现场足尺试验，成功分离了开口 PHC 管桩贯入过程中桩端阻力及侧摩阻力，得到了两者沿深度的变化规律；创新性地提出沉桩阻力分离的扩大头异形桩试验方法，并进行了试验验证。结果表明准分布式 FBG 光纤传感技术分离沉桩阻力效果较好，成层土地基桩侧摩阻力临界深度现象不显著。黏性土地基中扩大头异形桩桩侧摩阻力所占比例约为 10%，按照桩端面积进行折减后与实测结果吻合较好，误差约为 18.4%。扩大头异形桩试验方法可用于现场沉桩阻力的分离，一定程度上能够满足工程实际需要。

本书在成层土地基中进行了单桩静载荷试验及双桥静力触探试验，结合室内物理力学指标测试，揭示了静力触探与静压桩桩端阻力及桩侧摩阻力的差异，发现尺寸效应及土塞效应制约着锥尖阻力与桩端阻力的不同，桩周重塑区土体性状差异则是探杆侧壁摩阻力不同于桩侧摩阻力的主要原因。与原状土相比，重塑区土体重度、黏聚力、内摩擦角等参数增大，含水量降低约 6.73%。静载荷试验过程中土层单位极限摩阻力分别为 101.45kPa、153.21kPa、94.56kPa、67.31kPa，大于规范建议值。基于试验成果，对双桥静力触探估算单桩极限承载力经验公式修正系数进行了量化。现场实测表明，单桩极限承载力、桩侧摩阻力及桩端阻力采用建议修正系数计算值与实测值误差分别为 2.3%、4.5%及 2.3%，效果较好。

残余应力是指贯入过程中单程压桩结束后因桩顶卸荷而内锁于桩身的力。本书利用光纤传感技术对开口混凝土管桩贯入成层土地基中施工残余应力性状展开足尺试验研究，并对沉桩完成后残余应力对桩基承载力的影响及施工残余应力长期变化过程进行了监测。研究表明，开口 PHC 管桩桩身残余应力与平均残余负摩阻力随贯入深度呈折线型分布， $Z_n/L_p$  介于 0.66~0.92 之间；随沉桩循环次数增加，平均残余负摩阻力增长约 2%~41.25%，某固定深度处桩侧残余负摩阻力有减小的趋势，桩端残余应力大小与桩端土性状及终止压桩力大小密切相关。静载荷试验过程中，忽略桩身残余应力将高估中性面以上桩侧摩阻力约 53.46%，低估中性面以下桩侧摩阻力约 56.62%，低估桩端阻力约 10%。受桩周土作用影响，沉桩结束后桩身残余应力有小幅降低，并趋于一稳定值。

时间效应是指沉桩结束后桩基承载力随沉桩时间增长的现象。本书基于隔时隔压试验及静载荷试验，对开口混凝土管桩承载力时效性规律进行了研究，发现单桩极限承载力随

时间呈对数型增长，休止期内桩侧摩阻力对单桩极限承载力贡献较大，桩端阻力提高不明显。桩端位于非硬质土层试桩承载力每对数循环增长 59%，各土层时间效应系数分别为 0.39、0.46、0.89、0.69；桩端位于硬质土层试桩总时效系数较小，约为 0.16。桩侧摩阻力时效性室内试验表明滑动摩阻力时效性规律与单桩极限承载力变化规律类似。

# 目 录

第 1 章 绪论 .....	1
1.1 研究背景 .....	1
1.1.1 静压桩在我国应用现状 .....	2
1.1.2 静压预应力混凝土管桩相比其他桩型的优势 .....	3
1.1.3 静压预应力混凝土管桩的不足 .....	3
1.2 国内外研究现状综述 .....	4
1.2.1 桩端阻力与桩侧摩阻力分离试验研究 .....	4
1.2.2 静力触探估算单桩极限承载力 .....	5
1.2.3 桩身残余应力性状研究 .....	6
1.2.4 桩基承载力时间效应 .....	7
1.3 课题的提出 .....	8
1.4 本书研究思路及方法 .....	10
1.5 本书主要工作 .....	12
第 2 章 静压桩沉桩阻力机理分析及试验研究 .....	13
2.1 引言 .....	13
2.2 静压桩沉桩阻力机理分析 .....	13
2.2.1 黏性土中沉桩机理 .....	13
2.2.2 砂土中沉桩机理 .....	14
2.2.3 成层土地基中沉桩机理 .....	14
2.3 分离沉桩阻力足尺试验研究 .....	15
2.3.1 光纤传感技术的发展及应用 .....	16
2.3.2 光纤布拉格光栅 (FBG) 传感原理 .....	17
2.3.3 试验概况 .....	18
2.3.4 试验过程 .....	20
2.3.5 试验结果与分析 .....	23
2.4 开口混凝土管桩分离沉桩阻力的扩大头试验方法 .....	27
2.4.1 黏性土地区试验研究 .....	28
2.4.2 粉土地区试验研究 .....	29
2.5 基于能量法的沉桩阻力分析 .....	31
2.5.1 沉桩过程中能量平衡 .....	31
2.5.2 贯入过程中能量方程 .....	32

2.5.3 沉桩阻力分离的能量法验证·····	33
2.6 本章小结·····	34
<b>第3章 静力触探估算单桩极限承载力试验研究</b> ·····	<b>35</b>
3.1 引言·····	35
3.2 静力触探与静压桩贯入性状分析·····	35
3.2.1 静压桩重塑区现场试验研究·····	35
3.2.2 重塑区室内土工试验·····	40
3.3 桩-土滑动摩擦室内试验研究·····	41
3.3.1 试验设置·····	41
3.3.2 试验结果与分析·····	42
3.4 层状土地基开口PHC管桩极限承载力的CPT设计方法·····	44
3.4.1 现有设计方法讨论·····	44
3.4.2 基于静载荷试验单桩极限承载力经验公式修正系数取值·····	47
3.5 本章小结·····	54
<b>第4章 静压桩施工残余应力机理及试验研究</b> ·····	<b>55</b>
4.1 引言·····	55
4.2 国内外研究成果汇总·····	55
4.3 残余应力机理分析·····	59
4.3.1 残余应力产生的原因·····	59
4.3.2 残余应力对桩基承载力的影响·····	60
4.3.3 残余应力影响因素分析·····	62
4.4 残余应力足尺试验研究·····	63
4.4.1 试验设置·····	63
4.4.2 试验结果与分析·····	64
4.5 本章小结·····	74
<b>第5章 静压桩承载力时效性理论分析及试验研究</b> ·····	<b>76</b>
5.1 引言·····	76
5.2 国内外研究成果汇总·····	76
5.3 静压桩时效性机理分析·····	78
5.3.1 时效性机理分析·····	78
5.3.2 影响因素分析·····	79
5.4 基于隔时复压试验单桩承载力时效性研究·····	80
5.4.1 隔时复压试验·····	82
5.4.2 桩端位于非硬质土层隔时复压试验·····	83
5.4.3 桩端位于硬质土层隔时复压试验·····	87
5.4.4 桩端土性差异对单桩承载力发挥影响·····	89

5.5 承载力时间效应静载荷试验验证及预测	90
5.5.1 实例一	90
5.5.2 实例二	93
5.5.3 基于灰色理论 PHC 管桩单桩极限承载力预测	95
5.6 预制桩波速随休止时间增长现象分析	96
5.6.1 PHC 管桩动测试验	96
5.6.2 基于扩大头异形桩基桩动测试验	97
5.6.3 基桩动测指标与承载力相关性分析	97
5.7 侧摩阻力时效性室内试验分析	98
5.7.1 试验设置	98
5.7.2 试验结果与分析	98
5.8 本章小结	99
<b>第 6 章 结论与展望</b>	<b>101</b>
6.1 本书研究成果	101
6.2 主要创新点	103
6.3 进一步研究建议	103
6.3.1 沉桩阻力分离的进一步细化	103
6.3.2 贯入过程桩身回弹量与残余应力关系的建立	104
参考文献	105

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 研究背景

随着城市建设的快速发展，桩基础应用越来越广泛。早在几千年前，人们就学会利用桩基础将上部结构荷载传递到下部坚硬土层，桩基础应用历史悠久<sup>[1]</sup>。上部结构物承受荷载越大，造型越复杂，对桩基础承载能力要求越高，其施工工艺也越复杂<sup>[2]</sup>。按照施工工艺不同，桩基础可分为预制桩及灌注桩等。预制桩主要有混凝土预制桩及钢桩两类，混凝土预制桩尤其是高强预应力混凝土（PHC）管桩因其承载能力高、坚固耐久、施工速度快等优点越来越多地应用于实际工程。

高强预应力混凝土管桩沉桩方式有振动法、锤击法及静力压桩法三种。预制桩振动法施工是在桩身连接一振动锤与之形成振动体系，锤内轴上偏心块相对旋转产生的振动力强迫与桩接触的土层相应振动，使土层强度降低，阻力减小，从而使桩在自重及振动体系作用下沉入土中。锤击法施工是预制桩施工最常用的方法，在 20 世纪 80 年代广泛应用，其利用桩锤的冲击力克服土对桩的阻力，使桩沉到预定深度。根据沉桩深度及土层情况，可采用落锤、单动汽锤、双动汽锤、柴油锤、液压锤等对桩顶施压，此施工方法产生较大振动及噪声，对周围环境影响较大，在市区应用受到限制。20 世纪 60 年代，第一台大型静压桩机“Pile master”的问世标志着静力压桩法应用的开始。静力法沉桩（Press-in 或 Jacking method）是利用桩机自重及配重将预制桩送至预定深度的一种施工工艺，该方法对环境几乎无噪声及振动影响，较为环保，在施工对环境的影响要求较高的市区应用广泛，如图 1.1 所示。

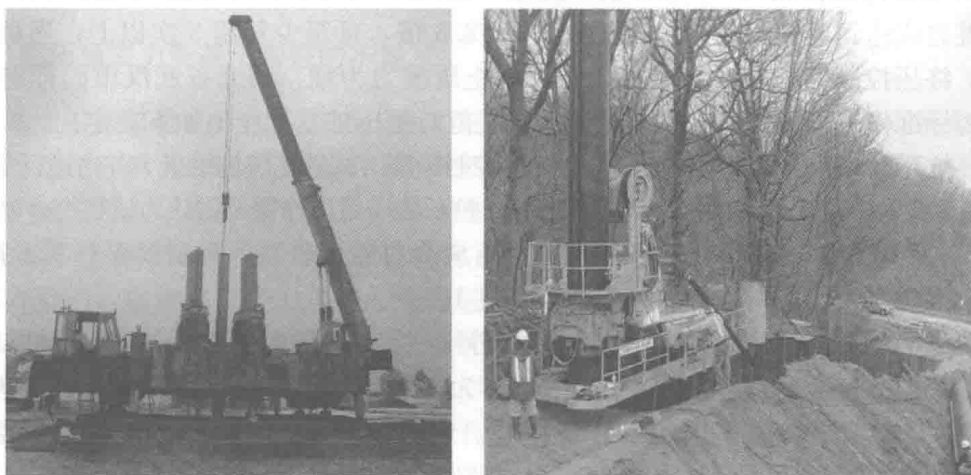


图 1.1 静力压入桩机

### 1.1.1 静压桩在我国应用现状

20世纪60年代,静压桩在我国最早应用于上海地区<sup>[3]</sup>,后来随着对施工环境要求越来越高,静力法施工应用越来越广泛,应用范围也由最初的低承载力向高承载力发展。目前静力法施工最大压桩力可达6000~7000kN,施工桩长超过65m,适用于静力压桩法的桩型主要为预制混凝土方桩、预应力混凝土管桩及钢管桩<sup>[4]</sup>。

国家及各地方性规范对静力压桩法施工介绍较少,如《建筑桩基技术规范》JGJ 94—2008、《上海地基基础设计规范》DGJ 08—11—2010等。虽然各技术规范并不建议将静力压桩法应用于深厚砂层地基施工,但仍有部分学者对其进行了研究。

龚茂波、杨光(1998)<sup>[5]</sup>报道了两例静压桩应用于9层居民楼的工程实例,其中预制桩为350mm×350mm混凝土方桩,单桩承载力特征值为750kN。第一个工程实例贯入过程中沉桩阻力达到单桩承载力特征值的两倍,并对其进行了3次复压,沉桩完成后埋深约为15.7~20.2m,桩端位于砂质黏土及砂土层,后续静载荷试验表明单桩承载力极限值超过了特征值的两倍。第二个工程实例因土层原因桩端没有到达预定深度。桩体设计埋深约为20m,贯入过程中最大压桩力1600~1700kN仅能满足地表以下13m桩长的贯入需求,此时桩端土 $SPT-N=30$ ,后续静载荷试验表明,单桩极限承载力为1300kN。武力等(2001)<sup>[6]</sup>报道了因桩体穿越砂层无法正常贯入的案例。李林涛等(2003)<sup>[7]</sup>介绍了混凝土方桩静力贯入淤泥质砂层的实例,其中混凝土方桩截面尺寸为400mm×400mm,桩长为20m。

《建筑桩基技术规范》JGJ 94—2008强调,静压桩贯入过程中单程压桩间隔时间至关重要,较长时间间隔将导致桩周土体强度恢复进而造成静压桩再次贯入困难。韩选江(1996)<sup>[8]</sup>报道了淤泥质黏土地基中4根静压混凝土方桩的工程性状,发现沉桩结束半小时后沉桩阻力增长幅度约36%~66%,变化显著。各地方性规范也强调贯入过程中单程压桩间隔时间不能太长。国内对静压桩终止压桩条件没有统一标准,然而,各地方性规范却给出了适用于各自地区的标准,以施工桩长或终止压桩力作为终压标准,特殊情况下结合复压来实现单桩承载力的控制。例如:广东汕头地区静压桩终压控制标准为:终止压桩力不得小于单桩承载力特征值的1.5~1.7倍;对于14~21m长桩而言,终止压桩力必须大于单桩承载力特征值的1.7~2.0倍,且至少复压3次以上;对于桩长小于14m的桩而言,压桩力应达到单桩承载力特征值的2.0~2.5倍,且至少复压3次以上;当桩长大于21m时,终压控制标准以设计桩长为主,终止压桩力为辅。湖北省武汉市同样对静压桩终压控制标准作出了规定<sup>[9]</sup>。广东地区技术规范对静压桩基础作出如下规定:

(1) 抗浮设计静压桩以设计桩长作为终压控制标准。试桩在沉桩结束24h内进行复压直至达到设计承载力,复压过程中桩顶无附加沉降且桩长能满足工作需要则认为试桩符合要求;

(2) 在压桩机械允许的情况下优先选用高承载力静压装置,否则就要对其进行复压,复压次数不应多于2次,且持荷时间不应超过10s。

马来西亚的一些工程咨询公司同样建议对静压桩实行终压控制<sup>[10]</sup>,规定摩擦桩以设计桩长作为终压控制标准,端承桩则以终止压桩力作为终压控制标准,且最终压桩力应该达到设计承载力的2.5倍,压桩机持荷时间不得少于30s。中国与马来西亚终压控制标准最主要的不同在于最终压桩力的等级。另外,马来西亚终压控制标准没有对复压进行规定。

单桩终止压桩力与极限承载力的关系是众多学者比较关心的一个问题,且现有文献介

绍较少。一般而言,终止压桩力不等同于单桩极限承载力,但与其密切相关。试验研究表明,对于黏性土地基长桩而言,极限承载力一般要大于终止压桩力。对于高灵敏性及高固结性黏土,土体强度恢复后,单桩极限承载力能达到最大压桩力的2~3倍<sup>[11]</sup>。

韩选江(1996)<sup>[8]</sup>对贯入黏性土地基中相同桩长(23.8m)预制混凝土桩性状进行了比较。试桩终止压桩力分别为750kN及900kN,但单桩极限承载力仅为800kN。认为贯入过程中沉桩阻力主要来源于桩端阻力,而单桩极限承载力则主要由桩侧摩阻力提供。张岩等(1998)<sup>[12]</sup>报道了一31层建筑物的桩基工程实例。该桩基工程采用1208根混凝土桩,设计承载力特征值为2200kN,采用5200kN静力压桩机施工,施工过程中最小压桩力为4500kN,施工完成后约90%基桩能够达到设计承载力。可见,单桩极限承载力与其经受的最大压桩力密切相关。

国内静力压桩技术还应用在地基处理及已有基础加固方面,称之为锚杆静压桩<sup>[13~17]</sup>。20世纪80年代,锚杆静压桩在国内首次应用<sup>[5]</sup>。在应用过程中,锚杆依靠静力贯入地基以支撑原有结构物基础,然后与原有基础连接在一起以承担原有建筑物荷载,此方法适用于短桩混凝土基础及浅基础。锚杆静压桩由几节短桩组成,且最大压桩力不得大于单桩设计承载力的1.5倍。

### 1.1.2 静压预应力混凝土管桩相比其他桩型的优势

相比其他施工方法而言,静压预应力混凝土管桩具有其独特优势:

(1) 静力压桩法施工无噪声,震动小,对周围环境影响较小,适合于市区、具有精密设备地区及其他对施工环境要求高的地区施工。

(2) 相比锤击法施工,准静态压桩力能够保证贯入过程中桩身完整性。贯入过程中桩身残余摩阻力的存在起到了预应力的作用,延缓了混凝土的开裂,提高了桩体结构承载能力。

(3) 预应力混凝土管桩承载力高,工厂化生产,能有效节约建筑材料及工程造价。静压法施工速度快,且沉桩过程中贯入阻力可由静压桩机压力表读出,能够动态监测沉桩阻力的变化。

(4) 静压桩施工无泥浆污染。相比钻孔灌注桩施工产生大量的废弃泥浆而言,静压桩施工更环保,无污染。

### 1.1.3 静压预应力混凝土管桩的不足

随着大型建筑物的兴起,静力压桩法应用由多层、低承载力向高层、高承载力发展,但其在应用过程中也暴露出了众多问题:

(1) 对于最大压桩力小于240t的静力压桩机而言,静压桩很难穿透砂土层。穿透5~6m密砂层,所需最小吨位的静力压桩机为400t。对于含有大量岩石的地层而言,静力压桩法不太适用,也就是说静力压桩法受地层情况影响较大。

(2) 大型静压桩机自重可能超过地基本身承载力,造成静压桩机下陷。

(3) 静力压桩机桩箍的设计较为困难,既要能夹紧桩身,又不至于将桩身夹碎。

(4) 静压桩机工作所需空间较大,对于紧邻建筑物桩基施工较为困难。

(5) 静压桩属于典型的挤土桩,挤土效应对周围环境造成不利影响<sup>[18,19]</sup>。例如对周边建筑物、构筑物、道路及地下管道造成破坏;静压桩水平抗力小,抗弯抗剪性能差,在

挤土效应严重地区, 容易造成管桩断裂。

## 1.2 国内外研究现状综述

### 1.2.1 桩端阻力与桩侧摩阻力分离试验研究

国内外对于桩端阻力及侧摩阻力分离的研究可以分为两类: 一类为模型桩试验, 主要借助于模型槽或离心机实现, 即在模型桩(钢桩或混凝土桩)桩端及侧壁安装测力元件, 或者将桩端和桩身经过特殊处理, 以测得桩体贯入过程中桩端阻力及侧壁阻力, 从而推得足尺桩贯入过程中桩端阻力及侧摩阻力。另一类为足尺桩试验, 借助于现场原位试验, 预先在桩身或桩端安装测试元件, 以测试贯入过程中桩端阻力及桩侧摩阻力。

Kerisel (1962)<sup>[20]</sup>采用不同规格的平底探头(直径为45~320mm)在不同密实度均匀石英砂中进行大量试验, 观测到了端阻力及侧摩阻力随深度变化的过程。

Banerjee 等 (1982)<sup>[21]</sup>通过桩身安装测试元件, 实现了桩体贯入模型槽过程中应力及土体位移测试。

西南交通大学利用柔性边界标定罐, 分别用面积为 $10\text{cm}^2$ 、 $6.16\text{cm}^2$ 、 $4.52\text{cm}^2$ 、 $2.54\text{cm}^2$ 的单桥探头, 对标准砂进行了等压力静力触探试验研究。

陈维家等 (1988)<sup>[22]</sup>利用面积为 $15\text{cm}^2$ 的静力触探探头对长沙地区粗、中、细砂在不同密实度下性状进行了试验研究, 并利用白光散斑光测技术观测到了直径为2cm的探头半模贯入过程中土体位移场及其发展规律。

White (2002)<sup>[23]</sup>通过平面应变试验箱及离心机静压桩模型试验, 动态地观测到了模型桩沉桩位移场, 研究了土体种类及初始密度对其影响, 提出了桩端和桩侧摩阻力分布的预测“竖向拱线理论”, 对砂土中静压桩机理进行了探讨。

胡立峰等 (2009)<sup>[24]</sup>利用液压千斤顶将管内壁贴有应变片的钢管桩(外径40mm, 壁厚0.8mm)压入 $3.0\text{m}\times 3.0\text{m}\times 4.5\text{m}$ 的大型模型槽, 观测到了模型桩贯入过程中端阻力及侧壁阻力变化, 并对后期静载荷试验进行了观察。

周健等 (2009)<sup>[25]</sup>通过模型槽试验对密实砂中静压桩沉桩过程进行了分析, 对桩体贯入过程中动端阻力、动侧摩阻力的发展规律及临界深度问题进行了揭示。

足尺桩试验方面, Broms 和 Hellman (1968)<sup>[26]</sup>通过监测沉桩过程中桩身下部压缩变形成功分离了贯入过程中侧摩阻力及端阻力。

张明义等 (2000)<sup>[27]</sup>通过安装自制桩端压力传感器测得了静压桩贯入层状土地基中桩端阻力变化情况。自制压力传感器由钢板、贴有应变片的钢管焊接而成, 通过实验室标定获得应力-应变关系, 并通过桩身上拔时桩端不参与工作获得桩侧摩阻力。

陈全福等 (2002)<sup>[28]</sup>在进行静压预制桩现场试验研究中, 提出了预制桩成型过程中桩端埋置钢弦式土压力盒的方法, 该方法能够记录贯入过程中桩入土深度及端阻力。此试验没有行之有效的方法获得桩侧摩阻力, 而且预制桩制作时桩端埋置土压力盒有一定难度, 土压力盒可靠性也是值得考虑的问题。

施峰 (2004)<sup>[29]</sup>研究PHC管桩荷载传递时, 用型钢或钢筋笼设置好测力元件后插入管桩桩孔, 然后灌水泥浆, 与管桩合为一体, 这种方法加大了管桩截面刚度, 在一定程度

上改变了桩体受力状态。

冷伍明等(2004)<sup>[30]</sup>研究基桩现场试验时,提出了预制管桩应变计设置方法和工艺,通过在预制桩制作时预埋一块钢板,在钢板上粘贴应变片,预制桩制作时预埋穿线管,使应变计导线从桩身内部通过,还提出了钢筋混凝土预制管桩侧向土压力盒安装方法。

俞峰(2004)<sup>[31]</sup>在香港地区通过静压6根安装振弦式钢筋应力计的H型钢桩,实现了贯入过程中桩身轴力监测,但这种传感器的布设方法对PHC管桩显然是不合适的。

张永雨(2006)<sup>[32]</sup>,潘艳辉等(2007)<sup>[33]</sup>进行了PHC管桩中预埋钢筋计的现场测试,在静压桩贯入过程中测得桩身轴力,由于管桩生产过程温度高,要用高温应变计,成本高且存活率低,该方法难以推广。

Abdul Aziz和Lee, S. K. (2006)<sup>[34]</sup>研制了一种可回收式的应变测试计,待沉桩结束后用支爪固定在管桩孔中测试,这是对传统测试方法的有益改进,但这种测试方法仅适用于沉桩完成以后的静载荷试验阶段应力测试,不能用于沉桩过程的测试。

近年来光纤传感测试技术蓬勃发展,与传统测试方法相比,光纤测试具有许多优点。在光纤测试研究方面,余小奎(2006)<sup>[35]</sup>与南京大学光电传感工程监测中心合作,利用光纤传感监测技术中的布里渊光时域反射计(BOTDR)对锤击PHC管桩成功进行测试。但测试是在每隔2m打桩停歇时间进行,每次采样时间需要15min,这对于研究贯入过程的静压桩测试显然是不允许的。

A. Klar等(2006)<sup>[36]</sup>进行了单桩静载过程中采用BOTDR分布式光纤技术及布设离散传感器的比较,并从经济性方面进行了阐述。

宋建学等(2007)<sup>[37]</sup>采用BOTDR分布式光纤技术成功对静载过程中后注浆大直径超长桩桩身应变分布进行了监测。

魏广庆等(2008)<sup>[38]</sup>采用布里渊时域反射技术(BOTDR)对灌注桩进行了分布式应变监测,取得了较为理想的效果。

邢皓枫等(2009)<sup>[39]</sup>进行过PHC管桩静载阶段的BOTDR方法测试。

### 1.2.2 静力触探估算单桩极限承载力

静力触探估算单桩极限承载力作为一种行之有效的方法近些年来得到广泛应用。利用单桥静力触探估算单桩极限承载力经验公式在我国较为成熟<sup>[40]</sup>。目前单桥静力触探基本废除,双桥静力触探技术应用广泛,众多学者试图建立其测试指标与单桩极限承载力的关系,并取得了一系列成果。

20世纪70年代,铁路触探组(1979)<sup>[41]</sup>基于试桩结果统计分析提出了静力触探估算打入混凝土桩极限承载力的综合修正法。

王钟琦(1986)<sup>[42]</sup>提出了利用双桥静力触探成果估算单桩极限承载力的方法。

陈继成(1987)<sup>[43]</sup>给出了静力触探成果与单桩极限承载力之间的经验关系公式。

魏杰(1994)<sup>[44]</sup>结合工程实例给出了静力触探与单桩贯入机理的计算模式、贯入阻力影响范围及贯入阻力临界深度的理论解,并在此基础上推导了静力触探指标与单桩竖向承载力理论相关方程。

刘俊龙(2000)<sup>[45]</sup>通过双桥静力触探对若干工程地基土的测试,并与单桩竖向静载荷试验结果比较,提出了适合福州地区砂土层地基静压预制桩单桩极限承载力预测公式。

赵春风等 (2003)<sup>[46]</sup>在测得单桩极限侧摩阻力和极限端阻力的基础上,提出了静力触探估算单桩极限承载力的修正公式。

张明义等 (2007)<sup>[47]</sup>结合双桥静力触探成果提出了计算静压桩沉桩阻力的综合调节系数法。

樊向阳等 (2007)<sup>[48]</sup>通过工程实例对比并运用数理统计方法,给出了单桥静力触探与双桥静力触探指标之间的经验公式,并对公式的适用性进行了探讨。

刘永保 (2009)<sup>[49]</sup>通过工程实例分析了经验参数法与静力触探方法估算单桩极限承载力的应用。

俞峰等 (2011)<sup>[50]</sup>在 ICP 及 UWA 设计方法基础上发展了 HKU 设计方法,并对这三种方法的优缺点进行了对比。

刘俊伟 (2012)<sup>[51]</sup>在已有设计方法的基础上,提出了综合考虑土塞效应、挤土效应及侧阻退化效应的静力触探设计方法——ZJU 设计法,该方法以静力触探锥尖阻力为基本参数。

国外对静力触探估算单桩极限承载力方法研究较为广泛,如 Dutch 法<sup>[52]</sup>、LCPC 法<sup>[53]</sup>等,其中以 Jardine 等人提出的 ICP 设计方法及西澳大学提出的 UWA 设计方法较为著名<sup>[54,55]</sup>。我国《建筑桩基技术规范》JGJ 94—2008 及《上海地基基础设计规范》DGJ 08—11—2010 给出了双桥静力触探确定单桩极限承载力经验公式。美国石油协会已经将 ICP、UWA 设计方法纳入海洋平台设计规程。

### 1.2.3 桩身残余应力性状研究

静压桩贯入过程中,因桩顶卸荷内锁于桩身的力称为施工残余应力,施工残余应力的存在对桩基承载力具有重要影响。早在 1969 年, Hunter 等<sup>[56]</sup>对施工过程中桩身残余应力现象进行了描述,认识到了桩身残余应力对桩基承载力的影响。

Gregersen 和 DiBiagio (1973)<sup>[57]</sup>对松砂中预制桩施工残余应力进行了报道。

Cooke 等 (1973)<sup>[58]</sup>通过预先在桩身安装测试元件对静压桩沉桩过程进行了监测,同样发现了残余应力现象。1979 年,其对钢管桩及钻孔灌注桩桩身残余应力进行了对比研究,发现静载荷试验过程中钻孔灌注桩桩身残余应力不可忽略不计<sup>[59]</sup>。

Vesic (1977)<sup>[60]</sup>指出桩身残余应力对桩基承载力具有重要影响。

Holloway 等 (1978)<sup>[61]</sup>在 Vesic 研究基础上指出静载荷试验过程中忽略残余应力将高估桩侧摩阻力而低估桩端阻力。张文超 (2007)<sup>[62]</sup>采用有限元软件对卸载后桩身残余应力进行了数值模拟,同样得出了上述结论。此观点得到了 Robert<sup>[63]</sup>的认可。

O'Neill 等 (1982)<sup>[64]</sup>试验研究发现,桩长范围内残余应力方向是变化的,并给出了中性面的概念,指出中性面以上残余应力方向向下,中性面以下残余应力方向向上。

Briaud 和 Tucker (1984)<sup>[65]</sup>基于标准贯入试验结果荷载传递曲线,提出了一种考虑残余应力的砂土地基中桩基承载力预测方法,并利用该方法对 33 根桩承载力进行了预测。同年, Goble 和 Hery<sup>[66]</sup>对锤击桩残余应力进行了研究。

Rieke 和 Crowser (1987)<sup>[67]</sup>通过静载荷试验对砂土地基中 4 根规格为 W14×145 的 H 型桩贯入过程产生的施工残余应力进行了研究。试验表明,桩身残余应力对极限桩端阻力及极限桩侧摩阻力具有重要影响,通过后续竖向抗压及抗拔试验可以明显地减小桩身残余应力。同年, Poulos<sup>[68]</sup>采用边界元方法对沉桩引起的残余应力进行了预测。

Darrag 和 Lovell (1989)<sup>[69]</sup>基于波动方程提出了锤击桩残余应力预测的数值方法。

Randolph 等 (1991)<sup>[70]</sup>认为充分考虑桩身残余应力对认识桩端阻力及桩侧摩阻力分布具有重要影响,并结合试验进行了说明。

Kraft (1991)<sup>[71]</sup>认为残余应力是临界深度产生的重要原因,此观点同样得到了 Al-taee 等<sup>[72]</sup>及 Fellenius<sup>[73]</sup>的认可。

Danziger 等 (1992)<sup>[74]</sup>研究发现,桩端残余应力与桩端阻力密切相关,桩端阻力越大,桩端残余应力越大。Costa 等 (2001)<sup>[75]</sup>通过参数分析方法同样得出了上述结论。

Massad (1992)<sup>[76]</sup>通过构建数学模型对桩端残余应力进行了模拟,认为残余应力对桩顶沉降具有重要影响。

Maiorano 等 (1996)<sup>[77]</sup>对不同地质条件下不同施工方法对桩身残余应力影响进行了研究。

Alawneh 等 (2001)<sup>[78]</sup>给出了桩端残余应力预测公式,该公式综合考虑了桩身弹性模量、桩型及桩周土的影响。

Paik 等 (2003)<sup>[79]</sup>对比分析了开口管桩及闭口管桩残余应力分布情况。研究表明,开口管桩桩身残余应力性状明显不同于闭口桩。

张明义 (2001)<sup>[80]</sup>通过桩底设置自制桩端压力传感器的现场试验对粗砾砂土中预制混凝土方桩桩端残余应力进行了研究。

Zhang 和 Wang (2007)<sup>[81]</sup>研究发现,H 型钢桩桩身残余应力随贯入深度呈指数型增长趋势,对摩阻力影响主要体现在浅层范围内。

寇海磊 (2008)<sup>[82]</sup>认为压桩完成后桩顶回弹是桩身残余应力的外在表现,建议量取单程压桩结束瞬时桩顶残余回弹量,尝试从宏观上对桩身残余应力进行研究。

Zhang 等 (2009)<sup>[83]</sup>研究表明,静压 H 型钢桩桩身残余应力大于锤击 H 型桩,残余应力的存在对桩侧摩阻力及桩端阻力具有重要影响。

俞峰等 (2011)<sup>[84,85]</sup>通过静压桩身安装测试元件的 H 型钢桩发现,循环加载及循环次数对桩身残余应力具有重要影响,并就其对 O-Cell 试桩法、抗拔承载力及土塞效应影响方面进行了阐述。

刘俊伟等 (2012)<sup>[86]</sup>认为沉桩方法对预制桩残余应力具有重要影响,并通过计算模拟对此进行了研究。

刘俊伟等 (2012)<sup>[87]</sup>从能量守恒角度出发,建立了施工全过程能量平衡方程,表明桩长径比与剪切带摩擦性状对桩身残余应力具有重要影响。

#### 1.2.4 桩基承载力时间效应

沉桩结束后桩基承载力随时间增长的现象称为桩基承载力时效性,最初报道来源于 1933 年帕塔列耶夫对码头打入桩的研究。通过对比新近打入桩与 106 年前打入桩发现,桩基承载力后者为前者的 2.25 倍。在随后几十年中,国外众多工程技术和研究人员积累了一些宝贵数据。

1940 年,丹麦技术人员通过对冰碛软黏土地基长度 16m、直径 43cm 木桩研究发现,休止期 7d 后桩基承载力增长约 1.34 倍。

Terzaghi 和 Peck (1948)<sup>[88]</sup>在其著作《Soil Mechanics in Engineering Practice》中阐述了软黏土夹粉砂地基中桩长 26m、截面为 300mm×300mm 方桩沉桩完成 33d 后,桩侧摩阻力增长了 3.39 倍。

1951年,美国学者分别对软黏土地基中混凝土方桩及钢桩进行了试验研究,发现混凝土方桩休止300d后承载力增长约2.3倍;钢桩沉桩结束30d后,承载力增长约2.3倍。

1955年,美国工程技术人员对粉质软黏土地基直径为15cm、长度为4.5m钢桩进行了试验研究,发现休止期1个月承载力增长了约5.15倍。

1961年,苏联学者对截面35cm×35cm、长度介于9~14.5m之间钢筋混凝土方桩打入软黏土地基进行了试验研究,发现沉桩186d后,桩基承载力是沉桩初期的2倍。

1961年,日本技术研究人员在横滨地区对直径30cm、桩长6.6m钢桩打入软黏土地基2h、1d、7d、21d及28d后承载力进行了测试,发现28d时桩基承载力是成桩后2h的2.5倍。

1961年,挪威科学家对粉质软黏土中直径分别为35cm、15cm,桩长为13.1m木桩进行了长期试验研究,首次静载试验796d后进行了第二次试验,两次结果分别为8MPa和29MPa,增长了近4倍。

1982年, Bartolomcy AA、Yushkolv BS对饱和软黏土中群桩时间效应进行了研究。

1984年, Nauroy JF、Letirant在法国 Quiou、Plouasne及Pisou地区同一个场地钙质砂中进行了抗拔桩时间效应研究,试验用钢管桩直径30cm、壁厚8mm、桩长23m。研究表明, Quiou和Plouasne场地,桩侧摩阻力不受休止时间影响;Pisou场地抗拔桩时间效应显著,沉桩一周后侧摩阻力增长约5倍。

Shek等(2006)<sup>[89]</sup>对打入全风化花岗岩桩长分别为56m、58m H型桩进行了时效性研究,表明全风化花岗岩地区桩侧摩阻力时效系数介于0.53~1.06之间。

我国桩基承载力时效性试验研究起步较晚,开始于20世纪50年代。1958年上海日晖港及天津塘沽钢筋混凝土方桩承载力时效性试验为我国桩基承载力时效性研究拉开了序幕。

1960~1964年,交通部第三航务局结合上海地区码头建设对黏性土地基中预制方桩及H型桩时效性进行了研究,发现桩基承载力前期增长快,后期增长慢,增长幅度达1.37~1.6倍。

李雄、刘金砺(1992)<sup>[90]</sup>借助天津大港电厂二期工程,对饱和软土中预制桩承载力时间效应进行了研究,表明单桩承载力时间效应主要表现为侧摩阻力增长。

张新奎等(2000)<sup>[91]</sup>发现,粉细砂地基中预制方桩侧摩阻力时效系数介于1.54~1.85之间,桩端阻力时效系数介于1.1~1.2之间,侧摩阻力时效性更为显著。

张明义等(2002)<sup>[92]</sup>提出利用隔时隔压方法对桩基承载力时效性进行研究,并取得了一定成果。

王成平(2003)<sup>[93]</sup>对埋置于软土地基中开口PHC管桩时效性进行了研究,发现25d休止期时单桩极限承载力是沉桩结束后180d的70%。

俞峰(2004)<sup>[31]</sup>对砂性土地基中静压H型桩进行了观测,首次静载荷试验34d后进行了第二次静载荷试验发现,单位桩侧摩阻力由167kPa增长到189kPa,桩端阻力由34.2MPa增长到45.0MPa,砂性土地基中时间效应显著。

### 1.3 课题的提出

预制桩沉(贯)入过程中性状及承载力研究是一个传统课题。压桩开始前终压控制标

准、压桩过程中桩身及桩周土性状、沉桩结束后休止期内单桩承载力变化一直是众多学者致力于研究的领域。但大部分研究基于锤击桩展开,静压桩沉桩前后性状涉及较少,这一点可以从上述研究现状看出,究其原因主要与静压桩适用范围有关。不同沉桩方式(锤击、静压)对终压控制标准、沉桩过程中桩身及桩周土体性状及沉桩结束后承载力的发展变化具有重要影响。

预制桩贯入过程中施工残余应力对桩身荷载的传递及静载荷试验过程中桩基承载力确定都具有重要影响。国内对施工残余应力研究较少,主要是基于H型桩及其他预制实体桩展开,对开口PHC管桩施工残余应力未见报道,而其施工残余应力性状与其他预制桩型具有显著差别。沉桩结束后施工残余应力时间效应对桩基承载力发展具有重要影响,有必要对其进行系统全面的研究。

近年来,静压桩应用越来越多,对其性状研究也趋于广泛与全面,但大多集中于某一方面,如挤土效应、土塞效应、承载力时效性,有些方面研究较少,如施工残余应力及其休止期内发展变化情况。但是静压桩沉桩前后所表现出的桩体性状并不是单一因素所能决定的,而是众多因素共同作用的结果。Zhang等(2009)<sup>[83]</sup>将沉桩过程中桩基所表现出的性状称为“施工效应”,但沉桩前单桩极限承载力估算、沉桩过程中桩端阻力与桩侧摩阻力分离对研究贯入过程中桩体性状具有重要影响,尤其是贯入过程中沉桩阻力的分离是研究施工效应对桩体性状影响的重要基础,现分述如下:

(1) 静力触探估算单桩极限承载力。桩基设计初始阶段需要预先估算工程场区单桩极限承载力,静力触探贯入过程中探杆受力与静压桩相似,因此,利用静力触探资料估算单桩极限承载力成为一种行之有效的方法。单桩极限承载力的估算是沉桩开始前最重要的准备工作之一。

(2) 沉桩过程中桩端阻力及侧摩阻力的分离。贯入过程中沉桩阻力包括桩端阻力及桩侧摩阻力。以往众多研究未将桩端阻力及桩侧摩阻力分离,概念模糊。只有将沉桩阻力沿深度分离成侧摩阻力和端阻力,才能更好地研究贯入机理及承载力。分离侧摩阻力和端阻力的测试试验成为制约桩基性状研究的瓶颈问题。

(3) 土塞效应。开口PHC管桩贯入过程中土体涌入管内形成的土塞对桩端阻力发挥程度的影响效应称为土塞效应。土塞效应是静压开口PHC管桩区别于其他预制实体桩最明显的特征之一。静压开口PHC管桩沉桩过程中沉桩阻力由桩端壁阻力、土塞阻力及桩侧摩阻力组成,土塞效应的存在对三者均具有重要影响。

(4) 挤土效应。静压开口PHC管桩贯入过程中桩周土体位移场及应力场发生变化,积聚的超孔隙水压力逐渐消散,其性状变化制约着休止期内桩基承载力的发展。与其他预制实体桩完全挤土性状不同,静压开口PHC管桩属于部分挤土桩,沉桩过程中桩周土体位移场及应力场差别较大。

(5) 残余应力。沉桩过程中因桩顶卸载而内锁于桩身的力称为施工残余应力。施工残余应力的存在对桩基承载力具有重要影响,对于单桩竖向静载荷试验,忽略残余应力将高估中性面以上桩侧摩阻力,低估中性面以下桩侧摩阻力及桩端阻力。对于单桩抗拔静载荷试验,忽略残余应力将低估中性面以上桩侧摩阻力,高估中性面以下桩侧摩阻力及桩端阻力<sup>[61~63]</sup>。开口PHC管桩施工残余应力可分为内、外壁两部分,此为与其他预制桩型显著差别之一。

(6) 时间效应。沉桩结束后桩基承载力具有时效性,主要与桩周土固结、超孔隙水压力消散及土体老化有关。多数情况下,桩基承载力随休止时间逐渐增长<sup>[11,94,95]</sup>,特殊情况