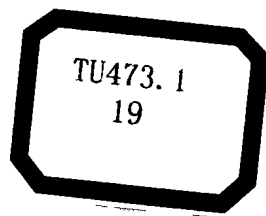




# 桩承载力自平衡测试 技术及工程应用

龚维明 戴国亮 著

中国建筑工业出版社



# 桩承载力自平衡测试 技术及工程应用

龚维明 戴国亮 著

中国建筑工业出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

桩承载力自平衡测试技术及工程应用 / 龚维明, 戴国亮  
著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2006

ISBN 7-112-07970-5

I. 桩... II. ①龚... ②戴... III. 桩承载力-测试  
技术 IV. TU473.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 157465 号

本书是关于桩承载力自平衡测试技术的一本专著, 该书系统介绍了这项技术的基本原理、基本理论及其在典型房屋建筑工程和桥梁工程中的具体应用, 包括润扬长江大桥、苏通长江大桥、杭州湾跨海大桥等国家重点工程。全书包括基本理论、在典型桩型中的应用、在桥梁工程中的应用及在特殊岩土中的应用与展望 4 篇共 11 章。

本书适合桩基检测机构、设计院和质量监督等部门技术人员, 高等院校师生参考使用。

\* \* \*

责任编辑: 王 梅  
责任设计: 赵 力  
责任校对: 刘 梅 王金珠

## 桩承载力自平衡测试技术及工程应用

龚维明 戴国亮 著

\*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

新华书店经销

北京天成排版公司制版

北京建筑工业印刷厂印刷

\*

开本: 787 × 1092 毫米 1/16 印张: 12 $\frac{1}{4}$  字数: 304 千字

2006 年 2 月第一版 2006 年 2 月第一次印刷

印数: 1—4,000 册 定价: 36.00 元

ISBN 7-112-07970-5

(13923)

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)

本社网址: <http://www.cabp.com.cn>

网上书店: <http://www.china-building.com.cn>

# 前 言

随着高层建筑及大跨桥梁的兴建，大直径、大吨位、超长桩应用得越来越多，确定其单桩承载力最可靠的办法是静载荷试验。传统的桩基静载荷试验方法有两种，一是堆载法，二是锚桩法。其存在的主要问题是：前者必须解决几百吨甚至上千吨的荷载来源、堆放及运输问题，后者必须设置多根锚桩及反力大梁，这样不仅所需费用昂贵，时间较长，而且易受吨位和场地条件限制，以致许多大吨位桩和特殊场地的桩承载力往往得不到可靠的数据，基桩的潜力不能合理发挥，这是桩基础领域面临的一大难题。

针对上述情况，国外发达国家提出在桩身中埋设荷载箱的测试方法，称之为 O-cell 法，国内称为自平衡法。

作者在理论上对自平衡法的机理进行了深入探讨，并研制了加载设备及测试方法，于 1996 年开始在工程中推广应用，目前已完成 300 多个测试项目，包括我国多个重大工程项目，为优化设计提供了依据，节约了工程造价，取得了良好的经济效益。目前我国已将该法纳入相关规程。

本书是作者近 10 年理论研究与工程应用的心得体会，在此 10 年间，作者经历了失败时的沮丧和成功时的喜悦。

在编著该书过程中，作者得到了各位前辈及同行的鼓励和支持，也得到了许多博士生及硕士生的帮助，更得到了众多设计人员、施工单位、建设单位的鼎力相助。由于给予帮助的人实在太多，作者难以在此一一致谢，敬希鉴谅。

鉴于问题的复杂性，该法还有待于进一步研究和经验积累，期待着读者的批评指正，作者深信在广大同行的共同努力下，自平衡测试技术必将日臻完善，在我国桩基工程中得到广泛应用。

编 者

2005 年 12 月 20 日

# 目 录

## 第一篇 基本理论

第一章	基本原理	2
第一节	国内外发展概况	2
第二节	测试准则	7
第三节	荷载箱埋设技术	11
第二章	有限元分析	14
第三章	等效转换方法	27
第一节	托桩荷载传递机理分析	27
第二节	简化转换方法	32
第三节	精确转换方法	38
第四节	两种转换方法对比分析	42
第五节	本章结论	43

## 第二篇 在典型桩型中的应用

第四章	在人工挖孔桩中的应用	46
第一节	南宁佳得鑫广场	46
第二节	中科院合肥分院等离子体所实验楼工程	50
第三节	江苏省电网调度中心	52
第四节	南京月牙湖花园君安苑工程	63
第五节	北京西直门交通枢纽立交工程	66
第五章	在普通钻孔灌注桩中的应用	69
第一节	南京金奥大厦	69
第二节	南京下关商城桩基加固工程	71
第六章	在挤扩多支盘桩中的应用	73
第一节	湖州中心医院	73
第二节	嘉兴龙威大厦	76
第七章	在沉管灌注桩中的应用	80
第一节	南京江浦实业银行	80
第二节	泰州师范学校体育馆	81
第八章	在管桩中的应用	83
第一节	南京长阳花园	83
第二节	东南大学江宁校区	85

## 第三篇 在桥梁工程中的应用

第九章	在桥梁工程中的应用	90
-----	-----------	----

# 目 录

第一节	润扬长江大桥 .....	90
第二节	东海大桥 .....	103
第三节	苏通长江大桥 .....	109
第四节	杭州湾跨海大桥 .....	118
第五节	西堠门大桥 .....	124
第六节	越南大翁桥和芹玉桥 .....	127

## 第四篇 在特殊岩土中的应用与展望

第十章	在特殊岩土中的应用 .....	132
第一节	多年冻土地区的应用 .....	132
第二节	岩溶地区的应用 .....	140
第三节	黄土地区的应用 .....	146
第四节	井筒式地下连续墙基础中的应用 .....	168
第十一章	总结与展望 .....	173
第一节	国内外自平衡试桩法的比较 .....	173
第二节	桩承载力自平衡法的几个关键问题讨论 .....	180
第三节	自平衡法在基桩研究领域的广泛应用 .....	183
主要参考文献	.....	186

# 第一篇

---

## 基本理论

# 第一章 基本原理

## 第一节 国内外发展概况

### 一、桩承载力确定方法

随着高层建筑、桥梁工程、海洋工程建设项目的增多，桩基础的应用量越来越大。如何正确评价单桩的承载能力，选择合理的设计参数是关系到桩基础是否安全与经济的重要问题。

确定桩承载力的方法大体可分为两类<sup>[1][2]</sup>：1)单桩承载力直接试验法；2)通过其他手段，分别得到桩端阻力和桩侧阻力然后相加得到，如静力分析计算方法、原位测试中的标准贯入法、静力触探法和旁压试验法、十字板剪切试验、圆锥动力触探等。由于后者不是从具体桩上取得的数据，可靠性较差，因此本文主要分析单桩承载力直接试验法。

#### 1. 动力测桩法

动力测桩法一般是在桩顶作用一动力荷载，如瞬态竖向作用力，使桩产生显著的加速度和土阻尼效应。在桩侧安装力、速度、加速度或位移传感器，以量测桩土系统的振动响应，用波动理论分析和研究应力波沿桩土系统的传递和反射，采用时域或频域波形分析和传递函数方法，从而判断桩身阻抗变化和确定单桩承载力。

动测法又分为低应变动测法、高应变动测法和动静试桩法(Briaud J. L., et al., 2000)。低应变动测法主要有球击频率分析法、共振法、机械阻抗法、水电效应法和动力参数法等。高应变动测法主要有波动方程法、锤贯法、波形拟合法、动力打桩公式法、CASE法、TNO法等。

由于低应变法无法在一定程度上激化桩周土的阻力并加以实测，实测的仅是桩土系统的某些动力参数，然后通过经验来估算承载力，所提供的承载力绝非实测的承载力。高应变动测法是建立在一维杆件中应力波传递原理的基础上，试验方法相对于静载荷试验方法简单，费用低，宜于增加检测比例，提高检测结果的代表性，但其依据应力波传播原理，动态成分高，测试结果的可靠性较差。动静试桩法兼有静载荷试验和高应变测试的优点，试验原理简单、费用低、历时短、方便灵活。由于采用简单的牛顿运动定律使方法本身非常直观可信，费用仅为传统静荷载试验的1/4~1/2，对于承载力高或要进行多次重复试验，节约的费用会更加可观，需要的反力物仅为施加荷载的5%~10%，移动起来非常方便。因为是动荷载，试验时间相当短，大大节约工期。另外，用实测桩顶位移的光电激光器可以消除静荷载试验中通过基准梁实测桩顶位移带来的误差，但在我国尚未推广应用，还需要进一步研究其与传统静荷载试验的相关性并改进其分析过程。和静荷载试验相比，100ms的荷载持续时间显然不理想，虽然对比高应变动测，已经延长了8~10倍，克服了

应力波传播现象,大大减少了动态成分,但从本质上讲,仍是一种动测方法,动态现象的存在使得必须通过一些假定来调整实测数据,致使分析方法带有一定的限制条件。例如,当孔隙水压力较大时,现在的分析方法必须用实测孔隙水压力对结果进行修正。

## 2. 静力载荷试验方法

单桩竖向抗压静载试验,就是采用接近于竖向抗压桩实际工作条件的试验方法。荷载作用于桩顶,桩顶产生位移(沉降),可得到单根试桩  $Q-s$  曲线,还可获得每级荷载下桩顶沉降随时间的变化曲线,当桩身中埋设有量测元件时,还可以直接测得桩侧各土层的极限摩阻力和端承力。因此单桩承载力的最直接最可靠的检测方法是静载荷试验,往往可以在统计基础上直接应用于工程设计。同时,单桩静载荷试验还提供非常有效的单桩沉降与桩顶荷载的关系曲线,为桩基变形验算或预测提供了重要资料。

静载荷试验装置包括:加载系统、量测系统和反力系统等,其中常用的反力系统有:锚桩、锚杆、堆载或联合反力系统;以荷载增加方法划分,静载荷试验法主要有:慢速维持荷载法、快速维持荷载法、等贯入速率法、循环加卸载试验法等。

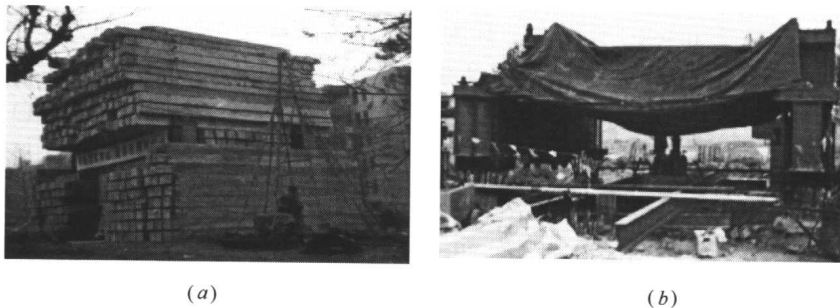


图 1-1 传统静载法现场  
(a)堆载法; (b)锚桩法

一个工程中应取多少根桩进行静载试验,各个部门规范没有统一规定,《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2002)<sup>[3]</sup>规定:同一条件下的试桩数量不宜少于总桩数的 1%,并不少于 3 根;《港口工程桩基规范》(JTJ 254—98)<sup>[4]</sup>规定:工程桩总数在 500 根以下时,试桩不少于 2 根,每增加 500 根宜增加一根试桩;《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—94)<sup>[5]</sup>规定:同一条件下的试桩数量不宜小于总桩数的 1%,且不应少于 3 根。总桩数在 50 根以内时,不应少于 2 根;《公路桥涵施工技术规范》(JTJ 041—2000)<sup>[6]</sup>规定:在相同地质情况下,按总桩数的 1%计,并不得少于 2 根。实际测试时,可根据工程具体情况参考相关规范进行。

静载荷试桩法的缺点是成本高、工程量大和工期长等,但它作为一种标准方法,可提供设计完整可靠的承载力参数,由此可带来巨大的经济效益和避免工程潜在的不安全因素,而且还能积累经验促进其他试桩法的发展。静载荷试桩法费钱费时的主要原因是需要设置专门的反力系统,测试一根灌注桩的承载力,大约需要 2~4 根锚桩提供反力,试验成本成倍增加;如采用堆载反力系统,则运输和安装费用也占很大的比例,同时还受试桩吨位和场地条件的限制(图 1-1)。尤其桥梁工程中的桩基设计,往往由于设计者缺少可靠、有效的单桩承载力数据,而只能采用《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTJ 024—85)中所推荐的设计参数,推荐参数对于地区性问题往往取值偏于保守,使得桩基的安全

系数过大，而造成桥梁桩基工程经济上的浪费。近年来，这一状况有所改善，江阴长江大桥北引桥、荆州长江公路大桥、钱塘江六桥及虎门大桥均采用了静载荷试验，获得了准确、有效的单桩承载力数据，减少了工程桩数，取得了显著的经济效益。但是，静载荷试验费用也是相当可观的，而且试验最大荷载不超过 36000kN(钱塘江六桥，采用“4 锚 1”反力梁体系，2001)。且单桩承载力越高，试桩困难越大，以致许多大吨位桩的承载力往往得不到准确数据，基桩的潜力不能合理发挥，这是桩基础领域面临的一大困惑。如大型桥梁工程中桩多在坡地和水中，而且吨位较大，难以测试，以至得不到准确的承载力数据，所以设计较为保守，造成承载力的浪费。

因此，扶持、改进和提高静载荷试验是很有现实意义的，桩承载力自平衡测试法就是基于改进传统静载荷试验的反力系统发展起来的。

## 二、桩承载力自平衡测试方法

### 1. 自平衡测试方法的发展

用桩侧阻力作为桩端阻力的反力测试桩承载力的概念早在 1969 年就被日本的中山(Nakayama)和藤关(Fujiseki)所提出，称为桩端加载试桩法<sup>[8][9]</sup>。20 世纪 80 年代中期类似的技术也为 Cernac 和 Osterberg 等人所发展<sup>[10]</sup>，其中 Osterberg 将此技术用于工程实践，并推广到世界各地，所以一般称这种方法为 Osterberg-Cell 载荷试验或 O-cell 载荷试验。该法是在桩端埋设荷载箱，沿垂直方向加载，即可求得桩极限承载力。目前该法已应用在钻孔灌注桩、钢桩、预制桩中，美国工程实例有：

(1) 麻省波士顿附近 Saugus 河铁路大桥桥墩基桩，采用钢管桩，长 39m，直径 460mm，壁厚 12.7mm，水上打桩，试桩目的在于测定粉质黏土层所能提供的桩侧摩阻力，以便加以利用，实测单位侧阻力为 29kN/m<sup>2</sup>(图 1-2a)。

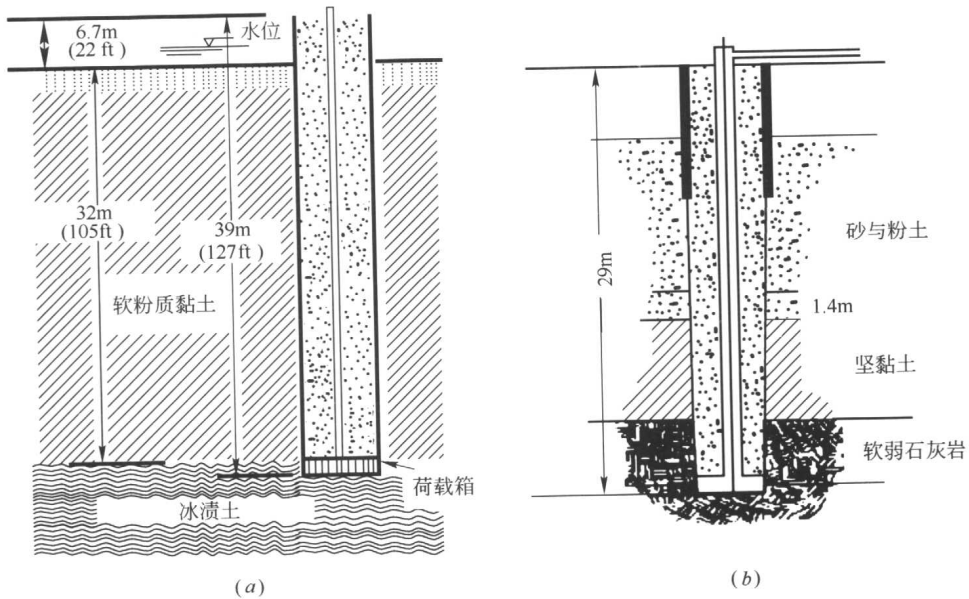


图 1-2 国外 O-cell 试桩  
(a)Saugus 河铁路大桥；(b)Orange 港公路大桥

(2) 佛罗里达州 Orange 港公路大桥桥墩基桩, 水深 24m, 船上打桩, 桩穿越砂与粉土层及坚黏土层, 嵌入软弱而性质多变的石灰岩。进行 3 根钻孔桩试验, 采用堆载法、锚桩法与 O-cell 测桩对比, 试验结果吻合(图 1-2b)。

(3) 麻省波士顿鹿岛水处理厂扩建工程建筑物基桩, 该工程总投资数十亿美元, 为美国特大型工程之一, 桩端持力层为冰渍土, 性质特好, 采用 Osterberg 法作了三根钻孔桩试验, 单桩最大荷载至 30000kN(包括侧阻与端阻), 远未达到破坏, 潜力很大, 将打入桩方案改为钻孔桩, 节省大量资金。

近几年欧洲及日本、加拿大、新加坡等国和香港、台湾地区也广泛使用该法<sup>[11]~[14]</sup>, 例如:

(1) 香港九龙广东铁路公司某大楼嵌岩桩, 嵌岩段直径 1m, 深 3m。该试桩目的在于确定嵌岩段的总承载力。测得最大桩端、桩侧荷载均为 14700kN。

(2) 新加坡某工程基桩, 地层为 13.7m 海洋黏土, 下卧含漂石硬黏土。进行了两根试桩, 其中一根为钻孔扩底桩, 其直身部分桩径为 1.2m, 长 51.5m, 扩底直径为 2.4m, 试验测得桩端单位阻力为 2670kN/m<sup>2</sup>, 另一根为直身钻孔桩, 尺寸同前, 试验测得桩端单位阻力为 3500kN/m<sup>2</sup>。以上国家和地区都已有相应的测试规程或指南, 目前该法已应用在钻孔灌注桩、钢桩和预制桩中。

目前国内外上万吨大吨位试桩如表 1-1 所示。

国内外上万吨试桩工程

表 1-1

年 份	地 点	试验荷载	年 份	地 点	试验荷载
2001	Tucson, AZ	151MN	2004	西堠门大桥, 舟山	130MN
2002	San Francisco, CA	146MN	2000	润扬长江大桥, 镇江	120MN
2002	San Francisco, CA	137MN	2003	苏通长江大桥, 南通	100MN
1997	Apalachicola River, FL	135MN			

在国内, 清华大学李广信教授在 1993 年首先将此方法介绍到国内, 并在以后几年指导博士和硕士做了大量的理论研究和模型试验, 但缺乏现场试验的研究<sup>[15]~[17]</sup>。史佩栋从 1996 年来相继介绍了该方法在国外的应用和发展情况<sup>[18][19]</sup>。但是该技术在海外属专利产品, 没有相关技术资料报道。东南大学土木工程学院经过努力于 1996 年率先开始实用性应用<sup>[20]~[23]</sup>, 于 1999 年制定江苏省地方标准《桩承载力自平衡测试技术规程》(DB32/T 291—1999)<sup>[24]</sup>, 并获两项国家专利。2002 年建设部、科技部作为重点推广项目, 2003 年纳入《建筑基桩检测技术规范》(JGJ 106—2003), 2004 年纳入《公路工程动测技术规程》(JTG/TF 81—01—2004)<sup>[25]</sup>。

自平衡测桩法适用于淤泥质土、黏性土、粉土、砂土、岩层以及黄土、冻土、岩溶特殊土中的钻孔灌注桩、人工挖孔桩、沉管灌注桩、管桩及地下连续墙基础, 包括摩擦桩和端承桩。特别适用于传统静载试桩相当困难的大吨位试桩、水上试桩、坡地试桩、基坑底试桩、狭窄场地试桩等情况。

目前该法在北京、上海、天津、重庆、广东、广西、江苏、浙江、江西、安徽、福建、河南、河北、云南、贵州、四川、辽宁、吉林、黑龙江、湖南、湖北、山西、山东、青海、新疆等省市应用, 并用于越南、印度尼西亚等国家的工程。目前已完成特大吨位试

桩：润扬大桥南汊桥南塔试桩，桩径 2.8m，桩长 59m，测得极限承载力为 120MN；舟山西堭门大桥，桩径 2.8m，桩长 40m，测得极限承载力为 130MN<sup>[26]~[30]</sup>。

### 2. 自平衡测试方法的原理

自平衡试桩法是在桩尖附近安设荷载箱，沿垂直方向加载，即可同时测得荷载箱上、下部桩身各自的承载力。

自平衡测桩法的主要装置是一种经特别设计可用于加载的荷载箱。它主要由活塞、顶盖、底盖及箱壁四部分组成。顶、底盖的外径略小于桩的外径，在顶、底盖上布置位移棒。将荷载箱与钢筋笼焊接成一体放入桩体后，即可浇捣混凝土成桩。

试验时，在地面上通过油泵加压，随着压力增加，荷载箱将同时向上、向下发生变位，促使桩侧阻力及桩端阻力的发挥，见图 1-3。由于加载装置简单，多根桩可同时进行测试。东南大学土木工程学院开发了测桩软件，可同时对多根桩测试数据进行处理。

采用并联于荷载箱的压力表或压力环测定油压，根据荷载箱率定曲线换算荷载。试桩位移一般布置 4 个百分表或电子位移计测量。采用专用装置分别测定荷载箱向上位移和向下位移。对于直径很大及有特殊要求的桩型，可对称增加各一组位移测试仪表。固定和支承百分表的夹具和基准梁在构造上应确保不受气温、振动及其他外界因素的影响以防止发生竖向变位。因此，根据读数绘出相应的“向上的力与位移图”及“向下的力与位移图”（图 1-3）及相应的  $s\text{-}lgt$ 、 $s\text{-}lgQ$  曲线，判断桩承载力、桩基沉降、桩弹性压缩和岩土塑性变形。

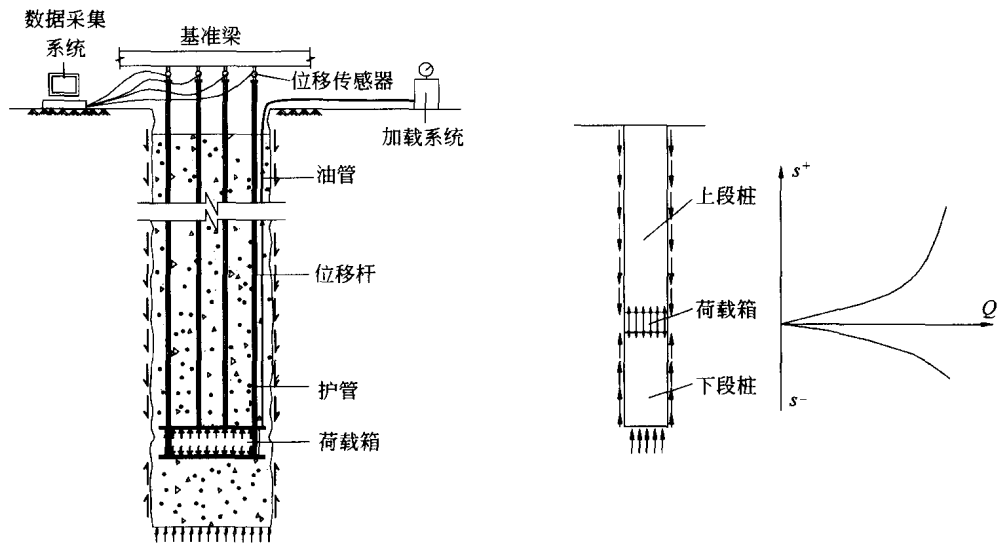


图 1-3 桩承载力自平衡试验示意图

基桩自平衡试验开始后，荷载箱产生的荷载沿着桩身轴向往上、往下传递。假设基桩受荷后，桩身结构完好(无破损，混凝土无离析、断裂现象)，则在各级荷载作用下混凝土产生的应变等于钢筋产生的应变，通过量测预先埋置在桩体内的钢筋应变计，可以实测到各钢筋应变计在每级荷载作用下所得的应力-应变关系，可以推出相应桩截面的应力-应变关系，那么相应桩截面微分单元内的应变亦可求得。由此便可求得在各级荷载作用

下各桩截面的桩身轴力及轴力、摩阻力随荷载和深度变化的传递规律。

由于自平衡试桩法本身的特点,因此可以满足某些特殊的设计要求,有时需要测出桩身上段的极限侧阻力、下段的极限侧阻力以及极限端阻力,可以采用双荷载箱测试技术。该技术是采用两只荷载箱,一只放在桩下部,一只放在桩身某一部位,便可分别测出桩身上段的极限侧阻力、下段的极限侧阻力以及极限端阻力。图 1-4 为该方法荷载箱摆放位置示意图。采用双荷载箱也可以进行后压浆桩测试。下荷载箱可摆在桩端(或附近)。首先进行压浆前两个荷载箱测试,求得桩端承载力、桩身承载力,然后进行桩端高压注浆再进行两个荷载箱测试,这样就可求得压浆对端阻力、桩承载力的提高作用。双荷载箱布置给施工带来不便,但只要在上荷载箱预留孔位,使得下荷载箱位移棒能垂直通过,一般均容易成功。

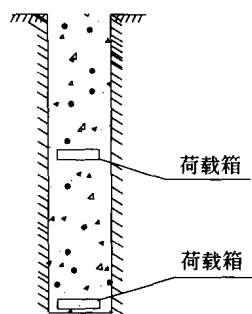


图 1-4 双荷载箱摆放位置示意图

3. 自平衡测试方法的特点
- 该测试方法有以下几个特点:
- (1) 装置较简单,不占用场地,不需运入数百吨或数千吨物料,不需构筑笨重的反力架,可多根桩同时测试,试桩准备工作省时、省力、安全;
  - (2) 该法利用桩的侧阻与端阻互为反力,因而可清楚地分出侧阻力与端阻力分布和各自的荷载-位移曲线;
  - (3) 试验费用省,尽管荷载箱为一次性投入器件,但与传统方法相比可节省试验总费用的 30%~60%,具体比例视桩吨位与地质条件而定;
  - (4) 由于试验方便,费用低,时间省,该法有利于增加试桩的数量,扩大检测面;
  - (5) 试验后试桩仍可作为工程桩使用,必要时可利用预埋管对荷载箱进行压力灌浆;
  - (6) 在下列情况下或当设置传统的堆载平台或锚桩反力架特别困难或特别花钱时,该法更显示其优势,例如:水上试桩,坡地试桩,基坑底试桩,狭窄场地试桩,斜桩,嵌岩桩,抗拔桩等,这些都是传统试桩法难以做到的。

## 第二节 测试准则

### 一、测试时间

在桩身强度达到设计要求的 70% 前提下,成桩到开始试桩的时间可根据具体试桩工程,参照不同部门标准执行。如《建筑基桩检测技术规范》(JGJ 106—2003)规定:对于砂土不少于 10d,对于黏性土和粉土不少于 15d,对于淤泥及淤泥质土不少于 25d。

### 二、加载方式

一般采用慢速维持荷载法,即逐级加载,每级荷载作用下,上、下两段桩均达到相对

稳定后方可加下一级荷载，直到试桩破坏，当一段桩已达破坏，而另一段桩未破坏时，应继续加至两段桩均破坏，然后分级卸载到零。当考虑实际工程桩的荷载特征，可采用多循环加、卸载法(每级荷载达到相对稳定后卸载到零)。当考虑缩短试验时间，对于工程桩作检验性试验，可采用快速维持荷载法，即一般每隔一小时加一级荷载。

### 三、加卸载与位移观察

加卸载分级、位移观察间隔时间及位移相对稳定标准可根据具体试桩工程，参考相应部门规范执行，如对于《公路桥涵施工技术规范》(JTJ 041—2000)，规定如下：

#### 1. 荷载分级

每级加载为预估加载值的  $1/10 \sim 1/15$ ，第一级按两倍荷载分级加载。

#### 2. 位移观测

每级加载后在第一小时内分别于 5min、15min、30min、45min、60min 各测读一次，以后每隔 30min 测读一次。电子位移传感器连接到电脑，直接由电脑控制测读，在电脑屏幕上显示  $Q-s$ 、 $s-lgt$ 、 $s-lgQ$  曲线。

#### 3. 稳定标准

每级加载下沉量，在下列时间内如不大于 0.1mm 时即可认为稳定：

- (1) 桩端下为巨粒土、砂类土、坚硬黏质土，最后 30min。
- (2) 桩端下为半坚硬和细粒土，最后 1h。

#### 4. 终止加载条件

当出现下列情况之一时，即可终止加载：

- (1) 已达到极限加载值；
- (2) 某级荷载作用下，两段桩的位移均是为前一级荷载作用下位移量的 5 倍。若仅一段桩发生此情况，仍需继续加载；
- (3) 某级荷载作用下，两段桩的位移量均大于前一级荷载作用下位移量的 2 倍，且经 24h 尚未达到相对稳定；
- (4) 抗拔试验时，上段累计上拔量超过 25mm，同时下段桩亦超过沉降允许值；
- (5) 总下沉量小于 40mm，但荷载已达荷载箱加载极限，或两段桩累计位移已超过荷载箱行程，加载即可终止。

#### 5. 卸载及测试

(1) 卸载应分级进行，每级卸载一般可为 2 倍加载荷载分级。每级荷载卸载后，应观测两段桩的回弹量，观测办法与加载相同。直到回弹量稳定后，再卸下一级荷载。回弹量稳定标准与加载稳定标准相同。

(2) 卸载到零后，至少在 1.5h 内每 15min 观测一次，开始 30min 内，每 15min 观测一次。

### 四、成果整理和承载力确定

#### 1. 试验概况

整个测试工作整理成表格形式(表 1-2、表 1-3)，并应对成桩和试验过程出现的异常现象作补充说明。

单桩竖向静载试验概况表

表 1-2

工程名称		地 址		试 验 单 位		
试 桩 编 号		桩 型		试 验 起 止 时 间		
成 桩 工 艺		桩 断 面 尺 寸 (mm)		桩 长		
混 凝 土 强 度 等 级	设 计	灌 注 桩 虚 土 厚 度 (m)		配 筋	规 格	配 筋 率 (%)
	实 际	灌 注 充 盈 系 数 (%)			长 度	

综合柱状图

表 1-3

层 次	土 层 名 称	描 述	地 质 符 号	相 对 标 高	荷 载 箱 位 置	试 桩 平 面 布 置 示 意 图
1						
2						
3						
4						
5						

2. 单桩竖向静载试验记录

单桩竖向静载试验记录见表 1-4、表 1-5。根据需要：一般应绘制  $Q-s_{上}$ 、 $Q-s_{下}$ 、 $s_{上}-lgt$ 、 $s_{下}-lgt$ 、 $s_{上}-lgQ$ 、 $s_{下}-lgQ$  曲线。

在实际工程测试时，上述表格及曲线均由计算机自动生成。

单桩竖向静载试验记录表

表 1-4

荷 载 (kN)	观 测 时 间 日/月/时分	间 隔 时 间 (min)	向 上 位 移 (mm)				向 下 位 移 (mm)			
			表 1	表 2	平 均	累 记	表 1	表 2	平 均	累 计

试验：

资料整理：

校核：

单桩竖向抗压静载试验结果汇总表

表 1-5

序 号	荷 载 (kN)	历 时 (min)		向 上 位 移 (mm)		向 下 位 移 (mm)	
		本 级	累 计	本 级	累 计	本 级	累 计

试验：

资料整理：

校核：

当进行桩身应力、应变测定时，应整理出有关数据的记录表和绘制桩身轴力分布、侧阻力分布，桩顶荷载-沉降、桩端阻力-沉降关系等曲线。

3. 极限承载力的确定

根据位移随荷载的变化特性确定极限承载力，不同部门规范确定方法有所不同。如对

建筑基桩，可规定如下：陡变形  $Q-s$  曲线取曲线发生明显陡变的起始点；对于缓变形  $Q-s$  曲线，上段桩极限侧阻力取对应于向上位移  $s^+ = 40\text{mm}$  的荷载；下段桩极限承载力值取  $s^- = 40\text{mm}$  的荷载，当桩长大于  $40\text{m}$  时，宜考虑桩身弹性压缩量；对直径大于或等于  $800\text{mm}$  的桩，可取  $s = 0.05D$  ( $D$  为桩端直径) 的对应荷载。

根据沉降随时间的变化特征确定极限承载力：取  $s-\lg t$  曲线尾部出现明显弯曲的前一级荷载值。根据上述准则，可求得桩上、下段极限承载力实测值  $Q_u^+$ 、 $Q_u^-$ 。该法测试时，荷载箱上部桩身自重方向与桩侧阻力方向一致，故在判定桩侧阻力时应当扣除。

该法测出的上段桩摩阻力方向是向下的，与常规摩阻力方向相反。传统加载时，侧阻力将使土层压密，而该法加载时，上段桩侧阻力将使土层减压松散，故该法测出的摩阻力小于常规摩阻力，国内外大量的对比试验已证明了该结论。

目前国外对该法如何由测试值得出抗压桩承载力的方法也不相同。有些国家将上、下两段实测值相叠加而得抗压极限承载力，这样偏于安全、保守。有些国家将上段桩摩阻力乘以大于 1 的系数再与下段桩叠加而得抗压极限承载力。

我国则将向上、向下摩阻力根据土性划分。对于黏土层，向下摩阻力为  $0.6 \sim 0.8$  倍向上摩阻力；对于砂土层，向下摩阻力为  $0.5 \sim 0.7$  倍向上摩阻力。作者在同一场地做了多根静载与自平衡法的对比试验，表明黏土中其系数为  $0.73 \sim 0.90$ 。因此，参考我国有关规范，桩抗压极限承载力  $Q_u$  取值为：

$$Q_u = \frac{Q_u^+ - G_p}{\gamma} + Q_u^- \quad (1-1)$$

式中  $G_p$ ——荷载箱上部桩自重；

$\gamma$ ——系数，对于黏土、粉土， $\gamma = 0.8$ ；对于砂土， $\gamma = 0.7$ ；对于岩石，取  $\gamma = 1.0$ ；

$Q_u^+$ 、 $Q_u^-$ ——荷载箱上、下段桩极限承载力。

上段桩抗拔极限承载力  $Q_u$  取值为

$$Q_u = Q_u^+ \quad (1-2)$$

对于工程应用而言，这样的计算已具有足够的精度。

单桩竖向极限承载力标准值应根据试桩位置、实际地质条件、施工情况等综合确定，当各试桩条件基本相同时，单桩竖向抗压极限承载力标准值可按下面的方法确定：

(1) 计算试桩结果的统计特征值，其方法是：

- 1) 确定正常条件下几根试桩的极限承载力实测值  $Q_{ui}$ ；
- 2) 计算几根试桩实测极限承载力平均值  $Q_{um}$ ；

$$Q_{um} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^m Q_{ui} \quad (1-3)$$

3) 计算每根试桩的极限承载力实测值与平均值之比  $a_i$ ：

$$a_i = Q_{ui} / Q_{um} \quad (1-4)$$

4) 按下式计算  $a_i$  的标准差  $S_n$ ：

$$S_n = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(a_i - 1)^2}{(n-1)}} \quad (1-5)$$

(2) 确定单桩竖向抗压极限承载力标准值  $Q_{uk}$ ，此时应分两种情况分别进行：

$$\text{当 } S_n \leq 0.15 \text{ 时, } Q_{uk} = Q_{um} \quad (1-6)$$

$$\text{当 } S_n > 0.15 \text{ 时, } Q_{uk} = \lambda Q_{um} \quad (1-7)$$

单桩竖向抗压极限承载力标准值折减系数  $\lambda$  可由变量  $a_i$  的分布，按下面的方法确定：

1) 当试桩数  $n=2$  时，按表 1-6 确定；

2) 当试桩数  $n=3$  时，按表 1-7 确定；

单桩竖向抗压极限承载力折减系数  $\lambda(n=2)$

表 1-6

$a_2 - a_1$	0.21	0.24	0.27	0.30	0.33	0.36	0.39	0.42	0.45	0.48	0.51
$\lambda$	1.00	0.99	0.97	0.96	0.94	0.93	0.91	0.90	0.90	0.88	0.85

单桩竖向抗压极限承载力折减系数  $\lambda(n=3)$

表 1-7

$\lambda$	$a_3 - a_1$								
$a_2$		0.30	0.33	0.36	0.39	0.42	0.45	0.48	0.51
0.84								0.93	0.92
0.92								0.94	0.93
1.00		0.99	0.98	0.98	0.97	0.96	0.95	0.93	0.92
1.08		1.00	0.99	0.98	0.97	0.96	0.95	0.90	0.88
1.16		0.98	0.97	0.95	0.94	0.93	0.91	0.86	0.84

3) 当试桩数  $n \geq 4$  时，按下式计算：

$$A_0 + A_1\lambda + A_2\lambda^2 + A_3\lambda^3 + A_4\lambda^4 = 0 \quad (1-8)$$

$$A_0 = \sum_{i=1}^{n-m} a_i^2 + \frac{1}{m} \left( \sum_{i=1}^{n-m} a_i \right)^2 \quad (1-9)$$

$$A_1 = -\frac{2n}{m} \sum_{i=1}^{n-m} a_i \quad (1-10)$$

$$A_2 = 0.127 - 1.127n + \frac{n^2}{m} \quad (1-11)$$

$$A_3 = 0.147(n-1) \quad (1-12)$$

$$A_4 = -0.042(n-1) \quad (1-13)$$

取  $m=1, 2, \dots$ ，满足式(1-8)的  $\lambda$  即为所求。

### 第三节 荷载箱埋设技术

自平衡试桩法在国内至今已做了几百例工程近 2 千根桩。荷载箱的埋设位置是一个重要的关键技术，对此根据工程实例及试桩经验，归纳出了荷载箱在桩中合理的埋设位置，如图 1-5 所示。

图 1-5(a)是一般常用位置，即当桩身成孔后先在孔底稍作找平，然后放置荷载箱。此法适用于桩侧阻力与桩端阻力大致相等的情况，或端阻大于侧阻而试桩目的在于测定侧