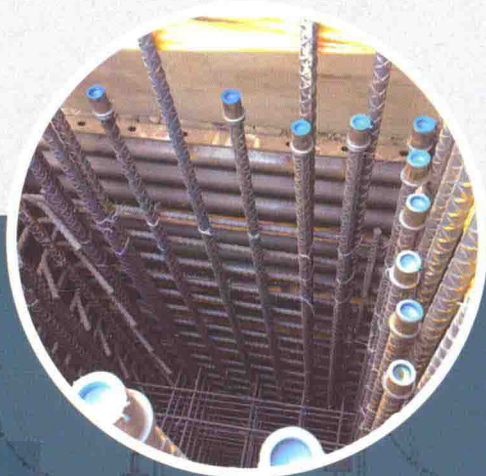


基桩质量检测技术

JIZHUANG ZHILIANG JIANCE JISHU

(下册) 张志勇 金 政 伍允望 陈洪祥 编著



基桩质量检测技术 (下册)

张志勇 金 政 伍允望 陈洪祥 编著



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

基桩质量检测技术分上下两册,本书以工程实践为基础介绍了常用基桩质量检测技术,主要包括高应变动测技术和应力波发射法等内容。书中针对不同的检测技术均有详细的理论介绍,着重分析了工程实例的试验结果,得出了诸多有价值的研究成果,进一步完善了基桩质量检测技术。

本书内容由浅入深、通俗易懂、易于教学,同时又贴近工程实际,可作为普通高等教育土木工程及相关专业学生、研究生的教学用书,也可供从事基桩质量检测的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

基桩质量检测技术. 下册/张志勇等编著. --上海: 同济大学出版社, 2015. 10

ISBN 978 - 7 - 5608 - 6029 - 9

I. ①基… II. ①张… III. ①桩基础—工程质量—检测 IV. ①TU473.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 232154 号

基桩质量检测技术(下册)

张志勇 金 政 伍允望 陈洪祥 编著

责任编辑 马继兰 谢惠云 责任校对 徐春莲 封面设计 陈益平

出版发行 同济大学出版社 www.tongjipress.com.cn

(地址: 上海市四平路 1239 号 邮编: 200092 电话: 021 - 65985622)

经 销 全国各地新华书店

印 刷 同济大学印刷厂

开 本 787 mm×1 092 mm 1/16

印 张 6.5

字 数 162 000

版 次 2015 年 10 月第 1 版 2015 年 10 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978 - 7 - 5608 - 6029 - 9

定 价 30.00 元

本书若有印装质量问题, 请向本社发行部调换 版权所有 侵权必究

目 录

第 4 章 高应变动测技术	1
4.1 概述	1
4.2 竖向荷载下单桩承载力的确定方法	1
4.2.1 静载试验法	2
4.2.2 静力计算法	2
4.2.3 静力触探法	3
4.2.4 经验公式法	4
4.2.5 高应变动测法确定单桩竖向静极限承载力	4
4.3 高应变动测技术的优点	7
4.4 高应变技术发展现状	7
4.5 高应变动测基本理论	8
4.5.1 杆的纵向波动方程	8
4.5.2 应力波在杆不同阻抗界面处的反射和透射	9
4.5.3 土阻力波及其传播规律	10
4.5.4 连续杆件模型	12
4.6 波形拟合法中土弹限研究	15
4.6.1 Smith 土模型及其改进模型	15
4.6.2 土弹限分析	16
4.6.3 弹限的试验研究	17
4.6.4 弹限取值分析	22
4.6.5 工程实例验证	24
4.6.6 小结	30
4.7 分层土阻力检验	31
4.7.1 桩身埋设量测元件的大直径钻孔灌注桩静载荷试验	32
4.7.2 大直径钻孔灌注桩高应变动测	35
4.7.3 各土层摩阻力试验结果	36
4.7.4 土阻力检验基本原理	36
4.7.5 假设检验结果	40
4.7.6 假设检验结果分析	41
4.7.7 小结	41
4.8 基桩高应变动测技术的应用研究	42

4.8.1 高应变法动测技术的误差分析	42
4.8.2 对高应变动测误差的认识	45
4.8.3 减小高应变动测误差方法分析	46
4.8.4 动静对比条件	46
4.9 结论与建议	47
第5章 应力波反射法	49
5.1 概述	49
5.2 动测技术的概况和发展现状	49
5.2.1 桩的完整性检测技术在国外的应用和发展	49
5.2.2 桩的动测技术在我国的发展和应用	50
5.3 反射波法的现场测试技术	51
5.3.1 反射波法的测试仪器	51
5.3.2 现场测试要求及注意事项	51
5.4 基桩应力波反射法理论基础	52
5.4.1 应力波反射法控制方程	52
5.4.2 应力波在桩身中的传播规律	54
5.4.3 桩身材料阻尼对应力波传播的影响	59
5.4.4 桩周土阻力对应力波传播的影响	62
5.4.5 影响桩顶质点速度曲线的因素	65
5.5 PIT-S 软件简介及基桩的应力波反射法数值分析	66
5.5.1 PIT-S 软件简介	66
5.5.2 完整基桩数值模拟分析	67
5.5.3 单一缺陷桩的几何参数模拟分析	72
5.5.4 易产生误判的几种情况	78
5.6 应力波反射法的实践研究	80
5.6.1 适用范围	80
5.6.2 检测结果参数	81
5.6.3 振源特性及其影响	84
5.6.4 传感器安装谐振影响	85
5.6.5 各种不同检测方法的综合运用	88
5.6.6 基桩完整性分类讨论	93
5.7 本章小结	94
参考文献	96

图 目 录

图 4-1	桩的一维连续模型	8
图 4-2	两种阻抗材料的杆件示意图	9
图 4-3	土阻力作用示意图	10
图 4-4	土阻力波传播示意图	11
图 4-5	桩受力状况图	14
图 4-6	Smith 土模型示意图	15
图 4-7	修改后的土静反力计算模型	16
图 4-8	S1# 试桩处于土层中位置示意图	18
图 4-9	S1# 试桩 $Q-s$ 曲线	19
图 4-10	S1# 试桩 $s-\lg t$ 曲线	20
图 4-11	S1# 试桩 $s-\lg Q$ 曲线	20
图 4-12	S1# 试桩桩身轴力图	21
图 4-13	桩侧摩阻力与桩土相对位移关系图	21
图 4-14	桩端阻力与桩土相对位移关系图	22
图 4-15	桩静载试验的 $P-S$ 曲线	23
图 4-16	桩端弹限取法示意图	24
图 4-17	S1# 桩实测曲线及 CCWAPC1、CCWAPC2 拟合曲线	25
图 4-18	S2# 桩 $Q-s$ 曲线	27
图 4-19	S2# 桩 $s-\lg t$ 曲线	27
图 4-20	S2# 桩 $s-\lg Q$ 曲线	28
图 4-21	S2# 桩实测曲线及 CCWAPC1、CCWAPC2 拟合曲线	29
图 4-22	⑤ ₋₁ # 试桩 $Q-s$ 曲线	33
图 4-23	⑤ ₋₁ # 试桩 $s-\lg t$ 曲线	33
图 4-24	⑤ ₋₁ # 试桩 $s-\lg Q$ 曲线	34
图 4-25	⑤ ₋₁ # 试桩桩身轴力图	34
图 4-26	⑤ ₋₁ # 试桩桩侧各土层摩阻力图	35
图 4-27	单元土阻力模型	41
图 4-28	桩身“弹性模量”与荷载关系曲线	43
图 5-1	微元受力图	53
图 5-2	任一点 B 的计算	55
图 5-3	完整桩状态域的划分	55
图 5-4	应力波在桩底的反射和投射	56

图 5-5	自由桩底获取的完整桩桩底反射信号	57
图 5-6	单一缺陷示意图	58
图 5-7	多缺陷的反射图	59
图 5-8	混凝土材料一维粘弹性模型	60
图 5-9	土阻力对速度波形的影响	65
图 5-10	不同桩长时的波形图	67
图 5-11	不同脉冲宽度时的波形图	68
图 5-12	A_R/A_I -桩长的关系曲线	69
图 5-13	A_R/A_I -脉冲宽度的关系曲线	69
图 5-14	完整桩在不同桩周土下的时程曲线图	71
图 5-15	砂土的影响	72
图 5-16	黏土的影响	72
图 5-17	深度 0.875 m 不同脉冲宽度时的响应曲线	73
图 5-18	深度 1.25 m 不同脉冲宽度时的响应曲线	73
图 5-19	不同位置缺陷波形曲线图	74
图 5-20	入射波与反射波幅值比和 BTA 的对应关系	76
图 5-21	A_R/A_I - BTA 值的关系曲线	76
图 5-22	入射波与反射波幅值比和缺陷长度的对应关系	77
图 5-23	A_R/A_I -缺陷长度关系曲线	78
图 5-24	软硬夹层影响	79
图 5-25	渐变情况下桩身阻抗变化	79
图 5-26	第一缺陷不同严重程度下的不同测试曲线	80
图 5-27	上海嘉定区某桥梁工程桩波形图	82
图 5-28	浅部断桩时域曲线图	83
图 5-29	不同材料敲击桩头所得的力波及谱图	85
图 5-30	工程实测曲线	85
图 5-31	考虑安装刚度的计算模型	86
图 5-32	安装谐振频率 ω_1, ω_2 随安装刚度 K 的变化	87
图 5-33	惯性式传感器接收特性幅频曲线	87
图 5-34	不同安装方法的谐振频率比较	88
图 5-35	相同接收条件下不同激振方式在同一工程桩上的实测曲线	88
图 5-36	S1 低应变检测波形图	92
图 5-37	S1 跨孔超声波检测成果图	92
图 5-38	S2 低应变检测波形图	92
图 5-39	S2 跨孔超声波检测成果图	92
图 5-40	S1 试桩第一次静载荷试验 $Q-s$ 曲线	92
图 5-41	S2 试桩第一次静载荷试验 $Q-s$ 曲线	93
图 5-42	S1 试桩第二次静载荷试验 $Q-s$ 曲线	93

第4章 高应变动测技术

4.1 概述

高应变动测法检测单桩竖向承载力,有其无法比拟的优点,在工程实践中已越来越得到人们的重视和青睐。研究和解决工程实践中出现的问题,进一步改进和提高高应变动测技术水平是非常必要的。

本章主要从高应变动测技术的改进和应用方面着手,论述了如下几点内容:

(1) 指出波形拟合法中弹限传统取值方法的不足,提出了依据各土层桩土相互作用实际性状分土层取弹限的方法,并设计了现场足尺试验,对各土层弹限值取法进行了研究。然后以实测的高应变信号为依据,采用本章方法确定的弹限进行计算,并将结果与可靠的静载荷试验结果进行对比分析。

(2) 大直径灌注桩的高应变动测,是广为关注的热点,也是高应变动测的难点。本章在通过桩身埋设有量测元件的大直径灌注桩静载荷试验,实测得到各土层摩阻力,在此基础上,对大量基桩动测得到的各土层摩阻力统计值采用假设检验等方法进行分析。通过分析可以更全面、更深入地了解高应变动测技术,有助于找出误差较大的土层,从而针对性地查明原因,提出改进措施。

(3) 高应变动测技术的误差分析及减小误差的一些方法和动静对比的条件。

4.2 竖向荷载下单桩承载力的确定方法

桩是埋入土中的柱形杆件,就受压桩而言,其作用是将上部结构的荷载传递到深部较坚硬、压缩性小的土层或岩层上。总体上,可按竖向受荷与水平受荷两种工况来分析桩的承载性能。

对于承受竖向荷载的桩,单桩竖向抗压极限承载力是指桩在竖向荷载作用下到达破坏状态前或出现不适于继续承载的变形所对应的最大荷载,所能承受的最大荷载值由以下两个因素决定:一是桩本身的材料强度,即桩在轴向受压、偏心受压或在桩身压屈的情况下,结构强度的破坏;二是地基土强度,即地基土对桩的极限支承力。通常情况下,第二个因素是决定单桩极限抗压承载力的主要因素,也是我们主要讨论的问题。

在竖向受压荷载作用下,桩顶荷载由桩侧摩阻力和桩端阻力承担,且桩侧阻力和桩端阻力的发挥是不同步的,即桩侧阻力先发挥,先达极限,桩端阻力后发挥,后达极限;二者的发挥过程反映了桩土体系荷载的传递过程:在初始受荷阶段,桩顶位移小,荷载由桩上侧表面的土阻力承担,以剪应力形式传递给桩周的土体,桩身应力和应变随深度递减;随着荷载的增大,桩顶位移加大,桩侧摩阻力由上至下逐步被发挥出来,在达到极限值后,继续增加的荷载则全部由桩端土阻力承担。随着桩端持力层的压缩和塑性挤出,桩顶位移增长速度加大,

在桩端阻力达到极限值后,位移迅速增大而破坏,此时桩所承受的荷载值就是桩的极限承载力。由此可以看出,桩的承载力大小由桩侧土和桩端土的物理力学性质决定,而桩的几何特征如长径比、侧表面积大小、桩的成桩效应也会影响承载力的发挥。

桩在竖向荷载作用下的承载力已成为国内外岩土工程研究者共同关心的问题。现有的确定单桩承载力的方法有很多,主要有静载试验法、静力分析法、经验公式法、以静力触探试验为代表的原位测试法和以高应变为代表的动测方法。

4.2.1 静载试验法

静载试验法是通过在桩上直接分级加载,同时观测其每级的分时沉降量,最后分析其试验结果,确定单桩承载力。这种方法综合考虑了桩与土的相互作用,是确定单桩承载力最为可靠的方法,因此大的工程一般都要在现场做静载试验来确定设计承载力。

静载试验法是确定桩承载力的常用方法。传统的静载试桩法迄今仍被世界各地奉为经典,被认为是最为直观的单桩承载力确定方法。但是,长期以来,静载试验的装置一直停留在压重平台或锚桩反力架之类的形式,试验工作费时、费力、费钱,因此人们常力图回避做静载试验,而且单桩承载力越高,越不倾向于做静载试验,以致许多重要的建筑物的大吨位基桩往往得不到准确的承载力数据,基桩的潜力不能发挥。

针对上述情况,美国西北大学教授 Osterberg 于 20 世纪 80 年代中期萌发了新的思路,成功研究出了一种新的试桩法,该方法用安装于桩身底部的荷载箱产生向上和向下的推力,通过埋设在桩身内的元件来量测桩身轴力和位移。由于其加压装置简单,不需要锚桩反力架,不占用施工场地,试验方便,能节省时间,且能分别测出桩的摩阻力和端阻力与上下位移间的关系曲线,便于分别考虑这两种承载力,明确两种承载力的发展过程。这对桩基础进行可靠度设计时考虑和确定分项系数也是十分重要的。我国工程界、学术界对 Osterberg 法表现出极大的兴趣,对其进行了深入研究并将其命名为“自平衡试桩法”^[1-3]。但是这种方法也存在很多缺点和问题^[4-5]:

- (1) 对某些桩型不适用,如不能用于 H 型钢桩。
- (2) 需要预先计划。对于闭口和实心的排土桩,荷载箱必须在打桩前安装,必须精心计划。成桩后无法再对荷载项进行调整。
- (3) 桩顶荷载沉降曲线的等效。虽然从实测数据中得到,但等效的桩顶荷载沉降曲线不是直接量测,对极限承载力的判定可能比较保守。
- (4) 桩的刚性假定对于长的混凝土桩不适用,忽略桩身压缩可能带来较大误差。
- (5) 加载机理不同对试验结果的影响有待进一步研究。

4.2.2 静力计算法

静力计算法是将桩当作深基础,并假定不同的地基破坏模式,运用土力学原理求得桩的竖向极限承载力,然后除以安全系数,即可确定桩的竖向容许承载力。

1. 桩端阻力的计算

采用刚塑性体理论,假定不同的破坏滑裂面,通过力的平衡条件,可导得桩端极限阻力

的理论计算公式。Terzaghi(1943), Meyerhof(1951)和 Vesic(1963)等人所提出的单位面积极限端阻力 q_{pu} 的计算公式可由下式统一表达:

$$q_{pu} = \zeta_c CN_c + \zeta_\gamma \gamma_1 b N_\gamma + \zeta_q \gamma h N_q \quad (4-1)$$

式中 N_c, N_γ, N_q ——桩底无量纲承载力系数,与土的内摩擦角 φ 有关;

$\zeta_c, \zeta_\gamma, \zeta_q$ ——与桩底性状相关的系数;

b, h ——桩底宽(或直径)和桩的入土深度;

c ——土的内聚力;

γ_1 ——桩端平面以下土的浮重度;

γ ——桩端平面以上土的浮重度。

2. 桩侧阻力的计算

桩侧极限阻力 q_{su} 的计算可分为总应力法和有效应力法两种。根据计算表达式所用系数的不同,可将其分为 α 法、 β 法和 λ 法,其中, α 法属于总应力法, β 法属于有效应力法。

4.2.3 静力触探法

1. 单桥探头

《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)^[6]推荐使用单桥探头(其圆锥底面积为 15 cm^2 , 滑套高 7 cm , 锥角 60°), 根据土层的静探的比贯入阻力 p_s 值, 估算预制桩的单桩竖向极限承载力:

$$Q_u = \alpha_b p_{sb} A + U \sum_{i=1}^n q_{ski} L_i \quad (4-2)$$

式中 p_{sb} ——桩底附近的静探比贯入阻力标准值;

α_b ——桩端阻力修正系数;

q_{ski} ——用静探估算的桩周第 i 层土的极限侧阻力标准值。

2. 双桥探头

用双桥探头触探结果确定单桩竖向承载力已列入苏联、英国等国家的规范。我国《铁路桥涵设计规范》(TBJ 2—85)^[7]推荐计算预制打入桩的“综合修正法”, 其计算单桩竖向极限承载力 Q_u 的经验公式为

$$Q_u = \alpha_i \bar{q}_c A + U \sum L_s \beta_s \bar{f}_s \quad (4-3)$$

式中 $\bar{q}_c$ ——桩底平面的平均静探端阻力;

$\bar{f}_s$ ——第 s 层土的平均静探局部侧摩阻力;

U, A ——桩周长及桩底面积;

L_s ——第 s 层土的厚度;

α_i ——端阻综合修正系数;

β_s ——侧阻综合修正系数。

4.2.4 经验公式法

通过多年的静载试验和工程实践积累的资料,经验方法已被列入了各种规程规范中,不同土层在不同的物理力学指标下的桩侧摩阻力和桩端阻力的取值可参考各种规范。

4.2.5 高应变动测法确定单桩竖向静极限承载力

所谓高应变动力试桩法,广义的讲,是指所有能使桩土间产生永久变形(或较大动位移)的动力检测基桩承载力的方法,这类方法要求给桩土系统施加较大能量的瞬时荷载,以保证桩土之间产生一定的相对位移。

20 世纪 30 年代,应力波理论就被用以分析打桩工程^[8],1931 年,伊萨克斯(D. V. Isaacs)首先指出,桩顶受到桩锤冲击后,冲击能量以波动形式传至桩底,因此可以用一维波动方程来描述,但其解过于复杂,只能用于极简单的边界条件,因而难以进入实用阶段。1938 年,福克斯(E. N. Fox)作了许多简化假定后,对打桩过程进行了粗略的分析,得出了用于打桩分析的波动方程的解答。

1950 年,史密斯(E. A. Smith)对锤-桩-土体系提出了用一系列质块、弹簧和阻尼器组成的离散化计算模型,并用差分方程和电子计算机进行计算,求得精确的数值解。1960 年,他发表了“打桩分析的波动方程法”这一著名的论文^[9],使波动方程真正进入了实用阶段。1964 年,美国的凯斯工学院(Case Institute of Technology)高勃尔(G. G. Goble)、劳契(F. Rausche)等研究成果的发表,标志着凯斯(Case)法和波形拟合法的逐渐形成,同时也使高应变动测领域进入了一个崭新的发展阶段。自从 19 世纪人们开始使用打桩公式计算桩基承载力以来,这种方法已包括动力打桩公式法、锤击贯入法、Smith 波动方程法、波动方程半经验解析解法(Case 法)、波动方程拟合法以及静动法(Statnamic)。

1. 动力打桩公式

动力打桩公式是最早的一种桩承载力动测方法。这种方法曾广泛地用于施工中,以控制打桩时的静承载力要求。几乎所有的动力打桩公式,都是从能量守恒原理推导出来的,其基本关系如下:

桩锤作功=桩贯入土中所需要有效功+桩土体系所消耗的弹性变形能
+桩土体系所消耗的非弹性变形能

由于在推导中采用了不同的假定,故得出不同的动力打桩公式。其中比较著名的有海利(Hiley)打桩公式、格尔谢凡诺夫公式和工程新闻公式等。国外对提高动力打桩公式的可靠性,进行了不少有益的尝试,如波兰的特契曼(A. Techman)和克劳斯(J. Klos)将动力打桩公式改为如下经验公式:

$$P_a = \frac{W}{s + \epsilon L} \quad (4-4)$$

式中 P_a ——桩的容许承载力;
 W ——每次锤击的能量;
 s ——贯入度;

L ——桩长。

根据现场静载试验所得的 P_a 与打桩时相对应的贯入度 s , 代入式(4-4), 即可求得 ϵ 的经验值。他们通过大量试验, 得出了给定的桩和桩锤条件下各类土的 $\epsilon = f(s)$ 。据认为, 这种由经验数据得出的公式误差小。此外, 有人将动力打桩公式与现代的测试技术结合起来, 直接测得打桩时桩顶所受的撞击能量, 从而使动力打桩公式中的待定参数减少, 同时也减少了人为确定参数带来的误差, 提高了现有动力打桩公式的可靠性。但是动力打桩公式在机理方面仍显粗糙, 原始假定为两物体碰撞的前提、动弹性变形的简单假设以及动静承载力之间简单的系数修正, 使得这一方法仍难以得到广大工程人员的认可。

2. 锤击贯入法

锤击贯入法是参考国内外已有的一些关于动力试桩方面的经验, 并结合我国国情而研制的一种简便易行的快速测定单桩承载能力的方法, 由四川建筑科学研究所与建设部科学研究院地基所共同开发。其主要原理是利用通过不同落高的重锤, 由小增大, 对桩顶施加瞬时锤击力 P_d , 使桩产生贯入度, 通过安装在锤上的力传感器, 测得每次撞击时的锤击力, 然后根据实测的 P_d 和相应的累计贯入度曲线与同一桩的静荷载试验曲线之间的相似性, 通过桩的静、动对比试验结果的相关分析, 求出桩的竖向静极限承载力, 即有:

$$P_u = C_u \cdot F_u \quad (4-5)$$

式中 P_u, F_u ——分别为静极限荷载和动极限荷载;

C_u ——比例系数, 与桩型和土质条件等有关, 根据已有的动静对比试验资料确定。

锤击贯入法所得的试验曲线与静载荷试验曲线很相似, 但要得到完整的 $F(t)_{\max} \sim \sum e$ 曲线并不容易, 常常在没有打出曲线的陡降段或所需的贯入度增量而已经把桩头打坏或锤击力超过力传感器的额定量程; 另外, 由于遇到负贯入度、 $F(t)_{\max}$ 值忽大忽小以及锤击偏心等原因, 都难以在现场获得正常的动测曲线。该方法主要用于中小型桩(直径不超过 0.4 m, 桩长不超过 15 m)承载力的测定。且对于比例系数 C_u 的物理意义及其影响因素和确定方法, 仍有待进一步深入研究。

3. 波动方程法

波动方程法即为史密斯(E. A. Smith)于 1960 年所提出的方法^[9], 在“打桩分析的波动方程法”这一著名的论文中, 他对锤-桩-土体系提出了用一系列质量块、弹簧和阻尼器组成的离散化计算模型, 以锤心初速度作为边界条件, 然后利用差分方程编程计算, 求出了精确的数值解。这一方法以一维波动方程为基础, 将桩土体系简化为分离单元模式, 用计算机程序在给定的锤、垫、桩、土的参数变化范围内通过程序的参数分析功能迅速绘制出多组理论承载曲线(Bearing graph), 即以纵坐标为不同的设定桩周土总静阻力值, 横坐标为用假定参数计算所得的打入阻力(每击贯入度的倒数)。每组曲线的某些参数(视要求而定)为设定值, 其余为变量相应便形成一组曲线, 确定承载力时桩的最终贯入度及锤的落高为实测, 其余参数全凭经验取用, 因此从各组曲线中选出相应的承载曲线便可由打入阻力反查总静阻力, 如有动静对比试验数据则更可作相应修正。

波动方程法的缺点在于其土参数的选取全凭经验而定,与基本土性缺乏关联,这对进一步了解桩土性状是不利的。然而对某一地区的固定施工场地有一定的适用性,也较为方便,因为在对土质、锤的效率、垫层耗能状况比较熟悉的情况下,易于掌握,其更多的用途是对大型打桩工程进行沉桩能力分析与预测。

波动方程法需要对桩锤和桩垫进行准确的模拟,这时常会对其应用带来不便。谢力子(1984)则基于设置在桩顶的力和加速度传感器量测系统,提出了利用这一量测系统反求桩锤和桩垫参数的方法,对原有的波动方程法作了一定的改进。

4. Case 法

Case 法动测基桩承载力是由 1964 年凯斯工业学院在俄亥俄州交通部的资助下,由高勃尔(G. G. Goble)等人领导的科研小组进行研制开发出来的。Case 法是在桩顶 1.5~2.0 倍桩径处的桩两侧对称安装应变式力传感器和加速度计,量测锤击时桩身受力和运动速度(由加速度积分得到)的时域波形,通过对实测的速度波曲线或力波曲线作为边界条件进行计算,以一套“行波理论”作为基础进行推导,在作了诸多的简化假设后,得到了形式极为简单明了的计算公式,并由大量的实测数据统计得出了相应的推荐参数,从而得到单桩竖向静极限承载力。Goble 教授所提供的 Case 方法中包含了许多 Case 子方法,需工程人员根据实际情况而选用,一般常使用阻尼系数法:

$$RSP = \frac{1}{2}(1 - J_c)[F(t) + ZV(t)] + \frac{1}{2}(1 + J_c)\left[F\left(t + \frac{2L}{c}\right) - ZV\left(t + \frac{2L}{c}\right)\right] \quad (4-6)$$

式中 Z ——桩身波阻抗;

J_c ——Case 阻尼系数,该值对承载力的提供起关键性的作用,在缺乏静载对比经验和波形拟合计算的地区,主要根据桩尖持力层的土性凭经验选定。

由于 Case 法和曲线拟合法基于同样的量测系统,且 Case 法具有简便快速的特点,但行业中对 Case 法的评价也存在不少分歧,可谓是毁誉参半。由于 Case 法过于理想化的刚塑性假设以及桩侧无动土阻力等许多人为的简化,导致其在本质上属于一种经验方法。对于缺乏经验的地区,Case 法的应用需要慎重。

5. 波形拟合法

波形拟合法由 Goble 研究小组在 1969 年提出,并在 1974 年由 Goble 和 Rausche 正式推出名为波动方程程序(CAPWAPC)的著名分析程序。在初期的 CAPWAPC 程序中,桩的计算模型采用 Smith 的质弹模型,而改进了的 CAPWAPC 程序则是以连续杆件模型为基础。

波形拟合法现场测试仪器和方法同 Case 法完全一样,它将现场高应变动力试验采集的力和速度时程曲线和波动方程结合起来,将桩划分为许多单元,涉及计算模型有桩的计算模型和土的计算模型。其基本的计算思路是预先假定各个单元体的计算参数,用实测的力值曲线或速度波曲线为边界条件求解波动方程,反算桩顶速度或桩顶力,使计算波形与实测波

形拟合,若二者不吻合,则重新调整各参数,反复迭代计算,直至二者吻合程度达到要求为止。

4.3 高应变动测技术的优点

较传统的静载荷试验,高应变动测技术具有下列优点:

(1) 仪器设备较为轻便,检测速度快,费用低,这是高应变动测相对传统的静载荷试验比较突出的优点,所以可做到对工程桩进行大比例检测。

(2) 具有静载荷试验所不具备的功能:高应变动测除了和静载荷试验一样能确定单桩极限承载力外,在混凝土预制桩及钢桩打桩过程中检测桩身应力,进行锤击效率监测,为选择沉桩工艺参数和确定桩长提供依据。

(3) 检测桩身结构完整性,区分是土的变形还是桩身结构破坏引起的沉降。

桩的承载力取决于桩身结构强度和地基土对桩的支撑力,除测定单桩极限承载力外,高应变动测法还能检测桩身结构完整性,判断桩身质量及缺陷位置。而静载试验是量测荷载和桩顶下沉量,得到 $Q-s$ 曲线,当下沉量达到人们规定的条件或某一值时,就认为桩侧阻力和端阻力已充分发挥,即通常所说的桩已“破坏”,从而求得单桩极限承载力,但桩顶下沉量可以是土的变形引起,也可以是由于桩身有缺陷导致结构破坏引起,两者从 $Q-s$ 曲线上往往难以区分,而高应变动测可以检测桩身缺陷及其位置,可以对两者的沉降加以区别。

(4) 易于进行高吨位的基桩承载力测定,能提供桩侧与桩端土阻力分布。

对于某些高吨位的基桩承载力的测定,如海洋石油平台的桩基工程,静载荷试验往往运作困难,以至无法进行,而高应变动测总能轻松完成检测。其波形拟合法还可得到详细的桩侧与桩端土阻力分布情况,模拟静载荷试验的 $Q-s$ 曲线。

4.4 高应变技术发展现状

Smith^[9]和 Goble^[10],Rausche^[11]的标志性成果使得高应变动测技术迅速发展到一个崭新的实用阶段,在此之后,各种研究工作蓬勃发展,硕果累累。

20 世纪 70 年代中后期,美国 PDI 公司开始生产以 PDA 打桩分析仪为名的高应变动力试桩专用仪器,其后经过改进,采用 CAPWAPC 进行实测波形的拟合法分析。Birand^[12]在 1992 年提出了辐射阻尼模型,在原有的分析程序基础上作了新的改进。

高应变技术在国内的发展也很活跃,江礼茂^[13]、袁建新^[14]、陈凡^[15]等采用特征线理论求解波动方程,在算法方面发展了高应变拟合技术;李增选^[16]采用行波理论的造迭代格式;王靖涛^[17]采用半理论半数值的解法;雷林源^[18-19]尝试用灰色系统和人工神经网络预测完整桩的轴向极限承载力;王雪峰^[20]对高应变在短粗式端承桩上的应用进行了理论改进;中国建筑科学研究院编制了波动分析程序 FEIPWAPC;刘明贵、王平、潘榕明等编制开发了 RSM-Pile Star 动测软件;武汉岩海工程技术开发公司开发了 CCWAPC 拟合法分析软件。

但是,目前高应变的发展仍没有取得突破性进展,主要表现在各种投入使用的分析方法,其基本模型均采用 Smith 于 1960 年提出的经验模型,或略作改进。

4.5 高应变动测基本理论

4.5.1 杆的纵向波动方程

考虑一材质均匀、截面恒定的弹性杆,长度为 L ,截面积为 A ,弹性模量为 E ,质量密度为 ρ 。取杆轴为 x 轴。若杆变形时平截面假设成立,受轴向力 F 作用,将沿杆轴向产生位移 u ,质点运动速度 $V=\frac{\partial u}{\partial t}$ 和应变 $\epsilon=\frac{\partial u}{\partial x}$,这些动力学和运动学量只是 x 轴和时间 t 的函数。由于杆具有无穷多的振型,则每一振型各自对应的运动量分布形式都不相同。如图4-1所示,杆 x 处的单元 dx ,如果 u 为 x 处的位移,则在 $x+dx$ 处的位移为 $u+\frac{\partial u}{\partial x}dx$,显然单元 dx 在新位置上的长度变化量为 $\frac{\partial u}{\partial x}dx$,而 $\frac{\partial u}{\partial x}$ 即为该单元的应变。根据虎克定律,应力与应变之比等于弹性模量 E ,可写出公式如下

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\sigma}{E} = \frac{F}{AE} \quad (4-7)$$

式中, σ 为杆 x 截面处的应力。

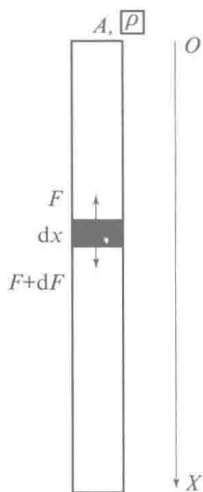


图4-1 桩的一维连续模型

将式(4-7)两边对 x 微分,得

$$AE \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{\partial F}{\partial x} \quad (4-8)$$

利用牛顿定律,考虑该单元的不平衡力(惯性力)列出平衡方程如下

$$\frac{\partial F}{\partial x} = \rho A dx \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (4-9)$$

合并式(4-8)和式(4-9)两式,得

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (4-10)$$

式中, $c = \sqrt{E/\rho}$, c 称为弹性波速。

$$u(x, t) = f(x - ct) + g(x + ct) \quad (4-11)$$

式(4-11)是式(4-10)的通解, 也称 D'Alembert 通解, 其物理意义在于波可分解为下行波 $f(x - ct)$ 和上行波 $g(x + ct)$, 两者分别同时向相反的方向传播。

4.5.2 应力波在杆不同阻抗界面处的反射和透射

桩身截面阻抗变化与杆的截面尺寸、质量密度、波速、弹性模量等因素或某一因素变化有关。假设如图 4-2 所示的杆由两种不同的阻抗材料组成, 当应力从波阻抗 Z_1 的介质入射至 Z_2 的介质时, 在两种不同阻抗的界面上将产生反射波和透射波, 用角标 I 、 R 和 T 分别代表入射、反射和透射。假设入射压力波 F_1 是已知的, 所以有 $V_1 = F_1/Z_1$ 。界面处的力 F 和速度 V 满足

$$F - F_1 = Z_1 \cdot (V_1 - V) \quad (4-12)$$

$$F = Z_2 \cdot V \quad (4-13)$$

求解上述两式, 得

$$F = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} F_1 = \frac{2Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2} V_1 \quad (4-14)$$

$$V = \frac{2}{Z_1 + Z_2} F_1 = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} V_1 \quad (4-15)$$

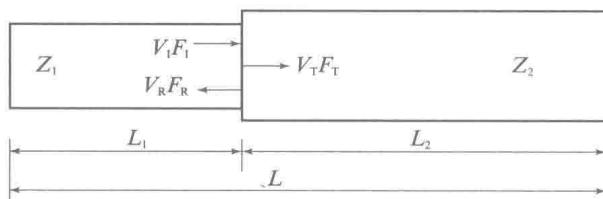


图 4-2 两种阻抗材料的杆件示意图

按习惯将界面处的力波和速度波分解为入射、反射和透射三种波。因界面上力 F 和速度 V 应分别满足牛顿第三定律

$$F_1 + F_R = F_T = F \quad (4-16)$$

和连续条件

$$V_1 + V_R = V_T = V \quad (4-17)$$

记完整性系数 $\beta = \frac{Z_2}{Z_1}$, 反射系数 $\zeta_R = \frac{(\beta - 1)}{(1 + \beta)}$, 透射系数 $\zeta_T = \frac{2\beta}{(1 + \beta)}$, 可得下列公式

$$F_R = \zeta_R \cdot F_I \quad (4-18)$$

$$V_R = -\zeta_R \cdot V_I \quad (4-19)$$

$$F_T = \zeta_T \cdot F_I \quad (4-20)$$

$$V_T = \left(\frac{1}{\beta}\right) \cdot \zeta_T \cdot V_I \quad (4-21)$$

$$1 + \zeta_R = \zeta_T \quad (4-22)$$

(1) 由于 $\zeta_T \geq 0$, 所以透射波总是与入射波同号。

(2) $\beta=1$, 即 $\frac{Z_2}{Z_1}=1$, 反射系数 $\zeta_R=0$, 透射系数 $\zeta_T=1$, $F_T=F_I$, 入射力波波形除随时间改变位置外, 其他不变, 相当于应力波不受任何阻碍地沿杆正向传播。

(3) $\beta>1$, 即波从小阻抗介质传入大阻抗介质。因 $\zeta_R \geq 0$, 故反射力波与入射力波同号, 若入射波为下行压力波, 则反射的仍是上行压力波, 与后继到来的入射压力波叠加起增强作用; 因反射力波与入射波运行方向相反, 则反射力波引起的质点运动速度 V_R 与入射波的 V_I 异号, 显然与后继到来的入射下行压力波引起的正向运动速度叠加有抵消作用; 又因 $\zeta_T \geq 1$, 则透射力波的波幅总是大于或等于入射力波。

(4) $\beta<1$, 即波从大阻抗介质传入小阻抗介质。因 $\zeta_R \leq 0$, 故反射力波与入射力波异号, 若入射波为下行压力波, 则反射的是上行拉力波, 与后继到来的入射压力波叠加起卸载作用; 因反射波与入射波运行方向也相反, 则反射力波引起的质点运动速度 V_R 与入射波的 V_I 同号, 显然与后继到来的入射下行压力波引起的正向运动速度叠加有增强作用。又因 $\zeta_T \leq 1$, 则透射力波的波幅总是小于或等于入射力波。

4.5.3 土阻力波及其传播规律

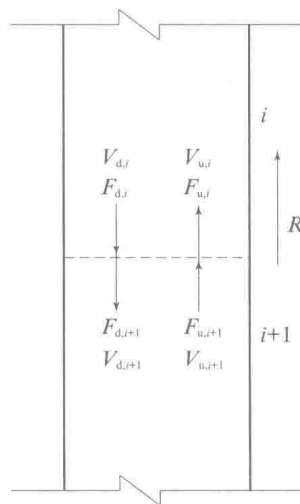


图 4-3 土阻力作用示意图

上面已叙述了入射应力波在杆阻抗变化处的反射和透射, 并与上、下行波建立联系。下面讨论入射应力波在杆深度 i 界面遇到土阻力 R_i 作用时的应力波反射和透射情况。如图