

基桩动测技术

王雪峰 吴世明 著

科学出版社

TU473.1
W401

基桩动测技术

王雪峰 吴世明 著

科学出版社

2001

内 容 简 介

本书系统地介绍和总结了应力波反射法(包括频域分析法)、高应变动力试桩法的基本理论和工程应用,以及基桩动测技术存在的诸多难点问题和解决途径,是我国目前最为全面、系统介绍常见基桩动测技术的专著,同时也是一本实际工程测试的指导书。本书共分七章,主要介绍了应力波反射法基本理论及实践、桩与岩土破坏变形机理、高应变动力试桩法基本原理及实践、桩基动测实用测试与分析技术。

本书可供土建、机械科技人员及建筑工程质量检测人员参考,亦可作为高等院校土木工程专业的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

基桩动测技术/王雪峰,吴世明著.-北京:科学出版社,2001

ISBN 7-03-009385-2

I. 基… II. ①王… ②吴… III. 试桩 IV. TU473.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 21107 号

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717

陈海印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2001 年 4 月第 一 版 开本:787×1092 1/16
2001 年 4 月第一次印刷 印张:13 3/4
印数:1—2 500 \字数:315 000

定价:28.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈杨中〉)

前 言

追溯起来,利用动力手段解决桩的问题,已有百余年的发展历史了。20 世纪 60 年代以来,随着电子技术的发展,实验手段和计算技术的日趋完善,社会对快速的无破损检测需求与日俱增,人们对于这一课题的研究兴趣更是有增无减,世界范围内的基桩动测技术应用与研究一直方兴未艾。在国外学习和工作期间,我有幸从事这方面的工作,回国以后,适逢基桩动测技术在我国得以大规模吸收、消化与普及,我和我的同事自然也参与了这方面的科研工作。

我的学生王雪峰,作为 RS 系列基桩动测仪和 CCWAPC 软件的主要研制开发人员之一,长期从事基桩动测方法和技术的研究与推广工作。近几年来,我们结合我国的实际情况,对应力波在基桩动测中的应用又进一步进行了系统的理论与实践总结,本书就是在此基础上完成的。书中除较全面地描述了一维纵波理论及其在高低应变动测技术中的应用外,还分析了弥散效应问题、横向惯性效应问题以及小缺陷的绕射问题,并对频域分析、扭转剪切波应用、缺陷定量分析与完整性分类也进行了系统讨论。如何将高应变动测技术合理地用于短粗式端承桩,是一很有现实意义的课题,本书亦介绍了我们在这一方面的科研成果。

基桩动测技术远未成熟,然而自 20 世纪 80 年代中期以来,随着我国市场经济的发展,测桩队伍日增,据不完全统计,1995 年即已超过 800 家,广大测试人员迫切希望有一本系统涉足技术细节、操作性强的书籍面世。本书顺应这一趋势,全面讨论了应力波反射法和波动方程高应变动力测桩法在现场测试与室内分析方面存在的各种技术细节。相信本书的出版,将有助于基桩动测技术的发展。

本书在撰写过程中,得到了武汉岩海公司的支持与帮助,该公司程乐平、杨燕军、潘榕明、谢叶、何纪风、林世胜等参与了本书的理论分析、现场试验及图谱整理工作,张岚、卢忱、杨人禄、张伟也参与了部分试验和插图绘制。中国科学院测量与地球物理研究所许厚泽院士、国家地震局哈尔滨工程力学研究所廖振鹏院士、原冶金部建筑研究总院徐攸在教授等审阅了全书并提出了宝贵意见,在此对他们表示衷心的感谢。

限于撰写水平,本书虽定名为《基桩动测技术》,但仅述及低应变应力波反射法和高应变波动方程法,尚未涉及动力参数法、机械阻抗法、共振法、水电效应法、声波透射法、锤击贯入法、动静法等,书中不妥与错误之处,敬请读者批评指正。

吴世明

2001 年 3 月

目 录

前言

第一章 概述	1
§ 1.1 基桩分类	1
§ 1.2 基桩工程的常见质量问题	4
§ 1.3 基桩动测技术的发展	6
第二章 应力波反射法理论基础	8
§ 2.1 应力波反射法控制方程	8
§ 2.2 特征线和特征线上的相容关系	9
§ 2.3 钟形脉冲波在桩中的传播.....	11
§ 2.4 小扰动状态下桩的振动特性	17
§ 2.5 横向惯性效应引起的桩身几何弥散.....	21
§ 2.6 材料阻尼对桩身传播应力波的影响.....	25
§ 2.7 桩周土阻力对桩身传播应力波的影响	28
§ 2.8 扭转剪切波在桩中的传播.....	30
§ 2.9 桩顶部的三维效应.....	34
§ 2.10 一维应力波在小缺陷旁的散射	40
§ 2.11 圆截面桩中的波	43
§ 2.12 轴向冲击荷载作用下圆截面桩的响应	47
§ 2.13 桩中一维纵波波速的弥散效应	49
§ 2.14 应力波反射法动力试桩若干问题讨论	54
第三章 应力波反射法实践研究	58
§ 3.1 振动测量基本概念.....	58
§ 3.2 应力波反射法振源特性及其对动测效果的影响	63
§ 3.3 常用传感器工作原理及应用效果比较.....	69
§ 3.4 安装条件对传感器频响特性的影响.....	80
§ 3.5 应力波反射法桩基动测系统.....	84
§ 3.6 频域分析在应力波反射法中的合理应用.....	90
§ 3.7 频域分析在柔性桩测试中的应用.....	93
§ 3.8 应力波反射法工程实践.....	97
§ 3.9 关于基桩完整性分类的讨论	101
第四章 桩与岩土破坏变形机理	103
§ 4.1 混凝土应力应变关系	103
§ 4.2 桩身砵模型的进一步改进	104

§ 4.3	土体的变形机理与本构关系	106
§ 4.4	岩体的变形机理与本构关系	109
§ 4.5	桩的破坏模式	112
§ 4.6	波动方程拟合分析法本构模型	113
第五章	高应变动力试桩法基本原理	120
§ 5.1	常用高应变法基本数理模型	120
§ 5.2	CASE 波动方程半经验解析解法	122
§ 5.3	CASE 法改进及 CASE 综合分析法讨论	125
§ 5.4	波动方程拟合分析法	133
§ 5.5	拟合分析步骤及拟合参数影响	135
§ 5.6	CCWAPC 波动方程拟合程序简介	138
§ 5.7	拟合法参数取值范围	144
第六章	高应变动力试桩法实践	147
§ 6.1	高应变法桩基动测系统	147
§ 6.2	高应变现场测试技术及注意事项	150
§ 6.3	关于测力传感器的讨论与改进	162
§ 6.4	常见桩型的动静对比试验研究	164
§ 6.5	短粗式端承桩的高应变试验研究	173
§ 6.6	短粗式端承桩的进一步动静对比验证	179
第七章	桩基动测实用测试与分析技术	184
§ 7.1	仪器保养与自检	184
§ 7.2	应力波反射法测试与分析	189
§ 7.3	高应变动力试桩法测试与分析	198
参考文献		210

第一章 概 述

木桩和竹桩是最早使用的桩,早在新石器时代,人类便通过打入木桩和竹桩在湖泊和沼泽地搭台作为水上住所,浙江省河姆渡就发现了这种原始社会遗址^[1],而我国西南许多少数民族地区至今仍沿用了这种习惯。随着人类活动向空间和海洋的延伸,各种高层建筑层出不穷,人们对桩基础的需要也越来越迫切,传统的木桩和竹桩逐渐为各种新的桩材料取代。

19 世纪 20 年代,已有人开始使用铸铁板桩修筑围堰和码头,二次世界大战后,无缝钢管也被作为桩材料用于基础工程,上海宝山钢铁厂曾使用直径 90cm、长约 60m 的钢管桩作为桩基础;自 20 世纪初钢筋混凝土预制构件问世以来,又出现了种类繁多的钢筋混凝土预制桩;1949 年,美国雷蒙德混凝土桩公司利用离心机生产出中空预应力钢筋混凝土管桩,我国亦于 50 年代开始生产和使用这种预应力钢筋混凝土桩。

就地灌注混凝土桩是以混凝土或钢筋混凝土为材料的另一种类型的桩。20 世纪 20~30 年代已出现了沉管灌注混凝土桩,30 年代上海修建的一些高层建筑,就曾采用 Franki 桩和 Vibro 桩等沉管灌注桩;50 年代,随着大型钻孔机械的发展,我国的铁路和公路桥梁大量采用了钻孔灌注混凝土桩和挖孔灌注桩。

随着大批就地灌注桩被广泛用于工业民用建筑之中,人们已很难对桩给予准确定义,传统意义上的桩,桩长应远大于桩径,钻孔灌注桩出现之前,由于打桩机械能力的限制,桩的直径普遍较小,这种界定尚且成立,钻孔灌注桩出现后,桩的直径日益增大,以至于很难对桩(pile)、柱(cylinder)和墩(pier)给出明确界限。

§ 1.1 基 桩 分 类

桩的种类五花八门,如果考虑用于复合地基的各种柔性桩(如粉喷桩、碎石桩、CFG 桩等)和近年来发展起来的异型桩(如树根桩、支盘桩、后压浆桩等),据沈保汉统计,竟有三百多种,但总体来讲,如不考虑尺寸影响,根据不同目的,我们可以按不同的分类法对刚性桩以如下方式进行分类^[2]。

1. 按成桩方法对土层影响进行分类

不同成桩方法对周围土层的扰动程度不同,这种不同将直接影响基桩承载能力发挥和计算参数的选用。一般可分为挤土桩、部分挤土桩和非挤土桩三类:

(1) 挤土桩,也称排土桩。桩周土体被压密或挤开,土的工程性质出现很大变化,主要有打入或压入式预制木桩、混凝土桩、打入式封口底钢管桩和混凝土管桩、以及就地沉管灌注桩等。

(2) 部分挤土桩,也称微排土桩。桩周土体仅受轻微扰动,土的原状结构和工程性质变化不明显,主要有打入式小截面 I 型和 H 型钢桩、钢板桩、开口式钢管桩(管内土挖

除)、螺旋桩等。

(3) 非挤土桩,也称非排土桩。将与桩体体积相同的土挖出,因而桩周土体扰动较少,但有应力松弛现象,主要有各种形式的挖孔或钻孔桩等。

2. 按桩材分类

根据桩的材料,可分为木桩(包括竹桩)、混凝土桩(含钢筋混凝土桩和预应力钢筋混凝土桩)、钢桩和组合桩。

(1) 木桩。天然原木或粗大的竹子做桩材料,也有加工成型的。

(2) 混凝土桩。混凝土桩是目前世界各地最广泛使用的桩,又可分为预制混凝土桩和就地灌注混凝土桩两大类,前者可在工厂或场地附近集中预制。一般为边长 250~600mm 的方桩,单节长 10~20m。当要求长桩时,可将单节桩连接成所需长度;为减少钢筋混凝土桩的钢筋用量和桩身裂缝,后来又发展了预应力钢筋混凝土桩,我国现用的预应力钢筋混凝土桩多为圆型管桩,外径一般为 400~550mm 等、壁厚 100mm、标准节长 8~10m、法兰盘接头。就地灌注混凝土桩可根据受力需要,放置不同深度的钢筋笼,其直径可根据设计需要确定。

(3) 钢桩。早期为铸铁板桩,现在则主要为型钢和钢管桩。钢管桩由各种直径和壁厚的无缝钢管制成,型钢包括各种形式的板桩,主要用作临时支挡结构或永久性的码头工程,H 型和 I 型钢桩也常用作支承桩。

(4) 组合桩。用两种材料组成的单根桩即为组合桩。较早采用的水下桩基就是组合桩,泥面以下用木桩,水中部分用混凝土桩,组合桩目前已很少使用。

3. 按桩的功能分类

桩主要承受轴向垂直荷载、横向水平荷载或两种兼而有之。因此,桩按功能可分为抗轴压桩、抗横压桩和抗拔桩。

(1) 抗轴压桩。一般工业民用建筑的桩基,在正常条件下(不考虑地震),主要承受从上部结构传来的垂直荷载。此类桩进一步据荷载传递机理又可划分为:

a. 摩擦桩。外部荷载主要通过桩身侧表面与土层的摩阻力传递给周围的土层,桩尖部分承受荷载很小,一般不超过 10%,这类桩基的沉降较大。

b. 端承桩。通过软弱土层后桩尖嵌入基岩的桩,外部荷载通过桩身直接传给基岩,桩的承载力主要由桩的端部提供。这种桩一般不考虑桩侧摩阻力的作用,但如果长径比很大,由于桩本身的压缩特性,桩侧摩阻力也可能发挥部分作用。

c. 端承摩擦桩。在外荷作用下,桩的端阻和侧摩阻同时发挥作用,端阻和侧阻所分担荷载的比例,与桩径、桩长、软土层的厚度,以及持力层的刚度有关。如若进一步划分,这类桩又可为端承摩擦桩(摩阻成分居多)和摩擦端承桩(端阻成分居多)。

(2) 抗横压桩,也称抗剪桩。港口码头工程用的板桩、基坑的支护桩等即为抗剪桩,主要承受水平推动荷载,桩身承受弯矩力,其整体稳定则靠桩侧土的被动土压力、或水平支撑和拉锚平衡。

(3) 抗拔桩。主要抵抗作用在桩上的拉拔荷载,拉拔荷载依靠桩侧摩阻力承受。

4. 按成桩方法分类

新的成桩方法和工艺,随科学技术和施工机械的发展,不断涌现,有的甚至尚未正式命名,这里仅介绍常用方法形成的基桩。

(1) 打入桩。将预制桩用击打或振动法打入地层至设计标高,打入的机械有自由落锤、蒸汽锤、柴油锤、压缩空气锤和振动锤等,其预制桩包括木桩、混凝土桩和钢桩。

(2) 就地灌注桩。按成孔的工艺又可分为两大类:

a. 沉管灌注桩。将钢管(钢壳)打入土层到设计标高,然后灌注混凝土。灌注时可逐渐将钢管拔出,或将钢管留在土层中,这类桩又可分振动沉管和锤击沉管两种。

b. 钻孔灌注桩。使用机械成孔,一般没有护壁或泥浆护壁,不扰动周围土层。钻孔的机械有冲击钻、旋转钻(尚可分为正循环、反循环等)、长螺旋和短螺旋等等,适用于不同的土层。

c. 人工挖孔灌注桩。人工取土成孔,类似如古代的打井方式,一般采用砖护壁或不护壁,多用于短粗桩,但也有用于 20 多米的情形,在黄土地区用洛阳铲取土成孔的桩型也可归入此类。

d. 夯扩桩、复打桩、支盘桩等。为提高灌注桩的承载力,可用管内锤击法或扩孔器将桩的端部扩大,也可将桩身局部扩大,借以改变受力状况,形成扩底的为夯扩桩,桩中出现树枝“托盘”的为支盘桩,桩底根系较多的为树根桩等等^[3]。

(3) 静压桩。利用无噪音的机械将预制桩压至设计标高。

(4) 螺旋桩。在木桩或混凝土桩的端部安一螺旋钻头,藉旋转机械将桩拧入土层至设计标高,这种桩现已较少使用。

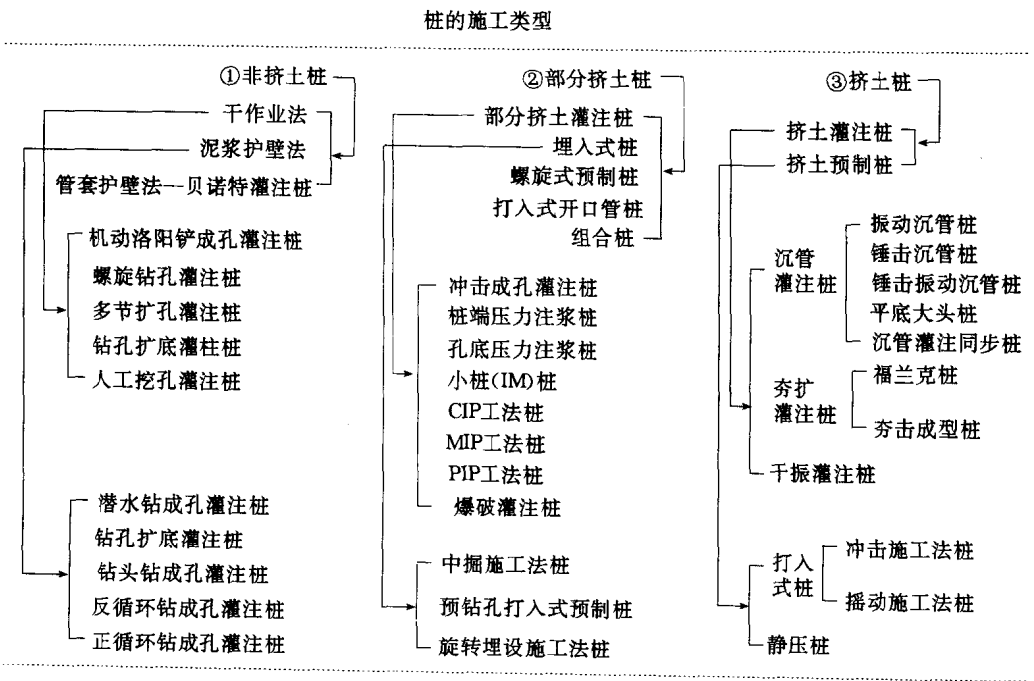


图1.1.1 桩的部分施工类型(沈保汉提供)

(5) 喷粉桩或搅拌桩。严格地讲此桩已属复合地基,这种桩将水泥、土混合在一起搅拌施工,细分又有干喷、湿喷等等。

除上述五种桩外,近 20 年已出现利用压浆提高桩承载力的压力灌浆桩等多种多样的桩型,这里不再一一列举。图 1.1.1 为依据成桩方法整理的部分桩施工类型。

§ 1.2 基桩工程的常见质量问题

基桩工程是隐蔽工程,出现的问题最多,后果也最为严重,震惊中外的武汉 18 层楼倾斜事故工程,就是因为夯扩桩没到达持力层引起的。近年来,房屋质量纠纷不断,很多都与基础质量相关,本节针对不同桩型,扼要介绍它们常见的质量问题^[2]。

1. 沉管灌注桩

沉管灌注桩分为锤击沉管、振动沉管和压力沉管三种工艺。桩径一般有 $\phi 325\text{mm}$ 、 $\phi 377\text{mm}$ 、 $\phi 480\text{mm}$ 、 $\phi 550\text{mm}$ 等,桩长一般不大于 25m。这种桩型质量不够稳定,故障率高,据广东某地区二百多根桩的检测统计,其承载力不满足设计要求的为 5%~10%,桩身质量有问题的达 15%~20%,主要的质量问题有:

(1) 锤击或振动沉管过程的振动力以弹性波传播方式在周围土体中衰减消散,沉管周围的主体以垂直振动为主,而一定距离后的土层,水平振动大于垂直振动,再加上侧向挤土作用,极易振断初凝邻桩,软硬土层交界处尤重。

(2) 若桩距小于三倍桩径,沉管过程可能会使地表主体隆起,从而在邻桩桩身产生一竖向拉力,使得初凝混凝土开裂。

(3) 拔管速度过快,管内混凝土浇灌高度过低,不足以产生一定的排挤压力,淤泥层易产生缩颈。

(4) 地层存在有承压水的砂层,砂层上又覆盖有透水性差的粘土层时,孔中浇灌混凝土后,由于动水压力作用,沿桩身至桩顶出现冒水现象,凡冒水桩一般都会演变成断桩。

(5) 振动沉管采用活瓣桩尖时,活瓣张开不灵活、混凝土下落不畅,引起断桩或混凝土密实度差的现象时有发生;当桩尖持力层为透水性良好的砂层时,若沉管后混凝土浇灌不及时,易从活瓣的合缝处渗水,稀释桩尖部分的混凝土,使得桩端阻力丧失。

(6) 预制桩尖混凝土质量不满足要求,沉管时被击碎塞入桩管内,拔管至一定高度后,桩尖下落且被孔壁卡住,形成桩身的下段无混凝土,产生俗称的“吊脚桩”。

(7) 钢筋笼埋置高度控制不准,找不到钢筋笼。

2. 冲、钻孔灌注桩

在地下水位较高的场地进行灌注桩施工,成孔方法有冲抓式、冲击式、回转钻式和潜钻式等,成孔过程采用就地造浆或制备泥浆护壁,以防止孔壁坍塌。混凝土浇灌采取带隔水栓的导管水下浇灌混凝土工艺。浇灌过程操作不当容易出现以下质量问题:

(1) 由于停电或其它原因,浇灌混凝土没有连续进行,间断一定时间后,隔水层凝固,形成硬壳,后续混凝土无法下灌,只好上拔导管,一旦泥浆进入管内必然形成断桩;而如用增大管内混凝土压力等办法,冲破隔水层,形成新的隔水层,破碎的老隔水层混凝土必将

残留在桩身中,造成桩身局部低劣混凝土。

(2) 水下浇灌混凝土的桩径不宜小于 600mm,桩径过小,由于导管和钢筋笼占据一定空间,加上孔壁摩阻作用,混凝土上升不畅,容易堵管,形成断桩或钢筋笼上浮。

(3) 泥浆护壁成孔,不同土层泥浆应按相应比重配制,否则孔壁容易坍塌。

(4) 正循环法清孔时,应根据孔的深浅,控制洗孔时间或孔口泥浆比重,清孔时间过短,孔底沉渣太厚,将影响桩端承载力发挥。

(5) 混凝土和易性不好时,易产生离析现象。

(6) 导管连接处漏水时将形成断桩。

3. 人工挖孔灌注桩

在地下水丰富的场地,采用人工挖孔灌注桩,容易发生以下质量问题:

(1) 地下水渗流严重的土层,易使护壁崩塌,土体失稳塌方。

(2) 土层出现流砂现象或有动水压力时,护壁底部土层会突然失去强度,泥土随水急速涌出,产生井涌,使护壁与土体脱空,或引起孔形不规则。

(3) 挖孔时如果边挖边抽水,地下水位下降时,护壁易受到下沉土层产生的负摩擦作用,使护壁受到拉力,产生环向裂缝,护壁所受的周围土压力不均匀时,又将产生弯矩和剪力作用,易引起垂直裂缝,而桩制作完毕,护壁和桩身混凝土成为一体,它是桩身的一部分,护壁裂缝破损或错位必将影响桩身质量和侧阻力的发挥。

(4) 孔较深时,浇灌混凝土若没采用导管,混凝土从高处自由下落易产生离析。

(5) 孔底水不易抽干或未抽干情况下浇灌混凝土,桩尖混凝土将被稀释,降低桩端承载力。

4. 混凝土预制桩

混凝土预制桩大多用柴油锤、蒸汽锤或自由落锤打入土中。打桩过程容易发生以下质量问题:

(1) 打桩时应选用合适的锤垫和桩垫,垫层过软会降低锤击能量的传递,打入困难;垫层过硬,将增大锤击应力,容易击碎桩头,一般最大锤击压应力不容许超过混凝土抗压强度的 65%。

(2) 打桩的拉应力易引起桩身开裂,打桩拉应力的产生及大小与桩尖土特性、桩侧土阻力分布、入土深度、锤偏心程度和垫层特性有关。若桩较长,桩尖土质较差,锤击入射的压力波从桩尖反射为拉力波,最大拉应力大多发生在打桩初期桩身中部一定范围,约 0.3~0.7 倍桩长位置;当桩尖土质较坚硬,入射波在桩尖的反射仍为压力波,压力波传至桩顶,此时桩锤已回跳离开桩顶,应力波因而将从自由桩顶端将反射形成拉力波,这时最大拉应力一般发生在桩的上部。当拉应力超过混凝土抗拉强度时,混凝土将开裂。

(3) 桩锤选用不合适,将难于打至预定设计标高或不满足贯入度要求。

(4) 桩头钢筋网片设置、配筋不符合要求或桩顶混凝土保护过厚,桩顶不平,桩身混凝土标号低于设计要求等,打桩时都易击碎桩头。

(5) 桩身倾斜或遇有障碍物,易导致桩头错位。

§ 1.3 基桩动测技术的发展

桩基础属隐蔽工程,为了保证桩基础的安全可靠,质量检验至关重要。过去人们常用直观的静载试验法,但现在,动测法已日趋流行。

基桩动力检验法具有费用低、快速、轻便等优点,因而越来越受到人们的重视和欢迎。1985 年的第十一届国际土力学学会,桩与其它深基础的总报告人 J. A. Foch 会前做过调查,当询问到桩的承载力测定用什么方法时,有 25% 的专家认为可以使用动力测试和波动方程法,欧洲使用动力试桩的人数已超过静力试桩的人数。

动力试桩,根据作用在桩顶上的能量大小,分为高、低应变两种方法,当作用在桩顶上的能量较大,直接测得的打击力与设计极限值相当时,可计算相应动测“极限承载力”,这便是高应变法;反之,作用在桩上的能量小,仅能使桩土间产生微小扰动,这类方法称之为低应变法。目前高应变法有动力打桩公式法、波动方程分析法、Case 法、曲线拟合法、锤击贯入法和动静法等。低应变法有机械阻抗法、应力波反射法、球击法、动力参数法和水电效应法等^[4]。

早在 100 多年以前就有人将桩假定为刚体模型,根据牛顿碰撞定律导出动力打桩公式,通过锤击能量、贯入度和一些经验常数估算单桩承载力。本世纪 30 年代曾有人将桩假定为土中的一维弹性杆件引入波动方程,研究了杆件内应力波的传播,但是数学求解复杂,无法用于解决工程实际。60 年代 A. Smith 提出了波动方程在桩基中应用的差分数值解法,它把锤-桩-土系统简化为质量块、弹簧和阻尼器模型,用电子计算机进行迭代运算,从而使波动方程打桩分析进入实用阶段^[5]。

美国 G. G. Goble 等在 1970 年发表了“关于桩承载力的动测研究”一文^[6],1975 年发表了“根据动测确定桩的承载力”研究报告^[7],70 年代中后期,美国 PDI(Pile Dynamics, Inc.)根据波动方程半经验解析解原理,开始生产以 PDA(Pile Driving Analyzer)打桩分析仪为名的高应变动力试桩专用仪器,通过量测桩顶应变和加速度转换来的力与速度时域波形,对桩的极限承载力、桩身质量、锤击能量、锤和垫的性能等作实时分析;其后又把桩作为连续模型,采用波动方程程序(CAse Pile Wave-equation Analysis Program/Continuous model,简称 CAPWAPC 程序)对桩侧摩阻分布、端阻和桩身缺陷进行实测波形的拟合法分析^[8]。荷兰、法国等也研制出了自己的桩基动测设备和相应分析程序,其中 TNO 在国际上亦有广泛应用^[9]。

1972 年湖南大学周光龙等人开始研究桩的动测技术,经多年研究探索和工程考核试验^[10],他们形成了动力参数测桩法;1976 年四川省建筑科学研究所和中国建筑科学研究院共同研究成功锤击贯入高应变动力试桩法;1978 年唐念慈在渤海 12 号储罐平台,沿两根大直径钢管桩两侧粘贴电阻应变片、在桩头安设加速度传感器,现场量测打桩过程中的各项数据及静荷载试桩时的桩身应力分布,并编制了 BF81 计算机程序,因而取得了各种静、动对比资料^[11];1980 年西安公路研究所研究了稳态激振机械阻抗法^[12],还与中国科学院电工研究所共同研究了水电效应法低应变动力测桩技术,自制了我国最早的低应变测桩仪器^[13];1980 年甘肃建筑科学研究所编制了输入实测力波的波动方程计算程序,并与上海铁道学院共同研制了我国的高应变打桩分析仪;1986 年中国科学院武汉岩土力学

研究所开发出第一台 RSM 桩基动测仪,经过多年发展,该仪器系列后来在国内占有较高市场占有率;1988 年后,中国建筑科学研究院开始针对引进的美国 PDA 打桩分析仪进行开发,编制了桩的特征线波动分析程序 FEIPWAPC,取得了较好效果,1992 年该单位又进一步研制了 FEI 系列桩基动测分析系统,基本与 PDA 兼容,以便携式计算机为主体,兼其高、低应变功能;1992 年,我国成立了首家专门从事高低应变桩基动测仪研制及方法研究的专业化公司武汉岩海工程技术开发公司,该公司开发的 RS 系列桩检测设备及 CCWAPC 波动方程拟合法分析软件业已达到国际先进水平,市场占有率也后来居上。

桩基动测技术的开发与应用,在国内经过十余年发展,已经取得了一系列可喜变化,这种变化不仅表现在国产检测设备及国内研究水准已与国外相差无几,更多的则表现在正确的动测技术已得到了极大的推广与贯彻,表现在广大测试人员对于各种桩基动测方法的合理运用与理性思维,表现在各级行业主管对桩基检测市场的正确导向与管理。

1994 年以前,我国低应变动测领域多见指数衰减式振荡信号、低应变提交极限承载力、高应变可以取代静载试验等不合理的现象与观点,学术领域和管理部门对各种方法解决问题的能力也争论得非常激烈,1993 年 9 月在济南召开的“全国桩基工程检测技术学术交流会”^[14]与 1994 年 1 月在北京召开的“全国小应变动测桩承载力研讨会”^[15]便具有鲜明的代表性。其后,建设部加强了这方面的行业管理,国家建工质检中心先后于 1994 年(北京方庄)、1996 年(郑州须水)、1998 年(郑州须水)组织了三批次全国性模型桩考核,《建筑桩基技术规范》JGJ(94-94)、《基桩低应变动力试桩检测规程》(JGJT93-95)、《基桩高应变动力试桩检测规程》(JGJ106-97)也先后出台,这些管理措施对提高全国测桩人员的水准,规范国内的测桩市场,起到了极大的推动作用。各省市的地方性考核与规程编制也以此为契机提上了议事日程,广大测桩人员的水平则日渐提高,对测桩技术的掌握、对测桩方法的理解也日趋理性,测试手段、测试曲线和结论样式也越来越趋于统一。

应力波反射法检测基桩完整性(低应变)、高应变实测曲线拟合法分析法检测基桩承载力(高应变)是目前得到肯定与推广的两种主要动测方法,但这两种方法同样存在大量问题,其中前者以缺陷程度无法定量分析、桩长评价误差较大、完整性分类人为因素太多最为突出,而后者则以灌注桩承载力的激发标准及动阻力剥离最为困难,为适应这种现状,人们目前不得不对这两种方法的应用范围进行了极大限制,以广东省正在编制的应力波反射法地方规程为例,该规程对桩长和砼强度检测不作要求,缺陷程度亦仅通过完整性分类反映,且分类中明确规定须存在不确定类(需用其它方法进一步检测),而(JGJ94-94)及(JGJ106-97)则明确指出高应变不能用于试桩,且不能单独用于工程桩验收,这些都是不得已而为之的符合方法现状的理性化管理措施,但研究人员并未因此而终止对基桩动测法进行更深入的研究,如雷林源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^[16,17],王雪峰提出结合一维纵波和扭转剪切波定量分析缺陷程度的全新方法,他还对高应变在短粗式端承桩上的应用进行了一系列理论改进和试验验证^[18]。更多的研究成果散见于各种专业期刊和会议文集之中。

第二章 应力波反射法理论基础

应力波反射法也称锤击法、T. N. O. 法、反射波法等,作为最简明的基桩完整性检测方法,应用最为广泛,我国已有千余家单位使用这种方法测桩,本章将对其理论进行系统阐述。

§ 2.1 应力波反射法控制方程

应力波反射法顾名思义,便是以应力波在桩身中的传播反射特征为理论基础的一种方法,该方法将桩假定为连续弹性的一维均质杆件,并且不考虑桩周土体对沿桩身传播应力波的影响。在物质坐标中研究一等截面均匀桩的纵向运动,取变形前($t=0$)质点的空间位置作为物质坐标,选桩轴为 x 轴(图 2.1.1),变形前的原始截面积 A 、密度 ρ 和其它材料性能参数均与坐标无关,假定桩在变形时横截面保持为平面,沿截面有均布的轴向应力,则各运动参量仅为 x 与 t 函数,整个问题简化为一维问题,这一假定对横向尺寸远小于应力波波长的细长桩可以成立。

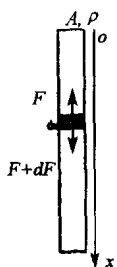


图 2.1.1 桩的一维连续模型

用 u 表示位移,应变为 $\epsilon = \partial u / \partial x$,工程应力 $\sigma = F/A$,这里 ϵ 、 σ 以拉为正,质点速度 $v = \partial u / \partial t$,以与 x 正向一致为正。

注意到应变 ϵ 和质点速度 v 分别是位移 u 对 x 和 t 的一阶导数,连续介质中位移 u 是单值连续函数,于是联系 ϵ 与 v 的相容方程即连续方程为

$$\frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial \epsilon}{\partial t} \quad (2.1.1)$$

(2.1.1) 式也称哥西连续条件或位移协调方程。考虑桩上长度为 dx 的微元体(图 2.1.1),据牛顿第二定律建立其运动方程为

$$\rho A dx \frac{\partial v}{\partial t} = F(x+dx, t) - F(x, t) = \frac{\partial F(x, t)}{\partial x} dx$$

即

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial \sigma}{\partial x} \quad (2.1.2)$$

这便是所谓的运动方程。

关于本构关系这里仅限于讨论应变率无关理论,假定应力只是应变的单值函数,材料的本构关系可写成

$$\sigma = \sigma(\epsilon) \quad (2.1.3)$$

(2.1.1)~(2.1.3) 式即为桩中纵向应力波传播的控制方程组,在偏微分方程理论中属于拟线性双曲线偏微分方程组,在给定的初始条件和边界条件下,可用它来求解三个未知函数 $\sigma(x, t)$ 、 $\epsilon(x, t)$ 和 $v(x, t)$ 。

考虑到一般情况下, $\sigma(\epsilon)$ 连续可微

$$\frac{\partial \sigma}{\partial x} = \frac{d\sigma}{d\epsilon} \cdot \frac{\partial \epsilon}{\partial x}$$

令

$$C^2 = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\sigma}{d\epsilon} \quad (2.1.4)$$

(2.1.2)式可改写为

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \frac{1}{\rho} \frac{d\sigma}{d\epsilon} \cdot \frac{\partial \epsilon}{\partial x}$$

即

$$\frac{\partial v}{\partial t} = C^2 \frac{\partial \epsilon}{\partial x} \quad (2.1.5)$$

与(2.1.1)式一起构成以 ϵ 和 v 为未知函数的一阶偏微方程组。

若将(2.1.1)式改写成

$$\frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial \epsilon}{\partial t} = \frac{d\epsilon}{d\sigma} \cdot \frac{\partial \sigma}{\partial t} = \frac{1}{\rho C^2} \cdot \frac{\partial \sigma}{\partial t}$$

即

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} = \rho C^2 \frac{\partial v}{\partial x} \quad (2.1.6)$$

和(2.1.2)式一起构成以 σ 和 v 为未知函数的一个阶偏微分方程组。

若将 $\epsilon = \partial u / \partial x, v = \partial u / \partial t$ 代入(2.1.5)式,则得

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - C^2 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0 \quad (2.1.7)$$

它是以位移 $u(x, t)$ 为未知数的二阶偏微方程,一般称为波动方程,由于作了应力只是应变的单值函数的假定,则 $C = \sqrt{1/\rho \cdot d\sigma/d\epsilon}$ 也只是应变 $\epsilon = (\partial u / \partial x)$ 的函数,因而(2.1.7)式对于 u 的二阶偏导数线性,属于两个自变量的二阶拟线性偏微分方程。在特殊情况下,例如应力是应变的线性函数时(符合 Hooke 定律 $\sigma = E\epsilon$), C 为常数($C^2 = E/\rho$), (2.1.7)式成了线性偏微分方程。进一步分析可知

$$u = f(x - Ct) + g(x + Ct) \quad (2.1.8)$$

是该方程的通解,也称 D'Alembert 通解, f 和 g 分别对应下行波和上行波传播的不变量, C 即是所谓的波速(应力波波阵面传播速度)。

§ 2.2 特征线和特征线上的相容关系

设在自变量平面 (x, t) 上有某曲线 $L(x, t)$ (图 2.2.1), u 的一阶偏导数 v 和 ϵ 沿此曲线方向的微分为

$$dv = \frac{\partial v}{\partial x} dx + \frac{\partial v}{\partial t} dt = \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} dx + \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} dt \quad (2.2.1)$$

$$d\epsilon = \frac{\partial \epsilon}{\partial x} dx + \frac{\partial \epsilon}{\partial t} dt = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} dx + \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} dt \quad (2.2.2)$$

式中, dx 和 dt 是曲线 $L(x, t)$ 上的微段 ds 在 x, t 两轴上的分量, dx/dt 是曲线 L 在点 (x, t) 的斜率。如果曲线 L 能使得(2.1.7)的左边化为只包含沿此曲线的方向微分(常微分),

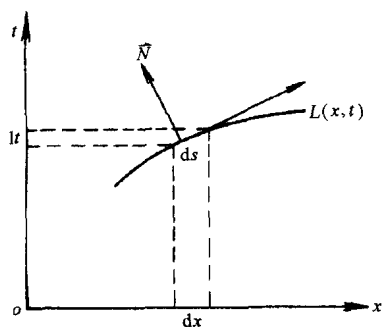


图 2.2.1

将使问题得到进一步减化,满足这一要求的曲线 $L(x, t)$ 也称特征线^[19]。

将(2.2.1)式和(2.2.2)式线性组合,有

$$dv + \lambda d\epsilon = \frac{\partial u}{\partial t^2} dt + \frac{\partial u}{\partial x \partial t} (\lambda dt + dx) + \lambda \frac{\partial u}{\partial x^2} dx = 0 \quad (2.2.3)$$

式中 λ 为待定系数,对比(2.1.7)式,两式若能互换,必须 u 的各二阶偏导数项系数成比例,即满足下列关系:

$$\frac{1}{dt} = \frac{0}{\lambda dt + dx} = -\frac{C^2}{\lambda dx} \quad (2.2.4)$$

据第一个等式得 $\lambda dt + dx = 0$, 即

$$\lambda = -dx/dt \quad (2.2.5)$$

据第二个等式得 $\lambda dx/dt = -C^2$, 将(2.2.5)式代入便有 $dx/dt = \pm C$, 或写成

$$dx = \pm C dt \quad (2.2.6)$$

因(2.2.3)式成立,(2.1.7)式左侧化成了常微分方程,故而对应的曲线 L 即为特征线,此即特征线微分方程。将(2.2.6)式代入(2.2.5)式,有 $\lambda = \mp C$, 代入(2.2.3)式,(2.1.7)式也即(2.2.3)式化为只包含沿特征线方向微分的常微分方程

$$dv = \pm C d\epsilon \quad (2.2.7)$$

此式规定了特征线上 v 和 ϵ 必须满足的制约关系,所以也称特征线上的相容关系,这样一来,(2.1.7)式的问题就完全等价地化成了解特征线方程(2.2.6)和相应相容关系式(2.2.7)的常微分方程问题。

与(2.2.6)式表示 (x, t) 平面的特征线相对应,(2.2.7)式也可看作 (v, ϵ) 平面上的特征线微分方程,其积分称作 (v, ϵ) 平面上的特征线,有时 (x, t) 平面又叫物理平面或 $x-t$ 图[图 2.2.2(a)],而 (v, ϵ) 平面则叫速度平面或 $\epsilon-v$ 图[图 2.2.2(b)],(2.2.6)式和(2.2.7)式间的对应性在几何意义上表示 (x, t) 平面上的两族特征线与 (v, ϵ) 平面上的两族特征线之间有一一对应关系(映像)。

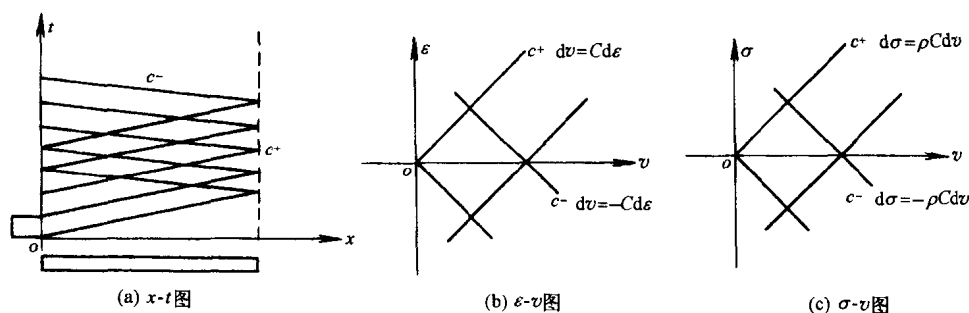


图 2.2.2 $C \pm$ 特征线簇

(x, t) 平面上的域与 (v, ϵ) 平面上的域之间、线与线之间、及不同簇特征线的交点之间均有对应性,正是这种对应性提供了(2.2.7)式的特征线解法基础。

以上分析均是以 v, ϵ 为未知函数,如果以 σ 和 v 为未知函数也可以求得特征线微分方程 $dx = \pm C dt$, 即(2.2.6)式,相容关系则变为

$$d\sigma = \pm \rho C dv \quad (2.2.8)$$

与(2.2.7)式等价,事实上,将(2.2.4)式代入(2.2.7)式,即可得(2.2.8)式。与 $(v-\epsilon)$ 平面对应的为 (v,σ) 平面,也叫应力平面或 $\sigma-v$ 图[图2.2.2(c)]。

特征线方程(2.2.6)在物理意义上表示扰动的传播,即在 (x,t) 平面上特征线代表扰动(波阵面)的传播轨迹, $C=\sqrt{d\sigma/d\epsilon}/\rho$ 代表波阵面传播的物质波速,正号表示正向波(即桩中的下行波),而负号表示负向波(上行波)的传播,(2.2.7)式或(2.2.8)式则确定了扰动传播过程中波阵面上质点速度 v 和应变 ϵ 或应力 σ 之间的相容关系。

进一步地引入积分常数 ξ_1, ξ_2, R_1, R_2 和 $F=A\sigma$,广义波阻抗 $Z=\rho CA$,并 v 用大写 V 代替,联系(2.2.6)、(2.2.8)式可得

$$\begin{cases} \text{下行波} & \begin{cases} x - Ct = \xi_1 \\ F + ZV = R_1 \end{cases} \\ \text{上行波} & \begin{cases} x + Ct = \xi_2 \\ F - ZV = R_2 \end{cases} \end{cases} \quad (2.2.9)$$

R_1, R_2 为Riemann不变量,为 ξ_1 和 ξ_2 的函数。

联立(2.2.8)式求解,对于空间中的任一点 B 而言(图2.2.3),其状态量可按下式求出:

$$\begin{cases} F = \frac{1}{2}[R_1(x - Ct) + R_2(x + Ct)] \\ V = \frac{1}{2Z}[R_2(x + Ct) - R_1(x - Ct)] \end{cases} \quad (2.2.10)$$

式中, R_1, R_2 的具体取值应由初边值条件中相同 ξ_1, ξ_2 点的实际值确定。

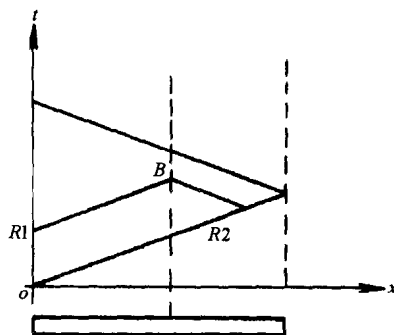


图2.2.3 任一点 B 的计算

比较(2.2.9)、(2.2.10)式,显然后者为前者的深入,它们均表明,当一维弹性波向下传播时,黎曼不变量 R_1 将保持不变,而向上传播时,黎曼不变量 R_2 保持恒定,任一点的状态则由这两个量线性叠加而成。

弹性波的传播过程中,尚应考虑间断波(波阵面)的跳跃条件。对于下行波波阵面 S^+ ,两侧间可通过上行特征线相关联并满足相应相容关系

$$dF = -ZdV \quad (2.2.11)$$

作为间断波,以间断量 $[F]=F^+-F^-$ 、 $[V]=V^+-V^-$ 表示波阵面两侧变量之间的差值,上式可演变为

$$S^+: [F] = -Z[V] \quad (2.2.12)$$

上行波阵面 S^- 上同理有

$$S^-: [F] = Z[V] \quad (2.2.13)$$

(2.2.10)、(2.2.12)、(2.2.13)式构成了整个 $(x-t)$ 空间的求解体系,这就是所谓的特征线求解方法。

§ 2.3 钟形脉冲波在桩中的传播

下章将提到,应力波反射法动测桩中,沿桩身传播的应力波波形尤其力脉冲基本上为