

桩基检测技术指南

刘明贵 余诗刚 汪大国 编

科学出版社

1995

(京) 新登字 092 号

桩基检测技术指南

刘明贵 余诗刚 汪大国 编

责任编辑 杨家福 余诗刚

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

中国科学院武汉分院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1995 年 10 月第 一 版 开本:787×1092 1/16
1995 年 10 月第一次印刷 印张:34 5/8 插页:0
印数:1—3000 字数:815 100

ISBN 7-03-005029-0/TB·132

定价:60.00 元

内 容 简 介

本书论述了桩基检测的现状与发展、振动理论基础、应力波理论、信号与系统分析基础、承压桩作用机理及承载力分析、桩基的工程检测方法、测试设备和桩基检测程序等内容。书末收编近 20 种国内外有关动力与静力试桩规范和标准。

本书可供岩土力学、地基基础和桩基检测等专业的工程技术人员以及大专院校相关专业的师生参考。

序

随着工程建设的蓬勃开展,尤其是城市高层建筑的迅猛发展,桩基常常是各种巨型建(构)筑物基础型式的首选对象。桩基的应用规模日益扩大,而桩的种类也不断推陈出新。众所周知,“高楼万丈平地起”,首先要打好基础,而基础大多是埋在地下的隐蔽工程。因此,百余年来桩基质量的检测一直是使工程界感到十分棘手的事。传统的桩静载试验检测方法,不仅耗资巨大、费工费时,而且由于抽样比例过小,以致所能获得的信息量太少,不能通盘掌握基础中全部桩的质量情况。

动力测桩的理论研究和应用在 19 世纪末就引起广大工程师的浓厚兴趣,但由于技术发展水平的限制,长期停留在利用动力打桩公式推估单桩承载力的研究领域内。其地域性因素影响很大,研究成果难以在广大地区内推广,以致曾有数以百计的动力打桩公式问世,很难判断哪一种公式是最具普遍权威性的。

只是在 20 世纪 30 年代初,应力波理论首次被用来分析打桩工程之后,才开辟了动力测桩技术的新纪元。波动方程理论愈来愈被世人所接受,使更多的研究者潜心研究这一理论。动力测桩技术的新飞跃是与 60 年代以后电子计算机技术的迅速发展分不开的。先进的科技理论要转化成真正的生产力必须求助于计算现代化,这一点在动力测桩领域内表现得极为突出。我国由于 10 年动乱的历史原因,这一技术的发展是在 70 年代刚刚起步,80 年代初才真正开展起来的。但是,一旦先进技术被人们所认识和掌握,就会很快变成巨大的生产力。短短的十余年间,我国工程界对动力测桩技术的应用已经从陌生到熟悉,从半信半疑到普遍承认和欢迎,工程建设对它的需求也随之愈来愈大。

十余年来,我国科技界和工程界联手协作,在引进国外先进的测桩技术之后,不遗余力地着手开发我国自己的动力测桩软硬件系统。在这方面,中国科学院武汉岩土力学研究所做了大量的研究、开发工作。十余年间,一代又一代动力测桩系统和分析软件相继问世,而且更新换代的周期愈来愈短,测桩队伍日益壮大,技术水平和开发产品的实力都呈现着日新月异的崭新面貌。他们在国内已处在举足轻重的地位。

当前,动力测桩技术力量还远远满足不了工程建设的需要,而动力测桩队伍的技术素质及人员数量更显得很不相称。这一现状急需改变。本书正是以这些情况为背景,旨在从桩的振动和应力波基础理论开始,全面论述桩基动力检测技术应用的方法和手段。本书的特点是始终紧紧地围绕承载桩的完整性检测和承载能力预测这一主要研究对象,着重介绍了有关承载桩的作用机理及承载力分析的基本原理,对基桩的工程检测方法的分类,以及各类方法的成果判释和分析原理等进行了较为系统的论述。本书深入浅出地向读者(包括初学者)提供一整套科学的、实用的、易于掌握的这一专业的知识和技术。本书对测试设备和检测程序也作了详细的、清晰的介绍。书末收编了近 20 种国内外有关动力与静力试桩规范和标准。

本书既对国内外这一领域内科技发展的现状作了深入、详细的综合评述,又将作者多年来孜孜不倦地从事这一领域研究的成果和宝贵经验总结出来,奉献给广大读者。本书首次在我国将桩基动力检测技术视为一门完整的、新型的分支学科,向从事这一技术工作并应用其成果的广大工程技术人员提供一本系统教材或参考书。我坚信,本书的出版必将对我国动力测桩技术

和岩土工程学科的发展起到重要的促进作用。粗浅地拜读本书清样之余,感到各章各节的字里行间都充满了科学的乳汁和辛劳的结晶。本人也以先读为快,受益匪浅,特作短序,以表感激之心。

刘祖德

1995年5月12日

目 录

第一章 桩基检测技术现状与发展趋势	(1)
1-1 桩基检测技术在国外的发展和应用	(1)
1-2 桩基检测技术在我国的发展和应用	(4)
1-3 建议与展望	(9)
第二章 振动理论基础	(13)
2-1 振动现象与力学描述	(13)
2-2 单自由度系统的自由振动	(15)
2-3 单自由度系统的强迫振动	(22)
2-4 一维弹性杆的振动	(28)
2-5 桩的强迫纵向振动	(36)
第三章 应力波基础	(40)
3-1 应力波的现象和概念	(40)
3-2 一维杆中纵波的控制方程	(41)
3-3 特征线和特征线上相容关系	(43)
3-4 半无限长杆中的线性弹性波	(45)
3-5 波阵面的有关问题	(49)
3-6 弹性波的相互作用	(51)
3-7 弹性波在固定端和自由端的反射	(53)
3-8 弹性波在不同介质面上的反射和透射	(54)
3-9 弹性波在变截面杆中的反射和透射	(57)
第四章 信号与系统分析基础	(61)
4-1 信号的描述及分类	(61)
4-2 信号的分解	(67)
4-3 系统的分类与分析方法	(71)
4-4 连续信号的离散化	(73)
4-5 采样定理	(76)
4-6 频率混叠与假频现象	(77)
4-7 傅里叶级数与离散频谱	(79)
4-8 傅里叶变换与连续频谱	(84)
4-9 有限离散傅里叶变换	(87)

4-10	快速傅里叶变换算法(FFT).....	(90)
4-11	频率分辨率的提高——200M FFT	(100)
4-12	Hilbert 变换	(104)
4-13	采样数据的预处理	(107)
第五章	承压桩作用机理及承载力分析.....	(123)
5-1	原理概述	(123)
5-2	单桩承载力确定方法	(128)
5-3	桩的垂直受压静载试验	(136)
5-4	桩的极限荷载的确定	(142)
5-5	桩的屈服荷载的确定	(150)
5-6	桩侧摩阻力和桩端阻力的分配.....	(156)
5-7	桩的荷载传递理论分析方法	(164)
5-8	荷载传递实例及荷载传递与位移的关系	(173)
5-9	桩的静载试验曲线及分析	(179)
5-10	群桩垂直受压承载力.....	(187)
5-11	单桩容许承载力	(203)
5-12	单桩水平承载力	(211)
5-13	群桩的水平承载力及影响桩水平承载力的因素	(218)
5-14	桩的抗拔承载力	(227)
第六章	桩基的工程检测方法	(234)
6-1	桩基础设计与现场静载法	(234)
6-2	小扰动应力波反射法	(245)
6-3	反射波法信号拟合技术	(253)
6-4	瞬态机械导纳法	(257)
6-5	小应变动力参数法	(261)
6-6	Case 法	(263)
6-7	CAPWAPC 方法.....	(277)
6-8	大应变波动方程反演拟合技术.....	(287)
第七章	测试设备	(295)
7-1	检测传感器	(295)
7-2	信号适配器	(308)
7-3	采样/保持与模/数转换	(311)
7-4	动态信号谱分析	(317)
7-5	桩基检测分析仪(国外)	(330)
7-6	桩基检测分析仪(国内)	(332)
第八章	桩基检测程序	(352)

8-1	RSM-Pilestar 软件	(352)
8-2	“王氏”动力验桩分析软件	
	“WANG-PLP”&“WANG-PCP”	(369)
8-3	桩基无损检测中桩身缺陷定量分析软件	(369)
8-4	单桩承载力计算软件	(374)
8-5	一个以波动理论为基础计算单桩承载力的计算机程序	(376)
8-6	桩的大应变波动分析优化算法程序	(382)
8-7	新编凯斯波动分析程序	(390)
附录一	高应变动力试桩法规程	(396)
附录二	桩基低应变动测规程	(410)
附录三	锤击贯入试桩法规程	(434)
附录四	建筑桩基技术规范(报批稿)	(449)
附录五	建筑地基基础设计规范	(458)
附录六	桩基试验要点	(460)
附录七	软土地区工程地质勘察规范	(464)
附录八	建筑地基基础设计规范	(470)
附录九	建筑地基处理技术规范	(471)
附录十	高层建筑岩土工程勘察规程	(472)
附录十一	工程地质手册——载荷试验	(473)
附录十二	高应变动力试桩的标准试验方法	(489)
附录十三	桩基础总论 Section 02351	(497)
附录十四	英国桩工专业联合会桩的试验规范	(498)
附录十五	英国桩工规范合同文件与测量	(507)
附录十六	国际上应用 PDA 桩基分析仪系统测试桩规范	(513)
附录十七	挪威近海结构物的设计、建造和检验规范	(516)
附录十八	丹麦基础工程实用规范	(527)
附录十九	前苏联建筑法规 СНиП II — Б. 5-67——桩基础设计	(531)
	全书参考文献	(550)

第一章 桩基检测技术现状与发展趋势

桩基是各类建筑物基础的一种常用型式。随着我国工程建设事业的蓬勃发展,铁路、公路、港口码头及城市建设得到了迅速发展。桥梁、塔架、重型构筑物、堤坝、高层建筑及海上采油平台以至核电站等工程大量采用桩基础,桩基础往往是最基本的基础形式。我国地域辽阔,地质条件复杂,同时又由于城市建设用地及环境条件限制,单一的施工机械或施工方法无法适应各种复杂条件的要求。为达到成“桩”目的,目前我国常用基本的成桩方法达 20 多种,如何检测成桩质量及各种桩型的承载力往往是设计者与建设业主所关心的问题。近几年来,全国各地建筑工程质量监督部门相继成立,桩基工程检测技术水平及设备也随之提高,为桩基工程检测技术的应用及发展奠定了基础。

我国桩基设计、施工技术的发展,对桩基工程检测技术提出了更高的要求。对于桩基工程,如何设计采用桩的类型、材料、尺寸大小、桩的布局,以及合理估计桩基础的承载能力是大家十分关心的问题,而单桩的质量和实际承载力则是桩基能否达到设计要求的关键。为了达到准确判定桩基工程的实际承载力,把握检测工作要点,桩基工程检测技术应明确分为两大类,即成桩质量检测与桩基承载力的检测。成桩质量的检测目的是检测施工质量是否达到设计要求;承载力的检测则是在保证成桩质量的前提下,检测桩周土实际承载力是否达到设计承载力的要求。在有质量缺陷的桩上进行承载力检测,其结果必然毫无意义,且可能产生承载能力的误判而造成巨大的浪费。因此,对于重要建筑或高层建筑,成桩质量检测及承载力检测两者缺一不可。目前确定单桩承载力的方法很多,这些方法可以分为两大类:第一类方法称直接法,是通过对实际试桩进行动的或静的试验测定;第二种方法称间接法,也有人称为静力计算法,则是通过其他手段,分别得出桩底端阻力和桩身的侧阻力后相加求得阻力,毋需对桩进行试验。间接法一般比直接法简单,但毕竟不是在具体桩上取得的试验结果,所以可靠性不如直接法,通常主要在初步设计阶段作为估算桩承载力的手段。

1-1 桩基检测技术在国外的发展和应用

桩的动测方法在国外已有 100 多年的历史,最早的动测方法是在能量守恒定理的基础上,利用牛顿撞击定律,根据打桩时测得的贯入度,推算桩的极限承载力。采用这种方法确定极限承载力时所用的关系式,称为动力打桩公式。动力打桩公式有很多种,一度成为除静荷载试验以外唯一能用来判断桩承载力的现场试验方法。虽然动力打桩公式都存在着这样或那样的问题,难以准确判断桩的承载力,但至今国外不少单位和技术人员还在应用,并且已有不少改进。近代的动测技术则是以应力波理论为基础发展起来的。随着生产发展的需要,尤其是海洋石油工业的兴起,出现了如采油平台等大型桩基工程,一根桩重达 4300 kN,液压桩锤的冲击能量可达 5600 kN·m,单桩承载力高达 50000 kN,

在这种情况下,旧的打桩公式自然已不能满足打桩工程的需要,因而,能正确反映打桩过程的应力波理论便在桩的动测技术上得到迅速的发展和应用。

1-1-1 理论与方法的发展

早在30年代,应力波理论就被用于分析打桩工程,1931年D.V.Isaacs首先指出,桩顶受到桩锤冲击后,冲击能量是以波动形式传至桩底,因此可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E.N.Fox作了许多简化假定,对打桩过程进行了粗略分析,得出了用于打桩分析的波动方程的解答。1950年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“打桩分析波动方程法”这一著名论文,对打桩的贯入性状进行了分析,并讨论了桩锤、锤垫、桩帽、桩垫以及桩和土的模拟问题,在文中定义了模拟中所涉及的全部参数,并从各种不同的应用波动方程的打桩实例中,提供了这些参数的建议值,从而使波动方程分析法开始进入实用阶段。在此后的10多年里,国外许多学者在计算机程序编制、参数的确定、可靠性研究以及波动方程的实际应用等方面进行了大量的工作。此外,瑞典的H.C.Fisher从50年代起就研究行波理论的图解法。上述这些研究工作对发展波动方程的应用技术作出了重要贡献。由于计算机程序是应用波动方程方法的关键,所以在这方面的发展尤为迅速,仅在美国就有十余种程序得到了广泛采用这些程序均有其特点和适用条件。例如TTI程序是得克萨斯运输研究所编制的程序,能考虑桩身接头和松动等因素;OCEAN WAVE程序和TIDY WAVE程序与TTI程序基本相同,但前者包括了新型液压锤的模拟,后者则以桩顶的实测力作为输入,可减少因桩锤等模拟不当而引起的误差;WEAP程序是CASE西部后备大学编制的适用于柴油桩锤的程序;DUKFOR程序是DUK大学编制的可以考虑打桩时残余应力的程序;SWEAP程序则是WEAP程序和DUKFOR程序的结合;PSI程序,能作考虑残余应力的多锤分析,对难打的桩的特性作出较好的描述,还能按土的非线性变形特性进行模拟轴向荷载试验的计算;CAPWAP程序则完全根据桩顶处实测的力和加速度数据计算桩的承载力和阻力分布,可随时根据计算结果与实测值的对比情况,调整输入数和阻力分布,进行重新计算,直至吻合为止。此外,荷兰富国国际工程地质顾问公司编制的WAVEQ,SRD程序以及荷兰HBX液压锤公司等也都有自己的波动方程计算程序。

波动方程应用于动测技术的另一类方法是将桩作为连续的弹性杆,在对边界条件作适当处理或简化后,设法直接对波动偏微分方程积分求解。丹麦工业大学的B.Hansen教授等发表了这方面的研究结果。荷兰建筑材料与建筑结构研究所的V.Koten也在简化的假定条件下,利用线性代换和阶跃函数,得出了无限长桩在锤击下考虑桩侧阻力对应力波起衰减作用的闭合解。70年代初,他们研制成TNO桩检测系统,用于检验桩的完整性和桩身质量。后来,通过在砂土中的静载和动力试验对比,证明可以用动测方法确定静载下桩的承载力,于是又研制了相应的分析方法和计算程序(TNOWAVE程序)。此外,CASE法也是属于这一类的方法,它是由Goble等人在1964年开始研究的,在几千根桩上进行了试验,并研制了相应的打桩分析仪,如瑞典生产的PID打桩分析仪就是以CASE法为原理制成的。

从 1980 年以来的十几年间,先后在瑞典、荷兰等国召开了四次“应力波理论在桩基工程中应用国际会议”。近几年来,以波动应力理论为基础的桩的动测技术在美国和欧洲又有新的发展,在预估承载力方面,已经开始广泛地应用于就地灌注桩的承载力动测上。对如何充分发挥土的阻力又不致使桩顶或桩身引起破坏的问题,研究出一些措施。在计算程序上,出现了采用连续模型及特征线法的 CAPWAP/C 程序。法国的 Gonin 等认为锤击力波通过桩身时所动员的桩侧阻力与静载下发挥的桩侧阻力毫无关系,因此常用的锤击方法存在着严重缺点,他们提出了一种崭新的动测承载力的方法,并研制了新的动测设备,使锤击力的作用时间延长,更接近于静载曲线。对端承桩和特殊土质条件下桩的承载力问题也有不少研究和应用波动方程法的实例分析。在桩质量检验方面,随着电子仪器的改进而发展起来的低应变的动测法已被证明是经济有效的方法,在荷兰、奥地利、原西德以及美国一些地区目前已广泛采用,如荷兰又改进了原来的测试系统,推出 TNO 携带式 FPDS-2 型基础桩诊断系统。在桩土系统的动静性状方面,通过对比试验进一步研究和改进动测技术的可靠性,如为使实测应力波与计算波形吻合好,应进行室内模型桩试验以改进桩侧阻力的计算模型。在锤击和现场量测设备方面,也有很多改进,例如创造了碟簧式桩锤和预应力碟簧式桩帽等,其作用都是使锤击应力峰值减小而应力波的持续时间增长,从而使锤桩不易损坏而提高打桩时的贯入效率。另外对桩顶力和加速度的量测方法和所用的传感器等也进行了研究和改进。

1-1-2 仪器与设备概况

瑞典乌波萨拉大学等根据 CASE 法原理研制成功的 PID 打桩分析仪,由瑞典打桩技术发展公司生产,它配有 HP9816 型微机进行分析,并与带软盘的数据存储示波器和数字绘图仪连接,可显示分析结果。该分析仪带有前置处理机,可将信号输入记忆示波器供大型计算机作进一步分析。PID 分析仪的主要功能除可用来检验桩的完整性和预估承载力外,还可测定打桩时桩身的锤击应力。

荷兰建筑材料与建筑结构研究所研制的 TNO 基础桩诊断系统是一种声波式的测试仪。其特点是将输入电路设计成自动调节量程,具有最佳分辨率,使桩底反射上来的微弱信号能清晰地显示出来。仪器内装有数字计算机,信号经数据处理后在示波器屏幕上显示。仪器体积小,重量轻,最适宜于现场试验。TNO 诊断系统最初仅用于检验桩的完整性,后来又研制的动荷载试验和打桩分析的方法及计算程序,可用来预估桩的侧阻力、端阻力和桩的荷载—沉降特性以及监测打桩过程中桩和桩锤的性能,并可根据土的性质、锤的参数和桩的尺寸,对打桩效率和可行性作出判断。

美国桩动力公司在 Goble 教授主持下生产的 PDA 打桩分析仪,由模拟系统和数字处理系统两大部分组成,前者包括信号的放大、滤波、基线修正、加速度积分、测试值平均等,能在 FM 磁带记录仪上记录模拟信号;后者包括 A/D 变换器、微处理机、存储器以及输出部分的示波器、D/A 变换器、计算机和数字记录与绘图仪,也可经解调器调制后通过电话将数据送到远处的中央计算机作分析。PDA 的功能与上述两种设备基本相同,可用来检验桩的完整性,并利用 CAPWAP 程序预估桩的承载力。1992 年,PDI 公司又推出了 PAK 型打桩分析仪。

荷兰富国国际工程地质公司生产的 PDR 打桩记录仪,可以监测打桩过程并同时显

示出打桩中桩的承载力。类似仪器还有荷兰混凝土集团生产的安装在液压锤上的打桩分析系统。

1-1-3 桩的动测技术在外国的应用

桩的动测技术在国外已得到广泛的应用,例如TNO桩诊断系统已在许多国家推广,积累了10多万根桩的测试经验,PID和PDA打桩分析仪也已在各大洲应用,试桩达几万根。在许多北欧和西欧国家如瑞典、芬兰、荷兰等国,大多数试桩均已采用动测法。1985年在第十一届国际土力学及基础工程会议上,J.A.Focht所作的关于“桩和其他深基础”的总结报告中,公布了向世界各地询问有关确定单桩垂直承载力的方法的调查结果,在被询问的专家中,有30%的人回答在粘性土中可用动测法(波动方程法),其中美国和加拿大则有50%的人认为可用动测法。

为了保证动测桩技术的正确应用,不少国家已将桩的动测法列入地基基础设计与施工规范,如澳大利亚桩基设计施工规范(AS2159-1978)规定可根据动力打桩公式或波动方程预估砂性土中桩的极限承载力;国际土力学和基础工程学会在1983年将CASE法和CAPWAP法作为学会建议的方法列入学会野外及室内试验委员会编制的规范;加拿大基础工程学会规范(1977年)规定,桩的承载力可用动力打桩公式、波动方程和打桩分析仪进行预估或用静荷载试验确定;荷兰规定所有灌注桩均须经过动力检测;原西德在广泛应用动测法的基础上,专门设立委员会从1980年开始制定有关动测步骤、方法与数据处理的建议,并于1984年正式出版桩的动测规程的第一稿。他们不仅将桩的动测技术用来解决桩的质量检验以及一般桩的承载力测定,而且成功地应用在大直径灌注桩甚至沉井和复杂的桩柱中。

1-2 桩基检测技术在我国的发展和应用

我国开展桩的动测技术起始于70年代初。1972年湖南大学周光龙教授就提出了桩基参数动测法,它对开创我国桩基动测方法研究,起到积极推动作用。70年代末80年代初,随着我国高层建筑等大型工程的不断兴建,动测桩技术在我国得到迅速发展。我国科技人员在学习外国先进技术的基础上,研究和引进了一系列动测桩方法和技术,它们在工程上得到了广泛的应用。

1-2-1 理论与方法的发展

在研究和发展我国独特的桩基动测方法中,1972年湖南大学土木系振动小组周光龙教授提出了桩基动参数法,同时还发表了“用动力法测定桩基各参数的原理、方法和分析”一文,探索用简单的锤击或重物冲击方法,获得桩-土体系的自振频率和其他动参数,并换算成桩的承载力。目前,动力参数法是各种动测方法中最简单的一种方法,它不仅用来测定桩的垂直承载力,也可以用来测定桩的水平承载力,动参数法在1985年正式通过省级技术鉴定,并在以后的推广应用中有新的改进。在此基础上,国家海洋局第二海洋研究所对程序设计又作了一定的改进,研制成DCY-1型桩基参数动测仪,该仪已在上海、杭州等地的桩基工程中得到应用。

70年代初我国就开始研究和应用法国首创的机械阻抗法,这种方法主要用于检验桩的质量和完整性,试验设备比较简单,便于推广。1978年湖南大学振动研究室和四川省成都市城市建设研究所的科技人员在西安公路研究所将其研制成功,并先后在工程中进行现场试验。随后,成都市城建研究所在此基础上研制了专用的ZK-2型桩基振动检验仪。机械阻抗法检验桩质量的技术已通过部级鉴定,许多单位已将它应用到工程中。

波动方程方法在我国的应用首先由南京工学院唐念慈教授等于1978年在渤海12号平台的钢管桩动力测试中获得成功。他们与渤海石油公司设计院等单位编制了BF81程序,它是我国最早使用的以锤心初速度为初始条件的程序之一。此后各单位编制了功能不同的计算机程序。例如,甘肃省建筑科学研究所于1980年编制了与CAPWAP程序相类似的以输入实测力波的波动方程的计算机程序,它可以消除桩顶以上锤、锤垫、桩帽、桩垫等模拟参数的误差,并且在研究桩-土荷载传递规律的基础上为准确确定土的动参数提供了可能。

西安公路研究所和中国科学院电工研究所共同研究成功的水电效应法,是通过桩顶上水容器内放电对桩施加一瞬态冲击力,由于水介质不传递剪切波,故桩只受压缩波的作用而产生垂直向振动,然后通过分析桩的振动波形,来判断桩的质量。为了使该方法得以实施,故研究并配置了相应的振动源装置、水声法接收信号的装置以及信号的处理装置。水电效应法在1985年通过了部级鉴定,并在数百项工程中得到了广泛应用。

四川建筑科学研究所与建设部中国建筑科学研究院地基所共同研究成功的锤击贯入法,是通过不同落高的重锤,对桩顶施加瞬时锤击力,使桩产生出贯入度,根据实测的锤击力和相应的累计贯入度关系曲线与同一桩的静载荷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,求出桩的极限承载力。为此,他们曾分别对预制桩、扩底桩和钻孔灌注桩进行许多现场试验,通过数十根静、动对比试验结果,得到桩的静极限承载力与动极限承载力线性相关的结论,从而为锤击贯入试验求静极限承载力提供了方便的途径。锤击贯入法于1981年通过部级鉴定。

在多年研究桩的动力特性的基础上,冶金部建筑研究总院工程抗震研究室提出了不必考虑土参振质量的桩-土体系综合动刚度的模型;在现场对比试验基础上,建议改用强迫振动方法测定体系的无阻尼共振频率;他们还研究了不同激振方法对同一桩、土条件下动刚度的影响,指出动应变量级大小对动刚度值有很重要的作用;为了避免测定土在强度破坏状态下桩的极限承载力,还分析了大量的桩静荷载试验资料,提出按容许变形曲线确定单桩容许承载力的原则和方法,这使桩的动测方法大为简便,而且所测得的容许承载力是在控制桩的沉降量的前提下得到的,一般可不再验算桩基础的沉降。冶金部建筑研究总院还着重研究了桩侧土摩阻力大小以及桩尖土性质对各阶共振频率的影响,并在此基础上提出了新的计算桩长公式和判断桩质量的方法。综合上述成果而形成的共振法试桩技术经过大量的工程试验和静、动试验对比,取得成功。该方法在1985年通过部级鉴定。此后,在广泛应用的基础上,编制了“共振法试桩操作规程”,并于1986年研制成功GZD-86型桩动测自动控制系统,已经部级鉴定。

中国科学院武汉岩土力学研究所吸取了国内外动测桩先进技术,在10多年来的桩基检测工作中,对桩基动测方法作了进一步的研究和应用,进行了大量的现场测试和室内试

验研究工作,应用岩土力学研究手段,发挥本专业的优势。该所的动测桩技术与方法及研制的桩基动测分析仪波及全国20多个省市。自1986年至1993年,该所采用CAPWAPC法、CASE法、锤击波法、动力参数法、水电效应法等测试技术,共完成近千项测桩工程任务,检测了近二万根桩。同时,在进行大量理论研究和方法试验的基础上,该研究所的专家研制了大量的桩基动测软件和试验仪器,王靖涛教授研制的“WANG-PIP”和“WANG-PCP”软件,已获美国版权。WANG-PIP程序是桩基完整性快速定量分析程序,获得桩身缺陷损坏程度的定量评估,从而能够对桩身完整性作出分类。WANG-PCP程序是用于单桩极限承载力的计算,它具有美国CAPWAPC法的全部功能,计算出单桩的极限承载力、摩阻力沿桩身的分布、端阻力在桩身中任一截面处压力和速度的变化和模拟试验的荷载-沉降曲线($P-S$ 曲线)。该所同时还研制有“新编CASE波动分析程序”、“桩身无损检测中桩身缺陷定量分析程序-PCC”,“RSM-Pilestar”(桩星)软件及“CPSA桩基分析软件”等程序。此后,在广泛应用研究的基础上,先后还研制了RSM系列桩基动测分析仪、RAP系列动力验桩仪、FD系列桩基动测仪,实现桩基检测自动数据采集、处理、显示打印等功能,使人为的工作量大为减少、精度高、可靠性好,已在全国各地的桩基工程中得到广泛的应用。

几种动测法的主要特点汇总于表1-1中。

我国在桩的动测方面的研究,还远不止上述几个方面,有些单位已研制了新的测试方法和设备,其中有的已付诸工程实践;目前已在推广应用的几种动测法,也在不断改进和不断完善之中。

1-2-2 桩的动测技术在我国的应用

桩的动测法在我国已进入了实用推广阶段,并且随着研究开发工作的深入、提高和国产测桩仪的普及,得到愈来愈广泛的应用。我国目前采用动测法的试桩数实际上已远远超过静荷载试验的桩数,而且,在这些大量的试桩中,虽也有误差稍大或个别误判的情况,但绝大多数试桩结果表明,这些动测法都有不同程度的可靠性,其测试结果可作为设计或现场检验的参考依据。几年来采用动测法试桩的工程均已投入使用,大量的工程实践证明,动测法有效地填补了静力试桩的不足,满足了桩基工程发展的需要。尽管如此,各种动测法在多年的实际应用中,都不同程度地存在着一些问题,亟待研究解决。这些问题也是造成动力试桩结果有时误差较大的主要原因,即方法本身缺点、参数的误差、试验误差、测试人员的分析水平低等。

1-2-3 采用动测法试桩的技术经济效果

采用动测法试桩的技术和经济效果是十分明显的,它与传统的静荷载试验(维持荷载法)相比,在试验设备、测试效率、工作条件或试验费用上,均有明显的优越性(见表1-2)。

采用动测法所带来的最大的技术经济效益还在于可以及时地给设计提供合理的桩承载力数值,充分利用桩的承载力,节约工程造价;及时地处理桩基工程事故,缩短工期的延误;及时检查出工程桩的隐患,便于采取补救措施,防止重大安全质量事故。举以下几个实例,就足以说明。

表 1-1 动力试桩方法一览表

方法名称	动力参数法	共振法	锤击贯入法	机械阻抗法	水电效应法	波 动 方 程 法			动力打桩公式
						Smith法 (SMITH)	CASE法 (CASE)	CASE波动分析 程序法 (CASWAP)	
激振方式	自由振动 (手锤冲击)	强迫稳态振动 (激振器扫频激振)	自由振动 (落锤冲击)	强迫稳态振动或 自由振动或随机振 动(激振器或手 锤)	自由振动(水中) 放电脉冲激励	自由振 动 (冲击, 对 P_{∞} 法则用标准落锤冲击)			自由振动 (锤击)
现场实测 的物理量	1. 自由振动频率 2. 振动波形	1. 共振频率 2. 桩顶响应的幅 (相)频曲线	1. 桩顶锤击力 2. 贯入度	1. 机械导纳幅(相) 频谱 2. 相干函数谱	1. 时域波形 2. 功率谱 3. 桩顶压强	1. 贯入度 2. 桩顶、桩身应力	1. 桩顶加速度随时间 的变化曲线 2. 桩顶应力随时间 的变化曲线	1. 间隔法 2. 间隔法 3. 贯入度	1. 贯入度 2. 弹性变形值 3. 桩顶冲击能(对 改进法)
	1. 确定垂直临界 荷载 2. 确定水平临界 荷载 3. 检验桩身质量	1. 确定垂直极限容许承 载力 2. 确定水平容许承载 力 3. 检验桩身质量判断 缺陷位置	1. 确定垂直极限承载 能力 2. 检验桩身质量	1. 检验桩身质量, 判断缺陷位置 2. 确定垂直容许承载 能力	1. 检验桩身质量 判断缺陷位置 2. 预估垂直极限承载 能力	1. 预估垂直极限承载 能力 2. 预估打桩时桩身 应力 3. 预估贯入可能性 4. 复杂打桩情况的 模拟	1. 预估垂直极限承载 能力 2. 测定桩身锤击应 力 3. 测定有效锤击能 量 4. 检验桩身质量 桩身缺陷位置	1. 预估垂直极限承载 能力 2. 测定桩身锤击应 力 3. 确定桩底及桩侧 阻力和有关参数 4. 模拟桩的静荷载 试验曲线	垂直极限承载 力
限制 使用条件		根据激振力大 小, 桩的长径比 应有相应限制	1. 直径不大于 0.4m 的桩 2. 桩长不超过 15m	分段的预制桩	预制桩上使用不 便	贯入度应有一定 范围	1. 桩是均质的直杆 2. 贯入度不宜小于 2mm	贯入度不宜小于 2mm 试验曲线	与所采用的动力 打桩公式有关
备 注						实质是一种数值 计算方法, 可衍生 出许多实用测试方 法(如 P_{∞} 法)			

表 1-2 动测法与静荷载试验技术经济指标对照

试桩方法 对比项目	动 测 法	静 荷 载 试 验
试 验 设 备	1. 设备轻便、灵活, 运输和现场安装工作 量小(一般 2 h 内即可安装就绪) 2. 省材料及能源	1. 需加荷梁架及百吨以上的重物(或锚桩), 设 备笨重、庞大, 起重、运输和安装的工作量 大(一般 1 ~ 2 天才能安装就绪) 2. 材料、能源消耗大
测 试 效 率	1. 只需 2 ~ 4 人, 约半小时即可试一根 桩, 当天可得出结果 2. 观测次数少、时间短, 不易出差错	1. 至少需 4 ~ 8 人日夜轮流值班, 连续观测 50 ~ 100 h, 不能当天得出结果 2. 试验时间长, 人易疲倦, 观测数据易出差 错
工 作 条 件	1. 占地面积小、时间短, 对施工现场干扰 小 2. 可在密集的工程桩上进行, 便于对工 程桩质量进行抽样检验 3. 不易发生安全事故	1. 占地面积大、时间长, 对现场干扰大, 常因 现场条件难以进行 2. 通常不允许在工程桩上进行, 特别是不容许 将工程桩作锚桩, 为此常需另辟试桩场 地 3. 加荷系统如安装不妥, 易发生严重安全事 故 4. 现场需设防雨等设施
试 验 费 用	费用低, 约为静载试验的 1/3 ~ 1/10	费用高, 要花大量的间接费用(如运输、起 重、安装和管理费以及锚桩的费用等)

1. 齐齐哈尔玻璃厂的桩基工程

该工程设计为桩尖进入中密圆砾层长 12m 的 350mm×350 mm 的预制桩, 但实际施工达不到, 锤击数大增, 以致桩顶打碎, 桩身露出地面犹如“石林”, 严重影响了工期, 静载试验又无条件进行。后采用共振法试桩, 测得承载力已超过原设计要求, 于是重新修改设计, 改用短桩, 而且还减少了桩数, 才使桩基工程得以顺利进行, 这样不仅节省了桩材料, 而且工期大为缩短, 仅材料及施工费用就节约 43 万元, 还未计算因工程早日投产而创造的价值。

2. 由香港设计的漳州某大酒店

该工程采 $\phi 600$ 和 $\phi 800$ 的钻孔灌注桩 800 多根, 完工后经钻取芯样发现部分桩混凝土有离析现象等质量问题, 曾有人建议报废。后经设计者同意用共振法检查 70 多根工程桩的质量和承载力, 然后以此为根据校核每个桩基础的总承载力。最终仅对少数几个基础进行补桩, 从而挽救了这一基础工程, 为建设单位节约了资金。

3. 天津针织公司宿舍

该工程桩基设计是根据经验估计承载力为 280 kN, 很令人不放心, 因工地狭小、工期紧迫, 无法进行静荷载试验, 后采用锤击贯入法, 给出容许承载力为 320 kN; 据此, 在原设计的五层楼的桩基上, 又加改为六层。此项工程已交付使用 4 年多, 情况良好。