

桩基应力波检测理论 及工程应用

王靖涛 著



地震出版社

桩基应力波检测理论及工程应用

王靖涛 著



00445028

3

地震出版社

1999

内 容 提 要

本书系统地阐述了桩基应力波检测理论,首次运用波传播反问题理论分析了桩基础承载力和完整性的反演问题,给出了确定桩承载力和检测完整性的两种新方法。反演方法中运用了人工神经网络系统,基本上实现了桩基承载力计算的自动化。书中还比较详细地介绍了与桩基应力波检测有关的应力波反问题理论、岩土力学、桩基础、现场勘察等方面的基础知识,并给出了桩基础动力检测方法、测量技术及大量的工程实例。本书可供高等院校土木工程专业师生及建筑设计、施工、监理和桩基检测的工程技术人员参考使用。

0107/2

桩基应力波检测理论及工程应用

王靖涛 著

责任编辑:姚家福

责任校对:王花芝

*

地质出版社出版

北京民族学院南路9号

北京地大彩印厂印刷

新华书店北京发行所发行

全国各地新华书店经售

*

787×1092 1/16 13.75印张 352千字

1999年5月第一版 1999年5月第一次印刷

印数 001—1000

ISBN 7-5028-1607-0/TU·135

(2053) 定价: 20.00元

前 言

桩基是目前应用最广泛的一种基础形式。随着高层和大型建筑工程的发展,建筑物基础承受的压力愈来愈大。为了保障桩基础的安全可靠并降低造价,对桩基础质量的检测就十分必要了。由于工程建设的需要和现代科学技术的发展,作为一种无损检测技术的桩基应力波检测应运而生,并在过去的十多年中获得了迅速的发展和广泛的应用。它主要包括两方面的内容,确定桩基承载力和检测桩基完整性。桩基检测现已成为基础工程建设过程中一个必不可少的组成环节。

现代各种波的探测技术,例如雷达、医学上的CT、地球物理探测中波动方法等,均属于波传播反问题的范畴。它们共同的理论基础是波传播反问题理论。桩基应力波检测技术也不例外,它的理论基础也是波传播反问题理论。基于这种观点,作者对桩基应力波检测技术进行了十多年的研究,提出了确定桩基承载力和桩完整性定量分析的两种新方法;设计了两个相应的计算程序,WANG-PCP和WANG-PIP。在桩基承载力分析中,采用了逐步积分和局部迭代相结合的方法,给出了一套土性参数调整的方法,从而大大地简化了计算过程。最近又与人工神经网络方法相结合,使土性参数的调整可自动进行。大量的工程实例证实了该方法的正确性和优越性。该项研究得到了国家自然科学基金委员会(作为“八·五”重点资助课题)的支持和香港王宽诚教育基金的支持。所取得的成果是与他们的大力支持分不开的。

本书中除了介绍作者的工作外,还比较全面地评述了桩基应力波检测中应用比较广泛的主要方法和最新的研究成果。同时还给出了比较多的试验结果及工程实例。本书系统地论述了与桩基应力波检测相关的应力波基本理论。特别对于波传播反问题理论作了比较系统的专门论述。对于带*号的章节,由于数学推导比较复杂,初学者可以不必阅读。

除了应力波理论外,桩基应力波检测技术还需要许多其他方面的专业知识,例如,岩土力学、地基与基础、工程地质、桩基设计与施工、测量技术等。为了使学习该项技术的读者避免花费许多时间去查找上述大量资料,本书中还给出了有关专业基本知识的介绍。

在本书的写作过程中得到了北京航空航天大学黎在良教授的支持和帮助,提供了许多宝贵的资料,丁美英副教授在试验和计算方面给予了帮助,我的研究生刘莹绘制了书中部分插图,在此对他们表示衷心的感谢。

作者水平有限,书中难免有不妥和错误之处,敬请读者批评指正。

王靖涛

1998年9月3日

目 录

绪论	(1)
一、桩基应力波检测理论的发展和应用	(1)
二、今后发展的几个问题	(5)
第一章 土和岩石分类及工程特性	(8)
1.1 土和岩石分类	(8)
1.1.1 土的分类	(8)
1.1.2 岩石的分类	(8)
1.2 土和岩石的物理力学性质	(10)
1.2.1 粘性土的物理性质	(10)
1.2.2 土的渗透性	(11)
1.2.3 土的固结与压缩	(11)
1.2.4 土的抗剪强度	(12)
1.2.5 岩体的力学特性	(13)
第二章 岩土的本构关系模型	(15)
2.1 增量弹塑性理论	(15)
2.2 流变模型	(19)
2.2.1 基本的流变元件	(19)
2.2.2 组合流变模型	(20)
2.2.3 土的蠕变	(23)
2.2.4 土的长期强度	(23)
第三章 现场勘察	(25)
3.1 目的和局限性	(25)
3.2 地质构造、地形地貌和水文地质条件	(25)
3.2.1 地质构造	(25)
3.2.2 地形地貌	(26)
3.2.3 水文地质条件	(26)
3.3 勘察内容	(26)
3.4 勘察方法	(27)
3.4.1 工程地质测绘与调查	(27)
3.4.2 勘探	(27)
3.4.3 测试工作	(29)
3.5 地基勘察报告	(29)

第四章 桩基础	(31)
4.1 桩的类型	(31)
4.1.1 排土桩	(32)
4.1.2 非排土桩	(32)
4.2 桩荷载传递机理	(33)
4.3 负摩阻力	(35)
4.4 单桩竖向承载力的确定	(37)
4.4.1 静载荷试验方法	(37)
4.4.2 试验设备	(37)
4.4.3 试验方法	(38)
4.5 桩基施工中的问题	(41)
4.5.1 打入桩	(42)
4.5.2 灌注桩	(42)
第五章 应力波理论基础	(45)
5.1 振动	(45)
5.1.1 质量-弹簧系统的自由振动	(45)
5.1.2 质量-弹簧系统的强迫振动	(46)
5.1.3 阻尼自由振动	(47)
5.1.4 阻尼强迫振动	(50)
5.2 应力波	(51)
5.2.1 概述	(51)
5.2.2 谐波	(52)
5.2.3 Fourier 变换和信号频谱	(53)
5.3 长杆中的纵波	(59)
5.3.1 控制方程	(59)
5.3.2 杆中谐波	(60)
5.3.3 达朗贝尔解	(60)
5.3.4 谐波的能流	(62)
5.4 波在边界上的反射和透射	(63)
5.4.1 固定端和自由端的反射	(63)
5.4.2 波在间断面上的反射和透射	(64)
5.5 有限长杆中的波	(66)
5.6 杆纵向撞击	(67)
5.6.1 两个杆的纵向碰撞	(67)
5.6.2 刚体与杆的碰撞	(68)
5.6.3 弹性球与杆的碰撞	(71)
5.7 杆中波的弥散	(72)
5.7.1 变截面的杆	(72)
5.7.2 横向惯性效应	(75)

5.7.3 弥散介质中的脉冲传播	(78)
5.8 无限弹性介质中的应力波	(80)
5.9 表面波	(83)
5.10 波在两种介质分界面上的反射和折射	(87)
5.10.1 波在自由表面上的反射	(87)
5.10.2 在两种介质分界面上的反射和折射	(90)
5.11 在流体饱和多孔固体中弹性波的传播	(93)
5.11.1 流体饱和多孔固体的应力-应变关系	(93)
5.11.2 无耗散动力关系	(95)
5.11.3 弹性波的传播方程	(97)
5.11.4 弹性波的性质	(98)
5.11.5 有耗散的传播方程	(100)
5.11.6 波的衰减	(101)
5.12 应力波在非弹性介质中的传播	(103)
5.12.1 内摩擦机理	(104)
5.12.2 内摩擦的度量	(105)
5.12.3 粘弹性介质中的应力波	(107)
第六章 波传播的反问题理论	(110)
6.1 反问题的一般描述	(110)
6.1.1 模型空间	(110)
6.1.2 数据空间	(111)
6.2 反问题的适定性	(111)
6.3 岩土工程中波传播反问题	(113)
6.3.1 波传播的反问题	(113)
6.3.2 岩土工程中的应用	(113)
6.4 一维波动方程的系数反演	(116)
6.4.1 一维波动方程系数反问题的提法	(116)
6.4.2 一维波动方程系数反演方法	(118)
6.5 波源反问题	(123)
6.6 Born 摄动法	(128)
6.6.1 Born 近似	(128)
6.6.2 频域上的反演	(130)
第七章 单桩承载力及土性参数的反演	(134)
7.1 Smith 法	(134)
7.1.1 力学模型	(134)
7.1.2 数值计算	(136)
7.1.3 Smith 法的应用与发展	(138)
7.2 Case 法	(141)
7.2.1 基本公式	(141)

7.2.2	承载力的计算	(143)
7.2.3	锤击能量与桩身应力	(145)
7.2.4	土阻力公式的另一个推导方法	(146)
7.3	CAPWAP 法	(147)
7.3.1	力学模型	(148)
7.3.2	土阻力的确定	(150)
7.3.3	CAPWAP 法的应用与改进	(151)
7.4	WANG-PCP 法	(153)
7.4.1	模型参数和数据参数	(153)
7.4.2	反演方法	(155)
7.4.3	土阻力波的动力光弹性实验	(157)
7.4.4	工程应用	(157)
7.5	WANG-PCPN 法	(163)
7.5.1	人工神经网络模型	(163)
7.5.2	网络的建立与训练	(166)
7.5.3	应用实例	(167)
第八章	桩基完整性检测	(169)
8.1	声脉冲反射波法	(169)
8.2	测量结果的解释与分析	(171)
8.3	WANG-PIP 法	(181)
8.3.1	波阻抗的反演	(181)
8.3.2	试验验证	(182)
8.4	低应变法的局限性	(184)
第九章	桩基应力波检测的试验方法和技术	(187)
9.1	测量的基本知识	(187)
9.1.1	概述	(187)
9.1.2	测量仪表的基本性能	(188)
9.1.3	测量误差	(190)
9.2	传感器	(191)
9.2.1	加速度计	(191)
9.2.2	应变传感器	(192)
9.3	数据采集	(194)
9.3.1	二进制代码	(194)
9.3.2	信号采样	(196)
9.4	数据处理、分析、显示和贮存	(198)
9.5	试验方法	(200)
9.5.1	高应变试验方法	(200)
9.5.2	低应变试验方法	(203)
参考文献		(205)

绪 论

一、桩基应力波检测理论的发展和应用

虽然桩基是个古老的基础形式,但是它的力学原理正确,通过桩的形式充分发挥了深部土层的承载能力。同时它具有施工方便的特点,致使它延续至今,仍是当前基础工程中一种普遍采用的重要基础形式。

由于地基土层的物理力学性质复杂多变,所以确定桩承载力一直是个比较困难的问题。确定桩承载力的方法基本上可分为两类:一是通过静动试验直接测定桩承载力;二是通过室内和原位试验测定土的物理力学参数,然后根据土力学理论估算桩的承载力。

用动力试验估算桩承载力已有 100 多年的历史。最早确定桩极限承载力的方法采用动力打桩公式。它是从能量守恒原理出发,利用牛顿撞击定理推导出来的。该公式建立了桩的极限承载力与打桩时测得的贯入度之间的关系。由于基本假设过于简单和公式中许多参数均由经验确定,故所估算的桩承载力带有较大误差。然而,由于它的简单和使用方便,至今有些工程单位仍在使用。

1883 年 St. Venant^[1]首先分析了一个一端固定的有限长的杆在自由端被一刚体撞击的情况,给出了应力波在杆中传播的解答。这种情况虽然与打桩有区别,但这项分析还是提供了打桩时应力波在桩中传播的基本规律。1931 年 Issacs^[2]指出,打桩是波的传播过程,可用一维波动方程来描述。1932 年 Fox^[3]在许多简化条件下,给出了一个打桩分析的波动方程解答。后来这方面研究一直未有大的进展。直到 60 年代初,随着大型电子计算机的出现与发展,用数值方法求解波动方程已成为可能。1960 年 Smith^[4]提出了一个描述锤-桩-土系统的离散的数学模型,借助于电子计算机,用差分法求得了相应的解答,并给出了土和系统单元参数的建议值。

沿着这个方向,后来许多学者进一步研究和发展了 Smith 方法。这个方法后来称之为“波动方程”分析。最初用于预估桩承载力和桩中应力,后来也用于沉桩能力分析上。

至今已经设计了许多“波动方程”分析程序。其中以 Texas 运输研究所^[5]设计的 TTI 和 Goble 等^[6]完成的 WEAP 最为重要。TTI 程序是在 Texas A & M 大学的程序基础上改进和发展的。WEAP 程序改进了对柴油打桩系统的分析,并首先完成了计算的力和速度时程曲线与现场测量结果之间广泛的相关性研究。随后对 WEAP 程序进行了改进,先后推出 WEAP 86、WEAP87 和 GRLWEAP 程序^[7,8]。最新的 GRLWEAP 程序功能更齐全,使用更方便。

除上面提到工作之外,在波动方程分析的发展中,还有许多学者作出了改进,提出了一些新的模型。Holloway^[9]指出,在打桩中,一次锤击后桩和土中会留下残余应力,并在分析中考虑了这一因素的影响。Rempe 和 Davisson^[10]给出桩锤的更完善的模型。Warrington^[11]提出

了一个新型波动方程分析程序。它特别适用于外燃式桩锤。值得指出的是,目前绝大多数波动方程计算程序中都采用了差分方法。1984年 Smith 和 Chow^[12]给出了一个波动方程分析的有限元程序。然而,至今还是差分法占统治地位。这可能是由于有限元法比较费时和需要更多的计算机内存之故。

最早在打桩中进行动力测量的是 Glanville 等^[13]。在1960年前后,美国密歇根州公路局^[14]完成了一项大规模的研究计划。这项试验的主要目的是评价桩锤的性能。他们使用了一个特别设计的力传感器来测量桩顶力,同时还进行了加速度测量。

从1964年至1975年的12年间,美国 Case 技术学院(现为 Case Western Reserve 大学) Goble 领导的研究小组进行了桩基应力波检测测量技术和理论分析的系统的研究^[15~18],取得了丰富的研究成果。在测量技术方面,他们改进了应变测量技术,设计了可重复使用的应变传感器。采用模拟-数字转换技术,利用微机可以方便地储存和处理测量数据,完善了力和速度的测量系统。1972年这个研究小组成立了“桩动力公司”(PDI),并开始生产打桩分析仪(PDA)。

在理论研究方面,这个小组的主要贡献是以在桩顶直接测量的力和速度时程曲线作为求解波动方程的边界条件。这样就避免了不易确定的锤子和垫层性能影响,为桩承载力的精确计算创造了条件。在作了许多假定之后,他们推导出了波动方程的一个准封闭解。这就是著名 Case 法^[15]。它是利用在桩头附近测得的桩截面上承受的力和质点速度作为输入数据,通过简单的计算公式,即可获得桩的极限承载力。这个方法简单,具有现场实时处理功能,获得了广泛的应用。但它在确定桩承载力时还须要经验地给出桩尖处的阻尼系数,且仅提供总的承载力,而不能给出摩阻力沿桩身的分布和端阻力。针对这种情况,他们又发展了 Case 法, Rausche 等^[19]于1972年提出了一个桩波动方程分析程序,简称 CAPWAP 法。这是桩波动方程分析的一个突破性进展。这种分析技术也以桩顶力和速度时程曲线作为边界条件。然而它却能给出摩阻力沿桩身的分布和端阻力,以及模拟静载试验的荷载-沉降曲线。同时还可提供土层的物理力学参数:阻尼系数、极限静阻力、最大弹性位移,而不须要人为地确定。从而大大地减少了桩极限承载力确定中的经验成分。该方法最初采用了像 Smith 法那样的离散的计算模型,使用了动力有限元法中的 Wilson 线性加速度方法求解波动方程。首先对假设的土性参数,计算出桩顶的力曲线,并与实测的桩顶力曲线进行对比。若两者相差较大,则修改土参数,重新求解波动方程。这个迭代过程一直进行到计算的和实测的力曲线之差达到所要求的误差为止。这个计算过程也可以看作力曲线(或速度曲线)的拟合过程。因此也可称它为信号拟合法。后来又作了不少改进,特别是替代了离散模型,改用了连续杆模型,并采用了特征线法求解波动方程。这样显著提高了计算精度。

从桩顶的动力响应,CAPWAP 法不仅能确定桩承载力,还可以计算出土性参数。这些土的常数可以用于波动方程沉桩能力分析上。这种方法已在墨西哥湾一处采油平台工程中使用,并取得了好的结果^[20]。

在 CAPWAP 法的计算中,每一次迭代都须要修改相应所有桩单元的土性参数(每一个桩单元相对应3个土性常数),并重新求解一次波动方程。几十个土性参数的调整是困难的,需要一定的经验。同时多次求解波动方程也花费较多的计算时间。

丹麦技术大学的 Hansen 和丹麦岩土研究所的 Denver^[21]给出了一个与 Smith 的质量-弹簧离散模型不同的一维杆连续模型。推导出了相应的波在桩中传播的控制方程组,其中考虑了

桩侧面土阻力的作用。采用特征线法,在一些简化的假设下获得了该方程组的近似解。这些解是基于桩顶力和速度的测量值得到的。

1989年加拿大Berminghammer公司和TNO^[22]合作开发了一种新的桩荷载试验方法,称为STAT-NAMIC。它的基本原理是,在桩顶施加一个相当长持续时间的压力脉冲,并同时测量桩顶位移。从而可以获得一条准静态的荷载-位移曲线。将这条曲线划分成5个区域。在一定的假设下可以近似计算出各区域的阻尼系数。将施加的力扣除掉惯性力和阻尼力即可得到静荷载-位移曲线。正如Seidel^[23]指出的,这个试验方法虽然具有可能性,但它的分析方法还存在一些缺陷。虽然这个方法计算简单,但它不像CAPWAP法那样是对应力波在桩中传播的整个过程作严格的分析,所以也给出不出侧摩阻力沿桩身的分布和端阻力。

在我国,早在1972年周光龙^[24]提出了一个确定桩基承载力的方法——动力参数法。唐念慈等^[25]于1978年在渤海12号平台试桩工程中首次使用了波动方程法进行了打桩分析,并设计了BF81计算程序。梁守信等^[26]设计了多种确定单桩承载力的信号拟合程序。江礼茂等^[27]提出拟合法中土阻力的双线性模型。陈凡^[28]给出了考虑土的加工硬化或软化的土阻力模型。袁建新等^[29]给出了土性参数调整的一个优化方法。我国一些学者还发展了一些低应变的和其他检测方法^[30]。

当今各种波探测技术的理论基础均属波传播反问题范畴。桩基应力波检测也不例外,它的理论基础也是波传播反问题理论。波传播反问题是利用在物体表面测得的波动响应后,反过来推断物体内部波源或介质的物理力学性状。波传播反问题是反问题中应用最广泛的一类。它包括两大类:一是介质反问题(Inverse medium problems);二是波源反问题(Inverse source problems)。前者是对已知刺激,从波的边界响应推断介质的物理力学性状,一般表现为反演波动方程系数。波源反问题是对已知介质,从测量得到的边界数据确定发射波源的性质,表现为控制方程的力源项反演。桩基完整性检测属于介质反问题,而桩基承载力确定归于波源反问题。基于波传播反问题理论,王靖涛^[31~35]提出了一个确定单桩承载力方法(WANG-PCP)和桩完整性定量分析方法(WANG-PIP)。其实,从反问题理论观点来看,CAPWAP法也是一种求解反问题的方法,即用不断反复求解正问题的方式来求解反问题。

在桩基应力波检测的高应变试验(Case试验方法也称为高应变试验方法)中,在桩顶测得的回波信息,正是桩土之间摩擦力激发出来的。根据在桩顶连续测得的质点速度和压力时程曲线来反演各土层的阻力和相应的土性参数是个典型的多参数多波源反问题。在对桩顶回波响应与土阻力之间内在关系的分析基础之上,作者提出了一个半解析半数值的反演方法。开拓了一个特征线法逐步积分与局部迭代相结合的反演途径。给出了一套土性参数新的调整方法。所给出的WANG-PCP程序的输入数据仍是高应变试验中测得的桩顶压力和速度曲线。可提供与CAPWAP法相同的结果。包括桩的极限承载力,侧摩阻力沿桩身的分布和端阻力,各土层的土性参数:最大静阻力、最大弹性位移、阻尼系数,在应力波传播过程中桩身中任一截面承受的力和质点速度,模拟静载试验的荷载-沉降曲线等。

该方法的逐步积分和局部迭代的计算过程模拟了应力波从桩顶开始逐步向上传播的过程。在每一步积分中仅须调整3个土性参数,从而大大地简化了土性参数的调整过程,减少了计算时间,并为实现土性参数调整的自动化创造了条件。逐步积分的过程也可以看作是速度曲线的逐段拟合过程。为了直观地监察曲线拟合的质量,每一步积分的中间结果和整个拟合曲线都显示在荧屏上。

最近对这个方法又做了进一步的改进,将人工神经网络方法引入了土性参数调整过程中,实现了桩周土参数调整的自动化。这更便于工程技术人员的使用。由于神经网络方法具有自学习和自适应能力,通过在某一地区的工程应用,它的计算精度可以不断提高。

1966年美国芝加哥市的两座高层建筑物基础的墩基出了毛病,要求提供一种检验已浇注墩基的可靠方法^[26]。Baker和Khan^[27]提出了8种检测墩基缺陷的可能方法。其中提到3种不同的地震波及波速测量方法,但认为地震法经验有限,成果还是不肯定的。Steinbach和Vey^[38]对应力波传播法在探测桩及墩基缺陷方面做了比较系统的研究。他们首先在实验室内进行了铝棒和混凝土棒的模型试验。试验结果显示了这种方法用于探测混凝土断裂的可能性。随后又进行了现场试验,证实了应力波传播法可以用来探测混凝土桩及墩基中的断裂。由于这个方法快速、无损、经济,所以发展很快。后来被称为声脉冲反射波法或低应变法。

TNO^[39]研制了一系列桩完整性检测的基桩诊断系统(FPDS),并将这项技术推广到了世界各地。

早在1979年Rausche等^[40]就提出可以采用Case试验方法来检测桩的完整性。他们引入了一个定量描述桩身中缺陷的完整性因子。它是桩身缺陷处下部和上部波阻抗之比。用这个指标可以对桩身中缺陷处损坏的严重程度进行分类。他们还给出了计算这个因子的一种计算方法。后来,他们将确定桩承载力的CAPWAP法用于低应变试验结果的分析,提出了一个桩完整性分析的信号拟合法,称为PITWAP法^[41]。这个方法以桩顶测量的力或假设的力作为输入数据。计算桩顶的速度,并将它与测量值进行比较。这里土阻力的分布是不知道的,须参考邻近桩的结果。若计算的和测量的速度曲线不一致,则将调整桩的模型,重复上面分析直到达到最佳拟合为止。在低应变试验中,通常仅测量桩顶加速度(通过数值积分转变为速度),因此力的时程曲线是不完全知道的(在撞击过程的早期,力与速度成正比)。同时土阻力分布也不能精确了解,这些都会给计算结果带来较大误差。

Rausche等^[42]采用PITWAP信号拟合法,对桩身中可能出现的不同类型、不同损坏程度的缺陷,以及各种土阻力分布情况进行了计算模拟,给出了一系列的低应变试验模拟图例。这些图例对于识别各种类型缺陷的反射波波形和土阻力的影响是有帮助的。

另外一种检测桩完整性的低应变方法是首先在法国发展起来的动力响应方法^[43],或称机械阻抗法。这个方法在我国也获得了广泛的应用和发展^[44]。该方法一般分为两类:稳态机械阻抗法和瞬态机械阻抗法。这种方法的基本原理是将桩-土结构看作一振动系统。当用较小的力在桩顶进行激励时,由于系统振幅较小,这时可近似将桩-土系统作为线性系统处理。因此可将线性振动系统的一些概念和分析方法引入桩-土系统的振动分析中。它的试验结果分析,不像反射波法的时域分析,都是在频域中进行的。首先利用快速Fourier变换(FFT)将激振力和速度响应曲线表示成它们的频率谱。用力的谱除速度谱得到导纳幅频曲线,它的倒数即是机械阻抗。通过对导纳幅频曲线分析来识别缺陷的存在及可能的类型。这种方法除测量桩顶加速度外还须测量激振力。在分析中须进行FFT变换。它比反射波法要复杂些。为了获得可靠的判断,有时可将这两种试验结果进行对比。

如前面指出的,高应变的Case试验方法也可用于桩完整性分析。由于在高应变试验中时测得了桩顶力和速度曲线,因此使用信号拟合法对试验结果进行分析是比较方便的。同时,在高应变试验中使用的锤子重,输入到桩中的冲击能量大,故可以探测到桩身中较深部位的缺陷。然而,正是由于锤子质量大,入射的压力脉冲持续时间长,致使波长增大,不易探

测出尺寸较小的缺陷。

在低应变试验中,仅测量桩顶的质点加速度时程曲线。从波传播反问题理论分析可知,欲反演出桩中某些截面的波阻抗变化,仅知道桩顶速度响应是不够的。由于边界条件不足,这个反演问题是“欠定”的。为此必须补充一定的条件。王靖海^[33]提出了一个桩基完整性定量分析方法。通过波传播的分析,给出了一个近似的补充条件,然后直接反演波动方程的系数。这种方法比较简单,可在现场对试验数据进行实时处理。

应力波理论在沉桩能力分析,打桩系统的性能分析和打桩监测等方面还有许多重要的应用,这里就不一一列举了。

从以上所述可以看出,桩基应力波检测和监测已成为应力波理论应用的重要领域。为了交流这方面的研究成果和促进桩基应力波检测理论的发展和工程应用,从1980年开始,每四年召开一次“应力波理论在桩基上应用”的国际会议。第一次会议是在瑞典的Stockholm召开。至今已召开了五次。可以说每一次会议都记录了桩基应力波理论发展的历程。最近第五届会议在美国佛罗里达州的奥兰多举行的。在这次会议上发表的论文数量和出席的人数都是空前的,充分反映了桩基应力波理论和工程应用的发展势头。

应力波理论在桩基上的应用研究是在基础工程需要的推动下发展起来的。一开始它就与工程实践紧密结合,以应力波理论为基础,在计算机、数值计算方法、传感器和数据采集等发展所提供的条件下,当今已发展成为一项高技术。经过近40年的理论和测量技术的发展和大量的工程实践,该项技术日趋成熟,为建筑物基础检测提供了快速、无损、经济、可靠的方法,在基础工程中发挥了越来越重要的作用。许多国家已将动力检测方法列入地基基础设计与施工规范中。我国已制定了相应的行业标准,“桩基低应变动力检测规程”JGJ/T 93-95^[43]和桩基“高应变动力检测规程”JGJ 106-97^[45]。

二、今后发展的几个问题

虽然桩基应力波检测理论及技术已获得了很大的发展和广泛的应用,然而基础工程中不少检测问题至今还未解决。同时随着基础工程的发展,许多新桩型的出现、各种新的施工技术的采用、海上采油平台基础等都提出了许多新的课题。这必将进一步刺激桩基应力波检测技术的发展。下面就今后发展的几个问题进行讨论。

1. 桩基应力波检测的理论基础

如前面所述,桩基应力波检测与其他许多波探测技术一样,都属于波传播反问题范畴。因此,波传播反问题理论是它们的共同的理论基础。从桩顶的波动响应,反过来推算桩身中的缺陷或桩土间的摩擦力,这正是反问题理论所要解决的课题。桩身中缺陷探测是波传播的介质反问题,而土阻力和土性参数的反演是波源反问题。自70年代以来,波传播反问题发展迅速,已成为当今数学物理研究中的热点之一,并已获得了许多研究成果。从波传播反问题理论高度来研究桩基应力波检测问题,将会使我们能够更深刻地认识它的内涵和从波的反问题理论中吸收和利用新的思想和方法,从而推动桩基应力波检测理论的发展。作者提出的两个新方法——WANG-PCP和WANG-PIP,正是沿着这个方向研究的结果。

2. 单桩承载力的确定

计算单桩承载力时,土性参数的调整是个关键问题。它不仅花费较多的计算时间,而且

是产生计算误差的主要根源。虽然 WANG-PCP 法已将信号拟合法中几十个土性参数的调整减少到每一步积分中 3 个,但仍是费时和麻烦的事情。为此作者采用了一个神经网络模型来进行土性参数的调整。这样实现了桩周土性参数调整的自动化,取得了很好的效果。

最近有些学者^[47]企图使用神经网络模型直接建立桩顶动力响应与承载力之间的关系,完全放弃了波动方程的分析方法。作者认为这样做是不妥的。神经网络方法适宜解决复杂的非确定性、模糊、随机等问题。对部分有规律性问题可以采用确定性的数学方法与神经网络方法相结合的办法来解决,充分发挥两种方法的优点,以提高计算效率。桩顶波动响应与土阻力之间业已存在确定性的关系,通过求解波动方程可以获得每个桩单元相对应的总的土阻力,即土的动阻力与静阻力之和。剩下的问题是如何利用土的本构关系模型将土的动静阻力分离开来。由于土的本构关系带有较大的不确定性,因此这一部分是比较难处理的。正如作者所做的那样,对于土性参数调整,采用神经网络模型来解决是合适的。

3. 桩基完整性检测

虽然检测桩完整性的低应变法具有许多优点,如快速、无损、经济、方便等,但是它也有不少局限性。例如,目前可探测的最大桩长度是 30 倍的桩径,即 $L/D=30$ 。对于 L/D 大于 30 的桩,则须使用较重的锤或高应变试验方法。然而这将花费较多的时间和增加试验成本。最好的方法是进一步提高仪器的动态范围和信噪比,以增强对微弱信号的检测能力。

如前面指出的,低应变法仅测量桩顶的速度响应,还缺少力的边界条件,对波阻抗的反演是个“欠定”问题。再加之土阻力的干扰,因此桩身中缺陷的定量分析还是困难的。目前虽然已给出了一些方法,但是对多于一个的主要缺陷分析还是不太可靠的。

对于接近桩顶或桩尖出现的缺陷,由于它们引发的反射波受到桩顶冲击入射波和桩尖反射波的干扰,有时识别它们很困难。特别对于比较小的缺陷,往往被入射波或桩尖反射波所掩盖。对这种情况,应尽量采用比较窄的入射脉冲宽度,以提高分辨率。

桩身中的缺陷是多种多样的,特别是混凝土灌注桩,不仅有断裂,还有缩颈、夹泥、混凝土离析、桩底沉渣等。有些不同类型的缺陷却产生相似的反射波形。例如缩颈与夹泥或离析的反射波形,有时就较难区分开。这是因为它们引起了相似的波阻抗变化。因此需要补充其他方面的信息来进行综合分析评价。如考虑桩的类型、施工方法、地质条件等。目前还没有一套完善的准确的识别缺陷类型的方法,经验还是需要的。对这种识别问题,采用神经网络方法也许可能是有效的。

4. 沉桩能力分析和打桩监测

为确保桩基质量和避免浪费,仅在成桩后进行检测还是不够的。应贯彻“预防为主”的原则。应在设计到施工的全过程中,进行必要的试验、监理和监测,以防患于未然。

沉桩能力分析是当已知锤-桩-土系统的所有参数时,预估打桩时的贯入度或锤击数。这项分析对桩的设计、施工方法和桩锤的选择和确保施工安全顺利的完成都是十分必要的。

对桩基施工过程实施监理和监测也是必不可少的。一方面必须严格地按照已制订的施工方案进行施工,另一方面如发现新的问题,经慎重考虑,还可以对施工工艺,甚至原有设计进行必要的修改。在桩动力试验中,已采用了运算速度快、体积小式的笔记本式计算机和设计了具有现场实时处理功能的计算分析软件。这使得打桩监测和监控已不是困难的事情。通过监测系统可以测得桩锤传递给桩的冲击能量、桩身中出现的最大拉应力和最大压应力、土阻力等。从而可以监视桩锤和垫层的性能、桩体中的应力状态、打桩阻力等。这样减少了桩体

或桩锤损坏的风险,有时还可以发现不必打到预定的深度,桩承载力的要求已得到满足,从而降低了成本。

5. 改进和发展测量技术和设备

测量是分析的基础。测量结果直接关系到分析结果的精确度。因此测量技术和设备的改进和发展无疑是非常必要的。微机的引入,特别是笔记本计算机的使用,大大地改变了桩动力试验测量技术的面貌。由于模拟-数字转换位数的提高及浮点放大技术的采用,显著地扩大了测量的动态范围,增强了对微弱信号的检测能力。然而这还不能满足对长桩的检测要求。仍应进一步提高分辨力和信噪比。

在高应变试验中,压力是从应变测量获得的。目前使用的工具式应变传感器,安装还比较麻烦,且寿命有限,所以应进一步改进应变传感器或发展新式压力传感器。

在测量软件方面应提高对试验数据的实时处理功能,以保障获得可靠的试验数据。

6. 加强研究和培训

从前面叙述的桩基应力波检测发展过程来看,它的生命力在于工程需要。因此今后的发展仍须针对实际工程中存在的问题和不断出现的新问题进行研究。同时,必须充分利用现代科学技术发展所提供的理论和技术的最新成果,不断地提出和创造新的方法和技术。

有了先进的技术和精密的仪器并不能保障获得高精度的检测结果。这里的关键问题是检测人员的素质和水平。虽然桩基应力波检测的测量技术和分析软件都朝着自动化和智能化方向发展,更便于操作和使用,然而这并不意味着对从事检测工作的技术人员素质要求的降低,反而要求更高了。对桩基质量和承载力进行综合评价要求工程师具备多方面的知识,对测量技术和分析理论有深刻的理解和熟练地掌握,对所发生的问题和最终分析结果能够做出正确的判断。这里应力波理论、岩土力学、地基基础、工程地质、桩基的设计与施工、测量技术等基本知识都需要了解和掌握,并还应通过检测实践,取得经验。

第一章 土和岩石分类及工程特性

1.1 土和岩石分类

在土木工程中所遇到的土和岩石与其他工程材料不同,物理力学性质千变万化,十分复杂。为了了解它们的共同点与差异,有必要对它们进行分类认识。针对不同的工程对象,区分为性质相近的类别,对它们的工程特性进行综合评价,为工程选址和设计施工提供定量的资料。因此土和岩石分类具有重要的实际意义。岩土的分类方法往往是针对不同的工程任务提出的。在建筑工程中,岩土主要是作为承受建筑物荷载的地基,因此这里仅从这个角度来评价岩土的工程性质。

1.1.1 土的分类

土按地质成因可分为残积土、坡积土、洪积土、冲积土等。根据颗粒级配或塑性指数可分为碎石土、砂土、粉土和粘性土,对于具有特殊工程特性的土称为各种特殊土。

下面分述碎石土、砂土、粉土、粘性土和特殊土的划分标准。

碎石土

碎石土是粒径大于 2mm 的颗粒含量超过全部土重 50% 的土。根据颗粒形状和颗粒级配还可细分为:漂石或块石、卵石或碎石、圆砾或角砾。

砂土

粒径大于 2mm 的颗粒含量不超过全部土重 50%, 粒径大于 0.075mm 的颗粒超全部土重 50% 的土。砂土按粒组含量还可细分为砾砂、粗砂、中砂、细砂和粉砂。

粉土

粒径大于 0.075mm 的颗粒含量不超过全部土重 50% 和塑性指数 I_p 小于或等于 10 的土。还可按颗粒级配细分为砂质粉土和粘质粉土。

粘性土

塑性指数 I_p 大于 10 的土,称为粘性土。由于粘性土的工程性质与土的生成年代和土的成因有密切关系,因此可按沉积年代和塑性指数进行分类。

①按沉积年代分为老粘性土、一般粘性土和新近沉积粘性土。

②按塑性指数分类为粘土和粉质粘土。

特殊土

特殊土是指在特定地质环境或人为条件下形成的特殊性质的土。它包括软土、人工填土、湿陷性土、红粘土、膨胀土、多年冻土等。

关于土分类的详细情况可参考文献 [48]。

1.1.2 岩石的分类

岩石与土的界限是很难严格划分的。如按强度划分,单轴抗压强度低于 1MPa 的岩石应归入土体。

岩石根据成因可分为火成岩、沉积岩和变质岩。下面分述其他几种分类方法。

一、按坚固性分类

岩石根据坚固性可分为硬质岩石和软质岩石两类。进一步还可细分为很软、软、中等硬、很硬和极硬。按单轴抗压强度的划分见表 1.1.1。

表 1.1.1 岩石的硬度和强度 (引自文献 [49])

硬 度	很 软	软	中 等	硬	很 硬	极 硬
强度/MPa	1~3	3~10	10~25	25~70	70~200	>200

二、按风化程度分类

根据岩石风化的特征,例如矿物变异、结构和构造、坚硬程度及可挖掘性或可钻性等,将岩石风化程度区分为微风化、中等风化和强风化三等。如表 1.1.2 所示。

表 1.1.2 岩石风化程度的划分 (引自文献 [48])

风化分类	风 化 特 征	
	硬 质 岩 石	软 质 岩 石
微 风 化	岩质新鲜,表面稍有风化迹象,锤击声清脆,并感觉锤有弹跳,裂隙少,岩块大于 50cm,镐不能挖掘,岩芯呈圆柱状	岩石结构、构造清楚。岩体层理清晰。裂隙较发育。岩块为 20~50cm。裂隙中有风化物填充。锤击沿片理或层理裂开。用镐挖掘较难。岩芯柱分裂,但可拼成圆柱状
中 等 风 化	岩石的结构、构造清楚,岩体层理清晰。锤击声脆,微有弹跳感。裂隙较发育,岩块为 20~50cm,裂隙中有少量充填物,用镐难挖掘。岩芯柱分裂,但可拼成圆柱状	岩石结构、构造及岩体层理尚能辨认。裂隙很发育,岩块为 2~20cm,碎块用手可折断。用镐较易挖掘。岩芯柱破碎,不能拼成圆柱状
强 风 化	岩石结构、构造及岩体层理都不甚清晰。矿物成分已显著变化,有次生矿物。锤击为空壳声,碎块用手易折断,裂隙发育,岩块为 2~20cm,用镐可以挖掘,岩芯柱破碎,不能拼成圆柱状	岩石结构、构造不清楚,岩体层理不清晰。岩质已成疏松的土状,用镐易挖掘,岩芯成碎屑状,可用手摇钻钻进

三、岩体的综合评价与分类

岩石的硬度和强度等材料力学指标虽然比较高,但作为地基整体的岩体,由于内部存在的缺陷,如断层、节理、溶洞、剪切带、软弱夹层等,将使它的承载能力大大下降。例如石灰岩一般强度比较高,但它内部往往出现溶洞。这对地基的稳定是危险的。因此应对基岩进行综合评价。特别须注意岩体中间断面的性状。现已针对不同工程目的提出了不少岩体工程分类方法。尤以 Bieniawski 提出的地质力学分类方法^[50](或称岩体权值系统)考虑的参数比较全面,突出了不连续面的指标。它用来对岩体分级的 6 个指标是单轴抗压强度、岩石质量指标(RQD)、不连续面间距、不连续面条件、地下水条件、不连续面方向。这里的岩石质量指标(RQD)是由 Deere^[51]提出的。对于一给定的钻孔深度,其中长度大于或等于 100mm 的岩芯块的总长度与该深度之比,即为 RQD 值(用百分数表示)。这个指标与岩石质量的关系在表 1.1.3 中给出。