

学校编码: 10384

分类号_____密级_____

学号: 20051302577

UDC _____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

桩基完整性的阻尼多次波动力检测研究

Study on Dynamic Integrity Testing of Pile Foundation Using
Multiple Method When Considering Damping

叶伟斌

指导教师姓名: 张建霖 教授

专 业 名 称: 结构工程

论文提交日期: 2008 年 5 月

论文答辩时间: 2008 年 月

学位授予日期: 2008 年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2008 年 5 月

厦门大学学位论文原创性声明

兹提交的学位论文，是本人在导师指导下独立完成的研究成果。
本人在论文写作中参考的其他个人或集体的研究成果，均在文中以明确方式标明。本人依法享有和承担由此论文产生的权利和责任。

声明人（签名）：

年 月 日

摘 要

近年来,随着我国城市化进程的加速,桩基被广泛地应用在高层建筑、重型厂房、桥梁、港口码头、海上采油平台等工程上。桩基础作为一种具有承载力高、沉降量小等特点的基础形式,能够将上部结构的荷载直接传到深层稳定的土层中去,从而大大减少基础的沉降和建筑物的不均匀沉降,因此,桩基础在震区、软土地区、膨胀土地区及冻土地区等被大量使用。随着桩基被迅速和大量地推广和应用,桩基质量带来的工程问题愈来愈多。由于桩基是地下隐蔽结构物,在施工中易于出现各种缺陷(如缩径、断裂、夹泥和沉渣等质量问题),桩基质量好坏将直接影响到建筑结构的安全。因此,必须对施工质量进行检测,以便及时发现问题并采取相应措施,防止工程事故的发生。采取有效的检测手段对桩基进行检测,避免工程事故的发生是当今工程界普遍关注的问题。

目前,低应变反射波法以其现场测试简便快捷的优势占据了桩基完整性检测的大部分市场。本文在前人试验基础上,综合对比采用桩周土阻尼参数拟合公式,通过理论分析推导了透射波和多次波的反射系数与旅行时间,将桩周土阻尼与多次波模型相结合,从而成功地模拟出包含任意缺陷的合成速度波曲线,使得应力波在桩基中的传播规律有了进一步的认识。反演包含透射和多次反射影响的速度波曲线,只需在反演过程中准确识别每次第一个应力波的到达时间和幅度,就可以准确地得到所有反射界面的反射系数及其对应的旅行时间,从而得到波阻抗变化规律及其对应深度。本文将理论结果和工程实践进行对比检验,其结果令人满意。该方法在高层建筑、重型厂房、桥梁等工程中具有比较广泛的应用前景。目前,该方法在桩基础的完整性检测中得到初步应用,将可进一步拓展到工程结构重要构件的检测中。

关键词: 桩基检测 反射波法 多次波 阻尼

ABSTRACT

In recent years, with the rapid development of urbanization in China, pile foundation is extensively applied in the construction of tall buildings, heavy-duty factory buildings, bridges, docks, offshore oil production platforms, etc. As a foundation type which has the characters of large bearing capacity and small amount of settlement, pile foundation can directly transfer the load of superstructure to the stable soil layer in the deep level of the earth, hence the settlement of foundation and the differential settlement of building will be reduced largely. Because of this, pile foundation is extensively applied in earthquake region, soft soil region, expansive soil region, frozen soil region, etc. With the tremendous promotion and application of pile foundation, problems resulting from the quality of pile foundation become more and more. On the one hand, since pile foundation is a type of structure hidden underground, the quality defects (such as necking, fracture, soil inclusion, dregs, etc.) are very common. On the other hand, the quality of pile foundation will directly affect the stability of superstructure. As a result, the quality testing of pile foundation is required for the purpose of discovering problems and hence preventing construction distresses. As the those reasons mentioned earlier, the quality testing of pile foundation using effective methods and hence preventing construction distresses attracts more and more attention.

At present, because of its advantages of simplicity and quickness, low strain reflected wave method occupies most part of market of integrity testing of pile foundation. On the basis of previous tests, by comprehensive comparison, the damping parameters of soil around pile body are used to fit equations. Then, the reflection coefficient and traveling time are deduced by theoretic analysis. After this, the synthetic velocity waves which contain arbitrary defects are simulated by the combination of the damping of soil around pile body and the model of multiple. Accordingly, the transmission law of stress wave in pile body becomes clearer. In the process of the inversion of velocity waves which affected by penetrance and multiple reflection, the reflection coefficient and the corresponding arrival time at all the reflection interfaces can be gained precisely by identifying the arrive time and amplitude of the first stress wave at each time only. Consequently, the change law of wave resistance and its corresponding depth may be gained. This paper compares theoretical results with practical results, which shows that the method proposed by

this paper is feasible. Hence, it will have extensive applicable prospects in the construction of tall buildings, heavy-duty factory buildings, bridges, etc. This method has been applied in the integrity testing of pile foundation tentatively now, and in the future it may be applied in the testing of important components of engineering structures.

Key Words: testing of pile foundation, reflected wave method, multiple, damping

目 录

第一章 绪 论	1
1.1 桩基简介	1
1.2 国内外桩基检测方法的发展和应用近况	1
1.2.1 桩基动测技术的国外发展和应用近况.....	1
1.2.2 桩基动测技术的国内发展和应用近况.....	3
1.3 桩基础检测的目的及意义	5
1.4 桩基完整性检测常用的方法	6
1.4.1 桩基非无损检测方法简介.....	6
1.4.2 桩基无损检测方法简介.....	6
1.5 本文研究的背景与内容	9
第二章 反射波法理论及检测基本原理.....	12
2.1 一维波动方程理论	12
2.2 弹性波的反射与透射	15
2.3 桩基信号的时域分析	17
2.4 桩基信号的频域分析	20
2.5 桩基质量的评定标准及实例分析	22
2.5.1 桩基质量的评定标准.....	22
2.5.2 桩基质量评定的实例分析.....	24
2.6 低应变反射波法的局限性	27
第三章 考虑阻尼影响的桩基低应变完整性测试多次波分析.....	28
3.1 多次波方法的研究	28
3.2 人工合成包含多次反射波的速度信号曲线	28
3.2.1 数学模型.....	29
3.2.2 人工合成速度曲线原理.....	30
3.3 多次波曲线的反演方法	35
3.4 阻尼对桩身传播应力波的影响	36
3.4.1 横向惯性效应引起的桩身几何弥散	37
3.4.2 材料阻尼对桩身传播应力波的影响.....	40

3.4.3 桩周土阻力对桩身传播应力波的影响.....	44
3.5 桩基完整性检测中桩土相互作用阻尼参数的研究	46
3.5.1 基本量化分析方法.....	47
3.5.2 桩土作用下桩身缺陷程度量化分析.....	49
3.5.3 桩土相互作用阻尼参数的确定.....	50
3.6 反射波法（包含透射波的多次波）的程序实现方法及数值模拟	52
3.6.1 包含透射波和多次波的反射波法的程序实现.....	52
3.6.2 模型算例一.....	55
3.6.3 模型算例二.....	56
3.6.4 模型算例三.....	58
3.6.5 模型算例四.....	60
3.6.6 模型算例五.....	63
3.6.7 模型算例六.....	66
3.6.8 模型算例七.....	68
3.7 小 结	71
第四章 基于阻尼多次波分析的桩基缺陷试验.....	72
4.1 反射波法现场测试技术及要求	72
4.2 反射波法测试仪器及测试流程	76
4.3 阻尼多次波法的工程实测与诊断	82
第五章 论文总结与展望	86
5.1 总结	86
5.2 展望	86
参考文献	88
致 谢	91
攻读硕士学位期间发表论文目录	92

CONTENTS

Chapter 1 Preface	1
1.1 Brief introduction of pile foundation	1
1.2 State-of-the-art of the dynamic testing method of pile foundation.....	1
1.2.1 State-of-the-art of the dynamic testing method of pile foundation in oversea countries.....	1
1.2.2 State-of-the-art of the dynamic testing method of pile foundation in China.....	3
1.3 Purpose and significance of the integrity testing of pile foundation	5
1.4 The common dynamic testing methods of pile foundation.....	6
1.4.1 Brief introduction of destructive dynamic testing methods of pile foundation	6
1.4.2 Brief introduction of non-destructive dynamic testing methods of pile foundation	6
1.5 Research background and contents of this paper	9
Chapter 2 The theory of reflected wave method and basic principle of testing	12
2.1 The theory of one-dimensional wave equation .	12
2.2 The reflection and penetrance of elastic wave.....	15
2.3 Analysis of the signal of pile foundation in time domain.....	17
2.4 Analysis of the signal of pile foundation in frequency domain	20
2.5 Judging standard for the quality of pile foundation and example analysis	22
2.5.1 Judging standard for the quality of pile foundation	22
2.5.2 Example analysis of the quality judgement of pile foundation.....	24
2.6 The limitations of low strain reflected wave method .	27
Chapter 3 Analysis of the low strain integrity testing of pile foundation using multiple method when considering the influence of damping	28
3.1 Study on multiple method	28
3.2 Man-made curve of velocity signal containing reflected multiple	28
3.2.1 Mathematical model.....	29
3.2.2 Principle for the formation of man-made curve of velocity signal	30

3.3 Inversion method for the formation of multiple curve.....	35
3.4 The influence of damping on the transmission of stress wave in pile body	36
3.4.1 Geometric diffusion of pile body caused by inertia effect in the cross direction	37
3.4.2 The influence of material damping on the transmission of stress wave	40
3.4.3 The influence of resisting force of the soil around pile body on the transmission of stress wave.....	44
3.5 Study on the damping parameter when considering the interacting of pile and soil in the integrity testing of pile foundation	46
3.5.1 Method of basic quantification analysis	47
3.5.2 Quantification analysis of pile defects when considering the interacting of pile and soil.....	49
3.5.3 Determination of damping parameter when considering the interacting of pile and soil.....	50
3.6 Implementation and numerical simulation of reflected wave method (containing multiple and penetrance wave) using computer program	52
3.6.1 Implementation of reflected wave method (containing multiple and penetrance wave) using computer program	52
3.6.2 Model Numerical example 1	55
3.6.3 Model Numerical example 2.....	56
3.6.4 Model Numerical example 3.....	58
3.6.5 Model Numerical example 4.....	60
3.6.6 Model Numerical example 5.....	63
3.6.7 Model Numerical example 6.....	66
3.6.8 Model Numerical example 7.....	68
3.7 General conclusions	71
Chapter 4 Integrity testing of pile foundation using multiple menthod when considering damping	72
4.1 Testing technique and requirements of refulcted wave method in construction site	72
4.2 Testing equipments of reflected wave method and testing process	76
4.3 Engineering test and diagnosis of multiple method when considering damping	82

Chapter 5 Conclusions and issues for further study86

5.1 Conclusion86

5.2 Expectation86

References88

Acknowledgements91

List of published papers during pursuing master degree..... 92

厦门大学博硕士学位论文摘要库

第一章 绪论

1.1 桩基简介

人类对桩基础的应用已经有很长的历史。早在新石器时代,桩基础就开始得到应用。那时,人类通过打入木桩和竹桩在湖泊和沼泽地搭台作为水上住所。随着人类社会的进步以及人类活动向空间和海洋的延伸,各种高层建筑、厂房、桥梁等层出不穷,人们对桩基础的要求越来越高,传统的木桩和竹桩已被各种新材料、新工艺、新技术的桩型取代。目前我国大量使用的桩型种类五花八门,主要有预制混凝土桩、就地混凝土灌注桩、钢桩等多种桩型,常用的基本成桩方法达到20多种^[1],施工工艺有打入、压入、钻孔等多种方法。如果按成桩材料和成桩方法分类,有混凝土桩、钢桩、CFG桩、碎石桩、预制桩、灌注桩、旋喷桩、搅拌桩、沉管桩等等。水泥搅拌桩、低强度等级混凝土灌注桩、CFG桩、灰土桩、碎石桩等是在土中设置的竖向增强体,均属复合地基范畴,虽被称为桩,但不是桩基工程。

建筑物的全部荷载是加在其基础结构之上的,并通过基础结构将荷传递给地基的。因此,地基和基础结构是建筑的根基,直接关系到建筑物的安危。实践证明,建筑物事故的发生多数是由于地基或基础结构质量的问题而引起的。基础结构一般分为浅基础与深基础两类。当浅层土质松软,不能满足建筑物对地基的强度和变形方面的要求时,就要利用深部坚实土层或岩层作为地基来建造深基础结构工程。深基础结构主要有桩基、墩基、沉井和连续墙等几种形式。近年来,桩基结构由于具有成本较低,抗震性能好,有利于实现基础结构工程的机械化和工业化等优点,成为一种常用的深基础形式,也是一种很有发展前景的基础形式。

1.2 国内外桩基检测方法的发展和应用近况

1.2.1 桩基动测技术的国外发展和应用近况

动测方法虽然已经有一百多年的历史,但是近代的动测技术则是随着现代化电子等技术的发展而在近三四十年前诞生的。可以说,它是岩土工程以及土动力学方面发展最快的分支之一,并受到越来越多的重视。无论在国外或国内都得到了迅速的推广和应用。

早在1867年,圣·维兰(St. Verant)提出波动方程,解决了自由支撑的细长弹性杆件一端受锤击后应力波的传播规律,之后动测方法在能量守恒的基础上,利用牛顿撞击定律,根据打桩时测得的贯入度来推算桩的承载能力。近代的动测技术则是以应力波理论为基础发展起来的。早在30年代,应力波理论就被用来分析打桩工程。1931年, D.V.Isaacs首先指出,当桩顶受到桩锤冲击后,冲击能量将以波动形式传至桩底,因此可用一维波动方程来描述,但其只能用于极简单的边界条件,且得出的解过于复杂,因而难以进入实用阶段。E.N.Fox在1932年对以上模型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。二十世纪五十年代,以E.A.Smith为代表的一些学者对锤—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,并利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^[6],对打桩的贯入性状进行了分析,并给出了土和系统单元参数的建议值,从而使波动方程分析法进入实用阶段变得可能。1960年以后,又有学者对打桩贯入形状作了分析,并讨论了桩锤、锤垫、桩帽、桩垫以及桩和土的模拟问题,定义了模拟中所设计的全部参数,从应用各种不同的波动方程的打桩实例中,提供了参数的建议值,从而使波动方程分析开始进入实用阶段,为桩基动力检测奠定了理论基础。

从1964年至1975年,美国Case技术学院G.G.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研究,取得了丰富的成果,1970年Goble等发表了“关于桩承载力的动测研究”^[18]一文,1975年发表了“根据动测确定桩的承载力”^[19]研究报告。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,为桩承载力的准确计算创造了条件。在做了许多假定以后,他们推导出了波动方程的一个准封闭解,这就是著名的Case法。针对Case法只能提供总的承载力,而不能给出侧摩阻力和端阻力这个不足,在Case法的基础上,Rausche等人于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,然而它却能给出侧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。后来又产生了CAPWAPC(Case Pile Wave-equation Analysis Program/ Continuous model)程序,它是对以上程序又做了不少改进,特别是用桩

的连续杆件模型代替了离散模型，并采用了特征线法求解波动方程，显著提高了计算精度。美国桩动力公司在Goble主持下生产了PDA打桩分析仪(PDA可用来检验桩的完整性)，并利用CAPWAPC程序预估桩的承载力：后来该公司又推出PIT代替PDA来测定桩的完整性，Rausche等采用PITWAP拟合方法分析桩的完整性，对缺陷类型和程度作出评价^[7]。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，荷兰的TNO桩检测系统和相应的分析程序TNOWAVE，在国际上也有广泛使用。

从1980年以来，“应力波理论在桩基工程中应用”的国际会议的召开^[8-16]，对交流桩基应力波检测理论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起到了积极作用^[17]。

近几年来，以波动理论为基础的动测技术在美国和欧洲有了新的发展。在测试技术上也作了进一步改进，并研制了新的桩基动测设备，使动测技术得到进一步的发展。为了保证动测技术的正确应用，不少国家已将桩的动测法列入地基基础设计与施工规范。加拿大、荷兰、德国等国建立了相应的桩基动测规范，不仅将动测技术用来解决桩的质量检验以及一般桩的承载能力测定，而且成功的将动测技术用于大直径灌注桩甚至沉井和复杂的桩基工程中。

1.2.2 桩基动测技术的国内发展和应用近况

在检验桩的完整性方面，我国最早于1972年开始研究基桩动测技术，经多年探索和工程实践先后形成了动力参数法、锤击贯入高应变动力试桩法、稳态机械阻抗法、水电效应法等动测方法，并于1980年开始自行研制基桩动测仪器。1988年后有关单位开始引进美国或荷兰的基桩动测分析仪进行分析和研究。到目前我国已有许多单位能够研制具有自主知识产权的基桩动测分析仪器，大部分技术水平较先进，研发能力较强，在国内基桩检测市场上占有较大的份额。

唐念慈^[20]等于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打桩分析，并设计了BF81计算程序。江礼茂^[21]等1990年提出拟合法中土阻力的双线性模型，并以波动理论为基础编制了计算单桩承载力的计算机程序。陈凡^[22]给出了考虑土的加工硬化或软化的土阻力模型，研制了FEIPWAPC特征线桩基波动分析程序。袁建新^[23]等给出了土性参数调整的一个优化方法。柴华友用特征线法计算桩顶速度理论值，由Powell法反演桩身波阻抗，并探讨了土阻尼

的影响。王靖涛基于桩基应力波理论研制了 WANG-PIP 和 WANG-PCP, WANG-PIP 是桩基完整性定量分析程序。其他一些学者也做了很多研究,丰富了应力波理论^[25-29]。应力波在桩基的传播满足波动方程,因为地面锤击的应力波其振动方向和传播方向都是垂直向下,所以只产生沿桩基传播的一维纵波,因此波动方程比较简单。对波动方程直接进行离散,可以采用有限元和有限差分等数值方法求解,刘利民等^[44]利用该方法讨论了不同模型桩的反射波特点,结果曲线中包含了第二次反射波,并且说明了当第二处缺陷与桩顶的距离为第一处的整数倍时第二次反射波的影响。除此之外还可以采用几何方法,即利用波的运动学特性,研究应力波在传播过程中波前面的空间位置或速度与其传播时间的关系,这种关系主要由锤击的子波和桩基不同深度的反射系数确定。反射系数是由于桩基不同深度波阻抗发生变化引起的,其中包括桩基截面变化等所引起的波阻抗变化,利用波动方程可以推导反射系数与波阻抗变化率的关系。几何方法虽然简单、直观,但是对于多个反射界面和多次反射波,反射系数将变得十分复杂,徐攸在先生的“桩的动测新技术”中对包含一个断面的桩基从物理现象上讨论了多次反射波现象,并且指出多次波“迭加在一起,组成幅值随时间变化的波形曲线,上下不对称,衰减很快且无规则,与完整桩呈指数衰减的波形曲线迥然不同”。目前为止,与多次反射波有关的难题仍然得不到进一步的研究,因此,利用几何方法只能解决一些只包含少数缺陷的简单模型问题,或者只讨论前面少数界面与第一次反射有关的信号。罗骥先^[45]利用几何方法推导包含多次反射波的反射系数,但是只考虑了平均分层的特殊情况。张建霖、张灿辉^[43]课题组模拟出桩基动测中包含透射波和多次反射波影响的合成速度曲线,可以处理任意个不等距的反射界面情况,使得应力波在桩基中的传播规律有了进一步的认识;提出了反演包含透射和多次反射影响波速度曲线的相应多次波分析方法,该方法只要每次速度波初至时间和幅度能够准确获得,就可以非常成功地得到反射界面的反射系数及其对应旅行时间,从而得到波阻抗变换律及其对应深度。同时,也有许多学者和研究人员对应力波在桩身中传播时,桩身及桩周土对其传播时的阻尼影响作出了大量的研究,得出了许多研究成果,为进一步对桩基缺陷的进行定量分析提供了大量的理论依据^[49-63]。

1.3 桩基础检测的目的及意义

随着我国建筑业的迅猛发展,城市高层建筑及大型重要工程的日益增多,基桩作为工程建设中的一种重要基础形式越来越得到广泛的应用。基桩是通过桩身材料强度或桩与土的相互作用将荷载传递给地基土层的。对于承受较高上部荷载重量的刚性桩基础,桩身质量及材料强度的优劣直接关系到整个建筑物的安全稳定,如果存在问题不能及时查出并采取补救措施,将会对整个工程造成不可估量的损失。在基桩工程施工中,由于地质条件复杂,施工条件及施工人员的技术水平等原因同时由于基桩施工是地下隐蔽施工,地下情况无法直接观测,基桩出现缩径、扩径、夹泥、离析、断裂等质量问题就很难避免,这些质量问题将会导致对它的承载力的影响^[2]。为了保证建设工程质量,确保建筑物的安全,必须找出存在质量问题的桩,直观的做法是用地质钻机钻取桩芯,查明桩身有无缺陷以及混凝土质量如何,这种方法虽然直观、可靠,但费时、费力、费用高,而且要损坏桩,只能对少量桩做抽样检验,不能给出统计性的检验结果,其代表性是有限的。

基桩桩身质量与基桩承载力是否能达到设计要求将决定桩基础能否既经济又安全地通过设置在土中地基桩,将外荷载传递到深层土体中。基桩检测主要在桩基础施工前和施工后进行,是桩基础设计和施工质量验收中的重要组成部分。基桩检测是指:(1)对基桩桩身质量进行检测,查清桩身缺陷及位置,以便对影响桩基承载力和寿命的桩身缺陷进行必要的补救,同时达到对桩身质量的普查目的;(2)对基桩承载力进行检测,达到判定与评价基桩承载力是否满足设计要求的目的。基桩检测可以进一步延伸到对桩基础质量的验收与评定。

为了对基桩性能作出准确判断,必须提高工程桩检测的检测质量。桩身完整性检测是至关重要的隐蔽工程验收手段,加强桩基质量的监控和检测,保证提高桩基质量,是当今建筑工程中的重要课题。基于上述原因,研究一种简单、快捷、准确的基桩质量无损检测方法,提高检测质量,最大限度查清桩身质量是一个急待解决的问题。国内外科技人员一直在寻求一种快速、简便和可靠的桩基测试方法,桩基动测技术就是在这种工程实际需要的背景下得以提出和发展的。应用动测法检测基桩完整性,对于缩短工期,便于工程桩的普查都具有十分明显的实际意义和应用价值。桩基动测法有以下几个特点^[3]:

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库