

XXXXXXXX 公路学院

土木工程专业毕业论文

低应变力波反射法的桩基完整性检测及应 用的研究

作者姓名： _____

学 号： _____

指导老师： _____

专 业： _____

班 级： _____

二〇〇九年三月

目录

摘要.....	2
ABSTRACT.....	3
第一章绪论.....	4
1.1 立题背景和问题的提出.....	4
1.2 桩基础的发展历程.....	7
1.3 桩基动测技术国内外发展状况.....	7
1.4 桩基动测的其它方法综述.....	8
1.5 本文主要研究工作.....	10
第二章 基本原理.....	12
2.1 波动方程及其解的形式.....	12
2.1.1 波动方程.....	12
2.1.2 波动方程解的形式.....	13
2.2 弹性波的反射与透射.....	14
2.2.1 在截面不变的桩中波的传播.....	14
2.2.2 桩身截面变化时波的传播.....	16
2.2.3 反射系数与透射系数.....	17
2.3 端承桩瞬态动测响应的数学模型.....	19
2.3.1 完整端承桩瞬态动测响应的数学模型.....	19
2.3.2 缺陷端承桩瞬态动测响应的反射波法数学模型.....	23
第三章检测系统中相关测试设备和参数的选用.....	25
3.1 相关设备的选用.....	25
3.1.1 激振设备的性能研究.....	25
3.1.2 传感器的选用与安装.....	27
第四章 采用改进的检测方法测定桩长的研究.....	30
4.1 在桩身不同部位拾振测定桩长的研究.....	30
4.1.1 不同点拾振的理论波形及桩长确定方法.....	30
4.1.2 测试系统及操作.....	33
4.1.3 现场测试与分析.....	34
4.1.4 小结.....	50
第五章 结论与展望.....	52
5.1 本文的主要结论.....	52
5.2 继续研究的建议.....	53
参考文献.....	54
致 谢.....	55

摘要

基桩动力检测法以其快速、准确、经济的优点成为基桩完整性检测的一种重要手段。随着人们研究的深入，基桩动力检测法也在不断的发展。但就目前而言，动力检测法仍然存在一些无法克服的缺点，以至于影响到检测的准确性。本文通过对低应变应力波反射法在桩基工程中应用的理论分析并根据工程质量管理要求，提出了采用低应变动测基桩质量的新试验技术方法——双峰法和时差法。该方法在一定程度上改进了传统测试方法在获得桩身相关信息方面的局限性，使得在桩长和波速都未知的情况下，对于现场施工桩长可以获得较满意的确定。提出了分析确定桩长的计算方法，并通过对预制桩实地的测试，初步验证了此法的可行性。

关键词：低应变应力 桩基 双峰法 时差法 桩长 应力波速

ABSTRACT

The foundation pile power examination law by its fast, accurate, the economical merit becomes the foundation pile integrity examination one important means. Thorough which studies along with the people, foundation pile power examination law also in unceasing development. But in the present case, the power examination law still had the shortcoming which some are unable to overcome, affects the examination accuracy. This paper presents two new experimental methods — Double wave crests method and Time differential method, in which for the testing of pile quality in dynamic low strain method, by analyzing the application of stress wave theory to the piles and on the demands of project quality control. This method improves traditional testing method to a certain extent, thus getting more relevance information of pile, pile length in-site can be satisfactory determined without the construction pile length and wave velocity. This paper puts forward a calculation method for the pile length, and verifies the feasibility of this method through testing pre-cast concrete piles in-site. and finally achieve the purpose of determining the pile length. we can realize this method and verify by information of a project.

Key Words: low strain and stress; piles; double wave crests method; time differential method; pile length; stress wave velocity;

第一章绪论

1.1 立题背景和问题的提出

桩基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，尤其目前我国桩基施工队伍庞杂，施工工艺各异，施工机具良莠不齐，桩基施工质量不稳定，甚至偷工减料(例如浇筑混凝土强度不足、桩长缩减等)是较为普遍的现象。所以，对于刚性桩来说，桩身完整性(质量)检测是至关重要的隐蔽工程验收手段，任何情况下都是不容忽视的，否则就有出现安全事故的隐患，威胁到人们的生命和财产安全。

目前，基桩动力检测法以其快速、准确、经济的优点成为基桩完整性检测的一种重要手段。随着人们研究的深入，基桩动力检测法也在不断的发展。就目前而言，有以下几种动力试桩方法：

动力参数法、共振法、反射波法、机械阻抗法、水电效应法、波动方程法、改进的动力打桩公式法和静动法。这里将主要介绍以波动方程法和反射波法为基础的低应变法和高应变法。这是因为就目前来看，在确定桩基承载力和完整性方面用的最多的还是低应变法和高应变法，而这两种方法目前国内外普遍采用瞬态冲击方式，通过实测桩顶加速度或速度响应时域曲线，借一维波动理论分析来判定基桩完整性，也即反射波法。目前几乎所有的有关检测单位均采用低应变激振法来检验桩的完整性。

但是我们也要看到低应变法存在的问题:采用一维杆波动理论的前提是激励脉冲的波长与桩的半径 R 之比应足够大(≥ 10), 否则平截面假设不成立, 即“一维纵波沿杆传播”的问题转换为应力波沿具有一定横向尺寸柱体传播的三维问题。另一方面, 激励脉冲波长与桩长相比又必须比较小, 否则波动性状不明显, 从而对准确探测桩身缺陷位置产生不利影响。针对这些问题有很多学者提出了许多新的改进方法, 例如, 采用小波来过滤反射波法反射回来的原始信号, 消除环境及电气噪声、土阻力干扰、桩身浅部缺陷反射信号等的干扰从而达到改善信号质量、提高桩基动测资料分析水平。尽管如此低应变法还是存在着一些局限性, 对于桩体变化较大的基桩, 其得到的波形往往很复杂很容易产生误判。特别是在复合地基中的竖向增强体的检测问题, 例如对于水泥土桩, 桩身施工质量离散性较大, 水泥土强度变化范围大可从零点几兆帕到几兆帕, 虽有低应变法检测其桩身完整性的报导, 但可靠性和成熟性还有待进一步探究。

与低应变法相比，高应变法检测桩身完整性存在着设备笨重、效率低及费用高等缺点，但由于激励能量和检测有效深度大的优点，特别在判定桩身水平整合型缝隙、预制桩接头等缺陷时，能够查明这些“缺陷”

是否影响竖向抗压承载力的基础上，合理判定缺陷程度，因而可作为低应变检测这类缺陷桩的一种补充验证手段。但是高应变法同样存在着很多限制条件，对于嵌岩的大直径灌注桩、扩底桩由于尺寸效应，端阻力充分发挥所需的位移很大，这时对桩锤匹配能力下降，而往往高应变检测所用锤的重量有限，很难在桩顶产生较长持续时间的高水平作用的荷载，达不到使土阻力充分发挥所需的位移量。遇到这种情况，高应变法就显得不那么适用了。

另外，声波透射法也是一种有着鲜明技术特点的检测方法，它可以覆盖全桩长的各个截面，信息量相当丰富，结果准确可靠，且现场操作简便、迅速，不受桩长、长径比的限制，一般也不受场地限制。但是此法需要预埋声管，指定受检桩，不能做到随机抽检从而也起不到监控的作用。因此当没有预埋声测管或声测管堵塞无法声波透射法时，此时用钻芯法就能达到检测的目的。钻芯法是一种微破损或局部破损检测方法，具有科学、直观、实用等特点，不仅可以检测混凝土灌注桩，而且也可检测地下连续墙的施工质量，但是此法成本非常高，也无法对预制桩和钢桩的成桩质量进行检测。它和声波透射法一样是桩基动测技术的很好的补充。

在桩基的完整性检测中，对测试系统的改进也是一种改善动测法准确度的有效手段，在传统的检测系统无法解决基桩完整性检测中存在的种种问题的时候，例如，尺寸效应及无法获得更多的参考信息等等。改进测试系统就改进了传统测试手段在这方面的缺陷。有学者就在这方面做了研究，提出了一种多点检测系统，采用多传感器多点拾

振，在应用多次覆盖原理对数据进行处理，可以有效的抑制干扰，提高信号的信噪比和测试精度。这也为我们提供了一种新的思路，测试手段上的改进也能取得很好的效果，如果能从测试数据中获得更多的信息将有助于我们提高桩基检测的准确度。

1.2 桩基础的发展历程

桩基础是历史悠久、应用广泛的一种基础形式，在距今 12000 年历史的智利古文化遗址中就已发现了桩的雏形。我国也在 7000 年前开始采用桩基础了，桩基础的发展也经历了一个漫长的过程。如今随着桩基础应用领域的扩宽以及我国工程建设事业的蓬勃发展，机械设备和施工技术不断得到改进与发展，产生了各种新桩型和新工法，为桩在复杂地质和环境条件下的应用注入了勃勃生机。因此，在高层建筑、重型厂房、桥梁、港口码头、海上采油平台以至核电站等工程中，大量采用桩基础。这样，桩基成为我国工程建设中很重要的一种基础形式，人们对桩基础的要求也越来越高，因而对其本身的质量检测就显得尤为重要了。

1.3 桩基动测技术国内外发展状况

自 1960 年 Smith 提出桩锤一桩一土系统的集中质量法差分求解模型以来，在此基础上世界上部分国家开展了一系列动力测试桩承载力的研究工作，并于 20 世纪 80 年代后期形成了实用的高应变现场测试和室内波动方程分析方法。与此同时低应变法检测桩身完整性研究工作也在进行，其中机械阻抗法在 20 世纪 70 年代初就已取得了进展；而低应变反射波法早期的研究也在英、法等国开展并在 80 年代后进入快速发展时期，在国际上基本占据了低应变动力检测桩身完整性的

主导地位。我国的桩动力检测理论研究实践始于 20 世纪 70

年代，研究开发了一些具有我国特色的方法，如湖南大学的动力参数法、四川省建筑科学研究所和中国建筑科学研究所共同研究的锤击贯入试桩法、西安公路研究所的水电效应法、成都市城市建设研究所的机械阻抗法、冶金部建筑研究总院的共振法等。这些都成为我国主要采用的基桩动测方法。20世纪80年代中至90年代初，我国在各种低应变法在基本理论、机理、仪器开发、现场测试和信号处理技术、工程桩或模型桩验证研究、实践经验积累等方面，取得了许多有价值的成果。20世纪90年代中期，建工行业标准《基桩低应变动力检测规程》(JGJ/T93-95)和《基桩高应变动力检测规程》(JGJ 106-97)的相继颁布，标志着我国基桩动测技术发展进入了相对成熟期。在这把与本文密切相关的反射波法的一些研究成果做一些总结。在信号处理方面，有学者提出用小波来过滤桩中反射回来的原始信号，消除环境及电气噪声、土阻力干扰、桩身浅部缺陷反射信号等的干扰从而达到改善信号质量、提高桩基动测资料分析水平的目的。还有学者提出将小波变换和人工神经网络两者结合起来提出了一种全新的桩身缺陷诊断方法。在对缺陷位置及桩长的确定影响较大的波速问题上，针对一维波动理论的不足，有学者提出用乘系数的方法来弥补波速的误差。这些都使得反射波法在实践中的可靠度得到了一定程度的提高。

1.4 桩基动测的其它方法综述

(1) 超声波法

超声波法在检测灌注桩方面有其独到的优点，它不受桩长、长径比的限制，一般也不受场地限制，已成为目前混凝土灌注桩完整性检测的重要手段。其基本方法是：基桩成孔后，灌注混凝土之前，在桩内预埋若干根声测管作为声波发射和接收换能器的上下通道，在桩身混凝土灌注若干天后开始检测，用声波检测仪沿桩的纵轴方向以一定的间距逐点检测声波穿过桩身各截面的声学参数，然后对这些检测数据进行处理、分析和判断，确定桩身混凝土缺陷位置、范围、程度，从而推断桩身混凝土的连续性、完整性和均匀性状况，评定桩身完整性等级。

(2)静动法

静动法是最近发展起来的一种大应变动测桩承载力的方法。它克服了波动方程法要求桩产生较大的贯入度，难以在灌注桩上实现的严重缺点。它的主要特点就是利用一种特殊的加载装置使作用在桩顶的力脉冲延续时间较长，这样可使桩产生很大的贯入度，又不破坏桩顶，且更为重要的是在这种动力作用下，桩身的应力和位移都与应力波的传播无关，而接近与静态承压桩，因此在分析上比较简单。由于静动法产生的加速度 $a=10-20g$ ，所以平台上的堆载只需要静载时的 50%-10%，大大节省了人力和物力。静动法确定桩承载力的方法是根据实测的静动力 F 、位移 U 、速度 V 和加速度 a ，按下面的平衡方程求得桩的承载力 P_u 也即土的静阻力 F_u ：
$$P_u = F_u = F - CV - ma$$
，当 $U=U_{max}$ 时， $V=0$ ，即可得桩的极限荷载 $P_u = F_u = F - ma$ 。另外在如何从静动法的试验结果 $F-U$ 曲线，求出相应的静载 $P-S$ 曲线，目前有

三种方法:起始刚度法、修正起始刚度法和卸荷点法。

(3) 钻芯法

在实际工程当中，可能由于受现场条件、当地试验设备能力等条件限制无法进行静载试验、高应变检测和低应变检测，或是由于没有预埋声测管或声测管堵塞无法进行声波透射法试验时，钻芯法便可以用来作为桩基检测的方法。它对拟建工程场地条件要比静载和高应变低得多，故它可以作为特定条件下的检测手段。钻芯法是一种微破损或局部破损检测手法，具有科学、直观、实用等特点，不仅可以检测混凝土灌注桩，也可检测地下连续墙的施工质量；同时，它还可以检测沉渣厚度、混凝土与持力层的接触情况，以及持力层的岩土性状、是否存在夹层等，这也是其它检测方法无法比拟的。但它也有局限性，其检测能力受桩的长径比制约，它也不能对预制桩和钢桩的成桩质量进行检测，这时低应变法就能体现它的优越性了。所以各种检测手段互相都有互补性，有时运用时可以将它们联合起来综合使用。钻芯法借鉴了地质勘探技术，在混凝土中钻取芯样，通过芯样表观质量和芯样试件抗压强度试验结果，综合评价混凝土的质量是否满足设计要求。钻芯法比较适用于混凝土灌注桩的特点可弥补低应变法在这方面的不足，同时钻芯法还可以对水泥土搅拌桩进行有效的、直观的检测，这一点也是低应变法目前很难做到的。

1.5 本文主要研究工作

本文拟在原有的反射波法测定桩长的试验方法上做一些技术上的改进，通过改进使得桩长的测定得到一定程度的提高。

本文是对反射波法确定桩长的一种新的尝试，拟解决的问题和采取的手段。

初步设想为以下几个方面:

(1)通过收集工程中已开挖验证的桩及相关曲线分析，找出理论分析曲线与实际开挖验证曲线的不符之处，重新进行时频域分析，找出在实际工程中造成误判的因素。

(2)在实际工程中，对所检测的桩采用改进的试验方法反复试验，分析时域特征曲线，得出响应特征参数。对比改进试验与原始方法的试验数据，找出其优点。

(3)通过设定不同的参数进行检测，研究在不同的锤击材料下，对改进试验的影响，找出最佳的锤击材料，使其与改进试验方案相配套。

在进行上述工作时可能会遇到下列问题:在对改进的试验方法所测得的时频域曲线可能会有较大的径向干扰波，使得在对曲线分析时产生严重的误判或者看不到桩底反射。可以考虑使用数字滤波手段或者改变拾振点位置来获取更多有效信息。

第二章 基本原理

2.1 波动方程及其解的形式

桩的动测技术以一维波动理论为理论基础。当给桩顶施加无论是振动还是锤击等激励能量时，都以应力波形式沿桩身传播，传递过程是以一维波动方程为数学模型的。

2.1.1 波动方程

在建立应力波沿桩身传递的一维波动方程的时候，由于在桩顶施加的是微小激振力，作了以下假定：

- (1) 桩身材料是均匀和各向同性的；
- (2) 位移假设相当微小以至对动力激发的反应总是线弹性的，服从胡克定律；
- (3) 桩受激振动时，其横截面保持为平面，而且每个截面上的应力是均匀分布的。

有了以上假定我们便可以建立桩的一维波动方程(如图 2-1)

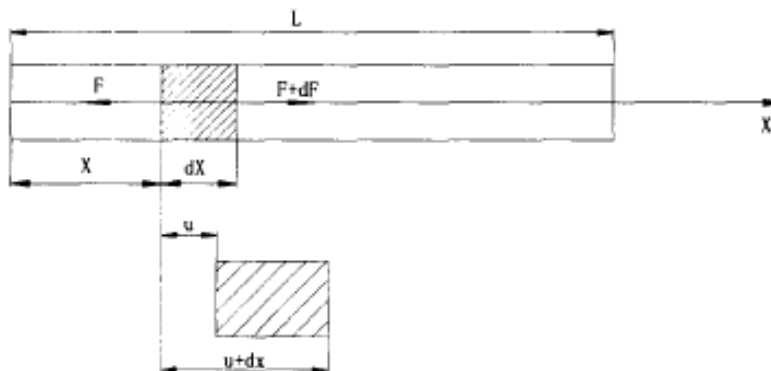


图2-1 杆件的纵向振动

取桩身的纵向为 X 轴，方向如图(2-1)所示。设桩长为 L,

截面积为 A , 密度为 ρ , 弹性模量为 E , 受轴向力 F 作用, 将沿桩身纵向产生位移 u , 则质点运动速度 $v = \frac{\partial u}{\partial t}$ 和应变 $\varepsilon = \frac{\partial u}{\partial x}$, 它们只是 x 和时间 t 的函数。

于 t 时刻在 x 处取一微元 dx , 受力情况如图 2-1 所示。由牛顿第二定律建立方程:

$$(F + \frac{\partial F}{\partial x} dx) - F = (\rho A dx) \frac{\partial v}{\partial t} \quad (2.1.1)$$

其中 $F = \sigma A$ (其中 σ 为轴向应力), 可得平衡方程:

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

又考虑一般情况下 $\sigma(\varepsilon)$ 连续可微, 则有:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial x} = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \quad (2.1.3)$$

根据胡克定律有 $\varepsilon = \frac{\sigma}{E}$ 将其代入式 (2.1.2), (2.1.3) 中便有:

$$E \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} = \rho \cdot \frac{\partial v}{\partial t} \quad (2.1.4)$$

令 $c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$, 并将 $v = \frac{\partial u}{\partial t}$ 和 $\varepsilon = \frac{\partial u}{\partial x}$ 代入到上式中整理得:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0 \quad (2.1.5)$$

此式即为一维波动方程, c 实际上就是一维杆件中的应力波传播速度。

2.1.2 波动方程解的形式

2.1.2.1 分离变量法求解波动方程

采用分离变量法求解波动方程(2.1.5)，令其解有如下形式：

$$u(x,t) = U(x) \cdot T(t) \quad (2.1.6)$$

代入波动方程得：

$$\frac{1}{U} \frac{d^2 U}{dx^2} = \frac{1}{c^2 T} \frac{d^2 T}{dt^2} \quad (2.1.7)$$

令上式左右两边等于一个常数 $-\left(\frac{\omega}{c}\right)^2$ 并代入上式，可得以下两个常微分方程：

$$\frac{d^2 U}{dx^2} + \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 U = 0 \quad (2.1.8)$$

$$\frac{d^2 T}{dt^2} + \omega^2 T = 0 \quad (2.1.9)$$

它们的通解分别为：

$$U(x) = A \sin \frac{\omega}{c} x + B \cos \frac{\omega}{c} x \quad (2.1.10)$$

$$T(t) = C \sin \omega t + D \cos \omega t \quad (2.1.11)$$

2.1.2.2 采用行波理论求解波动方程

式(2.1.5)一维波动方程为二阶偏微分方程，可以采用达朗贝尔通解求解此式，可得有下列形式的解：

$$u(x,t) = f(x-ct) + g(x+ct) \quad (2.1.12)$$

2.2 弹性波的反射与透射

2.2.1 在截面不变的桩中波的传播

首先研究一维波动方程的通解 $u = f(x-ct) + g(x+ct)$ ，这里单独把下行波拿出来研究，下行波的质点运动速度记作 $v \downarrow$ ，其值为：

$$v \downarrow = \frac{\partial f(x-ct)}{\partial t} = f'(x-ct) \cdot (-c) = -cf' \quad (2.2.1)$$

下行波产生的应变为:

$$\varepsilon \downarrow = \frac{\partial f(x-ct)}{\partial x} = f'(x-ct) \cdot 1 = f' \quad (2.2.2)$$

式中符号表示以压缩变形的压力为正。此时下行波的力为:

$$P \downarrow = \varepsilon \downarrow \cdot AE = -AE \cdot f' \quad (2.2.3)$$

将式(2.2.1)代入式(2.2.3)中可得:

$$P \downarrow = \frac{AE}{c} v \downarrow = Z \cdot v \downarrow \quad (2.2.4)$$

式中, $Z = \frac{AE}{c} = \rho c A$ 为桩的波阻抗。

同样, 对于上行波可以得到类似的式子:

$$P \uparrow = -Z \cdot v \uparrow \quad (2.2.5)$$

在一般情况下, 桩身上任一截面上测到的质点运动速度或力都是上行波与下行波的叠加的结果

$$\begin{cases} v = v \downarrow + v \uparrow \\ P = P \downarrow + P \uparrow \end{cases} \quad (2.2.6)$$

下面研究两种桩中常见情况下力和质点速度叠加的情况:

(1) 桩端为自由端时, 边界条件为 $P = P \downarrow + P \uparrow = 0$, 则:

$$P \downarrow = -P \uparrow \quad (2.2.7)$$

将式((2.2.4)与((2.2.5)代入上式可得桩端质点速度:

$$v \uparrow = v \downarrow, \quad V = v \uparrow + v \downarrow = 2v \quad (2.2.8)$$

公式(2.2.7)和(2.2.8)

表示应力达到自由端后，将产生一个符号相反、幅值相同的反射波，即压力波产生拉力反射波，在桩端处叠加，使桩端力为 0，而桩端质点运动速度增加一倍。

(2) 桩端为固定端时，边界条件 $V = v \uparrow + v \downarrow = 0$ ，则：

$$v \downarrow = -v \uparrow \quad (2.2.9)$$

将式(2.2.4)与(2.2.5)代入上式得：

$$P \downarrow = P \uparrow, \quad P = P \downarrow + P \uparrow = 2P \quad (2.2.10)$$

上两式表示应力波达到固定端后，产生一个与入射波相同的反射波，即入射压力波产生压力反射波，在桩端处由于波的叠加使桩端反力增加一倍，桩端速度为 0。

2.2.2 桩身截面变化时波的传播

当桩身截面发生突然变化时(见图 2-2),

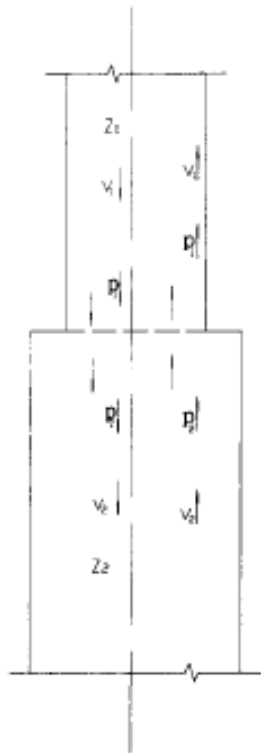


图2-2 柱截面变化情况

此时波阻抗由 $Z_1 = \frac{A_1 E_1}{c_1}$ 变为 $Z_2 = \frac{A_2 E_2}{c_2}$

，根据变截面处的平衡条件与连续条件，可有：

$$\begin{cases} P_1 \downarrow + P_1 \uparrow = P_2 \downarrow + P_2 \uparrow \\ v_1 \downarrow + v_1 \uparrow = v_2 \downarrow + v_2 \uparrow \end{cases} \quad (2.2.11)$$

将式(2.2.4), (2.2.5)代入上式中，整理后可得：

$$\begin{cases} P_1 \uparrow = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} P_1 \downarrow + \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} P_2 \uparrow \\ P_2 \downarrow = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} P_1 \downarrow + \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} P_2 \uparrow \end{cases} \quad (2.2.12)$$

当刚开始传播时只有下行波 $P \downarrow$ 变截面，上式变为：

$$\begin{cases} P_1 \uparrow = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} P_1 \downarrow \text{ (反射波)} \\ P_2 \downarrow = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} P_1 \downarrow \text{ (透射波)} \end{cases} \quad (2.2.13)$$

同理，当截面上只有上行波 $P \uparrow$ 变截面时，式(2.2.12)变为：

$$\begin{cases} P_1 \uparrow = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} P_2 \uparrow \text{ (透射波)} \\ P_2 \downarrow = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} P_2 \uparrow \text{ (反射波)} \end{cases} \quad (2.2.14)$$

式(2.2.13), (2.2.14)表明当原有的下行波及上行波通过变截面时，都会分成透射波与反射波两部分。透射波的性质与入射波一致，幅值为原入射波的 $2Z_2/(Z_1+Z_2)$ 倍；反射波的幅值为 $(Z_2-Z_1)/(Z_1+Z_2)$ 倍，根据 (Z_2-Z_1) 的正负号来决定反射波的性质是否发生变化。

2.2.3 反射系数与透射系数

根据以上的讨论我们可以得出反射波法测定桩身质量的基本原理，当桩身阻抗发生变化时，可以用波在桩身的传播规律进行分析，此时根据式(2.2.13),(2.2.14)，定义反射系数 R_r 、透射系数 R_t ，分别为：

$$R_r = \frac{P_1 \uparrow}{P_1 \downarrow} = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} = \frac{n - 1}{n + 1} \quad (2.2.15)$$

$$R_t = \frac{P_2 \downarrow}{P_1 \downarrow} = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} = \frac{2}{n + 1} \quad (2.2.16)$$

其中 $n=Z_1/Z_2$ 为阻抗比。式(2.2.15), (2.2.16)便为低应变反射波法对桩身缺陷或桩反射信号进行分析判断的重要依据，由上两式可得出以下结论：

(1)当 $n=1$ 时， $R_r=0$ ，说明界面处不存在阻抗不同或截面不同的材料，无反射波信号。

(2)当 $n>1$ 时， $Z_1>Z_2$ ， $R_r>0$ ，反射波与入射波同号。说明界面是由高阻抗硬材料进入低阻抗软材料或大截面进入小截面。这在工程实际中对应于桩身存在缩颈、断裂、混凝土离析、夹泥等之中的某种或几种情况。

(3)当 $n<1$ 时， $Z_1<Z_2$ ， $R_r<0$ ，反射波与入射波反号。说明界面是由低阻抗软材料进入高阻抗硬材料或小截面进入大截面。这在工程实际中对应于桩身存在扩颈或嵌岩桩桩底等阻抗相对增大的情况。

而透射波始终不改变符号和方向，这从式(2.2.13), (2.2.14)中都能看出，它与初始入射波方向一致。

2.3 端承桩瞬态动测响应的数学模型

本文主要的研究桩型为端承桩，而其基于低应变动力测桩的正演理论的数学模型是研究此种桩型的必要手段，这里列举的是分布参数系统建立的端承桩数学模型。它需要做以下几点假设：

(1) 桩受激振动是在弹性限度内。由于通常低应变法的激振力很小，且可以控制，所以桩的振动完全满足这一假设。

(2) 桩材料是均匀或分段均匀且各向同性的。

(3) 桩受激振动时，其截面保持为平面。与前面所讨论的桩的横向几何弥散一样，对于桩的长径比也要大于一定的数值，这样才能满足这一假设要求。

一般 $L/D \geq 10$ 就能满足假设要求。

2.3.1 完整端承桩瞬态动测响应的数学模型

基于以上所做的假设可以建立起以下阻尼波动方程(如图):

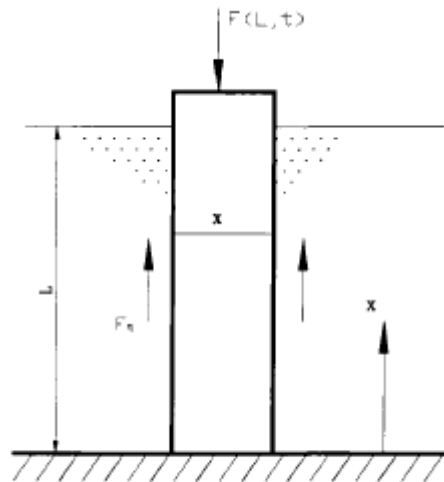


图 2-4 端承桩的参数

$$\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} + 2\beta \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} - c^2 \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} = 0 \quad (2.3.1)$$

式中， β 为桩侧土的等效粘滞作用阻尼系数;其它参数与式(2.1.5)一致。

对(2.3.1)采用分离变量法，令 $u(x,t) = Y(x)Z(t)$, 可得:

$$\begin{cases} Y''(x) + v^2 Y(x) = 0 & 0 \leq x \leq L \\ Z''(t) + 2\beta Z'(t) + (vc)^2 Z(t) = 0 & t > 0 \end{cases} \quad (2.3.2)$$

v 是分离常数; $Y(x)$ 为波动函数，它与时间 t 无关; $Z(t)$ 为振动函数，它与坐标 x 无关。

求解可得:

$$Y(x) = a \cos vx + b \sin vx \quad (2.3.3)$$

由上式可知 $v = \frac{2\pi}{\lambda}$ 就是应力波的圆波数。

解方程((2.3.2②)并消去 $\beta \geq vc$ 时的大阻尼和临界阻尼这两种不属于振动的解的情况，只取 $\beta < vc$ 时的小阻尼情况，可得其振动型解:

$$Z(t) = e^{-\beta t} (c_0 \cos \omega t + d_0 \sin \omega t) \quad (2.3.4)$$

式中， ω 就是桩阻尼振动圆频率。于是便可得位移函数:

$$u(x,t) = Y(x)Z(t) = e^{-\beta t} (c_0 \cos \omega t + d_0 \sin \omega t)(a \cos vx + b \sin vx) \quad (2.3.5)$$

a, b, c_0, d_0 为待定系数，它们由初始条件和边界条件所决定。

初始条件:当桩顶面($x=L$)受一瞬时冲击力作用时，在冲击力作用的末时刻($t=0$)，桩顶获得的初速度为:

$$\left. \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} \right|_{t=0} = u_t(x,0) = v_0, \quad x=L \quad (2.3.6)$$

边界条件:指在 $t>0$ 的任何时刻，应力波在桩的边界截面(

桩顶、桩底)上的状态, 有:

$$\text{桩底刚性固定: } u(x,t)|_{x=0} = u(0,t) = 0, \quad t > 0 \quad (2.3.7)$$

$$\text{桩顶面自由: } \frac{\partial u(x,t)}{\partial x} \Big|_{x=L} = u_x(L,t) = 0, \quad t > 0 \quad (2.3.8)$$

由于低应变的瞬态激振施加的激振力不可能使端承桩振动起来, 于是便有:

$$u(x,t)|_{t=0} = u(x,0) = 0, \quad 0 \leq x \leq L \quad (2.3.9)$$

把初始条件和边界条件分别代入到位移函数(2.3.5)可得到相对应的待定系数的值。由边界条件(2.3.7)可得: $u(0,t) = Y(0)Z(t) = 0$, 在 $t > 0$ 时 $Z(t)$ 不为零, 因而只有 $Y(0) = 0$, 从而 $a = 0$ 。于是便有:

$$Y(x) = b \sin vx \quad (2.3.10)$$

又由边界条件(2.3.8)有 $u_x(L,t) = Y_x(L)Z(t) = 0$, 必有 $Y_x(L) = 0$ 再将(10)代入其中, 有: $vb \cos vL = 0$, 又 v, b 均不为零, 所以就有下式:

$$\cos vL = 0 \quad (2.3.11)$$

上式就是应力波圆波数 v 必须满足的方程, 称为波数方程。由此可得到圆波数的一个序列:

$$v_n = \frac{(2n-1)\pi}{2L} \quad n=1, 2, \dots, \infty \quad (2.3.12)$$

因而桩的自振圆频率的一个序列为:

$$\omega_n = v_n c = \frac{(2n-1)\pi c}{2L}, \quad n=1, 2, \dots, \infty \quad (2.3.13)$$

相应可得到桩阻尼自振频率的一个序列为:

$$\omega_n = \sqrt{(v_n c)^2 - \beta^2} = \sqrt{\frac{(2n-1)^2 \pi^2 c^2}{4L^2} - \beta^2} \quad (2.3.14)$$

则可得到下面两个函数序列:

$$\begin{cases} Y_n(x) = b_n \sin v_n x \\ Z_n = e^{-\beta t} (c_n \cos \omega_n t + d_n \sin \omega_n t) \end{cases} \quad (2.3.15)$$

因而位移函数为:

$$u(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} Z_n(t) Y_n(x) = e^{-\beta t} \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cos \omega_n t + B_n \sin \omega_n t) \sin v_n x \quad (2.3.16)$$

这里已将 b_n 并入 C_n 和 d_n 中构成了两个新的系数序列 A_n 和

B_n 。将上式代入到(2.3.9)中可得 $A_n=0$, $B_n = (-1)^{n+1} \cdot \frac{2I}{\rho AL \omega_n}$, 从而得到:

$$u(x,t) = \frac{2I}{\rho AL} e^{-\beta t} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \cdot \frac{1}{\omega_n} \cdot \sin \omega_n t \cdot \sin v_n x \quad t>0, 0 \leq x \leq L \quad (2.3.1$$

7)

式中 I 代表瞬时冲击力对桩的冲量, ρA 为单位长度的质量。由于在实际桩基检测时, 传感器放置在桩顶面上, 既仅仅观测桩顶面的振动响应。故令 $x=L$ 代入到(2.3.17)中, 便可得到完整端承桩瞬态动测振动位移响应的数学模型:

$$u(t) = \frac{2I}{M} \cdot e^{-\beta t} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\omega_n} \sin \omega_n t, \quad t>0 \quad (2.3.18)$$

对上式分别求一阶导和二阶导可得到相应的动测振动速度和振动加速度响应, 它们的数学模型分别为:

$$v(t) = \frac{2I}{M} \cdot e^{-\beta t} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \left(\cos \omega_n t - \frac{\beta}{\omega_n} \sin \omega_n t \right), \quad t>0 \quad (2.3.19)$$

$$a(t) = \frac{2I}{M} \cdot e^{-\beta t} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{\beta^2 - \omega_n^2}{\omega_n} \sin \omega_n t - 2\beta \cos \omega_n t \right), \quad t>0 \quad (2.3.20)$$

式中, $M = \rho AL$ 为桩身的质量。

2.5.2 缺陷端承桩瞬态动测响应的反射波法数学模型

缺陷端承桩，泛指桩体材料的杨氏模量 E 、密度 P 和截面 A 三个参数存在间断的端承桩。可以采用两种方法建立正演模型，一种就是如前所述求解波动方程导出振动响应的数学模型；另一种就是利用应力波在桩身缺陷处产生反射波并在该处叠加，通过叠加原理来建立振动的响应的数学模型。在前面的论述中已具体提过应力波的反射和投射问题，这里利用它来建立反射波法的数学模型。

其原理就是利用端承桩缺陷处的应力波回到桩顶面与顶面的应力波叠加起来，便产生了叠加现象，通过对叠加现象的分析研究，可以给出缺陷端承桩瞬态动测响应模型。假设距离桩底 X_0 处有一缺陷，桩顶响应经过时间 t_0 后达到缺陷处，反射回桩顶的时间为 $t_1=2t_0$ ，当桩顶的响应时间大于 $2t_0$ 时，则在时刻 t_1 时在桩顶处形成叠加现象，其性质和强弱取决于缺陷的类型及严重程度(如图 2-5)：

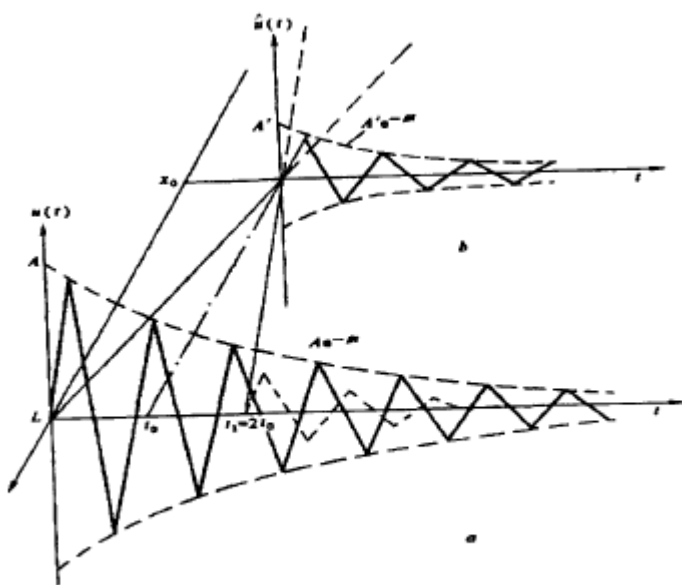


图 2-5 振动响应的传播和反射三维表意图

反射波法的解析解是在完整端承桩的瞬态动测位移响应数学模型中变化而来:

设式(2.3.18)中 $\frac{2I}{M} = A$, $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \omega_n t}{\omega_n} = u_0(t)$ 则振动响应方程为:

$$u(t) = Ae^{-\beta t} u_0(t) \quad (2.3.21)$$

式中 A 为振动响应初始幅值, 在整个振动的持续时间 T 内, 若 $(2t_0 < T < 2(n+1)t_0)$, 此时有 n 次反射的振动响应, 其序列为 $\hat{u}_n(t^{(n)})$, 由叠加原理可知, 在桩顶处观测的缺陷端承桩瞬态振动响应的叠加形式为:

$$u^*(t) = u(t) + \sum_{q=1}^n \alpha_1^q u_q(t^{(q)}) \quad (2.3.22)$$

从上式可知, 振动反射叠加部分 $u_q(t^{(q)})$ 的极性取决于反射系数 α_1 的符号, 它是缺陷类型识别的重要标志。

第三章检测系统中相关测试设备和参数的选用

3.1 相关设备的选用

在一个完整的动测桩基的测试系统中，观测系统和分析系统的共性非常明显，而被测系统千差万别，对动测相关设备的研究正是要剥离观测系统和分析系统的共性部分，突显被测对象，为准确分析研究被测对象创造条件。

反射波现场测试仪器布置如图(3-1)所示：

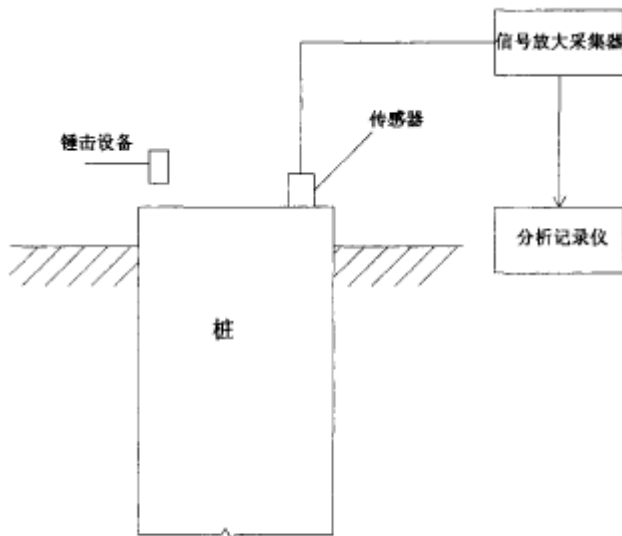


图 3-1 反射波现场测试仪器布置

3.1.1 激振设备的性能研究

激振器是一个产生瞬时冲击力的器件。对激振器的要求就是要使产生的瞬时冲击力应符合以下条件。

(1)尽可能是沿桩轴方向;

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。

如要下载或阅读全文，请访问：

<https://d.book118.com/935132041114011200>