

单桩完整性及承载力的 无破损试验

——稳态正弦激振机械阻抗法及
弹性波反射法原理及应用实例

唐有职 鲍延辉 吴仲伦 编著



地震出版社

1993

单桩完整性及承载力的 无破损试验

——稳态正弦激振机械阻抗法及
弹性波反射法原理及应用实例

唐有职 鲍延辉 吴仲伦 编著

地震出版社

1993

(京) 新登字 095 号

单桩完整性及承载力的无破损试验

唐有职 鲍延辉 吴仲伦 编著

责任编辑: 蒋乃芳

地质出版社 出版

北京民族学院南路 9 号

中国地质大学轻印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

全国各地新华书店经售

850×1168 1/32 5.25 印张 141 千字

1993 年 5 月第一版 1993 年 5 月第一次印刷

印数: 0001—2700

ISBN 7-5028-0777-2 / TU · 72

(1170) 定价: 5.80 元

前 言

用动力法无破损检验桩身质量及预估单桩极限承载力是新近发展起来的一门新的应用测试技术。随着我国工程建设的高速发展，特别是沿海地区大量建筑物广泛采用各种类型、各种尺寸的基础桩，这门新的应用测试技术将会有较大的进展及应用前景。

由于大直径灌注桩、高承载力单桩的广泛使用，特别是海洋平台工程的发展，静荷载试验等方法难以确定单桩极限承载力和检测桩身质量，因此，从其他学科中转导出了一些测试方法应用于桩基质量的检测和单桩极限承载力的预估。

单桩桩身质量的无破损检验及单桩极限承载力的预估，实际上就是结构体系的振动分析。故所有的动力试桩方法，都以振动理论为基础。对桩的无破损检验不外乎是振动试验和振动分析这两个过程。然而，实际桩土系统的振动分析比一般机械、结构的振动分析复杂得多，其中包括桩本身的功能及桩身多变的形状，桩周土体的参振，以及桩与土的相互作用等等。由于这诸多因素，使得测试结果的分析变得复杂、多解，并带来一定难度，只有通过反复研究，反复试验，才能对桩身质量及单桩极限承载力作出准确的判断和预估。

本书根据作者多年来的研究和实践，在介绍许多实际宝贵资料的同时，着重论述稳态正弦扫频机械阻抗法、弹性波反射法的基本原理和应用实例，全书通过大量工程桩的检测资料（都是作者亲自测试所得），说明所述测试方法检验桩身质量和预估单桩极限承载力的可行性及实用性。

此外，书中对用动力法预估单桩极限承载力的内容单列一章，因为这是目前学术界争论较激烈的课题，有人认为用动力法

目 录

第一章 概论	(1)
§ 1.1 桩基的施工特点及其可能出现的缺陷类型	(1)
§ 1.2 桩基施工质量的检验	(2)
§ 1.3 低应变动力检测法的理论基础	(4)
§ 1.4 低应变法动力检测桩的基本概念	(5)
第二章 机械阻抗的基本概念	(6)
§ 2.1 机械阻抗的概念来源	(6)
§ 2.2 机械阻抗的定义	(8)
第三章 桩土系统经受稳态激励时的机械阻抗分析	(11)
§ 3.1 稳态阻抗法中常用的两种激励方法	(11)
§ 3.2 桩土系统在稳态扫频激励下的振动形态	(13)
§ 3.3 桩土系统作为单自由度系统作刚体运动时的 阻抗分析	(14)
§ 3.4 桩土系统作为弹性竖杆作波动时的阻抗分析	(20)
第四章 稳态正弦激励机械阻抗测试技术	(26)
§ 4.1 稳态正弦激励的特点	(26)
§ 4.2 现场测试设备及其特点	(27)
§ 4.3 现场检测方法	(34)
第五章 基桩质量判别方法和步骤	(38)
§ 5.1 正常桩的典型导纳曲线及其特征参数	(38)

§ 5.2	桩身完整性的判别及其步骤	(40)
第六章	现场试验桩的速度导纳曲线解释实例	(48)
§ 6.1	足尺模型试验桩的速度导纳曲线分析	(48)
§ 6.2	现场工程桩实测导纳曲线解释实例	(60)
第七章	单桩极限承载力的预估	(96)
§ 7.1	用机械阻抗法测试并预估单桩极限承载力 的基本概念	(96)
§ 7.2	单桩极限承载力与桩土系统综合刚 度之间的关系	(98)
§ 7.3	模型摩擦桩、支承桩、摩擦支承桩之 间的动测刚度比较	(100)
§ 7.4	根据桩的静压载试验所得的 $P-s$ 曲线的 基本类型及用于计算单桩承载力的 计算沉降量 s 的取值	(101)
§ 7.5	桩土系统综合刚度的现场测试及单桩 极限承载力的计算	(105)
§ 7.6	单桩极限承载力计算实例	(106)
第八章	综合动力试桩方法	(118)
§ 8.1	采用综合方法对基桩质量检测的必要性	(118)
§ 8.2	用弹性波反射法对基桩质量进行检测	(118)
§ 8.3	用两种检测方法对同一工程桩质量进行检测的 应用实例	(154)
主要参考文献		(162)

第一章 概 述

桩基础是建筑物常用的基础形式之一。1965 年以来，由于就地灌注混凝土桩施工技术的迅速发展，在基础设计方案的选择中，就地灌注混凝土桩逐渐处于被优选的地位，它不仅部分取代了预制打入桩，而且对一般地基条件不很理想的中小型建筑物具有更大的适应性。根据沿海几个省市的粗略统计，约有 80%左右的建筑物采用桩基础，其中大部分是各种不同成孔方法的灌注桩。

另一方面，随着高层建筑和大跨度桥梁的发展，要求基础能支承的荷载愈来愈大，桩径和桩长都需要作相应的增加，故先预制后打入的施工方法已不适用，灌注桩的“用武之地”更加广大。

§ 1.1 桩基的施工特点及其可能出现的缺陷类型

预制打入桩系在地面模板中预制，然后用打桩架起吊定位后打入土中。其桩身含筋率高，预制时振捣充分，混凝土标号易控制，一般桩身质量易保证。在打桩过程中，只要锤击能量与贯入阻力匹配适当，一般即能顺利地打到设计指定的桩尖持力层标高。桩身可能形成的缺陷主要是断桩，即在某一截面处的混凝土被冲击力压碎，钢筋压屈。其主要原因或是混凝土标号太低，或是锤击能量偏小，桩头无法贯入持力层，导致锤击次数太多。

灌注桩的成桩过程是在桩位处的地面下或水下完成，施工工序多，又不便于监视。因此，质量控制的难度远比预制打入桩大，出现的质量问题亦比预制打入桩多得多，根据统计约占

10%—20%。

灌注桩的质量问题与其成桩工艺密切相关。属于桩身完整性的常见质量缺陷有夹泥、断裂、缩颈、扩颈、空洞、混凝土离析等。分析这些缺陷产生的原因，大致有：

(1) 灌注混凝土过程中，导管埋入混凝土中的深度不够，致使新灌混凝土上翻，或提升导管速度太快，导致导管中翻水，造成两次灌注，使桩身形成夹泥的断裂界面。

(2) 孔中水头下降，对孔壁的静水压力减小，导致局部孔壁土层失稳坍落，造成混凝土桩身夹泥或缩颈。孔壁坍落部分留下的窟窿，成桩后即形成扩颈。

(3) 混凝土搅拌不均匀，或运输路径太长，或导管漏水，混凝土受水冲泡等，使粗骨料集中在一处，造成桩身混凝土离析。

(4) 沉管法成桩过程中，当混凝土灌注接近地面（约1.5—3.0m）时，管中混凝土桩压力减小，若提管速度太快，混凝土柱易被拉断，致使形成桩身断裂或缩颈等。

影响桩底支承条件质量主要是灌注混凝土前清孔不彻底，孔底沉淀层厚度超过规定的极限标准，影响桩的承载力。

§ 1.2 基桩施工质量的检验

严格地讲，桩基础和基础桩的概念是不同的。数根桩的桩顶用一刚性承台联接起来形成的整体，称为“桩基础”，或“桩基”。组成此桩基础的每根桩称为“基础桩”或“基桩”，俗称单桩。桩基工程的质量检验可以对桩基进行检测，亦可对每根基桩进行检测。前者用的较少，仅在桩尺寸较小和桩数不多的情况下（如某些设备下的桩基础）进行。大量的则是对基桩的质量检测。

基桩施工质量的好坏，主要用桩身形体的完整性和桩在土介质中的承载力来检验和评定。传统的检验方法就是在桩顶做静压载试验。其主要优点是：

- (1) 静力状态，它接近桩的实际工作条件；
- (2) 方法的原理比较直观；
- (3) 能提供较可靠的定量评价。

其主要缺点是：

- (1) 费钱费时，设备笨重，对大尺寸桩难以实施；
- (2) 正规的静压载试验属破坏性试验，试验后的桩无法再利用；

(3) 得到的承载力系桩身混凝土灌注质量和桩周土支承能力的综合评价。只要承载力能满足要求，桩身存在某种缺陷亦将被认可，即忽视了这些缺陷对承载的长期效应；

(4) 静压桩试验不可能多做。根据统计学观点，对于工地上极少数桩的静压载试验数据无法用来评价该建筑工地所有桩的总体质量，特别是各种成孔方法的灌注桩。

鉴于传统的静压载试验存在上述不足，随着科学技术的进步和综合性应用技术的发展，60年代开始提出了用动力法检验基桩质量的方法。在桩顶施加动力激励，同时在桩头上测量桩土系统的动力反应，借助于竖杆的波动理论或机械阻抗理论，分析判别桩身完整性和估计基桩的承载能力。

动力法的主要优点是简便而省时，因此可大大增加受检测的桩数，即加大受检覆盖面，有利于用统计学的方法对一个建筑工地的基桩质量作出总体评价。

动力检验法可分为高应变法和低应变法两大类。

高应变法主要用于桩身材料基本均匀的预制打入桩、钢管桩。其方法是在桩顶施加大的锤击力，同时在桩顶四个侧面对称安装一组加速度传感器和应变传感器，用以测量和记录力波曲线和速度波曲线，然后根据行波理论的一整套分析计算方法（有Case法和Capwap法等）获得桩身完整的评价和承载力的估算值。高应变法要求锤击能量足够大。对于实心钢筋混凝土预制桩，自由落锤的锤重应不小于桩身重量的8%，以保证一次锤击

足以使桩尖贯入土中不少于 2mm。这是因为高应变法认为，桩侧土的阻力和桩尖土的阻力（反映承载能力）必须使土产生足够的位移才能得到发挥，否则无法评定基桩的承载能力。

低应变法的特点是对桩顶施加的振动激励能量很小，只能激起桩土系统的微幅振动。同时测量和记录桩顶的振动速度和加速度。利用波动理论分析回波速度，或用机械阻抗理论分析其导纳函数（见第二章），即可判断桩身完整性。用低应变法预估基桩承载力，目前惯用的手段是先在导纳函数曲线上，根据振动理论求得桩周土的支承刚度 K ，然后用完全经验的方法推算承载力。

属于低应变检验桩的方法有机械阻抗法（包括稳态法、瞬态法和随机法）、桩基参数动测法（锤击法）、共振法、水电效应法和回波法（反射波法）等。

§ 1.3 低应变动力检测法的理论基础

低应变动力检测法的理论基础是线性振动理论，即认为由桩和桩周土组成的振动系统是一个线性振动系统。线性振动系统的振动特点是：①系统的基本特性参数不随时间而改变，是“时不变”的；②系统的输入（激励）和输出（响应）符合迭加原理：若输入为 x_1 时，输出为 y_1 ，输入 x_2 时，输出为 y_2 ，则当输入为 $x_1 + x_2$ 时，其输出必定为 $y_1 + y_2$ 。实际上，理想的线性振动系统是不存在的，线性振动系统通常只是实际系统微幅振动的一个抽象模型。如果振幅太大，必将引入较复杂的非线性振动问题，使动力分析大大复杂化。埋入土中的桩和其周围土组成的振动系统，通常在不超过 1 kN 的动力激励下，所发生的振动量级是极其微小的，属于微幅振动。系统的特性参数在短期内亦可认为是“定常”不变的。这样就有条件应用线性振动理论和方法来分析较复杂的桩土系统的振动问题。换句话说，低应变法之所以只能采用低能量的激励方法，使桩土系统的振动限制在微幅振动范

围内，而不能采用高能量激励，使桩尖和土产生足够大的位移，就是这个道理。

§ 1.4 低应变法动力检测桩的基本概念

任何一个结构（或系统）受到动力作用（激励）后必有一定的反应（或称响应）。这种反应除与来自外界的激励条件有关外，主要决定于结构本身的性质（称动力特性），而其动力特性又决定于结构本身的性状。

根据动力响应判别事物性状的实例是很多的。古代，人们已知道利用人耳这个灵敏的天然传感器探测物体对外来激励的响应信息——主要是声音差异来判断物体的性状。最简单的例子是用手拍打西瓜表皮（激励），同时听其声音（响应）以判断瓜的生熟。又如火车到站后，检车员用一小锤敲打车轮的轮轴、轴箱和支承弹簧等部件，听其声音即能判断有无裂缝。在打桩过程中亦如此，有经验的打桩工人根据锤击声音的变化即能发现桩已被打断等。

近代科学技术的发展，使人们拥有足够的手段对桩（或其它结构系统）施加各种不同的动力激励，激励力的大小和其变化规律都是可测的，同时又有灵敏度很高的各种传感器，能把桩顶（或其它结构系统）受激励后的振动响应的各种信息（速度、加速度等）测量并记录下来，然后借助于近代振动信号的计算机分析技术，获得反映桩土系统（或其它结构系统）动力特性的一系列信息及其参数。

桩土系统的动力特性通常用其特性曲线来描述。可以在时间域里描述，也可在频率域里描述。机械阻抗法则属于频率域描述法。

本书主要介绍稳态机械阻抗法的原理、仪器、设备、现场检测和分析方法，并列举大量工程实例以供工程技术人员借鉴利用。此外，也将介绍应力波反射技术及大量工程应用实例。

第二章 机械阻抗的基本概念

§ 2.1 机械阻抗概念的来源

机械阻抗概念来源于机电模拟。所谓机电模拟是根据机械系统与相应的电器系统在简谐激励条件下，描述它们的动态特性的微分方程（数学模型）具有相同的形态而建立起来的一种比拟方法。曾提出过两类机电模拟，即阻抗型机电模拟和导纳型机电模拟。现以第一类阻抗型机电模拟予以说明。

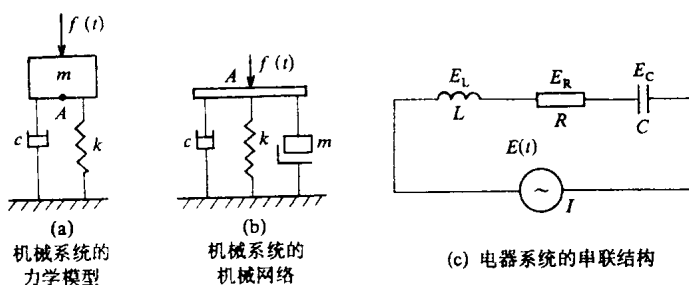


图 2-1

图 2-1a 表示一个具有质量 m ，弹簧刚度 k 和阻尼系数 c 的单自由度机械系统的力学模型，并经受简谐力 $f(t)$ 的激励。图 2-1b 是其相应的由“机械元件” m ， k ， c 组成的“机械网络”图。绘制机械网络图的原则是：①元件 c 和 k 按原样予以“接地”；②由于在考虑质量元件上的加速度时，总是以地作为惯性参照系，因此网络网中代表质量的元件总有一端是“接地”的，而且在接地端与质量

块之间必须有一“滑隙”，表示质量块可以对地自由运动；③网络图中的“刚性扁担”表示三个元件在结点 A 的位移相等。图 2-1c 是与机械网络相对应的电路系统，由电感 L ，电阻 R 和电容 C 三个电器元件组成，经受简谐电信号激励。在此必须注意，机械元件的并联结构与电器元件的串联结构相对应。

下面先列出电器系统和机械系统的特性微分方程，通过对比，找出它们之间的比拟关系，然后再列出电器系统的电阻抗，最后根据上述比拟关系，写出机械系统的机械阻抗。

已知图 2-1c 电路的特性微分方程为

$$\left. \begin{aligned} E(t) &= E_L(t) + E_R(t) + E_C(t) \\ E(t) &= L \frac{dI(t)}{dt} + RI(t) + \frac{1}{C} \int I(t) dt \\ I(t) &= I_L(t) = I_R(t) = I_C(t) \end{aligned} \right\} \quad (2-1)$$

同时，由振动理论，已知图 2-1a 机械系统的特性微分方程为

$$\left. \begin{aligned} f(t) &= f_m(t) + f_c(t) + f_k(t) \\ f(t) &= m \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + c \frac{dx(t)}{dt} + kx(t) \\ &= m \frac{dv(t)}{dt} + cv(t) + k \int v(t) dt \\ v(t) &= v_m(t) = v_c(t) = v_k(t) \end{aligned} \right\} \quad (2-2)$$

对比式 (2-1) 和式 (2-2) 可以发现，两者完全相似，而且具有如下的对应比拟关系。即力与电压相当 ($f \longleftrightarrow E$)；质量与电感相当 ($m \longleftrightarrow L$)；阻尼与电阻相当 ($c \longleftrightarrow R$)；弹簧刚度与电容相当 ($k \longleftrightarrow 1/C$)；速度与电流相当 ($v \longleftrightarrow I$)。

图 2-1c 中总阻抗 Z 应是三个电器元件阻抗之和，即

$$Z_L = j\omega L; \quad Z_R = R; \quad Z_C = \frac{1}{j\omega C}$$

$$Z = j\omega L + R + \frac{1}{j\omega C} \quad (2-3)$$

根据上述两种系统的对应比拟关系，不难写出机械系统的机械阻抗为

$$Z = j\omega m + c + \frac{k}{j\omega} \quad (2-4)$$

式(2-4)与由机械振动学中一般原理得到的结果完全一致。这就是机电模拟方法在机械振动分析问题中的应用。

§ 2.2 机械阻抗的定义

图 2-2 表示当一线性振动系统经受频率为 ω 的简谐交变力 $f(t)$ 激励时，系统的响应[位移响应 $x(t)$ 或速度响应 $v(t)$ 或加速度响应 $a(t)$]必定亦是同频率的谐振动。但响应一般都滞后于激励。

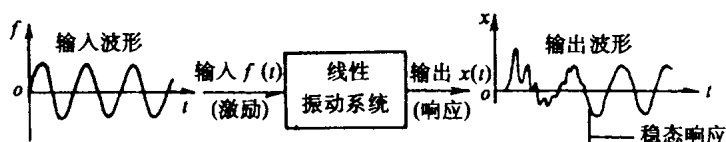


图 2-2

假设

$$\text{激励力} \quad f(t) = F\sin(\omega t + \varphi_1) \quad (2-5)$$

则

$$\left. \begin{array}{l} \text{位移响应} \quad x(t) = X \sin(\omega t + \varphi_2) \\ \text{速度响应} \quad v(t) = V \sin(\omega t + \varphi_3) \\ \text{加速度响应} \quad a(t) = A \sin(\omega t + \varphi_4) \end{array} \right\} \quad (2-6)$$

式中

F —— 激励的振幅；

X, V, A —— 位移响应、速度响应、加速度响应的幅值；

$\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ 和 φ_4 —— 各自的相位。

机械阻抗定义为稳态激励时，激励力的幅值与其响应的幅值之比，简称阻抗。机械阻抗的倒数称为机械导纳，简称导纳。阻抗和导纳都是 ω 的函数。根据响应量的不同，阻抗和导纳可分别表示如下：

$$\left. \begin{array}{ll} \text{位移阻抗} & Z_x(\omega) = \frac{F(\omega)}{X(\omega)} \quad (\text{动刚度}) \\ \text{速度阻抗} & Z_v(\omega) = \frac{F(\omega)}{V(\omega)} \quad (\text{阻抗}) \\ \text{加速度阻抗} & Z_a(\omega) = \frac{F(\omega)}{A(\omega)} \quad (\text{视在质量}) \\ \text{位移导纳} & Y_x(\omega) = \frac{X(\omega)}{F(\omega)} \quad (\text{动柔度}) \\ \text{速度导纳} & Y_v(\omega) = \frac{V(\omega)}{F(\omega)} \quad (\text{导纳}) \\ \text{加速度导纳} & Y_a(\omega) = \frac{A(\omega)}{F(\omega)} \quad (\text{惯量}) \end{array} \right\} \quad (2-7)$$

上述六种阻抗和导纳均有各自的称谓。同时，只要知道一种阻抗或导纳，即可求得其他的阻抗和导纳。在应用中，凡不加说明的阻抗或导纳，都是指速度阻抗或速度导纳。不论用哪种阻抗或导纳研究分析问题，都统称为“阻抗法”。

考虑到被测系统上激励点和测试响应点的位置及作用方向的

不同，有必要将阻抗和导纳的意义进一步加以扩展。在同一点施加激励和测量响应，称为原点阻抗（或导纳）；不是同一点的，称为传递阻抗（或传递导纳）；激励和响应是同方向的，称为正向阻抗（或正向导纳）；不同方向的，称为交叉阻抗（或交叉导纳）。在基桩检测中，总是在桩顶中心竖向激励，同时在桩顶靠近边缘处测量竖向响应，因此，属于正向传递阻抗（或导纳）。

第三章 桩土系统经受稳态激励时的 机械阻抗分析^①

在第一章中已经说明，当作用于桩顶的激励力不是很大，使桩土系统的振动限制在极小的微幅振动范围内时，即使桩身混凝土和桩周土体的应力应变关系都是非线性的，也可近似地把桩土系统作为线性系统来考虑。这样，即可用线性振动理论对桩土系统进行动力特性分析。

在这一章里，先介绍稳态阻抗法中激励力和响应的变化规律，然后阐述桩土系统的阻抗分析方法。

§ 3.1 稳态阻抗法中常用的两种激励方法

在机械阻抗试验中，如果需采用稳态激励，则有两种不同作用规律的激励方法可供选择。一种是正弦线性（或对数）步进扫频激励，另一种是正弦线性连续扫频激励。两者的区别可用图 3-1 说明。

图 3-1a 表示线性（或对数）步进扫频时激励频率的变化规律。在测试所要求的频率变化范围内，从 $f_{\min}$ 至 $f_{\max}$ 按一定的频率间隔（步长）逐个频率激励，而且每个频率都持续相同的时间 t 。 t 的确定应考虑在每一频率的激励力作用下，系统的响应达到稳定和仪器测量分析时所需要的时间。作用在桩顶的不同频率的

① 本章部分内容和图件引自朱之基《混凝土灌注桩质量无损检测技术》教材送审稿。