

江苏省建设工程质量检测人员培训教材

# 高应变法检测 补充讲义

江苏建科建筑技术培训中心

二〇一九年十一月

# 目 录

第一节	概述-----	1
第二节	基本理论或原理-----	2
第三节	仪器设备-----	6
第四节	测试技术-----	8
第五节	现场检测-----	14
第六节	数据处理-----	24
第七节	报告编写-----	29
第八节	工程实例分析-----	30
第九节	高应变动测仪操作-----	38

# 高应变法检测

## 第一节 概述

### 高应变法 High strain dynamic testing

用重锤冲击桩顶，实测桩顶部的速度和力时程曲线，通过波动理论分析，对单桩竖向抗压承载力和桩身完整性进行判定的检测方法。

### 方法适用范围

本方法适用于检测基桩的竖向抗压承载力和桩身完整性；监测预制桩打入时的桩身应力和锤击能量传递比，为沉桩工艺参数及桩长选择提供依据。

进行灌注桩的竖向抗压承载力检测时，应具有现场实测经验和本地区相近条件下的可靠对比验证资料。

对于大直径扩底桩和  $Q-s$  曲线具有缓变型特征的大直径灌注桩，不宜采用本方法进行竖向抗压承载力检测。

高应变法检测的主要功能是判定单桩竖向抗压承载力是否满足设计要求。这里所说的承载力是指在桩身强度满足桩身结构承载力的前提下，得到的桩周岩土对桩的抗力（静阻力）。所以要得到极限承载力，应使桩侧和桩端岩土阻力充分发挥，否则不能得到承载力的极限值，只能得到承载力检测值。

与低应变法检测的快捷、廉价相比，高应变法检测桩身完整性虽然是附带性的，但由于其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，能够在查明这些“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。当然，带有普查性的完整性检测，采用低应变法更为恰当。

高应变检测技术是从打入式预制桩发展起来的，试打桩和打桩监控属于其特有的功能，是静载试验无法做到的。

## 第二节 基本理论或原理

### 一、凯斯（Case）法

桩是一根细长的杆件，因此在研究打桩过程时不能将问题简单地看成为刚体的碰撞，而必须考虑应力波在桩身中的传播。如果再进一步忽略土体振动的影响，打桩过程可用一维波动方程来描述，凯斯法从行波理论出发，导出了一整套简洁的分析计算公式并改善了相应的量测仪器。使之能在打桩现场立即得到关于承载力，锤击能量，桩身内力和桩身质量等许多分析结果。凯斯法的优点就是具有较强的实时分析功能。凯斯法的计算公式在推导过程中作了不少简化。从数学的观点看是不够严格的。因此有人将凯斯法的计算公式称之为为一维波动方程的准封闭解。

#### 1、Case 法的基本假定

为了简化问题，Case 采用了下述假定：

- （1）桩看作一维杆体，桩身等阻抗，即截面不变、桩身材质均匀且无明显缺陷；
- （2）只考虑桩底的动阻尼，忽略桩身周围的动阻尼；
- （3）应力波在传播过程中没有能量耗散和信号畸变；
- （4）在  $(t_1 \sim t_1 + 4L/C)$  时段内桩侧各点的摩阻力不变。

#### 2、Case 法基本公式——阻尼系数法

基于上述假定，Case 法导出，在锤的冲击下，岩土对桩的实际总阻力  $R_t$  为：

$$R_t = 1/2[F_1 + F_2] + Z/2[V_1 - V_2] \quad (2-1)$$

我们的希望的是岩土对桩的静阻力，所以必须从总阻力  $R_t$  中扣除由于桩身在土中运动而受到的附加阻力  $R_d$ ，根据第二点假设，桩侧动阻力可不予考虑，Case 法假定桩尖动阻力与桩尖的运动速度  $V_b$  成正比，令  $J_c$  为比例常数，经推导得：

$$R_{sp} = (1 - J_c) \times (F_1 + ZV_1) / 2 + (1 + J_c) \times (F_2 - ZV_2) / 2 \quad (2-2)$$

式中：

$R_t$ ——桩对土的实际总阻力；

$R_{sp}$ ——阻尼系数法所确定的桩的静阻力（即桩的极限垂直承载力）；

$J_c$ ——桩尖土层的凯斯系数，其取值与桩尖岩土颗粒粗细有关，高勃尔建议如表 6-1 取值；

$F_1$ 、 $V_1$ —— $t_1$  时刻（或应力波初始峰值时刻）实测的力值、速度值；

$F_2$ 、 $V_2$ —— $t_2$  时刻 ( $t_2=t_1+2L/c$  即来自桩底反射波时刻) 实测的力值、速度值;  
 $Z$ ——桩身阻抗, 为  $P$  (密度)、 $c$  (波速)、 $A$  (截面积) 的乘积。

表 2-1 PDI 公司推荐的  $J_c$  值

土质	纯砂	粉砂	粉土	亚粘土	粘土
$J_c$	0.1~0.15	0.15~0.25	0.25~0.4	0.4~0.7	0.7~1.0

### 3、关于 Case 法的几点说明

(1) Case 法公式确实很简单, (2-2) 式中未知数仅为  $J_c$ , 其它为实测值, 在现场只要输入  $J_c$  值, 即可得预测承载力值;

(2) 根据基本假定, 符合条件的桩为初打阶段的打入桩, 这时  $J_c$  值为桩尖土层的 Case 阻尼系数。实际上,  $J_c$  值正是高勃尔根据 120 根打入桩动静对比结果总结出来的。

(3) 应该说, 对复打阶段的预制桩、对静压桩、对桩侧动阻力比较明显的灌注桩、对挖孔桩, 均无法和假设条件完全一致, 这时  $J_c$  值变成了一个没有明确物理意义的经验系数, 综合反映试桩各个方面的特定条件。

(4) Case 法有一定适用范围, 对短桩 (桩长与桩径之比较小), 对扩底桩、对桩身截面变化较复杂或桩身存在较严重缺陷的桩, 因基本不符合 Case 法假设前提, 一般来说不适宜用 Case 法, 而应该用 Capwapc (曲线拟合法) 或静载法解决。

经过以上的讨论, 我们可以看出, 对大部分桩, 动静对比求取  $J_c$  值除反映桩尖土的颗粒粗细程度外, 还包括了试桩与 Case 法假设前提背离程度的影响。换句话说,  $J_c$  值除和桩尖土有关外, 还与桩周土、不同桩类型有关。所以说  $J_c$  值具地区性, 不同地区均需要作动静对比, 求取不同桩型、不同桩径大小、不同地质条件下桩的凯斯系数, 其道理就在这。上述第 (4) 点所提到的各种桩, 因试桩条件与假设前提背离程度太大,  $J_c$  值的求取当然就很困难了, 所以, 就不适宜用 Case 法。

## 二、凯斯波动分析程序法

凯斯波动分析程序法 (实测曲线拟合法) 中典型的代表是 Capwapc 法, 是高应变动力试桩中较为常用的方法。其将凯斯法在现场实测的波形曲线输入到更精密的波动理论计算程序中, 是以波动方程解为基础的方法。主要是将理论计算所得力波  $F(t)$  与速度波  $V(t)$ , 和实测值的反复比较, 迭代, 通过调整土阻力大小与分布及各参数值来与实测力波与速度波拟合以提供承载力。图 2-1 是实测曲线拟合法的原理框图。

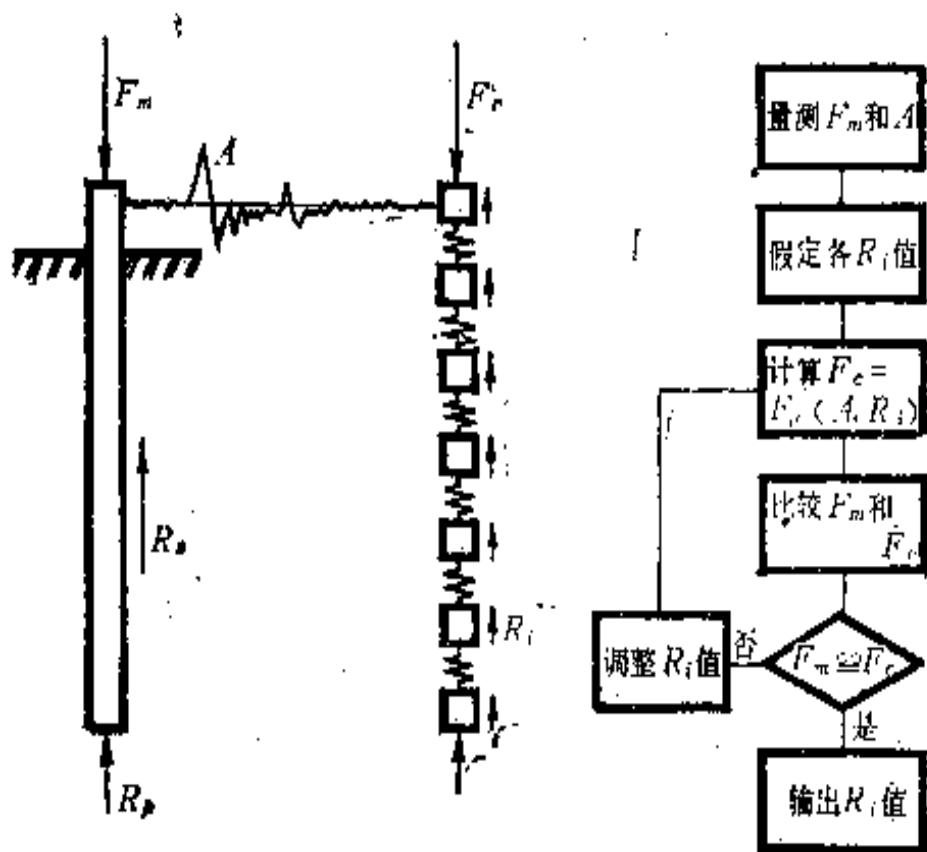


图 2-1 实测曲线拟合法原理框图

该方法采用连续杆件模型，将桩身分成  $N_p$  个（桩身及传感位置的桩材弹模、波速等）弹性杆件单元，每个单元长度大约为 1m，桩身模型中包含桩材性质、波阻抗、桩身裂隙、材料阻尼等参数。将土分成  $N_s$ （一般取  $N_s=1/2N_p$ ）个单元，模型中除了最大静阻力  $R_u$ ，最大弹性变形  $Q$  及阻尼系数  $J_c$  三个基本参数外，还增加了卸载时的弹性变形、卸载水平、重新加载水平、桩端与岩土间空隙、桩端附加质量（土塞）、残余应力及能量耗散（幅射阻尼）等选项。在多数情况下，桩周土单元的  $Q$  值和  $J_c$  值可取相同值，桩身阻抗是恒定的，故一般情况下共有  $N_s+19$  个未知数。

该分析方法的思路是根据实测的应力和速度曲线中，选一条曲线进行相应的波动计算，将求得的另一条计算曲线与实测曲线相比较拟合。也可以通过应力和速度曲线求解上行波和下行波相拟合进行，即从上行波曲线（或下行波曲线）出发，对各种参数进行设定，计算出下行波（或上行波）曲线，把计算结果和相应的实测曲线进行比较，根据对比的差值，自动修改数学模型，再进行下一次的计算拟合，如此反复进行，直至达到拟合效果满意为止，才能最终确定符合实际桩土体系的各种参数，但必须指出最终设定的各种参数应基本符合桩周土的分布规律。可见这种算法是以实测值作为客观标准来反

演桩土参数。经过多次拟合，最终得到桩身剖面形状、土参数分布（如土阻沿桩身分布）和根据桩土参数进行静力分析模拟出的静荷载—沉降曲线。此外，由于求解是对整个波动过程进行的，因而还能给出桩身任一深度处的动力学和运动学参数随时间的变化，应该注意到：参数选取是否合理与分析人员素质与经验的丰富程度有很大关系，所得拟合效果因人而异。因此，尽管拟合法的标唯一，但实际上解并非唯一，只可能将不同的解控制在一定的变异范围内。

### 第三节 仪器设备

一、检测仪器的主要技术性能指标不应低于《基桩动测仪》JG/T 3055 中表 1 规定的 2 级标准，且应具有保存、显示实测力与速度信号和信号处理与分析的功能。

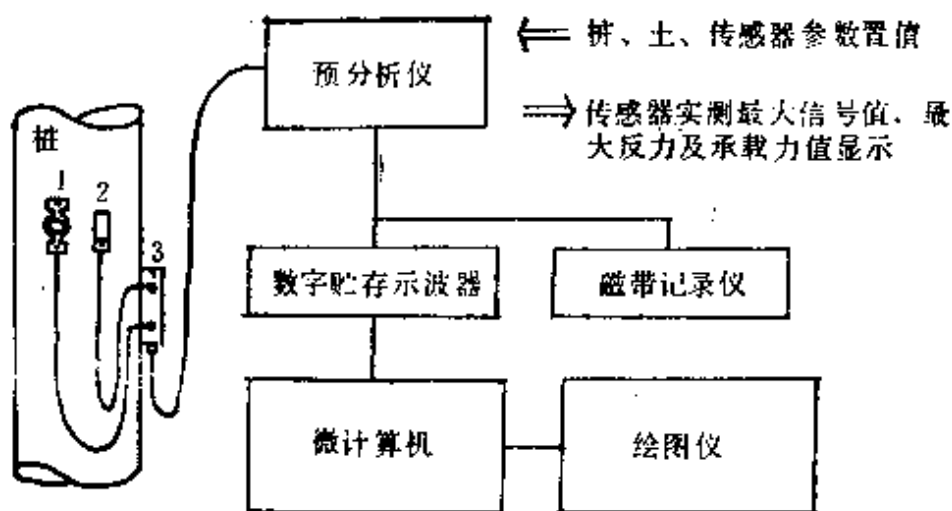
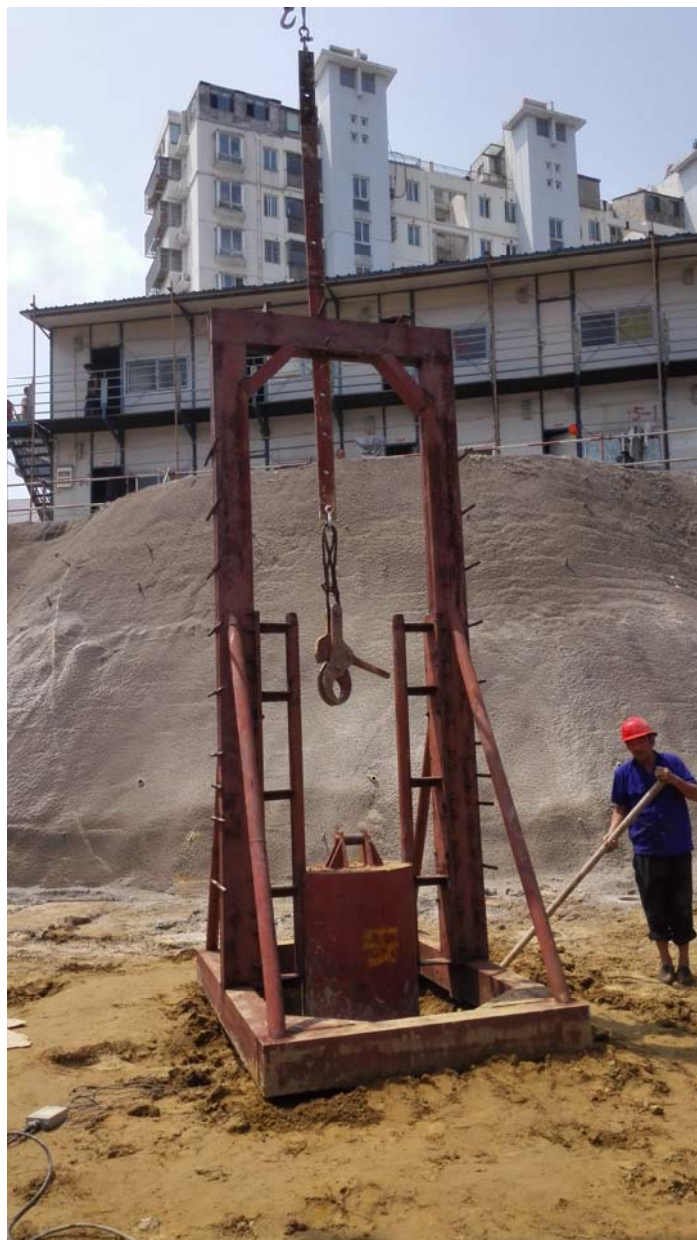


图 3-1 高应变整机系统示意图

1.应变传感器 2.加速度传感器 3.接线盒

二、锤击设备宜具有稳固的导向装置；打桩机械或类似的装置（导杆式柴油锤、振动锤除外）都可作为锤击设备。



三、重锤应材质均匀、形状对称、锤底平整，高径（宽）比不得小于 1，并采用铸铁或铸钢制作。当采取自由落锤安装加速度传感器的方式实测锤击力时，高径（宽）比应在 1.0~1.5 范围内。

四、进行承载力检测时，锤的重量与单桩抗压承载力特征值的比值不得小于 0.02。

五、当作为承载力检测的灌注桩桩径大于 600mm 或混凝土桩桩长大于 30 米时，尚应对桩径或桩长增加引起的桩-锤匹配能力下降进行补偿，在符合规范 JGJ106-2014 第 9.2.5 条规定的前提下进一步提高检测用锤的重量

六、桩的贯入度可采用精密水准仪等仪器测定。



## 第四节 测试技术

随着社会经济的发展，建筑物的桩基类型也多种多样，一些实践表明有些桩与一维应力波理论有关桩身的基本假定相差较大，这里将基本假定列出，供大家参考：

桩是一个**时间不变的系统**，即桩的基本特性在测试所涉及的时间内可以看作是固定不变的；

桩是一个**线性系统**，即桩在总体上是弹性的，所有的输入和输出都可以简单叠加；（在桩身的局部环节可以考虑其非线性性状）

桩是一个**一维杆件**，即桩身每个截面上的应力应变都是均匀的，可以用平均应力应变来描述桩身截面上的分布。

### 一、试验方法及信号的选取

将二支加速度传感器和二支应变力传感器分别对称安装在距桩顶2倍桩径左右的桩侧表面，锤以自由下落方式锤击桩顶，瞬时冲击产生的加速度和力信号通过桩基动测系统放大和 A/D 转换，变成数字信号传给微机，信号经过计算机软件的处理(故障诊断、双边平均、加速度积分及 CASE 计算等)后存入磁盘，同时显示实测波形。

#### 1、典型现场记录

依据行波理论，在波形曲线开始段，即传感器开始感受到冲击波，而土阻力的回波还不明显时，在安装传感器的桩截面上只有单一的行波，在波形曲线的初始段（一般在峰值以前）F 曲线与 ZV 曲线应基本重合。

图 4-1 是典型的现场记录波形，可见在波形曲线的初始段两条曲线是重合的。当波形曲线初始段没有明显的重合趋势时，应停止试验，仔细检查传感器和仪器，认真找出产生异常的原因。（①地表有阻力；②传感器附近变截面；③参数不合理；④传感器位置不当，安装不好；⑤偏心，力的任一值与平均值之差的绝对值超过平均值的 33%，为严重偏心。）

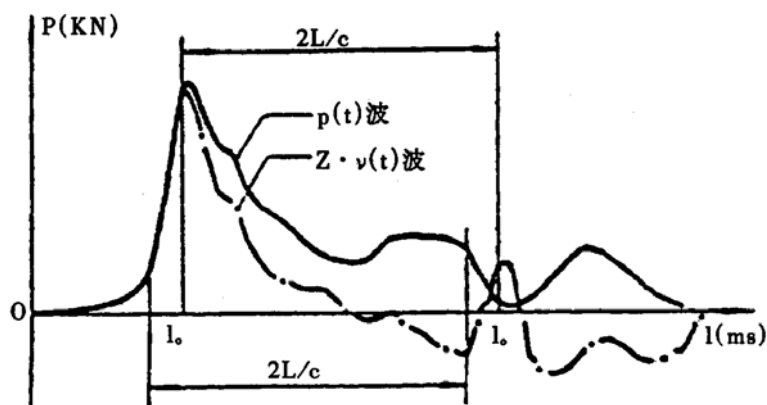


图 4-1 典型的现场记录波形

图 4-2、图 4-3 是测试中可能遇到的两种异常情况。图 4-2 的异常情况比较明显, 曲线的形状完全不重合。图 4-3 曲线形状似乎有重合的趋势, 但是实测的  $Z$  值与理论估算值相差太大。对于预判打入桩, 桩截面尺寸是已知的。实测的  $Z$  值与理论值之间的相对误差不应大于  $\pm 25\%$ , 通常误差在  $\pm 20\%$  范围内。

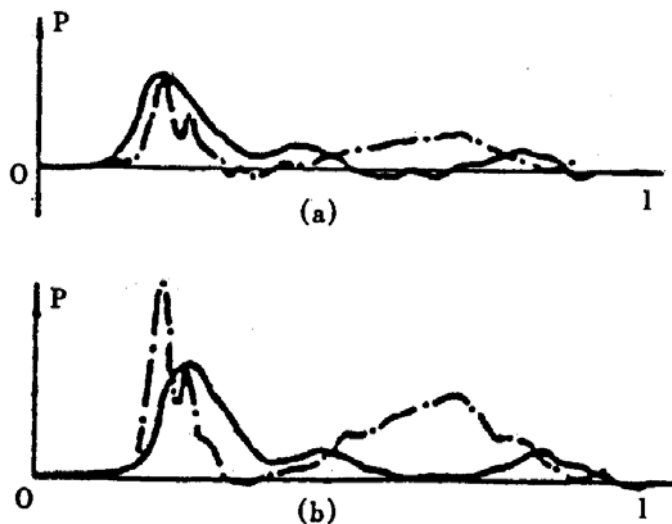


图 4-2 F 波和 ZV 波起始段不重合的实录曲线

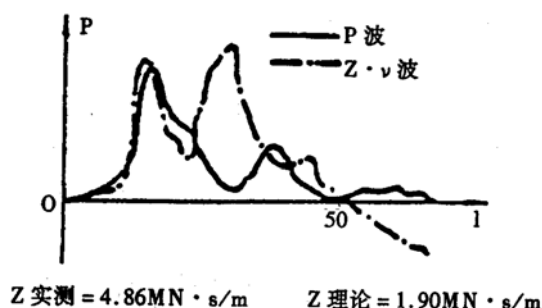


图 4-3  $Z$  值不符的情况

当传感器接收到上行的回波 (一般情况首先是土阻力的回波),  $F$  曲线与  $Zv$  曲线开始被分开。当上行的回波是压力波时,  $F \uparrow$  为正值,  $v \uparrow$  为负值。

截面的入射波的波幅为

$$F \downarrow = F_{\max} - \frac{1}{2} \Delta R \quad (4-1)$$

式中  $F_{\max}$  为力波的峰值。

如果在  $t_a$  时刻以后没有任何回波叠加, 则自  $t_a$  以后, 速度波和力波将保持平行。图中超出平行线的部分就是由拉力回波的叠加所产生的, 它的大小可用  $\Delta U$  表示。

这里以压力为正, 故上行的拉力波  $F_1 \uparrow$  幅值是负的, 上行的速度为  $-F_1 \uparrow / Z$  是正值。上行的拉力波与原来的波叠加时, 使力波幅值减小  $|F_1 \uparrow|$ , 使速度波  $Z \cdot V$  增加  $|F_1 \uparrow|$ ,

所以两条曲线的差值  $F-ZV$  的变化量为  $\Delta U = -2 F_1 \uparrow$ 。故可得式 (4-2)。

$$\frac{F_1 \uparrow}{F_1 \downarrow} = \frac{-\frac{1}{2} \Delta U}{F_{\max} - \frac{1}{2} \Delta R} \quad (4-2)$$

高勃尔、劳歇建议在实际应用中，公式修改为

$$\alpha = \frac{-F_1 \uparrow}{F_1 \downarrow} = \frac{-\frac{1}{2} \Delta U}{F_{\max} - \Delta R} \quad (4-3)$$

由式 (4-3) 得高应变基桩完整性系数

$$\beta = \frac{1 - \alpha}{1 + \alpha} \quad (4-4)$$

根据观察这一异常回波的时刻  $t_x$ ，即可求得缺陷距传感器的距离为

$$x = \frac{1}{2} \cdot c \cdot t_x \quad (4-5)$$

其中  $c$  为波在桩桩身中传播的速度

压力回波使传感器测到的  $F$  的值增加， $V$  值减小， $F$  曲线与  $ZV$  曲线拉开， $F$  曲线值大于  $ZV$  曲线值。反之，当回波是拉力波时， $F_1 \uparrow$  为负值， $V \uparrow$  为正值，则  $F$  值减小， $V$  值增加， $ZV$  曲线值大于  $F$  曲线值。两曲线开始拉开后， $F$  曲线值大于  $ZV$  曲线值，可知回波是压力波，一般情况下，它是由土阻力所产生，在时刻  $t_b$  时，突然产生了相反的现象，即  $F$  波急剧减小， $ZV$  波急剧增加，说明在时刻  $t_b$  起传感器接收到一个较强的拉力回波，一般它是由于桩截面的突然缩小所产生的。由于时间  $(t_b - t_a)$  与估算的  $2L/c$  值很接近，我们即可判断在  $t_b$  时刻，传感器接收到桩尖回波，时间  $t_b - t_a$  就是实测的  $2L/c$  值，实测的  $2L/c$  与理论值之间误差的大小也是判断现场测试记录可靠性的重要依据。

## 2、信号的判读

实测信号能否用于解释，试验人员必须在现场作出判断，一个信号的好坏主要从如下几方面进行判别：

(1) 信号的成比例性：正常情况下（桩身浅部存在缺陷除外），实测力曲线与速度

曲线起始部分应该重合。若力曲线速度曲线在起始部分即有较大的偏离，这可能有如下几种情况引起：一是传感器附近混凝土松散，锤击作用下该处混凝土产生塑性变形；二是锤击严重偏心，引起信号偏离；三是弹性波速输入不正确。试验人员应根据实际情况及时排除故障，重新测试。

(2) 信号的一致性：同一试桩的不同锤击信号应具有相关一致性。若不同的锤击信号差异很大，试验人员应及时检查传感器的安装是否松脱，传感器有否损坏，采取措施重新测试。

(3) 信号的归零性：正常的实测信号，力与速度曲线尾部必须归零。引起零漂的原因主要是锤击偏心，使桩身砼局部受压和受拉。以及传感器处混凝土松散，锤出时产生塑性变形。另外传感器处桩身若存在局部裂缝，也往往引起实测曲线零漂。

(4) 试验的充分性：试验的充分与否，直接影响承载力的计算，一个不充分的试验曲线。其提供的承载力显然是保守的。试验是否充分，主要从如下两方面进行观察：一是观察桩在锤击下的贯入度；二是观察速度曲线  $2L/C$  时刻之前是否归零，如果速度曲线在  $2L/C$  之前提早归零，那么，可以肯定该桩的承载力仍未能充分激发，此时，必须加大锤重或提高落距，进行下一步的检测。

总之，实测数据的好坏必须从信号的比例性、一致性、归零性及充分性进行判别，只有反映真实情况的实测数据，才能得出正确的结果。

## 二、分析方法

将存储在磁盘上的原始信号回放，利用 CAPWAPC 软件进行波形拟合分析。具体做法是：先假设桩—土模型及其参数，以实测速度信号作为边界条件输入，求解波动方程，反算桩顶的力，如果计算的力曲线与实测的力波形不符合。则继续调整桩—土模型及参数，再进行拟合计算，直到计算的力曲线与实测力曲线的吻合程度达到最佳状态为止，最终给出桩的极限承载力、荷载—沉降曲线及土阻力沿桩分布图。

### 1、若干规定

(1) 实测曲线拟合法所采用的力学模型应符合下列规定：

- I、土的力学模型能反映土的实际应力应变性状；
- II、桩的力学模型能反映桩的实际性状，可采用一维弹性模型。

(2) 采用实测曲线拟合法分析计算时应符合下列规定；

- I、可用实测的速度、力和上行波的其中之一作为边界条件进行拟合；
- II、曲线拟合时间段长度，在  $2L/C$  时刻后延续时间不应小于 20ms；对于柴油锤打桩信号，在  $t_1+2L/c$  时刻后延续时不应少于 30ms
- III、拟合分析选定的参数，必须在岩土工程的合理范围之内。各单元所选用的土的最大弹性位移  $S_q$  值不得超过相应桩单元的最大计算位移值；
- IV、拟合完成时应使计算曲线与实测曲线吻合良好；
- V、贯入度的计算值应与实测值吻合良好；

## 2、分析拟合的步骤：

(1) 按照《建筑基桩检测技术规范》(JGJ106—2014) 规定，正确选取信号，确定平均波速；

(2) 根据工程地质勘察报告和施工记录，假定桩和土的力学模型及其模型参数；

(3) 利用实测的速度（或力、上行波、下行波）曲线作为输入的边界条件，通过波动方程数学求解，反算桩的力（或速度、下行波、上行波）曲线；

(4) 如果计算的曲线与实测的曲线不吻合，说明假设的模型及参数不合理，有针对地调整桩土模型及参数；

具体方法是：

- I、第一时间段（从冲击脉冲开始到  $2L/C$  时刻止）主要提供阻力分布信息。在  $Q_{uake}$  值和阻尼值一定的情况下，第一个  $2L/C$  时段的拟合仅需调整阻力分布。
- II、第二时间段（从第一段终止点为起点，到  $t_r+3ms$ ）中长度  $t_r$  为冲击波的上升时间，该区段的波主要用于修正桩尖阻力和总阻力（包括静阻力和动阻力）。
- III、第三时间段（从第一段终点为起点，到  $t_r+5ms$ ）的波，主要用于修正阻尼系数。
- IV、第四时间段（以第二时间段终点为起点，区段长度为 20ms）的波主要用于修正土的卸载性质。

(5) 再计算，直至计算曲线与实测曲线的吻合程度良好，且难进一步改善为止；

(6) 最后，也应使贯入度的计算值与实测值吻合良好。

### 3、目前实测曲线拟合法所采模型

(1) 土的静阻力模型一般为理想弹一塑性或考虑土体软化和硬化的双线性模型。模型与两个主要参数——土的极限阻力  $R_u$  和土的最大弹性位移  $S_q$ 。

(2) 土的动阻力模型，一般采用与桩身质点运动速度成比例的线型粘滞阻尼。

(3) 桩的单元划分一般采用等时单元（即应力波通过每个单元的时间相等）。为避免高阶项影响计算精度，不宜采用弹簧—质量块的离散模型。

(4) 桩单元中除考虑 A、E、C 等参数外，也可考虑桩身阻尼和裂隙。

### 4、关于波形拟合时间段长度和拟合系数加权

对波形拟合时间段长度的规定，是考虑了在  $2L/c$  之后，虽然与质点运动相关的动阻力趋于减弱，但总静土阻力一般在  $2L/c$  之后才能更充分发挥，具体参见图 6-6。而且不同的土质条件，特别是桩端持力层力学性状的差异，桩端阻力和总阻力可能远远滞后于  $2L/c$  时刻。所以对曲线拟合质量应采用合理的加权方法计算其拟合系数的规定，实质上是针对  $2L/c$  后，为更好的控制总阻力响应区段的拟合质量。

拟合分析应参考工程地质勘察资料和桩基基础施工记录，以使分析选用的参数更加合理。

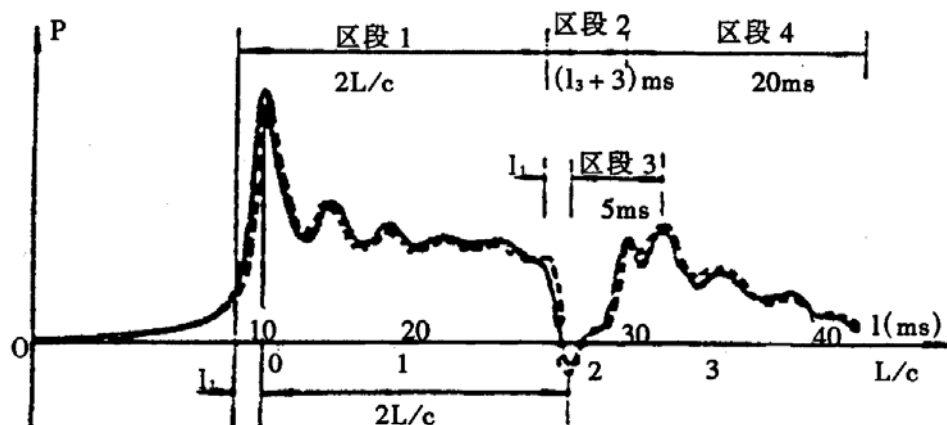


图 6-6 CAPWAPC 程序中评估计算曲线拟合程序的四个时间区段

## 第五节 现场检测

高应变动力试桩方法是 70 年代首先在美国发展起来的，由于计算机技术的飞速发展，近十年的进步尤为显著，这种方法在不少国家和地区得到了应用，有的已被正式纳入国家规范。我国 1985 年引进了这项技术取得了很大成绩。现已有《**建筑基桩检测技术规范**》（JGJ106—2014）。现场测试要注意：**试桩数选定**：与静力试桩不同，高应变试桩桩数一般为工程总桩数 5%，并不少于 5 根。**试桩时间确定**：动力试桩给出的承载力只代表桩时候的承载力。桩在设置过程中不可避免地使桩周土扰动，进而部分或大部分丧失土强度。因此，充分的休止时间是必须的。一般砂性土中的桩休止时间短，粘土中的桩休止时间长。**桩锤选择**：在不过分增添锤击设备吊装运输麻烦的前提下，一般要选择较重的锤，这主要是为了锤击使土阻力能得到充分发挥。现在《**建筑基桩检测技术规范**》（JGJ106—2014）中明确规定，锤击设备中导杆式柴油锤荷载上升时间过于缓慢，容易造成速度响应失真；分片组装锤和强夯锤下落时平稳性差且不易导向，更易造成严重锤击偏心并影响测试质量。锤体高径（宽）比规定不得小于 1，锤体的重量必须大于预估单桩极限承载力的 1%，桩径大于 600mm，桩长大于 30m 的灌注桩还用增加锤重。**锤击信号测量**：在距桩顶 2 倍桩径以下的桩侧表面对称安装应变传感器和加速度传感器各 2 支，以便减少锤击应力集中、消除锤击偏心。应变测量对锤击偏心、安装处混凝土质量的平整度很敏感，往往由于安装不良而导致测试失败。加速度传感器的低频特性也应引起足够重视。**打桩监控**：以预制桩打入过程中连续测量，要求仪器具备实时处理能力，这样才能区分地质分层，观察打桩应力，桩锤效率和桩身缺陷的变化。具体如下：

### 一、检测前的准备工作

1、预制桩承载力的时间效应应通过复打确定。

2、桩顶面应平整，桩顶高度应满足锤击装置的要求，桩锤重心应与桩顶对中，锤击装置架立应垂直。

3、对不能承受锤击的桩头应做加固处理，混凝土桩的桩头处理按《**基桩检测技术规范**》JGJ106-2014 附录 B 执行。

钻孔灌注桩由于在桩头附近存在一定深度的浮浆，该层浮浆强度低，塑性大，如果不对其加以处理，则将严重影响测试信号的质量，使测试信号严重畸变，而无法用于解释。在处理的办法是将该层浮浆凿除，凿除深度主要以桩身砼设计标号为依据，务必使桩头表面砼强度达到或接近设计砼强度值。

特别是由于钻孔灌注桩的桩身直径大，设计承载力高，若要充分激发桩身土阻力，必须选择较重的落锤，为了防止重锤直接作用在桩头，避免桩头砼产生塑性变形和破裂，必须在桩头处捣制桩帽。桩帽的作用是为了缓冲重锤对桩头过大的动力冲击，以及锤击偏心时对桩头的剪切破坏。因此，捣制桩帽时，必须在桩帽内设置若干层钢筋网片，以消散锤击偏心时，重锤对桩头所产生的剪切应力。另外，桩帽砼的强度必须比桩身砼强度高一至二个级别，以提高桩帽的耐打性，进一步保护桩头。对此，（规程）中有明确和详细的要求。

## 附录 B 混凝土桩桩头处理

**B.0.1** 混凝土桩应先凿掉桩顶部的破碎层和软弱混凝土。

**B.0.2** 桩头顶面应平整，桩头中轴线与桩身上部的中轴线应重合。

**B.0.3** 桩头主筋应全部直通至桩顶混凝土保护层之下，各主筋应在同一高度上。

**B.0.4** 距桩顶 1 倍桩径范围内，宜用厚度为 3~5mm 的钢板围裹或距桩顶 1.5 倍桩径范围内设置箍筋，间距不宜大于 100mm。桩顶应设置钢筋网片 2~3 层，间距 60~100mm。

**B.0.5** 桩头混凝土强度等级宜比桩身混凝土提高 1~2 级，且不得低于 C30。

**B.0.6** 高应变法检测的桩头测点处截面积应与原桩身截面积相同。

## 4、传感器的安装应符合《基桩检测技术规范》JGJ106-2014 附录 F 的规定。





**传感器的安装要保证一定深度。**动力试桩的理论基础是一维波动方程，要求波以平面波的形式传播与接收。重锤所激发的球面波只有在数倍桩径深度以后才能按准平面波的形式传播，因此传感器的安装深度不宜小于 2 倍桩径，对于大直径桩不得小于 1 倍桩径。另一方面，为了减少锤击应力集中，消除锤击偏心的影响，传感器的安装也必须尽量远离桩顶。

**传感器与桩的连接**可采用螺栓，也可以采用粘贴法，加速度传感器和应变传感器各采用两个，在桩的两侧对称布置，以消除桩身弯曲应力的影响。但也不应离桩顶太远，因为这将给测试带来许多困难，传感器一般装在距桩顶 2~3 倍桩径的位置处。安装时还要注意传感器与桩身接触面的平整度。对于不平整的表面应凿平，磨光，以保证传感器的轴线与桩轴线的平行，当采用螺栓连接时，不可加弹簧垫圈。

**动力试桩力传感器是试桩分析仪力学参数测量的主要元件**，力传感器实际测定的是应变，而力是通过桩身断面面积、桩身材料弹性模量计算出来的。力传感器安装在桩身表面，在试桩现场测量桩身冲击应变，因而力传感器要具有防尘、防水、防止机械冲击，良好的频率特性和高分辨力。力传感器弹性体采用超硬度铝合金，通过精密切削成型和严格的热处理，以专用自补偿电阻应变计特殊贴片调试工艺，经反复老化处理后，用弹性橡胶、硅橡胶、防水漆等材料制成复合防护层。每个成型力传感器必须通过由计算机、应变发生器、数字多用表组成的校准装置测试。给出各项技术指标。

(1) 在力传感器安装之前应检查传感器。

- I、将传感器接入试桩分析仪，检查传感器的初偏值是否在允许范围之内。
- II、在试桩分析仪处于接受状态时，手持传感器一端，在其另一端分别用手指硬、软部位轻轻敲击，就能观察到不同的信号图形。

(2) 力传感器的安装固定。

I、力传感器与桩身接触的基面都经研磨，十分平整，因而安装传感器的桩身表面也必须用磨光机打磨平整，并与传感器基面吻合良好。

II、力传感器都使用 M8mm 机制六角螺栓安装固定，对于钢桩，在测点位置先钻 5mm 的孔，孔间中心距离为 75mm(或 3 寸)，充许偏差 $\pm 1\text{mm}$ ，然后用 M8mm 丝钻绞成螺孔。对于砼桩需用 M8mm 胀锚螺栓固定。为了保证孔距在允许偏差范围以内，建议先打好一孔，装胀锚螺栓，套上打孔样板后再钻另一孔。对于木桩可用木螺丝固定传

感器。安装传感器轴线与桩身轴线平行偏差 $<3^{\circ}$ 。

III、安装固定力传感器要用长度合适的 M8 六角或内六角标准螺栓，螺栓与传感器接触面应加垫圈，以防擦伤传感器。

IV、拧紧螺栓过程中，应十分小心，随时监视输出信号，切勿使力传感器弯曲或扭曲超过传感器变形极限，产生不可回复的永久变形，损坏传感器。

V、拧紧螺栓过程中，可以适当地拉伸、压缩力传感器，使用传感器输出接近零位。

VI、力传感器引出导线与仪器分线器连接后，应把导线固定在传感器上部的桩身上，以避免锤击过程中，因导线下垂影响测量数据或损坏传感器。

VII、为了防止损坏力传感器，一般在试桩导架安装好后，再安装传感器。起吊装有传感器的桩必须十分小心，对传感器本体及导线务必采取保护措施。

VIII、力传感器外壳是保护传感器用的，传感器使用前后，请将传感器放在外壳内。撞击、跌落、挤压都会损坏传感器。

IX、力传感器可以安装在桩身的任意位置上，然而安装位置越低，实测的传递能量会减小。如果传感器越接近桩顶，损坏传感器的机遇越多。一般说离桩顶 2—3 倍桩径处最理想。为了避免损坏传感器，选定的安装位置也应在最终的入土深度时仍在地面以上。对于复打，当桩顶离地面较高时，传感器要安装在最宜人员操作的高度，如离地 1.2 米左右。

## 附录 F 高应变法传感器安装

**F.0.1** 检测时至少应对称安装冲击力和冲击响应（质点运动速度）测量传感器各两个（传感器安装见图 5-1）。冲击力和响应测量可采取以下方式：

- 1 在桩顶下的桩侧表面分别对称安装加速度传感器和应变式力传感器，直接测量桩身测点处的响应和应变，并将应变换算成冲击力。
- 2 在桩顶下的桩侧表面对称安装加速传感器直接测量响应，在自由落锤锤体  $0.5H_r$  处（ $H_r$  为锤体高度）对称安装加速度传感器直接测量冲击力。

**F.0.2** 在第 F.0.1 条第 1 款条件下，传感器宜分别对称安装在距桩顶不小于  $2D$  的桩侧表面处（ $D$  为试桩的直径或边宽）；对于大直径桩，传感器与桩顶之间的距离可适当减小，但不得小于  $1D$ 。安装面处的材质和截面尺寸应与原桩身相同，传感器不得安装在截面突变处附近。

在第 F.0.1 条第 2 款条件下，对称安装在桩侧表面的加速度传感器距桩顶的距离不

得小于  $0.4H_r$  或  $1D$ ，并取两者高值。

**F.0.3** 在第 F.0.1 条第 1 款条件下，传感器安装尚应符合下列规定：

- 1 应变传感器与加速度传感器的中心应位于同一水平线上，同侧的应变传感器和加速度传感器间的水平距离不宜大于  $100\text{mm}$ 。安装完毕后，传感器的中心轴应与桩中心轴保持平行。
- 2 各传感器的安装面材质应均匀、密实、平整，并与桩轴线平行，否则应采用磨光机将其磨平。
- 3 安装螺栓的钻孔应与桩侧表面垂直；安装完毕后的传感器应紧贴桩身表面，锤击时传感器不得产生滑动。安装应变式传感器时应对其初始应变值进行监视，安装后的传感器初始应变值应能保证锤击时的可测轴向变形余量为：

1) 混凝土桩应大于  $\pm 1000\mu\varepsilon$ ；

2) 钢桩应大于  $\pm 1500\mu\varepsilon$ 。

**F.0.4** 当连续锤击监测时，应将传感器连接电缆有效固定。

**5、桩头顶部应设置桩垫，桩垫可采用  $10\sim 30\text{mm}$  厚的木板或胶合板等材料。**

桩垫的选择使用桩垫的目的是为了防止重锤与桩帽直接接触，缓减重锤的冲击能量，保持桩帽不被重锤击烂。桩垫的选择应根据测试时的实际情况，选择不同厚度的干木板或纤维夹板。过厚的桩垫会延缓锤与桩帽的接触时间，使冲击脉冲变宽，起跳不干脆，影响桩身平均波速的求取及桩身浅部缺陷的判定。

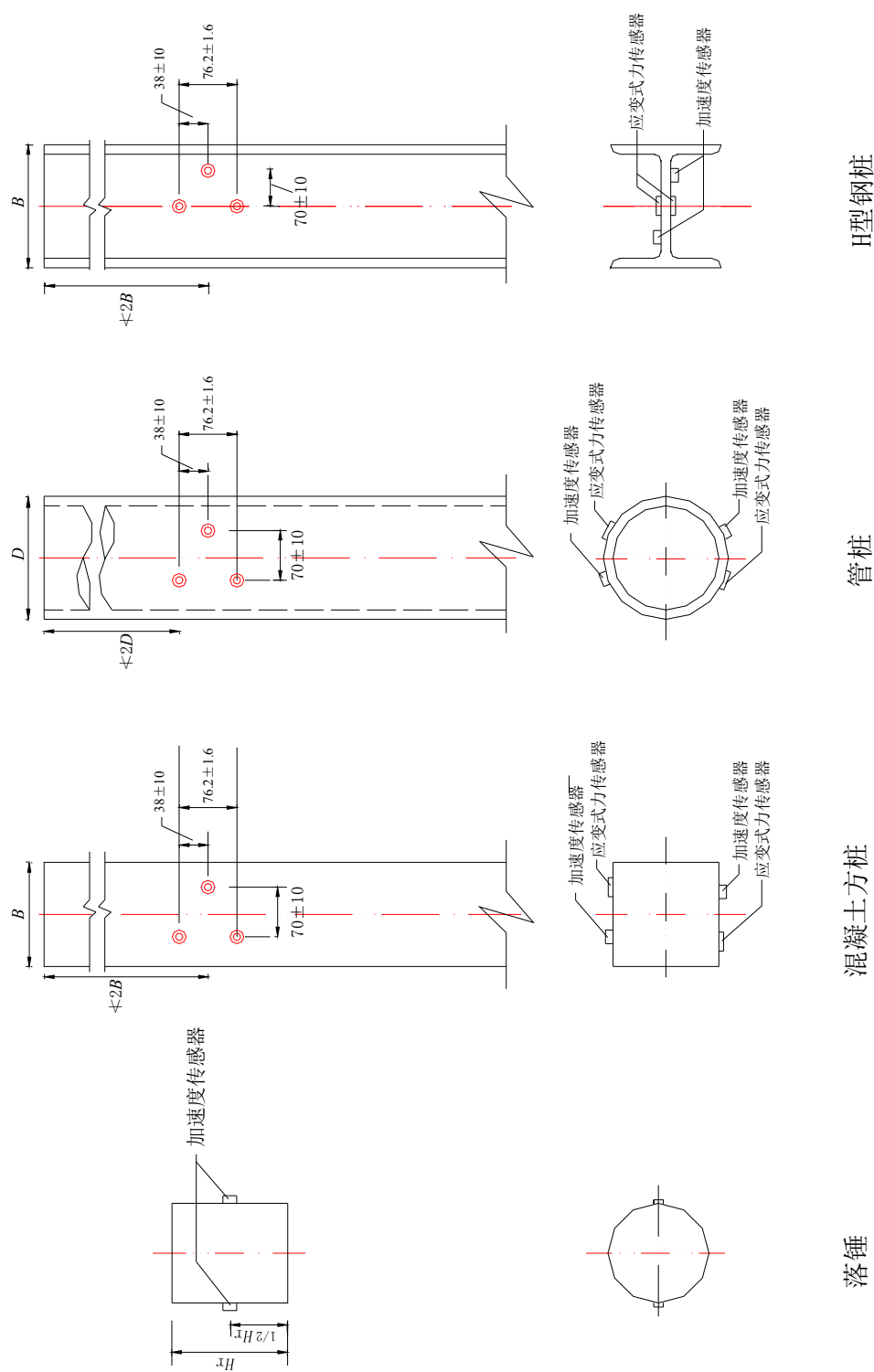


图 5-1 传感器安装示意图（单位：mm）

## 二、现场试验参数设定与计算

### 1、采样时间间隔宜为 $50\sim 200\mu\text{s}$ ，信号采样点数不宜少于 1024 点。

有些仪器设定采用采样频率，即采样时间间隔的倒数，长桩取低频（采样间隔适当长一些），并设定相应采样数据长度，每个信号的采用点数不宜少于 1024 点。

### 2、传感器的设定值应按计量检定结果设定。

力传感器和加速度传感器标定系数应由国家法定计量单位开具的标定系数或传感器出厂标定系数作为设定值。

3、自由落锤安装加速度传感器测力时，力的设定值由加速度传感器设定值与重锤质量的乘积确定。



4、测点处的桩截面尺寸应按实际测量确定，波速、质量密度和弹性模量应按实际情况设定。

5、测点以下桩长和截面积可采用设计文件或施工记录提供的数据作为设定值。

测点下桩长应取传感器安装点至桩底的距离；

对于预制桩，可采用建设或施工单位提供的实际桩长和桩截面积作为设定值；

对于灌注桩，测点下桩长和截面积设定值宜按建设或施工单位负责提供的完整的施工记录确定。

6、桩身材料质量密度应按表 5-1 取值。

表 5-1 桩身材料质量密度 (t/m<sup>3</sup>)

钢桩	混凝土预制桩	离心管桩	混凝土灌注桩
7.85	2.45~2.50	2.55~2.60	2.40

7、桩身波速可结合本地经验或按同场地同类型已检桩的平均波速初步设定，现场检测完成后应按《基桩检测技术规范》JGJ106-2014 第 9.4.3 条调整。

一般钢桩，波速值可设定为 5120m/s；

对于混凝土预制桩，可在打入前实测无缺陷桩的桩身平均波速作为设定值；

对于混凝土预制桩，在桩长已知的情况下，可用反射波法按桩底反射信号计算桩的平均波速作为设定值；如桩底反射信号不清晰，可根据桩身混凝土强度等级参数综合设定。

8、桩身材料弹性模量应按下列式计算：

$$E = \rho \cdot c^2 \quad (5-1)$$

式中  $E$ ——桩身材料弹性模量 (kPa)；

$c$ ——桩身应力波传播速度 (m/s)；

$\rho$ ——桩身材料质量密度 (t/m<sup>3</sup>)。

三、现场检测应符合下列要求：

1 交流供电的测试系统应良好接地；检测时测试系统应处于正常状态。

2 采用自由落锤为锤击设备时，应重锤低击，最大锤击落距不宜大于 2.5m。

3 试验目的为确定预制桩打桩过程中的桩身应力、沉桩设备匹配能力和选择桩长时，应按《基桩检测技术规范》JGJ106-2014 附录 G 执行。

## 附录 G 试打桩与打桩监控

### G.1 试 打 桩

**G.1.1** 为选择工程桩的桩型、桩长和桩端持力层进行试打桩时，应符合下列规定：

- (1) 试打桩位置的工程地质条件应具有代表性。
- (2) 试打桩过程中，应按桩端进入的土层逐一进行测试；当持力层较厚时，应在同一土层中进行多次测试。

**G.1.2** 桩端持力层应根据试打桩结果的承载力与贯入度关系，结合场地岩土工程勘察报告综合判定。

**G.1.3** 采用试打桩判定桩的承载力时，应符合下列规定：

- (1) 判定的承载力值应小于或等于试打桩时测得的桩侧和桩端静土阻力值之和与桩在地基土中的时间效应系数的乘积，并应进行复打校核。
- (2) 复打至初打的休止时间应符合规定。
- (3) 试打桩数量不应少于 3 根。

### G.2 桩身锤击应力监测

**G.2.1** 桩身锤击应力监测应符合下列规定：

- (1) 被监测桩的桩型、材质应与工程桩相同；施打机械的锤型、落距和垫层材料及状况应与工程桩施工时相同。
- (2) 应包括桩身锤击拉应力和锤击压应力两部分。

**G.2.2** 为测得桩身锤击应力最大值，监测时应符合下列规定：

- (1) 桩身锤击拉应力宜在预计桩端进入软土层或桩端穿过硬土层进入软夹层时测试。
- (2) 桩身锤击压应力宜在桩端进入硬土层或桩周土阻力较大时测试。

**4** 检测时应及时检查采集数据的质量；每根受检桩记录的有效锤击信号应根据桩顶最大动位移、贯入度以及桩身最大拉、压应力和缺陷程度及其发展情况综合确定。

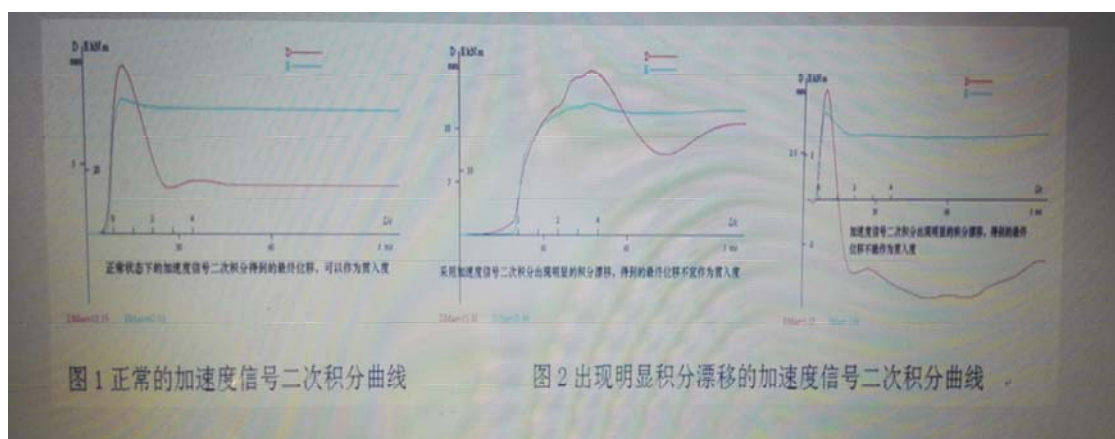
**5** 发现测试波形紊乱，应分析原因；桩身有明显缺陷或缺陷程度加剧，应停止检测。

**四、承载力检测时宜实测桩的贯入度，单击贯入度宜在 2~6mm 之间。**

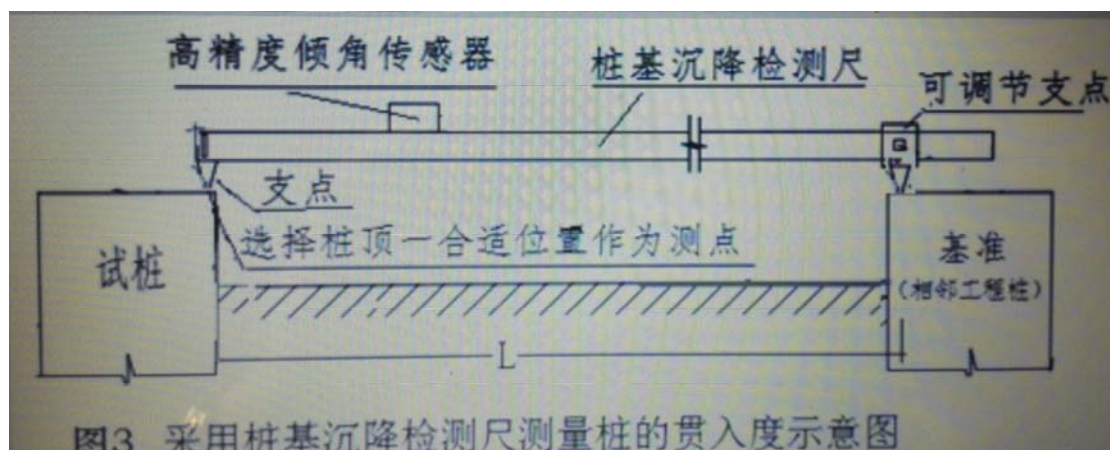


桩的锤击贯入度，即桩顶锤击前后的高程差，是高应变检测中的主要测量参数，是反映桩侧、桩端阻力是否充分发挥的一个重要信息。现行规范明确规定，采用实测曲线拟合法判定桩承载力时“贯入度的计算值应与实测值接近”。因此准确测量桩的锤击贯入度已成为合理拟合分析和准确判定承载力的关键环节。目前国内外高应变检测桩的贯入度的测量方法有以下几种：

- 1 在试桩桩身作一标记，采用精密水准仪远距离非接触测量。这种方式观测准确度相对较高，但对设备的精度和安装要求严格，操作不便，较少使用。
- 2 采用传统的百分表接触式测量，但重锤冲击引起的桩周土振动会严重影响到整个测量系统的稳定性，导致桩的贯入度测量结果不可靠，使用较少。
- 3 用高应变检测中实测的加速度信号二次积分得到的最终位移作为贯入度。这种方式较为简单，多被采用。但这种方法由于高应变检测使用的冲击型加速度传感器若低频响应较差或采集设备零漂较大，实测信号常会产生明显的积分漂移，造成实测贯入度存在较大的偏差。另外当信号采集结束时若桩的运动尚未停止也不能采用这种方法。



#### 4 采用桩基沉降检测尺。



五、在安装传感器之前，仪器设备需进行调试，确保仪器、传感器连接正常。



## 第六节 数据处理

- 一、检测承载力时选取锤击信号，宜取锤击能量较大的击次。
- 二、当出现下列情况之一时，锤击信号不得作为承载力分析计算的依据。
  - 1 传感器安装处混凝土开裂或出现严重塑性变形使力曲线最终未归零。
  - 2 严重锤击偏心，两侧力信号幅值相差超过 1 倍。
  - 3 触变效应的影响，预制桩在多次锤击下承载力下降。
  - 4 四通道测试数据不全。

三、桩身波速可根据下行波波形起升沿的起点到上行波下降沿的起点之间的时差与已知桩长值确定（图 6-1）；桩底反射信号不明显时，可根据桩长、混凝土波速的合理取值范围以及邻近桩的桩身波速值综合确定。

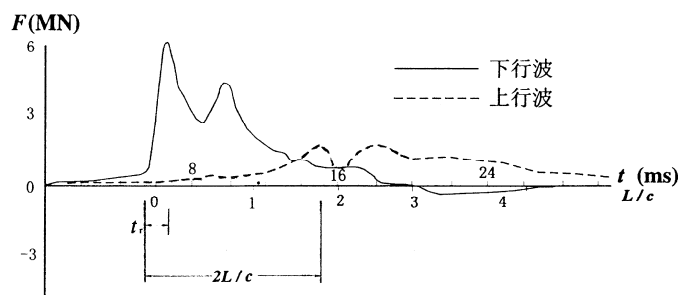


图 6-1 桩身波速的确定

四、当测点处原设定波速随调整后的桩身波速改变时，桩身材料弹性模量和锤击力信号幅值的调整应符合下列规定：

- 1 桩身材料弹性模量应按式（5-1）重新计算。
- 2 当采用应变式传感器测力时，应同时对原实测力值校正。

五、高应变实测的力和速度信号第一峰起始比例失调时，不得进行比例调整。

六、承载力分析计算前，应结合地质条件、设计参数，对实测波形特征进行定性检查：

- 1 实测曲线特征反映出的桩承载性状。
- 2 观察桩身缺陷程度和位置，连续锤击时缺陷的扩大或逐步闭合情况。

七、以下四种情况应采用静载法进一步验证：

- 1 桩身存在缺陷，无法判定桩的竖向承载力。
- 2 桩身缺陷对水平承载力有影响。

3 单击贯入度大, 桩底同向反射强烈且反射峰较宽, 侧阻力波、端阻力波反射弱, 即波形表现出竖向承载性状明显与勘察报告中的地质条件不符合。

4 嵌岩桩桩底速度曲线同向反射强烈, 且在时间  $2L/c$  后无明显端阻力反射; 也可采用钻芯法核验。

#### 八、 采用凯司法判定桩承载力, 应符合下列规定:

- 1 只限于中、小直径桩。
- 2 桩身材质、截面应基本均匀。

3 阻尼系数  $J_c$  宜根据同条件下静载试验结果校核, 或应在已取得相近条件下可靠对比资料后, 采用实测曲线拟合法确定  $J_c$  值, 拟合计算的桩数应不少于检测总桩数的 30%, 且不少于 3 根。

4 在同一场地、地质条件相近和桩型及其截面积相同情况下,  $J_c$  值的极差不宜大于平均值的 30%。

#### 九、 凯司法判定单桩承载力可按下列公式计算:

$$R_c = \frac{1}{2}(1-J_c) \cdot [F(t_1) + Z \cdot V(t_1)] + \frac{1}{2}(1+J_c) \cdot \left[ F\left(t_1 + \frac{2L}{c}\right) - Z \cdot V\left(t_1 + \frac{2L}{c}\right) \right] \quad (6-1)$$

$$Z = \frac{E \cdot A}{c} \quad (6-2)$$

式中  $R_c$ ——由凯司法判定的单桩竖向抗压承载力 (kN);

$J_c$  ——凯司法阻尼系数;

$t_1$  ——速度第一峰对应的时刻 (ms);

$F(t_1)$  —— $t_1$  时刻的锤击力 (kN);

$V(t_1)$  —— $t_1$  时刻的质点运动速度 (m/s);

$Z$  ——桩身截面力学阻抗 (kN·s/m);

$A$  ——桩身截面面积 (m<sup>2</sup>);

$L$  ——测点下桩长 (m)。

注: 公式 (6-1) 适用于  $t_1+2L/c$  时刻桩侧和桩端土阻力均已充分发挥的摩擦型桩。

对于土阻力滞后于  $t_1+2L/c$  时刻明显发挥或先于  $t_1+2L/c$  时刻发挥并造成桩中上部强烈反弹这两种情况, 宜分别采用以下两种方法对  $R_c$  值进行提高修正:

- 1 适当将  $t_1$  延时, 确定  $R_c$  的最大值。
- 2 考虑卸载回弹部分土阻力对  $R_c$  值进行修正。

#### 十、 采用实测曲线拟合法判定桩承载力, 应符合下列规定:

- 1 所采用的力学模型应明确合理, 桩和土的力学模型应能分别反映桩和土的实际力学性状, 模型参数的取值范围应能限定。
- 2 拟合分析选用的参数应在岩土工程的合理范围内。
- 3 曲线拟合时间段长度在  $t_1+2L/c$  时刻后延续时间不应小于 20ms; 对于柴油锤打桩信号, 在  $t_1+2L/c$  时刻后延续时间不应小于 30ms。
- 4 各单元所选用的土的最大弹性位移值不应超过相应桩单元的最大计算位移值。
- 5 拟合完成时, 土阻力响应区段的计算曲线与实测曲线应吻合, 其他区段的曲线应基本吻合。
- 6 贯入度的计算值应与实测值接近。

#### 十一、 单桩竖向抗压承载力特征值的确定应符合下列规定:

单位工程同一条件下的单桩竖向抗压承载力特征值  $R_a$  应按本方法得到的单桩承载力检测值的一半取值。

#### 十二、 桩身完整性判定可采用以下方法进行:

1 采用实测曲线拟合法判定时, 拟合时所选用的桩土参数应符合第十条第 1~2 款的规定; 根据桩的成桩工艺, 拟合时可采用桩身阻抗拟合或桩身裂隙 (包括混凝土预制桩的接桩缝隙) 拟合。

2 对于等截面桩, 可参照表 6-1 并结合经验判定; 桩身完整性系数  $\beta$  和桩身缺陷位置  $x$  应分别按下列公式计算:

$$\beta = \frac{[F(t_1) + Z \cdot V(t_1)] - 2R_x + [F(t_x) - Z \cdot V(t_x)]}{[F(t_1) + Z \cdot V(t_1)] - [F(t_x) - Z \cdot V(t_x)]} \quad (6-4)$$

$$x = c \cdot \frac{t_x - t_1}{2000} \quad (6-5)$$

式中  $\beta$ ——桩身完整性系数;

$t_x$ ——缺陷反射峰对应的时刻 (ms);

$x$ ——桩身缺陷至传感器安装点的距离 (m);

$R_x$ ——缺陷以上部位土阻力的估计值, 等于缺陷反射波起始点的力与速度乘以桩身截面力学阻抗之差值, 取值方法见图 6-2。

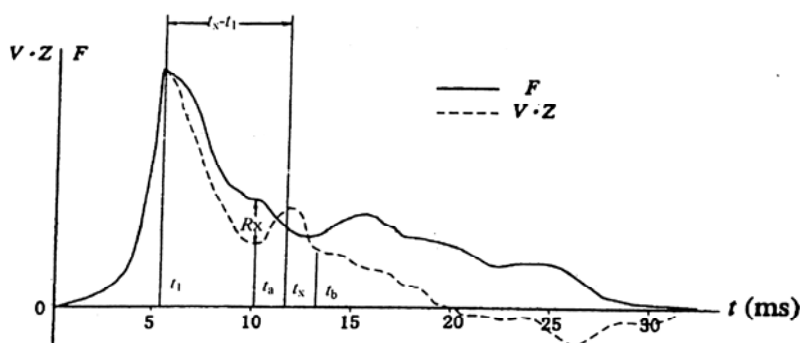


图 6-2 桩身完整性系数计算

表 6-1 桩身完整性判定

类别	$\beta$ 值	类别	$\beta$ 值
I	$\beta=1.0$	III	$0.6 < \beta < 0.8$
II	$0.8 < \beta < 1.0$	IV	$\beta < 0.6$

十三、 出现下列情况之一时, 桩身完整性判定宜按工程地质条件和施工工艺, 结合实测曲线拟合法或其他检测方法综合进行:

- 1 桩身有扩径的桩。
- 2 桩身截面渐变或多变的混凝土灌注桩。
- 3 力和速度曲线在峰值附近比例失调, 桩身浅部有缺陷的桩。
- 4 锤击力波上升缓慢, 力与速度曲线比例失调的桩。

十四、 桩身最大锤击拉、压应力和桩锤实际传递给桩的能量应分别按以下相应公式计算。

最大桩身锤击拉应力可按下式计算:

$$\sigma_t = \frac{1}{2A} \left\{ Z \cdot V \left( t_1 + \frac{2L}{c} \right) - F \left( t_1 + \frac{2L}{c} \right) - Z \cdot V \left[ t_1 + \frac{2L-2x}{c} \right] - F \left[ t_1 + \frac{2L-2x}{c} \right] \right\} \quad (6-6)$$

式中  $\sigma_t$ ——最大桩身锤击拉应力 (kPa);

$x$ ——传感器安装点至计算点的距离（m）；

$A$ ——桩身截面面积（m<sup>2</sup>）。

最大桩身锤击压应力可按下式计算：

$$\sigma_p = \frac{F_{\max}}{A} \quad (6-7)$$

式中  $\sigma_p$ ——最大桩身锤击压应力（kPa）；

$F_{\max}$ ——实测的最大锤击力（kN）。

**G.2.5** 桩身最大锤击应力控制值，应符合《建筑桩基技术规范》JGJ 94-2008 中有关规定。

### G.3 锤击能量监测

**G.3.1** 桩锤实际传递给桩的能量应按下式计算：

$$E_n = \int_0^{t_c} F \cdot V \cdot dt \quad (6-8)$$

式中  $E_n$ ——桩锤实际传递给桩的能量（kJ）；

$t_c$ ——采样结束的时刻。

**G.3.2** 桩锤最大动能宜通过测定锤芯最大运动速度确定。

**G.3.3** 桩锤传递比应按桩锤实际传递给桩的能量与桩锤额定能量的比值确定；桩锤效率应按实测的桩锤最大动能与桩锤的额定能量的比值确定。

十五、 高应变检测报告应给出实测力与速度的实测信号曲线。

## 第七节 报告编写

### 一、高应变动力试桩法检测基桩时，检测报告应包括以下内容：

- 1、工程名称、工程地点、检测目的、检测日期和检测依据；
- 2、建设、勘测、设计和施工单位名称；
- 3、检测场地的工程地质概况、桩位置及相应的钻孔柱状图；
- 4、桩基设计施工概况，桩位平面图及试桩施工记录；
- 5、检测情况、仪器设备及检测过程中出现的异常现象的说明；
- 6、每根桩的实测曲线、参数取值、试验数据处理、分析方法和试验结果，对实测曲线拟合法应包括：拟合曲线、拟合质量系数、模拟静荷载—沉降曲线、桩身阻抗变化、土阻力沿桩身分布、选用的各桩单元有关参数。
- 7、结论。
- 8、签署报告单位名称、测试负责人、报告审核人和审定人。

### 二、检测报告除应包括《基桩检测技术规范》JGJ106-2014 一般内容外，还应包括：

- 1 计算中实际采用的桩身波速值和  $J_c$  值；
- 2 实测曲线拟合法所选用的各单元桩土模型参数、拟合曲线、模拟的静荷载—沉降曲线、土阻力沿桩身分布图；
- 3 实测贯入度；
- 4 试打桩和打桩监控所采用的桩锤型号、锤垫类型，以及监测得到的锤击数、桩侧和桩端静阻力、桩身锤击拉应力和压应力、桩身完整性以及能量传递比随入土深度的变化。

### 三、高应变动力试桩法进行试打桩和打桩监控时，检测报告除应符合全以上规定外，尚应包括以下内容：

- 1、打桩机械、桩锤垫类型；
- 2、锤击数、桩侧静土阻力、桩端静土阻力、桩身锤击压应力、桩身锤击拉应力和桩锤实际给桩的能量与桩入土深度的关系；
- 3、对打桩全过程中桩身结构完整性的评价。

## 第八节 工程实例分析

### 【工程实例 1】

图 8-1 是上海某大楼 52m 长钢筋混凝土桩的凯斯法测试的波形曲线。试桩为 50cm×50cm 矩形截面。采用 C45 混凝土，分三截预制，钢板焊接接头。测试时，桩的实际入土深度约为 50.5m。传感器安装在桩顶以下 1.0m 处。图 8-2 为现场工程地质剖面图。

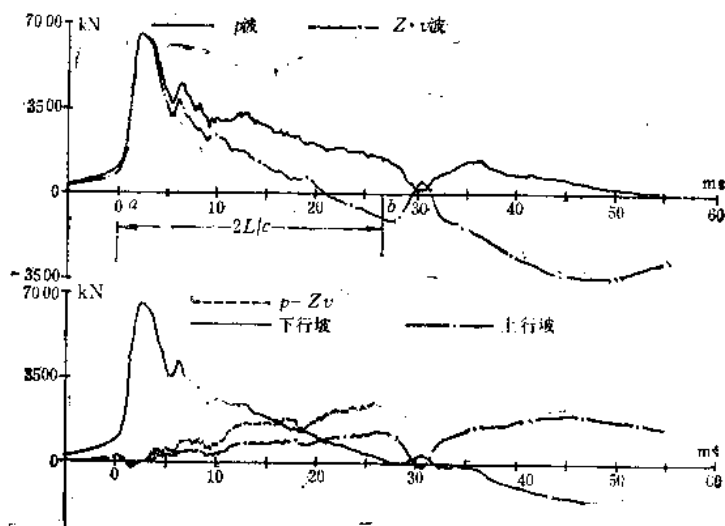


图 8-1 凯斯法测试的波形曲线

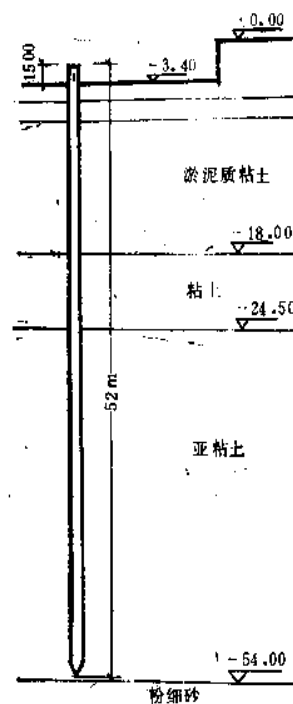


图 8-2 现场工程地质剖面图

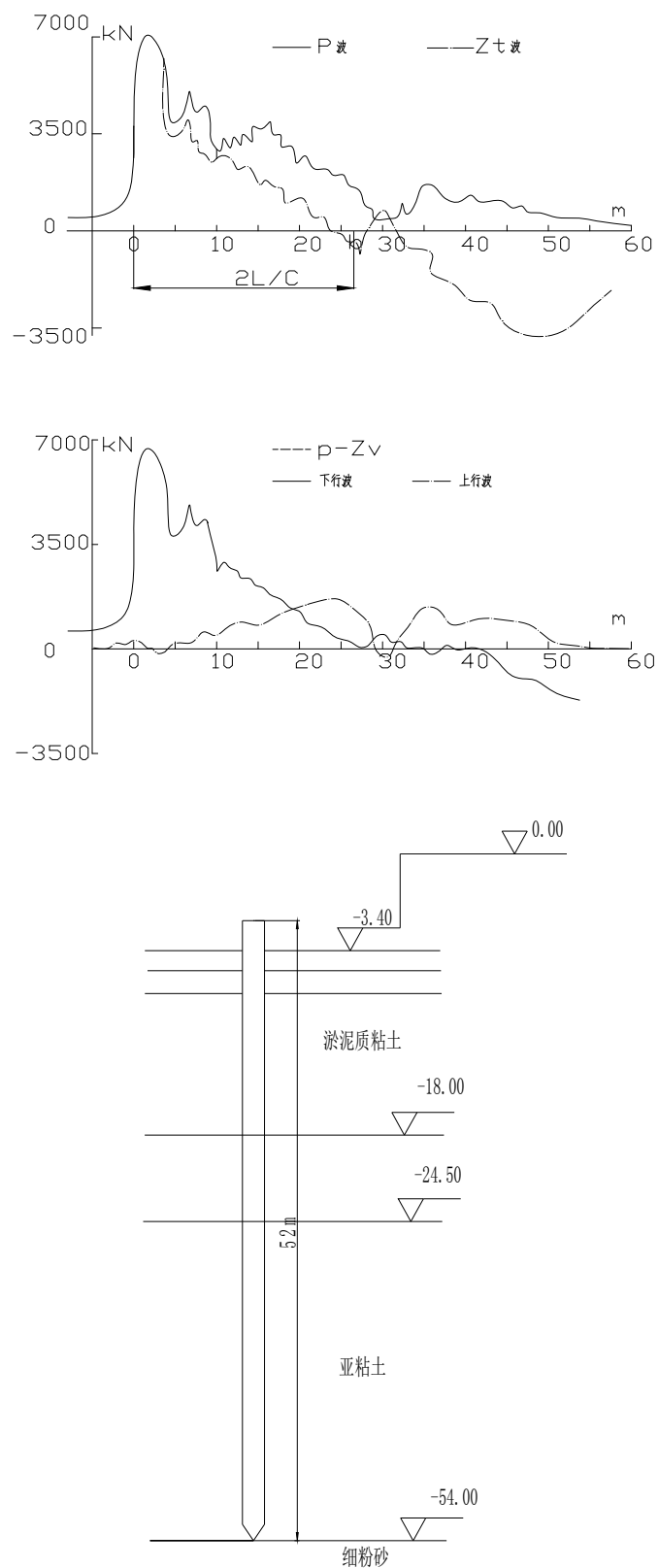


图 6-12 现场工程地质剖面图



表 8-1 凯斯法预估承载力值 (kN)

$J_1$	凯斯法 (基本公式)	按长桩影响修正公式计算值				
		$J_2=0.30$	$J_2=0.40$	$J_2=0.45$	$J_2=0.50$	$J_2=0.60$
0.05	6135	5756	5630	5567	5503	5377
0.10	5809	5431	5305	5242	5179	5052
0.15	5485	5106	4980	4917	4854	4727
0.20	5160	4781	4655	4592	4529	4403
0.25	4844	4465	4339	4276	4213	4087

## 【工程实例 2】

将现场采取 69 米预制桩的波形曲线，用 CAPWAP C 程序进行分析。图 8-3 和图 8-4 分别是初打结束时和复打开始时各取一锤讯号进行分析的结果，并将分析的结果汇总于表 8-2。由此可见 CAPWAP C 法的分析可以详细地描述桩尖和桩侧土阻力的分布情况。

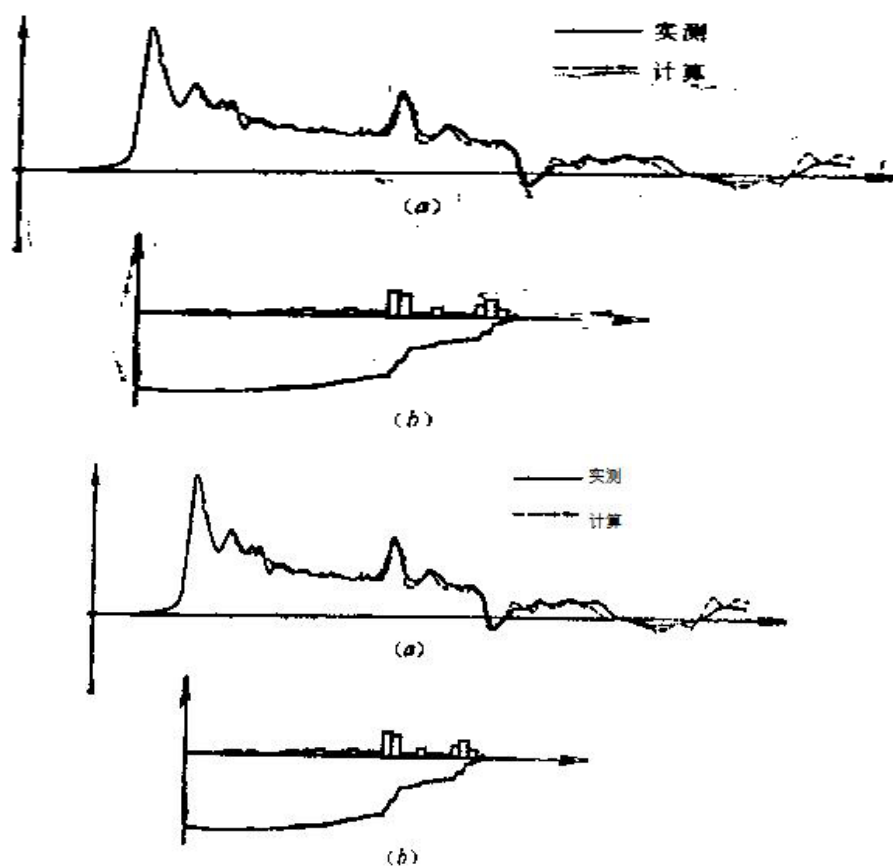


图 8-3 初打时 CAPWAP C 分析

(a) 计算力波曲线与实测曲线的拟合 (b) 桩侧摩阻力分布

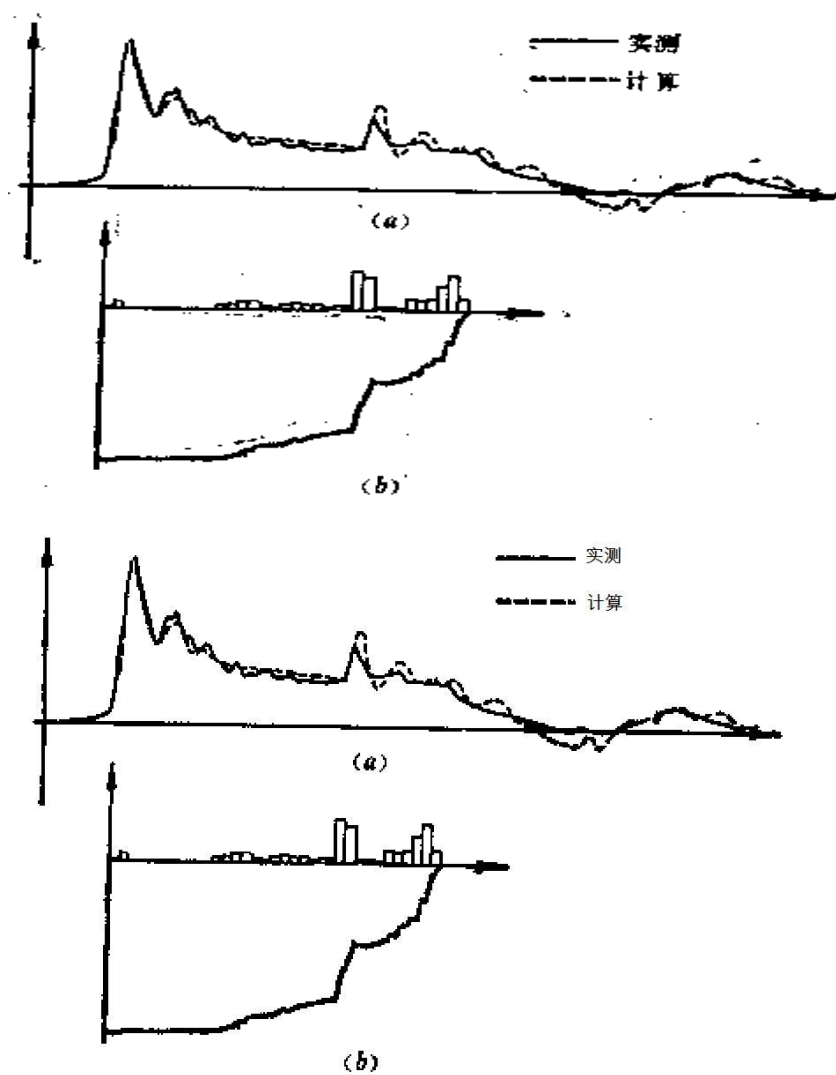


图 8-4 复打时 CAPWAP C 分析

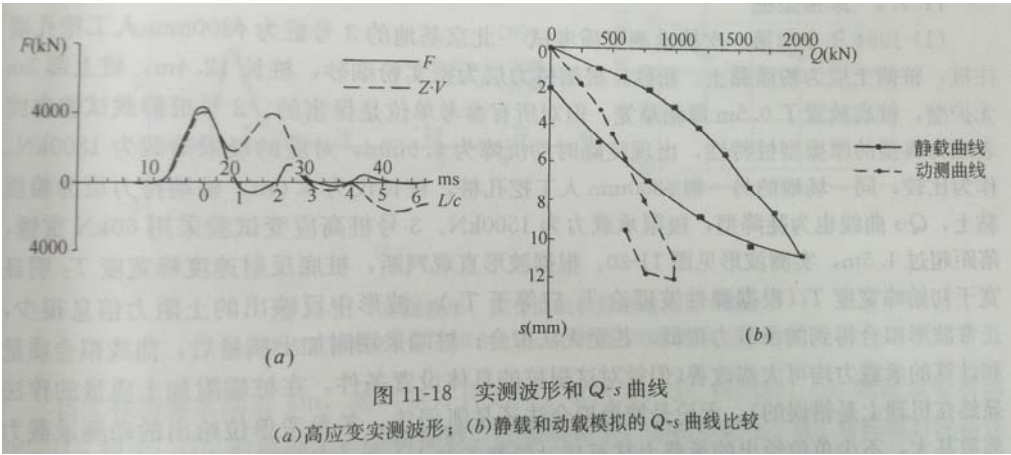
(a) 计算力波曲线与实测曲线的拟合 (b) 桩侧摩阻力分布

表 8-2 波形拟合法分析结果汇总

单元号	埋深(m)	初 打 时			复 打 时		
		最大弹性位移 Q(cm)	摩阻力 R(kN)	累计摩阻力 $\sum R$ (kN)	最大弹性位移 Q(cm)	摩阻力 R(kN)	累计摩阻力 $\sum R$ (kN)
0	1.0	0.000	0.0	2352.7	0.000	0	4810
1	3.0	0.254	0.2	2352.5	0.254	1.0	4809
2	5.0	0.254	0.2	2352.3	0.254	1.4	4808
3	7.0	0.254	0.2	2352.1	0.254	1.4	4807
4	9.0	0.254	3.1	2349.0	0.254	1.4	4805
5	11.0	0.254	3.1	2345.9	0.254	1.4	4803
6	13.0	0.254	3.1	2342.8	0.254	1.4	4802
7	15.0	0.254	3.1	2339.7	0.254	1.4	4801
8	17.0	0.254	3.1	2336.6	0.254	1.4	4799
9	19.1	0.254	3.1	2333.5	0.254	1.4	4798
10	20.1	0.000	0	2333.5	0.000	0	4798
11	21.1	0.254	3.1	2330.3	0.254	1.4	4796
12	23.1	0.254	3.1	2327.2	0.254	52.2	4744
13	25.1	0.254	3.1	2324.1	0.254	63.3	4681
14	27.1	0.254	44.1	2280.0	0.254	117.3	4564
15	29.1	0.254	22.0	2258.0	0.254	148.1	4415
16	31.1	0.254	59.9	2198.1	0.254	48.7	4367
17	33.1	0.254	69.5	2128.6	0.254	22.4	4344
18	35.1	0.254	36.9	2091.8	0.254	84.0	4260
19	37.1	0.254	34.9	2056.8	0.254	93.3	4167
20	39.1	0.254	55.9	2000.9	0.254	84.5	4082
21	40.1	0.000	0	2000.9	0.000	0	4082
22	41.1	0.254	81.3	1919.7	0.254	83.1	4000
23	43.1	0.254	42.8	1876.8	0.254	65.2	3934
24	45.1	0.254	42.8	1834.0	0.254	65.2	3869
25	47.1	0.254	42.8	1791.1	0.254	65.2	3804
26	48.1	0.000	0	1791.1	0.000	0	3804
27	49.1	0.254	453.2	1337.9	0.500	847.6	2956
28	50.1	0.000	0	1337.9	0.000	0	2956
29	51.1	0.254	428.4	909.6	6.500	711.2	2245
30	53.2	0.254	13.3	896.3	0.254	21.0	2224
31	55.2	0.254	26.5	869.8	0.254	21.0	2203
32	57.2	0.254	127.1	742.7	0.254	21.0	2182
33	59.2	0.254	29.6	713.1	6.500	226.7	1955
34	61.2	0.254	29.6	683.5	6.500	214.3	1741
35	63.2	0.254	29.6	653.9	6.500	204.4	1536
36	65.2	0.254	211.3	442.6	6.500	522.2	1014
37	67.2	0.254	299.2	143.4	6.500	759.8	255
38	69.2	0.254	130.5	12.9	6.500	239.9	15.0
桩尖		0.508(cm)12.9(kN)			0.508(cm)15.0(kN)		
桩侧		0.254(cm)2339.8(kN)			4898.9(kN)		
卸载最大弹性位移		100%Q			100%Q		
重新加载水平		0			0		
桩尖土附加质量		0.432(kN)			0.500		
桩尖土附加阻尼		0			0		
桩尖处的间隙		0			0.0635(cm)		

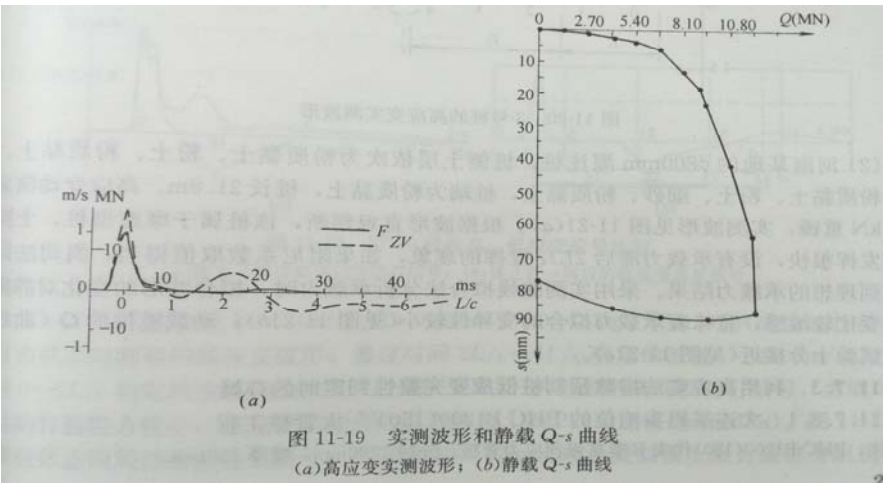
【工程实例 3】

本工程实例是需要静载荷进一步验证的；单击贯入度大，桩底同向反射强烈且反射峰较宽，侧阻力波、端阻力波反射弱。设计条件为端承型桩，直径 800mm 钻孔灌注桩，桩端持力层为全风化花岗片麻岩，测点下桩长 16m。试验采用 60kN 重锤，先做高应变检测，后做静载验证检测。图 11-18 (a) 实测波形反映出的桩承载性状与设计条件不符（基本无侧阻、端阻反射，桩顶最大动位移 11.7mm，贯入度 6~8mm）。采用波形拟合法分析承载力时，承载力比按勘察报告估算的低很多。静载验证试验尚未压至破坏，由于设计取值较低，满足设计要求。静、动试验得出的荷载—沉降曲线对比见图 11-18 (b)，动测承载力更低，但高应变测试的锤重符合要求，贯入度表明承载力已“充分”发挥。



【工程实例 4】

直径 1600mm 人工挖孔灌注桩，桩长 18.8m。桩侧土层依次为淤泥质粉砂、粉细砂、软塑状粉质粘土、坚硬状粉质粘土，桩端持力层为半岩半土状强风化泥岩。设计要求的极限承载力为 13500kN。高应变动测采用 80kN 重锤，实测波形见图 11-19 (a)；静载试验曲线见图 11-19 (b)，表明单桩极限承载力不满足设计要求。



由于高应变测试时锤重偏小，桩顶最大动位移仅为 5.2mm，常规的曲线拟合得到的承载力明显低于静载结果。当然，即使增加锤重，预计产生的桩顶动位移也是有限的，因而这种情况下高应变动测低估承载力是可以想见的。

### 【工程实例 5】

摩擦型桩：1994 年全国第一次桩动测资质考试北京基地的 3 号桩为直径 800mm 人工挖孔灌注桩，桩侧土为粉质粘土、粉砂，桩端持力层为密实粉细砂，桩长 12.4m，桩上部 3m 无护壁，桩底放置了 0.5m 厚稻草笼，但对所有参考单位是保密的。3 号桩静载试验曲线表现为典型的摩擦型桩特性，出现陡降时的沉降为 6.9mm，对应的极限荷载为 1800kN，作为比较，同一场地的另一根直径 800mm 人工挖孔桩，桩长仅为 6.0m，桩端持力层为粉质粘土，Q-s 曲线也为陡降型，极限承载力为 1500kN。3 号桩高应变试验采用 60kN 重锤，落距超过 1.5m，实测波形见图 11-20。根据波形直观判断，桩底反射速度峰宽度  $T_2$  明显宽于初始峰宽度  $T_1$ （根据弹性波理论  $T_2$  应等于  $T_1$ ），波形中反映出的土阻力信息较少，正常波形拟合得到的承载力很低，甚至无法拟合；桩端采用附加土质量后，曲线拟合质量和计算的承载力均可大幅改善（但针对这根桩的具体设置条件，在桩端附加土质量的做法显然在机理上是错误的）。无论是波形拟合法还是凯司法，各参考单位给出的动测承载力离散甚大，不少单位给出的承载力甚至超过静载承载力的几倍。估计是在无奈的情况下根据地质条件“猜出”的结果。所以，即不能主管臆断，也不宜采用能使拟合结果产生很大变异的桩—土模型及其参数。

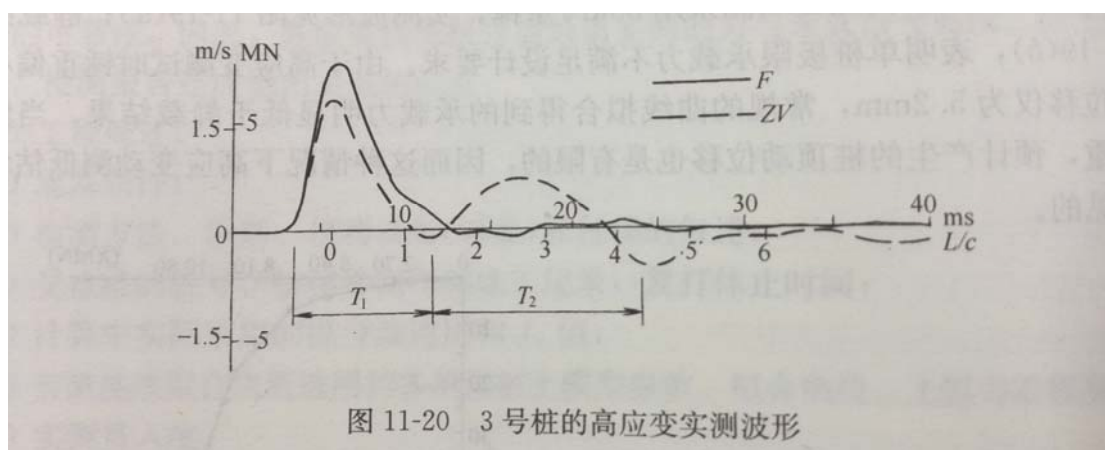
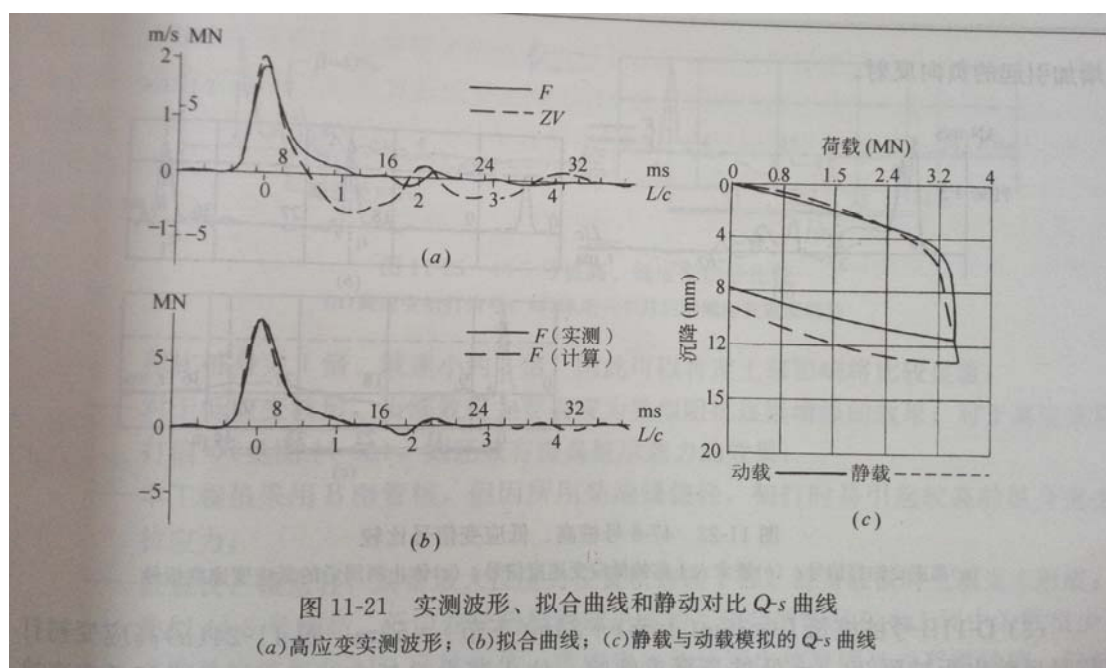


图 11-20 3 号桩的高应变实测波形

**【工程实例 6】**

摩擦型桩：河南某地的直径 800mm 灌注桩，桩侧土层依次为粉质粘土、粉土、粉质粘土、粘土、粉质粘土、粉土、细砂、粉质粘土，桩端为粉质粘土，桩长 21.8m。高应变动测采用 41.5kN 重锤，实测波形见图 11-21 (a)。根据波形直观判断，该桩属于摩擦型桩，土阻力前期发挥很快，没有承载力滞后  $2L/c$  发挥的现象，如果阻尼系数取值得当，凯司法同样可得到理想的承载力结果。采用实测曲线拟合法分析承载力时，拟合波形的变化对静阻力的改变比较敏感，意味着承载力拟合的变异性较小（见图 11-21b）；动载模拟的  $Q-s$  曲线与静载试验十分接近（见图 11-21c）。





## 第九节 高应变动测仪操作

### 一、FEI 桩基动测分析系统(中国建筑科学研究院)

#### 1、系统连接

电源：在本系统主机的背面，有直流及交流接口，分别印有“AC220V”及“DC12V”字样，通过本系统配备的专用电线可分别与 220V 交流电源或 12V 直流电源相接。

接地：系统主机背面留有接地接头，标有“GND”字样，开机之前务必用一根电线良好接地。

传输电缆：主机背面有一圆形 37 芯接口，标有“INPUT”字样，系统配备的信号传输电缆即与此接口相接，并可串接数根(每根长约 20m)。

1 分 4 导线：传输电缆的公头与主机背面“INPUT”接口相接，母头与“1 分 4 导线”相接，“1 分 4 导线”用于与四支传感器相接，这四支传感器分成两组，每组含一加速度接口(标有 A1、A2 字样) 和一应变环接口(标有 F1、F2 字样)。

传感器：两支加速度传感器与“1 分 4 导线”上标有 A1、A2 的两个三芯接头相接，两支应变环与“1 分 4 导线”上标有 F1、F2 的两个五芯接头相接。

至此，本系统连接完毕。



图 9.1 主机上部



图 9.2 主机正面

## 2、采集参数设置

- 1) 打开主机的电源，本系统的采集软件安装在硬盘 C:区之 DATPRO 子目录中。在 DOS 系统下键入 CD DATPRO，进入该子目录，然后键入 DATPRO，即可进入主菜单。如图 9.3。

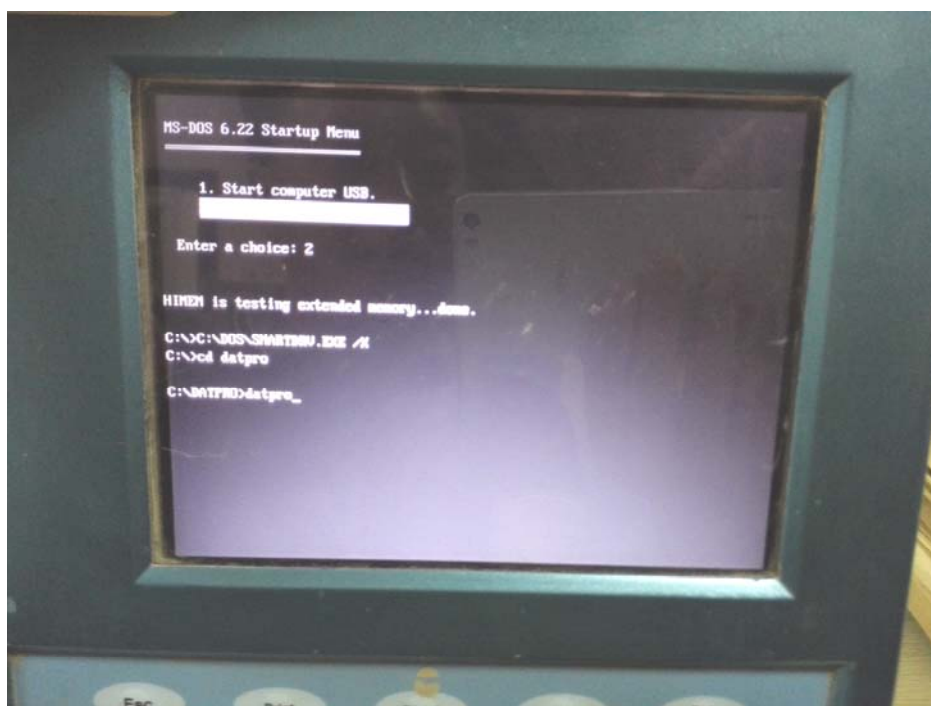


图 9.3 进入主菜单



- 2) DATPRO 主菜单的屏幕的最上方是"Data Processing"(数据处理)字样，下分五个窗口并隐含了有五个子菜单，如图 9.3。在这里并不打算把全部参数、子菜单作一次性的介绍，而只介绍与信号采集有关的部分。



图 9.3 DATPRO 主菜单

- 3) 要修改该窗口中的参数，先在 Command 栏中键入该参数的前两个字符，然后空一格，再键入新的数值并回车。WSpeed：应力波波速，对砼桩一般可预设 3100~4100 m/s。如图 9.4。

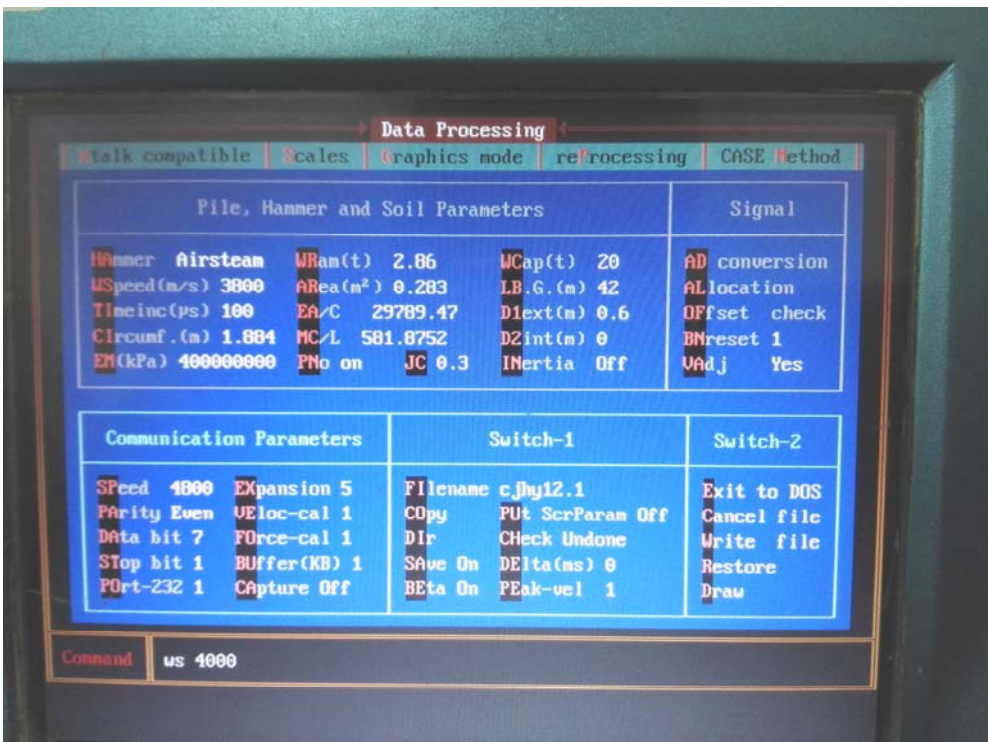


图 9.4 设置波速

4) Clrcumf: 测点处桩身周长，设置如图 9.5。



图 9.5 设置桩身周长

5) EM: 测点处桩材料的弹性模量，EM 与 WS 两个参数设定后，程序将自动计算材料的容重。设置如图 9.6。



图 9.6 设置弹性模量



6) ARea: 桩在测点所在截面的面积, 设置如图 9.7。



图 9.7 设置截面面积

7) LB.G.: 测点下桩长, 可根据施工记录预设。设置如图 9.8。

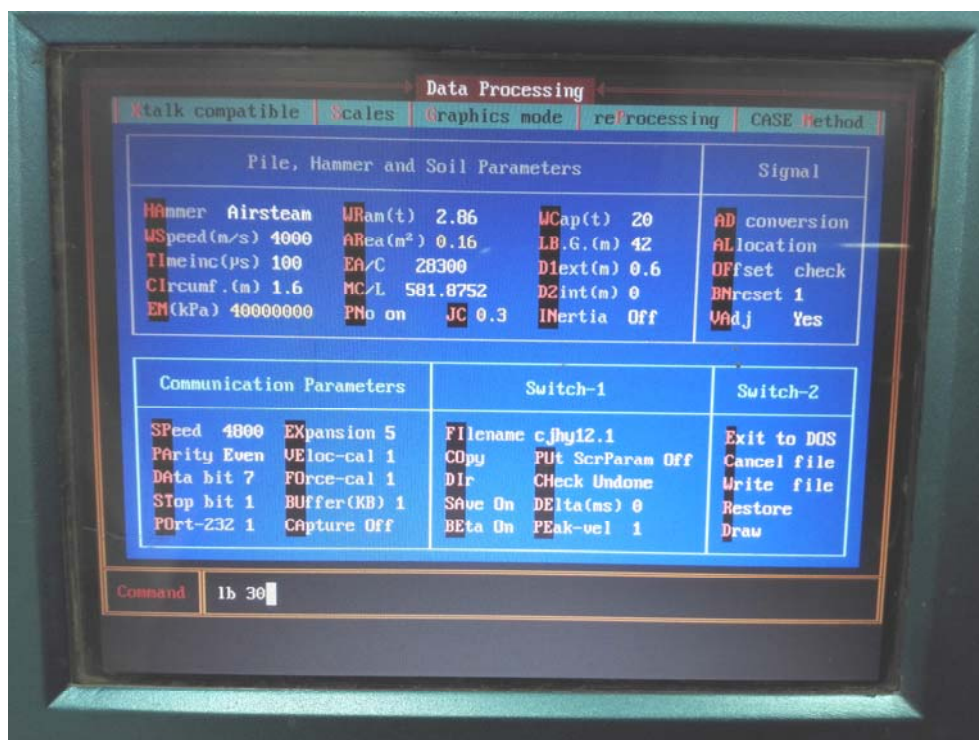


图 9.8 设置测点下桩长

- 8) D1ext: 测点处桩的横向尺寸，对圆桩设为外径；对方桩设为边长。D2int: 测点处桩的横向尺寸，对圆实心桩设为 0；对管桩设为内径；对方桩设成边长。设置如图 9.9。

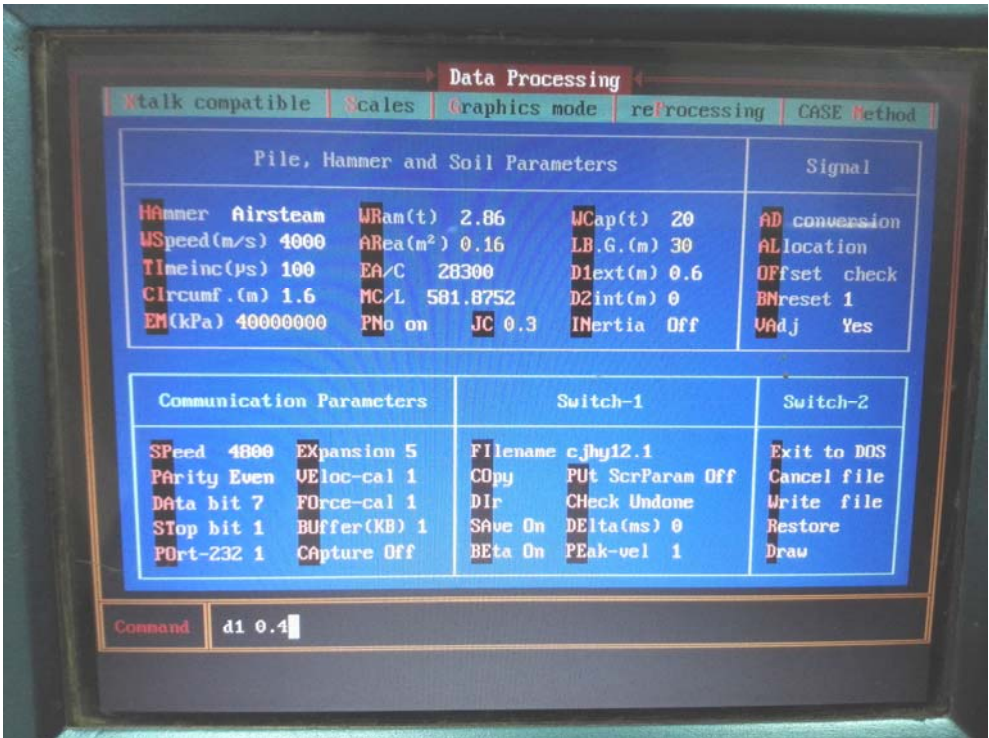


图 9.9 设置桩的横向尺寸

- 9) “BNreset”，此参数记录的是试验中的锤击序号，在试验过程中，它会作为信号文件的扩展名，且自动累加，设置如图 9.10

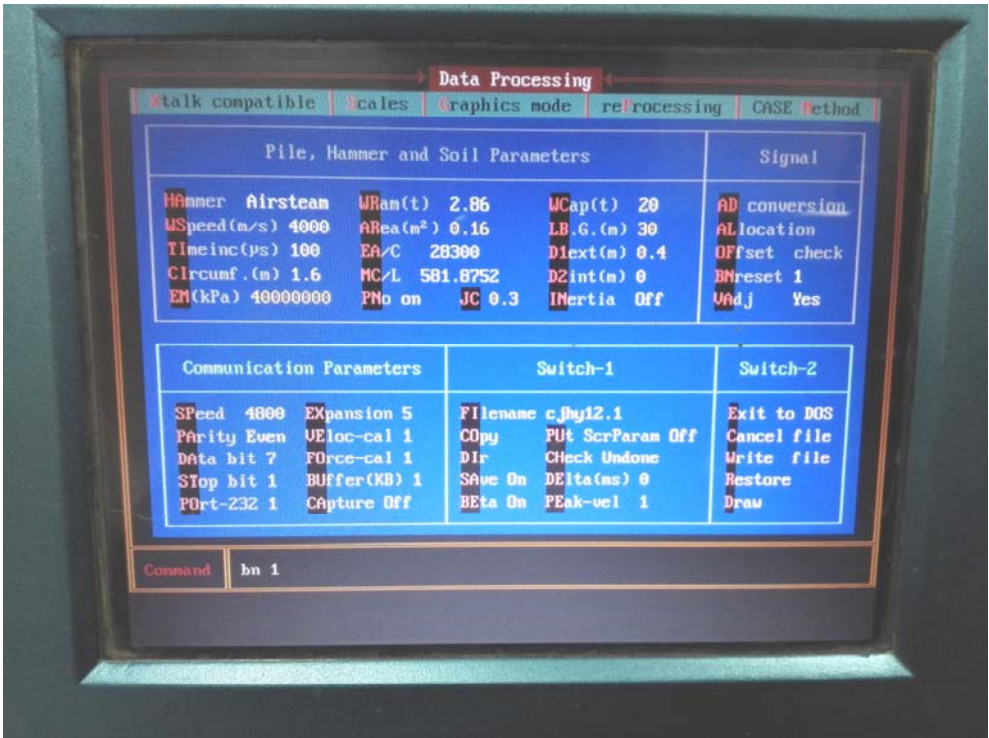


图 9.10 设置锤击序号



- 10) Filename: 信号的文件名来自两个参数: 文件名的基名来自主菜单中的“Filename”。此基名的设置最好包含桩号及工程名称的信息。设置如图 9.11。

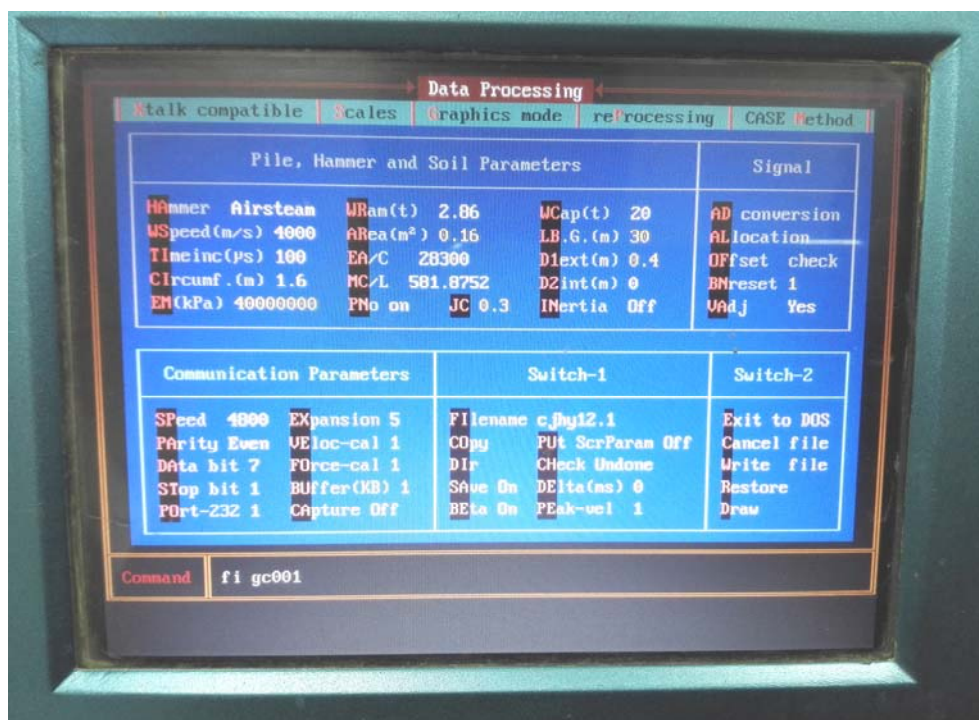


图 9.11 设置文件名

- 11) PU ON: 在设置完上述的有关参数后, 可键入 PU ON (该命令位于 Switch-1 窗口中)将这些参数存起来, 这样下次启动 DATPRO 时, 首先显示在菜单中的就是已设置好的参数了。否则, 只要从 DATPRO 程序中退出来, 以上设置的参数都将丢失。如图 9.12。

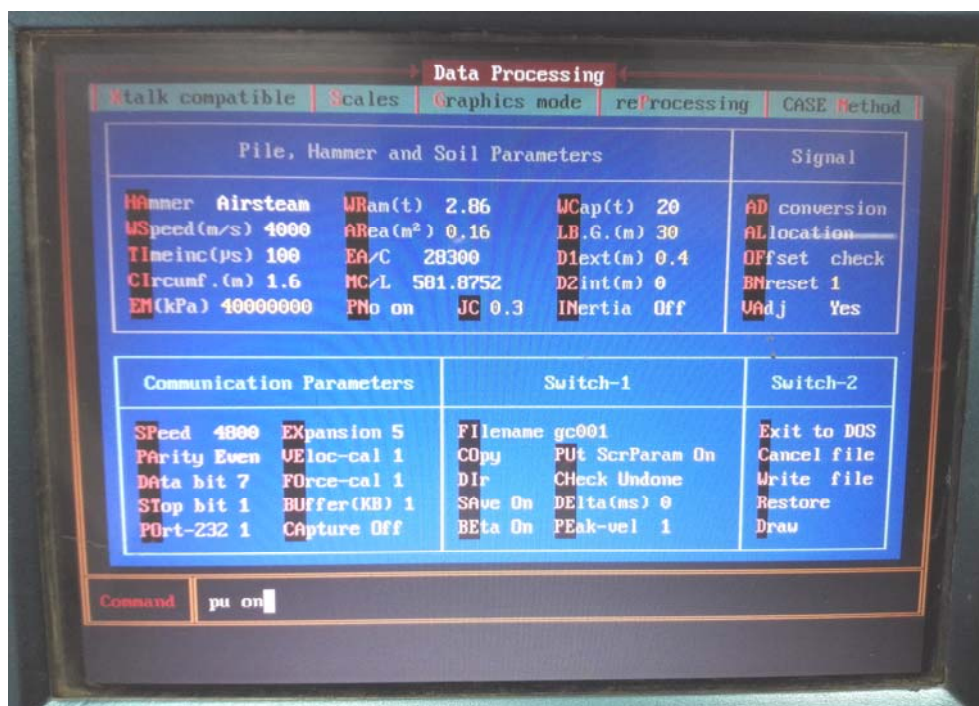


图 9.12 保存参数

12) OF: 键入 OF，屏幕显示四个通道的输出电压，CH1 和 CH2 分别对应两个加速度传感器的输出； For1 和 For2 分别对应两个应变环的输出(应变环受压输出为正值，受拉为负值)，若受压超过+2.5V 或受拉超过-3.0V，系统会报警发声。听到报警声，务请卸下传感器重新安装，直至其初始输出落在-3.0V~2.5V 之间，按 ESC 键退出。如图 9.13。



图 9.13 检查通道

13) AD: 在完成参数的设置和传感器的监视安装之后，键入 AD，会出现采集状态控制表，利用↑↓键可以选择不同的单项(反视频)。如图 9.14、9.15。

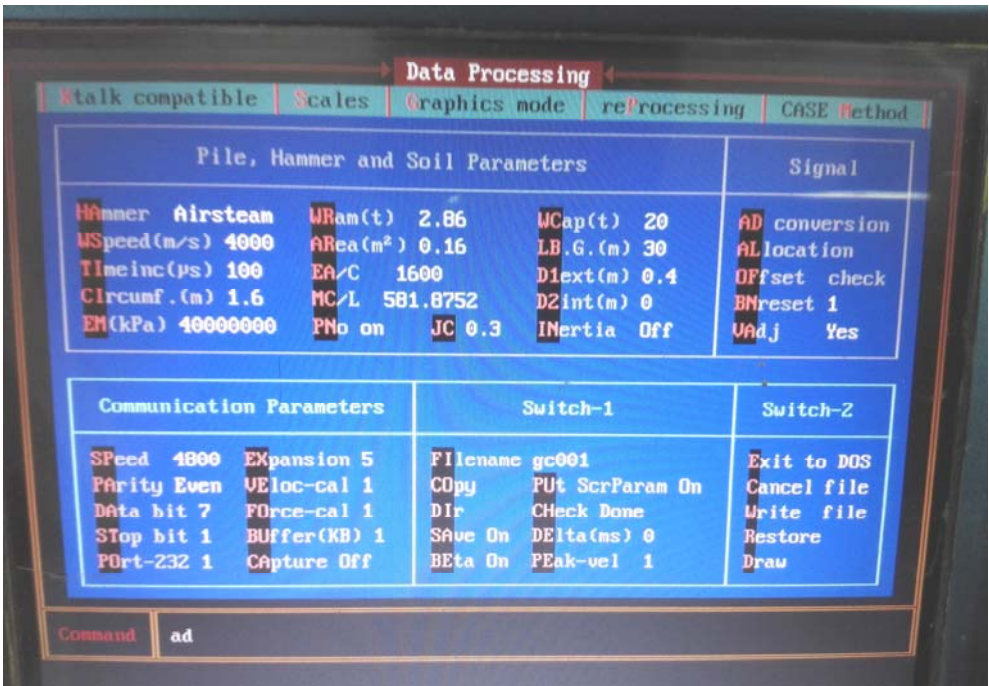


图 9.14 进入采集状态控制表



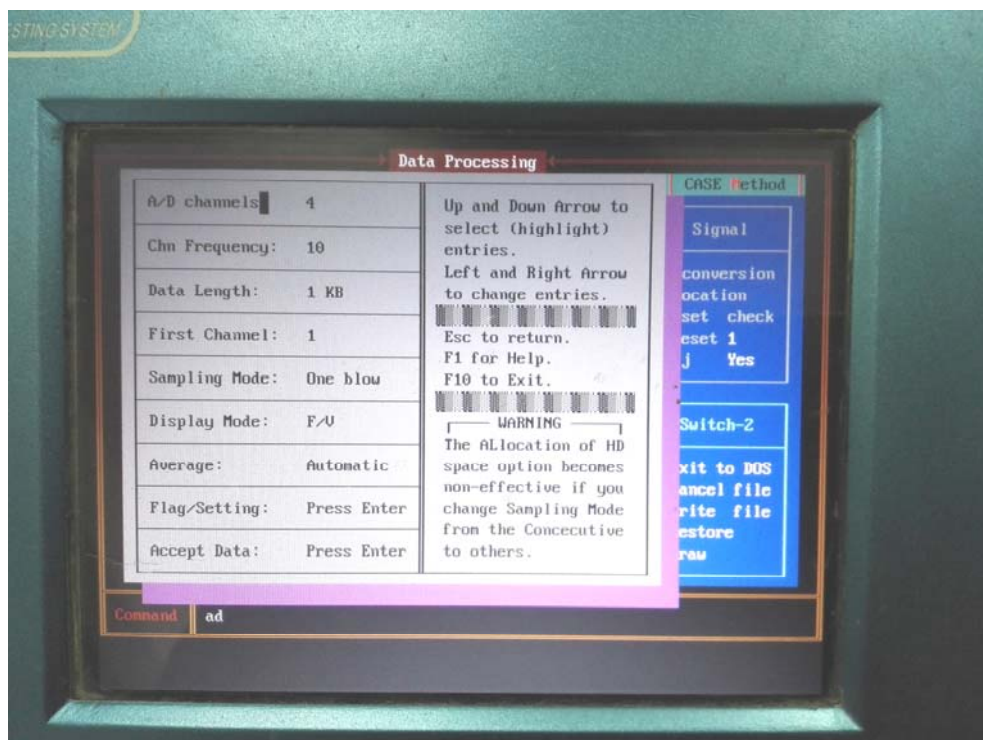


图 9.15 采集状态控制表

- 14) 在上面的“采集状态控制表”中的最下端为“Accept Data”(接受数据)选项，将光标移至该选项并键入，进入信号采集的等待状态，如图 9.16、9.17。

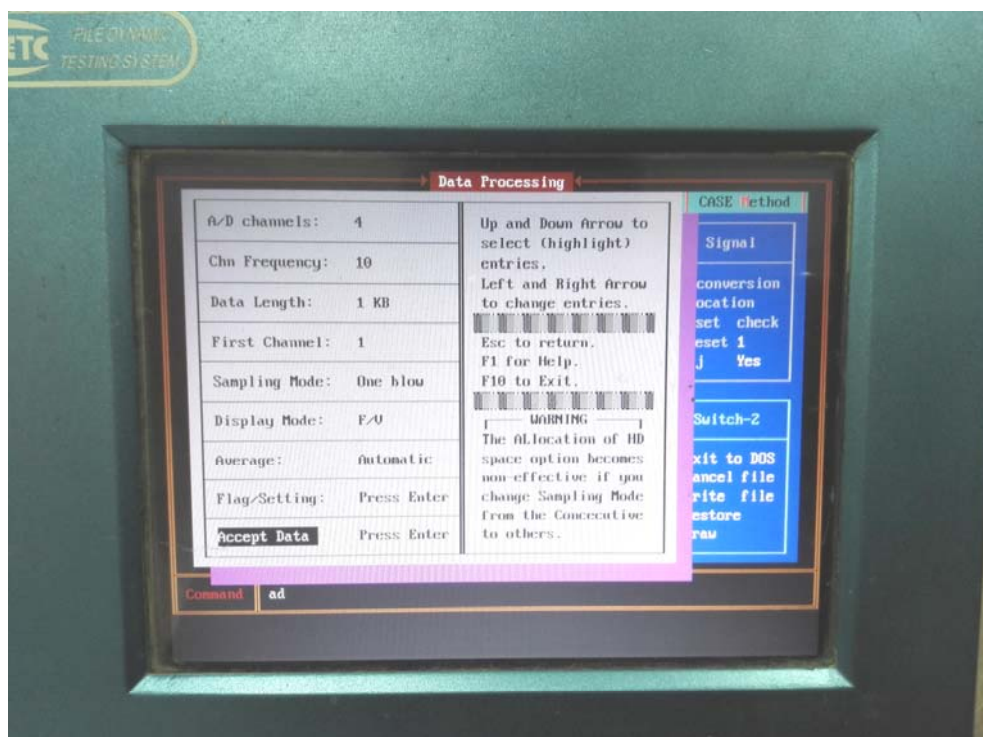


图 9.16 进入信号采集等待状态



图 9.17 信号采集等待状态



## 二、武汉岩海 RS 系列高应变动测仪操作

1、光电式旋转编码键盘（开关）：此开关可左旋、右旋和压下（立刻释放）三种操作；类似于计算机中的鼠标，借助于中文提示菜单，此旋转开关可以完成全部功能操作。



图 9.18 动测仪正面

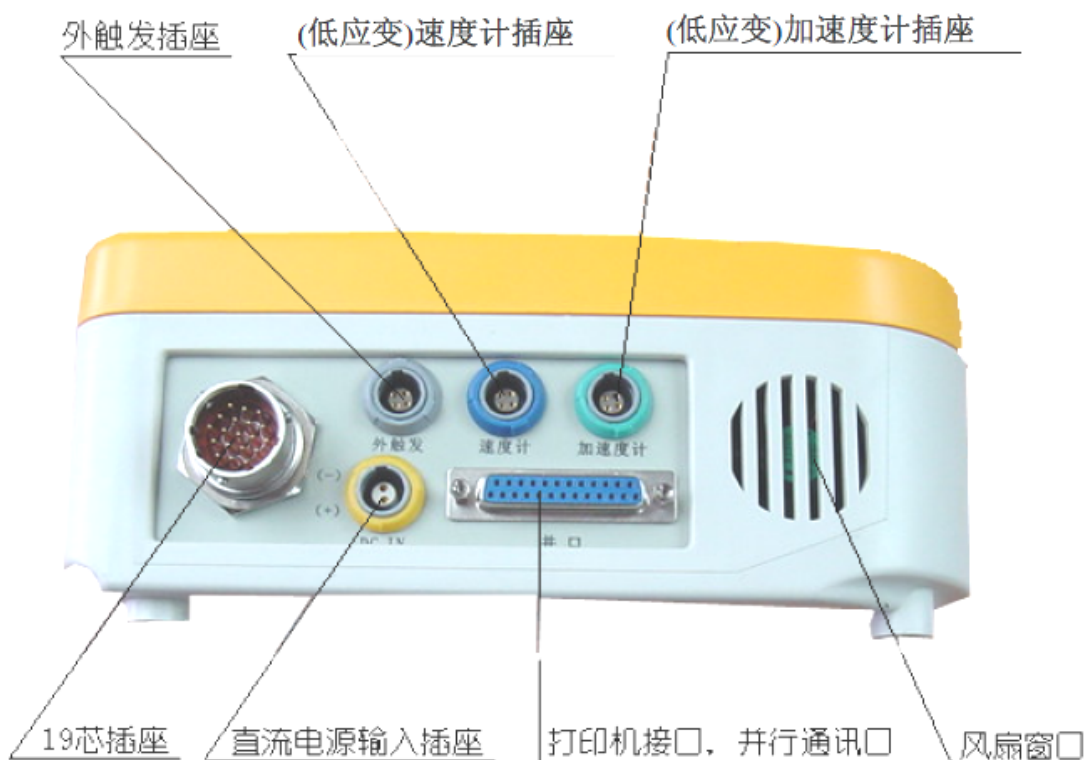


图 9.19 动测仪上面板

2、参数设置

- 1) 正确联接好测试系统，打开电源开关，系统自动进入“测量类型选择菜单“（图9.20）。左旋或右旋光电旋钮开关，将“方框光标”置于所需要的测量类型处，压下（立刻释放）光电开关，确认测量类型。

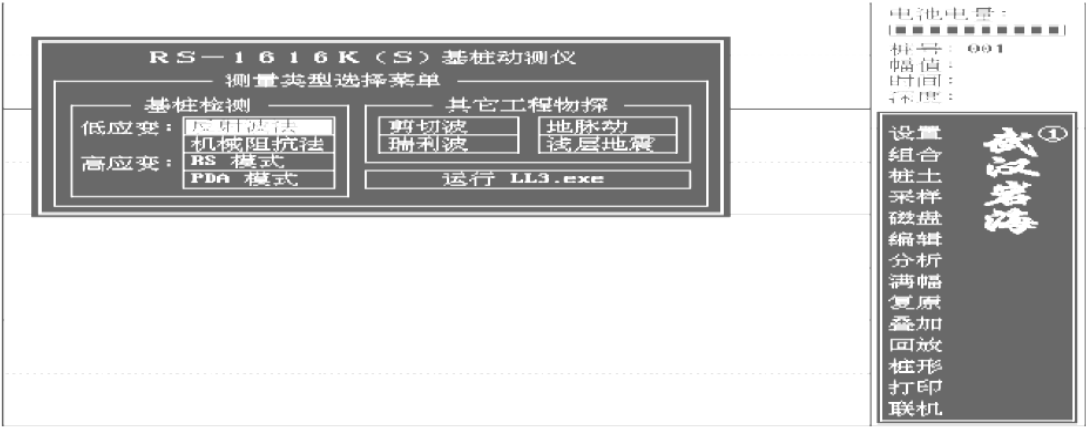


图 9.20 测量类型选择

- 2) 在测量类型选择菜单中，移动方形光标至“RS 模式”功能项处（使用国产加速度计及高应变适配器），或者“PDA 模式”功能项处（使用进口加速度计），压下光电开关，选择高应变测量，液晶屏上弹出“高应变参数设置菜单”（图9.21）。注意：高应变测桩的两种模式，除传感器灵敏度系数输值方式不同外，操作和界面完全一样。

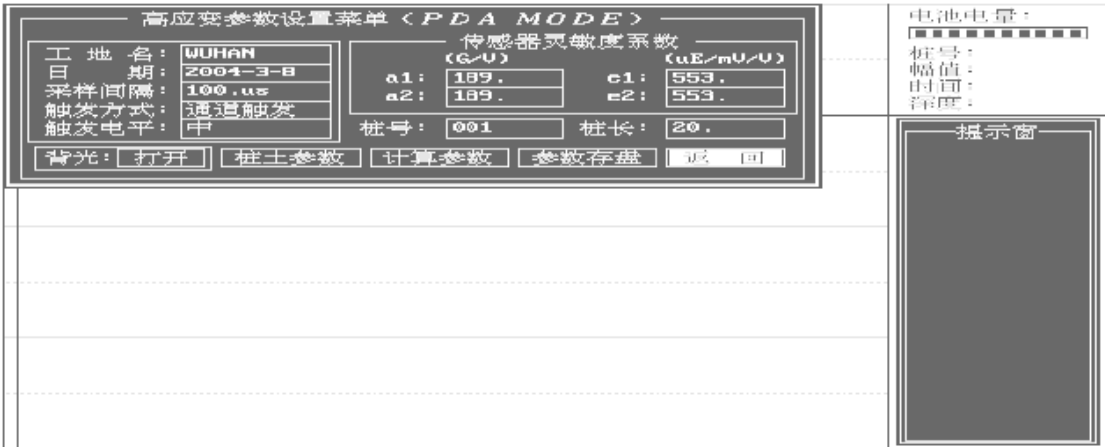


图 9.21 高应变参数设置菜单

- 3) 将方形光标移到“桩土参数”处，压下光电开关，液晶屏幕上弹出“桩土参数设置菜单”（图9.22）。屏幕上的显示值均为上次设置后的存盘值，可以根据实际情况修正，对于软件有外径、内径之分时，仅对空心管桩而言。凡灌注桩内径均可输入“0”值，然后选择“返回”。



图 9.22 桩土参数设置

- 4) 将方形光标移到“计算参数”处，压下光电开关，液晶屏上弹出“计算参数设置菜单”（图9.23），解释如下：



图 9.23 计算参数设置

※调整系数：主要用于修正实测信号的正比性，除非万不得已，一般不建议使用。该组系数直接作用于实测信号之上，在传感器安装位置不合理以及有其它原因时可以一试。

※ 计算通道选择：选择参与计算的通道。

※ 信号极性：主要用于防止传感器安装方向不同时，信号出现互为反向，从而给计算带来不便。

※ 采样时自动计算：如果选择“是”，采样完毕后，程序将自动计算 CASE 结果，并在屏幕上显示 F/ZV 曲线；否则显示原始信号。

※ 采样时自动存盘：如果选择“是”，采样完毕后，程序将自动保存测试数据，桩号即为保存数据的文件名。在打桩监控时常采用自动存盘。

※ 连击锤记录间隔：在打桩监控时，数据自动存盘的间隔锤数。为“0”时表示每锤都保存数据，为“1”时表示每 2 锤保存其中的一锤数据，.....记录间隔一般设为 0 或者 1。

※ 幅值显示：选择显示“电压量”还是“物理量”。当选择“电压量”时，在液晶屏右上方显示被测信号的电压幅值；当选择“物理量”时，在液晶屏右上方显示被测信号的物理值量，即  $\mu\text{E}$ （微应变）或者  $G$ （加速度  $g$ ）。

※ 有效值显示：计量标定时用，一般关闭。

5) 在图9.21 中选择“参数存盘”或者“返回”，程序将运行至测试分析主屏。信号采样后的测试分析主屏如图9.24 所示。

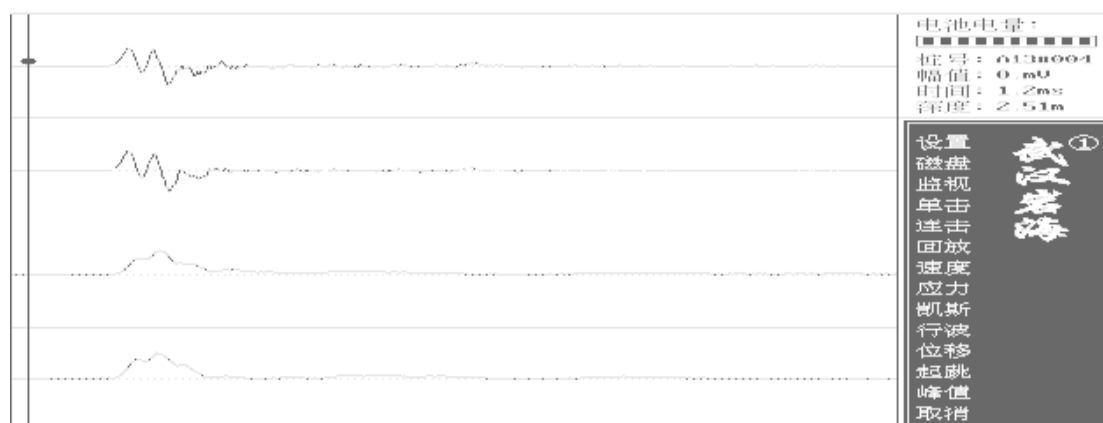


图 9.24 测试分析主屏