

基桩高应变法动力检测 实用技术

张林海



2010年6月

目 录

第一章	高应变动测基础知识
第二章	高应变中的应力波理论
第三章	凯司法(CASE)
第四章	高应变试验现场实测
第五章	实测曲线拟合法
第六章	高应变动侧试验中需注意的几个问题

第一章 振动与波的基础知识

1.1 . 机械振动

1 . 机械振动的概念

是指物体或系统在平衡位置附近以某种方式进行的往复运动。

2 . 机械振动系统模型的组成：质量、弹簧和阻尼。

3 . 线形系统与非线形系统

线形系统：表示激励与响应间的微分方程是线形微分方程的振动系统。

非线形系统：表示激励与响应间的微分方程是非线形微分方程的振动系统。

4 . 时不变与时变系统

时不变系统：质量、刚度和阻尼等参数不随时间变化的系统。

时变系统：质量、刚度和阻尼等参数随时间变化的系统。

5 . 振动的分类

(1) 按振动系统的结构参数特征分类：

A . 线性振动：在确定性激励下线形系统的振动，其响应间的微分方程是线形的。

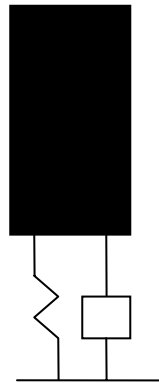
B . 非线形振动：在任意性激励下非线形系统的振动，其响应间的微分方程是非线形的。

(2) 按振动产生的原因分

A . 自由振动：当系统的平衡被初时扰动破坏后，仅在恢复力的作用下的振动。

B . 受迫振动：在外力干扰持续作用下的振动。

C . 自激振动：激励是在受系统本身振动控制的，当存在适当反馈的特性下，



系统会自动激起定幅振动，一旦振动被抑制，激扰也随同消失。

(3) 按系统自由度分

A．单自由度系统振动：系统的几何位置仅需一个参数就能决定。

B．多自由度系统振动：系统的几何位置仅需多个参数才能决定。

6．简谐振动

(1) 概念：物体或系统的振动物理量 (u, v, a) 是时间的正弦或余弦函数。

$$x = A \sin(\omega t + \phi)$$

$$\omega = 2\pi / T = 2\pi f$$

x ：位移；

A ：振幅；

T ：周期；

ω ：圆频率；

f ：频率；

$\omega t + \phi$ ：相位；

ϕ ：初相位

(2) 振幅、周期、频率

振幅：离开平衡位置的最大距离；

周期：振动一次所需的时间；

频率：在 1 秒种内振动的次数。

2.2 . 应力波

(1) (波动) 概念：应力波是机械振动在连续介质中的传播过程。

亦即：波动只是振动状态 (振动相位) 的传播，连续介质中个质点仅在它们各自的平衡位置附近振动，并没有随振动的传播而流动。

(2) 高应变中研究应力波的基本假定 (前提)：

- . 质量均匀连续分布；
- . 材料各向同性；
- . 在弹性范围内，服从虎克定律；
- . 杆的横截面在振动时，仍保持为平面，并作整体运动。
- . 不计横向变形。

(3) 描述波动的几个常见概念；

. 波面：波阵简称“波面”。波源发出的振动在介质中传播经相同时间所到达的各点组成的面。同一波阵面上各点的振动位相相同。

把波动过程中，介质中振动相位相同的点连成的面称为波阵面，简称波面。把波面中走在最前面的那个波面称为波前。由于波面上各点的相位相同，所以波面是同相面。

A . 平面波：波面为平面的波；
球面波：波面为球面的波。

B . 波长的定义：沿着波的传播方向，应力波在一个波动周期内所传播的距离；
($=CT=C/f$)。在纵波中波长是指相邻两个密部或疏部之间的距离。

C . 周期：完成一次完整波动所花的时间；

D . 频率：在 1 秒种内完成完整波动的个数。

E . 波速与质点振动的速度的区别

质点运动速度 (v)：是指单位时间里质点在其平衡点附近运动时的位移变化量。或：质点在其平衡点附近往复运动的速度。

波传播速度 (C)：应力波沿桩身传播的运动速度。

在高应变动测试验中，质点运动速度（ v ）往往只有几个 m/s ；而波传播速度，即波速（ C ）要达到几千 m/s ，如表 1.1 所示。

表 1.1 典型的波速值

桩型	钻孔灌注桩	预制混凝土桩	预应力管桩	钢管桩
波速（ m/s ）	3000 ~ 3600	3400 ~ 3800	3800 ~ 4100	5100

表现在高应变实测曲线中，如图 1.1 所示。

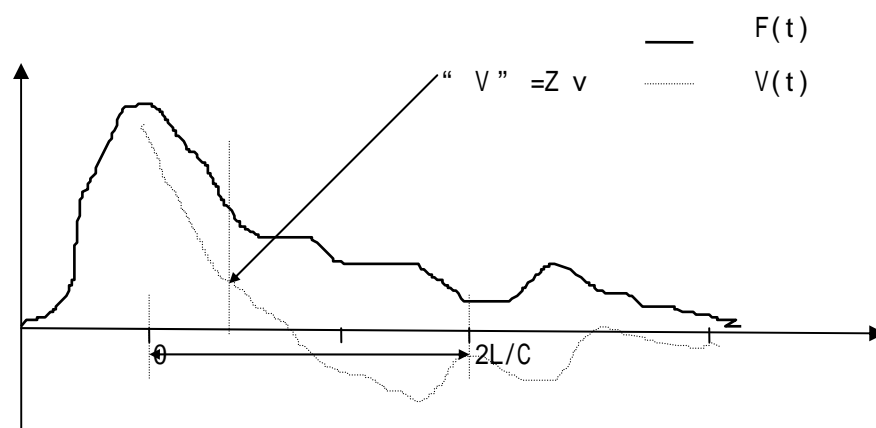


图 1.1

波速： $C=2L/T$

质点运动速度： v 对应与 $v*Z$ 曲线上的值 $v=V/Z$ ，表示 t 时刻的质点运动状态。

（4）波的分类

. 纵波：是指质点的振动方向与波动的传播方向相一致。纵波的外形特征是具有“疏松”和“稠密”的区域，也称为疏密波。（在高应变和低应

变动测试中，所研究的应力波都为纵波。)

· 横波：是指质点的振动方向与波动的传播方向相垂直。

横波的外形特征是具有凸起的波峰和凹下的波谷。

· 表面波：是指质点的振动方向与波动的传播方向成 45 度角度。

(5) 应力波的特性

应力波具有反射、透射、散射、叠加、弥散（衰减）等特性。

· 反射、透射：

当波传播到两种介质的阻抗变化分界面时，一部分从界面返回，形成反射波；另一部分进入到另一种介质，形成透射（折射）波。

· 波的叠加原理

- i. 两列波相遇后，仍然保持他们各自的特性（频率、波长、振幅、震动方向等）不变，并按照原来的方向继续前进，好象没有遇到过其它波一样。
- ii. 在相遇区域内，任一点的振动为两列波单独存在时在该点所引起的振动位移的矢量和。

(6) 波阻抗（Z）

①. 定义为：桩身截面所受内力增量与质点运动速度增量之比。

即： $Z = dF/dv = A \cdot d\sigma/dv = A \cdot E d\varepsilon/dv = EA/C$ $C = dv/d\varepsilon$

式中 A 为桩身截面面积。 σ ---应力； ε ---应变

波阻抗 Z 的量纲为：kN.s/m

②. 其物理意义是：质点运动变化所提供的力。或质点运动速度变化一个单位速度（1m/s）所需的力。

③. 波阻抗 Z 仅与材料本身有关，大小由材料本身性质所决定。

④. 波阻抗的计算方法

$$Z = EA/C = \rho C^2 A / C = \rho A C = (\gamma / g) A C \quad E = \rho C^2 \quad \rho = \gamma / g$$

式中：

Z----桩身材料波阻抗， $\text{kN}\cdot\text{s}/\text{m}$ 。

E----桩身材料弹性模量， kPa (10^{-3}Mpa)。

C----波速， m/s 。

A----桩身截面面积， m^2 。

ρ ----桩身材料质量密度， kg/m^3 。

γ ----桩身材料重度， kN/m^3 。

g----重力加速度， m/s^2 。

不同桩型典型桩身材料重度如表 1.2 所示。

表 1.2 典型桩身材料重度/密度

桩 型	钻孔灌注桩	预制钢筋混凝土桩	钢桩
重度 (kN/m^3)	24.0	24.5-25.0	78.5
密度 (kg/m^3)	2400	2400—2500	7850

1.3 测试系统

1. 基本的测试系统：

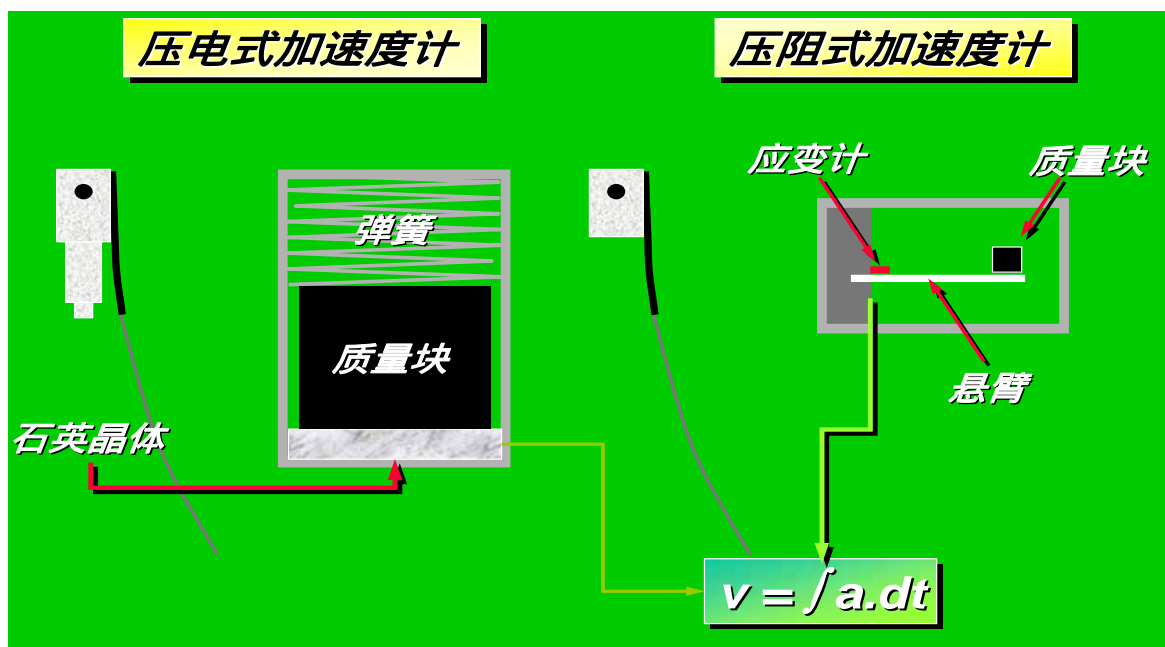
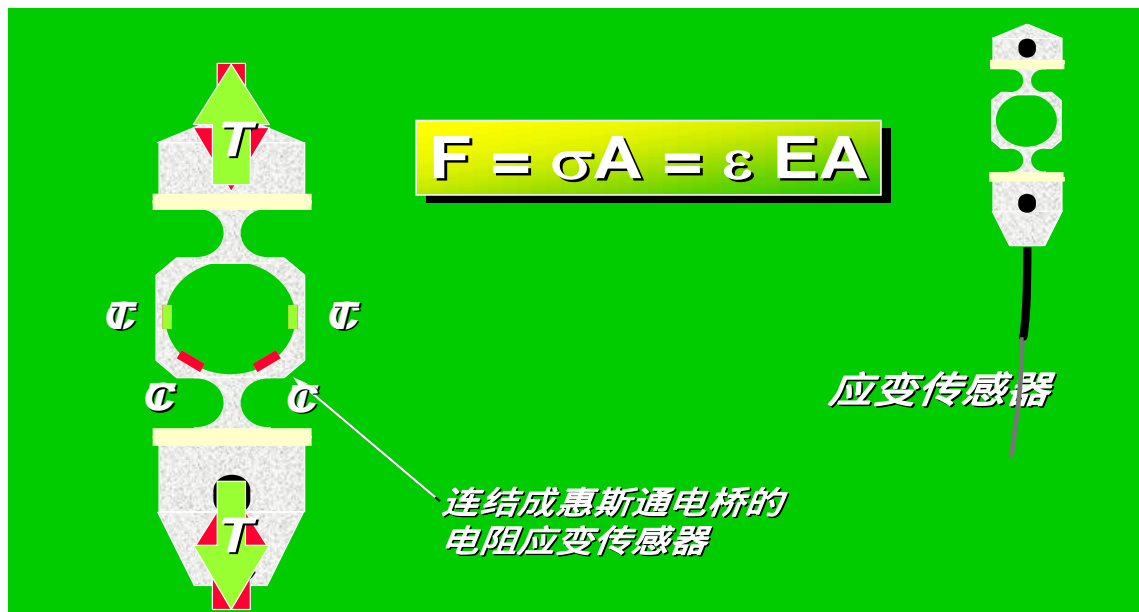
激振系统：用来激发被测物体或使被测物体产生振动的设备系统(即产生激振信号的系统)。如高应变试验的重锤和低应变试验的手锤。

测量系统：将测振量转换为电信号，并加以转换、放大、显示、记录、储存以及计算分析的整个系统。我们测量的是电信号，通过传感器的标定系数还原成被测的物理参数。

被测对象：就是试验对象。如：高应变试验中的桩、土。

2. 拾振器（传感器）

概念：拾振器就是传感器。它把被测的振动量转换成电信号。我们根据不同的被转换振动量，把它分为速度传感器、加速度传感器（压电、压阻）、应变传感器等。



传感器的主要特性参数

传感器的主要特性参数包括：灵敏度、幅频特性、分辨率、线性度、线性

范围、动态范围、频率范围等。

A . 灵敏度 S :

$$S = \text{输出信号} / \text{输入信号}$$

B . 幅频特性 : 输出信号与输入信号之间的频率响应函数 , 其模的特性就是幅频特性 , 幅角的特性为相频特性。

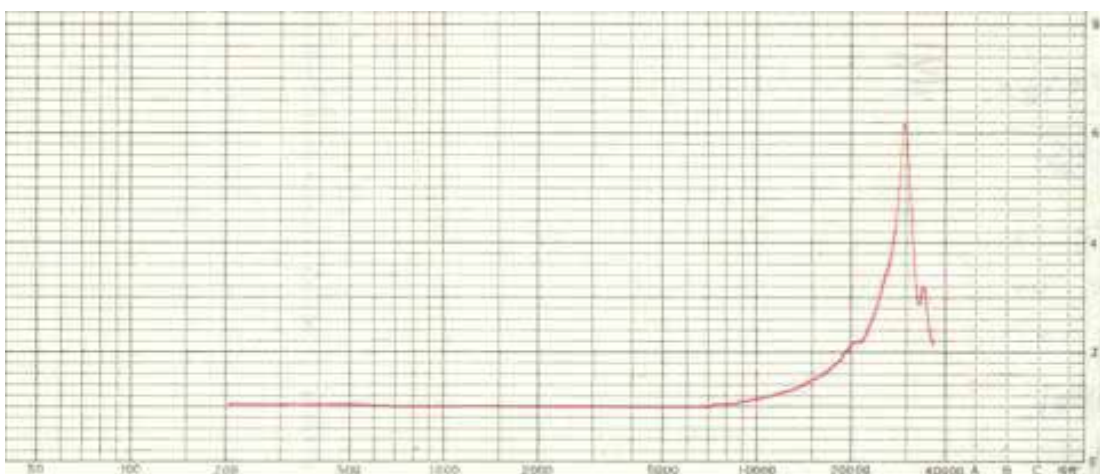


图 4 典型加速度传感器的幅频特性图

幅频特性反映了灵敏度与频率之间的关系。只有在平直区才能工作 , 否则就会误差 , 即频率失真。

C . 动态范围 : 指输出信号与输入信号间维持线性关系时输入信号幅度的容许范围。

D . 分辨率 : 能够引起输出量发生可以分辨的变化 , 其最小输入量的大小就是分辨率。

E . 线性度、线性范围

当仪器的灵敏度在一定限度内波动而不越过灵敏度的误差范围 , 这个限度叫线性度。仪器在一定的范围内保证线性度 , 这一范围就是线性范围。上海新规范规定 : 混凝土桩用加速度的线性范围是 $0-10000\text{m/s}^2$; 钢桩用加速度的线性范围是 $0-50000\text{m/s}^2$ 。

F. 频率范围：仪器的灵敏度的变化不超过某一规定的百分比时，仪器的使用频率范围。上海新规范规定：加速度的频率范围是 10-7500Hz。

第二章 高应变中的应力波理论

2.1 应力波理论的应用条件（基本假定）

(1). 桩为一维线弹性细长（长度比直径大得多—在这种情况下，横向位移对纵向运动的效应可以忽略不计）杆件。

(2). 桩身材料各向同性。

2.2 下行波与上行波

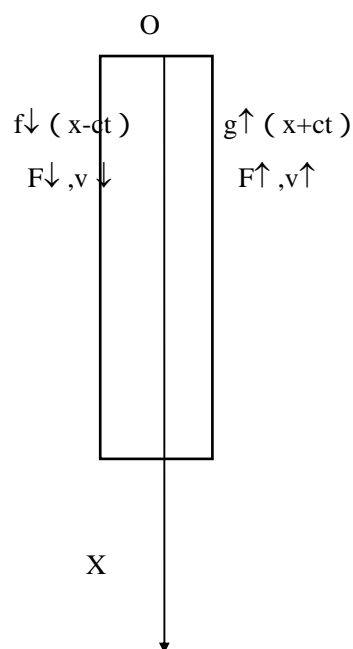


图 2.1

几个规定：

1. 杆件上端面为坐标原点 O ， X 轴向下为正。如图 2.1 所示；
2. 位移 u 、质点运动速度 V 和加速度 a 以向下为正（ X 轴正向），向上为负；
3. 桩身内力、应力 和应变 以受压为正，受拉为负。

应力波在杆件中的运动，可以用一维波动方程来描述：

$$\rho \partial^2 u / \partial t^2 = E \partial^2 u / \partial x^2 \quad \dots(2.1)$$

u 为在 x 位置处、在时间 t 时质点的纵向位移。

其达朗贝尔通解为：

$$u(x,t) = g(x+ct) + f(x-ct) \quad \dots(2.2)$$

即 u 由 g 和 f 两部分组成。

考察一下 $f(x-ct)$ 波：位移波分量 f 是指在某个时刻 t 和某个位置 x 上的物理量，由 x 和 t 决定。对于某个固定波形的位移波 $f(100)$ 来说，出现的时间和位置由 t 和 x 所决定。即： $100 = x - ct$ ， $x = 100 + ct$ 。若 $C = 5000 \text{ m/s}$ ，当 $t = 0$ 时， $x = 100$ ；当 $t = 0.002$ 秒时， $x = 110$ ；……。随着时间 t 的延长， x 值变大，意味着应力波 $f(x-ct)$ 逐渐远离原点，向下运动。因此 $f(x-ct)$ 是向下运动的波，一般称为下行波，用 $f_{\downarrow}(x-ct)$ 表示。

同样可以知道， $g(x+ct)$ 是向上运动的波，一般称为上行波，用 $g_{\uparrow}(x+ct)$ 表示。

①. 下行波 $f_{\downarrow}(x-ct)$ ：

$$v_{\downarrow} = \partial f_{\downarrow}(x-ct) / \partial t = -C f'_{\downarrow}$$

$$\varepsilon_{\downarrow} = -\partial f_{\downarrow}(x-ct) / \partial x = -f'_{\downarrow}$$

因此有： $v_{\downarrow} = C \varepsilon_{\downarrow}$

$$\text{即：} \varepsilon_{\downarrow} = v_{\downarrow} / C \quad \dots(2.3)$$

$$\text{而 } F_{\downarrow} = \varepsilon_{\downarrow} \cdot E \cdot A = (EA/C) v_{\downarrow} = Z v_{\downarrow}$$

其中波阻抗 $Z = EA/C$

$$\text{故：} F_{\downarrow} = Z v_{\downarrow} \quad \dots(2.4)$$

在下行波中，质点运动的速度方向与所受力方向始终一致。

②. 上行波 $g_{\uparrow}(x+ct)$ ：

$$v_{\uparrow} = \partial g_{\uparrow}(x+ct) / \partial t = C g'_{\uparrow}$$

$$\varepsilon_{\uparrow} = -\partial g_{\uparrow}(x+ct) / \partial x = -g'_{\uparrow}$$

$$\text{因此有：} v \uparrow = -C\varepsilon \uparrow \quad \text{.....(2.5)}$$

$$\text{而 } F \uparrow = \varepsilon \uparrow \cdot E \cdot A = - (EA/C)v \uparrow = -Zv \uparrow$$

$$\text{故：} F \uparrow = -Zv \uparrow \quad \text{.....(2.6)}$$

在上行波中，质点的运动的速度方向与所受力方向始终相反。

$$\text{总之：} F \downarrow = Zv \downarrow$$

$$F \uparrow = -Zv \uparrow$$

2.3 $v \downarrow$, $v \uparrow$, $F \downarrow$, $F \uparrow$ 与 F , v 之间关系

由于：

$$F = F \downarrow + F \uparrow$$

$$= Zv \downarrow - Zv \uparrow \quad \Rightarrow Zv = Zv \downarrow - Zv \uparrow$$

$$v = v \downarrow + v \uparrow \quad \Rightarrow Zv = Zv \downarrow + Zv \uparrow$$

上式联立，可得：

$$v \downarrow = 1/2 (v + F/Z) \quad \text{.....(2.7)}$$

$$v \uparrow = 1/2 (v - F/Z) \quad \text{.....(2.8)}$$

及

$$F \downarrow = (F + Zv) / 2 \quad \text{.....(2.9)}$$

$$F \uparrow = (F - Zv) / 2 \quad \text{.....(2.10)}$$

2.4 应力波在自由端、固定端的反射

(1). 杆件底部为自由端

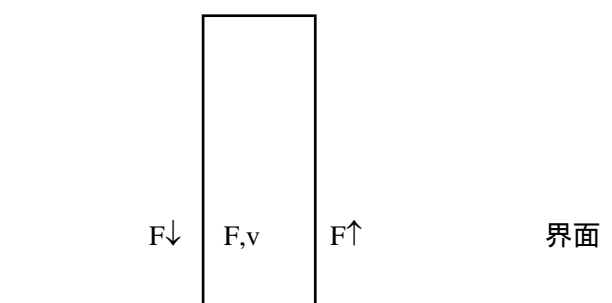


图 2.2 自由端

边界条件为：

$$F = F\downarrow + F\uparrow = 0$$

$$\text{因而：} F\uparrow = -F\downarrow \quad \text{.....(2.11)}$$

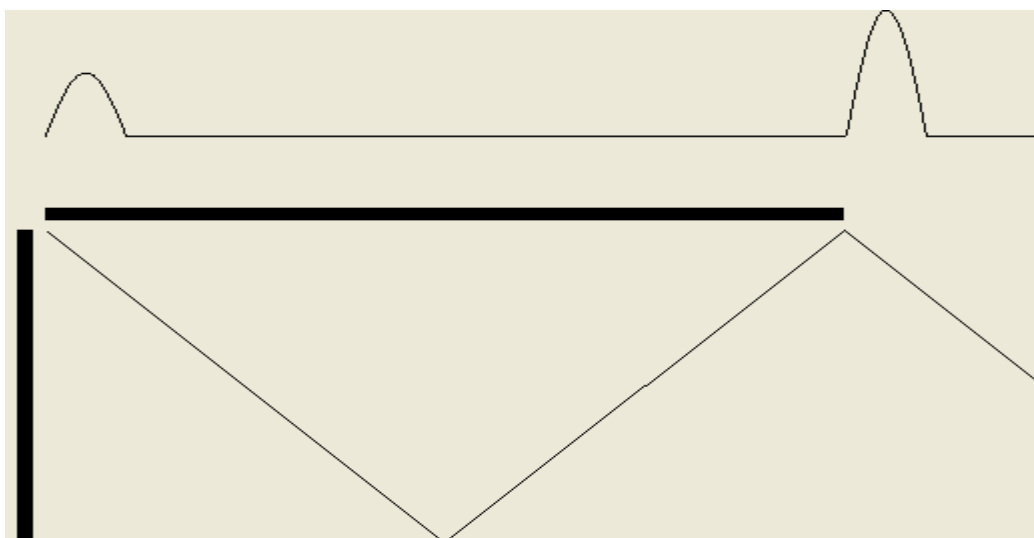
$$\text{亦即：} -Zv\uparrow = -(Zv\downarrow) \Rightarrow v\uparrow = v\downarrow$$

$$\text{因此：} v = v\downarrow + v\uparrow = 2v\downarrow \quad \text{.....(2.12)}$$

结论：

应力波到达自由端后，将产生一个性质相反、幅值相等的反射波。即压力波产生拉力反射波；拉力波产生压拉力反射波。

在杆端处，由于波的叠加，使杆端处质点运动速度增加一倍。



(2). 杆件底部为固定端

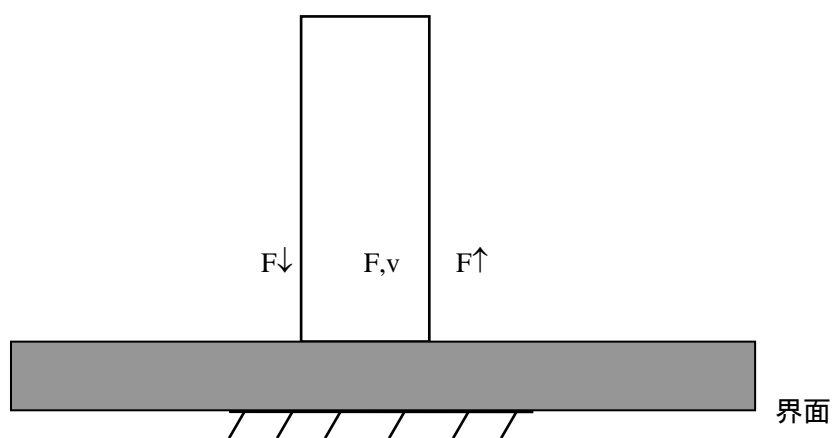


图 2.3 固定端

边界条件：

$$v = v_{\downarrow} + v_{\uparrow} = 0$$

$$\text{因而：} v_{\uparrow} = -v_{\downarrow} \quad \text{.....(2.13)}$$

$$\text{亦即：} -F_{\uparrow}/Z = -(F_{\downarrow}/Z) \Rightarrow F_{\uparrow} = F_{\downarrow}$$

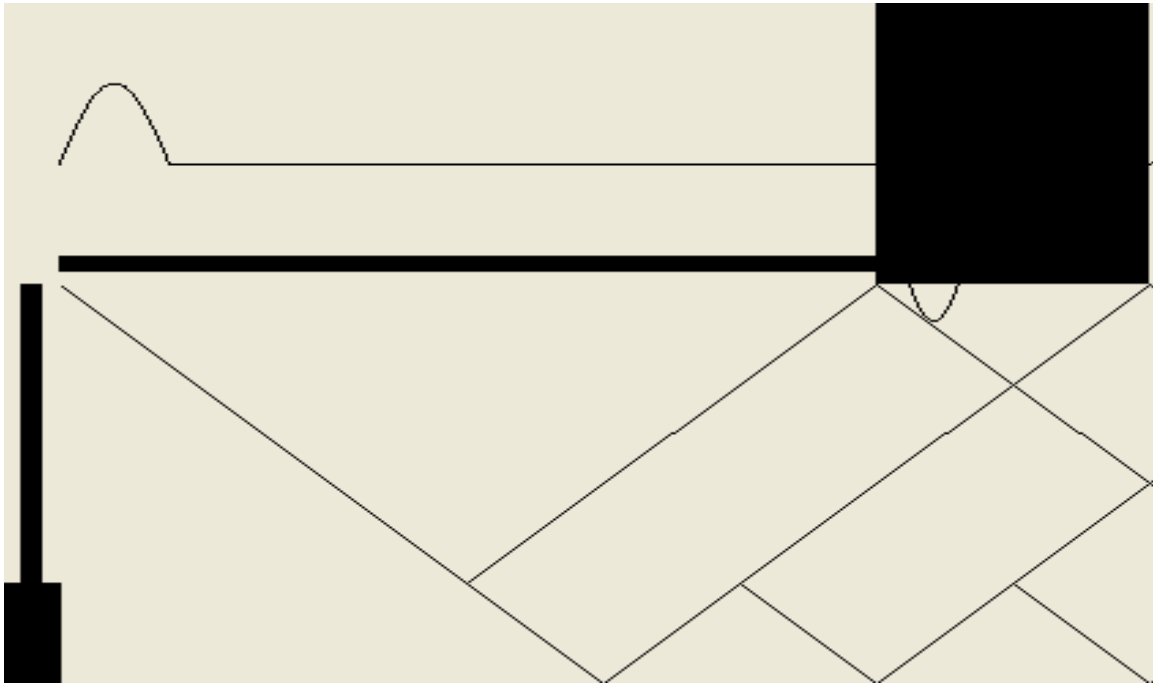
$$\text{因此：} F = F_{\downarrow} + F_{\uparrow} = 2F_{\downarrow} \quad \text{.....(2.14)}$$

结论：

应力波到达固定端后，将产生一个性质相同、幅值相等的反射波。即压力波产生压力反射波；拉力波产生拉力反射波。

在杆端处，由于波的叠加，使杆端处质点所力增加一倍。





2.5 杆件阻抗变化的反射、透射特征

(1). 杆件受到 $F1\downarrow$ 和 $F2\uparrow$ 两个应力波的共同作用(如图 2.4)

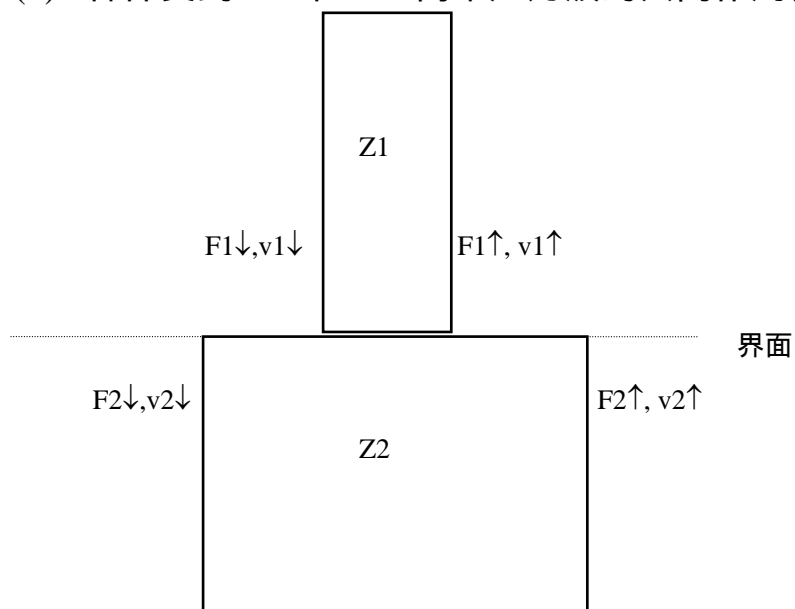


图 2.4

边界条件：根据连续性

$$F1\downarrow + F1\uparrow = F2\downarrow + F2\uparrow$$

$$v1\downarrow + v1\uparrow = v2\downarrow + v2\uparrow$$

结合： $F1\downarrow = Z1v1\downarrow$, $F2\downarrow = Z2v2\downarrow$

$$F1\uparrow = -Z1v1\uparrow , \quad F2\uparrow = -Z2v2\uparrow$$

可得：

$$F1\uparrow = (Z2 - Z1) / (Z2 + Z1) F1\downarrow + 2Z2 / (Z2 + Z1) F2\downarrow \dots\dots(2.15)$$

$$F2\downarrow = 2Z2 / (Z2 + Z1) F1\downarrow \dots\dots(2.16)$$

(2). 当仅有下行波 ($F1\downarrow$) 存在时，即 $F2\uparrow = 0$

则：

$$F1\uparrow = (Z2 - Z1) / (Z2 + Z1) F1\downarrow \quad (\text{反射波}) \quad \dots\dots(2.17)$$

$$F2\downarrow = 2Z2 / (Z2 + Z1) F1\downarrow \quad (\text{透射波}) \quad \dots\dots(2.18)$$

从式 $F1\uparrow = (Z2 - Z1) / (Z2 + Z1) F1\downarrow$ 可以推得：

①. 当桩端自由时，即 $Z2=0$ ，则

$$F1\uparrow = -F1\downarrow$$

②. 当桩端固定时，即 $Z2 \rightarrow \infty$ ，则

$$F1\uparrow = F1\downarrow$$

与 2.4 中结论一致。

反射波的大小和性质与以下因素有关：

入射波的大小和性质；

界面上下材料阻抗的大小。

2.6 土阻力波

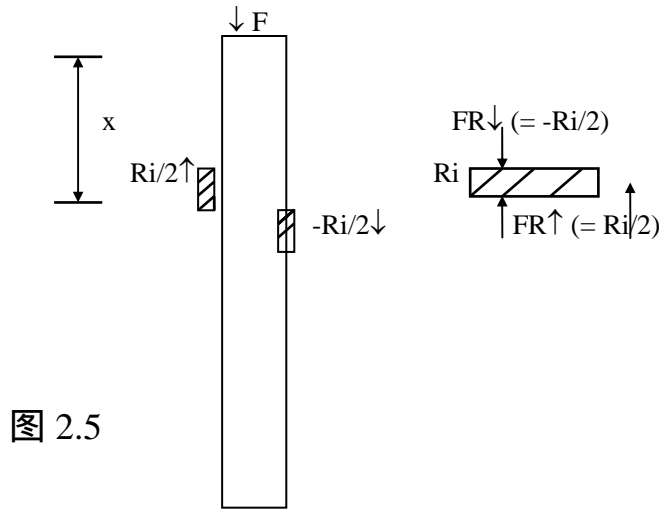


图 2.5

如图 2.5，当应力波传到 x 位置时，激发了该处的土阻力 R_i 。土阻力 R_i 分成两部分：向上传播的 FR_{\uparrow} 和 FR_{\downarrow} 。

力平衡条件为： $FR_{\uparrow} - FR_{\downarrow} = R_i$

$$v_{R\uparrow} = v_{R\downarrow}$$

由于： $v_{R\uparrow} = -FR_{\uparrow} / Z$

$$v_{R\downarrow} = FR_{\downarrow} / Z$$

$$\text{所以有： } FR_{\uparrow} = 1/2R_i \quad \dots\dots\dots(2.19)$$

$$FR_{\downarrow} = -1/2R_i \quad \dots\dots\dots(2.20)$$

结论：在桩侧土阻力作用下，桩身内部将产生一个上行的压力波和下行的拉力波。两者的幅值相等，都各等于该处土阻力值的一半。

第三章 凯 斯 法

3.1 基本假定

- (1). 桩为一维线弹性细长杆件。
- (2). 桩身材料是均质的（弹性模量 E 和桩身截面积 A 恒定）。
- (3). 土的基本模型为：总土阻力由土的静阻力和土的动阻力组成。用摩擦键和弹簧模拟土的静阻力，用阻尼壶模拟土的动阻力。土的动阻力集中在桩尖附近，并与桩尖质点的运动速度成正比。桩侧动阻力忽略不计。
- (4). 应力波在传播过程中的能量损耗，包括桩身内阻尼损耗和向桩周土中的逸散损耗，都忽略不计。

实际上(1)(2)(4)就是桩的模型；(3)是土的模型。

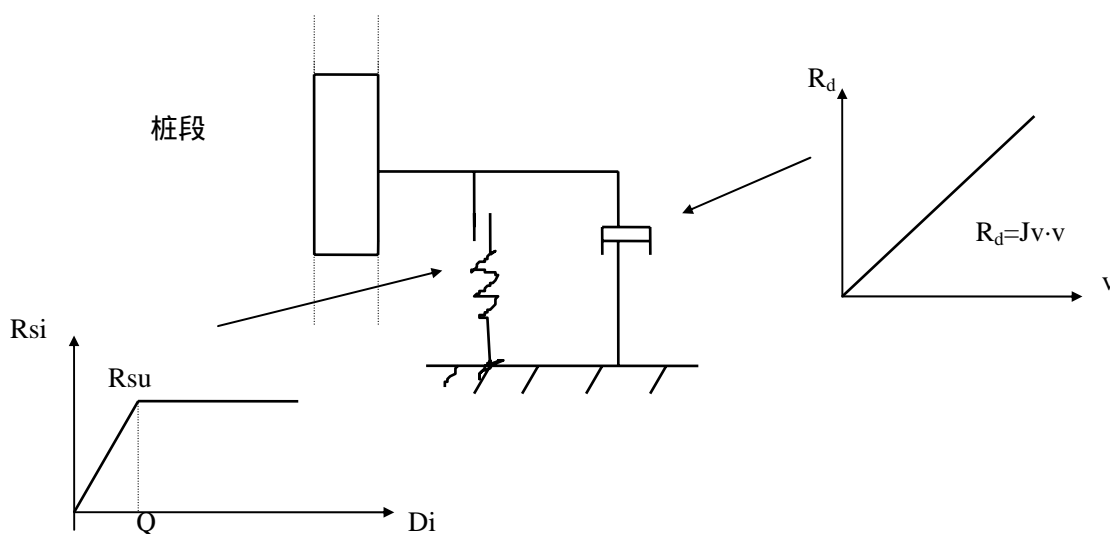


图 3.1 土的基本模型

土的基本模型为：由摩擦键、弹簧模拟土的静阻力 R_s ；由阻尼器模拟土的动阻力 R_d 。

并且有： $R_d = J_v \times v$

式中： J_v 为土的粘滞阻尼系数， $\text{kN}\cdot\text{s}/\text{m}$ 。（量纲与 Z 同）

在高应变试验中常用的阻尼系数还有：

Smith 阻尼系数 J_s , s/m ;

Case 阻尼系数 J_c , 无量纲。

它们之间的关系为：

$$J_v = R_{su} \cdot J_s = Z \cdot J_c$$

R_{su} 为土体单元的最大静阻力。

3.2 基本的凯斯法计算公式数学推导

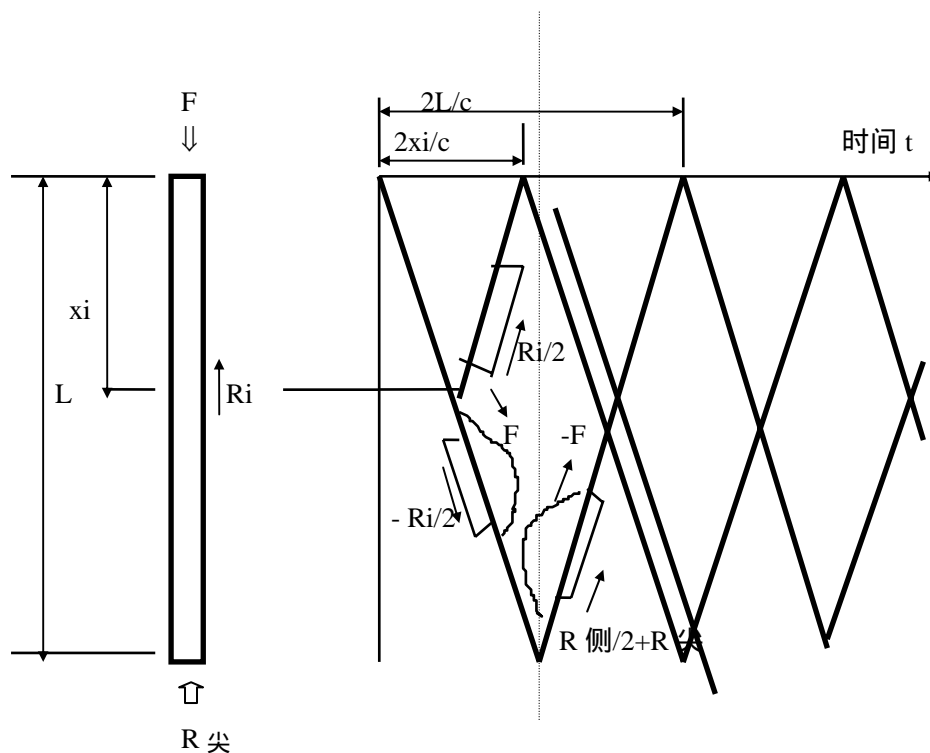


图 3.2 应力波在桩身中传播示意

公式推导的基本思路

①. 在公式推导过程中，涉及到四类波：

a. 向下传播的锤击压力应力波 $F(t)$ ；

b. 向上传播的压力土阻力波 $1/2R(i, t)$ ；

c. 向下传播的拉力土阻力波 $-1/2R(i, 2L/C)$ 。

d. 在时间为 L/C 时激发起的向上传播的桩尖压力土阻力波 $R_{\text{尖}}(L, L/C)$ ；

②. 以桩顶作为位置坐标和时间坐标的原点。

③. 向下传播的锤击压力应力波 $F(t)$ ，在桩身内作无数次的来回反射。将无数次的来回反射波叠加起来。

④. 某一位置 i 处向上传播的压力土阻力波 $1/2R(i, t)$ ，在桩身内作无数次的来回反射，将无数次的来回反射波叠加起来(对时间叠加)。

⑤. 将从桩顶到桩底不同位置各点的④中叠加波再叠加起来(对位置叠加)。

⑥. 从桩顶到桩底不同位置各点处向下传播的压力土阻力波

$-1/2R(i, t)$ ，在 $t=L/C$ 时刻同时到达桩尖(大小为 $\sum -1/2R(i, 2L/C)$

$= -R_i/2$)，该波在桩身内作无数次的来回反射，将无数次的来回反射波叠加起来(对时间叠加)。

⑦ 向上传播的桩尖压力土阻力波 $R_{\text{尖}}(L, L/C)$ ，在桩身内作无数次的来回反射。将无数次的来回反射波叠加起来。

⑧. 将③⑤⑥⑦中的三类叠加波全部叠加起来得： $F(t)$ ， $V(t)$ 表达式。

⑨ 将 $F(t)$ ， $V(t)$ 表达式在时间上取为“ $t=t+2L/C$ ”则得 $F(t+2L/C)$ ， $V(t+2L/C)$ 表达式。

考虑到 4.1 中的基本假定，将⑦⑧中的 $F(t)$ ， $V(t)$ ， $F(t+2L/C)$ ， $V(t+2L/C)$ 表达式作适当的数学处理，即可得到凯斯法计算总土阻力的基本公式：

$$\begin{aligned} R_{\text{总}} &= 1/2[F(t_1) + F(t_1 + 2L/C)] + Z/2[v(t_1) - v(t_1 + 2L/C)] \\ &= 1/2[F(t_1) + Zv(t_1)] + 1/2[F(t_1 + 2L/C) - Zv(t_1 + 2L/C)] \\ &= F_{\downarrow}(t_1) + F_{\uparrow}(t_1 + 2L/C) \end{aligned}$$

..... (3.1)

3.3 求取静土阻力 R_s

总土阻力由两部分叠加而组成：一是在静载荷试验中所表现出的土的静阻力 R_s ，一部分为由于桩身运动而产生的附加的土的动阻力 R_d 。即： $R_{总}=R_s+R_d$ 。

因此 $R_s=R_{总}-R_d$

由 4.1 中的基本假定可知：土的动阻力 R_d 集中在桩尖附近，并与桩尖质点运动速度 V_b 成正比。即

$$R_d=J_v \cdot V_{尖}=Z \cdot J_c \cdot V_{尖} \quad \dots\dots\dots (3.2)$$

式中： J_v 为桩尖处土的粘滞阻尼系数， $kN \cdot s/m$ 。

J_c 为桩尖处土的 Smith 阻尼系数，无量纲。

J_v 与 J_c 有关系： $J_v=Z \cdot J_c$

求取桩尖质点运动速度 $V_{尖}$ ：

将桩尖看作是一个自由端，桩尖土阻力作为一个附加阻力。在 $t=L/C$ 时刻（此时锤击冲击力到达桩尖，桩尖处质点的运动速度 $V_{尖}$ 最大），影响桩尖处质点的运动速度 V_b 的因素有：

①. 由向上传播的锤击压力 $F(t_1)$ 在桩尖处所激发产生的质点运动总速度 $V_{尖1}$ 为： $V_{尖1} = [2 F(t_1)] / Z \quad \dots\dots (3.3)$

②. 由向上传播的拉力桩侧土阻力 $-1/2R_{侧}$ 在桩尖处所激发产生的质点运动总速度 $V_{尖2}$ 为：

$$V_{尖2} = - [2 \cdot (1/2 R_{侧})] / Z = -1/Z \cdot R_{侧} \quad \dots\dots\dots (3.4)$$

③. 由向上传播的压力桩尖土阻力 $R_{尖}$ 在桩尖处所激发产生的质点运动总速度 $V_{尖3}$ 为： $V_{尖3} = -1/Z \cdot R_{尖} \quad \dots\dots\dots (3.5)$

将①②③三部分进行叠加，则有：

$$\begin{aligned}
 V_{\text{尖}} &= V_{\text{尖}1} + V_{\text{尖}2} + V_{\text{尖}3} \\
 &= 1/Z [2 F(t_1) - \underline{R_{\text{侧}} - R_{\text{尖}}}] \\
 &= 1/Z [2 F(t_1) - \underline{R_{\text{总}}}] \quad \dots\dots (3.6) \\
 &\quad (\text{其中 } \underline{R_{\text{总}} = R_{\text{侧}} + R_{\text{尖}}})
 \end{aligned}$$

将式 (4.6) 代入式 (4.2) 可得：

$$\begin{aligned}
 R_d &= Z \cdot J_c \cdot V_{\text{尖}} \\
 &= Z \cdot J_c \cdot \{1/Z [2 F(t_1) - \underline{R_{\text{总}}}] \} \\
 &= J_c [2 F(t_1) - \underline{R_{\text{总}}}] \quad \dots\dots (3.8)
 \end{aligned}$$

因此有：

$$\begin{aligned}
 R_s &= R_{\text{总}} - R_d \\
 &= R_{\text{总}} - J_c [\underline{2 F(t_1)} - \underline{R_{\text{总}}}] \\
 &= (1 + J_c) R_{\text{总}} - J_c [\underline{F(t_1)} + \underline{Z V(t_1)}] \quad \dots\dots (3.9) \\
 &\quad (\text{其中 } \underline{F(t_1) = Z V(t_1)})
 \end{aligned}$$

将 (4.1) 代入 (4.9)，并整理得：

$$\begin{aligned}
 R_s &= 1/2(1 - J_c) [F(t_1) + Z V(t_1)] + 1/2(1 + J_c) [F(t_1 + 2L/C) - Z V(t_1 + 2L/C)] \\
 &= (1 - J_c) F_{\downarrow}(t_1) + (1 + J_c) F_{\uparrow}(t_1 + 2L/C) \\
 &\quad \dots\dots (3.10)
 \end{aligned}$$

式 (4.10) 就是计算单桩承载力的基本公式。

3.4 凯斯法中几种确定承载力的计算方法

在公式（3.10）的单桩承载力的基本计算公式中，需要人为选择的参数有两个：一个是 t_1 时刻的选择；另一个是凯斯阻尼系数 J_c 的选择。不同具体情况下，有着各自合适的参数选择方法，亦即产生不同的计算方法。

3.4.1. 阻尼系数法（ R_{sp} 法）

在（3.10）的单桩承载力的基本计算公式中，阻尼系数法一般是选取 $F \sim V$ 实测曲线中速度峰值所对应的时刻为 t_1 时刻。在实测曲线中，在起始阶段，通常速度曲线只有一个明确的峰值。但有时也会出现靠得很近的双峰，此时一般选择较高速度峰值所对应的时刻为 t_1 时刻。

3.4.1.1. 不同的 t_1 时刻选择对计算结果的影响

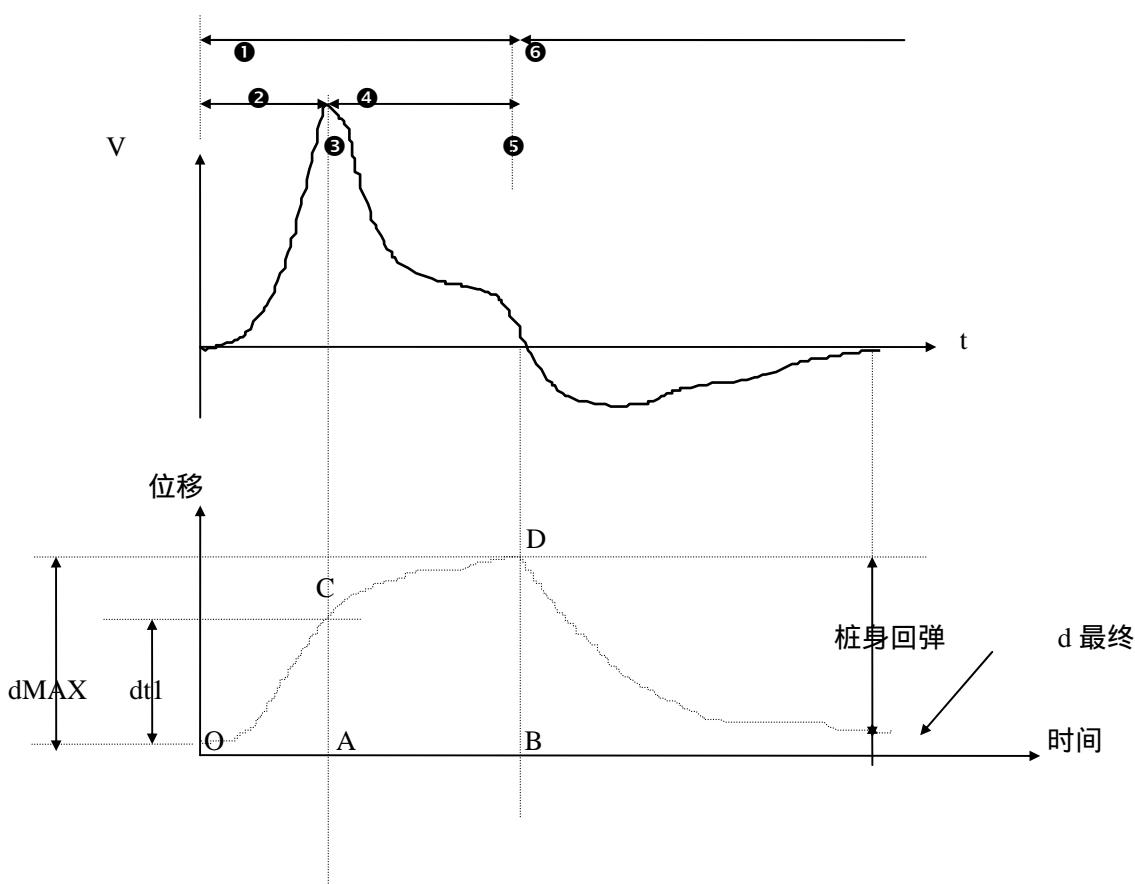


图 3.2 动位移与速度的关系

(1). 动位移与速度的关系：

$$v = dd / dt$$

$$d = \int v dt$$

(2). 从速度曲线推断动位移曲线

依据速度曲线上起始上升、峰值、下降、零值、正值、负值，将速度曲线划分成 6 个区段，如图 3.2 所示。

①. 速度是动位移的变化率，速度值为正，说明动位移在增大。如图 3.2 中速度曲线①区段及位移曲线的 OD 段；

②. 速度值逐渐增大（值始终大于零）时，动位移的增大变化趋势越来越快（动位移曲线的斜率为正，且较大）。如图 3.2 中速度曲线②区段及位移曲线的 OC 段；

③. 速度值减小（但值始终大于零）时，动位移的增大变化趋势越来越小（动位移曲线的斜率为正，但变小）。如图 3.2 中速度曲线④区段及位移曲线的 CD 段；

④. 速度值最大时刻，是动位移变化率最大的时刻（动位移曲线的斜率最大），但不是动位移最大时刻（ $dt_1 < d_{MAX}$ 或 $AC < BD$ ）。如图 3.2 中速度曲线⑤点及位移曲线的 C 点；

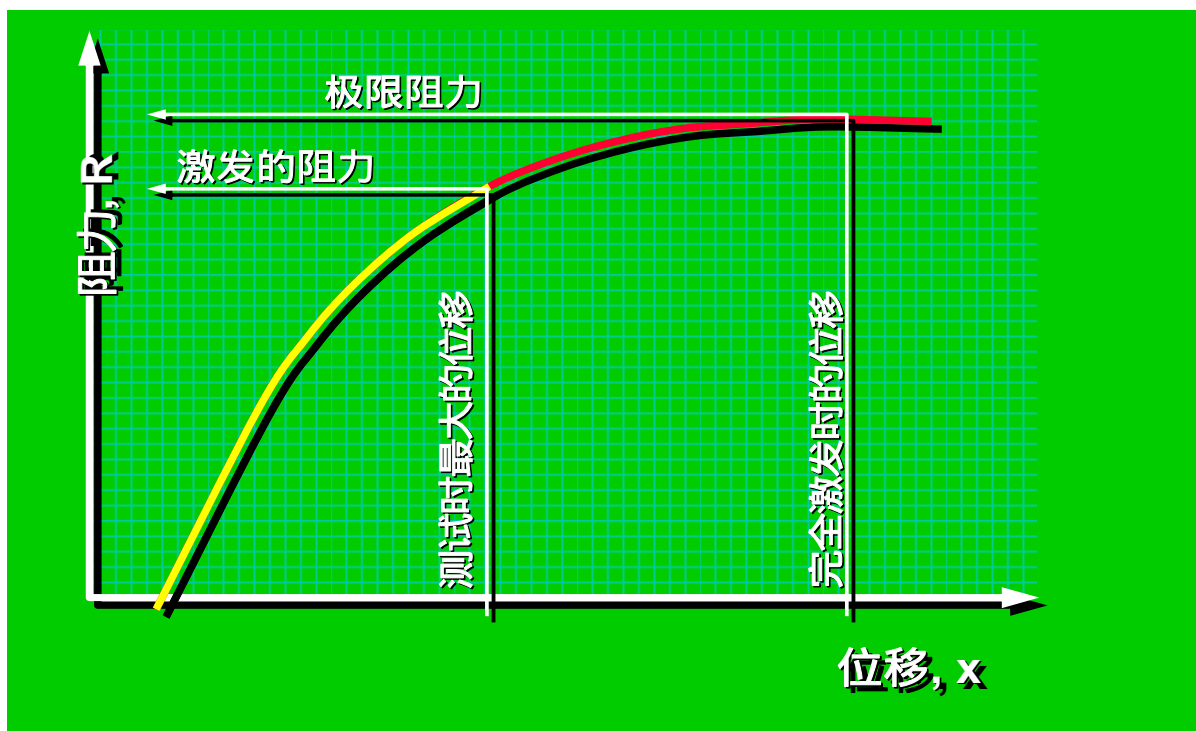
⑤. 当速度为零时，动位移变化率为零（动位移曲线的斜率为零），此时动位移达到最大值（ d_{MAX} 或 BD），如图 3.2 中速度曲线⑥点及位移曲线的 D 点；

⑥. 当速度值为负时，动位移在减小。如图 3.2 中⑦区段；

⑦. 当速度由负值变为零时，动位移变化率为零（动位移曲线的斜率由负变为零），动位移量不再减小，而保持恒定。此时保持不变的动位移量 d 最终可认为是桩身最终贯入度； d_{MAX} 与 d 最终之差就是桩身回弹量。

由此可见：1) 在其它条件相同的情况下（ F ），缓升的 V 曲线应该具有较大的 d_{MAX} 与 d 。低频的锤击力能激发更大的土阻力。

2) 取 t_1 时刻时，由于较大端阻力会延迟， t_1+2L/C 时刻的计算值并非最大，故计算的 R_s 值可能会偏低。同时取 t_1 时刻对应的最大位移量可能不是足够大，所激发的土阻力可能也稍低。



(3). 不同的 t_1 时刻选择对计算结果的影响

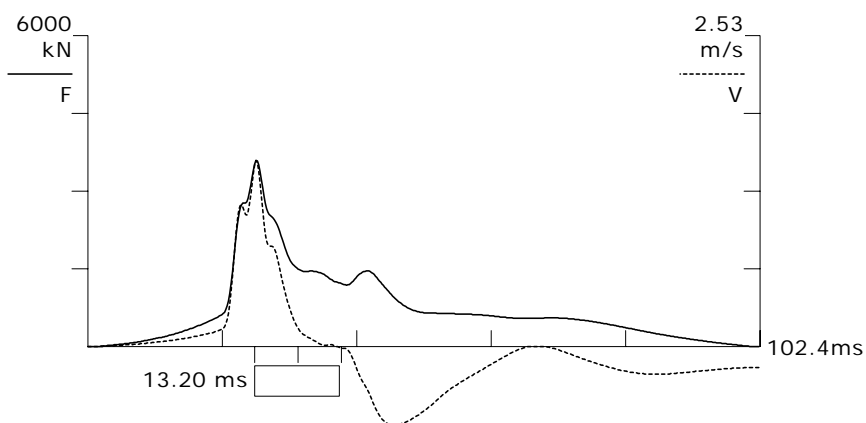
在我国，绝大多数高应变动测工程师都习惯于采用阻尼系数法，即认为在速度峰值时刻，所计算的静土阻力为极限承载力。优点在于速度峰值所对应的 t_1 时刻比较容易确定。

事实上，在以下情况下，由于端阻力的后延，采用阻尼系数法计算结果就会偏低：

- ①. 大直径的排土桩（ Q 值较大）；
- ②. 高锤击数难以贯入的桩（ Q 值较大）；
- ③. 端承桩（ Q 值较大）；

④. 桩尖存在一定厚度沉渣的钻孔灌注桩 ($R_{\text{尖}}$ 滞后)。

高 Q 值现象在 F ~ V 实测曲线上往往表现出 : $R_{\text{尖}}$ 较大 ,且滞后于 $2L/C$ (在 $2L/C$ 之后有崛起的高峰)。



3.4.1.2 阻尼系数法中凯斯阻尼系数 J_c 取值

一般认为：凯斯阻尼系数 J_c 主要与桩尖土的性质有关。根据新的上海市工程建设规范《建筑基桩检测技术规程》（DGJ08-218-2003 J10287-2003），凯斯阻尼系数 J_c 取值如表 3.1 所示。

表 3.1 凯斯阻尼系数 J_c 参考值

土的类型	阻尼系数
中砂、细砂	0.10 ~ 0.20
粉砂	0.20 ~ 0.40
粉土	0.30 ~ 0.50
粘性土	0.40 ~ 1.0

土的颗粒越细， J_c 取值越大。

3.4.2 负阻力补偿法 (R_{su} 法)

动测时, 如果桩身较长或桩难以贯入 (贯入度很小), 桩身的上部就有可能早于 $2L/C$ 时刻产生向上的反弹运动, 作用在这些桩段上的土阻力因而将反方向加到桩身上。

1 长桩。当锤击力波下行到桩身下部时, 上部某质点由锤击力产生的向下运动速度已经很小, 若此时上行的 $1/2R_{\text{侧}}$ 较大, 与该位置剩余的锤击力叠加, 会使该质点的 $V < 0$ 。也即此时的质点运动速度向上, 就会产生向下的土阻力, 即负摩阻力。

2 难以贯入的桩。由于桩难以贯入, 由锤击力产生桩身质点的运动速度本来就比较小, 而一般来说桩侧土阻力会比较大。当锤击力波下行到桩身下部时, 较大的上行的 $1/2R_{\text{侧}}$, 与该位置剩余的锤击力叠加, 会使该质点的 $V < 0$ 。也即此时的质点运动速度向上, 就会产生向下的土阻力, 即负摩阻力。

表现在实测曲线上, 就是在 t_1+2L/C 之前, 速度为负值。

产生的负摩阻力与实际的桩侧土阻力叠加, 会使得实测信号中的土阻力比真正的桩侧土阻力要小。这时, 凯斯法总土阻力计算公式所得的总土阻力 $R_{\text{总}}$ 中将有部分阻力相互抵消而使得其结果比实际情况低, 必须予以补偿。因而必须进行修正, 方法如下。

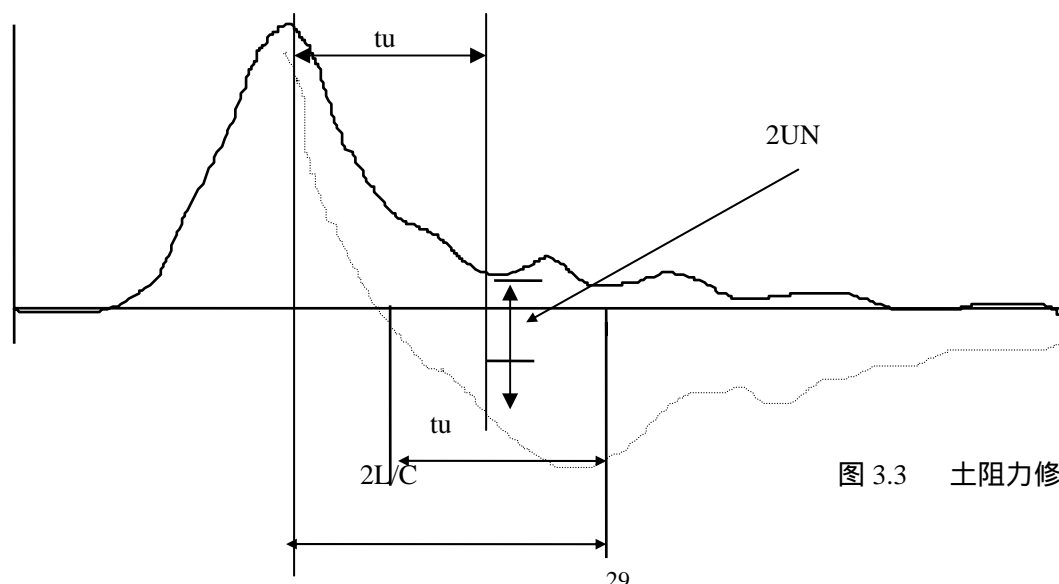


图 3.3 土阻力修正示意图

如图 3.3 所示，计算出补偿阻力 U_N ，将起叠加到 $R_{总}$ 得：

$$R'_{总} = R_{总} + U_N$$

在阻尼系数法计算公式中，用 $R'_{总}$ 代替 $R_{总}$ ，代入公式(3.9)中计算出的静土阻力用 R_{su} 表示。

3.4.3 最大土阻力法 (RMAX 法)

公式(3.10)计算土的静阻力中， t_1 时刻的选择可以是任意的。在保持 $2L/C$ 时间段长度不变的情况下， t_1 时刻选择从速度峰值相对应的时刻向后延时，不断进行计算，其中最大的静土阻力就是 RMAX。经验表明：由最大土阻力法计算所得承载力偏高。因此在采用这种方法计算时，所取用的凯斯阻尼系数要比表 4.1 中的取值人为的增大 0.2，而且不应小于 0.4，以适当增大动土阻力，减低静土阻力。

应用范围 :前面 3.4.1.1 阻尼系数法(3)中所述 4 种不适用于阻尼系数法的桩（即大的最大弹性形变量 Q ）及起始段上升时间很短土阻力来不及充分发挥的桩，在有经验的情况下，也可采用本计算方法。

4.4.4 自动算法 (RAU 法)

为了避免由于凭经验设定 J_c 而带来的计算误差，在不考虑桩测土阻力的情况下，自动算法自动消除土的动阻力而直接求得土的静阻力。

即：
$$R_s = R_{总} - R_d$$

当 $R_d=0$ 时

$$R_s = R_{总}$$

而土的动阻力 $R_d = Z J_c V_{尖}$ ，所以若 $V_{尖}=0$ ，则 $R_d=0$ 。

由式 (3.6)

$$R_d = J_c [2F_{\downarrow}(t_1) - R_{总}] \quad \dots\dots (3.11)$$

由式 (3.1)

$$R_{\text{总}} = F_{\downarrow}(t_1) + F_{\uparrow}(t_1 + 2L/C)$$

代入 (3.1) 得

$$\begin{aligned} R_d &= J_c[2F_{\downarrow}(t_1) - R_{\text{总}}] \\ &= J_c[F_{\downarrow}(t_1) - F_{\uparrow}(t_1 + 2L/C)] \end{aligned}$$

因此, 若 $R_d = 0$

$$\text{必须 } F_{\downarrow}(t_1) = F_{\uparrow}(t_1 + 2L/C) \quad \dots (3.12)$$

公式 (3.12) 告诉了我们判断 $R_d = 0$ 的方法: 即在 F_{\downarrow} 、 $F_{\uparrow} \sim t$ 曲线上, 如果上行波在 $t_1 + 2L/C$ 的值与下行波在 t_1 的值相等的话, 则 $R_d = 0$, 如图 3.4 所示。

由于 $V_{\text{尖}} = 0$, 所以此时应该为端承桩。

RAU 法计算时, 基本不考虑桩侧阻力, 主要适用于端阻力为主的桩 (桩尖速度为零)。

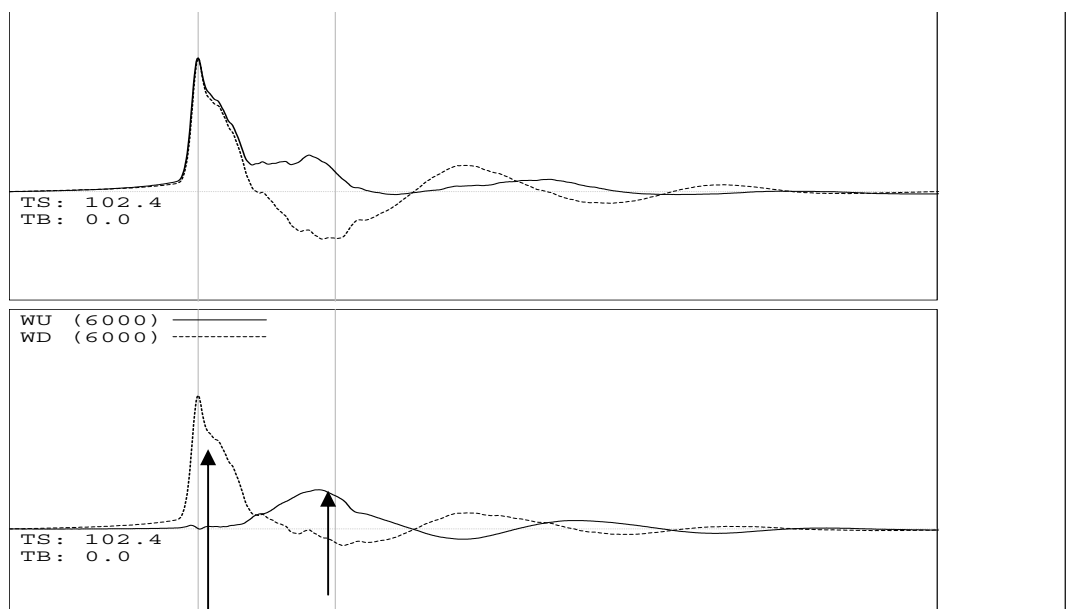


图 3.4 判断 $R_d = 0$ 的方法

3.5 高应变动测桩身结构完整性判断

3.5.1 表达式

高应变动测桩身结构完整性是用完整性系数 β 表示。 β 定义为下上两个截面的波阻抗 Z_2 、 Z_1 之比。即 $\beta= Z_2/Z_1$

在目前的高应变动测仪器中，完整性系数 β 都可以自动计算出。

3.5.2 完整性判断标准

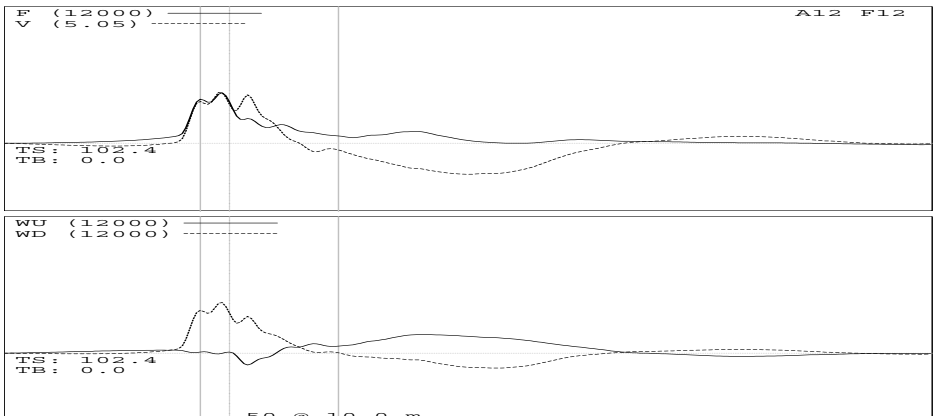
根据新的上海市工程建设规范《建筑基桩检测技术规程》(DGJ08-218-2003 J10287-2003)，完整性判断标准如表 4.2 所示。

表 3.2 桩身完整性判定表

被测截面处的 β 值	缺陷程度	桩身完整性类别
1.0	无缺陷	I
0.8 $\beta < 1.0$	轻度缺陷	II
0.6 $\beta < 0.8$	明显缺陷	III
$\beta < 0.6$	严重缺陷	IV

3.5.3 缺陷位置 x

对应于缺陷位置 X 的时间 t ，则 $X=Ct/2$ (3.13)



3.6 打桩锤击压应力和拉应力检测

1. 最大锤击压应力

对于一般的摩擦桩：最大锤击压应力位于桩头附近，其值为桩头处最大锤击压力除以桩身截面积。

对于端承桩：最大锤击压应力位于桩尖，其值为桩头处最大锤击压力的 2 倍除以桩身截面积。

2. 最大锤击拉应力

对于一般的摩擦桩，桩顶锤击力以压力波的形式向下传播，到达桩底反射为拉力波，在时刻 t_1+2L/C 返回到传感器处，根据公式(2.10)其值可以直接从 F 、 V 曲线计算得到，大小为：

$$F^{\uparrow}(t_1+2L/C) = [F(t_1+2L/C) - ZV(t_1+2L/C)] / 2$$

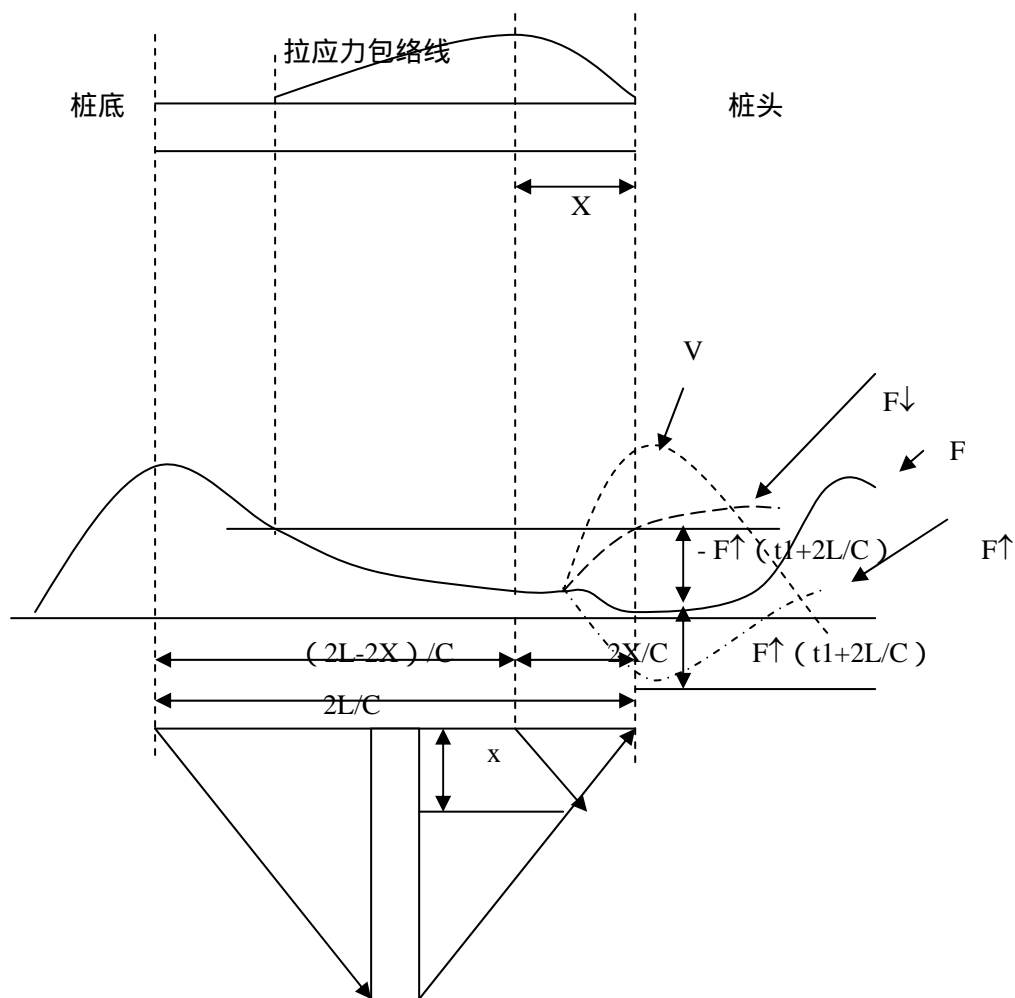
考虑到桩侧和桩端的比较小时，该拉力与下行压力波的尾部叠加，就得到桩身中某处出现的净拉应力。最大拉应力的大小为：

$$= \min (F^{\uparrow}(t_1+2L/C) + F^{\downarrow}(t_1+(2L-2x)/C)) / A \quad 0 \\ t_1 < t < t_1+2L/C$$

$$\text{或：} \quad = (F(t_1+2L/C) - ZV(t_1+2L/C) + F(t_1+(2L-2x)/C) + ZV(t_1+(2L-2x)/C)) / 2A$$

x —传感器安装位置到计算点的距离

A —桩身截面积



桩身拉应力计算示意图

3.7 凯斯法小结

(1). 必须重视凯斯法的应用条件

①. 高应变试验只适用于弹性杆件。对于搅拌桩、粉喷桩之类塑性桩，应力波传播不符合一维波动方程使用条件，不能进行高应变试验。

②. 桩必须是细长杆件。高应变研究应力波的纵波，当桩的长度比其截面直径大得多时（一般细长比应大于 ），横向位移对纵向运动的效应可以忽略不计。在这种条件下才能应用应力波理论。那些象圆桶状的桩，进行高应变试验是不合适的。

③. 桩身材料必须均匀单一。对于复合型桩只能进行曲线拟合计算。

(2). 凯斯法的优点

①. 计算简单，在选取了 t_1 时刻和凯斯阻尼系数后，就可得出承载力值。

②. 计算速度快、可提供的参数多，可作实时分析，进行打桩监测。

完整性检测/定量计算：长桩/多缺陷桩/多接头预制桩/预制桩接头脱开情况下的完整性判断。

(3). 凯斯阻尼系数 J_c 的选择

在凯斯法承载力计算公式中，真正需要人设定的参数只有凯斯阻尼系数 J_c 。

凯斯阻尼系数 J_c 物理意义：桩尖处持力土层的凯斯阻尼系数 J_c ，主要取决于土层的颗粒细度。

粘滞阻尼系数 J_v 只与土的性质有关。由于 $J_c = J_v / Z$ ，所以 J_c 就不仅与土的性质有关，还与桩的情况有关。

事实上，为了使计算公式简化，凯斯法在公式推导前作了一些假定，通常这些假定与实际情况是不相符的，为满足计算结果的精度，就将这些不相符的影响都反映到凯斯阻尼系数 J_c 中去。凯斯阻尼系数 J_c 无量纲，实际就成了一个经验系数。

凯斯阻尼系数 J_c 的取值方法：

①. 由表 3.1 根据桩尖处持力土层性质选取。

②. 通过与曲线拟合计算结果对比而获得。

③. 通过与静载荷试验结果对比而获得。

第四章 高应变试验现场实测

4.1 几个基本概念

1. 基桩的高应变法动测试验

是指采用重锤冲击桩顶，使桩周土产生塑性变形，实测桩顶附近所受力和速度随时间变化规律，通过应力波理论分析得到桩土体系有关性状。

(1) 重锤：

指相对于所试验桩的极限承载力而言具有一定重量的锤。

重锤选择：

①. 根据上海市工程建设规范《建筑基桩检测技术规程》(DGJ08-218-2003)，
“...锤重应不小于预估单桩极限支承力的 1.5%”。

②. 作波动方程分析 (WEAP 程序)，选择锤重、落高和垫层材料等。

目的：是为了保证试验具有足够大的锤击能量，使得桩周土产生塑性变形，又不把桩头打坏。

(2). 土体塑性变形：

根据土体在受外力作用下应力～应变关系曲线（如图 6.1 所示），随着作用力的逐渐增大土体由弹性状态逐渐向塑性状态转变，当作用力增大至某一极限值时，土体进入塑性状态。因此桩周土进入塑性状态时，动测试验所得承载力才为极限承载力。

根据试验，土体进入塑性状态前的弹性形变量，即最大弹性形变量（quake 值）一般为 1 英寸（2.54mm）。因此动测试验一般要求锤击过程中，桩的贯入度大于 2.5mm/击。但单击贯入度也不是越大越好。若单击贯入度太大，则总承载力中动阻力所占比重过大，会降低静阻力计算的精度。考虑到上海地区桩的特殊性（长桩、大直径、承载力要求高）和动测试验的实际情况，上海市工程建设规范《建筑基桩检测技术规程》(DGJ08-218-2003)，
“单击贯入度宜控制在 2mm～6mm”。

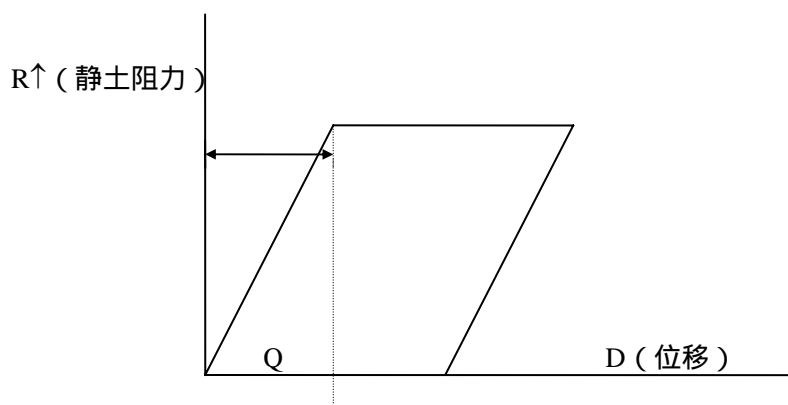


图 4.1. 静土阻力 ~ 位移关系

2 单桩极限承载力

(1). 静载荷试验中的单桩极限承载力

通常所谓的“单桩极限承载力”都是相对传统的静载荷试验而言的。

根据中华人民共和国行业标准《建筑桩基技术规范》(JGJ 94-94)第 2.1 条,“单桩竖向极限承载力—是指单桩在竖向荷载作用下到达破坏状态前或出现不适于继续承载的变形时所对应的最大荷载。它取决于土对桩的支承阻力和桩身材料强度,一般由土对桩的支承阻力所控制,对于端承桩、超长桩和桩身质量有缺陷的桩,可能由桩身材料强度控制。”

(2). 动测试验中的单桩极限承载力

动测试验中的单桩极限承载力是指地基土对桩的极限支承力。当试验过程中桩身屈服时,其承载力应视具体情况综合判定。

动测试验中的单桩极限承载力是指在满足桩身强度前提下的地基土对桩的极限支承力。

3. 高应变动测试验的功能

(1). 确定单桩竖向承载力。采用实测曲线拟合分析时，可以得到桩侧与桩尖土阻力分布，模拟静载荷试验的 $P \sim S$ 曲线。

(2). 检测桩身结构完整性，判断桩身缺陷程度及缺陷位置。

(3). 对于打入桩，还有进行打桩监控：

①. 打桩时实时检测桩身应力、传递能量、桩锤效率。

②. 选择合理的桩型和桩长。

4 高应变动测试验的资料分析方法

(1). Case (凯斯) 法

(2). 曲线拟合法

4.2 锤重的选择

见 6.1 节。

4.3 桩垫材料的作用与选择

(1). 作用

①. 限制、减缓锤对桩头的压应力。

②. 让冲击荷载均匀分布在桩顶平面上。

(2). 选取

可选用纤维板、石棉板、工业毛毡等；禁用橡胶皮（侧向变形大，会拉裂桩头）。

钻孔灌注桩试验时，简单实用的桩垫材料就是纤维板 and 黄砂。

装



4.4 传感器的安





(1). 距离

离开桩顶的距离一般不宜小于 $2D$ (D 为桩身截面直径), 在任何情况下, 都不得小于 1 倍桩径。

原因: ①. 避免应力集中, 使所数据更具代表性。

②. 避免桩头破损时, 损坏传感器。

(2). 位置

传感器应处于同一桩身截面, 并呈对称布置。

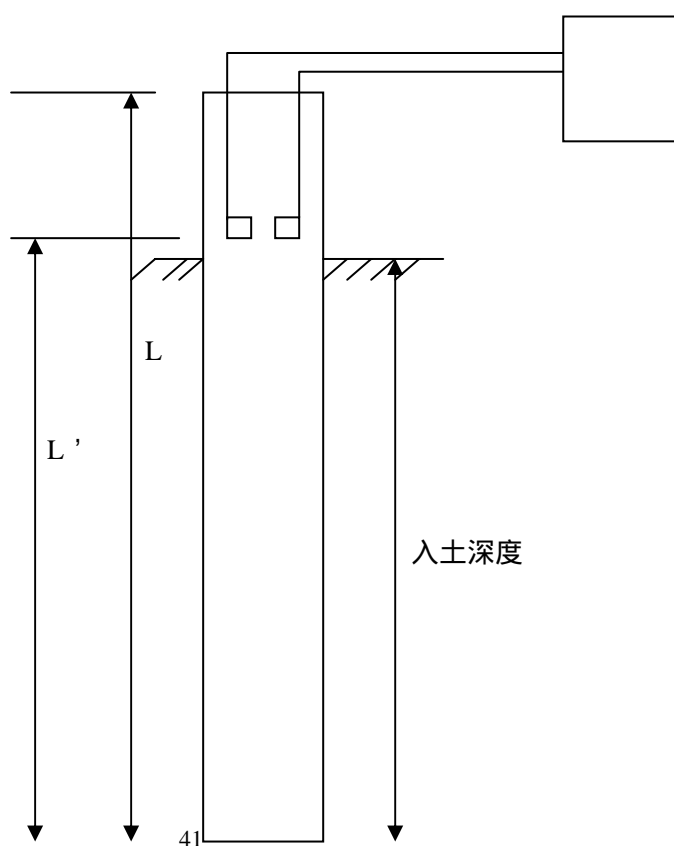
原因: 主要是消除锤击偏心的影响。

(经验表明: 锤击偏心时, 两边两个加速度的值相差不大; 但两边两个力值相差明显。由此可知, 在实测时, 选用加速度传感器作为触发传感器较好)

4.5 参数的选用

1 桩长

在动测试验中, 桩的总长 L 必须是已知的。高应变动测现场试验打桩分析仪中所输入桩长必须是传感器以下到桩尖的长度 L' 。



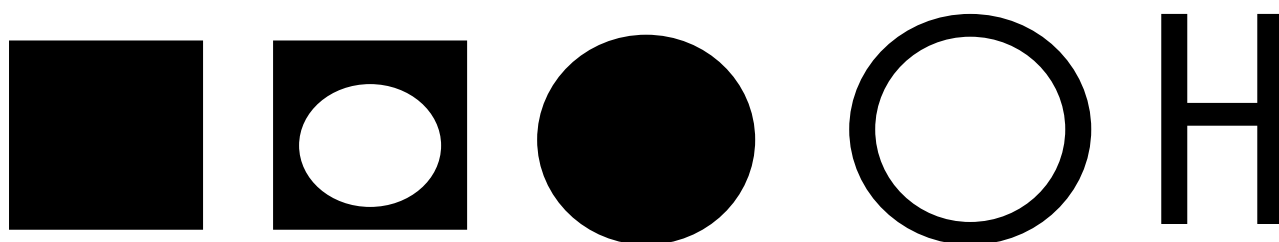
2 桩身有效截面积的确定

(1). 实心桩（钻孔灌注桩、预制方桩）

桩身截面积实心部分的面积。

(2). 管桩（钢管桩、预应力钢筋混凝土管桩）

桩身截面积就是其壁的面积。



3 传感器截面处桩身材料的波速 C_m 、弹性模量 E_m 的确定

(1). 经验法

根据以往经验确定传感器截面处桩身材料的波速 C_m 、弹性模量 E_m 。

(2). 计算法

弹性模量 E_m 和波速 C_m 有公式： $E_m = \gamma C_m^2 / g$ ，在实际试验中，一般是先确定了波速 C_m ，再计算弹性模量 E_m 。目的是为了计算出截面处所受内力 F_m 。

$$F_m = A_m \cdot E_m \cdot \varepsilon_m(t) \quad \dots\dots(4.14)$$

如果传感器截面处桩身材料的波速 C_m 设定不准，计算的内力以及随后所有的计算结果就都有一定误差。这个问题在实测时可以通过一定的校核和修正得到改善，但一般不能完全解决。

4. 平均波速 C 的确定

一般来说，钢管桩的材料是比较均匀的；但混凝土桩则不然，可能一节混凝

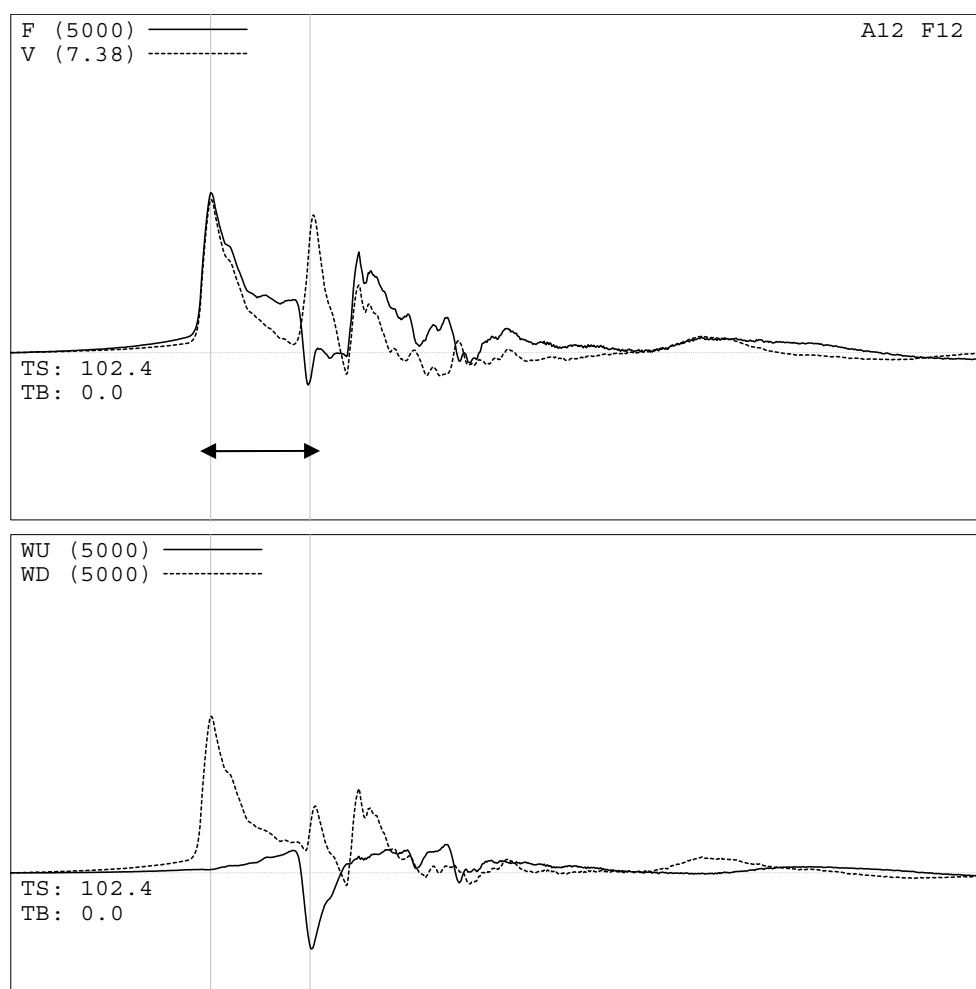
土桩桩的上下各个截面处的波速都不一定相等。同样材料，不同长度的桩的平均波速也可能不同。

在采用公式(3.1)计算土阻力时，式中的波速 C 是应力波在桩身中来回传播的速度，是平均波速。

平均波速 C 主要用于计算时间 $T=2L/C$ 。

平均波速 C 的确定方法：

①. 当土阻力较小时，可以采用“峰～峰”法进行计算。



②. 当土阻力较大，特别是桩尖土阻力较大时，采用“峰～峰”法计算误差

很大（由于 Q 值较大，桩尖土阻力的峰值向后延迟，采用“峰~峰”法时，所取用的 ' $2L/C$ ' 较真正的 $2L/C$ 要大），此时应采用上行波下行波的“起跳点法”。

③. 当桩尖反射不明显时，应采用上行波下行波的“起跳点法”。

如图 4.5 所示。

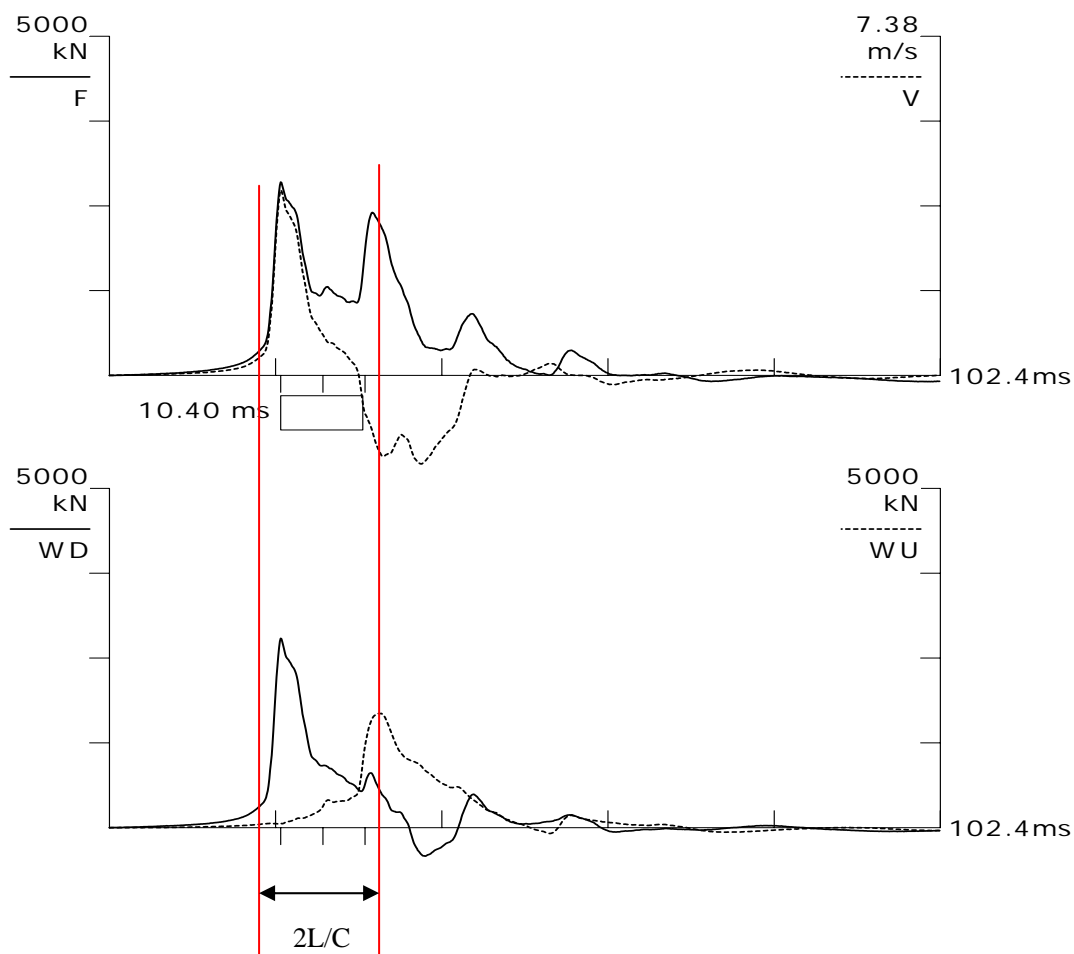


图 4.5 平均波速的确定

4.6 资料的初步分析

1 正常实测曲线的基本特征

- (1). 曲线基本光滑，无高频振动。
- (2). 与相邻锤击信息相比，曲线形态稳定，即具有较好的一致性（虽然锤子落高、土阻力发挥不同，但曲线形态应相似）。
- (3). 在曲线起始段（tr），F、V 曲线重合。
- (4). 在曲线尾部，F、V 曲线归零（取样时间至少 100ms）。F、V 不归零，说明传感器位置可能有塑性形变--如开裂等。
- (5). 一般 F、V 峰值应基本相等。
- (6). 在 $0 < t < 2L/C$ 时间段，F、V 曲线应逐渐分离，并成比例关系。

典型的实测曲线如图 4.6 所示。

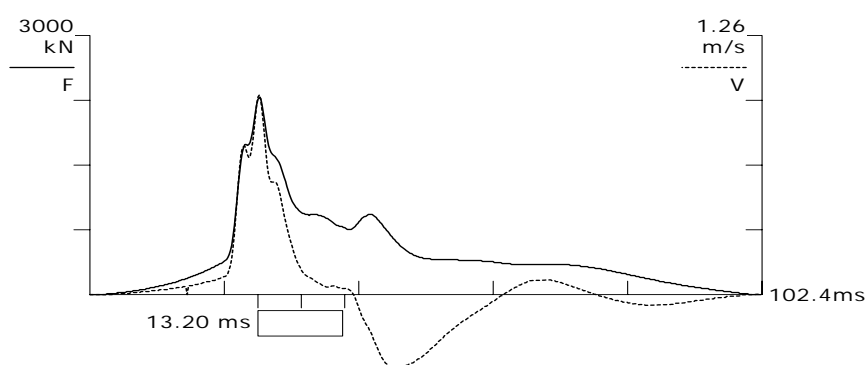


图 4.6 典型的实测曲线

2 计算用曲线选取的基本原则

(1) 初打打入桩

- a. 具有较好一致性的正常曲线。
- b. 取最后一阵（5-10 锤）中能量较大的击次。

(2) 复打桩及钻孔灌注桩

理想情况下：一锤就产生所需要的贯入度，桩周土就进入塑性状态。但是实际上难以达到。

- (1). 对试验桩连续锤击,连续量测,直至桩周土体破坏(产生一定贯入度)。
- (2). 取此过程中 EMX 和承载力最大者(此时土体刚刚破坏),如土 4.7 所示。

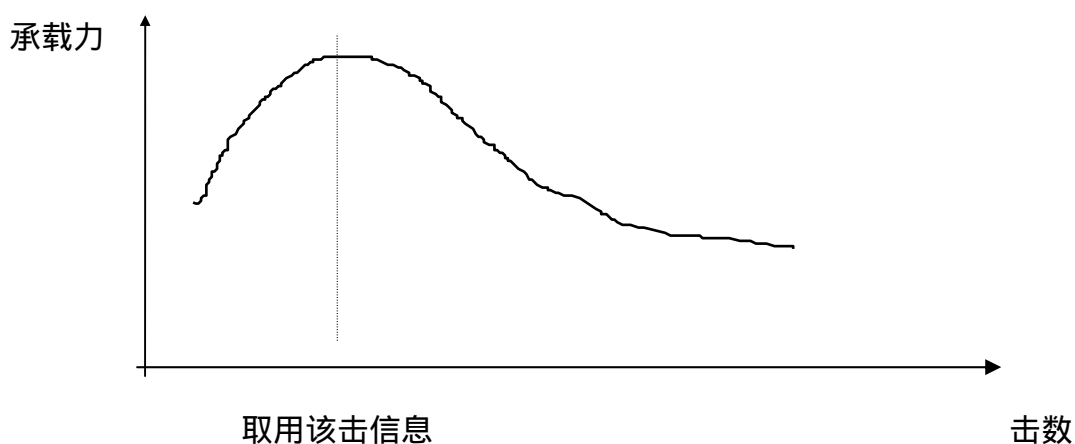


图 6.7 复打桩曲线取用

6.7 常见几种异常曲线及原因初探

(1). 桩身异常

如图 4.8，反映桩身处异常。分析步骤：

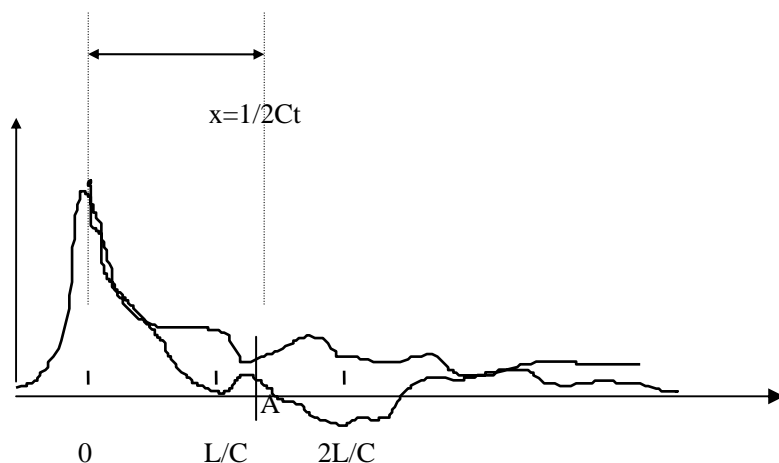


图 4.8

- a. 检查 4 只传感器通道，保证实测数据质量可靠。

- b. 核实保证 $2L/C$ 设定正确。
- c. 首先判定在 A 位置处异常。
- d. 若是钻孔灌注桩，应检查在缺陷位置前有无扩径。如有，则应结合扩径、缩颈程度作出判断；如无，则根据完整性系数 β 值大小作出缺陷程度判断。
- e. 若是钢管桩，则直接根据完整性系数 β 值大小作出缺陷程度判断。
- f. 若是预制方桩，应先计算缺陷是否是在接桩处，若不是，则直接根据完整性系数 β 值大小作出缺陷程度判断；若是，则：①可进行连续量测，观察异常 A 处变化情况。如果异常 A 处波形稳定且 β 值大于 0.6，那么异常为接桩处缝隙反映，桩身完整；如果异常 A 处程度越来越大， β 值越来越小，那么该处桩身破损了。② 没有条件进行连续量测，只有根据 β 值作出判断。根据经验 β 值小于 0.5，可判为桩身严重破损。而 β 值大于 0.6，那么异常很可能为接桩处缝隙反映，桩身应属完整。

(2). 如图 4.9(1)，4.9(2)

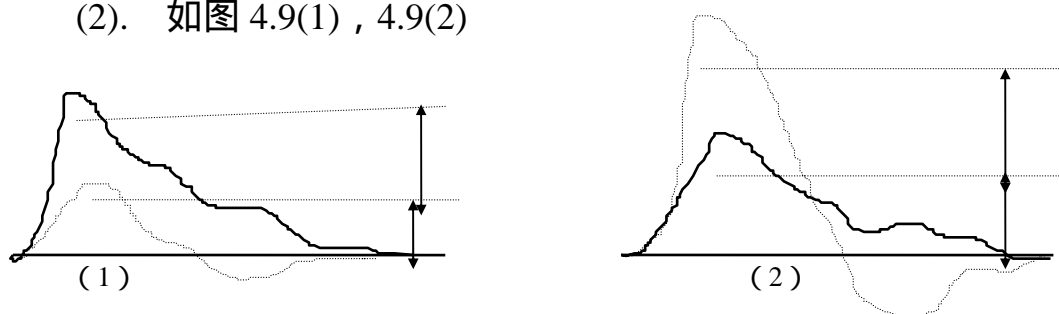


图 4.9

V 的峰值近为 F 峰值的 $1/2$ ，或 F 的峰值近为 V 峰值的 $1/2$ 。很可能是其中某一加速度传感器或者某一应变传感器不通了。

(3). 如图 4.10

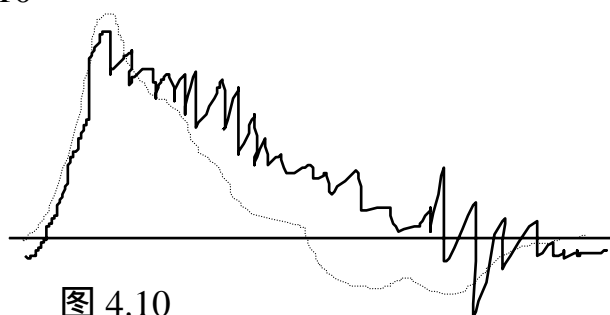


图 4.10

有高频震荡叠加在 F 曲线上，很可能是其中一只 F 传感器松动了。

(4). 如图 4.11

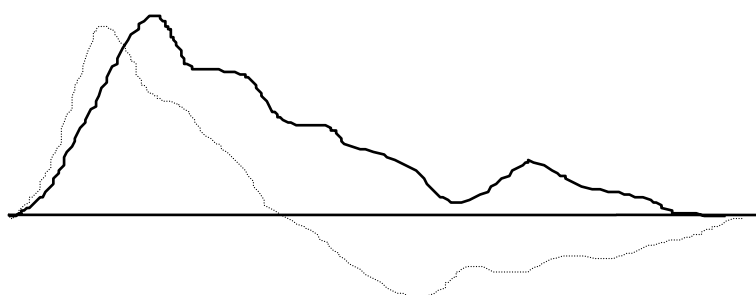


图 4.11

在起始段，F、V 曲线不重合。很可能是锤击严重偏心，一侧力信号出现受拉。

(5). 如图 4.12

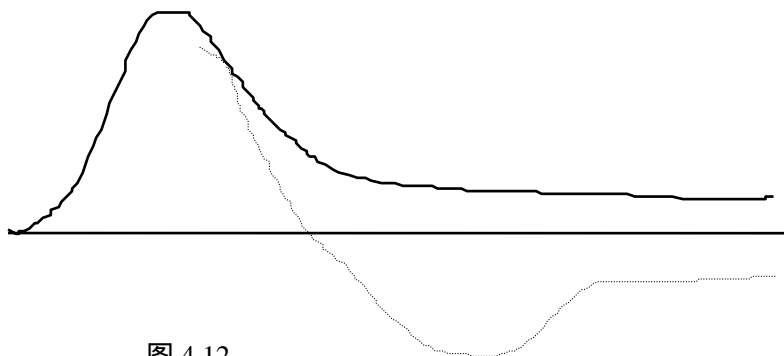


图 4.12

F 曲线不归零。通常出现在钻孔灌注桩测试中。原因是桩头或传感器位置处出现裂缝，产生塑性形变，出现残余应变。

(6). 如图 4.13

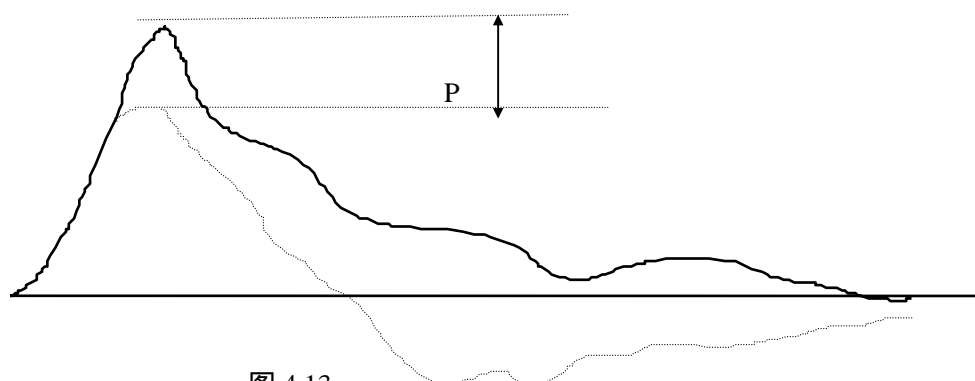


图 4.13

在峰值处，F、V 出现较小差值 P。原因：

- ①. 传感器离地面很近，而且表层土很硬，传感器很快就接受到了来自表层的土阻力。
- ②. 钻孔灌注桩，在传感器位置以下很近处桩身严重扩径。
- ③. 如果不是①②中的原因，则是波阻抗 $Z (=E_m A/C_m)$ 选用不当。或者波速选用不当。

4.8. 对实测 F ~ V 曲线的进一步认识（主要是 $0 \leq t \leq 2L/C$ 时段）

F ~ V 曲线中的 V 曲线，实际上是 V·Z 曲线。波阻抗 Z 是由桩身材料决定的，是个定值。采用 VZ，目的是为了可以与 F 作比较。将 F 和 VZ 画在同一坐标系中，比较、分析起来就大大方便了。但习惯上我们仍将 V·Z 曲线称为 V 曲线。以下仍沿用该习惯。

上行波、下行波叠加在 F ~ V 曲线上，对 F ~ V 曲线的影响及基本表现

我们已知：① 在下行波中，质点运动的速度方向与所受力方向始终相同，

且有 $F\downarrow = Zv\downarrow$ 。

②在上行波中，质点运动的速度方向与所受力方向始终相反，且有 $F\uparrow = -Zv\uparrow$ 。

③将所受压力波，规定为正。

④将所受拉力波，规定为负。

在高应变中，存在着：下行压力波、下行拉力波、上行压力波和上行拉力波四种运动形式波。但是无论是下行压力波还是下行拉力波，都符合 $F\downarrow = Zv\downarrow$ 关系；但是无论是上行压力波还是上行拉力波，都符合 $F\uparrow = -Zv\uparrow$ 关系。

把桩看作是一根自由杆件（没有土阻力作用），那么在 $0 \leq t < 2L/C$ 时段，就只有锤击力 $F\downarrow(t)$ 这个下行波存在（此时段桩尖反射还未到达）。由于 $F\downarrow(t) = ZV\downarrow(t)$ ，所以在该时段 F 、 V 曲线应该是重合的(如图 4.14 所示)。此时的 $F\downarrow$ 、 $V\downarrow$ 都是压力波。

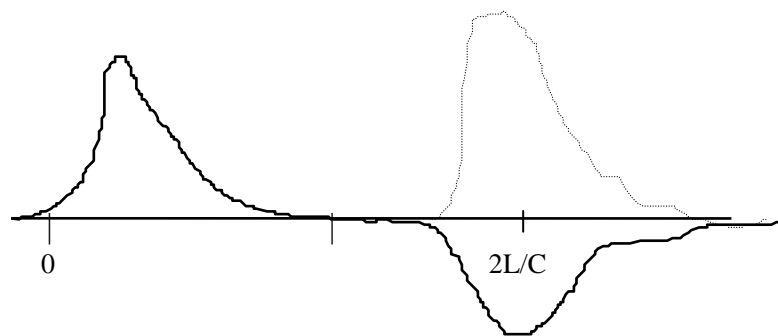


图 4.14

1. 当有下行的压力波 $F'\downarrow(t)$ 作用时，研究这时的 F 、 V 曲线的变化情况

此时 $F_{\text{总}}(t) = F\downarrow(t) + F'\downarrow(t)$ ；

由于 $F'\downarrow(t) = ZV'\downarrow(t)$

故 $ZV_{\text{总}} = ZV\downarrow(t) + ZV'\downarrow(t) = F\downarrow(t) + F'\downarrow(t) = F_{\text{总}}$

$$F_{\text{总}} - ZV_{\text{总}} = 0 \quad \dots\dots(4.15)$$

表现在 $F \sim V$ 曲线上就是： F 曲线增大，向上平移 $F'\downarrow(t)$ ； V 曲线也增大，向上平移 $F'\downarrow(t)$ 。总之， F 、 V 曲线同向向上平移 $F'\downarrow(t)$ ，两曲线的相对位置保持不变。

因此，凡是下行的压力波，都将使得 F 、 V 曲线同向向上平移，原有距离保持不变。

2. 当有下行的拉力波 $-F'\downarrow(t)$ 作用时，研究这时的 F 、 V 曲线的变化情况

$$\text{此时 } F_{\text{总}} = F\downarrow(t) + [-F'\downarrow(t)] = F\downarrow(t) - F'\downarrow(t) ;$$

$$\text{由于 } [-F'\downarrow(t)] = ZV'\downarrow(t)$$

$$\text{故 } V'\downarrow(t) = [-F'\downarrow(t)]/Z = -F'\downarrow(t)/Z$$

$$\text{所以 } ZV_{\text{总}} = ZV\downarrow(t) + ZV'\downarrow(t) = F\downarrow(t) - F'\downarrow(t) = F_{\text{总}}$$

$$F_{\text{总}} - ZV_{\text{总}} = 0 \quad \dots\dots(4.16)$$

表现在 $F \sim V$ 曲线上就是： F 曲线减小，向下平移 $F'\downarrow(t)$ ； V 曲线也减小，向下平移 $F'\downarrow(t)$ 。总之， F 、 V 曲线同向向下平移 $F'\downarrow(t)$ ，两曲线的相对位置保持不变。

因此，凡是下行的拉力波，都将使得 F 、 V 曲线同向向下平移，原有距离保持不变。

3. 当有上行的压力波 $F'\uparrow(t)$ 作用时，研究这时的 F 、 V 曲线的变化情况

$$F_{\text{总}} = F\downarrow(t) + F'\uparrow(t) ;$$

$$\text{由于 } V'\uparrow(t) = -F'\uparrow(t)/Z$$

$$\text{所以 } ZV_{\text{总}} = ZV\downarrow(t) + ZV'\uparrow(t) = F\downarrow(t) - F'\uparrow(t)$$

$$F_{\text{总}} - ZV_{\text{总}} = 2F'\uparrow(t) \quad \dots\dots(3.17)$$

表现在 $F \sim V$ 曲线上就是： F 曲线增大，向上平移 $F'\uparrow(t)$ ； V 曲线减小，向下平移 $F'\uparrow(t)$ 。总之， F 、 V 曲线是反向平移，两曲线互相分离，分离的幅度为 $2F'\uparrow(t)$ 。

因此，凡是上行的压力波（如上行的土阻力波 $1/2R_i$ ），都将使得 F 、 V 曲线反向平移，两曲线互相分离，分离的幅度为 $2F'_{\uparrow}(t)$ 。

4. 当有上行的拉力波 $-F'_{\uparrow}(t)$ 作用时，研究这时的 F 、 V 曲线的变化情况

$$F_{\text{总}} = F_{\downarrow}(t) - F'_{\uparrow}(t);$$

$$\text{由于 } V'_{\uparrow}(t) = -[-F'_{\uparrow}(t)/Z] = F'_{\uparrow}(t)$$

$$\text{所以 } ZV_{\text{总}} = ZV_{\downarrow}(t) + ZV'_{\uparrow}(t) = F_{\downarrow}(t) + F'_{\uparrow}(t)$$

$$F_{\text{总}} - ZV_{\text{总}} = -2F'_{\uparrow}(t) \quad \dots\dots\dots (3.18)$$

表现在 $F \sim V$ 曲线上就是： F 曲线减小，向下平移 $F'_{\uparrow}(t)$ ； V 曲线增大，向上平移 $F'_{\uparrow}(t)$ 。总之， F 、 V 曲线反向平移，两曲线互相靠拢，靠拢的幅度为 $-2F'_{\uparrow}(t)$ 。

因此，凡是上行的拉力波（如断桩反射），都将使得 F 、 V 曲线反向平移，两曲线互相靠拢，靠拢的幅度为 $-2F'_{\uparrow}(t)$ 。

6.9 桩身阻抗变化在 $F \sim V$ 曲线上表现

钻孔灌注桩的扩、缩颈；打入桩中桩身破损，都直接反映了桩身阻抗变化。

在锤击力 F_{\downarrow} 作用下，当桩身阻抗变化时（上部为 Z_1 ，下部为 Z_2 ），反射波 F_{\uparrow} 为：

$$F_{\uparrow} = F_{\downarrow}(Z_2 - Z_1)/(Z_2 + Z_1) \quad \dots\dots\dots (4.19)$$

(1). 桩身阻抗变大（如钻孔灌注桩的扩颈）

此时 $Z_2 > Z_1$ ， $Z_2 - Z_1 > 0$ ， F_{\uparrow} 与 F_{\downarrow} 性质相同。

因锤击力为压力波，所以反射波为上行的压力波。根据上述第 3 点所述，该反射波 F_{\uparrow} 会使得： F 曲线增大，向上平移 $F_{\uparrow}(t)$ ； V 曲线减小，向下平移 $F_{\uparrow}(t)$ 。总之， F 、 V 曲线是反向平移，两曲线互相分离，分离的幅度为 $2F_{\uparrow}(t)$ 。如图 4.15 所示。

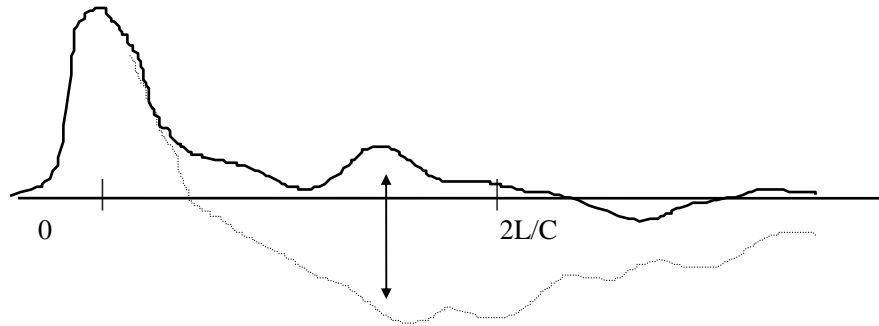


图 4.15

(2). 桩身阻抗变小（如钻孔灌注桩的缩颈，打入桩破损）

此时 $Z_2 < Z_1$, $Z_2 - Z_1 < 0$, $F \uparrow$ 与 $F \downarrow$ 性质相反。

因锤击力为压力波，所以反射波为上行的拉力波。根据上述第 4 点，该反射波 $F \uparrow$ 会使得： F 曲线减小，向下平移 $F \uparrow(t)$ ； V 曲线增大，向上平移 $F \uparrow(t)$ 。总之， F 、 V 曲线是反向平移，两曲线互相靠拢，靠拢的幅度为 $2F \uparrow(t)$ 。如图 4.16 所示。

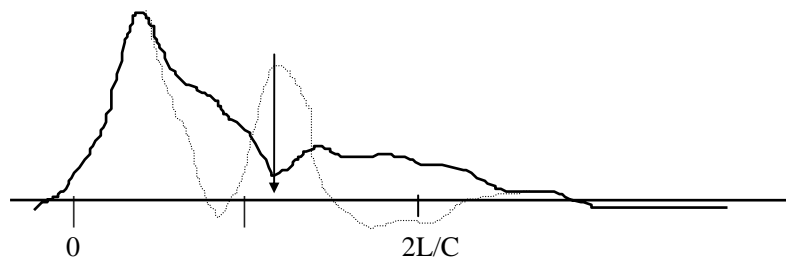


图 4.16

4.10 桩侧土阻力在 $F \sim V$ 曲线上的表现

在 $0 < T < 2L/C$ 时段，土阻力波中只有桩侧各点处向上传播的压力土阻力波（ $=R_i/2$ ）能传到桩顶，为传感器所接受。因此只有桩侧各点处向上传播的压力土阻力波影响 F 、 V 曲线。

根据上述(3)所述，该反射波 $1/2R_i$ 会使得： F 曲线增大，向上平移 $1/2R_i$ ； V 曲线减小，向下平移 $1/2R_i$ 。总之， F 、 V 曲线是反向平移，两曲线互相分离，

分离的幅度为 $2 \times 1/2 R_i = R_i$ ，即该点的土阻力值。

由于从桩身上部到下部，土阻力是累计方式叠加在 F 、 V 曲线上的。所以在实测 $F \sim V$ 曲线上时间轴上某点 t_m 处 F 与 ZV 之差就是桩身 $X_m (=Ct_m/2)$ 以上土阻力之和。

因此在实测 $F \sim V$ 曲线上沿时间轴 ($2L/C$ 之前)，我们可以观察到从顶部到任意位置处的桩侧土阻力(包括静土阻力和动土阻力)累加值。

4.11 $F \sim V$ 曲线上时间轴 $t=2L/C$ 处所包含的信息

应力波在桩身中的反射如图 4.17 所示。

(1). 锤击力的反射波 $F_1' \uparrow$

锤击压力 $F \downarrow (t_1)$ 经自由端反射为一向上传播的锤击拉力 $F_1' \uparrow (t_1) = -F \downarrow (t_1)$ ，在时刻 $t_1 + 2L/C$ 为传感器所接受。根据上节第(4)点所述，该反射波 $F_1' \uparrow$ 会使得： F 曲线减小，向下平移 $F \downarrow (t_1)$ ； V 曲线增大，向上平移 $F \downarrow (t_1)$ 。总之， F 、 V 曲线是反向平移，两曲线互相靠拢，靠拢的幅度为 $2F \downarrow (t_1)$ 。

(2). 桩尖土阻力波 $R \uparrow_{\text{尖}}$

桩尖土阻力 $R \uparrow_{\text{尖}}$ 为一向上传播的压力波。根据上接第(3)点所述，该波 $R \uparrow_{\text{尖}}$ 会使得： F 曲线增大，向上平移 $R \uparrow_{\text{尖}}$ ； V 曲线减小，向下平移 $R \uparrow_{\text{尖}}$ 。总之， F 、 V 曲线是反向平移，两曲线互相分离，分离的幅度为 $2 \times R \uparrow_{\text{尖}} = 2R_{\text{尖}}$ 。

(3). 向下传播的土阻力波 $R_i \downarrow (= -R_i/2)$ 的反射波

锤击压力波沿桩身向下传播的过程中，先后被激发的向下传播的土阻力波 $R_i \downarrow (= -R_i/2)$ 在时间为 $t=L/C$ 时，同时到达桩尖，其大小为 $R \downarrow = \sum R_i \downarrow = -R_{\text{侧}}/2$ 。经自由端反射为一向上传播的压力土阻力反射波，其大小 $R_{\text{侧}}/2$ 。

根据 3.7.4.1 第(3)点所述，该波会使得： F 曲线增大，向上平移 $R_{\text{侧}}/2$ ； V

曲线减小，向下平移 $R_{\text{侧}}/2$ 。总之，F、V 曲线是反向平移，两曲线互相分离，分离的幅度为 $2 * R_{\text{侧}}/2 = R_{\text{侧}}$ 。

(4). 在 $t=2L/C$ 稍前时刻，F、V 的差值还包含了 3.7.4.3 中所述的从顶部到桩底的桩侧土阻力累加值，即 $R_{\text{侧}}$ 。

(2)、(3)、(4) 中的三项都是使得 F、V 曲线反向平移而互相分离的，使曲线分离的总幅度为三项的影响值之和： $2R_{\text{尖}} + R_{\text{侧}} + R_{\text{侧}} = 2(R_{\text{尖}} + R_{\text{侧}}) = 2R_{\text{总}}$ 。而(1)项是使得 F、V 曲线同向平移而互相靠拢的，F、V 差值为 $-2F_{\downarrow}(t_1)$ 。综合(1)、(2)、(3)、(4)四项，在 $t=2L/C$ 时刻，F、V 差值为：

$$2 [R_{\text{总}} - F_{\downarrow}(t_1)] \quad \dots\dots\dots(4.20)$$

式(4.20)意味着：在 $t=2L/C$ 时刻，F、V 曲线包含着总土阻力、桩尖土阻力和锤击力的信息。由于锤击力的反射波是使得 F、V 曲线靠拢的，而总土阻力和桩尖土阻力是使得 F、V 曲线分离的。因此如果 F、V 曲线在此分离得越开，就表示总土阻力越高（进而推知桩的承载力越高）；事实上由于高的桩尖土阻力所在土的最大弹性形变量 Q 值往往也大，需要延迟适当的时间才能充分发挥，所以较高的桩尖土阻力往往出现在 $t=2L/C$ 时刻稍后处。由此可认为在 $t=2L/C$ 时刻稍后处 F 出现高峰，往往就是大的桩尖土阻力的表现。

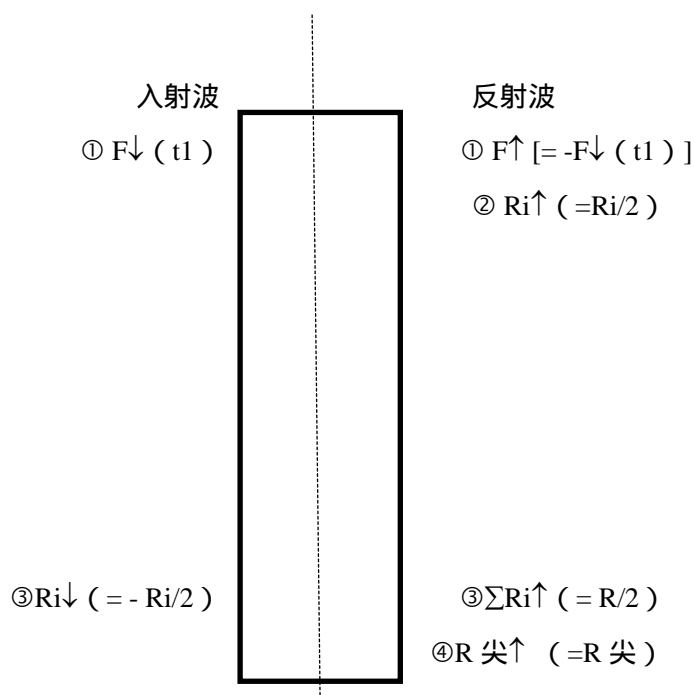


图 4.17 应力波在桩身中的反射示意

4.12 几种常见的输出结果曲线的定性分析

1 $F \sim V$ 曲线

- (1). F 曲线的峰值就是传感器位置处的桩身截面受到的最大锤击力。
- (2). V 曲线的峰值就是传感器位置处质点运动的最大速度。
- (3). 在 $0 < t < 2L/C$ 时段, F 、 V 曲线分离程度表明了桩侧土阻力的大小。分离得越开, 表明桩侧土阻力越大。
- (4). 在 $t=2L/C$ 时刻, F 、 V 曲线分离程度表明了桩的总土阻力及桩尖土阻力(往往稍微延迟)的大小。分离得越开, 表明桩的总土阻力及桩尖土阻力(往往稍微延迟)越大。

2 下行波 F_{\downarrow} 、上行波 F_{\uparrow} 曲线

- (1). 下行波 $F_{\downarrow} \sim t$ 曲线反映的就是锤击力 $F_{\downarrow}(t_1)$ 随时间(仅 $0 < t < 2L/C$ 时段)变化关系。
- (2). 上行波 $F_{\uparrow} \sim t$ 曲线反映的就是桩侧土阻力分布情况(包含静阻力和动

阻力，为相应土阻力累加值的一半）（仅 $0 < t < 2L/C$ 时段）。

(3). 计算平均波速。

3 $R \sim t$ 曲线

$R \sim t$ 曲线中有 $R_s \sim t$ 曲线和 $R_{总} \sim t$ 曲线。

(1). $R_s \sim t$ 曲线较光滑，说明凯斯阻尼系数取值是合适的。

(2). $R_{总}$ 曲线与 R_s 曲线之差就是土的动阻力。

(3). $R_{总}$ 曲线与 R_s 曲线交点所对应时刻就是桩尖运动速度为零的时刻。

此承载力就是自动法（RAU）值。

4 D、E 曲线

(1). E 曲线中的峰值就是最大传递能量值。

(2). D 曲线中的峰值就是桩身最大动位移量。

(3). D 曲线中的最终稳定值就是桩相对于土的最终动位移量，有时可认为是桩身贯入度。当然取样时间必须足够长。

事实上，往往最终动位移量仅作为桩身贯入度的参考值。因为动位移是由速度积分而来，而速度是由加速度积分而来。我们实测的是加速度，加速度信息可能会由于桩身扩、缩颈、接桩缝隙等多次反射而畸变（属正常曲线），使得计算的最终动位移量不能真正反映桩身贯入度；同时从加速度到速度，再从速度到位移，也会因为累计误差或取样点的减少而影响计算结果的可靠度。当然由不正确的加速度实测信息计算得到的最终动位移量的可靠性就无从谈起。

因此，桩身贯入度还是以实测为准。

第五章 曲线拟合法

5.1 基本模型

与凯斯法中所采用的模型相比较，曲线拟合法中所采用的桩、土模型作了很大改进。主要有：

1. 桩的模型

- ①. 桩身材料可以是不均质的（如复合桩、扩底桩、桩身扩缩颈等）。
- ②. 考虑了桩身材料内阻尼所造成的应力波衰减。

. 将桩离散为一系列单元长度为 1-2 米的质弹系统，单元内部无阻抗变化；应力波在每个单元内的传播时间相等（均质桩单元长度 L 相等，非均质桩 L 不相等）。

桩的段数是 N_p ，桩侧土单元数是 N_s 。 N_p 可以等于也可不等于 N_s 。

每个桩单元 i ：

单元长度： $L = t \cdot C_i$

2. 土的模型

(1) 基本参数和基本关系

在基本模型中有三个基本参数：极限静土阻力 R_{ui} 、弹性限度 Q_i 和粘滞阻尼系数 J_i

设在第 i 桩段有一土单元 k ，已知桩段速度为 v_i ， N_{p-1} 位移 u_i

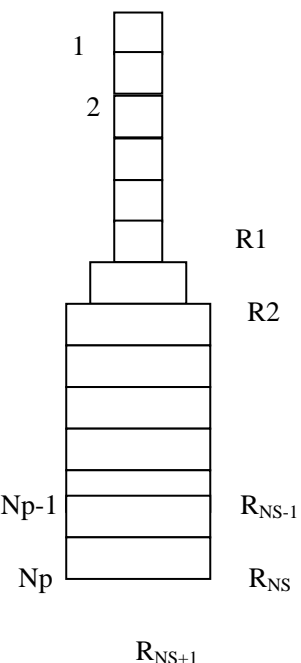
以及粘滞阻尼系数 J_i ，则第 k 土单元的阻力为：

$$R_k = R_{sk} + R_{dk}$$

静阻力： $R_{sk} = K_{sk} \cdot u_i$

其中： $K_{sk} = R_{uk} / Q_i$ ，为斜率，即土刚度。

且 $R_{nk} = R_{sk} - R_{uk}$ 。（ R_{nk} 为卸载程度）



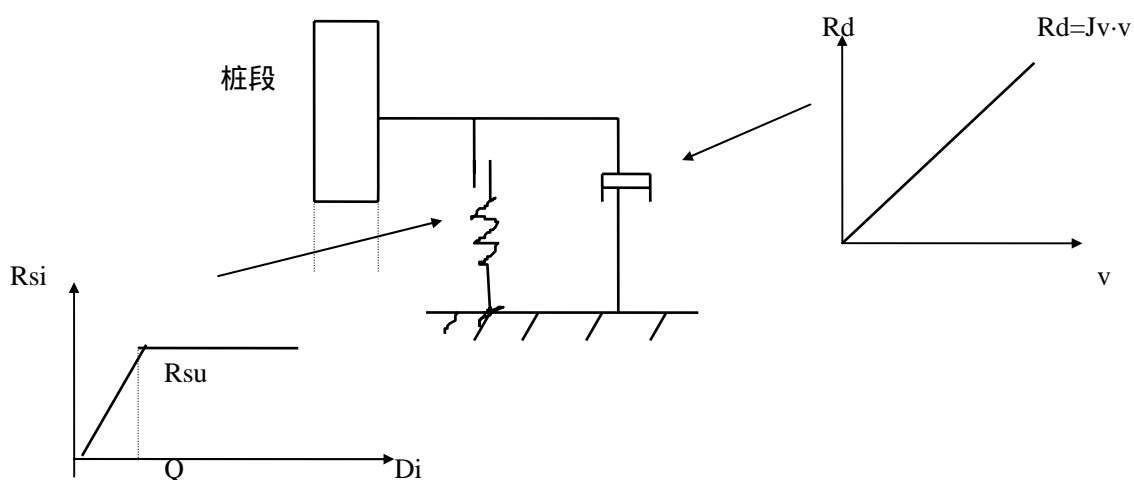
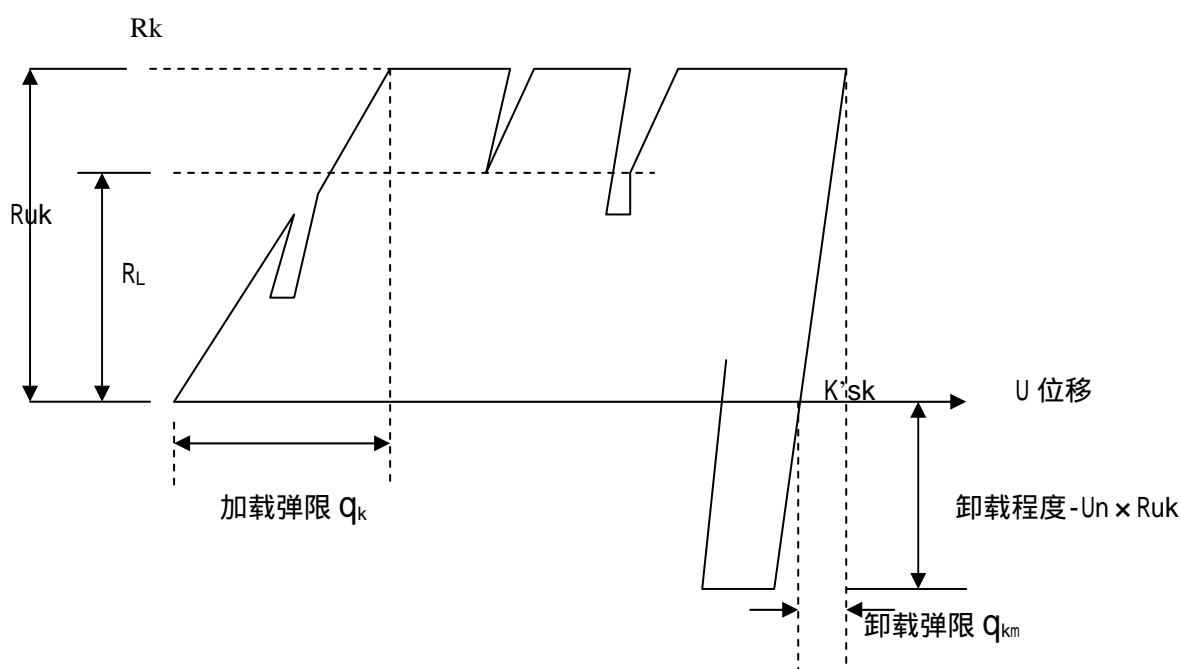


图 5.1 土的基本模型

(2) 卸载与加载，反复加载



A. 卸载比 U_n (UN)

上图中，卸载程度 $R_{nk} = -U_n \times R_{uk}$

其中卸载比 U_n : $0 \leq U_n \leq 1$

对桩尖土而言，不可能产生上拔力，故卸载比 $U_n=0$ 。只有桩侧土存在卸载比 U_n ，若 $U_n=0$ 则表明不存在负阻力，若 $U_n=1$ 则表明存在较大的负阻力

对于易打桩，由于没有回弹，所以 $U_n=0$ ；对于难打桩， $U_n=0 \sim 1$ 。

卸载比 U_n 对计算曲线的影响：对计算曲线的后部影响大，减低 U_n 时，将使计算曲线的尾部升高。

B. 桩侧最大弹性形变量 q_k (QS)

q_k 的取值不能为零，也不能超过桩段的最大位移量，否则将导致该段土阻力的激发不充分。

q_k 大时会延迟桩侧土阻力的激发。

通常 $q_k = 2.54\text{mm}$

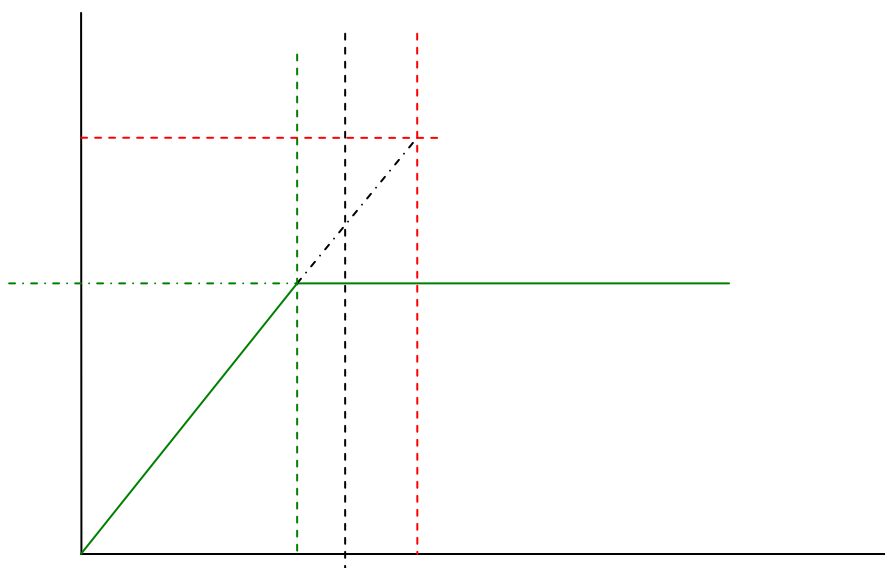
c. 桩尖最大弹性形变量 q_t (QT)

桩尖最大弹性形变量 q_t 的变化较大，取决于桩的尺寸和土性。

桩尖最大弹性形变量 q_t 必须小于桩底的位移。

通常 $q_t = 2.54\text{mm}$

q_k 大时会延迟桩尖土阻力的激发。



D. 桩侧卸载弹限比 CS (CS_{kn})

当桩身质点速度为负时 ($0 < t < 2L/C =$, 桩身向上回弹，桩侧卸载弹
限 q_{km}

为： $q_{km} = CS \times q_k$

q_k 为桩侧加载弹限

$$CS = q_{km} / q_k$$

CS 用来规定卸载弹限的大小。其取值为 0 ~ 1。

CS 小，则卸载弹限 q_{km} 小，则导致快速卸载，使得计算曲线的中后部减低。

对于长摩擦桩而言，若在 $2L/C$ 之前就出现卸载，则卸载弹限比 C_k 就会影响计算曲线。

E . 桩端土卸载弹限比 C_t (C_{Toe})

C_t 的大小为 0 ~ 1。

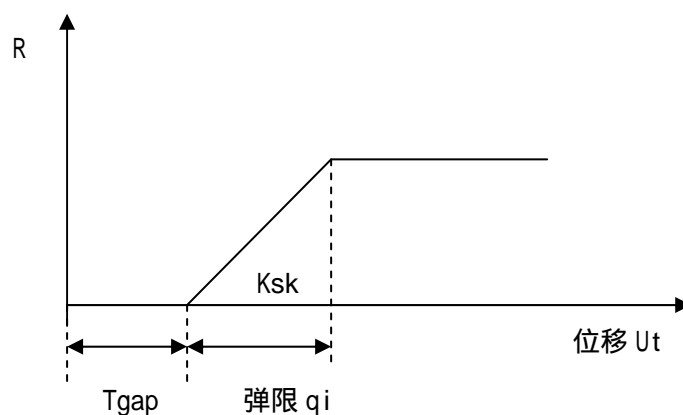
C_t 小，则导致快速卸载，使得计算曲线的后部减低。

F . 反复加载程度 L_{skn} 和 L_{Toe}

反复加载程度 L_{skn} 和 L_{toe} 对计算曲线的影响：一般情况下对计算曲线没有影响，只有当桩侧（端）的速度经过了一次正值、一次负值，再一次正值后，并且卸载弹限比较小小时，才会起作用。影响计算曲线的后部。

G . 土隙

当桩尖与土之间存在间隙 (T_{gap}) 时，将导致硬化型土阻力。



$$\text{此时静土阻力：} R_{sk} = K_{sk} (U_i - T_{gap})$$

若 $U_i < T_{gap}$, 则 $R_{sk}=0$

间隙 (T_{gap}) 只影响计算曲线上 $2L/C$ 附近。

通常产生间隙的情况： 难打桩 灌注桩存在桩底沉渣

H . 土塞 PL

把土塞看成是一种外部的、被动的阻力作用，作为拟合的“微调”来使用。

在 j 时刻，由于土塞 W_s 作用在土阻力 R_M 为：

$$R_M = W_s (v_{尖j} - v_{尖j-1}) / gdt$$

W_s ：土塞重量；

$v_{尖j}$ ： j 时刻桩尖运动速度；

g ：重力加速度；

dt ：计算步长。

土塞 PL 只影响计算曲线上 $2L/C$ 附近

I . 土阻尼

土的粘滞阻尼系数 J_v (线性阻尼)

量纲为： $kN \cdot s/m$ 。

$$R_d = J_v \times v$$

Smith 阻尼系数 J_s (SS , ST)

量纲为： s/m 。

$$R_d = J_s \times v \times R_s$$

Case 阻尼系数 J_c (JS , JT)

量纲为：无量纲。

$$R_d = J_c \times z \times v$$

它们之间的关系为：

$$J_v = R_{su} \cdot J_s = Z \cdot J_c$$

R_{su} 为土体单元的最大静阻力。

对于桩侧， $J_c = (J_{vi}) / Z$

对于每个土单元， $J_{ci} < 1$ ，但是对于整个桩侧土来说， J_c 可以大于 1，对于阻抗教低的长桩，甚至可以高达 3。

推荐使用 Smith 阻尼系数 J_s 。

对于桩端， $J_{c \text{ 尖}} = J_{v \text{ 尖}} / z$

通常 $J_{c \text{ 尖}} = 1$

通常情况下，选用线性阻尼模型（ $OP=0$ ）；当桩底的极限土阻力第一次就被充分激发的情况下，选用 SMITH 阻尼模型（ $OP=1$ ）；当桩底的弹限相对较高，或存在土隙时，选用 SMITH 阻尼模型（ $OP=1$ ）或复合阻尼模型（ $OP=2$ ）。

阻尼系数对计算曲线的影响：通常在 $0 < t < 2L/C$ 范围，增大 SS 计算曲线上移；增大 ST ，计算曲线上在 $t=2L/C$ 附近曲线上移。增大 SS ，改善计算曲线尾部的震荡。当计算的锤击数过低，没有办法使其增大时，增加 SS 。

J. 辐射阻尼

使用条件

锤击贯入度很小，桩、土间没有产生剪切破坏，如难打桩、表面非常粗糙的灌注桩；使用了辐射阻尼后，土阻尼系数 SS 、 ST 均应小于 1.3；开口钢管桩、H 型钢桩，一般不使用辐射阻尼。

模型

用土体质量 MS 、 MT 和阻尼系数 SK 、 BT 代表。

对于摩擦桩，使用桩侧辐射阻尼 MS 和 SK ；

对于端承桩，使用桩侧辐射阻尼 MT 和 BT ；

对于 MS 和 SK 取值如下：

$$MS = 10 \times \text{桩的周长} \times N / 2 \quad \text{KN}$$

N ：桩单元数/土单元数

$$SK = R_{3 \text{ 平均}} \times N \times \quad / Z_1$$

$$R_{3 \text{ 平均}} = (R_1 + R_2 + R_3) / 3$$

R_1 、 R_2 、 R_3 为没有采用辐射阻尼时拟合，三个最大的静土阻力单元的值，单位 KN/m 。

系数 : 4 8

Z1 : 第一桩单元的阻抗。

对计算曲线的影响

使用辐射阻尼后，值越小，会使计算曲线上 $2L/C$ 前后下降。

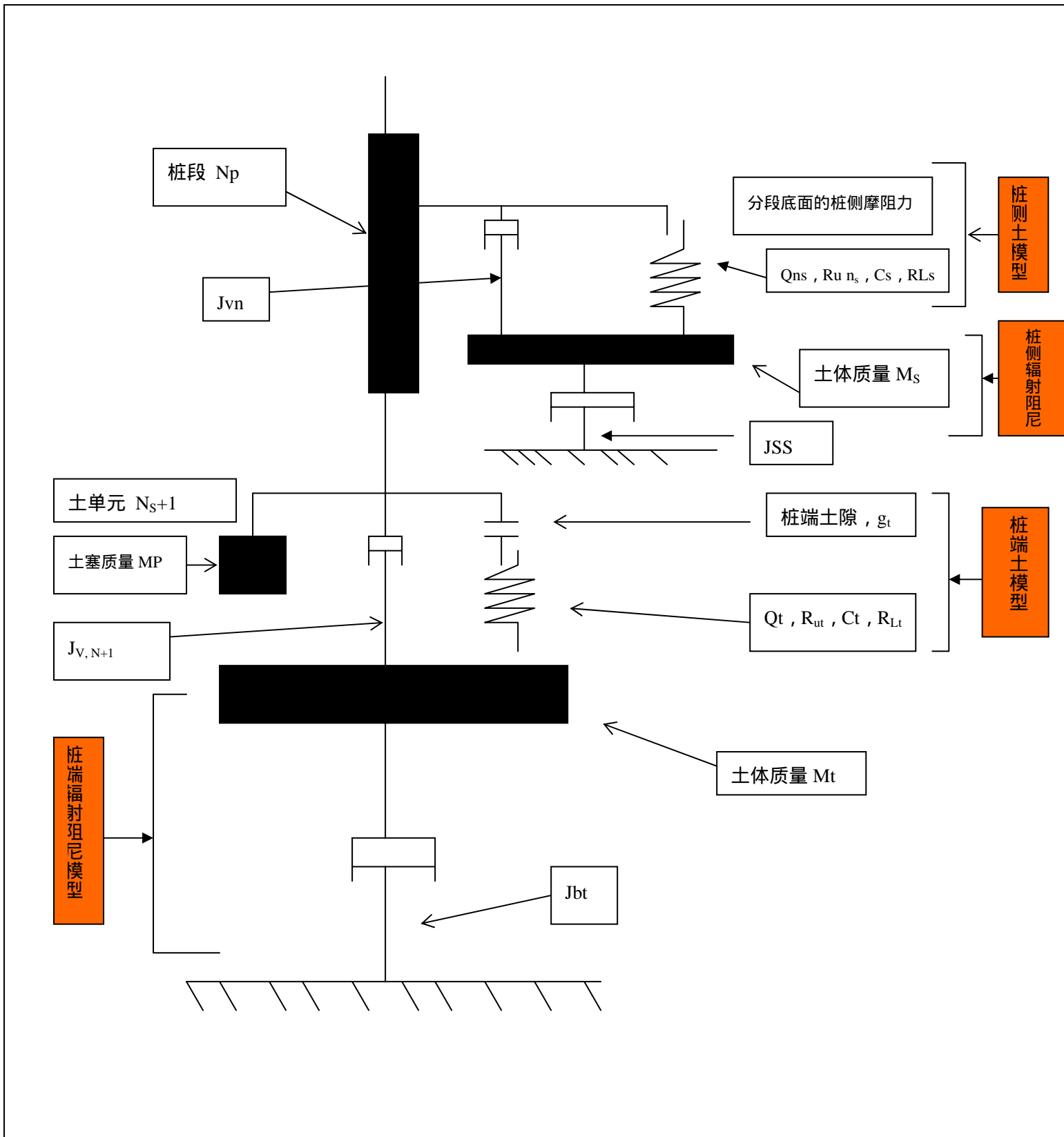
K . 桩身阻尼 PI

作用：平滑拟合曲线，特别是 $2L/C$ 附近；延迟应力波的返回。

一般取值：对于钢桩：PI=0.01；

对于预制混凝土桩：PI=0.02；

对于灌注桩：PI=0.03。

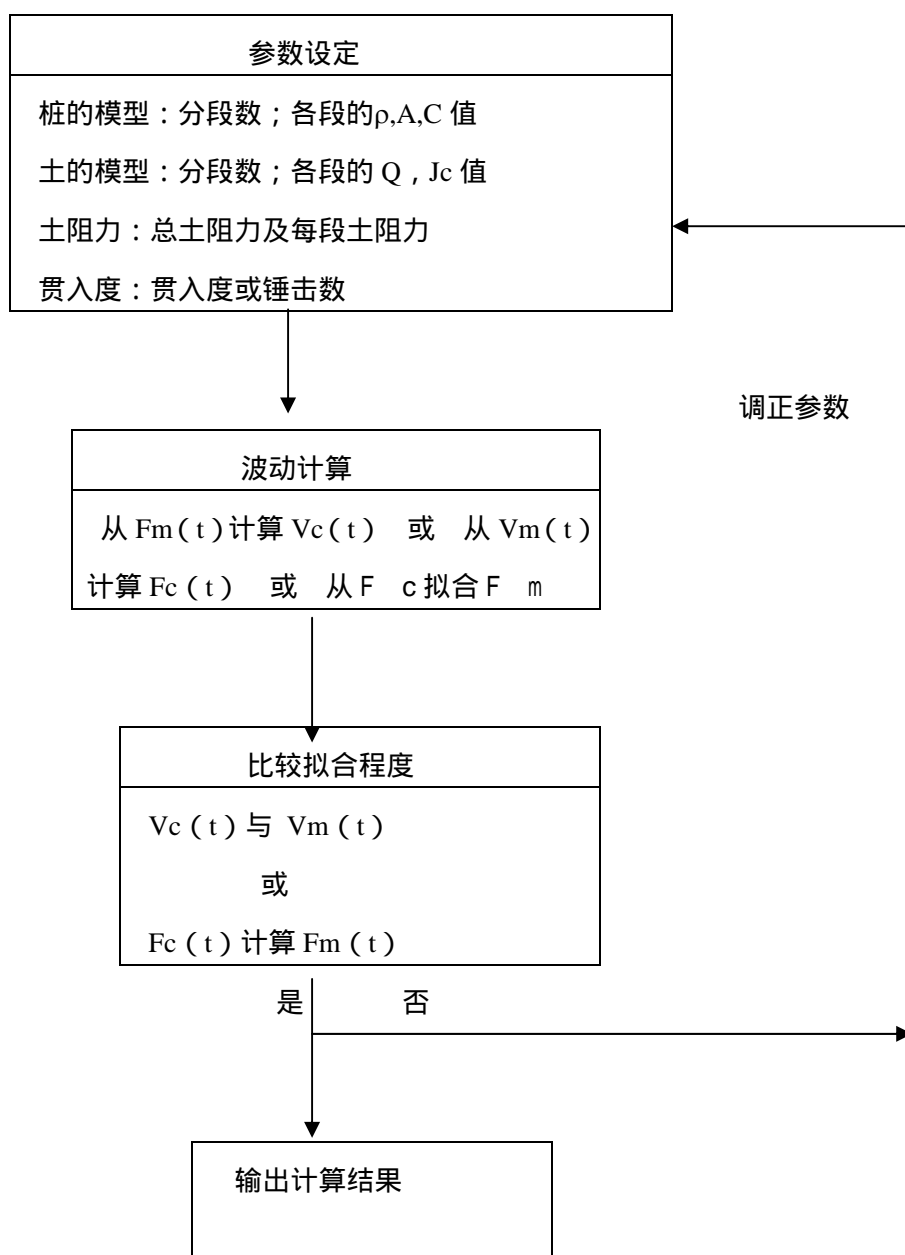


扩展的 CAPWAP 土阻力模型

5.2 曲代计算2 曲线拟合的基本过程

确定拟合方向： $F \rightarrow V$ ； $V \rightarrow F$ ； $F \uparrow$ $F \downarrow$

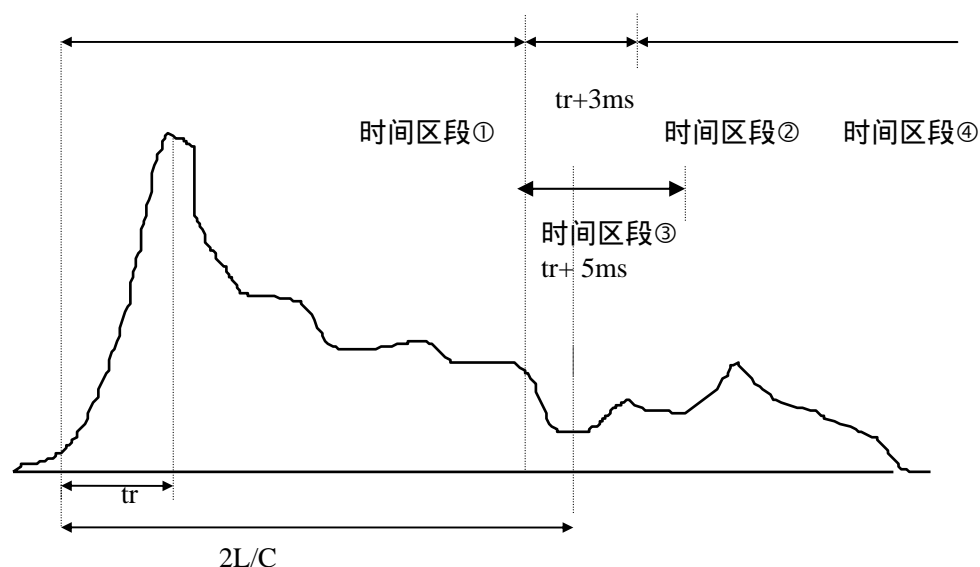
采用迭代算法。选定以实测曲线 $F_m(t)$ 或 $V_m(t)$ 为边界条件，设定一组土参数，从 $V_m(t)$ 或 $F_m(t)$ 计算出 $F_c(t)$ 或 $V_c(t)$ ，将 $F_c(t)$ 或 $V_c(t)$ 与 $F_m(t)$ 或 $V_m(t)$ 作比较，如果不满足要求，则调整土参数，继续进行计算、比较；再计算、再比较....，直到满足条件为止。此时输出的一组土参数即为最终计算结果。



C. 主要成果

- a. 提供可靠度更高的总承载力，区分桩侧和桩尖的土阻力；
- b. 提供桩侧土阻力分布；
- c. 模拟静载试验的 $P \sim S$ 曲线。

5.3 基本算法



- (1). 第一时间段：主要修正桩侧土阻力分布和桩侧阻尼系数。
- (2). 第二时间段（ $tr+3ms$ ）：主要修正桩尖土阻力、总承载力。
- (3). 第三时间段（ $tr+5ms$ ）：主要修正阻尼系数。
- (4). 第三时间段：主要修正 Q （弹限）、 UN （卸载程度）等。

5.4 拟合质量的评估

1．用拟合质量系数 MQ 来评定曲线拟合质量

$$MQ = |f_{jc} - f_{jm}| / F_m$$

2．用锤击数 BCT 拟合评定曲线拟合质量

$$BCT=1/(U_{tm}-q_{av})$$

U_{tm} ---最大桩端的计算位移；

$$q_{av}=(\sum q_i R_{ui})/R_u$$

其中： q_i 、 R_{ui} 分别为各土单元的弹限和相应的极限土阻力； R_u 为总的极限土阻力值。

5.5 曲线拟合标准

根据规范，曲线拟合标准有：

(1). 采用的力学模型应能反映实际性状；

(2) 拟合使用的土参数应在岩土工程的合理范围内，选用的土的最大弹性形变量不的超过响应桩单元的最大位移量。

(3). 拟合曲线长度在 t_1+2L/C 时刻后的延续时间不应少于 20ms，当用柴油锤打桩时，曲线拟合长度应适当增加；拟合结束时，土阻力响应区的计算曲线必须与实测曲线吻合，其它拟合区域应基本吻合；拟合完成时的拟合系数，混凝土预制桩和钢桩不宜大于 3%，钻孔灌注桩不宜大于 5%。

(4). 由拟合分析得出的贯入度计算值应与同一锤击所对应的实测最终贯入度基本一致。

5.5 基本输出结果

(1). 总承载力、桩侧土阻力、桩尖土阻力。

(2). 桩侧土阻力分布。

(3). 锤击压应力、拉应力、传递能量沿桩身分布。

(4). 模拟静载荷试验的 $P \sim S$ 曲线。

(5). 曲线拟合曲线。

第六章 高应变动测试验中需注意的几个问题

6.1 高度重视所采集的原始信息的质量

高应变动测试验所有计算分析的基本依据就是所采集的原始信息。原始信息不可靠，则以后一切计算结果都是不可靠的。保证原始信息的质量，就是整个动测试验得以圆满成功的基础。

原始信息的质量保证主要依据以下两条：

- ①. 所采集的原始信息是正常的；
- ②. 满足试验要求。如试验做到极限；或承载力保证值大于设计荷载的 2 倍等。如果现场随便采集一击信息，在桩身材料和桩周土都没有破坏的情况下，所计算承载力不满足要求，则整个试验是失败的。

6.2 高应变动测所得承载力评价

- (1). 如前所述，高应变动测所得承载力是地基土对桩的支承力。
- (2). 打入桩在初打时测试，所得承载力是打入时的单桩承载力，低于单桩极限承载力。
- (3). 为了获得单桩极限承载力，打入桩必须在其桩周土体恢复后进行复打测试，并得到足够的休止时间。打入桩复打测试及钻孔灌注桩测试的承载力可为单桩极限承载力。
- (4). 只有当(3)中打入桩复打测试及钻孔灌注桩测试，桩身贯入度大于 2mm/击时，计算的承载力才为单桩极限承载力。如果桩身贯入度大小 2mm/击，一般可称为承载力的保证值。

6.3 动静对比的条件

- (1). 动测试验满足以上(3)、(4)条要求，为地基土对桩的极限支承力。

- (2). 静载荷试验做到地基土破坏。
 - (3). 在进行动测试验和静载荷试验时，土的恢复休止时间差不多。
 - (4). 所比较的是同一根桩。
- 只有满足了以上 4 个条件的动测试验和静载荷试验结果才具有可比性。

6.4 现场锤击的好坏至关重要

(1) 严重的锤击偏心

1) 要求：

A．锤的对称性：中心轴对称；

B．吊起后平稳：锤的几何中心线（上截面中心与下截面中心连线）与重心线重合；吊点与锤的几何中心线重合；对组合锤，四个角紧固螺栓的螺帽不能松动（A 高频 B 几何中心线与重心线不重合）。

C．锤的几何中心线与试验桩的中心线重合。

a．是垂直的；

b．击点在桩的中心。



D . 锤的底面与桩面都要水平、平整



2) 典型的因严重锤击偏心造成的问题曲线

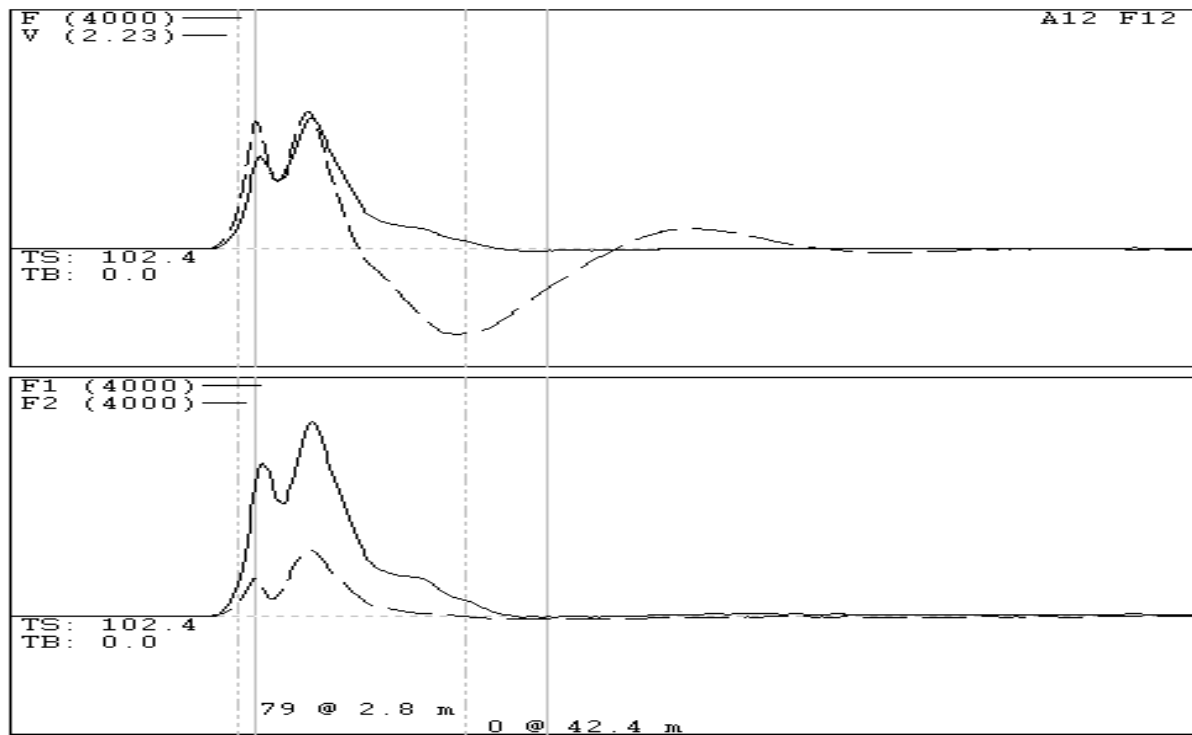


图 1 峰值不等

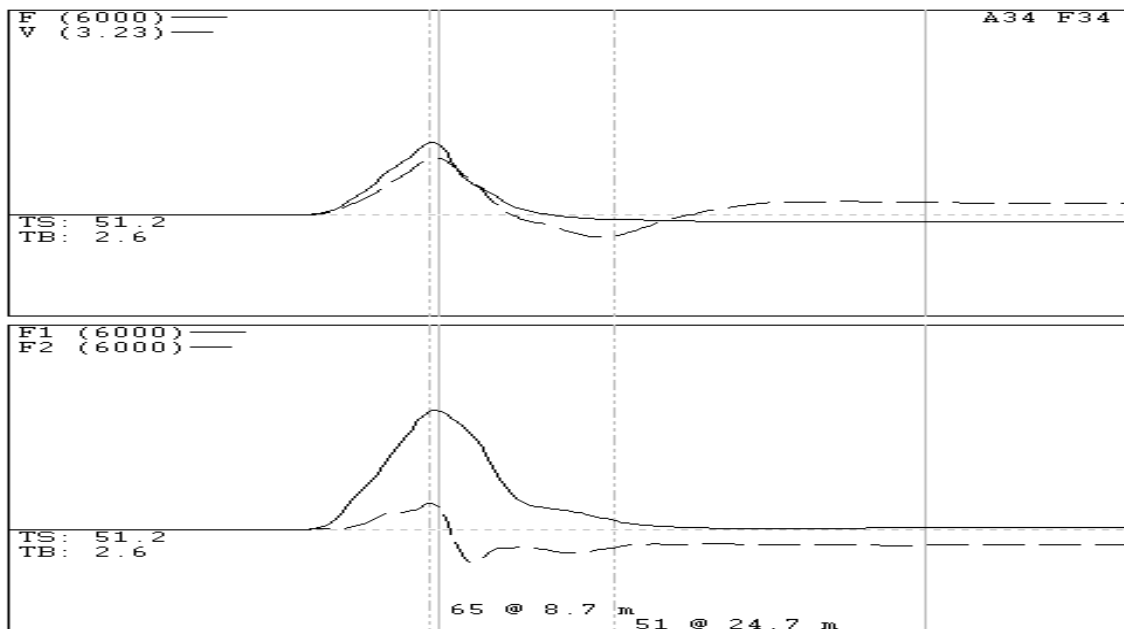


图 2 曲线畸变、峰值偏移

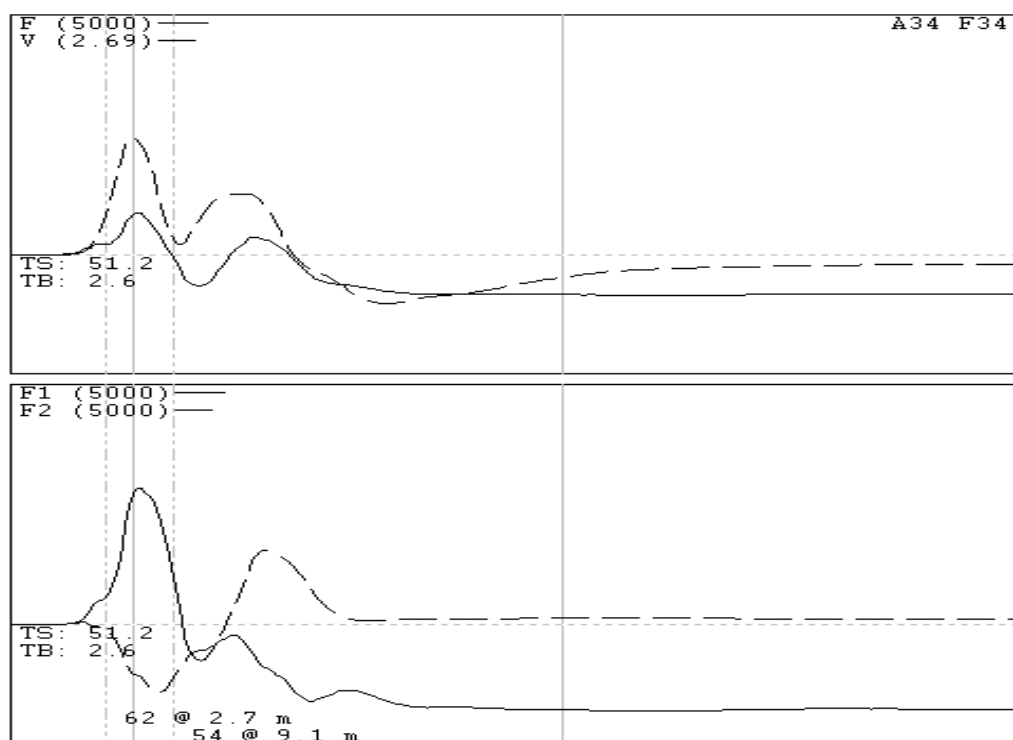


图 3 曲线严重畸变

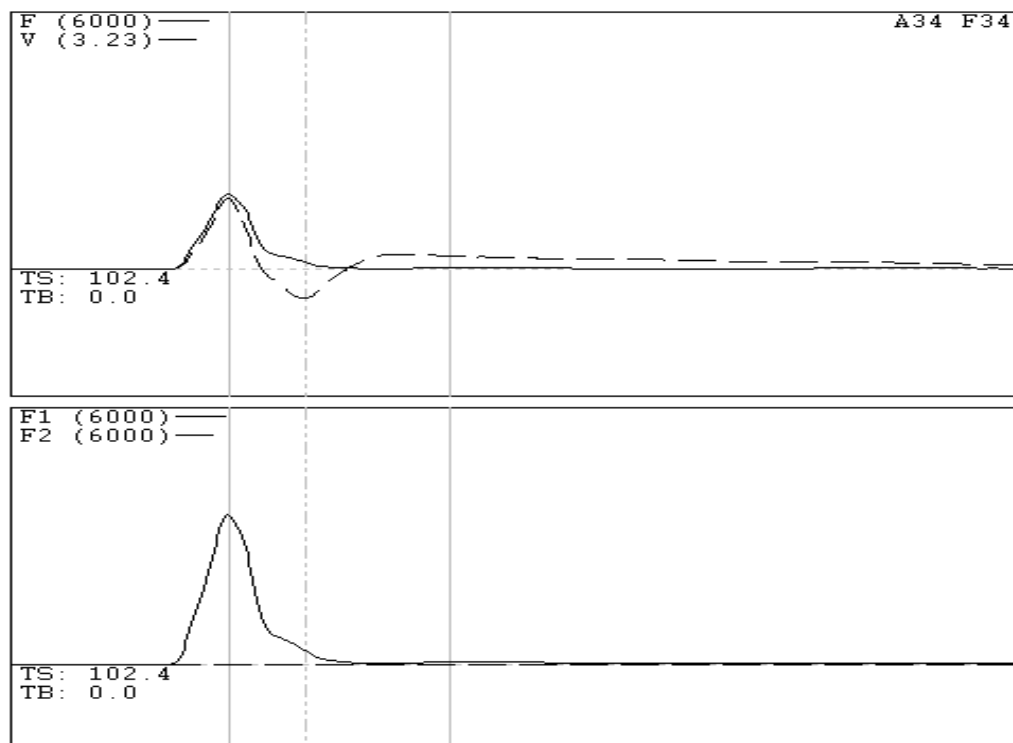


图 4 曲线畸变。土阻力减小、桩身假缺陷

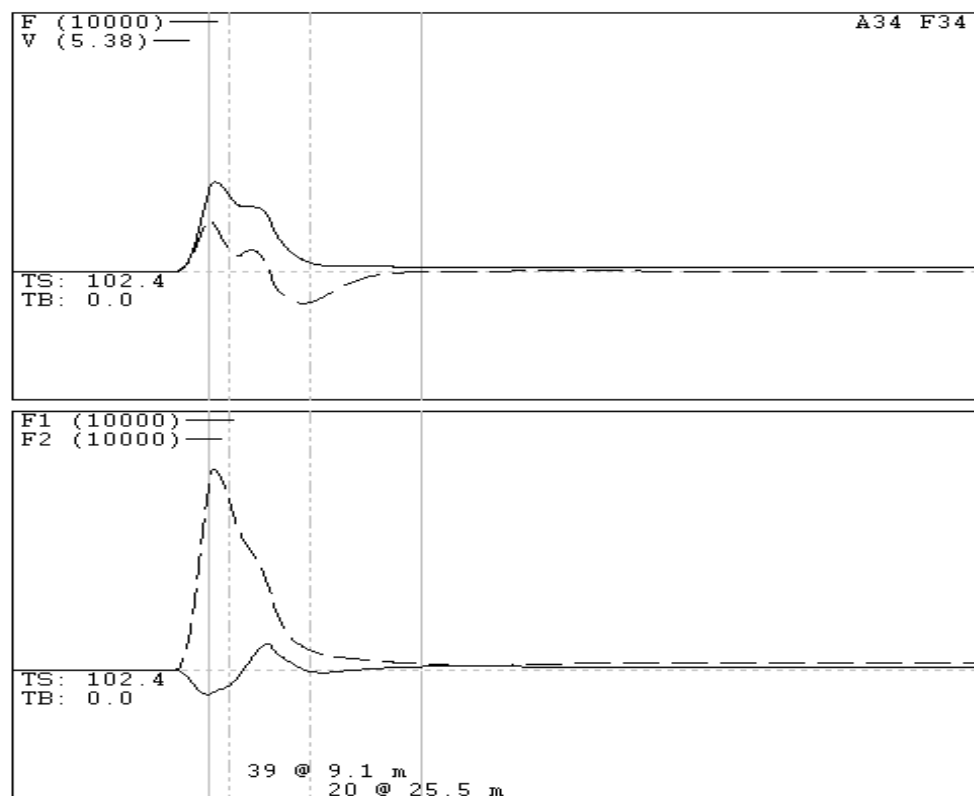


图 5 曲线畸变。土阻力减小、桩身假缺陷

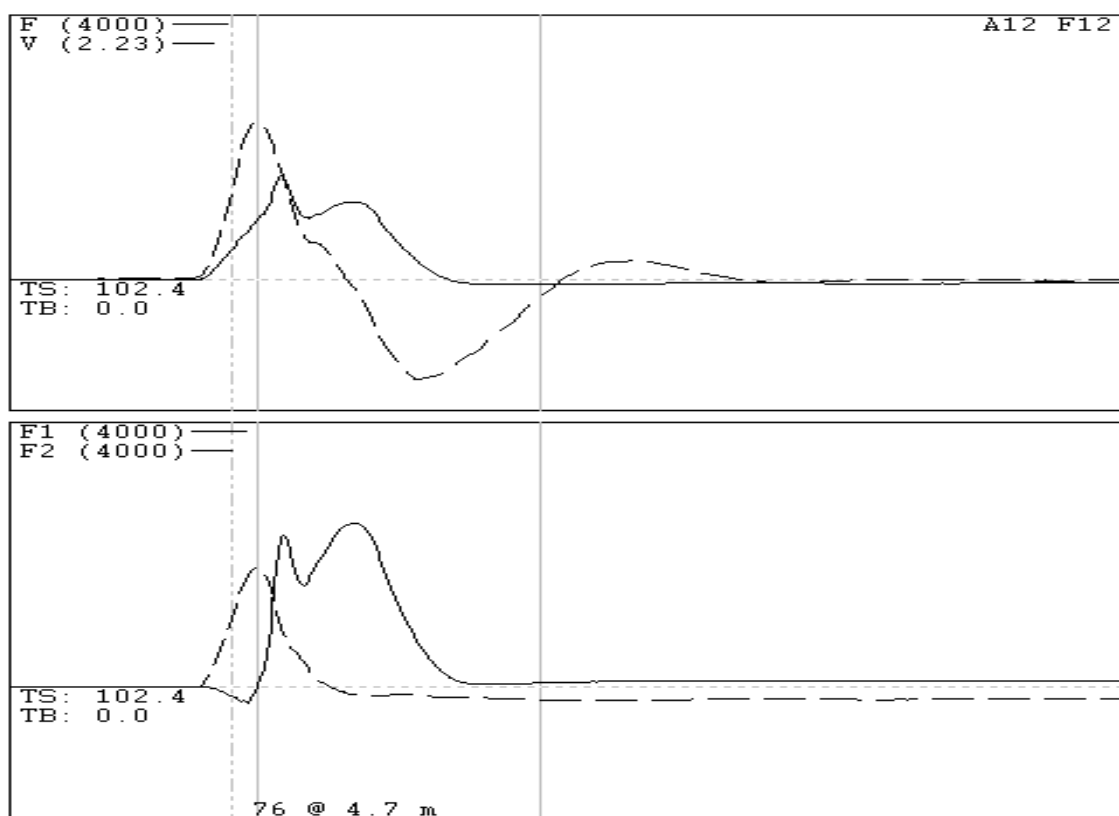


图 6 峰值不等

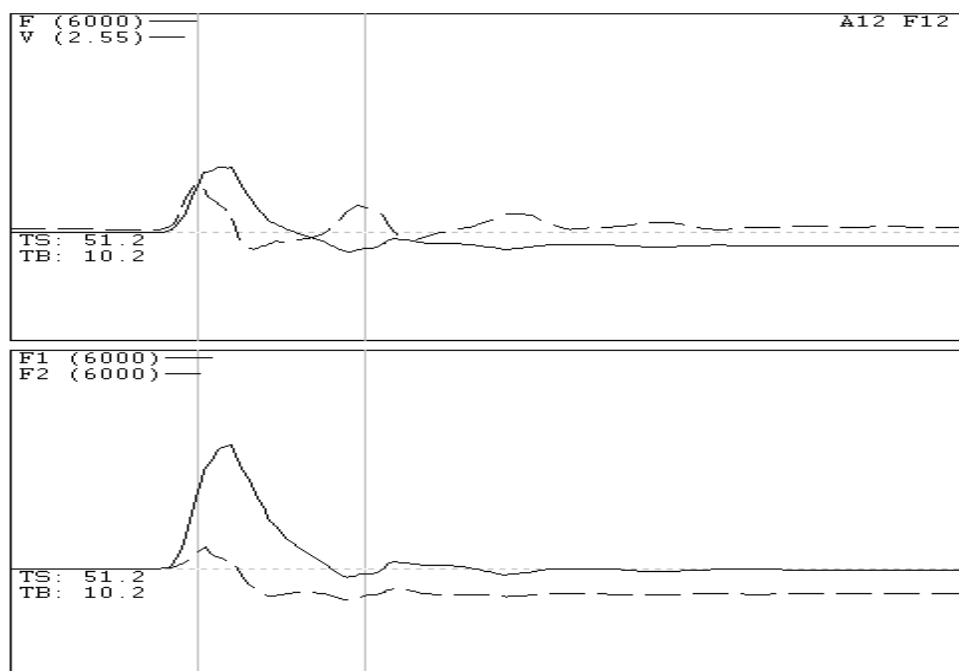


图 7 尾部不归零

国外典型的锤击设备





Ohio tests on CFA pile

*Drop weight from
welded H piles*

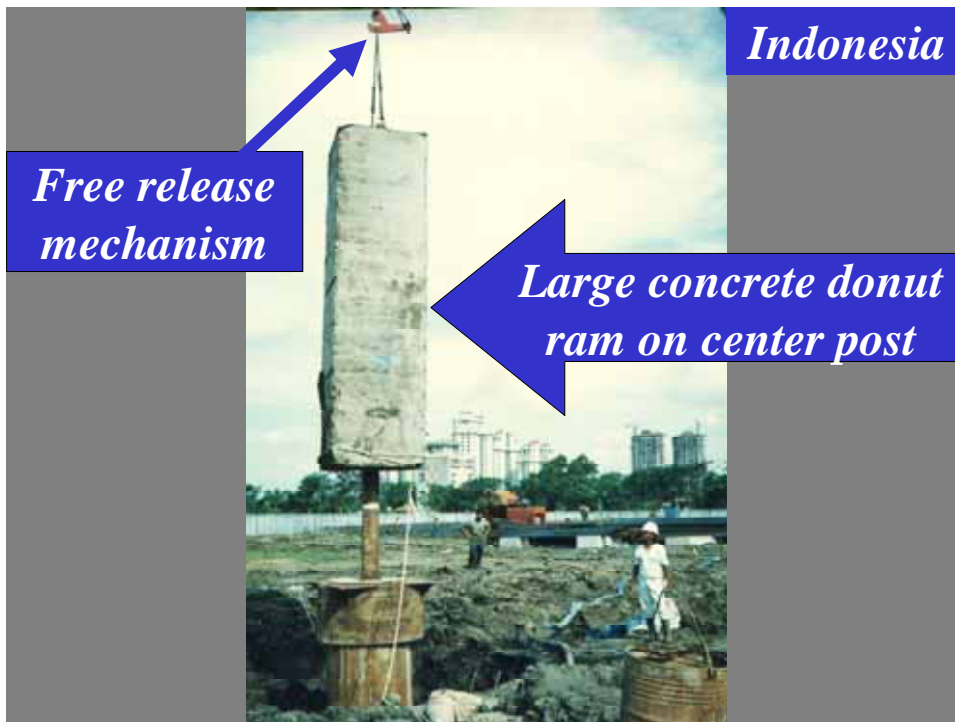
ram guide



Middle East tests

*“donut” ram on
center guide*









(2) 传感器的安装

(3) 传感器电缆线的问题

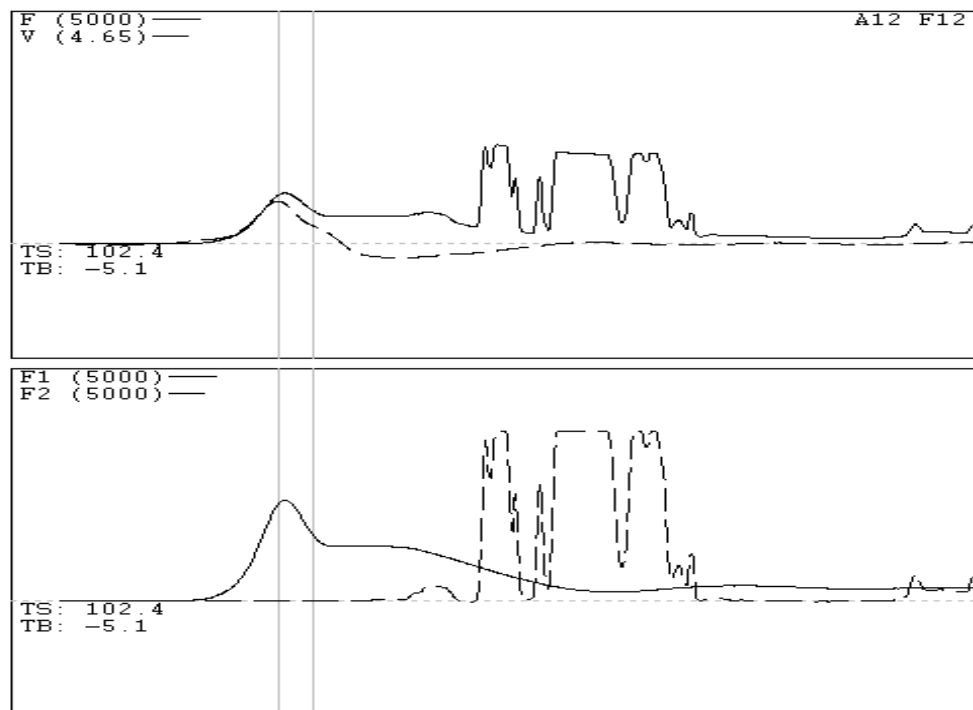


图 8 电缆接触或屏蔽不好

(4) 输入参数有误

$$F=A \quad C^2$$

$$ZV=A \quad CV$$

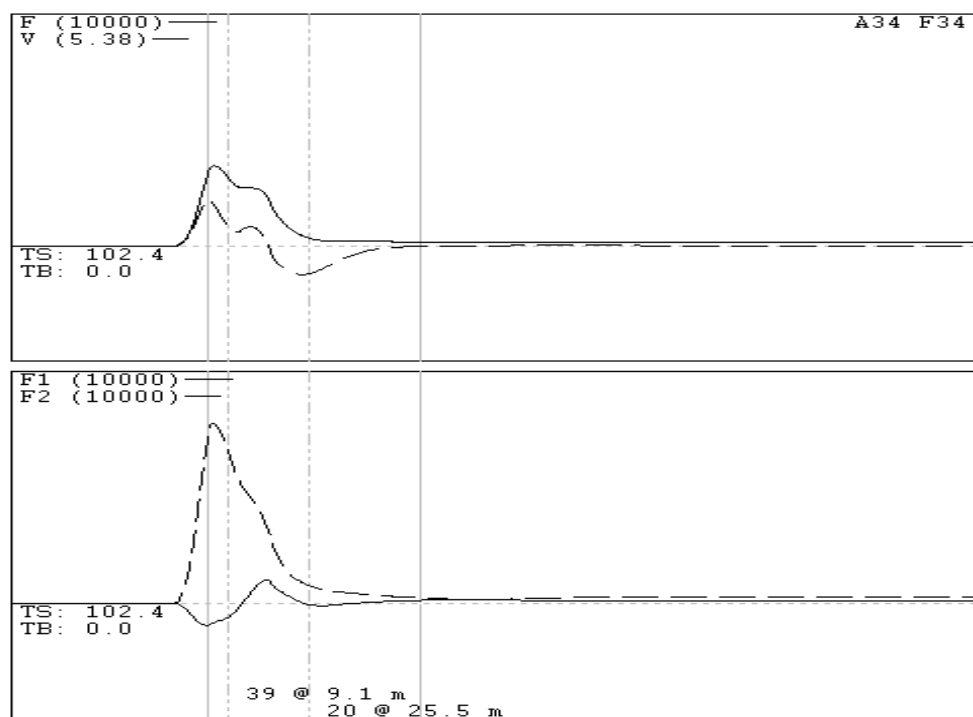
$$F/ZA=C \quad /V$$

C---使 F 和 ZV 分开

A , --使 F 和 ZV 值同等变化

6.5 . 桩身完整性的判断

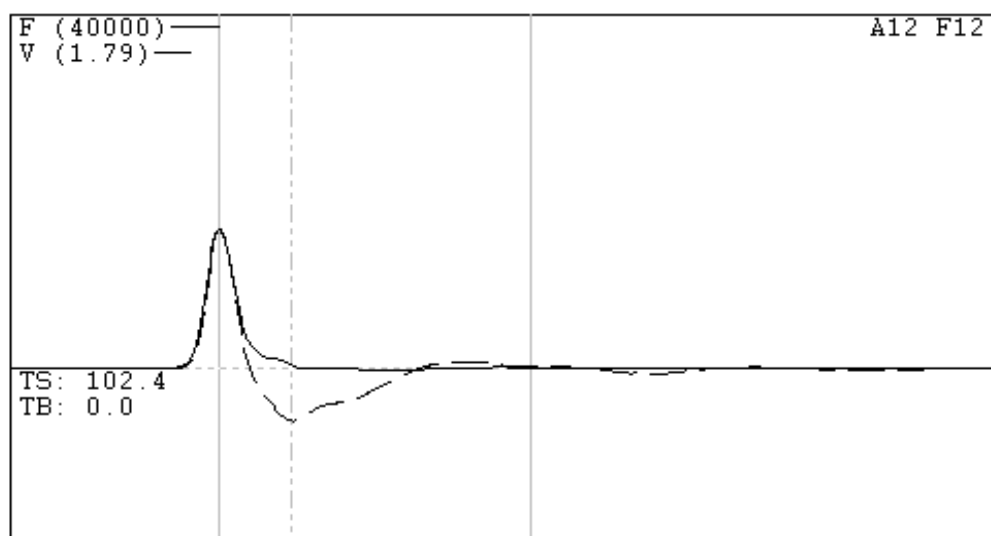
1 . 曲线异常引起的 BTA 降低 ;



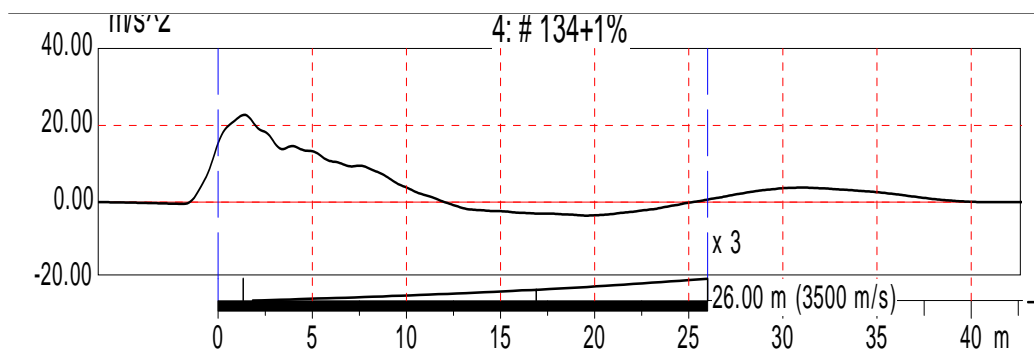
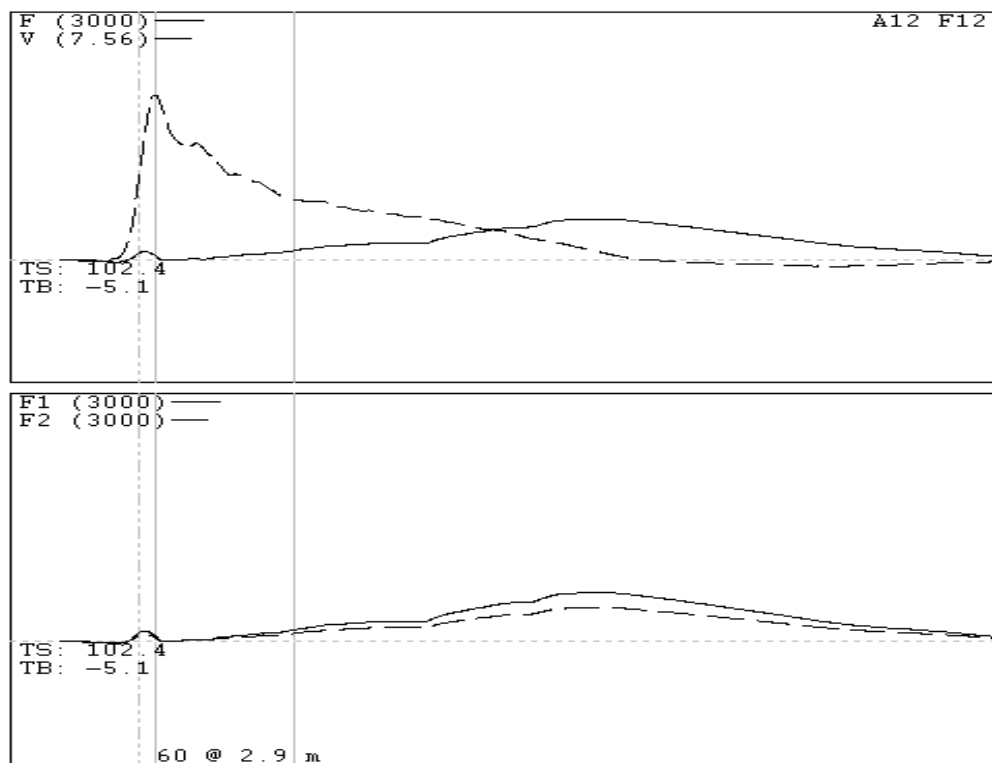
2. 打入桩的接头问题；

3. 灌注桩的扩缩径问题；

4 土阻力的激发不充分问题



5. 桩头附近（盲区严重缺陷 1 米左右）



----- 结束 -----

谢 谢 ！