

# 基 桩 高 应 变 动 测 技 术

张林海 上海锐欣仪器科技有限公司

<http://www.ruistar.net>



2024 年 03 月

## 目 录

### 第一章 振动与波的基础知识

#### 1.1 质点振动

#### 1.2 波动 应力波

### 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

#### 2.2 下行波与上行波

#### 2.3 $v_{\downarrow}(t)$ , $v_{\uparrow}(t)$ , $F_{\downarrow}(t)$ , $F_{\uparrow}(t)$ 与 $F(t)$ , $v(t)$ 之间关系

#### 2.4 应力波在自由端、固定端的反射

#### 2.5 杆件阻抗变化的反射、透射特征

#### 2.6 土阻力波

### 第三章 凯斯法

#### 3.1 基本假定

#### 3.2 基本的凯斯法计算公式数学推导

#### 3.3 求取静土阻力 $R_s$

#### 3.4 凯斯法中几种确定承载力的计算方法

#### 3.5 高应变动测桩身结构完整性判断

#### 3.6 打桩锤击压应力和拉应力检测

#### 3.7 凯斯法小结

### 第四章 高应变试验现场实测

#### 4.1 几个基本概念

#### 4.2 高应变的测试系统

#### 4.3 锤和锤重的选择

#### 4.4 桩垫材料的作用与选择

#### 4.5 传感器的安装

#### 4.6 参数的选用

#### 4.7 实测资料的初步分析

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

#### 4.9 桩身阻抗变化在 $F \sim V$ 曲线上表现



- 4.10 桩侧土阻力在  $F \sim V$  曲线上的表现
- 4.11  $F \sim V$  曲线上时间轴  $t=2L/C$  处所包含的信息
- 4.12 几种常见的输出结果曲线的定性分析
- 4.13 打桩监控
- 4.14 检测桩的数量
- 4.15 采样时间长度的匹配

## 第五章 曲线拟合法

- 5.1 基本模型
- 5.2 曲线拟合的基本过程
- 5.3 基本算法
- 5.4 主要土参数对拟合曲线的影响
- 5.5 拟合质量的评估
- 5.6 曲线拟合标准
- 5.7 基本输出结果

## 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
- 6.2 高应变动测所得承载力评价
- 6.3 动静对比的条件
- 6.4 现场锤击的好坏至关重要
- 6.5 高应变动测试验的局限性
- 6.6 典型的锤击设备

## 第一章 振动与波的基础知识

### 1.1 质点振动

#### 1. 质点振动的概念

是指质点在平衡位置附近以某种方式进行的往复运动。

#### 2. 质点振动系统模型的组成：质点、弹簧和阻尼器。见图 1.1。

#### 3. 振动的主要分类

(1) 自由振动：系统不受外力作用，而阻尼又可以忽略不计的情况下的自然振动。自由振动的振幅决定于振动开始时系统所具有的能量，而振动的频率则决定于系统本身的参量。自由振动的频率就是系统的固有频率。

(2) 阻尼振动：质点振动时受阻力作用，形成能量损失而使系统的振动幅值逐渐减小的振动。

(3) 受迫振动：系统受外力作用而被强迫进行的振动。如果外力激励是周期性的和连续的，则受迫振动就是稳态振动。受迫振动的特性与外部激励力的大小、方向和频率密切相关。

#### 4. 振动系统的自由度

- (1) 单自由度系统：系统的几何位置仅需一个参数就能决定。
- (2) 多自由度系统：系统的几何位置仅需多个参数才能决定。

#### 5. 描述振动的参数

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。

#### 6. 描述振动的主要物理量

质点运动的加速度  $a$ 、速度  $v$ 、位移  $u$ 、频率、周期

$a/v/u$  三者之间存在微积分的关系，可以相互换算：

$$v = du/dt = \int a dt$$

$$a = dv/dt = d^2u/dt^2$$

$$U = \int v dt$$

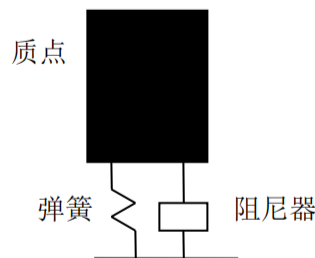
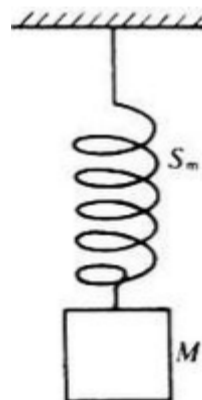


图 1.1 质点振动系统模型



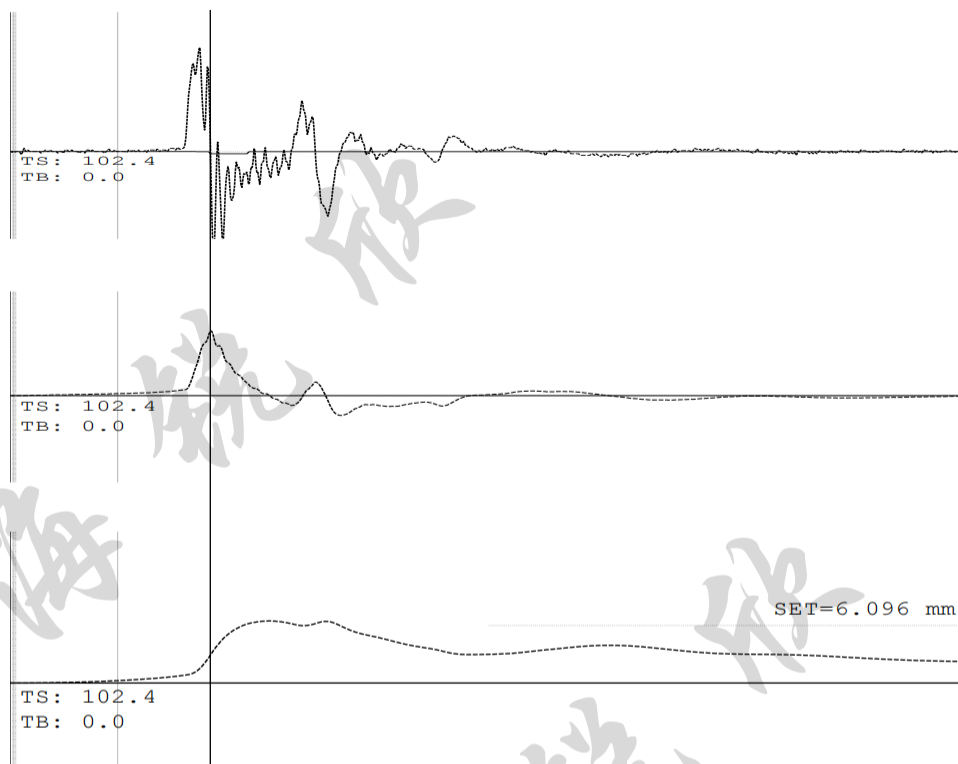


图 1.2 加速度、速度和位移三者之间的关系

## 7. 冲击脉冲的特征

冲击脉冲是一种在外在的瞬时、短促力作用下，激发起的振动。这种振动的特点是：形状非完全对称，持续时间短暂。

峰值（ $V_{max}$ ）：脉冲产生的最大振动速度幅值

脉冲时间宽度（ $T$ ）：整个冲击脉冲的持续时间。

频率（ $f$ ）：冲击脉冲的持续时间  $T$  的倒数：

$$f = 1/T$$

脉冲波形时间较长，则脉冲频率较低，一般称为低频脉冲；

脉冲波形时间较短，则脉冲频率较高，一般称为高频脉冲。

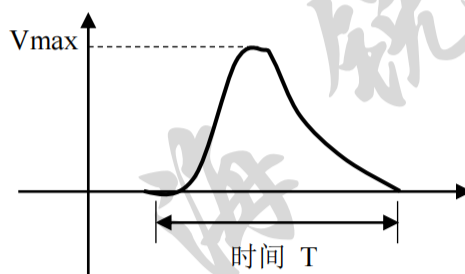


图 1.3 冲击脉冲

## 1.2 波动 应力波

1. 波动：任何连续介质内质点的振动都会向四周传播扩散，波动就是这种局部振动向四周的传播过程。

这种介质必须是连续的，波动中的各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。

因此，波的产生条件是：（1）有振动的波源；（2）有能传播振动的连续介质。

### 2. 波的传播过程

（1）波传播的是振动形式和能量。每个质点只在各自的平衡位置附近做振动，并不随波迁移，后一质点的振动总是落后于带动它的前一质点的振动。

（2）介质中各质点的振动周期和频率都与波源的振动周期和频率相同。

（3）由波源向远处的各质点，都依次重复波源的振动。

3. 弹性波：波在各种形态的连续介质中都可以生成。如果介质的应力应变始终处于其材料弹性范围内的波动，被称为弹性波。就可以应用弹性力学原理来进行描述。

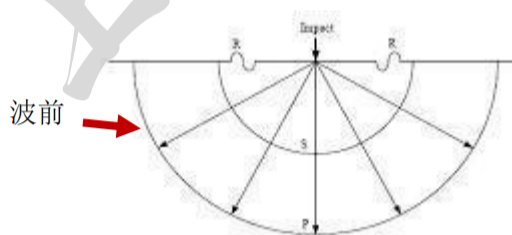
### 4. 应力波 声波

在固体中传播的弹性波称为应力波；在流体中传播的弹性波称为声波。

### 5. 描述波动的几个常见概念：

#### （1）波面和波前

波面：波源发出的振动在介质中传播经相同时间到达的各点组成的面称为波阵面，简称波面。把波面中走在最前面的那个波面称为波前。



#### （2）体波和面波

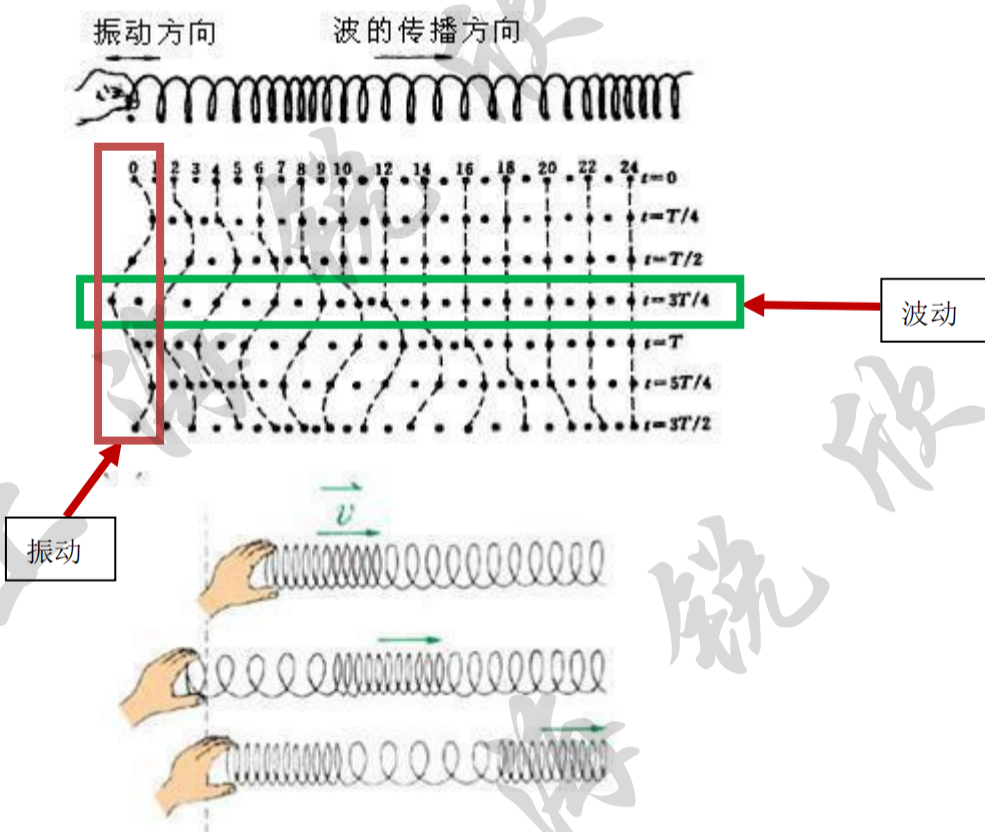
体波：就是能够在弹性介质内部任何部位传播。体波有纵波（P波）和横波（S波）两种。

面波：只能沿弹性介质的表面进行传播。面波主要有 Rayleigh 波（R波）和 Love 波两种。



## 6. 体波的分类

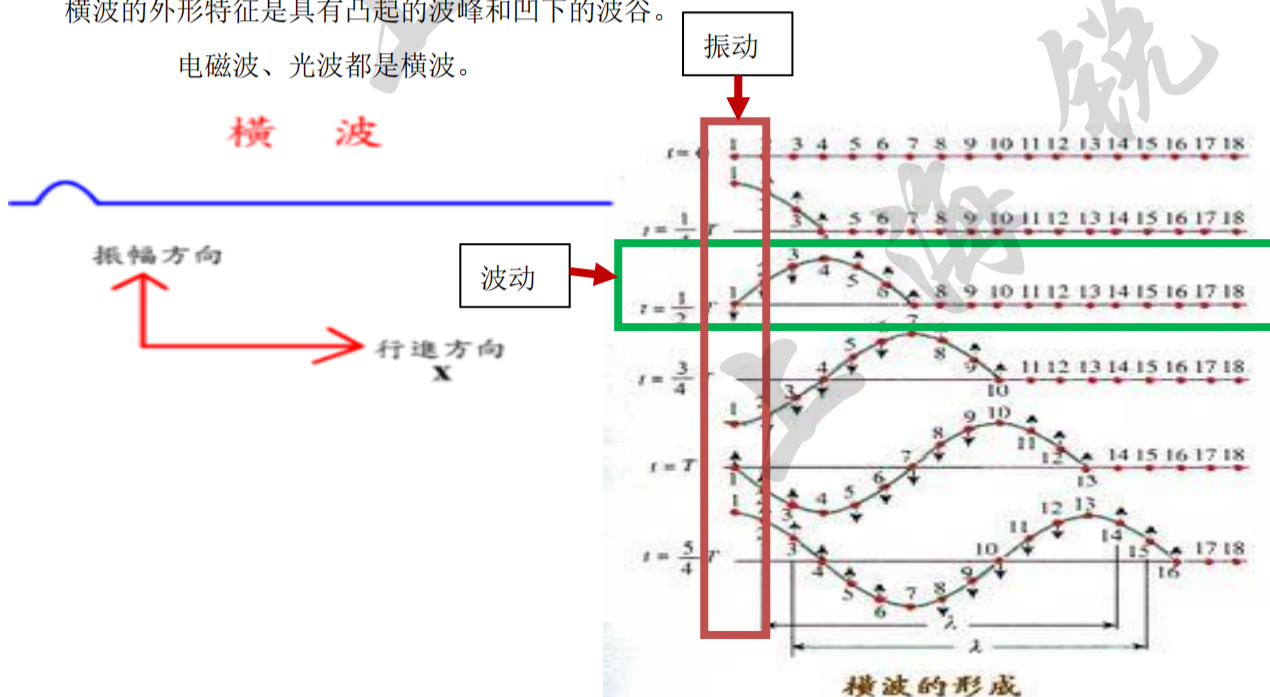
(1) 纵波(P波)：是指质点的振动方向与波动的传播方向相一致。纵波是一种伸缩运动，只要介质在长度变化方面具有弹性性质，纵波就能在其中传播。因此纵波有可能在任何固体、液体和气体中传播。纵波的外形特征是具有“疏松”和“稠密”的区域，也称为疏密波。(在高应变和低应变动测试验中，所研究的应力波都为纵波。) 纵波速度始终大于横波速度。



(2) 横波(S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。

电磁波、光波都是横波。



## 7. 波的图像与振动图像的区别

波的图像反映介质中各个质点在某一时刻偏离平衡位置的位移（速度、加速度）。

振动图像反映同一个质点在不同时刻偏离平衡位置的位移（速度、加速度）。

## 8. 描述波动的几个物理量

- (1) 波长  $\lambda$ ：振动在一个周期内传播的距离等于波长。波长在纵波中是两相邻的密部（或疏部）之间的距离；在横波中是两个相邻的波峰或相邻的波谷之间的距离。

$$\lambda = T \times C \quad (T \text{ 为周期, } C \text{ 为波速})$$

波长的长度与波速  $C$  和周期  $T$  有关，即波长由波源（波的频率或周期与波源振动频率或周期相同）和介质（波速）共同决定。

- (2) 波动频率  $f$ （或周期  $T$ ）：波的频率(或周期)由振源决定，大小就是波源的振动频率(或周期)。波的传播过程中，经过任何介质时，传播波的频率(或周期)都保持不变。波从一种介质进入另一种不同介质时，唯一不变的是频率(或周期)，波速与波长都发生变化。

- (3) 波速：单位时间内波向外传播的距离： $C = \lambda / T = \lambda f$ 。波速的大小本质上是由介质决定的。

介质能传播波是因为介质中各质点间有弹力的作用，弹力越大，相互对运动的反应越灵敏，则对波的传播速度越大。波的传播速度由介质决定，与振动频率无关。

但是在基桩检测的工程实践中，同一根桩超声波检测、低应变、高应变检测，实测波速有差异，这可能是因为桩身混凝土是非完全弹性的，有一定的粘性等因素有关；另外相同材料的桩，但是不同的长度，实测平均波速也有差异。

波从一种介质进入另一种介质，频率不会发生变化，波速和波长将发生改变。

## 9. 波速与质点振动的速度的区别

波速与质点振动的速度有着本质的区别，切忌混为一谈。

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。一般来说，只要变形没有超过材料的弹性限度，质点将不可能脱离介质，而只能其平衡点来回摆动运动。

波传播速度（ $C$ ）：应力波的波前会跨越一系列质点，不断向前传播。波速就是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（纵波），即波速（ $C$ ）要达到几千  $m/s$ ，两者要相差几千倍。典型的值如表 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（ $m/s$ ）	3300~3900	3500~4000	3800~4400	5100

表现在高应变实测曲线中，如图 1.4 所示。

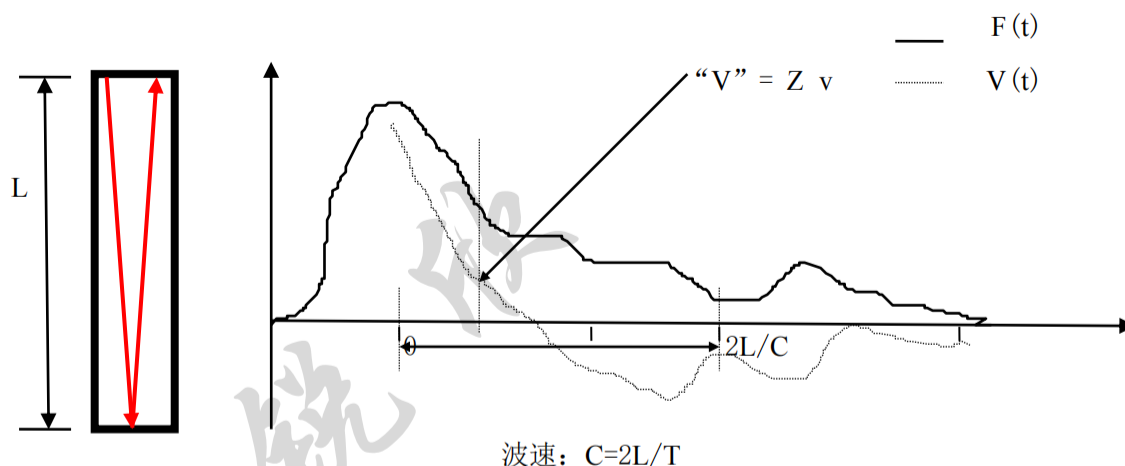


图 1.4

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

#### 10. 应力波的变形参数

包括应变  $\varepsilon$ 、应力  $\sigma$  和力  $F$ （即一定范围内应力的总和）

在弹性范围内，材料中的应变  $\varepsilon$  和应力  $\sigma$  的关系取决于材料的弹性模量  $E$ ：

$$\sigma = E \varepsilon$$

一定面积  $A$  范围内的作用力  $F$ ，严格来说应该在其面积内，对应力进行积分计算而得到。对于均匀的应力场或者已知其平均应力值，则可以直接计算：

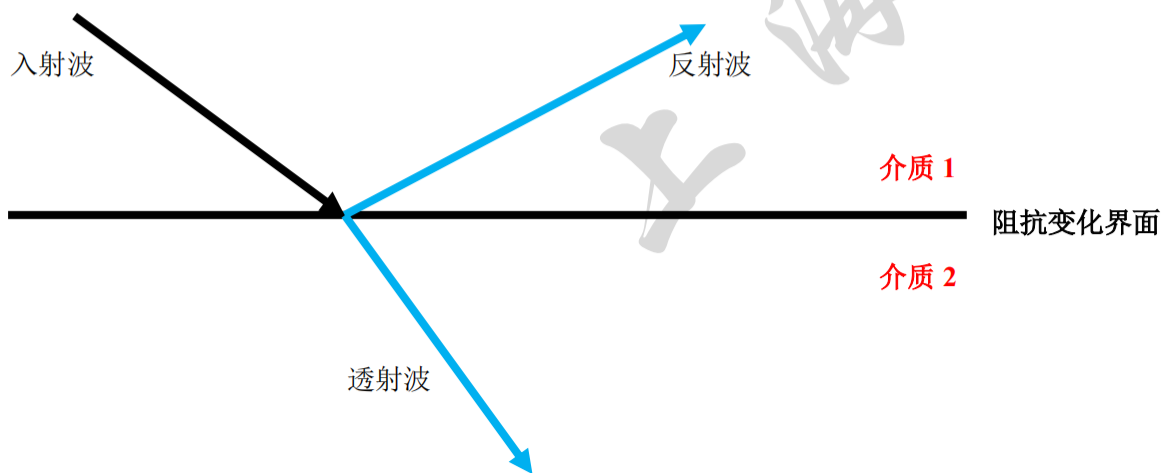
$$F = EA \varepsilon$$

#### 11. 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。

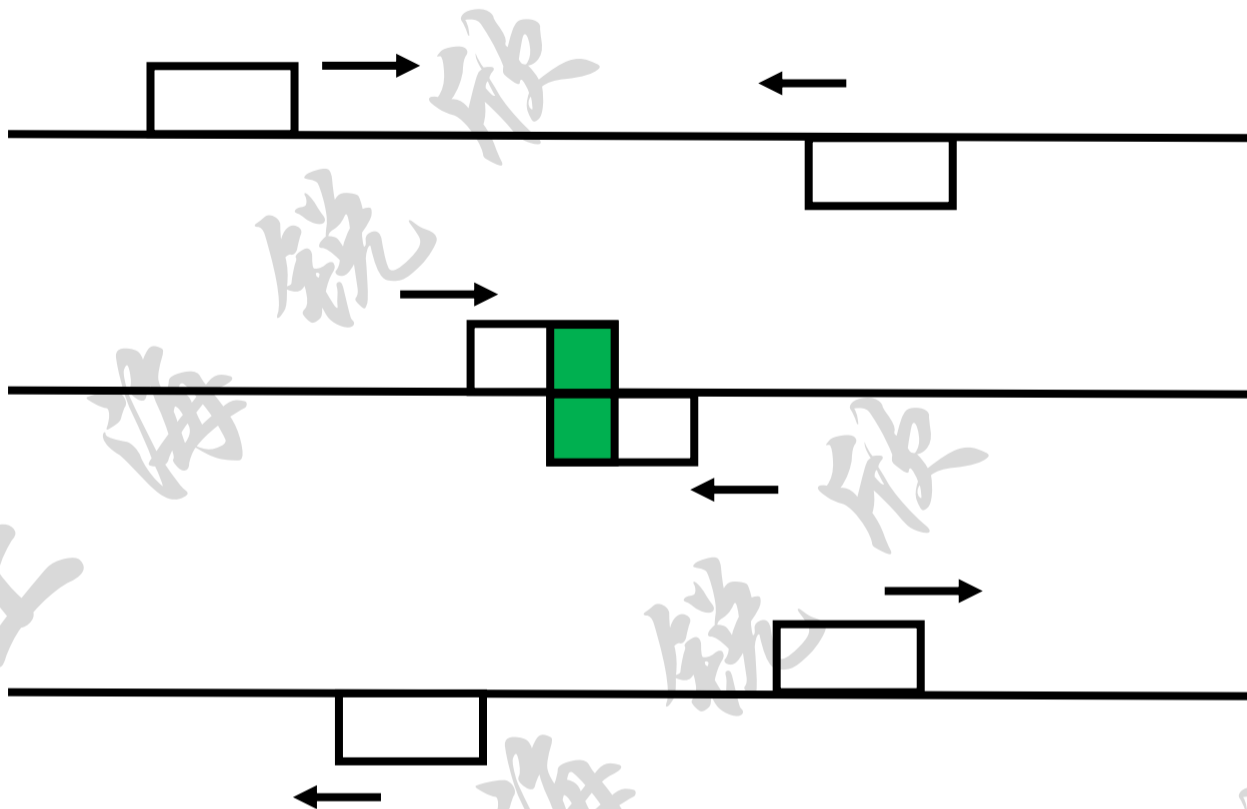
##### ①. 反射、透射：

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。



## ②. 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。



## 12. 波阻抗 (Z)

①. 波阻抗的定义：桩身截面所受内力增量与质点运动速度增量之比。

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

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

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

$$\text{其中： } E = \rho C^2 \quad \rho = \gamma / g$$

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,  $\text{kPa}$

$C$  --- 波速,  $\text{m}/\text{s}$

$A$  --- 桩身截面面积,  $\text{m}^2$

$\rho$  --- 桩身材料质量密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$

$\gamma$  --- 桩身材料重度,  $\text{kN}/\text{m}^3$

$g$  --- 重力加速度,  $\text{m}/\text{s}^2$

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	高强度预应力管桩	钢桩
重度 ( $\text{kN}/\text{m}^3$ )	24.0	24.5~25.0	25.0~26.0	78.5
密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	2400	2450~2500	2500~2600	7850

## 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

在以下介绍的应力波理论中，首先必须满足以下几个条件：

#### 1 桩为一维线弹性细长杆件

一般认为，对于我们高应变检测，所谓细长杆件是指符合  $L/D \geq 5$  的要求。（ $L$  为杆件长度， $D$  为杆件的截面直径）。

（1）这样才能采用一维波动理论

（2）这样截面为平面的假定才能成立

#### 2 杆件的截面直径不得大于应力波的波长（ $\lambda$ ）

根据研究，与截面直径相比，波长必须足够大， $\lambda/D \geq 5$ ，在这种情况下，横向运动所产生的惯性力对纵向运动的效应才可以忽略不计。

举例：高应变冲击力脉冲时间宽度  $T=3\text{ms}$ ，应力波传播的速度为  $4000\text{m/s}$ ，则波长  $\lambda = 12$  米。一般情况下是能够满足这个条件的。

#### 3 杆件的长度必须大于应力波的波长

这样应力波才能在杆件中展开传播，才具有波动特性，否则杆件的运动就是刚体运动了。

### 2.2 下行波与上行波

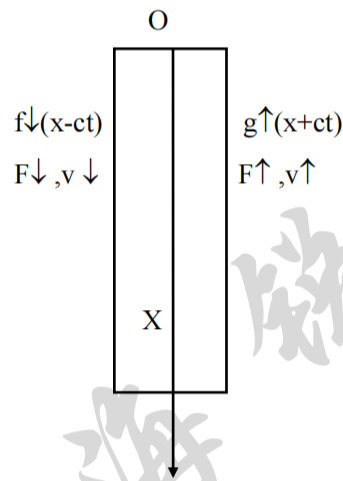


图 2.1

几个规定：

1. 杆件上端面为坐标原点  $O$ ， $X$  轴向下为正（与锤击力方向一致）。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  $\sigma$  和应变  $\epsilon$  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：

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

$u$  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：

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

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  $f\downarrow(x-ct)$ ：

$$v\downarrow = \partial f\downarrow(x-ct)/\partial t = -Cf'\downarrow$$

$$\varepsilon\downarrow = -\partial f\downarrow(x-ct)/\partial x = -f'\downarrow$$

因此有： $v\downarrow = C\varepsilon\downarrow$        $c = v\downarrow / \varepsilon\downarrow$

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

而  $F\downarrow = \varepsilon\downarrow \cdot E \cdot A = (EA/C)v\downarrow = Zv\downarrow$

其中波阻抗  $Z = EA/C$

故： $F\downarrow = Zv\downarrow$        $\dots\dots(2.4)$

在下行波作用下中，杆件截面受力与该截面上被激发的质点运动的速度有关，两者始终成正比例。

②. 上行波  $g\uparrow(x+ct)$ ：

$$v\uparrow = \partial g\uparrow(x+ct)/\partial t = Cg'\uparrow$$

$$\varepsilon\uparrow = -\partial g\uparrow(x+ct)/\partial x = -g'\uparrow$$

因此有： $v\uparrow = -C\varepsilon\uparrow$        $\dots\dots(2.5)$

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

故： $F\uparrow = -Zv\uparrow$        $\dots\dots(2.6)$

在上行波作用下中，杆件截面受力与该截面上被激发的质点运动的速度有关，两者始终成反比例。

因此： $F\downarrow = Zv\downarrow$

$F\uparrow = -Zv\uparrow$

**要点：**（1）明确应力波的运动方向，是上行（与锤击力方向相反，即与  $X$  轴反向）的？还是下行的（与锤击力方向相同，即与  $X$  轴同向）？在应用公式的时候，一定要对号入座。

（2）这里的力和速度之间是有因果关系的。是该作用力在传播经过某个截面时，在该截面上引起的质点的运动速度。如有几个力同时作用，应该分别计算各自力产生的各自速度大小，再将这几个速度进行矢量叠加计算。

**举例：**阻抗为 2500kN.s/m 的桩，在 5000kN 的锤击力作用下，在桩身中产生的质点运动速度是多少？（不考虑能量损失）

计算：由于  $F\downarrow = Zv\downarrow$

$$v\downarrow = F\downarrow / Z = 5000/2500 = 2 \text{ m/s}$$

### 2.3 $v\downarrow(t), v\uparrow(t), F\downarrow(t), F\uparrow(t)$ 与 $F(t), v(t)$ 之间关系

在桩身某位置安装应变和加速度传感器，测得了不同时刻总的截面受力和截面上总的质点运动速度。事实上，我们的传感器测得的是一个经过了叠加了的合成值  $(F(t), v(t))$ ，如果该截面上同时有上行波和下行波共同作用，则通过计算可以从实测的叠加合成值中，将上行波和下行波分量分离出来。

由于：

$$F(t) = F(t)\downarrow + F(t)\uparrow \quad \Rightarrow F(t) = Zv(t)\downarrow - Zv(t)\uparrow$$

$$v(t) = v(t)\downarrow + v(t)\uparrow \quad \Rightarrow Zv(t) = Zv(t)\downarrow + Zv(t)\uparrow$$

上式联立，可得：

$$v(t)\downarrow = (v(t) + F(t)/Z) / 2 \quad \dots\dots(2.7)$$

$$v(t)\uparrow = (v(t) - F(t)/Z) / 2 \quad \dots\dots(2.8)$$

及

$$F(t)\downarrow = (F(t) + Zv(t)) / 2 \quad \dots\dots(2.9)$$

$$F(t)\uparrow = (F(t) - Zv(t)) / 2 \quad \dots\dots(2.10)$$

**要点：**（1）可以这样理解：理论上分量（上行波和下行波）叠加得到合成量（实测值），而事实上，我们是已知合成量（实测值），再根据这个计算公式，从实测的合成量  $(F(t), v(t))$  中，将分量  $F\downarrow(t)$ ， $F\uparrow(t)$  计算出来。

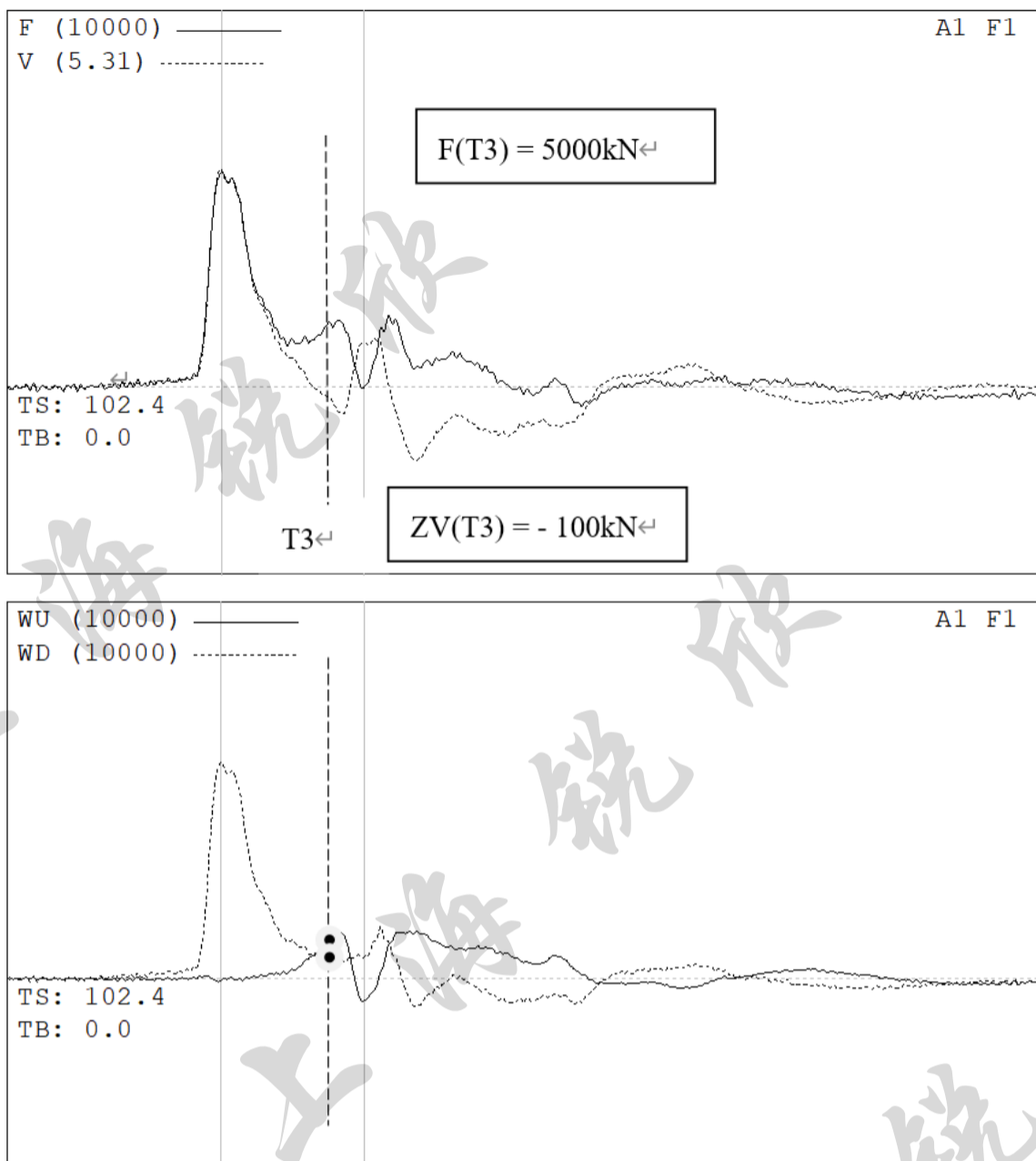
（2）公式中，合成量  $(F(t), v(t))$  和分量  $F\downarrow(t), F\uparrow(t)$  的时刻要对应。

**举例：**如下图，已知  $F(t_3)=5000\text{kN}$ ， $Zv(t_3) = -100\text{kN}$ 。请计算  $F\downarrow(t_3)$ ， $F\uparrow(t_3)$

计算： $F\downarrow(t_3) = (F(t_3) + Zv(t_3))/2 = (5000 - 100)/2 = 2450\text{kN}$

$$F\uparrow(t_3) = (F(t_3) - Zv(t_3))/2 = (5000 - (-100))/2 = 2550\text{kN}$$





## 2.4 应力波在自由端、固定端的反射

### (1) 杆件底部为自由端

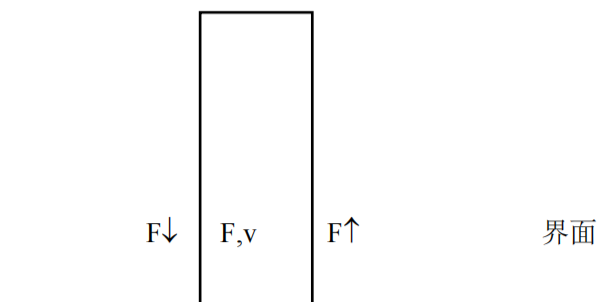


图 2.2 自由端

边界条件为:

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

因而:  $F\uparrow = -F\downarrow$  .....(2.11)

亦即:  $-Zv\uparrow = -(Zv\downarrow)$

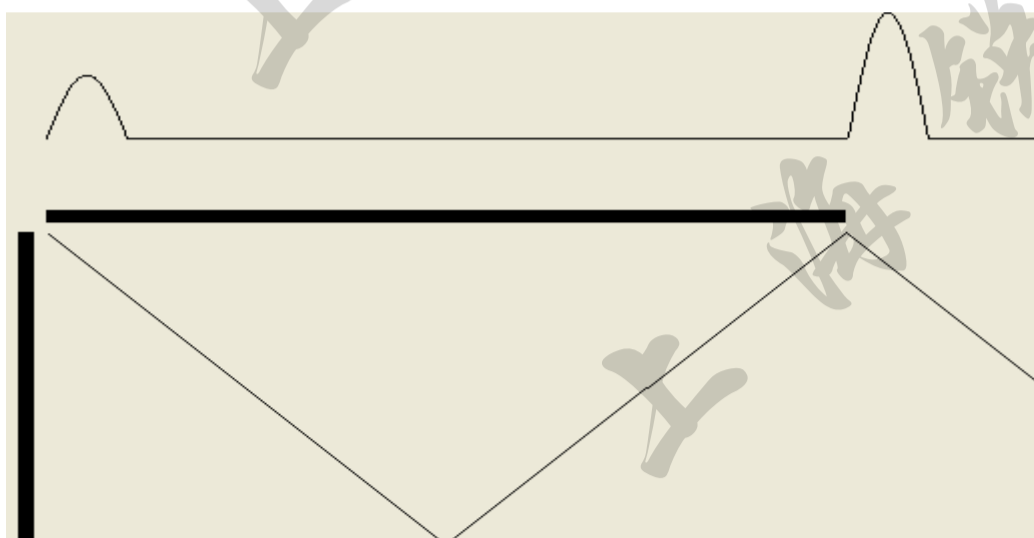
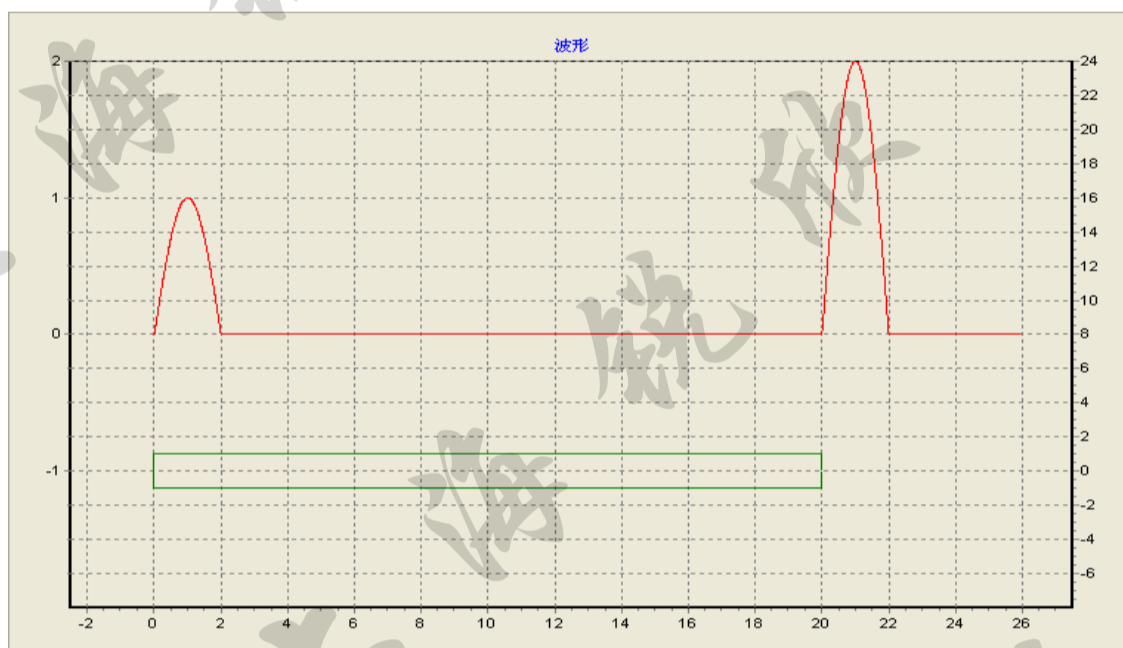
$$\Rightarrow v\uparrow = v\downarrow$$

因此在自由端:  $\Sigma v = v\downarrow + v\uparrow = 2v\downarrow$  .....(2.12)

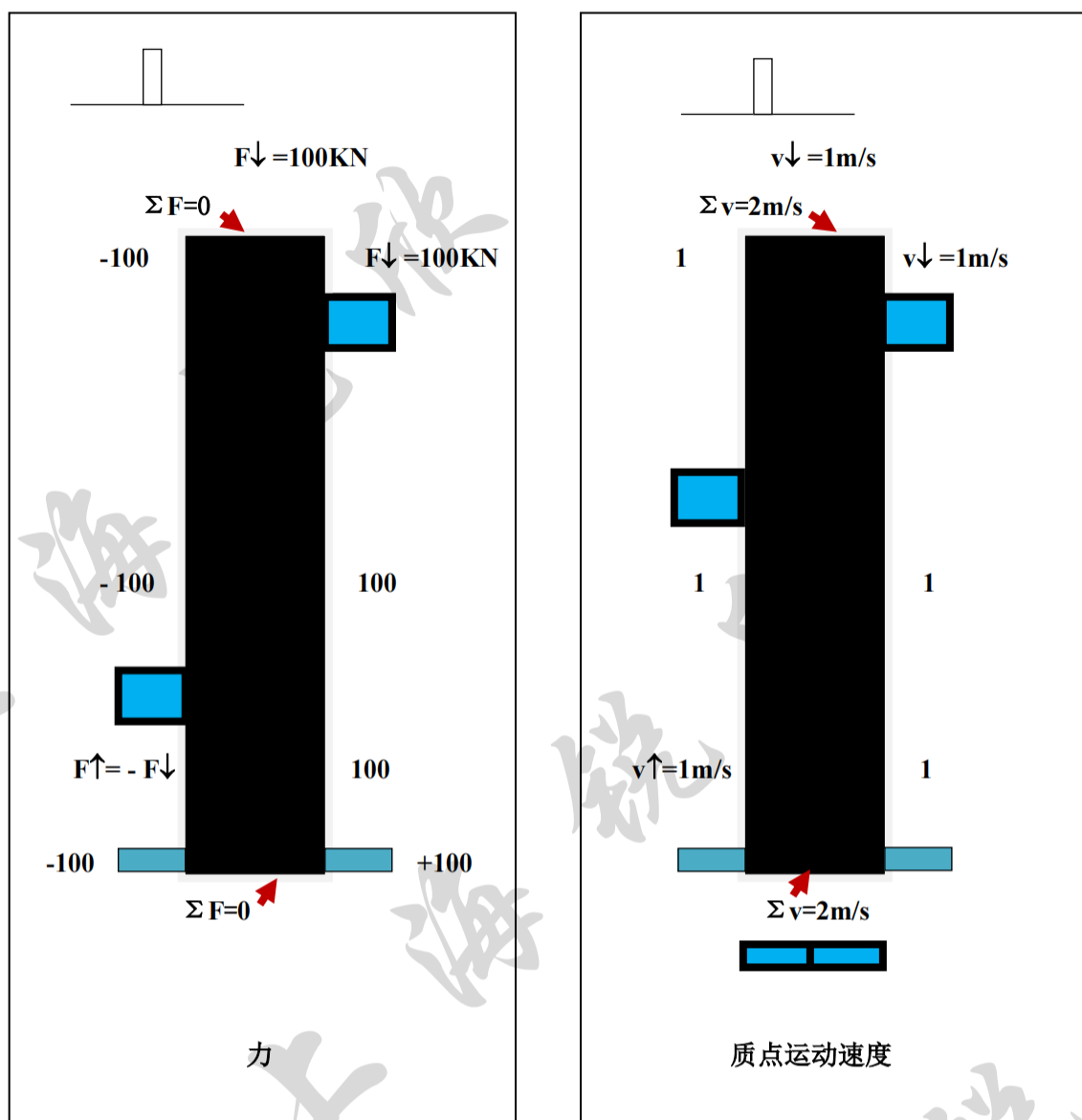
结论:

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。



举例分析：对于矩形入射波



(2) 杆件底部为固定端

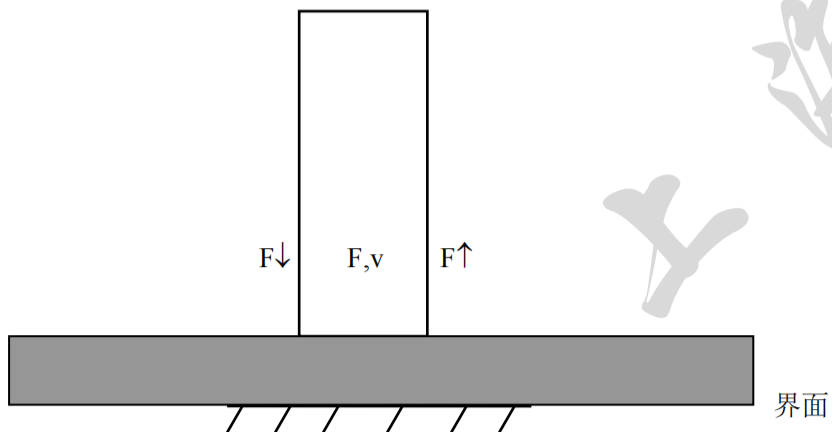


图 2.3 固定端

边界条件:

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

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

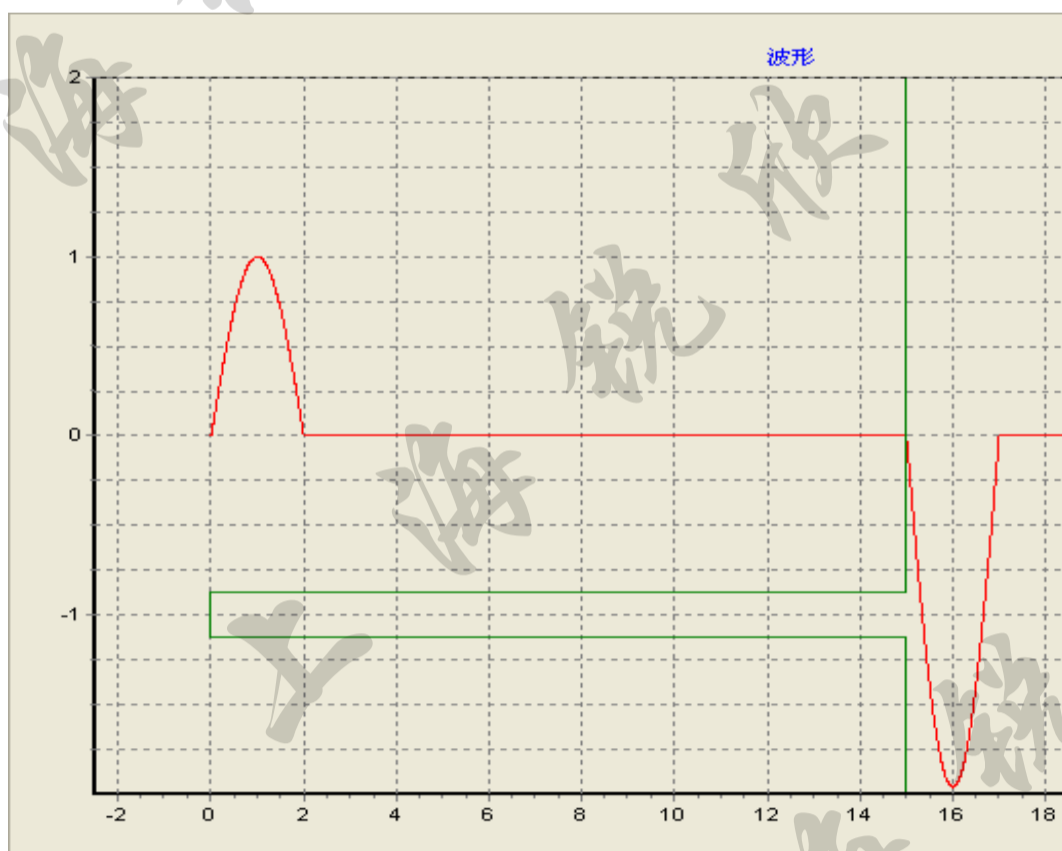
亦即:  $-F_{\uparrow}/Z = -(F_{\downarrow}/Z) \Rightarrow F_{\uparrow} = F_{\downarrow}$

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

结论:

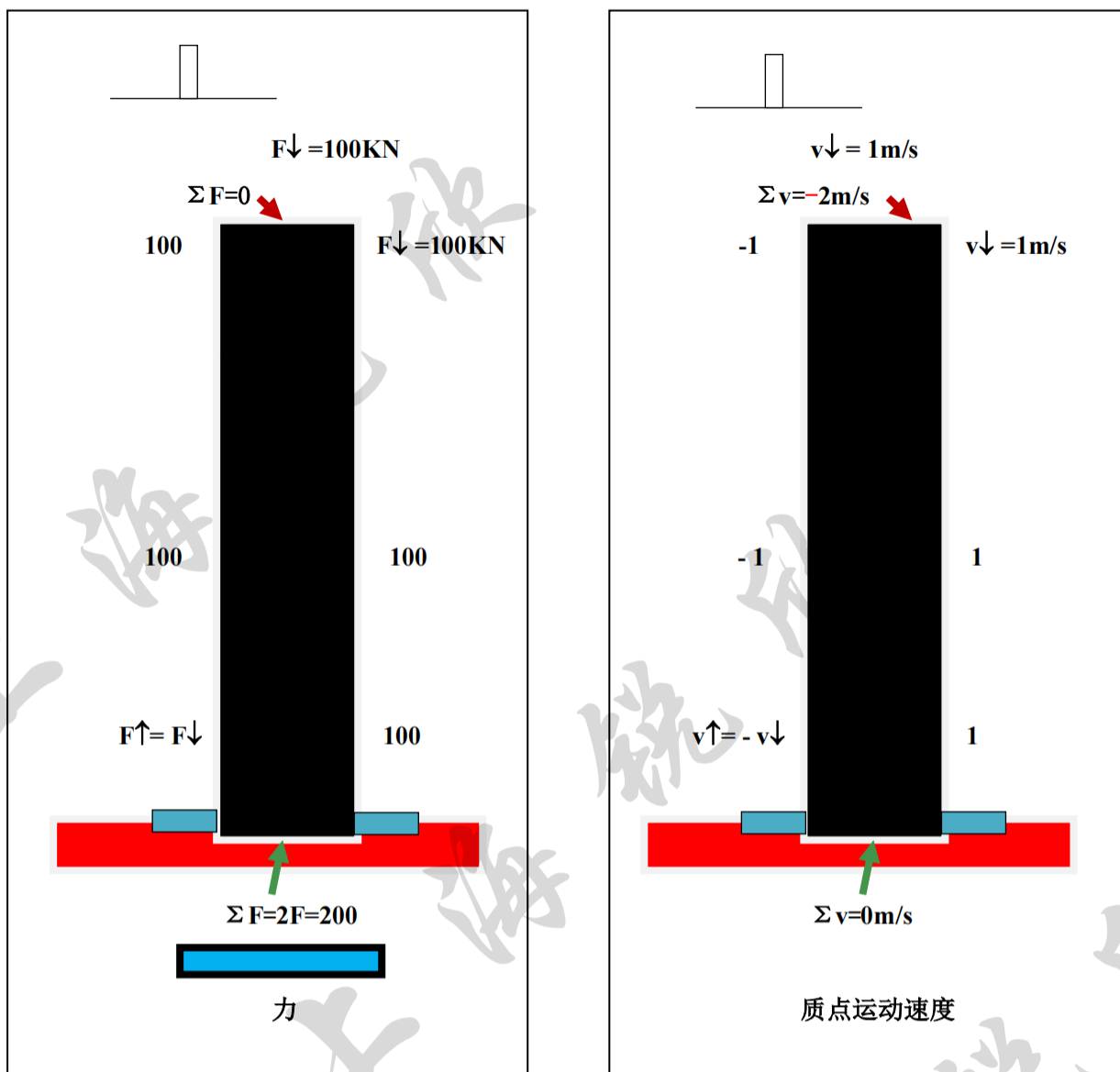
应力波到达固定端后, 将产生一个性质相同、幅值相等的反射波。即压力波产生压力反射波; 拉力波产生拉力反射波。

在杆端处, 由于波的叠加, 使杆端处质点所力增加一倍。





### 举例分析：对于矩形入射波



## 2.5 杆件阻抗变化的反射、透射特征

如下图，杆件中某处的阻抗发生了变化，上段的阻抗为  $Z_1$ ，下段的阻抗为  $Z_2$ 。

(1) 一般地，杆件受到  $F_1 \downarrow$  和  $F_2 \uparrow$  两个应力波的共同作用（如图 2.4）

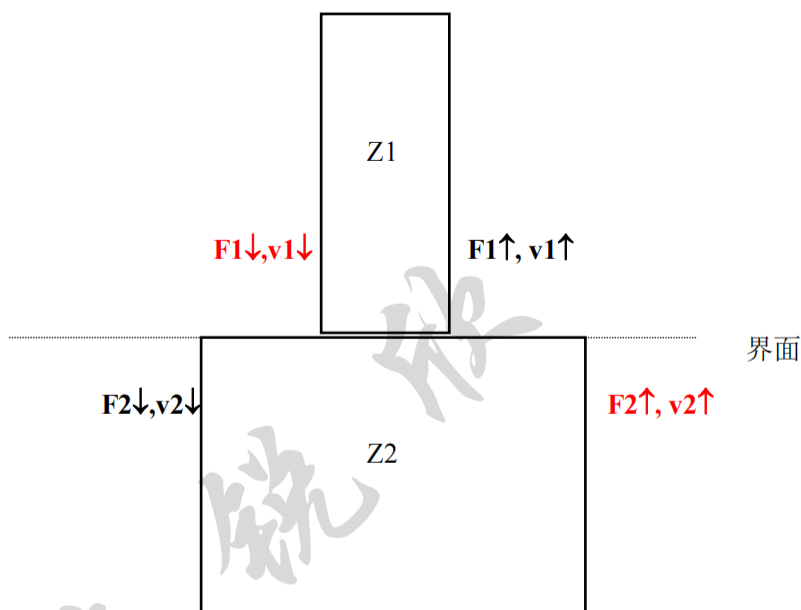


图 2.4

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

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

可得：

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

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

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

则：

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

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

$$(F2\downarrow - F1\uparrow = F1\downarrow$$

$$\Rightarrow F\downarrow_{\text{透射}} = F\downarrow_{\text{入射}} + F\uparrow_{\text{反射}})$$

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

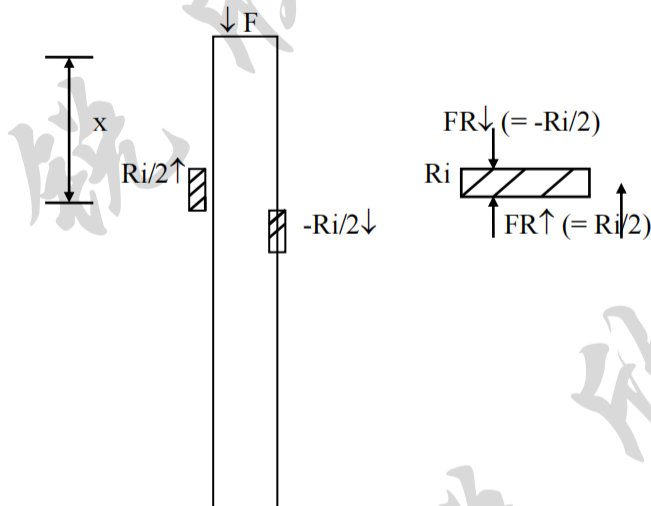


图 2.5

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： $F_{R\uparrow} - F_{R\downarrow} = R_i$

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

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

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

所以有： $F_{R\uparrow} = 1/2 R_i$  .....(2.19)

$F_{R\downarrow} = -1/2 R_i$  .....(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。静阻力采用弹塑性模型，用摩擦键和弹簧模拟；动阻力采用线性的黏滞阻尼模型，用阻尼壶模拟。

并假定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。

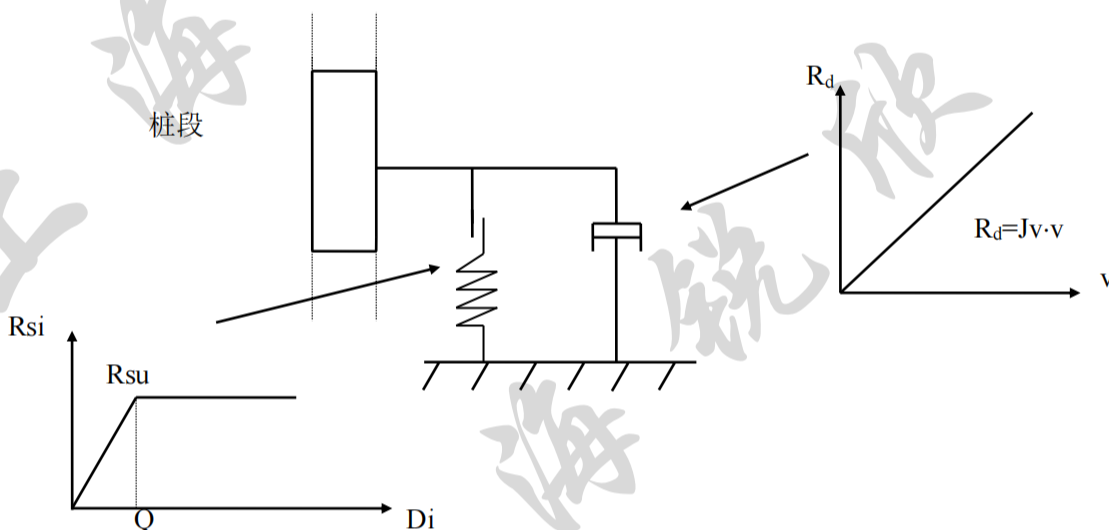


图 3.1 土的基本模型

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， $\text{kN}\cdot\text{s}/\text{m}$ 。（量纲与波阻抗  $Z$  同）

在高应变试验中常用的阻尼系数还有：

Smith 阻尼系数  $J_s$ ， $\text{s}/\text{m}$ ；

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

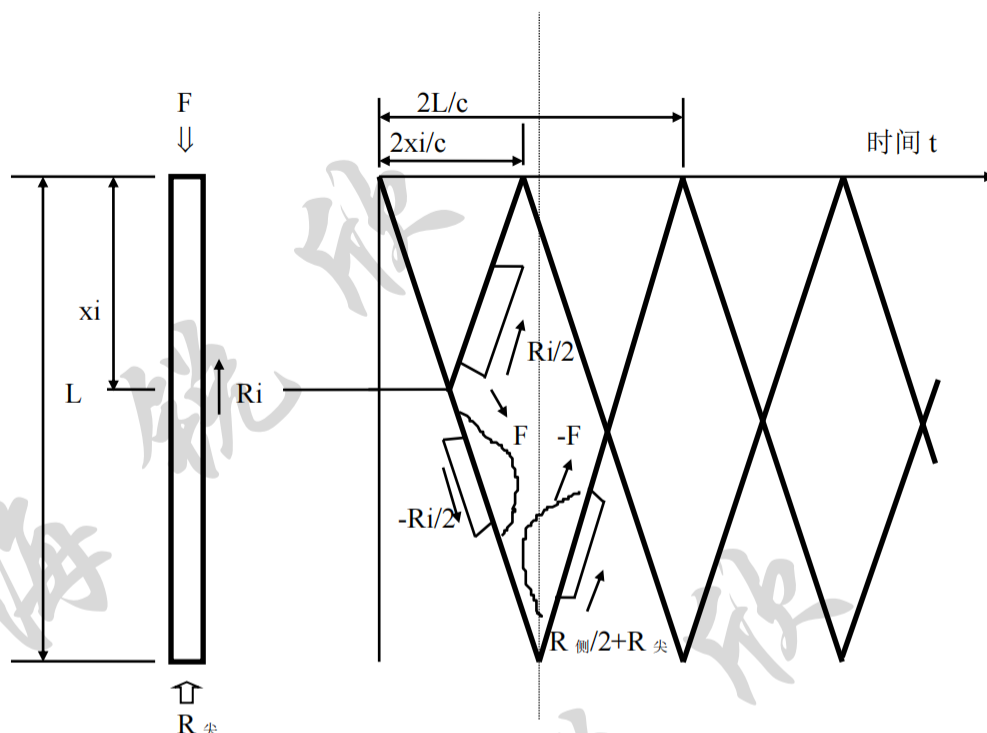


图 3.2 应力波在桩身中传播示意

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. 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  $1/2 R(i, t)$ ，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  $\Sigma -1/2R(i, 2L/C)$ )

=  $-R_i/2$ ), 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。

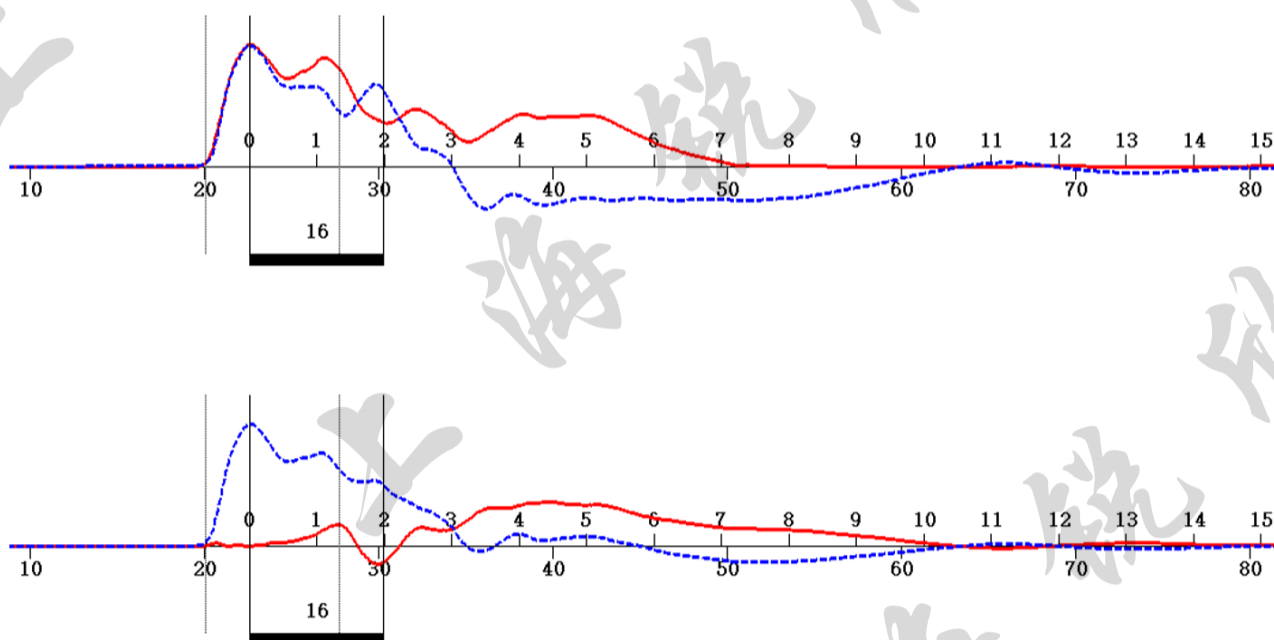
⑧. 将③⑤⑥⑦中的三类叠加波全部叠加起来得:  $F(t)$ ,  $V(t)$  表达式。

⑨. 将  $F(t)$ ,  $V(t)$  表达式在时间上取为 “ $t_2=t+2L/C$ ”, 则得  $F(t+2L/C)$ ,  $V(t+2L/C)$  表达式。

⑩. 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:  $R_{\text{总}}=R_s+R_d$ 。因此  $R_s=R_{\text{总}}-R_d$

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  $V_{\text{尖}}$  成正比。即

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

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

$J_c$  为桩尖处土的凯司阻尼系数, 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. 由向下传播的锤击压力  $F(t_1)$  在桩尖处所激发产生的质点运动总速度  $V_{尖1}$  为:

$$V_{尖1} = 2 \times (F(t_1)/Z) \dots (3.3) \quad (\text{自由端 2 倍})$$

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

$$V_{尖2} = 2 \times [(-R_{侧}/2)/Z] = -R_{侧}/Z \dots (3.4) \quad (\text{自由端 2 倍})$$

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:

$$V_{尖3} = -R_{尖}/Z \dots (3.5)$$

将①②③三部分进行叠加, 则有:

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

(其中  $R_{总} = R_{侧} + R_{尖}$ )

将式 (3.6) 代入式 (3.2) 可得:

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

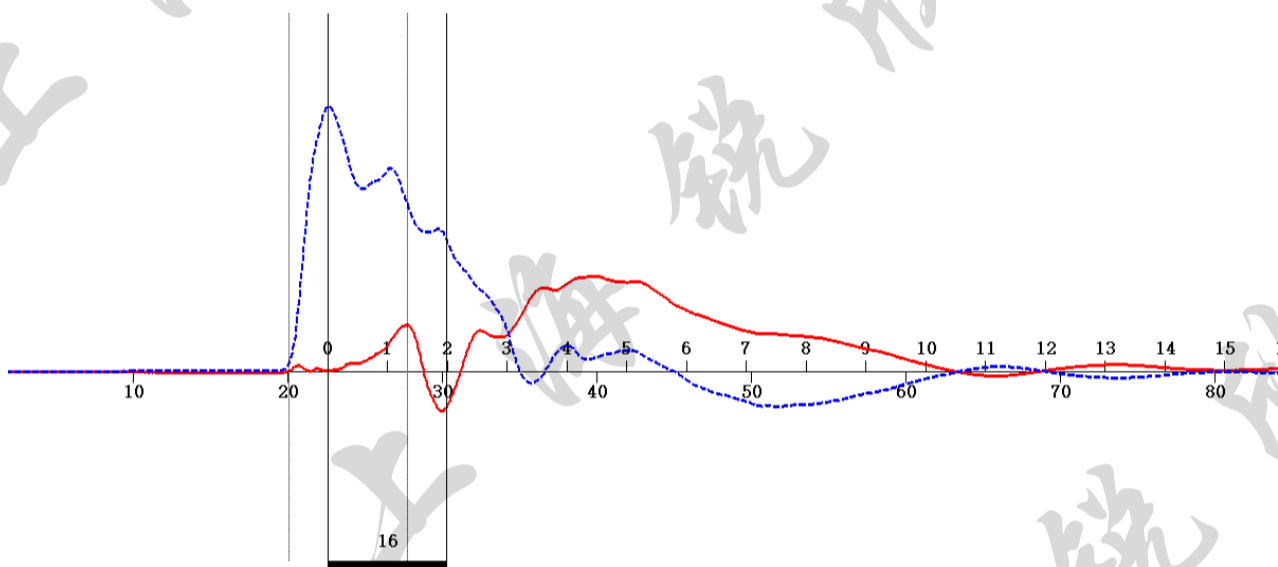
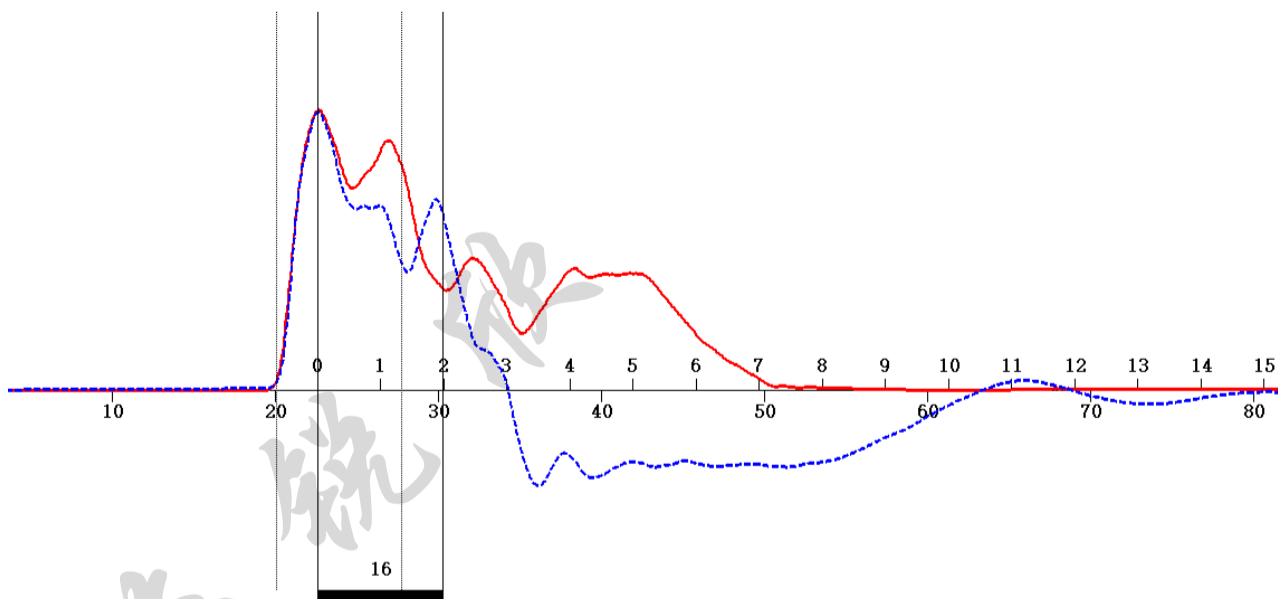
因此有:

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

将 (3.1) 代入 (3.9), 并整理得:

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

式 (3.10) 就是计算单桩承载力的基本公式。



$$R_s = (1-J_c) [F(t_1)+ZV(t_1)] / 2 + (1+J_c) [F(t_1+2L/C) - ZV(t_1+2L/C)] / 2$$

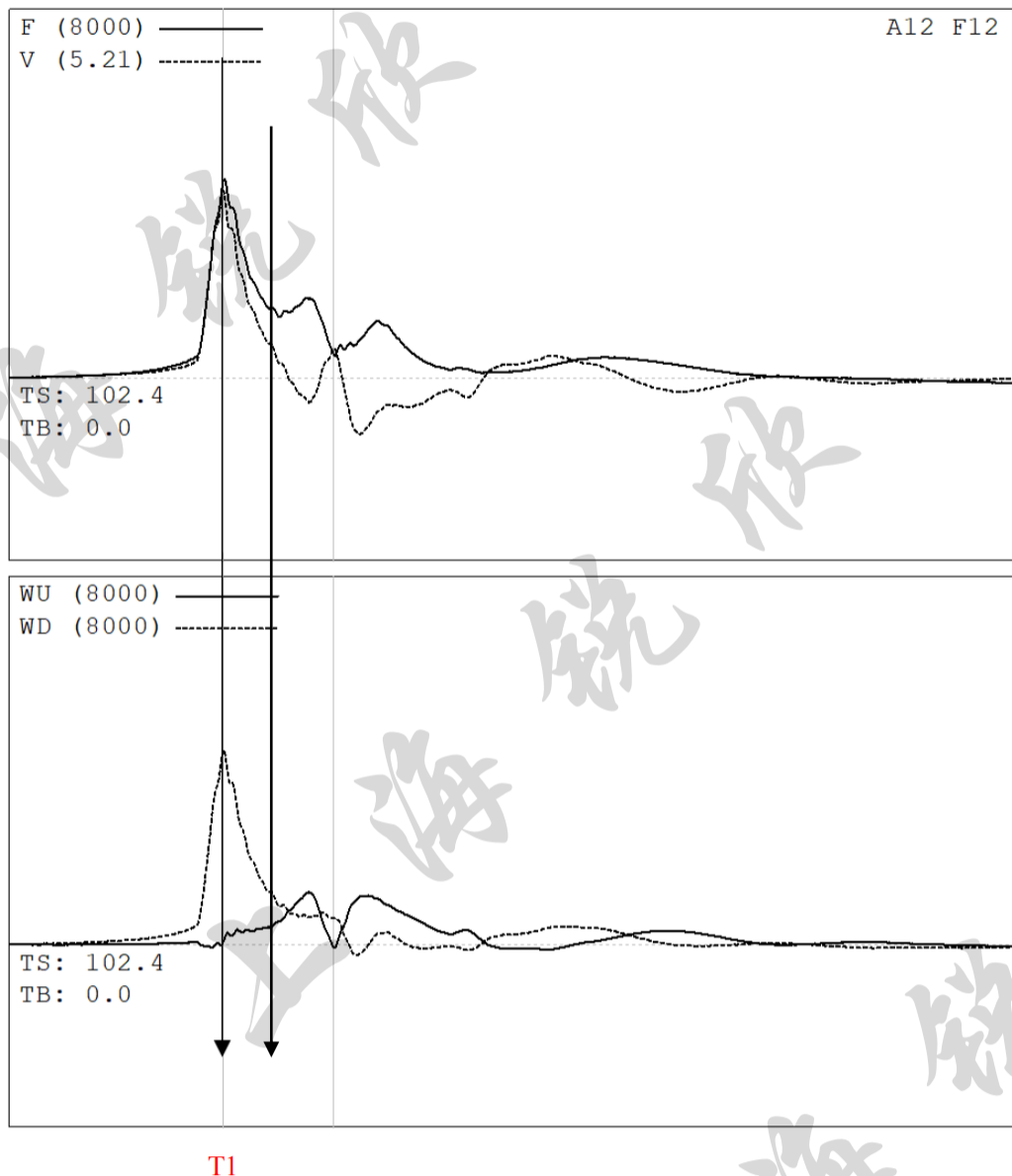
$$= (1-J_c)F\downarrow(t_1) + (1+J_c)F\uparrow(t_1+2L/C)$$

### 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。

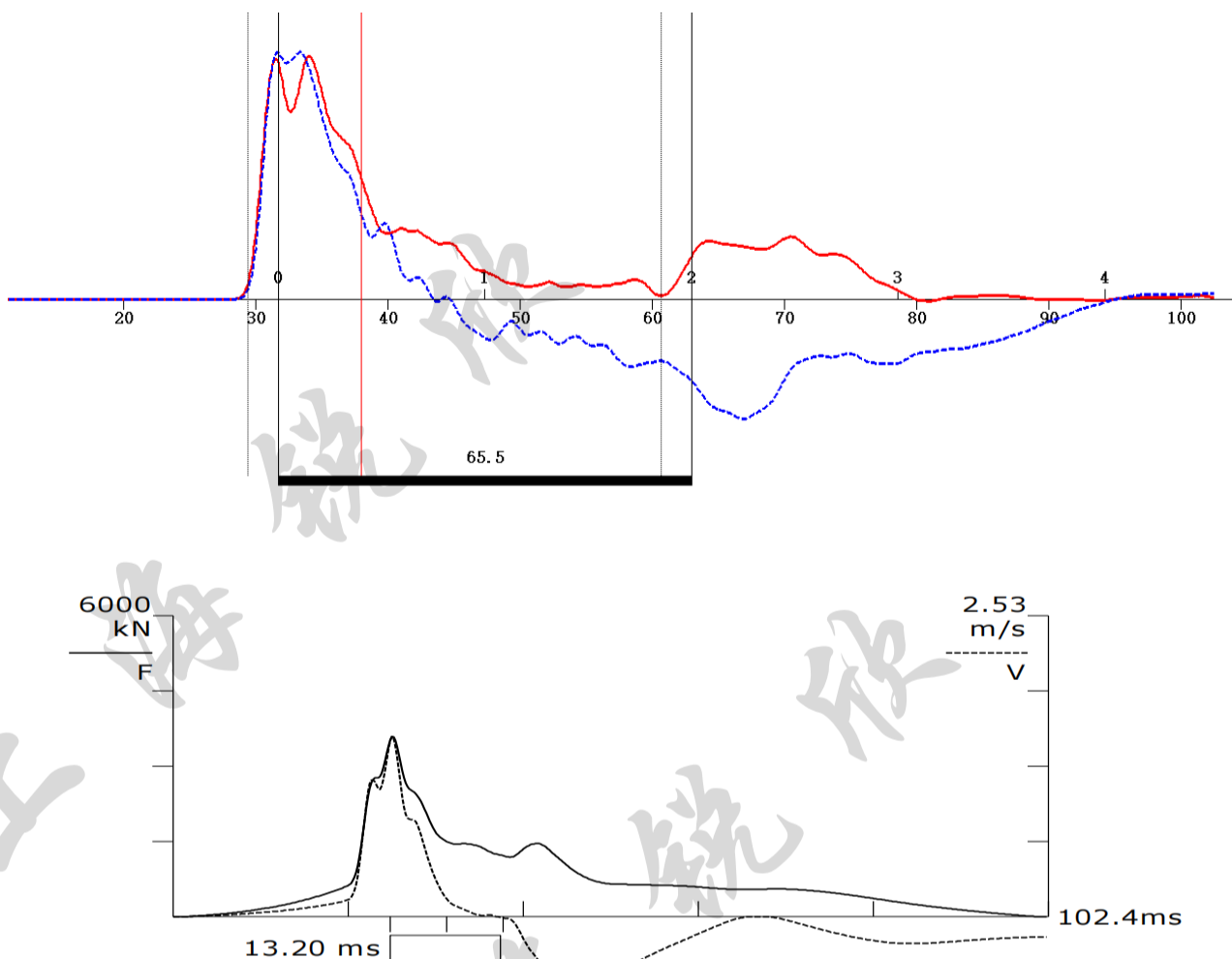
### 3.4.1. 阻尼系数法（Rsp 法）

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~V 实测曲线中速度峰值所对应的时刻为 t1 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 t1 时刻。



3.4.1.1. 当存在较大桩尖土阻力时，该土阻力在时间轴上出现会有延迟。

此时取速度峰值为 t1 时刻时，而  $t1+2L/C$  时刻所对应的并非桩尖土阻力所出现的时刻，故计算的土阻力值会偏低。



#### RS 阻尼系数法的局限性

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（桩底的弹性形变量  $QT$  值较大）；
- ②. 高锤击数难以贯入的桩（桩底的弹性形变量  $QT$  值较大）；
- ③. 端承桩（桩底的弹性形变量  $QT$  值较大）；
- ④. 桩尖存在一定厚度沉渣的钻孔灌注桩（桩尖与土之间存在间隙）。

高  $Q$  值现象在  $F \sim V$  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  $R_{侧}/2$  较大，与该位置剩余的锤击力叠加，会使该质点的  $\Sigma V < 0$ 。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  $R_{侧}/2$ ，与该位置剩余的锤击力叠加，会使该质点的  $\Sigma V < 0$ 。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  $R_{总}$  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。

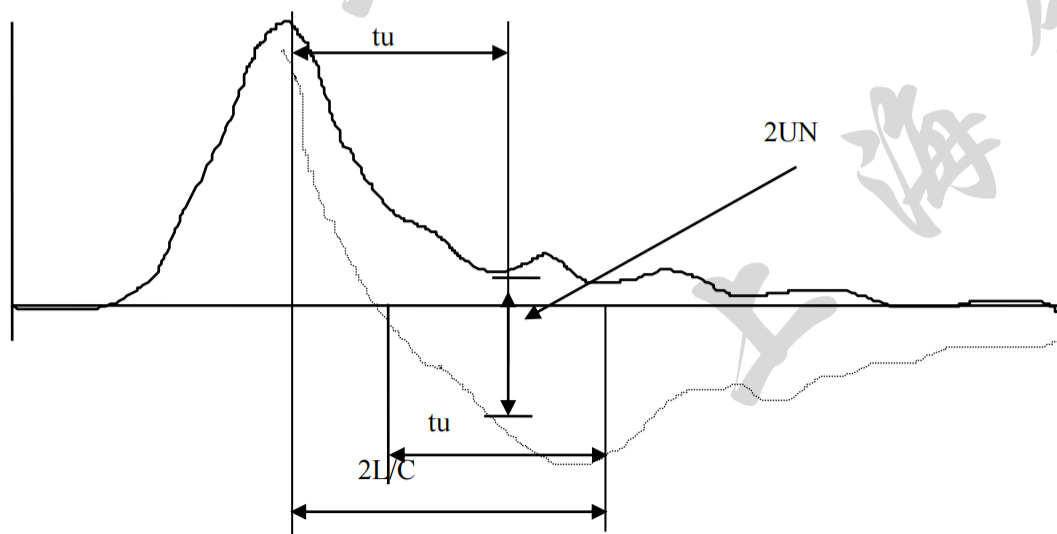


图 3.3 土阻力修正示意图

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

$$R'_{总} = R_{总} + UN$$

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  $RSU$  表示：

在阻尼系数法计算公式中，用  $R'_{总}$  代替  $R_{总}$ ，用  $RSU$  代替  $R_s$  带入下式：

$$R_s = R_{总} - R_d = R_{总} - Jc[2F(t_1) - R_{总}] = (1+Jc)R_{总} - Jc[F(t_1) + ZV(t_1)], \text{ 得:}$$

$$RSU = (1+Jc)R'_{总} - Jc[F(t_1) + ZV(t_1)] = (1+Jc)(R_{总} + UN) - Jc[F(t_1) + ZV(t_1)]$$

$$= (1+Jc) \times UN + (1+Jc)R_{总} - Jc[F(t_1) + ZV(t_1)] = RSP + (1+Jc)UN$$

$$RSU = RSP + (1+Jc)UN$$

### 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。

### 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 $\beta$ 表示。 $\beta$ 定义为下上两个截面的波阻抗 $Z_2$ 、 $Z_1$ 之比。

即  $\beta = Z_2 / Z_1$

公式推导：在缺陷上界面，存在反射波 $F_{反}$ ，其大小与入射波 $F_{入}$ 大小有关。

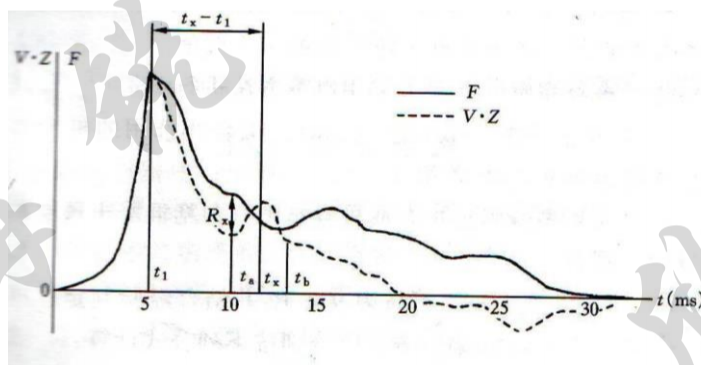
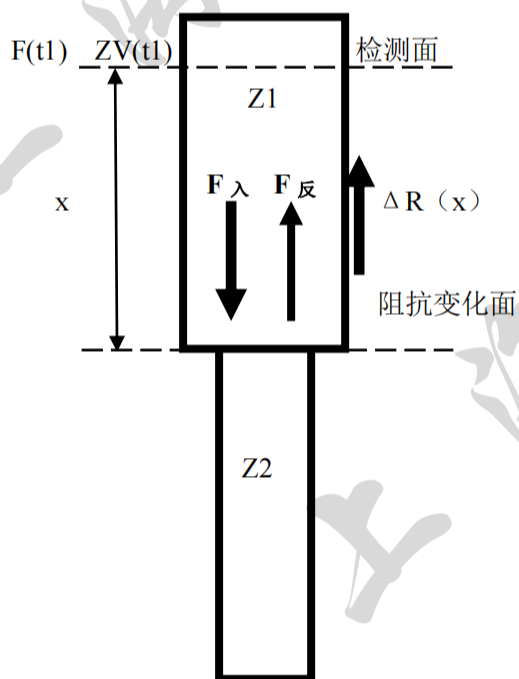
根据公式（2.17）： $F_{反} = F_{入} (Z_2 - Z_1) / (Z_2 + Z_1) = F_{入} (Z_2/Z_1 - 1) / (Z_2/Z_1 + 1)$

$$= F_{入} (\beta - 1) / (\beta + 1)$$

即： $F_{反} = F_{入} (\beta - 1) / (\beta + 1)$

所以： $\beta = (F_{入} + F_{反}) / (F_{入} - F_{反})$  .....(3.14)

请注意：这里的反射波和入射波是指缺陷界面上的反射波和入射波。



若离检测面距离为 $x$ 处的阻抗由 $Z_1$ 变为 $Z_2$ ，检测面到阻抗变化面桩侧土阻力为 $\Delta R_x$ 。则在检测面处的 $F_{T1}$ 在向下运行，同时还有下行的土阻力波 $(-\Delta R(x)/2)$ 。因此传播到阻抗变化面上的入射波的大小为：

$$F_{入} = F_{\downarrow}(t_1) - \Delta R(x)/2 \quad (\text{向下传播的桩侧土阻力为 } -\Delta R(x)) \quad \text{.....(3.15)}$$

在检测面经过 $t_1 + 2x/c$ 后，传感器检测到来自阻抗界面的上行波 $F_{\uparrow}(t_x)$ ，其大小为：

$$F_{\uparrow}(t_x) = F_{反} + \Delta R(x)/2 \quad (\text{向上传播的桩侧土阻力为 } +\Delta R(x))$$

也即： $F_{反} = F_{\uparrow}(t_x) - \Delta R(x)/2$  .....(3.16)

将公式（3.15）和公式（3.16）代入公式（3.14）得：



$$\beta = \left( \left( F \uparrow (tx) - \Delta R(x) \right) / 2 + \left( F \downarrow (t1) - \Delta R(x) / 2 \right) \right) / \left( \left( F \downarrow (t1) - \Delta R(x) \right) / 2 - \left( F \uparrow (tx) - \Delta R(x) / 2 \right) \right)$$

$$= \left( F(t1) + F \uparrow (tx) - \Delta R(x) \right) / F(t1) - F \uparrow (tx)$$

由于:  $F \uparrow (tx) = (F(tx) - ZV(tx)) / 2$ ,  $F \downarrow (t1) = (F(t1) + ZV(t1)) / 2$

代入上式整理得:

$$\beta = \left[ \left( F(t1) + ZV(t1) \right) + \left( F(tx) - ZV(tx) \right) - 2\Delta R(x) \right] / \left[ \left( F(t1) + ZV(t1) \right) - \left( F(tx) - ZV(tx) \right) \right] \quad \dots\dots(3.17)$$

tx --- 缺陷速度反射峰值所对应的时刻(ms)

$\Delta R(x)$  --- 缺陷以上部位土阻力的估算值, 等于缺陷反射波起始点的力与该时刻的速度乘以 Z 之差值  
在目前的高应变动测仪器中, 完整性系数 $\beta$ 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 3.2 所示。

表 3.2 桩身完整性判定表

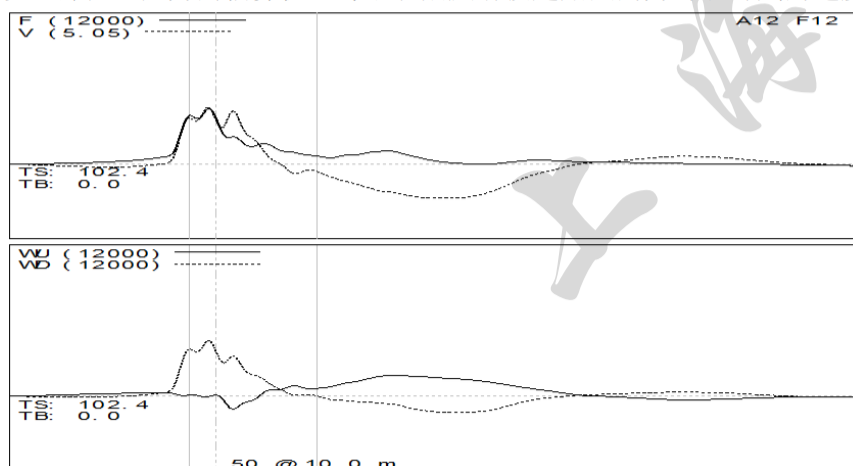
被测截面处的 $\beta$ 值	缺陷程度	桩身完整性类别
1.0	无缺陷	I
$0.8 \leq \beta \leq 1.0$	轻度缺陷	II
$0.6 \leq \beta \leq 0.8$	明显缺陷	III
$\beta \leq 0.6$	严重缺陷	IV

### 3.5.3 缺陷位置 x

$$\text{缺陷位置: } x = c(tx-t1) / 2000 \quad \dots\dots(3.18)$$

TX --- 缺陷反射峰值所对应的时刻 (ms)

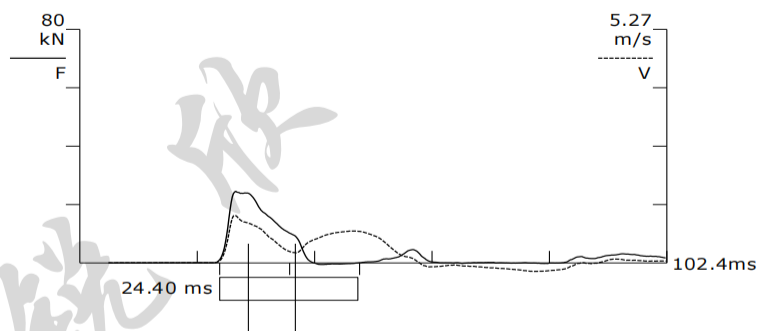
RX --- 缺陷以上部位土阻力的估算值, 等于缺陷反射波起始点的力与该时刻的速度乘以 Z 之差值。



### 3.5.4 关于高应变检测桩身完整性问题

与低应变法检测桩身完整性相比，高应变法具有以下优点：

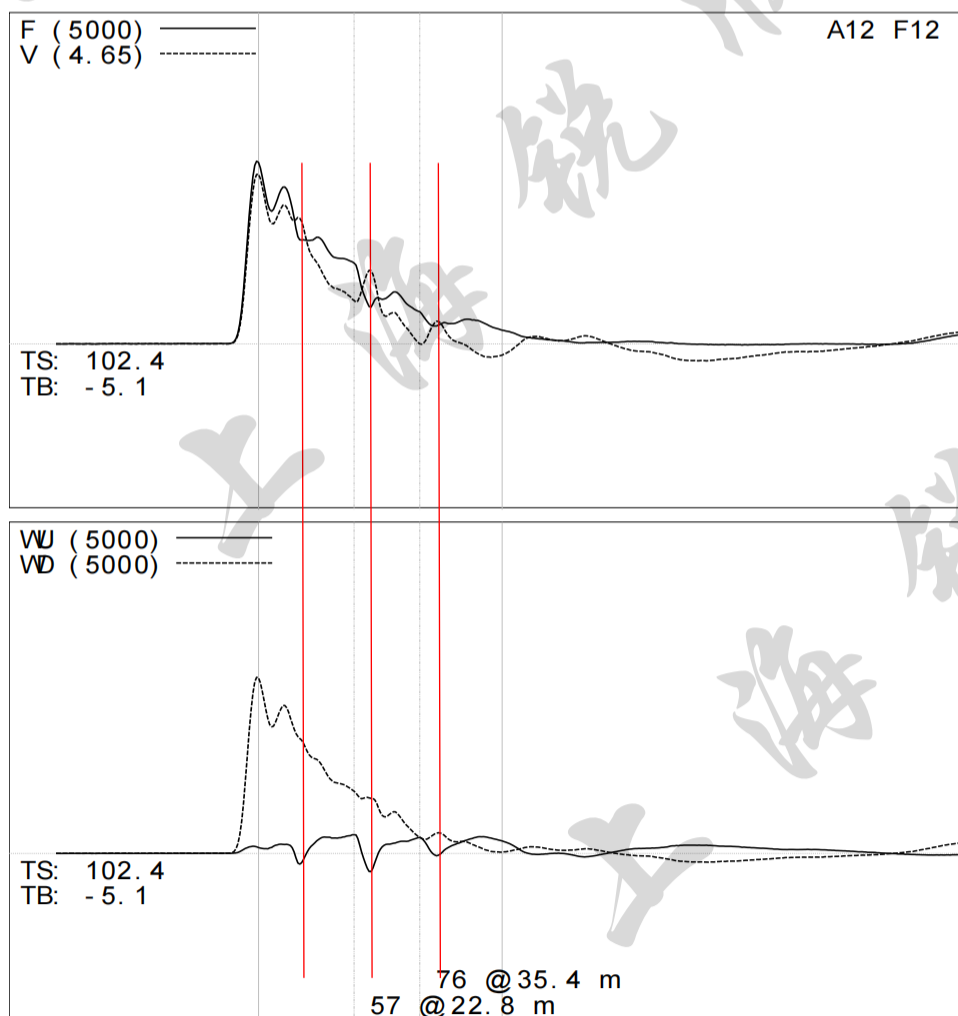
#### 1 锤击能量大，可检测长桩深部的桩身完整性



钻孔灌注桩  $\Phi 800$ ，桩长 46.2 米。30 米处严重缺陷。

#### 2 可对缺陷程度直接定量计算，根据 BTA 值判定桩身完整性

#### 3 可以检测打入桩的多个接头情况

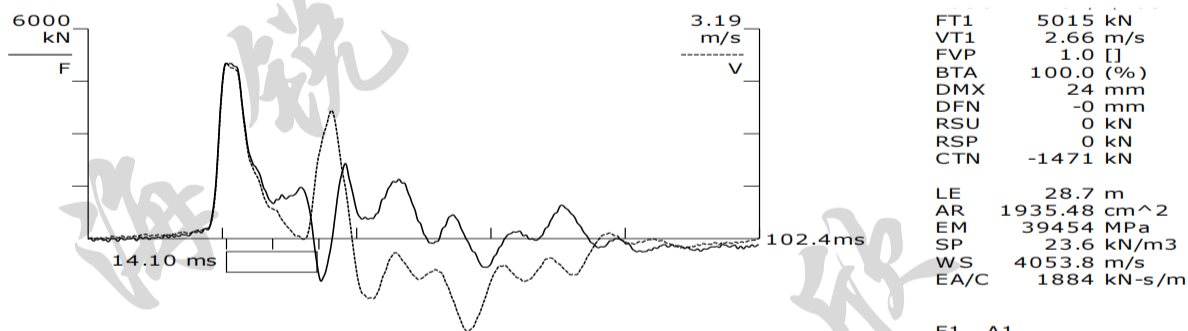


PHC600 100 桩长 47 米，四节桩，分别为 11、12、12、12 米。每节桩的接头反映很明显。

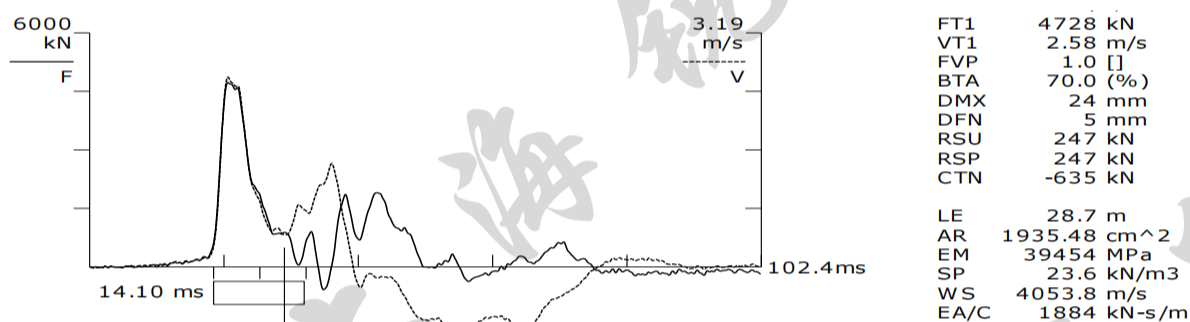
#### 4 采用连续锤击的方式，可以观察缺陷的扩大或闭合情况

举例：PHC 管桩，桩长 20 米

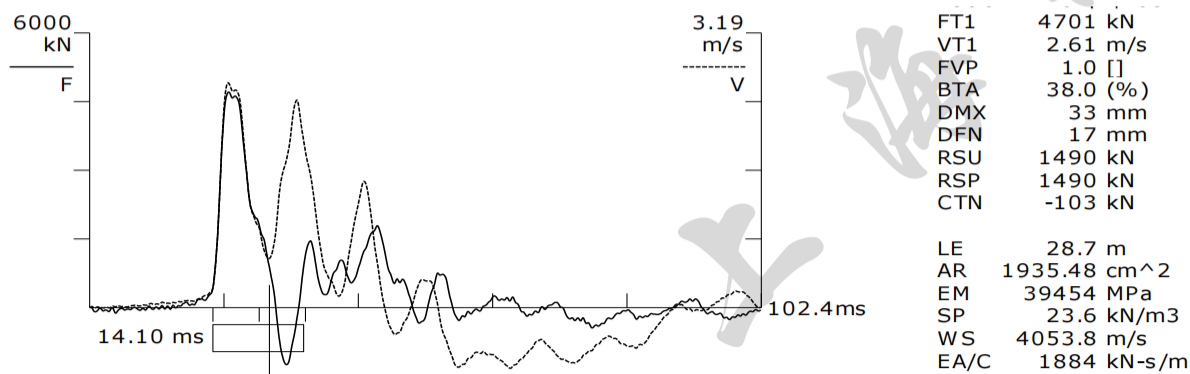
在打桩过程中，进行高应变测试。测试开始的第 35 锤，100%桩身完整；第 44 锤时，离开传感器安装位置约 18 米左右处的力和加速度曲线异常，力曲线突然上升，加速度曲线突然下降，81%桩身轻微缺陷；当锤击进行到第 51 锤时，曲线的异常更加明显，BTA=44%桩身出现了严重缺陷。



第 35 锤 BTA=100%



第 44 锤 BTA=70%



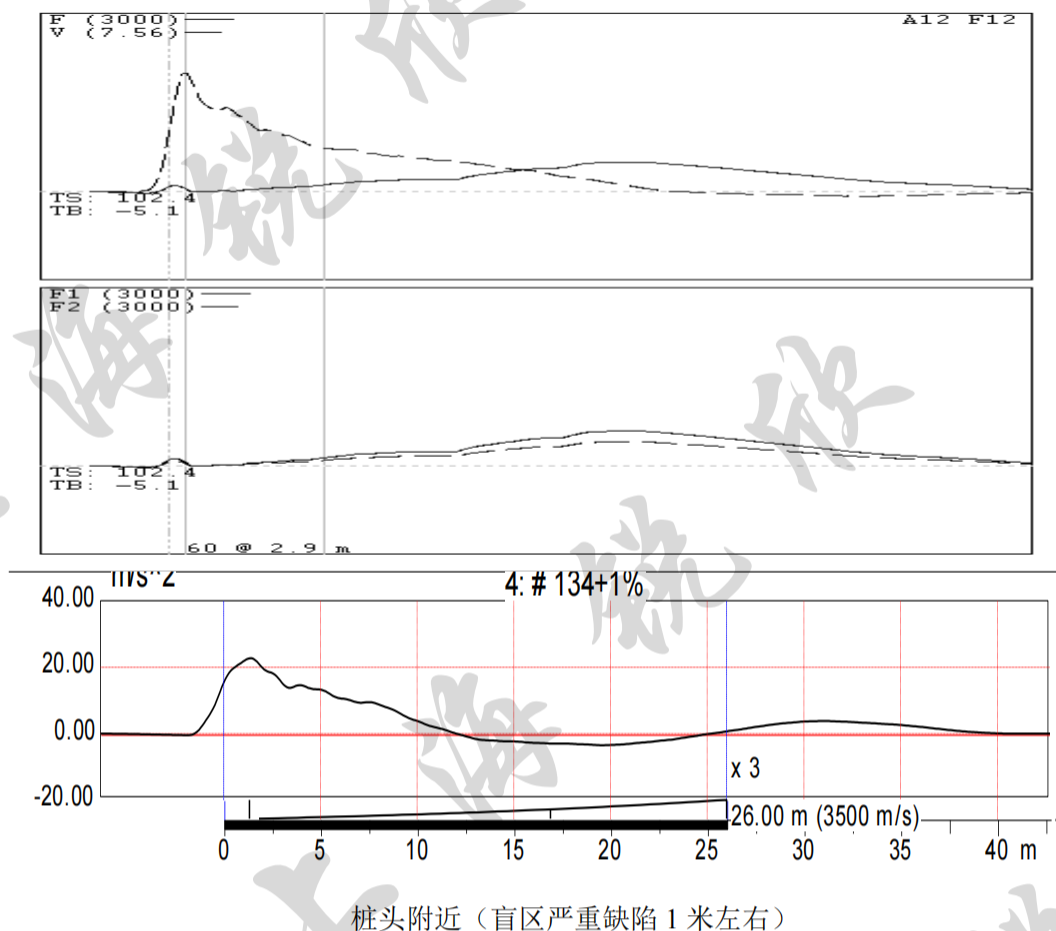
第 51 锤 BTA=38%

高应变检测检测桩身完整性需要注意的几个问题：

1 检测到的是阻抗的变化。

和低应变检测一样，高应变检测的是阻抗变化，不能够分辨出缺陷是离析还是缩颈引起的。

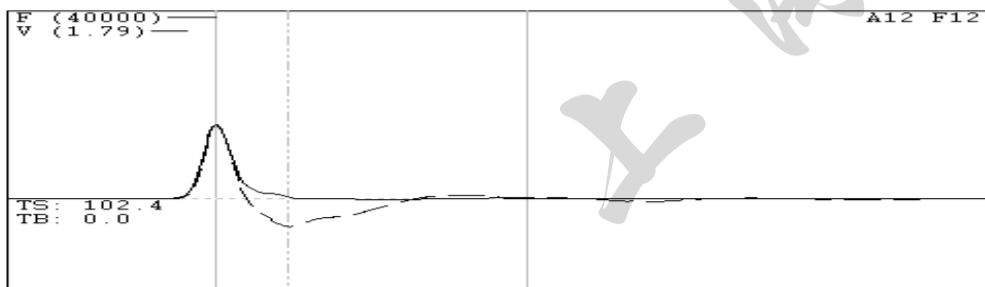
2 高应变锤击脉冲比较宽，一般上升时间不小于 2ms，对浅部缺陷的判定存在盲区。解决的办法是：根据 F-ZV 曲线在峰值的比例失调情况，作出判断；或者减小脉冲宽度，提高检测的分辨率。



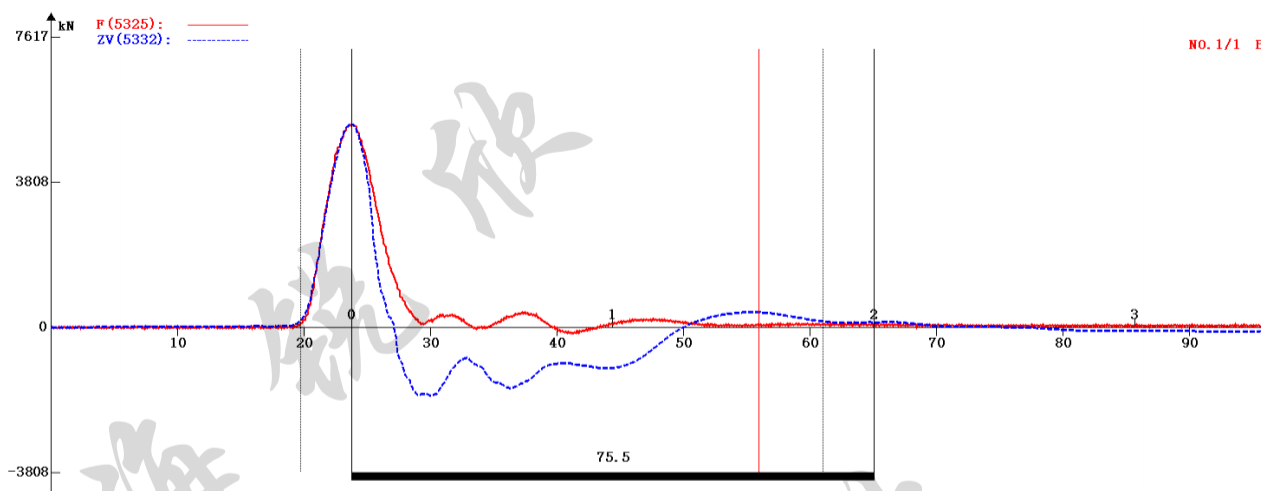
桩头附近（盲区严重缺陷 1 米左右）

3 由于锤击脉冲比较宽，不能有效检测细小裂缝。

4 不能采用小锤轻击的方式，检测桩身完整性。当锤击能量太小的时候，桩身下部的土阻力没有能激发起来，桩身上部可能出现土的卸载，导致速度曲线在桩底之前就提早上跳，出现桩身完整性异常的假象。



举例：上图为上海地区灌注桩  $\Phi 800$ ，桩长 56 米，试验锤重 40K N，落高 0.8 米。事实上这是一根桩身完整的桩，但是计算的 BTA=44%。



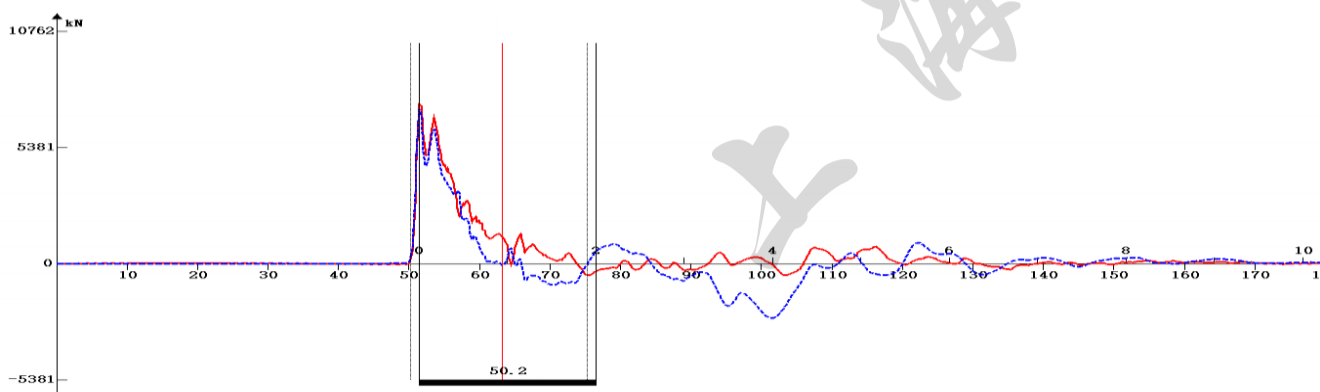
上图为宁波地区灌注桩  $\Phi 800$ ，桩长 75.5 米，为了检测桩身完整性，采用较轻的锤，试验 30KN 重锤，落高 0.8 米。实测曲线显示，在 58 米左右位置，计算的 BTA=64%。其实桩身只是在 18 米左右有缺陷。

所以，当仅仅采用高应变法检测桩身完整性的时候，锤重可以比规范要求的轻一些，但是必须：实测曲线存在清晰的桩底反射。

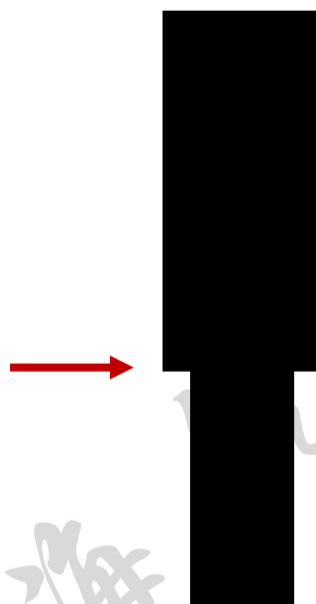
5 当存在多个缺陷时，由于我们推导计算公式时假定：缺陷以上部位桩身阻抗是均值的，所以只能准确定量计算最上面第一个缺陷的程度。

6 不能单纯的依靠 BTA 值判定桩身完整性，对于以下几种情况，桩身完整性的判定应该按照工程地质条件、施工工艺，结合实测曲线拟合法和其它检测方法综合判定：

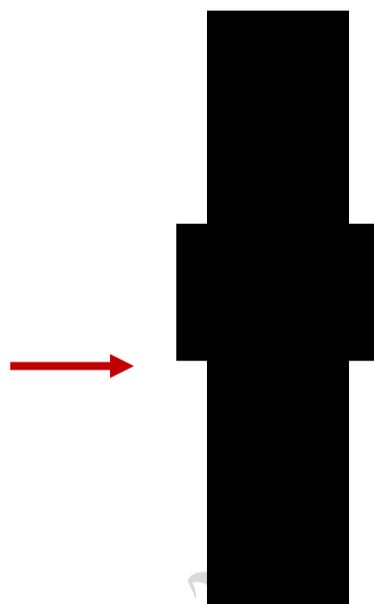
(1) 打入桩的接缝问题



(2) 桩身有扩颈的桩



(a) 上部扩径，但是下部  
缩径部分直径仍大于设计桩径



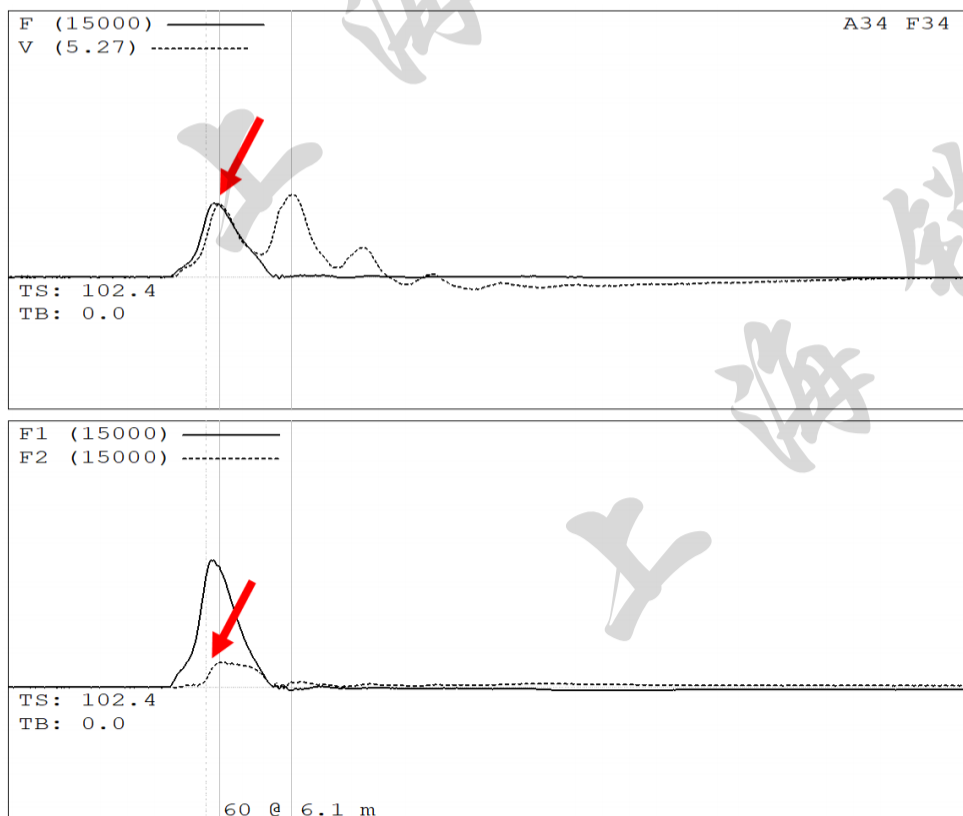
(b) 先扩后缩，缩径部分直径仍大于设计桩径

(3) 桩身渐变或多变的灌注桩（多支盘桩）

(4) 力和速度曲线在峰值附近比例失调，桩身浅部有缺陷的桩

(5) 等截面桩且缺陷深度  $x$  以上部位土阻力出现卸载回弹

7. 实测 F-ZV 曲线异常，有时会导致桩身完整性异常假象



### 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：

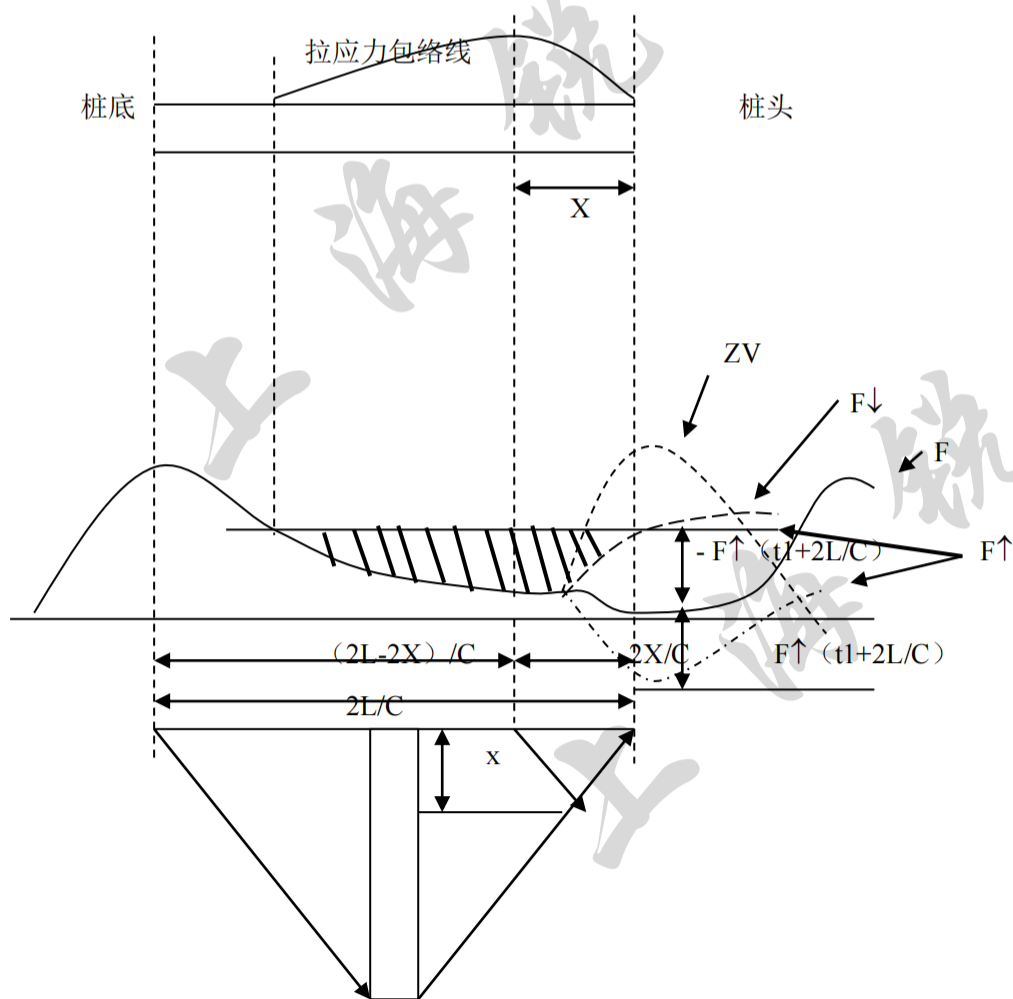
$$\sigma = \min ( F \uparrow (t_1+2L/C) + F \downarrow (t_1+(2L-2x)/C) ) / A \leq 0$$

$$t_1 < t < t_1+2L/C$$

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

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，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 应用范围

(1) 凯司法适用于预制桩、钢桩和中小直径的灌注桩，且应有较可靠的地区经验

(2) 桩身材质应基本均匀，截面应基本相等

(3) 凯司阻尼系数  $J_c$  值，宜通过同一工程中同一根桩的动静对比试验得出。当不具备动静对比试验条件时，应采用实测曲线拟合法确定（拟合桩的数量符合规范要求）。在同一条件下同一场所桩型和截面相同时， $J_c$  值的极差与平均值之比应不大于 30%。

#### 3 凯斯法的优点

(1) 计算简单，在选取了  $t_1$  时刻和凯司阻尼系数后，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。

(3) 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。

#### 4 凯司阻尼系数 $J_c$ 的选择

在凯司法承载力计算公式中，真正需要人设定的参数只有凯司阻尼系数  $J_c$ ，要事先人为的为  $J_c$  选择一个合适的数值。

凯司阻尼系数  $J_c$  物理意义：桩尖处持力土层的凯司阻尼系数  $J_c$ ，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司阻尼系数  $J_c$  中去。凯司阻尼系数  $J_c$  无量纲，实际就成了一个经验系数。

凯司阻尼系数  $J_c$  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《建筑地基与基桩检测技术规程》(DG/TJ 08-218-2017) 第 9.2.4 条, “...自由落锤的锤重应不小于单桩竖向抗压承载力设计值的 3%; 柴油锤.... 但应不小于单桩竖向抗压承载力设计值的 2%; 超长桩及长径比大的桩, 锤重应适当加大”。

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”。

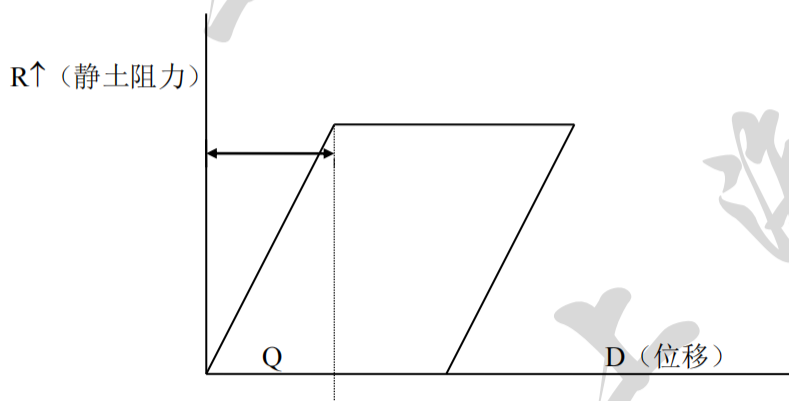
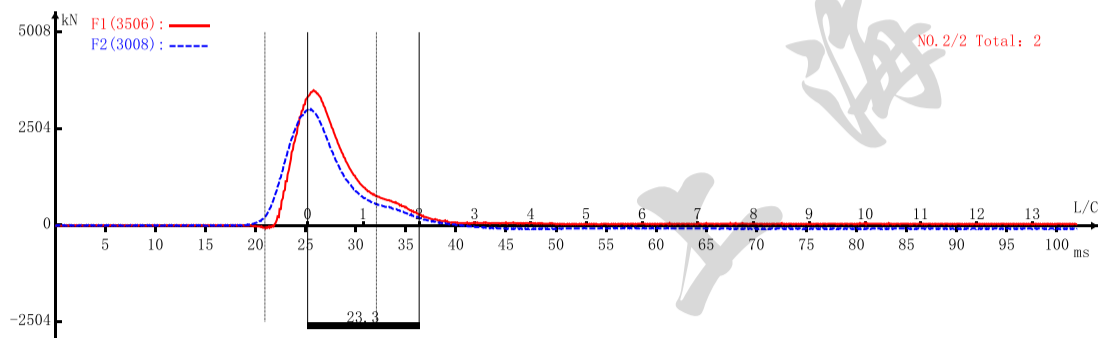
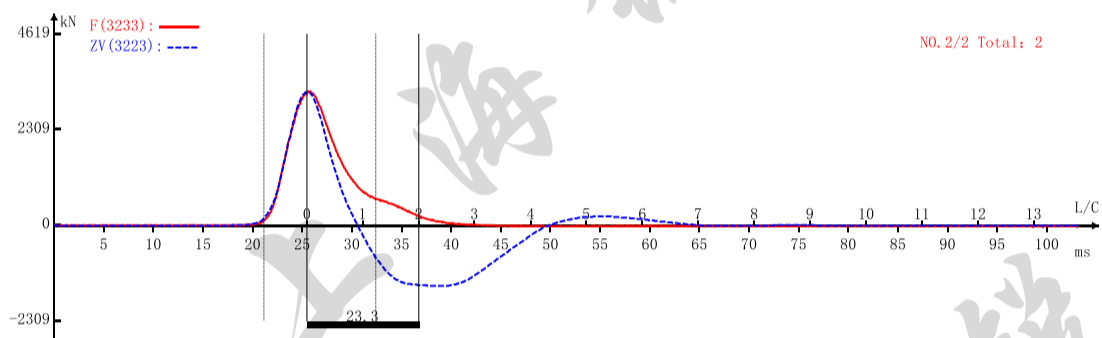


图 4.1 静土阻力~位移关系

## 2. 重锤的导向装置

根据上海市工程建设规范《建筑地基与桩基检测技术规程》(DG/TJ 08-218-2017) 第 9.2.3 条, “高应变检测专用锤击设备应具有稳固的导向装置。”



采用导向架后, 测试的典型实测曲线, 大大减少了锤击偏心。

### 3. 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。

### 4. 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~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。

### 5. 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 高应变的测试系统

### 1. 基本的测试系统

高应变的测试由激振系统(锤击设备)、测试仪器和被测对象三部分组成。

① 锤击系统: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。

② 测量仪器系统: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。





L-HPT 高/低应变一体基桩动测仪（上海锐欣仪器科技有限公司）



LPT-E 低应变基桩动测仪（上海锐欣仪器科技有限公司）

③ 被测对象：就是试验对象。如：高应变试验中的桩、土。

## 2. 传感器（拾振器）

① 概念：传感器又被称之为拾振器。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。



#### a. 工具式应变传感器

基本原理：传感器中心为一个铝合金环形框架，在框架内壁对称贴四片箔式应变片，四个电阻片连成桥式电路，当轴向受力时，两片受压，另两片受拉。

应变传感器测量的是桩身 77mm（传感器两安装螺孔距离）段的应变值  $\varepsilon$ 。力  $F$  通过桩身材料的弹性模量  $E$  和桩身有效截面面积  $A$  间接计算得到：

$$F = EA \varepsilon = C^2 \rho A \varepsilon$$

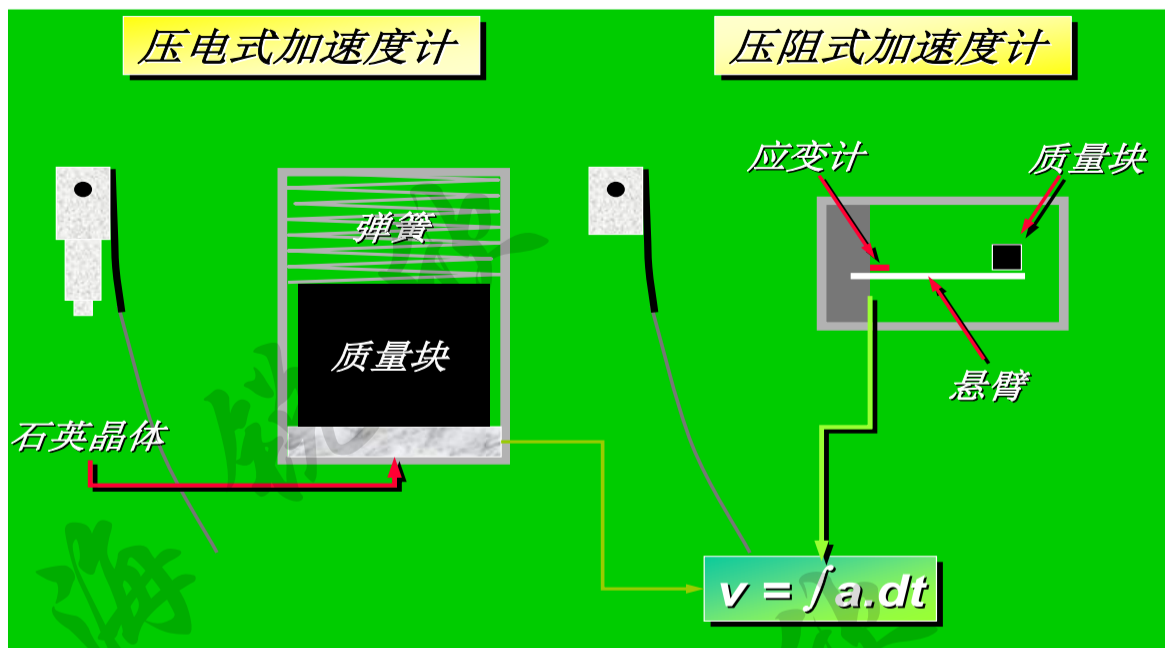
在我们的一般测试中，轴向平均应变范围一般小于  $\pm 1000\mu\varepsilon$ 。

应变传感器的量程：有  $1000\mu\varepsilon$  和  $2000\mu\varepsilon$  两种。



应变传感器（两侧带保护 上海锐欣仪器科技有限公司）

## b. 加速度传感器



加速度传感器有压电式和压阻式两种。

根据上海市工程建设规范 建筑基桩检测技术规程《DGJ08-218-2003》规范中规定：加速度传感器的安装谐振频率不应小于 10000Hz，加速度在 0-10000m/s<sup>2</sup> 和 0-7500Hz 内成线形。若试验桩为钢桩，则宜采用 0-50000 m/s<sup>2</sup> 范围成线形的加速度传感器。



高应变压电式加速度传感器（美国原装进口 上海锐欣仪器科技有限公司）

## 3. 传感器的灵敏度参数

灵敏度 S:

$$S = \text{输出信号} / \text{输入信号}$$



### 4.3 锤和锤重的选择

#### 1. 锤击设备的种类

高应变试验用锤有两大类：一类是打桩机，另一类是自制的锤击设备。

#### 2. 打桩机

打桩机包括单动筒式柴油锤、双动筒式柴油锤、蒸汽锤等等。

目前工程中普遍采用的是单动筒式柴油锤。在打桩监控检测和复测中最为理想的一种锤击设备。



### 3. 自制的锤击设备

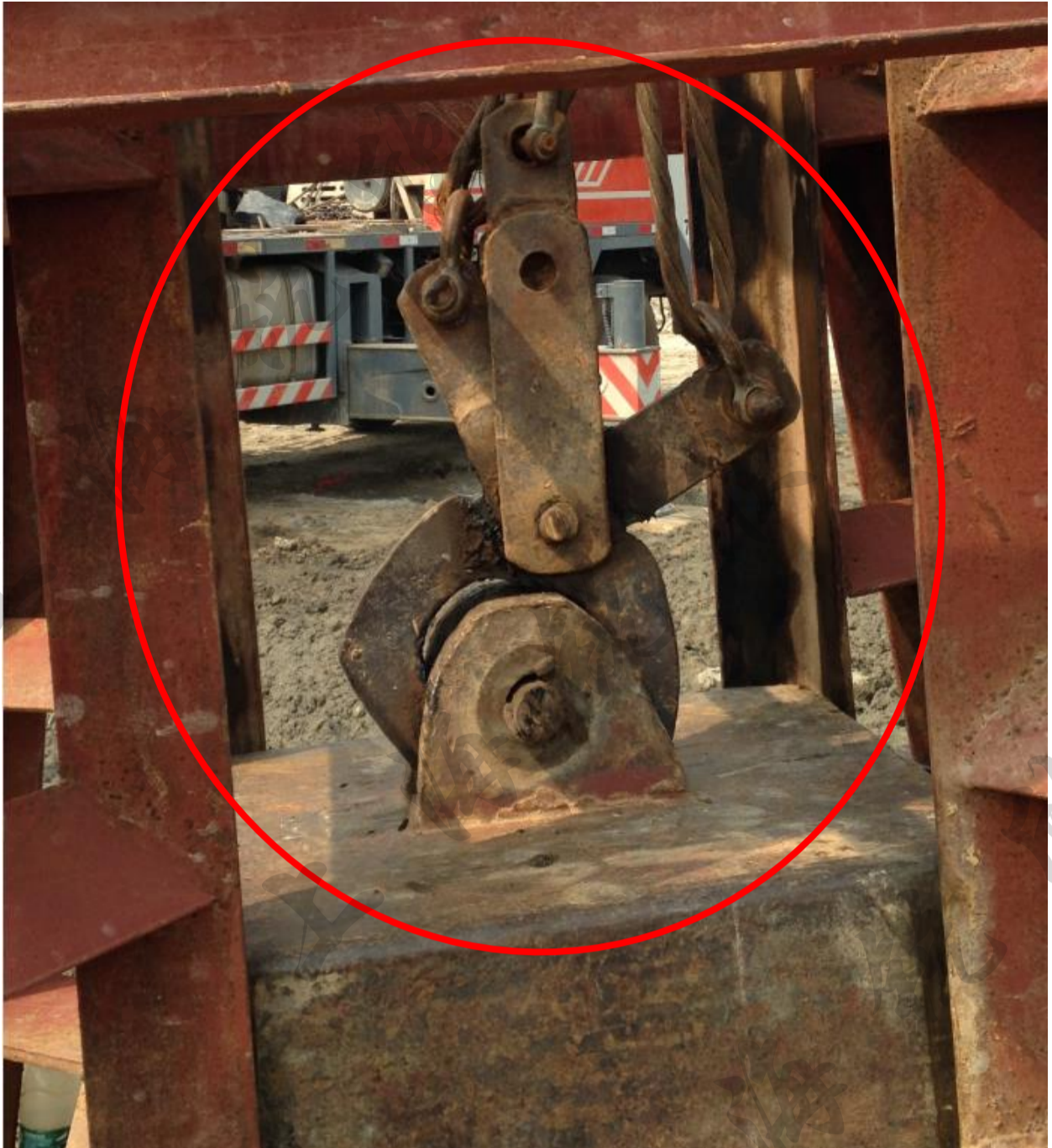
自制的锤击设备包括锤体（整体或片状组合）、脱钩装置和导向架三部分。其中脱钩装置分为力臂式、锁扣式两种。

力臂式是利用杠杆原理，在长臂的一端加力，使脱钩器旋转一定角度释放出来。这种方式的优点是方便，缺点是锤在脱钩时晃动，下落时极易偏心。是目前上海检测单位普遍使用的一种脱钩方式。





锁扣式是将锤提高到一定高度后锁死，开始试验时，将锁扣打开，让重锤自由下落。其优点是脱钩过程不会使重锤偏心。



#### 4. 自制锤锤形规定

根据上海市工程建设规范《建筑地基与桩基检测技术规程》(DG/TJ 08-218-2017) 第 9.2.5 条规定，“重锤应材质均匀、形状对称、锤底平整、高宽（径）比不得小于 1，并采用铸铁或铸钢制作。重锤宜整体铸造”。

## 5. 锤重的选择

根据上海市工程建设规范《建筑地基与桩基检测技术规程》(DG/TJ 08-218-2017) 第 9.2.4 条,“...自由落锤的锤重应不小于单桩竖向抗压承载力设计值的 3%; 柴油锤.... 但应不小于单桩竖向抗压承载力设计值的 2%; 超长桩及长径比大的桩, 锤重应适当加大”。

### 4.4 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和黄砂。

### 4.5 传感器的安装







### 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。传感器的中心轴应与桩的中心轴平行。

原因: 主要是消除锤击偏心的影响。同时使实测数据更具代表性。

(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)

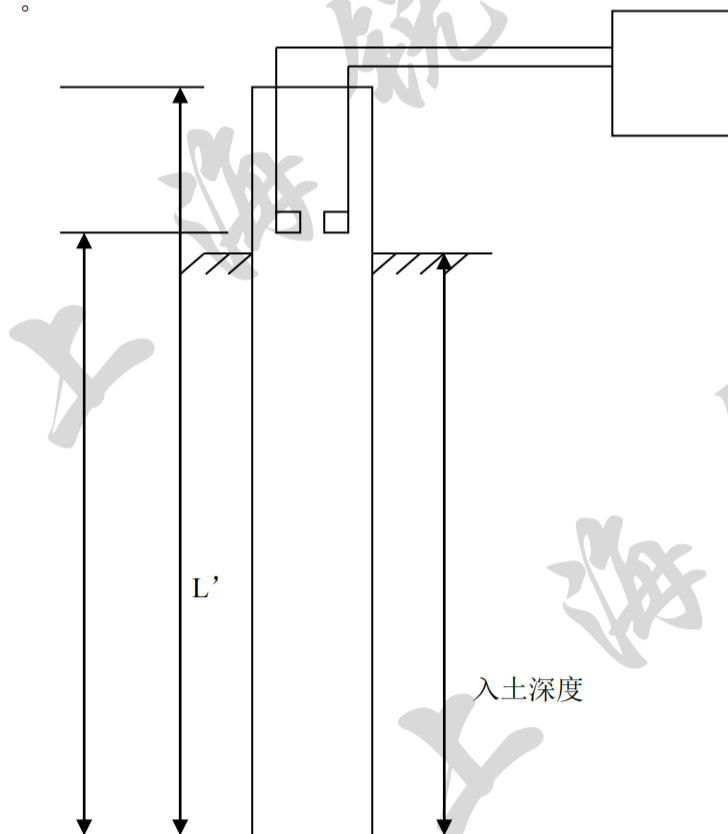
3. 严禁使用单只应变传感器或单只加速度传感器进行检测。

4. 应变传感器在安装过程中, 要对其初始值进行监测, 不得超过该传感器允许的初始变形值。

## 4.6 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

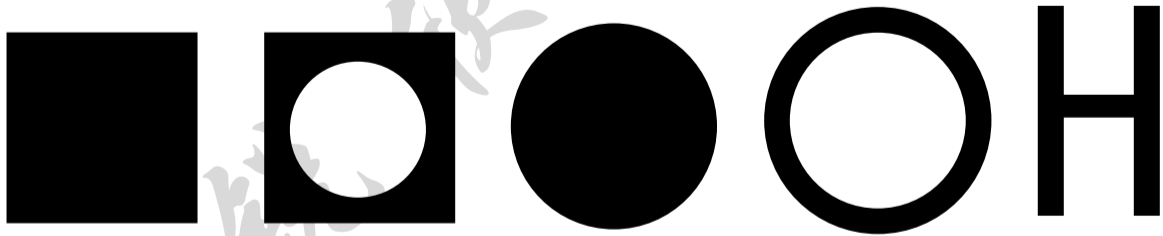
(1). 实心桩 (钻孔灌注桩、预制方桩)



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  $F_m$ 。

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

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。

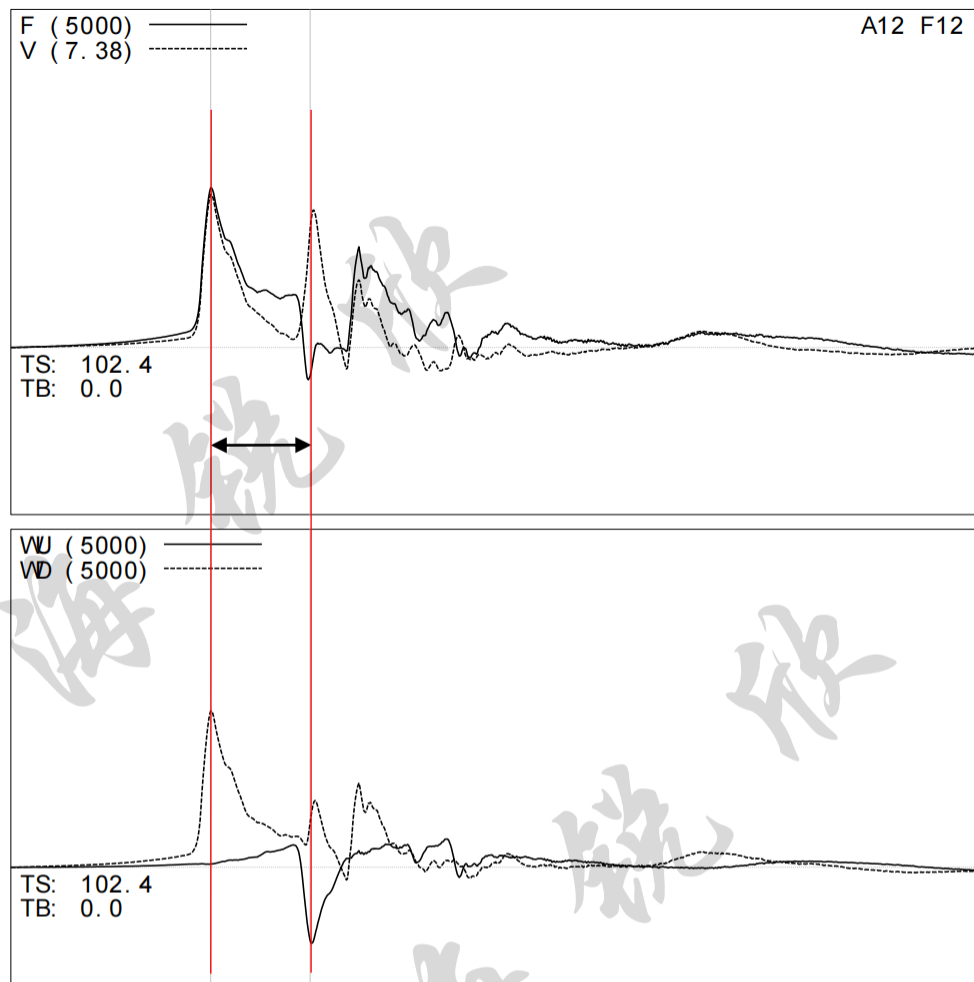
在采用公式(3.1)计算土阻力时，式中的波速  $C$  是应力波在桩身中来回传播的速度，是平均波速。

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。

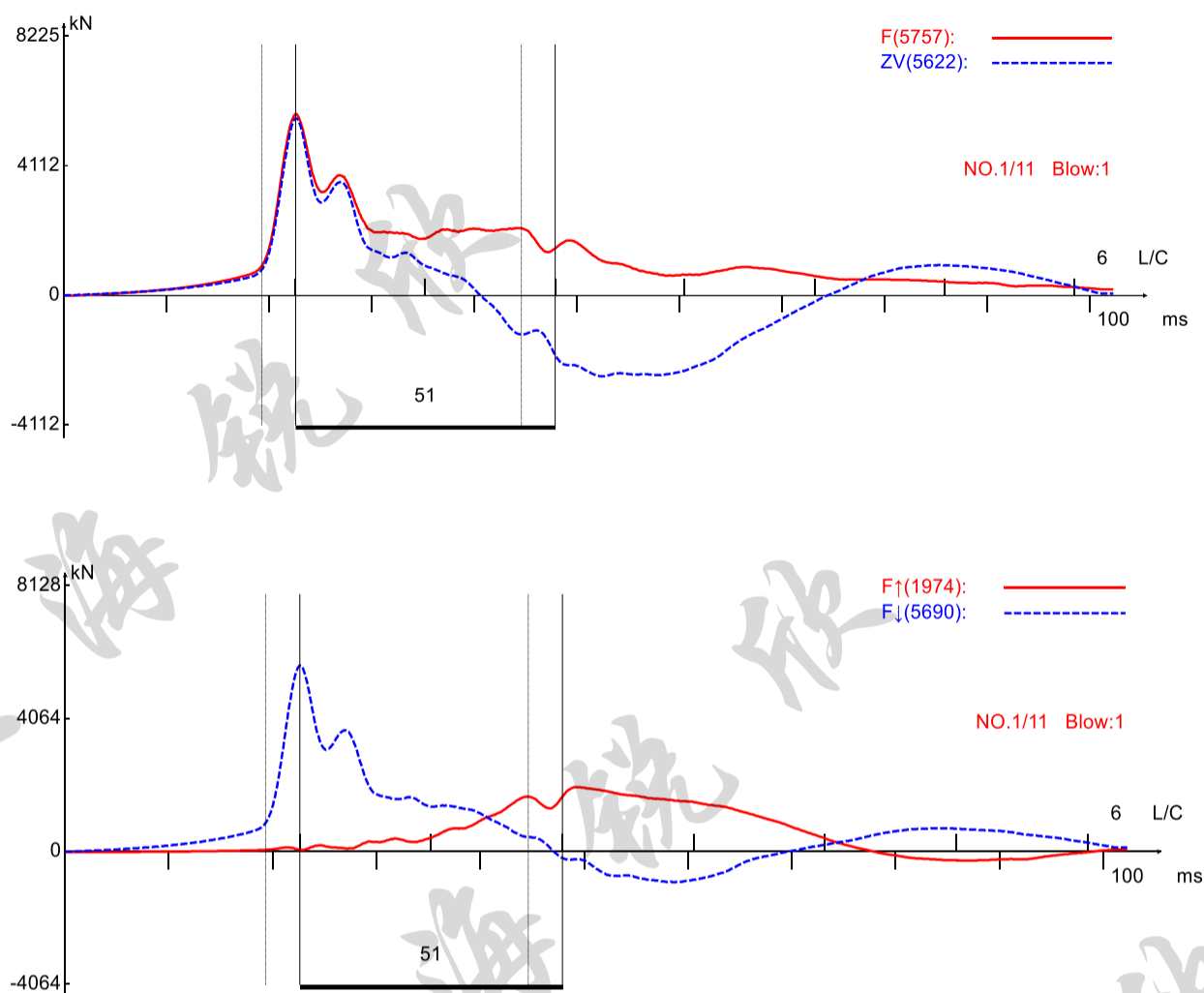


图 4.5 平均波速的确定

## 4.7 实测资料的初步分析

### 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（ $t_r$ ），F、V 曲线重合。一般 F、V 峰值应基本相等。
- (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). 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。

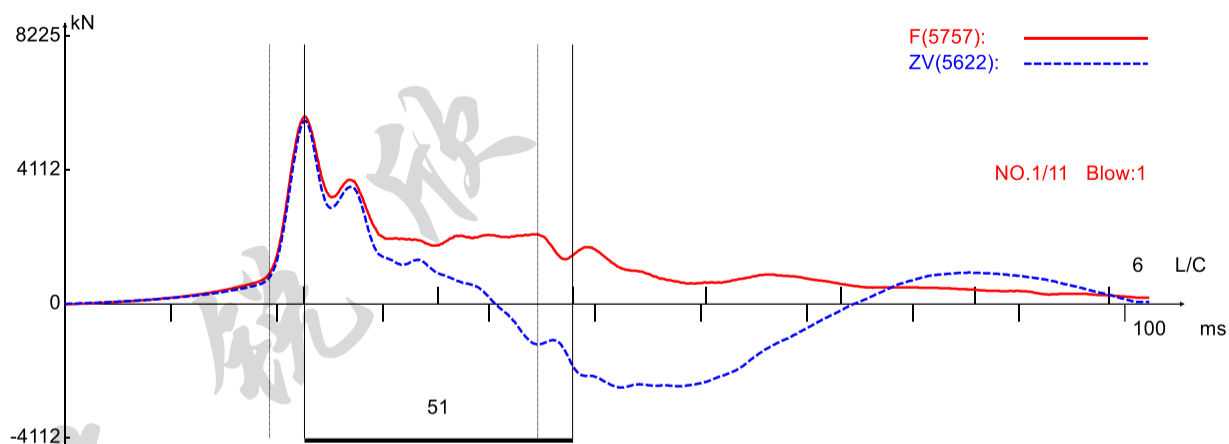


图 4.6 典型的实测曲线

## 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。

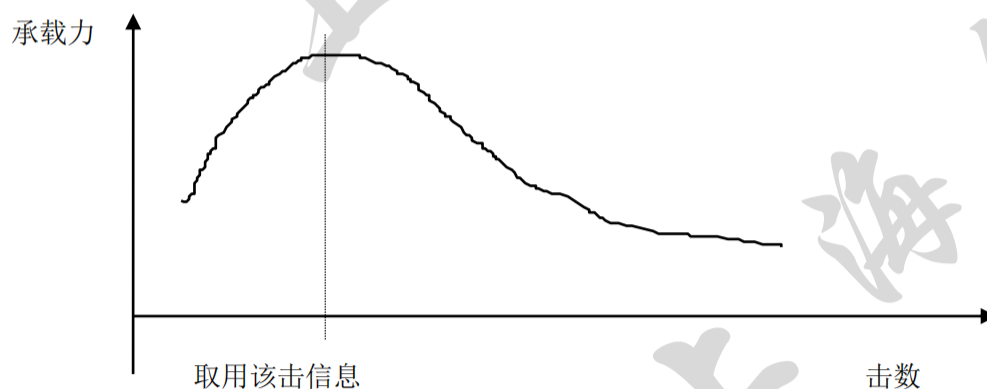


图 4.7 复打桩曲线取用

## 3. 判断承载力检测时的曲线是否可用

当出现下列情况之一时，实测曲线不得用于计算单桩承载力：

- (1) 传感器安装处混凝土开裂或出现塑性变形，使力曲线最终未归零。
- (2) 严重锤击偏心，两侧力信号幅度相差超过 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) 四通道数据不全。

#### 4. 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：

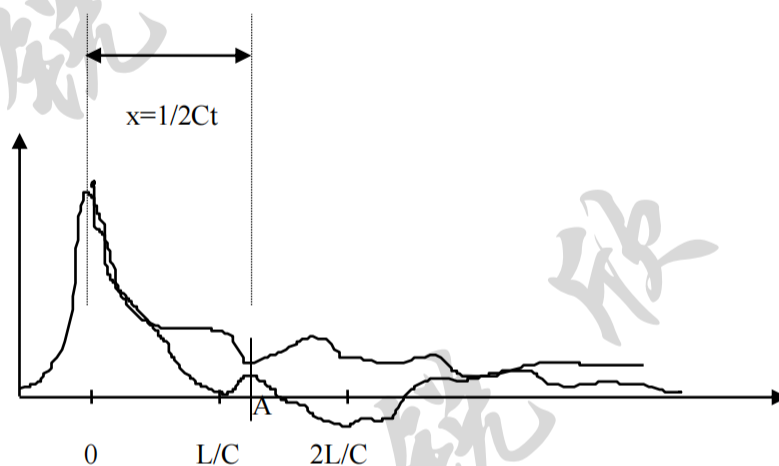


图 4.8

- 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 $\beta$ 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 $\beta$ 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 $\beta$ 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 $\beta$ 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， $\beta$ 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 $\beta$ 值作出判断。根据经验 $\beta$ 值小于 0.5，可判为桩身严重破损。而 $\beta$ 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)

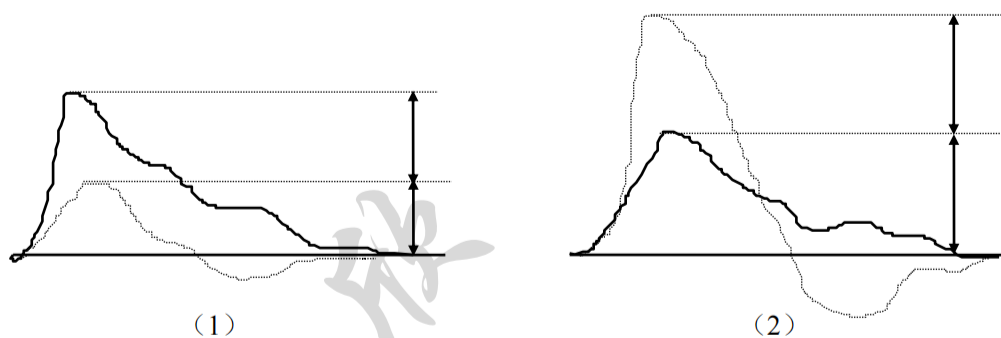


图 4.9

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

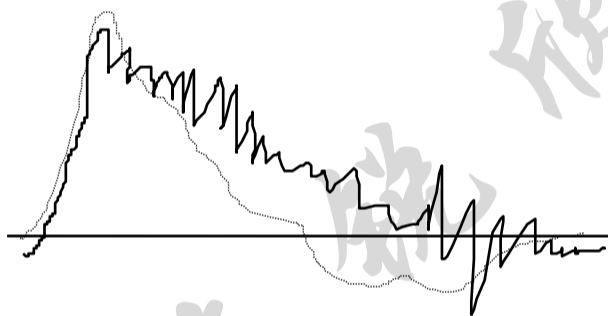


图 4.10

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

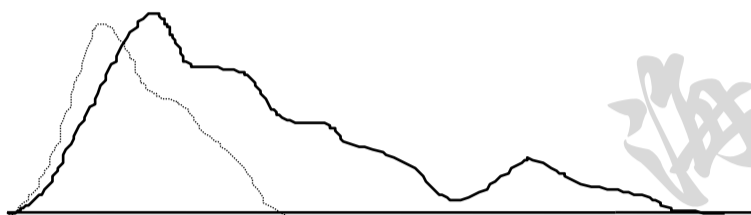


图 4.11

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

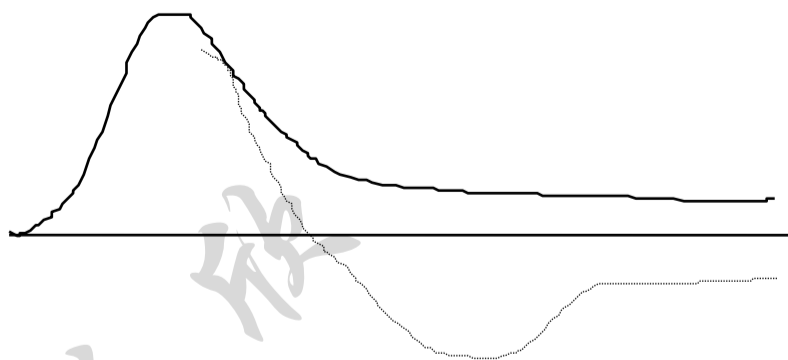


图 4.12

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

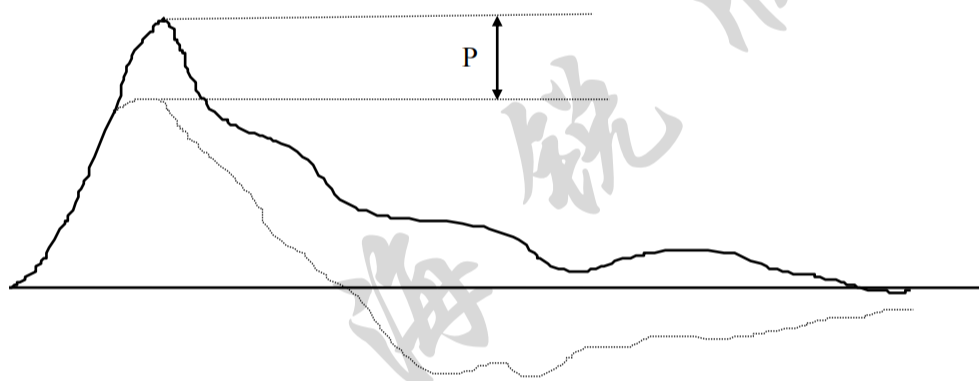


图 4.13

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  $Z (=EmA/Cm)$  选用不当。或者波速选用不当。

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

$F \sim V$  曲线中的  $V$  曲线, 实际上是  $V \cdot Z$  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  $V \cdot Z$  曲线称为  $V$  曲线。以下仍沿用该习惯。

##### 4.8.1 上行波、下行波叠加在 $F \sim V$ 曲线上, 对 $F \sim V$ 曲线的影响及基本表现

- 我们已知:
- ① 对于下行波:  $F \downarrow = ZV \downarrow$ ;
  - ② 对于上行波:  $F \uparrow = -ZV \uparrow$ ;
  - 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。

如果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)。

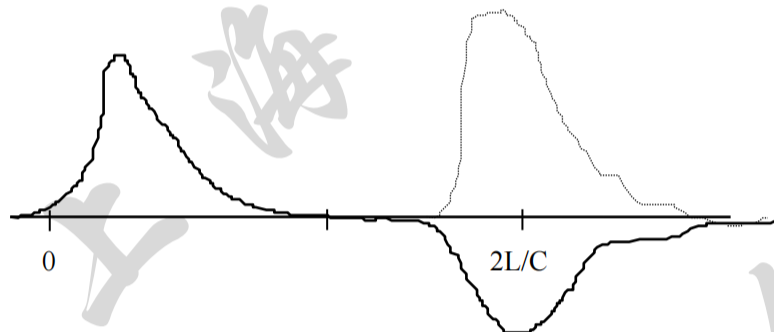


图 4.14

1. 当有另外的下行的压力波  $F' \downarrow(t)$  作用在这条曲线上时, 我们研究  $F' \downarrow(t)$  作用后  $F_{\text{总}}(t)$ 、 $ZV_{\text{总}}(t)$  之间的变化情况

$F' \downarrow(t)$  作用后: (1) 力曲线:  $F_{\text{总}}(t) = F \downarrow(t) + F' \downarrow(t)$

(2)  $ZV$  曲线:  $ZV_{\text{总}}(t) = ZV \downarrow(t) + ZV' \downarrow(t)$

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

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

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

$F$  和  $ZV$  曲线仍然没有分开



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，也向上平移  $F'\downarrow(t)$ 。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，我们研究  $F'\downarrow(t)$  作用后  $F_{\text{总}}(t)$ 、 $ZV_{\text{总}}(t)$  之间的变化情况：

$F'\downarrow(t)$  作用后：（1）力曲线： $F_{\text{总}} = F\downarrow(t) + [-F'\downarrow(t)] = F\downarrow(t) - F'\downarrow(t)$

（2） $ZV$  曲线： $ZV_{\text{总}} = ZV\downarrow(t) + ZV'\downarrow(t)$

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

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

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

**$F$  和  $ZV$  曲线仍然没有分开**

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，我们研究  $F'\uparrow(t)$  作用后  $F_{\text{总}}(t)$ 、 $ZV_{\text{总}}(t)$  之间的变化情况：

$F'\uparrow(t)$  作用后：（1）力曲线： $F_{\text{总}} = F\downarrow(t) + F'\uparrow(t)$

（2） $ZV$  曲线： $ZV_{\text{总}} = ZV\downarrow(t) + ZV'\uparrow(t)$

由于  $ZV'\uparrow(t) = -F'\uparrow(t)$

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

$$F_{\text{总}} - ZV_{\text{总}} = 2F'\uparrow(t) \quad \dots\dots(4.17)$$

**$F$  和  $ZV$  曲线产生了分离**

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

$-F'\uparrow(t)$  作用后：（1）力曲线： $F_{\text{总}} = F\downarrow(t) - F'\uparrow(t)$

（2） $ZV$  曲线： $ZV_{\text{总}} = ZV\downarrow(t) + ZV'\uparrow(t)$

由于  $ZV'\uparrow(t) = -[-F'\uparrow(t)/Z] = F'\uparrow(t)$

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

$$F_{\text{总}} - ZV_{\text{总}} = -2F'\uparrow(t) \quad \dots\dots(4.18)$$

**$F$  和  $ZV$  曲线产生了同向靠拢**

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  $-2F'\uparrow(t)$ 。

#### 4.9 桩身阻抗变化在 F~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：

$$F\uparrow = F\downarrow(Z_2 - Z_1)/(Z_2 + Z_1) \quad \dots\dots(4.19)$$

（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。

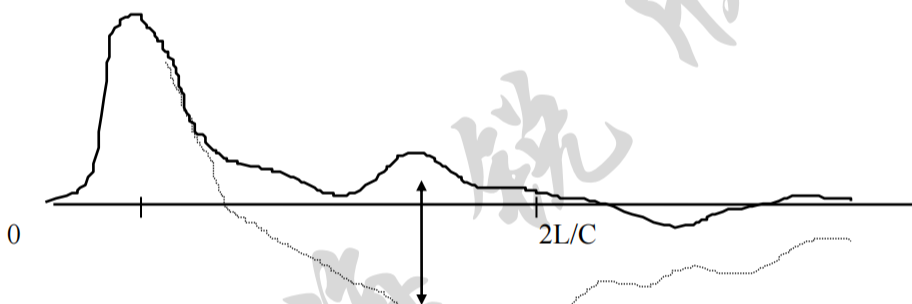


图 4.15

（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。

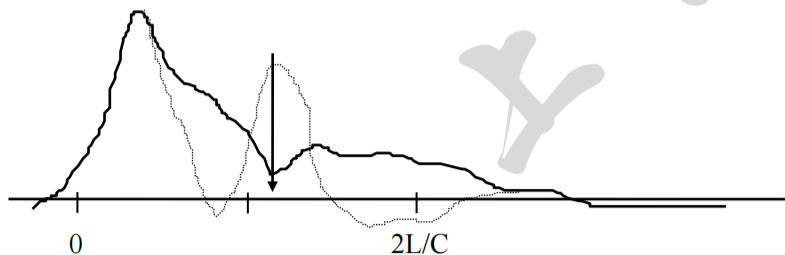


图 4.16

#### 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 ( $=R_{i2}$ ) 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  $1/2R_{i2}$  会使得： $F$  曲线增大，向上平移  $1/2R_{i2}$ ； $V$  曲线减小，向下平移  $1/2R_{i2}$ 。总之， $F$ 、 $V$  曲线是反向平移，两曲线互相分离，分离的幅度为  $2 \times 1/2R_{i2} = R_{i2}$ ，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 $R_{i2} \downarrow (= -R_{i2}/2)$ 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  $R_{i2} \downarrow (= -R_{i2}/2)$  在时间为  $t=L/C$  时，同时到达桩尖，其大小为  $R \downarrow = \sum R_{i2} \downarrow = -R_{\text{侧}}/2$ 。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  $2 \times R_{\text{侧}}/2 = R_{\text{侧}}$ 。

(4) 在  $t=2L/C$  稍前时刻， $F$ 、 $V$  的差值中实际上已经包含了从顶部到桩底的桩侧土阻力累加值（上行的压力土阻力所产生  $2 \times R_{\text{侧}}/2 = R_{\text{侧}}$ ），即  $R_{\text{侧}}$ 。

(2)、(3)、(4) 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：

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

(注： $R_{\text{总}} = \text{动} + \text{静}$ )

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（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。

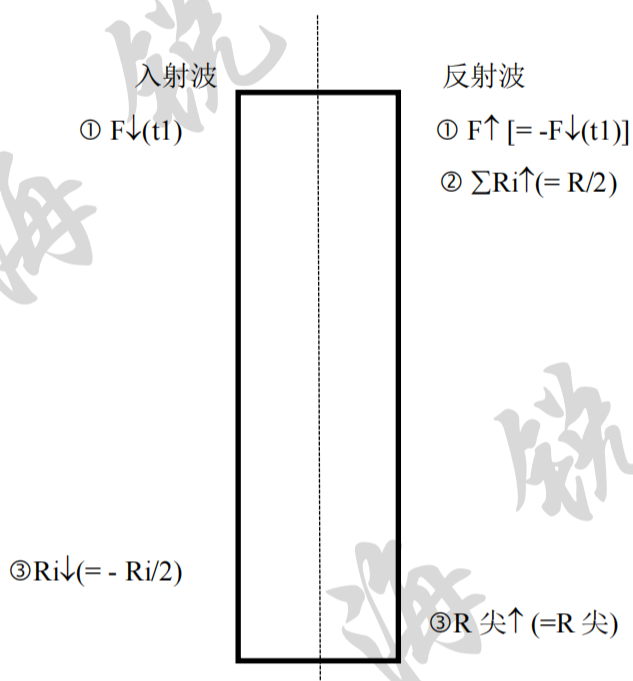
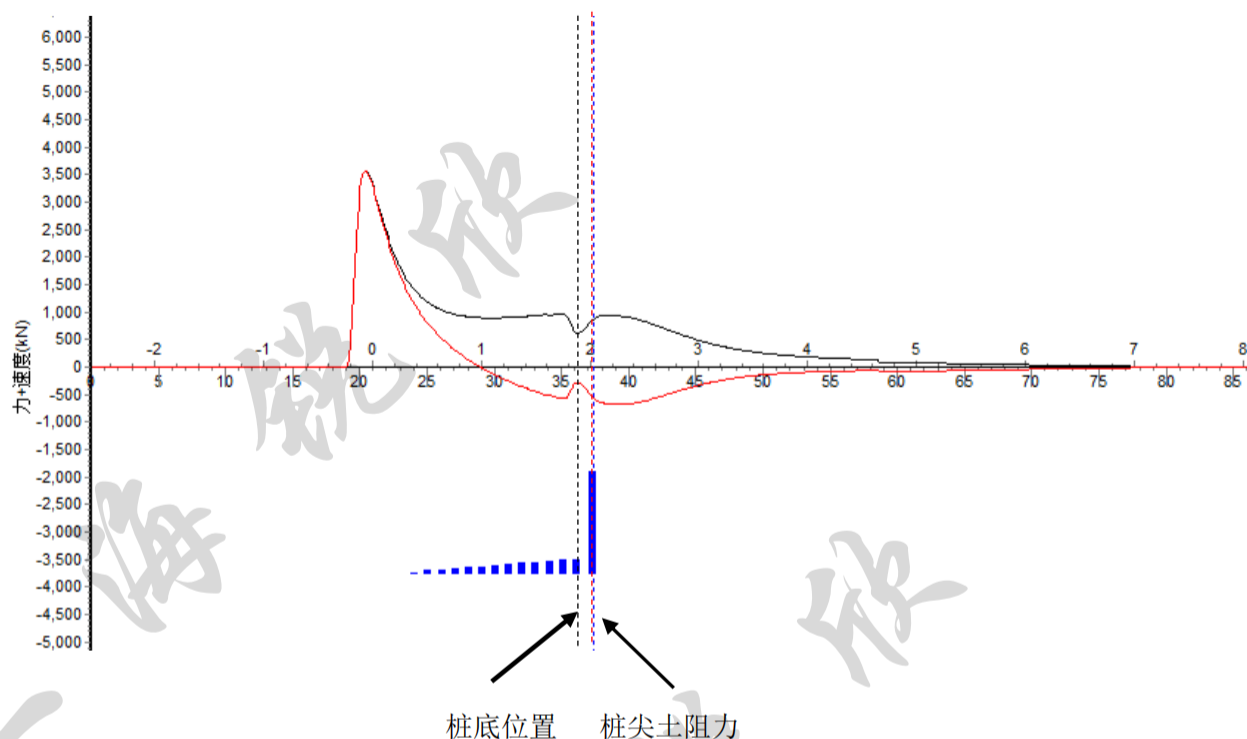


图 4.17 应力波在桩身中的反射示意



较大的桩尖土阻力滞后于桩底位置

#### 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  $F_{\downarrow}(t)$  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。

#### 4.13 打桩监控

##### 1 打桩监控的目的

打桩监控试验的目的是为了确定预制桩桩长选择和锤击设备的匹配能力以及进行可打性分析研究。

##### 2 检测方法

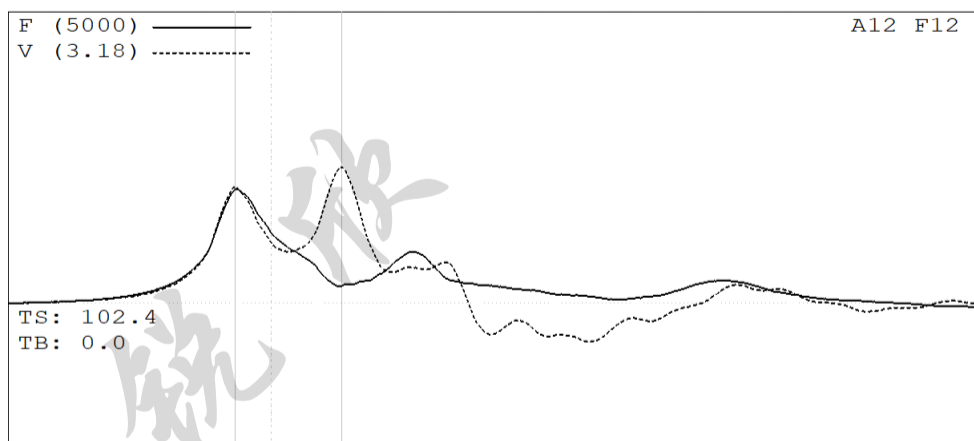
###### (1) 试打桩

A 为选择工程桩的桩型、桩长和桩端持力层进行试打桩

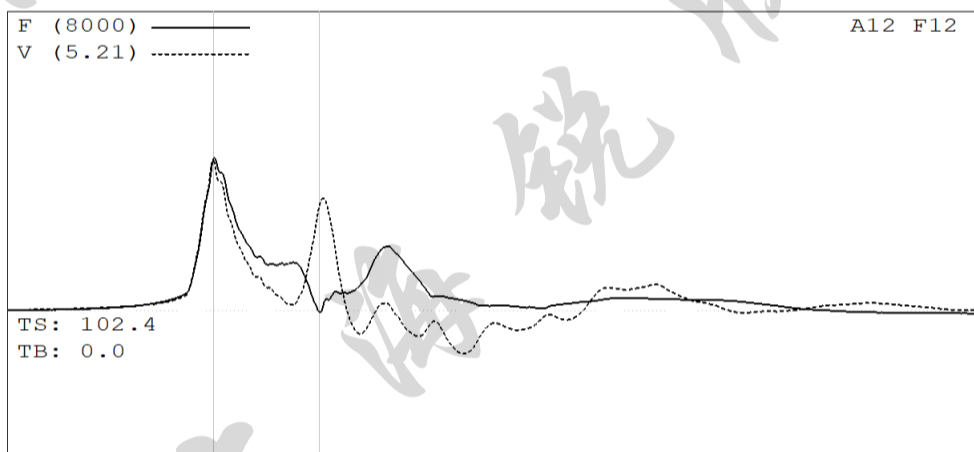
应根据桩端不同土层进行测试，检测进入不同持力层时的承载力值。

对初打承载力随时间而增长效应估计不能太高，并要进行复打检测校验。

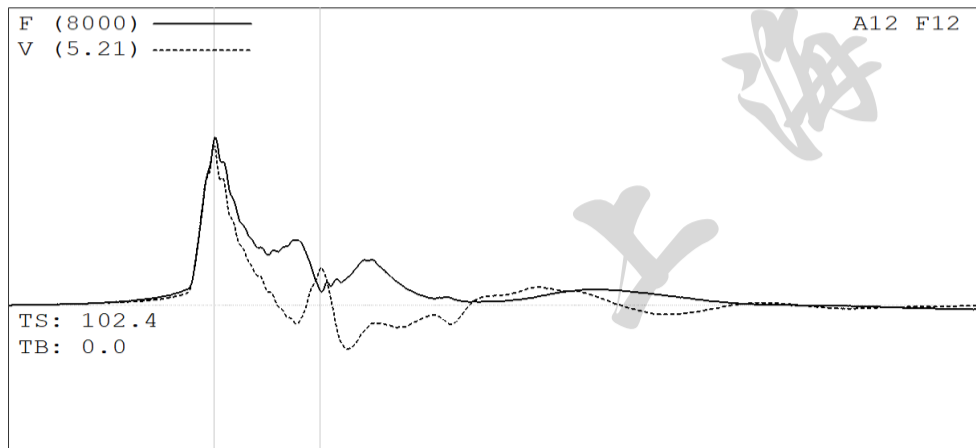
以上是桩进入不同入土深度，桩端进入不同持力层的实测曲线。



第 27 锤



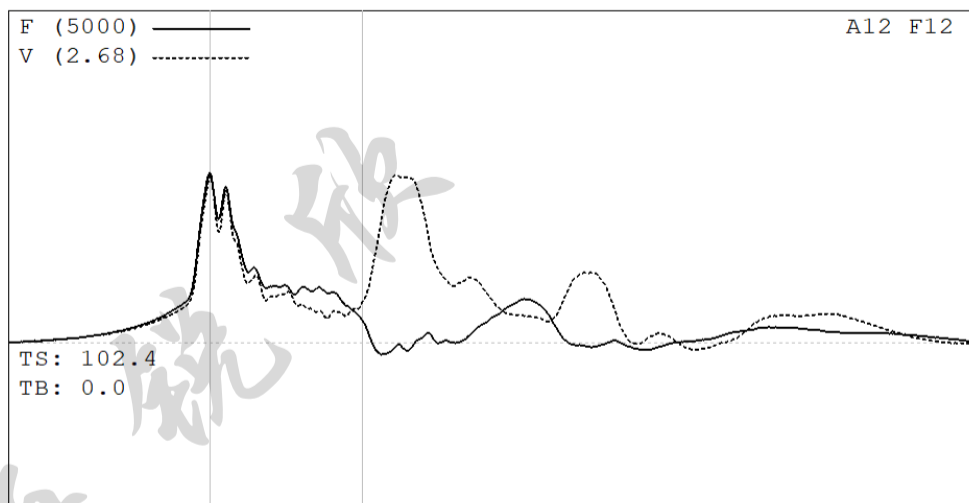
第 46 锤



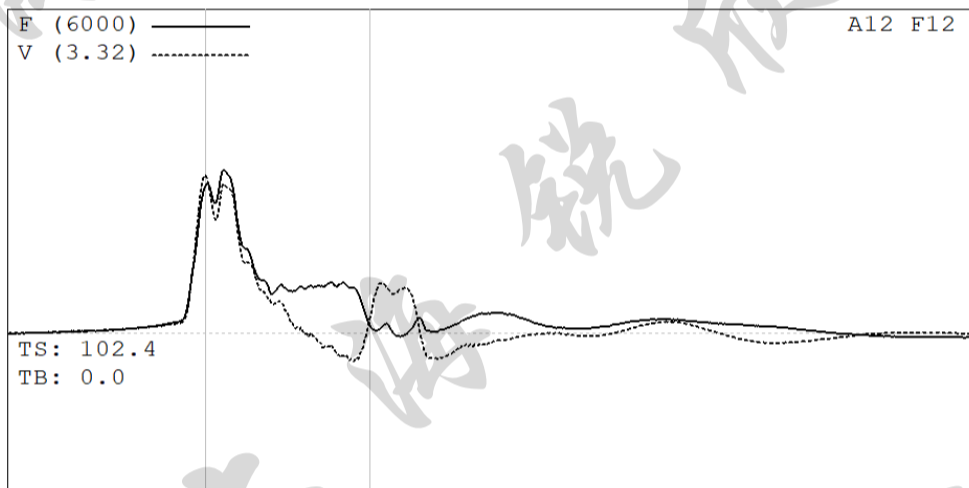
第 76 锤



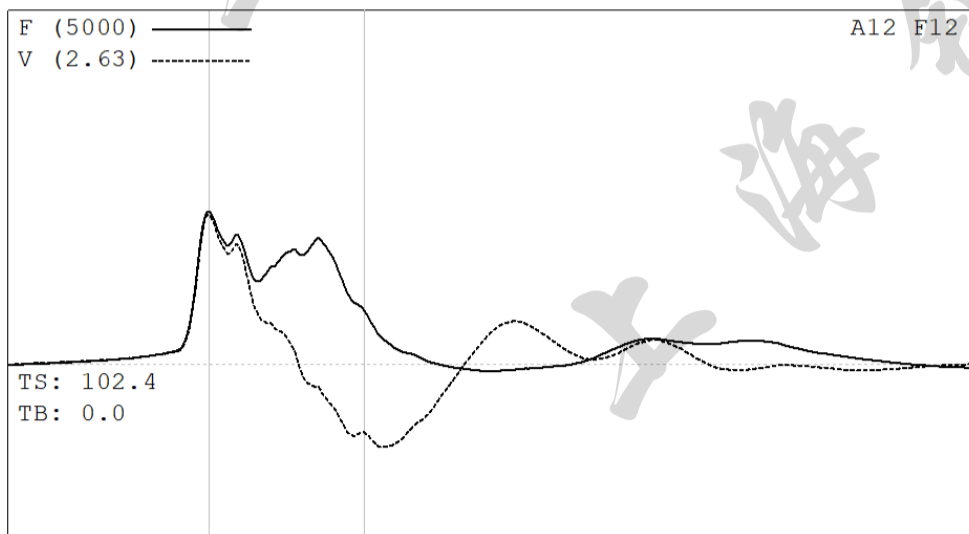
以下是初打桩和分别休止 1 天和休息 75 天后的实测曲线。



初打桩



休止 1 天后复测



休止 75 天后复测

## B 桩身锤击应力监测

检测内容包括锤击压应力和锤击拉应力

锤击拉应力应在桩端进入软土层或穿过硬土层进入软夹层时检测。

最大拉应力幅值和位置的影响因素：

- I 锤击力幅值低，且持续时间长，拉应力就低。
- II 打桩时土阻力越低，拉应力就越大。
- III 桩越长，且锤击力波持续时间越短，最大拉应力位置就越下移。

锤击压应力应在桩端进入硬土层桩周土阻力较大时检测。

对于一般摩擦桩，最大锤击压应力一般出现在桩顶处，其大小为： $F_{MAX}/A$

## C 锤击能量检测

- I 传递能量  $E_n = \int_0^t FV dt$

传递能量是指桩锤实际传递给桩的能量（kJ）

- II 桩锤最大动能： $E_d = mv^2/2$

$$V = (2gH)^{0.5}$$

- III 桩锤额定能量  $E_e$ ，由厂家给出

- IV 桩锤传递比： $E_n/E_e$

- V 桩锤效率： $E_d/E_e$

根据美国 PDI 公司提供的资料（供参考），桩锤传递比的范围如下表：

锤型	钢桩	混凝土桩
柴油锤	26~50%	17~40%
自由落锤	35~60%	25~50%

## D 锤跳高度 H 计算

对于单动开口柴油来说，锤跳高度 H 为：

$$H(m) = 1.22 * (60/BPM)^2 - 0.1$$

式中：BPM 为开口柴油锤的每分钟击数

## 4.14 检测桩的数量

根据上海市工程建设规范《建筑地基与基桩检测技术规程》(DG/TJ 08-218-2017) 第3.2.2条规定：

“2、对于本规程第 3.2.1 条规定以外工程，宜采用单桩竖向抗压静载荷试验进行承载力验收检测，检测数量及检测方法应符合本规程第 3.2.2 条第 1 款的规定；也可采用单桩静载荷试验与高应变法组合进行单桩竖向抗压承载力的验收检测，单桩静载荷验收检测试桩数量不应少于总桩数的 0.5%、且不应少于 3 根，高应变法作为单桩竖向抗压承载力检测的补充，检测试桩数量不应少于总桩数的 3%，且不应少于 5 根；

3、场地和地基条件简单、荷载分布均匀的三层及三层以下民用建筑及一般工业建筑、重要性较低的小型桥梁等不具备进行静载试验条件的工程，当有可靠工程经验时，也可直接采用高应变法进行单桩竖向抗压承载力验收检测，同一条件下单位工程试桩数量不应少于总桩数的 5%，并不得少于 5 根，试桩应有足够的代表性。”

#### 4.15 采样时间长度的匹配

##### 1. 采样时间长度要求：

对于采样时间长度，上海规范和国家规范都没有具体规定，但是在拟合要求中，上海规范要求拟合长度为  $2L/C+20\text{ms}$  以上，国家规范要求拟合长度为  $2L/C+30\text{ms}$  以上。所以采样长度应该为  $2L/C+30\text{ms}$  以上。

例如：PHC 管桩，桩长 50 米，波速取 4000m/s，则采样时间长度至少为： $(2 \times 50/4000) \times 1000 + 30 = 55\text{ms}$

##### 2. 高应变仪器的采样设置

(1) 采样长度：1K，2K，4K

(2) 采样频率：10K，20K，40K

##### 3. 采样时间计算

$T = \text{采样长度} / \text{采样频率}$

如：取采样长度 1K，采样频率 10K。则采样时间长度为： $1000/10 = 100\text{ms}$

所以按照规范，上面桩可以采用采样长度 1K，采样频率 10K 的配置。

##### 4. 采样长度的选择，还与锤击脉冲的宽度有关，锤击脉冲越宽（低频），选择的采样长度越长。

## 第五章 曲线拟合法

根据上海市工程建设规范《建筑地基与桩基检测技术规程》(DG/TJ 08-218-2017) 第 9.1.4 条规定, “应采用实测曲线拟合法确定单桩抗压承载力”。

凯司法的不足

由于凯司法的一些基本假定, 使得这种计算方法存在一些问题:

1. 不能适用桩身阻抗存在较大变化的情况
2. 对于桩侧土阻力较大的桩, 桩侧存在较大的动阻力, 如果忽视了桩侧动阻力的存在, 会使得计算结果的可靠性降低。
3. 对于长摩擦桩, 在  $2L/C$  之前桩身上部土单元可能会出现卸载, 凯司法中的考虑方法比较粗糙。
4. 凯司法阻尼系数的取值, 存在人为因素, 需要通过动静对比确定。

实测曲线拟合法, 可以弥补凯司法的不足。

本节的主要内容是:

- (1) 拟合法中的桩-土模型
- (2) 计算算法
- (3) 收敛标准
- (4) 各种参数对拟合曲线的影响
- (5) 拟合中的注意事项

### 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。
  - ③. 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  $\Delta L$  相等, 非均质桩  $\Delta L$  不相等)。
  - ④. 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  $N_s$ 。

⑤. 每个桩单元 i:

单元长度:  $\Delta L = \Delta t * C_i$

## 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  $J_i$

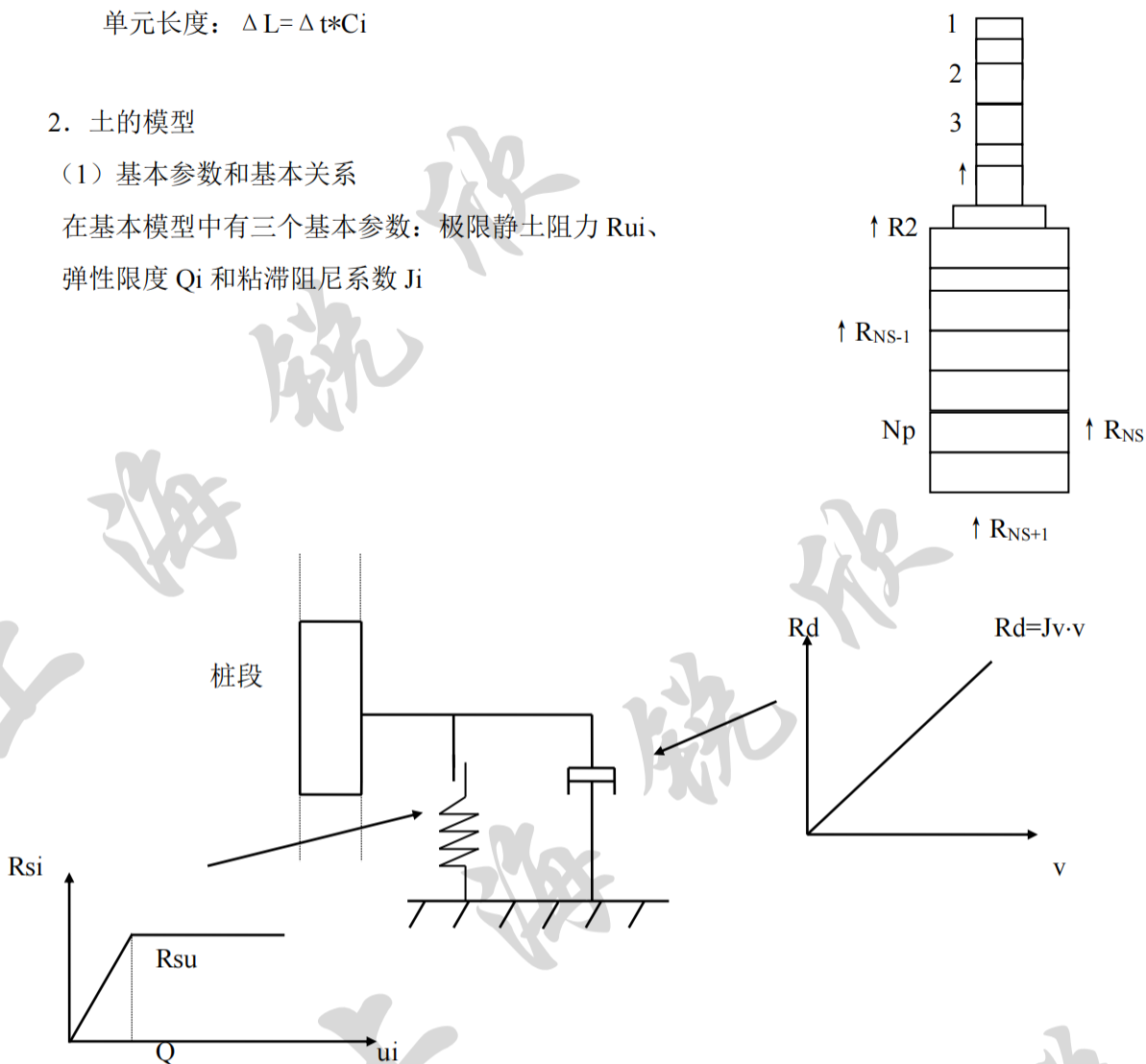


图 5.1 土的基本模型

在土的模型中, 增加了卸载和反复加载、卸载性能。

拟合计算中土阻力计算如下:

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  $k$  土单元的总阻力为:

$$R_k = R_{sk} + R_{dk} \quad (R_{sk} \text{ 为静土阻力; } R_{dk} \text{ 为动土阻力})$$

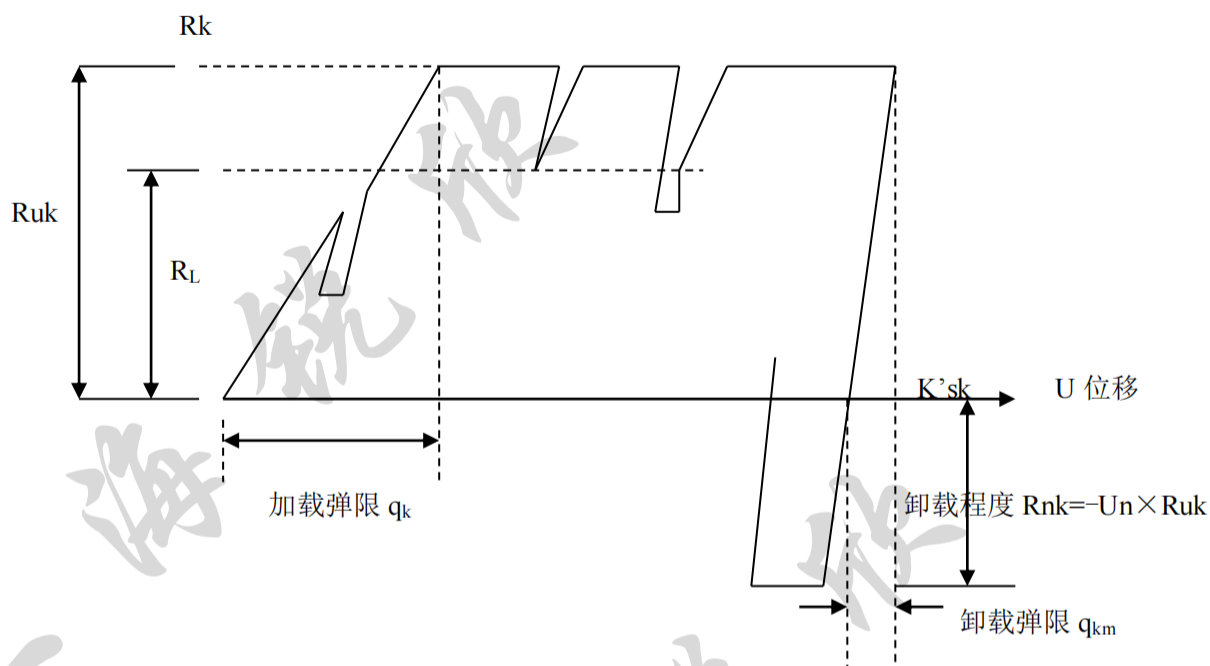
静阻力:  $R_{sk} = K_{sk} \times u_i$  ( $K_{sk}$  为土的刚度即斜率;  $u_i$  为位移)

其中: 刚度  $K_{sk} = R_{uk}/Q_i$  ( $R_{uk}$  为最大静土阻力值;  $Q_i$  为土单元的最大弹性形变量)

且静土阻力的变化范围为:  $R_{nk} \leq R_{sk} \leq R_{uk}$  ( $R_{nk}$  为卸载程度)

动阻力  $R_{dk} = J_i \times V_i$  ( $J_i$  为土的粘滞阻尼系数;  $V_i$  为相应桩段的运动速度)

## (2) 卸载与加载, 反复加载

A. 卸载比  $U_n$  (UN)

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

$$U_n = -R_{uk}/R_{nk}$$

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超过实际的激发值。

$q_k$  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。

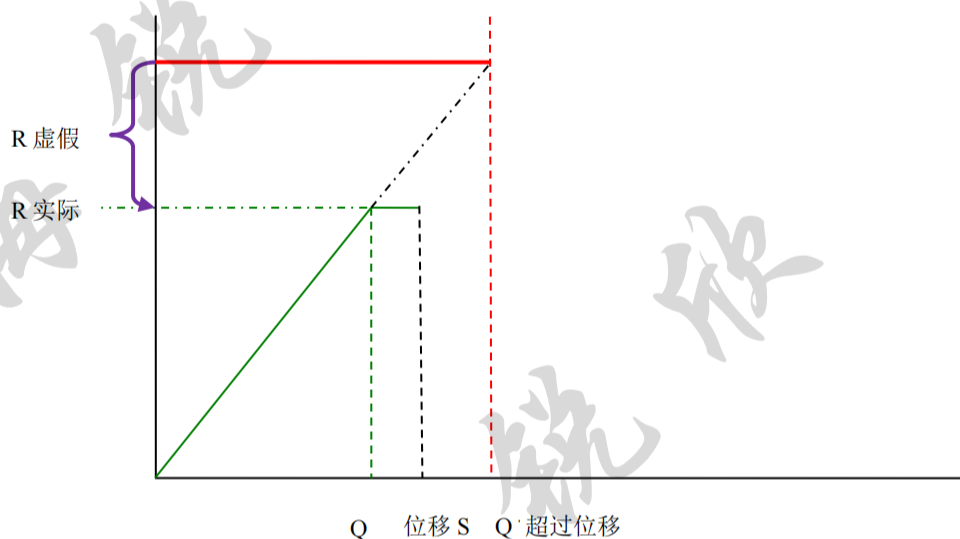
桩尖最大弹性形变量  $q_t$  必须小于桩底的位移。否则将导致该段土阻力超过实际的激发值。

通常  $q_t = 2.54\text{mm}$

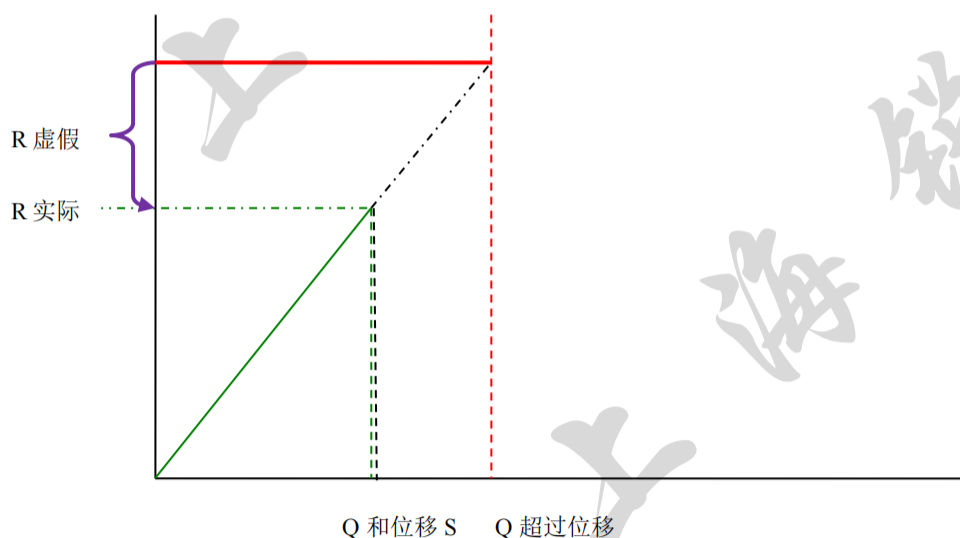
弹性形变量大时会延迟桩尖土阻力的激发。

关于  $Q$  不能超过桩段的最大位移量的问题

土破坏（达到极限 若取  $Q$  大于  $S$ ，则使得计算值大于实际极限值）



土未破坏（未达极限。若取  $Q$  大于  $S$ ，则使得计算值大于实际激发值）



如上图，小于等于位移  $S$  的  $Q$  对应于实际激发的土阻力。但是如果设定的  $Q$  值超过了位移  $S$ ，则  $Q$  所对应的土阻力值  $R$  超过了实际激发的土阻力，由  $R$  实际变成了  $R$  虚假，是不对的。



#### D. 桩侧卸载弹限比 CS (CSkn)

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 Ct (CToe)

Ct 的大小为 0~1。

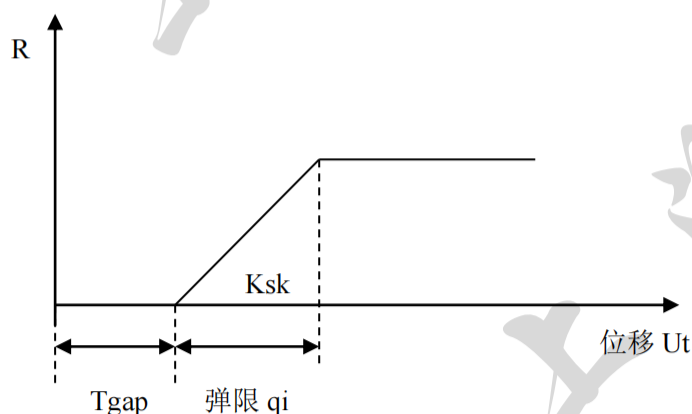
Ct 小, 则导致快速卸载, 使得计算曲线的后部减低。

#### F. 反复加载程度 Lskn 和 LToe

反复加载程度 Lskn 和 Ltoe 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 (Tgap) 时, 将导致硬化型土阻力。



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 (Tgap) 只影响计算曲线上  $2L/C$  附近。

通常产生间隙的情况：① 难打桩 ② 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

### ① 土的粘滞阻尼系数 $J_v$ （线性阻尼）

量纲为： $kN \cdot s/m$ 。

$$R_d = J_v \times v$$

### ② Smith 阻尼系数 $J_s$ （SS，ST）

量纲为： $s/m$ 。

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

### ③ 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， $J_c = \sum (J_{vi}) / Z$

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  $J_{c \text{ 尖}} \leq 1$

阻尼系数对计算曲线的影响: ① 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。② 增大 SS, 改善计算曲线尾部的震荡。③ 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

### ① 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。

### ② 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

$$SK = R_{3 \text{ 平均}} \times N \times \phi / Z1$$

$$R_{3 \text{ 平均}} = (R1 + R2 + R3) / 3$$

R1、R2、R3 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  $\phi$ :  $4 \leq \phi \leq 8$

Z1: 第一桩单元的阻抗。

### ③ 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。

通过辐射阻尼, 计算承载力的增加不宜超过总承载力的  $1/3$ 。

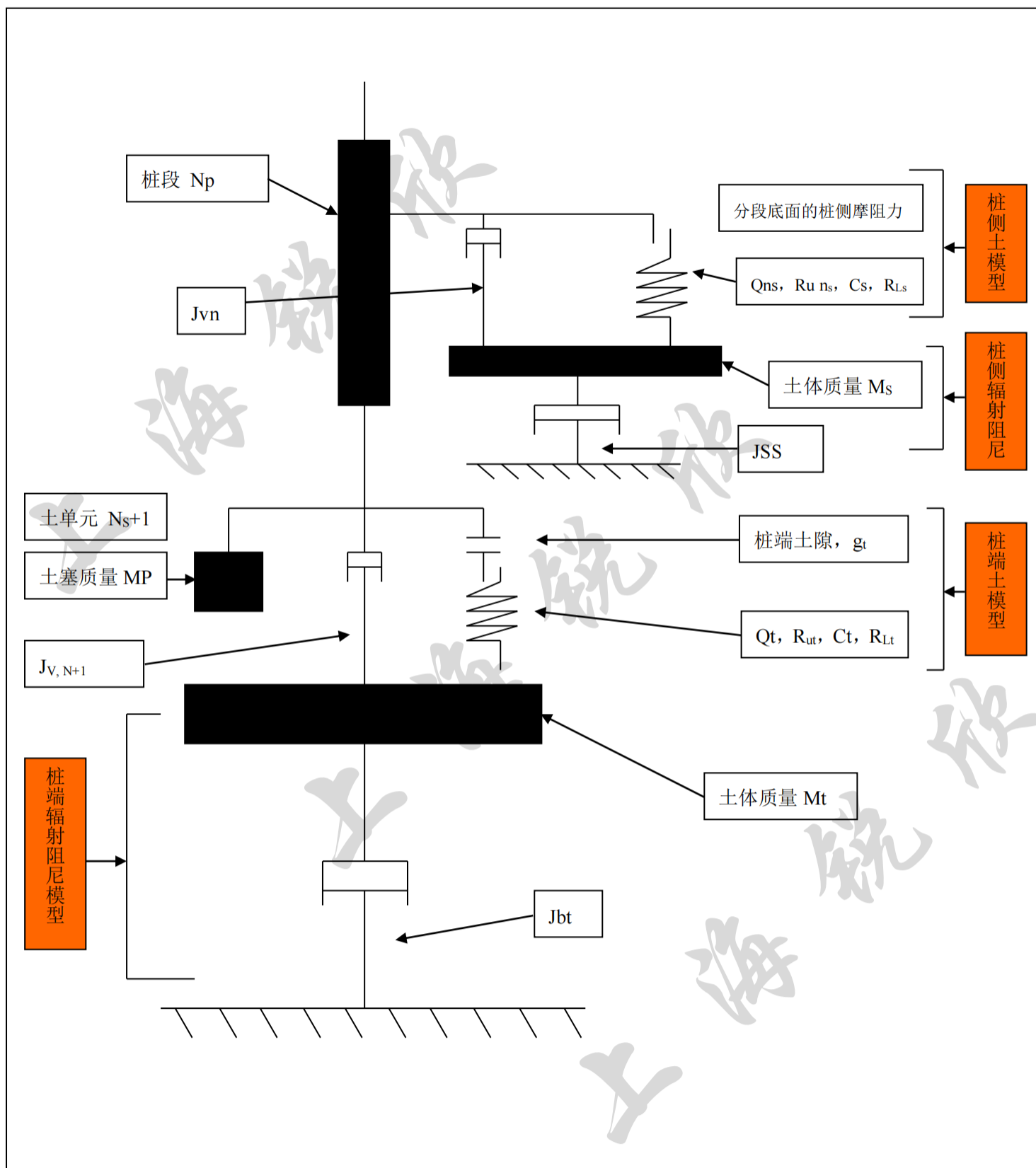
## K. 桩身阻尼 PI

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。

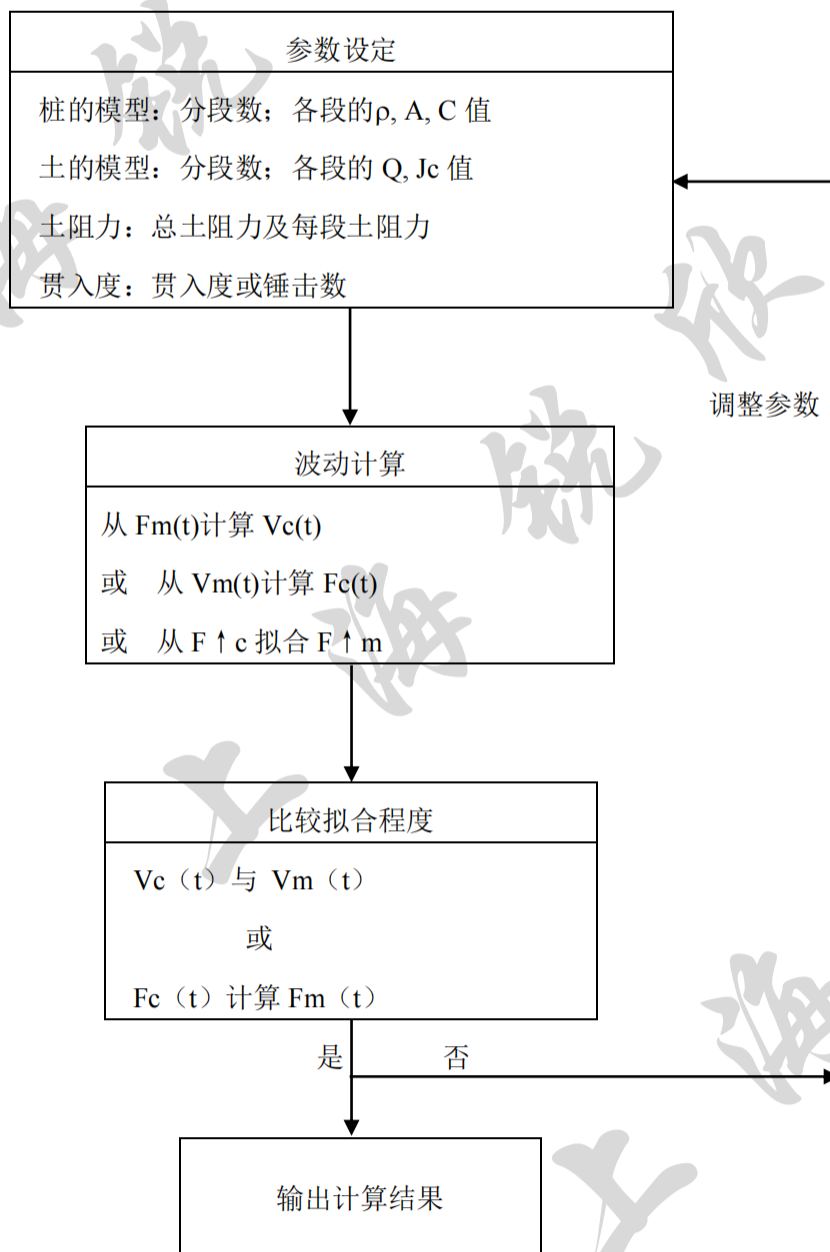


扩展的 CAPWAP 土阻力模型

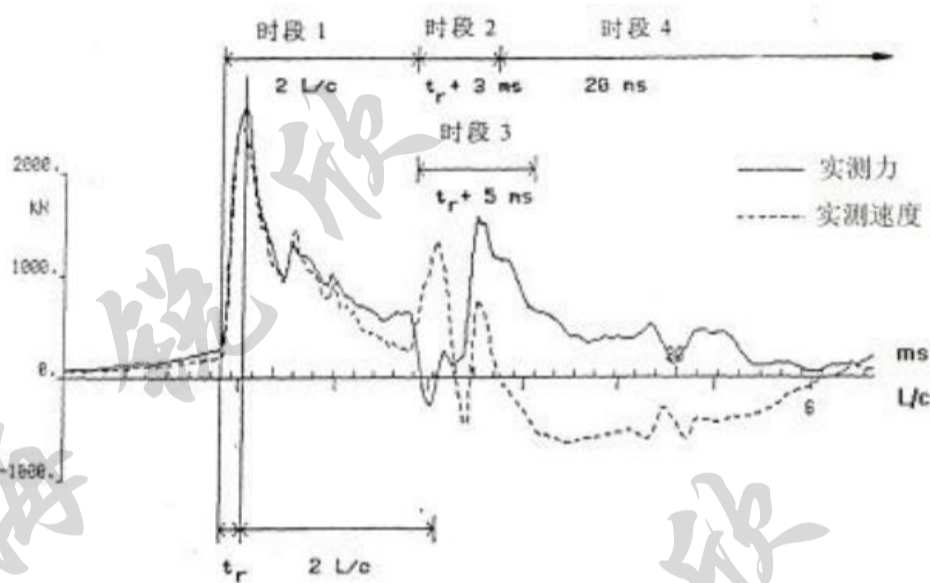
## 5.2 曲线拟合的基本过程

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

采用迭代计算法。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。



### 5.3 基本计算法

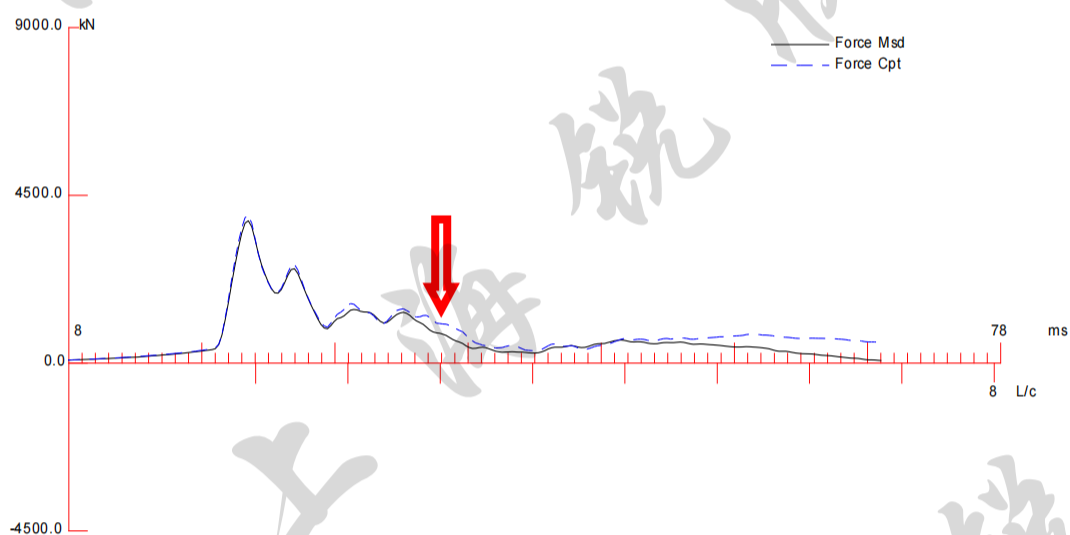
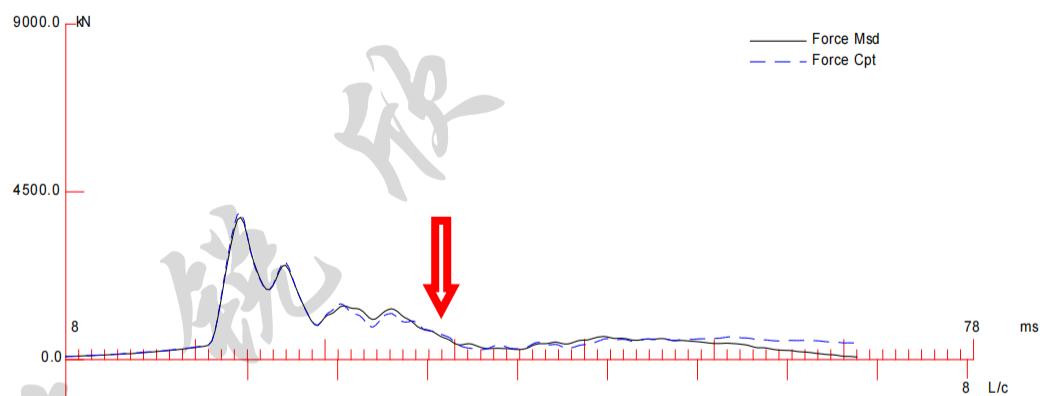


- (1). 第一时间段：主要修正桩侧土阻力分布和桩侧阻尼系数  $SS$ 。
- (2). 第二时间段 ( $t_r+3ms$ )：主要修正桩尖土阻力、桩尖阻尼系数  $ST$ 、桩尖弹限  $Q$  尖和总承载力。
- (3). 第三时间段 ( $t_r+5ms$ )：主要修正土塞和桩侧卸载比  $CS$ 。
- (4). 第四时间段：主要修正桩尖卸载比  $CT$  和卸载程度  $UN$ 。

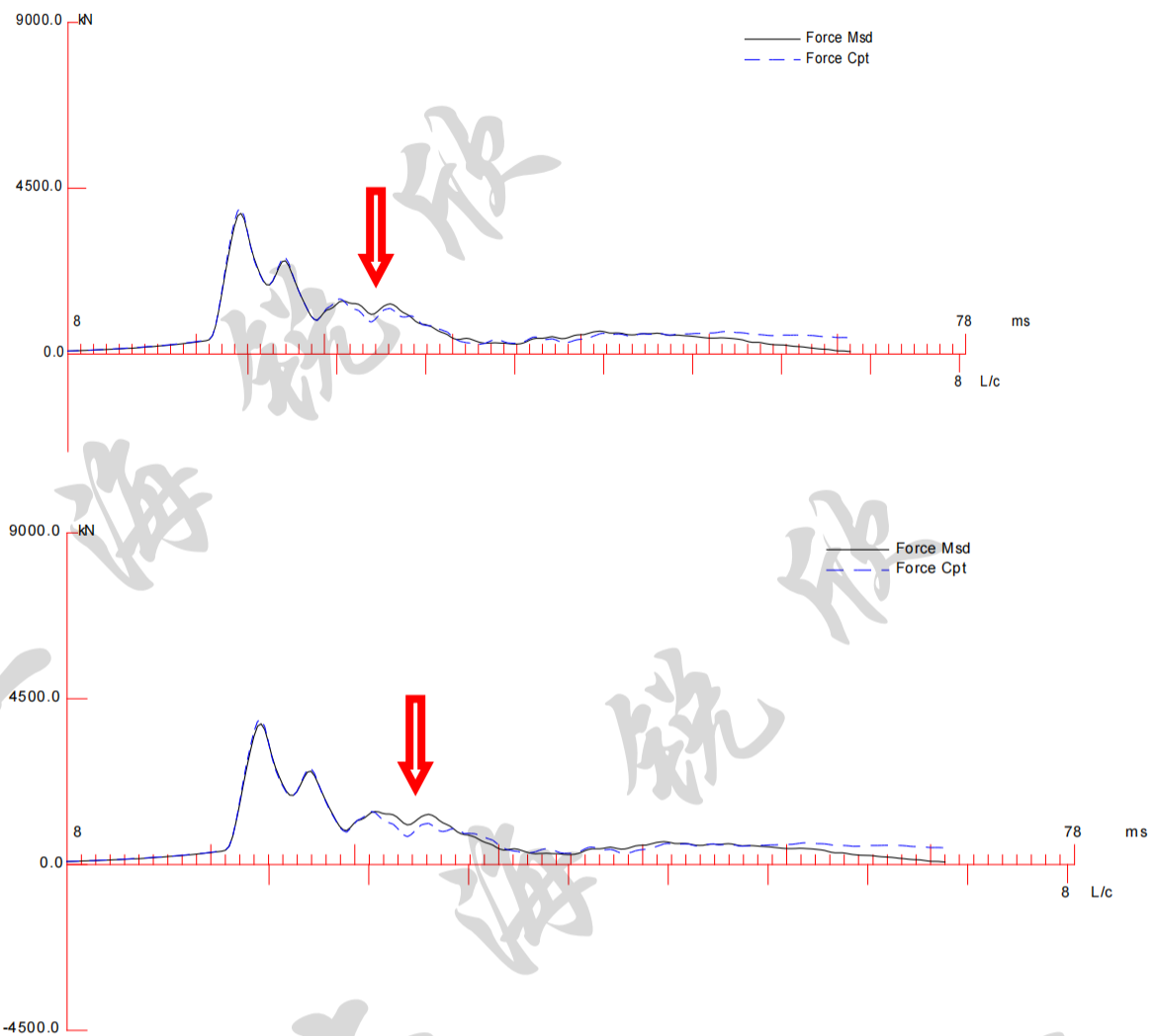


## 5.4 主要土参数对拟合曲线的影响

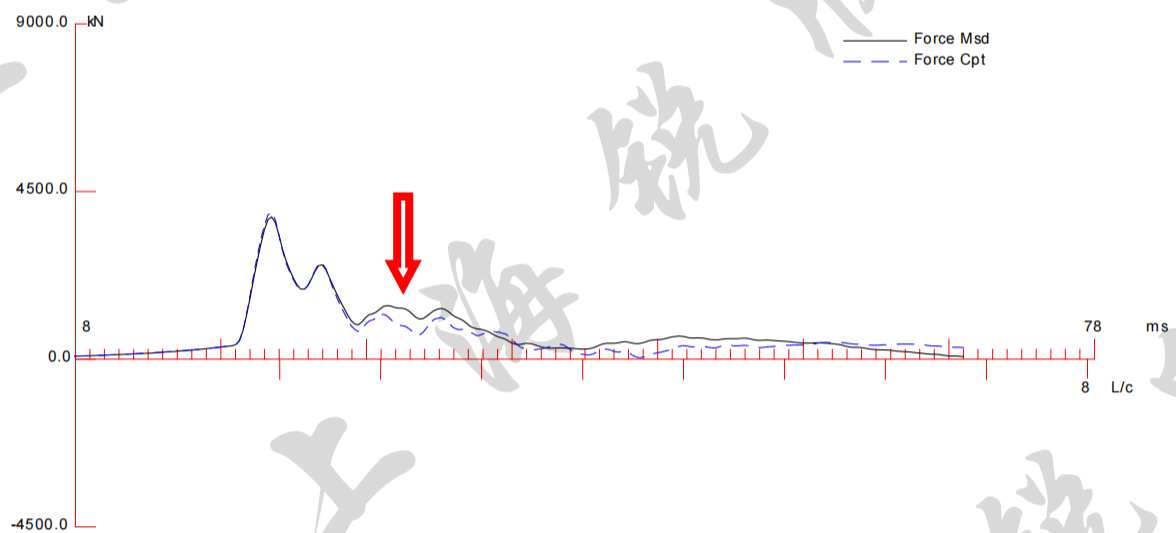
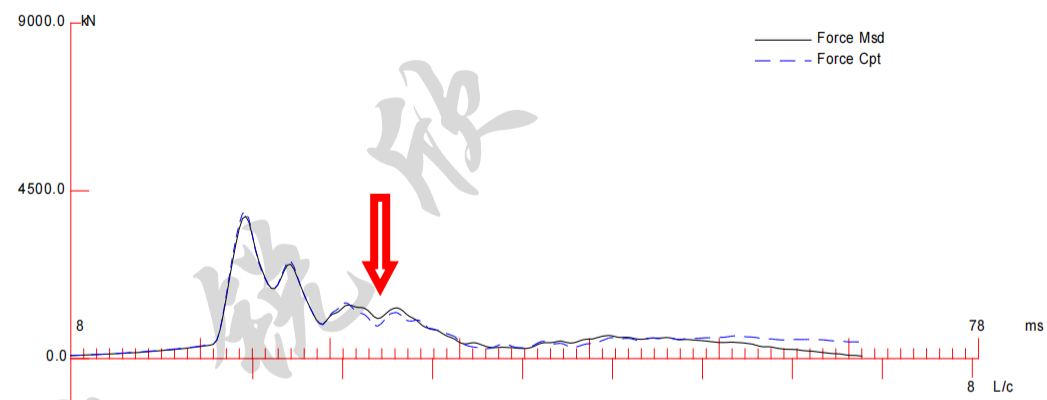
### 1 桩的总承载力的影响



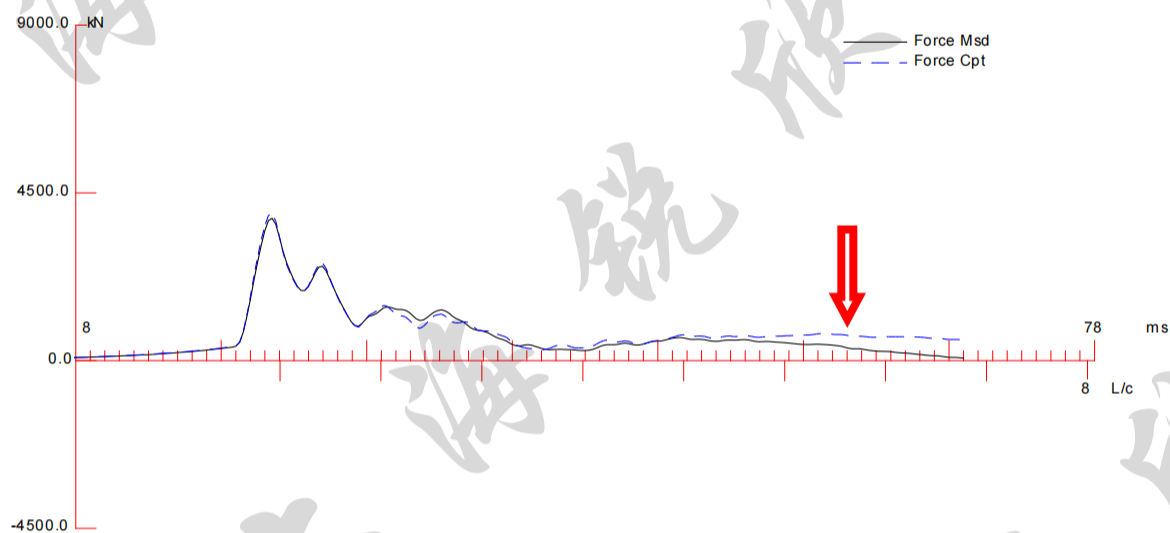
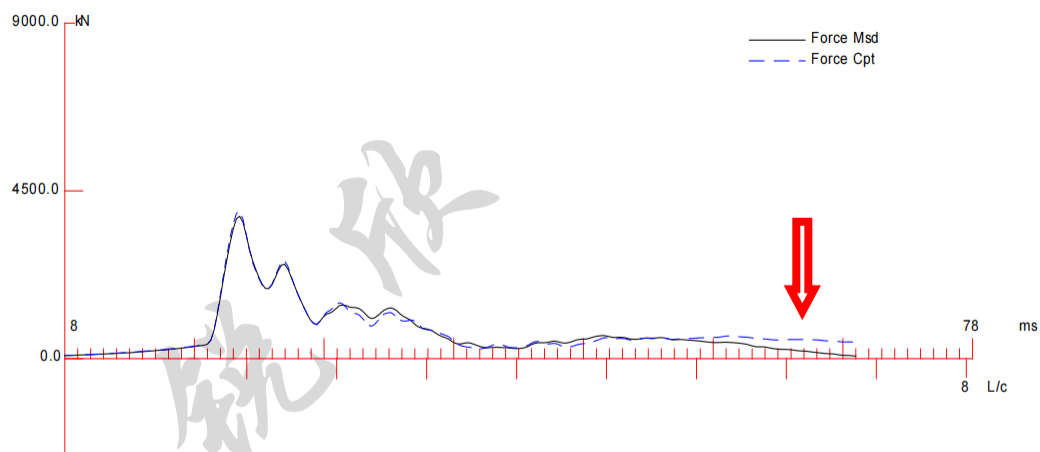
总的承载力增加 10%



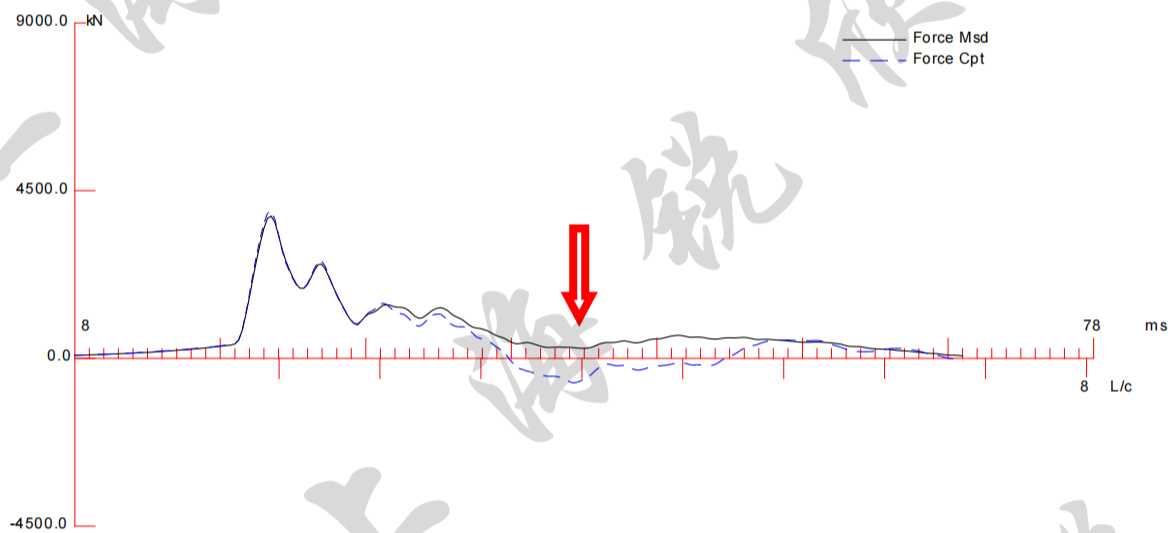
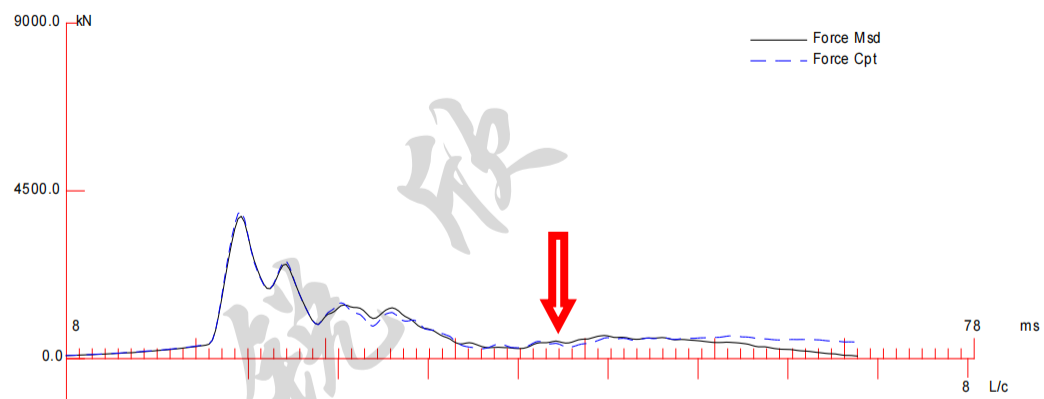
桩侧土阻力减少 20%



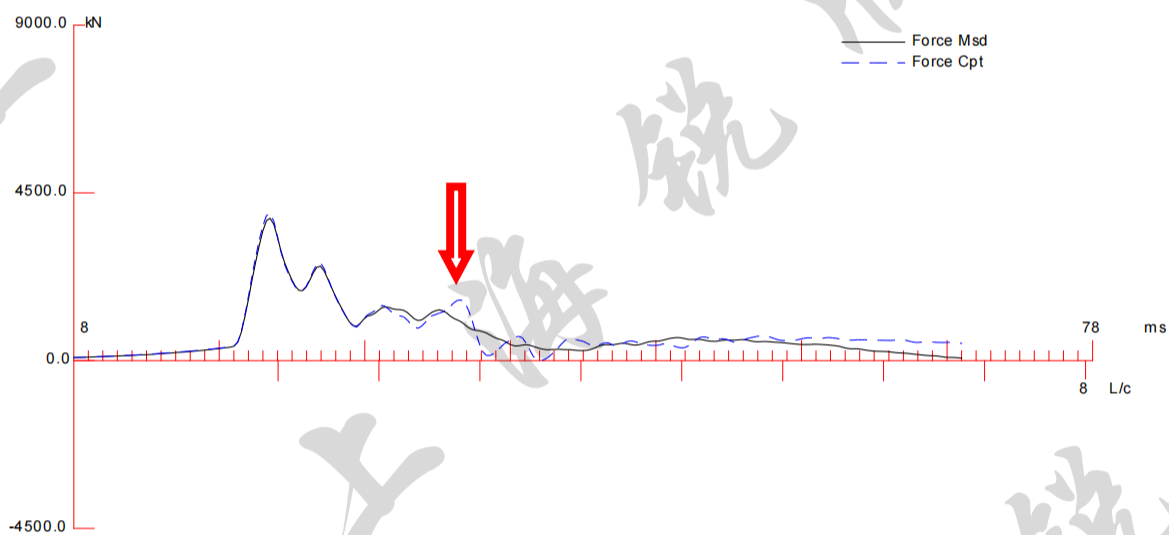
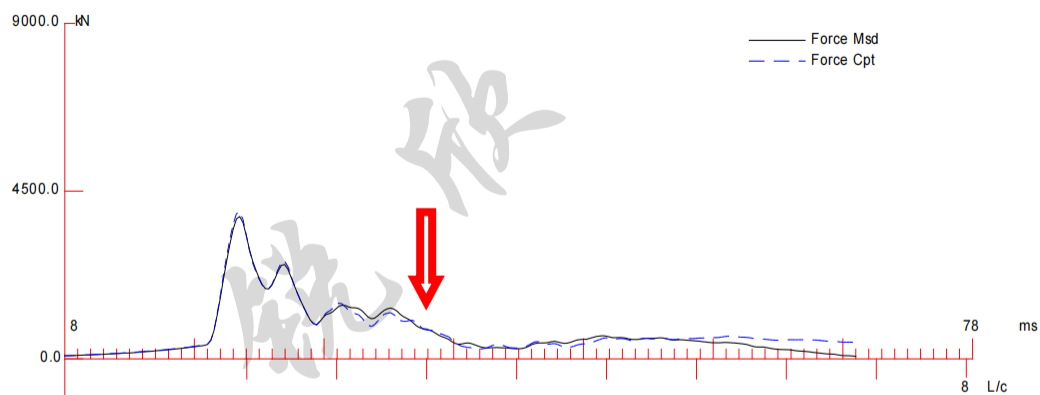
桩侧 SS 从 0.7 减小到 0.4



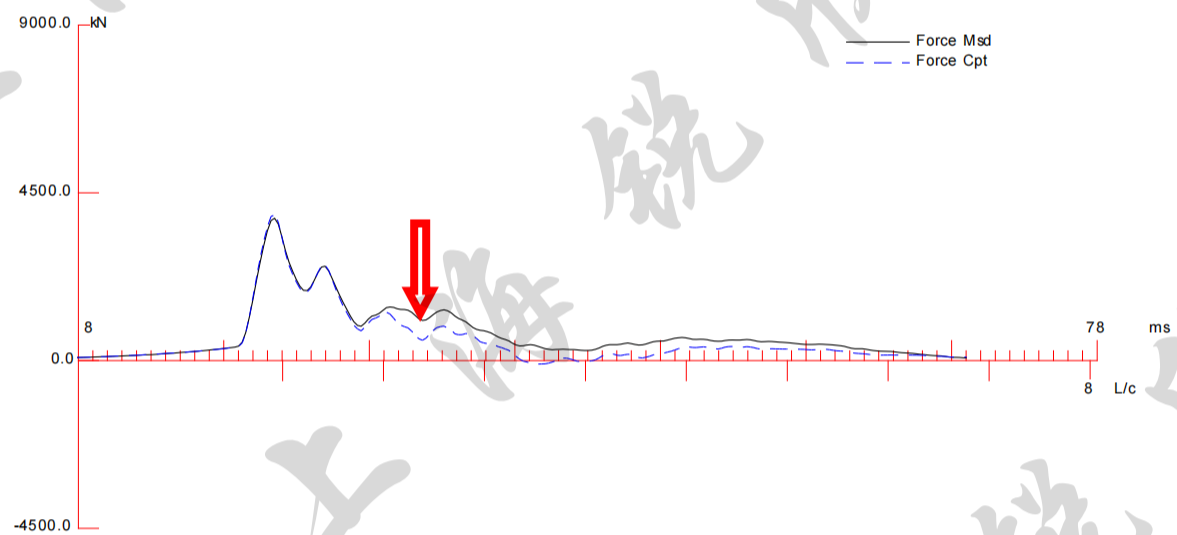
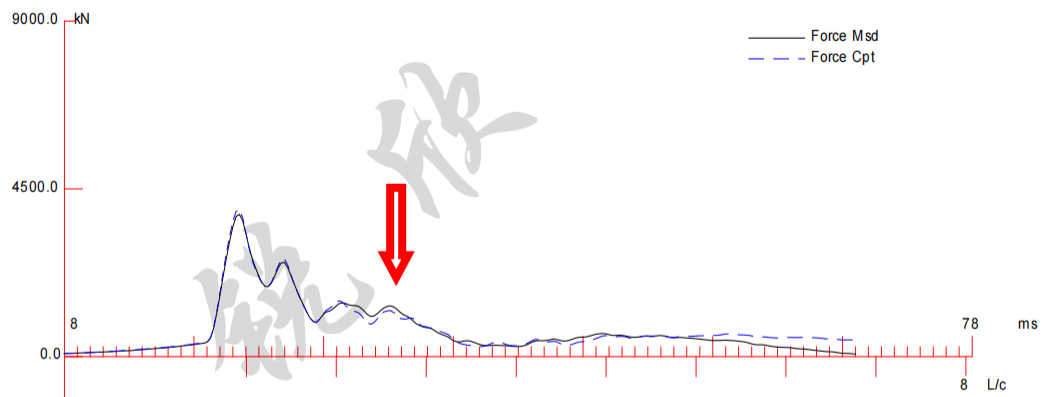
UN 从 1 减小到 0.3



CS 从 0.7 减小到 0.2



PL 从 0 增加到 10



SK 从 0 增加到 0.8



## 5.5 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

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

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。

## 5.6 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。

- (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。

(条文说明中: 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%)

## 5.7 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~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

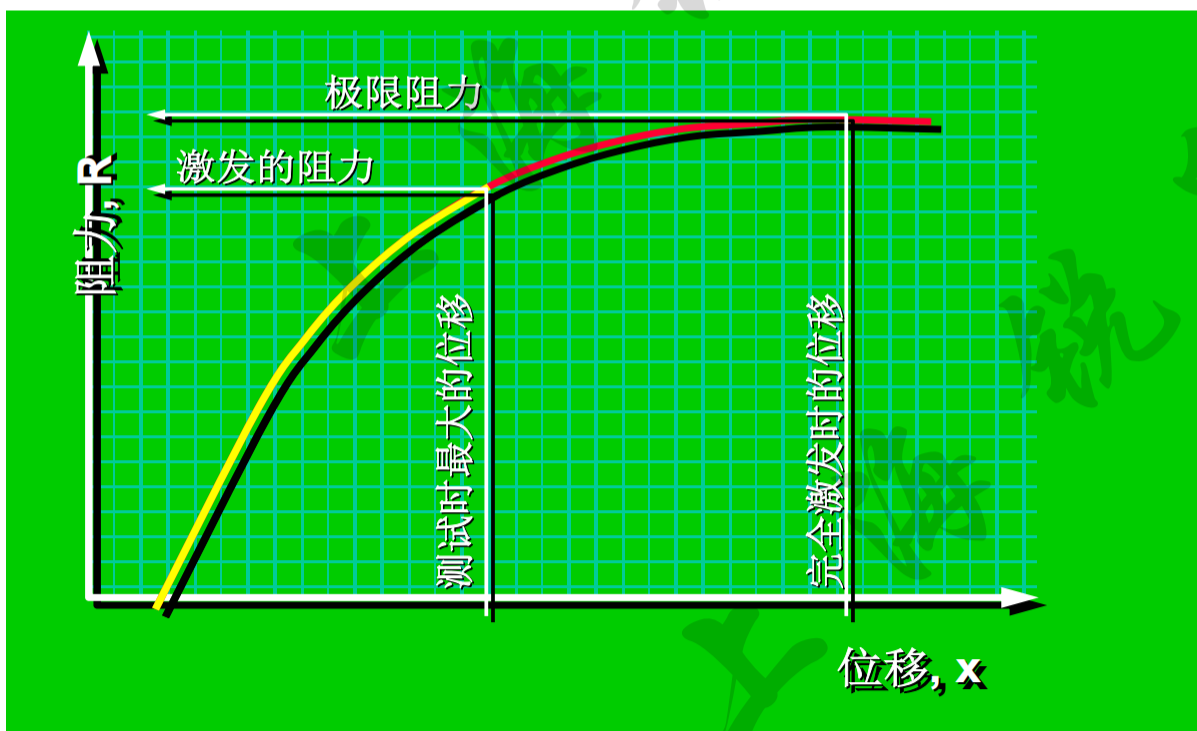
高应变动测试验所有计算分析的基本依据就是所采集的原始信息。原始信息不可靠，则以后一切计算结果都是不可靠的。保证原始信息的质量，就是整个动测试验得以圆满成功的基础。

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

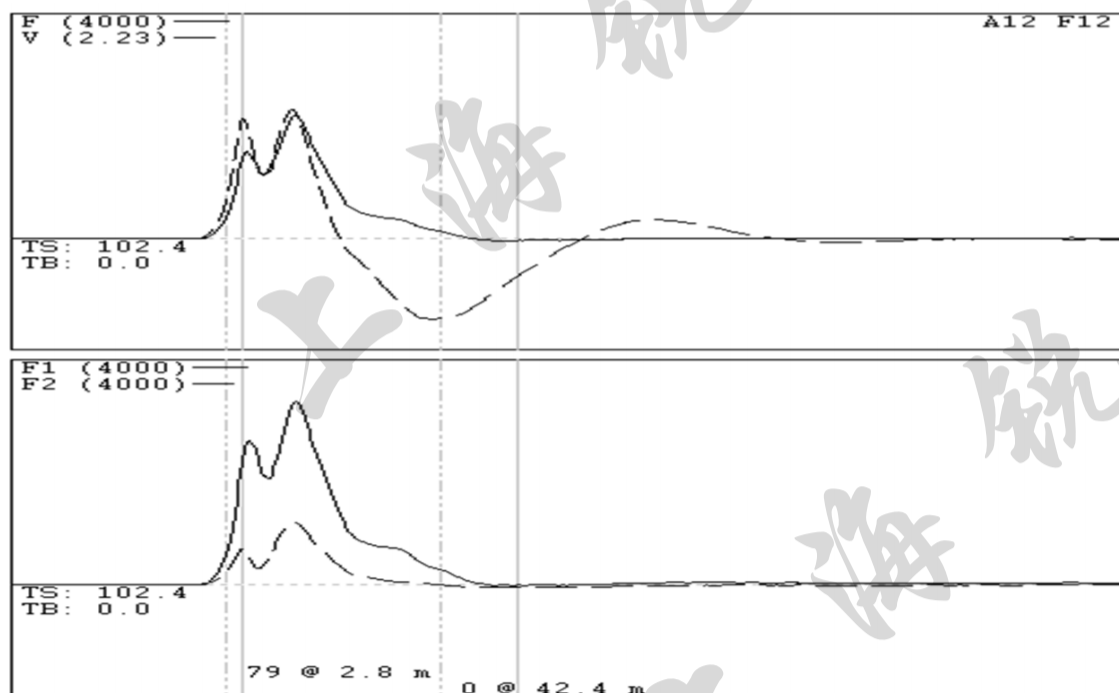


图1 峰值不等

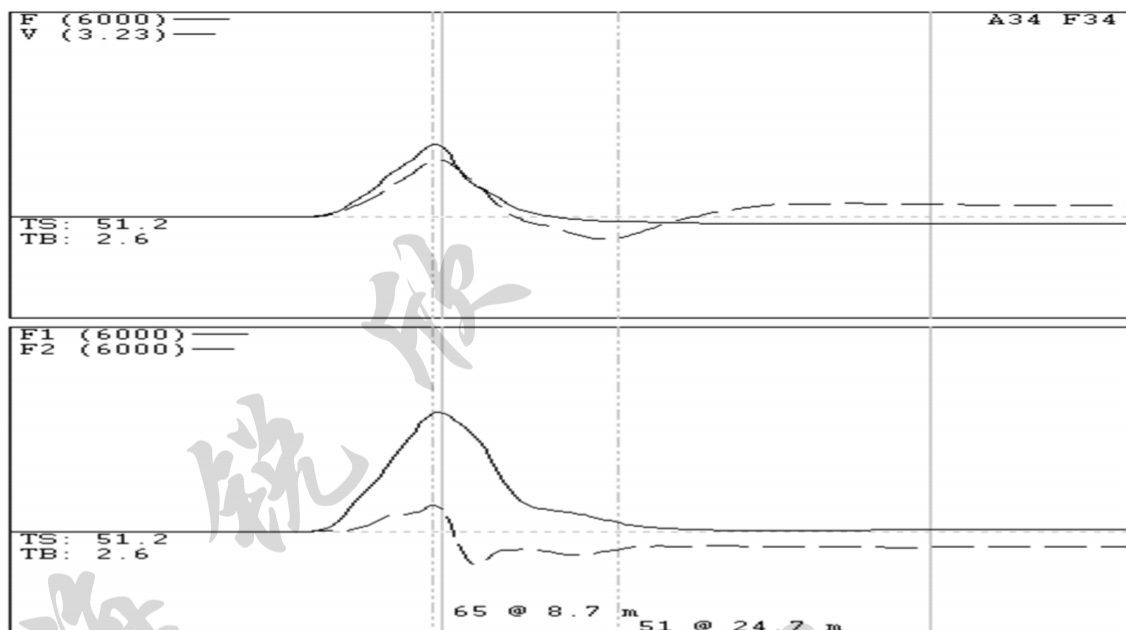


图2 曲线畸变、峰值偏移

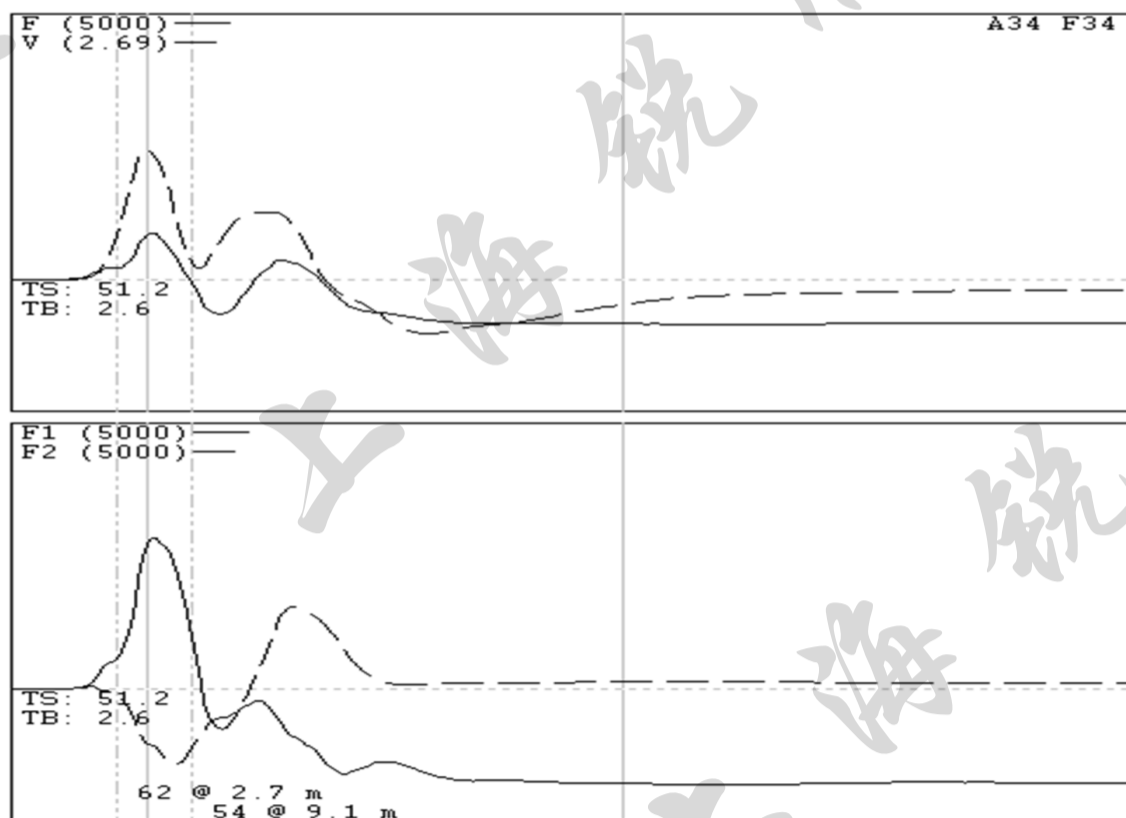


图3 曲线严重畸变

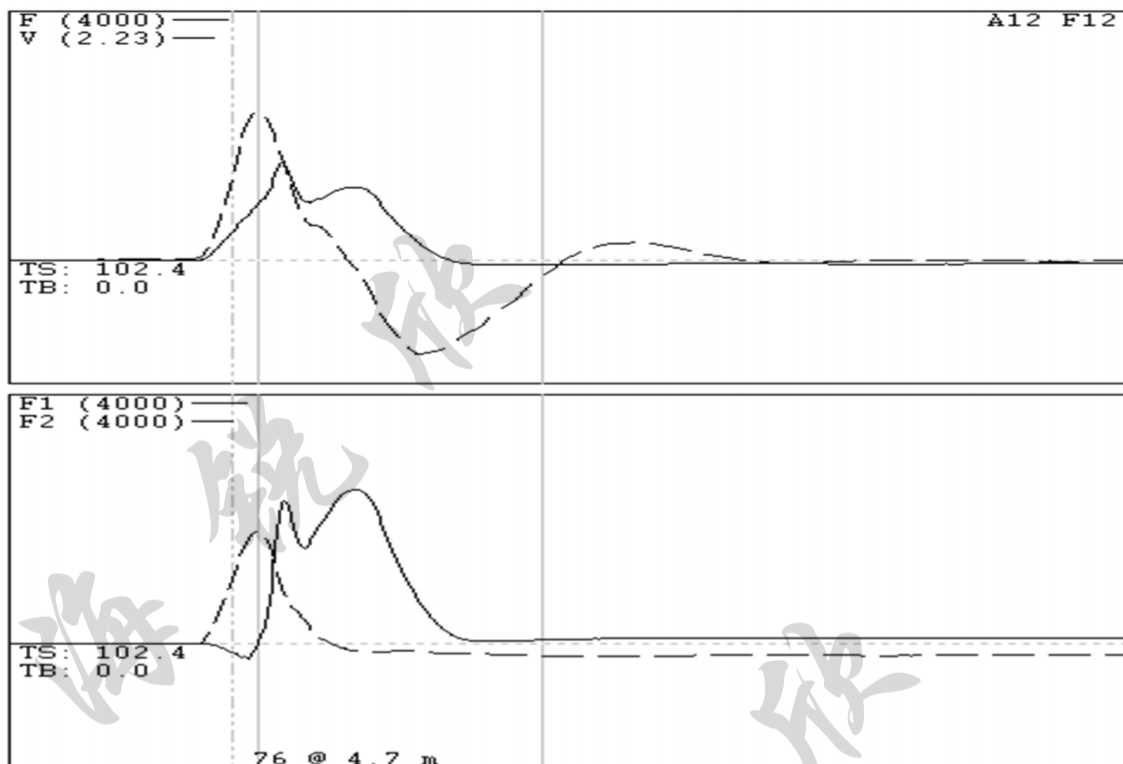


图4 曲线畸变、桩身假缺陷

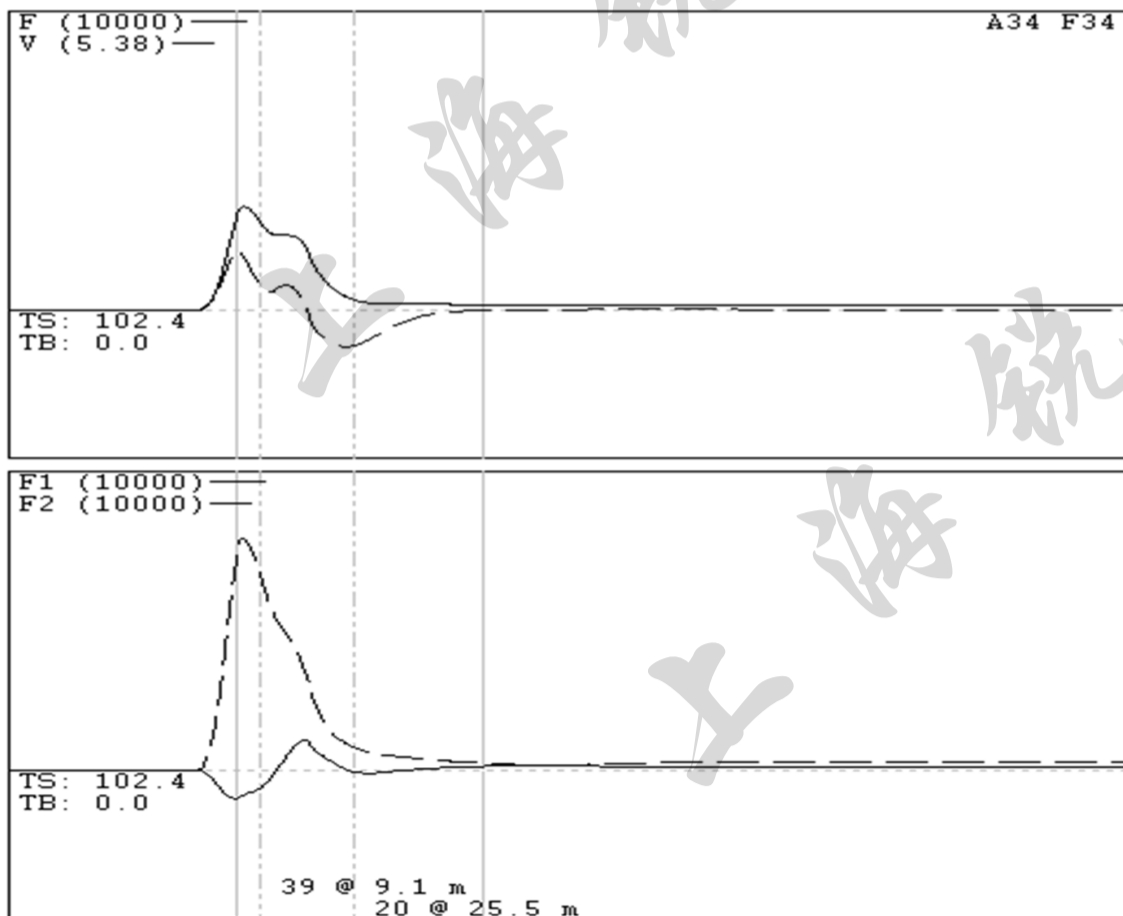


图5 峰值不等



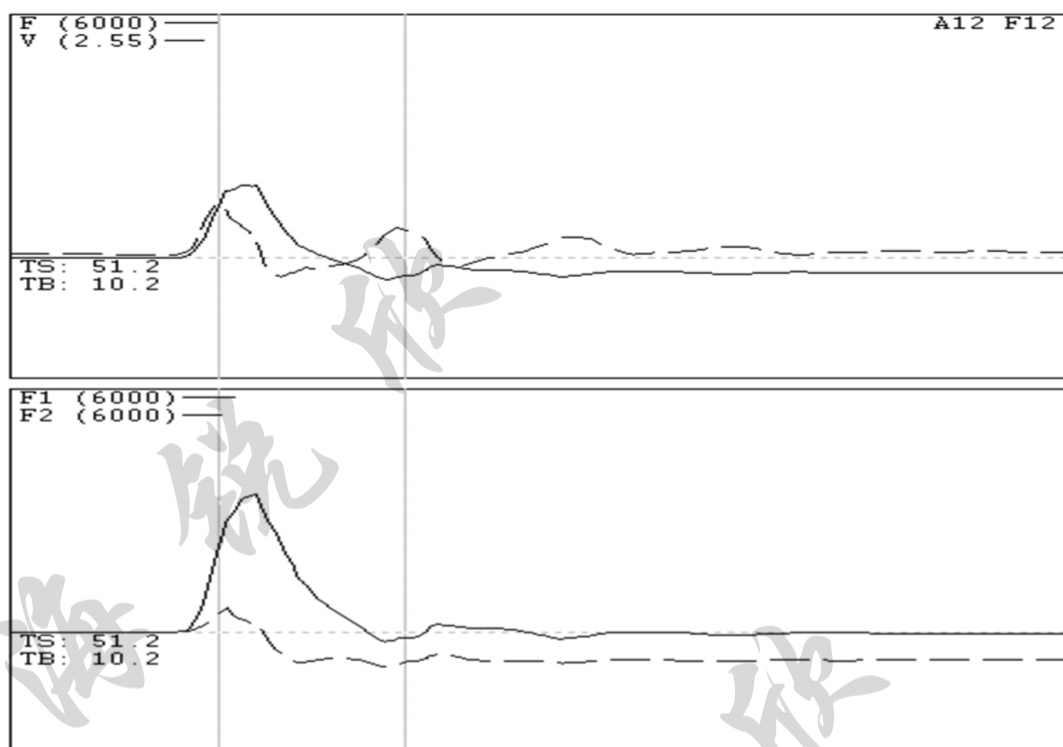


图6 尾部不归零

(2) 传感器的安装

(3) 传感器电缆线的问题

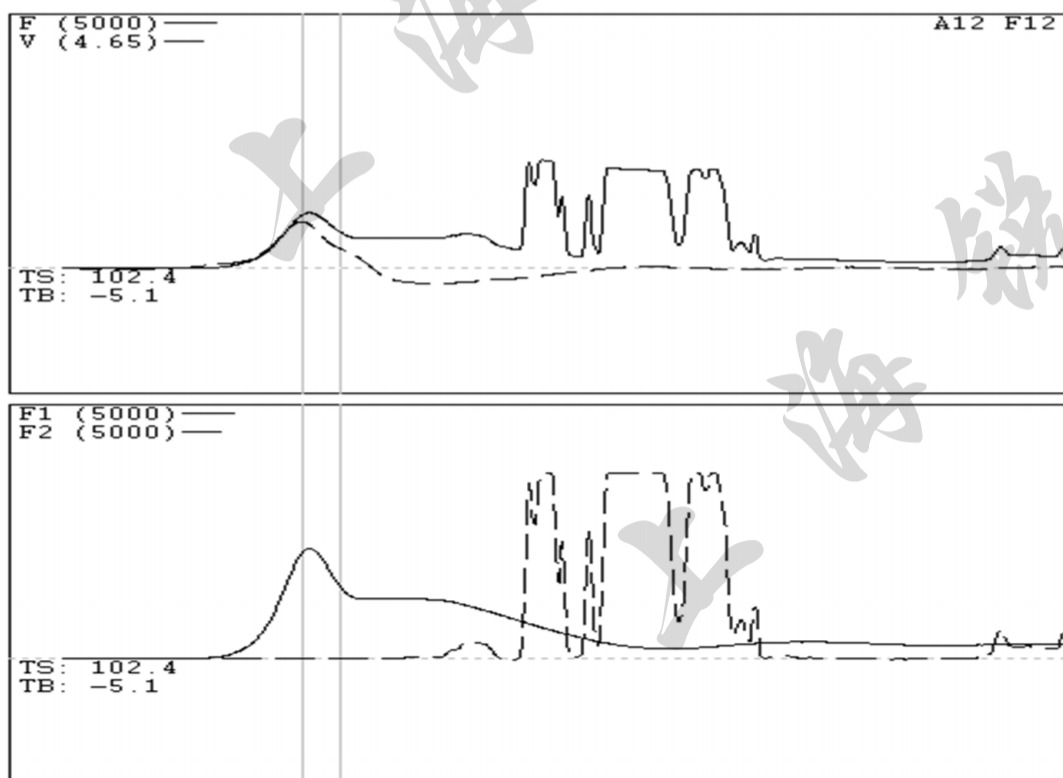


图7 电缆接触或屏蔽不好

(4) 输入参数有误

$$F=A \rho C^2 \varepsilon$$

$$ZV=A \rho CV$$

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

C --- 使 F 和 ZV 分开

A,  $\rho$  --- 使 F 和 ZV 值同等变化

## 6.5 高应变动测试验的局限性

- 1 所应用的桩-土力学模型与实际工程中的力学性质的差异。
- 2 当单桩承载力由桩身结构强度控制时,高应变试验无法定量检测桩身结构承载力,无法判断桩身承载力。
- 3 高应变试验中,桩-土之间的相对位移无法达到静载荷试验的位移量,导致土阻力发挥存在差别,通常试验承载力要低于静载荷试验结果。

## 6.6 典型的锤击设备









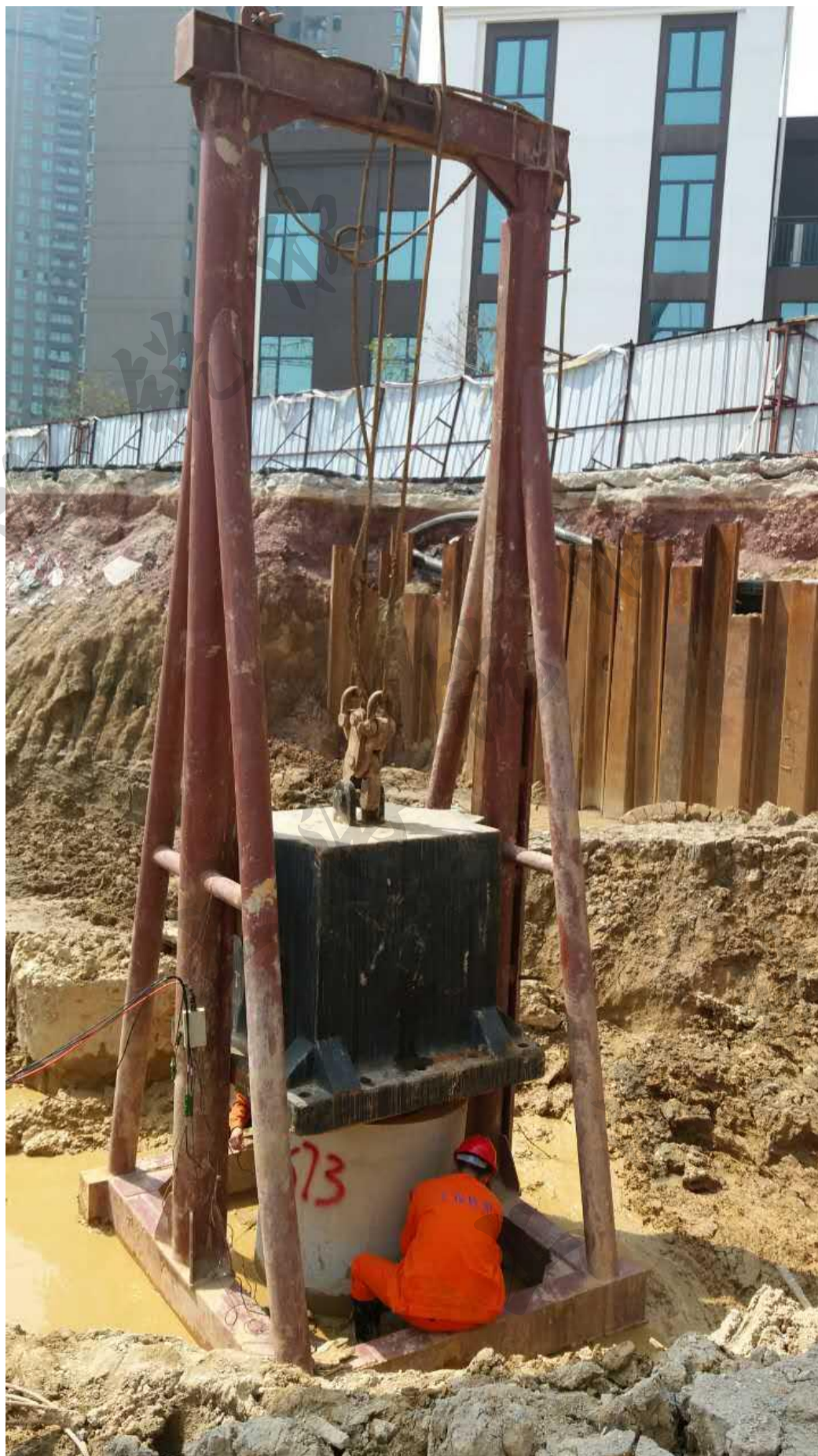










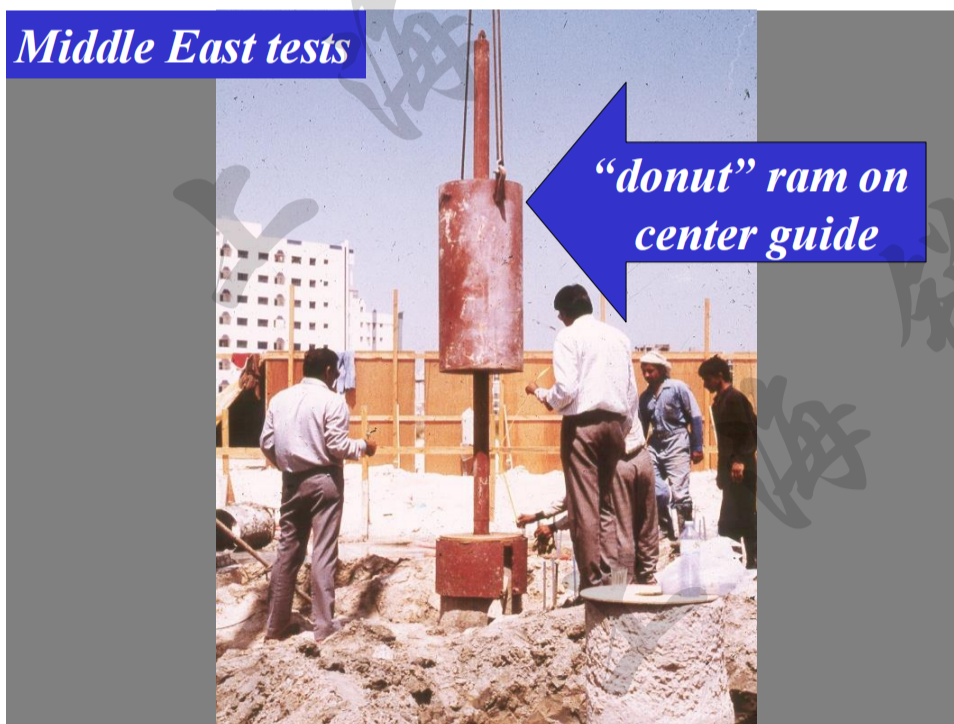
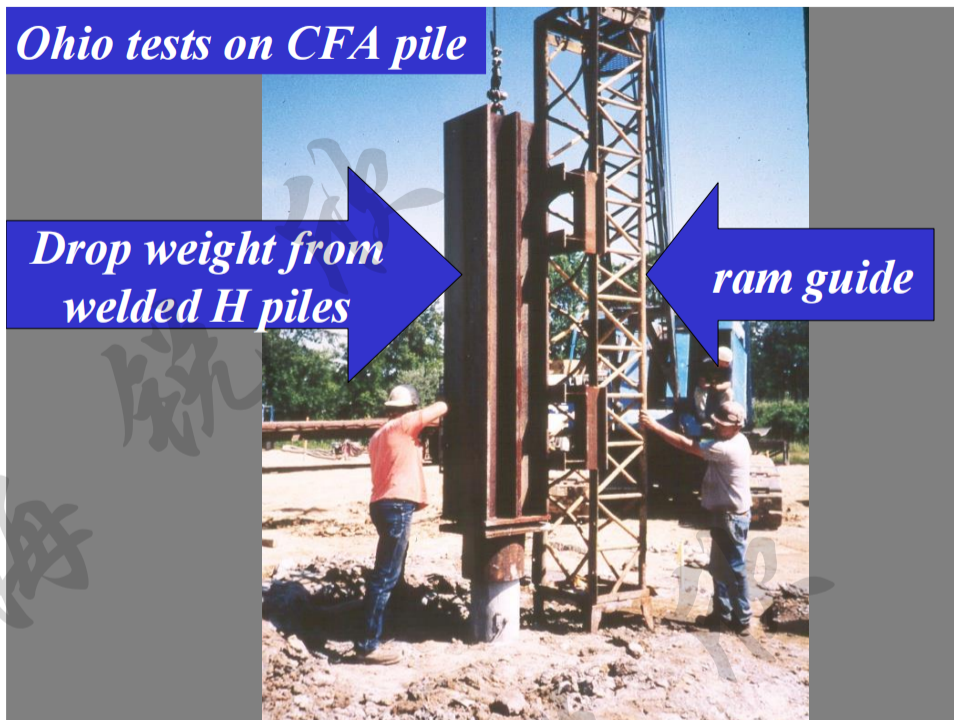


















THE END

谢 谢