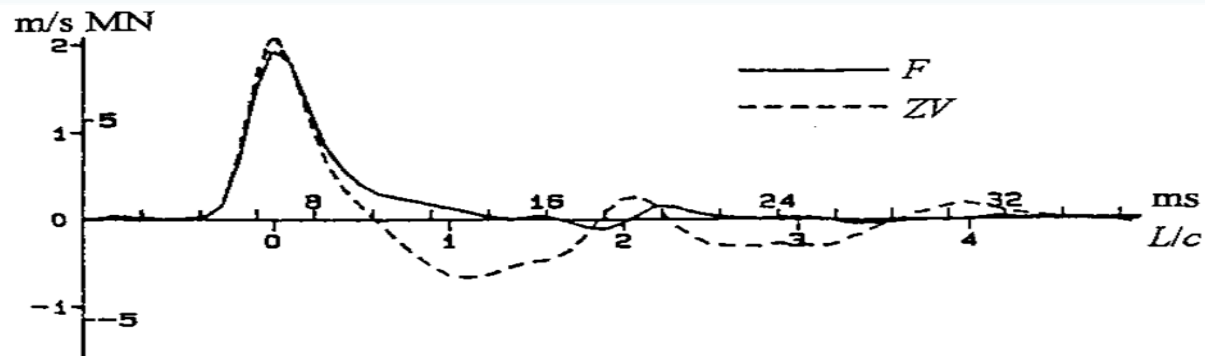
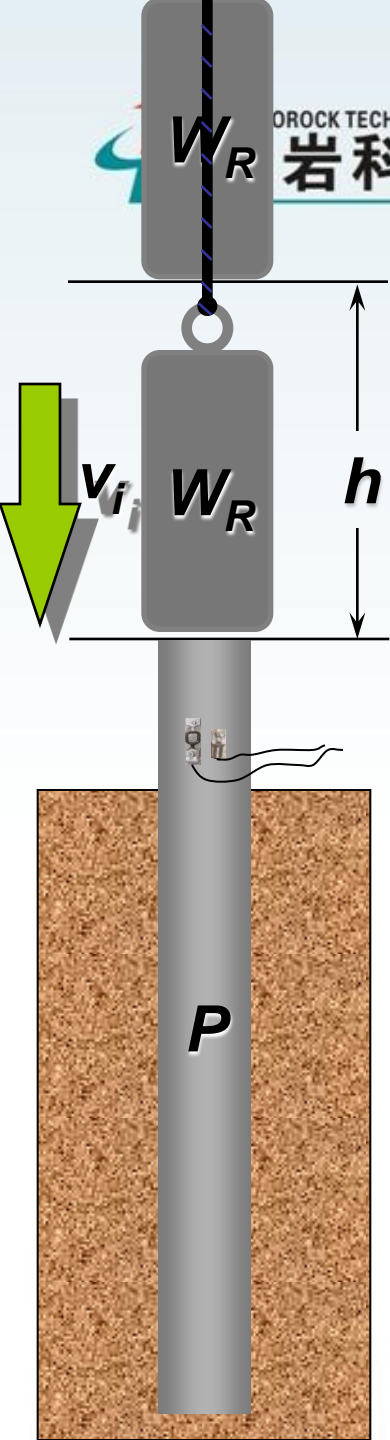


基桩无损检测培训

高应变检测技术



中国科学院武汉分院继续教育学院

中国科学院武汉岩土力学研究所

武汉中岩科技有限公司

2016.11



全风化花岗岩④,层

5.31

180

180

干作业钻孔灌注桩桩基参数表 (kPa) 表 1-2

地层名称及层号	极限侧摩阻力 (kPa)	极限端阻力 (kPa)	备注(m)
粉土②层	42	1500	15<L
湿陷性粉土②,层	-10		
粉质黏土②,层	55	2600	15<L
湿陷性粉质黏土②,层	-10		
粉质黏土③层	80	2800	15<L
强风化花岗岩④层	110	2800	15<L
全风化花岗岩④,层	65	1600	15<L

注: 根据我单位多年同类土层静载试验成果统计, 承载力值高

于规范所给定数值。

持力层: 初灰柏土

- 1、应力波及高应变的基本理论
- 2、检测系统
- 3、现场检测
- 4、检测数据分析与判定
- 5、检测实例与波形汇编
- 6、高应变的若干问题

1

应力波及高应变的基本理论

- 1.1 高应变的基本理论
- 1.2 应力波在桩中传播的基本规律
- 1.3 Case法承载力计算
- 1.4 完整性系数计算
- 1.5 桩身应力及打桩效率

1.1 高应变的基本理论

1、高应变的基本概念

什么是高应变法基桩检测？

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

高应变法检测目的？

- (1) 判定单桩竖向承载力是否满足设计要求。
 - (2) 检测桩身缺陷及位置，判定桩身完整性类别。
 - (3) 分析桩侧和桩端阻力。
 - (4) 进行打桩监控。
- ◆主要目的：承载力单桩竖向承载力

1.1 高应变的基本理论

2、高应变方法

自19世纪人们开始采用打桩公式计算桩基承载力以来，方法包括：

(1) 打桩公式法，用于预制桩施工时的同步测试，采用刚体碰撞过程中的动量与能量守恒原理。



桩是一个质量沿长度分布的细长杆，刚体运动的假设是不合理的，它的运动方式是由应力波决定的

2、高应变方法

新闻打桩公式

$$P_u = \frac{\xi W_r h}{e + c}$$

修正新闻打桩公式

$$P_u = \frac{\xi W_r h}{e + c} \times \frac{W_r + n^2 W_p}{W_r + W_p}$$

式中 P_u ——单桩极限承载力

W_r ——锤重

W_p ——桩重

c ——桩土体系总的弹性变形

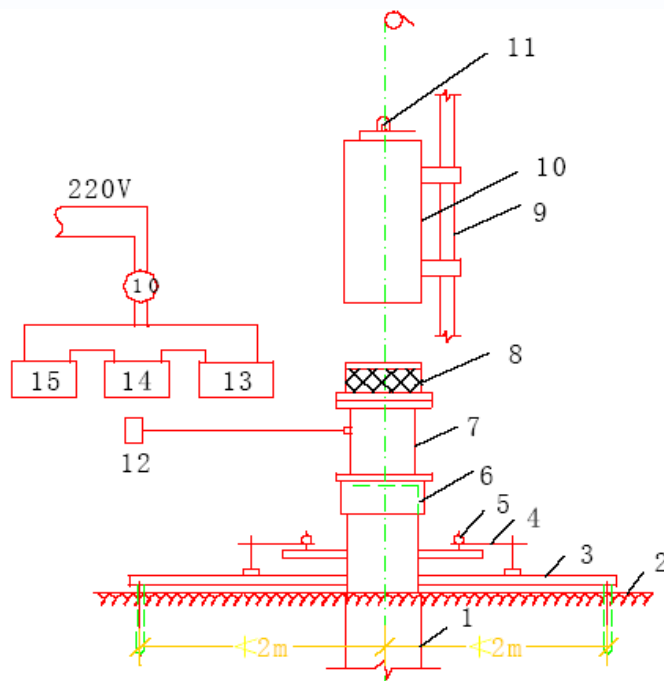
e ——最终贯入度

ξ ——机械折减系数

n ——撞击时恢复系数

2、高应变方法

(2) **锤击贯入法**，简称锤贯法，仿照静载荷试验法获得动态打击力与相应沉降之间的曲线。通过动静对比系数计算静承载力，也有人采用波动方程法和经验公式法计算承载力。



2、高应变方法

(3) **Smith 波动方程法**，设桩为一维弹性桩，桩土间符合牛顿粘性体和理想弹塑性体模型，将锤、冲击块、锤垫、桩等离散化为一系列单元，编程求解离散系统的差分方程组，得到打桩反应曲线，根据实测贯入度，考虑土的吸着系数，求得桩的极限承载力。

(4) **波动方程半经验解析解法，也称CASE法**，根据应力波理论，可同时分析桩身完整性系数和桩土承载力

(5) **波动方程拟合法**，是目前广泛应用的一种较合理的方法。

目前主要是CASE法和波动方程拟合法。

1.1 高应变的基本理论

2、高应变方法

(6) 静动法 (Statnamic)，其意义在于延长冲击力作用时间 ($\sim 100\text{ms}$)，使之更接近一静载试验状态。



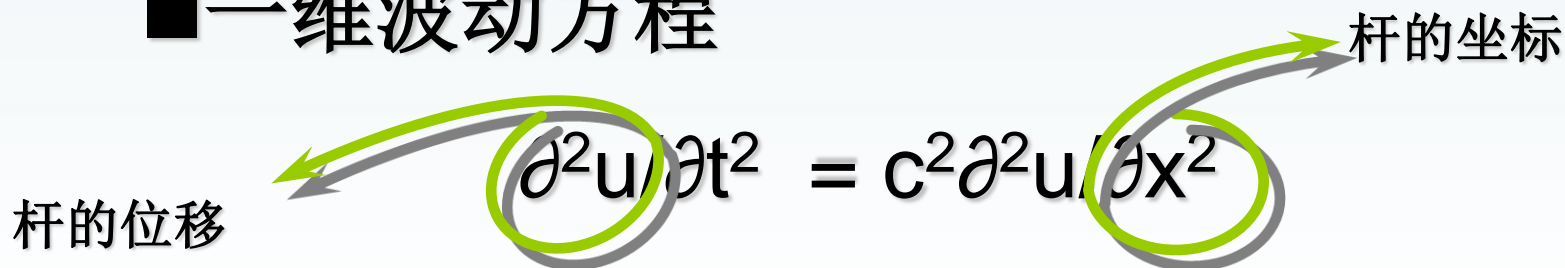
3、高应变的基本假设

高应变动力试桩在原理上就被简化为一维线性波动力学问题：

- 假定桩身材料是均匀的和各向同性的
- 假定桩是线弹性杆件
- 假定桩是一维杆件
- 假定纵波的波长比杆的横截面尺寸大得多
- 假定破坏只发生在桩土界面

4、波动方程

■ 一维波动方程



The diagram shows the 1D wave equation $\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$. A green arrow points from the text '杆的位移' (displacement of the rod) to the variable u in the first term. Another green arrow points from the text '杆的坐标' (coordinate of the rod) to the variable x in the second term. Both $\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$ and $\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$ are circled in green.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$$

杆的位移

杆的坐标

式中： u 是杆上 x 处在 t 时刻的轴向位移，它是纵向坐标和时间两个变量的函数。

5、波动方程的解

■ 下行波和上行波

一维波动方程的达朗贝尔通解为：

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

解由两部分组成，分别代表两个行波，其传播速度均为 c 而传播方向相反，在竖向的桩身中传播时通常称为下行波和上行波。

根据波动理论，一个任意位移波和与它对应的应力波在杆中的传播仅仅随时间以波速 c 沿正反方向移动而其形状保持不变。

5、波动方程的解

■ 下行波 $f(x-ct)$

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 $C = 4000\text{m/s}$ ，当 $t = 0$ 时， $x = 100$ ；当 $t = 0.002$ 秒时， $x = 108$ ；………。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。

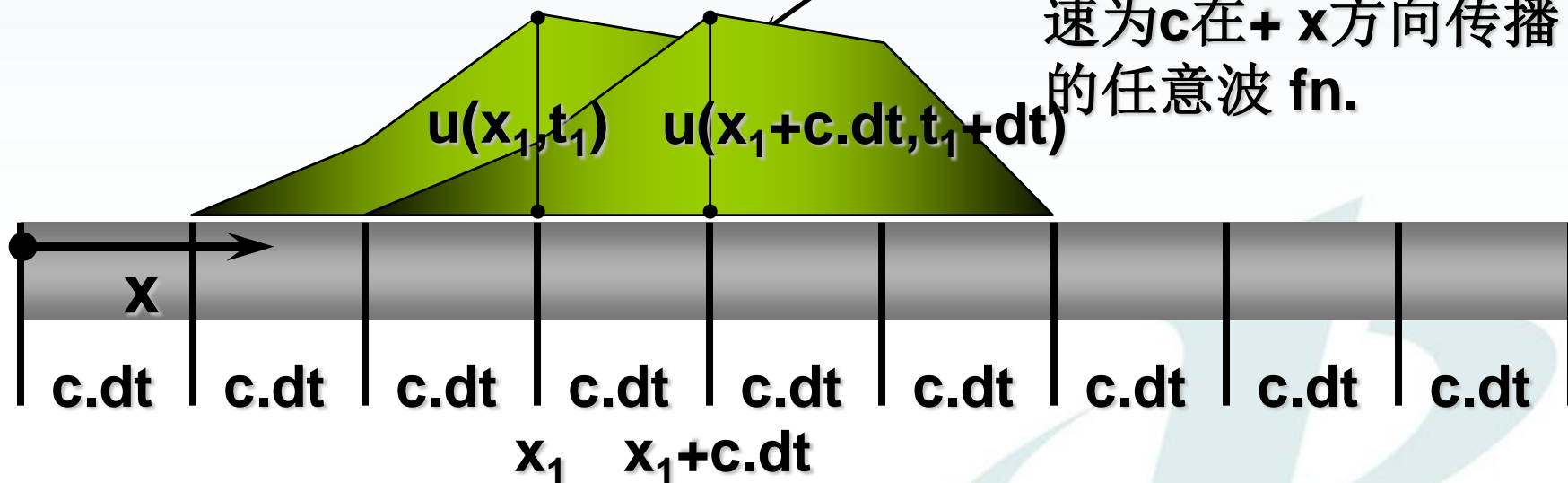
5、波动方程的解

$$u(x, t) = f(x - ct)$$

时刻, $t_1 + dt$

位移量

令 $f(x - ct)$ 为一个以波速为 c 在 $+x$ 方向传播的任意波 f_n .



$$u(x_1, t_1) = f(x_1 - ct_1)$$

$$u(x_1 + c \cdot dt, t_1 + dt) = f(x - ct_1) = u(x_1, t_1)$$

5、波动方程的解

■ 上行波 $g(x+ct)$

对于某个固定波形的位移波 $g(100)$ 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 $C=4000\text{m/s}$, 当 $t=0$ 时, $x=100$; 当 $t=0.002$ 秒时, $x=92$;。随着时间 t 的延长, x 值变小, 意味着应力波 $g(x+ct)$ 逐渐靠近原点, 向上运动。

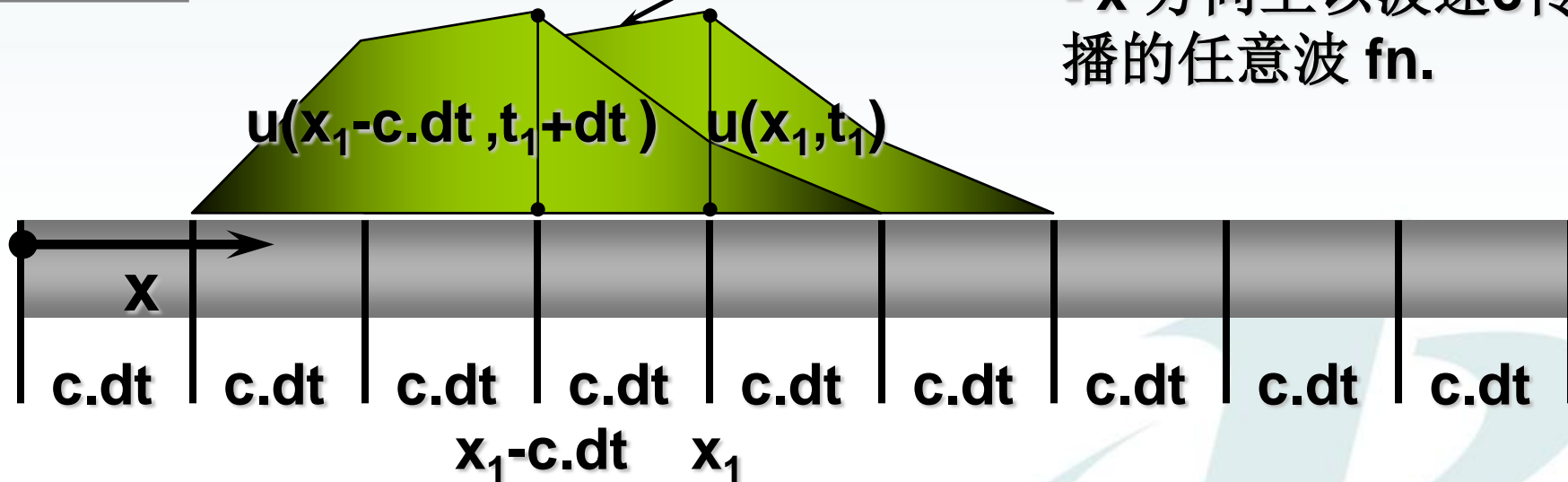
$g(x+ct)$ 是向上运动的波, 一般称为上行波, 用 $g \uparrow (x+ct)$ 表示。

5、波动方程的解

$$u(x, t) = g(x + ct)$$

时刻, $t_1 + dt$

令 $g(x + ct)$ 为一个在 $-x$ 方向上以波速 c 传播的任意波 fn .



$$u(x_1, t_1) = g(x_1 + ct_1)$$

$$u(x_1 - c \cdot dt, t_1 + dt) = g(x + ct_1) = u(x_1, t_1)$$

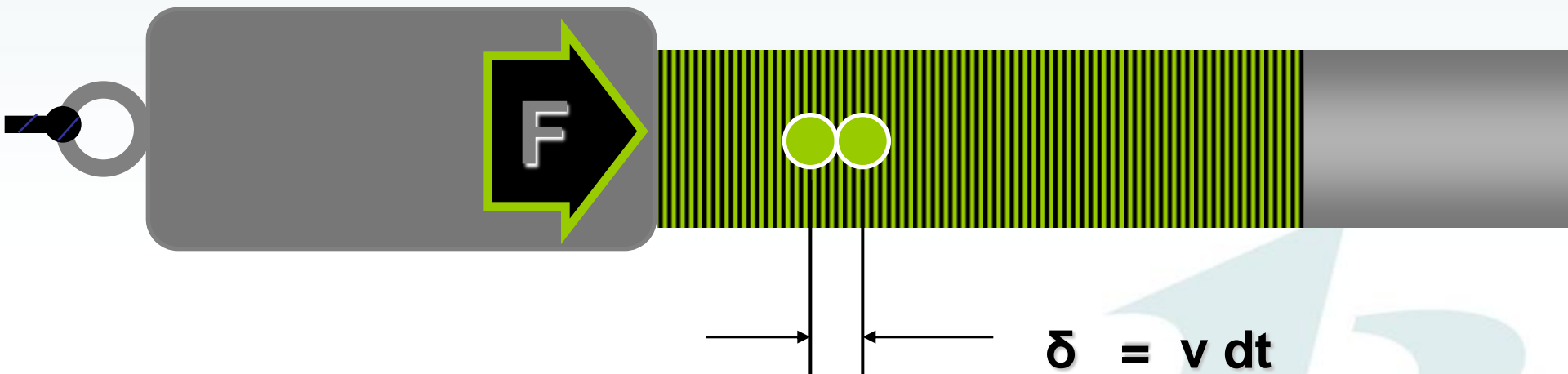
1.2 应力波在桩中的传播规律

1、桩顶附近的传播规律

$$F = EA \varepsilon = v EA / C = Z v$$

力和速度是成比例的

$$dL = c dt$$



$$\text{应变, } \varepsilon = \delta / dL = v/c$$

由于桩身压缩 dL ，桩身质点产生的微小位移，从而使质点产生速度 v

2、上下行波的计算公式

质点速度与应力应变的关系

- 质点的速度与应变的关系 $V = \epsilon c$
- 质点的速度与应力的关系 $V = \sigma c/E$
- 质点的速度与力的关系 $V = Fc/(EA)$

2、上下行波的计算公式

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： $v_{\downarrow} = c\varepsilon_{\downarrow}$

$$\text{即：}\varepsilon_{\downarrow} = v_{\downarrow} / c$$

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

$$\text{故：} F_{\downarrow} = Zv_{\downarrow}$$

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、上下行波的计算公式

上行波 $g \uparrow(x+ct)$:

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

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

因此有: $v \uparrow = -c \varepsilon \uparrow$

而 $F \uparrow = \varepsilon \uparrow * E * A = - (E * A / c) v \uparrow = -Z v \uparrow$

故: $F \uparrow = -Z v \uparrow$

在上行波中, 质点运动的速度方向与所受力方向始终相反。

2、上下行波的计算公式

- 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 $F_{\downarrow} = Zv_{\downarrow}$ 。
- 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 $F_{\uparrow} = -Zv_{\uparrow}$ 。
- 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。
- 无论是下行压力波还是下行拉力波，都符合 $F_{\downarrow} = Zv_{\downarrow}$ 关系；
- 无论是上行压力波还是上行拉力波，都符合 $F_{\uparrow} = -Zv_{\uparrow}$ 关系。

1.2 应力波在桩中的传播规律

2、上下行波的计算公式

$$\text{下行力波 } F_{\downarrow} = Z v_{\downarrow}$$

$$\text{上行力波 } F_{\uparrow} = -Z v_{\uparrow}$$

一般情况下，在桩身任一位置截面上量测到的质点运动速度和力都是下行波和上行波叠加的结果：

$$v_m = v_{\downarrow} + v_{\uparrow}$$

$$F_m = F_{\downarrow} + F_{\uparrow}$$

$$v_{\downarrow} = (v_m + F_m/Z)/2$$

$$F_{\downarrow} = (F_m + Z v_m)/2$$

$$v_{\uparrow} = (v_m - F_m/Z)/2$$

$$F_{\uparrow} = (F_m - Z v_m)/2$$

1.2 应力波在桩中的传播规律

2、上下行波的计算公式

下行波

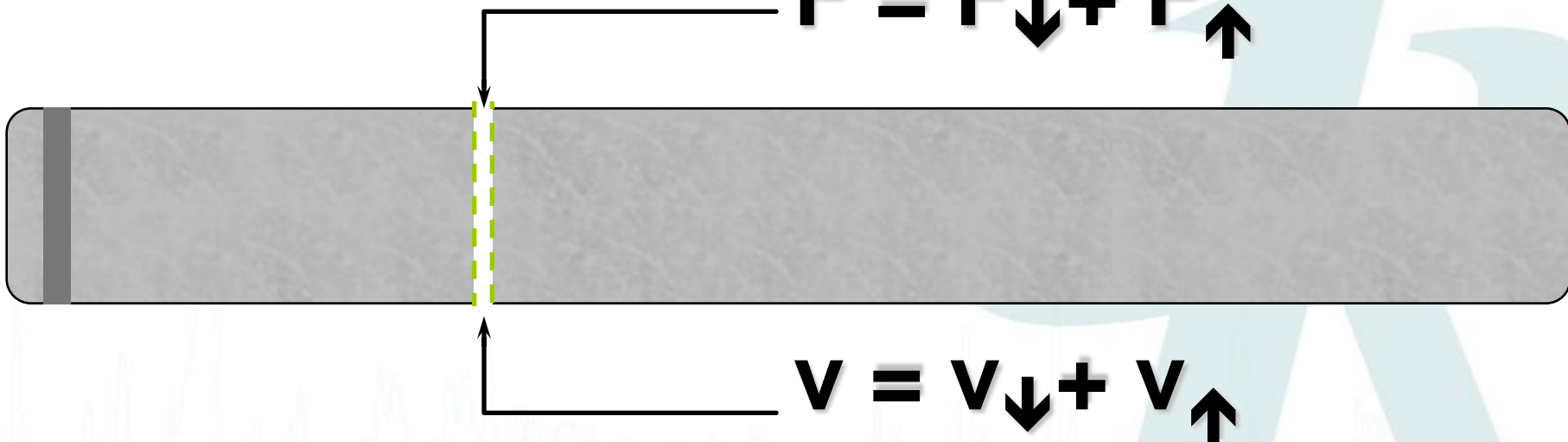
$$F_{\downarrow} = \frac{1}{2}(F + Zv)$$

上行波

$$F_{\uparrow} = \frac{1}{2}(F - Zv)$$

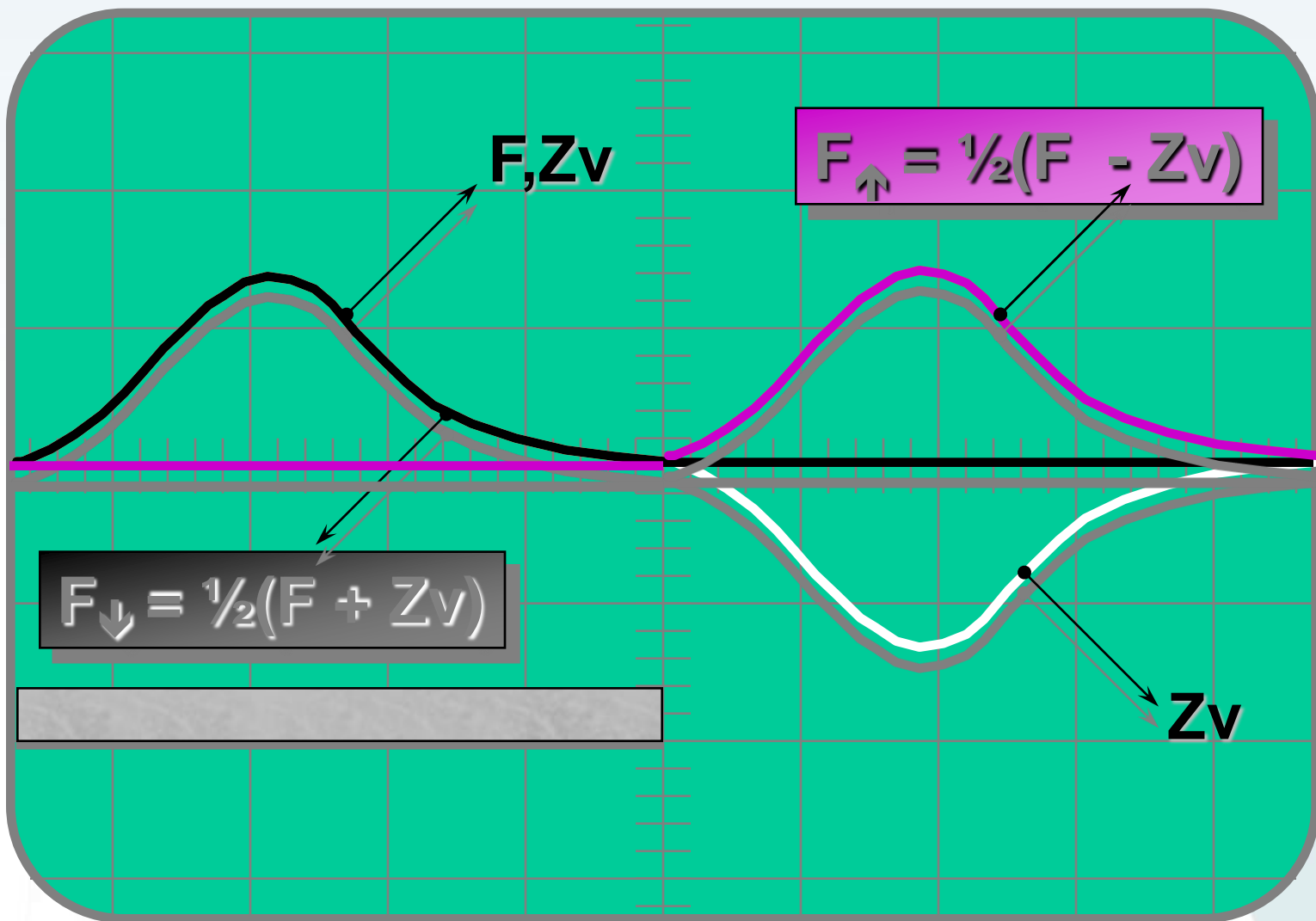
$$F = F_{\downarrow} + F_{\uparrow}$$

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



1.2 应力波在桩中的传播规律

2、上下行波的计算公式



3、桩端发生变化时的规律

(1)当桩端为自由端时，其边界条件是受力为零。

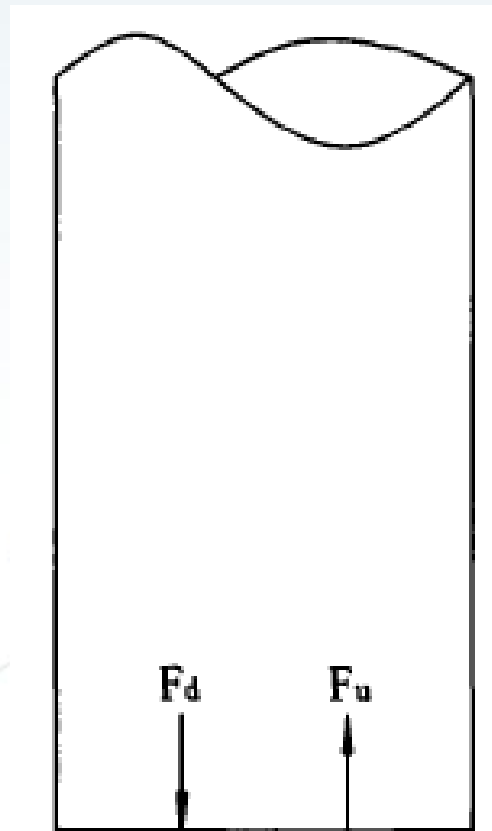
$$F = F_{\downarrow} + F_{\uparrow} = 0$$

$$F_{\uparrow} = -F_{\downarrow}$$

【上下行波的关系】

$$-Zv_{\uparrow} = -(Zv_{\downarrow}) \quad v_{\uparrow} = v_{\downarrow}$$

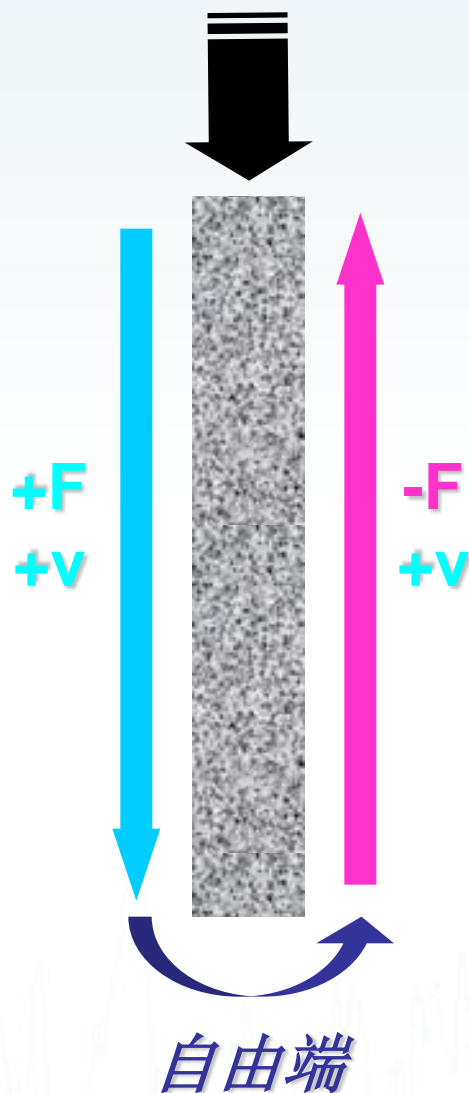
$$v = v_{\downarrow} + v_{\uparrow} = 2v_{\downarrow}$$



边界条件 $F=0$

1.2 应力波在桩中的传播规律

3、桩端发生变化时的规律

**结论:**

应力波到达自由端后，将产生一个幅值相同、符号相反的反射波，即入射压力波产生拉力反射波，入射拉力波产生压力反射波。在杆端由于波的叠加，使杆端质点运动速度增加一倍

3、桩端发生变化时的规律

(2)桩端为固定端时，其边界条件是速度为零。

$$V = V_{\downarrow} + V_{\uparrow} = 0$$

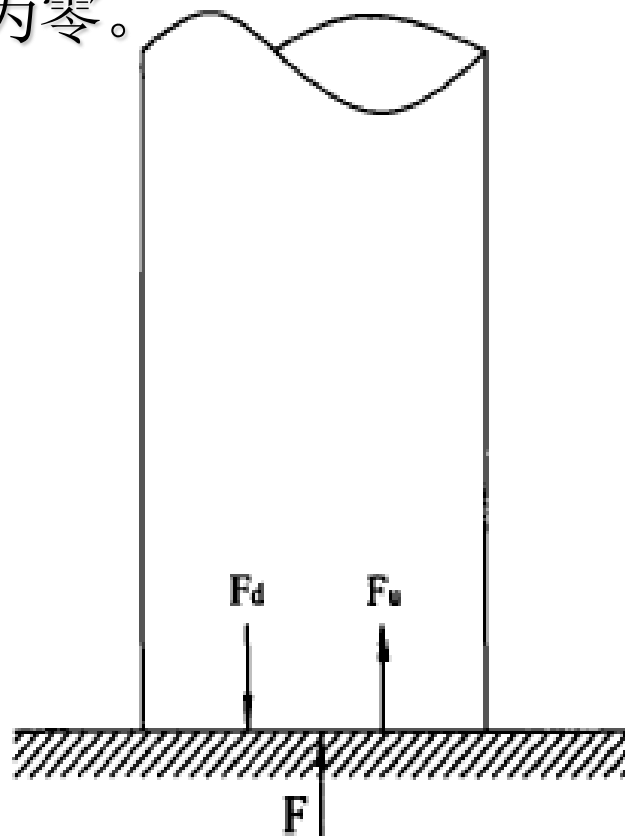
$$v_{\uparrow} = -v_{\downarrow}$$

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

【上下行波的关系】

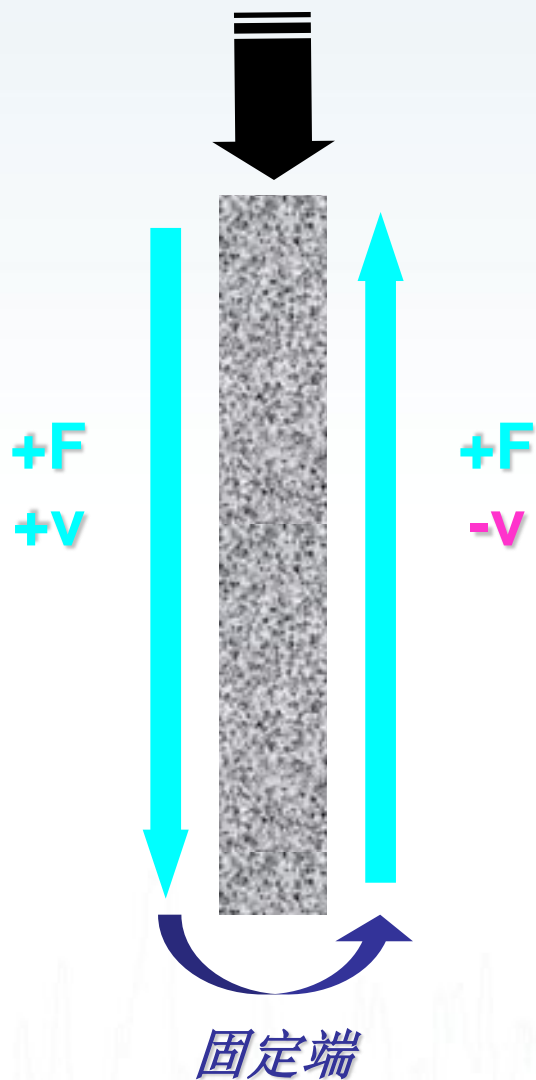
$$F_{\uparrow} = F_{\downarrow}$$

$$F = F_{\downarrow} + F_{\uparrow} = 2F_{\downarrow}$$



边界条件 $V=0$

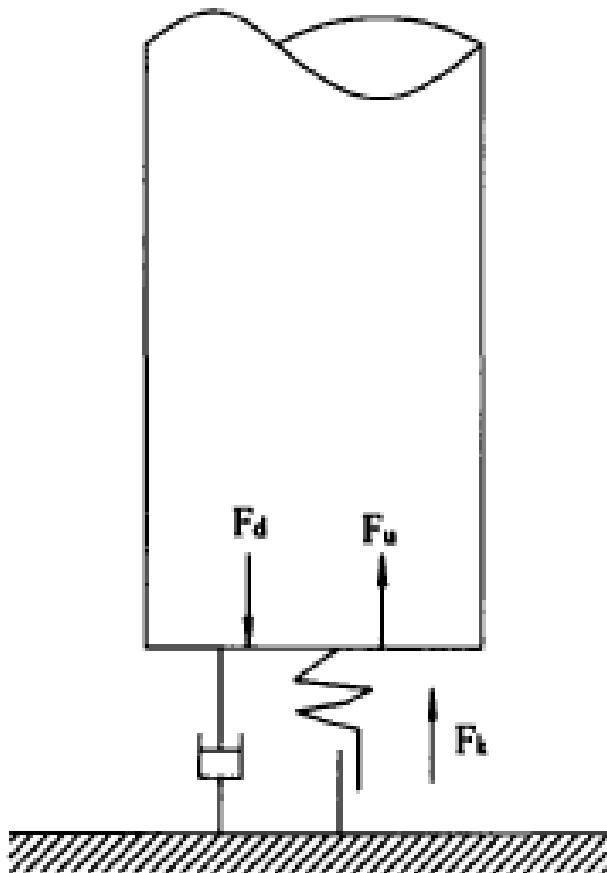
3、桩端发生变化时的规律

**结论:**

应力波到达固定端后，将产生一个与入射波相同的反射波，即入射压力波产生压力反射波，入射拉力波产生拉力反射波。在杆端由于波的叠加，使端部反力增加一倍。

3、桩端发生变化时的规律

(3)当桩端约束介与自由端与固定端之间时



实际工程中大多处于这种状态。

持力层对桩端的作用用一个弹塑性弹簧并联一个粘壶来模拟。

弹簧的弹塑性与桩身材料特性、几何尺寸及桩端岩土体的力学特性相关。

3、桩端发生变化时的规律

结论：

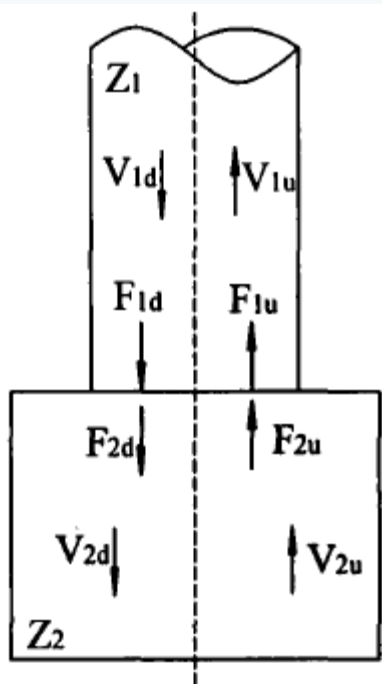
- 下行压力波（运动速度向下）遇自由端反射为上行拉力波（运动速度向上），端点力为零，质点速度加倍。
- 下行压力波（运动速度向下）遇固定端反射为上行压力波（运动速度向上），端点质点速度为零，力加倍。
- 下行拉力波（运动速度向上）遇自由端反射为上行压力波（运动速度向上），端点质点速度加倍。
- 下行拉力波（运动速度向上）遇固定端反射为上行拉力波（运动速度向上），端点质点速度为零。

4、桩身阻抗发生变化时

由力平衡和介质连续条件：

$$F_{1d} + F_{1u} = F_{2d} + F_{2u}$$

$$V_{1d} + V_{1u} = V_{2d} + V_{2u}$$



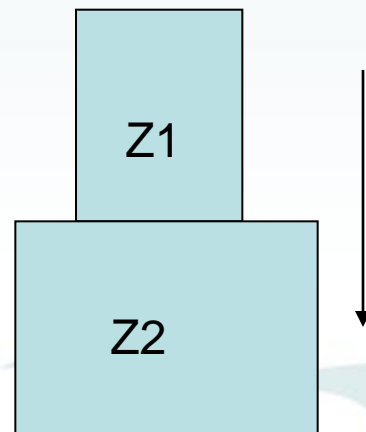
$$\begin{cases} F_{1u} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} F_{1d} + \frac{2Z_1}{Z_2 + Z_1} F_{2u} \\ F_{2d} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} F_{1d} + \frac{Z_1 - Z_2}{Z_2 + Z_1} F_{2u} \end{cases}$$

4、桩身阻抗发生变化时

当只有下行波 $F_1 \downarrow$ 入射界面时

$$F_1 \uparrow = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} F_1 \downarrow \quad (\text{反射波})$$

$$F_2 \downarrow = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} F_1 \downarrow \quad (\text{透射波})$$



当桩端自由时，即 $Z_2=0$ ，则

$$F_1 \uparrow = -F_1 \downarrow$$

当桩端固定时，即 $Z_2=\infty$ ，则

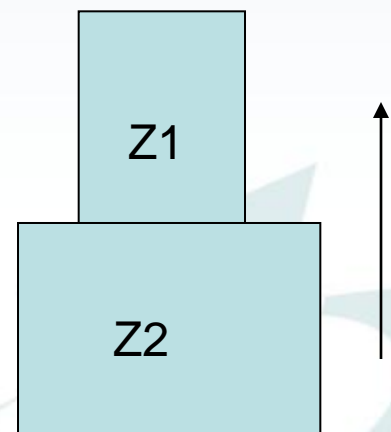
$$F_1 \uparrow = F_1 \downarrow$$

4、桩身阻抗发生变化时

当只有上行波 $F_2 \uparrow$ 入射界面时

$$F_1 \uparrow = \frac{2Z_1}{Z_2 + Z_1} F_2 \uparrow \quad (\text{透射波})$$

$$F_2 \downarrow = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_2 + Z_1} F_2 \uparrow \quad (\text{反射波})$$

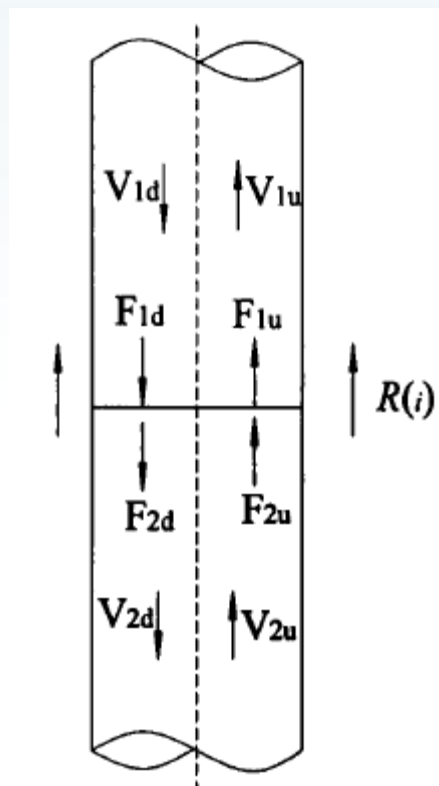


4、桩身阻抗发生变化时

结论:

- 当原来的下行波，上行波入射桩身阻抗突变处时，都会产生透射波和反射波。透射波的性质（拉升波或者压缩波）与入射波一致。反射波的性质由 $(Z_2 - Z_1)$ 的符号决定。
- 当 $Z_2 < Z_1$, 即入射波由阻抗大的截面向阻抗小的截面传播时，反射波改变符号，即入射的拉力波产生反射压力波，入射的压力波产生反射拉力波。
- 当 $Z_2 > Z_1$, 即入射波由阻抗小的截面向阻抗大的截面传播时，反射波与入射波的性质相同，即入射的拉力波产生反射拉力波，入射的压力波产生反射压力波。

5、土阻力作用时



上侧

$$\begin{cases} F_1 = F_{1u} + F_{1d} \\ V_1 = V_{1d} + V_{1u} \end{cases}$$

下侧

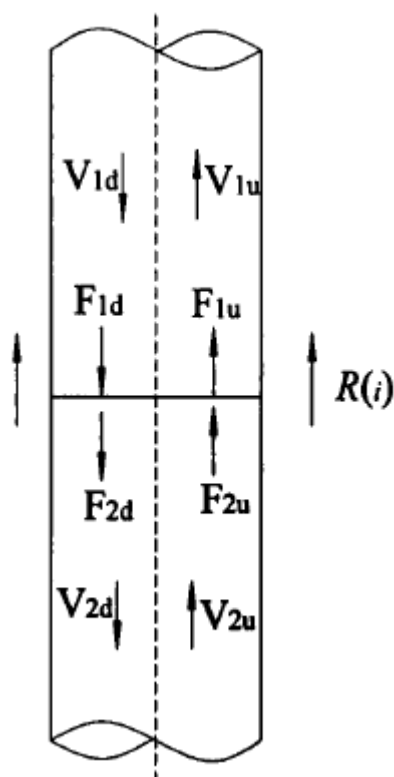
$$\begin{cases} F_2 = F_{2u} + F_{2d} \\ V_2 = V_{2d} + V_{2u} \end{cases}$$

力平衡和
截面连续

$$\begin{cases} F_1 - F_2 = R(i) \\ V_1 = V_2 \end{cases}$$

5、土阻力作用时

$$\begin{cases} F_{1u} = F_{2u} + \frac{1}{2} R(i) \\ F_{2d} = F_{1d} - \frac{1}{2} R(i) \end{cases}$$



当脉冲到达桩身截面 i 后激发的桩侧土阻力 $R(i)$ 将分成两部分沿桩身传播：

一部分以压缩波的形式向上传播

一部分以拉伸波的形式向下传播

大小等于该处土阻力的一半。

1、Case法的基本假定

- **CASE法的近似假定**

(1)桩身阻抗恒定，即桩身截面不变，桩身材质均匀且无明显的缺陷。

(2)只考虑桩底的动阻尼，忽略桩侧土的动阻尼，而且静阻力始终保持恒定。

(3)应力波在传播过程中没有能量耗散和信号畸变。

(4)在 $(t_1 \sim t_1 + 4l/c)$ 时段内桩侧各点的摩阻力不变。

2、桩的力学模型

一维、均质、等截面、连续的线弹性，基本不考虑桩身缺陷影响，应变与质点速度之间满足协调方程。

局限：

- 桩身自阻尼衰减没有考虑
- 承载力分析时，桩身缺陷没有考虑，所以缺陷桩误差更大
- 桩身塑性没有考虑，低强度桩、力信号过大时存在问题
- 锤击偏心时存在问题
- 传感器过上存在问题

3、桩侧土的力学模型

(1) 桩侧土的静阻力模型

桩侧土的静阻力模型为理想刚塑性模型

理想刚塑性静阻力模型的意义为：桩侧土静阻力一经激发即达到极限，且不随桩—土之间的相对位移的变化而变化



(2) 桩侧土的动阻力模型

CASE法忽略桩侧土的动阻力。

3、桩侧土的力学模型

问题:

弹性阶段即位移初始增加阶段被忽略，加载起始阶段即认为已达到极限承载力状态，导致了极限承载力曲线上零值也是极限承载力的谬误。

要求:

位移取值足够大，使得极限承载力出现平坦段、达到拟理想刚塑性状态才可以正确应用——要求有更大的打击力和动位移

4、桩端土的力学模型

(1) 桩端土的静阻力模型

桩端土的静阻力模型为理想刚塑性模型

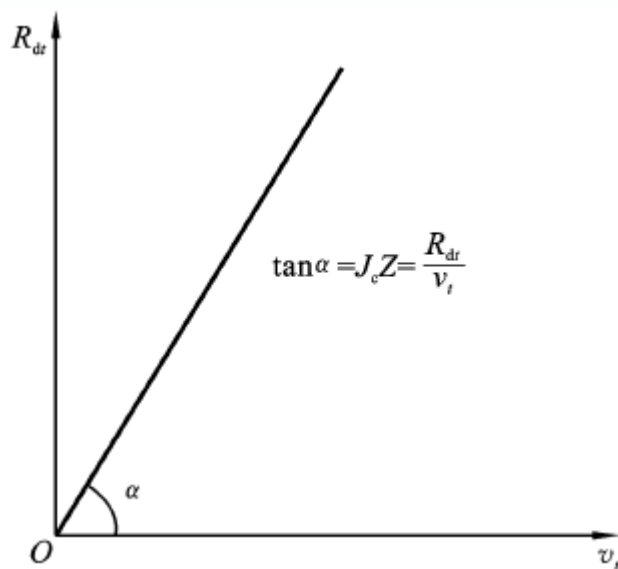


4、桩端土的力学模型

(2) 桩端土的动阻力模型

CASE法的桩端土的动阻力模型采用线性粘滞阻尼模型

$$R_d = J_c \cdot Z \cdot V(L, t)$$



4、桩端土的力学模型

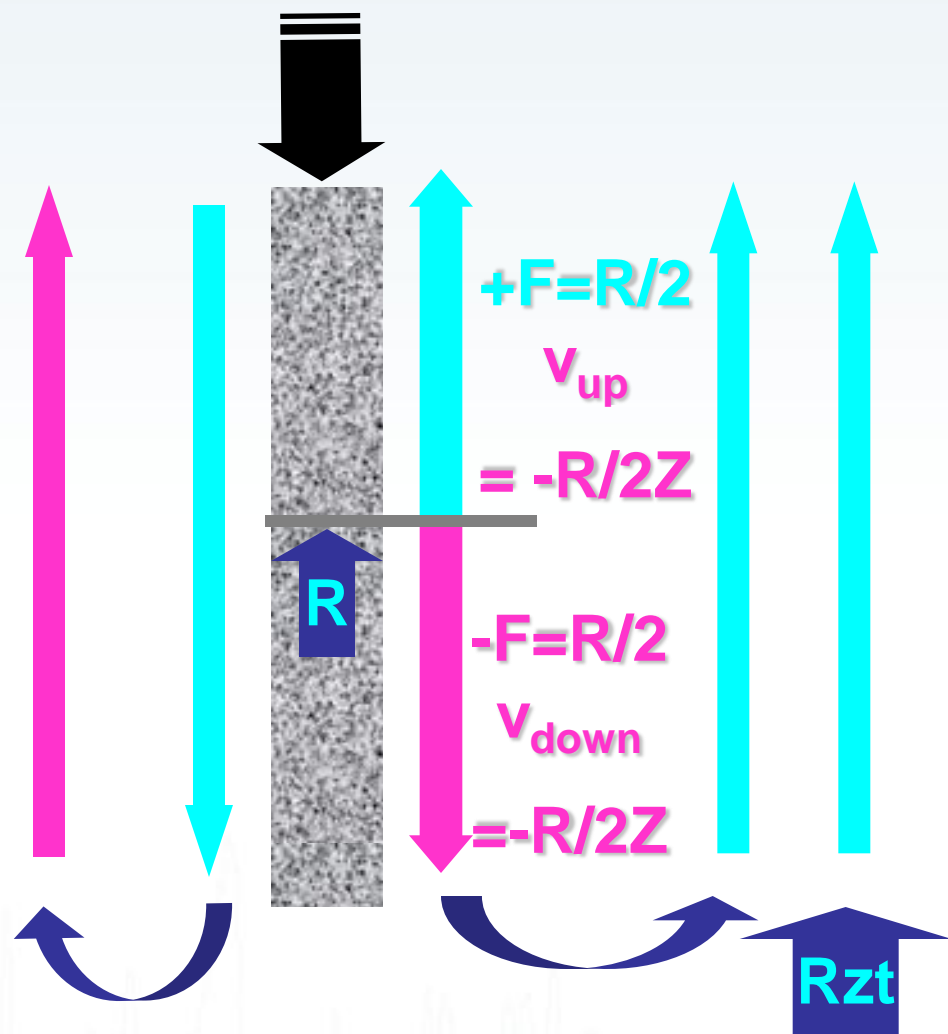
优点：动阻力与桩身质点运动无关，解耦承载力计算，得到解析解

指标：CASE阻尼系数，虽与持力层塑性指数有关，但更多的已演变成一个与动静对比相关的系数了

问题：动阻力与桩身广义波阻抗相关，却与桩底的无关

- 须确保桩侧动阻力较小，桩侧须光滑、等截面，须有足够位移
- 持力层和桩侧土层须相差较大
- 仅考虑了牛顿粘性体模型，没有考虑惯性力等的影响

5、总阻力公式



在冲击力作用下:

下行压力波

$(+F = +Zv)$

在 x 位置激发的土阻力 R

结果下行拉力波和上行压力波，数值均为 $R/2$ 。

当到达桩底时刻:

上行压力波为 $Rzc/2$

上行压力波为 $Rzc/2$

5、总阻力公式

在 $t_2=t_1+2L/c$ 时刻，上行波 $F_{\uparrow}(t_2)$ 的数据中包含：

(1) 锤击产生的初始下行压力波在桩底反射产生的上行拉力波，由于波在传播中幅值保持不变，该项为 $-F_{\downarrow}(t_1)$ 。

{ (2) 全部上行的桩侧压缩阻力波的总和，即 $R_{zc}/2$ 。
(3) 全部下行的桩侧拉伸阻力波经桩底反射后转变为上行的压缩波，其值亦为 $R_{zc}/2$ 。

(4) 桩端阻力的上行波 R_{zt} 。

5、总阻力公式

$t_2=t_1+2L/c$ 时刻:

$$F(t_2) = F_{\uparrow}(t_2) + F_{\downarrow}(t_2) = -F_{\downarrow}(t_1) + R_{zc}/2 + R_{zc}/2 + R_{zt} + F_{\downarrow}(t_2)$$

$$F_{\uparrow}(t_2) = R_{zc} + R_{zt} - F_{\downarrow}(t_1)$$

即: $R_{zc} + R_{zt} = F_{\downarrow}(t_1) + F_{\uparrow}(t_2)$

可得著名的**Case-Goble**公式, 即**CASE法的总阻力公式**:

$$R_t = [F(t_1) + Z \cdot V(t_1)] + [F(t_2) - Z \cdot V(t_2)] / 2$$

6、阻尼系数法（RSP）承载力公式

根据土阻力数学模型和近似假定，土阻力包含：

（1）静阻力 R_s

（2）由于动力作用所产生的附加动阻力 R_d 。

$$R_t = R_s + R_d$$

土的动阻力模型采用的是线形粘滞模型，即

$$R_d = J_v \cdot V_b(t) \quad J_v \text{—为粘阻尼系数。}$$

引入无量纲的阻尼系数 J_c （ J_c 为CASE阻尼系数），则：

$$R_d = J_c Z V_b(t)$$

$$V_b(t) = ?$$

6、阻尼系数法（RSP）承载力公式

影响桩尖处质点的运动速度 V_b 的因素有：（设桩端自由）

◆由向下传播的锤击压力 $F_{\downarrow}(t_1)$ 在桩尖处所激发产生的质点运动总速度 V_{b1} 为： $V_{b1} = [2 F_{\downarrow}(t_1)]/Z$

◆由向下传播的拉力(桩侧土阻力) $-R_{zc}/2$ 在桩尖处所激发产生的质点运动总速度 V_{b2} 为：

$$V_{b2} = -[2 \cdot R_{zc}/2]/Z = -R_{zc}/Z$$

◆由向上传播的压力（桩端土阻力） R_{zt} 在桩尖处所激发产生的质点运动总速度 V_{b3} 为： $V_{b3} = -R_{zt}/Z$

将三部分进行叠加，则有：

$$V_b = V_{b1} + V_{b2} + V_{b3} = [2 F_{\downarrow}(t_1) - R_{zc} - R_{zt}] / Z = [2 F_{\downarrow}(t_1) - R_d] / Z$$

6、阻尼系数法（RSP）承载力公式

$$R_s = R_t - R_d = R_t - J_c [2 F_{\downarrow}(t_1) - R_t]$$

$$= (1 + J_c) R_t - J_c [F(t_1) + ZV(t_1)]$$

整理得：

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

变量： t_1 , L/c , J_c

阻尼系数法一般是选取 $F \sim ZV$ 实测曲线中速度峰值所对应的时刻为 t_1 时刻。

一般意义上使用，积累的经验最为丰富（桩长适中，端阻力占比例不大的摩擦桩）

7、最大阻力法（RMX）承载力公式

t_1 为变量：

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RMX。

经验表明：由最大土阻力法计算所得承载力偏高。

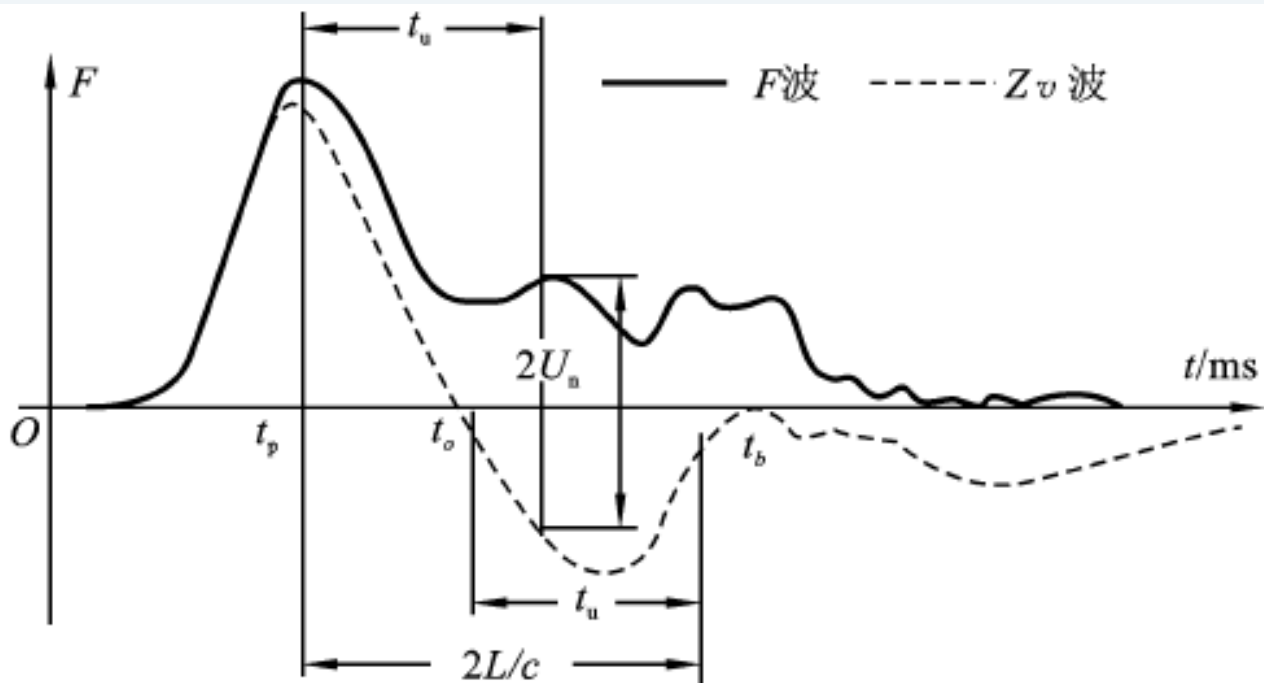
适用于：上升时间短或土的弹限值大，土阻力来不及充分发挥的情形。（端承桩或端阻力充分发挥需较大位移）

8、卸载法（RSU）承载力公式

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 $R_{\text{侧}}/2$ 较大，与该位置剩余的锤击力叠加，会使该质点的 $\Sigma V < 0$ 。

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 $R_{\text{侧}}/2$ ，与该位置剩余的锤击力叠加，会使该质点的 $\Sigma V < 0$ 。



$$U_n = \frac{R_x}{2} = \frac{F(t_1 + t_u) - ZV(t_1 + t_u)}{2}$$

$$R_{un} = R_c + (1 + J_c)U_n$$

适用于：长桩，考虑了卸载效应

9、最小阻力法 (RMN) 承载力公式

L/c是变量:

桩底反射不明显，桩身存在缺陷使桩底反射滞后或桩极易被打动等情况。

$$RMN = \min \left\{ \begin{aligned} &\frac{1}{2}(1 - Jc)[F(t_1) + ZV(t_1)] + \\ &\frac{1}{2}(1 + Jc)\left[F\left(t_1 + \frac{2L}{c} + \Delta\right) - ZV\left(t_1 + \frac{2L}{c} + \Delta\right)\right] \end{aligned} \right\}$$
$$-\frac{2L}{5c} \leq \Delta \leq \frac{2L}{5c}$$

10、各种方法的适用范围

阻尼系数法RSP：一般意义上使用，积累的经验最为丰富；单击贯入度在6~7mm的情况。

最大阻力法RMX：上升时间短或土的弹限值大，土阻力来不及充分发挥的情形。

最小阻力法RMN：桩底不明显时，更偏安全；适用于桩身存在缺陷，桩底反射滞后，单击贯入度较大。

卸载法RSU：长桩，考虑了阻力的卸载效应。

端承桩自动计算值RAU：短桩、端承桩（桩底速度为零时对应的值）

摩擦桩自动计算公式RA2：摩擦桩，据说与拟合值接近

1、无土阻力时的完整性系数

对于等截面均匀桩，只有桩底反射能形成上行拉伸波，且一定是在 $2L/c$ 时刻到达桩顶

实测信号中 $2L/c$ 之前看到上行拉伸波，一定是由于桩身阻抗减小引起。

当没有土阻力影响时，只有下行波：

$$F_R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} F_I$$

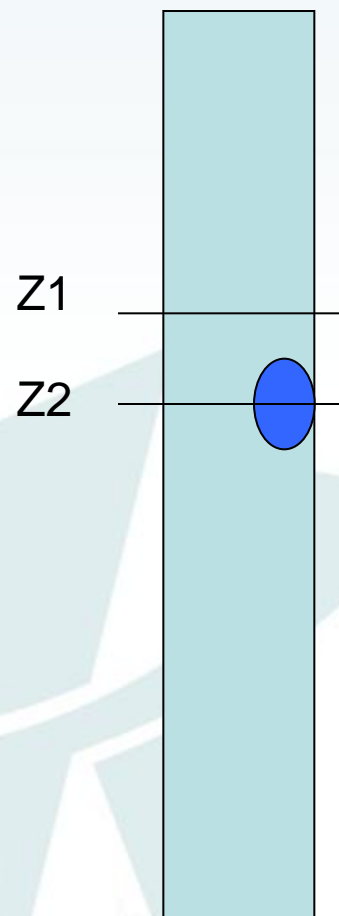
$$\beta = \frac{Z_2}{Z_1}$$

$$\beta = \frac{F_I + F_R}{F_I - F_R}$$

$$F_I = F_d(t_1)$$

$$F_R = F_u(t_x)$$

$$\beta = \frac{F_d(t_1) + F_u(t_x)}{F_d(t_1) - F_u(t_x)}$$



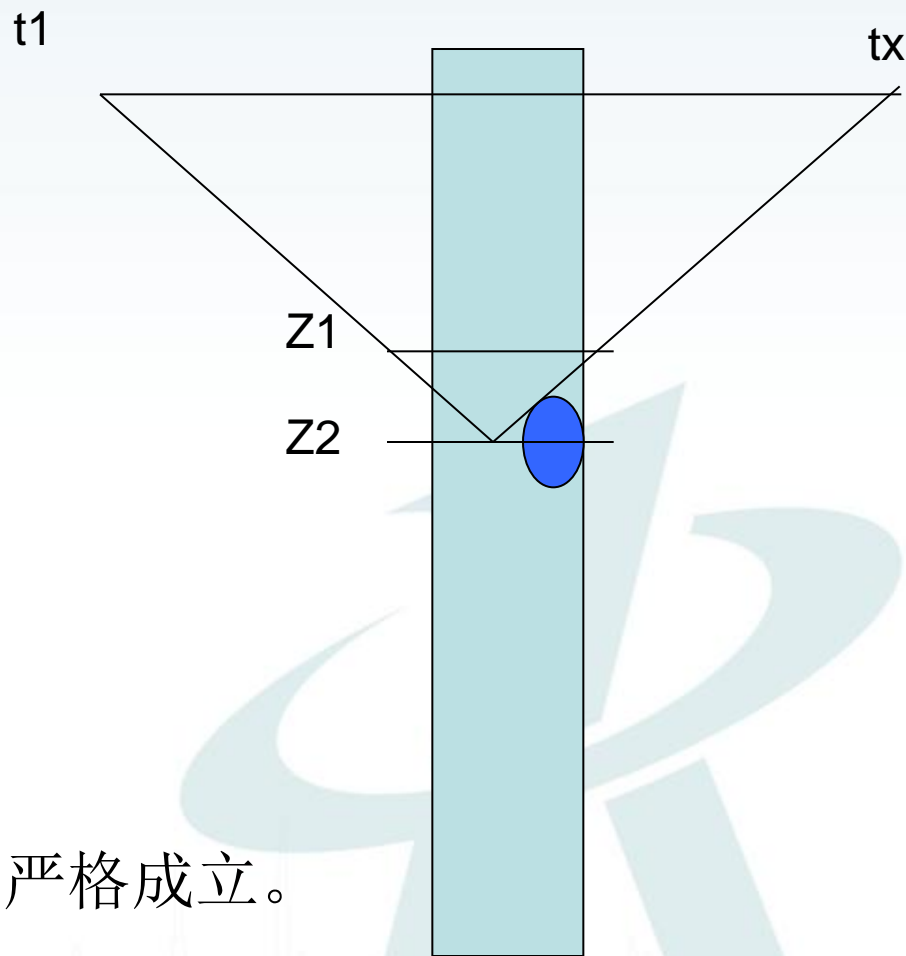
2、有土阻力时的完整性系数

当有土阻力时

$$F_I = F_d(t_1) - \frac{R_x}{2}$$

$$F_u(t_x) = F_R + \frac{R_x}{2}$$

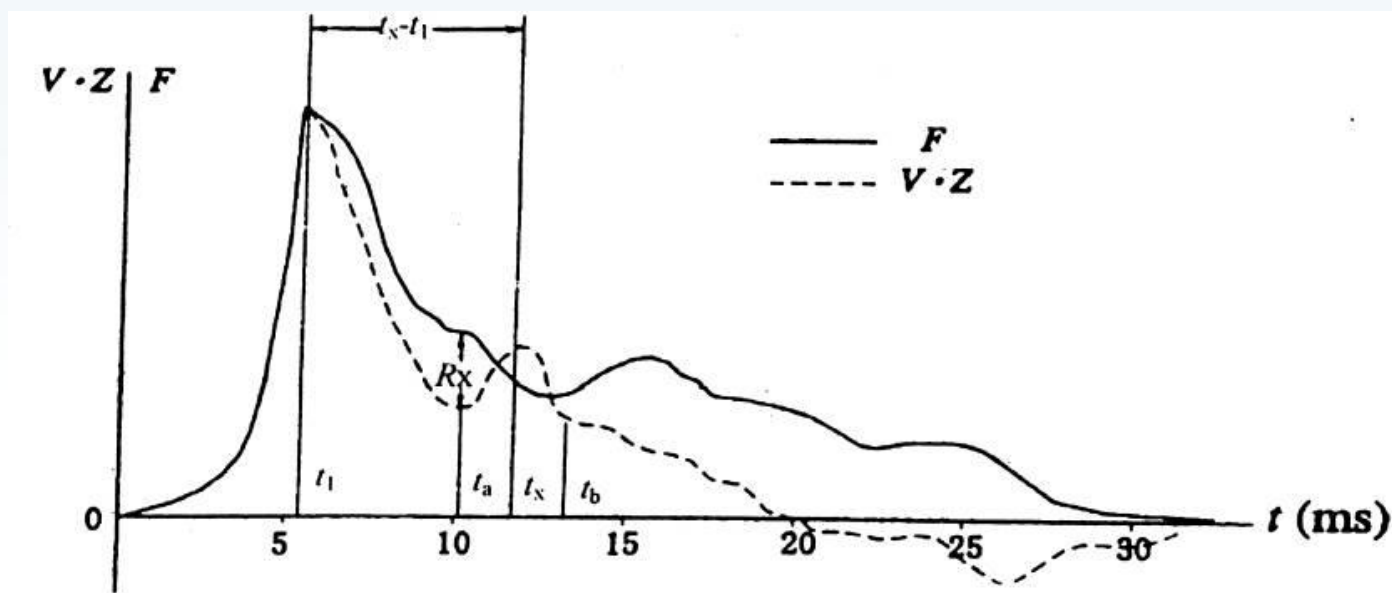
$$\beta = \frac{F_d(t_1) - R_x + F_u(t_x)}{F_d(t_1) - F_u(t_x)}$$



对等截面桩顶下第一个缺陷才算严格成立。

2、有土阻力时的完整性系数

截面的完整性系数为 $\beta = Z_2 / Z_1$



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

1、打桩监控

打入式预制桩有下列条件要求之一时，应采用高应变法进行试打桩的打桩过程监测：

- 控制打桩过程中的桩身应力；
- 选择沉桩设备和确定工艺参数；
- 选择桩端持力层。

检测预制桩打入时的桩身应力和锤击能量传递比，为沉桩工艺参数及桩长选择提供依据。

桩身锤击应力状态及其分布——压应力和拉应力

桩身锤击能量传递比——桩锤实际传递给桩的能量

承载力时间恢复系数——初打试验与复打试验

2、最大压应力计算

最大压应力：

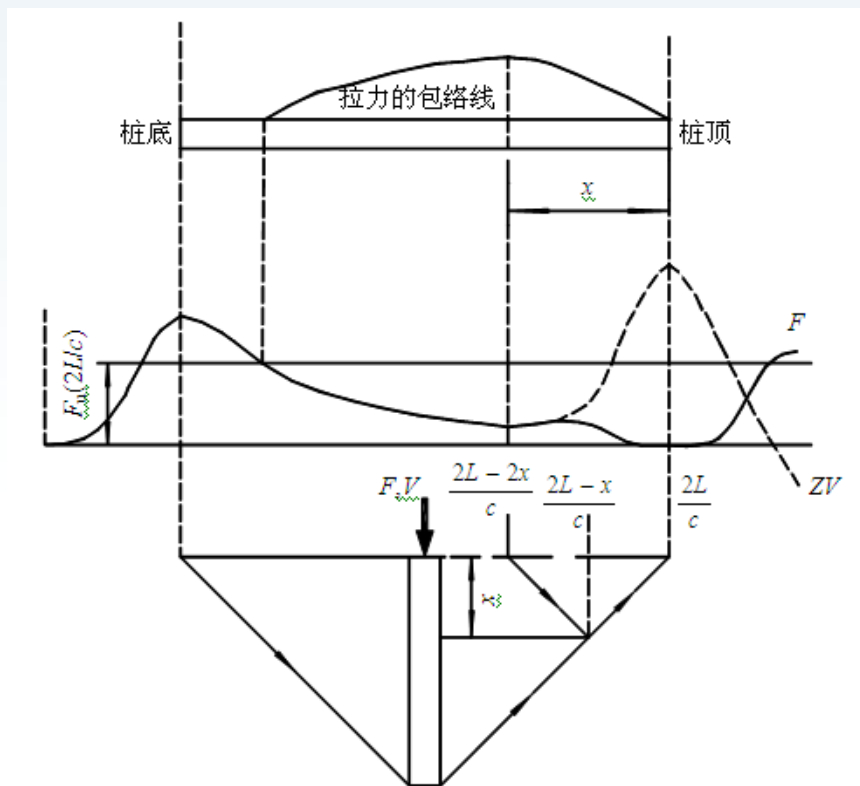
对于一般的摩擦桩：最大锤击压应力位于桩头附近，其值为桩头处最大锤击压力除以桩身截面积。

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。

$$\text{最大压应力: } \sigma_p = \frac{F_{\max}}{A}$$

F_{\max} —— 实测最大锤击力 (kPa)

3、最大拉应力计算



下行波曲线随时间渐弱，当反射的拉力波与上行途中的渐弱的下行压力波尾部叠加，就会在桩身某一部位出现净的拉应力。

$$\sigma_t = \min_{t_1 < t < t_1 + 2L/c} \left[F_u \left(t_1 + 2L/c \right) + F_d \left(t_1 + \frac{2L - 2x}{c} \right) \right] \cdot \frac{1}{A} \leq 0$$

3、最大拉应力计算

最大拉应力:

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：

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

当桩侧和桩端的土阻力比较小时，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：

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

4、打桩效率计算

传递能量

$$E_n = \int_0^{t_e} F \cdot V \cdot dt$$

桩锤最大动能

$$E_k = \frac{1}{2} M_r \cdot V_{r,\max}^2 \quad V_{r,\max} = \sqrt{2gH}$$

桩锤效率

$$e_h = \frac{E_k}{E_r}$$

锤击系统效率

$$e_d = \frac{E_n}{E_k}$$

系统总效率

(桩锤能量传递比)

$$e_t = \frac{E_n}{E_r}$$

 E_n ——桩获得的冲击能量 E_k ——桩锤的最大动能 M_r ——重锤质量 $V_{r,\max}$ ——重锤最大运动速度 E_r ——桩锤的额定能量

2

检测系统

- 2.1 检测仪器
- 2.2 传感器
- 2.3 检测对象
- 2.4 锤击设备
- 2.5 其他辅助设备

1、基本要求

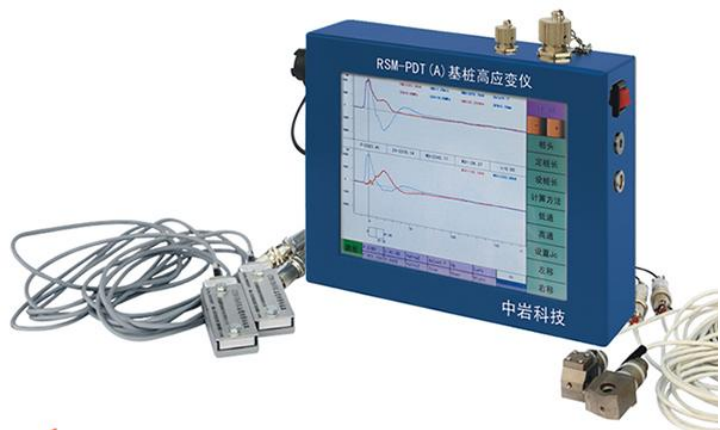
检测仪器的主要技术性能指标不应低于现行行业标准《基桩动测仪》JG/T 3055规定的2 级标准。

高应变法检测仪器属于法定计量设备：

- 生产厂家必须具备生产许可证。
- 检测仪器能通过计量部门检定
- 具备防尘、防潮、防震性能
- 适应恶劣条件（温度变化、防水等）

2、常见仪器

- 武汉中科智创岩土技术有限公司生产的RSM系列仪器

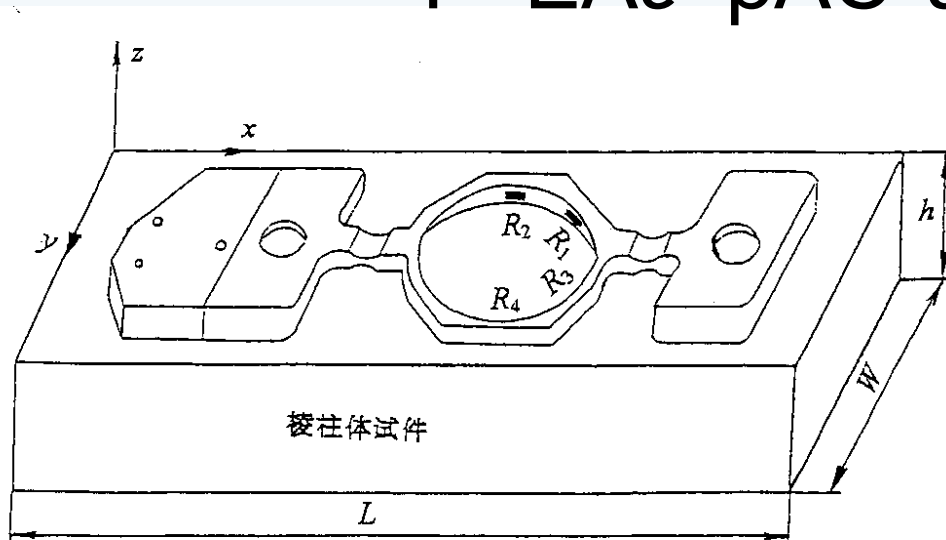


- 美国桩基动力学公司（PDI）生产的PAK型和PAL型打桩分析仪

1、测力传感器

应变环

$$F=EA\varepsilon=\rho AC^2\varepsilon$$



1、测力传感器



在重锤上安装加速度传感器来测力: $F=ma$

2、测速度传感器

加速度计



量程：

混凝土桩 1000~2000g

钢桩 3000~5000g

选择原则：

选择的量程大于预估最大
冲击加速度的1倍以上

$$ZV = \rho AC \int a \, dt$$

检测对象

- 本方法适用于检测基桩的竖向抗压承载力和桩身完整性；
- 监测预制桩打入时的桩身应力和锤击能量传递比，为沉桩工艺参数及桩长选择提供依据。
- 对于大直径扩底桩和Q-S 曲线具有缓变型特征的大直径灌注桩，不宜采用本方法进行竖向抗压承载力检测。
- 进行灌注桩的竖向抗压承载力检测时，应具有现场实测经验和本地区相近条件下的可靠对比验证资料。

理解：混凝土灌注桩、预制桩、钢管桩、组合桩等刚性桩

1、规范对形状的要求

JGJ 106 《建筑基桩检测技术规范》规定：

重锤应该形状对称，高径（宽）比不得小于1。

当采取落锤上安装**加速度传感器**的方式实测锤击力时，重锤的高径（宽）比应在1.0～1.5范围内。

2、规范对重量的要求

进行高应变承载力检测时，锤的重量与单桩竖向抗压承载力特征值的比值**不得小于0.02**。（JGJ106）

进行高应变承载力检测时，锤的重量应大于预估的单桩极限承载力的1.0%~1.5%，锤重或落距选择是否合适应以能否有效和充分激发试验桩的桩侧及桩端土阻力为准。（TB10218）

检测单桩轴向抗压承载力时，激振锤的重量不得小于基桩极限承载力的1.2%。（JTG）

3、锤重选择应该考虑的因素

选择锤重应考虑以下因素：

- (1) 测承载力及桩的承载性状的影响。承载力越大，锤越重；承载力构成中端阻力占的比例越大，则要求锤越重。
- (2) 桩径的影响。桩径越大，桩本身的惯性越大，锤与桩匹配能力下降，要求锤越重。此外，桩径的增大也会增大土的弹限，导致对锤重的要求增加。
- (3) 桩长的影响。桩越长，应力波在传播过程中的衰减越大，桩中下部及端阻力就越难激发，因而要求的锤重越重。

3、锤重选择应该考虑的因素

- (4) 岩土弹限的影响。桩侧、桩端土的弹性极限较大。土的弹限越大，意味着激发岩土阻力所需的桩土相对位移越大，要求锤重越重。
- (5) 桩垫的影响。桩垫的选择应是保证充分激发岩土阻力前提下，尽量选择较软的桩垫。
- (6) 提倡“重锤低击”。“轻锤高击”虽然可以提高锤击能量，但常会打碎桩头。高应变试桩应大力提倡“重锤低击”。

4、常见的锤击设备

锤击设备可以采用筒式柴油锤、液压锤、蒸汽锤等具有导向装置的打桩机械，**但不得采用导杆式柴油锤、振动锤。**（JGJ &TB）

激振宜采用由铸铁或铸钢整体制作而成的自由落锤。（JTG）

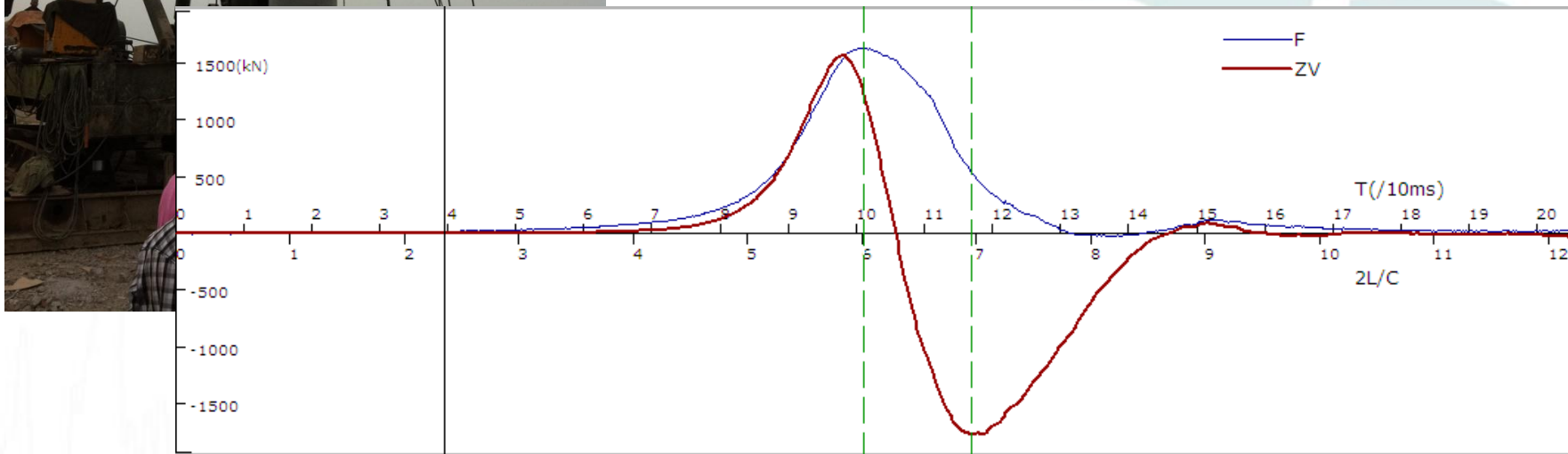
锤击设备分两类：预制桩打桩机械和自由落锤

4、常见的锤击设备



导杆式柴油锤：

压缩气缸中的气体对桩施力，力和速度上升十分缓慢



5、重锤的稳定性要求

高应变检测专用锤击设备应具有稳固的导向装置。



重锤及导向架

2.5 其他辅助设备

1、冲击钻



2、膨胀螺栓



3、起重设备



4、脱钩



自由落锤脱钩主要三类：力臂式、锁扣式和钳式

5、锤垫

锤击脉冲的宽度：锤垫的厚薄、软硬程度、锤头的硬度及锤重。

➤一是使锤击力分布均匀，调整锤击过程的持续时间，将锤击能量更有效地传递给桩；

➤二是缓冲锤体的冲击力，使打桩压应力不超过容许值。

若桩垫过软，会降低锤击能量的传递，锤激发岩土阻力的能力下降，使桩贯入困难；

若桩垫过硬，锤击力峰值过高，达不到调整、缓冲桩顶均匀受力，保护桩头的目的。

可采用木垫、纸垫、草垫以及工业毛毡等锤垫。

6、贯入度测量装置

桩的贯入度可采用高精度水准仪等仪器测量。

将打桩机作为锤击设备时，可根据多次锤击下桩的总下沉量来确定单击贯入度。



3

现场检测

- 3.1 检测准备工作**
- 3.2 现场检测**
- 3.3 打桩监控**
- 3.4 现场相关问题分析**

1、资料收集

- 桩号、工程名 、复打和初打日期
- 锤击信息，如锤重、落高
- 所需的承载力（极限值还是设计值）
- 打入桩的垂直或倾斜情况
- 工程地质情况，如土层性质、分层及其力学性质
- 目测桩身材质情况
- 施工或测试中的一些不寻常情况
- 锤击数或每击贯入度

2、检测时间确认

灌注桩：混凝土龄期，休止时间的确认

混凝土强度达到28天龄期或同条件养护试块达到设计强度（灌注桩）。

考虑时间效应，砂土7天，粉土10天，非饱和粘性土15天，饱和粘性土25天；泥浆护壁灌注桩，宜适当延长休止时间。

预制桩：初打，复打

钢管桩：初打，复打

2、检测时间确认

时间效应说明：

- (1) 打入桩施工时，由于挤土和振动影响，使饱和土的孔隙水压力上升，造成桩周土有效应力下降，桩侧和桩端土阻力降低。经过一段时间后，随着超孔隙水压力消散，桩侧和桩端土阻力得到恢复。
- (2) 打入桩施工时，沉桩过程对桩周土产生扰动，由于土的触变作用，桩侧和桩端土阻力也会降低，土的敏越感度参数越大，降低越多。经过一段时间后，这部分损失的阻力得到恢复。

3、桩头处理

预制管桩：预应力混凝土管桩测试时，在条件允许的情况下，尽量选择桩顶带法兰盘的桩进行测试。若桩头受损，可进行切割处理，将受损段切割掉，但要保证切割面水平平整。对于桩顶没有法兰盘的试桩，应用细砂找平桩顶后才可测试。



3.1 检测准备工作

3、桩头处理



3、桩头处理

混凝土灌注桩：桩头处理尽可能采用接桩方式，即在原桩顶接长1.5～2.0倍桩径的桩段，这样可以大大改善所采集到的数据的质量。

处理方法可参照《建筑基桩检测技术规范》JGJ 106-2014中附录B“混凝土桩桩头处理”。



1、桩侧开挖或者周围平整



建立工作面



2、传感器安装位置的选择

- 位置位于桩顶以下 $2D$ 以下，对大直径桩不得小于 $1D$
- 远离非均匀处 (如接桩、焊接处或面积变化处; 最好在其下大于 $1D$)
- 避免安装至“裂缝”处 (缝隙会产生错误的应变读数)
- 处于地面或水面以上
- 确保传感器接头处于水面以上
- 复合桩 (如充填混凝土管桩) 是否需要切割窗口

3、桩侧打磨



灌注桩打磨。预制桩挑选光滑面

4、打孔及膨胀螺栓安装



5、导向装置就位（导向架与锤一起的）



6、布置锤垫

- 桩垫厚度一般取10~30mm，可根据经验来定。
- 一般采用木板或胶合板等材料。
- 锤重较轻或锤击落距较低时，选用较薄的桩垫；锤重较重或锤击落距较高时，选用较厚的桩垫。桩垫厚度也可根据第一锤的波形加以调整。桩垫尺寸可略大于桩顶截面尺寸。
- 当检测仅为检验桩的结构完整性时，要减轻锤重，降低落距，减少锤垫厚度，但应能测到明显的桩底反射信号。

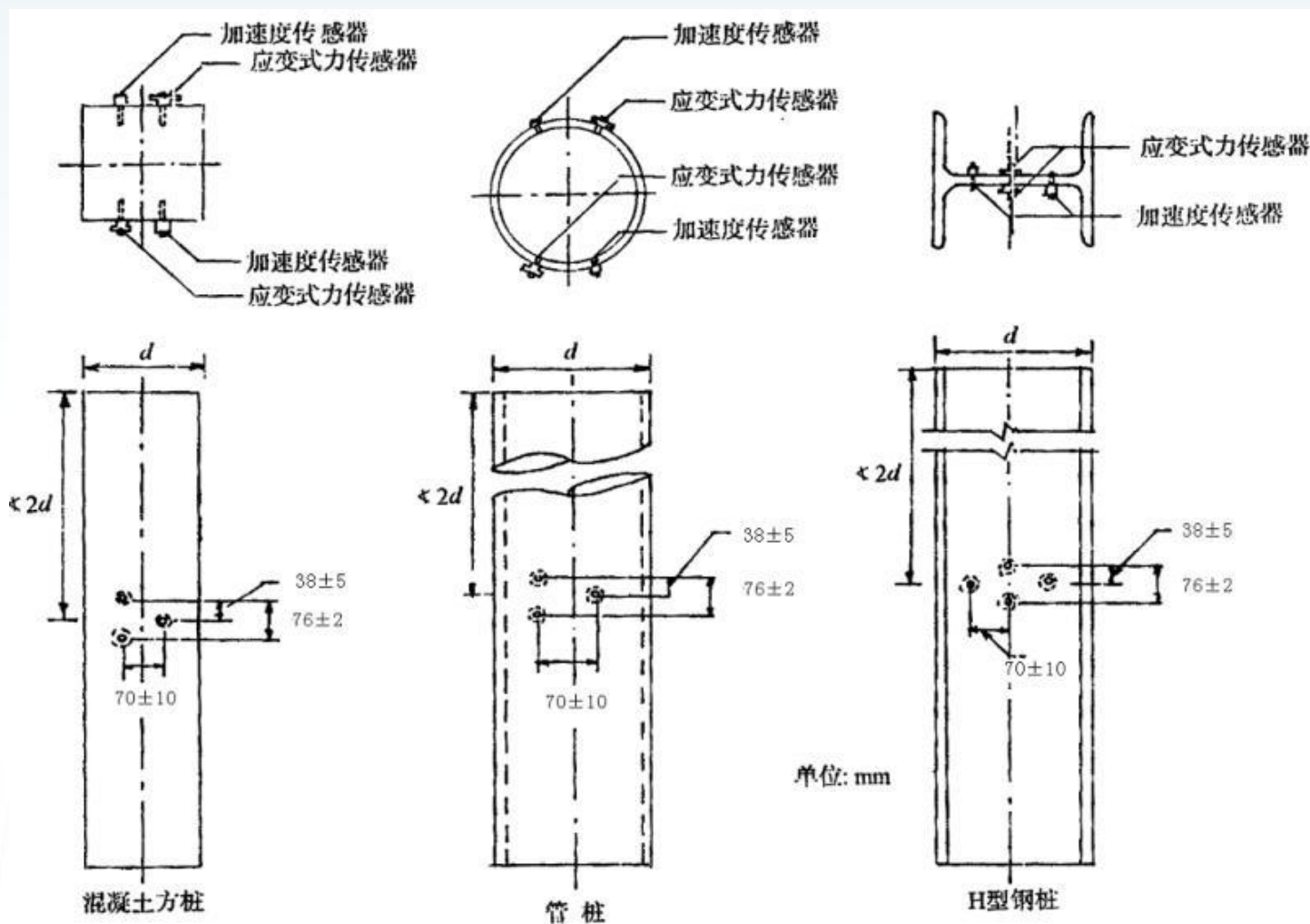
7、传感器安装

- (1)、传感器必须对称安装在桩顶以下桩身两侧，对测试信号平均时方可消除锤击偏心的影响。安装的传感器与桩顶的距离一般不小于 $2D$ （ D 为试桩的直径或边长），对大直径桩不得小于 $1D$ ，以避开桩顶附近复杂应力关系影响。
- (2)、安装传感器的桩身表面应平整，且其周围不得有缺损和断面突变。传感器必须牢固安装，安装好的传感器不能在锤击过程中产生相对滑动。

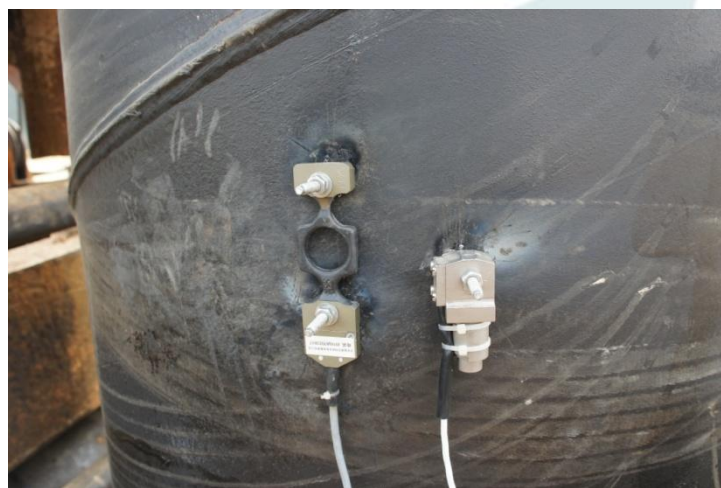
7、传感器安装

- (3)力传感器中心与加速度器中心应位于同一水平线上，两者间的距离不应大于80mm。安装好的传感器中心轴应与桩中心轴保持平行。
- (4)传感器安装过程中应监测传感器初始变形值。安装好的传感器初始变形值不应超过规定值。
- (5)连续测试过程中，如从测试波形中发现传感器松动，如力曲线中出现振荡信号或力曲线不归零，要及时拧紧。如发现传感器损坏，要及时更换。

7、传感器安装



7、传感器安装



7、传感器安装



7、传感器安装

特殊桩型的安装

- 混凝土和钢管的应变相同

- 如钢的成份少、应用窗口将传感器直接按到混凝土上

- 如钢的成份高、可将传感器直接按到钢管上

注意：窗口会产生应力集中

8、自由落锤就位



9、仪器参数设置

- 桩身参数 (传感器位置)
 - 面积
 - “直径” (传感器位置和周长)
 - 测点下桩长
 - 材料参数
 - 质量密度 平均波速
 - 弹性模量 $EM = \rho c^2$ (注意单位!)
 - 入土桩长 (用于拟合分析)
 - 均匀桩身或非均匀桩身---桩身阻抗变化

9、仪器参数设置

- (1) 传感器参数设定值按计量检定结果设定。
- (2) 测点处的桩截面尺寸按实际测量确定。

➤ 实心桩（钻孔灌注桩、预制方桩）

桩身截面积实心部分的面积。

➤ 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。

9、仪器参数设置

(3) 质量密度、弹性模量按桩的设定。

➤ 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 、弹性模量 E 。

➤ 算法

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

9、仪器参数设置

	密度	弹模	波速
	kg / m ³	Mpa	m / s
钢桩	7850	210,000	5,123
混凝土桩	2400~2550	24,000 ~ 48,000	3,000 ~ 4,500
木桩	650 ~ 1300	7,000 ~ 28,000	3,000 ~ 4,500

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

9、仪器参数设置

(4) 平均波速的确定。

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。

9、仪器参数设置

(5) 测点以下桩长和截面积按设计或施工记录提供的数据设定。测点以下桩长指桩头传感器安装点至桩底的桩长，一般不包括桩尖部分。

入土桩长指嵌入土中的桩长，是地面或基坑底面至桩底的桩长。

(6) 采样时间间隔宜为 $50\sim 200\mu\text{s}$ 。采样时间间隔一般为根据桩长和波速自动计算，有些仪器也可以人为设定。

10、仪器状态确认

高应变虽为非破坏性试验，但一般不具有多次锤击的条件。

应仔细检测：

- 仪器及传感器的连接
- 通过监视(或自检)确认传感器安装好坏
- 可通过敲击加速度确认触发情况

11、提升高度控制

规范：最大锤击落距不宜大于2.5m

控制落锤高度一般基于以下条件：

- （1）冲击力不宜过高，否则桩体材料会塑性变形甚至破坏；
- （2）桩体有一定的沉降位移，确保桩被打动；
- （3）要求落锤稳定。

12、锤击

原则：

重锤低击是保障高应变法检测
承载力准确性的基本原则。



12、锤击

“重锤低击”的好处

- (1) 重锤低击可避免“轻锤高击”产生的应力集中，而应力集中容易使桩身材料产生塑性甚至破坏；
- (2) 重锤低击荷载脉冲作用时间长，且荷载变化缓慢，可以使桩产生较大的沉降位移；
- (3) 重锤低击，桩体产生的速度较小，速度变化率也较小，因此动阻力的影响较小，可减少动阻尼参数误差对拟合分析影响，提高拟合分析精度；
- (4) 重锤低击作用可类似静荷载中快速加载及静动法试验。

13、贯入度测量

宜实测桩的贯入度，单击贯入度宜在**2~6mm**之间

桩的贯入度可采用精密水准仪等仪器测定

将打桩机作为锤击设备时，可根据多次锤击下桩的总下沉量来确定单击贯入度。

两次积分确定贯入度时，可能存在问题：

- 采集时段短，信号采集结束时桩的运动尚未停止，只有当位移曲线尾部为一水平线时，贯入度才可信。
- 加速度计的质量优劣影响速度曲线的趋势，零漂大和低频响应差时极为明显。

14、信号确认

理想高应变波形信号特点

(1)力和速度的时程一致，上升峰值前二者重合，峰值后二者协调，力曲线应在速度曲线之上（除非桩身有缺陷），两曲线间距离随桩侧土阻力增加而增大，其差值等于相应深度的总阻力值，能真实反映桩周土阻力的实际情况。

说明：

灌注桩由于波速的离散性，峰值基本上很难重合

14、信号确认

(2)力和速度曲线的时程波形终线归零。位移曲线对时间轴收敛

说明：

- 力信号不归零，或者由于安装压力不足，传力过程中产生相对错动，这时需重新拧紧膨胀螺栓。
- 由于安装位置的混凝土产生塑性变形或开裂等，这时必须选择适当的位置重新安装传感器

14、信号确认

(3)锤击没有严重偏心，对称的两个力或速度传感器型的测试信号不应相差太大，二组力信号不出现受拉。

说明：

- 无导向装置的情况下，锤击偏心
- 在锤架底存有淤泥、桩顶无法兰盘的情况下极易造成偏心，此时应先垫实架底，整平桩头，再放上桩垫板，在锤击过程中调整桩垫板高度。
- 在传感器、电缆间接头松弛时，可能出现一侧力特别小

14、信号确认

(4)波形平滑，无明显高频干扰杂波，对摩擦桩桩底反射明确；

说明：

应该特别注意交流电的干扰

14、信号确认

(5)有足够的采样长度。保证曲线拟合时间段长度不少于 $5L/c$ ，并在 $2L/c$ 时刻后延续时间不小于20ms。

说明：

规范规定有拟合要求，一定要记录长度足够

14、信号确认

(6)贯入度适中，一般单击贯入度不宜小于2mm，也不宜大于6mm。

说明：

■贯入度小，使检测得到的承载力低于极限值；贯入度过大造成的桩周土挠动大，承载力分析所用力学模型与实际情况相差较大，与静载试验对比，统计结果离散性很大。

■实践表明， D_{max} （最大动位移）仍是可供佐证的主要指标。

打桩引起的桩身破坏有几种形式：

- (1) 锤击压应力过大、锤击偏心造成桩头破坏。
- (2) 桩端碰到基岩、密实卵砾石层使桩端反射的压应力与下行的压力波在桩端附近迭加，使锤击压应力过大造成桩身下部破坏。
- (3) 混凝土的抗拉强度一般在其抗压强度的 $1/10$ 以下，而且抗拉强度并不随抗压强度的增加而正比增加(增加缓慢)。所以，对混凝土桩，拉应力引起的桩身破坏是不容忽视的。

桩体破坏形式

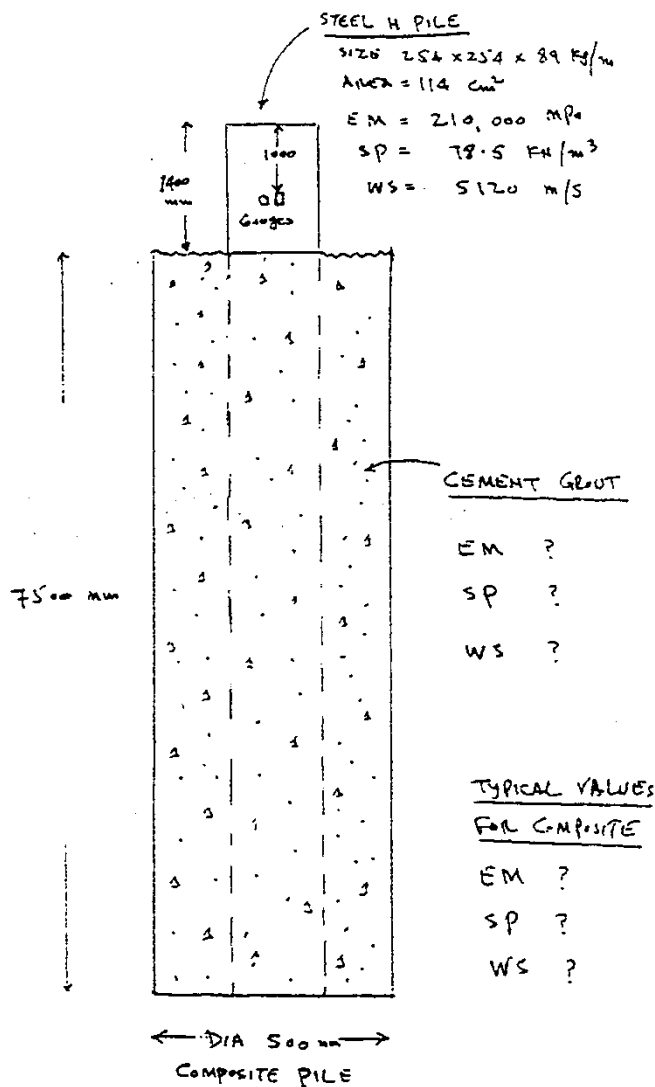
1、现场注意问题

(1) 传感器的安装位置与锤击点之间应有足够大的距离，应该符合规范的要求。

- 当传感器安装在离桩顶一定距离，可以避开桩顶附近复杂的应力状态，使所测信号符合一维弹性波的理论要求；
- 同时也可以避免一旦桩头被打裂而对传感器造成的损坏。

3.4 现场相关问题分析

1、现场注意问题



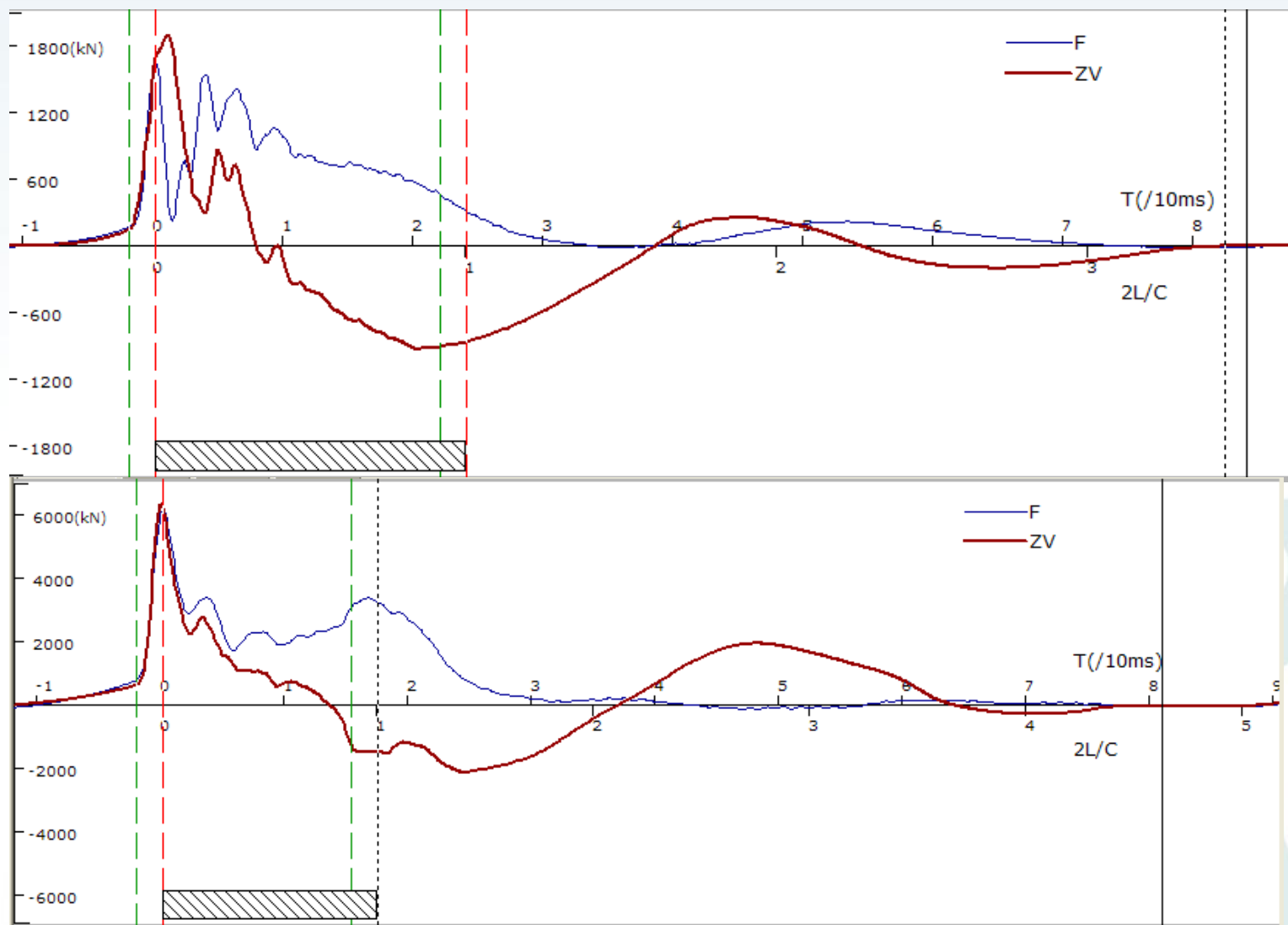
组合型的桩

上面为H型钢桩

下面为混凝土桩

3.4 现场相关问题分析

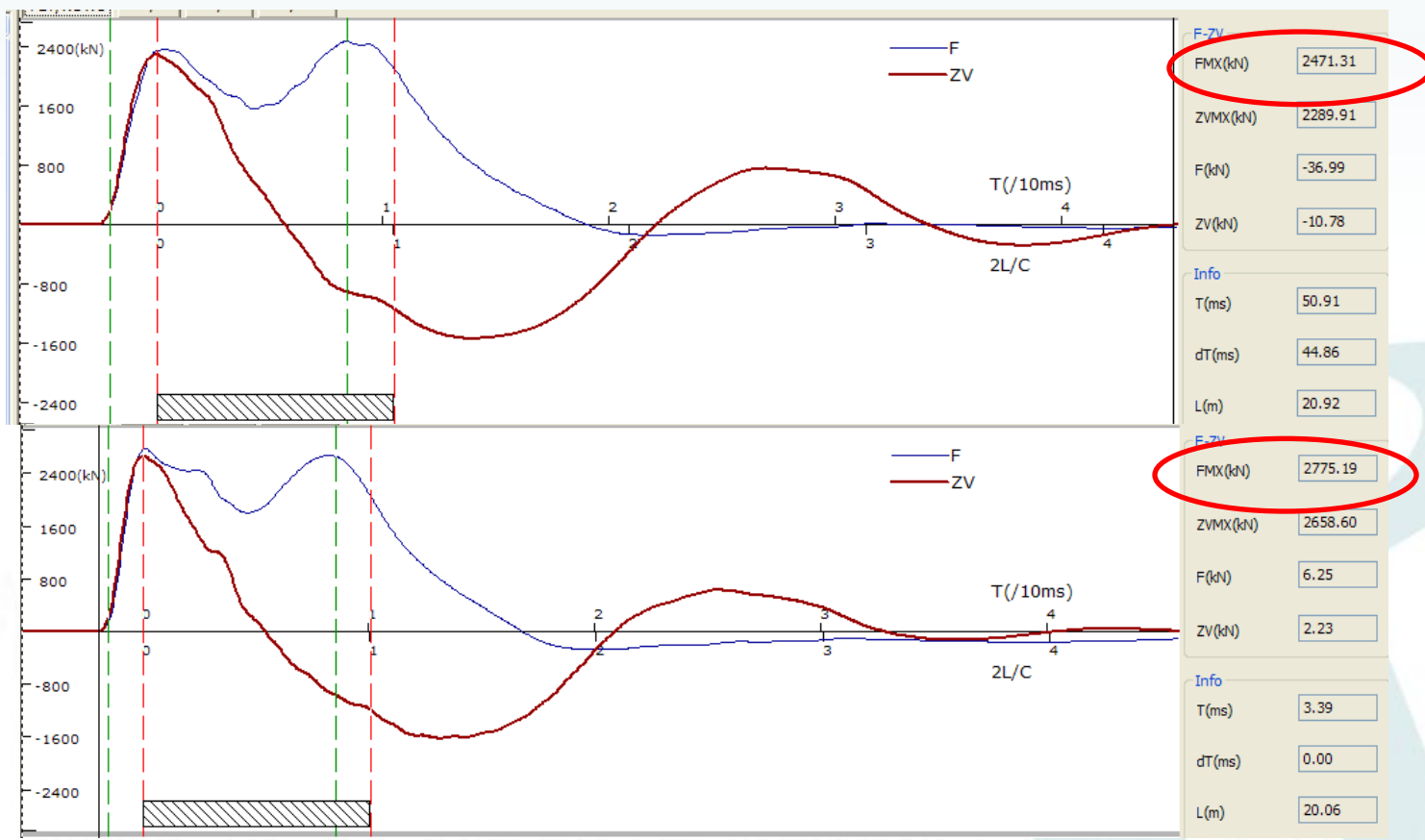
1、现场注意问题



3.4 现场相关问题分析

1、现场注意问题

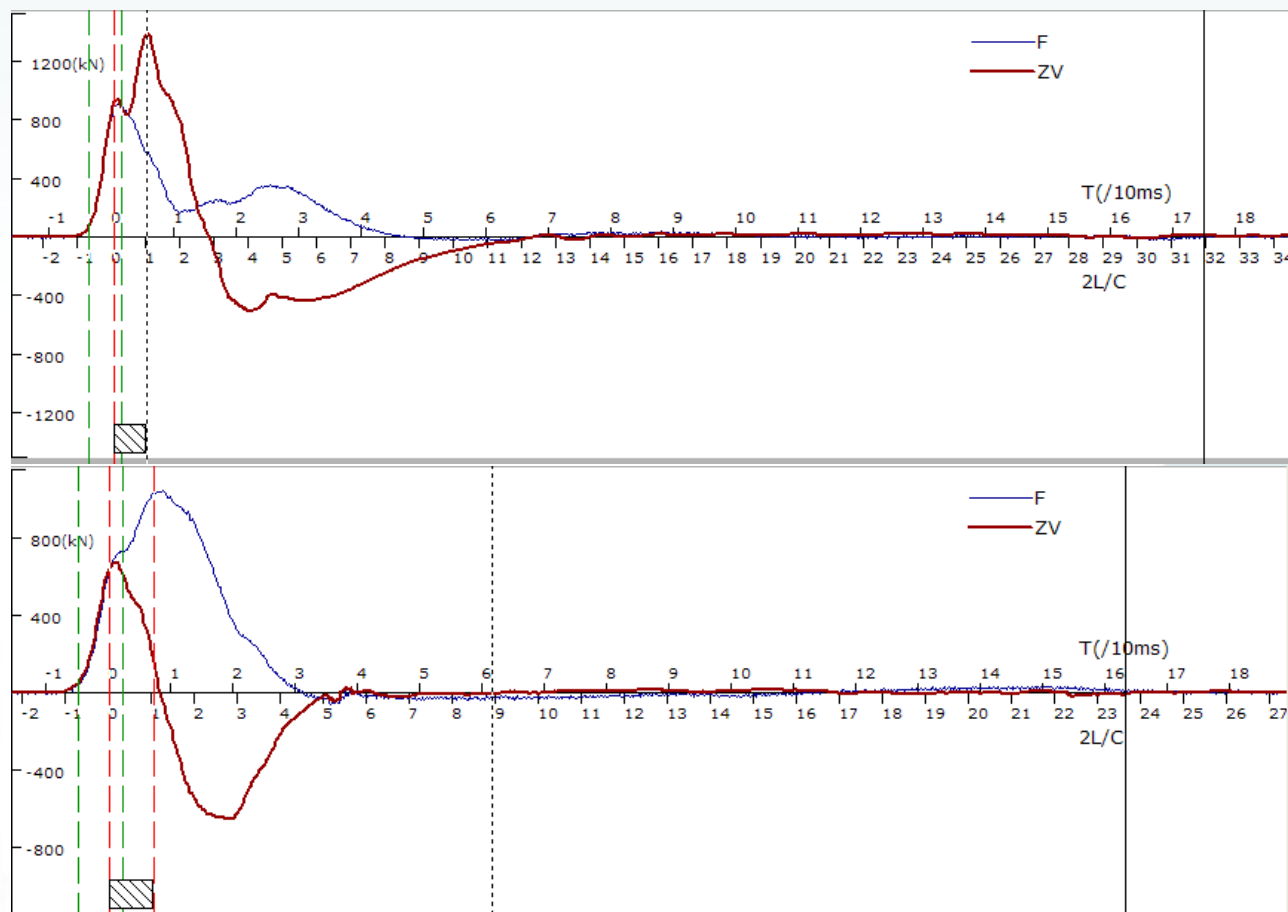
(2) 在桩数较多、多种桩径混杂、单桩极限承载力要求有差别的工地，宜按最大承载力选择锤重。



3.4 现场相关问题分析

1、现场注意问题

(3) 检测前基桩应满足一定的休止时间，使桩身混凝土达到足够的强度，桩周土超孔隙水压力消散。

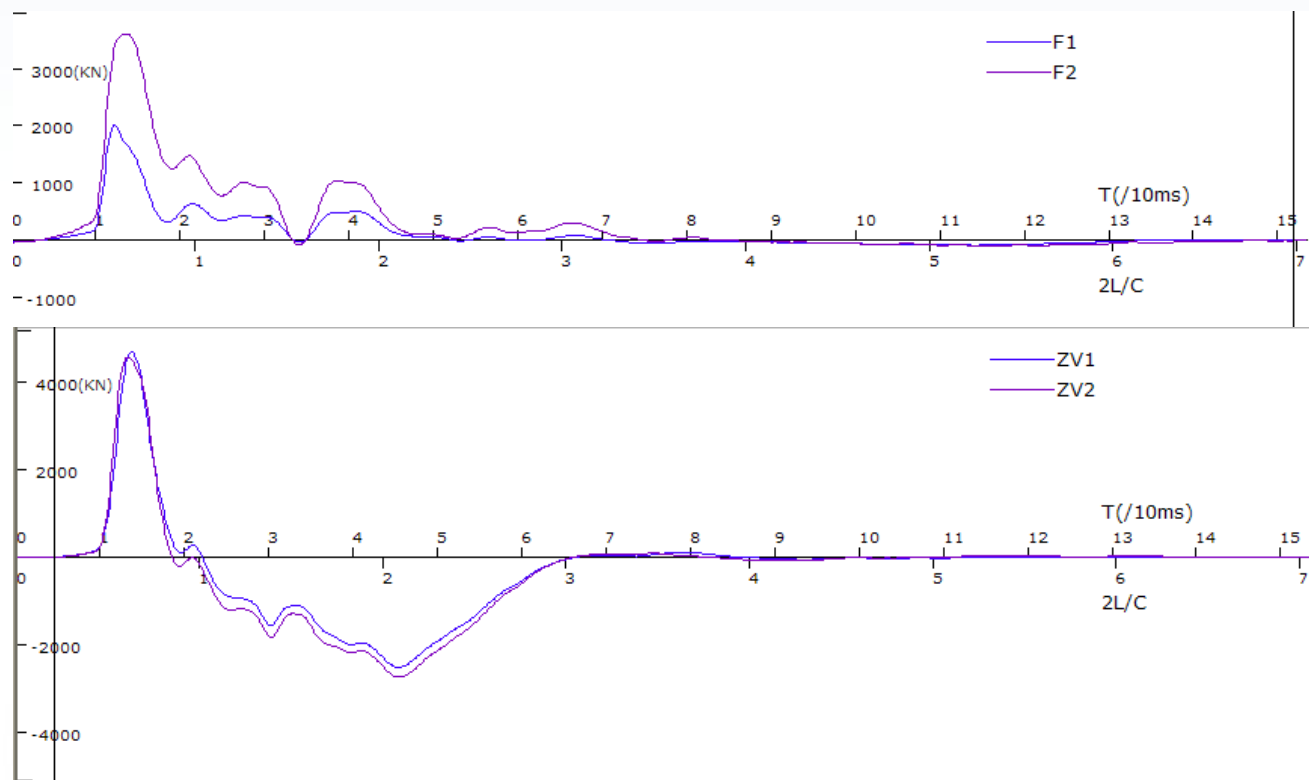


1、现场注意问题

（4）脱钩：锤击的一点点偏心，可以导致信号一致性严重恶化，

这一点已为大量试验所验证——偏心不可大意

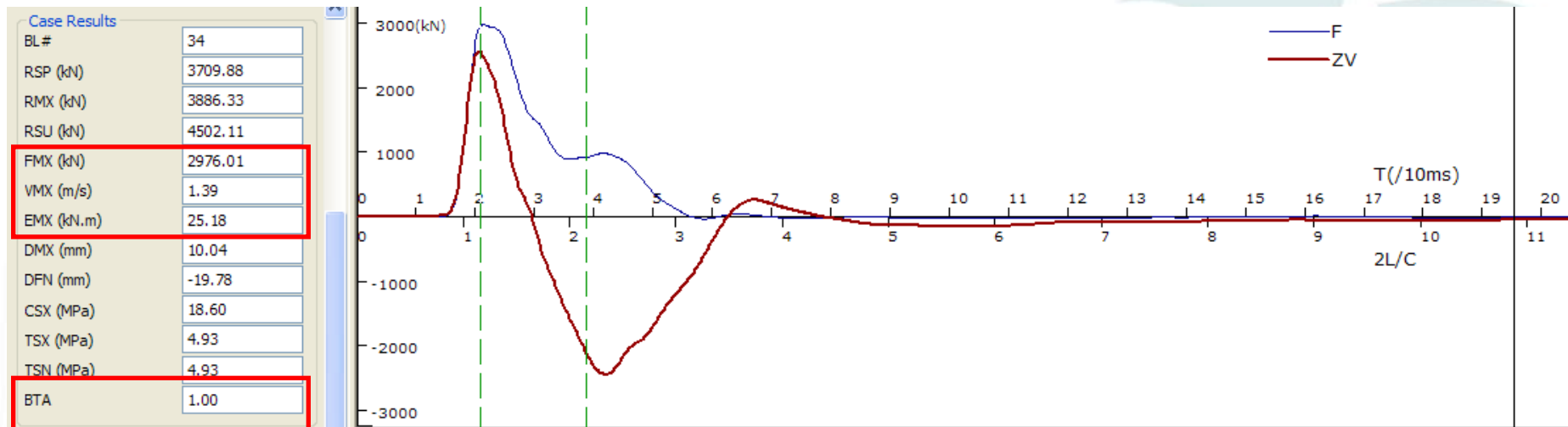
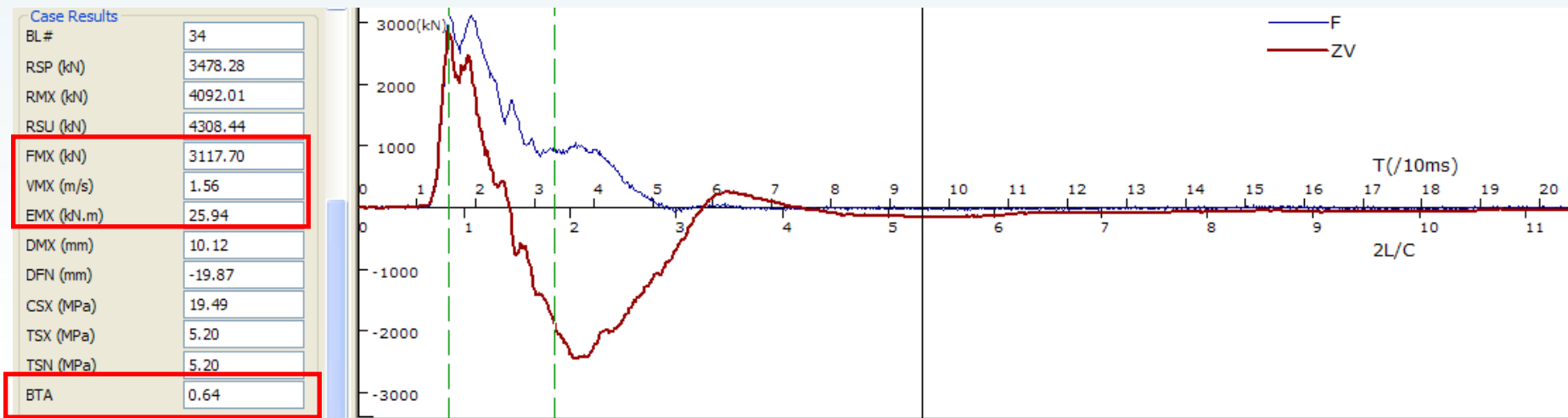
锤击脱垂的脱钩容易导致偏心； 脱钩以中心脱落的方式为宜



3.4 现场相关问题分析

1、现场注意问题

(5) 滤波的设置对结果有比较大的影响



3.4 现场相关问题分析

1、现场注意问题

(6) 安全

现场安全非常重要，要保证：

远离吊车吊臂

远离导向架

保护传感器及传感器连接线缆



2、现场问题排查

（1）两侧力信号幅值相差过大。

产生的原因：

锤击偏心（无导向架时锤子的晃动；导向架放置不平；桩垫放置不平等）

灵敏度系数设置颠倒

控制的目标：

应保证在规范规定的范围之内

保证灵敏度与编号对应上。

2、现场问题排查

（2）加速度信号提前震荡。

产生的原因：

交流干扰（现场使用了交流电，并且没有有效接地）

现场的其他振动干扰

控制的目标：

尽量使用干电池或者有效接地

排除现场的振动干扰

2、现场问题排查

（3）测试信号震荡厉害

产生的原因：

传感器安装不牢或松动（打孔过大或者打孔倾斜），桩垫使用不当，膨胀螺栓不好，滤波参数设置不合理

控制的目标：

侧面打磨平整，选择合适的钻头，打孔距离准确，使用较好的膨胀螺栓，将传感器紧贴桩侧面，设置合理的参数

2、现场问题排查

（4）接收状态时收到连续杂乱信号，或者锤击后无信号产生。

产生的原因：

传感器损坏，传感器提前触发（加速度通道较力通道灵敏，当周围在同时进行打桩时，微弱的振动就能激发加速度通道）

控制的目标：

传感器正常，接头连接无短路，无较大干扰

2、现场问题排查

(5) 速度与力峰值不重合

桩浅部阻抗变化；桩浅部土侧阻力很大；测点处混凝土的非线性造成力值明显偏高；锤击力波上升缓慢或桩很短时，土阻力波或桩底反射波的影响；桩垫过厚。

波速选择不当。

灵敏度系数不对。

传感器安装歪斜。

控制的目标：

开始阶段成正比例，不一定重合

2、现场问题排查

(6) 曲线比例性差

- 标定系数?
- 平均波速? ($\varepsilon = v/c$)
- 非均匀桩身?
- 传感器靠近地面附近?
- 使用柴油锤? (预燃作用)
- 起跳时间长? (桩垫太软)

2、现场问题排查

（7）力值或速度最终未归零。

产生的原因：

混凝土产生塑性变形或开裂；打孔间距与传感器对应不上，强行安装；采集时间较短，在采集的时间段内还没有停止震动；

控制的目标：

采集足够的长度，选择较均匀的地方打孔。

2、现场问题排查

（8）贯入度数值不明

产生的原因：

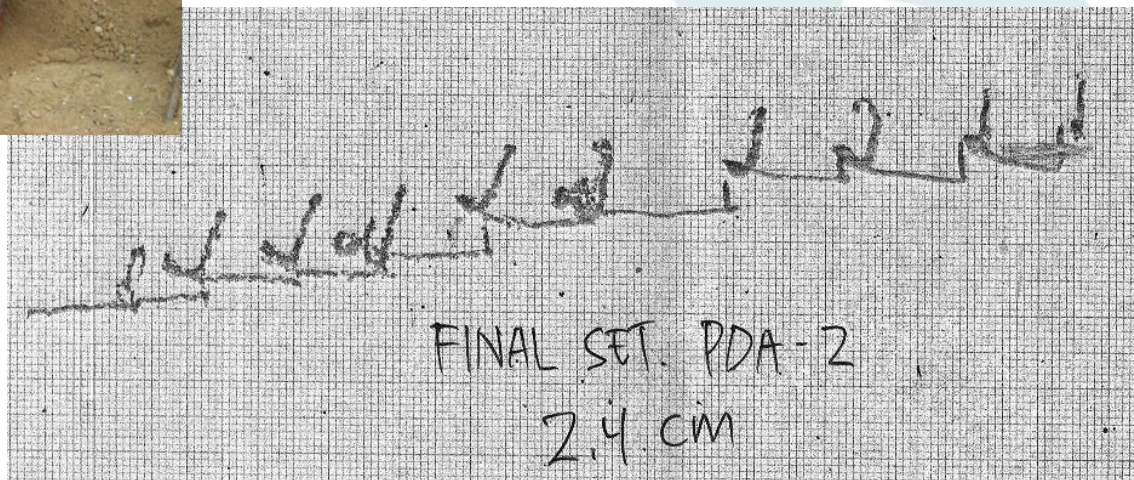
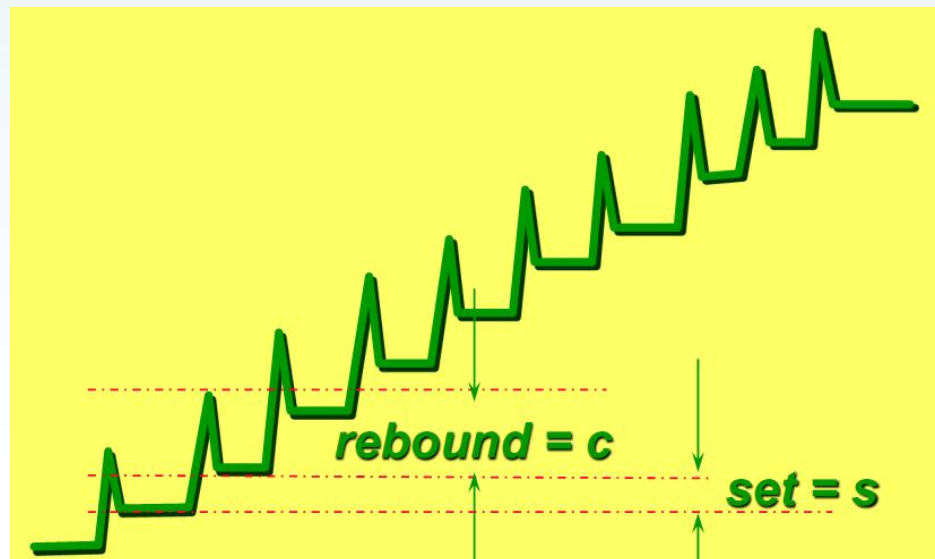
不监测桩的锤击贯入度，仅仅通过加速度多次积分得到位移曲线，通过最终的位移值大小来估计贯入度。

控制的目标： 通过高精度的仪器监测桩的变形

也可采用其他辅助方法验证。

2、现场问题排查

(8) 贯入度数值不明



2、现场问题排查

（9）多次锤击数值相差较大

产生的原因：

触变效应造成承载力不断下降；每次锤击之后没有实时对传感器进行加固；

控制的目标：

做好充分准备，一次采集好波形，多次锤击往往不允许

2、现场问题排查

总结：

实测数据问题一般出自下列方面：

- 传感器问题
 - 电缆问题
 - 传感器安装问题
 - 桩身存在严重缺陷
 - 传感器标定系数问题
 - 设置问题
- 主要问题

4

数据分析与结果判定

- 4.1 信号的选择和调整
- 4.2 波速的确定
- 4.3 承载力的计算
- 4.4 完整性系数的计算
- 4.5 检测报告

1、信号的选取

(1)选择信号的原则

- ✓比例性好
- ✓无电子或机械噪音
- ✓经两次积分得到的最终每击贯入度接近实测贯入度且最终速度曲线为零
- ✓力曲线最终为零
- ✓上升时间短

(2) 对于高土阻力的情况（每击贯入度小于3mm/击），选择高能量/高打击力的记录；对于低土阻力的情况（每击贯入度大于8mm/击），选择低能量/低打击力的记录

1、信号的选取

当出现下列情况之一时，高应变锤击信号不得作为承载力分析计算的依据：

- (1)、传感器安装处混凝土开裂或出现严重塑性变形使力曲线最终未归零；
- (2)、严重锤击偏心，两侧力信号幅值相差超过 1 倍；
- (3)、四通道测试数据不全。

2、信号的调整

力与速度比例失调

◆因波速改变需调整通过时测应变换算得到的力值

◆传感器设定值或仪器增益的输入错误

以下几种情况造成比例失调属正常：

- (1)、桩浅部阻抗变化；
- (2)、桩浅部土侧阻力很大；
- (3)、测点处混凝土的非线性造成力值明显偏高；
- (4)、锤击力波上升缓慢或桩很短时，土阻力波或桩底反射波的影响；
- (5)、桩垫过厚。

2、信号的调整

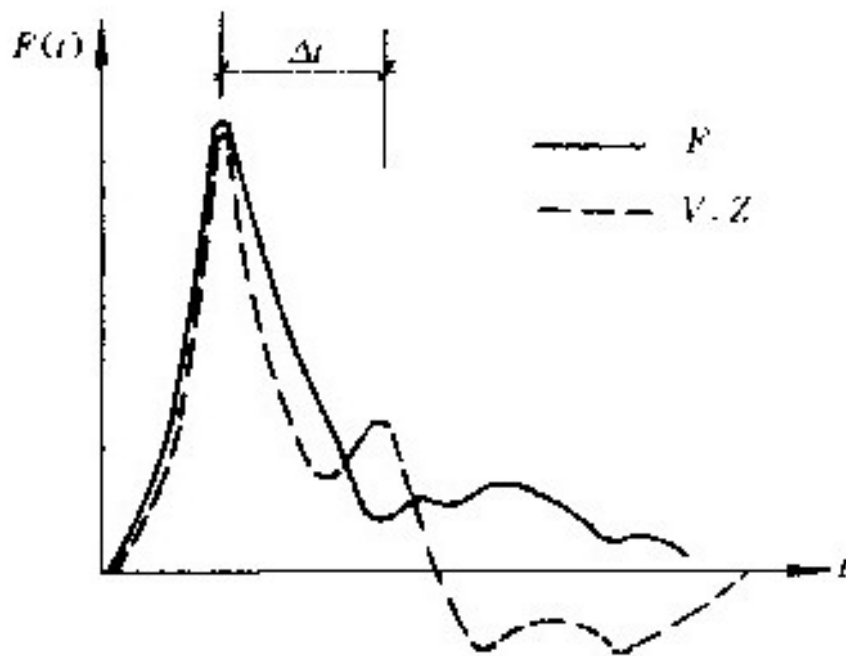
测点处混凝土的非线性造成力值明显偏高时，
减小力值时，可避免计算的承载力过高

高应变实测的力和速度信号第一峰起始段不成比例时，不得对实测力或速度信号进行调整。

4.2 波速的确定

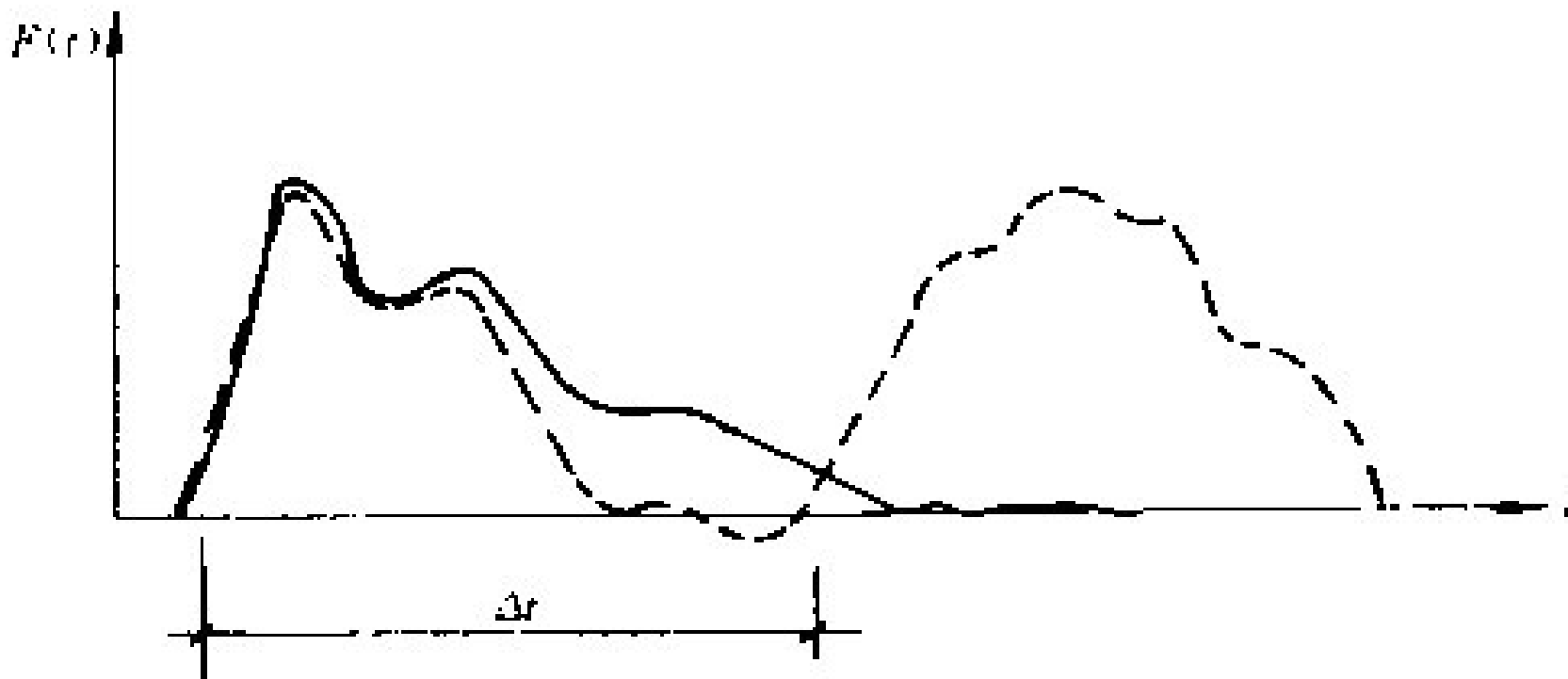
1、“峰值-峰值”法

➤ “峰值—峰值”法，通过入射波峰值和桩底反射波峰值计算；（阻力较小时）



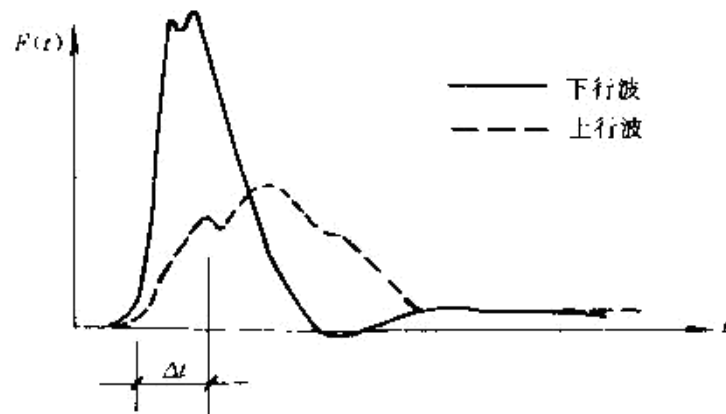
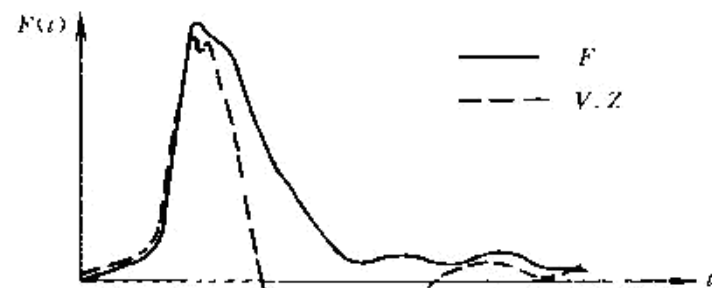
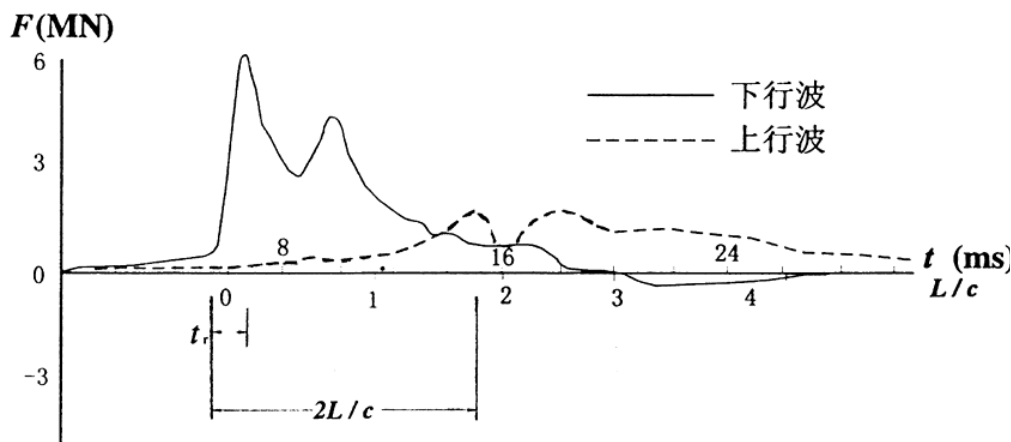
2、上升沿-上升沿法

➤ 上升沿—上升沿法，即速度波上升沿（速度峰值10%位置为起点）到反射波上升沿的时间 Δt 确定波速



3、上下行波法

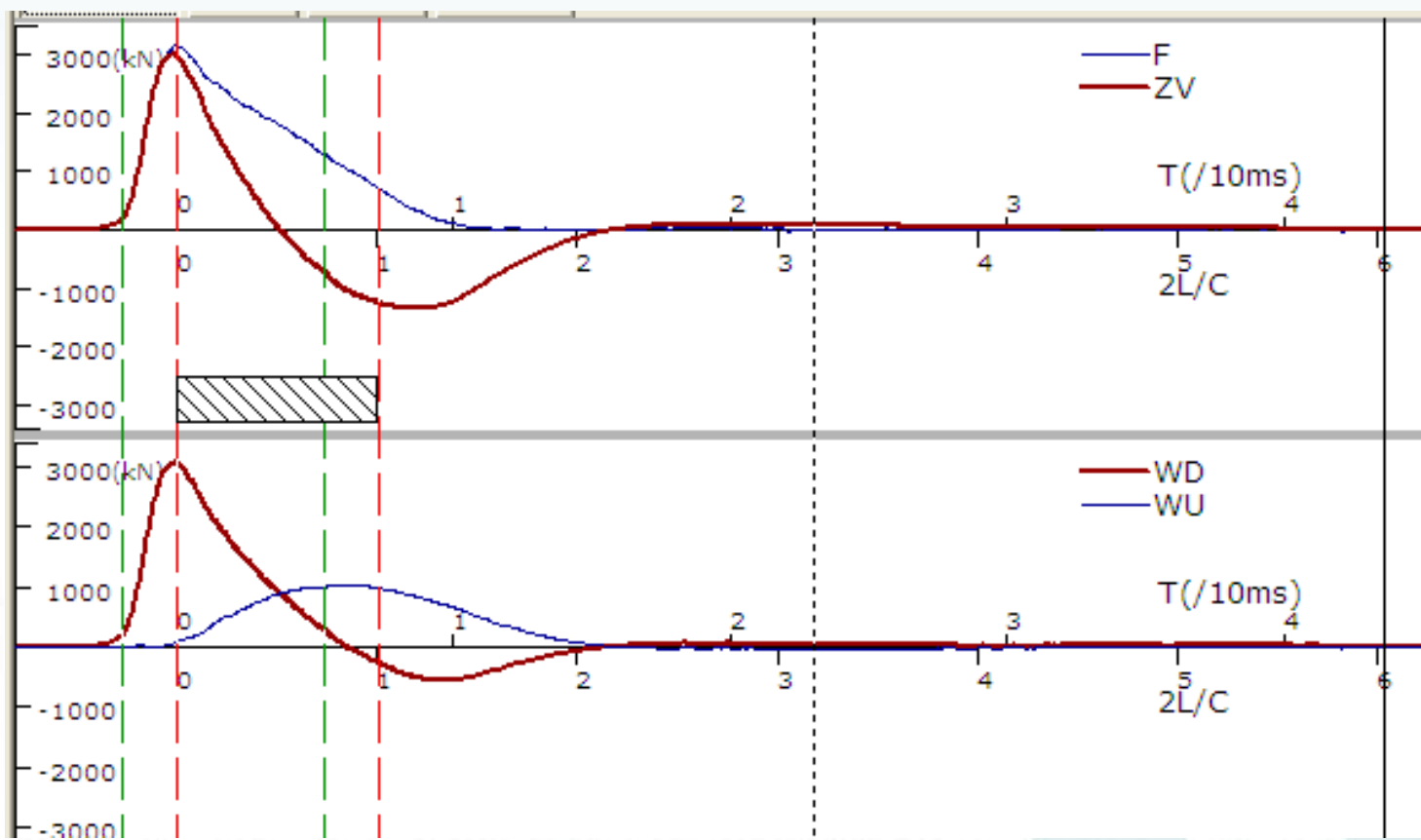
➤ 上下行波起跳点法，即通过下行波的起跳点和上行波的下跳点计算；（桩底反射不明显，或桩端土阻力较大时）



4.2 波速的确定

4、经验波速法

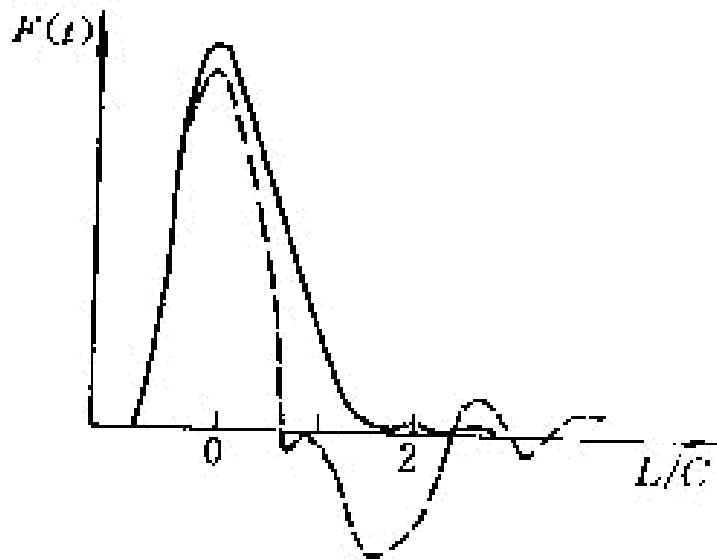
➤经验波速法，(桩长、波速的合理范围；临近桩的波速；低应变的波速)



1、计算前的检查

承载力分析计算前，应结合地基条件、设计参数，对实测波形特征进行定性检查：

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



2、计算公式的选择

Case法和波动方程曲线拟合法都是分析高应变动力试桩信号、判定单桩承载力的方法。

Case法公式简单，但做了很多假定，根据情况选择方法：

RSP法

RMX法

RSU法

RMN法

RAU法

RA2法

2、计算公式的选择

对于 t_1+2L/c 时刻桩侧和桩端土阻力均已充分发挥的摩擦桩，单桩竖向承载力检测值可采用：**RSP法**

对于土阻力滞后于 t_1+2L/c 时刻明显发挥或先于 t_1+2L/c 时刻发挥并产生桩中上部强烈反弹这两种情况，宜分别采用下列方法对**RSP**的计算值进行提高修正，得到单桩竖向抗压承载力检测值：

- 1 将 t_1 延时，确定 R_c 的最大值；（**RMX**）
- 2 计入卸载回弹部分土阻力对 R_c 值进行修正。（**RSU**）

3、 J_c 的取值

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。

3、 J_c 的取值

- 阻尼系数 J_c 宜根据同条件下静载试验结果校核，或应在已取得相近条件下可靠对比资料后，采用实测曲线拟合法确定值，拟合计算的桩数不应少于检测总桩数的30%，且不应少于3根。
- 在同一场地、地基条件相近和桩型及其截面积相同情况下， J_c 值的极差不宜大于平均值的30%。

4、承载力的判定

承载力特征值按得到的单桩竖向抗压承载力检测值的50%取值。

5、静阻力 R_s 的极值问题

静土阻力 R_s 的值限问题:

$$R_s = 2 F_{\downarrow}(t_1) - (1+J_c) Z V_{\text{尖}}$$

在锤击力 $F(t_1)$ 作用下所激发的静土阻力 R_s 除了与锤击力 $F(t_1)$ 有关外,还与 J_c 、 Z 和激发的桩尖质点的运动速度 $V_{\text{尖}}$ 有关。

从理论上来说, 当桩尖质点的运动速度 $V_{\text{尖}}$ 为零, 如端承桩, 最大的静土阻力 $R_s=2F(t_1)$ 。

但是事实上, 所激发的土阻力一般不会超过锤击力的 1.2 倍左右。因为土阻力要激发必须要有必要的位移 (存在质点运动速度) 。

1、方法的选择

在桩身情况复杂或存在多处阻抗变化时，可优先考虑用实测曲线拟合法判定桩身完整性。

采用实测曲线拟合法判定时，拟合所选用的桩土参数应按承载力拟合时的有关规定；根据桩的成桩工艺，拟合时可采用桩身阻抗拟合或桩身裂隙以及混凝土预制桩的接桩缝隙拟合。

2、计算公式

等截面桩且曲线深度 x 以上部位的土阻力 R_x 未出现卸载回弹，高应变检测中桩身完整性的分类标准为：

$$\beta = \frac{[F(t_1) + Z \cdot V(t_1)] - 2R_x + [F(t_x) - Z \cdot V(t_x)]}{[F(t_1) + Z \cdot V(t_1)] - [F(t_x) - Z \cdot V(t_x)]}$$
$$x = c \cdot \frac{t_x - t_1}{2000}$$

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

3、验证情况

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

- 桩身有扩径的桩。
- 混凝土灌注桩桩身截面渐变或多变。
- 力和速度曲线在第一峰附近不成比例，桩身浅部有缺陷的桩。
- 锤击力波上升缓慢。
- 缺陷x以上部位的土阻力 R_x 出现卸载回弹。

报告应该包含的内容

- 规范要求的基本内容
- 实测的力与速度信号曲线。
- 计算中实际采用的桩身波速值和 J_c 值；
- 实测曲线拟合法所选用的各单元桩土模型参数、拟合曲线、土阻力沿桩身分布图；
- 实测贯入度；
- 试打桩和打桩监控所采用的桩锤型号、锤垫类型，以及监测得到的锤击数、桩侧和桩端静阻力、桩身锤击拉应力和压应力、桩身完整性以及能量传递比随入土深度的变化。

流程回顾

5

检测实例与波形汇编

- 5.1 实测信号反映的特征
- 5.2 典型波形展示
- 5.3 工程实测信号

1、力和速度时程曲线

力与速度时程曲线所包含的信息：

- 数据采集的质量，测试效果
- **F,ZV**曲线是否归零反映出传感器以及仪器系统的工作状态
- 土阻力的分布，判断桩的承载状况，有桩底反射时刻校核波速
- 桩身完整性评价

1、力和速度时程曲线

$F \sim V$ 曲线:

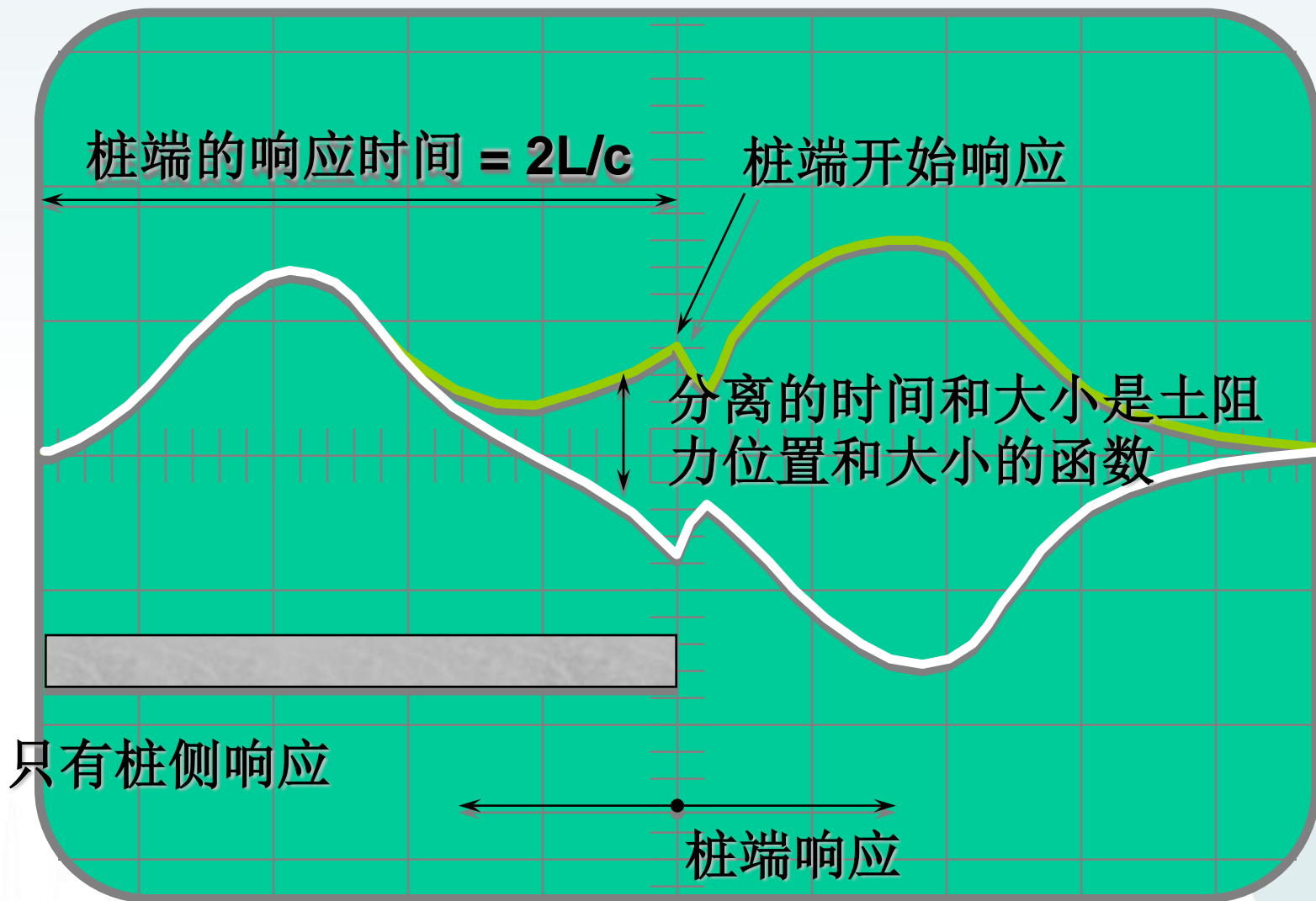
- F 曲线的峰值就是传感器位置处的桩身截面受到的最大锤击力。
- V 曲线的峰值就是传感器位置处质点运动的最大速度。
- 在 $0 < t < 2L/C$ 时段, F 、 V 曲线分离程度表明了桩侧土阻力的大小。分离得越开, 表明桩侧土阻力越大。
- 在 $t = 2L/C$ 时刻, F 、 V 曲线分离程度表明了桩的总土阻力及桩尖土阻力 (往往稍微延迟) 的大小。分离得越开, 表明桩的总土阻力及桩尖土阻力 (往往稍微延迟) 越大。

2、上下行波曲线

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

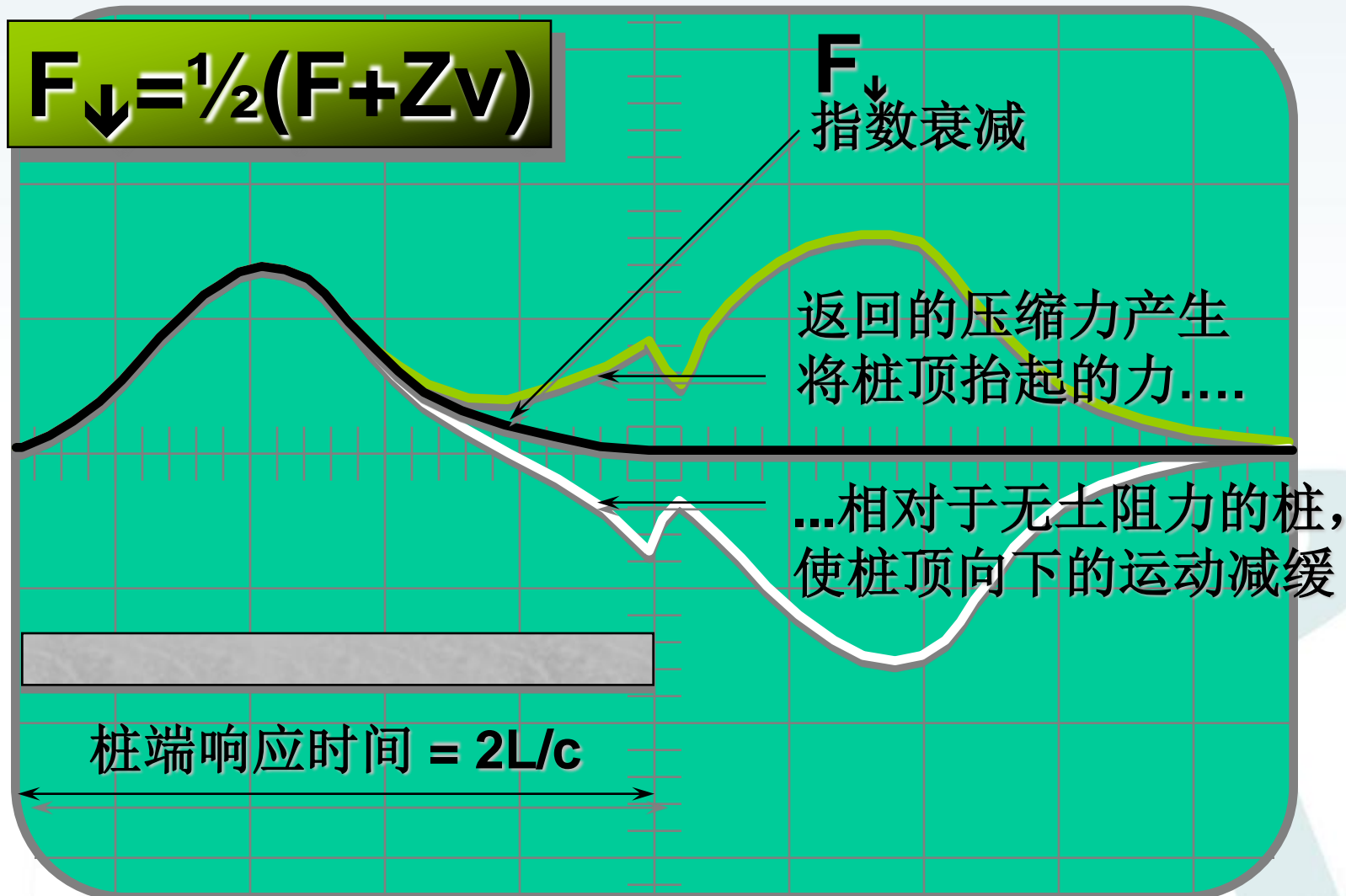
- 下行波 $F_{\downarrow} \sim t$ 曲线反映的就是锤击力 $F_{\downarrow}(t_1)$ 随时间（仅 $0 < t < 2L/C$ 时段）变化关系。
- 上行波 $F_{\uparrow} \sim t$ 曲线反映的就是桩侧土阻力分布情况（包含静阻力和动阻力）（仅 $0 < t < 2L/C$ 时段）。
- 通过上下行波曲线可计算平均波速。

2、上下行波曲线



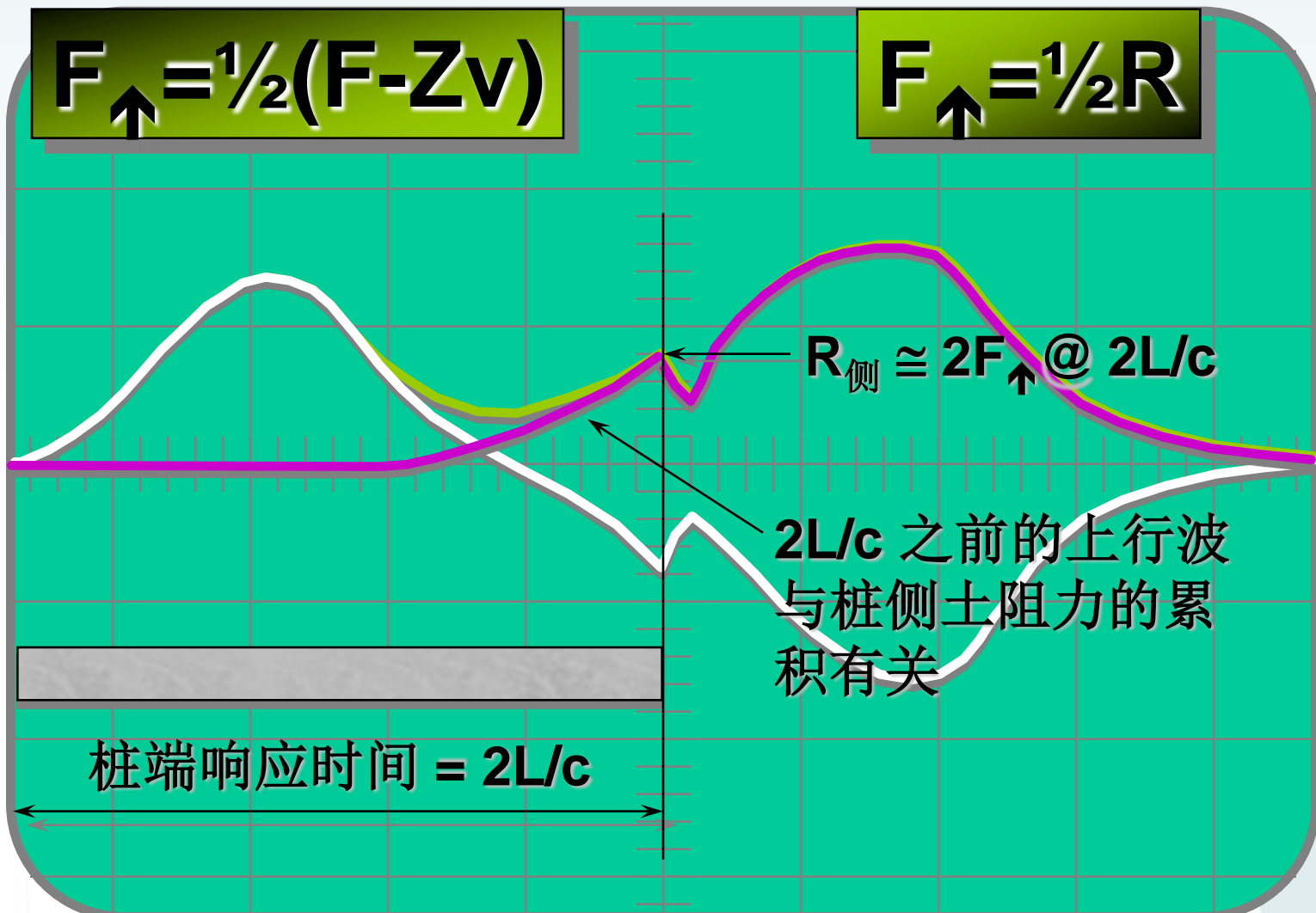
5.1 实测信号反映的特征

2、上下行波曲线

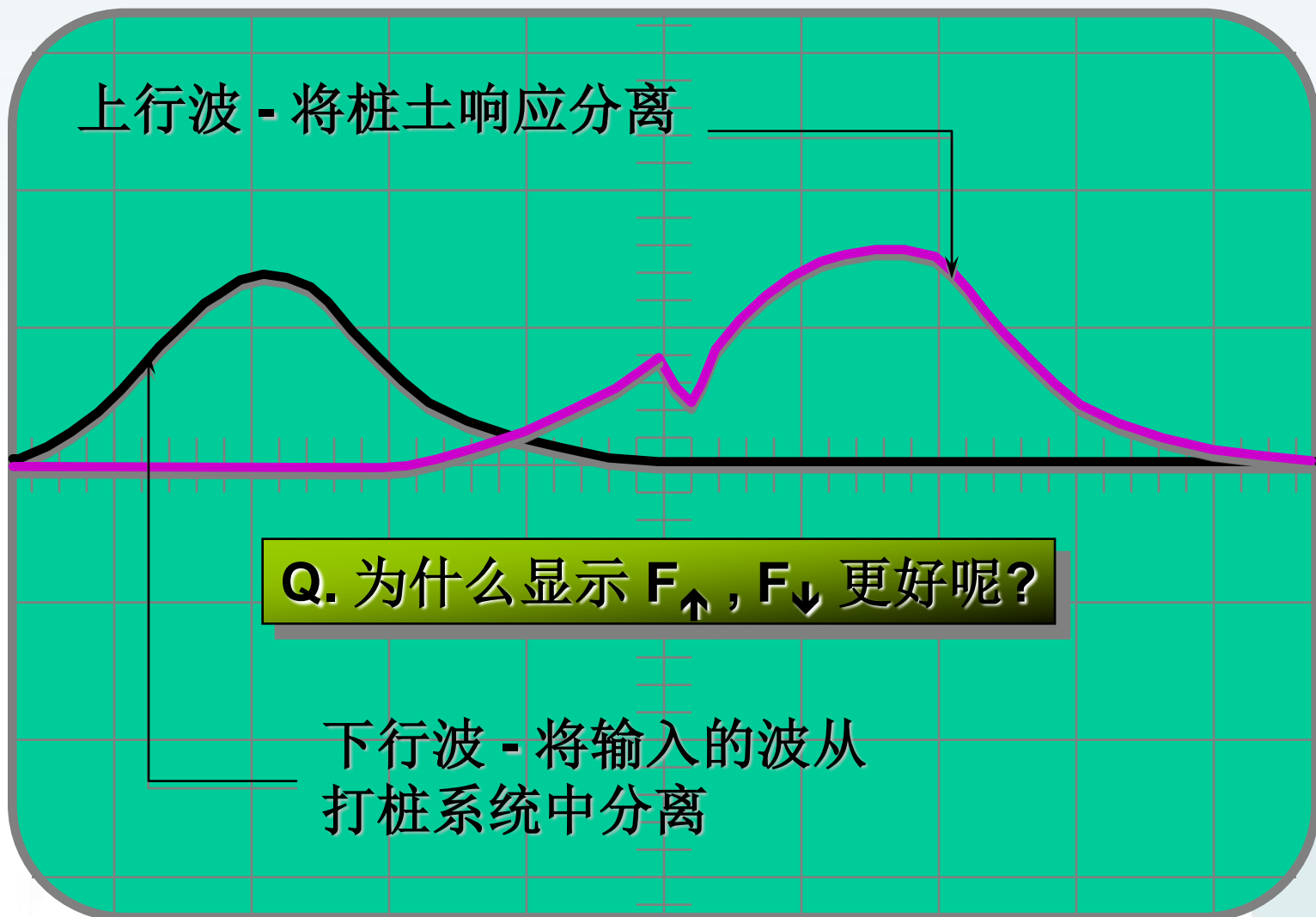


5.1 实测信号反映的特征

2、上下行波曲线



2、上下行波曲线



3、位移能量曲线

能量、位移曲线所包含的信息：

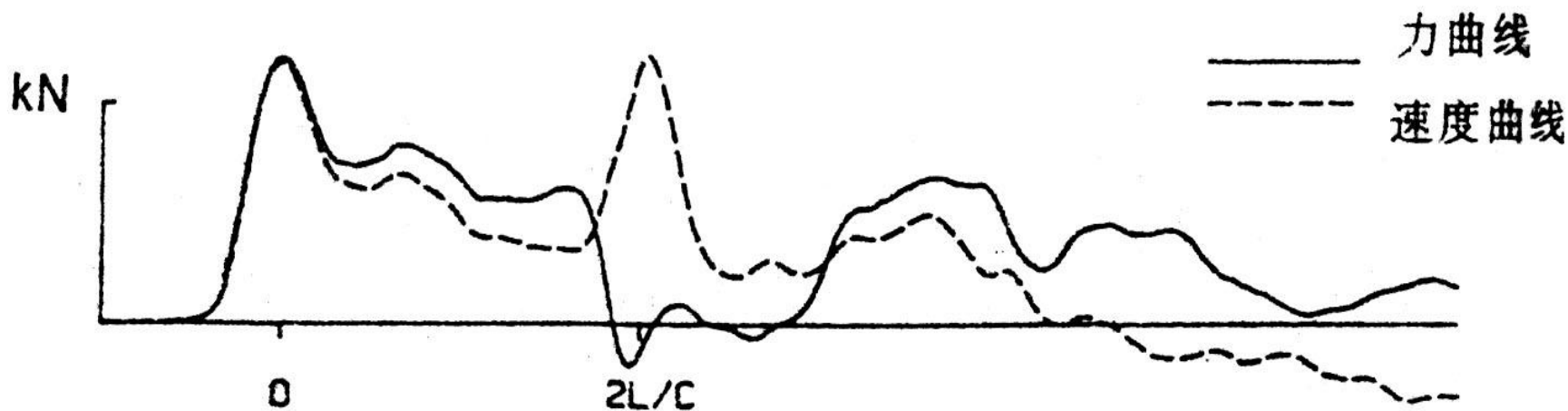
- ◆E 曲线中的峰值就是最大传递能量值。
- ◆D 曲线中的峰值就是桩身最大动位移量。
- ◆D 曲线中的最终稳定值就是桩相对于土的最终动位移量，有时可认为是桩身贯入度。

动位移与速度的关系：

$$v = dD / dt$$

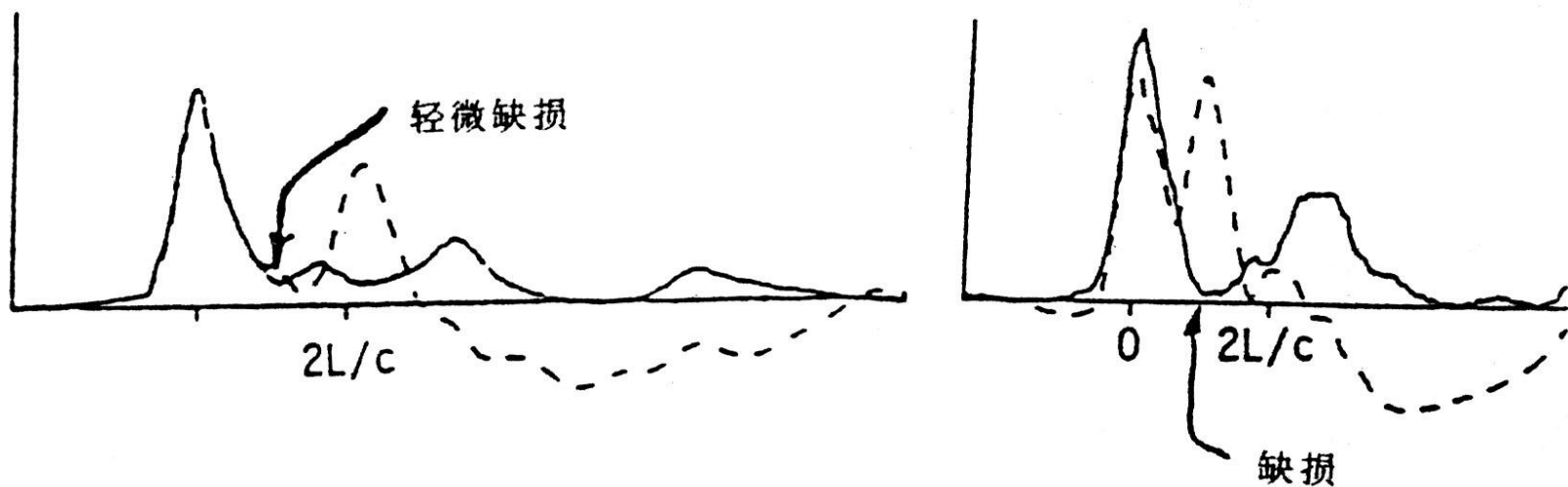
$$D = \int v dt$$

1、典型波形



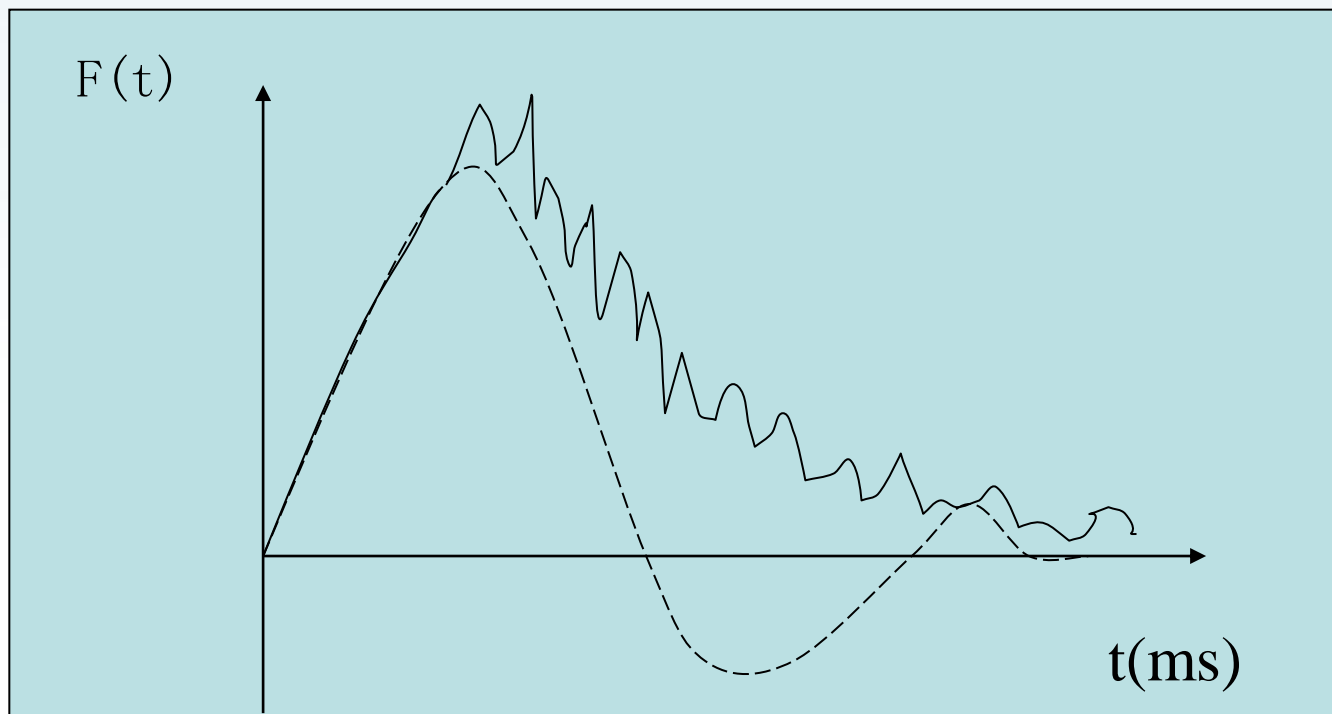
典型的桩端变阻抗反射在实测记录上的表现

1、典型波形



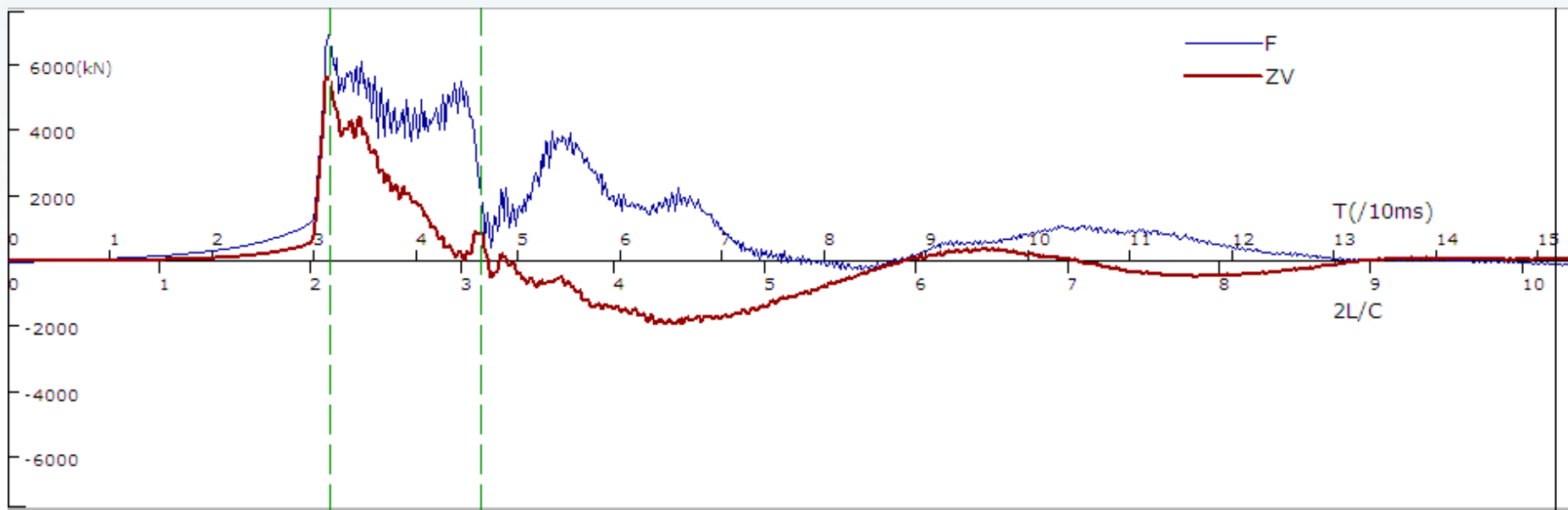
典型的桩身缺损在实测记录上的表现

2、异常波形分析



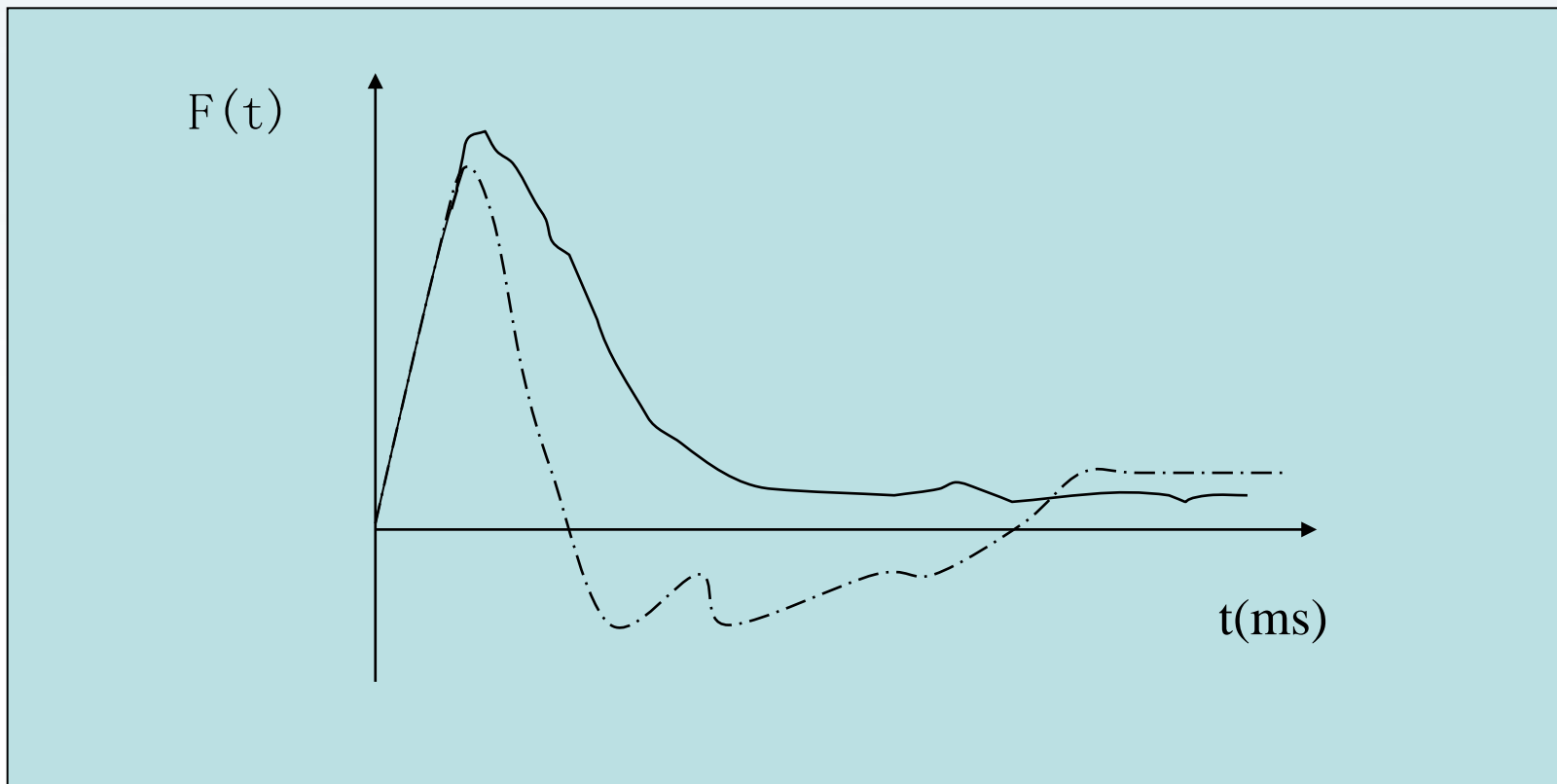
力传感器安装不紧

2、异常波形分析



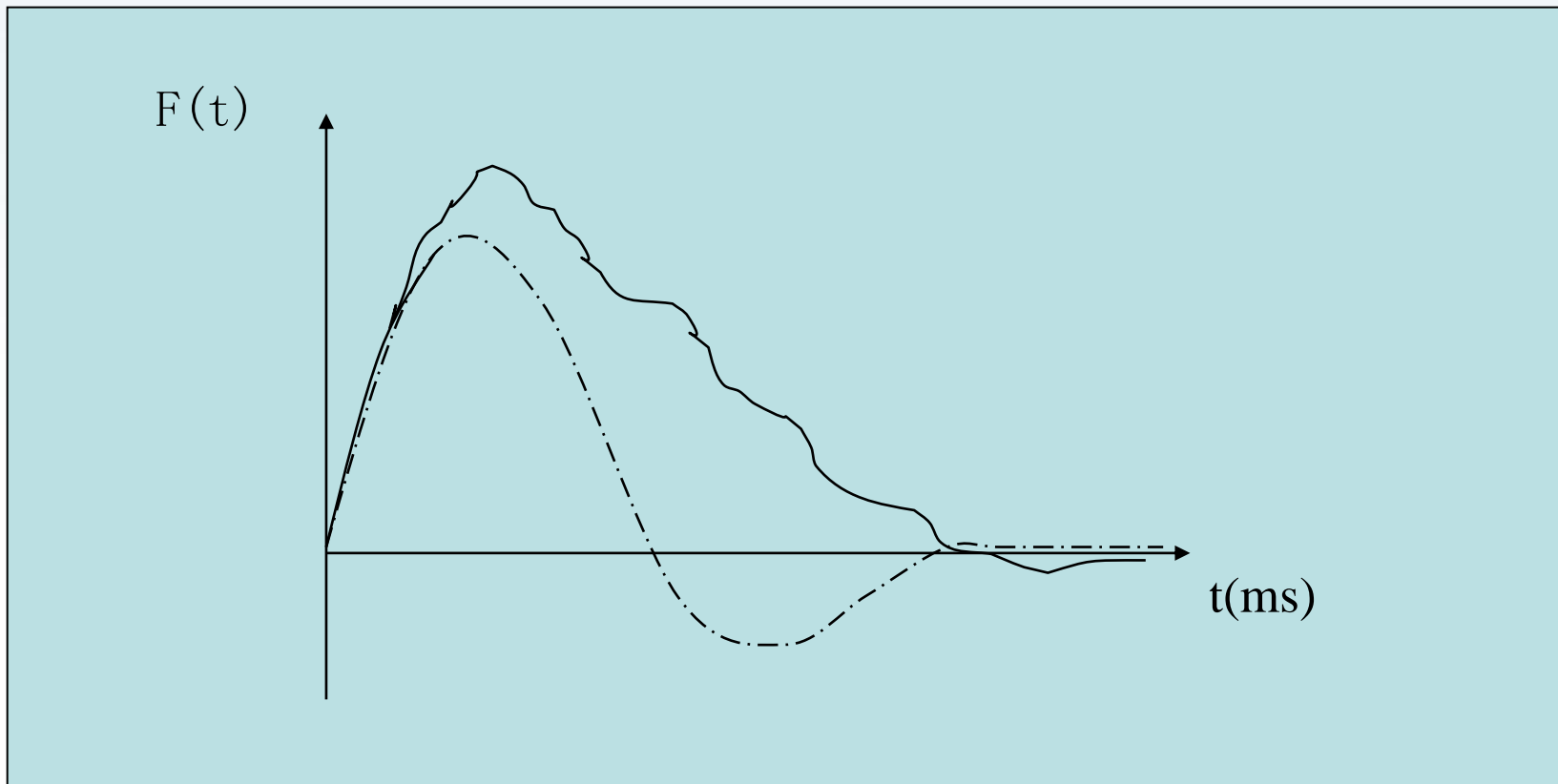
钢管桩传感器安装不太紧

2、异常波形分析



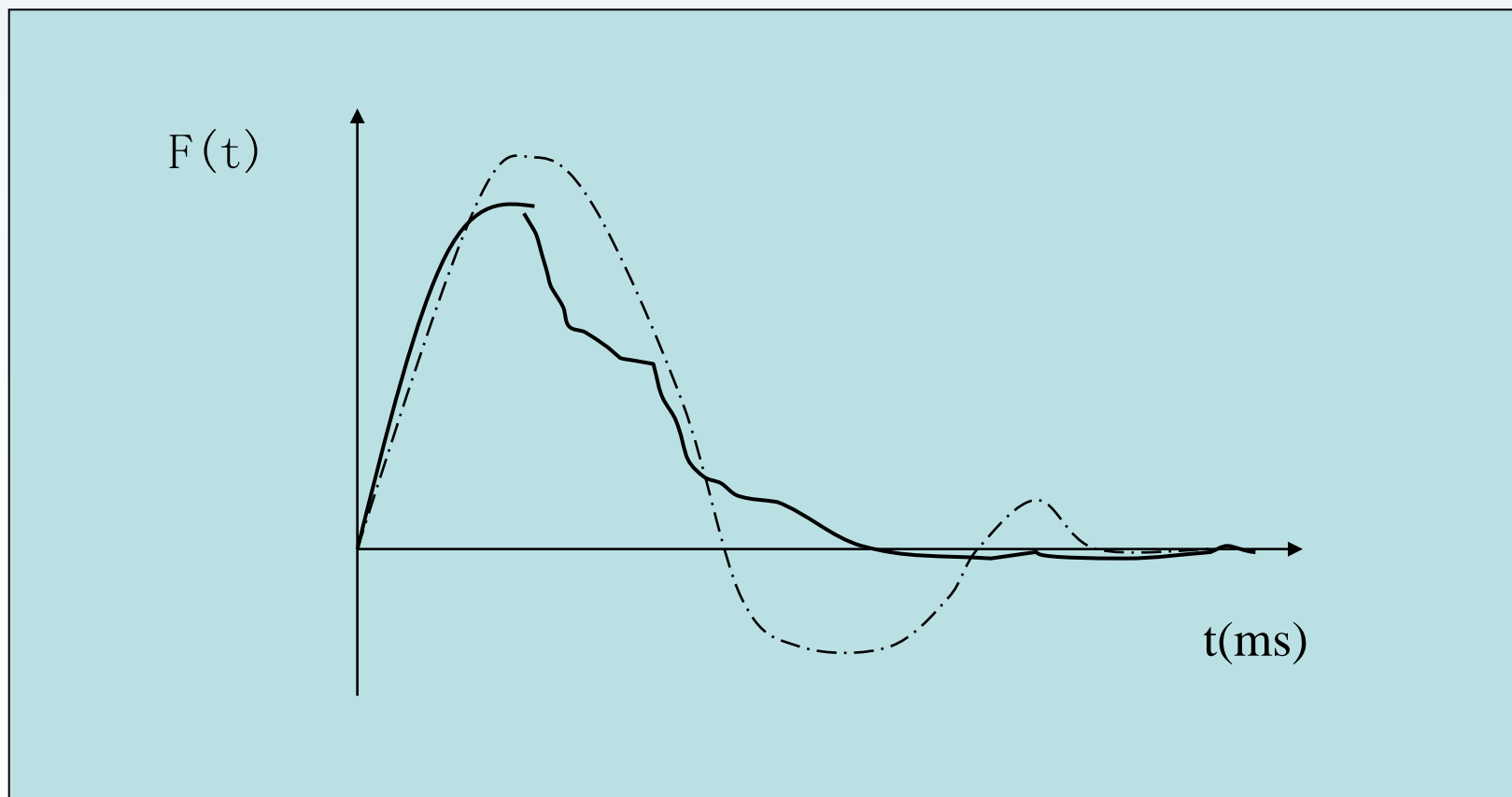
锤击引起测点砧塑性变形

2、异常波形分析



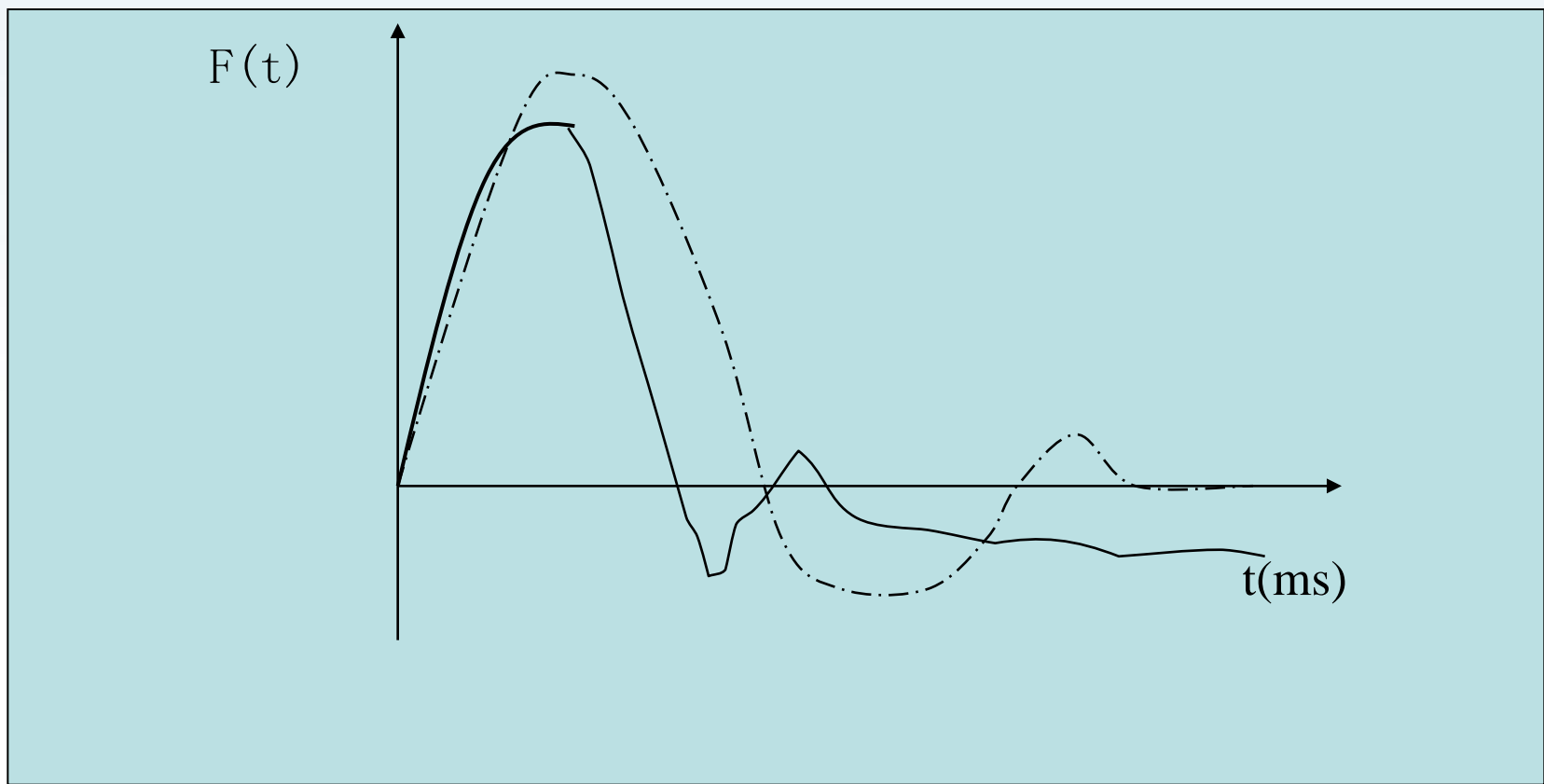
测点附近桩身扩颈或桩垫过厚

2、异常波形分析



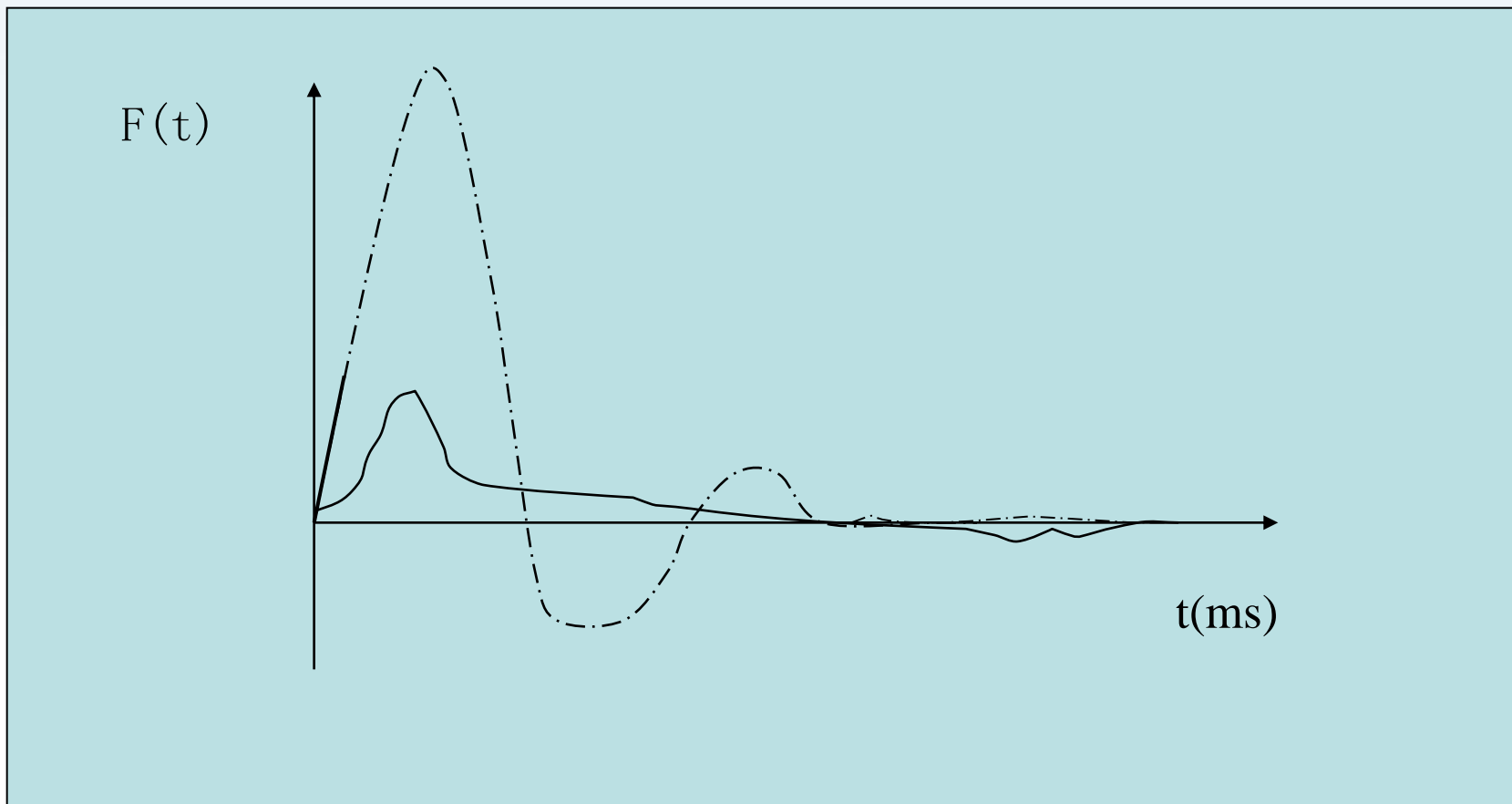
测点附近桩身有缩颈

2、异常波形分析



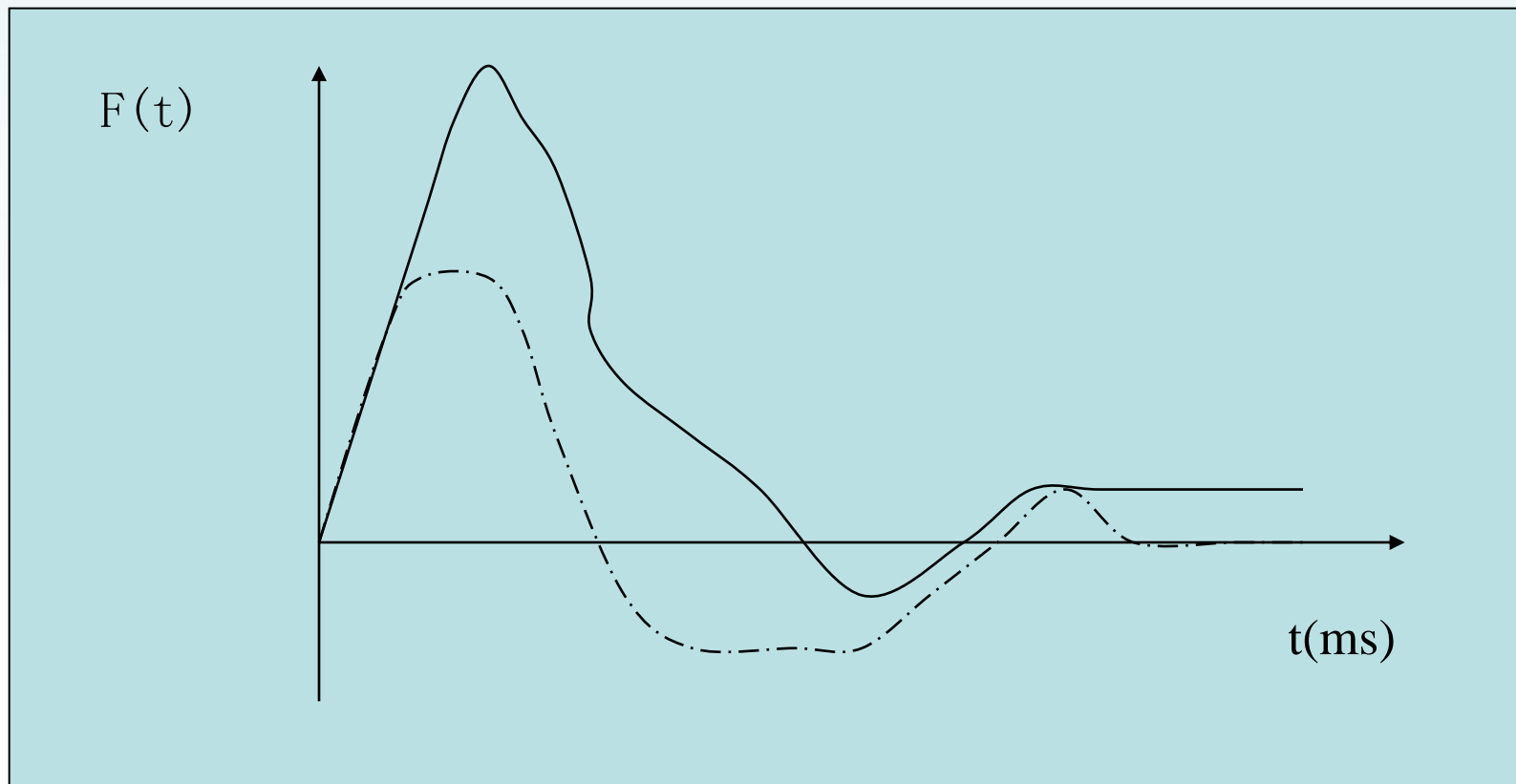
测点附近桩身有裂缝, 或传感器安装在新接桩头上, 接头连接没做好

2、异常波形分析



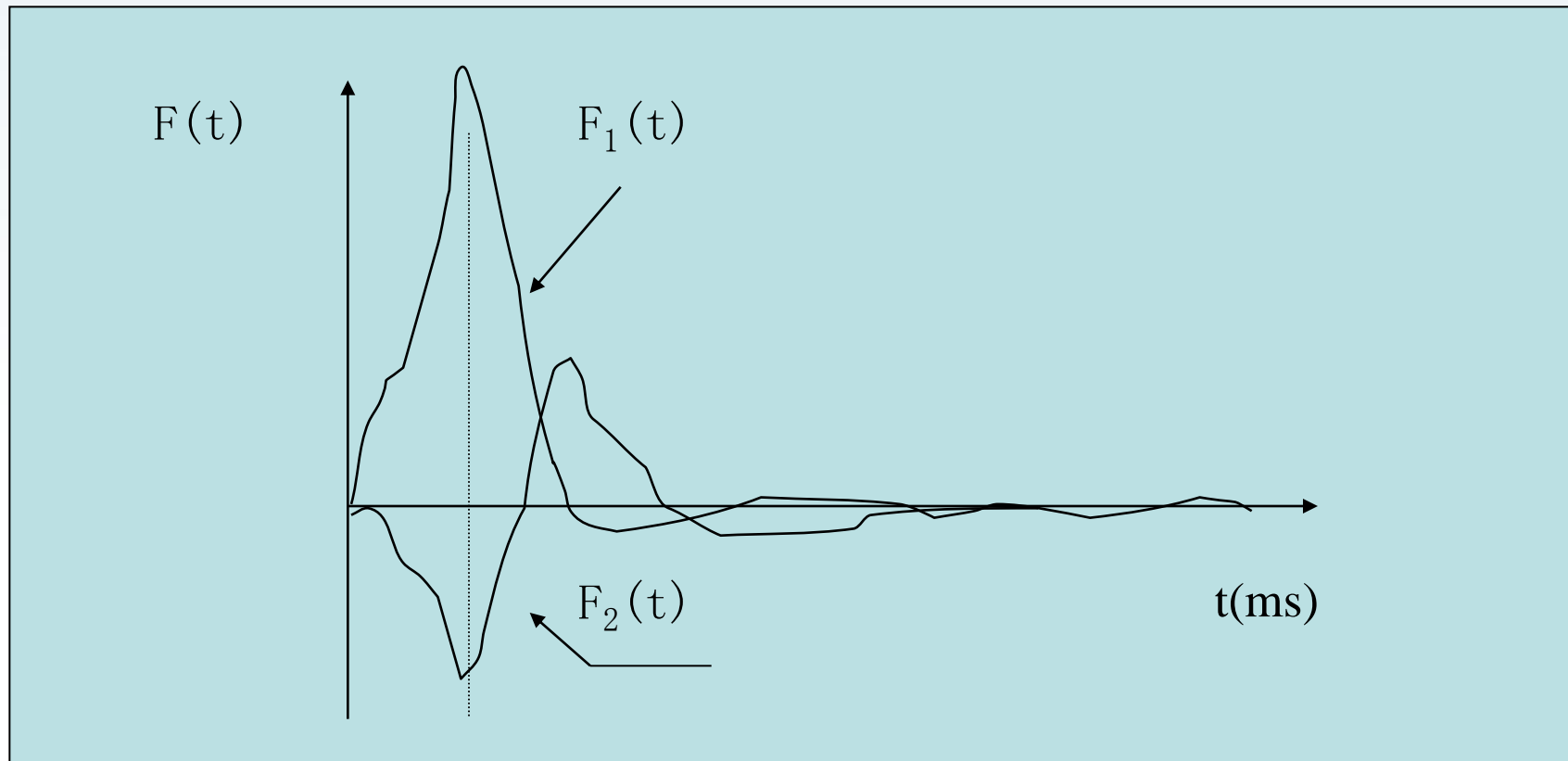
桩身浅部有严重缺陷或断桩

2、异常波形分析



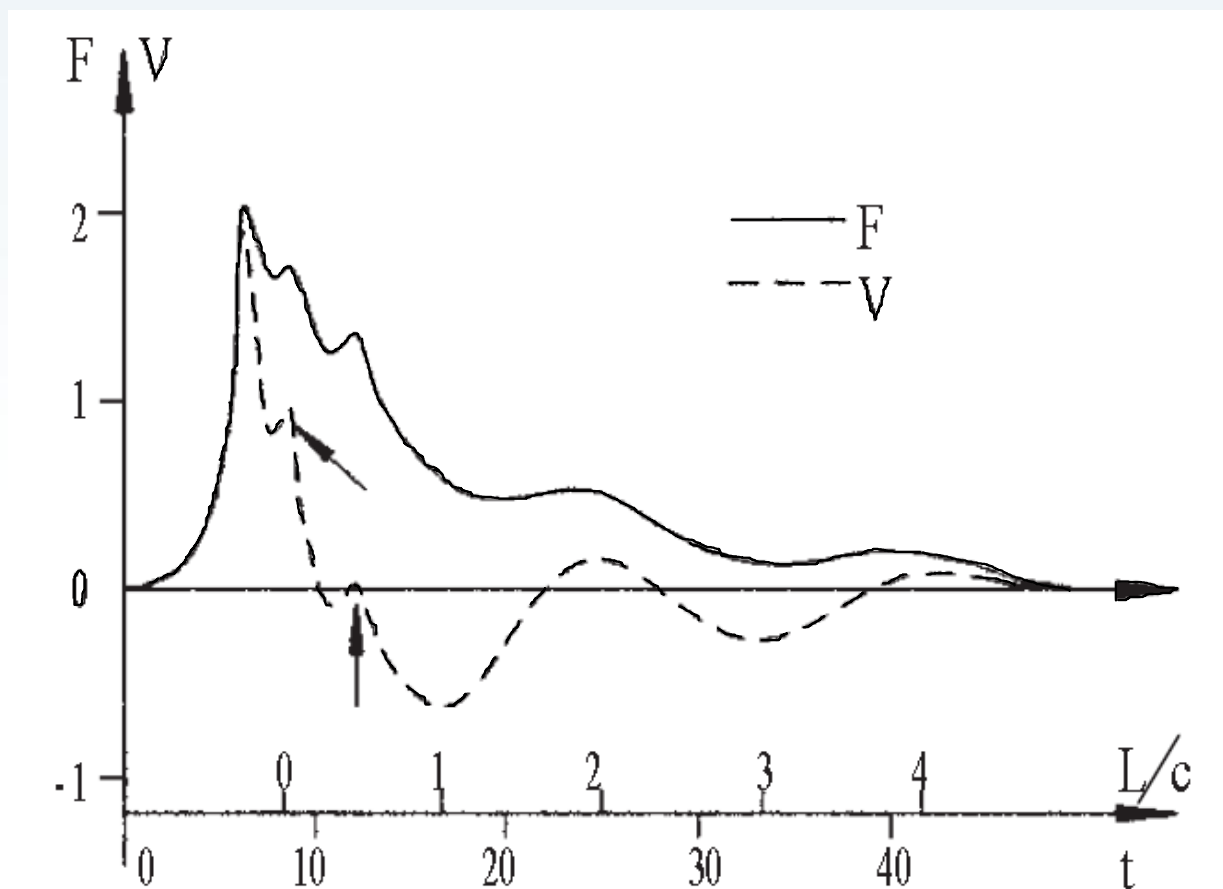
传感器安装处砼强度低

2、异常波形分析



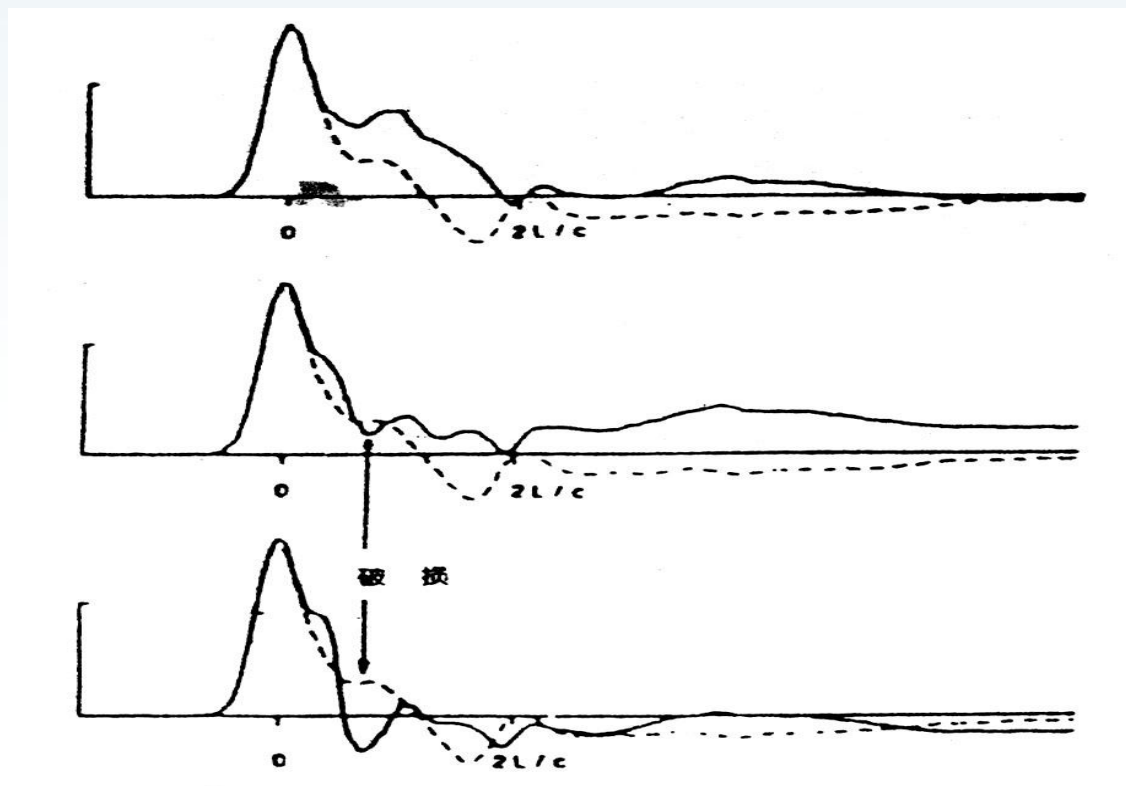
锤击严重偏心

2、异常波形分析



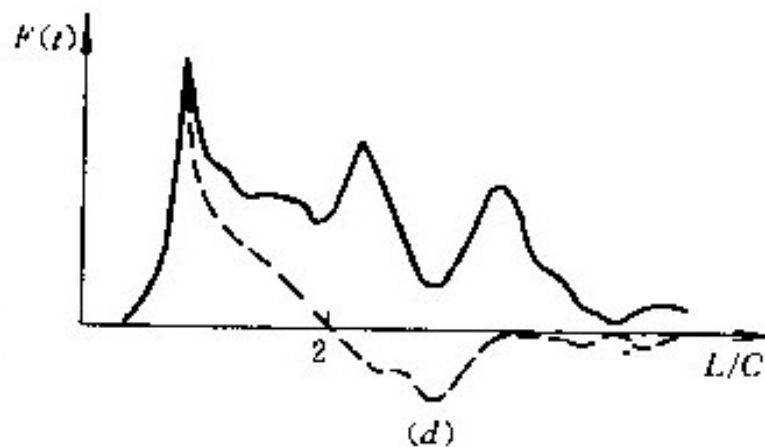
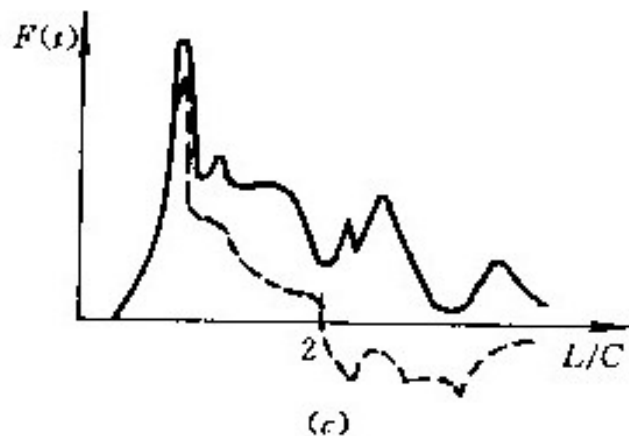
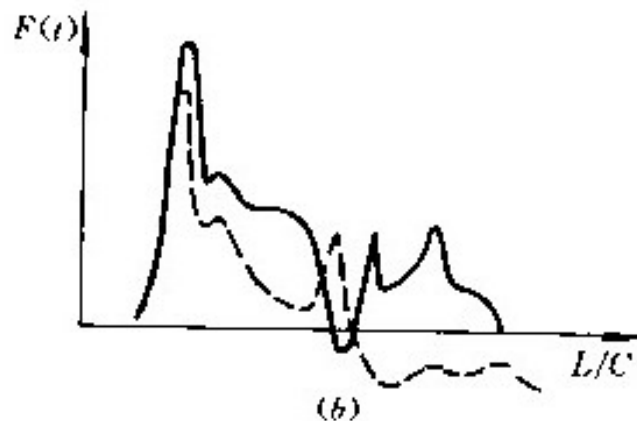
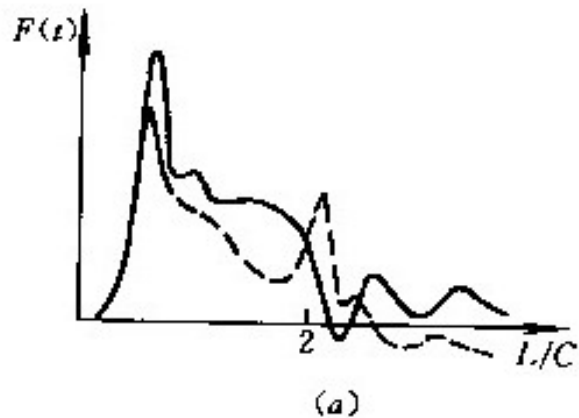
桩接头不良的波形

2、异常波形分析



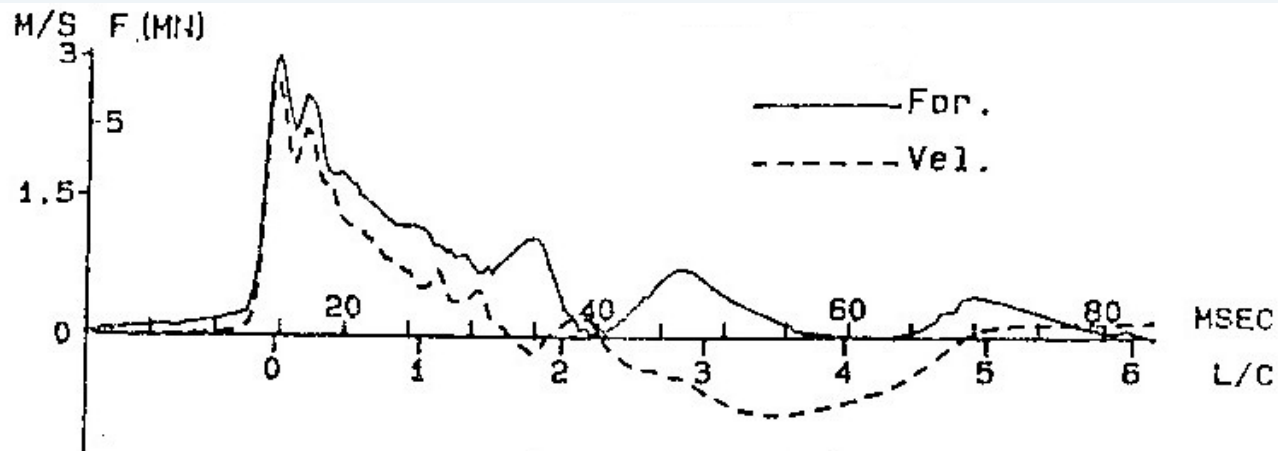
在连续锤击下混凝土桩身出现破损的时的曲线变化

2、异常波形分析

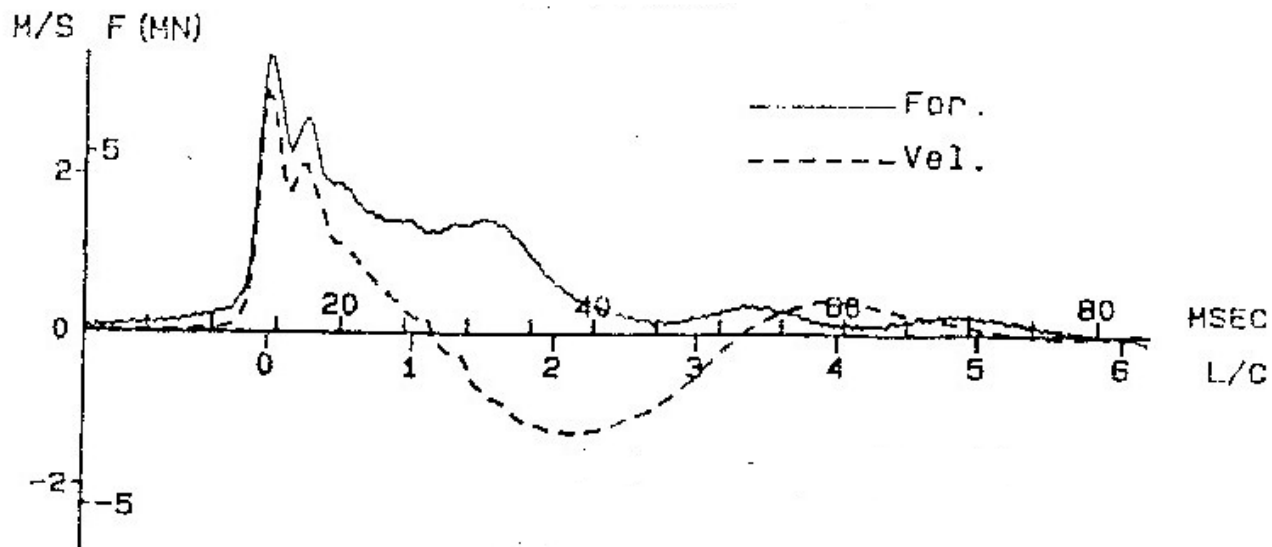


打桩过程中的实测波形变化

3、土阻力的影响

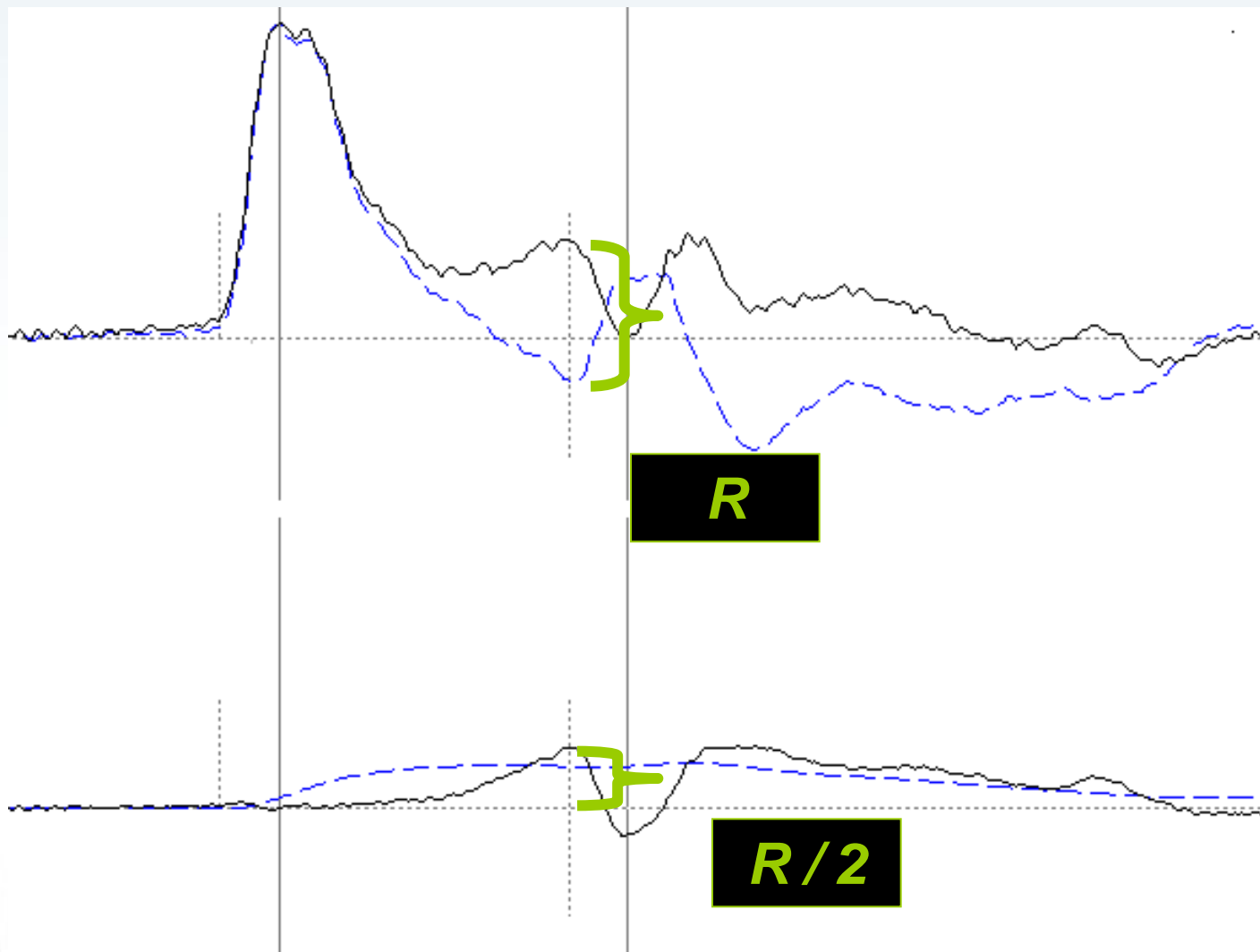


初打

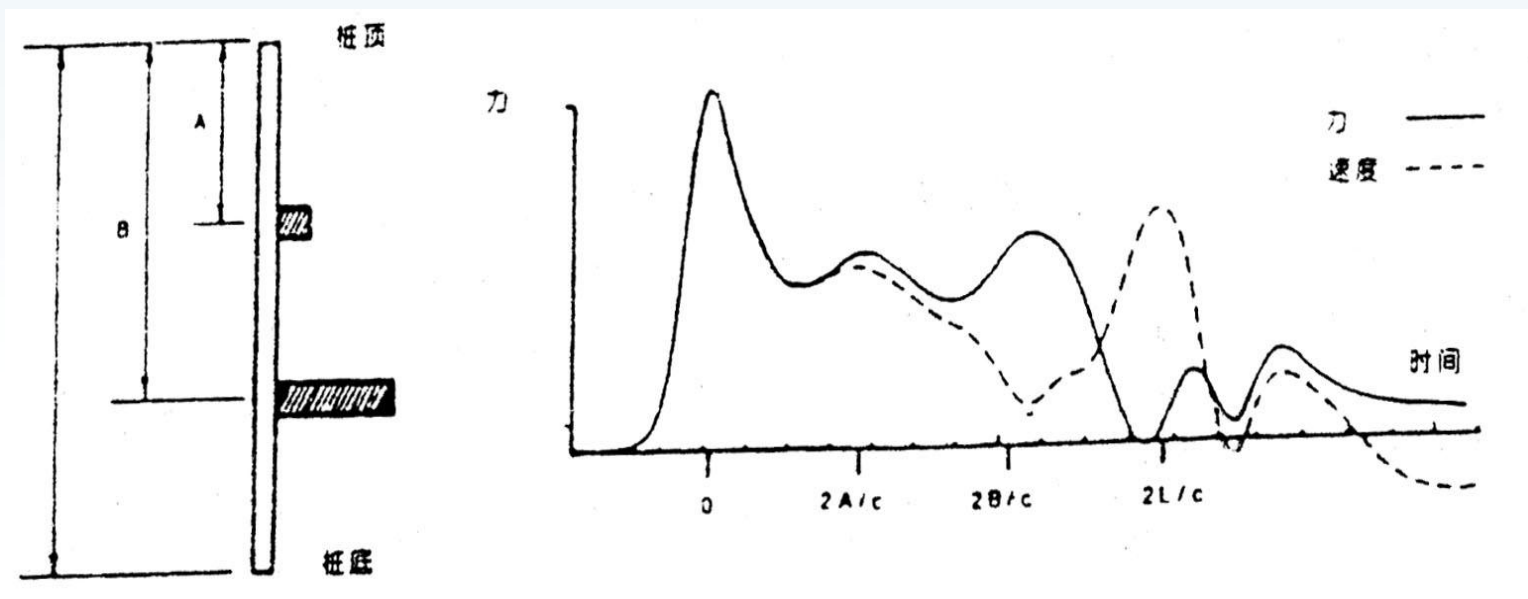


复打

3、土阻力的影响

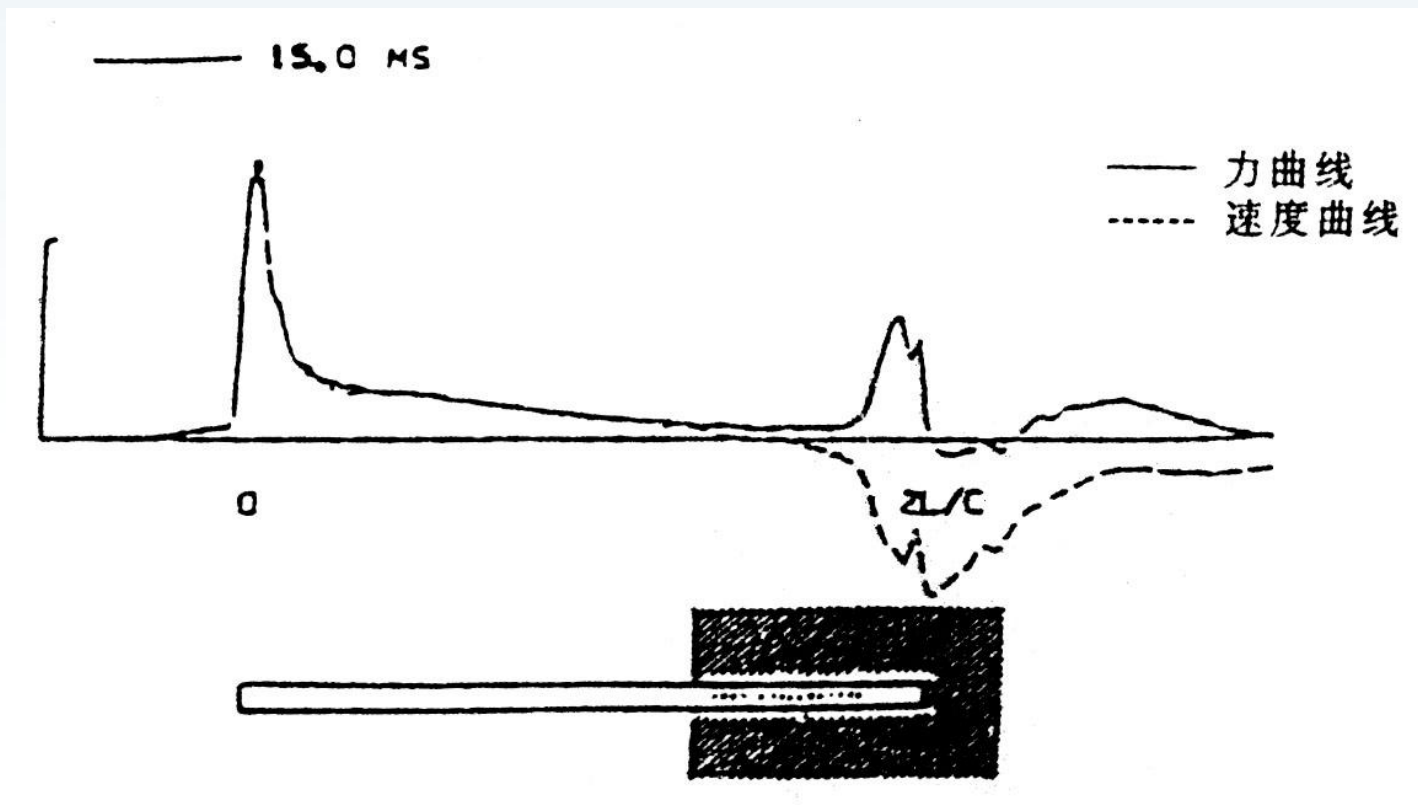


3、土阻力的影响



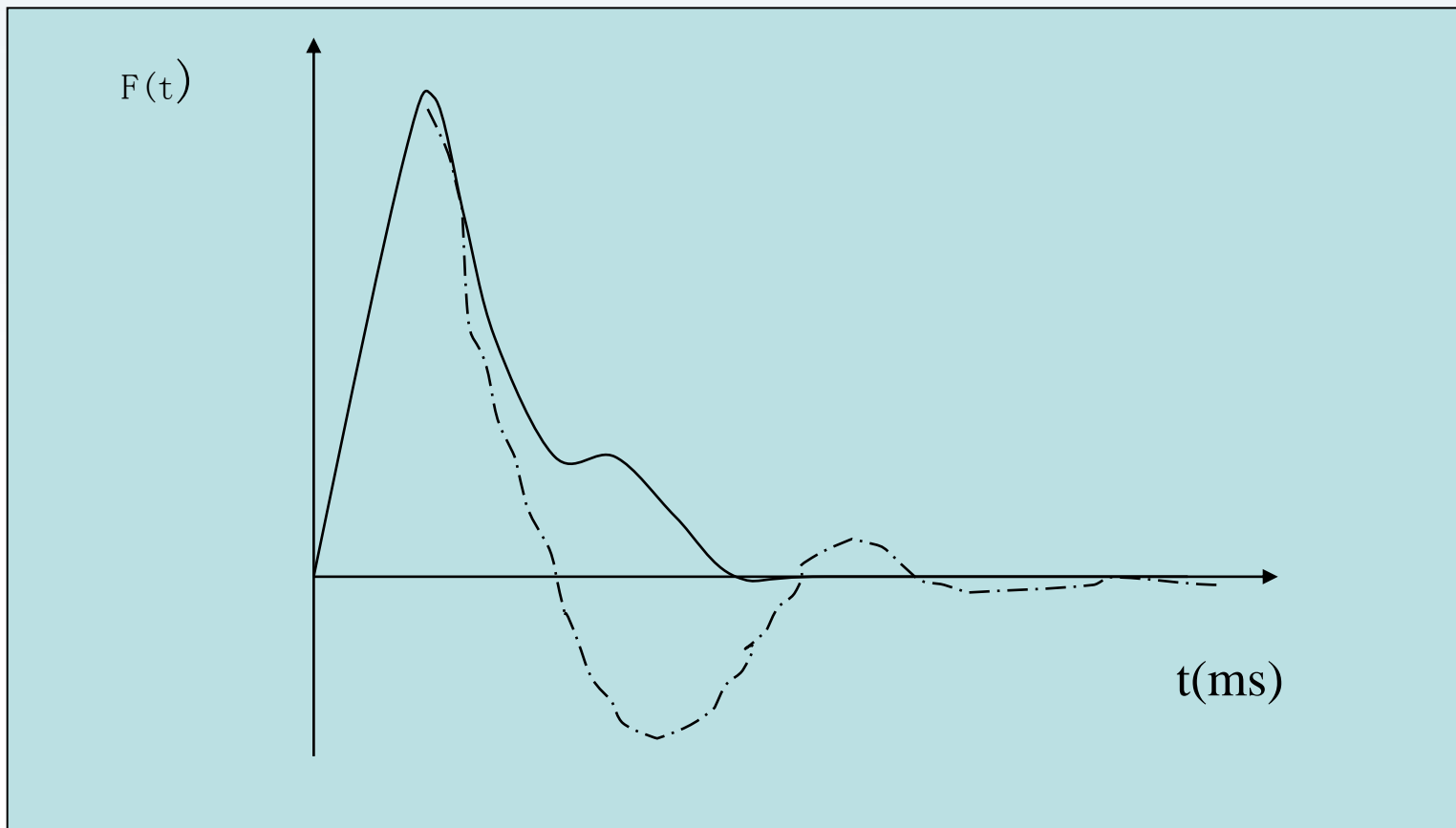
土阻力对实测曲线的影响

3、土阻力的影响



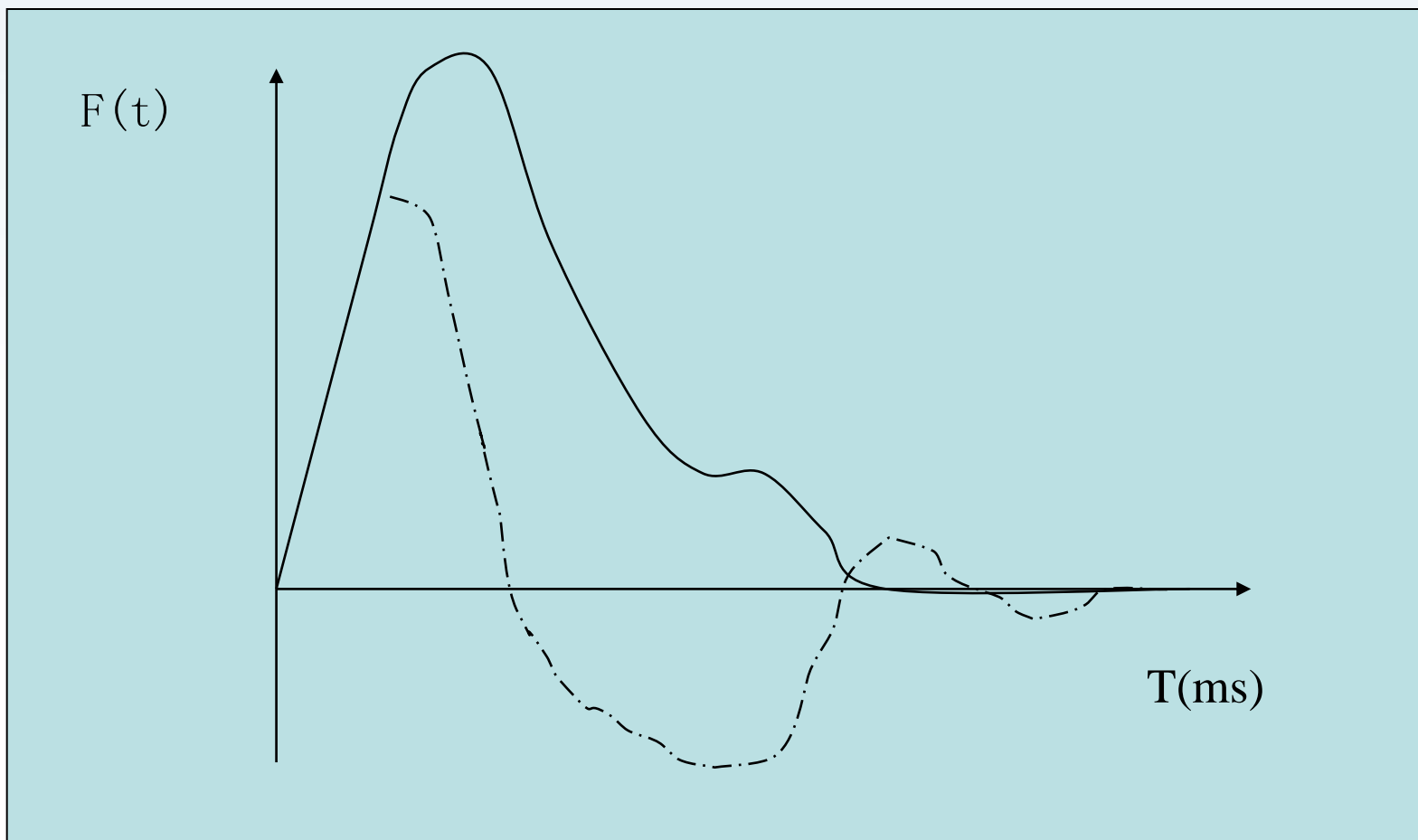
近海工程中上部无侧阻力桩的典型实测曲线

3、土阻力的影响



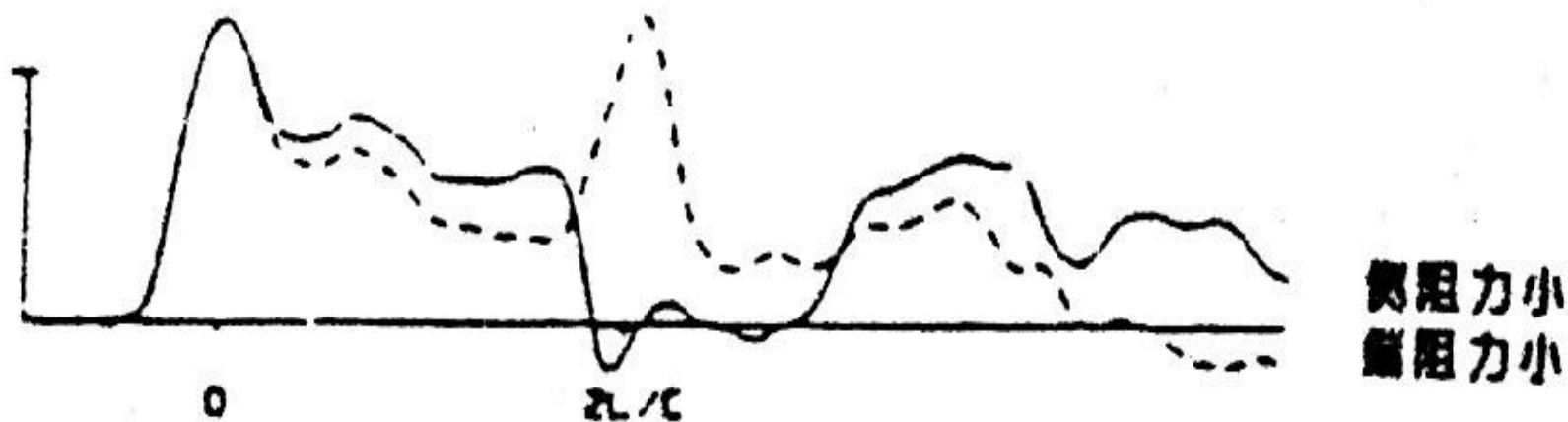
浅部阻力较小的桩

3、土阻力的影响



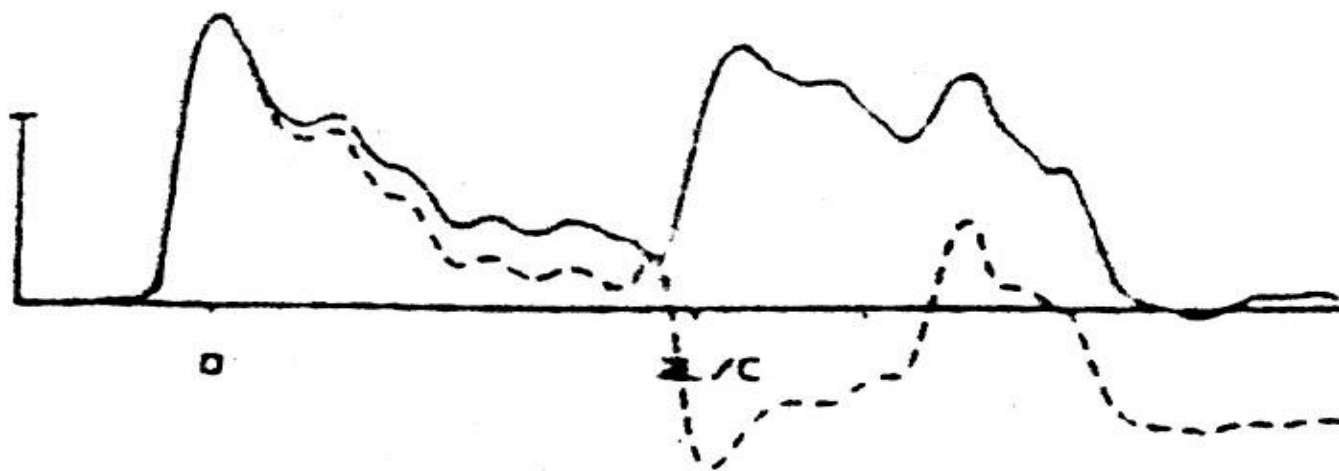
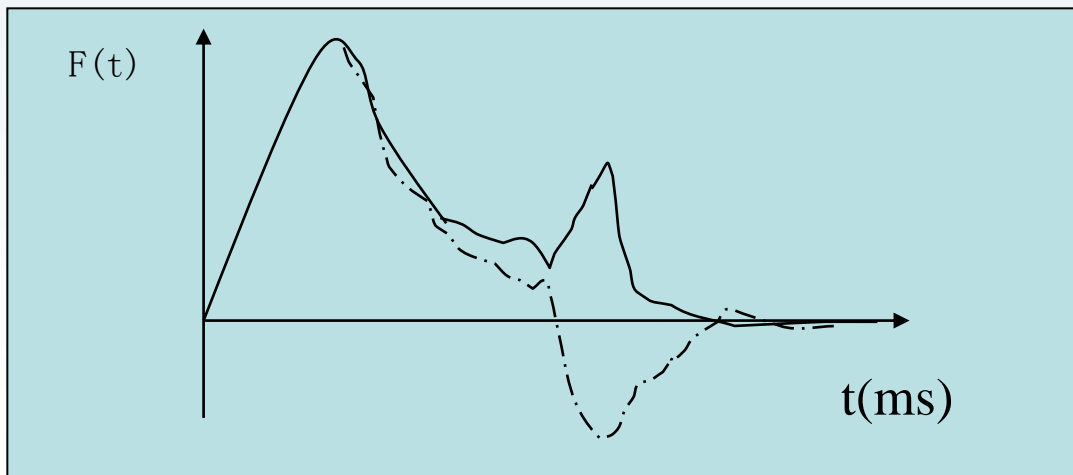
浅部阻力较大的桩

3、土阻力的影响



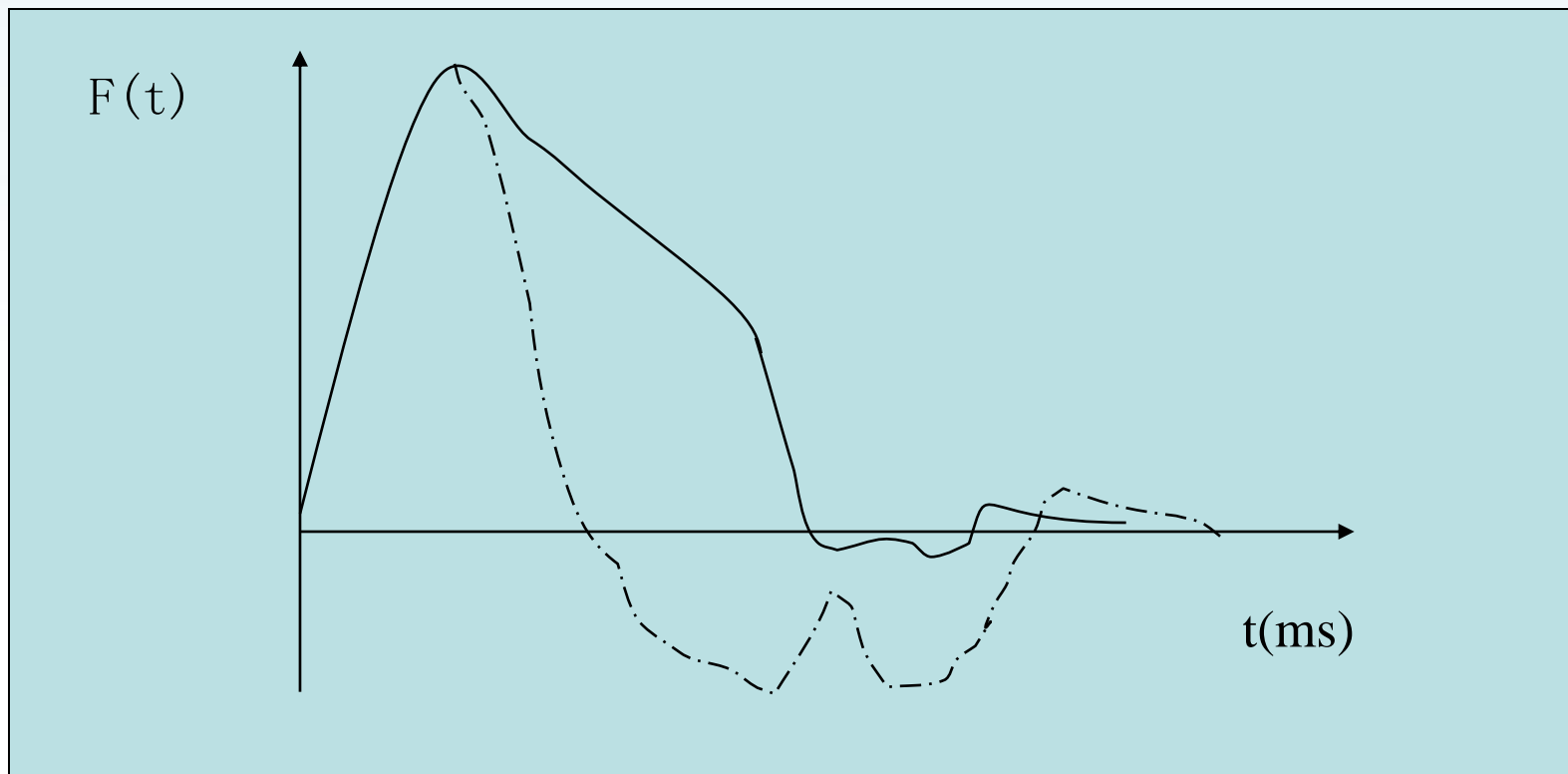
侧阻力和端阻力均较小的波形

3、土阻力的影响



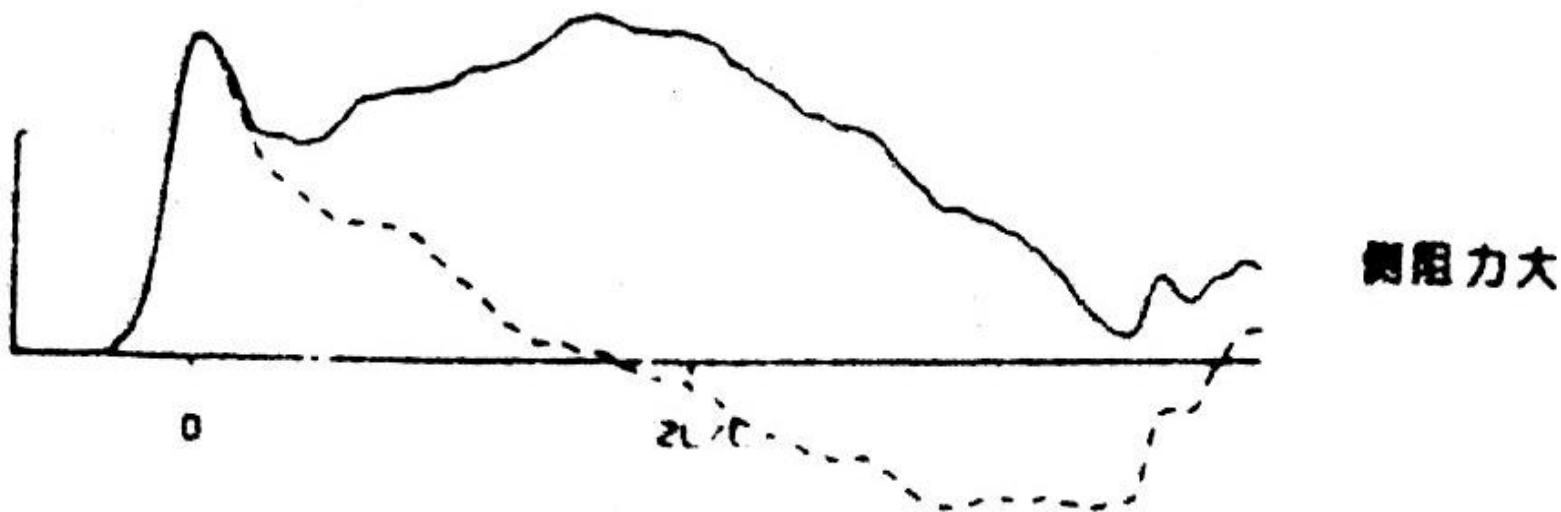
侧阻力小
端阻力大

3、土阻力的影响



无缺陷的端阻力小侧阻力大的桩

3、土阻力的影响

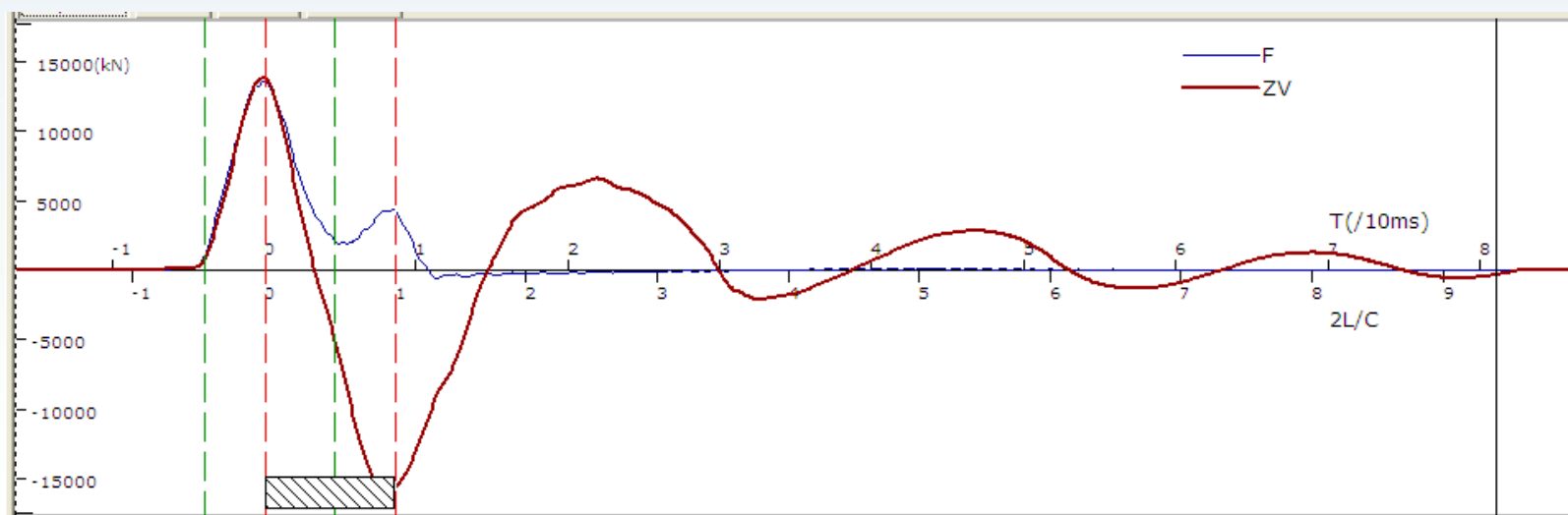


侧阻力较大的桩

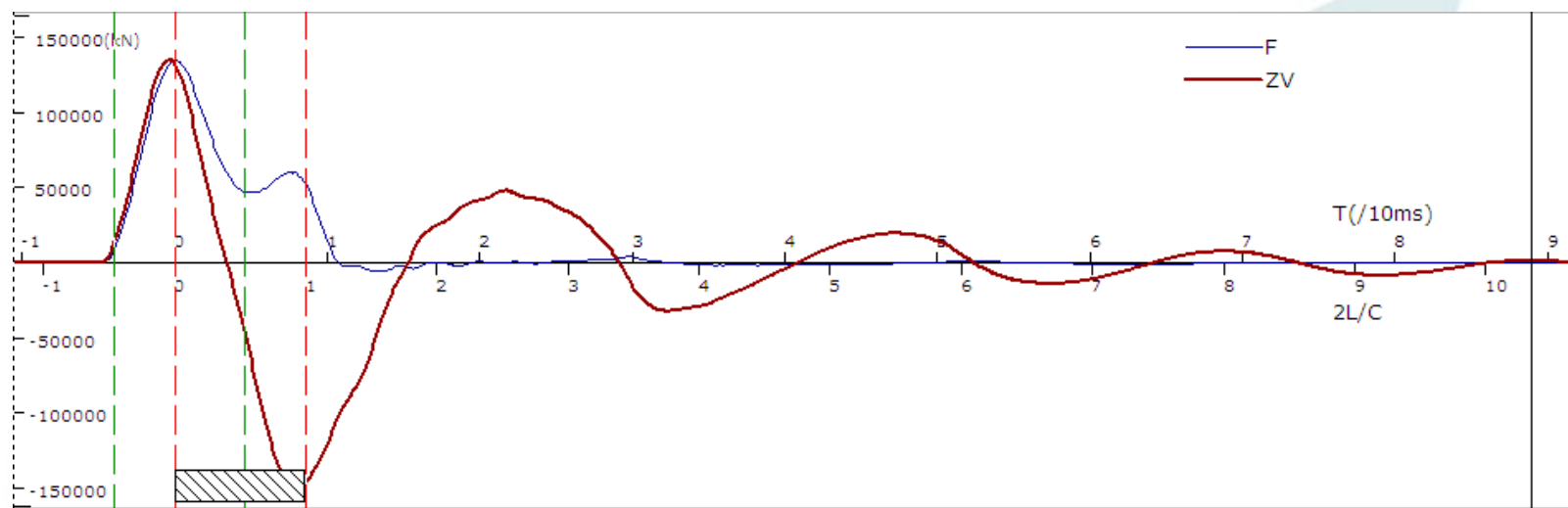
5.3 工程实测信号



5.3 工程实测信号

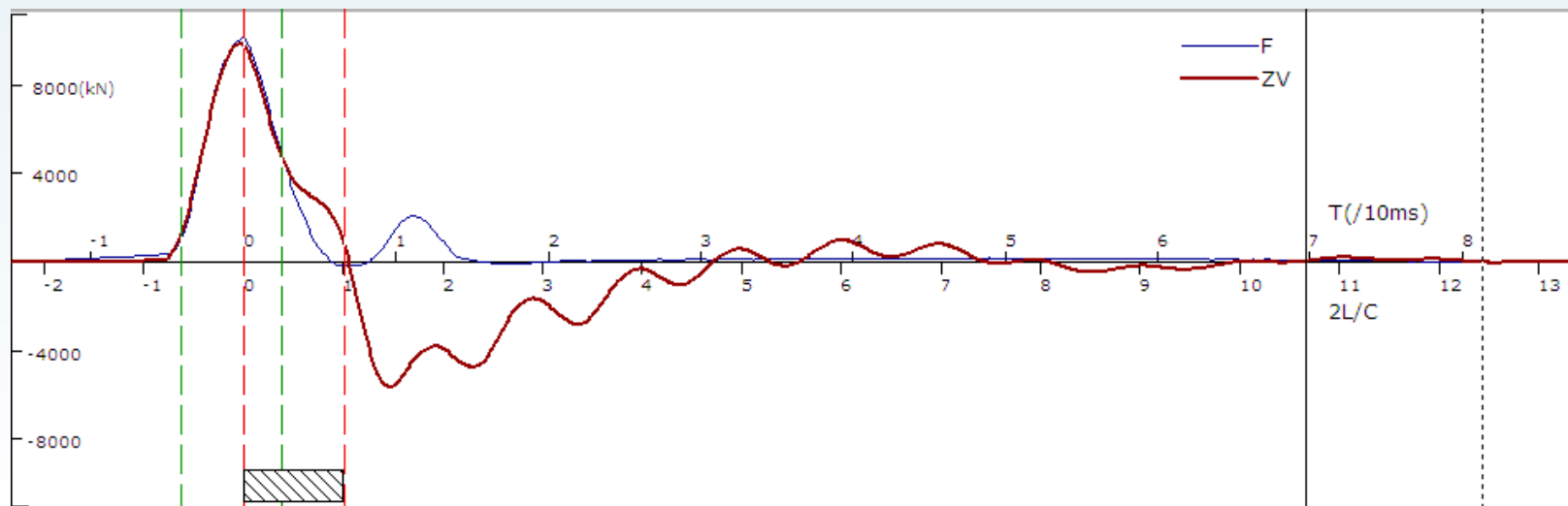


4a

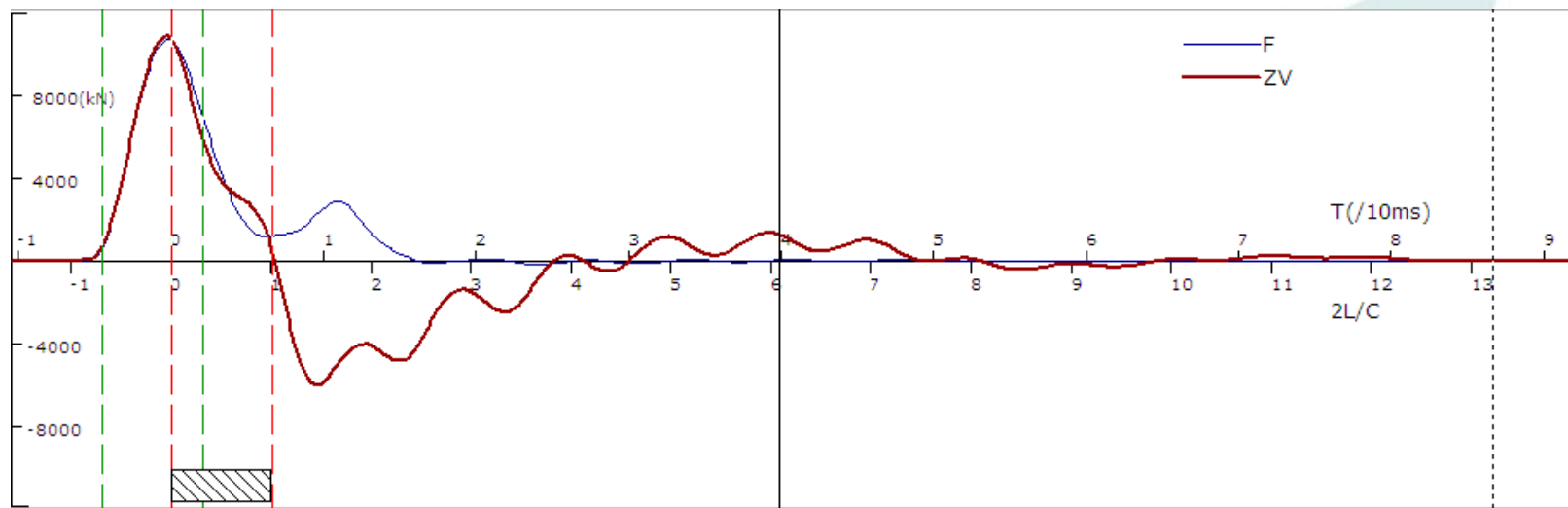


传统

5.3 工程实测信号



4a



传统

- (1) 避免了桩头损伤和安装部位混凝土差导致的测力失败以及应变式传感器的经常损坏。
- (2) 避免了因混凝土非线性造成的力信号失真（混凝土受压时，理论上讲是对实测力值放大）。
- (3) 直接测定锤击力，即使混凝土的波速、弹性模量改变，也无需修正；当混凝土应力-应变关系的非线性严重时，不存在通过应变环测试换算冲击力造成的力值放大。
- (4) 测量响应的加速度计只能安装在距桩顶较近的桩侧表面，尤其不能安装在桩头变阻抗截面以下的桩身上。

- (5) 桩顶只能放置薄层桩垫，不能放置尺寸和质量较大的桩帽（替打）。
- (6) 需采用重锤或软锤垫以减少锤上的高频分量，但一般不宜突破锤高2m的限值，则最大使用的锤重可能受到限制。
- (7) 当以信号前沿为基准进行基线修正时，锤体加速度测量存在-1g（g为重力加速度）的恒定误差，锤体冲击加速度小时相对误差增大。
- (8) 重锤撞击桩顶瞬时难免与导架产生碰撞或摩擦，导致锤体上产生高频纵、横干扰波，锤的纵横尺寸越小，干扰波频率就越高，也就越容易被滤除。

6

高应变法的若干问题

- 6.1 高应变的适用范围
- 6.2 存在的问题及误差来源
- 6.3 目前高应变测试现状

1、适用条件

采用凯司法判定桩承载力

- 1 只限于中、小直径桩。
- 2 桩身材质、截面应基本均匀。
- 3 阻尼系数 J_c 宜根据同条件下静载试验结果校核，或应在已取得相近条件下可靠对比资料后，采用实测曲线拟合法确定 J_c 值。
- 4 在同一场地、地质条件相近和桩型及其截面积相同情况下， J_c 值的极差不宜大于平均值的30%。

2、优点

- 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。
- 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、Case法的局限性

- 假设条件苛刻且桩土模型理想化，与工程桩 实际差别较大，计算结果的可靠性降低
- **Case**法阻尼系数 J_c 为地区性经验系数，物理意义不明确，取值的人为因素较多，需要通过动、静对比试验来确定。
- 桩身阻抗有较大变化时，**CASE**法无法考虑，严重影响计算结果。
- **Case**法不能将桩侧摩阻力与桩端承力分开，且不能得到桩侧摩阻力分布。

4、验证

以下几种情况应采用静载法进一步验证：

- (1) 桩身存在缺陷，无法判定桩的竖向承载力；
- (2) 桩身缺陷对水平承载力有影响；
- (3) 触变效应的影响，预制桩在多次锤击下承载力下降。
- (4) 单击贯入度大，桩底同向反射强烈且反射峰较宽，侧阻力波、端阻力波反射弱，即波形表现出竖向承载性状明显与勘察报告中的地质条件不符合；
- (5) 嵌岩桩桩底同向反射强烈，且在时间 $2L/c$ 后无明显端阻力波反射；也可采用钻芯法核验。

1、Case法存在的不足

CASE法引入的基本假设在简化运算的同时带来一些不足:

- (1) 桩身是等阻抗的，不能考虑桩身阻抗有较大变化的情况。对非均匀桩由于应力波传递过程中产生的畸变，忽略它的影响，会使结果的可靠性下降;
- (2) 只考虑桩底的动阻尼，忽略桩侧土的动阻尼，对于桩侧摩阻力较大的桩，桩侧土阻尼较大，桩侧土阻尼不能忽略;
- (3) 摩阻力保持不变，对于长摩擦桩，在 $2L/C$ 时刻之前，桩身上部土单元可能已开始出现卸载，不考虑卸载会低估桩的承载力;

1、Case法存在的不足

(4) J_c 对结果影响太大，CASE法的关键参数 J_c 是一个地区性经验系数，这个取值的人为因素较多，且地质报告不准确时会对计算结果有较大的影响，需通过动静对比试验确定；

(5) 理想刚塑形体模型与实际情况相差较大，忽略了土的加载阶段

2、误差分析

- 现场采集数据的质量

 - 冲击设备和测试系统的工作状态

 - 冲击设备有足够能量

 - 测试人员的素质

- 综合的多学科知识和丰富的经验

- 高应变方法本身的误差

 - 桩土力学模型与实际的差异

 - 承载力由桩身材料控制

 - 承载力发挥与实际的桩土相对位移

3、高应变不能解决的问题

- 桩身结构破坏的承载力
- 时间效应对承载的影响
- 桩的负摩阻力结果
- 土的蠕变影响
- 砂土的液化影响
- 桩基的长期沉降
- 嵌岩桩的承载力

(1) 锤的问题。

小锤打大桩（不小于1.0%~1.5%）

组合片锤（不平，容易变形）

强夯锤（严重偏心）



(2) 不符合CASE法的基本假定

适合CASE法分析的桩，首先要截面相等、材料相同，因为当桩身材料阻抗有突变时，锤击产生的下行波和上行波每次经过截面变化处都要产生反射和透射，而CASE公式中未包含这些反射和透射信息，因此桩身缺陷越严重，CASE法计算误差也就越大，原则上不适合使用CASE法。

特长桩，扩底，嵌岩桩基本都不实用。

CASE法只适用于中、小直径桩，且桩长不宜过长。

(3) 使用CASE系数不规范

CASE阻尼系数是无量纲阻尼系数，与土的类别有关，但又不限于土性。

(4) 测试仪器与软件不规范

有些软件可以随便将力与速度对齐，修改曲线

谢谢！

杨永波

电 话：13207183168

E-mail: 22684240@qq.com

yangyb@whrsm.com

网 址：www.whrsm.com