

特征线理论与应用实例 Theory of Characteristics & Applications

FEIPWAPC高应变拟合分析 High Strain Dynamic Signal Matching

ITSMC低应变拟合分析 Low Strain Dynamic Signal Matching

桩的特征线波动分析程序

Pile Wave Analysis Program By the Method of Characteristics

用 户 手 册

(User's Manual)

编 写： 陈 凡

中国建筑科学研究院地基基础研究所
Institute of Foundation Engineering
China Academy of Building Research

一 九 九 二 年 三 月

桩的特征线波动分析程序

第一部分——特征线理论

中国建筑科学研究院地基基础研究所

1992·3

桩的特征线波动分析程序

陈 凡

中国建筑科学研究院地基所

一、引言

采用静荷载试验确定单桩承载力是工程上沿用多年的一种常规方法。它的主要缺点是费时、费钱、费力。相比之下，动力试桩具有省时、省钱、省力等突出优点，关键是如何提高该法的可靠性。

桩的承载力一般由侧壁摩阻力和端阻力这两部分所提供。在土的极限强度一定时，这两部分阻力发挥的程度均依赖于位移。正是出于这种物理概念，使得以波动理论为基础的大应变动荷载试桩方法日趋流行并被世界上许多国家所接受。经过把土阻力模型简化为刚塑性及土阻尼主要集中于桩尖的假定，利用波动理论可导出打桩分析系统的承载力简化计算方法——CASE法。

尽管CASE法确定单桩极限承载力是一种较为有效的方法。但在某些情况下，其可靠性尚待深入研究。例如，缺乏地区性经验、各地区地质条件不同；灌注桩施工质量和对桩尖土力学性质的影响（灌注桩及扩底桩的截面不均匀将无法得到准确的桩身平均阻抗值，所以只好将这一不确定因素归结为桩尖阻尼系数的变化）；桩是否产生足够下沉以充分调动土的极限阻力（尤其是长桩和大直径灌注桩）。这些因素都在主观上或客观上直接影响着CASE法计算极限承载力所需唯一参数——桩尖阻尼系数的取值，这势必影响预示承载力的精度。因此，需要考虑更接近实际的桩身和土阻力模型，发展参数选取不依赖于人主观意志的实用计算方法。

二、Maxwell体细长杆中纵波传播的特征线解

1、特征关系的推导

视桩为Maxwell材料构成的均匀粘弹性杆，其长度为 L ，截面积为 A ，弹性模量为 E ，质量密度为 ρ ，粘性系数为 η ，取杆轴为 x 轴。若杆变形时平截面假设成立，则杆中各运动参量只是 x 和时间 t 的函数，位移 u ，应变 $\epsilon = \partial u / \partial x$ ，质点速

度 $v = \partial u / \partial t$ 和力 F 均为 x 方向的量。为研究杆的纵向运动，利用下列基本方程

$$\text{连续方程} \quad \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial \epsilon}{\partial t} \quad (1)$$

$$\text{平衡方程} \quad \rho A \frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial F}{\partial x} \quad (2)$$

$$\text{物理方程} \quad \frac{\partial \epsilon}{\partial t} = \frac{1}{EA} \frac{\partial F}{\partial t} + \frac{F}{\eta A} \quad (3)$$

以位移 u 作为未知函数时，等价地有

$$\rho \frac{\partial^3 u}{\partial t^3} - E \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial t} + \frac{\rho E}{\eta} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0 \quad (4)$$

若略去桩身粘性不计，物理方程(3)化为虎克定律

$$\frac{F}{A} = E \frac{\partial u}{\partial x} \quad (5)$$

此时若引入波速 $C = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ ，可得到熟知的一维波动方程

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - C^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0 \quad (6)$$

不失一般性，下面着重讨论方程(4)。根据偏微分方程分类知，(4)式属双曲型偏微分方程。通过自变量平面 (x, t) 任一点有三条相异的实特征线。

关于特征线的概念，可用方向导数来定义：即如果能把三阶偏微分方程或等价的一阶偏微分方程组的线性组合化为只含沿自变量平面 (x, t) 上某曲线 $W(x, t)$

的方向导数时，此曲线为特征线。由附录A，可导出三条特征线方程

$$dx = \sqrt{\frac{E}{\rho}} dt = C dt \quad (7)$$

$$dx = -\sqrt{\frac{E}{\rho}} dt = -C dt \quad (8)$$

$$dx = 0 \quad (9)$$

再利用附录A中的(A.10)式，便得到分别沿特征线方程(7)、(8)和(9)上成立的常微分方程

$$dv = \frac{dF}{Z} + \frac{C}{\eta A} \cdot F dt \quad (10)$$

$$dv = -\frac{dF}{Z} - \frac{C}{\eta A} F dt \quad (11)$$

$$d\varepsilon = \frac{dF}{EA} - \frac{F}{\eta A} dt \quad (12)$$

式中 $Z = \rho CA$ 称为阻抗

由于(10)、(11)和(12)式中的 F 与 v 及 F 与 ε 必须满足特征线(7)、(8)和(9)的相互制约关系，不能完全任意，所以称(10)、(11)和(12)式为特征线相容关系。这样求解三阶偏微分方程(4)(或等价的一阶偏微分方程组(1)、(2)和(3)式)的问题就完全等价地化成了求解特征关系(7)、(8)、(9)、(10)、(11)和(12)式的常微分方程组问题。不难证明：若桩身粘性不计，有如下特征关系

$$dx = \pm C dt \quad (13)$$

$$dv = \pm \frac{dF}{Z} \quad (14)$$

2、初值与边值问题

设粘弹性杆原来处于静止状态，在杆的端部 $x=0$ 处受到撞击，杆端力随时间变化 $F_0(\tau)$ 是已知的，于是问题归结为在初始条件

$$v(x, 0) = F(x, 0) = \varepsilon(x, 0) = 0 \quad 0 < x \leq L \quad (15)$$

及边界条件

$$F(0, t) = F_0(\tau) \quad t > 0 \quad (16)$$

下求解(7)–(12)式。

由图1可见，从 Aox 区域中任一点 $B(x, t)$ 出发的三条特征线分别交 ox 轴于 B_1 、 B_2 和 B_3 。由(10)–(12)有

沿 BB_1 : $F(x, t) - Z \cdot v(x, t) = F(x_{11}, t_{11}) - Z \cdot v(x_{11}, t_{11})$

$$- \frac{Z}{\eta A} (x - x_{11}) \cdot F(x_{11}, t_{11})$$

沿 BB_2 : $F(x, t) - EA \varepsilon(x, t) = F(x_{22}, t_{22}) - EA \varepsilon(x_{22}, t_{22})$

$$+ \frac{E}{\eta} (t - t_{22}) \cdot F(x_{22}, t_{22})$$

沿 BB_3 : $F(x, t) + Z \cdot v(x, t) = F(x_{33}, t_{33}) + Z \cdot v(x_{33}, t_{33})$

$$- \frac{Z}{\eta A} (x - x_{33}) \cdot F(x_{33}, t_{33})$$

由初始条件(15)可解出

$$v(x, t) = F(x, t) = \varepsilon(x, t) = 0 \quad (17)$$

类似地有

$$v(x_n, t_n) = F(x_n, t_n) = \varepsilon(x_n, t_n) = 0$$

$$v(x_p, t_p) = F(x_p, t_p) = \varepsilon(x_p, t_p) = 0$$

显然(17)对整个 Aox 区域成立，则 OA 线上的值是确定的。

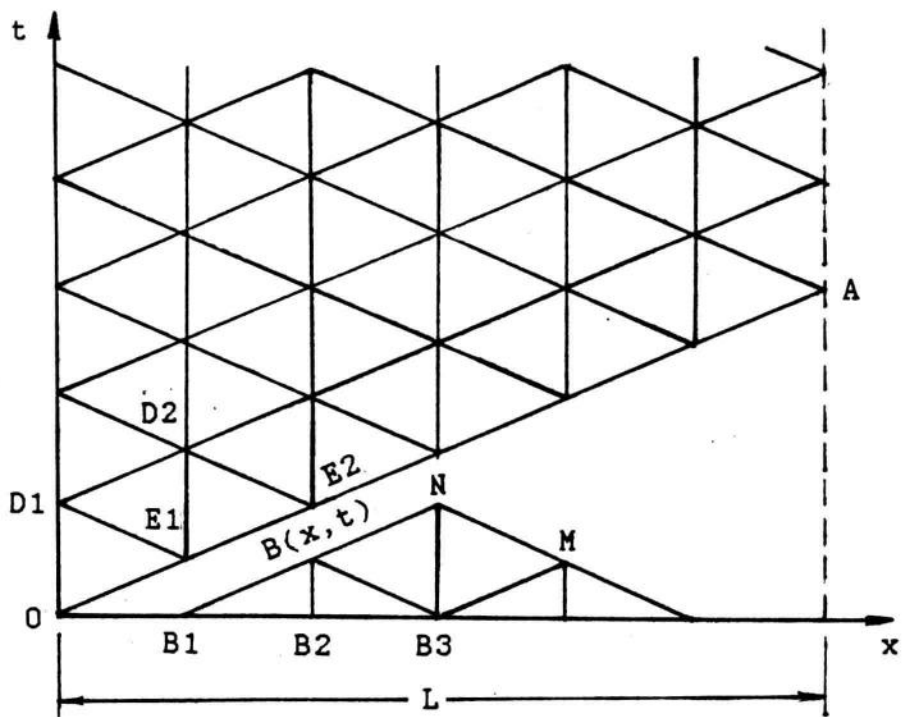


图1 x-t 平面图

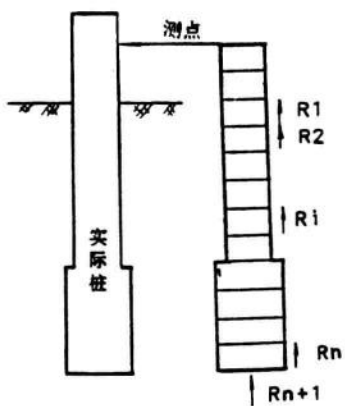


图2 桩模型

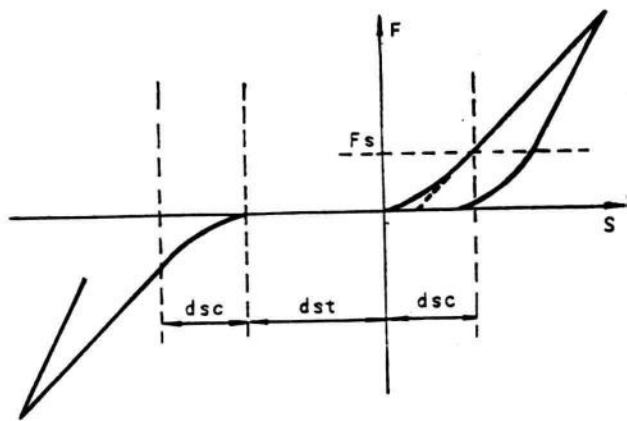


图3 拉压裂隙模型

对于Aot区域，D1点的边界值 $F(o, t_{o1})$ 是已知的，该点的 v 和 ϵ 可由下面两式求出

$$v(o, t_{o1}) = v(x_{e1}, t_{e1}) - \frac{1}{Z} [F(o, t_{o1}) - F(x_{e1}, t_{e1})]$$

$$+ \frac{1}{\eta A} (x_{o1} - x_{e1}) \cdot F(x_{e1}, t_{e1})$$

$$\epsilon(o, t_{o1}) = \epsilon(o, o) + \frac{1}{EA} [F(o, t_{o1}) - F(o, o)]$$

$$- \frac{1}{\eta A} (t_{o1} - o) \cdot F(o, o)$$

而内点D2的 v ， F 和 ϵ 可由下列三式求出

$$Z \cdot v(x_{o2}, t_{o2}) - F(x_{o2}, t_{o2}) = Z \cdot v(x_{o1}, t_{o1}) - F(x_{o1}, t_{o1})$$

$$- \frac{Z}{\eta A} (x_{o2} - x_{o1}) \cdot F(x_{o1}, t_{o1})$$

$$Z \cdot v(x_{e2}, t_{e2}) + F(x_{e2}, t_{e2}) = Z \cdot v(x_{e1}, t_{e1}) + F(x_{e1}, t_{e1})$$

$$- \frac{Z}{\eta A} (x_{e2} - x_{e1}) \cdot F(x_{e1}, t_{e1})$$

$$\epsilon(x_{o2}, t_{o2}) - \frac{F(x_{o2}, t_{o2})}{EA} = \epsilon(x_{e1}, t_{e1}) - \frac{F(x_{e1}, t_{e1})}{EA}$$

$$- \frac{1}{\eta A} (t_{o2} - t_{e1}) \cdot F(x_{e1}, t_{e1})$$

这样，求桩受冲击荷载的单值解问题，最终归结为求解Aox区中的初值问题和解Aot区中初值与边值的混合问题。

由上述推导可见：求解三个阶偏微分方程(4)或等价的一阶偏分方程组(1)，(2)和(3)的问题可转换成求解特征关系式(7)~(12)的常微分方程组问题，使问题求解得到简化。此外，采用差分形式求解式(7)~(12)时由于不存在高阶差分，从而使计算精度比集中质量法高。

三、桩模型

FEIPWAPC(Foundation Engineering Institute Pile Wave Analysis Program by Characteristics)程序将桩分成 n 个等时单元，所谓“等时”是指应力波通过每个桩单元所需时间相等。每个单元的侧壁摩阻力 R_i 作用在相邻单元界面处，第 $n+1$ 个土阻力代表桩尖阻力。桩模型图示见图2。

为了考虑接桩或裂隙的影响，在相邻单元界面处增设了桩身裂隙模型。由图3可见：加载时，若相邻两单元间的相对位移 S 小于压缩裂隙宽度 d_{sc} ，裂隙处压力 F 与相对位移 S 呈抛物线变化；当 S 超过 d_{sc} 后(即 $F > F_s$)，裂隙闭合， F 与 S 呈线性变化。卸载时， F 与 S 线性变化，但卸载刚度增加 $(1/C_s^*)$ 倍($0 < C_s < 1$ ，称为恢复系数)；当 F 下降到小于 F_s 后， F 与 S 又按抛物线变化。 F 随位移减少降至零后，将一直保持到 S 的绝对值等于拉伸裂隙宽度 d_{st} ，此间将没有拉应力通过单元界面。当 S 的绝对值大于 d_{st} 后，变化趋势见图3左半边。

对于开口管桩或其它异型桩，土塞的形成使桩在贯入过程中产生较大的排土量，为了近似模拟这种特性，把土塞的土质量等量地折算成相邻桩单元阻抗值的增加。

在打桩过程中偶尔遇到这样的情况：在桩很容易打动时，有时会出现桩尖速度反射峰比初始第一峰宽而且平缓，估计是桩尖部分土体随桩一起运动造成的，可以把这部分土体附加在桩尖使桩延长(Pile Length Extension)；还有一种情形与上相反，即桩很难打入时，时间 $2L/C$ 处有清晰的速度反射尖峰(其表象如同桩尖缝隙存在)，但随后速度曲线陡降(力曲线陡升)，这种情况则很可能是桩尖打入坚硬岩层或遇孤石，同样，可以将部分岩体附加在桩尖使桩延长。考虑土(岩)

体随桩端一起运动这一事实尽管在实际应用上容易为人们接受，但还尚待进一步研究予以证实。

前面在推导特征关系时已经考虑了桩身阻尼，它是由Maxwell体(弹簧-粘壶串联)中的粘壶来模拟的，此处不再赘述。但应指出：如果桩身材料为弹簧-粘壶并联的Voigt体，将无法得到特征线解，利用附录A很容易证明。这意味着间断值

不可能沿特征线 $\frac{dx}{dt} = \pm C$ (间断线) 传播，因此，就力学-数学模型严密性而言，

这种模型应尽量避免。

四、土模型

1、土的静阻力和动阻力模型

若单元土阻力R只与其相邻桩单元的运动有关，则可用下式表示土阻力

$$R = R_s + R_d \quad (18)$$

R_s 和 R_d 分别为土的静阻力和动阻力。 R_s 与桩单元的位移有关，即

$$R_s = \begin{cases} \frac{R_u}{QKL} \cdot u & (u \leq QKL) \\ R_u + \alpha \cdot \frac{R_u}{QKL} \cdot (u - QKL) & (QKL < u \leq u_0) \\ \frac{R_s}{R_u} & (u > u_0) \\ \frac{R_u}{QKU} \cdot (u - u_{max}) & (u < u_{max}, R_s > UNL) \\ UNL & (u < u_{max}, R_s \leq UNL) \end{cases} \quad (19)$$

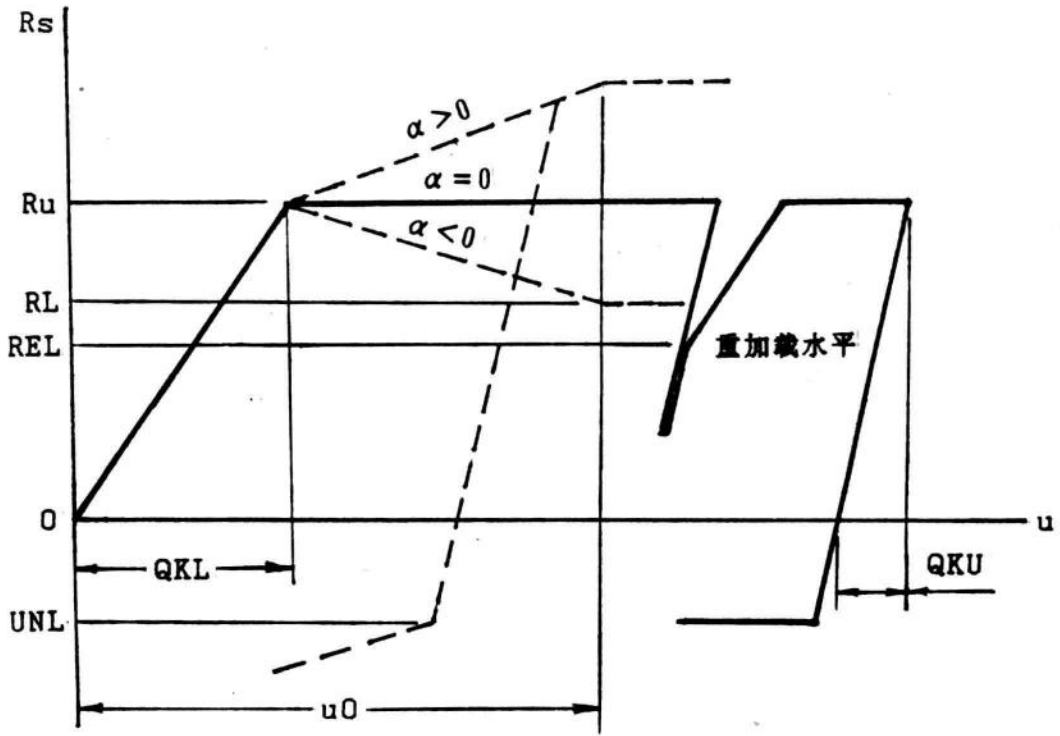


图4a 土的静阻力模型

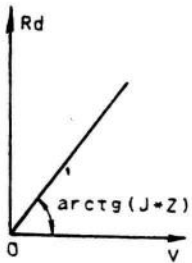


图4b 土的动阻力模型

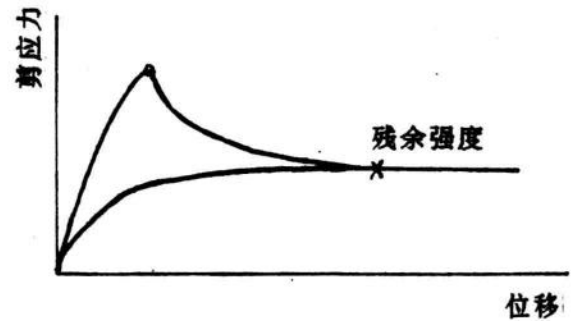


图5 剪应力—位移曲线

R_d 与桩单元的运动速度有关, 即

$$R_d = J \cdot Z \cdot v \quad (20)$$

(19)式中, R_u 为土的极限强度, R_L 为土的残余(最终)强度, Q_{KL} 和 Q_{KU} 分别为加载与卸载最大弹性变形值, α 为硬化($\alpha > 0$)或软化($\alpha < 0$)系数, UNL 为卸载弹性限; (20)式中, J 为无量纲阻尼系数与桩身阻抗和 R_u 分布有关(见第二部分程序手册)。土的静、动阻力模型分别见图4a和图4b。对于桩尖, 卸载时静阻力不能为负值, 当静阻力为零后桩尖仍继续回弹, 若使桩尖产生负的动阻力, 可选择桩尖附加粘壶(桩尖附加阻尼BTDP)。

与CAPWAPC程序不同, FEIPWAPC程序的土阻力模型考虑了土的加工软化或硬化性质(见图5)。对于密实砂、硬粘土、超固结土和灵敏粘土, 一般在较小的剪切变形条件下即可达到峰值强度, 在历经较大的变形后达到其残余强度; 而一般对于松砂或正常固结土, 其剪切变形曲线常表现为加工硬化, 虽历经较大变形, 却不会出现峰值。显然, 当桩的下沉量较大时, 或者桩较长, 桩身弹性压缩较大时(见图6), 如果桩侧与桩尖土体确实表现出软化或硬化特性, 那么计算中计及这种软化或硬化特性肯定会优于理想弹塑性模型。

2. 桩尖缝隙模型

灌注桩施工时常出现桩尖沉渣过厚的现象, 模拟这种情况通常采用的做法是在桩尖设置一定厚度的缝隙(GAP)。当桩尖下沉量小于GAP值时, 桩尖土的静、动阻力均为零。

不过若桩未曾受过上拔, 真正的桩尖缝隙就不会存在。为此, FEIPWAPC程序另外在桩尖增设了一种非线性缝隙模型, 以便考虑桩尖土体刚度(R_u/Q_{KL})的非线性。图7是该模型的示意图。当桩尖土下沉量小于GAP值时, 土阻力—位移曲线为抛物线; 超过GAP值后呈线性变化。一般地讲, 灌注桩的桩尖常选择在较好的持力层上, 并有一定的嵌固深度, 可以认为沉渣的压缩是在一维应变条件下进行的, 而土阻力与位移的抛物线变化规律恰好近似反映了这一特征。

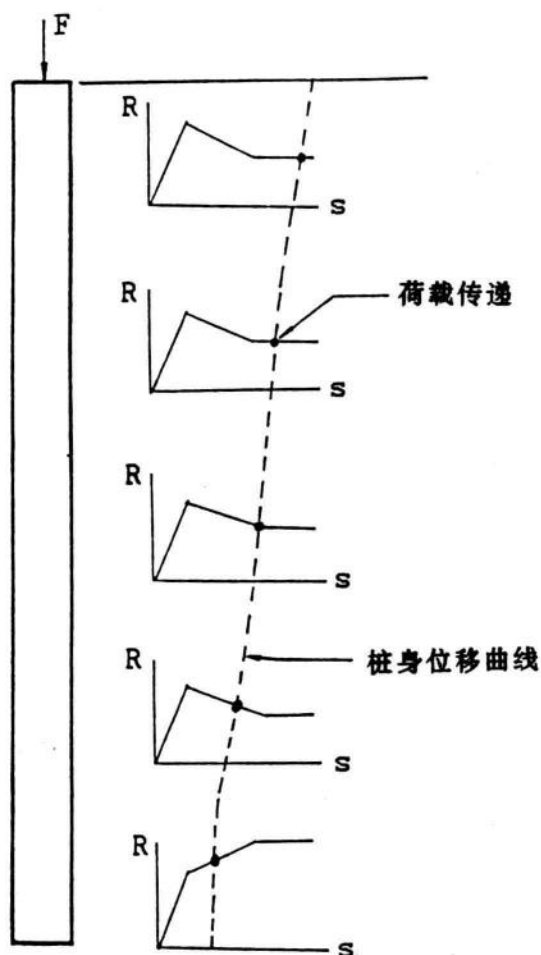


图6 荷载传递曲线

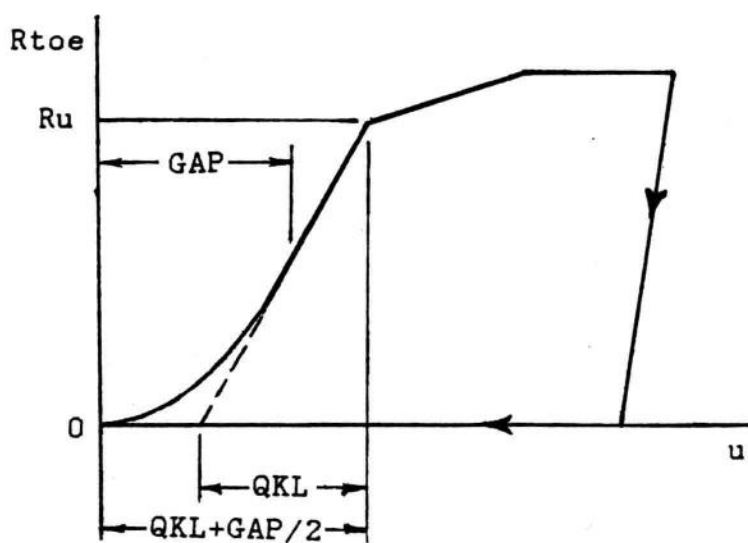


图7 非线性桩尖缝隙模型

3、Smith阻尼的选择

一旦CASE形式的无量纲阻尼系数给定，土的动阻力只与桩身运动速度有关（见20式）。在某些场合下，这种定义就不尽合理。例如当桩尖下沉量小于给定的GAP值时，土的静、动阻力本来均应很小（真实的缝隙存在时则全为零），但由于缺乏桩尖静阻力，桩尖的运动速度比无缝隙时高，即动阻力比无缝隙时来得大，显然与桩尖缝隙的概念相违背。

桩尖缝隙模型提供了两种桩尖阻尼形式的选择：一种是粘性阻尼，另一种是Smith阻尼；特别当GAP值为零时，FEIPWAPC程序将自动地把桩尖粘性阻尼 $J_v (= J \cdot Z)$ 转换成Smith阻尼 J_s

$$J_s = J \cdot Z / R_u$$

Smith形式的动阻力为

$$R_d = J_s \cdot R_s \cdot v \quad (21)$$

易见：Smith形式的动阻力与(20)式相比的不同之处在于前者使动阻力产生滞后。

此外，有时桩在 $2L/C$ 时间后虽历经较长一段时间，但仍以较高速度产生回弹，粘性阻尼的使用会使计算速度曲线在 $2L/C$ 时间后迅速趋于零。因此，FEIPWAPC程序也为各单元土弹簧卸载后的阻尼形式选择提供了两种方式。

五、计算方法

1、曲线拟合

和CAPWAPC程序相同。特征线法计算的基本要点是通过对实测信号进行“拟合”实现的。这些信号是力、速度、下行力波W_{DN}和上行力波W_{UP}。具体做法是：假定各桩单元参数（如A、E、C桩身阻尼和裂隙）；再建立与桩单元相邻的土阻力模型。然后以实测的速度（或力或下行力波或上行力波）作为桩顶边界条件输入，通过求解特征线方程，反算出桩顶的力（或速度或上行力波或下行力波）。若计算曲线与实测曲线不符，调整桩单元参数和“土模型”参数，重新计算直至计算曲线与实测曲线的符合程度不能进一步改善为止。

2、锤击数校核

校核计算锤击数(贯入度)是否与实测锤击数(贯入度)吻合也是很重要的。注意：在整个计算时段对实测速度曲线积分得到的贯入度一般不等于实测贯入度。这是因为：

压电式加速度计无零频率响应；

信号采集的时间很短，而计算时段还要短一些，此时桩的运动尚未停止；

人为的基线修正(如FEI-A桩基动测系统的VAdj)。

实际上，FEIPWAPC程序计算的贯入度是桩尖最大位移减去所有单元Quake的加权平均值得到的(见第二部分——程序手册)，并非桩顶的最终贯入度。

六、残余应力分析(RSA)

通常，FEIPWAPC拟合前采用的初始条件为：各桩段的力，速度和位移以及作用于各桩单元上的土阻力均为零，但在实际打桩过程中，这种零初条件并不一定正确。例如，桩在受锤击过后并未完全回弹，而一般情况下桩尖Quake值大于桩侧Quake值。因此，桩尖试图向上回弹相对大的距离，使桩侧单元向上运动，于是，桩侧土阻力减小到零后变为负值，直至桩尖的正阻力和桩侧的负阻力达到静力平衡；还有一种情况也会出现残余应力，这就是具有较强侧摩阻力的细长桩，开始锤击时桩上部产生较大的位移，而桩尖由于强摩擦的作用下沉较小。当锤击结束后，桩上部企图回弹更大的距离，但桩尖则回弹较小，于是摩阻力变为负值，桩处于预压状态。当下次锤击时，桩上部土阻力发挥首先需要一定的位移使土阻力由负变为零，然后再产生正向阻力(向上)，而桩尖土阻力由于上一锤的作用已处于加载状态，进而只需较小的位移就能发挥。

综上所述，残余应力是由于桩回弹不充分产生的。由于残余应力的存在，每个桩单元在桩身力和土阻力作用下处于平衡，即前面锤击的部分能量被贮存在桩中。如果不考虑残余应力的存在，可能在桩下部低估土阻力和位移，而在上部则高估了土阻力和位移。在FEIPWAPC分析中，我们可以通过考虑残余应力来纠正这种误差。

七、工程实例

1、01号桩和04号桩

这两根试桩均为钻孔灌注桩，同属一个场地，桩长均为21.80米。01号桩的桩径为 $\phi 800$ 毫米，04号桩的桩径为 $\phi 500$ 毫米。地质条件为：0~0.5~4.0米，亚粘土及轻亚粘土；4.0~5.2米，亚粘土；5.2~7.9米，粘土(III₁)；7.9~10.4米，亚粘土(III₂, III₃)；10.4~12.6米，轻亚粘，12.6~14.0米，细砂；14.0~桩尖，亚粘土。根据地质条件判断，这两根桩属于摩擦桩。动力试桩采用41KN重锤击设备，测试仪器为打桩分析仪(PDA)。

图8a和图9a分别给出了01号桩和04号桩的实测力和速度曲线以及各自的力拟合曲线与速度拟合曲线；图8b和图9b分别给出了01号桩和04号桩的荷载—沉降曲线、桩身剖面图以及桩身力与土阻力分布图。在图8b和图9b的荷载—沉降曲线图中，实线(Dyn)为根据动测信号分析模拟的桩顶荷载—沉降曲线；虚线(Sta)为静荷载试验得到的荷载—沉降曲线。表1则给出了01号桩拟合时所用的桩—土模型及其参数取值与计算分析结果。图8c和图9c则分别给出了锤击过程中桩顶、桩中部和桩端的力、速度和位移时程曲线以及动阻力和静阻力时程曲线。从这两根桩的土阻力分部图可见：从8.0~9.0米深度开始，桩侧摩擦变强，因此，计算出的桩身最大力发生在近桩中段处(见表1，图8c和图9c)。

按FEIPWAPC分析得到的极限承载力及桩尖阻尼系数 J_c 取值来推算CASE法承载力(RS1)可以得到

01号桩： $J_c = 0.57$ ，FEIPWAPC分析得到的承载力为3466KN，CASE法承载力为2950KN；

04号桩： $J_c = 0.78$ ，FEIPWAPC分析得到的承载力为2052KN，CASE法承载力为2050KN。

可见：根据FEIPWAPC拟合得到的 J_c 值推算CASE法承载力并与FEIPWAPC承载力比较，两者的符合程度令人满意。但必须指出：这两根桩在基本相同的地质条件下桩尖阻尼系数取值差异较大；此外，对于变截面桩而言，CASE法承载力不仅与

桩尖阻尼系数有关，而且也 and 桩身平均阻抗(MC/L)有关。(上面给出的CASE法承载力是根据FEIPWAPC拟合得到的桩身平均阻抗来确定的)。而在直接用CASE法确定承载力时，一般不可能准确估算桩的平均阻抗。因此，当桩身截面变化(如扩径)很大时，CASE法确定的承载力由于平均阻抗取值的差异将引入很大的人为误差。

2、04-02b号桩

04-02b号桩为钻孔灌注桩，设计桩径0.6米，桩长26.6米。上部土层主要是填土、砂质轻亚粘土(软塑)和花岗岩残积土(硬塑)，桩尖持力层为强风化花岗岩。在距04-02b号桩30米远处，曾对一根与04-02b号桩桩型相同、地质条件相近、长度为28.7米的桩做过静荷载试验，破坏荷载为2900KN。半年后做动载试验，FEIPWAPC程序分析得到的极限承载力3090KN。从04-02b号桩动测实测波形上判断，这根桩具有明显的缺陷。因此，从10.3米开始将桩身阻抗依次减小，且在20.7米、22.1米、23.6米和25.1米四处设置了裂隙。由图10的实测波形还可发现：在两个箭头所示范围内，力基本保持为一恒定的低值，而此间桩顶速度大于零，意即桩在较低的力作用下下沉，鉴于桩顶位移较大($D_{MAX}=19.4$ 毫米)，计算中考虑了土的加工软化特性(取 $\alpha=-0.33$)。假设的极限阻力为1476kN，而由于软化实际算出的最大静阻力为1107kN。做为比较，图10还给出了 $\alpha=0$ 时的拟合曲线。

3、23-01-03F号桩

该桩为钻孔灌注桩，长13.4米，设计桩径0.6米。上部土层为填土、亚粘土、淤泥质粘土和中粗砂，桩尖持力层为强风化(长石大部分已风化成高岭土)。由图11的实测波形可见：除桩中上部有明显缺陷外，桩尖出现了很强的反射。当桩尖阻尼系数(CASE阻尼)大于0.1时就已开始明显地削弱桩尖处的计算速度。因此，计算中选用了桩尖缝隙模型及Smith形式的阻尼，其中GAP=0.55毫米，相应的CASE阻尼提高到0.49。作为比较，静荷载试验的荷载-沉降曲线也绘于图11中。

4、366-03-03F号桩

该桩和23-01-03F号桩属同一场地、同一桩型，相距约100米，桩长为25米，