

PDA-CASE动力试桩研究

柯 李 文

(广东省建筑科研设计所, 广州)

提 要

本文系统地探讨CASE法在阻力分析中的波前效应。对应力波在第一个传播周期中的可能性状作了全面的描述, 并结合工程实例对CASE动力试桩中的有关技术问题进行讨论, 最后对试桩中可能出现的误差进行分析。

一、前 言

用动力试桩法检测桩身质量和测定桩承载力是各国岩土力学和基础工程工作者多年来所共同追求的目标。由此出现了各种各样的动力试桩方法。在实践中, 人们对低应变法测定桩承载力的可信度逐渐产生怀疑。国际土力学与基础工程学会对动力试桩法曾作出如下的评估: 如果锤击不足以充分发挥土的强度, 则任何动测法都不能测定桩的承载力。正因为如此, 以测定桩身运动所激发的岩土阻力为依据的高应变动力试桩法在国际上获得越来越广泛的重视, PDA-capwap法被看作有希望代替静力试桩的方法。

用于现场检测的PDA打桩分析仪, 用CASE法计算桩承载力, 快速、直观, 但CASE法是一种简化的分析方法, 其桩侧摩阻的计算是以理想化假设为前提的, 而桩承载力的确定, 则依赖于阻尼系数的选择。本文通过对应力波传播过程的详细分析, 阐明PDA-CASE动力试桩法的基本原理和信号分析法。同时还对影响信号分析的诸因素进行讨论。

二、PDA-CASE动力试桩法

(一) 岩土阻力的确定

美国PDI公司(Pile Dynamics, Inc)生产的打桩分析仪(PDA), 通过装在离桩顶至少1.5倍直径的桩侧上的一对应变式力传感器和一对压电式加速度传感器测量桩顶的力和加速度信号, 并用CASE法确定桩身运动所激发的岩土阻力。CASE法将桩对锤击力的动力反应看作锤击所产生的应力波与土阻力波的叠加, 这使桩的动力反应分析大大简化。假如对波动力和质点速度的符号作如下规定:

波动力 $F(t)$ ——压缩为正, 拉伸为负;

质点速度 $V(t)$ ——向下为正, 向上为负。

则由波动理论知, 下行波和上行波的波动力和质点速度有如下关系

$$F \downarrow(t) = ZV \downarrow(t) \quad (1)$$

$$F \uparrow(t) = -ZV \uparrow(t) \quad (2)$$

式中 $Z = \rho c A$ 为桩的力学阻抗, 令

$$F(t) = F \downarrow(t) + F \uparrow(t) \quad (3)$$

$$V(t) = V \downarrow(t) + V \uparrow(t) \quad (4)$$

$$\text{则} \quad F \downarrow(t) = [F(t) + ZV(t)]/2 \quad (5)$$

$$F \uparrow(t) = [F(t) - ZV(t)]/2 \quad (6)$$

当锤击产生的应力波向下传播到 x 时, 在 x 以上的桩段产生运动, 并激发桩侧岩土阻力 $R(x)$, 产生大小相等传播方向相反的上行压缩阻力波 $R_u(x)$ 和下行拉伸阻力波 $R_d(x)$

$$R_u(x) = -R_d(x) = -\frac{1}{2}R(x) \quad (7)$$

令冲击开始时间为 t_1 , 则对于均匀桩在冲击后的第一个波传播周期 ($t_1 \leq t < t_1 + \frac{2L}{c}$) 内, 传感器所感受的上行波信号只有阻力波

$$F \uparrow\left(t_1 + \frac{2x}{c}\right) = -\frac{1}{2}R(x) \quad 0 \leq x < L \quad (8)$$

即桩侧摩擦阻力 $R(x)$ 可由上行波信号确定

$$\begin{aligned} R(x) &= 2F \uparrow\left(t_1 + \frac{2x}{c}\right) \\ &= F\left(t_1 + \frac{2x}{c}\right) - ZV\left(t_1 + \frac{2x}{c}\right) \end{aligned} \quad (9)$$

当 $t = t_1 + \frac{2L}{c}$ 时

$$\begin{aligned} F \uparrow\left(t_1 + \frac{2L}{c}\right) &= R_u(L) - R_d(L) - F \downarrow(t_1) \\ &= R(L) - F \downarrow(t_1) \end{aligned} \quad (10)$$

或

$$\begin{aligned} R(t_1) &= R(L) \\ &= F \downarrow(t_1) + F \uparrow\left(t_1 + \frac{2L}{c}\right) \\ &= \frac{F(t_1) + F\left(t_1 + \frac{2L}{c}\right)}{2} - \frac{Mc}{L} \cdot \frac{V\left(t_1 + \frac{2L}{c}\right) - V(t_1)}{2} \end{aligned} \quad (11)$$

这就是CASE法总阻力公式。应当指出的是,桩侧摩擦阻力表达式(9)是在未考虑波前效应的情况下导出的。

实际的锤击过程是复杂的冲击过程,有一定的上升时间 τ (见图1)

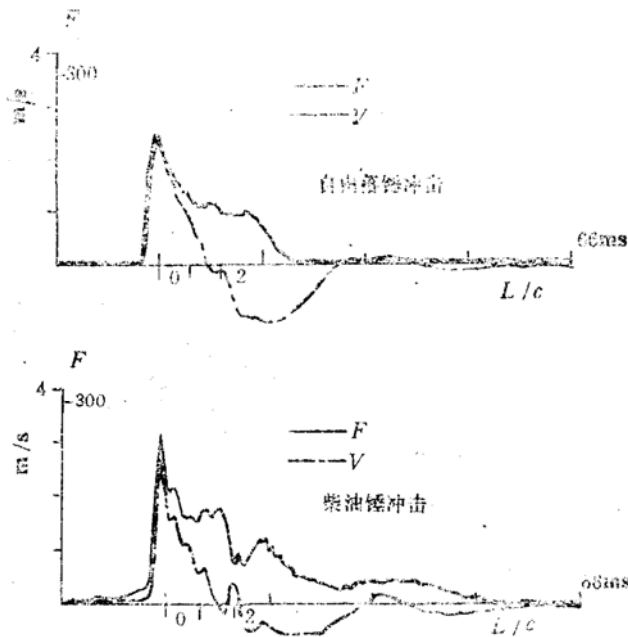


图1 应力波信号的时程曲线

CASE法定义速度峰(而不是波前)所对应的时间为冲击开始时间 t_1 ,故速度峰在 $t_1 + \frac{x}{c}$ 时下行到 x ,应力波除激发 x 以上桩侧摩擦阻力 $R(x)$ 外,在波峰以下至波前之间的桩段也产生运动,并激发其桩侧摩擦阻力 $\bar{R}(x)$ 。

当冲击上升时间较长, $\tau \geq \frac{2L}{c} - \frac{2x}{c}$,即 $\tau + \frac{2x}{c} > \frac{2L}{c}$ 的情况下,波峰到达 x 时,在 $t = t_1 + \frac{2x}{c} - \frac{2L}{c}$ 时的波前冲击已达桩底并发生反射,此时虽然波峰未达桩底,但整条桩都已产生波动,并激发 x 以上的桩侧阻力 $R(x)$ 及 x 以下的桩侧阻力 $\bar{R}(x)$,其相应的上行阻力波 $R_u(x)$, $\bar{R}_u(x)$,下行拉伸波为 $R_d(x)$, $\bar{R}_d(x)$,故在 $t_1 + \frac{2x}{c}$ 时,传感器所接收的上行波信号除 $R_u(x)$ 外,还将包含上行阻力波 $\bar{R}_u(x)$ 及下行阻力波 $\bar{R}_d(x)$ 和 $t = t_1 - \left(\frac{2L}{c} - \frac{2x}{c}\right)$ 时的峰前冲击 $F \downarrow \left(t_1 + \frac{2x}{c} - \frac{2L}{c}\right)$ 在桩底的反射,

$$F \uparrow \left(t_1 + \frac{2x}{c} \right) = R_u(x) + \bar{R}_u(x) - \bar{R}_d(x) - F \downarrow \left(t_1 + \frac{2x}{c} - \frac{2L}{c} \right)$$

$$\text{故} \quad F \uparrow \left(t_1 + \frac{2x}{c} \right) = \frac{1}{2} R(x) + \bar{R}_u(x) - \bar{R}_d(x) - F \downarrow \left(t_1 + \frac{2x}{c} - \frac{2L}{c} \right)$$

(12)

$$\begin{aligned}
 R(x) &= 2F \uparrow \left(t_1 + \frac{2x}{c} \right) + 2F \downarrow \left(t_1 + \frac{2x}{c} - \frac{2L}{c} \right) \\
 &\quad - 2\bar{R}_u(x) + 2\bar{R}_d(x) \\
 &= F \left(t_1 + \frac{2x}{c} \right) - ZV \left(t_1 + \frac{2x}{c} \right) + \Delta R_1
 \end{aligned} \quad (13)$$

$$\text{式中} \quad \Delta R_1 = 2F \downarrow \left(t_1 + \frac{2x}{c} - \frac{2L}{c} \right) - 2\bar{R}_u(x) + 2\bar{R}_d(x) \quad (14)$$

ΔR_1 就是所谓波前效应,即由式(9)计算桩侧摩擦阻力的误差。

若冲击上升时间较短, $\tau < \frac{2L}{c} - \frac{2x}{c}$, 即 $\tau + \frac{2x}{c} < \frac{2L}{c}$, 则

$$\begin{aligned}
 \bar{R}_d(x) &= 0 \\
 F \downarrow \left(t_1 + \frac{2x}{c} - \frac{2L}{c} \right) &= 0 \\
 F \uparrow \left(t_1 + \frac{2x}{c} \right) &= \frac{1}{2} R(x) + \bar{R}_u(x)
 \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned}
 R(x) &= 2F \uparrow \left(t_1 + \frac{2x}{c} \right) - 2\bar{R}_u(x) \\
 &= F \left(t_1 + \frac{2x}{c} \right) - ZV \left(t_1 + \frac{2x}{c} \right) + \Delta R_2
 \end{aligned} \quad (16)$$

波前效应所引起的误差为

$$\Delta R_2 = -2\bar{R}_u(x) = -\bar{R}(x) \quad (17)$$

为了测定岩土极限阻力, CASE法要求锤击应有足够的能量, 使应力波波峰到达 x 时, 在 x 以上的桩身位移大于桩侧岩土的最大弹性变形, 因而 x 以上的桩侧摩擦阻力 $R(x)$ 将保持极限状态。然而由波前效应引起的 x 以下桩侧摩擦阻力 $\bar{R}(x)$ 则不可能达到极限值, 且因依赖于锤击的性状而具有不确定性。由式(9)和式(12), (15)比较可知, 用式(9)计算摩擦阻力 $R(x)$ 包含着波前效应所引起的误差, 是一种近似的计算方法。只有在波前效应可忽略的情况下, 式(9)才是准确的。而CASE总阻力公式(11)则对任何真实的纵向冲击都是准确的。

式(12), (15)是应力波在第一个传播周期 $\left(t_1 \leq t < t_1 + \frac{2L}{c} \right)$ 中的性状的描述, 是判别所采集的信号是否合理的依据。例如, 对于冲击上升时间较短的情况 $\left(\tau < \frac{2L}{c} - \frac{2x}{c} \right)$, 由式(15)知

$$F \left(t_1 + \frac{2x}{c} \right) - ZV \left(t_1 + \frac{2x}{c} \right) \geq 0 \quad \left(t_1 \leq t < t_1 + \frac{2L}{c} - \tau \right)$$

若在时间区间 $\left[t_1, t_1 + \frac{2L}{c} - \tau \right]$ 中, 出现 $F\left(t_1 + \frac{2x}{c}\right) < ZV\left(t_1 + \frac{2x}{c}\right)$ 的情况, 则应判断是否因锤击偏斜所致, 否则可能是桩身缺陷引起。

(二) 用CASE法确定桩承载力

公式(11)确定的岩土总阻力包含静阻力 $R_s(t)$ 和动阻力 $R_d(t)$, 而试桩的目的在于确定桩的静承载力, 即土的静阻力。CASE法假设动阻力全部集中于桩尖上, 定义动阻力为

$$R_d(t_1) = J_c ZV_b(t_1 + L/c) = J_c [2F \downarrow(t_1) - R(t_1)] \quad (18)$$

式中 J_c 为CASE土阻尼系数, $V_b(t_1 + L/c)$ 为桩尖速度。则

$$\begin{aligned} R_s(t_1) &= R(t_1) - R_d(t_1) \\ &= R(t_1) - J_c [F(t_1) + ZV(t_1) - R(t_1)] \\ &= (1 - J_c) \frac{F(t_1) + ZV(t_1)}{2} \\ &\quad + (1 + J_c) \frac{F(t_1 + \frac{2L}{c}) - ZV(t_1 + \frac{2L}{c})}{2} \end{aligned} \quad (19)$$

这就是CASE阻尼因子法计算桩承载力的公式。可见由CASE法确定桩的承载力依赖于土阻尼系数的选择, 按CASE法假定, 阻尼系数只依赖于桩尖持力层的土特性, 并可由动力试桩与静力试桩的对比试验确定。

1988年至1989年广东省建筑科研设计所动力试桩组在广东地区对11根预制混凝土桩进行动、静试桩对比, 对美国PDI公司所提供的土阻尼表进行校核、修正和补充(见表1)。

表1 CASE 阻尼系数 J_c

持力层 岩土类型	强风化 硬质岩	强风化 软质岩	砾、砂	粉砂	粉土	粉质粘土	粘土
J_c	0.05	0.05—0.10	0.10—0.15	0.15—0.25	0.25—0.40	0.40—0.70	0.70—1.0

阻尼因子法是最基本的CASE子方法。其它的CASE子方法有最大阻力法、最小阻力法、卸载法、自动法等^[1], 其适用范围见表2。

表2 确定桩承载力的PDA-CASE子方法

PDA-CASE 子方法	阻尼因子法 RSP	最大阻力法 RMX	最小阻力法 RMN	卸载法 RSU	自动法 RAU
适用范围	130 < 锤击数/m < 500	冲击上升时间短或 大quake(土弹性极限)	锤击数/m < 130	长桩难打入, 在 2L/c之前, $V < 0$	桩侧摩擦阻力小

(三) 关于动、静试桩对比

PDA动力试桩, 由CASE法确定的桩的承载力依赖于土阻尼系数的选择(见式(19))。CASE法假定阻尼系数只依赖于桩尖持力层的土特性, 并可由动力试桩和静力试桩的对比试

验确定(见表1)。但由式(18), CASE阻尼系数 J_c 可写为

$$J_c = \frac{\frac{R_d(t_1)}{R(t_1)}}{\frac{2F \downarrow(t_1)}{R(t_1)} - 1} \quad (21)$$

可见 J_c 与土的总阻力有关。给定 J_c , 实质上是给出动阻力和总阻力的比值 $R_d(t_1)/R(t_1)$, ($F \downarrow(t_1)$ 及 $R(t_1)$ 已由测量确定), 这不是由桩尖持力层的土特性所能完全确定的(除非侧摩擦阻力完全可以忽略)。这是CASE法的一个不确定因素。也是通过动、静试桩对比确定阻尼系数的困难所在。

还应强调的是关于预制桩的动、静对比试验, 应是复打动测极限承载力与静载试桩的极限承载力的对比。因为只有这时, 土阻尼系数才是唯一待定的参数。如上所述, 当PDA动力试桩是在收锤阶段进行时, 其测定的静阻力, 除依赖于土阻尼系数外, 还与土的触变特性及桩的位移(如果未达到土的最大弹性变形的话)有关。在这种情况下, 进行动、静试桩对比不能确定阻尼系数与岩土特性的依赖关系。

(四)PDA动力试桩的几个技术问题

1. 灌注桩的桩头处理。根据锤击要求, 应将灌注桩桩头松散混凝土打掉, 使桩头混凝土达到设计标号, 桩顶应打平; 可重新接桩头, 但传感器宜装在原桩上, 因为CASE法的桩承载力公式是对均匀桩导出的。若将传感器装在阻抗大于原桩的桩头上时, 在桩头与原桩连接面将出现拉伸反射, 速度峰增大, 力峰减小, 力信号和速度信号一开始就丧失比例性(见图2), 既影响桩承载力的测定精度, 还使桩的完整性检验变成不可能。

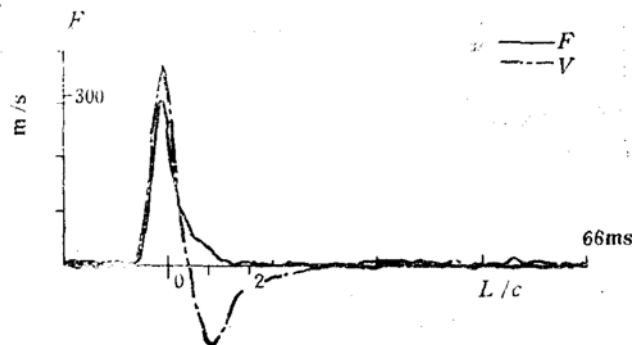


图2 传感器近下方桩身阻抗减小对信号比例性的影响

2. 桩垫效应。桩垫直接影响力波的性状。锤击产生桩顶的压缩力 $F \downarrow(t)$ 和桩顶速度 $V \downarrow(t)$ 与锤速 V_h 及桩垫刚度 K 有如下关系^[2]

$$F \downarrow(t) = ZV \downarrow(t) = \frac{KV_h}{\omega_d} e^{-\xi\omega_d t} \sin\omega_d t \quad (20)$$

使用厚垫撞击, 接触时间长, 因而产生较大波长的弹性波, 且无尖峰(见图3)。与使用薄垫相比, 前者能降低桩头压缩应力, 防止桩头开裂破坏, 又可减少动阻尼效应(见式(18))。特别对于灌注桩, 为了保护桩头, 防止因桩头开裂影响测试效果, 应使用足够厚的桩垫, 但为了检测桩身完整性, 则宜用薄桩垫或不用桩垫, 以减少冲击上升时间, 使信号有明显的峰

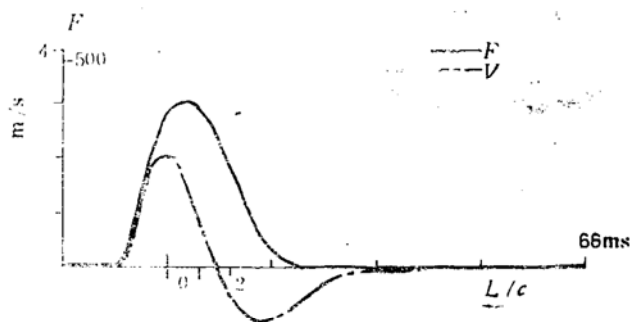


图3 厚桩垫效应

值, 这可减少信号的波前效应(见式(12), (15)), 有利于对缺陷处反射信号的辨认。

对于短桩若使用厚桩垫, 冲击上升时间太长, 则由于波前效应而无法检验桩的完整性(见(12)式)。

3. 复打试桩的必要性。如果测量是在打桩收锤阶段同时进行的, 则因打桩时土受扰动强度减弱, 所测的承载力不能代表桩的真正承载力。图4(a)是在打桩收锤阶段试桩, 图4(b)是同一根桩在打桩后18小时复打试桩, 复打测到的总阻力是收锤阶段的1.65倍, 为了获得预制打入桩的真正承载力, 复打试桩是必要的。

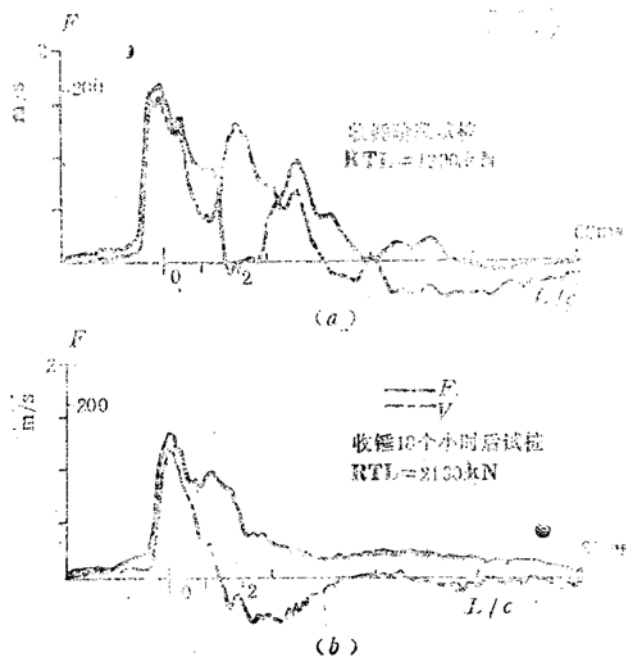


图4 打入桩土阻力的时间效应

(五) 误差分析

用PDA打桩分析仪测定桩的承载力, 具有明确的理论基础, 只要正确使用, 其测量误差可控制在20%以内。误差的主要来源, 是使用不当所带来的过失误差。

1. 操作过失误差。由锤击偏心或偏斜所引起的误差一般通过取两个传感器信号的平均值, 便可基本消除误差。如果只使用单个传感器信号, 则其误差将无法控制(见图5)。甚至可能引起误判。

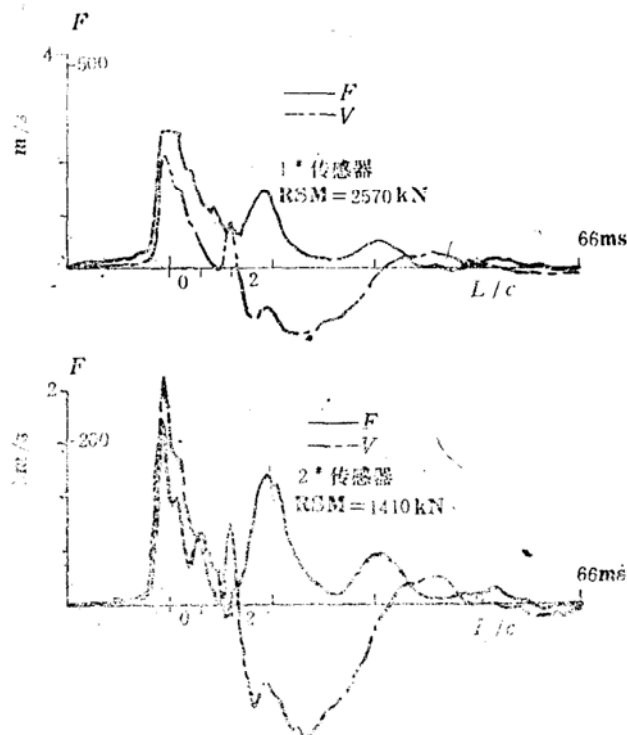


图5 桩身两侧信号比较

2. 力学参数设置误差。由式(19)知, 要确定桩承载力, 须由仪器操作者设置如下力学参数: 力学阻抗 EA/c , Mc/L , 应力波传播周期 L/c , 及土阻尼系数 J_c 。这包含 E , A , c , L , γ 及 J_c 等六个参数的取值。对于预制桩, 前五个量可准确确定, J_c 是唯一待定量, 而对于灌注桩, 除 J_c 值待定外, 其余五个参数只能由施工单位提供 (c 由混凝土标号试定), 即灌注桩具有更多的不确定因素, 这都是可能的误差源。不管是预制桩还是灌注桩, 选定阻尼系数 J_c , 是PDA-CASE动力试桩法的关键, 也是误差的主要来源。

对于某一试桩, 承载力 $R_s(t)$ 与 J_c 的依赖关系可由下式确定

$$R_s(t_1) = R(t_1) - J_c[F(t_1) + ZV(t_1) - R(t_1)] \quad (21)$$

式中 $R(t_1)$, $F(t_1)$, $V(t_1)$, 已由PDA测定, 故 $R_s(t_1)$ 与 J_c 成线性关系。

对于持力层为未全风化的基岩及砂土, 阻尼系数变化范围较小(见表1), J_c 取值所引起的误差不大, 但对于粘土 J_c 取值不当可能引起较大误差。

[例]:

8901—15* 桩, $\phi 550$ 预应力管桩, 入土桩长15.8m, 桩尖持力层为强风化砂岩, 测得总阻力 $R(t_1) = 2400 \text{ kN}$, $F(t_1) = 2760 \text{ kN}$, $V(t_1) = 2.19 \text{ m/s}$, 代入式(21)得

$$R_s(t_1) = 2400 - 3242J_c$$

由此式, 桩承载力随 J_c 变化如表3

表3 桩承载力变化

J_c	0	0.05	0.1	0.15	0.2
$R_s(t)(\text{kN})$	2400	2240	2080	1910	1750
$\frac{R_s(t)}{R_{0.1}}(\%)$	115	108	100	92	84

可见, 在 J_c 可能取值的范围内, 相对误差不超过15%。

3. 对CASE子方法选用不当, 可能产生很大的误差。如8907—1#桩, 对第11击的信号用不同的CASE子方法处理结果如下:

表4 不同子方法处理结果

子方法	RSM	RMX	RMN	RSU	RAU	RAZ
承载力(kN)	1330	1870	1310	1330	1540	1830

三、结 论

PDA-CASE动力试桩法测量桩运动所激发的岩土阻力, 理论是明确的。试桩时只要贯入量足够大(大于2.5mm/击), 则可测得土的极限阻力。测量的桩承载力依赖于土阻尼系数的选择。通过广泛的动力和静力试桩对比, 获得系统的岩土-阻尼的相关性, 或者靠capwap软件的支持, 能可靠地预测桩的承载力。

参 考 文 献

- [1] Pile Driving Analyzer Manual, Pile Dynamic, Inc., 1987.
- [2] R.W.克拉夫, J.彭津, 结构动力学, 科学出版社, 1981年.

Study on PDA-CASE Dynamic Test of Pile

Ke Liwen

(Guangdong Provincial Building Research & Design Institute)

Abstract

In this paper, the effect of stress wave front on the analysis of soil resistance is studied. The behaviour of stress wave signal in the first cycle is described. The technique in relation to CASE dynamic test of pile is discussed. Finally, the error in CASE dynamic test of pile is estimated.