

文章编号: 0253-3782(2004)S0-0131-10

单次冲击能量及 P-S 曲线测桩法^{*}

许昭永¹⁾ 段永康²⁾ 王 彬¹⁾ 胡毅力²⁾

杨润海¹⁾ 许 峻²⁾ 赵晋明¹⁾

1) 中国昆明 650041 云南省地震局防灾研究所

2) 中国昆明 650091 昆明市南方岩土工程技术公司

摘要 通过研究打桩公式法和应力波动法(如 CASE 法), 提出单次冲击能量及 P-S 曲线测桩法: 用重锤或小型火箭筒一次冲击桩顶, 用桩顶附近的检波器记录振波图和检测静、动位移。通过实测冲击能(总能量)转换系数、波动和振动各自消耗的能量等各物理量, 测定计算单桩竖向承载力。利用振波图计算力(P)与位移(S)动态关系曲线, 确定屈服点, 并利用静载荷试验检验动测结果和确定动静 P-S 曲线的相关常数, 进而确定与承载力相应的沉降量。而且, 可由 PS 曲线的形态判定桩身成型质量。

关键词 单次冲击 能量法 动态 P-S 曲线 单桩承载力测定 桩身质量评估

中图分类号: P315.72⁺⁷

文献标识码: A

引言

通过广大科技工作者的多年应用和实践, 以及各方的努力, 高、低应变动测法终于正式进入建筑基桩检测技术规范(中华人民共和国行业标准, 2003)。该规范对高应变动测法的激振方式规定为锤击, 但对火箭筒激振也不反对。后者国外使用较多, 国内使用者甚少。该规范对高应变动测法的分析方法规定为凯司(CASE)法和实测曲线拟合(CAPWAP)法。这些分析方法在国外早有应用, 它们连同 Smith 法及其相关的改进方法都属波动方程法。另外, 还有属经验公式法的打桩公式法、锤击贯入法和 $P-\Sigma S$ 曲线等也常被应用(徐攸在, 刘兴满, 1989; 中国建筑科学研究院, 1991; Broms, Choo, 1988; Rausche *et al*, 1985; Fellenius, 1988)。在仔细研究主要几种大应变动测法后, 我们认为现行各种方法虽各有特色, 然而也程度不同地存在一些不尽如人意之处。运用波动方程在讨论应力波、质点运动速度时的条件是小位移、小应变; 在计算承载力或土阻力时并未考虑桩整体下沉(平动)所消耗的能量, 而仅将静阻力设定或凭经验确定为动阻力的倍数; 而打桩公式法(包括改进的), 虽然计及多种能量, 但却未顾及波在桩中传播的能量消耗, 而且因难于测量桩土体系的弹性变形量, 有些甚至凭经验确定为静位移(沉降)的多少分之一; 即使对规范规定的方法, 在选取力学模型和岩土力学参数及确定阻尼系数时, 也容易参杂进很大的人为因素。这样, 在理论上、计算方法上便出现了不足, 即有些物理量并非直接测量而是估算, 这就容易产生较大误差。

通过研究如何利用单次冲击桩顶的波动和振动, 本研究提出“单次冲击能量 P-S 曲线

* 云南省“十五”重点项目(云计地区[2002]54-02-02)和云南省地球物理学会共同资助。

2003-09-08 收到初稿, 2004-04-02 收到修改稿, 2004-05-09 决定采用。

测桩法”，它是在以足够大的力冲击桩顶后，依据桩顶附近多种传感器的记录，直接测定有关的各物理量，从能量关系计算确定单桩竖向极限承载力，同时作出动荷载和动位移曲线，确定屈服点，进而确定与承载力相应的沉降量，并由静载荷试验的结果检验相关性。而且可由 P-S 曲线的形态判定桩身成型质量。本方法试图兼顾上述二法的特长，又克服它们的不足（即实测各物理量，而非估算）。

1 静载荷试验的数学物理意义

单桩垂直向静载荷试验曲线（图 1）最基本的有 4 种形态，这显示了该现象的复杂性。图 1 中如曲线 3 则不能像材料力学实验那样确定极值（破坏）应力，而如曲线 1, 2, 4 则可能像材料力学实验那样确定极值（破坏）应力。于是有关规范规定，单桩竖向极限承载力的确定为：P-S 曲线上比例极限（线弹性）的 n 倍；P-S 曲线上陡降段的起点；或者是规定（允许）某一沉降量所对应的承载力（中华人民共和国行业标准，2003, 2002；中华人民共和国国家标准，2002）它们的共同点可用数学方法表示为

$$P = P(S) \quad \frac{\partial P}{\partial S} = K \quad (1)$$

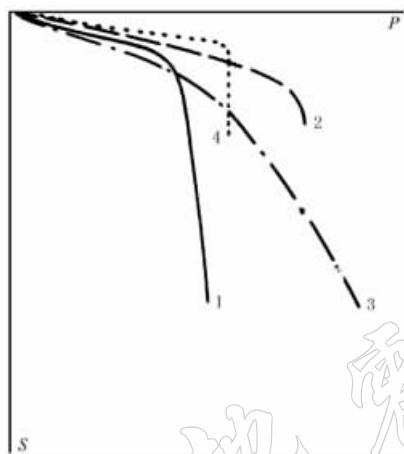


图 1 常见静载试验 P-S 曲线

- 1. 摩擦桩；2. 端承摩擦桩；
- 3. 摩擦端承桩；4. 端承桩

并从 P-S 曲线确定其相应的沉降量。

2 数学力学分析

2.1 波动、振动和平动以及单桩极限承载力的测定

桩在受冲击后，将由几部分运动组成：在冲击之前，对于重锤， h 为落高， m 为质量， g 为重力加速度，其能量为 $W = mgh$ 。

桩在受冲击后，一是桩作为刚体整体在土中的减速运动，其初速度为 v_{01} ，末速度为 0。克服桩所受的阻力（包括侧阻力和端阻力）为 f_r ，移动距离 S 。令 M 为桩的质量， $a_p (< 0)$ 为加速度。克服总阻力所消耗的能量 W_p 为

$$W_p = f_r S \quad f_r = ma_p = M \frac{v_{01}^2}{2S} \quad (2)$$

二是桩作整体振动，令 k 为桩土体系的刚度， η 为阻尼系数， $\omega (= 2\pi f)$ 为角频率， v_{max} 为最大速度。

$$M \frac{d^2x}{dt^2} + 2\eta \frac{dx}{dt} + kx = 0 \quad (3)$$

当 $k > \eta$ 时

$$X = X_0 e^{-(\eta/m)t} \cos(\omega t + \phi)$$

$$\omega = \frac{\sqrt{kM - \eta^2}}{M} = \omega_0 \sqrt{1 - \frac{\eta^2}{kM}} \quad \omega_0^2 = \frac{k}{M} \quad (4)$$

振动消耗能量 W_z

$$W_z = \frac{1}{2} M \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 + \frac{1}{2} kx^2 = Mv_{\max}^2 \quad (5)$$

三是桩产生弹性变形, 桩体内产生纵波波动

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \frac{\partial R}{\partial x} + E \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + 2\eta \frac{\partial u}{\partial t} + E \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0 \quad (6)$$

$$u(x, t) = u_0 e^{-(\eta/\rho)t} \cos \omega(t - x/c) = u_0 e^{-(\eta/\rho)t} \cos 2\pi(f t - \nu x) \quad (7)$$

纵波速度

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (8)$$

波数

$$\nu = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{cT} = \frac{f}{c}$$

式中, 沿桩轴线为坐标轴 ox , 桩横截面积为 A , 密度为 ρ , 杨氏模量为 E , 波长为 λ , $\partial P(t, x)$ 和 $\partial R(t, x)$ 是作用于桩体元的净轴向力和净侧阻力, 并且

$$\partial P(x, t) = AE \partial \left(\frac{\partial u(x, t)}{\partial x} \right) \quad \partial R(x, t) = \partial \left(2\eta \frac{\partial u(x, t)}{\partial t} \right) \quad (9)$$

纵波的波动能量 W_b , 可由纵波在单位时间、单位截面上的能流 $w(x, t)$ 求出

$$W_b = \int_0^A \int_0^\infty w(x, t) ds dt = \int_0^A \rho c \int_0^\infty v^2(t) dt ds \quad (10)$$

式中, 能流 $w(x, t) = \rho c (\partial u / \partial t)^2 = \rho c \nu^2(t)$, ρc 为波阻抗.

桩在受冲击后, 首先产生波动, 其次是桩整体振动. 只有在冲击力足够大时, 才可能使桩整体向下沉降(平动). 假定转换为声能、热能等可忽略不计, 则

$$\xi mgh = W_b + W_z + W_p \quad (11)$$

其中, ξ 为能量转换系数. 由于总有一些能量消耗在锤的反弹上面, 因此 ξ 最大也难达到 1.

到此, 即可由式(5)、式(10)分别测定振动和波动能量, 而 ξ (能量转换效率系数)、静位移和弹性位移也可直接测定. 由此测得单桩极限承载力(即其所受的最大阻力包括侧阻力和端阻力) f_r

$$f_r = \frac{\xi mgh - W_b - W_z}{S} \quad (12)$$

这里必须指出, 首先要确定桩作了整体移动后, M 才能取桩的全部质量.

改进的打桩公式法中, 在桩上由力和速度传感器实测到的能量(W_c)(徐攸在, 刘兴满, 1989)为变形(波动)和振动消耗的能量, 可由下式测定承载力:

$$f_r = \frac{\xi mgh - W_c}{S} \quad (13)$$

$$W_c = \int_0^{t_s} F(t) v(t) dt \quad (14)$$

式中, S 包括桩体静位移 S_1 (下沉量)和振动位移 S_2 (桩土体系的弹性变形). 式中各量都可实测. 振动位移 S_2 还可由下式测得:

$$S_2 = \int_0^{t_s} v(t) dt \quad (15)$$

式中, t_s 为纵波从桩顶到桩底的走时. 该方法要求对测力计准确标定.

由于一次冲击使桩的下沉只有几个毫米(量级)甚至更小, 因此, 对 S 的测量精度将对整个结果有很大影响.

若从力的平衡分析, 将冲击力 F 在短时间内视为恒定力, 分别测定 F , f_b —— 波动力(桩体内的变形力)、 f_z —— 振动力(桩土体系的恢复力). 于是, 可得

$$f_r = F - (f_b + f_z) \quad F\Delta t = \Delta(mv) \quad (16)$$

此法的困难是对冲击力作用时间 Δt 的准确测定和对桩(顶)垫的消耗力的测定.

桩在受冲击后, 桩顶附近传感器记录到的速度、加速度将由 3 部分组成. 但随着时间推移, 平动速度迅速消失为 0. 桩体振动中心并不在原先的平衡位置, 而是向下移动了. 对于振动, 在平衡位置, 速度最大, 加速度为零; 在远离平衡位置点, 速度为零, 加速度最大. v_{01} 并不等于 v_0 .

在桩顶附近测力计所测得的力, 其实是要与 3 部分力平衡: 一是变形力(波动), 二是振动力, 三是摩阻力. 即在桩顶附近直接测定 F . 由式(16)也可测定单桩极限承载力 f_r .

2.2 P-S 曲线的确定

对 P-S 曲线的确定我们已有专门论述(胡毅力等, 2004), 但为叙述问题清晰, 在此也作一简单介绍. 如前所述, 桩受冲击后可能产生 3 部分运动, 我们将可能产生的平动并入非线形变形. 通常按多项式, 可有

$$\epsilon = a_0(\sigma - \sigma_0) + a_1(\sigma - \sigma_0)^2 + \dots \quad (17)$$

经变换可得, 在考虑阻力时波动方程为

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \frac{\partial R}{\partial x} + E \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\partial u}{\partial x} + a \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^{n-1} \right] = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + 2\eta \frac{\partial u}{\partial t} + E \left[1 + an \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^{n-1} \right] = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0 \quad (18)$$

为便于讨论, 忽略阻尼项(侧摩阻力), 可得

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c \left[1 + an \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^{n-1} \right] \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial u}{\partial t} \right) \quad (19)$$

上式表明, 当为小位移小应变时, 由桩上同一点记录到的速度和加速度可以分别经过简单积分加速度和微分速度得到, 即它们为线性关系; 而当为大位移大应变时, 即桩相对于土体产生整体滑动时, 其速度和加速度则不能经过简单积分和微分得到, 即它们为非线性关系.

同样, 将桩相对于土的整体滑动增加为位移的非线形项, 可得振动方程

$$M \frac{d^2 x}{dt^2} + 2\eta \frac{dx}{dt} + k(1 + nbx^{n-1})x = 0 \quad (20)$$

通过改写式(6)和微商变换得动载荷, 即对加速度记录进行时间和整个桩长积分, 可得

$$F_d = \int_0^L \left(\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial R}{\partial x} \right) dx = \int_0^L A\rho \int_0^t a(t) dt dx = m \int_0^t a(t) dt = LA\rho\alpha \int_0^t a_v(t) dt \quad (21)$$

式中, L 为桩长, A 为桩的横截面积, ρ 为桩的密度, α 为加速度传感器的标定常数 ($m/s^2 \cdot V^{-1}$). 其相应的动位移为

$$S_d = \int_0^l \frac{\partial s}{\partial x} dx = \int_0^t v(t) dt = \beta \int_0^t v_v(t) dt \quad (22)$$

式中, β 为速度传感器的标定常数 ($\text{cm/s} \cdot \text{V}^{-1}$).

作 F_d - S_d 曲线并确定屈服点 (F_{db} , S_{db}). 当 S 小于 S_{db} 时, k_d 为常数; S 大于 S_{db} 时, k_d 随着 S 增大而减小. 到此, 已完成与式(1)类似的曲线. 即完成从小位移、小应变到大位移、大应变的过渡, 即式(21)和式(22)的计算结果在小位移、小应变时为线性关系; 而在大位移、大应变时为非线性关系. 由此曲线上确定屈服点, 进而确定与承载力相应的沉降量.

3 测量方法及实例

3.1 测量方法及观测系统

本研究强调的是通过实测各个物理量, 最后测定承载力. 当然, 这个物理量不仅能测, 还要易测. 理论上式(2)、(12)、(13)和(16)都可给出承载力, 然而式(2)的 v_{01} 和式(16)的 Δt 都很难于准确测定. 于是选择式(12)或(13)测量分析.

为测定式(12)的各个物理量及得到动 P-S 曲线, 以重锤或火箭筒冲击桩顶, 在桩顶附近用速度和加速度传感器记录波形图, 以力和位移传感器分别记录力和位移. 观测系统见胡毅力等(2004)论文.

由式(21)、(22)分别计算动荷载和动位移, 并作 F_d - S_d 曲线. 当仅有一个加速度计和一个速度计记录时, 只能拟合一条 F_d - S_d 曲线, 而有两个加速度计和两个速度计记录时, 则可拟合 4 条曲线. 故只要条件许可, 应尽量采用两个加速度计和两个速度计同时记录, 以增加有效数据并提高可靠性. 对于锤击贯入法而言, 不断增加冲击力, 进行多次冲击, 作出 P - ΣS 曲线, 由曲线确定屈服点, 进而确定承载力. 而本方法则为选择一次合适的冲击结果, 即可作出 F_d - S_d 曲线. 由式(12)计算出单桩极限承载力 f_r , 再确定屈服点, 进而确定与承载力相应的沉降量. 即本方法的优点是一次冲击.

3.2 分析处理

式(12)和(13)各物理量都已明确, 这里再叙述对 ξ 的分析测定. 锤撞击桩后, 它们都将经历压缩、恢复和回弹阶段. 通过动量守恒及能量分析, 得到

$$\xi = (1 + n)^2 m_0 \quad m_0 = \frac{m/M}{(1 + m/M)^2} \quad (23-1)$$

$$n = \frac{v_{\max}}{v_0} \quad m \sqrt{2gh} = (m + M)v_0 \quad (23-2)$$

式中, n 为撞击恢复系数. 对于弹性碰撞, $n = 1$; 非弹性碰撞, $n < 1$. 式(23)表明, 要提高能量转换系数, 即提高消耗在桩上(包括前述各种运动)的能量, 一要提高 n , 二要增加锤桩质量比. 本来, 按定义也很难直接测量 n , 然而, 经过实践, 通过用速度传感器测出最大 v_{\max} , 由动量守恒测出 v_0 , 从而测得 n . 从已有的测量结果看, 对于特制桩头, n 大于 0.9 小于 1.0; 对于特制桩帽但在桩顶垫砂时, n 为 0.35 左右.

由于式(12)考虑了各种能量消耗, 特别是桩体克服最大静摩擦力而整体下沉, 因此, 由此计算出的总阻力与实际静载荷试验所得的单桩极限承载力非常接近, 故而我们就将总(摩擦)阻力 f_r 作为单桩极限承载力; 然而由式(22)所计算的位移与实际静载荷试验所得的沉降量则相差甚多: 本动测法所得总位移一般只有几毫米, 最小只有零点几毫米, 最大不超过 15 mm; 而静载荷试验总位移最小也往往超过 10 mm, 大多数为几十毫米. 本来独

立地用动测方法确定承载力及沉降量也是可行的，但现行规范规定只以静载试验结果作设计依据。故而，不得不作动静试验结果统计对比。

先作一些动静对比试验，取动测承载力 f_r 与静载荷极限承载力相对应，再取两种曲线的屈服点处的位移相对应，分别对承载力和沉降量作最小二乘法拟合，确定常数；再将其应用到以后的测量中。以下二式即分别表示二者的关系：

$$P_u = f_r - aP_b = ac_1 P_{db} \quad (24)$$

$$S_b = c_2 S_{db} \quad (25)$$

式中， (P_b, S_b) 和 (P_{db}, S_{db}) 分别为静、动 P - S 曲线的屈服点。 c_1, c_2 分别为屈服点力和位移的相关常数。

3.3 测试实例

3.3.1 锤击

对于重锤冲击桩顶的波形记录图等详见胡毅力等(2004)的论文。为使方法叙述清晰，这里做简要叙述。图 2a, b 为中间处理结果，分别显示大锤在较小和较大冲击力时的 F_d - S_d 曲线。显然，只有冲击力足够大时，曲线才出现弯曲，才有可能确定屈服点。

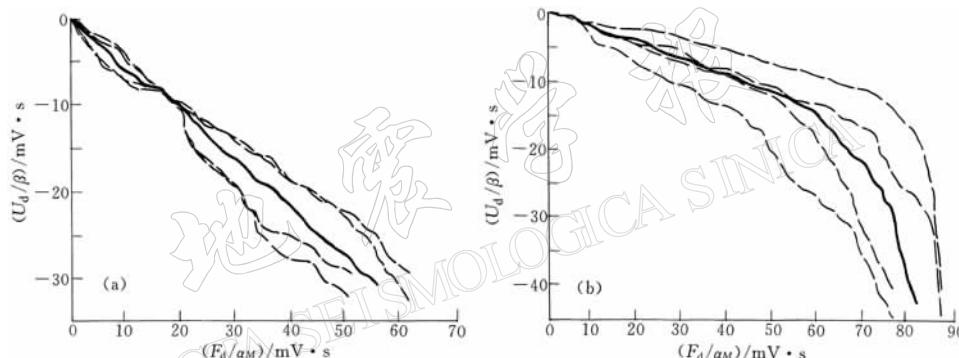


图 2 大锤在较小(a)和较大(b)冲击力时的 F_d - S_d 曲线
细虚线为一个加速度和一个速度检波器测定的曲线，粗实线为两个加速度
和两个速度检波器测定的平均拟合曲线

图 3 为桩的动测结果与静载试验的对比。图 3a 为综合 P - S 曲线。其先由多条动 F_d - S_d 曲线平均合成，再由动静相关常数修订而得到。同时显示了平均拟合后未平滑(实线)和平均拟合后又平滑(虚线)的曲线。图中还表示了屈服点和极限承载力(P_u)及相应沉降量的位置(+)。图 3b 为同一根桩的静载荷 $Q(P)$ - S 曲线。由图看出，动静两条 $Q(P)$ - S 曲线相似，并且两者的单桩极限承载力及其相应的沉降量也相近。

3.3.2 小型火箭筒激振

对于微型火箭筒冲击，可依药量及火箭筒形状参数等计算冲击力

$$F = f_1(m) \times f_2(x) \quad (26)$$

式中， f_1 和 f_2 分别为药量 m 和火箭筒形状参数的函数。在确定桩体产生整体运动后，虽然可通过测定式(12)的各个物理量，并由其计算出单桩极限承载力 f_r 。然而，由于爆破冲击能及机械能转换系数等难于标定等技术方面的原因，我们只能通过对不同桩型、不同承载力等级、不同药量等进行与静载荷对比试验，确定动、静试验相关关系，而后再测定单桩极限承载力及与其相应的沉降量。微型火箭筒冲击桩顶的波形图与锤击波形图相似，但

频率较高。其动测 P-S 曲线也与锤击类似：同样是冲击力较大时，其屈服明显；较小时，呈(直)线性；介于二者之间时，虽为非线性但变化缓慢(所有图件从略)。

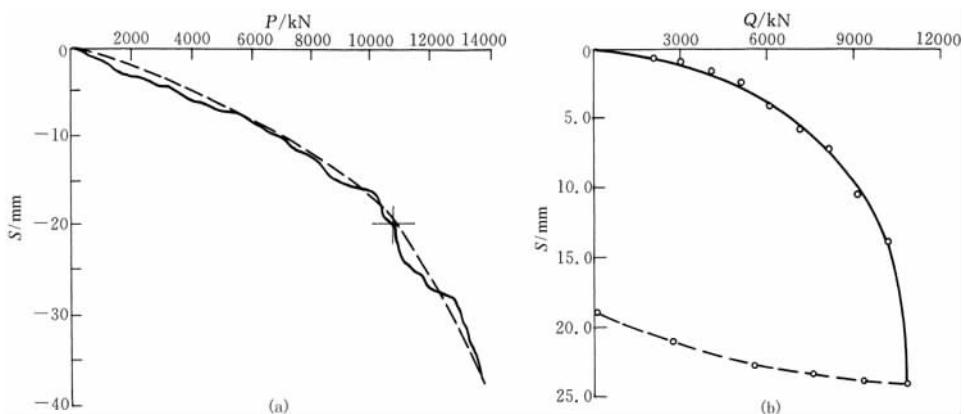


图 3 桩的动测结果与静载试验的对比

(a) 动测 P-S 曲线、屈服点和极限承载力(P_u)及相应沉降量；(b) 同一根桩的静载荷 Q(P)-S 曲线。

桩长：15.1 m；桩径：1.2 m；静载试验最大荷载为 10 750 kN；极限荷载为 10 080 kN

3.4 动测 P-S 曲线的多样性、复杂性及对桩身成型质量的判断

正如静载荷试验一样，动测 P-S 曲线也有多种形式。图 2b、图 3a 显示了基本正常的较为理想的 P-S 曲线，其较为平缓也可能为工程地质本身条件所致。图 4a, b 展示了两种桩身有缺陷的典型图。尤其图 4a，它显示桩身某一段有裂缝或夹泥沙，P-S 曲线显示开始时随压力增加位移迅速增加，但后来压力再增加位移却增加缓慢。这表明桩身缺陷使承载力下降，但随着裂缝闭合承载力又有所回升。具体对承载力影响多少，可由冲击后桩的静位移(下沉)量 S_1 确定： S_1 越大，则承载力下降越多。实际上，式(12)已表明，承载力与 S_1 成反比。只是由于桩身出现缺陷，它会使 S_1 增大很多。由此表明，可从 P-S 曲线判定桩身成型质量。例如图 3a 者可定为 I, II 类(优、良桩)，而图 4 者，则桩身质量出现问题即存在缺陷，但对缺陷程度的判断还需结合承载力进行分析。承载力下降太多者(如 50%)，无疑可定为 IV 类，意为缺陷严重或报废桩。桩身缺陷虽对承载力有所影响，但相差还不太多者，可定为合格桩(II ~ III类)或基本合格(III类)(中华人民共和国行业标准, 2003)。虽然

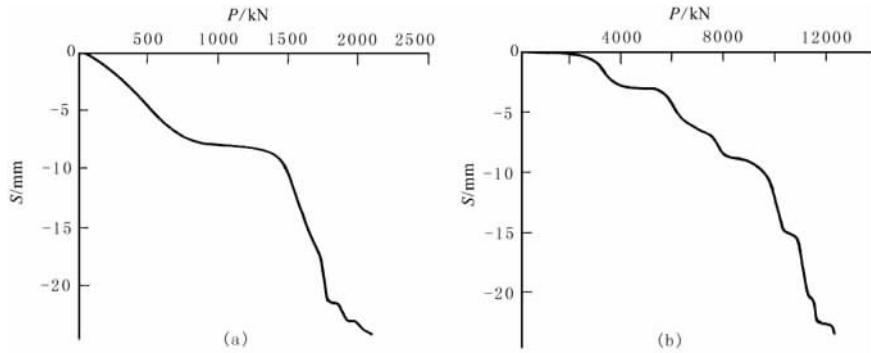


图 4 动测 P-S 曲线的多样性及复杂性

如此, 笔者仍以为, 直接从波形图判断桩身质量则更方便一些.

4 检测对比

表 1 给出几个工地以锤击测得的动载试验结果和静载荷试验结果. 不难看出, 二者的承载力较为接近, 相对偏差一般为 10% 左右, 但均未超过 20%. 表 1 同时给出几个工地以火箭筒测得的动载试验结果和静载荷试验结果. 不难看出, 二者的承载力也较为接近, 两者相差一般为 10% 左右, 并不超过 20%. 在已经进行的检测中, 用重锤冲击单桩极限承载力最大已达 14 000 kN. 但由于火箭筒较小, 药量较少, 用其冲击单桩极限承载力仅达近 2 000 kN; 若要再大, 则需改进制造新的火箭筒. 再者, 今后可以测力计实测受冲击后桩顶所受的力.

这里再次特别强调: 经由式(12)给出的各个物理量测得的单桩极限承载力, 其与静载试验结果相差甚小; 然而, 与承载力相应的沉降量因为是统计对比由经验所得, 因此其与静载试验结果的偏差则不易确定, 有时甚小, 有时却很大(表 1). 再者, 锤击贯入时, 若未测量桩的静下沉量, 而仅由屈服点经验相关常数确定的承载力, 则比能量法测定的承载力偏差要大. 它仅为不易测定静位移时所使用的方法.

实际上, 从式(12)作测量误差分析, 各个量的误差总和可使总(摩)阻力(单桩极限承载力)的相对测量误差接近或达到约 10%, 因此, 动、静测试结果相差 10% 左右属正常范围.

表 1 部分桩动测结果与静载试验的比较

桩号	桩长 /m	桩径 /cm	动 测 结 果		静 载 结 果		相对偏差 $(P_d - P_s)/P_d$
			极限承载力 P_d/kN	相应沉降量 S_d/mm	极限承载力 P_s/kN	相应沉降量 S_s/mm	
德缘 2	28.5	50	1 420	24	1 449.9	26.45	-2.1%
德缘 3	28.5	50	1 660	23	1 611.0	25.40	2.4%
德缘 4	28.5	50	1 470	25	1 557.3	24.55	-5.3%
德缘 6	30.0	50	1 800	23	$\geq 1 772.9$	24.56	1.5%
德缘 7	30.0	50	1 740	24	1 557.3	29.61	10.5%
德缘 11	30.0	50	1 480	20.2	1 557.3	28.17	-5.2%
柳坝 4	25.0	42	1 610	13	1 643	13.79	-2.1%
柳坝 5	25.0	42	1 750	18	1 696	15.58	3.1%
柳坝 7	25.0	42	1 010	14	1 060	18.81	-4.9%
柳坝 8	25.0	42	1 360	15	1 219	22.21	10.4%
楚雄 102	11.0	120	2 950	28	2 800	52	5.1%
楚雄 103	11.0	120	2 910	42	2 800	50	3.8%
宣威Ⅲ7	15.1	120	10 700	25	10 080	14.19	5.8%
宣威Ⅲ8	15.1	120	11 000	30	$\geq 9 240$	≥ 22	16%
宣威Ⅲ9	15.1	120	9 900	25	$\geq 9 240$	≥ 17	6.6%
宣威Ⅰ1	17.1	120	14 900	17	$\geq 14 000$	≥ 15	6.0%
宣威Ⅰ2	17.1	120	15 200	25	$\geq 14 000$	≥ 19	7.4%
宣威Ⅰ3	17.1	120	14 800	25	$\geq 14 000$	≥ 19	5.4%
宣威Ⅱ5	17.1	120	12 800	30	12 096	32.04	5.5%
宣威Ⅱ6	17.1	120	14 600	21	$\geq 14 000$	≥ 23	4.1%

5 讨论和结论

本研究强调通过实测各个物理量, 最后测定承载力。而所选物理量测量方法又较易准确施行。通过实践证明, 以重锤撞击桩顶, 以速度传感器接收讯号, 以位移传感器或精密水准测量位移和下沉量, 而桩长、桩径及密度、纵波速度等都较易准确得到。由于解决了撞击恢复系数 n 和能量转换系数 ξ 的测量方法(难题), 因此, 以式(12)进行分析计算是可行且合理的。然而, 由于式(12)的能量测量总的相对误差、总位移测量的相对误差往往都可能超过 5%, 于是, 总阻力的测量误差可能超过 10%, 但不超过 20%。因此, 与静载荷试验结果对比, 其偏差在 10% 左右是正常的。这就要求尽可能准确测定各个物理量。由式(12)和(16)知, 要使桩产生整体运动, 冲击力必须大于桩的极限承载力。测量前, 先依据设计承载力选择锤重和落高, 或确定火箭筒大小及其药量; 选择调整仪器参数, 尽量使记录图形适中合理。再者, 在桩顶适当加垫层, 避免撞坏桩头。测量后需仔细分析计算等。由于本方法特别是对于锤击, 单桩极限承载力是通过式(12)的各个物理量直接测得, 故在受冲击后桩体必须整体下沉(即有静位移), 这表示, 桩已克服最大静摩擦力向下运动。这就避开了 Smith 法、Case 法所遇到的理论困难, 即其在波动理论推导中, 并未考虑在桩顶附近测力计所测得的力, 其实是要与变形力(波动)、振动力和摩阻力 3 部分力平衡。

通过引入非线性关系, 将桩受冲击后产生的波动、振动和平动合并在一起分析计算。理论分析表明, 当为小位移小应变时, 由桩上同一点记录到的速度和加速度可以分别经过简单积分加速度和微分速度得到, 即它们为线性关系; 而当为大位移大应变时, 即桩相对于土体产生整体滑动时, 速度和加速度则不能经过简单积分和微分得到, 即它们为非线性关系。而观测结果也表明, 即由(21)、(22)两式作绝对值积分所得的关系曲线显示: 当冲击力较小, 即小位移时, 两者为线性关系; 当冲击力足够大, 即大位移时, 两者为非线性关系。于是, 由此即可进行动测 P-S 曲线, 可确定屈服点。单从承载力测定而言, 不必再测 P-S 曲线, 但由于要确定沉降量, 不得不做其后的分析对研究。再者, 非线性分析毕竟是近似处理, 因此, 动 P-S 曲线如图 1 中曲线 2, 3 者较多, 也有近似于图 1 中曲线 1 者, 但绝无如图 1 中曲线 4 者。这是因为对于端承桩, 特别是基岩强度和刚度与混凝土相近时, 这种撞击一般不会使桩破坏, 除非桩身有明显缺陷。也就是说, 这种测试分析方法对前 3 种桩型效果要好于后一种。

本方法的实质是确定桩体是否因冲击而整体产生加速运动, 动 P-S 曲线出现明显屈服点则表示桩体产生整体运动; 而大体为线性者则表示桩体未产生整体运动, 而仅为质点振动。因此, 在动测中, 首先确定冲击力方式及大小, 在确信冲击力比桩土间摩擦力大时, 试验结果才有效; 即使此时依然为缓变曲线, 也可相信其为工程地质本身条件所致。再者, 屈服点力与位移的相关常数 c_1 , c_2 可能因地区而异。此外, 本方法测量结果与静载荷试验相比, 其曲线基本相似, 承载力较准确, 沉降量偏差有时相对较大。

实验过程中云南省地震工程研究院李佩林、华培忠、李正光等, 云南大学地球物理系胡家富等参加了许多工作; 审稿专家对本文提出许多宝贵意见。笔者在此一并表示衷心感谢。

参 考 文 献

- 胡毅力, 许峻, 段永康, 等. 2004. 波列振幅 $P-S$ 曲线测桩法[J]. 地震学报, 26(6): 660~668
- 徐攸在, 刘兴满. 1989. 桩的动测新技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 188~199, 258~336
- 中国建筑科学研究院. 1991. 锤击贯入试桩法规程 CECS 35:91[A]. 见: 刘金砾主编. 桩基工程检测技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 293~310
- 中华人民共和国行业标准. 2003. 建筑基桩检测技术规范 JGJ106-2003[M]. 北京: 中国建筑材工业出版社, 13~18, 32 ~44
- 中华人民共和国行业标准. 2002. 建筑地基处理技术规范 JGJ79-2002[M]. 北京: 中国建筑材工业出版社, 80~81
- 中华人民共和国国家标准. 2002. 建筑地基基础设计规范 GB50007-2002, 附录 Q[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 136 ~138
- Broms B B, Choo L P. 1988. A simple driving formula based on stress-wave measurements[A]. In: Proc 3rd International Conference on Application of Stress-wave Theory to Piles[C]. Ottgwa: Canada Press, 826~841
- Fellenius B H. 1988. Variation of CAPWAP results as a function of the operator[A]. In: Proc 3rd International Conference on Application of Stress-wave Theory to Piles[C]. Ottawa: Conada Press, 814~825
- Rausche F, Gobble G G, Likins E. 1985. Dynamic determination of pile capacity[J]. J Geotechnical Engineering, ASCE, 111(3): 367~383

A NEW METHOD FOR TESTING PILE BY SINGLE-IMPACT ENERGY AND $P-S$ CURVE

Xu Zhaoyong¹⁾ Duan Yongkang²⁾ Wang Bin¹⁾ Hu Yili²⁾
Yang Runhai¹⁾ Xu Jun²⁾ Zhao Jinming¹⁾

1) Institute of Disaster Prevention of Yunnan Province, Kunming 650041, China

2) Kunming Nanfang Technology and Consultation Company for Rock and Soil, Kunming 650091, China

Abstract: By studying the pile-formula and stress-wave methods (e. g., CASE method), the authors propose a new method for testing piles using the single-impact energy and $P-S$ curves. The vibration and wave figures are recorded, and the dynamic and static displacements are measured by different transducers near the top of piles when the pile is impacted by a heavy hammer or micro-rocket. By observing the transformation coefficient of driving energy (total energy), the consumed energy of wave motion and vibration and so on, the vertical bearing capacity for single pile is measured and calculated. Then, using the vibration wave diagram, the dynamic relation curves between the force (P) and the displacement (S) is calculated and the yield points are determined. Using the static-loading test, the dynamic results are checked and the relative constants of dynamic-static $P-S$ curves are determined. Then the subsidence quantity corresponding to the bearing capacity is determined. Moreover, the shaped quality of the pile body can be judged from the formation of $P-S$ curves.

Key words: single impact; energy method; dynamic $P-S$ curves; observation of single-pile bearing capacity; quality estimation of pile body