

振动法与传递函数法结合的试桩技术

潘时声

(浙江省建筑科学研究所, 杭州)

一、引言

目前国内外采用的动力试桩方法可分为大应变法和小应变法两类。小应变法在这之前由于还没有找到桩的承载力与刚度之间的本质关系, 其单桩承载力值只能凭动静对比和经验来确定, 有时误差较大。本文介绍用稳态扫频强迫振动法(简称振动法)和传递函数法的结合检测桩的质量并确定承载力。用传递函数法计算桩的静力受荷性能, 由此得到桩的承载力与刚度之间的本质关系, 再用振动法测得桩的实际刚度和桩身质量, 通过综合分析可确定单桩承载力。

二、试桩基本原理

(一) 稳态扫频强迫振动法

恒定激振力 F 激振桩, 可得如图1所示桩的速度导纳反应曲线^[1], 图中 V_0 和 F_0 分别为桩头振动速度 V 和激振力 F 的振幅, N 为反应曲线稳态区域内 $\left| \frac{V_0}{F_0} \right|$ 的平均值。

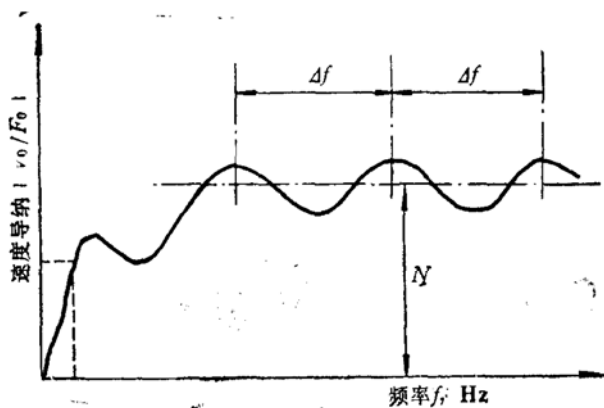


图1 桩的速度导纳反应曲线

估出应力波在桩身中的传播速度 v_c , 再利用速度导纳反应曲线中的共振频率间隔 Δf , 可用下式估算桩长 L , 即

$$L = \frac{v_c}{2\Delta f} \quad (1)$$

估出在桩身混凝土的密度 ρ 和波速 v_c , 利用所测的 N 值, 可估算桩身截面积 A , 即

$$A = \frac{1}{\rho v_c N} \quad (2)$$

若已知桩长 L , 根据反应曲线中的 Δf , 可计算波速 v_c , 根据波速 v_c 可大致计算出桩身混凝土强度。另外, 若利用式(1)计算出的 L 与实际桩长不符, 则说明桩有问题。在振动法计算长度处可能有缩颈、断裂或鼓肚现象。对于实测值 N 与理论计算值 N 进行比较, 可判断桩身质量。实测值 N 越小, 桩身质量越好。相反, 如果实测值 N 比理论计算值 N 大得多, 则桩身质量肯定有问题, 不是截面变小, 就是混凝土质量差。

图1所示的速度导纳反应曲线的初始直线段斜率的倒数再乘以 2π 为桩的刚度 K , 即

$$K = \frac{2\pi f}{\left| \frac{V_0}{F_0} \right|} \quad (3)$$

(二)传递函数法

分析和计算桩荷载传递的基本微分方程为^[2]

$$\frac{ds^2(z)}{dz^2} - \frac{u}{EA} f(s) = 0 \quad (4)$$

式中 u 为桩身截面周长; E 为桩的弹性模量; $s(z)$ 为桩在深度 z 处的位移, $f(s)$ 为桩侧摩阻力, 即为传递函数。

假设桩端位移为 s_b , 单位桩端阻力为 $r(s_b)$, 利用边界条件

$$z = L, s = s_b, \left. \frac{ds}{dz} \right|_{s=s_b} = -\frac{r(s_b)}{E} \quad (5)$$

可得方程(5)的解为

$$C_1 = \frac{r^2(s_b)}{E^2} - \frac{2u}{EA} F(s_b) \quad (6)$$

$$P(z) = EA \sqrt{\frac{2u}{EA} F(s) + C_1} \quad (7)$$

$$\int_{s_b}^s \frac{ds}{\sqrt{\frac{2u}{EA} F(s) + C_1}} = L - z \quad (8)$$

式中 C_1 为积分常数; $F(s)$ 是 $f(s)$ 的原函数; $P(z)$ 是桩任意截面处的轴力。

对于均质地基土中的桩, 假设桩端位移 s_b 后, 可由式(6)求积分常数 C_1 , 然后由式(8)求桩任意深度的位移 s , 由式(7)求桩中轴力。令 $z = 0$, 所求 s 和 P 即为桩顶的位移和荷载。假设一组 $s_{b1}, s_{b2}, s_{b3}, \dots$ 值和 $z = 0$, 即可求得桩顶荷载 P 与位移 s 的关系, 也就是 $P-s$ 曲线。

对于分层地基, 可按以上方法, 从最底下一层开始, 然后一层一层往上计算。

(三) 单桩承载力的确定

用以上介绍的传递函数法, 可得桩的荷载位移曲线, 这样就知道了桩的承载力与刚度之间的关系, 令比值为 K_r 。至于传递函数和 $r(s_b)$, 通过实践证明, 双曲线函数能满足要求, 其值可根据桩侧极限摩阻力和桩端极限支承力确定, 详见参考文献[3]。然后利用振动法所测刚度及相应的桩身质量, 可得桩的承载力, 即计算公式为

$$P_u = \eta K_r K \quad (9)$$

式中 P_u 为其桩极限承载力; K_r 为用传递函数法计算的桩的承载力和刚度的比值; η 为考虑桩的尺寸、桩身质量、土质等因素的误差而需要的修正系数, 根据经验确定, 大致范围为 0.8—2.0, 一般桩均为 1.0。

桩长对桩的刚度、承载力与刚度的比值 K_r 的影响可利用式(6)、(7)和(8)求得, 现举一例子见图2所示。这里桩直径为 0.377m。可看到, 桩的刚度随桩长的变化不大, 而比值 K_r 变化较大, 基本上成直线关系。同理, 图3是桩直径的影响计算结果, 该桩长 15m。可看出, 桩的刚度随桩直径变化较为敏感, 除小直径外, 基本上是线性变化, 而比值 K_r 随直径变化不大。

至于桩周围土的影响也较大, 不能忽略, 请见参考文献[3]。

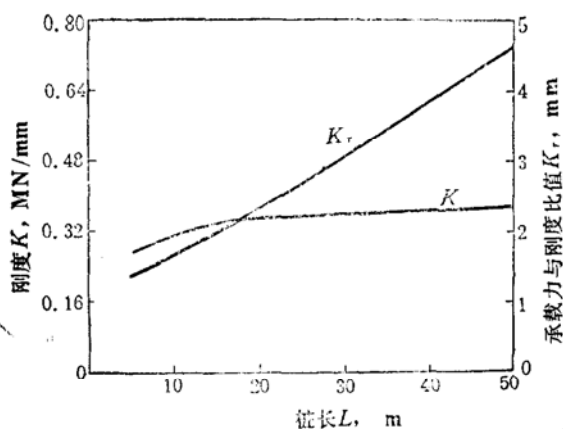


图2 K 与 K_r 随桩长 L 的变化

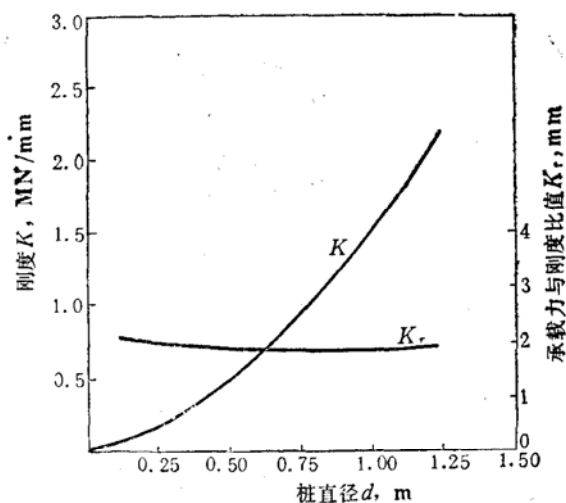


图3 K 与 K_r 随桩直径 d 的变化

三、工程应用与结果分析

(一) 桩基参数测试与质量检验

杭州古荡调谐器配件厂10#桩反应曲线见图4所示。用振动法测得 $\Delta f = 108\text{Hz}$, 速度导纳 $N = 1.17 \times 10^{-8} \text{s/kg}$, 该桩为混凝土灌注桩, 根据其混凝土密度和强度, 取波速 $v_c = 3500 \text{m/s}$, $\rho = 2400 \text{kg/m}^3$, 由此计算得 $L = 16.2 \text{m}$, 桩直径为 0.360m。实际桩长和直径分别为 16.5m 和 0.370m, 误差分别为 -1.8% 和 -2.7%。

镇海石油化工总厂 D_2 和 D_3 桩是边长为0.45m的方形预制桩,桩长分别为20.5m和46.0m。实测反应曲线见图5所示。对于这两根桩,速度导纳平均值 N 均为 $0.49 \times 10^{-6} \text{ s/kg}$,令波速 $v_c = 4000 \text{ m/s}$, $\rho = 2400 \text{ kg/m}^3$,计算得桩截面边长 $a = 0.46 \text{ m}$,误差为2.2%。

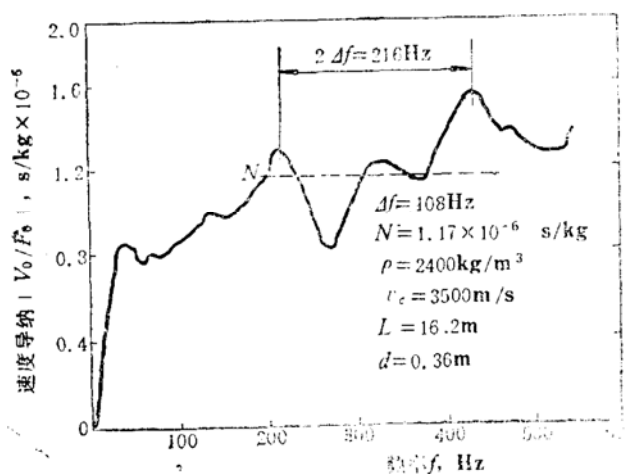


图4 杭州古荡调谐器配件厂10*桩实测反应曲线

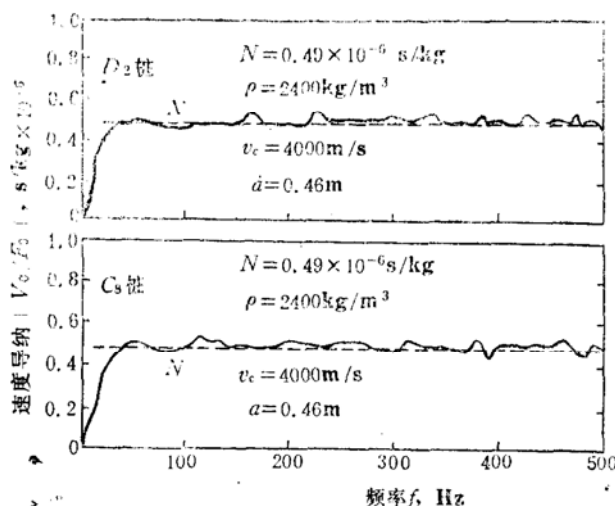


图5 镇海石油化工总厂 D_2 、 C_3 、桩实测反应曲线

杭州千斤顶厂167*桩为17.50m长的灌注桩,直径0.377m,其反应曲线见图6所示,由于该桩顶混凝土质量很差,取波速 $v_c = 3000 \text{ m/s}$,由曲线图估计得 $0.3\Delta f = 934 \text{ Hz}$, $\Delta f = 3113 \text{ Hz}$,由此计算得 $L = 0.48 \text{ m}$,开挖后发现离桩顶0.45m处有严重裂缝,该裂缝上下两部分几乎已完全脱开,手一推即把上面部分推掉。

通过对200多根桩的振动法测试,可知对于短桩能测出桩长和面积,对于长桩有困难。若桩在上部有严重缩颈或断桩,则极易测出,且能估算出大致位置,从图6可看,此种情况非常明显,其反应值很大。

(二)桩的承载力动静对比

50根桩的动静承载力对比结果见表1所示。这些试验都是在1986年和1987年两年内完成的,动测试验均在静载试验之前。用振动法测得桩的刚度 K ,再用传递函数法求桩的承载

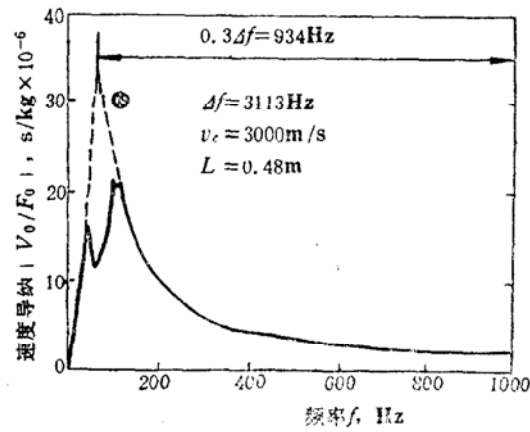


图 6 杭州千斤顶厂 167*桩实测反应曲线

表1 振动法测得单桩极限承载力与静载试验结果比较

序 号	桩 长 (m)	截 面 (m)	类 型	① 静载法 (kN)	② 振动法 (kN)	比 值 ②/①	备 注
1	10.00	φ0.377	灌注桩	250	230	0.92	
2	16.50	φ0.377	灌注桩	160	157	0.98	
3	18.50	φ0.377	灌注桩	220	440	2.00	静载试验桩顶破裂
4	16.50	φ0.377	灌注桩	40	80	2.00	桩顶下0.80m处严重缩颈
5	16.50	φ0.377	灌注桩	450	392	0.87	
6	16.50	φ0.377	灌注注	270	230	0.85	
7	27.20	φ0.377	灌注桩	1400	1411	1.01	
8	27.20	φ0.377	灌注桩	1250	1441	1.15	
9	13.50	φ0.377	灌注桩	640	659	1.03	
10	13.50	φ0.377	灌注桩	740	689	0.93	
11	19.00	φ0.377	灌注桩	400	450	1.13	
12	19.00	φ0.377	灌注桩	340	400	1.18	
13	19.00	φ0.377	灌注桩	420	471	1.12	
14	19.00	φ0.377	灌注桩	360	600	1.67	静载试验桩顶破裂
15	19.00	φ0.377	灌注桩	440	467	1.06	
16	25.00	φ0.377	灌注桩	1030	1050	1.02	
17	25.00	φ0.377	灌注桩	1160	1360	1.17	
18	18.10	0.40×0.40	预制桩	2200	2410	1.10	
19	19.20	0.40×0.40	预制桩	1600	1485	0.93	
20	9.00	φ0.377	灌注桩	110	286	2.60	严重缩颈或断桩

续表1

振动法测得单桩极限承载力与静载试验结果比较

序 号	桩 长 (m)	截 面 (m)	类 型	① 静载法 (kN)	② 振动法 (kN)	比 值 ②/①	备 注
21	9.40	$\phi 0.377$	灌注桩	420	360	0.86	
22	9.50	$\phi 0.377$	灌注桩	650	665	1.02	
23	39.57	0.45×0.45	预制桩	5500	5160	0.94	
24	18.50	0.30×0.30	预制桩	900	980	1.09	
25	12.67	0.30×0.30	预制桩	800	870	1.09	
26	8.40	$\phi 0.377$	灌注桩	900	384	0.93	
27	8.15	$\phi 0.377$	灌注桩	1000	916	0.92	
28	8.30	$\phi 0.377$	灌注桩	430	502	1.17	
29	11.20	$\phi 0.377$	灌注桩	900	734	0.82	
30	20.50	0.45×0.45	预制桩	2420	2413	1.00	
31	20.50	0.45×0.45	预制桩	2034	2219	1.09	
32	20.50	0.45×0.45	预制桩	2730	2189	0.80	
33	46.00	0.45×0.45	预制桩	9000	9426	1.05	
34	46.00	0.45×0.45	预制桩	10000	8580	0.86	
35	46.00	0.45×0.45	预制桩	9500	8711	0.92	
36	44.00	0.45×0.45	预制桩	8000	9086	1.14	
37	7.50	$\phi 0.377$	灌注桩	616	670	1.09	
38	7.50	$\phi 0.377$	灌注桩	672	660	0.98	
39	7.50	$\phi 0.377$	灌注桩	672	580	0.86	
40	7.50	$\phi 0.325$	灌注桩	504	420	0.83	
41	7.50	$\phi 0.325$	灌注桩	504	460	0.91	
42	15.20	$\phi 0.377$	灌注桩	50	113	2.26	严重缩颈或断桩
43	15.20	$\phi 0.377$	灌注桩	290	342	1.18	
44	20.00	$\phi 0.377$	灌注桩	330	332	1.01	
45	15.50	$\phi 0.377$	灌注桩	480	440	0.92	
46	5.78	$\phi 1.130$	灌注桩	5500	4946	0.90	
47	18.00	$\phi 0.325$	灌注桩	200	171	0.86	
48	16.76	$\phi 0.377$	灌注桩	720	720	1.00	
49	16.65	$\phi 0.377$	灌注桩	600	600	1.00	
50	23.00	$\phi 0.377$	灌注桩	520	500	0.96	

力与刚度的比值 K_r 。并考虑用振动法测得桩身质量等因素,即可用式(9)计算桩的承载力。例如7*桩(杭州西湖供销社1*桩),动测刚度 K 为464.6kN/mm,传递函数计算得桩的承载力与刚度之比值 K_r 为3.06mm,该桩质量好,令 η 为1,由式(13)得 $P_u=1411$ kN,实测值为1400kN,两者几乎相等。再例如35*桩(镇海石油化工总厂C₉桩), $K=472$ kN/mm, $K_r=18.456$ mm,计算得 $P_u=8711$ kN,实测值为9500kN,误差为-8.3%。从表中可看出,除了5根有严重问题的桩外,振动法测试结果误差均在20%之内,这对大多数工程来说是容许的。

四、结 语

运用本文介绍的改进的传递函数法能计算桩的刚度和桩的承载力与刚度之比值。且可知,桩的刚度随桩的长度变化不大,对桩截面尺寸变化很敏感,基本上与桩直径成线性关系,对不同土质分布有所影响。桩的承载力与刚度之比值随桩长变化很大,基本上为线性关系,而随桩截面尺寸变化不大,对不同土质分布也有影响。利用桩的振动法测试,对于短桩可以估侧得桩长、截面积和桩身质量等参数。对于缩颈或断裂,振动法则很容易测出,且能估算出大致位置。

用振动法测得桩的刚度,再利用传递函数法计算桩的承载力与刚度之比值,同时考虑振动法所测的桩身质量,可以确定单桩承载力。通过50根桩的动静对比可知,除了桩有严重的缩颈、断裂、混凝土强度甚低等严重的桩身质量问题外,用振动法测得承载力的误差在20%之内,而对于桩身质量有严重问题的桩,虽然不能给出准确的承载力,但振动法能够明显反应出存在的问题。

参 考 文 献

- [1] Davis, A. G., Robertson, S. A., Vibration Testing of Piles, Structural Engineer, London, Vol. 54, No. 6, 1976, pp. A7—A10.
- [2] Kezdi, A., Bearing Capacity of Piles and Pile Groups, Proceedings of the 4th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, London, Vol. 2, 1957, pp. 46—51.
- [3] 潘时声, 混凝土桩动测快速检测新技术, 浙江省建筑科学研究所课题鉴定资料, 1988年。