

瞬态面波预测单桩承载力模型研究

武炜¹, 张献民², 杨进¹, 曹金凤³

(1. 中国地质大学 地球物理与信息技术学院, 北京 100083; 2. 河北工业大学 土建学院, 天津 300132; 3. 中国矿业大学 力学与建筑工程学院, 北京 100083)

摘要:总结了现有单桩竖向承载力检测技术存在的一些问题, 结合实例提出了一种预测单桩承载力的间接方法——瞬态面波法。剪切波速与标贯击数之间也存在着相关关系, 通过标贯击数建立起剪切波速与桩侧摩阻力及桩端阻力的相关模型, 应用瞬态面波测试技术可快速检测桩周土剪切波速, 确定单桩承载力。

关键词:瞬态面波; 预测; 单桩承载力; 桩端阻力; 桩侧摩阻力

中图分类号: P631.4; TU473.16

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2004)01-0088-04

单桩竖向静载荷试验是确定单桩竖向承载力最基本也是目前被认为最可靠的一种方法。由于试验的设备庞大笨重, 故运输、安装比较困难, 试验的时间也长, 一般需 3~7 d。试验时, 试验人员要连续监测纪录 50~100 h, 所以静压试验成本很大。在工程中, 做单桩静载荷试验的只是很少一部分(1%, 且不少于 3 根)。一般也不允许在工程桩上做试验, 特别是不允许用工程桩做锚桩, 需另辟试桩场地。高应变动力试桩可以对单桩承载力进行判定, 也可以评价桩身结构完整性。但该方法介于静载荷和低应变法之间, 其位移仍处于 $Q-s$ 曲线线性阶段, 常需人为给定部分参数, 有时误差很大, 并且需要重锤和大的贯入度。低应变测试时作用在桩顶上的动荷载小于使用荷载, 其能量小, 只能使桩土产生弹性变形, 一般情况下只产生动应变。低应变法从原理上, 不能直接进行承载力的推断, 而是由实测动刚度和静、动对比的修正进行推算, 因此带有很大的地区经验和人为因素。

瞬态面波技术可快速检测桩长范围内的剪切波速, 应用建立的桩侧摩阻力、端阻力与剪切波速度的相关模型, 实现单桩承载力的预测, 并具有较高的精度, 这为单桩承载力预测提供了新的方法技术。

1 瞬态面波测试技术

面波分为瑞雷波和拉夫波, 而瑞雷波在振动波组中能量最强、振幅最大、频率最低, 容易识别也易于测量, 所以面波勘探一般是指瑞雷面波勘探。

1.1 面波的基本理论

在均匀各向同性半无限弹性介质中, 瑞雷波(R

波)是在一定条件下由 P 波与 SV 波叠加后干涉形成, 且其能量主要集中在介质自由表面附近, 能量的衰减与 $1/\sqrt{r}$ 成正比, 因此比体波 $P, S \propto 1/r$ 的衰减要慢的多。综合分析表明 R 波具有如下特点^[1]。

(1) 在波形记录中振幅最大, 能量最强(占 2/3);

(2) 在波形记录中该波组周期最大, 频率最低;

(3) 在不均匀介质中 R 波相速度 v_R 具有频散特性, 此点是面波勘探的物理基础;

(4) 由 P 波初至到 R 波初至之间 1/3 处为 S 波组初至, 且 v_R 与 v_s 具有很好的相关性, 其相关式为

$$v_R = \frac{0.87 + 1.12\mu}{1 + \mu} v_s$$

式中, μ 为泊松比。此关系奠定了 R 波在测定岩土物理力学参数中的应用;

(5) R 波在多道接收中具有很好的直接性, 即一致的波振同相轴;

(6) 质点运动轨迹为逆转椭圆, 且在垂直平面内运动;

(7) R 波是沿地表传播的, 且其能量主要集中在距地表一个波长(λ_R)尺度范围内。

1.2 瞬态面波法的基本原理^[1,2]

瞬态面波法勘探的实质是通过测量不同频率面波的传播速度, 来推断不同深度(距离)的岩土介质性质。在地面上沿波的传播方向以一定的道间距 Δx 设置 $N+1$ 个检波器, 就可以检测到 $N\Delta x$ 长度范围内面波的传播特征。在瞬态面波勘探中, 可以用傅氏变换将时域记录转换为频域记录, 对于频率为 f_i 的频率分量, 可以用互谱法计算相邻检波器记录

的相移 $\Delta\varphi$, 则相邻道 Δx 长度内面波的传播速度 v_{Ri} 可由式(1)计算

$$v_{Ri} = 2\pi f_i \Delta x / \Delta\varphi \quad (1)$$

在满足空间采样定理的条件下, 测量范围 $N\Delta x$ 内的平均波速为

$$\bar{v}_{Ri} = 2\pi f_i N\Delta x / \sum_{j=1}^N \Delta\varphi_{ij}$$

在同一测点对一系列频率 f_i 求取相应的 v_{Ri} 值就可以得出一条 v_R-f 曲线, 即频散曲线。由 $\lambda_R = v_R/f$ 可将 v_R-f 曲线转换为 $v_R-\lambda_R$ 曲线, 此曲线的变化规律就反映了该点介质深度上的变化规律。沿测线不同点的 $v_R-\lambda_R$ 曲线则反映了介质剖面方向上的变化特征。

2 瞬态面波预测单桩承载力模型的建立

用标贯击数 ($N_{63.5}$) 预估单桩承载力在国内外都有采用, 而剪切波速与标贯击数 ($N_{63.5}$) 之间的模型国内外也都有所研究, 通过标贯击数建立起剪切波速与桩侧摩阻力及桩端阻力的相关模型, 利用下式可计算单桩承载力

$$Q_{uk} = u \sum q_{sik} H_i + q_{pk} A_p \quad (2)$$

表1 用 $N_{63.5}$ 估算单桩承载力 a 、 b 、 c 值

土质	q_{sik}						q_{pk}					
	粘性土	红粘土	粉细砂、细砂	中砂	粗砂	砾砂	粘性土	粉细砂	细砂	中砂	粗砂	砾砂
a	98	70	80	90	116	135	1600	1100	1500	1900	2500	2500
b	24	24	30	30	30	30	25	25	25	25	25	25
c	0.05	0.05	0.07	0.07	0.07	0.07	-0.1	-0.05	-0.05	-0.05	-0.05	-0.05

2.2 标贯击数与剪切波速模型选择

国内外大量试验研究成果表明^[4], 剪切波速 v_s 与标贯击数 $N_{63.5}$ 大小均反映着土层的软硬程度, 所以两者之间存在着良好的相关关系(指数关系: $v_s = aN_{63.5}^b$)。考虑到地区性和地层类别的属性, 我们选用国内统计的模型I(4)和模型II(5)及国外的模型III(6)。

$$\text{粘土层: } N_{63.5} = 10 \left(\frac{\lg v_s - 1.8808}{0.413} \right) \quad N_{63.5} < 25 \quad (4)$$

$$\text{砂土层: } N_{63.5} = 10 \left(\frac{\lg v_s - 1.959}{0.299} \right) \quad N_{63.5} = 25 \sim 50$$

$$\text{粘土层: } N_{63.5} = 10 \left(\frac{\lg v_s - 2.0086}{0.292} \right) \quad N_{63.5} < 25 \quad (5)$$

$$\text{砂土层: } N_{63.5} = 10 \left(\frac{\lg v_s - 1.8395}{0.40} \right) \quad N_{63.5} = 25 \sim 50$$

$$\text{粘土层: } N_{63.5} = 10 \left(\frac{\lg v_s - 2.0000}{0.333} \right) \quad N_{63.5} < 25 \quad (6)$$

$$\text{砂土层: } N_{63.5} = 10 \left(\frac{\lg v_s - 1.9031}{0.333} \right) \quad N_{63.5} = 25 \sim 50$$

式中, Q_{uk} 为单桩极限承载力; u 为桩的横断面周长; H_i 为桩周各层土的厚度; A_p 为桩端面积。应用瞬态面波测试技术可快速将桩周土分层, 并测得桩周土剪切波速及层厚, 从而可以经济、简便、有效地对单桩承载力进行普查, 同时可以与静载试验结果进行比较, 得出调整系数, 提高预测的准确性。

2.1 标贯击数与桩侧摩阻力及桩端阻力模型选择

根据弹塑性理论, 土的应力应变关系具有非线性特征, 土的强度随标贯击数增长也是非线性变化的, 文献[3]经大量分析研究得出标贯击数 $N_{63.5}$ 与桩侧摩阻力 q_{sik} 及桩端阻力 q_{pk} 的关系为

$$q_{sik} q_{pk} = ath(N_{63.5}/b + c) \quad (3)$$

式中, a 、 b 、 c 为待定系数, a 值大小反映土强度的极限值; b 、 c 值反映土的强度随标贯击数变化的增长趋势。该模型首先引进双曲正切函数, 其渐近线即代表土强度的极限值。它不但考虑了土层强度的非线性特征, 同时又能反映各类土层强度的极限稳值, 物理概念较明确。依据《建筑桩基技术规范》(JGJ94-94) 推荐的 q_{sik} 、 q_{pk} 值, 将 a 值根据不同土质取为规范给出范围的最大值, b 、 c 值参考文献[3]给定的值确定。以钻孔灌注桩为例给出 a 、 b 、 c 值(表1)。

2.3 瞬态面波预测单桩承载力模型的建立

根据 2.1 及 2.2 模型的选择, 可以建立起剪切波速与桩侧摩阻力及桩端阻力的模型如下式

$$q_{sik} q_{pk} = Ath(B \lg v_s + C) \quad (7)$$

式中, A 、 B 、 C 为待定常数, 其中 A 值反映土强度的极限值, B 、 C 值反映土的强度随波速变化的增长趋势。依据《建筑桩基技术规范》(JGJ94-94) 推荐的 q_{sik} 、 q_{pk} 值, 经计算和统计分析得到 A 、 B 、 C 的值。以钻孔灌注桩为例给出 A 、 B 、 C 值(表2)。

利用 Matlab 软件编制了瞬态面波法预测单桩承载力的程序。在计算时, 先将桩周土按不同土质分层, 然后根据瞬态面波测试结果将每一层按剪切波速不同再分成若干层, 将剪切波速、层厚及桩半径输入程序可得到桩侧摩阻力沿桩身分布图和桩端阻力值及单桩承载力值。

表 2 钻孔灌注桩 A、B、C 值

土 质		模型 I			模型 II			模型 III		
		A	B	C	A	B	C	A	B	C
桩侧摩阻力	粘性土	98	1.0089	-1.8475	98	1.4269	-2.8162	98	1.2512	-2.4525
	红粘土	70	1.0089	-1.8475	70	1.4269	-2.8162	70	1.2512	-2.4525
	粉细砂、细砂	80	1.1148	-2.1139	80	0.8333	-1.4629	80	1.001	-1.8350
	中砂	90	1.1148	-2.1139	90	0.8333	-1.4629	90	1.001	-1.8350
	粗砂	116	1.1148	-2.1139	116	0.8333	-1.4629	116	1.001	-1.8350
	砾砂	135	1.1148	-2.1139	135	0.8333	-1.4629	135	1.001	-1.8350
桩端阻力	粘性土	1600	0.9685	-1.9216	1600	1.3699	-2.8515	1600	1.2012	-2.5024
	粉细砂	1100	1.3378	-2.6707	1100	1	-1.8895	1100	1.2012	-2.3360
	细砂	1500	1.3378	-2.6707	1500	1	-1.8895	1500	1.2012	-2.3360
	中砂	1900	1.3378	-2.6707	1900	1	-1.8895	1900	1.2012	-2.3360
	粗砂	2500	1.3378	-2.6707	2500	1	-1.8895	2500	1.2012	-2.3360
	砾砂	2500	1.3378	-2.6707	2500	1	-1.8895	2500	1.2012	-2.3360

2.4 工程实例

以天津市某工地桩基为例。该楼为 12 层,局部 13 层,基础采用钻孔灌注桩基础,桩长 22.7 m。场地属滨海相冲积平原,场地基本平坦。在 50 m 深度范围内,地基土属第四系全新统及上更新统人工堆积层、陆相冲击层及海相沉积层,地基土按成因时代的不同可分为 8 个大层,从下而上依次为粘土、细砂、粉土、细砂、粉细砂、粉质粘土、粘土及杂填土等。施工前对场地进行了 6 根(组)单桩极限承载力静压测试。

工作条件及技术参数:试验采用 SWS-2 型面波勘探仪,4 Hz 低频拾振器 12 只,道间距 1.0 m。测线布置于每两排桩之间。激振锤为 100 kg,提升高度 1.8 m,然后自由下落,直接锤击地面,或采用 20 磅大锤加垫木板。以 5 号桩为例其测试结果见图

1,利用瞬态面波法预测单桩承载力程序计算结果见图 1b、c、d。对场地进行测试时,现场已开挖,因此用测试结果计算单桩承载力时,应加上浅层 6 m 土的侧摩阻力,按规范取其侧摩阻力值为 15 kPa。

其它桩静载试验的测试及计算结果见表 3、表 4。表 4 中 h 、 v_s 分别为瞬态面波测试的桩周各层土的厚度及剪切波速。表 5 中, Q_{uk2} 为静载测试结果, Q_{uk1} 为瞬态面波方法计算结果, α 为调整系数,其值为与之比。计算表明,用瞬态面波法预测单桩极限承载力时,模型 I 在 0.762 5 ~ 1.007 2 之间,平均值为 0.886 8,标准差为 0.094 2;模型 II 在 0.7562 ~ 1.011 1 之间,平均值为 0.878 4,标准差为 0.091;模型 III 在 0.741 3 ~ 0.987 4 之间,平均值为 0.868,标准差为 0.092。总体上计算略偏于安全,从计算结果来看,用瞬态面波技术预测单桩承载力可以获得较高的精确度。

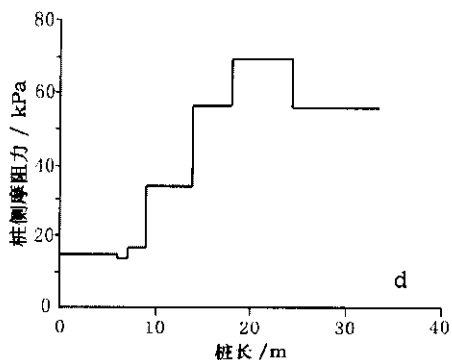
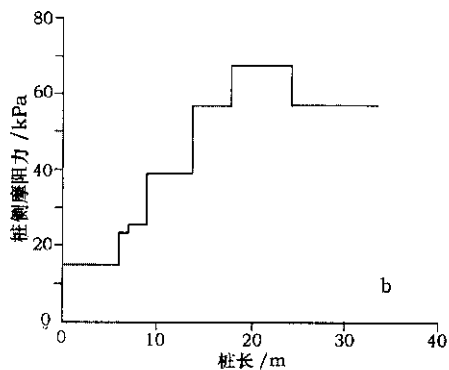
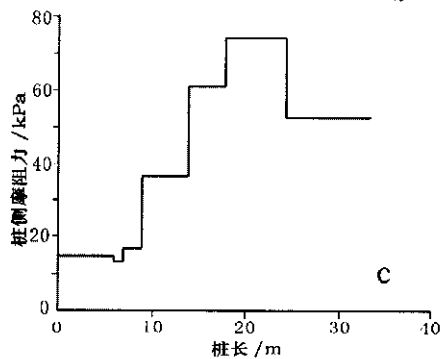
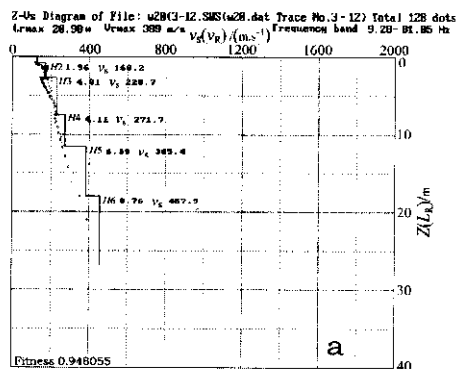


图 1 5 号桩测试结果

a—瞬态面波测试结果;b—模型 I 处理结果;c—模型 II 处理结果;d—模型 III 处理结果

表 3 试验桩瞬态面波测试结果

桩号	1		2		3		4		5		6	
	h/m	$v_s/(m \cdot s^{-1})$	h/m	$v_s/(m \cdot s^{-1})$	h/m	$v_s/(m \cdot s^{-1})$	h/m	$v_s/(m \cdot s^{-1})$	h/m	$v_s/(m \cdot s^{-1})$	h/m	$v_s/(m \cdot s^{-1})$
1	0.77	264.5	1.54	176.4	2.24	342.1	5.86	453.9	6.93	479.1	5.05	499.5
3	0.77	264.5	1.54	176.4	2.24	342.1	5.86	453.9	6.93	479.1	5.05	499.5
4	0.89	106.9	1.37	213.6	3.87	250.4	3.55	169.2	6.79	407.3	9.11	471.7
5	0.63	117.7	1.96	168.2	4.81	220.7	4.11	271.7	6.39	385.4	8.76	457.9
6	0.85	202.9	1.59	168.6	4.11	255.6	4.50	299.7	5.23	341.1	7.79	436.3
7	0.85	202.9	1.59	168.6	4.11	255.6	4.50	299.7	5.23	341.1	7.79	436.3

表 4 瞬态面波法试桩程序计算结果与静载实测结果对比

桩号	桩长/m	Q_{uk2}/kN	模型 I			模型 II			模型 III		
			$Q_{pk}A_p/kN$	Q_{uk1}/kN	α	$Q_{pk}A_p/kN$	Q_{uk1}/kN	α	$Q_{pk}A_p/kN$	Q_{uk1}/kN	α
1	28.9	3300	280.7575	3256.35	0.9868	311.702	3148.42	0.9541	304.9201	3165.80	0.9593
3	33.5	4200	280.7575	3711.40	0.8837	311.702	3643.40	0.8675	304.9201	3650.99	0.8693
4	28.9	3600	305.0531	2745.06	0.7625	277.8341	2722.25	0.7562	298.6669	2668.69	0.7413
5	33.5	3300	310.9488	3323.89	1.0072	283.0818	3336.78	1.0111	304.2098	3258.36	0.9874
6	28.9	3300	295.4691	2787.60	0.8447	269.4484	2806.63	0.8505	289.7145	2737.85	0.8296
7	33.5	3900	295.4691	3259.22	0.8357	269.4484	3241.72	0.8312	289.7145	3201.33	0.8208

3 结论

笔者建立了剪切波速与桩侧摩阻力及桩端阻力 3 种关系模型,在实际工程中可结合当地情况自行选择,同时可以与静载试验结果进行对比,得到调整系数,以提高瞬态面波法的预测精度。

瞬态面波法与静载试验、高应变动力测桩方法相比具有成本显著降低、效率高、无破损等特点,从而可实现现场单桩承载力的普查,打破以往单桩承载力只能抽检的局面。

参考文献:

- [1] 刘康和. 面波探测新技术综述[J]. 电力勘测, 1997, 14(2): 61-64. 19.
- [2] 崔占荣, 张世洪, 张俊喻. 瞬态瑞雷波勘探中一些问题的讨论[J]. 物探与化探, 1995, 19(5): 369-378.
- [3] 刘俊龙. 用标贯击数估算单桩极限承载力[J]. 岩土工程技术, 2000, 14(2): 88-91.
- [4] 杨成林. 瑞雷波勘探[M]. 北京: 地质出版社, 1993.
- [5] 祝龙根, 刘利民, 耿乃兴. 地基基础测试新技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.

THE APPLICATION OF SURFACE WAVE TEST TECHNIQUE TO ESTIMATING THE BEARING CAPACITY OF PILE

WU Wei¹, ZHANG Xian-min², YANG Jin¹, CAO Jin-feng³

(1. Faculty of Geophysical Exploration, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. The Faculty of Civil Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China; 3. China University of mining and Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: The method for determining the load bearing capacity of pile is summarized and the basic principle of the transient surface wave test technique is described in this paper. The application of this technique to estimating the bearing capacity of pile, in particular, is presented with a practical example. The standard penetration test blow count ($N_{63.5}$) related to the shear wave velocity could be used to estimate the bearing capacity of pile. The correlation model of V_s with q_{sik} and q_{pk} was constructed through $N_{63.5}$. The transient surface wave could be used to test the shear wave velocity of soil around the pile and estimate the bearing capacity of pile.

Key words: transient surface wave; estimation; bearing capacity of single pile; tip resistance of piles; lateral friction of piles

作者简介: 武炜(1976-),女,汉族,河北省邯郸市人。1999年毕业于河北建筑科技学院工业与民用建筑专业,2002年河北工业大学获结构工程硕士学位,现为中国地质大学(北京)地球探测与信息技术专业博士研究生。