

波形拟合法在人工挖孔扩底桩承载力测试中的应用

吕芝全¹, 潘纪顺^{1,2}, 刘长来², 海蕊², 王碧辉², 孙方宇²

(1. 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026;

2. 中国地震局地球物理勘探中心, 河南 郑州 450002)

摘要: 从人工挖孔扩底桩的工作机理和波形拟合法的基本原理出发, 结合工程实例阐述了波形拟合法在确定人工挖孔扩底桩承载力中的应用特点及可行性。

关键词: 人工挖孔扩底桩; 高应变; 承载力; 波形拟合

中图分类号: TU473.1⁺6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2002)01-0078-07

0 前言

人工挖孔扩底桩作为一种传统的桩基形式, 多用于桩端具有良好持力层的独立基础, 常采用单桩单柱的形式。确定人工挖孔扩底桩承载力的传统方法是《建筑桩基技术规范》(GBJ94-94)所规定的静载荷试验。这种方法是通过测定荷载与沉降量的关系($Q-s$)来确定单桩极限承载力。该方法既直观又可靠, 但由于桩间距大、单桩承载力高等特点, 采用的堆重平台反力装置很难测出完整的 $Q-s$ 曲线, 不仅花费时间长、耗资巨大、抽验率低、代表性差, 而且不安全。因此, 研究和应用动力测桩法来弥补静载荷试验不足是十分必要的。基桩高应变动力检测法在国际上已有了 30 多年的发展历程, 有关理论和方法技术也已日趋成熟。中国于 1997 年 12 月颁布了国家行业标准《基桩高应变动力测试规程》(JGJ106-97), 标志着高应变测试技术在中国已获得认可和推广。最新发展的波形拟合法, 运用一维波动方程对桩身阻抗和土阻力进行分层分析和计算, 进而计算出单桩承载力和判断桩身的完整性。考虑到人工挖孔扩底桩的桩身尺寸已知, 使波形拟合法在该桩型上的可靠应用成为可能。

1 波形拟合法的基本原理

基桩高应变测试技术是用高能量的冲击荷载考察实际桩土体系。它通常利用重锤打击桩头使桩身产生一永久性位移, 通过对安装在桩顶附近的应变传感器和加速度传感器, 测得桩身中的力波($F(t)$)和速度波($V(t)$), 进行分析计算得出桩的极限承载力。所施加的锤击脉冲力将产生沿桩身传播的应力波, 它满足一维波动方程; 而桩身截面产生的相对运动在桩土界面处激发起土的阻力; 同时这种土阻力又在桩身中激发次生应力波。土阻力在实测曲线上表现为

收稿日期: 2000-11-06

作者简介: 吕芝全(1972-), 男(汉族), 湖北宜都人, 工程师, 中国科学技术大学硕士研究生, 现主要从事岩土工程的测试和研究。

$F(t)$ 曲线和 $V(t)$ (乘以阻抗 Z) 曲线的分离, 其分离的速度和程度正好反映了试验时所激发的土阻力信息. 因此, 利用应力波的分层解析能力可以求取基桩高应变动力检测法所采集数据中的桩-土体系分层分段阻力和阻抗的全部信息.

所谓波形拟合法 (又称实测曲线拟合法), 就是把一条实测曲线 (例如 $Z * V_m(t)$) 作为初始条件和边界条件, 对各种桩土参数进行设定, 然后利用行波理论进行计算, 即可求得另一条曲线的计算结果 ($F_c(t)$). 把计算结果 $F_c(t)$ 和实测结果 $F_m(t)$ 曲线相比较, 根据所显示的差别修改桩土参数的设定值, 再进行下一次的拟和. 经过多次的循环, 直到获得满意的结果, 最终确定符合实际的岩土参数值.

目前各种波形拟合分析软件 (例如 CAPWAP C 软件) 大都采用了连续的数学模型和特征线算法, 能够为每一段桩身设定不同的阻力、阻尼和弹限. 向上运动和向下运动时的土阻力和刚度也可以不等. 另外还可以考虑桩身任意截面处的阻抗变化、桩端处的辐射阻尼、缝隙和开口桩的土塞、以及连续锤击时的残余应力影响等. 这些改进使波形拟合法应用于人工挖孔扩底桩成为可能. 相对其它桩型而言, 人工挖孔扩底桩各段的桩身尺寸已知, 桩身材质相对均匀, 其弹性模量 E 和平均波速 C_a 等桩身模型参数容易确定, 从而可以有效地将沿桩身各段阻抗因素和土阻力因素区别开来, 为运用波形拟合法准确求取人工挖孔扩底桩的单桩极限承载力提供了保证, 大大降低了多解性. 由于受力特性及施工工艺上的特殊性, 高应变实测波形拟合法应用于人工挖孔扩底桩时所采用的具体拟合方法也有别于其它桩型.

2 工程应用实例

下面通过几个具体工程实例来说明实测波形拟合法在人工挖孔扩底桩承载力确定分析中的应用特点.

2.1 实例 1

某水泥厂 17[#]住宅楼 11[#]人工挖孔扩底桩, 设计桩身直径 $d = 800$ mm, 扩大头直径 $D = 1\ 200$ mm, 施工桩长 $L = 8.0$ m. 桩顶以下 6.0 m 处开始扩径, 桩身砼强度等级为 C30, 桩端持力层为卵石层, 设计要求桩端进入持力层不少于 50 mm. 高应变现场动测结束后立即进行静载荷试验, 其荷载 (Q) ~ 沉降 (s) 曲线见图 1. 动测仪器采用武汉岩海公司生产的 RS-1616J 桩基动测仪; 采用 8 t 组合锤打击; 波形拟合分析用美国 GRL 公司开发的 CAPWAP C 软件包. 其实测曲线和拟合曲线见图 2, 分析计算结果见表 1.

根据图 2 中实测力波分解的上、下行波曲线分析, 在 $2L/C$ 时刻之前上行波的值很低, 而且在第一峰值之后, $2L/C$ 时刻之前力曲线和速度曲线并没有出现分离, 表明该桩侧摩阻力值很低; 而在 $2L/C$ 时刻之后上行波的值上升很快, 此时端阻力急剧开始增加, 只是端阻力的发挥要相对滞后. 该桩的阻力分布反映了端承桩的受力特性, 而拟合分析结果正好说明了这一点. 后面 2 个实例中的实测波形亦具有类似特征. 同时对比表 1 和该场地《岩土工程勘察报告》可以发现, 拟合计算所得到的桩侧单位摩阻力值要比实际桩侧对应土层的极限侧摩阻力标准值低约 30 %, 而且扩大头上部 1 ~ 2 个单元所对应的侧摩阻力有减小的迹象, 这一现象同文献 [5] 的结论相吻合.

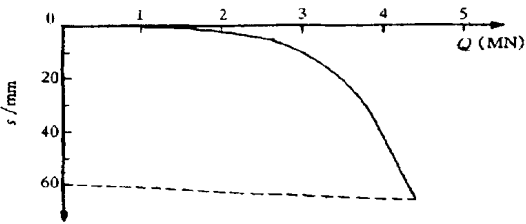


图 1 11[#]桩 Q - s 曲线
Fig.1 Q - s curve of 11[#] pile.

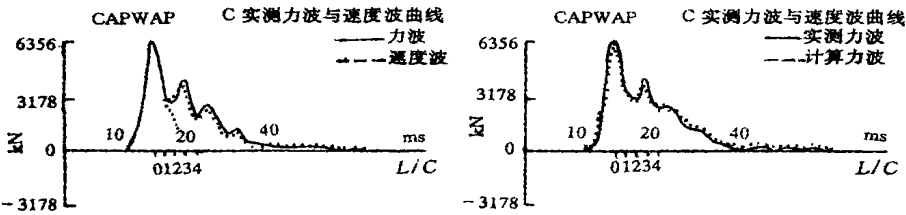


图 2 11[#]桩实测曲线和拟合波形

Fig. 2 Measured waves and fitting waves of 11[#] pile.

在利用实测波形拟合法分析人工挖孔扩底桩过程中,可直接输入桩身模型(非均匀桩模型)参数,包括分段桩身阻抗值.这些参数很容易确定,可视为已知值.因此在分析计算过程中重点应放在桩侧土、特别是桩端土参数的拟合上,这一点有别于其它灌注桩的分析.11[#]桩的拟合计算表明,对扩底桩而言,2 L/C 时刻之前的波形段比较容易拟合,桩侧弹限 Q_{skn} 值相对稳定,一般在 2.5 mm 左右,桩侧土阻尼系数很小;桩端扩大头处对应 2 L/C 时刻附近的波形难以拟合,需考虑的因素较多,主要表现在以下几个方面.

表 1 11[#]桩 CAPWAP C 拟合结果表

单元号	深度 /m	弹限 /mm	阻力 /kN	单位桩侧/ 端阻力 /kPa	阻 尼 系 数		阻力 总 和 /kN
					Case	Smith /[s ⁻¹ m ⁻¹]	
1	1.1	2.54	45.00	19.16	0.007 5	0.45	
2	2.3	2.54	45.00	19.16	0.007 5	0.45	
3	3.4	2.54	46.00	19.59	0.007 7	0.45	
4	4.5	2.54	39.34	16.75	0.006 6	0.45	
5	5.7	2.54	56.20	16.98	0.004 6	0.45	
6	6.8	2.54	150.34	35.21	0.007 6	0.45	
桩端		16.00	3 280.0		0.763 8	0.48	3 662.0

- (1) 桩端弹限 Q_{toe} 的调整
- 增大 Q_{toe} 值会延迟桩端土的加载与卸载,从而导致计算力曲线 $F_c(t)$ 在 2 L/C 时刻处降低,稍后的部位则升高;反之亦然.本例中计算 Q_{toe} 达到 16 mm,属于大 Quake(弹限)值情形,它常出现在桩端进入硬持力层的情况.实测波形上表现为土阻力响应滞后,速度曲线在 2 L/C 时刻之后陡降.实践表明,对于桩端持力层较好的扩底桩来说,桩端 Q_{toe} 值一般都很 大,有时甚至超过 20 mm,这意味着桩端土阻力的发挥需要很大的位移,这也是图 1 中沉降 s 很大的原因.人工挖孔扩底桩一般都表现出高 Q_{toe} 现象.
- (2) 桩端土阻尼系数 J_{toe} 的选取
- 增大 J_{toe} 值会使 2 L/C 时刻处的计算力曲线 $F_c(t)$ 升高,但 J_{toe} 值过高会在 2 L/C 时刻以后的计算曲线中产生高频振荡; J_{toe} 值过低则出现低频振荡.大量拟合计算发现 J_{toe} 值都小于 1,而且对扩底桩有 $J_{toe} > J_{skn}$ (桩侧土层阻尼系数),这也是由扩底桩的端承受力特性所决定的.
- (3) 桩端土卸载系数 C_{toe} 的影响
- 它对波形拟合的影响类似于 Q_{toe} ,增大 C_{toe} 值将延迟桩端土的卸载,从而使 $F_c(t)$ 曲线的尾部上升.对于桩长较短的端承桩来说, C_{toe} 值一般取 0.2 ~ 1,但当桩底存在虚土时也可能大于 1.
- (4) 桩底土隙 T_{gp} 的设置

T_{gap} 能够延缓桩底土阻力作用的充分发挥. 减小 T_{gap} 值会使 $2L/C$ 时刻前面附近的 $F_c(t)$ 曲线上升, $2L/C$ 时刻以后附近的 $F_c(t)$ 曲线下降. 挖孔扩底桩在施工过程中难免出现孔底虚土清理不干净, 或混凝土与持力层胶结不好, 此时在桩端设置一定厚度的缝隙比较符合实际情况. 此外当桩端持力层很坚硬时, 桩身在重锤的打击作用下将会出现不同程度的回弹, 从而使桩端不能与持力层很好地接触. 此时如果设置一合适的 T_{gap} 值并将其加到 Q_{toe} 上将有助于 $2L/C$ 处 $F_c(t)$ 曲线较高时的拟合. T_{gap} 最大值一般不得超过 2 mm .

除上述几个参数之外, 平均波速 C_a , 总阻力 R_u 和桩端阻力 R_{toe} 也是影响扩底桩实测波形尾部 $2L/C$ 附近拟合质量的重要参数. 这些参数对整个波形拟合效果的影响是相互的, 因此宜综合调整.

运用上述方法对 11[#] 桩的实测曲线进行拟合分析得到该桩单桩极限承载力 $R_u = 3\,662\text{ kN}$, 其中端承力 $R_{\text{toe}} = 3\,280\text{ kN}$, $J_{\text{skn}} = 0.04$, $J_{\text{toe}} = 0.76$, 各参数均在合理范围之内. 而根据图 1 按照有关规范所确定的单桩极限承载力为 $4\,000\text{ kN}$, 动静对比相对误差为 8.5% , 这个结果是完全可以接受的.

2.2 实例 2

某造纸厂抄纸完成车间 A24—25[#] 人工挖孔扩底桩, 设计桩身横截面为“椭圆形”, 面积 $A_d = 5.77\text{ m}^2$, 扩大头底面积 $A_D = 7.14\text{ m}^2$, 施工桩长 $L = 7.6\text{ m}$. 桩顶以下 4.8 m 处开始扩径, 桩身砼强度等级为 C30, 桩端持力层为细砂层. 高应变动测结束后, 因所提交的承载力结果偏低故又对该桩做静载荷试验以验证其承载力. 测试仪器采用 RS-1616J 桩基动测仪, 用 10 t 组合锤打击, 波形拟合采用 CAPWAP C 软件. 静荷载 $Q-s$ 曲线见图 3, 高应变实测曲线和拟合曲线见图 4, 计算结果见表 2.

采用实例 1 中的分析思路拟合计算得到 A24—25[#] 桩极限承载力 $R_u = 3\,658.5\text{ kN}$, 而根据图 3 求得该桩极限承载力为 $4\,200\text{ kN}$, 动静对比相对误差为 13% . 由表 2 可看出该桩的端承力 $R_{\text{toe}} = 3\,087\text{ kN}$, 换算得到桩端土的极限端阻力标准值 $q_{\text{pk}} = 432\text{ kPa}$, 是文献[2] 中相应土层的 q_{pk} 取值的 60% , 这说明除了施工质量之外, 桩身尺寸效应对大直径灌注桩, 特别是某些非常规桩型桩端极限阻力的发挥所起的“折扣”作用是不容忽视的. 此外, 一维波动分析理论用于小长径比

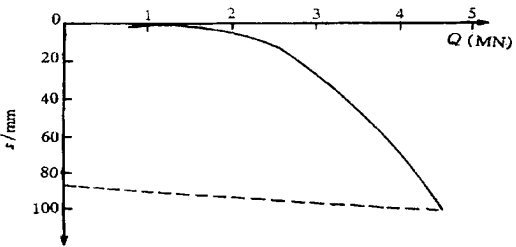


图 3 A24—25[#] 桩 $Q-s$ 曲线
Fig. 3 $Q-s$ curves of A24—25[#] pile.

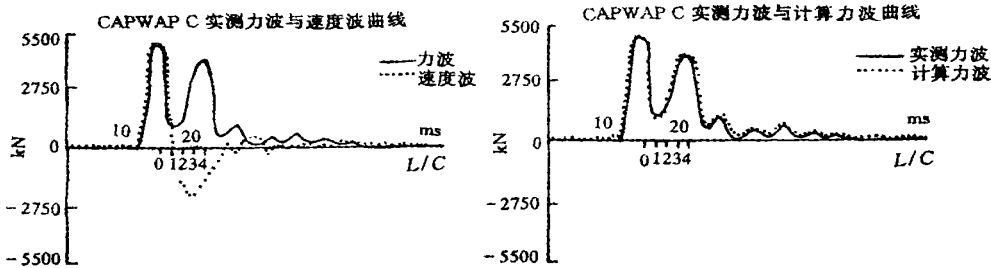


图 4 A24—25[#] 桩实测曲线和拟合波形
Fig. 4 Measured waves and fitting waves of A24—25[#] pile.

(L/D) 的“墩基”型桩能否有效也是影响扩底桩高应变承载力测试结果可靠性的重要因素。

2.3 实例 3

某市人民会堂 58[#] 人工挖孔扩底桩, 设计桩身直径 $d = 1\,200\text{ mm}$, 扩大头直径 $D = 2\,000\text{ mm}$, 施工桩长 $L = 7.2\text{ m}$, 桩端持力层为卵砾石层, 桩顶以下 4.5 m 处开始扩径, 桩身砼强度等级为 C30, 在成孔过程中设置 10 cm 厚的外齿式护壁. 高应变动测仪器采用美国 PDI 公司生产的 PAL 打桩分析仪, 用 20 t 组合锤打击, 波形拟合采用 CAPWAP C 软件, 其实测曲线和拟合曲线见图 5, 计算结果见表 3.

表 2 A24—25[#] 桩 CAPWAP C 拟合结果表

单元号	深度 /m	弹限 /mm	阻力 /kN	单位桩侧/ 端阻力 /kPa	阻 尼 系 数		阻力 总 和 /kN
					Case	Smith /[s^*m^{-1}]	
1	1.1	2.54	51.03	10.00	0.001 8	0.73	
2	2.2	2.54	61.03	12.00	0.001 7	0.71	
3	3.3	2.54	81.23	16.00	0.002 2	0.76	
4	4.3	2.54	81.03	14.70	0.001 8	0.75	
5	5.4	2.54	76.54	12.75	0.002 5	0.69	
6	6.5	2.54	92.06	13.54	0.002 1	0.75	
7	7.6	2.54	128.60	18.37	0.003 4	0.75	
桩端		13.19	3 087.0		0.564 2	0.78	3 658.5

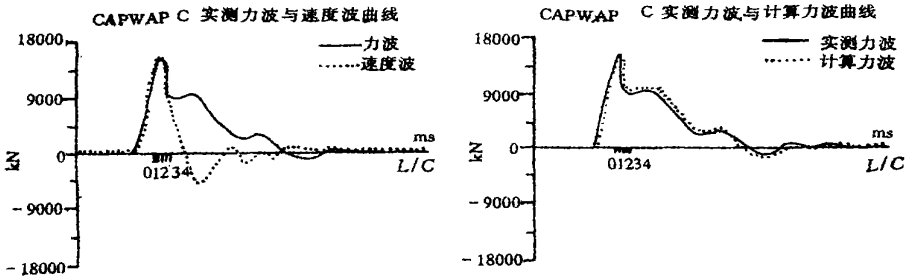


图 5 58[#] 桩实测曲线和拟合波形

Fig. 5 Measured waves and fitting waves of 58[#] pile.

表 3 58[#] 桩 CAPWAP C 拟合结果表

单元号	深度 /m	弹限 /mm	阻力 /kN	单位桩侧/ 端阻力 /kPa	阻 尼 系 数		阻力 总 和 /kN
					Case	Smith /[s^*m^{-1}]	
1	1.1	2.16	178.66	36.95	0.013 2	0.83	
2	2.2	2.16	198.50	41.05	0.017 0	0.83	
3	3.3	2.54	223.79	46.28	0.021 9	0.83	
4	4.4	2.54	283.85	58.70	0.028 8	0.89	
5	5.5	2.48	309.73	52.75	0.032 5	0.95	
6	6.6	2.48	335.80	48.56	0.032 1	0.95	
桩端		9.12	9 369.17		0.864 2	1.46	10 899

从图 5 可看出, 尽管最大锤击力高达 16 MN, 但所激发出来的桩端土的阻力似乎并不高, 而由实测速度曲线计算得到的贯入度偏低, 这说明桩端阻力激发不充分. 实测曲线拟合过程中表现为: 尽管增大 Q_{toe} 值, 但总静阻力并不增加, 而且桩端 Smith 阻尼系数 S_{toe} 高达 1.46 s/m.

射阻尼模型来模拟 58[#]，CAPWAP C 中的辐

，

2.5 %，

B_{Tdp} 和支撑重量 M_{toe} 。

$0.2 \leq B_{Tdp} \leq 1$ ， M_{toe} 一般不低于直径为扩底直径、3 倍直径的桩底土柱的重量， B_{Tdp} 又不起作用。

S_{toe} 大于 1.0 s/m、Quake 值较低时，

(10 %).

，58[#]

3 中的结果是合理而且可靠的。3 还可看出， Q_{toe} 虽然比实例 1、2 中的 Q_{toe} 低，Quake=2.39 而言该人工挖孔桩表现出大 Quake 值现象，

3 结论与建议

波形拟合法在测试人工挖孔扩底桩承载力测试方面是可行的

(10 %)，

“ ”

(L/D)

L/D 下限的确定还有待于进一步的研究。

[

[1] . JGJ 106—97. [S] . : , 1997.

[2] . GBJ94—94. [S] . : , 1995.

[3] , . [M] . : , 1989.

[4] . PDA 动力测桩技术的原理和在中国应用[A] . : [C] , 1993.

[5] , , . [J] . , 1999, (2).

[6] Goble Rausche Likins and Associates Inc. CAPWAP Users Manual (Version 1996)[Z] . Cleveland Ohio, USA. 1996.

[7] Goble Rausche Likins and Associates Inc. . CAPWAP Guide. (Version 1996)[Z] . Cleveland, Ohio, USA. 1996.

[8] . , CCWAPC 用户手册[Z] . 1996.

[9] . [Z] . 1992.

APPLICATION OF THE WAVEFORM FITTING METHOD IN DETERMINING
BEARING CAPACITY OF ARTIFICIAL EXCAVATED BELLED PILE

Lu Zhi-quan¹, Pan Ji-shun^{1,2}, Liu Chang-lai²,
Hai Rui², Wang Bi-hui², Sun Fang-yu²

(1. *University of Science and Technology of China , Hefei 230026, China;*
2. *Research Center of Exploration Geophysics, CSB, Zhengzhou 450002, China*)

Abstract: Based on the mechanism of artificial excavated belled pile foundation and the basic principle of waveform fitting method, features and practicability about the method applied to determining bearing capacity of the pile foundation are explicated in associated with several practical engineering examples.

Key words: Artificial excavated belled pile; High strain; Bearing capacity; Waveform fitting