

基桩缺陷量化低应变动测研究

Quantitative analysis of defects to piles in foundation with low strain dynamic test

张献民^{1,2}, 蔡靖¹, 王建华¹

(1. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300072; 2. 河北工业大学 土建学院, 天津 300132)

摘要: 针对瞬态激振条件下均质土中桩存在缺陷的定解问题, 研制了分析程序。通过大量正演计算, 拟合出桩周土为黏土、砂土、粉土条件下缺陷程度与时域速度响应波形中入射波与反射波波幅比之间的关系式。模型桩试验分析结果表明, 本文给出的缺陷量化分析方法可取得显著效果。

关键词: 基桩; 缺陷; 低应变动态测试; 定量分析

中图分类号: TU 473.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2003)01-0047-04

作者简介: 张献民(1959-), 男, 天津大学博士生, 河北工业大学教授。主要从事土木工程动态测试理论的研究。

ZHANG Xian-min^{1,2}, CAI Jing¹, WANG Jian-hua^{1,2}

(1. School of Constructional Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Hebei University of Technology, Tianjin 300132, China)

Abstract: The software is developed for the vibration response to exciting force on defective piles in homogeneous soil. Using this software, the relationship between degree of defect and ratio of amplitude was studied, in which the influence of the characteristics of the soil around piles is taken into account. Finally, model pile test was done to verify the accuracy of quantitative analysis theory.

Key words: pile; defect; dynamic test with low-strain; quantitative study

0 引言*

因地质和施工等方面的原因, 基桩常出现缩颈、扩颈、断裂、离析等缺陷, 从而影响桩基承载力及上部结构的安全。因此, 桩的完整性检测是工程界十分关心的问题。基桩完整性低应变无损检测技术, 已在工程中发挥了重要作用。但目前对基桩缺陷仅能给出定性评价, 没有量化指标。而工程要求必须对缺陷桩的类别作出划分, 而划分又必须依据基桩的实际缺陷程度。

对桩土模型波动响应分析, 可实现不同缺陷桩的正演计算^[1~3]。但要对实测曲线的反演拟合尚存在许多问题: 如不同性能的传感器, 其实测曲线会存在不同程度的差别, 须使用专门标定的传感器, 才有可能与软件配套使用, 这就限制了基桩缺陷正演拟合分析技术在实际中的应用。本文通过大量正演计算, 对不同桩周土条件下缺陷程度与时域速度响应波形中入射波波幅与反射波波幅的比值进行了相关性分析, 给出了基桩低应变量化分析的简便有效方法。

1 缺陷桩瞬态激振响应分析

在缺陷桩瞬态响应分析方面已开展了研究^[1,2], 对桩土体系模型, 我们作如下规定: ①桩为线弹性变截面均质杆, 桩长为 L , 在桩身密度 ρ 、弹性模量 E 恒定的情况下, 按桩身截面面积的不同将桩分为 N 段, 截面

面积自下而上分别为 $\bar{A}_1, \bar{A}_2, \dots, \bar{A}_n$, 相应的截面周长为 $C_1, C_2, \dots, C_n$, 截面直径为 $D_1, D_2, \dots, D_n$, 每段桩的高度为 $h_1, h_2, \dots, h_n$ 。②桩处于均质土中, 桩周土对桩的作用简化为与振速成正比的分布阻尼力 c_s 和与位移成正比的分布弹性力 k_s 以并联的方式耦合。③桩底土对桩的作用简化为线性弹簧 k_b 和线性阻尼器 c_b 并联的方式。④桩土系统振动为小变形。

根据上述概化的缺陷桩分析模型。桩身第 j 段质点振动位移 $u_j(x, t)$ 所满足的微分方程为

$$\bar{A}_j E_j \frac{\partial^2 u_j}{\partial x^2} - c_s C_j \frac{\partial u_j}{\partial t} - k_s C_j u_j = \bar{A}_j \rho \frac{\partial^2 u_j}{\partial t^2}, j = 1, 2, \dots, n. \quad (1)$$

将方程式(1)两边同除以 $\bar{A}_j \rho$ 得

$$v^2 \frac{\partial^2 u_j}{\partial x^2} - G_j \frac{\partial u_j}{\partial t} - W_j u_j - \frac{\partial^2 u_j}{\partial t^2} = 0, \quad (2)$$

其中, $G_j = c_s C_j / \bar{A}_j$, $W_j = k_s C_j / \bar{A}_j$, $v = \sqrt{E/\rho}$ 。式(2)加之初始条件、边界条件及桩段分界面处位移和力的连续性条件, 即构成了缺陷桩振动响应的边值问题。

用Laplace积分变换法解上述边值问题。可得桩顶速度频率响应 $H_v(\omega)$, 当在桩顶作用任意激振力

* 基金项目: 河北省建设科学基金资助项目(99128)

收稿日期: 2002-04-15

$q(t)$, 其 Fourier 变换为

$$Q(i\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} q(t) e^{-i\omega t} dt, \quad (3)$$

则 $V(i\omega) = H_v(i\omega) \cdot Q(i\omega)$, 其中 $V(i\omega)$ 为桩顶速度响应 $\bar{v}(t)$ 的傅立叶变换。因此, 桩顶速度响应为

$$\begin{aligned} \bar{v}(t) &= \text{IFT}[Q(i\omega) \cdot H_v(i\omega)] \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} H_v(i\omega) \cdot Q(i\omega) e^{i\omega t} d\omega. \end{aligned} \quad (4)$$

根据上述模型研制了分析程序, 图 1 为扩颈桩的计算结果。对缺陷桩的速度响应分析, 可得到缺陷程度 $\delta = \Delta D/D$ 与入射波、反射波的振幅比 A_1/A_2 之间的关系式, 从而实现时域中的缺陷量化分析。

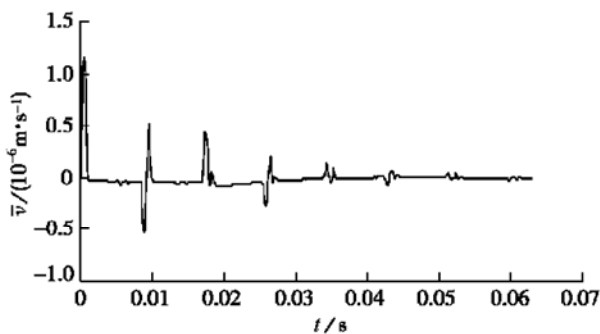


图 1 缺陷桩速度响应曲线
Fig. 1 Velocity response curve of defective pile

2 缺陷量化分析

本文重点分析基桩缩颈、扩颈的程度与响应曲线中入射波与反射波波幅比之间的关系, 对于离析等缺陷可通过波阻抗的等效换算来实现分析。利用程序进行大量正演计算, 拟合出桩侧土为黏土、砂土、粉土的地质条件下桩径变化程度 $\delta = |D_1 - D_2|/D_1$ 与入射波、反射波相对幅值之间的关系式。这里约定 D_1 为正常桩的桩径, D_2 为缺陷处的桩径。

在正演曲线中, 得到的波形是桩顶质点的振动情况, 设入射波幅值为 A_1 , 桩顶接收的反射波幅值为 A_2 。桩本身和桩周土都有阻尼作用, 但是桩和桩周土比较, 其阻尼影响小得很多, 通常可忽略不计。因此, 在分析讨论时, 主要研究桩侧土阻尼因子 J_s 、桩端土阻尼因子 J_p 以及缺陷位置变化时, δ 与 A_1/A_2 之间的关系。计算分析表明, 缺陷长度过小时, 即使缺陷程度较大, 也不会有较明显的反射波, 此时的反射波幅已不能客观地反映缺陷程度, 本文的计算模型中未考虑缺陷过小的情况, 取缺陷长度为 0.5 m 作为计算依据。

对于桩周土阻尼系数国内外有多种取值^[4-7], 综合桩周土阻尼系数的取值, 并考虑较大的应用范围, 本文采用: 砂土 $J_s = 0.11 \sim 0.22$, $J_p = 0.48$; 粉土 $J_s = 0.2 \sim 0.3$, $J_p = 0.49$; 黏土 $J_s = 0.44 \sim 1.1$, $J_p = 0.6$ 。应当

指出, 由于土的复杂性, 实际条件下的阻尼因子量值可能与本文给出的范围存在差别, 但这并不影响本方法的应用, 实际应用时, 可根据现场完整桩的时域曲线波幅比, 反推桩周土的阻尼系数。

2.1 黏土中桩存在缩颈时的量化分析

黏土中我们取桩侧阻尼因子 $J_s = 0.44 \sim 1.1$, 桩端阻尼因子 $J_p = 0.6$ 。将这两个参数代入缺陷桩速度响应模型进行计算, 得到黏土中缺陷桩的速度响应曲线, 从而确定 $\delta - A_1/A_2$ 的关系式。对桩侧阻尼因子为 0.44, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.1 条件下, 在桩身 4, 8, 12, 16, 20, 24, 28 m 处存在缺陷, 其程度与波幅比之间的关系曲线进行了计算, 图 2, 3 所示是阻尼因子为 0.6, 0.8 时的计算结果, 其它阻尼因子量值下均获得了类似的结果。结果表明, 同一阻尼因子下 $\delta - A_1/A_2$ 的关系曲线有相同的趋势。

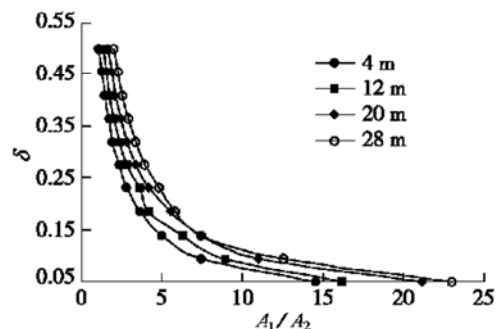


图 2 阻尼因子为 0.6 时的 $\delta - A_1/A_2$ 曲线
Fig. 2 $\delta - A_1/A_2$ curves with damping coefficient 0.6

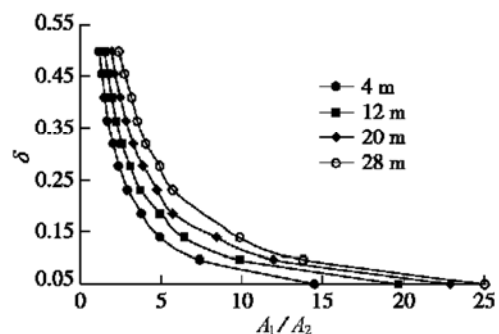


图 3 阻尼系数为 0.8 时 $\delta - A_1/A_2$ 的曲线
Fig. 3 $\delta - A_1/A_2$ curves with damping coefficient 0.8

用最小二乘法拟合各条曲线, 曲线拟合情况如图 4, 5 所示。计算分析表明, 缺陷程度与波幅比之间的关系可表示为

$$\delta = a(A_1/A_2)^b, \quad (5)$$

其中 a, b 是与桩侧土阻尼因子和缺陷位置有关的系数。在不同土质、缺陷性质及缺陷位置下其取值不同。黏土中桩有缩颈时 a, b 的取值如表 1 所示。从表 1 中可以看出: 不同桩侧阻尼因子下, b 变化不大, a 随着缺陷位置的变化规律基本相同, 其关系曲线如图 6, 7 所示。在同一桩侧阻尼因子下, 系数与缺陷位置的

表 1 黏土中桩有缩颈缺陷时 a, b 的取值(h 为缺陷深度)
Table 1 The value of a and b of a necking pile locates in clay

h/m	$J_s = 0.44$		$J_s = 0.5$		$J_s = 0.6$		$J_s = 0.7$	
	a	b	a	b	a	b	a	b
4	0.5716	- 0.9015	0.5723	- 0.9088	0.5766	- 0.8992	0.5918	- 0.9148
8	0.6343	- 0.9320	0.6352	- 0.9210	0.6474	- 0.9066	0.6780	- 0.9319
12	0.6455	- 0.8994	0.6632	- 0.9034	0.7081	- 0.9242	0.7350	- 0.9346
16	0.6869	- 0.9230	0.7164	- 0.9238	0.7707	- 0.9546	0.7736	- 0.9267
20	0.7462	- 0.9115	0.7825	- 0.9079	0.8115	- 0.8946	0.8713	- 0.9041
24	0.7854	- 0.9625	0.8125	- 0.9523	0.8705	- 0.9496	0.9546	- 0.9612
28	0.8722	- 0.9370	0.9091	- 0.9330	0.9914	- 0.9463	1.0577	- 0.9158

h/m	$J_s = 0.8$		$J_s = 0.9$		$J_s = 1.0$		$J_s = 1.1$	
	a	b	a	b	a	b	a	b
4	0.5983	- 0.9178	0.5994	- 0.9066	0.6039	- 0.9077	0.6200	- 0.9237
8	0.6861	- 0.9178	0.7043	- 0.9283	0.7253	- 0.9433	0.7296	- 0.9178
12	0.7338	- 0.8935	0.7956	- 0.9438	0.8307	- 0.9564	0.8311	- 0.9292
16	0.7981	- 0.9089	0.8459	- 0.9158	0.8919	- 0.9364	0.9366	- 0.9247
20	0.9295	- 0.9191	1.0086	- 0.9376	0.9792	- 0.8670	1.1286	- 0.9266
24	1.0290	- 0.9674	1.1033	- 0.9642	1.2236	- 0.9938	1.3529	- 1.0010
28	1.2337	- 0.9779	1.4030	- 0.9922	1.3131	- 0.9039	1.5357	- 0.9328

关系是非线性的, 且随着缺陷位置的增大, 系数呈非线性增长; 在同一深度, 系数随桩侧土阻尼系数的增大而增大。采用二次多项式拟合它们之间的关系, 曲线拟合情况如图 6, 7 所示。经计算分析, 不同桩侧阻尼因子下的拟合关系可表示为

$$a = \xi_1 h^2 + \xi_2 h + \xi_3, \tag{6}$$

式中 ξ_1, ξ_2, ξ_3 为系数, 其具体取值见表 2。

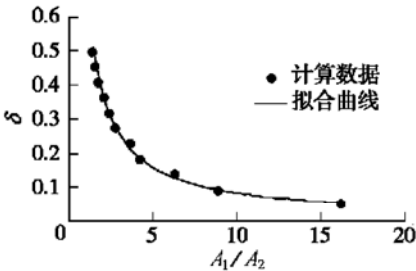


图 4 阻尼因子为 0.6 时 12 m 处有缺陷时的曲线拟合情况
Fig. 4 Fitting of $\delta-A_1/A_2$ curves corresponding to diversely located defects

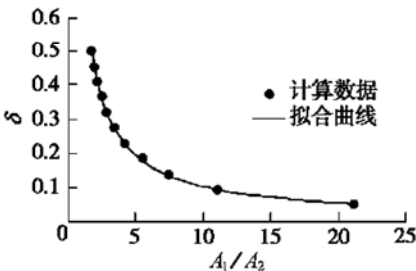


图 5 阻尼因子为 0.6 时 20 m 处有缺陷时的曲线拟合情况
Fig. 5 Fitting of $\delta-A_1/A_2$ curves corresponding to diversely located defects

2.2 黏土中桩存在扩颈时的量化分析

与上述相同作类似的分析, 对扩颈缺陷 $\delta-A_1/A_2$ 关系曲线进行拟合分析, 得到形如式(5)的关系式。分

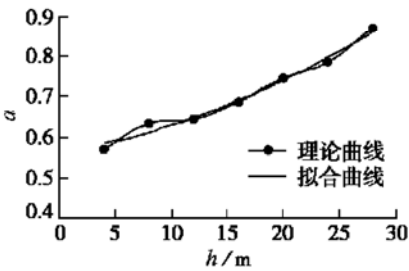


图 6 阻尼因子为 0.44 时的 $a-h$ 关系曲线拟合情况
Fig. 6 Fitting of $a-h$ curves with different damping coefficients

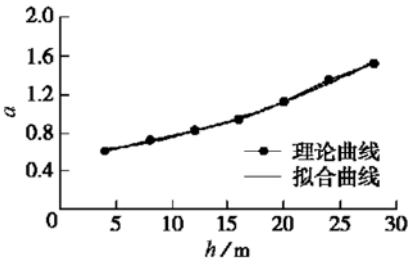


图 7 阻尼因子为 1.1 时的 $a-h$ 的关系曲线拟合情况
Fig. 7 Fitting of $a-h$ curves with different damping coefficients

表 2 不同桩侧土阻尼系数 ξ_1, ξ_2, ξ_3 下的取值
Table 2 The value of ξ_1, ξ_2 and ξ_3

J_s	ξ_1	ξ_2	ξ_3	相关系数
0.44	0.0002	0.0046	0.5620	0.9925
0.50	0.0002	0.0084	0.5445	0.9943
0.60	0.0001	0.0113	0.5401	0.9929
0.70	0.0002	0.0107	0.5584	0.9965
0.80	0.0007	0.0016	0.5998	0.9955
0.90	0.0009	0.0016	0.6078	0.9896
1.00	0.0004	0.0152	0.5547	0.9900
1.10	0.0009	0.0109	0.5709	0.9985

析结果与缩颈情况类似表明: 同一桩侧阻尼因子下, 系数 a 与缺陷位置 h 的关系是非线性的, 且随着缺陷位置 h 的增大, 系数 a 呈非线性增长, 在同一深度, 系数 a 随桩侧土阻尼因子的增大而增大; 系数 b 随缺陷位

置变化不大,应用时可以查表内插或取常数。其具体取值限于篇幅这里略。同理,经计算分析不同阻尼因子下的 $a-h$ 关系可表示为

$$a = \eta_1 h^2 + \eta_2 h + \eta_3, \quad (7)$$

式中 η_1, η_2, η_3 为系数。

此外,我们还对桩侧土为粉土、砂土条件下,桩存在扩颈、缩颈时作了类似的分析,取得了类似的成果,限于篇幅,这里不再赘述。

3 模型桩试验分析

分别对完整、存在扩颈、存在缩颈等模型桩进行了试验分析,为了分析传感器的性能对实测分析的影响,试验时采用两个阻尼系数不同的速度传感器分别进行采样,然后对分析结果进行对比。这里给出缩颈模型桩的试验结果。

缩颈缺陷模型桩为方桩($0.4 \text{ m} \times 0.4 \text{ m}$),桩身混凝土标号为 C 40,桩长 9.2 m,缩颈位置在 6.2 m 处,缩颈长度为 0.5 m。双面对称缩入共 0.1 m。

图 8 为缩颈缺陷模型桩上用低阻尼速度传感器的实测曲线,图 8 中入射波波峰对应的时刻为 0.24 ms,桩底反射波波峰对应时刻为 4.41 ms,缺陷反射波波峰对应时刻为 3.03 ms,计算波速为 4412 m/s,计算得到的缺陷位置为 6.16 m。缩颈程度分析如下:图 8 中入射波波幅 $A_1 = 72 \text{ mv}$,反射波波幅 $A_2 = 15 \text{ mv}$,波幅比 $A_1/A_2 = 4.8$ 。波幅的取值方法为, A_1 的取值从横轴起算, A_2 从反射波曲线的背景起算,同时应注意当背景曲线为波动曲线时,当有效反射波与背景波动同相叠加或反相叠加时,此时的有效反射波幅应从背景波动的波峰或波谷起算。根据现场完整桩波幅特征反推得到桩侧土阻尼因子 $J_s = 0.5$,根据桩周土为黏土时的分析结果及该场地实际情况,查表内插取 $b = -0.9183$, a 可根据缺陷位置 $h = 6.16 \text{ m}$ 及查得有关系数计算求得 $a = 0.6038$ 。从而缺陷程度 $\delta = 0.6038(A_1/A_2)^{-0.9183} = 0.1430$ 。

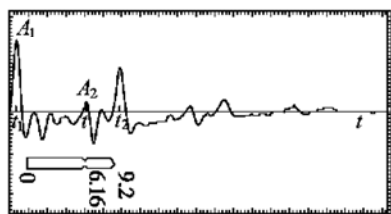


图 8 缩颈缺陷模型桩实测速度响应曲线

Fig. 8 Velocity response curve of model pile with necking

上式计算得到的是基桩为圆桩的前提下的桩径变化程度,而该模型桩为方桩,因此必须统一换算为面积变化程度才能进行对比分析。我们已知桩径变化程度为 $\delta = 1 - D_2/D_1$,面积变化程度可表示为: $\beta = (\bar{A}_1 - \bar{A}_2)/\bar{A}_1 = 1 - (D_2/D_1)^2 = 1 - (1 - \delta)^2 = 0.2655$,实际缺

陷面积变化程度为 $\beta = 0.25$ 。可见实测计算得出的缺陷程度与实际缺陷程度相差不大,说明缩颈缺陷桩缺陷量化分析理论的合理性。用高阻尼速度传感器对该桩进行了测试,亦获得了较为满意的结果。

4 结 论

(1) $\delta-A_1/A_2$ 关系曲线在不同土质、不同缺陷性质、不同桩侧土阻尼因子时都有相同的规律,都是形如 $\delta = a(A_1/A_2)^b$ 的乘幂变化趋势,只是对于不同土质、不同缺陷性质,系数 a, b 的取值不同。

(2) 不论什么土质,在同一桩侧土阻尼因子下,缺陷位置一定时,缺陷程度越大波幅比越小;缺陷程度一定时,缺陷位置越深波幅比越大。

(3) 系数 a 与缺陷位置 h 之间均为非线性关系,可用二次或三次多项式对其进行拟合。

(4) 模型桩试验分析表明,本文的缺陷量化分析方法是可行的,该方法基本不受传感器特性的影响,对于不同阻尼传感器采集的信号,波幅比比较稳定。

(5) 本文的量化分析模型假设桩周土为同一种均匀土质,若为不均匀土质,在计算模型中桩侧土阻尼系数按土层分别取用。这样缺陷桩要根据缺陷和土层两个参数进行桩身分段。

(6) 在具体应用时,桩侧土阻尼因子的取值是影响分析精度的关键,该值可根据经验或用现场完整桩的时域波形反算获得。

(7) 文中只考虑了缩径和扩径两种缺陷,对于其它类型的缺陷可等效为桩径的变化进行量化分析。

(8) 在正演分析过程中,缺陷长度取 0.5 m,对缺陷过小的情况未进行讨论分析,实际应用时对缺陷过小的情况,本文给出的分析方法不再适用。

参考文献:

- [1] 王奎华,谢康和,曾国熙. 变截面阻抗桩受迫振动问题解析解及其应用[J]. 土木工程学报, 1998, 31(6): 545-551.
- [2] 刘东甲. 不均匀土中多缺陷桩的轴向动力响应[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(7): 391-395.
- [3] 张献民,刘国辉. 低应变瞬态锤击桩基无损检测技术[M]. 北京:地质出版社, 1995.
- [4] 徐攸在,刘兴满. 桩的动测新技术[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 1989.
- [5] 康益群,叶为民. 土木工程测试技术手册[M]. 上海:同济大学出版社, 1995.
- [6] Forehand P W, Reese. Prediction of pile capacity by the wave equation[J]. ASCE SM2, 1964: 1-25.
- [7] Hirsch T J, Carr, et al. Pile driving analysis-wave equation user's manual[M]. TTI Prodrum, 1973.