

打桩对桩周土体阻尼系数的影响^①

王耀存¹, 李 飒¹, 张培献², 戴 旭¹

(1.天津大学建工学院岩土所,天津 300072; 2.中水北方勘测设计研究有限责任公司,天津 300222)

摘要:目前大直径超长桩的可打入性分析的准确性是打桩施工顺利进行的重要保障,打桩过程中土阻力预测是其中的关键一环。近几年高应变动测技术迅速发展,凭借其突出优势成为动力沉桩分析的新方法。结合高应变动测试验采用CAPWAP软件对打桩过程中土阻力进行分析,被广泛应用于海洋桩基监测和承载力评估中。CAPWAP程序中涉及的土阻尼系数 J_s 和 J_t 对承载力计算影响非常大,是非常重要的参数,阻尼系数的取值直接影响承载力计算的准确性。为得到更准确的阻尼系数,对东海某工程2根桩进行全程高应变动测试验,并利用CAPWAP软件对其中一根桩的实验结果进行分析,对桩周土体阻尼系数做了研究,认为同打桩过程中的桩侧阻尼系数并非一成不变的,而是随着打桩的进行存在减小的趋势。

关键词:土阻尼系数; CASE 阻尼; 高应变动测; CAPWAP 软件; 波动方程; 土阻力; 桩基

中图分类号: TU411; TU473.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2014)04-0946-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2014.04.0946

Influence of Piling on Damping Coefficients of Soil Surrounding Piles

WANG Yao-cun¹, LI Sa¹, ZHANG Pei-xian², DAI Xu¹

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Tianjin University, Tianjin 30072, China;

2. China Water Resources Beifang Investigation Design and Research Co. Ltd, Tianjin 300222, China)

Abstract: The accuracy of drivability analysis for piles with large diameters is very important for pile driving safely. The prediction of soil resistance to driving (SRD) is the focus of this analysis. Numerous models have been developed to predict soil resistance. With many outstanding advantages, the technology of high-strain testing is the basis for a new advanced method for pile-driving analysis. The Case Pile Wave Analysis Program (CAPWAP) method is generally used to analyze dynamic tests data to obtain the SRD. CAPWAP is based on one-dimensional wave theory, which is widely used in pile foundation monitoring and bearing capacity evaluation in ocean engineering. Using CAPWAP to analyze the data from dynamic testing, the SRD can be determined during the entire pile installation procedure. When using CAPWAP, soil factors and pile parameters such as damping, quake force, and wave velocity should be determined. Among the parameters, the soil damping coefficient of friction J_s and top of pile J_t , have the greatest influence on pile bearing capacity. Soil damping coefficients are the most important parameters of soil dynamics. Various models have proposed distinct J_s and J_t , and each soil type has a specific damping value. For example, the Smith model proposed values of 0.16 and 0.48 for J_s and J_t , respectively, and the Case model recommended J_s values of 0.15 for cohesive soil and 0.65 for cohesionless soil; J_t was 0.5 regard-

① 收稿日期: 2014-08-20

作者简介: 王耀存(1988—), 女, 河北人, 在读硕士研究生, 研究课题为海洋工程中桩基承载力计算及打桩过程中土阻力预测。E-mail: hbwangyc99@163.com

less of soil type. Many models widely use the value of 2.54 mm for quakes. Although many scholars give different experience values, the Case damping coefficients are widely adopted in most cases. Engineering applications reveal that various soil parameter values strongly influence the SRD; therefore, the study of soil parameter values is meaningful. To obtain more accurate damping parameters and to improve the reliability of CAPWAP, this study examines the results of pile dynamic testing of an engineering application in the East China Sea. During pile installation, the pile is struck up to 1868 times to penetrate the design depth, with each blow containing a set of corresponding force and velocity curve. In this study, we analyze approximately 200 curves by CAPWAP to obtain a set of soil parameters for each layer. To obtain the changes in J_s and J_t with depth, numerous data are analyzed. First, a study is conducted to determine J_s and J_t with various penetration depths. The results show that the soil damping coefficients increasingly decay rather than remain constant during piling and change with penetration depth. Therefore, when using CAPWAP to predict the soil resistance to driving, using a constant for J_s or J_t during the entire pile installation is not reasonable and will result in error. To further study the changes in soil damping coefficients during pile installation, the relationship of soil damping coefficients with blows is examined. It is determined that the change trend of blows is in contrast to that of the damping coefficient. Finally, this study analyzes the change trend of soil damping coefficients with depth. During the piling procedure, the factor value is shown to steadily decrease in a manner similar to a linear gradient.

Key words: soil damping coefficient; CASE soil damping; high strain testing; CAPWAP; wave equation; soil resistance to driving (SRD); pile foundation

0 引言

在海洋工程建设中,桩基础被广泛采用。特别是最近几十年随着海洋平台规模的扩大,桩基直径也越来越大,桩基重量达 400 t 以上,单桩承载力从几 MN 达到几十 MN。海上桩基工程复杂,难度大。在进行桩基承载力设计时既要考虑安全又要兼顾经济。要准确的评估桩基承载力,可靠的计算方法是关键的一环。目前高应变动力试桩法是海洋工程中评估桩基承载力最先进的技术,该方法既能全程检测桩体情况,判断桩体完整性,又能合理地确定桩基承载力,因此得到广泛应用^[1]。尤其是大直径大吨位的海洋桩基工程中,其优势更加明显^[2]。

CASE 波动方程分析法(CAPWAP)是高应变动力试桩法中的一种,以一维波动理论为依据。其设备简单,测试周期短,造价低,可靠性高。打桩过程中力与能量以波的形式在桩身传播,桩土相互作用,桩身应力波在传播过程中受桩周土体阻尼影响非常大^[3],因此准确确定桩周土体阻尼参数十分重要。目前评价土体阻尼参数主要靠静动试验对比得到,该参数是一种地域性的经验系数^[4]。对土体阻尼系数,国内和国外学者主要从阻尼系数的影响因素、计算公式以及取值做了大量研究。

LYsmer & Richart^[5]和 Novak^[5]分别根据弹性半空间理论和弹性动力学理论推导出了桩端和桩侧土阻尼系数公式,公式中提出土阻尼系数与桩半径、土体密度以及土体剪切模量等因素有关。Chow 等^[7]将阻尼系数与土性联系起来,给出了阻尼系数的计算表达式。Heerema^[8]则认为砂土的桩尖阻尼系数与土体的有效内摩擦角 ψ' 有关, ψ' 越小桩尖阻尼系数越大;而在黏性中液性指数 I_L 越大桩尖阻尼系数越大。袁春辉^[9]指出砂土越密实,桩侧土阻尼系数越大。王腾等^[10]根据不同土体在不同荷载下的桩身应力波曲线,得到阻尼系数与土体含水率之间的关系。国内其他学者^[11-14],对桩侧土阻尼系数的影响因素也做了很多研究。一些学者提出了阻尼系数的取值。Smith^[15-16]法认为桩侧土阻尼系数 $J_s = 0.16$,桩尖土阻尼系数 $J_t = 0.48$ 。CASE^[17]法也提出了不同土体的凯斯阻尼系数,被广泛采用。之后有很多学者对 CASE 阻尼系数的取值范围进行了探讨和补充^[18-20],得到了一些地区土阻尼系数的经验值。

为了得到更准确的阻尼系数取值,提高 CAPWAP 的计算精度,本文对我国某海域工程中的 2 根桩进行了全程高应变监测,对其 1 868 锤的实测曲线进行了 CAPWAP 分析,并根据实测数据分析

得到的阻尼系数进行研究。

1 CASE 波动分析程序法

CAPWAP 以一维波动方程为理论基础,将桩看似一细杆,模拟桩基破坏阶段,以确定桩基极限承载力。

1.1 计算模型

CAPWAP 法通过打桩分析软件 PDA 得到实测的力波曲线和速度波曲线,并将其作为边界条件进行计算,计算过程中仅涉及桩的计算模型和土的计算模型,打桩锤和垫层并不考虑在内。

在 CAPWAP 程序中,桩的计算模型采用 Rausche 和 Goble^[14] 提出的连续杆件模型。该模型将桩分成 N_p 个弹性杆件单元(图 1),假定土阻力作用在每个杆件单元的底部,各个单元受力连续。当杆件截面发生变化时,变截面处仍满足连续条件。

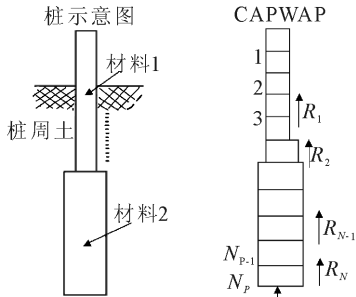


图 1 桩的计算模型

Fig.1 The calculation model of pile

土的计算模型采用改进的 Smith 土模型,将土的应力—应变关系简化为理想弹塑性,模型中不仅考虑最大静阻力 R_s 、最大弹性变形 Q 和阻尼系数 J ,还增加了土的重加载水平 R_L 、卸载水平 C 以及土塞情况 P_L 等。改进的土模型与实际工程更接近,土的应力—应变关系描述更准确,因此计算结果也更加合理。

1.2 单桩承载力

桩体受到锤击时桩周土体受到振动,土体总阻力 R_T 由静阻力 R_s 和动阻力 R_d 组成,而实际工程中更关心的是静土阻力 R_s ,即桩的静承载能力 R_s 。根据一维波动理论以及上述桩土计算模型,利用 CAPWAP 实测力波曲线 $F(t)$ 和速度波曲线 $V(t)$,土阻力由初始力波曲线第一峰 t 时刻和力波返回桩顶的时刻 $(t+2L/c)$ 叠加得到,基本公式为:

$$R_T(t) = R_s(t) + R_d(t) = \frac{1}{2} \left[F(t) + F\left(t + \frac{2L}{c}\right) \right] +$$

$$\frac{Z}{2} [V(t) - V\left(t + \frac{2L}{c}\right)] \quad (1)$$

式中, L 为桩长; c 为应力波波速; Z 为桩身阻抗, $Z = EA/c$; E 为弹性模量; A 为截面面积。

采用阻尼法计算桩基静承载力。假定动阻力集中在桩端,且与桩端质点运动的速度 $v_t(t)$ 成正比,即

$$R_d(t) = J \cdot v_t(t) \quad (1)$$

式中, J 为桩端阻尼系数。

当桩顶受到锤冲击时,桩顶产生的压缩波与桩身各个截面处的桩侧摩阻产生的下行波同时到达桩端,此时的力波幅值为:

$$F_{\downarrow} = F(t) - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n R(i, t) = F(t) - \frac{1}{2} R_T(t)$$

根据一维波动理论,桩端处应力波发生叠加,桩端质点速度增加一倍,因此,

$$\begin{aligned} v_t(t) &= 2v_{\downarrow} = 2 \frac{F_{\downarrow}}{Z} = \frac{2}{Z} \left[F(t) - \frac{1}{2} R_T(t) \right] \\ &= \frac{1}{Z} [2F(t) - R_T(t)] \end{aligned} \quad (3)$$

对于桩侧摩阻为主的长桩,考虑桩侧阻尼的影响,则桩的静承载力计算公式为:

$$R_s(t) + R_T(t) - R_d(t) = \frac{1}{2} J_s \cdot R_{si} \quad (4)$$

其中, R_{si} 为最大桩侧摩阻力,按下式计算:

$$R_{si} = \text{MAX}_{0 \leq t \leq \frac{2L}{c}} \{ F(t) - Z \cdot v(t) \}$$

将式(2),式(3)代入式(4),得到桩极限静承载力计算公式:

$$\begin{aligned} R_s(t) &= \text{MAX}_{0 \leq t \leq \frac{2L}{c}} \left\{ \frac{1}{2} \left[F(t) + F\left(t + \frac{2L}{c}\right) \right] + \right. \\ &\quad \left. \frac{Z}{2} [v_t(t) - v_t\left(t + \frac{2L}{c}\right)] - \right. \\ &\quad \left. J_t [2F(t) - R_T(t)] \right\} - \frac{1}{2} J_s \cdot R_{si} \end{aligned} \quad (5)$$

其中, J_t 为桩端土凯斯阻尼系数, $J_t = J/Z$; J_s 为桩侧土凯斯阻尼系数。

由桩体极限静承载力计算式(5)可以看出,桩基承载力与桩周土体的阻尼系数密切相关,阻尼系数取值的较小改动都会引起桩基承载力较大的改变。因此,准确确定桩周土阻尼系数 J_s 和 J_t 直接关系到 CAPWAP 软件计算的桩体静承载力是否准确。

2 现场试验

2.1 工程概况

该导管架平台位于我国某海域,平均水深

84.1 m。导管架平台桩基采用大直径钢管开口桩。桩径 $\Phi 2\ 438\ \text{mm}$ ($(96''$), 壁厚从 45~80 mm 不等, 桩体设计长度 117.6 m, 入泥深度 96.0 m, 每根桩重 434.9 t。打桩时采用 MENCK 1200S 液压锤进行打桩, 锤重 198.2 t。

根据勘察报告提供的工程地质情况, 作业场地地层主要以中密至密实粉细砂、粉土、硬至坚硬粉质黏土为主。勘察揭露深度为 125.0 m, 层序共分为 15 层, 各土层沿深度分布情况参见如下表 1 所示。

表 1 土层分布情况

Table 1 Distribution of soil layers

序号	深度/m	土性
1	0~1.8	中密粉细砂
2	1.8~3.3	中密-密实粉砂
3	3.3~8.0	粉质黏土
4	8.0~13.0	粉质黏土
5	13.0~19.5	中密粉细砂
6	19.5~24.4	密实粉细砂
7	24.4~32.0	中密砂质粉土
8	32.0~39.2	硬质粉质黏土
9	39.2~53.0	硬-坚硬粉质黏土
10	53.0~55.2	中密-密实粉质黏土
11	55.2~57.6	坚硬粉质黏土
12	57.6~64.2	中密-密实砂质粉土和粉细砂
13	64.2~72.8	硬粉质黏土和粉土迭层
14	72.8~81.0	中密-密实砂质粉土
15	81.0~125.0	非常坚硬粉质黏土

2.2 CAPWAP 分析

根据该工程桩土实际情况, 对本次打桩共记录的 1868 锤进行了 CAPWAP 软件分析计算, 得到

了打桩时不同深度的桩基承载力以及土体参数。在此选取了其中一锤的 CAPWAP 分析结果, 见图 2。

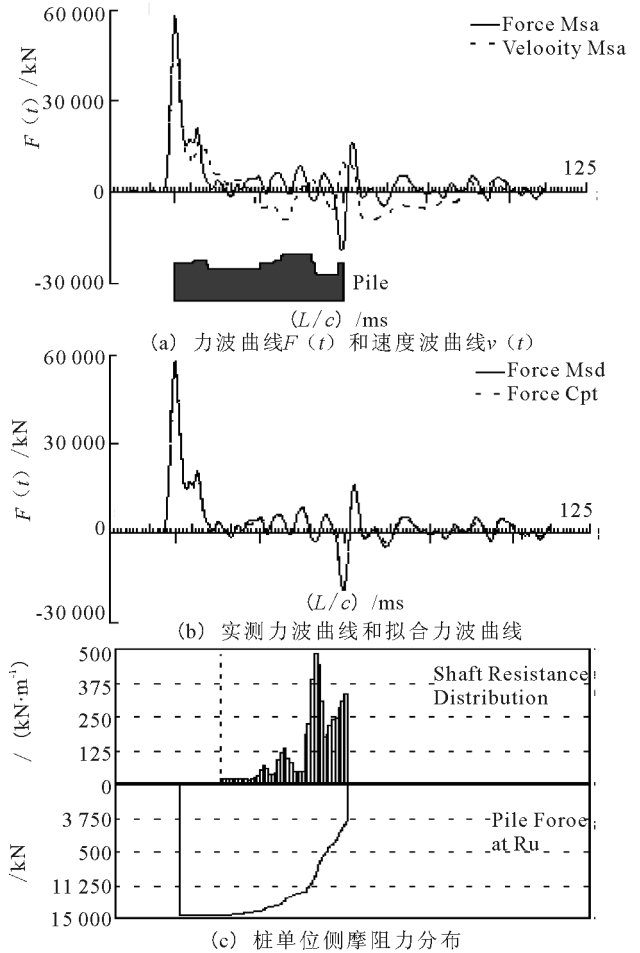


图 2 CAPWAP 输出结果

Fig.2 CAPWAP output results

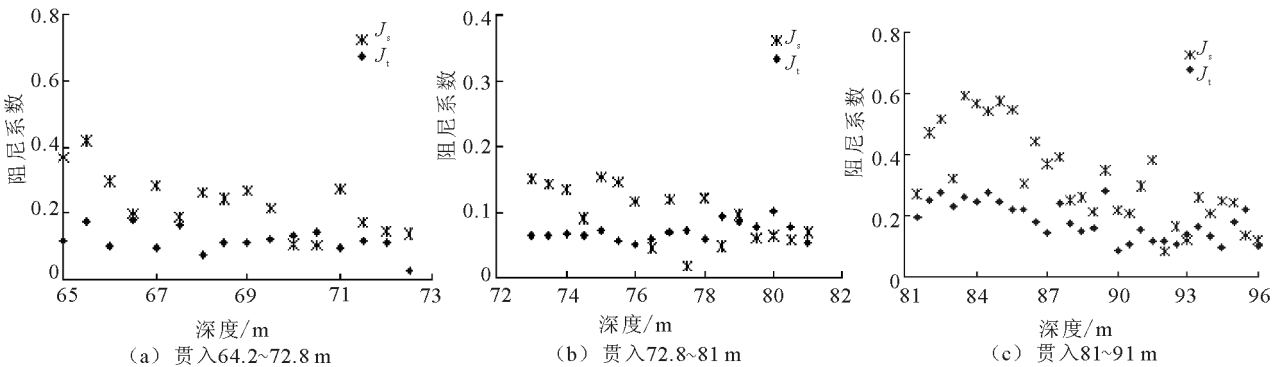


图 3 不同贯入深度时阻尼系数变化

Fig.3 The changes of damping factor in different penetration depths

3 结果分析

该工程监测到桩体自由入泥 22 m, 打桩到 24 m 后发生溜桩, 直至 62 m 溜桩结束。溜桩前, 从自由入泥 22 m 到贯入 24 m 为粉细砂, 锤击数为 184

击, 贯入仅 2 m, 锤击数相对较少, 相应的力波曲线也较少。溜桩后, 贯入 62~64.2 m 为同一粉质砂土和砂质粉土层, 贯入该土层仅 2.2 m, 数据也相对较少, 而且受溜桩影响, 数据不可靠。因此本文没有对

这两部分的土层参数情况进行研究,只分析了桩体贯入 64.2 m 到最终入泥 96 m 时随着打桩的进行土体阻尼系数的变化。根据 CAPWAP 对实测数据分析的结果,得到了不同贯入深度时的桩侧阻尼系数 J_s 和桩端阻尼系数 J_t 随深度变化的散点图(图 3)。

从图 3 可以看出,当桩体贯入 64.2~72.8 m、72.8~81 m 和 81~96 m 时,桩侧阻尼系数 J_s 随着贯入深度有较明显的递减趋势。虽然桩端阻尼系数

J_t 也有递减,但这种趋势并不明显,可近似认为桩体贯入该深度处 J_t 不发生变化。这说明在打桩过程中土体的的桩侧阻尼系数 J_s 受到打桩振动的影响而发生变化。

为了进一步研究桩侧阻尼系数与打桩过程的关系,绘制了桩体贯入不同深度时,每 0.5 m 的锤击数和桩侧阻尼系数 J_s 随深度变化曲线,见图 4。

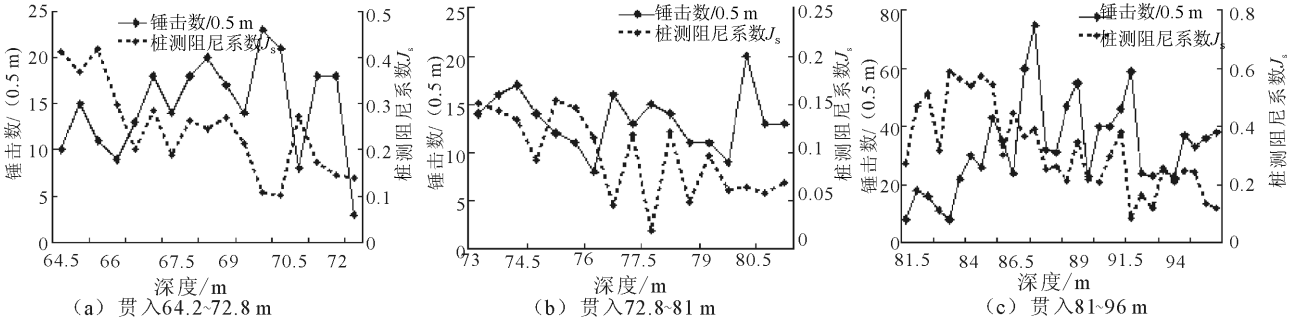


图 4 贯入不同深度时锤击数和阻尼系数变化

Fig.4 The changes of blow counts and damping factor in different penetration depths

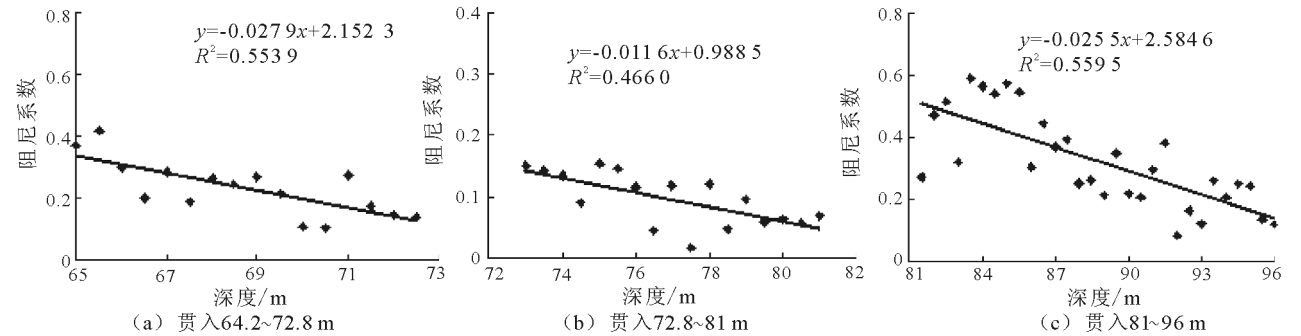


图 5 贯入不同深度时桩侧阻尼系数随深度变化

Fig.5 The changes of damping factor with depth in different penetration depths

从图 4 可以看出,打桩过程对桩侧阻尼系数 J_s 产生影响, J_s 随着锤击振动的变化而发生改变。每 0.5 m 的锤击数越大,土体越硬,桩侧土阻尼系数 J_s 则越小,即两者成相反的变化趋势。由于受到锤击振动在整个打桩过程中 J_s 成递减的趋势。为了清楚地了解桩侧土阻尼系数 J_s 受打桩过程影响的程度,对阻尼系数进行了拟合分析(图 5)。

从图 5 桩侧阻尼系数 J_s 与贯入深度的拟合结果可以看出,在打桩过程中桩侧阻尼系数与贯入深度可认为是线性递减的关系。

4 结语

桩周土体阻尼系数的取值对桩承载力影响较大,是重要的力学参数。本文通过研究得出如下结

论:

- (1) 从现场监测数据可以得出:打桩过程中土体阻尼系数并不是一定值,而是随着贯入的进行发生变化。
- (2) 打桩过程中,随着贯入深度的变化桩端土阻尼系数 J_t 比较稳定,变化不大,但桩侧阻尼系数整体存在减小的趋势。
- (3) 打桩振动使土体物理力学特性发生改变,桩侧阻尼系数 J_s 受打桩振动的影响,随着贯入深度的增加而线性递减。

参考文献(References)

[1] 高杨.高应变动力试桩技术在工程中的应用[J].华中建筑,1997,15(1):73-82.

- GAO Yang. The Application of High Strain Dynamic Tentative Piling Technique in Engineering[J]. Huazhong Architecture, 1997, 15(1): 73-82. (in Chinese)
- [2] 牛志荣, 陈永顺, 李森西. 高应变动测技术在桩基工程中的应用[J]. 重庆交通学院学报, 1995, 14(2): 89-93.
NIU Zhi-rong, CHEN Yong-shun, LI Sen-you. The Application of High Strain Dynamic Test in Pile Engineering[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 1995, 14(2): 89-93. (in Chinese)
- [3] 陈建斌, 周立运, 鲍倬. 桩周土阻尼系数的研究[J]. 武汉大学学报, 2003, 36(1): 73-76.
CHEN Jian-bin, ZHOU Li-yun, BAO Lu. Study of the Soil Damping Factor Around the Pile[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2003, 36(1): 73-76. (in Chinese)
- [4] 徐攸在. 桩的动测新技术(第二版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
XU You-zai. The New Technology of Pile Dynamic Tests (The Second Edition) [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2002. (in Chinese)
- [5] Lysmer J, Richart F E. Dynamic Response of Footing to Vertical Loading[J]. Soil Mech and Found Div, Asce, 1966, 2(1): 65-91.
- [6] Novak M. Vertical Vibration of Floating Piles[J]. Journal of Engrg Mech Div, Asce, 1977, 103(1): 53-167.
- [7] Chow Y K, Karunaratne G P, Wong K Y, Lee S L. Prediction of Carrying Capacity of Driving Piles[J]. Canada Geotechnique, 1988, 25(1): 13-23.
- [8] Heerema E P. Dynamic Point Resistance in Sand and in Clay for Pile Drivability Analyses[J]. Ground Engineering, 1981(9): 30-37.
- [9] 袁春辉. 桩-土相互作用土参数的室内模型试验研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2010.
YUAN Chun-hui. Laboratory Model Experimental Study of Soil Parameters of Pile-soil Interaction[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2010. (in Chinese)
- [10] 王腾, 王奎华, 谢康和. 变截面桩速度导纳的解析解[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(4): 573-576.
WANG Teng, WANG Kui-hua, XIE Kang-he. The Analytical of the Variable Cross-section Pile Velocity Admittance[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(4): 573-576. (in Chinese)
- [11] 刘东甲. 纵向振动桩侧壁切应力频率域解及其应用[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(5): 544-546.
LIU Dong-jia. Longitudinal Vibration of Pile Wall Shear Stress Frequency Domain Solution and its Application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(5): 544-546. (in Chinese)
- [12] 王雪峰, 吴世明. 桩基动测技术[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2001.
WANG Xue-feng, WU Shi-ming. Pile Dynamic Test Technology[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2001. (in Chinese)
- [13] 蔡靖, 张献民, 王建华. 基桩完整性检测中桩土相互作用参数的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(5): 617-621.
CAI Jing, ZHANG Xian-min, WANG Jian-hua. Experimental Study on Pile-soil Interaction Parameter in Pile Integrity Test [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(5): 617-621. (in Chinese)
- [14] 王建华, 智胜英. 低应变条件下桩土相互作用的阻尼系数[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(9): 1800-1808.
WANG Jian-hua, ZHI Sheng-ying. Damping Coefficients of Pile Soil Interaction With Low Strain[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(9): 1800-1808. (in Chinese)
- [15] Smith E A L. Pile-driving Analysis by the Wave Equation[J]. ASCE, Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, 1960, 80(4): 31-65.
- [16] Smith E A L. Pile Driving Analysis by the Wave Equation[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1960, 86(4): 35-61.
- [17] Goble G G. Bearing Capacity of Piles from Dynamic Measurements[R]. Department of Civil Engineering, Case Western Reserve University, 1975.
- [18] Roussel H J. Pile Driving Analysis of Large-diameter, High-capacity Offshore Pipe Piles[D]. Louisiana: Tulane University, 1979.
- [19] Rausche F, Goble G G, Likins G E. Dynamic Determination on Pile Capacity[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 111(3): 367-383.
- [20] 朱光裕, 陆岳屏. 波动理论沉桩分析中土参数的研究[C]//中国土木工程学会第五届土力学及基础工程学术会议论文集. 北京: 中国建筑工业出版社, 1988: 369-374.
ZHU Guang-yu, LU Yue-ping. Study of Soil Parameters in Pile Driving Analysis Using Wave Theory[C]// Proceedings of the 5th National Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Beijing: China Architecture & Building Press, 1988: 369-374. (in Chinese)