

沿桩顶径向的动测三维效应分析

王雪峰¹, 陈培¹, 黄贻海², 甘轶¹

(1. 华中科技大学 土木工程与力学学院, 湖北 武汉 430074; 2. 荆门职业技术学院, 湖北 荆门 448000)

摘要: 桩基动测问题的理论基础一维应力波理论只有在锤径桩径比、波长桩径比、桩长桩径比足够大时才能近似成立, 否则该问题实际上为应力波在柱体中传播的三维问题。基于应力波理论, 考虑计算精度和效能, 借助新型有限元分析系统 COMSOL Multiphysics 对桩基动测过程进行一维和三维动态仿真, 对比分析两种模型计算结果异同, 沿桩顶径向三维效应主要表现为不同部位速度响应不同且信号发生振荡, 入射波存在延时, 反射波到时也存在差别。结合野外实验较系统地研究这些三维效应随锤桩比、波长桩径比、长径比的变化规律, 给出三维效应的动测规避方式。

关键词: 桩基工程; 桩基动测; 速度曲线; 振荡; 三维效应

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2007)增 1 - 3209 - 06

ANALYSIS OF 3D EFFECT OF DYNAMIC TEST ALONG PILE TIP

WANG Xuefeng¹, CHEN Pei¹, HUANG Yihai², GAN Yi¹

(1. School of Civil Engineering and Mechanics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China; 2. Jingmen Technical College, Jingmen, Hubei 448000, China)

Abstract: Testing results of piles under low strain integrity are normally interpreted using one-dimensional stress wave theory. While one-dimensional stress wave theory is acceptable for pile-driving analysis, the responses of piles integrity tests can not be adequately simulated when the hammer and the incident wave length are small in relation to the diameter of the pile. Extensive parametric studies are performed using one-dimensional and three-dimensional(axisymmetrical) wave equation models respectively. Considering the calculation precision and efficiency, the axisymmetrical system of COMSOL Multiphysics is used to simulate the process of pile's dynamic test. The main three-dimensional effect lies in the oscillating degrees of velocity curves and the time of reflected wave. Under the conditions of different hammers, wave lengths and pile diameters, the three-dimensional dynamic effect is analyzed. Moreover, some suggestions about how to avoid three-dimensional dynamic effect are put forward.

Key words: pile foundations; pile dynamic test; velocity curve; oscillation; 3D effect

1 引言

桩基完整性反射波法动测的理论基础是一维应

力波理论, 但该理论只是在锤径桩径比、波长桩径比、桩长桩径比足够大时才能近似成立, 否则桩基动测问题实际上仍只能还原为应力波在柱体中传播的三维问题^[1, 2], 由此导致的三维效应将严重影响

收稿日期: 2006 - 06 - 19; **修回日期:** 2006 - 09 - 04

作者简介: 王雪峰(1965 -), 男, 博士, 1986 年毕业于中国科学技术大学爆炸力学专业, 现任教授, 主要从事岩土工程数值计算与测试技术方面的教学与研究工作。E-mail: chingfly@126.com

到大直径桩和浅部缺陷桩的正常判读。

由于三维效应的存在，桩顶不同部位必然产生不同响应，陈凡和王仁军^[3]认为高频干扰振幅的最小点约在距圆心 2/3 半径处，并且给出了桩顶面各点相对于该处的干扰振幅包络；Y. K. Chow 等^[4]从首脉冲后伴随的负向脉冲出发，研究了完整桩和不规则桩中不同测点对该负向脉冲的影响，认为 0.5 倍半径处负向脉冲最小。目前国内外对桩顶面三维效应的影响因素以及规避方式仍然缺乏较为系统的研究，数值计算方面的工作也相对较少。

在大量野外实验和应力波理论上，考虑到计算精度和资源占用问题，本文借助新型有限元分析系统 COMSOL Multiphysics，对基桩动测过程进行了一维和三维动态仿真。对比分析两种模型计算结果的异同，桩顶面三维效应主要表现为不同部位速度响应不同且信号发生振荡，入射波存在延时，反射波到存也存在差别。本文较系统地研究了这些三维效应随锤桩比、波长桩径比、长径比的变化规律，给出了三维效应的动测规避方式。

2 桩顶三维现象

2.1 三维效应的理论解

弹性杆件的经典一维应力波理论中，应力波为平面波，如果不考虑桩身材料阻尼、桩周土体等的影响，桩身任一点任意时刻的位移、速度和应力都存在 D'Alembert 解^[1]：

$$v(x, t) = f(x - ct) + g(x + ct) \quad (1)$$

式中： c 为一维纵波波速，且 $c = \sqrt{E/\rho}$ ； f 和 g 分别为下行波和上行波。传播过程中，上、下行波幅值保持不变，其形式完全取决于入射波的形态，而根据碰撞理论，这两个函数基本上可以用升余弦函数(或半正弦波)表示且不会出现振荡形态。对于一根完整桩，如果两端自由，桩顶观测到的反射波将是入射波的 2 倍；如果桩底完全固支，桩顶观测到的首次反射波将是入射波的 -2 倍。

但实际上点源作用在桩顶中心时，将首先形成一自敲击点向四周扩散的直达球面波，该波沿桩顶表面传播时，同时产生纵波、横波和表面波，如果采用轴对称模型，并取拉梅常数 $\lambda = \mu$ ，泊松比 $\nu = 0.25$ ，突加荷载 Q 作用下，距中心 r 处 t 时刻的纵向位移存在如下形式的解析解^[5]：

$$w(T) = \begin{cases} 0 & (T \leq 0.58) \\ \frac{Q}{32\pi\mu r} \left(6 - \frac{1.73}{\sqrt{T^2 - 0.25}} - \frac{3.19}{\sqrt{1.18 - T^2}} + \frac{0.44}{\sqrt{T^2 - 0.32}} \right) & (0.58 < T \leq 1.00) \\ \frac{Q}{16\pi\mu r} \left(6 - \frac{3.19}{\sqrt{1.18 - T^2}} \right) & (1.00 < T \leq 1.09) \\ \frac{3Q}{16\pi\mu r} & (T > 1.09) \end{cases} \quad (2a)$$

其中，

$$T = C_T t / r \quad (2b)$$

式中： C_T 为横波波速。如图 1 所示，振动以瑞雷波为主， $T = 1.09$ 为瑞雷波的到达时刻，但在此前将产生小幅度反向的纵波和横波，野外测试时这种反向波有时是可以观测到的。

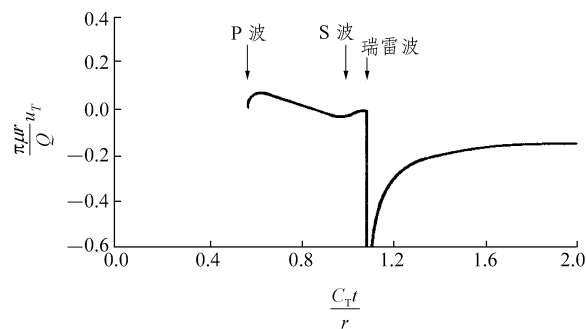


图 1 桩顶质点的垂直位移

Fig.1 Vertical displacement on the top of pile

上述公式还表明，随着 r 的增加，直达波速度和位移的幅值将成反比地减小，振源越小效果越明显。一定面积的振源，由于需要振源积分，虽无反比关系，但这种减小趋势还是存在的。

对于突加荷载 Q 作用下的无限长圆截面桩，还可以根据三维精确理论得到沿 x 轴向下传播的波阵面 ($x = ct$) 附近关于速度超越方程的数值解，如图 2 所示。与一维理论解相比，三维情况下弥散和振荡非常明显，且其振荡程度还受桩径控制，桩径越大，振荡和弥散越明显。此解亦可在一维波动理论的基础上考虑横向惯性效应得到，其可靠性已在 Hopkinson bar 实验中得到验证^[6]。

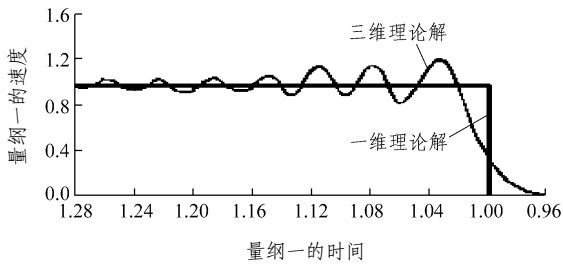


图 2 波阵面附近的速度分布

Fig.2 Velocity distribution near wavefront

三维效应形成的直达波衰减和波形振荡程度将随振源面积的增大而减弱。对于一个脉冲波, 还可以证明, 加大波长也可以有效抑制三维效应的存在。

2.2 实测曲线中的三维效应

工程实践中, 桩顶三维现象表现出了很多形式, 如同一根桩, 不同测点、不同激发方式, 测试效果有时候绝然不同, 有的振荡(典型的如小锤大桩), 有的不振荡(如高应变), 有的甚至在起跳以前出现反向等等。但是长期以来, 人们并没有对其进行充分分析。

图 3 为上海莘庄一工地现场实测速度曲线^[7], 上部为桩边缘信号, 振荡明显; 下部为 0.6R 附近信号, 波形振荡微弱。由此可见, 采取一定措施可以有效避免三维效应, 此例说明桩顶不同部位所表现的三维效应是不同的。

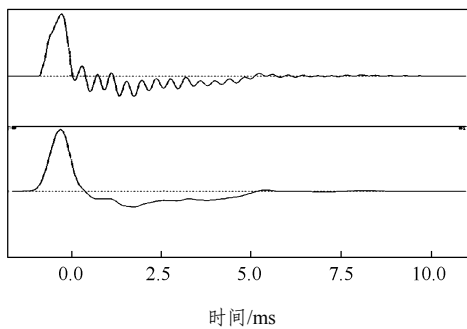


图 3 桩顶速度曲线^[7]

Fig.3 Velocity curves on the top of pile^[7]

2.3 数值分析中的三维现象

利用数值模拟分析桩顶三维效应, 要求有极高的计算精度, 普通的三维模型和计算程序是难以胜任的, 是故在不影响分析目的的前提下, 采用轴对称模型, 将三维化为二维^[4]。并选用新近开发的 COMSOL Multiphysics 系统 “weak” 形式, 该系统

是基于偏微分方程内核的仿真计算交互开发系统, 可对所求解的任意时刻进行后处理操作。

模型控制方程:

$$d \frac{\partial u}{\partial t} + \nabla(-c \nabla u - \alpha u + \gamma) + \alpha u + \beta \nabla u = f \quad (3)$$

边界条件:

$$n(c \nabla u + \alpha u - \gamma) + q u = g \quad (4)$$

$$h u = r \quad (5)$$

式中: $d, c, \alpha, \gamma, a, \beta, f, n, q, g, h, r$ 均为系统约定的常数系数矩阵; u 为广义位移, 且 $u = \{u_r, w, u_r/(r \partial t), \partial w/\partial t\}$, 其中 u_r 为径向位移, w 为竖向位移。

取桩长 $L = 10 \text{ m}$, 桩径 $D = 0.8 \text{ m}$, 弹性模量 $E = 30 \text{ GPa}$, 密度 $\rho = 2.45 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 桩端自由, 并取激振力为 $F = 1.68 [1 - \cos(4000\pi t)] \text{ N/m}^2 (0 \leq t \leq 0.5 \text{ ms})$ 、直径为 0.04 m 的圆形激振面模拟小锤敲击桩顶, 按程序要求设定各系数矩阵。

图 4 为桩顶某质点纵向速度响应。从图中可以看出信号出现振荡, 且 “反射波幅值/首波幅值” 不满足 2 倍关系, 三维效应严重。

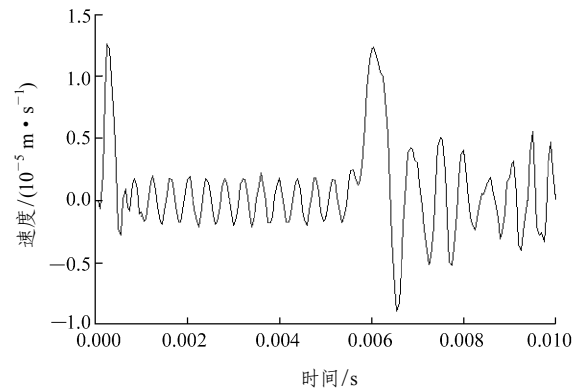


图 4 桩顶某质点的纵向速度曲线(有三维效应)

Fig.4 Longitudinal velocity curve of some point on the top of pile(with 3D effect)

表 1 为上述模型基础上, 取力脉宽为 1 ms , 激振面与桩面相称, 改变桩径 D 的 4 组三维算例与一维模型算例及一维理论解的对比。

当桩长远大于桩径、激振面与桩面完全重合、入射波波长远远大于桩径时, 程序三维模型计算所得的数值解应和一维应力波理论解完全吻合, 即波形没有高频振荡, 桩底反射亦为入射波的 2 倍。很显然, 与理论解比较, 一维模型计算结果完全相符; 三维存在幅值和波速偏差, 但是桩径越小、偏差越

表1 一维与三维模型计算结果对比

Table 1 Comparison of 1D and 3D model results

计算模型	首波		首次反射		入射波		
	振动速度 /(mm·s ⁻¹)	误差/%	振动速度 /(mm·s ⁻¹)	误差 /%	波速 /(km·s ⁻¹)	误差 /%	
一维	理论解	3.93	7.86		3.50		
	计算值	3.93	0.00	7.83	0.01	3.50	0.00
三维	D=1.0 m	4.05	3.05	6.90	11.90	3.45	1.46
	D=0.8 m	3.96	0.76	7.50	4.21	3.45	1.46
	D=0.6 m	3.95	0.51	7.80	0.38	3.45	1.46
	D=0.4 m	3.93	0.00	7.85	0.26	3.50	0.00

小, 当桩径为 0.4 m 时, 所有误差已接近为 0, 而且波形没有振荡。

3 三维效应影响参数分析

3.1 计算方案

定义锤桩比 $\alpha_1 = d/D$, 波长桩径比 $\alpha_2 = \tau c/D$, 长径比 $\alpha_3 = L/D$, 对 α_1 , α_2 和 α_3 有代表性的取值, 如表2所示, 其中 τ 为入射波脉冲宽度。

表2 模型参数

Table 2 Parameters of model

测点 编号	L/m	D/m	τ /ms	d/m	α_1	α_2	α_3
1	10	0.8	1.0	0.04	0.050	4.38	12.50
2	10	0.8	1.0	0.30	0.375	4.38	12.50
3	10	0.8	1.0	0.80	1.000	4.38	12.50
4	10	0.8	0.5	0.04	0.050	2.19	12.50
5	10	0.8	4.0	0.04	0.050	17.52	12.50
6	3	1.6	1.0	0.08	0.050	2.19	1.88
7	3	0.8	1.0	0.04	0.050	4.38	3.75

3.2 首波峰值沿径向的变化

一维情况下, 由

$$F = \sigma A = ZV = \rho CAV \quad (6)$$

可得

$$V = F / (\rho CA) \quad (7)$$

式中: F 为激振力, Z 为广义波阻抗, V 为质点振动速度, A 为横截面积。

将锤击区应力等效到桩顶整面, 得到首脉冲理

论幅值。计算表明, 0.3R 以内首波峰值明显高于理论值, 且其程度与长径比 α_3 无关, 与锤桩比 α_1 和波长桩径比 α_2 有关, α_1 和 α_2 越大, 偏离理论值程度越弱。0.5R 以外基本与理论值持平, 其中尤以 0.6R 附近最接近。部分计算结果如图5所示, 其中 β 为测点量纲一的坐标(测点位置 r 与桩半径 R 的比值)。

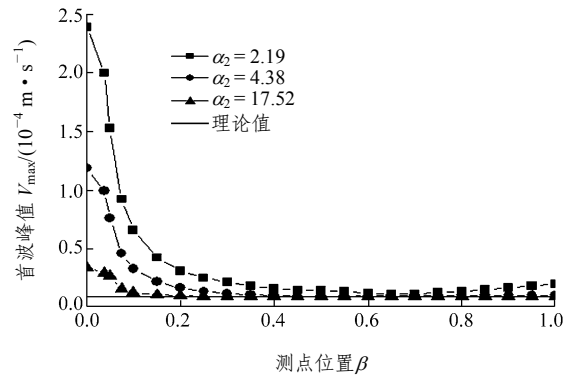


图5 首波峰值沿径向的变化($\alpha_1 = 0.05$, $\alpha_3 = 12.50$)
Fig.5 Change of incident wave in radial direction($\alpha_1 = 0.05$, $\alpha_3 = 12.50$)

3.3 反射波峰值与首波峰值的比值沿径向的变化

定义 n 为反射波峰值与首波峰值的比值。计算结果表明, n 基本与长径比 α_3 无关, n 沿径向先增大至 0.5R 附近后逐渐减小。锤桩比 α_1 越小, n 越小; 不同 α_1 值对 0.6R 以外区域的 n 值影响不大; $\alpha_1=1.00$ 时, 所有 n 值相等, 且接近理论值 2.0。波长桩径比 α_2 值越大, n 越接近理论值, 部分计算结果如图6所示。

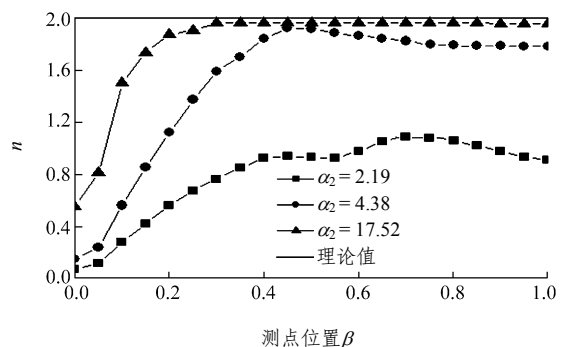


图6 n 值沿径向的变化($\alpha_1 = 0.05$, $\alpha_3 = 12.50$)
Fig.6 Change of value of n in radial direction($\alpha_1 = 0.05$, $\alpha_3 = 12.50$)

3.4 速度振荡程度沿径向的变化

基桩反射波法动测实践过程中, 常出现一种与测量系统频响特性无关的高频干扰, 小锤激发大桩

时尤为显著, 时程曲线表现为首波过后的负向脉冲和振荡, 该振荡衰减极为缓慢, 严重影响了桩身有用信号的正常识别。定义振荡程度 m 为干扰振荡最大幅值与首波峰值之比。计算表明, m 与 α_3 无关, 与 α_1 和 α_2 有关, 如图 7, 8 所示。

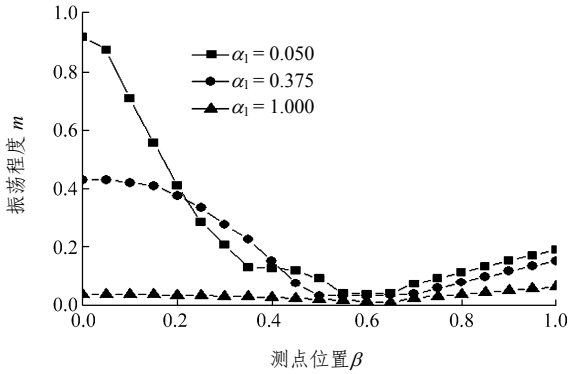


图 7 振荡程度 m 沿径向的变化 ($\alpha_2 = 4.38, \alpha_3 = 12.50$)
Fig.7 Change of oscillating degree m in radial direction ($\alpha_2 = 4.38, \alpha_3 = 12.50$)

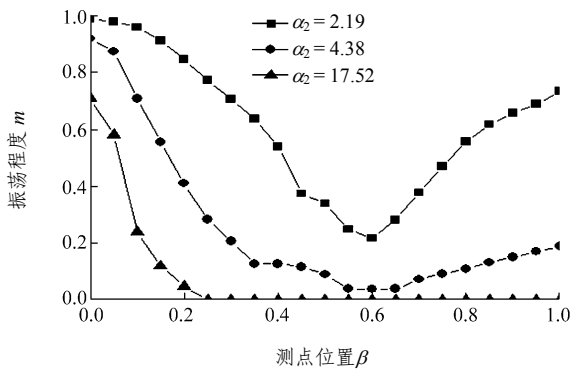


图 8 振荡程度 m 沿径向的变化 ($\alpha_1 = 0.05, \alpha_3 = 12.50$)
Fig.8 Change of oscillating degree m in radius direction ($\alpha_1 = 0.05, \alpha_3 = 12.50$)

从图中可看出, m 沿径向先减小至 $0.6R$ 附近后再不断增大。 α_1 越小振荡程度越严重, 但不同 α_1 值对 $0.6R$ 以外区域影响不大; $\alpha_1 = 1.000$ 时 m 全部接近于 0, 与理论分析吻合。 α_2 越大, 振荡程度越小。

3.5 纵波波速沿径向的变化

初始激励所激发的应力波沿桩顶表面传播, 接收点的速度峰值到时滞后于锤击点, 必将导致按“峰-峰”确定的纵波波速 c 高出实际值。表 3 为本文 7 个计算算例桩顶几个代表性的点按“峰-峰”确定的纵波波速与一维纵波波速理论值 c 的比较。

表 3 不同部位纵波波速

Table 3 Longitudinal wave velocities at different positions

测点编号	本文算例纵波波速				一维纵波波速理论值 c
	0	0.3R	0.6R	1.0R	m/s
1	3 333	3 390	3 448	3 448	3 500
2	3 333	3 333	3 448	3 509	3 500
3	3 448	3 448	3 448	3 448	3 500
4	3 333	3 390	3 448	3 604	3 500
5	3 125	3 571	3 571	3 571	3 500
6	3 000	3 333	3 429	3 750	3 500
7	3 000	3 158	3 333	3 529	3 500

从表中可看出, 波速沿径向呈增大趋势, 锤击区域附近波速与理论值相比普遍偏小, $0.6R$ 附近最接近一维纵波波速理论值。 α_1 值对纵波波速影响不大, $\alpha_1 = 1.000$ 时, 各点纵波波速相等且接近一维纵波波速理论值; α_2 越小, 桩顶边缘波速与理论一维纵波波速相差越大; α_3 越小, 纵波波速沿径向的变化程度越大。

4 工程实例分析

图 3 的工程实例反映了不同测点振荡程度的不同, 将传感器安装于 $0.6R$ 处附近一定区域可以部分避免三维效应。

实际桩基检测, 当脉冲太窄或直径很大时, 即便将传感器置于 $0.6R$ 处, 所得信号也同样会出现较强高频干扰波, 如图 9 中上面曲线所示, 该曲线为铁锤敲击某工程直径为 1.2 m 的钻孔灌注桩 $0.6R$ 处信号^[8]。这个时候只有采用力棒乃至更大面积的激振装置(如高应变重锤), 才能很好地避免三维效应。力棒实测曲线如图 9 中下方曲线所示。

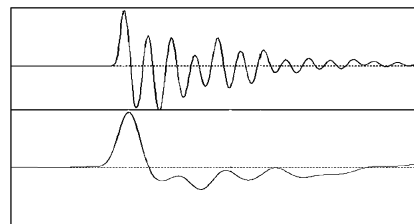


图 9 铁锤和力棒敲击所得速度曲线

Fig.9 Velocity curves with different hammers

桩顶三维效应并非一无是处,浅部缺陷的识别与判读是需要借助三维效应的。湖北省的一根考核用模型桩,设计为倒靴状,0.5 m处急剧缩颈,结果判断断桩者有之,严重缩颈者有之,轻度缩颈乃至扩颈者也不乏其人,实测波形也是有的振荡有的不振荡^[9]。事实上规范也要求大桩必须多点测量,也是考虑了桩顶的三维效应因素。

5 结 论

基桩动测中的三维效应是非常明显的。本文分析表明:

(1) 首波幅值三维效应主要受 α_1 和 α_2 影响, α_1 和 α_2 越大,三维效应越弱,0.6R附近最接近一维理论值。

(2) 反射波幅与入射波幅之比 n 受 α_1 和 α_2 控制, α_1 和 α_2 越小, n 越小、三维效应越严重。但是 α_1 值对0.6R以外区域影响不大。

(3) 三维效应的主要特征——波形振荡沿径向先减小至0.6R附近后再不断增大,此参数同样受锤桩比和波长桩径比控制。

(4) 当长径比达到一定程度,可以视为一维的时候,长径比对三维效应影响不大。

(5) 纵波波速受 α_2 和 α_3 控制,沿径向逐渐增加,在0.6R附近最接近一维纵波波速理论值。

有鉴于此,基桩动测时,为了规避三维效应,宜增大锤体底面积,软化锤垫,尽可能在0.6R附近拾取速度信号。

参考文献(References):

[1] 王雪峰,吴世明.基桩动测技术[M].北京:科学出版社,2001.
(WANG Xuefeng, WU Shiming. Technical of pile dynamic testing[M].

Beijing: Science Press, 2001.(in Chinese))

- [2] 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.(XU Youzai, LIU Xingman. New technical of pile dynamic testing[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1989.(in Chinese))
- [3] 陈凡,王仁军.尺寸效应对基桩低应变完整性检测的影响[J].岩土工程学报,1998,20(5):92-96.(CHEN Fan, WANG Renjun. Dimension effect on low strain integrity testing of piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(5): 92 - 96.(in Chinese))
- [4] CHOW Y K, PHOON K K, CHOW W F, et al. Low strain integrity testing of piles: three-dimensional effects[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003, 129(11): 1 057 - 1 062.
- [5] 阿肯巴赫.弹性固体中波的传播[M].徐植信,洪锦如译.上海:同济大学出版社,1992.(ACHENBACH J D. Wave propagation in elastic solids[M]. Translated by XU Zhixin, HONG Jinru. Shanghai: Tongji University Press, 1992.(in Chinese))
- [6] 王礼立,朱兆祥.应力波基础[M].北京:国防工业出版社,1984.(WANG Lili, ZHU Zhaoxiang. Stress wave foundation[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1984.(in Chinese))
- [7] 武汉岩海公司. RS-1616K基桩动测仪用户手册[R].武汉:武汉岩海公司,2000.(Wuhan Rocksea Co., Ltd.. User manual of RS-1616K pile dynamic testing device[R]. Wuhan: Wuhan Rocksea Co., Ltd., 2000.(in Chinese))
- [8] 武汉岩海公司.桩基动测分析指南[R].武汉:武汉岩海公司,2000.(Wuhan Rocksea Co., Ltd.. Guide to analysis of pile dynamic testing[R]. Wuhan: Wuhan Rocksea Co., Ltd., 2000.(in Chinese))
- [9] 王雪峰,罗仁安.影响基桩完整性动测效果的因素与改进措施[J].长江建设,1996,(2):38-40.(WANG Xuefeng, LUO Ren'an. Factors influencing the low strain integrity testing of piles and improvement measurement[J]. Yangtze River Construction, 1996, (2): 38 - 40.(in Chinese))