

大直径桩 - 土系统作用下解析解与室内模型试验研究

李曼, 杨冬英, 龚志超

(苏州科技大学土木工程学院, 江苏苏州 215011)

摘要: 将桩视为一维杆件的基础上考虑桩身横向惯性效应, 建立大直径桩与三维连续介质土耦合振动模型, 得出此模型的耦合振动方程, 并得到大直径桩顶时域响应半解析解, 分析大直径桩代表性参数对桩 - 土系统的动力影响; 随后开展大直径模型桩室内试验研究, 对模型桩桩顶施加小应变激振力, 通过 EPPDS 型无线基桩动测仪进行小应变下的桩顶数据采集, 对改变模型桩的直径及桩身材质进行相关参数研究, 将理论计算的结果与试验测试数据进行对比分析, 证实了解析解的正确性及对实践指导的可靠性。

关键词: 大直径桩; 理论分析; 模型试验

中图分类号: TU435

文献标识码: A

Study on analytical solution and indoor model test for Large Diameter Pile - Soil System

LI Man, YANG Dongying, GONG Zhichao

(College of Civil Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011, China)

Abstract: The lateral inertial effect of the pile is considered on the basis of one-dimensional bar, coupling vibration equation of large diameter pile and three-dimensional continuum soil is established, and the semi-analytical solution of time response of large diameter pile is obtained. The dynamic effects of the parameters of the large diameter pile on the pile - soil system are analyzed. Then, the large-diameter model piles are tested in laboratory, and the small-strain exciting force is applied to the top of the model piles. The pile top data are collected by the EPPDS wireless piles dynamometer. The correlation parameter are analyzed by changing the diameter of the model pile and the pile body material. The results of theoretical calculations are compared with the experimental data to verify the correctness of analytical solution and the reliability of practical guidance.

Key words: Large diameter pile; Theoretical analysis; Model test

随着大直径桩在工程建设项目中得到大规模的应用, 针对大直径桩的研究越来越深入。其中在大直径桩动力研究中, 多位学者对大直径桩 - 土耦合纵向振动进行了解析研究。黎正根等^[1]在大直径桩三维效应现象下对其几何弥散作用及横向惯性效应进行了分析; 郑长杰等^[2]考虑土体材料的滞回阻力和桩 - 土耦合振动时, 对大直径管桩纵向振动频域特性进行了各影响参数的理论研究; 何伟杰等^[3]在考虑大直径桩端土应力扩散效应及桩侧土体径向非均质情况下, 进行了多圈层土中大直径桩的纵向

振动研究。相对于大直径桩解析理论研究, 对大直径桩振动分析室内试验和现场试验还有很多不足, 缺乏与理论研究的对比分析, 无法明确解析研究成果的精度。一些学者进行了桩基础室内模型试验的探索, 如智胜英等^[4]通过低应变测试方式测定桩土相互作用的阻尼系数; 吴文兵等^[5]对考虑土塞效应的管桩进行了纵向振动的模型试验; 杨仁浩^[6]对低应变模型试验中的模型材质、桩型、试验方法等参数进行了系统阐述。从已有试验成果看, 结合大直径解析理论对比分析的试验还不足, 缺少大直径桩

收稿日期: 2016-12-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51508369); 江苏省自然科学基金资助项目 (BK20150289)

作者简介: 李曼 (1990-), 女, 新疆阿勒泰人, 硕士, 助理工程师, 从事桩 - 土耦合振动理论研究。

理论解的验证和精度分析。本文在大直径桩的纵向振动理论研究基础上,展开室内模型试验研究,并进行理论模型和室内模型的对比分析,验证理论解的正确性,完善理论模型,为工程实践应用作支撑。

1 大直径桩-土纵向振动解析分析

1.1 理论计算模型与基本假定

大直径桩-土的耦合振动问题,关键要建立合理的土体动力模型和桩身动力模型。本文的土体动力模型采用王奎华^[7]论文中三维轴对称条件下考虑土体三维波动效应的土体动力模型,大直径桩身动力模型采用考虑横向惯性效应下大直径桩的振动模型,建立起如图1所示大直径桩-土耦合振动模型。桩顶受纵向激振力 $F e^{i\omega t}$ 作用,桩周土对桩身的侧壁摩擦力为 $f_m(r, z) e^{i\omega t}$,桩沿侧壁对土体的竖向剪切反力为 $p(r, z) e^{i\omega t}$, H 、 r 、 A_p 、 ρ_p 、 k_b 分别为桩长、桩径、桩截面积、桩密度及桩底弹性支承常数。 E_s 、 k_s 、 ρ 分别为土的弹性模量、土底弹性支承常数及土体密度。

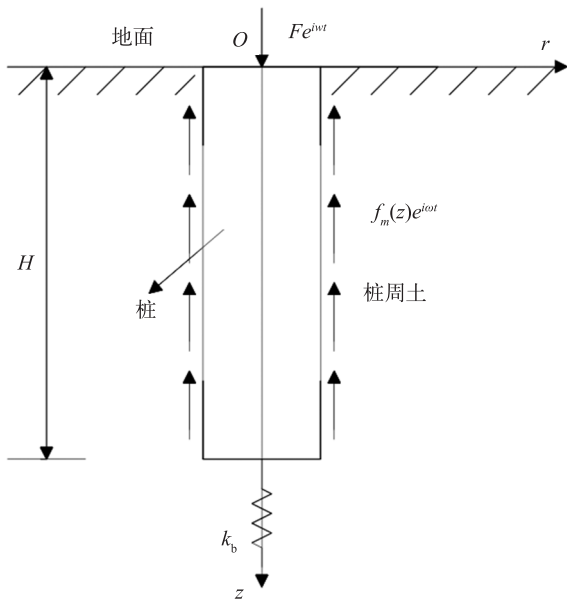


图1 桩土系统模型

Fig.1 Pile-soil system model

本模型的基本假定:土层视为均质、各向同性的单相粘弹性介质,忽略土体沿水平方向位移,土体无穷远处应力、位移为0;桩为完全弹性、竖直、圆形等截面体,桩底部支承简化为弹性支承;桩土满足接触面两侧位移及应力连续,土体顶部应变为0,桩土系统为小应变下的谐和振动。

1.2 建立土体与桩的平衡方程

设土体任意点位移为 $w(r, z, t)$,建立符合三维轴对称计算模型下的粘弹性土层的纵向振动动力平衡方程:

$$[(\lambda+2G)+i(\lambda'+2G')] \frac{\partial^2}{\partial z^2} w(r, z, t) + (G+iG') \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial r^2} \right) w(r, z, t) = \rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} w(r, z, t) \quad (1)$$

式中, λ 为拉梅常数; G 为土层的剪切模量, λ' 、 G' 为相关的粘性系数,虚数 $i = \sqrt{-1}$ 。

设大直径桩在假设模型下的简谐荷载作用中,任意一点桩身的位移为 $u(z) e^{i\omega t}$,可得桩的动力平衡方程:

$$E_p A_p \frac{\partial^2}{\partial z^2} (u(z) e^{i\omega t}) - \rho_p A_p \frac{\partial^2}{\partial t^2} (u(z) e^{i\omega t}) + \rho_p A_p v^2 r^2 \frac{\partial^4}{\partial z^2 \partial r^2} (u(z) e^{i\omega t}) - 2\pi r f_m(r, z) e^{i\omega t} = 0 \quad (2)$$

式中,桩的泊松比用字母 ν 表示,桩的杨氏(弹性)模量用 E_p 来表示, $f_m(r, z) e^{i\omega t}$ 表示桩侧单位长度摩阻力。

1.3 振动方程定解分析

经由桩-土相互作用关系建立桩、土平衡方程(1)、(2),结合相关边界条件,通过一系列的数学力学变换^[8]可得到桩的位移幅值表达式为(式中相关参数参见参考文献[8]):

$$u = D \left[\cos \left(\frac{\omega}{\sqrt{V_p^2 - v^2 r^2 \omega^2}} z \right) + \sum_{n=1}^{\infty} r_n' \cos(h_n z) \right] + D' \left[\sin \left(\frac{\omega}{\sqrt{V_p^2 - v^2 r^2 \omega^2}} z \right) + \sum_{n=1}^{\infty} r_n'' \cos(h_n z) \right] \quad (3)$$

可推导桩顶速度频率响应无量纲参数(即速度导纳无量纲参数)为

$$H_v'(\omega) = -i \left[(D/D') \left(1 + \sum_{n=1}^{\infty} r_n' \right) - \sum_{n=1}^{\infty} r_n'' \right] \quad (4)$$

当桩顶受半正弦脉冲激励,可得桩顶时域响应半解析解为

$$V(t) = -\frac{1}{2} \frac{Q_{\max}}{\rho_p A_p V_p} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{H_v' \bar{T}}{\pi^2 \bar{T}^2 \bar{\omega}^2} (1 + e^{-i\bar{\omega} \bar{T}}) e^{i\bar{\omega} t} d\bar{\omega} \quad (5)$$

式中,无量纲脉冲因子 $\bar{T} = T/T_c$,无量纲时间 $\bar{t} = t/T_c$ 。

2 桩-土系统振动曲线分析

除将要研究的桩径及桩的纵波波速以外,大直径桩土系统一般参数取值为: $H=10\text{ m}$, $\rho_s=2\ 000\text{ kg/m}^3$, $\rho_p=2\ 500\text{ kg/m}^3$, $V_p=4\ 000\text{ m/s}$, $\bar{k}_b=0.1$ 。无量纲脉冲宽度因子 $\bar{T}=0.4$, 图中 V' 表示为桩顶时域响应半解析解的无量纲值。

2.1 桩径对桩顶动力响应的影响

在上述一般参数取值不变的情况下,对桩径进行变化取值(r_0 分别取 0.3、0.5、0.7 m):

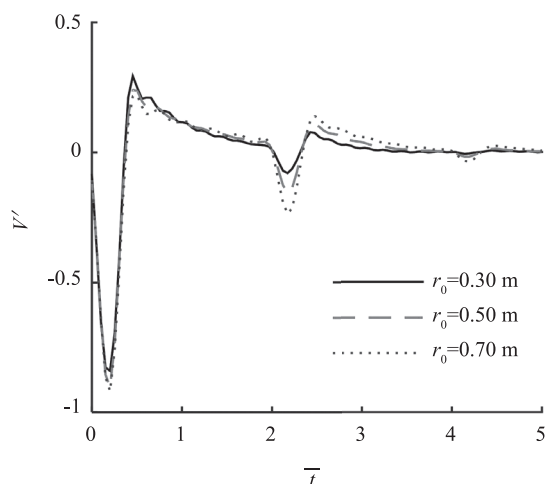


图2 桩径对桩顶时域响应曲线的影响
Fig.2 Influence of pile diameter on time domain response curve of pile top

从图2中的桩顶时域响应曲线可知,随着桩径的增大,桩周土产生的阻抗作用越小,桩周土吸收能量的能力越弱,波在桩身中传递能量损失越小,桩底反射信号幅度增大,曲线的振荡明显增大,同时桩径越大,二次反射越明显。

2.2 桩弹性模量对桩顶动力响应的影响

桩周土体性质不变的情况下,对大直径桩弹性模量进行变化取值(E_p 分别取 20、30、40 MPa)。

由图3可知,在桩端土体性质不变的情况下,随着桩弹性模量的增大,桩与桩端土性质差异性增大,则桩顶时域响应曲线振荡幅值增大,桩尖反射强度增大,曲线变化趋势越明显。

2.3 横向惯性效应对桩顶动力响应的影响

由于本模型是针对大直径桩进行研究,大直径桩-土相互作用时存在的横向惯性效应通过桩的泊松比 ν 来体现,下图分别对大直径桩在考虑横向惯

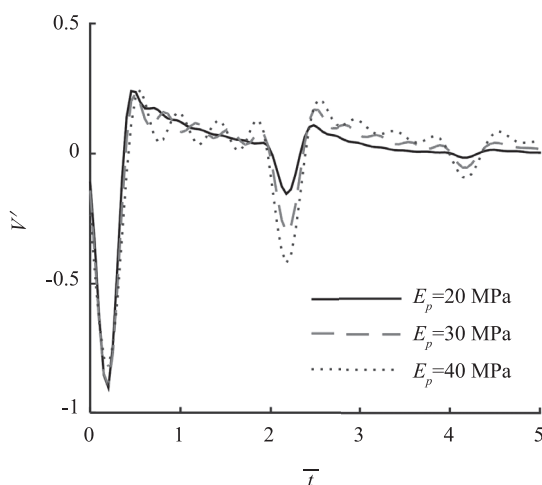


图3 桩弹性模量对桩顶时域响应曲线的影响
Fig.3 Influence of elastic modulus of pile on time response curve of pile

性效应模型和一维杆件模型(即 $\nu=0$ 时)下的桩顶时域响应曲线进行对比($r_0=0.6\text{ m}$)。

通过图4可看出,考虑横向惯性效应时,随着泊松比越大,波动能量被耗散得越多,曲线振荡越大,桩底的反射信号幅值越小。

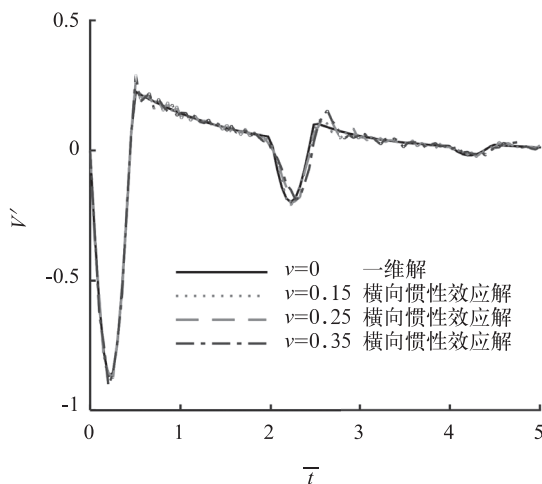


图4 横向惯性效应对桩顶时域响应曲线的影响
Fig.4 Influence of transverse inertial effect on time domain response curve of pile top

3 模型试验振动分析

3.1 模型试验目的

通过 EPPDS 型无线基桩动测仪开展低应变情况下的大直径桩模型动测试验,以期达到下列试验目的:进行试验规律与理论规律一致性的论证,从而论证理论解的正确性;验证理论分析的可靠性和实用价值,证明理论研究的合理性。

表1 模型桩相关参数对比表
Tab.1 Comparison table of relative parameters of model pile

模型桩编号	桩材质	桩径 D/cm	预计达到的对比目的
①	尼龙棒材	5	研究材质变化的影响
②	铝合金棒材	5	
③	铝合金棒材	7	研究桩径变化的影响

3.2 模型试验材料及设备

本模型试验使用桩长 1 m (假设实际桩长 20 m, 模型尺寸按 1:20 的比例进行缩小设置), 为达到研究不同桩径及桩材质的目的特采用直径不同的实心尼龙棒和铝合金棒材模拟大直径桩, 将模型桩埋置入模型地基中。对模型桩顶施加小应变激振力时, 通过 EPPDS 型无线基桩动测仪采集桩顶动力响应数据, 进行试验结果曲线分析。

3.2.1 模型试验材料

模型桩参数: PA6 型尼龙棒材: 密度为 918 kg/m^3 , 泊松比为 0.34, 长度 1 m, 直径为 5 cm; 6061 型铝合金棒材: 密度为 2756 kg/m^3 , 泊松比为 0.33, 长度 1 m, 直径分别为 5 cm 和 7 cm; 桩埋置于高 1.4 m、直径 0.6 m 的圆桶中; 桩周土体采用击实后密度为 2177 kg/m^3 , 泊松比为 0.25 的含水黄砂。

3.2.2 模型试验设备

试验设备工作流程如图 5 所示的浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心研制的 EPPDS 型无线基桩动测仪。将无线桩基动测仪的基本参数设置完成后将传感器安装点固定于距模型桩中心约 2/3 半径处, 按下开始采样, 激振锤敲击点位于桩顶截面中心, 根据数据采集器的指示灯提示进行敲击, 待敲击触发后, 采样结束, 即在采样程序屏幕会出现如图 6 所示曲线。

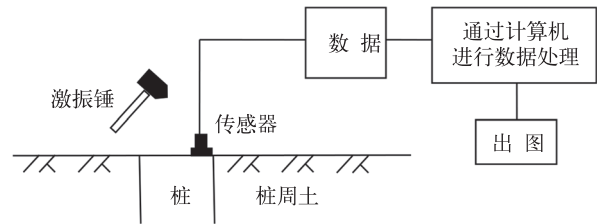


图 5 EPPDS 型无线基桩动测仪低应变检测流程图
Fig.5 Flow chart of low - strain testing of EPPDS-based wireless piles dynamic measurement instrument

3.3 模型试验与理论解反演分析

根据模型桩波速测试 (图 6), 通过传播时间和距离换算^[9]出铝合金材质的模型桩波速为 5394 m/s , 尼龙棒材质的模型桩波速为 1699 m/s 。

基于前文中的桩基纵向振动理论, 对直径为 5 cm 的铝合金模型桩进行拟合分析 (拟合曲线如图 7 所示), 通过多次试算, 在确保理论与实测的桩顶速度时域曲线的入射信号幅值、脉冲宽度、首次桩底反射信号幅值均相等时, 可反演出桩周砂的剪切波速为 $V_s=105 \text{ m/s}$, 脉冲宽度 $T_0=0.25 \text{ ms}$ 。

将反演所得 V_s 、 T_0 代入直径为 5 cm 的尼龙、直径为 7 cm 的铝合金模型桩理论曲线, 并将相同参数下的理论曲线与实测曲线进行对比, 对比结果如图 8 所示。由结果可知, 不同材质桩的理论曲线及实测曲线均比较接近, 验证了相关数值和理论解析

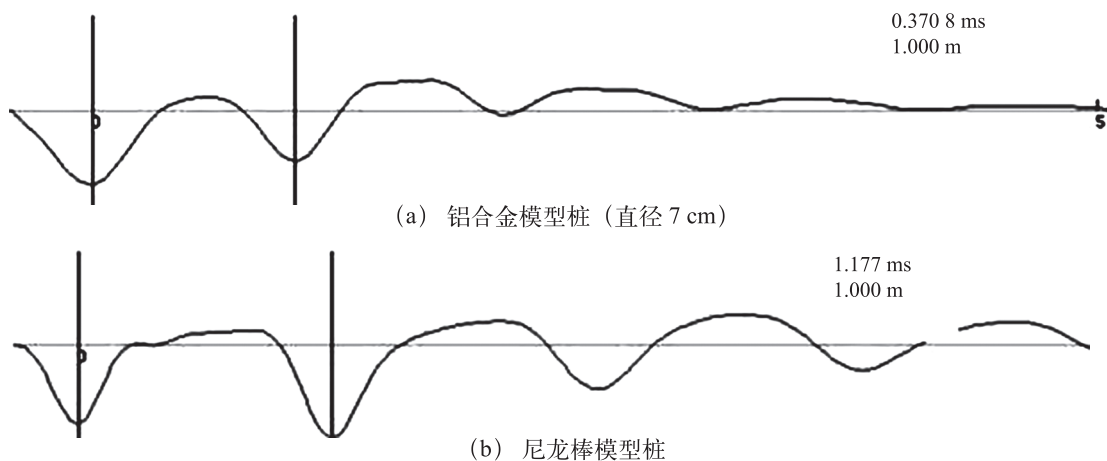


图 6 模型桩波速测试

Fig.6 Wave velocity testing of model pile

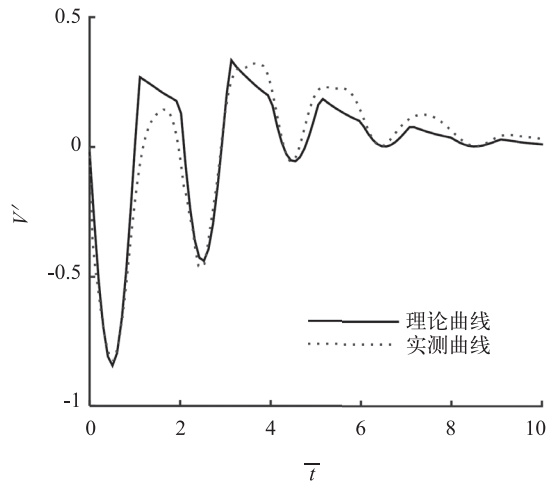
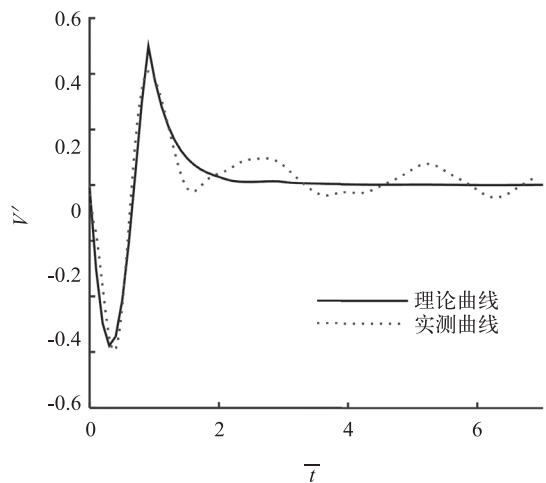
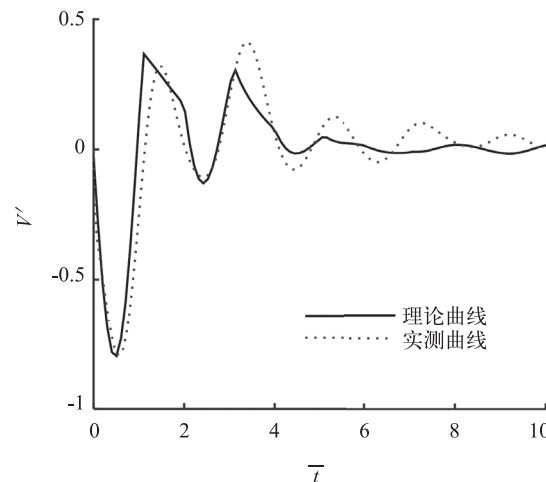


图 7 直径为 5 cm 的铝合金模型桩拟合曲线
 Fig.7 The fitting curve of 5 cm diameter aluminum alloy model pile



(a) 尼龙模型桩



(b) 铝合金模型桩

图 8 直径为 5 cm 的尼龙、直径 7 cm 的铝合金模型桩拟合曲线

Fig.8 The fitting curve of diameter of 5 cm nylon, 7 cm diameter aluminum alloy model pile

研究的正确性。

3.4 模型试验结果振动分析

通过对试验中改变模型桩的桩径及桩身材料所呈现的桩顶速度响应曲线进行变量分析，得到相应规律与理论解析规律作比较，进一步验证理论解析的正确性，同时分析精度。

3.4.1 模型试验中桩径对桩顶动力响应的影响

本试验分别对直径为 5 cm 和 7 cm 的铝合金模型桩进行桩顶动力响应数据采集，研究同种材质不同直径的模型桩的理论实测反射波曲线，并进行数据曲线对比分析。

图 9 反映了理论（实线表示）与实测（虚线表示）的桩顶时域速度曲线随桩径的变化情况。由图可知，对于不同桩径情况下，实测曲线与理论曲线的变化趋势一致，即桩径越大，桩底反射信号幅值越大，二次反射越明显，这与桩径变化的理论结果一致。

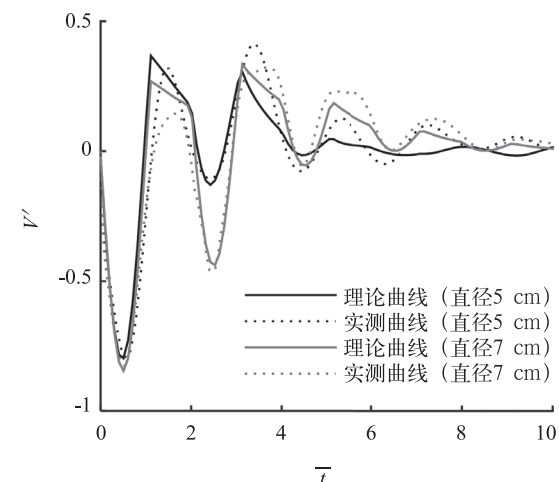


图 9 不同桩径的铝合金模型桩理论与实测反射波曲线对比
 Fig.9 Comparison of theoretical and measured reflection curves of aluminum alloy pile with different pile diameters

3.4.2 模型试验中材质对桩顶动力响应的影响

探究直径相同，不同材质的桩型对桩顶动力响应的影响，可转化为对不同桩土模量比^[10-11]的影响分析，在桩周土体性质不变的情况下，即为探究不同弹性模量对桩顶动力响应的影响。

试验采用直径为 5 cm 的铝合金模型桩和尼龙棒模型桩进行桩顶数据采集，将得到的数据曲线与相应条件下的实测曲线进行拟合分析。

如图 10 所示，可看出实测曲线与理论曲线的变化趋势基本相同，桩身弹性模量越大（铝合金弹性模量值大于尼龙棒），桩身与桩端土的性质差异性

表2 模型桩拟合优度对比表
Tab.2 Comparison of fitting goodness of model pile

拟合优度参数	尼龙棒材 (直径 5 cm)	铝合金棒材 (直径 5 cm)	铝合金棒材 (直径 7 cm)
RMSE	0.0524 32	0.055 503	0.059 976
Reduced Chi-Sqr	0.892 84	0.869 044	0.892 223

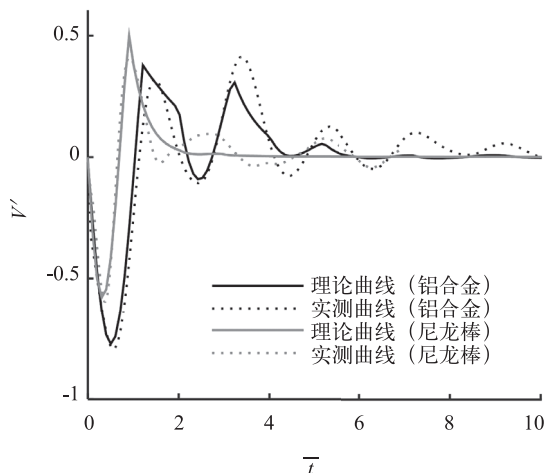


图10 直径5 cm的不同材质模型桩的实测反射波曲线对比
Fig.10 Comparison of measured reflection wave curves of piles with diameters of 5cm and different material properties
越显著,则桩底一次反射幅值越大,桩顶时域响应曲线振荡越明显,这与上述对桩弹性模量进行的理论分析结果一致。

3.4.3 模型试验拟合程度分析

为更加准确的表述理论曲线与实测曲线的拟合程度(图7—图9),本文采用RMSE(均方根越接近于0,说明模型的拟合越好,数据预测也越成功)与Reduced Chi-Sqr(确定系数越接近1,表明方程的变量对实测数据的解释能力越强,模型对数据拟合的也越好)这两个拟合优度参数进行验证。

通过表2相关拟合分析值可看出,采用两种拟合优度参数形式对模型试验数据进行分析, RMSE拟合精度差异为5%左右, Reduced Chi-Sqr拟合相似度可达80%,三种桩模型都获得了较为理想的拟合优度值,验证了理论曲线对实测曲线具有较好的拟合程度。

4 结论

1) 桩径、弹性模量及泊松比对桩顶时域响应影响较大;随着泊松比的增大说明对于大直径桩来说,桩身的横向惯性效应不可忽略。

2) 同种材质的大直径桩,桩径增大,桩底反射

信号幅度增大,曲线的振荡明显增大,二次反射越明显;在桩径相同的情况下,对于不同材质的桩,弹性模量越大,桩顶时域响应曲线振荡幅值越大,桩尖反射强度越大。即在改变同一参数时理论与实测曲线变化趋势基本一致。

3) 桩模型获得了理想的拟合优度值,进一步验证了采用三维连续介质模型的大直径桩纵向振动理论分析的正确性,证明理论对实际工程具有一定的指导意义。

参考文献:

- [1]黎正根,龚育龄.波在大直径桩中传播的三维效应现象[J].岩石力学与工程学报,1998,17(4):434-439.
- [2]郑长杰,丁选明,黄旭,等.滞回阻尼土中大直径管桩纵向振动响应解析解[J].岩石力学与工程学报,2014,33(Z1):3284-3290.
- [3]何伟杰,杨冬英,张言,等.基于扩散虚土桩法的大直径桩纵向振动研究[J].地震工程与工程振动,2016(3):25-32.
- [4]智胜英,王建华.测定低应变桩土相互作用阻尼系数的试验方法[J].水文地质工程地质,2008,35(6):85-89.
- [5]吴文兵,蒋国盛,王奎华,等.土塞效应对管桩纵向动力特性的影响研究[J].岩土工程学报,2014(6):1129-1141.
- [6]杨仁浩.模型试验在基桩低应变检测中的应用[J].建筑技术,2015,46(6):562-564.
- [7]王奎华,王宁,刘凯,等.三维轴对称条件下基于虚土桩法的单桩纵向振动分析[J].岩土工程学报,2012,34(5):885-892.
- [8]杨冬英.复杂非均质土中桩土竖向振动理论研究[D].杭州:浙江大学,2009.
- [9]JGJ106-2014,建筑基桩检测技术规范[S].
- [10]张智卿,王奎华,李强,等.非饱和土中端承桩纵向振动问题简化解[J].工程力学,2010,27(5):159-165.
- [11]李强,王奎华,谢康和.饱和土中端承桩纵向振动特性研究[J].力学学报,2004,36(4):435-442.

(责任编辑 王利君)