

桩底土对既有承台单桩纵向振动特性的影响研究*

王奎华[†], 张宏志, 李振亚, 高柳, 肖偲

(浙江大学 滨海和城市岩土工程研究中心, 浙江 杭州 310058)

摘要:基于虚土桩和广义 Voigt 模型, 建立桩及承台纵向振动的动力平衡方程, 求得承台纵向振动时位移、速度的频域、时域解, 研究了桩底土对既有承台单桩纵向振动特性的影响. 结果表明: 在相同初始位移条件下, 单层桩底土厚度越大, 承台位移、速度幅值及振动频率越小, 而共振频率基本一致; 存在软弱下卧层时, 下卧层厚度越大、土质越差, 承台位移、速度幅值越小. 最后, 通过与桩底土单 Voigt 模型及实际工程曲线对比发现, 采用虚土桩模型能准确模拟软弱下卧层的作用, 使得计算结果更为接近工程实测数据.

关键词:时域分析; 虚土桩模型; 广义 Voigt 模型; 黏弹性桩; 承台; 纵向振动特性; 拉氏变换

中图分类号: TU473

文献标志码: A

Study on Influence of Pile Subsoil on Vertical Vibration Characteristics of Single Pile with Cushion Cap

WANG Kuihua[†], ZHANG Hongzhi, LI Zhenya, GAO Liu, XIAO Si

(Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: Based on fictitious soil pile and generalized Voigt model, dynamic equilibrium equations of pile and cushion cap were established in the vertical vibration, displacement and velocity solutions of cushion cap were obtained on frequency and time domain, and the influence of pile subsoil on the vertical dynamic characteristics of cushion cap was studied. The results show that under the same initial displacement condition, the deeper thickness of single-layer pile subsoil results in the smaller displacement, velocity amplitude and vibration frequency of cushion cap, but the resonant frequency is the same. In the case of weak substratum, the deeper thickness of substratum and the worse substratum results in the smaller displacement and velocity amplitude of cushion cap. Finally, the comparison results with single Voigt model of pile subsoil and actual engineering curves show that fictitious soil pile model can accurately simulate the role of weak substratum and the calculation is more close to the measurements.

Key words: time domain analysis; fictitious soil pile model; general Voigt model; viscoelastic pile; cushion cap; vertical vibration characteristics; Laplace transforms

承台-桩-土的相互作用是一个复杂的接触问题, 也是进行既有承台单桩动力设计与检测的关键.

对桩-土或承台-桩-土相互作用的研究方法主要有试验法、数值模拟法及解析法.

* 收稿日期: 2016-10-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51378464), National Natural Science Foundation of China(51378464)

作者简介: 王奎华(1965—), 男, 江苏滨海人, 浙江大学教授, 博士生导师

[†] 通讯联系人, E-mail: zdwkh0618@zju.edu.cn

周乃明^[1]通过现场试验与数值模拟相结合的方法,对机械阻抗法在既有承台单桩的完整性和承载力判定上的应用进行了研究.邹新军等^[2]通过试验研究了桩径、荷载频率等参数对桩顶位移的动力影响规律.尚守平等^[3]、熊辉等^[4]通过有限单元法分别研究了动力荷载作用下桩-土、上部结构-桩-土的相互作用机理.

在解析法研究上:土径向与纵向性质变化均会影响单桩纵向振动特性.针对桩周土的影响,王奎华等^[5]提出将桩周土视为 Voigt 体,求解桩顶动刚度的方法.随后,王奎华^[6]、Wu 等^[7]通过研究桩周土的三维非均匀性,解释了桩周土的作用机理;为了分析桩底土的影响,王奎华等^[5]、胡昌斌等^[8]将桩底土的支承作用看作完全刚性,这种假设可以很好地解释端承桩的受力特性,但是对摩擦桩的分析有较大的不足.之后,王奎华等^[6]、胡昌斌等^[9]引入弹簧、牛顿黏壶并联的模型模拟桩底土的作用,提高了摩擦桩的分析精度,但弹簧常数和阻尼系数的取值与实际工程中桩底土的参数没有直接联系,属于理论上的估计,因此与实际情况仍有差异.在单桩研究的基础上,王奎华等^[10]通过承台-桩-土模型研究了既有承台单桩在时域内的纵向振动情况,该文章仅研究了影响承台纵向振动特性的桩周土因素,并未考虑桩底土纵向成层条件下的耦合影响.而在实际工程中经常存在软弱下卧层,现有的模型无法模拟该工况.因此,在承台-桩-土模型中,桩底土的参数取值及其成层性对既有承台单桩纵向振动特性的影响研究仍不充分,需要进一步深入探讨.

基于此,本文采用 Wu 等^[11]的虚土桩模型来模拟桩底土中存在不同性质土层的情况,而桩周土的成层性通过广义 Voigt 模型进行考虑,并结合拉氏变换法和阻抗递推理论对承台纵向振动方程进行求解,以期更好地理解桩底土影响承台-桩-土振动特性的机理.

1 计算模型

1.1 桩底土虚土桩模型

基于虚土桩模型,根据土体的纵向成层性将虚土桩、桩分为 n 层,自基岩顶至土体表面依此编号为 $1, 2, \dots, i, \dots, n$ 层,各层厚度分别为 $L_1, L_2, \dots, L_i, \dots, L_n$,各层顶部深度分别为 $h_1, h_2, \dots, h_i, \dots, h_n$,见图 1.各层桩均满足以下假设:1)材料均质,截面积相同;2)以桩土完全接触的小变形为前提.

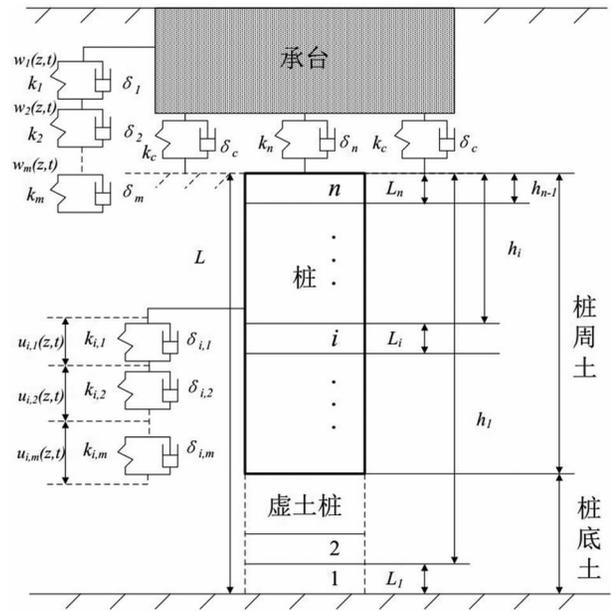


图 1 基于虚土桩的承台-桩-土耦合振动模型

Fig.1 Coupling vibration model of cushion cap and pile foundation and soil based on fictitious soil pile

1.2 桩周土广义 Voigt 模型

桩周土通过 m 个 Voigt 体串联成的广义 Voigt 模型(见图 1)进行模拟,设 $q(t)$ 为顶部任意激振力.设第 i ($1 \leq i \leq n$) 层桩体位移为 $u_i(z, t)$, 桩周土对该处施加的面积力为 $f_i(z, t)$. 用 $u_{i,1}(z, t), u_{i,2}(z, t), \dots, u_{i,m}(z, t)$ 分别表示该层桩周土模型中第 1, 第 2, \dots , 第 m 个 Voigt 体的位移; $k_{i,1}, \delta_{i,1}$ 及 $k_{i,2}, \delta_{i,2}, \dots, k_{i,m}, \delta_{i,m}$ 分别表示第 1, 第 2, \dots , 第 m 个 Voigt 体(单位面积上)弹簧常数和黏性系数.通过拉氏变换求得该处桩体位移-力频域表达式^[6]为:

$$F_i(z, p) = U_i(z, p) \left(\sum_{q=1}^m \frac{1}{k_{i,q} + \delta_{i,q} p} \right)^{-1} \quad (1)$$

式中: $F_i(z, p), U_i(z, p)$ 分别为 $f_i(z, t), u_i(z, t)$ 的拉氏变换式; $p = i\omega$ 为复参量, $\omega = 2\pi f$, i 为虚数单位, f 为传统意义上的频率.

1.3 桩纵向振动动力平衡方程

本文中桩为一维黏弹性桩,第 i 层桩纵向振动的动力学方程为:

$$E_{pi} A_{pi} \frac{\partial^2 u_i(z, t)}{\partial z^2} + \delta_{pi} A_{pi} \frac{\partial^3 u_i(z, t)}{\partial z^2 \partial t} = \rho_{pi} A_{pi} \frac{\partial^2 u_i(z, t)}{\partial t^2} + W_i f_i(z, t) \quad (2)$$

式中: $\rho_{pi}, V_{pi}, \delta_{pi}$ 和 R_{pi} 分别为第 i 层桩密度、压缩波波速、黏性系数和半径; $E_{pi} = \rho_{pi} V_{pi}^2, W_i = 2\pi R_{pi}$ 和 $A_{pi} = \pi R_{pi}^2$ 分别为该层桩的弹性模量、周长及

面积.

1.4 承台纵向振动动力平衡方程

承台明置情况下受到桩和承台底土的支承作用,承台底土采用单 Voigt 模型模拟;承台埋置情况下除受到上述两种作用外,还受到承台侧土的动摩擦力,承台侧土同样采用广义 Voigt 模型,可以建立埋置情况下的承台-桩-土耦合振动动力平衡方程如下:

$$-M \frac{\partial^2 w(z,t)}{\partial t^2} - A_c f_c(z,t) = f(t) + k_c w(z,t) + \delta_c \frac{\partial w(z,t)}{\partial t} \quad (3)$$

式中: M 为承台的质量; $w(z,t)$ 为承台位移; $f(t)$ 为桩顶对承台的支承力; k_c, δ_c 分别为承台底部土模型的弹簧常数和黏性系数,计算式^[12]如下.

$$k_c = \frac{4\rho_c R_c v_c^2}{1 - \mu_c}, \delta_c = \frac{3.4\rho_c v_c R_c^2}{1 - \mu_c} \quad (4)$$

式中: ρ_c, v_c, μ_c 和 R_c 分别为承台底土的密度、剪切波速、泊松比和承台按面积等效原则等效为圆形截面的半径; $f_c(z,t)$ 为该处承台单位面积与承台侧土间的动摩擦力; A_c 为承台的侧面积.

当 $A_c = 0$ 时,式(3)可以简化为明置承台-桩-土耦合系统动力平衡方程.

2 承台动力平衡方程求解

设桩顶对承台的支撑力 $f(t)$ 和承台位移 $w(z,t)$ 的拉氏变换分别为 $F(p)$ 和 $W(z,p)$, 两者在拉氏域内的关系可以表示成如下形式:

$$F(p) = Z_n(p) W(z,p) \quad (5)$$

桩顶阻抗函数为:

$$Z_n = -\frac{\rho_{pn} A_{pn} V_{pn} \theta_{pn} \tan(\theta_{pn} - \gamma_{pn})}{T_n T_c} (1 + \beta_{pn} p T_c) \quad (6)$$

式(6)可由阻抗递推函数求得,其中 $\beta_{pn} = \delta_{pn} / (E_{pn} T_c)$ 为第 n 层桩的无量纲黏性系数,具体求解过程及参数含义、取值可参见文献[11].

参照桩周土频域内位移与力的关系即式(1),可得承台侧土对承台施加的动摩擦力频域表达式为:

$$F_c(z,p) = W(z,p) \left(\sum_{j=1}^m \frac{1}{k_j + \delta_j p} \right)^{-1} \quad (7)$$

假设承台的振动是将其从偏离静力平衡位置的初始位置 W_0 释放引起的,即对承台施加一个初始位移.对式(3)进行拉氏变换,并且将式(5)和式

(7)代入求解得:

$$W(z,p) = \frac{(\delta_c + pM) W_0}{Mp^2 + Z_n(p) + k_c + \delta_c p + A_c \left(\sum_{j=1}^3 \frac{1}{k_j + \delta_j p} \right)^{-1}} \quad (8)$$

$$V(z,p) = W(z,p) p \quad (9)$$

若 $A_c = 0$,式(8)变为承台明置情况下的解.根据拉氏逆变换,可以得到承台的位移,速度时域响应函数为:

$$\begin{aligned} w(z,t) &= \text{ILT}[W(z,p)] \\ v(z,t) &= \text{ILT}[V(z,p)] \end{aligned} \quad (10)$$

3 参数分析

为了便于实际分析及应用,采用 Novak 等^[13]提出的 3 个 Voigt 体串联的一维模型近似地代替广义 Voigt 模型,如图 2 所示.

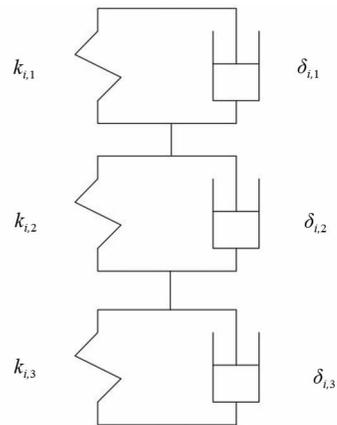


图 2 3 个 Voigt 体串联模型

Fig.2 Three Voigt series model

相关参数的建议取值如下:

$$\begin{cases} k_1 = 3.518G_s, \delta_1 = 113.097G_s R_{pi} / v_s \\ k_2 = 3.581G_s, \delta_2 = 25.133G_s R_{pi} / v_s \\ k_3 = 5.529G_s, \delta_3 = 8.362G_s R_{pi} / v_s \end{cases} \quad (11)$$

式中: G_s 和 v_s 分别为桩周土的剪切模量和剪切波速.式(11)中的模型参数是单位轴向长度上的数值,必须经转换后才能得到本文所需参数,具体转换关系如下:

$$\begin{cases} k_{i,y} = \frac{k_y T_c^2}{A_{pi} \rho_{pi}}, y = 1, 2, 3 \\ \delta_{i,y} = \frac{\delta_y T_c}{A_{pi} \rho_{pi}}, y = 1, 2, 3 \end{cases} \quad (12)$$

3.1 单层桩底土时明置承台振动响应分析

3.1.1 桩底土层厚度

本节采用的模型在纵向上分为承台、桩及虚土桩,虚土桩底部边界为基岩.承台参数为:长×宽×高=1.6 m×1.6 m×3.2 m,密度 2 200 kg/m³.桩参数为:桩长 15 m,桩径 0.3 m,密度 2 400 kg/m³,压缩波波速 4 000 m/s,桩身材料的无量纲阻尼系数取 0.1.桩周土参数为:厚度 15 m,密度 1 800 kg/m³,剪切波速 150 m/s.桩底土参数为:密度 1 800 kg/m³,剪切波速 150 m/s,压缩波波速 1 000 m/s.通过建立桩底土与桩周土厚度的关系来考虑桩底土厚度对承台纵向振动特性的影响,用 H 表示桩周土厚度,桩底土厚度分别取 $0.2H, 0.4H, H$.

在分析中,为了更加直观地分析桩底土对承台纵向振动特性的影响,忽略承台侧土,即分析明置承台的纵向振动特性.

图 3 为承台位移频响与桩底土厚度的关系.由图 3 可以看出,在上述桩土条件下,承台位移频响曲线计算结果均有一个明显的共振峰,不同桩底土厚度时共振频率相同,但幅值随着桩底土的厚度增加有减小的趋势.

图 4 为承台位移时响与桩底土厚度的关系.由图 4 可以看出,承台位移时响曲线呈现出典型自由振动特点,桩底土厚度越大,承台振动频率及位移幅值越小.产生该现象的原因可以解释为:随着桩底土厚度增加,桩顶阻抗的黏性系数对承台纵向振动特性的影响所占的比重逐渐变大,振动的能量消散逐渐变快,直观表现为时域内的位移幅值减小.由于对承台施加的是初始位移,桩底土越厚,其总的初始能量越低,这也是造成承台位移幅值减小的原因.

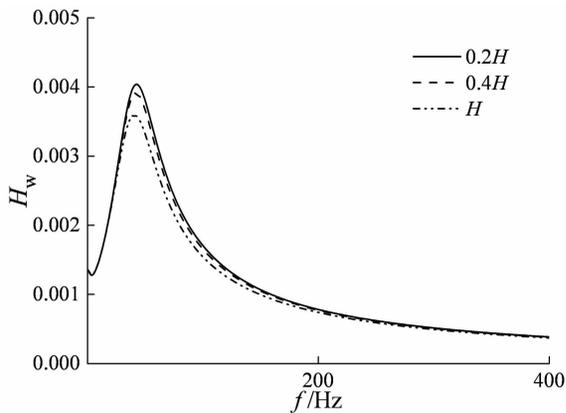


图 3 承台位移频响与桩底土厚度的关系
Fig.3 Relation between free vibration displacement of cushion cap and thickness of pile subsoil on frequency domain

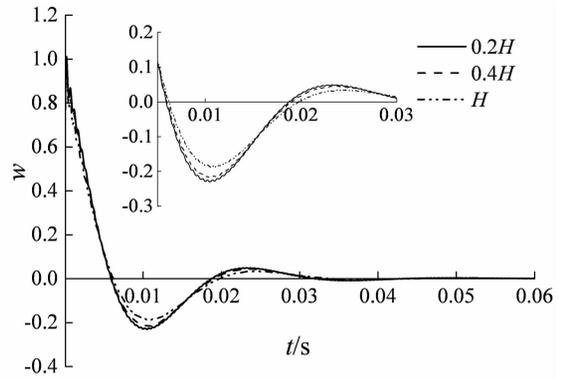


图 4 承台位移时响与桩底土厚度的关系
Fig.4 Relation between free vibration displacement of cushion cap and thickness of pile subsoil on time domain

图 5 为承台速度时响与桩底土厚度的关系.由图 5 可以看出,承台速度时响曲线总是会有先剧烈衰减而后缓慢衰减直至静止的过程.桩底土厚度越大,承台的初始速度越小,即其初始能量越低,这与图 4 反应的情况是一致的.

图 6 为承台速度频响与桩底土厚度的关系.由图 6 可以看出,随着桩底土厚度增加,速度幅值逐渐减小,但共振频率几乎一致,衰减的速率与桩底土厚度成反比.随着频率的增大,曲线逐渐趋于一致,说明在高频率下,桩底土厚度对于承台纵向振动的速度频响曲线影响很小.

作为动力机器的基础,承台振动是非常频繁的.桩底土的影响会在频繁的振动中叠加、放大,继而对实际工程中承台的耐久性、安全性产生重大影响.因此,考虑桩底土对承台纵向振动特性的影响是十分有必要的.

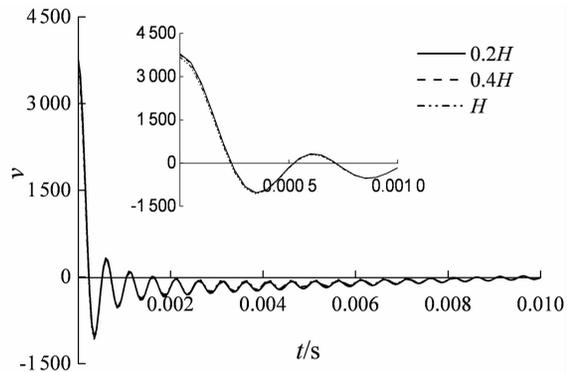


图 5 承台速度时响与桩底土厚度的关系
Fig.5 Relation between free vibration velocity of cushion cap and thickness of pile subsoil on time domain

承台振动时,位移、速度幅值均是在进行动力基础设计时需要考虑的部分,在接下来的分析中,

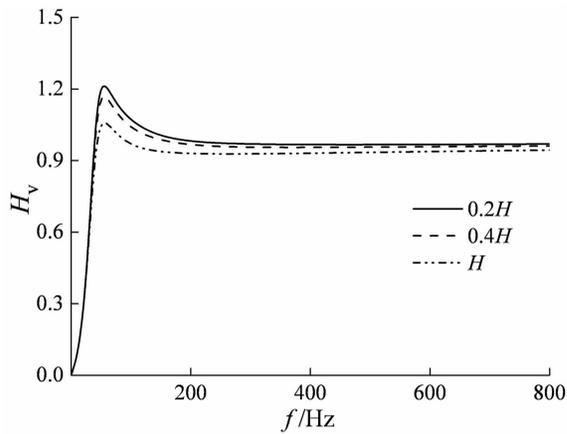


图6 承台速度频响与桩底土厚度的关系
Fig.6 Relation between free vibration velocity of cushion cap and thickness of pile subsoil on frequency domain

主要讨论承台位移的时响及速度的频响曲线。

3.1.2 桩底土剪切波速

由于土的力学性质与剪切波速密切相关,因此分析桩底土剪切波速的变化对于承台纵向振动特性的影响是有必要的。

承台、桩、桩周土的参数均同 3.1.1 节。桩底土参数为:密度 1800 kg/m^3 , 压缩波波速 1000 m/s , 厚度 $0.4H$, 剪切波速分别取 150 m/s , 200 m/s 和 250 m/s 。

图7和图8分别为承台位移时响、速度频响与桩底土剪切波速的关系。由图7和图8可以看出,当桩底土厚度为 $0.4H$ 时,桩底土剪切波速的变化几乎不对承台纵向振动的位移时响及速度频响曲线产生影响。表明当桩底土达到一定厚度时,剪切波速不是影响承台纵向振动特性的主要因素。

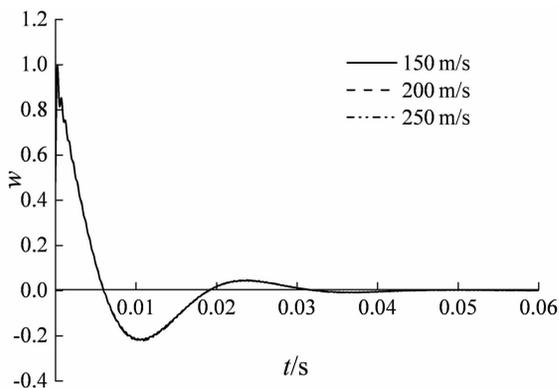


图7 承台位移时响与桩底土剪切波速的关系
Fig.7 Relation between free vibration displacement of cushion cap and shear wave velocity of pile subsoil on time domain

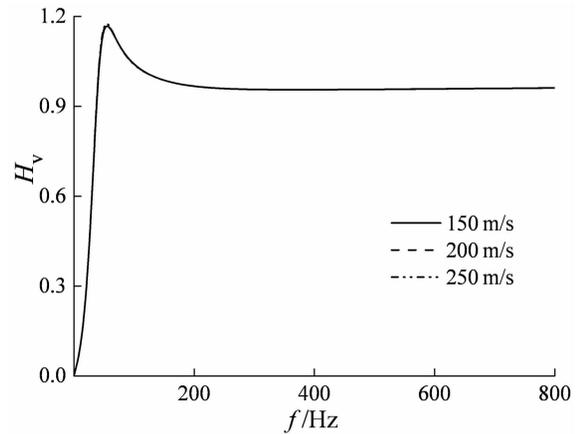


图8 承台速度频响与桩底土剪切波速的关系
Fig.8 Relation between free vibration velocity of cushion cap and shear wave velocity of pile subsoil on frequency domain

3.2 双层桩底土时明置承台振动响应分析

3.2.1 软弱下卧层厚度影响分析

本节模型纵向上分为承台、桩、桩底持力层及软弱下卧层,利用虚土桩模型可以从数学上精确考虑软弱下卧层对承台纵向振动特性的影响。具体参数同 3.1.1 节,根据 JGJ94-2008《建筑桩基技术规范》的要求,并结合实际工程中对安全系数的要求,持力层厚度取为 $0.2H$,即 3 m 。软弱下卧层参数为:密度 1600 kg/m^3 , 剪切波速 60 m/s , 压缩波波速 500 m/s 。为了考虑软弱下卧层厚度对承台纵向振动的影响,其厚度分别取 $0.2H$, $0.4H$ 和 H 。图9为承台位移时响与下卧层厚度的关系。由图9可以看出,软弱下卧层厚度越大,承台纵向振动的频率及位移幅值越小。

图10为承台速度频响与下卧层厚度的关系。由图10可以看出,相较于单层桩底土的情况,带软弱下卧层的承台速度频响曲线在共振峰后先降低后升高并逐渐趋于一致。软弱下卧层厚度越大,速度幅值越小。

3.2.2 软弱下卧层压缩波波速影响分析

通过对桩底土剪切波速的分析发现,其变化对承台纵向振动特性的影响较小,所以此处主要分析软弱下卧层压缩波波速的影响。软弱下卧层厚度取 $0.4H$, 压缩波波速分别取 250 m/s , 500 m/s 和 750 m/s ,其余参数同 3.2.1 节。

图11为承台位移时响与下卧层压缩波波速的关系。由图11可以看出,压缩波波速与承台的位移幅值呈现正相关的关系,但随着压缩波波速的增加,承台的位移幅值增加的幅度逐渐减小。说明在软

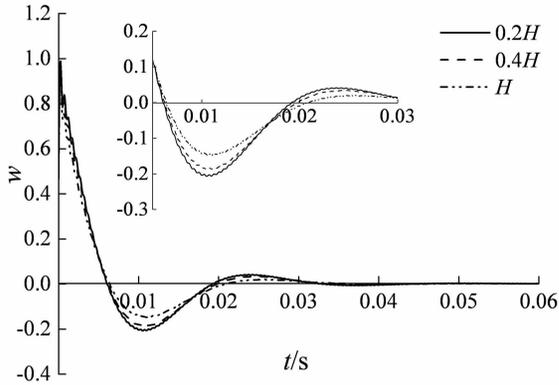


图 9 承台位移时响与下卧层厚度的关系
Fig.9 Relation between free vibration displacement of cushion cap and thicknesses of substratum on time domain

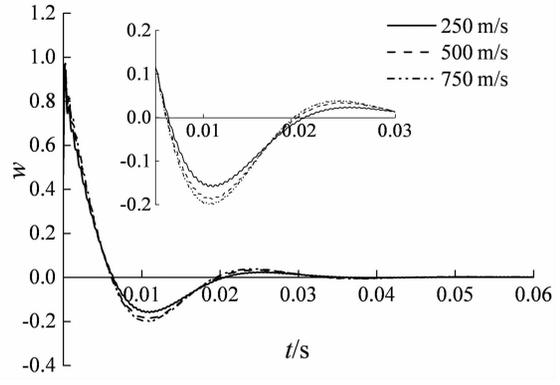


图 11 承台位移时响与下卧层压缩波波速的关系
Fig.11 Relation between free vibration displacement of cushion cap and primary wave velocity of substratum on time domain

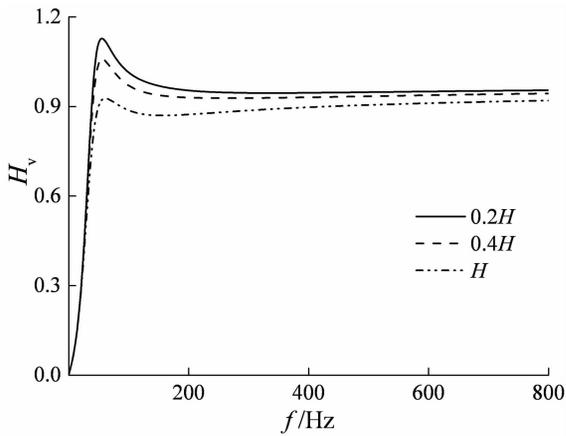


图 10 承台速度频响与下卧层厚度的关系
Fig.10 Relation between free vibration velocity of cushion cap and thicknesses of substratum on frequency domain

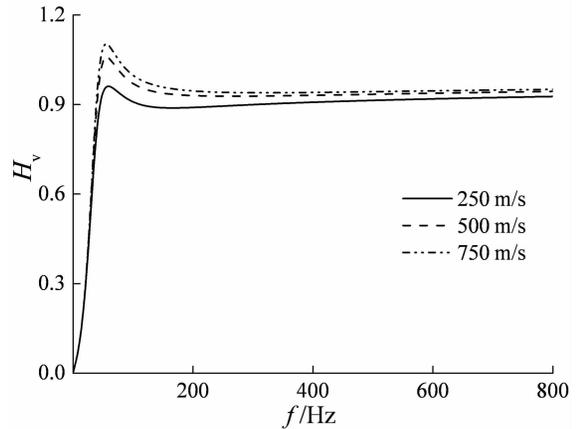


图 12 承台速度频响与下卧层压缩波波速的关系
Fig.12 Relation between free vibration velocity of cushion cap and primary wave velocity of substratum on frequency domain

弱下卧层性质极差的条件下,其对承台纵向振动特性的影响比较显著.这种现象可以解释为:土的弹性模量与压缩波波速的平方相关,随着压缩波波速的增加,桩底土的刚度逐渐增加,进而在相同初始位移的条件下,承台具有的初始能量增加,位移幅值变大.但随着桩底土性质逐渐变好,其黏性系数变大,即能量耗散的能力增强,抵消了部分增加的能量,表现为位移幅值增加的幅度逐渐减小.

图 12 为承台速度频响与下卧层压缩波波速的关系.由图 12 可以看出,下卧层土质越差,速度幅值越小.速度频响曲线在软弱下卧层土质极差的情况下,在共振峰后先降低后升高的趋势越发明显.

4 工程应用

浙江温州工地一带明置承台管桩,桩底土分两层,参数分别为:持力层厚 2.1 m,密度 2 000 kg/

m³,压缩波波速 1 040 m/s;软弱下卧层厚 2.8 m,密度 1 600 kg/m³,压缩波波速 670 m/s;桩侧土与持力层性质相同.桩直径 55 mm,长 31 m,设计砼强度等级为 C80,在打入前测得其压缩波波速为 4 000 m/s;承台的长宽均为 1.5 m,高为 2.8 m,设计砼强度等级为 C40;承台底部有厚为 10 cm 的混凝土垫层,垫层砼强度等级为 C20,密度 2 200 kg/m³,剪切波速 3 000 m/s.桩身材料无量纲黏性系数取 0.1,土体泊松比取 0.4.

获得实测曲线的方法是:工地现场将重球上升至一定高度后释放,撞击承台顶部,即给承台施加初速度;然后将冲击荷载下承台纵向振动信号输入信号分析仪,得到对应的加速度信号,通过积分转换,测得承台的位移参数.设承台初始速度为 v_0 ,初始位移为 0,对式(2)进行拉氏变换,可得承台明置下的位移为:

$$W(z, p) = \frac{Mv_0}{Mp^2 + Z_n(p) + k_c + \delta_c p} \quad (12)$$

通过实测曲线与桩底土虚土桩、单 Voigt 模型^[10]计算结果的对比,由图 13 可以看出,由于充分考虑了桩底土的成层性,同时虚土桩模型的参数可以直接取桩底土材料参数,无需通过经验估算,理论上更加严密.因此虚土桩模型比单 Voigt 模型计算结果更接近实测曲线.实测曲线相较于理论曲线到达负方向位移幅值的时间减少,其原因是桩周土数据为打桩前所测,在打桩时由于挤土效应使得桩周土密度增大,桩顶阻抗的虚部增大,承台振动能量耗散速率加快.由于实测中影响因素繁多导致曲线最终未收敛,但两者从基本性质上来看是较为吻合的,因此从实践的角度出发,基于虚土桩模型的承台-桩-土体系能为设计提供参考.

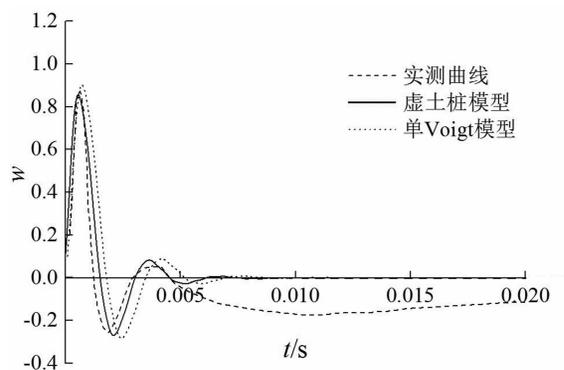


图 13 承台自由振动位移时域响应的实测和反演拟合结果

Fig.13 Measured and Inverting fitting results of free vibration displacement of cushion cap on time domain

5 结论

1) 单层桩底土时,在其他桩土参数保持不变的前提下,随着桩底土厚度变大,承台纵向振动的位移、速度幅值及振动频率均减小,共振频率基本不变.

2) 双层桩底土时,在相同初始位移条件下,软弱下卧层的厚度越大、土质越差,承台纵向振动的位移、速度幅值越小.

3) 通过与桩底土单 Voigt 模型计算结果及实测曲线对比发现,基于虚土桩的承台-桩-土模型能够直接选取桩底土参数进行计算,无需通过经验估算,理论上更加严密.且能考虑桩底土成层性对承台纵向振动特性的影响,使得计算结果更为接近工程实测数据.因此在承台动测过程中,需要考虑桩底土对测试结果的影响,避免误判.

参考文献

- [1] 周乃明. 动刚度法在既有承台-桩基检测中的应用研究[D]. 广州: 华南理工大学土木与交通学院, 2015: 31-43. ZHOU Naiming. Application research about dynamic stiffness method in the existing cap-pile testing[D]. Guangzhou: School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, 2015: 31-43. (In Chinese)
- [2] 邹新军, 陈少玉, 尹帮顺, 等. 基桩动力稳定性模型试验研究[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2012, 39(12): 19-24. ZOU Xinjun, CHEN Shaoyu, YIN Bangshun, et al. Model test for dynamic stability of piles[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2012, 39(12): 19-24. (In Chinese)
- [3] 尚守平, 莫颖, 熊辉. 有限元-无限元耦合法在桩-土动态反应中的应用[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2009, 36(4): 1-5. SHANG Shouping, MO Ying, XIONG Hui. Application of FEM-IEM coupling method in dynamic response for pile-soil system[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2009, 36(4): 1-5. (In Chinese)
- [4] 熊辉, 杨佳. 桩-土(软支撑)-结构非线性动力相互作用分析[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2016, 43(1): 97-102. XIONG Hui, YANG Jia. Nonlinear dynamic time history analysis for pile-soil(soft support model)-structures[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2016, 43(1): 97-102. (In Chinese)
- [5] 王奎华, 谢康和, 曾国熙. 有限长桩受迫振动问题解析解及其应用[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(6): 27-35. WANG Kuihua, XIE Kanghe, ZENG Guoxi. Analytical solution to vibration of finite length pile under exciting force and its application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, 19(6): 27-35. (In Chinese)
- [6] 王奎华. 成层广义 Voigt 地基中黏弹性桩纵向振动分析与应用[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2002, 36(5): 565-572. WANG Kuihua. Vibration of inhomogeneous viscoelastic pile embedded in layered soils with general Voigt model[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science Edition, 2002, 36(5): 565-572. (In Chinese)
- [7] WU W B, JIANG G S, HUANG S G, et al. Vertical dynamic response of pile embedded in layered transversely isotropic soil[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2014, 2014: 1-12.
- [8] 胡昌斌, 张涛. 桩与滞回阻尼土相互作用时桩基扭转振动时域响应分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(S1): 3190-3197. HU Changbin, ZHANG Tao. Time domain torsional response of dynamically loaded pile in hysteretic type damping soil layer[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(S1): 3190-3197. (In Chinese)
- [9] 胡昌斌, 黄晓明. 成层黏弹性土中桩土耦合纵向振动时域响应研究[J]. 地震工程与工程振动, 2006, 26(4): 201-211. HU Changbin, HUANG Xiaoming. A quasi-analytical solution to soil-pile interaction in longitudinal vibration in layered soils considering vertical wave effect on soils[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2006, 26(4): 201-211. (In Chinese)
- [10] 王奎华, 陈鑫, 吕述晖, 等. 自由振动时滞承台单桩的纵向动力特性[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2014, 48(9): 1595-1602. WANG Kuihua, CHEN Xin, LÜ Shuhui, et al. Vertical dynamic characteristics of single pile with cushion cap undergoing free vibration[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science Edition, 2014, 48(9): 1595-1602. (In Chinese)
- [11] WU W B, LIU H, NAGGAR M H E, et al. Torsional dynamic response of a pile embedded in layered soil based on the fictitious soil pile model[J]. Computers and Geotechnics, 2016, 80: 190-198.
- [12] LYSMFR J, RICHART F E. Dynamic response of footing to vertical load[J]. Soil Mechanical and Foundation Division, ASCE, 1966, 92(1): 65-91.
- [13] NOVAK M, NOGAMI T. Dynamic soil reaction for plane strain case[J]. Journal of the Engineering Mechanical Division, ASCE, 1978, 104(4): 953-959.