

考虑挤土效应时楔形桩纵向振动阻抗研究^①

吴文兵, 谢帮华, 黄生根, 徐学连

(中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要:基于复刚度传递多圈层平面应变模型,研究考虑桩周土挤土效应时成层地基中楔形桩的纵向振动问题。首先根据桩周土体的纵向成层情况并考虑楔形桩的变截面特性,将桩土系统沿纵向划分为有限个微元段,对每个微元段的桩周土体建立复刚度传递多圈层平面应变模型,并通过剪切复刚度递推方法求得桩周土作用在桩身的剪切复刚度;然后将求得的剪切复刚度代入桩身纵向振动控制方程,运用 Laplace 变换技术和阻抗函数递推方法,推导得到考虑桩周土挤土效应时成层地基中楔形桩纵向振动时桩顶复阻抗的解析解;最后,采用参数研究方法在低频范围内分析挤土效应对桩顶复阻抗的影响及其规律。

关键词: 楔形桩; 挤土效应; 纵向振动; 阻抗; 复刚度; 平面应变模型

中图分类号: TU435

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2015)04-1042-07

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2015.04.1042

Vertical Dynamic Impedance of Tapered Piles Considering Compacting Effects

WU Wen-bing, XIE Bang-hua, HUANG Sheng-gen, XU Xue-lian

(Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China)

Abstract: On the basis of the complex stiffness transfer model, the vertical vibration of tapered piles embedded in layered soil is theoretically investigated by considering the compacting effect of the soil layer surrounding the tapered pile in the piling process. First, the pile-soil system is discretized into finite segments, which allows for the stratification of the surrounding soil and variable cross-sections of the tapered piles. Since the complex stiffness transfer model has the ability to simulate the compacting effect, the complex stiffness of various soil segments in addition to those of the tapered piles is obtained. The analytical solution of the complex impedance of the tapered piles under longitudinal excitation force is then derived by substituting the complex stiffness into the vertical dynamic governing equation of the tapered pile and using the Laplace technique and impedance function transfer method. Finally, the influence of the compacting effect of the surrounding soil on complex impedance at the pile head is investigated within the low-frequency range using the parametric study method.

Key words: tapered pile; compacting effect; vertical vibration; impedance; complex stiffness; plane strain model

0 引言

静压桩的挤土效应一直是岩土工程界长期关注

的问题,国内外众多学者从两个方面对该问题进行系统的研究。一方面是研究静压桩挤土效应位移场

① 收稿日期: 2014-08-20

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(51309207); 中国博士后科学基金特别项目(2013T60759); 中国博士后科学基金面上项目(2012M521495); 中央高校基本科研业务费专项资金摇篮计划项目(CUGL150411)

作者简介: 吴文兵(1988—), 男, 江西鄱阳人, 博士, 副教授, 主要从事桩基动力学理论研究方面的工作。

E-mail: zjuwub1126@163.com。

的发展过程及土参数对位移场发展过程的影响,如:Randolph 等^[1-2]对压桩引起桩周土的变形进行了观测;罗战友等^[3]指出沉桩的挤土效应与桩土相互作用面的性质密切相关;鹿群等^[4]指出静压桩挤土效应实际上是压桩机竖向压力和桩受压沉入土两者综合作用的结果;徐建平等^[5]利用模型试验得到了沉桩过程中土体位移随水平和深度方向的变化规律;龚晓南等^[6]对饱和软黏土中进行静力压桩所涉及的几个力学问题进行分析,提出了进一步研究这一问题的合理方法;罗战友等^[7]讨论了桩-土界面不同摩擦情况对沉桩产生位移场的影响。另一方面是评估静压桩挤土效应对桩基承载力和沉降的影响,如:彭劼等^[8]通过考虑土体非线性性质修正了现有的荷载传递函数解法;张雪松等^[9]指出桩周地基土的再固结作用将导致桩基产生较大的沉降。上述研究成果表明,挤土效应对桩基周围环境和桩基自身承载特性都具有显著的影响,彻底弄清其影响规律对地基工程建设有重大的现实意义。

近年来,楔形桩因其良好的承载特性受到了广泛关注,众多学者分别采用现场试验和模型试验^[10-11]、理论研究^[12-13]及数值分析^[14]等方法对其承载特性进行了大量的研究,但对楔形桩成桩过程产生的挤土效应的研究仍相当少,现有文献中仅有何杰等^[15]采用室内模型试验研究了楔形桩压桩过程中挤土效应对地表隆起的影响规律,关于挤土效应对楔形桩动力特性影响的研究则相对较少。在现有桩土纵向耦合振动研究成果中,通常将桩假定为圆形等截面有限长桩^[16]、变截面阻抗桩^[17]以及圆形等截面黏弹性桩^[18],而对楔形桩这种桩身截面沿深度连续变化情况的研究相对较少,仅有吴文兵等^[19]、蔡燕燕等^[20]对楔形桩的振动特性进行了初步探索。对于桩与桩周土相互作用模型方面,主要有较简单的动态 Winkler 模型^[21]、平面应变模型^[22-23]、不考虑桩周土体径向位移的桩土耦合模型^[24]及考虑桩周土三维波动效应的严密耦合模型^[25]。近年来,基于桩的成桩效应,国内外众多学者提出并发展了桩周土体径向非均匀模型^[26-27]。尽管现有研究成果关于桩土纵向耦合振动的研究已经相当丰富,但对于楔形桩这种必须考虑挤土效应的特殊桩型的桩土纵向耦合振动的研究却相对较少。

为推广楔形桩在工程中的应用,本文采用王奎华等^[27]提出的复刚度传递多圈层平面应变模型来描述楔形桩周土挤土效应产生的径向非均匀性,求得考虑挤土效应时成层地基中楔形桩桩顶复阻抗的

解析解,并讨论其变化规律。

1 数学模型

1.1 计算简图

在土体为平面应变模型条件下考虑成桩时的挤土效应,对成层地基中黏弹性支承楔形桩的纵向振动问题进行研究。桩土系统相互作用模型如图 1 所示,桩顶作用任意简谐激振力为 $Q(t)$ 。对楔形桩采用文献^[19]给出的建模过程进行建模,其中,第 j 微元段桩的半径为 $r_j = r_p + \frac{H}{m}(j-1)\tan\theta$, 式中 H 、 θ 和 r_p 分别为楔形桩的桩长、楔角及桩端截面半径,第 j 微元段桩材料密度、弹性纵波波速及截面积分别表示为 ρ_{pj} 、 V_{pj} 和 A_{pj} 。每一微元段内桩材料为均质,当微元段数量划分足够多时,楔形微元段可以近似看成圆柱体,并能满足计算精度的要求^[19]。

1.2 桩周土挤土效应的理论模型

楔形桩成桩时桩周土层被扰动挤密,可能会加强靠近桩身部分土体的剪切模量,也可能使得土体密实度发生变化,产生挤土效应,形成土体的径向非均匀特性。本文采用复刚度传递多圈层平面应变模型描述成桩后的土体径向非均匀性,具体思路为:将桩周土体分为两大区域,一是靠近桩身区域(下文称作内部区域),该区域厚度用 b 表示,受楔形桩的挤土效应影响,土体性质随距离桩中心远近而发生变化;二是远离桩身区域(下文称作外部区域),该区域不受桩的挤土效应影响,土体性质均匀。然后再将内部区域由内到外划分为 n 个土体切变模量和密实度渐变的同心圆圈层来描述土体的径向非均匀性,在每个小圈层内土体性质均匀。将同心圆圈层依次标识为 $1, 2, \dots, k, \dots, n$, 圈层外边界对应的半径依次标识为 $b_{j,1}, b_{j,2}, \dots, b_{j,n}$ 。当处于圈层中心的楔形桩受到竖向激励时,土体也会随桩一起产生竖向振动。桩周土对楔形桩产生的剪力用土体剪切复刚度来描述。利用复刚度传递多圈层平面应变模型,可以得到第 j 微元段楔形桩身侧壁处土体复刚度 $K_{j,1}$ 。

1.3 各有关边界条件

(1) 楔形桩为黏弹性、竖直、圆形变截面锥体,桩的截面半径随深度均匀变小;

(2) 桩周土为黏弹性材料,桩周土与楔形桩完全连续接触,楔形桩端部为黏弹性支承边界;

(3) 桩周土体径向无限延伸,土层上表面为自

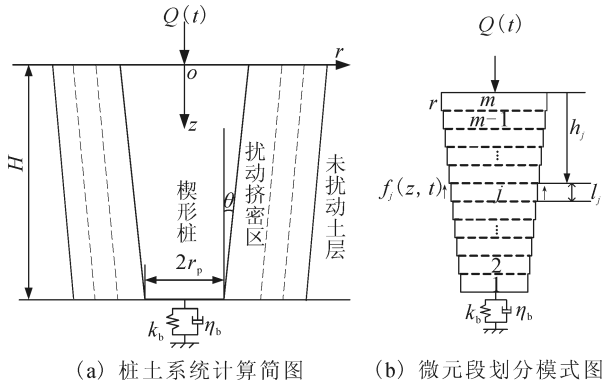


图 1 计算模型
Fig.1 Calculating model

由边界,底部为黏弹性支承边界;

(4) 桩土接触面上,土体动应力通过剪切复刚度传递给桩。

2 桩土耦合振动方程及求解

2.1 土体纵向振动方程及求解

根据 Novak 等^[22-23]1978 年提出的土体纵向振动时的平面应变模型,可得简谐振动情况下桩身周围土体中第 j 微元段第 k 圈层内土体动力方程为:

$$r^2 \frac{d^2 W_{j,k}}{dr^2} + r \frac{dW_{j,k}}{dr} - \beta_{j,k}^2 r^2 W_{j,k} = 0 \quad (1)$$

式中: $\beta_{j,k} = \frac{i\omega}{v_{Sj,k}\sqrt{1+iD_{Sj,k}}}$, 其中 $v_{Sj,k}$ 为土体剪切

波速,且满足 $v_{Sj,k} = \sqrt{G_{Sj,k}/\rho_{Sj,k}}$, $\rho_{Sj,k}$ 、 $G_{Sj,k}$ 、 $D_{Sj,k}$ 、 $W_{j,k} = W_{j,k}(r)$ 分别为第 j 微元段第 k 圈层土体质量密度、切变模量、材料阻尼和土体纵向振动的位移幅值; ω 为振动圆频率, $\omega = 2\pi f$, f 为常规意义上的频率; $i = \sqrt{-1}$ 为虚数单位。

求解(1)可得:

$$W_{j,k}(r) = A_{j,k} K_0(\beta_{j,k} r) + B_{j,k} I_0(\beta_{j,k} r) \quad (2)$$

式中: $I_0(\beta_{j,k} r)$ 和 $K_0(\beta_{j,k} r)$ 分别是零阶第一类和第二类修正 Bessel 函数; $A_{j,k}$ 和 $B_{j,k}$ 是由边界条件决定的复常数。

(1) 外部区域

由于外部区域不受挤土效应的影响,土质均匀,根据式(2)可得第 j 微元段外部区域任意一点的土体位移幅值为:

$$W_{j,n}(r) = A_{j,n} K_0(\beta_{j,n} r) + B_{j,n} I_0(\beta_{j,n} r) \quad (3)$$

式中: $A_{j,n}$ 和 $B_{j,n}$ 是由外部区域边界条件决定的复常数。利用水平无穷远处土体位移衰减为 0, 可得: $B_{j,n} = 0$ 。第 j 微元段楔形桩内、外部区域分界面任意一点的土体竖向剪切复刚度可以表述为单位位移

所对应的剪切力,可表达为^[27]:

$$K_{j,n} = \frac{-2\pi b_{j,n} \tau_{j,n}(b_{j,n})}{W_{j,n}(b_{j,n})} = \frac{2\pi b_{j,n} G_{Sj,n}^* \beta_{j,n} K_1(\beta_{j,n} b_{j,n}) / K_0(\beta_{j,n} b_{j,n})}{v_{Sj,n} \sqrt{1+iD_{Sj,n}}} \quad (4)$$

式中: $\beta_{j,n} = \frac{i\omega}{v_{Sj,n} \sqrt{1+iD_{Sj,n}}}$, $v_{Sj,n}$ 为第 j 微元段外部

区域土体剪切波速; $G_{Sj,n}^* = (1+iD_{Sj,n})$; $K_1(\beta_{j,n} b_{j,n})$ 为一阶第二类修正 Bessel 函数。

(2) 内部区域

假设第 j 微元段第 k 圈层的外边界处($r = b_{j,k}$)的竖向剪切复刚度已知,记为 $K_{j,k}$ 。需要求解的是内边界处($r = b_{j,k-1}$)的竖向剪切复刚度 $K_{j,k-1}$ 。首先,利用剪切复刚度定义可得 $K_{j,k}$:

$$K_{j,k} = \frac{2\pi b_{j,k} \beta_{j,k} G_{Sj,k}^* [A_{j,k} K_1(\beta_{j,k} b_{j,k}) - B_{j,k} I_1(\beta_{j,k} b_{j,k})]}{A_{j,k} K_0(\beta_{j,k} b_{j,k}) + B_{j,k} I_0(\beta_{j,k} b_{j,k})} \quad (5)$$

式中: $A_{j,k}$ 、 $B_{j,k}$ 均为第 j 微元段第 k 圈层的待定常数; $I_1(\beta_{j,k} b_{j,k})$ 为一阶第一类修正 Bessel 函数。将式(5)进行变形可得:

$$\frac{A_{j,k}}{B_{j,k}} = \frac{2\pi b_{j,k} \beta_{j,k} G_{Sj,k}^* I_1(\beta_{j,k} b_{j,k}) + K_{j,k} I_0(\beta_{j,k} b_{j,k})}{2\pi b_{j,k} \beta_{j,k} G_{Sj,k}^* K_1(\beta_{j,k} b_{j,k}) - K_{j,k} K_0(\beta_{j,k} b_{j,k})} \quad (6)$$

同样,利用剪切复刚度定义可得 $K_{j,k-1}$:

$$K_{j,k-1} = \frac{2\pi b_{j,k-1} \beta_{j,k-1} G_{Sj,k-1}^* [A_{j,k-1} K_1(\beta_{j,k-1} b_{j,k-1}) - B_{j,k-1} I_1(\beta_{j,k-1} b_{j,k-1})]}{A_{j,k-1} K_0(\beta_{j,k-1} b_{j,k-1}) + B_{j,k-1} I_0(\beta_{j,k-1} b_{j,k-1})} \quad (7)$$

将式(6)代入式(7)可得:

$$K_{j,k-1} = \frac{2\pi b_{j,k-1} \beta_{j,k-1} G_{Sj,k-1}^* [C_{j,k-1} K_1(\beta_{j,k-1} b_{j,k-1}) - D_{j,k-1} I_1(\beta_{j,k-1} b_{j,k-1})]}{C_{j,k-1} K_0(\beta_{j,k-1} b_{j,k-1}) + D_{j,k-1} I_0(\beta_{j,k-1} b_{j,k-1})} \quad (8)$$

式中:

$$\begin{cases} C_{j,k} = 2\pi b_{j,k} \beta_{j,k} G_{Sj,k}^* I_1(\beta_{j,k} b_{j,k}) + I_0(\beta_{j,k} b_{j,k}) K_{j,k} \\ D_{j,k} = 2\pi b_{j,k} \beta_{j,k} G_{Sj,k}^* K_1(\beta_{j,k} b_{j,k}) - K_0(\beta_{j,k} b_{j,k}) K_{j,k} \end{cases} \quad (9)$$

式(8)、式(9)就是复刚度传递多圈层平面应变模型土层剪切复刚度的递推公式,利用这两个公式采用 Matlab 进行编程,可以计算得到任意圈层径向非均匀条件下桩周土与楔形桩交界面处的剪切复刚度 $K_{j,0}$ 。

2.2 楔形桩纵向振动方程及求解

假设 $u_j(z, t)$ 为第 j 微元段桩的纵向振动位移,则第 j 微元段桩周土对该处桩身侧面单位面积

作用力可表达为 $f_j(z,t)=K_{j,1}u_j(z,t)$, 进一步可得到第 j 微元段桩的纵向振动方程:

$$E_{Pj}A_{Pj}\frac{\partial^2 u_j(z,t)}{\partial z^2}+A_{Pj}\delta_{Pj}\frac{\partial^3 u_j(z,t)}{\partial z^2\partial t}-m_{Pj}\frac{\partial^2 u_j(z,t)}{\partial t^2}-f_j(z,t)=0$$

(10)

式中: E_{Pj} 、 $A_{Pj}=\pi r_j^2$ 、 m_{Pj} 、 δ_{Pj} 分别为第 j 微元段桩的弹性模量、截面积、单位长度桩身质量及桩材料黏性阻尼系数。

桩顶及桩端处的边界条件为:

$$\left[E_{Pm}A_{Pm}\frac{\partial u_m(z,t)}{\partial z}+A_{Pm}\delta_{Pm}\frac{\partial^2 u_m(z,t)}{\partial z\partial t}\right]\Big|_{z=0}=-Q(t)$$

(11)

$$\left[E_{P1}\frac{\partial u_1(z,t)}{\partial z}+\delta_{P1}\frac{\partial^2 u_1(z,t)}{\partial z\partial t}+k_bu_1(z,t)+\eta_b\frac{\partial u_1(z,t)}{\partial t}\right]\Big|_{z=H}=0$$

(12)

式中: $Q(t)$ 为桩顶激振力; k_b 为桩端土的支承刚度, η_b 为桩端土的阻尼, 分别根据 Lysmer 和 Richart^[28] 的模拟公式 $k_b=\frac{4\rho_{bs}V_{bs}^2r_p}{(1-\nu)}$ 、 $\eta_b=\frac{3.4\rho_{bs}V_{bs}r_p^2}{(1-\nu)}$

计算, 其中 ρ_{bs} 、 V_{bs} 、 ν 和 r_p 分别表示桩底土的密度、剪切波速、泊松比和楔形桩桩端截面半径。

相邻楔形桩微元段分界面两侧的桩身位移和截面力满足连续条件, 即:

$$u_j(z,t)\Big|_{z=h_j}=u_{j+1}(z,t)\Big|_{z=h_j}$$

(13)

$$\left[E_{Pj}A_{Pj}\frac{\partial u_j(z,t)}{\partial z}+A_{Pj}\delta_{Pj}\frac{\partial^2 u_j(z,t)}{\partial z\partial t}\right]\Big|_{z=h_j}=\left[E_{P(j+1)}A_{P(j+1)}\frac{\partial u_{j+1}(z,t)}{\partial z}+A_{P(j+1)}\delta_{P(j+1)}\frac{\partial^2 u_{j+1}(z,t)}{\partial z\partial t}\right]\Big|_{z=h_j}$$

(14)

桩顶动力作用开始时满足的初始条件为:

$$u_j(z,t)\Big|_{t=0}=0$$

$$\frac{\partial u_j(z,t)}{\partial t}\Big|_{t=0}=0$$

(15)

结合式(15), 对楔形桩动力平衡方程(10)进行拉普拉斯变换并化简, 可得:

$$V_{Pj}^2\left(1+\frac{\delta_{Pj}}{E_{Pj}}s\right)\frac{\partial^2 U_j(z,s)}{\partial z^2}-\left(s^2+\frac{1}{\rho_{Pj}A_{Pj}}K_{j,0}\right)U_j(z,s)=0$$

(16)

式中: $U_j(z,s)=L[u_j(z,t)]=\int_{-\infty}^{+\infty}u_j(z,t)e^{-st}dt$, 为 $u_j(z,t)$ 的拉普拉斯变换形式。 V_{Pj} 、 ρ_{Pj} 分别为第 j 段桩的一维弹性纵波波速和材料密度; $E_{Pj}=$

$\rho_{Pj}V_{Pj}^2$; s 为拉普拉斯变换复参量, 有 $s=i\omega$ 。
式(16)的解为:
$$U_j(z,s)=E_j\cos(\bar{\lambda}_jz/l_j)+F_j\sin(\bar{\lambda}_jz/l_j)$$

(17)

式中: $\bar{\lambda}_j=\sqrt{\frac{(s^2+\frac{K_j}{\rho_{Pj}A_{Pj}})t_j^2}{1+\frac{\delta_{Pj}}{E_{Pj}}s}}$ 为无量纲特征值;
 E_j 、 F_j 为由边界条件确定的待定系数。 $t_j=l_j/V_{Pj}$ 为弹性纵波在第 j 段桩身内传播所需的时间, 弹性纵波在整个桩中传播所需的时间为 $T_c=\sum_{j=1}^mt_j$ 。

根据位移阻抗函数的定义(简谐激振力与简谐位移响应的复数式之比)可得第 j 微元段桩顶部($z=h_j$)截面处的位移阻抗函数的解析表达式^[25]:

$$Z_{Pj}\Big|_{z=h_j}=-\frac{\rho_{Pj}A_{Pj}V_{Pj}\left(1+\frac{\delta_{Pj}}{E_{Pj}}s\right)\bar{\lambda}_j\tan(\bar{\lambda}_j-\varphi_j)}{t_j}$$

(18)

式中: $\varphi_j=\arctan\frac{Z_{P(j-1)}t_j}{\rho_{Pj}A_{Pj}V_{Pj}\bar{\lambda}_j\left(1+\frac{\delta_{Pj}}{E_{Pj}}s\right)}$, 其中

$Z_{P(j-1)}$ 为第 $j-1$ 微元段桩顶部的位移阻抗函数, 可结合阻抗函数的传递性由边界条件得到。

通过式(18)进一步递推得到第 m 段桩顶部(即楔形桩桩顶)位移阻抗函数:

$$Z_{Pm}\Big|_{z=h_m}=-\frac{\rho_{Pm}A_{Pm}V_{Pm}\left(1+\frac{\delta_{Pm}}{E_{Pm}}s\right)\bar{\lambda}_m\tan(\bar{\lambda}_m-\varphi_m)}{t_m}$$

(19)

式中: $\varphi_m=\arctan\frac{Z_{P(m-1)}t_m}{\rho_{Pm}A_{Pm}V_{Pm}\bar{\lambda}_m\left(1+\frac{\delta_{Pm}}{E_{Pm}}s\right)}$ 。

桩顶复阻抗即桩顶复刚度, 实部代表真实的动刚度, 反映在弹性系统下桩土系统抵抗纵向变形的能力, 虚部代表动阻尼, 反映了应力波的能量耗散。将复阻抗表示成如下的复数表达式:

$$Z_{Pm}=K_r+iC_i$$

(20)

3 参数影响分析及讨论

为了突出研究挤土效应对楔形桩振动特性的影响, 将桩周土取为单层土, 对于成层土中楔形桩的振动情况, 只需根据实际情况将桩周土取为成层土即可。用于计算的楔形桩参数为: 桩长为 10 cm, 密度为 2 500 kg/m³, 弹性纵波波速为 4 000 m/s, 桩端

截面半径为 $r_p = 0.3\text{ m}$, 材料阻尼的取值不会对同一参数变化的规律产生影响, 因此将桩的材料阻尼取为 $\delta_{pj} = 0$ 。已有研究结果表明, 当楔形桩沿纵向微元段划分数量 $m = 200^{[19]}$ 和纵向圈层数量 $n = 20^{[27]}$ 以上时, 即可满足楔形桩纵向划分的精度要求。因此, 在后续分析中, 楔形桩统一沿纵向等长度划分 200 个微元段, 沿径向划分为 20 个圈层。

3.1 挤土范围对桩顶复阻抗的影响

内部区域范围表示楔形桩成桩过程中受扰动挤密的范围, 具体与楔形桩设计参数、施工工艺及土质类型等因素有关。因此, 讨论挤土范围对桩顶复阻抗的影响对楔形桩动力设计来说十分必要。计算参数为: 楔形桩楔角 $\theta = 2^\circ$, 从外部区域到内部区域, 桩周土的剪切波速从 150 m/s 线性增加到 200 m/s, 桩周土密度为 $2\,000\text{ kg/m}^3$, 径向圈层划分数 $n = 20$, 内部挤土区域厚度 $b = 0, 0.05r_p, 1r_p, 1.5r_p, 2r_p, 2.5r_p$ 。

图 2 反映了在动力基础设计关注的低频范围内, 考虑桩周土挤土效应时桩周土挤土范围对桩顶

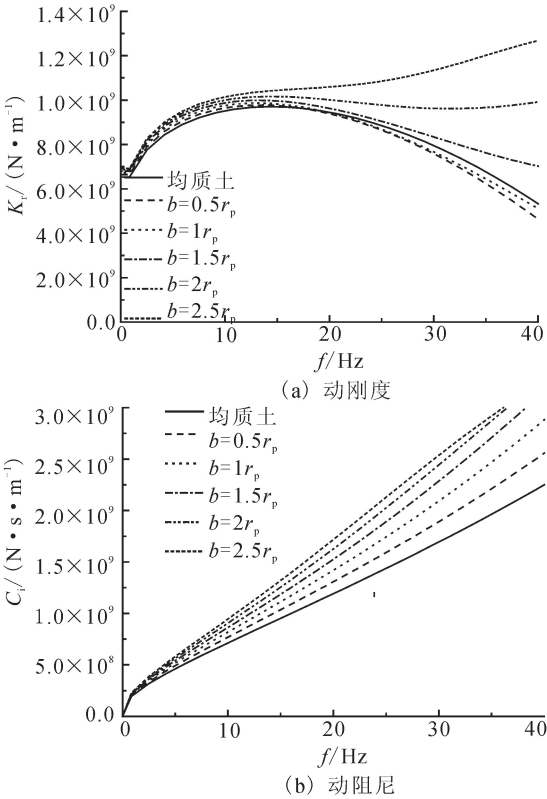


图 2 挤土范围对桩顶复阻抗的影响

Fig.2 Influence of compacting range on complex impedance at the pile head

复阻抗的影响。由动刚度曲线可以看出, 当挤土范

围较小时 (本例挤土范围小于 $2r_p$), 动刚度随着频率的增加先是逐渐增大, 当频率超过一定值后再逐渐减小; 当挤土范围较大时 (本例挤土范围大于 $2r_p$), 动刚度随着频率的增加而逐渐增大。在较低频率范围内, 随着挤土范围的增大同一频率值的动刚度也增大, 当频率增大到一定值后, 随着挤土范围的增大同一频率值动刚度先减小后增大。由动阻尼曲线可以看出, 当频率超过 5 Hz 后, 动阻尼随着频率的增加基本呈线性增加的趋势。随着挤土范围的增大, 同一频率值的动阻尼也逐渐增大, 但增大的幅度会相应减小。这说明随着挤土范围的增大, 在桩内传播的应力波的能量衰减越快。

3.2 挤土程度对桩顶复阻抗的影响

分析挤土程度对桩顶复阻抗的影响。计算参数取为: 楔形桩楔角 $\theta = 2^\circ$, 桩周土密度为 $2\,000\text{ kg/m}^3$, 径向圈层划分数 $n = 20$, 内部挤土区域厚度 $b = r_p$ 。定义剪切波速比例系数 q 来反映挤土程度, q 为内部区域靠近桩身土体的剪切波波速与外部区域剪切波速的比值, 外部区域的剪切波速取为 150 m/s, 剪切波速比例系数 $q = 1, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2$ 。

图 3 反映了在动力基础设计关注的低频范围

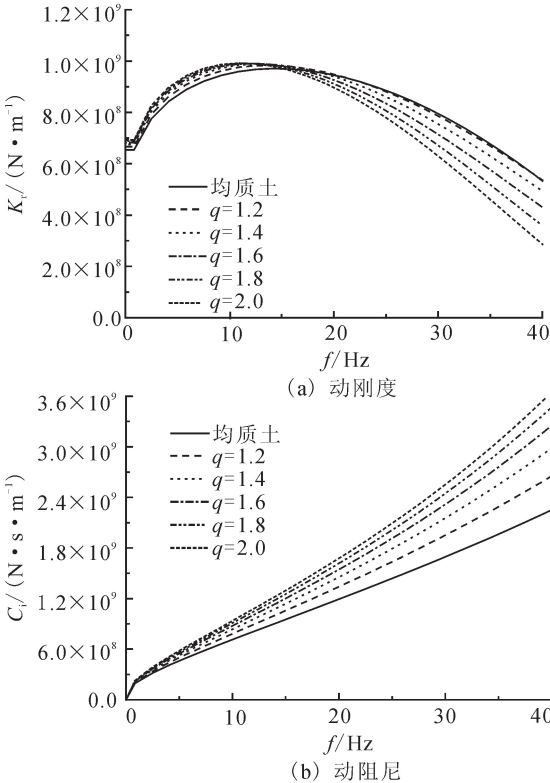


图 3 挤土程度对桩顶复阻抗的影响

Fig.3 Influence of compacting degree on complex impedance at the pile head

内,考虑桩周土挤土效应时桩周土挤土程度对桩顶复阻抗的影响。由动刚度曲线可以看出,动刚度随着频率的增加先是逐渐增大,当频率超过一定值后再逐渐减小。在较低频率范围内,随着挤土程度的增大同一频率值的动刚度也增大,当频率增大到一定值后,会出现随着挤土程度的增大,同一频率值的动刚度减小。由动阻尼曲线可以看出,当频率超过5 Hz后,动阻尼随着频率的增加基本呈线性增加的趋势。随着挤土程度的增大,同一频率值的动阻尼也逐渐增大,但增大的幅度会相应减小。这说明随着挤土程度的增大,在桩内传播的应力波的能量衰减越快。

4 结论

(1) 当桩土系统振动频率在较低频范围内时,可以通过增大桩周土挤土范围来提高桩土系统抵抗纵向变形的能力。但当桩土系统振动频率增加到一定值后,桩土系统抵抗纵向变形的能力随着挤土范围的增大先减小后增大。在动力基础设计关注的低频范围内,桩土系统抵抗纵向振动的能力随着挤土范围的增大而增大。

(2) 当桩土系统振动频率在较低频范围内时,桩土系统抵抗纵向变形的能力随着桩周土挤土程度的增大而增大,此时可通过增大桩周土挤土程度来提高桩土系统抵抗纵向变形的能力。但当桩土系统振动频率增加到一定值后,桩土系统抵抗纵向变形的能力随着挤土程度的增大而减小。在动力基础设计关注的低频范围内,桩土系统抵抗纵向振动的能力随着挤土程度的增大而增大。

参考文献(References)

- [1] Randolph M F, Steenfelt J S, Worth C P. The Effect of Pile Type on Design Parameter for Driven Piles[C]//Proceedings of the Seventh European Conference on Soil Mechanics and Foundation in Engineering. Brighton, 1979: 114-207.
- [2] Steenfelt J S, Randolph M F, Worth C P. Instrumented Model Piles Jacked into Clay[C]//Proceedings of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation in Engineering. Stockholm, Sweden, 1981: 857-864.
- [3] 罗战友, 龚晓南, 王建良, 等. 静压桩挤土效应数值模拟及影响因素分析[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2005, 39(7): 992-996.
LUO Zhan-you, GONG Xiao-nan, WANG Jian-liang, et al. Numerical Simulation and Factor Analysis of Jacked Pile Compacting Effects [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2005, 39(7): 992-996. (in Chinese)
- [4] 鹿群, 龚晓南, 马明, 等. 考虑桩机作用的静压桩挤土效应[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2007, 41(7): 1132-1135, 1190.

- LU Qun, GONG Xiao-nan, MA Ming, et al. Squeezing Effects of Jacked Pile Considering Static Pile Press Machine's Action [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2007, 41(7): 1132-1135, 1190. (in Chinese)
- [5] 徐建平, 周健, 许朝阳, 等. 沉桩挤土效应的模型试验研究[J]. 岩土力学, 2000, 21(3): 235-238.
XU Jian-ping, ZHOU Jian, XU Chao-yang, et al. Model Test Research on Pile Driving Effect of Squeezing Against Soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, 21(3): 235-238. (in Chinese)
- [6] 龚晓南, 李向红. 静力压桩挤土效应中的若干力学问题[J]. 工程力学, 2000, 17(4): 7-13.
GONG Xiao-nan, LI Xiang-hong. Several Mechanical Problems in Compacting Effects of Static Piling in Soft Clay Ground [J]. Engineering Mechanics, 2000, 17(4): 7-13. (in Chinese)
- [7] 罗战友, 王伟堂, 刘薇. 桩-土界面摩擦对静压桩挤土效应的影响分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(18): 3299-3304.
LUO Zhan-you, WANG Wei-tang, LIU Wei. Influence Analysis of Friction between Pile and Soil on Compacting Effects of Jacked Pile [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(18): 3299-3304. (in Chinese)
- [8] 彭劼, 施建勇, 黄刚. 考虑挤土效应的桩基承载力分析[J]. 河海大学学报, 2002, 30(2): 105-108.
PENG Jie, SHI Jian-yong, HUANG Gang. Analysis of Bearing Capacity of Pile Foundation in Consideration of Compaction Effect [J]. Journal of Hohai University, 2002, 30(2): 105-108. (in Chinese)
- [9] 张雪松, 屠毓敏, 龚晓南, 等. 软黏土地基中挤土桩沉降时效性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(19): 3365-3369.
ZHANG Xue-song, TU Yu-min, GONG Xiao-nan, et al. Time-dependency Analysis of Soil Compaction Pile in Soft Clay Ground [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(19): 3365-3369. (in Chinese)
- [10] 蒋建平, 高广运. 扩底桩, 等. 直径桩对比试验研究[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(6): 764-766.
JIANG Jian-ping, GAO Guang-yun. Comparison of Belled Pile, Tapered Pile and Equal-diameter Pile [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(6): 764-766. (in Chinese)
- [11] 刘杰, 王忠海. 楔形桩承载力试验研究[J]. 天津大学学报, 2002, 35(2): 257-260.
LIU Jie, WANG Zhong-hai. Experimental Study on the Bearing Capacity of Wedge Pile [J]. Journal of Tianjin University, 2002, 35(2): 257-260. (in Chinese)
- [12] EL Naggar M H, Wei J Q. Uplift Behaviour of Tapered Piles Established from Model Tests [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2000, 37: 56-74.
- [13] 刘杰, 何杰, 闵长青. 楔形桩与圆柱形桩复合地基承载性状对比研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(7): 2202-2206.
LIU Jie, HE Jie, MIN Chang-qing. Contrast Research of Bearing Behavior for Composite Foundation with Tapered Piles and Cylindrical Piles [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(7): 2202-2206. (in Chinese)

- [14] Take W A, Walsangkar A J. The Elastic Analysis of Compressible Tin-piles and Pile Groups[J]. Geotechnique, 2002, 31(4): 456-474.
- [15] 何杰, 刘杰, 陈科良, 等. 静压楔形桩挤土效应的室内模型试验[J]. 工业建筑, 2008, 38(1): 74-75, 109.
HE Jie, LIU Jie, CHEN Ke-liang, et al. Experiment of Compacting Effects of Static Piling in Clay Ground With Tapered Pile[J]. Industrial Construction, 2008, 38(1): 74-75, 109. (in Chinese)
- [16] 王奎华, 谢康和, 曾国熙. 有限长桩受迫振动问题解析解及应用[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(6): 27-35.
WANG Kui-hua, XIE Kang-he, ZENG Guo-xi. 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)
- [17] 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应用[J]. 土木工程学报, 1998, 31(6): 56-67.
WANG Kui-hua, XIE Kang-he, ZENG Guo-xi. An Analytical Solution to Forced Vibration of Foundation Pile with Variable Section Impedance and Its Application[J]. China Civil Engineering Journal, 1998, 31(6): 56-67. (in Chinese)
- [18] Wang K H, Wu W B, Zhang Z Q, et al. Longitudinal Dynamic Response of an Inhomogeneous Viscoelastic Pile[J]. Computers and Geotechnics, 2010, 37(6): 536-544.
- [19] 吴文兵, 王奎华, 武登辉, 等. 考虑横向惯性效应时楔形桩纵向振动阻抗研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(增刊 2): 3618-3625.
WU Wen-bing, WANG Kui-hua, WU Deng-hui, et al. Study of Dynamic Longitudinal Impedance of Tapered Pile Considering Lateral Inertial Effect[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(Suppl 2): 3618-3625. (in Chinese)
- [20] 蔡燕燕, 俞缙, 郑春婷, 等. 楔形桩桩顶纵向振动阻抗的解析解[J]. 岩土工程学报, 2012, 33(增刊 2): 392-398.
CAI Yan-yan, YU Jin, ZHENG Chun-ting, et al. Analytical Solution for Longitudinal Dynamic Complex Impedance of Tapered Pile[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(Suppl 2): 392-398. (in Chinese)
- [21] 孔德森, 栾茂田, 杨庆. 桩土相互作用分析中的动态 Winkler 模型研究评述[J]. 世界地震工程, 2005, 21(1): 12-17.
KONG De-sen, LUAN Mao-tian, YANG Qing. Review of Dynamic Winkler Model Applied in Pile-soil Interaction Analyses[J]. World Earthquake Engineering, 2005, 21(1): 12-17. (in Chinese)
- [22] Novak M, Aaoul-ella F. Impedance Functions of Piles in Layered Media[J]. Journal of the Engineering Mechanical Division, ASCE, 1978, 104(EM3): 643-661.
- [23] Novak M, Nongami T, Aboul-ella F. Dynamic Soil Reaction for Plane Strain Case[J]. Journal of the Engineering Mechanical Division, ASCE, 1978, 104(EM4): 953-959.
- [24] 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(增刊 1): 3190-3197.
HU Chang-bin, 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(Suppl 1): 3190-3197. (in Chinese)
- [25] 王奎华, 阙仁波, 夏建中. 考虑土体真三维波动效应时桩的振动理论及对近似理论的校核[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(8): 1362-1370.
WANG Kui-hua, QUE Ren-bo, XIA Jian-zhong. Theory of Pile Vibration Considering True Three-dimensional Wave Effect of Soil and Its Check on the Approximate Theories[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(8): 1362-1370. (in Chinese)
- [26] El Naggar M H, Novak M. Nonlinear Lateral Interaction in Pile Dynamics[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1995, 14(2): 141-157.
- [27] 王奎华, 杨冬英, 张智卿. 基于复刚度传递多圈层平面应变模型的桩动力响应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(4): 825-831.
WANG Kui-hua, YANG Dong-ying, ZHANG Zhi-qing. Study on Dynamic Response of Pile Based on Complex Stiffness Transfer Model of Radial Multizone Plane Strain[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(4): 825-831. (in Chinese)
- [28] Ysmer J, Richart F E. Dynamic Response of Footing to Vertical Load[J]. Soil Mechanical and Foundation Division, ASCE, 1966, 2(1): 65-91.