

预应力混凝土管桩桩土相互作用的有限元分析

律文田, 王永和, 冷伍明

(中南大学 土木建筑学院, 长沙 410075)

摘 要: 以软土地区某桥梁基桩动载试验为背景, 采用有限单元法对桩土动力相互作用进行了分析。采用等效线性模型模拟了土体材料的非线性, 并考虑桩的材料阻尼以及桩土接触界面处状态非线性对动力响应的影响, 并分析了桩的材料参数和土的参数对桩顶动位移的影响。分析表明, 基桩弹性模量和材料阻尼对桩顶动位移有一定的影响, 但基桩材料阻尼的影响很小, 桩顶位移随桩侧土压缩模量和阻尼的增大而减小。

关 键 词: 有限单元法; 材料阻尼; 位移; 压缩模量

中图分类号: TB 115 **文献标识码:** A

Finite element analysis of interaction of pre stressed concrete pipe pile and soil

LV Wen-tian, WANG Yong-he, LENG Wu-ming

(School of Civil and Architectural Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: Based on the dynamic test of the pile in soft soil area, the interaction of pile and soil is analyzed by finite element method. Commonly used equivalent linear model is chosen to consider the nonlinearity of soil, material damping of pile is considered and the changing-status nonlinearity of soil-structure interface is considered by contact element. Parameters of pile and soil influenced on pile's displacement were analyzed. The results show, there is some influences on pile top's displacement as a result of a change of pile's modulus of elasticity and material damping; and the pile's displacement become smaller with the pile's modulus of compressibility and material damping increasing.

Key words: finite element method; material damping; displacement; modulus of compressibility

1 引 言

桩基础在公路和铁路桥梁、港口码头、动力机械基础、高层大跨建筑工程中应用非常广泛, 能较好地适应复杂地质条件以及各种荷载情况, 特别是在软弱地基上采用得较多。目前对静荷载作用下桩基础的理论研究、试验研究很多^[1], 对动力荷载作用下基桩的动力特性也进行了一些理论分析和试验研究^[2~5]。但在软土地区, 交通荷载作用下基桩的动载现场试验研究并不多见。近年来, 随着高速公路、高速和重载铁路建设在我国的发展, 人们迫切希望了解基桩在交通荷载作用下的动力性能和变形特性。基于此, 笔者所在的课题组利用自行研制的桩顶静载和动载组合加载装置, 对软土地区某桥梁桩基进行了现场静动载试验。现场试验由于很多因

素的制约, 不可能对所有的基桩和所有情况都进行试验, 因此结合现场试验的数值分析就显得尤为重要。本文基于现场试验, 通过有限单元法对基桩与土的共同作用的力学性能进行动力分析, 计算时采用等效线性模型来模拟土体材料的非线性, 并考虑桩的材料阻尼以及桩土接触界面处状态非线性对动力响应的影响。

2 桩土相互作用动力分析

关于分析计算桩土动力相互作用的模型主要有 3 类: 文克尔模型、连续介质方法和有限单元法。动力学问题的有限元法同静力学问题一样, 要把物体离散为有限数目的单元体。不过在考虑单元特性时, 物体所受的载荷还要考虑单元的惯性力和阻尼力等因素。桩土系统动力响应的基本运动方程为

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F(t)\} \quad (1)$$

式中 $[M]$, $[C]$, $[K]$ 分别为质量矩阵, 阻尼矩阵和刚度矩阵; $\{u\}$, $\{\dot{u}\}$ 和 $\{\ddot{u}\}$ 分别为节点位移向量、节点速度向量和节点加速度向量; $F(t)$ 为外加荷载。

2.1 土体动力本构模型和材料非线性模拟

土的本构关系是土体在受力状态下的应力-应变关系, 实际上它是土体内应力、应变、应变率、应力水平、应力历史、应力路径、加载率、时间及温度等一系列因素之间的函数关系。合理选择地基模型是相互作用分析中非常重要的问题。土体动力本构模型主要有: 双线性模型、等效线性模型、Iwan模型、Martin-Finn-Seed模型和内时模型等。在描述土体非线性方面, 等效线性模型^[6]具有概念明确、应用方便等优点, 在实际中应用广泛; 等效线性模型是将土视为粘弹性体, 采用等效模量和等效阻尼比来反映土体动应力-动应变关系的非线性与滞后性。

B.O.Hardin等由试验得出了土在周期荷载作用下土的应力-应变曲线为双曲线型, 其表达式可写为

$$\tau_d = \frac{\gamma_d}{\frac{1}{G_0} + \frac{\gamma_d}{\tau_{y\max}}} \quad (2)$$

式中 G_0 为起始剪切模量; $\tau_{y\max}$ 为最大动剪应力; τ_d 和 γ_d 分别为动剪应力和动剪应变。若将 G_0 的坡度线与 $\tau_{y\max}$ 水平线的交点的横坐标定义为参考应变 γ_r , 则 $\gamma_r = \tau_{y\max} / G_0$, 则式 (2) 可化简为

$$G_d = \frac{G_0}{1 + \gamma_d / \gamma_r} \quad (3)$$

B.O.Hardin 等根据应力-应变关系, 找出了动剪切模量和阻尼比之间的简单关系:

$$D = D_{\max} \left(1 - \frac{G_d}{G_0} \right) \quad (4)$$

将式 (3) 代入式 (4) 可得:

$$D = D_{\max} \left(\frac{\gamma_d / \gamma_r}{1 + \gamma_d / \gamma_r} \right) \quad (5)$$

式中 D 为阻尼比; $D_{\max}$ 为最大阻尼比, 与土的种类和振次等有关。

等效线性化方法的基本思想是, 根据土的动剪切模量和阻尼比与动剪应变幅值之间的关系, 且在计算时先假定各层土的动剪切模量和阻尼比为常

数, 然后求出各土层的平均应变, 再用有关公式计算出相应的剪切模量和阻尼比, 然后用计算出的阻尼比和剪切模量进行计算, 如此反复迭代, 直到协调为止。

2.2 阻尼模型

在动荷载作用下, 材料阻尼有两种表现形式:

(1) 振动外载以弹性波的方式在材料内传播时, 因波面的增大而导致能量损失, 称为几何阻尼; (2) 由于材料内部的摩擦及粘性效应所产生的能量损失, 称为材料内阻尼。本文计算时采用瑞利 (Rayleigh) 阻尼^[7], 从而计算模型中每种材料的阻尼矩阵有如下形式:

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (6)$$

式中 α , β 为材料阻尼的组合系数, 按下式确定^[8]。

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \frac{2\omega_i\omega_j(\omega_i D_i - \omega_j D_j)}{\omega_i^2 - \omega_j^2} \\ \beta &= \frac{2(\omega_i D_i - \omega_j D_j)}{\omega_i^2 - \omega_j^2} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中 ω_i 和 ω_j 为计算体系的第 i 和 j 阶频率; D_i , D_j 为对应体系的第 i 和 j 阶频率的阻尼比。

2.3 边界条件的设置

对于动荷载情况, 虚拟边界会将由振动结构所传出的波反射到已离散的土中, 而不让它们透过边界传至无穷远处。为了处理地震能量向场地远处逸散, 选择合适的边界条件来反映网格以外的土体成为有限元方法求解结构-地基动力相互作用的关键问题。文中计算时采用粘-弹性边界, 即在边界上设置阻尼器和弹簧。设置的阻尼器可以吸收向外辐射的波动能量, 从而达到模拟波动的透射过程。粘性阻尼器 C_b 和线性弹簧 K_b 由下式确定^[9]:

$$K_b = \frac{G}{2r_b} \quad (8)$$

$$C_b = \rho V_s = \sqrt{G\rho} \quad (9)$$

式中 r_b 为振动点到设置人工边界的距离; V_s 为剪切波速; G 为剪切模量; ρ 为质量密度。

3 有限单元法分析

3.1 工程实例

软土地区某桥梁桩基, 预制混凝土管桩桩长 24 m, 直径为 0.55 m, 采用静压方式压入软土地基。场地地层属第四系全新统冲湖积层, 主要由淤泥质

粉质粘土, 粉质粘土及粉砂组成。各层地层土性自上而下分述如下: 层①为淤泥质粘土, 深灰色, 流塑, 含少量腐植物, 局部夹有薄层粉砂, 高压缩性、低强度的特点, 且大多数灵敏度超过 16, 为流动粘土, 具高触变性, 厚度为 15.62 m; 层②为粉质粘土, 绿灰色, 软塑, 厚 2.8 m, 具中等压缩性; 层③为粉砂, 褐黄色, 深灰色, 中密-密实, 饱和, 厚度为 5.48 m。

3.2 有限元模型

文献[10]对土体取 10 倍结构横向尺寸并施加粘性边界以及土体取 30 倍结构横向尺寸, 并取自由边界的情况分别从土体底部输入地震波进行结构-地基动力相互作用计算。通过对两种情况下体系的位移时程分析认为, 土体取 10 倍结构横向尺寸并施加粘性边界的计算效果与土体取 30 倍结构横向尺寸并取自由边界的相近, 说明在采用粘性边界时, 有限元计算所需土体的尺寸可大大小于土体取自由边界时的计算尺寸, 采用粘性边界可以较多地节约计算机资源和计算时间。本文在计算时横向土体取 20 倍桩直径的尺寸、竖向取 3 倍桩长尺寸, 采用粘弹性边界条件。采用等效线性模型来模拟土体材料的非线性, 并考虑桩的材料阻尼以及桩土接触界面状态非线性对动力响应的影响。桩土材料的计算参数见表 1。

表 1 桩土材料计算参数

Table 1 Parameters of pile and soils

材料参数	压缩模量 /MPa	阻尼比	泊松比	密度 /kg·m ⁻³
第①层土	4.35	0.08	0.40	1 780
第②层土	8.77	0.08	0.36	1 880
第③层土	13.68	0.08	0.31	2 030
桩	39 500	0.05	0.23	2 500

3.3 模型验证

为了验证所建立的有限元模型的合理性和可靠性, 利用文献[11]中模型试验桩的动力试验结果与有限元计算结果进行比较。模型桩的直径为 17 mm, 长 510 mm, 材料参数及计算结果见表 2 和表 3。试验时动载幅值为 100 N, 频率为 3.5 Hz。

通过比较可以看出, 有限元计算的结果基本上反应了实际情况。桩顶位移幅值计算结果与材料力学估算值以及文献[11]结果比较接近。桩顶处在有限元计算中因采用的是集中荷载, 其应力值由于应力集中现象的影响, 结果偏大; 为了便于比较, 计

算在桩顶下一倍桩径处的应力, 计算的应力结果分别为 0.392, 0.425, 0.412 MPa, 应力值与材料力学估算结果相差不到 5%。考虑到基桩实际侧摩阻力分布上部大而下部小的特点, 材料力学估算的应力值 0.425 MPa 偏大, 因而实际误差更小。因此, 利用上述方法建立的有限元模型来分析桩土动力相互作用是可行的。

表 2 桩土计算参数表

Table 2 Parameters of pile and soils

材料	弹性模量 /MPa	损耗系数 /%	泊松比	质量密度 /kg·m ⁻³
土	2	10	0.36	1964
桩	2000	5	0.29	2100

表 3 计算结果比较

Table 3 Comparison of calculated solutions

计算方法	桩顶位移 幅值 /mm	桩顶加速 度幅值 /m·s ⁻²	桩顶应力 /MPa	桩顶下一 倍桩径处 应力/MPa
文献[11]方法	0.057		0.680	0.392
模型试验	0.070		0.440	
材料力学估算	0.056		0.440	0.425
本文有限元法	0.057	0.019	0.716	0.412

4 计算结果分析

为了了解交通荷载作用下桥梁基桩的动力性能, 利用有限元模型来分析桩土动力相互作用。分析时在桩顶施加正弦荷载 (kN), 其表达式为

$$F(t) = 20 \sin(6\pi t) + 30 \quad (10)$$

4.1 桩的材料参数影响

图 1 和图 2 给出了桩身材料参数和桩顶动位移幅值的关系曲线。由图 1 可以看出, 随着基桩弹性模量的增大, 桩顶动位移随之减小。

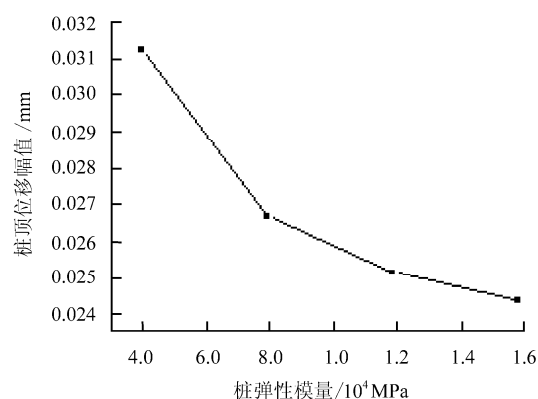


图 1 基桩弹性模量与桩顶位移的关系

Fig.1 The relation between modulus of elasticity and displacement of pile

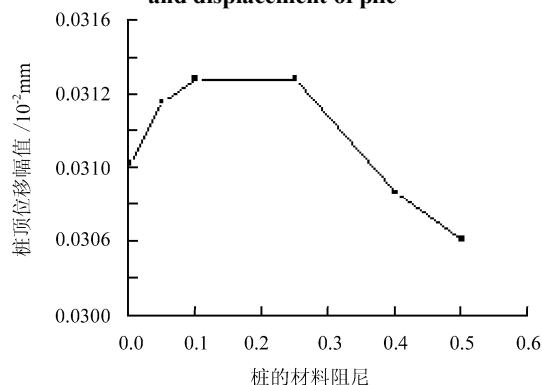


图 2 桩材料阻尼与桩顶位移的关系

Fig.2 The relation between material damping and displacement of pile

从图 2 可知，桩顶位移幅值随桩身材料阻尼的增大，先增大后减小，也就是有一个波峰状的分布。这是因为，改变桩材料阻尼也就改变了桩土体系的刚度，当荷载大小和频率一定时，逐渐增大桩的材料阻尼就使得体系自振频率有可能与外荷载频率相同而通过共振区，表现为位移振动幅值增大。当阻尼从 0 增大到 0.5 时，桩顶位移幅值变化仅为 2.58×10^{-4} mm，也就是说，桩的材料阻尼对桩顶位移的影响很小。因此，分析预应力混凝土管桩在动荷载作用下的动力响应，可不考虑桩身材料阻尼的影响。

从图 3 可知，当其它条件不变时，随桩的长细比 (L/d) 增加桩顶的振幅随之减小。当长细比小于 30 时，桩顶位移幅值变化速率较大；当长细比大于 30 时，变化速率较慢。当长细比从 10 增大到 30 时，桩顶位移幅值从 0.32 mm 减小到 0.05 mm，但长细比从 30 变化到 50 时，桩顶位移幅值变化很小。因此，软土地区桥梁基桩在动力荷载作用下，其竖向位移振动幅值受长径比影响较大；当长细比大于 30 时桩顶的振幅趋于稳定，设计中宜采用长径比大于 30 的桩。

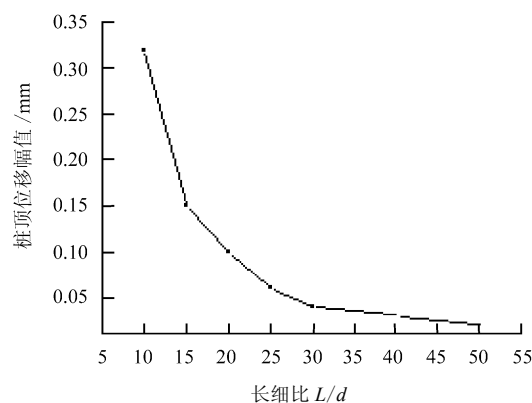


图 3 桩的长细比对桩顶动位移幅值的影响

Fig. 3 The effect of the ratio of length to diameter on the pile top's displacement

4.2 土参数影响

分析桩侧土参数对桩顶动位移幅值的影响时，主要分析软土层的压缩模量和土体阻尼对其影响。假定其它条件不变，通过改变压缩模量和阻尼来分析动位移幅值的变化。变化曲线如图 5 和图 6 所示。

图 4 给出了竖向位移沿水平方向的变化，竖向位移分量在离开桩轴线后迅速减小，减小的速率随距离增大而减小，这反应了土体材料阻尼和几何阻尼的影响，同时也说明在土体范围内竖向应变随水平距离的增大而减小。

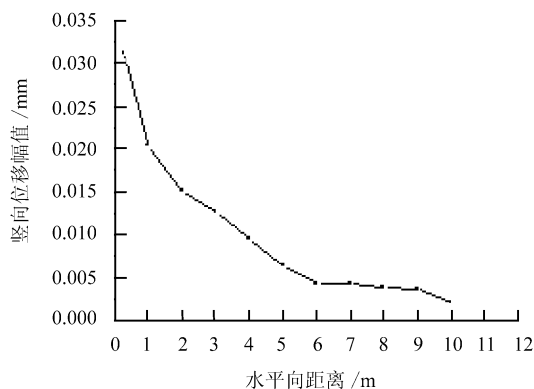


图 4 竖向位移沿水平方向的变化

Fig. 4 Vertical displacement changing along horizontal displacement

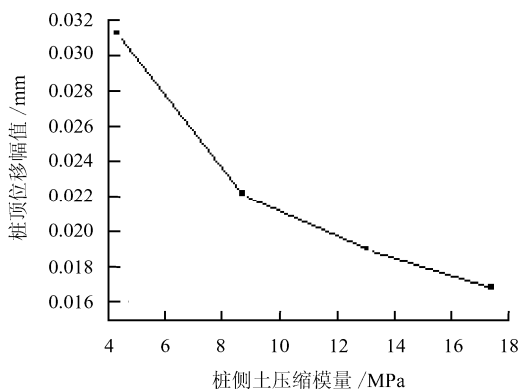


图 5 桩顶位移与桩侧土压缩模量的关系

Fig. 5 The relation between modulus of compressibility and pile top's displacement

由图 5 可以看出，竖向位移随土的压缩模量的增大而减小，减小的速率随压缩模量增大趋于平缓。这与静力时土体压缩模量的增大导致位移必然减小的规律类似，这是因为改变土的压缩模量也就是改变了桩土体系的刚度，在其它条件不变的情况下，

位移随桩土体系刚度的增大而减小。但当荷载大小及频率一定时^[11], 逐渐增大土的压缩模量还有可能使桩土体系自振频率与荷载频率相同而通过共振区, 这样桩顶位移幅值就会出现一个峰值。

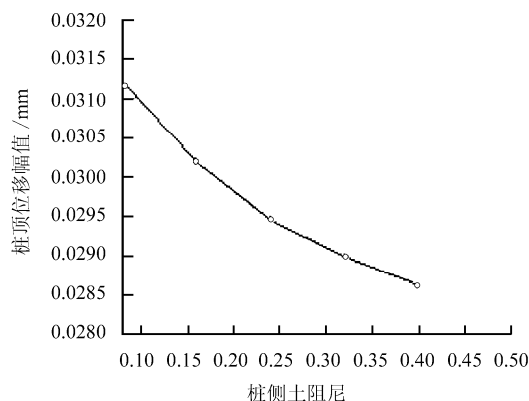


图 6 桩侧土阻尼与桩顶位移关系

Fig. 6 The relation between soil's damping and pile top's displacement

如图6所示, 在桩土体系受到动力作用时土体内阻尼是体系阻尼的重要组成部分。计算表明, 土体阻尼的存在可使桩顶位移减小, 增大阻尼可有效地减小桩的振动幅度。另外, 随着阻尼的增大也会改变桩土体系的刚度。

5 结 语

本文采用有限单元法对桩土动力相互作用进行分析, 分析时采用等效线性模型来模拟土体材料的非线性, 并且考虑桩的材料阻尼以及桩土接触界面处状态非线性对动力响应的影响。分析表明, 基桩弹性模量和材料阻尼对桩顶位移幅值有一定的影响, 但是桩身材料阻尼对混凝土预制管桩桩顶位移影响不大, 随桩的长细比增加桩顶的振幅随之减小, 建议软土地区桥梁基桩设计中宜采用长径比大于30的桩。另外, 随桩侧土压缩模量和阻尼的增大, 桩顶位移随之减小。

参 考 文 献

- [1] 皇甫明, 王幼青, 张军. 纵横向荷载作用下桩的工作性状研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2003, 35(6): 743 - 746.
- [2] Mammoon S M, Banerjee P K. Time-domain analysis of dynamically loaded single piles[J]. *Journal of the Engineering Mechanics Division, American Society of Civil Engineering*, 1992, 118(EM1): 140 - 160.
- [3] 王腾, 王奎华, 谢康和. 成层土中桩的纵向振动理论研究及应用[J]. 土木工程学报, 2002, 35(1): 83 - 87.
- [4] 彭雄志, 赵善锐, 罗书学, 等. 高速铁路桥梁基础单桩动力模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(2): 218 - 221.
- [5] Maheshwari B K, Truman K Z, El Naggar M H, Gould P L. Three-dimensional nonlinear analysis for seismic soil-pile-structure interaction[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2004, 24(4): 343 - 356.
- [6] 王杰贤. 动力地基与基础[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [7] 吴世明. 土动力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.
- [8] 徐自国, 宋二祥. 刚性桩复合地基抗震性能的有限元分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(2): 179 - 184.
- [9] 沈聚敏, 周锡元, 高小旺, 等. 地震工程学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.
- [10] 陈波. 土-桩基-结构动力相互作用体系的模拟及分析[博士学位论文D]. 上海: 同济大学, 2002.
- [11] 彭雄志. 轴向循环荷载作用下桩的动力特性研究[博士学位论文D]. 成都: 西南交通大学, 2000.