

桩-土-结构体系随机地震响应的实用计算方法及参数分析

周爱红, 袁颖, 侯征, 周海辉

(石家庄经济学院, 河北 石家庄 050031)

摘要:考虑地震的随机性和土体的非线性,引入粘弹性边界,提出了一种在谐响应分析中直接输入加速度的加载方式,建立了基于虚拟激励法、等效线性化法和确定性动力有限元法相结合的非线性桩-土-结构体系随机地震响应的实用计算方法。采用该法对单桩支承的剪切型结构进行了较为全面的参数分析。结果表明基岩地震动输入水平,桩长度和土体模量都对结构反应有较大影响。该方法可方便的用于随机地震下桩-土-结构体系的参数分析中。

关键词:桩-土-结构体系; 随机地震; 等效线性; 虚拟激励法; 参数分析

中图分类号: TU311.3; O324 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2011)01-0051-05

Parametric Analysis and Practical Calculation Method for the Stochastic Seismic Response of Soil-Pile-Structure Interaction System

ZHOU Ai-hong, YUAN Ying, HOU Zheng, ZHOU Hai-hui

(Shijiazhuang University of Economics, Shijiazhuang 050031, China)

Abstract: Considering the randomness of earthquake and the nonlinearity of soil, introducing viscous-spring boundary, a loading pattern of inputting acceleration directly in harmonic response analysis is proposed. The practical calculation method of stochastic vibration response for pile-soil-structure interaction system based on pseudo-excitation method, equivalent linearization method and definite dynamic finite element method is presented. The parametric analyses of the single end-bearing pile structure are conducted in detail using this method. The results show that the parameters as inputting ground motion, pile length and soil modulus have obvious effect to seismic response of the system. The method could be employed to perform parametric analysis of pile-soil-structure interaction system subject with stochastic earthquake conveniently.

Key words: Soil-pile-structure interaction system; Stochastic earthquake; Equivalent linearization; Pseudo-excitation method; Parametric analysis

0 引言

以往处理土工结构在地震作用下的动力响应问题时,通常是选择某一确定性的地震波作为输入,因而属于一种确定性分析。但地震是随机发生的^[1],结构会受到什么样的地震作用具有不确定性,因此对结构进行随机振动分析更为合理。而虚拟激励法是随机振动分析强有力的工具^[2-3]。在地震作用下,

尤其是在强震作用下土料会呈现出强非线性,用线性弹性模型描述这种强非线性与实际相差较大,而用弹塑性模型来描述又太复杂,难以为工程人员所应用。另外,考虑选取哪种模型,不仅要考虑它能否比较真实地反应在给定环境下土体的物理力学特征,还要考虑是否可获得该模型中所包含的参数的可靠

收稿日期:2009-12-14

基金项目:河北省自然科学基金(E200900093;E2009000944);石家庄经济学院博士科研启动基金

作者简介:周爱红(1976-),女(汉族),河北滦县人,副教授,主要从事土动力学以及岩土工程随机振动方面研究。

数值。等价线性化模型在描述结构的确定性强震动响应分析中就以其适用性强而被广泛应用。本文在基于地震的随机性和土体的非线性基础上,引入粘弹性边界条件,采用虚拟激励法将复杂的随机振动分析转化为一系列谱响应分析,引入等价线性化模型,结合大型通用软件^[4],提出一种对桩-土-结构体系的地震响应进行有限元计算的方法。并用该方法对单桩支撑的剪切型结构进行参数分析,以期寻找一种工程上简便合理且适用性强的随机振动分析方法。

1 土体本构模型

已有很多专家学者先后开展了对地震动随机过程的研究,提出了很多随机地震荷载的模型,典型的有 Housner^[5-6] 的白噪声模型,金井清^[7-8] 的过滤白噪声模型,Ruiz and Penzien^[9] 的双过滤白噪声模型,欧进萍、牛获涛、杜修力^[10] 的过滤有色谱模型等。其中后两种都是对金井清模型的改进模型。

目前金井清模型应用得最为广泛。很多专家学者也对模型中的参数问题进行了研究,但给出的结果却有较大差异。后来孙景江、江近仁^[11] 改用规范的反应谱,给出了与规范反应谱对应的金井清谱的参数。本文也拟采用。

随机振动分析不同于确定性的振动分析,土层内产生的剪应变 $\gamma(t)$ 是随机的。对于随机剪应变过程中等效的剪应变如何取值问题,不同的学者有不同的看法。作者在文献^[4] 中详细探讨了不同等效剪应变的取值对土体材料参数的影响,并得出可在随机振动分析中采用直接插值法进行线性等效。下面简单介绍直接插值等效线性化模型^[12]。

假设随机地震动输入为均值为零的平稳高斯过程,则由高斯分布线性变换的特点可知剪应变 γ_{xy} 也是一高斯过程,且均值同样为零。则其峰值 γ_p 的概率密度函数为

$$p(\gamma_p) = \sqrt{\frac{1-\beta^2}{2\pi\sigma_\gamma^2}} \exp\left(-\frac{\gamma_p^2}{2\sigma_\gamma^2(1-\beta^2)}\right) + \frac{\beta\gamma_p}{2\sigma_\gamma^2} \left[1 + \operatorname{erf}\left(\frac{\gamma_p}{\sigma_\gamma \sqrt{2\beta^2-2}}\right)\right] \exp\left(-\frac{\gamma_p^2}{2\sigma_\gamma^2}\right) \quad (1)$$

式中: $\operatorname{erf}(\cdot)$ 为误差函数, $\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$; β 为带宽参数

$$\beta = \sigma_\gamma^2 / (\sigma_\gamma \dot{\sigma}_\gamma) \quad (2)$$

σ_γ 、 $\dot{\sigma}_\gamma$ 、 $\ddot{\sigma}_\gamma$ 分别为剪应变 $\gamma(t)$ 、剪应变速度 $\dot{\gamma}(t)$ 、剪应变加速度 $\ddot{\gamma}(t)$ 的均方根。带宽 β 是控制剪应变幅值

γ_p 的分布的参数。当 $\beta=1$ 时, $p(\gamma_p)$ 的带宽最窄, γ_p 服从瑞利分布;当 $\beta=0$ 时, $p(\gamma_p)$ 的带宽最宽, γ_p 服从高斯分布。

利用这个特点,按下式近似计算等效剪模和等效阻尼:

$$\left. \begin{aligned} G_{eq} &= G(\gamma_{eq}) = G_m (1 + |\gamma_{eq}/\gamma_R|) \\ \xi_{eq} &= \xi(\gamma_{eq}) = \xi_m |\gamma_{eq}/\gamma_R| / (1 + |\gamma_{eq}/\gamma_R|) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中, G_{eq} 、 ξ_{eq} 是与等效剪应变幅 γ_{eq} 协调的等效剪模和等效阻尼。等效剪应变 γ_{eq} 按下式计算:

$$\gamma_{eq} = E[\gamma_p]_G + \beta(E[\gamma_p]_R - E[\gamma_p]_G) \quad (4)$$

式中, $E[\gamma_p]_G$ 和 $E[\gamma_p]_R$ 是 γ_p 分别服从高斯分布和瑞利分布的均值。

2 边界的设置与输入地震动方法

2.1 人工边界设置

基于有限元模型,采用直接分析法进行桩-土-结构相互作用体系的地震响应分析时,需要设置人工边界,以使计算域内的外行波在截断边界处不会反射回来。

本文将王振宇^[13] 提出的边界进一步应用于考虑土体非线性的桩-土-结构相互作用体系的随机地震响应分析中。然后在地基两侧的边界处直接设置并联的弹簧阻尼单元,利用阻尼器吸收外行的地震波能量,利用弹簧来描述地基的弹性恢复性能,实现粘弹性人工边界的施加。

法向边界

$$K_{fi} = \frac{2G_i}{r} A_i, C_{fi} = \rho_i c_{pi} A_i \quad (5)$$

切向边界

$$K_{qi} = \frac{3G_i}{2r_i} A_i, C_{qi} = \rho_i c_{si} A_i \quad (6)$$

这里 K_i 、 C_i 分别为弹簧和阻尼系数; G_i 、 c_{pi} 、 c_{si} 分别为介质的剪切模量、纵波波速和横波波速; A_i 代表边界点 i 所代表的面积; r_i 为散射源(波源)到边界点 i 的距离。

2.2 输入地震动方法

本文将随机地震响应分析转化为一组简谐振动分析后,在谱响应分析中输入虚拟加速度激励。在 ANSYS 谱响应动力分析中输入的外部激励是简谐力荷载,而按照虚拟激励法原理计算随机振动时需施加一系列加速度谱荷载。最直观的方法是大量法,即增加大质量单元,把施加的加速度荷载转化为施加在大质量单元上的力荷载。这样带来的最大

问题是不能使用动力分析中最为常用的瑞利阻尼,并且可能使模型质量矩阵产生奇异。笔者提出了一种直接输入加速度的方法。

在简谐荷载作用下,如果把输入加速度表示为 $\ddot{x} = -\omega^2 A \sin(\omega t)$, 则速度 $\dot{x} = A\omega \cos(\omega t)$, 位移 $x = A \sin(\omega t)$ 。

其中: A 为激励幅值, ω 为激励频率, t 为时间。由此可得

$$x = -\ddot{x} / \omega^2, |x| = |\ddot{x}| / \omega^2 \quad (7)$$

这样就通过输入强迫位移输入了加速度。作者在文献[14]中应用 ANSYS 软件,采用这两种输入方式进行了非线性土坝随机地震响应分析,结果表明这两种输入方式得出的土坝材料参数和响应非常接近,直接加速度法用时较少。

3 分析方法

把复杂的桩-土-结构体系模型化,则在随机地震作用下与非线性结构等效的线性结构的运动方程为

$$[M]\{\ddot{X}\} + [C_{eq}]\{\dot{X}\} + [K_{eq}]\{X\} = -[M]\{J\}\ddot{x}_g(t) \quad (8)$$

其中, $[M]$ 为质量矩阵; $[C_{eq}]$, $[K_{eq}]$ 分别为等效阻尼矩阵, 等效刚度矩阵; $\{\ddot{X}\}$, $\{\dot{X}\}$, $\{X\}$ 分别为节点加速度向量, 节点速度向量和节点位移向量; $\{J\}$ 为荷载指示向量; $\ddot{x}_g(t)$ 为平稳加速度随机地震荷载, 假设其功率谱为 $G_{\ddot{x}_g}(\omega)$ 。

按照虚拟激励法, 将输入加速度功率谱 $\sqrt{G_{\ddot{x}_g}(\omega)}$ 在一系列 ω 处离散, 对第 j 个离散点构造虚拟简谐激励 $\sqrt{G_{\ddot{x}_g}(\omega_j)} e^{i\omega_j t}$, 则其虚拟简谐运动方程为

$$[M]\{\ddot{X}\} + [C_{eq}]\{\dot{X}\} + [K_{eq}]\{X\} = -[M]\{J\}\sqrt{G_{\ddot{x}_g}(\omega_j)} e^{i\omega_j t} \quad (9)$$

按照线性确定性结构谐振问题计算出响应量, 幅值平方则为响应量在 ω_j 处的功率谱值。循环迭代直到计算完对应所有 ω 的谱分析, 则得到响应量的功率谱, 进而积分计算响应量的方差和高阶谱矩。这样就通过虚拟激励法将线性结构随机地震反应分析转化为线性结构的确定性简谐振动分析。计算流程见图 1。

4 参数敏感性分析

桩-土-结构是一个复杂的体系, 上部结构的反应受多个因素的影响。本文取单桩支承的剪切型结构作为分析对象, 上部结构的参数不变, 通过改变

桩的长度, 土体的模量, 地震动输入水平来考察上部结构的反应。设计工况见表 1。

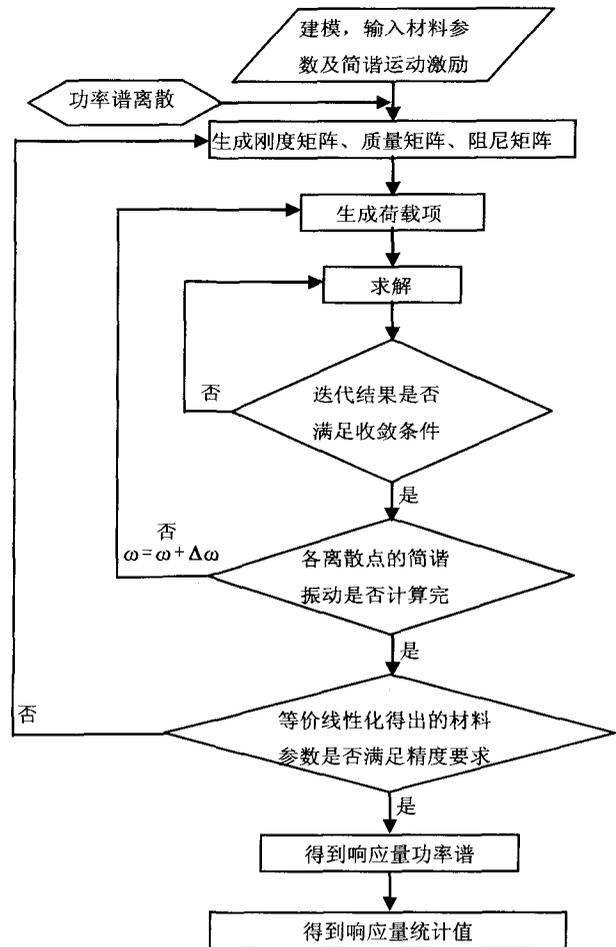


图 1 计算流程图

Fig. 1 Calculation flow chart.

表 1 设计工况

工况	计算条件		
	桩长/m	土体模量/MPa	地震动水平/g
1	20	60	0.2
2	10	60	0.2
3	30	60	0.2
4	20	20	0.2
5	20	360	0.2
6	20	60	0.1
7	20	60	0.4

4.1 计算参数

上部结构^[15]用剪切型质量串来模拟, 其几何量与力学量示于表 2。钢筋混凝土刚性承台, 尺寸为 $2\text{ m} \times 2\text{ m} \times 1\text{ m}$ 。桩直径为 1.0 m , 弹性模量为 $E_p = 30\text{ GPa}$, 泊松比为 $\nu_p = 0.167$, 质量密度为 $\rho_p = 2\ 500\text{ kg/m}^3$, 阻尼比为 5% 。桩周围土体为均质土体, 密度为 $\rho_s = 1\ 800\text{ kg/m}^3$, 泊松比为 0.35 , 最大阻尼比为 0.3 , 参考剪应变 2.5×10^{-4} 。

地震过程为零均值平稳高斯过程,用平稳运动金井清功率谱和强震持时来描述其效应,相应参数为: $\omega_g=1.79$, $\xi_g=0.46$,峰值因子 $r_p=3.54$,强震持时20 s。

表2 结构参数

层次	层高/cm	刚度/[kN·cm ⁻¹]	质量/kg	阻尼比
1	497	85.66	1 020	0.05
2	433	66.10	980	0.05
3	400	48.87	775	0.05

4.2 桩长对体系随机地震响应的影响

土体模量为60 MPa,桩的长度分别取10 m、20 m、30 m,计算工况为表1中的2、1、3工况。基岩输入地震动加速度为0.2 g。从图2(a)可以看出,桩越长同样高程处的最大位移越大。从图2(b)可以看出,在靠近桩顶约3 m处桩身最大剪力期望值达到最大值。桩越长,桩底剪力越小,桩身处的剪力最大值越小;桩越长,结构剪力越小。

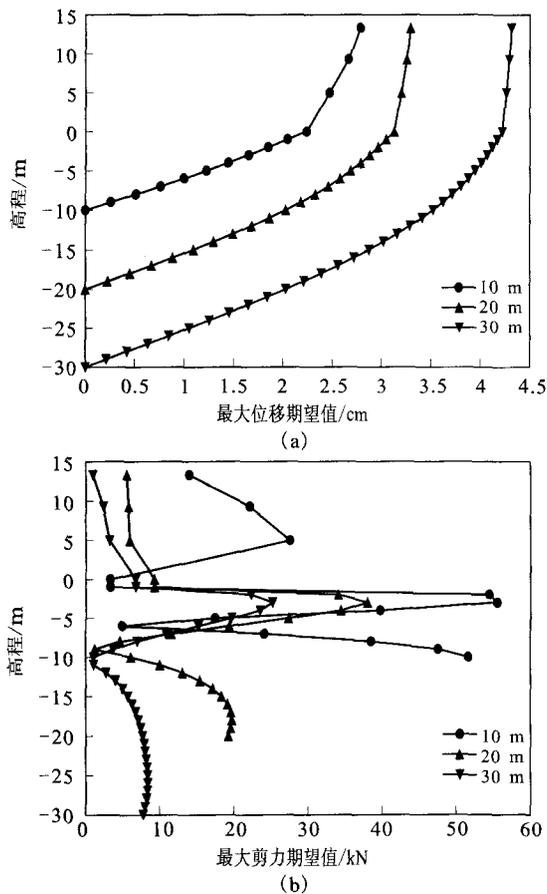


图2 不同桩长时最大位移期望值和最大剪切期望值分布

Fig. 2 Distribution of max expectant displacement and max expectant shear force in different pile lengths.

4.3 土体模量对体系随机地震响应的影响

桩长20 m,土体模量为20 MPa、60 MPa、360 MPa,计算工况见表1的4、1、5。基岩输入地震动加速度为0.2 g。从图3(a)可以看出:土体模量越大,同样高程处最大位移越小。从图3(b)可以看出:在靠近桩顶约3 m处,桩身最大剪力期望值达到最大值。土体模量越大,桩底剪力越小,结构的剪力越大。

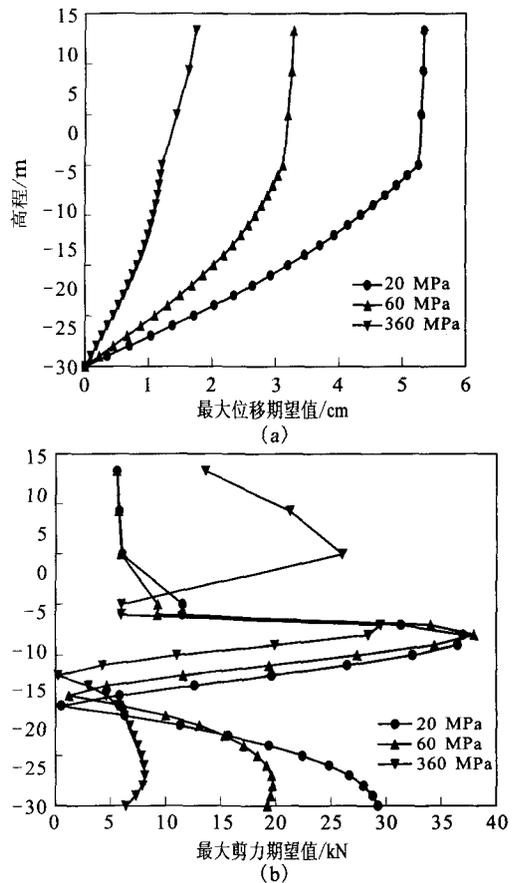


图3 不同土体模量最大位移期望值和最大剪力期望值分布

Fig. 3 Distribution of max expectant displacement and max expectant shear force in different soil modulus.

4.4 输入地震动水平对体系随机地震响应的影响

桩长20 m,土体模量60 MPa,计算工况为表1中6、1、7。基岩输入地震动水平参考抗震规范对应设计烈度为Ⅷ度、Ⅷ度和Ⅸ度,分别取0.1 g、0.2 g和0.4 g。从图4可以看出:地震动水平越大,同样高程处最大位移和最大剪力越大;桩身最大剪力期望值在桩长约1/2处达到最小值。

5 结论

本文建立了基于虚拟激励法、等效线性化法和确定性动力有限元法相结合的非线性桩—土—结构

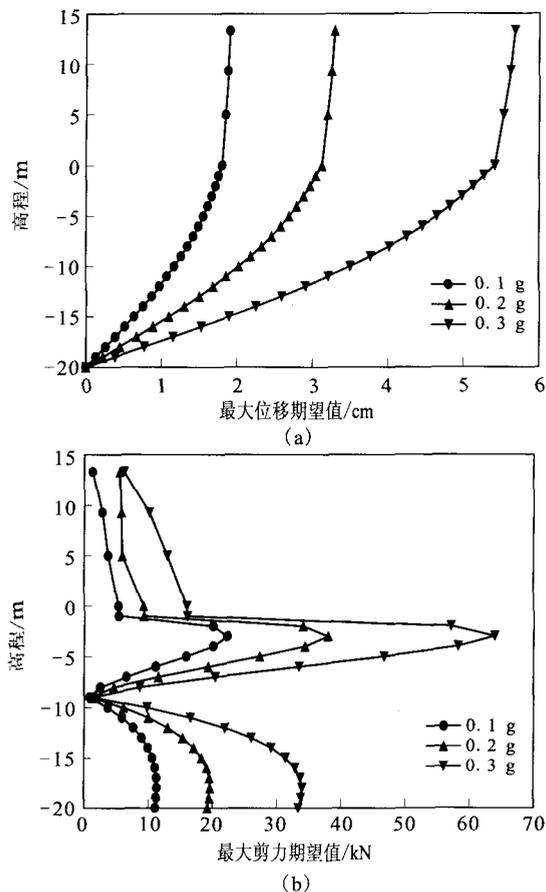


图4 不同地震动水平下最大位移期望值和最大剪力期望值分布

Fig. 6 Distribution of max expectant displacement and max expectant shear force in different input accelerations.

体系比较简单实用的随机振动分析方法,并编制了相应的程序。应用该程序对端承单桩支承的剪切型结构体系进行了较全面的参数分析。结果表明基岩地震动的输入水平、土体模量大小及桩的长度对结构反应都有较大影响。因此,结构抗震设计中要根据所处场地合理确定地震动,重点考察土体模量特性,根据实际情况确定桩长,考虑地震动的随机性和桩-土-结构的动力相互作用以及土体的强非线性。

[参考文献]

- [1] 董娣,刘锐,桑向国. 随机方法模拟地震动的应用研究[J]. 西北地震学报, 2006, 28(4): 298-302.
- [2] 何晴光,杜永峰,程选生. 基于虚拟激励法的消能减震结构随机响应分析[J]. 西北地震学报, 2008, 30(4): 366-368.
- [3] 林家浩,张亚辉. 随机振动的虚拟激励法[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [4] 周爱红,袁颖,张鸿儒. 基于ANSYS二次开发技术的土层随机地震反应分析[J]. 煤炭学报, 2007, 32(11): 5711-8711.
- [5] Housner G W. Characteristics of Strong Motion Earthquake [J]. BSSA, 1947, 37(1):125-138.
- [6] Housner G W. Characteristics of Strong Motion Earthquake [J]. BSSA, 1945, 45(3):457-472.
- [7] Kanai K. Semi-empirical Formula for the Seismic Characteristics of the Ground[J]. Bulletin of the Earthquake Research Institute[J]. University of Tokyo, 1957, 35:306-325.
- [8] Tajimi H. A Statistical Method of Determining the Maximum Response of a Building Structure during an Earthquake[A]// Proc., Second World Conf. On Earth. Eng. [C]. Tokyo:[s. n.], 1960.
- [9] Ruiz P, Penzien J. Probabilistic Study of the Behavior of Structures during Earthquakes[R]. Earthquake Eng. C., UCB, CA, Report No. EERC 69-03, 1969.
- [10] 欧进萍,牛获涛,杜修力. 设计用随机地震动的模型及其参数确定[J]. 地震工程与工程振动, 1991, 11(3):45-53.
- [11] 孙景仁,江近仁. 与规范反应谱对应的金井清谱的参数[J]. 世界地震工程, 1990, (1):42-48.
- [12] 吴再光. 土层随机地震反应的一种改进算法[J]. 振动工程学报, 1990, 3(1): 56-59.
- [13] 王振宇,刘晶波. 成层地基非线性波动问题人工边界与波动输入研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(7): 1169-1173.
- [14] 周爱红,张鸿儒,袁颖. 土工结构随机地震响应分析实用方法研究[A]//中国土木工程学会第十届土力学及岩土工程学术会议[C]. 重庆: 重庆大学出版社, 2007: 604-608.
- [15] 李桂青,等. 结构动力可靠性理论及其应用[M]. 北京: 地震出版社, 1993.