

一致激励条件下非线性工程场地地震动相干函数分析*

陈原¹, 李杰²

(1. 广州大学建筑工程系, 广州 510006; 2. 同济大学建筑工程系, 上海 200092)

摘要: 在地震动过程中, 土介质中的剪切波速往往出现显著的降低现象, 体现出强烈的非线性性质。本文将随机振动的虚拟激励原理、土非线性分析的等效线性化方法与工程波动理论散射问题的求解方法相结合, 建立了开放系统中一致激励条件下考虑岩土介质非线性的工程场地地震动随机场数值模拟方法。该方法将随机输入下的波动分析问题转换为虚拟激励下的确定性波动分析问题, 非线性土体峰值剪应变的统计特征可通过剪应变均方差和峰值因子获得。结合具体算例及 Monte—Carlo 模拟方法对所提出方法的合理性进行了验证, 在此基础上应用该方法对一致激励下实际工程场地的地震动相干性进行分析, 结果表明场地的局部条件对地震动相干性有重要影响。

关键词: 波动有限元分析; 虚拟激励法; 等效线性化; 一致激励; 相干函数

中图分类号: TU435 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2006)04-0369-08

0 引言

地震动空间变化规律对大尺度结构的地震响应有着重要影响。基于密集地震台阵记录的统计回归工作极大地促进了地震动空间变化规律的研究, 但是这种统计方法所得到的模型强烈依赖于密集台阵记录, 无法有效地将其研究结果应用于其他实际工程场址。为了改变这种模型研究与工程应用之间的脱节现状, 研究者们开始寻求基于理论分析思路的地震动空间变化规律研究途径。例如: 文献[1]利用数值方法研究了从基岩垂直输入随机激励下随机介质场地的地震动相干函数; 文献[2]、[3]利用波动有限元分析技术分析了复杂场地地震动空间相关性。上述研究都是在线弹性范围内进行的, 然而, 在地震动过程中, 土介质中的剪切波速往往出现显著的降低现象, 体现出强烈的非线性性质^[4], 因此, 有必要寻求一种能够考虑场地介质非线性特性的场地地震动相干函数的分析方法。

1 分析方法

1.1 等效线性化方法及其研究背景

由于地震动具有随机性, 应采用随机振动的分

析方法, 结构非线性随机振动的基本微分方程一般具有如下形式:

$$g(\ddot{x}, \dot{x}, x) = f(t) \quad (1)$$

式中 x 为位移向量;

$g(\ddot{x}, \dot{x}, x)$ 中第 i 分量 $g_i(\ddot{x}, \dot{x}, x)$ 为与第 i 自由度相应的非线性恢复力关系;

$f(t)$ 为随机输入。

在非线性随机振动分析中, 目前使用较广的是随机等效线性化方法, 该方法假定存在一个与式(1)等效的线性系统:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = f(t) \quad (2)$$

系统中各参数的取值应遵循使等效线性系统的反应 x 尽可能接近原非线性系统的反应的原则。基于上述思想, 研究者一般采用严格的随机等效线性化方法^[5]和基于确定性等效线性化分析方法提出的随机等效线性化方法^[6~9]对问题进行求解。其中, 严格的随机等效线性化方法分析繁杂, 难以推广, 在土动力分析中较少应用。相对而言, 基于确定性等效线性化分析方法提出的随机等效线性化方法虽然理论上并不严密, 且其中参数如 γ_{\max} 的确定也带有一定的经验性, 但该方法简单易行、适用范围广。本文把工程波动理论中散射问题的处理方法与随机振动的虚拟激励方法相结合, 提出一种考虑土介质非线性性质的随机波动分析方法, 并将其应用于一致激励下工程场地地震动相干性的分析。

* 收稿日期: 2006-02-17; 修回日期: 2006-06-08

基金项目: 国家自然科学基金研究群体计划(50321803)资助

作者简介: 陈原(1968-), 男, 讲师, 博士。主要从事结构工程抗震研究。Email: chenyuansky@163.com

1.2 非线性波动有限元分析

以图 1 的直入射情况为例说明本文的计算方法。设二维波动分析问题,入射波为 SV 波,对工程场地进行波动有限元分析时,从无限域中截取一个有限计算区域,在计算区域的边界处需要采用特殊的技术模拟外行波场,这种经人为引入的边界一般称之为人工边界。对人工边界范围内的区域进行有限元离散后,可以写出运动控制方程的波动有限元矩阵形式:

$$M \ddot{u}(t) + C \dot{u}(t) + Ku(t) = R(t) \quad (3)$$

其中 $M, C, K, R(t)$ 分别是单元的质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵和荷载矢量。

采用文献[10]发展的多次透射人工边界,有如下以人工边界范围内部结点位移表示的人工边界节点位移关系式:

$$u_0^{p+1} = \sum_{j=1}^N (-1)^{j+1} C_j^N (u_j^{p+1-j} - u_{r,j}^{p+1-j}) + u_{r,0}^{p+1} \quad (4)$$

式中 N 为人工边界的透射阶数,本文中 $N=2$;

C_j^N 为二项式组合系数;

u_j^{p+1-j} 表示与所考虑人工边界结点处于同一法线上、且距离为 $jc_a \Delta t$ 的内部质点在 $(p+1-j) \Delta t$ 时刻的波动描述量; Δt 为计算时步, c_a 为人工波速,本文取介质的剪切波速; $u_{r,j}^{p+1-j}$ 表示与所考虑人工边界结点处于同一法线上、且距离为 $jc_a \Delta t$ 的内部质点在 $p \Delta t$ 时刻的射入人工边界的波的波动描述量,正确确定由射入人工边界的波在人工边界范围内形成的波场是波动有限元的关键问题,入射波场的计算方法见文献[11]。

上述波动分析方法是在介质为线弹性的条件下进行的,为考虑介质的非线性性质,本文利用工程中广泛应用的等效线性化方法^[12]将上述线性波动有限元分析推广到非线性领域。

为了保证计算区内波动有限元分析的计算精度,离散单元网格尺寸 Δx 一般应当满足

$$\Delta x \leq (1/6 - 1/10) \lambda_{\min} \quad (5)$$

其中 λ_{\min} 为分析中所关心频段内谐波的最短波长。

本计算数值积分主要采用 Newmark- β 方法,该方法是无条件稳定的,但在自由场的计算中,则是依据差分法的原理来实现的,计算步长应根据差分法的要求确定。在波动有限元分析中,计算步长 Δt 应满足

$$\Delta t \leq \alpha (\Delta x / c_0)_{\min} \quad (6)$$

式中 c_0 为场地介质的物理波速,一般可取介质的

剪切波速;

α 为小于 1 的系数,根据实际计算情况而定。

1.3 一致激励下非线性工程场地地震动相干函数分析方法

根据随机过程理论的基本概念,相干函数 [Coherency] 定义为任意 2 个随机过程之间的标准化互功率谱密度,即对于 i, j 2 个点地震动,其相应相干函数 $\gamma_{ij}(\omega)$ 的严格数学定义为^[13,14]

$$\gamma_{ij}(\omega) = \begin{cases} \frac{S_{ij}(\omega)}{\sqrt{S_{ii}(\omega)S_{jj}(\omega)}} & \text{当 } S_{ii}(\omega)S_{jj}(\omega) \neq 0 \\ 0 & \text{当 } S_{ii}(\omega)S_{jj}(\omega) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中 $S_{ij}(\omega)$ 为 2 点地震动随机过程之间的互功率谱密度;

$S_{ii}(\omega)$ 和 $S_{jj}(\omega)$ 分别为对应于 i, j 2 个点的自功率谱密度。

相干函数的另一常用表示方式为

$$\gamma_{ij}(\omega) = |\gamma_{ij}(\omega)| \exp[i\theta_{ij}(\omega)] \quad (8)$$

式中 $\theta_{ij}(\omega)$ 为相干函数相角;

$|\gamma_{ij}(\omega)|$ 称为迟滞相干函数,用于衡量 2 个站点间所记录运动过程线性相关程度,当其中一站点的记录过程可由另一站点的记录经某种线性变换得到时,迟滞相干函数值为 1,对于 2 个完全不相关的过程,其迟滞相干函数值为 0。

当地震动为随机过程时,系统方程为随机振动方程,本文采用林家浩^[15]提出的随机振动分析的虚拟激励方法。在构造虚拟激励时,根据波动有限元的特点,通过入射波的位移谱来构造虚拟激励即虚拟入射波。在入射的地震波为一致激励且为直入射情况下,设入射波位移谱为 $S(\omega)$,则所构造的虚拟入射波为 $\sqrt{S(\omega)} e^{i\omega x}$ 。由确定性结构分析方法得到该虚拟激励作用下的场地响应矢量 y ,最后可以写出稳态响应谱密度矩阵:

$$Y_{yy}(\omega) = y^*(\omega) y^T(\omega) \quad (9)$$

将计算得到的波动观测量的谱密度代入式(7)或(8),即可获得所求的地震动相干函数。

当需要考虑入射波的行波效应时,入射波位移谱为 $s(\omega) \exp(-i\omega d/v_0)$,其中 d, v_0 分别为任意 2 点间距离和入射波视波速。设底部介质剪切波速为 v ,依据式(10)可确定虚拟剪切波的入射角 θ ,从而可按文献[11]的分析方法通过对斜入射波的计算求得问题的解答。

$$\theta = \arcsin(v/v_0) \quad (10)$$

当需要考虑土的非线性效应时,非线性单元的等效剪应变可由下式求得:

$$(\gamma_d)_{\text{eff}} = 0.65 p_m \sigma_{\gamma_d} \quad (11)$$

式中 p_m 为峰值因子, p_m 的取值与地震动的强度、输入地震动谱的类型、土的非线性性质均有关系(文献[8,9])^[16],考虑到下面将要计算问题的具体情况,在本文中 p_m 取为 2.5;

σ_{γ_d} 为单元剪应变方差,由下式求得:

$$\sigma_{\gamma_d}^2 = 2 \int_0^{\infty} s_{\gamma}(\omega) d\omega \quad (12)$$

式中 $s_{\gamma}(\omega)$ 为单元剪应变谱密度,可由式(11)的谱密度矩阵及单元的应力—应变关系得到。

随机非线性波动分析方法的基本步骤除单元的等效剪应变需通过虚拟激励法由上述 2 式求得外,其他步骤与确定性非线性波动分析方法步骤基本一致。

依据波动有限元散射问题的计算特点,其底部波动输入均采用位移输入,相应的底部波动输入的谱也采用位移谱,当底部波动输入的加速度谱已知时,可利用式(13)将其转换为位移谱,然后进行波动输入。

$$S_{\ddot{x}\ddot{x}}(\omega) = \omega^4 S_{xx}(\omega) \quad (13)$$

式中 $S_{\ddot{x}\ddot{x}}(\omega)$ 为入射波加速度自谱密度;

$S_{xx}(\omega)$ 为入射波位移自谱密度。

2 分析实例

2.1 算例一

计算模型如图 1,土层分 2 层。表层非线性土层厚 30 m,计算物理参数:泊松比为 0.3,质量密度 $\rho = 2\,000.0 \text{ kg/m}^3$ 。底部硬土层为线性土层,计算物

理参数:泊松比为 0.25,质量密度 $\rho = 2\,400.0 \text{ kg/m}^3$,剪切模量 $G = 6 \times 10^8 \text{ Pa}$,剪切波速 500 m/s。表层土的非线性特性以双曲线模型来描述^[17]:

$$G = \frac{G_{\text{max}}}{1 + |(\gamma_d)_{\text{eff}}/\gamma_R|}$$

$$\xi = \frac{|(\gamma_d)_{\text{eff}}/\gamma_R| \xi_m}{1 + |(\gamma_d)_{\text{eff}}/\gamma_R|} \quad (14)$$

式中 $G, \xi, (\gamma_d)_{\text{eff}}$ 分别为等效剪模、等效阻尼比和等效剪应变;

ξ_m 和 γ_R 为参数,为方便计算,设表层土动剪切模量的初值 $G_0 = G_{\text{max}}$,沿深度一致分布, $G_{\text{max}} = 1.2 \times 10^8 \text{ Pa}$, $\xi_m = 0.3, \gamma_R = 0.000\,3$ 。底部硬土层内入射波的加速度谱采用金井清谱^[18]:

$$s(\omega) = \frac{1 + 4\beta^2(\omega/\omega_0)^2}{[1 - (\omega/\omega_0)^2]^2 + 4\beta^2(\omega/\omega_0)^2} s_0 \quad (15)$$

取 $s_0 = 0.000\,8, \omega_0 = 16.9, \beta = 0.94$,相当于入射波最大加速度 0.06 g(硬土层表面最大加速度 0.12 g)。随机波动分析时利用式(13)将上述加速度谱转换成位移谱。人工边界划定的计算范围 200 m \times 44 m,单元大小 2 m \times 2 m,计算时步 0.001 5 s。不考虑行波效应时,地震波直入射,按随机非线性波动分析方法求得表面点的加速度谱密度曲线如图 2。

为验证本文提出的随机波动非线性分析方法的正确性,对上述算例同时进行了数值模拟。对输入地震动位移过程的模拟采用三角级数形式:

$$x(t) = \sum_{i=1}^N a_i \cos(\omega_i t + \varphi_i)$$

$$a_i^2 = 4.0 \cdot S(\omega) / \omega^4 \cdot \Delta\omega \quad (16)$$

其中 φ_i 为在 $[0, 2\pi]$ 上均匀分布的随机变量;

$s(\omega)$ 为输入地震动加速度过程谱密度。

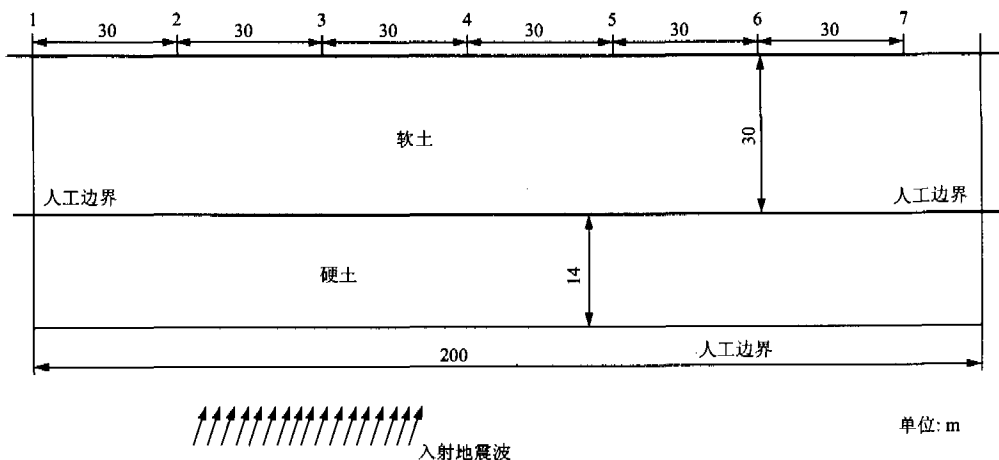


图 1 水平均匀成层场地计算示意

Fig. 1 The computational model of horizontal layered site

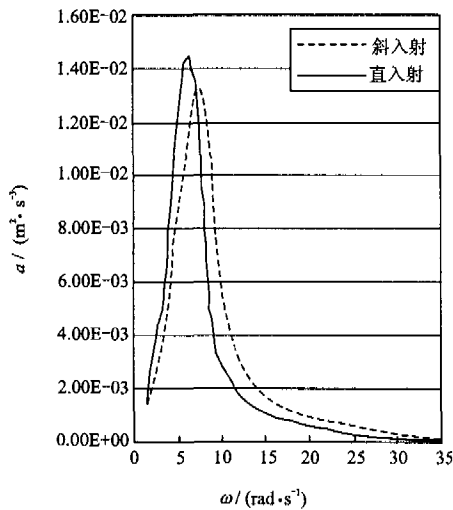


图 2 地面加速度谱密度

Fig. 2 The acceleration power spectral density of surface

按确定性波动非线性分析方法计算每一地震波样本输入下的场地动力响应,并综合所有结果计算得出动力响应的统计特征。数值模拟得到的表面点的位移和加速度的均值及方差过程如图 3,数值模拟次数为 500 次。

由图 3 可见,表面点的加速度的均值反应均趋于 0,这与输入地震动为 0 均值平稳随机过程相符;同时可见随着时间的增加,表面点的加速度方差过程趋于稳定。根据由本文提出的随机波动非线性分析方法得到的图 2 的加速度谱密度 $s(\omega)$ 曲线,按式 (12) 计算表面点稳态反应的加速度方差,可得 $\sigma = 0.39 \text{ m/s}^2$ 。将此结果与图 3 稳态段的值进行比较,可见两者符合较好,比较结果说明本文提出的随机波动非线性分析方法是可行的。以下研究不考虑行波效应条件下(直入射)场地地震动的相干性,场地表面迟滞相干函数及相角如图 4。

根据式(16)生成一定数量的随机地震波样本,

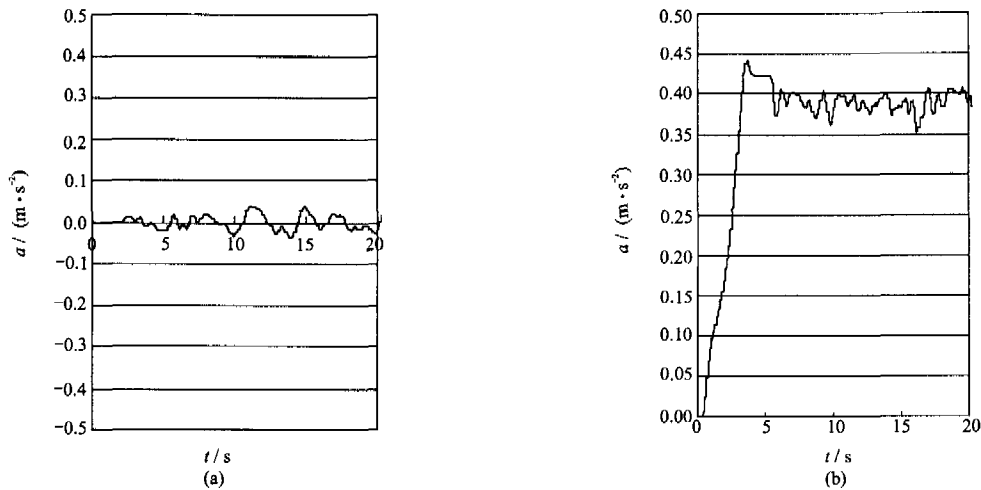


图 3 地面加速度均值(a)和方差(b)过程

Fig. 3 The mean value (a) and standard deviation (b) of acceleration at surface

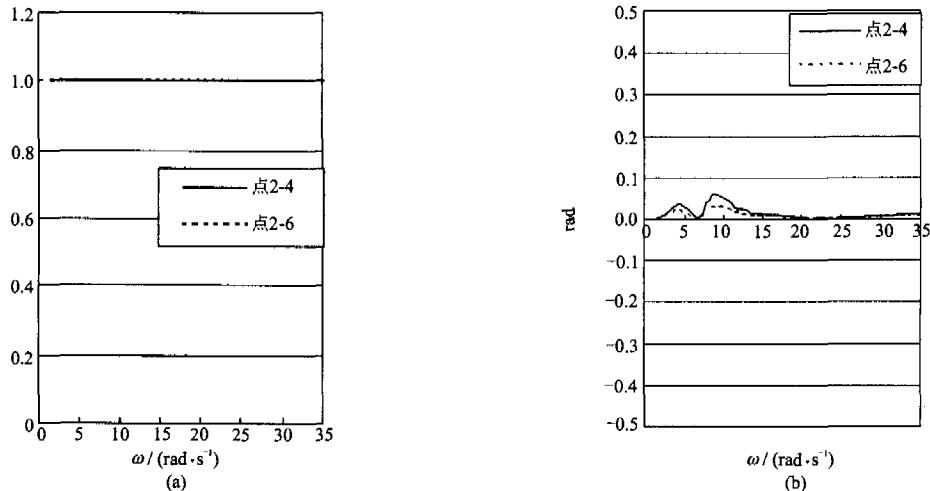


图 4 地面点迟滞相干函数(a)和相角(b)变化

Fig. 4 The lagged coherency (a) and phase spectrum (b) with respect to frequency

由图 4 可见,表面各点之间的迟滞相干函数总为 1,这与一致激励随机振动基本理论相符;相应的相角趋近于 0,这与人射波不考虑行波效应是一致的。因此对水平向均匀分布的成层介质场地,当地震波垂直入射时,表面各点之间的迟滞相干函数总为 1,相应的相角为 0。此外,由图 2 可见,表面加速度自谱密度具有较窄的频段,这在一定程度上反映了土介质的非线性性质,计算同时表明,在系统的基频处,表面点加速度谱密度达到最大值。

当考虑行波效应时,入射波谱具有形式 $s(\omega) \cdot \exp(-i\omega d/v_0)$,假设入射波视波速 $v_0=1500$ m/s,底部介质的剪切波速 $v=500$ m/s,可得入射波与垂直方向夹角为 20° 。斜入射时表面点加速度谱密度曲线见图 2,迟滞相干函数与图 4 完全一致,迟滞相干函数相角变化见图 5。

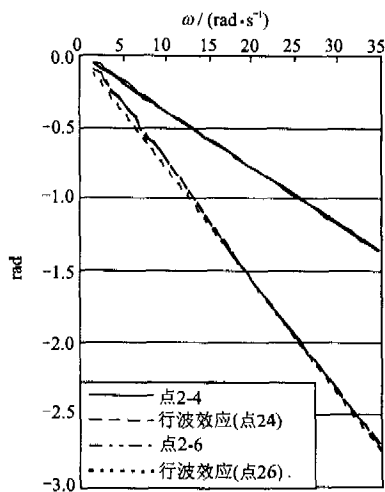


图 5 迟滞相干函数相角变化

Fig. 5 The phase spectrum of coherency function

由图 5 可见,地震波斜入射时,表面各点之间的迟滞相干函数总为 1,相应的相角与行波效应的相角一致。综上所述,在一致激励情况下,当表面介质沿水平向均匀分布时,表面各点之间的迟滞相干函数总为 1,相应的相角由入射波的行波效应决定。

应该指出,在波动有限元分析中,计算结果的可靠频段范围一般可由式(5)进行估计。设计算中关心的最高频率为 f_{max} ,将式(5)改写为

$$f_{max} \leq (1/6 - 1/10)(c/\Delta x)_{min} \quad (5b)$$

由上式可见,计算结果的有意义频段范围与单元大小划分有密切关系。本例中,表层非线性土层经叠代计算后所得最小剪切模量 $G=0.4 \times e^8$ Pa,相应剪切波速约为 141 m/s,可靠频段的上限约为 $(1/8) \cdot (141/2) = 8.8$ (Hz)。考虑到场地运动的高频成分对非线性土层的力学指标影响有限,因此按本例单元划分方式计算得到的土层非线性力学指标是合理的,场地地震动相干性计算结果在有意义的频段范围内是可靠的。当需要在更高的频段范围内考察场地的地震动相干性时,波动有限单元网格尚需进一步细化,这必然会增加计算工作量,有关这一问题还需进一步研究。

2.2 算例二

考虑一侧向介质分布不均匀场地(图 6),表层为非线性土层,其下为硬土层,各土层物理力学指标及底部输入地震动谱与算例一相同。考虑行波效应,入射波视波速 $v_0=1500$ m/s,此时入射波与垂直方向夹角为 20° 。由于多次透射公式(4)的应用条件是在人工边界附近介质沿边界法向均匀分布,根据本模型的特点,当右人工边界距不规则地形足够远时,

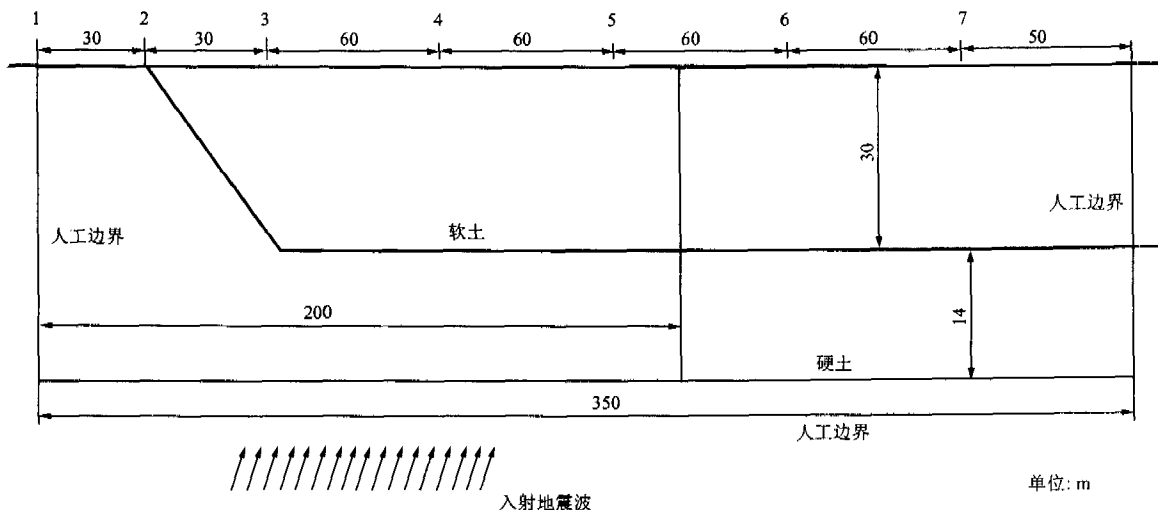


图 6 不规则场地计算示意

Fig. 6 The computational model of lateral irregular site

右人工边界附近非线性介质的分布是可以满足这一条件的。计算表明为满足这一条件,由人工边界划定的计算范围不小于 $200\text{ m} \times 44\text{ m}$,单元大小 $2\text{ m} \times 2\text{ m}$,随着计算范围在水平方向的增大,场地点 3、4、5 等的反应基本不变。这表明只要人工边界划分的范围足够大,本文的计算方法是稳定的。现将计算范围设为 $350\text{ m} \times 44\text{ m}$,对上述计算范围进行随机非线性波动分析,非线性介质表面点的加速度谱密度曲线见图 7,图中同时绘出非线性介质侧向均匀分布场地表面加速度谱密度曲线以资比较。由图 7 可见随着表面点远离不规则地形,其加速度谱密度曲线逐渐接近规则场地的加速度谱密度曲线。

以下研究场地地震动的相干性。计算表明,一致激励下表面各点间迟滞相干函数总为 1,与算例一结果完全相同,故不绘出。表面各点间迟滞相干函数相角变化情况见图 8、图 9,对于侧向不均匀分布场

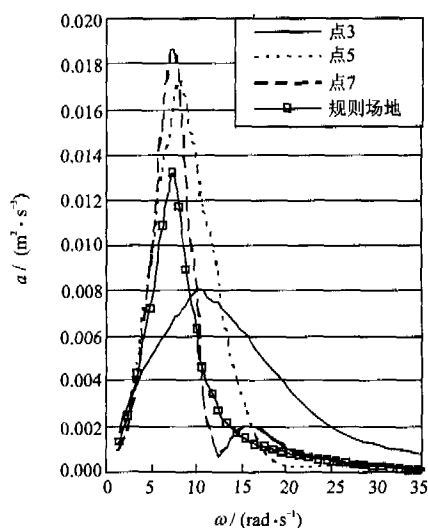
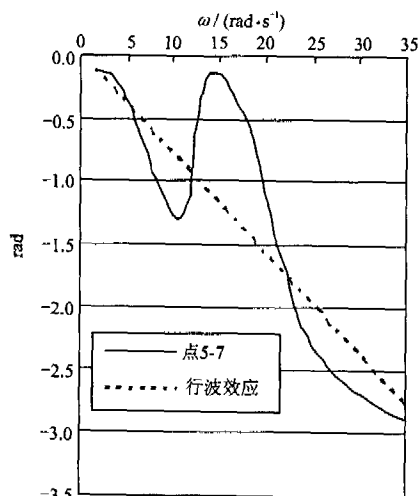
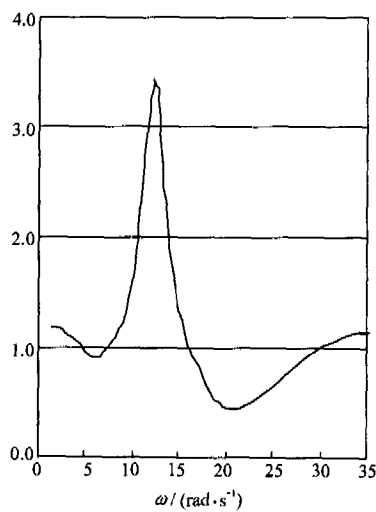


图 7 地面加速度谱密度

Fig. 7 The acceleration power spectral density of surface



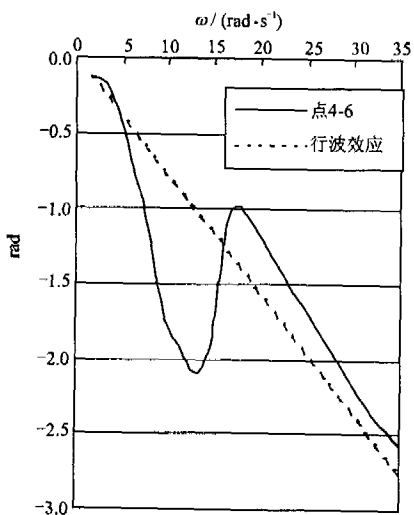
(a)



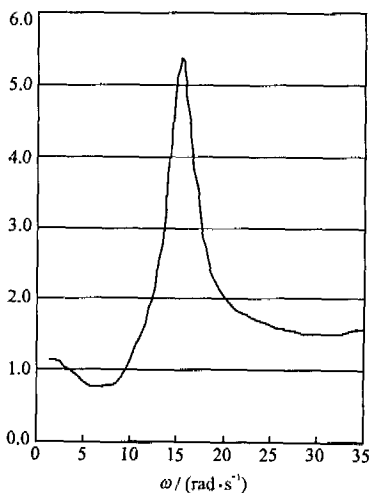
(b)

图 8 表面点 5-7 迟滞相干函数相角(a)和谱密度比(b)变化图

Fig. 8 The phase spectrum (a) and spectral ratio (b) of point 5-7



(a)



(b)

图 9 表面点 4-6 迟滞相干函数相角(a)和谱密度比(b)变化图

Fig. 9 The phase spectrum (a) and spectral ratio (b) of point 4-6

地,迟滞相干函数相角的变化与行波效应不一致,与算例一完全不同,这与局部场地条件的影响密切相关。设场地表面2个点*i*、*j*的加速度谱密度分别为 $s_i(\omega)$ 和 $s_j(\omega)$,据此可得 $\sqrt{s_i(\omega)/s_j(\omega)}$ 随 ω 变化曲线如图8、图9。对照图8、图9中2组曲线,可见在2点谱密度比的均方根曲线峰值点附近,迟滞相干函数相角的不规则变化最为剧烈,因此在一致激励条件下,2点间场地条件的不一致性不仅使2点谱密度随频率产生不同的变化,而且对迟滞相干函数相角变化产生重要影响。

总之,在一致激励地震波作用下,土层的剪切波速发生明显的变化,体现出强烈的非线性性质,使得土的力学指标空间分布发生变化,对场地表面点的谱密度和迟滞相干函数的相角产生影响,从而影响到地震动场的空间相干性。

3 结论

(1)本文将工程波动理论中散射问题的分析方法与考虑土介质非线性性质的等效线性化方法和随机振动的虚拟激励方法相结合,发展了开放系统中考虑土介质非线性性质的随机波动分析方法,用Monte-Carlo模拟的方法对所提出方法的合理性进行了验证。

(2)应用随机非线性波动分析方法对一致激励作用下一般工程场地的地震动相干性进行了分析,分析表明一致激励作用下工程场地任意2个点间的迟滞相干函数总为1,表面点的加速度谱密度及相角的变化则与行波效应及局部场地条件密切相关,具体表现为:对水平均匀分布成层介质场地,表面点加速度谱密度具有一致性,相干函数相角变化由入射波的相角决定;对不规则场地,表面点加速度谱密度随所在点不同而不同,迟滞相干函数相角的变化也不规则,与所研究2个点间谱密度随频率变化趋势有关。

(3)在一致激励地震波作用下,由于土层的非线性性质,使得土力学指标空间分布发生变化,对场地点的谱密度及迟滞相干函数相角产生影响,从而影响到地震动场的空间相干性。

参考文献:

- [1] Zerva A., Harada T. Effect of surface layer stochasticity on seismic ground motion coherence and strain estimates [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 1997, (16):445-450
- [2] 李杰,廖松涛. 工程场地地震动相干函数的数值模拟[J]. *地震工程与工程振动*, 2003, 23(2):12-17
Li J, Liao S T. Numerical simulation of ground motion coherency function on engineering site [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2003, 23(2):12-17
- [3] 丁海平,金星,刘启方,等. 场地条件对地震动相干函数的影响[J]. *地震工程与工程振动*, 2003, 23(1):1-5
Ding H P, Jin X, Liu Q F, et al. Effects of site condition on coherency function of ground motion [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2003, 23(1):1-5
- [4] M. Kawano, K. Asano. Verification of predicted nonlinear site response during the 1995 Hyogo-Ken Nanbu earthquake [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2000, (20):493-507
- [5] Ezio Faccioli, Jorge Ramirez. Earthquake response of nonlinear hysteretic soil system [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1976, (4):261-276
- [6] S. K. Pal, M. S. Rahman. Probabilistic analysis of seismically induced permanent movements in earth dam [J]. *Soils and Foundations*, 1991, (31):47-59
- [7] M. S. Rahma, C. H. Yeh. Variability of seismic response of soils using stochastic finite element method [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 1999, (18):229-245
- [8] Izuru Takewaki, Nobuyoshi Fujii. Nonlinear surface ground analysis via statistical approach [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2002, (22):499-509
- [9] 吴再光,韩国城. 非线性土层随机地震反应的概率平均等价线性化方法[J]. *岩土工程学报*, 1989, 11(4):9-16
Wu Z G, Han G C. Probabilistic average approach for stochastic seismic analysis of soil layer [J]. *Journal of Rock and Soil Engineering*, 1989, 11(4):9-16
- [10] 廖振鹏. 工程波动理论导引[M]. 北京:科学出版社, 1996
Liao Z P. Introduction to Wave Motion Theories in Engineering [M]. Beijing: Science Press, 1996
- [11] 李山有,廖振鹏. 大型结构地震反应值模拟中的波动输入[J]. *地震工程与工程振动*, 2001, 21(2):1-5
Li S Y, Liao Z P. Wave motion input in numerical simulation of seismic response for large scale structure [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2001, 21(2):1-5
- [12] Idriss, I. M., J. Lysmer, R. Hwang, et al. QUAD-4—A computer program for evaluating the seismic response of soil structures by variable damping finite el-

- ement procedures [A]. Earthquake Engineering Research Center, Report No. UCB/EERC-73/16 [C]. Berkeley, University of California, 1973
- [13] Abrahamson N. A, Schneider J. F, Stepp J. P. Empirical spatial coherency functions for application to soil-structure interaction analysis [J]. *Earthquake Spectra*, 1991, 7(1): 1-27
- [14] Harichandran R. S, Vanmarke H. Stochastic variation of earthquake ground motion in space and time [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 1986, 112(2): 154-174
- [15] Lin Jiahao, Zhang Wenshou, Li Jianjun. Structural response to arbitrarily coherent stationary random excitations [J]. *Computer and structure*, 1992, 50(5): 629-633
- [16] 陈国兴, 谢君斐. 土坝地震性能二维随机分析方法 [J]. *地震工程与工程振动*, 1994, 14(3): 81-90
Chen G X, Xie J F. A method of 2-D random response analysis of earth dam earthquake performance [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 1994, 14(3): 81-90
- [17] Bobby O. hardin, Vincent P. Drnevich. Shear modulus and damping in soils; design equation and curves [J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division* July, 1972, (SM7): 667-692
- [18] 李杰, 李国强. 地震工程学导论 [M]. 北京: 地震出版社, 1992. 348
Li J, Li G Q. Introduction to Earthquake Engineering [M]. Beijing: Earthquake Press, 1992. 348

Numerical Simulation of Coherency Function of Nonlinear Ground Motion under Consistent Excitations

CHEN Yuan¹, LI Jie²

(1. Department of Building Engineering Guangzhou University, Guangzhou 510006, China;

2. Department of Building Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: During strong ground motion, the shear wave velocity of soil often decreases greatly which exhibits a great deal of nonlinearity. In this article, with the introduction of the pseudo-excitation method and the equivalent linearization approach into numerical simulation techniques of wave motions considering scattering problem, a nonlinear stochastic wave motion analysis method is presented in which the consistent excitation can be substituted by pseudo—incident waves in terms of the power spectrum density of random excitations, the effective shear strain of nonlinear soil is evaluated by mean peak shear which is computed in terms of its standard deviation and peak factor. The reliability and accuracy of the proposed method is examined through the comparison with results by Monte—Carlo simulation method and is used to estimate the spatial incoherence of earthquake ground motion. The results indicate that the local site conditions have great effects on the seismic ground motion under consistent excitations. The nonlinearity of the soil changes the structure of power spectra of the studied engineering site, this leads to the variation of spectral ratio at observation points and eventually change the spatial incoherence of the site.

Key words: finite element wave analysis; pseudo-excitation method; equivalent linearization; consistent excitation; coherency function