

# 非线性土层随机地震反应的概率 平均等价线性化法

吴再光 韩国城 林 泉

(大连理工大学土木系)

## 提 要

本文在总结现有计算土层平稳随机地震反应等价线性化法的基础之上, 提出了新的概率平均等价线性化法, 以单层土、单自由度水平剪切振动系统为例, 用Monte-Carlo数值模拟法对本文方法及其它方法进行了统计检验。结果表明, 概率平均法概念明确, 精度较其它方法更高, 计算也不复杂, 是一种较好的方法。

## 一、前 言

近年来, 随着地震动概率描述方法的不断改进和完善, 地震危险性分析越来越多地应用于实际工程抗震设计中, 有些方法已为美国、加拿大等国家制定地震危险性区划图所广泛采用, 还有不少地震国家, 包括我国在内, 也正在编制具有概率意义的地震危险性区划图, 考虑地震动发生在时间、空间及强度等方面的随机性进行概率地震危险性分析已成为当今地震动描述的发展趋势。

目前的场地地震危险性分析, 主要是针对场地下卧基岩面进行的。如果建筑物座落在基岩上, 直接应用危险性分析结果进行反应计算即可。但实际上多数情况并非如此, 普遍存在的是基岩上均有一定厚度的上覆土层, 由此产生了两方面的问题, 一是在基岩随机地震动激励下上覆土层是否有足够安全度来抵抗动荷的作用, 二是基岩随机地震动经过上覆土层过滤后地表的振动如何, 要回答这两方面的问题, 就必须进行土层随机反应计算。

## 二、土层随机反应分析方法概述

由于土料的非线性及地震荷载的随机性, 决定了控制土层反应的方程只能是下面的二阶非线性随机微分方程

$$[M]\{\ddot{x}\} + f(\{x\}, \{\dot{x}\}) = \{p(t)\} \quad (1)$$

式中  $f(\{x\}, \{\dot{x}\})$  是与节点位移  $\{x\}$  和速度  $\{\dot{x}\}$  有关的非线性恢复力;  $\{p(t)\}$  是输入随机地震荷载。

目前为止,精确求解式(1)还有困难,研究者们大力发展了各种近似算法,其中使用较广泛的是等价线性化法。该法假定存在一个与式(1)表述的非线性系统等价的线性系统,运动方程为

$$[M] \{\ddot{x}\} + [C_e] \{\dot{x}\} + [K_e] \{x\} = \{p(t)\} \quad (2)$$

为使等价线性系统的反应 $\{x\}$ 尽可能接近原非线性系统的反应,研究者们采用了各种方法来估计等价线性系统的材料参数 $[C_e]$ 和 $[K_e]$ 。这些方法基本上可以概括为两类:一类是数学上较严格的等价线性化法,另一类主要是凭经验出发的经验性方法。严格的等价线性化法将式(1)与式(2)作差,然后按均方误差最小为等价条件来确定材料参数矩阵 $[C_e]$ 和 $[K_e]$ ,经验性方法先任意假定一组材料参数形成 $[C_e]$ 和 $[K_e]$ ,解线性方程(2)得到反应 $\{x\}$ 和 $\{\dot{x}\}$ ,再凭不同的经验由反应从恢复力 $f(\{x\}, \{\dot{x}\})$ 中确定新的材料参数,若确定出的新值与原假定值相差太大,则用新值代替旧值,返回式(2)重新计算,通过反复迭代取得 $\{x\}$ , $\{\dot{x}\}$ 和 $[C_e]$ , $[K_e]$ 之间的协调。

在非线性土层随机反应分析中,费思利(Faccioli)<sup>[11]</sup>曾假定反应的幅值和相角均随时间缓慢变化,利用严格的等价线性化法计算了美国、墨西哥几个场地土层的一维随机地表放大效应问题;皮尔斯(Pirse)<sup>[12]</sup>等利用文义归等提出的滞回结构随机地震反应等价线性化法进行了一维砂层的随机反应计算,并对土层地震液化可能性作了评价;罗莫(Romo)<sup>[13]</sup>引入锡德(Seed)在确定性分析中提出的 $0.65\gamma_m$ 等效应变法,计算了随机地震作用下二维土-结构相互作用问题;冯启民<sup>[14]</sup>在分析地震动随机场时对 $0.65\gamma_m$ 法作了改进,直接取单元剪应变的均方根 $\sigma_s$ 作为等效应变,循环迭代计算了二维土层的随机反应。上述各种算法中,费思利的算法严格,但仅适用于弱振小阻尼情况;文义归的算法理论严密,适用范围广,但计算复杂,在确定等价材料参数时需涉及反应的协方差矩阵,而协方差矩阵的维数 $m$ 与土层离散自由度 $n$ 的关系为 $m = (3n + 2)(3n + 3)/2$ ,如果只取10个自由度, $m$ 也将达528维,显然这种算法要求解复杂土层或土石坝等的随机反应是比较困难的,目前主要用于计算多层剪切型框架房屋结构的随机反应;锡德和冯启民的算法则为经验性算法,虽然经验性算法理论上并不是很严密,但处理简单,适应范围广,应用方便,计算容易,需要做的工作是仔细校核各种经验算法的精度。

### 三、概率平均等价线性化法

如上所述,各种经验算法之不同就在于各自凭不同的经验从 $f(\{x\}, \{\dot{x}\})$ 中确定等价线性系统的材料参数矩阵 $[C_e]$ 和 $[K_e]$ ,显然,土料应遵循什么样的非线性恢复力关系对经验方法确定材料参数时至关重要。土料的动力非线性应力-应变关系是一个研究较多的问题,目前应用较广、也比较简单的是哈丁-达尼维奇(Hardin-drnevich)<sup>[15]</sup>双曲线模型,该模型将土的非线性应力-应变关系分离为独立的两部分,即等效剪模 $G_e$ 与等幅循环剪应变 $\gamma_e$ 的关系和等效阻尼比 $\xi_e$ 与 $\gamma_e$ 的关系:

$$G_e = G(\gamma_e) = \frac{G_m}{1 + |\gamma_e/\gamma_R|}$$

$$\xi_e = \xi(\gamma_e) = \frac{|\gamma_e/\gamma_R| \xi_m}{1 + |\gamma_e/\gamma_R|} \quad (3)$$

式中  $G_m$ ,  $\xi_m$  和  $\gamma_R$  均为模型参数;  $\gamma_e$  为等幅循环剪应变幅值(峰值)。

这样,对一厚度为  $H$  的水平剪切振动单层土,按一维集中质量模型简化为水平振动单自由度振子,其等效线性方程为

$$m \ddot{x} + c_e \dot{x} + k_e x = -m \ddot{x}_g(t) \quad (4)$$

土层取单位面积,  $c_e = 2\xi_e m \omega_e$ ,  $\omega_e = \sqrt{G_e/mH}$ ,  $G_e$  和  $\xi_e$  与土层等幅剪应变反应幅值  $\gamma_e$  的关系如式(3),不同的等幅循环剪应变幅  $\gamma_e$  将导致不同的  $G_e$  和  $\xi_e$ ,对于不规则的随机地震激励  $\ddot{x}_g(t)$ ,将引起不规则随机剪应变循环,到底应从这一不规则循环中取多大的应变作为等效的等幅剪应变  $\gamma_e$ ,不同研究者建议了各自不同的经验方法。锡德等建议取  $\gamma_e = 0.65\gamma_m$ ,  $\gamma_m$  为随机不规则剪应变循环中的最大值,根据随机过程中最大值与均方值之间的关系,基本可取  $\gamma_m = 3\sigma_\gamma$ ,  $\sigma_\gamma$  为剪应变过程的均方根值,由此得  $\gamma_e = 1.95\sigma_\gamma$ ;冯启民参考了这一取法,但直接取  $\gamma_e = \sigma_\gamma$ 。显然,两种取法  $\gamma_e$  几乎差一倍。伊万(Iwan)<sup>[6]</sup>曾比较了多种等价线性化算法,建议按下式计算新的等价参数

$$\left. \begin{aligned} T_e &= \frac{1}{\gamma_m} \int_0^{\gamma_m} T(\gamma_p) d\gamma_p \\ \xi_e &= \frac{1}{\gamma_m} \int_0^{\gamma_m} \xi(\gamma_p) d\gamma_p \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中  $\gamma_p$  为不规则剪应变反应的任意峰值;  $T(\gamma_p)$  为以  $\gamma_p$  等幅循环时系统的振动周期;  $T(\gamma_p) = 2\pi\sqrt{mH/G(\gamma_p)}$ ;  $G(\gamma_p)$  和  $\xi(\gamma_p)$  即为式(3)的关系。

式(5)的含义是不先去确定某个等效的等幅应变  $\gamma_e$ ,再按式(3)插值确定等价土料参数,而是将  $[0, \gamma_m]$  区间内所有可能出现的随机剪应变峰值  $\gamma_p$  对应的  $T(\gamma_p)$  和  $\xi(\gamma_p)$  取算术平均作为系统的等价参数,这种方法可称为算术平均等价线性化法,而锡德和冯启民的算法可称为等效应变直接插值法。

但是,应该注意到,由于地震荷载的随机性导致  $\gamma_p$  也是一随机变量,并且这一随机变量不是在  $[0, \gamma_m]$  区间上均匀分布的,式(5)的算术平均隐含了  $\gamma_p$  均匀分布这一假定。实际上,对于受平稳高斯过程激励的单自由度线性振子,如果反应是窄带平稳高斯过程,峰值分布符合瑞利分布,如果反应是宽带过程,峰值分布符合高斯分布,而真实土层反应既不纯粹是窄带,也不完全是宽带,介于二者之间,其概率密度函数  $p(\gamma_p)$  与宽带参数  $\alpha$  有关<sup>[7]</sup>

$$\begin{aligned} p(\gamma_p) &= (2\pi)^{-\frac{1}{2}} \sigma_\gamma^{-1} (1-\alpha^2)^{\frac{1}{2}} \exp\{-\gamma_p^2 [2\sigma_\gamma^2(1-\alpha^2)]^{-1}\} \\ &\quad + (2\sigma_\gamma^2)^{-1} \alpha \gamma_p \{1 + \operatorname{erf}[\gamma_p(2\alpha^2 - 2)^{-\frac{1}{2}}/\sigma_\gamma]\} \exp(-\gamma_p^2/2\sigma_\gamma^2) \end{aligned} \quad (6)$$

只要确定了剪应变反应的前四阶矩, 上式则唯一确定。根据以上分析, 笔者认为, 式(5)的平均更合理的应当是考虑 $\gamma_p$ 的概率分布取概率平均, 即取数学期望, 并且不对周期取平均而直接对剪模取平均, 即式(7), 这就是本文建议的概率平均等价线性化法。

$$\left. \begin{aligned} G_e &= E[G(\gamma_p)] = \int_0^{+\infty} G(\gamma_p) p(\gamma_p) d\gamma_p \\ \xi_e &= E[\xi(\gamma_p)] = \int_0^{+\infty} \xi(\gamma_p) p(\gamma_p) d\gamma_p \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

#### 四、方法的检验

检验各种等价线性化法的最好手段是蒙特-卡洛(Monte-Carlo)数值模拟法, 即产生符合同一随机过程的一组人工地震波作为输入, 计算原真非线性系统对每条人造波的确 定性反应, 然后通过统计方法将真非线性系统模拟结果与等价线性系统随机反应分析结果比较, 则可检验等价线性化法的精度。检验需做两方面的工作: 一是计算在随机地震荷载激励下等价线性系统的随机反应, 二是计算真非线性系统对每条人工波的确 定性反应。由于数值模拟计算工作量大, 一般都选择比较简单的计算模型。本文选择了图1所示的单层土单自由度系统受水平剪切振动的情况作为计算模型。

首先计算等价线性系统的随机反应。对图1的计算模型, 可列出式(4)的等价线性系统运动方程, 适当假定一组初始土料参数 $G_e$ 和 $\xi_e$ , 形成 $c_e$ 和 $k_e$ 。按流行作法, 对基岩水平加速度输入 $\ddot{x}_g(t)$ 假定为零均值平稳高斯过滤白噪声过程, 功率谱 $S_{\ddot{x}_g}(\omega)$ 用金井清谱<sup>[7]</sup>描述

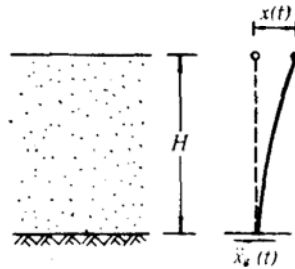


图1

$$S_{\ddot{x}_g}(\omega) = \frac{1 + 4\xi_g^2(\omega/\omega_g)^2}{(1 - \omega/\omega_g)^2 + 4\xi_g^2(\omega/\omega_g)^2} S_0 \quad (8)$$

式中 谱参数 $\omega_g$ 和 $\xi_g$ 分别为过滤频率和阻尼比;  $S_0$ 为地震强度参数。

由于土层的高阻尼特性, 在平稳输入下反应很快可达平稳, 其平稳位移反应的功率谱则为

$$S_x(\omega) = |H(\omega)|^2 S_{\ddot{x}_g}(\omega) \quad (9)$$

式中 频响函数 $H(\omega) = -m(-\omega^2 m + i\omega c_e + k_e)^{-1}$ 。

## 功率谱积分得相对位移、速度及加速度的方差

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x^2 &= \int_0^\infty S_x(\omega) d\omega \\ \sigma_{\dot{x}}^2 &= \int_0^\infty \omega^2 S_x(\omega) d\omega \\ \sigma_{\ddot{x}}^2 &= \int_0^\infty \omega^4 S_x(\omega) d\omega \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

一般认为土层剪应变沿深度均匀分布,  $\gamma = x/H$ , 其功率谱则为  $S_\gamma(\omega) = S_x(\omega)/H^2$ , 按式(10)相同的积分, 不难得出剪应变反应的各阶矩。由于式(4)为线性系统, 在零均值平稳高斯过程输入下的平稳剪应变反应  $\gamma(t)$  也为零均值平稳高斯过程, 从而可按式(6)确定剪应变峰值概率密度  $p(\gamma_p)$ 。有了  $\sigma_\gamma$  和  $p(\gamma_p)$ , 通过上面介绍的四种等价线性化法, 均可从  $G(\gamma_p)$  和  $\xi(\gamma_p)$  关系中确定新的等价剪模  $G_e$  和阻尼比  $\xi_e$ , 利用新值代初始假定值, 返回式(4)重新计算, 循环迭代到新、旧值之差达到规定精度为止, 最后确定出材料参数与动力反应相协调的等价线性系统, 通过式(9), (10)计算等价线性系统的反应以近似代替原非线性系统的反应。

本文的检验主要针对土层绝对加速度反应  $a(t) = \ddot{x}(t) + \ddot{x}_g(t)$  的最大值  $a_m$  和动剪应力反应  $\tau(t)$  的最大值  $\tau_m$  进行的。由于  $a(t)$  和  $\tau(t)$  为随机过程,  $a_m$ ,  $\tau_m$  则为随机变量, 具有特定的概率分布。按范马克(Vanmarcke)<sup>[8]</sup>的分析, 对于受平稳高斯过程激励的线性单自由度振子, 其平稳反应  $a(t)$  在  $[0, t]$  时段内最大值  $a_m$  的概率分布函数可表示为

$$F(y) = [1 - \exp(-r^2/2)] \exp \left\{ -2 \nu_{y^*} t \frac{1 - \exp(-\sqrt{\pi/2} \delta_e r)}{1 - \exp(-r^2/2)} \right\} \quad (11)$$

式中  $r = y/\sigma_a$  为穿越水平;  $\nu_{y^*} = (\Omega_a/2\pi) \exp(-r^2/2)$ ;  $\Omega_a = \sqrt{\lambda_2/\lambda_0}$ ;  $\delta_e = \delta_a^{1.2}$ ;

$$\delta_a = \sqrt{1 - \lambda_1^2 \lambda_2 \lambda_0}; \quad \lambda_i = \int \omega^i S_a(\omega) d\omega.$$

对  $F(y)$  求导可得概率密度函数  $f(y)$ 。这样, 通过计算等价线性系统的绝对加速度反应  $a(t)$  的功率谱  $S_a(\omega)$  和动剪应力反应  $\tau(t)$  的功率谱  $S_\tau(\omega)$ , 即可确定其最大值  $a_m$ ,  $\tau_m$  的概率分布函数和概率密度函数, 而对线性系统,  $S_a(\omega)$  和  $S_\tau(\omega)$  的计算并不是一件困难的事。

为了检验等价线性化法计算的最大值的概率分布, 必须进行真非线性系统的样本波形反应计算。首先是产生符合式(8)金井清功率谱的一组平稳人工地震波, 其产生方法有不少研究者讨论过<sup>[7]</sup>, 在此不重复。随后是计算每条人工波激励下的非线性系统反应。土料在循环动荷作用下的应力-应变关系表现为非线性滞回关系, 由于能量的耗损形成一定大小的滞回圈, 除了骨架曲线外还有加、卸载分枝曲线, 目前要严格遵循土的滞回曲线进行动力反应分析是一项比较困难的工作。对双曲线应力-应变关系, 本文按王志良等<sup>[9]</sup>介绍的广义马辛(Masing)法则形成应力-应变滞回圈, 根据规定的加卸载准则, 由威尔逊- $\theta$ (Wilson- $\theta$ )法逐步积分计算动力反应。应当说明, 广义马辛曲线主要适用于等幅加载的情况, 对非等幅加载有一定误差。由于本文的人工地震波全是平稳波, 其幅值变化在地震强度较小时并不是很大, 因而选择广义马辛曲线还是可以接受的。据此, 笔者编写了相应的一维集中质量模型非线性动力反

应分析程序,利用该程序逐一计算每条人工波激励下的土层反应,每条反应曲线均有一个最大反应值,一组人工波输入得一组最大反应值,通过数理统计检验方法则可检验等价线性化法确定的最大值理论分布的近似程度,理论分布可接受的显著性水平 $\alpha$ 将确定出,如果显著性水平 $\alpha$ 高,说明理论分布近似程度好,相应的等价线性化法精度就高。检验概率分布一般有 $\chi^2$ 检验法和K-S检验法<sup>[10]</sup>, $\chi^2$ 检验法主要用于检验概率密度 $f(x)$ ,K-S检验法主要用于检验概率分布 $F(x)$ ,通过计算理论分布与经验分布的某种差值,利用专门的检验表,可查出各自的显著性水平 $\alpha$ 。

本文对单层土的检验,选择了如下的计算参数:土层参数取密度为 $2\text{g/cm}^3$ ,层厚 $4\text{m}$ ;双曲线模型参数 $G_m = 120\text{MPa}$ , $\xi_m = 0.28$ , $\gamma_R = 2.5 \times 10^{-4}$ ,按此参数作成的 $G/G_m - \gamma_e$ 和 $\xi/\xi_m - \gamma_e$ 曲线与锡德等统计的砂土的经验曲线符合良好;地震输入参数取 $\omega_g = 6\pi \text{ 1/s}$ , $\xi_g = 0.64$ ,强度参数模拟 $7^\circ$ 和 $8^\circ$ 地震分别取 $S_0 = 0.0018\text{m}^2/\text{s}^5$ 和 $S_0 = 0.0075\text{m}^2/\text{s}^5$ ,相当于最大地震加速度为 $0.1\text{g}$ 和 $0.2\text{g}$ ,根据这些参数,分别按四种等价线性化法和非线性数值模拟法进行土层反应计算,四种等价线性化法计算的均方根加速度反应 $\sigma_a$ 和均方根剪应力反应 $\sigma_\tau$ 如表1。从表

表1

方 法 \ 统计量	$7^\circ$		$8^\circ$	
	$\sigma_a(g)$	$\sigma_\tau$ (kPa)	$\sigma_a(g)$	$\sigma_\tau$ (kPa)
0.65 $\gamma_m$ 法	0.060	2.39	0.105	4.23
$\sigma_\gamma$ 法	0.070	2.79	0.120	4.81
算术平均法	0.065	2.58	0.112	4.48
概率平均法	0.064	2.54	0.113	4.50

中可以看出,由于0.65 $\gamma_m$ 法取的等效剪应变 $\gamma_e$ 比 $\sigma_\gamma$ 差不多大一倍,使得插值的剪模低,阻尼大,因而反应偏小;相反, $\sigma_\gamma$ 法由于 $\gamma_e$ 小,插值的剪模大,阻尼小,因而反应偏大,两种算法 $\sigma_a$ 在 $7^\circ$ 地震时相差15%, $8^\circ$ 地震时相差也有15%,预计地震强度增高时误差还会增大。算术平均法与概率平均法结果比较接近,且都介于两种插值法结果之间,说明平均法结果确实是比较“平均”。由非线性数值模拟的 $7^\circ$ 地震时绝对最大加速度概率密度直方图和四种等价线性化法确定的理论概率密度曲线均绘于图2,数值模拟并经统计检验得出理论分布能被接受的显著性水平 $\alpha$ (%)列于表2。数值模拟共计算了 $7^\circ$ 地震时的平稳人工地震波100条。

表2

$\alpha$ (%) \ 方 法	$7^\circ$			
	$F(a_m)$	$f(a_m)$	$F(\tau_m)$	$f(\tau_m)$
0.65 $\gamma_m$ 法	< 1	< 1	< 1	< 1
$\sigma_\gamma$ 法	< 1	< 1	< 1	< 1
算术平均法	> 10	> 2	> 5	> 2
概率平均法	> 10	> 5	> 10	> 2

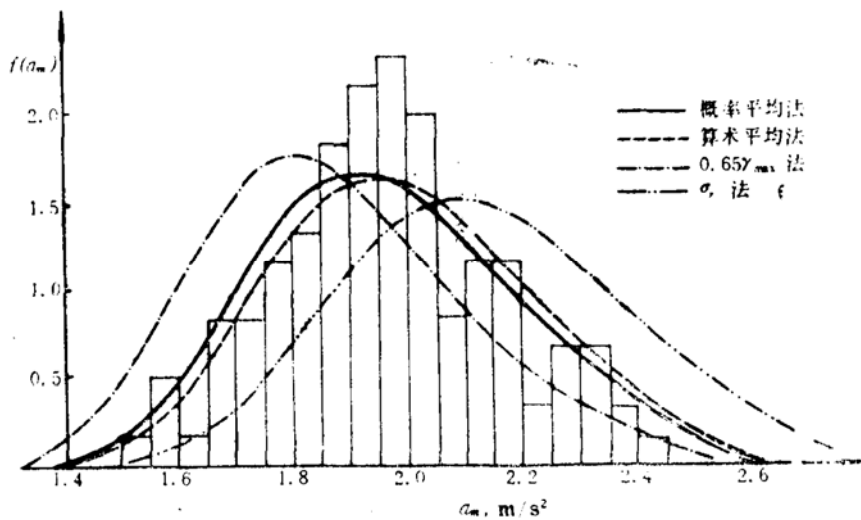


图2

从图2中可以看出,概率平均法与算术平均法的理论概率密度曲线和模拟的直方图比较一致,而 $0.65\gamma_m$ 法明显低估土层反应, $\sigma_v$ 法明显高估土层反应。从表2中可知,相比较来说,概率平均法可接受的显著性水平最高,近似程度最好,算术平均法次之, $0.65\gamma_m$ 法和 $\sigma_v$ 法接受水平低,误差较大。

以上只是针对单层土单自由度体系进行了计算,对于多层土的情况,按文献[11]的分析,完全可以将每层土作为单层土处理,确定其等价线性参数,然后进行组合形成多层土多自由度体系运动方程,求解过程与单层土类似,笔者将另文介绍多层土的计算情况,但有一点应当说明,随着土层的增厚, $0.65\gamma_m$ 法和 $\sigma_v$ 法的计算误差将逐渐增大,特别是临近地表时,计算误差是相当可观的。

根据本文对单层土的计算以及笔者对多层土的计算结果,总的看法是,对非线性土层地震反应问题,如果要从比较精确的概率分布检验来衡量等价线性化法的精度,以上四种方法可接受水平都不是很高,按通常作法选择5%的显著性水平,概率平均法还可以接受,算术平均法勉强可以接受, $0.65\gamma_m$ 法和 $\sigma_v$ 法就很难接受了。但也应当注意到,任何近似算法都应和整个土动力学的发展水平相协调,目前在地震输入、土料动力特性、非线性反应等许多方面还存在较大的误差,单纯追求精度过高的算法而去花太多的力量也是不现实的。通过上述较严格的检验,笔者认为,概率平均等价线性化法概念明确,精度可以保证,计算也不复杂,是一种较好的方法,算术平均法近似程度基本可以接受,也不失为一种近似计算方法。

## 五、结 语

如何适应当前地震动概率描述和结构抗震动力可靠性设计的发展趋势,进行简便有效的土层随机地震反应分析,是一项十分有意义的课题。本文在总结现有土层随机反应分析方法的基础之上,建议了新的概率平均等价线性化方法,并用单层土单自由度水平剪切振动体系为计算模型,进行了蒙特-卡洛数值模拟检验。检验结果表明,概率平均等价线性化法概念明确,处理恰当,精度较高,是一种简便有效的方法。如何将本文方法推广应用到二维复杂地



基及土石坝随机地震反应分析中, 笔者将另文介绍。

### 参 考 文 献

- [1] Faccioli, E., A Stochastic Approach to Soil Amplification, BSSA, Vol.66, No.4. 1976.
- [2] Pires, J.E.A., et al., Probabilistic Analysis of Seismic Safty Against Liquefaction, Proc. 8th. WCEE, Vol.III, 1984.
- [3] Romo-organista, M.P., et al., PLUSH-A Computer Program for Probabilistic Finite Element Analysis of Seismic Soil-Structure Interaction, Report No. UCB/EERC-77-01, 1977.
- [4] 冯启民, 地震动随机场分析, 国家地震局工程力学研究所博士论文, 哈尔滨, 1986年。
- [5] Hardin, R.O., Drnevich, V.P., Shear Modulus and Damping in Soils, Design Equations and Curves, ASCE, Vol.98, No. SM7, 1972.
- [6] Iwan, W.D., Gates, N.C., Estimating Earthquake Response of Simple Hysteretic Structure, ASCE, Vol.105, No.EM3, 1979.
- [7] 星谷胜, 随机振动分析, 常宝琦译, 地震出版社, 1977年。
- [8] Vanmarcke, E.H., On the Distribution of the First-Passage Time for Normal Stationary Random Processes, ASME, Applied Mechanics, Vol.42, 1975.
- [9] 王志良、韩清宇, 粘弹塑性土层地震反应的波动分析法, 地震工程与工程振动, 1卷1期, 1981年。
- [10] 洪华生、邓汉忠, 工程规划与设计中的概率概念, 孙芳垂等译, 冶金工业出版社, 1985年。
- [11] Spanos, P-T, D., Iwan, W.D., On the Existence and Uniqueness of Solutions Generated by Equivalent Linearization, Nonlinear Mechanics, Vol.13. 1978.

## Probabilistic Average Approach for Stochastic Seismic Response Analysis of Soil Layers

*Wu Zaiguang Han Guocheng Lin Gao*

(Dalian University of Technology)

### Abstract

In this paper, the currently used equivalent linear methods for calculating seismic responses of nonlinear soil structures are briefly summarized and some improvements are made. A new approach, the probabilistic average approach, is proposed. A numerical example is presented in detail by using all kinds of equivalent linear methods, including the proposed one. Monte-Carlo simulation method is applied to examine the results. It is found that the concept of proposed method is more clear and the precision is higher than other approaches.