

沈建文, 刘峥, 石树中. 2010. 用震级和距离参数修正土层反应的等效线性化方法. 地震学报, 32(4): 466-475.  
Shen Jianwen, Liu Zheng, Shi Shuzhong. 2010. Modify equivalent linear method of finding soil seismic response with magnitude and distance parameters. *Acta Seismologica Sinica*, 32(4): 466-475.

# 用震级和距离参数修正土层 反应的等效线性化方法<sup>\*</sup>

沈建文<sup>1),\*</sup> 刘 峥<sup>1)</sup> 石树中<sup>2)</sup>

1) 中国上海 200062 上海市地震局

2) 中国杭州 310013 浙江省地震局

**摘要** 传统等效线性化波动法主要的缺陷之一, 是当基岩输入地震动较强时, 高频段算得的频响放大倍率比实际场地的实测结果明显偏低。该缺陷可能导致低估重大工程的设计地震动参数的严重后果, 因而是亟待解决的重要问题。本文认为, 现行基于土的剪切模量和阻尼比的频率相关性修正等效剪应变的做法有其合理性, 但不便应用并可能具有较大的不确定性; 由于震级可以影响地震动的频谱特征, 通过震级调整等效剪应变的做法也可视为按照频率调整等效剪应变。由于距离与震级一样也可以影响地震动的频谱特征, 本文提出通过震级  $M$  和距离  $R$  参数修正等效线性化的方法 EQLM( $M, R$ ), 并用算例说明, 等效线性化方法的上述缺陷可以通过本文提出的 EQLM( $M, R$ )方法得到一定程度的改善。

**关键词** 土层地震反应 等效剪应变 等效线性化方法 频率相关模量和阻尼比

doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2010.04.009 中图分类号: P315.9 文献标识码: A

## Modify equivalent linear method of finding soil seismic response with magnitude and distance parameters

Shen Jianwen<sup>1),\*</sup> Liu Zheng<sup>1)</sup> Shi Shuzhong<sup>2)</sup>

1) Earthquake Administration of Shanghai Municipality, Shanghai 200062, China

2) Earthquake Administration of Zhejiang Province, Hangzhou 310013, China

**Abstract:** One of important shortcomings of the traditional equivalent linear method (EQLM) is that for large input motions the magnification of high frequency components calculated is obviously lower than that observed. The defect may lead to a serious result of underestimating design ground motion parameters for key projects. So this important issue needs to be solved. Although it is reasonable to improve EQLM by using frequency-dependent modules and damping ratios, it is not convenient to use and has great uncertainties. This article points out that, because magnitudes can affect spectra of ground motion, the method to improve EQLM by adjusting equivalent shear strain based on magnitudes may

\* 基金项目 浙江省重点科研社会发展项目(2005C23075)资助。

收稿日期 2009-05-11 收到初稿, 2009-12-25 决定采用修改稿。

† 通讯作者 e-mail: jianwenshen@126.com

also be regarded as frequency-dependent. Since distance can also affect the spectra, we suggest a method EQLM( $M, R$ ) to improve EQLM by the parameters of magnitudes and distances. An example of EQLM( $M, R$ ) is given to show that the above-mentioned shortcoming of EQLM can be resolved to some extent.

**Key words:** soil seismic response; equivalent shear strain; equivalent linear method; frequency-dependent modules and damping ratios

## 引言

许多震例说明,场地覆盖土层的性质可对震害产生重要影响,土层对基岩地震动的影响对于抗震设计具有重要意义。人们对场地土层地震反应规律的认识主要有两种途径:一是通过对比地表地震动记录和场地下卧基岩面(或邻近自由基岩面)的地震动记录,认识土层地震反应的规律;二是根据场地的地形和土层的力学参数,建立场地的力学模型,由基岩输入地震动计算地表地震动。

由于强震记录仍然有限,按震级、距离分组,统计得到的场地放大系数有明显随震级和距离变化而不连续变化的现象。为此,刘峥等(2009)用美国西部若干震例的基岩强震资料和深厚覆盖土层上的地表强震资料,分别建立衰减规律,得到了美国西部深厚覆盖土层地表峰值加速度对于基岩峰值加速度的放大规律,结果如表1所示。

表1 美国西部深冲积层场地对基岩峰值加速度的放大倍数(据刘峥等(2009)强震资料统计)

Table 1 Magnification factors of the thick alluvium sites to bedrock peak accelerations in western United States. Statistical analysis is based on strong earthquake records

$M_S$	基岩峰值加速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$				
	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0
5	1.18	1.06	1.00	0.96	0.90
6	1.08	0.97	0.92	0.88	0.82
7	0.99	0.89	0.84	0.80	0.75

从表1可见,对于相同的基岩峰值加速度,当其源自较小震级时(基岩地震动的高频成分较丰富),厚土对峰值加速度的放大倍数较大。例如,5级地震在场地产生基岩地震动的峰值加速度为 $1 \text{ m/s}^2$ 时,峰值加速度的放大倍数为1.06;7级地震在场地产生基岩地震动的峰值加速度为 $1 \text{ m/s}^2$ 时,则放大倍数为0.89。

研究土层反应的理论计算方法,目前影响较大的有等效线性化方法和非线性方法两类。前者包括SHAKE以及基于土的剪切模量和阻尼比的频率相关性修正等效线性化的方法;后者包括有效应力和总应力方法。研究者对不同方法作了比较分析(Hartzell *et al*, 2004)。

应该指出,理论计算的结果与强震资料得到的认识有时不一定相符。刘峥(2009)用不同震级和不同峰值加速度组合出若干工况,分别用上述美国西部建立的基岩地震动衰减规律计算得到加速度反应谱,并合成时程,选择3个深覆盖土层场地,用传统的等效线性化计算土层反应,得到了地表峰值加速度对基岩峰值加速度的放大系数,如表2所示。从表中可见,尽管由于场地情况的差异,计算数据的绝对数值不可能与统计结果一致,但不难

注意到与统计结果相反的规律：对于相同的较大的基岩峰值加速度，当其源自较小震级时，厚土对峰值加速度的放大倍数反而较小。这种矛盾值得重视。它可能提示：等效线性化计算方法有问题。

表 2 深冲积层场地对基岩峰值加速度的放大倍数(传统等效线性化方法计算)

Table 2 Magnification factors of the thick alluvium sites to bedrock peak accelerations, as computed with traditional equivalent linear method

$M_s$	基岩峰值加速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$				
	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0
5	1.26	1.09	0.98	0.88	0.69
6	1.36	1.13	0.99	0.90	0.74
7	1.44	1.21	1.03	0.93	0.76

许多研究者注意到，当计算基底输入地震动幅值较大时，等效线性化低估了地震动的高频成分(李小军，彭青，2001；齐文浩，薄景山，2007)。为了弥补等效线性化低估高频地震动的缺陷，近几年来，基于土的剪切模量和阻尼比的频率相关性修正等效线性化的方法引人注目(Furumoto *et al*, 2002; Yoshida *et al*, 2002; 蒋通，邢海灵，2007；邢海灵，2007)。另一方面，等效线性化方法也可以通过震级  $M$  调整等效剪应变的折减系数(Bardet *et al*, 2000)。本文将讨论基于土的剪切模量和阻尼比的频率相关性，以及基于震级参数调整等效剪应变的折减系数，修正等效线性化方法的物理意义，提出用震级、距离参数调整等效剪应变的折减系数，修正等效线性化的改进方法，并用算例说明改进效果。

## 1 已有的调整等效剪应变折减系数的等效线性化波动法

等效线性化方法(equivalent linear method, 简写为 EQLM)的主要缺陷之一，是当土层应变较大或地震动较强时，高频段算得的频响放大倍率比实际场地的实测结果明显偏低。

在传统的等效线性化波动法中，等效剪应变通常固定取最大剪应变的 0.65 倍(廖振鹏，李小军，1989)。对于等效线性化方法的改进，集中于对等效剪应变的确定。在至今已有的研究工作中大体有两种途径：一种思路如 SHAKE91 及其后续版本，直接通过引入震级来改变等效剪应变相对于最大剪应变的折减系数(以下简称“折减系数”)，用

$$X = \frac{M-1}{10} \quad (1)$$

作为等效剪应变相对于最大剪应变的折算系数。在 SHAKE91 的使用手册中，没有对该做法的理由作解释，仅简单说明等效剪应变与最大剪应变之比的典型值范围在 0.4—0.75 之间。在与 SHAKE91 原理相同的 EERA 的使用手册中，同样使用式(1)，并指出式中的  $M$  体现地震动的持续时间和循环加载次数(Bardet *et al*, 2000)。为行文方便，下面我们将通过  $M$  调整折减系数的等效线性化方法简称为 EQLM( $M$ )。

另一种思路是基于土的剪切模量和阻尼比的频率相关性确定等效剪应变(以下简称“频率相关法”)。蒋通和邢海灵(2007)以及邢海灵(2007)对此作了系统的综述，并提出了改进方法。由于频率相关法的思路与本文方法的提出有关，我们在此对他们的成果作简单介绍和评述。

Furumoto 等(2002)认为, 地震动大小不同, 各频率下的应变幅值也不同, 故土层反应分析中用到的土的剪切模量和阻尼比应是频率相关的, 应当采用与频率相关的等效应变, 即

$$\bar{\gamma}(\omega) = \frac{\alpha_c \gamma_{\max} F_{\gamma(\omega)}}{F_{\gamma_{\max}}} \quad (2)$$

式中,  $\bar{\gamma}(\omega)$  为与频率相关的等效应变,  $F_{\gamma(\omega)}$  是应变波形的傅里叶谱值,  $F_{\gamma_{\max}}$  为  $F_{\gamma(\omega)}$  的最大值,  $\alpha_c$  为系数。他们以此为基础, 编制了等效线性化分析程序 FDEL。然而, 后继研究表明, FDEL 在地震动较大的情况下的计算结果与实测结果的拟合效果并不理想(Yoshida *et al.*, 2002)。

Yoshida 等(2002)认为, 对应于应变幅值较大的低频段, 系数  $\alpha$  应接近于 1.0, 以使应力计算结果接近实际; 在较高的频率段, 则可以不考虑土层的非线性影响, 根据分析结果将频率分成 3 个区段, 即

$$\bar{\gamma}(f) = \begin{cases} \gamma_{\max} & f < f_p \\ \gamma_{\max} \left(1 - \frac{\lg f - \lg f_p}{\lg f_e - \lg f_p}\right)^m & f_p \leqslant f \leqslant f_e \\ 0 & f > f_e \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $f_p$  为最大应变对应的频率,  $f_e$  为非线性计算的截止频率(建议取 15 Hz),  $m$  为系数(建议取 2.0)。他们以此为理论基础编制了计算程序 DYNEQ。

蒋通和邢海灵(2007)进一步的工作表明, 不同地震动的应变谱形状有较大的区别, 还可有局部的波动。通过细致的分析, 他们提出, 在迭代计算中, 各层最大应变的折减系数采用下式计算:

$$\frac{\gamma(\omega)}{\gamma_{\max}} = \begin{cases} \min\left(\frac{\tilde{\gamma}(\omega)}{\gamma_r}, 1\right) & \omega \leqslant \omega_r \\ \min\left(\frac{\left(\frac{\tilde{\gamma}(\omega)}{\gamma_r}\right)^e \left(\frac{\omega}{\omega_r}\right)^{1-e}}{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_R}\right)^N}, 1\right) & \omega_r \leqslant \omega \end{cases} \quad (4)$$

指数  $e$  为 0.5—1.0 之间的值, 与场地特征有关。当场地覆盖层较浅且较硬时取较大值, 对深厚的较软弱的场地宜取较小的值。 $\tilde{\gamma}(\omega)$  为平滑的应变幅值谱。参考频率  $\omega_r$  通常取  $2\pi f_p$ ,  $f_p$  为由应变时程根据零交法算得的最大应变对应的频率。 $\gamma_r$  为频率  $\omega_r$  对应的参考幅值, 窗的截止频率  $\omega_R = 2\pi(f_e - 3)$ , 指数  $N$  可取接近  $f_e - 5$  的值。

通过逐步深入的研究, 频率相关法表现出较强的拟合立体台阵观测记录的能力, 改善了等效线性化方法低估高频地震动的缺陷, 成为等效线性化方法的重要分支(Hartzell *et al.*, 2004)。但从上面介绍可见, 由于地震动的复杂性, 剪应变的傅里叶幅值谱对不同地震动可有较大的差别, 最大剪应变折减系数的经验公式较为复杂。为了拟合观测资料, 公式中某些常数不仅与地震动有关, 还需借助场地土的差异作调整。调整经验公式的参数可以使建立和验证方法时, 地表地震动计算结果与立体台阵地表地震动的观测记录有良好的相似性, 但对于特定工程场地的土层反应, 这将导致公式的不确定性。此外, 尽管传统的等效线性化方法有缺陷, 但仍得到广泛的应用, 主要原因是其使用方便。而频率相关法

已经明显减弱了该优点.

## 2 本文对于等效线性化波动法的改进方案 EQLM( $M, R$ )

对比上述两种调整折减系数的做法, 我们注意到, 频率相关法对应变幅值较大的低频段, 调高折减系数; 对较高的频率段, 调低折减系数. 而对于 EQLM( $M$ ) 法, 震级越大, 地震动频率越低, 折减系数越高; 震级越小, 地震动频率越高, 折减系数越低. 由此可见, 若从地震动的频率特征理解式(1), 则上述两种方法的原理思路是大体一致的, 其物理意义的共同基础是按照地震动的频率调整应变折减系数, 只是式(1)通过改变  $M$  作调整, 而频率相关法则通过地震动中的频率成分作调整.

频率相关法较为复杂, 其中需要确定的经验性常数较多, 可能导致较大的不确定性, 不利于推广. 故本文将尝试用第一种思路调整折减系数, 并加以改进.

众所周知, 基岩地震动的频谱不仅受震级影响, 也与震中距有关, 即远震产生的地震动频率低, 而近震的地震动频率高. 根据刘峥(2009)得到的基岩加速度衰减规律, 比较不同震级、不同震中距的反应谱( $\beta$  谱), 震级相差 1 级, 反应谱形状的变化大体相当于震中距由 10 km 左右到 300 km 左右的变化, 如图 1 所示.

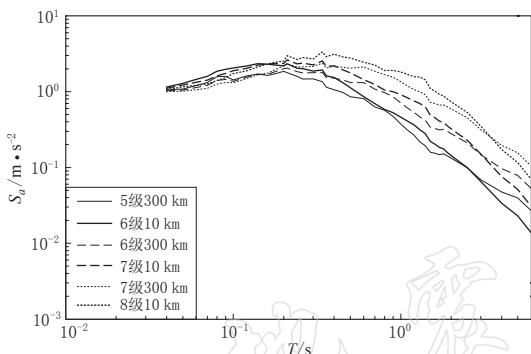


图 1 5—7 级地震在 10 km 与 300 km 处的反应谱( $\beta$  谱)对比图

Fig. 1 Comparison of  $\beta$  response spectra for magnitudes 5, 6 and 7, and for epicentral distances 10 km and 300 km

形式改写为

$$X = X(M, R) = \frac{M + C_1 \lg(R + R_0) + C_2}{C_3} \quad (5)$$

从图 1 可以看出, 震中距为 300 km 的 5 级地震记录的反应谱宽度大体与震中距为 10 km 的 6 级地震记录的相当; 震中距为 300 km 的 6 级地震记录的反应谱宽度大体与震中距为 10 km 的 7 级地震的相当; 震中距为 300 km 的 7 级地震记录的反应谱宽度大体与震中距为 10 km 的 8 级地震的相当. 根据衰减规律可以先求出  $R_0$  值. 本文以刘峥(2009)建立的美国西部基岩衰减规律, 得到 8 级时  $R_0$  为 29.9 km, 4 级时  $R_0$  为 5.3 km, 故有

$$C_1 [\lg(300 + 29.9) - \lg(10 + 5.3)] = 1 \quad (8)$$

据此, 我们可以先确定  $C_1 = 0.75$ ; 再假定远大地震和近小地震  $X$  的取值, 即可确定系数  $C_2$  和  $C_3$ .

对于 EQLM( $M$ ) 法, 当震级范围在 4—8.5 时, 按照式(1),  $X(M)$  的范围在 0.3—0.75 之间. 对于频率相关法, 由于按频段作调整, 其折减系数的取值范围级为 0—1. EQLM( $M, R$ ) 法作整体调整, 由于引入了  $R$  因素, 取值范围可适当大于 EQLM( $M$ ) 法.

根据美国西部强震资料建立的深厚覆盖土层地表峰值加速度对于基岩峰值加速度放大的规律, 综合考虑, 我们取  $X(8, 300) = 0.8$  和  $X(4, 10) = 0.3$ . 由方程(5)可解得  $C_2 =$

$-1.90$ ,  $C_3 = 10.00$ .

限于篇幅, 参数的详细比选可参见刘峥(2009)文章.

根据基岩峰值加速度衰减公式, 我们可以得到与表 2 中基岩峰值加速度对应的震级-距离对, 当震级-距离对中距离项在 10 km 以内时, 统一按 10 km 处理. 按照式(5), 我们得到了表 3 中的折减系数.

表 3 不同震级-距离对的折减系数  $X(M, R)$  值

Table 3 Discount coefficients  $X(M, R)$  for different magnitude-distance pairs

基岩地表峰值加速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	震级-距离对		折减系数 $X(M, R)$	基岩地表峰值加速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	震级-距离对		折减系数 $X(M, R)$
	M	R/km			M	R/km	
0.5	5	22.00	0.421	2.0	5	4.90	0.405
	6	45.00	0.542		6	12.50	0.515
	7	92.00	0.664		7	29.00	0.636
1.0	5	11.50	0.407	3.0	5	2.02	0.405
	6	25.50	0.529		6	7.09	0.512
	7	54.00	0.650		7	18.50	0.628
1.5	5	7.30	0.405				
	6	17.30	0.521				
	7	38.20	0.642				

按照表 3 中的各震级-距离对, 根据反应谱衰减公式, 可以得到相应的基岩加速度反应谱, 并合成加速度时程, 作为研究土层反应的输入.

本文使用经中国地震局震害防御司验收推广的 XQH 软件包(沈建文等, 1997). 其中土层反应部分与 EERA 作过比较(Bardet *et al*, 2000), 差异可以忽略.

根据上述参数, 用 EQLM( $M, R$ )取代 EQLM(0.65), 重新计算表 1、表 2 中的各工况, 得到的结果如表 4 所示. 从表 4 中可见, 当基岩峰值加速度大于  $1 \text{ m/s}^2$  时, 引言中指出的资料统计与计算结果的矛盾已得到一定程度的解决.

表 4 深冲积层场地对基岩峰值加速度的放大倍数(EQLM( $M, R$ )计算结果)

Table 4 Magnification factors of the thick alluvium sites to bedrock peak accelerations, as computed with EQLM( $M, R$ )

$M_S$	基岩峰值加速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$				
	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0
5	1.35	1.24	1.11	1.00	0.92
6	1.40	1.18	1.06	0.99	0.84
7	1.44	1.21	1.03	0.92	0.71

### 3 EQLM(0.65)与 EQLM( $M, R$ )计算结果比较

#### 3.1 计算模型与参数

为了进一步比较 EQLM(0.65)与 EQLM( $M, R$ )方法计算结果的差异, 我们给出以下算例: 取上海地区的典型场地, 钻孔柱状图的剪切波速等资料如表 5 所示; 剪切模量比及

阻尼比参数列于表 6 和表 7.

表 5 钻孔柱状图及相关参数  
Table 5 Borehole column profile and relevant parameters

土性	层底深度 /m	密度 /kg·m <sup>-3</sup>	平均波速 /m·s <sup>-1</sup>	土性	层底深度 /m	密度 /kg·m <sup>-3</sup>	平均波速 /m·s <sup>-1</sup>
砂性土	11.5	1900	150	砂性土	122	1970	
黏性土	15.8	1720	160	砂性土	145	1960	360—605
黏性土	23	1800	140	黏性土	253	1970	(根据上海地区)
黏性土	28.3	1860	200	砂性土	270	1950	深孔回归, 随深
黏性土	31.8	1950	250	黏性土	283	1970	度线性升高)
黏性土	61	1920	280	黏性土	300	1970	
砂性土	90	1980	340	基岩		2000	800
黏性土	98	1930	360				

表 6 各类土壤的剪切模量比  $G/G_{\max}$  的取值范围  
Table 6 Shear modulus ratios  $G/G_{\max}$  for different soils

土类	剪应变/ $10^{-4}$							
	0.05	0.1	0.5	1	5	10	50	100
黏性土	0.996	0.988	0.960	0.880	0.700	0.420	0.200	0.075
砂性土	0.990	0.985	0.960	0.875	0.720	0.500	0.260	0.130

表 7 各类土壤的阻尼比  $\lambda$  的取值范围  
Table 7 Damping ratios  $\lambda$  for different soils

土类	剪应变/ $10^{-4}$							
	0.05	0.1	0.5	1	5	10	50	100
黏性土	0.010	0.012	0.018	0.025	0.045	0.085	0.165	0.250
砂性土	0.009	0.010	0.013	0.020	0.030	0.060	0.120	0.185

### 3.2 输入地震动

根据刘峥等(2009)回归得到的美国西部基岩加速度衰减规律, 按  $M=6$  地震和峰值加速度 1, 2, 3 m/s<sup>2</sup>, 可得到分别配对的震中距  $R=25.5, 12.5, 7.09$  km. 据反应谱衰减规律得到 3 条加速度反应谱, 分别合成加速度时程(每工况 9 条), 作为地震动输入. 图 2 为  $M=6$  地震时, 峰值加速度分别为 1, 2, 3 m/s<sup>2</sup> 的地震动时程.

### 3.3 计算结果

根据表 5—表 7 中的土层数据, 通过 EQLM(0.65)和 EQLM( $M, R$ )两种方法计算得到的地表加速度反应谱, 土层反应得到的地表峰值加速度的结果列于表 8. 图 3—图 5 中给出了 6 级地震的反应谱结果.

从表 8 的结果我们注意到, 若以 EQLM( $M, R$ )的计算结果作为标准, 传统的等效线性化方法 EQLM(0.65)在全部工况下低估了地表峰值加速度. 当基岩峰值加速度较大、震级相对较小时, 低估更为明显, 最大低估误差达到 24%. 从图 3—图 5 中的反应谱情况看, 小于 1 s 左右的高频部分的反应谱已有比较明显的提高, 等效线性化方法低估高频地震动的缺陷已得到一定程度的改善.

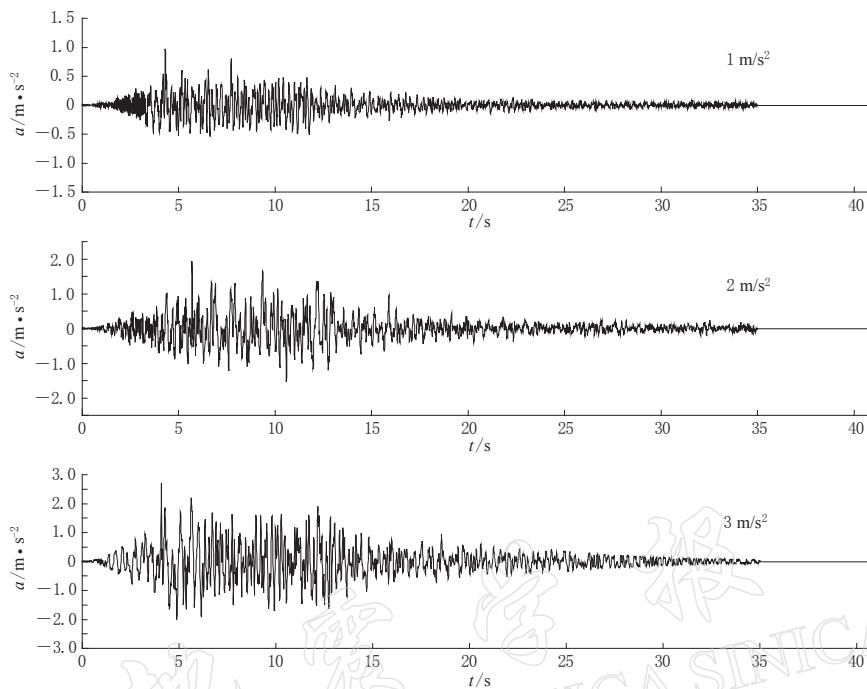


图 2 6 级地震基岩峰值加速度为  $1, 2, 3 \text{ m/s}^2$  时的地震动时程样本

Fig. 2 Samples of acceleration time history for bedrock peak acceleration

$1 \text{ m/s}^2$ ,  $2 \text{ m/s}^2$  and  $3 \text{ m/s}^2$  caused by earthquakes with magnitude 6

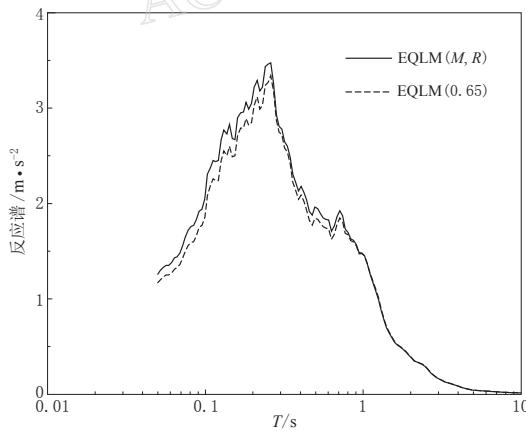


图 3 6 级地震土层反应得到的地表加速度

反应谱(基岩峰值加速度为  $1 \text{ m/s}^2$ )

Fig. 3 Soil acceleration response spectra for an  $M_6$  earthquake derived by EQLM (0.65) and EQLM( $M, R$ ). Bedrock peak acceleration is  $1 \text{ m/s}^2$

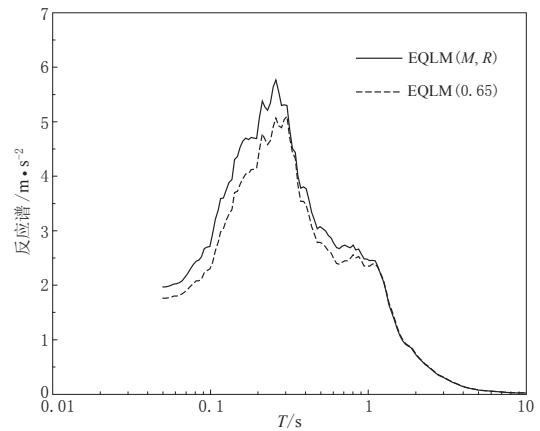


图 4 6 级地震土层反应得到的地表加速度

反应谱(基岩峰值加速度为  $2 \text{ m/s}^2$ )

Fig. 4 Soil acceleration response spectra for an  $M_6$  earthquake derived by EQLM (0.65) and EQLM( $M, R$ ). Bedrock peak acceleration is  $2 \text{ m/s}^2$

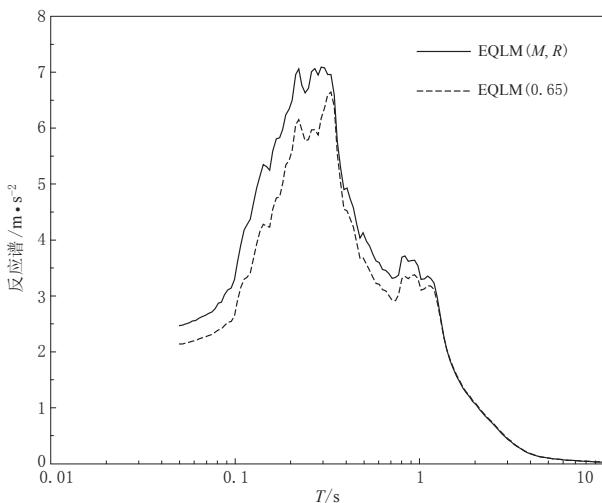
图 5 6 级地震土层反应得到的地表加速度反应谱(基岩峰值加速度为  $3 \text{ m/s}^2$ )

Fig. 5 Soil acceleration response spectra for an  $M_6$  earthquake derived by EQLM(0.65) and EQLM( $M, R$ ). Bedrock peak acceleration is  $3 \text{ m/s}^2$

表 8 EQLM(0.65)与 EQLM( $M, R$ )土层反应的计算结果Table 8 Soil seismic responses calculated with EQLM(0.65) and EQLM( $M, R$ )

基岩地表峰值 加速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	震级-距离对		折减系数 $X(M, R)$	地表峰值加速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$		低估误差
	$M$	$R/\text{km}$		EQLM(0.65)	EQLM( $M, R$ )	
1.0	5	11.5	0.407	1.06	1.22	15%
	6	25.5	0.529	1.07	1.13	6%
	7	54	0.65	1.13	1.13	0
2.0	5	4.9	0.405	1.66	1.89	14%
	6	12.5	0.515	1.65	1.83	11%
	7	29	0.636	1.59	1.62	2%
3.0	5	2.02	0.405	2.12	2.63	24%
	6	7.09	0.512	2.05	2.36	15%
	7	18.5	0.628	1.78	1.82	2%

## 4 讨论与结论

基于土的剪切模量和阻尼比的频率相关性修正等效剪应变的频率相关法可以改善等效线性化方法低估高频地震动的缺陷, 有其合理性。但该法明显减小了等效线性化使用方面的优越性, 且实际应用时由于参数的复杂性可能产生较大的不确定性。

本文指出, 由于震级可以影响地震动的频谱特征, 通过震级调整等效剪应变的做法实质上也可视为按照频率调整等效剪应变。由于距离与震级一样, 也可以影响地震动的频谱特征, 故提出了通过震级  $M$  和距离  $R$  参数调整等效剪应变的等效线性化方法 EQLM( $M, R$ )。本文用算例说明, 等效线性化方法的上述缺陷可以通过本文提出的 EQLM( $M, R$ )方法得到一定程度的改善。由于该方法不确定性较小, 易于推广。

建立或验证土层反应的模型和参数可以用两种做法: 一为基于单个立体台阵的强震记录调整参数考察模拟效果; 二为用大量基岩和相关地表强震记录的统计结果作为标准。不

同台阵差异较大，模拟不同台阵资料往往得到不同的参数。当资料较少必须作场地土层反应盲测时，参数的选择会有较大的不确定性。对于等效线性化这类简化方法，本文基于大量强震记录得到的统计结果作分析。由于资料有限，借鉴了SHAKE91等效应变的取值方案，综合确定参数。随着资料的积累，参数可以进一步修正优化。

由于等效线性化方法的缺陷，许多研究者都指出，该方法仅适用于应变较小的工况。至于应变较小具体是多少，不同研究者给出的答案不尽相同。频率相关法和本文建议的方法对传统的等效线性化的缺陷有所改善，其适用情况值得进一步研究。

## 参 考 文 献

- 蒋通, 邢海灵. 2007. 水平土层地震反应分析考虑频率相关性的等效线性化方法[J]. 岩土工程学报, **29**(2): 218-224.
- 李小军, 彭青. 2001. 不同类别场地地震动参数的计算分析[J]. 地震工程与工程振动, **21**(1): 29-36.
- 廖振鹏, 李小军. 1989. 地表土层地震反应的等效线性化解法[M]//廖振鹏主编. 地震小区划. 北京: 地震出版社: 141-153.
- 刘峰, 沈建文, 石树中, 余湛. 2009. 软土对峰值加速度的放大作用[J]. 同济大学学报(自然科学版), **37**(5): 607-611.
- 刘峰. 2009. 用震级和距离参数修正等效线性化波动方法的研究[D]. 上海: 同济大学博士论文: 74-77.
- 齐文浩, 薄景山. 2007. 土层地震反应等效线性化方法综述[J]. 世界地震工程, **23**(4): 211-226.
- 沈建文, 蔡长青, 邱瑛. 1997. XQH 1.00 地震安全性评价工作程序包简介[J]. 地震学刊, (1): 46-51.
- 邢海灵. 2007. 考虑场地特征和空间相关性的地震动模拟方法研究[D]. 上海: 同济大学博士论文: 26-29.
- Bardet J P, Ichii K, Lin C H. 2000. *A Computer Program for Equivalent-Linear Earthquake Site Response Analyses of Layered Soil Deposits*[R]. Berkeley: University of Southern California: 37.
- Furumoto Y, Sugito M, Yashima A. 2002. Frequency-dependent equivalent linearized technique for FEM response analysis of ground [C]//*The Proceedings of the Twelfth World Conference on Earthquake Engineering*. Auckland, New Zealand: New Zealand Society for Earthquake Engineering. Paper, No. 1808: 1-8.
- Hartzell S, Bonilla L F, Williams R A. 2004. Prediction of nonlinear soil effects[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **94**(5): 1609-1629.
- Yoshida N, Kobayashi S, Suetomi I, Miura K. 2002. Equivalent linear method considering frequency dependent characteristics of stiffness and damping[J]. *Soil Dyn Earthq Eng*, **22**(3): 205-222.