

文章编号: 1000-7598 (2010) 12-3928-06

刚度和阻尼频率相关的等效线性化方法

王 伟, 刘必灯, 周正华, 王玉石, 赵纪生

(中国地震局工程力学研究所, 哈尔滨 150086)

摘 要: 在实际工程中发现, 在强地震动作用下等效线性化方法低估了地表地震动的峰值加速度反应。通过与场地效应竖向台阵观测记录的对比分析证实了这一现象, 其主要原因是等效剪应变水平的取值高于高频段实际剪应变水平, 从而抑制了土层地震反应中的高频成份。若干分析表明, 动力反应过程中土体的剪应变是随频率而变化的, 且试验表明土体的刚度和阻尼是与剪应变相关的, 据此假设土体刚度和阻尼是与频率相关的。基于这一假设, 对传统等效剪应变的选取如何使得土层对基底地震动输入中的高频成分产生滤波效应的原理进行探讨, 且通过频率相关的等效线性化方法对该原理进行证明。将该方法应用于 Port Island 场地效应竖向台阵的分析, 并与实际地震动记录进行了对比, 结果表明, 较之传统等效线性化方法, 能更加合理地考虑地震动输入中的高频成分。

关 键 词: 土体非线性反应; 等效线性化方法; 频率相关; 刚度; 阻尼

中图分类号: TU 435

文献标识码: A

Equivalent linear method considering frequency dependent stiffness and damping

WANG Wei, LIU Bi-deng, ZHOU Zheng-hua, WANG Yu-shi, ZHAO Ji-sheng

(Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150086, China)

Abstract: It is found that the conventional equivalent linear method underestimates the peak ground acceleration of the soil layer earthquake response under the strong earthquake input in practice. The phenomenon is proved by calculating and analyzing the record data from the site effect borehole station array. The reason is that the artificial value of the equivalent shear strain is quite larger than the real shear strain in high frequency band and it reduces the contribution of the high frequency components of the site soil layer earthquake response. Studies show that the shear strain changes with the frequency; the shear strain-dependent shear modulus and damping was proved in the experiments; so the shear modulus and damping are supposed to be frequency-dependent. Based on this assumption, how the high frequency component of the earthquake input motion is filtered by the soil layer caused by the equivalent shear strain reduction factor is discussed. Meanwhile, the frequency-dependent stiffness and damping are applied to the equivalent linear method and the feasibility is discussed by numerical calculation. The accuracy of the proposed method is examined by comparing with the record borehole data from large earthquakes, for example, the Port Island borehole record data in Hanshin Earthquake of 1995. The proposed method always gives much better results than the conventional equivalent linear method; so that the high frequency component can be reasonably considered.

Key words: nonlinear soil response; equivalent linear method; frequency dependent; stiffness; damping

1 引 言

目前, 等效线性化方法是工程中应用于地表土层地震反应分析最为广泛的方法, 这种方法首先由 Idriss 和 Seed 提出, 并编写了 SHAKE 计算程序。20 世纪 80 年代末, 廖振鹏等^[1]也对等效线性化方

法进行研究, 提出了能模拟无限辐射条件的等效线性化分析方法, 亦编写了相应的计算程序。相对于时域非线性分析方法, 频域等效线性化方法有其自身的优点, 在输入计算数据的准备方面, 等效线性化方法更为简单; 在本构关系方面, 有较为成熟的且为试验所证实的复阻尼理论; 在数值积分计算的

收稿日期: 2010-09-07

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划资助项目 (No. 90715042, No. 90715038); 地震行业科研专项 (No. 200808008); 国家科技支撑计划 (No. 2006BAC13B02)。

第一作者简介: 王伟, 男, 1982 年生, 博士研究生, 主要从事工程地震方面的研究工作。E-mail: wwwiem@163.com

稳定性方面, 对于基底给定的地震波输入, 在正演分析中等效线性化方法一般不分散。等效线性化方法的另一个优点是其可以用于地震动输入的反演分析, 即由波动理论对地表地震动记录进行分析, 进而得到工程场地的基底或某土层的地震动输入。

由于传统等效线性化方法中等效剪应变的折减系数 α 值通常取为 0.65, 通过与实际地震记录对比, 这一参数的选取压制了土层地震反应中高频成分。因此, 在强地震动输入水平下, 等效线性化方法低估了地表土层的加速度反应峰值, 不能真实地反映地表地震动的频谱特性。鉴于这一现实, Msasta Sugito^[2] (杉户真太) 和 Nozomu Yoshida^[3] (吉田望) 等进行了相关研究。Msasta Sugito 等^[2] 针对软土和强地震动输入下 SHAKE 的计算结果与实测结果的差异, 对等效线性化方法进行了改进, 假定频率相关的等效剪应变为 $\gamma_{\text{eff}}(\omega) = c\gamma_{\text{max}} F_{\gamma(\omega)} / F_{\gamma_{\text{max}}}$, $F_{\gamma(\omega)}$ 为应变-时程的傅氏谱幅值, $F_{\gamma_{\text{max}}}$ 为 $F_{\gamma(\omega)}$ 的最大值, c 为系数, 用来统一调整沿着频率轴的剪应变傅氏谱。基于以上原理, Msasta Sugito 等编制了刚度和阻尼频率相关的等效线性化程序 FDEL。Nozomu Yoshida 等^[3] 依据多次实际地震记录的统计分析, 提出等效剪应变按 3 个频段考虑, 每个区段的计算公式如下:

$$\gamma_{\text{eff}}(\omega) = \begin{cases} \gamma_{\text{max}}, & f < f_p \\ \gamma_{\text{max}} \left(1 - \frac{\lg f - \lg f_p}{\lg f_c - \lg f_p} \right)^m, & f_p \leq f \leq f_c \\ 0, & f > f_c \end{cases} \quad (1)$$

式中: f_p 为采用 0 交法算得的最大剪应变对应的频率; f_c 为非线性的计算截至频率 (一般取为 15 Hz), 高于此频率时不考虑土层非线性; m 为系数 (一般取为 2.0)。基于以上原理亦编制了计算程序 DYNEQ。此外, Dominic Assimaki^[4] 和蒋通^[5] 等也提出了不同形式的等效剪应变计算公式。

本文在已有工作的基础上, 对传统等效剪应变的选取, 如何使得土层对基底地震动输入中的高频成分产生滤波效应的原理进行探讨, 并提出了一种频率相关的等效剪应变确定方法, 以使土层地震反应等效线性化方法计算结果更趋合理。

2 传统等效线性化方法问题分析

在传统的等效线性化方法中, 等效剪应变取为: $\gamma_{\text{eq}} = 0.65\gamma_{\text{max}}$, 其中 γ_{max} 为一次地震过程中的最大剪应变。由图 1 可以看出, 若按上述方法确定等效剪应变, 则其幅值明显大于时程中大多数剪应

变幅值 $\gamma_{(t)}$, 因此, 该等效剪应变的选取整体增大了地震动的剪应变水平。在等效线性化方法计算中每层土体的动剪切刚度 G 和动阻尼比 λ 是依据动剪切刚度比 $\frac{G}{G_0}$ 和动阻尼比 λ 随剪应变 γ 变化关系确定的。由图 2 可以看出, 由于等效剪应变 $\gamma_{\text{eq}} > \gamma_{(t)}$, 因而 $\frac{G_{\gamma(t)}}{G_{\text{max}}} > \frac{G_{\gamma_{\text{eq}}}}{G_{\text{max}}}$, $\lambda_{\gamma_{\text{eq}}} > \lambda_{\gamma(t)}$; 如果 $\gamma_{(t)}$ 足够小, 比如其值达到 10^{-5} 及以下, 则土体处于线弹性状态, 但由于等效剪应变的选取而强制使得土体进入非线性。因此, 等效剪应变的选取导致土体的动剪切刚度值降低, 动阻尼比值增加, 使得土体过度软化, 造成地震动输入中高频成分被土体严重滤波, 因而导致地震动作用下土体的动力反应降低, 即传统等效线性化方法低估了实际的地震动反应。

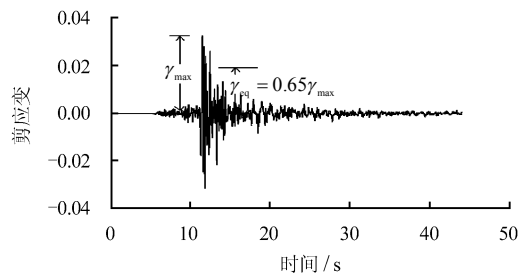


图 1 等效剪应变定义示意图

Fig.1 Sketch of definition of equivalent shear strain

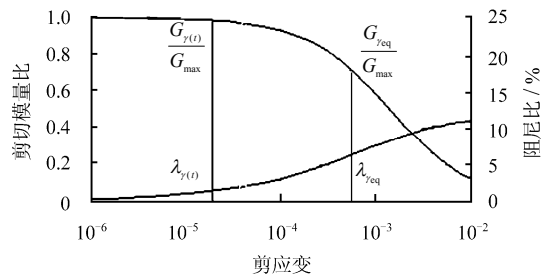


图 2 等效剪应变选取引起刚度、阻尼变化示意图

Fig.2 Stiffness and damping changes caused by equivalent shear strain selection

另外, 在对实际地震动中土体剪应变的统计分析发现, 剪应变的幅值在高频段随着频率的增大而降低, 如图 3^[4]所示。在传统等效线性化方法中由于等效剪应变的选取整体增大了地震动的剪应变幅值, 因此, 人为导致地震动中高频成分受到压制。对于高频的压制, 由图 4 不难得出, 若 $\gamma_{\text{eq}} > \gamma$, 则有 $f_{\gamma} > f_{\gamma_{\text{eq}}}$ 成立, 由于地震动加速度反应的幅值主要取决于地震波动中高频成分的贡献, 所以传统等效线性化方法低估了地震动的加速度反应。同样,

传统的等效线性化方法不能给出地震动反应完整的频谱成分, 尤其高频段成分被人为滤掉, 从而在短周期段不能给出合理的地震动反应谱平台高度。

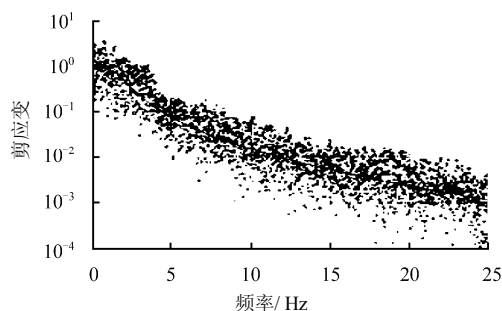


图3 剪应变-频率统计关系图^[4]

Fig.3 Statistical relationship between shear strain and frequency

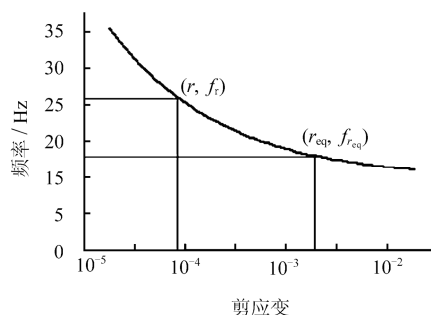


图4 等效剪应变的统一选取对地震动频率成分影响示意图

Fig.4 Sketch of earthquake motion frequency components affected by the equivalent shear strain selection

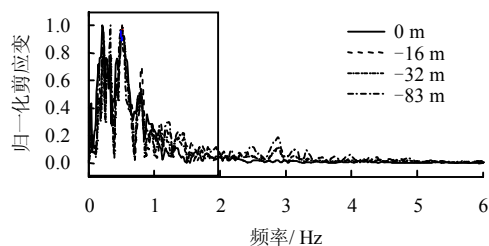
3 方法原理

1995 年阪神地震中, 日本南兵库县 Port Island 场地效应观测台阵在不同深度同时记录了一批数字强震动记录, 分析发现, 不同深度处剪应变的傅氏谱形状极其相似, 只是幅值不等, 如图 5 所示。

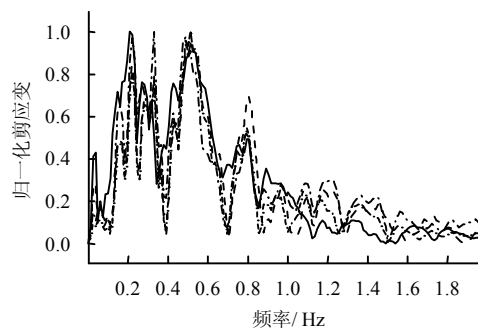
依据 Port Island 场地效应竖向台阵记录的地震动土体剪应变傅立叶谱分析结果, 本文假定每层土体的频率相关的等效剪应变为归一化的基底输入剪应变 $a(f)$ 与其最大剪应变值 $\gamma_{n,\max}$ 的积, 其表达式如下:

$$\Gamma_{n,f} = a(f)\gamma_{n,\max} \quad (2)$$

对于无限均匀介质中传播的平面剪切波, 质点速度与剪应变的关系可表示为 $c \left| \frac{\partial u}{\partial x} \right| = \frac{\partial u}{\partial t}$, 其中 c 为介质剪切波速; $\frac{\partial u}{\partial x}$ 为介质剪应变; $\frac{\partial u}{\partial t}$ 为介质质点速度。假定基岩为均匀介质, 其输入加速度时程



(a) 归一化傅立叶谱图



(b) 图 5(a)方框区域放大效果

图5 Port Island 竖向观测台阵不同深度剪应变归一化傅立叶谱

Fig.5 The normalized shear strain Fourier spectra at different depths in Port Island borehole station

通过积分得到速度时程, 并由上述公式求得剪应变时程, 然后对其进行傅氏变换得到剪应变时程的傅立叶谱, 进而应用剪应变傅立叶谱峰值归一化便得到归一化的基底输入剪应变 $a(f)$ 。

在等效线性化方法实现过程中, 依据式 (2) 确定的 $\Gamma_{n,f}$ 、动刚度比-剪应变和动阻尼比-剪应变的关系, 得到与每个频率相对应的动刚度比 $\frac{G}{G_{\max}}(f)$ 和动阻尼比 $\lambda(f)$, 从而确定出频率相关的

刚度和阻尼。在此基础上, 经反复叠加计算获取最终分析结果, 其收敛标准为所有土层中所有频率点刚度和阻尼当前迭代和前一迭代的最大误差小于某一规定值 ε , 如取 $\varepsilon = 5\%$ 。

4 分析算例

以日本 Port Island 场地为例, 应用本文方法进行场地地震反应分析, 并与实际记录进行对比, 以证明本文方法的有效性。同时, 亦与传统非线性等效线性化方法结果进行对比, 说明本文方法计算结果的合理性。

4.1 Port Island 场地概述

Port Island 场地位于日本南兵库县境内, 钻孔资料表明, 上覆土层主要为冲、洪积砂和黏土组成, 各分层土的厚度、剪切波速和重度详见表 1。该场

地的竖向台阵于 1995 年 1 月 17 日在阪神地震中成功记录到一组高质量的地震记录, 为本文进行分析比较提供了宝贵资料。

表 1 Port Island 场地分析模型参数

Table 1 The analysis model parameters of Port Island site

厚度 / m	岩土名称	密度 / (g/cm ³)	剪切波速 / (m/s)
5.0	砾砂	1.9	170
7.5	砾砂	1.9	210
6.5	砾砂	1.9	210
8.0	冲积黏土	1.6	180
6.0	冲积砂	1.9	245
17.0	洪积砾	1.9	305
11.0	洪积砂	1.9	350
18.0	洪积黏土	1.6	303
4.0	洪积砾砂	1.9	320
	计算基岩	2.3	500

4.2 计算结果分析

依据 Port Island 场地钻孔资料建立了计算分析模型, 模型主要参数详见表 1。在分析计算中, 其动刚度比和阻尼比与剪应变关系参数选用我国典型场地土样试验结果, 并分别以 -83 m 处 E-W 和 N-S 向加速度记录作为基底输入, 峰值分别为 302g 和 678g。计算所得结果包括地震动反应峰值加速度 $A_{\max}$ 和峰值速度 $V_{\max}$ 、地表加速度傅立叶谱、反应谱和传递函数等。

4.2.1 地震动反应峰值分析比较

图 6、7 所示为实际观测记录与本文方法和传统等效线性化方法在以基底 E-W 向、N-S 向地震动为输入计算所得的不同深度处加速度峰值结果。

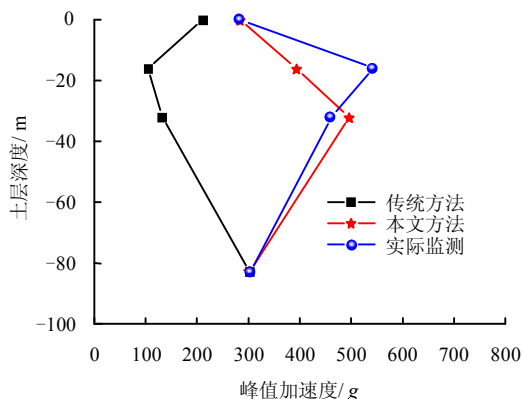


图 6 以 -83 m 处 E-W 向地震动为输入计算所得不同深度峰值加速度结果

Fig.6 The peak acceleration at different depths calculated by using the E-W acceleration Record at -83 m as the basement earthquake input

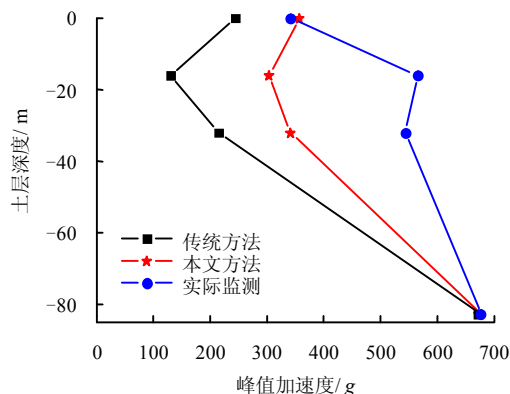


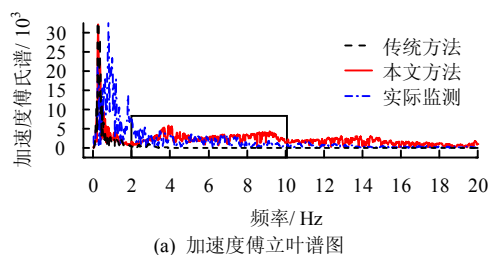
图 7 以 -83 m 处 N-S 向地震动为输入计算所得不同深度峰值加速度结果

Fig.7 The peak acceleration at different depths calculated by using the N-S acceleration record at -83 m as the basement earthquake input

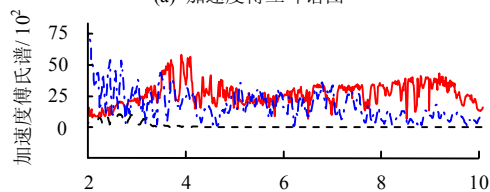
由图 6、7 可以看出, 显然传统方法明显低估了不同深度的加速度峰值, 而本文提出的频率相关的等效线性化方法与传统等效线性化相比, 变化趋势更接近实际观测记录。在土层表面, 本文方法的计算结果与实际观测记录值相差不大, 从而说明传统等效线性化方法由于压制了地震动输入中的高频成分而造成土层地震动加速度反应的低估, 也证明了本文方法分析结果是可靠的。

4.2.2 地表加速度傅立叶谱分析比较

图 8、9 分别对应于以基底 E-W 向和 N-S 向地震动为输入计算所得的土层地表加速度傅立叶谱。由图 8 分析可知, 传统等效线性化方法和本文方法的加速度傅立叶谱与实际观测记录值相比, 在 0~2.5 Hz 范围内衰减较快, 但在 2.5 Hz 以后, 传统等



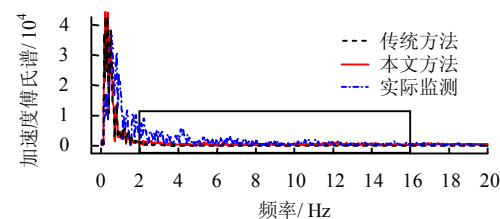
(a) 加速度傅立叶谱图



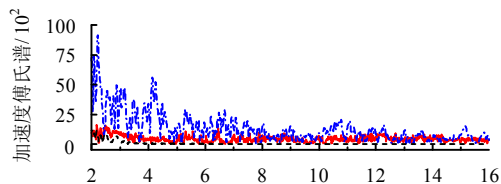
(b) 图 8(a) 方框区域放大效果图

图 8 以 -83 m 处 E-W 向地震动为输入计算所得土层地表加速度傅立叶谱

Fig.8 The ground acceleration Fourier spectra calculated by using the E-W acceleration record at -83 m as the basement earthquake input



(a) 加速度傅立叶谱图



(b) 图 9(a) 方框区域放大效果图

图 9 以 -83 m 处 N-S 向地震动为输入计算
所得土层地表加速度傅立叶谱

Fig.9 The ground acceleration Fourier spectra
calculated by using the N-S acceleration record
at -83 m as the basement earthquake input

效线性化方法的幅值衰减接近 0, 而本文方法的幅值与实际观测记录吻合较好。同样, 对图 9 分析可知, 传统等效线性化方法和本文方法的加速度傅立叶谱与实际观测记录相比, 在 0~3.0 Hz 范围内衰减较快, 但在 3.0 Hz 以后, 本文方法与实际观测记录吻合较好, 而传统等效剪应变方法的幅值几乎为 0。从而进一步证明传统等效线性化方法压制了土层地震反应的高频成分。

在以基底 E-W 向地震动为输入作用下, 两种方法低频段的地表反应加速度傅立叶幅值谱在 0~2.5 Hz 频带内衰减太快是由等效线性化方法引起的。由于在整个计算中采用等效线性化原理, 产生了岩土体的共振效应, 即在共振频率处峰值远大于其他频率点的值, 且共振峰很窄。岩土体本身是个非线性体, 其本构特性应该是与应变水平有很大关系的, 尤其是当应变水平大时, 土体的非线性效应是非常强烈的。而等效线性化是采用一个线性体系来模拟一个非线性体系, 自然会把线性体系固有的一些特性引入其中, 如共振效应。因此, 靠近自振频率的输入波能量被放大, 而远离该频率的能量被压制, 造成计算结果与实际岩土体反应存在较大差异。同样, 图 10 证明了等效线性化方法计算中土层地震反应共振效应的存在, 不难看出, 在 0.5 Hz 处其传递函数值远远大于其他频率的传递函数值, 在其频率一定范围之外传递函数衰减很快。

4.2.3 反应谱分析比较

图 11、12 分别对应以基底 E-W 向和 N-S 向地震动为输入计算所得的土层表面加速度反应谱, 通过比较可以发现, 在周期 0~1 s 内本文的反应谱幅

值明显高于传统的等效线性化方法, 且其幅值与实际观测的反应谱幅值相差不大, 其原因可以通过对

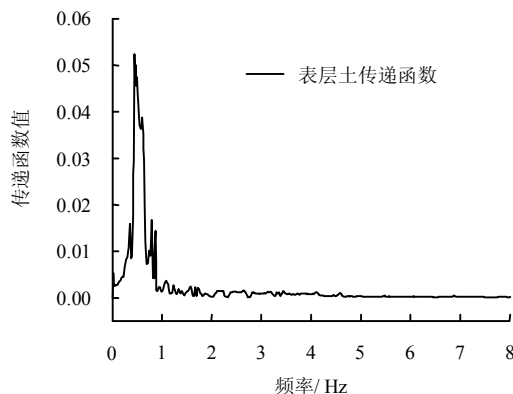


图 10 以 -83 m 处 E-W 向地震动为输入计算
得到的土层地表传递函数曲线

Fig.10 The surface soil transfer function curve calculated
by using the E-W acceleration record at -83 m
as the basement earthquake input

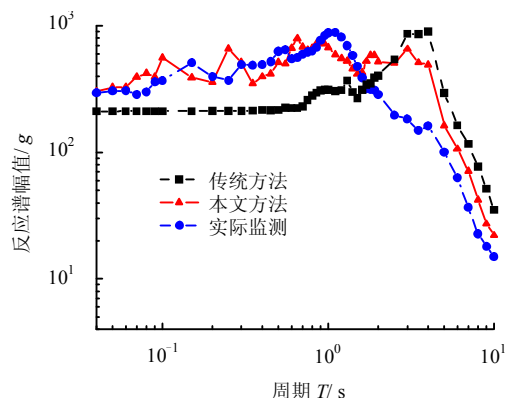


图 11 以 -83 m 处 E-W 向地震动为输入计算
所得加速度反应谱

Fig.11 The acceleration response spectra calculated
by using the E-W acceleration record at -83 m
as the basement earthquake input

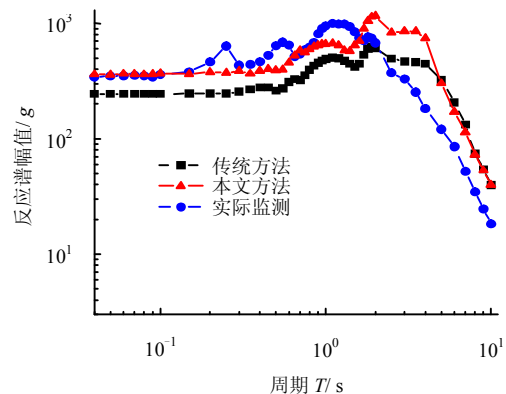


图 12 以 -83 m 处 N-S 向地震动为输入计算
所得加速度反应谱

Fig.12 The acceleration response spectra calculated
by using the N-S acceleration record at -83 m
as the basement earthquake input

图 8、9 的傅氏谱的比较得出, 由于传统方法压制了地震输入中的高频成分, 从而造成反应谱在短周期段内幅值的下降, 而本文方法很好地考虑了地震输入中的高频成分, 从而其反应谱幅值与实际观测记录相差不大。

4.2.4 传递函数分析比较

图 13、14 分别对应于以基底 E-W 向和 N-S 向地震动为输入计算所得的地表传递函数。通过比较可以发现, 传统方法在大于 2 Hz 的频段内传递函数值几乎为 0, 即其对地震动输入的高频成分有明显的压制, 而本文方法则与传统方法相比在高频段的传递函数有明显的改善, 值得注意的是, 在基底 N-S 向地震动为输入作用下的低频部分本文与传统方法的差别不是很明显, 其主要原因在于基底 N-S 向的地震动中高频成分相对较小, 从而导致两者结果相差不大。

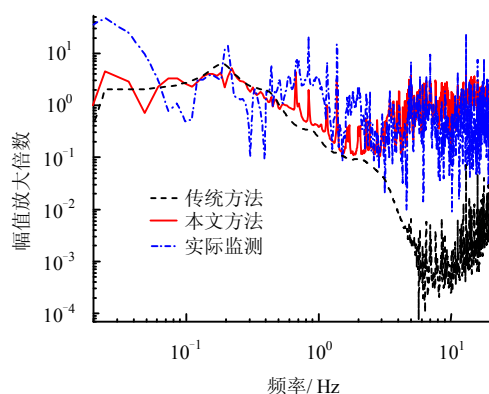


图 13 以-83 m 处 E-W 向地震动为输入计算所得地表传递函数曲线

Fig.13 The ground surface transfer function curves calculated by using the E-W acceleration record at -83 m as the basement earthquake input

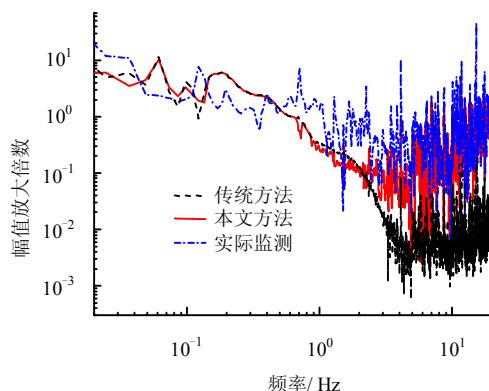


图 14 以-83 m 处 N-S 向地震动为输入计算所得地表传递函数曲线

Fig.14 The ground surface transfer function curves calculated by using the N-S acceleration record at -83 m as the basement earthquake input

5 结 论

(1) 本文通过考虑与频率相关的刚度和阻尼, 提出一种改进的等效线性化方法。通过算例分析可以看出, 本文方法改善了传统等效线性化方法中对土层地震动反应高频成分压制的缺点, 使得计算结果更趋合理, 更能真实地反映高频段地震动反应。

(2) 尽管本文方法分析结果较之传统等效线性化方法更合理, 但仍与实际记录有一些差别, 其原因可能是由于在数值计算中采用的土层动力参数与实际值有所差别所致。另外, 由于本文方法采用的仍是等效线性化模型, 因此, 在计算中会引入线性体系的一些固有特性, 导致岩土体的共振效应, 同样会导致计算结果与实际相比有所差别。

参 考 文 献

- [1] 李小军. 场地土层对地震地面运动影响的分析方法[J]. 世界地震工程, 1992, 8(2): 49—60.
LI Xiao-jun. Analysis method of ground earthquake motion affected by the site soil layer[J]. **World Earthquake Engineering**, 1992, 8(2): 49—60.
- [2] MASATA SUGITO, GODA H, MASUDA T. Frequency dependent equi-linearized technique for seismic response analysis of multi-layered ground[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1994, 493(III-27): 49—58.
- [3] NOZOMU YOSHIDA, SATOSHI KOBAYASHI, IWAO SUETOMI, et al. Equivalent linear method considering frequency dependent characteristics of stiffness and damping[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2002, 22(3): 205—222.
- [4] DOMINIC ASSIMAKI, EDUARDO KAUSEL. An equivalent linear algorithm with frequency and pressure-dependent moduli and damping for the seismic analysis of deep sites[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2002, 22(9—12): 959—965.
- [5] 蒋通, 刑海灵. 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, 2007, 29(2): 218—224.
JIANG Tong, XING Hai-ling. Equivalent linear method of horizontal soil layer earthquake response calculation considering frequency dependent characteristics of stiffness and damping[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2007, 29(2): 218—224.