

DOI: 10.11779/CJGE202107008

基于应变区间折减理论的频率相关等效线性化方法

郑山锁^{1, 2}, 张晓宇^{1, 2}, 龙立^{1, 2}, 陈方格^{1, 2}, 贺钧³, 李平⁴

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 结构工程与抗震教育部重点实验室, 陕西 西安 710055;
3. 中国启源工程设计研究院有限公司, 陕西 西安 710055; 4. 陕西师范大学, 陕西 西安 710055)

摘要: 为了克服传统等效线性化方法高频段响应被低估的问题, 基于传统等效线性化分析原理, 结合目前各种频率相关的等效线性化理论方法, 提出了考虑有效应变区间折减的频率相关等效线性化方法。采用标准化应变谱表征等效应变与频率的关系, 引入剪切应变弹性阈值概念, 修正标准化应变幅值在弹性应变范围内的频段, 同时采用 Gaussian 平滑方法拟合标准化应变谱, 建立有效应变区间折减系数的分段函数, 并利用竖向台阵的地震动实测记录对本文方法的可靠性和适用性进行考察。各类场地的分析结果表明: 本文方法考虑了地震动高频成分所对应的较大剪切模量和较小阻尼比的实际情况, 给出了场地地震反应在高频段的优化结果, 可为实际工程的抗震设计提供可靠依据。

关键词: 频率相关; 等效线性化; 区间折减; 场地地震响应分析

中图分类号: TU435 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2021)07-1238-07

作者简介: 郑山锁(1960—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事结构工程与工程抗震方面的科研工作。E-mail: zhengshansuo@263.net。

Frequency-dependent equivalent linearization method based on strain interval reduction theory

ZHENG Shan-suo^{1, 2}, ZHANG Xiao-yu^{1, 2}, LONG Li^{1, 2}, CHEN Fang-ge^{1, 2}, HE Jun³, LI Ping⁴

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Key Lab of Structural Engineering and Earthquake Resistance, Ministry of Education, Xi'an, 710055, China; 3. China Qiyuan Engineering Corporation, Xi'an 710055, China; 4. Shaanxi Normal University, Xi'an 710055, China)

Abstract: In order to overcome the problem of underestimating the high-frequency Fourier spectrum amplification ratio obtained by the original equivalent linearization method, a frequency-dependent equivalent linearization method considering the effective strain interval reduction is proposed. Based on the traditional equivalent linearization analysis theory, various frequency-dependent equivalent linear methods are combined. The standardized strain spectrum is utilized to characterize the relationship between the equivalent strain and the frequency. The concept of shear strain elastic threshold is introduced to modify the standardized strain spectrum amplitude at the frequency within the elastic strain range. The standardized strain spectrum is fitted by the Gaussian smoothing method, then the piecewise function for the effective strain interval reduction coefficient is established. The ground motion measurement records at vertical stations are utilized to investigate the reliability and applicability of the proposed method. The analysis results of various sites show that the method fully considers the actual situation of the larger shear modulus and smaller damping ratio. Those factors are corresponding to the high-frequency component of the ground motion. The proposed method gives the optimization results of the site seismic response in the high frequency band and provides a basis for the seismic design of the actual projects.

Key words: frequency dependence; equivalent linearization; interval reduction; site seismic response analysis

0 引言

水平层状场地非线性地震反应分析方法中, 等效线性化方法是目前工程界广泛应用的计算方法, 已被《工程场地地震安全性评价技术规范》推荐使用。这种方法首先由 Idriss 等^[1]提出, 根据一维剪切波的传播理论, 采用等效剪切模量和阻尼比来近似计算场地

土层非线性反应。该方法认为 $\bar{\gamma} = \alpha\gamma_{\max}$, 其中, α 为系数, 一般取 0.65, 然而, 当地震强度较大或剪应变较大时, 传统等效线性化方法分析得到的频响放大

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFC1509302); 陕西省重点研发计划项目(2021ZDLSF06-10); 西安市科技计划项目(2019113813CXSF016SF026)

收稿日期: 2020-07-03

倍率在高频段偏小, 高频段滤波严重, 地表地震动反应峰值明显偏低, 不能可靠地反映地表地震动的频谱特征。为了改善这一问题, 诸多学者基于传统方法进行了改进和研究。

Furumoto 等^[2]、Sugito 等^[3]在软土场地和输入地震动较大的条件下研究等效线性化方法的计算结果与实测记录的差异, 用频率相关的变系数来计算等效剪切应变, 从而考虑了土体力学参数的频率相关性, 改进了等效线性化方法, 并编制了应用程序 FDEL。Yoshida 等^[4-5]进一步将频率分为若干段, 每个频段使用不同的换算法则。Kausel 等^[6]给出了等效剪切应变与频率的关系式来考虑剪切模量和阻尼比的频率相关性。蒋通等^[7]采用矩形窗口来进行应变谱的平滑处理, 从而拟合标准化应变谱, 提出了最大应变的新系数。王伟等^[8]通过对 Port Island 场地强震动记录的分析, 探讨了等效剪应变的取值对高频成分的滤波效应的影响。袁晓铭等^[9]采用直频法动剪模量阻尼比求解技术, 提出了考虑荷载频率特征的土层地震反应计算方法。

本文基于传统等效线性化分析思路, 结合目前各种频率相关的等效线性化方法, 提出一种基于有效应变区间折减理论的频率相关等效线性化新方法, 并基于竖向台震地震动记录验证该方法在较硬场地、一般软土场地及厚软土场地地震反应分析中的可靠性。

1 应变区间折减理论与频率相关等效线性化方法

在场地对地震动的响应中, 剪应变幅值的取值和迭代所产生的变化对场地动力学行为有重要影响。针对传统等效线性化方法存在的高频段响应被低估的问题, 国内外学者提出了若干改进方法, 但剪应变和频率关系的确定不够精确, 甚至在部分频率区间内剪应变拟合情况和实际记录值偏差较大。从归一化的剪应变傅里叶幅值谱的半对数曲线的整体特征来看, Kausel 的方法整体上能够表达应变谱的下降趋势, 但是剪应变谱在局部还表现出一定的不稳定性^[6]。本文在 Kausel 方法的基础上, 基于有效应变区间分段取值的研究思路, 采用 Gaussian 平滑方法拟合应变谱, 得到与原傅里叶幅值误差更小的平滑谱值, 更能拟合实际情况。同时, 引进弹性应变阈值的概念, 仅增加了塑性指数一个参数, 计算速度快, 所需参数获取简单, 科学地给出了高频段的响应。

当平面剪切波速在无界、均匀的介质中传播时, 任意点 x 处的剪切应变 γ 与该点的速度 \dot{u} 成正比^[6]:

$$\gamma = \frac{\partial u(t-x/v_{se})}{\partial x} = -\frac{1}{v_s} \frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{\dot{u}}{v_s}, \quad (1)$$

式中, v_s 为剪切波速。因此, 对于任意地震记录的剪应变频谱 $\gamma(\omega)$ 都可以通过将加速度时程进行基线校正后对时间积分, 再除以剪切波速, 最后进行傅里叶变换处理得到。对剪应变傅里叶幅值谱的标准化处理可以利用 0 和平均频率 ω_0 之间的平均值 γ_0 :

$$\gamma_0 = \frac{1}{\omega_0} \int_0^{\omega_0} \gamma(\omega) d\omega, \quad (2)$$

$$\omega_0 = \frac{\int_0^{\infty} \omega \gamma(\omega) d\omega}{\int_0^{\infty} \gamma(\omega) d\omega}. \quad (3)$$

确定弹性应变阈值。Kim 等^[10]通过土的扭剪及其振柱试验表明土体存在“弹性”区域。Okur 等^[11]在循环荷载作用下对近百个土样进行三轴试验, 得出塑性指数 I_p 与土体弹性应变阈值的关系为

$$\gamma_{cv} = \frac{0.00035}{1 + 11.9e^{-0.1I_p}}. \quad (4)$$

式中 γ_{cv} 为剪切应变弹性临界值; I_p 为塑性指数。由于塑性指数 I_p 为土层的基本物理参数, 获取方便, 本文采用式(4)计算弹性应变阈值。

同时, Okur 等^[11]统计回归得出了弹性应变范围内剪切模量和阻尼比之间的关系:

$$\lambda = -0.18114 \left(\frac{G}{G_{max}} \right) + 0.20033, \quad (5)$$

式中, λ 为动阻尼比, G 为动剪切模量, G_{max} 为剪切模量最大值。

Kausel 等^[6]通过试验得到, 地震动中不同频率所对应的剪切模量和阻尼比取值不同, 尤其是高频、小幅值成分所对应的剪切模量明显大于低频成分, 而阻尼比的取值规律正好相反。当厚软土场地遭遇地震动时, 剪切模量和阻尼比随着剪应变的取值不断变化, 小应变情况下, 剪切模量取较大值, 而阻尼比取较小值, 这时地表地震动响应较大, 这两个核心动力学参数随着剪应变小范围的取值而变得相当敏感^[12]。这是因为土体的剪应变在弹性阈值范围内时, 仍然属于线弹性体, 所以场地对于剪切应变处于弹性区间的地震动分量将会有较大的响应。Kim 等^[10]的试验表明, 当土体处于弹性应变内时, 动剪切模量通常是常量, 且等于最大剪切模量 G_{max} 。因此, 本文方法中, 剪切应变幅值小于弹性应变阈值时, 动剪切模量统一取固定值 G_{max} , 对应的动阻尼比按式(5)取值, 即 $\lambda = 0.01919$ 。

当标准化剪应变谱值大于弹性应变阈值时, 本文采用高斯平滑处理方法对标准化应变谱曲线进行拟合。

综上, 提出基于有效应变区间的最大剪应变折减系数 α 为

$$\alpha = \begin{cases} 1.0 & (\omega_i \leq \omega_F) \\ \frac{1}{2n+1} \sum_{k=i-n}^{i+n} h(\omega_k) \left| \frac{\gamma(\omega_k)}{\gamma_0} \right| & (\omega_F < \omega_i < \omega_{cv}) \\ \frac{\gamma_{cv}}{\gamma_0} & (\omega_i \geq \omega_{cv}) \end{cases} \quad (6)$$

式中 ω_F 为从高频到低频首次超过 1.0 的应变幅值对应的频率; ω_{cv} 为剪应变弹性临界值对应的频率值; $h(\omega)$ 为高斯移动窗口中应变幅值对应的权重, 由式(7)确定; n 为点的个数。默认的高斯平滑处理方法仅对目标数据周围的 5 个数据进行移动平均值处理, 处理效果较差, 由于高斯核是对连续高斯的离散近似, 窗口越大近似越好, 但太大的窗口取值容易造成数据失真, 降低平滑化曲线的细节质量, 因此本文建议根据频率的采样率把窗口值设置为 70~100, 据此, n 的取值为 35~50。

$$h(\omega_k) = \frac{e^{-\frac{(\omega_k - \omega_i)^2}{2\sigma^2}}}{\sum_{j=i-n}^{i+n} h(\omega_j)} \quad (k \in [i-n, i+n]) \quad (7)$$

式中, ω_i 为窗口中心的频率, σ 为高斯滤波器的标准差, 取值与窗口中点的个数相关, 本文取 $\sigma = 2n/5$ 。

下面以 KOBE 记录的地震加速度时程为例进行对比分析。本文方法分析流程如图 1 所示。

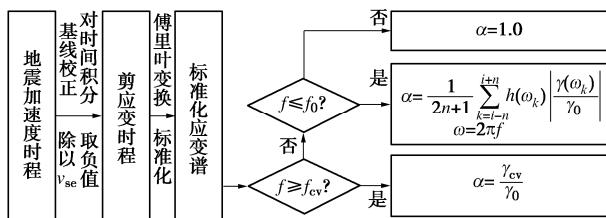


图 1 有效应变区间分段折减的分析流程

Fig. 1 Analysis process of segmentation reduction of effective strain interval

具体地, 将地震加速度时程转换为剪应变时程, 即将基线校正后的加速度时程对时间进行积分, 再除以剪切波速, 进而将剪应变时程进行傅里叶变换, 标准化后得到标准化应变谱, 最后调整为半对数曲线呈现。采用本文方法和传统等效线性化方法分别对上述场地地震记录进行分析得到的标准化谱值及最大剪应变折减系数 α , 如图 2 所示。

由图 2 可知, 传统等效化线性方法低估了处于 f_F 频率成分范围内的剪应变幅值, 而高于 f_F 频率分量的剪应变幅值被高估。由于地震动高频段的谐波分量对地震动峰值加速度起主导作用, 而地震动高频段的谐波分量被抑制, 因此传统方法计算得到的地表加速度峰值偏低, 不利于安全。

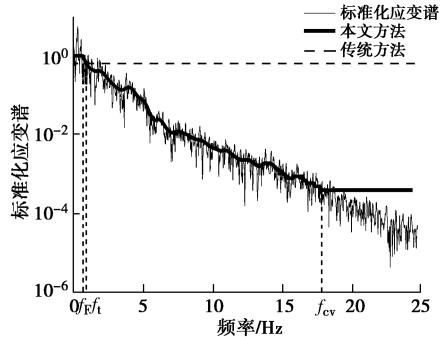


图 2 标准化应变谱及拟合曲线

Fig. 2 Standardized strain spectra and reduction factors of maximum shear strain

本文针对频率分量低于 f_F 的区段, 取折减系数为 1.0, γ_{max} 不被放大; 对频率分量在 f_F 与 f_{cv} 之间的区段, 实现了与拟平滑的应变谱曲线较好的近似, 在小范围频率内减小与拟平滑曲线的误差, 能够更好地表征剪应变的频率相关性; 针对高于频率分量 f_{cv} 的区段, 因为幅值低于阈值 γ_{cv} , 动剪切模量取值为最大剪切模量 G_{max} , 相应的阻尼比便取了较小的数值。由此充分考虑了地震动高频成分所对应的较大剪切模量和较小阻尼比的实际情况, 合理地给出了场地地震反应在高频段的优化结果。

2 基于竖向台阵地震记录的可靠性分析

考察场地地震反应分析方法可靠性和适用性的最佳途径是利用竖向台阵地震动实测记录复演场地地震响应过程。利用在 KiK-net 选取的台阵及其实测地震动记录, 将传统等效线性化方法 (DeepSoil 软件中的等效线性化方法) 与本文方法进行对比计算, 以实际地表地震响应记录为标准, 验证二者对于不同场地的计算精度和可靠性。

选取的台阵基本信息及土层特征参数如表 1 所示, 波速柱状图见图 3。土体动力学参数的动剪切模量比 G/G_{max} 和阻尼比 λ 的估计参照 Hashash 等^[13]的做法, 采用图 4 的结果。塑性指数通过侯云亮^[14]所提出的剪切波速与塑性指数的统计回归公式近似取值。根据中国规范中建筑场地分类标准, 以等效剪切波速 $v_{se}=500$ m/s 来确定场地覆盖层厚度 (式 (8)), 将所选台阵点场地分为较硬场地、一般软土地和厚软场地 3 种类型。根据各场地土层详细信息计算和规范对比, 可以得到, IWTH14 为较硬场地, SZOH42 为一般软土地, 而 IBRH07 和 IBRH10 为厚软土地。图 5 给出了厚软土地地表加速度记录与计算值的对比, 可见两者较为接近。

$$v_{se} = \frac{d_0}{t}, \quad t = \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{v_{si}} \quad . \quad (8)$$

式中 v_{se} 为土层等效剪切波速; v_{si} 为第 i 层土的剪切波速; d_0 为计算深度, 取覆盖层厚度和 20 m 两者较小值; d_i 为第 i 层土的厚度; t 为剪切波传播时间; n 为土层数。

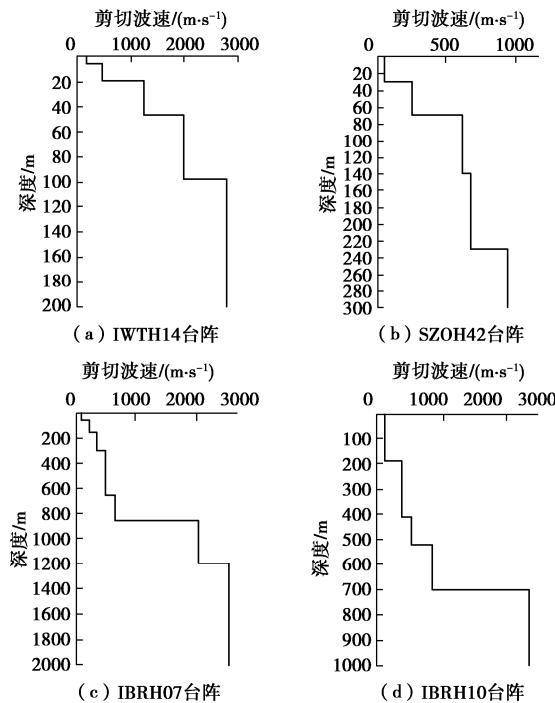
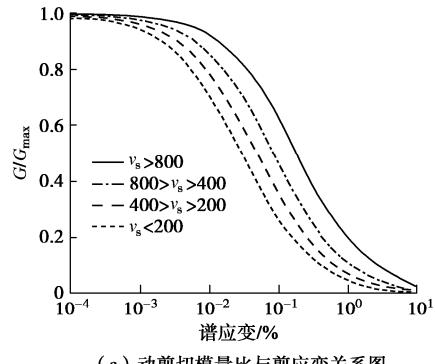
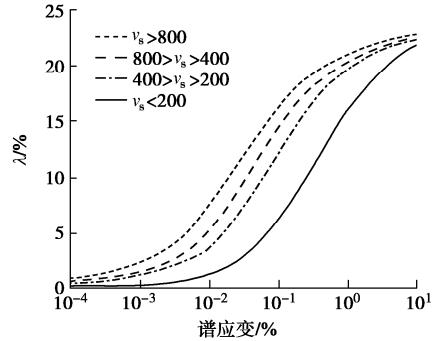


图 3 各台阵波速柱状图

Fig.3 Column graphs of shear-wave velocity



(a) 动剪切模量比与剪应变关系图



(b) 阻尼比与剪应变关系图

图 4 土体动力学参数图

Fig. 4 Dynamic parameters of soil

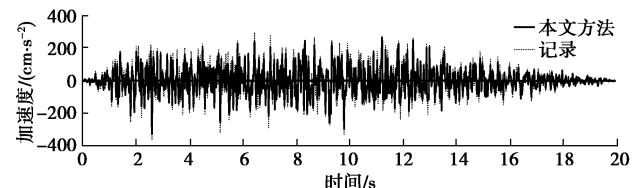


图 5 IBRH07 台阵地表加速度记录与计算值的比较

Fig. 5 Comparison between calculated surface acceleration of

IWTH14 station and measured records

表 1 所选台阵的基本信息

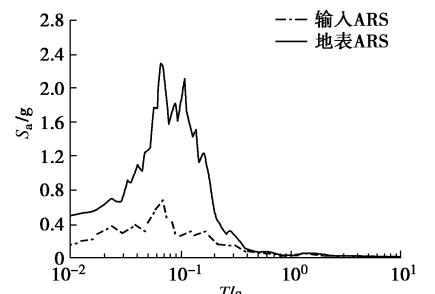
Table 1 Basic information of selected stations

编号	台阵	纬度	经度	v_{se} (m·s ⁻¹)	覆盖层 厚度/m	T_{500} /s
#1	SZOH42	34.9723	138.9159	139.29	30	0.86
#2	IBRH10	36.1078	139.9919	301.98	190	2.52
#3	IBRH07	35.9489	140.3334	224.84	147	2.62
#4	IWTH14	39.7406	141.9125	292.68	6	0.08

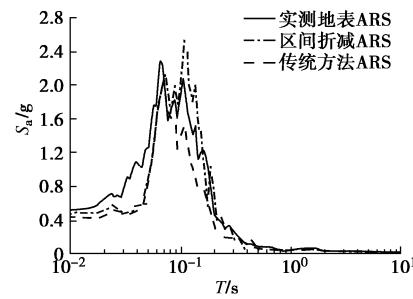
2.1 地表地震动响应结果对比分析

(1) 较硬场地的计算结果对比分析

选取 IWTH14 台阵所在场地作为研究对象, 该场地的覆盖层厚度 $h=6$ m, 等效剪切波速 $v_{se}=292.68$ m/s, 卓越周期 $T_{500}=0.08$ s, 中国规范将其划分为 II 类场地。地表加速度反应谱 (ARS) 与实测记录值对比如图 6 所示。



(a) 实测输入加速度反应谱与地表加速度反应谱



(b) 两种方法计算所得地表加速度反应谱对比

图 6 IWTH14 台阵计算所得地表加速度反应谱与实测记录对比

Fig. 6 Comparison between calculated surface acceleration

response spectrum (ARS) of IWTH14 station and measured records

由图 6 可知, 传统方法和本文方法计算得到的地表加速度峰值响应, 偏差分别为-4.8% 和 -3.1%, 均在 $\pm 5\%$ 的较小范围之内。计算结果与实测记录的加速度反应谱

曲线在整体范围内变化趋势基本一致, 反应谱曲线随着周期变化都是先增大后减小, 呈现小平台的单峰值形态, 但在某些局部频段存在不同程度的差别。这些局部波动现象是因为数值分析所采用的动力学参数与实际情况有所不同, 一维线性模型中存在的固有特性会导致土体的共振效应。

总体而言, 在较硬场地上两种方法都能较好地反映场地地震动响应的真实情况, 具有较好的适用性。针对较硬土场地, 本文方法沿袭了传统等效线性化方法的计算准确度。

(2) 一般软土场地的计算结果对比分析

选取台阵 SZOH42 台阵进行分析。该台阵所在场地的覆盖层厚度 $h=30$ m, 等效剪切波速 $v_{se}=139.29$ m/s, 20 m 内等效剪切波速 $v_{s20}=126.83$ m/s, 场地卓越周期 $T_{500}=0.86$ s, 按照中国场地类别划分标准, 属于III类场地。场地的地震响应分析结果对比如图 7 所示。

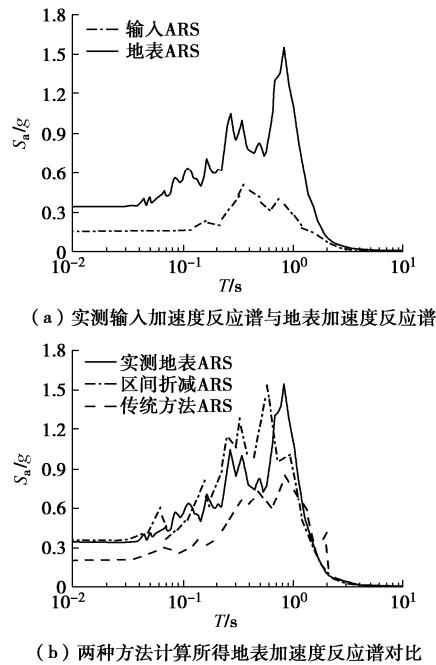


图 7 SZOH42 台阵计算所得地表加速度反应谱与实测记录对比

Fig. 7 Comparison between calculated surface acceleration response spectrum (ARS) of SZOH42 station and measured record

由图 7 可见, 传统等效线性化方法对地表峰值加速度的估计偏小且偏差在 30% 以上; 而本文方法计算所得的地表地震动峰值与实测记录的偏差在 ±5% 以内, 偏差微小, 软土场地放大效应不足的问题得到了明显的改善。由此可见, 本文方法对于一般软土场地而言, 分析结果更接近实测记录值, 优势较为明显。

(3) 厚软土场地的计算结果对比分析

选取 IBRH07 台阵进行分析, 其所在场地的覆盖层厚度 $h=147$ m, 等效剪切波速 $v_{se}=224.84$ m/s, $v_{s20}=90$

m/s, $T_{500}=2.62$ s, 参照中国规范属于IV类场地。根据中国规范中建筑场地分类标准, 该台阵场地覆盖层的下一层厚度为 153 m, 但土层的剪切波速刚好为临界剪切波速 500 m/s, 其土层总体厚度可以延伸至近 300 m, 所以 IBRH07 台阵按场地性质属于IV类厚软土场地。场地地震响应分析结果对比如图 8 所示。

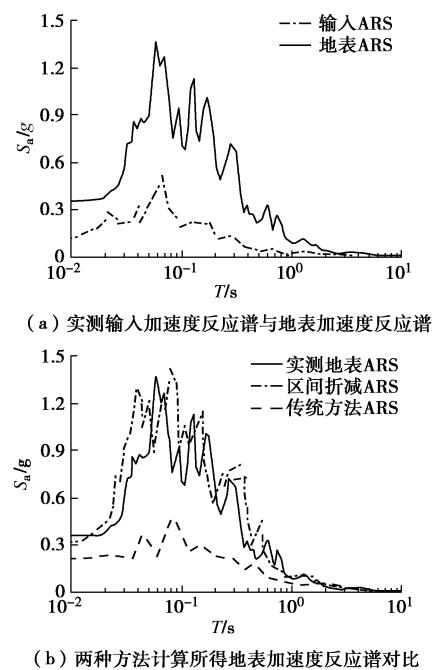


图 8 IBRH07 台阵计算所得地表加速度反应谱与实测记录对比

Fig. 8 Comparison between calculated surface acceleration response spectrum (ARS) of IBRH07 station and measured record

由图 8 可知, 传统等效线性化方法在厚软土场地的地震动响应结果明显偏小, 从地表加速度反应谱所呈现的形态就可以判断在厚软弱场地上基本已经丧失了可靠性, 不可用于实际工程的参考和分析。而本文方法的计算结果与实际记录值非常接近, 相比传统方法优势显著, 整体上可以反映实际工况的地表地震动响应, 表现出良好的适用性, 基本克服了传统等效线性化方法对厚软土场地放大效应严重低估的不足, 改善效果较为明显。

2.2 傅里叶幅值谱及放大系数的可靠性分析

(1) 地表地震动傅里叶幅值谱对比分析

对 IBRH07 和 IBRH10 两个台阵厚覆盖层软土场地进行地震动响应分析, 地表加速度时程曲线所对应的傅里叶幅值谱如图 9 所示。

由图 9 可知, 本文方法计算得到的地表地震动响应的傅里叶频谱值明显高于传统等效线性化方法计算所得, 且中高频成分丰富, 说明传统等效线性化方法对中高频成分存在低估情况, 部分频率区间的差距可高达 4 个数量级。

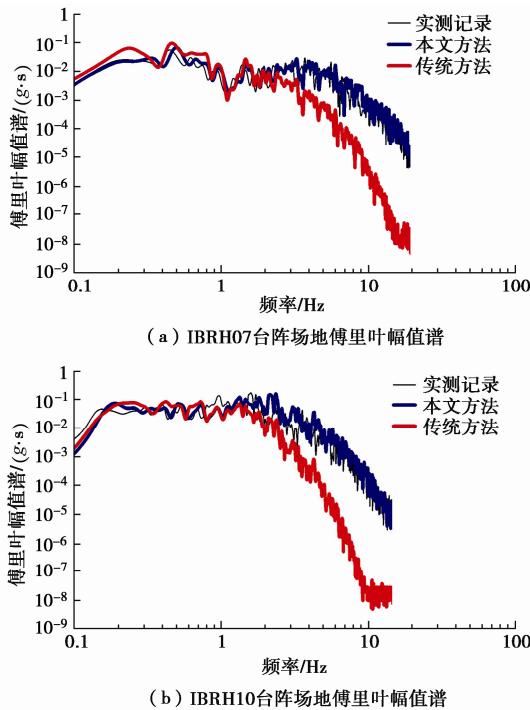


图 9 厚软土场地地表地震动傅里叶幅值谱

Fig. 9 Fourier amplitude spectra of time-history curves of ground motion on thick soft ground

当基岩输入加速度峰值愈大, 场地覆盖层厚度愈厚, 产生差距的频率范围不断扩宽, 相同频率区间的傅里叶幅值差别也愈大, 传统等效线性化方法对中高频成分的抑制作用愈明显。对于厚软土场地采用本文方法计算得到的中高频成分的傅里叶幅值谱明显高于采用传统等效线性化方法计算所得的傅里叶幅值谱。

(2) 地表动力放大系数比较分析

两种方法计算所得不同频率下的放大系数对比如图 10 所示。对于 IBRH07 台阵, 其地表加速度的动力放大系数峰值均在 6.5 左右, 两种方法总体均呈现先增加后减少的趋势。但在 0.9 Hz 之后, 两种方法出现了明显的差别, 本文方法得到的放大系数缓慢下降, 而传统方法随之立即衰减, 差距愈来愈大。从 IBRH10 台阵来看, 传统等效线性化方法在高频段基本丧失应有的放大效应。

综上所述, 传统等效线性化方法的计算结果在很大频率范围内都严重偏小。通过动力放大系数的对比可以看出: 在大于某个频率的范围内, 传统等效线性化方法计算所得的动力放大系数明显低于本文方法的结果, 在高频段丧失了可靠性, 显著低估了厚软土场地的放大效应; 而本文方法有效克服了传统方法的缺陷, 针对传统等效线性化方法在中高频段滤波过于严重的不足, 有了明显的改善。

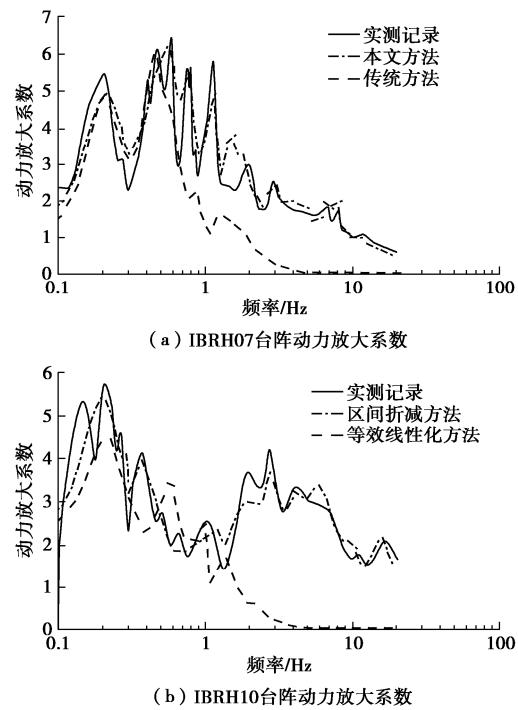


图 10 厚软土场地地表地震动时程曲线的动力放大系数

Fig. 10 Magnification factors of time-history curve of ground motion on thick soft ground

3 结 论

(1) 基于竖向台阵阵地震动记录, 采用本文方法与传统等效线性化方法对场地进行了地震动响应分析。结果表明在硬场地上两种方法计算所得的地表地震动响应基本一致, 输出的地表峰值加速度与实测数据非常接近, 偏差在 $\pm 5\%$ 的较小范围之内; 在一般软土场地上, 传统等效线性化方法对地表峰值加速度的估计偏小且偏差分别在 30% 和 50% 以上, 而本文方法计算所得的地表地震动峰值与实测记录的偏差均在 $\pm 5\%$ 以内。针对厚软土场地, 传统等效线性化方法计算的地震动响应结果明显偏小, 基本已经丧失了可靠性, 本文方法的计算结果与实际记录值非常接近。

(2) 在厚软土场地上, 采用本文方法计算得到的中高频成分的傅里叶幅值谱明显高于采用传统等效线性化方法计算所得的傅里叶幅值谱; 对于傅里叶幅值谱放大系数, 本文方法有效克服了传统方法的缺陷, 明显改善了传统方法在中高频段滤波过于严重的不足。

(3) 本文所提出的考虑应变区间折减的频率相关等效线性化方法, 能够更好地拟合和调整标准化应变谱曲线, 充分考虑了地震动高频成分所对应的较大剪切模量和较小阻尼比的实际情况, 合理地给出了场地地震反应在高频段的优化结果, 可为实际工程的抗震设计提供可靠依据。

参考文献:

- [1] IDRISI I M, SEED H B. Seismic response of horizontal soil layers[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1968, **94**(4): 1003 - 1031.
- [2] FURUMOTO Y, SUGITO M, YASHIMA A. Frequency-dependent equivalent linearized technique for FEM response analysis of ground[C]// 12th World Conference on Earthquake Engineering, 2002, Auckland.
- [3] SUGITO M, GODA H, MASUDA T. Frequency dependent equi-linearized technique for seismic response analysis of multi-layered ground[J]. Journal of Geotechnical Engineering, JSCE, 1994, **493**(27): 49 - 58.
- [4] YOSHIDA N, KOBAYASHI S, SUETOMI I, et al. Equivalent linear method considering frequency dependent characteristics of stiffness and damping[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2002, **22**(3): 205 - 222.
- [5] YOSHIDA N, SUETOMI I. DYNEQ: a computer program for dynamic analysis of level ground based on equivalent linear method[R]. Aichi-kon: Engineering Research Institute, Sato Kogyo Co. Ltd. 1996: 61 - 70.
- [6] KAUSEL E, ASSIMAKI D. Seismic simulation of inelastic soils via frequency-dependent moduli and damping[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2002, **128**(1): 34 - 47.
- [7] 蒋 通, 邢海灵. 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. An equivalent linear method considering frequency-dependent soil properties for seismic response analysis[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(2): 218 - 224. (in Chinese))
- [8] 王 伟, 刘必灯, 周正华, 等. 刚度和阻尼频率相关的等效线性化方法[J]. 岩土力学, 2010, **31**(12): 3928 - 3933. (WANG Wei, LIU Bi-deng, ZHOU Zheng-hua, et al. Equivalent linear method considering frequency dependent stiffness and damping[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(12): 3928 - 3933. (in Chinese))
- [9] 袁晓铭, 李瑞山, 孙 锐. 新一代土层地震反应分析方法 [J]. 土木工程学报, 2016, **49**(10): 95-102, 122. (YUAN Xiao-ming, LI Rui-shan, SUN Rui. A new generation method for earthquake response analysis of soil layers[J]. China Civil Engineering Journal, 2016. **49**(10): 95 - 102, 122. (in Chinese))
- [10] KIM D S, STOKOE K H, HUDSON W R. Deformational Characteristics of Soils at Small to Intermediate Strains from Cyclic Tests[M]. Austin: University of Texas at Austin, 1991.
- [11] OKUR D V, ANSAL A. Stiffness degradation of natural fine grained soils during cyclic loading[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2007, **27**(9): 843 - 854.
- [12] VUCETIC M, DOBRY R. Effect of soil plasticity on cyclic response[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1991, **117**(1): 89 - 107.
- [13] KIM B, HASHASH Y M A. Site response analysis using downhole array recordings during the March 2011 Tohoku-Oki earthquake and the effect of long-duration ground motions[J]. Earthquake Spectra, 2013, **29**(S1): 37 - 54.
- [14] 侯云亮. 西安地区黄土地基剪切波速与工程特性相关性的研究[D]. 西安: 长安大学, 2007. (HOU Yun-liang. Research on Correlation Between Shear Wave Velocity and Engineering Properties of Soil in Xi'an Area Loss Ground[D]. Xi'an: Chang'an University, 2007. (in Chinese))