

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.201912021

场地地震反应的特征线解与等效线性化解 对比研究*

鄢兆伦^{1,2}, 彭小波^{1,3}

(1. 江苏省地震局, 江苏 南京 210014; 2. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081;
3. 防灾科技学院, 河北 三河 065201)

摘要: 研究了响踉(Ⅱ类)、盐城(Ⅳ类)、CHBH06(Ⅲ类)3种不同类别的场地在震动作用下特征线差分计算结果与等效线性化法计算结果的差异性。在响踉场地(Ⅱ类)下,随输入地震动峰值增加,特征线法计算的峰值加速度逐渐增加,反应谱曲线规律性递增;等效法计算峰值加速度先减小后增加,反应谱曲线在较大输入时逐渐递增。在盐城场地(Ⅳ类)下,特征线法计算的峰值加速度均比等效法的计算值稍大,反应谱平台宽度较等效法反应谱平台宽度宽。在KIK-net的CHBH06场地(Ⅲ类)中,将两种方法的计算结果与实际记录对比,结果表明:特征线法时程的傅里叶谱频带宽度与实际记录接近,加速度反应谱与实际记录的加速度反应谱较等效法加速度反应谱接近。通过对比分析,以期促进特征线差分方法的应用。

关键词: 场地反应分析; 特征线-差分; 等效线性化; 时域非线性

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)06-1222-06

Comparison Study on Results of Site Seismic Response between Characteristic-difference Method and Equivalent Linear Method

YAN Zhaolun^{1,2}, PENG Xiaobo^{1,3}

(1. Earthquake Administration of Jiangsu Province, Nanjing 210014, China; 2. Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China; 3. Institute of Disaster Prevention, Sanhe 065201, China)

Abstract: This paper studied the difference between the results computed from the characteristic-difference method and the equivalent linear method for three typical models including Xiangtang, Yancheng and CHBH06 sites. As the input peak acceleration increased in the Xiangtang site (class II), the PGA (peak ground acceleration) calculated by the characteristic-difference method became larger gradually, while the PGA by the equivalent linear method decreased firstly and then increased. The response spectrum curves rose regularly for the characteristic-difference method, but didn't increase till the input excitation was large enough for the equivalent linear method. In the Yancheng site (class IV), the PGA of the characteristic-difference method was larger than that of the equivalent linear method, and the platform of the response spectrum was wider than the one of the equivalent linear method. By comparing the calculated results with the earthquake record in the KIK-net CHBH06 site (class III), the frequency band and response spectrum curve calculated by the characteristic-difference

* 收稿日期:2019-12-20;修回日期:2020-04-26

基金项目:江苏省地震局青年基金项目(19407)、江苏省“333”高层次人才培养工程项目(BRA2017501)资助

作者简介:鄢兆伦(1986—),男,工程师,博士研究生。主要从事岩土地震工程研究。E-mail:yanzhaolun2007@126.com

method were both closer to those of the actual record. The characteristic-difference method could be applied more widely through this analysis.

Keywords: seismic response analysis; characteristic-difference method; equivalent linear method; time-domain nonlinear

引言

场地地震响应是地震工程学重要研究内容。以线性叠加原理为基础的等效线性化方法应用广泛。同时, W. B. Joyner等^[1]、R. Pyke等^[2]、王志良等^[3]、李小军^[4]、袁晓铭等^[5]研究发展了能够实时考虑土体动力非线性特性的时域非线性计算方法。两类方法计算结果的差异主要与场地类别和地震动强度有关^[6]。现在常用的频域方法在坚硬场地中强地震动输入时,得到的PGA和反应谱偏小^[7]。在较弱地震动下,等效线性的SOILQUAKE、SHAKE2000和DEEPSOIL计算精度相当^[8]。时域非线性的DEEPSOIL在软土场地计算结果具有较高的精度^[9]。

特征线差分方法是一种时域非线性计算方法^[10]。该方法将波动方程、本构方程及相容方程转化为特征线上的差分格式直接求解地表反应,具有诸多的优点^[11],但是关于其计算结果与等效线性化方法结果的差异研究较少,结论不甚明了。为此,选取3类典型场地在不同地震动水平下,研究特征线差分方法与等效线性法计算结果的差异性。

1 方法简介

等效线性化方法在频率域内将地震动输入通过以土层物理力学参数为基础的传递函数反复迭代得到地表的震动时程。在迭代中取最大剪应变的0.65倍为经验参数,具体原理众多文献已详细介绍,不再赘述。特征线差分计算原理:水平土层在垂直上传播的地震动作用下,其反应满足以下方程关系:

$$\begin{cases} \frac{\partial \tau}{\partial z} = \rho_k \frac{\partial v}{\partial t} & (\text{平衡方程}) \\ \tau = f_k(\gamma) + \mu_k \frac{\partial \gamma}{\partial t} & (\text{本构关系}) \\ \frac{\partial \gamma}{\partial t} = \frac{\partial v}{\partial z} \left(\equiv \frac{\partial^2 u}{\partial z \partial t} \right) & (\text{相容方程}) \end{cases} \quad (1)$$

式中, τ 、 γ 、 v 、 u 为剪应力、剪应变、速度和位移; ρ_k 、 μ_k 、 f_k 为第 k 个土层密度、黏性系数、循环荷载下的本构关系。

利用特征线法将上式化为深度—时间上的差分形式:

$$\begin{cases} \tau_P - \tau_R - \rho_k C_{PR}(v_P - v_R) = \mu_k v_{zt} \Delta t \\ \tau_P - \tau_S + \rho_k C_{PS}(v_P - v_S) = \mu_k v_{zt} \Delta t \end{cases} \quad (2)$$

式中, C_{PR} 和 C_{PS} 是PR、PS时段内的平均波速。

利用上式结合边界条件和连续性条件可以逐步计算各土层的应力和速度。

2 模型及输入

2.1 计算模型

选取典型的响蹯3号测井(Ⅱ类)^[12]、盐城场地(Ⅳ类)^[13]、KIK-net的CHBH06钻孔场地(Ⅲ类)^[14]为模型,见表1~3。场地土动力参数选取场地当地的实验值或文献推荐值(限于篇幅未列出)。

表1 响蹯3号测井的场地参数
Table 1 Site parameters of the No.3 drill in Xiangtang

土性	深度/m	厚度/m	波速/(m·s ⁻¹)
杂填土	0.8	0.8	271
粉土	3.0	2.2	156
细砂	6.8	3.8	300
粉砂	9.0	2.2	218
粉黏土	13.0	4.0	237
粉土	15.2	2.2	282
细砂	18.2	3.0	288
粉黏土	20.0	1.8	319
粉黏土	25.0	5.0	319
粉黏土	30.5	5.5	319
强风化岩	46.8	16.3	829

2.2 地震输入

选取埃尔森特罗南北向加速度记录,并以其1/6、1/5、1/4、1/3、1/2、3/4、1倍作为响蹯场地输入;以

表2 盐城钻孔场地参数

土性	厚度/m	深度/m	波速/(m·s ⁻¹)
黏土	2.0	2.0	100
淤泥质粉质黏土	2.0	4.0	88
粉质黏土	4.0	8.0	150
粉土	9.2	17.2	160
黏土	9.2	26.4	190
粉土	19.6	46.0	224
粉质黏土	15.5	61.5	278
黏土	11.5	73.0	323
粉土	7.4	80.4	389
黏土	7.6	88.0	455
基岩			500

表3 CHBH06号钻孔场地参数

土性	厚度/m	深度/m	波速/(m·s ⁻¹)
填土	2.0	2.0	180
砂砾1	3.0	5.0	180
砂砾2	13.0	18.0	200
砂砾3	36.0	54.0	360
砂1	38.0	92.0	400
砂2	38.0	130.0	440
砂3	35.0	165.0	460
砂岩	1.2	166.2	970

盐城场地当地人工合成的小震、中震、大震的加速度时程作为盐城场地的输入;以某次地震的孔底记录作为CHBH06钻孔场地的输入,并取相应地表记录作对比。各场地原始地震动输入如图1~3所示。

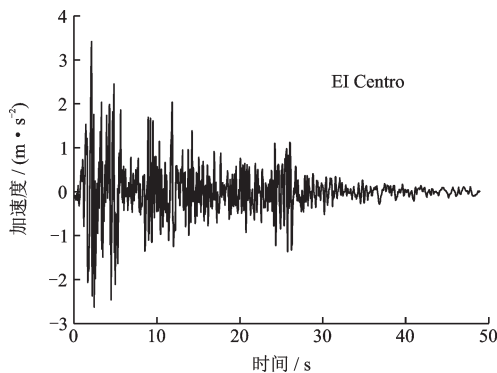


图1 响蹯场地输入时程

Fig.1 Input acceleration for Xiangtang site

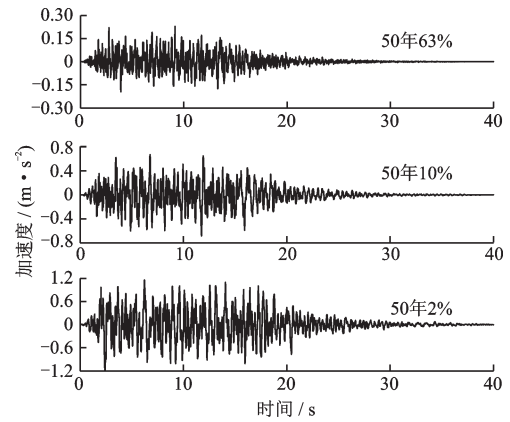


图2 盐城场地输入时程

Fig.2 Input acceleration for Yancheng site

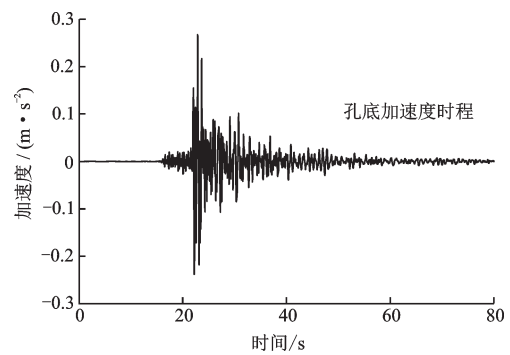


图3 CHBH06钻孔输入时程

Fig.3 Input acceleration for CHBH06 site

3 对比与分析

3.1 响蹯场地

响蹯场地模型在1/3倍输入的结果如图4所示。

从地表时程(图4(a)、(b))可以看出:特征线法结果高频成分明显多于等效法结果(其他输入的结果亦是,限于篇幅未列出)。

在各个地震动输入水平下,特征线法计算的峰值均大于等效法计算峰值。在不同的输入水平下,峰值的方法倍数变化规律不明显,在输入峰值加速度大于1.7 m/s²时两种方法计算的峰值加速度差异逐渐减小。在输入峰值加速度为0.85 m/s²时,等效法峰值放大倍数低于1,这种可能与该输入地震动的特性相关。

随输入的地震动逐渐增加,特征线法计算的地表反应谱(图5(a),图中标注CHAR表示特征线法结果,下同)呈现出规律性增加。在较小的地震动(1/4倍及以下)输入时,等效法计算的反应谱(图5(b),图中标注EQUI,下同)的变化不规律。在较大

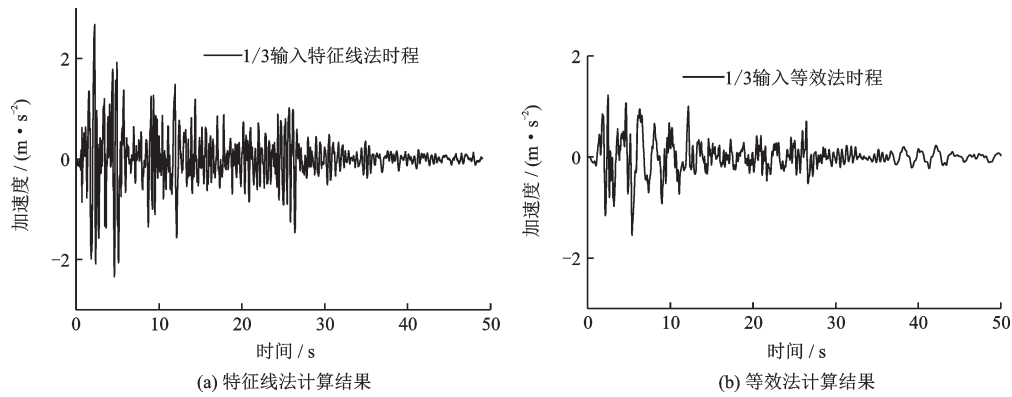


图4 响蹼场地计算结果
Fig.4 The results of Xiangtang

表4 响蹼场地地表峰值加速度
Table 4 Peak ground acceleration of Xiangtang site

输入峰值/ ($m \cdot s^{-2}$)	地表加速度峰值/ ($m \cdot s^{-2}$)		峰值放大倍数	
	等效法	特征线法	等效法	特征线法
0.569 5	0.969 9	1.339 8	1.703 1	2.352 6
0.683 4	0.905 8	1.633 8	1.325 4	2.390 6
0.854 3	0.812 6	2.051 2	0.951 2	2.401 1
1.139 0	1.550 2	2.670 8	1.361 0	2.344 9
1.708 5	3.551 7	3.882 1	2.078 8	2.272 2
2.562 8	5.294 1	5.613 3	2.065 7	2.190 3
3.417 0	7.319 7	7.567 8	2.142 1	2.214 8

地震动输入时,两种方法计算反应谱的最大值比较接近。在周期2~3 s时,等效法计算的地表加速度反应谱明显的增加,说明等效法会对某些频率成分进行放缩。

3.2 盐城场地

在相同的地震动输入水平下,图6显示特征线法的地表峰值加速度与等效法地表峰值加速度差异不显著。图6(a)、(b)对比发现:特征线法计算的3条地表时程的频率成分都较等效法计算的地表时程的频率成分复杂,高频成分明显更多。

图7(a)、(b)对比可知:特征线法计算地表反应谱的最大值与等效法计算地表反应谱的最大值差异较小,二者的平台高度差亦较小。特征线法的反应谱平台宽度明显较等效法反应谱平台宽。二者的特征周期差别不大,主要差别在第一拐点周期。在短周期处(低于0.1 s),特征线法计算的反应谱较等效法计算的反应谱有明显的增加(如图7(a)),这与两种方法的计算原理相关。

3.3 CHBH06钻孔场地

计算结果如图8所示:等效法峰值加速度与特征线法峰值加速度均小于实际记录的峰值加速度。特征线法计算峰值略小于等效法计算峰值,二者的差异相对于地表真实记录为1%,可以忽略。

加速度傅里叶谱(图9)可以看出:地表实际记录的加速度傅里叶谱值分布频带较宽约0~9 Hz,主要集中于6 Hz以内,而频带内的傅里叶幅值较小接近0.006 m/s^2 。等效法加速度傅里叶谱值分布频带范围窄小,最大频率只达到7 Hz左右,主要部门集中于4 Hz内,同时幅值较大,达到0.025 m/s^2 ,这与

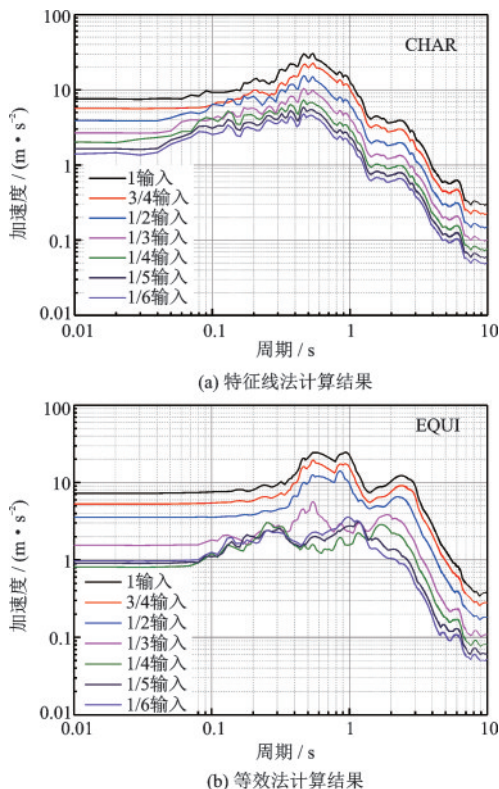


图5 响蹼场地地表加速度反应谱
Fig.5 Surface response spectrum of Xiangtang

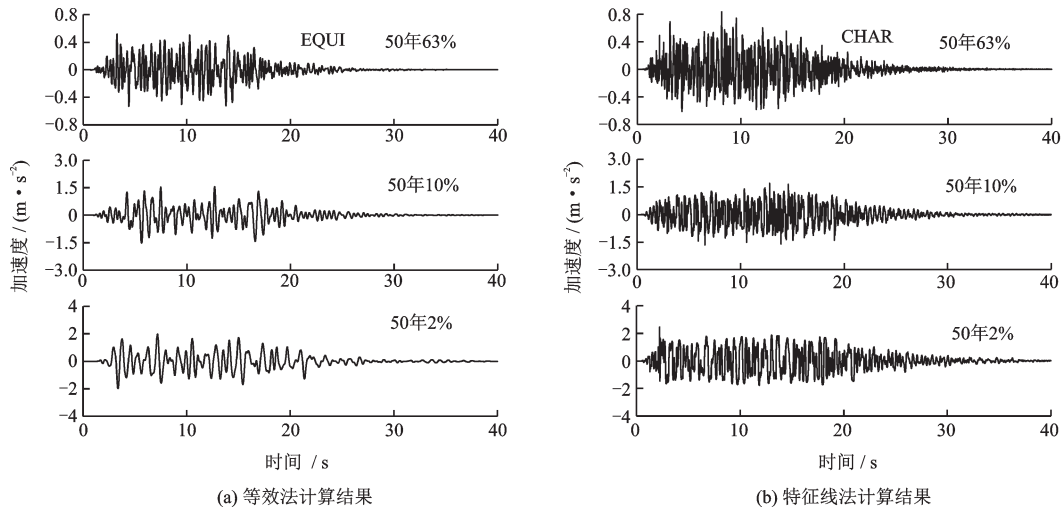


图6 盐城地表加速度时程

Fig.6 Surface acceleration of Yancheng

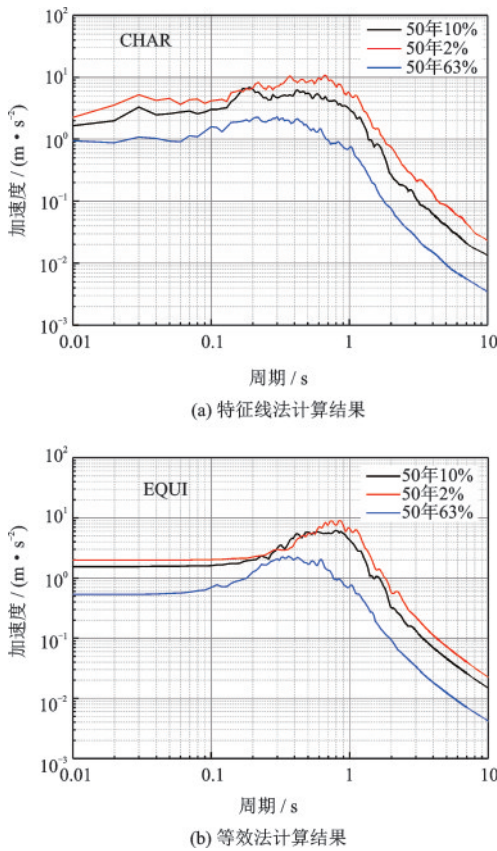


图7 盐城场地等效法地表加速度反应谱

Fig.7 Surface response spectrum of Yancheng

实际记录的傅里叶谱差别较大。特征线法计算的傅里叶谱主要频带与实际记录频带相接近,高频成分(7 Hz以上)较多,傅里叶幅值处于实际记录幅值与等效法傅里叶幅值之间,而更接近实际记录的幅值。

加速度反应谱(图10)看出:两种方法得到的加

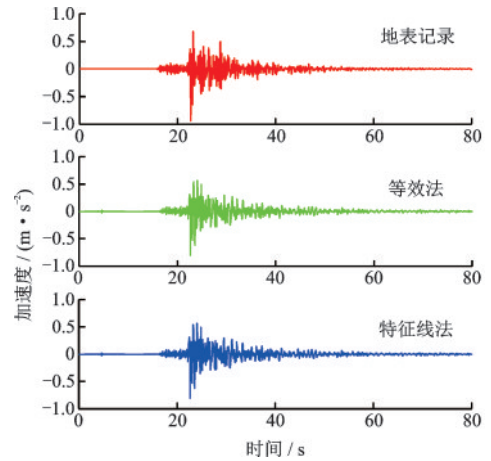


图8 两种加速度结果与实际记录

Fig.8 Results of the two methods and the record

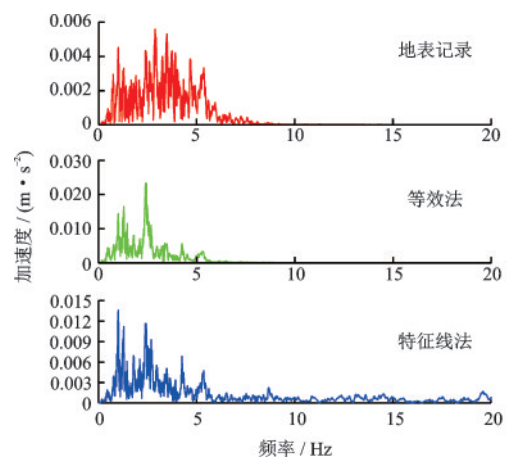


图9 傅里叶谱比较

Fig.9 Comparison of Fourier spectrum

速度谱与实际加速度谱较为一致。周期在0.04 s之后至第一拐点周期(约0.16 s)特征线法的加速度谱

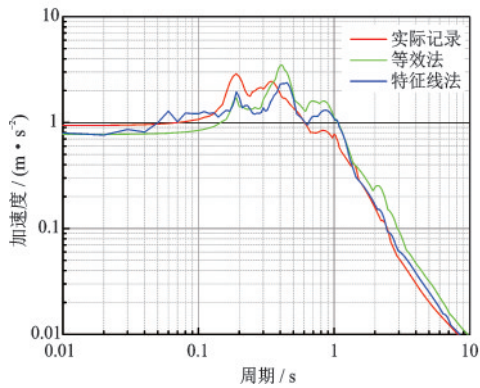


图10 反应谱比较

Fig.10 Comparison of response spectrum

表5 两种计算峰值加速度与记录值对比

Table 5 The comparison of peak ground acceleration

输入加速度 峰值/($m \cdot s^{-2}$)	地表加速度峰值/ ($m \cdot s^{-2}$)			峰值放大倍数/ 记录值差异	
	记录值	等效法	特征 线法	等效法	特征 线法
0.267 6	1.091 5	0.816 0	0.805 2	3.05/ 25.2%	3.01/ 26.2%

与实际谱值较接近,稍有波动。等效法加速度谱与实际加速度谱几乎同步上升,这应该与等效法的傅里叶变换特性相关。两种计算方法均呈现出延长特征周期的作用,并且二者特征周期接近(约0.5s);特征周期之后两种方法的加速度反应谱与实际记录加速度反应谱的趋势一致,而特征线法的加速度反应谱更加接近实际记录的反应谱。

4 结 论

本文分别利用等效线性化方法和特征线差分方法对三类典型场地进行了土层反应计算,对比分析两种计算方法的结果可以得到:

(1)特征线方法计算结果中高频成分多,等效法得到的地表时程高频成分较少。

(2)在盐城场地和CHBH06场地中两种方法计算的地表峰值加速度差异不显著;响踉场地在较小地震动输入时,特征线法峰值大于等效法峰值。

(3)两种方法计算的地表加速度反应谱的平台高度较一致。在反应谱的短周期处,特征线法反应谱值大于等效法的值。

两种方法计算结果差异的主要原因是:特征线差分法在时域内逐步迭代,频率成分不会丢失,同

时在土层间和土层内部节点之间存在着多次内插计算,增加高频分量;等效线性化方法是频域内通过土体力学参数的传递函数整体计算,土层滤波作用减少高频成分。

本文选取了3种不同类型的典型场地,在不同地震动强度下研究了两种方法的结果差异,得出了相关的结论。由于选取的场地的样本少得出结论是否具有普适性,需要增加样本量采用统计理论继续深入研究。

参考文献:

- [1] Joyner W B, Chen A T P. Calculation of nonlinear ground response in earthquake [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1975, 65(5): 1315-1321.
- [2] Pyke R. Nonlinear soil models for irregular cyclic loadings [J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, American Society of Civil Engineering, 1979, 105(6): 715-726.
- [3] 王志良,韩清宇.粘弹塑性土层地震反应的波动分析法[J].地震工程与工程振动,1981,1(1):116-137.
Wang Zh L, Han Q Y. Analysis of wave propagation for the site seismic response, using the visco-elastoplastic model [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1981, 1(1): 116-137. (in Chinese)
- [4] 李小军.非线性土层地震反应分析的一种方法[J].华南地震,1992,12(4):1-8.
Li X J. A method to analyzing seismic response of nonlinear soil layers [J]. South China Journal of Seismology, 1992, 12(4): 1-8. (in Chinese)
- [5] 袁晓铭,李瑞山,孙锐.新一代土层地震反应分析方法研究[J].土木工程学报,2016, 49(10):95-102.
Yuan X M, Li R Sh, Sun R. A new generation method for earthquake response analysis of soil layers [J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(10): 95-102. (in Chinese)
- [6] 杨洋,孙锐,杨洪搏,等.国际上两种典型土层地震反应分析程序对比研究[J].世界地震工程,2017, 33(3): 17-23.
Yang Y, Sun R, Yang H B, et al. Contrasting study between two international typical soil layers response analysis programs [J]. World Earthquake Engineering, 2017, 33(3): 17-23. (in Chinese)
- [7] 王鸾,袁近远,汪云龙,等.硬场地实测记录下几种土层地震反应分析程序可靠性对比[J].世界地震工程,2018,34(3):161-168.

(本文责编:池营营)

(下转第1247页)