

文章编号: 1006-4710(2013)04-0421-07

等效线性和非线性方法土层地震反应分析对比

王振华^{1,2}, 马宗源¹, 党发宁¹

(1. 西安理工大学 岩土工程研究所, 陕西 西安 710048; 2. 西北电力设计院, 陕西 西安 710032)

摘要: 根据软土、砂土及黄土的动剪切模量及阻尼比与动剪应变幅值衰减关系, 分别输入人工设定的正弦及天然地震加速度时程, 使用等效线性方法和非线性方法对水平均质土层的地震反应进行了计算分析。将两种方法计算结果进行了对比, 探讨了考虑土体动应力应变关系的非线性方法与等效线性方法计算结果的差别。非线性方法所得土层的动力反应过程滞后于等效线性方法的计算结果。动荷载的频率及强度较低或较高时两种方法计算结果的差异较大, 土体的阻尼会放大这种差异。

关键词: 土层地震反应; 等效线性方法; 非线性方法; 频率; 伪加速度反应谱

中图分类号: P315.9 **文献标志码:** A

Seismic Response Analysis of Soil Layer Using Equivalent Linear or Nonlinear Method

WANG Zhenhua^{1,2}, MA Zongyuan¹, DANG Fanning¹

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. Northwest Electric Power Design Institute, Xi'an 710032, China)

Abstract: Based on the attenuation relationships among soft soil, sand soil and loess dynamic shearing module and damping ratio as well as dynamic shearing strain magnitude, the artificial set sine and natural seismic acceleration time interval are input into the analysis, and then, the equivalent linear method and non-linear method are used to carry out computation analysis of the seismic response of horizontal and homogeneous soil layer. The calculation results by two kinds of methods are compared. The analytical results indicate that in considering soil body dynamic stress and strain relationship, the soil layer dynamic reflection process by non-linear method delays that by the equivalent linear method, and that in case of dynamic loading frequency and strength being lower or higher, the results calculated by the two kinds of methods are very different, and the soil body damping can enlarge this kind of difference.

Key words: seismic response analysis of soil layer; equivalent linear method; nonlinear method; frequency; pseudo-acceleration response spectrum

动力过程中土体的应力应变关系表现出强烈的非线性, 表现为土体的模量随动应变幅值的增加而衰减, 并且具有一定的滞回特性^[1]。土层地震反应分析主要有解析方法、等效线性方法及非线性方法三种, 其中等效线性方法和非线性方法属于数值计算方法。由于计算原理简明且计算工作量小, 等效线性方法成为现阶段土层地震反应分析较为成熟且应用广泛的方法^[2-5]。等效线性方法将动力过

程中土体的非线性行为线性化, 用等效的剪切模量或阻尼比代替土体不同动应变幅值下呈非线性规律变化的剪切模量和阻尼比^[2-3]。另一方面, 等效线性方法对动力非线性问题的线性处理不能反映土体滞回圈形状的应力应变关系。此外, 等效线性方法没能考虑高频、小幅震动成分的影响, 当土层应变较大或地震动较大时, 计算出的地面反应比实测结果偏大^[3-6]。非线性方法是一种基于土体的动力学非

收稿日期: 2013-09-20

基金项目: 中央财政支持地方高校发展专项资金特色重点学科资助项目(106-00X101, 106-5X1205)。

作者简介: 王振华, 男, 教授级高工, 博士生, 研究方向为地震工程及岩土力学。E-mail: 82593397@163.com。

党发宁, 男, 教授, 博士, 博导, 研究方向为岩土力学。E-mail: dangfn@mail.xaut.edu.cn。

线性本构模型的土层地震反应分析方法^[7]。相对于等效线性方法,非线性方法计算原理更为复杂,尚未得到广泛应用。非线性方法能够反映土体非线性的动应力应变关系,并且可以考虑土体的残余应变进行弹塑性分析,此外该方法还可以考虑大变形、固结及三维等因素的影响。非线性方法的计算精度主要与土体的动力本构模型的选取及数值计算方案的精度有关。本文分别使用等效线性方法和非线性方法对不同土性的均质土层地震反应进行计算分析,地震荷载分别加载人工设计的正弦加速度时程及天然地震加速度时程。对比计算结果分析等效线性和非线性方法的差别。

1 计算模型

对于等效线性方法,本文采用 SHAKE-91 软件进行计算分析。SHAKE-91 是一款基于等效线性方法的一维土层地震反应计算软件,使用快速傅里叶变换方法(Fast Fourier Transform)将动力荷载展开为若干谐振分量项,基于波动方程的连续频域积分对问题进行求解^[7-8]。该方案求解的是一组线性方程组,根据给定的模量及阻尼比与动应变幅值关系使用迭代方法确定等效的剪切模量和阻尼比。所以该计算方案主要包括土体动力非线性的等效线性处理和线性波动方程的求解两部分内容。非线性方法采用计算软件 FLAC 进行计算分析。FLAC 是一款使用 C++ 语言开发的基于显式有限差分算法的计算程序。FLAC 的计算理论内容可参考文献[9]、[10]和[11]。

选取 Hardin-Drnevich 模型预测土的动模量和阻尼比随动应变的衰减关系。大量土的动三轴试验数据说明 Hardin-Drnevich 模型更适于预测饱和黄土的动应力应变关系^[12]。根据 Hardin-Drnevich 模型,土的动剪切模量和阻尼比可写为动剪应变的函数^[13-14]

$$G/G_{\max} = 1/(1 + \gamma/\gamma_{\text{ref}}) \quad (1)$$

$$D/D_{\max} = (\gamma/\gamma_{\text{ref}})/(1 + \gamma/\gamma_{\text{ref}}) \quad (2)$$

式中, G_{\max} 为土体的初始剪切模量, D_{\max} 为动剪切模量 G 接近零时的最大阻尼比, γ 为土体的动剪应变幅值, γ_{ref} 为参考剪应变(等于极限动剪应力 τ_{\max} 与初始剪切模量 G_{\max} 的比值,即 $G/G_{\max} = 0.5$ 时动剪切模量对应的动剪应变幅值 γ),由式(2)知 γ_{ref} 越大土体的阻尼就越大。

2 土层地震反应分析

本文计算分析的直角坐标设置为土层水平向为

X 轴,竖向为 Y 轴。等效线性及非线性方法计算所用假定为:土层为水平向均质各向同性材料;忽略土体的塑性行为,即认为土体是线弹性材料;动力荷载只输入水平分量的加速度波,即只考虑剪切波的影响。

2.1 频率和峰值加速度的影响

考虑频率和峰值加速度的影响,在水平方向上加载正弦波加速度时程,震动持续时间为 20 s,分别采用等效线性及非线性方法计算不同土质地层的地震反应。土层为均质且各向同性,地层厚度为 50 m,土层密度取值为 1800 kg/m^3 。土体的初始剪切模量 G_{\max} 取值为 50 MPa,动力加载过程中剪切模量的变化分别按照软土、砂土以及黄土的动剪切模量与动剪应变幅值衰减曲线进行计算。其中,砂土的剪切模量或阻尼比与剪应变幅值衰减关系数据取自文献[15],软土和黄土的剪切模量或阻尼比与剪应变幅值衰减关系分别采用天津杨柳青和陕北彬长热电厂地震安全性评价报告动三轴试验数据。土的动剪切模量和阻尼比由动三轴试验测定,试验在 W3Z-20 电液伺服动三轴试验机上进行。圆柱形试验土样直径为 39.1 mm,高为 80.0 mm,使用抽气饱和法进行饱和。图 1 为动三轴试验得到的消除残余应变后的陕北黄土动剪应力-动剪应变关系曲线。由动三轴试验得到的土动剪应力-动剪应变关系曲线可以进一步得到土的骨干加载曲线,进而确定土的动剪切模量。天津软土、砂土以及陕北黄土的动剪切模量与动剪应变幅值衰减曲线如图 2 所示。非线性方法模型动剪切模量 G 分别由图 2 中三种土的剪切模量变衰减动三轴试验数据拟合确定,天津软土、砂土及陕北黄土的 Hardin-Drnevich 模型参数 γ_{ref} 拟合结果分别为 0.2、0.06 和 0.021。

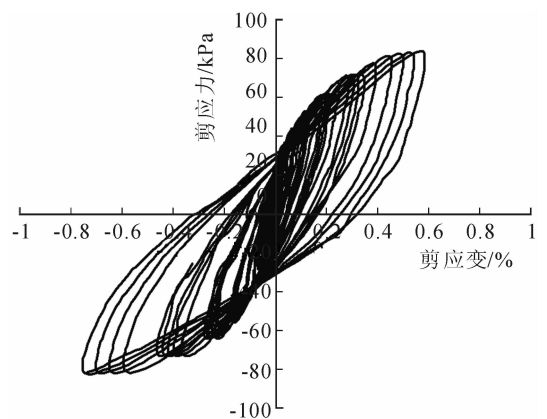


图 1 土的动剪应力及动剪应变的关系曲线
Fig. 1 Relationship between dynamic shear stress and dynamic shear strain

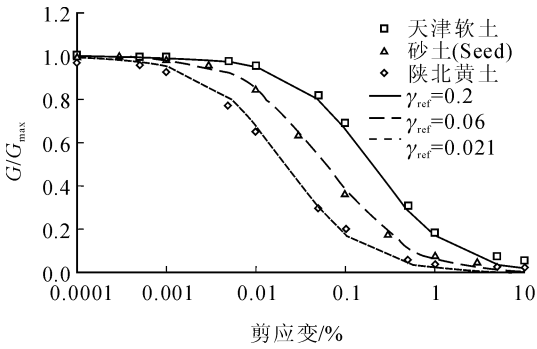


图2 土的动剪切模量与动剪应变幅值衰减曲线
Fig.2 Modulus reduction values for soils

计算中加载的水平向正弦加速度波为:

$$\ddot{u}(t) = \sqrt{0.375e^{-2.2t}t^{8.0}} \sin(2\pi\omega t) \quad (3)$$

其中, ω 为正弦波频率, t 为波动时间。正弦波峰值加速度为 $0.2g$ (g 为重力加速度, 取值 9.81 m/s^2)。

非线性方法计算分析中, 将土层在竖向向上划分为 16 个正四边形有限差分单元, 在底部单元的节点上加载加速度时程。

由于 SHAKE-91 为一维地震反应分析(假定剪切波只沿地层竖向传播), 故在 FLAC 中约束所有单元竖向位移以模拟一维情况, 计算中记录顶部和底

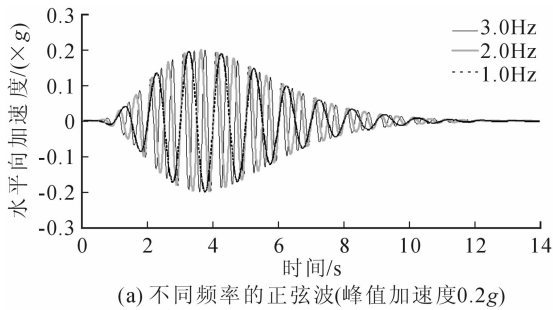
部单元应力应变数据及节点水平分量加速度时程。

将以上正弦波按照一定倍数等比例缩放后, 再进行加载不同峰值加速度的计算分析。

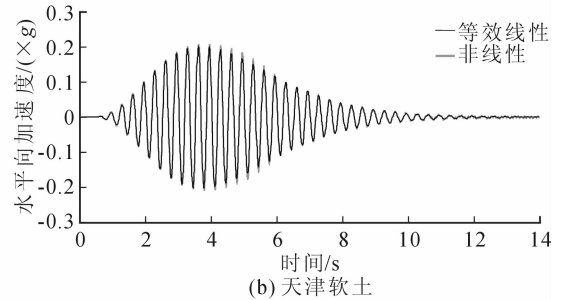
图 3 为峰值加速度 $0.2g$ 情况下不同频率的正弦波加速度时程及两种方法计算出的地表水平向加速度。可以看出, 天津软土地层的两种方法计算结果相似, 而非线性方法计算出的砂土和黄土地层地表加速度峰值要滞后于等效线性方法计算结果, 说明土体的阻尼越大动力滞后效应越明显。

图 4 为加载峰值加速度 $0.2g$ 、频率 3 Hz 的正弦波后由两种方法计算出的土体动应力应变曲线。可以看出, 非线性方法可以反映土体在震动过程中的滞回运动, 应力应变曲线呈现滞回圈形状发展, 而等效线性方法计算出的土体应力应变曲线则为线性变化, 不能够反映土体的动力滞回特性。

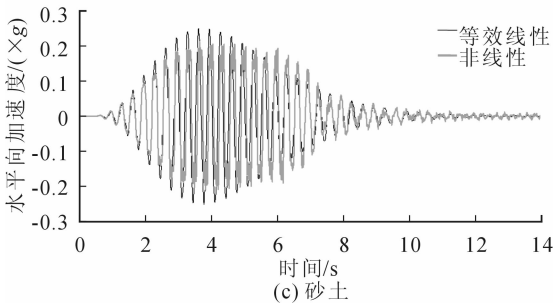
图 5 为采用双对数坐标显示的两种方法在不同频率及峰值加速度情况下计算出的地表峰值加速度。可以看出, 等效线性方法计算出的地表峰值反应加速度随着正弦波峰值加速度的增大明显大于非线性方法的计算结果。土体阻尼越大两种方法计算结果的差异越大, 震动频率较低 (1 Hz) 或较高 (7 Hz) 时两种方法的地表峰值反应差别较大。



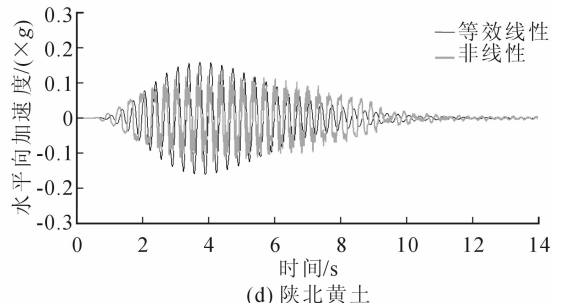
(a) 不同频率的正弦波(峰值加速度 $0.2g$)



(b) 天津软土



(c) 砂土



(d) 陕北黄土

图3 加载频率 3 Hz 、峰值加速度 $0.2g$ 正弦波时程得到的地表水平向加速度

Fig.3 Sine wave for input motion and acceleration time history at ground surface

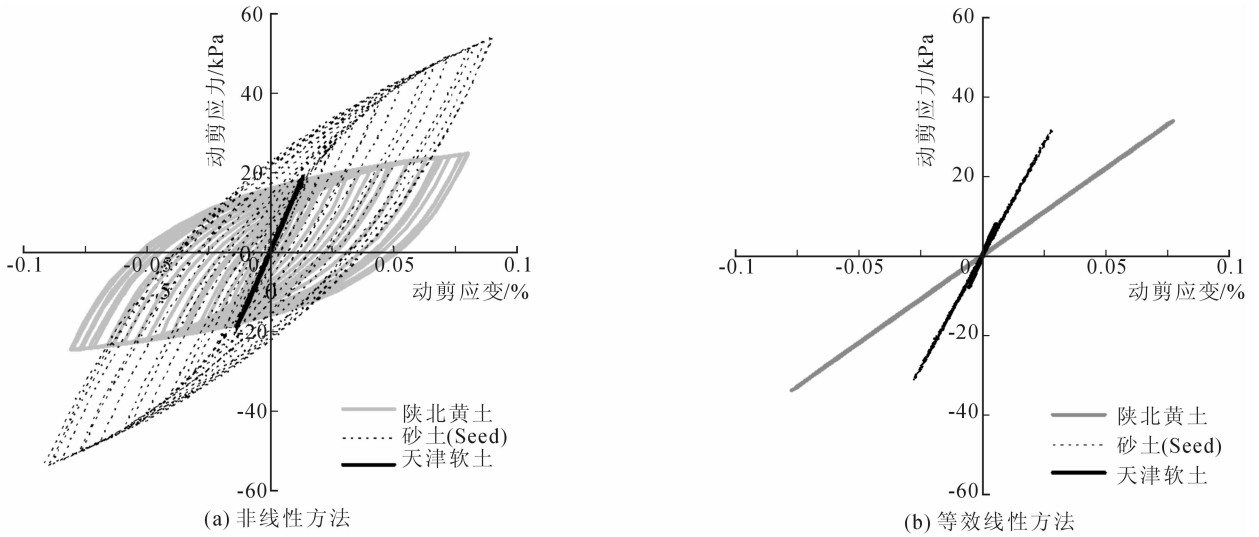


图4 土体动应力应变曲线(峰值0.2g、频率3 Hz)
 Fig. 4 Dynamic stress-strain curves for soil (peak acceleration 0.2g, frequency 3 Hz)

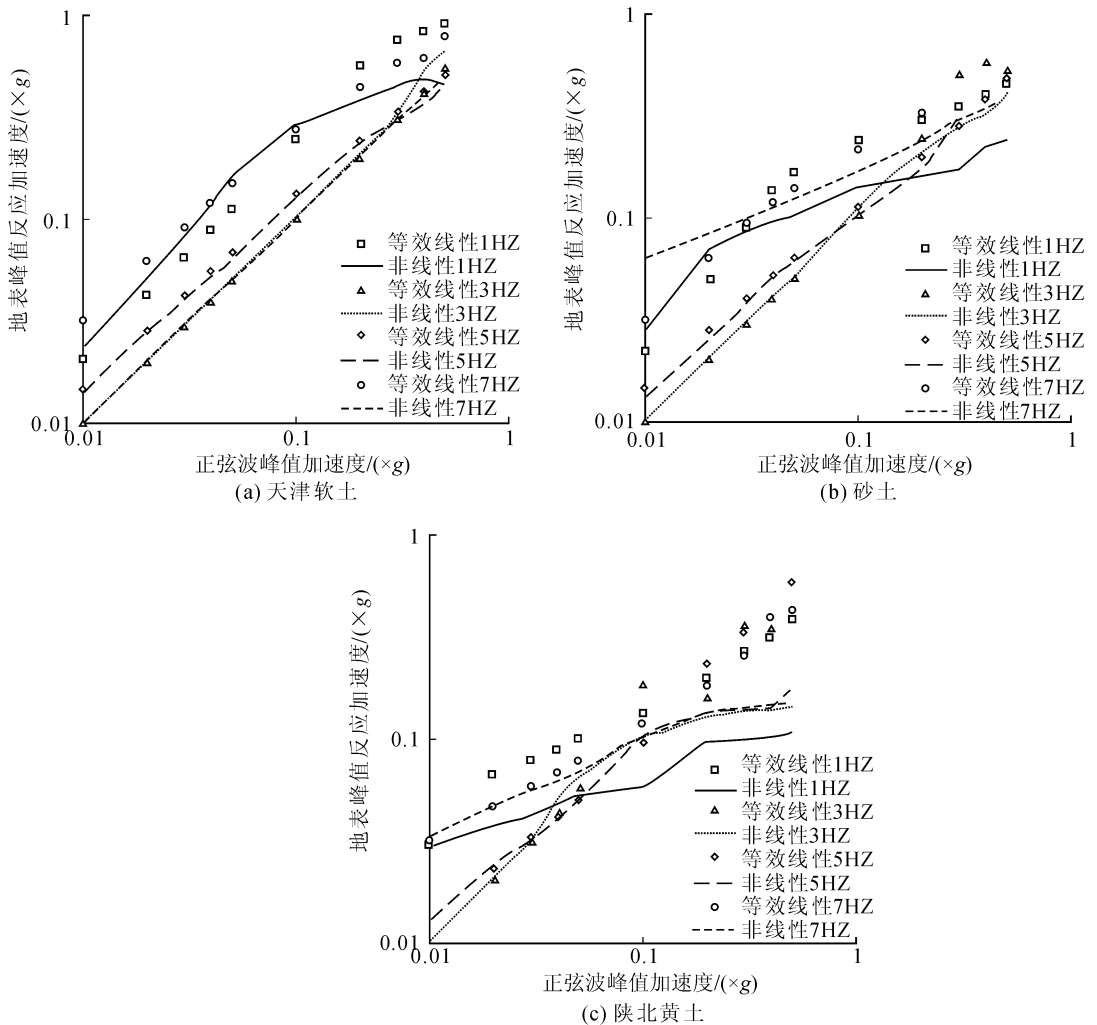


图5 两种方法计算出的地表峰值反应加速度
 Fig. 5 Peak response accelerations at ground surface yield by equivalent linear or nonlinear method

2.2 地震荷载

此工况土层厚度及计算所用参数与前部分计算工况相同。地震荷载选择1940年5月18日美国加利福尼亚 El Centro 地震加速度时程(南北分量),峰值加速度为 $0.3417g$,震动持续时间为 30 s ,加速度时程如图6(a)所示^[16-17]。计算中将 El Centro 地震加速度时程等比例缩放进行不同峰值加速度的分析。图6(b)、(c)和(d)分别为加载峰值加速度 $0.1g$ 的地震波采用等效线性和完全非线性两种方法

计算出的软土、砂土和黄土地表的水平向反应加速度时程。由软土、砂土和黄土地层反应加速度时程可知,非线性方法计算出的地震反应加速度滞后于等效线性方法计算结果。伪加速度谱反应是由土层地震反应的绝对最大值近似得出,实际中常使用这个量来度量地震时地面运动的程度^[18]。按照5%的阻尼比计算地层的伪加速度反应谱。图7为使用等效线性和非线性方法得出的软土、砂土和黄土地层的伪加速度反应谱,数据均使用双对数坐标显示。

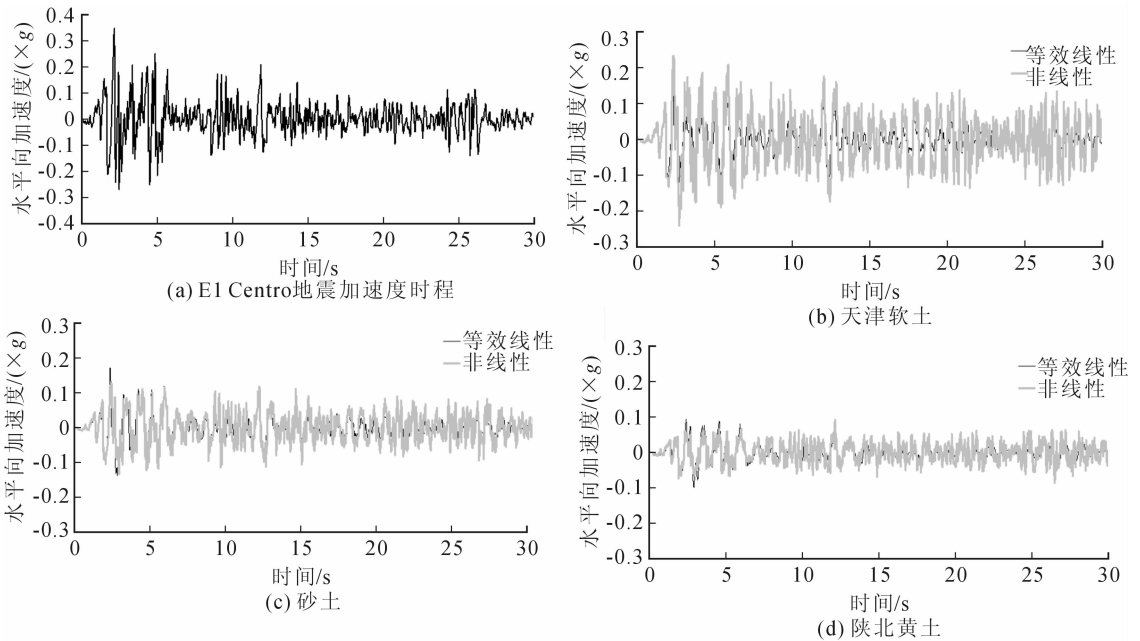


图6 El Centro 地震加速度时程及地表水平向反应加速度(峰值加速度 $0.1g$)

Fig.6 El Centro earthquake record and response acceleration at ground surface(peak acceleration $0.1g$)

由图7中各种地层的伪加速度反应谱可以看出,非线性方法在短周期范围($0.01 \sim 0.1\text{ s}$)内未出现伪加速度反应,当地震动输入较小时(峰值加速度低于 $0.1g$)非线性方法计算出的地层伪加速度谱反应要大于等效线性方法,地震动输入较大时(峰值加速度大于 $0.1g$)非线性方法计算结果低于等效线性方法。

3 结论

1) 通过人工设定不同频率及峰值加速度正弦波计算分析发现:峰值加速度越大等效线性方法计算出的地层反应越高于非线性方法,正弦波的频率较低或较高时两种方法的地表峰值反应加速度差别较大;土体的阻尼越大两种方法的差异越大。

2) 输入天然地震荷载情况,非线性方法在短周期范围未出现土层的伪加速度反应。当地震动

输入较小时非线性方法所得地层伪加速度谱反应要高于等效线性方法结果,地震动输入较大时等效线性方法的计算结果要高于非线性方法。人工正弦波及天然地震荷载计算结果说明,非线性方法得到的地层动力反应均滞后于等效线性方法,说明土体的动力非线性行为将会对土体动力反应分析结果产生很大的影响。

3) 等效线性方法不能合理反映土层实际的地震反应过程及规律,导致计算分析结果与实际不相符。非线性方法不仅反映了土体非线性的动应力应变关系,同时还可以综合考虑土体动力过程中的塑性行为、大变形及固结等因素影响,从而可以进一步模拟边坡或地基等的动力失稳及破坏问题,以及考虑孔隙水压力的影响分析岩土材料的液化问题。

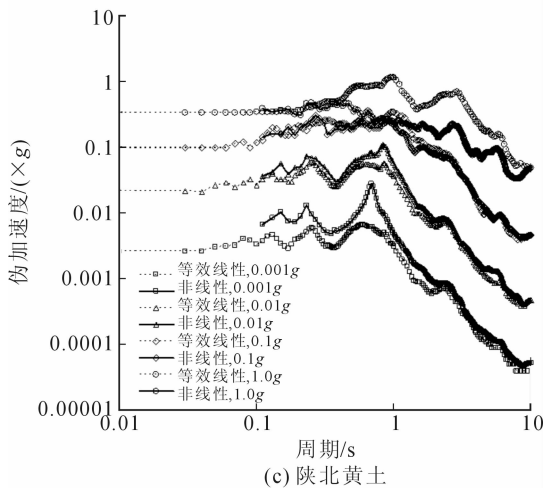
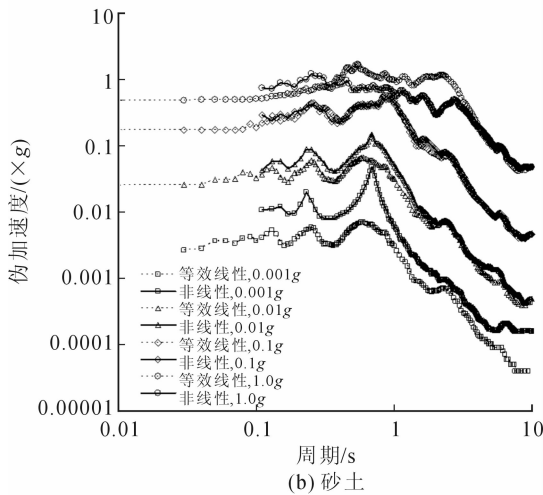
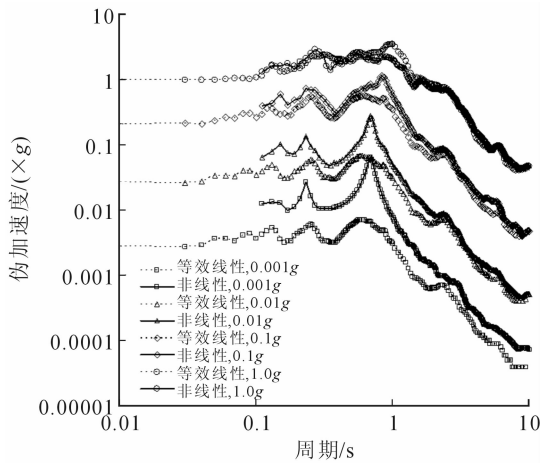


图7 两种方法计算出的地层伪加速度反应谱

Fig.7 Spectral ordinates for computed motion yield by equivalent linear or nonlinear method

参考文献:

- [1] 谢定义. 土动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011.
- [2] 廖振鹏, 李小军. 地表土层地震反应的等效线性化解

法, 地震小区划(理论与实践)[M]. 北京: 地震出版社, 1989.

- [3] 齐文浩, 薄景山. 土地震反应等效线性化方法综述[J]. 世界地震工程, 2007, 23(4): 221-226.
- Qi Wenhao, Bo Jingshan. Summarization on equivalent linear method of seismic responses for soil layers[J]. World Earthquake Engineering, 2007, 23(4): 221-226.
- [4] 薄景山, 李秀领, 刘德东, 等. 土层结构对反应谱特征周期的影响[J]. 地震工程与工程振动, 2003, 23(5): 42-45.
- Bo Jingshan, Li Xiuling, Liu Dedong, et al. Effects of soil layer construction on characteristic periods of response spectra[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2003, 23(5): 42-45.
- [5] 兰景岩, 吕悦军, 刘红帅. 地震动强度及频谱特征对场地地震反应分析结果的影响[J]. 震灾防御技术, 2012, 7(1): 37-45.
- Lan Jingyan, Lü Yuejun, Liu Hongshuai. Influence of intensity and frequency of ground motion on site earthquake response[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2012, 7(1): 37-45.
- [6] 戚承志, 钱七虎. 核电站抗震研究综述[J]. 地震工程与工程振动, 2000, 20(3): 76-86.
- Qi Chengzhi, Qian Qihu. Overview of seismic research for nuclear power plant[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2000, 20(3): 76-86.
- [7] Schnabel P B, Lysmer J, Seed H B. Shake: A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites [R]. Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California, 1972.
- [8] Cooley J W, Tukey J W. An algorithm for the machine calculations of complex fourier series[J]. Mathematics of Computation, 1965, 19(90): 297-301.
- [9] 马宗源, 乔蓓, 王振华, 等. 等效线性及非线性方法的土坝地震反应分析[C]// 第四届全国水工抗震防灾学术交流会, 西安, 2013: 119-122.
- Ma Zongyuan, Qiao Bei, Wang Zhenhua, et al. Seismic response analysis of soil dam using equivalent linear or nonlinear method[C]// The 4th National Symposium on hydraulic earthquake disaster prevention, Xi'an, China, 2013: 119-122.
- [10] 马宗源, 廖红建, 谢永利. 基于统一弹塑性有限差分法的真三轴数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(9): 1368-1373.
- Ma Zongyuan, Liao Hongjian, Xie Yongli. True triaxial simulation based on unified elastoplastic finite difference method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(9): 1368-1373.

- [11] 马宗源, 廖红建. 双剪统一弹塑性有限差分方法研究[J]. 计算力学学报, 2012, 29(1): 43-48.
Ma Zongyuan, Liao Hongjian. Study of twin shear unified elastoplastic finite difference method[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2012, 29(1): 43-48.
- [12] 廖红建, 李涛, 马宗源, 等. 黄土骨干曲线模型比较分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(S2): 17-21.
Liao Hongjian, Li Tao, Ma Zongyuan, et al. Comparative analysis of backbone curve models for loess soils [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(S2): 17-21.
- [13] Hardin B O, Drnevich V P. Shear modulus and damping in soils: measurement and parameter effects[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Engineering Division, ASCE, 1972, 98(6): 603-624.
- [14] Hardin B O, Drnevich V P. Shear modulus and damping in soils: design equations and curves[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Engineering Division, ASCE, 1972, 98(7): 667-692.
- [15] Seed H B, Wong R T, Idriss I M, et al. Moduli and damping factors for dynamic analyses of cohesionless soils[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1986, 112(11): 1016-1032.
- [16] 杨德健, 刘恭忍. 轴向地震运动对堆石坝的影响[J]. 西安理工大学学报, 1993, 9(3): 210-215.
Yang Dejian Liu Gongren. Effects of longitudinal earthquakes on rock fill dams[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 1993, 9(3): 210-215.
- [17] 解振涛, 张俊发, 田勇, 等. 地面地震动时程向地层深处反演研究[J]. 西安理工大学学报, 2007, 23(4): 418-421.
Xie Zhentao, Zhang Junfa, Tian Yong, et al. Research on inversion of earthquake acceleration time-period from ground to interior stratum[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2007, 23(4): 418-421.
- [18] Clough R W, Penzien J. Dynamics of structures [M]. New York: McGraw-Hill, 1975.

(责任编辑 王卫勋)