

文章编号: 1000-7598 (2011) 04-1089-06

典型场地在不同地震动输入水平下的反应

王 伟¹, 周正华¹, 王玉石¹, 赵纪生¹, 李小军²

(1. 中国地震局工程力学研究所, 哈尔滨 150080; 2. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081)

摘 要: 强震动作用下场地土的非线性对地震动反应特征影响明显。场地土的非线性效应首先是由岩土工程学家在室内试验中发现的, 继而地震学家在强震动记录分析中亦发现了场地土的非线性效应。一般来讲, 随着地震动输入强度增加, 场地土非线性效应越明显。但对于不同场地类型, 相同地震动水平作用下, 场地土非线性效应是不同的。针对这一问题, 选择了几个典型场地, 采用等效线性化方法分析了不同地震动强度作用下各类场地土的非线性效应, 并提出了一种以场地等效剪切波速随地震动输入水平变化为依据的场地土非线性效应确定方法, 且定义当等效剪切波速变化率不足 20% 时, 场地地震反应分析可不计入场地土的非线性效应。

关 键 词: 场地类型; 非线性效应; 地震动输入水平

中图分类号: TU 475+1

文献标识码: A

Response of typical sites under different earthquake motion input levels

WANG Wei¹, ZHOU Zheng-hua¹, WANG Yu-shi¹, ZHAO Ji-sheng¹, LI Xiao-jun²

(1. Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China;

2. Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China)

Abstract: The characteristics of surface ground motion are apparently affected by the nonlinear behavior of site soil under strong motion input. The soil nonlinear behavior is firstly discovered by geotechnical engineers in laboratory tests; and then the seismologists confirm it by analyzing record data from the strong motion observation. Generally speaking, the site soil nonlinear behavior becomes more significant while the earthquake excitation increases; however, for different site types and same excitation level, there would be different site soil nonlinear behaviors. A method is proposed to determine the corresponding earthquake motion input thresholds for typical sites based on the relationship of shear wave velocity variation ratio and earthquake excitation.

Key words: site types; nonlinear effect; earthquake motion input level

1 引 言

在岩土工程领域, 目前应用的一些土体本构模型, 诸如线性黏-弹性模型、弹-塑性模型、等价非线性黏-弹性模型等, 其应力-应变关系是非线性和黏滞性的, 尤其当土的剪应变达到 10^{-5} 及以上水平时更为明显, 且随着荷载激发强度的增加, 土的阻尼升高, 剪切波速降低, 诸如此类的非线性效应已经在土的循环动三轴试验中发现^[1]。另一方面, 各类场地上的强震动观测记录也证实了场地土在一定强度地震动作用下存在着非线性效应, 具体表现为, 随着输入地震动强度增加, 场地地震反应峰值加速

度降低, 场地卓越频率减小。上述现象均在一系列强地震中得到了证实, 比如 1985 年的墨西哥地震, 1989 年的 Loma Prieta 地震^[2]。

随着人们逐步对场地土非线性效应认识的提高, 相关研究工作得到了广泛关注, 场地影响竖向台阵的建设就是其中之一。竖向台阵的建设旨在通过布设在不同深度土层的加速度计获取地震记录, 以进行场地效应分析, 如场地的放大效应、土体非线性效应等。在 Garner Valley 的场地影响竖向观测台阵中, 分别安装在地表以下 220 m 的花岗岩岩体中及地表的加速度计在两次地震 ($M_L 4.2$ 和 $M_L 2.5$) 中获得了 2 组加速度记录。Archuleta 于 1992 年在

收稿日期: 2010-02-03

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.200808019); 国家科技支撑计划(No.2006BAC13B02)。

第一作者简介: 王伟, 男, 1982 年生, 博士, 主要从事工程抗震方面的研究。E-mail: wwwiem@163.com

对记录进行谱比分析时发现 3~40 Hz 频带内的 $M_L 2.5$ 地震的放大系数明显高于 $M_L 4.2$ 地震的放大系数, 且后者谱比峰值较前者向左发生偏移, 即随着地震动水平增加, 场地的卓越频率变小, 如图 1 所示^[3]。

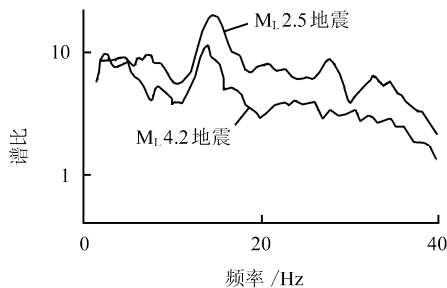


图 1 傅立叶谱谱比曲线

Fig.1 Ratios of Fourier amplitude spectra curves

Darragh 和 Shakal^[4]于 1991 年就 Loma Prieta 地震中 Treasure Island 软土场地和 Yerba Buena 基岩场地上的地震动记录进行谱比分析。结果显示, 在 Loma Prieta 主震中, Treasure Island 场地的放大系数在 0.5~7 Hz 之间, 放大系数很小, 而在余震中则很大, 具体分析结果见图 2, 其中实线对应主震, 虚线对应余震。

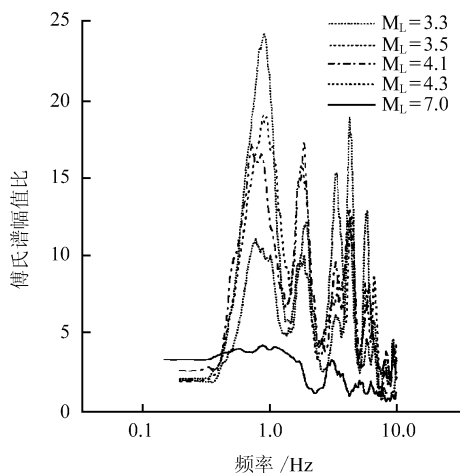


图 2 Treasure Island 软土场地与 Yerba Buena 基岩场地间的地震动谱比曲线

Fig.2 Ratios of Fourier amplitude spectra curves between Treasure Island soft site and Yerba Buena rock site

综上所述, 随着输入地震动强度的增加, 场地土非线性效应越明显。但对于不同场地类型, 相同地震动水平作用下, 场地土的非线性效应如何呢? 本文针对这一问题, 选择了几个典型的场地, 采用

等效线性化方法分析了不同地震动强度作用下各类场地土的非线性效应。在此基础上, 提出了一种以场地等效剪切波速随地震动输入水平变化为依据的场地土非线性效应确定方法, 且定义当等效剪切波速变化率不足 20% 时, 场地地震反应分析可不计入场地土的非线性效应。

2 分析方法基本原理

对于覆盖层厚度为 H 的场地, 其卓越频率 f 可依据式 (1) 来近似确定

$$f = V / 4H \quad (1)$$

式中: V 为场地的等效剪切波速, 可用式 (2) 表示

$$V = \frac{1}{H} \sum_{i=1}^n v_i h_i \quad (2)$$

式中: v_i 、 h_i 分别为各土层的剪切波速和厚度。

随着地震动输入水平的增加, 场地土剪应变增大, 由图 3 可知, 土的动剪切刚度比减小, 即土体动剪切刚度变小。若土体动剪切刚度和密度分别用 G 和 ρ 表示, $G_{\max}$ 为动剪切刚度比最大值, 则

$$v = \sqrt{G / \rho} \quad (3)$$

由式 (3) 可知, 土体动剪切刚度 G 减小等效于土层的剪切波速下降。各层土的剪切波速降低将导致场地等效剪切波速下降, 由于地震前后场地土厚度 H 基本不变, 由式 (1) 可得场地的卓越频率 f 将变小。

由式 (1) 可以看出, 场地的等效剪切波速变化趋势与卓越频率 f 的变化趋势相同, 因此, 利用等效线性化方法对典型场地在不同地震动输入水平下进行地震反应分析, 在此基础上确定不同地震动输入水平下典型场地的等效剪切波速变化率 (相对于场地初始等效剪切波速的变化)。

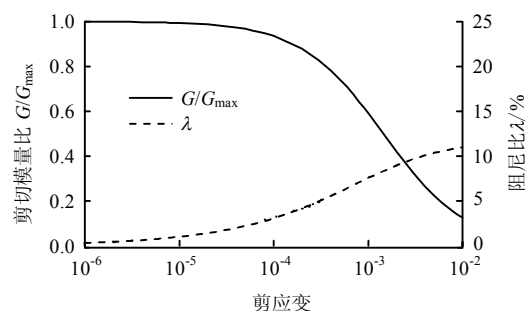


图 3 动剪切刚度比和动阻尼比与剪应变的关系
Fig.3 Dynamic shear modulus ratio and damping ratio versus shear strain

3 分析算例

本文以3个典型场地为分析实例,采用等效线性化方法计算了不同输入地震动水平下的地震反应,对不同的等效剪切波速随不同地震动输入水平的变化规律进行分析,以确定3个典型场地在不同地震动输入水平下等效剪切波速相对初始等效剪切波速的变化率。所选场地地形平坦,在局部场地范围内满足一维场地分析模型对于土层水平成层的要求。

在各个典型场地地震反应等效线性化分析中,基底不同强度地震动输入通过将图4所示的加速度时程各时刻加速度进行统一调整得到,相应调整系数为0.01、0.05、0.10、0.20、0.40、0.60、0.80、1.00、1.30、1.50、2.30、3.00,对应不同输入水平的加速度峰值分别为3.4、17、34、68、136、204、272、

340、408、476、680、1 020 gal。此外,以下3个典型场地分析模型中相关岩土类在8个典型剪应变水平下对应的动剪切刚度比 $G/G_{\max}$ 和动阻尼比 λ 见表1。动刚度比、阻尼比与剪应变的关系参数均选自我国典型场地土样试验结果。

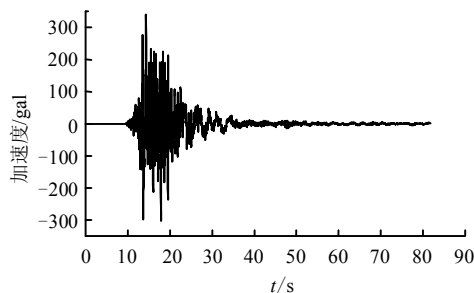


图4 基底输入加速度时程

Fig.4 Acceleration time history of basement input

表1 各类土动力参数

Table 1 Dynamic parameters of different soil types

剪应变	1 淤泥*		2 淤泥质黏土		3 黏土		4 粉质黏土		5 粉土		6 密实砂		7 中密砂		8 细砂		9 基岩	
$\gamma/10^{-4}$	$G/G_{\max}$	λ	$G/G_{\max}$	λ	$G/G_{\max}$	λ	$G/G_{\max}$	λ	$G/G_{\max}$	λ	$G/G_{\max}$	λ	$G/G_{\max}$	λ	$G/G_{\max}$	λ	$G/G_{\max}$	λ
0.05	0.860	0.030	0.985	0.012	0.980	0.012	0.980	0.012	0.960	0.012	0.980	0.005	0.965	0.006	0.920	0.015	1.000	0.004
0.10	0.790	0.035	0.970	0.015	0.960	0.015	0.970	0.015	0.930	0.017	0.965	0.007	0.935	0.010	0.880	0.022	1.000	0.008
0.50	0.600	0.055	0.845	0.033	0.825	0.037	0.840	0.037	0.770	0.036	0.885	0.020	0.775	0.030	0.700	0.056	1.000	0.010
1.00	0.470	0.077	0.730	0.055	0.710	0.056	0.730	0.056	0.650	0.050	0.805	0.035	0.660	0.045	0.575	0.065	1.000	0.015
5.00	0.165	0.137	0.320	0.136	0.300	0.130	0.400	0.112	0.300	0.087	0.560	0.080	0.300	0.088	0.260	0.104	1.000	0.021
10.00	0.090	0.165	0.210	0.170	0.200	0.165	0.250	0.137	0.200	0.105	0.448	0.100	0.250	0.103	0.178	0.125	1.000	0.030
50.00	0.015	0.220	0.085	0.200	0.050	0.235	0.070	0.170	0.060	0.148	0.220	0.120	0.105	0.124	0.058	0.145	1.000	0.036
100.00	0.010	0.235	0.058	0.205	0.025	0.254	0.030	0.180	0.035	0.155	0.174	0.124	0.090	0.130	0.018	0.150	1.000	0.046

注: 1 淤泥*, 其中数字为土类号。

3.1 日本东京大学千叶实验所场地

由场地钻孔所揭示土层可知,日本东京大学千叶实验所场地(简称千叶场地)上覆土层主要为粉质黏土、砂土和细砂,各分层土的厚度、剪切波速和重度如表2所列^[5]。依据各分层土剪切波速计算得该场地等效剪切波速为260 m/s,且厚度为40 m,由我国《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2001)场地分类标准确定该场地为Ⅱ类建筑场地。本文依据钻孔资料、各分层土剪切波速及试验数据建立了用于等效线性化分析的一维场地模型,如表2所列。将图4中的加速度时程进行调整后所得不同强度加速度时程作为输入地震动,采用等效线性化方法计算不同输入地震动水平下的地震反应,并由此确定场地等效剪切波速及其变化率随输入地震动水平的变化,如图5、6所示。由图可以看出,场地等效剪切波速随输入地震动强度增强而逐渐减小,而其变化率则逐渐增大。

3.2 日本南兵库县 Port Island 场地

由场地钻孔所揭示土层可知,日本南兵库县 Port Island 场地(简称 Port Island 场地)上覆土层主要为细砂,各分层土的厚度、剪切波速和重度如表3所列^[6]。依据各分层土剪切波速计算得该场地等效剪切波速为197 m/s,且厚度为83 m,由我国《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2001)场地分类标准确定该场地为Ⅲ类建筑场地。本文依据钻孔资料、各分层土剪切波速及试验数据建立了用于等效线性化分析的一维场地模型,如表3所列。将图4中的加速度时程进行调整后所得不同强度加速度时程作为输入地震动,采用等效线性化方法计算不同输入地震动水平下的地震反应,并由此确定场地等效剪切波速及其变化率随输入地震动水平的变化,如图7、8所示。由图可以看出,场地等效剪切波速随输入地震动强度增强而逐渐减小,而其变化率则逐渐增大。

表 2 千叶场地地震反应分析模型参数

Table 2 Analysis model parameters of Chiba site

序号	岩土名称	土类号	厚度/m	剪切波速/(m/s)	重度/(kN/m ³)
1	粉质黏土	4	5	140	11.3
2	砂质砂土	7	5	320	14.7
3	细砂	8	14	320	19.1
4	细砂	8	16	420	19.6
5	基岩	9		500	22.2

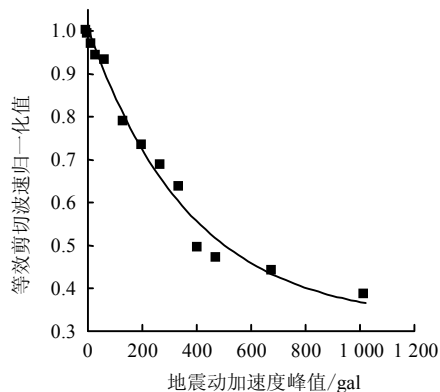


图 5 千叶场地归一化等效剪切波速与地震动加速度峰值关系曲线

Fig.5 Fitting curve of normalized equivalent shear wave velocity to earthquake peak acceleration at Chiba site

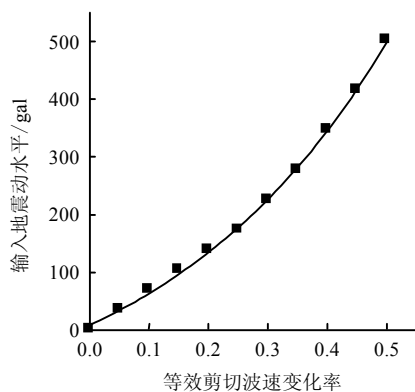


图 6 千叶场地等效剪切波速变化率与地震动加速度峰值关系曲线

Fig.6 Fitting curve of equivalent shear wave velocity change rate to earthquake peak acceleration at Chiba site

表 3 Port Island 场地地震反应分析模型参数

Table 3 Analysis model parameters of Port Island site

序号	岩土名称	土类号	厚度/m	剪切波速/(m/s)	重度/(kN/m ³)
1	细砂	1	2.0	170	19
2	细砂	1	3.0	170	19
3	细砂	1	7.5	210	19
4	细砂	1	6.5	210	19
5	淤泥	2	8.0	180	16
6	中密砂	3	6.0	245	19
7	密砂	4	17.0	305	19
8	密砂	4	11.0	350	19
9	黏土	5	18.0	303	16
10	密砂	4	4.0	320	19
11	基岩	6		500	22

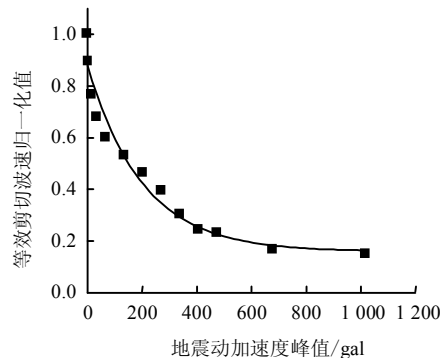


图 7 Port Island 场地等效剪切波速归一化值与地震动加速度峰值关系曲线

Fig.7 Fitting curve of normalized equivalent shear wave velocity to earthquake peak acceleration at Port Island site

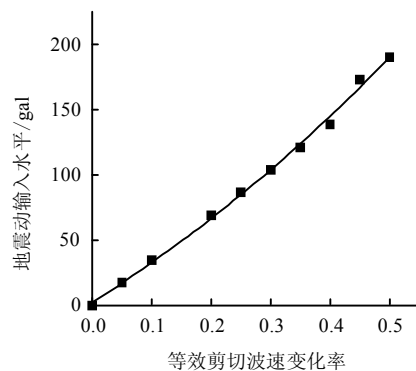


图 8 Port Island 等效剪切波速变化率与地震动加速度峰值拟合曲线

Fig.8 Fitting curve of equivalent shear wave velocity change rate to earthquake peak acceleration at Port Island site

3.3 江苏盐城场地

由场地钻孔所揭示土层可知,江苏盐城场地(简称盐城场地)上覆土层主要为黏土和粉质黏土,各分层土的厚度、剪切波速和重度如表 4 所列。依据各分层土剪切波速计算得该场地等效剪切波速为 139 m/s,且厚度为 88 m,由我国《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2001)场地分类标准确定该场地为 IV 类建筑场地。本文依据钻孔资料、各分层土剪切波速及试验数据建立了用于等效线性化分析的一维场地模型,如表 4 所列。将图 4 中的加速度时程进行调整后所得不同强度加速度时程作为输入地震动,采用等效线性化方法计算不同输入地震动水平下的地震反应,并由此确定场地等效剪切波速及其变化率随输入地震动水平的变化,如图 9、10 所示。由图可以看出,场地等效剪切波速随输入地震动强度增强而逐渐减小,而其变化率则逐渐增大。

表4 盐城场地地震反应分析模型参数

Table 4 Analysis model parameters of Yancheng site

序号	岩土名称	土类号	厚度 /m	剪切波速 /(m/s)	重度 /(kN/m ³)
1	黏土	1	2.0	100	19.3
2	淤泥质粉质黏土	2	2.0	88	18.3
3	粉质黏土	3	4.0	150	18.9
4	粉土	4	9.2	160	20.1
5	黏土	1	9.2	190	19.3
6	粉土	4	19.6	224	19.2
7	粉质黏土	3	15.5	278	19.7
8	黏土	1	11.5	323	19.3
9	粉土	4	7.4	389	20.1
10	黏土	1	7.6	455	19.7
11	基岩	5		500	22.0

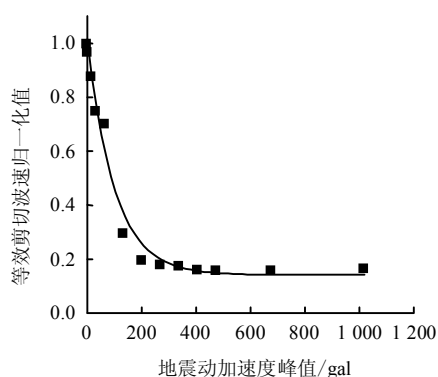


图9 盐城场地等效剪切波速归一化值与地震动加速度峰值的拟合曲线

Fig.9 Fitting curve of normalized equivalent shear wave velocity to earthquake peak acceleration at Yancheng site

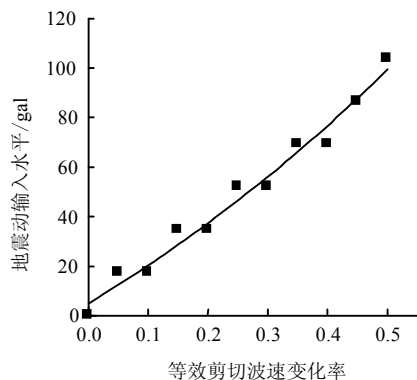


图10 盐城场地等效剪切波速变化率与地震动加速度峰值拟合曲线

Fig.10 Fitting curve of equivalent shear wave velocity change rate and earthquake peak acceleration at Yancheng site

4 综合对比分析

图11为3个典型场地的等效剪切波速随输入地震动强度的变化趋势。由图可知,随着输入峰值加

速度的增加,3种典型场地的等效剪切波速发生明显衰减,拟合曲线符合指数衰减规律,且随场地由硬变软(Ⅱ~Ⅳ类)等效剪切波速衰减变快,也就是说在相同的输入地震动水平下,场地等效剪切波速的衰减随场地由硬变软而增加。

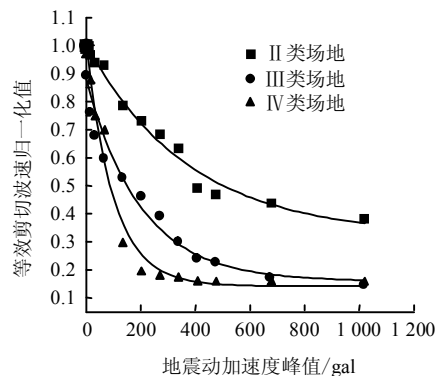


图11 3种场地归一化等效剪切波速随输入地震动加速度峰值的变化趋势

Fig.11 Different variation trends of normalized equivalent shear wave velocity to earthquake input peak acceleration for three different site types

图12为3个典型场地的等效剪切波速变化率随输入地震动水平的变化规律。由图可知,对于不同的场地,相同的剪切波速变化率所需要的地震动输入水平不同,且随场地由硬变软(Ⅱ~Ⅳ类),输入地震动水平由高到低。例如,当等效剪切波速变化率达30%时,千叶场地、Port Island场地和盐城场地所对应的地震动输入水平分别为226、102、55 gal。同样,相同的地震动输入水平所引起的3类场地的剪切波速变化率不相同,例如,当输入地震动加速度峰值为100 gal时,引起千叶场地、Port Island场地和盐城场地的等效剪切波速变化率分别为15%、30%、50%。

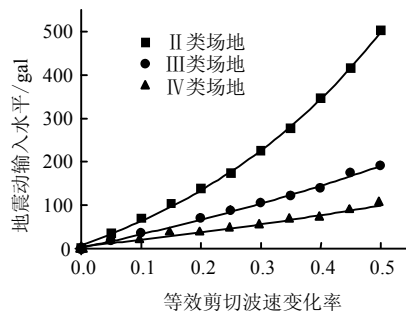


图12 3种场地等效剪切波速变化率随输入地震动水平变化规律

Fig.12 Variation rules of equivalent shear wave velocity change rate to earthquake peak acceleration for three site types

3 种典型场地地震反应分析结果表明, 土层非线性效应随输入地震动强度增加而越来越明显, 且在相同的输入地震动水平下, 场地由硬变软非线性效应越来越强。同时, 分析亦发现, 各类场地在等效剪切波速变化率小于 20% 时, 场地土非线性对地震反应的影响可忽略。鉴于此, 可以认为, 当等效剪切波速变化率不足 20% 时, 场地地震反应分析可不计入场地土的非线性效应。对于本文分析的 3 种典型场地, 等效剪切波速变化率为 20% 时所对应的输入地震动幅值水平分别为 140、70、35 gal。

5 结 语

本文针对千叶场地、Port Island 场地和盐城场地 3 种典型的场地, 采用等效线性化方法分析了不同地震动强度作用下各类场地的反应, 以及其等效剪切波速随输入地震动水平的变化规律。在此基础上, 提出了一种以场地等效剪切波速随地震动输入水平变化为依据的场地土非线性效应确定方法, 且定义当等效剪切波速变化率不足 20% 时, 场地地震反应分析可不计入场地土的非线性效应。

此外, 分析结果表明: 土层非线性效应随输入地震动强度增加而越来越明显, 且在相同的输入地震动水平下, 场地由硬变软非线性效应越来越强; 场地等效剪切波速随输入地震动强度增强逐渐减小, 而其变化率则逐渐增大; 在相同的输入地震动水平下, 场地等效剪切波速的衰减随场地由硬变软而增加, 即等效剪切波速变化率随场地由硬变软而变大。

本文所提出的以场地等效剪切波速随地震动输入水平变化为依据的场地土非线性效应确定方法的

可行性在此得到了论证。然而, 相应的分析结果仅通过 3 种典型场地的分析所得的, 其普适性有待通过大量的统计分析论证。

参 考 文 献

- [1] 张克绪, 谢君斐. 土动力学[M]. 北京: 地震出版社, 1989.
- [2] IGOR A, WEN K L. Nonlinear soil response—a reality[J]. **Bulletin of the Seismological Society of America**, 1996, 86(6): 1964—1978.
- [3] ARCHULETA R J, SEALE S H, SANGAS P V, et al. Garner valley downhole array of accelerometers: Instrumentation and preliminary data analysis[J]. **Bulletin of the Seismological Society of America**, 1992, 82(4): 1592—1621.
- [4] DARRAGH R B, SHAKAL A F. The site response of two rock and soil station pairs to strong and weak ground motion[J]. **Bulletin of the Seismological Society of America**, 1991, 81(5): 1885—1899.
- [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. An equivalent linear method considering frequency-dependent soil properties for seismic response analysis[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2007, 29(2): 218—224.
- [6] YOSHIDA N. Earthquake response analysis at Port Island during the 1995 Hyogoken-nanbu earthquake[J]. **Tsuchi to Kiso**, 1995, 43(10): 49—54.
- [10] 宫必宁, 童蕾, 牛志国. 土石坝工程的拱效应分析[J]. 东北水利水电, 2004, 22(12): 14—15.
GONG Bi-ning, TONG Lei, NIU Zhi-guo. Analysis of arch effect in earth-rock dam engineering[J]. **Water Resources and Hydropower of Northeast**, 2004, 22(12): 14—15.
- [11] 孙锋, 张顶立, 姚海波. 土坝坝体底部劈裂灌浆加固效果研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(4): 1187—1192.
SUN Feng, ZHANG Ding-li, YAO Hai-bo. Study of effects of split grouting for reinforcing bottom of embankment[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(4): 1187—1192.
- [12] 张辉, 朱俊高, 王俊杰, 等. 击实砾质土抗拉强度试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增刊 2): 4186—4190.
ZHANG Hui, ZHU Jun-gao, WANG Jun-jie, et al. Experimental study of tensile strength of compacted gravel soil[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(Supp.2): 4186—4190.

上接第 1088 页