

地震动强度及频谱特征对场地地震反应 分析结果的影响¹

兰景岩¹⁾ 吕悦军¹⁾ 刘红帅²⁾

1) 中国地震局地壳应力研究所, 北京 100085

2) 中国地震局工程力学研究所, 哈尔滨 150080

摘要 通过收集整理 235 个实际钻孔资料并建立了 2820 个计算工况, 运用一维波动等效线性化地震反应分析方法, 基于不同类别场地条件, 研究在不同强度、频谱特性的地震动输入形式下, 场地条件对地表地震动参数影响, 重点考察地表峰值加速度的变化特征及规律, 并对计算结果进行了统计回归分析, 给出了不同场地类别条件下地表峰值放大倍数的一般经验值。由于我国现行抗震设计规范中, 没有考虑地震烈度或地震动强度对设计反应谱的影响, 也没有考虑地震动频谱特性对地表峰值的影响, 因此, 本文的研究成果可为未来修订抗震设计规范提供参考依据。

关键词: 场地条件 地震反应分析 地震动输入 强度及频谱特性

引言

工程地震的理论和实践表明, 场地条件对震害程度和地面地震动有重要影响, 场地土对地震波的放大作用已是国内外学者公认的事实。除此之外, 地震动输入的特性也是影响震害程度和地面地震动的重要因素。从大量震害经验中不难发现, 地震震级越大, 烈度越高, 地面破坏越严重。此外基于理论的模拟计算分析也表明, 基岩输入地震动越高, 经过场地土层的放大作用后, 地表地震动的强度、频谱都有一定程度的改变, 特别是地表地震动峰值的放大尤为明显。

正是由于场地条件、地震动输入对地震动有着明显地影响, 同时它们也是设计地震作用的关键因素, 直接决定着设计地震作用的估计和工程抗震设防的选取, 所以这方面的工作一直受到地震工作者的高度重视。近些年来, 国内许多专家学者就地震动的场地效应方面做了很多研究, 取得了丰富的理论成果。根据不同场地上的强震记录资料, 统计分析给出了不同类别场地的地震动参数值, 是考虑场地条件对地震动影响的最直接的方法²(周锡元等, 1991; Crouse等, 1996)。事实上, 由于我国缺乏足够的强震记录资料, 而已有的强震记录大多又缺

1 基金项目 中央级公益性科研院所基本科研业务专项 (ZDJ2012-12)

[收稿日期] 2011-10-12

[作者简介] 兰景岩, 男, 生于 1981 年。助理研究员。主要从事地震工程研究。E-mail: lanjy1999@163.com

通讯作者 吕悦军, 男, 生于 1966 年。研究员。主要从事工程地震理论研究。E-mail: luyj1@263.net

2 薄景山, 1998. 场地分类和设计反应谱调整方法研究. 中国地震局工程力学研究所博士后出站报告.

少场地条件资料,因而使得理论分析的结果无法用实际的强震记录检验(薄景山等,2003)。鉴于上述考虑,有研究学者采用场地模型计算分析方法来考虑场地条件对地震动的影响(苏经宇等,1985;Hwang等,1997;薄景山等,2004)。基于这种研究思路,有学者利用大量的不同类型工程场地计算剖面,通过对计算场地地震反应结果的统计分析,给出了基于场地类别及地震动强度参数的场地地震动参数变化的经验关系(李小军等,2001a;2001b)。另一方面,地面反应谱不仅与局部场地条件有关,还与地震动的强度有关,地震动强度不同,同样的场地对地震动的影响也不同,得到的反应谱形状也不同(朱东生等,2005)。同样的理论计算也表明,由于土体的非线性特征,随着基底地震动幅值增大,地震动反应表现出明显的非线性(李媛媛等,2005;刘红帅等,2005;兰景岩等,2007)。

从上述的研究可以看出,目前我国研究学者针对场地条件对地震动影响的研究较多,考虑不同场地条件下地震动输入(幅值、频谱特性)对地震反应的影响方面的研究成果则相对较少。因此,在我国现行抗震设计规范中,是以地震烈度及对应的地面加速度峰值来反应地震动的大小,以场地分类来规定设计反应谱周期大小,尚未考虑地震烈度或输入强度对反应谱的影响,以及地震动输入的频谱特性对地表地震动的影响。

基于这样的研究背景,本文将通过大量实际的钻孔资料建立地震反应模型,运用一维波动理论土层地震反应分析方法,研究在不同场地条件下不同强度、频谱特性地震动输入作用下的地震反应,并统计地表峰值加速度相对于基底输入峰值的平均放大系数,给出不同场地类别条件下地震动参数的特征及变化规律。

1 输入地震动的确定

计算所需的基岩地震动时程采用人工合成地震动的方法,因为人工合成地震动能够反映近震和远震,且相当于设计地震烈度6、7、8度。本文共合成了12条(见图1)基岩地震动加速度时程。

合成方法:采用拟合目标函数的三角级数迭加法合成基岩地震加速度时程,以类似《建筑抗震设计规范(GB 50011—2001)》(中华人民共和国国家标准,2001)规定的反应谱作为规准目标谱,将峰值加速度(0.05g、0.10g、0.20g)分别乘以相应的规准目标谱,得到拟合加速度时程的目标反应谱,从目标谱中选择60个周期作为拟合目标谱的控制点,控制点的周期从0.04s至6s按对数等间距分布,要求目标谱与合成时程的反应谱之间相对误差小于5%,目标谱与合成地震动时程的反应谱之间相对误差小于5%。

规准目标反应谱 $\beta(T)$ 的形式如下:

$$\beta(T) = \begin{cases} 1 & T \leq T_0 \\ 1 + (\beta_m - 1) \frac{T - T_0}{T_1 - T_0} & T_0 < T \leq T_1 \\ \beta_m & T_1 < T \leq T_g \\ \beta_m \left(\frac{T_g}{T}\right)^c & T_g < T \leq 6.0 \end{cases}$$

式中, T 为反应谱周期; β_m 为反应谱最大值; T_g 为反应谱特征周期; c 为反应谱衰减系数。

表1给出了以上各特征参数。图1为输入水平向地震动加速度时程曲线,图中所注at 0.10(0.45) 2.25表示以峰值加速度为0.10g、特征周期为0.45s、平台高度为2.25的频谱特性拟合

得到的加速度时程曲线（其他图注也用同样的方法表示）。图 2 为水平向加速度反应谱拟合曲线，图中所注 rs_at 0.10 表示以峰值加速度为 0.10g 的 4 条不同频谱特性的加速度时程拟合曲线（其他图注也用同样的方法表示）。

表 1 规准目标谱的特征参数

Table 1 Characteristic parameters of objective spectrum

A_{max}	β_m	T_0	T_1	T_g	C
0.05g	2.25	0.04	0.1	0.25	0.9
0.10g	2.25	0.04	0.1	0.35	0.9
0.20g	2.25	0.04	0.1	0.45	0.9
0.20g	2.25	0.04	0.1	0.65	0.9

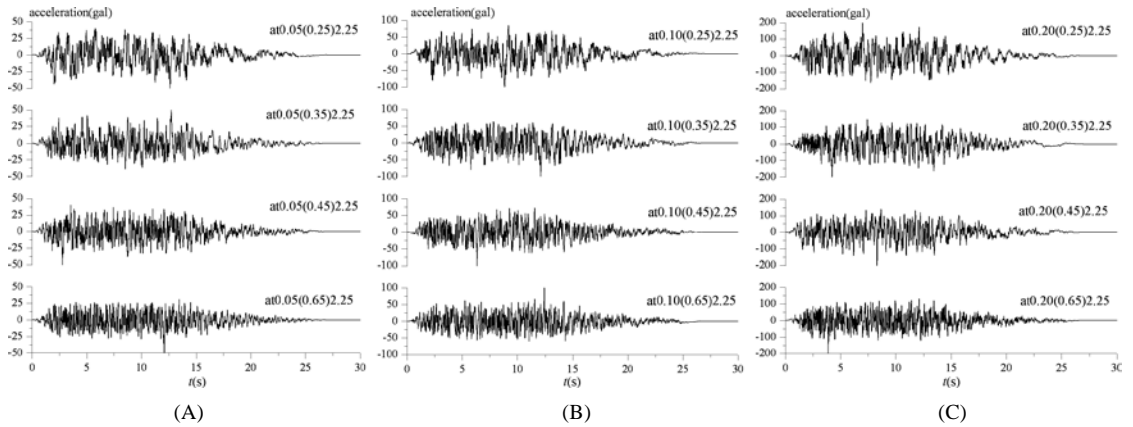


图 1 基岩输入地震动

Fig. 1 Ground motion input for bedrock

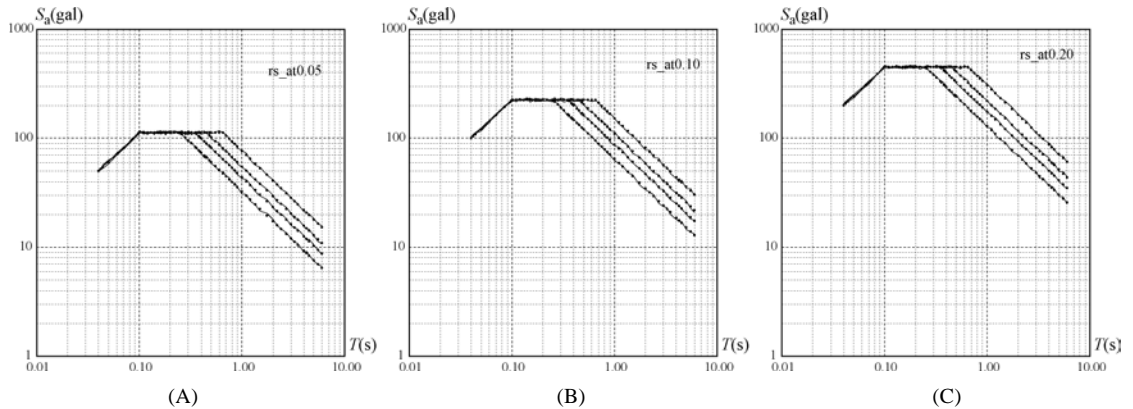


图 2 目标反应谱与拟合谱

Fig. 2 The response spectrum of objects and the fitting spectrum

2 建立场地动力计算模型

结合中国地震局地壳应力研究所完成的地震安全性评价项目中实际钻孔资料,另外从中国地震局工程力学研究所、上海市地震局、辽宁省地震局等单位收集到的大量不同类型、不同工程地质条件的实际钻孔资料共 235 个。基于我国《建筑抗震设计规范(GB 50011-2001)》(中华人民共和国国家标准,2001)规定划分的 4 类场地,其中 I 类场地 15 个,II 类场地 125 个,III 类场地 80 个,IV 类场地 15 个。组成用以进行土层地震反应分析的共计 2820 个计算工况。需要说明的是,本文所指 I 类场地不包括出露基岩场地。

场地计算模型中 II 类、III 类场地居多,这是因为 II 类、III 类场地是最常见的场地类型,也是多数研究人员重点考虑的对象。场地计算模型中土层剪切波速分布范围为 100m/s—490m/s,覆盖层厚度范围为 2m—130m,235 个场地模型参数的分布情况见表 2。

表 2 计算场地模型参数的分布情况

Table 2 Mechanical parameters of the calculation for site models

场地类别	计算模型个数	按等效剪切波速值分布		按覆盖层厚度分布	
		范围	个数	范围	个数
I	15	(250, 500]	8	<3 [3, 5)	10 5
		(140, 250]	4		
		(0, 140]	2		
II	125	(250, 500]	63	[3, 5] (5, 15] (15, 50] >50	12 36 58 19
		(140, 250]	41		
		(0, 140]	21		
III	80	(140, 250]	48	>15 [15, 50) >50	8 29 43
		(0, 140]	32		
IV	15	(0, 140]	15	(80, 100]	9
				>100	6

3 计算结果及分析

计算选用的 235 个钻孔剖面,剪切波速的测量方法与测试要求满足工作规范,其底部均达到或超过了 500m/s,满足《工程场地地震安全性评价(GB17741-2005)》(中华人民共和国国家标准,2005)基底输入的要求,其输入基底为坚硬土或软岩。基岩输入地震动时程,则采用了幅值不同、频谱不同的 12 条人工输入地震波(图 1 所示),构成 2820 个计算工况。同时运用一维波动等效线性化土层地震反应分析技术(廖振鹏等,1989),从峰值和反应谱两个方面来考察不同类别场地条件下,输入不同地震动对地表地震动参数的影响。

3.1 计算结果

对 235 个计算模型依次按照反映近震、远震影响的地震动输入进行土层地震反应分析,得到的地表加速度反应谱如图 3—图 6 所示。图中黑线代表对应输入 am 0.05 时程得到的地表反应谱;红线代表对应输入 am 0.10 时程得到的地表反应谱;绿线代表对应输入 am 0.20 时程得到的地表反应谱;蓝线代表基岩设计谱。

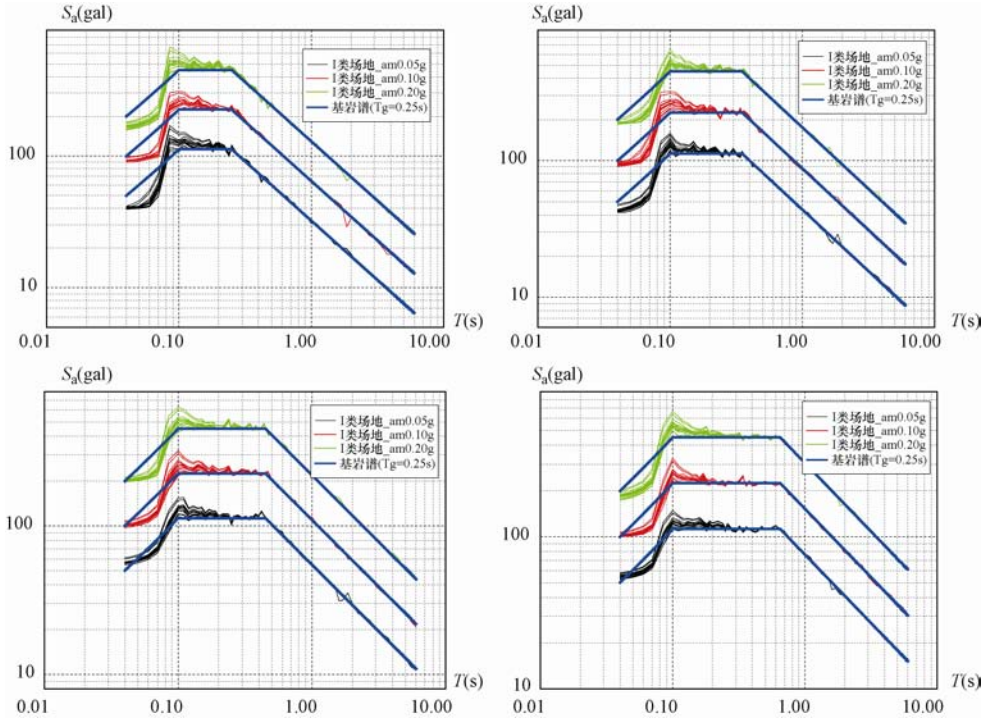


图 3 I 类场地条件下输入地震动对峰值和反应谱的影响

Fig. 3 Influence of ground motion input on peek value and spectrum under site condition type I

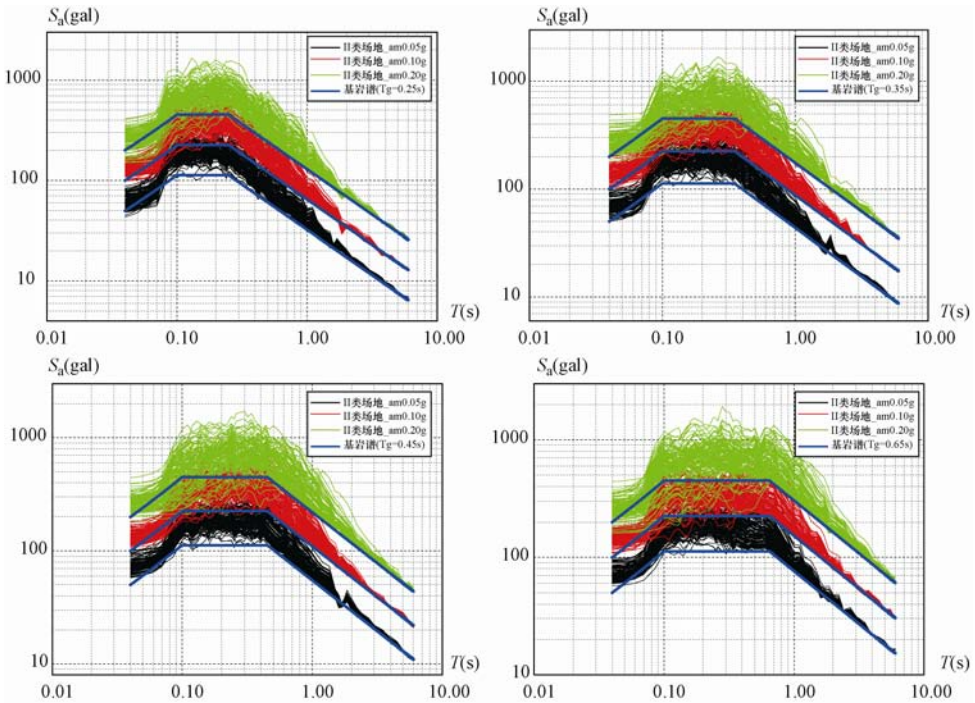


图 4 II 类场地条件下输入地震动对峰值和反应谱的影响

Fig. 4 Influence of ground motion input on peek value and spectrum under site condition type II

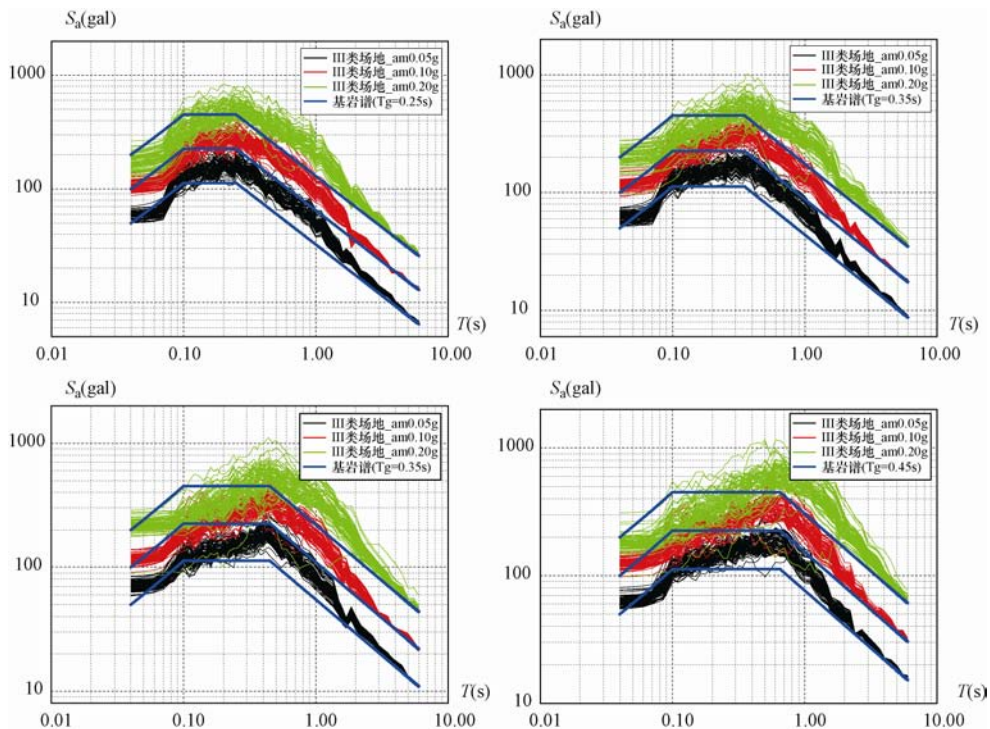


图 5 III类场地条件下输入地震动对峰值和反应谱的影响

Fig. 5 Influence of ground motion input on peek value and spectrum under site condition type III

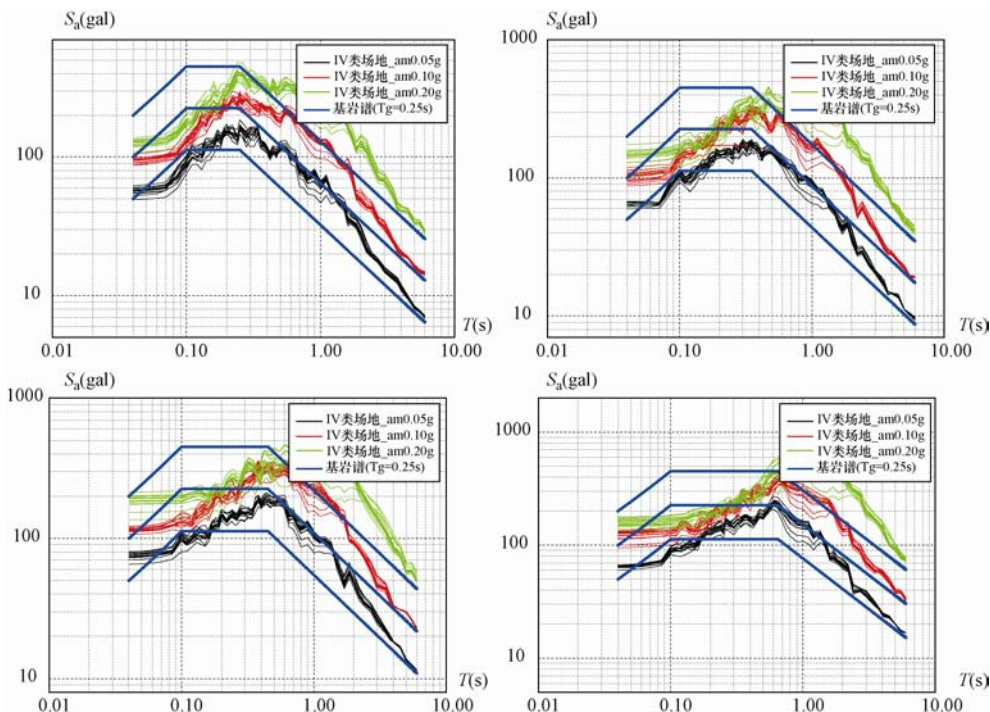


图 6 VI类场地条件下输入地震动对峰值和反应谱的影响

Fig. 6 Influence of ground motion input on peek value and spectrum under site condition type IV

3.2 统计分析

为了使地表峰值的放大效应能够更清晰地体现出来，这里定义无量纲的放大倍数 M ，即地表峰值加速度与基岩输入峰值加速度的比值，其形式如下：

$$M = \frac{A_m^1}{A_m^0}$$

式中， A_m^1 为地表峰值加速度，单位：gal； A_m^0 为基岩输入峰值加速度，单位：gal。

通过计算分析可得出以下结论：

(1) 在 I 类场地情况下，地表反应谱在高频段较丰富，长周期则与输入基岩反应谱几乎没有差别。当输入地震动为近震小震（am 0.05g， $T_g=0.25s$ 或 $0.35s$ ）时，地表峰值加速度小于基岩峰值；当输入地震动为远震小震（am 0.05g， $T_g=0.45s$ 或 $0.65s$ ）时，地表峰值较基岩峰值有所放大，放大系数在 1.1—1.2 左右；当输入较强地震动（am 0.10g，am 0.20g）时，地表峰值较基岩输入有所缩小。峰值加速度放大系数的统计值见表 3。

表 3 不同场地类别条件下放大系数的统计值

Table 3 The statistical values of magnification factor under different kinds of site condition

输入	近震、远震	场 地 类 别							
		I 类		II 类		III 类		IV 类	
		地表峰值 (gal)	放大系数 M	地表峰值 (gal)	放大系数 M	地表峰值 (gal)	放大系数 M	地表峰值 (gal)	放大系数 M
50gal	0.25s	40.17	0.803	61.57	1.231	58.28	1.166	56.30	1.126
	0.35s	42.52	0.850	69.58	1.392	61.33	1.227	64.18	1.284
	0.45s	54.48	1.090	72.47	1.449	69.09	1.382	73.87	1.477
	0.65s	54.00	1.080	71.33	1.427	62.53	1.251	64.20	1.284
100gal	0.25s	87.93	0.879	128.1	1.281	107.0	1.070	93.08	0.931
	0.35s	93.18	0.932	134.3	1.343	115.7	1.157	101.1	1.011
	0.45s	99.47	0.995	132.3	1.323	114.0	1.140	114.3	1.143
	0.65s	99.71	0.997	143.1	1.431	125.4	1.254	120.6	1.206
200gal	0.25s	164.8	0.824	256.0	1.280	172.3	0.862	124.5	0.623
	0.35s	188.1	0.941	271.2	1.356	200.9	1.005	140.6	0.703
	0.45s	199.6	0.998	257.9	1.290	216.9	1.085	184.7	0.924
	0.65s	182.0	0.910	256.3	1.282	181.4	0.907	157.2	0.786

(2) 在 II 类场地条件下，地表反应谱和峰值加速度都有明显变化。地表反应谱谱形变宽，输入地震动越强，反应谱谱形变宽越明显；地表峰值加速度较基岩输入峰值放大约 1.3 倍左右，随着输入峰值强度增大，放大倍数降低。

(3) III 类场地是处在中硬场地和软弱场地之间的一种场地类型，它的地表峰值放大倍数以及反应谱变宽程度也处在 II 类场地和 IV 类场地的情况之间。总的来说，输入地震动越强，地表峰值越低，反应谱长周期越丰富，谱形越宽。

地表峰值加速度与基岩峰值放大倍数随着输入地震动强弱变化而变化，较弱地震动输入（am 0.05g）时，地表放大系数约为 1.25 倍；中强地震动输入（am 0.10g）时，放大系数约为

1.15 倍; 较强地震动输入 (am 0.20g) 时, 略有缩小, 约为基岩峰值的 0.96。

(4) 在 IV 类场地条件下, 输入较弱地震动时, 地表峰值加速度放大约 1.29 倍; 但输入中强地震动时, 地表峰值加速度则与基岩峰值相当; 当输入较强地震动时, 地表峰值较基岩峰值缩小明显, 约为基岩输入的 76%。此外, 反应谱变宽, 有向长周期方向移动的趋势, 且随着输入地震动越强, 这种趋势越发明显。实际上, 由于基岩输入的增大, 由于土层的非线性影响, 地震波高频成分已有较大缩减, 因此地表峰值有缩小的趋势。此外, 土层的非线性影响和土层对于输入地震动某频段的共振等效效应, 在地震波高频缩减的同时, 低频段的反应谱得到了放大, 因此导致了地表反应谱向长周期方向移动。

4 结语

本文基于 235 个场地计算模型, 运用一维波动理论等效线性化方法进行了场地地震反应分析, 重点探讨了 4 个类别场地条件下, 不同输入地震动对地表地震动的影响, 同时对计算结果进行了统计回归分析, 给出了不同场地类别条件下地表峰值的放大倍数的一般经验值。

在分析计算过程中, 出现了一些值得探讨的问题。对于较软弱的场地条件, 特别是 IV 类场地, 当计算基底输入幅值较高时, 地震动低频成分十分丰富而高频成分过少, 导致这一现象发生是由于土层的非线性特性在等效线性化方法中, 在相对高频成分非线性都起到了压制 (或过滤) 作用, 这也从某个方面表现了等效线性化方法会严重低估对非等效频率频段的能量, 尤其是高频成分。为此, 还应进一步探讨土体非线性对地震动特性的影响问题, 利用时域非线性积分方法, 并结合具有场地条件的强震观测记录特征, 以保证理论分析结果的可靠性。从方法上对场地地震反应分析技术的合理性和科学性进行校正, 将会在一定程度上解决当前场地条件对地震动影响的关键问题。

参考文献

- 薄景山, 李秀领, 李山有, 2003. 场地条件对地震动影响研究的若干进展. 世界地震工程, **19** (2): 11—15.
- 薄景山, 翟庆生, 吴兆营等, 2004. 基于土层结构的场地分类方法. 地震工程与工程振动, **24** (4): 46—49.
- 兰景岩, 薄景山, 吕悦军, 2007. 剪切波速对设计反应谱的影响研究. 震灾防御技术, **2** (1): 19—24.
- 李小军, 彭青, 2001a. 不同类别场地地震动参数的计算分析. 地震工程与工程振动, **21** (3): 29—36.
- 李小军, 彭青, 刘文忠, 2001b. 设计地震动参数确定中的场地影响考虑. 世界地震工程, **17** (4): 34—41.
- 李媛媛, 徐扬, 李冬梅, 2005. 不同类别场地地震动反应分析. 山西地震, (4): 27—33.
- 廖振鹏, 李小军, 1989. 地表土层地震反应的等效线性化解法. 见: 地震小区划——理论与实践. 北京: 地震出版社, 141—153.
- 刘红帅, 薄景山, 吴兆营等, 2005. 土体参数对地表加速度峰值和反应谱的影响. 地震研究, **28** (2): 167—171.
- 苏经宇, 王广军, 1985. 典型土层剖面的地震反应分析. 工程抗震, (4): 16—20.
- 周锡元, 王广军, 苏经宇, 1991. 场地、地基、设计地震. 北京: 地震出版社.
- 朱东生, 虞庐松, 陈兴冲, 2005. 地震动强度对场地地震反应的影响. 世界地震工程, **21** (2): 115—119.
- 中华人民共和国国家标准, 2001. 建筑抗震设计规范 (GB 50011-2001). 北京: 中国建筑工业出版社.
- 中华人民共和国国家标准, 2005. 工程场地地震安全性评价 (GB 17741-2005). 北京: 中国标准出版社.
- Crouse C.B. and McGuire J.W., 1996. Site response studies for purpose of revising NEHRP seismic provisions.

Earthquake Spectra, **12** (3): 408—439.

Hwang H.H.M., Lin Huijie and Huo Jun-Rong, 1997. Site coefficients for design of buildings in eastern United States. Soil Dynamic and Earthquake Engineering, **16** (1): 29—40.

Influence of Intensity and Frequency of Ground Motion on Site Earthquake Response

Lan Jingyan¹⁾, Lu Yuejun¹⁾ and Liu Hongshuai²⁾

1) Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing 100085, China

2) Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Haerbin 150080, China

Abstract Based on 235 soil profiles of engineering sites to build 2820 computing calculating models, the effect of site condition on surface ground motion parameters was studied by using the one-dimensional equivalent linear method of soil seismic response on the wave motion mode. This study focuses on the varying characteristic and rules of Peak Ground Motion Acceleration under different inputs with intensity and spectrum characters. And then the statistic regression analysis for the results was performed, and the empirical value of magnification factor for Surface Peak was obtained under different kinds of site condition. In the current seismic code of China, the effect on both ground intensity in design spectrum and frequency of ground motion in peak acceleration has not been taken into consideration yet. So, the results of this paper will provide certain reference for revising the seismic code in future.

Key words: Site condition; Earthquake response analysis; Earthquake ground motion input; Intensity and frequency of ground motion