

文章编号: 0253-3782(2007)01-0067-10

适用于中国场地分类的地震动 反应谱放大系数*

吕红山^{*} 赵凤新

(中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所)

摘要 对美国抗震设计规范的场地系数的研究基础进行了分析,并对中美两国场地分类指标进行了对比.通过对场地土层波速测试资料的分析,找出了两种分类方法的联系,从而得到了将美国场地系数转换为适于中国场地分类的方法,同时给出了基于中国场地分类的地震动反应谱放大系数.

关键词 场地分类 抗震设计规范 平均剪切波速 场地系数

中图分类号: P315.5; P315.9 **文献标识码**: A

引言

场地条件对地震动(峰值加速度、反应谱等)的影响一直是地震学家和地震工程学家共同关注的问题.最直接的研究场地土效应的方法是建立井下台阵进行强震观测,即在同一地点地下不同深度设置强震仪,通过比较地表土层与地下深处基岩的强震记录,分析场地土对地震动的影响.目前在许多地方设立了井下强震观测台阵,如台湾的 SMART1 和 SMART2 台阵(Wen, 1994; Beresnev *et al.*, 1995),日本神户的 Port 岛(Jorge, Kojiro, 1997),日本的 Amagasaki、Takasago 和 Nanko (Sato *et al.*, 2001),希腊的 Thessaloniki (Dimitriu *et al.*, 1998),在美国则已经布置了十余个井下观测台阵进行相关研究(Bonilla *et al.*, 2002).这些观测台阵取得的强震记录,提供了直接的场地土对基岩地震动有放大作用且是非线性的证据,因此地震学家在地球结构模型中也已经开始考虑地表几十米土层对地震动的非线性影响(Beresnev, 2002).

在墨西哥(Mexico)大地震、洛马普列塔地震(Loma Prieta)、北岭地震(Northridge)和阪神地震中,取得了不同场地上大量强震记录.通过比较这些场地与附近基岩的强震记录,对场地土的地震动效应进行了深入研究.通过求反应谱比的方法也发现场地土对地震动有非线性放大效应.墨西哥地震中基岩加速度峰值在 $0.5 \sim 1 \text{ m/s}^2$ 之间,而附近软弱土层上记录到的加速度峰值是基岩的 $1.5 \sim 4$ 倍(Seed *et al.*, 1988).在洛马普列塔地震中,基岩加速度峰值在 $0.8 \sim 2 \text{ m/s}^2$ 之间,而附近软土场地(E类,对应中国分类的IV类)上记录到的基岩加速度放大系数是 $2 \sim 3$.短周期反应谱值(0.2 或 0.3 s)平均放大也是 $2 \sim 3$ 倍;在 $0.5 \sim 1.5 \text{ s}$ 周期范围,软土放大更达到了 $3 \sim 6$ 倍;在中硬土(C及D类)上同样放大基

* 地震科学联合基金(A07046)资助.中国地震局地球物理研究所论著 06AC1035.
2006-01-25 收到初稿,2006-10-13 决定采用修改稿.

† 通讯作者. e-mail: lhs361@yahoo.com.cn

岩地震动, 不过放大系数较小(Dobry *et al*, 2000). 对洛马普列塔地震的强震记录分析表明, 土层对基岩地震动加速度和短周期反应谱值的放大系数相差在 30% 以内. 简化的理论分析和经验统计分析表明, 土层对基岩地震动的反应谱放大系数与地下 30 m 深度范围内的土层平均剪切波速成比例关系(Borcherdt, 1994). 因此, 在 NEHRP(National Earthquake Hazards Reduction Program) 规范中引入了新的场地分类方法. 该方法不再仅靠对场地土的定性描述, 而是用平均剪切波速这一定量化指标来进行场地分类.

对不同场地地震动衰减关系的研究也是了解场地土对地震动影响的一种途径. 1995 年以后美、日和欧洲的学者开始应用 NEHRP 场地分类方法进行不同场地的地震动衰减关系研究(Lee *et al*, 1995; Molas, Yamazaki, 1995; Ambraseys *et al*, 1996; Abrahamson, Silva, 1997; Campbell, 1997; Sadigh *et al*, 1997; Youngs *et al*, 1997; Spudich *et al*, 1999; Atkinson, Boore, 2003; Boore *et al*, 1997; Campbell, Bozorgnia, 2000; Kobayashi *et al*, 2000; Shabestari, Yamazaki, 2000; Takahashi *et al*, 2000; Gülkan, Kalkan, 2002; Ambraseys, Douglas, 2003).

根据大量强震观测和土动力试验结果, 地震工程学家还建立了土层地震反应分析的数值计算方法, 既有等效线性化法, 也有完全的非线性计算方法. 对于中硬场地(C类、D类), 在较弱地震动输入下, 两种方法都能给出较好的结果. 而在强地震动输入下或是对软弱场地(如 E 类)进行土层反应分析时, 由于对土体特性非常敏感, 计算结果可靠性有待检验.

我国由于强震记录很少, 一些研究者应用场地土层地震反应数值分析对场地土地震动影响进行了研究(李小军等, 2001), 但给出的软弱场地放大系数明显偏小, 对地震动没有放大效应. 而其他研究者根据对美国部分强震记录的统计分析, 在参考有关研究成果的基础上, 给出了地震影响系数最大值调整的建议(耿淑伟等, 2002; Tao, Geng, 2003; Tao *et al*, 2006).

从 1994 版 NEHRP 推荐规范开始, 美国抗震设计规范中使用 F_a 和 F_v 两个场地系数, 同时考虑场地条件对地震动峰值加速度和场地特征周期的影响(Building Seismic Safety Council, 1995). 在 2003 版 NEHRP 推荐规范及 1997 版统一建筑规范(UBC)仍引用上述场地系数(Building Seismic Safety Council, 2004; Dobry *et al*, 2000).

我国现行抗震设计规范没有考虑不同场地上地震动峰值加速度和加速度反应谱平台值的变化, 对场地地震动影响的估计是不充分的.

在本文研究中将先对中美两国抗震设计规范的场地分类指标进行对比, 寻找两种分类方法的联系, 从而得到将美国场地系数转换为适于中国场地分类的方法, 然后给出基于中国场地分类的地震动反应谱放大系数.

1 美国抗震设计规范中场地系数分析

美国当前抗震设计规范中规定的反应谱曲线如图 1 所示. 其中 F_a 和 F_v 分别对应 0.3 s 和 1 s 场地对基岩反应谱值的放大系数. 相关场地系数数值如表 1 和表 2 所示(Building Seismic Safety Council, 2004).

表 1 和表 2 中的场地系数是在综合了震害经验、强震观测的统计分析和土层地震反应数值分析的基础上给出的. 由于 C 类和 D 类场地的强震记录较多, 对这两类场地的 F_a 和

表 1 NEHRP 中规定的短周期放大系数 F_a

场地分类	基岩地震动加速度峰值				
	$\leq 1 \text{ m/s}^2$	2 m/s^2	3 m/s^2	4 m/s^2	$\geq 5 \text{ m/s}^2$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.2	1.2	1.1	1.0	1.0
D	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0
E	2.5	1.7	1.2	0.9	0.9

表 2 NEHRP 中规定的 1 s 周期放大系数 F_v

场地分类	基岩地震动加速度峰值				
	$\leq 1 \text{ m/s}^2$	2 m/s^2	3 m/s^2	4 m/s^2	$\geq 5 \text{ m/s}^2$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3
D	2.4	2.0	1.8	1.6	1.5
E	3.5	3.2	2.8	2.4	2.4

F_v 主要是基于强震记录的统计分析结果得到的。对于 E 类场地，当基岩地震动小于 1 m/s^2 时是基于对墨西哥 1985 年大地震和洛马普瑞埃塔 1989 年地震中的强震记录分析给出的；而对于基岩输入大于 1 m/s^2 的情况，对应的场地系数则是结合土层地震反应数值分析结果给出的 (Borcherdt, 1994; Dobry *et al.*, 2000)。

1994 版 NEHRP 规范发布之后，许多学者应用不同方法按照 NEHRP 的场地分类及场地谱形式对场地系数作了研究 (Crouse, McGuire, 1996; Dobry *et al.*, 1999; Joyner, Boore,

2000; Rodriguez *et al.*, 1999; Silva *et al.*, 2000; Stewart *et al.*, 2001; Borcherdt, 2002)。美、日和欧洲的学者按照 NEHRP 场地分类方法，研究了不同场地的衰减关系 (Lee *et al.*, 1995; Molas, Yamazaki, 1995; Ambraseys *et al.*, 1996; Abarhamson, Silva, 1997; Campbell, 1997; Sadigh *et al.*, 1997; Youngs *et al.*, 1997; Spudich *et al.*, 1999; Atkinson, Boore, 2003; Boore *et al.*, 1997; Campbell, Bozorgnia, 2000; Kobayashi *et al.*, 2000; Shabestari, Yamazaki, 2000; Takahashi *et al.*, 2000; Gülkan, Kalkan, 2002; Ambraseys, Douglas, 2003)。对于这些衰减关系，计算 $0.1 \sim 0.5 \text{ s}$ 的土层和基岩反应谱比的平均值作短周期放大系数 F_a ，计算 $0.5 \sim 1.5 \text{ s}$ 土层和基岩反应谱比的平均值作 1 s 周期放大系数 F_v 。将上述不同学者得到的场地系数，以及利用不同场地衰减关系计算出的场地系数与 NEHRP 规范中的场地系数绘制在一起，得到图 2。

使用不同的强震数据集，采用不同的研究方法得出的场地系数会有一定差别，但是正如图 2 中所示，多数情况下 NEHRP 中规定的场地系数是当前相关研究的均值。可以认为，

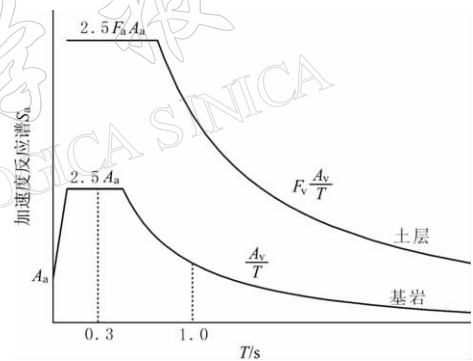


图 1 美国规范中的场地设计谱曲线

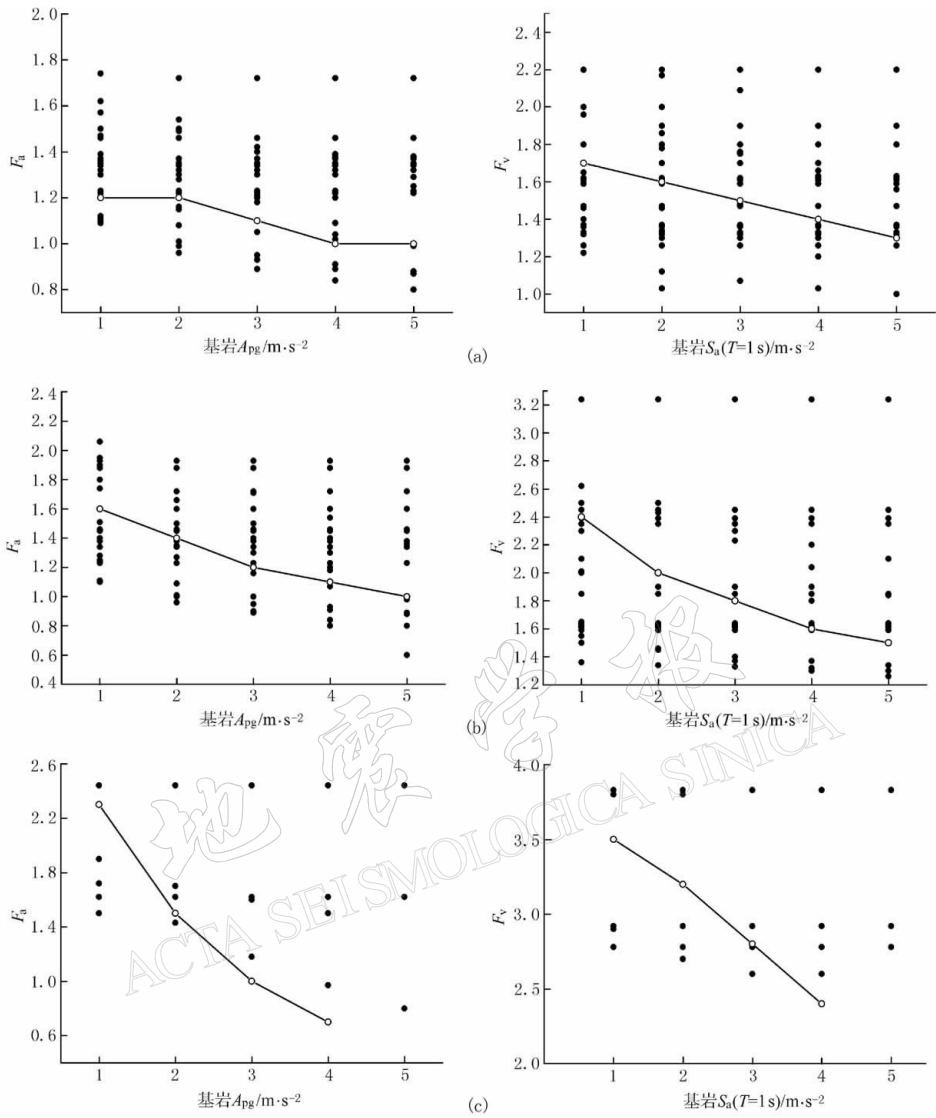


图 2 C 类(a)、D 类(b)和 E 类(c)场地的场地系数比较(—o— NEHRP)

表 3 地震影响系数最大值调整建议(Tao *et al*, 2006)

场地分类	基岩地震动强度						
	0.5 m/s ²	1 m/s ²	1.5 m/s ²	2 m/s ²	2.5 m/s ²	3 m/s ²	4 m/s ²
I	1.2	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
II	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
III	1.1	1.3	1.2	1.2	1.1	1.0	1.0
IV	1.2	1.4	1.3	1.3	1.2	1.0	0.9

表 1 中 NEHRP 规范给出的场地系数较好地反映了人们目前对场地地震动效应的认识。

耿淑伟等(2002)提出的场地条件地震影响系数最大值调整建议值与表 1 中的 F_a 相对应。具体参数如表 3(Tao *et al*, 2006)所示。表 1 与表 3 相比有很大差异,表 3 中不同场地

间的调整系数差别很小, 针对软弱的Ⅳ类场地的调整系数小于 NEHRP 中规定的 E 类场地的数值.

本文以 NEHRP 规范的场地系数作为研究适用于中国场地分类场地系数的基础. 下面先对中美两国抗震设计规范的场地分类指标进行对比.

2 中美场地分类指标对比

美国的抗震设计规范以地表以下 30 m 范围内的土层平均剪切波速 v_{S30} 作为场地分类指标 (Building Seismic Safety Council, 2004). 而在我国建筑抗震规范中则采用双指标的场地分类方法, 即 20 m 深度范围内的平均剪切波速 v_{S20} 和剪切波速大于 500 m/s 的土层覆盖层厚度 (国家质量监督检验检疫总局, 中华人民共和国建设部, 2001). 美国规范中的基岩是指平均剪切波速 v_{S30} 大于 760 m/s 的场地, 而中国规范则规定平均剪切波速 v_{S20} 大于 500 m/s 的场地为基岩; 美国规范将场地分为 A, B, C, D, E 五类, 而中国规范则划分出 I, II, III, IV 四类; 两国规范对不同场地的分类指标参数范围的规定也不同. 这里需要强调的是两国规范都用了土层平均剪切波速作为分类指标, 尽管计算深度不同而计算方法相同. 在此用同一场地的剪切波速测试资料, 分别计算平均剪切波速 v_{S30} 和 v_{S20} , 并按照中美两国规范进行场地分类, 然后对两种场地分类和平均剪切波速值进行对比分析.

本文所用场地波速测试资料来源于美国 ROSRINE (Resolution of Site Response Issues from the Northridge Earthquake) 计划^①. 该计划对几十个自由场地强震台站的土层特性进行了详细勘察, 取得了工程地质柱状剖面 and 波速测试资料. 其计算对比结果如图 3 所示. 其中横轴是平均剪切波速 v_{S30} , 纵轴是平均剪切波速 v_{S20} . 各个场地美国的场地类型是按照平均剪切波速 v_{S30} 值以横坐标轴分区, 各个场地的中国场地分类类型则以不同符号表示.

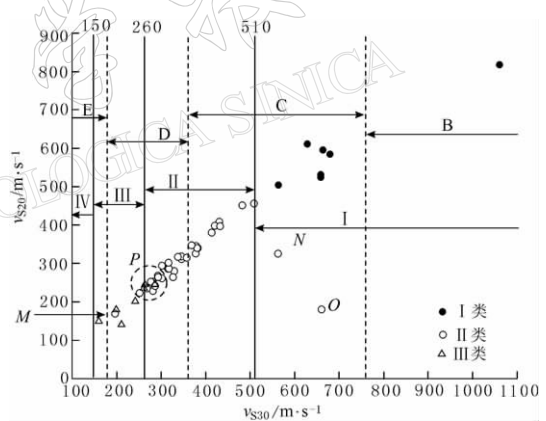


图 3 中美两国场地分类比较

图 3 中数据点分布的趋向性非常明显, 说明两国规范中计算的平均剪切波速 v_{S30} 与 v_{S20} 是有某种对应趋势的. 下面先对图中的某些特殊点进行分析. 图中 N 和 O 两点偏离总体数据分布趋势, 原因是美国规范中严格计算了 30 m 深度范围内的平均剪切波速, 而中国规范计算平均剪切波速的深度是取覆盖层厚度与 20 m 二者的较小值, 同时规定覆盖层厚度按地面至剪切波速大于 500 m/s 的土层顶面距离确定. 这里的 N 和 O 代表的场地, 在表层 10 m 厚的土层下紧接着就是剪切波速在 1 000 m/s 以上的土层. 按中国规范只计算这 10 m 左右土层的平均剪切波速, v_{S20} 约为 320 m/s 和 180 m/s. 按美国规范计算 v_{S30} 则为 560 m/s 和 660 m/s. 图 3 中 P 区域内的点所代表的场地, 按美国规范都属 D 类场地, 按

^① Bardet J P, Nielsen E, Villacorta R. 1998. ROSRINE Data Dissemination. <http://rccg03.usc.edu/rosrine/publications/>

中国规范则属于Ⅱ类或Ⅲ类场地,且在图上数据点交错排列.这是因为这些场地的 v_{S20} 在250 m/s左右,厚度在50 m左右,处在我国规范规定的Ⅱ类和Ⅲ类场地分类边界值附近.图中M点 v_{S20} 在140~250 m/s间,但厚度稍小于50 m,不够Ⅲ类场地标准.这是将复杂的场地简单划分为几个类别带来的不确定性造成的.按照规范的分方法,在分类指标界限值附近,波速相差1 m/s,土层厚度差1 m,就应被划分为两种不同的场地,图3中P所指的区域内的点和M点就是这种情况的反映.

多数情况下 v_{S30} 与 v_{S20} 按照图3做出的曲线是很有规律的,除去少数特殊情况,按美国规范得到的 v_{S30} 在510 m/s以上的场地对应于中国规范的Ⅰ类场地; v_{S30} 在510 m/s与260 m/s之间的场地对应于中国规范的Ⅱ类场地; v_{S30} 在260 m/s与150 m/s之间的场地对应于中国规范的Ⅲ类场地; v_{S30} 在150 m/s以下的场地对应于中国规范的Ⅳ类场地.同时可知,中国的Ⅰ类场地包含了美国的全部A类、B类和部分C类场地,中国的Ⅱ类场地则介于美国的C类与D类之间,中国的Ⅲ类场地则介于美国的D类与E类之间,中国的Ⅳ类场地则全部为美国的E类场地.需要指出的是仅有美国场地类型,并不能确定相应的中国场地分类.目前许多强震台站提供平均剪切波速 v_{S30} .如上所述, v_{S30} 可与 v_{S20} 建立对应关系,当得知某一场地的 v_{S30} 即可大致确定对应的 v_{S20} ,也就能确定相应的中国场地分类.这样就便于利用国外强震记录针对中国场地分类进行相关研究.在得到中美两国规范中场地土分类间的关系后,下面通过转换给出适用于中国场地分类的场地系数.

3 适于中国场地分类标准的地震动场地系数

对于中国和美国的两个场地,若土层沿深度分布的土性相同,剪切波速等物理指标也相近,则这两个场地就应是同样的场地.但由于中美两国规范分类标准不同,可能会被划分成不同的类型.当知道美国某个强震记录台站的 v_{S30} 时,就可以通过前述划分方法得到该台的中国场地类别,这样就可以获得基于中国场地分类的强震记录集.

美国规范中的 F_a 和 F_v 经统计按照下面的公式确定(Borcherdt, 1994):

$$F_a = (v_B / \bar{v}_s)^{M_a} \quad (1)$$

$$F_v = (v_B / \bar{v}_s)^{M_v} \quad (2)$$

其中, v_B 是基岩的剪切波速,取为1 050 m/s; M_a 和 M_v 为与基岩加速度峰值有关的统计参数; \bar{v}_s 是所计算场地的平均剪切波速 v_{S30} . F_a 和 F_v 与场地平均剪切波速 v_{S30} 的关系如图4和图5所示.

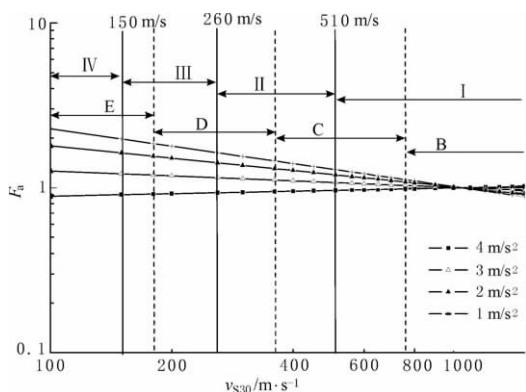


图4 中美两国场地土放大系数 F_a 的比较

B, C, D, E类的放大系数分别对应曲线760~1 500 m/s, 360~760 m/s, 180~360 m/s和100~180 m/s的均值.按照前述平均剪切波速 v_{S30} 与中国场地分类的关系,可知Ⅰ,Ⅱ,Ⅲ,Ⅳ类场地放大系数应分别对应图中曲线510 m/s以上,260~510 m/s,150~260 m/s和100~150 m/s的均值.

尽管场地土特性复杂,地震动的随机性很强,用简单的几个指标将场地进行分类有很大的不确定性,但总体上反映出场

地土对地震动有放大作用且是非线性的，弱地震动时软场地对短周期放大比中硬场地大。中美两国规范对中硬、中软、软弱场地的分类指标不同，但不同场地对地震动影响的总体描述应是一致的。从比较上式计算可知，II类场地放大系数比C类大，但在C与D类放大系数之间，可近似为C、D类放大系数的均值；III类场地放大系数比D类大，但在D与E类放大系数之间，可近似取为D、E类放大系数的均值；而IV类场地放大系数与E类接近。中国的I类场地含美国全部A类、B类和部分C类场地。尽管C类场地放大系数大于1，但A类放大系数小于1，总体而言I类场地的放大系数仍与B类接近。

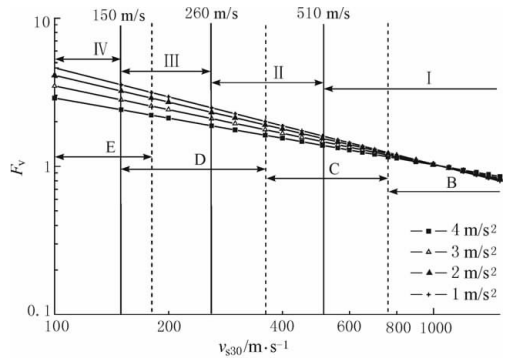


图 5 中美两国场地土放大系数 F_v 的比较

表 4 适用于中国场地分类的场地放大系数 F_a

场地类型	基岩地震动加速度峰值				
	$\leq 1 \text{ m/s}^2$	2 m/s^2	3 m/s^2	4 m/s^2	$\geq 5 \text{ m/s}^2$
I	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
II	1.4	1.3	1.2	1.1	1.0
III	2.1	1.6	1.2	1.0	1.0
IV	2.5	1.7	1.2	0.9	0.9

表 5 适用于中国场地分类的场地放大系数 F_v

场地类型	基岩地震动加速度峰值				
	$\leq 1 \text{ m/s}^2$	2 m/s^2	3 m/s^2	4 m/s^2	$\geq 5 \text{ m/s}^2$
I	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
II	2.1	1.8	1.7	1.5	1.4
III	2.9	2.6	2.3	2.0	1.9
IV	3.5	3.2	2.8	2.4	2.4

综合上述情况，得到的中国不同场地的反应谱放大系数如表 4 和表 5 所示。显然，应用该场地系数给出的场地相关谱，既可放大反应谱短周期平台段，也会加大特征周期。表 4 与表 3 均表达了土层对地震动的放大作用，以及在强烈地震动作用下土的非线性会导致放大率的下降，但调整系数有差异。表 3 中 I，III，IV 类土间的调整系数差别很小，而本文给出的 II，III，IV 类土间调整参数差别较大，尤其 IV 类土的调整系数要大于表 3 的结果。

量大面广的 6 层以下的民用建筑基本自振周期较短。依据我国当前抗震设计规范，同样基岩输入此类建筑处于 II，III 或 IV 类场地时，用同样的地震动参数进行抗震设计，本文场地系数给出的结果，显然在 III 或 IV 类场地上的设计地震动参数要大于在 II 类场地上的相应值。

4 小结

场地的地震动影响是地震工程中的一个重要问题。本文利用工程勘探波速测试资料对

中美两国的场地土分类指标进行对比,找到了二者间的相互关系,这将为使用国外强震记录按中国场地分类进行相关研究提供了方便.通过分析美国场地土效应的研究成果,得到了对美国场地系数进行修正使其适合于中国场地分类的方法,给出了适用于中国场地分类的地震动场地系数.本文仅是关于场地地震动影响的初步研究结果,今后将收集不同场地的强震记录,特别要重点收集相关强震记录台站详细工程地质勘查资料,对此问题进行进一步深入研究.

参 考 文 献

- 耿淑伟,陶夏新,王国新. 2002. 对抗震设计规范中地震作用规定的三点修改建议[G]//王亚勇主编. 现代地震工程进展. 南京:东南大学出版社: 919-925.
- 李小军,彭青,刘文忠. 2001. 设计地震动参数确定中的场地影响考虑[J]. 世界地震工程, **17**(4): 34-41.
- 国家质量监督检验检疫总局,中华人民共和国建设部. 2001. 建筑抗震设计规范(GB50011—2001)[S]. 北京:中国建筑工业出版社: 15-17.
- Abrahamson N A, Silva W J. 1997. Empirical response spectral attenuation relations for shallow crustal earthquake[J]. *Seism Res Lett*, **68**(1): 94-127.
- Ambraseys N N, Simpson K A, Bommer J J. 1996. Prediction of horizontal response spectra in Europe[J]. *Earthquake Engng Struct Dyn*, **25**(4): 371-400.
- Ambraseys N N, Douglas J. 2003. Near-field horizontal and vertical earthquake ground motions[J]. *Soil Dyn Earthq Eng*, **23**(1): 1-18.
- Atkinson G M, Boore D M. 2003. Empirical ground-motion relations for subduction zone earthquakes and their application to cascadia and other regions[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **93**(4): 1 703-1 729.
- Beresnev I A, Wen Kuoliang, Yeh Y T. 1995. Nonlinear soil amplification; Its corroboration in Taiwan[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **85**(2): 496-515.
- Beresnev I A. 2002. Nonlinearity at California generic soil sites from modeling recent strong-motion data[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **92**(2): 863-870.
- Borcherdt R D. 1994. Estimates of site-dependent response spectra for design (methodology and justification)[J]. *Earthquake Spectra*, **10**: 617-653.
- Borcherdt R D. 2002. Empirical evidence for acceleration-dependent amplification factors[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **92**(2): 761-782.
- Boore D M, Joyner W B, Fumal T E. 1997. Equations for estimating horizontal response spectra and peak acceleration from western North American earthquakes: A summary of recent work[J]. *Seism Res Lett*, **68**(1): 128-153.
- Bonilla L F, Steidl J H, Gariel J C, et al. 2002. Borehole response studies at the Garner Valley downhole array, Southern California[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **92**(8): 3 165-3 179.
- Building Seismic Safety Council. 1995. *NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings* (1994 edition)[S]. Washington D C: Building Seismic Safety Council, FEMA 222A/223A: 32-36.
- Building Seismic Safety Council. 2004. *NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures* (2003 edition)[S]. Washington D C: Building Seismic Safety Council, FEMA 450/451: 19-38.
- Campbell K W, Bozorgnia Y. 2000. New empirical models for predicting near-source horizontal, vertical, and V/H response spectra; Implications for design[C]//*Proceedings of the Sixth International Conference on Seismic Zonation*. Oakland, California: Earthquake Engineering Research Institute.
- Campbell K W. 1997. Empirical near-source attenuation relationships for horizontal and vertical components of peak ground acceleration, peak ground velocity, and pseudo-absolute acceleration response spectra[J]. *Seism Res Lett*, **68**(1): 154-179.
- Crouse C B, McGuire J W. 1996. Site response studies for purpose of revising NEHRP seismic provisions[J]. *Earthquake Spectra*, **12**(3): 407-439.

- Dimitriu P P, Papaioannou C A, Theodulidis N P. 1998. EURO-SEISTEST strong-motion array near Thessaloniki, Northern Greece: A study of site effects[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **88**(3): 862-873.
- Dobry R, Borcherdt R, Crouse C, *et al.* 2000. New site coefficients and site classification system used in recent building seismic code provisions[J]. *Earthquake Spectra*, **16**(1): 41-67.
- Dobry R, Ramos R, Power M S. 1999. Site factors and site categories in seismic codes[R]. *Technical Report MCEER-99-0010*: 81.
- Gulkan P, Kalkan E. 2002. Attenuation modeling of recent earthquakes in Turkey[J]. *Journal of Seismology*, **6**(3): 397-409.
- Jorge A, Kojiro I. 1997. Nonlinearity, liquefaction, and velocity variation of soft soil layers in Port Island, Kobe, during the Hyogo-ken Nanbu earthquake[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **87**(5): 1 244-1 258.
- Joyner W B, Boore D M. 2000. Recent developments in earthquake ground-motion estimation[C]// *Proceedings of the Sixth International Conference on Seismic Zonation*. Oakland, California; Earthquake Engineering Research Institute, Vol. II: 679-685.
- Kobayashi S, Takahashi T, Matsuzaki S, *et al.* 2000. A spectral attenuation model for Japan using digital strong motion records of JMA87 type[C]// *Proceedings of Twelfth World Conference on Earthquake Engineering*. Auckland, New Zealand; Elsevier Science Ltd, Paper No. 2 786.
- Lee V W, Trifunac M D, Todorovska M I, *et al.* 1995. Empirical equations describing attenuation of peak of strong ground motion, in terms of magnitude, distance, path effects and site conditions[R]// *Technical Report. CE 95-02*. Los Angeles: Department of Civil Engineering, University of Southern California: 51-71.
- Molas G L, Yamazaki F. 1995. Attenuation of earthquake ground motion in Japan including deep focus events[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **85**(5): 1 343-1 358.
- Rodriguez M A, Bray J D, Abrahamson N. 1999. Characterization of site response general categories[R]// *PEER Report 1999/03*. Berkeley, California; Pacific Earthquake Engineering Research Center: 24-27.
- Sadigh K, Chang C Y, Egan J A, *et al.* 1997. Attenuation relationships for shallow crustal earthquakes based on California strong motion data[J]. *Seism Res Lett*, **68**(1): 180-189.
- Satoh T, Fushimi M, Tatsumi Y. 2001. Inversion of strain-dependent nonlinear characteristics of soil using weak and strong motions observed by boreholes sites in Japan[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **91**(2): 365-380.
- Seed H B, Romo M P, Sun J I, *et al.* 1988. The Mexico earthquake of September 19, 1985: Relationships between soil conditions and earthquake ground motions[J]. *Earthquake Spectra*, **4**: 687-729.
- Shabestari K T, Yamazaki F. 2000. Attenuation relation of response spectra in Japan considering sitespecific term[C]// *Proceedings of Twelfth World Conference on Earthquake Engineering*. Auckland, New Zealand; Elsevier Science Ltd, Paper No. 1 432.
- Silva W, Darragh R, Gregor N, *et al.* 2000. *Reassessment of Site Coefficients and Near-Fault Factors for Building Code Provisions*[R]. USGS NEHRP Program Report 98-HQ-GR-1010: 55.
- Spudich P, Joyner W B, Lindh A G, *et al.* 1999. SEA99: A revised ground motion prediction relation for use in extensional tectonic regimes[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **89**(5): 1 156-1 170.
- Stewart J P, Liu A H, Choi Y, *et al.* 2001. *Amplification Factors for Spectral Acceleration in Active Regions*[R]. Pacific Earthquake Engineering Research Center Report 2001/10: 33-68.
- Takahashi T, Kobayashi S, Fukushima Y, *et al.* 2000. A spectral attenuation model for Japan using strong motion data base[C/CD]// *Proceedings of the Sixth International Conference on Seismic Zonation*. California; Palm Springs, Paper No. 00194.
- Tao Xiaxin, Geng Shuwei. 2003. Earthquake action provision in GB50011-2001 and there improvements[C]// *Proceedings of International Conference on Advances and New Challenges in Earthquake Engineering Research*. Hong Kong: [s. n.], 2002.
- Tao X X, Geng S W, Tao Z R. 2006. Some Thoughts on Earthquake Action Provision in Seismic design Code[C/CD]// *Proceedings of 8th US National Conference on Earthquake Engineering*. San Francisco, USA: [s. n.].

- Wen K L. 1994. Nonlinear soil amplification inferred from downhole strong seismic motion data[J]. *Geophysical Res Lett*, **21**(24): 2 625-2 628.
- Youngs R R, Chiou S J, Silva W J, *et al.* 1997. Strong ground motion attenuation relationships for subduction zone earthquakes[J]. *Seism Res Lett*, **68**: 58-73.

SITE COEFFICIENTS SUITABLE TO CHINA SITE CATEGORY

Lü Hongshan Zhao Fengxin

(*Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China*)

Abstract: The basis for the National Earthquake Hazards Reduction Program site coefficients is summarized in the paper. The comparison of site classification between China and US code provisions has been carried out. The relationship between two site classifications has been found by the analysis of wave velocity of site soil. Thus amplitude-dependent site amplification factors for China site classification has been gained by transformation from US amplification factors. Two amplification factors are specified: F_a for short periods and F_v for longer periods. On the contrast, there is only one long period factor and not a short period factor in the current China code provision.

Key words: site classification; seismic code; average shear-wave velocity; site coefficients

地震学报
ACTA SEISMOLOGICA SINICA