第 27 卷 第 3 期
2005 年 5 月 (292～300)

地 震 学 报
ACTA SEISMOLOGICA SINICA

Vol. 27, No. 3
May, 2005

文章编号: 0253-3782(2005)03-0292-09

反应谱对构造环境剪应力场的依赖性*

李保昆[1,2)] 陈培善[1)] 白彤霞[1)]

1) 中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所
2) 中国北京 100036 中国地震台网中心

摘要 在以前理论工作的基础上，导出了构造环境剪应力值对反应谱的影响. 在美国知名学者 Boore 等建立的预测公式 BJF94 的基础上，提出了新的预测公式 CLB20. 在 CLB20 中引进了应力场量值 τ_0 对 SA 的影响项. BJF94 主要是基于美国西部的强震观测资料作出的经验预测公式，而 SEA99 是基于全球张性地区的强震观测资料作出的预测公式. 我们把两者的预测结果进行了全面的比较，发现 BJF94 的预测值 lg(*Y*) 减去 0.16 个对数单位后，与 SEA99 的预测值十分接近. 这说明张性地区的 lg(*Y*) 较小；地区性差异主要表现在构造环境剪应力场的差异上. 如果这个因素在预测公式中能得到适当体现，同时预测公式中的震级标度都用全球统一的矩震级，距离都使用多数人倾向使用的断层投影距，那么预测公式的地区性差异将大大减轻，以至最后消失，有可能构造出全球适用的预测公式. 我们的抗震设计直接引用美国研究者发表的反应谱衰减结果(例如 BJF94 和 SEA99)，不会导致太大的误差.

关键词 加速度反应谱 构造环境剪应力场 反应谱预测公式 矩震级 断层投影距
中图分类号: P315.72+7 **文献标识码:** A

引言

场地的加速度反应谱和峰值加速度是现在抗震设计中不可缺少的重要参数，目前仍然是相当活跃的研究领域. 随着数字化高精度强震观测数据的不断增多，特别是美国 1989 年的 Loma Prieta 地震 (*M*7)，1992 年 Landers 地震 (*M*7.3)，Big Bear 地震(*M*6.4)和 1994 年 Northridge 地震(*M*6.7)；1995 年希腊 Kozani 地震(*M*6.6)及其余震；1995 年土耳其 Dinar 地震(*M*6.4)；1995 年埃及 Gulf of Agaba，Nuweiba 地震(*M*7.2). 这些地震都有大量的强震观测数据. 许多地震工作者把这些观测数据加进去，又进一步改进了他们以前得到的经验拟合预测公式(Boore *et al*，1994，1997；Spudich *et al*，1996，1997，1999；Atkinson，Boore,1997；Sadigh *et al*，1997；Campbell，1997).

近 20 年，我们也得到了不少强震观测资料. 但是往往是一次地震只有少数几个台，有的甚至 1 个台的观测数据，形成不了场，而且更多为模拟记录. 用这些数据可以统计研究峰值加速度(*PGA*)、速度(*PGV*)和位移(*PGD*)的衰减关系和预测公式(陈培善等，1998，1999a，b). 但是用它们来研究反应谱的预测公式，仍然比较困难. 美国的强震观测资料已相当丰富，并且研究得也相当仔细. 那么，我们能否直接借用他们的预测公式用于我国的

* 国家自然科学基金(49874010)和地震科学联合基金重点项目(95-07-441)资助. 中国地震局地球物理研究所论著号 05AC1015.
2004-02-19 收到初稿，2004-10-28 收到最后修改稿，2004-12-06 决定采用.

http://www.dizhenxb.org.cn

抗震设计呢？本文企图回答这个问题.

1　影响反应谱的因素分析

1.1　影响反应谱的 3 个因素

目前几乎所有经验预测公式都是由 3 部分独立组成，即震源、几何扩散和介质吸收、场地条件 3 部分. 也就是说这 3 个因素影响了场地的 PGA，PGV，PGD 以及 SA. 以加速度反应谱(SA)为例，写成函数形式(Sadigh *et al*，1997)即

$$SA(M, r_{jb}, f) = E(M, f)\, D(r_{jb}, Q, f)\, I(f) \tag{1}$$

式中，M 为矩震级；r_{jb} 为断层投影距，即场地至断层在地面的投影的最近距离；f 为频率，E 为震源谱，D 为几何扩散和介质吸收的影响，Q 为路径介质的品质因素，I 为场地条件的影响.

过去，不同研究者的预测方程所采用的震级和距离参数不统一(Joyner，Boore，1988；Campbell，Bozorgnia 1994)，使得不同的预测方程比较起来很困难. 表面看起来，预测方程有地区性差异，即一个地区一个样. 例如，对于震级，有面波震级 M_S，近震震级 M_L 和矩震级 M_W. 现在都逐渐趋于统一，都使用全球统一的绝对震级标度矩震级 M_W，这样世界上各个国家或不同地区地震大小的标度都统一了；对于距离，过去有震源距，震中距，能中距，断层距，断层投影距等. 大震往往有很大的破裂长度，在研究近场强地面运动衰减时，不同的距离会差别较大，而导致不同的结果. 而真正影响场点地震动值的仅仅是整个破裂带上距场点最近的那一部分. 所以用断层投影距 r_{jb} 比较合适，现在许多研究者都倾向使用它. 如果我们量度场地到震源的距离都使用 r_{jb}，那么，不同地区，不同地震，量度距离的差异性将消失. 下面分析 3 个因素的地区性差异.

1.2　场地条件

场地条件的影响指场点附近的地质构造、地形和建筑物等的影响，这种影响当然有地区性. 当地的地质构造是场地条件的主要部分，用以描述这种影响的参数仍有相当大的共性. 例如，比较简单的划分为基岩和土层两种场地. 更细致的划分是根据覆盖层的厚度和基岩的性质，划分为地表沉积层、浅土层、深土层、软基岩和硬基岩(Boore *et al*，1994，1997；Campbell，Bozorgnia，1994).

近年来，美国 Boore 等(1994，1997)发展了一种更定量的表示方法，即用近地表 30 m 深的剪切波波速 v_S 来划分场地类型. 分别为 A～E 类，A 类为 v_S>1 500 m/s，B 类为 750～1 500 m/s，C 类为 360～750 m/s，D 类为 180～360 m/s，E 类为<180 m/s. 一般硬土取 v_S=310 m/s，岩石取 v_S=620 m/s(Boore *et al*，1997). 如果采用这种方法来控制和描述场地条件的差异，则这种方法可以用于世界各地，没有地区性差异. 特殊场地、地形、建筑物等，当然要特殊考虑.

1.3　传播介质

描述从震源到场点的介质参数，最常用的是距离和传播路径介质的平均 Q 值. 距离参数如果都采用断层投影距 r_{jb}，则距离参数无地区差异，Q 值当然有地区差异. 但是只有当 r_{jb} >100 km 以后，不同 Q 值的影响才会显著起来. 近距离时，Q 值对各种地震动参数衰减的影响很小，甚至可以忽略. 当不忽略时，采用适当的当地的 Q 值以后，Q 值的影响亦可加以校正. 这样，距离和 Q 值的影响就没有地区性了，可以用适当的衰减公式加以描述.

特殊构造的影响，例如盆地边缘、盆地中央等，断层的阻隔效应、地形等则有强烈的地区性，应加以特殊考虑.

1.4 震源和构造环境

如果地震震源仅用一个参数，即统一的矩震级 M_W 来描述，则世界各地的震源就没有地区差别. 现在已经知道不同的构造环境下发生的同样大小的地震（M_W 相同），地震动值会有差异. 早在 1981 年，Hanks 和 MeGuire (1981) 就推导了均方根加速度 a_{rms} 与应力降 $\Delta\sigma$ 的关系：

$$a_{rms} = 0.85\frac{(2\pi)^2}{106}\frac{\Delta\sigma}{\rho R}\sqrt{\frac{f_{max}}{f_0}} \tag{2}$$

由于测定应力降的困难和测定结果的分散，应力降对 a_{rms} 的影响，尚未在实际的预测方程中体现出来. McGarr(1984)发现逆断层地震产生的地震动值高于走滑断层和正断层地震的值. Boore 等(1997)用许多观测资料进一步证实了这一点，并在预测方程中得到体现. Spudich 等(1996，1997，1999)的工作也证实了这一点.

Spudich 等(1996，1997)用全球观测资料，得到了张性地区的预测公式 SEA96. 1999 年又进一步改进成 SEA99. 我们把他和 Boore 等(1994) 得到的预测公式 BJF94 进行了比较，发现 SEA99 的 lg(PGA)值和 lg(SA)值系统地比 JBF94 的值低 0.1～0.2. 也就是说，张性地震产生的地震动值较低.

根据陈培善等导出的地震定标率和断裂力学破裂模式，可以导出一个矩形断层，二维破裂模式的远场平均加速度谱的表达式(陈培善，陈海通，1989；陈培善，Duda，1993)：

$$\begin{cases} |A_{cc}(r,\omega)| = \dfrac{\mu\langle R^c_{\theta\varphi}\rangle}{4\pi\rho c^2 r}|\langle A_s(\omega)\rangle| \\ |A_s(\omega)| = M_0\begin{cases}\omega^2 & \text{当} \quad \omega \leqslant \omega_1(\text{Ⅰ 区}) \\ \omega_1\omega & \text{当} \quad \omega_1 < \omega \leqslant \omega_2(\text{Ⅱ 区}) \\ \omega_1\omega_2 & \text{当} \quad \omega_2 < \omega \leqslant \omega_3(\text{Ⅲ 区}) \\ \omega_1\omega_2\omega_3/\omega & \text{当} \quad \omega > \omega_3(\text{Ⅳ 区})\end{cases} \end{cases} \tag{3}$$

式中，μ 是刚性模量，$R^c_{\theta\varphi}$ 是 P 波($c=\alpha$) 或 S 波($c=\beta$) 的辐射图形因子，〈 〉表示在震源球上的平均，ρ 是密度，r 是震源距，$A_s(\omega)$ 是震源加速度谱，M_0 是地震矩. ω 为圆频率；ω_1，ω_2，ω_3 是拐角圆频率

$$\omega_1 = 1/(c_L L) \qquad \omega_2 = 1/(c_W L) \qquad \omega_3 = 1/(c_\tau L)$$

式中，L 是断层长度，c_L 和 c_W 分别是在断层长度和宽度方向上的破裂慢度，c_τ 是反比于位错速度的量，假定它们均为常数.

L 与 M_0 的关系为

$$M_0 = c_M L^3 = \frac{\pi\tau_0^2}{16\tau_y}L^3 \tag{4}$$

式中，c_M 是一个与环境剪应力状态有关的参数，τ_0 是构造环境剪应力值，τ_y 是屈服剪应力强度.

在 $|\langle A_s(\omega)\rangle|$-$\omega$ 平面图上(陈培善，Duda，1993，文中图 1)，由 ω_1，ω_2 和 ω_3 决定的 3 条斜直线把 $|\langle A_s(\omega)\rangle|$-$\omega$ 平面分成 4 个区域. 任何震级的地震动峰值加速度谱都在 Ⅲ 区，即在 $\omega_2 \sim \omega_3$ 范围内. 这时，震源处的加速度振幅谱峰值(FS)与地震矩 M_0 和构造环境剪应

力值的关系为

$$|\langle A_s(\omega)\rangle| = M_0\omega_1\omega_2 = \frac{1}{c_L c_W} M_0^{1/3}\left(\frac{\pi\tau_0^2}{16\tau_y}\right)^{2/3}$$

$$FS \propto \tau_0^{4/3} M_0^{1/3} \tag{5}$$

根据上面诸式，可进一步导出震源处 PGA，PGV 和 PGD 与 M_0 和 τ_0 的关系式(陈培善，Duda，1993)为

$$PGA \propto \tau_0^2 \tag{6}$$

$$PGV \propto \tau_0^{4/3} M_0^{1/3} \tag{7}$$

$$PGD \propto \tau_0^{2/3} M_0^{2/3} \tag{8}$$

并且用观测资料证实了上述关系式的正确性(陈培善，Duda，1993；Chen，Duda，1996).

公式(5)～(8)说明上述诸量对构造环境剪应力值有强烈的依赖性. 实际上，McGarr (1984)和 Boore 等(1994，1997)发现的逆断层地震产生的地震动值高于走滑断层和正断层地震的值，正是反映了地震动值对构造应力场的依赖性，因为产生逆断层的构造环境应力值 (或背景应力值)比产生正断层或走滑断层的要高(McGarr，1984). 根据式(5)～(8)，我们认为不同地区(例如中国和美国)发生的地震，其最大的差别就是构造应力场的差别.

如果我们能把这些构造环境因素都考虑进去，在预测公式中得到适当体现，那么，这样得到的预测公式就能用于世界不同地区.

2　预测公式的改进

我们已经在 PGA，PGV 和 PGD 的预测公式中考虑了构造环境剪应力值 τ_0 的影响，得到了较好的结果(陈培善等，1998，1999a，b). 我们考察了世界上许多知名学者对反应谱 SA 和 PGA 的衰减作出的经验拟合公式，从资料的完整性，方法的合理性，工作的细致程度，以及实际检验结果来看，我们认为 BJF94 和 SEA99 是最好的. BJF94 是美国 Boore 等(1994)经过 20 余年研究得到的衰减公式；而 SEA99 是由 Spudich 等(1999)11 位美国著名学者近年提出的预测公式. 我们在 BJF94 的基础上考虑 τ_0 值对反应谱的影响.

BJF94 对 PGA 和 SA 的预测方程为

$$\ln(Y) = b_1 + b_2(M-6) + b_3(M-6)^2 + b_5\ln(r) + b_v\ln(v_S/V_A) \tag{9}$$

式中，ln 是自然对数；Y 是 PGA 值或反应谱 SA，以 9.8 m/s^2 为单位(g = 9.8 m/s^2)，对 SA，Y 是 5% 阻尼时随机水平分向值；M 是矩震级；$r=\sqrt{r_{jb}^2+h^2}$，r_{jb} 为断层投影距；h 为等效震源深度，v_S 为地表 30 m 内的平均 S 波速度. 式中的常数 $b_1 \sim b_5$，b_V，V_A，h 都在 Boore 等(1997) 文献中的表 8 给出. 为了有一直观的形象，我们截取少量值，列于表 1.

从表中看到，原 b_1 分成 3 项：b_{1SS}，b_{1RV}，b_{1all}分别对应于走滑、逆冲和所有地震. 从第一行系数中看到，逆冲断层地震的 ln(PGA)值比走滑的要大 0.196 = (−0.117 − (−0.313))，即逆冲地震的 PGA 值是走滑地震的 1.22 倍. 各种周期的反应谱绝大部分也是逆冲断层的大. 系数 b_2 代表了 Y 值对震级 M 的依赖性，b_3 是 Y 值对 M 的非线性依赖性的修正，是一个很小的值. b_5 是 Y 值随距离的衰减，他们已放弃了几何扩散衰减 b_5 应为 −1.0的约束(1/r 衰减)，而 b_5 的绝对值变得更小，使之符合近年来的观测事实(Boore *et al*，1994). 在早期的预测公式 JB82 中的系数 b_4，它代表了吸收系数即介质 Q 值

表 1 预测方程（5）中的部分系数，它们被用于估计加速度反应谱在 5%的阻尼时的随机水平分向值，周期为 0 的一行，用于估计峰值加速度

周期/s	b_{1ss}	b_{1rv}	b_{1all}	b_2	b_3	b_5	b_v	V_A	h
0.000	−0.313	−0.117	−0.242	0.527	0.000	−0.778	−0.371	1 396	5.57
0.100	1.006	0.187	1.059	0.753	−0.226	−0.934	−0.212	1 112	6.27
0.200	0.999	1.170	1.089	0.711	−0.207	−0.924	−0.292	2 118	7.02
0.500	−0.122	0.087	−0.025	0.884	−0.090	−0.846	−0.553	1 782	4.13
1.000	−1.133	−1.009	−1.080	1.036	−0.032	−0.798	−0.698	1 406	2.90
2.000	−1.699	−1.801	−1.743	1.085	−0.085	−0.812	−0.655	1 795	5.85

的影响．在 BJF94 中，b_4 消失了．表示 Q 的影响已经可以忽略．b_v 代表了场地条件的影响，是周期的函数．如果代入硬土 $v_S=310$ m/s，一般基岩 $v_S=620$ m/s，则土层上的 PGA 值是基岩的 1.3 倍．V_A 值和 h 值在拟合经验公式时确定，可以看成是等效基岩速度和等效震源深度，它们对 Y 值的影响相对较小．他们使用的资料都是发生在美国西部的地震观测资料，震级为 M5.5～7.5、距离 $r<80$ km 范围内，所以他们称预测公式也只适用于这个范围内．

由于 SA 和拟速度反应谱（PSV）与震源处的加速度振幅谱峰值（FS）呈线性关系（当然仅是统计上的线性关系），我们已找到了 FS 与 τ_0 的关系，即式(5)．于是，我们在式(9) 中加一项，即考虑构造环境剪应力场的影响，得到我们的预测公式 CLB20：

$$\ln(Y)=\frac{4}{3}\ln(\tau_0/\tau_a)+b_1+b_2(M-6)+b_3(M-6)^2+b_5\ln(r)+b_v\ln(v_S/V_A) \quad (10)$$

式中，τ_0 是当地震源处的构造环境剪应力值；τ_a 是美国地震的平均应力值，$\tau_a=11.85$ MPa（陈培善等，1998）．

SA 对震级、距离、衰减吸收、场地条件、输入波周期等因素的定量依赖关系，BJF94 和 SEA99 预测公式都已经考虑得很周到了．唯一有构造应力场对 SA 的影响，Boore、Joyner、Fumal 和 Spudich 等人已有所察觉，但无定量关系．我们就是在他们已经得到的关系的基础上，定量地加进了构造环境剪应力场的影响．

我们对全球浅源地震构造环境剪应力场的初步研究表明，在洋脊地区，其应力值低．全球浅源地震平均应力值为 10 MPa 左右（肖磊，陈培善，1997）．中国地区的应力值是东部低，西部和台湾高，新疆最高（陈培善等，1995，2001）．

3 预测公式的比较

在预测公式(10)中，如果取 $\tau_0=11.85$ MPa，则 CLB20 就与 BJF94 完全一样．SEA96 和 SEA99 是近年出现的使用了全球观测资料（包括希腊、意大利和土耳其的地震）和研究得比较仔细的预测公式（Spudich *et al*，1996，1997，1999）．我们拟把 CLB20 与 SEA99 进行比较．在式(10)中，取 $\tau_0=9.0$ MPa；$v_S=310$ m/s，即土层的值；b_1 取 b_{1all} 的值．

图 1～图 4 给出了 CLB20 和 SEA99 两个预测公式预测值的比较．图 1 给出了 PSV 随周期的变化，固定距离 $D=70$ km；震级取 $M_W=5.5$，6.5 和 7.5．由图看到它们是十分接近的．短周期部分（$T<0.3$ s）CLB20 略低，长周期部分（$T>0.3$ s），它略高．如果取 $\tau_0=11.85$ MPa，则 CLB20 就变成 BJF94，这时全部曲线将向上平移 0.16 个对数单位．于是将全部比 SEA99 高．再次证明，张性地区的应力值较低．

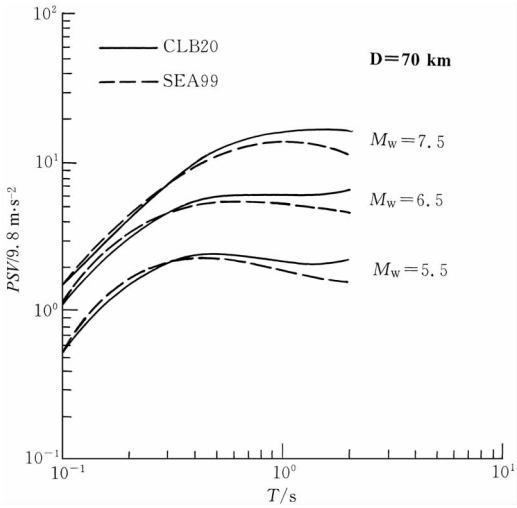

图 1　随机水平分向在 5%阻尼时的拟速度反应谱(*PSV*)随周期的变化

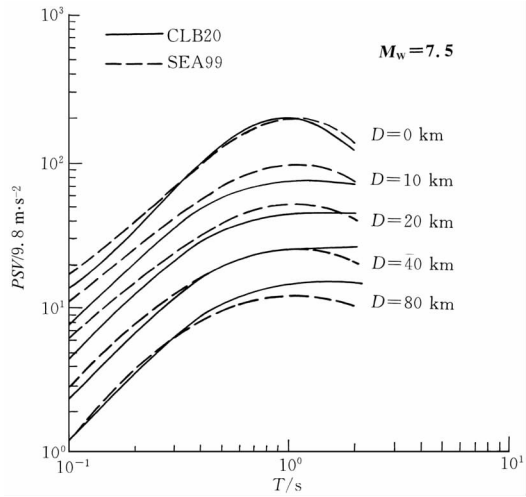

图 2　随机水平分向在 5%阻尼时的拟速度反应谱(*PSV*)随周期的变化

图 2 与图 1 相似，但是其固定震级 $M_W=7.5$，考查不同距离 *PSV* 随周期变化. 由图看到，它们也是很接近的，短周期部分($T<0.3$ s) CLB20 比 SEA99 略小，长周期部分($T>0.3$ s)，它略高. 如果取 $\tau_0=11.85$ MPa，则 CLB20 将全部高于 SEA99. 再一次证明了张性地区的应力值较低.

图 3 给出了 *SA* 随周期的变化. 情况与图 1 类似，不再赘述.

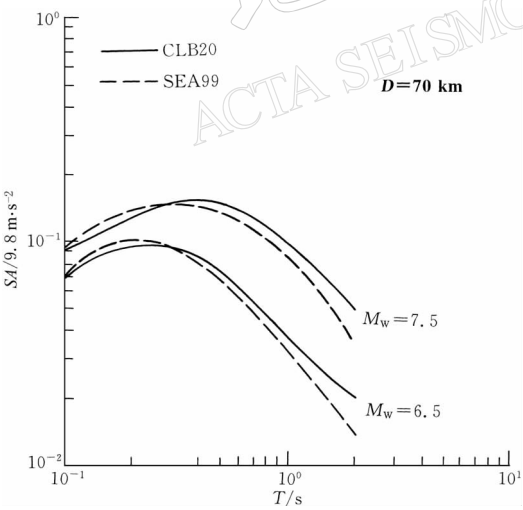

图 3　随机水平分向在 5%阻尼时的加速度反应谱(*SA*)随周期的变化

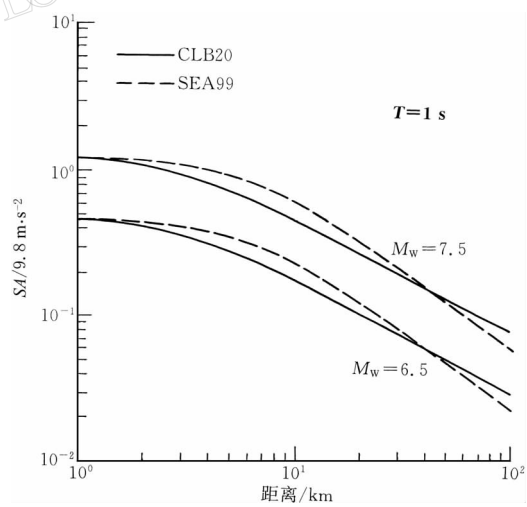

图 4　随机水平分向在 5%阻尼时的加速度反应谱(*SA*)随距离的变化

图 4 给出了 *SA* 随距离的变化. 其固定周期 $T=1$ s，$M_W=6.5$，7.5. 由图看到，两者也是很接近的，但是 SEA99 衰减较快.

通过比较图 1～图 4，可以看出，CLB20 与 SEA99 两者是十分相近的. 也就是说，广

地震学报 ACTA SEISMOLOGICA SINICA

泛地采用全球张性地区的强震观测资料得到的 SEA99，与采用美国西部地区的强震观测资料得到的 BJF94 减少 0.16 个对数单位以后(即 CLB20 公式采用的值)，两者是十分接近的. 这说明，当考虑和比较不同研究者用不同地区的强震观测资料做出的 SA 和 PSV 的衰减公式时，若震级和距离都采用同一标度(矩震级 M_W 和断层投影距 r_{jb})，并且考虑了构造环境剪应力值的影响以后，SA 和 PSV 衰减关系的地区性差异可以大大减轻，以至完全消失.

4 预测公式的具体应用

要想应用式(10)预测一个场地的 SA 值，必须知道发震地区的构造环境剪应力场量值 τ_0，这是一个十分困难的问题. 但是，工程建设不能等待，必须应用. 我们认为一个折中的办法，就是求取一个地区的平均应力场量值，并且与美国西部的应力值比较. 但是就这个问题，也还研究得十分不够. 根据我们的初步研究，全球平均值 $\tau_0=10$ MPa. 美国西部平均值为 12 MPa；中国东部平均值约为 10 MPa，西部平均值约为 12 MPa，新疆最高，达 17 MPa. 但是某次地震的 τ_0 值与一大片地区的平均 τ_0 值还会有较大差别. 以美国西部地震为例，1994 年北岭(Northridge) 地震的 τ_0 平均值高达 18.4 MPa，1992 年的 Landers 地震为 15.2 MPa，1997 年的 Imperial Valley 地震 τ_0 值为 9.8～12.2 MPa(陈培善等，1998). 由于 $PGA\propto\tau_0^2$，所以 τ_0 值的这些差异，可以引起 PGA 的较大差异. 北岭地震的 PGA 观测值就几乎比 JB93 和 C88(Joyner，Boore，1988 发表的预测公式)的预测值高出了将近一倍(陈培善等，1998).

目前，在我国和美国西部的构造应力场研究得还相当不够的情况下，我们认为，对于 SA 的衰减，直接引用美国研究者发表的结果(例如 BJF94 和 SEA99)不会导致太大的误差.

5 讨论和结论

追踪研究强地震参数(PGA，SA，PSV 等)经验衰减关系的权威学者 Joyner 和 Boore (1988)，Boore 等(1997)，Campbell 和 Bozorgnia (1994)，Campbell(1997)以及 Spudich 等(1996，1997，1999)的工作，就会发现，发生一些强震以后，他们就添加新的强震观测资料，以改进或作出新的预测关系. 有时，预测关系中的系数变化还比较大. 例如，SEA96 变成 SEA99 以后，反映随距离衰减的系数 b_5，在 SEA96 中 $|b_5|$ 还比较小(0.85～1.0)，反映了 SA 和 PGA 随距离衰减较慢的事实. 而到 SEA99 中，$|b_5|$ 反而变得较大(1.0～1.25)，这不符合当 $r_{jb}>100$ km 以后的观测事实. 由于 Spudich 等使用 $r_{jb}>100$ km 的资料相当少，所以不能反映震中距较大的情形. 而 Spudich 自己也声称，SEA99 只适用于 $r_{jb}<100$ km 的范围. 似乎预测公式在随距离的衰减方面 SEA99 还不如 SEA96 好. 出现这种情况，我们认为是没有考虑物理背景，仅仅使用纯最小二乘技术拟合观测资料带来的结果. 如果在拟合时，考虑到多种物理因素的影响背景，公式中的常数可能会更稳定. 例如，考虑震级对 $\ln(Y)$ 的影响时，可以首先求出 $\partial\ln(Y)/\partial M$；考虑随距离的变化，可先求出 $\partial\ln(Y)/\partial\ln(r)$；考虑 τ_0 值的影响，可先求出 $\partial\ln(Y)/\partial\ln(\tau_0)$. 同时，还要加上一些理论上的考虑. 这样，可能就不会因为由于增加一批强震观测资料，导致系数变化太大，而逐渐得到带有普适性的结果.

http://www.dizhenxb.org.cn

我们在 BJF94 的基础上，加上构造环境剪应力场 τ_0 的影响项$(4/3)\lg(\tau_0/\tau_a)$后，得到 CLB20，即式(10). 在 CLB20 中，若取 $\tau_0=11.85$ MPa(即 τ_a 值，美国西部的 τ_0 平均值)，则 CLB20 与 BJF94 完全一样. 我们在 CLB20 中取 $\tau_0=9.0$ MPa，然后与 SEA99 全面比较，结果表明(图 1～图 4)，两者十分相近. 这说明：张性地区发生的地震，*PGA* 和 *SA* 均较小，约小 0.16 对数单位；在 *SA*，*PGA* 和 *PSV* 的衰减关系中，若考虑了构造背景应力场或发震应力场的量值 τ_0 对它们的影响以后，*SA* 和 *PSV* 衰减关系的地区性差异可以大大减轻，以至完全消失，因为 τ_0 值是重要的影响参数.

目前，在构造应力场量值尚不清楚的情况下，我国的抗震设计直接引用美国研究者发表的结果(例如 BJF94 和 SEA99)，我们认为不会导致太大的误差. 当然，下面进一步的工作，是研究 τ_0 值的地理分布，以得到潜在震源区准确的 τ_0 值.

研究过程中，对本文的论点及有关问题，我们曾与彭克中、鄢家全、赵凤新等教授进行了有益地讨论，在此一并表示衷心地感谢.

参　考　文　献

陈培善，陈海通. 1989. 由二维破裂模式导出的地震定标律[J]. 地震学报，**11**(4)：337～350

陈培善，Duda S J. 1993. 峰值速度和加速度对环境剪应力场的依赖性[J]. 地球物理学报，**36**(2)：185～194

陈培善，肖磊，白彤霞. 1995. 根据环境应力场寻找中国大陆地区的潜在震源区[J]. 地震学报，**17**(3)：294～304

陈培善，李保昆，白彤霞. 1998. 根据构造环境应力场预测水平峰值加速度[J]. 地球物理学报，**41**(4)：502～517

陈培善，李保昆，白彤霞. 1999a. 中国强地震速度衰减研究[J]. 地球物理学报，**42**(3)：358～370

陈培善，李保昆，白彤霞. 1999b. 中国强地震位移衰减研究[J]. 地球物理学报，**42**(4)：495～507

陈培善，白彤霞，成瑾. 2001. 中国地区构造环境剪应力场分布特征[J]. 地球物理学报，**44**(增刊)：91～97

肖磊，陈培善. 1997. 全球主要地震活动带上的应力分布图象[J]. 地震学报，**19**(2)：129～138

Atkinson G M, Boore D M. 1997. Some comparisons between recent ground motion relations[J]. *Seism Res Lett*, **68**: 24～40

Boore D M, Joyner W B, Fumal T E. 1994. *Estimation of Response Spectra and Peak Accelerations from Western North American Earthquakes: An Interim Report, Part* 2[R]. U S Geol Surv Open-File Rep, 40, 94～127

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**: 28～153

Campbell K W, Bozorgnia Y. 1994. Empirical analysis of strong ground motion from the 1992 Landers, California, earthquake[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **84**: 573～588

Campbell K C. 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**: 154～179

Chen P S, Duda S J. 1996. Fracture mechanics rupture model of earthquakes and an estimate of ambient shear stress[J]. *Phys Earth Planet Inter*, **93**(3-4): 299～308

Hanks T C, McGuire R K. 1981. The character of high frequency strong ground motion[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **71**: 2 071～2 095

Joyner W B, Boore D M. 1988. Measurement, characterization, and prediction of strong ground motion[A]. In: *Proc of Earthquake Engineering & Soil Dynamics* Ⅱ[C]. GT Div/ASCE, Park City, Utah, 27-30 June 1988, 1～60

McGarr A. 1984. Scaling of ground motion parameters, state of stress, and focal depth[J]. *J Geophys Res*, **89**: 6 969～6 979

Sadigh K, Chang C Y, Egan J A, *et al*. 1997. Attenuation relationships for shallow crustal earthquakes based on Califor-

nia strong-motion data[J]. *Seism Res Lett*, **68**: 180～189

Spudich P, Fletcher J, Hellweg M, *et al*. 1996. *Earthquake Ground Motions in Extensional Tectonic Regimes*[R]. U S Geological Survey Open-File Report 96-292, 351

Spudich P, Fletcher J, Hellweg M, *et al*. 1997. SEA96: a new predictive relation for earthquake ground motions in extensional tectonic regimes[J]. *Seism Res Lett*, **68**: 190～198

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

THE DEPENDENCE OF RESPONSE SPECTRUM ON THE TECTONIC AMBIENT SHEAR STRESS FIELD

Li Baokun[1, 2] Chen Peishan[1] Bai Tongxia[1]

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

2) *China Earthquake Networks Center*, *Beijing* 100036, *China*

Abstract: It has been analyzed the influence of the tectonic ambient shear stress value on response spectrum based on the previous theory. Based on the prediction equation BJF94 presented by the famous American researchers, CLB20, a new prediction formula is proposed by us, where it is introduced the influence of tectonic ambient shear stress value (τ_0) on response spectrum. BJF94 is the prediction equation which mainly depends on strong ground motion data from western USA, while the prediction equation SEA99 is based on the strong ground motion data from extensional region all over the world. Comparing these two prediction equation in details, it is found that after BJF94's prediction value lg(Y) minus 0.16 logarithm units, the value is very close to SEA99′s one. This case demonstrates that lg(Y) in extensional region is smaller; the differences of prediction equation are mainly owe to the differences of tectonic ambient shear stress value. If the factor of tectonic ambient shear stress value is included into the prediction equation, and the magnitude is used seismic moment magnitude to express, which is universal used around the world, and the distance is used the distance of fault project, which commonly used by many people, then regional differences of prediction equation will become much less, even vanish, and it can be constructed the universal prediction equation proper to all over the world. The error in the earthquake-resistant design in China will be small if we directly use the results of response spectrum of USA (*e. g.* BJF94 or SEA99).

Key words: acceleration response spectrum; tectonic ambient shear stress field; prediction equation of response spectrum; seismic moment magnitude; distance of fault project

http://www.dizhenxb.org.cn