

赵培培, 王振宇, 薄景山, 谢志南. 2019. 南北地震带川滇甘陕地区竖向与水平向加速度反应谱比的统计分析. 地震学报, 41(3): 391–398. doi: 10.11939/jass.20170188.

Zhao P P, Wang Z Y, Bo J S, Xie Z N. 2019. Statistic analyses on the vertical to horizontal acceleration response spectra ratios of Sichuan-Yunnan-Gansu-Shaanxi region in the North-South Seismic Belt. Acta Seismologica Sinica, 41(3): 391–398. doi: 10.11939/jass.20170188.

南北地震带川滇甘陕地区竖向与水平向加速度反应谱比的统计分析*

赵培培¹⁾ 王振宇^{1),†} 薄景山^{1,2)} 谢志南²⁾

1) 中国河北燕郊 065201 防灾科技学院

2) 中国哈尔滨 150080 中国地震局工程力学研究所

摘要 本文收集了从南北地震带川滇甘陕地区 263 个有详细场地资料的强震台站获得的 802 组强震动记录, 按照场地、震级和震中距等因素统计分析了竖向与水平向加速度反应谱比的形状以及不同场地、震级和震中距下不同周期段内的谱比平均值, 并与建筑抗震规范 GB50011—2010 规定的 0.65 进行了比较. 结果表明: 竖向与水平向加速度反应谱比受场地、震级和震中距等因素的影响; I 类和 II 类场地在全周期段的谱比均值基本上大于 0.65; 无论何种分组情况谱比均值在 0.1—1.0 s 周期范围内基本低于定值 0.65, 周期大于 1.0 s 的谱比均值基本上远高于 0.65. 因此对于大部分抗震规范直接把竖向地震作用取为水平向地震作用的 0.65 倍, 有待商榷. 本文建议根据水平向反应谱的标定方式来确定现有竖向强震动记录的竖向地震作用.

关键词 竖向地震动 谱比 场地类别 震级 震中距

doi: 10.11939/jass.20170188

中图分类号: P315.9

文献标识码: A

Statistic analyses on the vertical to horizontal acceleration response spectra ratios of Sichuan-Yunnan-Gansu-Shaanxi region in the North-South Seismic Belt

Zhao Peipei¹⁾ Wang Zhenyu^{1),†} Bo Jingshan^{1,2)} Xie Zhinan²⁾

1) Institute of Disaster Prevention, Hebei Yanjiao 065201, China

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

Abstract: Based on 802 groups of strong ground motions collected from 263 sites in Sichuan, Yunnan, Gansu and Shaanxi Provinces, this paper analyzes the shape of the vertical to horizontal acceleration response spectra ratios on the condition of different site conditions, magnitudes and epicentral distances, as well as corresponding average value of the spectra ratio in different period intervals. And then the average spectral ratio values are compared with the standard value 0.65 specified in the Code for Seismic Design of Buildings (GB50011–2010).

* 基金项目 河北省教育厅高等学校科学研究计划项目(Z2019035, Z2019025)和国家重点研发计划(2018YFC1504004)共同资助.

收稿日期 2018–10–10 收到初稿, 2019–02–16 决定采用修改稿.

† 通信作者 e-mail: soeso@163.com



The results show that the ratios of vertical to horizontal acceleration response spectra are affected by the factors such as site, magnitude and epicentral distance. The spectral ratio of class I and class II sites in the whole period is basically greater than 0.65. Whatever the grouping situation, the mean value of spectral ratio in the period of 0.1–1.0 s is lower than 0.65. In the period larger than 1.0 s, the spectral ratio is basically much higher than 0.65. Therefore, it is worth discussing that the ratio of vertical to horizontal seismic influence coefficients is set as 0.65 in most of the codes for seismic design of building. It is suggested that the vertical seismic action of the existing vertical strong motion records should be determined according to the calibration method of the horizontal response spectrum.

Key words: vertical ground motion; spectrum ratio; site category; earthquake magnitude; epicentral distance

引言

一般结构抗震设计时,仅考虑水平向地震作用的影响,往往忽视了竖向地震作用对结构产生的影响(王国权, 2001; 周正华等, 2007).在我国抗震设计中,仅遇到高烈度区或近场的大跨结构、悬臂结构和超高层工程结构才考虑竖向地震动的作用,将竖向地震动影响系数的最大值取为水平向的 0.65 倍(中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2010).然而,近年来发生的几次强地震,在近场产生了较强的竖向地震动,部分竖向峰值加速度远远超过水平向峰值加速度.许多研究人员对这一特征进行了深入研究,其结果显示竖向与水平向的加速度谱比为一周期函数,而且与场地条件相关,短周期内的谱比大于 2/3 而长周期的谱比小于 2/3 (Bozorgnia, Niazi, 1995; Dimitriu *et al*, 1999; 周正华等, 2003; Ambraseys, Douglas, 2003; 耿淑伟, 陶夏新, 2004; 徐龙军, 谢礼立, 2007; 贾俊峰, 欧进萍, 2010; 李恒, 秦小军, 2010; 谢俊举等, 2010).

近年来,南北地震带的川滇甘陕地区发生了大量的破坏性地震(汶川地震、玉树地震、芦山地震等),该地区布设了大量的强震台站,因而获得了大量的强震动数据.随着各种特殊结构物的大量兴建,竖向地震作用的研究受到了工程界的广泛重视(徐龙军, 谢礼立, 2007; 李恒, 秦小军, 2010; 齐娟等, 2014).目前,直接以我国大量强震动记录为数据基础进行的竖向地震动研究相对来说较少,为此,本文将以南北地震带川滇甘陕地区的强震动记录($M \geq 4$)为研究对象,统计分析不同场地、震中距和震级等因素下的竖向与水平向的反应谱比,以期工程结构的竖向抗震设计提供一定的参考依据.

1 强震动记录来源与分组

本文选取南北地震带川滇甘陕地区最大峰值加速度(peak ground acceleration, 简称为 PGA) $\geq 10 \text{ cm/s}^2$ 的强震动记录作为统计资料,剔除明显不合理的强震动记录并进行基线校正处理,最终获得研究区域内有详细场地条件的强震动记录 802 组.为了更好地统计分析,按照大震近场、大震远场、小震近场、小震远场的分类对所获取的数据进行分类(赵培培, 2017; 赵培培等, 2017),其柱状图结果绘于图 1.由于我国场地类别划分中 II 类场地的分布范围较广,因此所得的 II 类场地上的强震动记录较多,又由于该地区发生大震的次数有限,所以图 1 中小震远场 II 类场地的强震动记录较多,这可能会对统计分析结果产生一定的影响.图 2 给出了不同类别场地上强震动记录随震级、震中距的变化趋势.

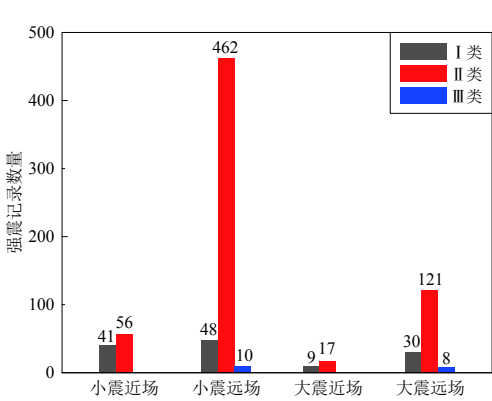


图1 强震动记录柱状图

Fig. 1 Histogram of strong ground motion recordings

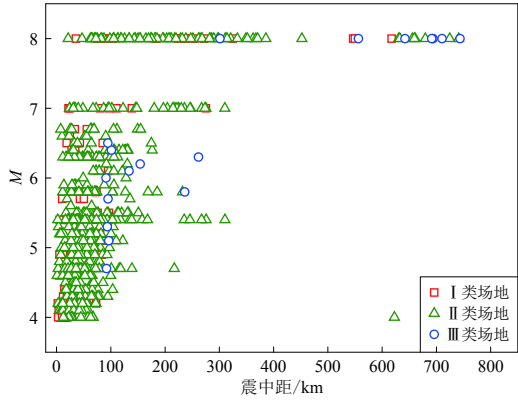


图2 强震动记录随震级、震中距的分布图

Fig. 2 Distribution of strong ground motion recordings along with magnitude and epicentral distance

2 竖向与水平向反应谱比的总体特征

本文先计算出所用强震动记录中阻尼比为0.05的加速度谱. 为了更好地分析竖向与水平向反应谱比的总体特征, 对每组强震动记录计算谱比, 然后再对谱比进行平均, 其结果如图3所示. 可见: 竖向与水平向的谱比并不是规范规定的一个定值0.65, 而是随着周期而变化; 谱比 $P(T)$ 总体的平均值为0.57, 比规范所规定的0.65要偏小些; 0—0.1 s 周期内的谱比曲线存在一峰值0.71, 远高于0.65; 其余大部分周期内的谱比值均小于0.65. 因此, 竖向反应谱不应简单地取为水平向反应谱的一定值, 而应考虑其随周期的变化.

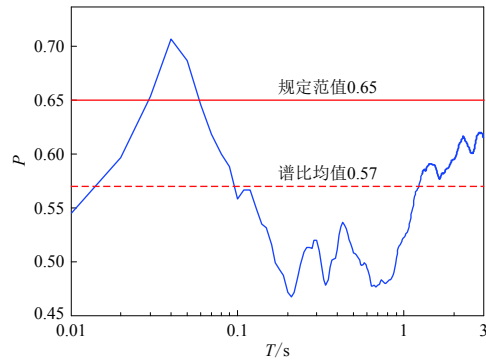


图3 反应谱比 P 随周期 T 的变化曲线

Fig. 3 Variation of average spectral ratio P with period T

3 竖向与水平向反应谱比与场地类别的关系

大量的研究表明, 竖向与水平向的谱比主要受场地类别的影响(耿淑伟, 陶夏新, 2004; 贾俊峰, 欧进萍, 2010; 李恒, 秦小军, 2010). 本文按照小震、大震、场地类别将同场地类别的强震动记录谱比进行平均, 得到平均谱比曲线, 如图4所示, 其中小震的谱比曲线周期最长取到3 s, 大震的谱比曲线周期最长取到10 s. 表1列出了小震、大震情况下不同场地的平均谱比分段均值.

从图4可看出, 场地类别对竖向与水平向谱比的影响比较显著, 不同场地的平均谱比曲线的形状基本相似, I类和II类场地基本呈两边高、中间低的现象, 但不同场地的谱比变化规律有所不同. 小震时, II类场地的谱比值基本上要高于I类场地; 0—0.1 s 周期内, II类场地的谱比值要高于《建筑抗震设计规范》(以下简称为“规范”)(中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2010)所规定的0.65, 且峰值可达

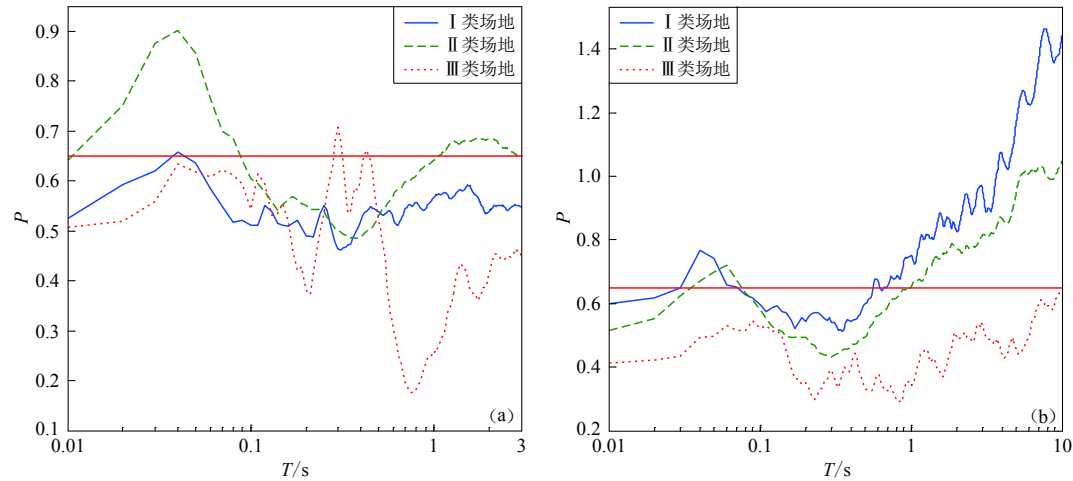


图 4 小震(a)、大震(b)情况下不同场地的平均谱比 P 曲线

Fig. 4 Average spectral ratio P curves for different sites on the condition of small (a) and strong (b) earthquakes

表 1 不同场地各周期段的谱比平均值

Table 1 Average spectral ratio for several periods on different sites

周期 T/s		谱比均值		
		I 类	II 类	III 类
小震	<0.1	0.57	0.74	0.58
	$[0.1-1.0]$	0.53	0.56	0.38
	$[1.0-3.0]$	0.56	0.67	0.42
	$[0-3.0]$	0.55	0.65	0.41
大震	<0.1	0.65	0.63	0.49
	$[0.1-1.0]$	0.63	0.54	0.36
	$[1.0-3.0]$	0.87	0.76	0.46
	$[3.0-10.0]$	1.25	0.97	0.54
	$[0-10.0]$	1.11	0.88	0.51

0.9, I 类场地和 III 类场地的谱比值基本低于 0.65; 0.1—1.0 s 周期内, 除个别 III 类场地的谱比值稍高于 0.65 外, 其余情况下的谱比值均远远小于“规范”所规定的 0.65; 1.0—3.0 s 周期范围内, II 类场地的谱比值大部分要高于 0.65, 其余情况均小于 0.65, III 类场地的谱比值在周期大于 0.1 s 时产生了剧烈的上下振荡现象, 造成这种现象的原因可能是该场地类别上的强震动记录数量较少而引起的统计偏差. 大震时, 随着场地变软, 全周期段的谱比值不断地减小; III 类场地的谱比值在全周期内均小于 0.65; 周期大于 1.0 s 的范围内 I 类和 II 类

场地的谱比值随周期的增大呈增大趋势, 而且远远高于“规范”所规定的 0.65, I 类场地的峰值高达 1.41, II 类场地的峰值也在 1.05. 从大震统计的结果来看, 该结果与谢俊举等(2010)关于汶川主震竖向与水平向谱比值的统计分析结果基本相近.

从表 1 可看出: 小震时, II 类场地在 <0.1 s 和 1.0—3.0 s 周期范围内的谱比均值高于 0.65, 其余情况下的谱比均值均小于 0.65; 大震时, 不同周期段的谱比均值均随着场地变软而降低; 全周期段的平均谱比值除 III 类场地外均远远高于规范规定的 0.65; 除小于 0.1 s 周期外, I 类和 II 类场地的中长周期平均谱比均值远高于 0.65.

4 竖向与水平向反应谱比与震级的关系

按照震级区间 $[4-5.5)$, $[5.5-6.5)$, $[6.5-7.5)$ 和 ≥ 7.5 分组, 求取每个震级区间内的谱比均值, 从而得到同场地不同震级区间内的平均谱比 $P(T)$ 曲线, 如图 5 所示; 将图 5 中不同震级区间的谱比曲线进行分段求其平均值, 结果列于表 2.

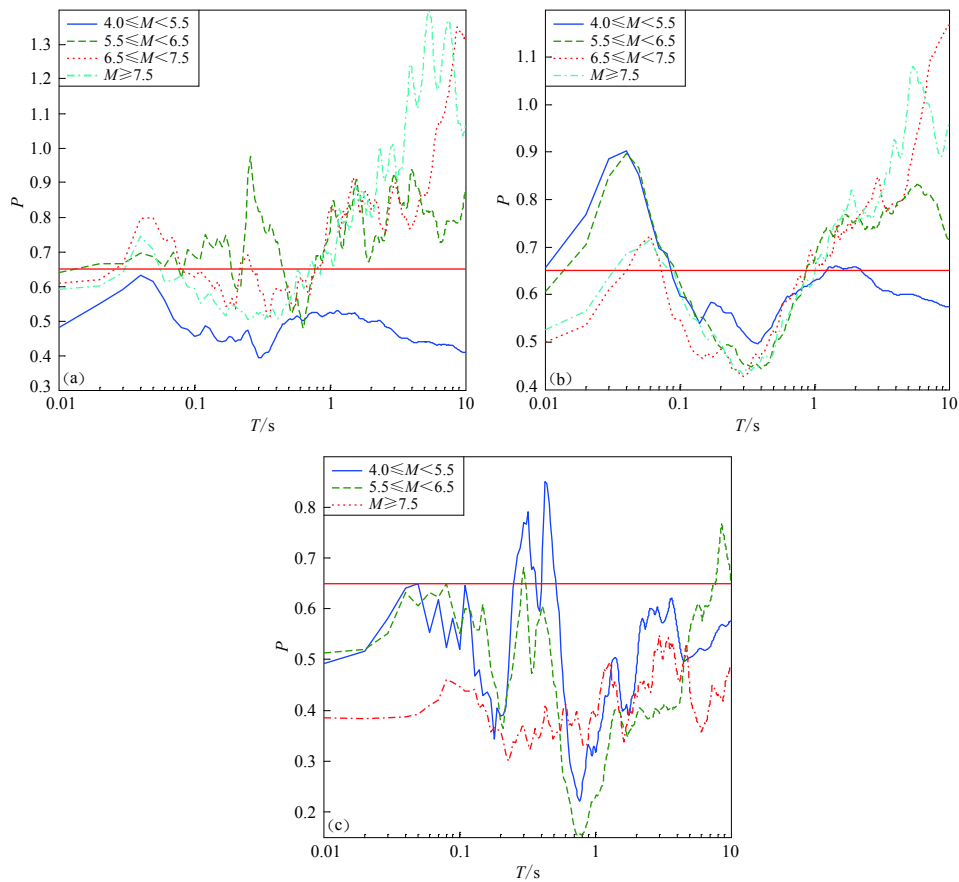


图 5 不同场地条件下不同震级区间的平均谱比 P 曲线
(a) I 类场地; (b) II 类场地; (c) III 类场地

Fig. 5 Average spectral ratio P curves for different magnitude intervals under different site condition
(a) Class I ; (b) Class II ; (c) Class III

从图 5 可看出, 震级对不同场地条件下的竖向与水平向反应谱比有一定的影响. II 类场地下, 反应谱比在周期小于 1.0 s 的范围内随震级的增大呈减小的趋势, 在大于 1.0 s 的周期内随着震级的增大呈增大的趋势; II 类场地下, 不同震级区间的谱比曲线均在 0.1 s 周期以内出现一峰值, 而后迅速下降至谷底, 谷底位置基本处于 0.3 s 周期, 谷底过后则随着周期的增大谱比值有上升的趋势; II 类场地下, 不同震级区间的谱比曲线表现为“马鞍形”, 在 >3.0 s 的周期内, 谱比值随着震级的增大呈增大的趋势. 当 $M \geq 5.5$ 时, I 类与 II 类场地不同震级的平均谱比在周期 >1.0 s 时均远远大于 0.65, 而且平均谱比峰值远高于 1.0. 由于 III 类场地上的强震数量过少, 所以在分析震级对谱比的影响时存在一定的偏差, 尚待收集更多的 III 类场地资料进一步分析.

由表 2 的统计结果可以看出: I 类和 II 类场地在 $M \geq 5.5$ 的各个震级区间的平均谱比除个别外基本高于 0.65, 尤其是长周期段的谱比均值远高于“规范”规定的 0.65 定值, 有些谱比均值甚至大于 1.0; I 类和 II 类场地在 $M \geq 5.5$ 的整个周期内的谱比均值要远高于 0.65; I 类和 II 类场地的平均谱比均值随震级的增大而增大; III 类场地上的谱比均值基本在 0.65 以下.

表 2 不同震级区间的平均谱比均值列表
Table 2 Average spectral ratio of different magnitude intervals

场地类别	周期 T/s	平均谱比均值			
		$4.0 \leq M < 5.5$	$5.5 \leq M < 6.5$	$6.5 \leq M < 7.5$	$M \geq 7.5$
Ⅰ类	<0.1	0.53	0.67	0.69	0.63
	$[0.1-1.0)$	0.49	0.67	0.63	0.60
	$[1.0-3.0)$	0.50	0.79	0.83	0.87
	$[3.0-10.0]$	0.43	0.81	1.06	1.19
	$[0-10.0]$	0.45	0.79	0.97	1.07
Ⅱ类	<0.1	0.74	0.74	0.61	0.64
	$[0.1-1.0)$	0.57	0.54	0.55	0.54
	$[1.0-3.0)$	0.64	0.74	0.75	0.76
	$[3.0-10.0]$	0.59	0.79	0.99	0.95
	$[0-10.0]$	0.60	0.76	0.90	0.87
Ⅲ类	<0.1	0.57	0.58	—	0.40
	$[0.1-1.0)$	0.46	0.36	—	0.38
	$[1.0-3.0)$	0.50	0.37	—	0.45
	$[3.0-10.0]$	0.54	0.59	—	0.44
	$[0-10.0]$	0.53	0.53	—	0.44

5 竖向与水平向反应谱比与震中距的关系

由于Ⅰ类和Ⅲ类场地的强震数据较少,本文仅就强震动数据比较丰富的Ⅱ类场地,对小震和大震下不同震中距的平均谱比进行统计分析,各分组的平均谱比曲线如图6所示;将不同震中距的平均谱比进行分段求其平均值,其计算结果列于表3.

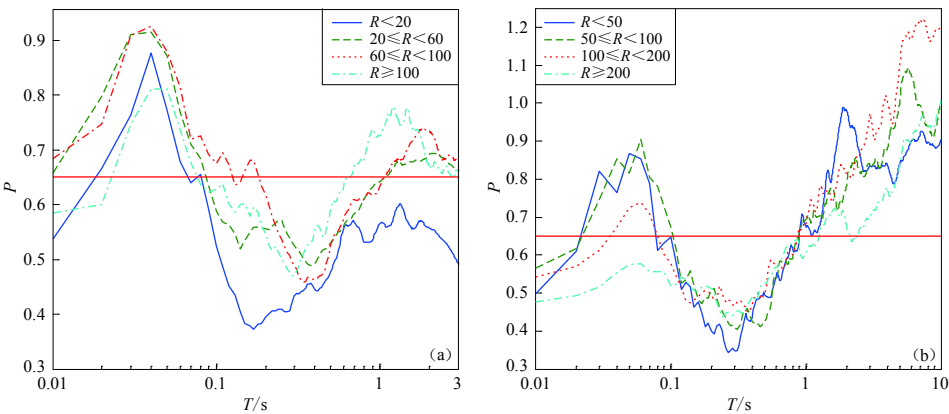


图 6 小震(a)和大震(b)下不同震中距 R 范围内Ⅱ类场地的平均谱比 P 曲线
Fig. 6 Average spectral ratio P curves for small (a) and strong (b) earthquakes with different epicentral distance R ranges for the site class II

由图6可见:不同震中距的平均谱比曲线的形状基本一致,不管是小震还是大震,其谱比曲线均呈中间低、两边高的变化趋势,而且均在小于0.1 s周期内出现一峰值,在0.1—1.0 s周期内出现一波谷,在周期大于1.0 s后随着周期的增加不同震级的平均谱比值也在不断增大;小震情况下,不同震中距的平均谱比在短周期内的谱比峰值均在0.8以上,小震远场在

表 3 不同震中距 R 下的平均谱比值

Table 3 Average spectral ratio within different epicentral distance R ranges

周期 T/s		平均谱比值			
		$R < 20\text{ km}$	$20\text{ km} \leq R < 60\text{ km}$	$60\text{ km} \leq R < 100\text{ km}$	$R \geq 100\text{ km}$
小震	< 0.1	0.67	0.75	0.77	0.69
	$[0.1-1.0)$	0.49	0.57	0.57	0.62
	$[1.0-3.0]$	0.55	0.68	0.70	0.70
	$[0.0-3.0]$	0.54	0.65	0.66	0.67

周期 T/s		平均谱比值			
		$R < 50\text{ km}$	$50\text{ km} \leq R < 100\text{ km}$	$100\text{ km} \leq R < 200\text{ km}$	$R \geq 200\text{ km}$
大震	< 0.1	0.71	0.75	0.64	0.53
	$[0.1-1.0)$	0.52	0.53	0.55	0.55
	$[1.0-3.0)$	0.84	0.78	0.82	0.67
	$[3.0-10.0]$	0.87	0.96	1.13	0.89
	$[0.0-10.0]$	0.83	0.89	1.01	0.81

周期大于 1.0 s 时的谱比峰值均高于 0.65；大震情况下，0.1 s 周期内、200 km 震中距以内的谱比峰值高于 0.65，周期大于 1.0 s 的平均谱比峰值均高于 1.0，远远高于“规范”所规定的 0.65 定值，说明该地区的大震在周期大于 1.0 s 时具有较大的竖向地震作用。

从表 3 可知：不同震中距的平均谱比均值在 0.1—1.0 s 周期内均低于 0.65，在周期 > 1.0 s 时小震远场的谱比均值高于 0.65，在全周期内的谱比均值基本处于 0.65 左右；大震在 0.1 s 周期内、震中距小于 100 km 时的谱比均值大于 0.65，在周期 > 1.0 s 时不同震中距的谱比均值均远远高于 0.65，全周期内不同震中距的谱比均值均高于 0.8，远远高于“规范”所规定的 0.65，这说明“规范”中规定的 0.65 有待商榷。

6 讨论与结论

本文以我国南北地震带川滇甘陕地区的 $M \geq 4.0$ 强震动资料为基础，对竖向与水平向加速度反应谱比按照总体特征、场地、震级和震中距进行了统计分析。结果显示：竖向与水平向反应谱的谱比并不是某一定值，而是随周期的变化而变化；竖向与水平向反应谱比值会受到场地、震级和震中距等因素的影响，平均谱比值在大震时随着场地条件的变软而变小，Ⅱ类场地在周期大于 1.0 s 时的平均谱比值随震级的增大而增大，不管何种情况下，Ⅱ类场地的平均谱比曲线均呈两边高、中间低的特征。对谱比的分段求平均值可知，无论是何种分组情况，平均谱比均值在 0.1—1.0 s 周期内基本低于“规范”所规定的 0.65 定值，Ⅰ类和Ⅱ类场地下周期大于 1.0 s 时的大震谱比均值远远高于 0.65，Ⅱ类场地下周期大于 1.0 s 时的小震远场以及 $5.5 \leq M < 6.5$ 时的谱比均值均大于 0.65；Ⅰ类和Ⅱ类场地下，全周期段的谱比均值基本上大于 0.65。然而，大部分的抗震规范取水平向地震作用的 0.65 倍作为竖向地震作用，这显然不太合适，因此本文建议根据现有的竖向强震动记录，按照水平向反应谱的标定方式来确定竖向地震作用，从而将其应用于结构的竖向抗震设计。

此外，相对于Ⅱ类场地，Ⅰ类和Ⅲ类场地的强震动记录较少，因此关于Ⅰ类和Ⅲ类场地的统计分析有待于积累更多的强震动记录。

参 考 文 献

耿淑伟, 陶夏新. 2004. 地震动加速度反应谱竖向分量与水平分量的比值[J]. 地震工程与工程振动, 24(5): 33-38.

- Geng S W, Tao X X. 2004. The ratios of vertical to horizontal acceleration response spectra[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **24**(5): 33–38 (in Chinese).
- 贾俊峰, 欧进萍. 2010. 近断层竖向与水平向加速度反应谱比值特征[J]. *地震学报*, **32**(1): 41–50.
- Jia J F, Ou J P. 2010. Vertical-to-horizontal acceleration response spectrum ratio of near-fault ground motion[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **32**(1): 41–50 (in Chinese).
- 李恒, 秦小军. 2010. 竖向与水平向地震动加速度反应谱比特性分析[J]. *地震工程与工程振动*, **30**(1): 8–14.
- Li H, Qin X J. 2010. Study on characteristics of vertical to horizontal acceleration response spectral ratio[J]. *Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **30**(1): 8–14 (in Chinese).
- 齐娟, 罗开海, 杨小卫. 2014. 竖向地震动特性的统计分析[J]. *地震工程与工程振动*, **34**(增刊1): 253–260.
- Qi J, Luo K H, Yang X W. 2014. Statistical analysis on characteristics of vertical ground motions[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, **34**(S1): 253–260 (in Chinese).
- 王国权. 2001. 921 台湾集集地震的断层地面运动特征[D]. 北京: 中国地震局地质研究所: 106–108.
- Wang G Q. 2001. *The Characteristics of Near Fault Ground Motion Caused by the 1999 Chi-Chi, Taiwan*, *Earthquake*[D]. Beijing: Institute of Geology, China Seismological Bureau: 106–108 (in Chinese).
- 谢俊举, 温增平, 高孟潭, 胡丰贤, 何少林. 2010. 2008 年汶川地震近断层竖向与水平向地震动特征[J]. *地球物理学报*, **53**(8): 1796–1805.
- Xie J J, Wen Z P, Gao M T, Hu Y X, He S L. 2010. Characteristics of near-fault vertical and horizontal ground motion from the 2008 Wenchuan earthquake[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **53**(8): 1796–1805 (in Chinese).
- 徐龙军, 谢礼立. 2007. 竖向地震动加速度反应谱特性[J]. *地震工程与工程振动*, **27**(6): 17–23.
- Xu L J, Xie L L. 2007. Characteristics of acceleration response spectra for vertical ground motions[J]. *Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **27**(6): 17–23 (in Chinese).
- 赵培培. 2017. 设计反应谱拟合方法研究及特征参数统计[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所: 20–22.
- Zhao P P. 2017. *Statistics of Characteristic Parameters and Research on Fitting Method of Design Response Spectrum*[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration: 20–22 (in Chinese).
- 赵培培, 王振宇, 薄景山, 张建毅. 2017. 川滇甘陕地区设计反应谱特征周期的统计分析[J]. *世界地震工程*, **33**(2): 97–104.
- Zhao P P, Wang Z Y, Bo J S, Zhang J Y. 2017. Statistical analysis of characteristic periods of design response spectra in Sichuan, Yunnan, Gansu and Shaanxi[J]. *World Earthquake Engineering*, **33**(2): 97–104 (in Chinese).
- 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 2010. GB50011—2010: 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社: 20–41.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. 2010. GB50011—2010: *Code for Seismic Design of Building*[S]. Beijing: China Architecture & Building Press: 20–41 (in Chinese).
- 周正华, 周雍年, 卢滔, 杨程. 2003. 竖向地震动特征研究[J]. *地震工程与工程振动*, **23**(3): 25–29.
- Zhou Z H, Zhou Y N, Lu T, Yang C. 2003. Study on characteristics of vertical ground motion[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **23**(3): 25–29 (in Chinese).
- 周正华, 林淋, 王玉石, 王伟. 2007. 竖向地震动反应谱[J]. *防灾减灾工程学报*, **27**(增刊): 33–36.
- Zhou Z H, Lin L, Wang Y S, Wang W. 2007. The response spectrum of vertical ground motion[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation*, **27**(S): 33–36 (in Chinese).
- Ambraseys N N, Douglas J. 2003. Near-field horizontal and vertical earthquake ground motions[J]. *Soil Dyn Earthq Eng*, **23**(1): 1–18.
- Bozorgnia Y, Niazi M. 1995. Characteristics of free-field vertical ground motion during the Northridge earthquake[J]. *Earthq Spect*, **11**(4): 515–525.
- Dimitriu P, Kalogeras I, Theodulidis N. 1999. Evidence of nonlinear site response in horizontal-to-vertical spectral ratio from near-field earthquakes[J]. *Soil Dyn Earthq Eng*, **18**(6): 423–435.