

竖向与水平向地震动加速度峰值比统计特征分析*

李恒^{1,2}, 李井冈¹, 王墩¹, 蔡永建^{1,2}

(1. 中国地震局地震研究所, 武汉 430071; 2. 湖北省地震局, 武汉 430071)

摘要: 以强地面运动加速度记录为基础, 研究了竖向与水平向加速度峰值比值(V/H)的统计分布特征。结果表明, V/H 服从对数正态分布。对记录按震级、震中距、场地条件和震源机制进行分类统计, 研究了这些因素对 V/H 的影响。统计分析结果显示, V/H 与震级的关系不明显; V/H 随距离的增大而减小, 在软土地地上尤为明显; V/H 与场地条件有很大关系, 在近场(R≤60 km)土层场地要高于基岩场地, 而在远场则相反; 震源机制对 V/H 有较大影响, 特别是在近场。

关键词: 竖向地震动; 加速度峰值比; 对数正态分布; 震源机制

中图分类号: P315.9 文献标识码: A 文章编号: 1000-0666(2010)02-0195-05

0 引言

大部分抗震设计规范中规定, 高耸结构和大跨度结构需要考虑竖向地震动的影响, 一般取水平向地震动的1/2~2/3。然而, 近20年来发生的几次强烈地震中, 在近场记录到了较强的竖向地震动, 部分场点记录到的竖向峰值远超过水平向峰值。竖向地震动的这一特征引起了各国学者和工程师们的极大重视, 并从各个方面进行了深入研究, 并取得了一定的成果。以往研究使用的资料大多局限于个别地震或某个特定区域的地震资料, 所得结果不具有普适性。如 Ohsaki (1980) 使用了日本的8个地震动记录, Niazi 和 Bozorgnia (1991) 使用的是台湾 SMART-1 台阵记录, Bozorgnia 等 (1995) 使用的是美国 Loma Prieta 地震和 Northridge 地震记录, 周正华等 (2003)、周锡元等 (2006) 使用的是1999年台湾集集地震记录。

由于地震动具有很大的随机性, 因此统计结果的可靠性很大程度上取决于样本量的大小及其分布的优劣状况。本文收集了全球范围内128次地震的3235组强地面运动记录(每组记录包括2条水平和1条竖向记录), 在震级域和距离域的分布较为理想, 特别是在近场有了一定的数据基础(图1)。本文着重研究竖向与水平向地震动加速度峰值比(V/H), 首先将V/H作为随机变量分析其

总体分布特征, 然后分别研究场地条件、震中距、震级和震源机制等因素对 V/H 的影响。

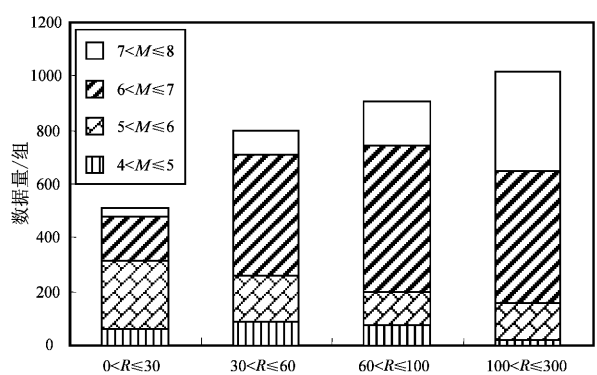


图1 地震记录的震级—震中距分布
Fig. 1 Magnitude-distance distribution of strong ground motion data

1 V/H 总体分布函数

1.1 对数正态分布

如果随机变量X的函数lnX服从正态分布N(μ,σ²), 则称服从参数为μ和σ²的对数正态分布, 记为X~LN(μ,σ²), 其密度函数为

f(x) = { 1 / (sqrt(2*pi)*sigma*x) * exp(-(lnx - mu)^2 / (2*sigma^2)), x > 0; 0, x <= 0. }

* 收稿日期: 2009-05-31.
基金项目: 中国地震局地震研究所基金(IS200926044)项目资助.

μ 和 σ^2 的最大似然无偏估计量分别为

$$\hat{\mu} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln X_i,$$
$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left(\ln X_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln X_i \right)^2.$$

(2)

容易证明, 服从对数正态分布的随机变量 X 的期望和方差分别为

$$EX = \exp\left(\mu + \frac{\sigma^2}{2}\right),$$
$$DX = \exp(2\mu + \sigma^2) (\exp(\sigma^2) - 1).$$

(3)

对式 (1) 求导, 并令 $f'(x) = 0$, 可求得驻点为 $x = \exp(\mu - \sigma^2)$, 对比式 (3) 可知, 密度函数取得最大值的位置位于均值左侧, 这是对数正态分布的一个重要特征。

1.2 V/H 的统计数字特征

对 V/H 的 3 235 个统计样本做间隔为 0.05 的直方图进行分析 (图 2), 图中横坐标刻度值为统计区间中值; V/H 大于 2.0 的样本极少, 图中没有体现, 但参与了统计计算。由图可知, 出现频率最高的区间为 (0.375, 0.425], 而样本均值为 0.57, 并且图形左陡右缓。因此, 可假定 V/H 服从对数正态分布。利用式 (2) 进行计算得到 $\ln(V/H)$ 的均值和方差分别为

$$\mu = -0.6584, \sigma^2 = 0.1619.$$

(4)

利用式 (3) 计算得到 V/H 的均值和方差为

$$E(V/H) = 0.5613, D(V/H) = 0.0554.$$

(5)

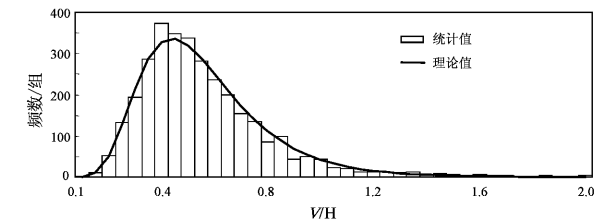


图 2 V/H 直方图与理论分布图

Fig. 2 Histogram and theoretic distribution of V/H

1.3 分布函数的假设检验

本文采用皮尔逊 χ^2 检验法来检验 V/H 是否服从对数正态分布, 即 $\ln(V/H)$ 是否服从正态分布。

表 1 为分布检验表, 表中 ν_i 表示 $\ln(V/H)$ 落入第 i 个区间的频数, p_i 表示当假设成立时 $\ln(V/H)$ 取值落入第 i 个区间的概率, n 表示样本总量。

表 1 V/H 概率分布检验表

Tab. 1 Probability distribution test of V/H

$\ln(V/H)$ 区间	频数 ν_i	概率 p_i	np_i	$(\nu_i - np_i)^2 / np_i$
$(-\infty, -1.8]$	10	0.002 27	7.35	0.952 3
$(-1.8, -1.6]$	24	0.007 36	23.80	0.001 7
$(-1.6, -1.4]$	76	0.023 01	74.44	0.032 7
$(-1.4, -1.2]$	183	0.056 48	182.70	0.000 5
$(-1.2, -1.0]$	341	0.108 80	351.96	0.341 1
$(-1.0, -0.8]$	572	0.164 51	532.20	2.977 0
$(-0.8, -0.6]$	665	0.195 27	631.70	1.755 4
$(-0.6, -0.4]$	573	0.181 95	588.60	0.413 3
$(-0.4, -0.2]$	402	0.133 08	430.51	1.888 5
$(-0.2, 0]$	227	0.076 41	247.17	1.646 7
$(0, 0.2]$	103	0.034 43	111.39	0.631 6
$(0.2, 0.4]$	42	0.012 18	39.40	0.172 2
$(0.4, 0.6]$	12	0.003 38	10.93	0.103 9
$(0.6, +\infty)$	5	0.000 88	2.85	1.624 3
Σ	3 235	1.000 00	3 235.00	12.541 4

经表 1 计算可得

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^m \frac{(\nu_i - np_i)^2}{np_i} = 12.5414 < \chi_{\alpha}^2(14 - 2 - 1)$$
$$= 19.675.$$

(6)

式中显著水平 $\alpha = 0.05$ 。故 $\ln(V/H)$ 服从正态分布, 即 V/H 服从对数正态分布。

1.4 分布函数的应用

根据 V/H 服从对数正态分布的特点, 借鉴地震危险性概率分析的思路, 计算了 V/H 超过某些给定值的概率, 即超越概率

$$P(x) = 1 - F(x) = 1 - \int_0^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma\tau} \exp\left(-\frac{(\ln\tau - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) d\tau.$$

(7)

建议工程抗震设计时, 按工程的重要性等级和结构对竖向地震动的敏感程度确定超越概率, 然后按表 2 选取 V/H 值。

表2 不同超越概率水平对应的 V/H 值
Tab.2 V/H of different exceeding probability

超越概率	50%	45%	40%	35%	30%	25%	20%	15%	10%	5%	2%	1%
V/H	0.52	0.54	0.57	0.60	0.64	0.68	0.73	0.79	0.87	1.00	1.18	1.32

2 距离和场地条件对 V/H 的影响

本文将场地条件分为基岩场地、硬土地地和软土地地3类，主要依据30 m内的等效剪切波速 V_{s30} 。考虑到少部分台站场地的 V_{s30} 是估算得到的，并不是实测数据，因此同时参考了场地土宏观描述，具体分类原则如下：

- (1) 基岩场地： $V_{s30} > 500$ m/s 或覆盖土层厚度小于5 m。
- (2) 软土地地： $V_{s30} < 250$ m/s 或覆盖土层大于20 m的深软土层且 $V_{s30} < 300$ m/s。
- (3) 硬土地地：除(1)和(2)之外的场地。

为了减小局部距离范围内数据不均匀对结果造成的影响，采用“滑动平均”的方法，即采用 $[R_0 - \Delta R, R_0 + \Delta R]$ 用范围内的平均值代表 R_0 处的值。本文采用的半窗长 ΔR 为10 km，滑动步长为10 km。考虑到震中距大于180 km的记录较少，本文只分析了180 km内V/H与距离的关系。图3为不同场地上V/H随距离的变化关系，从图中可以看出：60 km内土层场地上V/H大于基岩场地，这与周正华等（2002）利用30 km以内数据得到的结果一致，而60 km以外基岩场地上V/H大于土层场地；在近场，软土地地上V/H远大于另两类场地上的V/H，且随距离的增大迅速减小，而基岩场地和硬土地地上V/H随距离减小的幅度相对较小；在130~150 km范围内三类场地上均出现

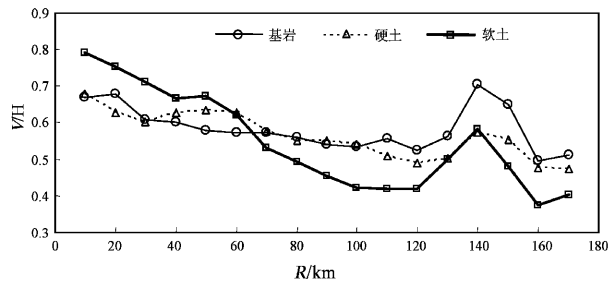


图3 不同场地上 V/H 随距离的变化
Fig.3 Relationship between V/H and distance on different sites

V/H 高值异常，该距离段内高 V/H 值绝大部分来自1999年台湾集集地震及其余震记录，其原因尚待进一步研究。

3 震源特性对 V/H 的影响

在地震动预测中，通常将震级作为考虑影响震源的唯一因素。然而众多研究表明震源机制对地震动有较大影响（郭明珠等，2002；李新乐，朱晞，2004；贺秋梅等，2006；俞言祥等，2005，董娣等，2006，2008）。本文通过考察震级和震源机制两个因素来分析震源特性对V/H的影响。图4为不同距离分档内V/H随震级的变化关系，由图中可以看出，V/H随震级的变化并没有较好的规律性。为了排除场地条件对上述结果的影响，将各组数据又按场地条件进行了分类，统计结果显示不同场地上V/H与震级的相关关系不明显。地震波理论表明，在均匀半空间，仅存在体波（P、SH、SV）和瑞利面波，无勒夫波；瑞利波V/H是定值，而体波V/H仅与入射角有关。因此，至少在基岩场地上（可近似为均匀半空间），V/H与震级的相关关系不大。

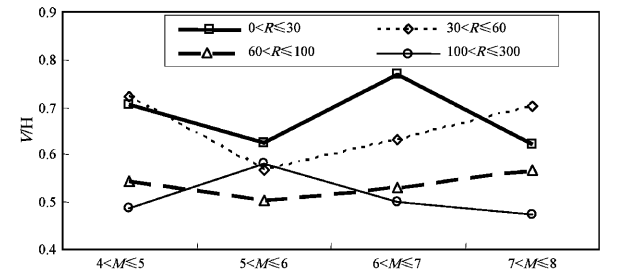


图4 不同距离内 V/H 随震级的变化
Fig.4 Relationship between V/H and magnitude in different distances

本文将震源机制分为走滑断层、正断层、逆断层、逆滑断层和正滑断层5类。由于正断层机制下的样本较少，本文没有进行分析。表3为按震源机制和场地条件分类的样本记录分布情况，除正滑断层数据较少以外，其他机制类型的数据量基

表 3 按震源机制分类的数据分布情况 (单位: 组)

Tab. 3 Distribution of the data classified by focal mechanisms (unit: group)

震源机制	0 < R ≤ 30 m			30 m < R ≤ 60 m			60 m < R ≤ 100 m			100 m < R ≤ 300 m		
	基岩	硬土	软土	基岩	硬土	软土	基岩	硬土	软土	基岩	硬土	软土
走滑	20	62	62	37	74	77	40	103	111	30	133	100
逆断	45	53	13	80	165	119	89	141	202	71	173	259
逆滑	61	98	30	42	70	62	42	68	65	37	73	111
正滑	4	14	5	5	14	16	9	18	15	1	7	13

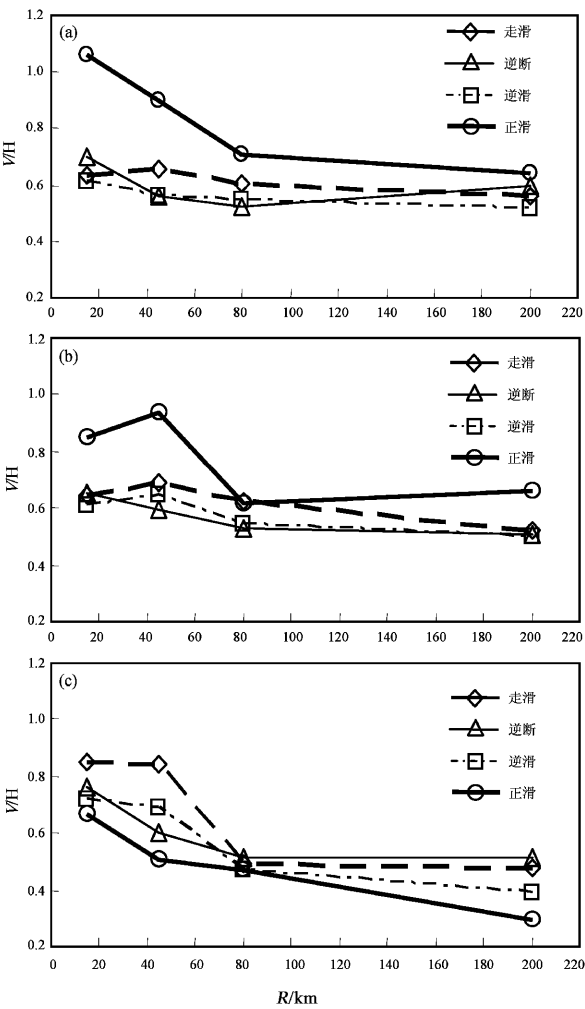


图 5 V/H 与场地条件、震源机制和距离的关系
(a) 基岩; (b) 硬土; (c) 软土

Fig. 5 Relationship between V/H, focal mechanism and distance on different sites
(a) rock; (b) stiff soil; (c) soft soil

本能满足统计需要。

图 5 为不同场地上各类震源机制条件下 V/H 随距离的变化关系,从图中可以看出:各类场地上走滑断层机制下 V/H 均高于逆滑断层机制;在基岩场地和硬土场地上,正滑断层机制下 V/H 高

于其它断层机制,尤其在近场(60 km 范围内)均大于 0.8,而在软土地地上则低于其它断层机制,且随距离增大迅速减小。

贺秋梅等(2006)的研究表明近断层范围内震级越大 V/H 越大,而在后续按震源机制分类研究中,得出各种震源机制下 V/H 随震级的关系不明显的结论,其得到的震源机制对 V/H 影响的结论与本文有较大差异。笔者认为产生这种差异的原因有两点:一是其使用的数据偏少,某些分组仅 1 个样本,甚至缺失,因此结果的随机性较大;二是分类方法不一样,贺秋梅等(2006)是在震级分档的基础上按震源机制分类,而本文是在场地分类的基础上按震源机制分类。本文前述结果表明,V/H 与震级的关系不大,而与场地条件关系密切。由此可见,对数据的分组方法不同,可能会导致完全不同的结论。

尽管本文使用了 3 000 多组、近万条地震记录,但正滑断层机制条件下样本量仍显不足,上述相关结果有待进一步搜集数据后证实。

4 结论

本文对收集到的全球范围内的强地面运动记录进行统计分析,结果表明加速度峰值比 V/H 总体服从对数正态分布,据此性质给出了对应不同超越概率水平的 V/H 值,并建议工程抗震设计时,按工程的重要性和结构对竖向地震动的敏感程度选取合适的 V/H 以确定设计竖向地震动峰值。

对数据样本按震级、场地条件、震中距、震源机制进行了分类统计分析,结果表明:

(1) V/H 随震中距的增大而较小,基岩和硬土地地衰减较慢,软土地地衰减较快;近场土层场地上 V/H 大于基岩场地,远场则相反。

(2) V/H 与震级的关系不大,而震源机制对

V/H 有较大影响, 如 V/H 在走滑断层机制下高于在逆滑断层机制; 在基岩和硬土地地上, 正滑断层机制下 V/H 高于在其它断层机制下, 而在软土地地上则低于在其它断层机制下。

参考文献:

董娣, 桑向国, 刘锐, 等. 2008. 震源机制对近场地震动反应谱的影响[J]. 西北地震学报, 30(1): 6-10.

董娣, 周锡元, 闫维明, 等. 2006. 地震动不确定性及其影响因素的初步分析[J]. 地震研究, 29(2): 167-175.

郭明珠, 毛志清, 魏秀丽, 等. 2002. 伽师强震群地震动特点与震源机制关系的研究[J]. 地震工程与工程振动, 22(1): 28-31.

贺秋梅, 闫维明, 董娣, 等. 2006. 震源机制和场地条件对近场强震地面运动特性的影响[J]. 地震研究, 29(3): 256-263.

李新乐, 朱晞. 2004. 考虑场地和震源机制的近断层地震动衰减特性的研究[J]. 工程地质学报, 12(2): 141-147.

俞言祥, 胡聿贤, 潘华. 2005. 地震震源机制对长周期地震动的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 24(17): 3 113-3 118.

周锡元, 徐平, 王国权, 等. 2006. 1999 年台湾集集地震近断层竖向与水平反应谱比值的研究[J]. 地震地质, 28(3): 325-335.

周正华, 周雍年, 卢滔, 等. 2003. 竖向地震动特征研究[J]. 地震工程与工程振动, 23(3): 25-29.

周正华, 周雍年, 赵刚. 2002. 强震近场加速度峰值比和反应谱统计分析[J]. 地震工程与工程振动, 22(3): 15-18.

Bozorgnia Y, Niazi M, Kenneth W Campbell. 1995. Characteristics of Free-Field Vertical Ground Motion during the Northridge Earthquake[J]. Earthquake spectra, 11(4): 515-525.

Niazi M, Bozorgnia Y. 1991. Behavior of near source peak vertical and horizontal ground motion over SMART-1 array, Taiwan[J]. BSSA, 81(3): 715-732.

Ohsaki C S. 1980. Analyses of seismic ground motion parameters including vertical components[J]. Proc 7WCEE, 269-276.

Analysis of Statistic Characteristics of Peak Ratios in Vertical and Horizontal Ground Motion Acceleration

LI Heng^{1,2}, LI Jing-gang¹, WANG Dun¹, CAI Yong-jian^{1,2}

(1. Institute of Seismology, CEA, Wuhan 430071, Hubei, China)

(2. Earthquake Administration of Hubei Province, Wuhan 430071, Hubei, China)

Abstract

In this paper, the statistic analysis of peak ratios in vertical and horizontal acceleration (V/H) is done by using strong ground motion data. It is shown that V/H obeys the lognormal distribution. Based on the data, the effects of magnitude, epicentral distance, site conditions, and focal mechanism on V/H are analyzed. The results show that the effect of magnitude is inconspicuous, and V/H is reduced as the epicentral distance is increased, especially on soft soil site. In the near-field ($R \leq 60$ km), V/H on soil site is bigger than it on rock site, and it is opposite in the far-field. In addition, the focal mechanism affects to V/H greatly, especially in the near-field.

Key words: vertical ground motion, acceleration peak ratio, lognormal distribution, focal mechanism