

汶川 8.0 级地震地震动峰值加速度衰减特性分析

刘浪¹⁾, 李小军²⁾

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081)

摘要: 利用汶川 8.0 级特大地震中 107 个台站所获取的强震动加速度记录进行回归统计分析, 给出了此次地震的地震动峰值加速度衰减关系. 将 107 个台站分为上盘区和下盘区两部分, 其中 77 个台站属于上盘区, 30 个台站属于下盘区. 对上/下盘区进行了详细的地震动衰减特性对比分析, 主要包括两个区的水平向和竖向峰值加速度衰减关系、竖向与水平向峰值加速度比值变化以及是否存在上/下盘效应等, 揭示了汶川地震近断层地震动一些特性.

关键词: 汶川地震; 强震动; 地震动衰减; 回归分析

中图分类号: P 315.9

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2012)02-0173-07

Peak Ground Acceleration Attenuation Relationship of Wenchuan 8.0 Earthquake

LIU Lang¹⁾, LI Xiao-jun²⁾

(1. Civil Engineering School Mechanics, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China)

Abstract: The strong motion recordings at 107 observation stations from Wenchuan 8.0 earthquake in 2008 are analyzed with the statistics method. For comparing the ground motions in two different regions—the hanging wall and footwall regions, the 107 observation stations are divided into the two regions. There are 77 stations in the hanging wall region and others in the footwall region. The acceleration attenuation relationships of strong motions were analyzed by the least squares method. Two horizontal and Two vertical acceleration attenuation relationships are obtained. Based on these relationships, the characteristics of strong motions, including the horizontal and vertical acceleration attenuations, the variation of ratio of peak accelerations in horizontal and vertical motions, and the hanging wall and footwall effects are discussed to find out the difference of strong motions in the two regions. Finally, attenuation models are compared with some well-known attenuation relationships.

Key words: Wenchuan earthquake; strong motion; attenuation relationship; statistics method

地震动衰减关系是描述地震引起的地震动的经验关系, 包括以简单的参数反映地震震源、地壳介质及地球近地表局部场地等对地震动的影响特征. 它作为工程抗震设计地震动输入确定工作的

核心部分, 其合理与否直接影响对地震动特性的认识和估计. 国内外学者经过半个多世纪的地震动衰减关系的研究, 取得一系列的研究成果^[1-3], 霍俊荣^[4]对地震动衰减关系研究成果进行了系统

收稿日期: 2009-11-16.

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2009BAK55B05); 中国工程院咨询研究项目重大专项(2010-ZD-4).

作者简介: 刘浪(1985—), 女, 博士研究生, 主要从事公路桥梁可靠性评估及地震工程方面的研究, E-mail: yilupolai2008@163.com.

的分析总结,给出了美国西部地区的地震动衰减关系,并建立了适用于我国的分区域地震动衰减关系. 这些衰减关系至今仍被工程场地地震安全性评价工作广泛使用^[5]. 随着近 20 a 的强震地震动观测记录的不断积累,人们利用新的强震记录资料进一步发展了地震动衰减关系^[6-8],李小军等^[9]提出中小地震近场地震动衰减关系建立和选用的原则. 2008 年汶川 M8.0 地震中,国家强震动观测网络系统获得了大量的强震动记录,特别是获得了一些高峰值加速度的近断层强震动记录^[10],针对汶川地震的这些强震动记录作者开展了地震动特性的初步分析^[11-12]. 本文在已有研究的基础上,对此次特大地震的地震动衰减特性进行详细分析.

1 强震动加速度及地震动衰减模型

本研究采用的国家强震动台网中心提供的强震动加速度记录^[13],来自于 107 个台站(如图 1 所示). 同时,以断层(中央断裂地表破裂带)端点为起点沿北南方向各偏移 45°,并根据台站所处的位置分为 2 个区域,即本文所确定的上盘区(断层左上面)和下盘区(断层右下面),这样上盘区包括了 154 条水平向记录、77 条垂向记录;下盘区包括 60 条水平向记录、30 条垂向记录,2 个区域均将东西向和南北向的水平记录作为 2 次独立的观测量.

地震动衰减关系参数可以归纳为反映地震震源的参数、地震波在壳介质中传播的参数、场地条件影响的参数等. 针对这一次地震,与震级相关项变成了常数项,强震动观测台站到断层(中央断裂地表破裂带)最短距离(断层距)作为反映地震波在壳介质中传播的参数. 鉴于汶川地震的强震动观测台站绝大部分都建于土层上,较少台站位于基岩上,本研究不再区分记录来自基岩或是土层,暂不考虑场地效应. 同时,本文中所采用的强震动记录很多断层距已经超过 200 km,因此距离因子方面同时考虑了几何扩散项和非弹性衰减项. 峰值加速度衰减关系式为

$$\lg Y = b_0 + b_1 R + b_2 \lg R + \varepsilon \quad (1)$$

式中 R 为断层距; b_0 、 b_1 、 b_2 均为常数; ε 为随机误差.

2 水平向峰值加速度回归结果及比较分析

利用图 1 所示的台站的强震动记录数据,采用

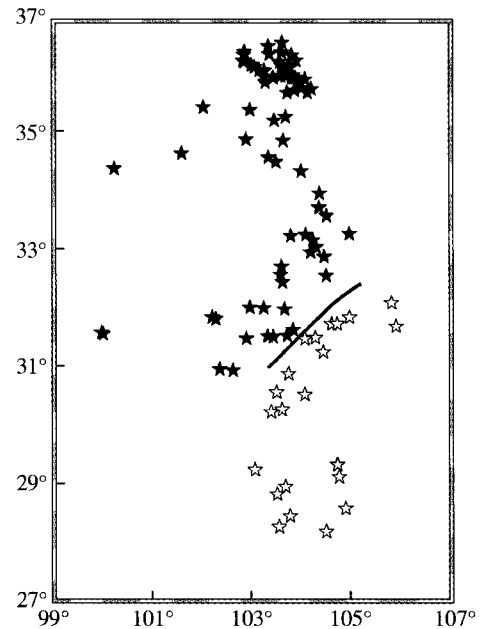


图 1 断层上盘区和下盘区的观测台站分布
Fig. 1 The distribution of observation stations in hanging wall and footwall regions

最小二乘法回归,得到上盘区地震动峰值加速度衰减关系为

$$\lg Y = 4.3278 - 0.001R - 1.1047 \lg R \quad (2)$$

下盘区地震动峰值加速度衰减关系为

$$\lg Y = 3.0016 - 0.0027R - 0.3387 \lg R \quad (3)$$

回归结果与原始数据的比较如图 2 和图 3 所示. 无论从拟合图还是残差分析图都可以看出回归结果与原始数据拟合较好,反映了原始数据的衰减趋势,且说明汶川地震的地震动有较好的衰减规律.

由图 3 可以明显看出,在断层距为 100 km 范围内,上盘区的拟合值要略高于下盘区,在近断层范围内其差别较为明显,显示了近断层地震动的上/下盘效应特性;而在距离 200 km 以外的较远范围两者则相差无几,衰减速率也差不多. 考虑到距离跨度较大,为了能更好地进一步讨论峰值加速度的衰减规律,现将两个区都进行距离分档,断层距分为 0 ~ 50、51 ~ 100、101 ~ 200 和 201 ~ 500 km 四个档,并在各个距离档内选用最常用的几个衰减关系^[1-4,7]进行对比,结果如图 4 和图 5 所示.

不同的衰减关系差别很大. 本文的衰减关系与霍俊荣(1989)的最为接近,尤其在近场(断层距 50 km 内)相差最小,也就是说霍俊荣的衰减关系较为适合汶川地震动衰减. 总体上来说,Fukushima 关系的两个衰减关系的计算值是近场值最大而衰减速率

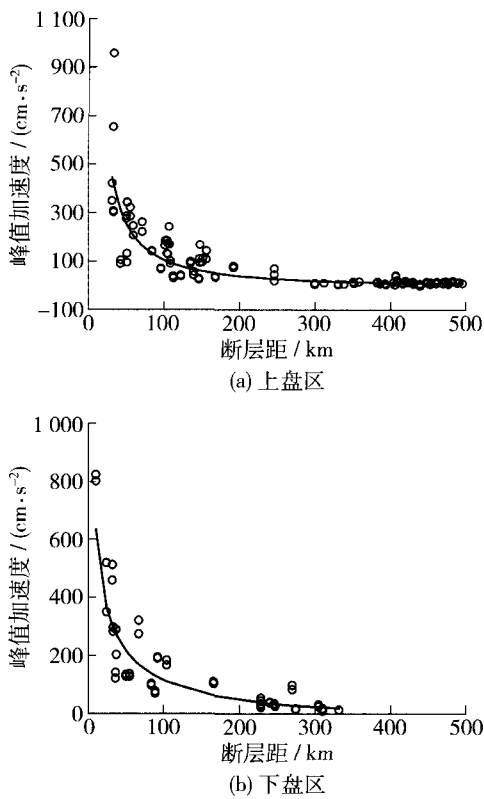


图 2 水平向峰值加速度衰减关系与观测值比较

Fig. 2 Horizontal peak acceleration attenuation relationship compared with the recordings

最快,至较远场(200 km 外)时计算值只有 20 cm/s² 左右,在 120 km 范围内所的值要高于本文所得到上盘区的值,而在 20 ~ 90 km 要高于本文所得到下盘区的值;Joyner 和 Campbell 关系的计算值相对较小且衰减最为缓慢,在较远场依然得到了近 50 cm/s² 的计算值. 出现这些差异的原因,应该主要是由于所采用的强震动资料不同,且都缺乏特大地震的强震记录,而本文针对的是汶川特大地震. 在距离上,其他衰减关系基本上都对选取的强震记录进行了距离的限制,或者偏重于某个距离档,例如 Fukushima 将距离限定为小于 200 km 的台站记录,本文的距离范围则比较广,0 ~ 500 km 的记录均采用. 场地条件差别则更大,有的衰减关系采用的是全基岩记录,有的是基岩和土层的混合使用,有的是将两者分开考虑并引入场地条件参数. 而本文鉴于本次地震强震记录的有限性以及大部分记录都来自于 II 类土层,因此并未进行基岩和土层的严格区分,而是混合使用. 另外一个重要原因在于其他衰减关系中所采用的强震动记录并未进行上盘、下盘分区,而在后来的研究中表明上/下盘效应对近断层地震动特性有着较大的影响,尤其是象汶川地震这样的逆冲型断层

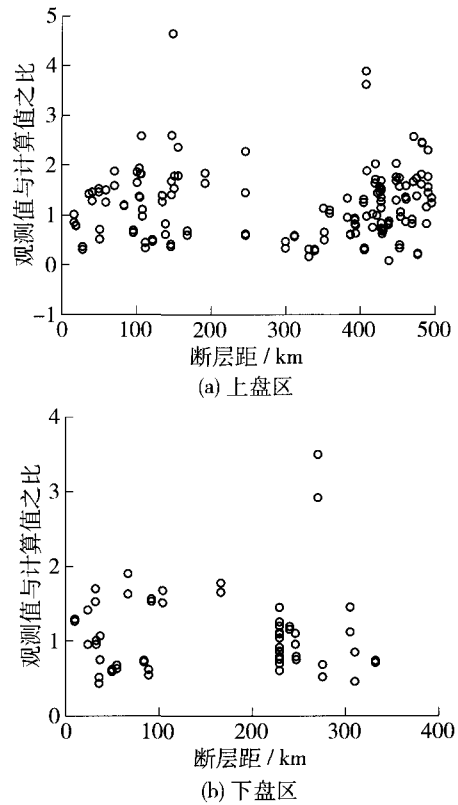


图 3 水平向峰值加速度观测值与计算值之比及残余量

Fig. 3 Ratio of observed to predicted values on horizontal peak acceleration and residuals

大地震,这点也可以在上面两个区 50 km 范围内的峰值加速度衰减差异中看出. 以上这些因素都将造成彼此的差异.

现就本文的衰减关系与霍俊荣提出的衰减关系^[4]作进一步比较分析. 在近场(50 km 内)两者差别最小,衰减的速率也差不多,其中霍俊荣衰减关系的计算值相对高些;在中远场(200 km 内),霍俊荣的衰减速率明显增快,计算值都要小于本文所得到的;直至较远场(200 km 外),霍俊荣的衰减速率变得平缓,计算值仍然较本文所得计算值小. 由于霍俊荣所采用的记录资料多为模拟记录资料,在记录校正时使用了高通滤波器而将长周期成分滤除,这样往往会造成对高震级长周期成分的低估,也就是说在长周期更为丰富的远场,霍俊荣的衰减关系似乎低估了峰值加速度的大小. 同理,与其他衰减关系相比,应该说本文所采用的远场记录更为丰富. 而其他衰减关系大震级远场记录数目很少,其适用的震级和距离范围值得考虑. 本文通过对比分析认为这些衰减关系并不适宜直接应用于诸如汶川这样的特大地震上.

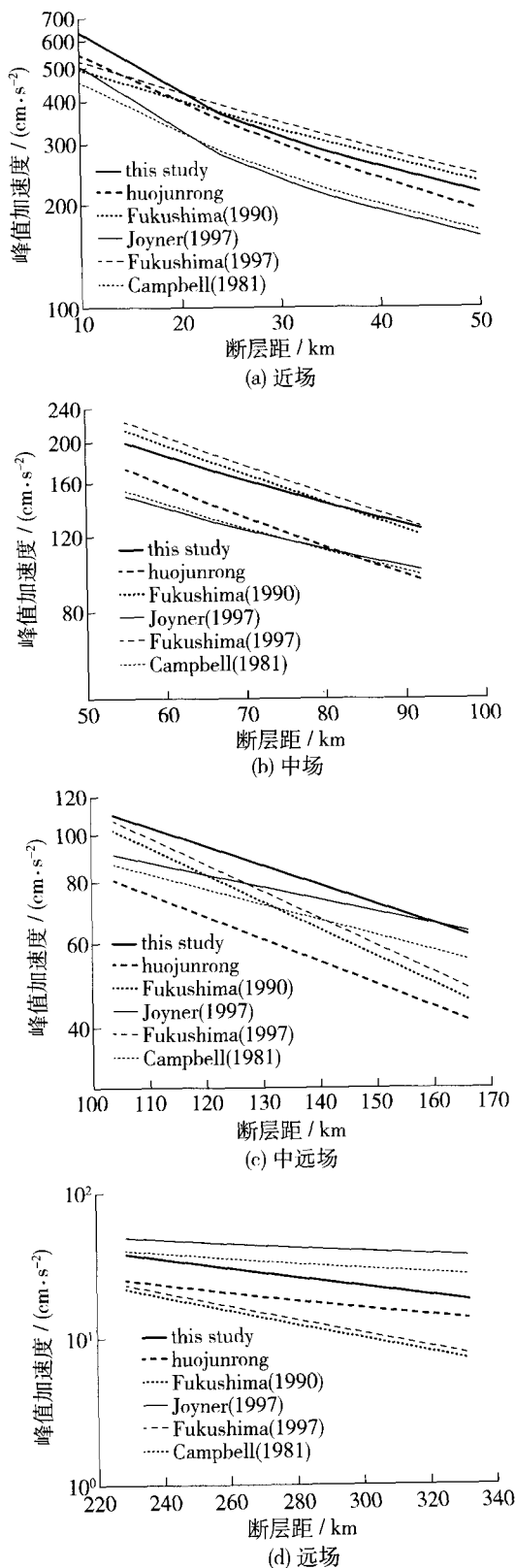


图4 本文水平向峰值加速度衰减关系与其他衰减关系比较(上盘区)

Fig. 4 Horizontal peak ground acceleration attenuation relationship in this study compared with others in hanging wall region

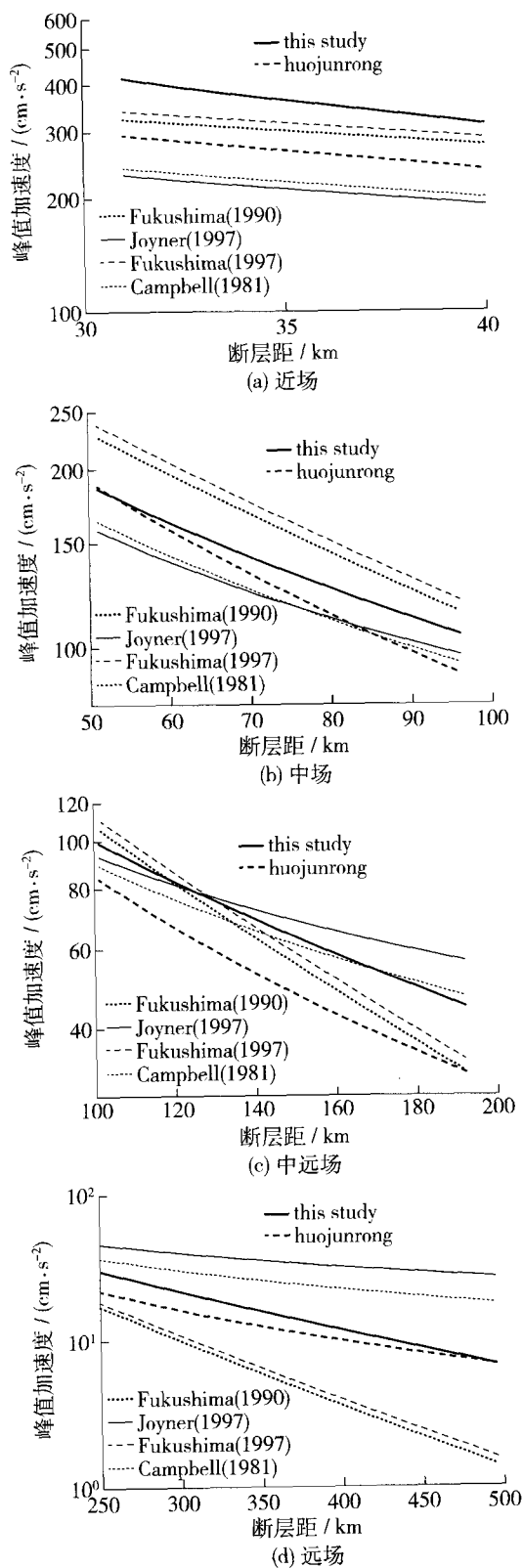


图5 本文峰值加速度衰减关系与其他衰减关系比较(下盘区)

Fig. 5 Horizontal peak ground acceleration attenuation relationship in this study compared with others in footwall region

3 竖向地震动峰值加速度回归结果及比较分析

竖向地震动峰值加速度的衰减关系形式、采用的记录以及考虑的参数与水平峰值加速度的完全相同,上盘区的回归的结果为

$$\lg Y = 4.3278 - 0.0015R - 1.1254\lg R \quad (4)$$

下盘区的回归结果为

$$\lg Y = 3.7969 - 0.0009R - 0.9876\lg R \quad (5)$$

回归结果与原始数据的比较如图 6 所示,与水平向结果类似,无论从拟合图还是残余量分析图都可以看出回归结果与原始数据拟合较好。

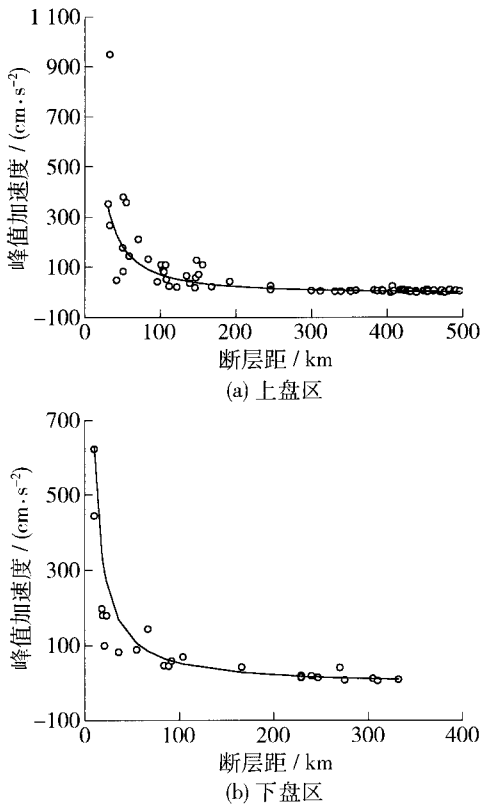


图 6 竖向峰值加速度衰减关系与观测值比较

Fig. 6 Vertical peak acceleration attenuation relationship compared with the recordings

由图 6 和图 7 中可以看出竖向峰值加速度衰减规律与水平向上基本一致. 在断层距为 200 km 范围内上盘区的拟合值要略高于下盘区,而在较远场 200 km 以外则相差无几,且 2 个区的衰减速率也差不多。

总体上来看,无论在上盘区还是下盘区,水平向峰值加速度的计算值都要大于竖向,而随距离的增加衰减速率也各自不同,垂向上衰减相对较缓慢。

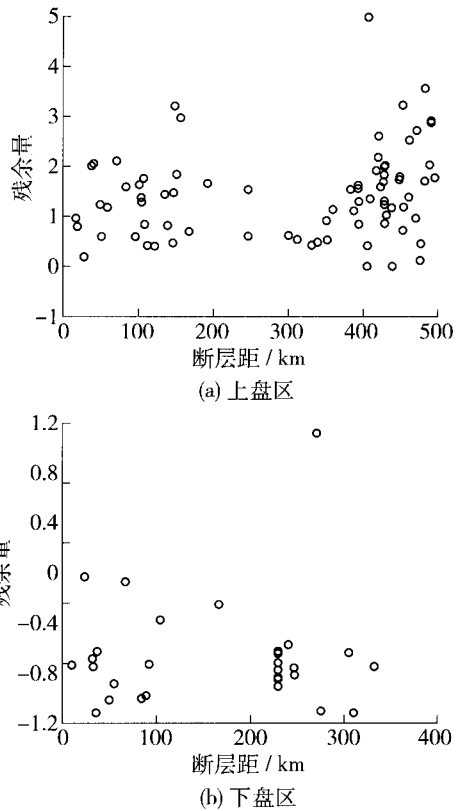


图 7 竖向峰值加速度观测值与计算值之比及残余量

Fig. 7 Ratio of observed to predicted values on vertical peak acceleration and residuals

而在同一个距离档内,上盘区和下盘区各自在垂向上的衰减以上盘区更甚,特别是在中远场,下盘区的竖向加速度峰值比上盘区小很多. 这说明下盘区竖向峰值加速度衰减受到距离的影响更大. 现将加速度的两个水平分量分别作为独立的一个观测值与对应的同一台站上的竖向观测值相除来进行分析。

由图 8 和图 9 中统计回归结果可以看出,上盘区竖向与水平向峰值加速度比随着断层距的增加而逐渐减小,但在断层距为 100 km 的范围内都超过了工程上通常所考虑的 2/3^[14-15],说明上盘区近场的竖向峰值加速度比较大. 这样的竖向地震动对工程结构抗震设计会产生很大的影响,这显示了大震级近断层范围内采用 2/3 这一设计值并非安全取值,因此单独考虑近断层范围的竖向地震动特征显得很有必要. 下盘区在 200 km 范围内随着断层距增加该比值逐渐减小,且约 30 km 处已小于 2/3. 虽在 200 km 之外比值又有所上扬,但仍小于 2/3. 这表明同比上盘区,下盘区的竖向加速度峰值总体上要小一些,这也同样说明了下盘区的竖向加速度峰值衰减比上盘区要快。

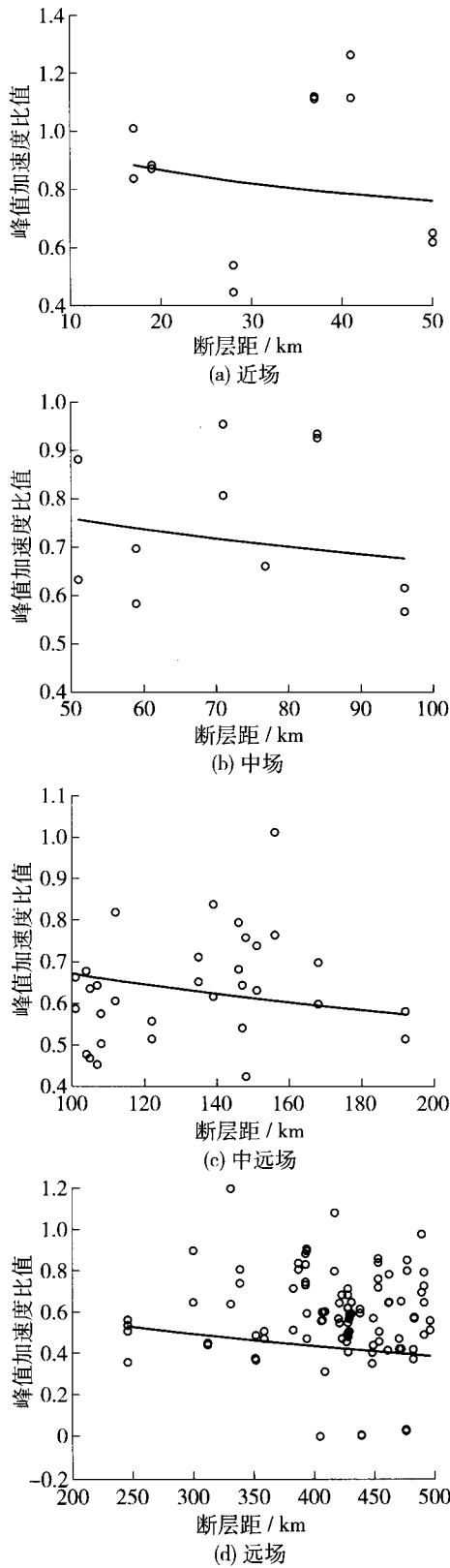


图8 竖向与水平向峰值加速度比值(上盘区)
Fig.8 The ratio of vertical to horizontal peak ground acceleration in hanging wall region

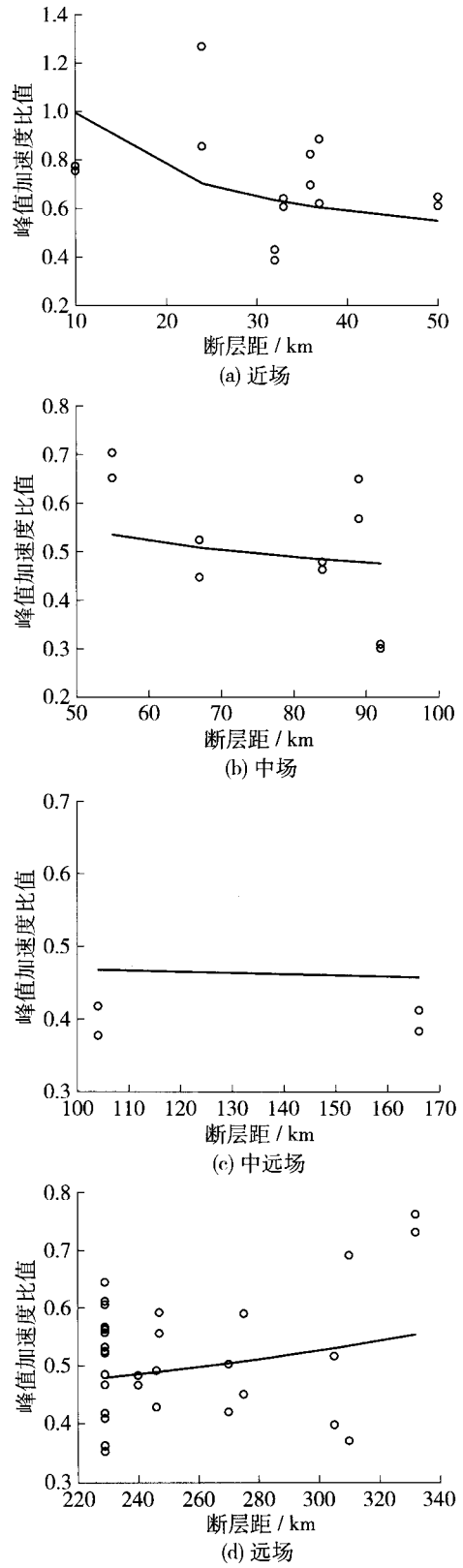


图9 竖向与水平向峰值加速度比值(下盘区)
Fig.9 The ratio of vertical to horizontal peak ground acceleration in footwall region

4 结论

对断层上盘、下盘区的水平向峰值加速度进行了回归统计,针对4个距离档对2个区的衰减与常用的多个衰减关系分别进行了比较分析,包括2个区内不同距离档的比较和相同距离档不同区之间的比较.研究表明:

1) 上盘区的衰减要慢于下盘.总体上,上盘地震动要大于下盘,即存在近断层的上/下盘效应.

2) 已有的这些衰减关系并不适宜直接应用于诸如汶川这样的特大地震上,应充分利用特大地震的强震动记录资料确定合理的地震动衰减关系.

3) 对竖向地震动的峰值加速度进行了单独的回归统计,并求出与水平向所得结果之比.虽然总体上竖向地震动的峰值加速度小于水平向,衰减也要快过水平向,但在近断层甚至中场范围,竖向地震动依然很大,目前工程上常用的2/3这一比值显得不够安全,并不利于结构的抗震设防,在近断层范围内应注重考虑竖向地震动的取值.

参考文献:

- [1] CAMPBELL K W. Near-source attenuation of peak horizontal acceleration [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1981, 71(6): 2039-2070.
- [2] JOYNER W B, BOORE D M. Peak horizontal acceleration and velocity from strong motion records including records from the 1979 imperial valley, California, earthquake [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1981, 71(6): 2011-2038.
- [3] FUKUSHIMA Y, TANNAKA T. A new attenuation relation for peak horizontal acceleration of strong earthquake ground motion in Japan [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1990, 80(4): 757-783.
- [4] 霍俊荣. 近场强地面运动衰减规律的研究 [D]. 哈尔滨: 国家地震局工程力学研究所, 1989.
HOU J R. Study on the attenuation law of near field ground motion [D]. Haerbin: the Institute of Engineering Mechanics, State Seismological Bureau, 1989. (in Chinese)
- [5] 胡聿贤. 地震安全性评价技术教程 [M]. 北京: 地震出版社, 1999: 282-320.
- [6] BOORE D M, JOYNER W B, FUMAL T E. Equations for estimating horizontal response spectra and peak acceleration from Western North American earthquake: a summary of recent work [J]. *Seismological Research Letters*, 1997, 68(1): 128-153.
- [7] FUKUSHIMA Y, IRIKURA K, UETAKE T, et al. Characteristics of observed peak amplitude for strong ground motion from the 1995 hyogoken nanbu (Kobe) earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1990(3): 545-565.
- [8] KANNO T, NARITA A, MORIKAWA N, et al. A new attenuation relation for strong ground motion in Japan based on recorded data [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2006, 96(6): 879-897.
- [9] 李小军, 阎秀杰, 潘华. 中小震近场地震动估计中地震动衰减关系的适用性分析 [J]. *地震工程与工程振动*, 2005, 25(1): 1-7.
LI Xiao-jun, YAN Xiu-jie, PAN Hua. Suitability analysis of ground motion attenuation relation in estimation of near-field ground motion for small and moderate earthquakes [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2005, 25(1): 1-7. (in Chinese)
- [10] 李小军, 周正华, 于海英, 等. 汶川8.0级地震强震动观测及记录初步分析 [C] // 汶川地震建筑震害调查与灾后重建分析报告, 北京: 中国建筑工业出版社, 2008: 3-12.
LI Xiao-jun, ZHOU Zheng-hua, YU Hai-ying, et al. Preliminary analysis of recordings and observation of strong motion from the Magnitude 8.0 Wenchuan Earthquake [C] // *Analysis Report on the Survey of Building Damages and Post-disaster Reconstruction in the Wenchuan Earthquake*, Beijing: China Architecture & Building Press, 2008: 3-12. (in Chinese)
- [11] LI X J, ZHOU Z H, YU H Y, et al. Strong motion observations and recordings from the great Wenchuan earthquake [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2008, 7(3): 235-246.
- [12] LI X J, ZHOU Z H, HUANG M, et al. Preliminary analysis of strong-motion recordings from the magnitude 8.0 Wenchuan, China earthquake of May 12, 2008 [J]. *Seismological Research Letters*, 2008, 79(6): 844-854.
- [13] 卢寿德, 李小军. 汶川8.0级地震未校正加速度记录 [M]. 北京: 地震出版社, 2008: 50-60.
- [14] 周正华, 周雍年, 卢滔, 等. 竖向地震动特征研究 [J]. *地震动与工程振动*, 2003, 23(3): 25-29.
ZHOU Zhen-hua, ZHOU Yong-nang, LU Tao, et al. Study on characteristics of vertical ground motion [J]. *Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2003, 23(3): 25-29. (in Chinese)
- [15] 中国建筑科学研究院 GB50011—2010. 建筑抗震设计规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.

(责任编辑 张士瑛)