

DOI:10.11918/201809108

汶川地震竖向地震动衰减关系

刘平¹, 罗奇峰², 陈兴周¹

(1. 西安科技大学 建筑与土木工程学院, 西安 710054; 2. 同济大学 上海防灾救灾研究所, 上海 200092)

摘要: 为系统研究汶川地震的竖向地震动特征, 回归出了汶川地震的竖向地震动衰减关系. 在此基础上, 分析场地效应和上/下盘效应对竖向地震动的影响; 分析竖向加速度反应谱(a_{ps} , 阻尼比 0.05) 的特征, 并提出一个简单的竖向设计反应谱; 利用竖向和水平向地震动衰减关系直接得到地震动竖向与水平向比(V/H) 的关系, 分析不同距离不同周期 V/H 的特征. 结果表明: 竖向地震动受场地效应和上/下盘效应的影响; 竖向反应谱和水平向反应谱在卓越周期、特征周期、峰值的震荡周期跨度及下降段的衰减速率都存在较大的差异; V/H 离散性较大, 且在不同周期不同距离表现出完全不同的特征, 而 V/H 的场地效应和上/下盘效应是由竖向和水平向地震动的场地效应和上/下盘效应的强弱不同造成的; 加速度反应谱的 V/H 呈现出两个极值的“马鞍型”, 但在不同距离具有不同的特征, 近场最大极值出现在高频段($t < 0.1$ s), 而远场最大极值出现在低频段($t > 1$ s). 中国未来一段时间竖向地震动的研究到应用的过程一方面可以不断完善竖向设计反应谱, 另一方面可以考虑利用 V/H 的关系求关键点的强度.

关键词: 汶川地震; 竖向地震动; 衰减关系; 反应谱; 地震动竖向与水平向比

中图分类号: P315.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2020)02-0119-10

Vertical ground motion attenuation relationship of Wenchuan earthquake

LIU Ping¹, LUO Qifeng², CHEN Xingzhou¹

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;
2. Shanghai Institute of Disaster Prevention and Relief, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: To study the vertical ground motion characteristics of Wenchuan earthquake, a vertical ground motion attenuation relationship was fitted. First, the site effect and hanging/foot wall effect on the vertical ground motion were investigated, and the characteristics of vertical pseudo-spectral acceleration (a_{ps} , damping ratio 0.05) were analyzed. Then, a simple vertical design response spectrum was proposed. The vertical-to-horizontal ratios (V/H) relationship was obtained by using vertical and horizontal ground motion attenuation formulas, and the characteristics of V/H were analyzed at different distances in different periods. Results showed that the vertical ground motion was affected by the site conditions and the hanging/foot wall. There were many differences between the vertical and the horizontal response spectra, including the excellent period, the characteristic period, the period span of oscillation of peak response spectrum, and the attenuation rate of the falling phase. V/H had great discreteness, which showed completely different characteristics with the variation of distances in different periods, whereas the site effect and the hanging/foot wall effect on V/H were caused by the difference between those on vertical and horizontal ground motions. The V/H of acceleration response spectrum exhibited a "saddle type", while it had different characteristics at different distances that the maximum value appeared in high frequency band ($t < 0.1$ s) for near field and in low frequency band ($t > 1$ s) for far field. Considering the process from research to application, the investigation of vertical ground motion in China in the future, on one hand, shall continuously improve the vertical design response spectrum, and on the other hand, shall consider estimating the key value of response spectrum by using the relationship of V/H .

Keywords: Wenchuan earthquake; vertical ground motion; attenuation relationship; response spectrum; vertical-to-horizontal ratios

大震震害研究表明: 竖向地震作用对建构筑物, 特别是一些功能性建筑构造, 如大型储油灌、大跨桥

梁、高速公路、大坝等的影响不能忽视^[1-3]. 在抗震设计中竖向地震动多数情况下都用水平向地震动乘以一个固定系数(地震动竖向与水平向比, V/H) 来估计, V/H 以 Newmark and Hall^[4] 提出的 2/3 为参考值. 近些年一些典型强震的地震动研究表明大震近场 V/H 往往大于 1^[5-8]. 一些学者也结合强震数

收稿日期: 2018-09-15

基金项目: 国家自然科学基金(51808444)

作者简介: 刘平(1984—), 男, 讲师;

罗奇峰(1947—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 刘平, liuping1005@xust.edu.cn

数据库进行了 V/H 的研究,研究表明: V/H 与震级、距离、场地类型、周期等参数存在一定关系^[9-14]. 也有学者对竖向地震动进行单独的研究^[15-17],包括竖向地震动的衰减特征,场地效应、断层效应、上/下盘效应等对地震动的影响.

研究竖向地震动,并以此开发竖向设计反应谱对于抗震设计非常必要. Bozorgnia and Campbell^[18] 发展了简化的 V/H 关系式及竖向地震动设计谱的程序. 按照该方法美国建筑抗震安全委员会^[19] 提出了竖向设计加速度反应谱. 耿淑伟和陶夏新^[20] 基于中国抗震规范的场地分类标准研究给出了 V/H 的修正参考式. 据此中国的《公路工程抗震规范》^[21] 对于桥梁竖向设计加速度反应谱规定: V/H 在基岩场地等于 0.6; 在土层场地,短周期 ($< 0.1\text{ s}$) 等于 1, 中长周期 ($> 0.3\text{ s}$) 等于 0.5, 介于两者之间用线性插值确定. 周正华等^[22] 也提出了不同强度和不同场地类型的设计反应谱.

2008 年 5 月 12 日,四川省汶川发生了 Ms 8.0 的特大地震. 此次地震在给中国经济和人民生命安全带来严重损失的同时,也得到了珍贵的地震数据. 完成于 2007 年底的中国数字强震动台网在此次地震中获得了丰富的数字强震记录^[23], 这为大震地震动的研究提供了宝贵的数据. 震害调查中发现多处山区桥梁受竖向地震的影响^[24]. 据统计,近场约有 30% 的台站 V/H 大于 2/3, 其中汶川卧龙台甚至达 1.18^[25]. 对于此次地震,谢俊举等^[26] 选取了断层距小于 120 km 的 40 个台站的记录,初步定性地分析了竖向峰值加速度的上/下盘效应和场地效应、 V/H 在不同周期和距离的特性. 韩建平和周伟^[25] 选取了 94 组记录,也对 V/H 等进行了初步研究. 本文将结合 NGA 项目^[27-28] 模型分析汶川地震的竖向地震动衰减关系,场地效应和上/下盘效应对竖向地震动的定量影响,竖向加速度反应谱特征及 V/H 的特性.

1 衰减模型的建立

以汶川地震断层距小于 300 km 的 102 组记录为分析对象^[29], 衰减关系模型如下:

$$\ln Y = a_0 + a_1 \cdot \ln(R_{rup} + a_2) + a_3 \cdot R_{rup} + a_4 \cdot \ln(v_{s30}/v_{REF}) + a_5 \cdot F_{HW}(R_{jb}, R_x, W, \delta). \quad (1)$$

式中: Y 为地震动, R_{rup} 为场地到断层破裂面的最短距离, v_{s30} 为场地地面以下 30 m 范围内的等效剪切波速, v_{REF} 为场地效应的等效剪切波速参考值, F_{HW} 为上/下盘效应项, $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$ 为回归系数.

式(1)中第 1 项 a_0 表示震级对地震动的影响; 第 2 项和第 3 项分别表示地震动随断层距的几何衰减和非弹性衰减; 第 4 项和第 5 项分别表示场地效

应和上/下盘效应. 其中,前 3 项为衰减关系的一般形式,对于场地效应和上/下盘效应作如下说明.

1) 场地效应. 也称为场地条件对地震动的放大作用, 本文通过 v_{s30} 与 v_{REF} 的比及回归系数 a_4 的大小来反映. 汶川地震中所有台站的 v_{s30} 均在 200 ~ 700 m/s, 属于 C 和 D 类场地^[30]. 取 v_{REF} 为 360 m/s (C、D 类场地的界限值), 从回归结果可以比较两类场地竖向地震动的不同.

2) 上/下盘效应. 场地与断层的空间相对关系引起的一种几何效应. 如图 1, 场地 S1 和 S2 分别处于断层的上、下两盘, 由于场地地震动受到断层面上每个点的影响, 相同断层距的条件下, S1 的地震动自然大于 S2. 随着距离的增加, 这种几何效应越来越小, 到一定距离可以忽略. 所以, 上盘效应是倾斜发震断层近场地震动的显著特性, 其影响程度与距离、断层倾角、断层宽度等因素有关. 结合汶川地震, 对 AS08^[31] 模型的上/下盘效应项作了如下调整:

$$F_{HW}(R_{jb}, R_x, W, \delta) = T_1(R_x, W, \delta) \cdot T_2(R_{jb}). \quad (2)$$

其中

$$T_1(R_x, W, \delta) = \begin{cases} 0.5 + \frac{R_x}{2W \cos \delta}, & R_x \leq W \cos \delta, \\ 1, & R_x > W \cos \delta, \end{cases}$$

$$T_2(R_{jb}) = \begin{cases} 1 - R_{jb}/30, & R_{jb} < 30 \text{ km}, \\ 0, & R_{jb} \geq 30 \text{ km}. \end{cases}$$

式中: R_{jb} 为场地到断层在地面投影的最短距离, R_x 为场地到断层上边缘在地面投影线的最短距离(上盘取正, 下盘取负), W 为断层面的宽度(汶川地震取 42.5 km), δ 表示断层的倾角(汶川地震取 50° ^[32]). 上/下盘效应影响范围见图 2.

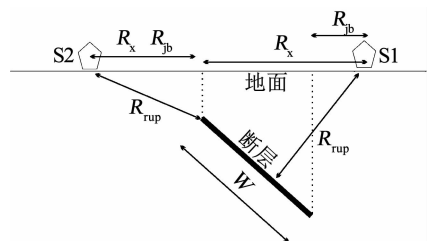


图 1 距离的定义

Fig. 1 Definition of distance

2 竖向地震动衰减关系分析

竖向地震动衰减关系的回归结果见表 1. 从表 1 的回归结果、图 3 中竖向地震动衰减回归曲线和散点图的分布来看, 本文的衰减关系能较好地反映汶川地震竖向地震动的空间分布特性.

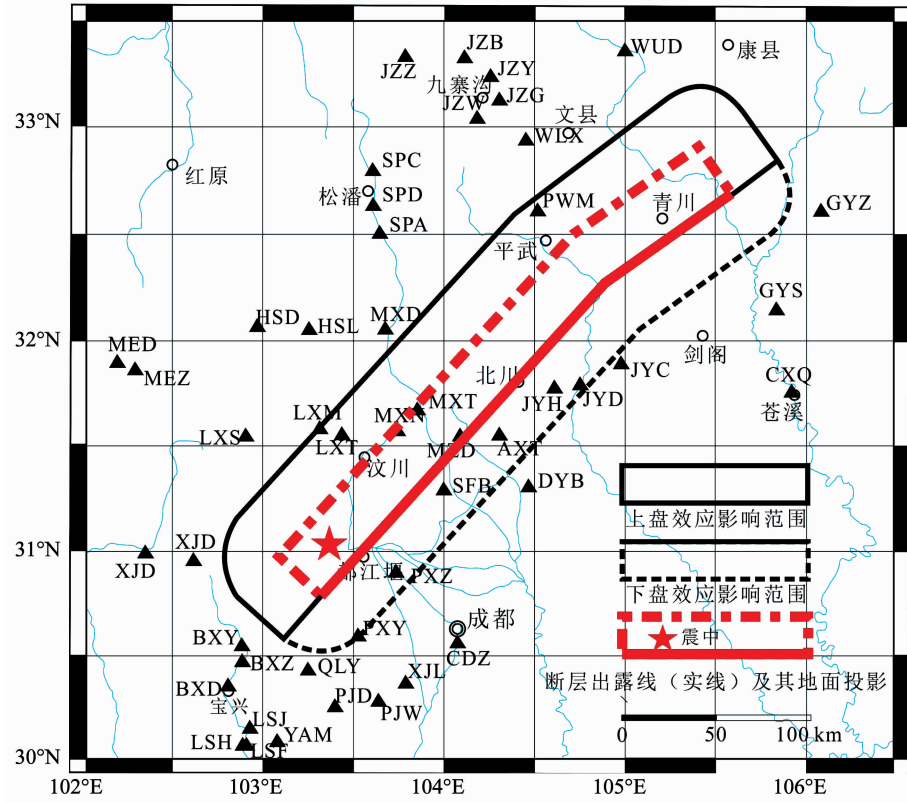


图 2 上/下盘效应的影响范围(底图源自文献[32-34])

Fig. 2 Regions of hanging/foot wall effect

表 1 竖向地震动衰减关系回归结果

Tab. 1 Regression results of vertical ground motions attenuation relationship

周期	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	标准差 $\sigma_{ln Y}$
v_{PG}	9.772	-1.755	25	0.005 08	-0.131	-0.303	0.427
a_{PG}	-0.334	-0.366	25	-0.005 86	-0.719	1.516	0.532
0.010 s	-0.358	-0.356	25	-0.005 96	-0.725	1.518	0.533
0.030 s	-1.855	0.095	14	-0.009 77	-0.773	2.304	0.605
0.050 s	-1.552	0.136	14	-0.011 44	-0.790	1.839	0.588
0.075 s	-2.096	0.313	14	-0.012 30	-0.749	1.944	0.572
0.100 s	-2.588	0.413	25	-0.012 04	-0.824	2.067	0.597
0.300 s	-0.640	-0.219	25	-0.005 22	-0.614	1.153	0.557
0.500 s	2.693	-1.160	25	0.002 02	-0.321	0.511	0.571
0.700 s	3.583	-1.468	19	0.004 66	-0.158	-0.137	0.589
0.750 s	3.611	-1.501	17	0.004 96	-0.120	-0.379	0.601
1.000 s	5.669	-2.019	25	0.007 86	0.047	-0.502	0.611
3.000 s	5.530	-2.236	25	0.008 76	0.095	-0.571	0.564

注: v_{PG} 为峰值速度, a_{PG} 为峰值加速度, 0.010 ~ 3.000 s 为加速度反应谱.

2.1 场地效应分析

从图 3 中竖向地震动的散点分布来看, 相同条件下, 短周期 0.03 s 时, D 类场地(圆)的地震动值明显大于 C 类场地(方块); 到 0.30 s 时, D 类场地的地震动值稍大于 C 类场地; 长周期 1.00 s 时, 两类场地的地震动值没有明显的差别. 从图 4 的衰减

回归曲线来看, 短周期 0.03 s, $v_{S30} = 300$ m/s (D 类场地) 的衰减曲线在 $v_{S30} = 500$ m/s (C 类场地) 的衰减曲线之上; 到 0.30 s 时, 两条曲线的距离已经稍有接近; 长周期 1.00 s 时, 两条曲线基本重合. 式(1)中 a_4 为场地效应项系数, 从表 1 可以看出, 当周期 ≤ 0.75 s, a_4 为负, 其绝对值由 0.01 s 的 0.719

减小到 0.75 s 的 0.120; 当周期 > 0.75 s, a_4 为正, 但其绝对值较小, 1.00 s 时, 该值为 0.047, 3.00 s 时为 0.095.

以上分析说明: 竖向地震动存在场地效应的影响, 短周期 (≤ 0.075 s) 时, v_{S30} 越小 (场地越软), 竖

向地震动越大 (场地对地震动有放大作用), 但随着周期的增加场地效应逐渐减弱; 长周期时 (> 0.075 s) 竖向地震动的场地效应比较微弱, 但是与短周期呈现出完全相反的效应, 表现为 v_{S30} 越大 (场地越硬) 竖向地震动越大.

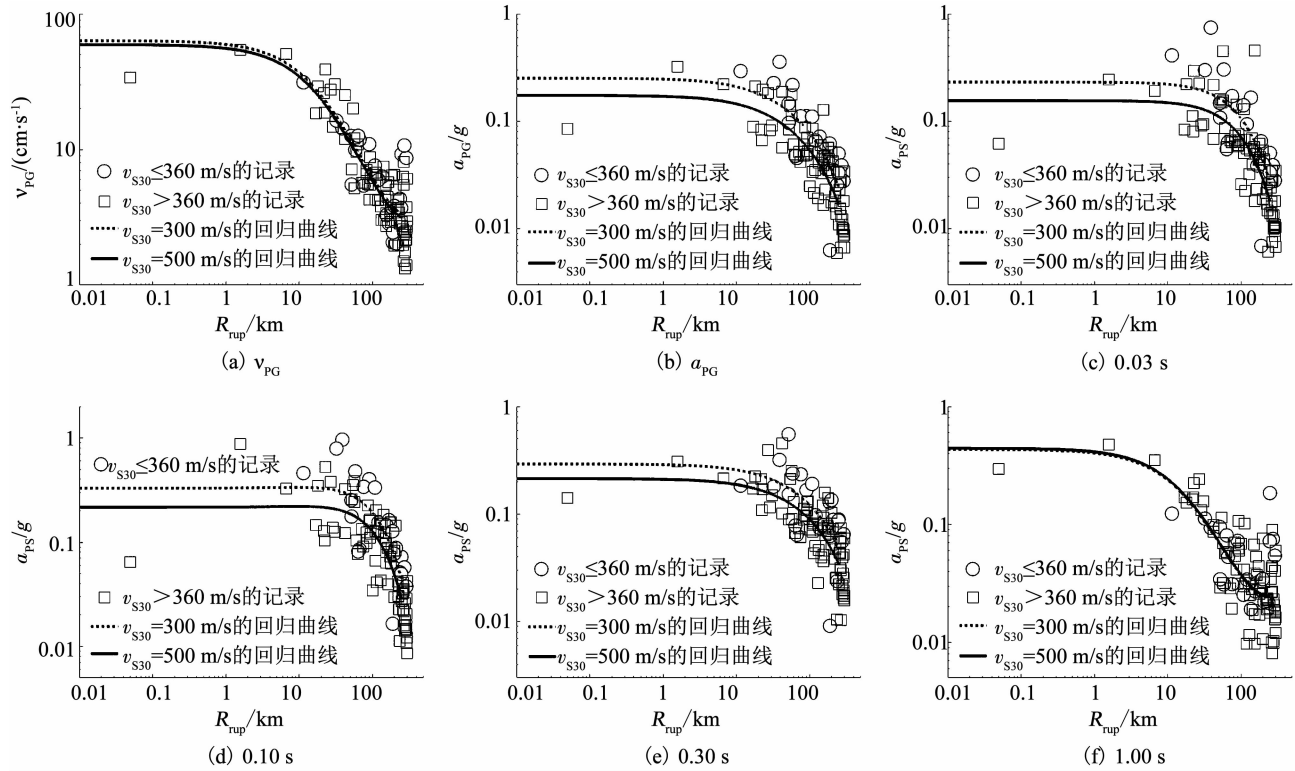
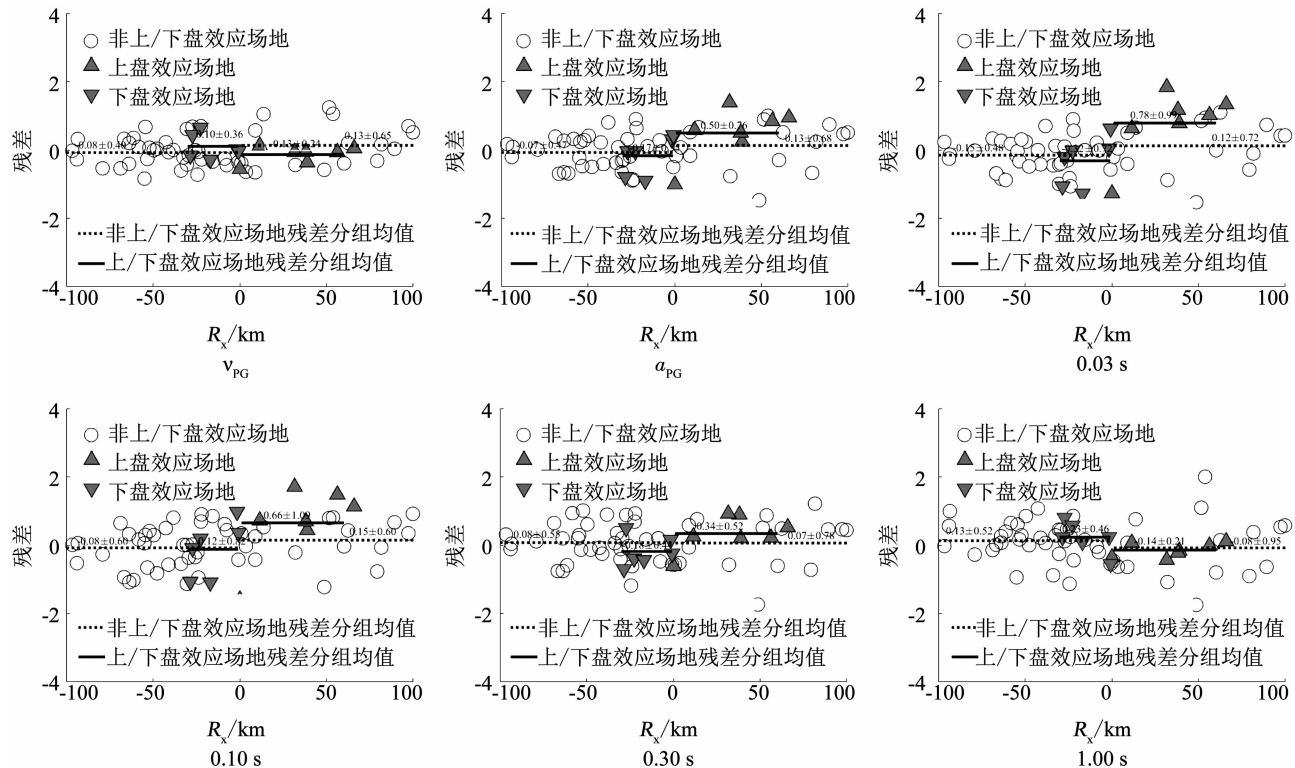
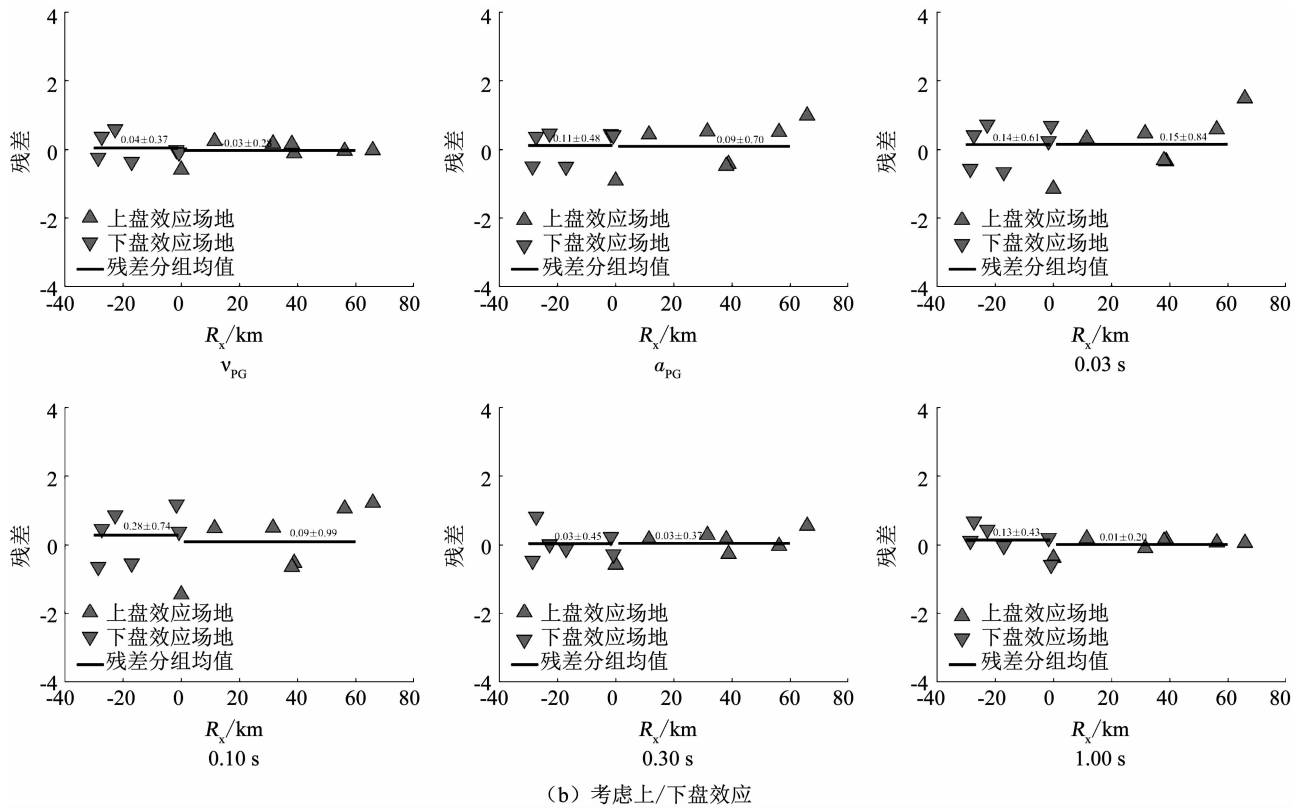


图 3 竖向地震动的衰减回归曲线和散点图

Fig. 3 Vertical ground motions attenuation regression curves and scatterplot



(a) 不考虑上/下盘效应



(b) 考虑上/下盘效应

图4 近场竖向地震动回归残差及分组均值

Fig. 4 Fit residuals and binned means of vertical ground motion in near site

2.2 上/下盘效应分析

图4(a)为式(1)中无第5项(上/下盘效应项)的竖向地震动回归残差和区分上、下盘的分组残差均值. 上盘效应场地(正向三角,位于图2的细实线框的区域内)和下盘效应场地(逆向三角,位于图2的细点断线框区域内)存在较大的差别,表现在:短周期0.03 s,上盘效应场地多数残差大于0,下盘效应场地多数残差小于0,分组的残差均值(实线)也显现出了同样的特征,分别为0.78和-0.32;随着周期的增加,上、下盘的差别越来越小;到长周期1.00 s,上、下盘效应场地残差只有微小的差别,从统计值来看,上盘效应场地的残差均值0.32大于下盘效应场地的残差均值-0.18;3.00 s时上、下盘效应场地残差无明显差别,甚至从统计值来看,下盘的残差均值0.23大于上盘的残差均值-0.14,但是都接近0. 上、下盘中距离断层较近的区域内未考虑上/下盘效应场地($|R_x| < 100 \text{ km}, R_{jb} \geq 30 \text{ km}$,图4中的圆,位于图2的上/下盘效应影响范围以外的区域)的残差并无规律性的差别,分组残差均值(点断线)的绝对值也均较小. 这说明将上/下盘效应影响的区域规定在 $R_{jb} < 30 \text{ km}$ 的范围基本合理. 图4(b)为式(1)上下盘效应场地的回归残差和分组残差均值. 可以看出,考虑上/下盘效应后,上、下盘效应场

地的竖向地震动残差均在0附近较均匀地分布,残差均值也都更接近0. 这说明用式(2)定量化表示上/下盘效应是合理的.

以上的过程说明:竖向地震动存在上/下盘效应的现象,随着周期的增加,上/下盘效应逐渐减弱;本文衰减模型的上/下盘效应项能较好地体现近断层场地的上/下盘效应特征.

3 竖向加速度反应谱

图5为由回归结果确定的不同断层距的汶川地震竖向和水平向加速度反应谱. 可以看出,竖向反应谱和水平向反应谱一样随着周期的增加先增大到一个峰值后又开始下降. 两者又存在较大的差异,表现在:竖向反应谱卓越周期(峰值点周期)大约为0.10 s,而水平向的卓越周期较晚,其中近场(1 km, 10 km)为0.18~0.20 s,而远场(50 km, 100 km)为0.15 s左右;峰值点附近反应谱均会出现一定的震荡(相当于设计反应谱的平台段),水平向反应谱峰值震荡的周期跨度明显长于竖向(100 km时不明显);水平向反应谱的特征周期(下降段起始点的周期)远大于竖向;水平向下降段的衰减速度也快于竖向.

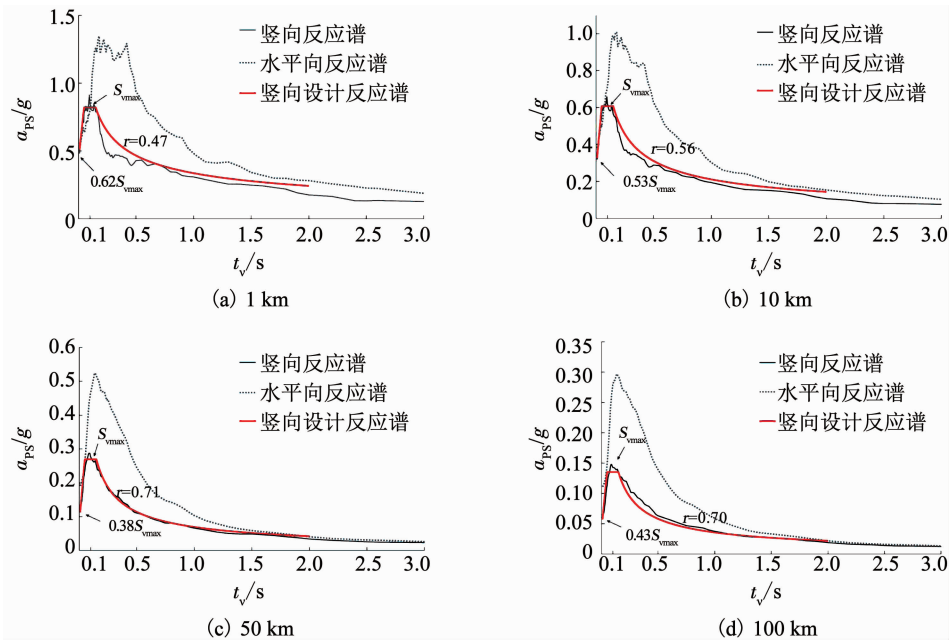


图 5 汶川地震竖向、水平向加速度反应谱及竖向设计反应谱

Fig. 5 Vertical, horizontal, and design vertical a_{ps} of Wenchuan earthquake

根据竖向反应谱的谱型特征,粗略设计了一个竖向设计反应谱,关系式如下:

$$S_v = \begin{cases} S_{vmax} [(1-b)t_v/t_{v1} + b], & t_v \leq t_{v1}, \\ S_{vmax}, & t_{v1} < t_v \leq t_{vg}, \\ S_{vmax} (t_{vg}/t_{v1})^r, & t_{vg} < t_v. \end{cases} \quad (3)$$

式中: S_v 为竖向设计反应谱, t_v 为竖向自震周期, t_{v1} 为平台段的起始周期, t_{vg} 为竖向特征周期, S_{vmax} 为竖向设计加速度反应谱最大值, r 为下降段的衰减指数, b 为 0 s 时竖向设计加速度反应谱与最大值的比值.

周正华等^[22]提出的竖向设计反应谱为两段:平台段($<$ 特征周期)和下降段(\geq 特征周期),且特征周期取水平向特征周期.该反应谱存在两个问题:设定小于特征周期为一定值,忽略了上升段的存在;竖向特征周期取值偏大.FEMA P-1050^[19]竖向设计反应谱的谱型特征与本文提出的基本相同,但分为 4 段(<0.025 s 的反应谱设为一定值,且为平台段强度的 0.4 倍;平台段的起始周期和特征周期分别为 0.05 和 0.15 s;下降段的衰减指数为 0.75).

选取平台段起始周期和特征周期与 FEMA P-1050 相同,对不同断层距的反应谱按式(3)进行拟合,结果见图 5.可以看出,选取起始周期 0.05 s、特征周期 0.15 s 是较为合理的; b 、 r 在断层距为 1 和 10 km 的近场分别为 0.62, 0.47 和 0.53, 0.56, 与 FEMA P-1050 的值(0.40, 0.75)差距较大,而断层

距为 50 和 100 km 的远场基本与该规范一致.

4 V/H 分析

V/H 的关系式一般利用最小二乘法直接拟合而成.本文采用另一种方法^[35]:

$$\ln(V/H) = \ln Y_v - \ln Y_h, \quad (4)$$

式中: $\ln Y_v$ 和 $\ln Y_h$ 分别为式(1)拟合的竖向和水平向地震动衰减关系(回归结果见表 2).

V/H 关系式的标准差按下式计算:

$$\sigma_{\ln(V/H)} = \sqrt{\varphi_{\ln(V/H)}^2 + \tau_{\ln(V/H)}^2}. \quad (5)$$

其中

$$\begin{aligned} \varphi_{\ln(V/H)} &= \sqrt{\varphi_{\ln Y_v}^2 + \varphi_{\ln Y_h}^2 - 2\rho_{\ln Y_v, \ln Y_h}^w \varphi_{\ln Y_v} \varphi_{\ln Y_h}}, \\ \tau_{\ln(V/H)} &= \sqrt{\tau_{\ln Y_v}^2 + \tau_{\ln Y_h}^2 - 2\rho_{\ln Y_v, \ln Y_h}^B \tau_{\ln Y_v} \tau_{\ln Y_h}}. \end{aligned}$$

式中: $\sigma_{\ln(V/H)}$ 为 V/H 关系式的总标准差, $\varphi_{\ln Y_v}$ 、 $\tau_{\ln Y_v}$ 分别为事件内(within-event, 同一地震)和事件间(between-event, 不同地震)的竖向地震动回归标准差, $\varphi_{\ln Y_h}$ 、 $\tau_{\ln Y_h}$ 分别为事件内和事件间的水平向地震动回归标准差, $\varphi_{\ln(V/H)}$ 、 $\tau_{\ln(V/H)}$ 分别为事件内和事件间的 V/H 标准差, $\rho_{\ln Y_v, \ln Y_h}^w$ 、 $\rho_{\ln Y_v, \ln Y_h}^B$ 分别为事件内和事件间竖向和水平向地震动残差的相关系数.汶川地震 V/H 关系式的标准差见表 2(本文模型不需考虑事件间的回归标准差).

表 2 水平向地震动衰减关系回归结果及 V/H 关系式的标准差

Tab. 2 Regression results of horizontal ground motions attenuation relationship and standard deviation of V/H

周期	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	标准差 $\sigma_{\ln(V/H)}$
v_{PG}	9.527	-1.665	25	0.005 96	-0.432	0.308	0.632
a_{PG}	-0.934	-0.097	18	-0.007 13	-0.556	1.030	0.692
0.010 s	-0.940	-0.094	18	-0.007 16	-0.556	1.033	0.693
0.030 s	-1.094	-0.030	17	-0.007 88	-0.544	1.284	0.738
0.050 s	-1.780	0.201	14	-0.009 97	-0.532	1.452	0.728
0.075 s	-3.209	0.654	25	-0.013 39	-0.687	1.484	0.756
0.100 s	-3.271	0.720	25	-0.013 86	-0.533	1.375	0.775
0.300 s	0.432	-0.250	14	-0.005 42	-0.863	0.883	0.784
0.500 s	1.741	-0.721	25	-0.001 17	-0.676	1.086	0.751
0.700 s	3.438	-1.257	24	0.003 05	-0.567	0.542	0.738
0.750 s	3.105	-1.204	21	0.002 82	-0.516	0.430	0.727
1.000 s	4.775	-1.691	25	0.006 36	-0.524	0.135	0.734
3.000 s	6.615	-2.489	25	0.011 32	-0.179	-0.287	0.636

从图 6 中散点图的分布来看, V/H 的离散性较大, 散点分布无明显的规律. 从图中 V/H 的曲线来看, 短周期 0.03 s 时 V/H 随着断层距的增加, 先有轻微的增大后又逐渐减小; 0.10 s 时, V/H 随着断层距的增大, 先减小后又有轻微的增大; 0.30 s 时, V/H

H 随着断层距的增加缓慢增大; 到长周期 1.00 s 时, V/H 随着断层距的增加, 首先急剧减小, 后保持在一个相对稳定的值. 这说明 V/H 在不同周期随距离变化的特征不同.

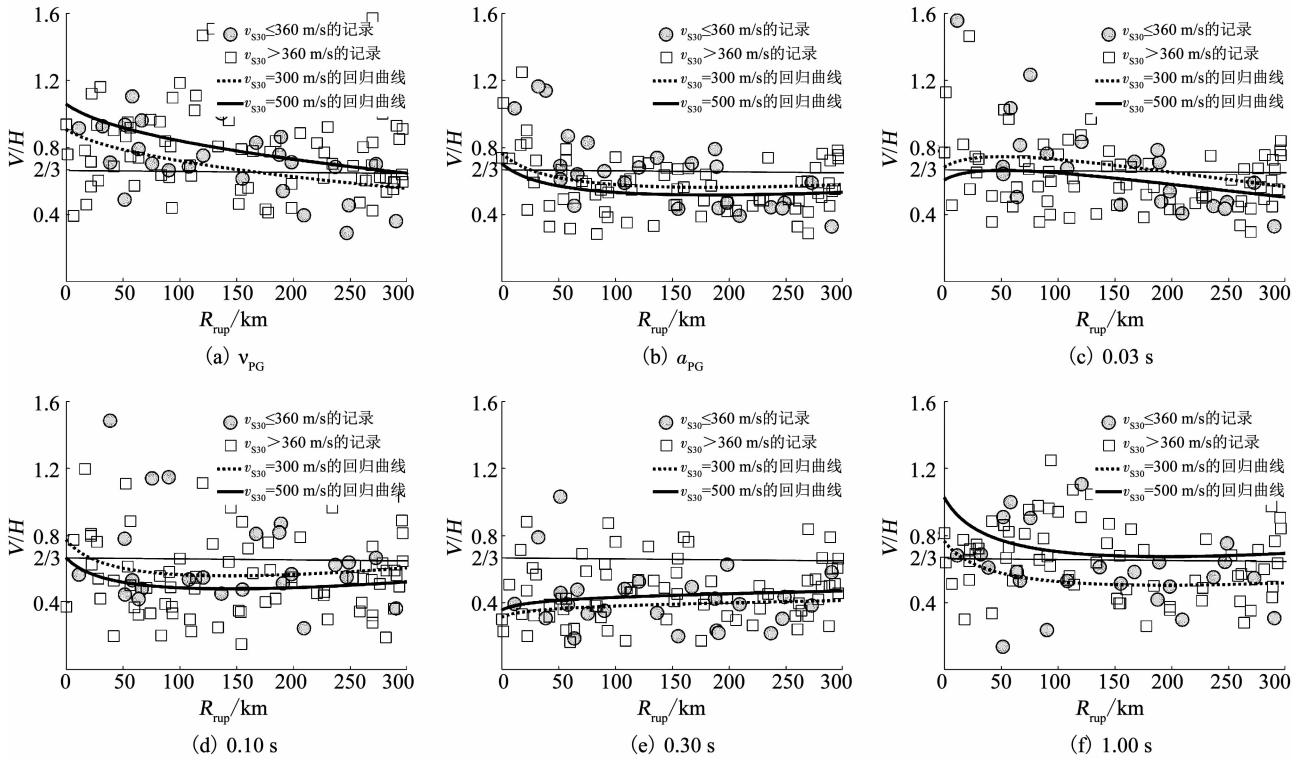


图 6 V/H 曲线和散点图

Fig. 6 V/H curves and scatterplot

从图 6 同样可以看出, 短周期(0.03 s)时, D 类场地(圆)的 V/H 大于 C 类场地(方块); 随着周期增加到 0.30 s 时, 两类场地的 V/H 没有明显的差

别; 到 1.00 s 时, C 类场地的 V/H 明显大于 D 类场地. V/H 曲线(C 类场地为实线, D 类场地为点断线)也显现出和散点分布同样的特征. 这说明不同类型

场地的 V/H 在不同周期具有不同的特征。

图 7 为不同断层距加速度反应谱的 V/H 曲线。加速度反应谱 V/H 曲线均呈现出“马鞍型”的特征,即有两个峰值:高频段峰值($t < 0.1$ s)和低频段峰值($t > 1$ s)。不同断层距加速度反应谱 V/H 曲线的具体形态又有所不同:1 km 时,高频段峰值明显大于低频段峰值;10 km 时,高频段峰值仍大于低频段峰值,但差距已减小;50 km 时,低频段的峰值已大

于高频段峰值;100 km 时,低频段峰值明显大于高频段峰值。这仍说明 V/H 在不同距离具有不同的特征。图 7 还给出《公路工程抗震规范》加速度反应谱 V/H 的设计曲线,可以看出,近场(1 km, 10 km)时,设计 V/H 曲线能较好地反应 V/H 实际关系(大于 2 s 的低频段偏低),但远场(50 km, 100 km)由于回归曲线高频的 V/H 小于低频的 V/H ,这与设计 V/H 的差距较大,会高估高频和低估低频的竖向地震动。

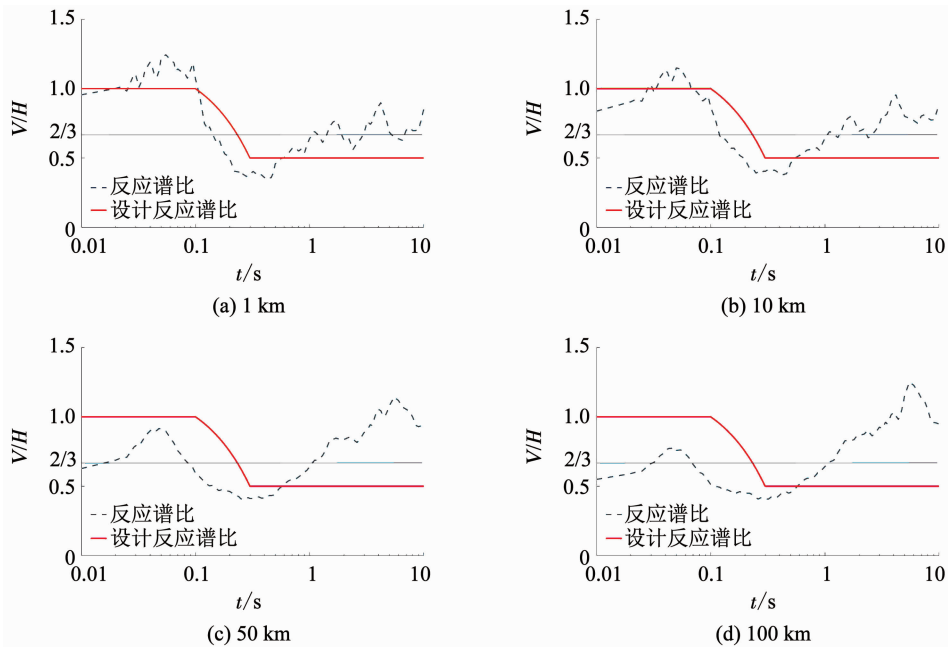


图 7 汶川地震加速度反应谱(阻尼比 0.05) V/H 曲线

Fig. 7 V/H curves of a_{ps} (damping ratio 0.05) of Wenchuan earthquake

5 结论与讨论

1) 本文的模型能较好地反映汶川地震竖向地震动的分布特性。结果表明:竖向地震动存在场地效应和上/下盘效应的现象,随着周期的增加,场地效应和上/下盘效应均逐渐减弱;峰值加速度的场地效应和上/下盘效应与短周期地震动特征较为一致,峰值速度的场地效应和上/下盘效应特征均与长周期地震动的特征较为一致(图 3, 4)。本文的衰减关系能较好地反映不同类型场地的竖向地震动衰减特性和上/下盘效应对竖向地震动的影响(式(1), (2))。

2) 竖向反应谱和水平向反应谱存在较大的差异,表现在竖向反应谱的卓越周期和特征周期都小于水平向;竖向反应谱峰值的震荡周期跨度小于水平向;竖向反应谱下降段的衰减速度缓于水平向。因而竖向设计反应谱和水平向设计反应谱也应有几方面的不同:设计竖向反应谱的平台段周期范围与水平向不同;水平向的特征周期不能直接用于竖向;竖向反应谱下降段的衰减指数与水平向应有所不同。

3) V/H 的离散性较大,该比值在不同周期随距离的变化特征完全不同。 V/H 在不同的场地显现出不同的特征,这种场地效应是场地对竖向和水平向地震动的作用不同造成的,这点可以从表 1 和表 2 中场地效应系数 a_4 的差异体现。竖向和水平向的场地效应系数差别越大, V/H 的场地效应越明显(v_{PC} 相差 0.301; a_{PC} 相差 -0.163; a_{PS} 0.03 s 相差 -0.229, 0.10 s 相差 -0.291, 0.30 s 相差 0.249, 1.00 s 相差 0.571。这与图 6 中两条曲线的距离成正比)。同样, V/H 的上/下盘效应也是由竖向和水平向地震动上/下盘效应的强弱不同造成。这些特征本文不作具体分析。

4) 加速度反应谱的 V/H 呈现双极值的“马鞍型”,但在不同距离具有不同的特征,具体表现为:在近场,最大值出现在高频段($t < 0.1$ s);在远场,最大值出现在低频段($t > 1$ s)。

V/H 在不同位置及不同周期显现出不同的特征,在抗震设计中,不能简单地以水平向地震动的 2/3 来估计竖向地震动,而需要综合考虑场地位置、场地条件及频谱等特性。目前,中国的《公路工程抗

震规范》虽然已有很大的进步,但是对于汶川地震远场以及长周期竖向地震动估计仍存在很大偏差,而 FEMA P-1050 对于汶川地震近场地震动的估计会有一定的偏差.当然,这还需要更多的地震来验证.研究竖向地震动,并以此开发竖向设计反应谱对于抗震设计非常必要,但目前的地震区划工作均建立在水平向地震动的基础上.如何利用现有的成果,并结合竖向地震动自身的特征进行竖向反应谱的设计是目前竖向地震动输入工作中一个较为合理的研究方向.由于 V/H 的离散性及不同距离不同场地显现出的完全不同的特征,直接利用水平向地震动乘以 V/H 来估计竖向地震动的工作比较复杂,并且难以保证估计的精度.在未来一方面可以研究不同场地不同地震分组(考虑震级和距离)的竖向反应谱谱型特征来不断地完善设计反应谱谱型关系(式(3)),另一方面在确定竖向强度时可以利用 V/H 的关系求出关键点的强度(S_{\max}).这样能在一个较短的周期范围内研究 V/H ,利用设计水平向反应谱求出设计竖向反应谱的平台段强度,同时可以考虑竖向反应谱自身的特征.

参考文献

- [1] 陈念英. 竖向地震力对建筑物破坏的工程实例[J]. 工程力学, 1985, 2(4): 130
CHEN Nianying. Engineering example of vertical seismic force damage to buildings[J]. Engineering Mechanics, 1985, 2(4): 130
- [2] PAPAIOGLOU A J, ELNASHAI A S. Analytical and field evidence of the damaging effect of vertical earthquake ground motion[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1996, 25(10): 1110. DOI: 10.1002/(SICI)1096-9845(199610)25:10 <1109::AID-EQE604 >3.0.CO;2-0
- [3] KYNNATH S K, ERDURAN E, CHAI Y H, et al. Effect of near-fault vertical ground motions on seismic response of highway overcrossings[J]. Journal of Bridge Engineering, 2008, 13(3): 289. DOI: 10.1061/(ASCE)1084-0702(2008)13:3(282)
- [4] NEWMARK N M, HALL W J. Earthquake spectra and design[M]. Berkeley, California: Earthquake Engineering Research Institute, 1982
- [5] BUREAU G J. Near-source peak ground acceleration [J]. Earthquake Notes, 1981, 52(1): 81
- [6] BOZORGNIYA Y, NIAZI M. Distance scaling of vertical and horizontal response spectra of the Loma Prieta earthquake[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1993, 22(8): 703. DOI: 10.1002/eqe.4290220805
- [7] 周正华, 周雍年, 赵刚. 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, 2003, 22(3): 16
ZHOU Zhenghua, ZHOU Yongnian, ZHAO Gang. Statistical analysis of peak ratios and response spectra of near-field accelerograms [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2003, 22(3): 16
- [8] 周锡元, 徐平, 王国权, 等. 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, 2006, 28(3): 325
ZHOU Xiyuan, XU Ping, WANG Guoquan, et al. A case study on near fault vertical to horizontal response spectral ratio from the 1999, Chi-Chi, Taiwan, earthquake[J]. Seismology and Geology, 2006, 28(3): 325. DOI: 10.3969/j.issn.0253-4967.2006.03.001
- [9] ABRAHAMSON N A, LITEHISER J J. Attenuation of vertical peak acceleration[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1989, 79(3): 549. DOI: 10.1016/0009-2541(89)90006-5
- [10] NIAZI M, BOZORGNIYA Y. Behavior of near-source vertical and horizontal response at SMART-1 array, Taiwan [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1992, 21(1): 37. DOI: 10.1002/eqe.4290210103
- [11] AMBRASEYS N N, SIMPSON K A. The prediction of vertical response spectra in Europe [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1996, 25(4): 401. DOI: 10.1002/(SICI)1096-9845(199604)25:4 <401::AID-EQE551 >3.0.CO;2-B
- [12] 周正华, 周雍年, 卢滔, 等. 竖向地震动特征研究[J]. 地震工程与工程振动, 2003, 23(3): 25
ZHOU Zhenghua, ZHOU Yongnian, LU Tao, et al. Study on characteristics of vertical ground motion [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2003, 23(3): 25
- [13] GÜLERCE Z, ABRAHAMSON N A. Site-specific design spectra for vertical ground motion[J]. Earthquake Spectra, 2011, 27(4): 1023. DOI: 10.1193/1.3651403
- [14] AKKAR S, SANDIKKAYA M A, AY B Ö. Compatible ground-motion prediction equations for damping scaling factors and vertical-to-horizontal spectral amplitude ratios for the broader European region[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2014, 12(1): 517. DOI: 10.1007/s10518-013-9537-1
- [15] ABRAHAMSON N A, SILVA W J. Empirical response spectral attenuation relations for shallow crustal earthquakes [J]. Seismological Research Letters, 1997, 68(1): 94. DOI: 10.1785/gssrl.68.1.94
- [16] CAMPBELL K W. Empirical near-source attenuation relationships for horizontal and vertical components of peak ground acceleration, peak ground velocity, and pseudo-absolute acceleration response spectra[J]. Seismological Research Letters, 1997, 68(1): 154. DOI: 10.1785/gssrl.68.1.154
- [17] SILVA W J. Characteristics of vertical strong ground motions for applications to engineering design[C]//Proceedings of the FHWA/NCEER Workshop on the National Representation of Seismic Ground Motion for New and Existing Highway Facilities. Buffalo, New York: National Center for Earthquake Engineering Research, 1997
- [18] BOZORGNIYA Y, CAMPBELL K W. The vertical-to-horizontal response spectral ratio and tentative procedures for developing simplified V/H and vertical design spectra [J]. Journal of Earthquake Engineering, 2004, 89(1): 175. DOI: 10.1080/13632460409350486
- [19] NEHRP recommended seismic provisions for new buildings and other structures: FEMA P-1050 [S]. Washington D C: Building Seismic Safety Council, National Institute of Building Sciences, 2015
- [20] 耿淑伟, 陶夏新. 地震动加速度反应谱竖向分量与水平向分量的比值[J]. 地震工程与工程振动, 2004, 24(5): 37
GENG Shuwei, TAO Xiaxin. The ratios of vertical to horizontal acceleration response spectra [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2004, 24(5): 37
- [21] 公路工程抗震规范: JTG B02-2013 [S]. 北京: 人民交通出版

- 社, 2013
Specification of seismic design for highway engineering: JTG B02-2013[S]. Beijing: China Communications Press, 2013
- [22] 周正华, 林淋, 王玉石, 等. 竖向地震动反应谱[J]. 防灾减灾工程学报, 2007, 27(增刊): 35
ZHOU Zhenghua, LIN Lin, WANG Yushi, et al. Response spectra of vertical ground motion[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2007, 27(S): 35
- [23] 中国地震局震害防御司. 汶川 8.0 级地震未校正加速度记录[M]. 北京: 地震出版社, 2008
China Earthquake Administration Department of Earthquake Disaster Prevention. Uncorrected acceleration record of Wenchuan Ms 8.0 earthquake[M]. Beijing: Earthquake Press, 2008
- [24] 杜修力, 韩强, 李忠献, 等. 5.12 汶川地震中山区公路桥梁震害及启示[J]. 北京工业大学学报, 2008, 34(12): 1278
DU Xiuli, HAN Qiang, LI Zhongxian. The seismic damage of bridges in the 2008 Wenchuan earthquake and lessons from its damage[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2008, 34(12): 1278
- [25] 韩建平, 周伟. 汶川地震竖向地震动特征初步分析[J]. 工程力学, 2012, 9(12): 211
HAN Jianping, ZHOU Wei. Preliminary investigation on characteristics of vertical ground motion during Wenchuan earthquake[J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(12): 211
- [26] 谢俊举, 温增平, 高孟潭, 等. 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, 2010, 53(8): 1796
XIE Junju, WEN Zengping, GAO Mengtan, et al. Characteristics of near-fault vertical and horizontal ground motion from the 2008 Wenchuan earthquake[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2010, 53(8): 1796. DOI: 10.1002/cjg2.1525
- [27] POWER M, CHIOU B, ABRAHAMSON, et al. An overview of the NGA project[J]. Earthquake Spectra, 2008, 24(1): 3. DOI: 10.1193/1.2894833
- [28] BOZORGNIA Y, ABRAHAMSON N, AI ATIK L, et al. NGA-West2 research project[J]. Earthquake Spectra, 2014, 30(3): 974. DOI: 10.1193/072113EQS209M
- [29] Pacific Earthquake Engineering Research Center. NGA-West2 Database Flatfile [EB/OL]. [2016-05-15]. <https://peer.berkeley.edu/thrust-areas/data-sciences/databases>
- [30] CHOI Y, STEWART J. Nonlinear site amplification as function of 30 m shear wave velocity[J]. Earthquake Spectra, 2005, 21(1): 1. DOI: 10.1193/1.1850527
- [31] ABRAHAMSON N A, SILVA W J. Summary of the Abrahamson & Silva NGA ground-motion relations[J]. Earthquake Spectra, 2008, 24(1): 77. DOI: 10.1193/1.2924360
- [32] KOKETU K, YOKOTAO Y, GHASEMI H, et al. Source process and ground motions of the 2008 Wenchuan earthquake. Investigation report of the 2008 Wenchuan earthquake, China[R]. Grant-in-Aid for Special Purposes of 2008, MEXT No. 2090002, 2008
- [33] 王卫民, 赵连锋, 李娟, 等. 四川汶川 8.0 级地震震源过程[J]. 地球物理学报, 2008, 51(5): 1407
WANG Weimin, ZHAO Lianfeng, LI Juan, et al. Rupture process of the Ms 8.0 Wenchuan earthquake of Sichuan, China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2008, 51(5): 1407
- [34] WANG Dong, XIE Lili. Study on response spectral acceleration from the great Wenchuan, China earthquake of May 12, 2008[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2010, 14(6): 936. DOI: 10.1080/13632461003611095
- [35] BOZORGNIA Y, CAMPBELL K W. Ground motion model for the vertical-to-horizontal (V/H) ratios of PGA, PGV, and response spectra[J]. Earthquake Spectra, 2016, 32(2): 954. DOI: 10.1193/100614EQS151M

(编辑 刘 彤)