

王文才,尹志文,苏小芸,等.2018年陕西宁强 5.3 级地震强地面运动特征及局部场地效应分析[J].地震工程学报,2020,42(6): 1700-1705.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.06.1700

WANG Wencai, YIN Zhiwen, SU Xiaoyun, et al. Characteristics of Strong Ground Motion of the 2018 Ningqiang M5.3 Earthquake in Shaanxi Province and Local Site Response Analysis[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(6): 1700-1705. doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.06.1700

2018 年陕西宁强 5.3 级地震强地面运动特征 及局部场地效应分析

王文才^{1,2}, 尹志文^{1,2}, 苏小芸^{1,2}, 江志杰^{1,2}

(1. 甘肃省地震局, 甘肃 兰州 730000; 2. 甘肃兰州地球物理国家野外科学观测研究站, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 2018年9月12日陕西省宁强县发生5.3级地震,中国数字强震动台网的39个专业台站在此次地震中触发。文章中通过处理捕获的117条三分向加速度记录,给出近场台站的地震动参数,绘制震中附近区域峰值加速度等值线图,其长轴呈西南—东北方向展布。采用实际观测数据与几种常用地震动衰减关系对比,发现霍俊荣衰减预测模型能更好地反映此次地震的影响场。将振幅最大的51GYD台的反应谱与我国抗震设计反应谱比较,采用最小二乘法拟合出不同震中距5个台站各周期谱加速度衰减特性,总结出此次地震的反应谱基本特征。运用 H/V 谱比法对51GYD土层台和62ZM台阵进行局部场地地震反应分析,研究覆盖土层对地震动的放大作用,及局部地形对峰值加速度和峰值速度的影响过程。

关键词: 宁强 5.3 级地震; 反应谱; 衰减关系; 场地反应; 地形效应

中图分类号: P315.63

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2020)06-1700-06

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.06.1700

Characteristics of Strong Ground Motion of the 2018 Ningqiang M5.3 Earthquake in Shaanxi Province and Local Site Response Analysis

WANG Wencai^{1,2}, YIN Zhiwen^{1,2}, SU Xiaoyun^{1,2}, JIANG Zhijie^{1,2}

(1. Gansu Earthquake Agency, Lanzhou 730000, Gansu, China;

2. Lanzhou National Geophysical Observation and Research Station, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: On September 12, 2018, a M5.3 earthquake occurred at Ningqiang County, Shaanxi Province. Thirty-nine strong motion stations located in this region were fully triggered by the main shock. A total of 117 records of three-component acceleration were obtained by NSMONS. In this paper, we first calculated the ground motion parameters of near-field stations and drew the contour map of peak accelerations near the epicenter. It is then found that the attenuation prediction model of Huo Jun-rong can better reflect the influence field of the earthquake by comparing the observed data with some commonly used ground motion prediction equations. Finally, we compared the acceleration response spectrum of 51GYD station with the design spectrum to summarize the basic characteristics of response spectra for this earthquake. The H/V spectral ra-

收稿日期: 2020-07-10

基金项目: 甘肃省地震局科技发展基金(2018Y02); 中国地震局 2019 年三结合课题(3JH-201901004); 甘肃省地震局科技发展基金(2016Q02)

第一作者简介: 王文才(1987—), 男, 工程师, 主要从事强震动观测与数据应用研究工作。E-mail: haocaiww@163.com。

通信作者: 尹志文(1964—), 男, 高级工程师, 主要从事地震台网建设与运行维护工作。E-mail: 601242151@qq.com。

tio method was applied to analyze the seismic response of the local site at 51GYD station and 62ZM array. Furthermore, the amplification effect of overburden soil on ground motion and the influence process of local topography on peak acceleration and peak velocity were studied.

Keywords: Ningqiang M5.3 earthquake; response spectrum; the attenuation relationship; site response; topographic effect

0 引言

2018 年 9 月 12 日 19 时 6 分陕西省宁强县发生了 5.3 级地震,震中位于 32.75°N,105.69°E,震源深度 11 km。中国数字强震动观测网络(NSMONS)布设在陕西、四川、甘肃的 39 个专业台站在此次地震中捕获到 117 条三分向加速度波形记录,为研究该区域内近场地震动特征提供了数据支持。目前学者^[1-3]利用强震动记录开展近场地震动特征和场地效应方面的研究多是一些震级较大的地震。此次宁强地震中广元东溪台(51GYD)记录到三分向加速度值分别为-392.5、-369.4 和 111.7 gal,其仪器烈度达到 7.4 度,足以对建筑物造成损伤。另外位于中庙的地形影响台阵也记录到主震加速度记录,为研究覆盖土层和地形对地震动的放大作用提供了依据。

本文首先从地震动的幅值、衰减关系、反应谱方面分析近场强地面运动特征,然后根据 51GYD 台和 62ZM 台阵记录研究局部场地条件对地震动的影响。旨在为抗震设防、地震危险性分析、场地放大效应估计和山区地震动预测等方面提供参考。

1 强震动记录特征分析

中国数字强震动观测网络的 39 个强震台在此次宁强 5.3 级地震中共捕获三分量加速度记录 117 条,其台站分布情况如图 1 所示。

触发台站分布在距震中 25.7~282.0 km 的范围内,其中 50 km 以内有 4 个台,50~100 km 范围内有 6 个台,其余台站分布在 100 km 之外。

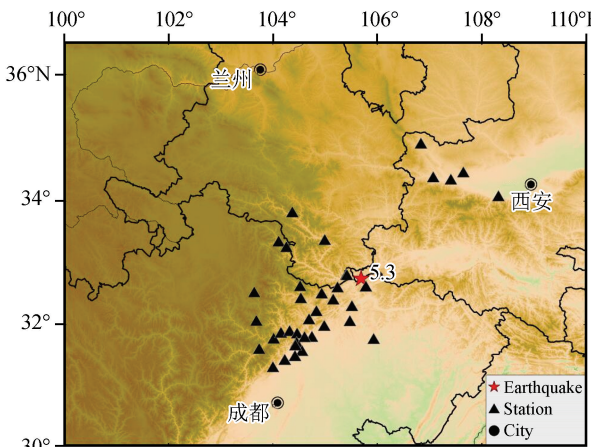


图 1 触发强震动台站分布图
Fig.1 Distribution of strong motion stations

1.1 幅值特征

首先对记录到的原始加速度波形采用巴特沃斯高通滤波,除去低频干扰,然后计算出事件前 20 s 记录的平均值,用最小二乘法对存在零线偏移的记录进行基线调整,消除零线漂移对加速度时程的影响^[4]。计算得到震中距小于 100 km 台站地震动参数如表 1 所列。由表 1 可知,广元东溪台(51GYD)捕获的峰值加速度(PGA)最大,其 EW、NS、UD 向 PGA 分别为-392.5、-369.4、111.7 gal,其余台站的 PGA 随震中距的增大而逐渐减小。

62ZM 台阵的 PGV 随高程的增加而增大,其余台站记录的 PGV 随距离增大而减小;所有台站水平向的 PGA 和 PGV 均大于垂直向。51GYD 台加速度和速度时程曲线如图 2 所示。

表 1 近场强震动记录(震中距<50 km)及相关参数

Table 1 Strong motion records (epicentral distance <50 km) and some related parameters

台站名称	台站代码	场地条件	震中距 /km	高程 /m	峰值加速度/(cm·s ⁻²)			峰值速度/(cm·s ⁻¹)		
					东西	南北	垂直	东西	南北	垂直
中庙 4	62ZM4	土层	25.8	591	120.30	111.0	-83.90	-1.32	1.38	-1.13
中庙 1	62ZM1	土层	26.7	819	-71.17	-104.20	50.71	1.28	2.28	-1.21
中庙 2	62ZM2	土层	27.0	955	-63.06	57.74	-35.26	1.69	2.88	-1.03
青川地办	51QCD	土层	46.1	790	-27.43	-44.87	-28.06	0.87	0.85	0.52
剑阁下寺	51JGS	土层	54.7	503	18.32	14.19	-7.18	0.52	0.59	-0.21
青川关庄	51QCS	土层	64.3	710	-10.22	9.79	-7.32	-0.34	0.29	-0.19
青川桥楼	51QCQ	土层	76.7	821	-6.42	8.06	-4.23	-0.25	0.19	-0.12
剑阁中学	51JGD	土层	81.9	536	10.41	11.68	3.45	-0.28	0.28	-0.14
广元东溪	51GYD	土层	93.3	472	-392.52	-369.40	111.68	12.53	12.68	-2.83

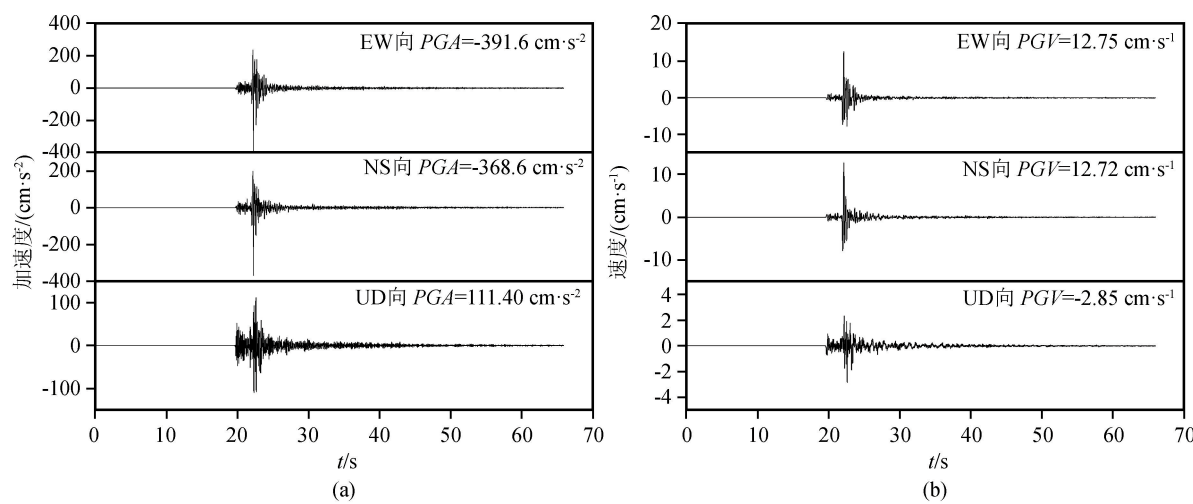


图 2 51GYD 台加速度时程和速度时程

Fig.2 The acceleration and velocity time-history curves of 51GYD station

利用表 1 的地震动参数,通过计算各台水平向 PGA 几何平均值,然后采用克里金插值方法得到水平向 PGA 的等值线图,如图 3 所示。可以看出此次地震的 PGA 等值线图呈西南—东北方向展布,这与地震宏观烈度调查图的走向具有较强的相似性^[5]。另外,由于近场台站靠近发震断层,其地震动的空间展布形态受断层破裂类型和传播方式的影响,距离震中最近的青川断裂(相距约 4 km)是龙口山断裂带北东段最重要的一条断裂,南起平武,向东经青川、勉县进入汉中盆地,全长超过 200 km。其走向和 PGA 等直线图及宏观烈度调查图的形态相似,因此我们认为此次地震动参数的空间展布可能受青川断裂控制。

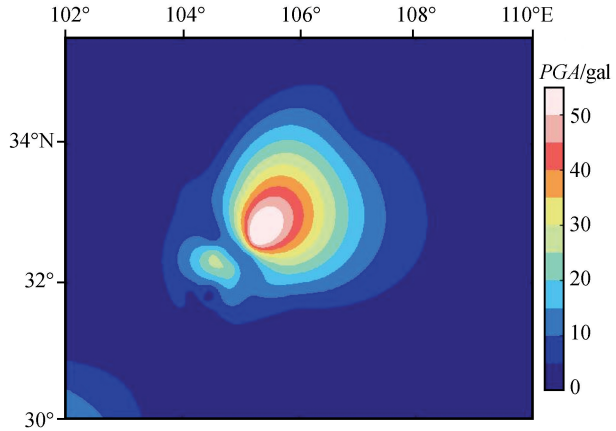


图 3 PGA 等值线图

Fig.3 Contour map of PGA in the event

1.2 衰减关系

由于受震源和传播路径介质的影响,地震动在传播过程中表现出不同的衰减特性,目前地震学者

已提出多种衰减关系,本文选用国内常用的几种衰减模型作为与本次地震动对比的预测方程。

通过计算各台站实际观测的 PGA 值,然后与霍俊荣等^[6]土层地震动衰减模型、俞言祥等^[7]五代区划图地震动衰减关系对比,其结果如图 4 所示。由图可知:霍俊荣等^[6]和俞言祥等^[7]长轴预测曲线与观测值吻合较好,而后者短轴预测方程与观测值离散性较大;在 $20\text{ km} < R < 80\text{ km}$ 的近距离范围内,两者长轴预测曲线与实际观测值相当,说明预测值较好地反映了本次地震的近场地震动影响;在 $80\text{ km} < R < 150\text{ km}$ 的中远距离,两者长轴预测曲线均较观测值偏小;在 $150\text{ km} < R < 282\text{ km}$ 的远场,霍俊荣等^[6]衰减方程与实际观测结果吻合较好,而俞言祥等^[7]长轴预测曲线较观测值偏小,短轴预测曲线始终较观测值小。造成这种现象的原因,一方面是由于此次地震震级较小,地震动衰减场基本呈

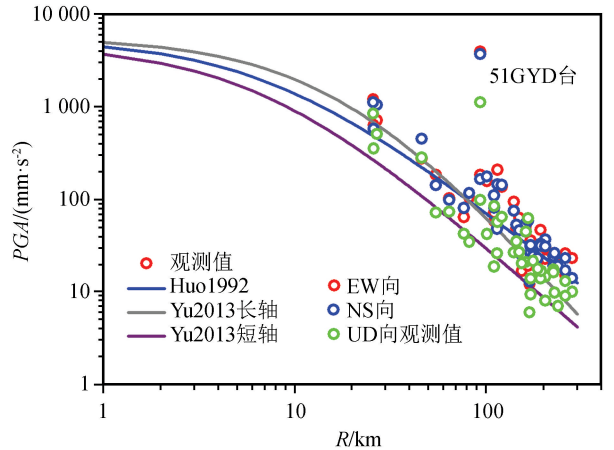


图 4 PGA 观测值与几种衰减关系对比

Fig.4 Comparison of observed PGA and some attention relations

圆形分布,而非椭圆形状。另外,观测台站分布不均匀,缺少震中距小于 20 km 的观测数据,且单次地震动的参数本身存在较大的随机性,而衰减关系是通过大量地震动参数回归计算所得,如 51GYD 台的加速度峰值明显高于周边台站的地震动水平。因此,虽然观测值较预测方程存在一定的离散性,但整体趋势与实际观测结果保持一致。

1.3 反应谱特征

利用捕获的加速度时程,计算 51GYD 台 5% 阻尼比的三分向反应谱,如图 5 所示。由于震中附近强震动观测台多建于中硬土上,属于 II 类场地,根据我国《建筑抗震设计规范》(GB 50011-2010)^[8] 规定,采用第二组设计地震绘制 7 度多遇、设防、罕遇地震的反应谱,并与实际观测谱加速度对比。由图 5 可知:(1) 51GYD 台 EW 向记录的谱加速度幅值最大且为“多峰”型,NS 向和 UD 向的反应谱峰值次之,且它们的峰值均为“单峰”型。(2) 51GYD 台三分向谱加速度峰值均超过 7 度设防地震,EW 向和 NS 向的谱加速度在 0.1~0.35 s 的周期内高于 7 度罕遇地震设计谱,在 0.1~0.4 s 的整个平台周期内高于 7 度设防谱,谱加速度曲线在 0.5 s 后下降到 7 度设防反应谱以下,在 1 s 后下降到 7 度多遇地震设计谱以下。由于该地区中小城市、城镇主要建筑物的结构自振频率为 1~3 Hz,对应自振周期为 0.3~1 s,因此,根据谱加速度峰值和平台周期的观测值与设计谱比较结果:本次地震对 51GYD 台附近自振周期在 0.3~1 s,尤其是 0.3~0.5 s 的建筑物会造成显著的破坏影响。另外,在大于 1 s 的中长周期部分,由于反应谱值只有十几 gal 甚至接近于零,因

此对结构自振周期较长的大坝、桥梁、输电塔、超高建筑等影响较小。

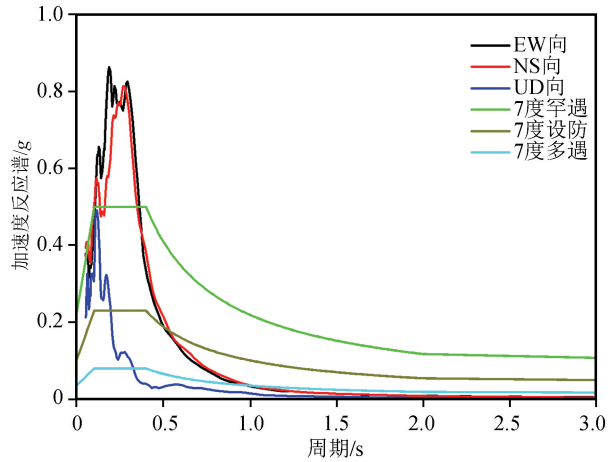
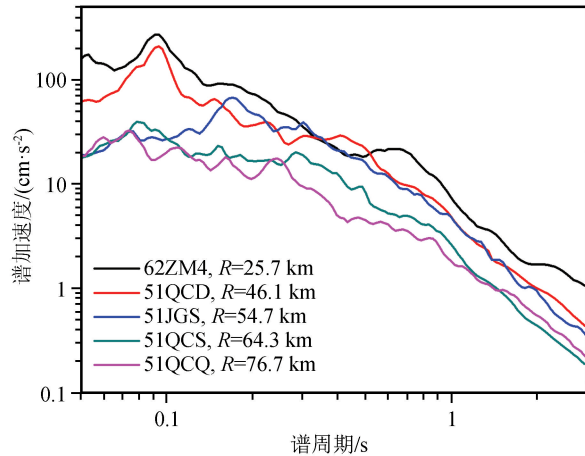


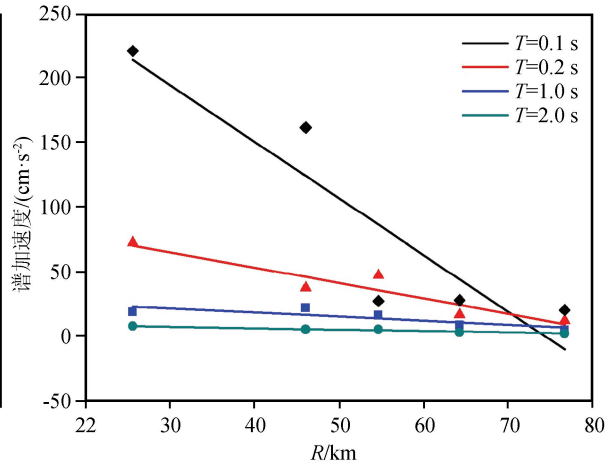
图 5 5 个典型台站的观测记录反应谱与设计反应谱比较

Fig.5 Comparison between response spectrum of observation records of five typical stations and design response spectrum

为研究自由场地台站加速度反应谱随震中距的变化规律,将斜坡上 62ZM1、62ZM2 两个台的观测数据剔除,然后绘制不同震中距 5 个台站(53ZM4、51QCD、51JGS、51QCS、51QCQ)对数坐标的谱加速度对比图,如图 6(a) 所示。可知:近场内随震中距增大反应谱的卓越周期变化不大,其中 51JGS 台的谱加速度峰值位于 0.18 s 附近,其余 4 个台的谱加速度在 0.07~0.09 s 之间达到最大,但各反应谱曲线在高频段部分出现缠绕交叉。为了明晰这种变化趋势,采用最小二乘法拟合出 5 个台站各周期($T=0.1$ s、 0.2 s、 1.0 s、 2.0 s)谱加速度随震中距增大的



(a) 不同震中距台站谱加速度比较



(b) 不同周期谱加速度衰减关系

图 6 5 个不同震中距台站的观测记录反应谱比较

Fig.6 Comparison between response spectrum of observation records of five stations with different epicentral distance and design response spectrum

衰减关系,如图 6(b)所示。由拟合直线斜率可知: $T=0.1\text{ s}$ 的谱加速度值衰减最快,然后依次为 $T=0.2\text{ s}$ 、 $T=1.0\text{ s}$ 的谱加速度,其中 $T=2.0\text{ s}$ 的谱加速度衰减最慢。说明长周期分量较短周期分量的谱加速度衰减速度慢,这一方面与其自身的波长和波在传播过程中的散射、绕射有关;另一方面也受特定传播路径和局部场地条件等因素的影响。

2 局部场地效应分析

大量的震害调查、数值模拟结果表明:局部高凸地形、土层等场地条件对地震动有显著影响,直接关系到地震灾害的严重程度,一直以来场地反应是地震工程领域研究的热点课题。近年来,随着大量高质量强震动记录的不断积累,越来越多的学者^[9-11]开始直接利用强震动记录分析台站的局部场地效应,宁强 5.3 级地震中土层台和地形台阵观测到明

显的地震动的放大作用。

(1) 土层场地对地震动的影响

本次地震中 51GYD 台捕获的峰值加速度最大,其 EW、NS、UD 向 PGA 分别为 -392.5 、 -369.4 、 111.7 gal 。另外由图 4 所示的衰减关系可知:该台的地震动水平显著高于周边台站,可能是由该台局部覆盖土层对地震动引起的放大作用。为了验证这种猜想,利用 51GYD 台记录的加速度波形,采用 HVSR (Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio) 方法^[11]得到其场地响应曲线,如图 7(a)所示,计算 51BCQ 基岩台的谱比响应曲线作为对比。由图知,51GYD 台在 $0.6\sim 7\text{ Hz}$ (对应 $T=0.14\sim 1.6\text{ s}$) 的较宽频带范围内均较基岩台有显著放大,且在卓越频率 3 Hz (对应 $T=0.33\text{ s}$) 附近其谱比曲线的放大因子达到 10,因此 51GYD 台的峰值加速度显著高于其他台站的主要原因是由该台站覆盖土层的场地放大效应引起的。

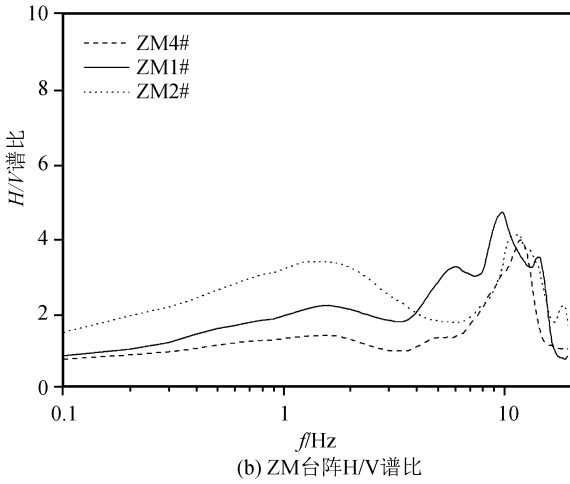
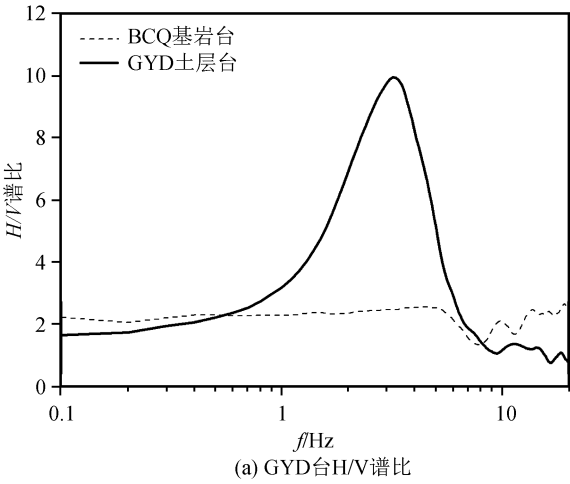


图 7 51GYD 台和 62ZM 台阵强震动记录 HVSR 曲线

Fig.7 H/V spectral curves of 51GYD station and 62ZM array

(2) 场地地形效应

中庙地形台阵位于甘肃省陇南市中庙乡,由 ZM4、ZM1、ZM2、ZM3 台 4 个土层台站组成。其中 ZM4 台位于山下自由场地,ZM1、ZM2 分别处于山体斜坡上,ZM3 位于山顶。王海云等^[12]、王伟等^[13]通过研究汶川地震中自贡山体地形台阵强震动记录认为:山体对地震动具有放大作用。从宁强 5.3 级地震中 ZM4、ZM1、ZM2 捕获到主震加速度记录(表 1)来看:随着高程的增加,山体对 PGA 似乎并没有放大作用,而对 PGV 有放大作用。计算上述 3 个单台的 H/V 谱比曲线并绘于图 7(b)中,可见:随着高程的增加,在高频段 3 个台的谱比曲线并没有太大的变化,只是 ZM1 台的优势频率相对其他两个台向低频方向有所偏移。而在 $0.1\sim 4\text{ Hz}$ 的低、中频

段 3 个台的谱比曲线随高程的增加而显著增大。

由于 PGA 的大小主要由地震波中的高频成分决定, PGD 的大小由低频成分决定, PGV 主要由中频段决定。由图 7(b)可知,山体对地震动的放大主要集中在中频段,而高频段谱比曲线的卓越频率主要是由山体不同台站的覆盖层厚度决定的。即中庙山体对地震动有显著的放大作用,但主要是集中在中频段,也就是主要对 PGV 起到放大作用。所以,此次地震山地对 PGA 的放大效应不明显。

3 结论

基于 2018 年陕西宁强 5.3 级地震中我国数字强震动台网捕获的一批高质量的主震记录,从地震动的幅值、衰减关系、反应谱、覆盖层对地震动的影

响和场地地形效应方面研究了此次地震的基本特征,得到如下结论:

(1) 震中附近区域 PGA 等值线长轴呈西南—东北方向展布,与震后调查结果基本吻合;

(2) 俞言祥等^[7]长轴预测曲线在 $20\text{ km} < R < 80\text{ km}$ 的近场与实际观测值吻合较好,但在中远场低估了地震动参数,霍俊荣等^[6]预测方程始终能较好地反映本次地震的地震动影响场;

(3) 51GYD 台水平向谱加速度在整个平台周期内高于 7 度设防反应谱,在部分周期也高出罕遇地震的设计谱,可能对 51GYD 台附近自振周期在该范围内的建筑造成显著的破坏影响;

(4) 51GYD 台的 H/V 谱比曲线在 $0.6 \sim 7\text{ Hz}$ 的较宽频带内较基岩台有显著放大,且在卓越频率 3 Hz 附近谱比曲线的放大因子达到 10 左右,因此覆盖土层对地震动的放大效应可能是 51GYD 台的地震动水平显著高于周边台站的主要原因。

(5) 62ZM 台阵 3 个台站的 H/V 谱比曲线在 $0.1 \sim 4\text{ Hz}$ 的低中频段随高程的增加而显著增大,而在高频段变化不大。由于 PGA 由地震动中的高频成分决定,而 PGV 对地震动的中频段成分更加敏感。因此,表 1 中 62ZM 山体的地震动放大作用主要体现在对峰值速度的放大上,但对峰值加速度的放大作用不明显,且主要是由局部山体地形的场地效应引起的。

参考文献(References)

- [1] 温瑞智,任叶飞,黄旭涛,等.芦山 7.0 级地震强震动记录及其震害相关性[J].地震工程与工程振动,2013,33(4):1-14.
WEN Ruizhi,REN Yefei,HUANG Xutao,et al.Strong Motion Records and Their Engineering Damage Implications for Lushan Earthquake on April 20,2013[J].Earthquake Engineering and Engineering Vibration,2013,33(4):1-14.
- [2] 白玉柱,徐锡伟.由强震动数据分析芦山地震地面运动持时及周期特征[J].地震地质,2017,39(1):92-103.
BAI Yuzhu,XU Xiwei.Analysis on the Characteristics of Duration and Period of Ground Motion of the Lushan Earthquake Based on the Station Records[J].Seismology and Geology,2017,39(1):92-103.
- [3] 王文才,李佐唐,石文兵.2017 年 6 月 3 日内蒙古阿拉善左旗 5.0 级地震强震记录及特征分析[J].地震工程学报,2018,40(1):139-145.
WANG Wencai,LI Zuotang,SHI Wenbing.Strong Motion Records and Its Characteristics in Alashanzuoqi Ms5.0Earthquake on June3,2017, Inner Mongolia[J].China Earthquake Engineering Journal,2018,40(1):139-145.
- [4] BOORE D M.Effect of Baseline Corrections on Displacements

- and Response Spectra for Several Recordings of the 1999 Chi-Chi,Taiwan, Earthquake[J].Bull Seism Soc Amer,2001,91(5):1199-1211.
- [5] 陕西省地震局. http://www.eqsn.gov.cn/manage/html/8abd83af1c88b3f2011c88b74299001f/_content/18_09/14/1536904888063.html.2018.
- [6] 霍俊荣,胡丰贤.地震动峰值参数衰减规律的研究[J].地震工程与工程振动,1992,12(2):1-11.
HUO JUNRONG HU YUXIAN.Study on Attenuation Laws of Ground MotionParameters[J].Earthquake Engineering and Engineering Vibration,1992,12(2):1-11.
- [7] 俞言祥,李山有,肖亮.为新区划图编制所建立的地震动衰减关系[J].震灾防御技术,2013,8(1):24-33.
YU Yanxiang, LI Shanyou, XIAO Liang. Development of Ground Motion Attenuation Relations for the New Seismic Hazard Map of China[J].Technology for Earthquake Disaster Prevention,2013,8(1):24-33.
- [8] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国质量监督检验检疫总局.中华人民共和国国家标准:建筑抗震设计规范:GB 50011—2010[S].北京:中国建筑工业出版社.2010.
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.National Standard (Mandatory) of the People's Republic of China:Code for seismic design of buildings GB 50011—2010 [S].Beijing:China Architecture & Building Press,2010.
- [9] 荣棉水,李小军,王振明,等.HVSR 方法用于地震作用下场地效应分析的适用性研究[J].地球物理学报,2016,59(8):2878-2891.
RONG Mianshui,LI Xiaojun,WANG Zhenming,et al.Applicability of HVSR in Analysis of Site-effects Caused by Earthquakes[J].Chinese Journal of Geophysics,2016,59(8):2878-2891.
- [10] 冀昆,温瑞智,任叶飞,等.芦山地震场地非线性反应特征分析[J].地震工程与工程振动,2014,34(增刊 1):333-338.
JI Kun,WENRuizhi,REN Yefei,et al.Estimation on Site Nonlinear Response in Lushan Earthquake[J].Earthquake Engineering and Engineering Vibration,2014,34(Suppl 1):333-338.
- [11] YAMAZAKI F,ANSARY M A.Horizontal-to-vertical Spectrum Ratio of Earthquake Ground Motion for Site Characterization[J].Earthquake Engineering & Structural Dynamics,1997,26(7):671-689.
- [12] 王海云,谢礼立.自贡市西山公园地形对地震动的影响[J].地球物理学报,2010,53(7):1631-1638.
WANG Haiyun,XIE Lili.Effects of Topography on Ground Motion in the Xishan Park,Zigong City[J].Chinese Journal of Geophysics,2010,53(7):1631-1638.
- [13] 王伟,刘必灯,刘培玄,等.基于台阵记录的局部场地条件地震动效应分析[J].地震学报,2016,38(2):307-317.
WANG Wei,LIUBideng,LIU Peixuan,et al.Analyses on the Effect of the Local Site Conditions on the Strong Motion Based on the Array Records[J].Acta Seismologica Sinica,2016,38(2):307-317.