

文章编号: 0258-2724(2013)05-0783-09 DOI: 10.3969/j.issn.0258-2724.2013.05.001

## 2013年4月20日芦山地震最大加速度记录分析

温瑞智<sup>1,2,3</sup>, 任叶飞<sup>1,2</sup>, 齐文浩<sup>1,2</sup>, 卢滔<sup>3</sup>,  
杨振宇<sup>4</sup>, 单振东<sup>1,2</sup>, 汪云龙<sup>1,2</sup>

(1. 中国地震局工程力学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080; 2. 中国地震局地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080; 3. 防灾科技学院, 河北 三河 065201; 4. 中国地震灾害防御中心, 北京 100029)

**摘要:** 2013年4月20日芦山地震是汶川地震后龙门山断裂带发生的又一次破坏性地震, 中国数字强震动观测网络有100余台仪器触发并获得加速度记录. 设置在四川省宝兴县防震减灾局的强震台(编号51BXD)在东西向获得了 $1.026g$  ( $-1\ 005.3\ gal$ )的峰值加速度记录, 这是我国首次在自由地表获得峰值超过 $1g$ 的记录, 是我国强震动观测历史上的重要事件. 经震后灾害调查, 发现观测台站附近建筑物破坏并不严重, 确定地震宏观烈度为Ⅶ度, 这引起了社会的广泛关注与争议. 通过现场考察, 初步认定台站的特殊选址带来了局部地形影响, 陡峭山坡放大了高频段地震动. 还分析了宝兴县另外3个强震台站的观测环境, 并采用全球新一代地震动预测方程进行对比分析, 结果显示, 该台在小于 $0.2\ s$ 范围内的反应谱放大明显. 为了进一步说明台址受场地地形影响, 对台站附近进行了背景噪声测试, 采用水平/垂直谱比法计算了场地背景噪声的卓越周期、水平向放大系数, 得出了随着地势由山脚向山坡上增高, 场地卓越频率逐渐增大, 且放大系数也随之增大的结论, 这与51BXD强震动记录反应谱特征一致. 最后, 与汶川地震典型记录反应谱、抗震规范谱等进行对比, 分析了51BXD强震动记录不同频段的特点; 结合附近建筑物现场震后调查结果, 初步解释了造成建筑物破坏较轻的原因, 验证了局部地形影响是造成峰值加速度记录较大的主要原因.

**关键词:** 芦山地震; 最大强震动记录; 局部地形影响; 测试; 放大

**中图分类号:** P315.63 **文献标志码:** A

## Maximum Acceleration Recording from Lushan Earthquake on April 20, 2013

WEN Ruizhi<sup>1,2,3</sup>, REN Yefei<sup>1,2</sup>, QI Wenhao<sup>1,2</sup>, LU Tao<sup>3</sup>,  
YANG Zhenyu<sup>4</sup>, SHAN Zhendong<sup>1,2</sup>, WANG Yunlong<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Harbin 150080, China; 2. Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China; 3. Institute of Disaster-Prevention Science and Technology, Sanhe 065201, China; 4. China Earthquake Disaster Prevention Center, Beijing 100029, China)

**Abstract:** The Lushan earthquake on April 20, 2013 is another destructive event after the Wenchuan earthquake in 2008. More than 100 strong motion stations were triggered in the main shock. The 51BXD station located in Baoxing Country recorded a peak ground acceleration (PGA) of more than  $1g$ , that is  $1.026g$  ( $-1\ 005.3\ gal$ ) in the EW direction. It has been the first time that more than  $1g$  is recorded at free field site in China and it should be a milestone event in Chinese strong motion observation history. However, in the released official Lushan intensity map, the around area was classified to intensity Ⅶ, which raises an interesting question why such a great PGA leads to a low

收稿日期: 2013-06-16

基金项目: 中国地震局公益性行业科研资助项目(201008010); 中国地震局工程力学研究所基本科研业务费资助项目(2011B06)

作者简介: 温瑞智(1968-), 男, 研究员, 博士, 研究方向为工程地震, E-mail: ruizhi@iem.ac.cn

intensity. During the post-earthquake field survey, it was found that this station was located on a steep slope, not a real “free-field” station, so the recording could be affected by the topography. By comparing with 3 other nearby stations with the next generation attenuation models, it is shown that the earthquake response spectrum less than 0.2 s was amplified significantly. To support this evidence, a background noise test was performed around this area, and predominant period and horizontal acceleration amplification factor were calculated with the traditional spectral ratio method. The calculation results clearly show that from the bottom of the valley to the top, the predominant frequency increases and the amplification factors also raise with the predominant frequency increasing. In addition, the response spectrum of 51BXD recording was calculated and compared with some others from the Wenchuan earthquake to interpret why there were so slight damages to its around buildings. The preliminary conclusion is that the topography is the root cause for 1g peak ground acceleration recording in the Lushan earthquake.

**Key words:** Lushan earthquake; maximum acceleration recording; local site effect; test; amplitude

自1933年3月13日美国获得第1条强震动记录以来,描述强震动的参数逐渐引起人们的重视,例如常用的峰值加速度、峰值速度以及一些由此衍生的地震动参数,其中备受关注的是这些参数的最大幅值随强震动记录增加不断被刷新.1940年5月18日美国帝国谷的6.7级地震获得了著名的El Centro强震动记录,其东西(EW)方向的峰值加速度(peak ground acceleration, PGA)约为0.33g.该记录长期以来被认为是一个合理的水平向地震动输入.在1971年2月9日美国圣菲尔南多6.6级地震中,洛杉矶盆地有200余台强震动仪器被触发,在Pacoima大坝左坝肩获得的模拟记录达到1.25g,为世界上第1次记录到峰值超过1g的加速度记录.经过分析,这个近场的高峰值记录归结于地形影响<sup>[1]</sup>.在2008年6月14日日本岩手·宫城内陆7.2级地震中,IWTH25台站记录到垂直向PGA达到了惊人的3.94g.目前世界上记录到的PGA超过1g的强震动记录已有100余条<sup>[2]</sup>.

2013年4月20日四川芦山地震是继2008年5月12日汶川地震之后在龙门山断裂带上发生的又一次破坏性地震.

在此次地震中,中国数字强震动观测网络共有121个强震动台触发,其中四川省境内有83个,分布如图1所示.位于宝兴县防震减灾局院内的强震台(编号51BXD)记录到未校正的单向峰值加速度(PGA)达1.026g(-1 005.3 gal).这是我国自1962年开展强震动观测工作以来首次在自由场观测到大于1g的强震动记录.2008年汶川地震中获得的强震动记录最大PGA为卧龙台的東西向、南北向和竖向(EW, NS, UD),分别为0.978g、0.666g

和0.967g,也未超越1g<sup>[3]</sup>.在芦山震后灾害调查中发现,51BXD台站周围的建筑物破坏并不严重,在宏观烈度调查中确定为Ⅶ度.虽然PGA不是唯一评价地震宏观烈度的指标,但还是在一定范围内引起了社会的极大关注.如何理解我国首次获得超过1g的加速度记录?为什么出现在Ⅶ度区内?是否有其他因素的影响?

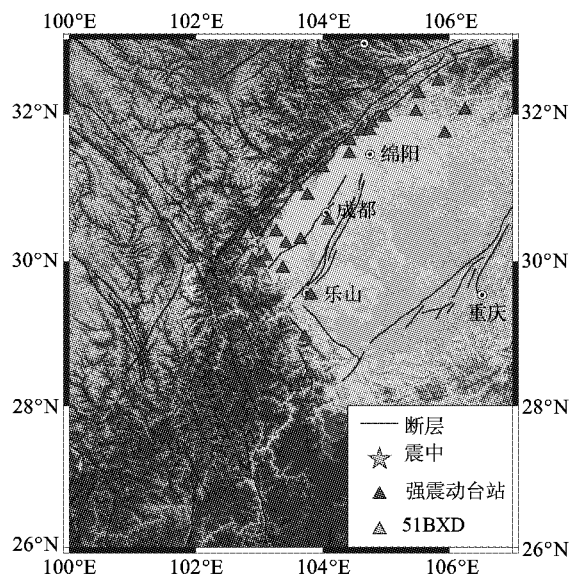


图1 2013年4月20日芦山地震在四川省境内触发的强震动台站

Fig. 1 Strong motion stations triggered by the Lushan earthquake within Sichuan Province

为了回答上述问题,需要对影响地震动的因素进行简要描述.影响地震动的主要因素有震源、传播路径和场地条件<sup>[4]</sup>.局部地形是场地条件的一种,一般认为条状突出的山嘴、高耸孤立的山丘、陡坡、河岸、盆地、河谷等均属于不利地段,这些地形

对地震动的影响在工程意义上不能忽略. 通常, 场地分析可采用解析方法, 但此法仅能得到很小一部分问题的解. Trifunac 采用波函数展开法得到了弹性半空间下二维半圆形沉积谷地的解. 采用与上述类似的方法, Trifunac 和 Wong 还得到了二维空间内半圆形凹陷地形和半椭圆凹陷地形在 SH 波入射下的解<sup>[5-6]</sup>. 虽然这些解具有很高的理论价值, 但对于实际的地形来说, 由于几何形态通常很不规则, 其介质也是非均匀的, 而且在强震下土体通常已进入非线性状态, 此时采用解析方法很难得到问题的解. 对于实际复杂地形的地震反应分析, 通常借助于数值模拟方法或谱比法.

2008 年汶川地震中, 布设在自贡的地形台阵获得了主震加速度记录, 填补了我国地形台阵强震记录的空白, 为研究地形对地震动的影响提供了条件. 之后, 部分研究者利用谱比法、数值模拟法等对地形放大效应进行了研究, 结果显示, 自贡台阵的放大系数沿山脊自下而上逐渐增大, 山脊地形从山脚往上, 随场地高程增大, 场地的放大效应也逐渐增强<sup>[7-9]</sup>.

## 1 51BXD 主震记录

51BXD 台站比邻宝兴县防震减灾局办公楼, 海拔 1 022 m, 交通较便捷. 据建台报告描述, 台址所处东河左岸一级阶地中部, 距前缘 35 m, 地貌单元属于高山区河谷“V”字型地貌, 山高 1 500 m 以上, 河谷宽 300 m. 台站位于山坡上, 高出谷地约 12 m, 地形十分陡峭, 基岩出露, 主要以花岗岩为主, 观测环境见图 2.

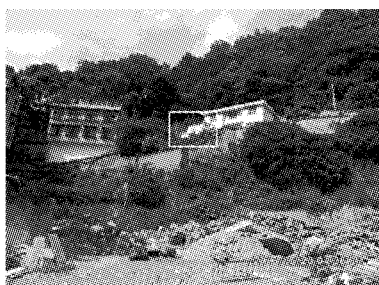


图2 51BXD 台站观测环境(镜像北东 40°)  
(方框为台站观测室)

Fig. 2 Station 51BXD and its environment

《地震台站建设规范 强震动台站》行业标准对强震台固定台站的选址有明确规定: 固定台站宜布设在自由场地上; 台站应避开局部地形起伏变化大的地点, 与高大建筑物之间的距离应大于建筑物的高度与长度. 在无合适的自由场地时, 可布设在独

立的一层或二层小房的底层地面上<sup>[10]</sup>.

美国强地面运动观测组织规定了在自由场地上的强震标准台选址要求: 避免安装在软硬不均匀的场地上, 这种场地可能引起地面运动不能与其附近场地地面运动相一致; 避免装在有局部地形特征的场地上, 例如山包、山脊、谷地等, 这些场地不能代表所要研究场地地面运动; 要安装在距离建筑物(构筑物)至少 1 倍结构最长尺寸的地方, 并且要远离任何的大型建筑, 这些结构引起的土-结构动力相互作用可能会对记录造成影响<sup>[11]</sup>. 可见, 51BXD 台站并非理想的自由场地, 很可能受到局部地形的影响.

图 3 为该台站在芦山地震中获得的 3 个观测方向的加速度记录时程, EW 方向基本与山脊走向垂直, 最大峰值为 1.026g, NS 方向与山脊的走向基本一致, PGA 为 0.840g. 从图 3 中可以清晰地看出, 此次地震持时小于 10 s, 持时相对较短.

图 4 为由校正的加速度积分得到的速度记录时程, 两水平向峰值速度 (peak ground velocity, PGV) 分别为 24.5 和 24.2 cm/s, 与较大的 PGA 值相比, PGV 值显得略小.

地震烈度由人感觉的强弱、器物反应的程度、房屋损坏或破坏的程度以及地面景观的变化情况等综合确定. 为了更确切地描述烈度, 我国现行的烈度表已经加入了加速度和速度 2 项物理量指标. 51BXD 台站所在的穆坪镇, 宏观烈度为Ⅶ度, 这似

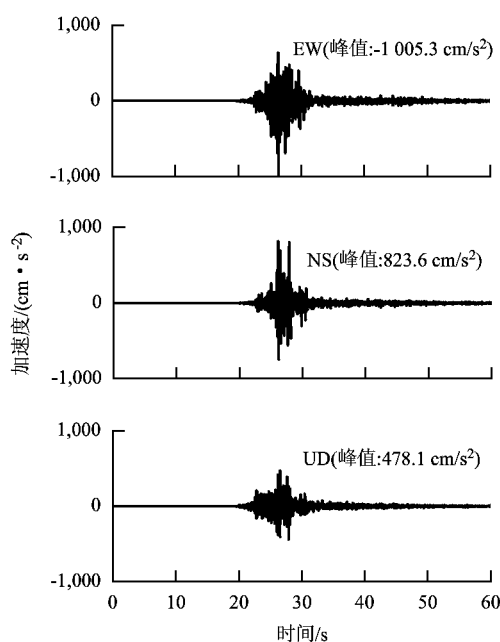


图3 51BXD 的校正加速度时程

Fig. 3 Corrected acceleration time-history for 51BXD

平与强震动记录的峰值不匹配,引起了一定的关注.根据《中国地震烈度表》中的PGA参考值,此点可以被确定为X度(约 $0.722g \sim 1.443g$ );根据速度峰值可以归为Ⅶ度( $19 \sim 35 \text{ cm/s}$ ).规范同时强调,“当有自由场强震动记录时,水平向峰值加速度和速度可作为综合评定的参考指标”<sup>[12]</sup>.51BXD的场地显然并不是通常意义上的自由场地,已经不适合采用一维水平成层原理进行解释、分析.

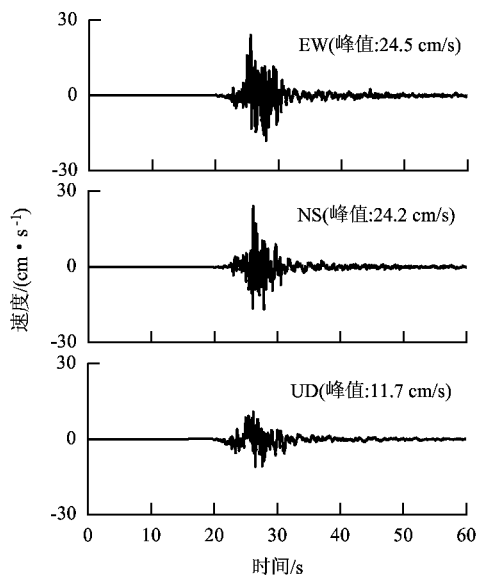


图4 51BXD的校正速度时程  
Fig. 4 Corrected velocity time-history for 51BXD

目前,S变换在一维时间序列分析研究中得到广泛应用.S变换是Stockwell等提出的一种新的时频分析方法,该方法在自适应调节窗口频率的基础上,引入小波的多分辨率分析,在时频平面上比小波变换更直观,易于理解<sup>[13]</sup>.为了分析该记录的场地非线性反应特征,对记录进行了S变换.图5是

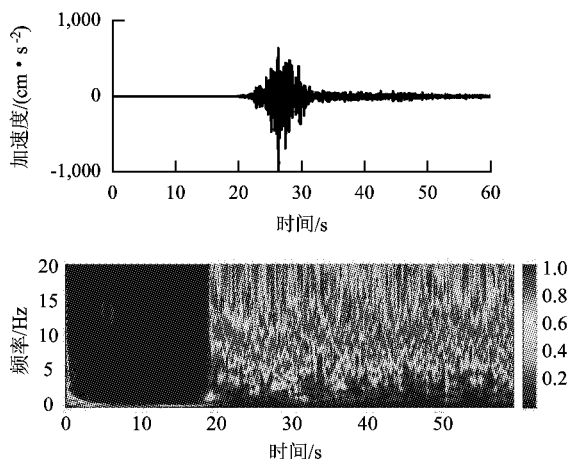


图5 EW向规范化的S变换  
Fig. 5 Normalized S transformation in the EW direction

记录EW向规范化的S变换结果,未发现明显的非线性反应特征,这与台站场址为基岩出露一致.

## 2 地震动预测方程对比

为了更好地解释51BXD台站是否存在观测异常,采用全球新一代地震动衰减关系(next generation attenuation, NGA)的预测结果与51BXD台站实测结果进行对比分析. NGA代表了国外新一代地震动预测方程(ground motion prediction equations, GMPEs)的新走向,共有5个工作小组基于不同的研究目标,选择不同的基础数据,开发了5个NGA模型.它们考虑了地震动的主要特点,包括破裂的方向、倾斜断层的上盘和下盘效应、断层作用的方式、断层的影响深度、破裂面积、相对于参考基岩的场地放大效应以及三维沉积盆地的放大效应等多个参数.由于第5组模型是针对基岩场地,所以选用了其中4组考虑场地效应的模型,分别为AS08<sup>[14]</sup>、BA08<sup>[15]</sup>、CB08<sup>[16]</sup>和CY08<sup>[17]</sup>模型.

采用的芦山地震震源参数是基于远场P波反演获得的震源机制解,震级 $M_w = 6.7$ ,错动倾角 $\lambda = 88.8^\circ$ ,断层倾角 $\delta = 38.5^\circ$ ,断层走向 $\theta = 205^\circ$ ,震源深度 $h = 10.2 \text{ km}$ <sup>[18]</sup>.为了便于比较,计算了与51BXD相近的宝兴盐井(51BXY)、宝兴民治(51BXZ)和宝兴明礼(51BXM)台站的GMPE值,这3个台站的位置和记录参数见图6和表1.

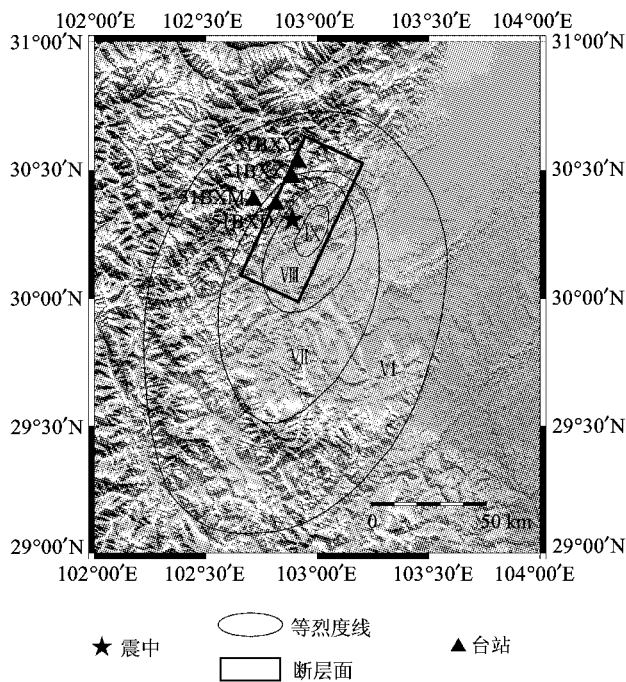


图6 宝兴县内4个台站的分布  
Fig. 6 Strong motion stations in Baoxing Country

对于 51BXD 和 51BXZ 台站 30 m 的平均剪切波速( $v_{s30}$ )值,根据 GMPEs 中对于基岩场地  $v_{s30}$  的定义,取  $v_{s30}=760$  m/s;51BXM 和 51BXY 台站场地属于 II 类,具有一定的覆盖层厚度,根据钻孔波速资料,推算了  $v_{s30}$  值<sup>[19]</sup>.

可以看出,51BXD 和 51BXZ 台站的  $R_{jb}$  均为 0 ( $R_{jb}$  为 Joyner-Boore 定义的场地至断层破裂面的最短水平距离),断层距相近,场地又均为基岩场地,因而反应谱的幅值变化趋势较相似. 但 51BXD 明显在周期小于 0.2 s 时的反应谱被显著放大;51BXZ 也存在放大趋势,但没有 51BXD 幅值大,见

图 7 和图 8.

相比而言,51BXM 和 51BXY 台站记录在周期小于 0.2 s 时的观测值均与 NGA 预测值较吻合,见图 9 和图 10.

另外,在中长周期部分,除 51BXY 台站外,其余 3 个台站的观测值均与预测值较吻合.

为了更好地分析 51BXD 台站受局部山坡地形的影响,作者调查了其余 3 个台站的观测环境,它们均坐落于较平坦、开阔的自由地表,观测条件相对简单,不存在大角度的斜坡,无地形影响,51BXD 台站则受到局部地形影响的可能性较大.

表 1 宝兴县内 4 个强震动台站及其强震动记录参数  
Tab. 1 The strong motion stations and their recording parameters

| 名称   | 代码    | 场地类型 | 断层距<br>$R_{rup}/\text{km}$ | $R_{jb}/\text{km}$ | PGA/( $\text{cm}\cdot\text{s}^{-2}$ ) |        |        | PGV/( $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ) |      |      |
|------|-------|------|----------------------------|--------------------|---------------------------------------|--------|--------|---------------------------------------|------|------|
|      |       |      |                            |                    | EW                                    | NS     | UD     | EW                                    | NS   | UD   |
| 宝兴地办 | 51BXD | 基岩   | 16.6                       | 0.0                | -1 005.3                              | 823.6  | 478.1  | 24.5                                  | 24.2 | 11.7 |
| 宝兴盐井 | 51BXY | 土层   | 15.8                       | 0.0                | 429.2                                 | -298.6 | 244.4  | 11.8                                  | 9.8  | 6.6  |
| 宝兴民治 | 51BXZ | 基岩   | 15.6                       | 0.0                | 583.2                                 | 316.4  | -387.2 | 26.2                                  | 10.8 | 16.6 |
| 宝兴明礼 | 51BXM | 土层   | 22.5                       | 8.7                | -387.2                                | 199.8  | 132.1  | -17.6                                 | 7.9  | 7.2  |

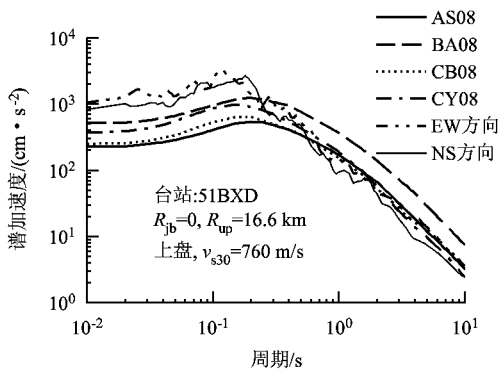


图 7 51BXD 反应谱与 GMPEs 的比较  
Fig. 7 Response spectrum for 51BXD and GMPEs

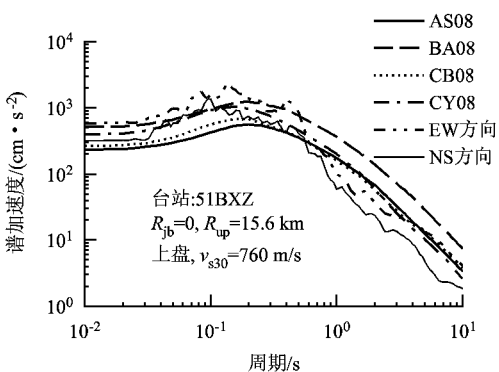


图 8 51BXZ 反应谱与 GMPEs 对比  
Fig. 8 Response spectrum for 51BXZ and GMPEs

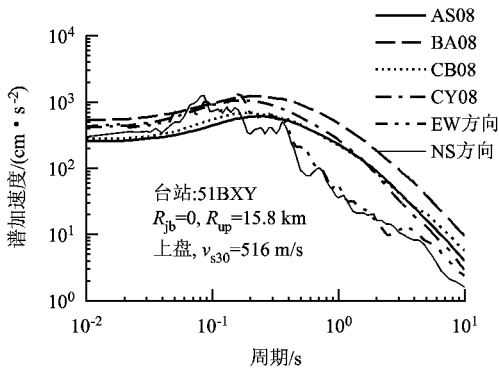


图 9 51BXY 反应谱与 GMPEs 的比较  
Fig. 9 Response spectrum for 51BXY and GMPEs

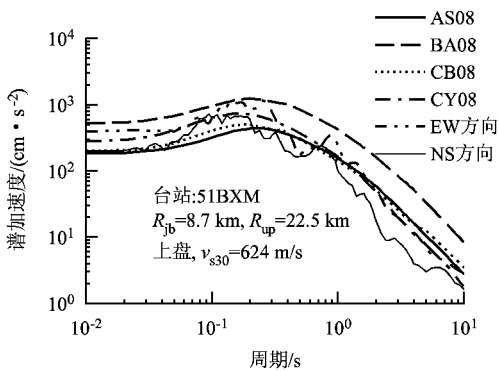


图 10 51BXM 反应谱与 GMPEs 的比较  
Fig. 10 Response spectrum for 51BXM and GMPEs

### 3 台站附近背景噪声测试与分析

环境背景噪声通常可以用来分析场地特征. 对51BXD进行了现场背景噪声测试, 沿山坡不同高度设置了3个观测点, 即山上1<sup>#</sup>, 山间2<sup>#</sup>和山下3<sup>#</sup> (图11), 其中2<sup>#</sup>观测点也是台站所在位置.

采用传统单点谱比法进行数据分析. 该方法由Nakamura提出, 具有简便经济、对环境要求低等诸多优点. 单点谱比法计算峰值频率通常不受测试条

件影响, 可以给出场地的基阶共振频率或卓越周期接近于1. 与地震动观测数据相比, 地脉动单点H/V谱比与地震动H/V谱比具有非常一致或卓越频率附近一致的特性<sup>[20]</sup>.

测试过程中, 对每个测点均连续测试5~20 min 多个不等时段. 由于台站所在位置存在多种噪声源, 数据处理过程中剔除了明显的过车、人走动等瞬时噪声. 背景噪声数据处理后的H/V结果可以清晰看出, 从山上点到山下点, 卓越频率逐渐减小, 且放大系数也逐渐减小, 见图12~图14 (外面2条线分别为平均值加、减1倍方差的范围).

山上观测点卓越频率为20 Hz左右, 谱比峰值较突出; 山间观测点卓越频率为5~15 Hz, 峰值平缓; 山下观测点卓越频率较小, 为3 Hz左右, 并且放大系数也相应减小很多. 这些结果与汶川地震中自贡台阵随着场地高程的增大, 其场地的放大效应也逐渐增大的结论基本相一致, 充分说明了51BXD台站受到局部地形影响较大, 且主要集中在5 Hz以上的频段.

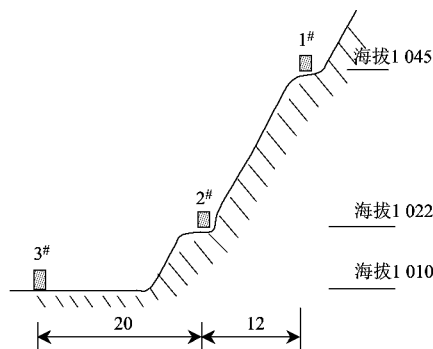
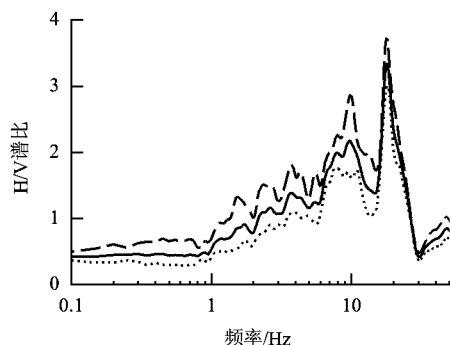
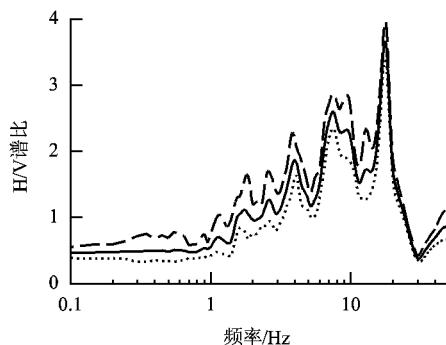


图11 51BXD背景噪声测试观测点分布 (单位:m)  
Fig. 11 Profile for the background noise test (unit: m)

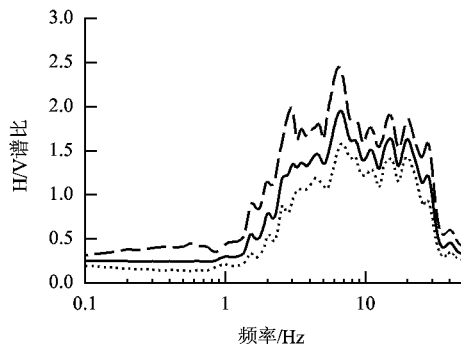


(a) EW 方向

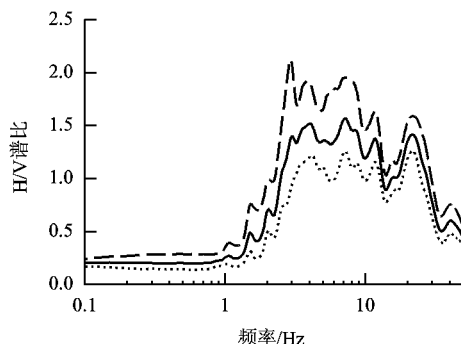


(b) NS 方向

图12 山上观测点1<sup>#</sup>的谱比曲线  
Fig. 12 H/V spectral ratio of 1<sup>#</sup> observation point



(a) EW 方向



(b) NS 方向

图13 山间观测点2<sup>#</sup> (台站位置) 的谱比曲线  
Fig. 13 H/V spectral ratio of 2<sup>#</sup> observation point

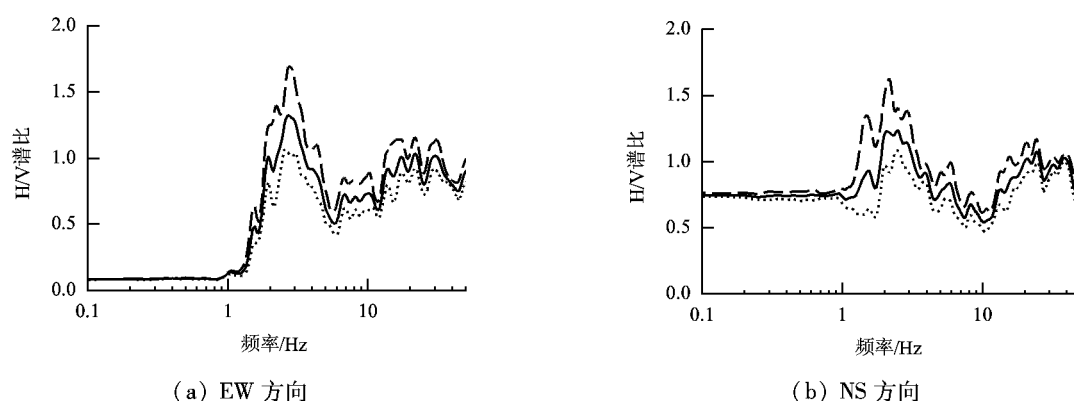


图14 山下观测点3#的谱比曲线

Fig. 14 H/V spectral ratio of 3# observation point

#### 4 台站附近结构震害

计算了51BXD台站记录的5%阻尼比的反应谱,比较了汶川地震中汶川卧龙(51WCW)、什邡八角(51SFB)2个台站记录的反应谱,并与抗震设计规范中设计谱进行了比较,见图15(纵坐标为重力加速度 $g$ 的倍数).可见,51BXD记录在周期0.3~0.6 s范围内的谱加速度低于设计谱,这一周期范围正好与该台站周围主要建筑物结构的自振周期相对应,也是我国常见的多层砖混结构的自振周期范围.而51WCW和51SFB记录恰好在这一周期范围内谱值较卓越,远大于设计谱,这与汶川地震中其台址周围建筑物破坏比较严重相吻合.另外,在大于1.0 s的中长周期部分,51BXD记录谱值远低于设计谱,因而对于结构自振周期较长的大坝等水利设施和桥梁、输电塔等生命线工程以及大型体育馆、超高层建筑等影响较小,这与实际震害调查结果一致.

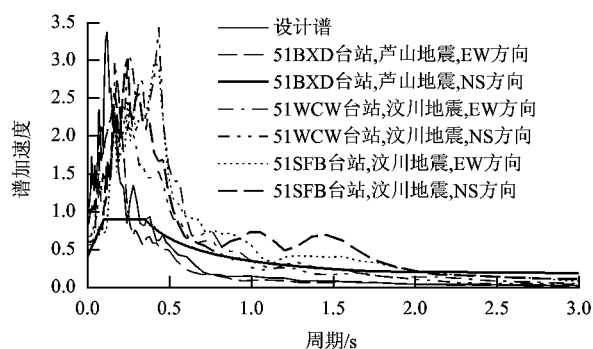


图15 51BXD加速度反应谱

Fig. 15 Acceleration response spectrum for 51BXD

图16为这几个记录的加速度-位移谱曲线,可判断51BXD记录仅能对自振周期小于0.2 s的结

构产生较大加速度反应,而51WCW和51SFB记录却可以对自振周期0.2~0.5 s范围内的结构同时产生较大加速度和位移反应,这一周期范围正好与我国常见的多层砖混结构的自振周期相对应.另外,51SFB记录对于自振周期1.5 s左右的结构能产生较大位移反应,因而对于中高层建筑的地震破坏能产生较大影响.

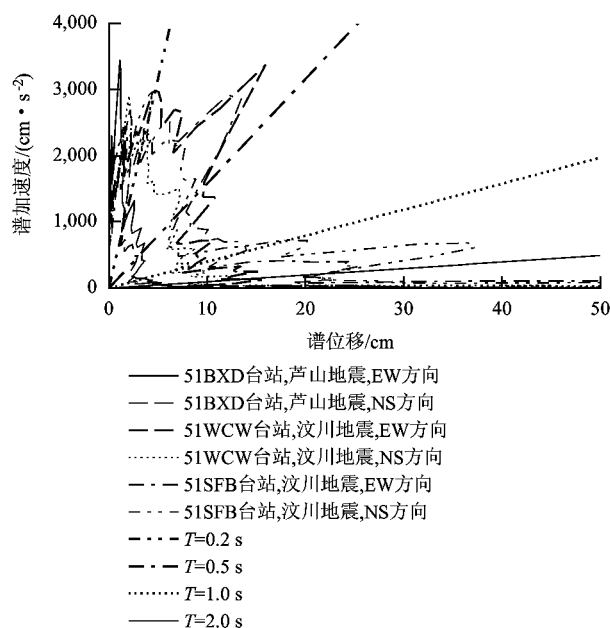


图16 51BXD谱加速度-谱位移曲线

Fig. 16 Acceleration-displacement response spectrum for 51BXD

本文还对51BXD台站周围建筑的破坏情况进行了简要分析.图2中右侧白色的2层楼为宝兴县防震减灾局办公楼,台站观测室与其相邻.该办公楼为砌体结构,建设时间为1970年,正面2层,坐落在基岩山坡,背面1层,可以近似看作1.5层砌体结构.地震后可明显看出窗角产生的斜裂缝,以

及贯穿墙体的水平裂缝,属于严重破坏(图17),不再适宜办公使用.其左侧为该台站观测室,面积 $8\text{ m}^2$ 左右,砖混结构,为标准的强震台站观测房,具有圈梁构造柱等抗震措施,在此次地震中完好.在台站对面距离 $20\text{ m}$ 左右,有4栋多层砌体结构,其中1栋属于严重破坏,不适宜居住,其余几栋基本完好,仍在正常使用(图18).通常结构自振周期可以近似用 $0.1N$ 来估算, $N$ 为楼层层数,因而台站附近楼的自振周期近似为 $0.4\sim 0.6\text{ s}$ .由图15可知,这一周期段内51BXD地震动反应谱值远低于设计谱,这可以初步解释其中3栋楼在地震中基本完好的原因;防震减灾局办公楼的自振周期近似为 $0.15\text{ s}$ ,因而造成了严重破坏,除了与房屋比较老旧有关外,还因其自振周期与地震动卓越周期相近有较大关系.历次震害调查发现,局部场地条件对地震动的影响较大,加重建筑结构震害,震害较重的场地多为局部条件复杂的场地.但从此次地震也发现,并不是所有局部复杂场地都会加重地震震害,与地震动放大卓越频段有直接关系.



图17 宝兴县防震减灾局办公楼严重破坏  
Fig. 17 Damaged office for Baoxing Bureau of Earthquake Mitigation

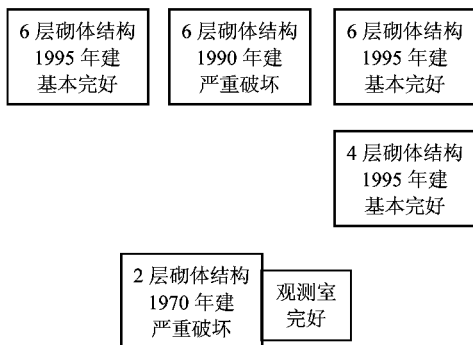


图18 台站附近建筑物震害示意  
Fig. 18 Damaged buildings around 51BXD

## 5 结论

本文通过对51BXD台站的震后现场考察,发现其在芦山地震中获得的最大记录的特殊性,通过常用的衰减关系进行了验证分析,发现在小

于 $0.2\text{ s}$ 周期范围内地震动被显著放大.通过现场背景噪声测试,采用谱比法分析了场地的卓越周期和放大倍数,得出了台站受地形效应影响显著的结论.基于现场建筑物震害的定性分析,验证了地形效应是产生高PGA值的原因.地形的影响还应包含观测台坐落在小的陡坡台阶上的影响,该台的地震影响已不适宜采用一维场地地震反应方法进行分析,进一步的工作应采用二维或三维方法验证.

芦山地震中,我国强震动台网在继汶川地震后又一次比较全面地获得了高质量的强震动数据.川滇地区地形地貌复杂,一些强震动台站的观测环境并非理想的自由观测场地,导致一些强震动记录“异常”.但从强震动观测的目的来说,这恰恰给进一步研究地震动特性提供了很好的实例,对它的研究可使人们更清楚地了解局部场地地质条件和地形如何影响地震动.本次地震使我国的强震动记录在峰值上突破了 $1g$ ,标志着我国强震动观测技术正在走向成熟.随着对地震环境认识的深入,强震台布设合理性、科学性的提高,增加了获取近场强震动记录的几率.高分辨率、大动态范围的强震观测仪器也是获得高质量强震动记录的保证,可以相信,我国最大单向PGA数值会被刷新.

**致谢:**防灾科技学院郭迅教授和宝兴县防震减灾局任江局长在现场考察中给予了热情支持和帮助,中国科学院青藏高原研究所王卫民研究员提供了震源反演参数,在此一并感谢.

## 参考文献:

- [1] STRASSER F O, BOMMER J J. Review: strong ground motions: have we seen the worst[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2009, 99(5): 2613-2637.
- [2] ANDERSON J G. Source and site characteristics of earthquakes that have caused exceptional ground accelerations and velocities[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2010, 100(1): 1-36.
- [3] 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.
- [4] REN Y F, WEN R Z, YAMANAKA H, et al. Site effects by generalized inversion technique using strong motion recordings of the 2008 Wenchuan



- earthquake[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2013, 12(2): 165-184.
- [5] TRIFUNAC M D. Scattering of plane SH waves by a semi-cylindrical canyon[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 1972, 1(3): 267-281.
- [6] WONG H L, TRIFUNAC M D. Scattering of plane SH waves by a semi-elliptical canyon[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 1974, 3(2): 157-169.
- [7] 杨宇,李小军,贺秋梅. 自贡西山公园山脊场地地形和土层效应数值模拟[J]. *震灾防御技术*, 2010, 6(4): 436-447.  
YANG Yu, LI Xiaojun, HE Qiumei. Numerical simulation for site effect of ridge terrain and overlaying soil in Zigong Xishan park[J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 2010, 6(4): 436-447.
- [8] 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 Geophysics*, 2010, 53(7): 1631-1638.
- [9] 张建毅,薄景山,王振宇,等. 汶川地震局部地形对地震动的影响[J]. *自然灾害学报*, 2012, 21(3): 164-169.  
ZHANG Jianyi, BO Jingshan, WNAG Zhenyu, et al. Influence of local topography on seismic ground motion in Wenchuan earthquake[J]. *Journal of Natural Disaster*, 2012, 21(3): 164-169.
- [10] 中国地震局工程力学研究所. DB/T 17—2006 地震台站建设规范:强震动台站[S]. 北京:地震出版社, 2006.
- [11] Consortium of Organizations for Strong-Motion Observation Systems (COSMOS). Guidelines for installation of advanced national seismic system strong-motion reference stations[R]. Richmond, California: COSMOS, 2001.
- [12] 中国地震局工程力学研究所,中国地震局地球物理研究所. GB/T 17742—2008 中国地震烈度表[S]. 北京:中国标准出版社, 2008.
- [13] STOCKWELL R G, MANSINHA L, LOWE R L. Localization of the complex spectrum: the S transform[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1996, 44(4): 998-1001.
- [14] ABRAHAMSON N A, SILVA W J. Summary of the Abrahamson & Silva NGA ground-motion relations[J]. *Earthquake Spectra*, 2008, 24(1): 67-97.
- [15] BOORE D M, ATKINSON G M. Ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5% -damped PSA at spectral periods between 0.01 and 10.0 s[J]. *Earthquake Spectra*, 2008, 24(1): 99-138.
- [16] CAMPBELL K W, BOZORGNIYA Y. NGA ground motion model for the geometric mean horizontal component of PGA, PGV, PGD and 5% damped linear elastic response spectra for periods ranging from 0.01 to 10 s[J]. *Earthquake Spectra*, 2008, 24(1): 139-171.
- [17] CHIOU B S J, YOUNGS R R. An NGA model for the average horizontal component of peak ground motion and response spectra[J]. *Earthquake Spectra*, 2008, 24(1): 173-215.
- [18] 王卫民,郝金来,姚振兴. 2013年4月20日四川芦山地震震源破裂过程反演初步结果[J]. *地球物理学报*, 2013, 56(4): 1412-1417.  
WANG Weimin, HAO Jinlai, YAO Zhenxing. Preliminary result for rupture process of Apr. 20, 2013, Lushan earthquake, Sichuan, China[J]. *Chinese Journal Geophysics*, 2013, 56(4): 1412-1417.
- [19] WEN R Z, REN Y F, SHI D C. Improved HVSR site classification method for free-field strong motion stations validated with Wenchuan aftershock recordings[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2011, 10(3): 325-337.
- [20] 师黎静,陶夏新. 地脉动方法最新研究进展. *地震工程与工程振动*[J]. 2007, 27(6): 30-37.  
SHI Lijing, TAO Xiaxin. Latest advance in microtremor methods[J]. *Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2007, 27(6): 30-37.

(中、英文编辑:付国彬)