

2018年云南通海2次5.0级地震强震动记录特征 及其场地反应分析*

王文才, 尹志文, 田秀丰[✉], 徐 钦, 石文兵, 江志杰

(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8月13日和14日云南通海县相继发生2次5.0级地震, 中国数字强震动台网的41个(13日)和30个(14日)强震台站在2次地震中共捕获到213条三分向加速度记录, 给出近场台站的地震动参数, 绘制了震中附近区域峰值加速度等值线图, 其长轴呈WS—EN方向展布。将实际观测数据与几种常用地震动衰减关系对比, 发现霍俊荣和胡聿贤(1992)的衰减预测模型能更好地反映此次地震影响场。将不同震中距的5个台站反应谱对比, 并与我国设计反应谱比较, 拟合出不同周期谱加速度的衰减特性, 总结了地震的反应谱基本特征。最后基于主震和多次余震观测记录, 运用HVSr谱比法分析了3个典型台站的场地效应, 并对其是否发生非线性反应作了初步判断。

关键词: 通海5.0级地震; 反应谱; 衰减关系; 场地效应; 非线性反应

中图分类号: P315.914

文献标志码: A

文章编号: 1000-0666(2019)04-0635-07

0 引言

2018年8月13日1时44分云南通海县发生5.0级地震, 震中位于 24.19°N , 102.71°E , 震源深度7 km。2018年8月14日3时50分, 该地再次发生5.0级地震, 震源深度6 km, 中国数字强震动观测网络(NSMONS)(崔建文等, 2006)布设在该地区的41个(13日)和30个(14日)强震台站在2次5.0级地震中共捕获到213条三分向加速度波形记录。已有研究(温瑞智等, 2013; 徐钦等, 2018; 王文才等, 2017; 李世成等, 2017)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针对一些震级较大的主震。然而主震后强余震的发生往往会对已经受到损伤和尚未来得及进行工程加固的建筑物造成二次伤害, 因此, 科学评价主余震灾害造成的破坏对抗震减灾工作具有重要价值(温卫平, 2015)。

本文利用近场台站在2次5.0级地震中捕获的强震动记录, 从地震动的幅值特征、衰减关系、反应谱、场地反应和非线性识别等方面分析强震动记录的基本特征, 旨在为抗震设防、地震序列作用下地震动的影响、地震危险性分析、场地放大效应估计和非线性识别等方面提供参考。

1 强震动记录

中国数字强震动观测网络的41个(13日)和30个(14日)强震台在2次通海5.0级地震中共捕获3分量加速度记录213条, 其中有28个台在2次地震中同时触发, 其台站分布情况如图1所示。

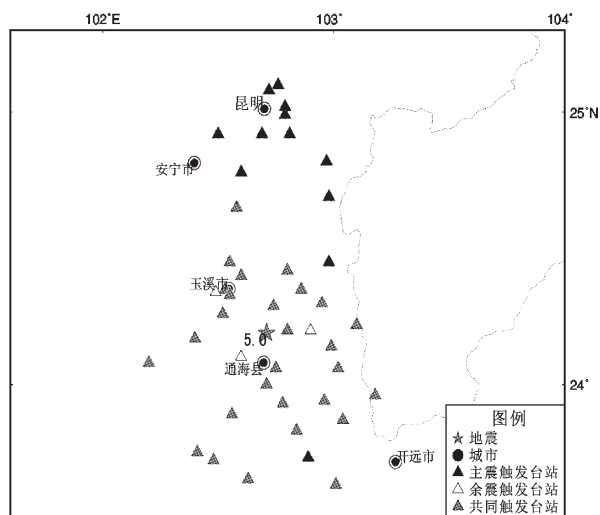


图1 触发强震动台站分布图

Fig. 1 Distribution of strong motion stations

* 收稿日期: 2019-01-04.

基金项目: 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(2018Y02)、甘肃省强震动台站加速度传感器极性检测和方位角普查校正项目(2015-JC073)、甘肃地震背景场探测项目——强震动分项共同资助。

✉ 通讯作者: 田秀丰(1984-), 高级工程师, 主要从事强震动观测和地震预警方面的研究. E-mail: 877985609@qq.com.

8 月 13 日的 5.0 级地震中触发台站分布在距震中 9.7 ~ 101.3 km 范围内, 其中 50 km 以内有 23 个台, 50 ~ 100 km 范围内有 17 个台, 有 1 个台在 100 km 之外。8 月 14 日的 5.0 级地震中触发台站分布在距离震中 8.15 ~ 69.3 km 的范围内, 其中 50 km 以内的有 23 个, 震中距在 50 ~ 69.3 km 范围内有 7 个台。

2 幅值特征

首先采用巴特沃斯高通滤波去除记录到的原始加速度波形的低频干扰, 然后计算出地震事件前 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 (Boore, 2001)。计算得到近场

(震中距 < 50 km) 台站地震动参数 (表 1)。由表 1 可知, 虽然 2 次地震震级相同, 但 8 月 14 日 5.0 级地震的加速度峰值 (*PGA*) 明显小于 8 月 13 日 5.0 级地震。53JXG 台的 *PGA* 均较其他台大, 时程曲线如图 2 所示, 13 日、14 日 EW, NS, UD 向 *PGA* 分别为 159.1, -170.4, 61.8 gal 和 77.0, -103.8, -41.2 gal。

统计表 1 中各地震动参数发现: 2 次地震中各台水平向 *PGA* 普遍大于垂直向, 其中 13 日地震中有 20 个台, 占触发台站的 87.0%, 14 日地震中有 22 个台, 占触发台站的 95.7%。另外, 主震中 $PGA_{NS} > PGA_{EW} > PGA_{UD}$ 的台站有 16 个, 占触发台站的 70%, 说明 NS 向的峰值加速度较其他 2 个方向卓越, 表现出一定的方向性。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

表 1 近场强震动记录 (震中距 < 50 km) 及相关参数
Tab. 1 Near-field strong motion records (epicentral distance < 50 km) and related parameters

| 台站名称 | 台站代码 | 场地条件 | 震中距/ km | 8 月 13 日地震峰值加速度/(cm · s ⁻²) | | | 8 月 14 日地震峰值加速度/(cm · s ⁻²) | | |
|------|-------|------|------------|---|--------|-------|---|--------|-------|
| | | | | 东西 | 南北 | 垂直 | 东西 | 南北 | 垂直 |
| 河西 | 53THH | 土层 | 8.15 | — | — | — | 49.4 | -40.6 | 79.6 |
| 雄关 | 53JXG | 土层 | 9.71 | 159.1 | -170.4 | 61.8 | 77.0 | -103.8 | -41.2 |
| 江川 | 53JCX | 土层 | 11.53 | -84.6 | 106.3 | -46.0 | -40.7 | 51.5 | -18.4 |
| 里山 | 53TLS | 土层 | 15.01 | 63.0 | -55.1 | -40.2 | 63.7 | -50.4 | 48.5 |
| 研和 | 53YYH | 土层 | 20.78 | 38.1 | -39.9 | 20.6 | 14.2 | 26.3 | -10.6 |
| 高大 | 53TGD | 土层 | 21.13 | -77.2 | -118.0 | 34.9 | 47.6 | -69.6 | -21.7 |
| 红塔集团 | 53YHT | 土层 | 22.48 | 31.6 | 25.5 | -19.7 | 17.8 | -18.6 | -11.2 |
| 华宁 | 53HNX | 土层 | 22.91 | — | — | — | -16.6 | 19.4 | 12.9 |
| 路居 | 53JLJ | 土层 | 23.40 | 21.8 | 30.9 | -19.3 | -11.1 | -18.2 | 10.9 |
| 玉溪局 | 53YXS | 土层 | 25.19 | -14.6 | -26.8 | -25.8 | — | — | — |
| 红塔区 | 53YHQ | 土层 | 25.48 | 20.7 | -18.3 | 14.3 | 11.2 | -14.0 | 10.5 |
| 江城 | 53JJC | 土层 | 27.15 | -35.5 | -30.7 | 13.2 | -15.9 | 13.5 | 7.6 |
| 茂地 | 53HMD | 土层 | 27.23 | 20.8 | -17.9 | 12.3 | -12.5 | -11.1 | 6.8 |
| 大营 | 53YDY | 土层 | 27.85 | -17.1 | -17.9 | 8.9 | -17.4 | 10.9 | -6.5 |
| 普茶寨 | 53HPC | 土层 | 28.95 | 17.6 | 39.5 | 16.9 | 16.5 | 24.8 | 10.3 |
| 曲江 | 53JQJ | 土层 | 29.77 | 24.2 | -21.3 | -12.4 | 11.9 | 10.3 | -8.0 |
| 峨山 | 53ESX | 土层 | 31.52 | -5.3 | 6.4 | 2.0 | -4.3 | 5.1 | 1.6 |
| 北城 | 53YBC | 土层 | 33.15 | 6.0 | -8.1 | -8.1 | 5.9 | -3.7 | -3.0 |
| 华溪 | 53HHX | 土层 | 34.62 | 10.3 | 11.4 | 5.1 | 6.4 | 10.2 | 4.2 |
| 龙朋 | 53SLP | 土层 | 36.67 | -47.5 | 48.6 | 19.9 | 45.9 | -28.6 | -14.6 |
| 利民 | 53JLM | 土层 | 37.64 | -7.8 | 7.8 | 5.5 | -6.2 | -6.3 | 5.9 |
| 盘溪 | 53HPX | 土层 | 39.69 | -7.9 | 8.1 | 7.4 | -6.5 | 5.4 | 3.9 |
| 青龙 | 53HQL | 土层 | 39.80 | 6.7 | 11.3 | -4.5 | — | — | — |
| 李浩寨 | 53LHZ | 土层 | 34.15 | 5.7 | -8.6 | -6.5 | -5.3 | 5.0 | -4.1 |
| 岔科 | 53JCK | 土层 | 48.88 | -10.8 | -9.2 | -4.3 | -11.6 | 8.4 | -4.8 |

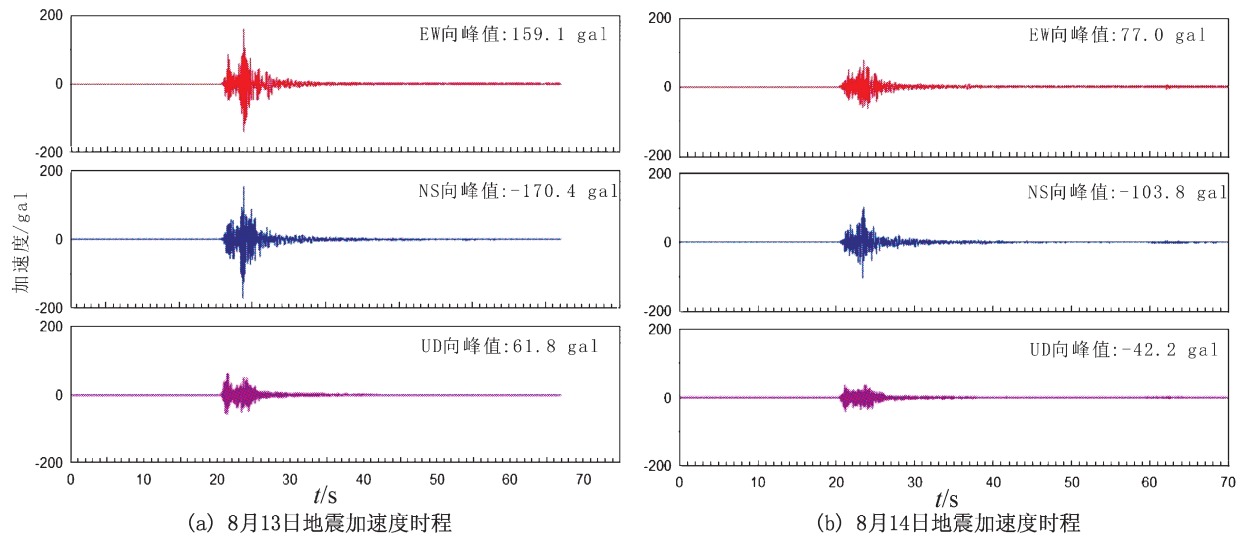


图2 53JXG台2次地震震加速度时程

Fig. 2 The acceleration time-series curves of the 53JXG stations with the two earthquakes

裂类型和传播方式的影响,王光明等(2018)研究认为近SN向小江断裂带西支南段的次级断裂明星一二街断裂或与其平行的隐伏断裂是此次地震的发震断裂。因此通海地震动参数的方向性可能受明星一二街断裂控制。

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2

次5.0级地水平向PGA的等值线图,如图3所示。可以看出PGA等值线图均呈WS—EN方向展布,这与地震宏观烈度调查图的走向及余震精定位结果分布情况具有很强的相似性(云南省地震局,2018;王光明等,2018)。另外,相对14日地震而言,13日地震等值线的形态更显“肥胖”,相同等值线的覆盖面积更广泛,中心点附近的等值线水平更高。

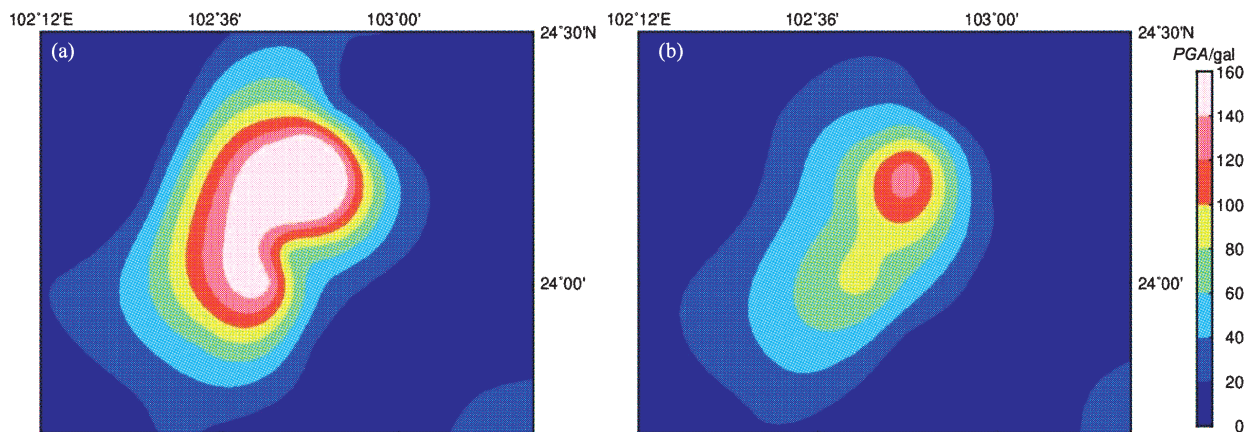


图3 8月13日(a)、14日(b)PGA等值线图

Fig. 3 Contour map of PGA of the event

3 衰减关系

2次通海地震中获得了较为丰富的强震动记录为研究强震动的衰减关系提供了很好的基础资料。地震波在传播过程中由于受震源和传播路径介质的影响,地震动表现出不同的衰减特性,过去几

十年中世界各地的地震学者提出了多种衰减关系。本文选用国内几种常用的地震动衰减关系作为对比的地震动预测方程。

通过计算各触发台站水平向实际观测记录PGA的几何平均值,然后与霍俊荣和胡聿贤(1992)的土层地震动衰减模型、俞言祥等(2013)第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：长轴预测曲线与观测值吻合较好，而短轴预测方程与观测值离散性较大；在 $10\text{ km} < R < 20\text{ km}$ 的范围内长轴预测曲线较观测值偏小；在 $20\text{ km} < R < 200\text{ km}$ 的范围内长轴预测曲线较观测值偏大，即：远程观测值比 GMPE 预测值低；短轴的预测值始终较观测值偏小，造成这种现象的原因如下：一方面是由于此次地震震级较小，地震动衰减场基本呈圆形分布，而非椭圆形状。另一方面，观测台站分布不均匀，缺少震中距小于 10 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。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。

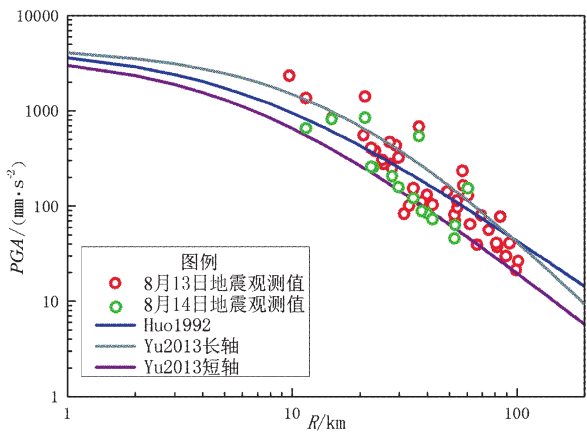


图 4 2 次 5.0 级地震 PGA 观测值与几种衰减关系对比

Fig. 4 Comparison of the two earthquakes between observed PGA and the event with GMPE

4 反应谱特征

利用近场 5 个幅值较大台站（53JXG，53JCX，53TLS，53YHH，53YHT）的加速度波形，通过计算 5% 阻尼比谱加速度的水平向几何平均值，依据《建筑抗震设计规范》（GB 50011—2010），选用 II 类场地绘制 VIII 度多遇、VIII 度设防、VIII 度罕遇地震的设计反应谱，并与实际观测值对比，如图 5 所示。可以看出：①13 日 5.0 级地震中，53JXG，53JXC，53TLS 台的谱加速度峰值均不同程度超过 8 度多遇地震，53JXG 台的峰值在很小的谱周期内略高于 8 度设防地震的设计反应谱值，但都小于罕遇设计值。②14 日 5.0 级地震中，5 个台站反应谱值均低于 8 度设防地震的设计标准。随着震中距的增大，其他台站的谱加速度峰值逐渐减小，在大多数谱周期范围内均小于 8 度多遇地震的设计值。③图 5 中 5 个台站，只有 53JXG 台记录的谱加速度值超过了 VIII 度设防反应谱平台值，其周期在 $0.1 \sim 0.25\text{ s}$ 的范围内且卓越平台较窄，反应谱曲线在 0.25 s 后迅速下降到较低水平，而该地区中小城市和城镇主要建筑物的结构自振频率为 $1 \sim 3\text{ Hz}$ ，对应自振周期为 $0.3 \sim 1\text{ s}$ ，因此，本次地震对该地区达到抗震设防标准的建筑破坏影响较小。另外，在大于 1 s 的中长周期部分，反应谱值只有十几 gal 甚至接近于零，因此也不会对结构自振周期较长的大坝、桥梁、输电塔、超高建筑等造成严重的影响。

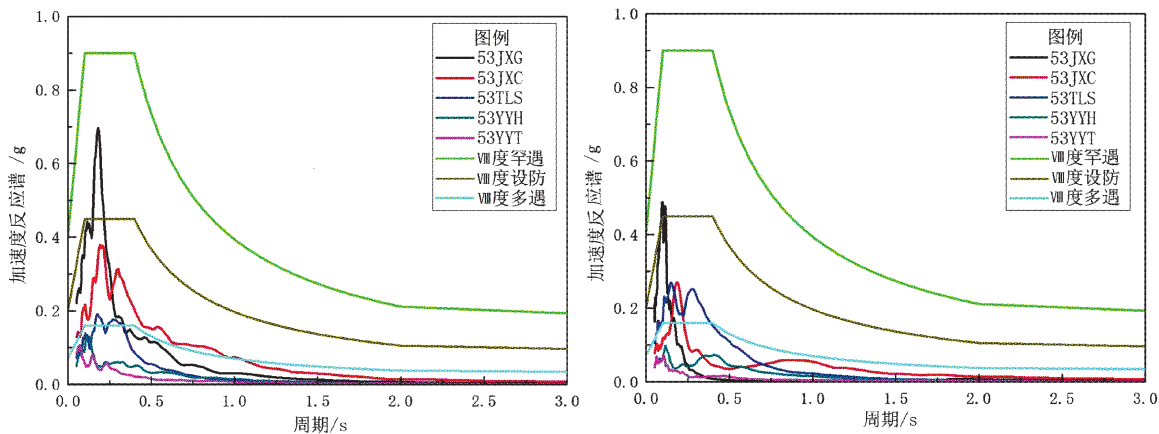


图 5 5 个典型台站的观测记录反应谱与设计反应谱比较

Fig. 5 Comparison of acceleration response spectra and designed reponse spectra of five typical stations

绘制对数坐标的上述5个台站加速度反应谱对,如图6a所示,可知近场内随着震中距的增大,反应谱的卓越周期变化不大,均在0.1~0.3 s的范围内,但在高频段部分,曲线出现缠绕交叉。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, 0.5 s, 1.0 s, 2.0 s)谱加速度随震中距增大的衰减关系,如图6b所示。

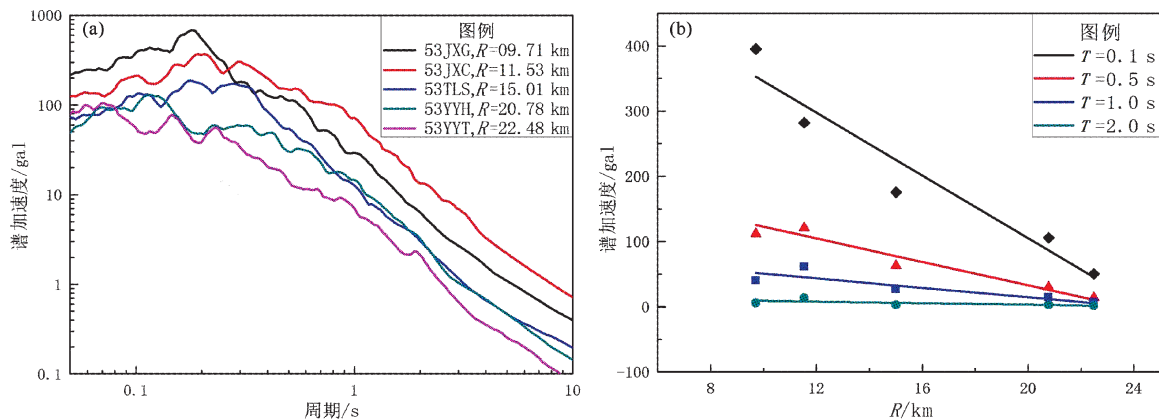


图6 5个台站的观测记录加速度反应谱对(a)和各周期谱加速度随震中距增大的衰减关系(b)

Fig. 6 acceleration response spectra pair (a) and the relationship between the acceleration response spectra and seismic distance in different cycles (b) of five typical stations

5 场地特征与非线性识别

场地效应直接影响地震灾害的严重程度,一直以来是地震工程领域研究的热点。近年来,随着强震动记录的不断积累,越来越多的学者(Yamazaki, Ansary, 1997; 荣棉水等, 2016)开始直接利用强震动记录分析台站场地效应。另外,大量研究结果表明:土体在强地震动作用下的应变幅值增加,剪切模量随之降低而阻尼比增强,当应变超过一定的范围时,土体会发生非线性反应(冀昆等, 2014)。因此,使用地震记录进行

场地非线性识别对扩展强震动记录应用范围同样具有重要意义。

5.1 谱比法分析台站场地反应

3个近场典型台站(53JXG, 53JXC, 53TGD)记录到大量的主余震强震动记录,利用这些波形数据,运用HVSr (Horizontal to Vertical Spectral Ratio)方法(Yamazaki, Ansary, 1997)得到台站场地响应曲线,如图7所示。由图7可知,多次主、余震加速度波形计算的HVSr谱比曲线形态基本一致,3个台站的场地卓越频率 f_g 稳定在2.1 Hz、6.1 Hz和4.2 Hz附近,卓越频率处谱比曲线的增益分别为:7.0, 2.7, 5.1。

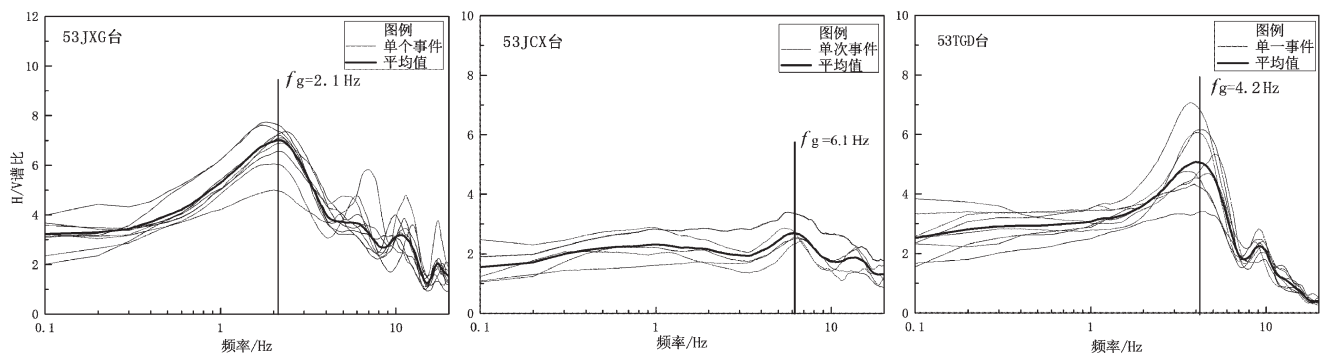


图7 3个典型台站强震动记录HVSr谱比曲线

Fig. 7 HVSr spectral curves of strong motion records of the three typical stations

5.2 非线性识别

53JXG, 53JCX, 53TGD 台距震中最近, 13 日地震中记录的 PGA 最大, 在 NS 向均超过 100 gal, 可能发生非线性反应。为了证明这种假设, 考虑到数据处理对信噪比的要求, 选择 $3 \text{ gal} < PGA < 30 \text{ gal}$ 的余震谱比平均曲线作为场地线性反应的参考, 通过与主震谱比结果对比, 绘制出强震、弱震的卓越频率比较 (图 8)。

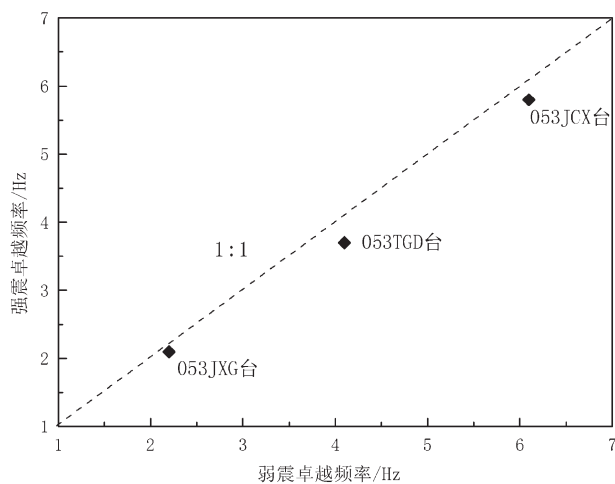


图 8 强震谱比曲线频率与弱震谱比曲线频率比较
Fig. 8 Comparison of predominate frequency between mainshock and weak aftershocks

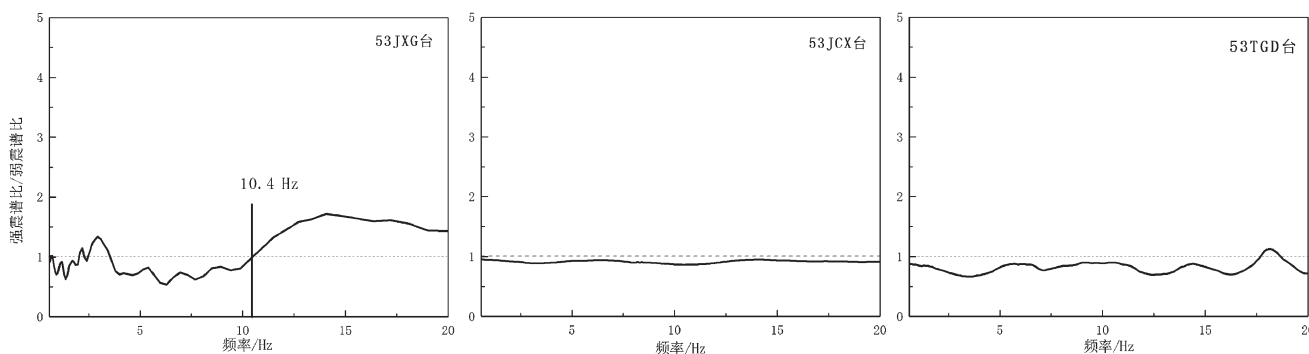


图 9 各台站弱震谱比/强震谱比曲线

Fig. 9 The ratio of spectra of weak aftershocks/strong main shock at each station

6 结论

基于从 2018 年云南通海 2 次 5.0 级地震中捕获的强震记录, 从地震动的幅值、衰减关系、反应谱、场地效应和非线性识别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

由图可知, 3 个台站在强震下均出现了不同程度的卓越频率向低频移动现象, 大应变下土体的动剪切模量降低所致, 而卓越频率出现偏移是场地非线性反应的重要特征之一 (Beresnev, Wen, 1996)。为了进一步说明强震和弱震作用下台站场地反应的差别, 做出弱震平均谱比与强震谱比曲线的比值随频率的变化曲线, 如图 9 所示, 其中虚线代表比值为 1 的参照线。

由图 9 可知: ①53JCX 和 53TGD 台在研究频段内, 弱震和强震谱比曲线幅值相当, 其比值略小于 1; ②53JXG 台在低频段弱、强震谱比曲线的比值位于 1 附近; 而在中高频段, 弱震谱比曲线明显大于强震谱比曲线。这是因为低频段地震波的波长远超过表层土的厚度, 地表的覆盖土并不是影响场地放大的主要因素, 因此线性反应和非线性反应的差别不大。中频段处辐射能量集中, 散射阻尼作用明显, 导致该频段强震下的谱比幅值减小, 认为场地非线性反应开始出现, Beresnev 和 Wen (1996) 将该临界频率定义为 f_{NL} 。由此判断 52JXG 台在大于 10.4 Hz 的中高频段发生了非线性场地反应, 而 53JCX, 53TGD 台场地处于线性范围内。另外, 53JXG 台在低频段出现的比值波动可能是由于强震的谱比曲线仅由一条强震记录计算得到, 其平滑性不如弱震平均谱比曲线造成的。

PGA 等值线长轴呈 WS—EN 方向展布, 与震后调查结果相吻合; ②8 月 13 日 5.0 级地震记录幅度普遍大于 8 月 14 日 5.0 级地震, 且在 0~20 km 的范围内均大于 3 种衰减关系预测值, 说明地震破坏集中于近场、远场震害轻的特点, 相对而言, 霍俊荣和胡聿贤 (1992) 的衰减模型更符合本次地震的衰减规律; ③观测的最大谱加速度在小范围

内高出我国设防反应谱, 对结构自振周期在这一范围内的建筑物将产生较大影响, 但由于其平台周期窄且衰减迅速, 因此对其他周期的建筑物造成的影响较小; (4) 对加速度大于 100 gal 的 3 个台站进行场地反应和非线性识别后认为: 53JCX, 53TGD 台处于线性范围内, 而 53JXG 台在强震作用下可能发生了非线性反应, 由于土动力反应本身的复杂和不确定性, 利用强震动记录进行场地非线性识别的结果可为工程应用和实际研究提供参考。

参考文献:

- 崔建文, 高东, 李世成, 等. 2016. 新的云南数字强震动观测台网[J]. 地震研究, 39(增刊1): 453–458.
- 霍俊荣, 胡丰贤. 1992. 地震动峰值参数衰减规律的研究[J]. 地震工程与工程振动, 12(2): 1–11.
- 冀昆, 温瑞智, 任叶飞, 等. 2014. 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, 34(5): 333–338.
- 李世成, 林国良, 崔建文. 2017. 云南强震动观测发展及相关问题讨论[J]. 地震研究, 40(4): 629–637.
- 荣棉水, 李小军, 王振明, 等. 2016. *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, 59(8): 2878–2891.
- 王光明, 刘自风, 赵小艳, 等. 2018. 2018年云南通海 $M_s5.0$ 级地震序列重定位及发震构造讨论[J]. 地震研究, 41(4): 504–510.
- 王文才, 李佐唐, 党红, 等. 2017. 2017年8月8日四川九寨沟 7.0 级地震强震记录及特征分析[J]. 地震工程学报, 39(4): 652–657.
- 温瑞智, 任叶飞, 黄旭涛, 等. 2013. 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, 33(4): 1–14.
- 温卫平. 2015. 主余震地震动参数特征及损伤谱研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学.
- 徐钦, 古云鹤, 孙艳萍, 等. 2018. 四川九寨沟 7.0 级地震强震动记录及特征分析[J]. 地震工程学报, 40(4): 699–777.
- 俞言祥, 李山有, 肖亮. 2013. 为新区划图编制所建立的地震动衰减关系[J]. 震害防御技术, 8(1): 24–33.
- 云南省地震局. 2018. 2018年8月13日、14日云南通海两次 5.0 级地震烈度图[EB/OL]. (2018–16)[2019–01–04]. <http://www.yndzj.gov.cn/yndzj/300518/533077/533092/533096/535207/index.html>.
- Beresnev I A, Wen K L. 1996. Nonlinear soil response – A reality? [J]. Bull Seis Soc Am, 86(6): 1964–1978.
- Boore D M. 2001. Effect of baseline corrections on displacements and response spectra for four recordings of the [J]. Bull Seis Soc Am, 91(5): 1199–1211.
- Yamazaki F, Ansary M A. 1997. Horizontal – to – Vertical spectrum ration of earthquake ground motion for site characterization[J]. Earthquake Engineering Structural Dynamics, 26(7): 671–689.
- GB50011—2010 建筑抗震设计规范[S].

Strong Motion Record Characteristics and Site Response Analysis of the Tonghai $M_s5.0$ Earthquake Sequence in Yunnan province, 2018

WANG Wencai, YIN Zhiwen, TIAN Xiufeng, XU Qin, SHI Wenbing, JIANG Zhijie
(Lanzhou National Geophysical Observation and Research Station, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract

A major earthquake of $M_s5.0$ and aftershock of $M_s5.0$ occurred successively on August 13 and 14, 2018, Tonghai County, Yunnan Province. There are 41 and 30 strong motion stations which located in this region have been fully triggered in the main and aftershock. 213 records of three – component acceleration were obtained by NSMONS. In this paper, we first calculate the peak accelerations of the 213 strong motion records. The basic characteristics of amplitude in this earthquake were analyzed according to the acceleration time – series curves and contour line of PGAs. Then, the attenuation relationship of PGAs with different distance was analyzed by comparing the observed data with some commonly used GMPE (ground motion prediction equations). In order to summarize the characteristics of response spectrum, we compare the acceleration response spectra of some typical stations with the designed spectrum. The *HVSR* method has been used to analyze site effect and judge whether nonlinear response occur of 3 typical stations with main and multiple aftershocks records.

Keywords: Tonghai $M_s5.0$ earthquake sequence; response spectrum; the attenuation relationship; site effect; nonlinear response