

任叶飞,温瑞智,周宝峰等. 2014. 2013 年 4 月 20 日四川芦山地震强地面运动三要素特征分析. 地球物理学报, 57(6):1836-1846, doi:10. 6038/cjg20140615.

Ren Y F, Wen R Z, Zhou B F, et al. 2014. The characteristics of strong ground motion of Lushan Earthquake on April 20, 2013. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 57(6):1836-1846, doi:10. 6038/cjg20140615.

2013 年 4 月 20 日四川芦山地震强地面运动 三要素特征分析

任叶飞¹, 温瑞智^{1,2*}, 周宝峰¹, 黄旭涛¹

1 中国地震局工程力学研究所, 中国地震局地震工程与工程振动重点实验室, 哈尔滨 150080

2 防灾科技学院, 河北三河 065201

摘要 2013 年 4 月 20 日四川省芦山县境内发生 $M_s7.0$ 级地震,地震造成 196 人死亡,21 人失踪,11470 人受伤,震中最大烈度 IX.地震发生后,中国数字强震动观测网络和成都市地震烈度速报网络分别获得了 114 组和 63 组 3 分量强震动记录.记录得出在近场加速度幅值较高,与汶川地震峰值相当,然而震害却不严重.本文介绍了这些记录的基本情况,分析了其地震动三要素(幅值、持时、频谱)特征以及对建筑物结构的潜在影响.分析结果表明:芦山地震 PGA(地震动峰值加速度)与我国常用的霍俊荣地震动预测方程较一致,高于即将颁布的第五代区划图中使用的预测方程;PGV(地震动峰值速度)与第五代区划图中使用的预测方程基本一致;Significant 持时和 Bracketed 持时高于全球经验预测方程,且 Bracketed 持时衰减显著慢于全球平均水平;典型 11 个幅值较大记录的 5% 阻尼比加速度反应谱峰值周期都在 0.1~0.2 s 范围内,且谱值远高于规范设计谱,但在周期 0.3 s 之后迅速下降至设计谱以下;芦山地震地震动 PGV 值较小以及对应我国中小城市和城镇主要建筑物的结构自振周期范围(0.3~1 s)内加速度反应谱远低于规范设计谱,可用于解释其震害相对较轻的原因.

关键词 芦山地震;强地面运动;幅值;持时;反应谱;震害影响

doi:10. 6038/cjg20140615

中图分类号 P315

收稿日期 2013-06-13, 2014-05-20 收修定稿

The characteristics of strong ground motion of Lushan Earthquake on April 20, 2013

REN Ye-Fei¹, WEN Rui-Zhi^{1,2*}, ZHOU Bao-Feng¹, HUANG Xu-Tao¹

1 Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China

2 Institute of Disaster-Prevention Science and Technology, Sanhe Hebei 065201, China

Abstract An $M_s7.0$ earthquake occurred on April 20, 2013 in Lushan Country, Sichuan Province, China with the maximum seismic intensity of IX. It caused 196 dead, 21 missing and 11470 injured. During the main shock, 114 strong motion recordings were accumulated by the National Strong Motion Observation Network System (NSMONS) of China and 63 recordings by the Local Earthquake Intensity Reporting Network of Chengdu City. There is a common question why it didn't cause heavy damage as the large ground motion is almost as the same level of Wenchuan Earthquake. The characteristics of their amplitude, duration and spectrum and the potential effect on the earthquake damage were analyzed in this paper. The results show that the

基金项目 国家自然科学基金(51308515, 51308517)和国家科技支撑计划课题(2014BAK03B01)资助.

作者简介 任叶飞,男,1983 年生,助理研究员,主要从事强震动观测与工程地震研究. E-mail: renyefei@iem. net. cn

*** 通讯作者** 温瑞智,男,1968 年生,研究员,主要从事强震动观测与工程地震研究. E-mail: ruizhi@iem. ac. cn

PGAs of ground motion in Lushan Earthquake are in accordance with the empirical prediction equation commonly used in China, but larger than the one used in fifth-generation ground motion zonation map, while the PGVs match well; the significant durations and bracketed durations are both larger than the global empirical prediction equation, and the attenuation of bracketed duration is slower than the global level; the acceleration response spectra with 5% damping ratio of 11 typical large recordings all have the peak periods around 0.1~0.2 s where the spectral acceleration is considerably larger than the Chinese design spectra, and notably smaller when the period larger than 0.3s; the reason why the damage is relatively slight in Lushan Earthquake is inferred that the PGVs are small and the spectral acceleration is drastically smaller than the design spectra in the period range 0.3~1.0 s corresponding to the natural periods of 3~10 stories buildings mostly common in the moderate and small cities and towns of China.

Keywords Lushan Earthquake; Strong ground motion; Amplitude; Duration; Response spectra; Potential effect on earthquake damage

1 引言

北京时间 2013 年 4 月 20 日 8 点 02 分在我国四川省雅安市发生 $M_s7.0$ 级强烈地震,震源深度 13 km,震中位于芦山县龙门乡. 这是我国继 2008 年 $M_s8.0$ 级汶川地震、2010 年 $M_s7.1$ 级玉树地震之后的又一次破坏性浅源强烈地震. 截至 2013 年 4 月 26 日地震已造成 196 人死亡,21 人失踪,11470 人受伤. 相比汶川、玉树两次地震,此次地震受灾情况相对较轻. 众所周知,地震时地震动作用于建筑物引起结构破坏,在不考虑建筑结构本身因素前提下较强烈地震动往往引起较严重的结构破坏. 根据温瑞智等(2013)震后调查显示,芦山地震中地震动强度与震害程度显著不一致. 芦山地震中中国数字强震动观测网络和成都市地震烈度速报网络获得大量高质量强震动记录,通过地震动三要素(幅值、持时、频谱)分析这些记录的特征,从地震动特征角度给出此次地震震害较轻的解释,为记录的后续使用提供帮助与参考.

2 强震动记录

根据国家强震动台网中心发布的信息,截至 2013 年 5 月 20 日共获得 3 分量自由场记录 114 组,其中四川省 83 组,云南省 21 组,陕西省 8 组和甘肃省 2 组;云南省地震局减灾大楼获得一套结构台阵记录;另外,刚刚建设完成的成都市地震烈度速报网络也获得了 63 组记录. 图 1 给出了所有获取记录的台站地理分布. 从图中可见,震中附近台站分布

较密集,尤其是高密度的区域台网在大震中获取大量近场记录在我国尚属首次. 根据温瑞智等(2013)对数据的统计信息,断层距(台站至断层破裂面的最短距离)在 100 km 以内的记录达到了 79 组. 本文在断层距计算时,断层面几何模型亦参考了王卫民等(2013)的反演结果. 这些近场记录弥补了我国 7 级左右地震近场强震动记录稀少的空白,为丰富我国强震动记录数据库积累了宝贵的资料.

表 1 是这些记录的不同 PGA(地震动峰值加速度)范围的数量情况,200 $\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$ 以上的记录在东西、北南、垂直向各有 12、12、5 条,其中最大记录是距震中最近的宝兴地办台站(台站代码 51BXD)获得,震中距 10 km,东西、北南和垂直向的加速度

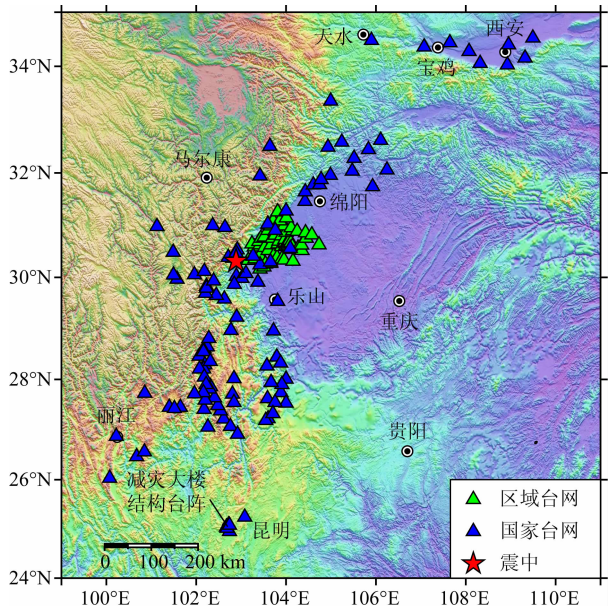


图 1 芦山 7.0 级地震强震动记录台站分布
Fig. 1 Strong motion stations in Lushan $M_s7.0$ Earthquake

表 1 芦山 $M_s7.0$ 级地震强震动记录随 PGA 的数量分布

Table 1 Numbers of strong motion recordings versus PGA in Lushan $M_s7.0$ Earthquake

PGA ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$)	EW 方向			NS 方向			UD 方向		
	国家	区域	合计	国家	区域	合计	国家	区域	合计
0~10	56	0	56	51	0	51	64	0	64
10~50	35	24	59	41	25	66	33	56	89
50~100	11	26	37	8	23	31	4	6	10
100~200	3	10	13	5	12	17	9	0	9
200~400	4	3	7	8	3	11	3	1	4
400~600	4	0	4	0	0	0	1	0	1
≥ 600	1	0	1	1	0	1	0	0	0

峰值分别为 $-1005.3 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}$ 、 $823.6 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}$ 和 $478.1 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}$, 这是我国首次获得超过 1 g 的自由场加速度记录; 第二大记录是距震中 18 km 的宝兴民治台站(台站代码 51BXZ) 获得东西、北南和垂直向的加速度峰值分别为 $583.2 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}$ 、 $316.4 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}$ 和 $-387.2 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}$. 这两个台站均为基岩台, 因而符合近场地震动基岩场地高频幅值较大的特性.

图 2 是幅值较大的典型记录的三观测方向的加速度时程曲线及台站地理分布, 震中位置采用 USGS 最终发布的更新后的结果(30.308°N , 102.888°E), 地震烈度等值线引自中国地震局发布的《四川芦山“ $4 \cdot 20$ ” 7.0 级强烈地震烈度图》. 51BXD 和 51BXZ 均在 VII 度区内, 仅国家台网的芦山飞仙(台站代码 51LSF) 和区域台网邛崃高何(台站代码 QLGH) 位于 VIII 区内. 可见, 这些记录整体上 PGA 较大却对应地震烈度较小, 本文将重点讨论这些记录地震动三要素(幅值、持时、频谱) 特性, 分析结构破坏较轻存在不一致性的原因.

在分析之前, 对记录进行必要的数据处理工作. 首先, 对于零线偏移的记录进行零线调整, 如图 3 所示, 两个典型零线偏移记录的调整示例. 图 3a 是国家台网的邛崃油榨台站东西向记录出现零线跳跃现象, 各时间点零线偏移量相同. 通过计算尾波 10 s 的平均值, 在出现零线跳跃后的记录时程中将其扣除进行零线调整; 图 3b 是区域台网的蒲江朝阳湖台站东西向记录, 整个时间过程零线出现偏移且偏移量随时间增加而增加, 通过对整个时程进行 4 次多项式拟合, 得出一条曲线为实际的零线, 将整个时程扣除这条曲线完成零线调整过程. 如果采用常用的直线拟合方式, 零线调整结果并不理想, 如图中红色虚线所示. 其次, 为消除基线漂移对计算 PGV(地震动峰值速度)、反应谱长周期部分的影响, 采用 Boore 方法对部分近场记录进行了基线校正处理

(Boore, 2001). 经过上述处理过程, 对加速度时程进行积分可获得较为可靠的 PGV 值.

3 幅值特征

针对此次地震记录的水平向 PGA 及 PGV 衰减特性进行了分析, 图 4 给出了震中距在 200 km 以内的记录 PGA 及 PGV 值对应震中距分布, 取两个水平观测方向的几何平均值进行分析. 图 4 还对比了该地区目前国内较常用的几个基岩场地的地震动预测方程, 即通常所谓的地震动衰减关系: 针对 PGA 有俞言祥和汪素云(2006) 的中国西部地区(YW06)、霍俊荣(1989) 的中国西南地区(Huo89)、雷建成等(2007) 的中国四川盆地(Lei07) 以及第五代区划图中的中强地震区(Yu13)(俞言祥等, 2013); 针对 PGV 有霍俊荣(1989) 的中国西南地区(Huo89) 和第五代区划图中的中强地震区(Yu13)(俞言祥等, 2013).

从图中可见, 对于 PGA, 在近场震中距 40 km 以内, 芦山地震记录都高于任何一种衰减关系, 一定程度上体现了此次地震近场高频成份卓越的特性; 在 $40 \sim 200 \text{ km}$ 距离内, 芦山地震记录较符合 YW06、Huo89 这两个衰减关系, 离散点对应这两条衰减曲线呈现一定程度的上下正态分布, 且上方离散程度要稍大于下方, 存在土层放大效应的影响. 然而, 对于 Lei07 和 Yu13, 几乎所有离散点都在曲线之上, 对于芦山地震水平向 PGA, 这两个衰减关系显然是低估的. 需要强调的是单个地震的数据在统计学意义上并不能说明由大量地震数据统计获得的衰减关系的趋势. 对于 PGV, 从图 4 可见, 任何距离范围内, 芦山地震记录较符合第五代区划图中的中强地震区的衰减关系(Yu13), 在震中距 100 km 以内显著低于 Huo89.

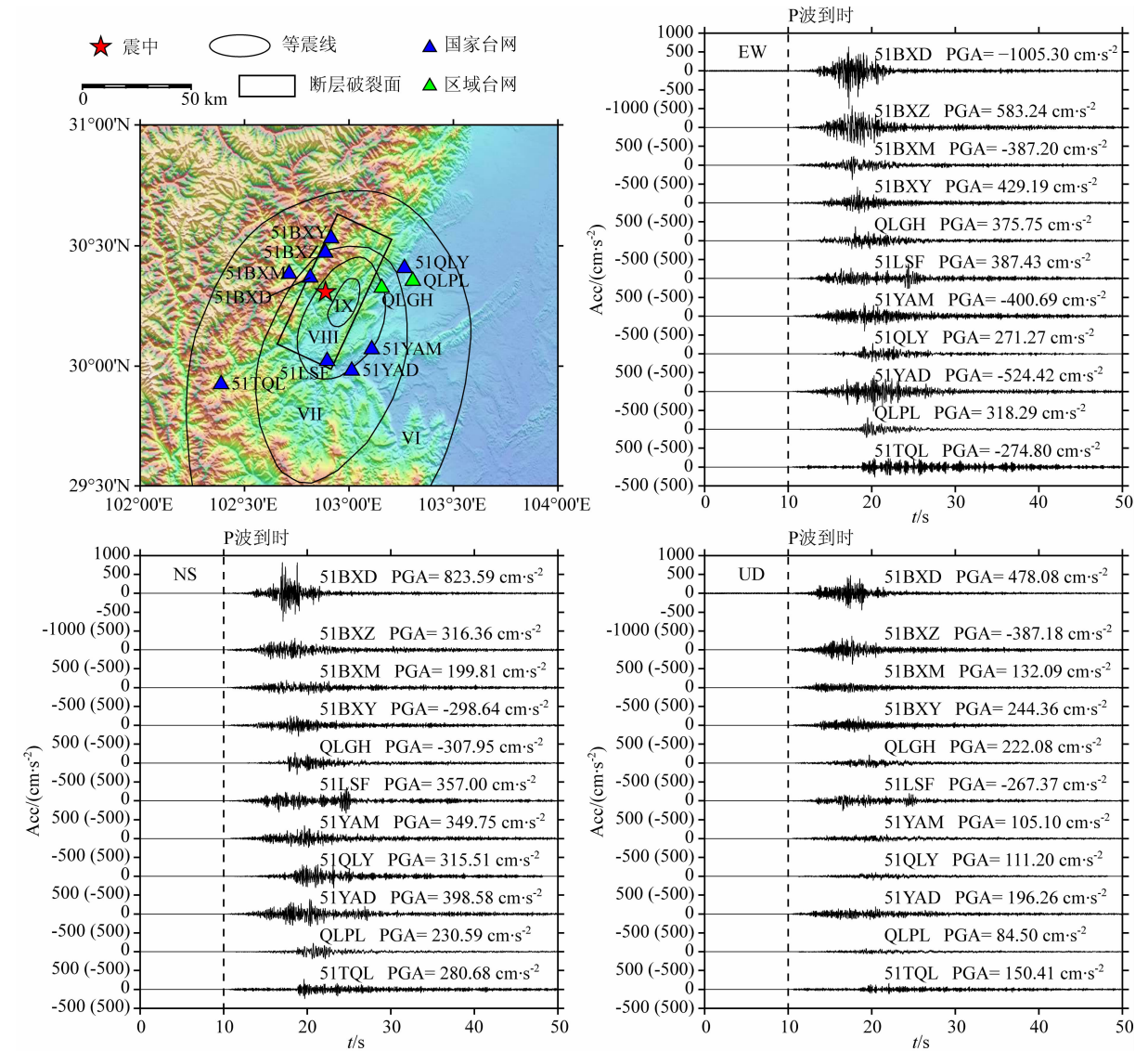


图2 典型记录的加速度时程和台站位置(各记录P波到时统一对齐相对时间)

Fig. 2 Near-fault acceleration time-histories and locations

(The P-wave onset of each recording is translated to the same relative time)

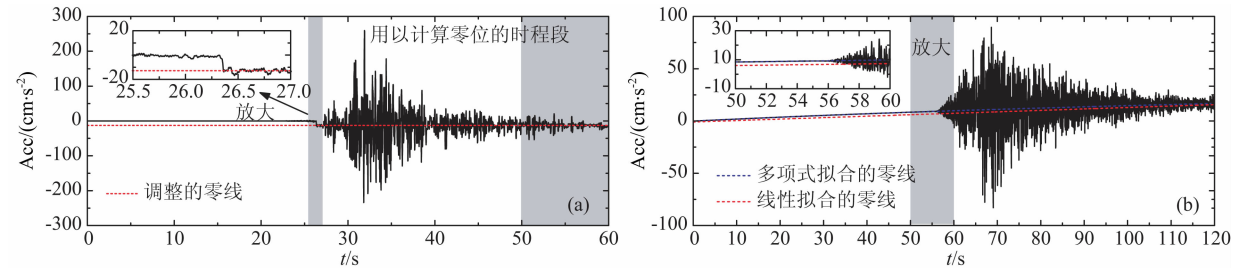


图3 典型记录的零线调整

(a) 国家台网的邛崃油榨台站东西向记录;(b) 区域台网的蒲江朝阳湖台站东西向记录.

Fig. 3 Zero-line adjustment of some typical time-series

(a) Time history for Youzha Station (EW component); (b) Time history for Chaoyanghu Station (EW component).

接下来拟合了PGA与PGV之间的关系,如图5所示,拟合结果如下:

$$\ln(\text{PGV}) = 0.796\ln(\text{PGA}) - 2.099, \quad (1)$$

拟合相关系数R等于0.85,体现了PGA与PGV

之间较好的相关性。

同时,将此次地震的 PGA 与 PGV 的相关性与灾害非常严重的 2008 年汶川地震和 1999 年集集地震进行了比较,图 5 给出了这三次地震动 PGA 与 PGV 对应离散点分布以及对数线性关系拟合,汶川地震的数据来源于 Liu and Li(2009)以及 Ren et al. (2013),集集地震的数据来源于 Wang et al. (2002),为保持一致,芦山地震只取 PGA 大于 $50\text{ cm}\cdot\text{s}^{-2}$ 的数据。图中两条实线表示对应中国地震烈度表中规定的烈度 IX 的 PGA 和 PGV 阈值,分别为 $354\text{ cm}\cdot\text{s}^{-2}$ 和 $36\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ (中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,2008)。

从 PGA 角度(图 5),芦山地震对应烈度 IX 的

记录在数量与幅值上大体与汶川地震相当,但要少于集集地震;然而从 PGV 角度,芦山地震对应烈度 IX 的记录却是零,相反,汶川地震有部分,集集地震有较多。一定程度上这与震源破裂机制有关,相比汶川地震和集集地震,芦山地震破裂时间短、破裂面小,能量释放相对集中,地震动高频成份卓越,中低频成份弱小,体现出了高幅值 PGA、低幅值 PGV 的特点。由于 PGV 也是控制结构破坏的主要地震动参数之一,因而这一特点也与芦山地震灾害较轻相对应。另外,破裂方向性效应也是产生大幅值 PGV 的原因之一,汶川地震和集集地震破裂方向性效应明显,致使在近断层区域引起较大速度脉冲,影响结构破坏(胡进军,2009)。

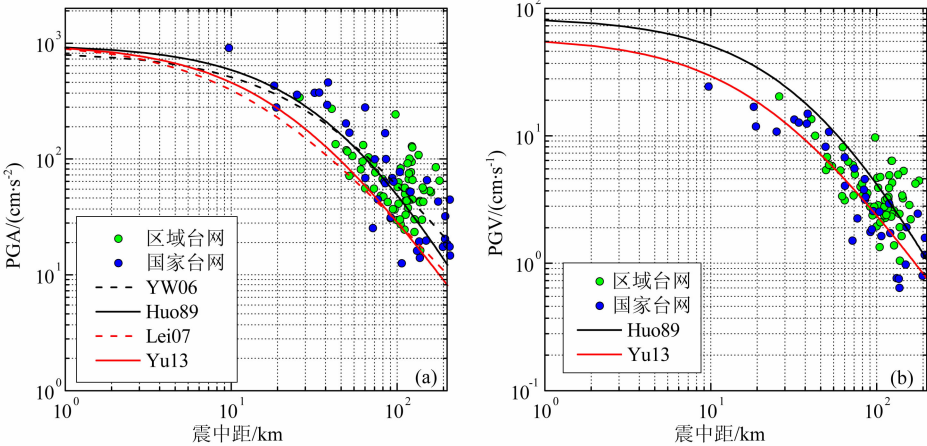


图 4 水平向 PGA(a)及 PGV(b)衰减特征

Fig. 4 Attenuation of the horizontal PGA (a) and PGV (b)

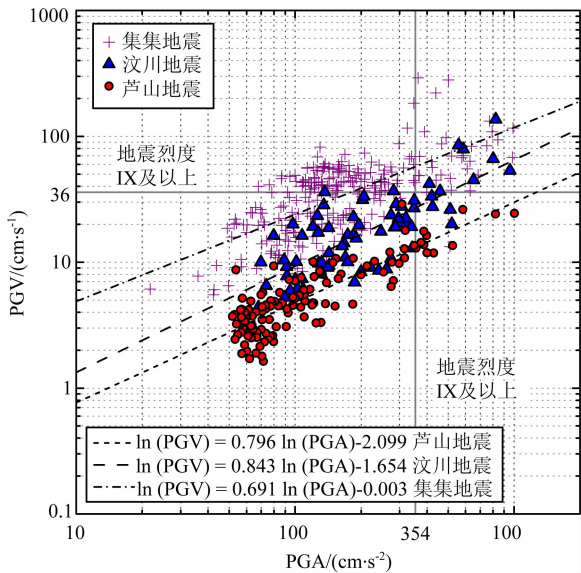


图 5 集集地震、汶川地震以及芦山地震的 PGV 与 PGA 的对数线性关系

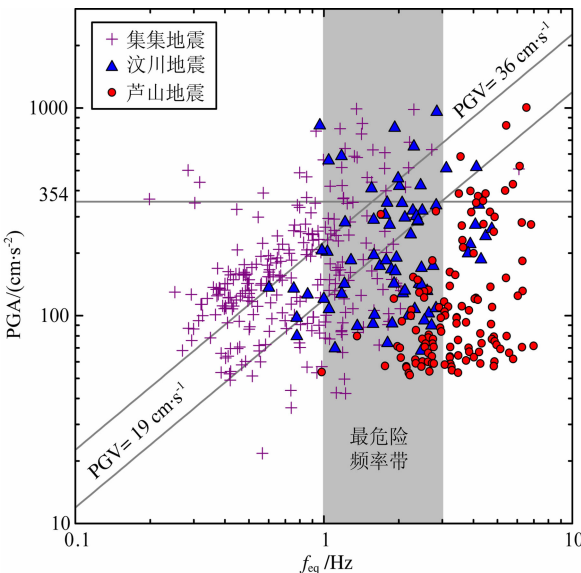


图 6 集集地震、汶川地震以及芦山地震的 PGA 与等效卓越频率 f_{eq} 的对应关系

Fig. 5 PGVs versus PGAs for Chi-chi, Wenchuan and Lushan Earthquake

Fig. 6 PGAs versus the equivalent predominant frequency f_{eq} in Chi-chi, Wenchuan and Lushan Earthquake

为了从地震动幅值特性解释此次地震结构破坏较轻的原因,分别计算了集集地震、汶川地震和芦山地震记录的等效卓越频率 f_{eq} ,即 $PGA/(2\pi PGV)$. f_{eq} 是衡量地震动与结构破坏间关系的一个重要指标,由离散傅里叶变换对地震动正弦或余弦特性的假设获得,曾被用来合理解释 2011 年东日本 M_w 9.0 级强烈地震却引起较轻的结构破坏(Kawase,2011).

图 6 给出了上述三个地震动 PGV 与 f_{eq} 的离散分布.图中水平灰色实线表示对应中国地震烈度表中规定的烈度 IX 的 PGA 阈值,两条斜灰色实线分布表示对应烈度 VIII 和 IX 的 PGV 阈值;阴影部分定义为我国中小城市和城镇主要建筑物(3~10 层)的结构自振频率范围(1~3 Hz).从图 6 可见,在此频率范围内,对于芦山地震,无论是 PGA 还是 PGV 都分布在对应地震烈度 IX 以下,尤其是 PGV,对应地震烈度 VIII 以上的也仅 1 条记录.在此频率范围内,集集地震和汶川地震仅有一部分记录 PGA 和 PGV 同时分布在对应地震烈度 IX 以上,大量记录 PGV 分布在对应地震烈度 VIII 以上.由此可解释芦山地震中为何高幅值的 PGA 却引起相对较轻结构破坏.

4 持时特征

持时作为工程结构抗震设计与研究中不可或缺的地震动参数之一,尚无统一的定义,其种类不下 40 余种(Bommer and Martinez,2000).我们以较常用的 Significant 持时 D_s 、Bracketed 持时 D_B 作为研究对象. D_s 通常定义为 5%~75%和 5%~95%的 Arias 强度之间的时间间隔(Trifunac and Brady,1975),由于间隔范围是相对于 Arias 强度而言的,

所以又称相对持时(Relative Duration),这里我们用 D_{SR} (5%~75%)和 D_{SR} (5%~95%)表示. D_B 是指超过一定地震动阈值(通常取 0.025 g、0.05 g 和 0.1 g)的首尾时间间隔(Bolt,1973),是绝对持时(Absolute Duration),我们将其表示为 D_{BA} (0.025 g)、 D_{BA} (0.05 g)和 D_{BA} (0.1 g).针对芦山地震强震动记录,我们分别按式(2)回归了上述 5 种持时的随距离变化的关系式:

$$D = c_1 + c_2 \cdot R_{rup} + \sigma, \tag{2}$$

其中, D 表示我们研究的 5 种持时; R_{rup} 表示断层距,即台站至断层破裂面的最短距离,在本文研究中取最大值为 100 km; c_1 、 c_2 以及 σ 分别为回归系数和标准差,结果见表 2.

由于成都区域台网的台站主要服务于地震烈度速报,在台站选址时要求相对宽松,台站有位于基岩之上的,也有位于成都平原深厚软弱土层之上的,也有位于城市中心的建筑物之内的,因而对于该区域台网的记录数据离散性相对较大.对于国家台网,台站选址时严格按照相关标准执行,一定区域内的台站场地条件差异不明显,由建台报告可知,四川省内台站大都位于中硬土之上,国家台网的记录数据离散性相对要小.基于此,在上述回归分析时,分别采用仅国家台网的记录(样本 1)、国家台网和区域台网的所有记录(样本 2)进行回归计算.从表 2 可见,样本 2 的相关系数 R 对于 D_{SR} (5%~75%)、 D_{SR} (5%~95%)和 D_{BA} (0.1 g)都较小,体现了样本 2 的较大数据离散型;而样本 1 的相关系数 R 对于各种持时都保持较高值,体现了样本 1 的较小数据离散型,也说明了地震动持时与距离的较高相关性.这些结果也验证了上述关于区域台网和国家台网台站场地条件有所区别的描述.

表 2 5 种持时与距离关系的回归系数
Table 2 Parameters of regression equations for five kinds of duration studied in this paper

系数	D_{SR} (5%~75%)	D_{SR} (5%~95%)	D_{BA} (0.025 g)	D_{BA} (0.05 g)	D_{BA} (0.1 g)
仅国家台网数据(样本 1)					
c_1	0.1352±0.0157	0.1516±0.0297	-0.3512±0.0435	-0.3602±0.0397	-0.1654±0.0520
c_2	5.1707±0.7796	16.1364±1.4786	40.8090±2.1033	30.6990±1.7568	13.5396±1.4706
σ	2.7493	5.2146	7.3646	5.9524	4.1502
R	0.77	0.59	0.77	0.83	0.54
国家台网和区域台网所有数据(样本 2)					
c_1	0.0456±0.0095	0.0935±0.0209	-0.2698±0.0278	-0.1926±0.0263	-0.0819±0.0272
c_2	8.4294±0.5831	22.4952±1.2822	33.3306±1.6864	20.1797±1.4481	9.2390±1.1213
σ	3.1692	6.9685	9.1231	7.4562	4.9218
R	0.36	0.34	0.62	0.59	0.41

图 7 给出了两个样本对于 $D_{SR}(5\% \sim 75\%)$ 、 $D_{SR}(5\% \sim 95\%)$ 的回归曲线以及与已有的地震动持时经验预测方程进行了比较,分别是:Bommer et al. (2009)的基于 NGA 强震记录库的全球模型,考虑到四川区域强震台站的场地条件,平均意义上 V_{s30} 取 $350\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (Wang et al., 2010) (下文同);Trifunac and Brady(1975)的美国加州地区模型,考虑中硬土地地;以及卢书楠等(2013)的汶川地震近场区域模型.从图中可见,对于 $D_{SR}(5\% \sim 75\%)$,尽管卢书楠等(2013)的汶川地震近场区域模型由于其震级高而造成值远大于本文样本 2 回归得到的模型,但曲线形状基本一致,符合汶川地震与芦山地震发生在同一地质构造区域具有相同地震动传播规律的特点.另外,无论对于 $D_{SR}(5\% \sim 75\%)$ 还是 $D_{SR}(5\% \sim 95\%)$,本文回归的模型在 R_{rup} 100 km 以内均要高于 Bommer et al (2009) 的全球模型,也高于 Trifunac and Brady(1975)的美国加州地区模型.另

外,值得注意的是,如图 7 所示,获得最大记录的宝兴地办台站,两个水平方向的 $D_{SR}(5\% \sim 95\%)$ 远小于其他台站记录,符合近场基岩台站幅值高、持时短的近断层地震动特性.

同样,图 8 给出了两个样本对于 $D_{BA}(0.025\text{g})$ 、 $D_{BA}(0.05\text{g})$ 和 $D_{BA}(0.1\text{g})$ 的回归曲线以及与已有的地震动持时经验预测方程进行了比较,分别是: Bommer et al. (2009)的基于 NGA 强震记录库的全球模型;Kawashima and Aizawa(1989)的日本地区模型;以及 Wang et al. (2002)的集集地震近场区域模型.从图中可见,与 D_{SR} 类似,无论对于 $D_{BA}(0.025\text{g})$ 、 $D_{BA}(0.05\text{g})$ 还是 $D_{BA}(0.1\text{g})$,本文回归的模型均要高于 Bommer et al. (2009)的全球模型,且衰减速度相对较慢.相比 Kawashima and Aizawa(1989)的日本地区模型,对于 $D_{BA}(0.1\text{g})$,本文回归的模型均要高于它且衰减速度相对较慢;而对于 $D_{BA}(0.05\text{g})$,在 $R_{rup} < 20\text{ km}$ 时本文回归的模型相对低,相反,

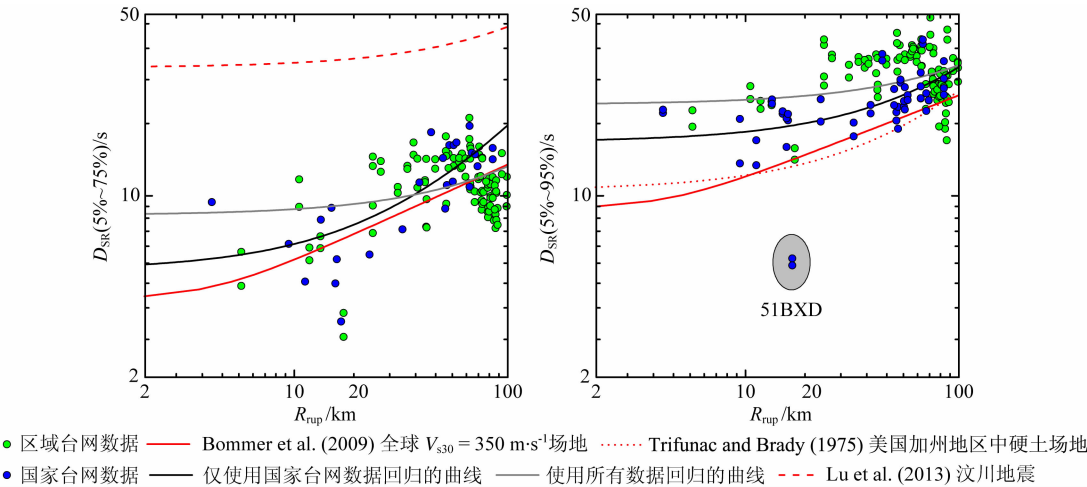


图 7 芦山地震 Significant 持时 $D_{SR}(5\% \sim 75\%)$ 与 $D_{SR}(5\% \sim 95\%)$ 与断层距的经验回归曲线
Fig. 7 Empirical prediction equations for significant duration $D_{SR}(5\% \sim 75\%)$ and $D_{SR}(5\% \sim 95\%)$

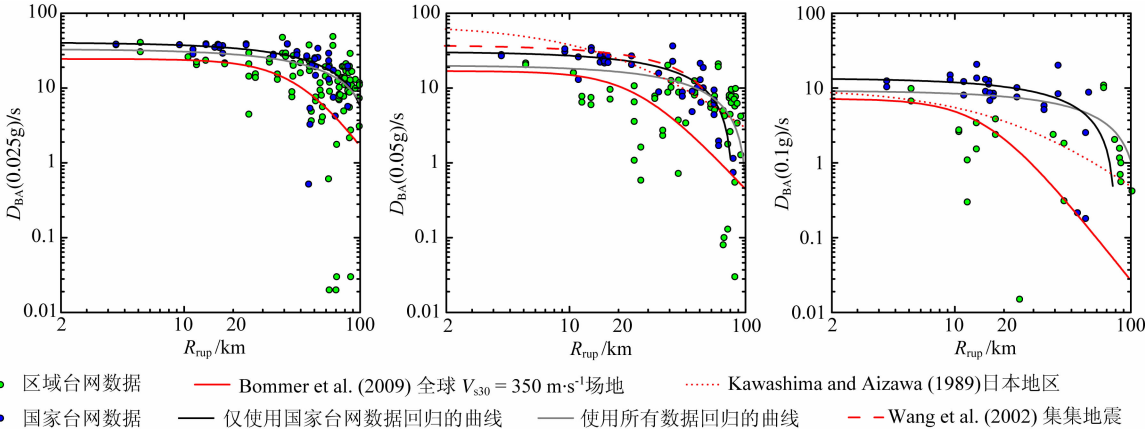


图 8 芦山地震 Bracketed 持时 $D_{BA}(0.025\text{g})$ 、 $D_{BA}(0.05\text{g})$ 和 $D_{BA}(0.1\text{g})$ 与断层距的经验回归曲线
Fig. 8 Empirical prediction equations for bracketed duration $D_{BA}(0.025\text{g})$, $D_{BA}(0.05\text{g})$ and $D_{BA}(0.1\text{g})$

$R_{rup}>20\text{ km}$ 时本文回归的模型相对高且具有近似的衰减特征.相比 Wang et al. (2002)的集集地震近场区域模型,由于震级相对小些,因而本文回归的对于 D_{BA} (0.05 g)的模型均要低,但却与其具有相似的曲线形状,说明了两个区域具有相似的地震动持时衰减特征.

5 反应谱特征

计算了图 2 所示 11 个典型的幅值较大的记录的 5%阻尼比的反应谱,两水平方向取几何平均值,并与我国《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010)中的设计谱进行比较(中华人民共和国住房和城乡建设部,2010).设计谱场地条件取我国较普遍的 II 类场地,也是四川地区强震动台站场址较为普遍的场地类型.按照规范中不同设计基本地震加速度和设计地震分组,这 11 个记录的反应谱被分为 3 组,如图 9 所示.另外,我们还选取了汶川地震中近似断层距、相同设计基本地震加速度和设计地震分组区域的台站记录进行了比较.

从图中可见,11 个记录的加速度反应谱存在同一特点:峰值周期都在 $0.1\sim0.2\text{ s}$ 范围内,且远高于设计谱,但卓越平台较窄,在对应设计谱特征周期之前迅速下降至设计谱以下.考虑上文所述的我国中小城市和城镇主要建筑物的结构自振频率范围($1\sim3\text{ Hz}$),对应自振周期约 $0.3\sim1\text{ s}$ 内,这些记录的加速度反应谱远低于设计谱,因而此次地震对于这一自振周期范围的建筑破坏影响较小.另外,在大于 1 s 的中长周期部分谱值更是甚小,仅几十 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-2}$ 甚至接近于 0,因而此次地震对于结构自振周期较长的大坝等水利设施和桥梁、输电塔等生命工程以及大型体育馆、超高层建筑等影响非常小.

相比汶川地震记录,绵竹清平台站(代码 51MZQ)在小于 0.3 s 周期段,加速度反应谱幅值与芦山地震宝兴地办台站(代码 51BXD)记录近似且高于设计谱,然而在我们所关心的 $0.3\sim1.0\text{ s}$ 范围内,51MZQ 记录却始终要高于设计谱,在大于 1.0 s 的中长周期部分与设计谱基本一致.其他汶川地震记录,如江油重华(代码 51JYC)台站记录相比芦山地震中的芦山飞仙台站(代码 51LSF)和天全两路台站(代码 51TQL)记录也有类似现象.还有汶川地震中的广元曾家(代码 51GYZ)台站记录相比芦山地震中的雅安地办台站(代码 51YAD)记录,短周期加速度反应谱最大谱值和形状近似,但峰值周期不

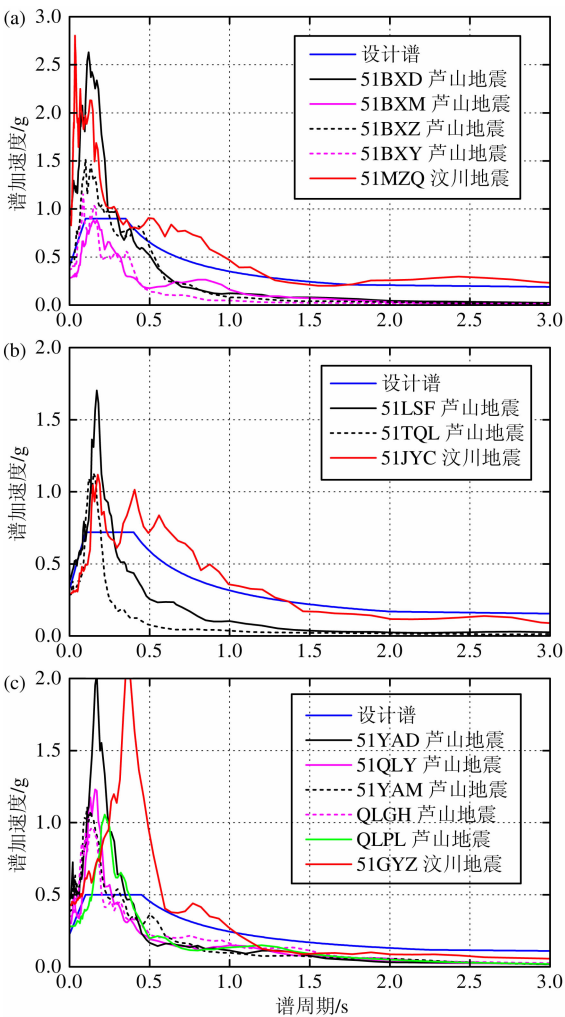


图 9 芦山地震典型强震动记录的水平向 5%阻尼比的加速度反应谱(a)以及与规范设计谱(b)、汶川地震典型记录的反应谱(c)进行比较

Fig. 9 Comparison of horizontal 5% damping-ratio spectral acceleration among Lushan Earthquake (a), Wenchuan Earthquake (b) and code design (c)

同,51YAD记录约为 0.15 s ,而51GYZ记录约为 0.35 s ,在周期 $0.3\sim0.5\text{ s}$ 范围内,51GYZ 记录谱值是设计谱的 $2\sim4$ 倍,对于自振周期在这一范围内的 $3\sim5$ 层结构的地震反应将产生显著影响.

以上对于芦山地震记录的反应谱特征分析以及与汶川地震记录的比较,合理解释了芦山地震地震动较大却震害较轻的原因.

另外,选取了不同断层距的 6 个基岩台站作为研究对象,计算其水平向加速度反应谱并取几何平均值,如图 10 所示.6 个基岩台分别为:宝兴地办(代码 51BXD)、宝兴民治(代码 51BXZ)、康定姑咱(代码 51KDZ)、郫县走石(代码 51PXZ)、西昌小庙(51XCX)和昭通台(代码 53ZTT).台站至断层破裂

面最短距离 R_{rup} 依次为: 16.59、15.58、51.04 km、67.79、241.71 km 以及 306.63 km. 如图 10 所示, 随着距离的增加, 反应谱峰值周期也逐渐增加, 平台变宽, 体现了地震动高频成份随距离逐渐衰减, 且衰减速度远快于中长周期成份, 因而远场台站中长周期成份相比较为卓越.

为了更好地说明此观点, 我们比较了这 6 个记

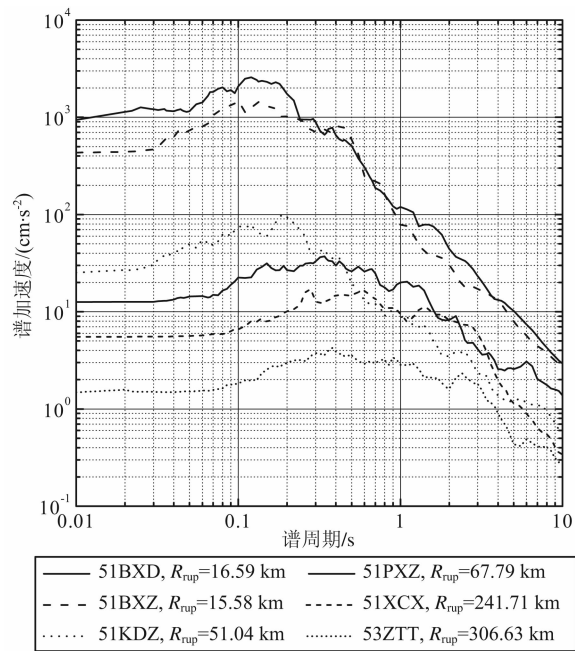


图 10 不同断层距的基岩台站记录加速度反应谱比较
Fig. 10 Comparison of horizontal 5% damping-ratio spectral acceleration for bedrock stations with respect to different rupture distance in Lushan Earthquake

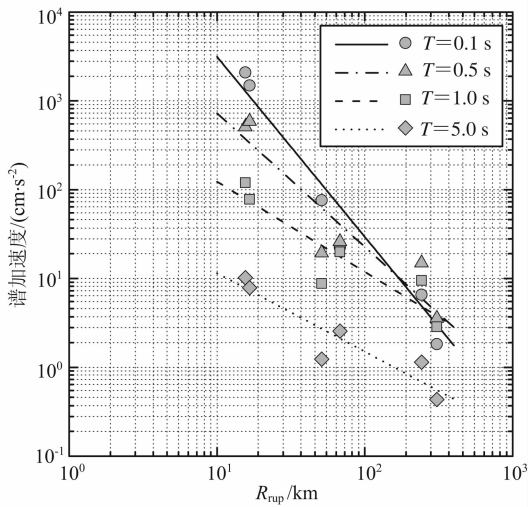


图 11 基岩台站记录不同周期的谱加速度值衰减特征
Fig. 11 Spectral acceleration of $T=0.1$ s, $T=0.5$ s, $T=1.0$ s, $T=5.0$ s varied by the rupture distance for those six bedrock stations

录的周期 $T=0.1$ s、 $T=0.5$ s、 $T=1.0$ s 和 $T=5.0$ s 的谱加速度值随距离变化规律, 如图 11 所示. 图中 4 条直线为谱加速度值与断层距简单的对数线性关系拟合, 由直线斜率可判断, $T=0.1$ s 的谱加速度值衰减迅速, 至 250 km 之后小于 $T=0.5$ s 和 $T=1.0$ s 的谱加速度值, 而 $T=1.0$ s 和 $T=5.0$ s 的谱加速度值衰减速度基本接近.

6 结论

本文介绍了芦山地震中中国数字强震动观测网络和成都市地震烈度速报网络分别获得的 114 组和 63 组自由场强震动记录基本情况. 从地震动三要素(幅值、持时、频谱)分析了这些记录的特征以及对建筑物结构反应的潜在影响, 从地震动特征角度解释了芦山地震地面运动较强烈而震害相对较轻的原因, 得出了以下几点结论:

- (1) 芦山地震强地面运动 PGA 与较常用的霍俊荣(1989)的中国西南地区的地震动预测方程以及俞言祥和汪素云(2006)的中国西部地区的预测方程较一致, 高于雷建成等(2007)的四川盆地的预测方程和第五代区划图中使用的预测方程(俞言祥等, 2013); PGV 与第五代区划图中使用的预测方程(俞言祥等, 2013)基本一致;
- (2) 芦山地震记录强地面运动 PGA 幅值与汶川地震和集集地震相当, 但 PGV 幅值远低于这两个地震;
- (3) 在等效卓越频率 f_{eq} 即 $PGA/(2\pi PGV)$ 的 1~3 Hz 范围内, 对应我国中小城市和城镇主要建筑物的结构自振频率范围, 芦山地震的 PGV 对应中国地震烈度表中规定的烈度 VIII 以上仅 1 条记录, 对于集集地震和汶川地震, 存在大量记录的 PGV 分布在烈度 VIII 以上, 可解释芦山地震震害相对较轻的原因;
- (4) 回归了两种 Significant 持时 D_{SR} (5%~75%)、 D_{SR} (5%~95%) 和 3 种 Bracketed 持时 D_{BA} (0.025g)、 D_{BA} (0.05g) 和 D_{BA} (0.1 g) 与断层距 R_{rup} 相关的经验关系, 对比已有的经验预测方程, 发现芦山地震 Significant 持时大于 Bommer 等(2009)的全球预测模型, 也大于 Trifunac 和 Brady(1975)的美国加州地区预测模型; 同样 Bracketed 持时也大于 Bommer 等(2009)的全球预测模型, 且衰减速度相对较慢.
- (5) 从回归的芦山地震 Bracketed 持时与距离

相关的经验关系,对比已有研究的集集地震相应经验关系曲线,发现曲线形状较一致,说明了芦山地震与集集地震近断层区域具有近似的地震动持时衰减特征;

(6) 芦山地震典型记录的 5% 阻尼比的加速度反应谱峰值周期都在 0.1~0.2 s 范围内,且远高于设计谱,然而在我国中小城市和城镇主要建筑物的结构自振周期(0.3~1 s)范围内,其谱值远低于设计谱,因而不产生较大破坏影响.另外,在大于 1 s 的中长周期部分谱值更是甚小,仅几十 $\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$ 甚至接近于 0,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、超高层建筑等破坏影响较小.

(7) 由不同距离的基岩台站的反应谱比较显示芦山地震地震动高频成份衰减迅速,周期大于 5 s 的反应谱值衰减速度基本保持一致.

在震后地震现场考察中,作者发现了部分强震动记录可能受到局部场地地形显著影响的现象,如本次地震中由 51BXD 台站获得最大记录,该台站就建在陡峭的山坡上.这些异常记录的地震动分析有待于进一步深入研究.

致谢 感谢三位匿名审稿人提出的宝贵建议,使文章得到了很好的改进.感谢国家强震动台网中心提供的国家台网强震动记录以及感谢广东省珠海市泰德企业有限公司提供的成都市地震烈度速报观测网络的强震动记录.感谢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.感谢美国 USGS 的 David M. Boore 博士、Roger borcherdt 博士和加州大学圣塔芭芭拉分校的 Jamison Steidl 博士在作者参加 2013 年 COSMOS 技术研讨会期间,关于文中相关研究结果进行的探讨与给出的宝贵建议.

References

- Bolt B A. 1973. Duration of strong ground motions. 5th World Conf. Earthq. Eng., Roma, Italy, Vol1, 1304-1313.
- Bommer J J, Martinez-Pereira A. 2000. Strong motion parameters: definition, usefulness and predictability. 12th World Conf. Earthq. Eng., New Zealand: Auckland, paper no. 206.
- Bommer J J, Stafford P J, Alarcon J E. 2009. Empirical equations for the prediction of the significant, bracketed, and uniform duration of earthquake ground motion. *Bull. Seism. Soc. Amer.*, 99(6): 3217-3233.
- Boore D M. 2001. Effect of baseline corrections on displacements and response spectra for several recordings of the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake. *Bull. Seism. Soc. Amer.*, 91(5): 1199-1211.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. 2008. The Chinese seismic intensity scale (GB/T 17742-2008) (in Chinese). Beijing: China Standards Press.
- Hu J J. 2009. Directivity effect of near-fault ground motion and super-shear rupture [Ph. D. Thesis] (in Chinese). Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration.
- Huo J R. 1989. Study on the attenuation laws of strong earthquake ground motion near the source [Ph. D. Thesis] (in Chinese). Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration.
- Kawase H. 2011. Strong motion characteristics and their damage impact to structures during the off pacific coast of Tohoku earthquake of March 11, 2011; How extraordinary was this M9.0 earthquake? 4th IASPEI / IAEE International Symposium: Effects of Surface Geology on Seismic Motion, Santa Barbara, U. S. A., 1-13.
- Kawashima K, Aizawa K. 1989. Bracketed and normalized durations of earthquake ground acceleration. *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, 18(7): 1041-1051.
- Lei J C, Gao M T, Yu Y X. 2007. Seismic motion attenuation relations in Sichuan and adjacent areas. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 29(5): 500-511.
- Liu Q F, Li X J. 2009. Preliminary analysis of the hanging wall effect and velocity pulse of the 5.12 Wenchuan earthquake. *Earthq. Eng. Eng. Vib.*, 8(2): 165-177.
- Lu S N, Zhai C H, Xie L L. 2013. Characteristics of duration of ground motion during the Wenchuan earthquake. *J. Earthq. Eng. Eng. Vib.* (in Chinese), 33(2): 1-7.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. 2010. Code for seismic design of buildings (GB50011-2010) (in Chinese). Beijing: China Architecture & Building Press.
- Ren Y F, Wen R Z, Yamanaka H, et al. 2013. Site effects by generalized inversion technique using strong motion recordings of the 2008 Wenchuan earthquake. *Earthq. Eng. Eng. Vib.*, 12(2): 165-184.
- Trifunac M D, Brady A G. 1975. A study on the duration of strong earthquake ground motion. *Bull. Seism. Soc. Amer.*, 65(3): 581-626.
- Wang D, Xie L L, Abrahamson N A, et al. 2010. Comparison of strong ground motion from the Wenchuan, China, earthquake of 12 May 2008 with the Next Generation Attenuation (NGA) ground-motion models. *Bull. Seism. Soc. Amer.*, 100(5B): 2381-2395.
- Wang G Q, Zhou X Y, Zhang P Z, et al. 2002. Characteristics of amplitude and duration for near fault strong ground motion from the 1999 Chi-Chi, Taiwan Earthquake. *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, 22(1): 73-96.
- Wang W M, Hao J L, Yao Z X. 2013. Preliminary result for

rupture process of Apr. 20, 2013 Lushan Earthquake, Sichuan, China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 56(4): 1412-1417.

Wen R Z, Ren Y F, Huang X T, et al. 2013. Strong motion records and their engineering damage implications for Lushan Earthquake on April 20, 2013. *J. Earthq. Eng. Eng. Vib.* (in Chinese), 33(4): 1-14.

Yu Y X, Li S Y, Xiao L. 2013. Development of ground motion attenuation relations for the new seismic hazard map of China. *Technology for Earthquake Disaster Prevention* (in Chinese), 8(1): 24-33.

Yu Y X, Wang S Y. 2006. Attenuation relations for horizontal peak ground acceleration and response spectrum in Eastern and Western China. *Technology for Earthquake Disaster Prevention* (in Chinese), 1(3): 206-217.

霍俊荣. 1989. 近场强地面运动衰减规律的研究[博士论文]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所.

雷建成, 高孟潭, 俞言祥. 2007. 四川及邻区地震动衰减关系. *地震学报*, 29(5): 500-511.

卢书楠, 翟长海, 谢礼立. 2013. 汶川地震中强震持时的特征研究. *地震工程与工程振动*, 33(2): 1-7.

中华人民共和国住房和城乡建设部. 2010. 建筑抗震设计规范 (GB50011-2010). 北京: 中国建筑工业出版社.

王卫民, 郝金来, 姚振兴. 2013. 2013 年 4 月 20 日四川芦山地震震源破裂过程反演初步结果. *地球物理学报*, 56(4): 1412-1417.

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. *地震工程与工程振动*, 33(4): 1-14.

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. *震灾防御技术*, 8(1): 24-33.

俞言祥, 汪素云. 2006. 中国东部和西部地区水平向基岩加速度反应谱衰减关系. *震灾防御技术*, 1(3): 206-217.

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 2008. 中国地震烈度表 (GB/T 17742-2008). 北京: 中国标准出版社.

附中文参考文献

胡进军. 2009. 近断层地震动方向性效应及超剪切破裂研究[博士论文]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所.

(本文编辑 汪海英)