

利用地脉动 *HVSR* 研究 2014 年 鲁甸 6.5 级地震场地效应^{*}

林国良, 张 潜, 崔建文, 赵 昆, 杨黎薇

(云南省地震局, 云南 昆明 650224)

摘要: 2014 年鲁甸 6.5 级地震导致龙头山镇位于洪积扇上的大量房屋倒塌, 而位于河流阶地上的房屋破坏相对较轻。为找出造成该震害差异的原因, 在龙头山镇布设间距 50 ~ 200 m 的高密度观测台阵进行连续地脉动观测, 采用 *HVSR* 谱比法来研究该地区的场地地震响应, 确定场地的卓越频率和放大系数。结果表明: *HVSR* 谱比结果与钻孔资料给出的结果较为一致, 位于洪积扇上的场地 *HVSR* 峰值频率介于 1.5 ~ 5.0 Hz, 河流阶地上的峰值频率多介于 6.0 ~ 10 Hz, 卓越频率值相对较小 (5 Hz 以下) 的场地与地震中破坏最严重的区域较为相符。

关键词: 龙头山; 地脉动; 谱比法; 场地效应; 鲁甸地震

中图分类号: P315.914

文献标志码: A

文章编号: 1000-0666(2019)04-0531-07

0 引言

地震波经过土层传播会引起砂土液化、地震波放大、能量衰减等现象, 因而在地震波动态加载下的土层条件变化将很大程度上影响地震的破坏情况, 导致相邻区域的地震破坏程度也会截然不同。国内外多次地震事件表明, 松软土层场地比硬土或基岩场地在地震中的震害更为严重(魏勇等, 2018)。2014 年 8 月 3 日云南省昭通市鲁甸县 (27.1°N, 103.3°E) 发生 6.5 级地震, 震源深度为 12 km。地震造成大量的房屋倒塌和人员伤亡。与云南其它地区同等级地震相比, 该地震伤亡更重, 而且在地震烈度为Ⅸ度极震区的龙头山镇镇政府所在地, 呈现出 2 种截然不同的破坏现象, 对此震害差异原因有必要进行深入研究。

研究局部场地效应的方法主要有传统谱比法 (Borcherdt, 1970)、*HVSR* (Horizontal to vertical spectral ratio) 谱比法 (Nakamura, 1989)、数值解析法 (Moya *et al*, 2000)、广义反演法 (任叶飞等, 2013; Wang *et al*, 2018) 等, 各种方法均有优

缺点及其使用范围。*HVSR* 谱比法因其能快速简单地获取场地和结构的动态特性而被广泛应用 (Konno, Ohmachi, 1998; Zaslavsky *et al*, 2008)。本文对龙头山镇场地进行高密度地脉动观测, 采用 *HVSR* 谱比法计算获取各个测点的卓越频率和振幅峰值, 结合地震记录、场地内勘探钻孔资料将计算结果与场地条件、建筑破坏程度进行对比分析, 探讨场地条件对地震震害的影响。

1 *HVSR* 谱比法

HVSR 谱比法是 Nakamura 建立在 Borcherdt (1970) 在参考基岩台传统谱比法的基础上提出来的的一种单台场地效应评估方法, 用记录到的环境噪声信号 (0.005 ~ 2 s) 能对场地土层特性的卓越频率 (*HVSR* 峰值频率或周期) 及场地放大系数做出较好估计, 该方法优点在于能消除震源、传播路径和仪器响应的影响。假设某一场地水平分量的经验传递函数可表示为:

$$TF = \frac{A_{SH}(f)}{A_{BH}(f)} \quad (1)$$

^{*} 收稿日期: 2019-06-10.

基金项目: 中国地震局地球物理研究所中央级公益性科研院所基本科研业务费专项 (DQJB18B16) 和云南省地震局青年地震科学基金资助项目 (2019ZX02) 联合资助。

经变换可得:

$$TF = \frac{A_{SH}(f)}{A_{BH}(f)} \times \frac{A_{SV}(f)}{A_{BV}(f)} \times \frac{A_{BV}(f)}{A_{BV}(f)} \\ = HVR_S \times TF_V \times \frac{1}{HVR_B} \quad (2)$$

式中: TF 为传递函数; H 表示水平分量; V 表示竖直分量; $A_{XV}(f)$ 表示傅里叶幅值谱, X 取 S 代表地表; B 代表基岩; Y 表示分量类型 (垂直分量和水平分量); HVR 表示水平向与竖直向傅里叶幅值谱谱比。由 Nakamura 方法的基本假定, 即井下基岩处加速度记录水平向和垂直向振幅谱一致, 故 $HVR_B = 1$, 地表土层台站与井下基岩处垂直分量振幅谱相近, 故 $TF_V \approx 1$, 综上则有:

$$TF = \frac{A_{SH}(f)}{A_{SV}(f)} = HVR_S \quad (3)$$

Nakamura 曾利用日本井下微地震动观测实验

证明以上 2 个假设成立; 马淑芹等 (2001) 用唐山响堂强震观测台阵地面和井下加速度记录进行研究, 也证明了这 2 个假设的真实性。Albarelo (2001)、Mucciarelli 等 (2003) 从试验和理论方面对该方法进行验证, 证明 $HVSR$ 谱比法在得到场地的卓越频率方面具有较好的稳定性, 而峰值振幅对场地地震动放大系数具有参考意义。

2 龙头山镇地脉动观测与数据分析

2014 年鲁甸地震后, 云南省地震局利用 TAG-33M 三通道一体化力平衡加速度仪获取由龙头山镇极震区 114 个测点组成的高密度观测台阵观测到的场地响应数据 (图 1), 其中龙头山测区测点间距约为 50 m, 地势较为平坦的骡马口测区测点间距约为 100 ~ 200 m。以 200 Hz 采样率、0.005 s 采样间隔, 在无风无雨的环境条件下观测一昼夜。



图 1 龙头山镇地脉动观测台阵

Fig. 1 The microtremor observation array in Longtoushan

每个测点获得一昼夜数据, 选择人为干扰较少时段 (30 min ~ 1 h), 进行基线校正去除异常趋势, 再经过巴特沃斯带通滤波器滤波 (0.1 ~ 10 Hz) 得到预处理数据。然后采取与传统地震事件触发长短时窗平均算法 (STA/LTA) 相反的方法剔除异常

信号, 得到较为稳定的数据, 其中短时窗 STA 窗长取 1 s、长时窗 LTA 窗长取 25 s、 STA/LTA 比值范围为 0.2 ~ 2.5。最后数据被 25 s 的时窗截取为多段 (图 2a 中不同颜色矩形窗), 分别计算每个时窗的水平向和垂直向傅里叶谱, 得到 $HVSR$ 谱比结果,

最后用 5% 余弦边瓣和平滑系数为 40 的 Konno - Ohmachi 平滑方法进行平滑(陈棋福等,2008)。所有时窗的 HVSR 谱比结果的平均值构成测点的 HVSR 谱比曲线,曲线的峰值振幅及所对应频率即

为测点场地的放大系数和卓越频率(图 2b ~ e 中黑色实线为 HVSR 平均值,彩色实线为每个波窗的 HVSR 曲线,上下黑色虚线为所有波窗 HVSR 结果的标准差)。

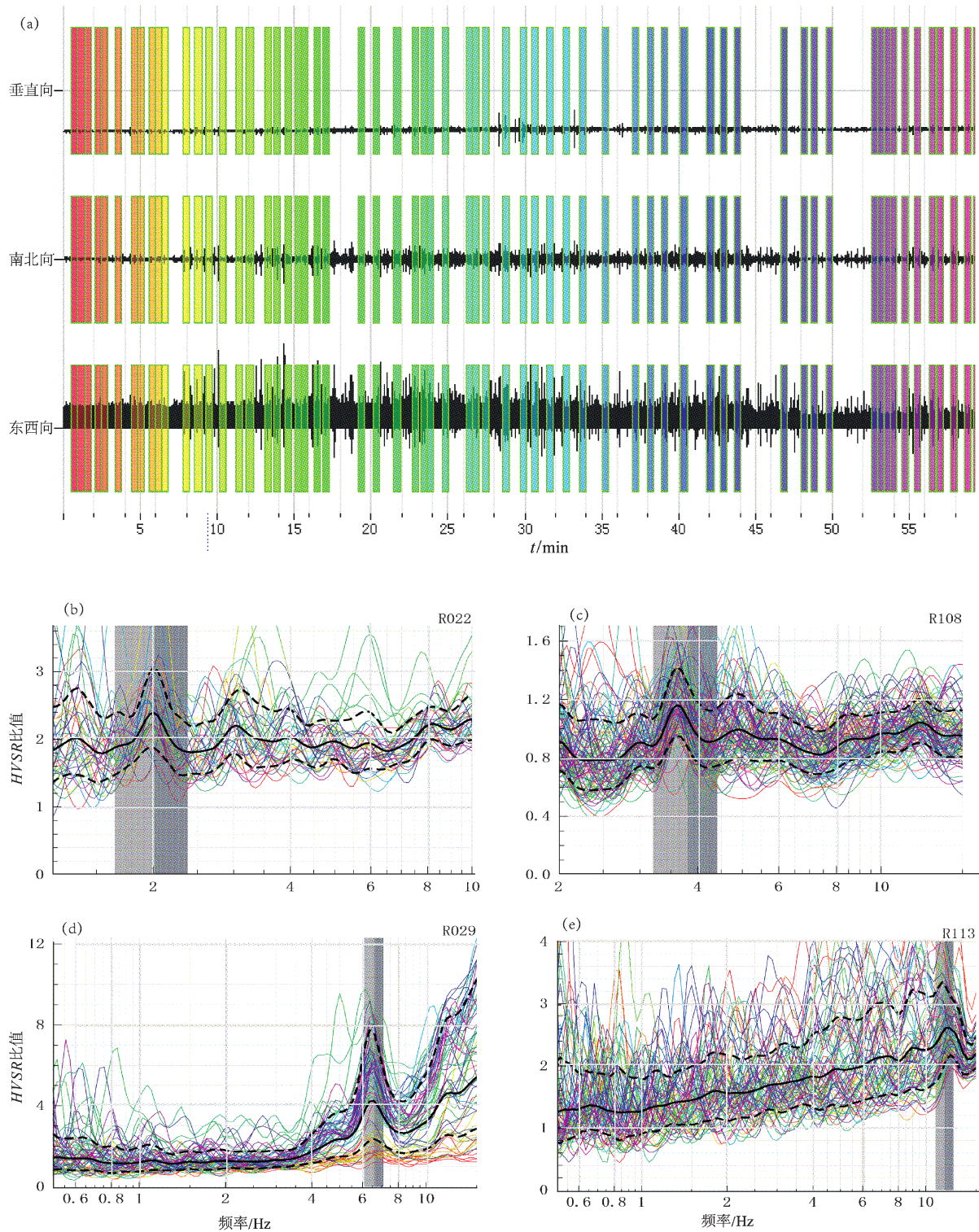


图2 HVSR 波窗选择及计算结果

Fig. 2 HVSR windows selection and the calculation results

3 结果与讨论

3.1 卓越频率与放大系数

图 3a 为 2014 年鲁甸地震极震区龙头山镇的 114 个测点的 *HVSR* 谱比曲线得出的卓越频率分布图。由图可见,卓越频率主要分布在 1.5 ~ 12.2 Hz,其中 3 Hz 以下测点 5 个,3 ~ 5 Hz 测点 21 个,5 ~ 8 Hz 测点 47 个,8 Hz 以上测点 41 个。因测试使用仪器类型一致且测试时间段相同,数据处理程序化,*HVSR* 谱比结果(图 2)多数具有单一明显峰值,卓越频率在龙头山地区亦呈现出规律性分布特征,故一定程度上能较有效地估计出场地卓越频率。卓越频率最高出现于骡马口山边基岩出露的地方,

卓越频率较低地区集中分布于龙头山镇镇府所在地及骡马口缓坡地带。震后建筑物震害调查显示,龙头山镇政府所在地,是此次地震造成房屋损毁最严重、人员伤亡最多的地方,此外房屋损毁最为严重的区域主要集中在洪积扇上,而建在龙泉河河流阶地上的建筑物破坏程度相对较轻,故李西等(2014)认为场地条件在此次地震破坏中起到了放大效应。龙头山镇政府所在区域位于洪积扇上,*HVSR* 峰值频率为 1.5 ~ 5.0 Hz,而河流一级阶地区域的峰值频率为 6.0 ~ 10 Hz;骡马口广场附近 *HVSR* 峰值频率为 1.5 ~ 5.0 Hz,随着逐渐靠近山体,卓越频率逐渐增大。该地区场地卓越频率分布较为规律,成条带状分布,卓越频率相对较小(5 Hz 以下)的区域与地震中破坏最严重的地区较吻合。

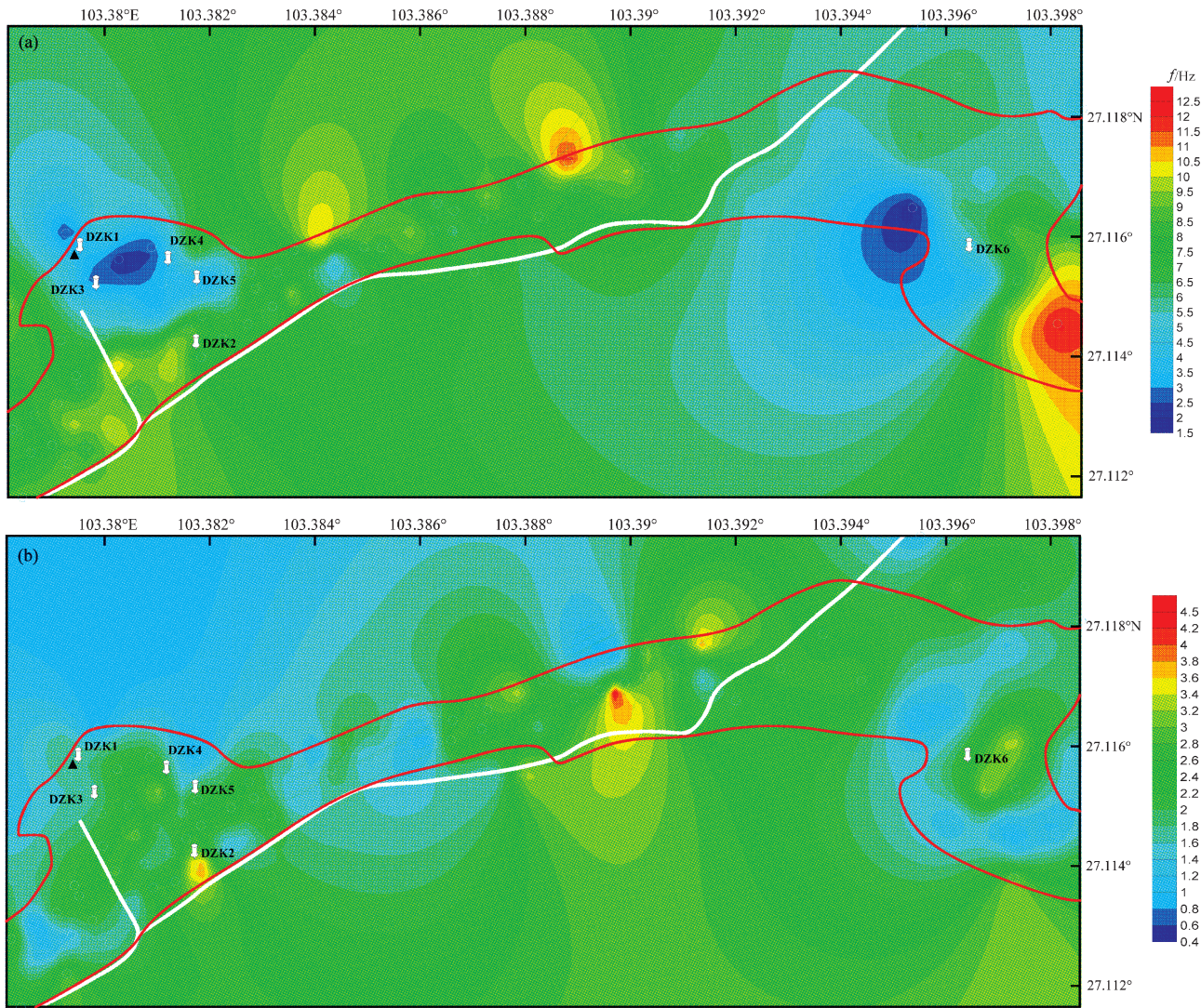


图 3 龙头山镇卓越频率分布图(a)和对应放大系数分布图(b)

Fig. 3 The Predominant frequency distribution and amplification factor of Longtoushan

图 3b 为龙头山镇卓越频率对应的场地放大系数,从图中可看出放大系数分布规律性不强,其值为 0.8~4.9,即使位于同一类场地条件的测点,其值也会存在较大差异。骡马口和河流阶地测点出现的高频率值对应的放大系数较低,说明基岩或硬土场地的放大效应作用不明显。破坏最严重的龙头山镇政府附近区域的放大系数为 3.0 左右,存在一定的放大作用。但龙头山镇政府东侧河流阶地上的卓越频率较高的测点出现部分 3.0~4.0 放大系数,这可能是因为这些测点离龙泉河较近,且多位于灾民安置帐篷内,受到河流湍急流水环境噪声和人为干扰因素越大,计算出的 HVSR 谱比值越高。

3.2 强震记录

震中距不足 5 km 的龙头山强震台获取到我国迄今为止极震区记录到的最大的加速度峰值,其东西、南北和竖向的峰值加速度分别为 948.5 cm/s^2 、 -704.9 cm/s^2 和 503.8 cm/s^2 。该记录的加速度傅

里叶谱显示主频为 1~4 Hz;反应谱显示,0.06~1 s 的周期内,东西、南北 2 个方向具有近 2 个重力加速度的平台(崔建文等,2014)。龙头山镇的建筑物多为 4 层以下,根据《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)的规定,该类建筑的卓越频率在 2.5~5 Hz。无论是台站附近 24 号测点 HVSR 谱比结果(4.5 Hz)、还是强震动记录傅里叶谱和反应谱的特征周期均与房屋的卓越频率较为接近,这是造成震害非常严重的重要原因之一。

3.3 场地条件和震害情况

云南省地震局组织的震后地震科学考察队在龙头山镇开展钻探和岩土测试工作,共确定 6 个钻探点,其位置及勘探结果分别见图 1 和表 1。6 个点建筑场地类别均为 II 类,Dzk1~Dzk5 为以洪积层(密实砂卵石,坚硬粘土)为代表的硬而厚的中硬场地土,Dzk6 为以冲积层为代表的软而厚的中软场地土。

表 1 龙头山钻孔波速和脉动测试结果

Tab. 1 The borehole wave velocity and microtremor test results of Longtoushan

钻孔 编号	位置	土层厚度/ m	等效剪切波速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	场地地质 评价	场地 类别	Parolai 等(2002) 卓越频率/Hz	金井清(1987) 卓越频率/Hz
Dzk1	强震台	26	270	中硬土	II	2.56	2.6
Dzk2	龙泉中学篮球场	7.8	376	中硬土	II	6.1	12.0
Dzk3	镇政府西侧公路边坡	24.3	368	中硬土	II	2.69	3.8
Dzk4	龙头山镇幼儿园	30.1	339	中硬土	II	2.31	2.8
Dzk5	龙头山镇老街子	21.8	349	中硬土	II	2.91	4.0
Dzk6	龙头山镇骡马口广场	18.7	246	中软土	II	3.25	3.3

从表 1 中可看出位于龙头山镇政府东侧的镇幼儿园覆盖层最厚,以龙头山镇老街子为界上部厚度在 21 m 以上,从强震动台站往下厚度依次降低,到河流阶地的龙泉中学覆盖层厚度仅为 7.8 m,较好地印证了龙头山镇政府附近区域位于洪积扇上。利用关系式 $h = 96f^{-1.388}$ (Parolai *et al.*, 2002), 以及 $f = V_s/4h$ (金井清, 1987), 分别根据 6 个钻孔点的覆盖层厚度和等效剪切波速可推测出场地卓越频率(表 1)。2 种公式推测的场地卓越频率除河流阶地上的钻孔点 Dzk2 外结果较为一致。而根据 HVSR 谱比法得到 6 个钻孔点附近测点的卓越频率分别为:24 号测点(Dzk1 附近)4.5 Hz、29 号测点(Dzk2 附近)6.59 Hz、23 号测点(Dzk3 附近)2.7 Hz、21 号测点(Dzk4 附近)2.36 Hz、40 号测点(Dzk5 附近)3.5 Hz、108 号测点(Dzk6 附近)3.8 Hz, 与 Parolai

等(2002)关系式得到的频率比较吻合,而 Dzk1 钻孔点获取的高频卓越频率 4.5 Hz 可能与强震动台站所在财政所在建办公大楼时的低速回填土有关,王伟君等(2009)曾利用观测台阵证实了低速回填土导致较高谱比峰值频率的结果。

此次地震极震区龙头山镇的房屋建筑结构主要以砖混结构、框架结构、简易房屋为主。其中简易房屋包括土木结构房屋和砖木房屋结构,在地震中多数倒塌或局部倒塌,未倒塌的房屋墙体开裂严重。占比较高的砖混结构房屋多数承重墙体出现较严重的水平或“X”型贯通裂缝,部分倒塌或局部倒塌。框架结构房屋个别倒塌或局部倒塌,部分房屋梁柱出现细微裂缝,多数房屋填充墙明显出现水平或“X”型贯通裂缝。图 4 为龙头山镇房屋出现的不同建筑结构破坏情况。值得注意的是相同的建

筑结构房屋,位于洪积扇部位的倒毁非常严重,如图 4a 位于洪积扇上镇政府西侧的三层砖混结构底层坐平(卓越频率:2.7~3.5 Hz),图 4b 位于镇政府南侧的龙头山镇老街砖混房屋倒毁(卓越频率 3.6~4.4 Hz),图 4c 位于镇政府东侧的三层砖混幼儿园出现墙体倒塌或严重开裂(卓越频率 2.3~4.2 Hz),图 4f 位于骡马口村广场附近的砖混结构房屋倒毁严重(卓越频率 3.3~3.7 Hz);而位于河流阶地上的龙泉中学至进镇桥头一带破坏相对较轻,没有出现倒毁的情况,仅部分房屋梁柱

出现细微裂缝或墙体出现 X 型裂缝,如图 4d 位于河流阶地上中学建筑墙体出现水平或“X”型裂缝,震后尚可用于应急宿舍(卓越频率 6.6~9.8 Hz),图 4e 位于河流阶地上民住商用房屋仅少量出现裂缝,基本完好(卓越频率 6~9.9 Hz)。出现这种震害差异除了考虑建筑结构的抗震性能外,建筑所处的场地条件和地形地貌也起着比较重要的作用。*HVSR* 谱比法确定的卓越频率所反映的场地效应能与钻孔资料较好地对应,与地震中所呈现的这种小范围的震害差异吻合较好。



图 4 龙头山镇不同类型建筑结构破坏情况

Fig. 4 Different types of damage cases

4 结论

2014 年鲁甸 6.5 级地震中在极震区龙头山镇位于洪积扇上的建筑破坏严重,而位于河流阶地上的建筑破坏较轻,场地效应所表现出来的震害差异尤为明显。为找出该震害差异的原因,本文利用地脉动观测数据,采用 *HVSR* 谱比法获取了龙头山镇高分辨率的卓越频率和放大系数结果,并与钻孔资料进行对比,得到如下结论:

该地区场地卓越频率分布较为规律,成条带状分布,洪积扇上 *HVSR* 峰值频率为 1.5~5.0 Hz,河流阶地上的峰值频率为 6.0~10 Hz,骡马口 *HVSR* 峰值频率为 1.5~12.2 Hz。总体上卓越频率值相

对较小(5 Hz 以下)的场地与地震中破坏最严重的区域较为相符,破坏最严重的龙头山镇老街和骡马口村广场附近的场地卓越频率均在 4~5 Hz,与房屋的自振周期相近,是加重震害的重要原因之一。放大系数分布规律性不强,其值 0.8~4.9,骡马口和河流阶地测点出现的 2 处高频率值对应的放大系数出现较低值,说明基岩或硬土场地条件的场地放大效应作用不明显,龙头山镇政府附近区域的放大系数在 3.0 左右,存在一定的放大作用。

HVSR 谱比法获取的峰值频率,与在龙头山开展的地震科学考察钻探工作获取的钻孔资料所推测结果较为一致,说明地脉动谱比法在场地卓越频率、场地类别划分甚至高分辨率的三维结构探测方面具有一定的可行性。

地震中建筑所处的场地条件直接影响建筑结构的破坏程度,因而在抗震设计中应充分考虑土层的动力特性对建筑结构的影响。

参考文献:

- 陈棋福,刘澜波,王伟君,等. 2008. 利用地脉动探测北京城区的地震动场地响应[J]. 科学通报,53(18):2229–2235.
- 崔建文,刘琼仙,段建新,等. 2014. 2014 年云南鲁甸 6.5 级地震强震动观测记录及初步分析[J]. 地震研究,37(4):542–548.
- 李西,张建国,谢英情,等. 2014. 鲁甸 $M_s6.5$ 地震地表破坏及其构造的关系[J]. 地震地质,36(4):1280–1291.
- 金井清. 1987. 工程地震学[M]. 北京:地震出版社,83–84.
- 马淑芹,龚绍京,栗连弟,等. 2001. 使用地面单台三分向地震记录资料评估场地效应方法的研究[J]. 西北地震学报,23(3):269–273.
- 任叶飞,温瑞智,山中浩明,等. 2013. 运用广义反演法研究汶川地震场地效应[J]. 土木工程学报,46(增刊2):146–151.
- 王伟君,刘澜波,陈棋福,等. 2009. 应用微动 H/V 谱比法和台阵技术探测场地响应和浅层速度结构[J]. 地球物理学报,52(6):1515–1525.
- 魏勇,崔建文,王秋良,等. 2018. 基于合成地震动的 2014 年鲁甸 $M_s6.5$ 地震场地效应分析[J]. 地震研究,41(1):32–37.
- Albarelo D. 2001. Detection of spurious maxima in the site amplification characteristics estimated by the *HVSR* technique[J]. Bulletin of the Seismological Society of America,91(4):718–724.
- Borcherdt R D. 1970. Effects of local geology on ground motion near San Francisco bay[J]. Bulletin of the Seismological Society of America,60(1):29–61.
- Konno K, Ohmachi T. 1988. Ground – motion characteristics estimated from spectral ratio between horizontal and vertical components of microtremor[J]. Bulletin of the Seismological Society of America,88(1):228–241.
- Moya A, Aguirre J, Irikura K. 2000. Inversion of source parameters and site effects from strong ground motion records using genetic algorithms[J]. Bulletin of the Seismological Society of America,90(4):977–992.
- Mucciarelli M, Gallipoli M R, Arcieri M. 2003. The stability of the horizontal – to – vertical spectral ratio of triggered noise and earthquake recordings[J]. Bulletin of the Seismological Society of America,93(3):1407–1412.
- Nakamura, Y. 1989. A Method for Dynamic Characteristics Estimation of Subsurface Using Microtremor on the Ground Surface[J]. Quarterly Report of Railway Technical Institute (RTRI),30(1):25–33.
- Parolai S, Bormann P, Milkereit C. 2002. New relationship between V_s , thickness of sediments, and resonance frequency calculated by the H/V ratio of seismic noise for the Cologne area (Germany) [J]. Bulletin of the Seismological Society of America,92(6):2521–2527.
- Wang H W, Ren Y F, Wen R Z. 2018. Source parameters, path attenuation and site effects from strong – motion recordings of the Wenchuan aftershocks (2008 – 2013) using a non – parametric generalized inversion technique [J]. Geophysical Journal International,212(2):872–890.
- Zaslowsky Y, Ataev G, Gorstein M, *et al.* 2008. Assessment of site specific earthquake hazards in Urban areas. A case study: the two of afula, israel and neighbouring settlements[J]. Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata,49(1):93–108.

Determining the Site Effects of the 2014 Ludian $M_s6.5$ Earthquake Using *HVSR* Microtremor Method

LIN Guoliang, ZHANG Qian, CUI Jianwen, ZHAO Kun, YANG Liwei
(Yunnan Earthquake Agenoy, Kunming 650224, Yunnan, China)

Abstract

The $M_s6.5$ earthquake occurred in Ludian County of Yunnan Province, 2014 caused severe damage to a large number of buildings on the pluvial fan, resulting in seriously personnel casualty and the economic loss. However, the damage of buildings on the river terrace was relatively lightly. Therefore, to find out the reason for this differences of damage level, we deployed high density observation array with the interval of 50 – 200m in the Longtoushan Town to measure microtremor continuously, and used the *HVSR* (Horizontal to vertical spectral ratio) method to get the predominant frequency and amplification factor of the site to study the site earthquake effect. We found out that the result of *HVSR* method was consistent with the outcomes from drill data. The *HVSR* predominant frequencies on the pluvial fan were between 1.5 ~ 5.0 Hz, while the ones on the river terrace were between 6.0 ~ 10 Hz, and the sites with relatively small predominant frequencies (less than 5 Hz) were highly consistent with the worst damaged area.

Keywords: Longtoushan; microtremor; spectral ratio; site effect; Ludian earthquake