

文章编号: 1008-2786-(2019)3-382-10

DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000431

# 基于环境噪声及地震数据对斜坡地震动响应特征分析——以芦山仁加斜坡为例

欧剑锋, 罗永红\*, 王运生, 朱兴貌, 张跃跃

(成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 成都 610059)

**摘 要:**“4·20”芦山强震导致震区斜坡动力响应强烈,并诱发大量斜坡次生地质灾害。强震后余震频发,在发震断裂附近芦山双石峡谷下游出口,对仁加水电站进水口边坡地震动效应监测初步揭示,该斜坡中上部峰值加速度放大达 3.4 倍,斜坡放大效应明显,但各监测点场地效应需深入分析。因此,基于对该斜坡环境噪声测试与地震监测数据,采用水平与竖向谱比(H/V)和标准反应谱(SSR)对比分析。研究揭示,该斜坡参考点 H/V 谱比曲线放大系数约为 1.1,场地放大效应微弱;斜坡上部监测点环境噪声揭示 H/V 与 SSR 谱比放大峰值频率约为 13.0 Hz,放大系数为 1.2~1.6。环境噪声与地震监测数据对比表明,其平均谱比曲线峰值频率特征接近,但后者谱比放大系数为 1.6~2.6。综合研究表明,该斜坡场地地质结构较为单一,其动力效应主要受斜坡地形因素较强,斜坡中上部地形放大效应较明显。基于环境噪声与地震数据对比研究斜坡场地效应,两者在场地卓越频率上较一致,而放大系数后者明显强于前者。

**关键词:**“4·20”芦山地震;斜坡地形放大效应;环境噪声;水平与竖向谱比(H/V);标准反应谱(SSR);

**中图分类号:** P467

**文献标志码:** A

国内外大量地震研究表明<sup>[1-4]</sup>,斜坡场地放大效应对地震动运动特征有着显著的影响。通过地震数据定量计算,国外学者对小红山监测时域和频域特征分析,发现斜坡狭长顶部放大系数为平地处的 11 倍<sup>[5]</sup>。Davis 等通过美国圣费尔南多地震数据分析,揭示山顶地震加速度要大于山脚,最大放大系数可达 30 倍,与频率密切相关<sup>[6]</sup>。“5·12”汶川地震之后,通过对青川桅杆梁斜坡和泸定冷竹关等斜坡地震动响应监测表明<sup>[7-8]</sup>,凸出山顶等斜坡部位地震动峰值加速度放大系数可达到 7~8 倍。近年来采用环境噪声测试对场地效应研究取得了较大进

展。通过环境噪声测试研究表明,其频率变化的谐振峰值,能够反映下伏介质的弹性与滞弹等特性<sup>[9]</sup>,使得光谱比技术成为了环境噪声测试的主要手段。基于塞萨洛尼基(希腊北部)环境噪声测试结果证实,H/V 谱比能有效地揭示场地卓越频率<sup>[10]</sup>。对意大利中部滑坡倾向性研究表明,环境噪声测试 H/V 谱比能够有效识别场地地震动响应的方向性<sup>[11]</sup>,为场地不同方向的放大效应研究提供依据。另外,加利福尼亚南部的环境噪声测试 H/V 谱比反映了硬岩场地的共振峰值频域较窄,且随着场地放大效应的增加,光谱卓越频率越来越高,频域也

**收稿日期**(Received date):2019-04-29;改回日期(Accepted date):2019-06-06

**基金项目**(Foundation item):国家创新研究群体科学基金(41521002);地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室开放基金研究资助(SKLG2019K024);国家自然科学基金(41877235)。[Funds for Creative Research Groups of China (41521002); Open Research Funds of State Key Laboratory for Geohazards Prevention and Geoenvironmental Protection (SKLG2019K024); National Natural Science Foundation of China (41877235)]

**作者简介**(Biography):欧剑锋(1994-),男,四川广元人,硕士研究生,主要研究方向:工程地质。[OU Jianfeng(1994-), male, born in Guangyuan, Sichuan province, M. Sc. candidate, research on engineering geology] E-mail:1210260324@qq.com

\* **通讯作者**(Corresponding author):罗永红(1981-),男,博士,副教授,主要研究方向:工程地质。[LUO Yonghong(1981-), male, Ph. D., associate professor, specialized in engineering geology] E-mail:luoyonghong2012@cdut.cn

更加宽,解释了高位点场地低密度和非线性应变在谱比中的表现特征<sup>[12]</sup>。通过对智利圣地亚哥盆地环境噪声测试分析,其场地效应 H/V 谱比特征揭示:(1) H/V 曲线峰值与地下速度有很强的相关性;(2) 峰值振幅较低的 H/V 和平缓的 H/V 曲线有微弱差异;(3) 频域较宽的 H/V 峰值能表明地下结构存在较强的横向变化<sup>[13]</sup>。随着环境噪声测试在场地效应中的广泛应用,学者们对各种可能影响数据质量的监测条件(噪声源、天气、附近结构和地下结构等)做了大量的研究和总结<sup>[14]</sup>,为保证测试结果的准确性提供了重要的依据和参考。大量的研究也证实了环境噪声谱比与地震监测数据谱比具有很好的相关性<sup>[15-19]</sup>。基于此,本文拟采用环境噪声测试并结合已有地震监测数据,对研究区斜坡场地动力效应进行深入分析。

## 1 研究区地质背景

研究区位于雅安市芦山县,地处青藏高原与成都平原的过渡带,地势北高南低,受地质构造影响,

山脉主要走向为北东向,分布在海拔 621 ~ 5346 m,属于构造侵蚀深切切割中山区地貌(图 1(a))。芦山县受龙门山大断裂带的影响,西北方断裂构造发育,其中安县—灌县断层位于研究区西北方向约 4 km 处。研究区地震基本烈度值为Ⅶ度,出露名山组含砾砂岩,灰黑色,基岩表层发育 1 ~ 2 m 的强风化层。研究区监测场地无第四纪覆盖物,地质条件较简单。

芦山地震后,余震频发,张磊<sup>[20]</sup>在该斜坡进行了大量的地震监测,共计 23 次余震事件,其震源分布如图 1(b)。

## 2 斜坡场地环境噪声测试

芦山地震中,基于双石峡沟口右岸仁加电站进水口斜坡地震动响应监测分析揭示<sup>[20]</sup>,该斜坡顶部峰值加速度(PGA)相对参考点(1#点)的最大放大系数可达 3.4 倍,阿里亚斯强度最大值可达 6.9 倍。由此表明,该斜坡在地震作用下的放大效应较明显,但各监测点场地效应需深入分析。因此,针对该斜坡参考点场地以及斜坡上部监测点(图 2),采用中

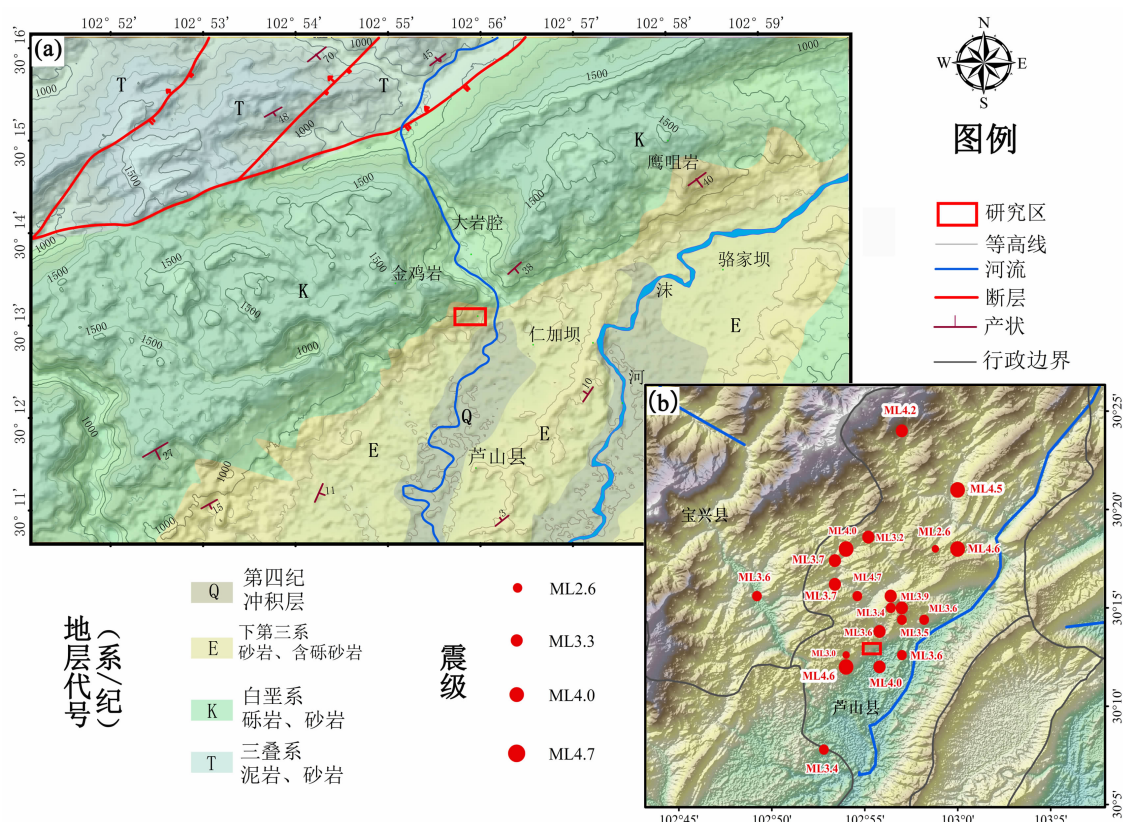


图1 研究区地质图:(a)地质构造;(b)芦山余震分布

Fig.1 Geological map of study area: (a) Geological structure map; (b) Lushan aftershocks distribution map

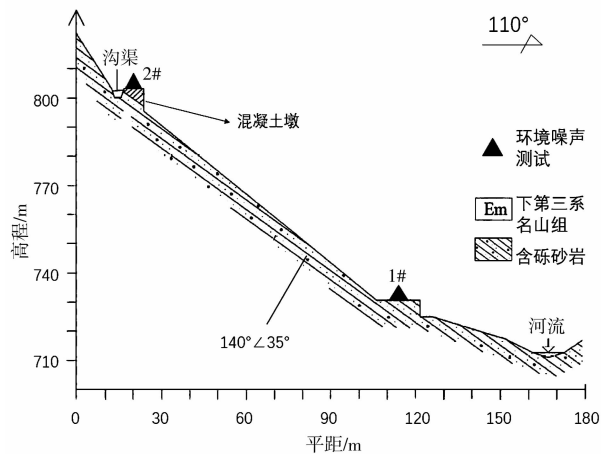


图2 仁加边坡环境噪声测试地质剖面图

Fig. 2 The geological and ambient noise measurements profile of Renjia slope

国地震局工程力学所研发的脉动传感器(QZ2012-E-3型微震速度计)和采集仪(G01NET-3斜坡地震响应监测与速报仪)开展斜坡坡场地环境噪声测试(表1)。2019年1月17日对研究区1#和2#监测点同时进行持续35~40 min的测试,并截取相同时间段的数据进行处理。

表1 传感器及采集仪主要参数

Tab. 1 Main parameters of sensor and acquisition instrument

传感器		采集仪	
灵敏度	0.1 V/mm	采样频率	1~2000 Hz
通频带	0.1~35 Hz	输入量程	-10~10 V
量程	100 mm	分辨率	0.005 mV
位移分辨率	0.001 mm	动态范围	≥120 dB
		通道	24位ADC

3 环境噪声测试结果分析

本次借助 Geopsy<sup>[9]</sup> 软件,采用水平与竖直向谱比(H/V)<sup>[21-22]</sup>方法,对1#和2#监测点进行场地动力响应分析。与此同时,采用标准反应谱比(SSR)<sup>[23]</sup>,对2#场地(以1#点为参照)开展谱比放大效应分析。

3.1 1#监测点 H/V 谱比分析

对1#监测点进行环境噪声测试(图3),结果表明该场地在水平EW方向和水平NS方向的H/V谱比放大系数均趋向于1,水平分量谱比放大效应差异不明显,H/V谱比分析揭示该场地无明显放大或衰减效应。

3.2 2#监测点 H/V 及 SSR 谱比分析

(1) H/V 谱比分析

2#监测点 H/V 谱比分析显示(图4),其水平EW方向放大系数为1.2,水平NS方向放大系数为1.35,峰值频率约为13.0 Hz。其放大系数在水平NS方向略强于水平EW方向。H/V谱比曲线在2 Hz以下置信区间较大,类似分析表明<sup>[14]</sup>其主要受场地风动等环境因素影响(研究区周围存在边坡进水口的持续水流以及风动),但并不影响2~20 Hz数据的准确性。

(2) SSR 谱比分析

2#监测点的环境噪声 SSR 谱比分析(图5)表明,其水平NS方向和水平EW方向的峰值频率在13.0 Hz附近,与其H/V谱比分析结果接近。水平EW方向放大系数为1.4,NS方向放大系数1.6,后

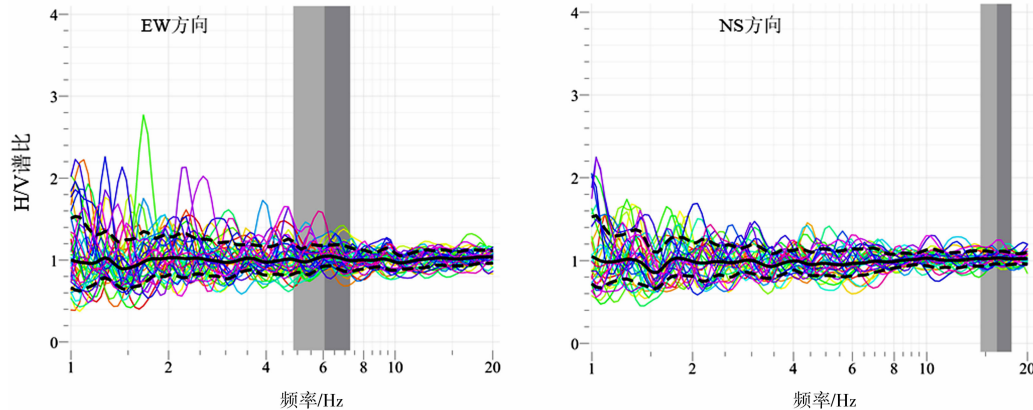


图3 1#监测点环境噪声 H/V 谱比特征

Fig. 3 Ambient noise H/V characteristics of site 1#



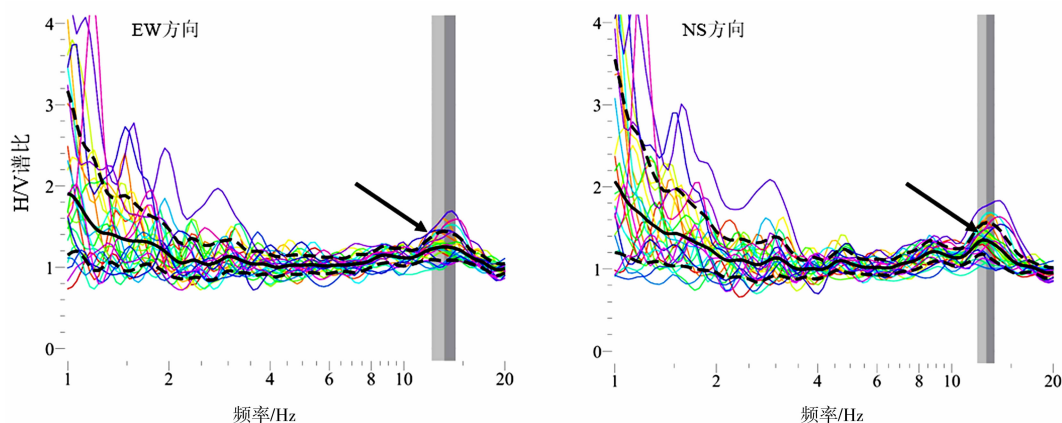


图4 2#监测点环境噪声 H/V 谱比特征

Fig. 4 Ambient noise H/V characteristics of site 2#

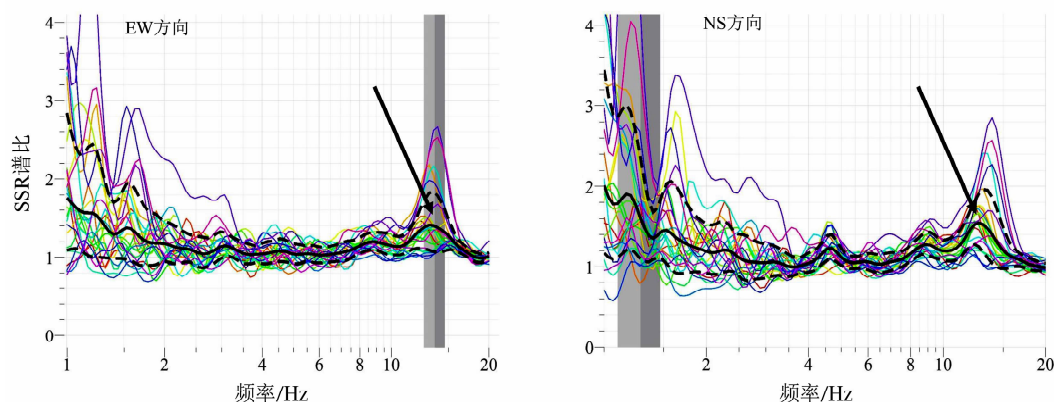


图5 2#监测点环境噪声 SSR 谱比特征

Fig. 5 Ambient noise SSR characteristics of site 2#

者放大效应略强于前者。

## 4 地震监测数据分析

芦山仁加电站斜坡地震响应典型监测数据震源参数特征见表2。

### 4.1 1#监测点 H/V 谱比分析

1#监测点单次余震及其平均值 H/V 谱比(图6),表明该场地 H/V 谱比平均放大系数在水平 EW 和 NS 方向分别为 1.2、1.3,而水平 NS 方向放大系数略强于水平 EW 方向,总体表明斜坡 1#监测场地(参考点)地震动放大效应微弱,可作为参考点对比分析斜坡上部监测点场地动力响应。

### 4.2 2#监测点 H/V 及 SSR 谱比分析

#### (1) H/V 谱比分析

2#监测点单次余震数据及其平均值 H/V 谱比

分析(图7)表明,单次余震谱比放大系数强于平均值。水平 EW 方向的单次余震最大放大系数约为 2.85,在水平 NS 方向则为约 4.0,水平 EW 方向放大系数在 2.0 以上的为 13 次,水平 NS 方向放大系数在 2.0 以上的为 13 次。在水平 EW 方向平均放大系数约为 1.6,水平 NS 方向平均放大系数约为 1.78。水平 NS 方向的单次余震最大放大系数和平均值均高于水平 EW 方向,揭示 2#监测场地放大效应虽具有一定方向性,但并不明显。与此同时,水平 EW 方向峰值频率主要分布在 8~20 Hz,水平 NS 方向峰值频率主要集中在 10~20 Hz,其次为 4~6 Hz,揭示该场地高频共振效应较强。

#### 4.2 2#监测点 H/V 及 SSR 谱比分析

##### (1) H/V 谱比分析

2#监测点单次余震数据及其平均值 H/V 谱比分析(图7)表明,单次余震谱比放大系数强于平均

表 2 芦山仁加电站斜坡地震动响应典型监测数据震源参数特征

Tab.2 Source parameters of typical monitoring data from slope dynamic response of Lushan Renjia Hydropower Station

日期	时间	纬度/(°)	经度/(°)	深度/km	震中距/km	震级值	参考地名
2013-04-21	17:01:54.6	30.26	102.94	20	4.69	ML3.8	四川芦山
2013-04-21	17:30:27.3	30.30	103.00	20	10.78	Ms4.2	四川邛崃
2013-04-21	22:16:55.7	30.30	102.90	20	9.76	Ms4.3	四川芦山
2013-04-22	03:36:37.1	30.20	102.93	20	2.01	ML4.0	四川芦山
2013-04-22	06:21:09.8	30.27	102.89	21	7.24	ML3.7	四川芦山
2013-04-22	09:18:08.7	30.25	102.95	18	3.83	ML3.9	四川芦山
2013-04-23	01:38:03.4	30.24	102.95	12	2.81	ML3.5	四川芦山
2013-04-23	04:20:24.0	30.26	102.91	17	5.33	ML3.4	四川芦山
2013-04-23	05:54:49.5	30.35	103.00	20	15.76	Ms4.5	四川芦山
2013-04-23	22:07:15.7	30.31	102.92	19	10.19	ML4.0	四川芦山
2013-04-24	11:10:50.5	30.23	102.93	19	1.61	ML3.7	四川芦山
2013-04-28	06:34:36.7	30.21	102.95	14	1.43	ML3.6	四川芦山
2013-04-30	01:28:46.1	30.30	102.98	10	10.01	ML2.6	四川芦山
2013-04-30	01:28:01.5	30.31	102.92	23	10.36	ML3.2	四川芦山
2013-05-01	02:14:15.5	30.20	102.90	20	4.09	Ms4.2	四川芦山
2013-05-02	21:16:06.9	30.25	102.94	19	3.68	ML3.6	四川芦山
2013-05-04	19:29:48.6	30.29	102.89	21	9.24	ML3.7	四川芦山
2013-05-05	20:43:18.3	30.21	102.90	14	3.69	ML3.0	四川芦山
2013-05-06	20:06:56.9	30.24	102.97	21	4.06	ML3.6	四川芦山
2013-05-10	12:12:52.0	30.13	102.88	20	11.22	ML3.4	四川天全
2013-05-11	05:55:37.7	30.26	102.82	22	12.25	ML3.6	四川宝兴
2013-05-11	08:50:40.3	30.40	102.95	20	20.45	Ms3.8	四川邛崃

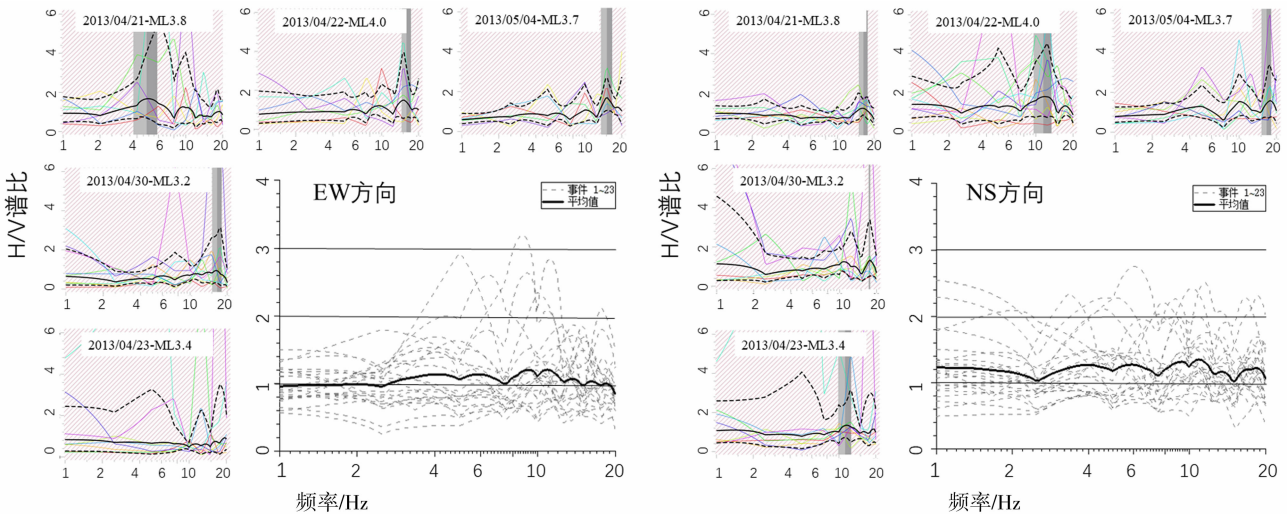


图 6 1#监测点单次余震数据及其平均值 H/V 谱比特征  
Fig.6 Aftershocks data and average H/V characteristics of site 1#

值。水平 EW 方向的单次余震最大放大系数约为 2.85,在水平 NS 方向则为约 4.0,水平 EW 方向放大系数在 2.0 以上的为 13 次,水平 NS 方向放大系数在 2.0 以上的为 13 次。在水平 EW 方向平均放大系数约为 1.6,水平 NS 方向平均放大系数约为 1.78。水平 NS 方向的单次余震最大放大系数和平均值均高于水平 EW 方向,揭示 2#监测场地放大效应虽具有一定方向性,但并不明显。与此同时,水平 EW 方向峰值频率主要分布在 8~20 Hz,水平 NS 方向峰值频率主要集中在 10~20 Hz,其次为 4~6 Hz,揭示该场地高频共振效应较强。

## (2) SSR 谱比分析

参考 1#监测点,对 2#监测点 SSR 谱比分析(图

8)发现,水平 EW 方向的单次余震最大放大系数约为 5.8,水平 NS 方向则约为 6.0。水平 EW 方向放大系数在 2.0 以上的为 20 次,水平 NS 方向放大系数在 2.0 以上的为 16 次。在水平 EW 方向放大系数平均值约为 2.6,水平 NS 方向放大系数平均值约为 1.8,前者放大效应强于后者,揭示了 2#相对于 1#监测点,其水平 EW 方向放大效应较强。水平 EW 方向峰值频率主要分布在 10~20 Hz,水平 NS 方向峰值频率主要集中在 8~20 Hz。

对比 H/V 谱比及 SSR 谱比分析,后者谱比曲线放大系数较前者较强,但二者峰值频率范围较为一致。

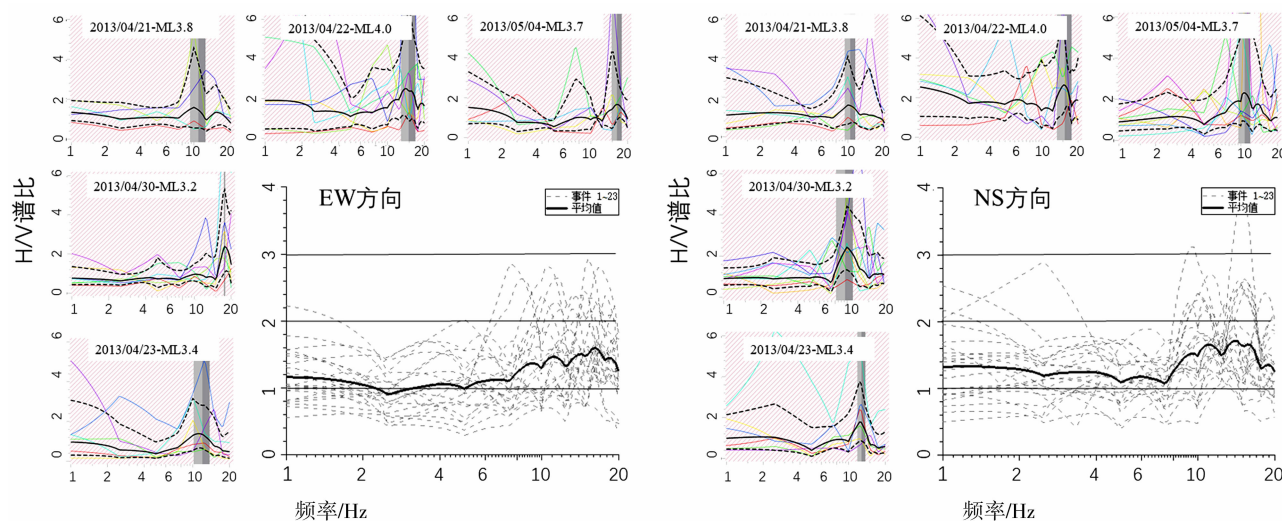


图7 2#监测点单次余震数据及平均值 H/V 谱比特征

Fig. 7 Aftershocks data and average H/V characteristics of site 2#

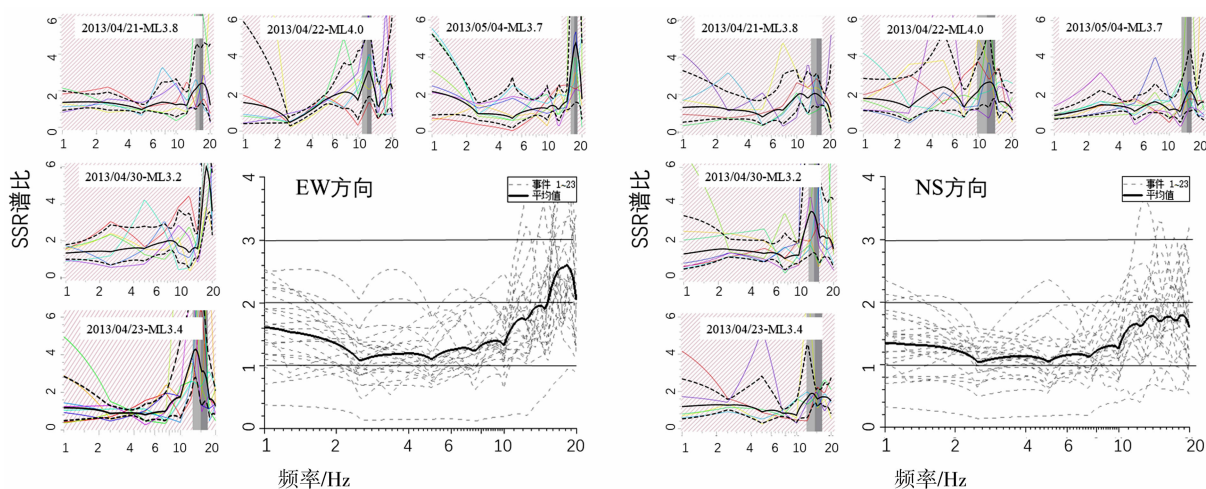


图8 2#监测点单次余震数据及平均值 SSR 谱比特征

Fig. 8 Aftershocks data and average SSR characteristics of site 2#



## 5 基于地震监测数据与环境噪声测试讨论及结论

### 5.1 讨论

由于测试环境存在前缘河水流动和岸坡公路过往车辆等环境噪音的影响,在研究区监测场地测试环境噪声的过程中,对数据处理采用了去噪等滤波方法以降低环境因素的影响。通过对监测数据初步分析发现,该斜坡中上部存在地形放大效应,但是由于采用单个峰值加速度分析并不能反映出参考场地的动力特征,所以本文除了采用两种谱比分析探究参考点的场地效应外,还对两种谱比方法结果进行了对比,结果表明两种谱比分析结果在斜坡上监测点的场地效应较为吻合。进一步对比地震监测数据,其结果如图9所示。

对比显示,1#监测点场地环境噪声与地震数据H/V谱比放大曲线较接近,后者放大系数稍强于前者,与余震所产生地震波通过复杂路径传播至场地导致水平分量增强或者竖向分量存在一定衰减有关,而环境噪声因能量较弱并未出现明显变化。结合该场地调查表明,其地势平坦,无第四系覆盖物,下伏砂砾岩单一岩性,无断层等构造出露,基岩场地地质条件较单一,因此该场地效应受地形和地质等因素影响较微弱,场地无明显放大或衰减效应,这与环境噪声及地震监测数据揭示较为吻合。

通过2#监测点地震数据及环境噪声数据对比发现,水平东西(EW)及南北(NS)方向H/V谱比曲线波动特征基本吻合,尤其是在高频段( $>10$  Hz)峰值频率较为一致。此外,基于相同参考点的SSR分析对比显示了相同放大特征,但地震数据显示的谱比放大系数均强于环境噪声。这种差异波动主要由能量巨大的应力波在地表的反复折射、散射和叠加造成。

分析揭示2#点监测峰值放大频率主要在高频段(8~20 Hz),结合该场地条件分析表明,其监测台站放置在混凝土墩与小型建筑屋构筑室内,根据钢筋混凝土结构经验公式<sup>[24]</sup>( $T = (0.05 \sim 0.1)N$ ,  $N$ 为楼层,此处 $N = 1$ ),对建筑物自震周期进行计算为自震频率为10~20 Hz,与所得到的地震波峰值频率(8~20 Hz)较为吻合,符合线性结构与地震波的共振效应<sup>[25]</sup>。由此表明,该点场地效应高频段放大主要受到小型建筑物影响。与此同时,其低频段场地效应峰值并不明显,呈现宽频放大特征,放大系数为1.0~2.0。与1#参考场地相似,2#场地无覆盖层出露,且岩性出露较单一,无断层构造等出露,由此表明在低频段,该场地放大效应受坡度等地形因素影响。

此外,通过对比2#场地水平东西与南北分量显示,场地方向效应不明显。对比2#监测点平均谱比曲线放大系数为2.6,峰值加速度放大系数为3.4,阿里亚斯强度达到6.9<sup>[20]</sup>,尽管不同方法揭示放大

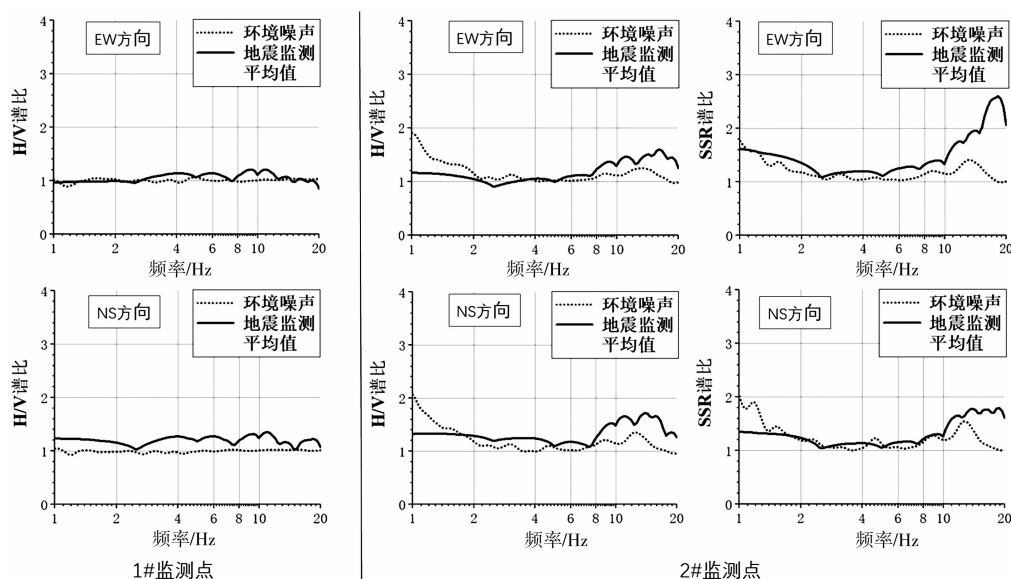


图9 地震监测数据与环境噪声测试平均谱比曲线对比

Fig. 9 Spectral ratio curves comparisons of average seismic monitoring data and ambient noise data

效应差异较大,谱比分析表明该场地放大效应主要体现在高频段,与建筑物结构共振效应相关。震后现场调查与相关研究表明场地放大效应在低频段(1~3 Hz)更加容易产生明显变形或破坏<sup>[26]</sup>,而低频段平均谱比曲线并无明显峰值,两者较为吻合。与此同时,通过分析峰值加速度等参数虽然也揭示了场地效应较强,但可能并不会因此产生斜坡变形或破坏效应(斜坡场地动力破坏较为复杂,与场地地质材料、结构和地形等因素有关,本文仅对其中一项进行分析)。

由于该斜坡场地地质条件单一,监测所得到的结果与结论具有一定的局限性,对于复杂介质场地及地形组合场地的动力效应分析需结合物探、数值模拟等深入研究。

## 5.2 结论

通过对研究区斜坡环境噪声测试与地震数据对比分析,该场地斜坡地震动响应主要特征如下:

(1)水平与竖向谱比研究揭示1#监测点场地谱比曲线平缓,场地放大效应微弱,是较为理想的参考场地。

(2)2#监测点谱比分析结果表明,受该点斜坡地形因素影响,其低频段谱比曲线放大效应可达1~2倍,且无明显峰值特征,高频段放大系数可达2.6,与该点建筑物共振效应相关。

(3)基于H/V谱比及SSR谱比分析揭示,其斜坡场地效应放大峰值频率接近,相对参考场地的变化特征,H/V谱比分析可能更具参考性。

(4)环境噪声与地震监测数据对比研究表明,两者谱比曲线所揭示的峰值频率较为吻合,但后者放大系数大于前者。

## 参考文献(References)

[1] GAUDIO V D, WASOWSKI J. Directivity of slope dynamic response to seismic shaking[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, **34**(12): 107-124.

[2] NOGUCHI S, SASATANI T. Quantification of degree of nonlinear site response [C]. 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China. 2008.

[3] 刘塑宽,查小刚.唐山地震高烈度区场地条件对震害的影响[J].西北地震学报,1982,4(2):67-74. [LIU Sukuan, ZHA Xiaogang. The damage anomaly of 1976 Tangshan earthquake in high intensity region [J]. *Northwestern Seismological Journal*, 1982, **4**(2): 67-74]

[4] 冀昆. 基于H/V谱比法的场地特征研究[D]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2014. [JI Kun. Estimation on site characteristic based on H/V spectral ratio method [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2014]

[5] BUECH F, DAVIES T R, PETTINGA J R. The little red hill seismic experimental study: Topographic effects on ground motion at a bedrock-dominated mountain edifice [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2010, **100**(5A): 2219-2229.

[6] DAVIS L L, WEST L R. Observed effects of topography on ground motion[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1973, **63**(1): 283-298.

[7] 罗永红,王运生,王福海,等.青川县桅杆梁斜坡地震动响应监测研究[J].工程地质学报,2010,18(1):27-34. [LUO Yonghong, WANG Yunsheng, WANG Fuhai, et al. Monitoring of slope seismic response during aftershocks of Wenchuan earthquake in Qingchuan county[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2010, **18**(1): 27-34]

[8] 罗永红,王运生,何源,等.“4·20”芦山地震冷竹关地震动响应监测数据分析[J].成都理工大学学报(自然科学版),2013,40(3):232-241. [LUO Yonghong, WANG Yunsheng, HE Yuan, et al. Monitoring result analysis of Lengzhuguan slope ground shock response of Lushan earthquake of Sichuan, China [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2013, **40**(3): 232-241]

[9] WATHELET M, JONGMANS D, OHRNBERGER M, et al. Array performances for ambient vibrations on a shallow structure and Consequences over Vs inversion[J]. *Journal of Seismology*, 2008, **12**(1): 1-19.

[10] PANOU A A, THEODULIDIS N, HATZIDIMITRIOU P, et al. Ambient noise horizontal-to-vertical spectral ratio in site effects estimation and correlation with seismic damage distribution in urban environment: the case of the city of Thessaloniki (Northern Greece) [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2005, **25**(4): 261-274.

[11] DEL G V, COCCIA S, WASOWSKI J, et al. Detection of directivity in seismic site response from microtremor spectral analysis[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2008, **8**(4): 751-762.

[12] TAYLOR S R, GERSTOFT P, FEHLER M C. Estimating site amplification factors from ambient noise[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, **36**, L09303.

[13] BONNEFOY-CLAUDET S, BAIZE S, BONILLA L F, et al. Site effect evaluation in the basin of Santiago de Chile using ambient noise measurements[J]. *Geophysical Journal International*, 2009, **176**(3): 925-937.

[14] CHATELAIN J L, GUILLIER B, CARA F, et al. Evaluation of the influence of experimental conditions on H/V results from ambient noise recordings[J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*,



- 2008, **6**(1): 33–74.
- [15] MUCCIARELLI M. Reliability and applicability of nakamura's technique using microtremors: an experimental approach [J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 1998, **2**(4): 625–638.
- [16] ZHAO B, LUO YH, WANG YS, et al. Seismic response of steep slopes inferred from ambient noise and accelerometer recordings: The case of Dadu River valley, China [J]. *Engineering Geology*, 2019: 1–24.
- [17] ZASLAVSKY Y, SHAPIRA A, ARZI A A. Amplification effects from earthquakes and ambient noise in the Dead Sea rift (Israel) [J]. *Soil Dynamics & Earthquake Engineering*, 2000, **20**(1): 187–207.
- [18] HORIKE, M. ZHAO B, KAWASE H, Comparison of site response characteristics inferred from microtremors and earthquake shear waves [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2001, **91**(6): 1526–1536.
- [19] RODRIGUEZ V H S. Applicability of the H/V spectral ratio of microtremors in assessing site effects on seismic motion [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2002, **31**: 261–79.
- [20] 张磊, 王运生, 罗永红. 芦山地震仁家村斜坡地震动监测 [J]. *山地学报*, 2015 (3): 339–347. [ZHANG Lei, WANG Yunsheng, LUO Yonghong. Monitoring result analysis of Renjia village slope ground shock response of Lushan earthquake in Sichuan, China [J]. *Mountain Research*, 2015(3): 339–347]
- [21] YAMANAKA H, MASAYUKI T, HIROSHI I, et al. Characteristics of long-period microtremors and their applicability in exploration of deep sedimentary layers [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1994, **84**(6): 1831–1841.
- [22] FIELD, EH, JACOB K H. A comparison and test of various site-response estimation techniques, including three that are not reference-site dependent [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1995, **85**(4): 1127–1143.
- [23] BORCHERDT R D. Effects of local geology on ground motion near San Francisco Bay. *Bulletin of the Seismological Society of America* [J], 1970, **60**(1): 29–61.
- [24] JGJ/T97—2011, 工程抗震术语标准 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011. [JGJ/T97–2011, Term Standard in Earthquake Engineering [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011]
- [25] 罗永红. 地震作用下复杂斜坡响应规律研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2011. [LUO Yonghong. Study on complex slopes response law under earthquake action [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011]
- [26] HARTZELL S H, CARVER D L, KING K W. Initial investigation of site and topographic effects at Robinwood Ridge, California [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1994, **84**(5): 1336–1349.

## Analysis of Slope Dynamic Response Inferred from Ambient Noise and Seismic Data: The Case of Renjia Slope, Lushan County, Sichuan, China

OU Jianfeng, LUO Yonghong\*, WANG Yunsheng, ZHU Xingmao, ZHANG Yueyue

(State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

**Abstract:** “4·20” Lushan macroshock triggered off massive dynamic responses from slopes in shock-hit area and consequently induced a large number of secondary slope failures. In view of frequent aftershocks ensuing from the earthquake, field observation at the downstream exit of Lushan Shuangshi Gorge near the seismogenic fault was conducted to investigate the vibration effect of a slope at the water inlet of Renjia Hydropower Station. It was preliminarily revealed that the peak acceleration in the middle and upper part of the slope was up to 3.4 times, suggesting a significant amplification effect of the slope, but the site effect of each monitoring point was worthy of in-depth analysis. In this research, based on the environmental noise test and seismic monitoring data of the slope, it had performed a comparison analysis of Horizontal to Vertical Spectral Ratio (H/V) with Standard Response Spectral (SSR). The study found that the amplification factor of the H/V curve of the slope at a reference point was about 1.1, indicating a weak site amplification effect. By analyzing the ambient noise at monitoring points on

the upper slope, it suggested that the peak frequency of H/V as well as SSR both were about 13.0 Hz, and the amplification coefficient was 1.2 – 1.6. In comparison with seismic monitoring data, ambient noise had a similar peak frequency characteristics of average spectral ratio curve, but seismic data had a amplification factor of spectral ratio 1.6 – 2.6. In point of comprehensive study, owing to a relatively single geological structure, the dynamic effect of the slope was mainly governed by strong topographic factors, with a considerable topographic amplification effect in the middle and upper part of the slope. By comparative study of slope site effect between environmental noise and seismic data, both had relatively consistent site predominant frequency, whereas the amplification factor of the latter was noticeably stronger than that of the former.

**Key words:** “4 · 20” Lushan earthquake; site effect; ambient noise; horizontal to vertical spectral ratio (H/V); standard spectral ratio (SSR)