

文章编号: 1008-2786-(2019)6-943-12
DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000484

宜宾长宁 M_s 6.0 级地震斜坡动力响应特征

金 刚^{1a}, 王运生^{1b*}, 史丙新², 罗 越^{1b}, 明伟庭^{1a}

(1. 成都理工大学 a. 环境与土木工程学院; b. 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 成都 610059;

2. 四川省地震局, 成都 610059)

摘 要: 地震作用下, 山体发生同震地质灾害, 在山体特定部位相对集中, 破坏程度较大。目前学术界多采取物理模型实验和数值模拟研究这一现象, 较少地采取天然地震下记录到的山体地震动响应数据进行分析。长宁 M_s 6.0 级主震以及 M_s 5.4 级余震触发了布置在石棉南岷河两岸的 3 台强震监测仪, 通过分析记录到的地震数据, 结果表明: (1) 震级的绝对大小决定了同一监测点峰值加速度和阿里亚斯强度 (Arias Intensity) 的大小, 即呈正相关; (2) 覆盖层场地在水平向对地震波能量表现为较为明显的低频放大效应和高频衰减效应, 而在垂直向则不明显; (3) 覆盖层场地水平方向特征周期远大于基岩场地; (4) 山脊部位对地震具有明显的放大效应, 表现为山脊处的水平向峰值加速度与阿里亚斯强度的放大; (5) 覆盖层场地在三分量上均对峰值加速度和阿里亚斯强度均有放大, 尤其是对阿里亚斯强度的放大最为显著。但是放大效应在水平向上要远强于垂直向; (6) 地震动响应规律具有极强的方向性, 水平向放大效应远强于垂直向。本研究为川西北高烈度山区地震危险性评价提供依据和参考。

关键词: 长宁地震; 同震地质灾害; 山体地震动响应

中图分类号: P642

文献标志码: A

地震同震地质灾害严重威胁着人类生命和财产安全。2008 年汶川 M_s 8.0 级特大地震所诱发的崩滑地质灾害其造成的伤亡人数更是占到了总伤亡人数的三分之一^[1], 例如 1600 人在王家岩滑坡中遇难、700 人在北川中学崩塌中遇难。由于对山体的地震动力响应规律的认识不够充分, 在山区进行重大工程建设, 场地选址上没有避开一些地震动力响应强烈的山体部位, 在地震发生时会对建筑设施带来灾难性的后果^[1]。针对这一问题, 国内学者对山体斜坡的地震动响应开展了大量研究。人们发现, 在地震作用下, 山体的某些部位会产生显著的地震动放大效应, 主要集中在山体的局部突出地形、山体

转折处和坡角剧烈变化处^[2]。地震发生时, 其能量以波的形式进行传递, 因此学者们首先从波的角度, 对这一现象展开研究, 揭示了地震波传播过程与山体破坏机理的耦合关系^[3-6]。2008 年汶川大地震的发生后, 基于现场调查和遥感解译, 发现特定地貌单元及山体特定部位处, 同震地质灾害发生概率较大, 如山脊, 山顶部位和背波面^[7-9], 使得学者们开始将研究重点集中到山脊、山顶等特殊部位。随着学者们对地震动响应认识加深和模拟软件发展, 依托物理和数值模拟分析, 逐渐揭示了特定岩土体和特定岩性组合下, 边坡地震动响应规律, 且山体多形峰的放大效应相较于单形峰要更为显著^[10-13], 这也

收稿日期 (Received date): 2019-07-15; 修回日期 (Accepted date): 2019-12-15

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金 (41877235); 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室自主课题项目 (SKLGP2015Z001)。
[National Natural Science Foundation of China (41877235); The Independent Fund of State Key Laboratory of Geo-hazard And Geo-Environment Protection (SKLGP2015Z001)]

作者简介 (Biography): 金刚 (1996-), 男, 河南郑州人, 硕士研究生, 主要从事地质工程与区域稳定性研究工作。[JIN Gang (1996-), male, Zhengzhou, Henan province, M. sc candidate, majored in geological engineering] E-mail: 825200169@qq.com

* 通讯作者 (Corresponding author): 王运生 (1960-), 男, 教授, 主要从事工程地质方面的教学工作。[WANG Yunsheng (1960-), male, professor, principally engaged in engineering geology teaching and research work] E-mail: wangys60@163.com

与实际地震同震灾害启的动部位相吻合。通过在典型剖面设立强震监测点,并分析捕获的天然地震数据,揭示孤立突出山梁相较于中高山斜坡地形,地震峰值加速度放大效应更为显著,山体内部不同水平深度的峰值加速度随着深度的增大而降低,且覆盖层场地存在显著的低频放大和高频衰减效应^[14-17],进一步从实测数据角度进一步研究和证实山体不同部位地震响应差异。但是,由于经费以及台站建设条件等原因限制,目前该研究领域多侧重于构筑山体边坡模型,进行数值或物理模拟。模拟实验所构筑模型是一种理想状态下模型,有时并不能够反映真实状态下的山体地震动响应,这就需要实测地震动数据对模拟实验结果进行科学重复性证明,进一步揭示山体地震动响应规律。基于此,本文拟采用布设在典型监测剖面的强震监测仪所记录到两次地震数据,对山体典型部位动力响应展开研究和重复性证明。

此外,川西北地区高烈度山区城镇逾百处,强震时山地灾害的风险极大。监测点地处石棉县城大渡河和南垭河交汇处,鲜水河断裂东侧。所处场地斜坡出露前震旦纪晋宁期花岗岩,岩体呈镶嵌状,表层风化强烈,每年均有崩塌,滑坡和泥石流发生。因此通过实测数据探究此类地形地貌条件下的山体地震动响应,对于川西北高烈度山区的防灾减灾工作以及地震危险性评价亦意义重大。

1 石棉县南垭河两岸监测数据

1.1 监测点概况与数据来源

汶川地震后,地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室(成都理工大学)依托中国地质调查局项目,在石棉县城布设强震监测点以研究山体地震动响应规律。石棉县强震监测点位于南垭河两岸,右岸鸡公山共布置有 1#和 2#共两个监测点,采集仪放置于盘山公路内侧前震旦纪晋宁期花岗岩体山洞内,公路为硬化水泥路面,车辆往来稀少,因此采集仪工作不受来往车辆的影响。左岸陈家包山脊处布有 3#监测点,采集仪直接放置于硬化水泥地面,无外界干扰,监测点的三维分布如图 1 所示,各监测点的场地属性如表 1。进行地震采集的仪器型号为 GOINET-3 结构与斜坡震动监测仪,由中国地震局工程应力研究所研制。其采集参数:输入量程

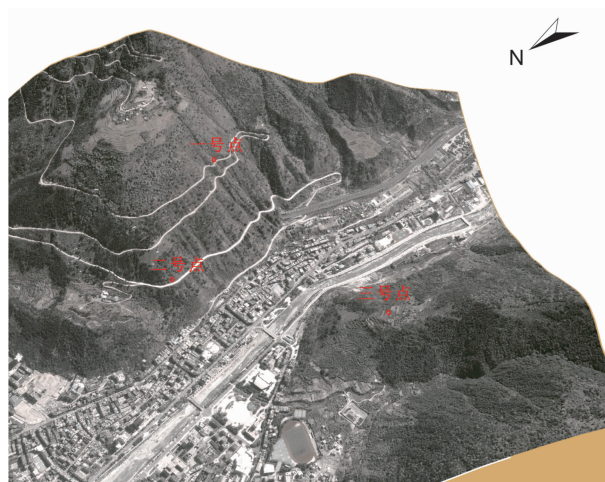


图 1 石棉监测点分布图

Fig. 1 Monitoring sites in Shimian county, Sichuan province, China

1 ~ 10 V, 采集间隔 0.00512 s, 动态范围 ≥ 10 dB。

中国地震台网测定,2019 年 6 月 17 日 22 时 55 分,四川省宜宾市长宁县发生 $M_s 6.0$ 级地震,震中位置长宁县双河镇附近,四川、贵州、云南、重庆等多地有明显震感。自 6 月 17 号以来,3 处监测点共记录到 6.0 级主震和 5.4 级余震共两组监测数据。

1.2 南垭河两岸地震动响应分析

6.17 长宁地震震中双河镇距离石棉县县城约 267 km(图 2)。地震波在传播过程会发生不同程度的衰减^[15],故只有 6.0 级主震和 5.4 级余震被完整记录。对记录到的地震数据进行低通 30 Hz 滤波和校正处理后,各个监测点的地震动响应参数如表 2、表 3 所示;各个监测点的三分量地震波时程曲线如表 4、表 5 所示。

根据表 2、表 3 所示可知,相较于 $M_s 5.4$ 级余震, $M_s 6.0$ 级主震中监测点 1#至 3#的三个方向峰值加速度都有所增加,但增加幅度各不相同,尤其是 3#点的 EW 向峰值加速度放大最为显著,较同在山脊处的 2#监测点放大 3.4 倍;3 个监测点 UD 向峰值加速度增加幅度较小,最大增加幅度为同在鸡公山上的 1#与 2#监测点,其增量为 0.59 gal。在 $M_s 6.0$ 级主震中,监测点记录到的 3 方向峰值加速度全部高于 $M_s 5.4$ 级余震所记录到的峰值加速,这也说明了同一地点的三方向峰值加速度大小取决于震级的绝对大小。

阿里亚斯强度自 1969 年被 Arias 提出后,便被用于量化物体振动能量的大小。当物体发生振动时,一般速度为 0 时,其振幅最大,储存的势能也就

表 1 监测点所在位置场地属性

Tab.1 Properties of each monitoring site

监测点编号	绝对高程/m	震中距/km	监测点所在部位	场地类型	场地坐标
1#	1150	265	山体平坡处	基岩(花岗岩)	29.231306°N,102.369106°E
2#	1060	265	山脊处	基岩(花岗岩)	29.233544°N,102.365023°E
3#	1102	267	山脊处	覆盖层	29.225359°N,102.360941°E

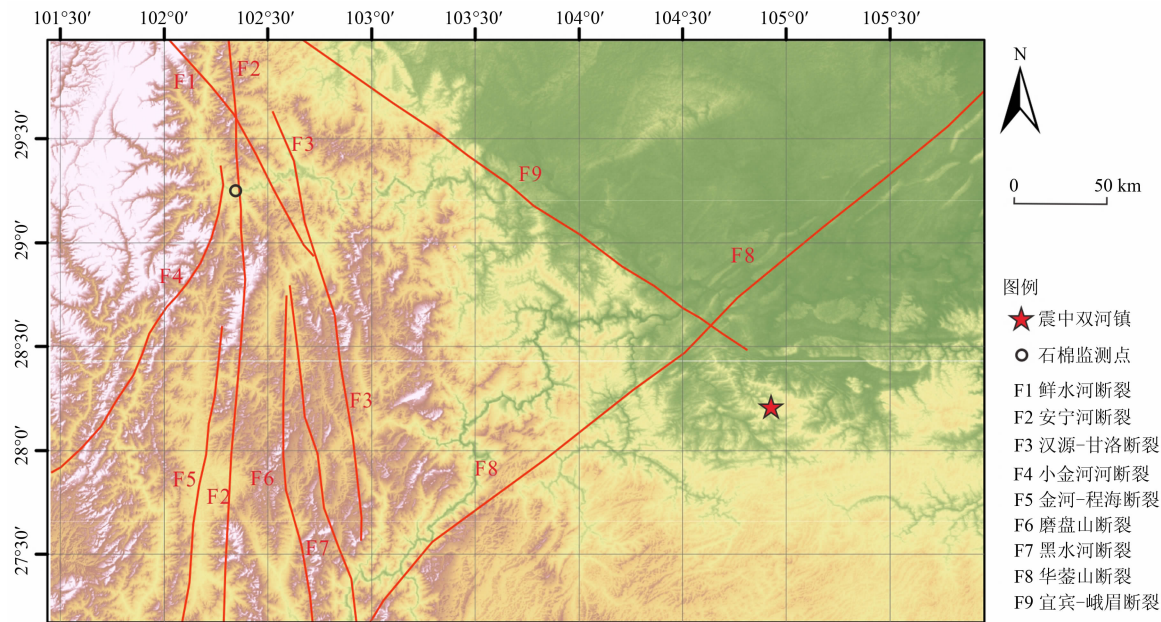


图 2 地震监测点与震中位置关系图

Fig.2 Location of earthquake monitoring sites and epicenter, China

表 2 M_s6.0 级地震各监测点地震响应参数

Tab.2 Parameters of seismic responses of M_s6.0 earthquake at each monitoring site

监测点 编号	峰值加速度/gal			阿里亚斯强度/(cm·s ⁻¹)			主频/Hz		
	EW	SN	UD	EW	SN	UD	EW	SN	UD
1#	1.22	2.94	2.23	0.36	1.22	0.89	0.98	1.94	1.02
2#	2.13	3.64	2.35	0.55	1.80	0.81	3.16	3.20	3.16
3#	7.42	10.18	2.94	15.09	13.26	2.75	1.26	1.01	2.61

注:1 gal=1 cm/s².

表 3 M_s5.4 级地震各监测点地震响应参数

Tab.3 Parameters of seismic responses to M_s5.4 earthquake at each monitoring site

监测点 编号	峰值加速度/gal			阿里亚斯强度/(cm·s ⁻¹)			主频/Hz		
	EW	SN	UD	EW	SN	UD	EW	SN	UD
1#	0.99	1.51	0.85	0.36	0.29	0.29	1.21	2.18	0.93
2#	1.31	1.65	1.40	0.50	0.55	0.35	1.85	2.33	3.87
3#	4.38	3.20	1.71	4.58	1.72	0.43	1.20	1.18	2.83

注:1 gal=1 cm/s².

表 4 M_s6.0 地震监测点地震时程曲线图

Tab. 4 Monitoring graph of the M_s6.0 earthquake at each monitoring site

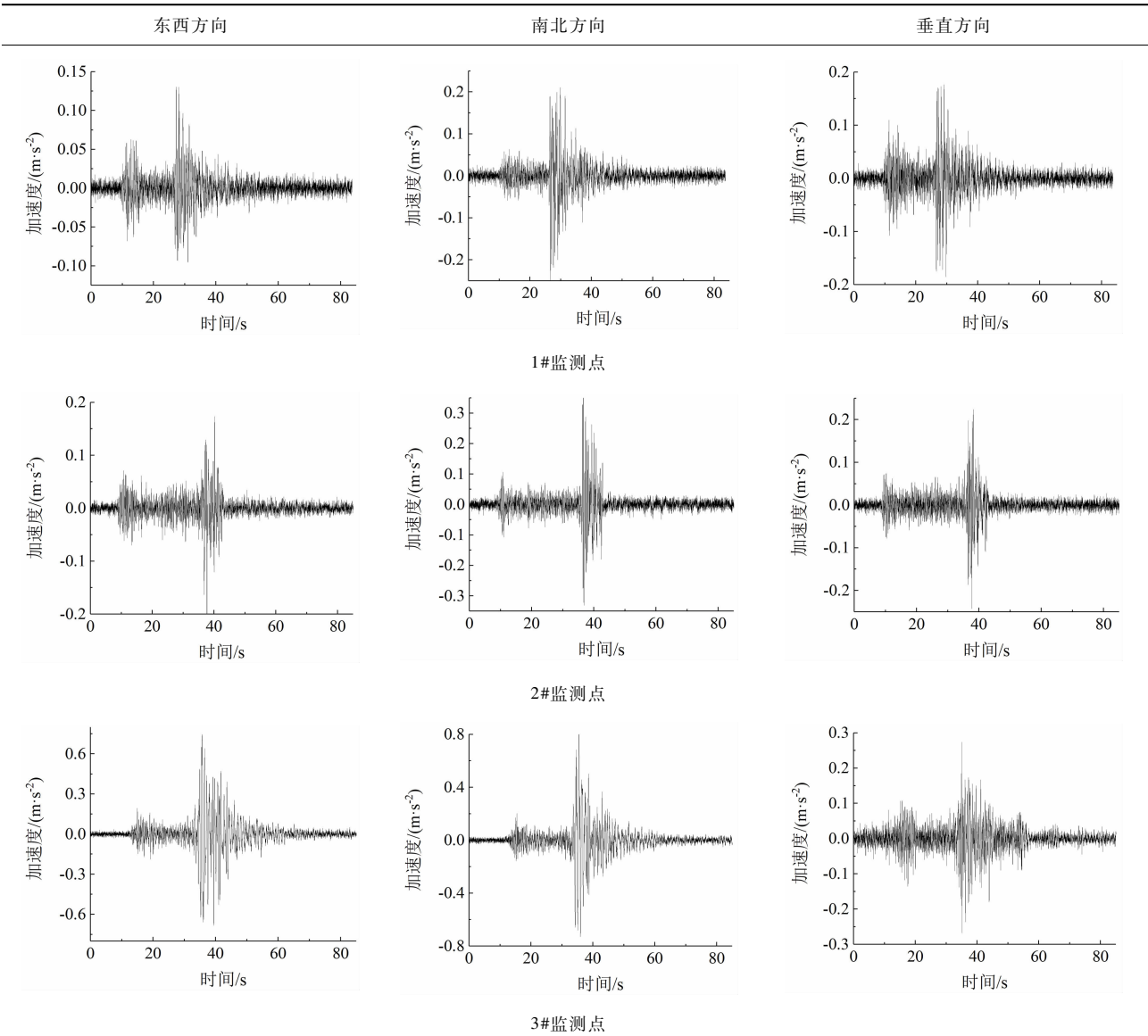
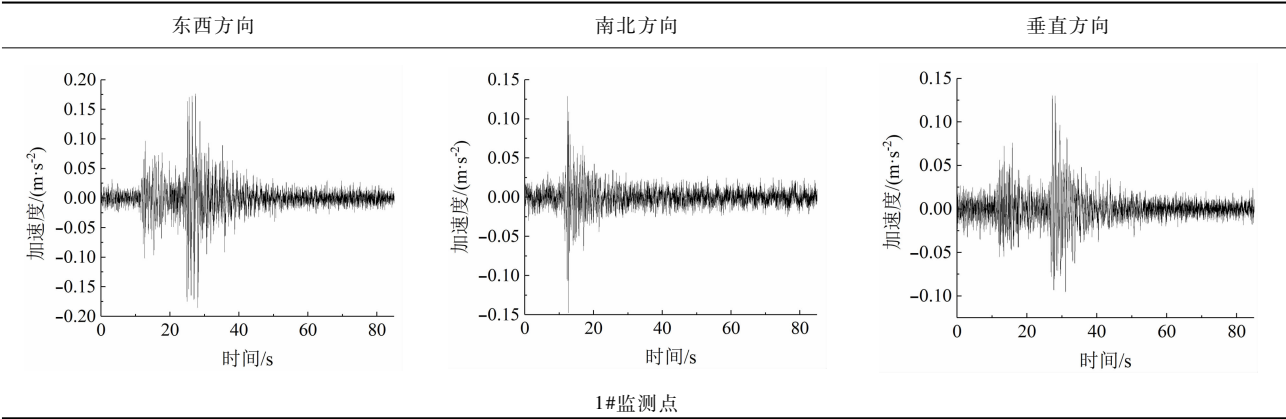
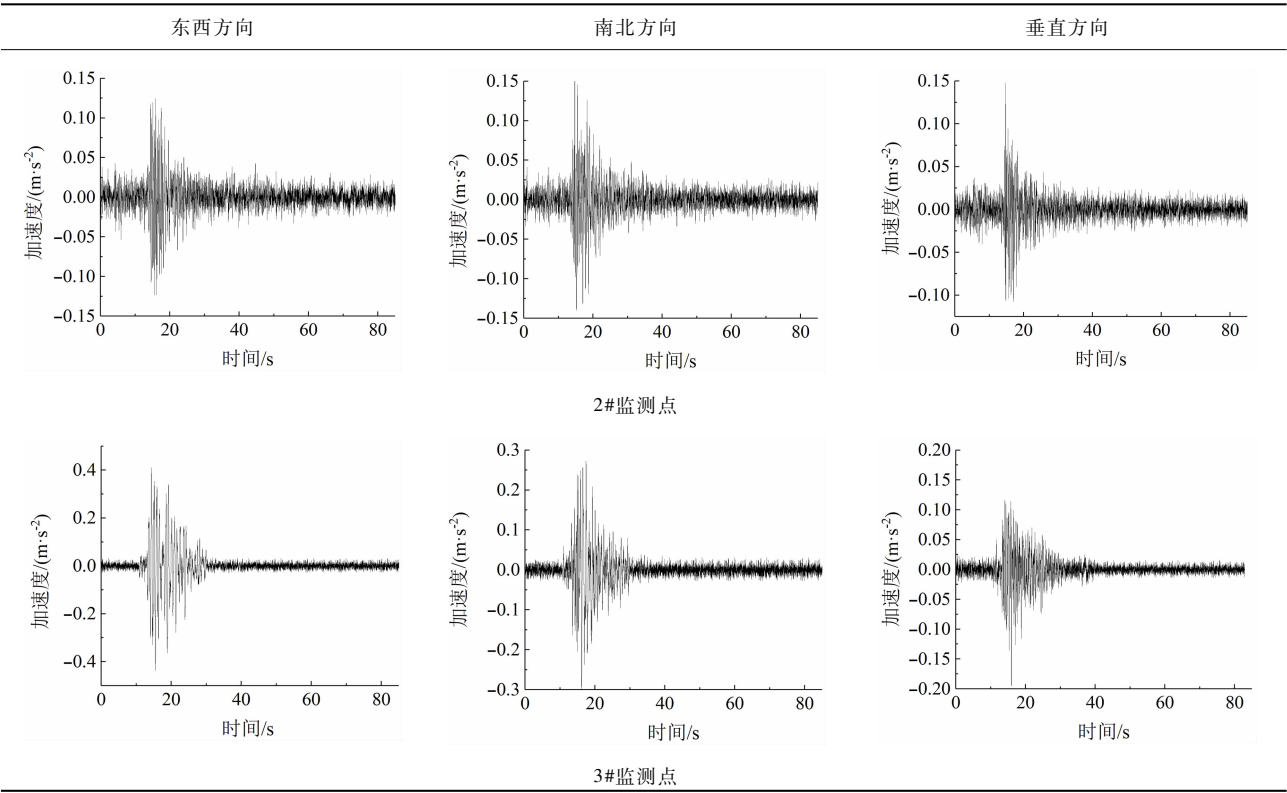


表 5 M_s5.4 地震监测点地震时程曲线图

Tab. 5 Monitoring graph of the M_s5.4 earthquake at each monitoring site



续上表



越大,同时振动过程中动能势能相互转化,因此可以用速度单位表征振动能量的大小。阿里亚斯强度即强震记录仪持续记录时段,加速度平方在持续时间上的积分,单位为 m/s ,其表达式为:

$$I_A = \frac{\pi}{2g} \int_0^{T_d} [a(t)]^2 dt$$

其中, T_d 为记录的振动时间; $a(t)$ 为单分量地震加速度。

在 $M_s5.4$ 级余震和 $M_s6.0$ 级主震中,2#监测点相较于 1#监测点,其东西向和南北向阿里亚斯强度均有所增加,但垂直向阿里亚斯强度变化不大。两次地震中,3#监测点水平向阿里亚斯强度数值较高,相较于 2#点,东西向放大系数最高可达 27.44。对比表中阿里亚斯强度可知,2#监测点在地震时,在三个方向上的能量要高于 1#监测点;3#监测点地震时其震动能量最大,要远远大于 2#和 1#监测点。

2 傅立叶频谱分析

任何连续周期信号都可以由一系列正弦曲线组合而成,由于大地的滤波作用,实测地震信号往往呈

现正弦波形^[14]。地震信号经过傅立叶级数变换处理后,可以得到傅立叶频谱图(表 6、表 7)其最高点所对应的频率为主频,其频谱图亦可以清楚反应地震波能量在不同频率区间的分布^[14]。

据表 6、表 7 可知,1#监测点的主频范围区间为 0.93 ~ 2.18 Hz;2#监测点的主频范围区间为 1.85 ~ 3.87 Hz;3#监测点的主频范围区间为 1.01 ~ 2.83 Hz。此外,3#监测点在两次地震中,其东西和南北向主频处幅值远远大于 2#和 1#监测点。6.0 级地震中 3#点东西和南北两方向的最高点幅值分别为 0.128 和 0.123,而 2#点幅值分别为 0.0145 和 0.0277,放大倍数分别为 8.83 倍和 4.44 倍。5.4 级地震中,3#监测点东西和南北两方向峰值幅值为 0.089 和 0.042,而 2#点幅值分别为 0.0116 和 0.012,放大倍数分别为 7.67 倍和 3.5 倍。而在垂直方向 1#、2#和 3#的峰值幅值无明显变化。综上所述可以认为:覆盖层对地震波在水平向有着显著的低频放大效应和高频衰减效应,而在垂直向低频放大和高频衰减效应则不太明显,这也与汶川地震山体放大效应研究结论^[1]一致。两次地震对比可知,其放大倍数与震级的绝对大小呈正相关。

表 6 $M_s6.0$ 地震傅立叶频谱图

Tab. 6 Fourier spectrum of $M_s6.0$ earthquake of each monitoring site

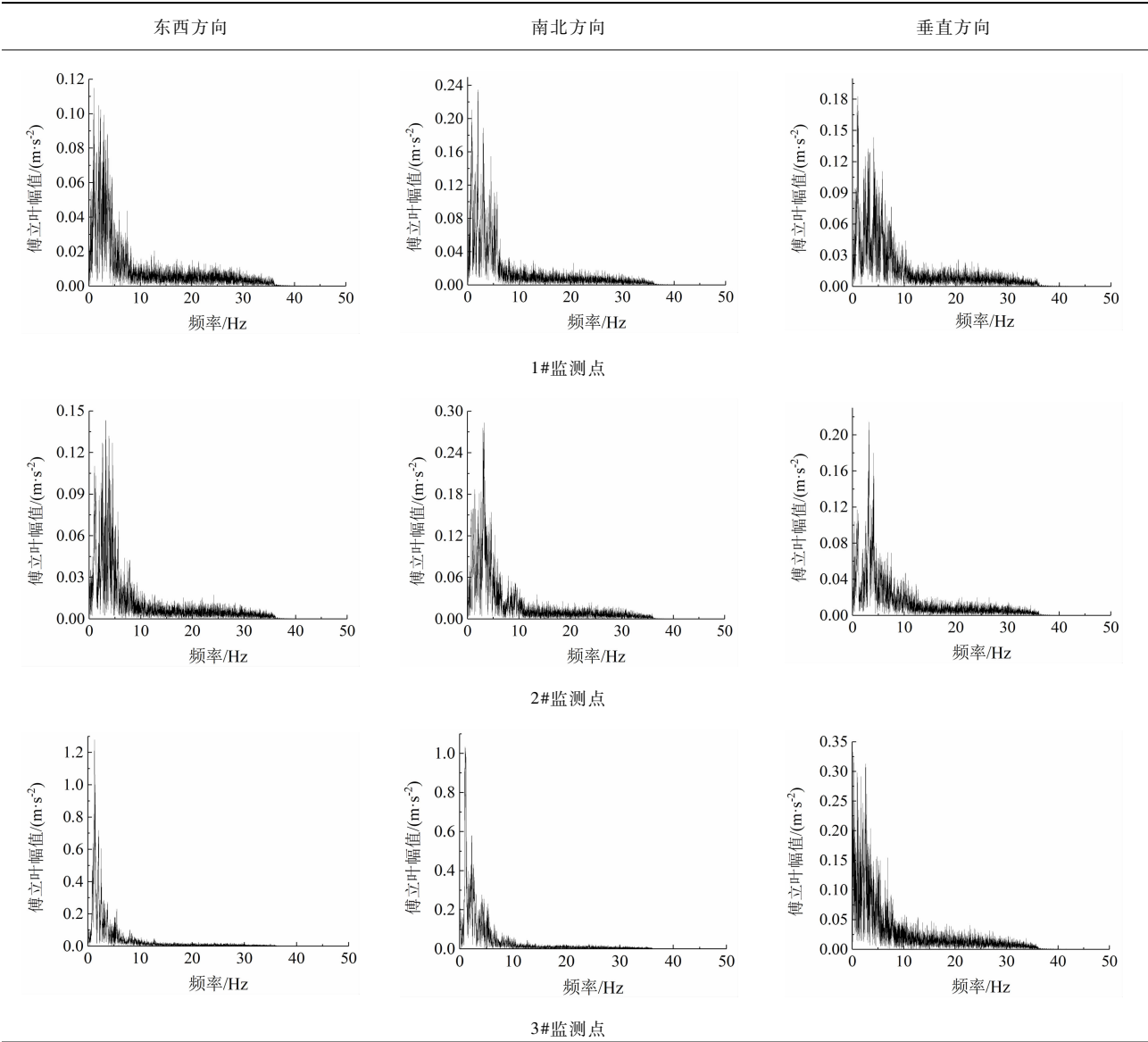
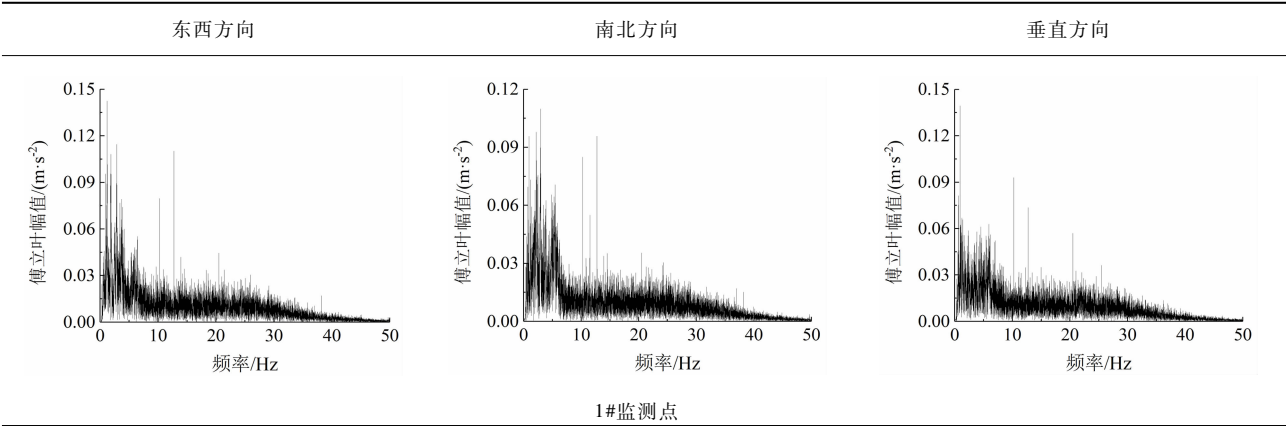
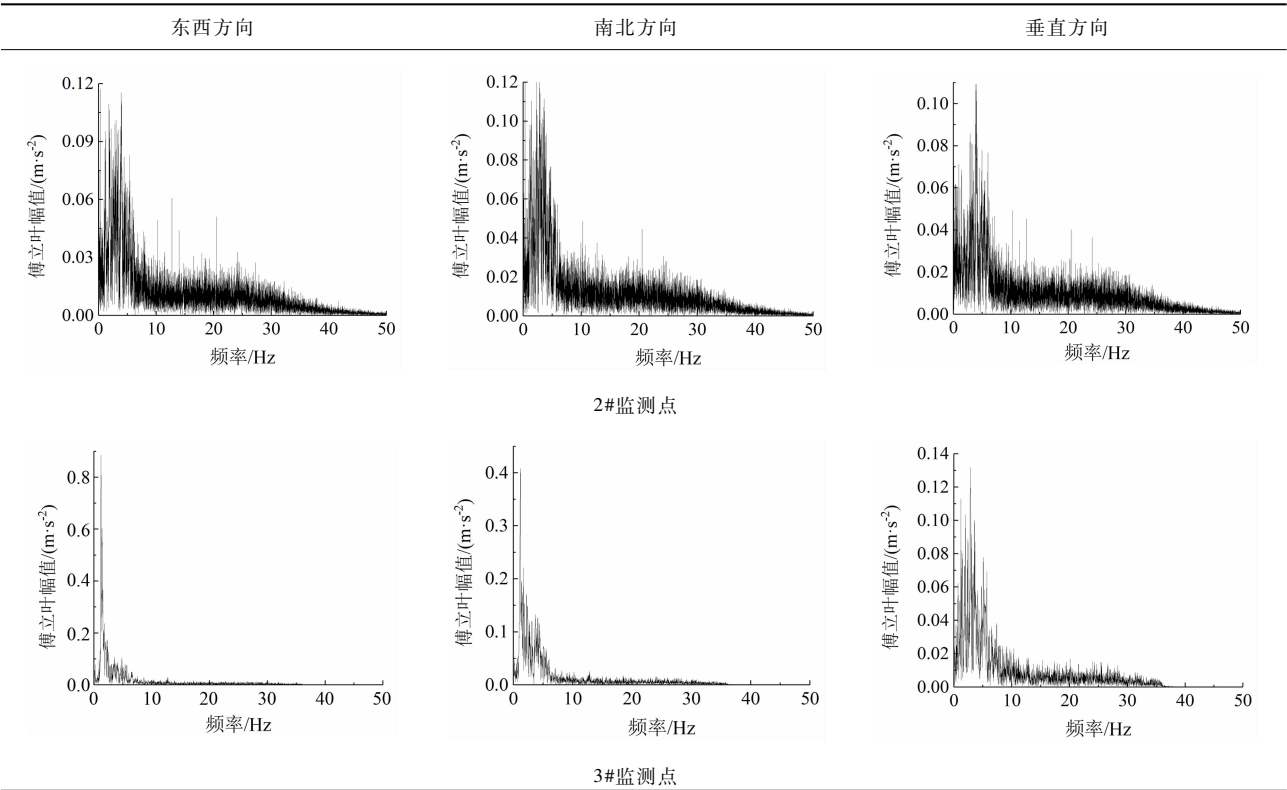


表 7 $M_s5.4$ 地震傅立叶频谱图

Tab. 7 Fourier spectrum of $M_s5.4$ earthquake of each monitoring site



续上表



3 加速度反应谱分析

加速度反应谱即在某一阻尼比的作用下,反应一系列单质点在振动时,其最大响应绝对值与场地结构周期的关系的频谱图。现采用 0.05、0.1 和 0.2 的阻尼比,分别对 6.0 级主震的三分量加速度反应谱展开计算,其结果可以用于评价场地的特征周期(表 10)。

经分析后其加速度反应谱如表 8,各监测点的特征周期如表 9。可以看出,随着阻尼比的增大,其加速度幅值逐渐减小,阻尼比为 0.05 时的加速度幅值最大,而阻尼比为 0.2 的时候,加速度幅值最小;无论阻尼比如何变化,其反应谱曲线的上升和下降趋势始终相同,故加速度反应谱可以反映不同阻尼场地对地震的响应,而非地震自身属性。1#与 2#监测点均位于鸡公山上,其东西向和南北向特征周期皆为 0.26 s,而垂直向特征周期则分别为 0.25 s 和 0.28 s。3#位于陈家包厚覆盖层之上,水平向特征周期有显著增大,其东西和南北向特征周期高达 0.78 s 和 0.88 s。而垂直向特征周期有一定程度增大。国家标准 GB50011-2010 根据场地特征周期,

将场地划分为抗震有利、一般、一般和不利四种场地类型。依据标准所规定的周期值,3#点明显为抗震不利场地。同时石棉县地处川西地震带之上,断裂带发育,地震频发^[19](如 2019 年 2 月 18 日石棉 M_s3.6 级地震),一旦石棉县受地震活动波及,3#点处村落将遭受严重震害。

4 放大效应分析

此次长宁地震,位于石棉县的 3 处监测点共记录到了 M_s6.0 级主震和 M_s5.4 级余震,因此共有两组数据可以用于对比分析,保证分析的科学重复性。基于三处监测点所在场地的属性差异,可对其记录到的数据进行两两对比分析,分别讨论地形与覆盖层对地震动响应的影响。

4.1 山脊部位对地震动响应的影响。

1#监测点和 2#监测点同放置于鸡公山盘山公路内侧的监测洞中,基岩类型全部为前震旦纪晋宁期花岗岩,二者高差约 100 m。但 1#监测点所在位置为山体平坡处,而 2#监测点则位于山体山脊处,因此利用两次地震所记录到的峰值加速度与阿里亚斯强度做对比,可以有效说明山体不同部位对地震

表 8 $M_s6.0$ 地震加速度反应谱
Tab.8 Acceleration response spectrum of $M_s6.0$ earthquake

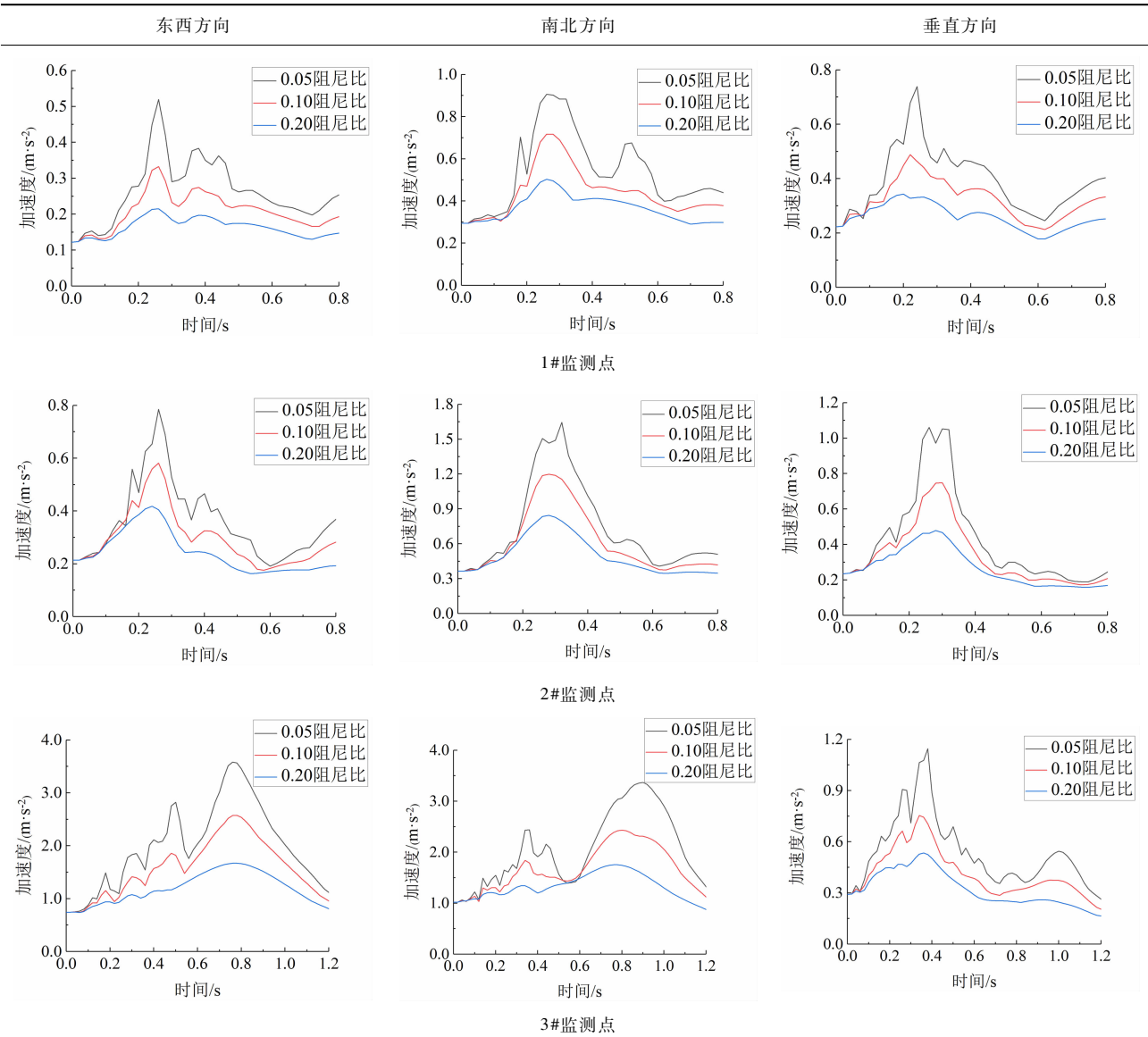


表 9 各监测点三分量特征周期
Tab.9 Predominant period in three directions at each monitoring site

监测点 编号	特征周期/s		
	东西向	南北向	垂直向
1#	0.26	0.26	0.25
2#	0.26	0.26	0.28
3#	0.78	0.88	0.36

表 10 GB50011 – 2010 场地划分标准
Tab.10 Land classification criteria GB50011 – 2010

设计 抗震分组	I_0	I_1	I_2	I_3	I_4
第一组	0.20	0.25	0.35	0.45	0.65
第二组	0.25	0.30	0.40	0.55	0.70
第三组	0.30	0.35	0.45	0.65	0.90

动响应的影响。 $M_s6.0$ 级主震时,2#监测点东西、南北和垂直向峰值加速度 (PGA) 分别为 2.13 gal、3.64 gal 和 2.35 gal 相较于 1#监测点的 1.22 gal、2.94 gal 和 2.23 gal,其三分量峰值加速度放大系数

分别为:1.74、1.23 和 1.05;同理 2#监测点相较于 1#监测点,其阿里亚斯强度 (I_A) 放大系数分别为:1.52、1.47 和 0.91。 $M_s5.4$ 级余震时,2#监测点东西、南北和垂直向峰值加速度放大系数分别为:

1.32、1.09 和 1.64,其阿里亚斯放大系数分别为:1.39、1.89 和 1.21。其量化表格如表 11、表 12 所示。

表 11 峰值加速度放大系数表(2#/1#)

Tab. 11 Amplification factors of PGA(2#/1#)

震级	峰值加速度放大系数		
	东西	南北	垂直
M _s 6.0	1.74	1.23	1.05
M _s 5.4	1.32	1.09	1.64

表 12 阿里亚斯强度放大系数表(2#/1#)

Tab. 12 Amplification factors of Arias intensity(2#/1#)

震级	阿里亚斯放大系数		
	东西	南北	垂直
M _s 6.0	1.52	1.47	0.91
M _s 5.4	1.39	1.89	1.21

可以看出两次地震水平向峰值加速度与阿里亚斯强度的放大系数均大于 1,说明山脊处相较于山体平坡处在水平方向上具有明显的放大效应,且峰值加速度放大系数随着震级提高而增强。但是垂直向峰值加速度与阿里亚斯放大系数却随着震级的提高发生衰减,M_s6.0 级地震时候,垂直向阿里亚斯放大系数甚至低于 1,这说明相同场地类型下垂直向峰值加速度与阿里亚斯强度可能主要受控于高程:当震级增大时,高程越大处,垂直向峰值加速度与阿里亚斯强度增量速率也就越大。山脊部位对水平向峰值加速度与阿里亚斯强度的控制较为明显,而对垂直向则不明显。

4.2 厚覆盖层对地震动响应的影响

3#监测点位于南垭河左岸陈家包山脊处,高程 1102 m,场地类型为厚覆盖层。该山体仅在南垭河左岸山脚边坡支护剖面上有同晋宁期块状花岗岩出露,其他地方无基岩出露。研究表明^[20],山体覆盖层厚度与海拔高度有关,覆盖层场地海拔越高处,其覆盖层厚度越大。现将两次地震中 3#监测点所记录的数据与同在山脊部位的 2#相对比,可以有效说明覆盖层对山体地震动响应的影响。在 M_s6.0 级主震中,3#点东西、南北和垂直向峰值加速度分别为:7.42 gal、10.18 gal 和 2.94 gal,相较于 2#监测点的 2.13 gal、3.64 gal 和 2.35 gal 其峰值加速度放大系数分别为:3.48、2.80 和 1.25,同理阿里亚斯强度

放大系数则分别为:27.44、7.37 和 3.4;在 M_s5.4 级余震中,3#点东西、南北和垂直向峰值加速度分别为:4.38 gal、3.20 gal 和 1.71 gal,相较于 2#监测点的 1.31 gal、1.65 gal 和 1.40 gal,其峰值加速度放大系数分别为:3.34、1.94 和 1.22,同理阿里亚斯强度放大倍数则分别为:9.16、3.13 和 1.23。其放大倍数量化表格如表 13、表 14 所示。

地震波传播过程中,在穿过不同地质界面的时候,会分异为频率不同的地震波成分^[21-23]。由于深厚覆盖层固有的自振频率,当地震波从下伏基岩传出时,土体可其中相同频率成分进行放大,由于共振作用,地表震动会发生一定的增强。同时表 13、表 14 可以看出,无论是 M_s6.0 级主震和 M_s5.4 级余震,其水平向的峰值加速度与阿里亚斯强度放大倍数几乎都在 2 以上,且随着震级的增大,放大倍数也随之增大。其中,阿里亚斯强度的放大效应最为显著,其东西向放大系数最大可达 27.44 倍。在垂直向上,随着震级的提高峰值加速度放大系数仅有小幅增大,而阿里亚斯强度放大系数仅接近 3。又由阿里亚斯强度的定义可知:覆盖层对受地震波影响发生振动质点的能量具有显著的增强作用,这一现象不仅表现为覆盖层场地相较于基岩场地,其放大倍数较大,而且在震级增加时,其放大系数仍能成倍增加。分析结果同样显示:这一增强效应同样表现为在水平方向上较为强烈,而在垂直向上相对较弱。这与长宁地震震中覆盖层地震动响应^[16]研究结果相符。

表 13 峰值加速度放大系数表(3#/2#)

Tab. 13 Amplification factors of PGA(3#/2#)

震级	峰值加速度放大系数		
	东西	南北	垂直
M _s 6.0	3.48	2.80	1.25
M _s 5.4	3.34	1.94	1.22

表 14 阿里亚斯强度放大系数表(3#/2#)

Tab. 14 Amplification factors of Arias intensity(3#/2#)

震级	阿里亚斯强度放大系数		
	东西	南北	垂直
M _s 6.0	27.44	7.37	3.40
M _s 5.4	9.16	3.13	1.23

5 结论

通过对石棉县南垭河两岸布置的强震监测点所记录到的 $M_s 6.0$ 级主震和 $M_s 5.4$ 级余震数据进行频谱分析,并结合场地状况对三个监测点的峰值加速度与阿里亚斯强度进行两两对比,现在可得到如下结论:

(1) 震级的绝对大小决定了同一监测点峰值加速度和阿里亚斯强度的大小,即呈正相关关系。

(2) 覆盖层场地在水平向对地震波能量具有较为明显的低频放大效应和高频衰减效应,而在垂直向则不明显。

(3) 覆盖层场地水平向特征周期远大于基岩场地,3#覆盖层场地为抗震不利场地。

(4) 山脊部位对地震具有明显的放大效应,表现为山脊处的水平向峰值加速度与阿里亚斯强度的放大。2#监测点附近崩塌灾害极其发育,这可能与屡次受地震影响致使山脊处岩体松动有关。

(5) 覆盖层场地对 3 分量的峰值加速度与阿里亚斯强度都有放大效应,尤其是对阿里亚斯强度的放大效应最为显著,放大倍数通常可达 3~9 倍。但是放大效应在水平向上要远强于垂直向。地震时,地表震动相较于基岩场地会更加强烈,地震放大效应明显。

(6) 地震动响应规律具有极强的方向性。3 分量的放大规律并非完全一致,尤其是在水平向和垂直向的响应规律差异最为明显。分析结果表明水平向放大效应远强于垂直向。

参考文献 (References)

- [1] 罗永红,王运生. 汶川地震诱发山地斜坡震动的地形放大效应[J]. 山地学报, 2013, **31**(2): 200 - 210. [LUO Yonghong, WANG Yunsheng. Terrain amplification effect of mountain slope vibration induced by Wenchuan earthquake [J]. Mountain Research, 2013, **31**(2): 200 - 210]
- [2] 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 Response Law of complex slope under earthquake action [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011:190 - 192.]
- [3] CELEBI M. Topography and geologic amplification determined from strong-motion and after shock records of 3 March 1985 Chile earthquake [J]. Bulletin of the Seismological of America. 1987, **77**: 1147 - 1107.
- [4] HARTZELL S H, CARVER D L, KING K W. Initial investigation of site and topography effects at Robinwood ridge, California [J]. Bull. Seis. Soc. Am. 1984, **84**:1366 - 1349.
- [5] 李孝波,薄景山,王欣. 基岩地形对地震动影响研究[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(3): 460 - 468. [LI Xiaobo, BO Jingshan, WANG Xin. Study on the influence of bedrock topography on ground motion [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(3): 460 - 468]
- [6] 黄栋,乔建平,张小刚. 堆积层斜坡地震动地形效应试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, **36**(3): 587 - 598. [HUANG Dong, QIAO Jianping, ZHANG Xiaogang. Experimental study on topographic effect of seismic ground motion on accumulative slope [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, **36**(3): 587 - 598]
- [7] 许强,李为乐. 汶川地震诱发滑坡方向效应研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2010, **42**(S1): 7 - 14. [XU Qiang, LI Weile. Directional effects of landslides induced by Wenchuan earthquake [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2010, **42**(S1): 7 - 14]
- [8] 黄润秋. 汶川地震地质灾害后效应分析[J]. 工程地质学报, 2011, **19**(2): 145 - 151. [HUANG Runqiu. Post-earthquake effect analysis of Wenchuan earthquake geological hazard [J]. Journal of Engineering Geology, 2011, **19**(2): 145 - 151]
- [9] 雷清雄,王运生,贺建先. 西藏俄拉村滑坡地震动态响应失稳过程[J]. 山地学报, 2017, **35**(3): 332 - 339. [LEI Qingxiong, WANG Yunsheng, HE Jianxian. Analysis on failure process and seismic response of Ela village landslide in Tibet [J]. Mountain Research, 2017, **35**(3): 332 - 339]
- [10] 祁生文,伍法权,孙进忠. 边坡动力响应规律研究[J]. 中国科学 E 辑:技术科学, 2003(S1): 28 - 40. [QI Shengwen, WU Faquan, SUN Jinzhong. Study on the law of slope dynamic response [J]. Chinese Science E: Technical Science, 2003(S1): 28 - 40]
- [11] 刘汉香,许强,范宣梅. 地震动参数对斜坡加速度动力响应规律的影响[J]. 地震工程与工程振动, 2012, **32**(2): 41 - 47. [LIU Hanxiang, XU Qiang, FAN Xuanmei. The influence of ground motion parameters on the dynamic response of slope acceleration [J]. Seismic Engineering and Engineering Vibration, 2012, **32**(2): 41 - 47]
- [12] 周兴涛,韩金良,施凤根. 地形地貌对地震波放大效应数值模拟研究[J]. 工程地质学报, 2014, **22**(6): 1211 - 1220. [ZHOU Xingtao, HAN Jinliang, SHI Fenggen. Study on numerical simulation of seismic wave amplification by topography and geomorphology [J]. Journal of Engineering Geology, 2014, **22**(6): 1211 - 1220]
- [13] 刘琨,卢育霞,李倩. 复杂地形条件对强地震动特征的影响[J]. 世界地震工程, 2012, **28**(4): 80 - 88. [LIU Qi, LU Yuxia, LI Qian. The influence of complex topographic conditions on the characteristics of strong ground motion [J]. World Seismic

- Engineering, 2012, **28**(4): 80–88]
- [14] 贺建先, 王运生, 罗永红. 康定 $M_s 6.3$ 级地震斜坡地震动响应监测分析[J]. 工程地质学报, 2015, **23**(3): 383–393. [HE Jianxian, WANG Yunsheng, LUO Yonghong, Kangding $M_s 6.3$ earthquake slope seismic response monitoring analysis [J]. Journal of Engineering Geology, 2015, **23**(3): 383–393]
- [15] 王运生, 贺建先, 罗永红. 康定 $M_s 5.8$ 级地震冷竹关坡体内地震动响应特征[J]. 西南交通大学学报, 2015, **50**(5): 838–844. [WANG Yunsheng, HE Jianxian, LUO Yonghong, Seismic responses of Lengzhuguan slope during Kanding $M_s 5.8$ earthquake [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2015, **50**(5): 838–844]
- [16] 王运生, 刘江伟, 赵波. 四川珙县 $M_s 5.4$ 级地震斜坡地震动响应特征[J]. 地球科学与环境学报, 2019, **41**(5): 613–622. [WANG Yunsheng, LIU Jiangwei, ZHAO Bo, Response Characteristics of slope seismic to Gongxian $M_s 5.4$ earthquake in Sichuan, China [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2019, **41**(5): 613–622]
- [17] 欧剑锋, 罗永红, 王运生. 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[J]. 山地学报, 2019, **37**(3): 382–391. [OU Jianfeng, LUO Yonghong, WANG Yunsheng. Analysis of slope dynamic inferred from ambient noise and seismic data: the case of Renjia slope Lushan County, Sichuan, China [J]. Mountain Research, 2019, **37**(3): 382–391]
- [18] 王运生, 全清, 罗永红. 四川芦山 $M_s 7.0$ 级地震的地质环境影响分析[J]. 地球科学与环境学报, 2013, **35**(2): 92–98. [WANG Yunsheng, QUAN Qing, LUO Yonghong. Geological Environmental impact analysis of Lushan $M_s 7.0$ earthquake [J]. Journal of Geosciences and Environment, 2013, **35**(2): 92–98]
- [19] 陈泽硕, 邓荣贵, 宋志. 四川石棉县“7·4”朱扎沟泥石流形成机制与堵河影响分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2016, **27**(3): 42–46, 65. [CHEN Zeshuo, DENG Ronggui, SONG Zhi. Formation mechanism of debris flow and impact analysis of river blockage in Zhuzhagou on July 4, Shimian County, Sichuan [J]. Chinese Journal of Geological Disasters and Prevention, 2016, **27**(3): 42–46, 65]
- [20] 李璐, 吴志坚, 李瑞宽. 岷县——漳县 6.6 级地震极震区场地覆盖层厚度探测及三维地形模型建立[J]. 地震工程学报, 2018, **40**(6): 1191–1197. [LI Lu, WU Zhijian, LI Ruikuan, Minxian-Zhangxian $M_s 6.6$ earthquake epicenter site coverage thickness detection and three-dimensional topographic model establishment [J]. Journal of Seismic Engineering, 2018, **40**(6): 1191–1197]
- [21] 吴忠铁, 范萍萍, 杜永峰. 地震波参数对基础隔震体系的减震效果影响研究与试验验证[J]. 土木工程学报, 2019, **52**(6): 35–44, 54. [WU Zhongtie, FAN Pingping, DU Yongfeng. Research and experimental verification of the influence of seismic wave parameters on the seismic absorption effect of base isolation system [J]. Journal of Civil Engineering, 2019, **52**(6): 35–44, 54]
- [22] HUGO M J. Modeling subduction earthquake sources in the central-western region of Colombia using waveform inversion of body waves [J]. Journal of Geodynamics, 2018, **116**(13): 47–61.
- [23] 张文, 刘勇, 王运生. 地震作用下边坡及不利地质体的动力特征[J]. 山地学报, 2016, **34**(6): 732–740. [ZHANG Wen, LIU Yong, WANG Yunsheng. Analysis of dynamic characteristics of slope and unfavorable geological body under earthquake [J]. Mountain Research, 2016, **34**(6): 732–740]

Characteristics of Seismic Response of the 6.0-Magnitude Earthquake, Changing county of Yibin in Southwest China's Sichuan province

JIN Gang^{1a}, WANG Yunsheng^{1b*}, SHI Bingxin², LUO Yue^{1b}, MING Weiting^{1a}

(1. a. College of Environment and Civil Engineering; b. State Key Laboratory of Geo-Hazard Prevention and Geo-Environment Protection, Chengdu University of Technology Chengdu 610000, China; 2. Seismological Bureau of Sichuan Province, Chengdu 610000, China)

Abstract: Following main and aftershocks of strong earthquakes, mountainous regions are susceptible to geohazards i.e., landslides. Despite persistent efforts to be made in understanding mechanisms of such geohazards through physical and numerical modeling, further efforts still need to investigate the site amplification effects of hillslopes through seismic monitoring. For example, the 2019 Changning earthquake occurred in Changning county of Yibin, Sichuan province, China, with a magnitude of $M_s 6.0$ and followed by many aftershocks of $\leq M_s 5.4$. These events were well recorded in three earthquake monitoring stations located on both bank sides of the Nanya river. To

understand the mechanism and response of hillslopes to the main and aftershocks, in this study, detailed analyses of the recorded seismic data had been conducted and confirmed following observations: (1) The earthquake magnitude was positively correlated with magnitude of peak ground acceleration and Arias intensity at the same site; (2) Along the horizontal directions, while confronting seismic wave energy, the soil layer had a more obvious low-frequency amplification and high-frequency attenuation effect compared to direction; (3) The horizontal predominant period of soil site was much longer than that of rock site; (4) The ridge had an apparent amplification effect during the earthquake, which reflected as the amplification of the horizontal peak ground acceleration and Arias intensity; (5) The soil site had an amplification effect on both the peak ground acceleration and Arias intensity of three components, especially on the latter (Arias intensity), with amplification effect much stronger in horizontal directions; (6) The seismic response to mountain hillslopes had a strong directivity, and the amplification effect in the horizontal directions was much stronger than that of the vertical directions. It is believed that the findings of this study would serve as a reference to draw seismic risk assessment in high mountainous areas in northwest Sichuan province.

Key words: Changning Earthquake; Co-earthquake Geological Disasters; Amplification Effect