

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2021.02.01

基于连续小波变换的斜坡动力响应特征分析 ——以四川长宁 $M_s6.0$ 级地震为例

金 刚^{1,2}, 王运生¹, 何先龙², 史丙新³, 周宇航¹

(1. 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, 四川成都 610059; 2. 中国地震局工程力学研究所, 河北廊坊 065000; 3. 四川省地震局, 四川成都 610041)

摘要:川西北地区深切峡谷发育, 地震扰动频繁。峡谷内高陡岩质斜坡在强震扰动下, 通常会发生震裂松弛, 进而导致失稳, 因此研究其强震响应意义重大。2019 年四川长宁 $M_s6.0$ 级地震触发了布置在石棉县城南桤河两岸的 3 台强震监测仪器, 通过对捕捉到的强震数据进行连续小波变换之后, 获取了其时频信息。分析结果表明: (1) S 波在频域上分为两种成分, 其主频值分别为 3.5 Hz 和 1.1 Hz 附近; (2) 山脊处的地震动放大效应主要体现在 S 波相对高频成分上能量的增加而低频部分则无显著变化; (3) 覆盖层场地自振频率与 S 波低频成分主频相近, 二者产生共振, 导致 S 波低频放大与高频衰减效应; (4) 地震动响应具有极强的方向性, 水平向地震动放大效应比垂直向更为显著。

关键词:连续小波变换; 长宁地震; 山体地震动响应; 时频分析

中图分类号: P694 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-8035(2021)02-0001-08

Time-Frequency characteristics and seismic response analyses of the 6.0-magnitude earthquake, Changning County of Yibin in Southwest China's Sichuan Province

JIN Gang^{1,2}, WANG Yunsheng¹, HE Xianlong², SHI Bingxin³, ZHOU Yuhang¹

(1. State Key Laboratory of Geo-Hazard Prevention and Geo-Environment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 2. Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Langfang, Hebei 065000, China; 3. Seismological Bureau of Sichuan Province, Chengdu, Sichuan 610041, China)

Abstract: In northwest Sichuan Province, due to the frequent earthquakes, the rocky hill slopes in the valley area usually get loosen and lead to the failure. For geohazard prevention and mitigation, it is important to determine the site amplification effects and seismic responses of hillslopes. For example, the 2019 Changning $M_s6.0$ earthquake that occurred in Changning County of Yibin, Sichuan Province, China, was well recorded in three earthquake monitoring stations located on both bank sides of Nanya River in Shimian County, Sichuan Province, China. In this study, detailed analyses of the recorded seismic data had been conducted with the method of Continuous Wavelet Transform and confirmed the following observations: (1) For S-wave, two sorts of components in the frequency domain were found, whose main frequency values were around 3.5 Hz and 1.1 Hz respectively. (2) The seismic amplification effect at the ridge was mainly reflected by the energy increase in the high frequency component of the S-wave, no clear changes in the low frequency component of the S-wave was found. (3) In soil site, the natural frequency of vibration was close to the main frequency of the low frequency component of the S-wave, resonance between the two components was generated, resulting in low-frequency amplification and high-frequency attenuation effect.

收稿日期: 2020-03-28; 修订日期: 2020-05-13

基金项目: 国家创新研究群体科学基金 (41521002); 国家自然科学基金 (41877235)

第一作者: 金 刚 (1996-), 男, 河南郑州人, 硕士研究生, 从事地质工程与区域稳定性研究。Email: 825200169@qq.com

通讯作者: 王运生 (1960-), 男, 博士, 博士生导师, 主要从事工程地质方面的教学工作。Email: wangys60@163.com

(4) The seismic response to mountain hill slopes had a strong directivity, and the amplification effect in the horizontal directions was much stronger than that of the vertical directions.

Keywords: continuous wavelet transform; Changing earthquake; seismic response; time-frequency analyses

0 引言

强震是人类所面临的最危险的自然灾害之一^[1]。在强切割山区,山体在地震作用下往往发生震裂松动,其完整性、强度大幅度降低,诱发一系列的崩、滑灾害^[2-3]。崩滑灾害堆积物又会为泥石流的发生提供物源^[4-5]。上述“崩滑流”灾害造成的人员伤亡和财产损失往往不亚于地震本身^[6]。随着对地震滑坡研究的深入,一些学者认为,山体在地震作用的失稳机理与山体的地震放大效应存在耦合关系。罗永红等^[7]对汶川地震次生地质灾害展开调查后,结合灾害区域地貌单元,认为特殊地形尺寸与地震波长的耦合作用导致地震放大效应。范刚^[8]基于自贡西山公园台站记录的地震数据,分析了地形对峰值加速度、峰值位移等地震动参数的影响规律,认为地形因素仅对水平向的地震响施加影响,而在垂直向不明显。VALAGUSSA 等^[9]通过对 1993 年 Papua New Guinea 地震、1999 年 ChiChi 地震、1994 年 Northridge 地震、2004 年 Niigata-Chuetsu 地震、2008 年 Iwate-Miyagi Nairiku 地震和 2008 年汶川地震后造成的地貌改观展开分析,探讨了地震震级和震中距与山体失稳规模的耦合关系。CROISSANT 等^[10]通过 2D 数值模拟,发现地震作用下断层作为一种不稳定结构面会对山体的稳定性产生不利影响。GUAN 等^[11]通过物理模拟,发现隧道深处即山体内部的水平向峰值加速度要小于同一高程山体表面处。HARZTEL 等^[12]对 1989 年 Loma Prieta 地震展开研究后表明,体波在山脊内的多向反射和散射以及瑞利波与勒夫波的相互作用是导致 Robinwood 山脊受震灾破坏严重的重要原因。CELEBI^[13]通过对 1976 年 Guatemala 地震和 1989 年 Loma Prieta 地震数据展开分析,发现山脊处的地震放大效应与地震波入射角度存在耦合关系。SU 等^[14]通过对地震波进行小波变换,讨论了地震波不同频率段的地面运动属性。2014 年康定地震后,王运生等^[15]对冷竹关地震台阵所记录到的数据进行分析,发现山体内部的地震动放大效应要弱于同高程山体表面,且山体表面傅立页谱图较山体内部,成分更为复杂。刘峡等^[16]利用小波变换的方法,对地震信号进行了时域特征上的分析。

地震波是一种复杂的非稳定波型,其携带的能量在时域上和频率域上分布极不均匀^[16],一旦某时刻能量突

然集中会对受震物体的结构稳定产生不利影响。目前针对地震动响应的研究多侧重于傅立页谱分析,而傅立页谱仅能表明频率域上能量分布,而忽略掉了相应频率出现的时间。小波分析作为数学放大镜,突破了傅立页变换和短时傅立页变换局限,可以清楚地表明地震波能量、时域、频率域之间的关系,以及地震波成分的演变。因此基于连续小波变换深入探讨地震在特殊山地单元下的地震动响应规律,对揭示地震致灾机理和开展防灾减灾工作意义重大。

1 监测数据来源与地震动响应分析

1.1 强震监测点概况

据中国地震台网,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,震中位于长宁县双河镇附近,震源深度 16 km。云南,四川和重庆等多地均有明显震感。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依托中国地震局“川西深切河谷斜坡地震动评价技术研究”项目,在雅安市石棉县南桧河两岸设立的 3 个地震监测点记录到了此次 $M_s 6.0$ 级地震。其中南桧河右岸鸡公山上放置有两台强震监测仪,左岸陈家包山上放置有一台强震监测仪器,其监测点分布位置如图 1 所示。鸡公山上两台站置于前震旦纪晋宁期具碎裂结构的弱风化花岗岩平硐内,陈家包台站置于坡残积厚覆盖层之上,下伏前震旦纪晋宁期花岗岩,在南桧河左岸坡脚有部分出露。红色剖面线



图 1 南桧河两岸监测仪器分布图 (方位角 118°)

Fig. 1 Distribution of monitoring sites on both banks of Nanya River

所代表的地质剖面见图 2。三台站仪器放置场地稳定,无外界因素干扰。其场地属性如表 1 所示。用于地震监测的仪器则由中国地震局工程力学研究所研制的

G01NET-3 结构与斜坡震动监测仪,采样时间间隔为 0.005 12 s。同时,四川省地震局也提供了石棉县先锋台阵记录到 $M_s6.0$ 级地震监测数据作为参照基准。

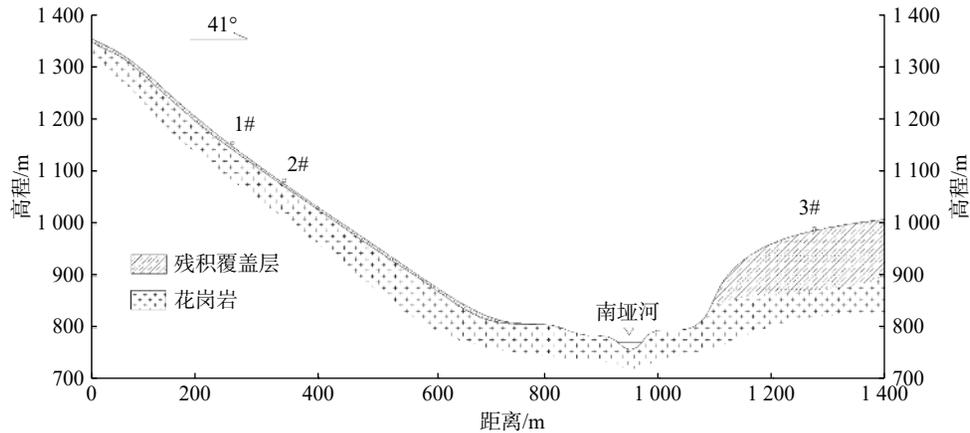


图 2 南桤河两岸红线地质剖面图

Fig. 2 Geological profile of both banks at Nanya River

表 1 各监测点所在位置场地属性
Table 1 Properties of monitoring sites

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
1#	1 150	265	山体平坡处	基岩(花岗岩)
2#	1 060	265	山脊处	基岩(花岗岩)
3#	1 102	267	山脊处	厚覆盖层
参照点(石棉先锋)	×	×	×	薄覆盖层

1.2 石棉县南桤河两岸山体地震动响应综述

山体的地震动响应主要表现在峰值加速度(Peak Ground Acceleration, PGA)和阿里亚斯强度(Arias Intensity, AI)的放大^[17]。对 3 个监测点以及 1 个参照点所记录到 $M_s6.0$ 级地震的数据进行低通 30 Hz 滤波处理后,通过软件 SeismoSignal 处理后可以读出其地震动响应的基本参数属性。其 4 个点的峰值加速度、阿里亚斯强度以及峰值加速度放大倍数如表 2 所示。

表 2 各监测点地震动响应参数
Table 2 Ground motion response parameters at each monitoring site

监测点编号	峰值加速度/gal			阿里亚斯强度/($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)		
	EW	SN	UD	EW	SN	UD
1#	1.22	2.94	2.23	0.36	1.22	0.89
2#	2.13	3.64	2.35	0.55	1.80	0.81
3#	7.42	10.18	2.94	15.09	13.26	2.75
*参照点	1.74	3.36	1.88	0.88	2.70	0.87

注: 1 gal=1 cm/s^2

罗永红^[17]、贺建先等^[18]、祁生文等^[19]结合大量实测地震数据分析发现,山体的山脊处,山体转折部位以及

第四纪覆盖层会对山体的地震动响应起控制作用,具体表现为上述部位的峰值加速度放大,在地震来临时候更加强烈的震动响应会导致山体发生失稳。由表 2 可见,同位于鸡公山上的 1#及 2#监测点,位于山脊处的 2#监测点其峰值加速度要大于 1#监测点。而 3#监测点场地类型为厚覆盖层,其水平向峰值加速度远远大于 1#和 2#监测点,而垂直向峰值加速度放大效应则弱于水平向,但也有一定程度的放大。可以明显看出,峰值加速度的放大效应在水平和垂直方向上具有显著的差异。

2 地震信号的时频分析

傅立页变换作为一种良好的信号分析手段,在世界范围内被广泛应用^[16]。但对于非稳定信号,傅立页变换只能体现出信号的频域特性,而隐略了随机信号中的时域特性。小波变换自 1986 年被发明以来,因其具有良好的时频分析能力,在信号处理领域内发展迅速^[20]。小波变换分析不仅可以描述非稳定信号的局部变化特征,而且可以通过尺度变换,从不同频域上观察信号的演变特征。因此,相较于使用传统手段傅立页变换对地震信号频率域上展开解析,利用小波变换分析地震信号,可以反映地震信号的时频特性,明确地震时频演变规律。

2.1 连续小波变换

将四台强震监测仪记录到的地震数据做小波变换处理。所选用的变换方式为连续小波变换(Continuous Wavelet Transform),小波基函数为 Mexh,其中心频率(Centre Frequency)为 0.25。选择矢量尺度为 1 至 140,

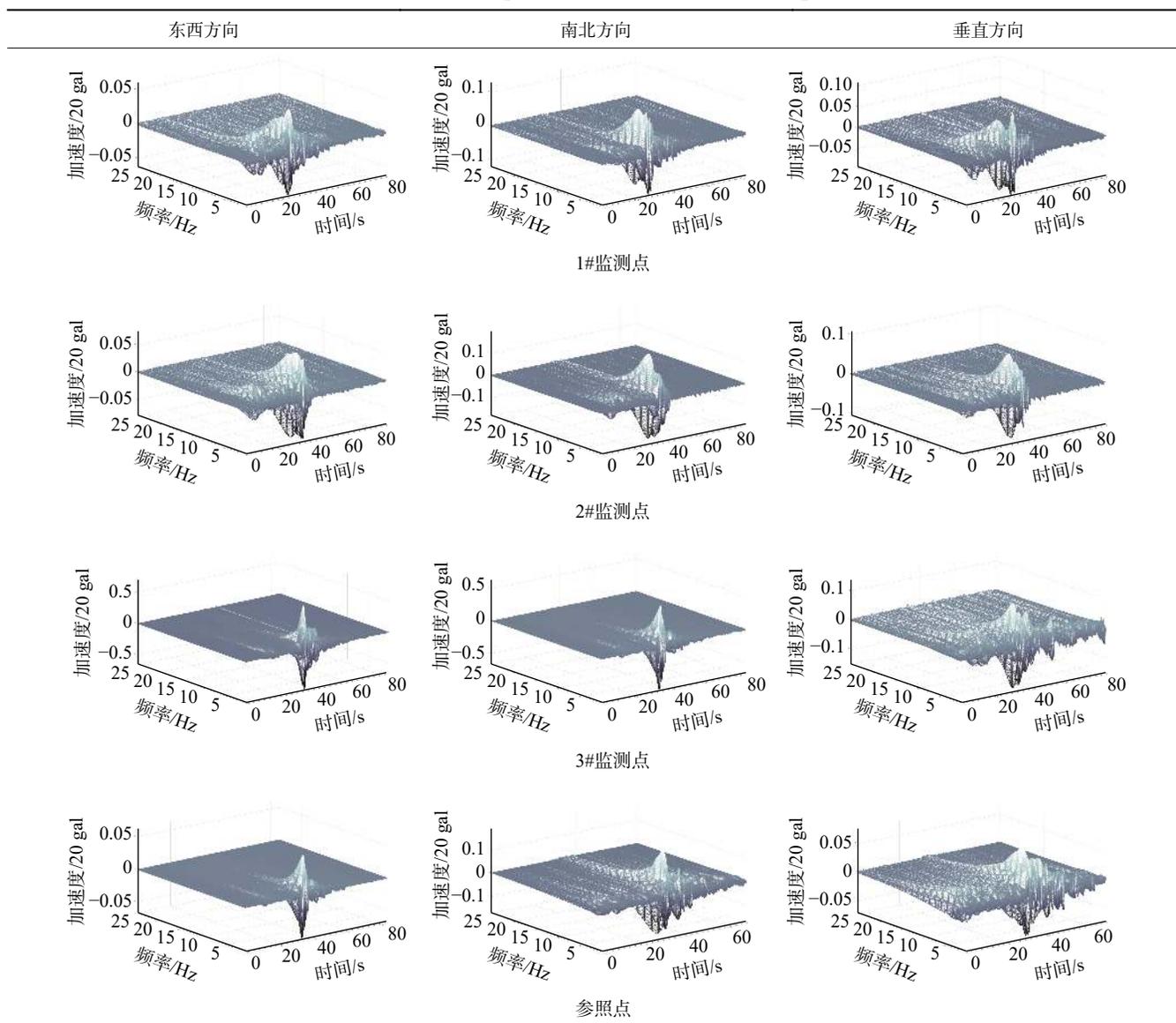
由 140 至 1 作公差为-0.5 的递减。由尺度-频率换算公式计算可得,其覆盖频率范围 0.35 ~ 50 Hz。

地震数据进行连续小波变换后,可以三维的方式呈现,其中 x 轴表示时间,单位为 s; y 轴表示频率,单位为

Hz; z 轴表示地震加速度幅值,单位为 20 gal。3 个监测点的地震时频图如表 3 所示。地震信号经过连续小波变换之后,透过传统时程图增加了频率信息,做到了时域和频率域上的结合。

表 3 监测点 3 分量连续小波分解图

Table 3 Three-component continuous wavelet decomposition



2.2 地震信号时频成分统计

地震信号经过连续小波变换后,其时域频域的结合有助与对地震信号成分的分析。4 处监测点的 3 分量地震信号时频图中,随着时间增加,有两个波峰,其中峰值较低先到达的为 P 波,而后到达的峰值较大的则为 S 波。在 S 波后面则为一段由体波激发的面波。S 波在到达受震地表后,分异为高频和低频两种成分:形状尖锐、变化剧烈的低频成分与光滑平顺、平稳降

低的高频成分。地震发生时,受震物体的破坏主要依靠 S 波和体波交会激发的面波^[21]。P 波主要为垂直方向上的振动,且幅值小于 S 波,对受震物体结构破坏较小^[6],因此本文分析重点为 S 波成分变化。现对各监测点三分量上 P 波和 S 波波峰空间坐标进行测量,其结果如表 4 所示,其中第一行表示波峰出现的时间位置,第二行表示波峰出现的频率位置,第三行表示波峰幅值绝对值。

表 4 监测点波峰成分统计表

Table 4 Statistical table of signal peak at each site

方向	S波高频波峰				S波低频波峰			
	1#	2#	3#	参照点	1#	2#	3#	参照点
东西	27.23 s	37.67 s	×	32.02 s	27.00 s	37.76 s	36.03 s	31.70 s
	2.8 Hz	3.9 Hz	×	3.2 Hz	1.4 Hz	1.4 Hz	1.3 Hz	1.1 Hz
	0.045	0.078	×	0.076	0.063	0.072	0.630	0.068
南北	26.50 s	36.52 s	×	32.00 s	27.09 s	36.41 s	35.09 s	32.27 s
	2.8 Hz	3.5 Hz	×	2.5 Hz	1.1 Hz	1.1 Hz	1.1 Hz	1.1 Hz
	0.120	0.183	×	0.188	0.110	0.115	0.656	0.138
垂直	26.77 s	37.73 s	34.85 s	32.88 s	27.19 s	38.13 s	35.28 s	32.36 s
	3.5 Hz	3.5 Hz	2.8 Hz	3.2 Hz	1.1 Hz	1.1 Hz	1.1 Hz	1.1 Hz
	0.086	0.107	0.150	0.076	0.090	0.068	0.089	0.068

3 放大效应分析

3.1 山脊部位放大效应分析

历史地震监测表明,地震作用下山脊部位往往放大效应更为显著^[17-18]。根据表 2 的时程数据分析结果来看,2#监测点所处的山脊部位,其水平向上 PGA 和 AI 数值要高于同在山腰部位的 1#监测点。其中 PGA 放大系数 ($2\#/1\#$) 在东西南北和垂直向上分别为 1.74、1.23 和 1.05; AI 放大系数 ($2\#/1\#$) 在三个方向上则分别为 1.52、1.47 和 0.91。这说明 2#监测点所在山体部位地震动力响应更为强烈。由表 4 可以看到地震成分的演变,1#与 2#监测点的 S 波低频部分,其波峰在频域上的发生位置完全相同,这可能与两处监测点位于一座山体有关。相较于 1#监测点,2#监测点的东西向、南北向和垂直向 S 波高频成分,波峰幅值放大倍数分别为 1.73、1.53 和 1.16,而 S 波低频部分的放大倍数则分别为 1.14、1.04 和 0.76。2#监测点三分量 S 波高频波峰幅值全部高于低频部分,而 1#监测点则相反。即在基岩场地下,山脊相较于山腰,地震放大效应主要体现为高频成分能量的增加,低频部分有小幅增大,但远不如高频部分。此外,放大效应还存在显著的方向性,无论是在 PGA 、 AI 放大系数上还是地震波峰成分演变上,水平方向的放大效应要更为显著。受地震作用,在 2#点所在的山脊处,落石与斜坡变形较其他地方更为发育(图 3)。

3.2 覆盖层场地放大效应分析

3#监测点的场地条件为厚覆盖层,下伏同晋宁期花岗岩,仅在南桎河左岸边坡支护剖面上有所出露。通过表 3 可以看到,3#监测点水平向时频三维图上高频成分衰减剧烈,其低频波峰幅值在东西向和南北向更是分别高达 0.630 和 0.656,相较于同在山脊部位的 2#监测点 S 波最大幅值,其放大倍数达 8.08 和 3.53。但在垂直向,依然可以清楚地看到 S 波的高频和低频成分,低频



图 3 2#监测点附近山脊部位的落石以及斜坡变形

Fig. 3 Rock falls and slope deformation around monitoring site 2# in Shimian County

成分在时间序列上出现的次数更多。此外,参照点场地条件为薄覆盖层,下伏同套岩组。同样可以看到,薄覆盖层场地的低频部分相较于基岩场地,其低频部分已经有所发育。而 PGA 放大系数 ($3\#/2\#$) 在东西、南北和垂直向上的放大系数为 3.48、2.79 和 1.25; AI 放大系数 ($3\#/2\#$) 则分别为 27.4、7.36 和 3.39。地震时,震感更加强烈。

现有研究表明,当成层厚覆盖层接收来自基岩传来的剪切波时,在地震波向地表传播的过程中,会发生多次反射与折射,波能量发生叠加而进一步增强,尤其为长周期波更为显著,这与表征能量的 AI 显著放大相吻合^[21-22]。此外,覆盖层土体对入射剪切波具有吸收和放大作用。当剪切波由基岩入射到覆盖层后,其中短周期成分被吸收,而长周期成分由于与土体自身振动周期相近,极易发生共振作用^[22]。为了探究 3#厚覆盖层场地的 S 波低频部分剧烈变化是否为共振效应引起,现在对 3#监测数据进行加速度反应谱分析。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, 0.2 的阻尼比^[20], 对 3#监测点三分量加速度反应谱展开计算, 用于评价场地的特征周期。其三分量反应谱图如表 5 所示。加速度反应谱中有多

个波峰, 表明覆盖层成分不均匀。其最高点所代表的时间即为场地的特征周期^[20], 分析后其特征周期如表 6。同时, 由同样方法求得基岩场地特征周期如表 7。

表 5 3#监测点场地 3 分量反应图谱

Table 5 Three-component response spectrum of monitoring site No.3

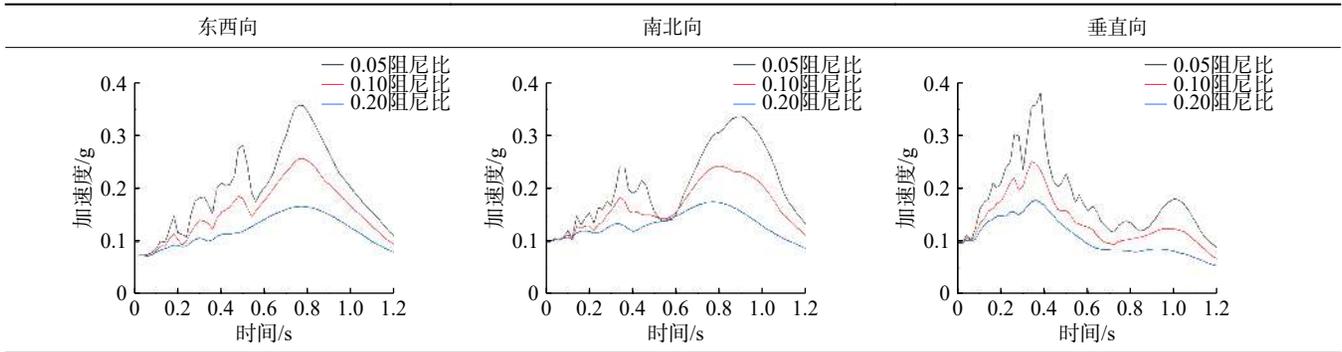


表 6 3#监测点三分量特征周期/频率表
Table 6 Dominant period / frequency of site 3#

	东西向	南北向	垂直向
特征周期/s	0.74	0.88	0.36
特征频率/Hz	1.35	1.13	2.77

表 7 1#与 2#监测点三分量特征周期
Table 7 Dominant period of site 1# and 2#

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

由表 6 和表 7 可知, 基岩场地特征周期远小于厚覆盖层场地。3#监测点东西向和南北向特征频率分别为 1.35 Hz 和 1.13 Hz, 即场地的特征频率十分接近于 S 波低频成分波峰峰值处频率, 频率差值分别为 0.05 Hz 和 0.03 Hz。而垂直向特征频率则与水平向有较大差异。在水平方向上, 由于频率接近, 地震发生时, S 波中低频成分振动与场地自振交汇, 产生强烈的共振效应, 导致频率域上其特征周期附近区间内振动峰值显著增加。加之厚覆盖层土体对短周期波成分的吸收效应和长周期波成分的折射叠加效应, 3#监测点的 S 波高频部分衰减显著^[21-22]。厚覆盖层对地震波显著放大, 地震时其震感更加强烈, 加重震害损失, 这一现象在震中区长宁灾害调查中得以体现。3#点所在村落多为刚度大, 结合性差的低矮砖混结构房屋和土坯房, 此次地震由于震中距较大, 震级较小, 未对 3#点所在村落建筑物造成严重损害。但如果震级加大, 受到山脊放大效应和覆盖层放大

效应的双重影响, 震感强烈, 相较于基岩场地这里会遭受更加严重地表震害。

4 结论

基于连续小波变换的信号处理手段, 对石棉县城南柅河两岸强震监测点所记录到的长宁 $M_s 6.0$ 级地震数据, 作三维时频图谱, 并结合时域和频域对地震信号成分进行分析。现有结论如下:

(1) 通过连续小波变换所呈的三维时频图, 可以清楚看到 S 波到达地表时分为高频和低频两种成分。其中高频成分主频在 3.5 Hz 附近, 而低频成分主频在 1.1 Hz 附近, 两种成分在时域上近乎同时出现。

(2) 地震时山脊部分的地震动响应更加强烈。山脊部位场地类型为基岩, 通过时频分析结果可知, 放大效应主要体现为 S 波高频成分能量的增加, 而低频部分则无明显变化。

(3) 覆盖层场地对 S 波具有显著的低频放大和高频衰减效应。S 波在厚覆盖层的折射和反射作用, 以及 3#覆盖层场地水平方向的自振与 S 波低频成分交汇产生共振效应, 是导致覆盖层场地低频放大效应显著的原因。地震发生时, 3#场地震感强烈, 地表震害将更加严重。

(4) 地震动响应规律具有极强的方向差异性, 从时程分析结果和时频分析结果可以看出, 其差异性主要体现在水平向和垂直向上, 其水平向的放大效应相较于垂直向要更为显著。

参考文献 (References) :

[1] 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. After effect of geohazards induced by the Wenchuan earthquake [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2011, 19(2): 145 - 151. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 王飞, 吴红刚, 郭春香. 碎石土路堑高边坡地震动力响应过程分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(1): 18 - 24. [WANG Fei, WU Honggang, GUO Chunxiang. Dynamic response of high cut based a numerical simulation slope to earthquake [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2020, 31(1): 18 - 24. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 温铭生, 刘传正, 刘艳辉, 等. 汶川地震高烈度区崩滑流灾害区域预警 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(1): 10 - 19. [WEN Mingsheng, LIU Chuazheng, LIU Yanhui, et al. Regional warning of geological hazards in high seismic intensity area of Wenchuan Earthquake [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2019, 30(1): 10 - 19. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 陈宗良, 叶振南, 王志宏, 等. 白龙江流域中上游第四纪沉积物的发育特征及其灾害效应 [J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(2): 29 - 36. [CHEN Zongliang, YE Zhennan, WANG Zhihong, et al. Development characteristics and disaster effect of the Quaternary sediments in the middle and upper reaches of the Bailongjiang River Basin [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2019, 46(2): 29 - 36. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 付智勇, 龙晶晶, 常鸣. 汶川地震前后四川都江堰龙池镇地区泥石流物源分布特征及其演化规律 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(6): 10 - 19. [FU Zhiyong, LONG Jingjing, CHANG Ming. Distribution characteristics and evolution rules of sediment supply for debris flow occurrence around Longchi Town of Dujiangyan City, Sichuan Province [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2019, 30(6): 10 - 19. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 王运生, 罗永红, 吉峰, 等. 汶川大地震山地灾害发育的控制因素分析 [J]. 工程地质学报, 2008, 16(06): 759 - 763. [WANG Yunsheng, LUO Yonghong, JI Feng, et al. Analysis of the controlling factors on mountainous epicenter zones of the Wenchuan earthquake [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2008, 16(06): 759 - 763. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 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. Mountain slope ground motion topography amplification effect induced by Wenchuan earthquake [J]. *Journal of Mountain Science*, 2013, 31(2): 200 - 210. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 范刚. 含软弱夹层层状岩质边坡地震响应及稳定性判别时频方法研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2016. [FAN Gang. The dynamic response and time- frequency method for seismic stability evaluation of layered rock slope with weak intercalated layer [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016. (in Chinese with English abstract)]
- [9] VALAGUSSA A, MARA P. Seismic and geological controls on earthquake-induced landslide size [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2019, 506: 268 - 281.
- [10] CROISSANT T, STEER P. Seismic cycles, earthquakes, landslides and sediment fluxes: Linking tectonics to surface processes using a reduced-complexity model [J]. *Geomorphology*, 2018, 339: 87 - 103.
- [11] GUAN Z C, ZHOU Y. The seismic responses and seismic properties of large section mountain tunnel based on shaking table tests [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, 90: 283 - 293.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] SU W C, HUANG S C. Identification of Structural Stiffness Parameters via Wavelet Packet from Seismic Response [J]. *Procedia Engineering*, 2017, 199: 1032 - 1037.
- [15] 王运生, 贺建先, 罗永红, 等. 康定 $M_s5.8$ 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, et al. Seismic responses of Lengzhuguan slope during Kangding $M_s5.8$ earthquake [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2015, 50(5): 838 - 844. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 刘峡, 张学民. 小波变换与地震信号特征分析 [J]. 地震, 2002, 22(3): 51 - 57. [LIU Xia, ZHANG Xuemin. Wavelet transform and seismic signal analysis [J]. *Earthquake*, 2002, 22(3): 51 - 57. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 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: 190-192. [LUO Yonghong. Study on Response Law of complex slope under earthquake action [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011: 190-192. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 贺建先, 王运生, 罗永红, 等. 康定 $M_s6.3$ 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, et al. Monitoring result analysis of slope seismic response during

- the Kangding ms6 [J] . *Journal of Engineering Geology*, 2015, 23(3): 383 – 393. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 祁生文, 许强, 刘春玲, 等. 汶川地震极重灾区地质背景及次生斜坡灾害空间发育规律 [J] . *工程地质学报*, 2009, 17(1): 39 – 49. [QI Shengwen, XU Qiang, LIU Chunling, et al. Slope instabilities in the severest disaster areas of 5·12 Wenchuan earthquake [J] . *Journal of Engineering Geology*, 2009, 17(1): 39 – 49. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 张维辰, 朱凯光, 池成全, 等. 基于小波变换的 2013 年芦山 MS7.0 地震前姑咱台钻孔应变异常时频分析 [J] . *地震学报*, 2019, 41(2): 230 – 238. [ZHANG Weichen, ZHU Kaiguang, CHI Chengquan, et al. Time-frequency analyses for borehole strain anomaly at Guzan station before 2013 Lushan MS7.0 earthquake based on wavelet transform [J] . *Acta Seismologica Sinica*, 2019, 41(2): 230 – 238. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 刘峥, 石树中, 沈建文. 用美国西部强震记录讨论厚覆盖土层峰值加速度的放大效应 [J] . *西北地震学报*, 2008(3): 245 – 248+254. [LIU Zheng, SHI Shuzhong, SHENG Jianwen. Amplification of PGA on deep soft sites based on the digital records of strong motion obtained in the western U.S.A [J] . *Northwestern Seismological Journal*, 2008(3): 245 – 248+254. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 杨健, 万志清. 覆盖土层对地震剪切波的放大与吸收作用 [J] . *岩土工程学报*, 1995, 17(1): 96 – 100. [YANG Jian, WAN Zhiqing. Wamplification and absorption effect of deep soil to S wave [J] . *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1995, 17(1): 96 – 100. (in Chinese with English abstract)]