

文章编号: 1008-2786-(2015)3-339-09

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000043

## 芦山地震仁家村斜坡地震动监测

张磊, 王运生, 罗永红

(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 四川 成都 610059)

**摘 要:** 芦山地震次生地质灾害一个显著特点是地形放大效应。震后第二天, 课题组在极震区仁家村斜坡局部孤突地带谷底基岩及斜坡中部坡折部位各放置一台地震监测仪, 捕捉到一系列余震数据。数据显示, 坡折(2#监测点)相对谷底监测点(1#监测点, 二级阶地高程)的最大峰值加速度一般放大最大可达 3.4, 最小为 1, 说明坡折部位的地震动能大于谷底部位。阿里亚斯强度计算显示, 坡折部位阿里亚斯强度最大值为 0.004 855 m/s, 谷底部位阿里亚斯强度值最大为 0.003 145 m/s, 前者约为后者的 1.5 倍, 阿里亚斯强度放大系数最大可达 6.9。傅里叶频谱分析可知, 1#监测点主频范围为 4.81 ~ 22.81 Hz, 2#监测点主频范围为 3.31 ~ 20.94 Hz, 说明局部孤突地形并不影响坡体接收到地震波的丰富程度。通过与桅杆梁监测成果对比, 说明了软弱覆盖层地震波的低频部分有放大作用, 而对高频部分存在滤波作用; 三面临空山体表现更显著的放大效应。研究认为, 地震条件下局部孤突地形对地震动加速度有明显的放大效应, 因而在这些地区较易达到岩土体的强度极限, 从而增加震裂、崩塌、滑坡等次生地质灾害发生的数量和规模。在进行山区工程选址和城镇规划时应充分考虑局部地形的放大作用和影响。

**关键词:** 芦山地震; 仁家村; 斜坡地震动效应; 监测; 地形放大效应

中图分类号: P642.2

文献标志码: A

北京时间 2013-04-20T8:02, 四川省雅安市芦山县(30.3°N, 103.0°E)发生 Ms7.0 级地震(简称“4·20”芦山地震), 震源深度 13 km。地震发生后在地形较为平坦的地区主要表现为地表破裂, 而在地形较为复杂的高山峡谷地区由于地形效应, 地震波呈现放大或者减小效应。1971 年 San Fernando 地震时的 Pacoima 坝有很高的加速度记录及 1987 年 Whittier Narrows 地震的破坏情况, 表明有场地放大的效应。1976 年 Guatemala 地震中, 滑坡主要集中在山脊的一边, 而另一边则没有。E. Faccioli 等<sup>[1-4]</sup>通过盆地的高宽比及基岩和盆地沉积层速度比等一系列因素的系统研究, 获得了丰硕的成果。Celebi<sup>[5-6]</sup>通过研究以及总结别人的经验, 得出了许多关于地形放大效应的成果。罗永红等人对芦山地震在冷竹关的斜坡地震动响应检测数据进行了分析

研究<sup>[7]</sup>。黄润秋等通过大型振动台试验研究了反倾和顺层类结构岩体强震条件下的动力响应, 总结了 PGA 放大规律<sup>[8]</sup>。Dominic Assimaki 等通过数值模拟研究了地形、土体非线性以及土-结构相互作用对于构筑在悬崖的建筑物在地震动动力条件下的放大作用<sup>[9]</sup>。张力等通过 FLAC3D 模拟理县-小金高速公路旁边的岩质滑坡的在汶川地震中的动力响应, 研究了该边坡的峰值加速度的地形放大效应<sup>[10]</sup>。杨国香等采用物理模型试验研究强震作用下反倾层状结构岩质边坡动力响应特征及破坏过程, 其中总结了地形放大效应的规律<sup>[11]</sup>。黄润秋等利用 GIS 技术对汶川大地震的地质灾害进行统计分析发现, 其中单薄的山脊以及孤立或多面临空的山体对地震波具有显著的放大效应<sup>[12]</sup>。石崇等利用平面射线理论和方法推导出单面边坡地震的高程放

收稿日期(Received date): 2014-04-04; 改回日期(Accepted): 2014-08-20。

基金项目(Foundation item): 中国地调局项目(1212011220154; 12120113009700); 深切河谷强震条件下谷坡地震动响应监测研究(ZS0060)。

[The research is supported by the China Geological Survey Program(1212011220154; 12120113009700) and the research of the response of deep river valley brae under intense earthquake(ZS0060).]

作者简介(Biography): 张磊(1988-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 地质灾害防治。[Zhang Lei(1988-), male, master, majoring in geological hazards. ]TEL: 15828075004. E-mail: 455313682@qq.com

\* 通信作者(Corresponding author): 王运生 [Wang Yunsheng] wangys60@163.com

大效应理论解用于描述边坡高程放大效应<sup>[13]</sup>。就目前的研究状况而言,对于边坡动力反应规律的研究仍然需要深入,对于余震的现场观测资料亟待丰富。芦山地震后,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质调查局工作项目“川西深切河谷斜坡地震动评价技术研究”,在芦山县清仁乡布置了1个震后余震监测剖面,开展斜坡强震动监测研究,获取了大量有价值的地震监测数据,丰富了边坡动力反应现场观测资料。仁家村斜坡剖面中的两个强震监测仪,记录了芦山自2013-04-21—05-11的24次余震在该监测斜坡的三个方向(东西、南北、竖直)的加速度。本文拟通过对该监测剖面强震记录数据,结合监测点的岩性、地形等因素分析该斜坡剖面的地震动地形放大效应,揭示该监测斜坡剖面在芦山强震作用下的地形放大系数及其影响因素,为强震条件下斜坡动力稳定性评价及成灾机理提供科学依据。

1 监测剖面概况

清仁乡剖面位于青衣江右岸芦山县清仁乡仁家村仁加水电站内,距芦山县城直线距离12 km,距芦山 Ms7.0 级地震震中约10 km。监测剖面地处山麓(图1),出露岩性为名山组(Em)含砾砂岩、不等粒砂岩地表受风化、河谷深切卸荷作用,强度较低,发育有1.0~2.0 m厚的强风化层。根据清仁乡两岸斜坡地形、工程地质条件,布置了两台监测仪(图1、2),各监测点基本信息见表1。监测点选用中国地震局工程力学研究所与成都理工大学地质灾害防治国家重点实验室联合开发生产的GOINET山地斜坡动力响应检测仪,其主要性能指标为:转换精度24位,采样率可设置范围:1~6 000 Hz/通道,通道间相互独立无干扰,输入通道数3、6通道,尺寸150 mm×120 mm×50 mm。

2 芦山地震动监测数据分析

仪器记录了“4·20”芦山地震从2014-04-

21—05-11的23次余震(表2),其中4级以上6次,3级到4级之间16次,3级以下1次。各监测点余震地震动响应特征见表2,4级以上余震加速度时程曲线见图3。



图1 仁家村斜坡各监测点位置图

Fig.1 Location of the monitoring points on the Renjia village slope

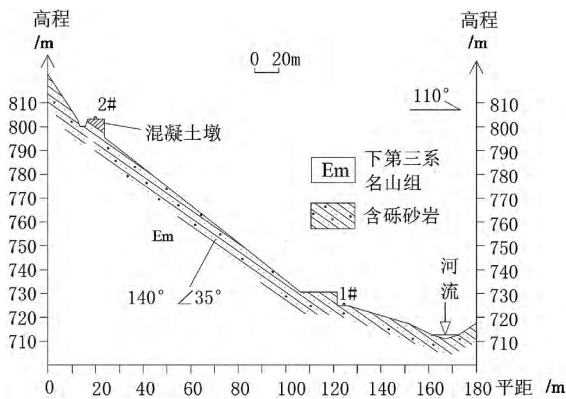


图2 仁家村监测剖面图

Fig.2 Monitoring geological profile of the Renjia village

通过对仁家村1#和2#监测点的强震动监测数据(表3)分析,可得2#监测点的最大峰值加速度为0.689 689 m/s<sup>2</sup>,1#监测点的最大峰值加速度为0.484 943 m/s<sup>2</sup>,坡折部位(1#监测点797 m)约为谷底(2#监测点723 m)的1.4倍。同次余震坡折相对谷底监测点的最大峰值加速度一般放大最大可达3.4,最小为1,说明坡折部位的地震动能量大于谷底。水平WE方向一般放大1.6倍,最大可达3.4倍;

表1 各监测点基本信息

Table 1 The basic information from the monitoring points

台站编号 Station No.	海拔 Altitude/m	距谷底高差 From the bottom height difference/m	经度 Longitude	纬度 Latitude	岩性 Lithology
1#	723	21	30°12'58.9"	102°56'17.33"	含砾砂岩、不等粒砂岩
2#	797	95	30°13'0.1"	102°56'13.82"	含砾砂岩、不等粒砂岩

表 2 仪器记录 4 级以上余震基本信息

Table 2 The basic information of the aftershocks which are more than 4 magnitude

日期 Date	时间 Time	纬度 Latitude( N ) / °	经度 Longitude( E ) / °	深度 Depth/km	震中距 Distance from the earthquake epicenter/m	震级类型及震级值 Magnitude type and magnitude values	参考地名 Reference place name
2013 - 04 - 21	17: 30: 27	30. 30	103. 00	20	10 779	Ms4. 2	四川邛崃
2013 - 04 - 21	22: 16: 56	30. 30	102. 90	20	9 763	Ms4. 3	四川芦山
2013 - 04 - 22	03: 36: 37. 1	30. 20	102. 93	20	2 011	ML4	四川芦山
2013 - 04 - 23	05: 54: 49. 5	30. 35	103. 00	20	15 760	Ms4. 5	四川芦山
2013 - 04 - 23	22: 07: 15. 7	30. 31	102. 92	19	10 193	ML4	四川芦山
2013 - 05 - 01	02: 14: 15. 5	30. 20	102. 90	20	4 091	Ms4. 2	四川芦山

注: 余震震源参数来自于地震数据共享中心,震中距来源于 Google。

表 3 4 级以上余震地震动参数特征

Table 3 The characteristics of ground shock parameters of the aftershocks which are more than 4 magnitude

地震时间( 震级) Time of earthquake ( magnitude)	海拔 Altitude /m	最大峰值加速度 The maximum peak aceleration/( m/s <sup>2</sup> )			主频 Dominant frequency/Hz			阿里亚斯强度 Arias intensity/( m/s)		
		EW	NS	UD	EW	NS	UD	EW	NS	UD
2013 - 04 - 21( Ms4. 2)	797	0. 449 363	0. 689 689	0. 450 353	8. 07	9. 43	4. 81	0. 002 473	0. 003 791	0. 000 356
	723	0. 373 431	0. 326 932	0. 293 377	5. 24	8. 81	3. 93	0. 001 849	0. 001 430	0. 000 268
2013 - 04 - 21( Ms4. 3)	797	0. 155 007	0. 147 808	0. 117 068	10. 54	14. 38	6. 47	0. 000 575	0. 000 522	0. 001 929
	723	0. 083 232	0. 112 617	0. 099 014	12. 53	3. 31	6. 54	0. 000 170	0. 000 286	0. 000 034
2013 - 04 - 22( ML4)	797	0. 533 896	0. 523 911	0. 632 873	8. 79	6. 69	7. 91	0. 003 769	0. 002 277	0. 000 317
	723	0. 230 681	0. 444 239	0. 387 251	6. 22	6. 63	4. 74	0. 000 568	0. 002 128	0. 000 194
2013 - 04 - 23( Ms4. 5)	797	0. 080 578	0. 050 173	0. 044 704	9. 38	18. 07	7. 53	0. 000 253	0. 000 149	0. 000 062
	723	0. 053 447	0. 061 232	0. 039 528	7. 49	4	7. 52	0. 000 124	0. 000 071	0. 000 030
2013 - 04 - 23( ML4)	797	0. 090 601	0. 060 405	0. 055 394	9. 69	10. 94	6. 46	0. 000 306	0. 000 240	0. 000 133
	723	0. 067 599	0. 050 942	0. 043 977	10. 09	9. 34	6. 59	0. 000 112	0. 000 124	0. 000 094
2013 - 05 - 01( Ms4. 2)	797	0. 475 915	0. 575 047	0. 233 652	8. 84	9. 28	7. 11	0. 004 597	0. 004 855	0. 000 041
	723	0. 484 943	0. 318 976	0. 233 652	10. 26	9. 53	7. 11	0. 002 454	0. 003 145	0. 000 020

\* 注: 余震震源参数来自于地震数据共享中心,阿里亚斯强度  $I_a = \frac{\pi}{2g} \int_0^{t_0} a^2(t) dt$

水平南北方向一般放大 1.4 倍,最大可达 2.1 倍; 竖直方向一般放大 1.3 倍,最大可达 1.9 倍。水平方向的放大倍数普遍高于竖直方向,其中水平 EW 方向的放大倍数高于水平 NS 方向的。由于山地峡谷地区地震波在自由临空面的反射作用导致地震波随着高程的增加会有放大效应,以及临空面上的面波在地表形态骤变处也存在反射和折射,所以在检测点 2#表现出明显的地震波放大现象。经祁生文等人研究均质、各向同性弹性单面坡,当坡高小于 1/5 波长时,边坡的动力反应呈动力低边坡效应,在坡肩部位相对坡脚部位会有明显的动力反应放大效应<sup>[14]</sup>。此次监测数据分析表明,在实际边坡中坡度改变部位也存在放大效应。关于坡肩部位与坡折部位在理论模型中是否有类似的地震动效应,本文由

于篇幅限制不做深入研究。

在 20 世纪 70 年代,智利大学的阿图·阿里亚斯教授构想出“机械地震强度”,提出用地震动过程中单质点弹性体系所消耗的单位质点的能量(  $I_a$  )作为地震动总强度。针对此次监测数据阿里亚斯强度计算显示(表 3),山上阿里亚斯强度最大值为 0.004 855 m/s,山下阿里亚斯强度值最大为 0.003 145 m/s,前者最大值约为后者的 1.5 倍,同次余震山上山下监测点的阿里亚斯强度值之比最大可达 6.9,最小为 1。由于阿里亚斯强度值的计算公式中含有加速度的平方,所以当加速度 > 1 时,经计算得到的阿里亚斯强度值会增大,当加速度 < 1 时,计算得到的阿里亚斯强度值会减小,从而导致放大效应差异显著,更明显的体显坡折监测点地震动能

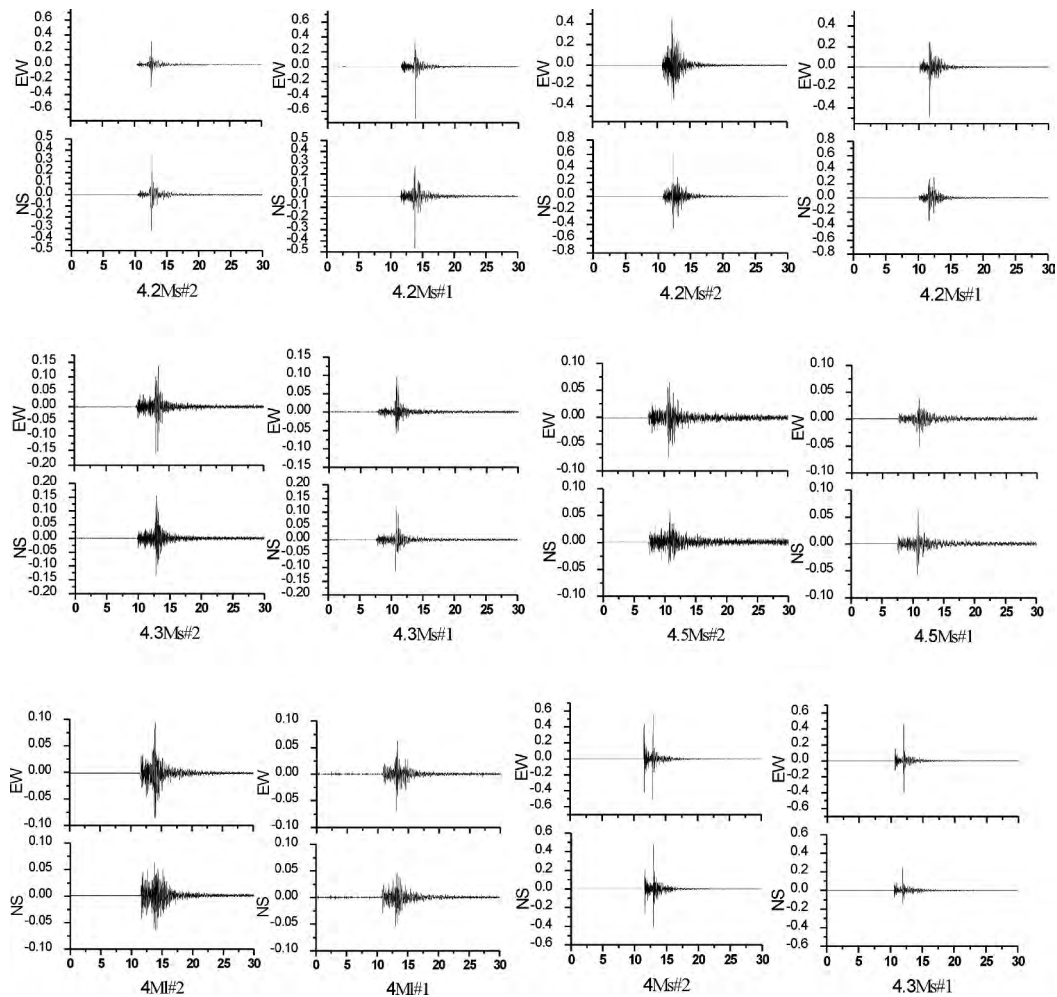


图 3 余震加速度时程曲线

Fig. 3 The comparison of the waveforms from monitoring points

量强于谷底。相对于加速度、速度峰值这样随机的地震动特征值,阿里亚斯强度能够反应整个震动持时的特征,从而更客观的描述了地震动的特征。进一步说明了监测坡体坡折部位相对于坡脚部位的地震动放大效应。坡折监测点的主频范围是 4.81 ~ 22.81 Hz,谷底监测点的主频范围是 3.93 ~ 20.94 Hz,两监测点的主频范围基本相同。

3 加速度反应谱特征

场地震动反应谱是指在给定的地震加速度作用期间内,场地的最大位移反应、速度反应和加速度反应随质点自振周期变化的曲线。选取了加速度峰值较大的 2 次余震 [2013-04-21( Ms4.2)、2013-04-22( M1.4) ] 参照《水工建筑物强震动安全监测技术规范》<sup>[15]</sup>校正加速度,分别计算其水平与竖直分量在阻尼比 0.05、0.1、0.2 作用下的加速度反应谱

如图 4、5。

监测点反应谱动力特性显示,随着阻尼比的增大响应加速度幅值减小,但反应谱曲线基本形态较为一致,表明场地介质的阻尼特性只影响其地震动振幅值,并不会影响地震动过程特性。各监测点反应谱特征周期见表 4,参照国家规定标准(表 5),各监测点均属于 I 类场地。

表 4 监测点各分量反应谱特征周期

Table 4 The response spectrum characteristic period of

		component from the monitoring points / ( T/s)		
余震 Aftershock	监测点 Monitoring points	水平南北向 Horizontal north south direction	水平东西向 Horizontal east- west direction	竖向向 Vertical direction
20130421( Ms4.2)	1#	0.110	0.11	0.070
	2#	0.120	0.08	0.080
20130422( M1.4)	1#	0.075	0.06	0.050
	2#	0.060	0.07	0.055

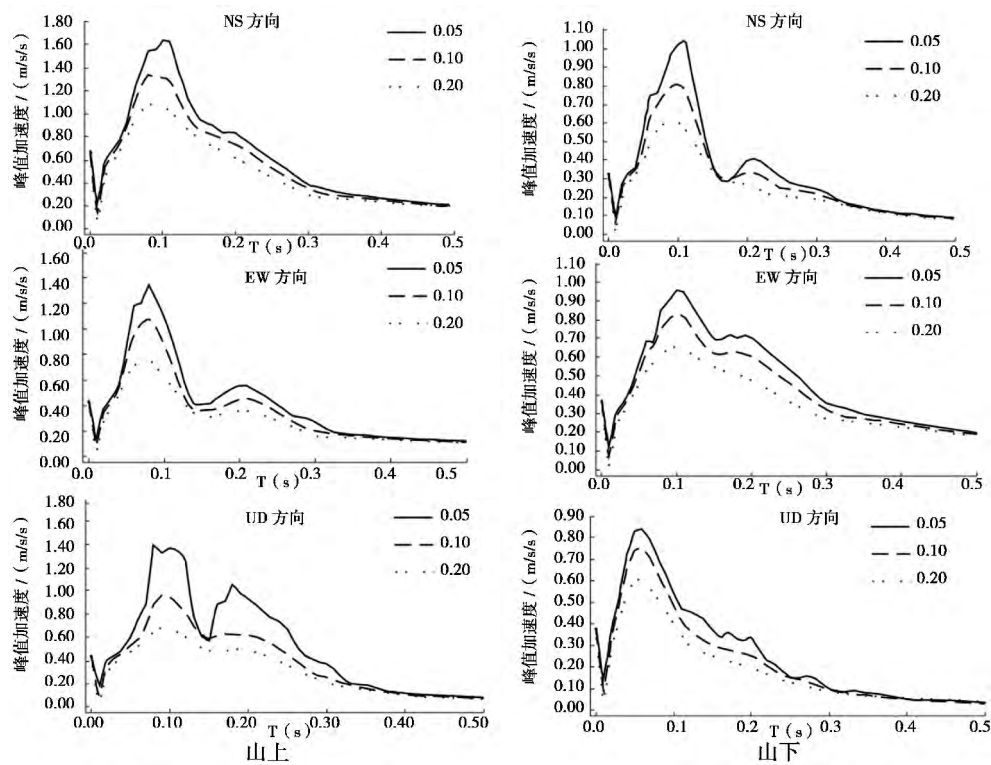


图4 (Ms4.2) 加速度反应谱

Fig. 4 (Ms4.2) The acceleration response spectra

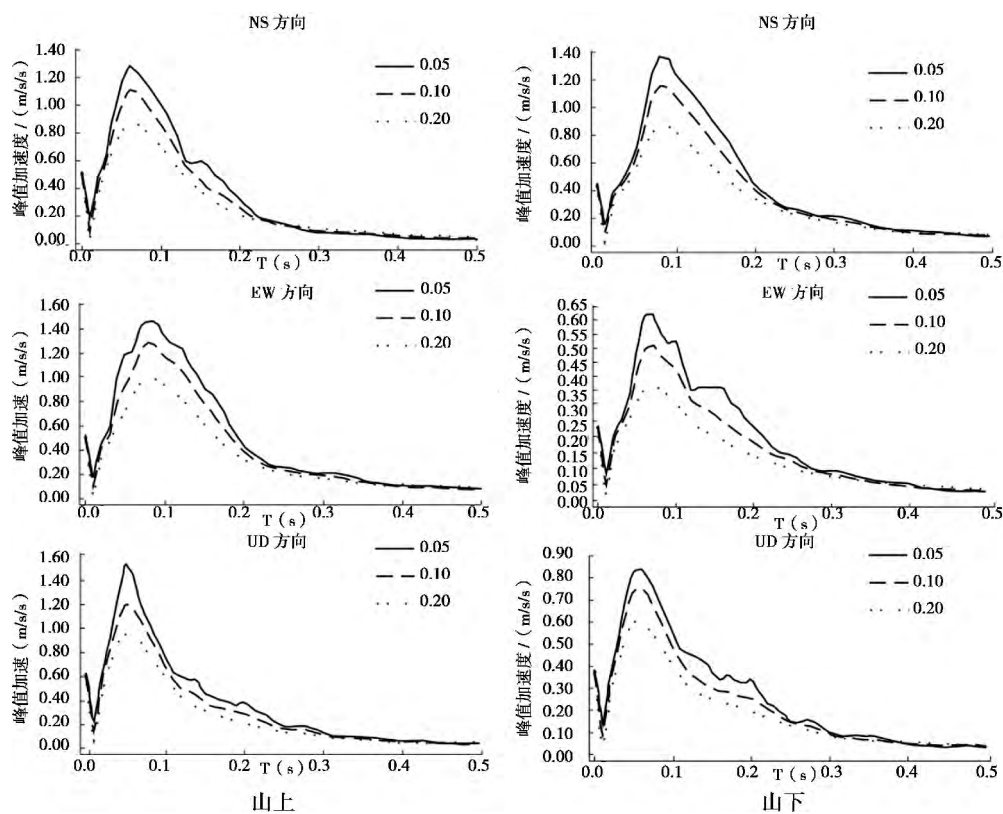


图5 (M14) 加速度反应谱

Fig. 5 (M14) The acceleration response spectra

表 5 GB5001-2001 规定的特征周期值

Table 5 Characteristic period specified in each GB5001-2001 /(T/s)

设计地震分组 Design earthquake group	场地类别 Site category			
	I	II	III	IV
第一组	0.25	0.35	0.45	0.65
第二组	0.3	0.4	0.55	0.75
第三组	0.35	0.45	0.65	0.9

4 斜坡地形放大效应规律

以山下即 1#监测点为参考点 2#监测点各方向的峰值加速度响应系数如图 6。

2#监测点竖直加速度峰值放大系数最大可达到 1.67,水平加速度峰值放大系数最大可达到 3.45。祁生文等人通过数值模拟得出:对于较低的边坡(小于 150 m),边坡坡面质点的位移、速度、加速度随高程的增大而线性增大,在坡肩部位达到最大<sup>[14]</sup>。2#监测点位置相对参考点高程高出 74 m,且位于坡度改变的拐点,通过监测数据分析证实了该放大效应的存在。可知在地震过程中,山区峡谷

一些局部地形有利于地震波峰值加速度的放大,因而在这些地区较早的达到岩土体的强度极限,从而增加震裂、崩塌、滑坡等次生地质灾害发生的数量和规模。由此,在烈度相同但是微地貌不同的地区会呈现出次生地质灾害发育差异。一些研究已表明<sup>[16]</sup>,中高山峡谷地区,震害通常出现在斜坡坡度突变部位、多面临空山体等地形<sup>[17]</sup>;地震作用下场地水平峰值加速度在坡脚处比峡谷处要低一些,在山顶处有放大效应。表中存在一些数据显示不但没有放大效应反而减小了,这是由于加速度峰值具有偶然性,并不能从整体反应地震动的强度。

5 芦山县仁家村与青川县桅杆梁监测成果对比

本次监测与桅杆梁监测两台监测仪器的高差十分相近,但是监测数据所表征的放大现象存在一定差异。本文选择了三次震级相同的地震(桅杆梁一次,仁家村两次)进行对比分析,数据如表 6。

仁家村地震监测在竖直、水平东西、水平南北三

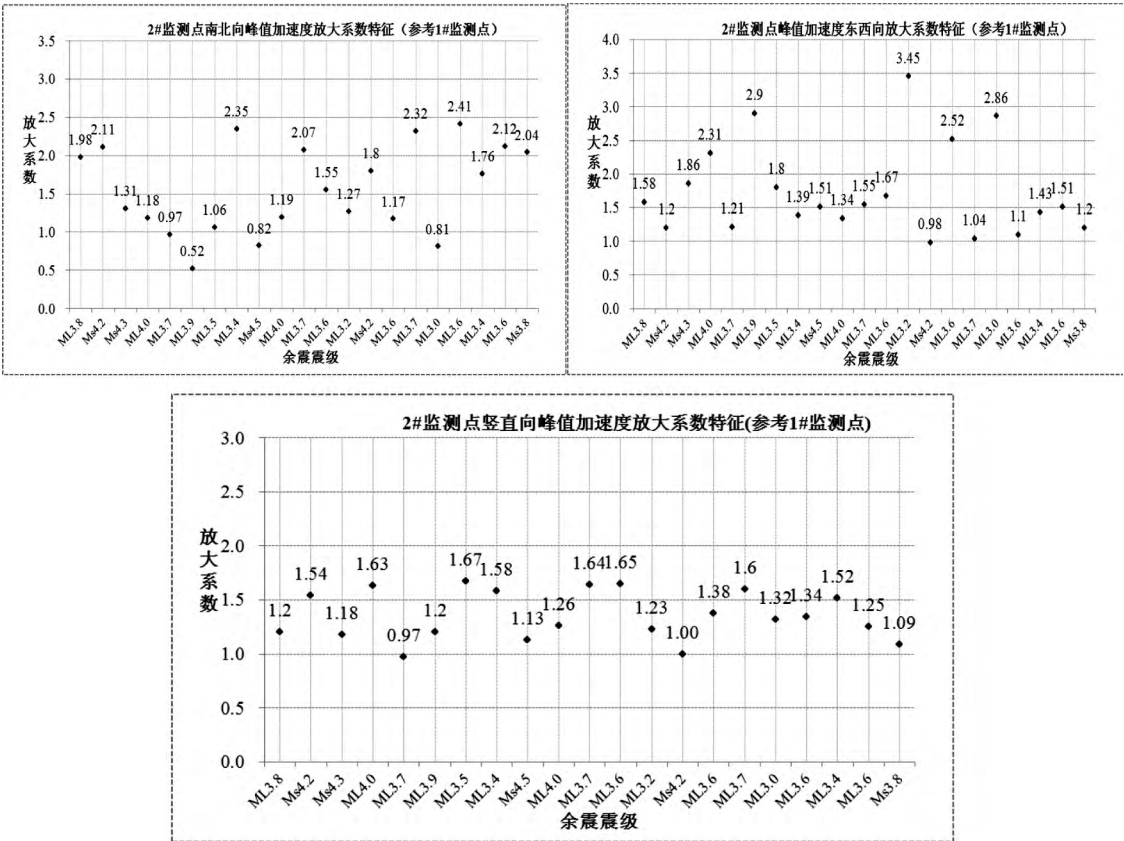


图 6 2#监测点加速度峰值放大系数

Fig. 6 The amplification coefficient of 2# monitoring point's PGA

表 6 桅杆梁与仁家村各监测点最大峰值加速度及主频值对比<sup>[18]</sup>  
Table 6 Comparison of most peak acceleration and main frequency

测点及高程 Measuring point and height		2009 - 05 - 14 平武 4. 2Ms							
		最大峰值加速度 The maximum peak acceleration 10 <sup>3</sup> m/s <sup>2</sup>			主频率值 Main frequency value/Hz				
		东西 East-west	南北 North-south	垂直 Vertical	东西 East-west	南北 North-south	垂直 Vertical	东西 East-west	南北 North-south
桅杆梁 Qingchuan	测点 Measvring point1( 805 m)	30. 85	33. 81	29. 38	20. 69	18. 63	20. 46		
	测点 Measvring point2( 875 m)	15. 23	542. 08	12. 08	5. 52	3. 6	5. 73		
	倍数关系 Multiple relationship	0. 49	16. 03	0. 41	0. 27	0. 19	0. 28		
测点及高程 Measuring point and height		2013 - 04 - 21 芦山 4. 2Ms							
		最大峰值加速度 The maximum peak acceleration 10 <sup>3</sup> m/s <sup>2</sup>			主频率值 Main frequency value/Hz				
		东西 East-west	南北 North-south	垂直 Vertical	东西 East-west	南北 North-south	垂直 Vertical	东西 East-west	南北 North-south
芦山 Lushan	测点 Measvring point 1( 723 m)	373. 43	326. 93	293. 38	5. 24	8. 81	3. 93		
	测点 Measvring point 2( 797 m)	449. 36	689. 69	450. 35	8. 07	9. 43	4. 81		
	倍数关系 Multiple relationship	1. 20	2. 11	1. 54	1. 54	1. 07	1. 22		
测点及高程 Measuring point and height		2013 - 05 - 01 芦山 4. 2Ms							
		最大峰值加速度 The maximum peak acceleration 10 <sup>3</sup> m/s <sup>2</sup>			主频率值 Main frequency value/Hz				
		东西 East-west	南北 North-south	垂直 Vertical	东西 East-west	南北 North-south	垂直 Vertical	东西 East-west	南北 North-south
	测点 Measvring point 1( 723 m)	484. 94	318. 98	233. 652	10. 26	9. 53	7. 11		
	测点 Measvring point 2( 797 m)	475. 92	575. 05	233. 652	8. 84	9. 28	7. 11		
	倍数关系 Multiple relationship	0. 98	1. 80	1. 00	0. 86	0. 97	1. 00		

个监测方向均表现出加速度随高程放大的现象 ,最大放大倍数 2. 11; 而桅杆梁地震监测则在水平东西、竖直方向最大峰值加速度均表现为衰减 ,在水平南北方向表现为放大 ,最大放大倍数 16. 03。本文认为 ,桅杆梁相对仁家村存在如此显著的放大现象 ,主要是由于桅杆梁监测剖面属于三面临空的山体 ,相比仁家村单面临空山体会呈现更显著的临空放大效应。

仁家村地震监测的各监测点的主频范围差异较小 ,而桅杆梁地震监测中监测点 2 的主频明显高于监测点 1 的。本文认为这是由于两检测剖面的场地条件差异所致。桅杆梁监测剖面监测点 2 具有厚层软弱覆盖层 ,该层对地震波的低频部分有放大作用 ,而对高频部分存在滤波作用; 而在仁家村地震监测中各监测点均无较厚覆盖层<sup>[18]</sup> ,从而导致两监测结果在主频方面的差异。

6 讨论

1. 本文的监测剖面 2#监测点处于局部孤突地形的坡度改变的部位 ,因此除了高程放大作用外还有孤突山梁端部鞭梢效应以及坡度改变放大效应 ,

较高程放大作用略高一些。

2. 本次监测仪器安置地段的岩性为含砾砂岩、不等粒砂岩 ,发育有 1. 0 ~ 2. 0 m 厚的强风化层。而不同岩性的地形放大倍数不相同 ,本文所研究内容仅是其中一例 ,不能对局部地形的放大效应做普遍性的总结 ,仅作趋势性说明。

3. 傅里叶频谱分析可知 ,1#监测点主频范围为 4. 81 ~ 22. 81 2#监测点主频范围为 3. 31 ~ 20. 94 ,说明局部孤突地形并不影响坡体接收到地震波的丰富程度。

4. 研究表明 ,斜坡地震动强度主控因素是地形 ,并不是随着高程持续增强的。

5. 引起我们注意的是 ,东西向的峰值加速度放大系数普遍要高于南北向的 ,也就是说沿监测剖面坡向方向的放大系数要大于垂直于坡向的。从微地貌分析 ,可能与监测山体微地貌上东侧临空( 图 1) 有一定关系 ,是否是唯一的控制因素 ,还需下一步深入分析。

7 结论

1. 仁家村斜坡地震动监测剖面的两台强震动监



测仪器,记录了芦山 Ms7.0 主震后多次余震在监测斜坡不同高程的动力响应过程,为分析边坡动力响应及成灾机理积累了宝贵的科学试验数据。

2. 通过 1#、2#监测点的强震动监测数据分析可知,山上阿里亚斯强度最大值为 0.004 855 m/s,山下阿里亚斯强度值最大为 0.003 145 m/s,前者最大值约为后者的 1.5 倍,同次余震山上山下监测点的阿里亚斯强度值之比最大可达 6.9,最小为 1.07。山上监测点地震动强于山下,反映了局部地形的放大效应。

3. 通过 1#、2#监测点的强震动监测数据分析可知,同次余震坡折相对谷底监测点的最大峰值加速度放大倍数最大可达 3.4,最小为 1,说明坡折部位的地震动能量大于谷底部位。水平东西方向一般放大 1.6 倍,最大可达 3.4 倍;水平南北方向一般放大 1.4 倍,最大可达 2.1 倍;竖直方向一般放大 1.3 倍,最大可达 1.9 倍。东西向的峰值加速度放大系数普遍要高于南北向的,即沿监测剖面坡向方向的放大系数要大于垂直于坡向。

4. 仁家村监测点地震动加速度反应谱分析显示,场地介质的阻尼特性对其振幅值影响明显,但并不影响地震动过程特性。各监测点特征周期显示均为 I 类场地。

5. 综合仁家村监测点芦山 Ms7.0 级强震数据及各监测点地形条件研究认为,强震条件下仁家村监测剖面存在明显的高程放大效应,山上的 2#监测点地震动强度明显高于山下 1#监测点。

6. 通过与青川县桅杆梁地震动监测成果的对比如,发现仁家村地震监测在竖直、水平东西、水平南北三个监测方向均表现高程放大效应;而桅杆梁地震动监测仅在南北方向放大效应明显,应是桅杆梁土体厚度大引起主频的差异所致。

## 参考文献(References)

- [1] Ak K. Local site effects on weak and strong ground motion[J]. *Tectonophysics*, 1933, 218: 93 – 111
- [2] Bard P Y. Effects surface geology on ground motion: recent results and remaining issues [G]//*Proc. 10th European Conference On Earth Quake Energy*. Vienna, 1994: 305 – 323
- [3] B Kennett. seismic wave propagation on stratified media[M]. New York: Cambridge University Press, 1983.
- [4] J H Steidl. Site response in southern California for probabilistic seismic hazard analysis [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2000, 90( 6B Suppl. ): 149 – S169
- [5] Celebi. The effects of topography on earthquake ground motion: a review and new results[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1988, 78: 42 – 63
- [6] Celebi. Topographic and geological amplification determined from strong-motion and aftershock records of 3 March 1985 Chile earthquake[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1987, 77: 1147 – 1107
- [7] 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 [罗永红, 王运生, 何源, 等. “4·20”芦山地震冷竹关斜坡地震动响应监测成果分析[J]. *成都理工大学学报: 科学技术版*, 2013, 40( 3 ): 232 – 241]
- [8] Huang Runqiu, Li Guo, Ju Nengpan. Shaking table test on strong earthquake response of stratified rock slopes[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32( 5 ): 865 – 875 [黄润秋, 李果, 巨能攀. 层状岩体斜坡强震动力响应的振动台试验[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32( 5 ): 865 – 875]
- [9] Dominic Assimaki, Eduardo. Kausel. Modified Topographic amplification Factors for a Single – Faced Slope due to Kinematic Soil – Structure Interaction [G]//*Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2007: 1414 – 1431
- [10] Zhang Li, Liu Jianhua, Fu Hongyuan, et al. Analysis on dynamic stability of rock slope in Seismic Area in Sichuan Province [G]//*Advances in Unsaturated Soil, Geo – Hazard, and Geo – Environmental Engineering*, 2011: 188 – 194
- [11] Yang Guoxiang, Ye Hailin, Wu Faquan, et al. Shaking table model test on dynamic response characteristics and failure mechanism of antidi layered rock slope[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 31( 11 ): 2214 – 2221 [杨国香, 叶海林, 伍法权, 等. 反倾层状岩质边坡动力响应特性及破坏机制振动台模型试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31( 11 ): 2214 – 2221]
- [12] Huang Runqiu, Li Weile. Research on development and distribution rules of geohazards induced by Wen Chuan earthquake on 12th May 2008[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27( 12 ): 2585 – 2592 [黄润秋, 李为乐. “5.12”汶川大地震触发地质灾害的发育分布规律研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27( 12 ): 2585 – 2592]
- [13] Shi Chong, Zhou Jiawen, Ren Qiang, et al. Ran theory solution of the elevation amplification effect on a single free face slope [J]. *Journal of Hohai University: Natural Science*, 2008, 36( 2 ): 238 – 241 [石崇, 周家文, 任强, 等. 单面边坡高程放大效应的射线理论解[J]. *河海大学学报: 自然科学版*, 2008, 36( 2 ): 238 – 241]
- [14] Qi Shengwen, Wu Faquan, Yan Fuzhang, et al. Rock slope dynamic response analysis [M]. Beijing: Science Press, 2007. [祁生文, 伍法权, 严福章, 等. 岩质边坡动力反应分析[M]. 北京: 科学出版社, 2007.]
- [15] DT/T5416 – 2009, 中华人民共和国电力行业标准/水工建筑物强震动安全监测技术规范[S]. DT/T5416 – 2009, The Electric Power Industry Standard of the People's Republic of China/Specifi-



- cation of Strong Motion Safety Monitoring for Hydraulic Structures [S].
- [16] Luo Yonghong ,Wang Yunsheng. Mountain slope ground motion topography amplification effect induced by Wenchuan earthquake [J]. Mountain Research 2013 ,31( 2) : 200 – 210 [ 罗永红 ,王运生. 汶川地震诱发山地斜坡地震动地形放大效应研究 [J]. 山地学报 2013 ,31( 2) : 200 – 210 ]
- [17] Zhang Yumin ,Li Huan ,Zhu Zeqi. Study on propagation characteristics of horizontal peak acceleration in gorge site [J]. World Earthquake Engineering 2011 ,27( 3) : 114 – 119 [ 张玉敏 ,李幻 ,朱泽奇. 高山峡谷场地地震动水平峰值加速度传播特性研究 [J]. 世界地震工程 2011 ,27( 3) : 114 – 119 ]
- [18] Luo Yonghong ,Wang Yunsheng ,Wang Fuhai ,et al. Monitoring of slope seismic response during aftershocks of Wenchuan earthquake in Qingchuan county [J]. Mountain Research 2010 ,18( 1) : 27 – 34 [ 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]. 山地学报 2010 ,18( 1) : 27 – 34 ]

## Monitoring Result Analysis of Renjia Village Slope Ground Shock Response of Lushan Earthquake in Sichuan ,China

ZHANG Lei ,WANG Yunsheng ,LUO Yonghong

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

**Abstract:** A illustrious phenomenon of the disaster induced by Lushan earthquake is the topography amplification effect. The research group just in the next day after “4 • 20” Lushan earthquake ,assigned two seismic instruments at the bottom of the valley( 1# monitoring point) and the middle of the slope( 2# monitoring point) respectively in the Renjia village meizoseismal area and collected a amount of data. The paper seeks to research the seismic response characteristics and topographic amplification effect through the analysis of the monitoring data. The analysis of the data indicates that the amplification coefficient of 2# monitoring point’ s PGA is from 1 to 3.4 ,illustrating that the seismic energy of the 2# monitoring point is much more than #1 monitoring point. The computation of the Arias intensity shows that the maximum of 2# monitoring point’ s Arias intensity is 0.004 855 m/s and the counterpart of 1# monitoring point is 0.003145 m/s ,the former is as 1.5 times as the latter. The maximum of the Arias intensity amplification coefficient is 6.9. According to the fouriers spectrum analysis ,it represents that the dominant frequency of 1# monitoring point is 4.81 ~ 22.81 Hz and that of 2# monitoring point is 3.31 ~ 20.94 Hz ,which indicates that the protrusion terrain has not influence on the number of earthquake waves. By comparison with Qingchuan monitoring achievement ,it has been verified that the soft covering layer amplifies the low frequency part of seismic wave and filters the high frequency part; three-side hanging mountain shows much more fierce amplification effect. Due to the monitoring data’ s computation and analysis ,it is concluded that ,under earthquake condition ,the protrusion terrain has obvious amplification effect on the ground acceleration. Therefore ,the rock mass in this area is much more easier to reach the strength limitation ,increasing the number and the scale of the collapse ,the landslide and the crack. It is suggested that we should take full consideration of the topography amplification effect ,when we choose the field and make the urban plan in the mountain areas.

**Key words:** Lushan earthquake; Renjia village; slope ground shock response; monitoring result; topography amplification effect