

汶川地震诱发山地斜坡震动的地形放大效应

罗永红 王运生

(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)

摘 要: 汶川地震诱发大量山地斜坡次生灾害具有明显的地形分布特征,对其地形放大效应研究具有重要的理论及实际意义。斜坡震害调查表明,宏观地貌单元对次生地质灾害的发育类型具有控制作用,中高山区以大中型滑坡、崩塌为主,低山及丘陵区以山体震裂、小型崩塌为主;峡谷形态对次生地质灾害的发育密度具有明显影响,其中“V”型峡谷发育密度高于“U”型峡谷;单薄山脊、条形山体、坡型转折部位、凸出地形等微地貌地形放大效应明显。监测显示,不同方向水平分量地震波峰值(*PHA*)相差可达 10 余倍,研究表明:地形尺寸与地震波波长的耦合作用使得地震动水平分量放大显著。

关键词: 汶川强震; 趋坡顶效应; 地形尺寸; 耦合作用; 地形水平放大效应

中图分类号: P511 X144

文献标志码: A

“5.12”汶川特大地震诱发数万处山地斜坡次生灾害。然而斜坡震害的调查表明,次生灾害的发育特征、分布高程、发生部位,与暴雨等因素诱发滑坡或崩塌存在较大差异。黄润秋等^[1]通过在 GIS 平台上对灾害点分布与高程的空间统计表明,汶川地震地质灾害主要分布在 650 ~ 2 000 m,其中又以 1 000 ~ 1 500 m 范围密度最高,达到 0.63 个/km²。坡度统计表明绝大多数地震地质灾害分布在 20° ~ 50°范围,其中 40° ~ 50°范围分布密度最大,而且地震地质灾害发生部位与微地貌形态有密切关系,通常发生在单薄山脊等地震波具有显著放大效应的部位。殷跃平^[2]对汶川八级地震地质灾害研究表明,地震对山区高陡斜坡的影响差异性非常大,在山顶上的放大作用非常显著。我国《建筑抗震设计规范》^[3]的 4.1.8 条规定,当需要在条状突出的山嘴、

高耸孤立的山丘、非岩石的陡坡、河岸及边坡边缘等不利地段建造丙类及以上建筑时,除保证其在地震作用下的稳定性外,尚应估计不利地段对设计地震动参数的可能放大效应。Jing Bo Liu^[4]对局部不规则地形地震动效应研究表明,孤立凸出地形对瑞利波通过时比体波具有更加显著的响应,而考虑相邻不规则地形的影响,地震动持时延长且谱比显示窄带峰值,地震动响应被放大。国外学者 Donald W. Griffiths^[5], M. Celebi^[6], Francisco J^[7], Shiann Jong lee^[8]等对地形效应开展了研究,得到了相应认识。汶川地震后调查表明,山地斜坡的地貌对地震作用下的次生灾害发育具有明显的影响或控制作用,同时震害的地形效应也是大量业界人士震后讨论的焦点之一,备受各界关注。因此对汶川地震斜坡地形效应研究具有重要的理论价值和工程意义。

收稿日期(Received date): 2012 - 08 - 11; 改回日期(Accepted): 2013 - 01 - 01。

基金项目(Foundation item): 中国地调局项目“西南地区重大地质灾害防治研究”——川西深切河谷斜坡地震动评价技术研究,编号 1212011220154; 自主课题项目: 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室自主研究课题资助; 国家自然科学基金项目(41072231) 等联合资助。[China Geological Survey Project: Research on deep valley slope seismic evaluation technology in western Sichuan. (1212011220154); State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection independent research projects(Ground motion topography effect); Youth Fund of the National Natural Science Foundation of China(41202211) joint funding.]

作者简介(Biography): 罗永红(1981 -) ,男,四川广安人,博士,讲师,从事工程地质教学及科研工作。[Luo Yonghong (1981 -) , male , Guang'an people Sichuan province , doctor , lecturer engaged in engineering geology teaching and research work.] E - mail: lyh445890689@ qq. com

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

1 龙门山区地貌发育特征

龙门山位于四川盆地西北边缘,为北东-南西走向的带状山脉,地处青藏高原与成都平原的交汇处,长约500 km,宽约30 km,最高峰达到4 984 m(九顶山),山前成都盆地最低高程为710~750 m,龙门山与山前地区高差>4 000 m,地形陡度变化的宽度仅15~20 km,其地形陡度比青藏高原南缘的喜马拉雅山脉的变化还要大,由此显示了龙门山地区是青藏高原边缘山脉中陡度变化最大的地区^[9-10]。依据山地高度分类^[11],海拔3 500~5 000 m为高山,1 000~3 500 m为中山,500~1 000 m为低山,<500 m为丘陵。其中地形切割深度1 000 m以上定为强烈切割中山,切割深度500~1 000 m为中等切割中山,切割100~500 m为轻微切割中山。龙门山区地形地貌复杂,地形高差悬殊,地域差异较大,地势整体由西北向东南逐渐倾斜(图1)。

研究区从西北向东南主要有高山、中山、低山、丘陵及平原五种地貌单元,其中高山区主要分布于彭州龙门山镇以北、都江堰市虹口乡和龙溪乡、崇州万担坪和大邑县火烧银一带,海拔最高处为大邑县双河乡境内的苗基岭,海拔5 364 m^[10]。都江堰至绵竹、汉旺,山脉海拔超过2 000 m,地形较为陡峻,

与河谷高差1 000 m左右,主峰为九顶山。绵竹至江油一带山脉海拔1 000~1 500 m,个别山峰2 000 m左右。江油东北海拔低于1 500 m,且与河谷高差<500 m。龙门山主要断裂对该区地貌的控制作用十分明显,在汶川-茂汶或映秀-北川断裂以西的龙门山主体部分,多为高山区,海拔可达4 000~5 000 m。对汶川地震高程统计表明^[1],失稳斜坡主要分布在800~2 000 m坡段范围,其中800~1 200 m坡段内发育最高。汶川地震地质灾害点分布与高程统计显示^[1],650 m高程以下灾害点密度仅为0.06个/km²,2 500 m高程以上地质灾害发育稀少,分布密度仅为0.05个/km,由此表明地形地貌高程对地震次生灾害的发育有重要的影响。

2 各地貌区地震次生地质灾害发育特点

龙门山地区高、中、低山、丘陵地貌发育,汶川特大地震触发各类型地貌产生大量次生灾害。调查显示,不同类型地貌区次生灾害发育密度、发育部位、规模及破坏特征等均存在一定差异。

2.1 低山及丘陵区震害发育特征

通过对丘陵及平原地区房屋建筑调查显示,一般居民建筑“Λ”型房屋屋顶震害表现为趋屋顶效应,通常导致尖状屋顶破坏明显(照片1,图2)。而对低

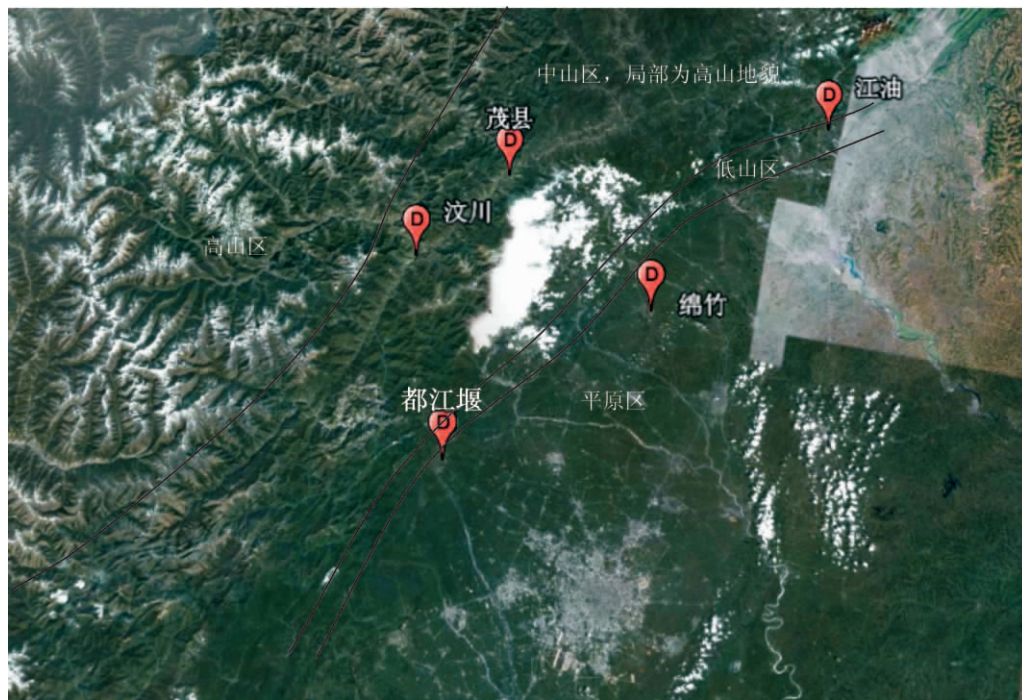


图1 龙门山地区地貌分区

Fig.1 The geomorphologic division of Longmen mountain area

山及丘陵地貌区震害调查显示,大型崩塌、滑坡灾害并不发育,主要以山体的裂缝、小型崩塌灾害为主,且震害趋坡顶效应亦较明显,地震通常导致山顶震裂、沿山脊破坏为主;以青川县城乔庄镇四周山体震害为例。青川县位于龙门山断裂带北段,县城位于乔庄镇,四周低山地貌发育,青川-平武断裂穿越县

城。汶川特大地震中,青川县城南西方向的桅杆梁、西北方向的狮子梁及北方向东山斜坡破坏最为严重。县城西南向桅杆梁山体地形凸出(照片2,图3),震后调查显示,山体顶部震裂缝发育形成贯通山脊的拉裂缝,长约300 m(图4),山顶建筑物被拉裂破坏(照片4)。



照片1 绵竹九龙乡地区寺庙屋顶破坏特征
Photo.1 Temple top building failure characteristics of Mianzhu Jiulong town area

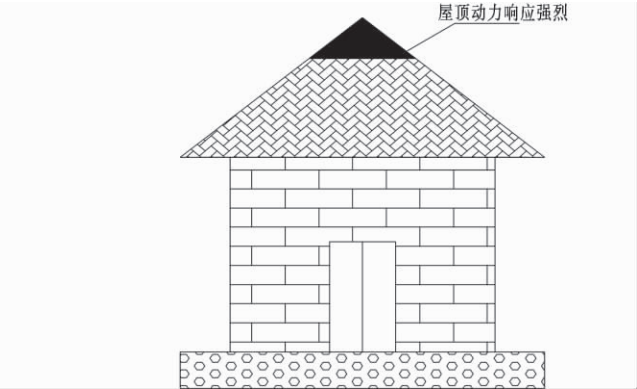


图2 “A”型屋顶动力响应强烈部位示意图
Fig.2 Sketch map of “A” type roof dynamic response strong position



照片2 桅杆梁斜坡地形地貌
Photo.2 Topography of Weigan hill

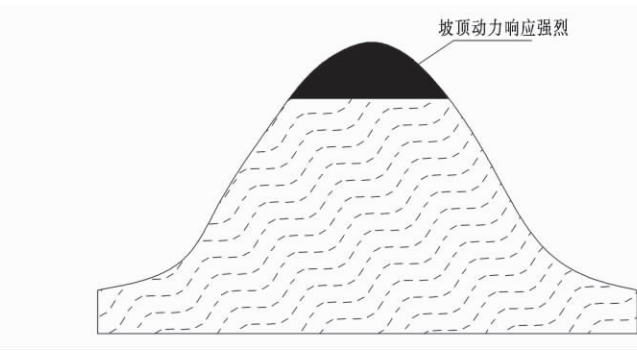


图3 塔状山体动力响应强烈部位示意图
Fig.3 Sketch map of tower hill dynamic response strong position



图4 桅杆梁斜坡遥感图
Fig. 4 Remote sensing map of Weigan hill



照片4 山体顶部建筑物拉裂破坏
Photo.4 Hill top buildings was tension crack



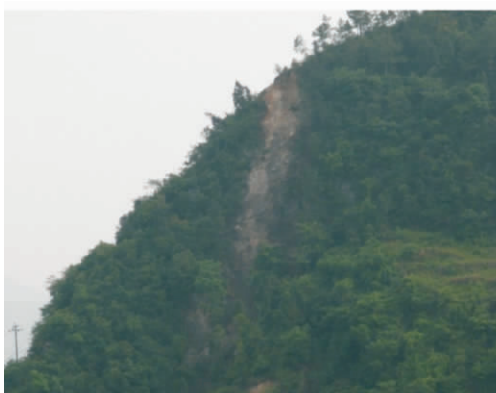
照片5 狮子梁斜坡地形地貌

Photo. 5 Topography of Shizi mountain



照片6 狮子梁顶部发育地震裂缝

Photo. 6 Top of Shizi mountain development earthquake crack



照片7 狮子梁端部凸出地形发育小型崩塌

Photo. 7 Protruding topography development small collapse at the end of Shizi mountain



照片8 狮子梁端部凸出地形顶部塔基震陷破坏

Photo. 8 The top of protruding topography tower foundation seismic subsidence failure



照片9 东山斜坡地形地貌

Photo. 9 Topography of Dongshan mountain

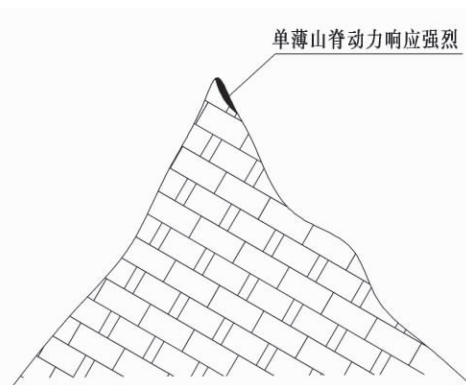


图5 单薄山脊动力响应强烈部位示意图

Fig. 5 Sketch map of thin ridge dynamic response strong position

县城北西方向的狮子梁沿山脊变形长约1 km, 山体顶部地震裂缝发育,而在狮子梁头部凸出地形部位地震动放大效应明显,震害严重(照片5~8)。

青川县城北东测东山斜坡呈条形单薄山脊,汶

川强震导致单薄山脊地形放大效应明显(照片9,图5),震害沿山脊分布,主要变形方式为岩体松动及震裂,破坏形式以崩塌为主(图6,照片10)。

青川县城各低山斜坡破坏特征显示,山顶地震

动力响应最为强烈,缓坡及山麓破坏相对不明显。与此同时,青川县城乔庄镇周围并非所有低山的山顶均遭受严重的破坏,通常为多面临空的塔状山顶、条形山体或单薄山脊破坏最为严重。

2.2 中山区震害发育特征

与低山区山顶破坏较为严重相比,中山地貌区山坡破坏最为严重,山顶及山麓震害并不发育。与此同时,直线形山坡及凸形山坡震害发育,凹形山坡震害不发育(图7),通常以大型滑坡、崩塌等次生灾害为主(照片11)。

通过对中山斜坡震害微地貌发育特征分析表明,次生地质灾害多发生在山脊两侧、坡形的转折部

位、多面临空的单薄山体、孤立山脊等斜坡部位(照片12~17)。

中山区震害调查显示,双沟交汇处的分水岭突出山体在地震作用下易形成崩塌或滑坡(照片18~19,图8~9)。

对峡谷区震害分布密度对比显示,峡谷形态特征对震害发育密度具有明显的影响,如映秀~汶川岷江高山峡谷段统计表明,中下游“V”型深切峡谷段地质灾害分布密度达8~11处/km,而上游草坡大桥~汶川“U”型峡谷段地质灾害分布密度不足5处/km(照片20~21)。草坡电厂至草坡乡政府“V”型峡谷段地质灾害发育密度较大,草坡乡政府以上

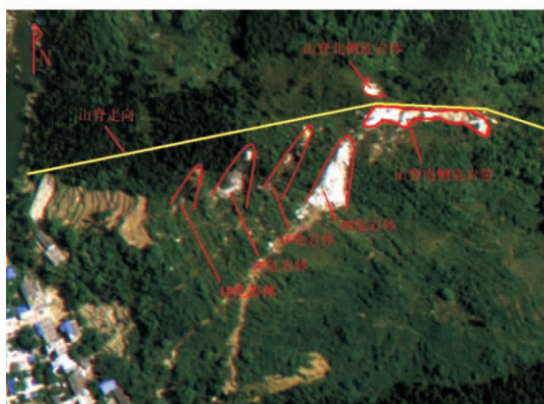


图6 东山斜坡遥感图

Fig. 6 Remote sensing map of Dongsan mountain



照片10 沿东山山脊南侧崩塌体

Photo. 10 Along south ridge of Dongsan mountain development collapse



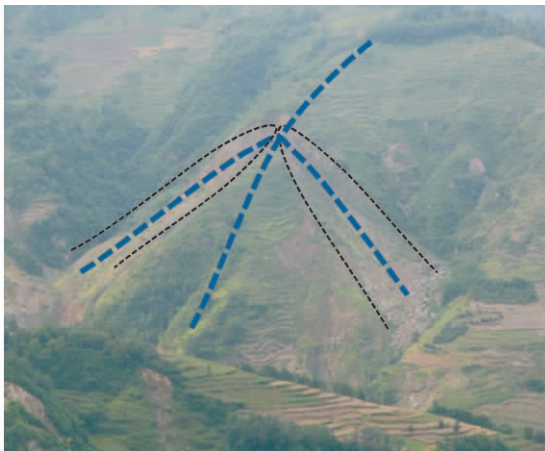
图7 国道213 银杏乡岷江右岸地震地质灾害发育特征遥感图(来源 google)

Fig. 7 Remote sensing map of earthquake geo-hazards development characteristics on National Highway No. 213 Yinxing town right bank of Minjiang river(From google)



照片 11 唐家山中山区大型地震滑坡发育特征

Photo. 11 Large seismic landslide development characteristics of Tangjiashan middle mountain area



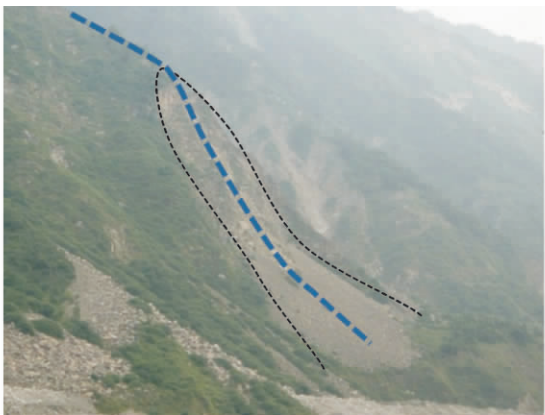
照片 12 山脊两侧发育地震崩塌

Photo. 12 On both sides of ridge development earthquake collapse



照片 13 山脊两侧发育地震滑坡

Photo. 13 On both sides of ridge development earthquake landslides



照片 14 坡形转折部位发育地震崩塌

Photo. 14 Slope beak position development earthquake collapse



照片 15 直线形山坡发育地震崩塌

Photo. 15 Linear hillside development earthquake collapse

“U”型峡谷段地质灾害并不发育(照片 22 ~ 23) 。

2. 3 高中山区大型滑坡地形地貌发育特征

“5. 12”汶川特大地震诱发龙门山地区产生了上百个大型 – 巨型地震滑坡^[1, 12]。与一般暴雨等因素诱发的典型滑坡不同, 地震大型滑坡多发生在高

中山峡谷区, 滑坡往往位于高陡边坡的上部或顶部 (拔河高度上百米) ,王运生等称之为高位滑坡^[13] , 多数滑坡的滑源区呈三面临空的山体、孤立山脊、沟 – 脊 – 沟地形或河谷凹岸, 已有研究表明这些地形部位^[6, 13 – 15]地震加速度得到放大, 坡顶的水平峰值



照片 16 三面临空山体发育地震崩塌

Photo. 16 Three facing empty mountain development earthquake collapse



照片 17 山脊次生灾害发育

Photo. 17 Secondary hazards development on ridge



照片 18 青川刘家湾双沟交汇处分水岭突出山脊发育地震滑坡
Photo. 18 Ridge of double ditch intersection watershed development seismic landslides in Liujiawan Qingchuan county



图 8 刘家湾滑坡地形遥感图(来源 google)
Fig. 8 Remote sensing map topography of Liujiawan landslide(From google)



照片 19 银杏乡洱沟内双沟交汇处分水岭突出山脊破坏严重
Photo. 19 Ridge of double ditch intersection watershed destroyed serious in Ergou of Yinxing town

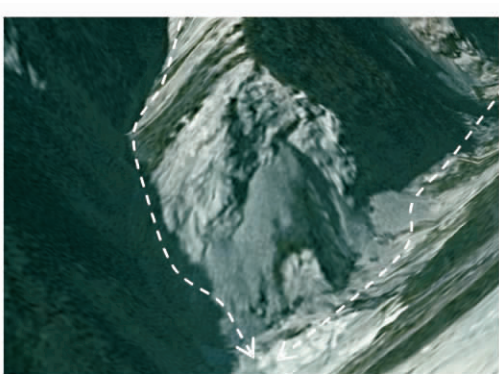


图 9 洱沟崩塌地形遥感图(来源 google)
Fig. 9 Remote sensing map of Ergou collapse topography(From google)

加速度可以增大到谷底的 2 ~ 3 倍。统计表明(表 1) ,大型滑坡滑源区相对高度多在 200 m 以上 ,最大可以达到 1 200 m ,最小发育坡度为 20° ,一般为 30° ~ 50° ,局部为 50° ~ 70°。

综上 ,汶川地震诱发山地斜坡次生灾害主要分布在中山及低山区 ,高山区不发育。其中低山及丘陵区 ,震害趋坡顶效应明显 ,震害类型主要以沿山脊的震裂缝、小型崩塌为主;以塔状山顶、条形山体、单

薄山脊、孤立山嘴地震破坏效应最为明显。

中山区,次生地质灾害多发育在斜坡中上部,坡顶次之,坡麓不发育。灾害类型通常以大中型滑坡、崩塌为主;以凸形山坡、直线形山坡、山嘴两侧、坡型转折部位、多面临空的山体、孤立山脊、双沟交汇处分水岭山脊地震次生灾害最为发育;中山峡谷区,“V”型峡谷区地震地质灾害发育密度高于“U”型峡谷地貌。由此表明,峡谷岸坡的距离对斜坡震害具有明显的影响。

3 斜坡地震动地形效应监测

斜坡地震动放大文献综述研究表明^[17],山顶的地震加速度比山脚放大效应明显,但在坡顶同一监测点其水平分量不同方向的峰值加速度值相差较大的鲜有报道。“5.12”汶川地震后在青川桅杆梁山顶 875 m 高程地震动观测台站显示,该监测点水平

南北分量峰值加速度(PGA)一般为东西分量的 5~7 倍,最大可达到 16~18 倍。与此同时,时程波形对比显示,水平南北向波形较水平东西及垂直向波形更加清晰,干扰成分更少(表 2)。

桅杆梁山体总体呈 NWW-SEE 走向的条形山体,山脊向 SSW 凸出的弧形。“5.12”汶川地震震害勘察显示,桅杆梁斜坡顶部地震动响应异常强烈,地震裂缝发育且沿山脊方向呈 NWW 向延伸,贯通性好,主要以拉裂、下错为主,拉裂缝宽度达 15~20 cm,最大下错量可达 30 cm(见照片 4)。根据国土资源部对坡顶裂缝的位移预警监测显示,2008-05-24 青川 6.4 级余震造成山体顶部裂缝扩展了约 1 cm。由此表明,无论是在汶川主震中,还是在较大余震的作用下,桅杆梁斜坡的变形破坏特征具有相似的重复性。分析可知,桅杆梁近 EW 走向的山脊在地震作用下沿其水平南北方向运动更为强烈,即沿南北两侧“甩动”强烈,因而容易形成沿山脊走向



照片 20 岷江中下游“V”型峡谷区地震地质灾害发育
Photo. 20 Middle and lower reaches of Minjiang V-shaped river valley seismic geo-hazards development



照片 21 岷江中上游“U”型峡谷区震害少于中下游
Photo. 21 Middle and upper reaches of Minjiang U-shaped river valley seismic geo-hazards less than middle and lower reaches



照片 22 草坡电站至草坡乡政府段“V”型峡谷区地震地质灾害发育
Photo. 22 From Caopo hydropower station to Caopo township government V-shaped river valley seismic geo-hazards development



照片 23 草坡乡政府上游“U”型峡谷区震害不发育
Photo. 23 Upstream of Caopo township government U-shaped river valley seismic geo-hazards are not development

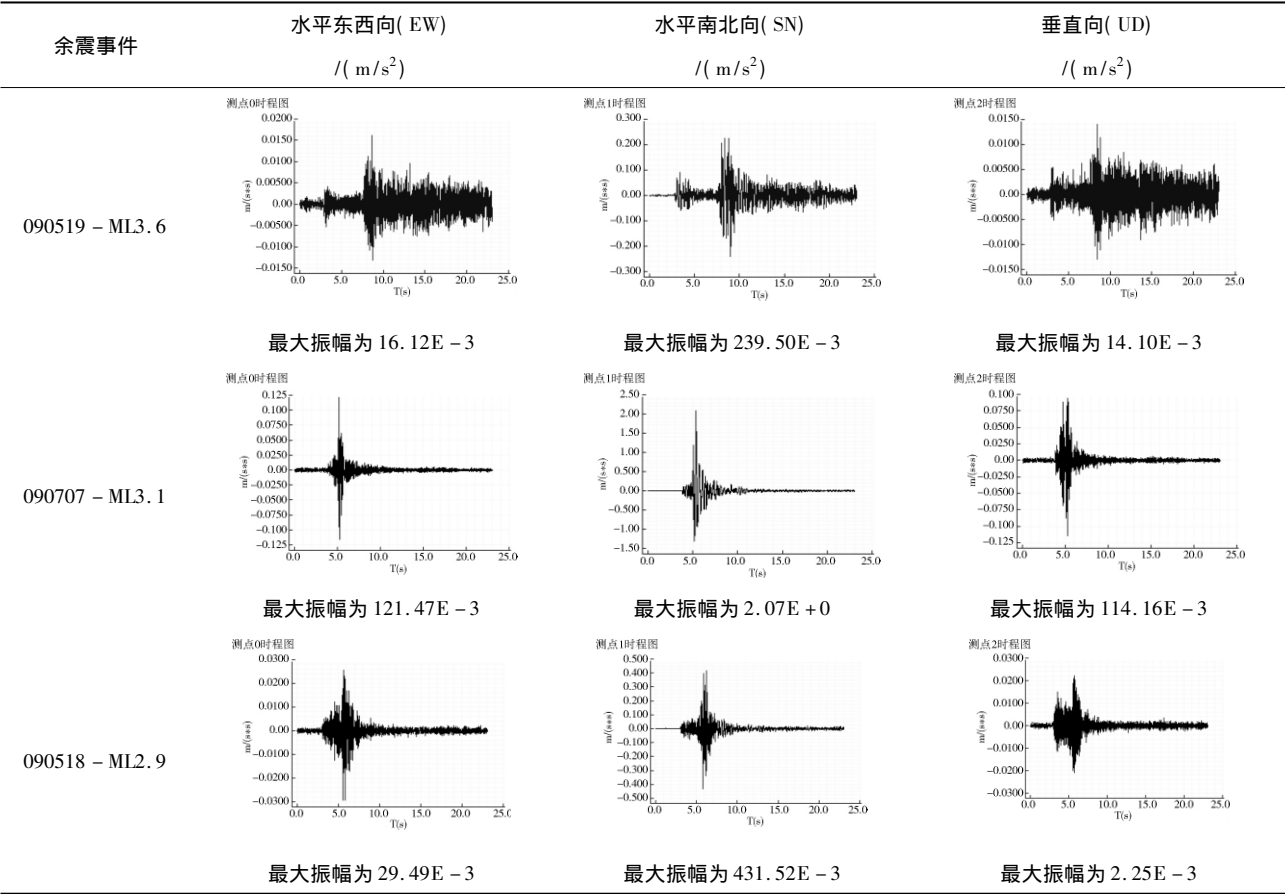
表 1 汶川地震大型滑坡地貌发育特征

Table 1 Large landslide topography characteristics of Wenchuan Earthquake

汶川地震诱发大型滑坡	滑坡堆积方量 $/(\times 10^6 \text{ m}^3)$	滑源区高程范围 /m	滑源区高差 /m	坡度 / $^\circ$	山体破坏部位地形 及微地貌	所在区域地形地貌
安县大光包滑坡	750	1 840 ~ 3 040	1 200	55 ~ 60	孤立山脊	强烈切割中山峡谷地貌
安县罐滩滑坡	4.68	708 ~ 1 170	462	45 ~ 47	反倾边坡	中山河谷地貌
安县老鹰岩滑坡	1.5	1 460 ~ 1 920	460	40 ~ 60	三面临空的突兀山峰	中山峡谷地貌
北川唐家山滑坡	20.37	752 ~ 1 192	540	40	三面临空的河谷凹岸	中山河谷地貌
北川王家岩滑坡	1.4	660 ~ 980	320	50	两冲沟之间,三面临空	中山河谷地貌
北川中学新区滑坡	0.5	750 ~ 950	200	30 ~ 40	反倾边坡	中山河谷地貌
青川东河口滑坡	15	1 090 ~ 1 350	260	26	不对称簸箕形	中山河谷地貌
青川窝前滑坡	12	1 620 ~ 1 875	227	35	陡坡地形	中山河谷地貌
青川石板沟滑坡	4.5	740 ~ 980	240	20	河谷地形	中山河谷地貌
青川县大岩壳滑坡	0.6	1 520 ~ 1 720	200	40 ~ 50	孤立山脊	中山峡谷地貌
青川县董家滑坡	0.88	1 021 ~ 1 221	200	30 ~ 50	凹岸凸出斜坡	中山峡谷地貌
汶川县牛眠沟滑坡	7.5	1 450 ~ 1 800	350	30 ~ 40	河谷地形	中山河谷地貌
绵竹文家沟滑坡	27.5	1 780 ~ 2 340	560	32 ~ 37	梯形	中山河谷地貌
彭州市谢家店子滑坡	4.0	1 460 ~ 1 900	440	45 ~ 50	沟 - 脊 - 沟相间地形	中山河谷地貌
平武县平溪村滑坡	0.65	1 250 ~ 1 390	140	35 ~ 40	河流弯道处,三面临空	中山河谷地貌
平武县镇家山滑坡	3.2	1 115 ~ 1 225 1 165 ~ 1 225	60 ~ 110	50 ~ 60	三面临空的单薄山脊	中山河谷地貌

表 2 桅杆梁坡顶典型余震时程波形及振幅值特征

Table 2 Typical aftershock time waveform and amplitude values characteristics Of Weiganliang slope top



发育的地震裂缝。而汶川地震后多次余震监测显示,坡顶水平南北分量振幅值明显强于水平东西分量,即表现为局部地形对地震动力响应的控制效应。

频谱分析显示,水平东西向主频率值主要为10~25 Hz,水平南北向主要为2.5~4.0 Hz,竖向向主要为5~6 Hz,其水平南北分量主频率值主要为低频成分。众所周知,横波的质点振动与波的传播方向相互垂直,S波传播的波速一般为3.2~4.0 km/s,而实际的地震波记录中包含多种波长波,而且短波长波叠加在长波长地震波之上,根据波长计算公式 $\lambda = V_s T$,取波速3.2 km/s,同时取桅杆梁坡顶(875 m)水平南北向主频率值2.5~4 Hz进行估算可知,地震波长 λ 约为0.80~1.28 km, $\lambda/2$ 波长约为0.4~0.64 km,而地震波半波长与该山体长(约650 m)较接近,且监测点位于坡体SEE端,接近于半波长的波峰处,其水平南北分量的振幅显著放大。罗永红^[16]对青川东山~狮子梁斜坡地震动主频率随高程变化统计表明,地震动主频率值随监测点高程增加趋于减小,因此笔者认为,地震波在斜坡顶部或上部以中低频地震波为主,其半波长刚好与多数山体地形尺寸接近。据此推测,汶川地震诱发单薄山脊、条形山体、凸出山体等地形放大效应与地震波半波长相关,当地形尺寸接近地震波半波长波峰时,局部地形与波峰的耦合作用下地形放大效应显著,斜坡震害发育。

4 结论

地形条件是地震诱发斜坡次生灾害的基本要素之一,亦是龙门山地区斜坡次生灾害异常发育的主要影响因素。斜坡地形放大效应导致坡体损伤或失稳破坏是地震地质灾害区别于暴雨诱发因素的特殊类型。强震作用下,由于地震波丰富的波长成分与地形尺寸耦合作用,产生的动力效应超过或远远超过斜坡岩土体的强度进而产生破坏。汶川地震诱发斜坡地震动地形效应主要有如下特点:1. 地震次生地质灾害在中山及低山区较发育,高山区不发育;2. “V”型峡谷区次生灾害强于“U”型峡谷;3. 中山区次生地质灾害在斜坡中上部较发育,山顶次之,山麓不发育,以大中型滑坡、崩塌为主;4. 低山及丘陵区次生地质灾害趋坡顶,以山体、山脊的震裂、小型崩塌为主;5. 中山区斜坡的凸出地形、坡型转折部位、直线型坡体、山嘴两侧等微地貌地形放大效应明显,

震害较为发育;6. 低山及丘陵区塔状山体、条形山体、单薄山脊、孤立山嘴等地形放大效应明显,震害较为发育;7. 大型滑坡地形最小发育坡度为20°,一般为30°~50°,局部为50°~70°;8. 局部地形对地震动放大具有控制作用,地形尺寸与地震波波长的耦合使得地震动水平分量放大显著。

致谢:文中所引用的唐家山滑坡、紫坪铺岸坡破坏等照片由汶川地震后各抗震救灾相关单位斜坡震害调查照片汇集资料提供,在此一并表示感谢。

参考文献(References)

- [1] Huang Runqiu, Tang Chuan, Li Yong, et al. Geohazard assessment of the Wenchuan Earthquake [M]. Beijing: Science and Technology Press, 2009: 236-237 [黄润秋, 唐川, 李勇, 等. 汶川地震地质灾害研究[M]. 北京: 科技出版社, 2009: 236-237, 268-269]
- [2] Yin Yueping. Researches on the geo-hazards triggered by Wenchuan earthquake SiChuan [J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(4): 433-444 [殷跃平. 汶川八级地震地质灾害研究[J]. 工程地质学报, 2008, 16(4): 433-444]
- [3] GB50011-2001. Specifications for seismic design of structures [S]. [GB50011-2001. 建筑抗震设计规范[S].]
- [4] Liu Jingbo. The effect of local irregular topography on seismic ground motion [J]. ACTA Seismologica Sinica, 1996, 9(2): 309-315
- [5] Donald W Griffiths, G A Bollinger. The effect of appalachian mountain topography on seismic waves [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1979, 69: 1081-1105
- [6] M Celebi. Topographical and geological amplifications determined from strong-motion and aftershock records of the 3 march 1985 Chile earthquake [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1987, 77: 1147-1107
- [7] Francisco J Sanchez - Sesma, Mechel Campillo. Diffraction of P, SV, and rayleigh waves by topographic features: a boundary integral formulation [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1991, 81: 2234-2253
- [8] Shiann Jong Lee, Dimitri Komatisch, Bor Shouh Huang, et al. Effects of topography on seismic-wave propagation: an example from northern taiwan [J]. Bulletin of the Seismological society of America, 2009, 99: 314-325
- [9] Li Yong, Xu Gongda, Zhou Rongjun, et al. Isostatic gravity anomalies in the Longmen Mountains and their constraints on the crustal uplift below the mountains on the eastern margin of the Qinghai - Tibet Plateau [J]. Geological Bulletin of China, 2005, 24(12): 1162-1168 [李勇, 徐公达, 周荣军, 等. 龙门山均衡重力异常及其对青藏高原东缘山脉地壳隆升的约束[J]. 地质通报, 2005, 24(12): 1162-1168]
- [10] Han Lifang. Research on the development regular and triggering mechanism of geological hazards in Longchi [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2010. [韩丽芳. 龙池地区地震地质灾害发育规律及成因机制研究[D]. 成都: 成都理工大学,

2010.]
- [11] Wang Yunsheng, Sun Shuqing, Li Yongzhao. Morphology and quaternary geology brief tutorial [M]. Chengdu: Sichuan University Press, 2008: 46–47 [王运生, 孙书勤, 李永昭. 地貌学及第四纪地质学简明教程 [M]. 成都: 四川大学出版社, 2008: 46–47]
- [12] Xu Qiang, Pei Xiangjun, Huang Runqiu, et al. Large-scale landslides induced by the Wenchuan earthquake [M]. Beijing: Science and Technology Press, 2009: 1–52 [许强, 裴向军, 黄润秋, 等. 汶川地震大型滑坡研究 [M]. 北京: 科技出版社, 2009: 1–52]
- [13] Wang Yunsheng, Xu Hongbiao, Luo Yonghong, et al. Study of formation conditions and toss motion program of high landslides induced by earthquake [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 11: 2360–2369 [王运生, 徐鸿彪, 罗永红, 等. 地震高位滑坡形成条件及抛射运动程式研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 11: 2360–2369]
- [14] Ashford S A, Sitar N. Analysis of topographic amplification of inclined shear waves in a steep coastal bluff [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1997, 87(3): 692–700
- [15] He Yunlong, Lu Shuyuan. A method for calculating the seismic action in rock slope [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(2): 66–68 [何蕴龙, 陆述远. 岩石边坡地震作用近似计算方法 [J]. 岩土工程学报, 1998, 20(2): 66–68]
- [16] Luo Yonghong. Study on complex slopes response law under earthquake action [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011. [罗永红. 地震作用下复杂斜坡动力响应规律研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2011.]

Mountain Slope Ground Motion Topography Amplification Effect Induced by Wenchuan Earthquake

LUO Yonghong, WANG Yunsheng

(State Key lab. of Geo-Hazard Prevention and Geo-Environment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: Physical and mechanical property of rock and soil mass may change across with the different spatial position, so it has different wave impedance characteristics. Under strong earthquake condition, stress wave during its propagation process usually produce strong reflex and refraction effects in the interfaces of different physical properties, and form strong dynamic tension stress and dynamic shear stress, resulting in failure in the rock and soil mass or forming an unique characteristic of dynamic instability. Based on surveying dynamic failure characteristics of rock slope triggered by the “5.12” Wenchuan earthquake and understanding of differences geological media of unstable slope, recurring to parameter test of rock body, theories research, numerical simulation and so on, at the same time combined with analysing characteristic of seismic-dynamic monitoring in different venues media, analysing data of soft and hard lithology combined model tested on the the large-scale shaking table, we research dynamic mutagenic effect of rock and soil media interfaces. The project is expected to reveal rock media dynamic characteristics of representative seismic landslide, dynamic characteristics of media interface, and based on the study it is expected to explore dynamic tension stress and shear stress of media interface impact on slope stability. Research results can provide scientific basis for town construction and major engineering construction in high intensity mountain area. So It has an important significance of earthquake preparedness and disaster reduction.

Key words: Wenchuan Earthquake; tend to slope top effect; terrain size; coupling effect; topography horizontal amplification effect