

四川汶川地震断裂活动和次生地质灾害浅析

王 涛^{1,2}, 马寅生², 龙长兴², 谭成轩^{1,2}, 吴树仁^{1,2}

WANG Tao^{1,2}, MA Yin-sheng², LONG Chang-xing², TAN Cheng-xuan^{1,2}, WU Shu-ren^{1,2}

1. 国土资源部新构造运动与地质灾害重点实验室, 北京 100081; 2. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081

1. Key Laboratory of Neotectonic Movement & Geohazard, Ministry of Land and Resources, Beijing 100081, China;

2. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China

摘要:为了揭示汶川地震断裂活动与次生地质灾害的关系,在对汶川地震重灾区进行快速调查的基础上,分析了影响汶川地震的龙门山断裂带震后的断裂活动、地表破裂与崩塌、滑坡、泥石流等次生地质灾害发育特征的关系。野外调查发现,龙门山 3 条断裂带的地表变形破坏(包括沿断裂带的道路、农田、建筑物和边坡变形破坏)特征具有明显的差异性和分段性,即映秀-北川断裂地震活动最剧烈,南坝-关庄断裂、灌县-安县断裂、平武-青川断裂等活动性次之的“纵向”差异性,以及龙门山断裂带由南向北地震活动性减弱的“纵向”分段性。地震断裂活动的差异性和分段性明显控制了崩塌、滑坡、泥石流等次生地质灾害的发育特征,即映秀-北川断裂区域的次生地质灾害规模大、分布密度大、危害严重,沿其余断裂的次生地质灾害危害相对较轻。

关键词:四川汶川地震;龙门山断裂带;地震次生地质灾害

中图分类号:P694

文献标志码:A

文章编号:1671-2552(2008)11-1913-10

Wang T, Ma Y S, Long C X, Tan C X, Wu S R. Fault activity of the Wenchuan earthquake in Sichuan, China and seismic secondary geohazards. *Geological Bulletin of China*, 2008, 27(11):1913-1922

Abstract: Quick investigation and analysis were carried out in worst-hit areas of the Wenchuan earthquake to reveal the relation between the Wenchuan earthquake fault activity and secondary geohazards. The authors analyzed the relations between fault activities and ground rupture of the Longmenshan fault zone and the characteristics of development of secondary geohazards such as rock falls, landslides and debris flows in main earthquake affected areas. According to the observation, the surface deformation and destruction (including roads, farmland, buildings and slopes along the fault zone) of three fault zones of the Longmen Mountains have distinct differences and segmentation. The activity of Yingxiu-Beichuan fault is most intense, the activities of the Nanba-Guanzhuang fault, Guanxian-Anxian fault and Pingwu-Qingchuan fault come next, showing "longitudinal differences", and the activity of the Longmenshan fault zone weakens from south to north, showing "latitudinal segmentation". It is evident that the difference and segmentation of earthquake fault activity controlled the development of seismic secondary geohazards such as avalanches, landslides and debris flows, i.e. the scale, distribution density and harm of secondary geohazards along the Yingxiu-Beichuan fault all exceed corresponding features of the counterparts along other faults.

Key words: Wenchuan earthquake; Longmenshan fault zone; seismic secondary geohazard

“5.12”汶川 Ms 8.0 级地震是新中国成立以来最为强烈的地震之一,震源深度约 14 km,最大烈度可达 XI 度。汶川地震导致近 7 万人遇难,失踪和受伤的

达 39 万人,严重受灾面积达 $10 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。龙门山断裂带为汶川地震断裂,自南西向北东延伸约 300 km (图 1),由龙门山后山断裂、中央断裂和山前断裂组

收稿日期:2008-08-04;修订日期:2008-10-06

地质项目:国家“十一五”规划科技支撑课题《地质灾害风险评估技术》(编号:2006BAC04B05)、国家重点基础研究发展计划(973)课题(编号:2008CB425803)、科技部公益基础项目《突发地质灾害监测》(编号:2004DIB3J080)和中国地质调查局项目《陕西宝鸡地区地质灾害详细调查》(编号:1212010640401)资助。

作者简介:王涛(1982-),男,在读博士,从事地质灾害研究。E-mail:wangtao820707@163.com

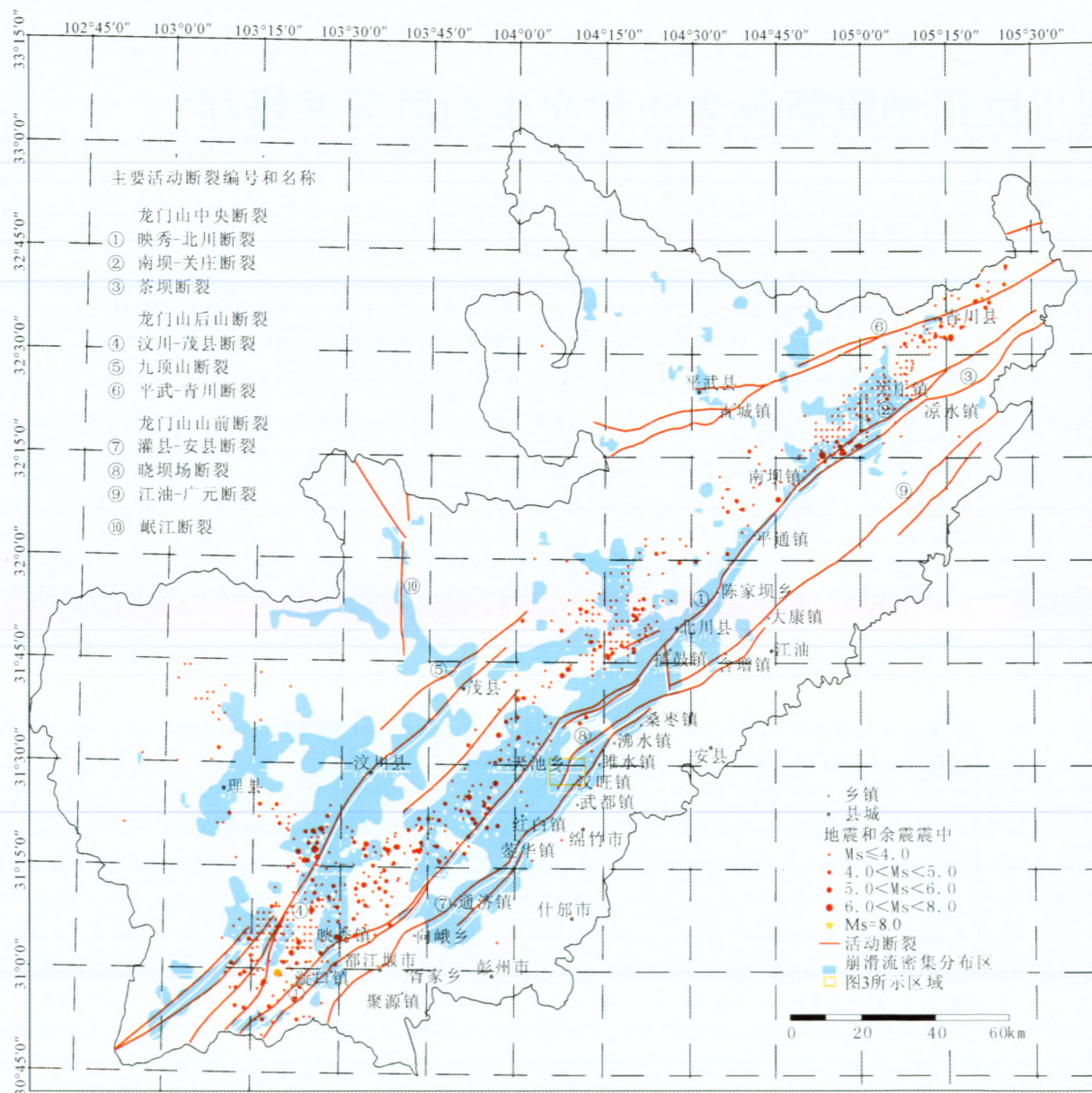


图1 汶川震区地震断裂、震中和次生地质灾害的分布

Fig. 1 Distribution of earthquake faults, epicenter and secondary geohazards in the Wenchuan earthquake area

成。在四川省境内,地震和余震震中基本上分布在成都平原西侧的山区,震后发生了大量崩塌、滑坡、泥石流等次生地质灾害,使地震危害进一步加剧。笔者参与了由国土资源部组织的赴四川地震灾区抗震救灾科学考察组,对龙门山断裂带3条主要地震断裂带的地震活动性、沿断裂带的地表变形破裂特征及其与崩塌、滑坡、泥石流等次生地质灾害的关系进行了考察分析,初步揭示了汶川地震断裂变形破裂与次生

地质灾害形成发育特征之间的密切联系。

1 龙门山地震断裂活动

龙门山断裂带位于青藏高原和四川盆地交界处,是中国南北地震带的构成部分^[1-3](图1)。该断裂带总体呈北东至南西向延伸,是由多条挤压逆冲断裂和多个推覆构造体组成的巨型复合推覆构造带,自西向东依次包括后山断裂、中央断裂和山前断裂。

其中后山断裂包括茂县-汶川断裂、九顶山断裂和平武-青川断裂;中央断裂包括映秀-北川断裂、南坝-关庄断裂和茶坝断裂;山前断裂包括安县-灌县断裂、晓坝场断裂和江油-广元断裂。调查发现从汶川至青川之间震中的分布、沿断裂带的地表变形和破裂比其他地区剧烈,表明汶川地震断裂活动显著集中在龙门山断裂带的中段和北段;同时龙门山断裂带横向的活动特征显示,中央断裂地震变形最强,山前断裂次之,后山断裂最弱。

1.1 中央断裂地表变形特征

龙门山中央断裂中段为映秀-北川断裂,北段由南坝-关庄断裂和茶坝断裂并列组成(图1)。映秀-北川断裂沿线的地震活动、地表变形破裂和崩滑流现象最为剧烈,南坝-关庄断裂和茶坝断裂位于映秀-北川断裂的东北端,断裂地表变形相对较弱,主要表现为沿线的边坡失稳破坏。

1.1.1 映秀-北川断裂

映秀-北川断裂是汶川地震的发震断裂,沿断裂带同震地表变形破裂现象比较明显,主要表现为挤压隆起、挤压膝折、挤压破碎带和断续分布的破裂。沿断裂带走向变形分布并不均衡,以平武县平通镇为界,南侧的汶川至北川之间断裂活动明显强于北侧平武县境内的断裂变形活动。沿断裂不同地点的变形现象也有明显差异,以下分段述之。

(1)在映秀-北川断裂南段的主震震中附近,地震断裂地表变形主要表现为逆冲挤压变形;在映秀镇中滩铺岷江右岸,混凝土路面受挤压逆冲,形成走向约 55° 的破裂带,带宽约45 m,指示地震断裂从北西向南东挤压逆冲,垂直位移约1.8 m,沿挤压方向水平缩短2.5 m(图版 I-a),挤压破裂带延伸到岷江河床形成高2 m的叠流。沿断裂带走向远观可见断裂上盘和下盘的接触带,其中上盘为二叠系石英闪长岩,下盘为震旦系灰岩,震后沿断面形成小规模의碎屑流。

(2)在断裂带中部北川县城至擂鼓镇一带,断裂带在地表的逆冲变形,使上盘逆冲,覆盖地表破裂(即地表破裂有一定潜伏性),故仅局部发现地表破裂,多表现为逆冲挤压隆起带和逆冲陡坎。如擂鼓镇磨房沟内形成走向约北东 40° 、高约3 m的挤压隆起带(图版 I-b),显示断裂由北西向南东挤压逆冲;映秀-北川断裂从擂鼓镇向北东延伸,在坚硬的地表面(水泥公路和基岩面)形成多处不连续的挤压

破裂,导致山坡发生多处滑坡和碎屑流;而在厚层的冲、洪积层中则形成沿断裂走向的逆冲陡坎,陡坎局部高约5.5 m(图版 I-c),指示断裂由北西向南东挤压逆冲。

(3)在断裂带北段,发震断裂地表变形除逆冲挤压变形之外,局部还有右旋走滑迹象。在平武县平通镇附近,涪江支流漫滩堆积物受到挤压逆冲,形成走向 55° 的膝折带,延伸约400 m,膝折高度约3.3 m(图版 I-d),地震局初步探槽揭示,膝折带底部发育宽30 cm左右的逆冲破裂带,产状为 $320^\circ \angle 57^\circ$,逆冲带内砾石定向性较好(图版 I-e)。沿地表膝折带追索,局部可见右旋走滑现象,耕地中的田埂被扭弯,指示右旋错移量为1.8~2.0 m(图版 I-f)。沿映秀-北川断裂向北东追踪至平通镇石坝村,也发现路面形成走向为 60° 的挤压隆起带,隆起高度约3.0 m,右旋错移量约1.5 m。

1.1.2 南坝-关庄断裂和茶坝断裂

南坝-关庄断裂位于中央断裂北段(图1),整体地表变形破裂明显比映秀-北川断裂弱,没有明显的地表破裂和逆冲变形现象,主要表现为沿断裂带建筑物和边坡的变形破坏。具体表现如下。

(1)位于南坝-关庄断裂上盘的平武县南坝镇沙湾,距离断裂1.5 km,多栋建筑物上部结构被破坏,且建筑物的地基多位于山麓松散的洪积扇和坡积物上,地震发生时多沿坡向滑移,个别地基滑移距离达1 m左右,形成断续分布的张裂带,沿 55° 走向延伸,与南坝-关庄断裂近乎平行。

(2)位于南坝-关庄断裂北西侧分支断裂尖灭处的青川县关庄镇东河口,在地震发生时,断裂尖灭部位发生新的扩展变形,导致边坡岩体发生失稳破坏,形成大规模的高速远程滑坡,堵塞坡前的嘉陵江支流,形成堰塞湖(图版 I-f),并导致人员大量伤亡。

(3)茶坝断裂南段与南坝-关庄断裂叠置段有数个 M_s 4.0~6.0级余震震中的记录,表明该段有一定程度的活动。茶坝断裂北段活动性十分微弱,区内基本没有地震活动的记录,在凉水镇发现断裂穿越处地面变形轻微。通过比较分析可知,茶坝断裂整体活动性比映秀-北川断裂和南坝-关庄断裂微弱。

1.2 山前断裂地表变形特征

调查区内龙门山山前断裂由南向北依次包括灌县-安县断裂、晓坝场断裂和江油-广元断裂,整体

图版 I Plate I



a. 映秀镇混凝土路面逆冲挤压破裂带(镜向 NW)



b. 擂鼓镇磨房沟道路挤压隆起(镜向 NW)



c. 擂鼓镇赵家沟映秀-北川断裂陡坎(镜向 N)



d. 平通镇槐杆村河滩挤压逆冲膝折陡坎(镜向 W)



e. 平通镇槐杆村膝折带探槽中的逆冲带(镜向 NW)



f. 平通镇槐杆村农田膝折右旋现象(镜向 W)



g. 向峨乡鹿池村拱桥挤压隆起断裂(镜向 SW)



h. 汉旺镇混凝土路面挤压膝折和破碎(镜向 NW)

呈左阶斜列式展布(图1)。在汶川地震期间,龙门山山前断裂带的同震破裂和变形较明显,但不同断裂的变形有所差异,具体表现为断裂活动性由南向北依次减弱,仅灌县-安县断裂地表变形破裂比较明显。

1.2.1 灌县-安县断裂

灌县-安县断裂的地表变形破裂比较明显,主要表现为路面、桥梁、建筑物等的变形破坏,其中典型的路面挤压膝折和破坏现象主要分布在都江堰市向峨乡、什邡市蓑华镇和绵竹市汉旺镇。

(1)都江堰市向峨乡鹿池村位于灌县-安县断裂南东侧,沿断裂带地面破坏严重,建筑物绝大部分倒塌,路边石质拱桥受挤压隆起破裂,隆起高度约60 cm,隆起带走向约70°(图版I-g),指示断裂由北北西向南南东向逆冲。

(2)什邡市蓑华镇金河右岸苏家湾,混凝土路面形成挤压翘曲带,翘曲高度约50 cm,沿挤压方向缩短40~50 cm。

(3)绵竹市汉旺镇官宋碾堰取水枢纽南东侧的公路,路面形成走向65°的挤压逆冲隆起带,隆起高度约1.5 m,隆起带宽约40 m,指示断裂由北西向南东挤压;局部路面发生挤压破碎,宽1.7 m的路面整体被挤出,路面的断槽缩短至0.7 m(图版I-h)。挤压隆起带延伸至西侧的绵远河中,形成高约1 m的小型瀑布。

沿灌县-安县断裂区域内建筑物的破坏现象也较普遍,破坏较严重的地区包括都江堰市向峨乡,彭州市小鱼洞镇、通济镇,绵竹市汉旺镇等,例如彭州市小鱼洞大桥位于灌县-安县断裂上盘,桥身形成多处挤压破裂,其中2段桥面被挤压折断后坠入河中,桥面原长约100 m,桥面破裂后断口距离缩短了5~10 m。

1.2.2 晓坝场断裂和江油-广元断裂

晓坝场断裂和江油-广元断裂没有明显的地表变形破裂,主要变形表现为沿断裂呈带状分布的崩滑流地质灾害。根据断裂沿线的崩滑流发育程度分析,崩滑流发育程度的总趋势从南向北逐步减弱。晓坝场断裂南段与灌县-安县断裂叠置,断裂沿线崩滑流十分发育,尤其在绵远河(图2)和干河子流域的边坡上分布更为集中;晓坝场断裂北段沿线崩滑流较少发育,表明其活动性明显弱于晓坝场断裂南段;江油-广元断裂沿线地质灾害分布十分稀疏,地震期间活动性不明显。

1.3 后山断裂地表变形特征

龙门山后山断裂带从南往北依次包括汶川-茂县断裂、九顶山断裂和平武-青川断裂(图1)。由于受道路破坏、降雨、崩滑流灾害等条件的限制,地面调查工作未涉及汶川-茂县断裂和九顶山断裂,下文仅对平武-青川断裂的地震活动特征进行介绍,其中调查重点是平武-青川断裂沿线的平武县古城镇和青川县城。

(1)在平武县古城镇,平武-青川断裂通过处的地面变形程度轻微,路面和建筑物基本完好,未见明显的断裂活动迹象。

(2)平武-青川断裂从青川县城北侧穿过,沿北东东走向延伸,沿断裂两侧宽约200 m的范围内建筑物破坏较严重,房体发育大量X型剪节理,个别房屋发生破坏倒塌,但城区其他地段建筑物的稳定性和完整性较好。在平武-青川断裂与城区西侧狮子梁的交接处形成滑坡,后缘裂缝长约1 km,沿近南北向展布,滑体尚未发生整体滑移,但威胁到了坡底4栋楼房的安全。另外,在平武-青川断裂附近边坡上的信号发射塔的塔基和桁架式塔体分别发生破坏和弯折,但远离断裂的边坡稳定性较好。以上现象表明平武-青川断裂在青川县城附近有一定的活动,但是程度并不剧烈。

由上述可知,平武-青川断裂的活动性比龙门山中央断裂带和山前断裂带南段的各断裂轻微,与龙门山断裂带北段的茶坝断裂和江油-广元断裂的活动性相当,反映了龙门山断裂带南段的活动程度整体强于北段。

1.4 小结

在汶川地震期间,沿龙门山断裂带的地表变形破裂主要表现在道路、农田、建筑物、边坡变形破坏等方面,较典型的地表变形破裂集中分布在龙门山中央断裂沿线的汶川县映秀镇、北川县擂鼓镇、平武县平通镇,以及龙门山山前断裂的绵竹市汉旺镇等地区。龙门山断裂带主要地震断裂的活动特征具有明显的差异性和分段性。其中,龙门山中央断裂带为汶川地震的发震断裂,断裂带中段的映秀-北川断裂地表变形破裂最为剧烈;龙门山山前断裂整体活动强度比中央断裂轻微;龙门山后山断裂带的平武-青川断裂活动性又弱于中央断裂和山前断裂。

根据断裂活动的地表响应,结合地震和余震的分布特征,发现龙门山断裂带的活动性也具备“纵



图2 绵竹市汉旺镇至天池乡断裂带崩滑流的分布(航片据中国国土资源航空物探遥感中心)

Fig. 2 Distribution of avalanches, landslides and debris flows in the fault zone between Hanwang Town and Tianchi Town, Mianzhu City

向”分段性的特征,即由南西向北东活动程度呈减弱的趋势,例如中央断裂中段的映秀-北川断裂活动性最强,北段的南坝-关庄断裂活动次之,再向北延伸的茶坝断裂活动最弱;山前断裂的灌县-安县断裂活动性最强,晓坝场断裂次之,江油断裂最弱;后山断裂的汶川-茂县断裂活动强于九顶山断裂和平武-青川断裂。不仅如此,与断裂活动伴生的地表变形破裂和崩塌、滑坡、碎屑流等次生地质灾害的发育也反映出沿南北向分段性的特征。龙门山断裂带的活动特征及其沿线次生地质灾害发育程度的差异,指示龙门山断裂带地震破裂由南向北发展,地震所释放的能量在断裂扩展过程中逐渐耗散衰减。

2 次生地质灾害

汶川地震诱发的次生地质灾害以崩塌、滑坡和碎屑流(简称崩滑流)为主,其次还有砂土液化和地

裂缝。在四川、甘肃和陕西省境内,地震诱发的崩滑流灾害达 18000 余处,波及范围达 $48 \times 10^4 \text{ km}^2$, 伤亡和失踪人员约占震后受灾人员总量的 1/3, 仅四川省 31 个灾难性滑坡就致死约 5000 人, 同时也造成了巨大的财产损失。调查发现,崩滑流次生地质灾害的发育特征主要受地震断裂的控制, 其次也受地形地貌、岩土体物理力学特性等因素的影响,是多因素综合作用的结果。

2.1 次生地质灾害的发育特征

(1)汶川地震诱发的崩滑流地质灾害与龙门山断裂带具有“如影随形”的关系,即崩滑流的分布特征很大程度上受发震断裂和同震断裂的控制,且随着断裂活动强度的差异而显示出不同的发育特征(图1)。地震诱发的崩滑流次生地质灾害通常呈群或呈带发育,在分布密集处,平面上难以将灾害划分为单独的个体,因此利用点密度不能客观地表征区

域内灾害的发育程度,应以面密度的形式对地震影响区内的灾害发育强度进行量化的比较分析。初步统计分析发现,映秀-北川断裂地区崩滑流灾害的面密度在区域内最大,其次为南坝-关庄断裂、灌县-安县断裂、晓坝场断裂南段的上盘地区和汶川-茂县断裂的两侧地区,断裂活动整体上也具有“横向”的差异性和“纵向”的分段性。

(2)龙门山断裂带上盘和下盘的崩滑流地质灾害发育程度有明显的差异。汶川地震断裂活动表现为逆冲挤压变形,因此上盘变形破裂比下盘强烈,地质灾害也是上盘比下盘强烈。如图 1 所示,各主要断裂上盘的崩滑流密集分布区的面积均大于下盘;另外,震区内大规模、高危害的灾难性滑坡多发育在断裂的上盘,如北川县唐家山高速远程滑坡、王家岩滑坡(图版 II-b)均位于映秀-北川断裂上盘,青川县东河口高速远程滑坡(图版 II-f)位于南坝-关庄断裂的上盘。断裂带不同部位的边坡破坏程度的差异表明边坡的失稳破坏与断裂上盘和下盘的运动方式关系密切。

(3)在受断裂控制的崩滑流灾害密集分布区域,灾害分布并不均衡,在主要河流及其支流的沿岸地区地质灾害分布更密集,由南向北岷江、白沙河、濛江、通溪河、石亭江、绵远河(图 2,相对龙门山断裂带的位置见图 1)、安昌河等流域地表变形显著。这种分布特征表明区内的地形地貌条件也是控制崩滑流发育的主要因素之一,推测沟谷地区的地形切割强烈,两岸边坡的坡度较大,为边坡失稳破坏提供了天然的势能条件。

(4)尽管区内主要流域沿岸边坡的整体崩滑流发育程度较高,但是通过对汉旺镇至天池乡之间绵远河及其支流沿岸崩滑流的调查发现,在相似的地质环境条件下,不同坡向的边坡失稳破坏差异显著(图 2)。坡向朝东-南东的山坡破坏严重;朝向西-北西的山坡整体稳定性较好,仅发育少量碎屑流,且规模和程度均弱于东-南东向山坡的崩滑流灾害。通常只有一条山脊之隔,山梁两侧的边坡对地震荷载的响应截然相反,此类现象在绵远河右岸反映显著,如自西向东的小钢剑梁、笼竹窝梁和赵家山梁东侧的边坡崩滑流十分发育,沿边坡呈群或呈带状连续分布,而山梁西侧的边坡破坏轻微;绵远河左岸的楠木沟至磨子坪、乱石窑至黄草坪沿线朝向南-南东的边坡崩滑流也较发育,呈串珠状断续分布,而对

应山梁相反侧的边坡却基本完好,指示了不同坡向边坡的地震响应差异。

(5)区域内地震砂土液化主要分布在都江堰市岷江水系的冲击平原中,如胥家镇土什村 6 组,位于蒲阳河右侧凸岸,距离河道约 1.7 km,沿稻田和住宅区零星分布砂土液化现象。聚源镇金鸡村位于蒲阳河右侧凸岸,距离河道约 500 m,在玉米地和建筑物中也出现砂土液化现象,玉米地中砂土喷出地面 1.5~2 m 高,喷冒持续数分钟,液化处地下水位为 4~5 m;农田中冒出的砂质主要为中细砂,建筑物内冒出的砂质主要为中粗砂。

地裂缝的形成和分布主要受龙门山断裂带的控制,尤其在活动强烈的断裂沿线,分布更加集中,例如映秀-北川断裂、南坝-关庄断裂、灌县-安县断裂、晓坝场断裂等。

2.2 典型崩滑流实例

汶川地震诱发的新生崩滑流灾害类型主要包括崩塌滑坡合成碎屑流、大型滑坡、高速远程滑坡等。各种形式的地质灾害典型实例如下文所述。

2.2.1 崩滑碎屑流

汶川地震诱发大量的崩塌、滑坡、碎屑流,在基岩山坡多形成崩滑碎屑流。如在映秀至汶川县城岷江两岸的块状岩体边坡形成的大量崩滑碎屑流,主要是在强震的作用下,基岩山体边坡被震碎裂,顺坡面形成的岩体崩滑碎屑流。同样在什邡市红白镇通溪河谷上游,岸坡由三叠系厚层砂岩、泥质粉砂岩和粉砂质泥岩组成,由于河流切割强烈,形成 V 型河谷,两侧边坡角度为 55~70°,在强震作用下,边坡形成大量崩滑混合碎屑流灾害(图版 II-a)。此类地质灾害通常形成于软弱或破碎的岩土体组成的陡坡上,加之处在发震断裂带区域内,往往在工程地质条件类似的斜坡上形成大量连续分布的碎屑流带。

2.2.2 大型滑坡

沿映秀-北川断裂发育的大型岩质滑坡规模大、破坏力强,往往导致大量人员伤亡或河流堵塞,形成堰塞湖,威胁下游群众的生命财产安全。这些现象在王家岩滑坡和肖家桥滑坡得到显著体现。

(1)王家岩特大型滑坡位于映秀-北川断裂上盘,北川县曲山镇西侧,距离断裂约 700 m,坡体由软弱碎屑岩类组成。滑坡平面形态呈舌状,滑向约 75°,滑坡宽约 300 m,水平滑距约 600 m,垂直滑距约 200 m,体积达 $1000 \times 10^4 \text{ m}^3$ (图版 II-b)。该滑坡无

图版 II Plate II



a. 红白镇通溪河岸边崩滑流(镜向 W)



b. 北川县王家岩滑坡(镜向 SW)



c. 茶坝乡肖家桥滑坡(镜向 S)



d. 陈家坝乡太洪村 2 组滑坡(镜向 NW)



e. 彭州市九峰村七组滑坡(镜向 NW)



f. 青川县关庄镇东河口滑坡(镜向 E)

明显的剪切滑动面,在映秀-北川断裂错动的瞬间,坡体发生拉裂破坏,被弹起抛掷后,顷刻间将 $7 \times 10^4 \text{m}^2$ 的人口密集区摧毁夷平,导致 1600 人死亡,损失约合 1600 万元,使王家岩滑坡成为地震区内最具危害性的滑坡之一。

(2)茶坪乡肖家桥特大型滑坡位于安昌河支流上游,边坡西、北、东三面临空,且均被河流环绕,坡体为三叠系厚层状灰岩组成的顺向坡,滑面西侧受映秀-北川断裂挤压破碎带的控制,东侧受岩层节理面的控制,滑向 340° ,滑体长约 350 m,宽约 200 m,平均厚约 180 m,体积约为 $1000 \times 10^4 \text{m}^3$ (图版 II-c)。滑体堵塞坡前河流,形成蓄水量约 $2000 \times 10^4 \text{m}^3$ 的堰塞湖,为地震灾区第二大堰塞湖。

2.2.3 高速远程滑坡

映秀-北川断裂和南坝-关庄断裂沿线形成多处高速滑坡,是否能够演化为远程滑坡很大程度上取决于滑坡前方是否具有足够的滑移空间储备,二者的成因机制具有相似性,因此下文对断裂沿线的高速滑坡和高速远程滑坡统一进行介绍。

(1)陈家坝乡太洪村 2 组高速滑坡,位于映秀-北川断裂通过处河流的右岸,坡体由志留系岩层构成,约 $500 \times 10^4 \text{m}^3$ 的松散堆积物冲到河流左岸约 250 m 处,形成堰塞湖(图版 II-d),并掩埋百余名村民。与河流左侧的泥盆系岩层岸坡相比,右岸边坡靠近断裂一侧,且岩体变形破碎程度较高。尽管两岸同处在断裂下盘,右岸的破坏程度比左岸显著得多。

(2)彭州市九峰村七组高速远程滑坡,位于映秀-北川断裂南东侧约 1 km 处,湔江上游右岸,后缘高陡岩质边坡的滑体向坡底滑动的过程中,途经深切狭窄的沟口,冲量受到约束后加剧,滑体因碰撞和抛掷作用而分散解体,大量碎屑物质到达沟口之外松散的冲击锥时,将其剥蚀搬运,形成约 $400 \times 10^4 \text{m}^3$ 的松散碎屑岩土体,将修建在半坡的道路损毁,坡前河流堵塞,形成堰塞湖(图版 II-e),并导致近百人死亡。

(3)青川县关庄镇东河口高速远程滑坡,位于南坝-关庄断裂北西支尖灭处,嘉陵江右岸,坡体岩性为变质岩,滑体体积约为 $1000 \times 10^4 \text{m}^3$,滑移距离达 2 km,堵塞河道,形成堰塞湖,掩埋 3 个自然村和过往的车辆,造成 260 余人丧生(图版 II-f)。

由上述介绍可知,与低速滑坡相比,高速远程滑坡的发育特征显示出更高的能量和更强的破坏能

力。不仅如此,调查发现,区内高速远程滑坡一般不存在定向性的宏观连续滑动面,而是表现为一系列粗糙断裂面组成的破坏面,表明强震荷载作用下的高速远程滑坡的启动机制有别于低速滑坡。低速滑坡滑动面的形成主要是滑体与滑床岩土体之间的剪切破坏所致,而高速远程滑坡则缘于滑床对滑体向上或斜向上施加的瞬时强冲击荷载,导致岩土体发生断裂破坏,进而被弹射至空中呈斜抛或平抛式运动,大量岩土体在瞬间下落的过程中受到气动冲击作用的影响,在气垫效应的作用下被抛掷到远处,从而形成特有的发育形态。此类滑坡的启动模式主要归因于 2 个因素,其一是极震产生的强大冲击荷载为滑坡的形成提供了动力触发条件,其二是岩土体抗拉强度较低,甚至很低,使边坡极易发生张裂破坏。上述 3 例滑坡的破坏机制应均属于此类。

另外,滑坡在剪切作用下启动后,如果具备足够的重力势能、地形地貌、运移空间等条件,滑体在下滑加速过程中也可形成气垫效应,进而发展成为高速远程滑坡。可见,高速远程滑坡的形成受到启动机制和运移过程的双重影响,在研究中应注意区分。

2.3 小结

汶川地震诱发的次生地质灾害以崩塌、滑坡和碎屑流为主,其次为砂土液化和地裂缝。从区域的角度观之,崩滑流地质灾害的形成和分布遵循龙门山断裂带地震活动性的“横向”差异性和“纵向”分段性特征。对于具体的断裂带,崩滑流灾害的发育程度又取决于断裂不同部位的相对运动方式,如龙门山断裂主要表现为逆冲性质,主动盘(即断裂上盘)的崩滑流灾害发育程度高于被动盘(即断裂下盘)。将考察范围缩小至特定流域,发现在断裂带崩滑流分布的相对集中区,在地形地貌因素的制约下,主要流域沿岸崩滑流发育的密度高于断裂带地区的平均灾害密度。对于特定流域内不同坡向的边坡而言,即使在相似的地质环境条件下,边坡坡向与地震波传播方向组合关系的差异又使区内边坡的失稳破坏特征迥异。落实到具体的边坡,其稳定性通常还取决于边坡的结构、岩土体的物理力学特性、水文地质条件、降雨等因素。由于边坡的稳定性受到上述多种因素的综合影响,边坡的失稳破坏通常形式多样,例如调查区内的崩滑流次生地质灾害类型主要包括崩滑碎屑流、大型滑坡和高速远程滑坡。

简而言之,需要从 2 个层面理解和认识各种因

素对次生地质灾害的制约作用。其一,应坚持从宏观到具体的逻辑思路,逐层递进分析各种影响稳定性的因素,依次对区域内地震断裂带的分布、活动性、运动机制,主要流域的地形地貌发育特征,边坡坡向与地震波宏观传播方向的组合关系,边坡结构,以及岩土体的物理力学性质等问题进行全面分析。其二,根据研究对象尺度的不同,辩证地在各种影响因素中考察重点,以使分析精度适应于研究对象的尺度,如对于崩滑流地质灾害的区域分布问题,应主要从考察宏观影响因素着手,而对于特定地段的边坡稳定性问题,应主要分析相对具体的影响因素。

3 问题讨论

3.1 地震与次生地质灾害

20 世纪 90 年代,针对地震崩滑流预测和工程应用领域的研究取得了一定进展,即主要通过对震级、烈度、震中距等宏观地震参数和灾害发生次数、规模等的统计分析,获得诱发灾害发生的某种地震参数的阈值^[4-7]。汶川地震诱发大量崩滑流等次生地质灾害,为深入认识和研究地震与边坡失稳的关系提供了大量珍贵的材料,既需要利用传统的“黑匣”式统计分析法,更需要充分运用新的理论方法,包括 3S 技术、模型实验、数值模拟等手段深入了解地震诱发灾害的机制,进而分析和评估次生灾害对经济社会造成的危害及其风险^[6-7]。例如对于特定类型的边坡,对应特定量值和时空概率的地震荷载,将会诱发何种类型、多大规模的破坏,又会导致多少危害和风险,怎样分别进行分析、评估和预测,如何采取合理的措施对灾害进行缓解和管理,等等,诸如此类的问题都有待进一步研究。

另外,对地震和降雨诱发的“链”式灾害的形成条件、连锁机制、危害和风险的研究应引起重视。强震荷载和降雨作用导致大量滑坡、崩塌、碎屑流等次生地质灾害,崩滑物质和水混合后易发展成为泥石流;而崩滑流形成的松散堆积物和流体物质又进一步毁坏房屋、道路和森林,并堵截河道,形成堰塞湖;随着新生的崩滑流不断在河道中淤积及水位的自然上升,加之雨季到来后集中降雨加剧了水位的升高,动水作用下的冲刷和侵蚀易使堰塞坝发生溃决,进一步形成洪涝灾害,威胁下游人民的生命和财产安全。

3.2 地震烈度

在对绵竹市汉旺镇绵远河谷的调查中,发现地震对地面的影响和破坏程度与距断裂带的距离有关,存在某一界限距离,该距离以内的区域地面(包括边坡、建筑物等)变形破坏明显,表明烈度较大;反之,该距离以外的区域地表破坏不明显,表明烈度较小。然而地面烈度并非必然随着与断裂带距离的减小而增大,例如与龙门山山前断裂相距约 1 km 的雎水镇建筑物仅有轻微损坏,而与断裂相距 2 km 的桑枣镇建筑物受损情况较严重。雎水镇下伏为侏罗系岩层,而桑枣镇下伏为第四纪土层,前者地面烈度低于后者,推测二者建筑物被破坏程度的差异主要与建筑物下伏地基的工程地质条件有关。另外,地面建筑物的地震受损情况还应与以下因素有关,包括建筑场地所处断裂带的部位、建筑物的结构、建筑物和地基的动力学耦合特性等。

此外,假设将相同能量的地震波输入到岩土体中,波在岩土体内部传播时,对于其上部建筑物的影响存在矛盾,即波在刚度较大的岩层中传播时,质点受扰动较小,从这个角度分析,利于地面稳定;可是岩层的弹性性质又不利于能量的衰减,到达地面的残余能量较大,不利于地面稳定。土体中的情况与此相反,表现为能量衰减较多和质点易于扰动的矛盾。可见,地面烈度是矛盾作用的结果,取决于地层的组成、岩土的动力学特性等。在特定地区,如何在综合考察多种因素的基础上定量地表示地震烈度,有待深入研究。

参考文献:

- [1]唐文清,陈智梁,刘宇平,等.青藏高原东缘鲜水河断裂与龙门山断裂交会区现今的构造活动[J].地质通报,2005,24(12):1169-1172.
- [2]马杏垣,等.中国岩石圈动力学地图集[M].北京:中国地图出版社,1989:49.
- [3]文德华.龙门山北段断裂活动特征[J].四川地震,1994,(1):53-57.
- [4]丁彦慧.地震崩滑与地震参数的关系及其在边坡灾害预测中的应用[J].地球物理学报,1999,42(增刊):101-106.
- [5]丁彦慧,王余庆,孙进忠,等.地震崩滑预测方法及其工程应用研究[J].工程地质学报,2000,8(4):475-480.
- [6]F C Dai, C F Lee, Y Y Ngai. Landslide risk assessment and management: an overview[J]. Engineering Geology, 2002, 64: 65-87.
- [7]吴树仁,周平根,雷伟志,等.地质灾害防治领域重大科技问题讨论[J].地质力学学报,2004,10(1):1-6.