

汶川特大地震之北川县城震害分析

王根龙¹, 刘红帅², 张军慧¹

(1. 中国地震局防灾科技学院 防灾工程系, 河北 三河 065201;
2. 中国地震局工程力学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080))

摘要:2008年5月12日汶川8.0级地震在北川县城造成了巨大的破坏,导致上万人死亡,整个北川县城变为废墟。现场地震科考分析显示,造成北川县城建筑物和道路严重损毁以及人员重大伤亡的三个主要原因为:活断层错动产生的地表破裂效应,地震引发的次生地质灾害(崩塌、滑坡)和强地震动产生的振动破坏效应。北川县城主断裂和次级断裂沿线分布的建筑物震害较重,而邻近断裂的建筑物震害相对较轻;地震触发的王家岩滑坡和景家山崩塌对北川县城造成了极大的破坏,导致2000余人死亡;而振动破坏效应在北川县城普遍存在,它产生的水平剪切运动对建筑物的危害很严重。

关键词:汶川特大地震;北川县城;断层错动效应;次生地质灾害;振动破坏效应;震害分析

中图分类号: P315.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2010)02-0173-06

Analysis on Seismic Hazards in Beichuan County Town Caused by Wenchuan Great Earthquake

WANG Gen-long¹, LIU Hong-shuai², ZHANG Jun-hui¹

(1. Department of Disaster-Prevention Engineering, Institute of Disaster-Prevention Science and Technology, CEA, Hebei Sanhe 065201, China; 2. Institute of Engineering Mechanic, CEA, Harbin 150080, China)

Abstract: M_s 8.0 Wenchuan earthquake on May 12, 2008 caused Beichuan county massive damage, and resulted in more than ten thousands deaths. The whole Beichuan county town has become ruin. Based on the field seismic investigation, three principal causes of building and road's serious damage as well as personnel heavy casualties are given: the ground surface rupture effect caused by seismo-active fault movement, the secondary geological hazards (collapse and landslide) and the vibration failure effect caused by strong ground motion. Damage of buildings along the main fault and secondary faults were more serious, but destruction in adjacent buildings is relatively not severe. The Wangjiayan landslide and Jingjiashan collapse brought about huge damage to the Beichuan county town and led to more than 2000 people death. The effects of vibration failure were ubiquitous for all buildings, especially horizontal shear movement generated serious constructional damage.

Key words: Wenchuan great earthquake; Beichuan county town; Effect of fault movement; Secondary geological hazard; Effect of vibration failure; Analysis of seismic hazard

0 引言

北川羌族自治县位于四川省西北部,属绵阳市。地理位置处于四川盆地向青藏高原过渡地带的龙门

山区。县城坐落在岷江南岸的曲山镇和茅坝镇,属峡谷地形。5.12汶川特大地震导致北川羌族自治县重大人员伤亡,整个县城顿时变成了一片废墟。

收稿日期:2009-02-09

基金项目:防灾减灾青年科技基金项目(2008A10);国家自然科学基金项目(40702055)

作者简介:王根龙(1975-),男(汉族),陕西华阴人,博士,副教授,主要从事地震地质灾害、岩土工程教学与研究方面的工作。

北川县处在侵蚀构造中山的东南边缘,属龙门山前山与后山交界地带。由于其地理位置的特殊性,导致它是汶川大地震中受灾最严重的县市之一。北川县属于极灾区,地震烈度大致相当于X、XI度区。据《北川县政府发[2008]121号文件》,震害情况具体为:北川县20个乡镇、278个村受灾,14.2万人无家可归,死亡人数达15 645人,失踪4 311人,受伤26 916人,93%房屋倒塌,经济损失高达585.7亿元。

2008年8月,中国地震局北川地震科考组从活断层错动产生的断层效应、地震引发的次生地质灾害(崩塌、滑坡)、强地震动产生的振动破坏效应三个方面对北川县城震害进行了调查。分析研究初步显示,断层错动效应、地震次生地质灾害、振动破坏效应是引起北川县城震害的三个主要因素。

1 断层错动效应

断层错动效应是指发震断裂错动引起附近或跨越断裂带的建筑物变形或破坏。通常来讲,断层错动造成跨越其上建筑物的震害是难以抵御的,但地面破裂的出现可能会吸收部分地面振动能量,减少振动历时,因而在一定程度上减轻了邻近建筑物的震害。这一理论在北川地震科考中得到了验证,即断层通过的地方一定范围内建筑物几乎完全倒塌,而邻近的建筑物震害相对较轻。

1.1 龙门山断裂带特征

汶川8.0级地震的发震构造为青藏高原东缘的龙门山断裂带。龙门山断裂带属于中生代造山作用形成的断裂褶皱带,新生代以来、至晚第四纪以来仍然有不同程度的活动,是一条大型的活动断裂带,断层走向为NE向^[1-2]。断裂带由三条主要活动断裂组成:西边一条叫汶川—茂县断裂(后山断裂),大体上沿汶川到茂县的高深峡谷延伸,这次地震时没有发生破裂;中间的一条叫映秀—北川断裂(中央断裂),沿映秀—北川—平通—南坝展布,连续性较好,是这次8.0级地震的主破裂带;东边的一条叫灌县—江油断裂(前山断裂),沿龙门山与成都平原交界处分布,这次地震形成了60 km长的地表破裂^[3-4]。

因为北川县城位于映秀—北川断裂带上,所以本次地震属于城市直下型地震。根据追踪断层的调查结果,通过北川县城的活动断裂共有两条(图1),一条为走向NE35°的主断裂(以下简称为主断裂),另外一条为走向SE150°的次级活动断裂(以下简称为

为次级断裂)。

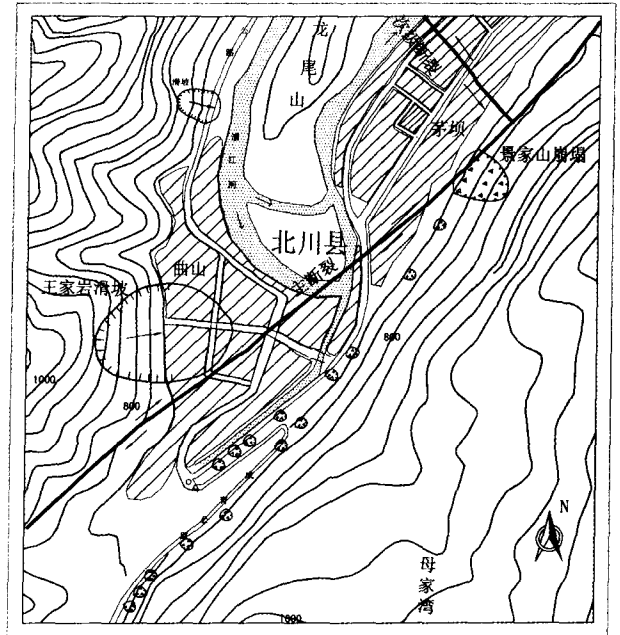


图1 北川县城次生地质灾害与断裂分布图

Fig. 1 Distribution map of secondary geologic hazards and surface ruptures in Beichuan county town.

1.2 主断裂及其震害

主断裂(映秀—北川断裂)及地震地表破裂带的走向为NE35°左右,倾向NW,近地表倾角达60°~70°,个别地方甚至近直立,随深度增加倾角逐渐减小。

主断裂从北川县城南1 km处延伸至北川县城中心吊桥附近,通过了北川老城区,出露长约2 km的地表破裂带(图2)。北西盘抬升高度2~3 m,具有较大的右旋分量。北川入城盘山公路沿断裂带路面多处出现错段、横向隆起、纵向倾斜,路面严重毁坏。跨越主断裂带及位于主断裂带的大量建筑物几乎完全倒塌,震害指数接近或达到1.0。邻近主断裂带的多数建筑物由于地表错动变形减小,因此震害相对较轻。分析认为造成主断裂沿线房屋震害的主要原因为断层水平错动产生的剪切破坏和两盘运动导致的地基隆起抬高破坏(图3)。从主断裂带沿线的道路和建筑物破坏情况来看,均显示出右旋活动特征。

1.3 次级断裂及其震害

走向SE150°的断裂是主断裂错动引起的次级断裂(图1),断层运动方式为逆冲断层,兼具左旋平移运动分量。这条次级断裂通过了北川县新城区,造成了数百米的地表破裂,导致跨越断层的建筑物



图2 主断裂带沿线建筑物的破坏(镜向 NE)

Fig.2 Destruction of buildings along the main fault (photo direction: NE).



图3 主断裂错动造成的道路破坏(镜向 NW)

Fig.3 Breakage of road adjacent to Beichuan hotel caused by movement of the main fault (photo direction: NW).

完全倒塌,震害指示达到 1.0;邻近建筑物出现了严重的倾斜变形或局部倒塌,震害指数接近或大于 0.7。

(1) 次级断裂通过县政府东路,断层的错动引起路面破裂,导致 NE 盘升高约 0.5 m(图 4)。

(2) 次级断裂通过北川县职业高中宿舍楼南端,造成该楼西南角一层支撑结构的破坏甚至坍塌,导致一层全面坍塌(图 5)。

(3) 北川县湔江大桥在地震中,由于次级断裂错动导致局部断裂破坏,未发生断裂的桥面也产生了超过 0.5 m 的水平位移。

2 地震次生地质灾害

地震次生地质灾害是指由地震触发的崩塌、滑坡等地质灾害。地震次生地质灾害的发生与强地震动和断层活动有关,有时是二者共同作用的结果。从地震次生地质灾害发生的时间和空间来讲,它发生的时间比地震稍晚,空间上仅局限于斜坡危险地



图4 次级断裂造成道路破坏(镜向 NE)

Fig.4 Breakage of road caused by movement of the secondary fault (photo direction: NE).



图5 次级断裂造成北川职业高中宿舍楼破坏(镜向 NW)

Fig.5 Damage of dormitory building at Beichuan professional high school caused by the secondary fault (photo direction: NW).

段^[5-7]。

汶川特大地震触发的崩塌和滑坡次生地质灾害,造成了北川县数千人死亡,大面积房屋被埋和多处公路被毁。在震害调查中共发现了 2 处滑坡和 17 处崩塌,其中王家岩滑坡和景家山崩塌是北川地震次生地质灾害的代表,造成的震害尤为严重。

2.1 王家岩滑坡特征与震害

王家岩滑坡导致北川县医院、计生委、公检法、小学和商业居民区等大面积房屋被埋,造成约 1600 人死亡(图 6)。该滑坡体长 290 m,宽 240 m,厚度 15 m,面积 69 600 m²,体积约 100 万 m³。滑体岩性为碎石夹土,碎石含量大于 50%,结构零乱。滑床推测为下寒武统(ϵ_{1ch})超山组灰黄色变质砂岩、板岩。滑面后部较陡,约 75°,中部稍缓,约 35°,前部平缓,小于 10°;滑面埋深约 15 m;滑面倾向 80°。

王家岩滑坡约 100 万 m³ 的滑坡体在短短几分



图6 北川县城王家岩滑坡(镜向NW)

Fig. 6 Wangjiayan landslide in Beichuan county town
(photo direction: NW).

钟内产生了200 m以上的水平位移量,据此推断属岩质大型高速地震滑坡。其破坏过程分为三个阶段:

(1) 启程剧动阶段。整个坡体在自重和地震荷载作用下产生贯通的滑动面,由地震动引起的坡体波动振荡的能量及储存于滑床附近坡体中的弹性应变能部分转化为滑体滑动的动能,产生初速度,使滑体启程剧动剪出;

(2) 破坏阶段。滑坡启程剧动后,岩体如同一刚体,迅速将势能转化为动能,滑体迅速向NEE向运动,扑向北川老城区,造成大量建筑物被埋;

(3) 碰撞停止阶段。当快速运动滑体运移一段距离后,遇到前方高密度建筑物的拦挡,滑体受阻而整体速度减缓直至停止,形成了坡度小于 10° 的滑坡体。

2.2 景家山崩塌特征与震害

地震发生后在景家山产生了大规模的崩塌,崩塌体摧毁了茅坝初中(图7),导致500余名学生被埋死亡。景家山崩塌的天然坡度大于 50° ;坡长200 m,坡宽150 m,厚度10 m,崩塌体积 30万 m^3 ;坡向 330° ,坡面呈直线形;岩性为泥盆系上统(D_{3sh})沙窝子组灰白色灰岩、白云质灰岩,层面产状 $100^\circ \angle 25^\circ$,巨厚-厚层状,岩体结构为块状-次块状,层面不发育,但岩体发育有溶蚀裂隙和风化卸荷裂隙,被裂隙切割块体大小不一,最大块度达 $10 \text{ m} \times 10 \text{ m} \times 6 \text{ m}$ 。

从岩体结构来分析,景家山崩塌岩体主要为厚层状白云质灰岩、灰岩,顺坡的缓裂和反向的陡裂等多组节理发育,特别是溶蚀裂隙较为发育,岩体呈块状结构;从地质构造来分析,NE向走向的龙门山发震断裂通过景家山附近,导致山体产生较大的位移;从地形地貌来分析,崩塌发生位置斜坡坡度较大,地

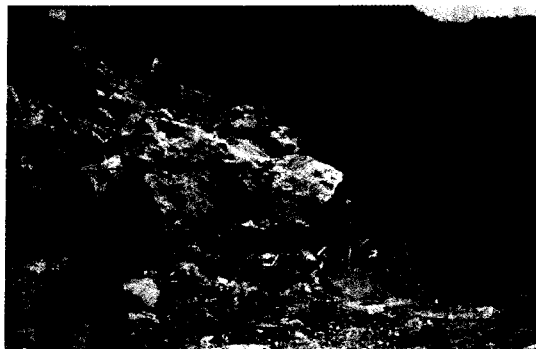


图7 景家山崩塌造成茅坝初中破坏(镜向NE)

Fig. 7 Destruction of buildings in Maoba middle school caused by Jingjiashan collapse
(photo direction: NE).

形较陡。上述三点是景家山崩塌发生的工程地质原因,而地震是该崩塌的触发因素。

当地震发生时,由于强烈的振动导致的水平和垂直加速度很大(水平加速度可达 0.5 g 以上),致使陡峻的基岩坡体在瞬间被震裂,坡体迅速解体为巨石,在振动激发的水平初速度作用下,“崩溃”而下,崩落的岩石主要堆积在坡体下部和坡脚部位^[8]。后缘断壁高约200 m,破裂面表现出顺陡、缓节理拉张的锯齿状特征。

3 振动破坏效应

振动破坏效应是指当地震发生时,地震波在岩土体中传播引起强烈的地面运动,使建筑物的地基基础及上部结构都发生振动,直接引起建筑物破坏。从根本上来讲,一次强烈地震发生时,建筑物的振动破坏主要是由于地震力直接作用引起的。地震力是一矢量,既有水平向的,也有铅直向的,在震中区铅直向的地震力不能忽视^[9-12]。一般情况下,从对上部结构的影响来看,危害主要来自地震产生的水平剪切运动。北川县城建筑物振动破坏类型主要有:

(1) 建筑物坍塌:北川老城区位于极震区,建筑物以砖混结构为主,强烈的振动破坏造成大量房屋倒塌(图8),有的是一部分倒塌,有的整体倒塌。



图8 北川老城区建筑物倒塌(镜向NW)

Fig. 8 Building collapse in the old city zone of Beichuan county town (photo direction: NW).

(2) 墙体剪切破坏:在北川县城,地震造成建筑物墙体剪切破坏是常见的破坏形式,因为砖墙的抗剪强度低,受地震的剪切作用产生斜裂缝;又因为地震是往复作用的,所以裂缝呈交叉 X 形,常出现在窗间或窗肚墙(图 9)。

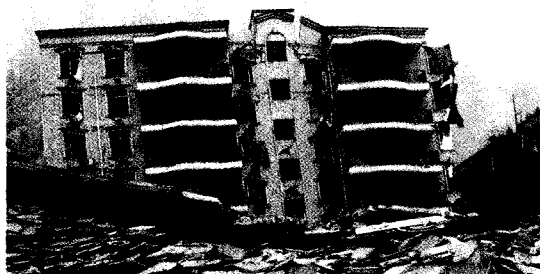


图 9 北川县城建筑物墙体剪切破坏(镜向 W)

Fig.9 Shear failure of Building masonry wall in Beichuan county town(photo direction: W).

(3) 底层破坏:刚度分布不均匀使地震作用不能均匀分配在各构件,造成应力集中,形成薄弱部位,这是房屋破坏严重的主要原因,如底层破坏。在北川县城,一些建筑物底层用作商店、车库等用途,导致底层开间大(柱间距大),净空高,因而(抗弯)刚度小,形成所谓软弱底层;加之底层受到剪力大,因此易于发生底层倒塌。由于底层破坏吸收了能量,上面的各层反到破坏较轻(图 5)。

(4) 混合结构破坏:即房屋一部分是砖砌体,另一部分是框架,刚度不同,弱者先坏。如图 10 为北川县一建筑物,下部为框架结构,上部为砌体结构,由于上下两部分刚度差异大,所以上部破坏要比下部严重。



图 10 北川县城建筑物混合结构破坏(镜向 W)

Fig.10 Destruction of building with mixed construction in Beichuan county town(photo direction: W).

(5) 柱的破坏:主要发生在北川县城的钢筋混

凝土房屋,震害一般集中在柱顶,震害现象由轻到重是:混凝土裂缝、剥落;钢筋外露;混凝土压碎崩落,钢筋成灯笼状鼓出(图 11);最严重的是失去承载力,使房屋倒塌。



图 11 北川县城建筑物柱的破坏(镜向 W)

Fig.11 Pillar destruction of building in Beichuan county town(photo direction: W).

进一步分析表明,断层错动和地震次生地质灾害引起的震害具有分区特征,而振动引起的震害具有普遍性。当断层错动效应和振动破坏效应相叠加时,沿断裂带的震害会产生明显增大;同样当地震次生地质灾害与振动破坏效应相叠加时,一定范围内震害也会急剧增大。

在对北川县城建筑物破坏调查中,如果不考虑断层错动效应和地震次生地质灾害的影响,揭示出振动破坏效应与场地条件关系密切。(1)第四系覆盖层厚度大的建筑场地对地震波具有放大作用,因此振动破坏有所增大;(2)靠近湔江河岸的建筑物场地,在振动作用条件下,地基会产生向临空方向较大变形,震害也会增大。

4 结论

(1) 汶川大地震在北川县城造成的严重破坏的主要原因为断层活动产生的地表破裂效应、地震引发的次生地质灾害和强地震动产生的振动破坏效应。

(2) 跨越断裂带上的建筑物几乎完全倒塌,邻近断裂带的建筑物震害相对较轻。

(3) 地震触发的崩塌、滑坡等次生地震地质灾害造成的破坏巨大,其中最为严重的是王家岩滑坡和景家山崩塌。地震次生地质灾害发生的时间比地震稍晚,空间上仅局限于斜坡危险地段。

(4) 振动破坏在北川县城是普遍存在的,它产生的震害是直接的。振动破坏与建筑物场地条件和建筑结构关系密切。地震产生的水平剪切运动对北

川县城建筑物的危害很严重。

(5) 断层错动和地震次生地质灾害引起的震害具有明显分区特征。当断层错动效应和振动破坏效应相叠加时,沿断裂带的震害会产生明显增大。同样,当地震次生地质灾害与振动破坏效应相叠加时,一定范围内震害也会急剧增大。

防灾科技学院的薄景山研究员、迟宝明教授、李巨文教授在北川地震科考工作中提供了技术指导,在此表示感谢!中国地震局地质研究所的张培震研究员、中国地震局工程力学研究所的袁一凡研究员在灾区地震科考期间也提供了帮助,因此深感谢意。

[参考文献]

- [1] 张培震,徐锡伟,闻学泽,等. 2008年汶川8.0级地震发震断裂的滑动速率、复发周期和构造成因[J]. 地球物理学报, 2008,51(4):1066-1072.
- [2] 邓起东,陈社发,赵小麟. 龙门山及其邻区的构造和地震活动及动力学[J]. 地震地质,1994,16(4):389-403.
- [3] 陈国光,计凤桔,周荣军,等. 龙门山断裂带晚第四纪活动性分段的初步研究[J]. 地震地质,2007,29(3):657-673.
- [4] 唐荣昌,韩渭宾. 四川活动断裂与地震[M]. 北京:地震出版社,1993.
- [5] 张德藩. 北川县城区山地灾害成因及防治对策[J]. 水利水电技术导报,1992,(1):22-28.
- [6] 谢和平,邓建辉,台佳佳,等. 汶川大地震灾害与灾区重建的岩土工程问题[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(9):1781-1791.
- [7] 黄润秋. 20世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(3):433-454.
- [8] 黄润秋,许强. 中国典型灾难性滑坡[M]. 北京:科学出版社,2008.
- [9] 袁中夏,谭明,马占虎. 汶川大地震四川省青川县砖混结构村镇房屋震害分析[J]. 西北地震学报,2008,30(4):317-325.
- [10] 董娣,桑向国,刘锐,等. 震源机制对近场地震动反应谱的影响[J]. 西北地震学报,2008,30(1):6-10.
- [11] 梁庆国,韩文峰,赵士耀. 垂直向地震作用对节理岩体失稳破坏的影响[J]. 西北地震学报,2007,29(4):307-313.
- [12] 刘齐茂,燕柳斌. 强震作用下框架结构的优化设计[J]. 西北地震学报,2008,30(2):107-112.