

# 背后山古滑坡对汉源老县城震害的影响\*

刘红帅<sup>1</sup>, 王根龙<sup>2</sup>, 薄景山<sup>1,3</sup>, 刘德东<sup>1</sup>

(1. 中国地震局工程力学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080; 2. 中国地质调查局 西安地质调查中心, 陕西 西安 710054;  
3. 防灾科技学院, 河北 三河 065201)

**摘要:** 通过对背后山地形地貌、地层岩性、地质构造等进行了野外考察, 揭示了背后山发育的古滑坡, 圈定了古滑坡周界, 分析了汶川地震对背后山古滑坡的影响。利用有限元软件 ADINA 估算了背后山古滑坡的卓越周期, 并与汉源老县城附近的强震记录的卓越周期进行了对比, 发现可能出现了共振现象。最后探讨了背后山古滑坡对汉源老县城建筑物震害的影响。

**关键词:** 背后山古滑坡; 震害调查; 卓越周期; 汉源老县城

**中图分类号:** P315.9

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2011)04-0511-07

## 0 引言

四川省汉源县老县城部分位于背后山古滑坡前缘的堆积体之上, 在2008年5月12日汶川8.0级地震中出现了高烈度异常现象。从汶川8.0级地震等震线上可以看出, 四川汉源和陕西渭河沿岸分别位于Ⅷ度和Ⅶ度烈度异常区, 甘肃庆阳南部、云南昭通地区北部、重庆梁平、西安部分地区出现了Ⅵ度异常区(图1)(袁一凡, 2008)。其中汉源老县城距宏观震中约200 km, 为汶川特大地震Ⅵ度区内唯一的Ⅷ度异常区, 也是十分罕见的远震高烈度异常区。揭示汉源老县城高烈度异常的成因, 不仅能解答科学界及公众关注的问题, 还能为地震灾害的防御和场地效应的深入研究提供珍贵的资料, 为抗震设计规范的修订与完善提供重要的科学依据。

汶川 $M_s8.0$ 地震发生后, 国内外学者围绕汶川地震近场重灾区震害进行了大量的考察和研究, 并发表了大量的论文, 也有少数学者报道了远场的震害(谢晓峰等, 2010; 张宇翔, 袁志祥, 2010)。笔者在中国地震局汶川地震科考指挥部的统一部署下, 对汉源县城地震高烈度异常区开展了系统的考察, 获取了翔实的第一手资料, 并对

其震害及烈度异常机理进行了初步总结(薄景山等, 2009; 卢滔等, 2009)。笔者认为背后山古滑坡对汉源老县城建筑物震害的影响剖析深度还不够, 因此笔者根据自己于2008年8月2~6日对背后山古滑坡野外科考获取的调查资料, 结合汶川地震中汉源县城附近的强震记录, 进一步探讨了背后山古滑坡对汉源老县城建筑物震害的影响。

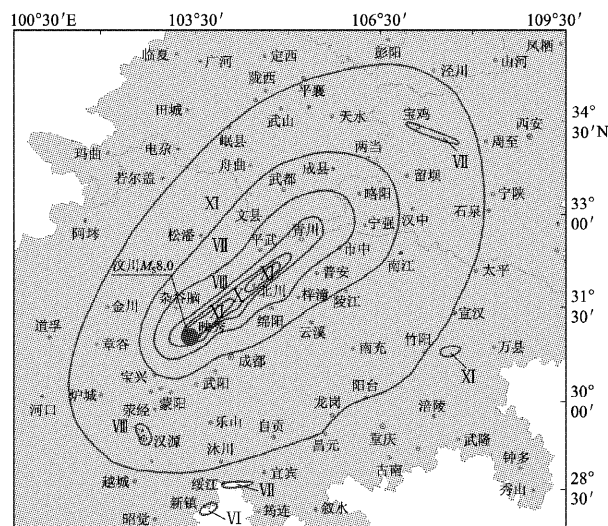


图1 汶川8.0级地震等震线图(袁一凡, 2008)

Fig. 1 Isoseismal map of  $M_s8.0$  Wenchuan Earthquake (Yuan, 2008)

\* 收稿日期: 2011-05-20.

**基金项目:** 中国地震局工程力学研究所基本科研业务费——背后山滑坡坡体结构对汉源县城烈度异常的影响(2009B03)、国家自然科学基金——汶川特大地震汉源县城地震烈度异常机理研究(50978237)、昔格达地层堆积型滑坡体与锚索抗滑桩的地震动接触应力研究(41172293)联合资助。

# 1 滑坡区工程地质条件

## 1.1 地形地貌

背后山滑坡位于汉源老县城背后山斜坡之上,地形上呈圈椅状,高程范围大致为 800~1 060 m,地势北东高,南西低(图 2)。地形上陡下缓,上部坡度约 20°~25°,下部坡度约 10°。滑坡体后缘及中部局部可见陡坎地貌,滑坡区总体上属风化剥蚀地貌。省道 306 线从坡体中部穿越,上部坡体多已被开垦为阶梯状的旱地、下部坡体为稻田,民宅零星分布在斜坡体上。滑坡体上发育有几条冲沟,冲沟为当地居民的主要饮水渠和灌溉渠<sup>①</sup>。

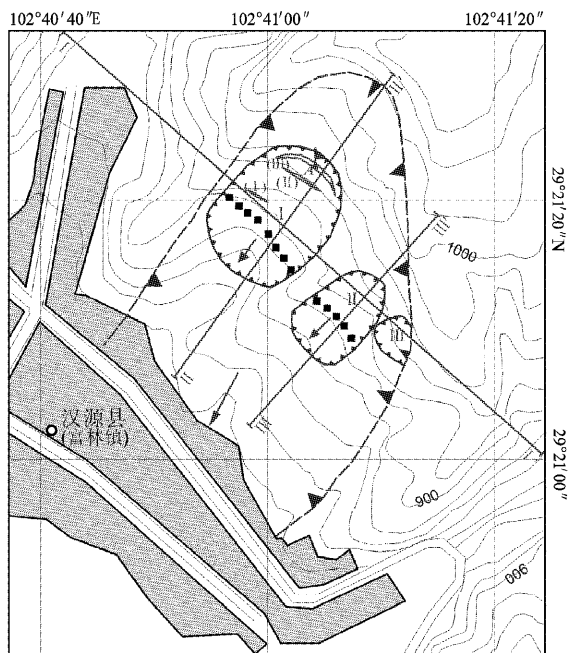


图 2 背后山滑坡平面图

Fig. 2 Planimetric map of Beihoushan Mountain landslide

## 1.2 地层岩性

滑坡体地层分为第四系滑坡堆积层( $Q^{del}$ )、第四系坡残积地层( $Q^{di+el}$ )及新近系昔格达组( $N_{2x}$ )。滑床地层可见侏罗系沙溪庙组( $J_{2s}$ )<sup>①</sup>。

滑坡堆积层( $Q^{del}$ ):灰黄色,主要为粉质粘土和粉土。上部土层主要为粉质粘土夹碎砾石,厚 1~3 m,湿润,可塑;底部地层主要为粉土,

一般厚 2~6 m,处于湿润至饱和的松散状态。堆积层厚 6~12 m。

坡残积层( $Q^{di+el}$ ):灰黄色粉质粘土,夹碎砾石,干燥至湿润,可塑,广泛分布于坡体上,厚 1~3 m。

新近系昔格达组( $N_{2x}$ ):灰色、灰黄色粉砂岩、粉砂质泥岩,半成岩,半胶结,具微细水平层理,岩质极软,易刻划折断,遇水软化,在坡体上广泛分布,厚度较大。

侏罗系沙溪庙组( $J_{2s}$ )地层:紫红色泥岩、粉砂质泥岩、砂岩。

## 1.3 地质构造及地震

滑坡区位于流沙河断裂东侧、汉源向斜的北东翼<sup>②</sup>,处于瓦山断块,新构造运动自喜山运动以来主要表现为间歇性的强烈上升,区域构造相对稳定<sup>①</sup>。滑坡所在区域的地震抗震设防烈度为 VII 度,地震动峰值加速度为 0.15 g,地震动反应谱特征周期为 0.45 s (GB50011-2010)。

## 1.4 水文地质条件

### (1) 地表水

该滑坡位于背后山斜坡上,倾向于大渡河,斜坡地表土体为细粒土,已被开垦为旱地。坡体地表水源主要为降雨、水田和灌溉渠。灌溉渠沿滑坡体中部斜向下穿过,沿冲沟成渠。饮水渠上部为自然冲沟,下部为人工浆砌沟,水田位于滑坡区的前下部。滑坡区的主要渗水为降雨和水渠中的水<sup>①</sup>。

### (2) 地下水

滑坡区地下水由若干不连续的水体组成,分为滑坡体中的孔隙水与昔格达层中的裂隙水,它们属于叠置层状含水结构,层与层之间乃至同一层地下水连续性较差。地下水主要来源于地表水与降水,赋存条件差,地下水不丰富<sup>①</sup>。

# 2 背后山古滑坡存在的证据

1994 年,地矿江油工程勘察院在总结已有工作的基础上,初步判定汉源县城背后山存在一个滑坡群。笔者根据该区的地形地貌及地层岩性和四川省滑坡发育特点等因素,综合分析,认为背后山发育有一特大型古滑坡,古滑坡已经演变为

① 四川省林业勘察设计研究院. 2007. 四川大渡河瀑布沟水电站库区公路重建工程省道 306 线汉源县三谷庄至 108 国道段 (M 合同段变更设计) K86+389~K86+447 段滑坡处治说明。

② 地矿江油工程勘察院. 1994. 四川省汉源县背后山滑坡、泥石流治理工程可行性研究报告。

现在的滑坡群。

2.1 地形地貌

整个坡体的地形地貌为圈椅状（图 3），具有典型的滑坡特征；根据滑坡、尤其是古滑坡的特

征，滑坡后壁往往呈现梯级陡坎状（图 4）；滑坡中部具有滑坡舌的形态（图 5）；古滑坡后壁经过多次坍塌或滑动后，陡坎高度明显变大（图 6）。依据上述特征，笔者圈定了古滑坡中后部的边界。



图 3 古滑坡后部圈椅状地形（镜向北西）  
Fig. 3 Round-backed armchair Shape of old landslide (mirrored to NW)



图 4 古滑坡后壁（镜向北东）  
Fig. 4 back cliffs of old landslide (mirrored to NE)



图 5 古滑坡舌状形态（镜向北西）  
Fig. 5 Tongue-shape morphology of old landslide (mirrored to NW)



图 6 古滑坡左后壁（镜向北东）  
Fig. 6 Left-back cliff of old landslide (mirrored to NW)

2.2 岩性界限

笔者以地形地貌特征为基础，结合前述滑坡体岩性特征，测绘了一条地质横向剖面图（图 7），之后又详细调查了古滑坡体周界的岩性及变形特点，进一步确定了古滑坡侧面边界。

2.3 古滑坡地质剖面

依据上述调查结果，笔者圈定了古滑坡的边界范围（图 2），古滑坡体长约 1 000 m。宽约 800 m。结合本区滑坡发育特点，推测古滑坡平均厚

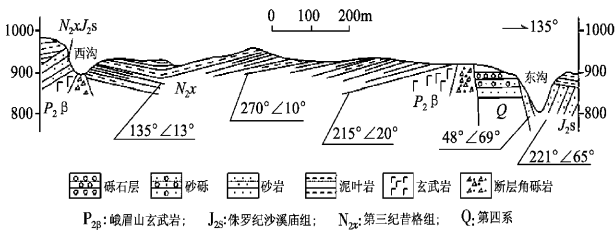


图 7 古滑坡体 I - I' 地质剖面  
Fig. 7 I - I' geological profile of old landslide

度约 20 m，体积分约  $(1\ 600 \times 10^4)\text{ m}^3$ 。依据已有的成果<sup>①,②</sup>，推测绘制了古滑坡的主滑地质剖面(图 8)。

综上所述，汉源县城背后山确实发育一特大型古滑坡。

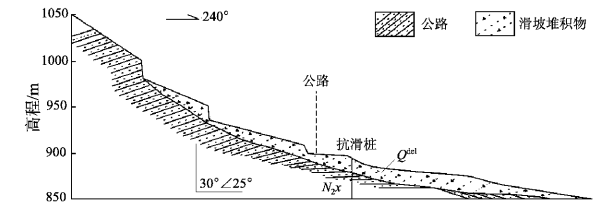


图 8 古滑坡体 II-II' 地质剖面

Fig. 8 II-II' geological profile of old landslide

3 地震对古滑坡活动的影响

根据滑坡体的地层岩性，初步推测古滑坡体的形成年代为新近纪末或第四纪初。由于受到多次滑动破坏，加之修建公路、降雨等因素的影响，目前古滑坡后缘形成了高约 20 m 的陡坎，并在背后山古滑坡内发育有 3 个新的次级滑坡，其平面分布如图 2 所示。科考过程中经过仔细踏勘后，笔者发现：汶川大地震发生后，背后山古滑坡后缘未产生拉张裂缝，侧缘未产生剪切拉张裂缝而且前缘未产生鼓张裂缝，I 号滑坡的锚索抗滑桩未出现破坏现象。但汶川大地震后，背后山古滑坡体上的 I 号滑坡体中后部产生了 3 条拉张裂缝，均位于库区公路北侧。裂缝 I、II 和 III 均为拉张裂缝，长度分别约为 40 m、150 m 和 200 m，宽度分别为 15~40 cm、20~50 cm 和 15~40 cm 不等，其对应照片分别为图 9、图 10 和图 11。

汶川大地震发生后，当地国土资源部门于 2008 年 5 月 24 日针对该滑坡裂缝布设了 2 台位移伸缩仪和 14 个位移监测点，并开展了周密的监测：每天测 2 次，上午 10 点一次，下午 4 点一次，情况异常时增加监测次数，每天下午 5 时以前报县国土资源局。图 12 给出了监测点 A 位移曲线(A 点对应的位置见图 2)。从图 12 可以看出：5 月 24 日后，I 号滑坡体在无雨时停止滑动，在降雨后，最大位移速率达 3 cm/d，这表明 I 号滑坡体中上部处于不稳定状态，有局部失稳的可能。



图 9 I 号滑坡条裂缝 I (镜向北)

Fig. 9 No. 1 crack inside No. I landslide (mirrored to N)

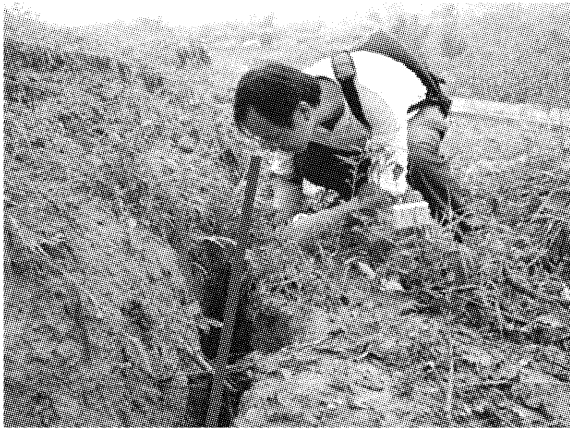


图 10 I 号滑坡条裂缝 II (镜向北)

Fig. 10 No. 2 crack inside No. I landslide (mirrored to N)



图 11 I 号滑坡条裂缝 III (镜向北)

Fig. 11 No. 3 crack inside No. I landslide (mirrored to N)

① 地矿江油工程勘察院. 1994. 四川省汉源县背后山滑坡、泥石流治理工程可行性研究报告.  
② 四川省林业勘察设计院. 2007. 四川大渡河瀑布沟水电站库区公路重建工程省道 306 线汉源县三谷庄至 108 国道段 (M 合同段变更设计) K86+389~K86+447 段滑坡处治说明.

综上所述，现今古滑坡体内部发育有 3 个新的活动滑坡。汶川大地震发生后，背后山古滑坡体未出现整体复活的迹象，但 I 号滑坡中后部出现了 3 条拉张裂缝，可能是因为背后山古滑坡中 I 号滑坡局部地形陡，对汶川大地震传至该处的地震波产生响应的结果。

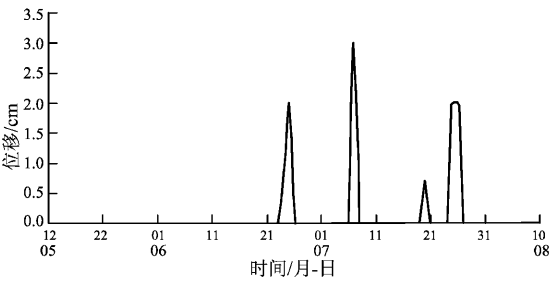


图 12 典型点 A 位移监测曲线

Fig. 12 Displacement monitoring curve of point A

4 古滑坡体对汉源老县城建筑物震害的影响

4.1 汉源老县城建筑物震害分布特征

根据汉源老县城的建筑物分布和震害特征，笔者选择了 42 个工作点，每个工作点的面积约为 1 km<sup>2</sup>。依据《中国地震烈度表》（GB/T 17742 - 1999），我们对 86 栋房屋建筑进行了详细的震害调查，给出了每一栋受调查房屋的震害指数。图 13 是依据调查房屋的震害指数绘制的震害等值线图（薄景山等，2009；卢滔等，2009），其中震害指数在 0.5 等值线以内区域的房屋震害为严重破坏至毁坏，地震烈度大于Ⅷ度；震害指数在 0.2 等值线以内，0.5 等值线以外区域的房屋震害为轻微至中等破坏，地震烈度为Ⅶ至Ⅷ度。从图 13 可以看出，汉源县老县城的地震烈度整体上可以评定为Ⅷ度，局部高于Ⅷ度。由此可见，地震灾评烈度评定的汉源烈度Ⅷ度异常区是客观存在的。

背后山古滑坡堆积体包括图 13 已标识的范围以及向西南延伸至震害指数为 0.5 的等值线附近的区域，因该部分长期受流沙河河水冲刷、河水携带的泥沙沉积覆盖以及人类活动的影响，界线难以确定，故未标识。根据图 13，结合现场建筑物震害调查情况，汉源老县城建筑物破坏最严重的区域主要分布在县城东北方向背后山古滑坡堆积体上，建筑物震害指数最高达 0.9；绝大数震害指

数大于 0.7，而震害指数  $D_1$  为 0.5 的等值线范围内的其它区域建筑物震害指数绝大多数为 0.5 ~ 0.6，只有少数达到 0.7。无论是远离这一区域高程逐渐降低的流沙河（向西、向南）方向的新城区、河漫滩，还是高程进一步增高的山区（向北、向东），建筑物破坏程度都有减轻的趋势。假设该区不存在背后山古滑坡堆积体的斜坡地形，至少Ⅷ度区的面积和灾害损失会明显减少，由此判定，背后山古滑坡堆积体的斜坡地形和土层结构对建筑物震害起到了明显的加重作用，导致高出周边两度的烈度异常区的面积明显增加。

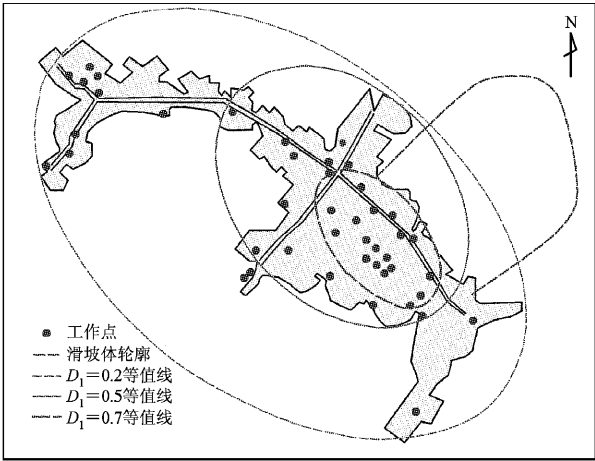


图 13 汉源县老县城震害指数等值线图

Fig. 13 The seismic disaster contour map of old Hanyuan County

4.2 古滑坡对建筑物震害的定量化初探

笔者通过野外调查，根据地形地貌和岩性组成初步判定，汉源县老县城部分坐落在背后山古滑坡前缘的堆积体之上。笔者以图 8 的地质剖面为基础，采用有限元 Adina 自振频率分析模块计算了背后山滑坡的前 10 个起控制作用的周期。

计算时，根据现场考察的初步结果，先将该边坡模型简化为由基底砂岩层和上覆滑坡堆积体组成的双层结构，再将该坡体简化为平面应变问题，边界条件采用粘弹性边界（陈红灯等，2010）。为了能够给出前 10 个卓越周期的上、下限范围，基底砂岩层的参数取为：弹模 5 ~ 10 GPa，密度 2 000 ~ 2 500 kg/m<sup>3</sup>，泊松比 0.2 ~ 0.3；滑坡堆积体的计算参数取为：弹模 1 ~ 5 GPa，密度 1700 ~ 2000 kg/m<sup>3</sup>，泊松比 0.25 ~ 0.35。当计算参数取最小值时，得到的结果为最小值，反之亦然。计算给出了前 10 个周期（表 1）。

表 1 汉源背后山滑坡前十个卓越周期 (单位: s)  
Tab. 1 Predomin period of Beihoushan landslide of Hanyuan (unit: s)

编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
最小值	0.66	0.62	0.52	0.45	0.39	0.38	0.32	0.27	0.25	0.23
最大值	0.80	0.76	0.63	0.56	0.54	0.50	0.44	0.40	0.38	0.35

通过对汉源附近的九襄、清溪、乌斯河、宜东 4 个强震台站记录到的地震波加速度时程的频谱特性分析,得到了汶川大地震地震波的卓越周期(表 2)。图 14 为离汉源县城最近的强震台——九襄台记录到的汶川主震 NS 向加速度时程和傅立叶幅值谱,从傅立叶谱中看出汉源县境内加速度能量主要集中在 0.8 ~ 6 Hz 这个频率段内,即约 0.17 ~ 1.3 s 周期段内(卢滔等, 2009)。对比分析表 1 和表 2 可以发现:九襄台水平向加速度记录(EW 和 NS 向)的卓越周期介于背后山滑坡第三个周期的最小值和最大值之间,竖向加速度记录的卓越周期介于第五、六和七个周期的最小值和最大值之间;清溪台 EW 和 US 向加速度记录的卓越周期介于背后山滑坡第一、二个周期的最小值和最大值之间,NS 向加速度记录的卓越周期介于第五、六和七个周期的最小值和最大值之间;乌斯河台 EW 和 NS 向加速度记录的卓越周期介于背后山滑坡第七、八、九和十个周期的最小值和最大值之间;宜东台 EW 和 US 向加速度记录的卓越周期介于背后山滑坡第五、六和七个周期的最小值和最大值之间,UD 向加速度记录的卓越周期介于第十个周期的最小值和最大值之间。由此可见,汶川地震的地震波传播至背后山时可能激发了古滑坡斜坡地形的多个周期的响应,产生了共振效应,导致地震放大效应更加显著,加重了汉源老县城位于古滑坡前缘堆积体之上的建筑物震害。

表 2 汉源附近强震记录的卓越周期 (单位: s)  
Tab. 2 Predominant period of strong motion records near Hanyuan (unit: s)

台阵名称	方位		
	E - W	N - S	U - D
九襄	0.55	0.59	0.41
清溪	0.72	0.44	0.64
乌斯河	0.32	0.34	0.20
宜东	0.42	0.42	0.23

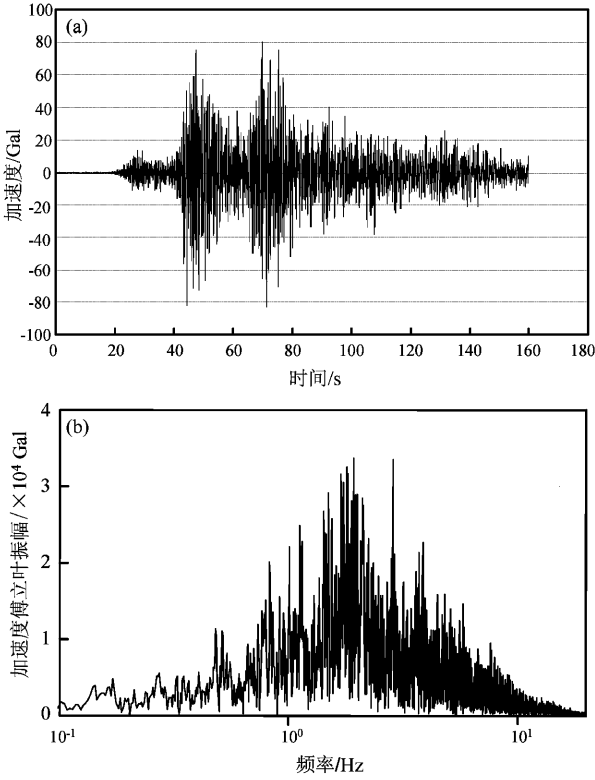


图 14 汶川地震主震汉源县九襄台加速度记录时程 (a) 与傅立叶幅值谱 (b)  
Fig. 14 Wenchuan main shock acceleration record on Jiuxiang station (a) and its Fourier amplitude spectrum (b)

5 结论与建议

(1) 背后山斜坡发育有古滑坡。经过踏勘证实,汶川大地震后背后山古滑坡体未发现整体复活的迹象。现今古滑坡体上发育有 3 个新的活动滑坡,其中汶川地震发生后I号滑坡中后部出现了 3 条拉张裂缝,裂缝长 40 ~ 200 m 左右,宽15 ~ 50 cm。

(2) 汉源老县城区坐落于背后山古滑坡前缘的堆积体之上,烈度异常与滑坡活动无关,背后山古滑坡的卓越周期与汉源附近强震台站所记录到的强震记录的卓越周期相接近,汶川地震时,



可能发生了共振效应，加重了位于古滑坡前缘的堆积体之上的汉源老县城建筑物震害。

(3) 建议在背后山古滑坡体上布置1~2条钻探剖面，查明背后山古滑坡地质结构，尤其是前缘的地层岩性及结构；进行土工试验，确定本构模型及参数，建立精细的地质模型，进一步估算古滑坡体的卓越周期，以便准确地判定古滑坡体对汉源老县城建筑物震害的影响。

感谢中国地震局汶川地震科考指挥部和汉源县人民政府对本项工作的大力支持。中国地震局工程力学研究所周正华研究员提供了汉源附近的强震记录，两名匿名审稿人提出了中肯的修改意见，在此一并致谢。

## 参考文献：

- 薄景山, 齐文浩, 刘红帅, 等. 2009. 汶川特大地震汉源烈度异常原因的初步分析[J]. 地震工程与工程振动, 29(6): 53–64.
- 陈红灯, 杜成斌, 苑举卫. 2010. 基于 ABAQUS 的粘弹性边界单元及在重力坝抗震分析中的应用[J]. 世界地震工程, 26(3): 127–132.
- 卢滔, 薄景山, 李巨文, 等. 2009. 汶川大地震汉源县建筑物震害调查[J]. 地震工程与工程振动, 29(6): 88–95.
- 谢晓峰, 王兰民, 袁中夏, 等. 2010. 汶川 8.0 级地震中宁夏南部山区震害特征分析[J]. 地震研究, 33(1): 106–110.
- 袁一凡. 2008. 四川汶川 8.0 级地震损失评估[J]. 地震工程与工程振动, 28(5): 10–19.
- 张宇翔, 袁志祥. 2010. 汶川 8.0 级地震陕西灾区震害特征分析[J]. 地震研究, 33(3): 329–335.
- GB 50011–2010, 建筑抗震设计规范[S].
- GB/T 17742–1999, 中国地震烈度表[S].

# Influence of the Beihoushan Mountain Landslide on the Earthquake Damage of Hanyuan Old County Town

LIU Hong-shuai<sup>1</sup>, WANG Gen-long<sup>2</sup>, BO Jing-shan<sup>1,3</sup>, LIU De-dong<sup>1</sup>

(1. Institute of Engineering Mechanics, CEA, Harbin 150080, Heilongjiang, China)

(2. Xi'an Center of Geological Survey, CGS, Xi'an 710054, shaanxi, China)

(3. Institute of Disaster Prevention Science and Technology, Sanhe 065201, Hebei, China)

## Abstract

A part of old county town of Hanyuan, Shaanxi Province lied on the front accumulation body of the Beihoushan Mountain landslide. A high-intensity abnormality caused by the  $M_s 8.0$  Wenchuan earthquake which was about 200 km away appeared there. The geomorphology, strata, type of rock and soil, geologic structures in the Beihoushan Mountain area were investigated. An old landslide in the Beihoushan Mountain was revealed. The boundary of old landslide was delimited. And effects of old landslide on earthquake damage of old Hanyuan County were analyzed. The predominant periods of the Beihoushan Mountain landslide were estimated using ADINA. The predominant periods of strong ground motion records near old Hanyuan County were close to those of the old landslide, which induced resonance effect to aggravate the earthquake damage of buildings lying on the front accumulation body of the Beihoushan Mountain landslide.

**Key words:** ancient landslide of the Beihoushan; earthquake damage investigation; predominant period; old county town of Hanyuan