

刘爱文, 宋毅盛, 李方杰, 夏珊, 2007. 宁洱 6.4 级地震庙山垭口附近的震害现象. 震灾防御技术, 2(3): 270—278.

宁洱 6.4 级地震庙山垭口附近的震害现象¹

刘爱文 宋毅盛 李方杰 夏珊

(中国地震局地球物理研究所, 北京 100081)

摘要 我国近期提出了大中城市和经济发达地区应具备抗御 6 级左右地震能力的防震减灾目标。宁洱地震作为我国多年来少有的近城市直下型地震, 此次地震的震害经验和教训具有重要的参考价值。本文在地震现场科学考察的基础上, 根据庙山垭口的地震宏观现象以及房屋震害现象, 初步分析和总结了中强地震震中地区的震害特征, 包括竖向地震力的影响、地震动的扭转效应以及地裂缝对建筑结构的作用。

关键词: 宁洱地震 震中附近 震害现象

引言

2007年6月3日云南省普洱市宁洱县发生6.4级地震。震区位于青藏高原东南缘的“三江”活动构造区内, 同时也是欧亚与印度两大活动板块碰撞带边缘地区, 该地区是我国乃至世界都十分罕见的中强地震原地或原构造重复率极高的典型构造区之一。据统计, 在迄今30余年的时段内, 在宁洱地震震中50km范围内共发生了9次5级以上地震, 其中5.0级至5.9级地震2次, 6.0级至6.9级地震7次。此次地震属于我国大陆地区多年以来少有的城市准直下型中强地震, 极震区烈度为Ⅷ度。地震虽然造成的人员伤亡数目较少, 但是由于地震发生的地点距离宁洱县城较近, 且震源深度较浅(5km), 造成宁洱县城区大量的房屋破坏, 城市生命线系统及其他基础设施也损坏严重(苗崇刚, 2007)。

我国近期提出了大中城市和经济发达地区应具备抗御 6 级左右地震能力的防震减灾目标。而目前国内外对中强地震震中附近的震害现象和强地震动特征的研究还较少。大多数学者研究的是 7 级左右及以上强烈地震近断层的地震动特征及其对建筑结构的影响, 如 1994 年美国北岭 M_S 6.8 级地震、1995 年日本阪神 M_S 7.2 级地震、1999 年我国台湾集集 M_S 7.3 级地震、土耳其 Izmit M_S 7.4 级地震和 2001 年印度古杰拉特邦 M_S 7.7 级地震等。7 级左右及以上强烈地震一般伴随着显著的发震断层, 其近断层地震动特征往往包含明显的地面永久位移、破裂方向性效应、速度大脉冲、上盘效应、扭动效应、竖向地震动作用显著等(李小军, 2001; Wang G. Q.等, 2002; 刘启方等, 2006)。这些近断层地震动的特征对地下结构、地面建筑物、桥梁、大坝等工程结构的影响显著。日本阪神地震的发震断层穿过神户市, 其引发的地震称

1 中国地震局地球物理研究所中央级公益性科研院所基本科研业务专项项目 DQJB06A01 资助。

【收稿日期】2007-08-18

【作者简介】刘爱文, 男, 生于 1973 年。副研究员。主要研究领域: 工程地震、生命线地震工程。E-mail: law73@163.com

之为“城市直下型”地震，给神户市造成了极其严重的震害，老旧房屋和以高架桥为代表的生命线工程遭到了前所未有的致命打击，首次出现地铁主体结构的震害（中国赴日地震考察团，1995；蔡之瑞，1995；钱培风，1996；周炳章，1996）。宁洱地震虽然只属于一个 6 级左右的中强地震，但是地震的震害现象却异常丰富，它提供了一次较好总结近城市中强地震震害经验的机遇。

对于 6 级左右的地震，很难采用近断层这一概念，因为根据已有地震的震害调查经验，在我国发生一次 6 级左右的地震，很少观察到明显的由发震断层引起的地表破裂现象，往往是地表的裂缝，地裂缝不长且成因复杂。另外，震后的科学考察只能考察到地震破坏的最终结果。在宁洱地震现场调查时，我们发现庙山垭口公路旁边一独户人家，一村民杨家生在清醒的状态下经历了此次地震发生的全过程。作者在庙山垭口现场测定了此处的 GPS 坐标，并分别与不同测震台网速报的震中位置进行比较，见表 1 和图 1。由于台网的布局 and 距震中的距离不同，不同台网测定的微观震中稍有差异。而庙山垭口则在此 2 个微观震中之间，且最接近于已确定的普洱断裂西支的位置。再根据他所看到的地光地声现象、地裂缝以及他家房屋震害现象，庙山垭口很可能非常靠近此次地震的宏观震中。本文在地震现场应急救援和科学考察资料的基础上，结合庙山垭口周围的宏观震害现象，初步分析和总结了这次 6 级左右中强地震震中附近的震害特点和强地震动特征。

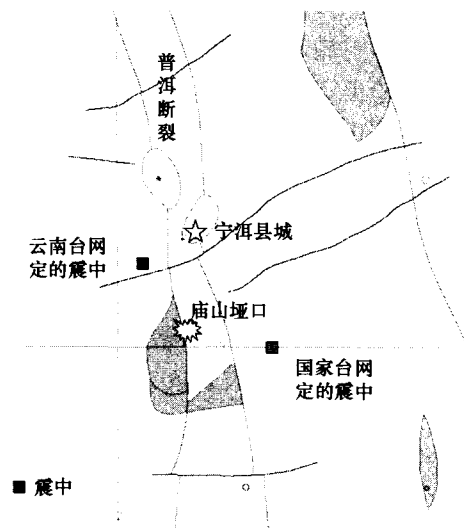


图 1 震区地质构造图和微观震中的位置
Fig. 1 Tectonic background of Ninger area and the location of epicenter

表 1 不同台网测定的微观震中参数

Table 1 Instrumental epicenters measured from different earthquake observation networks

序号	台网	震中位置		震级 M_s	震源深度 (km)
		北纬	东经		
1	全国测震台网	23°00'	101°6'	6.4	5
2	云南省地震台网	23°03'	101°1'	6.6	5
3	庙山垭口公路破坏处的 GPS 坐标	23°01'	101°2'		

1 庙山垭口附近的地震宏观现象

宁洱镇村民杨家生的房屋在宁洱县城通往普洱市的公路旁边，位于国道 G213 兰磨线 K2629+960 处，当地人称为庙山垭口，属于宁洱镇太达村委会。这里是国道 G213 兰磨线磨思高等级公路破坏最严重的地方，路面全部破坏，路面震陷、竖向开裂达 0.5m，交通中断。

1.1 庙山垭口的地光和地声现象

由于宁洱 6.4 级地震发生在凌晨 5 点 34 分，天还没有亮，大多数人均是在睡梦中被地震震醒的，而杨家生刚好是 5 点左右起来的，在清醒的状态下近距离经历了此次地震发生的全

过程。据他的描述，先听见地下轰的一声巨响后，他家的墙体和室内地面开裂，紧接着窗外闪起地光，光线很强，照亮了周围一切。地光闪过后，地面开始震动，在救出家人后他家正房的一部分前廊和厨房开始倒塌。

作为验证，另一位村民早晨 4 点左右起来，地震时他正在庙山垭口对面山坡上，看到公路塌方处闪出一条带状亮光，照亮了周围的山体。宁洱县城区也有不少人看见了地光。但是考察山背后的很多村庄却基本上没有听说有人看到了地光，大致可以确定庙山垭口为地光的发源地。

地震发生时，一小部分地震波能量传入空气变成声波，形成地声。此次宁洱地震地声现象很突出。宁洱城区为表土层较薄（10m 左右）的山间盆地，此次地震的震源深度又较浅（5km），所以 3 级以上的余震即可听到地声。

1.2 庙山垭口公路震害现象

现场调查表明，庙山垭口公路路面开裂现象显著。照片 1 为地震后 1 小时左右公路紧急抢修时拍摄的。公路路面出现多条斜向跨路裂缝（北偏西 30°），裂缝呈锯齿状，最宽达 20cm；裂缝可见深度近 1m。

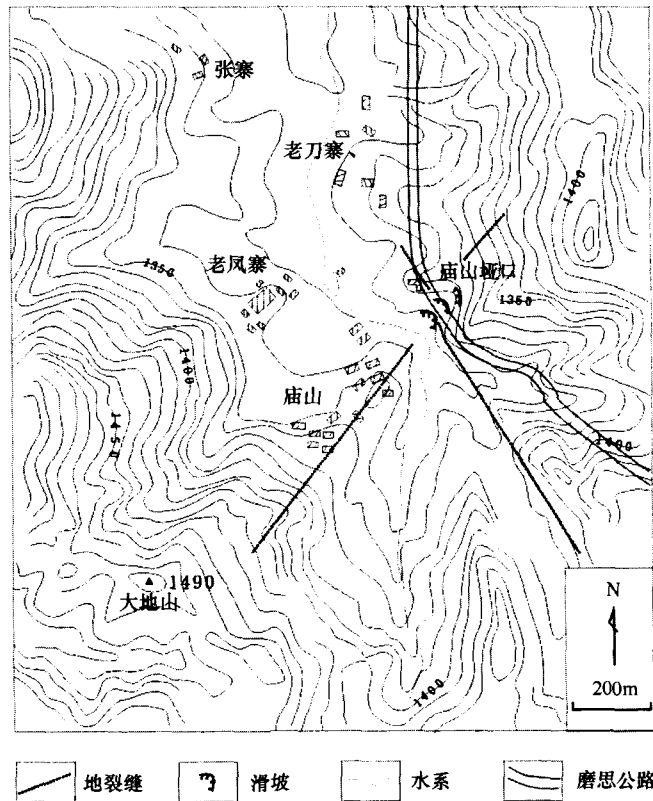


图 2 庙山垭口周围地震产生的地裂缝分布情况示意图

Fig. 2 Distribution of fissures induced by the earthquake near Miaoshan poort

照片 2 为本文作者在地震的当天、震后 13 小时现场拍摄的（镜头方向北偏东）。公路中间形成一个较明显的震陷区。在北边形成 2 组地裂缝：地裂缝 1 为北偏西 30°，长 400m 左右，通向杨家生的房屋；地裂缝 2 为北偏东 20°左右，沿山脊向山顶延伸大约 500m。公路路肩的

边坡滑移现象严重。根据杨家生的描述，公路路面的锯齿状地裂缝和 50cm 高的陡坎是在发震时刻立即形成的，紧接着的强震动作用使得有些地裂缝加大、加宽，并且开始诱发滑坡。滑坡则在强震过后继续进行，持续时间较长。

此处公路破坏的原因可能是多方面的。根据公路在此处建有护坡来看，庙山垭口的山体为一不稳定的滑坡体，在此次地震作用下破坏严重。另外，现场调查同时发现庙山垭口的周围在 20 世纪 30 年代至 70 年代采过煤，当时普洱煤矿即在此附近。据了解采煤坑道深 20—30m，煤层只有 3—4m。可惜当年煤矿的开采情况和煤层分布的详细资料目前很难得到。但是根据煤层的厚度和当年采煤的规模，可以推断采煤空区塌陷不可能造成此次 6.4 级地震。

1.3 庙山垭口周围地区地裂缝分布

在庙山垭口的周围，现场调查发现 2 条地裂缝（一条北西向，另一条为北东向）各向南延伸，长 1—2km，切过山脊或民宅（照片 3），不受地形与地貌的影响。如图 2 所示，这 2 条地裂缝交会于庙山垭口。

2 震中附近房屋的震害现象

杨家生家房屋的平面布局如图 3 所示。

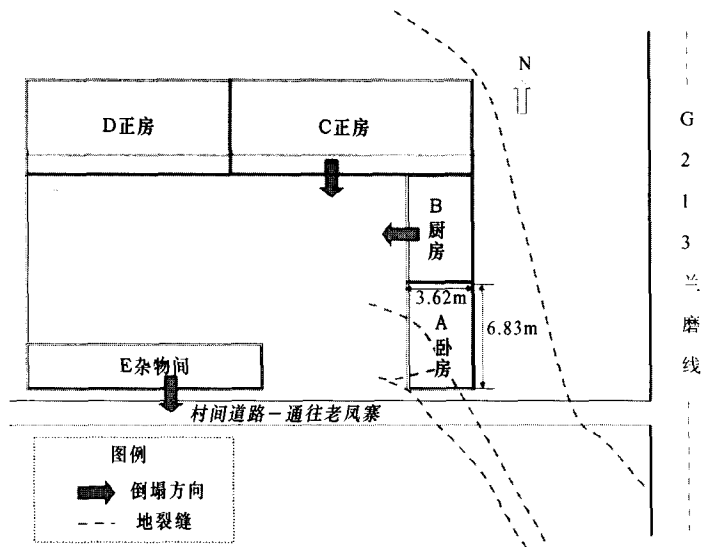


图 3 杨家生房屋的平面示意图

Fig. 3 Plane figure of Mr. Yang's house

2.1 砖木结构的震害

在图 3 中 C 和 D 为砖木结构，属于当地民居的传统结构模式，具有一定的代表性，有木柱前廊，不含阁楼，穿斗木结构，山墙为砖墙，九十年代建造，属于烈度评定中的 II 类房屋。在此次地震中房屋 C 的前廊倒塌（照片 4-1），房屋 D 前廊木柱移位（照片 4-2），前廊西侧混凝土空心砌块柱子移位并有 10° 顺时针扭转效应（照片 4-3），穿斗木架有一处拔榫 2cm（照片 4-4）。

2.2 混凝土空心砌块房屋的震害

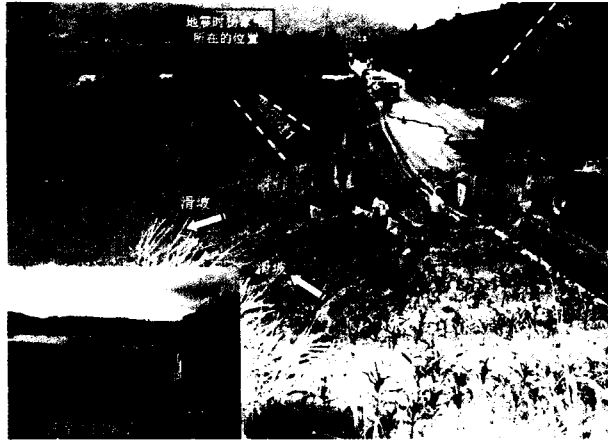
在图 3 中 A 和 B 为混凝土空心砌块房屋，砌块墙体为房屋的承重结构，于 2007 年春节新

建成。E 为杂物间，属于混凝土空心砌块简易棚舍。A、B、E 均采用混凝土空心砌块（尺寸，cm: $20 \times 20 \times 40$ ）为墙体，且作为承重结构，抗震性能均较差，属于烈度评定中的 I 类房屋。



照片 1 庙山垭口公路路面的开裂情况（镜头方向向南，普洱市公路局宁洱养护段提供）

Photo 1 Ground fissures on the road at Miaoshan poort (View in south direction)



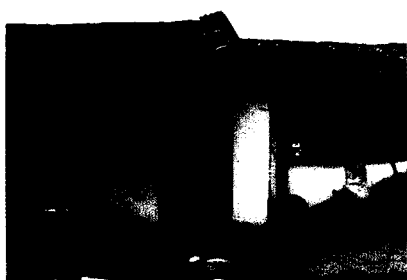
照片 2 庙山垭口公路震害分布情况（镜头方向北偏东）

Photo 2 Road damage near Miaoshan poort (View in north-east direction)



照片 3 北东向地裂缝穿过庙山民宅

Photo 3 A house in Miaoshan village is damaged by Northeast ground fissures underneath



4-1



4-2



4-3



4-4

照片 4 正房 C 和 D 的震害

Photo 4 Damage of the building C and D in Mr. Yang's house



照片 5 混凝土空心砌块房屋的震害

(左图为厨房 B 向西倒塌；右图为简易棚屋 E 向南倒塌)

Photo 5 Damage of concrete hollow block masonry (B falling down westward and E falling down southward)

混凝土空心砌块因为具有节约土地、施工方便、经济性好等特点，目前在城乡建筑中的应用越来越广泛。但是试验结果表明，混凝土空心砌块的脆性材料性质比粘土砖表现更为突出，特别是空心砌块由于壁和肋均较薄，即使在静载较大的轴压力下，也极易产生“劈裂”现象，会造成结构突然倒塌。混凝土小型砌块建筑的墙体开裂主要有以下几种形式：①内墙

阶梯形裂缝；②外纵墙端部阶梯形正八字裂缝；③墙顶水平裂缝；④门窗洞口四周的裂缝（徐铃彪等，2005）。通过非线性有限元的模拟以及相关的试验，无论是否增加了抗震构造措施，空心砌块墙体的初始开裂位移很小，仅为2mm左右，说明砌块墙体在水平侧移很小的情况下就会产生裂缝；通过在砌块墙体增设构造柱、芯柱及窗台圈梁等构造措施后，可以显著提高砌块墙的整体抗震和抗裂性能（徐铃彪等，2005；李利群，2001）。因此，《建筑抗震设计规范（GB 50011-2001）》（中华人民共和国国家标准，2001）规定，小砌块房屋应按要求设置钢筋混凝土芯柱或者用钢筋混凝土构造柱替代，这些芯柱设置要求均比砖房的构造柱要求严格，且芯柱与墙体的连接要采用钢筋网片。



照片6 地震缝对空心砌体墙的破坏

Photo 6 Concrete hollow block wall damaged by ground fissures



照片7 在竖向地震动作用下房屋椽子的断裂情况

Photo 7 Rafter damaged by vertical ground motion

因为没有增设抗震构造措施，杨家生家的混凝土空心砌体房屋部分倒塌（照片5）。如照片6所示，地震时杨家生即是站在此卧房A的窗户后面。据他回忆这些砌块墙体的裂缝在发震引起的地震缝作用下即刻产生。在地震引起的地震缝作用下，整个墙体出现5条裂缝，其中墙体裂缝②和⑤呈倒八字型阶梯形裂缝，①和③为竖直贯穿裂缝，④为窗户至墙右上端的

贯穿裂缝。发震构造引起的地裂缝, 由于其沉降速率大, 现有通用的建筑结构形式难以适应, 跨地裂缝的建筑物往往遭到破坏 (王景明, 2001)。

2.3 竖向地震力造成的破坏

图 3 中房屋 A 的破坏与地震的垂直向运动关系密切。根据现场考察, 屋内的地坪在震后有轻微的隆起现象, 最高约 3cm。房屋的椽子受竖向冲击断裂, 如照片 7 所示。

这种竖向地震力引起的破坏现象在其他地震的极震区也经常发生。以土坯墙的穿斗木结构为例, 地震灾区的普遍现象为土坯墙倒塌而木构架保持基本完好, 而在靠近震中的地区, 则木构架往往出现榫头折断等破坏现象, 有时抗震性能很弱的土坯墙反而没有倒塌。例如, 1971 年 4 月 28 日云南思茅—普洱间 6.5 级地震, 位于极震区 (Ⅷ度) 的那柯里村, 震后有两幢中式穿斗木结构屋顶部分垮下 (高文学, 1990)。

3 结论

综合地裂缝的分布、房屋的震害以及地声、地光等宏观现象, 初步可以认为庙山垭口至少是靠近此次宁洱 6.4 级地震的宏观震中。对于此次宁洱地震, 在震中附近震害的特征包括:

- (1) 竖向地震力作用明显, 震中地区木构架房屋往往出现榫头折断的现象;
- (2) 地震动的扭转效应, 在宁洱城区还有香炉转动、烟囱的扭转等震害现象;

(3) 地裂缝对房屋的破坏作用。对于一次中强地震, 与 7 级以上的强烈地震相比, 由断层位错引起的地上建筑和地下结构的震害现象可能少见, 但是在其震中地区, 发震活动构造、滑坡、不均匀场地沉降等都可能诱发形成地裂缝;

(4) 没有增设相应抗震构造措施的混凝土空心砌体房屋抗震能力低下, 震中附近的这类房屋和土坯房屋在此次宁洱地震中大多数遭受了严重破坏。

另外根据庙山垭口周围地区的房屋震害现象, 特别是宁洱县城城区房屋的南北向墙多数破坏严重, 还不足以判断此次宁洱地震极震区的震害还具有以南北向为主的方向性效应。这些震中地区的震害现象向我国目前的抗震设计方法和理论提出了新的挑战, 即竖向地震力的影响、地震动的扭转效应以及地裂缝对建筑结构的作用等一系列新的有待深入研究的课题。

参考文献

- 蔡之瑞, 1995. 1995 年 1 月 17 日日本阪神地震——直下型冲击. 世界地震工程, 2 (1): 1—4.
- 高文学, 1990. 中国地震年鉴 (1949-1981). 北京: 地震出版社.
- 李利群, 刘伟庆, 2001. 设置构造柱的混凝土小型空心砌块砌体抗震性能的研究. 工程抗震, 4 期: 16—20.
- 李小军, 2001. 对近年大震震害现象与工程地震问题研究的思考. 国际地震动态, 8 期: 26—31.
- 刘启方等, 2006. 近断层地震动的基本特征. 地震工程与工程振动, 26 (1): 1—10.
- 苗崇刚等, 2007. 云南宁洱 6.4 级地震应急行动及灾害特征. 国际地震动态, 6 期: 5—11.
- 钱培风, 1996. 日本阪神地震灾情严重的主要原因. 地震研究, 19 (3): 328—330.
- 石宏彬, 李连志, 2005. 小型混凝土空心砌块房屋抗震性能试验研究. 黑龙江工程学院学报(自然科学版), 19 (1): 11—13.
- 王景明, 王春梅, 刘科, 2001. 地裂缝及其灾害研究的新进展. 地球科学进展, 16 (3): 303—313.
- 徐铨彪, 金伟良等, 2005. 混凝土小型空心砌块墙体非线性有限元分析. 浙江大学学报 (工学版), 39 (6): 863—868.

中国赴日地震考察团, 1995. 日本阪神大地震考察. 北京: 地震出版社.

中华人民共和国国家标准, 2001. 建筑抗震设计规范 (GB-50011-2001). 北京: 中国建筑工业出版社.

周炳章, 1996. 日本阪神地震的震害及教训. 工程抗震, 3 (1): 39—42.

Wang G.Q., Zhou X.Y., Zhang P.Z. et al., 2002. Characteristics of amplitude and duration for near fault strong ground motion from the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 22: 73—96.

Damage Characters of Ning'er $M_{6.4}$ Earthquake Near Miaoshan Poort

Liu Aiwen, Song Yisheng, Li Fangjie and Xia Shan

(Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China)

Abstract In the recent earthquake disaster reduction goal of China, it is supposed that the major cities and the economical developed areas should be able to withstand the strike from a $M_S=6$ earthquake. As a rare example of earthquakes occurred near the city for many years in the mainland of China, the experience and lessons learnt from Ning'er earthquake are of important reference value. Based on the on-site investigation, we studied the macroscopic phenomena and the building damage near the epicenter, and summed up the damage characters, including vertical impact of the earthquake, rotation response of the ground motion, and effects of ground fissures on the structure.

Key words: Ning'er earthquake; Damage Epicenter; Earthquake damage