

叶肇恒, 宴金旭, 毛利, 等. 川滇交界东部地区房屋震害特征研究[J]. 华南地震, 2017, 37(1): 89-96. [YE Zhaoheng, YAN Jinxu, MAO Li, et al. Study on Earthquake Damage Characteristics of Buildings in the Eastern Boundary Between Sichuan and Yunnan Provinces [J]. South china journal of seismology, 2017, 37(1): 89-96.]

川滇交界东部地区房屋震害特征研究

叶肇恒, 宴金旭, 毛利, 鲁长江
(四川省地震局, 成都 610039)

摘要: 通过对川滇交界东部地区(四川境内)房屋调查分析, 结合该地区 1993 年以来破坏性地震中各类房屋结构震害情况, 分析了各类房屋结构在不同地震烈度下的震害特征, 给出震害矩阵, 为地震灾害房屋直接经济损失评估和烈度评定提供参考。

关键词: 震害特征; 震害矩阵; 直接经济损失

中图分类号: P315.9 文献标志码: A 文章编号: 1001-8662 (2017) 01-0089-08

DOI: 10.13512/j.hndz.2017.01.014

Study on Earthquake Damage Characteristics of Buildings in the Eastern Boundary Between Sichuan and Yunnan Provinces

YE Zhaoheng, YAN Jinxu, MAO Li, LU Changjiang
(*Earthquake Administration of Sichuan Province, Chengdu 610039, China*)

Abstract: Based on the investigation and analysis of the house in the eastern boundary between Sichuan and Yunnan provinces, combining with the damages to various types of buildings under destructive earthquakes since 1993, this paper analyzed the earthquake damage characteristics of different housing structure under different earthquake intensity, and gave the earthquake damage matrix, which provides reference for earthquake damage housing direct economic loss assessment and intensity assessment.

Keywords: Earthquake damage characteristics; Earthquake damage matrix; Direct economic loss

收稿日期: 2016-05-03

基金项目: 四川省地震局地震科技专项项目(LY1514)

作者简介: 叶肇恒(1985-), 男, 工程师, 主要从事地震现场应急工作。

E-mail: 27226650@qq.com.

0 序言

四川是中国大陆遭受地震灾害最为严重的省份之一，近年来四川发生多次破坏性地震。据统计，自1993年以来，四川境内共发生5级以上地震32次，其中37.5%发生在川滇交界东部地区。同时，该地区是四川省防震减灾工作重点布置区域。通过分析地区房屋震害特征，统计该地区房屋在历次地震中的破坏比、损失比，最终计算出房屋震害矩阵。深入认识川滇交界东部地区房屋震害特征，有助于了解地震灾害损失的变化趋势，有助于房屋灾害直接损失评估尺度的把握，有助于该地区防震减灾工作的开展。

1 地质构造特征

川滇交界东部地区主要活动构造包括：鲜水河断裂、安宁河断裂、则木河断裂、大凉山断裂和马边断裂带(图1)。

1.1 鲜水河断裂带

该断裂西起于甘孜西北，向南东经炉霍、道孚、乾宁、康定、泸定磨西，至石棉新民以南活动形迹逐渐减弱，最终消失于石棉公益海附近。综合研究结果表明：鲜水河断裂全新世以来的活动以惠远寺拉分盆地为界可分为两段：北西段长约200 km，由一条单一的主干断裂组成，平均水平滑动速率在10~15 mm/a之间；南东段结构比较复杂，乾宁-康定段由三条次级断层近于平行展布而成，单条断裂的滑动速率<10 mm/a，但三条断层滑动速率之和在10 mm/a左右，康定以南断层又呈一条单一的主干断层延伸，滑动速率值亦在9~10 mm/a左右。

1.2 安宁河断裂带

断裂北起于石棉田湾附近，在田湾-新民附近与鲜水河断裂呈十分复杂的空间羽列关系，形成了密集的地表破裂图象，向南经麂子坪、紫马垮、野鸡洞、大桥、冕宁、泸沽沙尔、新华、西昌西

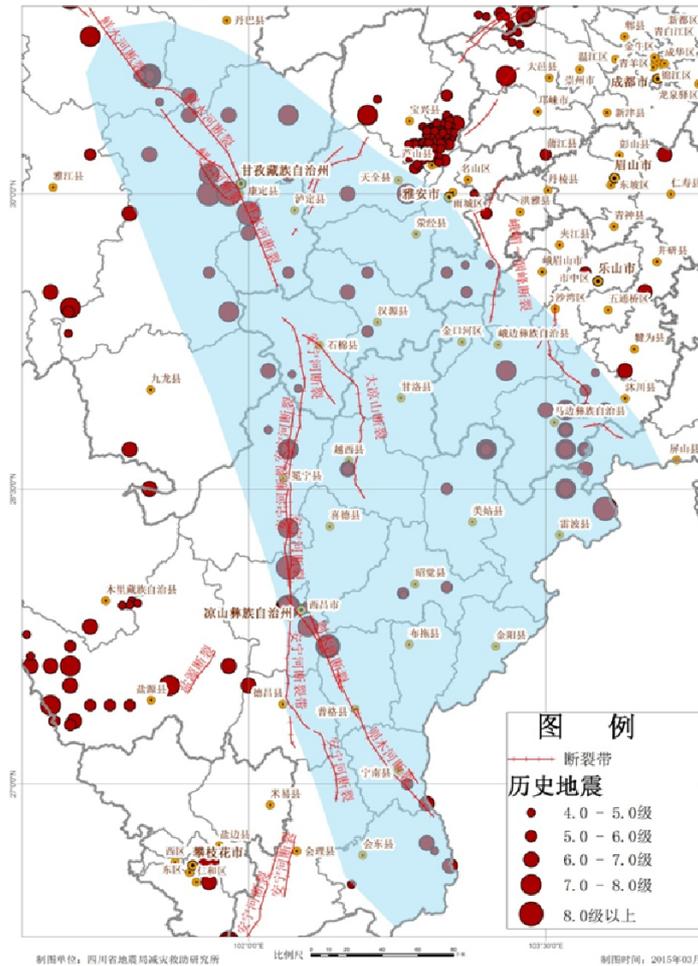


图1 川滇交界东部地区地质构造及历史地震分布

Fig.1 Geological structure and historical earthquake distribution in the eastern part of junction of Sichuan and Yunnan

宁、德昌至会理一带消失,断裂总体走向近南北,全长约 375 km。

1.3 则木河断裂带

该断裂北西起于西昌的西宁,向南东经西昌、普格、宁南,在巧家附近与小江断裂相连,全长约 140 km。则木河断裂由 5 条次级断层羽列组合而成,断裂为一条全新世左旋走滑活动断裂,断错地貌及近代地震地表破裂清晰,晚第四纪以来的平均水平滑动速率为 4.5~7.9 mm/a。

1.4 大凉山断裂带

大凉山断裂展布于安宁河、则木河断裂东侧的大凉山腹地。北起于石棉,与鲜水河断裂呈左阶羽列,向南经海棠、越西、普雄、昭觉竹核、拖都、布拖、吉夫拉打、交际河至巧家与小江断裂呈右阶羽列,全长约 280 km。

1.5 马边断裂带

该断裂带位于四川盆地西南缘,是凉山活动断块的东边界。北起于天全以南,向南经荃经、峨眉、马边至云南盐津,呈北北西向延伸,全长约 250 km,是由 9 条规模不等的断裂组成宽约 25~30 km 的断裂带。

据统计,鲜水河断裂南段共发生 6 级以上地震 12 次,其中 7 级以上地震 3 次;安宁河-则木河断裂带曾发生 6 级以上地震 8 次,其中 7 级以上地震 3 次;新生的大凉山断裂带虽无历史地震记载,但其滑动速率较大,是一条具备发生中强地震的断裂带;马边断裂带共发生 6.0 级以上强震 8 次,其中 7 级以上地震 2 次。

2 房屋震害特征

2.1 房屋建筑结构分类

川滇交界东部地区民族种类较多,经济发展不均衡,导致房屋建筑结构具有多样性的特点。

2.1.1 甘孜藏族自治州境内

以康定城区为例,主要建筑为框架剪力墙结构,其比例达到 80% 以上,设防烈度为 9 度,抗震性能好。丹巴、雅江、泸定等县及乡镇房屋以钢混及砖混为主,建筑质量较好,大多数房屋达到抗震设防要求。在该区域的广大农村房屋以藏式土木或石土木房屋为主,其所占比例达 90% 以上,该类房屋未经正规设计,建筑工艺粗糙,多为墙抬梁,且房顶较重,在历次破坏性地震中受

损较重。

2.1.2 乐山市、雅安市、眉山市、宜宾市所辖区域

乐山市、眉山市、雅安市、宜宾市四地城镇房屋以钢及钢筋混凝土结构和砖混为主,抗震性能好,绝大部分医院、学校均为 5.12 灾后重建,抗震性能好。农村房屋以砖混和砖木结构为主,砖混结构占 70% 以上,但很多自建房没有或没有完全达到设防标准,抗震性能一般。

2.1.3 凉山彝族自治州境内

凉山彝族自治州境内城镇房屋以钢及钢筋混凝土结构、砖混结构、砖木结构为主,2000 年以后新建房屋(约 40%) 基本按抗震设防要求建造,抗震性能好,老旧砖混房屋及砖木房屋抗震性能较差。在该区域的农村房屋以土木结构为主(达 70% 以上),该类房屋基本为墙抬梁房屋,墙体大部分为夯土,也有少部分土坯墙,抗震性能极差。该区域内农村自建砖混房屋大多采用空心砖,其抗震性能也很弱。

2.2 房屋震害分析

通过 1993 年至今历次破坏性地震中川滇交界东部地区各类房屋结构在不同烈度区内的破坏情况,分析该地区房屋震害特征。

(1) 砖木结构。包括砖木、木构架、石土木房屋等老旧房屋,川滇交界东部地区土木结构房屋多以藏式土木和墙抬梁房屋为主,分布范围广,且多处于山坡地段,抗震性能非常差。烈度为 VI 时,部分房屋出现索瓦、墙体出现轻微裂缝;烈度为 VII、VIII 度时,部分砖木结构出现墙体开裂、破损、歪闪现象;烈度为 VIII、IX 度时,部分砖木结构出现墙体严重破坏、木檩条塌落、屋盖毁坏,少数甚至出现整体倒塌现象(图 2、3)。

(2) 砖混结构。砖混结构分正规设计的和农民自建的非标准砖房,两种砖混结构的实际地震表现尤其在 VIII、IX 度高烈度区表现差异很大。VI、VII 度时,个别内墙多见抹灰层开裂或墙体开裂;VIII、IX 度时,正规设计的砖混结构震害表现良好,多为底层受剪开裂,女儿墙开裂或跌落,个别有纵横墙交接处竖向裂缝、或墙体裂缝;非标准砖房因其建设随意性强、墙体较薄、底层多空旷、因悬挑刚度有变等,墙体出现 X 型裂缝贯通,多数墙体开裂明显(图 4、5)。

(3) 钢混结构。钢混结构主要包括钢筋混凝土结构和框架剪力墙结构,该结构在甘孜藏族自治州、凉山彝族自治州境内(除县城)所占比例

相对较少，绝大部分分布在县城，抗震能力较好。烈度为Ⅶ、Ⅷ度时，框架结构主要表现为填充墙、女儿墙的震损破坏，如开裂、破损甚至整

体倒塌；烈度为Ⅸ度，芦山地震时，相当一部分汶川地震后新建的框架结构出现了较为严重的填充墙及附属构件的震损破坏。



图2 石木结构房屋外墙部分倒塌主体结构基本完好
Fig.2 Stone and wood structure building was basically intact while part of the wall was collapsed



图3 砖木结构房屋墙体开裂
Fig.3 The wall cracking of brick and wood structure building



图4 康定木雅祖庆学校砖混结构墙体垮塌
Fig.4 The brick-concrete structure wall of Kangding Muyazu school collapsed



图5 砖混结构房屋X型裂缝贯通
Fig.5 X type fracture coalescence of brick and concrete structure building

2.3 房屋破坏比与损失比

2.3.1 破坏比

房屋破坏比是指房屋破坏面积与调查总面积之比，按照房屋建筑不同类型、不同破坏等级分别求得。

依据《地震现场工作第四部分：灾害直接损失评估》(GB/T 18208.4-2011)，将土木结构、砖木结构等列为简易房屋，并分毁坏、破坏和基本完好3个破坏等级；将砖混结构、框架结构房屋列为非简易房屋，并分毁坏、严重破坏、中等破坏、轻微破坏和基本完好5个破坏等级。

《地震现场工作第四部分：灾害直接损失评估》(GB/T 18208.4-2005)实施前，砖木结构等简易房屋分毁坏、严重破坏、中等破坏、轻微破坏和基本完好5个破坏等级。因此，以2005年作为时间节点，对1993-2005年和2006年至今的破坏性地震进行统计，见表1、2。通过对1993—2005年房屋毁坏与严重破坏合并，轻微破坏与中等破坏合并，统计得出破坏比范围，如表3所示。

依据《地震现场工作第四部分：灾害直接损失评估》(GB/T 18208.4-2011)，砖混结构和钢混结构为非简易房屋，房屋破坏等级分毁坏、严重破

表 1 1993—2005 年国标实施以前砖木结构房屋破坏比 (%)

Table 1 The damage ratio of brick and concrete structure building before the implementation of national standard from 1993 to 2005 (%)

破坏等级	序号	地震事件			毁坏	严重破坏	中等破坏	轻微破坏	基本完好
		时间	地点	震级					
Ⅵ度	1	1993-10-14	马边	5.2			10	30	60
	2	1994-12-30	沐川	5.7	1	14	23	18.2	43.8
	3	1995-04-26	沐川	5.1			17	22	61
	4	1996-05-04	宜宾	5.4		2.5	14	41.5	42
	5	2001-02-14	雅江-康定	5.0		1	10	55	34
	6	2001-02-23	雅江-康定	6.0		9	22	30	39
Ⅶ度	1	1994-12-30	沐川	5.7	13	22.74	41.23	18.03	5
	2	1996-05-04	宜宾	5.4		18	42	24	16
	3	2001-02-23	雅江-康定	6.0	5	18	33	24	20
Ⅷ度	1	2001-02-23	雅江-康定	6.0	15	2	47	14	4

表 2 2006 年国际实施以来砖木结构房屋破坏比 (%)

Table 2 The damage ratio of brick-wood building after the implementation of national standard since 2006 (%)

破坏等级	序号	地震事件			毁坏	破坏	基本完好
		时间	地点	震级			
Ⅵ度	1	2008-05-12	汶川	8.0	3.68	20.86	75.46
	2	2008-08-30	仁和-会理	6.1		9.38	90.62
	3	2013-04-20	芦山	7.0	2.71	28.17	69.12
	4	2014-08-03	云南鲁甸	6.5	0.16	4.97	94.87
	5	2014-11-22	康定	6.3	18.45	39.86	41.69
	6	2015-01-14	金口河	5.0		20.58	79.42
Ⅶ度	1	2008-05-12	汶川	8.0	10.65	35.48	53.87
	2	2008-08-30	仁和-会理	6.1	10.70	49.63	39.67
	3	2013-04-20	芦山	7.0	16.92	57.96	25.12
	4	2014-11-22	康定	6.3	2.28	22.64	75.08
Ⅷ度	1	2008-08-30	仁和-会理	6.1	44.18	44.15	11.67
	2	2013-04-20	芦山	7.0	26.31	51.89	21.8
	3	2014-11-22	康定	6.3	26.2	48.85	25.13
Ⅸ度	1	2013-04-20	芦山	7.0	60.95	36.02	3.03

表 3 1993 至今各烈度区砖木结构房屋破坏比平均值 (%)

Table 3 The average of damage ratio of brick-wood building in every earthquake intensity since 1993 (%)

破坏等级	毁坏		破坏		基本完好	
	范围值	平均值	范围值	平均值	范围值	平均值
Ⅵ度	0.00~18.45	5.22	4.97~55.00	38.18	34.00~94.87	56.60
Ⅶ度	2.28~35.74	16.76	22.64~66.00	49.71	14.70~75.08	33.53
Ⅷ度	17.00~44.18	32.88	44.15~61.00	51.47	4.00~25.13	15.65
Ⅸ度	5~60.9	5~60.9	2~36.0	2~36.0	3.03	3.03

坏、中等破坏、轻微破坏和基本完好 5 个破坏等级。砖混结构和钢混结构破坏比分别见表 4、6，范围值和平均值分别见表 5、7。

2.3.3 损失比

房屋建筑损失比是指某类房屋建筑在不同破

坏等级下修复或重建时，单位面积所需费用与重建单价之比。《地震现场工作第四部分：灾害直接损失评估》(GB/T 18208.4-2011)给出了房屋损失比的取值范围，在川滇交界东部地区历次地震灾害评估中，取值都在规定范围内，多数地震取值

表4 1993至今各烈度区砖混结构房屋破坏比(%)

Table 4 The damage ratio of brick concrete building in every earthquake intensity since 1993(%)

破坏等级	序号	地震事件			毁坏	严重破坏	中等破坏	轻微破坏	基本完好
		时间	地点	震级					
Ⅵ度	1	1996-05-04	宜宾	5.4		2.00	16.80	43.40	37.80
	2	2008-05-12	汶川	8.0	0.91	1.94	4.32	10.28	82.55
	3	2008-08-30	仁和-会理	6.1			1.04	6.53	92.43
	4	2013-04-20	芦山	7.0		0.14	7.93	21.28	70.65
	5	2014-11-22	康定	6.3			2.18	27.05	70.77
	6	2015-01-14	金口河	5.0			1.14	22.33	78.53
Ⅶ度	1	1996-05-04	宜宾	5.4		11.20	38.80	34.60	15.40
	2	2008-05-12	汶川	8.0	2.95	5.37	10.58	26.40	54.70
	3	2008-08-30	仁和-会理	6.1		1.35	2.61	14.51	81.53
	4	2013-04-20	芦山	7.0	0.38	3.22	10.38	32.25	53.77
Ⅷ度	1	2008-08-30	仁和-会理	6.1	4.93	15.84	26.80	26.16	26.27
	2	2013-04-20	芦山	7.0	2.57	14.98	31.42	34.56	16.47
Ⅸ度	1	2013-04-20	芦山	7.0	17.09	39.67	25.86	10.26	7.12

表5 1993至今各烈度区砖混结构房屋破坏比平均值(%)

Table 5 The average of damage ratio of brick concrete building in every earthquake intensity since 1993(%)

破坏等级	毁坏		严重破坏		中等破坏		轻微破坏		基本完好	
	范围值	平均值	范围值	平均值	范围值	平均值	范围值	平均值	范围值	平均值
Ⅵ度	0.00~0.91	0.15	0.00~2.00	0.68	1.04~16.80	5.57	6.53~43.40	21.48	37.80~92.43	72.12
Ⅶ度	0.00~2.95	0.83	1.35~11.20	5.29	2.61~38.80	15.59	14.51~34.60	26.94	15.40~81.53	51.35
Ⅷ度	2.57~4.93	3.75	14.98~15.84	15.41	26.80~31.42	29.11	26.16~34.56	30.36	16.47~26.27	21.37
Ⅸ度	17.09	17.09	39.67	39.67	25.86	25.86	10.26	10.26	7.12	7.12

表6 1993年至今各烈度区钢混结构房屋破坏比(%)

Table 6 The damage ratio of reinforced concrete building in every earthquake intensity since 1993(%)

破坏等级	序号	地震事件			毁坏	严重破坏	中等破坏	轻微破坏	基本完好
		时间	地点	震级					
Ⅵ度	1	2008-05-12	汶川	8.0		0.30	2.13	5.27	92.30
	2	2013-04-20	芦山	7.0				5.12	94.88
	3	2014-11-22	康定	6.3				12.50	87.50
	4	2015-01-14	金口河	5.0				4.60	95.40
Ⅶ度	1	2008-05-12	汶川	8.0	0.30	1.75	5.99	9.64	82.32
	2	2013-04-20	芦山	7.0			8.42	23.71	67.87
	3	2014-11-22	康定	6.3			4.07	46.92	49.01
Ⅷ度	1	2013-04-20	芦山	7.0			10.18	41.46	48.36
	2	2014-11-22	康定	6.3			5.64	48.57	45.79
Ⅸ度	1	2013-04-20	芦山	7.0		5.96	31.98	33.82	28.24

为中值,个别震例取值偏低,考虑到今后的地震灾害经济损失评估与初评估工作可能会沿用下列取值,因此本文不再列出以往历次地震损失比取值表,直接按下列量表损失比取值。

3 房屋震害矩阵

提取表3、5、7中的破坏比平均值并分别定

义为矩阵 a_1 、 a_2 、 a_3 , 表8、9为矩阵 b_1 、 b_2 , 通过以下公式得出矩阵 c_1 、 c_2 、 c_3 , 从而川滇交界东部地区房屋震害矩阵。

$$c_1 = a_1 \times b_1 \quad (1)$$

$$c_2 = a_2 \times b_2 \quad (2)$$

$$c_3 = a_3 \times b_2 \quad (3)$$

通过式(1)、(2)、(3)计算得出不同烈度区房屋建筑的震害矩阵,见表10。

表 7 1993 年至今钢混结构房屋破坏比平均值 (%)

Table 7 The average of damage ratio of reinforced concrete building in every earthquake intensity since 1993 (%)

破坏等级	毁坏		严重破坏		中等破坏		轻微破坏		基本完好	
	范围值	平均值	范围值	平均值	范围值	平均值	范围值	平均值	范围值	平均值
Ⅵ度			0.00~0.30	0.08	0.00~2.13	0.53	4.60~12.50	6.87	87.50~95.40	92.52
Ⅶ度	0.00~0.3	0.10	0.00~1.75	0.58	4.07~8.42	6.16	9.64~46.92	26.76	49.01~82.32	66.40
Ⅷ度					5.64~10.18	7.90	41.46~48.57	45.02	45.79~48.36	47.08
Ⅸ度			5.96	5.96	31.98	31.98	33.82	33.82	28.24	28.24

注:在汶川地震中,Ⅵ、Ⅶ度区包括了川滇交界东部部分地区,Ⅷ、Ⅸ度区不包括该区域。因此在统计该地区钢混结构房屋破坏比时,出现了在Ⅵ、Ⅶ度区钢混结构房屋有统计值而Ⅷ、Ⅸ度区却没有统计值的情况。

表 8 简易房屋破坏损失比 (%)

Table 8 The loss ratio of simple building (%)

结构类型	毁坏	破坏	基本完好
砖木结构	95	40	2.5

表 9 非简易房屋破坏损失比 (%)

Table 9 The loss ratio of non simple building (%)

结构类型	毁坏	严重破坏	中等破坏	轻微破坏	基本完好
砖混结构	85	60	25	7.5	2.5
钢混结构	85	60	25	7.5	2.5

表 10 房屋震害矩阵 (%)

Table 10 The earthquake damage matrix of building (%)

房屋结构	破坏等级	震害指数			
		Ⅵ度	Ⅶ度	Ⅷ度	Ⅸ度
砖木结构	毁坏	4.96	15.92	31.24	57.90
	破坏	15.27	19.88	20.59	14.41
	基本完好	1.42	0.84	0.39	0.08
砖混结构	毁坏	0.13	0.71	3.19	14.53
	严重破坏	0.41	4.19	9.25	23.80
	中等破坏	1.39	4.10	7.28	6.47
	轻微破坏	1.61	1.82	2.28	0.77
	基本完好	1.80	1.29	0.53	0.18
钢混结构	毁坏	0.00	0.09	0.00	0.00
	严重破坏	0.05	0.35	0.00	3.58
	中等破坏	0.13	1.54	1.98	8.00
	轻微破坏	0.52	2.01	3.38	0.77
	基本完好	2.31	1.66	1.18	0.71

4 结语

川滇交界东部地区大多数地震发生在偏远山区,房屋建筑结构以石木结构、砖混结构为主,钢混结构房屋统计样本数偏少。自 1993 年以来,除了芦山 7.0 级地震以外,其余破坏性地震最大烈度均未超过Ⅷ度。因此,在研究各类结构房屋在Ⅸ度中震害表现时,主要以芦山 7.0 级地震烈度范

围内房屋进行研究。

在每一个烈度区对应于一组破坏比范围值,实际预测与初评估工作可视房屋减租实际抗震能力对破坏比取值做相应的调整。另外,历史震例中高烈度震例比低烈度震例少^[9-11],因此,选用高烈度破坏比时可适当放宽误差范围。同时,该地区多数地震灾区分布于乡村地方,砖木结构分布广且数量庞大,在进行烈度评定时应主要以土木

结构的震害为判别依据。

本文给出的川滇交界东部地区的房屋地震破坏比、损失比和震害矩阵的统计值可供地震现场调查、灾害损失评估参考,也可用作地震灾害损失快速预评估和震害预测的模型参数。

参考文献:

- [1] 国家质量技术监督局. CB/T17742-2008 中国地震烈度表[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [2] 国家质量技术监督局.GB/T 18208.4-201 地震现场工作第4部分: 灾害直接损失评估[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [3] 叶肇恒, 刘杨, 毛利, 等. 2014年8月3日云南鲁甸 M_s 6.5 级地震四川灾区震害特征分析[J]. 四川地震, 2015 (2): 16-19.
- [4] 周光全, 谭文红, 施伟华, 等. 云南地区房屋建筑的震害矩阵[J]. 中国地震, 2007, 23 (2): 115-123.
- [5] 周正华, 魏景芝, 王玉石, 等. 汶川 8.0 级地震房屋建筑震害特征[J]. 震灾防御技术, 2008, 3 (4): 384-390.
- [6] 王世元, 何玉林, 吴今生, 等. 四川芦山 7.0 级强烈地震高烈度区房屋震害特征[J]. 2013, 28 (4): 125-131.
- [7] 高永昭, 吴体, 肖承波, 等. 四川农村房屋震害特征及抗震能力分析[J]. 四川建筑科学研究, 2009, 35 (3): 136-140.
- [8] 周光全, 非明伦, 毛燕, 等. 云南地震灾害特征及经济损失评估技术研究[M]. 云南: 云南国浩印刷有限公司印刷, 2011.
- [9] 黄博, 夏唐代, 赵晴, 等. 老旧小区砖混结构房屋振动与减振[J]. 地震工程学报, 2015, 37 (1): 126-130.
- [10] 吴建超, 郑水明, 李恒, 等. 2014年3月30日湖北省秭归 $M4.7$ 地震房屋震害特征分析[J]. 地震工程学报, 2016, 38 (4): 669-672.
- [11] 姚新强, 孙柏涛, 陈宇坤. 基于震害预测的动态震害矩阵方法研究[J]. 地震工程学报, 2016, 38 (2): 318-322.