

云南省砖混结构房屋震害矩阵修正研究*

明小娜, 周 洋, 卢永坤, 杨健强

(云南省地震局, 云南 昆明 650224)

摘要: 根据云南省现有砖混结构房屋抗震设防情况将其分为未经抗震设防、有抗震构造措施和正规抗震设防3类。结合2000—2017年云南省内破坏性地震灾害损失评估资料, 统计不同砖混结构房屋类型的破坏比, 基于经验震害矩阵完善的方法推演震例稀缺烈度区的震害分布, 得到了云南省完整的砖混结构房屋建筑震害矩阵, 通过平均震害指数对比、震例对比验证了推演结果的可靠性。修正后的砖混结构房屋震害矩阵更能体现云南省现有砖混结构房屋的抗震能力, 可用于云南省地震灾害损失预评估等。

关键词: 砖混结构; 震害矩阵; 云南

中图分类号: P315.941

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2018)04-0605-08

0 引言

云南处于印度板块与欧亚板块中国大陆碰撞带东缘(皇甫岗等, 2007), 地形地貌多样, 地震活动频度高、震级大、分布广。根据1992—2003年云南地区历次破坏性地震积累的震害资料统计得出地震灾害损失初评估模型(周光全等, 2007)。在震后黑箱期, 云南省地震局通过该模型计算房屋直接经济损失, 为政府部门科学决策、有效组织抗震救灾工作提供保障。近年来, 随着云南地区经济增长、各项抗震安居工程推进、民众防震减灾意识增强以及房屋建造工艺发展, 自建民房砖混结构房屋比例呈上升趋势, 现有砖混结构房屋震害矩阵已经不能准确反映目前云南地区砖混结构房屋抗震能力。为此, 开展砖混结构房屋震害矩阵修正是当前云南省灾害损失评估的一项重要工作。

日本于1965年开始震害预测研究, 是世界上最早开展此项工作的国家, 美国震害预测研究始于20世纪70年代, 我国则是从1976年唐山大地震后开始的(张桂欣, 2010)。针对城市或区域内建筑群体的震害矩阵研究, 可归属于群体震害预测。砌体结构群体震害矩阵研究的常用方

法有解析易损性方法、经验易损性方法及混合易损性方法(程明超等, 2017)。解析易损性方法通过数学方法计算建筑物抗震设计性能从而得到建筑物的易损性曲线; 经验震害矩阵法通过统计分析实际地震资料得出不同烈度不同破坏概率的震害矩阵; 混合易损性矩阵是将2类方法相结合。孙柏涛和胡少卿(2005, 2010)提出了基于已有震害矩阵模拟的群体震害预测方法、基于建筑物易损性分类的群体震害预测方法、多因素影响的建筑物群体震害预测方法(张桂欣, 孙柏涛, 2010; 吕国军等, 2017)以及考虑设防水准的群体建筑物震害预测方法(孙柏涛等, 2013)等, 这些方法综合考虑了结构震害影响因素(层数、年代、用途、设防情况等)对建筑物抗震性能的影响, 通过建立样本数据库与预测区数据的数学模型推算预测区某种结构类型的震害矩阵, 提高了群体震害预测工作的效率, 但是, 这些方法需要统计预测区各影响因素对应的房屋建筑面积比例, 数据获取较为困难。

云南省自1992年开展地震灾害损失评估工作以来积累了大量数据资料, 笔者探索运用经验与数学模型相结合的方法对云南省砖混结构房屋震害矩阵进行修正。利用经验震害矩阵法统计实际地震资料得出不同烈度不同破坏概率的震害矩阵;

* 收稿日期: 2018-03-21.

基金项目: 云南地区房屋建筑震害矩阵研究(CEA-EDEM-201813)和云南省地震灾害区域特征研究(XH17032)联合资助.

将经验震害矩阵的数学模型用于推演震例稀缺烈度区的震害分布,最终得到云南省砖混结构房屋完整的震害矩阵。

1 研究区概况及砖混结构房屋分类

1.1 研究区概况

云南地处特提斯—喜马拉雅构造与环太平

洋构造域的交接部位,省内地质构造发育,红河断裂、小江断裂、马边—大关断裂等在历史上均发生过 7.0 级以上大震,是中国大陆遭受地震灾害最为严重的省份之一。据统计,1992—2017 年云南省及邻区共发生破坏性地震 78 次,其中:7.0~8.0 级地震 4 次,6.0~6.9 级地震 16 次,5.0~5.9 级地震 58 次,历史地震分布如图 1 所示。

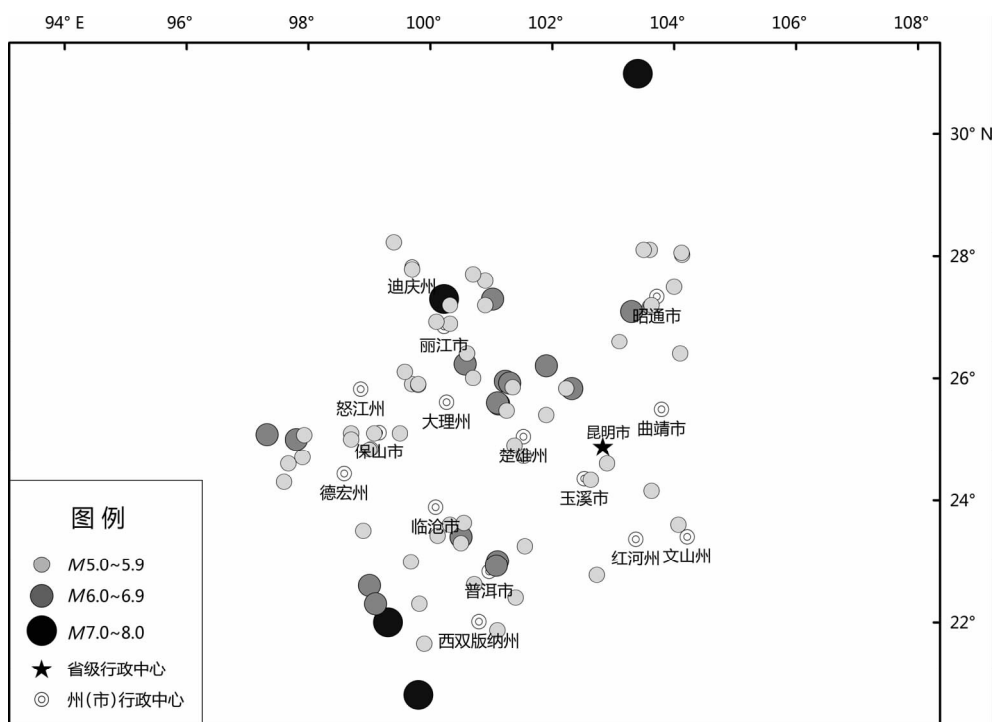


图 1 1992—2017 年云南省及邻区破坏性历史地震分布图

Fig. 1 Destructive historical earthquake distribution in Yunnan Province and its adjacent areas from 1992 to 2017

1.2 云南省砖混结构房屋分类

《中国地震烈度表》(GB/T17742—2008)将砌体房屋分为 B 类和 C 类,其中:B 类指未经抗震设防的单层或多层砖砌体房屋,C 类指按照Ⅶ度抗震设防的单层或多层砖砌体房屋。实际工作中常通过观察房屋建筑是否有抗震构造措施以及是否由正规施工单位按基本抗震设防烈度设计施工区分这 2 类房屋。

房屋抽样调查显示,云南省现有砖混结构除 B 类、C 类外,还有介于这 2 类结构之间、有抗震构造措施但未经正规设计和指导的由非正规施工单位建造的砖混结构,笔者将其称为有抗震构造措施的砖混结构房屋,用 B2 类表示。B2 类房屋设有钢筋混凝土圈梁、构造柱,圈梁尺寸多为 35~45

cm,构造柱尺寸多为 40~50 cm;现浇钢筋混凝土楼、屋盖;墙体采用砌块、水泥砂浆砌筑,承重墙多为 240 mm;层数一般为 3~5 层,层高 2.8~3.0 m。该类自建民房早期主要集中在城中村和城乡结合部,现在全省城乡均有分布,并且在农村砖混结构房屋中占比居于首位。其房屋整体抗震能力较好,但由于缺乏正规设计和指导,存在结构立面不规则、砂浆标号低、房屋开间大、窗洞数量及尺寸设计不合理等问题,削弱了房屋结构的整体抗震性能(图 2b)。

B 类结构房屋多为施工队根据当地场地和居住特点,就近取材建造的无构造措施、未经抗震设防的砖混结构房屋。此类房屋建造年代较早,主要分布在老城区、城乡结合部以及经

济不发达的地区。房屋墙体采用红砖或空心砖砌筑, 层数一般为1~3层, 层高2.6~2.9 m, 由于缺乏抗震构造措施, 其抗震能力十分薄弱(图2a)。

C类结构房屋是指以当地住建部门审核通过的

施工图纸为依据, 由正规施工单位建造的、符合当地抗震设防烈度的砖混结构房屋, 多为公共建筑, 如企事业单位、医院、学校或村镇办公楼、文化活动室, 部分为商品房住宅, 房屋抗震能力好, 层数一般为3~7层(图2c)。



图2 云南省现有砖混结构房屋建筑外观图

Fig. 2 The exterior diagram of the existing building of brick and concrete structures in Yunnan Province

2 研究方法

2.1 数理统计法

数理统计是以概率论为基础, 研究大量随机现象数量变化基本规律的一种方法。常用的数理统计有频数、概率、算术平均值、方差、最大值和最小值等。

在特定统计时间 N 年内, 将历史地震发生的次数记为 n , 相同地震烈度下同类房屋相同破坏等级的破坏比数据记为 $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$, 则 N 年内, 其历史破坏比数据算术平均值为:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (1)$$

选取 \bar{X} 作为某类房屋某一地震烈度区某破坏等级的破坏比统计结果。

2.2 经验震害矩阵推演方法

经验震害矩阵推演方法是根据某种结构类型已知烈度的破坏概率, 利用Beta概率密度分布函数对震害指数频率直方图进行拟合, 推演该结构类型未知烈度下的破坏比。该方法认为, 各破坏等级对应的震害指数是连续型随机变量 X , 某一烈

度下发生不同破坏状态的概率分布服从Beta概率分布。

其推演步骤如下: ①选取与该地区同类建筑物具有相似抗震能力、烈度VI~X的震害矩阵作为标准震害矩阵, 预推演的震害矩阵为待求震害矩阵; ②计算标准震害矩阵的均值 $E_{(x)}$ 和方差 $Var_{(x)}$; ③假设待求震害矩阵相邻烈度间震害指数的均值和方差的变化值与标准震害矩阵相对应的均值和方差的变化值相同, 计算出待求震害矩阵其它烈度下震害指数的 $E_{(x)}$ 和 $Var_{(x)}$; ④通过待求震害矩阵 $E_{(x)}$ 和 $Var_{(x)}$ 反演出Beta分布的形状参数 α 和 β ; ⑤根据形状参数 α 和 β 计算出对应于该烈度下震害指数的Beta概率密度分布函数; ⑥由Beta概率密度分布函数计算出各破坏等级的概率值。

标准震害矩阵均值 $E_{(x)}$ 和方差 $Var_{(x)}$ 计算公式为:

$$E_{(x)} = \sum_{k=1}^5 \sum_{j=1}^{N(k)} p_{(k)} X_{(jk)} \quad (2)$$

$$Var_{(x)} = \sum_{k=1}^5 \sum_{j=1}^{N(k)} p_{(k)} (X_{(jk)} - E_{(x)})^2 \quad (3)$$

式中: $p_{(k)}$ 为第 k 等级下的第 j 细小区间的震害指

数的发生概率; $X_{(j,k)}$ 为第 k 等级下第 j 小区域的震害指数的右值; $N_{(k)}$ 每个破坏等级区间的细分割数。

Beta 概率密度分布函数为:

$$f_{\xi}(x_{\alpha,\beta}) = \begin{cases} \frac{1}{B(\alpha,\beta)} x^{\alpha-1} (1-x)^{\beta-1} & x \in (0,1) \\ 0 & x \notin (0,1) \end{cases} \quad (4)$$

式中: α, β 为 Beta 分布的形状参数; $\alpha > 0, \beta > 0, B(\alpha, \beta) = \int_0^1 x^{\alpha-1} (1-x)^{\beta-1} dx$, 根据已知的均值和方差通过联立求解方程进行推算, 其公式为:

$$\alpha = \frac{E_{(x)}^2 - E_{(x)}^3}{Var_{(x)}} - E_{(x)} \quad (5)$$

$$\beta = (1 - E_{(x)}) \frac{E_{(x)} - E_{(x)}^2}{Var_{(x)}} - 1 \quad (6)$$

在此基础上, 由公式:

$$P(x_i \leq x \leq x_{i+1} | I) = \int_{x_i}^{x_{i+1}} f(x | I) dx \quad (7)$$

得出对应于该烈度下各破坏等级发生的破坏概率。

3 数据选取及处理

基于历史震害资料的数据推演方法, 数据的准确性与可靠性直接影响推演结果, 因此, 数据选取时, 要以现有的可用资料为基础, 遵循一定的原则, 按前述砖混结构房屋分类进行数据统计。

3.1 数据选取

数据选取要遵循时效性强、质量优的 2 个原则, 具体如下:

①数据时效性。影响砖混结构房屋抗震性能的因素包括设防标准、建造年代、承重墙厚、砂浆强度等级、用途、层数、平立面规则程度、房屋现状等(张桂欣, 孙柏涛, 2010)。针对某区域相同结构类型的房屋, 建造年代有一定的时间跨度, 随着时间推移, 地区经济水平的提高以及民众防震减灾意识的增强, 房屋建筑在设计、选料和施工工艺方面均会有差异, 抗震能力也存在差异。云南省砖混结构房屋多建于 2000 年以后, 经

过 2007 年农村民居地震安全工程、2009 年农村危房改造工程、2015 年抗震安居工程以及 2016 年精准扶贫工作的改造, 其房屋结构抗震构造措施逐步完善, 房屋抗震性能得到改善, 笔者选取 2000—2017 年的 42 个震例数据为样本数据, 如表 1 所示。

②数据质量。对于主-余震型、震群型地震, 由于发震时间间隔短、灾区重叠, 新生震害与已有震害难以区分, 其破坏比反映了叠加震害, 不宜作为单次地震的破坏比考虑, 在数据统计时舍弃后一组地震数据。例如: 2013 年 3 月 3 日洱源 5.5 级地震与 2013 年 4 月 17 日洱源 5.0 级地震, 舍弃后一组地震数据。在云南地震灾害调查工作中, 多以烈度区作为评估子区, 但仍有因最高烈度区面积过小而与次一级烈度区合并作为同一评估子区的情况, 该评估子区房屋结构破坏比反映的是 2 个烈度区房屋破坏的综合情况, 其值可能偏轻或偏重, 则应在数据统计时舍弃该评估子区对应的破坏比。例如 2014 年 8 月 3 日鲁甸 6.5 级地震最高烈度为 IX 度, 破坏比计算归并到 VIII 度, 数据统计时舍弃 VIII 度对应的破坏比。

3.2 数据分类统计

2000—2017 年云南省历次地震灾害损失评估资料中, 未细分砖混结构房屋破坏比。因此, 笔者通过数据相似性进行数据处理, 将其分离为 B 类、B2 类及 C 类对应的历史数据。

根据《地震现场工作第 3 部分: 调查规范》(GB/T 18208.3—2011) 和《地震现场工作第 4 部分: 灾害直接损失评估》(GB/T 18208.4—2011), 通过抽样调查确定各类结构在不同破坏等级下的破坏比, 抽样点的破坏比集中反映了该区域与抽样点同属相同结构类型的房屋建筑的震害情况。通过查阅、整理由地方政府汇集的历次地震经济、人口、房屋资料以及现场调查的房屋破坏资料, 结合不同学者(何俊宏等, 2016; 孙柏涛等, 2014; 郭宁, 2012; 朴永军, 2013)对川滇地区砖混结构房屋震害矩阵的研究, 经多次数据相似性试验分析, 发现用 VI 度区基本完好的破坏比进行数据分类较为合理。当 VI 度区基本完好的破坏比小于 80% 时, 经筛选后的地震事件多为 2010 年以前, 主要分布于滇东北、滇西和滇西南农村地区, 结合当时区域经济、人口情况, 此类抽样点破坏

表1 2000—2017年云南境内历史地震震例
Tab.1 Historical earthquakes in Yunnan from 2000 to 2017

序号	发震日期	$\varphi_N/(^{\circ})$	$\lambda_E/(^{\circ})$	震级	最高烈度	参考地点
1	2000-01-15	25.58	101.12	6.5	VIII	云南姚安
2	2000-01-27	24.15	103.63	5.5	VII	云南邱北—弥勒
3	2000-08-21	25.83	102.23	5.1	VI	云南武定
4	2000-10-06	24.30	97.60	5.8	VI	云南陇川西中、缅边界
5	2001-03-10	22.30	99.82	5.0	VI	云南澜沧
6	2001-05-24	27.60	100.90	5.8	VII	盐源—宁蒗
7	2001-06-08	24.83	99.00	5.3	VI	云南施甸
8	2001-07-10	24.90	101.38	5.3	VI	云南楚雄
9	2001-07-15	24.33	102.63	5.1	VI	云南江川
10	2001-09-04	23.63	100.55	5.0	VI	云南景谷
11	2001-10-27	26.23	100.57	6.0	VII	云南永胜
12	2003-07-21	25.95	101.23	6.2	VIII	云南大姚
13	2003-11-15	27.17	103.62	5.1	VII	云南鲁甸
14	2004-08-10	27.17	103.60	5.6	VIII	云南鲁甸
15	2004-10-19	25.10	99.08	5.0	VI	云南保山隆阳
16	2004-12-26	24.72	101.53	5.0	VI	云南双柏
17	2005-01-26	22.62	100.72	5.0	VI	云南思茅
18	2005-08-05	26.60	103.10	5.3	VI	云南会泽—会东
19	2005-08-13	23.60	104.07	5.3	VI	云南文山
20	2006-01-22	23.25	101.55	5.0	VI	云南墨江
21	2006-07-22	28.02	104.13	5.1	VI	云南盐津
22	2007-06-03	23.0	101.1	6.4	VIII	云南宁洱
23	2008-03-21	24.60	97.67	5.0	VI	云南盈江
24	2008-08-21	25.07	97.93	5.9	VIII	云南盈江
25	2009-07-09	25.60	101.10	6.0	VIII	云南姚安
26	2009-11-02	26.0	100.7	5.0	VI	云南宾川
27	2010-02-25	25.49	101.90	5.1	VI	云南禄丰—元谋
28	2011-03-10	24.70	97.90	5.8	VIII	云南盈江
29	2011-06-20	25.10	98.70	5.2	VI	云南腾冲
30	2012-06-24	27.70	100.70	5.7	VII	云南宁蒗
31	2012-09-07	27.50	104.00	5.7	VIII	云南彝良
32	2013-03-03	25.90	99.70	5.5	VII	云南洱源
33	2013-08-31	28.22	99.40	5.9	VIII	云南香格里拉、德钦
34	2014-04-05	28.10	103.60	5.3	VI	云南永善
35	2014-05-30	25.00	97.80	6.1	VIII	云南盈江
36	2014-08-03	27.10	103.30	6.5	IX	云南鲁甸
37	2014-08-17	28.10	103.50	5.0	VI	云南永善
38	2014-10-07	23.40	100.50	6.6	VIII	云南景谷
39	2015-03-01	23.50	98.90	5.5	VII	云南沧源
40	2015-10-30	25.10	99.50	5.1	VI	云南昌宁
41	2016-05-18	26.10	99.58	5.0	VI	云南云龙
42	2017-03-27	25.87	99.83	5.1	VI	云南漾濞

比数据较为接近于 B 类房屋抗震能力；当破坏比为 80%~85% 时，经筛选后的地震事件以 2011 年以前为主，多集中于滇南农村地区，结合当时区域经济、人口情况，此类破坏比数据较为接近于 B2 类房屋抗震能力；当破坏比大于 86% 时，经筛选后的地震事件以 2014 年以后为主，多集中于城市地区，少量滇南农村地区，结合当时区域经济、人口情况，此类破坏比数据较为接近于 C 类房屋抗震能力。

由式 (1)，并结合上述分类方法，得到 B 类、B2 类及 C 类历史地震数据统计如表 2~4 所示。B 类Ⅷ度、B2 类Ⅷ度和 C 类Ⅶ度、Ⅷ度样本数量太少，难以代表云南省砖混结构房屋建筑在该烈度下的抗震能力。因此，选取 B 类和 B2 类Ⅵ度、Ⅶ度，C 类Ⅵ度破坏比统计数据进行推演。

表 2 B 类房屋建筑破坏比统计 (%)
Tab. 2 Destruction ratio statistics of type B housing (%)

烈度	样本数量	毁坏	严重破坏	中等破坏	轻微破坏	基本完好
Ⅵ	23	0.03	0.56	2.23	23.32	73.86
Ⅶ	7	0.49	4.04	11.64	39.53	44.3
Ⅷ	4	3.72	15.68	23.42	37.82	19.36

表 3 B2 类房屋建筑破坏比统计 (%)
Tab. 3 Destruction ratio statistics of type B2 housing (%)

烈度	样本数量	毁坏	严重破坏	中等破坏	轻微破坏	基本完好
Ⅵ	15	0	0.2	0.75	15.86	83.19
Ⅶ	5	0	2.38	12.01	31.39	54.22
Ⅷ	2	1.36	10.63	42.56	31.64	13.81

表 4 C 类房屋建筑破坏比统计 (%)
Tab. 4 Destruction ratio statistics of type C housing (%)

烈度	样本数量	毁坏	严重破坏	中等破坏	轻微破坏	基本完好
Ⅵ	16	0	0.08	0.38	9.43	90.11
Ⅶ	3	0.52	0.81	4.95	27.78	65.94
Ⅷ	4	4.73	11.12	20.86	39.99	23.3

表 6 不同烈度对应的破坏比期望值、方差及其形状参数
Tab. 6 Destruction ratios, variances, and shape parameters corresponding to each intensity

烈度	标准震害矩阵		待求震害矩阵				
	期望	方差	期望	方差	α	β	4 阶高斯积分
Ⅵ	0.092	0.006	0.102	0.01	0.832	7.327	0.204
Ⅶ	0.185	0.032	0.188	0.031	0.738	3.187	0.513
Ⅷ	0.41	0.065	0.413	0.064	1.151	1.637	0.508
Ⅸ	0.613	0.059	0.616	0.058	1.896	1.182	0.414
X	0.795	0.029	0.798	0.028	3.796	0.961	0.284

4 砖混结构房屋震害矩阵推演

4.1 震害矩阵推演

在历史统计数据的基础上，基于经验震害矩阵完善的方法，考虑云南省砖混结构房屋建筑特点与四川省较为相似，以孙柏涛等 (2014) 提出的未设防砖混结构房屋震害矩阵作为 B 类、一般设防作为 B2 类、高设防作为 C 类砖混结构房屋的标准震害矩阵推演云南省完整的砖混结构房屋震害矩阵。以 B 类砖混结构房屋为例，给出云南 B 类房屋待求震害矩阵的推演过程及结果。

①标准震害矩阵震害分布如表 5 所示。

②结合标准震害矩阵及 B 类房屋破坏比统计数据，根据式 (2)、式 (3)，推演出待求震害矩阵Ⅷ度、Ⅸ度、X 度震害指数的均值和方差 (表 6)。

③根据式 (5)、式 (6) 计算出待求震害矩阵Ⅷ度、Ⅸ度、X 度 Beta 概率密度分布函数的形状参数 α 、 β 值 (表 6)。

④根据式 (4)、式 (7) 可推演出待求震害矩阵Ⅷ度、Ⅸ度、X 度不同破坏等级发生的破坏概率 (表 7)。

同理，可计算出 B2 类以及 C 类的砖混结构房屋震害矩阵，如表 8、表 9 所示。

表 5 标准震害矩阵震害分布 (%)
Tab. 5 Standard earthquake damage matrix
earthquake damage distribution (%)

烈度	毁坏	严重破坏	中等破坏	轻微破坏	基本完好
Ⅵ	0	0	1	22	77
Ⅶ	0	4	16	29	51
Ⅷ	6	20	36	25	13
Ⅸ	15	52	20	9	4
X	51	40	9	0	0

表 7 B 类房屋建筑震害矩阵（%）

Tab. 7 Building B earthquake damage matrix（%）					
烈度	毁坏	严重破坏	中等破坏	轻微破坏	基本完好
Ⅵ	0.03	0.56	2.23	23.32	73.86
Ⅶ	0.49	4.04	11.64	39.53	44.30
Ⅷ	5.35	25.78	30.41	26.71	11.75
Ⅸ	20.26	41.88	25.32	10.93	1.61
X	47.79	42.46	8.80	0.95	0

表 8 B2 类房屋建筑震害矩阵（%）

Tab. 8 Building B2 earthquake damage matrix（%）					
烈度	毁坏	严重破坏	中等破坏	轻微破坏	基本完好
Ⅵ	0	0.20	0.75	15.86	83.19
Ⅶ	0	2.38	12.01	31.39	54.22
Ⅷ	1.54	14.73	26.61	33.32	23.8
Ⅸ	18.07	33.77	25.15	16.97	6.04
X	37.44	41.83	16.03	4.37	0.33

表 9 C 类房屋建筑震害矩阵（%）

Tab. 9 Building C earthquake damage matrix（%）					
烈度	毁坏	严重破坏	中等破坏	轻微破坏	基本完好
Ⅵ	0	0.08	0.38	9.43	90.11
Ⅶ	0	1.20	9.66	32.56	56.58
Ⅷ	0.52	9.57	24.13	36.48	29.30
Ⅸ	8.05	28.36	29.04	24.03	10.52
X	29.89	44.98	19.29	5.43	0.41

4.2 推演结果分析

4.2.1 与平均震害指数范围值对比分析

表 10 《中国地震烈度表》规定的和本文推演的平均震害指数对比

Tab. 10 Average earthquake damage index comparison between China Earthquake Intensity Scale and the deduced result in this study

房屋结构类型	烈 度				
	Ⅵ	Ⅶ	Ⅷ	Ⅸ	X
B 类范围值	0~0.11	0.09~0.31	0.29~0.51	0.49~0.71	0.69~0.91
C 类范围值	0~0.08	0.07~0.22	0.20~0.40	0.38~0.60	0.58~0.8
B 类	0.06	0.16	0.41	0.62	0.81
B2 类	0.04	0.13	0.29	0.55	0.74
C 类	0.02	0.11	0.24	0.44	0.7

表 11 鲁甸 $M_s6.5$ 地震砖混结构房屋破坏比与推演值比较（%）

Tab. 11 Comparison of damage ratio of brick-concrete structure in rural areas of Ludian $M_s6.5$ earthquake and deductive value（%）

类型	毁坏	严重破坏	中等破坏	轻微破坏	基本完好
实际值	15.48	22.09	28.47	23.33	10.63
推演值	5.35~20.26	25.78~41.88	25.32~30.41	10.93~26.71	1.61~11.75

平均震害指数用于反应区域内某种结构类型房屋的平均震害程度，《中国地震烈度表》（GB/T 17742—2008）规定了地震烈度、结构类型与平均震害指数的对应关系。因此，可以通过对比 B 类、B2 类及 C 类房屋平均震害指数与烈度表中规定的平均震害指数，验证其结果的可靠性。计算时，房屋破坏等级基本完好、轻微破坏、中等破坏、严重破坏对应的震害指数取值为 0，0.2，0.4，0.7，1。

由表 10 可见，本文推演的 B 类、B2 类房屋的平均震害指数在烈度表规定的标准范围值内，表明推演结果可靠；随烈度增加 B 类、B2 类及 C 类房屋的平均震害指数递减（例如烈度为Ⅸ度时，震害指数分别为 0.62，0.55，0.44），表明房屋建筑设计越合理、抗震构造措施越完善，房屋抗震能力越好。

4.2.2 与鲁甸 $M_s6.5$ 地震农村房屋震害情况对比分析

鲁甸 $M_s6.5$ 地震灾区自建砖混房屋结构特征接近于 B 类（和嘉吉等，2015）。由于 B 类房屋Ⅵ度、Ⅶ度破坏比为统计数据，因此，主要用Ⅷ度、Ⅸ度推演数据进行对比。鲁甸农村地区砖混结构房屋破坏比与推演值对比见表 11。由于鲁甸 $M_s6.5$ 地震Ⅸ度面积小，与Ⅷ度合为同一个评估区。与 B 类推演震害分布范围比较，其实际值均在对应破坏等级的范围值内，并且除毁坏达到Ⅸ度外，其余值更接近于Ⅷ度震害分布。

5 结论

本文根据《中国地震烈度表》(GB/T17742—2008)砌体房屋分类标准结合云南省现有砖混结构房屋结构特点,将云南省现有砖混结构分为未设防砖混(B类)、有抗震构造措施砖混(B2类)和正规抗震设防(C类)3类;运用2000—2017年云南省内破坏性地震灾害损失评估资料,统计了3类砖混结构各烈度区不同破坏等级的破坏比均值,基于经验震害矩阵的数学模型对云南省砖混结构房屋震害矩阵进行了补全和修正,并验证了推演结果的可靠性。研究发现统计数据与实际震例的破坏比之间存在差异:一是历史数据选用平均值统计,平均值与单个数值之间存在不一致;二是基于经验震害矩阵的推演主要反应房屋建筑本身的抗震能力,而实际地震房屋建筑破坏是诸多因素(地质背景、场地效应等)共同作用的结果,因此其震害分布存在差异。

参考文献:

- 程明超,夏彦龙,张秋石. 2017. 砌体结构易损性研究现状[J]. 建筑应用, (3): 74—79.
- 郭宁. 2012. 南北地震带具有区域特殊性的滇西房屋建筑抗震性能分析[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所.
- 何俊宏,潘文,张健,等. 2016. 基于1993年以来震灾统计的云南省农村地区房屋易损性研究[J]. 建筑结构, (S1): 379—383.
- 和嘉吉,卢永坤,代博洋,等. 2015. 鲁甸 $M_s6.5$ 与景谷 $M_s6.6$ 地震灾区房屋抗震能力差异分析[J]. 地震研究, 38(1): 137—141.
- 胡少卿,孙柏涛,王东明,等. 2007. 经验震害矩阵的完善方法研究[J]. 地震工程与工程振动, 27(6): 46—50.
- 胡少卿,孙柏涛. 2010. 基于建筑物易损性分类的群体震害预测方法研究[J]. 地震工程与工程振动, 30(3): 96—101.
- 皇甫岗,秦嘉政,李忠华,等. 2007. 云南地震类型分区特征研究[J]. 地震学报, 29(2): 142—150.
- 吕国军,张合,孙丽娜. 2017. 廊坊市重要建筑物易损性分析[J]. 地震研究, 40(4): 638—645.
- 朴永军. 2013. 云南省青海省房屋地震易损性研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所.
- 孙柏涛,陈洪富,闫培雷,等. 2014. 南北地震带房屋建筑抗震能力分区特征研究[J]. 土木工程学报, 47(S1): 6—10.
- 孙柏涛,胡少卿. 2005. 基于已有震害矩阵模拟的群体震害预测方法[J]. 地震工程与工程振动, 25(6): 102—108.
- 孙柏涛,张桂欣,邓宏宇,等. 2013. 考虑设防水准的群体建筑物震害预测方法[J]. 土木工程学报, 46(5): 117—121.
- 张桂欣,孙柏涛. 2010. 多因素影响的建筑物群体震害预测方法研究[J]. 世界地震工程, 26(1): 26—30.
- 张桂欣. 2010. 两种多参数影响的建筑物群体震害预测方法研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所.
- 周光全,谭文红,施伟华,等. 2007. 云南地区房屋建筑的震害矩阵[J]. 中国地震, 23(2): 115—123.
- GB/T 17742—2008, 中国地震烈度表[S].
- GB/T 18208.3—2011, 地震现场工作第3部分: 调查规范[S].
- GB/T 18208.4—2011, 地震现场工作第4部分: 灾害直接损失评估[S].

Research on Earthquake Damage Matrix Correction of Brick – concrete Buildings in the Yunnan Province

MING Xiaona, ZHOU Yang, LU Yongkun, YANG Jianqiang
(Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650224, Yunnan, China)

Abstract

Firstly, according to the seismic fortification situation of existing brick – concrete buildings in the Yunnan Province, we divided it into three types, such as without seismic fortification, seismic structure measures and regular seismic fortification. Secondly, combining with the destructive earthquake disaster losses data from 2000 to 2017, we statistic the damage ratio of different types of brick – concrete structures. Thirdly, we deduced the distribution of seismic damage in the intensity area with rare earthquakes by the method of perfecting the empirical seismic damage matrix, and obtained earthquake damage matrix of a complete brick and concrete building in Yunnan. Finally, the reliability of the derivation results was verified by the comparison of the average earthquake damage index and the earthquake case. The revised earthquake damage matrix of brick – concrete buildings is closer to the earthquake – resistant capacity of existing brick-concrete structures in Yunnan and can be used for pre-evaluation of earthquake disaster losses.

Keywords: brick – concrete structure; earthquake damage matrix; Yunnan