

基于震害资料的西藏地区典型民居易损性分析¹

王 郁 刘爱文 李祥秀 王晓辉

(中国地震局地球物理研究所, 北京 100081)

摘要 我国的地震大多发生在农村地区, 当地民居的抗震能力是评估地震灾害风险、确定地震保险方案的主要因素。本文基于近 2000 年以来西藏地区发生破坏性地震灾害的调查结果, 总结了西藏地区土木结构和石木结构等民居的主要震害特点。在实际震例中, 西藏民居的震害主要以 VI 度和 VII 度的数据为主, 缺少 VIII、IX、X 度的震害数据。本文采用经验震害矩阵推演方法, 得出石木结构和土木结构震害矩阵和震害指数, 并与未设防砖混结构标准震害矩阵和设防砖混结构震害矩阵震害指数进行对比, 最终得到西藏地区主要民居震害指数与峰值加速度关系曲线。与未设防砖混结构相比, 西藏地区石木结构和土木结构抗震能力较弱, 其中土木结构抗震能力最弱。

关键词: 西藏民居 石木结构 土木结构 震害矩阵 震害指数

Vulnerability Analysis of Typical Dwellings in Tibet Based on Earthquake Damage Data

Wang Yu, Liu Aiwen, Li Xiangxiu and Wang Xiaohui

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

Abstract Most earthquakes in China occur in vast rural areas, and the seismic capacity of local dwellings is a major factor in assessing the risk of seismic hazards and determining earthquake insurance schemes. This paper summarizes the main characteristics of seismic damage of residential dwellings in Tibetan areas, such as civil and stone structures, based on the results of destructive seismic hazard surveys that have occurred in Tibetan areas since the last 2000 years. In the actual earthquake cases, the seismic damage of Tibetan dwellings is mainly based on the data of VI and VII degrees, and the data of VIII, IX and X degrees are missing. In this paper, we used the empirical damage matrix derivation method to derive the damage matrices and damage indices for stone and wood structures and civil structures, and compared them with the standard damage matrices for unprotected brick and mortar structures and the damage indices for protected brick and mortar structures, and finally obtained the relationship curves between the damage indices and peak accelerations for the major residential houses in Tibet. Compared with the unprotected brick-and-mortar structures, the seismic resistance of stone and wood structures in Tibetan area is weaker, and among them, the seismic resistance of wood structures is the weakest.

Key words: Tibetan dwelling; Stone and wooden structure; Civil and wooden structure; Seismic Performance; Earthquake damage index

¹ 基金项目 国家重点研发计划 (2018YFC1504602, 2019YFE0112500); 中国地震局地球物理研究所基本科研业务费专项 (DQJB19B43, DQJB20X08)

[收稿日期] 2021-04-08

[作者简介] 王郁, 女, 生于 1997 年。硕士研究生。主要从事结构工程抗震方面的研究。E-mail: wangyu970916@163.com

[通信作者] 李祥秀, 女, 生于 1987 年。副研究员。主要从事结构减震与隔震方面的研究。E-mail: lixiangxiu1005@163.com

引言

我国地震灾害频繁而强烈,大多数地震发生在广大农村或牧区,因此当地民居的地震易损性是评估地震灾害损失的重要因素,也是进行地震风险分析评估、确定地震保险方案的重要环节。地震易损性是指在不同强度的地震作用下,房屋结构达到或超过某一失效或者破坏状态的条件概率。不同结构类型的民居建筑,其地震灾害易损性也有所不同。同一结构类型的民居建筑地震易损性与其所在地理位置、建筑材料、建筑方式、老旧程度等因素有关;另外还与当地居民生活习俗、经济能力以及对地震安全的重视程度和防范意识有关(邱舒睿等,2015)。目前地震易损性分析方法主要有历史震害统计法、半经验半理论法、模糊类比法和理论分析法,理论分析法包括非线性时程分析法和静力非线性分析法(涂伟荣等,2011)。不同方法存在不同优缺点,需要针对不同地区、不同建筑物进行具体分析。国内已经有许多学者对一些地区民居地震易损性进行了分析研究,如李书进等(2010)在实地调查数据的基础上采用了半经验半理论法对民居进行震害预测,为湖北省农村地区地震灾害预测提供了科学依据;赵世伟等(2010)采用概率分析法推算民居震害指数,并在湖南地区进行了实际调研验证;周光全(2011)以云南简易房屋为例进行地震易损性评估,得到云南地区各结构震害指数,并通过实例验证了将5个破坏等级归并为3个破坏等级得到的震害指数更符合实际;孙柏涛等(2014)通过对比四川省不同地区已有震害矩阵数据,对南北地震带房屋进行分区研究,分析了不同地区各类房屋抗震性能;张戈(2015)和邱舒睿等(2015)分别对东北地区和青海省农居地震易损性进行了分析,并分析了住房震灾易损性的原因;本文采用胡少卿等(2007)的经验震害矩阵完善方法对西藏地区的民居震害矩阵进行了推演,并总结了当地民居各类结构震灾破坏率;杨娜等(2018)基于现场调研结果确定了青海地区特有庄廓院民居震害矩阵和震害指数,并与其他结构进行了对比;叶肇恒等(2019)基于四川省实际地震震害资料,对当地土木结构和石木结构房屋结构易损性进行分析,基于峰值速度(PGV)分别拟合出了四川当地藏式民居土木结构和石木结构地震易损性曲线。

本文主要研究西藏地区民居抗震能力。西藏地区海拔较高、气候寒冷,同时处于地震危险区,但藏族民居多数为自建房屋,结构类型以土木结构和石木结构为主,未经过正规设计,也未考虑抗震问题。建筑材料大多因地制宜,其强度和施工质量不能保证,因此西藏地区房屋抗震能力十分有限。而西藏又是我国地震多发区,地震活动,具有强度大、分布广等特点。本文在总结历次地震震害资料的基础上,对比分析了当地典型民居石木和土木结构抗震性能,以期当地地震风险评估和地震保险费率的确定等提供参考。

1 西藏地区 2000—2019 年破坏性地震统计

本文统计分析了2000—2019年西藏地区及周边发生的影响较大的破坏性地震²,如表1所示。由于西藏人口密度较低,所以地震多发生在无人区,如果发生在居住地区,将造成很大的损失。如2008年西藏当雄6.6级地震造成10人死亡,60人受伤(其中重伤14人),由于房屋毁坏造成失去住所的约2万人,直接经济损失4.11亿元(巴桑次仁等,2009);2017年西藏林芝市米林县6.9级地震震中虽为无人区,但也造成近3000户房屋受到不同程度的损坏。

2 西藏民居震害特点

从表1 14次地震的调查发现,遭受破坏的房屋结构类型以土木结构、石木结构为主。通过西藏地区现场人员调研发现,当地传统民居多为石木结构和土木结构。

藏式石木结构墙体多由不规则的石头搭建而成,如图1所示。以体积较大的石块为准,细小石块嵌塞在大石之间,用泥土填充缝隙,很少使用砂浆抹缝。墙体为内外两层,中间有空隙,内外层无咬砌,纵横墙之间也不进行咬砌。石木结构多由当地居民自建,未考虑抗震措施,因此存在石块与石块之间的咬合力不够、场地选址不当以及结构设计不合理等情况,从而在地震生墙体发生分层剥落甚至倒塌、木柱折断、屋盖过重导致坍塌等一系列震害,如图2所示(李秋容等,2018),其中墙的分层剥落是最普遍的破坏形式。

目前西藏地区土木结构民居一般年代已久,多数无人居住,由当地黄土和木头建造,无抗震构造措施,房屋总体抗震性能差,如图3所示。与石木结构类似,西藏地区土木结构为柱网结构形式,以木梁、木柱以及木檩条为室内结构体系,起到将上部荷载均匀传递给墙体的作用。土木结构的破坏形式主要包括门窗洞口、

2 西藏自治区地震局,2019.2000~2019年西藏自治区破坏性地震灾害损失评估汇编。

表 1 2000~2019 年西藏及周边震害损失

Table 1 List of the destructive earthquakes in and around Tibet from 2000—2019

序号	日期	经纬度	震源深度/ km	震级/ <i>M</i>	经济损失/ 万元	震害情况	地区
1	2003-08-18	95.6°E, 29.6°N	8	5.7	4341.84	震区属经济欠发达地区, 造成2人死亡	西藏波密与墨脱
2	2004-03-07	91.6°E, 31.4°N	15	5.6	1462.00	震中位于班戈县与那曲县交界, 造成5人受伤	西藏班戈、那曲与安多交界
3	2004-07-12	83.4°E, 30.5°N	10	6.7	1622.17	震中位于高山无人区, 震区属纯牧业地区, 无人员伤亡	西藏仲巴县
4	2004-08-24	92.2°E, 32.6°N	—	5.8	83.38	震区属纯牧业地区, 无人员伤亡	西藏安多县东北
5	2005-04-08	83.7°E, 30.5°N	10	6.5	1034.20	震中位于吉拉乡一带, 震区属纯牧业地区, 无人员伤亡	西藏仲巴县
6	2005-06-02	94.8°E, 29.1°N	—	5.9	4187.40	震区属经济欠发达地区, 无人员伤亡	西藏墨脱县
7	2008-01-09	85.2°E, 32.5°N	33	6.9	500.00	震中区属牧区, 无人员伤亡	西藏改则县
8	2008-10-06	90.3°E, 29.8°N	8	6.6	41137.00	震中位于当雄县格达乡羊易村一带, 造成10人死亡	西藏当雄县
9	2009-11-08	86.1°E, 29.4°N	33	5.6	1547.00	震区属于牧区, 无人员伤亡	西藏日喀则地区昂仁县北
10	2010-03-24	93.0°E, 32.4°N	33	5.7	4058.22	震中位于乡镇附近, 无人员伤亡	西藏那曲
11	2013-08-12	98.0°E, 30.1°N	10	6.1	208242.00	震中为无人区, 造成87人轻伤	西藏左贡县、芒康县交界
12	2015-04-25	84.7°E, 28.2°N	20	8.1	1030200.00	受尼泊尔地震影响, 西藏境内最高烈度为IX度, 日喀则市受灾严重, 震区位于乡镇, 造成27人死亡	—
13	2017-11-18	95.0°E, 29.8°N	10	6.9	19975.55	震中位于无人区, 无人员伤亡	西藏林芝市米林县
14	2019-04-24	94.6°E, 28.4°N	10	6.3	—	震中位于无人区, 无人员伤亡	西藏墨脱县



图 1 典型石木结构

Fig. 1 Typical stone and wood structure



图 2 石木结构破坏

Fig. 2 Destruction of stone and wood structures

梁端开裂和墙体剥落甚至倒塌以及木柱折断、屋盖失稳等情况, 其中最常见为墙体部分坍塌, 如图 4 所示。

3 西藏民居易损性分析

对西藏地区石木结构进行易损性评估时, 由于实际震例数据不足, 我们无法使用历史震害统计得到完整的震害矩阵。因此, 采用半经验半理论法, 利用历史地震资料, 并参考胡少卿等 (2007) 的方法得到相应的震害矩阵, 在此基础上对西藏石木和土木结构易损性进行评估。

3.1 石木结构和土木结构的震害矩阵

根据《地震现场工作第四部分: 灾害直接损失评估》(GB/T 18208.4—2005) (中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局等, 2012) (以下简称“灾评国标”) 中提出的简易房屋概念, 本文将西藏地区石木结构和土木结构房屋视为简易房屋, 将毁坏、严重破坏合并为毁坏, 将中等破坏和轻微破坏合并为破坏, 保留基本完好, 划分为 3 个破坏等级, 如表 2 所示。



图3 典型土木房屋

Fig. 3 Typical civil houses



图4 土木结构毁坏

Fig. 4 Destruction of civil and wooden structures

表2 石木结构和土木结构房屋破坏等级分类

Table 2 Destruction grade classification of stone-timber structure and civil structure

震害等级	震害描述	震害指数
基本完好	石木结构房屋个别墙体轻微裂缝, 不加修理可继续使用; 土木结构房屋个别墙体细裂	0.00 ~ 0.10
破坏	承重构件出现位移或倾斜; 石木结构和土木结构房屋墙体明显开裂或严重开裂、甚至局部倒墙。可修理, 修理后可继续使用	0.10 ~ 0.55
毁坏	石木结构和土木结构房屋两面以上墙体倒塌, 屋盖掉落或完全倒塌; 承重构件多数断裂或破坏严重, 结构濒于崩溃。修理困难或无法修复	0.55 ~ 1.00

在近年来的实际地震震害统计中, 石木结构房屋只有VI度和VII度震害数据, 缺少其他高烈度的震害数据。因此, 采用经验震害矩阵推演法, 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, 推演该结构在其他烈度 (VIII 度~X 度) 下的破坏比。该方法需要选取与具有相似抗震能力的同类结构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。

参考历年震害统计数据, 以藏北地区当雄县石木结构房屋破坏为例³, 如表3所示。标准震害矩阵根据尹之潜 (1996) 的结构易损性分类, 石木结构属于 D 类结构 (未经过正规设计的农村房屋), D 类结构震害矩阵无法通过分析方法给出, 主要根据震害经验确定, 不考虑时间及地区的影响, 全国采用统一的震害矩阵 (尹之潜, 1996), 如表4所示。

表3 西藏地震石木结构破坏比 (%)

Table 3 Damage ratio of stone-timber structure (Unit: %)

破坏等级	地震烈度				
	VI	VII	VIII	IX	X
基本完好	75.47	9.68	—	—	—
破坏	24.40	66.36	—	—	—
毁坏	0.13	23.96	—	—	—

将与各破坏等级对应的震害指数作为连续型随机变量 x , 则可求得对应烈度下各破坏等级下的概率, 再将不同烈度下各破坏等级的概率转化为服从概率分布的函数, 通过式 (1) 分别得出石木结构和标准结构震害矩阵在各烈度下的均值和方差, 推演得出西藏地区石木结构VIII、IX、X 度时的均值和方差。

$$E(x) = \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^{N(k)} p(k) X(j, k), \sigma^2(x) = \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^{N(k)} p(k) (X(j, k) - E(x))^2 \quad (1)$$

表 4 D 类结构震害矩阵 (单位: %)

Table 4 Earthquake damage matrix of type D structure (Unit: %)

破坏等级	地震烈度				
	VI	VII	VIII	IX	X
基本完好	32.0	16.5	7.0	2.5	0
轻微破坏	26.5	18.5	12.0	8.5	1.5
中等破坏	22.5	20.0	16.5	14.0	7.5
严重破坏	16.5	26.0	27.0	25.0	17.5
毁坏	2.5	19.0	37.5	50.0	73.5

式中: $p(k)$ 为第 k 等级下第 j 细小区间的震害指数的发生概率; n 为破坏等级数; $X(j,k)$ 为第 k 等级下第 j 小区域的震害指数的右值; $N(k)$ 为每个破坏等级区间的细分割数, 细小区间为 0.01。

表 5 和表 6 分别列出了标准结构震害矩阵在各烈度下的均值和方差以及石木结构在 VI 度、VII 度下的均值和方差。在此基础上, 对石木结构在 VIII 度、IX 度、X 度下的均值和方差进行推演, 如图 6 和图 7 所示。已知均值和方差, 利用式 (2) 求得对应于该均值和方差的 Beta 分布参数值, 得出相应的分布密度函数, 进而得出石木结构震害指数。

$$f_{\xi}(x_{\alpha,\beta}) = \begin{cases} \frac{1}{B(\alpha,\beta)} x^{\alpha-1}(1-x)^{\beta-1} & x \in (0, 1) \\ 0 & x \notin (0, 1) \end{cases} \quad (2)$$

式中: α, β 为 Beta 分布的形状参数; $\alpha > 0, \beta > 0, B(\alpha,\beta) = \int_0^1 x^{\alpha-1}(1-x)^{\beta-1} dx$ 。

表 5 各烈度下震害指数均值

Table 5 The damage index expectation for five intensives

项目	地震烈度				
	VI	VII	VIII	IX	X
D类结构	0.3275	0.4871	0.601	0.6606	0.7395
石木结构	0.1230	0.4021	—	—	—

表 6 各烈度下震害指数方差

Table 6 The damage index variance for five intensives

项目	地震烈度				
	VI	VII	VIII	IX	X
D类结构	0.0744	0.0931	0.0782	0.0609	0.0335
石木结构	0.0193	0.0646	—	—	—

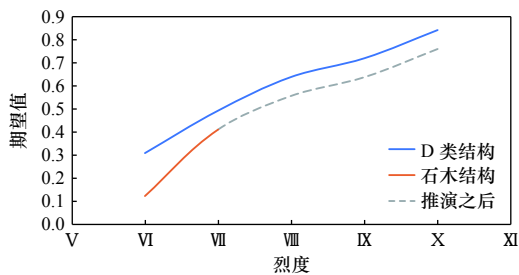


图 6 各烈度下震害指数均值

Fig. 6 The damage index expectation for five intensive

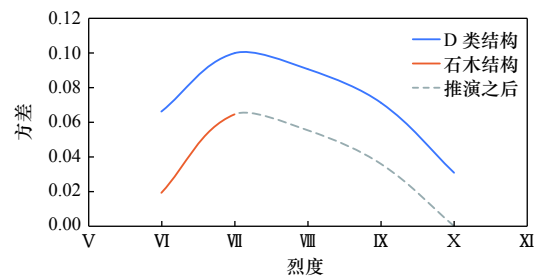


图 7 各烈度下震害指数方差

Fig. 7 The damage index variance for five intensive

值得注意的是,表 4 中 D 类结构破坏等级划分为 5 类,而本文将西藏地区民居破坏等级分成 3 类。按照周光全(2011)研究中简易房屋震害指数求解原则,即“中等破坏”和“轻微破坏”合并为“破坏”等级、“严重破坏”和“毁坏”合并为“毁坏”等级后的震害指数和破坏比与“灾评国标”实施前震害指数与破坏比的积必须保持不变的原则,最后取平均值。按标准地区求得的简易房屋震害指数如表 7 所示,根据表 7 求得石木结构得震害指数如表 8 所示。

以此类推,按照同样方法求得土木结构震害矩阵,如表 9 所示。

表 7 房屋建筑各破坏等级对应的震害指数

Table 7 seismic damage index of each damage class

破坏等级	基本完好	破坏	毁坏
震害指数	0.00	0.32	0.86

表 8 石木结构震害矩阵 (%)

Table 8 Earthquake damage matrix of stone-timber structure (Unit: %)

破坏等级	地震烈度				
	VI	VII	VIII	IX	X
基本完好	75.470	9.680	2.310	0.170	0.000
破坏	24.400	66.360	52.370	43.710	7.540
毁坏	0.130	23.960	45.320	56.660	92.460
震害指数	0.074	0.379	0.497	0.556	0.716

表 9 土木结构震害矩阵 (%)

Table 9 Earthquake damage matrix of civil structure (Unit: %)

破坏等级	地震烈度				
	VI	VII	VIII	IX	X
基本完好	74.430	10.270	2.870	0.560	0.000
破坏	24.890	51.370	39.600	31.410	1.590
毁坏	0.680	38.360	57.530	68.030	98.410
震害指数	0.085	0.494	0.621	0.686	0.851

3.2 各类结构震害指数对比

通过对比各类结构房屋震害指数,可判断各类结构房屋抗震能力。将求得的石木结构和土木结构与未设防砖混结构标准震害矩阵(孙柏涛等,2014)以及西藏地区调研得到的未设防砖混结构和设防砖混结构得到的震害矩阵进行比较结果如表 10 所示。

考虑到地震动强度与烈度之间为指数关系,参考《中国地震烈度表》(GB/T 17742—2020)(国家市场监督管理总局等,2020)给出的各烈度对应的峰值加速度(表 11),可得到表 10 中各结构震害指数随着地震动峰值加速度的关系曲线,(趋势线)如图 8 所示。

由图 8 可知,由于西藏地区石木结构与土木结构建造方式相同,所以两者的抗震能力较一致,但石木结构相对土木结构而言,其抗震能力较强,主要原因是石墙墙体中碎石填缝使得墙体破坏滞后且破坏不严重。另外,虽然石木结构采用碎石砌筑墙体,墙体较厚,但中间是空的,抗剪能力较差,这也是西藏石木结构破坏的主要原因。同时,与未设防砖混结构相比,石木结构和土木结构多为农牧民自建,结构整体性差,且缺少必要的建造技术和抗震意识,所以在遭遇地震时会造成较严重破坏。

表 10 各类结构震害指数对比

Table 10 Comparison of seismic damage indices for various types of structures

结构类型	地震烈度				
	VI	VII	VIII	IX	X
石木结构	0.079	0.418	0.567	0.636	0.828
土木结构	0.085	0.494	0.621	0.686	0.851
未设防砖混结构	0.048	0.150	0.394	0.612	0.826
设防砖混结构 (VIII 度区)	0.027	0.085	0.228	0.437	0.711
设防砖混结构 (VI 度区)	0.032	0.131	0.277	0.546	0.750

表 11 地震动峰值加速度与地震烈度对照表

Table 11 Comparison table of peak ground acceleration and seismic intensity

地震烈度	VI	VII	VIII	IX	X
地震动峰值加速度/g	0.040 ~ 0.090	0.090 ~ 0.180	0.180 ~ 0.350	0.350 ~ 0.710	0.710 ~ 1.410
平均加速度/g	0.063	0.125	0.250	0.500	1.000

4 结论

本文通过分析西藏地区 2000—2019 年震害资料, 总结得到西藏地区石木结构和土木结构主要震害特点为: 墙体出现分层剥落甚至倒塌、木柱折断以及屋盖过重导致坍塌等。通过半经验半理论法完善了石木结构和土木结构震害矩阵, 得到了结构震害指数。通过对比土木结构和石木结构震害指数可知, 在相同峰值加速度作用下, 土木结构损坏情况大于石木结构。同时, 与未设防砖混结构相比, 石木结构和土木结构破坏情况较严重。究其原因是西藏地区的石木结构和土木结构多为农牧民自建, 结构整体性差, 且缺少必要的建造技术和抗震意识。因此, 在无法重建的情况下, 建议对已建石木和土木结构进行小范围抗震加固, 提升房屋整体性, 以保证房屋抗震性能, 如采取在梁与墙搭接处加设垫块等措施。

本文对于提高应急保障效率、增加灾后重建能力以及完善地震保险制度具有重要的研究意义和参考价值。

参考文献

- 巴桑次仁, 郭春明, 邓桂英等, 2009. 西藏当雄 6.6 级地震与仲巴 6.8 级地震震害特征分析. *高原地震*, **21** (3): 64—69.
- Basangciren, Guo C. M., Deng G. Y., et al, 2009. Analysis on seismic disaster characteristics of Dangxiang Ms6.6 and Zhongba Ms6.8 earthquakes in Xizang. *Plateau Earthquake Research*, **21**(3): 64—69. (in Chinese)
- 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会, 2020. GB/T 17742—2020 中国地震烈度表. 北京: 中国标准出版社.
- 胡少卿, 孙柏涛, 王东明等, 2007. 经验震害矩阵的完善方法研究. *地震工程与工程振动*, **27** (6): 46—50.
- Hu S. Q., Sun B. T., Wang D. M., et al, 2007. Approach to making empirical earthquake damage matrix. *Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **27**(6): 46—50. (in Chinese)
- 李秋容, 周英, 2018. 藏式石木结构民居震害形式分析及建议. *黑龙江科学*, **9** (16): 98—99.
- Li Q. R., Zhou Y., 2018. Analysis and suggestion of seismic damage forms of Tibetan stone-wood structures. *Heilongjiang Science*, **9**(16): 98—99. (in Chinese)
- 李书进, 毛羚, 2010. 湖北农村民居现状调查与震害预测. *灾害学*, **25** (3): 139—144.

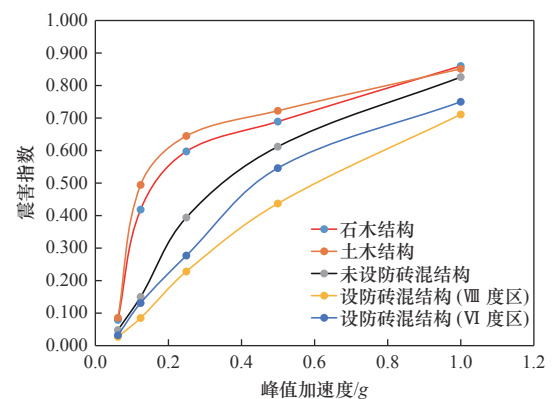


图 8 震害指数曲线比较图

Fig. 8 Comparison of seismic damage index curves

- Li S. J., Mao L., 2010. Status investigation and earthquake damage prediction of rural buildings in Hubei province. *Journal of Catastrophology*, **25**(3): 139—144. (in Chinese)
- 邱舒睿, 高惠瑛, 2015. 青海省农居地震灾害易损性研究. *震灾防御技术*, **10** (4): 969—978.
- Qiu S. R., Gao H. Y., 2015. The research of rural dwelling's seismic vulnerability in Qinghai. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, **10**(4): 969—978. (in Chinese)
- 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——以四川省为例. *土木工程学报*, **47** (S1): 6—10.
- Sun B. T., Chen H. F., Yan P. L., et al, 2014. Research on zoned characteristics of building seismic capacity along north south seismic belt-take Sichuan province as an example. *China Civil Engineering Journal*, **47**(S1): 6—10. (in Chinese)
- 涂伟荣, 谭平, 周福霖等, 2011. 房屋建筑抗震易损性分析方法研究综述. *华南地震*, **31** (1): 47—54.
- Tu W. R., Tan P., Zhou F. L., et al, 2011. State-of-art of seismic fragility analysis methods for building structure. *South China Journal of Seismology*, **31**(1): 47—54. (in Chinese)
- 杨娜, 王龙, 刘爱文等, 2018. 青海东南部农村民居结构特点及抗震能力分析. *震灾防御技术*, **13** (1): 206—214.
- Yang N., Wang L., Liu A. W., et al, 2018. Structural characteristics and seismic capacity analysis of rural buildings in the southeast of Qinghai province. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, **13**(1): 206—214. (in Chinese)
- 叶肇恒, 孟凡馨, 杨璐遥, 2019. 基于震害资料的四川省藏式房屋地震易损性研究. *华南地震*, **39** (1): 40—45.
- Ye Z. H., Meng F. X., Yang L. Y., 2019. Research on Seismic vulnerability of Tibetan folk houses in Sichuan province based on seismic hazard information. *South China Journal of Seismology*, **39**(1): 40—45. (in Chinese)
- 尹之潜, 1996. 结构易损性分类和未来地震灾害估计. *中国地震*, **12** (1): 49—55.
- Yin Z. Q., 1996. Classification of structure vulnerability and evaluating earthquake damage from future earthquake. *Earthquake Research in China*, **12**(1): 49—55. (in Chinese)
- 张戈, 2015. 东北地区生土民居地震易损性及空间分布研究. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所.
- Zhang G., 2015. Research on seismic vulnerability and spatial distribution of earth dwellings in northeast China. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration. (in Chinese)
- 赵世伟, 罗奇峰, 2010. 基于抽样调查的湖南四地区农村民居震害预测. *结构工程师*, **26** (5): 57—60.
- Zhao S. W., Luo Q. F., 2010. Earthquake damage prediction based on sampling investigation for rural housing in four regions of Hunan Province. *Structural Engineers*, **26**(5): 57—60. (in Chinese)
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会, 2012. GB/T 18208.4-2011 地震现场工作 第4部分: 灾害直接损失评估. 北京: 中国标准出版社.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standards Administration of China, 2012. GB/T 18208.4-2011 Post-earthquake field works—Part 4: assessment of direct loss. Beijing: Standards Press of China. (in Chinese)
- 周光全, 2011. 云南地区简易房屋的震害指数研究. *地震研究*, **34** (1): 88—95.
- Zhou G. Q., 2011. Seismic-damage Index of Simple-buildings in Yunnan. *Journal of Seismological Research*, **34**(1): 88—95. (in Chinese)