

姜 慧, 谭 潇, 王立新, 等. 城市建筑物震害预测方法的改进[J]. 华南地震, 2014, 34(2): 1-10. [JIANG Hui, TAN Xiao, WANG Lixin, et al. Improvement of Seismic Damage Prediction Method for Urban Buildings[J]. South China Journal of Seismology, 2014, 34(2): 1-10.]

城市建筑物震害预测方法的改进

姜 慧^{1,2,3}, 谭 潇⁴, 王立新^{1,2,3}, 董 伟⁵

(1. 广东省地震局, 广州 510070; 2. 中国地震局地震监测与减灾技术重点实验室, 广州 510070;
3. 广东省地震预警与重大工程安全诊断重点实验室, 广州 510070; 4. 广州大学, 广州 510070; 5. 香港城市大学, 香港)

摘要: 目前基于地震烈度的建筑物震害预测方法, 通常按整烈度给出预测结果, 造成在设定地震影响下烈度分界线两侧相邻的、抗震能力相同的建筑物震害预测结果有很大的差异, 而同一烈度圈内靠近高烈度分界线与靠近低烈度分界线的建筑物震害预测结果却完全相同, 这与实际震害情况严重不符。为了解决这个问题, 将地震烈度按 0.2 度间隔进行分档, 同时将震害指数和破坏等级也进一步细化出 5 个分档。按地震烈度与震害指数的关系, 通过拟合方法和等分方法得到 5 个烈度分档的震害指数调整系数和分档震害指数, 拟合方法获得的调整系数适用于群体房屋震害预测, 等分方法获得的震害指数适用于单体房屋震害预测, 通过改进方法获得的设定地震影响下震害预测结果, 可以体现同一烈度不同烈度分档内建筑物震害差异, 并使烈度线两侧, 抗震能力相同的建筑物的震害预测结果不再出现跃变。

关键词: 震害预测方法; 地震烈度; 震害指数; 调整系数

中图分类号: P315.9 文献标志码: A 文章编号: 1001-8662 (2014) 02-0001-10
DOI: 10.13512/j.hndz.2014.02.001

Improvement of Seismic Damage Prediction Method for Urban Buildings

JIANG Hui^{1,2,3}, TAN Xiao⁴, WANG Lixin^{1,2,3}, DONG Wei⁵

(1. Earthquake Administration of Guangdong Province, Guangzhou 510070, China; 2. Key Laboratory of Earthquake Monitoring and Disaster Mitigation Technology, CEA, Guangzhou 510070, China; 3. Key Laboratory of Earthquake Early Warning and Safety Diagnosis of Major Project, Guangzhou 510070, China; 4. Guangzhou University, Guangzhou 510007, China; 5. Department of Information Systems, City University of Hong Kong, Hong Kong, China)

Abstract: The present seismic damage prediction method of predicting damages of buildings is based on one-degree-interval intensity zone. This method results in quite different damages predicted for buildings with same seismic capacity but closely located in two sides of the intensity isocline, while the damages predicted for all buildings within the same intensity zone, no matter close to the higher intensity isocline or the lower intensity isocline, are identical under a certain scenario earthquake. This kind of results predicted is quite different from actual seismic damage. To solve this problem, the authors subdivide one-degree-interval intensity zone by 0.2

收稿日期: 2014-03-20

基金项目: 广东省地震预警与重大工程安全诊断重点实验室建设(2011A0660901006)

作者简介: 姜 慧 (1964-), 男, 博士, 研究员, 主要从事地震工程、结构抗震研究。

E-mail: jianghui@cca.igp.ac.cn.

degree interval, and break down the damage index and damage level into five smaller grades accordingly at the same time. Based on the relationship between seismic intensity and damage index, the authors use fitting and equal division methods respectively to get adjustment coefficient of damage index or graded damage index for five subdivided intensity grades. The adjustment coefficient of damage index obtained by fitting method is suitable for seismic damage prediction of building groups, and the damage index obtained by equal division method is applicable to single building. This improved method for damage prediction can not only reflect the discrepancy among buildings located in different subsections of the same intensity zone, but also make sure that the predicted damages of buildings with same seismic capacity and from two sides of an intensity isocline not fluctuate sharply.

Keywords: Seismic damage prediction method; Seismic intensity; Damage index; Adjustment coefficient

0 引言

地震的发生有一定的不可预测性,常常不期而至,并造成巨大的经济损失和人员伤亡。而建筑物的严重破坏及倒塌是造成经济损失和人员伤亡的最主要因素,因此,科学合理的预测出地震发生后建筑物的破坏程度具有十分重要的意义。它可以为城市防灾规划的编制和建筑物的抗震加固提供依据;也可以为震后的应急救灾工作提供辅助决策支持。

近几十年来,对于建筑物的震害预测,国内外学者进行了一系列的研究,目前常用的震害预测方法主要包括历史震害统计法、专家评估法、半经验半理论法、结构理论计算方法^[1]等。尹之潜定义了结构的抗力,并通过分析结构的破坏程度与其抗力均值的关系,给出了几种结构类型的震害指数的计算方法^[2];张令心等重点研究了量大面广的砖混结构地震易损性^[3-4],王志涛等研究了群体建筑物类比预测方法^[5]等。孙柏涛、孙得璋通过分析大量单体结构样本以及不同震害影响因子的参与度系数,并参照模糊综合评价模型,建立了多因子综合分析单体结构震害的方法^[6];高杰、冯启民等在对历史震害数据调查统计的基础上,运用统计回归的方法,建立了针对城市群体建筑的震害预测简化模型—单元破坏度指数法^[7];李升才、王毅恒选取了建筑物的结构类型、高度、建设年代、现状质量和用途作为震害因子,给出了通过计算加权海明距离得到建筑物破坏指数的类比预测方法^[8]。温增平等研究了考虑地震环境和局部场地影响的建筑物易损性^[9]。

尽管方法很多,但概括起来主要有两大类,第一类是适合单体建筑物的震害预测方法^[2-3,6,9],第二类是适合群体建筑物的震害预测方法^[2,5,7,8]。这两类方法在城市震害预测工作中是综合应用的,

第一类方法适用于重点调查建筑物(单体)在不同烈度下的易损性分析,第二类方法主要适用于预测研究区所有房屋在不同烈度下的破坏等级,可以是群体,也可以是单体。由这两类方法可获得研究区各类建筑物或所有建筑物在不同烈度下的震害指数和对应的破坏等级。由于在设定地震下,由地震烈度衰减关系,可算得所有建筑物所处位置的地震烈度,那么,就很容易根据烈度和震害指数或破坏等级的对应关系,得到设定地震影响下各类建筑物(群体)或所有建筑物(单体)的震害指数或破坏等级。

基于地震烈度的震害预测方法简单易行,在城市震害预测工作中得到了普遍应用。但还存在一个很突出的问题没有解决好,严重影响了建筑物震害预测结果的准确度。

1 问题的提出

从本质上讲,城市建筑物的震害预测有两个功能:第一个功能是:通过易损性分析方法,预测建筑物在给定烈度下的震害等级,为城中村和老旧房屋改造,及不达标建筑物的抗震加固提供参考依据;第二个功能是:预测设定地震(未来可能发生地震情况)下,建筑物的破坏等级和分布,为辅助决策和应急救援提供依据。由于目前的基于地震烈度的震害预测方法是按整烈度分区预测建筑物震害等级,对抗震能力相同的、但处于烈度分界线两侧相邻的建筑物,会得到差别很大的震害预测结果,而对同一烈度圈内靠近高烈度分界线与靠近低烈度分界线的建筑物震害预测结果完全相同,这与实际震害情况严重不符。

如图1所示,假设有4栋抗震能力相同的建筑物分别位于A点、B点、C点和D点,但处于A和B点,或C和D点的建筑物尽管相邻,由于

所处烈度区不同,他们的震害结果将存在很大的差异,甚至差一个破坏等级;而处于B和C点的建筑物位于同一烈度区的两端,由于同属一个烈度区,震害结果将是完全一致的,而与他们相邻的A和D点的建筑物,震害结果可能差一到两个等级。

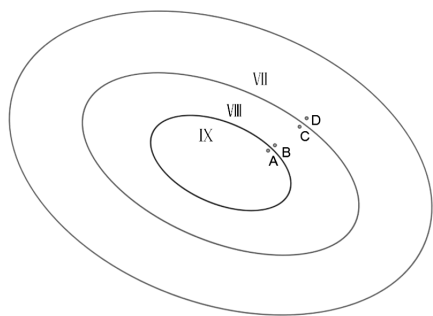


图1 设定地震烈度分界线及假定房屋位置示意图

Fig.1 Earthquake intensity boundary setted and the position of assumed housing

为了解决上述问题,使震害预测结果更加符合实际,本文提出了如下的改进方法。

2 改进方法

2.1 技术路线

针对现行方法存在的问题,本文将地震烈度按0.2度间隔进行分档,即将1度分为5个烈度档,同时对五个震害等级中轻微破坏、中等破坏和严重破坏三个等级及其对应的震害指数进行分档。然后根据平均震害指数与地震烈度之间的关系,拟合不同烈度分档的震害指数调整系数,用于各类群体房屋的震害预测。由于拟合法得到的不同烈度分档的震害指数调整系数不能反映单体建筑物的震害指数随烈度分档的变化规律,本文又提出等分法,即等间距插值获得不同烈度分档的震害指数,用于所有单体房屋的震害预测。最后得到各类或所有建筑物在不同烈度档对应的震害预测结果。其技术路线流程图如下(图2):

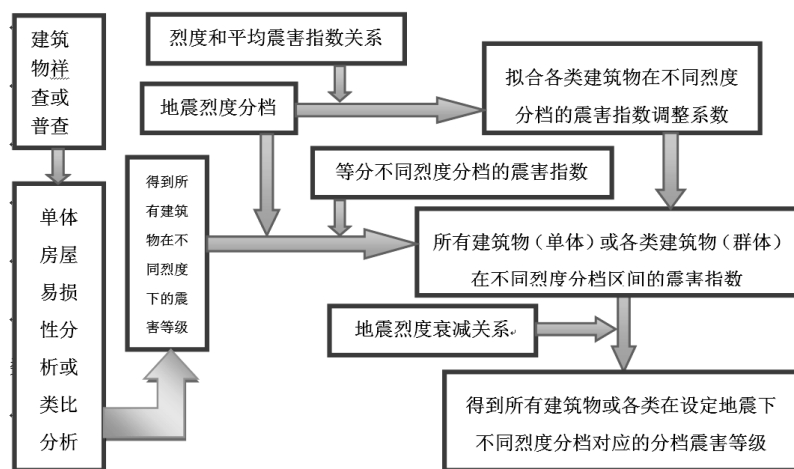


图2 建筑物震害预测改进方法技术流程图

Fig.2 Technical flowchart of improved methods of earthquake damage prediction of for building

2.2 地震烈度、震害指数及震害等级分档

2.2.1 地震烈度分档

本研究将地震烈度按0.2度间隔进行分档,即将1度分为5个烈度档,分档界限参考了地震烈度区划图或地震小区划确定烈度分界线的原则。即计算烈度转换成整数烈度时,烈度值小数点后面的数采取“7下8上”的进位原则,如6.7归为Ⅵ度,6.8归为Ⅶ度,Ⅵ度的数值区间为[5.8, 6.8)。每个烈度区间按五档平分划分,Ⅵ-X度的

分档情况见表1。

2.2.2 震害指数和震害等级分档

上世纪六七十年代,为了度量地震强度和破坏等级,提高宏观烈度的评定精度,胡聿贤教授提出了震害指数的概念。震害指数是房屋震害程度的定量指标,以0.00到1.00之间的数字表示由轻到重的震害程度^[10]。参考中国地震烈度表(GB/T 17742-1999)和尹之潜提出的震害等级与震害指数的对应关系^[2,13],震害指数的定义如表2所示。

表 1 地震烈度分档表
Table 1 Grading table of seismic intensity

烈度	中值	各烈度的 5 个分档的区间
Ⅵ	6.3	[5.8, 6.0); [6.0, 6.2); [6.2, 6.4); [6.4, 6.6); [6.6, 6.8)
Ⅶ	7.3	[6.8, 7.0); [7.0, 7.2); [7.2, 7.4); [7.4, 7.6); [7.6, 7.8);
Ⅷ	8.3	[7.8, 8.0); [8.0, 8.2); [8.2, 8.4); [8.4, 8.6); [8.6, 8.8);
Ⅸ	9.3	[8.8, 9.0); [9.0, 9.2); [9.2, 9.4); [9.4, 9.6); [9.6, 9.8);
X	10.3	[9.8, 10.0); [10.0, 10.2); [10.2, 10.4); [10.4, 10.6); [10.6, 10.8);

表 2 震害指数的定义
Table 2 The definition of damage index

震害等级	房屋的震害描述	震害指数	指数范围
基本完好	承重和非承重构件完好，或个别非承重构件轻微损坏，不加修理可继续使用。	0	$D \leq 0.1$
轻微破坏	个别承重构件出现可见裂缝，非承重构件有明显裂缝，不需要修理或稍加修理即可继续使用。	0.2	$0.1 < D \leq 0.3$
中等破坏	多数承重构件出现轻微裂缝，部分有明显裂缝，个别非承重构件破坏严重，需要一般修理后可使用。	0.4	$0.3 < D \leq 0.55$
严重破坏	多数承重构件破坏较严重，非承重构件局部倒塌，房屋修复困难。	0.7	$0.55 < D \leq 0.85$
毁坏	多数承重构件严重破坏，房屋结构濒临崩溃或已倒塌，已无修复可能。	1.0	$0.85 < D$

为了更加准确地表示房屋的破坏程度，且与烈度分档相匹配，本研究震害等级也进行分档，考虑到基本完好和毁坏分档的工程意义不大(基本完好房屋不加修理可继续使用，毁坏房屋已无修复可

能)，本研究对这两个震害等级不分档。又考虑到目前的认识水平没有达到物理分档的水平，本文采用平分方法对其中的轻微破坏、中等破坏和严重破坏三个震害等级进行分档并给出简单描述(见表 3)。

表 3 震害指数和震害等级分档
Table 3 Grading table of damage index and damage level

震害等级	震害等级分档 (描述)	震害分级	震害指数范围	指数范围
基本完好	基本完好	好	≤ 0.1	$D \leq 0.1$
轻微破坏	很轻轻微破坏(刚达到轻微破坏)	轻 ⁻²	0.125 (0.10, 0.13]	$0.1 < D \leq 0.3$
	较轻轻微破坏(偏轻的轻微破坏)	轻 ⁻¹	0.15 (0.13, 0.17]	
	轻微破坏(典型的轻微破坏)	轻	0.20 (0.17, 0.23]	
	较重轻微破坏(偏重的轻微破坏)	轻 ⁺¹	0.25 (0.23, 0.27]	
	很重轻微破坏(接近中等破坏)	轻 ⁺²	0.285 (0.27, 0.30]	
中等破坏	很轻中等破坏(刚达到中等破坏)	中 ⁻²	0.32 (0.30, 0.35]	$0.3 < D \leq 0.55$
	较轻中等破坏(偏轻的中等破坏)	中 ⁻¹	0.37 (0.35, 0.40]	
	中等破坏(典型的中等破坏)	中	0.42 (0.40, 0.45]	
	较重中等破坏(偏重的中等破坏)	中 ⁺¹	0.47 (0.45, 0.50]	
	很重中等破坏(接近严重破坏)	中 ⁺²	0.53 (0.50, 0.55]	
严重破坏	很轻严重破坏(刚达到严重破坏)	重 ⁻²	0.575 (0.55, 0.61]	$0.55 < D \leq 0.85$
	较轻严重破坏(偏轻的严重破坏)	重 ⁻¹	0.65 (0.61, 0.67]	
	严重破坏(典型的严重破坏)	重	0.70 (0.67, 0.73]	
	较重严重破坏(偏重的严重破坏)	重 ⁺¹	0.75 (0.73, 0.79]	
	很重严重破坏(接近毁坏)	重 ⁺²	0.815 (0.79, 0.85]	
毁坏	毁坏	毁	> 0.85	$0.85 < D$

2.3 拟合方法确定不同烈度分档的震害指数

我们知道，当地震发生时，无论哪种类型的房屋，地震影响烈度越大的地方破坏越严重。但不同

类型的房屋，随烈度的破坏情况有一定差别。本文重点研究量大面广的框架结构和砖混结构震害等级随地震烈度的变化规律。考虑到震害等级和震害指

数密切相关, 本节将研究框架结构和砖混结构震害指数随地震烈度的变化规律, 在此基础上拟合各分档烈度对应的房屋震害指数调整系数。

2.3.1 平均震害指数与地震烈度的关系

平均震害指数是指同类房屋震害指数的加权平均值, 即各级震害的房屋所占的比率与相应的震害指数的乘积之和。各类房屋的平均震害指数可以由式(1)进行计算:

$$D=\sum_{i=1}^5 d_i \lambda_i \quad (1)$$

式(1)中: i 表示房屋的 5 个破坏等级; d_i 表示房屋破坏等级为 i 的震害指数; λ_i 表示破坏等级为 i 的房屋破坏比, 可以用破坏面积与总面积之比或破坏栋数与总栋数之比来表示。

平均震害指数可以反应在地震作用下一片区域内某类房屋的破坏程度。平均震害指数越大, 表示该区域的震害程度越重; 平均震害指数越

小, 表示该区域的震害程度越轻。因此, 通过计算不同烈度下的平均震害指数并总结平均震害指数随烈度变化的规律, 可以找到建筑物的震害指数与地震烈度的关系, 进而给出各烈度下不同分档的建筑物震害的调整系数。下面本文以设防烈度 7 度地区为例, 对框架结构和砖混结构两种结构类型进行探讨。

2.3.2 7 度设防地区框架结构平均震害指数随烈度的变化规律

以设防烈度 7 度地区城镇中最常见的钢筋混凝土框架结构作为研究对象, 首先根据设防烈度 7 度地区框架结构的震害矩阵^[5], 计算各烈度作用下结构的平均震害指数, 然后选择几种不同的函数类型对地震烈度与平均震害指数进行曲线拟合, 本文选取了四种函数类型: 线性函数、二次函数、三次函数和高斯函数(表 4), 其曲线拟合见图 3。

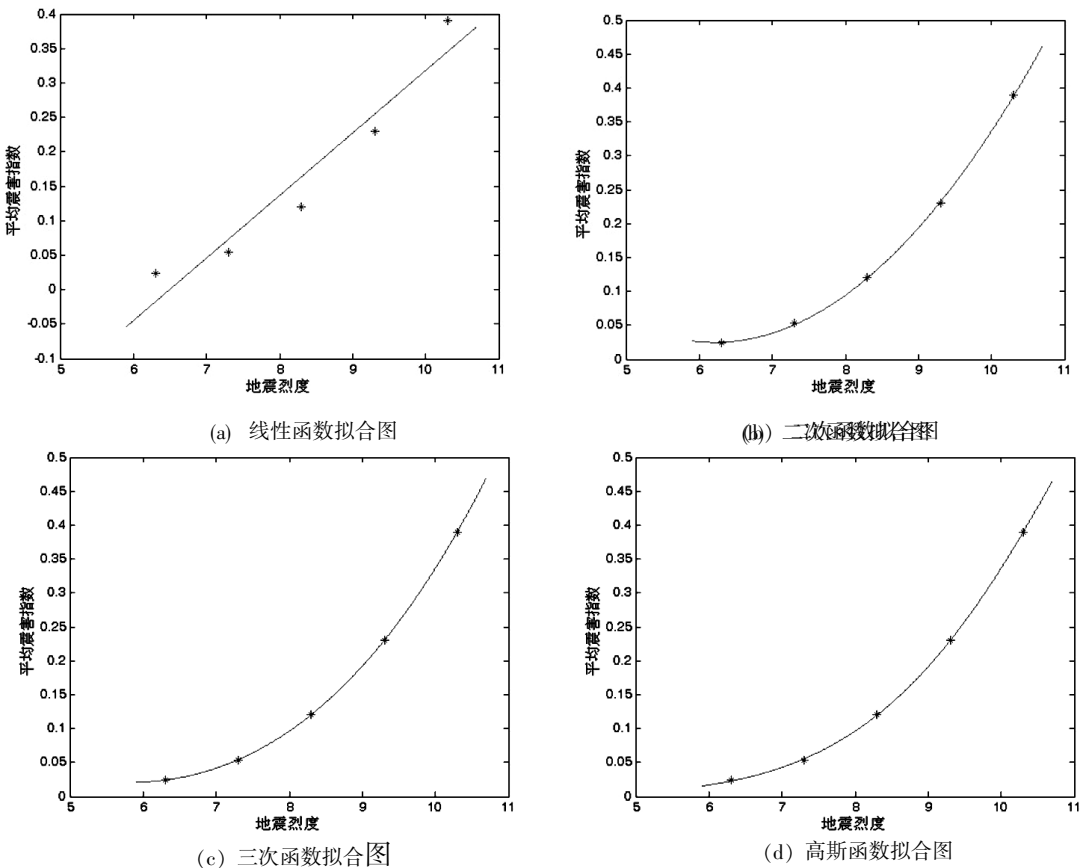


图3 砖混结构的平均震害指数与地震烈度关系拟合曲线

Fig.3 Fitting curve of the average damage index of brick structure and seismic intensity

从图 3 的四个拟合图中可以看出, 当选取的函数类型为三次函数时, 曲线的吻合程度最好, 因此, 我们取三次函数为平均震害指数随地震烈

度变化的规律表达式, 其表达式如下:
$$f(x)=0.001\ 167x^3-0.073\ 36x^2-0.032\ 51x+0.228\ 3 \quad (2)$$
式(2)中, x 表示地震烈度; $f(x)$ 表示平均震害指数。

表 4 各种拟合曲线函数表达式和方差

Table 4 Expressions and variance of various fitting functions

函数类型	函数表达式	方差
线性函数	$f(x)=0.090\ 8x-0.59$	0.046\ 98
二次多项式	$f(x)=0.021\ 71x^2-0.269x+0.862\ 4$	0.003\ 13
高斯函数	$f(x)=0.6531e^{-\left(\frac{x-12.8}{3.46}\right)^2}$	0.005\ 27
三次多项式	$f(x)=0.001\ 167x^3-0.007\ 336x^2-0.032\ 51x+0.228\ 3$	0.000\ 23

2.3.3 7 度设防地区砖混结构平均震害指数随烈度的变化规律

随着社会经济和施工技术的不断发展,钢筋混凝土结构越来越成为主流的结构类型,但是目前全国各城市尤其是中小城市中砖混结构仍然是存在数量最多的结构类型,而且其在地震中受到的破坏比钢混结构严重的多,因此对于砖混结构的震害预测研究仍然需要重视。砖混结构中砖墙是主要承重构件,由于气候的影响,不同地区砖混结构的外墙厚

度不同,对于结构的抗震能力有一定的影响,因此将全国分为三类情况:一类是较寒冷的地区,如黑龙江,新疆等地,外墙一般为 49 cm 厚;第二类如华北一类,外墙一般为 37 cm 厚;第三类是冬季比较温暖的地区,如华南地区,外墙一般为 24 cm 厚。

计算得到各类地区不同烈度下的平均震害指数后,仍然采用上文中的四种函数类型对地震烈度与平均震害指数进行曲线拟合,其曲线拟合图分别见图 4。

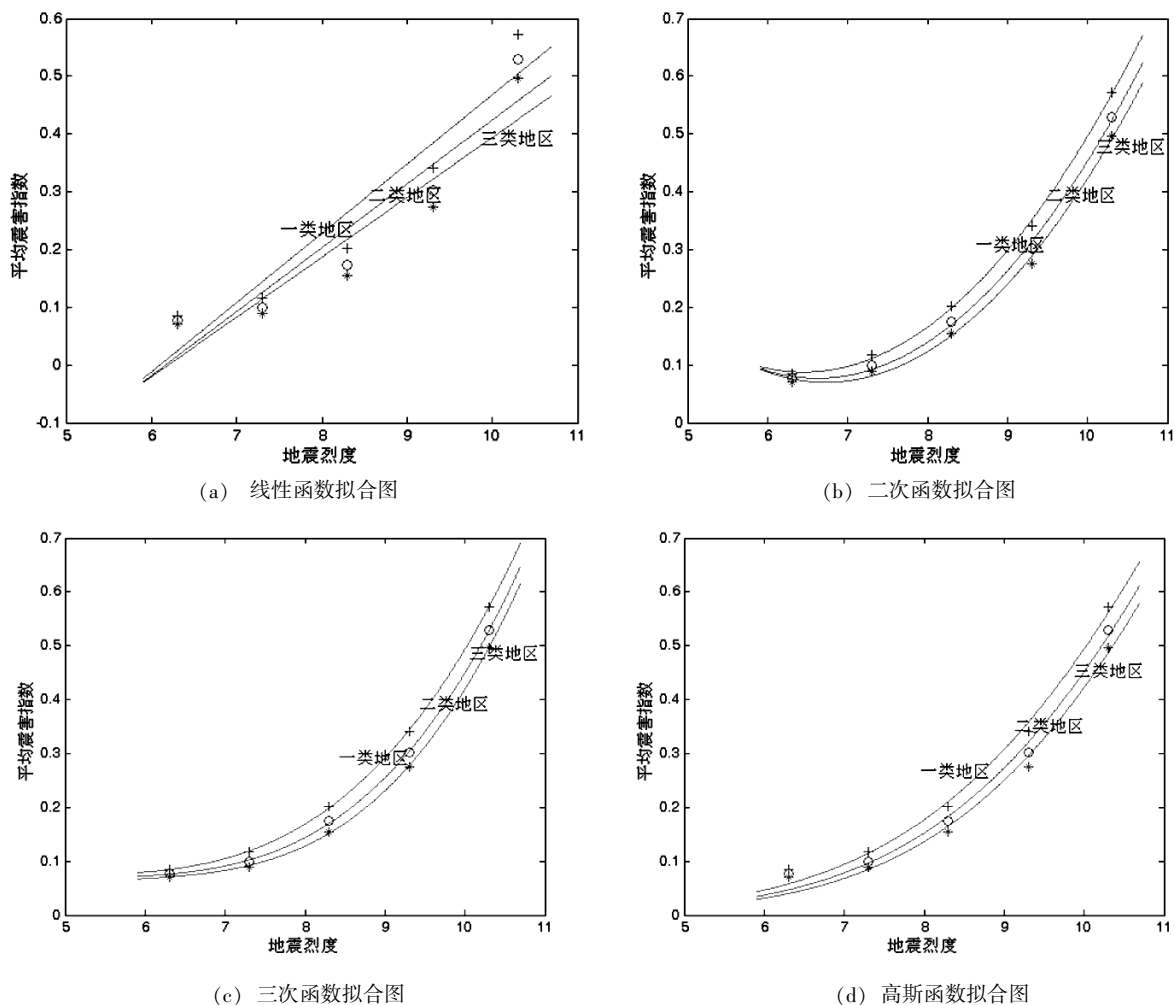


图 4 框架结构的平均震害指数与地震烈度关系拟合曲线

Fig.4 Fitting curve of the average damage index of frame structure and seismic intensity

同上文中的拟合结果类似,当选取的函数类型为三次函数时,曲线的吻合程度最好,三类地区的函数表达式分别见式(3)、(4)、(5)。

$f(x)=0.004\ 624x^3-0.082\ 09x^2+0.495x-0.945\ 6$ (3)

$f(x)=0.004\ 092x^3-0.068\ 89x^2+0.394\ 5x-0.698\ 2$ (4)

$f(x)=0.003\ 281x^3-0.049\ 3x^2+0.249\ 1x-0.3485$ (5)

其中,上式中的 x 表示地震烈度; $f(x)$ 表示平均震害指数。

2.3.4 两类房屋不同烈度档的震害调整系数和震害指数确定方法

根据式(2)、(3)、(4)和(5)四个函数表达式,很容易求得各烈度分档(中值)对应的平均震害指数值,并将各烈度档对应的震害指数与该整数烈度对应的震害指数标准值相比,得到各烈度档的房屋震害指数的调整系数,两种结构类型建筑物震害的调整系数($\lambda_I(j)$)建议值见表 5。

表 5 不同烈度分档下框架和砖混结构房屋的震害指数调整系数($\lambda_I(j)$)建议值

Table 5 Suggested values of adjustment factor ($\lambda_I(j)$) of frame structure and brick structure under different intensity

烈度	烈度分档	$\lambda_I(j)$	
		框架结构	砖混结构
Ⅵ	[5.8, 6.0)	0.85	0.94
	[6.0, 6.2)	0.9	0.97
	[6.2, 6.4)	1	1
	[6.4, 6.6)	1.15	1.05
	[6.6, 6.8)	1.3	1.1
Ⅶ	[6.8, 7.0)	0.7	0.85
	[7.0, 7.2)	0.85	0.9
	[7.2, 7.4)	1	1
	[7.4, 7.6)	1.2	1.1
	[7.6, 7.8)	1.4	1.2
Ⅷ	[7.8, 8.0)	0.75	0.8
	[8.0, 8.2)	0.85	0.9
	[8.2, 8.4)	1	1
	[8.4, 8.6)	1.15	1.12
	[8.6, 8.8)	1.3	1.25
Ⅸ(X)	[8.8, 9.0) [9.8, 10.0)	0.8	
	[9.0, 9.2) [10.0, 10.2)	0.9	
	[9.2, 9.4) [10.2, 10.4)	1	
	[9.4, 9.6) [10.4, 10.6)	1.15	
	[9.6, 9.8) [10.6, 10.8)	1.25	

知道了调整系数($\lambda_I(j)$),分档震害指数($D_I(j)$)可由下式确定。

$D_I(j)=D_I\lambda_I(j) \quad j=1, 2\cdots 5$ (6)

其中 D_I 为整烈度对应的震害指数, j 为 5 个分档的

序号。由拟合震害指数调整系数确定分档震害指数的方法,在本文中简称“拟合法”。

2.4 震害指数等分法

采用拟合法确定不同烈度分档的震害指数,物理意义明确,数学概念清楚,但它仅适合某类房屋的平均情况,对于单体房屋震害预测结果不适用。为了克服拟合法的不足,本研究提出了震害指数等分方法(简称“等分法”),它和拟合法不同,拟合法是在一度之间用调整系数乘以该烈度的震害指数确定分档震害指数,等分法是在两相邻烈度之间,按 5 个分档对震害指数进行等分,计算公式如下:

$D_{I+1}(j)=D_I+(j-1)*(D_{I+1}-D_I)/5$
 $j=1, 2\cdots 5 \quad 6.3\leq I\leq 10.3$ (7)

式(7)中, $D_{I+1}(j)$ 为 I 到 $I+1$ 度之间的分档震害指数, D_I 和 j 的含义同上,条件为 $6.3\leq I\leq 10.3$ 。

当 $I<6.3$ 时或 $10.3<I$ 时,半度间分档震害指数分别按式(8)、(9)确定。

$D_{I<6.3}(j)=D_6+(j-3)*(D_7-D_6)/5$
 $j=1, 2 \quad 5.8<I<6.3$ (8)

$D_{I>10.3}(j)=D_{10}+j*(D_{10}-D_9)/5$
 $j=1, 2 \quad 10.3<I<10.8$ (9)

但当 $D_{I<6.3}(j)\leq 0$ 时取 0;当 $D_{I>10.3}(j)\geq 1$ 时取 1。

2.5 算例和分析

2.5.1 典型震害假定情况下的震害指数确定方法及对比

假定某典型砖混结构在Ⅵ、Ⅶ、Ⅷ、Ⅸ、X 度地震作用下,对应震害等级分别为基本完好、轻微破坏、中等破坏、严重破坏和毁坏(表 6)。框架结构在Ⅵ、Ⅶ、Ⅷ、Ⅸ、X 度地震作用下,对应震害等级分别为基本完好、轻微破坏、中等破坏、严重破坏(表 7)。根据式(6)、(7)、(8)、(9),可分别用调整法和等分法求得对应的分档震害指数;根据表 5,可得到对应的分档震害等级。

表 6、7 分别为砖混结构和框架结构在典型震害假定下的不同方法震害指数结果和对比,图 5(a、b)分别为砖混结构和框架结构在典型震害假定下不同方法确定的震害指数与烈度的关系对比。从表和图都可以明显看出:

- (1) 无论是砖混结构还是框架结构,原始的整烈度预测方法(简称“原始法”),得到的震害指数和震害等级随烈度的增加台阶型(或跳板型)升高,很不合理。
- (2) 拟合法确定的砖混结构分档震害指数在

表 6 典型砖混结构的震害指数和震害等级确定方法列表

Table 6 The list of determination method of damage index and damage level of typical brick structure

烈度分档	烈度分档中值	整度震害指数	震害等级	调整法指数	分档震害等级	等分法指数	分档震害等级
5.8~6.0	5.9	0.05	基本完好	0.047		0	
6.0~6.2	6.1			0.048 5		0.03	
6.2~6.4	6.3			0.05		0.05	好
6.4~6.6	6.5			0.052 5		0.08	
6.6~6.8	6.7			0.055		0.11	轻 ⁻²
6.8~7.0	6.9	0.2	轻微破坏	0.17	好轻 ⁻¹	0.14	轻 ⁻¹
7.0~7.2	7.1			0.18	轻 ⁻¹	0.17	轻 ⁻¹
7.2~7.4	7.3			0.2	轻	0.2	轻
7.4~7.6	7.5			0.22	轻	0.24	轻 ⁺¹
7.6~7.8	7.7			0.24	轻 ⁺¹	0.28	轻 ⁺²
7.8~8.0	7.9	0.4	中等破坏	0.32	中 ⁻²	0.32	中 ⁻²
8.0~8.2	8.1			0.36	中 ⁻¹	0.36	中 ⁻¹
8.2~8.4	8.3			0.4	中 ⁻¹	0.4	中 ⁻¹
8.4~8.6	8.5			0.44	中	0.46	中 ⁺¹
8.6~8.8	8.7			0.48	中 ⁺¹	0.52	中 ⁺¹
8.8~9.0	8.9	0.7	严重破坏	0.56	重 ⁻²	0.58	重 ⁻²
9.0~9.2	9.1			0.63	重 ⁻¹	0.64	重 ⁻¹
9.2~9.4	9.3			0.7	重	0.7	重
9.4~9.6	9.5			0.784	重 ⁺¹	0.746	重 ⁺¹
9.6~9.8	9.7			0.875	毁	0.792	重 ⁺²
9.8~10.0	9.9	0.93	毁坏	0.744	重 ⁺¹	0.838	重 ⁺²
10.0~10.2	10.1			0.837	重 ⁺²	0.884	
10.2~10.4	10.3			0.93		0.93	
10.4~10.6	10.5			1	毁	0.976	毁
10.6~10.8	10.7			1		1	

表 7 典型框架结构的震害指数和震害等级确定方法列表

Table 7 The list of determination method of damage index and damage level of typical frame structure

烈度分档	烈度分档中值	整度震害指数	震害等级	调整法指数	分档震害等级	等分法指数	分档震害等级
5.8~6.0	5.9	0	基本完好	0		0	
6.0~6.2	6.1			0		0	
6.2~6.4	6.3			0		0	
6.4~6.6	6.5			0		0	
6.6~6.8	6.7			0	好	0	好
6.8~7.0	6.9	0.05	基本完好	0.035		0	
7.0~7.2	7.1			0.042 5		0.03	
7.2~7.4	7.3			0.05		0.05	
7.4~7.6	7.5			0.06		0.08	
7.6~7.8	7.7			0.07		0.11	轻 ⁻²
7.8~8.0	7.9	0.2	轻微破坏	0.15	轻 ⁻¹	0.14	轻 ⁻¹
8.0~8.2	8.1			0.17	轻 ⁻¹	0.17	轻 ⁻¹
8.2~8.4	8.3			0.2	轻	0.2	轻
8.4~8.6	8.5			0.23	轻	0.24	轻 ⁺¹
8.6~8.8	8.7			0.26	轻 ⁺¹	0.28	轻 ⁺²
8.8~9.0	8.9	0.4	中等破坏	0.32	中 ⁻²	0.32	中 ⁻²
9.0~9.2	9.1			0.36	中 ⁻¹	0.36	中 ⁻¹
9.2~9.4	9.3			0.4	中 ⁻¹	0.4	中 ⁻¹
9.4~9.6	9.5			0.46	中 ⁺¹	0.46	中 ⁺¹
9.6~9.8	9.7			0.5	中 ⁺¹	0.52	中 ⁺²
9.8~10.0	9.9	0.7	严重破坏	0.56	重 ⁻²	0.58	重 ⁻²
10.0~10.2	10.1			0.63	重 ⁻¹	0.64	重 ⁻¹
10.2~10.4	10.3			0.7	重	0.7	重
10.4~10.6	10.5			0.805	重 ⁺²	0.746	重 ⁺¹
10.6~10.8	10.7			0.875	重 ⁺²	0.792	重 ⁺²

高烈度区出现锯齿状异常,与实际震害不符;该方法确定的框架结构的分档震害指数和烈度的关系曲线基本合理。

(3) 分档震害指数和烈度的关系符合最好的是等分法,该方法确定的砖混结构和框架结构的分档震害指数,随烈度的增加单调均匀地增加

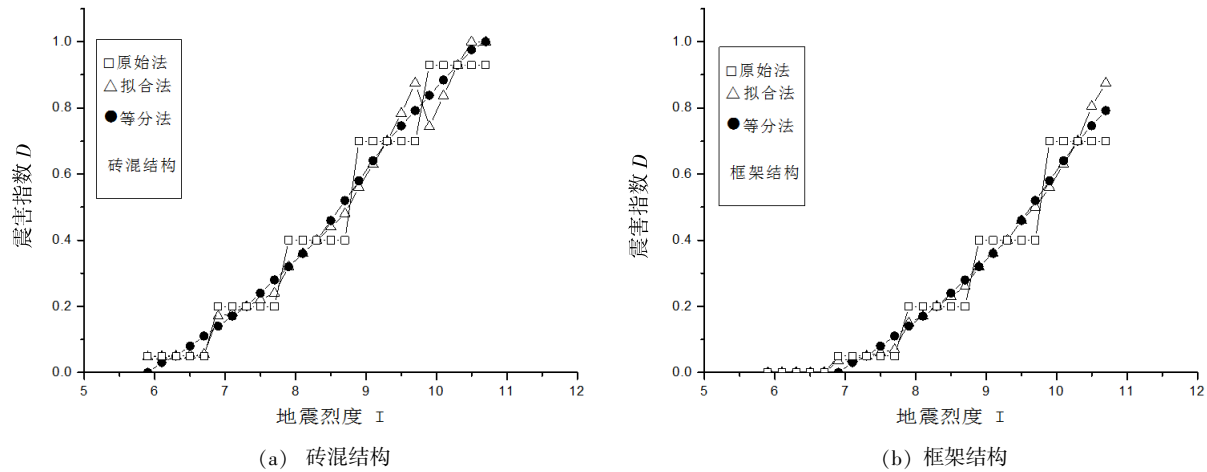


图 5 典型震害假定下不同方法确定的震害指数与烈度的关系对比

Fig.5 Comparison of the intensity and damage index determined by different methods under typical damage assumption

2.5.2 单体结构的分档震害指数确定方法及实例

(1) 砖混结构实例分析

本研究采用了文献[13]给出的一个 89 规范设计的砖混结构实例,按砖混结构易损性分析方法可计算不同烈度的震害指数,即得到原始法的震害指数。按拟合法和等分法,也可以分别得到不同烈度档的震害指数,结果如图 6 所示,从图中可以看出,“原始法”得到的震害指数和震害等级随烈度的增加台阶型升高,拟合法确定的分档震害指数在中到高烈度区都出现锯齿状异常,只

有等分法得到的分档震害指数,随烈度的增加单调地增加。

(2) 框架结构实例分析

本研究采用了文献[14]和[15]分别给出的 01 和 78 规范设计的两个框架结构实例,按易损性分析方法可计算结构不同烈度的最大层间位移角,通过位移角和与震害等级(震害指数)的关系,可用插值法得到“原始法”各烈度对应的震害指数。再用拟合法和等分法,可分别得到不同烈度档的结构震害指数,结果见如图 7,从图中可以看出:

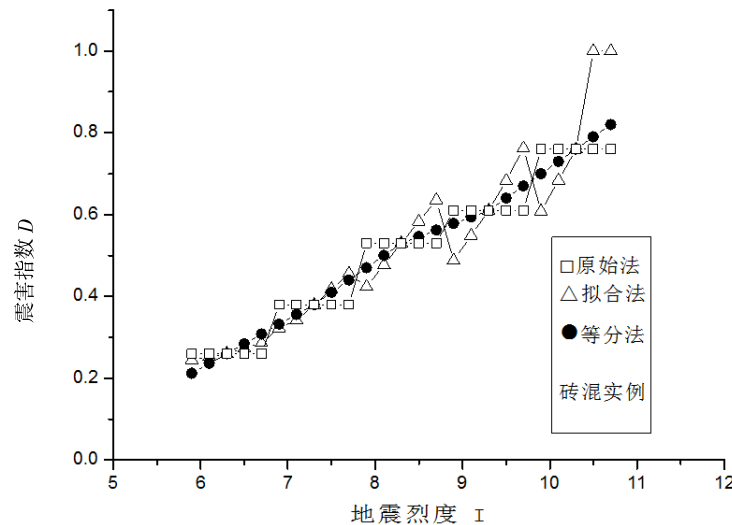


图 6 砖混结构的计算震害指数与烈度的关系曲线实例

Fig.6 The curve of the calculated damage index of brick structure and intensity

“原始法”得到的震害指数和震害等级随烈度的增加台阶型升高,拟合法得到的分档震害指数与 01 规范设计的框架结构符合较好,但与 78 规范设计的框架结构符合很差,在中到高烈度区锯齿状跳跃。只有等分法得到的分档震害指数,随烈度的

增加单调均匀地增加。

3 结论

本研究针对目前震害预测方法存在的问题,

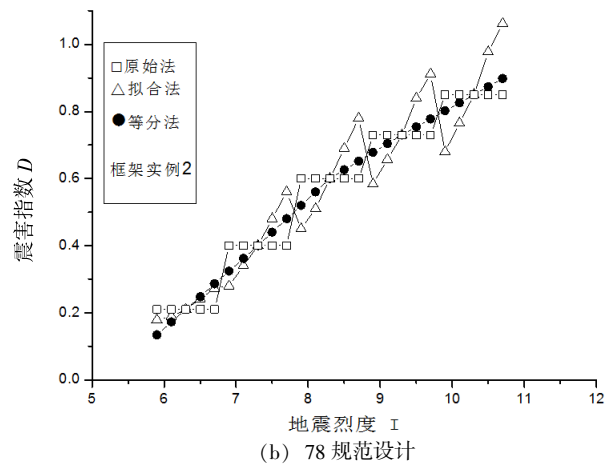
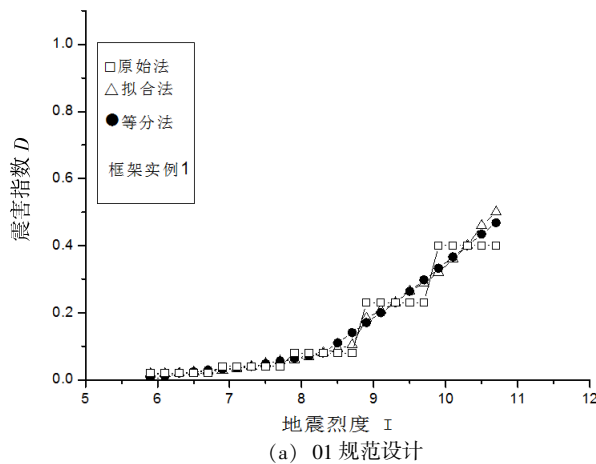


图 7 框架结构的计算震害指数与烈度的关系曲线实例

Fig.7 The curve of the calculated damage index of frame structure and intensity

提出拟合法和等分法两种改进方法。拟合法确定的各烈度档的震害指数,适合框架或砖混结构的某些类型和个别单体,但不具备普遍适用性,只能用于各类群体房屋的震害预测,且建议在使用过程中,按研究区的各类建筑物震害特点对平均震害指数进行修正。等分法确定各烈度档的震害指数,在各种情况下随烈度的增加单调地增加。且可直接在研究区建筑物的易损性分析结果基础上得到,适用于研究区单体房屋的震害预测。

总之,本文不仅提出改进方法,还指出了它们的适用条件,其应用可提高城市建筑物震害预测结果的精度,改善烈度分界线两侧预测结果跃变或不连续问题,使预测结果更加合理。

参考文献:

- [1] 崔玉宏,邱虎,聂永安,等.国内外单体建筑物震害预测方法研究述评[J].地震研究,2001,24(2):175-182.
- [2] 尹之潜.利地震灾害及损失预测方法[M].北京:地震出版社,1995.
- [3] 张令心,江近仁,刘洁平.多层住宅砖房的地震易损性分析[J].地震工程与工程振动,2002,22(1):49-55
- [4] 张令心,高森,王瑞.按新旧规范设计的多层住宅砖房地震易损性的对比[J].地震工程与工程振动,2007,27(6):75-81
- [5] 王志涛,苏经宇,马东辉,等.群体建筑物震害特征类

比预测方法与应用[J].北京工业大学学报,2008,34(8):843-847.

- [6] 孙柏涛,孙得璋.建筑物单体震害预测新方法[J].北京工业大学学报,2008,34(7):701-707.
- [7] 高杰,冯启民,张海东.城市群体建筑物震害模拟方法研究[J].震灾防御技术,2007,2(2):193-200.
- [8] 李升才,王毅恒.类比预测法在城市群体建筑物震害预测中的应用[J].地震工程与工程振动,2011,31(5):166-171.
- [9] 温增平,李小军,高孟潭,等.统一考虑地震环境和局部场地影响的建筑物易损性研究[J].地震学报,2007,28(3):277-283
- [10] 胡聿贤.地震工程学[M].北京:地震出版社,1998.
- [11] 中国地震局工程力学研究所.GB 19428-2003-T震害预测及其信息管理系统技术规范[S]//全国地震标准化技术委员会.北京:中国标准出版社,2003.
- [12] 中国地震局.GB/T 17742-2008 中国地震烈度表[S]//全国地震标准化技术委员会.北京:中国标准出版社,2008.
- [13] 尹之潜.地震灾害及损失预测方法[M].北京:地震出版社,1995.
- [14] 邓小刚.多层钢筋砼框架结构房屋的震害预测方法[J].工程抗震,1993(1):28-33
- [15] 左振营,余敏,赵瑞斌.多层RC框架结构房屋震害预测及抗力指标对比分析[J].天津城市建设学院学报,2005,11(1):10-14.