

# 廊坊市重要建筑物易损性分析\*

吕国军, 张合, 孙丽娜, 刘志辉

(河北省地震局, 河北 石家庄 050021)

**摘要:** 采用 PKPM SATWE 结构空间有限元分析软件建模算法对廊坊市 101 栋重要建筑物进行结构易损性分析, 以破坏等级为结果指标给出每栋抽样建筑的震害预测结果, 按照建筑物结构类型、建设年代和建设用途形成各自震害矩阵并给出所有重要建筑物的总震害矩阵, 对各类建筑物的抗震能力进行综合评价。

**关键词:** 空间有限元; 易损性分析; 震害矩阵; 抗震能力

**中图分类号:** P315.9

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2017)04-0638-08

## 0 引言

历次地震用生命的代价为我们留下了宝贵的震害经验, 2008 年汶川 8 级大地震全面检验了各类建筑物的抗震能力 (高惠瑛等, 2010), 北川中学、映秀中心小学、北川多所党政机关办公楼倒塌, 伤亡惨重。总结这些经验教训, 可以为我们的调查研究建筑物工程结构易损性提供示例从而更合理地进行震害预测。

本文运用 PKPM SATWE 结构空间有限元分析软件建模算法 (吴桂芬, 2012; 段姣姣, 2012) 对廊坊市 101 栋重要建筑物进行结构易损性分析 (尹之潜, 1991), 给出重要建筑物的震害矩阵 (尹之潜, 1994; 常业军, 马克俭, 2000; 常业军, 吴明友, 2001), 找出其薄弱环节, 有针对性地采取预防措施。

## 1 易损性分析方法

### 1.1 PKPM SATWE 结构空间有限元分析软件建模算法

重要建筑物的分析工作主要为核查建筑物的抗震构造措施和采用有限元分析程序对建筑物进行建模分析。对于砖混结构和钢筋混凝土框架结构采用 PKPM 结构抗震鉴定模块进行结构的抗震验算, 对

于钢筋混凝土剪力墙结构和框架-剪力墙结构采用 PKPM SATWE 模块进行验算。具体步骤如下:

(1) 根据收集到的廊坊市 101 栋重要建筑物的竣工图纸资料, 读取结构的实际详细设计信息, 包括建筑物结构构件的布置情况、截面尺寸、材料强度、承重构件配筋情况、荷载分布情况等, 其中混凝土强度采用图纸注明的设计强度作为实际强度, 对于进行了现场测试的建筑物采用混凝土的实测强度作为材料的实际强度, 框架结构中混凝土柱内的钢筋配置采用图纸注明的配筋方式, 然后按照《建筑抗震鉴定标准》(GB50023—2009) 进行验算鉴定。

(2) 对于砖混结构建筑和钢筋混凝土框架建筑, 首先进行一级鉴定, 即结构整体性态和抗震构造措施核查, 主要内容包括: 建筑总高度和层数、层高, 建筑结构体系平立面的规则性, 体系抗震薄弱环节, 承重构件截面尺寸, 构件连接和支撑情况, 非结构构件布置情况, 材料强度, 地基类型和基础形式等, 根据核查的情况确定结构的体系影响系数和局部影响系数。然后进行二级鉴定: 采用 PKPM 有限元软件按照结构的实际设计方案建立三维计算模型。该结构模型的综合抗震能力指数, 代表了整个建筑结构综合考虑其构造和承载力等因素所具有的抵抗地震作用的能力; 相应于破坏指数, 代表建筑物遇到地震时抵御地震灾害的能力 (张风华, 2002), 综合考虑两级鉴

\* 收稿日期: 2016-01-22.

基金项目: 河北省地震局科技星火计划面上项目 (DZ20150420026) 资助.

通讯作者: 张合 (1979-), 男, 河北省石家庄市人, 高级工程师, 主要从事工程地震、地震应急方面研究.  
E-mail: 13673161551@163.com.

定的结果对结构进行抗震能力评估（白雪霜，2012）。对于钢筋混凝土剪力墙结构和框架－剪力墙结构，直接根据建筑结构施工图提取结构构件设计信息，采用 PKPM 有限元软件建立三维计算模型，然后采用 SATWE 结构分析软件计算结构的承载力和变形情况，根据计算结果分析结构的易损性。

（3）计算结果分析。按结构分析计算得到的楼层综合抗震能力指数确定结构可能发生的震害等级。

1.2 以廊坊市人民医院门诊楼框架结构为算例

廊坊市人民医院门诊楼建于 1998 年，地上 7 层，局部 8 层。第一层高为 6.3 m，其余层高 3.3 m。室内外高差为 0.6 m。结构型式为框架结构，现浇楼板，楼板厚为 120 mm。地区抗震设防烈度为Ⅷ度（0.20 g），设计地震分组为第一组，框架抗震等级为二级，场地类别为Ⅲ类。本结构抗震设防类别为乙类。基本风压为 0.40 KN/m<sup>2</sup>。采用 C30 混凝土。

采用 PKPM 软件建立该工程结构计算的有限元模型，如图 1 所示。根据《建筑结构可靠度设计统一标准》（GB50068—2001），以综合抗震能力指数为判断指标，结合Ⅶ～Ⅸ度下的震害等级与综合抗震能力指数的关系式（建筑抗震设计规范，GB50011—2010）。楼层综合抗震能力指数计算式：

$$\beta = \psi_1 \psi_2 \zeta_y \tag{1}$$

$$\zeta_y = V_y / V_e \tag{2}$$

$$V_y = \sum V_{cy} + 0.7 \sum V_{my} + 0.7 \sum V_{wy} \tag{3}$$

式中： $\beta$  为平面结构楼层综合抗震能力指数； $\psi_1$  为体系影响系数，取值 1.25； $\psi_2$  为局部影响系数，取值 0.85； $\zeta_y$  为楼层屈服强度系数； $V_y$  为楼层的弹性地震剪力； $V_e$  为楼层现有受剪承载力； $\sum V_{cy}$  为框架柱层间现有受剪承载力之和； $\sum V_{my}$  为砖填充墙框架层间现有受剪承载力之和； $\sum V_{wy}$  为抗震墙层间现有受剪承载力之和。

楼层的弹性地震剪力，采用底部剪力法计算。地震作用按《建筑抗震鉴定标准》（GB50023—2009）3.0.5 条的规定计算，地震作用分项系数取 1.0。

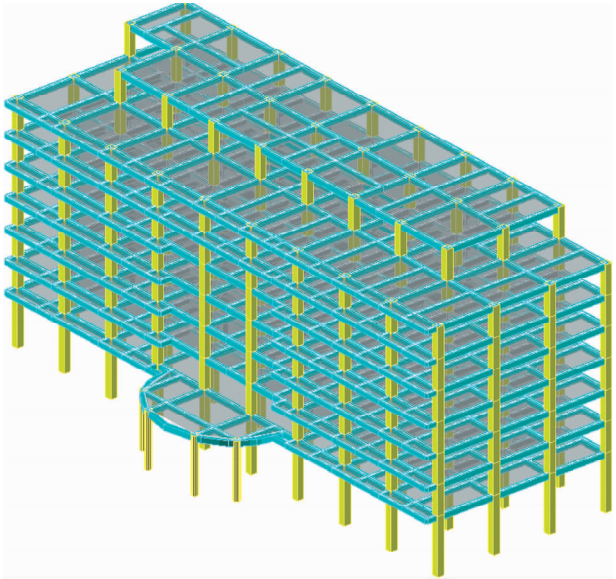


图 1 廊坊市人民医院门诊楼计算模型  
Fig. 1 Langfang City People’s Hospital Clinic Building calculation model

钢筋混凝土框架结构的楼层综合抗震能力指数与震害破坏等级之间的关系如 1 所示。

在Ⅶ度、Ⅷ度和Ⅸ度地震作用下，该建筑的综合抗震能力指数和破坏状态如表 2 所示。

表 1 框架结构综合抗震能力指数与震害等级的关系  
Tab. 1 Frame Structure Relationship comprehensive seismic capacity index and damage level

基本完好	轻微破坏	中等破坏	严重破坏	毁坏
$\beta \geq 0.8$	$0.5 \leq \beta < 0.8$	$0.35 \leq \beta < 0.5$	$0.2 \leq \beta < 0.35$	$\beta < 0.2$

表 2 廊坊市人民医院门诊楼易损性分析结果

Tab. 2 Langfang City People’s Hospital Clinic Building vulnerability analysis results

烈度	水平地震作用影响系数最大值/g	综合抗震能力指数	震害结果	结构薄弱层位置
Ⅶ度	0.23	1.06	基本完好	—
Ⅷ度	0.45	0.53	轻微破坏	二层
Ⅸ度	0.90	0.35	中等破坏	—

2 重要建筑物易损性分析结果

2.1 重要建筑物调查情况

在建筑物抗震防灾的研究方面，根据建筑物的重要性将现有建筑物分为重要建筑和一般建筑物进行震害预测。重要建筑物包括党政机关、抗

震救灾指挥部等部门的主要办公楼；公安、消防、医疗救护、学校、影剧院等单位的主要建筑物；生命线工程系统的重要建筑物（地震灾害预测及其信息管理系统技术规范，GB/T 19428—2013）。

在收集资料的基础上，对廊坊市重要建筑物进行了实地调查，并填写每栋建筑的完整信息，包括结构形式、建造年代、层数、面积、用途、薄弱环节以及现状评价等，共调查重要建筑物 101 栋，总建筑面积为 248 603 m<sup>2</sup>。从表 3 中可以看出钢筋混凝土框架结构是目前廊坊市重要建筑物中使用最多一种结构形式，占调查总面积的 49.81%、调查总栋数的 46.53%，该框架结构采用现浇梁、板、柱，空间布置灵活，抗震性能较好；多层砖混结构建筑，占总调查栋数的 43.56%，面积比为 31.26%，仅次于框架结构比例；框架-剪力墙结构既有框架结构空间布置灵活的优点，又具有很好的抗震能力，2000 年以后的建筑广泛地采用该种结构形式；底层框架结构是在底下几层使用框架结构，而框架上面各层使用砖混砌体的结构形式，其抗震能力较弱，具有“头重脚轻、上刚下柔”的特点；20 世纪 80、90 年代修建的建筑以学校和医院居多，多为砖混结构，预制楼板，施工质量一般，抗震能力相对较差。2000 年以后建的多层住宅楼也有一些是砖混结构，楼板为现浇钢筋混凝土的，施工质量也较以前有所提高，抗震能力有所提高。

表 3 重要建筑物分类表

Tab. 3 The important buildings Classification

分类	类型	栋数	栋数比(%)	面积/m <sup>2</sup>	面积比(%)
建筑结构	框架	47	46.54	123 825	49.81
	底框	4	3.96	5 600	2.25
	框剪	6	5.94	41 477	16.68
	砖混	44	43.56	77 701	31.26
建设年代	20 世纪 80 年代	26	25.74	47 769	19.21
	20 世纪 90 年代	37	36.63	73 791	29.68
	21 世纪初	38	37.63	127 043	51.11
建筑用途	教学	48	47.52	115 063	46.28
	医院	11	10.90	50 065	20.14
	热电	10	9.90	14 829	5.96
	厂房	4	3.96	8 000	3.22
	办公	20	19.80	42 076	16.92
	通讯	4	3.96	7 890	3.17
	住宅	4	3.96	10 680	4.31

2.2 重要建筑物易损性分析结果

采用 PKPM 有限元建模分析算法对 101 栋重要建筑物进行抗震能力分析。表 4 给出了廊坊市重要建筑物破坏状态的震害预测结果。为了验证该方法的可行性，我们随意抽取 25 栋重要建筑物，其中砖混结构有 12 栋，框架结构 10 栋，框架-剪力墙结构 3 栋。采用震害因子法（仝永德，2008；高杰等，2007；孟紫阳等，2013）计算得到震害指数矩阵，根据震害指数矩阵得到了

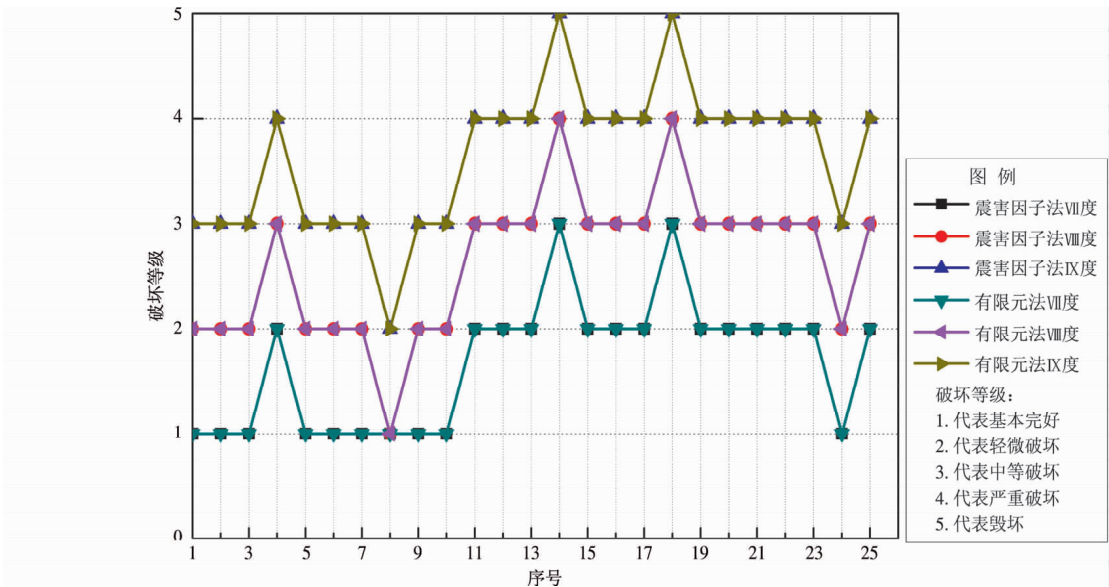


图 2 PKPM 有限元建模分析算法和震害因子法结果对比图

Fig. 2 PKPM finite element modeling and analysis of earthquake damage factor calculation method results comparison chart

这 25 栋建筑物的震害预测结果，与 PKPM 有限元建模分析计算法结果进行对比（图 2），发现两种方法的计算结果相符。表 5 ~ 7 给出了重要建筑物按结构类型、建设年代和建设用途分类在不同烈度下发生各种破坏等级的面积和栋数震害矩阵。廊坊市抗震设防烈度为Ⅷ度（高孟潭等，2015），当遭遇Ⅷ度地震影响时，有 8% 的砖混

结构房屋遭受严重破坏（表 5）；20 世纪 80 年代的建筑物有 13% 房屋遭受严重破坏（表 6）；有 32.43% 的住宅、6.25% 的厂房、3.49% 的医院和 0.43% 的教学房屋面积发生严重破坏（表 7）。当遭遇Ⅸ度地震时，这些遭遇Ⅷ度地震影响并发生严重破坏的重要建筑物会发生毁坏，因此这些类型房屋应该采取必要的抗震加固措施。

表 4 廊坊市 101 栋重要建筑物震害预测结果  
Tab. 4 101 important buildings damage prediction in Langfang City

序号	结构类型	层数	建造时间	用途	Ⅶ度	Ⅷ度	Ⅸ度	序号	结构类型	层数	建造时间	用途	Ⅶ度	Ⅷ度	Ⅸ度
1	框架	6	2005	教学	好	轻	中	32	砖混	1	1992	厂房	轻	中	严
2	框架	2	2006	医院	轻	中	严	33	砖混	6	1986	教学	轻	中	严
3	框架	2	2007	教学	轻	中	严	34	框架	4	2003	教学	好	轻	中
4	框架	3	1986	热电	轻	中	严	35	砖混	4	1998	办公	轻	中	严
5	框架	1	2009	热电	好	好	轻	36	框架	10	2000	办公	好	轻	中
6	底框	3	1997	教学	好	轻	中	37	砖混	3	1999	办公	轻	中	严
7	框架	4	2007	教学	好	轻	中	38	砖混	3	1988	教学	轻	中	严
8	框架	3	2001	教学	好	轻	中	39	砖混	4	1990	通讯	轻	中	严
9	砖混	3	1989	教学	轻	中	严	40	砖混	1	1999	热电	轻	中	严
10	砖混	1	1989	厂房	中	严	毁	41	砖混	1	1999	热电	轻	中	严
11	框架	3	1999	办公	轻	中	严	42	砖混	1	1999	厂房	轻	中	严
12	框架	1	2001	厂房	轻	中	严	43	砖混	6	1995	住宅	好	轻	中
13	框剪	6	2005	教学	好	轻	中	44	砖混	5	1996	住宅	好	轻	中
14	框架	3	1997	医院	好	轻	中	45	底框	5	1992	办公	好	轻	中
15	砖混	4	1995	教学	好	轻	中	46	框架	3	1991	办公	好	轻	中
16	砖混	5	2001	办公	轻	中	严	47	砖混	2	1991	办公	轻	中	严
17	砖混	4	1991	教学	轻	中	严	48	砖混	2	1991	教学	轻	中	严
18	砖混	5	1995	教学	轻	中	严	49	框架	5	2007	教学	好	轻	中
19	框架	7	2006	教学	好	轻	中	50	框架	5	2006	教学	好	轻	中
20	底框	5	1997	教学	轻	中	严	51	框架	6	2002	办公	轻	中	严
21	框架	4	2007	教学	好	轻	中	52	框架	6	2002	办公	好	轻	中
22	砖混	1	1988	教学	中	严	毁	53	框剪	11	2001	办公	好	轻	中
23	砖混	3	1989	教学	轻	中	严	54	砖混	4	1991	教学	轻	中	严
24	砖混	2	1989	教学	轻	中	严	55	砖混	3	1989	教学	轻	中	严
25	框架	5	1988	教学	轻	中	严	56	砖混	3	1990	教学	轻	中	严
26	框架	5	2004	教学	好	轻	中	57	砖混	5	1999	教学	轻	中	严
27	框架	6	2003	教学	好	轻	中	58	框架	4	2007	热电	好	轻	中
28	砖混	3	1989	教学	轻	中	严	59	框架	3	2005	教学	好	轻	中
29	框架	2	2006	教学	轻	中	严	60	框架	12	2004	办公	好	轻	中
30	框架	2	1999	办公	轻	中	严	61	框剪	8	2002	教学	轻	中	严
31	砖混	5	1990	教学	好	轻	中	62	砖混	5	1993	教学	轻	中	严

续表 4

序号	结构类型	层数	建造时间	用途	VII度	VIII度	IX度	序号	结构类型	层数	建造时间	用途	VII度	VIII度	IX度
63	框架	1	1997	热电	好	轻	中	83	框架	4	2003	住宅	好	轻	中
64	砖混	4	1987	教学	轻	中	严	84	框架	2	2006	办公	好	好	轻
65	砖混	4	1993	教学	轻	中	严	85	框架	5	2002	教学	好	轻	中
66	框架	7	1992	教学	轻	中	严	86	框架	4	2000	热电	好	轻	中
67	框架	2	1998	教学	轻	中	严	87	砖混	2	1987	教学	轻	中	严
68	框架	2	1987	办公	轻	中	严	88	砖混	3	1992	教学	轻	中	严
69	框架	4	1994	办公	好	轻	中	89	砖混	5	1988	医院	轻	中	严
70	框架	3	1994	教学	轻	中	严	90	砖混	4	1989	医院	中	严	毁
71	框架	5	1989	教学	轻	中	严	91	砖混	2	1987	医院	轻	中	严
72	框架	6	1994	办公	轻	中	严	92	砖混	3	1988	教学	轻	中	严
73	砖混	2	2002	教学	轻	中	严	93	砖混	4	1991	医院	轻	中	严
74	框架	6	2006	办公	好	轻	中	94	砖混	5	1987	住宅	中	严	毁
75	底框	1	2002	热电	好	轻	中	95	砖混	4	1990	通讯	轻	中	严
76	框架	2	1988	教学	轻	中	严	96	砖混	4	1988	医院	轻	中	严
77	框架	6	2000	办公	好	轻	中	97	砖混	5	1989	医院	轻	中	严
78	框架	6	2005	教学	好	轻	中	98	砖混	1	1988	热电	轻	中	严
79	框架	3	2008	通讯	好	轻	中	99	框剪	4	2008	热电	轻	中	严
80	框架	4	1987	办公	轻	中	严	100	框剪	15	2006	医院	好	轻	中
81	框架	4	2001	医院	好	轻	中	101	框剪	6	1987	通讯	轻	中	严
82	框架	6	1997	医院	好	轻	中								

注：表中好代表基本完好，轻代表轻微破坏，中代表中等破坏，严代表严重破坏，毁代表毁坏

表 5 廊坊市重要建筑物按结构类型分类在不同烈度下的震害矩阵

Tab. 5 The important buildings by type of structure under different intensity of earthquake damage matrix in Langfang

结构类型	建筑面积/m <sup>2</sup>	地震烈度	按面积比 (%)				
			基本完好	轻微破坏	中等破坏	严重破坏	毁坏
底框	5 600	VII	82. 14	17. 86	0	0	0
		VIII	0	82. 14	17. 86	0	0
		IX	0	0	82. 14	17. 86	0
框架	123 825	VII	76. 57	23. 43	0	0	0
		VIII	1. 15	75. 42	23. 43	0	0
		IX	0	1. 15	75. 42	23. 43	0
框剪	41 477	VII	68. 12	31. 88	0	0	0
		VIII	0	68. 12	31. 88	0	0
		IX	0	0	68. 12	31. 88	0
砖混	77 701	VII	23. 76	68. 24	8	0	0
		VIII	0	23. 76	68. 24	8	0
		IX	0	0	23. 76	68. 24	8

表 6 廊坊市重要建筑物按建筑年代分类在不同烈度下的震害矩阵

Tab. 6 The important buildings by construction year under different intensity of earthquake damage matrix in Langfang

建筑年代	建筑面积/m <sup>2</sup>	地震烈度	按面积比 (%)				
			基本完好	轻微破坏	中等破坏	严重破坏	毁坏
80	47 769	VII	0	87	13	0	0
		VIII	0	0	87	13	0
		IX	0	0	0	87	13
90	73 791	VII	50.94	49.06	0	0	0
		VIII	0	50.94	49.06	0	0
		IX	0	0	50.94	49.06	0
00	127 043	VII	85.44	14.56	0	0	0
		VIII	1.12	84.31	14.56	0	0
		IX	0	1.12	84.31	14.56	0

表 7 廊坊市重要建筑物按建设用途分类在不同烈度下的震害矩阵

Tab. 7 The important buildings are under construction in the use of different intensity earthquake damage matrix in Langfang

建设用途	建筑面积/m <sup>2</sup>	地震烈度	按面积比 (%)				
			基本完好	轻微破坏	中等破坏	严重破坏	毁坏
办公	42 076	VII	52.92	47.08	0	0	0
		VIII	2.21	50.72	47.08	0	0
		IX	0	2.21	50.72	47.08	0
厂房	8 000	VII	0	93.75	6.25	0	0
		VIII	0	0	93.75	6.25	0
		IX	0	0	0	93.75	6.25
教学	115 063	VII	64.42	35.15	0.43	0	0
		VIII	0	64.42	35.15	0.43	0
		IX	0	0	64.42	35.15	0.43
通讯	7 890	VII	20.24	79.76	0	0	0
		VIII	0	20.24	79.76	0	0
		IX	0	0	20.24	79.76	0
医院	50 065	VII	66.76	29.75	3.49	0	0
		VIII	0	66.76	29.75	3.49	0
		IX	0	0	66.76	29.75	3.49
热电	14 829	VII	50.64	49.36	0	0	0
		VIII	3.37	47.27	49.36	0	0
		IX	0	3.37	47.27	49.36	0
住宅	10 680	VII	67.57	0	32.43	0	0
		VIII	0	67.57	0	32.43	0
		IX	0	0	67.57	0	32.43



根据廊坊市重要建筑物不同类型易损性矩阵和所有重要建筑物易损性矩阵（表 8），通过计算得到了不同类型重要建筑物平均的抗震能力指数分布图和总平均震害指数图（图 3），从图 3a、b 中可以看到按照建设年代分：20 世纪 80 年代所建建筑物抗震能力最弱，21 世纪初所建建筑物抗震能力最强；按照结构类型分：砖混结构建筑物抗震能力最弱，框剪结构建筑物抗震能力最强；按照用途分：厂房抗震能力最差，住宅和通讯用的建筑物其次，医院和学校抗震能力较强。

图 3c 给出了廊坊市所有重要建筑物的总体平均震害指数（地震灾害预测及其信息管理技术系统规范，GB/T 19428—2013），震害指数与房屋建筑破坏比是对应抽样调查点或烈度区判定烈度的量化指标，也是定量研究某烈度区或调查点房屋建筑震害的重要依据（卢永坤等，2014）。结合表 5，当建筑物遭受Ⅶ度（相当于 50 年超越概

率 63%，小震）地震影响时震害指数为 0.12，56.58% 的房屋面积为基本完好，计 140 660 m<sup>2</sup>；40.92% 的房屋面积受轻微破坏，计 101 728 m<sup>2</sup>；2.50% 的房屋面积为中等破坏，计 6 215 m<sup>2</sup>。当建筑物遭受Ⅷ度（相当于 50 年超越概率 10%，中震）地震影响时震害指数为 0.29，0.57% 房屋面积为基本完好，计 1 417 m<sup>2</sup>；56.01% 的房屋面积受轻微破坏，计 139 243 m<sup>2</sup>；40.92% 的房屋面积为中等破坏，计 101 728 m<sup>2</sup>；2.50% 的房屋面积为严重破坏，计 6 215 m<sup>2</sup>。当建筑物遭受Ⅸ度（相当于 50 年超越概率 2%，大震）地震影响时震害指数为 0.53，0.57% 房屋面积为轻微破坏，计 1 417 m<sup>2</sup>；56.01% 的房屋面积为中等破坏，计 139 243 m<sup>2</sup>；40.92% 的房屋面积为严重破坏，计 101 728 m<sup>2</sup>；2.50% 的房屋面积为毁坏，计 6 215 m<sup>2</sup>。其破坏状态基本上满足“小震不坏，中震可修，大震不倒”的抗震设防标准。

表 8 廊坊市所有重要建筑物震害预测易损性矩阵

Tab. 8 All the important buildings earthquake damage prediction vulnerability matrix in Langfang

烈度 I	总建筑面积/ m <sup>2</sup>	总栋数	按面积比/栋数比（%）					震害指数
			基本完好	轻微破坏	中等破坏	严重破坏	毁坏	
Ⅶ	248 603	101	56.58/39.60	40.92/56.44	2.50/3.96	0/0	0/0	0.12
Ⅷ			0.57/1.98	56.01/37.62	40.92/56.44	2.50/3.96	0/0	0.29
Ⅸ			0	0.57/1.98	56.01/37.62	40.92/56.44	2.50/3.96	0.53

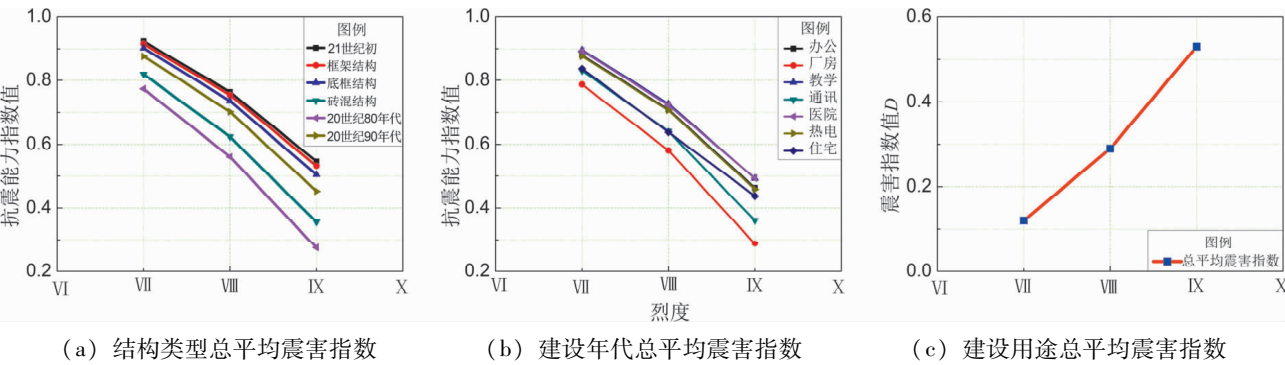


图 3 不同类型重要建筑物的平均抗震能力指数和总平均震害指数分布图

Fig. 3 The average index of the different types of seismic capacity and the overall average damage index distribution

3 结论与建议

采用 PKPM SATWE 结构空间有限元分析软件建模计算法对廊坊市 101 栋重要建筑物进行易损性

分析，结果表明廊坊市重要建筑物基本符合“三水准”设计要求，有一定的抗震能力。特别是 2000 年以来新建的以钢筋混凝土框架结构为主的建筑，抗震性能较好。但是 2000 年以前所建砖混结构房屋大多为预制楼板，抗震能力较差，相当

一部分医院、学校等重要建筑也采用抗震能力较弱的砖混结构,抗震能力明显不足,安全隐患较多。

建议对砖混结构房屋进行加固处理,特别是医院、学校等重要建筑要经过专门的抗震鉴定进行改造、加固或重建,在此过程中优先采用钢筋混凝土结构体系,设计中注意平、立面规则,尽量避免出现室外楼梯、不同建筑间的连廊、笨重砖砌护栏等不利于抗震的设计。

### 参考文献:

- 白雪霜. 2012. 现有钢筋混凝土框架结构抗震鉴定方法试验研究[D]. 北京:中国建筑科学研究院.
- 常业军,马克俭. 2000. 多层钢筋混凝土框架房屋的震害预测方法[J]. 安徽建筑工业学院学报(自然科学版),8(1):35-38.
- 常业军,吴明友. 2001. 建筑物结构易损性分析及抗震性能比较[J]. 山西地震,44(1):23-25,29.
- 段姣姣. 2012. 基于 PKPM 软件的长沙市节能建筑屋顶设计与分析[D]. 长沙:湖南大学.
- 高惠瑛,别冬梅,马建军,等. 2010. 汶川地震区砖砌体住宅房屋易损性研究[J]. 世界地震工程,26(4):73-77.
- 高杰,冯启民,张海东,等. 2007. 城市群体建筑物震害模拟方法研究[J]. 震灾防御技术,2(2):193-200.
- 高孟潭,李小军,徐锡伟,等. 2015. 《中国地震动参数区划图》宣贯教材[M]. 北京:中国质检出版社、中国标准出版社.
- 卢永坤,张建国,宋立军,等. 2014. 2014 年云南鲁甸 6.5 级地震烈度分布与房屋震害特征[J]. 地震研究,37(4):549-557.
- 孟紫阳,赵慧乾,郭明珠,等. 2013. 保定市群体建筑震害预测研究[J]. 地震研究,36(2):202-206.
- 全永德. 2008. 城市震害预测信息管理系统研究[D]. 青岛:中国海洋大学.
- 吴桂芬. 2012. PKPM 有限元软件在不规则框架结构力学计算中的应用[J]. 华电技术,34(7):23-25.
- 尹之潜. 1991. 地震灾害损失预测研究[J]. 地震工程与工程振动,12(4):87-96.
- 尹之潜. 1994. 地震灾害损失预测的动态分析模型[J]. 自然灾害学报,4(2):72-80.
- 张风华. 2002. 城市防震减灾能力评估研究[D]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所.
- GB/T 19428—2013,地震灾害预测及其信息管理系统技术规范[S].
- GB50011—2010,建筑抗震设计规范[S].
- GB50023—2009,建筑抗震鉴定标准[S].
- GB50068—2001,建筑结构可靠度设计统一标准[S].

## The Vulnerability Analysis of Important Buildings in Langfang City

LYU Guojun, ZHANG He, SUN Lina, LIU Zhihui

(Hebei Earthquake Agency, Shijiazhuang 050021, Hebei, China)

### Abstract

In order to minimize the loss of life and property in the future earthquake in Langfang City, the structural vulnerability analysis of 101 important buildings in Langfang City is carried out by using the PKPM SATWE structural space finite element analysis software modeling and calculation method. The seismic damage prediction results of each building are given by the failure level as the result index. According to the type of building structure, the construction time and the use of the construction of each seismic damage matrix, we give the total damage matrix of all the important buildings. Comprehensive evaluation of the seismic capacity of all kinds of buildings, we could provide the basis and reference for the preparation of the city's earthquake disaster prevention planning.

**Keywords:** space finite element; vulnerability analysis; seismic damage matrix; seismic capacity