

顾砾怡, 陆吉赞, 余刚群, 等. 嘉兴地区典型砌体结构地震易损性分析[J]. 华南地震, 2025, 45(2): 108-116 [GU Luoyi, LU Jiyun, YU Gangqun, et al. Seismic Vulnerability Analysis of Typical Masonry Structures in Jiaxing City [J]. South China journal of seismology, 2025, 45(2): 108-116]

嘉兴地区典型砌体结构地震易损性分析

顾砾怡, 陆吉赞, 余刚群, 朱奕非, 陈涛

(浙江省地震局, 杭州 310013)

摘要: 结构易损性分析是地震灾害风险评估的重要环节之一, 以嘉兴市区占比较大的砌体结构为例, 选择适合的强度指标及损伤指标, 采用增量动力分析方法, 对多个地震动进行调幅, 得到各个地震动强度作用下相应的结构响应结构并分析给出结构易损性曲线, 最终分析得到嘉兴地区典型砌体结构易损性曲线。易损性分析结果显示嘉兴地区典型砌体结构可基本满足当地VII度抗震设防要求, 在大震作用下, 结构发生倒塌的超越概率小于10%, 表明结构具有良好的抗倒塌能力。研究结果可为浙江地区建筑的精细化地震灾害风险评估和风险防范提供理论依据。

关键词: 地震易损性; 砌体结构; 层间位移角

中图分类号: TU352.11; TU364

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2025)02-0108-09

DOI: 10.13512/j.hndz.2025.02.13

Seismic Vulnerability Analysis of Typical Masonry Structures in Jiaxing City

GU Luoyi, LU Jiyun, YU Gangqun, ZHU Yifei, CHEN Tao

(Zhejiang Earthquake Agency, Hangzhou 310013, China)

Abstract: Structural vulnerability analysis is one of the important aspects of earthquake disaster risk assessment. This paper took the masonry structure with a large proportion in Jiaxing City as an example, selected the appropriate strength index and damage index, and adopted the incremental dynamic analysis method. The amplitude modulation of multiple ground motions was carried out to obtain the corresponding structural response structures under the action of each ground motion intensity, and the structural vulnerability curves were analyzed. Finally, the vulnerability curves of typical masonry structures in Jiaxing City were analyzed. The results of vulnerability analysis show that the typical masonry structure in Jiaxing City can basically meet the local VII seismic fortification requirements, and the exceedance probability of collapse of the structure is less than 10% under a large earthquake, indicating that the structure has good anti-collapse ability. The research results can provide a theoretical basis for the refined seismic disaster risk assessment and risk prevention of buildings in Zhejiang Province.

Keywords: Seismic vulnerability; Masonry structures; Interstory displacement angle

收稿日期: 2024-08-27

基金项目: 浙江省地震局科研项目(2023zjj07, 2023zjj03)

作者简介: 顾砾怡(1997-), 女, 助理工程师, 主要从事工程地震及风险评估等工作。

E-mail: 592166170@qq.com

0 引言

随着经济高速发展,人口和财富越来越集中,浙江省存在着“小震大灾,中震巨灾”的地震灾害风险。在浙江省地震灾害高风险区域内开展地震灾害风险防治工作亟需落实到单体工程上,因此在风险普查工作基础上进行单体工程地震灾害风险评估,是进一步开展地震灾害风险防治的重要举措。地震易损性分析作为地震灾害风险评估与区划工作的一个重要环节,可定义结构在不确定风险下的易损敏感性,对结构在不同强度地震下的抗震性能给出基于概率的描述^[1]。

20世纪70年代初,地震易损性最初是由外国学者用于评估核电站地震灾害风险,随着地震易损性研究理论的不断发展与成熟,不少国外学者将地震易损性研究成果应用于民用建筑与工业建筑领域。Hwang等^[2-4]先后对常见RC结构及框架结构等,进行了易损性分析工作。英国学者Rossetto等^[5]基于大批RC框架结构震后统计数据提出了RC结构在欧洲地区的易损性经验曲线,其研究成果服务应用于当地建筑抗震设防。

我国也有大量学者根据实际建筑数据进行地震易损性研究工作。杨钦杰等^[6]对广西钦州市主城区重要建筑中的砖混结构建筑进行震害预测分析研究。吕国军等^[7]对河北省廊坊市101栋重要建筑物进行结构易损性分析,根据破坏等级为指标给出分析结果并对各类建筑物的抗震能力进行综合评价。宋立军等^[8]根据普查结果,给出新疆石河子市各类结构的易损性矩阵,最终依据震害预测法得到石河子市的人员伤亡及经济损失结果。张永群等^[9]根据构造柱设置情况将多层砌体结构分为5个抗震措施类别,将层间位移角作为砌体结构不同破坏状态的量化指标,提出基于性能的多层砌体结构地震易损性分析方法,并建立了多层砌体结构的地震易损性曲线。楼思展等^[10]给出了建筑物震害率曲线分析方法,提出地震动随机性和场地条件对建筑物震害的差异影响。

综上所述,地震易损性分析是研究结构抗震性能的重要手段,其分析结果受结构类型、场地特征等多种因素影响。而浙江省在地震易损性分析方面的工作展开较少,《中国地震动参数区划图》(GB18306-2015)已于2016年6月正式发布实施,嘉兴市区的基本地震动峰值加速度由原来0.05 g变为0.10 g,基本烈度提高了一度,在此情

况下选择对嘉兴市既有六度设防的砌体房屋进行抗震能力分析进而提高防范地震灾害风险的能力就显得极为重要。而1978年改革开放以后,砌体结构大量建造,根据嘉兴市测绘数据显示,嘉兴市区主要建筑中砌体结构约占总建筑47%。基于上述研究背景及意义,从现有资料中选取浙江省嘉兴地区三栋砌体结构建筑作为研究对象,利用盈建科软件(YJK)进行地震易损性分析,最终给出易损性曲线并初步评估该地区典型砌体结构抗震性能。

1 地震易损性分析

增量动力分析(IDA)方法是通过对结构输入地震动并多次调幅进行弹性时程分析,最终得到强度指标(Intensity Measure, I_M)和损伤指标(Damage Measure, D_M)的关系曲线。根据IDA曲线的趋势和离散性,可以间接反映结构逐步破坏的过程,能够反映结构在不同等级地震作用下的抗震需求和抗倒塌能力,可以对结构的抗震性能和整体可靠性做较为真实准确的评价^[11-14]。

1.1 地震易损性分析基本步骤

(1)根据收集到的嘉兴地区典型砌体结构建筑物图纸资料,使用YJK软件建立结构有限元模型。

(2)结合嘉兴地区地震背景和场地特征选取一定数量的地震动记录,确定地震动强度指标 I_M 和结构损伤指标 D_M 。

(3)确定地震动调幅原则,对原始地震动进行调幅,将一组强度递增的地震动记录依次作用到结构中,分析计算得到结构在不同地震波下的响应结果。

(4)根据IDA分析结果,结合定义的结构性能水平限值,得到结构在不同强度地震作用下的响应超过结构能力参数的条件概率,最终给出结构地震易损性曲线。

1.2 地震动的选取及调幅

根据《中国地震动参数区划图》(GB18306-2015),选取的建筑所在区域位于0.10 g范围内,抗震设防烈度为VII度。而在进行地震易损性分析时应考虑地震动不确定性,因此需选取一定数量的地震动记录进行分析。文献[16]表明10条左右地震动记录可体现地震动不确定性的影响,并且足以判断结构的破坏情况。

为提高分析结果准确性,在选取地震动时需参考场地勘察报告等资料^[17],结合建筑所在场地条件和《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010)相关规定,从美国太平洋地震工程研究中心(Pacific

Earthquake Engineering Research Center, PEER)的数据库中选取接近建筑场地特征及符合建筑特征周期的9条地震记录,选用的地震波参数详见表1,其对应阻尼比5%的反应谱曲线如图1所示。

表1 选用的地震波参数表
Table 1 Selected seismic wave parameters

地震波名称	特征周期 T_g/s	PGA(主方向)/($cm \cdot s^{-2}$)	记录时长/s	步长/s
Coalinga-01_NO_364	0.44	76.27	40	0.01
BorahPeak,ID-01_NO439	0.45	39.66	39.7	0.01
Chalfant Valley-02_NO_551	0.46	59.66	39.98	0.005
BigBear-01_NO_907	0.43	57.39	59.01	0.01
Northbridge-01_NO_955	0.46	107.89	34.99	0.01
Manjil,Iran_NO_1636	0.45	130.74	60.43	0.01
Chi-Chi,Taiwan-05_NO_2960	0.45	48.44	69.99	0.005
ArtWave-RH1TG045(人工波)	0.45	100	30.02	0.02
ArtWave-RH3TG045(人工波)	0.45	100	30.02	0.02

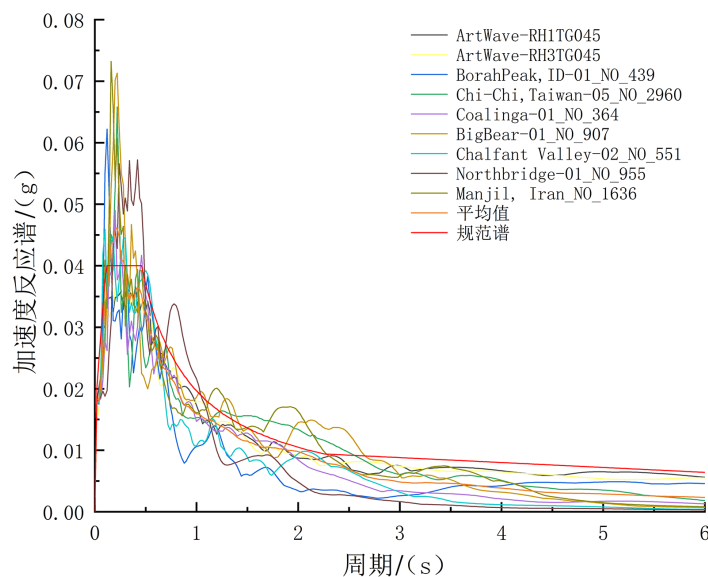


图1 选取的地震动反应谱

Fig.1 Selected ground motion response spectrum

由于地震动强度分布较广,PGA较小时结构一般处于弹性状态,结构构件的损伤随着PGA增大而增大。根据 Vamvatsikos 的研究,使用 Hunt&Fill法对所选的地震动进行调幅,以此来得到在不同地震动强度作用下的结构反应。因此,在本次研究中对选取的地震波按照7度(0.10 g)对应的小震(多遇地震)、中震(设防地震)、大震(罕遇地震)峰值加速度进行调幅^[18],且地震动采用双向输入,输入地震波主方向(X向)与次方向(Y向)的有效峰值比例为1:0.85。

1.3 强度指标和损伤指标的确定

地震易损性分析需根据分析对象合理选择强度指标(I_M)和损伤指标(D_M),才能更好地体现结构体系在不同地震动强度作用下的结构反应,才能更准确地反映结构的抗震性能。在本文研究砌体结构地震易损性进行增量动力分析过程中,选择地面峰值加速度(PGA)作为地震强度指标,选择最大层间位移角 θ_{max} 作为砌体结构的损伤指标(D_M)。

1.4 性能水平和破坏等级的确定

本文依据《建(构)筑物地震破坏等级划分》(GB/T24335-2009)^[19],将结构破坏等级划分为五类,分别是基本完好、轻微破坏、中等破坏、严重破坏、倒塌。在结构抗震性能评估中,最大层间位移角用

于定义结构破坏等级的应用广泛,而各破坏等级对应的层间位移角限值则是在综合多项研究成果基础上给出。参考国内外学者将层间位移角作为损伤指标的研究成果^[15],确定破坏等级与各性能水平下的层间位移角限值对应关系,如表2所示。

表2 破坏等级与各性能水平限值对应关系

Table 2 The corresponding relationship between damage levels and the limits of each performance level

破坏等级	性能水平 LS_i	损伤指标 D_i (层间位移角 θ_{\max})
基本完好	LS_1	1/1200
轻微破坏	LS_2	1/500
中等破坏	LS_3	1/250
严重破坏	LS_4	1/160
倒塌	-	-

1.5 地震易损性曲线绘制

地震易损性即在给定的地震动强度作用下结构的地震需求超越其抗震能力的概率,即结构达到或超过某一破坏状态的条件概率^[20],可用下式表示。

$$P_f = P(LS_i | I_M = x) = P(D_M \geq D_i | I_M = x) \quad (1)$$

式(1)中, LS_i 为结构的某一性能水平; I_M 代表强度指标,本文选用PGA; D_M 代表结构损伤指标,本文选用最大层间位移角 θ_{\max} ; D_i 为量化后的结构损伤指标; P_f 为地震易损性函数。

通常采用多条连续曲线来表达结构地震易损性,即结构易损性曲线,可较好地表达出结构在不同地震动强度作用下,达到各个结构性能极限状态的超越概率。多项研究表明,结构在相同地震动强度作用下,结构最大层间位移角服从对数正态分布。根据前文中表2对结构各抗震性能水平的定义,可得到不同地震动强度下结构响应超过性能状态限值的概率^[9],如下式:

$$P_f(\theta > D_i | A) = 1 - \varphi\left(\frac{\mu_{\ln D_i} - \mu_{\ln \theta | A}}{\sqrt{\sigma_{\ln D_i}^2 + \sigma_{\ln \theta | A}^2}}\right) \quad (2)$$

式(1)中, D_i 表示对应结构性能水平的性能指标限值,由表2确定; φ 为正态标准分布函数; $\mu_{\ln \theta | A}$ 和 $\sigma_{\ln \theta | A}^2$ 分别为遭遇地震峰值加速度 A 时,结构需求对应的对数均值和对数标准值; $\mu_{\ln D_i}$ 表示结构抗震能力的对数平均值; $\sigma_{\ln D_i}$ 表示结构抗震能力的对数标

准差。 $\sqrt{\sigma_{\ln D_i}^2 + \sigma_{\ln \theta | A}^2}$ 本文中取0.5。 $\mu_{\ln \theta | A}$ 及 $\mu_{\ln D_i}$ 根据模型反应结果取值。

2 研究内容

2.1 研究对象概况

通过“第一次全国自然灾害综合风险普查浙江省地震灾害风险评估与区划项目”、“嘉兴市地震灾害风险评估项目”等多个房屋摸排调查项目,收集到部分浙江省嘉兴地区建筑物图纸资料,本文选取三栋砌体结构建筑进行建模分析,建筑物基础信息详见表3。

2.2 有限元模型建立

以其中一栋建筑物为例(表3建筑物B),该建筑物共7层,其中第1层为自行车库,第2~7层为住宅,其建造年代为00年代,设防烈度为6度,地震加速度0.05g,分组为第一组,场地类别Ⅲ类。采用盈建科软件(YJK),使用建筑物图纸资料绘制各层平面轴网图,然后结合建筑物建造年代,依据相关规范根据图纸资料布置包括梁、柱、墙、墙洞等构件,并输入荷载,最后进行计算分析。建筑标准层平面布置图见图2,结构计算模型见图3。

表3 建模对象基础信息表

Table 3 Basic information of modeling objects

类别/房屋编号	A	B	C
建造年代	90年代	00年代	10年代
设防烈度		6度设防	
平面尺寸	24.9 m*12.0 m	33.2 m*10.1 m	19.9 m*12.2 m
总高	19.9 m	19.8 m	19.7 m
层数		7	
层高	2.84 m	2.83 m	2.81 m
砌体材料	±0.000以上,一层为MU10多孔砖,M7.5砂浆,二、三、七层为MU7.5砖,M7.5混合砂浆,四、五、六层为MU7.5砖,M5.0混合砂浆;±0.000以下为水泥砂浆	±0.000~2.190 m砖砌体采用MU10级机制红砖,M7.5级混合砂浆实砌;2.190 m以上砖砌体采用MU10级多孔砖,M5级混合砂浆实砌;13.390 m以上采用MU10级多孔砖,M7.5级混合砂浆实砌	±0.000以上砌体为粘土多孔砖,M7.5混合砂浆实砌;±0.000以下砌体为MU15混凝土标准砖,M10水泥砂浆实砌;
墙体厚度		内外承重墙体均厚240 mm,隔墙厚120 mm	
砌筑方式		实心砖墙(实砌)	
钢筋		HPB235一级钢,HRB335二级钢	
楼板		现浇钢筋混凝土板	
基础		桩基础	
场地条件		III类场地	
抗震构造		设置构造柱、圈梁	

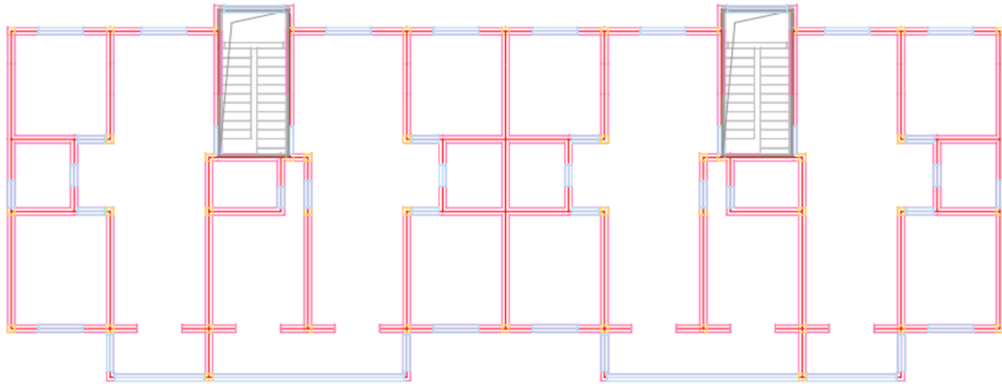


图2 建筑标准层平面布置图

Fig.2 Standard floor plan of the building

3 地震易损性分析

根据前述章节,对嘉兴地区三栋砌体房屋建模并利用增量动力分析法进行易损性分析,可分析得到地震易损性曲线。

3.1 层间位移角响应分析

在示例结构计算模型中输入地震动,得到结构响应结果,该结构模型在7度(0.10 g)小震、中震、大震作用下的层间位移角结果如图4。对应的小震(多遇地震)、中震(设防地震)、大震(罕见地震)峰值加速度分别为 35 cm/s^2 、 100 cm/s^2 、 220 cm/s^2 。

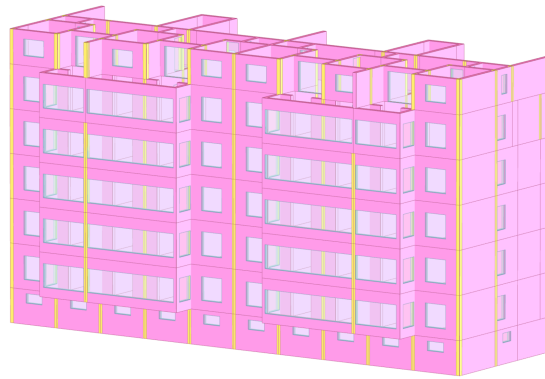


图3 结构计算模型图

Fig.3 Structural calculation model

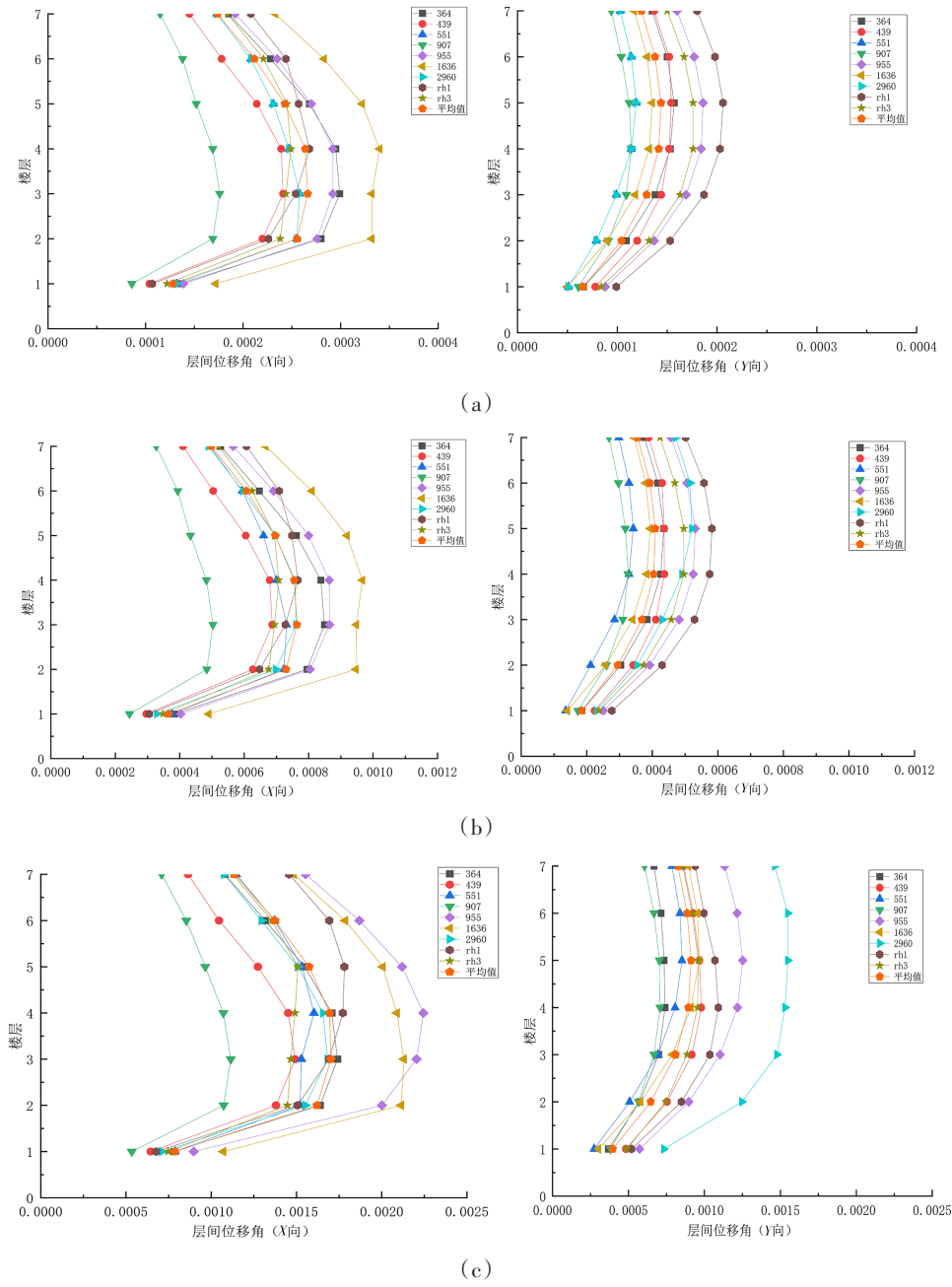


图4 7度(0.10g)小震(a)、中震(b)、大震(c)作用下的层间位移角曲线

Fig.4 Interstory displacement angle curves under small earthquake (a), moderate earthquake (b) and large earthquake (c) at intensity 7 (0.10 g)

由图4可见，示例结构模型在7度(0.10g)小震、中震、大震的地震作用下纵向(X向)及横向(Y向)的各楼层结构响应(由层间位移角体现)。由图中明显可见，在同一地震动作用下，层间位移角的较大值均出现在2层、3层或4层，即建筑物的中间层。且在同一强度地震动作用下，示例结构模型纵向(X向)的结构反应(层间位移角)均大于横向(Y向)。以示例模型为例，在7度(0.10g)小震、中震、大震的地震作用下纵向(X向)的层间位移角最大值分别为1/2941、1/1034、1/445。因此，本文将以建筑物纵向(X向)的最大层间位移角为性能

指标进行易损性分析。

3.2 地震易损性曲线绘制

本文以最大层间位移角 θ_{max} 作为地震需求参数，以峰值加速度PGA作为地震动强度参数，对砌体结构进行增量动力(IDA)分析，假设地震需求符合对数正态分布，将不同的地震动强度与其对应的结构模型最大层间位移角分别取对数，并对三栋建筑模型的反应结果数据进行线性拟合，得到地震需求能力和地震强度对数关系线性拟合如图5所示。

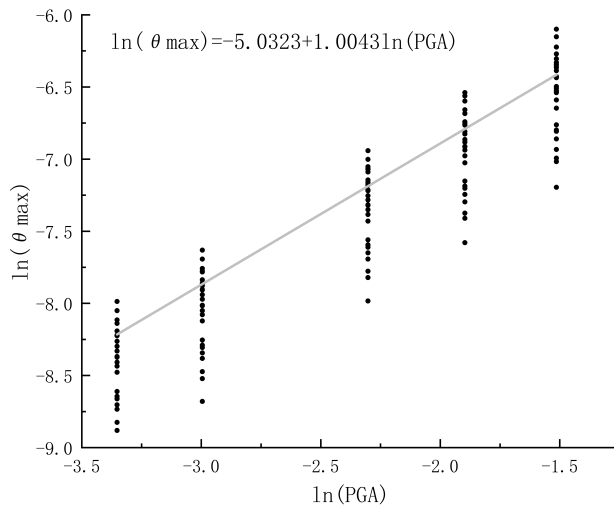


图5 地震需求回归分析

Fig.5 Regression analysis of seismic demand

结合线性拟合结果，根据式2，可绘制出结构地震易损性曲线，如图6所示，图中四条曲线由上

到下分别对应表2中的四个性能水平 LS_1 、 LS_2 、 LS_3 、 LS_4 。

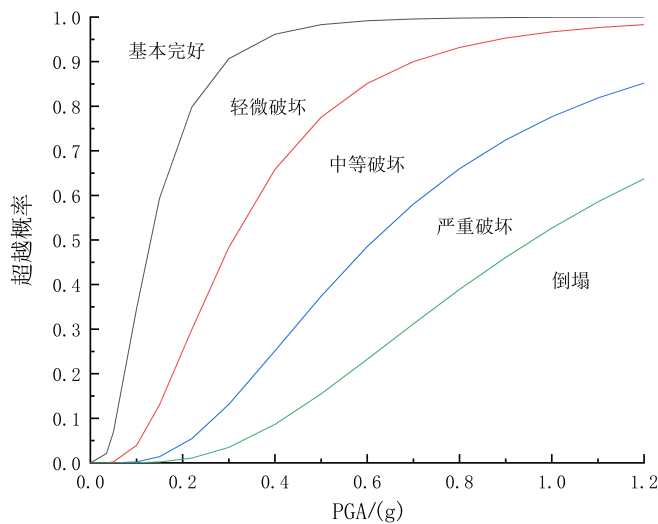


图6 结构地震易损性曲线

Fig.6 Seismic vulnerability curves of structure

从地震易损性曲线可以看出,结构保持基本完好的易损性曲线最为陡峭,即结构在地震作用下超越基本完好性能状态的概率较大,而随着结构从基本完好发展到倒塌状态,易损性曲线逐渐变得平缓,即超越概率越来越小。

从图6可知,小震作用下基本完好的概率最大,为97.91%,基本完好和轻微破坏的概率接近100%,说明结构满足抗震规范“小震不坏”的抗震原则。中震作用下,基本完好、轻微破坏和中等破坏的概率占到99.77%,发生严重破坏的概率仅0.21%,说明结构满足“中震可修”的抗震原则。大震情况下,发生轻微破坏的概率最大,为49.89%,而发生严重破坏和倒塌的概率占比小于10%,可认为达到大震性能要求。从分析结果初步来看,嘉兴地区砌体结构的抗倒塌能力较好。

4 讨论

4.1 模拟方法

虽然数值模拟的理论计算方法不断改进,但通过数值模拟方法得到的易损性曲线并不能全面真实的反映结构真实震害状态。在数值模拟的基础上,若能结合基于震害调查的经验分析法,将能更完善地体现建筑结构在特定地区遭受地震作用的结构反应和推测可能产生的经济损失及人员伤亡情况。

4.2 地震动输入

在地震动输入的选择上,已综合考虑了建筑物所在场地情况、设计地震分组、结构类型等因素,若为了更好地体现结构动力特性,应该将地震易损性输入参数从单一的地震烈度和峰值参数发展到输入与结构动力特性相关的反应谱。

4.3 批量计算局限性

目前通过建立多栋同一结构类型的单体建筑模型对探索该类结构类型易损性具有较好效果,但因易损性分析的步骤繁琐,关键细节较多且计算量较大,应考虑从单体结构的建模分析拓展到对群体结构进行批量分析,以此来探索更高效且准确的地震易损性分析方法。

4.4 建筑物状况的不确定性

每个建筑物因使用用途、环境、后期装修改造等原因存在一定程度上的性能差异,在对其进行易损性分析时,应考虑建筑物自身的不确定性。

4.5 损伤指标的选择

在进行地震结构易损性分析过程中,选择何种指标作为损伤指标,对易损性结果和对结构的抗震性能评估有较大影响,因此由损伤指标的选择不同而导致分析结果存在不确定性,应针对不同结构选择恰当的评价指标。

5 结论

本文选取浙江省嘉兴地区典型砌体结构建立结构分析模型,并根据浙江省地震背景和场地特征,进行基于增量动力分析方法的结构地震易损性分析,获得具有地方特色典型砌体结构的地震易损性曲线,为该结构分析方法在浙江地区的应用提供技术基础,为浙江地区建筑的精细化地震灾害风险评估和风险防治提供理论依据。

通过地震易损性曲线可直观地获得结构在不同强度作用下对于各性能指标的超越概率。主要结论如下:

(1)根据规范定义符合结构特征的损伤指标及其对应的性能水平限值,建立基于性能的嘉兴地区地震易损性分析方法,并得到具有地方特色的地震易损性曲线。

(2)根据易损性曲线综合来看,可初步判断,嘉兴地区典型砌体结构可基本满足当地VII度抗震设防要求,在大震作用下,结构发生倒塌的超越概率小于10%,表明结构具有良好的抗倒塌能力。

参考文献

- [1] 徐璐. 掉层框架剪力墙结构地震易损性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2019.
- [2] Hwang H H M, Low Y K. Seismic reliability analysis of plane frame structures[J]. Probabilistic Engineering Mechanics. 1989, 4(2): 74-84.
- [3] Hwang H H M, Low Y K, Hsu H M. Seismic reliability analysis of flat-plate structures[J]. Probabilistic Engineering Mechanics. 1990, 5(1): 2-8.

- [4] Hwang H H M, Jaw J W. Probabilistic damage analysis of structures[J]. *Journal of Structural Engineering*. 1990,116(7): 1992-2007.
- [5] Rossetto T, Elnashai A. Derivation of vulnerability functions for European-type RC structures based on observational data [J]. *Engineering Structures*. 2003, 25(10): 1241-63.
- [6] 杨钦杰,李蕾,梁结,等.钦州市建筑物抗震性能普查及震害预测分析[J].*华南地震*,2021,41(02):83-91.
- [7] 吕国军,张合,孙丽娜,等.廊坊市重要建筑物易损性分析[J].*地震研究*,2017,40(04):638-645+678.
- [8] 宋立军,唐丽华,尹力峰,等.石河子市建筑物群体易损性矩阵的建立方法及震害预测[J].*内陆地震*,2001,15(04): 320-325.
- [9] 张永群,蒋利学,王卓琳.基于性能的多层砌体结构地震易损性分析[J].*建筑结构学报*,2021,42(5):64-71.
- [10] 楼思展,叶志明,陈玲俐.框架结构房屋地震灾害风险评估[J].*自然灾害学报*,2005,14(5):103-109.
- [11] Vielma J C, Porcu M C, López N. Intensity measure based on a smooth inelastic peak period for a more effective incremental dynamic analysis [J]. *Applied Sciences*, 2020, 10 (8632):8632.
- [12] Kita A, Cavalagli N, Masciotta M, et al. Rapid post-earthquake damage localization and quantification in masonry structures through multidimensional non-linear seismic IDA [J]. *Engineering Structures*, 2020, 219 (15): 110841.
- [13] Jouneghani H G, Haghollahi A. Assessing the seismic behavior of steel moment frames equipped by elliptical brace through incremental dynamic analysis (IDA) [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2020(19): 435-449.
- [14] Yahyapour R, Seyedpoor S M. Comparing the seismic behavior of various knee braced steel frames based on incremental dynamic analysis and development of fragility curves [J]. *International Journal of Steel Structures*, 2021, 21(4):1-14.
- [15] 程明超.砌体结构地震易损性研究[D].西安:西安建筑科技大学,2021.
- [16] Wei Guo, Yao Hu, Yunsong Li, et al. Seismic performance evaluation of typical dampers designed by Chinese Building Code [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2019, 18(02):433-446.
- [17] 李敏,杨立国,陈海鹏,等.杭州市典型土层剪切波速与埋深间的关系分析 [J]. *震灾防御技术*, 2020, 15(1): 77-88.
- [18] 龚云峰,姚激,黄坤,等.采用不同减震结构体系的RC框架结构地震易损性分析[J].*工程抗震与加固改造*,2023, 45(02):83-89.
- [19] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.建(构)筑物地震破坏等级划分:GB/T24335-2009 [S].北京:地震出版社,2009.
- [20] 刘洪波,佟瑶,蒋焱俊,等.RC框架结构地震易损性分析方法研究进展[J].*世界地震工程*,2020,36(03):141-150.