

陈小兵, 欧阳志勇, 李亚东. 建筑物偏心结构对其抗震性能的影响[J]. 地震工程学报, 2018, 40(4): 652-657, 677. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2018.04.652
CHEN Xiaobing, OUYANG Zhiyong, LI Yadong. Effect of Eccentric Structures on the Seismic Performance of Buildings[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(4): 652-657, 677. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2018.04.652

建筑物偏心结构对其抗震性能的影响

陈小兵¹, 欧阳志勇², 李亚东³

(1. 广东理工职业学院, 广东 中山 528400; 2. 嘉应学院, 广东 梅州 514015; 3. 广州大学, 广东 广州 510006)

摘要: 偏心对建筑物的抗震效果有很大的影响。在对三种常见建筑物框架结构在偏心扭矩作用下的受震反应进行数值模拟时, 采用6层建筑物模型, 通过三维非线性模拟偏心结构对建筑物抗震性能影响的分析, 采用最大层间位移作为衡量标准, 绘制易损曲线来进行结果分析。结果显示: 若忽略意外扭矩的影响, 可能会高估钢结构体系的抗震性能, 而影响安全评估结果; 如果采用全层5%质量偏心来考虑意外偏心扭矩的话, 会低估钢结构建筑物的抗震性能。

关键词: 偏心; 抗震性能; 静态非线性模拟

中图分类号: TU47

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2018)04-0652-07

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2018.04.652

Effect of Eccentric Structures on the Seismic Performance of Buildings

CHEN Xiaobing¹, OUYANG Zhiyong², LI Yadong³

(1. Guangdong Polytechnic Institute, Zhongshan 528400, Guangdong, China;

2. Jiaying University, Meizhou 514015, Guangdong, China;

3. Guangzhou University, Guangzhou 510006, Guangdong, China)

Abstract: Eccentricity has a considerable influence on the seismic effect of buildings. In this study, the seismic responses of three common frame structures under the action of eccentric torque were numerically simulated. The influence of eccentric structures on the seismic performance of buildings was analyzed through three-dimensional nonlinear simulation of a six-story building model. Maximum inter-story displacement was used as the measurement standard, and fragility curves were drawn to analyze the results. The results show that if the influence of accidental eccentric torque is ignored, then the seismic performance of the steel-structure system will be overestimated, thus affecting the safety assessment results. Conversely, if the influence of accidental eccentric torque is considered using 5% mass eccentricity of the entire floor, then the seismic performance of the steel-structure system will be underestimated.

Keywords: eccentricity; seismic performance; static nonlinear simulation

收稿日期: 2017-08-20

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51438004); 教育部创新团队发展计划项目(IRT13057)

第一作者简介: 陈小兵(1983—), 男, 广东韶关人, 硕士, 讲师, 研究方向: 建筑结构抗震抗风。E-mail: gdcxb2004@163.com。

通信作者: 欧阳志勇(1985—), 男, 广东佛山人, 博士, 副教授, 研究方向: 预制装配式, 结构抗震。

0 引言

近年来世界各地地震频发,造成建筑物、桥梁及其他设施损坏,甚至倒塌^[1]。为提高建筑物的抗震性能,可在传统框架结构中增设斜撑来提高结构的刚度。斜撑虽然可以对框架结构进行加固,提高原有结构的可靠度和梁柱节点的受力能力,但同时也会对部分构件也会产生不利影响,因此使用时应考虑所有构件的受力情况。目前常用的钢结构建筑系统包含抗弯矩框架、偏心斜撑框架与挫屈束制斜撑框架系统。为研究这三种结构系统在偏心扭矩作用下的受震反应,本文以周中哲等^[2]的模型为基础构建建筑物模型,并参考建筑物抗震规定,来研究意外偏心对三种结构系统抗震性能的影响。

本文采用 6 层的建筑物模型,建筑物的平面位置为东西向(长向)五跨,南北向(短向)三跨,其跨度皆为 9 m,1 楼采用挑高设计,高度为 4.5 m,其他楼层高度均为 4 m(图 1)。

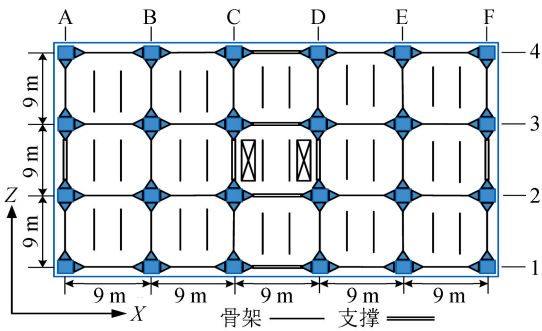


图 1 建筑物结构平面图
Fig.1 Structure plan of the building

1 模型建立

6 层楼结构分别为韧性抗弯矩框架(MRF)、偏心斜撑框架(EBF)与挫屈束制支撑框架(BRBF)系统,结构如图 2 所示,系统尺寸与材料分别如表 1、表 2、表 3 和表 4 所列。韧性抗弯矩框架拥有完整立体构件来承受垂直载重,而所有的地震力则由抗

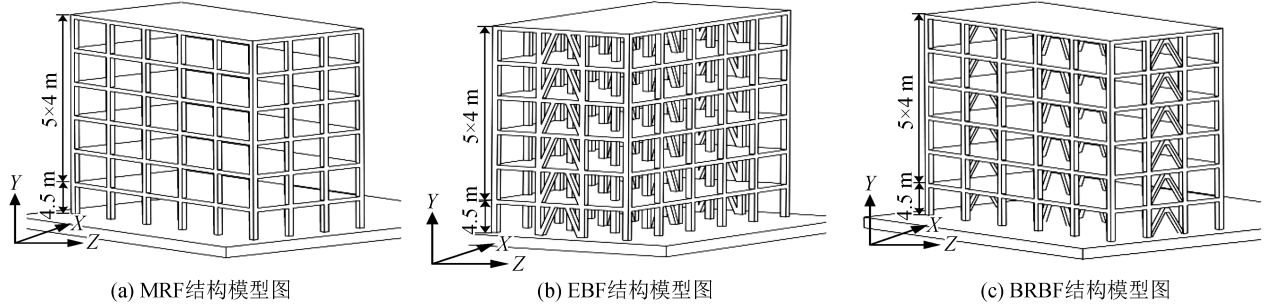


图 2 三种结构模型
Fig.2 Three structural models

表 1 MRF 系统的构件尺寸与材料^[2]

Table 1 Component size and material for MRF System^[2]

模型	柱(A572)	梁 X(A36)	梁 Z(A36)
6F~5F	Box500×500×19	H480×300×11×18	H380×299×9×14
4F~3F	Box500×500×22	H490×302×13×21	H500×304×15×24
2F~1F	Box500×500×25	H580×300×12×20	H580×300×12×17

注:Box 表示箱型梁,以下表中 Box 皆相同。梁 X,梁 Z 分别表示沿 X 方向和 Z 方向的梁,以下表中梁 X,梁 Z 皆相同

表 2 EBF 系统的构件尺寸与材料^[2]

Table 2 Component size and material for EBF System^[2]

模型	柱(A572)	梁 X(A36)	梁 Z(A36)
6F~5F	Box400×400×25	H580×300×12×17	H580×300×12×17
4F~3F	Box400×400×22	H480×300×11×18	H480×300×11×15
2F~1F	Box400×400×19	H480×300×11×18	H480×300×11×15
模型	支撑 X(A572)	支撑 Z(A572)	
6F~5F	H440×300×11×18	H440×300×11×18	
4F~3F	H300×300×10×15	H300×300×10×15	
2F~1F	H300×300×10×15	H300×300×10×15	

表 3 EBF 系统连杆梁尺寸与材料

Table 3 Size and material of connecting bar in EBF System

模型	梁 X(A36)	长/m	梁 Z(A36)	长/m
6F~5F	H580×300×12×17	1.40	H580×300×12×18	1.35
4F~3F	H480×300×11×19	1.40	H480×300×11×16	1.35
2F~1F	H480×300×11×18	1.35	H480×300×11×15	1.35

表 4 BRBF 系统的构件尺寸与材料^[2]

Table 4 Component size and material for BRBF System^[2]

模型	柱(A572)	BRB X(A36)	BRB Z(A36)	梁 X(A36)	梁 Z(A36)
6F	Box400×400×19	$A_c=25\text{ cm}^2$	$A_c=35\text{ cm}^2$	H480×300×11×18	H380×299×9×14
5F	Box400×400×19	$A_c=25\text{ cm}^2$	$A_c=35\text{ cm}^2$	H480×300×11×18	H380×299×9×14
4F	Box400×400×22	$A_c=50\text{ cm}^2$	$A_c=55\text{ cm}^2$	H480×300×11×18	H390×300×10×16
3F	Box400×400×22	$A_c=50\text{ cm}^2$	$A_c=55\text{ cm}^2$	H480×300×11×18	H390×300×10×16
2F	Box400×400×25	$A_c=50\text{ cm}^2$	$A_c=55\text{ cm}^2$	H580×300×12×17	H390×300×10×16
1F	Box400×400×25	$A_c=60\text{ cm}^2$	$A_c=70\text{ cm}^2$	H580×300×12×17	H390×300×10×16

弯矩构件承担;偏心斜撑框架主要通过连杆梁发生的大量塑性变形来消耗地震能量,并提高结构韧性;挫屈束制支撑框架是在同心斜撑框架系统中加设斜撑元件。挫屈束制对地震能量的消耗主要是由核心单元、围束单元与滑动单元组合而成的一种斜撑构件来完成。柱采用箱型设计,梁及斜撑为 H 型钢。柱、斜撑构材采用 A572Grade 50 钢材,而梁、连杆梁构件则采用 A36 钢材。

如图 3 所示,采用塑铰模型考量非线性效应的梁、柱及 EBF 斜撑元件,并考虑柱的轴力与弯矩影响。在结构分析时,对梁、柱以及斜撑结构均采用双线性模型(bilinear material)来模拟,并采用两面塑性理论^[3]的应变硬化材料(hardening material)模拟剪力连杆。

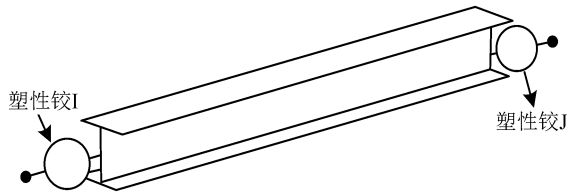


图 3 塑铰模型

Fig.3 Plastic hinge model

1.1 意外偏心

实际上建筑物的活载重分布具有随机不规则性的特点。本文先对未偏心结构进行建模分析,而后根据法规将全层质心偏移 5%,用随机方式模拟结构物实际的活载分布,以了解意外偏心扭矩效应对结构抗震性能的影响(为了说明方便,以后通称为随机意外偏心)。也就是将楼层质心左右偏移 5%及任意楼层有无偏心的条件作排列组合,来模

拟实际建筑物因活载分布不均匀造成的意外偏心状态。本文采用拉丁超立方取样^[4]进行均匀乱数取样,来模拟任意数层有意外偏心的情况。若结构的抵抗力刚度中心与质量中心不一致,则这个偏心将导致结构承受额外的扭矩而扭转,示意如图 4 所示。

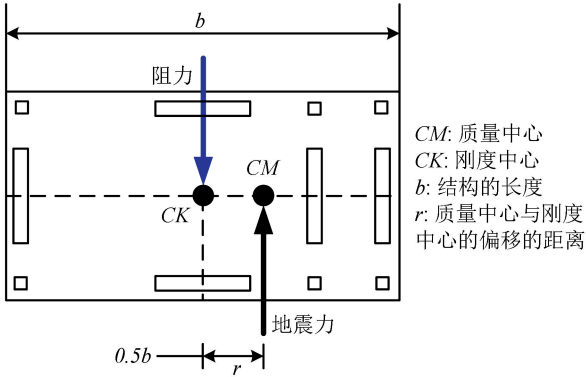


图 4 偏心扭矩示意图

Fig.4 Map of eccentric torque

1.2 地震资料

本文采用 8 组不同时间地点的地震加速度历时记录^[5]进行结构非线性动力时程分析。地震纪录如表 5 所列。首先将各地地震历时除以其最大地表加速度(Peak Ground Acceleration, PGA)加以正规化^[5],再将 PGA 调整成 0.1g,0.2g,⋯,3.0g 等,以进行后续的易损性分析。

1.3 衡量标准

本文采用层间位移角作为损害指标^[7]。层间位移角即楼层间的位移差(Δ)除以该楼层高度(h)所得的转角值(θ)。

$$\theta = \Delta / h$$

(1)

将地震历时反应输入建筑物模型进行动力分析,可得各楼层的层间位移角。根据求得的最大层

间位移角,采用基于易损性曲线的地震损伤评估方法来进行结构的抗震性能分析。

表 5 地震记录资料^[6]

Table 5 Seismic record information^[6]

地震地点/时间/国家	现场条件	震级/M	深度/km	加速度/g
Chi-Chi CHY010-E,1999 年,台湾	硬场地	7.6	25.39	0.227
帝王谷中心,1979 年,美国	冲积层	6.5	8.3	0.349
S 神户,1995 年,日本	浅(硬)土	6.9	0.6	0.821
兰德斯,约书亚树,1992 年,美国	深狭土	7.3	11.6	0.274
Llolleo 010,1985 年,智利	砂岩、火山岩	7.9	34.1	0.712
洛马普列塔,1989 年,美国	深狭土	6.9	31.6	0.134
北岭,1994 年,美国	广深土	6.7	16.3	0.187
圣费尔南多帕萨迪纳,1971 年,美国	广深土	6.6	31.7	0.088

对三维结构系统在不同外力作用下的特征性进行数值模拟。根据以往的研究资料,可以通过震灾调查统计方法、非线性静力分析方法与非线性动力分析方法来得到易损曲线。本文所考虑的结构易损性为结构物受震后损害程度。根据 Shen 等^[8]和 Li 等^[9]的方式,用非线性动力分析来建立钢结构建筑物的易损曲线。非线性动力分析法即为时程分析法,采用此方法获得易损曲线前必须先建立损害指标,位移、层间位移角或者能量消散函数都可以作为损害指标。

2 分析与讨论

对 MRF、EBF 和 BRBF 钢结构系统进行无偏心、全局 5%质量偏心与随机意外偏心的情况模拟,

来分析其抗震性能。

2.1 无偏心

图 5(a)为针对层间位移角 $\theta \geq 0.7\%$ 所绘三种钢结构易损曲线。由图可知,EBF 和 BRBF 系统易损曲线走势非常相似,且其二者的损害机率均小于 MRF 系统。PGA 大于 $0.2g$ 后,EBF 与 BRBF 的损害机率才开始增加。而 PGA 超过 $0.1g$ 后 MRF 的损害机率即开始增加。

图 5(b)为针对层间位移角 $\theta \geq 2.5\%$ 所绘三种钢结构易损曲线。由图 5 两图的比较结果可知,在较大的侧移限度下,MRF 的易损曲线与 EBF 与 BRBF 相比开始有明显的差异。具体而言,MRF 的易损曲线自 $PGA=0.5g$ 时开始爬升,而 EBF 及 BRBF 系统的易损曲线则在 $PGA=1g$ 时才开始爬升。

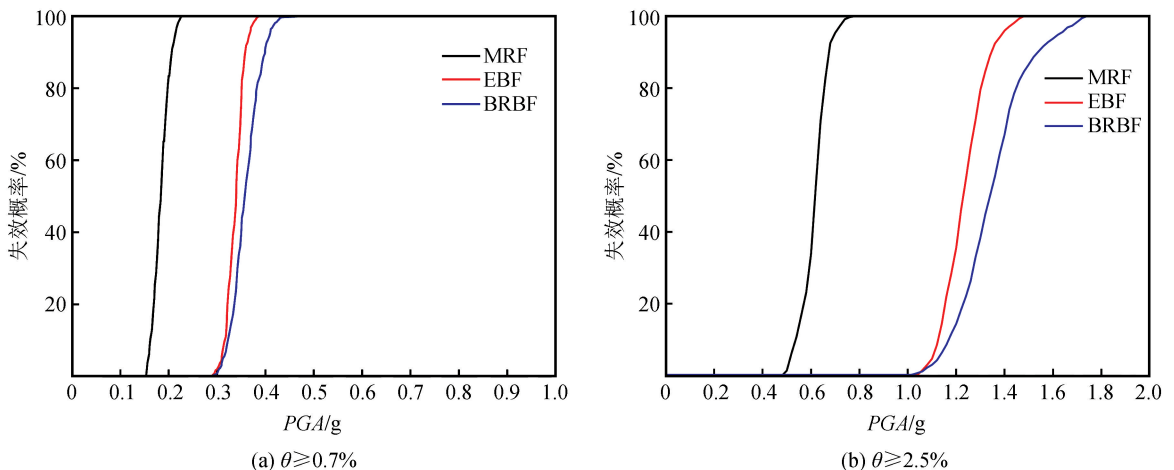


图 5 无偏心三种钢结构易损曲线

Fig.5 Fragile curves of three types of steel structures without eccentricity

2.2 全局 5%质量偏心

图 6(a)为针对层间位移角 $\theta \geq 0.7\%$ 与考虑规范规定的意外偏心所绘的易损曲线。由图可知,

MRF 的易损曲线自 $PGA=0.15g$ 时开始爬升,而 EBF 及 BRBF 系统的易损曲线则在 $PGA=0.2g$ 时才开始爬升,且两者的易损曲线相当靠近,即两者的

损害机率均低于 MRF 系统。图 6(b)为针对层间位移角 $\theta \geq 2.5\%$ 所绘的易损曲线。由图可知,MRF 的易损曲线自 $PGA = 0.5g$ 时开始爬升,而 EBF 及

BRBF 系统的易损曲线则在 $PGA = 0.9g$ 时才开始爬升,两者的易损曲线相近,即两者的损害机率均低于 MRF 系统。

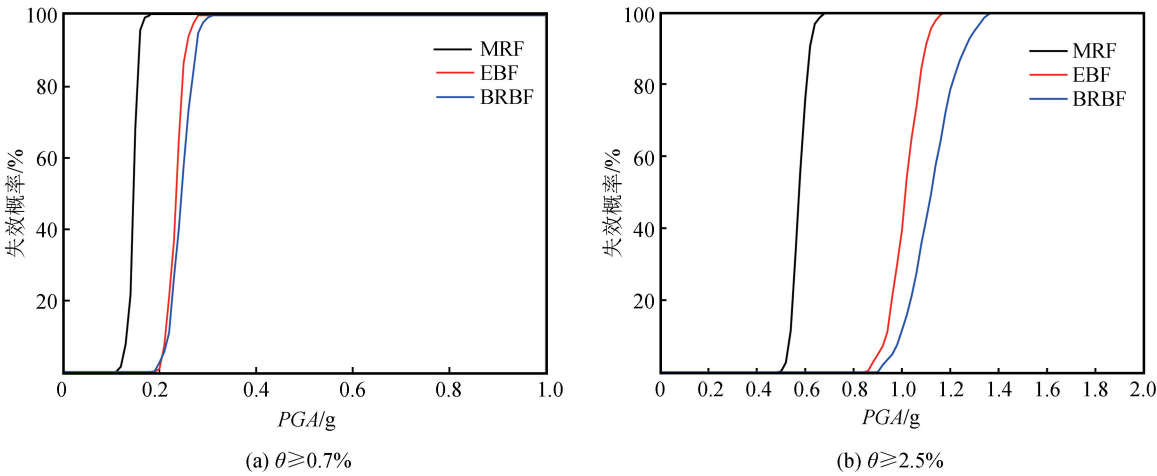


图 6 全层质量偏心 5%时三种钢结构易损曲线

Fig.6 Fragile curves of three types of steel structures with 5% mass eccentricity of the whole floor

由图 5(a)和图 6(a)比较可知,考虑全层 5%质量偏心后,曲线开始上升时的 PGA 值有稍许地降低。而比较图 5(b)和图 6(b)会发现,当层间位移角界限值由 0.7%提高至 2.5%时,上述偏心扭矩效应对易损曲线的影响也大致不变。

2.3 随机意外偏心

图 7(a)为针对层间位移角 $\theta \geq 0.7\%$ 界限与考虑实际楼层活载分布所绘的三种钢结构物易损曲

线。由图可知,EBF 及 BRBF 系统的易损曲线极为相近,均在 $PGA = 0.2g$ 时开始爬升,而 MRF 系统的易损曲线在 $PGA = 0.15g$ 时即开始爬升。图 7 (b)为针对层间位移角 $\theta \geq 2.5\%$ 界限所绘的三种钢结构物易损曲线。由图可知,EBF 及 BRBF 系统的易损曲线极为相近,均在 $PGA = 1.0g$ 时开始爬升,而 MRF 系统的易损曲线则在 $PGA = 0.5g$ 时即开始爬升。

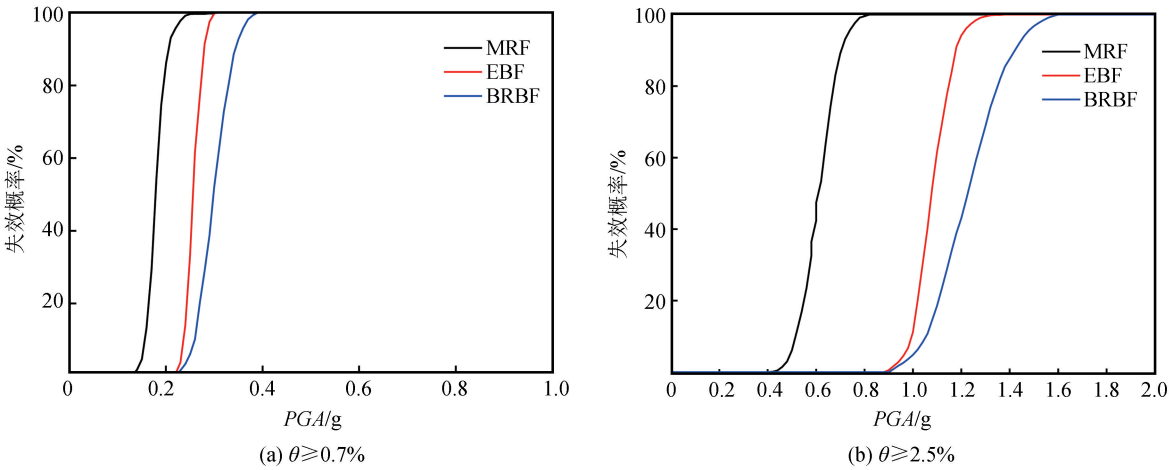


图 7 意外偏心时三种钢结构易损曲线

Fig.7 Fragile curves of three types of steel structures with accidental eccentricity

比较图 5(a)、图 6(a)和图 7(a)的层间位移角 $\theta \geq 0.7\%$ 界限的易损曲线可知,随机意外偏心与全层 5%质量偏心的易损曲线非常相近。比较曲线开始上升时的 PGA 值会发现,随机意外偏心曲线较无

偏心略低,而高于全层 5%质量偏心。由此可知,若不考虑意外偏心扭矩效应会高估低层楼结构的抗震性能,从而导致不安全的评估结果。而依规范建议考虑全层 5%质量偏心则可能会低估结构的抗震性

能,得到的评估结果相对较保守。由此可知,EBF 及 BRBF 系统可以提升低层楼钢结构建筑物的抗震性能。

比较图 5(b)、图 6(b)和图 7(b)的易损曲线可知,当层间位移角界限值由 0.7%提高至 2.5%时,意外偏心扭矩对易损曲线也有相似的影响。若不考虑意外偏心扭矩效应,可能会低估损害机率,得到不安全的评估结果。若考虑全层 5%质量偏心则所得的抗震性能略为保守。因此对低楼层的钢结构建筑物而言,EBF 与 BRBF 系统都会降低其生命安全界限损害机率,且后者的抗震性能较前者好。

表 6 偏心结构对三种钢结构系统的影响

Table 6 Influence of eccentric structure on three systems					
钢结构			无偏心	5%偏心	随机意外偏心
MRF	$\theta \geq 0.7\%$	PGA/g	0.170	0.140	0.156
	$P_f=10\%$	标准化	1.090	0.967	1.000
	$\theta \geq 2.5\%$	PGA/g	0.624	0.586	0.622
	$P_f=50\%$	标准化	1.008	0.943	1.000
BRBF	$\theta \geq 0.7\%$	PGA/g	0.264	0.216	0.238
	$P_f=10\%$	标准化	1.100	0.913	1.000
	$\theta \geq 2.5\%$	PGA/g	1.220	1.068	1.184
	PGA/g	标准化	1.030	0.902	1.000
BRBF	$\theta \geq 0.7\%$	PGA/g	0.268	0.225	0.249
	$P_f=10\%$	标准化	1.075	0.910	1.000
	$\theta \geq 2.5\%$	PGA/g	1.326	1.164	1.268
	$P_f=50\%$	标准化	1.047	0.915	1.000

限状态机率所对应的 PGA 值就分别被高估了 7.7%与 4.6%。

3 结论

本文以一 6 层钢结构办公大楼为模型,研究偏心结构对其抗震性能的影响。分析中以层间位移角 $\theta \geq 0.7\%$ 与 $\theta \geq 2.5\%$ 做为非结构性损害和生命安全损害的界限,来建立各构架系统的易损性曲线。考虑到这两种极限状态机率(limit-state probability)对评估建筑物结构损害状况有重要意义,而需进一步比较其对应的 PGA 值来进行分析与讨论。

- 根据上述的分析结果,得出如下主要结论:
- (1) 忽略意外偏心扭矩效应影响可能会高估钢结构系统的抗震性能,导致不安全的评估结果。如分析的 6 层楼 BRBF 系统,其非结构性损害($\theta \geq 0.7\%$)与生命安全损害($\theta \geq 2.5\%$)两种极限状态机率所对应的 PGA 值分别被高估了 7.7%与 4.6%。
 - (2) 根据规范,如果采用全层 5%质量偏心来考虑意外偏心扭矩会低估钢结构建筑物抗震性能。

2.4 偏心影响

比较了建筑物在无偏心、全层 5%质量偏心及随机意外偏心下的受震损害程度后,以随机意外偏心结构系统为基准,将无偏心及全层 5%质量偏心结构系统的 PGA 值除以随机意外偏心结构系统的 PGA 值进行标准化,以方便比较质量偏心扭矩效应的影响。

由表 6 可知,若不考虑偏心扭矩效应^[10],将会高估 6 层楼建筑物抗震性能,从而导致不安全的评估结果。如分析的 6 层楼 BRBF 系统,其非结构性损害($\theta \geq 0.7\%$)与生命安全损害($\theta \geq 2.5\%$)两种极

参考文献(References)

[1] 何政,刘耀龙.地震动与损伤模型对结构失效影响的统计分析[J].沈阳工业大学学报,2013,35(5):580-586.
HE Zheng, LIU Yaolong. Statistical Analysis for Effect of Ground Motions and Damage Models on Structural Failure[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2013, 35(5): 580-586.

[2] 周中哲,刘佳豪.含挫屈束制消能斜撑构架效应之接合板耐震设计与试验分析[J].建筑钢结构进展,2011,13(5):44-49.
ZHOU Zhongzhe, LIU Jiahao. Evaluating Frame Action on a Corner Gusset Connection in Steel Buckling-Restrained Braced Frames: Seismic Design and Experimental Study[J]. Progress in Steel Building Structures, 2011, 13(5): 44-49.

[3] 王志博.钢结构同心斜撑构架简化模型的静动态分析[J].建筑技术开发,2017,44(19):16-18.
WANG Zhibo. Static and Dynamic Analysis of Simplified Models for Concentrically Braced Steel Frame[J]. Building Technique Development, 2017, 44(19): 16-18.

[4] MCKAY M D, BECKMAN R J, CONOVER W J. A Comparison of Three Methods for Selecting Values of Input Variables in the Analysis of Output from a Computer Code[J]. Technometrics, 2000, 42(1): 55-61.

(下转第 677 页)

havior of Multi-coupling Beams in Shear Wall Structure[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2014, 31(4): 125-134.

[13] 韩春,李青宁,姜维山.框架-剪力墙组合结构的拟动力试验研究[J].建筑钢结构进展,2016,18(1):23-28.

HAN Chun, LI Qingning, JIANG Weishan. Pseudo-dynamic Test on Frame-shear Wall Structure[J]. Progress in Steel Building Structures, 2016, 18(1): 23-28.

(上接第 657 页)

[5] 胡东萍.基于地理空间数据的地震诱发滑坡易感性统计模型研究[D].重庆:重庆大学,2014.

HU Dongping. The Study on the Susceptibility Statistical Model of Earthquake-induced Landslides Based on Geospatial Data [D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.

[6] 吴昊,叶献国,蒋庆,等.巨型框架结构基于易损性曲线的地震损伤评估[J].建筑结构,2018,48(1):46-49.

WU Hao, YE Xianguo, JIANG Qing, et al. Vulnerability Curves-based Seismic Damage Assessment of Mega-frame Structures[J]. Building Structure, 2018, 48(1): 46-49.

[7] CURADELLI R O, RIERA J D. Reliability Based Assessment of the Effectiveness of Metallic Dampers in Buildings under Seismic Excitations[J]. Engineering Structures, 2004, 26(13): 1931-1938.

[8] SHEN J, SEKER O, AKBAS B, et al. Seismic Performance of Concentrically Braced Frames with and Without Brace Buckling[J]. Engineering Structures, 2017, 141: 461-481.

[9] LI Y, ELLINGWOOD B R. Reliability of Woodframe Residential Construction Subjected to Earthquakes[J]. Structural Safety, 2007, 29(4): 294-307.

[10] 戴君武,白文婷.偏心结构地震反应求解剪力-扭矩“三状态空间模型”[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2005,24(6):832-834.

DAI Junwu, BAI Wenting. Shear-torque 3-state-space Model of Seismic Response Analysis for Asymmetric Structures[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science Edition), 2005, 24(6): 832-834.