

杜永峰,黄小宁,李慧.基于性能的基础隔震钢筋混凝土框剪结构的倒塌可靠度分析[J].地震工程学报,2018,40(5):879-882,896.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.05.879

DU Yongfeng, HUANG Xiaoning, LI Hui. Performance-based Collapse Reliability Analysis of Base-isolated Frame-wall Structures[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(5): 879-882, 896. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2018.05.879

## 基于性能的基础隔震钢筋混凝土 框剪结构的倒塌可靠度分析

杜永峰<sup>1,2</sup>, 黄小宁<sup>1</sup>, 李 慧<sup>1,2</sup>

(1. 兰州理工大学 防震减灾研究所, 甘肃 兰州 730050;

2. 兰州理工大学 西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心, 甘肃 兰州 730050)

**摘要:**利用基于性能的结构可靠度分析方法,对基础隔震钢筋混凝土框剪结构进行分析研究。选取 20 条实际地震动记录,以 0.2g 为步长对结构地震动参数 PGA 进行调幅后,建立了 140 个结构-地震动样本空间。选取上部结构的最大层间位移角、隔震层位移为量化指标,对每一个样本进行动力非线性时程分析后,将结构响应进行统计得到结构在各地震动强度下超越极限破坏状态的概率,将其绘制成基础隔震钢筋混凝土框剪结构的易损性曲线并利用整体可靠度方法分析结构发生倒塌的可靠度指标。该方法直观地反映了结构发生倒塌的概率,为结构的地震损失评估提供依据。

**关键词:**可靠度分析;易损性分析;基础隔震框剪结构;性能

中图分类号:TU352.1<sup>+</sup>2

文献标志码:A

文章编号:1000-0844(2018)05-0879-05

DOI:10.3969/j.issn.1013-0019.2018.05.879

## Performance-based Collapse Reliability Analysis of Base-isolated Frame-wall Structures

DU Yongfeng<sup>1,2</sup>, HUANG Xiaoning<sup>1</sup>, LI Hui<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Earthquake Protection and Disaster Mitigation, Lanzhou Univ. of Tech, Lanzhou 730050, Gansu, China;

2. Western Center of Disaster Mitigation in Civil Engineering of Ministry of Education, Lanzhou Univ. of Tech,

Lanzhou 730050, Gansu, China)

**Abstract:** Using the performance-based fragility analysis method, this paper analyzes a base-isolated RC frame-wall structure. This paper selects 20 actual ground motion records with 0.2 g as the step length, adjusts the ground motion parameter PGA, and sets up 140 structure-ground motion sample spaces. The peak inter-story drift ratio of a super structure and the displacement of the isolation layer are then selected as structural performance indices. After dynamic nonlinear time history analysis of each sample, statistics of the structural responses are obtained, and the probability of collapse of the structure beyond each limit damage state is determined. A global reliability method is then used to calculate the collapse reliability indices of the structures and draw them into a base isolation RC frame structural fragility curve. The collapse probability and collapse reli-

收稿日期:2016-10-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目名称(51578274;51178211)

作者简介:杜永峰,(1962—),男,甘肃正宁人,博士,教授,博士生导师,主要从事结构隔震与减震控制研究。E-mail:dooyf@lut.cn。

ability indices can reflect the performance of base-isolated frame-wall structures and provide a reliable basis for structural earthquake damage assessment.

**Key words:** reliability analysis; base-isolated frame-wall structure; fragility analysis; performance

## 0 引言

“大震不倒”一直是国内外建筑结构抗震设计的基本设防原则,但近年来的几次地震,记录到的地震动峰值均超过了该地区的大震地震动峰值,这给工程设计人员提出了如何使结构抗极强震及极强震后应如何加固等一系列的问题。结构整体可靠度分析可以预测结构在不同地震作用下发生各级破坏的概率,对于评定结构的抗震安全性,制定防灾措施等具有重要意义。一方面,设计人员可以根据结构可靠度指标的不同,有针对性的提高结构的抗震能力;另一方面,可以对结构的灾后损失进行估计。2006年吕大刚等<sup>[1]</sup>指出,基于性能的抗震设计和结构的易损性分析这两个学科具有许多本质的联系,完全可以将基于性能的抗震设计思想应用于结构的易损性分析当中去。常泽民<sup>[2]</sup>在此思想的基础上应用基于可靠度和性能的方法以及基于可靠度和灵敏度的方法分别进行了结构整体和局部易损性的分析。之后,国内的研究者们纷纷将基于性能的抗震设计思想应用于结构的易损性及可靠度分析研究中去,取得了一定的成果。刘晶波等<sup>[3]</sup>同时考虑了结构本身的不确定性和地震动输入的不确定性,提出了一种

基于性能的结构整体地震易损性分析方法,并对两个不同类型的方钢管混凝土框架结构进行分析。结构“整体可靠度”理论近年来才在我国得到重视和研究,陆新征等<sup>[4]</sup>提出了混凝土结构防连续倒塌理论与设计方法研究,对结构的抗连续倒塌有指导性的意义,宋鹏彦等<sup>[5]</sup>将结构连续倒塌的全概率方法应用于地震作用下的结构整体连续倒塌极限状态可靠度分析,采用构件可靠度方法对结构进行地震作用下最可能失效构件的识别。

在以上研究基础上,本文以一基础隔震钢筋混凝土框剪结构为例,将易损性分析方法及整体可靠度理论引入隔震结构的倒塌分析中,直观地给出隔震结构发生倒塌的可能性。

## 1 结构性能水平划分与量化指标限值

本文参考文献<sup>[6-8]</sup>中对于基础隔震钢筋混凝土结构的性能水准划分和量化指标分析研究成果,将基础隔震钢筋混凝土结构在地震作用下的性能水准划分为正常使用、立即使用、生命安全和防止倒塌四个状态,本文仅对结构防止倒塌性能进行研究。具体定义与划分见表1:

表1 基础隔震结构性能水准及量化指标限值

Table 1 The performance levels and the quantitative limits of base-isolated structures

性能水平	防止倒塌
要求	隔震支座变形达到规范容许的最大限值,或达到剪切极限变形限值。上部结构50%以上的承重构件严重破坏,其中50%以下的构件达到极限状态,承载力开始下降。
上部结构层间位移角限值	1/100
隔震支座限值	0.55倍支座有效直径与支座内部橡胶总厚度3倍两者的较小值

## 2 结构倒塌易损性方程

结构的易损性曲线能够很直观地反映在不同的地震动强度作用下,结构需求超过特定破坏状态的概率<sup>[9-10]</sup>。根据本文对结构性能水平的定义和结构地震需求的概率分布,可以由式(1)求得不同PGA下结构需求超过倒塌极限破坏状态的概率:

$$P(u | IM > LS) = 1 - \Phi\left(\frac{\ln(LS) - U_{\ln u | PGA}}{\sigma_{\ln u | PGA}}\right) \quad (1)$$

其中: $U_{\ln u | PGA}$ 和 $\sigma_{\ln u | PGA}$ 分别表示加速度为PGA时结构需求的对数均值和对数标准差,由数据的统计

分析得到; $LS$ 表示对应于结构倒塌的量化指标限值; $IM$ 代表隔震结构上部结构最大层间位移角及隔震层位移; $\Phi(\cdot)$ 为标准正态分布函数。

## 3 整体倒塌可靠度分析方法<sup>[11]</sup>

对结构进行整体倒塌可靠度分析时,利用IDA的分析结果,基于式(1)估计 $P(u | IM > LS)$ 的前四阶统计矩,然后采用高阶矩法(HOMM)进行可靠度分析。其流程具体步骤为:

- (1) 建立结构有限元分析模型;
- (2) 确定样本空间基本变量的统计参数和分布类型;

(3) 对每个结构样本进行 IDA 分析,获得结构样本的地震响应;

(4) 采用点估计法估计式(1)所对应的状态变量  $P(u|IM>LS)$  的前四阶统计矩;

(5) 采用二次四阶矩计算结构的整体可靠指标和失效概率。

本文所采用的二次四阶矩法主要是基于状态变量模型,采用考虑基本随机变量之间相关性的改进点估计法估计状态变量的前四阶统计矩,然后采用最大熵法(MEP)拟合状态变量的概率密度曲线,最后通过数值积分直接求得结构的失效概率。

### 4 算例分析

本文以一钢筋混凝土框剪隔震结构为例。该结构的抗震设防类别为乙类,抗震设防烈度 III 度(0.2g),设计地震分组第三组,场地类别 II 类。隔震支座布置及类型如图 1 所示。A-B 轴处剪力墙厚为 400 mm,其余剪力墙厚均为 300 mm,隔震支座的基本参数如表 2 所列,利用 perform-3D 对结构进行静力弹塑性分析和动力弹塑性分析时,剪力墙用非线性纤维截面,梁选用 FAMA Beam, Concrete Type;柱选用 FAMA Column, Concrete Type 来模拟构件的非线性行为。

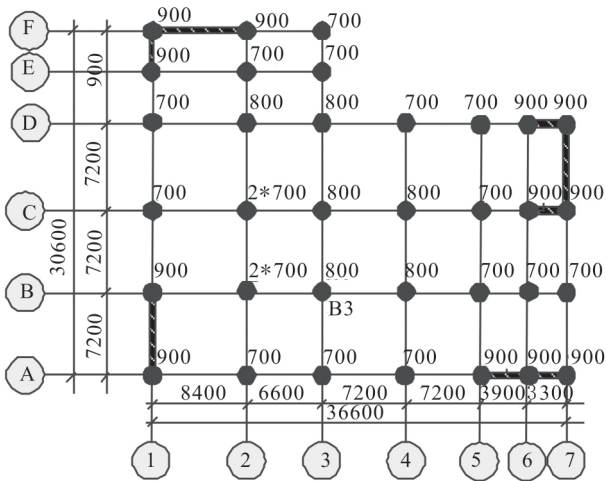


图 1 结构平面图

Fig.1 Plan layout of structure

#### 4.1 地震动样本空间的选择

地震动的不确定性会导致结构响应的离散性<sup>[12]</sup>。在 ATC-63 建议的地震动记录集中选择 20 条地震动,调幅至 400 gal 即罕遇地震作为地震激励。图 2 给出了阻尼比为 5% 的 20 条地震记录的弹性加速度反应谱,反映地震动的离散性。对每一

条波的峰值加速度均按比例调整为 0.1g、0.3g、0.5g、0.7g、0.9g、1.1g、1.3g、1.5g,然后分别赋给结构模型,这样就形成了 140 个结构-地震动计算样本。

表 2 隔震支座特性

Table 2 Characteristics of the isolators

支座类型	竖向刚度/ (kN·mm <sup>-1</sup> )	屈服前刚度/ (kN·mm <sup>-1</sup> )	屈服后刚度/ (kN·mm <sup>-1</sup> )	等效阻尼比/ (kN·mm <sup>-1</sup> )	屈服力/kN
LRB700	3 030	11 800	1 180	0.275	123.1
LRB800	3 780	12 760	1 276	0.275	160.3
LRB900	3 935	13 847	1 387	0.275	203.5

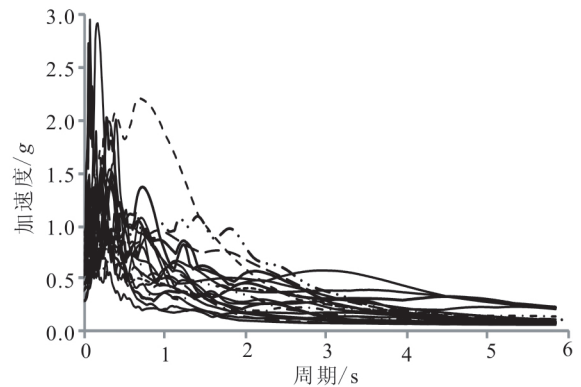


图 2 地震波反应谱

Fig.2 Response spectra of ground motion records

#### 4.2 结构易损性分析

根据易损性分析方法[即式(1)],并结合表 1 基础隔震结构性能水准及量化指标限值,以 PGA 为横坐标,以超越概率为纵坐标,绘制地震易损性曲线及超越概率(图 3 及表 3)。

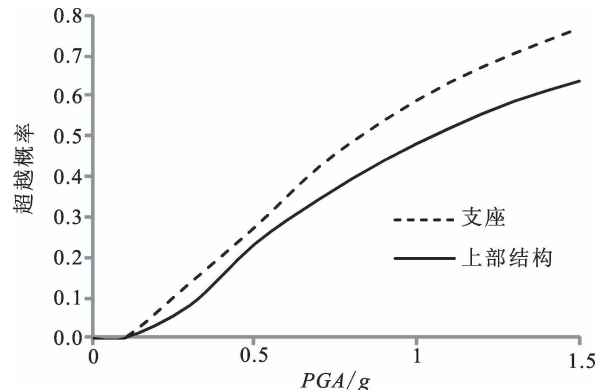


图 3 易损性曲线

Fig.3 Global fragility curves

表 3 各 PGA 下结构响应的超越极限状态的概率

Table 3 The probability of the structure beyond limit damagstates under each PGA intensity

部位	PGA/g						
	0.3g	0.5g	0.7g	0.9g	1.1g	1.3g	1.5g
支座	0.13	0.27	0.42	0.54	0.63	0.70	0.76
上部结构	0.08	0.23	0.34	0.44	0.51	0.58	0.63

从图3及表3可以看出,当PGA达到1.5g时,结构的倒塌概率为76%,而大部分抗震结构,当PGA达到1g时结构的倒塌概率几乎达到100%,说明基础隔震结构表现出良好的性能。从上部结构层间位移角和支座位移的超越概率对比来看,支座位移的超越概率大于上部结构层间位移角的超越概率,说明隔震支座会先于上部结构发生破坏,且随着PGA的增大,隔震支座和上部结构层间位移角之间的差距也增大,说明地震动越大结构的减震效果越

明显。且两者超越概率之间的差距在17%左右,从工程角度来看,两者的抗震性能在同一水平,这与工程设计的目标相同,说明该隔震结构的设计合理。

### 4.3 结构整体倒塌可靠度分析

根据基于倒塌极限状态方程式(1)及第3节所述的可靠度分析方法,对结构进行整体抗震可靠度进行分析,获得整体抗震可靠指标如表所列。

对比表4和表3中上部结构层间位移角及隔震层位移的失效概率,如在PGA为1.1g时,利用易

表4 结构整体抗震可靠指标分析结果

Table 4 Analysis results of global seismicreliability indices

PGA/g	支座						PGA/g	上部结构					
	平均值	变异系数	偏度系数	峰度系数	失效概率	可靠度		平均值	变异系数	偏度系数	峰度系数	失效概率	可靠度
0.3	0.34	1.06	1.11	-1.73	0.17	0.94	0.3g	0.48	1.00	1.00	-2.00	0.07	0.99
0.5	0.22	1.45	0.94	-1.59	0.24	0.69	0.5g	0.03	1.06	1.11	-1.74	0.17	0.94
0.7	0.08	4.14	-0.42	-0.60	0.40	0.24	0.7	0.02	1.40	1.01	-1.61	0.24	0.71
0.9	-0.05	-8.25	-1.54	1.05	0.54	-0.12	0.9	0.01	3.09	-0.09	-1.15	0.37	0.32
1.1	-0.19	-3.03	-1.93	1.67	0.63	-0.33	1.1	-0.01	-4.31	-1.73	1.06	0.57	-0.23
1.3	-0.32	-2.22	-2.01	1.72	0.67	-0.45	1.3	-0.02	-2.68	-1.90	1.30	0.64	-0.37
1.5	-0.48	-1.83	-1.97	1.42	0.77	-0.55	1.5	-0.03	-2.18	-1.93	1.22	0.67	-0.45

损性分析方法得到上部结构层间位移角的失效概率为51%、而隔震支座的失效概率为63%;利用可靠度分析方法得到的上部结构层间位移角的失效概率为57%,而隔震支座的失效概率为63%。从对比分析中可以看出,两种方法计算的失效概率差别不大,因此文中提出的整体可靠度方法可以用于评估地震作用下结构抗倒塌的能力;而且本文中的方法可以直观地给出结构的可靠度指标,当整体可靠度为负值时,说明该结构在此种荷载作用下发生破坏的可能性比较大,工程设计人员应予以重视。

## 5 结论

(1) 整体可靠度分析方法可以用于评估结构的抗地震倒塌性能,且该方法能够直观地反映结构在地震作用下的表现,从而能为结构的地震损失评估提供依据。

(2) 对于基础隔震结构,随着地震作用的增大,结构的减震效果越明显,对于设计合理的隔震结构在极强震作用下结构更可能会由于隔震支座的位移超限等原因发生破坏,设计人员应予以重视。

### 参考文献(References)

[1] 吕大刚,李晓鹏,王光远.基于可靠度和性能的结构整体地震易损性分析[J].自然灾害学报,2006,15(4):107-114.  
LV Dagang, LI Xiaopeng, WANG Guangyuan. Global Seismic

Fragility Analysis of Structures Based on Reliability and Performance[J]. Journal of Natural Disasters, 2006, 15(4): 107-114.  
[2] 常泽民.钢筋混凝土结构非线性抗震可靠度及地震易损性分析[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2006.  
CHANG Zemin. Nonlinear Seismic Reliability and Fragility-analysis of RC Structures [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006.  
[3] 刘晶波,刘阳冰,闫秋实,等.基于性能的方钢管混凝土框架结构地震易损性分析[J].土木工程学报,2010,43(2):39-47.  
LUI Jingbo, LIN Yangbing, YAN Qiushi, et al. Performance-based Seismic Fragility Analysis of CFST Frame Structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(2): 39-47.  
[4] 陆新征,李易,叶列平.混凝土结构防连续倒塌理论与设计方法研究[M].北京:中国建筑工业出版社,2011:40-54.  
LU Xinzheng, LI Yi, YE Lieping. Theory and Design Method for Progressive Collapseprevention of Concrete Structures[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011: 40-54.  
[5] 宋鹏彦.结构整体可靠度方法及RC框架非线性整体抗震可靠度分析[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012:74-77.  
SONG Pengyan. Structural Global Reliability Methods and Nonlinear Global Seismicreliability Analysis of RC Frames[D]. Harbin: HarbinInstitute of Technology, 2012: 74-77.  
[6] 建筑结构抗震设计规范:GB 50011-2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.  
Code for Seismic Design of Buildings: GB50011-2010[S]. Beijing: China Architecture Industry Press, 2010.  
[7] 刘博文,徐开,刘畅,等.Perform-3D在抗震弹塑性分析与结构性能评估中的应用[M].北京:中国建筑工业出版社,2014.

(下转第 896 页)

- and Dynamic Analysis of Magnetolectric Laminated Composites[J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(14): 2113-2123.
- [12] 杨璐, 陈虹, 岳永志, 等. 反应谱法与时程分析法抗震分析对比[J]. 沈阳工业大学学报, 2016, 38(3): 331-336.  
YANG Lu, CHEN Hong, YUE Yongzhi, et al. Comparative Analysis of Seismic Response between Response Spectrum and Time History Analysis[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2016, 38(3): 331-336.
- [13] 李冰洋, 刘永华, 刘中宪. 基于 ANSYS 自定义单元的半刚性梁柱节点抗震滞回性能模拟分析[J]. 世界地震工程, 2018, 34(1): 98-104.  
LI Bingyang, LIU Yonghua, LIU Zhongxian. Simulation and Analysis of Seismic Hysteretic Behavior of Semi-rigid Beam Column Joints Based on ANSYS Custom Unit [J]. World Earthquake Engineering, 2018, 34(1): 98-104.
- [14] 贾正飞. 基于 ANSYS 的某高层建筑力学性能分析[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2018.  
JIA Zhengfei. Analysis of Mechanical Properties of a High-rise Building Based on ANSYS[D]. Qingdao: Qingdao Technological University, 2018.
- [15] POLYAKOV S V. On the Interactions between Masonry Filler Walls and Enclosing Frame When Loaded in the Plane of the Wall[J]. Translations in Earthquake Engineering Research Institute, 1956, 32(2): 1-25.
- [16] POLYAKOV S V. On the Interactions between Masonry Filler Walls and Enclosing Frame When Loaded in the Plane of the Wall[J]. Translations in Earthquake Engineering, Moscow: Earthquake Engineering Research Institute, 1960: 1-25.

\*\*\*\*\*

(上接第 882 页)

- LIU Bowen, XU Kai, LIU Chang, et al. Seismic Elastic-plastic Analysis and Performance-based Evaluation with Perform-3D [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2014.
- [8] 混凝土结构设计规范: GB50011-2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.  
Code for Design of Concrete Structures: GB50011-2010[S]. Beijing: China Architecture Industry Press, 2010.
- [9] Ozaki M. Improved Response Factor Method for Seismic Fragility of Reactor Building [M]. Nuclear Engineering and Design, 1998, 185: 277-291.
- [10] YANG Hee Joe, SUNG Gook Cho. Seismic Fragility Analysis of Nuclear Power Plant Structures Based on the Recorded Earthquake Data in Korea [C] // Transactions of the 17<sup>th</sup> International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology Prague, Czech Republic, 2003.
- [11] 杜永峰, 包超, 宋翔, 等. 结构抗连续倒塌鲁棒性简化分析方法研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2015, 47(2): 170-175.  
DU Yongfeng, BAO Chao, SONG Xiang, et al. A Simplified Method of Structural Robustness to Resist Progressive Collapse [J]. Xi'an Univ of Arch Tech (Natural Science Edition), 2015, 47(2): 170-175.
- [12] 郑山锁, 田进, 韩言召, 等. 考虑锈蚀的钢结构地震易损性分析[J]. 地震工程学报, 2014, 36(1): 1-6.  
ZHENG Shansuo, TIAN Jin, HAN Yanzhao, et al. Seismic Fragility Analysis of Steel Structure Considering Steel Corrosion [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2014, 36(1): 1-6.