

文章编号:1671-6833(2010)01-0011-05

## 小震下基于功能的 RC 多层框架体系可靠度研究

朱俊锋<sup>1</sup>, 朱海华<sup>1</sup>, 王东炜<sup>2</sup>

(1. 河南科技大学 建筑工程学院, 河南 洛阳 471003; 2. 郑州大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘 要:** 基于层间位移, 以层间变形失效为主要失效模式, 采用 PNET 方法, 进行了 RC 多层框架结构在小震作用下的体系可靠度计算, 并与蒙特卡罗方法的结果进行对比, 研究表明: 以层间变形失效为主要失效模式, 并考虑它们之间的失效相关性, 进行 RC 多层框架结构的体系可靠度计算是可行的。

**关键词:** 体系可靠度; 框架结构; 失效相关性; 蒙特卡罗法

**中图分类号:** TU311.2

**文献标识码:** A

### 0 前言

从概念上讲, 建筑结构体系可靠度是衡量建筑结构整体性能的一个重要指标. 我国《工程结构可靠度统一设计标准》(GB50153-92) 已明确指出: “当有条件时, 工程结构宜按结构体系进行可靠度设计. 结构体系可靠度设计, 应根据结构破坏特点选定主要破坏模式”<sup>[1]</sup>. 在土木工程领域, 由于众多因素的影响, 体系可靠度的概念还难以应用于工程实际.

结构体系可靠度分析面临的主要困难是结构的失效模式多, 随着结构体系构件和冗余度的增加, 结构的失效模式以级数级增加, 而且各失效模式之间还具有相关性. 理论分析表明: 在结构体系的众多失效模式中, 仅有少数几个失效模式对结构体系可靠度起主要作用, 其它失效模式的影响可以忽略<sup>[2]</sup>. 结构体系可靠度可以用结构主要失效模式的失效概率来表示.

近 10 年来, 基于功能的结构抗震设计方法成为人们研究的热点, 它要求在不同水准的地震作用下, 直接以结构的功能作为设计目标. 基于功能的结构抗震设计应该是以结构可靠度理论为基础的, 具体地讲是基于结构体系可靠度理论在工程中的应用. 从实际震害经验知道, 地震作用下结构的破坏主要是由于层间变形过大引起的, 层间变形过大是建筑物内部设备损坏、管道和装修等受

到破坏的主要原因. 对于多层钢筋混凝土结构来说, 结构层间变形失效模式为结构的主要失效模式, 因此可以把结构层间变形作为各种功能要求的控制指标<sup>[3]</sup>.

### 1 算例

笔者对 4 层、6 层和 8 层对称和非对称的 RC 框架结构进行了数值模拟, 抗震设防烈度为 7 度, 抗震等级为二级, 框架柱混凝土强度等级为 C30, 框架梁混凝土强度等级为 C25, 梁柱纵向钢筋采用 HRB335 级钢筋, 箍筋采用 HPB235 钢筋. 按照现行抗震设计规范要求, 对算例模型进行计算和配筋. 各种结构的具体参数信息如表 1 所示.

表 1 RC 框架结构几何参数表  
Tab. 1 Geometrical parameters of RC frame structures

类型	跨度/m		
	4 层	6 层	8 层
对称	5.4, 2.4, 5.4	5.4, 2.4, 5.4	5.4, 2.4, 5.4
非对称	5.4, 2.4, 4.8	5.4, 2.4, 4.8	5.4, 2.4, 4.8

注: 层高为 3.0 m.

### 2 体系可靠度计算过程

#### 2.1 参数化建立有限元模型

#### 2.2 荷载信息

竖向荷载: 主要为结构的自重.

收稿日期: 2009-08-14; 修订日期: 2009-12-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50178064); 河南科技大学博士科研启动基金资助; 河南科技大学青年科学研究基金资助(2008QN020)

作者简介: 朱俊锋(1978-), 男, 河南临颍人, 河南科技大学讲师, 博士, 主要从事结构可靠度、工程结构抗震方面的研究.

水平荷载:模拟地震作用,分布方式为倒三角形      分布. 框架结构示意图如图 1 所示,荷载参数如表 2.



图 1 框架结构示意图

Fig. 1 Sketch map of frame structures

表 2 荷载参数表<sup>[3]</sup>

Tab. 2 Statistical parameters of loads

荷载类型	分布类型	$\kappa$	$\delta$
恒载	正态分布	1.06	0.07
地震作用	极值 I 型分布	1.06	0.30

2.3 结构失效准则

进行结构抗震可靠度分析首先要建立极限状态方程,而极限状态方程是建立在结构失效准则基础上的. 目前,结构失效准则主要有以下几种:强度失效准则、变形失效准则、能量失效准则、变形和能量双重失效准则. 在这 4 种失效准则中,变形失效准则能够较好地反映结构在地震作用下的最大反应,而且计算较为简便,所以在实际工程中得到了广泛的应用.

根据框架结构抗震设计的总目标,笔者基于层间位移定义如下极限状态,如表 3 所示.

表 3 极限状态方程

Tab. 3 Limint state equation

极限状态		极限状态方程		层间位移角 $\theta$
小震	不坏极限状态	$Z = [\Delta u]$	$Z > 0$ 安全	1/550
		$- \Delta u$	$Z = 0$ 极限状态	
			$Z < 0$ 失效	

对于钢筋混凝土框架结构,第  $n$  层的层间位移由下式给出:

$$\Delta u(n) = u_n - u_{n-1} \tag{1}$$

式中: $\Delta u(n)$ 为第  $n$  层的层间位移; $u_n$ 为第  $n$  层的水平位移; $u_{n-1}$ 为第  $n-1$  层的水平位移.

笔者假定,如果某一层的层间位移超过规范规定的层间位移,则认为结构破坏. 文中对结构最

弱层(层间变形失效模式中失效概率最大的楼层)的层间变形可靠指标作为参考指标,最弱层间变形的目标可靠指标采用  $2.0^{[6]}$ .

2.4 失效相关性分析

对框架进行随机有限元分析之后,可以得到各层的层间位移,将每一层的层间位移与界限层间位移相比较,可以得到各层是否破坏的信息,当某一层可靠时记为“1”,破坏时记为“0”,然后将各层的破坏信息按照一定的顺序排列,形成一个一维有序数列,利用线性统计回归方法,即可得到各层间的失效相关系数.

各层的层间位移均为随机变量,设随机变量  $x, y$  分别代表两个层间位移的统计结果,根据概率论知识,可以求出这两个随机变量的协方差  $cov(x, y)$  和标准差  $\sigma_x, \sigma_y$ ,则  $x, y$  之间的相关系数可以表示为:

$$\rho_{xy} = \frac{cov(x, y)}{\sigma_x \cdot \sigma_y} \tag{2}$$

2.5 失效相关性的判定

根据概率网络估算技术(Probabilistic Network Evaluation Technique,简称 PNET 方法)<sup>[7-8]</sup>,当两个层间位移的失效相关系数  $\rho_{xy} \geq 0.70$  时,认为这两层的破坏是相关的;反之,则认为这两层的破坏不相关.

2.6 体系可靠度计算方法

目前,对体系可靠度进行计算的主要方法有:宽界限公式;PNET 方法(又称为概率网络估算技术);条件概率法;Monte Carlo 方法. 其中宽界限公式只考虑了单个失效模式的失效概率,没有考虑失效模式间的相关性,一般情况下只用于体系

可靠度的初始检验或者粗略估计;而 PNET 方法由于考虑了各失效模式间的相关性,具有一定的适应性,同时选择代表失效模式进行体系可靠度分析,可以大大减小计算工作量,PNET 方法已成为延性结构体系可靠度分析较为可行的方法. Monte Carlo 方法在目前的结构可靠度分析方法中,被认为是一种相对精确的方法.

3 数值模拟结果

3.1 失效相关示意图

各层之间的失效相关示意图如图 2 所示. 图中浅颜色表示这几层的失效是统计相关的,深颜

色表示这几层的失效是统计独立的. 从图中可以看出:以层间变形失效为主要失效模式的 4 层钢筋混凝土框架结构在小震作用下,各层之间的失效可以认为是相互独立的;6 层钢筋混凝土框架结构在小震作用下,第 2 层和第 3 层之间的失效是统计相关的,其它层之间的失效是统计独立的;8 层钢筋混凝土框架结构在小震作用下,第 2 层、第 3 层、第 4 层之间的失效是统计相关的,其它层之间的失效是统计独立的.

3.2 层间位移计算结果

各计算模型的层间位移最大值、最小值、均值试验结果分别如图 3 所示.

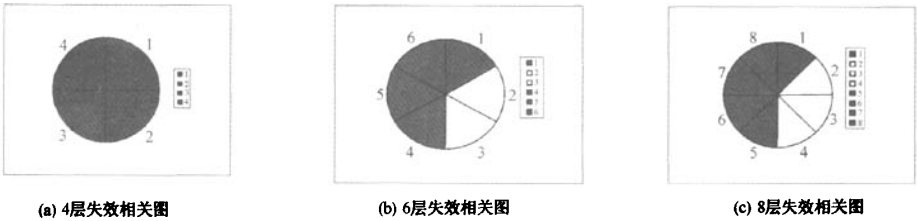


图 2 失效相关示意图

Fig. 2 Faure dependence sketch maps

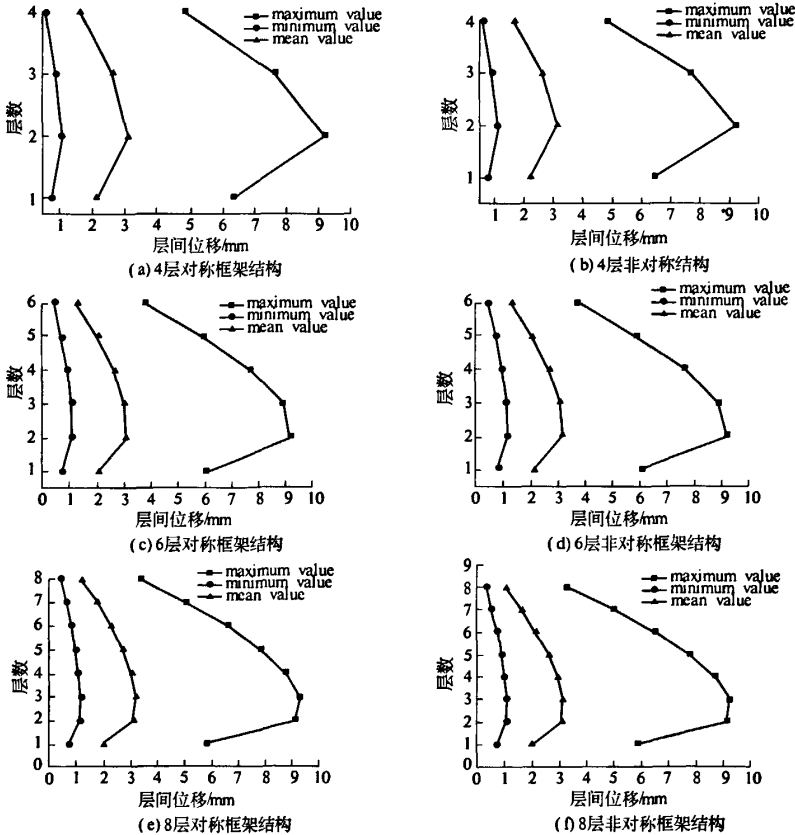


图 3 层间位移试验结果

Fig. 3 Test results of storey drifts

3.3 主要失效模式

各计算模型的主要失效模式、失效概率、可靠指标、代表模式分别如表 4~6 所示. 其中:主要模

式一栏中,括号外的数字是序号,括号内的数字是对应的层间.

表 4 4 层框架结构在小震作用下模拟结果

Tab. 4 Simulation results of four-storey frame structures under minor earthquakes

对称				非对称			
主要模式	失效概率	可靠指标	代表模式	主要模式	失效概率	可靠指标	代表模式
1(2)	0.022 7	2.000 9	[1]	1(2)	0.022 7	2.000 9	[1]
2(3)	0.004 5	2.612 1	[2]	2(3)	0.004 0	2.652 1	[2]
3(1)	0.000 7	3.194 7	[3]	3(1)	0.000 7	3.194 7	[3]

表 5 6 层框架结构在小震作用下模拟结果

Tab. 5 Simulation results of six-storey frame structures under minor earthquakes

对称				非对称			
主要模式	失效概率	可靠指标	代表模式	主要模式	失效概率	可靠指标	代表模式
1(2)	0.022 7	2.000 9	[1]	1(2)	0.022 7	2.000 9	[1]
2(3)	0.017 8	2.101 4	—	2(3)	0.016 9	2.122 4	—
3(4)	0.004 8	2.589 9	[2]	3(4)	0.003 6	2.687 5	[2]
4(1)	0.000 4	3.352 8	[3]	4(1)	0.000 4	3.352 8	[3]
5(5)	0.000 3	3.719 0	[4]	5(5)	0.000 3	3.431 7	[4]

表 6 8 层框架结构在小震作用下模拟结果

Tab. 6 Simulation results of eight-storey frame structures under minor earthquakes

对称				非对称			
主要模式	失效概率	可靠指标	代表模式	主要模式	失效概率	可靠指标	代表模式
1(3)	0.022 7	2.000 9	[1]	1(3)	0.022 7	2.000 9	[1]
2(2)	0.018 7	2.081 3	—	2(2)	0.020 2	2.049 6	—
3(4)	0.015 0	2.170 0	—	3(4)	0.014 8	2.175 4	—
4(5)	0.005 2	2.562 3	[2]	4(5)	0.004 5	2.612 1	[2]
5(6)	0.000 9	3.121 4	[3]	5(6)	0.000 7	3.194 7	[3]
6(1)	0.000 3	3.431 7	[4]	6(1)	0.000 3	3.431 7	[4]

3.4 基于功能的体系可靠度计算

体系可靠度分别按下列方法计算:

(1)当各失效模式间完全独立时,体系可靠度可以表示为

$$P_f = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_{fi}) \tag{3}$$

式中: $P_{fi}$ 为第  $i$  个失效模式的失效概率; $n$  为失效模式的个数.

(2)当各个失效模式间完全相关时,体系可靠度可以表示为

$$P_f = \max P_{fi} \tag{4}$$

(3)采用 PNET 方法:其基本思想是,首先将所有主要失效模式按彼此相关的密切程度分成若干组,在每组中选出一个失效概率最大的失效模式作为代表失效模式,然后假定各代表失效相互独立,结构体系可靠度可以表示为

$$P_f = 1 - \prod_{i=1}^m (1 - P_{fi}) \tag{5}$$

式中: $P_{fi}$ 为第  $i$  个代表失效模式的失效概率; $m$  为失效模式的个数.

各模型的体系可靠度具体计算结果如表 7~9 所示.

表 7 4 层 RC 框架结构在小震作用下体系可靠度计算

Tab. 7 System reliability of four-storey RC frame structures under minor earthquakes

类型	对称		非对称	
	失效概率	可靠指标	失效概率	可靠指标
完全独立	0.027 8	1.914 2	0.027 3	1.922 1
完全相关	0.022 7	2.000 9	0.022 7	2.000 9
蒙特卡罗	0.027 5	1.918 9	0.027 3	1.922 1
PNET 法	0.027 8	1.914 2	0.027 3	1.922 1

表 8 6 层 RC 框架结构在小震作用下体系可靠度计算  
Tab.8 System reliability of six-storey RC frame structures under minor earthquakes

类型	对称		非对称	
	失效概率	可靠指标	失效概率	可靠指标
完全独立	0.045 4	1.691 2	0.043 3	1.713 6
完全相关	0.022 7	2.000 9	0.022 7	2.000 9
蒙特卡罗	0.033 5	1.831 6	0.032 4	1.846 7
PNET 法	0.028 1	1.909 5	0.026 9	1.928 4

表 9 8 层 RC 框架结构在小震作用下体系可靠度计算  
Tab.9 System reliability of eight-storey RC frame structures under minor earthquakes

类型	对称		非对称	
	失效概率	可靠指标	失效概率	可靠指标
完全独立	0.061 4	1.543 1	0.061 8	1.539 8
完全相关	0.022 7	2.000 9	0.022 7	2.000 9
蒙特卡罗	0.035 2	1.809 4	0.034 2	1.822 4
PNET 法	0.028 9	1.897 3	0.028 1	1.909 5

4 结 论

从计算结果可以看出:以层间变形失效为主要失效中,由于各失效模式间具有一定的相关性,各失效模式间的失效既不是完全相关,也不是完全独立,而是处于两者之间.采用失效模式完全独立或者完全相关假设,得到的计算结果与蒙特卡罗方法的结果相比,存在较大的差别.PNET 方法考虑了失效模式间的相关性,计算结果与蒙特卡罗方法比较接近.

综上所述,多层钢筋混凝土框架结构在小震

作用下,以层间变形为主要失效模式进行结构体系可靠度的计算是可行的.以层间变形失效为主要失效模式可以大大简化失效模式的数量.

参考文献:

[1] GB 50153-92 工程结构可靠度设计统一标准[S]. 北京:中国计划出版社,1992.

[2] 欧进萍,侯钢领,吴斌. 概率 Pushover 分析方法及其在结构体系抗震可靠度评估中的应用[J]. 建筑结构学报,2001,22(6):81-86.

[3] 王光远,程耿东. 抗震结构的最优设防烈度与可靠度[M]. 北京:科学出版社,1999:124-127.

[4] 程耿东,李刚. 基于功能的结构抗震设计中一些问题的探讨[J]. 建筑结构学报,2000,21(1):5-11.

[5] 李刚,程耿东. 基于可靠度和功能的框架-剪力墙结构抗震优化设计[J]. 计算力学学报,2001,18(3):67-71.

[6] 李刚,程耿东. 基于功能的结构体系目标可靠度优化决策[J]. 计算力学学报,2002,19(2):127-131.

[7] ANG A H, TANG W H. Probability concepts in engineering planning and design. volume II: decision, risk, and reliability[M]. New York: John Wiley & Sons, 1984: 504-506.

[8] ANG A H, MA H F. On the reliability of structural systems. proceedings of the 3rd international conference on structural safety and reliability[C]. Trondheim, Norway, 1981: 295-314.

Study on System Reliability of Performance - based RC Multi - storey Frame Structures under Minor Earthquakes

ZHU Jun - feng<sup>1</sup>, ZHU Hai - hua<sup>1</sup>, WANG Dong - wei<sup>2</sup>

(1. School of Architecture & Civil Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang, 471003 China; 2. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou, 450001 China)

**Abstract:** In this paper, failure of storey deformation is regarded as main failure mode based on storey drift. The system reliability of RC multi - storey frame structure is calculated by using method of PNET. The result is compared with that of Monte-Carlo method. The study result indicates that it is feasible to calculate the system reliability of RC multi-storey frame structure considering the dependence of failure modes based on failure of storey deformation as main failure modes.

**Key words:** reliability of system; frame structure; failure dependence; Monte - Carlo method