

文章编号:1671-6833(2006)03-0009-06

基于位移的 RC 高层框架结构在大震作用下 失效模式相关性分析

朱俊锋¹, 王东炜², 霍 达³

(1. 北京工业大学建筑工程学院, 北京, 100022; 2. 郑州大学土木工程学院, 河南 郑州 450002)

摘 要: 为了简化抗震设计中结构体系可靠度的计算过程, 基于层间位移, 把层间位移作为随机变量, 以层间变形失效模式为主要失效模式, 采用蒙特卡罗方法对高层框架结构在大震作用下进行了失效模式相关性研究, 得出了高层框架结构在大震作用下部分失效模式相关性统计规律。

关键词: 体系可靠度; 框架结构; 失效模式; 相关性; 蒙特卡罗法

中图分类号: TU 448.27

文献标识码: A

0 引言

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》(GB 50153-92)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”。目前结构体系可靠度理论的研究已经取得了很大的进展, 在一些领域已开始应用于工程实际。但在土木工程领域, 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。

结构体系的可靠性分析涉及到结构的反应约束和失效模式等两方面的相关性^[1]。这些相关性往往对体系可靠度分析结果产生较大影响, 因此必须加以考虑。在实际应用中, 这些相关性通常由它们相应的功能函数间的相关系数来反映。在结构体系可靠度分析中, 两个功能函数的相关关系常由一个临界相关系数 ρ_0 划分为高级相关和非高级相关。当两功能函数的相关系数 $\rho_{xy} \geq \rho_0$ 时, 称它们为高级相关, 否则称为非高级相关。利用这种关系可以简化结构体系可靠度的计算。

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。对于结构体系可靠度分析, 搜索到结构所有失效模式是不可能的。理论分析表明^[2], 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。影响结构体系可靠度的少数几个失效模式称为结构的主要失效模式, 应该用结构主要失效模式的失效概率表示结构体系的可靠度。

近 10 年来, 基于性能的抗震设计方法成为人们研究的热点, 它要求在不同水准地震作用下, 直接以结构的性能作为设计目标。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。对于多层和高层钢筋混凝土抗震结构来说, 结构的层间变形是衡量结构破坏程度和性能水平的重要指标, 结构层间变形破坏模式为结构的主要破坏模式, 因此可以把结构层间变形作为各种功能要求的控制指标^[3-5]。

1 失效模式相关性分析过程

1.1 参数化建立有限元模型

随着高速计算机的发展和数值模拟方法的改进, 基于 Monte Carlo 方法的结构可靠度数值模拟方法得到了人们的重视。在结构可靠度的数值模拟中, 该方法具有模拟的收敛速度与基本随机变量的维数无关, 极限状态函数的复杂程度与模拟过程无关等优点, 为了得到较精确的可靠度, 目前只有应用 Monte Carlo 方法。因此, 文中采用 Monte Carlo 方法, 模拟次数为 10 000 次。

收稿日期: 2006-04-26; 修订日期: 2006-05-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50178064); 北京市重点实验室开放基金项目(EESR2003-4)

作者简介: 朱俊锋(1978-), 男, 河南临颖人, 北京工业大学在读博士研究生, 主要从事结构可靠度、工程结构抗震方面的研究。

1.2 荷载信息

竖向荷载:主要为结构的自重和活荷载,假定竖向荷载服从正态分布 水平荷载:模拟水平地震作用,分布方式为倒三角形分布,假定水平荷载服从极值 I 型分布。

表 1 荷载统计参数表^[6]

Tab.1 Statistical parameters of loads

荷载类型	分布类型	μ 均值/标准值	δ 变异系数
恒载	正态分布	1.06	0.07
地震作用	极值 I 型分布	1.06	0.30

1.3 结构失效准则

钢筋混凝土框架结构在大震作用下,允许出现塑性破坏,但应保证结构不能倒塌。由于地震的随机性很大,要使所设计的框架结构在遭受将来可能发生的大震时绝对不倒塌是不现实和不经济的。建筑结构抗震设计不能追求绝对的安全性,需要从现有的经济条件出发,使所设计的结构在未来地震作用下发生破坏的概率为社会所能接受,同时为当前经济条件所允许^[7]。

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破坏准则基础上的。目前,结构破坏准则主要有以下几种:强度破坏准则、变形破坏准则、能量破坏准则、变形和能量破坏准则。在这 4 种破坏准则中,变形破坏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,文中基于层间位移定义如下极限状态。

$$Z_i = [\Delta u_i] - \Delta u_i \begin{cases} > 0, \text{不倒} \\ = 0, \text{极限} \\ < 0, \text{倒塌} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $[\Delta u_i]$ 为大震作用下,第层极限层间位移, $[\Delta u_i] = [\theta] h_i$; Δu_i 为第 i 层层间位移(不扣除整体弯曲变形), $\Delta u_i = u_i - u_{i-1}$, u_i 为第 i 层的水平位移, u_{i-1} 为第 $i-1$ 层的水平位移; $[\theta]$ 为大震作用下框架结构的层间位移角限值, $[\theta] = 1/50$; h_i 为第 i 层的层高。

论文中假定,如果某一层的层间位移超过规范规定的层间位移,则认为结构倒塌。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。

1.4 失效相关性分析

对框架进行完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,即可得到各层之间的失效相关系数。

1.5 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),当两个层间位移的失效相关系数 $\rho_{xy} \geq 0.70$ 时,认为这两层的失效模式是高级相关的,近似认为它们之间的失效是统计相关的;反之,则认为这两层的失效模式低级相关,近似认为它们之间的失效是统计独立的。

2 算例

作者对 12 层、15 层和 18 层对称框架结构、非对称框架和等跨框架进行了大震作用下随机试验模拟,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 C 35,框架梁混凝土强度等级为 C 30。梁柱纵向钢筋采用 HRB 400 级钢筋,箍筋采用 HRB 335 钢筋。按照现行抗震设计规范要求,对试验模型进行计算配筋。各种结构的具体结构参数信息如表 2 所示。

表 2 框架结构几何参数表

Tab.2 Physical parameters of frame structures m

层数	简称	跨度	梁截面	柱截面
12 层	12-1	5.4, 2.4, 5.4	0.3×0.6	0.6×0.6
	12-2	5.4, 2.4, 4.8	0.3×0.6	0.6×0.6
	12-3	5.4, 5.4, 5.4	0.3×0.6	0.6×0.6
15 层	15-1	5.4, 2.4, 5.4	0.3×0.6	0.6×0.6
	15-2	5.4, 2.4, 4.8	0.3×0.6	0.6×0.6
	15-3	5.4, 5.4, 5.4	0.3×0.6	0.6×0.6
18 层	18-1	5.4, 2.4, 5.4	0.3×0.6	0.6×0.6
	18-2	5.4, 2.4, 4.8	0.3×0.6	0.6×0.6
	18-3	5.4, 5.4, 5.4	0.3×0.6	0.6×0.6

注:表中结构的层高均为 3.0 m

2.1 试验结果

各试验模型的试验结果如表 3~表 11 所示。

从表 3~表 5 可以看出,在大震作用下,12 层对称框架、非对称框架结构和等跨框架结构中,第 1 层~第 9 层中各层的失效是相关的,第 9 层~第 12 层中相邻层间的破坏是相关的;从表 6~表 8 中,15 层对称框架、非对称框架结构和等跨框架结构中,第 1 层~第 10 层中各层之间的失效是相关的,第 10 层~第 12 层中相邻层之间的失效是相关的;从表 9~表 11 可以看出,18 层对称框架、非对称框架和等跨框架结构中,第 1 层~第 12 层中各层之间的失效是相关的,第 12 层~第 18 层

中相邻层间的失效是相关的。

表 3 模型 12-1 在大震作用下相关系数表
Tab.3 Correlative coefficients of mode 12-1

under strong earthquakes					
相关层间	相关系数	相关层间	相关系数	相关层间	相关系数
1-2	0.758 1	1-3	0.692 9	1-4	0.682 7
1-5	0.724 4	1-6	0.781 7	1-7	0.848 4
1-8	0.968 9	1-9	0.723 0	1-10	0.490 5
1-11	0.387 6	1-12	0.316 4	2-3	0.914 0
2-4	0.900 6	2-5	0.955 5	2-6	0.969 8
2-7	0.893 5	2-8	0.734 6	2-9	0.548 1
2-10	0.371 9	2-11	0.293 9	2-12	0.239 9
3-4	0.985 3	3-5	0.956 6	3-6	0.886 4
3-7	0.816 7	3-8	0.671 4	3-9	0.501 0
3-10	0.339 9	3-11	0.268 6	3-12	0.219 2
4-5	0.942 5	4-6	0.873 4	4-7	0.804 7
4-8	0.661 5	4-9	0.493 6	4-10	0.334 9
4-11	0.264 6	4-12	0.216 0	5-6	0.926 7
5-7	0.853 8	5-8	0.701 9	5-9	0.523 7
5-10	0.355 3	5-11	0.280 8	5-12	0.229 2
6-7	0.921 3	6-8	0.757 4	6-9	0.565 2
6-10	0.383 4	6-11	0.303 0	6-12	0.247 3
7-8	0.822 1	7-9	0.613 4	7-10	0.416 2
7-11	0.328 9	7-12	0.268 4	8-9	0.746 2
8-10	0.506 2	8-11	0.400 0	8-12	0.326 5
9-10	0.678 4	9-11	0.536 1	9-12	0.437 6
10-11	0.790 2	10-12	0.645 0	11-12	0.816 3

表 4 模型 12-2 在大震作用下相关系数表
Tab.4 Correlative coefficients of mode 12-2

under strong earthquakes					
相关层间	相关系数	相关层间	相关系数	相关层间	相关系数
1-2	0.726 5	1-3	0.646 5	1-4	0.633 1
1-5	0.681 3	1-6	0.746 8	1-7	0.851 8
1-8	0.960 4	1-9	0.709 4	1-10	0.467 1
1-11	0.330 2	1-12	0.313 2	2-3	0.889 8
2-4	0.871 4	2-5	0.937 8	2-6	0.972 9
2-7	0.853 0	2-8	0.697 8	2-9	0.515 4
2-10	0.339 4	2-11	0.239 9	2-12	0.227 5
3-4	0.979 3	3-5	0.948 9	3-6	0.865 7
3-7	0.759 0	3-8	0.620 9	3-9	0.548 6
3-10	0.302 0	3-11	0.213 4	3-12	0.202 5
4-5	0.929 2	4-6	0.847 7	4-7	0.743 3
4-8	0.608 0	4-9	0.449 1	4-10	0.295 7
4-11	0.209 0	4-12	0.198 3	5-6	0.912 3
5-7	0.799 9	5-8	0.654 4	5-9	0.483 3
5-10	0.318 3	5-11	0.224 9	5-12	0.213 4
6-7	0.876 8	6-8	0.717 2	6-9	0.529 8
6-10	0.348 9	6-11	0.246 6	6-12	0.233 9
7-8	0.818 1	7-9	0.604 2	7-10	0.397 9
7-11	0.281 2	7-12	0.266 8	8-9	0.738 6
8-10	0.486 4	8-11	0.343 8	8-12	0.326 1
9-10	0.658 6	9-11	0.465 4	9-12	0.441 5
10-11	0.706 8	10-12	0.670 5	11-12	0.948 6

表 5 模型 12-3 在大震作用下相关系数表

Tab.5 Correlative coefficients of mode 12-3
under strong earthquakes

相关层间	相关系数	相关层间	相关系数	相关层间	相关系数
1-2	0.764 5	1-3	0.701 4	1-4	0.693 5
1-5	0.725 3	1-6	0.807 1	1-7	0.920 8
1-8	0.960 9	1-9	0.753 9	1-10	0.466 2
1-11	0.248 9	1-12	0.176 0	2-3	0.917 4
2-4	0.907 2	2-5	0.948 7	2-6	0.947 2
2-7	0.830 3	2-8	0.734 6	2-9	0.576 4
2-10	0.356 4	2-11	0.190 3	2-12	0.134 5
3-4	0.988 8	3-5	0.967 0	3-6	0.869 0
3-7	0.761 7	3-8	0.647 0	3-9	0.528 8
3-10	0.327 0	3-11	0.174 6	3-12	0.123 4
4-5	0.956 2	4-6	0.859 2	4-7	0.753 2
4-8	0.666 4	4-9	0.522 9	4-10	0.323 4
4-11	0.172 6	4-12	0.122 0	5-6	0.898 6
5-7	0.787 7	5-8	0.696 9	5-9	0.546 8
5-10	0.338 2	5-11	0.180 5	5-12	0.127 6
6-7	0.876 6	6-8	0.775 6	6-9	0.608 5
6-10	0.376 3	6-11	0.200 9	6-12	0.142 0
7-8	0.884 8	7-9	0.694 2	7-10	0.429 3
7-11	0.229 2	7-12	0.162 0	8-9	0.784 6
8-10	0.485 2	8-11	0.259 0	8-12	0.183 1
9-10	0.618 4	9-11	0.330 2	9-12	0.233 4
10-11	0.533 9	10-12	0.377 4	11-12	0.706 9

表 6 模型 15-1 在大震作用下相关系数表

Tab.6 Correlative coefficients of mode 15-1
under strong earthquakes

相关层间	相关系数	相关层间	相关系数	相关层间	相关系数
1-2	0.771 2	1-3	0.700 0	1-4	0.682 9
1-5	0.700 0	1-6	0.734 1	1-7	0.793 2
1-8	0.843 2	1-9	0.985 2	1-10	0.847 3
1-11	0.598 1	1-12	0.477 7	1-13	0.398 3
1-14	0.372 6	1-15	0.314 8	2-3	0.907 6
2-4	0.885 5	2-5	0.907 6	2-6	0.951 9
2-7	0.972 2	2-8	0.914 3	2-9	0.782 8
2-10	0.653 5	2-11	0.461 2	2-12	0.368 4
2-13	0.307 2	2-14	0.287 3	2-15	0.242 8
3-4	0.975 6	3-5	1.000 0	3-6	0.953 5
3-7	0.882 4	3-8	0.829 9	3-9	0.710 5
3-10	0.593 1	3-11	0.418 6	3-12	0.334 4
3-13	0.278 8	3-14	0.260 8	3-15	0.220 3
4-5	0.975 6	4-6	0.930 3	4-7	0.860 9
4-8	0.809 7	4-9	0.693 2	4-10	0.578 6
4-11	0.408 4	4-12	0.326 2	4-13	0.272 0
4-14	0.254 4	4-15	0.215 0	5-6	0.953 5
5-7	0.882 4	5-8	0.829 9	5-9	0.710 5
5-10	0.593 1	5-11	0.418 6	5-12	0.334 4
5-13	0.278 8	5-14	0.260 8	5-15	0.220 3
6-7	0.925 4	6-8	0.870 3	6-9	0.745 1
6-10	0.622 0	6-11	0.439 0	6-12	0.350 7
6-13	0.292 4	6-14	0.273 5	6-15	0.231 1
7-8	0.940 5	7-9	0.805 2	7-10	0.672 1
7-11	0.474 4	7-12	0.378 9	7-13	0.316 0
7-14	0.295 5	7-15	0.249 7	8-9	0.856 1
8-10	0.714 7	8-11	0.504 4	8-12	0.402 9

续表 6

相关层间	相关系数	相关层间	相关系数	相关层间	相关系数
8-13	0.336 0	8-14	0.314 2	8-15	0.265 5
9-10	0.834 8	9-11	0.589 2	9-12	0.470 6
9-13	0.392 4	9-14	0.367 0	9-15	0.310 1
10-11	0.705 8	10-12	0.563 8	10-13	0.470 1
10-14	0.439 7	10-15	0.371 5	11-12	0.798 8
11-13	0.666 0	11-14	0.622 9	11-15	0.526 4
12-13	0.833 8	12-14	0.779 8	12-15	0.659 0
13-14	0.935 3	13-15	0.790 3	14-15	0.845 0

表 7 模型 15-2 在大震作用下相关系数表

Tab.7 Correlative coefficients of mode 15-2
under strong earthquakes

相关层间	相关系数	相关层间	相关系数	相关层间	相关系数
1-2	0.745 7	1-3	0.676 5	1-4	0.663 1
1-5	0.676 5	1-6	0.711 6	1-7	0.764 7
1-8	0.837 7	1-9	0.973 9	1-10	0.834 8
1-11	0.602 8	1-12	0.473 5	1-13	0.372 4
1-14	0.326 5	1-15	0.309 8	2-3	0.907 2
2-4	0.889 3	2-5	0.907 2	2-6	0.954 3
2-7	0.975 2	2-8	0.890 2	2-9	0.765 7
2-10	0.622 6	2-11	0.449 6	2-12	0.353 1
2-13	0.277 7	2-14	0.243 5	2-15	0.231 0
3-4	0.980 3	3-5	1.000 0	3-6	0.950 6
3-7	0.884 7	3-8	0.807 5	3-9	0.694 6
3-10	0.564 8	3-11	0.407 8	3-12	0.320 3
3-13	0.251 9	3-14	0.220 9	3-15	0.209 6
4-5	0.980 3	4-6	0.931 9	4-7	0.867 2
4-8	0.791 6	4-9	0.680 9	4-10	0.553 6
4-11	0.399 8	4-12	0.314 0	4-13	0.246 9
4-14	0.216 5	4-15	0.205 4	5-6	0.950 6
5-7	0.884 7	5-8	0.807 5	5-9	0.694 6
5-10	0.564 8	5-11	0.407 8	5-12	0.320 3
5-13	0.251 9	5-14	0.220 9	5-15	0.209 6
6-7	0.930 6	6-8	0.849 5	6-9	0.730 7
6-10	0.594 1	6-11	0.429 0	6-12	0.336 9
6-13	0.265 0	6-14	0.232 4	6-15	0.220 4
7-8	0.912 8	7-9	0.785 2	7-10	0.638 4
7-11	0.461 0	7-12	0.362 1	7-13	0.284 8
7-14	0.249 7	7-15	0.236 9	8-9	0.860 2
8-10	0.699 4	8-11	0.505 0	8-12	0.396 6
8-13	0.311 9	8-14	0.273 6	8-15	0.259 5
9-10	0.813 1	9-11	0.587 1	9-12	0.461 1
9-13	0.362 7	9-14	0.318 0	9-15	0.301 7
10-11	0.722 1	10-12	0.567 1	10-13	0.446 0
10-14	0.391 2	10-15	0.371 1	11-12	0.785 4
11-13	0.617 7	11-14	0.541 7	11-15	0.513 9
12-13	0.786 5	12-14	0.689 7	12-15	0.654 3
13-14	0.876 9	13-15	0.831 9	14-15	0.948 6

表 8 模型 15-3 在大震作用下相关系数表

Tab.8 Correlative coefficients of mode 15-3
under strong earthquakes

相关层间	相关系数	相关层间	相关系数	相关层间	相关系数
1-2	0.753 5	1-3	0.702 6	1-4	0.686 9
1-5	0.703 7	1-6	0.726 7	1-7	0.783 3
1-8	0.915 3	1-9	0.983 8	1-10	0.847 5

续表 8

相关层间	相关系数	相关层间	相关系数	相关层间	相关系数
1-11	0.695 2	1-12	0.454 1	1-13	0.305 9
1-14	0.223 3	1-15	0.176 5	2-3	0.932 4
2-4	0.911 7	2-5	0.934 0	2-6	0.964 5
2-7	0.962 0	2-8	0.823 1	2-9	0.741 3
2-10	0.638 6	2-11	0.523 8	2-12	0.342 2
2-13	0.230 5	2-14	0.168 3	2-15	0.133 0
3-4	0.977 8	3-5	0.998 4	3-6	0.966 7
3-7	0.897 0	3-8	0.767 5	3-9	0.691 2
3-10	0.595 4	3-11	0.488 4	3-12	0.319 1
3-13	0.214 9	3-14	0.156 9	3-15	0.124 0
4-5	0.976 2	4-6	0.945 3	4-7	0.877 0
4-8	0.750 5	4-9	0.675 8	4-10	0.582 2
4-11	0.477 6	4-12	0.312 0	4-13	0.210 1
4-14	0.153 4	4-15	0.121 3	5-6	0.968 3
5-7	0.898 4	5-8	0.768 8	5-9	0.692 3
5-10	0.596 4	5-11	0.489 3	5-12	0.319 6
5-13	0.215 3	5-14	0.157 2	5-15	0.124 2
6-7	0.927 8	6-8	0.793 9	6-9	0.715 0
6-10	0.615 9	6-11	0.505 3	6-12	0.330 0
6-13	0.222 3	6-14	0.162 3	6-15	0.128 3
7-8	0.855 7	7-9	0.770 6	7-10	0.663 8
7-11	0.544 6	7-12	0.355 7	7-13	0.239 6
7-14	0.174 9	7-15	0.138 3	8-9	0.900 5
8-10	0.775 8	8-11	0.636 4	8-12	0.415 7
8-13	0.280 0	8-14	0.204 4	8-15	0.161 6
9-10	0.861 5	9-11	0.706 7	9-12	0.461 6
9-13	0.310 9	9-14	0.227 0	9-15	0.179 4
10-11	0.820 3	10-12	0.535 8	10-13	0.360 9
10-14	0.263 5	10-15	0.208 3	11-12	0.653 2
11-13	0.440 0	11-14	0.321 2	11-15	0.253 9
12-13	0.673 6	12-14	0.491 7	12-15	0.388 7
13-14	0.730 0	13-15	0.577 1	14-15	0.790 5

表 9 模型 18-1 在大震作用下相关系数表

Tab.9 Correlative coefficients of mode 18-1
under strong earthquakes

相关层间	相关系数	相关层间	相关系数	相关层间	相关系数
1-2	0.805 3	1-3	0.738 2	1-4	0.705 1
1-5	0.719 2	1-6	0.748 3	1-7	0.792 9
1-8	0.834 8	1-9	0.915 6	1-10	0.995 2
1-11	0.860 7	1-12	0.715 3	1-13	0.558 6
1-14	0.445 3	1-15	0.434 6	1-16	0.388 6
1-17	0.363 5	1-18	0.322 1	2-3	0.916 7
2-4	0.875 5	2-5	0.893 2	2-6	0.929 2
2-7	0.984 6	2-8	0.964 7	2-9	0.879 5
2-10	0.801 4	2-11	0.693 1	2-12	0.576 0
2-13	0.449 8	2-14	0.358 6	2-15	0.350 0
2-16	0.312 9	2-17	0.292 7	2-18	0.259 4
3-4	0.955 1	3-5	0.974 3	3-6	0.986 6
3-7	0.931 1	3-8	0.884 3	3-9	0.806 3
3-10	0.734 7	3-11	0.635 4	3-12	0.528 0
3-13	0.412 4	3-14	0.328 7	3-15	0.320 8
4-5	0.980 3	4-6	0.942 3	4-7	0.889 3
4-8	0.844 6	4-9	0.770 1	4-10	0.701 7
4-11	0.606 9	4-12	0.504 3	4-13	0.393 8
4-14	0.314 0	4-15	0.306 4	4-16	0.274 0
4-17	0.256 3	4-18	0.227 1	5-6	0.962 1

续表 9

相关层间	相关系数	相关层间	相关系数	相关层间	相关系数
5-7	0.907 2	5-8	0.861 6	5-9	0.785 6
5-10	0.715 8	5-11	0.619 1	5-12	0.514 5
5-13	0.401 8	5-14	0.320 3	5-15	0.312 6
5-16	0.279 5	5-17	0.261 4	5-18	0.231 7
6-7	0.943 7	6-8	0.896 4	6-9	0.817 2
6-10	0.744 7	6-11	0.644 0	6-12	0.535 2
6-13	0.418 0	6-14	0.333 2	6-15	0.325 2
6-16	0.290 8	6-17	0.272 0	6-18	0.241 0
7-8	0.949 8	7-9	0.866 0	7-10	0.789 0
7-11	0.682 4	7-12	0.567 1	7-13	0.442 9
7-14	0.353 1	7-15	0.344 6	7-16	0.308 1
7-17	0.288 2	7-18	0.255 4	8-9	0.911 7
8-10	0.830 7	8-11	0.718 5	8-12	0.597 1
8-13	0.466 3	8-14	0.371 7	8-15	0.362 8
8-16	0.324 4	8-17	0.303 4	8-18	0.268 9
9-10	0.911 2	9-11	0.788 1	9-12	0.654 9
9-13	0.511 4	9-14	0.407 7	9-15	0.397 9
9-16	0.355 8	9-17	0.332 8	9-18	0.295 0
10-11	0.864 9	10-12	0.718 8	10-13	0.561 3
10-14	0.4475	10-15	0.436 7	10-16	0.390 5
10-17	0.365 2	10-18	0.323 7	11-12	0.831 0
11-13	0.649 0	11-14	0.517 4	11-15	0.504 9
11-16	0.451 5	11-17	0.422 3	11-18	0.374 3
12-13	0.780 9	12-14	0.622 6	12-15	0.607 5
12-16	0.543 3	12-17	0.508 2	12-18	0.450 4
13-14	0.797 2	13-15	0.778 0	13-16	0.695 7
13-17	0.650 7	13-18	0.576 7	14-15	0.975 9
14-16	0.872 7	14-17	0.816 2	14-18	0.723 4
15-16	0.894 2	15-17	0.836 4	15-18	0.741 3
16-17	0.935 3	16-18	0.828 9	17-18	0.886 3

表 10 模型 18-2 在大震作用下相关系数表

Tab.10 Correlative coefficients of mode 18-2

under strong earthquakes					
相关层间	相关系数	相关层间	相关系数	相关层间	相关系数
1-2	0.787 6	1-3	0.717 8	1-4	0.691 5
1-5	0.694 9	1-6	0.727 2	1-7	0.771 1
1-8	0.815 7	1-9	0.872 1	1-10	1.000 0
1-11	0.902 2	1-12	0.742 2	1-13	0.555 4
1-14	0.449 7	1-15	0.392 4	1-16	0.339 8
1-17	0.310 1	1-18	0.310 1	2-3	0.911 3
2-4	0.878 0	2-5	0.882 2	2-6	0.923 3
2-7	0.979 1	2-8	0.965 6	2-9	0.903 2
2-10	0.787 6	2-11	0.710 6	2-12	0.584 6
2-13	0.437 4	2-14	0.354 2	2-15	0.309 1
2-16	0.267 6	2-17	0.244 3	2-18	0.244 3
3-4	0.963 4	3-5	0.968 1	3-6	0.987 0
3-7	0.930 8	3-8	0.879 9	3-9	0.823 1
3-10	0.717 8	3-11	0.647 6	3-12	0.532 7
3-13	0.398 7	3-14	0.322 8	3-15	0.281 7
3-16	0.243 9	3-17	0.222 6	3-18	0.222 6
4-5	0.995 2	4-6	0.950 9	4-7	0.896 7
4-8	0.847 7	4-9	0.793 0	4-10	0.691 5
4-11	0.623 9	4-12	0.513 2	4-13	0.384 1
4-14	0.311 0	4-15	0.271 4	4-16	0.235 0
4-17	0.214 5	4-18	0.214 5	5-6	0.955 5
5-7	0.901 1	5-8	0.851 8	5-9	0.796 8

续表 10

相关层间	相关系数	相关层间	相关系数	相关层间	相关系数
5-10	0.694 9	5-11	0.626 9	5-12	0.515 7
5-13	0.385 9	5-14	0.312 5	5-15	0.272 7
5-16	0.236 1	5-17	0.215 5	5-18	0.215 5
6-7	0.943 0	6-8	0.891 5	6-9	0.833 9
6-10	0.727 2	6-11	0.656 1	6-12	0.539 7
6-13	0.403 9	6-14	0.327 0	6-15	0.285 4
6-16	0.247 1	6-17	0.225 5	6-18	0.225 5
7-8	0.945 4	7-9	0.884 3	7-10	0.771 1
7-11	0.695 7	7-12	0.572 3	7-13	0.428 3
7-14	0.346 8	7-15	0.302 6	7-16	0.262 0
7-17	0.239 2	7-18	0.239 2	8-9	0.935 4
8-10	0.815 7	8-11	0.735 9	8-12	0.605 4
8-13	0.453 0	8-14	0.366 8	8-15	0.320 1
8-16	0.277 2	8-17	0.253 0	8-18	0.253 0
9-10	0.872 1	9-11	0.786 8	9-12	0.647 2
9-13	0.484 3	9-14	0.392 1	9-15	0.342 2
9-16	0.296 3	9-17	0.270 5	9-18	0.270 5
10-11	0.902 2	10-12	0.742 2	10-13	0.555 4
10-14	0.449 7	10-15	0.392 4	10-16	0.339 8
10-17	0.310 1	10-18	0.310 1	11-12	0.822 6
11-13	0.615 4	11-14	0.498 4	11-15	0.434 9
11-16	0.376 6	11-17	0.343 8	11-18	0.343 8
12-13	0.748 3	12-14	0.605 9	12-15	0.528 7
12-16	0.457 8	12-17	0.417 9	12-18	0.417 9
13-14	0.809 6	13-15	0.706 5	13-16	0.611 8
13-17	0.558 4	13-18	0.558 4	14-15	0.872 7
14-16	0.755 6	14-17	0.689 7	14-18	0.689 7
15-16	0.865 9	15-17	0.790 3	15-18	0.790 3
16-17	0.912 8	16-18	0.912 8	17-18	1.000 0

表 11 模型 18-3 在大震作用下相关系数表

Tab.11 Correlative coefficients of mode 18-3

under strong earthquakes

相关层间	相关系数	相关层间	相关系数	相关层间	相关系数
1-2	0.824 9	1-3	0.742 9	1-4	0.731 6
1-5	0.742 9	1-6	0.776 6	1-7	0.853 6
1-8	0.929 2	1-9	0.973 6	1-10	0.914 2
1-11	0.811 7	1-12	0.685 0	1-13	0.497 2
1-14	0.374 3	1-15	0.305 5	1-16	0.244 9
1-17	0.215 9	1-18	0.182 5	2-3	0.900 6
2-4	0.886 9	2-5	0.900 6	2-6	0.941 5
2-7	0.966 4	2-8	0.887 7	2-9	0.847 2
2-10	0.745 1	2-11	0.669 6	2-12	0.565 1
2-13	0.410 1	2-14	0.308 7	2-15	0.252 0
2-16	0.202 0	2-17	0.178 1	2-18	0.150 5
3-4	0.984 8	3-5	0.996 1	3-6	0.956 5
3-7	0.870 3	3-8	0.799 4	3-9	0.763 0
3-10	0.679 1	3-11	0.603 0	3-12	0.508 9
3-13	0.369 4	3-14	0.278 0	3-15	0.226 9
3-16	0.181 9	3-17	0.160 4	3-18	0.135 6
4-5	0.984 8	4-6	0.942 0	4-7	0.857 1
4-8	0.787 3	4-9	0.751 4	4-10	0.668 9
4-11	0.593 8	4-12	0.501 2	4-13	0.363 8
4-14	0.273 8	4-15	0.223 5	4-16	0.179 2
4-17	0.158 0	4-18	0.133 5	5-6	0.956 5
5-7	0.870 3	5-8	0.799 4	5-9	0.763 0
5-10	0.679 1	5-11	0.603 0	5-12	0.508 9

续表 11

相关 层间	相关 系数	相关 层间	相关 系数	相关 层间	相关 系数
5-13	0.369 4	5-14	0.278 0	5-15	0.226 9
5-16	0.181 9	5-17	0.160 4	5-18	0.135 6
6-7	0.909 8	6-8	0.835 8	6-9	0.797 7
6-10	0.710 0	6-11	0.630 4	6-12	0.532 0
6-13	0.386 2	6-14	0.290 7	6-15	0.237 3
6-16	0.190 2	6-17	0.167 7	6-18	0.141 7
7-8	0.918 6	7-9	0.876 7	7-10	0.780 4
7-11	0.692 9	7-12	0.584 7	7-13	0.424 4
7-14	0.319 5	7-15	0.260 8	7-16	0.209 0
7-17	0.184 3	7-18	0.155 8	8-9	0.954 4
8-10	0.849 5	8-11	0.754 2	8-12	0.636 5
8-13	0.462 0	8-14	0.347 8	8-15	0.283 9
8-16	0.227 5	8-17	0.200 7	8-18	0.169 6
9-10	0.890 1	9-11	0.790 3	9-12	0.667 0
9-13	0.484 1	9-14	0.364 4	9-15	0.297 4
9-16	0.238 4	9-17	0.210 2	9-18	0.177 7
10-11	0.887 8	10-12	0.749 3	10-13	0.543 9
10-14	0.409 4	10-15	0.334 2	10-16	0.267 9
10-17	0.236 2	10-18	0.199 6	11-12	0.844 0
11-13	0.612 6	11-14	0.461 1	11-15	0.376 4
11-16	0.301 7	11-17	0.266 0	11-18	0.224 8
12-13	0.725 8	12-14	0.546 4	12-15	0.446 0
12-16	0.357 5	12-17	0.315 2	12-18	0.266 4
13-14	0.752 8	13-15	0.614 4	13-16	0.492 5
13-17	0.434 3	13-18	0.367 0	14-15	0.816 2
14-16	0.654 3	14-17	0.576 9	14-18	0.487 6
15-16	0.801 6	15-17	0.706 9	15-18	0.597 3
16-17	0.881 8	16-18	0.745 2	17-18	0.845 1

3 结论

综上所述,以层间变形失效模式为主要失效模式的高层钢筋混凝土对称框架、非对称框架和等跨框架结构在大震作用下,各失效模式之间的相关性具有下列统计规律:绝大多数层之间的失效模式是相关的,相关的层间数约占总层数的 $2/3 \sim 3/4$,仅有少数层间的破坏是独立的。

参考文献:

- [1] 王东炜. 关于建筑结构若干失效相关性问题的探讨分析[J]. 世界地震工程, 2001, 17(1): 112~114.
- [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] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 高小旺, 魏 珪, 韦承基. 基于概率的结构抗震设计方法[J]. 建筑结构学报, 1988, 9(6): 58~65.
- [7] 李国强. 基于概率可靠度进行结构抗震设计的若干理论问题[J]. 建筑结构学报, 2000, 21(1): 12~16.

Displacement - based Failure Mode Dependency Analysis of RC High - rise Frame Structures under Strong Earthquakes

ZHU Jun - feng¹, WANG Dong - wei², HUO Da¹

(1. College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China; 2. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: In order to simplify the calculation of reliability of system, the story drifts are considered as random variables in this paper. The failure modes based on story drifts are main failure modes. The method of Monte - Carlo is used to study the dependency of high - rise frame structures under strong earthquakes based on story deformation. Some statistical rules of dependencies are obtained about high - rise frame structures under strong earthquakes.

Keywords: reliability of system; frame structure; failure mode; dependency; Monte - Carlo method