

文章编号:1671-6833(2005)03-0037-04

# 钢筋混凝土多层框架结构的失效相关性分析

朱俊锋<sup>1</sup>, 王东炜<sup>2</sup>, 霍 达<sup>1</sup>

(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:** 在建筑结构中, 体系可靠度是衡量结构整体性能的一个重要指标. 在体系可靠度的计算中, 一个急需解决的问题是结构构件或截面间的相关性问题. 基于静力弹塑性方法, 对钢筋混凝土多层框架结构在小震和大震情况下的失效相关性问题进行了研究, 分别得出了框架梁、柱在小震和大震下的部分失效相关性规律.

**关键词:** 静力弹塑性; 失效相关性; 体系可靠度; 框架结构

**中图分类号:** TU 448.27

**文献标识码:** A

## 0 引言

结构体系可靠度是衡量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.”<sup>[1]</sup> 目前, 体系可靠度的研究已经取得了很大的进展, 在电子、机械、航空等领域已开始应用于工程实践. 但在土木工程领域, 由于结构的荷载环境、失效机制、失效模式相关性等问题的相对复杂性, 结构体系可靠度的研究还基本上处于理论研究阶段, 相应的其计算方法尚未进入规范. 我国目前的有关建筑设计规范以及港口、铁路和水工规范等还都是以设计截面满足目标可靠指标来进行结构的可靠性设计的.

众所周知, 由可靠的构件不一定能组成一个可靠的结构; 同理, 由若干个可靠的控制截面也不一定形成一个可靠的构件. 致使我们不能进行结构水平的可靠性设计的一个重要问题, 即是结构中的失效相关性问题.

一个建筑结构在一定的失效准则下可能会有多个失效模式, 而每一个失效模式又是由多个失效约束(如失效截面、失效杆件、失效节点等)所组成的. 因此, 在建筑结构体系的可靠性分析中, 包含有两类失效相关性问题: 一类是失效模式间的相关性问题; 一类是约束状态间的相关性问题<sup>[2]</sup>

这些相关性往往对体系可靠度分析结果产生较大的影响, 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.

由于地震的随机性很大, 要使所设计的结构在遭受将来可能发生的小震时绝对不破坏和大震时绝对不倒塌, 是不现实和不经济的. 建筑结构的抗震设计需要从现有的经济条件出发, 在当前经济条件允许的情况下, 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, 而不能追求绝对的安全性<sup>[3]</sup>.

## 1 随机模拟分析过程

对结构进行 Pushover 方法分析, 其大致步骤如下<sup>[4~7]</sup>:

(1) 按现行抗震设计规范(GB 50011-2001) 设计钢筋混凝土多层框架结构.

(2) 选取结构的某榀典型框架, 按照结构的实际受力情况进行力学简化, 建立有限元分析模型, 包括几何尺寸、物理参数以及节点和构件的编号.

(3) 按照结构设计参数和截面配筋求出各个构件的正截面受弯承载力和斜截面受剪承载力.

(4) 对结构施加竖向荷载, 求出结构在竖向荷载作用下的内力, 以便和水平荷载作用下的内力进行组合. 竖向荷载标准值的分项系数按照规范的规定取用.

收稿日期: 2005-03-28; 修订日期: 2005-05-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50178064)

作者简介: 朱俊锋(1978-), 男, 河南省临颖县人, 北京工业大学博士研究生, 主要从事结构可靠度、工程结构抗震方面的研究.

(5) 对结构施加一定量的沿高度呈一定分布的水平荷载. 水平荷载施加于各楼层的质量中心处, 对于规则框架, 各层水平荷载之间的比例关系或沿结构高度的分布规律, 可以按照底部剪力法确定.

水平力的确定原则是: 水平力与竖向荷载共同产生的内力, 应能使个别构件进入屈服.

(6) 对于在上一步中进入屈服的构件, 利用塑性铰来改变其状态. 这样, 相当于形成了一个“新”的结构, 该结构维持竖向荷载不变, 并再施加一定量的水平力荷载, 又使一个或一小批构件进入屈服状态.

(7) 不断地重复第(6)步, 直到结构的侧向位移达到预定的破坏极限, 或由于铰结点过多而成为机构, 此时整个Pushover 过程结束.

1.1 约束失效判定准则

在小震和大震情况下, 钢筋混凝土框架结构梁、柱约束的失效可以按照强度失效准则进行判定, 即当给定的框架结构的截面抗力大于相应的荷载效应时, 认为约束“可靠”, 否则认为约束“失效”.

1.2 结构失效判定原则

“小震不坏”即要求在小震情况下, 结构应处于弹性状态, 有局部约束失效就认为结构破坏. 因此本文假定在小震作用下, 如果框架梁的任一截面出现塑性铰, 则认为整个结构未能满足“小震不坏”的设计要求而失效. 本文对小震下结构最弱截面的可靠性指标  $\beta$  进行了控制, 将其控制在 1.5 左右.

“大震不倒”即要求在大震情况下, 允许结构出现塑性破坏, 但不允许结构发生倒塌或危及生命的严重破坏. 本文假定在大震作用下, 如果某一层的层间位移超过规范规定的限定位移, 则认为整个结构失效. 层间弹塑性位移角限值按规范取为  $[\theta] = 1/50$ . 本文作者对大震下结构最弱层的可靠性指标  $\beta$  进行了控制, 将其控制在 0.5 左右.

1.3 随机 Monte Carlo 模拟

对于给定设计参数 (包括框架梁的截面面积、钢筋截面面积、钢筋强度与混凝土强度、保护层厚度等设计值) 和荷载, 分别调用这些参数相对应的随机数发生器, 产生相应的随机数值, 以实现钢筋混凝土多层框架结构的 Monte Carlo 随机模拟. 有关的统计参数见文献 [8].

1.4 失效相关性分析

对结构进行完随机有限元分析之后, 可得到

各约束是否失效的信息. 当约束可靠时, 记为“1”, 否则记为“0”. 然后, 将各约束的失效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, 即可对框架结构的截面约束进行失效相关性检验.

1.5 相关性判定原则

根据PNET( 概率网络估算技术) 方法, 当两个截面的失效相关系数  $R_{xy} \geq 0.70$  时, 认为这两个截面的破坏是相关的; 反之, 则认为这两个截面的破坏不相关.

2 算例分析

2.1 计算模型

本文作者主要对三跨六层的对称结构、近似对称结构和非对称结构进行了小震和大震下随机模拟试验. 各种结构的具体结构参数信息如表 1 所示. 设防烈度设为 8 度, 场地土类型为 II 类. 抗震等级为二级. 梁混凝土采用 C25, 柱混凝土采用 C30, 计算周期折减系数 0.8, 梁柱纵向钢筋 II 级, 按照现行抗震设计规范要求对试验模型进行计算配筋. 本文对框架梁考虑了左、右梁端两个截面的正截面抗弯约束, 对框架柱考虑了柱上、下端两个截面的正截面抗弯约束. 有关的荷载信息如下:

(1) 水平荷载. 水平荷载仅考虑水平地震作用, 不考虑风荷载的作用. 假定水平荷载服从极值 I 型分布

(2) 竖向荷载. 竖向荷载均为均布荷载, 作用于框架梁上, 主要是框架梁自重、单向预制板自重等产生的恒载以及活荷载等作用. 假定竖向荷载服从正态分布.

表 1 三跨六层结构参数表  
Tab. 1 Structural parameters of three-span-six-story structure

类别	对称结构	近似对称结构	非对称结构
跨度/m	5.7, 3.0, 5.7	5.7, 3.0, 6.0	6.0, 2.7, 7.2
层高/m	4.5, 3.6×5	4.5, 3.6×5	4.8, 3.6×5
梁截面/m	0.25×0.60	0.25×0.60	0.25×0.60(边跨), 0.25×0.50(中跨)
柱截面/m	0.45×0.45	0.50×0.50	0.50×0.50

说明: 表中跨度一栏依次为框架从左到右各跨跨度; 层高一栏依次为框架从下至上各层层高, 相邻几层层高一致时, 用×表示.

2.2 试验结果

限于篇幅, 本文作者给出了三跨六层对称框架结构在小震下的可能失效约束示意图, 如图 1(a) 所示, 各失效约束之间的相关系数如表 2 所

示;三跨六层对称结构框架梁在大震作用下,梁约束的编号如图 1(b) 所示,各失效约束之间的相关系数如表 3 所示;三跨六层对称框架柱在大震作用下,柱约束的编号如图 1(c) 所示,各失效约束

之间的相关系数如表 4 所示.为了方便期间,试验时对柱约束重新进行了编号,这样做对试验结果没有任何影响.

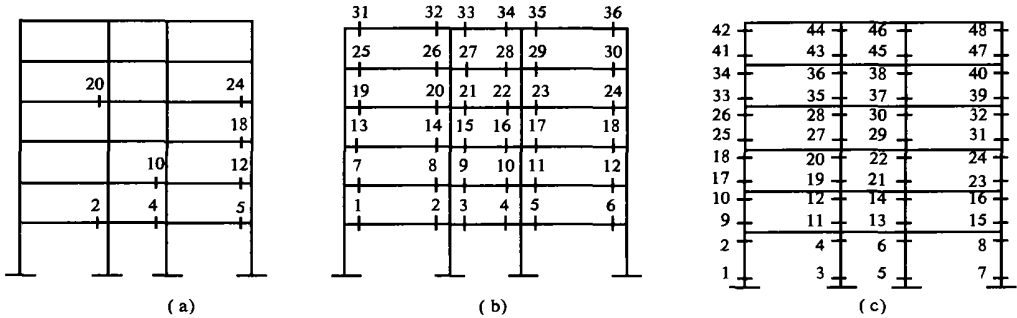


图 1 约束编号示意图

Fig. 1 The serial numbers of constraints

表 2 三跨六层对称结构在小震作用下失效相关系数表

Tab. 2 The correlative coefficient of symmetricaly three span six story structure under small earthquakes

相关约束	$R_{xy}$	相关约束	$R_{xy}$	相关约束	$R_{xy}$	相关约束	$R_{xy}$	相关约束	$R_{xy}$	相关约束	$R_{xy}$
2—4	0.212 3	2—6	0.180 5	2—10	0.461 8	2—12	0.316 4	2—18	0.307 1	2—20	0.140 9
2—24	0.177 2	4—6	0.634 6	4—10	0.196 5	4—12	0.462 6	4—18	0.196 5	4—20	0.180 4
4—24	0.541 9	6—10	0.167 1	6—12	0.393 0	6—18	0.167 1	6—20	0.152 8	6—24	0.519 7
10—12	0.342 5	10—18	0.165 0	10—20	0.307 1	10—24	0.193 1	12—18	0.412 0	12—20	0.380 8
12—24	0.398 1	18—20	0.152 5	18—24	0.193 1	20—24	0.208 6				

表 3 三跨六层对称框架梁在大震作用下相关系数表

Tab. 3 The correlative coefficient of symmetricaly three span six story frame beam under strong earthquakes

相关约束	$R_{xy}$	相关约束	$R_{xy}$	相关约束	$R_{xy}$	相关约束	$R_{xy}$	相关约束	$R_{xy}$	相关约束	$R_{xy}$
1—2	0.738 9	1—3	0.825 0	1—4	0.590 9	1—5	0.931 5	1—6	0.553 0	1—7	0.894 7
1—8	0.838 4	1—9	0.906 0	1—10	0.761 6	1—11	0.896 3	1—12	0.707 8	2—3	0.801 3
2—4	0.793 0	2—5	0.706 5	2—6	0.739 3	2—7	0.684 3	2—8	0.852 6	2—9	0.748 7
2—10	0.856 7	2—11	0.677 9	2—12	0.802 0	3—4	0.642 4	3—5	0.869 2	3—6	0.601 2
3—7	0.846 8	3—8	0.854 2	3—9	0.873 2	3—10	0.787 7	3—11	0.842 9	3—12	0.725 1
4—5	0.564 9	4—6	0.870 9	4—7	0.550 5	4—8	0.689 3	4—9	0.603 6	4—10	0.760 6
4—11	0.545 4	4—12	0.767 7	5—6	0.528 7	5—7	0.920 8	5—8	0.809 3	5—9	0.893 1
5—10	0.730 1	5—11	0.932 3	5—12	0.682 7	6—7	0.515 2	6—8	0.644 4	6—9	0.564 9
6—10	0.715 2	6—11	0.510 4	6—12	0.740 4	7—8	0.788 7	7—9	0.877 3	7—10	0.711 5
7—11	0.942 9	7—12	0.665 2	7—13	0.909 3	7—14	0.851 6	7—15	0.913 0	7—16	0.849 0
7—17	0.888 4	7—18	0.744 4	8—9	0.864 7	8—10	0.887 9	8—11	0.781 3	8—12	0.816 9
8—13	0.744 4	8—14	0.854 1	8—15	0.751 1	8—16	0.849 6	8—17	0.710 7	8—18	0.803 7
9—10	0.780 1	9—11	0.889 2	9—12	0.729 4	9—13	0.852 6	9—14	0.869 9	9—15	0.850 3
9—16	0.857 8	9—17	0.815 6	9—18	0.766 2	10—11	0.704 8	10—12	0.870 9	10—13	0.671 5
10—14	0.791 8	10—15	0.677 3	10—16	0.783 6	10—17	0.641 1	10—18	0.798 1	11—12	0.659 1
11—13	0.914 8	11—14	0.831 1	11—15	0.926 1	11—16	0.832 8	11—17	0.898 9	11—18	0.745 4
12—13	0.627 9	12—14	0.747 0	12—15	0.633 2	12—16	0.729 4	12—17	0.599 5	12—18	0.791 6
13—14	0.826 9	13—15	0.943 8	13—16	0.812 9	13—17	0.941 8	13—18	0.723 8	13—19	0.920 2
13—20	0.668 2	13—21	0.802 6	13—22	0.683 0	13—23	0.900 7	13—24	0.554 7	14—15	0.836 6
14—16	0.922 9	14—17	0.789 5	14—18	0.849 2	14—19	0.787 0	14—20	0.774 1	14—21	0.830 5
14—22	0.789 7	14—23	0.797 8	14—24	0.661 8	15—16	0.822 5	15—17	0.928 6	15—18	0.732 3

续表 3

相关约束	$R_{xy}$	相关约束	$R_{xy}$	相关约束	$R_{xy}$	相关约束	$R_{xy}$	相关约束	$R_{xy}$	相关约束	$R_{xy}$
15—19	0.911 3	15—20	0.684 7	15—21	0.812 9	15—22	0.697 6	15—23	0.896 0	15—24	0.570 1
16—17	0.776 1	16—18	0.864 2	16—19	0.775 7	16—20	0.778 6	16—21	0.840 5	16—22	0.798 4
16—23	0.790 3	16—24	0.667 6	17—18	0.691 0	17—19	0.928 0	17—20	0.649 0	17—21	0.784 2
17—22	0.661 2	17—23	0.898 5	17—24	0.536 9	18—19	0.692 5	18—20	0.791 0	18—21	0.788 6
18—22	0.774 7	18—23	0.709 2	18—24	0.723 7	19—20	0.665 1	19—21	0.815 4	19—22	0.677 3
19—23	0.954 8	19—24	0.553 4	19—25	0.889 9	19—26	0.843 3	19—27	0.906 7	19—28	0.911 5
19—29	0.869 7	19—30	0.760 8	20—21	0.811 6	20—22	0.911 2	20—23	0.681 2	20—24	0.823 6
20—25	0.593 4	20—26	0.735 0	20—27	0.619 4	20—28	0.681 2	20—29	0.581 5	20—30	0.763 4
21—22	0.826 5	21—23	0.839 3	21—24	0.675 2	21—25	0.731 1	21—26	0.836 0	21—27	0.763 2
21—28	0.820 6	21—29	0.716 5	21—30	0.820 6	22—23	0.693 7	22—24	0.810 7	22—25	0.604 3
22—26	0.742 3	22—27	0.619 4	22—28	0.693 7	22—29	0.592 2	22—30	0.742 8	23—24	0.566 7
23—25	0.871 1	23—26	0.863 4	23—27	0.896 0	23—28	0.922 6	23—29	0.851 5	23—30	0.784 2
24—25	0.493 7	24—26	0.611 5	24—27	0.511 3	24—28	0.566 7	24—29	0.483 8	24—30	0.696 0
25—26	0.807 4	25—27	0.937 2	25—28	0.871 1	25—29	0.970 5	25—30	0.703 0	25—31	0.907 8
25—32	0.828 8	25—33	0.914 3	25—34	0.941 2	25—35	0.884 5	25—36	0.906 5	26—27	0.842 7
26—28	0.893 0	26—29	0.791 2	26—30	0.860 6	26—31	0.732 9	26—32	0.871 7	26—33	0.746 0
26—34	0.767 6	26—35	0.714 1	26—36	0.789 0	27—28	0.909 3	27—29	0.938 9	27—30	0.733 8
27—31	0.869 7	27—32	0.852 0	27—33	0.885 3	27—34	0.910 9	27—35	0.847 4	27—36	0.894 5
28—29	0.853 7	28—30	0.802 9	28—31	0.790 8	28—32	0.873 2	28—33	0.804 9	28—34	0.828 3
28—35	0.770 6	28—36	0.826 5	29—30	0.689 0	29—31	0.926 3	29—32	0.831 5	29—33	0.935 5
29—34	0.962 9	29—35	0.902 6	29—36	0.925 8	30—31	0.638 2	30—32	0.800 4	30—33	0.649 6
30—34	0.668 4	30—35	0.621 8	30—36	0.689 0	31—32	0.789 1	31—33	0.964 6	31—34	0.954 7
31—35	0.974 4	31—36	0.926 3	32—33	0.803 2	32—34	0.961 9	32—35	0.768 9	32—36	0.847 4
33—34	0.961 9	33—35	0.957 3	33—36	0.937 9	34—35	0.930 3	34—36	0.941 1	35—36	0.902 6

表 4 三跨六层对称框架柱大震下相关系数表

Tab.4 The correlative coefficient of symmetrical three span six story frame column under strong earthquakes											
相关约束	$R_{xy}$	相关约束	$R_{xy}$	相关约束	$R_{xy}$	相关约束	$R_{xy}$	相关约束	$R_{xy}$	相关约束	$R_{xy}$
1—2	0.773 7	3—4	0.812 1	5—6	0.909 3	7—8	0.840 3	9—10	0.616 2	11—12	0.872 6
13—14	0.899 8	15—16	0.752 9	17—18	0.787 6	19—20	0.872 4	21—22	0.910 8	23—24	0.806 2
25—26	0.874 8	27—28	0.884 4	29—30	0.939 9	31—32	0.830 7	33—34	0.853 1	35—36	0.873 7
37—38	0.928 4	39—40	0.873 1	41—42	0.876 8	43—44	0.923 7	45—46	0.954 1	47—48	0.758 3
41—43	0.813 7	41—44	0.762 1	41—45	0.890 2	41—46	0.845 0	41—47	0.850 6	41—48	0.671 1
42—43	0.780 9	42—44	0.751 5	42—45	0.901 8	42—46	0.906 8	42—47	0.794 6	42—48	0.630 8
43—45	0.845 3	43—46	0.848 3	43—47	0.815 8	43—48	0.776 2	44—45	0.813 2	44—46	0.819 9
44—47	0.785 6	44—48	0.812 1	45—47	0.854 5	45—48	0.701 7	46—47	0.818 9	46—48	0.706 0

3 结 论

对上面的试验结果进行统计分析,可以得出多层钢筋混凝土框架结构分别在小震和大震下的部分失效相关性规律:

3.1 小震下钢筋混凝土多层框架结构失效相关性规律

在小震和强柱弱梁情况下,钢筋混凝土多层框架结构各约束的失效可认为是相互独立的,这与文献[9]用弹性随机有限元得出的结论一致.

3.2 大震下钢筋混凝土多层框架梁约束的失效相关性规律

在大震作用下,钢筋混凝土多层框架梁各失效约束之间的相关性具有下列统计规律:处于同一高度处的框架梁约束的失效是相关的;某一层与其相邻层的框架梁约束的失效是相关的.

3.3 大震下钢筋混凝土多层框架柱约束的失效相关性规律

在大震作用下,钢筋混凝土多层框架柱各失效约束之间的相关性具有下列统计规律:同一根框架柱上下端约束的失效是相关的;薄弱层中的各框架柱约束的失效是相关的.

(下转第 50 页)

The Comprehensive Evaluation Index Systems of the Dwelling Houses' Intelligence

MEN Mao -chen<sup>1</sup>, REN Tian -ping<sup>2</sup>, FANG Shu -yan<sup>3</sup>

( 1.Comprehensive Design and Research Institute , Zhengzhou University ,Zhengzhou 450002,China ;2.School of Mechanical Engineer - ing ,Zhengzhou University ,Zhengzhou 450002,China ;3.Department of Power Engineering ,Zhengzhou Electric Power College ,Zhengzhou 450004,China)

**Abstract :** This paper creates the comprehensive evaluation index systems of dwelling houses 'intelligence by using Delphi method . This paper deals with how to evaluate the dwelling houses 'intelligence in terms of modularizing and quantifying .It determines the weight of the index and establishes the evaluation model ,which provides some objective basis for the evaluation of the dwelling houses 'intelligence in future .

**Key words :** dwelling houses 'intelligence ; Delphi method ;index system

( 上接第 40 页)

参考文献:

[ 1] GB 50153-92,工程结构可靠度设计统一标准[S] .

[ 2] 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.

[ 3] 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.

[ 4] 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.

[ 5] 叶燎原,潘 文.结构静力弹塑性分析(push over) 的原理和计算实例[J] .建筑结构学报,2000,21( 1) ;37~43.

[ 6] 杨 溥,李英民,王亚勇,等.结构静力弹塑性分析(push over) 方法的改进[J] .建筑结构学报,2000,21( 1) ;44~50.

[ 7] 杨 溥,李 东,李英民,等.抗震结构静力弹塑性分析(push over) 方法的研究进展[J] .重庆建筑大学学报,2000,22( 2) ;87~92.

[ 8] 王光远,程耿东,邵卓民,等.抗震结构的最优设防烈度与可靠度[M] .北京:科学出版社,1999.

[ 9] 傅 方,王东炜,李广慧.小震作用下钢筋混凝土框架结构失效相关性分析[J] .地震工程与工程震动,1999,19( 1) ;87~92.

An Analysis of Failure Dependency of the RC Multilayer Frame Structures

ZHU Jun -feng<sup>1</sup>, Wang Dong -wei<sup>2</sup>, HUO Da<sup>1</sup>

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

**Abstract :** Reliability of system is an important index that scales the whole performances of building structures .During the calculation of reliability of structure system failure dependency of the components or the sections is one of the key problems that are to be solved .In this paper the failure dependency problem of RC frame structure is studied based on the method of static elastic plasticity under small and strong earthquakes respectively .Some failure dependency rules of beams and columns are obtained under small and strong earthquakes respectively .

**Key words :** static elastic plasticity ;failure dependency ;reliability of system ;frame structure