

文章编号:1671-6833(2011)01-0009-04

大震下基于位移的 RC 高层框架-剪力墙 结构失效相关性研究

朱俊锋¹, 王东炜²

(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:以层间变形失效为主要失效模式,采用 Monte-Carlo 方法,在大震作用下对 RC 高层框架-剪力墙结构进行了失效相关性研究. 研究结果表明绝大多数层之间的失效是统计相关的.

关键词:体系可靠度; 框架-剪力墙结构; 失效相关性

中图分类号: TU311.2 **文献标志码:** A

0 引言

在结构体系的失效概率计算中,合理地考虑各个单元失效间的相关性是非常重要的^[1]. 工程结构的失效相关性是指因为结构受到同一随机干扰源的作用(满足区域性和同时性假设),使得组成结构的各构件的失效相互关联而不独立^[2]. 传统的可靠性理论认为组成结构体系的各单元间的失效是相互独立的,该假设在机电等领域是成立的,因为在这些领域,造成各单元的失效具有偶然性. 而对于一个抗震结构而言,组成结构的各个构件,由于受到同一随机干扰源——地震的作用,使得各个构件的失效具有一定的相关性. 文献[3]给出了在单一随机干扰源作用下,系统的可靠性分析必须考虑单元间失效相关性的数学证明,并且结构数目越多相关问题越突出.

基于位移的抗震设计是在一定水准的地震作用下,以结构的位移响应作为目标设计结构和构件,用量化的位移设计指标来控制建筑物的抗震性能,使结构达到该水准地震作用下的功能要求^[4]. 从实际震害经验知道,地震作用下钢筋混凝土结构的破坏主要是由于层间变形过大引起的,层间变形过大也是建筑物内部设备、管道和装修等受到破坏的主要原因. 对于钢筋混凝土结构来说,结构层间变形是衡量结构破坏程度和功能的重要指标,结构层间变形失效为结构的主要破

坏模式^[5-6].

RC 框架-剪力墙结构由于兼有框架结构和剪力墙结构的优点,是目前高层建筑结构常用的结构形式之一,在设计、施工和使用过程中,其安全性、适用性和耐久性会受到大量随机因素的影响. 笔者在文献[7]和文献[8]基础上,以层间变形失效为主要失效模式,对 RC 框架-剪力墙结构在大震作用下进行了失效相关性研究.

1 失效相关性分析过程

1.1 建立框架-剪力墙结构有限元模型

框架-剪力墙结构计算简图采用框架-剪力墙铰结体系,首先将结构单元内所有框架综合起来,构成一榀假想的总框架,总框架的剪切刚度等于各榀框架剪切刚度之和;同理,将结构单元内所有剪力墙综合在一起,形成一榀假想的总剪力墙,总剪力墙的弯曲刚度等于各榀剪力墙弯曲刚度之和. 总框架与总剪力墙之间采用刚性链杆相连. 高层框架-剪力墙有限元模型如图 1 所示.

1.2 对结构进行可靠性分析

失效相关性分析是建立在对结构进行可靠性分析的基础上的. 笔者采用 Monte-Carlo 方法对 RC 高层框架-剪力墙结构进行可靠性分析,模拟次数为 10 000 次. 在可靠性分析过程中,结构承受的竖向荷载和水平荷载均为随机荷载. 竖向荷载主要包括结构的自重和活荷载,假定竖向荷载

收稿日期:2010-07-11;修订日期:2010-08-20

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;河南科技大学青年研究基金资助(2008QN020)

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

服从正态分布。水平荷载主要为水平地震作用,分布方式为倒三角形分布,服从极值 I 型分布,有关荷载的统计参数参见文献[9]。

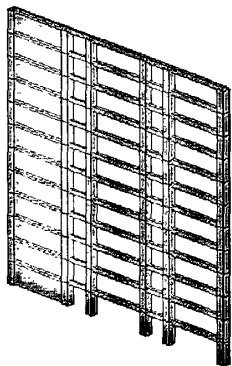


图 1 高层框架-剪力墙结构有限元模型

Fig.1 High-rise frame-shear-wall structure model

1.3 结构失效准则与极限状态方程

进行结构抗震可靠度分析首先需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之上的。目前,结构的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 种失效准则当中,由于变形失效准则计算较为简单,而且能够较好地反映结构在地震作用下的最大反应,在实际中得到了广泛的应用。根据框架-剪力墙结构在大震作用下的抗震设防目标,笔者基于层间位移,建立如下极限状态方程:

$$Z_i = [\Delta u_i] - \Delta u_i \begin{cases} > 0 & \text{可靠} \\ = 0 & \text{极限} \\ < 0 & \text{失效} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $[\Delta u_i]$ 为大震作用下第 i 层的极限层间位移, $[\Delta u_i] = [\theta] h_i$; $[\theta]$ 为大震作用下框架-剪力墙结构的层间位移角限值, $[\theta] = 1/100$; h_i 为第 i 层的层高; Δu_i 为大震作用下,第 i 层的层间位移, $\Delta u_i = u_i - u_{i-1}$; u_i 为第 i 层的水平位移, u_{i-1} 为第 $i-1$ 层的水平位移。

1.4 失效相关性分析

对 RC 高层框架-剪力墙结构进行完可靠性分析之后,可以得到每一层的层间位移(均为随机变量),将每一层的层间位移与对应的极限层间位移相比较,可以得到各层是否失效的信息。当某一层可靠时,记为“1”,失效时记为“0”,然后将各层的失效信息按照一定的顺序排列,形成一个一维有序数列,根据概率论有关知识,可以求得各层之间的失效相关系数。

1.5 失效相关性判定

求出各层之间的失效相关系数后,根据概率网络估算技术 PNET(Probabilistic Network Evaluation Technique)^[10],当两个层间位移的失效相关系数 $\rho_{ij} \geq 0.70$ 时,认为这两层之间的失效是高级相关的,近似认为它们之间的失效是统计相关的;反之,则认为这两层之间的失效是低级相关的,近似认为它们之间的失效是统计独立的。

2 算例

对 3 跨 12 层、3 跨 15 层和 3 跨 18 层 RC 框架-剪力墙结构在大震作用下进行了失效相关性分析。结构的抗震设防烈度为 8 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。层高均为 3.6 m,梁截面均为 0.25 m × 0.6 m,柱截面均为 0.5 m × 0.5 m。剪力墙厚度为 0.2 m,剪力墙混凝土强度等级为 C30。按照现行抗震设计要求,对结构进行计算配筋。框架-剪力墙结构中有关框架及剪力墙的几何参数分别如表 1 和表 2 所示。

表 1 框架几何参数表

Tab.1 Physical parameters of frame

层数	跨度/m	层高/m	框架榀数
12	6.0, 3.0, 6.0	3.6	8
15	6.6, 3.0, 6.6	3.6	8
18	7.2, 3.0, 7.2	3.6	8

表 2 剪力墙几何参数表

Tab.2 Physical parameters of shear-wall

层数	单片墙肢	单片墙肢	刚度
	面积/m ²	惯性矩/m ⁴	特征值
12	1.60	7.283	2.078
15	1.72	9.238	1.980
18	1.84	11.503	2.113

2.1 分析结果

以层间变形失效为主要失效模式的 3 跨 12 层、3 跨 15 层和 3 跨 18 层钢筋混凝土框架-剪力墙结构在大震作用下,各层之间的失效相关系数如表 3~表 5 所示。

从表 3 可以看出:以层间变形失效为主要失效模式的 12 层 RC 框架-剪力墙结构在大震作用下,绝大多数相关系数都大于 0.7 或者接近 0.7,仅有少数层间的失效相关系数小于 0.7。

从表 4 可以看出:以层间变形失效为主要失效模式的 15 层 RC 框架-剪力墙结构在大震作

表 3 12 层框架-剪力墙结构失效相关系数表

Tab.3 Failure correlation coefficients of twelve-storey frame-shear-wall structure

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	0.732 0	1-3	0.659 0	1-4	0.612 3
1-5	0.581 2	1-6	0.548 1	1-7	0.514 9
1-8	0.502 7	1-9	0.491 3	1-10	0.493 5
1-11	0.500 3	1-12	0.507 5	2-3	0.900 3
2-4	0.836 4	2-5	0.793 9	2-6	0.748 8
2-7	0.703 4	2-8	0.686 7	2-9	0.671 1
2-10	0.674 2	2-11	0.683 5	2-12	0.693 2
3-4	0.929 0	3-5	0.881 8	3-6	0.831 7
3-7	0.781 3	3-8	0.762 8	3-9	0.745 5
3-10	0.748 8	3-11	0.759 2	3-12	0.770 0
4-5	0.949 2	4-6	0.895 2	4-7	0.841 0
4-8	0.821 0	4-9	0.802 4	4-10	0.806 0
4-11	0.817 2	4-12	0.828 8	5-6	0.943 1
5-7	0.886 0	5-8	0.865 0	5-9	0.845 4
5-10	0.849 2	5-11	0.860 9	5-12	0.873 2
6-7	0.939 4	6-8	0.917 1	6-9	0.896 3
6-10	0.900 4	6-11	0.912 9	6-12	0.925 8
7-8	0.966 7	7-9	0.954 2	7-10	0.958 5
7-11	0.971 7	7-12	0.985 6	8-9	0.977 3
8-10	0.981 7	8-11	0.995 3	8-12	0.981 1
9-10	0.995 5	9-11	0.981 9	9-12	0.968 1
10-11	0.986 3	10-12	0.972 5	11-12	0.986 0

表 4 15 层框架-剪力墙结构失效相关系数表

Tab.4 Failure correlation coefficients of fifteen-storey frame-shear-wall structure

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	0.731 1	1-3	0.661 5	1-4	0.583 8
1-5	0.553 9	1-6	0.524 7	1-7	0.499 6
1-8	0.475 1	1-9	0.456 1	1-10	0.445 3
1-11	0.439 2	1-12	0.435 2	1-13	0.437 2
1-14	0.443 2	1-15	0.441 2	2-3	0.904 7
2-4	0.789 5	2-5	0.757 6	2-6	0.717 6
2-7	0.683 3	2-8	0.649 9	2-9	0.623 9
2-10	0.609 1	2-11	0.600 7	2-12	0.595 3
2-13	0.598 0	2-14	0.606 3	2-15	0.603 5
3-4	0.882 6	3-5	0.837 4	3-6	0.793 2
3-7	0.755 3	3-8	0.718 3	3-9	0.689 6
3-10	0.673 2	3-11	0.664 0	3-12	0.658 0
3-13	0.660 9	3-14	0.656 4	3-15	0.667 0
4-5	0.948 8	4-6	0.898 7	4-7	0.855 7
4-8	0.813 8	4-9	0.781 3	4-10	0.762 8
4-11	0.752 2	4-12	0.745 5	4-13	0.748 8
4-14	0.747 1	4-15	0.755 7	5-6	0.947 2

续表 4

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	0.901 9	5-8	0.857 8	5-9	0.823 5
5-10	0.804 0	5-11	0.792 9	5-12	0.785 7
5-13	0.789 3	5-14	0.788 7	5-15	0.796 5
6-7	0.952 1	6-8	0.905 6	6-9	0.869 3
6-10	0.848 7	6-11	0.837 0	6-12	0.829 5
6-13	0.833 2	6-14	0.833 8	6-15	0.840 9
7-8	0.951 1	7-9	0.913 0	7-10	0.891 4
7-11	0.879 1	7-12	0.871 2	7-13	0.875 1
7-14	0.866 4	7-15	0.883 2	8-9	0.960 0
8-10	0.937 2	8-11	0.924 3	8-12	0.916 0
8-13	0.920 1	8-14	0.913 0	8-15	0.928 6
9-10	0.976 3	9-11	0.962 8	9-12	0.954 2
9-13	0.958 5	9-14	0.952 6	9-15	0.967 3
10-11	0.986 2	10-12	0.977 3	10-13	0.981 7
10-14	0.976 7	10-15	0.990 7	11-12	0.991 0
11-13	0.995 5	11-14	0.990 8	11-15	0.995 4
12-13	0.995 5	12-14	0.981 9	12-15	0.986 5
13-14	0.986 3	13-15	0.990 9	14-15	0.986 1

表 5 18 层框架-剪力墙结构失效相关系数表

Tab.5 Failure correlation coefficients of eighteen-storey frame-shear-wall structure

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	0.715 9	1-3	0.661 1	1-4	0.623 8
1-5	0.559 7	1-6	0.523 7	1-7	0.497 3
1-8	0.480 6	1-9	0.454 4	1-10	0.441 5
1-11	0.416 5	1-12	0.406 5	1-13	0.400 8
1-14	0.395 3	1-15	0.393 5	1-16	0.398 9
1-17	0.402 6	1-18	0.404 5	2-3	0.923 4
2-4	0.871 3	2-5	0.781 9	2-6	0.731 6
2-7	0.694 6	2-8	0.671 3	2-9	0.634 7
2-10	0.616 7	2-11	0.581 8	2-12	0.567 8
2-13	0.559 8	2-14	0.552 1	2-15	0.549 7
2-16	0.557 2	2-17	0.562 4	2-18	0.565 1
3-4	0.943 6	3-5	0.846 7	3-6	0.792 3
3-7	0.752 3	3-8	0.727 1	3-9	0.687 3
3-10	0.667 8	3-11	0.630 1	3-12	0.614 9
3-13	0.606 3	3-14	0.598 0	3-15	0.703 0
3-16	0.603 5	3-17	0.609 1	3-18	0.612 0
4-5	0.897 3	4-6	0.839 6	4-7	0.797 2
4-8	0.770 5	4-9	0.727 4	4-10	0.707 7
4-11	0.667 7	4-12	0.651 6	4-13	0.642 5
4-14	0.633 7	4-15	0.630 8	4-16	0.639 5
4-17	0.645 5	4-18	0.648 5	5-6	0.935 7
5-7	0.888 4	5-8	0.858 6	5-9	0.811 7

续表 5

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	0.788 7	5-11	0.744 1	5-12	0.726 2
5-13	0.716 0	5-14	0.706 2	5-15	0.703 0
5-16	0.712 7	5-17	0.706 4	5-18	0.722 7
6-7	0.949 5	6-8	0.917 7	6-9	0.867 5
6-10	0.842 9	6-11	0.795 3	6-12	0.776 1
6-13	0.765 2	6-14	0.754 7	6-15	0.751 3
6-16	0.761 7	6-17	0.756 7	6-18	0.772 4
7-8	0.966 5	7-9	0.913 7	7-10	0.887 8
7-11	0.837 6	7-12	0.817 4	7-13	0.805 9
7-14	0.794 9	7-15	0.791 3	7-16	0.802 2
7-17	0.798 2	7-18	0.813 5	8-9	0.945 4
8-10	0.918 6	8-11	0.866 6	8-12	0.845 7
8-13	0.833 9	8-14	0.822 5	8-15	0.818 8
8-16	0.830 0	8-17	0.826 6	8-18	0.841 7
9-10	0.971 6	9-11	0.916 7	9-12	0.894 6
9-13	0.882 0	9-14	0.870 0	9-15	0.866 1
9-16	0.878 0	9-17	0.875 6	9-18	0.890 4
10-11	0.943 5	10-12	0.920 7	10-13	0.907 8
10-14	0.895 4	10-15	0.891 4	10-16	0.903 6
10-17	0.901 8	10-18	0.916 3	11-12	0.975 9
11-13	0.962 2	11-14	0.949 0	11-15	0.944 7
11-16	0.957 7	11-17	0.957 0	11-18	0.961 5
12-13	0.986 0	12-14	0.972 5	12-15	0.968 1
12-16	0.981 4	12-17	0.981 1	12-18	0.976 2
13-14	0.986 3	13-15	0.981 9	13-16	0.995 4
13-17	0.995 3	13-18	0.990 7	14-15	0.995 5
14-16	0.981 8	14-17	0.981 7	14-18	0.977 1
15-16	0.977 4	15-17	0.977 3	15-18	0.972 7
16-17	0.990 7	16-18	0.986 1	17-18	0.985 9

用下,第3层至第15层之间的失效相关系数绝大多数都大于0.7或者接近0.7,说明它们之间的失效是统计相关的。

从表5可以看出:以层间变形失效为主要失效模式的18层RC框架-剪力墙结构在大震作用下,第4层至第18层之间的失效相关系数绝大多数都大于0.7或者接近0.7,表明它们之间的失效是统计相关的。

2.2 失效相关示意图

以层间变形失效为主要失效模式的12层、15层和18层RC框架-剪力墙结构在大震作用下,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。

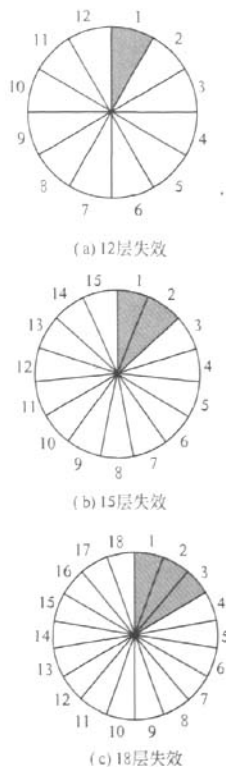


图2 失效相关示意图

Fig. 2 Failure dependence sketch maps

3 结论

以层间变形失效为主要失效模式的RC高层框架-剪力墙结构在大震作用下,绝大多数层之间的失效是统计相关的。

参考文献:

- [1] 王光远,朱靖华. 地震作用下串、并联工程系统中结构失效相关性的近似处理[J]. 地震工程与工程振动,1998,18(4):1-7.
- [2] 张鹏. 同时考虑中介状态和失效相关时复杂抗震工程系统可靠性研究展望[J]. 四川大学学报:工程科学版,2003,35(6):15-19.
- [3] 何钟怡. 单一随机扰动源作用下工程结构的失效相关性问题[J]. 地震工程与工程振动,1994,14(2):76-85.
- [4] 钱稼茹,罗文斌. 建筑结构基于位移的抗震设计[J]. 建筑结构,2001,31(4):3-6.
- [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]. 建筑科学,2000,21(1):5-11.
- [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.

(下转第17页)

- [5] JGJ 51—2002 轻骨料混凝土技术规程[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2002.
- [6] 程智清,刘宝举,杨元霞,等. 高强轻集料混凝土力学性能试验研究[J]. 粉煤灰,2006,18(4):7-9.
- [7] 王树和,甄飞,熊小群,等. 高强轻集料混凝土力学性能影响因素研究[J]. 武汉理工大学学报,2007,29(9):104-107.
- [8] 程智清. 高性能页岩轻集料混凝土试验研究[D]. 长沙:中南大学材料学院,2007.

Experimental Study on Tensile Strength of Manufactured-sand Expanded-shale Concrete

LI Chang-yong^{1,2}, CHEN Huai¹, ZHAO Shun-bo²

(1. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. School of Civil Engineering & Communication, North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Zhengzhou 450011, China)

Abstract: The experiments were conducted to study the effects of cement content, water to cement ratio and sand ratio on the tensile performances of lightweight concrete composited with manufactured sand and expanded shale. It is proved that the splitting tensile strength is mainly controlled by the capacity against splitting of expanded-shale itself, no regularity exists between splitting tensile strength and sand ratio. Increasing sand ratio can raise the axial tensile strength and the flexural tensile strength while cement content is lower, but there is no obvious influence when the cement content is larger. The splitting tensile strength and axial tensile strength decrease with the increase of water to cement ratio, but the flexural tensile strength does not change obviously. There are the optimum values of sand ratio and water to cement ratio result in the largest tensile elastic modulus of concrete. The mix proportion is suggested which satisfies the technical requirements of fresh concrete workability and LC35 lightweight concrete strength.

Key words: lightweight concrete; manufactured sand; expanded shale; test research; tensile performance

(上接第12页)

- [7] 朱俊锋,王东炜,霍达. 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[J]. 郑州大学学报:工学版,2006,27(3):9-14.
- [8] 朱俊锋,霍达,王东炜. 基于位移的RC整体剪力墙在小震作用下失效相关性分析[J]. 北京工业大学学报,2007,33(1):26-30.
- [9] 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,1999:124-273.
- [10] 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: 504-509.

Displacement-based Failure Dependence Study on RC High-Rise Frame-Shear-Wall Structures under Strong Earthquakes

ZHU Jun-feng¹, WANG Dong-wei²

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

Abstract: In order to simplify the calculation of structural system reliability, it is necessary to study the problem of failure dependence. In this paper, the failure dependences of RC high-rise frame-shear-wall structures are studied by using Monte-Carlo method under strong earthquakes based on storey drift. The results indicate that the failure of absolute stories of RC high-rise frame-shear-wall structures is statistically dependent under strong earthquakes based on storey drift.

Key words: reliability of system; frame-shear wall structure; failure dependence