

文章编号:1671-6833(2003)01-0085-04

# 砼框架结构在小震下失效及相关性分析

朱俊锋, 吴泽玉, 王东炜

(郑州大学土木工程学院, 河南 郑州 450002)

**摘要:**采用 Pushover 方法,通过大量的 Monte Carlo 随机模拟分析,研究了框架结构在地震作用下的失效相关性问题,得出了在小震和强柱弱梁情况下框架梁的失效规律及相关性规律.分析了在小震和强柱弱梁情况下框架结构的可能失效部位,指出在小震和强柱弱梁情况下,各约束之间失效相关性是可以忽略不计的,从而验证了“在小震下框架结构截面约束失效服从失效独立性假设”这一结论的正确性.

**关键词:**Pushover 方法; 框架结构; 失效相关性; 随机模拟

**中图分类号:**TU 311

**文献标识码:**A

## 0 引言

结构可靠度是结构可靠性的定量指标,是对工程结构进行综合性评估以及进行结构设计、施工、维修、加固和修复的重要指导性指标,对其进行深入的研究有着重要的理论意义和工程实用价值.要把该理论应用到实践中去,需要解决的核心问题是结构各约束间的失效相关性问题.目前关于建筑结构失效相关性方面的文献还很少.文献[1]采用弹性随机有限元方法,得出了在小震作用下,按照抗震设计规范设计的钢筋混凝土框架结构各反应约束间服从失效独立性假定的结论.

## 1 结构弹塑性分析方法

结构弹塑性地震反应分析是通过建立结构的计算模型和弹塑性恢复力曲线,并依据结构反应分析理论,对结构在地震作用下的内力、位移进行计算和分析,以期了解结构的各个部位在地震作用下反应的全过程.该方法对于评价和检验建筑结构的抗震性能有着十分重要的意义.目前,结构弹塑性分析主要有动力非线性和静力非线性两种方法.

### 1.1 动力时程分析法

动力非线性方法即动力时程分析法,它对于研究在强震下结构的非线性反应具有很明显的优点,被认为是结构弹塑性分析的最可靠方法.但动

力时程分析法计算过程复杂,计算工作量大,费用高.因而在实际使用过程中还受到很大限制,特别是在设计工作中,因为无法预测未来的地震运动,因而不可能通过动力时程分析法预测所设计房屋在未来地震作用下的真实表现.

### 1.2 Pushover 方法

Pushover 分析方法从本质上说是一种静力非线性计算方法,故又称为非线性静力分析方法.它的应用范围主要集中于对现有结构或设计方案进行抗侧力能力的计算,进而得到其抗震能力的估计.这种方法与以往的抗震静力计算方法不同之处主要在于,它将设计反应谱引入到了计算过程和计算成果的工程解释<sup>[2,3]</sup>.

Pushover 分析法没有特别严密的理论基础,其基本假定为<sup>[4]</sup>:①结构的响应与一等价单自由度体系相关,这意味着结构响应仅由结构的第一振型控制;②结构沿高度的变形由形状向量 $\{\varphi\}$ 表示,在整个地震反应过程中,不管结构的变形大小,形状向量 $\{\varphi\}$ 保持不变.

已有的研究表明:对于响应以第一振型为主的结构最大地震反应,静力弹塑性分析法可以得到合理的分析结果<sup>[3]</sup>.

Pushover 分析方法现已被正式写入美国的 ATC-40、FEMA 273 和 FEMA 274 之中.日本也将 Pushover 分析方法列为检查建筑物结构抗震性能的方法.我国在最近修订的建筑结构抗震规范中

收稿日期:2002-09-22;修订日期:2002-10-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(S0178064)

作者简介:朱俊锋(1978-),男,河南省临颍县人,郑州大学硕士研究生.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

也引入了 Pushover 方法,只是没有采用 Pushover 这个词<sup>[3]</sup>.因此,开展 Pushover 分析方法的研究与应用,具有重要的理论意义和实际应用价值.

2 失效及相关性研究

2.1 Pushover 方法实施步骤<sup>[3]</sup>

(1) 选取结构的某榀典型框架,按照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.

(2) 对结构施加竖向作用荷载.竖向荷载标准值的分项系数按照规范的规定取用.

(3) 对结构施加一定量的水平荷载.水平力施加于各层的质量中心处.对于规则框架,各层水平力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.

(4) 对在上一步中屈服的构件,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荷载,又使一个或一小批构件屈服.

(5) 不断地重复第(4)步,直到结构的侧向位移达到预定的破坏极限,或由于铰接点过多而成为机构,此时整个 Pushover 过程结束.

2.2 约束失效判定准则

在小震情况下,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为“可靠”,否则认为“失效”.

本文对框架梁仅考虑了左右梁端两个截面的正截面抗弯约束.

2.3 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)和实际作用荷载信息的框架结构,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 对框架结构的 Monte Carlo 随机模拟,具体模拟过程请参阅文献[4],本文中 Monte Carlo 随机模拟次数为 3000 次.

2.4 失效相关性分析

对结构进行完随机分析之后,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.

3 试验模型及算例分析

3.1 试验模型

本文主要对 3 跨 2 层、3 跨 6 层、3 跨 12 层的对称结构、近似对称结构和非对称结构等共 9 种结构进行了随机模拟试验.各种结构的具体结构参数信息如表 1 所示.

表 1 结构参数表

Tab.1 The structure parameters of the frame structures				m
项目	参数	对称结构	近似对称结构	非对称结构
三跨两层	跨度	5.7, 3.0, 5.7	5.7,3.0,6.0	6.0,2.7,7.2
	层高	4.5, 3.6	4.5, 3.6	4.8, 3.6
	梁截面	0.25×0.60	0.25× 0.60	0.25×0.60(边跨) 0.25×0.50(中跨)
	柱截面	0.45×0.45	0.50×0.50	0.50× 0.50
三跨六层	跨度	5.7, 3.0, 5.7	5.7,3.0,6.0	6.0,2.7,7.2
	层高	4.5, 3.6×5	4.5, 3.6×5	4.8, 3.6×5
	梁截面	0.25×0.60	0.25× 0.60	0.25× 0.60(边跨), 0.25×0.50(中跨)
	柱截面	0.45×0.45	0.50×0.50	0.50× 0.50
三跨十二层	跨度	5.7, 3.0, 5.7	5.7,3.0,6.0	6.0,2.7,7.2
	层高	4.5, 3.6×11	4.5, 3.6×11	4.8, 3.6×11
	梁截面	0.25×0.60	0.25× 0.60	0.25× 0.60(边跨) 0.25×0.50(中跨)
	柱截面	0.45×0.45	0.50×0.50	0.60×0.60(底层), 0.50×0.50

设防烈度设为 8 度,场地土类型为 II 类.3 跨 2 层、3 跨 6 层的抗震等级为二级,3 跨 12 层的抗震等级为一级.梁混凝土采用 C25,柱混凝土采用 C30,计算周期折减系数 0.8,二层和六层结构抗震等级为二级,十二层结构抗震等级为一级.梁柱

纵向钢筋 II 级,按照现行抗震设计规范要求,采用中国建筑科学研究院编制的 PK-PM 程序对试验模型进行计算配筋(不考虑配筋的放大系数).

3.2 荷载信息

(1) 水平荷载:水平荷载仅考虑左水平地震

作用,不考虑风荷载的作用.

(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.

3.3 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.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构件的可靠性指标 $\beta$ 进行控制,将其控制在1.5左右.

3.4 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.

3.5 计算结果

9个算例在小震情况下可能失效截面示意图见图1~3,部分失效相关系数见表2及表3.

表2 三跨六层对称结构相关系数表

Tab.2 The  $R_{xy}$  symmetrical structure of three span six layers

相关约束	$R_{xy}$	相关约束	$R_{xy}$	相关约束	$R_{xy}$
2-4	.2123	4-18	.1965	10-12	.3425
2-6	.1805	4-20	.1804	10-24	.1931
2-10	.4618	4-24	.5419	12-18	.4120
2-12	.3164	6-10	.1671	12-20	.3808
2-18	.3071	6-12	.3930	12-24	.3981
2-20	.1409	6-18	.1671	18-20	.1525
2-24	.1772	6-20	.1528	18-24	.1931
4-6	.6346	6-24	.5197	20-24	.2086
4-10	.1965	10-20	.3071		
4-12	.4626	10-18	.1650		

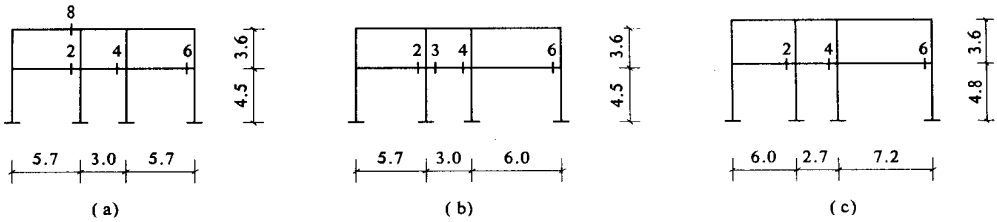


图1 三跨两层结构可能失效约束示意图

Fig.1 The possible failure restrictions of three span two layers

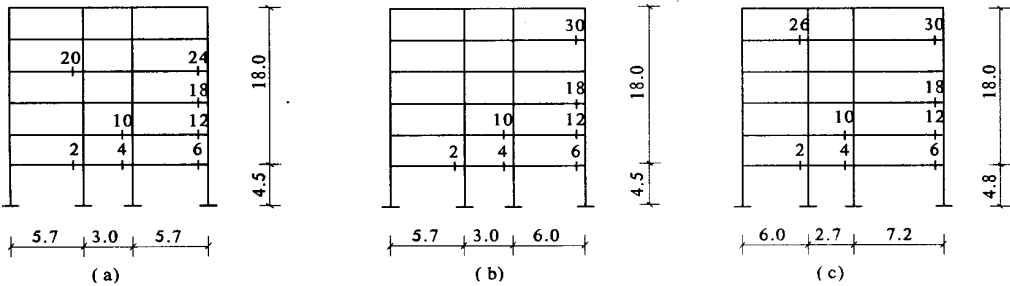


图2 三跨六层结构可能失效约束示意图

Fig.2 The possible failure restrictions of three span six layers

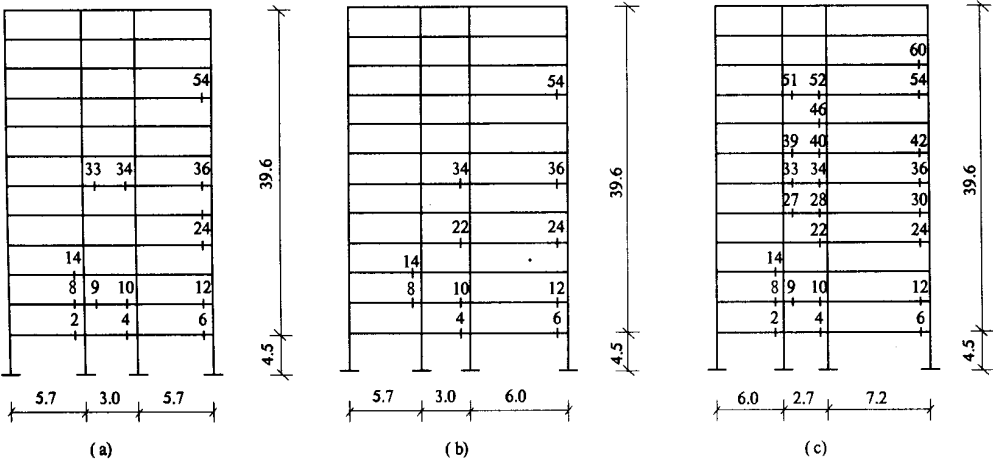


图3 三跨十二层结构可能失效约束示意图

Fig.3 The possible failure restrictions of three span twelve layers

表 3 三跨六层近似对称结构相关系数表  
Tab. 3 The Rxy of approximate symmetry structure  
of three-span-six-layers

相关约束	$R_{xy}$	相关约束	$R_{xy}$	相关约束	$R_{xy}$
2—4	.1147	4—10	.3391	6—30	.2601
2—6	.2003	4—12	.2817	10—12	.4584
2—10	.2246	4—18	.1147	10—18	.3384
2—12	.4072	4—30	.2403	10—30	.2707
2—18	.3327	6—10	.4287	12—18	.2645
2—30	.2634	6—12	.3799	12—30	.2114
4—6	.5136	6—18	.2003	18—30	.2634

4 结论

(1) 约束的失效规律:①对于低层房屋,约束首先从底层框架梁上开始失效,失效约束大都出现在底层框架梁上.在左地震作用下,失效约束大都出现在梁的右端.②对于中层房屋,约束首先从下部几层框架梁上开始失效,失效约束主要集中在下部几层(约为总层数的 1/2) 框架梁上,对称结构的约束失效部位与近似对称结构、非对称结构的约束失效部位大致一样.在左地震作用下,失效约束大都出现在梁的右端.③对于高层房屋,约束首先从下部几层框架梁上开始失效,失效约束主要集中在下部几层(约为总层数的 1/3) 框架梁上,且下部结构的失效约束部位大致一样.对于上部结构,对称结构和近似对称结构的失效约束部位基本上一样,而非对称结构上部约束的失效与

对称结构和近似对称结构有较大差别,非对称结构上部约束的失效主要集中在中跨.在左地震作用下,失效约束大都发生在梁的右端.

(2) 约束的失效相关性规律:在小震和强柱弱梁情况下,各约束之间失效相关性是可以忽略不计的,从而再次验证了小震下强柱弱梁结构的各约束之间的失效是统计独立的结论.

参考文献:

[1] 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.  
[2] 叶燎原,潘文.结构静力弹塑性分析的原理和计算实例[J].建筑结构学报,2000,21(1):37~43.  
[3] 沈聚敏,周锡元,高小旺,刘晶波.抗震工程学[M].北京:中国建筑工业出版社,2000.183~184.  
[4] 杨溥,李英民,王亚勇,赖明.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.  
[5] 何政,欧进萍.钢筋混凝土结构基于改进能力谱法的地震损伤性能设计[J].地震工程与工程震动,2000,20(2):31~37.  
[6] 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.

An Analysis of Failures and Failure Dependencies of the RC Frame Structures

ZHU Jun-feng, WU Ze-yu, WANG Dong-wei

(College of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: By means of the Pushover method and the Monte Carlo random analysis, This paper analyzes the lapse relativity problem of frame construction under earthquake. Some failure and failure dependency rules of the RC frame beams under the small earthquakes are obtained. And the possible positions of frame beams under small earthquakes are pointed out. It indicates that the lapse relativity of between constraints can be neglected. It is validated that the failure dependencies hypothesis that the section restrictions of the RC frame obey the failure independency is correct.

Key words: Pushover method; frame structure; failure dependency; random simulation