

文章编号:1000-582X(2007)04-0061-06

## 排架柱抗弯刚度折减系数探讨\*

刘毅,朱占友,魏巍,白绍良

(重庆大学土木工程学院,重庆 400030)

**摘要:**采用构件折减刚度考虑二阶效应的弹性有限元法是新纳入中国《混凝土结构设计规范》较先进的结构分析设计方法,该方法的准确程度主要依赖构件折减刚度取值的合理性.鉴于该规范尚缺乏确定排架柱相应折减刚度的分析研究成果,以单跨工业厂房变阶排架柱为研究对象,通过对一系列典型排架结构算例进行最不利荷载条件下的非弹性有限元全过程模拟,并采用折减刚度的弹性二阶分析所得柱顶侧向位移与非弹性有限元模拟的柱顶位移等效为条件,选定了适用于排架柱的刚度折减系数后,再以所选刚度折减系数完成的弹性二阶分析所求得的控制截面内力与非弹性有限元模拟结果的相符性证实了初选排架柱刚度折减系数的合理性.

**关键词:**排架柱;非弹性有限元;弹性二阶分析;刚度折减系数

**中图分类号:**TU318

**文献标志码:**A

钢筋混凝土结构在承载力极限状态下,将表现出明显的材料非线性和几何非线性特征.材料非线性主要受构件材料的非线弹性本构关系,构件开裂以及钢筋滑移等因素的影响;几何非线性主要表现在轴向力作用在产生挠曲的构件上或竖向荷载作用在产生侧移的结构上引起的附加内力和附加位移,即二阶效应问题.为了在结构分析中处理以上两类非线性问题,提出了“折减刚度法”,该方法结合考虑二阶效应的弹性有限元分析能够直接精确计算出结构的二阶内力,通过对不同类型构件采用相应的折减刚度能够比较客观地反映极限状态下由材料非线性引起的结构非弹性特征.中国《混凝土结构设计规范》(GB50010-2002)引入了“折减刚度法”来进行二阶效应的混凝土结构分析,其中构件刚度折减系数取值为:对梁类构件刚度取 $0.4E_cI$ ,柱类构件取 $0.6E_cI$ ,剪力墙类构件取 $0.45E_cI$ (不区分剪力墙是否开裂).如前所述,以上构件刚度折减系数的取值是根据由重庆大学土木工程学院完成的分析结果<sup>[1]</sup>并参考美国<sup>[2]</sup>、加拿大规范<sup>[3]</sup>以及新西兰NZS3101(1995)<sup>[4]</sup>规范后确定的.需要指出的是,其中柱类构件刚度折减系数的取值主要是根据若干框架结构分析结果得来的,因此在某种意义上只能算作

框架柱类构件的刚度折减系数.为了确保“折减刚度法”应用于排架结构的有效性,还需要对考虑非弹性特征钢筋混凝土排架柱的刚度折减系数进行系统的研究,拟在这方面作初步尝试.

### 1 确定排架柱折减刚度的原理和分析方法

图1是某结构非线性全过程反应的示意图,图中 $K_0$ 为结构的初始刚度, $S$ 表示结构所处的任意非弹性状态, $K_i$ 为该状态下的割线刚度.可以认为结构在非线性反应中的任意非弹性状态都对应一个弹性结构,该弹性结构的刚度即为相应状态下的割线刚度,即在特定受力状态下,结构的非线性反应可以用具有割线刚度的弹性结构来模拟,在相同的受力条件下非弹性结构与对应的弹性结构具有相同的反应.需要强调的是,等效的弹性结构与受力状态相关,不同的受力状态对应不同的弹性结构.当结构的非线性发展不显著时,比如非弹性状态处于结构非线性反应的上升段时(如状态 $S_1$ ),不同非弹性状态对应的等效弹性结构具有一定程度的一致性<sup>[1]</sup>,实际结构由于延性不同,在极限状态下进入屈服段的程度虽各有不同,但一般处于非线性反应的上升段,到反应极值点还有一定的距离.

\* 收稿日期:2006-12-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(59678035)

作者简介:刘毅(1971-),男,重庆大学博士研究生,主要从事钢筋混凝土结构的研究.

(Tel.):023-65123106;E-mail:liuyicg@163.com.

当结构的非弹性状态位于非线性反应的极值点附近或下降段时(如状态 $S_2$ ),不同非弹性状态的割线刚度差异很大,对应的等效弹性结构也会有明显的差异性.

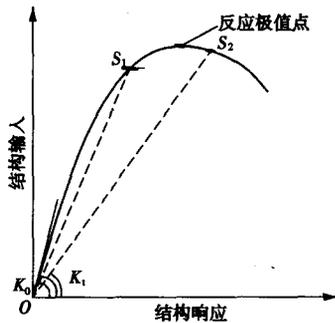


图1 结构的非线性反应

对于混凝土结构在不同受力条件下的非弹性状态可由相应的弹性结构来等效。混凝土结构构件(比如一跨梁或某层一根柱)的弯矩沿构件长度方向是变化的,构件各个截面就具有差异较大的非弹性特征,但该构件仍可等效为变截面的弹性构件,结构中的每根构件都可作如此等效,那么整个结构也可以近似等效为由变截面构件组成的弹性结构。按变刚度构件的等效处理思路过于复杂,为了便于工程应用,可以找到相应于原构件弹性刚度折减了的等代构件,来反映原构件在非弹性状态下整体刚度退化的特征。将这一思路引入整个结构,对结构的同类构件的特定状态也可以引入相应的弹性刚度折减系数,来反映整个结构在承载力极限状态下整体刚度退化的特征。图2表示了门式框架上述弹性刚度折减的思路。

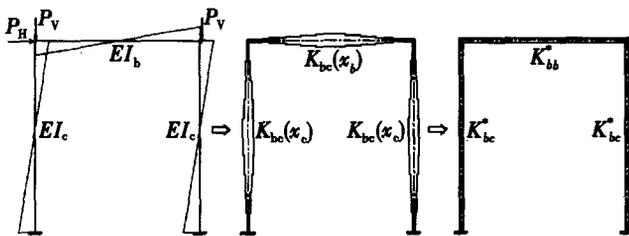


图2 弹性刚度折减的等代思路

为了便于工程应用,参照框架结构的折减刚度取值方案,即按排架上下柱统一取用一个折减系数。这种折减系数能近似反映排架的总体受力状态,但不能对应每根杆件本身所处的特定受力状态。因为排架的受力状态比较复杂,对于不同的荷载工况,排架进入非线性状态的程度不同,同一杆件或不同杆件之间的刚度折减也不相同,因此对同类构件给出的统一的刚度折减系数是反映排架总体非弹性特征的“综合刚度折减系数”<sup>[5-6]</sup>。

## 2 确定排架柱刚度折减系数的分析步骤

排架结构因不同于一般框架结构而具有其自身的特点,其中之一就表现在排架的受力条件比较复杂,显然排架最终的承载力极限状态与荷载工况密切相关,不同排架的极限状态可能对应不同的荷载工况,而在不同工况的组合荷载作用下排架达到的极限状态以及相应的排架柱弹性折减刚度系数可能差异很大。为寻找合理的排架柱刚度折减系数,具体分析步骤如图3所示。

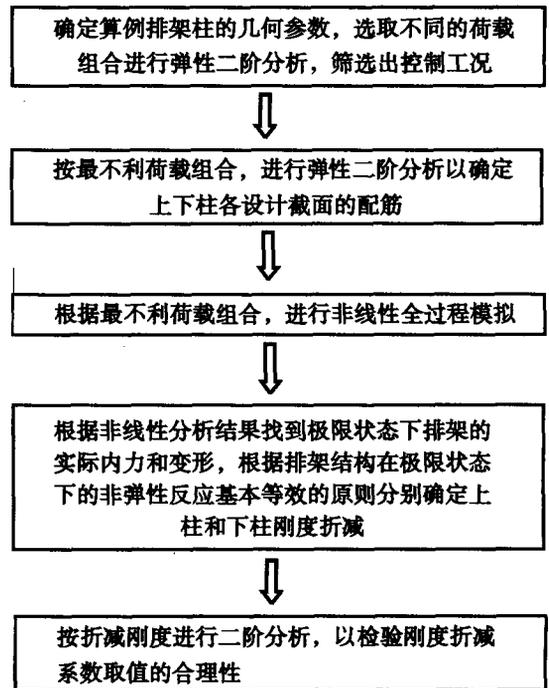


图3 排架柱刚度折减系数分析步骤

### 2.1 荷载分析与结构设计

由于是对排架二阶效应问题进行相关研究,因此 在荷载分析和结构设计时都基于考虑二阶效应的弹性有限元分析,这样有利于相关问题的澄清。根据文献[7-8]的有关计算分析,决定在进行排架非线性有限元全过程分析时采用两类最不利荷载组合作为分析工况。采用的分析工况和相应的最不利荷载组合如下:

(I) 恒载+吊车荷载+风荷载,相应的荷载组合为 $1.0 \times \text{恒载} + 0.9 \times 1.4 \times (\text{吊车荷载}(D_{\max} \text{在右柱}, T \text{自右向左}) + \text{风荷载}(\text{自右向左}))$ (荷载为标准值);

(II) 恒载+屋面活载+吊车荷载+风荷载,相应的荷载组合为 $1.2 \times \text{恒载} + 0.9 \times 1.4 \times (\text{屋面活载} + \text{吊车荷载}(D_{\max} \text{在左柱}, T \text{自左向右}) + \text{风荷载}(\text{自左向右}))$ (荷载为标准值)。

(II)类分析工况比(I)类多了屋面活荷载,(I)类和(II)类分析工况相应的最不利荷载组合对应的排架上下柱控制截面都为左上柱底截面和左下柱

底截面,2种荷载组合作用下排架的顶部侧移反应方向相反.在单跨排架弹性二阶分析中以上2种荷载组合是主要的最不利荷载组合,用作非线性有限元分析具有一定的代表性.

## 2.2 非线性有限元分析

### 2.2.1 分析模型

在非线性分析中采用的计算模型和排架柱的单元划分情况参见图4.单跨排架计算模型为有侧移模型,不考虑厂房整体结构的空问效应.排架下柱等分成10个单元,上柱对应吊车梁部分等分成2个单元,上柱其余部分根据上柱实际高度划分单元,单元的具体划分情况参见后文的典型算例.全排架结构共 $N_{note}$ 个节点,第 $(N_{note}-1)$ 、 $N_{note}$ 节点为屋架端部的从节点;全结构共 $(N_{note}-3)$ 个单元,第 $(N_{note}-3)$ 单元为屋架单元.

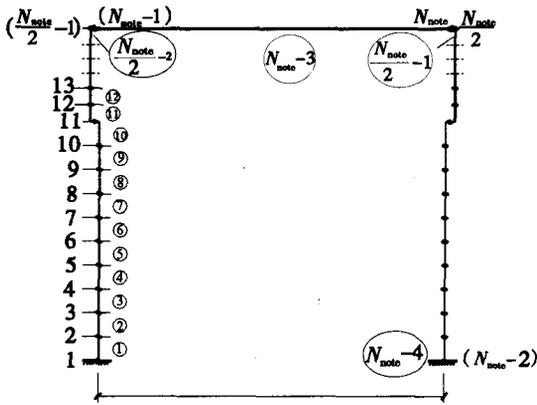


图4 计算模型和单元划分

非线性有限元分析程序NLACF<sup>[1,9]</sup>采用了分层有限元模型,排架柱截面沿截面高度的分层情况是:当上下柱截面为矩形截面时,截面等分成20层;当下柱截面为工形截面时,截面分层情况参见图5.

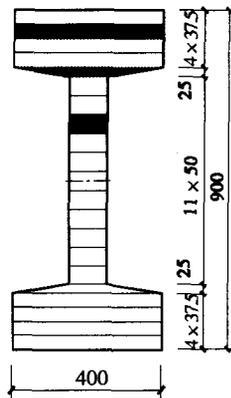


图5 工型截面的分层

### 2.2.2 加载方式

非线性有限元全过程分析与加载方式有关,为了更好地模拟排架实际受荷情况,加载过程分为两步:首先逐步施加竖向荷载及相应的弯矩,直至设计荷载水

平;再逐步施加水平荷载,直至排架达最大承载力.

作为分析对比基点的排架极限状态,是确定排架柱综合刚度折减系数的依据,将极限状态下排架的侧移和排架柱的内力作为使用综合刚度折减系数的考虑二阶效应的弹性有限元分析的参照,以此验证排架柱综合刚度折减系数的有效性.

### 2.3 计算刚度折减系数

非线性有限元全过程分析可以得到极限状态下排架柱上各单元的内力和各节点的位移,图6表示排架

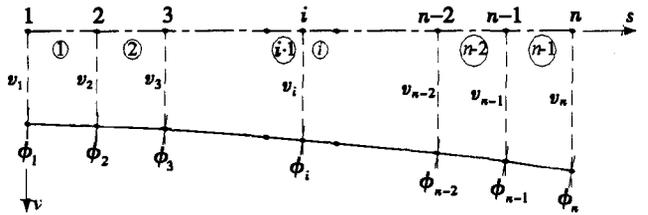


图6 某柱段的最终变形

中某柱段的最终变形情况,共 $n$ 个节点,划分了 $n-1$ 个单元.根据单元的弯矩和单元节点的转角可以求得第 $i$ 单元的平均抗弯刚度 $(\overline{EI})_i$ .设第 $i$ 单元的平均弯矩为 $\overline{M}_i$ ,单元两端相对转角为 $\Delta\varphi_i$ ,单元长度为 $\Delta s_i$ ,则单元平均曲率 $\overline{\kappa}_i$ 为

$$\overline{\kappa}_i = \frac{\Delta\varphi_i}{\Delta s_i} \quad (1)$$

由弯矩曲率关系可得第 $i$ 单元的平均抗弯刚度 $(\overline{EI})_i$ 为:

$$(\overline{EI})_i = \frac{\overline{M}_i}{\overline{\kappa}_i} \quad (2)$$

根据弯曲变形能等效的原则来求解柱段整体的等效抗弯刚度,进而求得等效抗弯刚度折减系数 $\alpha_e$ .柱段的弯曲变形能 $E_b$ 可表示为

$$E_b = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \overline{M}_i \Delta\varphi_i = \frac{1}{2} (\overline{EI})_i \overline{\kappa}_i^2 \Delta s_i \quad (3)$$

假设某抗弯刚度为 $(\overline{EI})^*$ 的等截面弹性杆与原柱段在相同的变形条件下有相同的弯曲变形能,可得:

$$E_b = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (\overline{EI})^* \overline{\kappa}_i^2 \Delta s_i \quad (4)$$

由式(3)和式(4)求得 $(\overline{EI})^*$ ,那么等效抗弯刚度折减系数 $\alpha_e$ 可表示为:

$$\alpha_e = \frac{(\overline{EI})^*}{EI} = \frac{\sum_{i=1}^n (\overline{EI})_i \overline{\kappa}_i^2 \Delta s_i}{EI \sum_{i=1}^n \overline{\kappa}_i^2 \Delta s_i} \quad (5)$$

## 3 确定排架柱刚度折减系数的算例分析

### 3.1 算例基本参数

对不同跨度,不同下柱高度,不同上下柱高比,不

同基本风压和不同吊车吨位级别的单跨混凝土排架进行了非线性有限元全过程模拟分析,在(I)类和(II)类分析工况相应的最不利荷载组合作用下得到在极限状态下的排架柱各单元的内力和各节点的位移,据此求得各单元的折减刚度和柱段整体的刚度折减系数,为建议的排架柱综合刚度折减系数试算取值提供依据。限于篇幅的限制,下面以其中比较典型的算例为例进行讨论,各算例采用的混凝土强度等级为C30,钢筋种类为HRB 335,其它基本参数见表1。

表1 算例的基本参数

算例编号	跨度/m	下柱高度 /m	上柱高度 /m	基本风压 /kN·m <sup>-2</sup>	吊车吨位 /t
1	18	6	2.4	0.3	32/5
2	18	6	1.8	0.7	20/5
3	24	6	1.8	0.5	32/5
4	24	9	5.4	0.3	50/10
5	30	9	2.7	0.3	10

### 3.2 算例的计算结果分析

将用式(5)所求得的所有算例排架柱上下柱段整体的刚度折减系数整理成表2。

表2 算例的各柱段刚度折减系数

分析工况	柱类别	算例1	算例2	算例3	算例4	算例5
I	左下柱段	0.516	0.488	0.570	0.562	0.709
	左上柱段	0.441	0.758	0.548	0.369	0.851
	右下柱段	0.637	0.590	0.700	0.578	0.605
	右上柱段	0.905	0.858	0.865	0.894	0.857
II	左下柱段	0.658	0.614	0.725	0.594	0.522
	左上柱段	0.897	0.852	0.855	0.900	0.859
	右下柱段	0.539	0.514	0.603	0.596	1.093
	右上柱段	0.591	0.780	0.689	0.427	0.843
	左上柱段	0.897	0.852	0.855	0.900	0.859
	右下柱段	0.539	0.514	0.603	0.596	1.093
	右上柱段	0.591	0.780	0.689	0.427	0.843

综合考查各算例排架柱的单元折减刚度分布和柱段整体平均及等效刚度折减系数,建议排架下柱的刚度折减系数在0.5~0.7之间取值;对于排架上柱,注意到左右柱的折减刚度一般会出现很大的差异,考虑到上柱轴压比偏小,折减刚度主要由弯矩决定,因此建议排架上柱的折减刚度系数偏小取值,范围在0.4~0.6之间。从表中还可以发现在某些算例的个别柱段单元的抗弯刚度折减系数出现了大于1.0的情况,原因是位于反弯点处的单元弯矩较小,刚度退化很弱,而非线性程序考虑了钢筋对抗弯刚度的贡献,可能使得非线性状态下的截面刚度大于未考虑钢筋影响的材料毛截面弹性刚度,从而造成刚度折减系数大于1.0的

情况。

为了给出具体的排架柱刚度折减系数取值建议,并证明建议值的合理性,需要对各算例排架柱的弹性抗弯刚度按建议的刚度折减系数折减,然后对采用构件折减刚度的排架进行考虑二阶效应的弹性有限元分析,最后与相应的非线性分析结果比较分析,根据弹性和非线性分析结果的对比情况评判刚度折减系数建议取值的有效性。

### 3.3 刚度折减系数的建议取值及有效性的验证

根据建议的排架柱刚度折减系数取值范围,试算了上下柱刚度折减系数的组合值:1)上下柱均为0.5;2)下柱为0.6,上柱为0.4;3)上下柱均为0.6;4)下柱为0.7,上柱为0.4;5)下柱为0.7,上柱为0.6。采用排架柱折减刚度的试算值,对以上各算例进行了考虑二阶效应的弹性有限元分析,得到两类分析工况下排架顶部的侧移和排架柱控制截面的内力,对比非线性分析结果,可以找到比较合理的排架柱刚度折减系数取值。

表3和表4分别是在(I)类、(II)类分析工况下排架顶部的非线性有限元分析和采用不同方案排架柱折减刚度的弹性二阶分析侧移对比情况。可以发现,当排架下柱的刚度折减系数取值为0.5时,弹性二阶分析的排架顶部侧移比非线性分析的结果明显偏大;当排架下柱的刚度折减系数取值为0.7时,2种分析工况的大多数算例的弹性二阶分析顶部侧移比非线性分析的结果明显偏小;排架上柱刚度折减系数变化(0.4~0.6)对弹性二阶分析顶部侧移的影响不明显。若以非线性分析的排架顶部侧移为对比基点,建议排架下柱的刚度折减系数取值为0.6,考虑到弹性二阶分析时上柱折减刚度变化对顶部侧移影响不显著,同时为了工程应用方便,建议排架上柱的刚度折减系数也取为0.6,即折减系数按方案(3)取值。

表3 在(I)类分析工况下各方案排架顶部侧移的对比情况

算例 编号	非线性 分析/mm	弹性二阶分析/mm				
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
1	81.65	97.69	80.37	79.30	68.03	67.02
2	68.73	77.20	63.59	63.02	53.94	53.39
3	74.05	98.47	80.34	79.62	67.69	67.01
4	184.27	216.42	179.68	172.55	151.75	145.26
5	33.53	50.19	41.22	40.76	34.87	34.44

对于折减系数取值方案(3),在(I)类分析工况中,算例1、2和3的非线性分析和弹性二阶分析的顶部侧移吻合程度比较好,算例4的非线性顶部侧移比弹性分析的偏大,主要原因在于排架的非线性发展比较充分,排架柱的刚度折减也较显著,总体上比建议的折减刚度偏低,因此顶点的非线性侧移反应就偏大;与

表4 在(II)类分析工况下各方案排架顶部侧移的对比情况

算例编号	非线性分析/mm		弹性二阶分析/mm			
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	
1	80.63	101.53	83.04	81.80	69.96	68.82
2	67.06	79.64	65.26	64.63	55.14	54.54
3	72.27	102.95	83.35	82.51	69.83	69.06
4	182.88	232.26	191.95	182.56	160.85	152.55
5	30.22	52.48	42.80	42.25	36.01	35.51

算例4相反,算例5的非线性顶部侧移比弹性二阶分析的小,主要由于排架的侧向荷载较小,非线性发展不充分,排架柱的刚度折减较弱(参见图2),总体刚度折减系数比建议的偏大,造成了最终的顶部非线性侧移反应偏小.在(II)类分析工况中,算例3和5的非线性顶部侧移比弹性二阶分析的要小,其他算例的顶部侧移吻合程度比较好.总体来说,通过非线性有限元分析和采用构件折减刚度的弹性二阶分析的顶部侧移对比可以发现,建议的刚度折减系数是一个适中偏安全的取值.

表5-表9是非线性有限元分析和采用(3)方案的构件折减刚度的弹性二阶分析中各算例排架控制截面弯矩和剪力的对比情况.从总体上看,弹性二阶分析的弯矩与非线性分析的结果是相近的,特别是在那些对排架柱设计起控制作用的截面上两种分析结果的符合程度是令人满意的.某些截面的弹性分析内力(如某些下柱顶部截面的剪力)与非线性分析的差异仍较大,毕竟弹性分析内力是经过一次分析就求得,而非线性分析中包含了结构复杂的内力重分布影响,这种差异性是可以接受的.

综上计算和分析结果,建议排架上下柱取统一的刚度折减系数为0.6.

表5 算例1排架柱控制截面内力对比情况

截面位置	内力	分析工况(I)		分析工况(II)	
		非线性分析	弹性分析	弹性分析	非线性分析
左下柱底	弯矩	410.81	440.50	415.45	384.70
	剪力	55.86	60.04	20.81	18.09
左下柱顶	弯矩	71.89	80.80	267.69	259.60
	剪力	49.75	58.80	10.98	22.70
左上柱底	弯矩	113.21	122.00	-15.04	-23.03
	剪力	49.08	56.71	9.89	12.40
右下柱底	弯矩	400.39	368.00	415.83	445.30
	剪力	18.49	15.86	54.02	58.09
右下柱顶	弯矩	271.63	262.60	82.64	92.13
	剪力	8.73	18.56	47.87	58.34
右上柱底	弯矩	-18.18	-26.60	117.29	126.80
	剪力	7.64	8.58	47.20	56.22
底部总剪力		74.35	75.90	74.82	76.18

说明:弯矩单位为kN·m,剪力单位为kN

表6 算例3排架柱控制截面内力对比情况

截面位置	内力	分析工况(I)		分析工况(II)	
		非线性分析	弹性分析	弹性分析	非线性分析
左下柱底	弯矩	392.78	415.90	398.34	371.50
	剪力	59.42	63.12	37.87	35.49
左下柱顶	弯矩	58.89	64.83	198.22	193.10
	剪力	45.11	52.95	15.04	22.93
左上柱底	弯矩	87.38	93.34	-3.19	-8.82
	剪力	43.52	50.32	12.51	14.52
右下柱底	弯矩	387.38	356.90	393.43	417.80
	剪力	35.67	32.93	56.93	60.80
右下柱顶	弯矩	205.06	199.10	69.68	76.04
	剪力	12.78	18.87	42.67	51.92
右上柱底	弯矩	-4.15	-10.36	90.64	97.06
	剪力	10.23	10.64	41.09	49.28
底部总剪力		74.35	95.09	96.05	94.80

说明:弯矩单位为kN·m,剪力单位为kN

表7 算例4排架柱控制截面内力对比情况

截面位置	内力	分析工况(I)		分析工况(II)	
		非线性分析	弹性分析	弹性分析	非线性分析
左下柱底	弯矩	471.81	512.10	462.79	436.70
	剪力	66.25	71.74	27.32	23.84
左下柱顶	弯矩	76.20	86.30	285.98	281.10
	剪力	56.01	68.65	10.94	26.72
左上柱底	弯矩	113.86	123.90	-14.89	-20.81
	剪力	54.87	65.78	9.12	13.66
右下柱底	弯矩	449.15	413.20	475.82	518.10
	剪力	24.34	20.31	63.22	68.64
右下柱顶	弯矩	296.40	288.30	91.72	102.90
	剪力	7.95	20.39	52.98	67.86
右上柱底	弯矩	-16.28	-24.04	118.87	130.10
	剪力	6.13	7.73	51.85	64.98
底部总剪力		74.35	90.60	92.05	90.55

说明:弯矩单位为kN·m,剪力单位为kN

表8 算例6排架柱控制截面内力对比情况

截面位置	内力	分析工况(I)		分析工况(II)	
		非线性分析	弹性分析	弹性分析	非线性分析
左下柱底	弯矩	837.88	849.30	958.63	951.70
	剪力	68.12	70.11	54.64	56.46
左下柱顶	弯矩	222.27	225.20	391.38	391.40
	剪力	57.86	67.24	38.12	65.01
左上柱底	弯矩	210.89	213.90	49.36	49.99
	剪力	56.90	64.45	36.59	46.67
右下柱底	弯矩	934.39	906.70	871.44	873.90
	剪力	52.40	53.25	66.27	67.39
右下柱顶	弯矩	400.56	392.60	260.16	261.30
	剪力	35.93	58.74	55.96	67.08
右上柱底	弯矩	32.15	24.96	222.49	223.70
	剪力	34.41	58.48	55.01	64.23
底部总剪力		74.35	120.52	123.36	120.91

说明:弯矩单位为kN·m,剪力单位为kN

表9 算例7排架柱控制截面内力对比情况

截面位置	内力	分析工况(I)		分析工况(II)	
		非线性分析	弹性分析	弹性分析	非线性分析
左下柱底	弯矩	335.58	295.90	243.15	361.60
	剪力	29.19	25.66	29.14	38.77
左下柱顶	弯矩	100.63	92.57	26.7852	53.81
	剪力	19.60	19.02	13.77	28.47
左上柱底	弯矩	64.65	56.47	-14.11	12.85
	剪力	18.71	17.57	12.35	25.06
右下柱底	弯矩	282.53	333.20	380.64	285.80
	剪力	29.15	33.34	29.04	20.42
右下柱顶	弯矩	68.52	80.02	145.58	124.80
	剪力	13.74	22.13	19.47	14.86
右上柱底	弯矩	-6.17	5.07	75.61	54.69
	剪力	12.31	18.77	18.58	13.41
底部总剪力		74.35	58.33	59.00	58.18

说明:弯矩单位为  $\text{kN} \cdot \text{m}$ , 剪力单位为  $\text{kN}$

#### 4 结论

理论上,采用构件折减刚度考虑二阶效应的弹性有限元法是最接近非线性有限元分析的比较准确的结构分析方法,在弹性有限元法已经发展成熟的情况下,“折减刚度法”的准确程度主要依赖构件折减刚度取值的合理性.笔者完成了跨度范围为  $18 \sim 30 \text{ m}$ ,上下柱高比范围为  $0.3 \sim 0.6$ ,基本风压范围为  $0.3 \sim 0.7 \text{ kN/m}^2$  和吊车吨位范围为  $10 \sim 50/10 \text{ t}$  的单层单跨混凝土排架非线性有限元全过程模拟分析,根据非线性分析结果初步提出了排架柱抗弯刚度折减系数取值建议.在非线形分析中选用了2种典型的荷载组合,采用了接近工程实际的加载顺序,力求在一定程度上准确模拟排架在极限状态下的非弹性反应.根据极限状

态下排架柱刚度折减分布在数值上特征和能量等效的原则,得到排架柱折减刚度的取值范围,并给出若干刚度折减系数取值方案.采用各种方案的折减刚度分别完成了2种组合荷载作用下排架考虑二阶效应的弹性有限元分析,对比非线性分析和弹性二阶分析的排架柱内力和排架顶部侧移计算结果,建议排架柱上下柱的刚度折减系数取值均为0.6.

#### 参考文献:

- [1] 刘毅. 钢筋混凝土框架柱二阶效应与稳定中若干问题的讨论[D]. 重庆:重庆大学,2000.
- [2] ACI Committee 318 Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI318-99) and Commentary (ACI318R-99)[S]. Detroit: American Concrete Institute, 1999.
- [3] CSA 1994a. Design of Concrete Structures. Standard CSA-A23.3-94[S]. Canada: Canadian Standards Association. December 1994.
- [4] New Zealand Standard Council Concrete Structure Standard (NZS3101; part 1:1995)[S]. Wellington: New Zealand Standards. May 1995.
- [5] MIRAZ S A. Flexural stiffness of rectangular reinforced concrete columns[M]. ACI Structural Journal, 1990(7): 425-435.
- [6] 刘毅,魏巍,白绍良. 考虑非弹性特征的钢筋混凝土框架杆件刚度折减系数[J]. 重庆建筑大学学报,2000(2): 25-32.
- [7] 朱占友. 钢筋混凝土结构二届效应若干问题的研究[D]. 重庆:重庆大学,2006.
- [8] 罗福午. 单层工业厂房结构设计[M]. 北京:清华大学出版社,1990.
- [9] 王志军. 考虑软化特征的预应力混凝土框架非线性有限元全过程分析[D]. 重庆:重庆大学,1991.

## Discussion of the Stiffness Reduction Factor of Bent-columns

LIU Yi, ZHU Zhan-you, WEI Wei, BAI Shao-liang

(College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

**Abstract:** The simplified structural analysis and design method employing stiffness reduction of member bars, has been accepted by Chinese Standard, in which second-order effects already been considered through elastic finite element analysis, and its accuracy mostly depends on the rationality of the stiffness reduction factor. Due to the absence of investigation in the stiffness reduction factor of bent frame, according to the non-linear finite element analysis of several single-story single-span bent frames, the stiffness reduction factor of bent-columns has been suggested. And the rationality of this factor has been proved by comparison of the internal force in bent-columns and displacement of bent frames in second-order elasticity analysis and non-linear finite element analysis.

**Key words:** bent frame; non-linear finite element analysis; second-order elasticity analysis; stiffness reduction factor

(编辑 侯 湘)