

文章编号:1673-2049(2015)04-0046-07

# 基于客观赋权法的构件重要性评估

朱丽华,王宁娟,戴 军

(西安建筑科技大学 土木工程学院,陕西 西安 710055)

**摘要:**总结了平均应力比法、稳定退化系数法和刚度退化系数法 3 种关键构件的评价方法,介绍了客观赋权法的基本原理,并将客观赋权法应用于结构的构件重要性评估,确定各评价指标的权重系数。最后以平面框架为算例,分别使用平均应力比法、稳定退化系数法、刚度退化系数法和基于客观赋权法的评价方法对结构的构件进行重要性评估。结果表明:基于客观赋权法的评价方法能够很好地寻找出结构中的关键构件,而且克服了单一评价指标的不足,具有较好的优越性。

**关键词:**构件重要性;客观赋权法;权重系数;连续倒塌

**中图分类号:**TU365

**文献标志码:**A

## Evaluation on Element Importance Based on Objective Weighting Method

ZHU Li-hua, WANG Ning-juan, DAI Jun

(School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China)

**Abstract:** Three kinds of evaluation methods, including the average stress ratio method, steady degradation factor method and rigidity degradation factor method for key elements were summarized. Besides, the basic principle of objective weighting method was introduced, and the method was applied into the evaluation for the key structural elements by defining the weight coefficient of each evaluation index. At last, taking a plane frame structure as an example, the evaluation on element importance was carried out by using the average stress ratio method, the steady degradation factor method, the rigidity degradation factor method and the evaluation method based on objective weighting, respectively. The results show that the evaluation method based on objective weighting method can find the key structural elements. Furthermore, it can overcome the weakness of single target, and has better superiority characteristic.

**Key words:** element importance; objective weighting method; weight coefficient; progressive collapse

## 0 引 言

结构在常规荷载作用下被提出应以适当的可靠度满足各项预定功能的要求,即在正常施工、正常使用、正常维护下结构应达到预期的安全性、适用性及耐久性<sup>[1]</sup>。随着偶然事件的不断发生,结构在非常规荷载作用下的抗连续倒塌性能被提出。目前,结

构的连续倒塌分析一般采用改变路径法,结构的初始损伤通过某一根或几根构件完全失效来模拟。该方法的关键是如何确定初始失效构件,GSA 2003<sup>[2]</sup>以及 DOD 2005<sup>[3]</sup>对初始失效构件的选择是根据构件所处位置确定的。对于无法确定的构件,工程师们经常根据经验判断,这样往往会忽略结构中部分关键构件<sup>[4]</sup>。因此,准确评估结构中的关键构件显

收稿日期:2015-01-20

基金项目:国家自然科学基金项目(50908186);陕西省科技新星项目(2013KJXX-53)

作者简介:朱丽华(1979-),男,江苏溧阳人,副教授,工学博士,E-mail:zhulihuaxa@163.com。

得尤为重要。

各国学者对于结构中构件重要性的评价方法做了大量探索。文献[5]从结构的刚度出发,用刚度衡量结构的安全性,定义原结构的刚度矩阵行列式与拆除构件后结构的刚度矩阵行列式的比值作为构件的重要性评价指标,但该评价指标并没有具体的工程意义<sup>[6]</sup>。文献[7],[8]亦基于刚度矩阵行列式对结构的易损性与冗度的关系进行了研究,提出了整体性指标,但该指标没有具体的物理意义。文献[9]从概率的角度对结构的易损性进行了研究,但是针对偶然事件,用概率模型不一定是一个有力的分析工具<sup>[10]</sup>。顾祥林等<sup>[11-12]</sup>利用层次分析法对结构的可靠性进行评估,通过判断矩阵确定结构中子结构的权重系数,以此来评价构件对结构整体安全性的影响程度。该方法中的判断矩阵完全是由设计人员根据自己的工程经验主观构建所得,其评价结果带有很强的主观性,可能与构件的实际情况存在偏差。文献[13]基于结构的承载力,采用平均应力比作为构件重要性评价指标,提出了移除指标的概念,其近似反映了结构的重要性程度,但该指标仅能反映构件受力的平均状态,对于应力集中等特殊状态则无法体现。

以上评价指标均有一定的局限性,因此,有必要提出一种更为准确、全面的评价方法来寻找结构中的关键构件。引起结构破坏的原因有很多种,主要有强度破坏和失稳破坏。单独考虑某一种影响因素来定义结构构件重要性评价指标不是很合理。本文建议综合考虑几种可能引起结构破坏的主要因素,基于多元准则评估方法进行构件重要性评价。将客观赋权法用于构件重要性评估中,把现有的几种构件重要性评价指标综合起来,通过计算各评价指标的权重以判断结构中的关键构件。

## 1 构件重要性评价指标

关键构件即为对结构整体性能产生很大影响的构件,结构的整体性能包括结构的承载力、刚度、变形能力以及稳定性等。文献[14]分别根据强度、刚度以及稳定性定义了构件重要性的评价指标。

### 1.1 平均应力比评价指标

结构的破坏一般都是承载力不满足要求而引起的,因此,用平均应力比作为衡量构件重要性的定量指标来评价构件的重要性,其定义如下

$$R_i = \frac{\sum_{j=1, j \neq i}^n S_{j\max}}{n-1} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

式中: $R_i$ 为第*i*根构件的重要性评价指标; $n$ 为结构构件的总根数; $S_{j\max}$ 为第*j*根构件中正应力绝对值的最大值 $\sigma_{j\max}$ 与材料屈服强度 $f_y$ 之比。

平均应力比评价指标近似反映了某根构件移除后剩余结构的平均应力水平。平均应力比值越大,剩余结构越不安全,即该构件的重要性越高。

### 1.2 稳定退化系数评价指标

稳定性是结构的最基本要求,对于由于失稳而破坏的结构,相比于强度指标,采用表征结构稳定性的指标来评价结构构件重要性更合理有效。选用结构的第1阶屈曲荷载来反映结构的稳定性,从而间接反映结构构件的重要性,其指标定义如下

$$R_i = \frac{\lambda_i}{\lambda_0} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

式中: $\lambda_i$ 为第*i*根构件移除后剩余结构的第1阶屈曲荷载系数; $\lambda_0$ 为原结构的第1阶屈曲荷载系数。

屈曲荷载系数 $\lambda$ 满足特征方程

$$|\mathbf{K} - \lambda \mathbf{K}_{\text{Rg}}| = 0 \quad (3)$$

式中: $\mathbf{K}$ 为结构的刚度矩阵; $\mathbf{K}_{\text{Rg}}$ 为基准几何刚度矩阵,一般取为单位荷载作用下的几何刚度。

稳定退化系数评价指标近似地反映了以稳定为控制条件的结构构件重要性,其值越小,说明拆除某根构件后,剩余结构的稳定退化程度越高,剩余结构可能越不安全。

### 1.3 刚度退化系数评价指标

刚度是反映结构变形能力的物理量,然而对于复杂的结构,求出整个结构的刚度显得不太经济。在动力学中,通过频率可以反映出整个结构的刚度,以频率的改变来反映结构体系刚度的退化,避免了求解结构整体刚度的困难,其评价指标定义如下

$$R_i = \frac{\omega_i}{\omega_0} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

式中: $\omega_i$ 为第*i*根构件移除后剩余结构的基本频率; $\omega_0$ 为原结构的基本频率。

刚度矩阵 $\mathbf{K}$ 与频率 $\omega$ 满足

$$|\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M}| = 0 \quad (5)$$

式中: $\mathbf{M}$ 为结构的质量矩阵。

刚度退化系数以结构的基本频率反映结构整体刚度的退化程度,拆除某根构件后,该评价指标的值越小,说明剩余结构刚度退化越严重,剩余结构可能越不安全,那么该构件的重要性就越高。

从式(1),(2),(4)能够总结出,对于同一结构而言,平均应力比评价指标反映了结构上所作用的荷载形式以及大小,稳定退化系数评价指标只是反映

了荷载的形式,刚度退化系数评价指标则仅与结构的固有特性有关。从 3 个指标的定义上可以看出,单个评价指标均具有一定的局限性。

## 2 客观赋权法的基本原理

客观赋权法是企业进行业绩评价的一种数学方法,其从实际数据出发,利用各指标值所反映的客观信息确定各评价指标的权重系数,被广泛应用于工程、经济、管理等领域。客观赋权法的基本思想是将达到同一个目的的很多种方案量化为它们在达到目的过程中所占的权重。其判断结果不依赖于人的主观判断,有较强的数学理论依据。常用的客观赋权法通常包括指标重要性相关法(Criteria Importance Through Intercriteria Correlation, CRITIC)<sup>[15]</sup>、标准离差及均方差法等。本文选用 2 种常用方法计算各指标的权重系数,分别是指标重要性相关法和标准离差法。

### 2.1 指标重要性相关法

指标重要性相关法的基本思想是把对同一目的很多影响因素的影响程度量化为它们在方案中的比重。各指标权重的确定取决于 2 个基本概念:对比强度和冲突性。对比强度用来反映同一个指标在各个方案之间的差异,用标准差来量化。标准差越大,说明各方案之间的差异性越大,其客观数据反映的信息量越大,相应的权重也就应较大。冲突性则以指标之间的相关性为衡量标准,2 个指标如果具有较强的正相关性,那么两者就具有较低的冲突性,即这 2 个指标在评价方案的优劣上其客观数据反映的信息具有较大的相似性,它对整个方案评价的贡献就较小,相应的权重也就应较小。

### 2.2 标准离差法

标准离差法的基本原理与指标重要性相关法相似,但其考虑的因素只有指标的对比强度,也用标准差来衡量。某个指标的标准差越大,说明该指标在各方案评价中的变异程度越大,反映的信息量就越大,在综合评价中的贡献越大,相应的权重也就应越大。如果指标的标准差越小,说明该指标在各方案评价中的变异程度越小,反映的信息量就越小,在综合评价中的贡献越小,相应的权重也就应越小。

## 3 客观赋权法的应用

结构是由很多根杆件组成的一个整体,这个整体可以看作是一种目的,组成构件的每种组合形式看作是达到这个目的的每一种方案。在每种组合形

式中,每根构件的作用或者重要性都会有所不同,而评价每根构件的重要性指标看作是各个方案的评价准则。这种综合评估方法是把这些分散的互相独立的评价指标通过计算确定其权重系数,综合评估结构中的关键构件。总之,就是对结构构件的重要性评估进行优化处理。

### 3.1 评价系统的建立

将结构体系看作是具有  $n$  个杆件的有限集合体,将  $m$  个本来独立的评价指标看作是评价这  $n$  个杆件的  $m$  个评价标准,则由有限集合及评价标准组成一个评价系统。本文将平均应力比评价指标、稳定退化系数评价指标以及刚度退化系数评价指标作为评价结构中所有构件的 3 个评价标准<sup>[16]</sup>,则该评价系统  $C$  即为

$$C = \max\{g_1(a), g_2(a), g_3(a)\} \quad (6)$$

式中: $g_j(a)$  为第  $a$  个杆件关于指标  $j$  的值。

### 3.2 各指标线性相关系数的确定

对一个结构的  $n$  个杆件,分别求出每根杆件相应的平均应力比、稳定退化系数以及刚度退化系数的评价指标。

平均应力比评价指标值越大,剩余结构越不安全,构件越重要;刚度退化系数和稳定退化系数评价指标值越小,剩余结构越不安全,构件重要性越高。那么平均应力比评价指标  $x_{ij}$  采用式(7)进行数据标准化处理,其余 2 个指标  $x_{ij}$  均采用式(8)对数据进行标准化处理,即

$$x_{ij} = \frac{g(a) - g_{j\min}}{g_{j\max} - g_{j\min}} \quad a=1, 2, \dots, n; j=1, 2, 3 \quad (7)$$

$$x_{ij} = \frac{g_{j\max} - g_j(a)}{g_{j\max} - g_{j\min}} \quad a=1, 2, \dots, n; j=1, 2, 3 \quad (8)$$

式中: $g_{j\max}$  为指标  $j$  的最佳取值; $g_{j\min}$  为指标  $j$  的最差取值。

各指标的比重  $R_{ij}$  由式(9)进行确定

$$R_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \quad (9)$$

确定各评价指标的比重后,根据公式<sup>[17]</sup>计算平均应力比评价指标、刚度退化系数评价指标以及稳定退化系数评价指标之间的线性相关系数  $r_{jk}$ ,即

$$r_{jk} = \frac{\sum_{a=1}^n (x_{aj} - \bar{x}_j)(x_{ak} - \bar{x}_k)}{\sqrt{\sum_{a=1}^n (x_{aj} - \bar{x}_j)^2 \sum_{a=1}^n (x_{ak} - \bar{x}_k)^2}} \quad j, k = 1, 2, 3 \quad (10)$$

式中: $x_{aj}$ ,  $x_{ak}$  分别为构件  $a$  关于指标  $j, k$  的标准化

数值; $\bar{x}_j, \bar{x}_k$  分别为所有构件关于指标  $j, k$  的标准化数值的平均值。

3.3 各指标权重系数的确定

由指标重要性相关法所计算的权重系数与指标所包含的信息量以及指标间的线性相关性系数有密切关系,记  $I_j$  为某个指标的信息量,其考虑了各指标间的对比强度和冲突性,由下式确定<sup>[18]</sup>

$$I_j = \sigma_j \sum_{k=1}^m (1 - r_{jk}) \quad m = 3 \tag{11}$$

式中: $\sigma_j$  为第  $j$  个指标的标准差。

$I_j$  越大,第  $j$  个指标所包含的信息量越大,该指标对评价方案的贡献就越大,其相对重要性也就越高。由此可得,第  $j$  个指标的客观权重  $w_j$  为

$$w_j = \frac{I_j}{\sum_{k=1}^m I_k} \tag{12}$$

由标准离差法确定的权重系数可根据各指标的变异程度来计算<sup>[19]</sup>,即

$$w_j = \frac{\sigma_j}{\sum_{j=1}^m \sigma_j} \quad j = 1, 2, \dots, m \tag{13}$$

3.4 构件重要性的排序

根据各指标的权重系数以及平均应力比、稳定退化系数、刚度退化系数评价指标,可以确定构件在结构体系中的重要性排序,最终计算值  $v_i$  为

$$v_i = \sum_{j=1}^m w_j x_{ij} \quad i = 1, 2, \dots, n \tag{14}$$

4 算例分析

基于前面 2 节的内容,选用文献[14]中的一榀六层三跨平面钢框架算例进行分析,验证本文所建议方法的适用性和优越性。该算例的层高均为 3.6 m,跨度均为 6 m,算例模型见图 1,同一层的杆件采用相同的编号。计算所得平均应力比、稳定退化系数以及刚度退化系数的评价指标见图 2。

由图 2 可知:底层中柱的平均应力比为 0.510,底层边柱的平均应力比为 0.495,底层边柱的稳定退化系数为 0.758,二层边柱的稳定退化系数为 0.806,底层边柱的刚度退化系数为 0.834,二层边柱的刚度退化系数为 0.869。根据结果可以判断出:当评价指标为平均应力比指标时,结构中的关键构件为底层中柱及边柱;当评价指标为稳定退化系数时,底层边柱的重要性最高,其次为二层边柱;当评价指标为刚度退化系数时,拆除底层边柱后,剩余结构的危险性最高,即结构中的最重要构件为底层

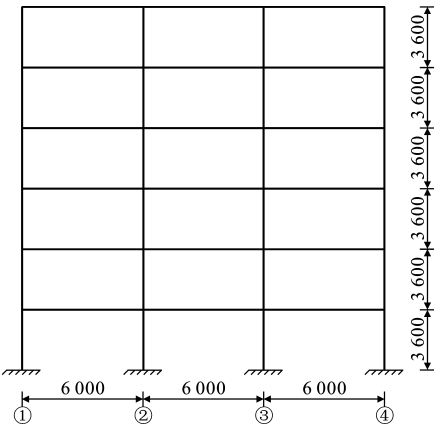


图 1 六层三跨平面框架(单位:mm)  
Fig. 1 Six-story Three-span Plane Frame (Unit:mm)

	0.207		0.210		0.207	
	1.079		1.079		1.079	
	1.031		1.031		1.031	
0.285	0.209	0.281	0.211	0.281	0.209	0.285
1.000	1.077	0.999	1.076	0.999	1.077	1.000
1.017	1.019	1.016	1.019	1.016	1.019	1.017
0.324	0.210	0.325	0.213	0.325	0.210	0.324
0.997	1.061	0.996	1.061	0.996	1.061	0.997
0.999	0.996	1.007	0.996	1.007	0.996	0.999
0.373	0.212	0.375	0.215	0.375	0.212	0.373
0.976	0.995	0.980	0.999	0.980	0.995	0.976
0.964	0.972	0.993	0.973	0.993	0.972	0.964
0.416	0.213	0.420	0.216	0.420	0.213	0.416
0.903	0.912	0.927	0.921	0.927	0.912	0.903
0.917	0.957	0.979	0.959	0.979	0.957	0.917
0.460	0.213	0.465	0.217	0.465	0.213	0.460
0.806	0.915	0.868	0.922	0.868	0.915	0.806
0.869	0.965	0.970	0.968	0.970	0.965	0.869
0.495	0.510			0.510		0.495
0.758	0.936			0.936		0.758
0.834	0.972			0.972		0.834

图 2 构件各重要性评价指标  
Fig. 2 Evaluation Indexes of Element Importance

边柱,其次为二层边柱。由此可以看出,同一个结构用不同的评价准则评估结构中的关键构件,评价结果可能会存在差异。

线性相关系数是反映几个评价准则相关性的参数,是将几个评价指标综合在一起的关键因素,根据公式(9)可计算得到上述 3 个评价指标之间的相关系数矩阵  $r$ ,即

$$r = \begin{bmatrix} 1.000 & 0.682 & 0.583 \\ 0.682 & 1.000 & 0.889 \\ 0.583 & 0.889 & 1.000 \end{bmatrix} \tag{15}$$

从上述相关系数矩阵  $r$  可以看出,稳定退化系数评价指标与刚度退化系数评价指标的相关系数高达 0.889,体现了 2 个指标较高的相关性,这个结果与 2 个指标的定义表现出了很好的一致性,同时图 2 中的原始数据也说明了这一点;平均应力比指标与稳定退化系数指标以及刚度退化系数指标间的相

关系数分别为 0.682 和 0.583,可见,平均应力比指标与其他 2 个指标存在较大的差异。同样,这个结果从 3 个指标的定义中可以分析得到,也可以从图 2 中的数据看出;对于 3 个指标自身来说,每个指标与自身的线性相关系数均为 1。

以上结果充分说明了客观赋权法理论的正确性和科学性,同时也证明了客观赋权法可以很好地应用在结构的关键构件评估中。如同前文所述,单独用某个指标评估结构中的关键构件时会有不足,应该将这些指标用科学的方法组合在一起,综合考虑各种因素来评价结构中的关键构件。因此,采用客观赋权法对构件的重要性进行评估,既有明显的可行性,同时具有一定的必要性。

为了验证客观赋权法计算结果的正确性,选择 2 种计算权重系数的方法进行各个指标权重系数的计算。由上面得到的相关系数矩阵,分别根据公式(11),(12),(13)计算出各指标的信息量  $I_j$ 、标准差  $\sigma_j$  和权重  $w_j$ ,2 种方法的计算结果如表 1 所示。

表 1 评价指标参数

Tab. 1 Evaluation Index Parameters

评价指标	CRITIC 法		标准离差法	
	$I_j$	$w_j$	$\sigma_j$	$w_j$
平均应力比	0.262	0.521	0.356	0.412
稳定退化系数	0.114	0.227	0.267	0.309
刚度退化系数	0.127	0.252	0.241	0.279

由表 1 可以看出,3 个指标权重最大的为平均应力比评价指标,其比稳定退化系数评价指标以及刚度退化系数评价指标能更好地评估结构中的关键构件。根据公式(14)可算得构件在结构中的权重,见图 3。图 3 中的数值从上到下依次为 CRITIC 法和标准离差法得到的权重值,其值越小,结构越偏于不安全。

从图 3 可以看出,2 种方法计算得出的数值非常接近,而且在构件重要性的评价结果上是完全一致的。指标重要性相关法的计算结果为:底层边柱为 0.002 6,二层边柱为 0.006 75,底层中柱为 0.302。标准离差法的计算结果为:底层边柱为 0.02,二层边柱为 0.154,底层中柱为 0.367,二层中柱为 0.367。根据计算结果可以清楚地看到:2 种方法均为拆除底层边柱后剩余结构最不安全,结构的关键构件为底层边柱、二层边柱以及底层中柱、二层中柱;随着层高的增加,各构件的指标值不断增大;对于同一结构而言,无论是水平构件还是竖向构件,底层构件重要性是最高的,其次是二层构件,依次类

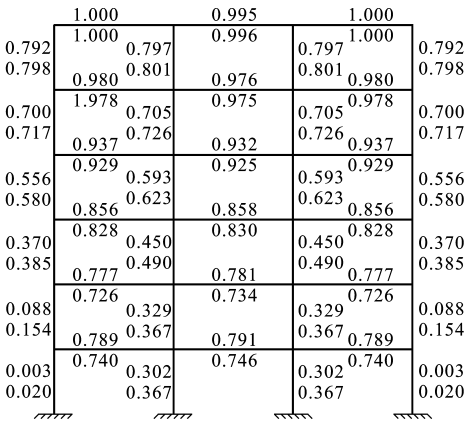


图 3 结构体系中的构件重要性排序

Fig. 3 Order of Element Importance in Structural System

推。从图 3 还可以看出:处于同一层的构件,框架柱指标值明显低于框架梁的指标值。框架梁计算值都在 0.7 以上,而框架柱的指标值最小为 0.002 6,几乎是梁的 1/10 000,即框架柱失效后的剩余结构比框架梁失效后的剩余结构更危险,这与结构设计上“强柱弱梁”的概念完全吻合。

GSA 2003 规程中建议选取待拆除的构件是移除首层角柱、长边中柱以及短边中柱,这些待拆除构件的选择是长期积累的工程经验所得。以上的分析结果与规程这部分观点基本保持一致,这充分说明该组数据的可靠性,也证明了该方法用在构件重要性评价中的适用性和正确性。

将 3 个评价指标与本文提出的构件重要性评估方法进行对比分析,结果见图 4,其中  $N$  表示楼层数,柱列 1 表示轴线①所在的柱列,其他柱列依次类推,A,B,C,D,E 依次表示平均应力比、稳定退化系数、刚度退化系数、CRITIC 法、标准离差法的评价结果。

从图 4 可以看出:①沿着层高方向,除去中柱,3 个评价指标的变化规律是基本相同的,平均应力比评价指标随着层数的增加而逐渐减小或者基本不变,稳定退化系数和刚度退化系数评价指标基本随着层数的增加而增大,对于二层中柱,其稳定退化系数评价指标要小于底层中柱的稳定退化系数评价指标,说明二层中柱的重要性要高于底层中柱;②就结构同一层构件而言,平均应力比评价指标认为柱的重要性要远大于梁,稳定退化系数和刚度退化系数评价指标认为二层以上柱的危险性要高于梁,而底层构件则是梁的危险性要高于中跨柱;③平均应力比评价指标认为底层中柱的危险性最高,其次是底层边柱。因此底层边柱和底层中柱失效时,剩余结

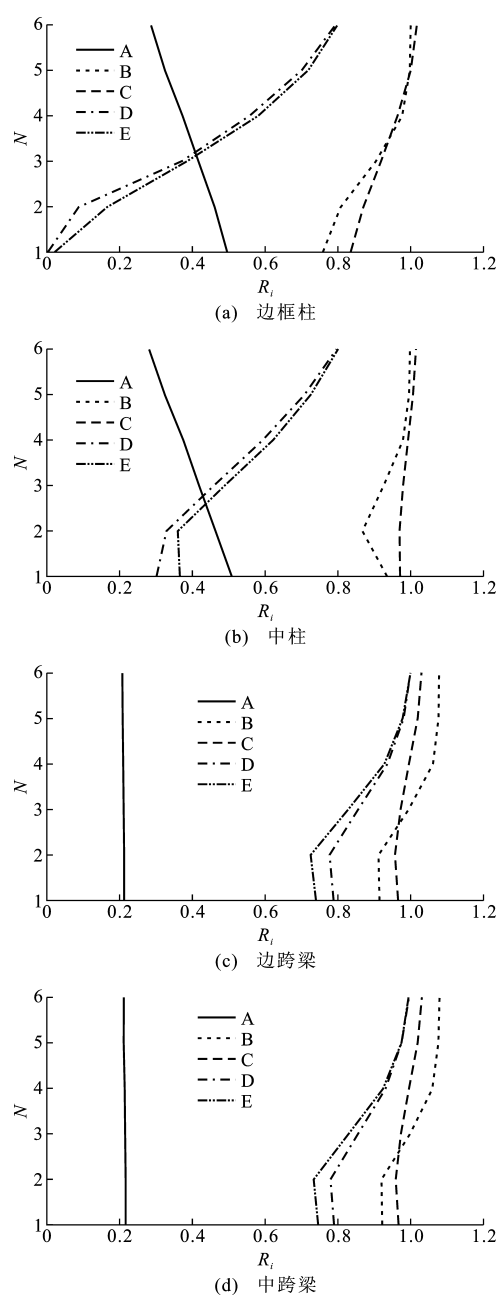


图 4 构件重要性的评价结果

Fig. 4 Evaluation Results of Element Importance

构最不安全。稳定退化系数和刚度退化系数则是底层边柱指标值最小,其次是二层边柱,因此底层和二层边柱的危险性是最高的。指标重要性相关法和标准离差法的计算结果是一致的,评价结果为:随着层数的增加,框架柱的指标值明显减小;结构中同一层构件相比,框架柱的重要性明显高于框架梁的重要性;显然可以看出,结构中的关键构件为底层以及二层的边柱和中柱。

经过分析可知,3 个评价指标的评价结果显然是有较大差异的,如果仅依赖某一种评价指标评估结构中的关键构件,很可能会造成关键构件的遗漏

甚至严重的偏差,而且评价结果没有明显的梯度,很难准确地判断出结构中的最危险构件以及次要构件。基于客观赋权法的构件重要性评价指标则能够很好地解决以上问题,其综合各指标的一致性,消除了各指标之间的冲突性,充分考虑了可能引起结构破坏的各种原因,更为全面地评估结构中的关键构件,评价结果清晰明了。因此,选取待移除构件时,不能单独只看某一个指标的评价结果,而是要综合考虑多个指标的评价值。

综合以上分析得出:本文建议的综合评估构件重要性方法是一种正确、合理、适用的方法,而且其表现出了比单独评价指标更大的优越性。

## 5 结 语

(1)平均应力比、稳定退化系数、刚度退化系数 3 种构件重要性评价方法针对某一特定破坏形式的结构各自具有较好的评价结果,但对于同一结构,3 种方法评价的结果出现差异。

(2)本文建议将客观赋权法用于评价构件重要性中,评价结果既保持了几个指标单独评价结果的一致性,又消除了它们评价结果的冲突性,得到的综合评价值能更合理地反映出构件重要性。

(3)本文建议的综合评估方法相比单一评价指标有更大的优越性。对于同一个结构,综合评估方法能更清楚地找到结构中的关键构件,反映结构中构件的重要性程度。

(4)本文提出的构件重要性评估方法虽然在一定程度上优于单独评价指标,但是其过分依赖于原始数据,计算方法比较复杂,而且不能体现评判者对不同属性指标的重视程度,对于其在不同结构的构件重要性评估中的应用有待进一步研究。

## 参考文献:

### References:

[1] 梁兴文,王社良,李晓文,等. 混凝土结构设计原理[M]. 北京:科学出版社,2007.  
LIANG Xing-wen, WANG She-liang, LI Xiao-wen, et al. Design Principle of Reinforced Concrete Structures[M]. Beijing: Science Press, 2007.

[2] GSA 2003, Progressive Collapse Analysis and Design Guidelines for New Federal Office Buildings and Major Modernization Projects[S].

[3] DOD 2005, Design of Buildings to Resist Progressive Collapse[S].

[4] 蔡建国,王峰岚,冯 健,等. 连续倒塌分析中结构重

- 要构件的研究现状[J]. 工业建筑, 2011, 41(10): 85-89.
- CAI Jian-guo, WANG Feng-lan, FENG Jian, et al. Review of the Key Element for Progressive Collapse of Structures[J]. Industrial Construction, 2011, 41(10): 85-89.
- [5] NAFDAY A M. System Safety Performance Metrics for Skeletal Structures[J]. Journal of Structural Engineering, 2008, 134(3): 499-504.
- [6] 叶列平, 林坦川, 曲哲, 等. 基于广义结构刚度的构件重要性评价方法[J]. 建筑科学与工程学报, 2010(1): 1-6.
- YE Lie-ping, LIN Tan-chuan, QU Zhe, et al. Evaluating Method of Element Importance of Structural System Based on Generalized Structural Stiffness[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2010(1): 1-6.
- [7] AGARWAL J, BLOCKL EY D, WOODMAN N. Vulnerability of 3-dimensional Trusses[J]. Structural Safety, 2001, 23(3): 203-220.
- [8] 柳承茂, 刘西拉. 基于刚度的构件重评估及其与冗余度的关系[J]. 上海交通大学学报, 2005, 39(5): 746-750.
- LIU Cheng-mao, LIU Xi-la. Stiffness Based Evaluation of Component Importance and Its Relationship with Redundancy[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2005, 39(5): 746-750.
- [9] LIND N C. A Measure of Vulnerability and Damage Tolerance[J]. Reliability Engineering and System Safety, 1995, 48(1): 1-6.
- [10] 邱德锋, 周艳, 刘西拉. 突发事故中结构易损性的研究[J]. 四川建筑科学研究, 2005, 31(2): 55-59.
- QIU De-feng, ZHOU Yan, LIU Xi-la. Study on the Structural Vulnerability Under Unexpected Conditions[J]. Building Science Research of Sichuan, 2005, 31(2): 55-59.
- [11] 顾祥林, 陈少杰, 张伟平. 既有建筑结构体系可靠性评估实用方法[J]. 结构工程师, 2007, 23(4): 12-17.
- GU Xiang-lin, CHEN Shao-jie, ZHANG Wei-ping. An Applicable Method to Assess the Reliability of Existing Building Structures[J]. Structural Engineers, 2007, 23(4): 12-17.
- [12] 陈少杰, 顾祥林, 张伟平. 层次分析法在既有建筑结体系可靠性评定中的应用[J]. 结构工程师, 2005, 21(2): 31-35.
- CHEN Shao-jie, GU Xiang-lin, ZHANG Wei-ping. The Application of AHP Method in Assessment of Existing Building Structures[J]. Structural Engineers, 2005, 21(2): 31-35.
- [13] 胡晓斌, 钱稼茹. 结构连续倒塌分析改变路径法研究[J]. 四川建筑科学研究, 2008, 34(4): 8-13.
- HU Xiao-bin, QIAN Jia-ru. Study on Alternate Path Method of Structural Progressive Collapse Analysis[J]. Building Science Research of Sichuan, 2008, 34(4): 8-13.
- [14] 胡晓斌. 新型多面体空间刚架结构抗连续倒塌性能研究[D]. 北京: 清华大学, 2007.
- HU Xiao-bin. Studies on the Progressive Collapse Resistant Behavior of the New Type Polyhedral Space Frame[D]. Beijing: Tsinghua University, 2007.
- [15] DIAKOULAKI D, MAVROTAS G, PAPAYANNAKIS L. Determining Objective Weights in Multiple Criteria Problems; The CRITIC Method[J]. Computers Operation Research, 1995, 22(7): 763-770.
- [16] GB 50153—2008, 工程结构可靠性设计统一标准[S].
- GB 50153—2008, Unified Standard for Reliability Design of Engineering Structures[S].
- [17] JAHAN A, MUSTAPHA F, SAPUAN S M, et al. A Framework for Weighting of Criteria in Ranking Stage of Material Selection Process[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 58(1/2/3/4): 411-420.
- [18] 伊廷华, 陈婷. 基于综合权重可拓理论的结构损伤评估方法研究[J]. 地震工程与工程振动, 2014, 34(2): 137-145.
- YI Ting-hua, CHEN Ting. Research on Structural Damage Assessment Based on Integrated Weight Extension Theory[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2014, 34(2): 137-145.
- [19] 王昆, 宋海洲. 三种客观权重赋权法的比较分析[J]. 技术经济与管理研究, 2003(6): 48-49.
- WANG Kun, SONG Hai-zhou. Comparative Analysis of the Three Objective Weight Empowerment[J]. Technoeconomics & Management Research, 2003(6): 48-49.