

文章编号: 1673-2049(2010)01-0001-06

基于广义结构刚度的构件重要性评价方法

叶列平, 林旭川, 曲 哲, 陆新征, 潘 鹏

(清华大学 土木工程系, 北京 100084)

摘要:总结了现有构件重要性评价指标的研究概况和工程经验;根据结构体系传力路径中传递荷载比例大的构件重要性大的思路,通过理论推导定义了考虑荷载作用的广义结构刚度;以拆除构件对广义结构刚度的影响程度作为该构件重要性评价指标,并进一步将该指标转化为结构变形能损失率,使该指标的概念更为清晰;采用该评价方法对 1 组框架结构分别在重力荷载和水平地震荷载作用下的构件重要性进行了分析。结果表明:该方法具有合理性,且便于计算,可用于大多数类型的结构。

关键词:结构安全性;构件重要性指标;广义结构刚度;传力路径;变形能

中图分类号:TU311.3 **文献标志码:**A

Evaluating Method of Element Importance of Structural System Based on Generalized Structural Stiffness

YE Lie-ping, LIN Xu-chuan, QU Zhe, LU Xin-zheng, PAN Peng

(Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: A summary of existing researches and engineering experience on element importance in the structural systems were presented. Based on the consensus that elements transferring more loads in the load path were generally more important in the structural systems, the element importance index was defined as the change in generalized structural stiffness under a certain load pattern after removing the element from the system. Then, the generalized structural stiffness taking into account the load pattern was proposed as a basis for evaluating the element importance. This index was further expressed in terms of the rate of structural strain energy change. The element importances of a series of frame structures under gravity and horizontal seismic load were then evaluated by the proposed method. The results show that the method is rational, convenient for calculating, and applicable to most structures.

Key words: structural safety; element importance index; generalized structural stiffness; load path; strain energy

0 引 言

2008 年颁布的国家标准《工程结构可靠性设计统一标准》(GB 50153—2008)^[1]将结构定义为:能

承受作用并具有适当刚度的由各连接部件有机组合而成的系统。因此,工程结构应作为一个系统(结构系统)来进行设计,并应运用系统方法来研究其设计理论和设计方法,以充分有效地实现整个结构系统

收稿日期:2010-01-01

基金项目:国家自然科学基金重点项目(90815025);“十一五”国家科技支撑计划项目(2009BAJ28B01);

“十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAJ03A02)

作者简介:叶列平(1960-),男,浙江温州人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail: ylp@tsinghua.edu.cn.

的各种设计目标。

从系统角度来看,结构系统的承载力、刚度、变形能力和耗能能力与组成结构系统的基本构件(如梁、柱、墙、板等)的承载力、刚度、变形能力和耗能能力既有联系,又不完全相同;同样,结构系统的安全性也与组成结构系统的基本构件的安全性既有联系,也不完全相同。

目前,工程结构设计通常是针对一般正常荷载作用下的结构构件极限状态进行设计,这是一种基于结构构件的结构设计,只能满足结构系统安全的基本要求,并不能反映结构中不同构件的失效或破坏对整体结构系统的影响。如果结构系统设计不合理,可能会因为某个或某几个构件的失效破坏而导致整体结构的崩溃,即倒塌破坏。爆炸、撞击等意外偶然作用下的结构抗倒塌研究就属于这类问题。这类问题研究关注的是构件失效或破坏对整体结构系统的影响,即所谓结构的易损性分析或结构的鲁棒性分析^[2-5]。因此,构件失效或破坏对整体结构系统的影响程度,即构件的重要性程度是易损性或鲁棒性研究的基础。

1 现有的结构构件重要性评价方法

结构构件的重要性评价不仅取决于结构系统自身的力学性能,也取决于作用荷载情况,还与结构性能的评价指标有关。就整体结构安全性而言,结构性能的评价指标是指一个构件的受损或失效对整体结构的刚度、稳定性、承载力的影响程度,并且与是否倒塌或倒塌后果(如倒塌面积)等有关。

根据评价中是否考虑荷载作用的影响,结构构件重要性评价方法可分为2类:一类是与荷载作用无关的评价方法,这种方法主要评价结构系统的自身属性;另一类是与荷载作用相关的评价方法,这种评价方法既包含了结构系统的自身属性,也包含了结构上的荷载作用属性(荷载分布和传力路径)的影响。

1.1 与荷载作用无关的评价方法

与荷载作用无关的结构重要性评价方法主要是从结构系统的拓扑关系和刚度分布来分析结构构件的重要性层次,从而获得结构安全性和易损性的信息^[6]。

各国学者直接或间接地根据构件对整体结构刚度的影响程度给出了构件的重要性评价指标。文献[4]中通过在结构的任意杆件两端施加单位平衡力系(对于刚架结构,指轴力、剪力和弯矩),使杆件中

间位置产生相应的内力值(轴力、剪力和弯矩),将各内力值相加作为该构件的重要性评价指标,该指标与结构的传力属性有关,也反映了结构的刚度分布,然而将3种不同的内力在数值上简单相加作为构件重要性评价指标缺乏依据。文献[5]中用结构基本频率衡量整体结构刚度,用移除构件后结构刚度退化率作为重要性评价指标。频率是能够全面反映整体结构刚度的指标,但由于结构有多阶频率,如果移除构件后结构频率次序发生变化,则仅用移除构件前后的基本频率比作为评价指标,其合理性值得商榷;另外,结构有多阶频率,对结构基本频率影响不大的构件也可能是对结构安全影响很大的构件。Nafday^[7]认为如果结构刚度矩阵奇异,则代表结构不稳定,提出用标准化后的结构刚度矩阵行列式来衡量结构的安全性,并将重要性评价指标定义为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。该指标虽然直接与结构的刚度矩阵相关,但结构刚度矩阵行列式的值没有明确的工程物理意义,无法体现结构构件在工程上的重要性。Agarwal等^[8]在研究结构易损性过程中也基于刚度矩阵行列式的概念提出了整体性指标,并基于该指标定义了损伤程度指标,但与Nafday的研究一样,仍然存在指标工程物理含义不明确的问题。

柳承茂等^[9]用构件失效后的影响面积来衡量构件的相对重要性程度,直接体现构件对结构安全性的影响,该方法概念简洁明确,但在确定影响面积时,仅与构件相关的空间有关,而与结构实际可能的失效面积无直接关系。张誉等^[10]、季征宇等^[11]采用层次分析法(AHP法)给出了构件的相对重要性关系,该方法使经验法操作更规范,但无法避免经验法先天的不足,仍具有主观性和不确定性。

1.2 与荷载作用有关的评价方法

结构中实际有效的传力路径不仅与结构自身几何构成和刚度分布等特性有关,还与荷载作用形式紧密相关。与荷载作用无关的评价方法均未考虑对结构荷载传力路径的影响。事实上,与荷载无关的评价方法中涉及的结构刚度并非是指结构抵抗外荷载的有效刚度,因此可能会出现对荷载传递没有贡献的构件,其重要性可能会高于对荷载传递贡献大的构件。实际上,与荷载无关的重要性评价方法没有考虑结构系统传递荷载的属性,故该方法是不全面的,为此,不少学者提出了一系列与荷载相关的重要性评价方法。

Gharaibeh等^[12]提出了基于系统可靠度理论的

评价方法,其构件重要性评价指标定义为该构件对结构整体可靠度的影响。可靠度理论本身是比较完备的,并适用于各种结构,然而,结构系统中各结构构件的相互关系(串、并联关系)错综复杂、相互耦合,使得结构系统失效树的分析非常复杂,且在计算结构系统可靠度时,不仅需要足够的统计数据,还需要对荷载、承载力等诸多因素的分布进行假定,因此该方法仅具有理论上的意义,难以应用于一般的工程结构。

文献[5]中在寻找关键构件时,提出了用平均应力比和稳定退化系数来衡量构件失效后对结构的影响。平均应力比指标可以宏观上大致体现结构构件的应力水平,主要适用于材料均匀和构件规则的钢结构,但未考虑构件上应力分布的影响(可能是整体构件应力水平高,也可能是局部应力集中)。稳定退化系数定义为移除该构件的剩余结构和原结构的一阶屈曲荷载系数的比值,该指标从结构稳定的角度衡量构件的重要性,一般适用于以稳定作为控制条件的结构。

文献[6]中提出了基于能量流的构件重要性评价指标,其计算原理为:在确定的荷载作用下,通过比较拆除构件后对结构总应变能的影响来确定该构件的重要性,其评价指标 γ_i 的定义为

$$\gamma_i = \frac{U_i}{U} \quad i=1,2,\dots,n \quad (1)$$

式中: U 为荷载作用下完好结构贮存的总应变能; U_i 为荷载作用下拆除杆件 i 后结构贮存的总应变能。

拆除构件后剩余结构的应变能增加越大,被拆除构件的重要性就越大。文献[6]中的方法通过引入应变能来综合衡量构件内力(轴力、剪力和弯矩)水平,概念和计算均比较简单,但其重要性评价指标的数值区间为 $[1, +\infty]$,数值大小与构件重要性程度不呈线性关系,在反映构件对整体结构的影响程度时存在一定的不足。

1.3 评价方法的选择

根据构件重要性评价的基本定义,构件重要性是指构件对整体结构性能的影响程度。而整体结构的性能有多方面,包括整体结构的承载力、变形能力、刚度、稳定性、可靠度、使用空间等,其中对整体结构的承载力、变形能力、稳定性、使用空间的影响程度,均需采用拆除构件的结构弹塑性分析甚至倒塌分析才能获得,这种分析的工作量十分巨大,因此上述构件重要性评价方法中大多采用的是结构弹性分析方法。相对来说,采用可以获得整体结构刚度

影响程度的弹性分析方法是目前可行的方法。

事实上,对于弹性结构,构件刚度对荷载作用下的结构体系的传力能力有很大影响,而传力路径中传递荷载比例大的路径上的构件显然是重要性大的构件。由图1可以得到构件刚度与结构传力路径之间关系的基本概念:

(1)对于图1(a)串联传力路径上的结构构件,只要拆除任意一个构件,该传力路径即失效,因此,处于串联关系的各构件的重要性相同。

(2)对于图1(b)并联传力路径上的结构构件,刚度越大的构件,其分担的荷载也越大,拆除后对结构的影响也越大,因此,处于并联关系的各个构件,刚度大的构件重要性大。

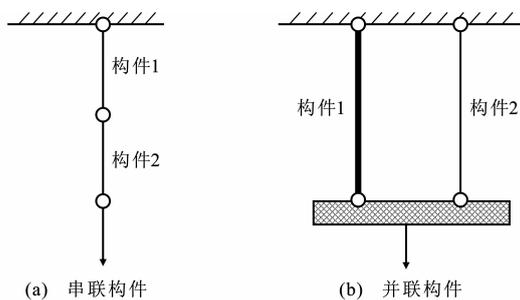


图1 结构构件的相互关系

Fig. 1 Relations of Structural Elements

实际工程结构的传力路径往往错综复杂,构件之间形成复杂的并联或串联关系,结构系统的传力路径非常复杂,难以直接评价各传力路径上各结构构件的重要性,但借助上述基本概念,可以通过给定荷载下的结构分析,定量计算出结构系统各传力路径上传递荷载的大小,由此给出构件的重要性评价指标。

2 传力系统重要性评定的经验

根据结构承力原理和长期工程实践经验,有以下结构构件重要性评定经验:

(1)柱和梁的重要性层次。一般工程结构始终受到重力荷载作用,柱在结构中通常起到传递重力荷载的作用,一旦柱发生破坏,则结构会发生局部或整体垮塌,因此柱通常比同层梁重要。结构抗震设计中强调“强柱弱梁”,不仅是由于梁铰机制有利于结构耗能,更重要的是因为柱铰机制更易导致结构的倒塌。

(2)柱的重要性层次。在结构抵抗竖向荷载的传力系统中,下部柱一般比上部柱重要,因为下部柱承受的竖向荷载大,拆除下部柱造成的影响区域和

楼层多。在结构抵抗水平荷载的传力系统中,边柱比同层的中柱重要,因为边柱对结构抗倾覆弯曲的贡献更大。

(3) 框架、剪力墙与核心筒的重要性层次。对于一般的框架-核心筒结构或框架-剪力墙结构,核心筒与剪力墙是结构主要的抗侧力构件,在水平荷载作用下,剪力墙或核心筒将承担主要的水平力,因而其重要性要高于框架。

(4) 节点的重要性层次。无论在何种荷载作用下,节点比与其相连的构件更重要,因为节点失效,将导致与其相连的所有构件失效,构件的各种功能也随之丧失。对于不同位置的节点,如何判断其重要性层次,主要看它所联系构件的重要性程度。节点联系的构件数量越多,联系构件的重要性程度越高,该节点就越重要。

基于工程实践经验的重要性评价能够反映一般规律,但在具体应用中缺乏定量计算,且评价结果往往取决于评价人的经验和专业水平。

3 基于广义结构刚度的构件重要性评价指标

3.1 广义结构刚度的概念与计算

对于保守结构系统,外力所做的功等于结构应变能的增量。当采用线弹性分析时,设结构上作用的荷载向量为 \mathbf{F} , $\mathbf{F} = F_{\max} \mathbf{v}$, 其中 F_{\max} 为荷载向量中的最大值, \mathbf{v} 为荷载分布向量, 则结构在荷载 \mathbf{F} 作用下的变形能 U 为

$$U = \frac{1}{2} \mathbf{F}^T \mathbf{D} = \frac{1}{2} \mathbf{F}^T \mathbf{K}^{-1} \mathbf{F} = \frac{1}{2} F_{\max}^2 \mathbf{v}^T \mathbf{K}^{-1} \mathbf{v} \quad (2)$$

式中: \mathbf{D} 为荷载 \mathbf{F} 作用下结构的位移向量; \mathbf{K} 为结构的刚度矩阵。

刚度的一般定义为结构抵抗变形的能力。对于弹性结构系统,当结构上的荷载分布确定时,结构的位移分布也是确定的。定义结构上荷载分布为广义力 F_{stru} , 相应结构的位移分布为广义位移 D_{stru} , 则广义结构刚度 K_{stru} 可表示为

$$K_{\text{stru}} = F_{\text{stru}} / D_{\text{stru}} \quad (3)$$

结构的变形能可表示为

$$U = \frac{1}{2} F_{\text{stru}} D_{\text{stru}} = \frac{1}{2} F_{\text{stru}}^2 \frac{1}{K_{\text{stru}}} \quad (4)$$

将(4)式与式(2)比较可知,广义结构刚度 K_{stru} 与 $\mathbf{v}^T \mathbf{K}^{-1} \mathbf{v}$ 成反比,为此定义的广义结构刚度为

$$K_{\text{stru}} = \frac{1}{\mathbf{v}^T \mathbf{K}^{-1} \mathbf{v}} \quad (5)$$

则式(2)可写成

$$U = \frac{1}{2} F_{\max}^2 \frac{1}{K_{\text{stru}}} \quad (6)$$

$$K_{\text{stru}} = \frac{1}{2} F_{\max}^2 \frac{1}{U} \quad (7)$$

式(7)表明,广义结构刚度 K_{stru} 可以通过计算给定荷载分布下结构贮存的变形能来获得。

需要指出的是,广义结构刚度 K_{stru} 不同于结构的刚度矩阵 \mathbf{K} 。结构刚度矩阵 \mathbf{K} 是结构自身的属性,与荷载作用形式无关;而广义结构刚度 K_{stru} 是反映整体结构抵抗给定荷载作用下变形能力的一个整体物理量,它既与结构上的荷载分布 \mathbf{v} 有关,又与结构的刚度矩阵 \mathbf{K} 有关。

3.2 评价指标

在给定荷载作用下,构件对广义结构刚度 K_{stru} 的贡献直接体现了该构件在结构传力系统中的地位,因此本文中以构件损伤所导致的广义结构刚度的损失率作为衡量构件在结构系统中的重要性评价指标 I , 其表达式为

$$I = \frac{K_{\text{stru},0} - K_{\text{stru},f}}{K_{\text{stru},0}} = 1 - \frac{K_{\text{stru},f}}{K_{\text{stru},0}} \quad (8)$$

式中: $K_{\text{stru},0}$ 为完好结构的广义结构刚度; $K_{\text{stru},f}$ 为拆除构件后的广义结构刚度。

由于 $K_{\text{stru},f} \leq K_{\text{stru},0}$, 因此式(8)的构件重要性评价指标 I 为 $0 \sim 1$ 之间的一个常数指标。 $I=0$ 表示该构件对广义结构刚度没有影响,在结构系统的传力路径中没有贡献(即为“零杆”);而 $I=1$ 表示该构件极其重要,一旦失效,结构将无法抵抗给定荷载。由此可见,式(8)定义的结构构件重要性评价指标 I 具有明确的物理意义,并可衡量评价构件的重要性程度。

将式(7)代入式(8),可得

$$I = \frac{U - U'}{U} = 1 - \frac{U'}{U} \quad (9)$$

式中: U' 为拆除构件后结构的变形能。

因此,式(8)基于广义结构刚度的构件重要性评价指标可以用变形能的方法来计算。需要指出的是,式(9)与文献[6]中的基于能量流方法的重要性评价指标表达式相近,2种方法获得的构件重要性程度排序是一致的,不同点在于式(9)重要性评价指标的数值区间为 $[0, 1]$, 物理含义是该构件对广义结构刚度的贡献。

4 算例分析

以下通过对1组不同层数和跨数的框架结构算

例进行分析,验证本文中所建议的构件重要性指标的合理性。表 1 列出了框架结构算例的结构参数,表 2 列出了框架梁和框架柱的参数。

4.1 重力荷载作用下的构件重要性评价

由于采用线弹性分析,荷载大小对分析结果没

表 1 框架结构参数

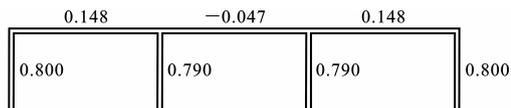
Tab. 1 Parameters of Frame Structures

框架编号	层数	跨数	层高/m	跨度/m
13	1	3	3.6	5.0
23	2	3	3.6	5.0
41	4	1	3.6	5.0
42	4	2	3.6	5.0
43	4	3	3.6	5.0

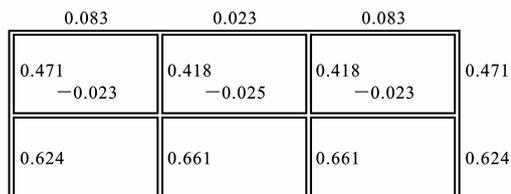
表 2 梁、柱参数

Tab. 2 Parameters of Beams and Columns

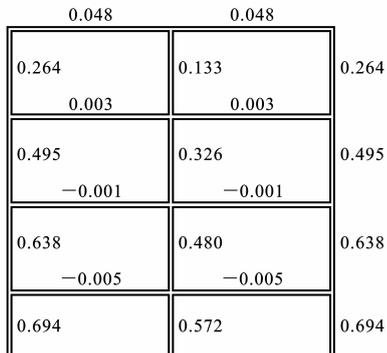
构件	截面尺寸		轴向刚度/ ($10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$)	抗弯刚度/ ($10^8 \text{ N} \cdot \text{m}^2$)
	宽/m	高/m		
梁	0.25	0.5	3.75	9.375
柱	0.40	0.4	4.80	7.680



(a) 框架13



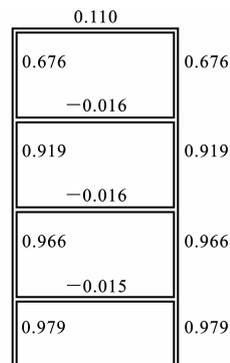
(b) 框架23



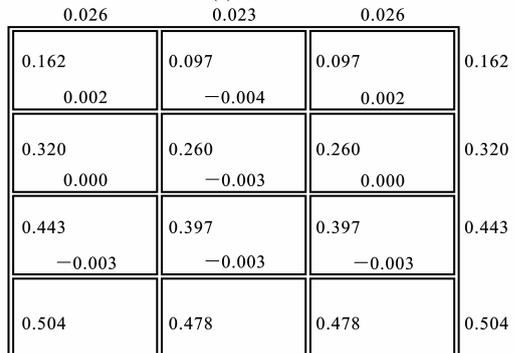
(d) 框架42

有影响,因此分析中重力荷载取 $1 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ (顶层取 $0.7 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$),作用在所有框架梁上,计算结果见图 2。由图 2 可以看出:在重力荷载作用下柱的重要性指标明显高于梁,下层柱的重要性高于上层柱,随着跨数的增加,框架柱的重要性有所降低,单跨框架柱的重要性指标在 0.9 以上,分析结果符合工程经验。

需要说明的是,采用拆除构件方法分析时,为维持原结构上的总荷载,需对构件拆除后该构件上的荷载进行重分配,本文分析中简单地把梁上的重力荷载对半作用在两侧的柱上。这样处理后的荷载分布相对均布重力荷载情况下结构传力方式更有利,但导致低估了梁的重要性,对重要性指标接近 0 的梁,重要性指标出现负数,此时将梁的重要性指标直接取为 0。还需说明的是,对重要性指标接近 0 的梁,尽管其对整体结构系统的重要性很低,但对其自身的重要性依然存在,即构件自身应能承担直接作用于其上的荷载,这属于构件本身的安全问题。



(c) 框架41



(e) 框架43

图 2 重力荷载作用下各框架的重要性指标计算结果

Fig. 2 Calculating Results of Importance Indexes of Frames Under Gravity Loads

4.2 水平地震荷载作用下的构件重要性评价

在每个梁、柱节点处施加同向水平倒三角分布的地震荷载,近似评估地震荷载作用下各结构构件的重要性程度,计算结果见图 3。在水平地震荷载作用下,结构中同时存在 2 种变形:一种为楼层剪力

引起的梁、柱弯曲变形,在这种变形中,中柱比边柱重要,因为中柱两端梁的约束更强;另一种是由倾覆弯矩引起的柱拉压变形,这种变形中,边柱则比中柱重要。由图 3 可以看出:对于倾覆弯矩较小的上部楼层,中柱比边柱重要性指标高;而在底部楼层,中

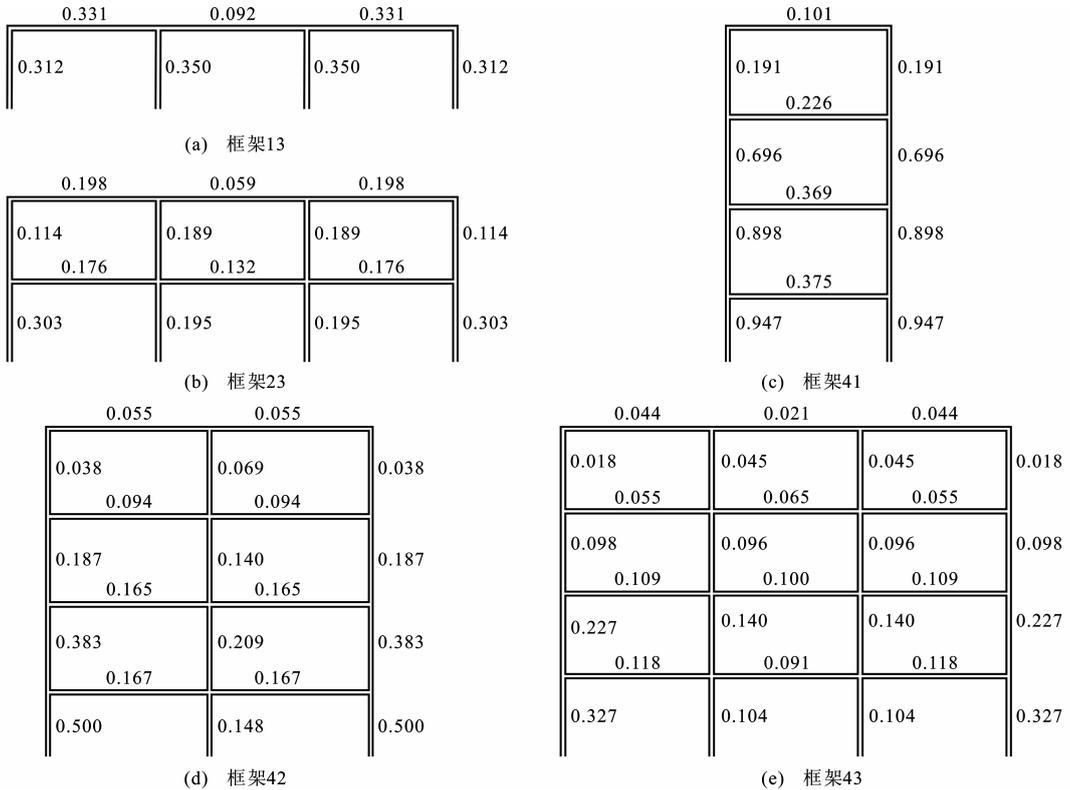


图3 水平地震荷载作用下各框架的重要性指标计算结果

Fig. 3 Calculating Results of Importance Indexes of Frames Under Horizontal Seismic Loads

柱比边柱重要性指标低。一般情况下,下层梁比上层梁重要,边梁比中梁重要,柱整体上比梁重要。此外,相对于重力荷载作用下的情况,梁的重要性明显提高,因为水平地震荷载作用下,梁的抗弯贡献增大。

由以上2个算例可知:本文中建议的结构构件重要性指标可以较好地识别结构系统不同构件的重要性,评价结果与工程经验一致。

5 结语

(1)结构系统中各结构构件(或子结构)的重要性评价对合理设计结构、保证整体结构的安全具有重要意义。研究表明,结构构件的重要性评价应考虑荷载作用对结构体系传力路径的影响。本文中基于整体结构在荷载作用下的传力路径的影响,提出了与荷载相关的广义结构刚度概念,并以构件对广义结构刚度的影响程度,用能量表达式给出了结构构件重要性评价指标。框架结构的算例分析表明,笔者提出的基于广义结构刚度的重要性评价指标与一般工程经验一致,能定量识别结构系统中的关键构件。本文中所提出的构件重要性评价指标具有明确的物理意义,且便于计算,可用于大多数类型的结

构,易于工程技术人员的理解和计算。

(2)由于受所采用的分析方法的限制,与现有的评价方法一样,本文中得到构件重要性评价结果并不能完全体现对整体结构弹塑性性能(如结构极限承载力、结构塑性变形能力)的影响程度,也未能考虑对构件的破坏特征(延性破坏、脆性破坏)的影响。此外,在弹性阶段对结构刚度贡献大的构件,也可能是次要构件,如金属屈服型耗能支撑,因此,构件的重要性评价需要根据所考察的整体结构性能指标进行进一步的相关研究。尽管如此,本文中提出的基于广义结构刚度的构件重要性评价方法对认识结构体系的传力路径、结构布置与组成特点及结构合理设计等具有重要的参考意义。在目前基于整体结构弹塑性分析的构件重要性评价实用方法建立之前,可采用本文方法与整体结构弹塑性受力特征相结合的方法来指导整体结构系统的设计。

参考文献:

References:

- [1] 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].

- ural Science, 2008, 29(4): 593-599.
- [4] ELLINGWOOD B, LIN T D. Flexure and Shear Behavior of Concrete Beams During Fires[J]. Journal of Structural Engineering, 1991, 117(2): 440-458.
- [5] CAI J, BURGESS I, PLANK R. A Generalised Steel/Reinforced Concrete Beam-column Element Model for Fire Conditions[J]. Engineering Structures, 2003, 25(6): 817-833.
- [6] BRATINA S, SAJE M, PLANINC I. The Effects of Different Strain Contributions on the Response of RC Beams in Fire[J]. Engineering Structures, 2007, 29(3): 418-430.
- [7] 乔长江. 具有端部约束的混凝土构件升降温全过程耐火性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2009.
- QIAO Chang-jiang. Fire Resistance of Reinforced Concrete Restrained Members During Heating and Cooling Phases[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2009.
- [8] EN 1993-1-2: 2005, Eurocode 3. Design of Steel Structures, Part 1-2: General Rules—Structural Fire Design [S].
- [9] EN 1992-1-2: 2004, Eurocode 2. Design of Concrete Structures, Part 1-2: General Rules—Structural Fire Design [S].
- [10] WELCH S, MILES S D, KUMAR S, et al. FIRE-STRUC—Integrating Advanced Three-dimensional Modeling Methodologies for Predicting Thermo-mechanical Behavior of Steel and Composite Structures Subjected to Natural Fires[R]. Belgium: BRE, 2006.
- [11] FRANSSEN J M. Thermal Elongation of Concrete During Heating Up to 700 °C and Cooling [R]. Belgium: University of Liege, 1993.
- [12] EN 1994-1-2: 2005, Eurocode 4. Design of Composite Steel and Concrete Structures, Part 1-2: General Rules—Structural Fire Design [S].
- ~~~~~
- (上接第6页)
- [2] 叶列平, 程光煜, 陆新征, 等. 论结构抗震的鲁棒性[J]. 建筑结构, 2008, 38(6): 11-15.
- YE Lie-ping, CHENG Guang-yu, LU Xin-zheng, et al. Introduction of Robustness for Seismic Structures[J]. Building Structure, 2008, 38(6): 11-15.
- [3] 叶列平, 曲哲, 陆新征, 等. 提高建筑结构抗地震倒塌能力的设计思想与方法[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(4): 42-50.
- YE Lie-ping, QU Zhe, LU Xin-zheng, et al. Collapse Prevention of Building Structures: a Lesson from the Wenchuan Earthquake[J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(4): 42-50.
- [4] 柳承茂, 刘西拉. 基于刚度的构件重要性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.
- [5] 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.
- [6] 张雷明, 刘西拉. 框架结构能量流网络及其初步应用[J]. 土木工程学报, 2007, 40(3): 45-49.
- ZHANG Lei-ming, LIU Xi-la. Network of Energy Transfer in Frame Structures and Its Preliminary Application [J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(3): 45-49.
- [7] NAFDAY A M. System Safety Performance Metrics for Skeletal Structures [J]. Journal of Structural Engineering, 2008, 134(3): 499-504.
- [8] AGARWAL J, BLOCKLEY D, WOODMAN N. Vulnerability of 3-dimensional Trusses [J]. Structural Safety, 2001, 23(3): 203-202.
- [9] 柳承茂, 刘西拉. 结构安全性综合评估方法的研究[J]. 四川建筑科学研究, 2004, 30(4): 46-48.
- LIU Cheng-mao, LIU Xi-la. Study on the Comprehensive Assessment Method of Structural Reliability [J]. Sichuan Building Science, 2004, 30(4): 46-48.
- [10] 张誉, 李立树. 旧房可靠性的模糊综合评判[J]. 建筑结构学报, 1997, 18(5): 12-20.
- ZHANG Yu, LI Li-shu. Fuzzy Comprehensive Evaluation of Reliability of Existing Building Structures [J]. Journal of Building Structures, 1997, 18(5): 12-20.
- [11] 季征宇, 林少培. 受损结构安全度模糊评估理论的建立[J]. 建筑结构学报, 1995, 16(2): 51-57.
- JI Zheng-yu, LIN Shao-pei. Fuzzy Evaluation for Residual Carrying Capacity of Damaged Structures [J]. Journal of Building Structures, 1995, 16(2): 51-57.
- [12] GHARAIBEH E S, FRANGOPOLOU D M, ONOUFRIOU T. Reliability-based Importance Assessment of Structural Members with Applications to Complex Structures [J]. Computers and Structures, 2002, 80(12): 1113-1131.