结构抗震鲁棒性分析方法研究①

包 超[1]，杜永峰[1,2]，刘 勇[1]，徐天妮[1]，王国福[1]

(1.兰州理工大学防震减灾研究所，甘肃 兰州 730050；
2.兰州理工大学西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心，甘肃 兰州 730050)

摘要：结合侧向增量连续倒塌过程中框架结构受力特征来研究结构抗震鲁棒性，提出其定量计算方法，通过对钢筋混凝土框架结构有限元模型的对比分析进行验证。研究表明：结构鲁棒性强弱是一个相对概念，虽然无法设计和建造出绝对鲁棒的结构，但可以通过定量分析结构鲁棒性进行建筑选型和结构布置方案优化；降低重要构件的易损性系数能够增强结构抗震鲁棒性，合理增加构件数量，同时加强其相互联系的有效性并保证备用荷载路径的可靠性，能够提高整体结构的鲁棒性；在同样荷载作用下，随着所承担荷载的不同，框架柱易损性系数按照大小排序依次为中柱、边柱和角柱，而由于备用荷载路径分布和传递荷载的机制不同，框架柱重要性按照大小排序则依次为角柱、边柱和中柱，对易损性系数和重要性系数均较大的构件设置可靠保护或增加荷载传递路径都能够提高整体结构抗连续倒塌的鲁棒性；提高结构冗余度，增强构件相互联系，可以降低结构中初始失效所造成的不利影响。

关键词：框架结构；连续倒塌；结构鲁棒性；构件易损性系数；构件重要性系数

中图分类号：TU375；TU31 **文献标志码**：A **文章编号**：1000－0844(2015)03－0660－07

DOI:10.3969/j.issn.1000－0844.2015.03.0660

Study on Seismic Robustness of Structure

BAO Chao[1], DU Yong-feng[1,2], LIU Yong[1], XU Tian-ni[1], WANG Guo-fu[1]

(1.*Institute of Earthquake Protection and Disaster Mitigation, Lanzhou University of Technology, Lanzhou* 730050,*Gansu*,*China*;
2.*Western Center of Disaster Mitigation in Civil Engineering of Ministry of Education, Lanzhou University of Technology, Lanzhou* 730050,*Gansu*,*China*)

Abstract: In the last decade because of the frequent occurrence and great harm brought by the progressive collapse of structures, this problem has attracted increasing attention in the engineering field and has become a hot research issue worldwide. Progressive collapse is defined as a situation where the local failure of a primary structural component leads to the collapse of the whole structure. A safe and robust structure is able to bear the required loads to prevent complete collapse. Researchers have suggested a number of ways to ensure that buildings of significant size can absorb local damage and resist progressive collapse. However, the source and magnitude of the loads may differ, so it is impossible to design and construct structures that can guarantee absolute safety. Although much work has been done in the field of structural robustness, the term used for structural property prevents progressive structural collapse and is still in the exploration stage. So far, there is no clear definition or accepted parameters to quantitatively evaluate structural robustness. In this study, we describe the progressive-collapse resistance robustness of a frame structure and propose a target-oriented component vulnerability coefficient in combination with an

① **收稿日期**：2014-06-30
基金项目：国家自然科学基金(51178211)
作者简介：包 超(1986－)，男(汉族)，甘肃崆峒人，博士研究生，主要从事结构抗震和减灾控制研究。E-mail:bc863@foxmail.com。

internal force feature of the frame structure during the collapse process. Additionally, we improve an existing structural robustness coefficient. Furthermore, we verified the practicability of our proposed method by computing a finite element model of a reinforced concrete frame structure using the finite element analysis software, SeismoStruct V6.5. Our results show that structural robustness is relative and can be enhanced by reducing the member vulnerability coefficient of important columns. Under the same load, the vulnerability coefficient of the frame columns can be segregated as the middle, side, and corner columns, and the member importance coefficients have the opposite values. Components with large vulnerability and important coefficients should be protected to ensure structural robustness.

Key words: frame structure; progressive collapse; structural robustness; vulnerability coefficient of member; importance coefficient of member

0　引言

1968 年 5 月 16 日清晨英国伦敦一座名为 Ronan Point 的 22 层公寓发生了连续倒塌事故,并造成了 4 死 17 伤的严重后果,事故起因是由于 18 层处厨房天然气泄漏发生爆炸,使厨房中部分承重墙丧失承载力,进而导致该公寓楼的一角从上至下发生连续性倒塌,这便是历史上著名的 Ronan Point 公寓连续倒塌事件,也正是因为此次事故的发生才使得全世界开始关注结构连续倒塌问题。尽管该事故的调查报告当年便得以公布[1],但从工程结构角度有关该公寓发生连续倒塌的原因直到其拆除数年后才被发现,即结构鲁棒性(structural robustness)较差,缺乏抵御局部破坏的能力[2],这也使得结构鲁棒性首次进入业界人士视野。然而,直到 1995 年美国 Alfred P. Murrah 政府大楼和 2001 年美国世贸大厦等一系列著名连续倒塌事件的发生,关于如何增强结构鲁棒性的问题才真正成为全世界土木工程界的研究热点。

为了保证建筑结构在极端条件下也能够具备一定的鲁棒性,国际结构安全联合委员会(JCSS),英国结构安全标准委员会(SCOSS)和美国土木工程师学会(ASCE)等多个国际组织先后推出了相关的标准和规范[3-5]。

结构的鲁棒性用于描述建筑结构承受局部损伤并抵抗不相称破坏的能力[5],国内外学者已对此做了大量深入研究。叶列平等[6]从结构体系、承载力与延性、破坏模式等方面探讨了提高结构抗震鲁棒性的措施。Ribeiro F L A 等[7]提出了一种鲁棒性评价方法,并利用 OpenSees 有限元软件建立了一栋实际钢框架结构,并以此为算例进行验证。黄靓和李龙[8]对一种已有的构件重要性系数做了相应改进,同时提出一种新的结构鲁棒性量化评价指标。郑山锁等[9]分别将增量动力分析方法和静力非线性方法与蒙特卡洛抽样相结合,从而得到结构概率地震需求及概率抗震能力的统计,并提出了地震易损性模型。Kanno Y 等[10]对结构强冗余度、弱冗余度和结构鲁棒性做了新的定义,确立三者之间的关系,并最终利用数个模型对其进行验证。周靖等[11]对 6 层钢筋混凝土框架结构进行易损性分析,并评估了不同强柱系数取值对钢筋混凝土框架结构抗震性能产生的影响。

虽然关于结构鲁棒性的研究已经取得了一定成果,但学界仍然没有建立一个可以被广泛接受的结构鲁棒性定量评价方法[9],所以目前有关其定量评价的研究尚都处于探索阶段。本文以地震作用作为外部激励,以结构地震响应作为主要分析指标,对结构抗震鲁棒性展开了研究。

1　结构抗连续倒塌鲁棒性计算

1.1　构件易损性系数

现有研究主要针对整体结构的易损性展开,即整个结构在极端事件中可能受到伤害或造成损伤的程度。结构易损性不仅取决于结构的布置形式、建筑材料的性能,还与关键构件的设计和构造措施等有关。

较之结构易损性,构件易损性用于反映外部荷载作用下构件发生破坏的概率。黄靓等[12]基于构件承载力建立了多种相关荷载作用下构件易损性系数,从而能够定量地评价构件易损程度。地震作用下结构中各构件同样会出现轴力、剪力和弯矩荷载共同作用的现象,考虑到该文献提出的计算方法对各变量的变化过于敏感,因而在此基础上做了相应

改进,使其能够适用于地震激励下结构抗震鲁棒性分析。构件易损性系数 φ 计算公式为

$$\varphi_i = p\frac{V}{V_0} + p\frac{M}{M_0} + q\frac{N}{N_0} \tag{1}$$

式中:V、M 和 N 分别表示构件在最不利状态下所受剪力值、弯矩值和轴力值;M_0 和 N_0 分别表示构件纯弯时正截面受弯极限承载力和纯压时轴心受压极限承载力。式中各系数计算方法为

$$\begin{cases} p = -\dfrac{4k}{(k-1)^2}, q = \dfrac{4k^2}{(k-1)^2} \\ k = \dfrac{n+m-1}{n^2-n} \\ n = \dfrac{N_b}{N_0}, m = \dfrac{M_b}{M_0} \end{cases} \tag{2}$$

1.2 构件重要性系数

构件重要性系数用来反映极端条件下个别构件承载力的丧失对原结构承载力的影响程度,而确定构件重要性系数是计算结构鲁棒性系数的基础[13]。

柳承茂[14]提出的构件重要性评估方法没有考虑外部荷载作用;高扬[15]则综合考虑了结构的几何拓扑关系、构件的刚度和强度以及外荷载的影响,提出基于结构承载力系数的构件重要性系数,但在其所提公式中以桁架结构承载力设计基准值为比较对象,难以推广至一般框架结构;为此,黄冀卓[16]以构件在结构能量流分布中的贡献和构件失效的影响面积为切入点研究了构件重要性系数的计算方法。然而,文献[16]在进行构件重要性分析时只考虑了竖向荷载作用,未考虑风和地震等水平荷载作用。本文研究模型需要考虑地震动激励与重力荷载存在耦合作用,而在该耦合作用下梁柱构件失效影响面积难以确定,所以本文不考虑构件失效影响面积,仅以地震作用下底层柱失效对结构总能量分布的影响程度作为重要性系数的评判指标,具体计算方法为

$$\gamma_i = \frac{\alpha_i}{\max\{\alpha_i\}} \tag{3}$$

$$\alpha_i = \Delta E_i = \frac{1}{2}(r_i')^T K_i (r_i) \tag{4}$$

式中:r_i 为构件重要性系数;α_i 用于表示第 i 框架柱的失效对结构总应变能的影响;k_i 为底层第 i 柱的单元刚度矩阵;r_i 和 r_i' 分别为第 i 底层框架柱在失效前、后其两端节点位移向量。

第 i 底层柱的单元刚度矩阵:

$$k_i = \begin{bmatrix} \frac{12EI}{l^3} & 0 & -\frac{6EI}{l^2} & -\frac{12EI}{l^3} & 0 & -\frac{6EI}{l^2} \\ 0 & \frac{EA}{l} & 0 & 0 & -\frac{EA}{l} & 0 \\ -\frac{6EI}{l^2} & 0 & \frac{4EI}{l^2} & \frac{6EI}{l^2} & 0 & \frac{2EI}{l} \\ -\frac{12EI}{l^3} & 0 & \frac{6EI}{l^2} & \frac{12EI}{l^3} & 0 & \frac{6EI}{l^2} \\ 0 & -\frac{EA}{l} & 0 & 0 & \frac{EA}{l} & 0 \\ -\frac{6EI}{l^2} & 0 & \frac{2EI}{l} & \frac{6EI}{l^2} & 0 & \frac{4EI}{l} \end{bmatrix} \tag{5}$$

底层柱下端与基础相连接,故在失效前后柱底端产生的位移与顶端的位移相比太小,可忽略不计,则柱底节点位移向量可写为:

$$r_i' = \begin{Bmatrix} \bar{u}_i' \\ \bar{v}_i' \\ \bar{\theta}_i' \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}, \quad r_i = \begin{Bmatrix} \bar{u}_i \\ \bar{v}_i \\ \bar{\theta}_i \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \tag{6}$$

将式(6)代入式(4)中,则构件刚度矩阵被简化为 3 阶方阵,进而可得第 i 底层柱对于结构总能量分布贡献的简化计算式:

$$\alpha_i = \frac{1}{2}\begin{Bmatrix} \bar{u}_i' \\ \bar{v}_i' \\ \bar{\theta}_i' \end{Bmatrix}^T \begin{bmatrix} \frac{12EI}{l^3} & 0 & \frac{6EI}{l^2} \\ 0 & \frac{EA}{l} & 0 \\ \frac{6EI}{l^2} & 0 & \frac{4EI}{l} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{u}_i \\ \bar{v}_i \\ \bar{\theta}_i \end{Bmatrix} \tag{7}$$

2.3 结构鲁棒性系数

构件易损性系数反映了结构构件在荷载作用下的易损程度,而构件的重要性系数则比较客观地反映出不同构件在抵御结构破坏时所做的贡献。二者相互之间并没有必然的联系,但分别从不同的侧重点表现了结构与构件之间的相互联系,所以在评价结构的鲁棒性时将它们综合起来考虑,这样才能更加全面地评估近场地震作用对结构鲁棒性的影响。

基于这种思想,文献[17]提出了综合考虑构件易损性系数和重要性系数的结构鲁棒性定量评价方法:

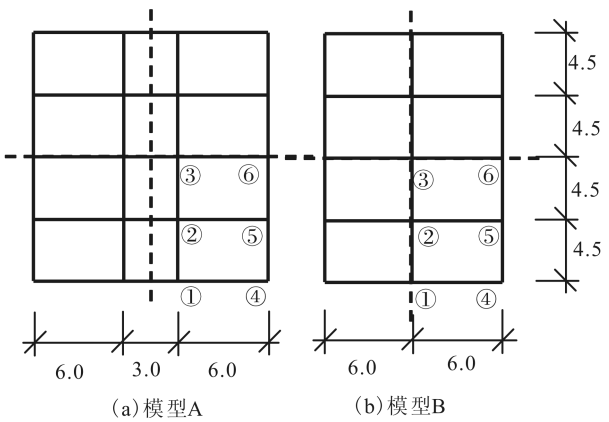
$$R = \frac{1}{\sum_{i=1}^{n}(\varphi_i \gamma_i)} \tag{8}$$

式中:R 为结构鲁棒性系数;φ_i 和 γ_i 分别为构件易损性系数和重要性系数;n 为所分析的构件总数。

结合上述分析可知:荷载作用下结构各构件的易损性系数较小,即构件不易被破坏,并且相应构件的重要性系数也较小,即构件的损伤对整个结构的影响不大,则整个结构在荷载作用下的鲁棒性就会增强,从而发生不相称的连续倒塌破坏几率也势必会降低。从这个观点出发也符合工程中的实际情况。

2　分析模型

利用有限元软件 SeismoStruct[18] 分别建立一栋 5 层 2 跨和一栋 5 层 3 跨抗震设防烈度为Ⅷ度的钢筋混凝土框架结构模型,即模型 A 和模型 B;其梁和柱均采用 C30 级混凝土,构件纵向钢筋采用 HRB400 级;层高 3.3 m,柱截面尺寸 0.5 m×0.5 m,梁尺寸 0.3 m×0.55m。结构平面布置如图 1 所示。



(a)模型A　　(b)模型B

图 1　结构平面布置图(单位:m)

Fig.1　Plan view of the RC frame structure (Unit:m)

本文所建模型为平面双向对称模型,为避免重复运算并提高运算效率,通过两条对称轴将原结构划分为 4 分具有相同参数的子结构作为研究对象。图 1 中标记的 6 根底层框架柱分别对应于各个工况。

3　地震动记录选取

以结构设计基本地震加速度 0.2 g 作为地震动激励输入到结构中。地震动激励均沿结构 x 向单向作用于结构。由于备用荷载路径法不仅可以在既有建筑震后加固和修复时进行模型计算[19],还可用于结构定性或定量鲁棒性评估[20],所以在评价构件重要性系数时,结合备用荷载路径法确定原结构与剩余结构的地震响应差异,并以此确定初始失效构件对原结构地震响应的影响程度。

地震动有很强的不确定性,而这种不确定性对结构响应造成的影响甚至大于结构自身的不确定性[24-26],所以要保证动力时程分析结果的合理性和准确性,有效排除诸多不确定因素可能引起的离散性,首先必须合理地选择地震动记录。地震动的不确定性主要来自地震动记录的频谱特性、持时和峰值,以及选取地震动记录的数量等因素。本文按照基于台站与地震信息的选取方法[21],从美国太平洋地震工程研究中心(Pacific Earthquake Engineering Research Center,PEER)的强震数据库中分别选取 6 条地震动记录,其中包含远场地震动记录和近场地震动记录各 3 条。地震动记录信息如表 1 所示。

表 1　地震动记录信息

Table 1　Information of earthquake records

编号	地震事件	震级/M	台站信息		地震信息
			台站	断层距/km	PGA/gal
acc-1	Northridge01	6.69	CDMG24278	20.72	568.3
acc-2	Chi-chi	7.62	TCU095	45.29	711.6
acc-3	Loma Prieta	6.93	USGS1662	76.97	259.8
acc-4	N.Palm Springs	6.06	USGS-5072	4.24	602.2
acc-5	Imperial Valley-06	6.53	USGS-5054	6.20	686.1
acc-6	Chi-chi	7.62	CHY028	8.72	790.4

4　计算结果及分析

4.1　构件易损性系数

由于各工况对应的底层框架柱的截面尺寸和所用材料相同,所以具有相同的极限承载力。根据截面构造情况确定构件抗压承载力、抗剪承载力和抗弯承载力。在两个模型上分别施加选取的地震动激励,提取地震作用下相应构件内力,并依此计算构件易损性系数,如表 2 所示。

从表 2 可以看出,构件易损性系数不仅随着外部激励的不同而不同,还与其在结构中所处的位置有关。为了便于观察各构件易损性系数的变化规律,将两个模型的构件易损性系数以曲线形式表示出来(图 2)。

从图 2 中可以看出,远场地震作用下的结构损伤系数平均值略小于近场地震作用下的,说明近场地震对结构造成损伤的风险更加突出。此外,中柱易损性系数最大,边柱次之,角柱最小,这主要是因为在诸多构件中中柱承担的重力引起的轴力最大,地震激励下上部质量引起的水平剪力较大,进而弯矩也较大,在轴力、剪力和弯矩共同作用下构件损伤

表 2 构件易损性系数

Table 2 Member vulnerability coefficients

模型	构件	地震动记录					
		acc-1	acc-2	acc-3	acc-4	acc-5	acc-6
模型 A	1	0.168	0.171	0.198	0.244	0.236	0.357
	2	0.200	0.240	0.253	0.344	0.267	0.405
	3	0.221	0.316	0.301	0.395	0.297	0.433
	4	0.152	0.121	0.137	0.168	0.211	0.201
	5	0.176	0.179	0.181	0.245	0.240	0.237
	6	0.195	0.243	0.219	0.285	0.265	0.256
模型 B	1	0.173	0.217	0.184	0.255	0.269	0.443
	2	0.188	0.261	0.204	0.306	0.281	0.500
	3	0.190	0.280	0.212	0.332	0.284	0.535
	4	0.150	0.178	0.120	0.167	0.246	0.233
	5	0.161	0.210	0.134	0.204	0.255	0.276
	6	0.162	0.224	0.141	0.223	0.257	0.296

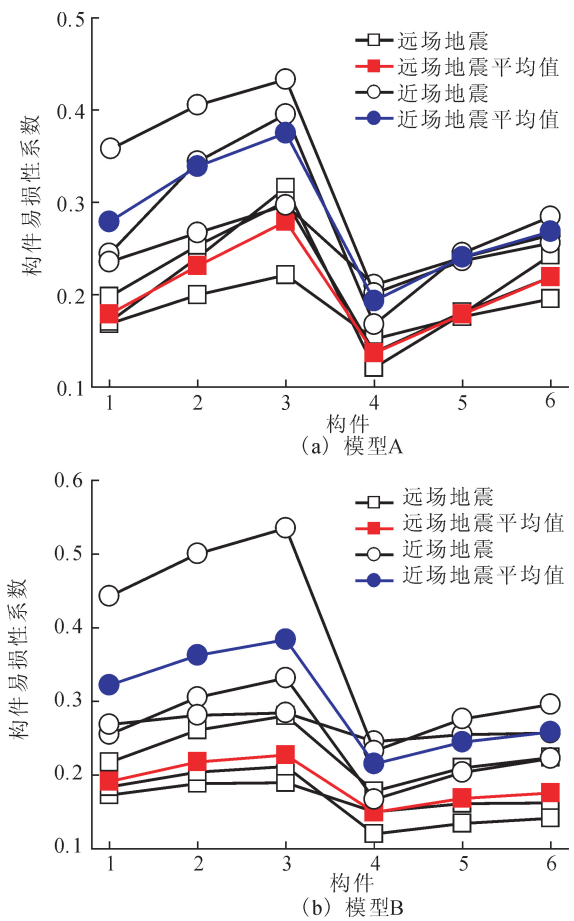


图 2 构件易损性系数曲线

Fig.2 Curve of member vulnerability coefficients

风险和易损性系数也就相对比较大;而角柱承担的荷载与其抗力差距较大,不易出现损伤,构件易损性系数也最小;工况 1 对应的短边边柱易损性系数与工况 5 和工况 6 对应的长边边柱易损性系数之间的差别则类似地取决于所承担的重力荷载和分担的上部质量。

4.2 构件重要性系数

构件重要性系数反映了某个构件失效对整个结构承载力的影响程度。分别分析原结构和各工况对应的剩余结构的地震动响应差别,并按照 1.2 节所述方法计算相应工况中底层框架柱的构件重要性系数,为了直观表示构件重要性系数相对大小关系,将其绘于图 3。

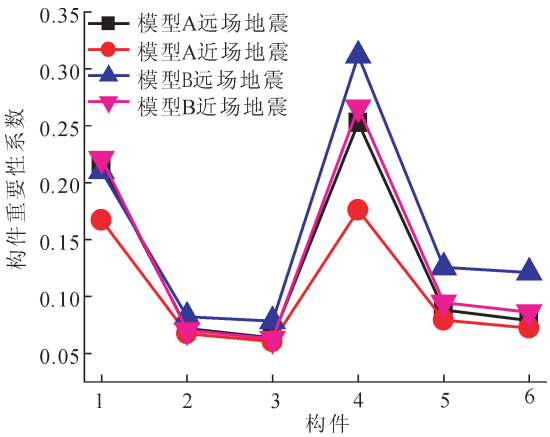


图 3 构件重要性系数曲线

Fig.3 Curve of member importance coefficients

从图 3 可以看出,在近场和远场地震激励作用下,模型 B 的构件重要性系数均普遍大于模型 A 的构件易损性系数,这是因为模型 B 的底层框架柱数量较少,在同一个地震激励作用下,每一个底层框架柱分担的地震作用占总地震作用比重均较大,个别构件失效都会对原结构的地震响应产生较大影响,而模型 A 的底层框架柱数量较多,个别构件失效对原结构地震响应所能够造成的影响有限,故而重要性系数也随之较低。

两个模型中各工况所对应框架柱的重要性系数大小相对关系是相近的,即角柱重要性系数相对较大,短向边柱和长向边柱次之,中柱最小。主要原因在于,当初始失效构件为角柱时,剩余结构仅能提供梁机制来分散和传递原本由失效角柱承担的外部荷载,而梁机制的承载能力非常有限,极容易造成破坏的延续,另外距离结构刚心最远的角柱失效后造成剩余结构扭转效应就最为显著,两种因素的叠加使得角柱失效对原结构产生的影响最大;当初始失效构件为中柱时,与其顶部节点连接的框架梁数量较多,这些框架梁不仅可以在变形较小时为其提供双向的梁机制,还可以在大变形阶段提供双向悬链线机制,使相应剩余结构具备有效的备用荷载路径,减缓破坏的发展,加之中柱工况 2 和工况 3 所对应中

柱距离结构刚性较近,地震作用下相应剩余结构的扭转效应也较小,因此构件重要性系数相对最小。至于短向边柱与长向边柱重要性系数的区别,很大一部分原因是由于相应剩余结构扭转效应的不同。

由此可见,加强构件之间的相互联系并增加可靠的备用荷载路径,能够降低个别构件失效对原结构承载能力和响应造成的影响。而对于重要性程度较大的构件应予以适当加强,降低其失效风险,或增设备用荷载路径,减轻因其失效而带来的不利影响。

除此以外,比较图 3 中不同类型地震激励所引起的结构重要性系数变化规律可以发现,远场地震动激励下构件重要性系数均略大于近场地震动激励下。主要原因在于,与近场地震激励相比,远场地震激励下结构位移响应较小,结构总应变能有限的情况下和其他构件分配到的应变能所占比例就相应增大,由此求得的构件重要性系数也略大于近场地震作用相应系数。

4.3　结构鲁棒性系数

根据本文提出的简化计算方法,利用已经求得的构件易损性系数和构件重要性系数,对结构抗震鲁棒性进行定量评价。不同类型地震作用下结构抗震鲁棒性系数如图 4 所示。

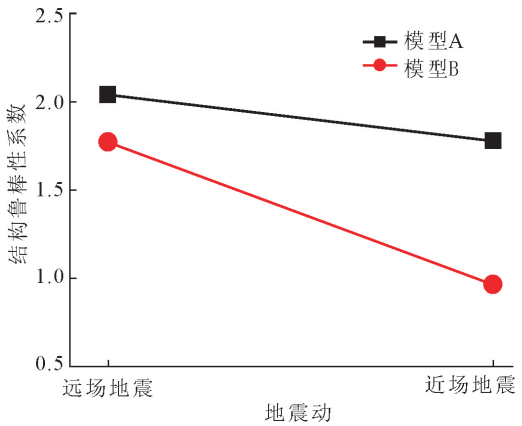


图 4　结构鲁棒性系数曲线

Fig.4　Curve of structural robustness coefficients

从图 4 中可以看出,与远场地震作用相比,近场地震作用下结构的鲁棒性系数相对较小,即近场地震对结构抗震鲁棒性影响更为显著,说明结构在近场地震作用下更加容易发生破坏甚至连续倒塌的现象。模型 A 的抗震鲁棒性系数较模型 B 稍大,这主要是因为模型 A 构件数量较多,使得结构冗余度较高,降低了发生连续倒塌的风险。此外,中间跨跨度较小缩短了构件之间的距离,增强了构件的相互联系,提高了备用荷载路径的效率和可靠性,有利于抵御初始失效带来的不利影响。

分析可知结构鲁棒性系数与外部激励密切相关,说明结构鲁棒性的优劣是一个相对概念。在现实生活中,无法设计和建设一个绝对“鲁棒”的结构,只有根据特定的外部荷载或潜在的极端荷载进行针对性的设计才能保证结构的相对安全和可靠。

5　结论

(1) 结构鲁棒性的强弱是一个相对概念,取决于结构中各构件损伤风险的高低和重要程度;通过定量分析,可以对结构鲁棒性优劣进行比较和筛选,在结构设计阶段则可用于建筑选型。

(2) 仅针对地震作用下结构抗震鲁棒性进行了分析,如果分别针对潜在的不同重要荷载进行一系列鲁棒性分析,就可以得到更加全面、综合的结构鲁棒性分析结果。

(3) 在同样荷载作用下,中柱重要性系数最小,边柱次之,角柱最大;与之相反,中柱易损风险最大,其次是边柱和角柱。增强构件之间的相互联系,提高备用荷载路径的荷载传递效率,可以降低初始失效对结构承载力造成的不利影响。

参考文献(References)

[1] Grifiths H,Pugsley A G,Saunders O.Report of the Inquiry Into the Collapse of Flats at Ronan Point, Canning Town[R]. London:Her Majesty's Stationery office,1968.

[2] The Building (Fifth Amendment) Regulations 1970[S].London: H.M.S.O., 1970.

[3] The Standing Committee on Structural Safety (SCOSS). 10th Report of SCOSS[R].London:SETO Ltd,1994.

[4] Faber M H. Principles of Risk Assessment in Engineering[R]. Zurich:Joint Committee of Structural Safety Publication,2008.

[5] ASCE 7-05.Minimum Design Loads for Buildings and Other Structure[S].New York:American Society of Civil Engineers, 2006.

[6] 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.(in Chinese)

[7] Ribeiro F L A,Neves L C,Barbosa A R.Seismic Robustness Assessment of Code Compliant Steel Moment Resisting Frame Under Seismic Triggered Sequences of Events[C]//15th Word Conference on Earthquake Engineering (15WCEE).Lisbon, Portugal,2012.

[8] 黄靓, 李龙.一种结构鲁棒性量化方法[J].工程力学,2012,29(8):213-219.
HUANG Liang,LI Long.A Quantification Method of Structur-

al Robustness[J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(8): 213-219.(in Chinese)

[9] 郑山锁,田进,韩言召,等.考虑锈蚀的钢结构地震易损性分析[J].地震工程学报,2014,36(1):1-6.
ZHENG Shan-suo, TIAN Jin, HAN Yan-zhao, et al. Seismic Fragility Analysis of Steel Structure Considering Steel Corrosion[J].China Earthquake Engineering Journal, 2014, 36(1): 1-6.(in Chinese)

[10] Kanno Y, Ben-Haim Y. Redundancy and Robustness, or When is Redundancy Redundant[J]. Journal of Structural Engineering, 2011, 137(9): 935-945.

[11] 周靖,蔡健,方小丹.强柱系数基于结构易损性的抗震性能评估[J].西北地震学报,2007,29(3):207-212.
ZHOU Jing, CAI Jian, FANG Xiao-dan. Evaluation of Structural Fragility Based Seismic Performance for Strong Column Factors[J]. Northwestern Seismological Journal, 2007, 29(3): 207-212.(in Chinese)

[12] 黄靓, 王蓥, 陈永亮,等. 一种简化的结构鲁棒性量化方法[J].工程力学,2013,30(10):46-53.
HUANG Liang, WANG Ying, CHEN Yong-liang, et al. A Quantification Method of Structural Robustness[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(10): 46-53.(in Chinese)

[13] 蔡建国, 王蜂岚, 韩运龙, 等. 大跨空间结构重要构件评估实用方法[J].湖南大学学报:自然科学版,2011, 38(3): 7-11.
CAI Jian-guo, WANG Feng-lan, HAN Yun-long, et al. Practical Method for the Evaluation of Important Structural Components of Long-span Space Structures[J]. Journal of Hunan University :Natural Sciences, 2011, 38(3): 7-11.(in Chinese)

[14] 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. (in Chinese)

[15] 高扬.结构鲁棒性定量计算中的构件重要性系数[D].上海:上海交通大学,2009.
GAO Yang. Importance Coefficients of Components in Quantitative Evaluation of Structural Robustness[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2009.(in Chinese)

[16] 黄冀卓, 王湛.钢框架结构鲁棒性评估方法[J].土木工程学报, 2012, 45(9): 46-54.
HUANG Ji-zhuo, WANG Zhan. An Approach for Evaluation of the Structural Robustness of Steel Frames[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(9): 46-54.(in Chinese)

[17] 杜永峰,包超,张尚荣,等.竖向不规则 RC 框架抗竖向连续倒塌鲁棒性分析[J].土木工程学报,2014,47(增刊 2):101-107.
DU Yong-feng, BAO Chao, ZHANG Shang-rong, et al. Robustness Analysis of the Vertical Progressive Collapse Resistance of Vertically Irregular RC Frames[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(Supp2): 101-107. (in Chinese)

[18] SeismoStruct V6.5. SeismoStruct-A Computer Program for Static and Dynamic Nonlinear Analysis of Framed Structures [OL]. SeismoSoft, Ltd. http:// www.Seismosoft.com, 2013.

[19] Lu D G, Cui S S, Song P Y, et al. Robustness Assessment for Progressive Collapse of Framed Structures Using Pushdown Analysis Methods[J]. International Journal of Reliability and Safety, 2012, 6(1): 15-37.

[20] Khandelwal K, El-Tawil S. Pushdown Resistance as a Measure of Robustness in Progressive Collapse Analysis[J]. Engineering Structures, 2011, 33(9): 2653-2661.

[21] 曲哲, 叶列平, 潘鹏.建筑结构弹塑性时程分析中地震动记录选取方法的比较研究[J].土木工程学报,2011,44(7):10-21.
QU Zhe, YE Lie-ping, PAN Peng. Comparative Study on Methods of Selecting Earthquake Ground Motions for Nonlinear Time History Analyses of Building Structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(7): 10-21.(in Chinese)