文章编号:1674-2974(2017)11-0038-08

DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2017.11.005

基于变形及滞回耗能的 RC 框剪结构地震损伤评估^{*}

杜永峰1,2,黄小宁17,李慧1,2

(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:为了研究 RC 框剪结构在地震作用下的损伤程度,通过引入基于结构广义刚度 的构件重要性指标,提出考虑构件重要程度的地震损伤评估方法.首先,利用 Perform-3D 对 RC 框剪结构进行弹塑性时程分析,得到 RC 框剪结构的耗能分布模式.在此基础上,以地震 变形、滞回耗能为基本参数,采用双参数构件损伤模型得到构件的损伤指数,利用基于构件 重要性指标的楼层损伤模型得到楼层的损伤指数.最后,结合不同地震峰值加速度下结构的 损伤指数、结构损伤程度与损伤指数范围的关系,评估结构在不同地震峰值加速度下的损伤 程度.计算结果表明,考虑构件重要程度的地震损伤评估法,可以同时体现构件损伤程度与 构件重要程度对楼层损伤的影响,可用于 RC 框剪结构的损伤评估.

关键词:钢筋混凝土框剪结构;构件损伤模型;楼层损伤模型;损伤评估 中图分类号:TU375 文献标志码:A

Deformation and Hysteretic Energy-based Seismic Damage Evaluation of Frame-wall Structures

DU Yongfeng ^{1,2}, HUANG Xiaoning^{1†}, LI Hui^{1,2}

Institute of Earthquake Protection and Disaster Mitigation, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;
 Western Center of Disaster Mitigation in Civil Engineering of Ministry of Education, Lanzhou University of Technology,

Lanzhou 730050, China)

Abstract: To investigate the damage of RC frame-shear wall structures under earthquake load, a member importance index based on the generalized structural stiffness was introduced. First, seismic elasticplastic analysis was made by using software perform-3D. Meanwhile, the rules of energy distribution were obtained for RC frame-shear-wall structures. Based on the deformation and hysteretic energy, a seismic damage model with double variables was built to evaluate the member damage, and floor damage model was developed to evaluate the floor damage based on member importance index. Finally, floor damage degree can be evaluated by comparison between damage index under different peak ground acceleration and index ranges. The results showed that the method reflected not only the member damage degree but also the member importance index having effect on floor damage, and the method was applicable to damage assessment for RC frame-shear-wall structures.

Key words: reinforced concrete frame-shear-wall structure; member damage model; floor damage model; damage evaluation

^{*} 收稿日期:2016-09-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51778276,51578274), National Natural Science Foundation of China(51778276,51578274) 作者简介:杜永峰(1962-),男,甘肃正宁人,兰州理工大学教授

[†]通讯联系人,E-mail:hxiaoning7191 @163.com

钢筋混凝土框架剪力墙结构以其优良的抗震 性能被广泛应用于实际工程,目前对这类结构的抗 震性能评估多以位移为指标[1-3],但在框架剪力墙 结构的震害调查及理论研究中发现[4],这类结构的 破坏主要有两方面原因:一方面是由于滞回耗能过 大,底层剪力墙产生斜向裂缝、根部混凝土被压溃; 另一方面是由于变形过大,结构中上部楼层的连 梁、框架梁产生破坏.以上发现表明,结构在地震作 用下会产生一定的变形,同时也将经历一个能量耗 散的过程,两者都会对结构造成不同程度的损伤, 当损伤发展到一定程度后,结构将失效或倒塌.因 此,仅以位移为指标可能会低估结构的损伤程度[5] 根据以上理论,Park 等^[6]提出了基于变形和耗能的 双参数构件损伤模型,同时也提出了基于耗能比率 的楼层损伤模型.杜修力等[7]认为损伤越严重的构 件对楼层损伤的影响越大,提出了基于损伤比率的 楼层损伤模型.以上楼层损伤模型均认为不同构件 产生相同损伤时,对楼层损伤的影响相同.但从工程 设计角度而言,对于框剪结构,设计人员希望通过 梁的塑性变形来消耗一部分的地震作用.因此,剪力 墙和梁产生相同损伤时,剪力墙损伤对楼层损伤的 影响明显大于梁损伤对楼层损伤的影响.为了能够 体现构件重要程度差异对楼层损伤的影响,文中考 虑将构件重要性指标引入基于损伤比率的楼层损 伤模型中,提出基于构件重要性指标的损伤评估 方法.

1 构件的重要性指标及楼层损伤指数

1.1 构件损伤模型

目前公认的构件损伤模型是由最大变形与能 量耗散组合而成的损伤模型,被称为双参数损伤模 型,或组合损伤模型.其中最具代表性的是 Park 等^[6]根据钢筋混凝土构件破坏的试验资料,提出基 于变形与累积滞回耗能的双参数地震损伤模型,其 表达式为:

$$D_i = D_{bi} + D_{hi} \tag{1}$$

$$D_{bi} = \frac{\delta_{\rm m}}{\delta_{\rm m}} \tag{2}$$

$$D_{hi} = \beta \frac{\int d\varepsilon}{Q_{v} \delta_{u}}$$
(3)

式中: D_i 为构件i的损伤指数; D_{bi} 为构件i由变形 引起的损伤指数; D_{bi} 为构件i由耗能引起的损伤指 数; δ_m 为地震作用下构件的最大位移; δ_u 为单调荷 载作用下构件的极限位移; Q_y 为构件的屈服强度; $\int d\epsilon$ 为构件总的滞回耗能; β 为系统组合参数.

1.2 构件的重要性指标

构件重要性指标是指一个构件的受损或失效 对结构整体的刚度、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^[8].

对于给定荷载作用形式下的结构,文献[8]以 构件拆除后引起的广义结构刚度损失率作为衡量 构件*i*的重要性指标*I*,其表达式为:

$$I_{i} = \frac{K_{N,0} - K_{N,i}}{K_{N,0}}$$
(4)

式中:K_{N.0}为完好结构的广义结构刚度;K_{N.i}为拆除构件*i*后剩余结构的广义结构刚度.根据式(4), 从完好结构中,从上到下依次拆除构件,可得到所 有构件的重要性指标.需要指出的是广义结构刚度 是反映整体结构抵抗给定荷载作用下变形能力的 一个物理量,它不但与结构上的荷载分布有关,也 与结构的刚度矩阵有关.关于水平地震作用下广义 刚度的具体计算方法参见文献[8].

由于 $K_{N,0} \ge K_{N,i}$,从式(4)中可以看出, I_i 是 0 到1的数,当 I_i 等于1时,表示该构件极其关键,当 该构件失效时,结构也因失去承载力而倒塌,当 I_i 等于0时,表示该构件对结构的刚度没有贡献,对结 构不重要.

1.3 楼层损伤模型

楼层损伤是对组成该层的各个构件分别按构件损伤分析法进行计算、评价,再按一定的权重组合系数将该层各个构件的损伤指数进行加权组合,得到该楼层的总体损伤指数.Park 等^[6]在定义了构件的损伤模型之后,通过引入加权组合系数定义了楼层损伤模型,将加权组合系数定义为某一层中各构件占楼层耗能的比率,假定 *f* 层中共有 *n* 个构件,其表达式为:

$$D_f = \sum_{i=1}^n \lambda_{if} d_{if} \tag{5}$$

$$\lambda_{if} = E_{if} / \sum_{i=1}^{n} E_{if} \tag{6}$$

式中: D_f 为*f* 层的损伤指数; D_{if} 为*f* 层中构件*i*的 损伤指数; λ_{if} 为*f* 层中构件*i*的加权组合系数; E_{if} 为*f* 层中构件*i*的滞回耗能.

杜修力等^[7]认为损伤越严重的构件对楼层损伤 的影响越大,故将构件的损伤指数作为加权系数, 其表达式为:

$$\lambda_{if} = D_{if} / \sum_{i=1}^{n} D_{if} \tag{7}$$

Park 和杜修力等提出的楼层损伤模型在加权 组合系数的计算中都没有考虑构件重要性对结构 楼层损伤的影响,也就是说,对于框剪结构,在同一 楼层中,剪力墙和梁产生相同损伤时,剪力墙损伤 和梁损伤对该楼层损伤的影响相同.而研究表明,在 强震作用下,连梁、框架梁先出现破坏,其一定程度 的损伤对结构整体性能影响较小,随着水平地震作 用的增大,墙肢出现损伤,墙肢轻微的损伤引起的 结构整体性能退化较明显^[9].因此,有必要通过修正 加权组合系数的计算方法,将不同构件的破坏,对 楼层损伤程度的影响加以区别.加权组合系数确定 的基本原则是能够反映各构件在保持结构整体稳 定性中的相对重要程度,影响结构倒塌的敏感构件 应被赋予较大的加权组合系数.从 1.2 节中给出的 构件重要性指标的定义可以看出,构件重要性指标 主要反应的是若该构件发生损伤后对该层、甚至结 构整体的损伤产生的影响.因此,本文在考虑构件损 伤程度的基础上,将构件的重要性指标引入加权系 数的计算中,假定第 f 层中共有 n 个构件,则 f 层 的损伤指数计算如式(8)~(12)所示.

$$\lambda_{bif} = I_{if} D_{bif} / \sum_{i=1}^{n} I_{if} D_{bif}$$
(8)

$$\lambda_{hif} = I_{if} D_{hif} / \sum_{i=1}^{n} I_{if} D_{hif}$$
(9)

$$D_f = D_{bf} + D_{hf} \tag{10}$$

$$D_{bf} = \sum_{i=1}^{n} \lambda_{bif} D_{bif} \tag{11}$$

$$D_{hf} = \sum_{i=1}^{n} \lambda_{hif} D_{hif} \tag{12}$$

式中: D_{bf} 为 f 层由变形引起的损伤指数; D_{hf} 为 f层由耗能引起的损伤指数; λ_{bif} 为 f 层中构件 i 的变 形加权组合系数; λ_{hif} 为 f 层中构件 i 的耗能加权组 合系数; I_{if} 为 f 层中构件 i 的重要性指标.

1.4 不同破坏程度损伤指数范围的确定

国内外相关文献[10-12]将结构地震损伤程 度分为5个等级,基本完好、轻微损伤、中等破坏、严 重破坏及倒塌.就目前的研究来看,对于 RC 结构, 不同破坏程度损伤指数范围没有相对统一的标准, 本文根据刘伯权等^[13]建议的不同破坏程度损伤指 数范围,给出 RC 框剪结构损伤程度和损伤指数范 围如表1所示.

2 地震损伤评估方法步骤

根据第1节中提出的基于构件重要性指标的楼

层损伤模型,给出框剪结构地震损伤评估方法的基本步骤,如图1所示.

表 1 结构损伤程度与损伤指数范围

Tab.1	Structural	damage	and	damage	index	range

损伤程度	基本 完好	轻微 损伤	中等 破坏	严重 破坏	倒塌
损伤指数范围	$0 \sim 0.1$	0.1~0.3	0.3~0.6	0.6~0.85	>0.85



Fig.1 Flowchart of seismic damage evaluation

3 算例分析

本文以一平面不规则 RC 框剪结构为例,利用 上述方法对该结构进行损伤评估.该结构的抗震设 防类别为乙类,抗震设防烈度8度(0.2g),设计地 震分组第3组,场地类别Ⅱ类,结构形式为钢筋混凝 土框剪结构,平面图如图2所示,为了满足使用功能 要求在第8层中去掉中间用方框标出的6根柱子. 楼板钢筋为 HPB235;梁、柱主筋为 HRB335,箍筋 为 HPB235; 剪力墙主筋为 HRB400, 分布筋为 HRB335.A-B轴处剪力墙厚为 400 mm,其余剪力 墙厚均为300 mm,梁采用700 mm×300 mm 的截 面,楼板厚取100 mm,结构其余参数如表2 所示.本 文中非约束混凝土的本构关系采用《混凝土结构设 计规范》^[14]附录 C.2.4 中的单轴应力应变关系.约束 混凝土的本构关系采用刘博文等人「『考虑箍筋约束 效应的混凝土轴心抗压强度的应力应变.钢筋的本 构关系采用《混凝土结构设计规范》^[14]附录C.1.2中 的有屈服点钢筋的应力应变关系.连梁在 Perform3D 中既可以采用通用墙单元模拟,也可以采用梁单 元模拟.由于算例中的连梁最小跨高比为1800/500 =3.6.研究表明,跨高比较大的连梁在发生剪切破 坏的同时可能会产生较大的弯曲变形^[15-16].而发生 弯剪破坏或弯曲破坏的连梁在 Perform-3D 中利用 墙单元模拟会更为复杂且计算量相对较大.因此,本 文采用两段弹性段梁+中间剪切铰+两端弯矩铰 模拟,剪切铰的内力与变形曲线如图 3 所示.连梁与 剪力墙平面内相接时,在相接墙肢内增加内嵌梁段 来反映梁与剪力墙的刚接状态.剪力墙用非弹性纤 维截面,框架梁选用(FAMA Beam, Concrete Type),框架柱选用(FAMA Column, Concrete Type),框架柱选用(FAMA Column, Concrete





表 2 结构基本参数 Tab.2 Parameters of structure

楼层	柱截面尺寸/ (mm×mm)	柱混凝 土等级	墙混凝 土等级	梁混凝 土等级
1~5	800×800(边柱)	C35	C40	C30
	700×700(甲柱) 800×800(边柱)	C35 C30	0.05	G 0.4
6~8	600×600(中柱)	C30	C35	C30

在 ATC-63 建议的地震动记录集中选择 20 条 地震动,图 4 给出了阻尼比为 5%的 20 条地震记录 的弹性加速度反应谱,反映地震动的离散性.

对比 Perform-3D 与 ABAQUS 计算得到的结构前 3 阶模态频率、非线性最大层间位移角、构件进入塑性阶段的顺序及最终构件所处的破坏状态,验证模型的正确性,分别如图 5 和表 3 所示.











图 5 层间位移角对比 Fig.5 Comparison of interstory drift

表 3 模态频率

		120.0.00	
Tab.3	Modal	frequency	of structure

模态	频率	汨朱/0/			
	Perform-3D	ABAQUS	庆左/ 70		
1	1.261	1.263	0.16		
2	1.413	1.446	2.28		
3	2.176	2.243	2.98		

从图 5 和表 3 可以看出,两种软件计算出的频 率误差相对较小,尤其是一阶频率基本一致;地震 动峰值(PGA)为600 gal时,结构非线性层间位移 角沿楼层的发展趋势是一致的且最大误差仅为 2.98%.对比图 2 用椭圆标出部分构件的损伤过程 发现(以 Imperial Valley 波为例,将 PGA 调幅至 600 gal),利用 ABAQUS 模拟时,首先连梁两端出 现损伤;随后,连梁两端的损伤持续增大,底层剪力 墙开始出现损伤;当到达地震动峰值阶段时,连梁 的两端和中部均出现损伤,第3层的剪力墙出现轻 微损伤.利用 Perform-3D 模拟时,首先连梁两端出 现弯矩塑性铰;随后,底部剪力墙的混凝土受拉开 裂;当到达地震动峰值阶段时,连梁两端均出现塑 性铰,中上部楼层连梁中部出现剪切铰,剪力墙的 1,2和3层进入塑性阶段.对比两个软件的计算结 果可以看出,两个软件计算构件进入塑性阶段的时 刻、顺序及构件最终所处的塑性状态基本一致,说 明本文结构的非线性模型是正确的.

3.1 构件重要性指标的计算

利用 1.2 节及文献[8]中给出的构件重要性指标的计算方法,得到算例中各构件的重要性指标.图 6 为轴 1 中剪力墙,框架梁及柱的重要性指标.

图 6 中将剪力墙以及剪力墙的边缘约束构件作 为一个整体,仅给出一个重要性指标,如图 6 中用圆 圈标出的构件的重要性指标为 0.132;1 层框架柱的 重要性指标分别为 0.014,0.015;框架梁的重要性指 标均为 0.004.由图 6 可以看出,同一层中剪力墙的 重要性指标大于柱的重要性指标,柱的重要性指标 大于梁的重要性指标.层与层之间的对比可以看出, 构件的重要性指标从上到下依次增大,这两个规律



与工程经验一致,说明此方法可以用于计算 RC 框 剪结构构件的重要性.

3.2 各楼层的耗能分布

地震作用下,结构各构件由于受到不同程度的 损伤破坏而产生累积滞回耗能.因此,结构的耗能分 布模式反映的是其损伤机制.文献[17]中认为从基 于能量的角度来看,框剪结构可控的耗能分布模式 有利于设计者对结构中有可能发生较多耗能的关 键区域进行有针对性的设计,确保其耗能能力,即 该结构的设计是安全的、合理的.因此,当结构的耗 能分布模式可控时,对结构进行损伤评估才有意义. 图 7 为 20 条地震波在 PGA 分别为 200 gal,400 gal 和 600 gal 时,结构的耗能分布图.从图中可以看出, PGA 分别为 200 gal,400 gal 和 600 gal 时,梁单元 的耗能主要集中在中上层,剪力墙的耗能分布也明 显集中,均稳定地发生在底部楼层.因此,这属于一 种稳定可控的耗能分布模式.



从图 7 可以看出,随着 PGA 的增大,各构件的 滞回耗能也增大,如当 PGA 分别为 200 gal,400 gal 和 600 gal 时,1 层剪力墙耗能分别为 2.3 kN•m, 113.5 kN•m,512.7 kN•m;当 PGA 为 200 gal 时,8 层梁单元耗能小于 7 层梁单元的耗能,当 PGA 为 400 gal 时,8 层梁单元的耗能基本等于 7 层梁单元的耗能,当 PGA 为 600 gal 时,8 层梁单元 的耗能大于 7 层梁单元的耗能.这是因为随着 PGA 的增大,结构塑性变形增大,由于 8 层中间抽掉了 6 根柱子,8 层梁单元的传力路径较长,会产生更为明 显的塑性变形,其滞回耗能也会增大.从以上分析可 知,当地震动增大到一定程度时,可能 8 层会先发生 不可修复的破坏.

3.3 各楼层的损伤指数

3.3.1 考虑扭转对结构变形的影响

根据《建筑结构抗震设计规范》^[10]表 3.4.3-1 中 对平面不规则结构的规定,扭转位移比 μ 可用式 (13)表示:

$$\mu = \frac{\Delta u_{\rm m}}{\Delta u_{\rm a}} \tag{13}$$

式中: Δu_m 为最大层间位移或最大楼层位移; Δu_a 为平均层间位移或平均楼层位移.经计算结构的扭 转位移比为1.23,扭转位移比大于1.2.因此,本文算 例为平面不规则结构.对于平面不规则结构,应考虑 扭转效应的影响,在计算中考虑前12阶振型的参 与,其质量参与系数为98.3%;同时也考虑双向地 震输入的影响.因此,在计算公式(2)中的 δ_m 时,取 双向地震作用计算结构响应的较大值.双向地震作 用的计算参考《建筑结构抗震设计规范》^[10]第5.2.3 条的相关规定.

3.3.2 各楼层的损伤指数计算

根据 Park 等^[6]提出的构件损伤模型,即式(1) 计算各构件的损伤,结合文中提出的基于构件重要 性指标的楼层损伤模型即式(8)~(12)计算各楼层 变形引起的损伤指数、滞回耗能引起的损伤指数及 总损伤指数,如图 8 所示.



Fig.8 Floor damage index

从图 8 中可以看出,当 PGA 分别为 200 gal, 400 gal和 600 gal时,除第 1 层外,变形引起的损伤 均大于耗能引起的损伤.结构中上部楼层的损伤大 部分是由于变形引起的.在 PGA 分别为 400 gal和 600 gal时第 1 层由耗能引起的损伤要大于由变形 引起的损伤,从耗能角度而言,剪力墙的耗能均稳 定地发生在底部楼层,尤其是 1 层的耗能很大,占结 构剪力墙总耗能的绝大部分.从变形角度而言,相比 于其他层,RC 框剪结构 1 层的变形相对较小,这两 个原因导致第 1 层由耗能引起的损伤大于由变形引 起的损伤.从图 8 比较可以看出,随着 PGA 的增大, 结构损伤指数增大,结构损伤越严重,且耗能损伤 在总损伤中所占比重增大,以7层为例,当PGA分 别为200 gal,400 gal和600 gal时,耗能损伤占总 损伤耗能的比率分别为13%,20%和26%.

3.4 损伤指数对比

表4和图9分别为杜修力等^[7](DU楼层损伤 模型)和本文提出的楼层损伤模型(II楼层损伤模 型)的对比.表4为2种方法计算的第1层剪力墙损 伤指数与第1层总损伤数的对比.图9为2种方法 计算的各楼层总损伤指数的对比.

表 4 损伤指数对比					
	Tab.4 Com	parison of damage	index		
PGA/gal	剪力墙损 数(DU 模	伤指 总损伤指数 〔型) (DU 模型)	总损伤指数 (Ⅱ模型)		
200	0.05	0.04	0.049		
400	0.21	0.19	0.205		
600	0.67	0.59	0.667		





从表4中可以看出,利用 DU 楼层损伤模型计 算的第1层剪力墙的损伤指数为0.67;第1层总损 伤指数为0.59,以上对比可看出,当不考虑构件重 要性指标时,第1层剪力墙的损伤指数要明显大于 总损伤指数,而震害调查表明^[4]对于 RC 框剪结构, 第1层的破坏主要由第1层剪力墙的破坏决定,而 且墙肢轻微的损伤引起的结构整体性能退化明显. 因此,利用 DU 楼层损伤模型可能会低估1层的损 伤.而利用 II 楼层损伤模型计算的总损伤指数与1 层剪力墙的损伤指数接近,评估结果更为合理.

从图 9 可以看出,利用 Ⅱ 楼层损伤模型计算的 楼层损伤指数大于利用 DU 楼层损伤模型计算的楼 层损伤指数,这是由于引入构件重要性指标后,强 调了竖向构件的重要性,对于底部楼层强调竖向构 件即剪力墙耗能对楼层损伤的影响;对于中上部楼 层,则强调竖向构件的变形对楼层损伤的影响,使 总损伤指数增大,评估结果更为安全、可靠.

3.5 结构损伤评估

利用表1中的损伤指数范围及各层的损伤指数,评估各层的地震损伤程度及地震作用下超越各损伤程度极限状态的概率,分别如图10和图11 所示.

从图 10 可以看出,随着 PGA 的增大,各楼层的损伤越严重,当 PGA 为 200 gal 时,楼层的最大



破坏程度为轻微损伤,当 PGA 为 400 gal 时楼层的 最大破坏程度接近中等破坏的限值,当 PGA 为 600 gal 时,8 层的破坏程度为倒塌.

根据结构地震易损性的分析方法^[18],如式(14) 所示.以 50 gal 为步长,将 PGA 从 50 gal 调整至 600 gal,考虑损伤指数的均值和标准差,计算结构 在地震作用下超越各损伤程度极限状态的概率.

$$F = \Phi\left(\frac{\mathrm{Ln}(\mu_{\mathrm{D}}) - \mathrm{Ln}(D_{\mathrm{LSi}})}{\sigma_{\mathrm{LnD}}}\right) \tag{14}$$

式中:μ_D为损伤指数均值; D_{LSi}为不同损伤程度极 限状态界限值(具体界限值参考表 1);σ_{hD}为损伤指 数的对数标准差.

从图 11 可以看出,结构基本完好极限状态的易 损性曲线最为陡峭,说明结构在地震作用下超越基 本完好状态的概率最大,超越严重破坏极限状态的 概率最小;从易损性曲线中也可直观得到结构超越 不同损伤程度极限状态的概率,如当 PGA=600 gal 时,结构超越严重破坏极限状态(发生倒塌)的概率 为 51.6%,设计人员可以根据结构的抗震性能,对 结构进行必要的加固.

4 结 论

本文在杜修力等提出的楼层损伤模型的基础 上,针对 RC 框剪结构,提出考虑构件重要程度的地 震损伤评估方法,主要结论如下:

1)引入构件的重要性指标可以在楼层损伤的 计算中,体现构件重要程度差异对楼层损伤的影响. 对于 RC 框剪结构,尤其是底层,引入构件的重要性 指标后,底层的损伤指数明显增大,且随着 PGA 的 增大,损伤指数的增大越明显.

2)比较各楼层由变形和滞回耗能引起的损伤 指数可以看出,中上部楼层,由变形引起的损伤明 显大于由耗能引起的损伤;而在底部楼层,由滞回 耗能引起的损伤明显大于由变形引起的损伤.因此, 对该类结构在工程设计或加固时,可有针对性的进 行处理.

3)随着 PGA 的增大,对于薄弱层,破坏程度的 增长明显大于其余层,有较早出现倒塌的可能.

4)文中仅将构件重要性指标引入楼层损伤模型中,在此基础上如何得到层重要性指标,有待进 一步的研究.

参考文献

- [1] CIMELLARO G P, REINHORN A M. Multidimensional performance limit state for hazard fragility functions [J]. Journal of Engineering Mechanism, 2011, 137(1):47-60.
- [2] 郑山锁,杨威,杨丰,等.基于多元增量动力分析方法的核心筒 结构地震易损性分析[J].振动与冲击,2015,34(1):117-123. ZHENG Shansuo, YANG Wei, YANG Feng, et al. Seismic fragility analysis for RC core walls structure based on MIDA method [J].Journal of Vibration and Shock,2015,34(1):117 -123.(In Chinese)
- [3] BETRO L, VITALIANI R, SAETTA A, *et al.* Seismic assessment of existing RC structure affected by gradation phenomena [J]. Structural Safety, 2009, 31(4), 284–295.
- [4] 尹保江,黄世敏,薛彦涛,等.汶川 5.12 地震框架-剪力墙结构震 害调查与反思[J].工程抗震与加固改造,2008,30(4):37-40.
 YIN Baojiang, HUANG Shimin, XUE Yantao, et al. Seismic damage investigation and thinking on the damage buildings of frame-shear wall structure in Wenchuan 5.12 earthquake [J].
 Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2008, 30 (4):37-40. (In Chinese)
- [5] 张耀庭,杜晓菊,杨力.RC 框架结构基于构件损伤的抗震性能 评估研究[J].湖南大学学报:自然科学版,2016,43(5):9-21. ZHANG Yaoting,DU Xiaoju,YANG Li. Research on seismic performance assessment based on component damage for RC frame structure [J].Journal of Hunan University:Natural Sciences,2016,43(5):9-21. (In Chinese)
- [6] PARK Y J, ANG A H S. Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete [J]. Journal of Structural Engineering, 1985,111(4):722-739.
- [7] 杜修力,欧进萍.建筑结构地震破坏评估模型[J].世界地震工

程,1991,7(3):52-58.

DU Xiuli, OU Jinping. Seismic damage evaluation model of building structures [J].World Earthquake Engineering, 1991,7 (3):52-58. (In Chinese)

- [8] 林旭川,叶列平.基于构件重要性指标的 RC 框架结构抗震优 化设计研究[J].建筑结构学报,2012,33(6):16-21. LIN Xuchuang, YE Lieping. Study on optimization of seismic design for RC frames based on member importance index [J]. Journal of Building Structures,2012,33(6):16-21. (In Chinese)
- [9] 刘博文,徐开,刘畅,等. Perform-3D 在抗震弹塑性分析与结构 性能评估中的应用[M].北京:中国建筑工业出版社,2014:136 -162.
 LIU Bowen, XU Kai, LIU Chang, et al. Seismic elastic-plastic analysis and performance-based evaluation with Perform-3D [M].Beijing: China Architecture and Building Press,2014:136
- -162.(In Chinese)
 [10] GB 50011—2010 建筑结构抗震设计规范[S].北京:中国建筑 工业出版社,2010:8-16,240-246.
 GB 50011—2010 Code for seismic design of buildings [S].
 Beijing: China Architecture Industry Press,2010:8-16,240-246.(In Chinese)
- [11] Federal Emergency Management Agency (FEMA). FEMA 356 Commentary on the guidelines for the seismic rehabilitation of buildings [S]. Washington DC: American Society of Civil Engineers, 2000;211-276.
- [12] 易伟建,尹犟.基于位移及滞回耗能的结构抗震性能评估新方法[J]. 湖南大学学报:自然科学版,2009,36(8):1-6.
 YI Weijian, YIN Jiang. A new method for evaluating seismic performance based on displacement and hysteretic energy [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2009, 36(8):1-6. (In Chinese)
- [13] 刘伯权,白绍良,刘鸣.抗震结构的等效延性破坏准则及其子结构试验验证[J].地震工程与工程振动,1997,17(3):77-83. LIU Boquan, BAI Shaoliang, LIU Ming. Equivalent ductility damage criteria of earthquake resistant structures and their verification by substructure method and their verification by substructure method [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration,1997,17(3):77-83. (In Chinese)
- [14] GB 50011—2010 混凝土结构设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2010:102—106.
 GB 50011—2010 Code for design of concrete structure [S].
 Beijing: China Architecture Industry Press, 2010:102-106. (In Chinese)
 [15] 赵军,李斌,李光辉. 不同跨高比钢纤维混凝土连梁的延性和
- [15] 赵年, 学斌, 学元卉. 不问跨高比钢纤维混凝土连架的延生和 耗能性能[J].世界地震工程, 2012, 28(4):17-22. ZHAO Jun, LI Bing, LI Guanghui. Ductility and energy dissipation of steel fiber reinforced concrete coupling beams with different span-depth ratios [J]. World Earthquake Engineering, 2012, 28(4):17-22. (In Chinese)
- [16] 皮天祥.钢筋混凝土剪力墙小跨高比连梁抗震性能试验和设计 方法研究[D].重庆:重庆大学土木工程学院,2008;24-75. PI Tianxiang. Experimental study on seismic behavior and design method study of small span-to-depth ratio coupling beams of seismic RC shear walls[D].Chongqing: College of Civil Engineering of Chongqing University,2008;24-75. (In Chinese)
- [17] 缪志伟,叶列平,裘赵云,等.RC框剪结构强震作用下的耗能分 布模式与损伤机制[J].东南大学学报:自然科学版,2012,42 (5):933-939.
 MIAO Zhiwei, YE Lieping, QIU Zhaoyun, *et al.* Distribution mode of hysteretic energy and damage mechanism of RC frame-shear-wall structure under strong earthquakes [J]. Journal of Southeast University : Natural Science Edition, 2012,42(5):933-939. (In Chinese)
- [18] 刘晶波,刘阳冰,闫秋实,等.基于性能的方钢管混凝土框架结构地震易损性分析[J].土木工程学报,2010,43(2):39-47. (In Chinese)
 LUI Jingbo,LIN Yangbing, YAN Qiushi, et al. Performance-based seismic fragility analysis of CFST frame structures[J].
 - China Civil Engineering Journal, 2010, 43(2): 39–47. (In Chinese)