

基于构件功能组装的建筑抗震韧性评价方法

卜海峰^{1,2}, 蒋欢军^{1,2}, 和留生^{1,2}

(1. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 为了量化单体建筑的抗震韧性,提出了一种基于构件组装的通用型功能损失量化方法和对应的建筑抗震韧性评价方法。为建筑构件定义一种基于概率的功能损失,以考虑构件功能损失在地震作用下的不确定性。使用树状层级结构组装构件的功能以获取建筑的功能损失。使用基于修复方案的建筑震后功能恢复模型获取建筑功能时变函数曲线。基于蒙特卡洛法给出单体建筑抗震韧性量化的计算方法。最后,应用该方法对一幢10层钢筋混凝土框架结构公寓建筑的抗震韧性进行了评价,并对比分析了不同韧性提升方法对该建筑抗震韧性的影响。算例分析结果表明,该方法能较合理地评价建筑的抗震韧性,案例建筑在设防烈度地震作用下的韧性较好,填充墙等非结构构件对建筑抗震韧性有较大影响;不同韧性提升方案中,提高建筑构件抗震性能和优化建筑震后修复策略的效果较为显著。

关键词: 抗震韧性;功能损失量化;修复方案;功能恢复模型;韧性提升方法

中图分类号: TU971

文献标志码: A

A Method for Seismic Resilience Evaluation of Buildings Based on Component Function Assembly

BU Hai Feng^{1,2}, JIANG Huan Jun^{1,2}, HE Liu Sheng^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: To quantify the seismic resilience of buildings, a general functional loss quantification method of buildings based on the component function assembly and a corresponding seismic resilience evaluation method of buildings were proposed. A probability-based function loss is defined for components to consider the uncertainty in earthquakes. A hierarchic structure is used to assemble the component function loss

to acquire the building function loss. Based on the post-earthquake function recovery model driven by the restoration scheme, the time-varying function curve of the building function is obtained. The calculation method of seismic resilience of buildings is presented based on the Monte Carlo method. The method is applied to a 10-storey apartment building with reinforced concrete frame structure, and the effects of different resilience enhancement methods on the building were compared. The results show that the proposed method can reasonably evaluate the seismic resilience of buildings. The seismic resilience of the building in the earthquake with fortification intensity is good. The non-structural components like infilled walls have great effects on the seismic resilience of buildings. Among various kinds of resilience enhancement methods, the seismic improvement of components and the optimization of post-earthquake repair schemes are more efficient.

Key words: seismic resilience; functional loss quantification; repair scheme; function recovery model; resilience enhancement methods

韧性一般指系统抵抗外部干扰并恢复其原有功能的能力,建筑的抗震韧性指建筑在遭受地震灾害时抵抗地震作用并在震后恢复功能的能力^[1]。最近的震灾调查表明,按照现行规范设计的建筑在遭受地震作用后,虽然结构的安全有保障,但经济损失偏大,影响城市正常的运转和生产力的恢复^[2]。因此,改善建筑的抗震韧性逐渐受到人们的重视。目前对提升建筑抗震韧性的方法已有较多研究,主要为采用新型构件和结构形式,如可更换结构构件、自复位结构体系和摇摆墙/框架^[3]等。但由于评价建筑抗震韧性的理论尚不完善,上述方法对提升建筑抗震

收稿日期: 2021-07-26

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC1500701)

第一作者: 卜海峰(1993—),男,博士生,主要研究方向为建筑抗震韧性评价。E-mail: bhf@tongji.edu.cn

通信作者: 蒋欢军(1973—),男,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为建筑抗震防灾。

E-mail: jhj73@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

韧性的量化程度无法确定。

比较主流的韧性量化方法是将韧性定义为建筑在预期时间内功能的平均值。因此,该方法首先需要定义建筑的功能指标。研究人员对不同类型的建筑定义了各类功能指标,以医疗系统为例,主要功能指标有:单位时间内的医疗能力^[4]、接收的患者人数^[5]、患者的等待时间^[6]、直接经济损失和间接损失的组合指标^[7]等。为了描述建筑震后的功能恢复过程,需要定义建筑功能恢复函数,如线性函数^[5]、指数函数^[5]、三角函数^[5]、双指数函数^[6]和谐波过阻尼函数^[7]等,不同类型的函数描述了不同的建筑功能恢复特征。这类功能指标存在两个主要问题:①指标只能适用于特定类型的建筑,且指标种类繁多,选择何种指标精确地表征建筑的功能存在一定困难;②指标只能描述建筑震后的静态功能,没有考虑功能的动态恢复过程,导致功能指标必须与预定义的功能恢复函数结合使用,而功能恢复函数种类繁多,选择能真实反映建筑功能恢复过程的函数也存在困难。

针对上述问题,本文提出了一种基于构件组装的通用型功能损失量化方法,以适应不同类型的建筑,用基于修复方案的建筑震后功能恢复模型获取真实的建筑功能恢复函数,实时计算建筑震后功能损失,基于全概率分析方法给出单体建筑韧性量化的计算方法,以期为建筑抗震韧性评估提供参考。

1 建筑抗震韧性评价方法

1.1 建筑震后功能损失量化

建筑由结构和非结构构件组成,构件功能的损失导致建筑功能的损失。因此,为了量化建筑在地震作用下的功能损失(function loss, FL),首先需要定义建筑内各构件的功能损失。在此基础上,分析建筑中各构件在功能上的逻辑关系,按照逻辑关系组装各构件的功能损失,得到建筑的功能损失^[8]。

1.1.1 构件功能损失量化

根据建筑模型和地震动信息,获取建筑内的构件在地震作用下的工程需求参数,结合构件易损性函数,根据概率分布确定各构件所处的损伤状态 D_s 。在易损性分析时,构件的损伤情况按照从轻到重依次划分为 $D_{s0}, D_{s1}, \dots, D_{sN}$ ($N \geq 1$),其中 D_{s0} 表示完好, D_{sN} 表示严重破坏。构件的功能损失与损伤状态密切相关,损伤越严重,功能损失越大,因此可对构件的不同损伤状态定义相应的功能损失。功能损失

的取值范围为 $[0, 1]$,其中0代表功能完好,1代表功能完全丧失。目前确定构件功能损失的方法主要有:取损伤状态下构件的修复费用与建造成本的比值^[9-10];按损伤状态在所有可能的损伤状态的位置线性插值^[11];按构件承担的功能类别采用预定义的解析函数^[12]。本文考虑构件功能损失的不确定性,假定构件各损伤状态下的功能损失为正态分布,其均值 μ 与损伤状态呈线性关系,标准差 σ 描述了功能损失的不确定程度。如图1所示,横坐标上的 D_s 按顺序均匀分布, D_{s0} 的功能损失均值取0, D_{sN} 的功能损失均值取1。

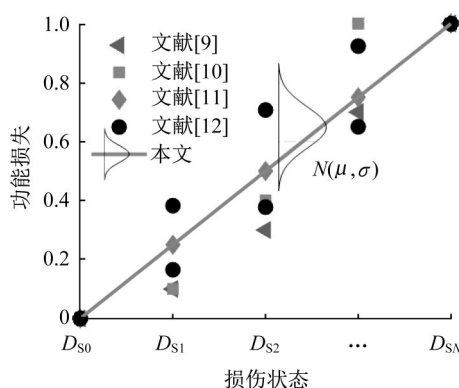


图1 构件损伤状态与功能损失的关系

Fig.1 Relationship between damage state and function loss

功能损失的不确定性来自业主对建筑构件功能认知的准确度。若构件在各损伤状态下的功能损失能较准确地确定,则标准差较小,反之较大。特别地,当构件在某损伤状态下的功能损失能完全确定时,则标准差为0(例如某构件在 D_{s5} 下完全破坏,功能损失为1,标准差为0)。与判定构件损伤状态的方法类似,根据概率分布确定构件在各个损伤状态下的功能损失,则楼层中各类构件的功能损失为

$$L_{i,j} = \frac{1}{m_{i,j}} \sum_{k=1}^{m_{i,j}} L_{i,j,k} \quad (1)$$

式中: $L_{i,j}$ 为第*i*楼层中第*j*类构件的功能损失; $L_{i,j,k}$ 为第*i*楼层中第*j*类构件的第*k*个构件的功能损失; $m_{i,j}$ 为第*i*楼层中第*j*类构件的数量。

1.1.2 建筑功能损失量化

将建筑某楼层中的各类构件按照功能属性划分到不同的子功能中,使用权重系数和关联函数组装构件的功能损失,得到子功能的功能损失,如图2所示。各构件的权重系数反映构件对子功能的重要程度,可采用关联矩阵法、层次分析法、专家调查法^[13]等方式选取。关联函数根据构件之间的关系构造或

选取,一般满足对称律、结合律、单调性和唯一性^[14],表1给出了构件之间串联、并联和独立时几种常见的关联函数,不同函数类型代表不同的关联程度,更详细的关联函数的解释、类型、构造原则和选用原则可参考文献[12]。

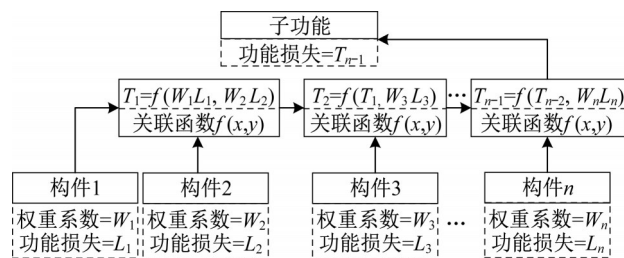


图2 子功能组装方法

Fig.2 Assembly method of sub-function

表 1 关联函数 $f(x, y)$

Tab.1 Correlation function $f(x, y)$

类型编号	构件之间的关系		
	串联	并联	独立
1	$\max(x, y)$	$\min(x, y)$	$x + y$
2	$x + y - xy$	xy	$x + y$
3	$\min(x + y, 1)$	$\max(x + y - 1, 0)$	$x + y$

建筑每个楼层提供的功能可划分为安全功能、基本功能和高级功能3种。其中安全功能指抵御地震作用以减轻伤亡的功能;基本功能指提供基本生活条件的功能(如空间、照明、给排水等);高级功能指楼层因特殊属性所具有的功能(如居住、办公、医疗等)。每种功能再细分为多个子功能,而子功能由该楼层中的相关构件的功能组装得到。总体而言,楼层的功能逻辑关系可用树状层级结构描述。同理,建筑的功能也可划分为安全功能、基本功能和高级功能,其含义与楼层的3种功能类似,每种功能由各楼层的3种功能组装得到。构件、楼层和建筑的功能逻辑关系描述如下。

将楼层的安全功能划分为结构安全和抛落物安全两个子功能,结构安全由梁、柱、剪力墙、连梁、支撑等结构构件组成,抛落物安全由填充墙、吊顶和饰面等地震下可致人员伤亡的非结构构件组成,如图3所示。同理,将楼层的基本功能划分为疏散、照明、暖通、给排水、空间5个子功能,每个子功能包含更详细的子功能和相应的构件,如图4所示。考虑楼层外部资源供应对功能的影响,将电源和水源视为构件,根据楼层外部供应情况确定其功能损失。由于不同建筑的高级功能区别较大,相应的特殊构件

的抗震性能需专门研究,这里暂不考虑高级功能。使用关联函数将基本功能与安全功能串联后作为楼层的总功能。

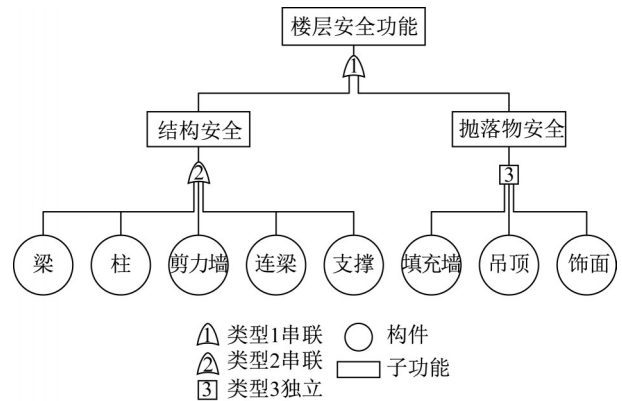


图3 楼层安全功能组装方法

Fig.3 Assembly method of storey safety function

建筑内的电梯、楼梯、管道等构件在楼层间相互连接,使楼层之间的功能存在明显的相关性,使用关联函数串联相邻楼层的相应子功能。如图4所示,各楼层均设计3个子功能节点,各楼层的子功能损失取该层节点功能损失与相连楼层对应节点功能损失的关联函数值,这种楼层间的关联通过子功能影响各楼层的总功能。取各楼层功能损失的平均值作为建筑的总功能损失,建筑的剩余功能则为单位1减去建筑功能损失。需要注意的是,该方法的功能关联函数和关联方式并不唯一,具有良好的扩展性。当采用新型构件、新型结构体系或需要考虑高级功能时,研究者可以扩展构件种类和功能损失组装方式。

1.2 建筑震后功能恢复模型

1.2.1 建筑修复方案

建筑的修复包括准备和修复两个阶段。修复前的准备阶段包括设计和招投标等延迟时间以及特种构件的长期交付时间,可采用REDi^[15]计算。建筑的修复阶段需为各楼层的构件制定合理的修复顺序,本文参考REDi和《建筑抗震韧性评价标准》^[16],将修复划分为7个工序,每个工序包含相应的构件,如图5所示。修复工作分为两个阶段,结构构件和楼梯在第一阶段优先修复,其他非结构构件在第二阶段随后修复。构件易损性数据库中包含构件在各损伤状态下的损失函数(如单位构件所需的修复工时),根据构件损伤情况,统计楼层内各类构件和各工序所需的修复工时,按照工程实际情况为各工序分配维修工人。根据楼层内各工序的工时和工人数,计算

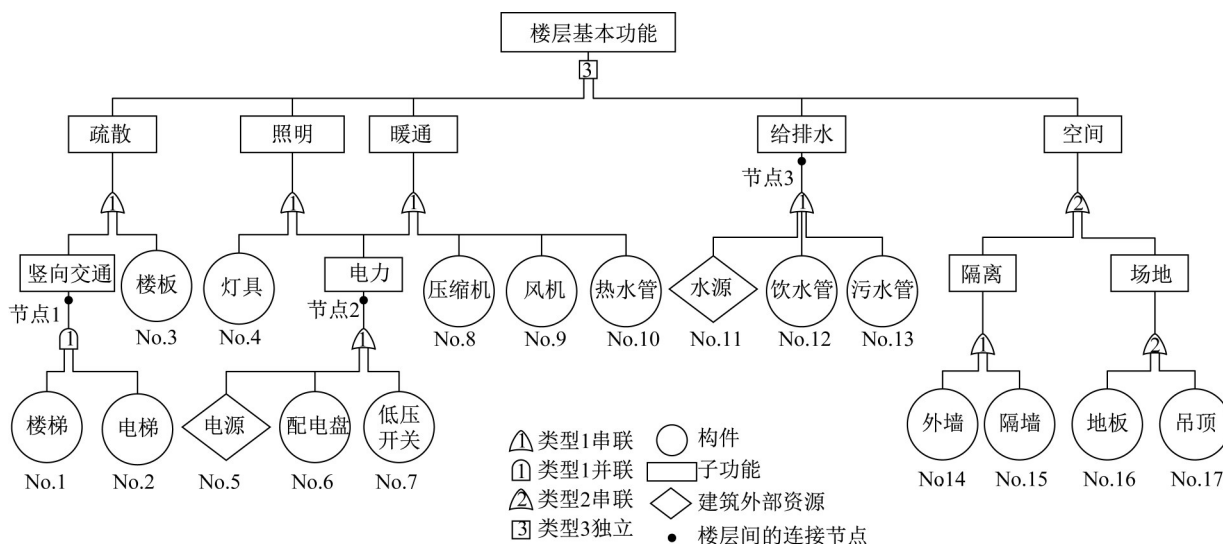


图4 楼层基本功能组装方法

Fig.4 Assembly method of storey basic function

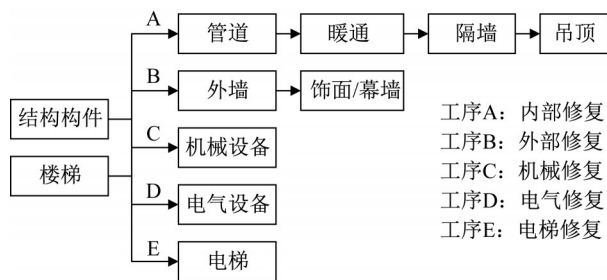


图5 楼层内的工序安排

Fig.5 Repair sequence in each storey

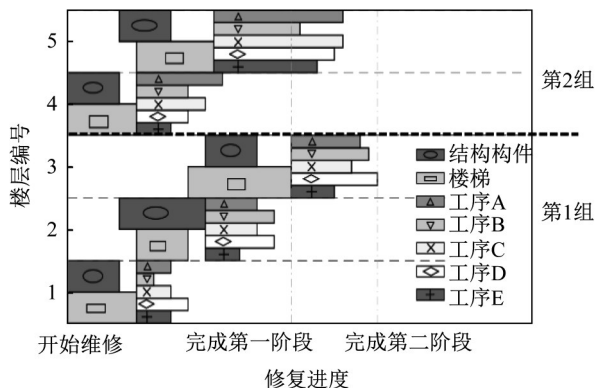


图6 楼层间的工序安排

Fig.6 Repair sequence between storeys

各工序所需的修复时间。

建筑各楼层修复的先后顺序目前尚无统一定论。FEMA P58^[17]假定建筑中所有构件同时修复和依次修复两种极端情况;REDi假定各楼层间的结构构件依次修复,非结构构件在层间同时修复;《建筑抗震韧性评价标准》假定建筑各楼层之间相互独立,同时修复。综合上述方案,这里对楼层进行分组,每组中包含若干个楼层,各组之间相互独立,同时修复。每组内的结构构件和楼梯按楼层顺序依次修复;其他工序在满足层内两阶段修复顺序的条件下,在层间同时修复。图6展示了某5层建筑划分为两组时的层间工序安排。值得注意的是,当所有楼层划分为同一组时,工序安排与REDi相同,此时人工和材料等修复资源的供应密度最小,修复时间最长;当所有楼层各自单独划分为一组时,工序安排与《建筑抗震韧性评价标准》相同,此时修复资源的供应密度最大,修复时间最短。楼层分组应根据资源供给能力和修复时间要求确定,以适应不同的需求。

1.2.2 建筑功能恢复曲线

根据建筑的修复方案可知整个修复进程,这里采用基于修复方案的建筑震后功能恢复模型,得到建筑随修复进程实时变化的功能值,具体方法如下:选取建筑震后的某个时刻,检查该时刻下建筑各楼层中各工序的修复情况,获取各类构件的功能损失值。假定某个工序修复完毕,则该工序中的所有构件均恢复其原有功能,功能损失为0,否则构件仍保持震后的功能损失。根据该时刻构件的功能损失,用本文1.1节的方法计算该时刻建筑的功能。用同样的方法计算修复过程中各时刻建筑的功能,以时间为横坐标,以建筑功能为纵坐标,获取建筑功能恢复曲线。按照韧性的定义^[1],将建筑功能恢复曲线对时间积分,并除以韧性评价控制时间(control time)^[7],即得建筑的抗震韧性指标,如图7所示,其中 $Q(t_i)$ 是 t_i 时刻建筑的瞬时功能, T 是韧性评价控

制时间,根据业主关注的时间段确定, R 是建筑的抗震韧性指标,其值介于0~1之间,越大代表建筑的抗震韧性越好。

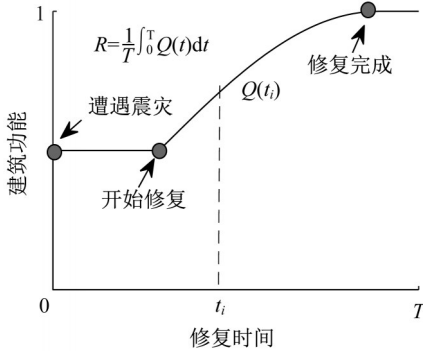


图7 建筑功能恢复曲线

Fig.7 Function recovery curve of buildings

1.3 建筑抗震韧性评价流程

上述韧性计算过程中存在较多的不确定性,例如:构件的功能需求参数由于地震激励和建筑模型的原因存在随机性;构件的损伤状态按照发生概率随机判断;构件的功能损失按照概率分布随机取值。因此,上述韧性指标值仅是建筑抗震韧性评价在概率意义上的一次实现。为了更合理地考虑抗震韧性计算的不确定性,借鉴全概率性能评估理论,采用蒙特卡洛法,对建筑韧性计算进行多次模拟,得到韧性指标值的概率分布及其统计值,取具有一定保证率的值作为最终的韧性评价结果,建筑抗震韧性评价流程如图8所示。

2 算例分析

2.1 建筑信息和地震响应

为了验证上述建筑抗震韧性计算方法的可行性,以1栋位于上海的长租公寓作为案例。该建筑为10层钢筋混凝土框架结构,按照《建筑抗震设计规程》^[18]设计,如图9所示。使用OpenSees建立相应的有限元模型,梁和柱均采用非线性纤维单元模拟,并考虑几何非线性,具体设计和建模信息可参考文献[12]。使用FEMA P695中22条远场地震波作为地震动输入,将加速度峰值调至8度设防水准(0.2g),结构层间位移角和楼层加速度响应如图10所示。

2.2 建筑震后功能损失

采用FEMA P58建筑构件易损性数据库,在构件的各损伤状态中增加功能损失项,如图11所示。

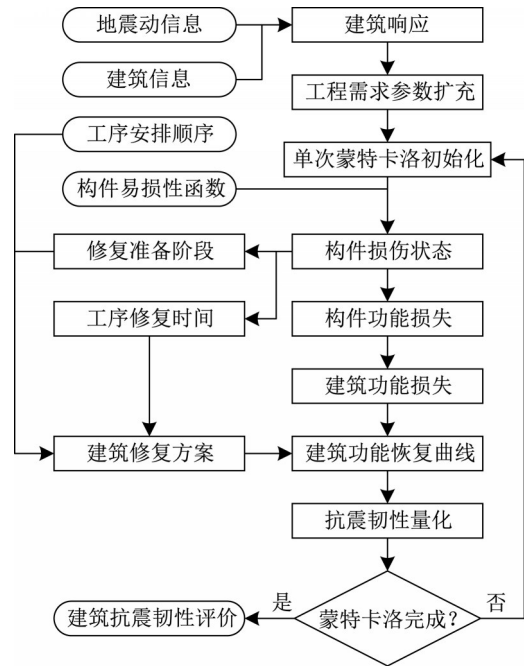


图8 建筑抗震韧性评价流程

Fig.8 Seismic resilience evaluation process of buildings

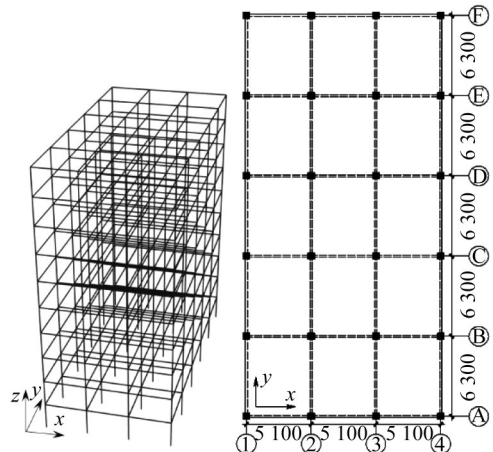


图9 结构轴测图和平面布置图(单位:mm)

Fig.9 Axonometric view and plane layout of structure (unit: mm)

假定构件功能损失的均值与损伤状态线性相关,标准差均为0.1,并将功能损失限制在0~1之间。建筑构件类型如表2所示,共有19个易损性组,按照实际数量将其布置在建筑各楼层。其中,编号1~17的构件用于计算各楼层的基本功能损失,编号14、17~19的构件用于计算各楼层的安全功能损失。暂不考虑建筑外部环境对水源和电源的影响,假定二者功能损失为0。为简单起见,假定各构件和子功能的权重均为1;层间节点采用类型1关联函数串联,权重设为1。计算各楼层的总功能时使用类型2关联函

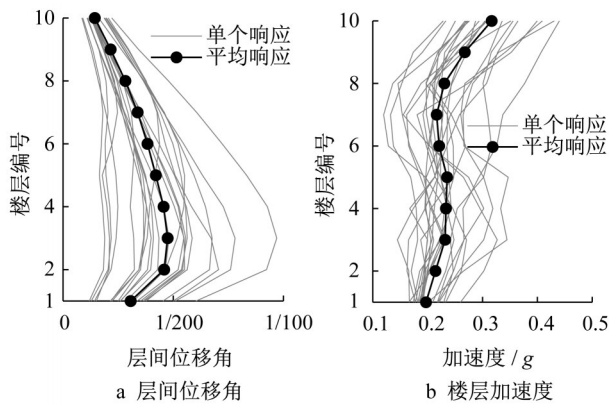


图 10 8度设防地震下的结构响应

Fig.10 Structural responses in a fortification intensity of 8 degrees

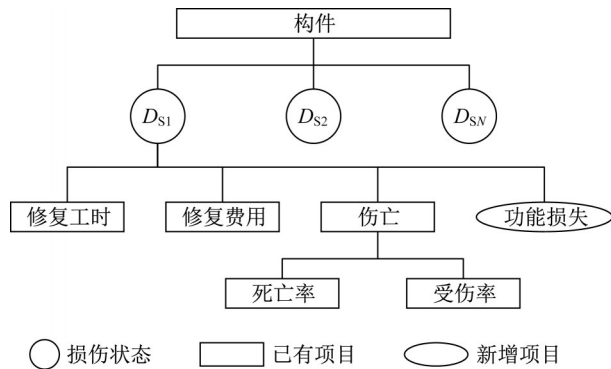


图 11 构件易损性数据结构

Fig.11 Data structure of component fragility

数串联安全功能和基本功能,考虑到二者对建筑总功能的贡献,权重分别假定为0.7和0.3。

将建筑工程需求参数扩展为1000组^[19],按上述方法计算所建模型。采用式(1)计算建筑各构件的功能损失,对数正态分布拟合结果如表2所示。从表2可以看出,在8度设防地震作用下,电梯、压缩机、填充墙、隔墙、地板的功能损失中值均超过0.25,功能损失较大;楼板、配电盘、低压开关、风机、饮用水管、污水管、边柱、中柱的功能损失中值均低于0.01,功能损失较小。

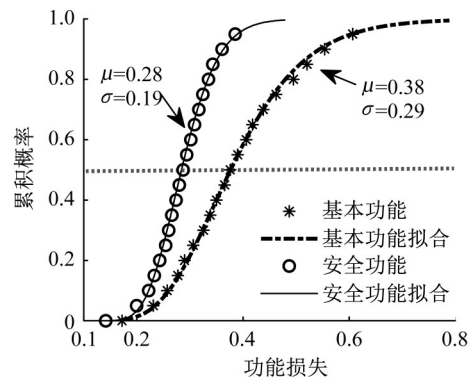
计算各次蒙特卡洛模拟中各楼层安全功能和基本功能的损失均值,采用对数正态拟合如图12a所示,可以看出,50%超越概率的楼层安全功能和基本功能损失均值分别为0.28和0.38。结合表2、图3和图4可以发现,对楼层安全功能影响较大的子功能是抛落物安全,主要受填充墙的影响;对楼层基本功能影响较大的子功能有竖向交通、暖通和空间,主要受电梯、压缩机和填充墙的影响。建筑功能损失的概率分布及对数正态分布拟合如图12b所示,

表 2 建筑的构件类型及其功能损失

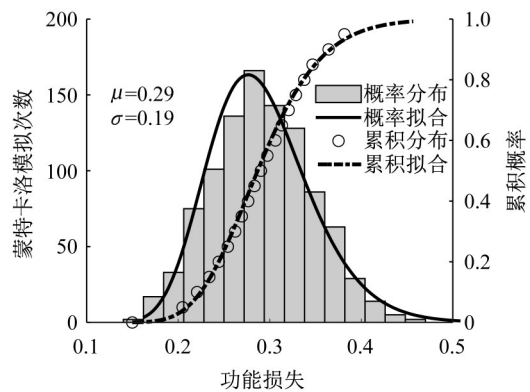
Tab.2 Types of components and their function loss

编号	分类	名称	功能损失	
			中值	对数标准差
1	C2011.021a	楼梯	0.05	1.90
2	D1014.011	电梯	0.35	0.77
3	B1049.002b	楼板	0.01	2.09
4	C3034.001	灯具	0.18	0.51
5		电源	0	
6	D5012.031a	配电盘	0	1.67
7	D5012.021a	低压开关	0	3.15
8	D3032.011a	压缩机	0.62	0.17
9	D3041.001a	风机	0	2.41
10	D2022.011a	热水管	0.10	1.68
11		水源	0	
12	D2021.011a	饮用水管	0	2.41
13	D2031.011b	污水管	0	3.17
14	B1051.012	填充墙	0.46	0.17
15	C3011.002a	隔墙	0.34	0.22
16	C3027.001	地板	0.28	0.33
17	C3032.001b	吊顶	0.10	0.55
18	B1041.001a	边柱	0	2.13
19	B1041.001b	中柱	0	2.04

50%超越概率的建筑功能损失约为0.29。对比图12a可以发现,建筑的总功能主要受各楼层安全功能的控制。



a 安全功能和基本功能



b 建筑总功能

图 12 建筑功能损失概率统计

Fig.12 Probability statistics of building function loss

2.3 建筑抗震韧性

汇总各构件的修复工时(人·d),并将构件按照工序分类统计,其中结构构件包含编号3、18~19构件;工序A包含编号4~5、10~13、15~17构件;工序B包含编号14构件;工序C包含编号8~9构件;工序D包含编号6~7构件。表3给出了底部楼层各工序在1 000次蒙特卡洛模拟中的平均工时,其他楼层的平均工时与底层差别不大,可以看出,受填充墙破坏

的影响,工序B是主要需要修复的部分;其次是工序A,主要受隔墙和地板破坏的影响。参考REDi确定各楼层的工人数,考虑到楼层之间施工影响较小,按REDi方法为各楼层设定人数上限。表3给出了底部楼层各工序的平均工人数。由于楼梯和工序D中的构件在模拟中往往没有损伤,因此工人数的均值小于1。

表3 底部楼层各工序的工时和工人数平均值

Tab.3 Average man-hour and number of workers of repair sequences on ground floor							
工序	结构构件	楼梯	A	B	C	D	E
工时/(人·d)	69.49	0.72	92.22	372.75	31.59	0.07	6.74
人数	1.49	0.35	5.87	5.92	1.65	0.02	1.10

按本文1.2节的方法确定修复方案,这里暂不考虑建筑修复前的延迟和构件长期交付时间,维修时将建筑楼层分为3组,楼层编号分别为1~3、4~6和7~10。根据各工序所需的修复工时和修复顺序确定每次模拟中建筑修复进程。以2 d为时间间隔,计算修复进程中建筑的功能值。以某次蒙特卡洛模拟为例,建筑功能随时间的变化如图13所示,建筑震后功能值约为0.69,总修复时间约为139 d。

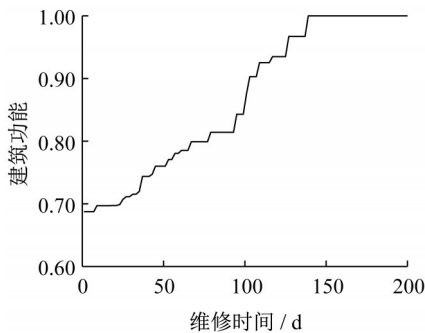


图13 某次模拟中建筑功能随时间的变化

Fig.13 Dynamic changes of building function loss in a simulation

选取控制时间 $T=200$ d,根据建筑功能恢复曲线计算韧性指标值,1 000次蒙特卡洛模拟的统计结果如图14所示。对韧性损失值(即单位1减韧性指标值)按对数正态分布统计可获得较好的概率分布拟合。从图14可以看出,该建筑的抗震韧性指标值介于0.65~0.95之间,这里偏保守地取84%保证率的值作为最终的抗震韧性指标值。可以看出,该建筑在8度设防地震下的抗震韧性指标值为0.81,总体上韧性较好,此时建筑的结构构件损伤较小,但填充墙等非结构构件的破坏使建筑的抗震韧性受到较大影响。

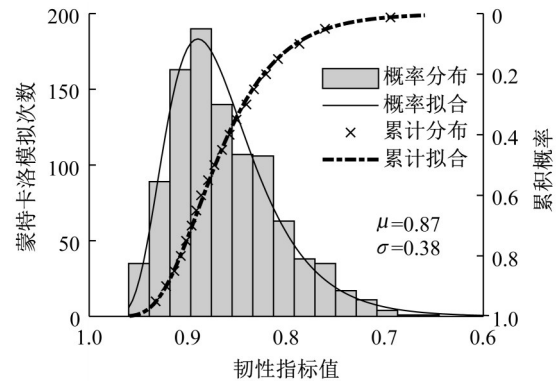


图14 建筑抗震韧性指标值概率分布

Fig.14 Probability statistics of building seismic resilience

3 建筑抗震韧性提升

从韧性评价的流程可以看出,提升建筑的抗震韧性有多种方案,可归为以下3类:①提升建筑抗震性能,如使用抗震设计的构件,使工程需求参数小于构件的损伤状态限值,减小构件的损伤概率;②调整构件配置,如增加备用构件和改变构件间的功能逻辑关系,以增强建筑功能的鲁棒性;③缩短建筑功能恢复时间,如使用可更换构件、优化建筑震后修复策略,从而使建筑功能快速恢复到震前状态。

为了对比以上3类方案对建筑抗震韧性提升的影响程度,分别采取相应的措施对算例中的建筑进行改造。由于具体的改造措施超出本文的研究范围,这里在原模型的基础上假定相应的改造结果,分别为:①构件各损伤状态的抗震能力中值均提升20%;②各楼层之间相互独立,不存在功能依赖;③各楼层之间同时修复,楼层内依然为两阶段修复原则。统计改造后的3个模型在1 000次模拟中的建

筑功能损失、功能恢复曲线和韧性指标值,如图15所示,可以看出,方案1和方案2的建筑震后功能损失分别为0.24和0.27,方案3为0.29,与原模型相同。方案1和方案2的建筑功能恢复速度基本相同,而方案3的建筑功能恢复速度明显快于方案1和方案2,3种方案的建筑抗震韧性指标值分别为0.86、0.82和0.84,与原模型相比分别提升6%、1%和4%。

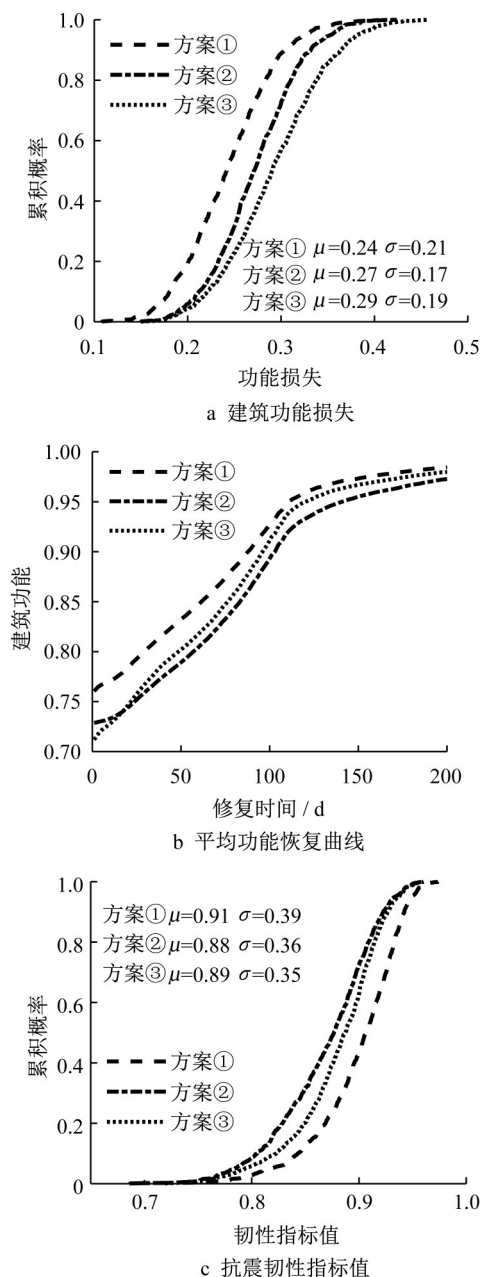


图15 3类提升方法的建筑抗震韧性对比

Fig.15 Comparisons of three seismic resilience enhancement methods

以上分析表明,3类方案均能不同程度地提升建筑的抗震韧性。其中,提升构件的抗震性能可明显减轻建筑的震后功能损失,从而提升建筑的抗震韧性;优化建筑震后修复策略不能改变建筑震后功能损失,但可加快建筑功能的恢复速度,从而提升建筑抗震韧性;改变楼层间的功能逻辑关系对建筑韧性提升并不明显,这是由于该建筑在8度设防地震作用下的主要损伤构件是填充墙,从图4可以看出,该建筑楼层的子功能之间是否关联与填充墙关系不大,因此层间功能是否关联对建筑总功能的影响有限。

表4给出了FEMA P58对上述3种方案的评价结果,假定建筑人口密度为 $1 \text{人} \cdot (100 \text{m}^2)^{-1}$,可以看出,方案1的修复费用、修复时间和伤亡情况相比原方案均有明显改善,而方案2和方案3与原方案没有差别。尽管方案2和方案3分别通过改进功能逻辑和优化修复策略提升了建筑的抗震韧性,但FEMA P58并不能体现这种效果。相比FEMA P58方法,本文提出的建筑抗震韧性量化方法具有较明显的优越性。

表4 基于FEMA P58的建筑抗震韧性结果均值

Tab.4 Averaged building seismic resilience based on FEMA P58

方案	修复费用/万美元	修复工时	受伤数/人	死亡数/人
原方案	253.53	6886.63	2.77	0.88
方案1	205.63	5588.09	1.88	0.62
方案2	253.53	6886.63	2.77	0.88
方案3	253.53	6886.63	2.77	0.88

4 结论

(1) 本文提出了一种基于构件组装的单体建筑地震功能损失量化方法,以及一种基于修复方案的建筑震后功能恢复模型,建立了一种建筑抗震韧性评价方法。该方法可合理地评价建筑的抗震韧性,并定量描述不同韧性提升方案对建筑抗震韧性的影响。

(2) 按现行中国抗震规范设计的建筑在8度设防地震作用下的抗震韧性较好,结构构件基本保持完好,填充墙等非结构构件的破坏对建筑的抗震韧性影响较大。

(3) 提高建筑构件抗震性能、改善建筑功能逻辑关系和优化建筑震后修复策略3类方案均能不同

程度地提升建筑的抗震韧性。其中提高构件的抗震性能和优化建筑震后修复策略的效果较显著。

作者贡献声明:

卜海峰:试验设计,程序设计,数据分析,撰写初稿。

蒋欢军:项目构思,课题指导,论文审阅与修改。

和留生:课题指导。

参考文献:

- [1] BRUNEAU M, CHANG S E, EGUCHI R T, *et al.* A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities [J]. *Earthquake Spectra*, 2003, 19(4):733.
- [2] BRUNEAU M, MACRAE G. Reconstructing Christchurch: a seismic shift in building structural systems [R]. Christchurch: Quake Centre, 2017.
- [3] 吕西林, 陈云, 毛苑君. 结构抗震设计的新概念——可恢复功能结构[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2011, 39(7):941.
LV Xilin, CHEN Yun, MAO Yuanjun. New concept of structural seismic design: earthquake resilient structures [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2011, 39(7):941.
- [4] BRUNEAU M, REINHORN A. Exploring the concept of seismic resilience for acute care facilities [J]. *Earthquake Spectra*, 2007, 23(1):41.
- [5] CIMELLARO G P, REINHORN A, BRUNEAU M. Seismic resilience of a hospital system [J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2010, 6(1):127.
- [6] CIMELLARO G P, REINHORN A, BRUNEAU M. Performance-based metamodel for healthcare facilities [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2011, 40(11):1197.
- [7] CIMELLARO G P, REINHORN A, BRUNEAU M. Framework for analytical quantification of disaster resilience [J]. *Engineering Structures*, 2010, 32(11):3639.
- [8] TERZIC V, VILLANUEVA P K, SALDANA D, *et al.* Framework for modelling post-earthquake functional recovery of buildings[J]. *Engineering Structures*, 2021, 246:113074.
- [9] 韩建平, 褚小嘉. 基于易损性分析的RC框架-填充墙结构地震直接经济损失计算[J]. *世界地震工程*, 2016, 32(3):13.
HAN Jianping, CHU Xiaojia. Seismic direct economic loss analysis of infilled RC frame structure based on fragility analysis [J]. *World Earthquake Engineering*, 2016, 32(3):13.
- [10] MELANI A, KHARE R K, DHAKAL R P, *et al.* Seismic risk assessment of low rise RC frame structure [J]. *Structures*, 2016, 5: 13.
- [11] 卢啸. 钢筋混凝土框架核心筒结构地震韧性评价[J]. *建筑结构学报*, 2021, 42(5):55.
LU Xiao. Seismic resilience evaluation of a reinforced concrete frame core tube structure [J]. *Journal of Building Structures*, 2021, 42(5):55.
- [12] 卜海峰, 蒋欢军, 和留生. 基于模糊理论的建筑震后功能损失评价方法[J]. *建筑结构学报*, 2020, 41(S2):11.
BU Haifeng, JIANG Huanjun, HE Liusheng. Method for assessment of building function loss in an earthquake based on fuzzy theory [J]. *Journal of Building Structures*, 2020, 41(S2):11.
- [13] 尚庆学, 李吉超, 王涛. 医疗系统抗震韧性评估指标体系[J]. *工程力学*, 2019, 36(S1):106.
SHANG Qingxue, LI Jichao, WANG Tao. Indicators system used in seismic resilience assessment of hospital system [J]. *Engineering Mechanics*, 2019, 36(S1):106.
- [14] SALICONE S. Measurement uncertainty: an approach via the mathematical theory of evidence [M]. Piscataway: Springer Science & Business Media, 2007.
- [15] ALMUFTI I, WILLFORD M. REDi rating system: resilience-based earthquake design initiative for the next generation of buildings [EB/OL]. [2020-12-01]. <https://www.arup.com/perspectives/publications/research/section/redi-rating-system>.
- [16] 国家市场监督管理总局. 建筑抗震韧性评价标准: GB/T 38591—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
State Administration for Market Regulation. Standard for seismic resilience assessment of buildings: GB/T 38591—2020 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2020.
- [17] Federal Emergency Management Agency. Seismic performance assessment of buildings volume 1: methodology [R]. Washington D C: Federal Emergency Management Agency, 2012.
- [18] 上海市城乡建设和交通委员会. 建筑抗震设计规程: DGJ08-9—2013[S]. 上海: 上海市建筑建材业市场管理总站, 2013.
Shanghai Urban and Rural Construction and Transportation Commission. Code for seismic design of buildings: DGJ08-9—2013[S]. Shanghai: Shanghai Station of the Building Materials Industry Market Management, 2013.
- [19] YANG T Y, MOEHLE J, STOJADINOVIC B, *et al.* Seismic performance evaluation of facilities: methodology and implementation [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2009, 135(10): 1146.