

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20220330003

基于功能需求导向的城市综合体震后修复路径 优化方法研究*

黄鹏超, 余丁浩, 李 钢, 董志骞, 王 睿, 张 晗

(大连理工大学海岸与近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要:城市综合体内部功能繁多,强震作用下综合体结构功能失效会影响城市区域功能的正常运转。建筑震后修复期望综合体内部重要功能优先、快速恢复并投入使用,合理规划其震后修复路径是满足此类结构功能需求的关键。既有研究中建筑震后多采取自下而上的修复路径,未考虑震后功能需求。基于此,提出了一种基于功能需求导向的城市综合体震后修复路径优化方法。考虑综合体具有的多功能特性及不同功能区内构件间的功能相关性特点,建立了基于故障树的功能损失分析模型,并以此为基础结合建筑功能区划分功能修复单元;以各功能的期望修复时间作为功能需求目标,对比功能修复单元的实际修复时间,提出功能需求目标完成率指标;在此基础上建立震后修复路径优化模型,结合遗传算法,形成了综合体震后修复路径优化方法。对某城市综合体开展震后修复路径优化,结果表明:所提方法可高效完成功能需求目标,使重要功能震后快速恢复并投入使用。

关键词:城市综合体;修复路径;功能需求导向;优化方法;功能相关性

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)06-1130-14

Research on Optimization Method of Post-earthquake Repair Path for Urban Complex based on Functional Demand Orientation

HUANG Pengchao, YU Dinghao, LI Gang, DONG Zhiqian, WANG Rui, ZHANG Han
(State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The internal functions of the urban complex are various, and the failure of the complex structure under strong earthquakes will affect the normal operation of the urban regional function. The post-earthquake repair of buildings expects important functions inside the urban complex to be quickly restored and put into use. Reasonable planning of post-earthquake repair paths for the urban complex is the key to meeting the functional demands of such structures. In the existing research, most of the buildings adopted the post-earthquake repair path from bottom to top, without considering the post-earthquake functional demands. Based on this, a post-earthquake repair path optimization method for urban complex based on functional demand orientation is proposed. Considering the multi-functional characteristics of the urban complex and the functional correlation between components in different

* 收稿日期:2022-03-30;修回日期:2022-05-23

基金项目:国家自然科学基金(52038002,52008075)、辽宁省“兴辽英才计划”项目(XLYC1902043)、中央高校基本科研业务费(DUT22RC(3)038)资助

作者简介:黄鹏超(1996—),男,硕士研究生。主要从事工程结构抗震韧性研究。E-mail:hpcdlut@163.com

通讯作者:李钢(1979—),男,教授,博导,博士。主要从事工程结构抗震方面的研究。E-mail:gli@dlut.edu.cn

functional areas, a functional loss analysis model based on a fault tree is established, and based on this model, the functional repair units are divided according to the functional areas of the building. Taking the expected repair time of each function as the function demand target, and comparing the actual repair time of the function repair unit, the completion rate index of the function demand target is put forward. On this basis, the post-earthquake repair path optimization model is established, and the post-earthquake repair path optimization method of the urban complex is formed by adopting the genetic algorithm. The post-earthquake repair path optimization of an urban complex is carried out, and the results show that the proposed method can efficiently achieve the functional demand and make the important functions recover quickly and put into use after the earthquake.

Keywords: urban complex; repair path; function demand orientation; optimization method; functional correlation

引 言

随着我国经济的快速发展,城市密集程度越来越大,为缓解用地紧张、提高建筑使用效率,集地铁、商业、办公、住宅等多功能于一体的城市综合体不断涌现。城市综合体作为城市地标性建筑,地震作用下功能失效将对城市区域功能的正常运转产生重大影响。在城市综合体震后修复过程中,作为重要公共服务基础设施和城市交通关键节点的地铁以及承担居民正常生活与工作的住宅和办公等重要功能应能在震后优先、快速恢复并投入使用^[1-3]。对于建筑规模较大、内部功能繁多的城市综合体,合理规划其震后修复路径是满足此功能需求的关键,具有重要意义。

建筑震后修复路径指震损建筑修复过程中在空间上所遵循的修复次序。传统地震工程的研究重点在于提高建筑的抗震性能从而避免建筑物在地震过程中出现倒塌,较少关注建筑的震后修复过程。在无特殊要求的情况下,震后修复大多采取从底层到顶层自下而上的修复路径^[4-6]。近年来,伴随着抗震韧性概念^[7-8]的提出,人们对建筑抗震性能提出了更高的要求,注重建筑震后的功能维持及快速恢复,抗震韧性也逐渐成为新的工程抗震指导思想^[9-10]。尽管建筑震后修复是计算修复时间与抗震韧性评估不可或缺的一环,但学者们的研究大多围绕抗震韧性评估方法^[8,11-12]、结构体系与加固改造方式对建筑韧性的影响^[13-17]及建筑功能损失计算方法^[18-20],围绕建筑震后修复路径的研究较少^[21-24]。贺思维^[23]对以办公楼为代表的单体建筑震后修复流程进行了最优化分析:自下而上优先修复建筑内重

要性较大的构件,在不改变修复时间的前提下提高建筑的抗震韧性;Q.X.Shang等^[24]在医疗建筑的震后修复过程中采用并联修复路径(所有层同时修复),结合构件修复逻辑和权重系数将层内修复工作划分为7个串联的修复序列,以此来计算建筑震后的修复时间。伴随着社会发展及韧性研究的深入,国内外相继发布了韧性评价标准^[25-28],其中所提供的建筑震后修复路径得到了众多学者的认同并广泛应用于不同建筑类型的震后修复时间计算^[14,20,29-39]。美国联邦应急管理署于2012年提出了FEMA P-58方法^[25],采取自下而上的串联修复路径(自下而上逐层修复)或并联修复路径,层内各构件依次修复。H.Zhu等^[29]、吴谓^[30]基于FEMA P-58方法计算了办公楼、医疗建筑的震后修复时间。考虑到按照两种修复路径所得到的修复时间差异较大且未考虑构件间的修复逻辑^[20,31],在FEMA P-58的基础上,奥雅纳公司于2013年提出了REDi方法^[26],提出采用两阶段修复:第一阶段修复结构构件,采用自下而上的串联修复路径,确保结构安全;第二阶段修复工作在第一阶段全部完成后开始,主要针对非结构构件,采用自下而上的串并联修复路径(逐层修复与部分层同时修复相结合),使建筑功能完全恢复。REDi方法对建筑震后修复工作进行了分类,建议了各修复工作的最大修复工人数和建筑总工人数,同时提出了构件的逻辑修复顺序。卢啸^[20]、J.F.Tipler等^[32]、H.C.Molina等^[33]、P.Yu等^[34]及宁晓晴^[35]基于REDi方法计算了住宅楼、高层建筑、医疗建筑及核电厂房等建筑的震后修复时间。美国韧性委员会于2015年提出了USRC方法^[27],采用与REDi方法相同的两阶段修复,不同的是第二阶段采取并联修复路径。2020年3月31日,我国发

布了《建筑抗震韧性评价标准》^[28](GB/T 38591—2020,以下简称《标准》),采用与REDi方法略有不同的两阶段修复^[36]:第一阶段修复结构构件及楼梯,在确保结构安全的基础上考虑了竖向交通对于震后修复的影响;层内第一阶段修复工作完成后进行第二阶段修复;第二阶段修复其他非结构构件,两阶段均采用并联修复路径,且考虑构件的逻辑修复顺序。岳哲萌^[14]、王啸霆等^[37]及薛荣刚等^[38]基于《标准》^[28]计算了办公楼、图书馆、医疗楼及教学楼等建筑的震后修复时间。肖意等^[39]针对一栋三层办公楼分别采用FEMA P-58方法^[25]、REDi方法^[26]、USRC方法^[27]及《标准》方法^[28]进行震后修复,对比不同修复路径和工人数量对于震后修复时间的影响,结果表明修复路径是影响震后修复时间的重要因素。

综上所述,现有研究多针对办公楼、教学楼、住宅楼以及医院等功能单一的中小体量建筑,此类建筑震后修复工作量相对较小,自下而上的简单修复路径能够达到功能快速恢复的目的。而城市综合体内部功能繁多、建筑体量大,各功能相对重要程度不同且分布在建筑的不同区域,不同功能区域内构件间存在功能相关关系,建筑震后修复工作量较大而修复工人数受限,自下而上修复路径难以满足建筑内部重要功能优先、快速恢复并投入使用的功能需求。基于此,本文根据综合体内不同功能区构件间的功能相关性特点,建立了考虑功能相关性的功能损失故障树分析模型并以此为基础定义功能修复单元;在此基础上提出功能需求目标完成率指标并建立震后修复路径优化模型,结合遗传算法,形成了适用于城市综合体的震后修复路径优化方法。

1 城市综合体功能概述

城市综合体指由三种及以上使用功能不同的建筑空间通过搭配组合而形成的一种多功能、高效率、系统化的建筑类型^[40-41],承担着诸如地铁、住宅、酒店、办公、商业及停车场等多项建筑功能。其中,商业功能是商场、餐饮、娱乐等功能的统称。在综合体内部,各项功能分布在建筑的不同区域,一般将单个功能所在建筑区域称为功能区,以该功能进行命名,如地铁功能区。根据建筑功能的不同,城市综合体可划分为地铁、住宅、酒店、商业及停车场

等多个功能区。综合体地上部分常采用高层建筑与裙房相结合的形式,裙房一般作为商业用途,而塔楼一般作为住宅、酒店及办公用途;地下部分作为上部建筑的地下室,一般承担商业、停车及地铁功能。城市综合体整体功能为各项功能的集合,各项功能由分布于该功能区内部的结构、供水、电力等子系统组成,各子系统则由分布于该功能区内部各构件组成。如图1^[42]所示为城市综合体内部功能示意图。需要指出的是,塔楼功能区是住宅功能区、酒店功能区及办公功能区的统称;裙房功能区是商业(商场、餐饮、娱乐)功能区的统称;地下功能区是商业功能区、停车场功能区及地铁功能区的统称。

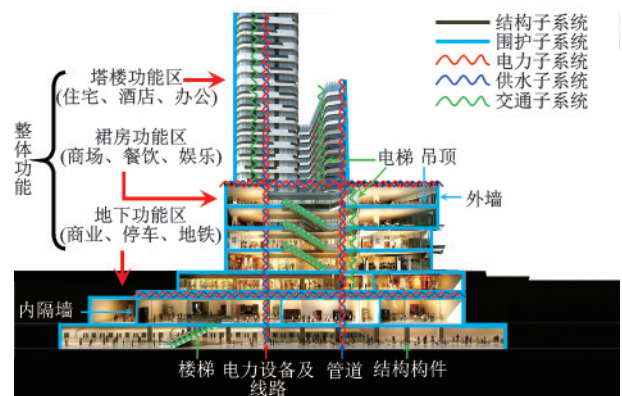


图1 城市综合体内部功能示意图^[42]

Fig.1 Internal function diagram of urban complex^[42]

城市综合体内部功能分区明确,单个功能区只承担一项建筑功能,该功能区内部构件在地震作用下发生损伤会导致构件本身功能损失,将直接影响功能区内子系统运行,进而影响该功能区所承担建筑功能的正常使用。此外,城市综合体内部各功能区之间又存在联系,单一功能区内部特定构件在地震作用下发生损伤会引起其他功能区与之关联构件的功能失效,从而影响其他功能区所承担建筑功能的正常使用。如地震作用下位于地下功能区内的供水管道发生损伤所引起塔楼功能区内的用水构件功能失效,最终同样会影响塔楼区域建筑功能的正常使用。这种存在于建筑内部构件间的功能影响称为功能相关性。对于某功能区,本文将引起该功能区内部构件功能失效的位于其他功能区的构件定义为功能相关性构件。单项建筑功能的正常使用不仅受本功能区构件的影响,同时受其他功能区内功能相关性构件的影响。由此可见,功能区内部构件功能损失是影响该区域建筑功能正

常使用的根本原因,而导致功能区内部构件功能损失的原因又分为以下两方面:(1)该功能区内部构件在地震作用下发生损伤;(2)其他功能区内部构件相关性构件在地震作用下发生损伤。

综上所述,不同功能区构件间的功能相关性会影响建筑功能的正常使用。而震后功能需求注重功能的使用性,期望重要功能短时间内修复完成后可立即投入使用。为满足功能需求,在进行城市综合体震后修复路径优化时应考虑功能相关性的影响:针对重要功能的震后修复,除了修复本功能区内震损构件外,还需修复其他功能区内具有功能相关性的构件。

2 城市综合体功能修复单元

为厘清存在于城市综合体功能区内部不同功能构件之间的相关关系,本节建立了考虑功能相关性的功能损失故障树分析模型;并在此基础上定义城市综合体的功能修复单元,明确影响功能使用的震损构件所在建筑区域以实现重要功能的针对性修复,对于进一步开展震后修复路径优化发挥关键作用。

2.1 考虑功能相关性的功能损失故障树分析模型

在城市综合体功能区内部各子系统中,以结构及围护为代表的子系统,其内部构件在地震作用下发生损伤只影响本功能区建筑功能的正常使用,功能区之间不存在功能相关性;而以供水及电力为代表的子系统,功能区之间存在显著的功能相关性。以供水系统为例,城市综合体内部配备有一套完整独立的建筑供水系统,各功能区内的供水子系统均属于建筑供水系统的一部分。裙房及塔楼一般采用不同的供水方式:地下部分及地上裙房多采用水压直接供水,供水管道一般位于地下,利用室外管网压力向室内各层输水;高层建筑由于楼层较高而外网水压不足,多采用水泵和水箱联合供水方式,水泵一般设于地下并与供水管道连接,通过输水管道将水源泵送至屋面水箱,再由水箱向下逐层输水。整个供水系统可分为供水、输水及用水三部分。供水构件地震作用下功能损失会导致输水和用水构件功能失效,输水构件地震作用下功能损失会导致用水构件功能失效。供电系统内部各构件间具有类似的功能关系。对于由功能相关性所引起的功能损失,本文采用演绎分析较为常用的故障

树分析法^[43],依据构件间功能失效的因果逻辑关系,使用逻辑门(逻辑与门和逻辑或门)及事件符号(底事件、中间事件和顶事件)进行城市综合体内部功能损失分析。以塔楼功能区为例,建立如图2所示的功能损失故障树分析模型。

塔楼功能区供水、电力及其他子系统功能损失均会引起塔楼区域建筑功能损失,使用性受到影响。除去功能区内构件对于功能的影响之外,塔楼功能区内供水、电力子系统功能损失还受到其他功能区构件的影响。以供水子系统为例,塔楼功能区内用水构件(X_1 、 X_2)及输水构件(X_4 、 X_5)震后损坏会直接引起供水子系统功能损失,影响塔楼区域建筑功能的正常使用;裙房及地下功能区内水泵(X_3)及输水管道(X_4)任一构件震后损坏都将影响输水过程,使得塔楼功能区用水构件失效;在用水及输水构件(X_1 — X_5)均不发生损坏的前提下,若地下功能区内供水管道(X_6)及贮水水箱(X_7)震后同时损坏,则供水源头受到影响,进而影响到输水过程,并使得塔楼功能区用水构件功能失效。在故障树分析模型中,对于由逻辑或门表示的逻辑关系称为功能耦联,具有功能耦联关系的任一事件发生都将使其上级事件发生,如需水管(X_1)与需水设备(X_2)任一构件损坏均会引起用水构件功能损失;而对于由逻辑与门表示的逻辑关系称为功能冗余,具有功能冗余关系的各事件必须同时发生才会使其上级事件发生,如供水管道(X_6)及贮水水箱(X_7)同时损坏才会引起建筑内部供水源头功能失效,只单一构件损坏,另一构件可作为备用。

需要指出的是,本文基于故障树分析法所建立的建筑功能损失分析模型,其目的是为厘清存在于综合体建筑内部不同功能区构件之间的功能相关关系,进而在震后修复路径优化过程中考虑其对于建筑功能的使用性影响,以确保重要功能修复完成后可投入使用。建筑功能损失概率及损失值并非本文研究内容。

2.2 功能修复单元

震后修复一般以层作为修复工作的区域划分^[22]。基于功能损失故障树分析模型,本文在进行单一功能震后修复时,将该功能区内部各层及其他功能区内部功能相关性构件所在层定义为功能修复单元。以塔楼区域建筑功能震后修复为例,为确保功能修复后可投入使用,除了在塔楼功能区内部

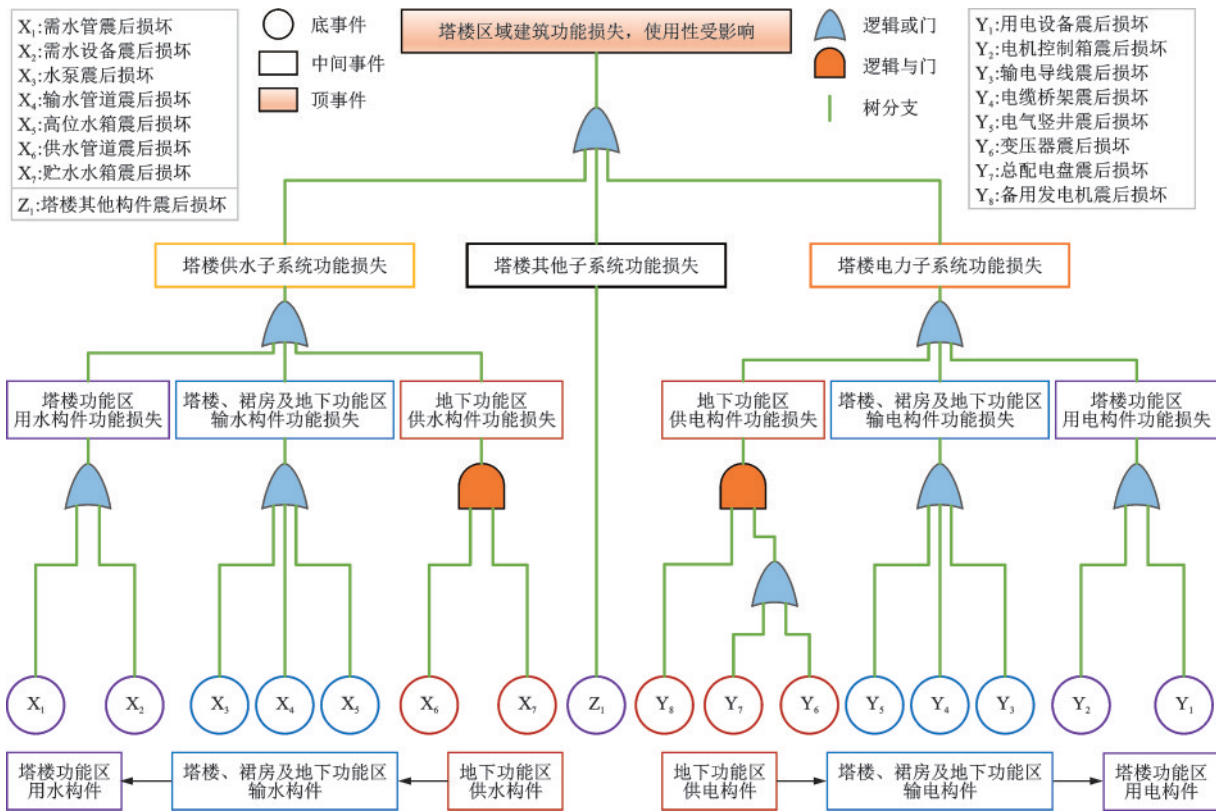


图2 考虑功能相关性的城市综合体塔楼区域建筑功能损失故障树分析模型

Fig.2 Fault tree analysis model of building function loss in tower area of urban complex considering functional correlation

各层开展修复工作外,还需对裙房及地下功能区内部功能相关性构件(如输水及供水构件)所在各层进行修复。功能修复单元个数与建筑功能个数相同,并以各功能进行命名,如住宅功能修复单元。功能修复单元考虑了不同功能区构件间的功能相关性对于功能使用性的影响,明确了影响功能使用的震损构件所在建筑区域。震后修复可在指定区域内分配修复工人,从而实现有针对性的功能修复。功能修复单元内部震损构件修复完毕,该功能完全恢复并可投入使用。单元内最后一项修复工作的完成时刻即为该功能震后恢复所经历的时间。本文不考虑推迟因素及城市公用设施中断因素对于功能恢复时间的影响,所得恢复时间只包括建筑震后修复所经历的时间。

综上所述,在功能修复单元内部开展修复工作可确保功能修复后立即投入使用,满足重要功能的使用性需求。

3 震后修复路径优化方法

为量化功能需求目标的完成情况,本节基于功

能修复单元提出了功能需求目标完成率指标,在此基础上结合遗传算法提出了城市综合体震后修复路径优化的设计方法。

3.1 功能需求目标完成率

震后功能需求指城市综合体内部重要功能优先、快速恢复并投入使用^[1-2],可以总结为使用性需求和快速性需求,其中快速性需求指的是重要功能的修复时间需求,即重要功能从震后功能损失到功能恢复所期望的修复时间。各功能的期望修复时间即为功能的需求目标,要根据实际修复工作量、修复工人数(假设震后修复所需材料充足、设备不出现故障)及修复路径来进行设定。在实际修复工作量一定且震后修复工人数不受限制的情况下,功能修复单元内部各层可同时以最大工人数开展修复工作,由此计算得到最短修复时间为 T_{\min} 天,可视作功能需求目标的下限;若震后修复工人数受到限制,假设最长修复时间为 T_{\max} 天,视为功能需求目标的上限。此外,相对重要的功能震后应优先修复,功能的需求目标值相对较小;相对次要的功能震后应暂缓修复,功能的需求目标值相对较大。为确定

功能需求目标值,本文采用REDi方法推荐的两阶段修复策略,且考虑综合体内部重要功能优先修复的震后功能需求。震后修复在确保结构安全的基础上,优先修复城市综合体内部重要功能,具体计算步骤为:(1)第一阶段进行结构构件修复;(2)第二阶段根据各功能的相对重要程度来确定各功能的修复次序。两阶段在修复过程中均采用REDi方法推荐的自下而上常规修复路径,以各功能修复完成时刻作为该功能的需求目标值。

为量化震后功能需求目标的完成情况,本文将城市综合体内部各功能需求目标值(期望修复时间)与各功能修复单元的修复完成时刻的比值定义为功能需求目标完成率,计算公式如下:

$$E_k = \frac{T_k}{t_k} \quad (1)$$

其中,变量 k 表示建筑功能总数 K 中的第 k 个功能,同时也表示第 k 个功能修复单元, $1 \leq k \leq K$; E_k 表示第 k 个功能的需求目标完成率; T_k 表示第 k 个功能的需求目标值; t_k 表示第 k 个功能修复单元的修复完成时刻,即第 k 个功能的实际修复时间。

在震后各功能内部构件发生损伤的情况下,功能需求目标完成率 $E_k > 0$ 。当 $0 < E_k < 1$ 时,功能实际修复所经历的时间要比期望修复时间长,说明功能需求目标没有完成;当 $E_k = 1$ 时,功能实际修复所经历的时间等于期望修复时间,说明功能需求目标恰好完成;当 $E_k > 1$ 时,功能实际修复所经历的时间要比期望修复时间短,说明功能需求目标超额完成。因此,只有当 $E_k \geq 1$ 时才认为完成功能需求目标,可在期望修复时间内完成功能修复并投入使用。

3.2 震后修复路径优化模型

满足震后功能需求的关键在于:(1)重要功能修复单元优先修复;(2)重要功能的功能需求目标完成率尽可能大。基于此,本文采取两阶段修复:第一阶段修复建筑内部结构构件及楼梯,优先恢复结构安全功能和竖向交通功能,采取自下而上的串并联修复路径,对于多塔楼的综合体建筑,根据功能重要程度逐塔楼进行修复;第二阶段修复建筑内部其他非结构构件,首先根据各功能相对重要程度确定各功能修复单元的修复次序,在功能修复单元内部以各层修复次序作为可行解,以最大化功能需求目标完成率作为目标函数,综合考虑非结构构件逻辑修复顺序及修复工人数约束条件,建立如下城

市综合体震后修复路径优化模型。

(1)可行解

对于第 k 个功能修复单元,其可行解 x_k 为单元内部各层修复次序的随机排列,即:

$$x_k = \{x_{k,j}\}, x_{k,j} \in \text{random}(1, J_k) \quad (2)$$

式中, J_k 表示第 k 个功能修复单元内的总层数,变量 j 表示其中的第 j 层; $x_{k,j}$ 表示第 k 个功能修复单元内第 j 层的修复次序编号,通过随机生成区间 $[1, J_k]$ 内部的整数得到。修复次序编号最小值为1,最大值为 J_k ,且两两之间不能重复。

(2)目标函数

对于城市综合体内部各功能修复单元,以最大化功能需求目标完成率作为其目标函数 $F(x_k)$,即:

$$F(x_k) = \max \left\{ \frac{T_k}{t_k} \right\} \quad (3)$$

第 k 个功能修复单元的修复完成时刻 t_k 的计算公式如下:

$$t_k = \max \{ FT_{ij}^k \} \quad (4)$$

式中,变量 i 表示修复工作总数 I 中的第 i 个修复工作, $1 \leq i \leq I$; FT_{ij}^k 表示第 k 个功能修复单元内第 j 层的第 i 个修复工作的完成时刻,所有修复工作完成时刻的最大值即为第 k 个功能修复单元震后所经历的修复时间。

(3)约束条件

层内修复遵循如图3所示的构件修复顺序。在第二阶段层内修复过程中,内部修复、外部修复及机械修复等各项修复工作可同时开始,其中内部修复遵循管道、空调系统、隔墙、吊顶的逻辑修复顺序,外部修复遵循外墙、饰面/幕墙的逻辑修复顺序^[26]。

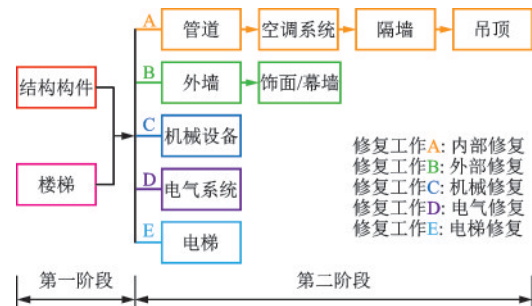


图3 构件修复顺序

Fig.3 Component repair sequences

在修复工人数量上,根据建筑面积限定整栋建筑所能容纳的最大工人数 M ^[26]。修复过程中各时刻

修复工人数要满足下式:

$$\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{J_k} \sum_{i=1}^I Ih_{ij,t}^k \leq M \quad (5)$$

式中,变量 t 表示总修复时刻 T 中的第 t 个修复时刻, $1 \leq t \leq T$; $Ih_{ij,t}^k$ 表示第 k 个功能修复单元内第 j 层的第 i 个修复工作在 t 时刻的修复工人数。最大工人数 M 的计算公式如下:

$$M = 2.7 \times 10^{-3} A_{\text{tot}} + 10 \quad (6)$$

式中, A_{tot} 为建筑的总面积, $20 \leq M \leq 260$ 。

根据建筑规模限定整栋建筑从事各修复工作的最大工人数^[26,44]见表1。修复过程中各时刻修复工人数要满足下式:

$$\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{J_k} Ih_{ij,t}^k \leq IM_i \quad (7)$$

式中, IM_i 表示整栋建筑震后第 i 个修复工作的最大修复工人数。

表1 REDi建议建筑内各修复工作的最大工人数
Table 1 The maximum number of workers suggested by REDi for each repair work in the building

修复工作	低层	中层	高层
	(5层及以下)	(6~20层)	(20层以上)
结构修复	M	M	M
楼梯修复	6	12	18
内部修复	15	30	45
外部修复	15	30	45
机械修复	9	18	27
电气修复	9	18	27
电梯修复	6	12	18

注:建筑层数、面积不同, M 值也不同,计算方法参照本文式(6)

考虑到工人需要一定的工作面来开展修复工作,本文限定层内从事各修复工作的最大工人数^[26]见表2。修复过程中各时刻修复工人数要满足下式:

$$Ih_{ij,t}^k \leq IH_{ij}^k \quad (8)$$

式中, IH_{ij}^k 表示第 k 个功能修复单元内第 j 层的第 i 个修复工作的最大修复工人数。

在修复过程中,假设各时刻的层内修复工人数不大于该时刻所余下的修复工作量,使各修复工作均在整数天完成,各时刻人员分配数要满足下式:

$$Ih_{ij,t}^k \leq IW_{ij,t}^k \quad (9)$$

式中, $IW_{ij,t}^k$ 表示第 k 个功能修复单元内第 j 层的第 i 个修复工作在 t 时刻未完成的修复工作量。

表2 REDi建议层内各修复工作的最大工人数

Table 2 The maximum number of workers suggested by REDi for each repair work in the floor

修复工作	每单位面积修复工人数	每单位构件修复工人数
结构修复	1人/47 m ²	—
楼梯修复	—	2人
内部修复	1人/93 m ²	—
外部修复	1人/93 m ²	—
机械修复	—	3人
电气修复	—	3人
电梯修复	—	2人

3.3 优化算法与流程

本文应用遗传算法(Genetic Algorithm,简称GA)^[45]来求解优化问题,采用实数编码^[46-48]的方法。对于第 k 个功能修复单元,问题的可行解 x_k 由 J_k 个基因编码 $x_{k,j}$ ($j=1,2,3,\dots,J_k$) 组成,编码方式如图4所示。

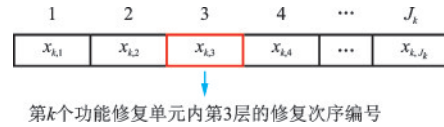


图4 实数编码方式

Fig.4 Real number encoding method

适应度函数 $f(x)$ 是用来衡量个体或可行解优劣程度的标准,在选择操作中需要根据个体适应度大小来进行个体的选择与淘汰。适应度函数 $f(x)$ 与目标函数 $F(x)$ 有关,本文优化问题的目标函数是最大化功能需求目标完成率,属于最大化问题。考虑到遗传算法规定个体适应度不能为负值且一般情况下越大越好,故将适应度函数 $f(x)$ 取为目标函数 $F(x)$,即:

$$f(x) = F(x) \quad (10)$$

选择算子的目的是在当代种群内部选择更为优良的个体保留到下一代,其所反映的是生物在进化和遗传过程中所面临的自然选择。本文采取较为常用的比例选择算子,即轮盘赌选择法。个体被选择的概率与其适应度函数值的大小有关,第 n 个个体被选择的概率 p_n 计算公式如下:

$$p_n = \frac{f_n}{\sum_{n=1}^N f_n} \quad (11)$$

式中, f_n 为第 n 个个体的适应度函数值; N 为种群内个体总数。

交叉算子的目的是通过当代个体两两配对进行染色体基因交换从而产生下一代的新个体,常用的交叉操作为单点交叉与两点交叉。本文采取有序的次序交叉算法^[48]。变异算子的目的是使当代个体染色体上的部分基因发生变异而产生新的染色体,本文采取两点交换式变异操作^[49-50],每一次变异过程计算机都会随机生成两个 $1 \sim J_k$ 的数,作为染色体变异点,两个变异点位置的基因进行互换生成新的个体。

本文以进化代数作为算法终止条件。在算法操作过程中,随着不断的循环迭代更新种群,进而得到越来越优的解,当算法循环次数 g 达到最大进化代数 G 时,停止循环并输出当前种群内最优解作为优化问题的最终解。图 5 为应用遗传算法对城市综合体震后修复路径优化模型求解的算法流程。

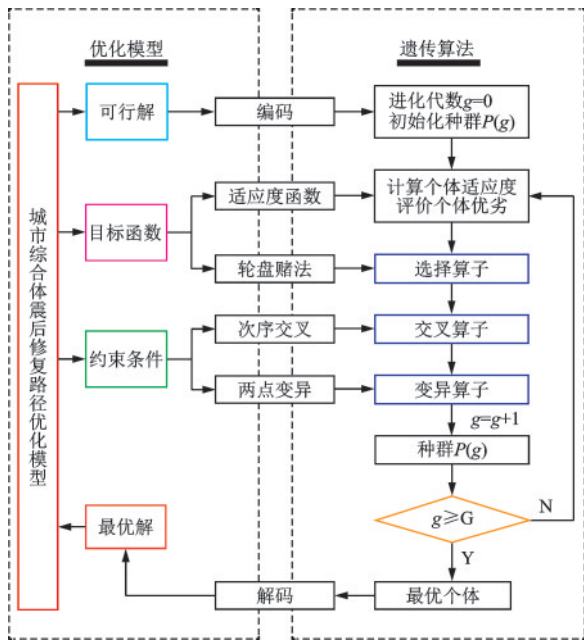


图 5 算法流程示意

Fig.5 Algorithm flow diagram

4 修复路径优化流程

构件损伤状态具有不确定性,一般根据构件易损性^[51]来进行模拟。而建筑震后修复工作量取决于各构件的损伤状态,会直接影响震后修复路径的优化结果。为模拟构件损伤状态所引起震后修复路径优化的不确定性,本文采用蒙特卡洛模拟方法

建立城市综合体震后修复路径优化流程,如图 6 所示。为充分模拟震后修复路径优化的不确定性,应进行不少于 1 000 次的蒙特卡洛模拟^[28]。

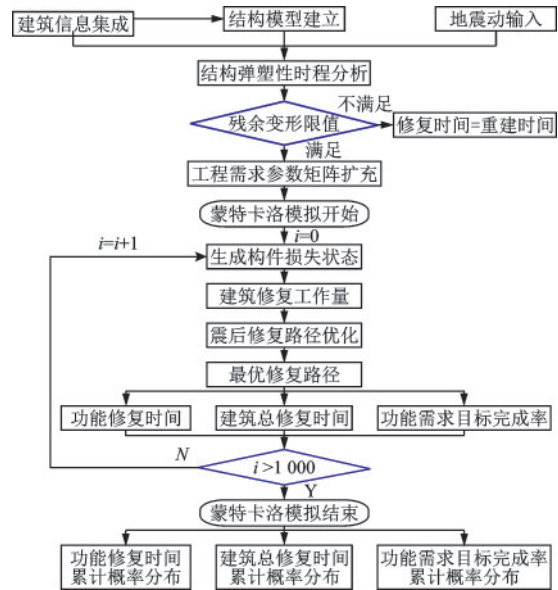


图 6 城市综合体震后修复路径优化流程

Fig.6 Optimization process of post-earthquake repair path of the urban complex

在优化流程中,首先集成建筑有效信息并建立结构模型,根据建筑所在场地情况选取多条地震动经调幅后输入,进行结构弹性时程分析获取多组工程需求参数。通过残余变形限值判断震后建筑是否可修,当不满足限值时,终止震后修复并认定建筑修复时间等于其重建时间。在满足限值的情况下,按照《标准》方法^[28]对获取的工程需求参数进行扩充,每次模拟均对应一组功能需求参数。单次模拟会得到该次震后修复路径优化结果:功能修复时间、建筑总修复时间及功能需求目标完成率。在所有次模拟完成后,将各次模拟结果按升序排列,得到各指标的累计概率分布曲线。根据累计概率分布曲线可明确各指标在对应数值下的超越概率,本文取各指标的中位值(即 50% 超越概率所对应的结果)作为各次模拟结果的代表值。

需要指出的是,《标准》^[28]中取 84% 保证率(即 16% 超越概率)所对应的结果作为代表值。相较而言,16% 超越概率和 50% 超越概率的指标大小,反映的是建筑震后较低可能出现和一般可能出现的情况,前者出现的概率较小,且所得建筑抗震韧性水平要低于后者,评价结果较为保守。本文取一般可能出现的情况(50% 超越概率)所对应的结果作

为代表值用于优化结果分析,所得建筑抗震韧性水平较高。

5 算例分析

为验证所提方法的可行性,将本文方法应用于北方地区某城市综合体的震后修复路径优化,并将优化结果与采用REDi方法所得的结果进行对比。

5.1 工程概况

该城市综合体采用大底盘双塔楼建筑布局^[52],总层数为33层,地下2层,地上31层,结构总高103.8 m。该建筑所在地区位于7度抗震设防区,设计基本地震加速度值为0.1g,设计地震分组为第一组,场地类别为二类场地。建筑内部各功能分布为:地下二层为停车场,地下一层至地上五层为商业用途,塔楼A为办公用途,塔楼B为居住用途。图7所示为城市综合体内部功能区分布情况。表3为城市综合体楼层面积信息。建筑内部电源与水源均设于地下,供水房设于地下二层,地下二层~地上五层采用水压直接供水方式,塔楼A和塔楼B均采用水泵和水箱联合供水方式,通过水井泵送至塔楼顶层水箱,再由水箱向下输水;变配电室设于地下一层,层间通过电气竖井输电,

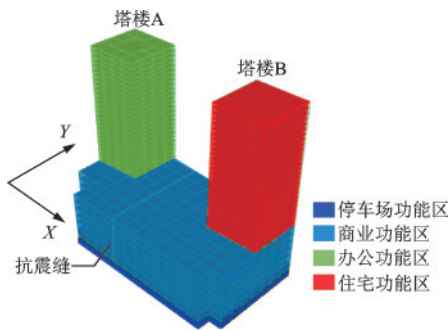


图7 城市综合体功能区分布

Fig.7 Finite element model of urban complex and distribution of functional area

表3 城市综合体楼层面积信息

Table 3 Building area information of urban complex		
功能区	楼层	建筑面积/m ²
停车场功能区	-2	8 467
商业功能区	-1~5	8 467
办公功能区(塔楼A)	6~30	1 292
	31	151
住宅功能区(塔楼B)	6~30	1 292
	31	225

层内通过电缆桥架和输电导线向各用电设备或开关输电。AB塔楼顶层均为设备层。

5.2 结构响应

利用通用有限元软件Abaqus建立算例建筑的三维有限元模型,按建筑场地类别与设计地震分组生成罕遇地震作用下的规范反应谱,并选取符合要求的11条实际地震动,按《建筑抗震设计规范》^[53](GB50011—2010)表5.1.2将输入地震的地面运动峰值加速度调整为0.22g,计算所选地震动的平均反应谱如图8所示。

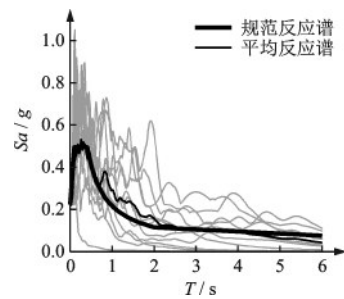


图8 地震动反应谱

Fig.8 Seismic response spectrum

采用单向地震动输入,沿算例结构X向(结构刚度小于Y向)输入地震动,通过时程分析得到X向结构响应参数,用以模拟建筑内部构件的损伤状态。由于构件的损伤状态受摆放位置、连接方式和损伤机制(滑移、倾覆等)等多个因素影响,实际损伤情况较为复杂,目前多通过结构响应参数结合构件易损性分析的方法对构件损伤状态进行评估^[51],本文的研究重点是建筑震后修复路径优化,因此对于方向性敏感构件和非方向性敏感构件统一简化采用各楼层最大结构响应参数进行估计。图9所示

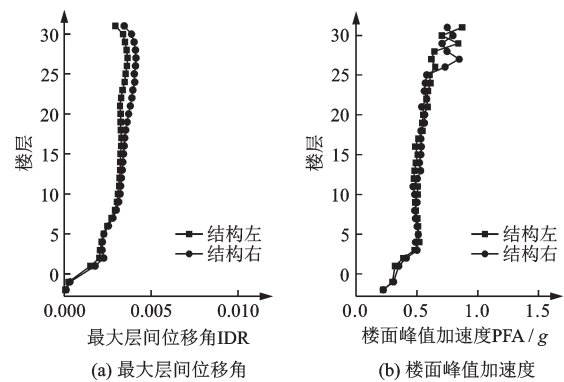


图9 结构响应参数平均值

Fig.9 Average value of structural response parameters

为11条地震动作用下抗震缝两侧各楼层最大结构响应参数的统计平均值。

建筑震后最大层间残余变形平均值为0.0009,满足残余层间变形限值0.005,建筑可修复。本文拟进行1000次蒙特卡洛模拟,来全面模拟震后修复路径优化过程中的不确定性,得到各次震后修复路径优化结果,并按升序排列获取累计概率分布情况与中位值。

5.3 修复路径优化

(1) 功能修复时间

本文以城市综合体内部主导功能为依据来确定综合体内部各功能的相对重要程度^[54]。对于算例建筑,其主导功能为住宅功能与办公功能,非主导功能为商业功能及停车场功能。在非主导功能中,商业功能所占资源较多,且可为城市综合体带来更大的收益,其主导作用相较于停车场功能更强。因此,各功能相对重要程度为:住宅功能、办公功能、商业功能及停车场功能。其中,住宅功能及办公功能作为重要功能,震后应优先修复;商业功能及停车场功能作为相对次要功能,震后应暂缓修复。各功能修复时间累计概率分布如图10所示。

在7度罕遇地震作用下,算例建筑震后的住宅、办公、商业及停车场功能的期望修复时间中位值分别为217天、325天、418天及431天。本文方法所得各功能修复时间中位值分别为110天、210天、325天及336天,均在期望时间之内完成修复,且各功能修复时间随着功能重要程度减弱而逐渐增加,与功能需求所期望的各功能修复时间增加趋势相同;相较之下,REDi方法所得各功能的修复时间中位值分别为441天、448天、245天及133天,其中重要功能如住宅及办公功能均未能在期望时间之内完成修复,而相对次要功能如商业及停车场功能却在期望时间之内完成修复,可见,该方法应用于城市综合体所得的震后修复路径并不合理,使相对次要的功能优先修复,修复前期占用了大量修复资源,导致重要功能的修复时间大幅延长,与功能需求相违背。

(2) 建筑总修复时间

算例建筑震后总修复时间累计概率分布如图11所示。本文方法所得算例建筑震后总修复时间中位值为336天;相较之下,REDi方法所得结果中位值为449天,比本文方法所得时间延长了113天。

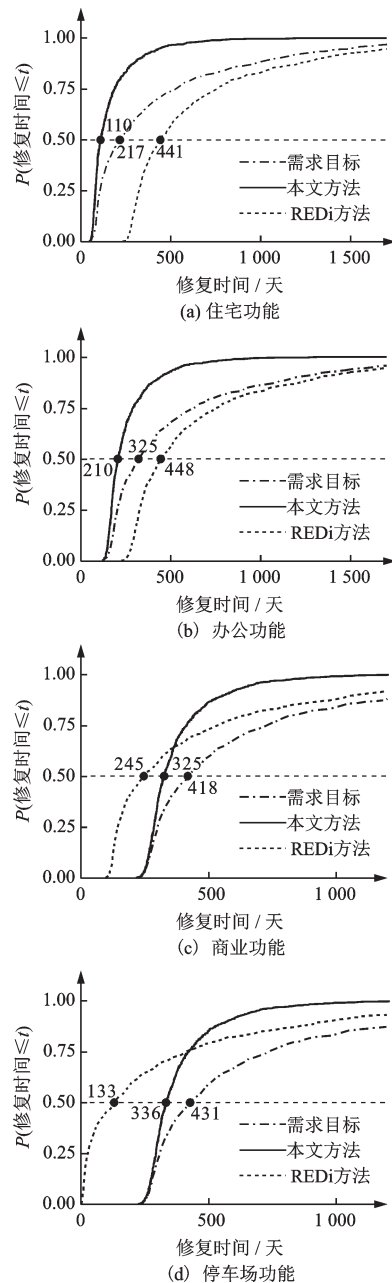


图10 各功能修复时间累计概率分布

Fig.10 Cumulative probability distribution of repair time for each function

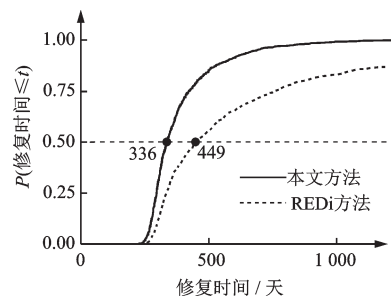


图11 建筑总修复时间累计概率分布

Fig.11 Cumulative probability distribution of building repair time

(3)功能需求目标完成率

算例建筑震后各功能需求目标完成率累计概率分布如图12所示。图13为各功能需求目标完成率中位值对比。由图可见,在7度罕遇地震作用下,本文方法所得算例建筑的住宅、办公、商业及停车场的功能需求目标完成率中位值分别是1.93、1.53、1.29及1.29,均大于1,说明各功能需求目标均高效完成;相较之下,REDi方法所得各对应功能的功能需求目标完成率中位值分别是0.49、0.72、1.70及3.24

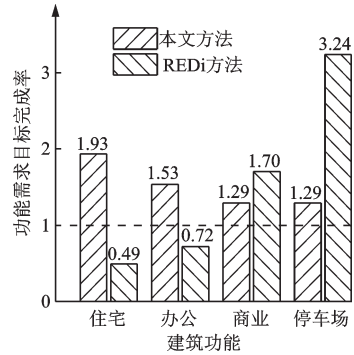


图13 功能需求目标完成率中位值

Fig.13 Median value of target completion rate of functional demands

3.24,其中重要功能如住宅功能与办公功能的功能需求目标完成率均小于1,说明未能完成功能需求目标。

6 结 论

提出一种以期望功能需求为导向的复杂城市综合体结构震后修复路径优化方法,通过算例验证了方法的可行性,得出以下结论:

(1)功能相关性对功能需求的影响不可忽略。功能需求注重功能的使用性,城市综合体各功能区构件间存在复杂的功能相关关系,间接影响建筑功能的正常使用。在震后修复过程中,针对功能修复单元开展的震后修复工作可实现目的性的功能修复,从而满足功能的使用性需求。

(2)修复路径优化可从快速性角度提升城市综合体的抗震韧性。相较于自下而上修复,所提方法可大幅缩短建筑总修复时间,体现了韧性指导思想中的快速性要求。

(3)本文方法可有效缩短综合体震后重要功能的修复时间,高效完成功能需求目标,使重要功能优先、快速恢复并立即投入使用。方法虽围绕城市综合体,实际上对于功能多样、复杂、大体量的建筑均适用。

参考文献:

- [1] 王新.轨道交通综合体对城市功能的催化与整合初探——以厦门轨道交通一号线城市广场站综合体设计为例[D].北京:北京交通大学,2014.
Wang X. The primary research of rail transit complex performance on the catalytic synthesis and integration of

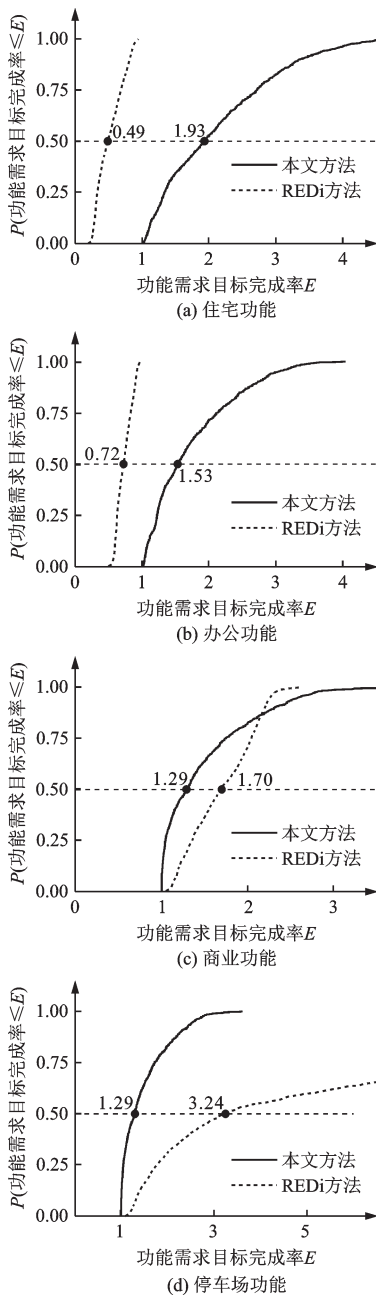


图12 功能需求目标完成率累计概率分布

Fig.12 Cumulative probability distribution of functional demands target completion rate

- urban functions——Rail Transit Line 1 in Xiamen City Square station complex design as an example [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014. (in Chinese)
- [2] 邓可蓉.震后公路恢复重建工程非适应性计价依据分析研究[D].重庆:重庆交通大学,2011.
Deng K R. Research on the non-compatible valuation basis of the highway restoration and reconstruction engineering after the earthquake [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2011. (in Chinese)
- [3] 中华人民共和国国务院.汶川地震灾后恢复重建条例[EB/OL].[2008-06-08]. <http://www.gov.cn>.
- [4] Porter K A, Kiremidjian A S, Legrue J S. Assembly-based vulnerability of buildings and its use in performance evaluation [J]. *Earthquake Spectra*, 2001, 17(2): 291-312.
- [5] Moretti S, Trozzo A, Terzic V, et al. Utilizing base-isolation systems to increase earthquake resiliency of healthcare and school buildings[J]. *Procedia Economics and Finance*, 2014, 18: 969-976.
- [6] Dong Y, Frangopol D M. Performance-based seismic assessment of conventional and base-isolated steel buildings including environmental impact and resilience [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2016, 45(5): 739-756.
- [7] EERI. Securing society against catastrophic earthquake losses: a research and outreach plan in earthquake engineering[R]. Oakland: EERI, 2003.
- [8] 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): 733-752.
- [9] 陆新征,曾翔,许镇,等.建设地震韧性城市所面临的挑战[J].*城市与减灾*,2017(4):29-34.
Lu X Z, Zeng X, Xu Z, et al. Challenges in building earthquake resilient cities[J]. *City and Disaster Reduction*, 2017(4): 29-34. (in Chinese)
- [10] 翟长海,刘文,谢礼立.城市抗震韧性评估研究进展[J].*建筑结构学报*,2018,39(9):1-9.
Zhai C H, Liu W, Xie L L. Progress of research on city seismic resilience evaluation [J]. *Journal of Building Structures*, 2018, 39(9): 1-9. (in Chinese)
- [11] Cimellaro G P. Improving seismic resilience of structural systems through integrated design of smart structures [D]. Buffalo: State University of New York, 2008.
- [12] Cimellaro G P, Reinhorn A M, Bruneau M. Framework for analytical quantification of disaster resilience [J]. *Engineering Structures*, 2010, 32(11): 3639-3649.
- [13] 周颖,吴浩,顾安琪.地震工程:从抗震、减隔震到可恢复性[J].*工程力学*,2019,36(6):1-12.
Zhou Y, Wu H, Gu A Q. Earthquake engineering: from earthquake resistance, energy dissipation, and isolation, to resilience [J]. *Engineering Mechanics*, 2019, 36(6): 1-12. (in Chinese)
- [14] 岳哲萌.减隔震建筑震后性能评估研究[D].哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2021.
Yue Z M. Research on post-earthquake performance assessment of energy dissipation and isolation buildings [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2021. (in Chinese)
- [15] 石晟,杜东升,王曙光,等.高层钢结构不同减震加固方案的抗震韧性评估[J].*土木工程学报*,2020,53(4):71-82.
Shi S, Du D S, Wang S G, et al. Assessment of reinforcement scheme for a high-rise steel structure based on seismic resilience and reinforcement benefit ratio [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2020, 53(4): 71-82. (in Chinese)
- [16] 吕西林,周颖,陈聪.可恢复功能抗震结构新体系研究进展[J].*地震工程与工程振动*,2014,34(4):130-139.
Lyu X L, Zhou Y, Chen C. Research progress on innovative earthquake-resilient structural systems [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2014, 34(4): 130-139. (in Chinese)
- [17] 谢剑,孙文笑,徐福泉,等.钢筋混凝土自复位剪力墙抗震性能试验研究[J].*建筑结构学报*,2019,40(2):108-116.
Xie J, Sun W X, Xu F Q, et al. Experimental study on seismic behavior of self-centering RC shear walls [J]. *Journal of Building Structures*, 2019, 40(2): 108-116. (in Chinese)
- [18] Cimellaro G P, Villa O, Bruneau M. Resilience-based design of natural gas distribution networks [J]. *Journal of Infrastructure Systems*, 2015, 21(1): 05014005.
- [19] Cimellaro G P, Reinhorn A M, Bruneau M. Performance-based metamodel for healthcare facilities [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2011,40(11):1197-1217.
- [20] 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):55-63.
Lu X. Seismic resilience evaluation of a reinforced concrete frame core tube structure [J]. *Journal of Building Structures*, 2021, 42(5): 55-63. (in Chinese)
- [21] Xu Z, Zhang F R, Jin W, et al. A 5D simulation method on post-earthquake repair process of buildings based on BIM [J]. *Earthquake Engineering and Engineering*

- Vibration, 2020, 19(3): 541-560.
- [22] 温傲寒. 考虑不同修复路径的RC框架结构工程韧性评估[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
Wen A H. Structural resilience evaluation of reinforced concrete frame structures considering different repairing path [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018. (in Chinese)
- [23] 贺思维. 灾害作用下单体建筑的功能损失评估方法研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2017.
He S W. Computational evaluation of the functional loss of individual buildings under disasters [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2017. (in Chinese)
- [24] Shang Q X, Wang T, Li J C. A quantitative framework to evaluate the seismic resilience of hospital systems[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2022, 26(7): 3364-3388.
- [25] FEMA P-58-1. Seismic performance assessment of buildings: Volume 1-Methodology [R]. Washington DC: Federal Emergency Management Agency, 2012.
- [26] Almufti I, Willford M. Resilience-based earthquake design (REDi) rating system [EB]. Available from: http://www.warup.com/Publications/REDi_Rating_System.aspx 2013.
- [27] Resiliency Council U. S.. Rating building performance in natural disasters [ER/OL]. [2021-03-13]. <http://us-rc.org/building-rating-system>.
- [28] 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.
- [29] Zhu H, Miao C, Zhuang M. Analysis of office-teaching comprehensive buildings using a modified seismic performance evaluation method [J]. Cmes-Computer Modeling in Engineering & Sciences, 2019, 118(3): 471-491.
- [30] 吴谓. 不同抗震设防RC框架结构医疗建筑抗震韧性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.
Wu W. Study on the seismic resilience of rc medical frame buildings with different seismic fortification levels [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2020. (in Chinese)
- [31] 张娟, 张明媛, 李钢. 地震灾害作用下老旧建筑群韧性评估与提升[J]. 土木工程学报, 2022, 55(1): 41-52.
Zhang J, Zhang M Y, Li G. Seismic resilience evaluation and improvement of old buildings[J]. China Civil Engineering Journal, 2022, 55(1): 41-52. (in Chinese)
- [32] Tipler J F, Deierlein G G, Almufti I. Seismic resilience of tall buildings benchmarking performance and quantifying improvements [C] // 10th U. S. National Conference on Earthquake Engineering, Anchorage, Alaska: [s.n.], 2014.
- [33] Molina Hutt C, Almufti I, Willford M, et al. Seismic loss and downtime assessment of existing tall steel-framed buildings and strategies for increased resilience [J]. Journal of Structural Engineering, 2016, 142(8): C4015005.
- [34] Yu P, Wen W P, Ji D F, et al. A framework to assess the seismic resilience of urban hospitals[J]. Advances in Civil Engineering, 2019(4): 1-11.
- [35] 宁晓晴. 重要建筑地震安全性及韧性评价方法研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2018.
Ning X Q. Research on evaluation methodology of seismic safety and resilience for significant buildings [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2018. (in Chinese)
- [36] 任军宇, 潘鹏, 王涛, 等. GB/T 38591—2020《建筑抗震韧性评价标准》解读[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(1): 48-56.
Ren J Y, Pan P, Wang T, et al. Interpretation of GB/T 38591-2020 'Standard for seismic resilience assessment of buildings' [J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(1): 48-56. (in Chinese)
- [37] 王啸霆, 潘鹏, 王涛, 等. 基于《建筑抗震韧性评价标准》的算例分析[J]. 建筑结构, 2020, 50(16): 57-63.
Wang X T, Pan P, Wang T, et al. Case study based on standard for seismic resilience assessment of buildings [J]. Building Structure, 2020, 50(16): 57-63. (in Chinese)
- [38] 薛荣刚, 黄丽红, 宫海军, 等. 基于建筑抗震韧性评价标准的某教学楼抗震韧性评价分析[J]. 建筑结构, 2021, 51(1): 60-65.
Xue R G, Huang L H, Gong H J, et al. Seismic resilience assessment analysis of a teaching building based on standard for seismic resilience assessment of buildings [J]. Building Structure, 2021, 51(1): 60-65. (in Chinese)
- [39] 肖意, 周颖, 吴浩, 等. GB/T 38591—2020《建筑抗震韧性评价标准》与国际相关标准对比研究[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(7): 194-202.
Xiao Y, Zhou Y, Wu H, et al. Comparative study on GB/T 38591-2020 'Standard for seismic resilience assessment of buildings' and relevant international standards [J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(7): 194-202. (in Chinese)
- [40] 哈腾夫. 城市豪布斯卡(HOPSCA)模式综合体初探[D]. 北京: 北京交通大学, 2010.
Ha T F. The preliminary study on the hopsca mode of

- city complex [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010. (in Chinese)
- [41] 宿同飞. 城市综合体的功能模式和对城市发展的影响研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2014.
Su T F. The Function of the urban complex model and its influence on the development of the city [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2014. (in Chinese)
- [42] 马亮, 王文俊. 徐州地铁一号线铜山路站商业综合体[DB/OL]. [2015]. <http://www.ikuku.cn/>.
- [43] 赵冬安. 基于故障树法的地铁施工安全风险分析[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
Zhao D A. Safety risk analysis of subway construction based on fault tree method[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011. (in Chinese)
- [44] Paul N, Ji S L, Mieler M, et al. Improving estimates of earthquake-induced downtime in individual buildings using the REDi methodology [C]//Proceedings of the 2018 Structures Congress, Texas, USA:[s.n.], 2018. DOI:10.1061/9780784481349.008.
- [45] Holland J H. Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence [M]. USA: The MIT Press, 1992.
- [46] 杨利宏. 基于遗传算法的资源约束型项目调度问题的优化[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
Yang L H. Optimization of resource-constrained project scheduling problem based on the genetic algorithm [D]. Shanghai: Shanghai JiaoTong University, 2007. (in Chinese)
- [47] 王玮强. 基于需求导向的快捷货物列车开行方案优化及选择研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2018.
Wang W Q. Research on optimization and selection of express freight trains operating plan based on the demand-oriented [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2018. (in Chinese)
- [48] 赵卫东, 林双双. 基于模拟遗传退火算法的RCPSP问题研究[J]. 软件导刊, 2018, 17(12): 61-64, 68.
Zhao W D, Lin S S. RCPSP study based on simulated annealing and genetic algorithm [J]. Software Guide, 2018, 17(12): 61-64, 68. (in Chinese)
- [49] 曾敏. 遗传算法求解多目标资源约束下多项目调度问题[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2018.
Zeng M. The Genetic algorithm for solving multi-objective resource constrained multi-project scheduling problem [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2018. (in Chinese)
- [50] 李敏. 资源约束下多项目调度问题遗传算法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
Li M. Research on genetic algorithm for the resource-constrained project scheduling problem [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008. (in Chinese)
- [51] 李钢, 薛璐, 余丁浩, 等. 考虑交通阻滞的区域建筑震后功能恢复能力评估[J]. 土木工程学报, 2021, 54(12): 1-11.
Li G, Xue L, Yu D H, et al. Evaluation of functional recovery ability of regional buildings after earthquake considering traffic block [J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(12): 1-11. (in Chinese)
- [52] 李钢, 张晗, 王睿, 等. 综合体结构地震失效与影响因素分析[J/OL]. 建筑结构学报: 1-19. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2021.0730.
Li G, Zhang H, Wang R, et al. Analysis of seismic failure and influencing factors of complex structure under seismic excitation[J]. Journal of Building Structures: 1-19. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2021.0730. (in Chinese)
- [53] 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [54] 吕倩. 我国城市综合体主导功能定位研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2014.
Lyu Q. The study of dominant function positioning on complex city in China [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2014. (in Chinese)

(本文责编: 赵霞)