

建筑弹性评价体系研究进展

吴静^{1,2}, 常原华³, 阮荣平⁴, 王兴民¹, 朱潜挺^{3*}

1. 中国科学院科技战略咨询研究院, 北京 100190
2. 中国科学院大学公共政策与管理学院, 北京 100049
3. 中国石油大学(北京)工商管理学院, 北京 102249
4. 中国人民大学农业与农村发展学院, 北京 100872

摘要 在当前全球气候变化导致极端天气和自然灾害频发的背景下, 提高建筑弹性, 有效展开建筑弹性评价显得日益迫切。回顾了国际上已有的建筑弹性评价体系和弹性评价方法学研究前沿; 提出了对中国未来构建建筑弹性评价体系的启示: 建筑物理特性是提高建筑弹性的内部根本, 社会经济环境是提高建筑弹性的外部辅助, 国家或政府的相关政策、法规建设是提高建筑弹性的有力保障等。鉴于目前中国尚未形成完整的建筑弹性评价体系, 建议从识别不同区域建筑的多灾种风险、开展弹性评价方法学研究、出台建筑弹性建设的标准与法规、提高全社会安全弹性能力及基于数字化的“互联网+建筑弹性”网络体系的构建等5个方面开展工作。

关键词 建筑弹性; 评价体系; 气候变化; 减灾防灾

建筑不仅是为人类提供栖息的场所, 更是人类社会经济活动的关键枢纽, 例如如政府、医院、学校等建筑在社会经济运行中具有枢纽性作用。要保持城市经济、社会的长期可持续城市化发展, 建立具有弹性的建筑环境以抵御和适应灾害的威胁显得日益重要^[1]。特别是在当前全球气候变化导致极端天气和自然灾害频发的背景下, 提高建筑弹性, 有效展开建筑弹性评价, 对于建筑更好地面对各种自然灾害及全球气候变化起到重要的预防和指导

作用, 也是提高城市弹性的重要组成部分^[2-5]。然而, 目前国内外尚未形成统一的建筑弹性评价体系。中国目前仅住房和城乡建设部公布了《建筑抗震弹性评价标准》, 而对于抗震以外的建筑弹性评价并未形成公开的、统一的评价体系。

2005年在国际减灾会议上首次确认了弹性在灾害议程中的重要性^[6]。在不同的空间尺度和不同的时间维度上, 需要构建不同的弹性体系, 采取不同的弹性措施。目前, 在国内外, 城市或社区层面

收稿日期: 2019-12-04; 修回日期: 2020-03-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(41871219, 41971266), 国家重点研发计划项目(2016YFA0602703)

作者简介: 吴静, 研究员, 研究方向为气候变化政策, 电子信箱: wujing@casisd.cn; 朱潜挺(通信作者), 副教授, 研究方向为气候经济学, 电子信箱: eteng0122@foxmail.com

引用格式: 吴静, 常原华, 阮荣平, 等. 建筑弹性评价体系研究进展[J]. 科技导报, 2020, 38(8): 21-29; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2020.08.003

的脆弱性和弹性评价得到了较为广泛的关注^[7-10]。2015年,美国国家标准与技术研究院(National Institute of Standards and Technology, NIST)从国家层面上提出了衡量社区弹性的一套标准体系^[11]。Kwasinski^[12]提出了社区弹性的概念性框架,包括社区维度及其与社区服务、系统和资源的关系。修春亮等^[13]从规模、密度、形态3个维度对大连市2000—2016年各县市区的城市弹性进行了评估;赵丹等^[14]以北京市为例分析了城市弹性评价体系;廖茂林^[15]对比研究了中韩两国的城市弹性;李亚等^[16]对中国228个地级市的城市弹性进行了实证评估,认为经济发展水平、基础设施建设、组织管理与社会保障是影响城市灾害弹性的主要因素。Govindarajulu^[17]分析了印度城市建筑弹性的财务和体制挑战,认为城市地方机构应该通过改善创收措施投资弹性基础设施建设。

虽然城市或社区层面的弹性已经得到广泛开展,然而相对而言,单体建筑的弹性评价仍相对较少^[18]。合理量化建筑弹性,构建科学的评价体系对城市建设和应对自然灾害至关重要^[19]。因此,本文梳理国际上现有的建筑弹性评价体系,为中国城市建筑弹性的定量评估提供借鉴参考。

1 建筑弹性的概念

弹性是思考自然和社会系统可持续性的首选方法,经济活动只有在他们所依赖的生命支持生态系统有弹性的情况下才是可持续的,加强社会管理建筑弹性的能力对于有效实现可持续发展至关重要^[20-23]。关于“弹性”的定义最早可以追溯到20世纪70年代,美国生态学家Holling用弹性来描述生态系统的稳定性^[24],随后逐渐被引入工程学^[25]、社会经济学^[26]等领域,弹性的内涵不断丰富。

美国国土安全部将弹性定义为适应不断变化的能力,以及准备、承受和迅速从中断中恢复的能力。近十几年来,随着城市人口分布密集度增加、城市社会组织职能复合度提升及经济结构日趋多元化,弹性城市作为缓解城市发展不确定性、实践城市可持续发展的新模式之一,逐渐被学界认可。

2002年,美国生态学年会上提出了“弹性城市”的概念,但至今没有达成广泛的共识。Godschalk^[8]认为城市弹性是人类社区和物质系统的结合体,而物质系统是持续的且通过人类社区的建设而发挥作用;Campanella^[27]更强调人类社区的重要性,认为城市弹性实质上依赖于民众集群。近几年,随着气候变化引起的自然灾害的强度和频率不断增加,使得建筑物不仅要具有可持续性,而且要有弹性,建筑弹性开始得到关注^[28-29]。

Bosher^[30]将建筑弹性定义为“建筑环境的设计、定位、建造、运营和维护的方式最大限度地提高了建造资产、相关支持系统以及建筑资产内的人承受极端自然(或人为)灾害影响的能力”。建筑弹性通常与建筑物的空间灵活性和适应性相关,是一个整体性、多维度、多尺度的概念,是跨越物理的、基础环境的、社会经济的、政治监管的以及组织领域的一种适应能力^[31-32]。与传统注重以程式化管理手段保证建筑稳定性的理念相比,建筑弹性着眼于增强建筑应对不确定性干扰因素的系统适应性,即讨论建筑整体功能受到不确定性扰动冲击时能否保证整体功能的可持续性,是建筑在遭受破坏后在一定时间范围内维护或恢复建筑功能的能力。对评估不同建筑标准的抗灾能力和建筑性能,既不存在通用、简洁的定义,也不存在统一的度量标准,这使得进行此类评估成为一项相当困难的任务^[33]。

Burroughs^[31]认为开展建筑弹性评价的必要性具体而言可以归纳为以下5点:1) 识别和减少建筑弹性的脆弱性;2) 帮助建筑所有者对于建筑破坏事件和情况做出提前规划;3) 帮助所有者对建筑做出明智的决定,并在功能、资产和收入来源方面更好地了解和保护建筑物;4) 获得更全面、更准确和综合的关于区域、社区、城市的建筑弹性;5) 对现有的单体建筑可持续性评价做出补充。

2 目前已有的建筑弹性评价体系比较

2019年,住房和城乡建设部发布了《建筑抗震弹性评价标准》征求意见稿,但对于应对更广泛的自然灾害,特别是气候变化背景下的建筑弹性评价

仍处于发展阶段,未见完整的报道。因此,本研究 展开比较(表1)。
 主要对国际上较为常见的4个建筑弹性评价方法

表1 建筑弹性评价方法对比

评价系统	所有者	一级评价维度
BRRT	澳大利亚保险理事会	自然灾害、建筑特性
B-READY	DNV GL公司	建筑物理体系、社区系统、运营系统
LEED	美国绿色建筑协会	弹性评估和规划、增强的弹性设计、被动生存能力和备用电源
RELIi	MTS, Perkins+Will	设施规划、灾害预防措施、灾害适应与减缓、社区凝聚力和社会经济活力、生产力健康和多样性、能源/水和食物、材料使用、创新应用

建筑弹性评分工具(building resilience rating tool, BRRT)是澳大利亚保险理事会的核心工具。该工具主要针对住宅建筑展开弹性评价。其弹性评价基于2个维度的数据:一是建筑物所处位置的自然灾害,二是建筑物的建筑材料及特性。BRRT允许用户识别地址,然后描述用于该位置的建筑物的设计和材料。所提供的结果确定了该位置对于自然灾害的危险暴露程度,包括洪水、严重的降雨/冰雹、飓风、森林大火和地震。最终给出建筑物暴露于危险中的弹性,其弹性得分为1~5。得分为5表示高弹性,得分为1表示非常低的弹性。图1^[34]

展示了BRRT系统的使用界面。为提高建筑物的弹性,BRRT同时也为用户提供弹性改进措施的建议,通过这些改进措施为受到自然灾害事件损坏风险的建筑物减少损失的成本。

建立弹性、适应性和灾难就绪共同体(building resilient, adaptive and disaster ready communities, B-READY)是由 DNV GL公司开发的弹性评价系统,该工具可对建筑物的弹性进行全面评估。它考虑了建筑的所有方面,可帮助建筑业主发现与气候变化相关的建筑风险,并识别具有实用性、成本高效的策略来降低风险保护财产安全。B-

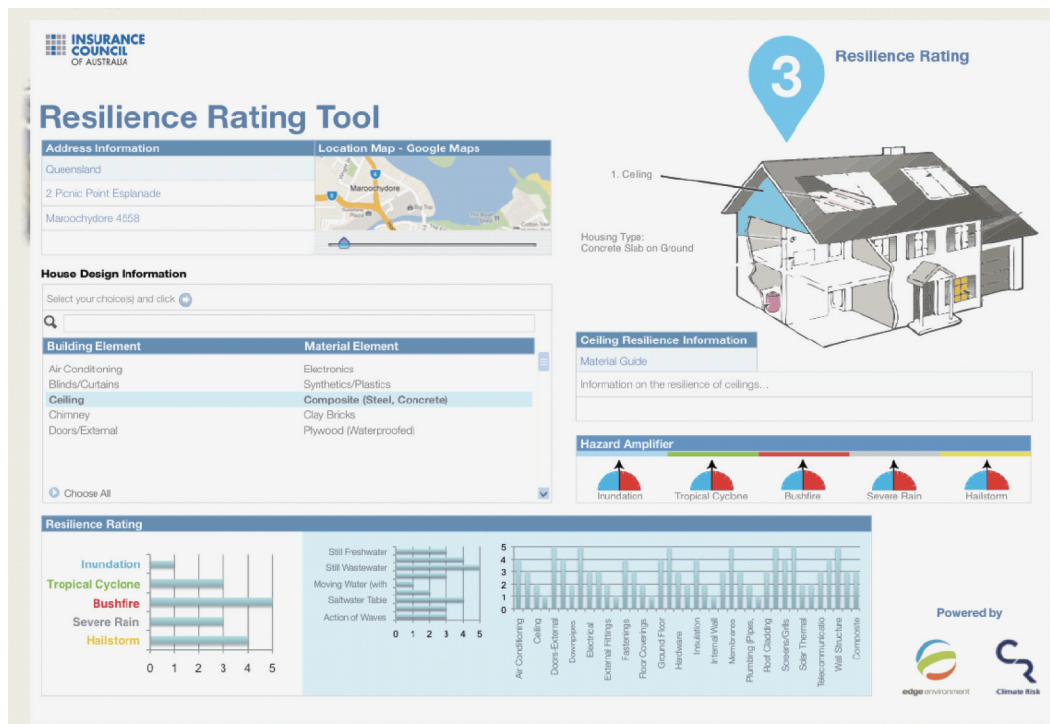


图1 BRRT弹性评估系统

READY 基于 140 多个弹性指标对建筑物展开评价,这些指标可分为 3 个维度,包括建筑系统、运营和社区。建筑系统是建筑物的物理组成部分,包括通信和安全系统、电气系统、消防设备、暖通空调设备和家具及管道系统等。运营指建筑管理部门在紧急情况发生前、紧急情况中和紧急情况发生后如何应对,包括制定应急计划和程序、维护应急物资及制定水电中断计划。社区包括社区外展、教育和社会弹性。相较于 BRRT 弹性评价系统仅针对住宅建筑展开弹性评价,B-READY 弹性评价系统的评价目标更为广泛,涉及公共建筑和商业建筑。因此,B-READY 在弹性评价指标不仅局限于建筑的物理属性,更是将单体建筑物纳入社会网络,考虑社区的风险教育和支援能力水平对建筑弹性的贡献。

BRRT 弹性评价体系 and B-READY 弹性评价体系都是针对建成建筑在特定地理位置中的弹性评价,而表 1 所列的另外 2 个弹性评价体系——能源与环境设计先锋 (Leadership in Energy and Environmental Design, LEED) 和弹性行为清单 (Resilience Action List, RELi) 评价体系则从建筑规划、设计、建造、运营各环节展开弹性评价,具有指导性解决策略的性质。非常类似,都是以积分的形式对建筑弹性进行评级。LEED 是一个绿色建筑评价体系,由美国绿色建筑协会建立并推广。2015 年,LEED 体系设立了针对弹性评价的 3 个试点积分 (Credit), 即 Credit IPpc98, Credit IPpc99, Credit IPpc100。基于这 3 个积分从 3 个方面评估建筑的弹性:1) 弹性评价与规划,旨在分析和响应建筑潜在的灾害;2) 增强弹性设计,旨在建立风险缓建策略;3) 中断时的被动生存能力和备用电源,旨在评估在停电期间保持安全的热条件和应急电源。RELi 是一个类似于 LEED 的建筑评级系统,但更加强调弹性,该系统已通过美国国家标准协会批准。2017 年,美国绿色建筑委员会宣布 2018 年末将 RELi 纳入其认证计划组合。RELi 提供了一个将弹性纳入新建筑设计和规划的综合流程,通过 8 个领域 200 余项指标提出弹性建设行动清单,从建筑规划、设计、运营、维护的各个阶段全面提高建筑在各个层面的弹性。同时,RELi 与现有的其他弹性评

级系统不同的是 RELi 将针对特定危险的弹性设计标准(如龙卷风准备)与一般弹性策略(如能效)相结合,从而全面提高建筑的性能。

3 建筑弹性评价方法学研究前沿

随着全球气候变化引起的全球升温、自然灾害频发等外部环境的恶化,建筑弹性评价的研究仍在持续开展,建筑弹性评价的方法仍需要进一步完善。为此,本研究进一步对 2 个针对弹性评价的研究前沿展开比较,这些研究虽然还未形成付诸于实际应用的评价体系,但可以为将来或中国建筑弹性评价体系的构建提供借鉴和参考。

3.1 基于 Delphi 专家咨询法的城市建筑弹性评价

Cerè 等采用德尔菲 (Delphi) 专家咨询法 (图 2), 分别对 23 位和 21 位不同领域内专家进行两阶段咨询,得到 48 个评价城市建筑面对地质环境危险的弹性指标^[35]。

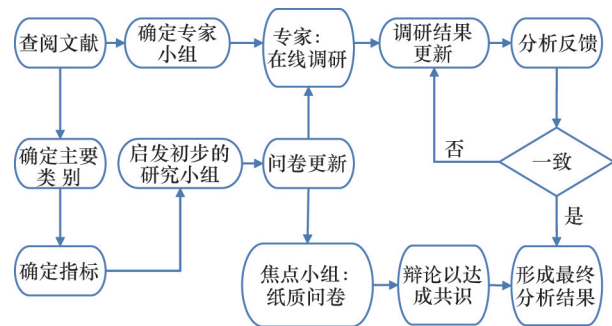


图 2 Delphi 专家咨询法流程

48 个指标归纳为 7 类,包括环境意识、治理与规划、公共服务事业、基础设施、突发事件与营救服务、经济、土地利用与城市形态。

1) 环境意识旨在构建前瞻性的策略以减轻灾害的影响和促进从灾害中的恢复力。要求必须对周围环境有一个深入的认识,包括自然环境和暴露度、脆弱性,可为提高灾害准备提供一个潜在风险的全面概述(表 2)。

2) 治理与规划是指政府机构出台的灾害预防措施的实施情况以及应对灾害的策略,其指标如表 3 所示。

表2 弹性评价的环境意识指标

序号	指标
1	在一次大灾难中灾害的数量和种类
2	灾害的地理范围
3	灾害强度/程度
4	灾害重返的时间阶段
5	地点坐标(例如海拔、城市或乡村、平原或山区)
6	局部放大和环境因素(例如化学污染物的扩散、地震的摇摆)
7	相关的岩土工程意识(例如钻心、勘测、勘察)
8	土壤类型(根据欧洲代码分类)
9	下雪的程度(根据欧洲法规)
10	风和地形的类别(根据欧洲规范)
11	工程改造对土壤性质的潜在影响(例如地雷、森林砍伐、燃料开采)
12	潜在灾害链发生的危险工业区(例如核电厂)
13	Köppen 分类的气候类型(例如大陆、温带、热带)

表3 弹性评价的治理与规划指标

序号	指标
14	危害预防和灾后重建
15	以往灾害治理战略的效果
16	遵循现有监督制度的程度
17	进行监测和数据收集(即建立早期预警系统)

3) 公共服务事业包括能源和水的供给网络以及在发生中断时的管理措施(表4)。

表4 弹性评价的公共服务事业指标

序号	指标
18	能源自给水平(例如备用能源、能源存量)
19	操作系统保护(例如系统减压、断路器)
20	能源供应多样化(例如燃料组合、多种来源、发电类型)
21	功能冗余程度(即功能相似的元素或完全替代彼此的能力)
22	水资源自给水平(例如水库容量、供水网络容量)
23	将使用过的水分为灰流和黑流,以避免交叉污染
24	废水排放能力水平(例如土壤吸收、绿色或灰色基础设施)
25	电信系统的多样性和冗余性(例如有线互联网线路、无线技术、卫星)
26	能源供应网络脆弱性(例如燃气管道、水库)
27	电信和能源供应网络的完整性和连通性

4) 基础设施广泛指物理的和组织的资产,这些资产是系统功能运转和内外元素联接的基础要素(表5)。

表5 弹性评价的基础设施指标

序号	指标
28	关键基础设施(例如水库、水坝)的结构监测系统
29	交通网络(例如火车站、机场)连通性水平
30	公共基础设施的维护制度
31	紧急服务的无障碍交通网络

5) 突发事件与营救服务所包括的指标与城市结构以及规划策略高度相关,同时必须对不符合安全标准的建筑进行调整(表6)。

表6 弹性评价的突发事件与营救服务指标

序号	指标
32	关键基础设施(例如医院)的冗余
33	关键基础设施的空间分布
34	紧急通信、进入预警系统和疏散信息
35	应对计划(例如疏散策略、交通管理)的可行性及更新

6) 经济方面的能力是建筑弹性的关键,这将直接影响建筑物理系统的质量。具体而言,建筑在灾害期间及之后的表现与建筑结构的质量高度相关,较差质量的材料和结构系统往往是建筑弹性缺失的主要原因(表7)。

表7 弹性评价的经济指标

序号	指标
36	提供灾后财务评估
37	提供地方财政支助,以遵守现行条例(例如,为遵守新的建筑条例而采取的结构性干预措施)
38	为危机后的立即应援提供财政支助(例如,政府支持、相关保险、建立应急基金)
39	危机后应援的资源(例如,部分由政府提供,部分由保险承保)
40	GDP对灾害预防和灾后恢复的影响
41	利用非政府组织和外国援助的能力
42	支持当地经济的产业结构和类型

7) 土地利用与城市形态对建筑弹性的构建起到影响作用,但这必须同时考虑城市中人口分布密度、基础设施鲁棒性、建筑结构等要素(表8)。

表8 弹性评价的土地利用与城市形态指标

序号	指标
43	城市结构和发展模式
44	人口密度(即每平方公里人口的集中程度)
45	城市规模的容积率(即建筑用地面积与城区面积之比)
46	基于卫星图像和GIS技术的城市规模建筑覆盖率(即建筑外部足迹和城市区域之和的比率)
47	建筑物的高度剖面(例如数字表面模型技术)
48	主要土地利用类型

3.2 ARMS 澳大利亚建筑弹性测度方案

澳大利亚建筑弹性测度方案(Australian Resilience Measurement Scheme for buildings, ARMS)弹性测度方案由Burrouhgs提出,该测度方案将弹性作为一个综合性的整体概念^[31]。认为建筑弹性涉及建筑的物理、基础设施、环境、经济社会、政治监管和组织6个维度,并基于6个维度,分别构建子维度,并在各子维度下进一步选择具体的指标。每个指标赋予5分制格式的评分(1=非常低/不存在,2=低,3=中等,4=高,5=非常高),最终基于各指标的打分,得到建筑各维度的打分以及建筑的整体弹性评级(表9)。ARMS所提出的建筑弹性测度的6个维度如下所述。

1) 物理特性维度:指建筑物的设计、物理配置、材料和工程的特性。在这个维度上,建筑系统需要包含建筑学的,结构的,生命安全,机械的,电气的,管道的,通信和信息技术、与外部基础设施和服务的连接等方面的指标。

2) 基础设施维度:指与本地或区域基础设施的联系,这些基础设施保障了建筑功能。

3) 环境维度:环境维度的弹性指建筑物对环境现象的适应力。提高环境弹性能力需要量化特定建筑物或场地可能面临的环境过程和干扰,包括这些事件的频率和强度,并确定如何建立适应能力以应对这些事件。

4) 社会经济维度:在经济方面主要指建筑使用和价值体现所在的更广的经济环境。在社会方面一是建筑所处社区的特性;二是考虑建筑的使用率,以及使用者的人身安全和福祉。

表9 ARMS 指标体系

维度	子维度
物理特性	建筑信息技术系统的特点和性能
	建筑设计,建筑材料质量
	物理安全、机械安全和电子安全
	构建系统的历史,包括报告的故障、维护和升级
	建筑结构和结构现状
	建筑机械、电气和管道系统的现状
基础设施	火灾警报和喷头等警报和防损坏系统的性能
	周边交通系统的特点和性能
	电网电力系统的特点和性能
	供水系统的特点和性能
	废水排水及其他基础设施的特点和性能
	通信基础设施的特征和性能
环境	建筑物自身供水供电的程度
	公用事业公司在破坏性事件发生后恢复正常服务的表现
	环境信息的可用性和质量,例如危害地图、灾害预测
	遭受破坏性事件的历史
	通过现有的或预测的洪水提出对建筑物/场地的危害
	通过现有的或预测的海平面上升速度提出对建筑物/场地的危害
社会经济	通过现有的或预测的森林火灾提出对建筑物/场地的危害
	通过现有的或预测的热带风暴提出对建筑物/场地的危害
	通过现有的或预测的自然界的其他灾害提出对建筑物/场地的危害
	场地/建筑物与紧急服务中心的接近程度
	专门为抗灾能力而设置的建筑物特点
	建筑物相对于相邻建筑物的场地和位置
政策监管	当地经济实力和弹性
	部门经济的实力和复原力
	社区特征与周边社区的社会资本
	建筑物用途及占用情况
政策监管	居住者/使用者的生命安全和福祉
	地方政府的特点有利于建立的环境恢复力
	有利于建设环境复原力的当地政府特征
	有利于建设环境复原力的国家政府特征
	就恢复力而言建筑物的规范和标准

续表9 ARMS指标体系

维度	子维度
组织	业务连续性计划的质量
	风险识别、分析、评估和管理
	决策过程的质量与可靠性
	组织内部和外部的沟通
	对政治和监管环境的认识和遵守
	关于组织决策建筑资产的经济考虑

5) 政策监管维度:主要指用于建筑设计、运行阶段的法律框架、立法和政策以及相应的影响。一个关键组成部分是建筑规范及其中包含的标准和准则。建筑规范代表了可接受的安全性和可靠性与经济实用性之间的折衷。这一方面还包括各级政府在制定促进弹性的政策和行动方面的能力和责任。

6) 组织(建筑所有者)维度:组织弹性的关键内容是建筑所有者识别和管理风险以及开发高质量决策流程的能力。

4 对中国构建建筑弹性指标体系的启示和建议

基于对国际上已有建筑弹性评价方法和弹性评价方法学研究前沿回顾,启发我们在构建中国建筑弹性指标体系时需考虑如下3个关键维度。

1) 建筑物理特性是提高建筑弹性的内部根本。所谓物理特性是指建筑物的设计、物理配置、材料和工程方面的参数特点。BRRT、B-READY、LEED等方法首先都重点考究了建筑物物理特性对自然灾害的承受能力。

2) 社会经济环境是提高建筑弹性的外部辅助。建筑弹性评价不仅是对建筑本身的物理结构弹性的评价,更重要的是将建筑融入在其所在的社会经济环境中,将社会发展、经济发展、基础设施、社区组织、建筑管理等维度的指标纳入到建筑弹性评价的指标体系中。经济环境构成了建筑物价值和使用的背景。社会环境包括两个方面:一是建筑所处社区的弹性预案水平;二是社区基础设施保障

水平。B-READY弹性评价体系和RELi弹性评价体系分别将社区弹性、社会经济活力、建筑周边基础设施等指标纳入了建筑弹性的评价中。

3) 国家或政府的相关政策、法规建设是提高建筑弹性的有力保障。建筑弹性的构建融合于建筑规划、设计、建造、使用、维护的各个环节,要全面综合地贯彻弹性指标就要求国家出台相应的建筑标准、政策、法规,保障建筑弹性的构建。这一方面在既有弹性评价方法中尚未得到重视,但在建筑弹性评价体系的方法学研究中已被广泛关注。

鉴于目前中国在针对建筑的多灾种弹性评价领域仍鲜见报道,为了进一步完善中国建筑面对多灾种的弹性建设,提高建筑弹性水平,保障全社会生命财产安全,未来中国构建建筑弹性评价体系可从以下5个方面展开工作。

1) 识别不同区域建筑的多灾种风险。以中国现已建成的自然灾害数据库为支撑,识别中国不同区域建筑面临的风险类别和影响程度,特别是气候变化影响下未来的灾害暴露度,从而认清各区域面对各种灾害可能导致的对建筑的破坏方式和破坏程度。

2) 开展弹性评价方法学研究。开展多学科交叉的建筑弹性评价体系方法学研究,综合运用计算机技术、遥感技术、经济学、管理学、土木工程等多学科知识,以促进中国建筑弹性评价的科学发展,搭建可量化的、面向多灾种的建筑弹性评级体系。

3) 出台建筑弹性建设的标准与法规。联合住房和城乡建设部、国家标准化管理委员会等多个部门,出台指导建筑全生命周期弹性建设的国家标准与法规,从建筑规划、设计、建造、使用、维护、管理等多个维度提出建筑弹性标准,将建筑弹性建设与建筑生命周期的各个环节紧密结合。

4) 提高全社会安全弹性能力。建筑弹性水平的提高离不开全社会安全弹性的支撑,需要将建筑作为社会网络中的一个节点,从个体、社区、城市、国家多个层面开展安全弹性教育和预案演练,构建完善的建筑弹性支撑网络。打通单体建筑与周边基础设施、社区服务和资源体系的连接。

5) 构建基于数字化的“互联网+建筑弹性”网

络体系。借助近年来蓬勃发展的数字化大潮,通过物联网技术、大数据分析,以数字化形式打通建筑管理基础信息数据与社会公共服务、基础设施数据的互联互通,构建“互联网+建筑弹性”网络体系,实现实体建筑与虚拟建筑的“数字双胞胎”,达到弹性目标下的社会资源调配最优化。

参考文献(References)

- [1] Jacob K H. Hazards and the built environment: Attaining built-in resilience[J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2011, 7(9): 729-731.
- [2] Pravin S N K. Review on climate change and its effects on construction industry[J]. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 2017, 4(11): 1179-1183.
- [3] Zhai Z J, Helman J M. Implications of climate changes to building energy and design[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2019(44): 511-519.
- [4] Wang L, Liu X, Brown H. Prediction of the impacts of climate change on energy consumption for a medium-size office building with two climate models[J]. *Energy and Buildings*, 2017(157): 218-226.
- [5] Maurizio C, Francesco G, Sonia L, et al. Climate change and the building sector: Modelling and energy implications to an office building in southern Europe[J]. *Energy for Sustainable Development*, 2018, 45: 46-65.
- [6] Cimellaro G, Reinhorn A, Bruneau M. Framework for analytical quantification of disaster resilience[J]. *Engineering Structures*, 2010(32): 3639-3649.
- [7] UN-ISDR. Local governments and disaster risk reduction [EB/OL]. (2010-03-20) [2019-06-13]. https://www.unisdr.org/files/13627_LocalGovernmentsandDisasterRiskReduction.pdf.
- [8] Godschalk D R. Urban hazard mitigation: Creating resilient cities[J]. *Natural Hazards Review*, 2003, 4(3): 136-143.
- [9] Albrito P. Making cities resilient: Increasing resilience to disasters at local level[J]. *Journal of Business Continuity and Emergency Planning*, 2012, 5(4): 291-297.
- [10] Kreimer A, Arnold M, Carlin A. Building safer cities: The future of disaster risk [EB/OL]. (2003-08-30)[2019-6-20]. http://www.preventionweb.net/files/638_8681.pdf.
- [11] Cauffman S A. Community Resilience planning guide for buildings and infrastructure systems[S]. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 2015.
- [12] Kwasinski A, Trainor J, Wolshon B, et al. A Conceptual framework for assessing resilience at the community scale[EB/OL]. (2016-01-20) [2019-05-30]. <https://www.preventionweb.net/go/53366>.
- [13] 修春亮, 魏冶, 王绮, 等. 基于“规模—密度—形态”的大连市城市弹性评估[J]. *地理学报*, 2018, 73(12): 51-64.
- [14] 赵丹, 杨兵, 何永. 城市弹性评价指标体系探讨——以北京市为例[J]. *城市与减灾*, 2019(2): 29-34.
- [15] 廖茂林, 李春霞. 中韩城市弹性评价与比较研究[J]. *城市*, 2019(3): 57-64.
- [16] 李亚, 翟国方. 我国城市灾害弹性评估及其提升策略研究[J]. *规划师*, 2017, 33(8): 5-11.
- [17] Govindarajulu D. Strengthening institutional and financial mechanisms for building urban resilience in India [J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2020, 47: 1-10.
- [18] Malalgoda C, Amaratunga D, Haigh R. Challenges in creating a disaster resilient built environment[J]. *Procedia Economics and Finance*, 2014, 18: 736-744.
- [19] 邵亦文, 徐江. 弹性城市: 基于国际文献综述的概念解析[J]. *国际城市规划*, 2015, 30(2): 48-54.
- [20] Levin S, Barrett S, Aniyar S, et al. Resilience in natural and socioeconomic systems[J]. *Environment and Development Economics*. 1998, 3(2): 221-262.
- [21] Arrow K, Bolin B, Costanza R, et al. Economic growth, carrying capacity, and the environment[J]. *Science*, 1995, 268(5210): 520-521.
- [22] Lebel L, Anderies J, Campbell B, et al. Governance and the capacity to manage resilience in regional social-ecological systems[J]. *Ecology and Society*, 2006, 11(1): 1-22.
- [23] Roostaie S, Nawari N, Kibert C J. Sustainability and resilience: A review of definitions, relationships, and their integration into a combined building assessment framework[J]. *Building and Environment*. 2019, 154: 132-144.
- [24] Holling C S. Resilience and stability of ecological systems[J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1973, 4(4): 1-23.
- [25] Wildavsky A B. Searching for safety[M]. New Brunswick: Oxford Transaction Publisher, 1991.
- [26] Adger W N. Social and ecological resilience: Are they related? [J]. *Progress in Human Geography*, 2000, 24(3):

- 347–364.
- [27] Campanella T J. Urban resilience and the recovery of new Orleans[J]. *Journal of the American Planning Association*, 2006, 72(2): 141–146.
- [28] Lizarralde G, Chmutina K, Boshier L, et al. Sustainability and resilience in the built environment: The challenges of establishing a turquoise agenda in the UK[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2015, 15: 96–10.
- [29] Phillips R, Troup L, Fannon D, Eckelman M J. Do resilient and sustainable design strategies conflict in commercial buildings? A critical analysis of existing resilient building frameworks and their sustainability implications[J]. *Energy Build*, 2017, 146: 295–31.
- [30] Boshier L. Hazards and the built environment: Attaining built-in resilience[M]. London: Taylor and Francis, 2008: 21–37.
- [31] Burroughs S. Development of a tool for assessing commercial building resilience[J]. *Procedia Engineering*, 2017, 180: 1034–1043.
- [32] Cecconi F R, Moretti N, Maltese S, et al. A rating system for building resilience[J]. *Journal of Technology for Architecture and Environment*, 2018, 1: 358–365.
- [33] Ladipo O, Reichard G, McCoy A, et al. Attributes and metrics for comparative quantification of disaster resilience across diverse performance mandates and standards of building[J]. *Journal of Building Engineering*, 2019, 21: 446–454.
- [34] Insurance council of Australia. Insurance council of Australia building resilience rating tool[EB/OL]. (2012–02–28) [2019–7–10]. https://www.greencrossaustralia.org/media/9903422/ica-brt-pres-updated%2028022012-formr_gc.pdf.
- [35] Cerè G, Rezgui Y, Zhao W. Urban-scale framework for assessing the resilience of buildings informed by a delphi expert consultation[J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2019, 36: 1–17.

Review on building resilience evaluation system

WU Jing^{1,2}, CHANG Yuanhua³, RUAN Rongping⁴, WANG Xingmin¹, ZHU Qianting^{3*}

1. Institutes of Science and Development, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China
2. School of Public Policy and Management, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
3. School of Economics and Management, China University of Petroleum, Beijing 102249, China
4. School of Agricultural Economics and Rural Development, Renmin University, Beijing 100872, China

Abstract The global climate change comes with the increased frequency of extreme weathers and natural disasters. It is urgent to improve the building resilience and to develop the building resilience evaluation systems. The existing building resilience evaluation systems and evaluation methodologies are reviewed in this paper, as well as the enlightenment to China's establishment of future building resilience evaluation system. The building of the physical characteristics is the internal foundation to improve the building resilience. The socio-economic capacity is the external assistance to improve the building resilience. National or government policies and regulations are a strong guarantee for improving the building resilience. There is not an official building resilience evaluation system in China yet, therefore, recommendations are proposed as follows. Multiple disaster risks for building in different regions should be identified. The resilience evaluation methodologies should be studied. Codes for building resilience should be introduced. The social safety resilience should be improved. The digital network of "Internet + Building" should be constructed.

Keywords resilience; evaluation system; climate change; disaster reduction and prevention ●



(责任编辑 卫夏雯)