

· 科学论坛 ·

## 城市抗震韧性的研究现状及关键科学问题\*

杨静<sup>1\*\*</sup> 李大鹏<sup>1</sup> 翟长海<sup>2</sup> 周颖<sup>3</sup> 陆新征<sup>4</sup>  
刘威<sup>3</sup> 李钢<sup>5</sup> 赵密<sup>6</sup> 温卫平<sup>2</sup>

(1. 国家自然科学基金委员会 工程与材料科学部, 北京 100085;  
2. 哈尔滨工业大学, 哈尔滨 150090; 3. 同济大学, 上海 200092; 4. 清华大学, 北京 100083;  
5. 大连理工大学, 大连 116024; 6. 北京工业大学, 北京 100124)

**[摘要]** 第204期双清论坛“抗震韧性城市建设的关键前沿基础科学问题”围绕城市抗震韧性的研究现状、发展趋势及面临的挑战进行了深入研讨,与会专家一致认为:建设抗震韧性城市势在必行,提高工程、城市和社会的韧性能力已经成为国际工程界的共识,是国际防震减灾领域的最新前沿。论坛主要从以下4个方面,凝练了城市抗震韧性的关键科学问题以及重点研究内容:(1)韧性城市设计地震动参数及抗震设防;(2)城市单体工程结构的韧性体系与功能恢复;(3)城市工程系统功能恢复及韧性提升;(4)城市抗震韧性评价及设计。通过地震学、土木工程、社会学、管理学等多学科的交叉与融合,城市抗震韧性的研究必将助推中国土木工程由单一基础设施灾害安全迈向综合基础设施集群系统的灾害安全和功能韧性等创新和发展。

**[关键词]** 抗震韧性;抗震韧性新体系;城市工程系统;城市抗震韧性评价

2018年7月27~28日,第204期双清论坛“抗震韧性城市建设的关键前沿基础科学问题”在哈尔滨召开,论坛由国家自然科学基金委员会(以下简称“自然科学基金委”)工程与材料科学部、管理科学部、地球科学部及政策局联合主办,哈尔滨工业大学承办,中国地震局工程力学研究所和广州大学协办,来自哈尔滨工业大学、清华大学、同济大学、美国伊利诺伊大学香槟分校等21个单位的50余位专家学者参加了本次论坛。论坛期间,与会专家围绕“抗震韧性城市建设关键基础科学问题”主题,充分讨论了抗震韧性城市国内外研究现状,分析和初步凝练了城市抗震韧性研究的重大科学问题,提出了今后5~10年的重点研究方向。

### 1 城市抗震韧性研究的挑战和机遇

城市抗震韧性是指采用多种措施来增强城市防震减灾的能力,增强区块、部门和维度间的联接,在遇到突发地震事件时或地震后,城市功能和社会经

济发展不间断或快速恢复。抗震韧性概念的提出为破解城市防灾减灾难题提供了解决思路。建设抗震韧性城市的实质是城市和社会能够承受住大地震的袭击而不会瞬间陷入混乱或受到永久性的损害,是实现我国经济社会可持续发展的重要支撑。城市抗震韧性研究涉及地震学、土木工程、计算机科学、人工智能、遥感技术、社会学、经济学、管理学等多学科的相互交叉和综合运用,其中涉及的诸多关键科学问题尚不明晰,亟待解决。

#### 1.1 城市地震安全严重威胁着我国“新型城镇化”战略的实施

地震,是一种突发性强、破坏性大的自然灾害。我国位于世界两大地震带—环太平洋地震带与欧亚地震带之间,是世界上地震灾害最为严重的国家之一。我国陆地面积仅占全世界陆地总面积的7%,但发生在我国陆地上的地震次数占全世界地震总次数的33%。我国有23个省会城市、三分之二的百万以上人口城市位于6度以上地震设防区,178个

收稿日期:2019-06-04;修回日期:2019-08-12

\* 本文根据第204期“双清论坛”的研讨整理。

\*\* 通信作者,Email:yangjing@nsfc.gov.cn

地级市位于7度以上的高烈度区<sup>[1]</sup>。

改革开放以来,我国城镇化快速发展,截止到2016年末,我国常住人口城镇化率已经达到57.4%<sup>[2]</sup>。随着社会经济发展、城市化进程加快以及我国新型城镇化战略的实施,人口、财富和生产力将以更快的速度向大城市、城市群与经济带集中。大城市与城市群内大型基础设施林立,新老建构物并存,呈现复杂、多样、密集的发展趋势,生命线系统密布城市,人员和社会财富高度集中,地震灾害形态、灾情演化和社会影响将更为复杂,应急救援更为困难。目前,我国城市抵御地震的能力还远不能适应经济社会的发展,大城市一旦遭受强烈地震的袭击,会在瞬间失去原来稳定的状态从而丧失城市功能。灾害脆弱性已经成为现阶段城镇化进程中制约城市可持续发展的核心问题,严重威胁着我国“新型城镇化”战略的实施。

## 1.2 城市抗震韧性研究发展机遇与挑战

新中国成立以来,以《中华人民共和国防震减灾法》和《中华人民共和国突发事件应对法》为代表的防震减灾法律体系不断完善,国家对防震减灾研究的投入不断增长,软硬件设施得到了巨大改善,中国防震减灾事业取得了巨大的进步与成就。我国在地震危险性分析、可恢复性结构新体系及抗震设计理论、生命线系统综合防震减灾以及城市防震减灾能力方面的研究成果为开展城市抗震韧性研究奠定了良好的基础。

近年来,城市抗震韧性研究发展迅速,已成为国内外地震工程领域的研究热点<sup>[3]</sup>。2011年美国国家研究委员会提出了实现“国家韧性”的目标<sup>[4]</sup>,美国旧金山、纽约等城市陆续提出了“抗震韧性城市”的建设目标<sup>[5,6]</sup>,美国国家科学基金(NSF)已于2017年设立系列重大研究计划<sup>[7]</sup>,推动美国工程和社区的韧性研究;日本也于2014年陆续推动“国土强韧化”计划<sup>[8]</sup>。2015年在日本仙台举行的第三次联合国减灾大会上通过的《2015—2030仙台减灾框架》指出:提高韧性是未来15年联合国的四个优先领域之一<sup>[9]</sup>。2017年,中国地震局更是将“韧性城乡”研究列为“国家地震科技创新工程”四大计划之一<sup>[10]</sup>。

我国具有世界上无与伦比的宏大规模工程背景与现实需求,这是进行城市抗震韧性研究的巨大实践优势,但也意味着重大关键技术问题的凝练和研究在世界范围内没有可参照的模式,我国的城市抗震韧性研究也面临诸多挑战。城市是一个复杂

的系统,影响城市抗震韧性的因素众多,既包括城市内的大量单体建筑,又包括医疗、交通、供水、供电等城市工程系统,还包括城市的经济发展水平、地震预警能力、居民地震教育水平、应急预案完备程度、灾后紧急救助能力等非工程类因素。如何将单一基础设施灾害安全转向综合基础设施集群系统的灾害安全和功能韧性是城市抗震韧性研究的巨大挑战。

## 2 城市抗震韧性研究现状与研究成果

### 2.1 韧性城市设计地震动参数及抗震设防

确定抗震韧性城市的设计地震动,涉及的问题包括城市复杂场地和工程环境强地震动场及其时空分布规律、韧性城市工程的地震动输入方法及控制性地震动参数、以及城市工程抗震韧性设防标准及设防目标。

几十年来,地震动的研究大多基于观测数据的统计分析,全球发表过各地区上百个经验性衰减关系<sup>[11]</sup>,一定程度上揭示了地震动的衰减规律、局部场地效应、震级影响等。由于许多巨型、大型城市常常处于复杂场地中,城市抗震韧性的研究需要构建相应复杂场地的地震动场。强地震动场的建立涉及震源机制、地震波在复杂介质中的传播、局部场地条件影响三方面的一系列基本问题。由于复杂场地强震动记录的不足,科学家只能通过数值模拟方法来模拟地震波的传播、局部场地效应等,并基于此来建立复杂场地的强地震动场。然而目前相关研究主要集中于弹性复杂场地的地震动场的建立,非线性范围的研究则一直进展有限,主要受限于复杂场地特性探测数据的匮乏以及超大规模数值模拟所需的计算机容量和计算效率。

城市大量建构物的存在极大地改变了原有自由场地条件下的地震动特征,基于自由场地记录统计得到的规律是否适用于城市工程还不得而知。城市工程环境下强震动特征的研究主要基于数值模拟和强震观测记录进行。数值模拟方面<sup>[12]</sup>,将城市场地与各种建构物作为一个载体,通过数值方法研究地震动的传播、自由场地的地震反应以及城市建构物存在情况下场地的地震反应,从而获得工程环境对城市大尺度场地地震动场的影响规律,目前研究主要集中于弹性场地条件,真实的非线性场地的研究是未来的研究趋势。基于强震观测记录进行统计分析方面的研究<sup>[13]</sup>,主要是通过大型建构物及其附近自由场地安装地震动台站,分析比较自由场地记录与大型建构物监测数据的差异,研究

并揭示大型建构筑物存在对地震动场的影响,这方面研究更适用于探究工程环境对局部场地效应的影响。同样,受限于大型建构筑物强震记录的匮乏,目前相关研究亦主要集中于弹性范围。

合理的地震动输入方法及控制性地震动参数是城市建构筑物抗震设计的基石。对于建筑结构,最常用的地震动输入方法为单点单向水平输入,为了研究双向甚至三向地震动的影响,则需要单点双向或者单点三向输入;对于大跨工程(空间结构、桥梁),则需要多点输入来考虑行波效应;地下工程的地震动输入方法比地上结构要复杂的多,不仅需要确定合适的地下土层来考虑地下工程—土层相互作用并兼顾计算量,还需要确定模型边界条件和场地反应。目前关于地下地震动特征的研究还很不成熟,地下工程及周围土层模型边界处的地震动输入时程确定一直是影响地下工程地震反应数值模拟结果准确性的最主要因素。

城市工程控制性地震动参数的研究可追溯到上世纪五六十年代,科学家提出了地震动反应谱<sup>[14]</sup>并将其作为代表地震作用的工具,此后全世界所有抗震规范迅速采用加速度反应谱作为设计谱,该方法实际上将加速度作为建构筑物的控制性地震动参数,这一现状一直持续到上世纪九十年代基于性态抗震设计理论<sup>[15]</sup>的提出。基于性态抗震设计理论更加侧重于结构本身的损伤,直接催生了基于位移或基于能量等抗震设计方法的研究。随着城市工程的不断大型化、密集化,各种动力特性迥异的建构筑物共存于相对狭小的城市空间,地震动控制性参数的研究中考虑不同建构筑物动力特性以及相互影响是下一步研究的重点。城市韧性工程更加侧重于地震作用之后保证建构筑物的功能能够正常使用或者快速恢复,确定地震动控制性参数时考虑建构筑物的功能也是需要重点关注的问题。

设防标准和设防目标的确定对于城市工程抗震设计至关重要,相关研究伴随了地震工程近80年的发展历程。我国现行建筑结构抗震设计规范<sup>[16]</sup>中规定了三个设防水准,从小到大分别对应于多遇地震、基本地震和罕遇地震,相应的设防目标分别为不坏、可修和不倒,其他工程抗震设计规范亦基于工程重要性和灾害后果,提出了不同的设防水准和设防目标。现有的设防水准和设防目标主要以控制地震人员伤亡为主要目标,并没有考虑地震经济损失、功能丧失程度、恢复时间等对于城市抗震韧性水平至关重要的指标。我国最新的地震动参数区划图<sup>[17]</sup>

在现有三个设防水准的基础上增加了极罕遇地震这一设防水准,但相应的设防目标还没有相关规定,目前直接以城市功能恢复为设防目标的研究在国内外还是空白。抗震韧性城市的建设旨在实现城市系统性的抗震韧性,而不是追求不同工程的一致抗震韧性,这表明不同的城市工程可以依据其重要性赋予其不同的设防标准和设防目标,相应的研究需要从城市系统的角度出发考虑不同工程对城市功能的影响程度。因此,城市工程抗震韧性设防标准及设防目标的确定需要以城市系统功能为目标,并考虑不同工程对城市系统功能的影响程度。

## 2.2 城市单体工程结构的韧性体系与功能恢复

1995年阪神地震发现建筑虽满足“大震不倒”抗震设防目标,但震后修复费用高昂,此后基于性态抗震设计得到迅速发展<sup>[18]</sup>。基于性态抗震设计思想根据建筑用途、重要性及设防水准制定性能目标,继而进行抗震设计,使结构在未来可能发生的地震下具有预期的性态和安全度,从而将震害损失控制在预期范围。然而2011年日本“3·11”地震和新西兰基督城地震后,人们发现城市遭受严重地震破坏后重建难度大、时间长,对社会产生重大影响,因此抗震韧性问题开始得到关注。与基于性态抗震设计思想不同,抗震韧性需要在满足结构性态要求基础上,提高其震后恢复能力,以便尽快恢复正常使用。因此抗震韧性设计不仅需考虑地震时的结构性态,更需考虑其震后恢复性。截止到目前,城市抗震韧性结构主要是可恢复功能结构<sup>[19, 20]</sup>,即震后不需修复或稍加修复即可恢复使用功能的结构,包括自复位结构、摇摆结构、可更换构件结构等。可恢复功能结构从材料、构件、节点、系统组成等方面入手,以实现震后可恢复性为目标,将材料非线性转化为几何非线性,高效整合体系弹性部件与弹塑性部件,利用集中耗能减震、可修复、可更换等技术实现结构损伤可控。此类结构易于建造维护,全寿命成本效益高,是发展城市抗震韧性结构的有效途径。

抗震韧性要求结构具备功能恢复能力,为此应明确功能恢复机理。以往单体结构抗震韧性的研究多集中于功能评估等理论研究,对具体结构灾变过程及韧性恢复机理的研究还不够充分。为缩短功能恢复时间,需增强结构鲁棒性和冗余度,提高其韧性可靠度。单体结构主要通过滞回变形和阻尼耗散地震能量,传统结构主要依赖前者,由此导致震后难以修复。结构振动控制可对抗震韧性起到较好的控制效果,不仅保证结构地震反应性能,且极大减少其损

伤破坏。振动控制主要有主动、半主动及被动控制三种方式。被动控制在结构局部安装离散耗能件,根据结构类型和特点选择合理控制方案,控制元件易修复、易更换,是提升结构韧性的有效手段。主动和半主动控制通过接收反馈信号,能较好地适应不断变化的加载条件,通过控制元件弥补因构件失效导致的破坏,较好地调节结构损伤状态,缩短恢复时间,提高韧性能力。此外,健康监测技术对结构性能恢复的有效性和可靠性具有重要意义,通过识别结构损伤状态,量化其恢复过程,进而建立结构韧性恢复评价方法。

结构抗震韧性评定是韧性城市理论的重要组成部分,其难点在于建立合适的韧性指标和计算方法,早期结构抗震性能评定理论无法反映其功能韧性<sup>[21]</sup>。2012年,FEMA提出新一代建筑抗震性能评估方法 FEMA P-58<sup>[22]</sup>,是城市工程结构抗震韧性评定理论的重要进展。2013年,Arup公司提出 REDi 体系<sup>[23]</sup>,建立了建筑韧性评级系统。2015年,美国可恢复功能理事会(USRC)成立<sup>[24]</sup>,旨在推动工程结构韧性评级的普及和实现韧性城市建设。目前,国家标准《建筑抗震韧性评价标准》<sup>[25]</sup>也通过专家审查,将于2019年起实施。该标准将国际先进的韧性评定方法与我国国情结合,采用星级制对建筑进行韧性评级。结构抗震韧性评定可有效提升既有和新建工程的功能恢复性,科学评估从传统加固到减震加固等各类技术的效应和经济性,有力促进新型可恢复功能结构的推广使用。

实现城市工程结构抗震韧性是实现城市抗震韧性的基础,对提升结构应对不确定地震风险的响应能力、适应能力和恢复能力至关重要。城市工程结构种类多样,形式复杂,在抗震韧性研究方面尚处于起步阶段,当前研究主要集中在建筑结构上,对桥梁结构、地下结构以及生命线工程等城市基础设施工程系统的抗震韧性研究还不够充分,对结构抗震韧性新体系的设计、韧性行为机理的分析以及韧性评定与性能提升上有待进一步深入研究。

### 2.3 城市工程系统功能恢复及韧性提升

城市工程系统包括电力、交通、供水、供燃气、排水和通讯等城市基础设施系统<sup>[26]</sup>。这些系统维系着城市的社会和经济功能,是构建抗震韧性城市的中中之重。地震灾害下,这些系统不仅应该具有良好的抗震能力,还应该具有出现破坏后保持功能、快速恢复的能力,这样才能保证抗震韧性城市目标的实现。针对这一目标,工程系统抗震防灾研究理念

正在由单一的抗震安全向综合考虑地震功能损失和功能恢复的抗震韧性思想转变,由单个系统的韧性评价向考虑多系统相互作用的耦联系统韧性设计理论转变。

城市工程系统以网络的形式分布在城市广大区域,地震作用下关注的要点不是系统中的各个结构,而是网络层次系统功能,包括:电力网络的供电能力,供水管网的供水能力等。从工程系统功能出发来进行工程系统抗震韧性评价,是城市抗震韧性研究的目标所在,也是抗震韧性城市建设的必然需求。

基于网络和系统功能思想进行工程系统的抗震韧性评价是国际上研究的热点和前沿。由于问题的复杂性,网络连通性评价方法成为目前工程系统抗震韧性评价的主要思路,也即通过评价地震后工程系统源汇节点对的通达性进行系统抗震韧性评价<sup>[27, 28]</sup>。韧性指标包括系统节点的连通可靠度、节点中间中心性(Betweenness centrality)、源汇节点对间独立通路数等。该方法从数学中的图论出发,不涉及系统的功能,可以评价所有的工程系统,但这一方法建立的指标多为静态指标,不能反映工程系统地震破坏和恢复的动态过程。同时,该方法没有考虑系统的实际物理背景,不能反映地震下工程系统真实的功能损失和恢复情况。近年来,基于功能失效思想进行工程系统抗震韧性的评估已经成为国内外学者的共识。如:利用交通流分析评价交通网络的抗震韧性<sup>[29]</sup>,利用水力分析评价供水管网的抗震韧性<sup>[30, 31]</sup>等等,该方法描述了地震下系统功能初始损失到逐渐恢复的全过程,能真实地反映地震下工程系统的状况。但目前运用这一方法存在着两个主要难题:(1)如何建立地震下系统破坏与功能损失之间的关系。目前仅仅只有供水、交通和电力系统能建立破坏与功能损失的关系,从而初步实现了基于功能的抗震韧性评价,燃气、排水和通讯系统还缺乏相应的评价方法;(2)如何确定工程系统各个单元的恢复次序。工程系统中部分单元具有较高的重要度,首先恢复这样的单元将会使得系统的功能得到较快的提升。目前,考虑震后物资、人力和资金等条件,建立恢复次序优化模型,采用遗传算法来进行求解是解决这一问题的主要手段,已经应用的工程系统对象包括供电和交通系统<sup>[32]</sup>。

不同工程系统之间往往是相互耦合的,存在着相互作用和相互影响,这种耦合作用会导致系统抗震韧性的降低。例如:地震后电力系统的破坏导致供水系统泵站断电无法工作,从而导致供水系统无

法供水,丧失供水功能。地震后电力系统破坏导致通讯系统无法工作,而通讯系统无法工作又导致电力系统破坏信息无法及时上报,导致电力系统恢复缓慢。考虑这种耦合作用的多系统抗震韧性评价问题称为耦联系统抗震韧性评价。由于问题的复杂性,耦联系统的抗震韧性评价问题刚刚起步,基本只考虑两个系统耦联的抗震韧性评估问题,而且只考虑电力系统对其他系统的影响<sup>[32, 33]</sup>。例如:考虑电力系统对供水系统泵站影响来进行耦联系统的抗震韧性评估;考虑电力系统对燃气系统门站、调压站等影响来进行抗震韧性评估等等。这些研究均发现考虑耦合作用后,系统的抗震韧性有着不同程度的降低。对于三个及三个以上系统之间的相互影响,相关的研究涉及很少,只是针对地震次生火灾考虑了消防、交通、供水和通讯四个工程系统的相互影响,并进一步考虑了不同系统的恢复对地震次生火灾的影响情况<sup>[34]</sup>。为了准确评价耦联系统抗震韧性,系统间耦合作用和功能影响的准确合理建模是问题的关键点和难点,也是今后研究的方向。

工程系统抗震韧性的最终目标是实现基于韧性的工程系统设计,也即通过优化设计,建造地震损失小、适应能力强、恢复时间短的城市工程系统。由于工程系统规模大、结构种类多样、设计参数繁多,考虑所有因素来实现工程系统的抗震韧性设计是不现实的,也是不必要的。根据工程系统的特点,对工程系统的关键参数和主要组成单元进行设计成为国内外研究学者的共识。目前,由于工程系统的抗震韧性评估理论尚未完全成熟,在此基础上的工程系统的抗震韧性优化设计工作刚刚起步。已有的工作基本上是在进行系统抗震韧性评估的同时,根据经验增加部分单元来改进工程系统的拓扑结构或者对部分关键单元进行改造来提高系统的抗震韧性,尚没有形成完整的优化设计思路和方法。已有研究者基于抗震可靠性进行了供水、供燃气管网的优化设计和优化改造<sup>[35, 36]</sup>。虽然这一工作主要从抵抗的角度出发,没有考虑系统恢复过程,尚不能完全称为工程系统韧性设计,但是这一工作为工程系统的抗震韧性设计提供了基本思路,也即:以抗震韧性指标为约束,系统拓扑结构、单元参数和恢复过程为优化参数,采用遗传算法等组合优化算法来进行工程系统的抗震韧性优化设计。

#### 2.4 城市抗震韧性评价及设计

城市抗震韧性不仅与各类基础设施和工程系统有关,还与灾前、灾时、灾后城市的感知能力、管理能

力和组织动员能力等密切相关。现阶段城市信息和灾害资料获取难以满足要求,对城市地震成灾全过程认识不足,对灾时和灾后恢复过程研究较少,缺乏基于“系统的系统”视角下韧性城市的评价和设计理论。

结构健康监测数据可以显著降低抗震韧性城市评价的不确定性、提高评价结果的准确性。结构健康监测技术是在基础设施上布设各类传感器与相关系统,实时感知、识别、诊断、评估结构的损伤状态及其演化规律。然而实际监测往往聚焦于单体结构,且由于设备造价高昂,设备布设严重不足,难以满足韧性城市评价需求。因此,有必要结合移动群智感知和遥感等传感技术发展城市空天地立体监测技术,并采用深度学习及计算机视觉等技术实现抗震韧性城市评价中的多源、多尺度、大数据融合处理,进而建立韧性态势感知体系。

灾变情景全过程计算机模拟是研究城市地震灾害的主要手段。目前弹塑性时程分析方法由于其良好的适应性与精度,已成为城市建筑群抗震韧性与生命线系统地震灾变模拟的主要方法。城市抗震韧性全过程建模需要建立从断层到城市系统的抗震韧性演化全过程模型,并发展基于全流程的建模理论。NSF NHERI SimCenter 研发的 Regional Earthquake Workflow App 将基于物理模型的地震动模拟,基于城市抗震弹塑性分析的建筑震害模拟,基于 FEMA P-58 的建筑韧性评价相结合,实现了旧金山湾区 180 万建筑物在 Hayward 7 级地震情境下的震害模拟和韧性评价。现阶段存在问题是:灾害单一环节研究多,全过程建模研究不足;实体系统研究多,社会、信息系统研究不足;地震直接灾害研究多,次生灾害特别是城市新型次生灾害(如坠物灾害、疏散踩踏灾害等)研究不足;灾害可视化场景研究不足。因此,有必要发展城市抗震韧性全过程建模及灾害链效应模拟,并充分考虑系统的关联与不确定性。

地震应急与恢复策略是地震发生后最重要、紧迫和直接的减灾与功能恢复方式。地震应急方面,日本和我国先后正式明确了地震应急内容<sup>[37, 38]</sup>,且我国已建立了抗震救灾指标体系<sup>[39]</sup>。当前地震应急的研究重点在于应急评估、搜救与物资分配、避难场所选择等相关问题。灾后恢复方面,美国发布了《国家灾害恢复框架》<sup>[4]</sup>,明确了短期、中期和长期三个阶段的主要任务。目前地震应急与恢复策略缺乏高效的应急评估和搜救手段、可靠的城市震后恢复

模型、不同恢复策略设计与实施的统筹方法、及对城市灾害适应能力建设的重视。今后应针对上述问题深入探讨,构建城市系统震时应急和震后恢复综合策略。

城市抗震韧性评价体系是构建现代抗震韧性城市设计理论与方法的重要基础。城市是一个复杂的“系统的系统”,城市灾害韧性不仅涉及建筑、基础设施等工程系统,还涉及经济、社会、信息等系统,城市功能很难通过单一指标表征。美国先后提出了城市灾害韧性定量评价方法<sup>[40]</sup>与城市灾害韧性评价体系(CARRI)<sup>[41]</sup>,并被广泛借鉴<sup>[42, 43]</sup>。但上述体系一般不区分灾种。而就地震灾害而言,美国旧金山城市规划与研究协会(SPUR)<sup>[5]</sup>提出了一套城市抗震韧性评价体系,明确了旧金山地区的抗震韧性评价与设计目标,并被美国国家标准与技术协会(NIST)借鉴<sup>[44, 45]</sup>。目前,现有针对地震的城市韧性评价体系的相关研究较少,依赖先验性指标,系统性和可靠性不足。为此有必要从城市系统的实体、信息、社会三度空间出发构建系统的城市抗震韧性评价体系,进而发展现代抗震韧性城市的设计理论与方法。

### 3 城市抗震韧性的重点研究内容

#### 3.1 韧性城市设计地震动参数及抗震设防

城市复杂场地和工程环境强地震动场及其时空分布规律;城市韧性工程的地震动输入方法及控制性地震动参数;城市工程抗震韧性设防标准及设防目标。

#### 3.2 城市工程结构的韧性体系与功能恢复

结构抗震韧性新体系及设计理论;结构复杂性行为机理及分析方法;城市工程结构抗震韧性评定与功能恢复。

#### 3.3 城市工程系统功能恢复及韧性提升

城市工程系统建模、易损性分析和功能恢复机理;城市工程系统相互作用机理和抗震韧性耦联分析方法;城市工程系统抗震韧性提升及优化设计。

#### 3.4 抗震韧性城市评价和设计

城市立体监测、数据融合和韧性态势感知体系;城市抗震韧性全过程建模及灾害链效应;抗震韧性城市的灾害应急对策与恢复策略;城市抗震韧性的评价体系与设计。

### 4 城市抗震韧性的关键科学问题

#### 4.1 城市工程地震危险性 & 强震动场时空分布

城市复杂场地强地震动的传播、衰减和空间分

布特征及其与震源机制和场地条件的关系;城市大型工程与场地的耦合机制;面向复杂城市工程的强地震动破坏特性参数及分布规律。

#### 4.2 城市单体及工程系统建模及抗震韧性行为

城市工程系统的建模及其不确定性;城市单体及工程系统的功能失效与恢复机理;城市工程系统间依存性机理及抗震韧性耦联机制;城市工程与社会、经济要素多元融合。

### 5 结论与展望

我国大城市与城市群内人员和社会财富高度密集,基础设施林立,城市地震安全问题严重威胁着我国“新型城镇化”战略的实施,灾害脆弱性已经成为城镇化进程中制约城市可持续发展的核心问题,实现工程设施、城市乃至整个社会的韧性已经成为国内外地震工程界的共识。现有的城市抗震韧性及防灾减灾理论、方法还不能支撑建设抗震韧性城市的客观需求,迫切需要解决城市抗震韧性背后的核心科学问题。城市抗震韧性的研究涉及地震学、土木工程、人工智能、遥感技术、社会学、经济学、管理学等多个学科,是一项极具挑战性的课题。城市抗震韧性的研究必将助推我国土木工程由单一基础设施灾害安全迈向综合基础设施集群系统的灾害安全和功能韧性等创新和发展。

### 参 考 文 献

- [1] 徐伟,王静爱,史培军,等. 中国城市地震灾害危险度评价. 自然灾害学报, 2004, 13(1):9—15.
- [2] 国家统计局. 城镇化水平持续提高,城市综合实力显著增强——党的十八大以来经济社会发展成就系列之二十五. [http://www.stats.gov.cn/zjtj/zftx/18fzj/201802/t20180212\\_1583133.html](http://www.stats.gov.cn/zjtj/zftx/18fzj/201802/t20180212_1583133.html). (2017-07-28) [2019-07-31].
- [3] 翟长海,刘文,谢礼立. 城市抗震韧性评估研究进展. 建筑结构学报, 2018, 39(9): 1—9.
- [4] FEMA. National disaster recovery framework. Federal Emergency Management Agency, Washington DC, 2011.
- [5] SPUR. The resilient city: defining what San Francisco needs from its seismic mitigation policies. San Francisco Bay Area Planning and Urban Research Association, San Francisco, 2009.
- [6] NYCEDC. A stronger, more resilient New York. New York City Economic Development Corporation, New York, 2013.
- [7] NSF. Proposal and award policies and procedures guide. National Science Foundation, Washington DC, 2011.
- [8] 内閣官房. 国土強靱化アクションプラン2014(平成26年6月3日国土強靱化推進本部決定). 内閣官房, 東京, 2014.
- [9] 联合国世界减少灾害风险大会. 2015—2030年仙台减少灾害风险框架. 联合国世界减少灾害风险大会, 仙台, 2015.

- [10] 陆新征, 曾翔, 许镇, 等. 建设地震韧性城市所面临的挑战. 城市与减灾, 2017(4): 33—38.
- [11] Douglas J, Boore DM. Peak ground accelerations from large ( $M \geq 7.2$ ) shallow crustal earthquakes; a comparison with predictions from eight recent ground-motion models. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2018, 16(1): 1—21.
- [12] Schwan L, Boutin C, Padrón LA, et al. Site-city interaction: theoretical, numerical and experimental crossed-analysis. *Geophysical Journal International*, 2016, 205(2): 1006—1031.
- [13] Petrovic B, Parolai S. Joint deconvolution of building and downhole strong - motion recordings; Evidence for the seismic wavefield being radiated back into the shallow geological layers. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2016, 106(4): 1720—1732.
- [14] Housner GW. Behavior of structures during earthquakes. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 1959, 85(4): 109—130.
- [15] 谢礼立, 马玉宏, 翟长海. 基于性态的抗震设防与设计地震动. 北京: 科学出版社, 2009.
- [16] GB 50011-2010, 建筑抗震设计规范. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [17] GB 18306-2015, 中国地震动参数区划图. 中国地震局, 2015.
- [18] FEMA 445 Next-generation performance-based seismic design guidelines: program plan for new and existing buildings. Washington DC. USA: Federal Emergency Management Agency, 2007.
- [19] 周颖, 吕西林. 摇摆结构及自复位结构研究综述. *建筑结构学报*, 2011, 32(9): 1—10.
- [20] 吕西林, 周颖, 陈聪. 可恢复功能抗震结构新体系研究进展. *地震工程与工程振动*, 2014, 34(4): 130—139.
- [21] ASCE/SEI 41 Seismic rehabilitation of existing buildings. American Society of Civil Engineers, Reston, 2007.
- [22] FEMA P-58 Next-Generation Methodology for Seismic Performance Assessment of Buildings. Federal Emergency Management Agency. Washington DC, 2012.
- [23] Almufti I, Willford MR. REDi Resilience-based earthquake design rating system, Arup, 2013.
- [24] Mayes RL, Reis E. US Resiliency Council (USRC): Rating Building Performance in Earthquakes and Other Natural Hazards. *Proceedings of 2015 SEAOC Convention*, October 2015.
- [25] 建筑抗震韧性评价标准. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019. (印制中)
- [26] 李杰. 生命线工程抗震: 基础理论与应用. 北京: 科学出版社, 2005.
- [27] Li J, He J. A recursive decomposition algorithm for network seismic reliability evaluation. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2002, 31(8): 1525—1539.
- [28] Ip WH, Wang DW. Resilience and friability of transportation networks: evaluation, analysis and optimization. *IEEE Systems Journal*, 2011, 5: 189—198.
- [29] Zhang WL, Wang NY, Nicholson C. Resilience-based post-disaster recovery strategies for road-bridge networks. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2017, 13(11): 1404—1413.
- [30] Liu W, Zhao YG, Li J. Seismic functional reliability analysis of water distribution networks. *Structure and infrastructure engineering*, 2015, 11(3): 363—375.
- [31] 宋朝阳, 刘威. 基于水力分析的城市供水管网抗震可恢复性研究, 第十届全国地震工程学术会议, 上海, 2018.
- [32] Ouyang M, Wang ZH. Resilience assessment of interdependent infrastructure systems: With a focus on joint restoration modeling and analysis. *Reliability Engineering & System Safety*, 2015, 141(S1): 74—82.
- [33] Ouyang M. Review on modeling and simulation of interdependent critical infrastructure systems. *Reliability Engineering & System Safety*, 2014, 121: 43—60.
- [34] 李杰. 城市地震灾场控制理论研究——抗震韧性城市的早期探索. 上海: 同济大学出版社, 2018.
- [35] Li J, Liu W, Bao YF. Genetic algorithm for seismic topology optimization of lifeline network systems. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2008, 37(11): 1295—1312.
- [36] Liu W, Xu L, Li J. Seismic design of water distribution networks using auto-generation techniques. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2017, 13(7): 831—843.
- [37] 彭岩, 李学良. 日本《地震防灾对策特别措施法》. *国际地震动态*, 1996(12): 28—32.
- [38] 中国地震局. 国家破坏性地震应急响应预案. <http://www.cea.gov.cn/publish/dizhenj/465/527/759/20120216093821078692066/index.html>. (2011-12-08).
- [39] 杨天青, 帅向华. 国家地震应急指挥技术系统建设中的关键技术及应用. *震灾防御技术*, 2010, 5(2): 208—214.
- [40] Bruneau M, Chang SE, Eguchi RT, et al. A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities. *Earthquake Spectra*, 2003, 19(4): 733—752.
- [41] Cutter SL, Barnes L, Berry M, et al. A place-based model for understanding community resilience to natural disasters. *Global Environmental Change*, 2008, 18(4): 598—606.
- [42] 100 RESILIENT CITIES. 2018. <http://www.100resilientcities.org/resources/>.
- [43] Disaster resilience scorecard for cities, detailed level assessment. UNISDR, 2017.
- [44] Community resilience planning guide for buildings and infrastructure systems; Volume I. NIST, 2016.
- [45] Community resilience planning guide for buildings and infrastructure systems; Volume II. NIST, 2016.

## Key scientific issues in the urban earthquake resilience

Yang Jing<sup>1</sup> Li Dapeng<sup>1</sup> Zhai Changhai<sup>2</sup> Zhou Ying<sup>3</sup> Lu Xinzheng<sup>4</sup>  
Liu Wei<sup>3</sup> Li Gang<sup>5</sup> Zhao Mi<sup>6</sup> Wen Weiping<sup>2</sup>

(1. *Department of Engineering and Material Sciences, National Natural Science Foundation of China, Beijing 100085;*  
2. *Harbin Institute of Technology, Harbin 150090;* 3. *Tongji university, Shanghai 200092;* 4. *Tsinghua University, Beijing 100083;*  
5. *Dalian University of Technology, Dalian 116024;* 6. *Beijing University of Technology, Beijing 100124*)

**Abstract** The 204th Shuangqing Forum sponsored by National Natural Science Foundation of China entitled “Key Frontier Basic Science Issues of Earthquake Resilient City Construction” conducted in-depth discussions around the research status, development trend and challenges of urban earthquake resilience. All the experts attending the meeting agreed that it is imperative to build earthquake resilient cities. Improving the resilience of engineering, cities and society has become the consensus of the international engineering community, and it is the latest frontier in the international field of earthquake prevention and disaster reduction. Key scientific issues in the urban earthquake resilience were summarized in the following four aspects: (1) design ground motion parameters and seismic fortification for resilient cities; (2) resilient system and functional recovery of urban single engineering structure; (3) functional recovery and resilience promotion of urban engineering systems; (4) evaluation and design of earthquake resilient cities. Through the intersection and integration of multiple disciplines, such as seismology, civil engineering, sociology, management and so on, the study of urban earthquake resilience will certainly promote the innovation and development of China’s civil engineering from single infrastructure disaster safety to comprehensive infrastructure cluster system disaster safety and functional resilience.

**Key words** earthquake resilience; new system for earthquake resilience; urban engineering system; urban earthquake resilience evaluation