

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20221102007

# 城市地下基础设施韧性发展现状及策略\*

廖英泽<sup>1</sup>, 王国盛<sup>1</sup>, 李喆<sup>2</sup>, 江媛<sup>2</sup>

(1. 北京工业大学岩土与地下工程研究所, 北京 100124; 2. 中国工程院战略咨询中心, 北京 100088)

**摘要:**韧性已成为我国新时代城市的新理念,提升城市地下基础设施韧性水平对韧性城市建设具有重要意义。本文明确了韧性的内涵,总结了国内外单体建筑和基础设施系统两个尺度的韧性评价方法。结合我国城市地下基础设施的发展现状,分析其在韧性理念下存在的短板,提出既有和新建城市地下基础设施韧性发展实施路径。对于既有城市地下基础设施,首要任务是评价其功能,建立韧性评价方法;对于新建城市地下基础设施,关键是融合韧性理念的规划和设计,明确恢复路径。最后提出城市地下基础设施韧性发展策略,从设施、管理、文化、经济和智能5个维度提出相应建议:提升既有和新建城市地下基础设施韧性;健全城市地下基础设施应急管理机制,加强主动管理理念;提升全社会人民韧性意识,提高自救互救能力;优化地下空间布局,设立城市地下基础设施应急专项资金;推进城市地下基础设施智能化,辅助管理决策。

**关键词:**城市地下基础设施;韧性城市;抗力韧性;恢复韧性

**中图分类号:** TU28 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)06-1183-08

## Development Status and Strategy of Urban Underground Infrastructure Resilience

LIAO Yingze<sup>1</sup>, WANG Guosheng<sup>1</sup>, LI Zhe<sup>2</sup>, JIANG Yuan<sup>2</sup>

(1. Institute of Geotechnical and Underground Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;  
2. Center for Strategic Studies, Chinese Academy of Engineering, Beijing 100088, China)

**Abstract:** Resilience has become the new vision for cities in the new era of China. It is of vital significance for resilient cities to improve the resilience of urban underground infrastructure. This paper describes the concept of resilience and examines the resilience evaluation methods at home and abroad from the two scales of single buildings and infrastructure systems. Based on the development status of urban underground infrastructure in China, this paper puts forward the implementation path of the resilience development of existing and new urban underground infrastructure by analyzing its shortcomings. For the existing urban underground infrastructure, the primary task is to evaluate its function and establish a resilience evaluation method. For new urban underground infrastructure, the key is to integrate the concept of resilience in planning and design, and clarify the recovery path. Finally, the strategy of urban underground infrastructure resilience development is put forward from the five dimensions

\* 收稿日期:2022-11-02;修回日期:2022-11-19

基金项目:国家重点研发计划课题(2022YFC3800901)、国家自然科学基金项目(52025084)资助

作者简介:廖英泽(1999—),女,硕士研究生。主要从事地下空间结构韧性评价方面的研究。

E-mail: liaoyingze@emails.bjut.edu.cn

通讯简介:江媛(1982—),女,副研究员,硕士。主要从事岩土与城市地下工程方面的研究。E-mail: jiangyuan@cae.cn

of facility, management, culture, economy and intelligence. The suggestions are as follows: improving the resilience of existing and new urban underground infrastructure, improving the emergency management mechanism of urban underground infrastructure and strengthening the concept of active management, raising people's awareness of resilience and enhancing the ability self-rescue and mutual rescue, optimizing the layout of urban underground space and establishing special emergency funds for urban underground infrastructure, and promoting the intellectualization of assist management and decision-making.

**Keywords:** urban underground infrastructure; resilient city; resistance; recovery

## 引言

近年来,自然灾害和人为灾害频发,城市安全风险不断增加。为提升城市应对灾害事件的能力,“韧性城市”应运而生。2002年,倡导地区可持续发展国际理事会(ICLEI)在联合国可持续发展全球峰会首次提出“韧性城市”的概念。“韧性城市”指城市能够凭自身的能力抵御灾害,减轻灾害损失,并合理地调配资源以从灾害中快速恢复。此后,联合国相继通过《兵库行动框架》(2005~2015年)和《仙台框架》(2015~2030年),为各国和地区提供减灾决策的指导性文件,有效地减少了灾害带来的损失。全球高度重视韧性城市建设,不少发达国家和地区制定了韧性提升计划,这些计划为韧性城市建设提供了宝贵经验。在2013年,洛克菲勒基金会启动“全球100韧性城市”项目,为韧性示范城市提供经济支持,四川德阳、湖北黄石、浙江义乌、浙江海盐4座城市先后入选。北京、上海分别在《北京城市总体规划(2016~2035年)》、《上海市城市总体规划(2017~2035年)》中提出要构建韧性城市。《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》中提出将韧性城市建设作为远景目标,加快提升城市品质。

韧性城市的建设涉及经济社会的全要素多领域,而城市地下基础设施涵盖交通、市政、公共服务等,包含城市的生命线系统,是韧性城市建设的重要组成部分。城市地下空间是地下基础设施的载体,存在于城市规划区地面以下的空间,其开发利用正如火如荼。据《2022中国城市地下空间发展蓝皮书》统计,截至2020年底,国内城市地下空间已累计建设24亿 $m^2$ 。“十三五”期间,中国累计新增地下空间建筑面积达到13.3亿 $m^2$ ,新增地下空间人均建筑面积为1.47 $m^2$ ,地下空间开发利用规模和速度处

在世界领先地位<sup>[1]</sup>。

以韧性为目标的新发展理念对城市地下基础设施的发展提出了更高的要求,即补齐自身短板、保障城市安全、构建韧性城市。城市地下基础设施具有隐蔽性、易灾性的特点,一旦发生重大安全事故,容易造成严重的经济损失和人员伤亡。“十三五”期间,涉及城市地下基础设施的灾害事故总量呈逐步上升的趋势<sup>[1]</sup>。据不完全统计,2020年全国城市地下空间发生237起灾害事故,主要为施工事故、地质灾害、火灾、水灾等。2021年太原、北京、广州和郑州接连受到极端暴雨的影响,地铁隧道淹水倒灌、道路坍塌、污水管线漏水断裂等安全事故屡见不鲜。党的十九届五中全会明确提出将保障地下安全提升到保障人民生命财产安全的高度。住房和城乡建设部印发的《关于加强城市地下市政基础设施建设的指导意见》中强调城市地下市政基础设施亟需提升自身的韧性,提高城市安全水平和综合承载能力。因此,为实现韧性城市的目标,迫切需要探索城市地下基础设施的韧性发展。本文探索了韧性的内涵,总结了国内外城市单体建筑和基础设施系统的韧性评价方法。通过分析了我国城市地下基础设施存在的短板,提出了城市地下基础设施韧性的发展路径,并给出了相应的策略和建议。

## 1 韧性的内涵和评价方法

### 1.1 韧性的内涵

韧性(resilience)起源于拉丁文resilio,意为跳回(jump back)<sup>[2]</sup>。在牛津词典中,韧性意为人或物抵抗某种冲击、侮辱或干扰并从中恢复的能力。韧性是一个广义的概念,不同学科对韧性的理解不尽相同。在心理学中,心理韧性是人的一种能力、品质,指人能承受高水平的外界不利变化,且尽可能少表现出不良行为<sup>[3]</sup>。在材料学中,韧性是指材料在塑

性变形前,弹性变形过程中吸收能量的能力<sup>[4]</sup>。C. S. Holling<sup>[5]</sup>在1973年首次将韧性引入生态学,认为韧性的生态系统能吸收变量并保持稳定。随后, C. R. Allen等<sup>[6]</sup>将韧性延申至社会生态学中,认为韧性是指系统经受干扰并可以维持其功能的能力,并提出了适应性循环理论,用以描述城市系统的动态机制。不难看出,韧性是个体或系统的一种内在能力,能抵抗外部冲击、压力等不利作用,并在有限的时间内快速恢复。韧性可分为抗力韧性和恢复韧性,即抵抗和恢复两部分能力<sup>[7]</sup>。抗力韧性指功能完备的个体或系统在外力作用下功能发生下降,直至某一水平,但仍保证关键功能不丧失的能力。恢复韧性指功能发生下降后的个体或系统通过恢复措施使得功能恢复至原有水平甚至更高水平的能力。

对于城市地下基础设施,抗力韧性与设施的尺度有关。城市地下基础设施是一个复杂的系统,除了单个的地下建筑,地下单体建筑之间、地上地下单体建筑之间相互作用明显,尺度大小影响抗力韧性发展的手段。抗力韧性在单体建筑中表现为抵抗外部作用,并保持关键功能的能力。对于由单体建筑构成的网络化基础设施系统,抗力韧性还应体现鲁棒性,即单体建筑的破坏在系统中的传递特性。单体建筑或基础设施系统在扰动作用下功能降低后,恢复韧性是指自我恢复和人为恢复特性,主要关注恢复时间和恢复成本。

## 1.2 城市单体建筑和基础设施系统的韧性评价方法

基于韧性的内涵,如何评价韧性成为韧性发展的关键问题。国内外学者将韧性运用到城市中,认为韧性是城市的固有属性,并对城市的韧性评价方法进行了实践探索。现有的评价方法主要从城市单体建筑和基础设施系统两个尺度进行评价。

从单体建筑尺度,由于现有的建筑设计规范几乎没有考虑韧性,FEMA(Federal Emergency Management Agency)颁布的FEMA-P58<sup>[8]</sup>以建筑恢复费用、恢复时间和人员伤亡作为性能指标,给出了相对应的概率分布,并对单体建筑进行韧性评估,但缺少对建筑韧性等级的划分。奥雅纳公司提出了REDi(resilience-based earthquake design initiative for the next generation of buildings)评级体系,为现有的建筑提供一个韧性评价框架<sup>[9]</sup>。该框架对FEMA-P58中恢复时间的计算进行了改进,考虑了

恢复过程中的停工时间,并将建筑韧性分为白金、黄金和白银三个等级<sup>[9]</sup>。《建筑抗震韧性评价标准》<sup>[10]</sup>(GB/T 38591—2020)提供了一个科学适用的评价方法和评价工具,对建筑的恢复费用、恢复时间和人员伤亡三个方面分别进行评级,以这三者中最低的评级作为整个建筑的韧性等级。

从基础设施系统尺度,M. Bruneau等<sup>[11]</sup>提出了一个概念框架以定义社区的抗震韧性,将韧性的特征归结于4R,即鲁棒性(Robustness)、快速性(Rapidity)、智慧性(Resourcefulness)和冗余性(Redundancy),并将4个特征运用到技术、社会、组织和经济4个维度,以评估社区的韧性。美国洛克菲勒基金会提出韧性城市具有7个主要特征,即灵活性、冗余性、鲁棒性、智慧性、反思性、包容性和综合性。从领导力及策略、健康及福祉、经济及社会、基础设施及环境4个维度为主要研究框架,细化12个目标。《安全韧性城市评价指南》<sup>[12]</sup>(GB/T 40947—2021)提出了安全韧性城市的评价指标体系和计算方法,以城市人员安全韧性、城市设施安全韧性和城市管理安全韧性作为评价内容,以识别城市系统的脆弱性,增强城市发展的韧性。

基础设施系统在应对外部作用时具有鲁棒性特征,除了定性和定量地形成韧性评价指标,还需要直观地展示系统在外力作用下的动态过程。加州大学太平洋地震工程研究中心开发的都市多基础设施网络韧性模拟工具(City-scale Multi-infrastructure Network Resilience Simulation Tool, CMNRST)提供了一个仿真框架,以量化城市基础设施系统,尤其是交通系统在地震作用下的韧性<sup>[13]</sup>。SimCenter(Computational Modeling and Simulation Center)是由伯克利团队开发的计算软件,该软件可以针对不同的灾害作用,以分析模拟城市结构、生命线和社区的反应,实现灾害分析、反应分析、建筑环境分析、不确定性量化等功能,为决策者提供相应的决策建议。Sim-CI是一个仿真模拟平台,结合GIS和相关数学算法的开发,考虑外部作用下城市基础设施系统韧性,并动态展示其破坏情况<sup>[14]</sup>。

由此可见,城市单体建筑、基础设施系统的韧性评价方法得到了国内外广泛的重视,并加以实践。然而对于单体建筑的韧性评价方法主要集中在地上建筑,城市地下单体建筑的评价方法还不够完善。由于地下单体建筑与地上单体建筑所处环

境、所受灾害、施工运维等方面存在显著差异,地上单体建筑的韧性评价方法不能直接用于地下单体建筑,需要发展适宜地下单体建筑的韧性评价方法。同时,目前城市地下基础设施系统如轨道交通、市政等已经初步形成网络化结构,未来将朝着多层网络化、深层化、地上地下一体化的方向发展,不容忽视其鲁棒性。因此,除城市地下单体建筑的韧性评价外,还需完善对城市地下基础设施系统的韧性评价。

## 2 韧性理念下城市地下基础设施存在的短板

近年来地下空间频发的灾害事件表明城市地下基础设施的建设、运维和管理仍存在与韧性城市理念不协调的地方。因此,需要从韧性视角识别城市地下基础设施存在的短板,进而提升城市地下基础设施韧性。

### 2.1 设施和环境调查不全面,不确定性因素难以量化

随着地下空间的综合开发和深度的利用,城市地下基础设施比重增加并朝着多元化、复杂化、集约化和深层化发展,充分利用地下空间的同时也加剧了风险隐患。

时间上,城市地下基础设施服役年限日益延长。据初步统计,我国有近10万公里管道发生老化,地下管道建设年限久远、资料缺失<sup>[15]</sup>。近年来管道事故多发频发,很大一部分与年久失修、废弃等因素有关,亦或存在安全隐患等问题。空间上,地下市政管网、轨道交通线路分布纵横交错,紧密关联。例如隧道在运营过程中,个别管片的破损会导致地下水渗漏、市政基础设施管网破裂甚至大量土体涌入隧道,引发隧道变形,地表塌陷。地面堆载、基坑开挖等作用也会使得地下管线沉降和破损,存在巨大的安全隐患,对公共安全造成威胁。

城市地下基础设施的规划设计、建设、运维始终与地质环境有着密不可分的关系。规划设计和建设阶段必须完成所在地区的自然地理、工程地质、水文条件、周边环境等调查工作,运维阶段须识别存在的风险,但地下空间灾害事件的发生具有突发性,往往难以及时、准确地识别出致灾因子。而工程地质和水文条件的变化具有不确定性,对既有城市地下基础设施的影响难以量化。

### 2.2 管理韧性和文化韧性不足,应急响应滞后

面对复杂的灾害,管理韧性和文化韧性是公共安全中不可或缺的一部分。城市地下基础设施涉及部门多、管理关联性大,缺乏统筹协调和高效治理是地下空间开发利用面临的困难<sup>[16]</sup>。并且,还存在数据共享不足、统计口径和标准不一致等问题,增加了管理难度。同时,全社会的韧性意识是有效应对灾害事件的基础。近年来,灾害事件的调查报告反映出市民对自然灾害防范意识不高,应急常识不足,缺乏个体韧性,对韧性城市建设参与度不高等问题。各学校、工作单位和社区忽视韧性宣传教育和应急演练,导致灾时社会秩序混乱,延长恢复的时间。

### 2.3 极端天气常态化,应急预案和规范标准不完善

城市地下基础设施是长期的工程,面对的是中长期的气候环境变化。随着自然灾害趋频、趋重,极端天气逐渐成为新常态。各地编制规划的应急预案更关注影响系统正常运行的多发、易发、突发事件,未能充分考虑常态化极端天气情况下的应急方案和响应机制,需要根据实际情况适时修订完善。其次,专项应急预案不仅要针对某一类型或某几种类型的突发事件,更要重视多灾害耦合作用造成的严重后果。

城市地下基础设施主要受洪涝、地震、火灾等自然灾害和人为灾害的影响,而洪涝灾害连续10年成为我国最主要的灾种之一,给城市造成极大压力。自2012年起,“海绵城市”成为应对城市洪涝灾害的城市新理念,即城市能够像海绵一样,在适应环境变化和应对自然灾害等方面具有良好的“弹性”,下雨时吸水、蓄水、渗水、净水,需要时将蓄存的水“释放”并加以利用<sup>[17]</sup>。国家和各城市都相继出台了《关于推进海绵城市建设的指导意见》。郑州市城乡规划局在2018年发布了《郑州市海绵城市专项规划(2017—2030年)》,规划区的防洪标准为200年一遇。然而,2021年7月20日郑州市遭受了千年一遇的特大暴雨,其规划尚未达到实际灾害的强度。事实证明,针对极端天气的韧性防灾规划和应急预案还有待进一步完善。

### 2.4 智能化治理能力低,缺乏动态管理

传统的城市地下基础设施防灾减灾技术大多

依靠人力,许多工程决策基本上依赖于工程经验。随着物联网、大数据、云计算、人工智能技术的蓬勃发展,城市地下基础设施正朝着智能化的方向发展,为城市地下基础设施韧性发展提供技术支持。然而,城市地下基础设施智能化仍存在一定的瓶颈<sup>[18]</sup>。一是城市地下基础设施种类多,应对外部作用的过程复杂,对灾变模型的建立带来一定的困难,可视化过程缓慢,面临精细化、真实感、高效化的挑战。二是我国城市地下基础设施信息化和数字化程度低,缺少长期的历史数据,制约了人工智能技术的应用。三是城市地下基础设施的决策尚且不能完全依赖人工智能,需要建立专家数据库,而不同专家的经验具有主观性,决策结果具有较大的离散性,致使决策难度大、效率低。这些局限性一定程度上制约着城市地下基础设施的韧性发展。

### 3 城市地下基础设施韧性发展实施路径

城市地下基础设施包括既有设施和新建设施,未来发展需要融入韧性的理念。韧性的内涵体现在抗力韧性和恢复韧性两个方面,在单体建筑和基础设施系统各有侧重。因此既有单体建筑、既有基础设施系统和新建单体建筑、新建基础设施系统应形成具有针对性的实施路径。

#### 3.1 既有城市地下基础设施韧性发展实施路径

针对既有城市地下基础设施,韧性发展的首要任务是对其功能进行评价,建立与之对应的韧性评价方法。韧性评价的前提是对城市既有基础设施的状态进行识别,故而需要加快对交通、市政、公共服务、仓储物流等既有基础设施的普查速度,以识别自身的状态和存在的病害隐患。

韧性评价方法包含抗力韧性评价和恢复韧性评价两个方面。对于既有城市地下单体建筑,抗力韧性的评价需要明确外部作用对其功能的破坏机理。但洪涝、地震等自然灾害,周边地质条件、水位条件的变化和地下空间的不断开发等外部作用形式复杂。自然灾害的时空分布规律和输入方法、地层参数和水位变化、近接施工的荷载传递路径、影响范围等问题是破坏机理研究中主要的因素,一定程度上限制了抗力韧性评价的准确性,仍需进一步精细研究。对于既有城市地下基础设施系统,抗力

韧性评价还需结合其建设目标进行鲁棒性分析。利用复杂网络理论和系统论等方法构建系统网络结构,将单体建筑和级联作用视为节点和连线,识别外部作用下节点失效后系统的反应和薄弱环节。

在抗力韧性评价基础上,划分评价等级,对评级低下的既有城市地下基础设施进行韧性提升,制定提升方案,并对提升方案建立恢复韧性的评价方法。恢复韧性评价需要综合考虑更新方案的恢复时间和恢复成本。单体建筑的提升方案包括加固、改建、扩建等,同时需要弱化对周边既有设施的影响。基础设施系统韧性提升的关键是强化薄弱环节的功能,提高系统鲁棒性。

#### 3.2 新建城市地下基础设施韧性发展实施路径

提高新建城市地下基础设施抗力韧性的关键是以韧性为导向的规划设计。对于新建城市地下单体建筑,相关的规划设计方法需要进一步的完善。《建筑结构可靠性设计统一标准》是以概率论为基础、以分项系数表达的极限状态设计方法<sup>[19]</sup>。其中要求结构在施工和使用期间不能超过承载能力极限状态,反映了一定的抗力韧性。但由于这种概率极限设计方法需要以大量的统计数据作为基础,当不具备这一条件时,实际的设计仍以工程经验确定。极端天气作用作为设计中的偶然作用,面临着常态化的趋势,传统的工程经验难以满足结构的韧性发展需要。此外偶然作用常以线性叠加的形式出现,作用系数按照有关标准的规定确定。由于多灾种耦合作用会带来非线性的系统反应,采用线性叠加形式的精度有待考证。同时,城市地下单体建筑所在的地层具有极大的不确定性,而在实际规划设计中,仍采用单一安全系数法和容许应力法,没有合理考虑地层参数、外部作用的不确定性。因此,对于新建城市地下单体建筑的规划和设计中应进一步加强规范标准的精细化程度,综合考虑地层参数的不确定性、多灾种耦合的作用形式等,提高设计方法在韧性理念下的科学性。

对于新建城市地下基础设施系统,需要对地下空间分层化和地上地下一体化进行合理规划,在保证单体建筑功能的同时,提高鲁棒性。对地下各层基础设施系统的可行性方案进行决策时,应强调在最不利外部作用下,单体破坏不使整体系统失效,从而降低灾害在系统内的传播。现有的地上地下一体化建设相关工程案例较少,研究还处在适宜

性评价阶段,一体化规划设计方法还不够成熟<sup>[20]</sup>。在地上地下一体化规划设计中应考虑两个方面:一是地下基础设施失去原有功能时,地上结构能不发生严重破坏;二是当地上或地下空间不再具备防突能力时,人员能快速逃离至地下或地上空间。

新建城市地下基础设施恢复韧性的目标是减少恢复时间和恢复成本。对于新建城市地上单体建筑,提高恢复能力可以采用可更换结构构件、自复位结构等可恢复功能结构,但地下结构受到围岩的约束,自复位结构的效果并不显著,单体建筑的自恢复能力仍有待提升。减少人为恢复的时间和成本的关键是对单体建筑进行监测,及时识别结构的损伤状态,并替换可更换的结构构件。对于新建城市地下基础设施系统,首先需要建立系统的灾变模型,将系统在外力作用下的动态破坏过程可视化,识别薄弱环节和级联效应。然后邀请具有一定工程经验的专家、学者构建恢复路径,确定每一个恢复步骤所需要的时间、资源等,并构建恢复工作甘特图,得到不同恢复路径的总时间和总成本等。最后对总时间、总成本等进行多目标优化,选取最优的恢复路径。

## 4 城市地下基础设施韧性发展策略

韧性已经成为城市未来发展的新理念、新目标,城市地下基础设施是韧性城市建设的重要环节,其韧性发展与工程、社会、经济等工程和非工程因素息息相关。需要从设施、管理、文化、经济、智能5个维度提出韧性发展策略,加强城市地下基础设施应对灾害等外部作用的能力,提升韧性。

### 4.1 设施韧性:提升城市地下基础设施韧性

城市地下基础设施韧性需要提高抗力韧性和恢复韧性。城市地下基础设施韧性评价体系是提高既有设施韧性的基础,需要加快城市地下基础设施韧性评价方法的研究,构建能反映单体建筑和基础设施系统功能目标的定量评价体系,加快全类别城市地下基础设施安全的普查速度。对韧性等级低下、存在安全风险的单体建筑或基础设施系统制定相应的更新方案,提升韧性。

新建城市地下基础设施的韧性提升需要科学合理的规划和高效经济的恢复手段。进一步完善地下结构的设计标准,加快地上地下一体化规划设

计的研究并加以实践,提高科学性和适用性。权属单位和管理部门等共同制定城市地下基础设施的最优恢复路径,减少恢复时间和成本等。

### 4.2 管理韧性:健全城市地下空间应急管理机制,加强主动管理理念

经国内外实践,高效可靠的灾害风险管理是减少损失的重要保障。各地可以提升城市地下基础设施韧性为目标建立多级联动、分工明确的应急管理机制,并形成可操作的城市地下空间应急预案。既要协调地区之间的横向联动,又要实现省、市、县、乡之间纵向的有效传导。管理理念从被动型抵抗向主动适应的韧性理念转变,始终贯穿灾前预测、预警,灾时快速应急,灾后有序恢复的全过程。

### 4.3 文化韧性:提升全社会人民韧性意识,提高自救互救能力

重视个体韧性,加强群众对极端天气的认知。城市地下基础设施权属单位、管理单位等应组织应急培训,并开展长期、定期应急演练。通过各类信息媒介宣传在地下空间的应急知识,在日常生活中渗透风险防范意识,提高公众自救互助的能力。引导公众参与韧性城市的规划、建设和运维,为公众参与社会治理提供平台和载体,推动公众有序参与、有效参与、规范参与,以个体韧性推动城市韧性。

### 4.4 经济韧性:优化城市地下空间布局,设立城市地下基础设施应急专项资金

优化城市地下空间布局是提高经济韧性的有效手段。一方面要根据灾害作出适应性调整,合理规划城市地下基础设施,减轻次生灾害带来的不良后果。另一方面结合韧性需求,提高创新能力,推动城市地下基础设施功能多样化和产业多元化。

设立城市地下基础设施应急专项资金,保障城市生命线系统灾后能快速恢复。除依靠地方政府及时下拨中央财政补助资金外,还可以利用金融保险来筹集应急资金,以缓解重大灾害下政府的财政压力。

### 4.5 智能韧性:推进城市地下基础设施智能化,辅助管理决策

加强城市地下基础设施智能化研究,助力韧性发展。加快城市地下基础设施的灾变模型和可视化机制研究,提高效率和精细化水平。提升日常的运行监测技术,自动采集各类基础设施的安全状态指标,进行故障诊断。利用大数据、云计算等技术

积累、分析各类灾害事故的相关数据,建立灾害事故数据库。运用人工智能技术,对过往的灾害事故和专家经验进行学习,预测故障发生的时间和地点,并模拟决策过程,为决策者提供帮助。

## 5 结 论

韧性是城市地下基础设施的发展趋势和愿景。城市地下基础设施韧性发展,需要从单体建筑和基础设施系统两个尺度综合考虑抗力韧性和恢复韧性。不同于地上建筑,城市地下基础设施位于地下,致灾因子和孕灾环境具有隐蔽性和不确定性,同时受围岩土体的影响,外部作用的响应难以直接获取。尤其是随着地下空间的分层网络化、深层化和地上地下一体化,基础设施系统的鲁棒性更加明显,不仅对既有设施的韧性评价方法存在困难,对新建设施的规划建设也带来一定挑战。同时,城市地下基础设施恢复韧性的研究还存在一定的空白,恢复韧性不仅是被动的工程学思维,社会、公众、科技等力量也不可或缺。城市地下基础设施韧性发展的许多关键科学问题,需要土木工程、计算机科学、管理学、经济学、人工智能等多学科、多领域交叉融合,也对规划设计人员、管理者、决策者以及全社会提出了更高的要求。

### 参考文献:

- [1] 中国工程院战略咨询中心,中国岩石力学与工程学会地下空间分会,中国城市规划学会. 2022中国城市地下空间发展蓝皮书[M].北京:科学出版社,2022.  
Center for Strategic Studies of Chinese Academy of Engineering, Sub-society for Underground Space of CS-RME, China Association of City Planning. 2022 Blue book of urban underground space[M].Beijing: Science Press,2022.
- [2] Cimellaro G P, Reinhorn A M, Bruneau M. Framework for analytical quantification of disaster resilience [J]. *Engineering Structures*, 2010, 32 (11) : 3639-3649.
- [3] 李海垒, 张文新. 心理韧性研究综述[J]. *山东师范大学学报(人文社会科学版)*, 2006(3): 149-152.  
Zhang H L, Zhang W X. Review of research on psychological resilience [J]. *Journal of Shandong Normal University (Humanities and Social Sciences)*, 2006 (3) : 149-152. (in Chinese)
- [4] US Department of Energy. DOE fundamentals handbook: thermodynamics, heat transfer, and fluid flow [M]. United States: DOE-HDBK-1012/2 - 92, 1992.
- [5] Holling C S. Resilience and stability of ecological systems [J]. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 1973(4): 1-23.
- [6] Allen C R, Angeler D G, Garmestani A S, et al. Panarchy: theory and application [J]. *Ecosystems*, 2014, 17 (4): 578-589.
- [7] 路德春, 马超, 杜修力, 等. 城市地下结构抗震韧性研究进展 [J]. *中国科学: 技术科学*, 2022, 52(10): 1469-1483.  
Lu D C, Ma C, Du X L, et al. Earthquake resilience of urban underground structures [J]. *Science in China: Science of Technology*, 2022, 52(10): 1469-1483. (in Chinese)
- [8] FEMA. Seismic performance assessment of buildings volume 1: methodology: FEMA P-58-1 [S]. Washington DC: Federal Emergency Management Agency, 2012.
- [9] Almufti I, Willford M. REDi™ Rating System: Resilience-based earthquake design initiative for the next generation of buildings [R]. London, UK: Arup Group, 2013.
- [10] 建筑抗震韧性评价标准: GB/T38591—2020 [S]. 北京: 中国质检出版社, 2020.
- [11] 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.
- [12] 安全韧性城市评价指南: GB/T40947—2021 [S]. 北京: 中国质检出版社, 2021.
- [13] Soga K, Wu R, Zhao B, et al. City-Scale Multi-Infrastructure Network Resilience Simulation Tool [EB/OL]. [https://apps. peer. berkeley. edu/publications/peer\\_reports/reports\\_2021/2021\\_05\\_Soga\\_final. pdf](https://apps. peer. berkeley. edu/publications/peer_reports/reports_2021/2021_05_Soga_final. pdf), 2021/2022.
- [14] Sim·CI. Sim·CI Simulation platform [EB/OL]. <https://sim-ci.com/>, 2018/2022.
- [15] 财新网. 燃气事故频发“十四五”全国将更新改造10万公里老旧管道 [EB/OL]. [https://www.mem.gov.cn/xw/xwfbh/2022n2y14rxwfbh/mtbd\\_4262/202202/t20220218\\_408091.shtml](https://www.mem.gov.cn/xw/xwfbh/2022n2y14rxwfbh/mtbd_4262/202202/t20220218_408091.shtml), 2022/2022.
- [16] 杨华勇, 江媛, 李喆, 等. 地下空间开发综合治理发展战略研究 [J]. *中国工程科学*, 2021, 23(4): 126-136.  
Yang H Y, Jiang Y, Li Z, et al. Research on the development strategy of comprehensive management of underground space development [J]. *Engineering Science*, 2021, 23(4): 126-136. (in Chinese)

- [17] 车生泉,谢长坤,陈丹,等.海绵城市理论与技术发展沿革及构建途径[J].中国园林,2015,31(6):11-15.  
Che S Q, Xie C K, Chen D, et al. Development history and construction path of sponge city theory and technology[J]. Chinese Garden, 2015, 31(6): 11-15. (in Chinese)
- [18] 宋玉香,张诗雨,刘勇,等.城市地下空间智慧规划研究综述[J].地下空间与工程学报,2020,16(6):1611-1621,1645.  
Song Y X, Zhang S Y, Liu Y, et al. Review on intelligent planning of urban underground space[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(6): 1611-1621,1645. (in Chinese)
- [19] 建筑结构可靠度设计统一标准:GB50068—2001[S].北京:中国建筑工业出版社,2001.
- [20] 郝爱兵,吴爱民,马震,等.雄安新区地上地下工程建设适宜性一体化评价[J].地球学报,2018,39(5):513-522.  
Hao A B, Wu A M, Ma Z, et al. Integrated evaluation on the suitability of overground and underground construction in Xiongan New Area[J]. Acta Geosciatica Sinica, 2018, 39(5): 513-522. (in Chinese)

(本文责编:赵霞)



(上接第 1173 页)

- [25] 庄海洋,任佳伟,王瑞,等.两层三跨框架式地铁地下车站结构弹塑性工作状态与抗震性能水平研究[J].岩土工程学报,2019,41(1):131-138.  
Zhuang H Y, Ren J W, Wang R, et al. Elasto-plastic working states and seismic performance levels of frame-type subway underground station with two layers and three spans[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(1): 131-138. (in Chinese)
- [26] 杨靖,云龙,庄海洋,等.三层三跨框架式地铁地下车站结构抗震性能水平研究[J].岩土工程学报,2020,42(12):2240-2248.  
Yang J, Yun L, Zhuang H Y, et al. Seismic performance levels of frame-type subway underground station with three layers and three spans[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(12): 2240-2248. (in Chinese)
- [27] 钟紫蓝,严智豪,史跃波,等.基于IDA方法的地铁车站结构抗震性能评价[J].北京工业大学学报,2021,47(7):680-690.  
Zhong Z L, Yan Z H, Shi Y B, et al. Seismic performance evaluation of station structures based on IDA method[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2021, 47(7): 680-690. (in Chinese)
- [28] 陈力波,张建经,卓卫东.汶川地区公路桥梁系统地震风险评估[J].土木工程学报,2013,46(增2):242-248.  
Chen L B, Zhang J J, Zhuo W D. Seismic risk assessment for highway bridge system in the Wenchuan region [J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46 (Sup 2): 242-248. (in Chinese)
- [29] Milgram S. The small world problem [J]. Psychology Today, 1967, 2(1): 60-67.
- [30] Albert R, Jeong H, Barabási A L. Error and attack tolerance of complex networks [J]. Nature, 2000, 406 (6794): 378-382.
- [31] Crucitti P, Latora V, Marchiori M, et al. Efficiency of scale-free networks: error and attack tolerance [J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2003, 320: 622-642.
- [32] Crucitti P, Latora V, Marchiori M, et al. Error and attack tolerance of complex networks[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2004, 340(1-3): 388-394.
- [33] 洪华生,邓汉忠.工程中的概率概念-在土木与环境工程中的应用(第二版)[M].北京:中国建筑工业出版社,2016.  
Hong H S, Deng H Z. Probability concepts in engineering; emphasis on applications to civil and environmental engineering (Second Edition) [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016. (in Chinese)