DOI 10.15302/J-SSCAE-2023.01.013

城市地下空间恢复韧性发展策略研究

路德春[1]，廖英泽[1]，曾娇[2]，江媛[2*]，王国盛[1]，秦博宇[3]，杜修力[4]

（1. 北京工业大学城市建设学部，北京 100124；2. 中国工程院战略咨询中心，北京 100088；
3. 西安交通大学电气工程学院，西安 710049；4. 北京工业大学，北京 100124）

摘要：防灾减灾理念及其运用在城市地下空间发展过程中发挥了一定的安全保障作用，但在自然风险和工程安全风险交织的背景下，无法全面满足城市地下空间未来发展需求；转向以“适灾”为导向的韧性防灾减灾理念，重视城市地下空间的灾后恢复韧性，成为未来发展亟需。本文分析了恢复韧性的内涵和影响因素，从工程、非工程角度阐述了国内外恢复韧性相关研究；重点从结构体系、评价方法、管理机制、空间规划、应急预案等方面，剖析了我国城市地下空间韧性发展现状。研究提出了“三阶段+评价体系”的城市地下空间恢复韧性发展策略，将灾后恢复过程划分为应急救援、恢复重建、规划适应三阶段，分别给出各阶段的恢复目标并为城市地下空间恢复韧性评价体系建设提供依据。研究建议，健全城市地下空间管理规章与应急预案，提高城市地下空间韧性规划水平，推动城市地下空间管理智能化，以促进城市地下空间恢复过程的有序与高效。

关键词：城市地下空间；防灾减灾；适灾；恢复韧性
中图分类号：TU28　　**文献标识码：**A

Development Strategy for Recovery Resilience of Urban Underground Space

Lu Dechun[1], Liao Yingze[1], Zeng Jiao[2], Jiang Yuan[2*], Wang Guosheng[1], Qin Boyu[3], Du Xiuli[4]

(1. Faculty of Architecture, Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. Center for Strategic Studies, Chinese Academy of Engineering, Beijing 100088, China; 3. School of Electrical Engineering, Xi’an Jiaotong University, Xi’an 710049, China; 4. Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: The concept of disaster prevention and mitigation is vital for the safe development of urban underground space. Considering the coexistence of natural and engineering safety risks, the concept needs to be improved for further development of the urban underground space, and it is imperative to follow a disaster-adaptation-oriented concept that emphasizes post-disaster recovery resilience of the urban underground space. This study analyzes the implications and influencing factors of recovery resilience and summarizes the research on recovery resilience from the engineering and non-engineering perspectives. Moreover, the development status of recovery resilience research is analyzed from the aspects of structural system, evaluation method, management mechanism, space planning, and emergency plan. On this basis, a strategy that consists of three stages and an evaluation system is proposed; it categorizes post-disaster recovery into three stages—emergency rescue, recovery, and plan adaptation—and proposes recovery goals for each stage, providing a basis for the establishment of a recovery resilience evaluation system for the urban underground space.

收稿日期：2022-11-27；**修回日期：**2022-12-29
通讯作者：*江媛，中国工程院战略咨询中心副研究员，研究方向为交通与建造领域发展研究；E-mail: jiangyuan@cae.cn
资助项目：中国工程院咨询项目“城市地下基础设施低碳发展战略研究”(2022-XY-76)
本刊网址：www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

Furthermore, we suggest that the management regulations and emergency plans of the urban underground space should be optimized, the resilience planning improved, and intelligent management promoted, thereby realizing the orderliness and high efficiency of urban underground space recovery.

Keywords: urban underground space; disaster prevention and mitigation; disaster adaptation; recovery resilience

一、前言

在自然灾害和工程灾害频发的背景下，韧性成为城市防灾减灾的主要目标，“十四五”规划纲要将其列为城市发展的新理念和新目标。党的二十大报告提出，提高城市规划、建设、治理水平，加强城市基础设施建设，打造宜居、韧性、智慧城市。城市地下空间作为开展城市建设、实施城市更新的重要方面，发展速度快且开发力度大，有关法律法规持续完善，施工技术不断创新，治理水平显著提升[1]；累计建设面积为2.4×10^9 m^2（截至2020年年底），“十三五”时期新增建设面积1.33×10^9 m^2，规模世界领先[2]。需要注意到，开发利用城市地下空间在缓解城镇化发展中交通拥堵、环境污染、人地矛盾等方面发挥了积极作用，但面临更为严峻的自然灾害风险和工程安全风险[2]。

当前，城市地下空间相关的规划与规范仍以抗灾能力作为主要设计目标，建造的结构可以抵抗中小型灾害风险；但针对大型或极端环境引起的灾害风险，需要更高的设计标准及配套的管理举措。随着极端天气的趋频、趋强，单纯提高设计标准的防灾措施显然是不切实际的，因而考虑城市地下空间的灾后恢复能力成为必然。城市地下的各类基础设施受灾后，可能造成通信、供电、供水等基本服务的中断，进而加剧城市恢复的难度，因而提升城市地下空间恢复能力是韧性城市建设的重要内容。然而，已有的城市地下空间韧性研究，以抗力韧性居多而缺少恢复韧性[3]。结构设计理念较多围绕保证结构安全的边界安全问题而发展[4]，容许应力、荷载抗力分项系数等传统设计发展为基于性能的设计、鲁棒性设计[5~7]。在韧性理念提出后，结构设计理念转向基于韧性的设计趋势有所增强[8]。在结构运维方面，城市地下空间在韧性城市建设中发挥重要作用成为共识：平时提高城市居民生活质量[9]，灾时保障人员和信息的高效流动[10]。

为了提升城市地下空间的整体韧性水平，亟需探索城市地下空间恢复韧性发展策略。本文在分析恢复韧性的内涵和影响因素、梳理城市地下空间恢复韧性发展现状及存在问题的基础上，提出城市地下空间恢复韧性提升的三阶段发展策略，以期为城市地下空间灾后恢复研究与建设提供基础参考。

二、恢复韧性的内涵及其影响因素

（一）恢复韧性的内涵

韧性是一种抵抗外部冲击、扰动等不利作用并从中快速恢复的内在能力，在不同学科中的具体含义不同[11~14]。韧性包含抵抗、恢复两个阶段，因而可分为抗力韧性、恢复韧性[15]：前者指系统抵抗灾害作用的能力，要求系统功能损失至一定水平后仍能保持其关键功能不丧失；后者指系统功能损失后，通过自身恢复、外部工程措施等使系统功能恢复至原有水平的能力。

传统的防灾减灾理念通常将灾害风险、作用对象割裂开来，主要通过抵抗不利作用来实现安全目标，单纯强调抗力韧性（即“抗灾”）。以韧性为导向的防灾减灾理念，则在传统理念中融入恢复韧性，强调抵抗与恢复的有机结合（即“适灾”）。可以看出，恢复韧性是被动防灾转向主动防灾的关键，涉及两类影响因素：恢复的技术和方法，为工程影响因素；通过人员、经济、管理等措施保障恢复过程的有序进行，为非工程影响因素。相较于抗力韧性，恢复韧性更注重非工程因素和灾后过程，采取更为宏观的视角看待城市地下空间的韧性发展。明确恢复韧性的内涵及其影响因素，是研究恢复韧性发展策略的前置条件。

（二）工程影响因素

对于地上建筑结构，工程设计单位开始意识到恢复韧性的重要性，将恢复韧性融入建筑结构的设计过程[16]。针对地震灾害的“四水准”抗震设防理念成为共识，以此理念为导向的可恢复功能结构体系研究相对成熟[17]。可恢复功能结构体系在遭受地震作用后无需修复或简便修复后，可恢复至原有完

备功能状态并快速投入使用：① 摇摆结构，放松基础对地上结构部分的自由度约束，使地上结构在地震作用下可摇摆或可竖向抬升，由此耗散地震输入的能量、限制结构的变形；② 自复位结构，在保证传力的基础上，放松梁柱或柱脚的约束，避免梁柱或柱脚出现塑性变形；③ 可更换结构，集中承担结构的损伤，减少主体结构其余部件的损伤程度，保证主体结构的功能完整性；④ 附加耗能装置，将地震输入的能量集中在可更换的阻尼装置中并进行耗散。可更换构件、附加耗能装置是可恢复功能结构体系的核心，与摇摆结构、自复位结构组合后，既可保障结构安全，又能实现灾后结构快速恢复，从工程角度充分体现了恢复韧性的内涵。

在提升工程结构的恢复韧性设计之外，工程设计单位研究并量化地上建筑结构的恢复过程，提出相应的评价指标体系，主要包括恢复时间、恢复成本、人员伤亡等指标。例如，美国联邦应急管理局（FEMA）提出了更新后的建筑抗震性能评估方法（FEMA-58）[18]，将灾后恢复过程纳入地上建筑结构的韧性评价范畴，可据此量化建筑结构的震后危险等级、恢复时间、恢复成本、人员伤亡等。英国奥雅纳公司（Arup）提出了基于韧性的地震设计计划（REDi）[19]并据此开展建筑结构韧性评级；在FEMA-58的基础上，REDi计入了检查、获取资金、动员人员等活动造成的停滞时间，改进了恢复时间的计算方法。《建筑抗震韧性评价标准》（GB/T 38591—2020）[8]结合国情改进了韧性评价方法，分别对灾后恢复时间、恢复成本、人员伤亡进行评级，将三者中的最低等级作为韧性等级。

（三）非工程影响因素

建筑结构灾后的快速恢复，离不开社会、经济、管理等非工程因素的保障。Arup构建了城市韧性框架和韧性指数，从健康与福祉、经济与社会、基础设施与生态系统、领导与策略等维度着手，选取人员、组织、场地、知识等因素来量化评价恢复过程中的保障能力[19]。联合国防灾减灾署（UNDRR）制定了城市韧性十要素[20]，旨在倡导加强城市韧性能力建设；城市管理需有协调机制和责任分工，及时识别当前和未来的灾害风险、评估灾害风险的经济影响，以社会信息传递和个体互助来强化社会联系。《安全韧性城市评价指南》（GB/T 40947—2021）[21]将人员安全韧性、设施安全韧性、管理安全韧性作为一级指标，在人员的安全文化、设施的灾后保障、管理体系的恢复计划、财政支持与科研活动等方面提出建议。还可将城市视为三度空间（物理、社会、信息）下由多个子系统构成的“系统的系统”，阐述城市韧性的内涵与特征并据此观察城市韧性[22]。

三、城市地下空间恢复韧性发展现状及存在问题

（一）城市地下空间规划

随着地下空间开发朝着深层化、多元化、立体化方向发展，恢复韧性对城市地下空间规划提出了新的更高要求。一方面，城市地下空间需保障自身安全，降低次生灾害发生的概率。隐患、病害是诱发次生灾害发生的主要因素，而近年来城市地下空间发生的灾害事故表明，相关规划理念存在“重开发、轻运营”问题，即侧重开发利用速度与规模，而对隐患及病害整改重视不够。例如，2013年青岛市地下输油管线泄漏爆炸重大事故的主要原因之一即为追求经济规模而导致不合理的管线布局，先期影响输油管线整改，后期造成重大的人身和经济损失[23]。另一方面，城市地下空间的灾害疏散道路需合理规划，而深层地下空间的开发利用加大了规划难度。当地下空间发生内涝时，受灾人员需要逆水而上，过少、过窄的疏散通道可能造成安全事故。例如，北京、郑州等城市的特大暴雨事故，都暴露出地下空间防灾规划滞后于现实发展需要的问题，未能充分保障地下空间内受灾人员的安全撤离。

（二）城市地下空间恢复韧性评价体系

现有的恢复韧性评价体系研究集中于城市地上空间结构，有关评价指标制定、恢复韧性量化等一定程度上提升了城市地上空间的灾后恢复能力[24]。而在城市地下空间结构方面，恢复韧性评价体系只能借鉴而不宜照搬城市地上空间结构的已有成果，还需深入研究。这是因为，地下结构与地上结构所处的环境、灾害类型、受灾程度等存在显著差异，灾后恢复路径也有明显区别[25,26]；城市地下空间开发利用的目标、原则等有异于地上空间，建设模式、运维人员、管理机制等非工程因素也有自身特

点[1]。目前，有关城市地下空间的韧性评价体系正在发展之中，虽有部分成果[27]，但整体而言处于探索阶段。

（三）城市地下空间可恢复结构及技术

不同于地上结构，地下结构受围岩约束且结构反应主要是变形累积，直接导致现有的可恢复功能结构体系难以沿用。例如，在地震作用下，地铁车站结构不再以摇摆反应为主，因而摇摆结构、附加耗能装置的适用性较差。目前，应用于城市地下结构的可恢复功能结构主要有自复位结构、可更换构件等。地下自复位结构通过上覆土重力提供恢复力，可使结构恢复到初始位置[28]。例如，地铁车站的中柱在灾后发生倾斜，可利用上覆土体重力、预应力钢筋的合力使其恢复；但这一合力难以提供使围岩变形减少至零的恢复力，因而自复位结构在地下空间的应用受到一定限制。

可更换构件是地下可恢复功能结构体系中较为有效的方法，将损伤转移至可更换构件以实现对主体结构的保护，使地下结构的恢复韧性得以提升[29]。在邻近建筑施工等有利作用下，区间隧道多采用管片加固、地层注浆等方式对隧道纵向沉降、管径收敛变形等病害进行恢复[30]。然而，管片加固的施工作业会影响地铁车辆的正常运营，对场地要求较高，具有一定的局限性[31]；地层注浆工艺复杂，注浆的数量、长度、范围等参数与围岩紧密相关，方案选取密切依赖工程经验，需深入开展机理、量化等研究工作[32,33]。

（四）城市地下空间管理机制

城市地下空间的灾后恢复需要管理机制保障，而城市地下空间中不同设施的运营主体、监管主体之间存在信息不通、协调困难、不便统筹等问题[1]。例如，地下空间的轨道交通、市政设施、商业设施，其运营主体通常为不同的企业[34]，相应监管涉及多个部门，管理和协调难度大。城市地下空间安全监管方面的部门规章、地方性法规等，存在监管理念与实践脱节等问题，不利于城市地下空间灾后的有序和快速恢复。

（五）城市地下空间应急预案

城市地下空间建设规模大、投资费用高，建成后运营时间长、荷载因素复杂、维护难度高；随着自然灾害的趋频、趋重，面临的灾害风险呈现不确定性和复杂性，灾后恢复难度极大[35]。现有的应急预案如《国家防汛抗旱应急预案》《国家地震应急预案》《国家突发地质灾害应急预案》等，主要针对单一自然灾害，对极端天气与多灾耦合情况下的响应及恢复关注不足，而多灾害耦合的地下空间应急预案依然缺失。此外，在基层预案中，目标、响应等级、应急流程等还不够明确。应急预案的不完善，一定程度上与城市地下空间法律法规体系不健全有关[36]（缺失具有法律效应及参考的上位法）；部分省份虽然发布了有关城市地下空间的地方性法规，但存在原则性较强、操作性较差，约束力不足、差异性明显等问题，难以发挥对城市地下空间韧性发展的保障作用。

四、城市地下空间恢复韧性发展策略

城市地下空间灾后恢复过程，从时间维度可分为三阶段：短期的应急救援、中期的恢复重建、长期的规划适应。分阶段提出恢复韧性发展策略，据此探讨恢复韧性评价体系构建。

（一）不同阶段的恢复韧性发展策略

1. 应急救援阶段

应急救援是灾后恢复的第一阶段，也是生命救援的黄金时期；根本目标是在最短时间内最小化人员伤亡，注重时间效益。历史灾害案例表明，该阶段的人员存活率最高，因而人的生命安全位于首要位置。应急救援阶段的发展策略包括：中央与地方、各地区、各部门统一协调且信息互通，确保专业应急救援体系的快速响应；增强受灾人员的自救、互救能力；按需投入足量资金，支持救援工作高效展开，最大程度保障受灾人员的生命安全。

城市地下空间结构体系的冗余度，与应急救援阶段的实施效率、人员伤亡程度直接关联；要求结构在灾害发生后保持基本功能，确保受灾人员的生命安全。例如，城市地下轨道交通应有一定的冗余度，具备灾后疏散人员、紧急物资运输、电力系统备份运行等能力。因此，城市地下空间具备恢复韧性，前提在于结构体系的冗余度：对于单体结构，需保证一定的延性，不至于快速倒塌而失效；对于

结构体系，在保证最低需求的应急运输、人员疏散等功能的基础上，能够防止连续性倒塌破坏。

2. 恢复重建阶段

恢复重建是灾后恢复的第二阶段，根本目标是保障功能恢复、优化资金分配，注重经济效益。加强城市地下空间结构的修复，确保救助资源的合理分配，是恢复重建阶段的重点工作。① 全面、快速地评估城市地下空间灾后各类设施的状态及功能，掌握受灾体的损失情况、孕灾环境的稳定性，据此制定恢复重建计划、计算恢复重建的资金需求。恢复重建阶段的发展策略包括：通过公共财政支持，引导城市地下空间快速恢复；通过金融保险等方式筹集灾后应急资金，缓解公共投入压力。② 制定城市地下空间恢复计划，选用具有针对性的恢复技术，提出不同地区、层级、类别的设施恢复措施，明确恢复重建的优先级以及恢复路径。城市地下空间各类设施的运营及监管部门、社会利益相关方等，共同参与优先级确定、恢复路径选取的论证过程，提高恢复重建的效率。

3. 规划适应阶段

规划适应是灾后恢复的长期过程，也是城市地下空间韧性水平提升的重要环节。在该阶段，城市地下空间的规划、建设、运营部门以及相关利益方，总结过往灾害事故中的经验教训，探索灾后恢复的新技术、新模式，增强未来恶劣灾害事故的应对能力。规划适应阶段的发展策略包括：① 开展城市地下空间既有设施的普查工作，识别病害并及时监控，对不能满足规范标准的设施进行补强、加固和更新；② 提升城市地下空间新建设施的恢复韧性设计能力，形成以韧性为导向的城市地下空间规划，提高地下单体结构的可恢复结构应用水平，增强地下系统结构的连接性和整体性；③ 提高城市地下空间的管理水平，支持恢复过程有序且高效开展。

（二）恢复韧性评价体系构建

科学评价城市地下空间的恢复韧性，精准识别薄弱环节和影响恢复韧性的要素，采取针对性改进措施，从而提高应急救援、恢复重建、规划适应水平。运用城市地下空间韧性提升决策框架，提出有限资源条件下恢复韧性优化策略。深入开展恢复韧性评价方法研究，识别风险来源、建立风险清单，构建综合反映城市地下空间灾后恢复能力的评价指标体系。量化各项评价指标，结合灾后恢复不同阶段的根本目标设置需要标准，如应急救援阶段的时间与人员伤亡评价、恢复重建阶段的恢复资金分配合理性评价、规划适应阶段的恢复后城市地下空间在工程和非工程方面的改进评价。此外，恢复韧性评价体系应侧重体现“以人为本”理念，运用基于灾后生活质量的评价指标体系[37]，按照维持生命所需、维持健康卫生所需、社会需求、维持文化生活所需等层次，系统评价城市地下空间恢复韧性，实现“恢复得更好”的发展目标。

五、城市地下空间恢复韧性保障措施

（一）健全城市地下空间管理规章与应急预案

提升城市地下空间恢复韧性，应以完备的制度体系作为保障。发布城市地下空间开发建设、权属登记、安全运营、监督管理等管理内容，落实安全责任主体与监管主体。各地区结合实际情况，制定 / 修订管理规章并形成操作细则，明确城市地下空间恢复韧性的运行依据。建议结合地方性规章的应用实践，适时推动城市地下空间领域的上位法立法工作。优化城市地下空间应急预案，体现地下空间灾种的偶然性、随机性、易耦合特点，明确应急的目标、响应等级、应急流程，确保基层预案具有针对性和实用性。

（二）提高城市地下空间韧性规划水平

科学合理的城市地下空间规划是灾后恢复韧性能力的根本保障。倡导“开发”“安全”并重，关注既有地下结构的隐患及病害情况，确保整改在先、建设在后。在规划层面，前瞻性与实践性并重，反映灾害事故的动态性及不确定性，为城市地下空间减灾与恢复韧性筑牢基础。探索以恢复韧性为导向的地上和地下结构一体化、地下空间多层开发规划与建设方法，以优质工程实践支撑规划制度完善；兼顾开敞空间灾时地面可达、人员疏散安全高效，合理补充地下公共空间灾时避难功能，降低灾后人员伤亡率。

（三）推动城市地下空间管理智能化

新兴信息技术为城市地下空间灾后救援、重建、恢复提供支持，驱动城市地下空间智能化运行

管理成为趋势。利用物联网、云计算、大数据等技术，针对过往灾害风险案例开展分析，对隐蔽的致灾因子进行监测、预判、预警；基于数字孪生技术，开展多灾害耦合作用下城市地下空间灾变过程的精细化、可视化模拟，提升城市地下空间灾害风险研判能力。构建城市地下空间智能信息平台，高质量开展数据获取与按需共享，实现必要信息的跨层级纵向传递、跨行业横向协调，技术性驱动城市地下空间灾后恢复韧性能力建设。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: November 27, 2022; **Revised date:** December 29, 2022

Corresponding author: Jiang Yuan is a associate research fellow from the Center for Strategic Studies of Chinese Academy of Engineering. Her major research field is development research in the field of transportation and construction. E-mail: jiangyuan@cae.cn

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Low-Carbon Development Strategy of Urban Underground Infrastructure” (2022-XY-76)

参考文献

[1] 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]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(4): 126–136.

[2] 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 CSRME, China Association of City Planning. 2022 blue book of urban underground space [M]. Beijing: Science Press, 2022.

[3] 郑刚, 程雪松, 周海祚, 等. 岩土与地下工程结构韧性评价与控制 [J]. 土木工程学报, 2022, 55(7): 1–38.
Zheng G, Cheng X S, Zhou H Z, et al. Resilient evaluation and control in geotechnical and underground engineering [J]. Chinese Journal of Civil Engineering, 2022, 55(7): 1–38.

[4] Shadabfar M, Mahsuli M, Zhang Y, et al. Resilience-based design of infrastructure: Review of models, methodologies, and computational tools [J]. ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering, 2022, 8(1): 03121004.

[5] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑结构可靠性设计统一标准(GB 50068—2018) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People’s Republic of China. Unified standard for reliability design of building structures(GB 50068—2018) [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018.

[6] 建筑结构荷载规范(GB 50009—2012) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
Load code for the design of building structures(GB 50009—2012) [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.

[7] Khoshnevisan S, Gong W P, Juang C H, et al. Efficient robust geotechnical design of drilled shafts in clay using a spreadsheet [J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2015, 141(2): 04014092.

[8] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 建筑抗震韧性评价标准(GB/T 38591—2020) [S]. 北京: 中国质检出版社, 2020.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration. Evaluation standard for seismic toughness of buildings(GB/T 38591—2020) [S]. Beijing: China Quality Inspection Press, 2020.

[9] 陆化普, 刘若阳, 张永波, 等. 基于 TOD 模式的城市空间结构优化研究 [J]. 中国工程科学, 2022, 24(6): 137–145.
Lu H P, Liu R Y, Zhang Y B, et al. Optimization of urban spatial structure based on TOD model [J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(6): 137–145.

[10] Admiraal H, Cornaro A. Future cities, resilient cities: The role of underground space in achieving urban resilience [J]. Underground Space, 2020, 5(3): 223–228.

[11] Allen C R, Angeler D G, Garmestani A S, et al. Panarchy: Theory and application [J]. Ecosystems, 2014, 17(4): 578–589.

[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] 李海垒, 张文新. 心理韧性研究综述 [J]. 山东师范大学学报(社会科学版), 2006, 51(3): 149–152.
Li H L, Zhang W X. Review of research on psychological resilience [J]. Journal of Shandong Normal University(Social Sciences), 2006, 51(3): 149–152.

[14] U.S. Department of Energy. DOE fundamentals handbook: Thermodynamics, heat transfer, and fluid flow [R]. Washington, DC: U.S. Department of Energy, 1992.

[15] 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: State of the art [J]. Scientia Sinica Technologica, 2022, 52(10): 1469–1483.

[16] 杨静, 李大鹏, 翟长海, 等. 城市抗震韧性的研究现状及关键科学问题 [J]. 中国科学基金, 2019, 33(5): 525–532.
Yang J, Li D P, Zhai C H, et al. Key scientific issues in the urban earthquake resilience [J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2019, 33(5): 525–532.

[17] 吕西林. 可恢复功能防震结构: 基本概念与设计方法 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
Lyu X L. Earthquake resilient structures: Basic concept and design methodology [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019.

[18] Applied Technology Council. Seismic performance assessment of buildings volume 1: Methology [R]. Washington, DC: Federal Emergency Management Agency, 2012.

[19] Arup. City resilience index: Understanding and measuring city resilience [R]. London: Arup, 2019.

[20] United Nations Office for Disaster Risk Reduction. Disaster resilience scorecard for cities [EB/OL]. (2017-03-15) [2022-10-15]. https://www.undrr.org/publication/disaster-resilience-scorecard-cities.

[21] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 安全韧性城市评价指南(GB/T 40947—2021) [S]. 北京: 中国质检出版社, 2021.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration. Guidelines for the evaluation of safe and resilient cities(GB/T 40947—2021) [S]. Beijing: China Quality Inspection Press, 2021.

[22] 方东平, 李在上, 李楠, 等. 城市韧性——基于“三度空间下系统的系统”的思考 [J]. 土木工程学报, 2017, 50(7): 1–7.
Fang D P, Li Z S, Li N, et al. Urban resilience: A perspective of system of systems in trio spaces [J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(7): 1–7.

[23] 柳长森, 郭建华, 金浩, 等. 基于WSR方法论的企业安全风险管控模式研究——“11·22”中石化管道泄漏爆炸事故案例分析 [J]. 管理评论, 2017, 29(1): 265–272.
Liu C S, Guo J H, Jin H, et al. Research on the safety risk management and control model for enterprise based on WSR methodology: Case analysis of “11·22” Sinopec oil pipeline leakage and explosion accident [J]. Management Review, 2017, 29(1): 265–272.

[24] 徐雪松, 闫月, 陈晓红, 等. 智慧韧性城市建设框架体系及路径研究 [EB/OL]. (2022-08-26) [2022-11-15]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4421.G3.20220825.1306.004.html.
Xu X S, Yan Y, Chen X H, et al. Framework system and path of smart resilient city construction [EB/OL]. (2022-08-26)[2022-11-15]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4421.G3.20220825.1306.004.html.

[25] 陈强, 陈桂香, 尤建新. 对地下空间灾害管理问题的探讨 [J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(1): 52–55.
Chen Q, Chen G X, You J X. Study on the disaster management of underground space [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, 2(1): 52–55.

[26] 陈国兴, 陈苏, 杜修力, 等. 城市地下结构抗震研究进展 [J]. 防灾减灾工程学报, 2016, 36(1): 1–23.
Chen G X, Chen S, Du X L, et al. R Review of seismic damage, model test, available design and analysis methods of urban underground structures: Retrospect and prospect [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2016, 36(1): 1–23.

[27] 罗冰洁, 彭芳乐, 刘思聪, 等. 城市地下空间韧性评价指标及模型探讨研究 [EB/OL]. (2022-11-22)[2022-12-05]. https://doi.org/10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20221866.
Luo B J, Peng F L, Liu S C, et al. Research on evaluation indicators and models of urban underground space resilience [EB/OL]. (2022-11-22)[2022-12-05]. https://doi.org/10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20221866.

[28] 杜修力, 王子理, 刘洪涛. 基于韧性设计的一种地下框架结构抗震新体系研究 [J]. 震灾防御技术, 2018, 13(3): 493–501.
Du X L, Wang Z L, Liu H T. Study of a seismic new system of underground frame structure based on toughness design [J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2018, 13(3): 493–501.

[29] 杜修力, 阴孟莎, 刘洪涛, 等. 柱脚可更换的地下结构抗震截断柱技术性能分析 [J]. 震灾防御技术, 2019, 14(3): 524–534.
Du X L, Yin M S, Liu H T, et al. Analysis of technical performance of underground structure seismic truncated columns with replaceable column foot [J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2019, 14(3): 524–534.

[30] 刘德军, 仲飞, 黄宏伟, 等. 运营隧道衬砌病害诊治的现状与发展 [J]. 中国公路学报, 2021, 34(11): 178–199.
Liu D J, Zhong F, Huang H W, et al. Present status and development trend of diagnosis and treatment of tunnel lining diseases [J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(11): 178–199.

[31] 张冬梅, 邹伟彪, 闫静雅. 软土盾构隧道横向大变形侧向注浆控制机理研究 [J]. 岩土工程学报, 2014, 36(12): 2203–2212.
Zhang D M, Zou W B, Yan J Y. Effective control of large transverse deformation of shield tunnels using grouting in soft deposits [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(12): 2203–2212.

[32] 夏曾银, 盛鲁腾, 程雪松, 等. 基坑引发隧道变形控制中注浆参数的敏感性分析研究 [J]. 建筑结构, 2022, 52(S1): 2546–2553.
Xia Z Y, Sheng L T, Cheng X S, et al. Sensitivity analysis of grouting parameters in tunnel deformation control caused by foundation pit [J]. Building Structure, 2022, 52(S1): 2546–2553.

[33] 赵帅, 张东明, 邵华, 等. 盾构隧道微扰动注浆对土体强度和衬砌横向收敛的影响 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2022, 50(8): 1145–1153.
Zhao S, Zhang D M, Shao H, et al. Influence of perturbation grouting of shield tunnel on soil strength and transverse convergence of tunnel linings [J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2022, 50(8): 1145–1153.

[34] 郭翔, 佘廉. 城市地下空间韧性建设研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2021.
Guo X, She L. Study on resilience construction of urban underground space [M]. Beijing: Science Press, 2021.

[35] 彭建, 柳昆, 阎治国, 等. 地下空间安全问题及管理对策探讨 [J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(1): 1–7.
Peng J, Liu K, Yan Z G, et al. Discussion on safety problems of underground space and appropriate managing measures [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6(1): 1–7.

[36] 朱合华, 骆晓, 彭芳乐, 等. 我国城市地下空间规划发展战略研究 [J]. 中国工程科学, 2017, 19(6): 12–17.
Zhu H H, Luo X, Peng F L, et al. Development strategy on urban underground space planning in China [J]. Strategic Study of CAE, 2017, 19(6): 12–17.

[37] Pan S J, Zhao Z Y, Lim H W, et al. Restored quality of life-based approach(REQUALIFE) for urban seismic resilience assessment: Quantitative method [J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2022, 79: 103169.