

# 地下空间利用与城市防灾研究 若干新进展与思考

陈志龙, 陈家运, 郭东军, 吴 涛

(中国人民解放军理工大学国防工程学院, 南京 210007)

**[摘要]** 城市地下空间是城市综合防灾空间的重要与必要组成部分。近年来,随着世界城市化进程和地下空间利用的加速,城市综合防灾面临挑战,利用地下空间的综合防灾特性进行城市综合防灾越来越受到国际学者的关注。本文分析了世界各国利用地下空间进行综合防灾的最新研究进展与典型工程案例,提出了我国利用地下空间进行城市综合防灾的建议,以期为我国城市地下空间开发利用提供借鉴与参考。

**[关键词]** 地下空间;综合防灾;城市可恢复力;关键基础设施

**[中图分类号]** TU9 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2013)05-0065-06

## 1 前言

根据联合国减灾署(UN/ISDR)的统计数据,从整体上看,世界范围内灾害造成的损失呈逐年递增趋势(见图1)。从地域上看,受自然灾害影响的死亡人数亚洲所占比例最大,紧急灾难数据库(EM-DAT)的资料显示:2000—2009年间世界因自然灾

害导致的遇难者数量中,亚洲所占比例达到84.55%,其中我国占有相当比例。2012年我国发生的自然灾害较往年为轻,但损失仍达到了674亿美元,防灾形势不容乐观。从单灾种来看,影响人数最多的灾害依次是水灾、干旱、风暴、地震和高温5类灾害;死亡人数最多的是地震、风暴、高温和水灾4类灾害<sup>[1]</sup>。

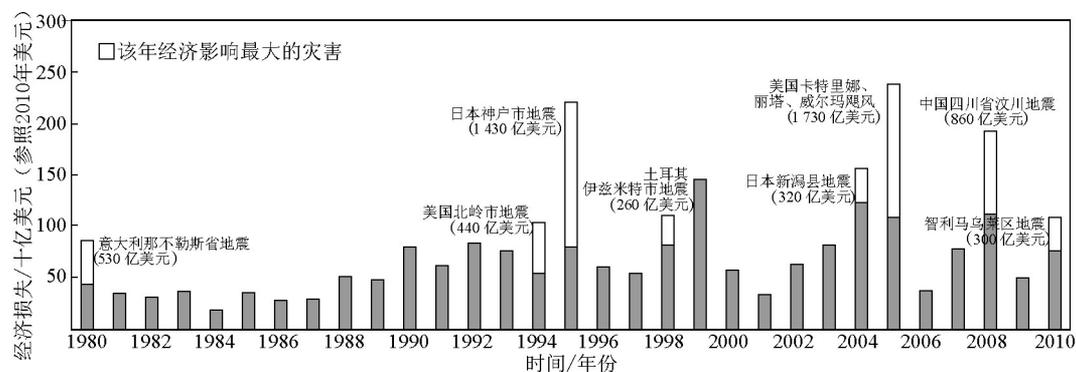


图1 1980—2010年世界自然灾害经济损失统计

Fig.1 Annual reported economical damages from natural disasters: 1980—2010

注:数据来源于紧急灾难数据库(EM-DAT)

**[收稿日期]** 2013-03-19

**[基金项目]** 国家自然科学基金委员会创新研究群体科学基金项目(51021001)

**[作者简介]** 陈志龙(1965—),男,江苏南通人,教授,博士生导师,研究方向为地下空间规划;E-mail: chen-zl@vip.163.com

如何有效预防、缓解和应对这些灾害成为研究的重要课题,尤其是城市开始了持续的大规模扩张,高度的财富集中和错综复杂的城市运行体系使城市变得更加脆弱,全球变暖、城市地质条件变化、城市环境污染等因素增加了城市面临的风险,也给城市的防灾工作带来空前的压力,城市综合防灾越来越得到重视。

城市地下空间为城市空间重要组成部分,目前我国城市地下空间面积以前所未有的速度增长,城市(尤其是城市中心区)地下空间利用规模越来越大,北京、上海等特大城市地下空间建成面积已超过 $5 \times 10^7 \text{ m}^2$ ,深圳市地下空间现有开发量达到 $1.9 \times 10^7 \text{ m}^2$ ,杭州市地下空间现在开发量达到 $8 \times 10^6 \text{ m}^2$ ,并且每年都以建成百万级平方米的速度持续增长。据预测,到2020年,北京地下空间总面积将达到 $9 \times 10^7 \text{ m}^2$ ,中心城区的地下空间将达到地面建筑总面积的20%~30%,并分别在丰台丽泽商务区和通州新城规划了 $2.3 \times 10^6 \text{ m}^2$ 和 $2.1 \times 10^6 \text{ m}^2$ 的超大地地下空间,将立体开发到5~6层<sup>[2]</sup>。

地下空间对诸多城市灾害有很好的防灾特性,有些是地上空间无法比拟的。与此同时,利用地下空间也需要考虑自身对火灾与洪灾的防御。由于地下空间对城市灾害有着不同于地上空间的灾害

机理和特性,在应对城市灾害时有其独特的优势和劣势。如何扬长避短,世界上越来越多学者开始关注研究利用地下空间来防御城市灾害。本文分析了此领域的研究新进展及典型工程。

## 2 地下空间防灾的最新研究进展

### 2.1 利用地下空间提高城市的可恢复力研究

随着城市的规模逐渐扩大,日益复杂和相互联系的基础设施变得举足轻重,而这些系统面对灾害时的整体可靠性更加难以预测。灾害对城市的影响已不仅限于对这些设施的物理损坏,旨在评判城市灾后恢复良好运行和稳定社会系统能力的城市可恢复力(resilience)成为城市防灾的一个新标准。而给水、交通、电力、通信、天然气和原油等关键基础设施由于对城市的维持运行和灾后恢复至关重要而成为衡量城市可恢复力的主要指标,图2表示了城市6大基础设施之间的相互关系<sup>[3]</sup>,这些关系错综复杂,融合了工程、数学、信息与计算机、决策与风险管理、经济和其他的社会科学等学科知识才能解决。同样基于城市可恢复力的角度考虑,地下基础设施的修复也不应该只看设施本身,应该着眼于城市系统维持运行的需求,从最关键的设施入手,逐渐修复好城市的“生命线”系统。

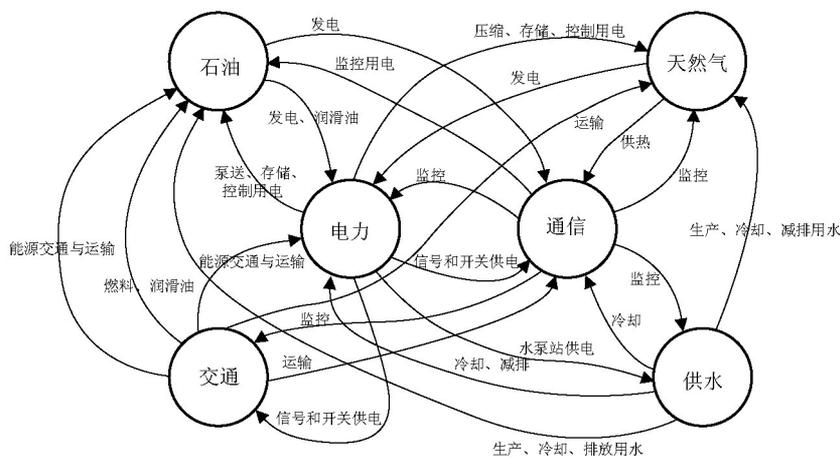


图2 6种基础设施间的相互关系

Fig.2 Interdependencies for six sectors of infrastructure

国际地下空间领域的学者 Sterling R 和 Nelson P 对利用地下空间提高城市可恢复力进行了研究。首先分析了地下空间在面临诸多灾害时的优势和弊端<sup>[3]</sup>,得出了对应关系的列表,并分析了这些灾害之外地下设施可能受到的影响或发生的变化:a. 地

下设施不为人们所看到,因此可能受到忽视而逐渐损坏;b. 地下设施有时可能没有被灾害损坏,却被灾害所带来的一些影响损坏,例如飓风很难损坏地下水管道,但树根缠绕着地下管道的大树被飓风刮倒则会将管道损坏;c. 很多地下设施一旦损坏则会

产生比设施本身更严重的后果,而且要花费比地面设施更大的代价修复,如地下排水管道破裂可能会导致地面渗水、破口处土壤流失乃至地面塌陷等后果。

因此在地下设施规划设计前,必须认真考虑设施所面临的直接风险以及由其他事件所带来的间接风险,做好应对措施和预案,采用新的规划布局方式和新的建造技术等。如地下综合设施管廊的设置可以很大程度上减少管线冲突,便于敷设维护,减轻地震影响;而将地下设施放置在更深的地下则有利于避免受到地上植被、施工等的影响。

在此基础上,重点分析了地铁系统(metro system)、地下道路(road tunnel)、供水网络(water distribution network)、排水网络(sewerage network)、电力配送网络(electrical transmission and distribution network)、信息网络(phone, data, cable and control networks)、燃气网络(gas transmission and distribution network)、区域冷暖系统(district heating and cooling system)、单建地下建筑(individual underground building)和地下综合体(interconnect underground complexes)独特的抗灾特性和对城市可恢复力的影响。

## 2.2 地下空间内部防灾理论及实证研究

地下空间防灾是城市综合防灾的一部分,地下空间只有保证自身在灾害中的安全性才能在城市综合防灾中发挥作用。当前地下设施的开发有大型化、综合化、地上地下一体化以及深层化等趋势,使得地下空间在面对火灾、爆炸、水淹等灾害时更加脆弱,这对地下空间的安全和运行的稳定性提出严峻考验,因此针对大型地下综合设施的安全研究为人们所关注。Amberg F等在对地下设施安全性的研究中,分析了若干不同功能的大型现代地下设施所面临的安全挑战,提出从功能布局、交通组织、消防措施、通风管控、规章制度等方面的若干设计原则,结合最新的信息化管理和灾害模拟等技术,对未来大型地下综合基础设施的防灾前景作了展望<sup>[4]</sup>。认为可以通过以下设计和技术手段达到安全目的:a. 全方位的安全监视和灾害探测系统;b. 对设施内所有使用者状态的掌控;c. 将火灾控制在尽可能小的范围内;d. 合理的通风排烟;e. 满足使用的疏散出口;f. 紧急照明和标识系统;g. 便于救援人员使用的设施;h. 维持建筑内设施运行完整性的措施;i. 安全相关的议题是灾害风险降低的核心;j. 时刻保持有序的组织管理。

此外,瑞士建设了Hagerbach地下试验场,对包括内部爆炸等地下空间内部灾害进行试验,经多年不断扩建改造,现规模长900 m、面积逾4 000 m<sup>2</sup>,并对上述理念与措施进行了验证,通过良好的疏散、防火、通风、电力等设施设计和标识、引导系统,制定各种紧急预案,设置专用救援消防设备,并配备专业的应急人员,使地下试验场满足安全需求。第11届国际隧道与地下空间协会年会于2011年9月顺利在Hagerbach地下试验场召开,期间有1 000~1 500人的日流量,最大容纳人数超过1 000人,并举办了450人的大型集会。通过这次年会,Hagerbach试验场的成功证明了其防灾措施的可靠性(见图3)。

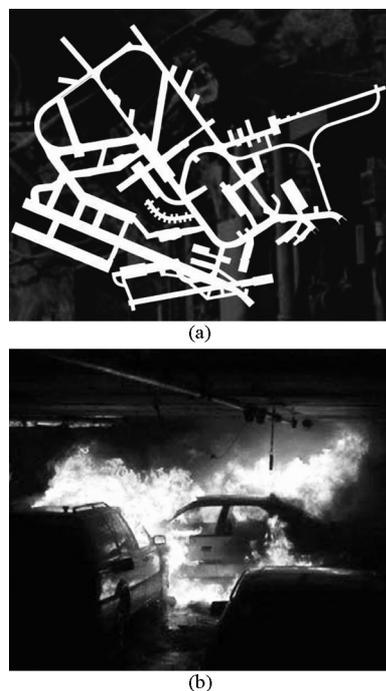


图3 Hagerbach地下试验场  
Fig.3 The Hagerbach test gallery  
注:来源于 Versuchs Stollen Hagerbach

## 3 利用地下空间综合防灾的典型案例

国外一些地下工程已经在城市综合防灾中发挥重要作用,其中一些是以城市防灾为主要目的进行建设的工程,并经时间的检验证明了其有效性。这些案例对挖掘我国地下空间潜力、提升城市的防灾能力有重要借鉴意义。

### 3.1 平灾结合地下道路建设

马来西亚首都吉隆坡常因雨季洪水泛滥而导

致巨大经济损失和人员伤亡。此外,城市市区内还存在过境交通导致的交通堵塞。针对以上两个问题,考虑到隧道工程在解决输水、城市交通等方面问题的优势作用,马来西亚政府于2007年5月在吉隆坡地区建成一条聪明隧道(smart tunnel)<sup>[5]</sup>。其中,城市中心地区的一段,平时作为公路隧道,洪水时期作为防洪隧道,根据洪水严重程度可以选择不同的隧道交通和洪水疏浚模式。该隧道不仅解决了吉隆坡水灾问题,而且疏解了隆芙大道及新街场路通往市区的交通阻塞问题,从Sungai Besi到吉隆坡市中心的200万人出行时间从30 min缩短到5 min(见图4)。

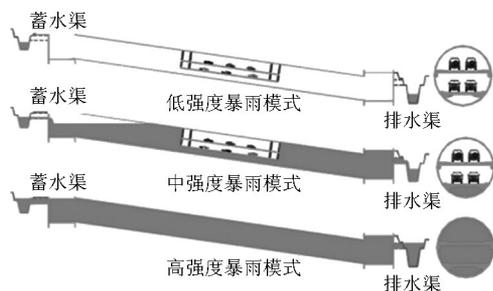


图4 地下道路防洪模式

Fig.4 The flood protection modes of the road tunnel

### 3.2 防城市内涝的地下河川

“首都圈外围排水路”是日本为应对春日部市等地区经常受到台风、洪水的困扰,于1992—2006年建设完成的大型地下排水系统。该系统长6.3 km,由内径10 m左右的下水道将5个深约70 m(相当于22层楼房的高度)、内径32 m的大型竖井连接起来,前4个竖井里导入的洪水通过下水道流入最后一个竖井,集中到一座由59根高18 m、重500 t的大柱子撑起巨型调压水槽。该水槽高25.4 m(约8层楼房高),长177 m,宽78 m,总贮水量达到670 000 m<sup>3</sup>。来自周边的洪水在这里汇聚,水势被调整平稳后通过4台大功率的抽水泵排向江户川,最大排水量达到每秒200 m<sup>3</sup><sup>[6]</sup>。“首都圈外围排水路”能有效地调节洪水,使得东京原来在暴雨袭击下变得脆弱不堪的城市排水系统得到加固,建成后的当年,该流域遭水浸的房屋数量由最严重年份的41 544家减至245家,浸水面积由27 840 hm<sup>2</sup>减至65 hm<sup>2</sup>,对日本埼玉县、东京都东部首都圈的防洪、泄洪起到了极大的作用(见图5)。



图5 巨型调压水槽

Fig.5 Giant regulator water tank

### 3.3 基础设施地下化防灾

东京电力开发利用地下空间采用地下输电,完全将电力设施与人隔绝开来,大大提高了供电的安全性。同时利用地下空间,还可以使得城市在遭受台风、地震等灾害时可以保证电力系统的稳定供给。至1991年,东京都内共有440多座各类变电站,其中地上变电站310多座,地下130多座,地下化率达到29.5%。其中275 kV的超高压变电站达到了12座,除了1座在地上,其余全部为地下式。东京市区内的电缆地下化率在1960年就达到了65.7%,到2002年已高达98%。

综合管沟的实施不仅可以减少城市道路的挖掘,保证道路交通功能的充分发挥,而且能够确保城市生命线的稳定安全,增强城市的防灾抗灾能力。日本在阪神地震后调查发现,在地下综合管沟中铺设管线抗震性能良好,凡是埋设在地下综合管沟内的管线损坏均较少。

### 3.4 平战、平灾结合的民防工程建设

欧洲国家的民防最初是针对战争的防御手段,在二战后长期的和平时期,欧洲国家出于政府公共安全的职责需要,赋予民防组织平时抢险救援的新职能,现在欧洲国家民防组织已成为市民日常生活安全保障体系中不可或缺的重要部分,其防空功能已经淡化,但应急救援的范围极其广泛甚至超出了一般综合防灾的范畴,包括:救火、交通、地震、毒气泄漏等突发事件的处理,抢救紧急病人和处理污染甚至承担拯救动物和宠物等任务。

在芬兰,600 m<sup>2</sup>以上的地面建筑必须建有民防掩蔽所,而如今,兼有民防和平时使用功能的地下空间被广泛建设,赫尔辛基地下游泳馆即是平战结合的例子(见图6),平时作为可容纳1 000人的游泳池,每年参观人数有40万,战时可为3 800人提供避难。芬兰建设的地下空间面积约占地上空间面积

的十分之一<sup>[7]</sup>。通过对这些土地的利用,芬兰得以在城区保留了很多绿地。

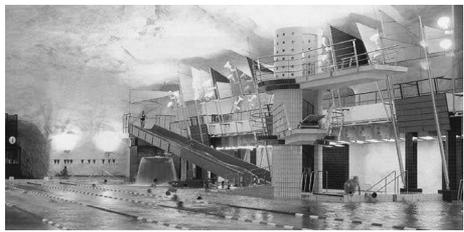


图6 赫尔辛基地下游泳馆

Fig.6 Underground swimming pool in Helsinki

## 4 地下空间与城市防灾研究与实践未来走向

### 4.1 新进展启示 I: 地下空间对城市防灾的重要性

随着世界城市化加速以及对城市可持续发展的逐渐关注,城市作为防灾减灾的中心和重点,综合防灾越来越受到重视,“安全的城市”甚至成为2007年世界人居日的两个主题之一。另外,地下空间已成为改善生态环境、提高城市总体防灾能力,实现可持续发展目标的重要手段和方法。地下空间本身所具有的许多防灾特性,例如抗震特性、防早期核辐射、冰雹、大雾、沙尘暴、热岛效应、低温冷害等,这些特性为城市防灾提供了可能。

此外,地下空间开发的巨大潜力为城市防灾提供强有力的推动。从理论上讲,城市地下空间的天然蕴藏量应等于城市总用地范围以下的所有土层和岩层的体积(平均厚度33 km),但是这个数字并没有实际的意义。在可以预见的时期,例如在21世纪的100年内,针对我国城市的实际情况以及现有的技术条件,合理深度达到100 m是现实的。如前所述,我国北京、上海等特大城市每年地下空间面积增长最少在百万级以上。

可以预见,未来的高新科技对城市防灾的支撑和推进,定会在广度和深度上比现在有更大的发展。虽然要克服许多困难和障碍,要经历一个比较长的过程,但是它的方向是无可怀疑的。

### 4.2 新进展启示 II: 理论的指导滞后于实际建设的需要

在我国地下空间快速发展背景下,目前一般主要从技术经济角度考虑对地下空间进行开发,很少从城市防灾角度对地下空间的需求进行考虑(除防空外)。我们已知城市地下空间对气象灾害、生命

线灾害等有天然的防护能力,而对于地上诸多难以解决的防灾矛盾如城市的内涝、空袭以及交通堵塞等灾害,要想保证灾难到来时有足够的安全避难空间、救护场所和疏散通道,就必须充分有效地开发利用地下空间,才能保证城市的可持续发展。因此,利用地下空间防灾是城市综合防灾系统的必要组成部分。

然而,在理论上,我们同样已知地上空间和地下空间防灾的联系主要表现在功能的对应互补,地下空间的开发应是地面防灾功能的扩展及延伸,在平面布局上应与地面的主要防灾功能相对应。对地上与地下防灾空间的协同、地下空间防灾的主控因子等深层次防灾机理研究还有待深入。另外,在我国超大型地下空间、地下综合体不断涌现的情况下,其内部的防灾规划、建筑设计理论也极为缺乏,可以说理论的指导滞后于实际建设的需要。

在上述背景下,确定了需要尽快发展相适应的理论来指导城市地下空间防灾实践。

## 5 结语

城市地下空间作为城市空间重要的一部分,在我国城市地下空间面积快速增长背景下,二者之间的关系研究引起越来越多的国际学者的关注。本文对此方面的研究新进展进行介绍,作为引玉之砖,以期征得学界的共鸣和重视,并希望能被相似或相同类型的研究或实践所借鉴。

### 参考文献

- [1] 郭东军,陈志龙,谢金容,等.城市综合防灾规划编研初探——以南京城市综合防灾规划编研为例[J].城市规划,2012(11): 49-54.
- [2] 钱七虎.我国地下空间开发利用综合管理研究[R].北京:中国工程院,2011.
- [3] Sterling R, Nelson P. City resiliency and underground space use [C]//Advances in Underground Space Development. Singapore: ACUUS, 2013.
- [4] Amberg F, Bettelini M. Safety challenges in complex underground infrastructures[C]//Advances in Underground Space Development, Singapore: ACUUS, 2013.
- [5] 张平,陈志龙,赵旭东.基于防灾视角下地下道路开发利用——以马来西亚吉隆坡地下道路为例[J].地下空间与工程学报,2012(6):1322-1327.
- [6] 李忠东.日本高效的“首都圈外围排水路”[J].中国防汛抗旱,2011(5):75.
- [7] Ilkka Vähäaho. Underground resources and master plan in Helsinki[C]//Advances in Underground Space Development. Singapore: ACUUS, 2013.

# Development and its thoughts on research of underground space and urban anti-disaster

Chen Zhilong, Chen Jiayun, Guo Dongjun, Wu Tao

(Engineering Institute of National Defense, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)

**[Abstract]** Urban underground space is important and necessary part for urban comprehensive anti-disaster. Along with the acceleration of urbanization and underground space use, urban comprehensive anti-disaster is facing challenges. International scholars have paid more attention to urban comprehensive anti-disaster with using the anti-disaster features of underground space. Analyzing typical engineering examples and research development of the role of underground space in urban comprehensive anti-disaster, some suggestions with regard to using underground space for urban comprehensive anti-disaster in our country are put forward, which is also reference for underground space using in our country.

**[Key words]** underground space; comprehensive anti-disaster; city resiliency; critical infrastructure