

上海科技专著出版基金资助项目

# 地 下 工 程 施 工

## 对历史建筑影响的研究与实践

Research and Practice on the Influence of  
Underground Construction on Historical Buildings

阳吉宝 著



上海科技专著出版基金资助项目

# 地下工程施工对历史建筑影响的研究与实践

阳吉宝 著

 同济大学出版社  
TONGJI UNIVERSITY PRESS

## 内 容 提 要

本书围绕地下工程施工对邻近历史建筑扰动影响问题,系统阐述了城市历史建筑保护要求以及地下工程设计与施工新技术,力图解决地下空间开发利用与历史建筑保护之间的矛盾。全书介绍了最新发展的可最大限度减小地下工程施工对周边环境影响的地下工程设计与计算理论,以及施工新技术、新工艺,有助于地下工程设计与施工新理念、新技术的发展与推广运用,对城市建设发展中的历史建筑保护具有指导意义。

本书可供地下空间开发利用与历史建筑保护领域从事研究、设计、施工和营运管理的人员学习参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

地下工程施工对历史建筑影响的研究与实践 / 阳吉宝著. —上海:同济大学出版社,2019. 11

ISBN 978-7-5608-8779-1

I. ①地… II. ①阳… III. ①地下工程—工程施工—影响—古建筑—保护 IV. ①TU-87

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 226693 号

## 地下工程施工对历史建筑影响的研究与实践

阳吉宝 著

责任编辑:李 杰

责任校对:徐春莲

封面设计:张 微

出版发行 同济大学出版社 [www.tongjipress.com.cn](http://www.tongjipress.com.cn)  
(地址:上海市四平路 1239 号 邮编:200092 电话:021-65985622)  
经 销 全国各地新华书店、建筑书店、网络书店  
排 版 南京新翰博图文制作有限公司  
印 刷 常熟市华顺印刷有限公司  
开 本 787 mm×1092 mm 1/16  
印 张 20.5  
字 数 512 000  
版 次 2019 年 11 月第 1 版 2019 年 11 月第 1 次印刷  
书 号 ISBN 978-7-5608-8779-1  
定 价 128.00 元

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换 版权所有 侵权必究

# ■ 前 言 ■

## FOREWORD

城市历史建筑是城市历史的沉淀和文脉的延伸,是展现城市历史的活化石。城市地下空间开发不可避免地要与城市历史建筑发生关联,为此引发了城市地下空间开发对历史建筑影响的问题,诸如此类的工程案例也屡屡见诸报刊。工程实践向人们提出新挑战、新课题,在开发地下空间的同时对受影响的历史建筑进行有效保护是功在当代、利在千秋的历史使命,开展地下空间开发对历史建筑影响的分析和保护理论研究,总结对历史建筑保护的成功经验,对地下空间开发利用过程中所遇到的历史建筑保护问题具有指导作用和重大的历史意义。

从设计与施工角度来看,地下工程开发主要涉及基坑工程、盾构(顶管)工程的设计与施工。所以,本书主要讨论基坑工程、盾构(顶管)工程对邻近历史建筑的影响,以及关于历史建筑保护的设计和工程措施。

本书系统阐述了地下工程施工对历史建筑的影响,在查明历史建筑目前使用状况、受荷情况、地质条件以及其保护等级的基础上,提出地下工程施工时历史建筑的变形控制标准,采用数值模拟方法分析基坑工程和盾构(顶管)工程的施工对历史建筑的影响,进而提出地下工程设计与施工要求,建议采用先进、科学、环保的施工新技术减小地下工程施工对邻近历史建筑的扰动和影响。最后通过工程实例介绍邻近历史建筑的基坑工程设计与施工控制全过程。

本书由上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司阳吉宝教授级高级工程师主笔。全书分为8章;前言和结束语由阳吉宝执笔;第1章由上海城市管理职业技术学院谢石连教授执笔;第2章由上海市房屋建筑设计院有限公司李瑞礼教授级高级工程师执笔;第3章由阳吉宝、李昌宝[上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司工程师]执笔;第4章和第5章由上海理工大学张治国副教授执笔;第6章由阳吉宝、陈凯和陆善佳(上海市建工设计研究院有限公司工程师)执笔;第7章由阳吉宝、陈志博(上海市建工设计研究院有限公司工程师)和钟正雄(上海岩土工程勘察设计院有限公司高级工程师)执笔;第8章由阳吉宝、李昌宝执

笔；全书由阳吉宝汇总、统编。

本书在编写过程中，得到上海建筑装饰(集团)有限公司陈中伟副总工程师、同济大学黄宏伟教授等的关心与大力支持，在此谨向他们致以衷心的感谢。书中引用了一些单位和个人研究成果、工作总结和学位论文，著者在此表示深切谢意。书中存在的不足之处，敬请读者批评指正。

著 者

2019年8月

# 目 录

## CONTENTS

### 前言

<b>1</b>	<b>绪论</b>	<b>1</b>
1.1	城市地下空间开发利用概况 / 1	
1.2	历史建筑概况 / 14	
1.3	城市地下空间规划 / 23	
<b>2</b>	<b>历史建筑调查与检测</b>	<b>27</b>
2.1	历史建筑调查 / 27	
2.2	历史建筑检测 / 30	
2.3	评价与建议 / 41	
<b>3</b>	<b>地下工程施工对历史建筑影响的因素分析及风险评价</b>	<b>42</b>
3.1	基坑开挖引起环境变形特征 / 42	
3.2	基坑周边历史建筑物沉降动态预测 / 57	
3.3	基坑开挖实例分析 / 67	
3.4	盾构(顶管)引起的环境变形特征 / 87	
3.5	盾构(顶管)掘进隧道周边历史建筑沉降的动态预测 / 100	
3.6	盾构(顶管)开挖实例分析 / 107	

## 4 基坑开挖对历史建筑影响全过程分析 118

---

- 4.1 分析目标 / 118
- 4.2 计算方法选择 / 126
- 4.3 计算参数选择 / 129
- 4.4 计算结果分析 / 133
- 4.5 对历史建筑保护的建议 / 159

## 5 盾构(顶管)施工对历史建筑影响全过程分析 161

---

- 5.1 分析目标 / 161
- 5.2 计算参数选择 / 164
- 5.3 计算结果分析 / 167
- 5.4 对历史建筑保护的建议 / 184

## 6 历史建筑保护设计 187

---

- 6.1 概述 / 187
- 6.2 设计依据 / 190
- 6.3 历史建筑的保护设计方案 / 195
- 6.4 基坑支护保护设计方案 / 200
- 6.5 盾构(顶管)保护设计方案 / 207
- 6.6 降水保护设计方案 / 210

## 7 邻近历史建筑的地下工程施工要求 218

---

- 7.1 概述 / 218
- 7.2 施工方案比选方法 / 220
- 7.3 基坑工程施工要求 / 232
- 7.4 盾构施工要求 / 241
- 7.5 顶管施工要求 / 248

## **8 上海国际舞蹈中心基坑支护设计与施工对周边历史建筑影响研究 259**

- 8.1 概述 / 259
- 8.2 保护建筑检测情况 / 265
- 8.3 历史建筑保护措施设计 / 278
- 8.4 邻近建筑物保护措施 / 288
- 8.5 工程监测 / 292
- 8.6 数值计算分析 / 303

## **参考文献 312**

## **索引 319**

## **后记 320**

# 1 绪 论

城市是一定地域范围内的空间实体,它的产生、形成与发展都存在内在的空间秩序和特定的空间发展模式,城市各物质要素空间分布特征及其不同的地理环境会演变为不同风格的城市形态。

城市空间是城市范围内社会、生态以及基础设施等各大系统的空间投影及空间关系的总和,它是决定城市集聚效益的重要因素,同时也决定了城市各构成要素关系的合理性和运营的有效性。城市空间系统可以从各要素的空间位置、集聚程度以及城市空间形态几个方面考察分析。

城市的空间集聚程度也是城市空间构成中的一个重要方面。城市从本质上看就是一种人类活动的集聚方式的空间载体。城市空间集聚程度过低,城市运营效益必然不高,城市的优越性也就无法体现;然而,如果城市空间的密度过高,反过来会影响城市系统的正常运行。

城市空间形态是城市总体规划形式和分布密度的综合反映。它是城市平面和高度的三维形态。

城市地下空间是指城市地表以下以土层或岩体为主要介质的可开发利用的空间领域,或指在城市地面以下土层或岩体中修建各种类型的地下建筑物或结构物的工程。城市空间系统中地平面以下部分的空间,往往以地下建筑的形式出现,它常常起到弥补城市地上空间不足的作用。

城市地下空间建筑是指在自然形成的溶洞内或由人工挖掘后进行建造的建筑,泛指各种生活、生产、防护的地下建(构)筑物,也可特指某一类型的地下空间,如交通隧道及国防工程等。构筑物通常指那些仅满足使用功能要求而对室内外艺术要求不高的建筑,如各种管沟、矿井、库房、隧道及野战工事等。

城市地下空间开发利用是指从事研究和建造城市各种地下空间的规划、勘察、设计、施工和维护管理等的一门综合性应用科学与工程,是土木工程的一个分支。其主要目的是解决城市地面空间不足所造成的矛盾,这些矛盾主要表现在城市人口膨胀、土地紧张、能源紧缺、交通拥挤、战争与灾害的威胁等。

历史建筑是指具有一定历史、科学和艺术价值,或具有特殊的价值与意义,反映城市历史风貌和地方特色的建(构)筑物。

随着社会历史保护意识的迅速提高,历史建筑的保护与利用在我国正呈现快速发展的趋势。城市地下空间开发利用对历史建筑保护的研究就显得尤为重要。

## 1.1 城市地下空间开发利用概况

### 1.1.1 现状与发展前景

#### 1.1.1.1 地下空间开发利用的现状

随着科技和经济的发展,城市的发展速度日益加快,无论是发达、较发达还是发展中国

家的城市地下空间的开发利用都期望达到高效、文明、舒适、安全的理想目标。当然,在不同历史时期,这些目标有不同的含义和标准,以现在的认知水平来看,这些长远的目标可以具化为:①用有限的土地取得合理的最高城市容量,同时又能保持开敞的空间,充足的阳光,新鲜的空气,优美的景观和大面积的绿地与水面;②在少用或不用常规能源的前提下,为居民提供不受自然气候影响的居住和工作条件;③在自然和人为灾害的危险完全消除以前,保障所有居民的安全,使之不受灾害的威胁。为实现这些目标,必须探索、研究达到这些目标的途径和措施。地下空间是迄今尚未被充分开发的一种宝贵资源,具有巨大的潜力。开发利用地下空间在技术上已比较成熟,更重要的是开发利用地下空间可以与原有城市上部空间协调发展。由于地下空间开发利用的难度、进度,以及部分单位、企业考虑自身利益等诸多原因,我国大部分城市地下空间开发利用缺乏完整统一的规划布局,部分城市处于一种“无政府”状态,亟待建章立制、长远规划、分步实施。

### 1.1.1.2 城市地下空间开发利用的基本属性

城市地下空间开发利用总体上是环境友好工程,可以充分利用地下空间,改善地面环境,增加绿地,节约资源。城市地下空间开发利用是一门综合性、实践性很强的交叉学科,其基本属性表现在如下几个方面。

#### 1. 综合性

城市地下空间开发利用是建造埋设在城市地面以下的土或岩层中的工程结构物。建造一项工程设施一般要经过勘察、设计和施工三个阶段,其中,设计和施工都受到地质及其周围环境的制约,如遇到历史建筑,还涉及历史建筑的保护问题。因此,在规划、设计之前必须对工程所处环境做周密调查,尤其重要的是工程地质和水文地质的勘探,并且这项工作应贯穿于整个工程建设的始终。规划、设计与施工需要运用工程测量、岩土力学、工程力学、工程设计、建筑材料、建筑结构、建筑设备、工程机械、技术经济等专业知识和洞室施工技术、施工组织等领域的知识以及计算机和工程测试等技术。因而,城市地下空间开发利用是一门涉及范围广的综合性学科。

城市地下空间作为人类活动的地下物质空间,对地下空间的空气、光和声等环境要求越来越高,也越来越关注地下空间对人的生理与心理产生的影响,为此还要求设计者具备地下空间环境的知识。由于施工条件的不同,有时还需要具备特殊施工方法的知识,如冻结法等。

#### 2. 社会性

城市地下空间开发利用是随着人类社会需要而逐渐发展起来的,它所建造的工程设施应反映出各个不同年代社会经济、文化、科学技术发展的面貌与水平。根据我国规划和现代化城市功能的要求,城市地下空间开发利用应成为为我国人民创造崭新的地下物质环境,为人类社会现代文明服务的重要组成部分。

#### 3. 实践性

城市地下空间开发利用是具有很强实践性的学科。早期的地下空间开发利用,如矿业的地下开采、铁路隧道、防空地下空间开发利用等都是通过工程实践,总结成功的经验,尤其是失败的教训发展起来的。材料力学、结构力学、流体力学以及近期有较大发展的土力学、基础工程学、岩体力学和流变力学等,是城市地下空间开发利用的基础理论学科。但地下空间开发利用是在土或岩层中,而各地的土或岩层的组分、成因与构造复杂,局部与区域地应力难以如实地确定。即使进行实验室试验、现场测试和理论分析,也有很大的局限性;荷载

不能被准确核定,那么按传统的以荷载核定支承结构尺寸的设计方法,显然不宜应用。而且在工程实践中,出现的许多新现象和新因素,用已有的理论都很难解释。因此,在某种意义上,城市地下空间开发利用的工程实践常先行于理论。至今不少工程问题的处理,在很大程度上仍然依靠实践经验,如衬砌结构的设计,以工程类比为主的经验法,至今仍在广泛应用。在以工程类比为主的经验法的基础上,只有通过新的工程实践,才能揭示新的问题,也才能发展新理论、新技术、新材料和新工艺。

#### 4. 统一性

城市地下空间开发利用是实现高效、文明、舒适和安全的现代化城市的重要组成部分。人们力争最经济地建造既安全适用又美观的地下空间工程,但工程的经济性与各项技术活动密切相关。首先表现在工程选址、总体规划上,其次表现在工程设计与施工技术的合理性和先进性上。工程建设的总投资、工程建成后的社会效益和经济效益以及使用期间的维护成本等,都是衡量工程经济性的重要依据,这些都与技术工作密切相关,必须综合考虑。

符合功能要求的城市地下空间作为一种空间艺术,首先,总体规划要与地面建筑设施有机配合与衔接,造型、通风、照明与色彩面饰、安全出口、人行活动线路等应做到协调和谐。其次,按照地下空间功能所要求的环境标准,利用附加于工程设施的局部装饰,反映出其艺术性。再次,要求工程设施的所有结构、构造、装饰等不应造成地下空间环境的污染,保证地下空间内空气新鲜、畅通、无异味,湿度、温度适宜,隔音防噪,光线明亮、照度适中,在艺术处理上流畅、典雅,使人们在心理上感到舒适。最后,要使工程设施表现出民族风格、地方色彩和时代特征。总之,地下空间应该体现出技术、经济、建筑艺术和环境的统一性,能够为城市增添新的景观,创造新的地下活动空间。

#### 1.1.1.3 城市地下空间开发利用的特征

##### 1. 为城市规模扩展提供了十分丰富的空间资源,是城市可持续发展的必然途径

随着国民经济现代化水平的提高和城市人口的增加,人类因居住和从事各种活动对土地的需求日趋扩大。从宏观上看,人口的增加和生活需求的增长与土地等自然条件的日益恶化和资源的逐渐枯竭引起的人类生存空间问题,已经达到了危机程度,在这种情况下,地下空间资源的开发与综合利用,为人类生存空间的扩展提供了具有很大潜力的自然资源。

目前,城市地下空间的开发深度已达 30 m 左右,据估算,即使只开发相当于城市总容积 1/3 的地下空间,就能达到全部城市地面建筑的容积。这足以说明,地下空间资源的潜力很大。

##### 2. 具有良好的热稳定性和密闭性

岩土的特性是热稳定性和密闭性,这样使得地下空间具有良好的密闭性与稳定的温度环境,对于建造要求恒温、恒湿、超净的生产、生活用建筑非常适宜,尤其对低温或高温状态下储存物资的效果更为显著,在地下比在地面创造这样的环境容易,且造价和运营费用较低。

##### 3. 具有良好的抗灾和防护性能

地下空间建筑有较强的防灾减灾优越性,由于地下空间处于一定厚度的土层或岩层的覆盖下,可免遭或减轻包括核武器在内的空袭、炮轰、爆破的破坏,可有效防御包括核武器在内的各种武器的杀伤破坏,同时也能较有效地抗御地震、飓风、水灾等自然灾害,以及爆炸等人为灾害。

##### 4. 社会、经济、环境等多方面的综合效益好

在大城市有规划地建造地下各种建筑工程,对节省城市占地、节约能源(有统计数据表

明,地下与地面同类型建筑空间相比,其空间内部的加热或冷冻负荷所耗能源可节省费用30%~60%)、克服地面各种障碍、改善城市交通、减少城市污染、扩大城市空间容量和提高城市生活质量等方面,都能起到极其重要的作用,是现代化城市建设的必由之路。

#### 5. 施工条件较复杂,造价较高

地下空间建筑由于处在岩土中,因此,施工难度大且复杂,一次性投资成本高,但使用寿命长,其封闭的特性对设备要求较高,人对地下空间的适应性较差。

城市地下空间开发利用往往是在大城市形成之后进行,而且要与地面建筑、交通设施等分工、配合和衔接,因而它要通过各种岩土层、河湖、建筑物基础和市政地下管道等。修建时既要不影响地面交通与正常生活,又要使地面不沉陷、不开裂,绝对保证地面或地下空间物体与设施的安全,这就给地下空间开发利用增加了难度,为此必须有可靠的施工组织设计和可靠的技术措施来保证。一般来讲,地下空间开发利用的施工期较长,工程造价较高,但随着科技的进步,地下空间开发利用的某些局限性将会逐渐得到改善或克服。

#### 6. 城市地下空间自然光线不足,与室外环境隔绝,对防水防潮要求较高

地下空间用于长期居住应选择地下掩土式或窑洞式建筑,全埋式地下空间建筑适用于工业、国防公共场所、民防、交通与贮存库等。

#### 1.1.1.4 地下空间开发利用发展前景

城市地下空间开发利用的主要趋势是综合化、分层化、深层化。地下空间形成人车分流;市政管线分层分置规划,使地下功能既区分又协调,发挥各自的功能优势;城市人口集中、繁华地带交通地下化;综合管廊的建设将成为必然,实现各类管网地下化,避免各部门、各行业因利用地下空间而频繁、重复挖破地面的现象。具体体现在以下诸方面。

##### 1. 城市可持续发展的要求

随着城镇化的进展,将出现居住在城市的人口比居住在乡村的人口还多。城市人口、地域规模、城市的生存环境和21世纪城市可持续发展的战略是当今世界的最热门话题。

城市是现代文明和社会进步的标志,是经济和社会发展的主要载体。随着我国城市化的加快,城市建设快速发展,城市规模不断扩大,城市人口急剧膨胀,许多城市不同程度地出现了建筑用地紧张、生存空间拥挤、交通堵塞、基础设施落后、生态失衡、环境恶化等问题,被称为“城市病”,给人类居住条件带来很大影响,也制约了经济和社会的进一步发展,成为现代城市可持续发展的障碍。如何治理“城市病”,提高居民的生活质量,达到经济与社会、环境的协调发展,成为亟待解决的重要社会课题。

改革开放以来,中国经济高速发展,促进了城市化水平的迅速提高,具体表现在城市数量增加和城市规模扩大。据国家土地管理局监测数据分析,已建城区规模扩展都在60%以上,其中有的城市呈数倍增长,其结果是占用了大量的耕地。我国人多地少,人均耕地占有面积只有世界平均水平的1/4。城市不能无限制地蔓延扩张,只能着眼于走内涵式集约发展的道路。城市地下空间作为一种新型的国土资源,适时有序地加以开发利用,使有限的城市土地发挥更大的效用,这是必然的趋势。

按照国际标准,城市人口密度为2万人/km<sup>2</sup>属于拥挤情况。上海城区平均人口密度为4万人/km<sup>2</sup>,局部地区为16万人/km<sup>2</sup>;北京城区四个区的平均人口密度为2.7万人/km<sup>2</sup>,均为超饱和状态,位于世界城市人口密度之首。随着城市经济发展和房地产开发,城市建筑和道路大规模建设,使可用于园林绿化的面积日益减少,据统计,我国城市人均绿化面积只有3.9 m<sup>2</sup>。上海市人均绿地面积7 m<sup>2</sup>,距国家制定的人均10 m<sup>2</sup>的绿化卫生标准还有相当

的差距。按联合国的建议,城市公共绿地面积应达人均  $40 \text{ m}^2$ 。莫斯科人均绿地面积为  $44 \text{ m}^2$ ,伦敦为  $22.8 \text{ m}^2$ ,巴黎为  $25 \text{ m}^2$ 。我国大中城市与国家制定的绿化卫生标准及发达国家大城市相比,差距更大。

交通拥挤、行车速度缓慢已成为我国许多城市普遍的非常突出的问题。如北京市主干道平均车速比 10 年前降低 50% 以上,而且正在以每年  $2 \text{ km/h}$  的速度递减,市区 183 个路口中,据统计,严重堵塞的达 60%,阻塞时间长达半个小时。交通堵塞的关键在于城市人均道路面积及道路与城市面积比太低。北京城区人均道路面积  $4.4 \text{ m}^2$ ,道路面积占城市面积的 8.4%,北京每公里汽车拥有量 400 余辆,为发达国家大城市汽车拥有量的数倍。北京快速路面积和立交桥数量均为全国之首,即便这样,北京道路面积自改革开放以来仅增加了 60%,而同时期机动车数量却增加了 10 余倍。道路的扩展远远跟不上车辆的增长。发达国家解决城市“交通难”的经验表明,发展以地下铁道为主的高效益、低能耗、轻污染的轨道交通才是根本出路。

完善的基础设施是改善城市环境的必要条件。我国一些大城市城区普遍存在污水排放和处理设施陈旧,固体垃圾堆放在郊区,供电、通信、供水、供热公用基础设施落后于城市扩张和城市人口增加的现象,这些必然会造成城市环境的恶化。当前,城市大气污染问题日益严峻,全国 500 多座城市,大气质量达到一级标准的不到 1%。2013 年 12 月,全国大范围的雾霾强度之大、范围之广、历时之长,震惊世界、震惊国人。酸雨面积超过国土面积 40%。80% 的城市污水未经处理排入江河,城市河段水质超过 3 级标准的已占 78%,50% 以上的城市地下水受到污染,全国有 7 亿~8 亿人饮用污染物超标的水。垃圾围城现象普遍,我国年生产生活垃圾 1.46 亿吨,每年还在以 10% 的平均增长率上升。生活垃圾只有 2.3% 被处理,其余只能堆积,堆存量高达 60 多亿吨,占地 30 多万亩。发达国家城市建设的经验之一是把市政公用设施管道汇集,建立便于维修管理的多功能公用隧道——城市综合管廊。修建地下垃圾收集管道系统、垃圾焚烧厂,以减量化、无害化、资源化方式处理垃圾,是城市垃圾的根本出路和解决问题的长远目标,但投资大、周期长,对发展中国家来说难以承受。因此,在市郊接合部,利用荒地、滩涂修建符合卫生标准的大型地下堆场的解决方案被提了出来。

对于人口和经济高度集中的城市,不论是战争还是自然灾害,都会给城市带来人员伤亡、道路和建筑损坏、城市功能瘫痪等重大灾难。众所周知,地下空间开发利用具有良好的抗震、防空袭和防化学武器等多种功能,是人们抵御自然灾害和战争危险的重要场所。在城市建设过程中兼顾城市防灾修建大量平战两用的地下工程,使城市总体抗灾、抗毁伤能力有所提高,也是实现城市可持续发展的重要基础。

当今发达国家的城市已把地下空间开发利用作为解决城市人口、环境、资源三大危机的重要手段和医治“城市综合征”、实施可持续发展的重要途径。

## 2. 地下空间开发利用规划

城市向三维空间发展,即实行立体化的再开发,是城市中心区发展唯一现实可行的途径。城市产生之初,其发展总是沿二维延伸,只有当生产力和科学技术的发展使得人类有能力向高空和地下发展时,城市才走上三维方向综合发展的轨道。发达国家大城市中心区都曾经先出现向上部畸形发展,而后出现“逆城市化”的教训。由于城市中心区经济效益高,尤以房地产业集中于城市中心区,造成城市中心区高层、超高层建筑林立,人流、车流高度集中。为了解决交通问题,又新建高架道路。高层建筑、高架道路的过度发展,使城市中心区环境恶化,城市中心区逐渐失去了吸引力,出现了居民迁出、商业衰退的“逆城市化”现象。

城市发展的历史表明,以高层建筑和高架道路为标志的城市向上发展的模式不是城市空间最合理的模式。人类对于城市空间资源的开发利用,大致经历了以下几个阶段:地面空间→高空以及浅层地下空间→深层地下空间。在实践中形成地面空间、上部空间和地下空间协调发展的城市空间构成的新概念,即城市立体化再开发。

城市地下空间是不可多得的宝贵资源,必须进行系统科学的规划,不仅要适应当前的发展,还要适应未来长远的发展。城市地下空间开发利用是城市建设的有机组成部分,与地面建筑紧密相连成为不可分割的整体,地下空间规划要做到与地面规划的协调性与系统性,形成一个完整的体系,地上地下协同发展。在城市地下空间的开发利用中,要重点突破、协调发展,以大型骨干项目为纽带,带动地下空间建设的发展。城市地下空间开发不能只建单一的某一项工程或只考虑单一的某一项功能,而是要综合考虑各方面的需要,建成地下多功能综合体,地下和地上协调一致才能充分发挥作用。一座城市可以先确立几个大的项目,如地铁、地下商城、地下大型公共设施等,竖向分层开发与地面建筑相互呼应、相互衔接,依次带动其他单体工程的开发。大型项目预留接口,点线结合,滚动开发,逐步完善,形成由大型工程连带起来的地上地下相互联系的主体网络体系。城市地下空间开发利用都属于地下建筑,它与地面建筑有较大的不同,一旦建成则局部改变了地层结构,并将永久地保存,不像地面建筑那么容易拆除改建。隧道及地下空间开发利用建设周期长,投资大,施工困难大,必须依靠科学技术,按照基本建设的规律和程序进行。

### 3. 大型地下综合体、地下街是城市密集区发展的趋势

城市地面以下的空间应全面利用,这部分空间应按浅层空间考虑,深度为0~10 m,郊区或耕地应保留一定的自然厚度,主要用于自然绿化及生态平衡,这一厚度至少为10 m,根据地表情况甚至达到15 m,所以郊区或乡村地下开发深度应在地表15 m以下。

城市浅层地下空间开发的方向应以工业与民用项目为重点,只要城市地面项目功能是合理的,地下项目应与地面项目相结合。如地面是商业服务中心,相应地,地下顶层也应是带有商业性质的项目,下层为地下交通网、车库及公用设施等。

日本城市地下空间开发利用已达到相当的规模。东京、横滨、大阪、名古屋等八座城市,地下铁路运营总里程达500多千米。各大城市有地下街82处,面积110万 $\text{m}^2$ 。地下机动车停车场152个,占停车场总数的43%,可停车30万辆以上,占总停车车辆数的50%。地下自行车停车场50个,可停放车辆3万辆以上。49座城市建有综合管廊,总长300 km。日本东京八重洲地下街,长400 m,宽80 m,建筑面积69 200  $\text{m}^2$ ,共三层,顶层为商业服务,中层为车库及地铁,底层为机房,管线也都设有单独的廊道。日本正向深层次、多功能的地下空间开发利用发展。

自20世纪80年代以来,我国城市地下空间开发利用遵循平战结合的原则,与城市建设相结合,以地下铁道工程为主题,陆续建成一批经济效益和社会效益明显的地下商场和地下综合体。上海结合地铁1号线修建的人民广场、徐家汇地下商业街,既疏散了客流,又方便了居民的购物。沈阳新客站综合开发体,鞍山、西安、石家庄、郑州、武汉、洛阳、大连、长沙等站前广场综合体,西安、吉林、长春、哈尔滨和成都的地下商业街都初具规模。哈尔滨市若干个地下商业街连成一体,形成面积为25万 $\text{m}^2$ 的地下城。大型地下综合体将会得到很大发展。

### 4. 地下铁道等城市交通的建设为地下空间开发利用的重点

目前,各国大中城市交通所出现的矛盾都是相同的,地下交通线路网对缓解城市交通拥挤和城市污染起着十分重要的作用。地下交通网主要包括地下公路交通网、地下铁道交通

网等。从1863年英国伦敦建成第一条6.5 km的地下铁道到目前全世界已有100多座城市建设了地铁,而且,地铁建设的总体趋势是地面、高架、地下铁道组成一体的快速交通系统。地下交通网建设深度既有浅层也有深层,在5~30 m不等。在日本除地铁外,正在兴建的地下50 m处的隧道,将以时速为600 km的地下飞机把东京和大阪连接起来。

随着城市的发展,海底隧道(如英吉利海峡隧道)、越江隧道(如上海黄浦江越江隧道)等,也都相应地发展起来。

#### 5. 海底隧道

受日本青函隧道、英法海底隧道的鼓舞,在世界范围内掀起一场海底隧道热。意大利计划利用海峡隧道把本土和西西里岛连接起来;日韩两国正在筹建穿越对马海峡隧道。此外在丹麦大海峡、直布罗陀海峡、白令海峡、马六甲海峡、巽他海峡、波斯普鲁斯海峡、宗谷海峡、间宫海峡等世界许多海峡都在进行海底隧道的规划和调查。我国除对琼州海峡隧道完成可行性研究以外,不少学者提出了跨越渤海湾的南桥北隧固定联络通道的设想,跨越长江入海口连接上海—崇明的南桥北隧于2009年顺利通车。海峡隧道以其全天候、大运输量、低能耗、安全高效等优点,越来越引起各国工程界的重视。但由于海底隧道具有建设投资大、技术要求高、施工难度大、建设周期长等特点,需充分论证其可行性。

#### 6. 发展具有防灾功能的地下空间

几百年的历史告诫人们,对人类威胁最大的是自然灾害、战争浩劫和生产事故三项,而地下空间开发利用对上述三项威胁都具有良好的防御性能,所以在地下空间规划时都有明确的防灾方面要求,如面积、出入口数量、垂直交通工具等。

#### 7. 城市市政设施的地下空间开发利用

城市市政基础设施是城市的生命线系统,包括水、暖、电、气等供应及排放系统。城市基础设施必须与城市总体规划、分区规划相结合,系统考虑。管线地下综合管廊则代表了其发展方向。

#### 8. 原有地下空间或天然洞室的利用

在城市地下空间开发利用过程中,经常有早期已开发的地下空间或天然形成的洞室,对原有的地下空间的维修、改造、处理,以及与新开发的地下空间的相互联系,自然是城市地下空间开发利用过程中的重要课题,特别是一些民防工程,其工程质量水平已达不到的要求水准,需经过改造才能投入使用。

天然洞室在山区城市中仍然存在,其开发利用较为经济,常开发成民用、工业、景观或军事建筑等。目前,有很多天然洞室被开发使用。

#### 9. 发展建立水和能源等的地下贮存系统

水和能源贮存系统目前在有些国家已经有成功的经验,如天然气、热能、油的贮存等。从实际建造看,地下贮存系统具有安全、节能、经济等多种优点,它必将得到大力发展。图1-1所示为美国液化天然气冻土库。图1-2所示为瑞典的一座地下热水库,它建在210 m深的地下岩石中,把地面上热电站余热产生的热水存在容积为20万 $\text{m}^3$ 的洞罐中,以供某大居民区使用。图1-3所示为美国的两种岩石蓄热库,在开挖后的洞库中全部用石碴回填,中间埋设三排管道,从当中一排管道通入热空气,流向上下两排管道,将石碴加热,利用岩石良好的蓄热性能将热能长期贮存。使用时,通入常温空气,被加热后输出。热空气可以由热电站提供,也可由太阳能收集器生产。这种蓄热库的输入和输出温度在500 $^{\circ}\text{C}$ 以上,可贮存4~6个月,造价低,容量很大。当前,地下2 000~4 000 m的高温岩体热能利用,正引起各国的重视。

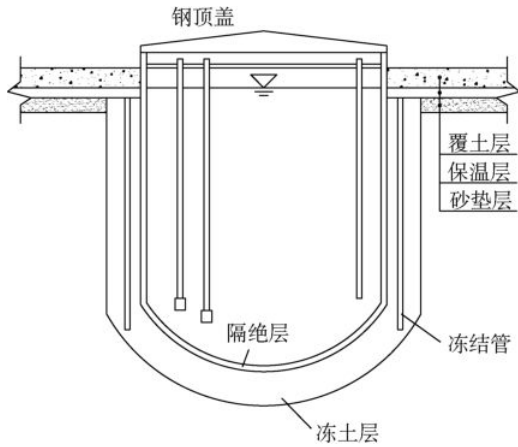


图 1-1 液化天然气冻土库

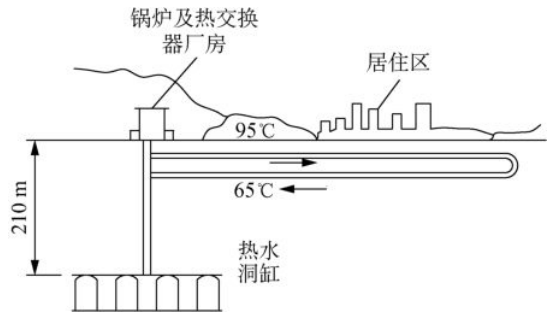


图 1-2 地下热水库

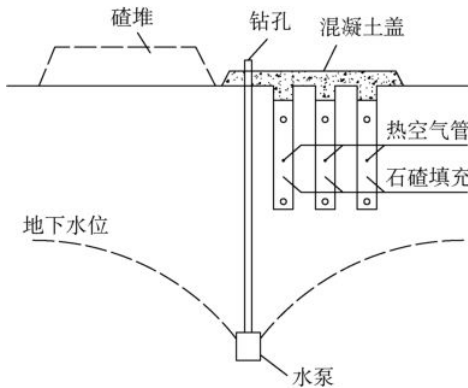
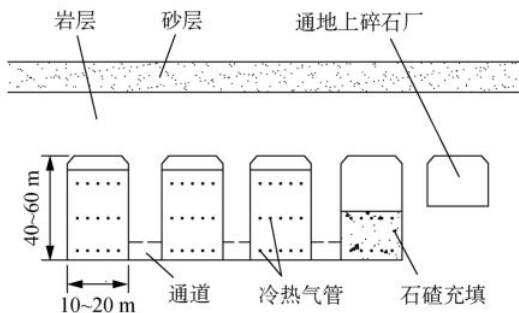


图 1-3 岩石蓄热库



此外,利用地下空间的密闭环境贮存和处理放射性废物的研究和试验也正在英国、瑞典和加拿大等国进行。

利用地下热稳定性好,能承受高压、高温和低温的能力,可大量储存水和能源。建造大容量水库成本过高,除必需外,应尽量利用土层中的含水层,特别是已疏干的含水层,这样,工程费用比建储水池小得多。储存低峰负荷的多余能量,供高峰时使用;储存常规能源以建立战略储备;储存间歇性生产的能源供无法生产时使用;储存天然的低密度能源,如夏季的热能、冬季的冷能等,供交替使用等都是能源储存的重要内容。可根据能源的不同性能与要求分别建造。

关于城市地下空间开发利用开拓发展的方向问题,无论在何处都应把城市地面空间与地下空间作为一个整体来统一规划,特别是在已形成相当规模的大城市,城市立体化再开发过程应是有计划、有目的地逐步实现。随着经济的发展,科学技术的不断进步,城市地下空间开发利用势必进入蓬勃发展的时期。

### 1.1.2 地下空间类型

城市地下空间有许多分类方法:按使用性质分类,按周围围岩介质分类,按设计施工方法分类,按建筑材料和断面构造形式分类,也有按其重要程度、防护等级、抗震等级分类等。