

普通高等学校岩土工程（本科）规划教材

城市地下工程概论

郭院成 主编

CHENGSHI DIXIA GONGCHENG GAILUN



黄河水利出版社

普通高等学校岩土工程(本科)规划教材

城市地下工程概论

主编 郭院成

黄河水利出版社

· 郑州 ·

内 容 提 要

本书为普通高等学校岩土工程(本科)规划教材。本书根据最新的技术规范编写,结合岩土工程与城市地下工程理论和技术研究发展现状,同时吸收了郑州大学岩土与地下工程研究所多年来的最新研究成果,系统介绍了城市地下空间开发利用过程中所涉及的理论和技术内容,具体包括城市化进程中的地下空间工程、桩基工程概论、复合地基技术概论、基坑支护工程概论、暗挖技术、地下建筑设计概论、岩土与地下工程监测技术、地下工程施工对环境的影响与控制、城市地下空间规划导论等。

本书内容丰富,可作为普通高等院校城市地下空间工程专业、土木工程专业地下建筑工程方向本科生、研究生教材,也可供地下工程、岩土工程等相关高校师生及广大工程技术人员使用或参考。

图书在版编目(CIP)数据

城市地下工程概论/郭院成主编. —郑州:黄河水利出版社,2014.3

普通高等学校岩土工程(本科)规划教材

ISBN 978-7-5509-0742-3

I. ①城… II. ①郭… III. ①城市建设-地下工程-高等学校-教材 IV. ①TU94

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第045104号

策划编辑:王志宽 电话:0371-66024331 E-mail:wangzhikuan83@126.com

出版社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼14层 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371-66026940,66020550,66028024,66022620(传真)

E-mail:hhsclcs@126.com

承印单位:黄河水利委员会印刷厂

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:19.5

字数:450千字

印数:1—3 100

版次:2014年3月第1版

印次:2014年3月第1次印刷

定价:39.00元

前 言

为贯彻落实教育部关于进一步加强高等学校本科教学工作的若干意见和教育部关于以就业为导向深化高等职业教育改革的若干意见的精神,加强教材建设,确保教材质量,组织制订了教材规划。本教材为城市地下空间工程专业、土木工程专业地下工程方向系列教材。

本书依据城市地下空间工程专业本科教育培养目标和方案以及最新相关规范(规程)编写。本书在内容编写上,既注意先进性与实用性的协调,又注意新规范和新成果的引用。在满足培养要求和符合学生认知特点的基础上,力求遵循如下原则:

(1) 强调基本概念、基本原理和基本方法与要求。

力求准确阐述本课程的基本概念和基本原理,使学生在了解城市地下空间开发利用所涉及的基本概念和基本理论方法基础上,能认识城市地下空间工程的基本特点,同时在涉及规范时,力求反映规范的基本原则和基本规定,以及与城市地下空间工程的基本理论和基本概念的内在关系,有利于学生对基本原理的应用。

(2) 适当扩展学生的知识面。

结合城市地下空间开发利用技术近年来的发展,介绍了先进的基础理论、设计施工方法、监测技术等新知识。

(3) 内容层次分明,适应多层次教学要求。

在章节安排上,力求层次分明,使全书各部分内容既相互关联、具有系统性,又具有相对独立性,以适应不同学时、地区、类别教学的需要。

城市地下空间工程涉及固体力学、结构力学、岩土力学、流体力学、计算力学以及结构工程、基础工程、地下工程、水利工程、海洋工程、隧道工程、环境工程等多门学科,多学科交叉、系统性强。我国城市地下空间的开发利用起步较晚,但发展迅速。在开发利用理论研究和实践应用方面已取得了巨大的进步,形成了更加完善的理论体系和越来越丰富的实践经验。

全书共9章,以第1章“城市化进程中的地下空间工程”为主线,介绍了国内外城市地下空间开发利用现状和城市地下空间工程开发利用技术,以及地下空间开发与环境保护等。第2章“桩基工程概论”介绍了桩基工程的设计、施工要求和桩基试验新技术以及桩基工程的新进展。第3章“复合地基技术概论”介绍了复合地基设计、施工要求和试验技术以及复合地基新技术进展概况。第4章“基坑支护工程概论”介绍了基坑支护形式及适用范围,基坑工程设计、施工及监测与信息法施工基本要求以及基坑工程变形控制技术及应急措施等。第5章“暗挖技术”介绍了钻爆法、浅埋暗挖法、TBM全断面掘进、盾构法、沉管法、免开挖顶管以及地铁车站的盖挖施工技术。第6章“地下建筑结构设计概论”介绍了地下主体结构形式与选型、设计与施工技术要求等。第7章“岩土与地下工程监测技术”介绍了岩土工程监测的技术要求和方法。第8章“地下工程施工对环境

的影响与控制”介绍了地下工程施工中产生的环境问题及环境保护技术等。第9章“城市地下空间规划导论”介绍了城市地下空间开发利用过程中的规划方法和技术要求等。

本书的编写及编写分工如下:第1、3、4章由郑州大学郭院成、郑州大学李明宇编写,第2、6、8章由郑州大学郜新军编写,第5章由河南理工大学王立平编写,第7章由李明宇编写,第9章由河南大学张建伟编写。郭院成担任本书的主编,并负责统稿。

本书所涉及的岩土工程理论与技术方面的最新研究成果部分受到了国家自然科学基金项目长短桩复合地基协同工作机制及变形刚度计算理论研究(50978235),河南省重大科技攻关项目小康型城乡住宅关键技术研究(981150121),河南省科技攻关项目静压预制桩复合地基新技术的试验研究与应用(001150222),河南省科技攻关计划项目水泥土桩墙复合土钉支护技术研究(0224620011),河南省自然科学基金项目桩锚支护结构施工力学及变形控制理论研究(0211063200),桩锚与土钉联合支护结构协同工作机理及其优化设计理论(0611010300),河南省高校青年骨干教师基金项目水泥土桩复合土钉基于增量法的变形过程分析,郑州市科技局重大科技专项城市快速路工程施工工艺工法研究与应用——桩基后注浆技术试验与应用研究(113PSHKS439)等项目的大力支持。编写过程中得到了郑州大学综合设计研究院有限公司周同和教授级高级工程师以及郑州大学岩土与地下工程研究所各位同事的帮助和大力支持,书中最新研究成果涵盖了童怀峰、李峰、张景伟等研究生的博士学位论文研究成果,以及王立明、秦会来、李明宇、宋卫康、李红霞、杨文、商继伟、方高奎、薛强、袁志波、王坤、吴鹏、靳军伟、陆俊虎、夏锦红、许红、王伟玲等研究生的硕士学位论文的核心研究成果,在此向他们卓有成效的科研工作表示衷心感谢!

本书编写过程中参考并引用了有关院校编写的教材,以及许多专家、学者的相关论著,在此一并表示感谢。

限于编者的水平和时间,对书中谬误和不当之处,敬请读者批评指正。

编 者

2013年11月

目 录

前 言

第 1 章 城市化进程中的地下空间工程	(1)
1.1 城市地下空间开发利用的意义	(1)
1.2 国外城市地下空间开发利用概况	(5)
1.3 我国城市地下空间开发利用现状	(15)
1.4 城市地下空间开发利用技术	(28)
1.5 地下空间开发与环境保护	(46)
参考文献	(50)
第 2 章 桩基工程概论	(52)
2.1 概 述	(52)
2.2 桩和桩基的分类	(53)
2.3 单桩竖向承载力的确定	(56)
2.4 桩基施工技术	(62)
2.5 桩基测试技术	(81)
2.6 桩基新技术进展	(105)
参考文献	(109)
第 3 章 复合地基技术概论	(111)
3.1 概 述	(111)
3.2 复合地基的类型及适用范围	(113)
3.3 复合地基设计技术要求	(118)
3.4 复合地基试验技术	(121)
3.5 复合地基技术理论的发展	(128)
参考文献	(135)
第 4 章 基坑支护工程概论	(136)
4.1 基坑支护形式及适用范围	(136)
4.2 基坑工程的特点及设计基本要求	(150)
4.3 基坑工程变形控制技术及应急措施	(153)
4.4 新型复合支护体系	(160)
参考文献	(169)
第 5 章 暗挖技术	(170)
5.1 暗挖技术发展概况	(170)
5.2 钻爆法施工技术	(172)
5.3 浅埋、超浅埋暗挖法施工技术	(180)

5.4	TBM 全断面掘进机施工技术	(183)
5.5	盾构法施工技术	(188)
5.6	沉管法施工技术	(197)
5.7	免开挖顶管技术	(202)
5.8	地铁车站的盖挖技术	(204)
5.9	辅助工法	(209)
	参考文献	(218)
第 6 章	地下建筑设计概论	(219)
6.1	地下主体结构概念与特点	(219)
6.2	地下主体结构型式与选型	(220)
6.3	地下建筑设计条件与要求	(224)
6.4	地下工程的防水设计	(227)
	参考文献	(238)
第 7 章	岩土与地下工程监测技术	(239)
7.1	岩土工程监测的意义	(239)
7.2	盾构法施工监测	(239)
7.3	矿山法施工监测	(241)
7.4	边坡工程施工监测	(248)
7.5	软土地基施工监测	(260)
7.6	岩土工程监测案例	(266)
	参考文献	(282)
第 8 章	地下工程施工对环境的影响与控制	(283)
8.1	地下工程对环境的影响	(283)
8.2	地下水控制技术	(287)
	参考文献	(291)
第 9 章	城市地下空间规划导论	(292)
9.1	开发利用城市地下空间的战略意义	(292)
9.2	中国城市地下空间利用的发展道路	(295)
9.3	国内外城市地下空间规划概况	(301)
9.4	城市地下空间规划的指导思想、任务与主要内容	(302)
	参考文献	(304)

第1章 城市化进程中的地下空间工程

随着城市化进程的不断加快和区域经济的不平衡发展,进入21世纪的中国大中型城市,尤其是沿海城市,人口暴增、建筑过密、交通拥挤,使原已满负荷运转的城市,全面进入超负荷状态。为了改变目前中国城市的这种病态发展模式,缓解由于人口、建筑、车辆过快增幅给城市有限地面空间和生态环境带来的恶劣影响,对城市地下空间进行系统、适度、有序地开发利用,已然成为提升现代化城市综合竞争力的有效手段。

1.1 城市地下空间开发利用的意义

我国改革开放以来,社会经济各项事业迅猛发展,截至2012年年底全国城镇人口比例已超过50%,大、中、小型城市数量不断增加,城市规模也在迅速扩大。城市中尤其是大城市中人口数量的迅速增长,使城市地面越来越拥挤,传统的道路交通设施已经不能适应快速发展的现代社会的需要,成为制约城市经济发展和可持续发展的主要瓶颈。为了缓解目前中国各地区城市地上空间的发展压力,地下空间的开发利用为城市的可持续发展提供了新的方向。

1.1.1 中国城市面临的问题

高度的社会化分工与协作、高效能的配套和基础设施、高质量的生活环境、高效率的管理工作成为中国城市化发展的奋斗目标。然而,经济增长过快、人口增长过快、区域经济发展不均衡也使现代城市空间与城市功能之间的各种矛盾日益尖锐,出现了各种城市问题。用地紧张、住房短缺、设施滞后、交通阻塞、供水不足、环境污染以及失业、生活贫困、社会不安定等不利于城市自然环境和社会稳定的非正常状况日趋增多。

21世纪初期开始,我国政府不断采取措施治理城市的发展问题,但城市问题继续恶化的趋势并没有得到有效遏制,我国大中型城市正面临着日益严重的发展危机。

(1)人口增长过快。人口的快速膨胀导致城市空间的过度拥挤、住房紧张、就业岗位竞争激烈、教育与医疗保障压力过大,严重影响了城市人口的生活质量。区域经济发展失衡和城市化进程过快导致大量人口涌入经济发达的沿海地区,造成沿海城市人口爆棚。当城市人口远远超出了城市本来所能容纳的人口数量时,便会出现拥挤不堪的现象,城市各种设施超负荷运转,人工环境不堪重负。人口数量庞大、人口密度过高,是引发各类城市问题的导火索。

(2)城市交通拥挤。城市交通拥挤、停车设施不足、交通事故频繁发生等一系列交通问题普遍存在。城市交通的阻塞问题使人们消耗在路上的时间不断增加,造成整个城市效率的降低,严重地影响了城市的经济发展。交通问题已经成为城市发展中最突出、最紧迫的问题,同时也是最棘手的问题。

(3)环境污染严重。环境污染包括大气污染、水污染、固体废弃物污染和噪声污染。汽车是城市空气污染、噪声污染的来源,尽管各国采取了严格控制汽车尾气排放及噪声等的一系列措施,但汽车的普及仍是造成空气污染严重的重要原因之一。中心区内高层建筑林立,呈现出高强度的空间利用形态,导致阳光和绿地大面积减少。同时,人口密集、工业集中、交通拥挤、各种废弃物大量排放,造成空气和水体污浊、垃圾遍地、环境恶化,许多城市出现了严重的环境公害,对人类的生存环境构成了危害。

(4)资源短缺和能源紧张成为制约城市发展的普遍问题。由于城市人口过于密集以及对资源的不合理使用,造成城市的资源短缺,直接影响了生产和生活,如用地紧张、地价飞涨、住房困难、供电紧张、清洁空气稀少等。同时,工业的发展、汽车数量的持续增长以及大量高能耗高层建筑的不断建造进一步恶化了城市能源供应的紧张局面。

(5)城市基础设施落后,城市建筑空间和基础设施建设不平衡。城市人口的增长和空间规模的扩大,对城市基础设施的供应能力提出了更高的要求,而城市基础设施的更新换代,需要较大的建设投资和较长的建设周期。城市基础设施能力不足已成为严重影响城市功能的显著问题。

(6)城市功能布局混乱、运行效率低下。现代社会的发展,使城市功能日益多样化、复杂化,导致原有的传统城市空间布局 and 现代城市功能不能相互适应,使城市各种功能在用地和空间紊乱的情况下不能协调运转,且造成了城市土地和空间资源的浪费,严重影响了人居环境以及城市正常功能的实现,极大地阻碍了城市发展。

1.1.2 地下空间开发与利用的意义

1.1.2.1 集约使用城市土地资源

中国城市发展沿用了“摊煎饼”式的粗放经营模式,表现在城市范围无限制地外延扩展。我国城市土地利用集约化程度处于国际较低水平,单位城市用地国民经济产值远远低于发达国家的水平;而且城市占地规模又处在快速增长中,占用了大量的耕地资源,每年有相当于三个中等县的耕地面积因被城市用地占用而流失。

耕地资源是一个国家最重要的战略资源之一,土地资源的可持续利用是中国实施可持续发展战略的基础。正视耕地资源稀缺并将继续减少的严峻现实,是中国政府和人民关注的最重大和最迫切的问题之一。1997年5月18日,中共中央国务院《关于进一步加强土地管理切实保护耕地的通知》要求,实行耕地总量预警制度,对人均耕地面积降低到临界点的地区,原则上不准再占用耕地。但是,目前城市人口的急剧发展与地域规模限制的矛盾仍然未能有效解决,致使中国城市发展只能走土地资源集约化使用的发展模式。

20世纪中叶以来,世界上许多发达国家和发展中国家已把对地下空间开发利用作为解决城市资源与环境危机的重要措施,实施城市土地资源集约化是城市可持续发展的重要途径。

1977年在瑞典召开了第一次地下空间国际学术会议,首次通过了呼吁开发利用地下空间的决议和文件。1980年在瑞典召开的“Rock Store”国际学术会议产生了《致世界各国政府开发利用地下空间资源为人类造福的建议书》。1983年联合国经济和社会理事会下属的自然资源委员会通过了确定地下空间为重要自然资源的文本,并把它列在其他工

作计划之中。1991年在东京召开的城市地下空间国际学术会议通过了《东京宣言》，提出了“二十一世纪是人类开发利用地下空间的世纪”。国际隧道协会为联合国准备了题为“开发地下空间,实现城市的可持续发展”的文件,其1996年年会的主题就是“隧道工程和城市地下空间在城市可持续发展中的地位”。1997年在蒙特利尔召开的第七届地下空间国际学术会议的主题是“明天—室内的城市”。1998年在莫斯科召开了以“地下城市”为主题的国际学术会议。在实践方面,瑞典、挪威、芬兰、加拿大、美国、日本和俄罗斯等国家在城市地下空间利用领域已达到相当的水平 and 规模。发展中国家,如埃及、印度、墨西哥等也于20世纪80年代先后开始了城市地下空间的开发利用。向地下要空间、要资源已成为城市可持续发展的历史必然和世界性的发展趋势,并以此作为衡量城市现代化的重要标志。

城市地下空间是一个巨大而丰富的自然资源,若得到合理开发,那么将对扩大城市空间、实现城市集约化发展具有重要的意义。城市地下空间可开发的资源量为可供开发的面积、合理开发深度与适当的可利用系数的乘积,这是一笔很可观而又丰富的资源。《大连市城市地下空间利用规划纲要》(讨论稿)中提出,开发浅层地下空间(深度30 m),开发面积为城市建设用地的30%(道路绿地建设用地),乘以0.4的可利用系数,地下空间开发资源量为5.8亿 m^3 ,可提供的建筑面积为1.94亿 m^2 ,超过现有大连市房屋建筑面积5921万 m^2 。

国外城市地下空间开发利用的经验是把一切可转入地下的设施转入地下,城市发展的成功与否取决于地下空间是否得到了合理的开发利用。世界各国开发利用地下空间的实践经验表明,可转入地下的设施领域非常广泛,涵盖了交通设施、市政基础设施、商业及文化娱乐设施、防灾设施、贮存及生产设施等。这种做法极大地改善了城市的人居环境,完善了集约化的城市效能。

1.1.2.2 能源及各种资源的节约与继续利用

在资源方面,按人口平均,中国是一个资源小国。我国人均能源占有量不到世界平均水平的1/2,人均水资源占有量为世界平均水平的1/4。实现资源的可持续利用有着重要意义。地下空间在这一方面具有得天独厚的优势。

地下空间由于岩土具有良好的隔热性,可防止造成地面温度变化的诸多因素如日晒雨淋等的影响,温度近乎恒定。因此,地下建筑物的能耗,远比地面建筑要少。建筑能耗占据了一个国家总能耗的很大比例,地下空间建筑在减小能耗、节约资源方面大有可为。

岩土的热稳定性与密闭性,使热量或冷量损失较小,基本不需要保温材料。利用岩石的自承能力,构造简单,使维护保养费用大大降低。地下空间为大规模的热能贮存提供了有利条件,如太阳能有季节性、昼夜性差异的特点,需要进行季节性贮存和利用,可以利用地下空间的特点,在地下水、岩石和土壤中贮存热量,这往往是最佳的甚至是唯一的一个选择。利用地下空间贮水,将冬季天然冰块贮存于地下,能用于夏季环境控制的空调系统。此外,也可将工业大量余热和用电负荷时多余电能加以贮存以供城市使用,这些都是可再生能源利用的有效形式,在国外得到了一定程度上的应用。

我国水资源短缺问题日益严重。一方面,全国476个城市中有300个城市缺水;另一方面,我国水资源在时空分布上又很不均匀,缺水的同时又有大量的淡水因为没有足够的

储存设施而白白流向大海。若能像芬兰、挪威等国那样,利用松散岩层、断层裂隙和岩洞等,或像日本那样建造人工地下河川、蓄水池或地下融雪槽,贮存丰水季节多余的大气降水供缺水季节使用,就能在很大程度上改观或克服因水资源在时空上分布不均的缺陷。

地下空间还可为物资贮存和产品生产提供更为适宜的环境,其独特的热稳定性和封闭性对贮存某些物资极为有利。在地下建造冷藏库,可以少用或不用隔热材料,温度调节系统也较地面冷库简单,运行和维护费用比地面冷库低的多;在地下建造油库,不仅有利于减少火灾和爆炸危险,而且由于地下温度稳定,受大气影响较小,油料不易挥发或变质,管理费用较地面油库节省 20.30%;在处理防潮防虫基础上,利用地下温度稳定建造地下粮库也具有明显的经济效益。

某些产品的生产对环境温度、湿度、清洁度、防微振等提出了很高的要求。在地面建筑中创造此类环境需要苛刻的条件和巨大的投资,但在地下空间则能利用岩、土良好的热稳定性和密闭性,创造良好的适宜生产的条件。

1.1.2.3 缓解城市交通矛盾

交通是城市功能中最活跃的因素,是城市可持续发展的最关键问题。交通阻塞、行车速度缓慢是中国大中城市普遍存在的突出问题,其问题的关键在于城市道路面积在城市面积中的比例及人均道路面积太低,每千米汽车拥有量太大,道路的扩展远远赶不上车辆的增长速度,这些是世界上任何城市都无法逃脱的问题,因此向城市地下要空间成为解决交通问题的关键。修建地下停车库是解决“停车难”问题的突破口,其具有容量大、用地少、布局容易接近服务对象等优点。在地下街、地下综合体建设中使地下停车场比例适当,解决停车难问题。结合地铁站修建地下车库,便于换乘地铁到达城市中心区,减轻城市中心区交通压力,提高地铁的利用率和减轻由汽车造成的城市公害。建设地铁交通网与地下通道、地下停车库、郊区火车相结合的体系是减少大城市中心区汽车数量、缓解城市交通压力、根治城市大气污染的有力措施。

1.1.2.4 改善城市生态环境

当前城市环境形势相当严峻。大气污染日趋加剧,全国 500 多座城市中,大气质量达到一级标准的不到 1%,我国城市占据了世界二十大污染城市中的十个,一些城市出现了不同程度的光化学烟雾事件,而且我国的酸雨区是世界上唯一的酸雨面积仍在扩大、降水酸度仍在升高的酸雨区。水污染现象严重,全国 50% 以上的城市地下水受到污染,有 7 亿~8 亿人饮用污染超标水,水污染加重了缺水矛盾,由污染造成的缺水量占了总缺水量的 10%。垃圾围城现象普遍,我国的生产生活垃圾处理的仅占 2.3% 左右,其余只能堆积,占用了城市周边大量土地。噪声污染普遍超标,全国有 1/3 的城市居民生活在噪声超标的环境中。建筑空间拥挤、城市绿化减少也是城市生态恶化的重要原因。

随着城市经济的发展和房地产开发,城市建筑和道路的大规模建设使可用于园林绿化的绿地和开敞空间日益减少。改善城市生态环境,减少城市大气污染,除发展地铁、轻轨等使用电能的公共交通网,减少尾气污染外,还要改变燃料能源结构,推广使用天然气等清洁能源。城市绿化是改善空气质量、消除空气有害物质的有效措施。利用地下空间建立污水收集、输送及处理的统一系统和垃圾、废弃物的分类、收集、输送及处理的统一设施,既节约了大量的城市用地,又可以有效地把污水和垃圾等的污染降低到最低限度。

1.1.2.5 提高城市综合防灾能力

城市的总体抗灾抗毁能力是城市可持续发展的重要内容。对于人口和经济高度集中的城市,不论是战争或是平时,自然灾害或各种突发情况都会给城市造成人员伤亡、道路和建筑破坏、城市功能瘫痪等重大灾难,构成城市可持续发展的严重威胁。实践证明,灾害对城市的破坏程度与城市对灾害的防御能力成反比。在城市总体规划中,除防洪、防空外,尚缺少综合防灾的内容,我国城市基础设施的防灾措施基本上处于空白状态,城市规划设计中缺少对防灾空间或避难空间的规划,各项城市防灾系统达不到现代城市的标准,在城市中缺少统一的防灾组织和指挥机构。

随着现代城市的高密度化和生活水平的高标准化,各种供给设施的建设将会急剧增加,需要改造和增设的管线也越来越多。由于历史的原因,中国城市公用事业地下管线比较混乱,每年管线破坏事故上万起,造成了严重的经济损失。为此,建设便于维修管理的多功能公用隧道——共同沟,可以减少马路的反复开挖以及施工对交通和城市居民生活的影响,便于维护检查和拆换,减少事故,提高城市基础设施的抗灾能力。

地下空间具有较强的抗灾特性,对地面上难以抗御的外部灾害如战争空袭、地震、风暴等有较强的防御能力,提供灾难时的避难空间、防灾物资储藏的防灾仓库、紧急饮用水仓库以及救灾安全通道等。

1.1.2.6 解决“城市综合症”的有效途径

很多发达国家在医治“城市综合症”的过程中,相继对其城市中心区进行改造和再开发。城市实施立体化开发,即向四维空间发展的模式,是城市中心区改造的唯一现实可行的途径。发达国家的大城市中心区曾经出现过向上部畸形发展而后呈现“逆城市化”或“城市郊区化”的教训,又称为内城分散化和城市中心区空心化。这是由于城市中心区经济效益高,所以各种资金纷纷涌向城市中心区投资,造成城市中心区高层建筑大量兴建,而为缓解车流、人流兴建了大量的高架道路,这些使城市环境迅速恶化,城市中心区逐渐失去吸引力,出现居民迁出、商业衰退的“逆城市化”现象。很明显,这不符合城市的集聚效应和原则。

城市发展历史表明,以高层建筑和高架道路为标志的城市向上部发展的模式不是扩展城市空间的最合理模式。在实践中逐渐形成地面空间、上部空间和地下空间协调发展的城市空间构成,即城市的立体化开发空间,才是未来城市空间的最合理模式。

充分利用地下空间是城市立体化开发的重要组成部分。地下空间开发的结果是扩大了城市空间容量,提高了集约度,消除了步车混杂现象,使交通顺畅,商业更加繁荣,增加了地面绿地,地面环境更加优美开阔,各种活动互相交融。这种开发模式有利于实现城市园林化和钱学森先生提出的“山水城市”的理想形态。

未来相当长一段时间内,缓解中国城市化进程过快和区域经济发展不平衡所造成的城市发展问题,唯一的途径是开发和利用城市地下空间。

1.2 国外城市地下空间开发利用概况

在世界建筑史上,人类最早对地下空间的开发和利用可以追溯到公元前 20 多世纪,

典型的代表作如古埃及的金字塔、古罗马城市中的排水系统。

埃及金字塔是著名的古代建筑,为世界七大奇迹之首。其工程浩大,结构之精细,至今还是未被揭开的人类之谜。埃及金字塔位于尼罗河西岸、开罗西南约 13 km 的吉萨地区,大约建于公元前 27 世纪。类似于我国古代的帝王陵墓,埃及金字塔是古埃及法老的墓穴。金字塔底座呈方形,愈上愈窄,聚于塔顶形成方锥形的建筑,其四面都形似汉文的“金”字,因此中文称为金字塔。埃及金字塔不仅反映出古埃及人高超的施工技术,同时也是古埃及人对地下空间利用的体现。

公元前 312 年,古罗马建筑了埋在地下的第一条水道,并辟建了第一条连接意大利中部和南部的阿比亚古道,逐渐形成城市的雏形。公元前 101 ~ 公元前 144 年,凯撒大帝将台伯河改道,扩大了台伯河边的用地,重新进行了罗马都市的规划,建设了新的罗马市集。为配合城市需求,又辟建新的地下水道,形成引水系统,公元前 144 年,便通过引水系统引进外地水源,供应罗马城内的用水。

目前,国外城市地下空间大规模开发和利用已历时 150 多年,无论是发展速度还是规模化、制度化、多样化,都远超中国。地下建筑的内部空间环境质量、应急系统和运营管理都达到了较高的水平。这里从时间、区域和功能三方面全面、系统地介绍国外城市地下空间开发历史和发展现状。

1.2.1 按时间划分

现代城市地下空间的利用始于 19 世纪末,地下空间开发较为著名的城市主要集中在亚洲的日本,欧洲的法国、德国、英国、瑞典、瑞士,以及北美的美国和加拿大。20 世纪 20 ~ 30 年代,以英、法、美为代表的国家,地下建设曾达到相当的规模,但是当时建设的出发点更多是着眼于防备需要。第二次世界大战之后,各国的经济进入复兴时代,20 世纪 50 年代后期至 70 年代前期伴随着城市中兴、商业区的复兴运动,出现过一轮城市地下空间大规模的开发。地下空间开发用途种类较多,有地铁、地下轻轨、地下商业街、市场、地下公共车库、地下道路等。现代城市地下空间开发利用,大体分为六个阶段。

1.2.1.1 城市地铁早期发展阶段

国外最早的城市地下空间工程始于地铁。英国伦敦于 1863 年就建成了世界上第一条地铁,开创了城市地下铁道建设的先河,美国纽约于 1867 年建成了世界上第二条地铁,1890 年电器牵引机车的发明应用之后,法国巴黎于 1900 年建设了第一条地铁,德国柏林于 1902 年建设了第一条地铁,西班牙马德里于 1919 年建设了第一条地铁,日本的东京于 1927 年建设了第一条地铁,目前世界上已经修建地铁投资运营的国家 and 地区有 40 多个,城市有一百多个。地铁改变了城市客运交通系统模式,也推进了城市地下空间的大规模开发利用。

1.2.1.2 第二次世界大战时期

第二次世界大战期间,已建成的城市地下空间设施(如地铁、地下室、大型下水道、废旧矿穴等)在防御空袭、维护生命财产安全、抵抗战争等方面发挥了巨大作用,使得地下空间的防护潜能得到了充分的验证。据统计,在遭受敌人空袭时,民防和地下防护设施建设相对较好的英国平均每受弹 1 t 伤亡 1 人。战后,欧美等发达国家充分认识到加强民防

工程建设、修建地下防护设施的重要地位和作用,曾掀起规划建设防空、备战地下工程的狂潮,成为影响世界城市地下空间开发利用的重要历史阶段。瑞士作为一个中立国家,接近300年没有战争,但是瑞士所有的建筑物都修建了地下防护工程,它的地下空间的开发主要是战时的防护和防灾。

1.2.1.3 城市复兴时期

进入20世纪60年代,世界主要工业发达国家处于政治稳定、经济飞速发展期,人口向城市大量积聚,为解决城市交通问题,轨道交通及地铁建设进入全面发展阶段。欧美等国的城市地铁均发展于20世纪五六十年代。伴随着地铁建设,地铁车站地区的地下街、地下车库,以及建筑物下的多层地下室、新建或改造地区的共同沟等地下空间设施得到很大发展。

1.2.1.4 石油危机影响阶段

20世纪70年代初期,石油危机引发了能源的地下化储存,世界范围内掀起了一场太阳能、地热能、余热利用,以及开发新型建筑来降低建筑物能耗的运动。这一时期,美国新型的太阳能建筑,中国地下窑洞的大改造,欧美等国的地下油库、气库、热水库、冰库、抽水蓄能电站等多种形式的地下空间利用设施均得到了空前大发展。

1.2.1.5 环境保护诉求影响阶段

进入20世纪八九十年代,大城市的交通拥堵、空气污染、噪声扰人、污水排放、建筑林立、绿地减少、热岛效应、空中黑色污染、古建筑与历史文化遗产保护等一系列环境问题已经成为实际性难题。各国都在结合国情探讨有效解决的新方法和新途径。各国共同的实践表明,开发利用城市地下空间资源,将城市的部分功能科学合理地转入地下,规划建设地下污水处理场、地下道路、地下车库、地下供热(冷)系统等设施,进一步提高城市土地竖向空间的开发利用价值,是解决诸多城市环境问题,提高城市运营效率和安全性,实现城市集约化、立体化和现代化的最有效途径之一。

1.2.1.6 可持续发展与地下空间利用阶段

20世纪是人类社会城市化、城市建设现代化快速发展的世纪。进入21世纪以来,全世界都面临着“人口、资源、环境”如何协调发展的难题,尤其是发达国家,都在思考一个共性的问题:人类社会和城市如何实现可持续发展。回顾总结20世纪发展经验和教训可以发现:比起海洋空间、宇宙空间,开发利用地下空间资源更加直接、经济和安全。城市地面围合占用的建筑空间高度已经超过500m,而城市地下空间开发利用深度除个别项目超过地下50m外,大部分均在地下30m以内。与地面相比,城市地下可供开发利用的空间资源潜力巨大。对城市地下空间资源进行科学的评估预测、编制规划、分层开发、综合利用已经成为当代城市实施可持续发展战略的主要内容之一。

1.2.2 按区域划分

在城市地下空间开发历史长河中,一些地下空间利用较早和较为充分的国家,如北欧的芬兰、瑞典、挪威和日本、加拿大等,正从城市中某个区域的综合规划走向整个城市和某些系统的综合规划,各个国家的地下空间开发利用在其发展过程中形成了各自独有的特色。

1.2.2.1 美国

纽约市地铁在世界上运营线路最长,达 443 km,车站数量最多,有 504 个,每天接待 510 万人次,每年接近 20 亿人次。纽约中心商业区有 4/5 的上班族都采用公共交通。市中心曼哈顿地区,常住人口 10 万人,白天进入该地区人口近 300 万人,多数是乘地铁到达。洛克菲勒中心地下步行道系统,在 10 个街区范围内,将主要的大型公共建筑在地下连接起来。南方城市达拉斯,一个有步行道 29 条的不受夏季高温影响的地下步行道系统,将市内主要公共建筑和活动中心在地下连接起来,休斯敦市地下步行道系统全长 4.5 km,连接了 350 座大型建筑物。旧金山市中心叶巴布固那地区的莫斯康尼地下会议展览中心的地面上,保留了城市仅存的开敞空间,建设了一座公园。美国纽约市的大型供水系统,完全设置在地下岩层中,石方量 130 万 m^3 ,混凝土 54 万 m^3 。除一条长 22 km、直径 7.5 m 的输水隧道外,还有几组控制和分配用的大型地下洞室,每一级都是一项复杂的大型岩石工程。

除此之外,美国地下建筑单体设计在学校、图书馆、办公、实验中心、工业建筑中也成效显著。一方面较好地利用地下特性满足了功能要求,同时又合理解决了新老建筑结合的问题,并为地面创造了开敞空间。如美国明尼阿波利斯市南部商业中心的地下公共图书馆、哈佛大学、加州大学伯克利分校,密执安大学、伊利诺伊大学等处的地下、半地下图书馆,较好地解决了与原馆的联系并保存了校园的原有面貌。

1.2.2.2 加拿大

加拿大突出的做法就是重点建设地下步行系统,庞大的交通系统、综合的服务设施和优美的环境享有盛名,保证加拿大在严冬时期各种商业、文化及其他事务交流活动的正常进行。多伦多地下步行道系统在 20 世纪 70 年代已有 4 个街区宽、9 个街区长,在地下连接了 20 座停车库、很多旅馆、电影院、购物中心和 1 000 家左右各类商店,此外,还连接着市政厅、联邦火车站、证券交易所、5 个地铁车站和 30 座高层建筑的地下室。这个系统中布置了几处花园和喷泉,共有 100 多个地面出入口。在这个地下综合区里,有超过 1 200 家零售商店。每天大约有 10 万名旅客穿过这个好像广场一样的地下综合区。

蒙特利尔能被评为当今世界上三个最适合人类居住的城市之一就归功于它有这个全世界最大的地下城,见图 1-1。蒙特利尔因为它每年有 4~5 个月的冬季而闻名。2 月的时候,气温会下降到 $-34\text{ }^{\circ}\text{C}$,一年的积雪量也能多达 2.5 m,同时还会伴随有呼啸的北风和让人睁不开眼的骤雨。另外,夏季又会带来令人窒息的闷热。7 月的时候,温度会升高到 $32\text{ }^{\circ}\text{C}$,湿度达 100%。这些使得开发和利用蒙特利尔的地下空间有了潜在的动力。

第一代的地下城建成于 1962 年,建

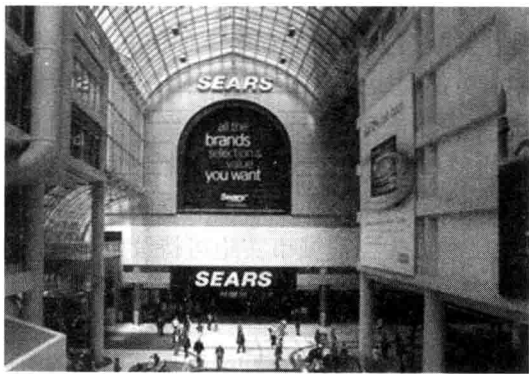


图 1-1 蒙特利尔地下城实景照片

筑面积为 50 万 m^2 , 加拿大国家铁路总公司、中央车站和伊丽莎白女王饭店都设在这里。蒙特利尔赢得了 1976 年夏季奥运会的主办权后, 地下城也引来了它的高速发展时期, 先后开辟出 4 条地下商业走廊, 大都位于同一条地铁交通干线的下面。到了 20 世纪 90 年代, 地下城进一步扩充并完善, 建设起更多的地下通道, 最终形成了一个由步行街通道联系起来的庞大系统。这个系统最深的地方上下可分五层, 邮局、超市、酒吧、咖啡屋、美容美发店一应俱全, 应有尽有。

蒙特利尔地下城长达 17 km, 总面积达 400 万 m^2 , 步行街全长 30 km, 连接着 10 个地铁站、2 000 个商店、200 家饭店、40 家银行、34 家电影院、2 所大学、2 个火车站和 1 个长途车站。地下之城实际上就是另外一个蒙特利尔。为了避免上面的恶劣天气, 每天有 50 万人进入到相互连接的 60 座大厦中, 也就是进入到超过 360 万 m^2 的空间中, 其中包括了占全部办公区域 80% 和相当于城市商业区总面积 35% 的商业空间。

1.2.2.3 欧洲

欧洲地下空间的开发始于 19 世纪, 因此欧洲对于地下空间的开发有许多成功的范例, 尤为让人称道的是开发地下空间与旧城保护相结合方面。欧洲国家城市中心区进行立体化开发, 发展了多种类型的地下空间, 形成了大型地下综合体。它的特点是规模大, 内容多, 水平、垂直方向上的布置也比较复杂。它把市中心的许多功能(特别是交通)转入地下, 而在地面实行步行化, 并充分绿化。

德国地下空间的开发利用注重保护有历史意义的旧城建筑。这些地下空间的开发不仅扩大了人类的生活空间和城市的功能设施空间, 而且具有以下更大的意义: 在建设了如此巨大的城市空间的同时, 为城市提供了更加优美的环境, 并与周围许多古老建筑取得了和谐统一, 例如著名的“大卢浮宫计划”。在无扩建用地、原有建筑必须保持的情况下, 设计者利用拿破仑广场下的地下空间容纳了全部扩建内容, 成功地对古典建筑进行了现代化改造。

在城市公共功能化方面, 对于地下空间的充分合理应用, 欧洲也做出了较好的典范, 例如挪威的大型地下供水系统, 其水源也实现地下化, 在岩层中建造大型贮水库, 既节省了土地又减少了水的蒸发损失。瑞典的大型地下排水系统, 不论在数量上还是在处理率上, 在世界上都处于领先地位, 瑞典排水系统的污水处理厂也全在地下, 埋深 30 ~ 90 m, 仅斯德哥尔摩市就有大型排水隧道 200 km, 拥有大型污水处理厂 6 座, 处理率为 100%。在其他一些中小城市, 也都有地下污水处理厂, 不但保护了城市水源, 还使波罗的海免遭污染。瑞典斯德哥尔摩地区有 120 km 长的地下大型供热隧道, 很多地区实现集中供热, 并正在试验地下贮热库, 为利用工业余热和太阳能节约能源创造有利条件。此外, 瑞典斯德哥尔摩市地下有共同沟 30 km 长, 建在岩石中, 直径 8 m, 战时可作为民防工程。瑞典是首先试用管道清运垃圾的国家, 在 60 年代初就开始研制空气吹送系统。1983 年在一个有 1 700 户居民的小区内建造一套空气吹送的管道清运垃圾系统, 预计可以使用 60 年。由于与回收和处理系统配套建设, 3 ~ 4 年就可回收投资。芬兰赫尔辛基的大型供水系统, 隧道长 120 km, 过滤等处理设施全在地下。

地下空间利用除众多的市政设施外, 就是发达的文化体育娱乐设施。在 20 世纪 90 年代建造的吉华斯柯拉的运动中心, 8 000 m^2 面积服务于 14 000 居民, 内设体育馆、草皮

和沙质球赛馆、体育舞蹈厅、摔跤柔道厅、艺术体操厅和射击馆等在交通方面合理利用地下空间。在芬兰,临近赫尔辛基市购物中心的地下游泳馆,其面积为 $10\,210\text{ m}^2$,建成时间为1993年。1987年完成了精神病医院地下的游泳馆和健身中心。为了保持库尼南小镇的低密度建筑和绿化的风貌,1988年建成为8 000居民服务的 $7\,000\text{ m}^2$ 的球赛馆也建于地下,内设标准的手球厅、网球厅,并有观众看台以及淋浴间、换衣间、存衣间、办公室等。里特列梯艺术中心每年吸引20万参观者,内设 $3\,000\text{ m}^2$ 的展览馆, $2\,000\text{ m}^2$ 的画廊,以及有1 000个座位的高质量音响效果的音乐厅。北欧地下空间的利用与民防工程的结合是其一大特点。

巴黎的地下建设了83座地下车库,可容纳43 000多辆车,弗约大街建设有欧洲最大的地下车库,地下4层,可停放3 000辆车。大量建设停车场是城市正常运转的重要条件,停车场建于地下可节约大量土地。巴黎市中心的卢浮宫是世界著名的宫殿,在无扩建用地,原有的古典建筑必须保持,无法实现扩建要求的情况下,设计者利用宫殿建筑包围的拿破仑广场下的地下空间容纳了全部扩建内容,为了解决采光和出入口布置,在广场正中和两侧设置了三个大小不等的锥形玻璃天窗,成功地对古典建筑进行了现代化改造。巴黎的列阿莱地区是旧城再开发充分利用地下空间的典范,把一个交通拥挤的食品交易和批发中心改造成一个多功能以绿地为主的公共活动广场,同时将商业、文娱、交通、体育等多种功能安排在广场的地下空间中,形成一个大型地下综合体。该综合体共4层,总面积超过20万 m^2 。巴黎雷雅乐地区处于旧城中心,原是一个大型食品批发中心,负担着法国 $1/5$ 人口的食品供应,但随着时代的变迁、日益沉重的交通负担以及本身的弱点,都使它不适宜再留在市中心。1962年借助于城市地铁系统的建设,将地面改造成一个开敞绿化公园,在地下设置商业服务中心。在巨大的地下空间中,容纳了3个购物中心、电影院、体育设施、植物园、停车场等设施,总面积达26.5万 m^2 。通过立体化的再开发,把一个地面上简单的贸易中心改造成一个多功能的公共活动广场。

俄罗斯属于地下空间开发利用的先进国家,特点是地铁系统和城市共同沟系统发达。莫斯科地下有130 km的共同沟。莫斯科地铁,分为三层,纵横交错,埋深达80 m,地铁以其建筑和运营的高质量而闻名于世,800万市民平均每人每天要乘一次地铁,地铁在莫斯科客运总量中所占比重为44%。

1.2.2.4 日本

1. 发展历史及现状

日本虽然比北欧等国起步晚,但其成熟程度有目共睹。例如,从高耸入云的大厦,到跨越海峡的高架路,再到日均流量达上千万的地铁网、商店鳞次栉比的地下街、用于通信和能源供应的地下管线网。人们的活动范围不再仅仅限于阳光普照的地方,而在深层的地下空间里,同样存在着另一个生机勃勃的世界。

东京从1927年建成了日本第一条地铁至今,已经有了12条地铁线路,营业线路总长度近300 km,在全球城市地铁中居第三位。东京平均不到 3 km^2 就设有一个地铁站。在那些位于城市中心的区域,地铁车站的密度更高。

20世纪30年代日本就开始建设地下商业街,于1957年东京第一条商业街建成。目前,日本至少在26座城市构筑了146条地下街,地下街及商业用途的建筑地下空间面积