

高等学校土木工程专业系列教材

地下建筑规划与设计

● 彭立敏 王薇 余俊 编著

DIXIAJIANZHUGUIHUA
YU SHEJI



中南大学出版社
www.csupress.com.cn

地下建筑规划与设计

彭立敏 王 薇 余 俊 编著



中南大学出版社
www.csupress.com.cn

图书在版编目(CIP)数据

地下建筑规划与设计/彭立敏,王薇,余俊编著.

—长沙:中南大学出版社,2012.9

ISBN 978-7-5487-0670-0

I.地... II.①彭...②王...③余... III.①地下建筑物-城市规划-教材②地下建筑-结构设计-教材

IV.①TU984.11②TU93

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第229144号

地下建筑规划与设计

彭立敏 王薇 余俊 编著

☐责任编辑 刘辉

☐责任印制 文桂武

☐出版发行 中南大学出版社

社址:长沙市麓山南路

邮编:410083

发行科电话:0731-88876770

传真:0731-88710482

☐印 装 长沙市宏发印刷有限公司

☐开 本 787×1092 1/16 ☐印张 18.5 ☐字数 455千字

☐版 次 2012年9月第1版 ☐2012年9月第1次印刷

☐书 号 ISBN 978-7-5487-0670-0

☐定 价 37.00元

图书出现印装问题,请与经销商调换

高等学校土木工程专业系列教材

编审委员会

主任	曾庆元	院士		
委员	(以姓氏笔画排序)			
	方理刚	王桂尧	刘杰	刘朝晖
	刘锡军	刘静	吕昀	任伯帜
	阮波	李九苏	李朝奎	余志武
	沈小雄	张向京	杨建军	杨伟军
	周志刚	周建普	周殿铭	钟新谷
	贺跃光	郭少华	徐林荣	高文毅
	唐依民	桂岚	黄立奎	蒋隆敏
	彭立敏	韩用顺	谭海洋	戴公连
	戴伟			

前 言

进入 21 世纪以来,随着我国国民经济高速、持续地发展,城市建设的规模 and 水平不断提高,城市地面用地短缺问题已日益突出,使得城市地下空间的开发利用已越来越受到人们的重视。中国目前已成为城市地下空间开发利用的大国,是世界上地下空间开发利用的研究的热点地区。本书编写的主要目的便是让在校学生能够比较全面地熟悉和了解掌握地下工程的基本知识,充分认识地下工程是国家的重要社会资源,是我国未来的几十年内重点开发的土木工程领域。

本书比较全面系统地介绍了城市地下建筑的国内外发展概况和所涉及诸多领域,包括:规划与设计理论、交通工程、商业街、贮库建筑、工业建筑、居住建筑、地下管线、人防工程、防水技术、环境控制、防灾以及环境保护等方面。

本书由中南大学的彭立敏、王薇和余俊三位主编,其中第 1 章、第 3 章、第 4 章、第 9 和 12 章由彭立敏编写;第 2 章、第 5 章、第 8 章、第 10 章由王薇编写;第 6 章、第 7 章、第 11 章、第 13 章由余俊编写。全书由彭立敏负责定稿。

本书主要是作为普通高等学校土木工程专业选修隧道与地下工程方向的教科书,还可用作从事隧道与地下工程的设计、施工和科学研究的技术人员、大专院校师生的参考书。

本书的初稿在此次正式出版之前,已在学校内部的专业课程教学中使用了数年,其中部分章节由刘小兵教授撰稿,在此一并致谢。

由于编者业务水平有限,书中不足之处,敬请读者批评指正。

编者
2012 年 9 月

目 录

第1章 绪论	(1)
1.1 概述	(1)
1.2 地下建筑的类型与特征	(3)
1.3 地下建筑的发展	(6)
第2章 地下建筑规划与设计理论	(11)
2.1 地下空间资源分析	(11)
2.2 地下建筑规划理论	(16)
2.3 地下空间的生理与心理问题	(29)
2.4 地下工程设计理论简介	(39)
第3章 地下交通建筑	(50)
3.1 地下铁道	(50)
3.2 城市地下公路	(60)
3.3 地下停车场	(66)
3.4 地下步行通道	(77)
第4章 地下商业街	(81)
4.1 地下商业街的类型与功能	(81)
4.2 地下商业街的规划	(86)
4.3 地下商业街的建筑设计	(88)
4.4 地下商业街空间艺术	(95)
第5章 地下贮库建筑	(99)
5.1 地下贮库的分类	(99)
5.2 地下贮库的规划布局	(100)
5.3 地下能源库	(101)
5.4 地下食物库	(119)
5.5 其他用途的地下贮库	(124)
5.6 地下贮库的效益分析及应注意的一些问题	(125)

第6章 地下工业建筑	(130)
6.1 地下工业建筑的类型及特点	(130)
6.2 工程地质和工程结构对地下厂房总体布置的影响	(135)
6.3 地下厂房布置问题	(140)
第7章 地下居住建筑	(153)
7.1 地下居住建筑物的沿革	(153)
7.2 窑洞居住建筑	(157)
7.3 覆土住宅建筑	(165)
第8章 城市地下管线	(175)
8.1 城市管线分类	(175)
8.2 地下管线的敷设	(177)
8.3 市政管线的综合布置	(185)
第9章 地下人防建筑	(191)
9.1 概述	(191)
9.2 地下建筑物防护规划	(195)
9.3 地下人防建筑的口部防护设计	(201)
9.4 地下人防建筑的主体工程设计	(210)
第10章 地下工程防水技术	(220)
10.1 地下工程防水设计	(220)
10.2 地下建(构)筑物的防水	(225)
10.3 地下工程渗漏水治理	(235)
第11章 地下建筑的环境控制	(237)
11.1 地下建筑热湿负荷计算	(237)
11.2 通风空调系统与设备	(247)
11.3 地下空间热湿环境和空气质量的检测与控制技术	(253)
第12章 地下建筑的防灾技术	(257)
12.1 地下建筑内部灾害的类型及特点	(257)
12.2 地下建筑综合防灾系统	(261)
12.3 地下建筑的防火设计	(263)
12.4 不同类型地下建筑的防火技术要点	(272)

第 13 章 地下建筑物与环境保护	(275)
13.1 基坑开挖对周围环境的影响及应对措施	(275)
13.2 盾构施工对周围环境的影响及应对措施	(279)
13.3 浅埋暗挖法施工对周围环境的影响及应对措施	(281)
13.4 地下建筑物施工对地下水环境的污染、破坏及应对措施	(281)
13.5 渣土对环境的污染及处理	(283)
参考文献	(285)

第1章 绪 论

1.1 概述

1.1.1 基本概念

地下建筑(underground building and structure),是指建造在土层或岩层中的各种建筑结构,是在地下形成的建筑空间。它既包括全部埋置于地下的建筑物,也包括地面建筑物的地下室部分;一部分露出地面,大部分位于地下的则称为半地下建筑。与“地下建筑”密切相关的两个术语是“地下空间”与“地下工程”。

地下空间(underground space)是在岩层或土层中天然形成或经人工开发形成的空间。天然地下空间,是与溶蚀、火山、风蚀、海蚀等地质作用有关的地下空间资源,按其原因为喀斯特溶洞、熔岩洞、风蚀洞、海蚀洞等。天然地下空间可以作为旅游资源加以开发利用,也可以作地下工厂、地下仓库、地下电站、地下停车场,战时亦可作为防空洞利用。人工地下空间,包括两类:一是因城市建设需要开发的地下交通空间、地下物流空间、地下贮存空间等,另一类是开发地下矿藏、石油而形成的废旧矿井空间。

地下工程(underground engineering)通常有两方面的含义:一方面是指建在地下的各种工程设施;另一方面是指从事建造和研究各种地下工程的规划、勘察、设计、施工和维护的一门综合性应用科学与工程,是土木工程的一个分支。随着国民经济的发展,地下工程的应用越来越广泛,城市地铁、公路、水电站、仓库、商场、体育馆、工厂等许多工程都安排在地下,某种场合下还必须安排在地下。

1.1.2 开发地下空间的意义

20世纪后50年以来,人类开发地下空间的动力源自两个方面的严峻挑战:一是人口危机,二是城市化的需求。

1. 人口危机

危机的根本原因在于人口的爆炸性增长。从世界范围看,1930—1960年的30年间,人口从20亿增加到30亿,年增长速度为33%;1960—1980年的20年间,人口从30亿增加到了45亿,年增长速度为75%,人口增长的速度加快了42%;1999年世界人口突破60亿大关,至2011年10月已达70亿。预计2050年将接近100亿,即人口在1950—2050年的百年之内将翻2番,因此生存空间是人类面临的巨大课题。

我国目前人口为13亿,希望在2050年之前,控制在15亿之内。由于我国人口众多,这一矛盾就显得尤为突出,反映出来的主要现象大致有:

①环境恶化。据2007年的资料,我国生态环境正在逼近承载能力极限。

水资源:我国水资源总量居世界第6位,但人均占有水资源量仅居第110位,是世界21

个贫水国之一。全国 600 多座城市中, 300 多座缺水, 严重缺水的有 108 个。全国七大水系中已有近一半河段受到不同程度的污染, 湖泊、水库富营养化程度加重, 多次在各大湖泊、沿海暴发大规模的赤潮(蓝藻)。

大气污染: 2005 年监测的 523 个城市中, $1/3$ 以上城市的空气质量低于二级标准。 $1/5$ 的城市空气污染严重。2008 年北京奥运会投入巨额资金整顿大气污染。

水土流失和荒漠化: 全国水土流失面积 356 万 km^2 , 占国土总面积的 37.1%; 国土荒漠化总面积已经达到 262 万 km^2 , 占国土总面积的 27%, 并正以每年 6700 km^2 的速度扩展。

②交通拥挤。以北京市为例, 尽管已经修了五环, 但干道的平均车速比 10 年前降低了 50% 以上, 而且车速正在以每年 2 km/h 的速度下降。道路的发展始终赶不上人口与车辆的增长, 因此, 交通成为了城市发展的瓶颈。

③住房紧张。人们原来只求有房住, 现在追求房屋宽敞、舒适, 讲究环境良好, 已经产生了很大的变化。1990 年, 城镇人均住房建筑面积仅为 13.4 m^2 ; 2001 年达到 21 m^2 , 提高了 57%, 约相当于 20 世纪 80 年代美国的 $1/3$, 德国、法国的 $1/2$ 。2005 年达到 26.11 m^2 , 比 1990 年翻了一番, 但仍然不能满足日益高涨的市场需求。

④耕地锐减。人口增长一方面需要增加住房, 增加道路等社会相关设施, 另一方面也需要增加口粮, 这就形成了矛盾。世界人均耕地为 3.75 亩, 中国只有 1.6 亩, 仅为世界人均数的 43%。全国有 2800 多个县级行政单位, 人均耕地小于 0.8 亩的就有 666 个, 占到总数的 23.7%。国家土地管理局的数据, 从 1986—1996 年的 10 年间, 全国 31 座大城市的扩展规模都在 60% 以上, 有的城市占地面积成倍增长, 占用了大量的耕地。耕地净减少 2963 万亩, 这比韩国耕地的总量还多。截至 2006 年, 全国耕地比 2005 年净减 460.2 万亩, 总面积下降到 18.27 亿亩, 已经逼近“十一五”规划纲要“到 2010 年末全国耕地面积必须确保不低于 18 亿亩”的红线。

2. 城市化的需要

城市化是现代化的必经之路, 而城市人口增长是城市化的重要特点。我国城镇人口 1997 年底为 3.6 亿(占人口比例 29%, 即城市化水平为 29%); 2003 年底为 4.4 亿, 城市化水平为 34%, 6 年的时间城镇人口增加了 8000 万(5 个百分点); 到 2010 年, 为 6.3 亿, 净增 1.9 亿多, 城市人口增长速度翻了一番, 城市化水平要达到 45%, 这将对城市空间形成巨大的压力。

资料表明, 为了维持较高质量的生活标准, 城市人均占地约需 100 m^2 (不仅指住房, 还包括公共服务设施、道路等), 则我国城市还需要增加 1 亿多亩土地, 这对于城市的发展形成了巨大的压力。因此开发利用城市地下空间的战略意义在于:

①在不扩大或少扩大城市用地的前提下, 实现城市空间的三维式拓展, 从而提高土地利用效率, 节约土地资源;

②缓解城市发展中的各种矛盾;

③保护和改善城市生态环境;

④实现城市的集约化发展和可持续发展, 最终大幅度提高整个城市的生活质量, 达到高度的现代化。

1.2 地下建筑的类型与特征

1.2.1 地下建筑的类型

地下建筑的类型多样,几乎涵盖人类生活的方方面面。按照用途、存在环境和建造方式及开发深度,其类型划分如下。

1. 按用途分类

地下交通建筑:是至今为止,城市地下工程建设的主要类型,是为发展城市交通事业,提高城市内车辆运行时速,减少对城市的空间污染而建造的地下铁道、地下轻轨交通、地下汽车交通道、地下步行道、水底隧道及地下停车场等。

地下商业(与公共)建筑:是为改善人们的生活环境而建造的地下商场与商业街、地下剧院和音乐厅、地下展览馆和图书馆、地下运动场和地下游泳馆、地下医院等。这些建筑即使在地面上,也多采用人工通风照明,若将其设置在地下,使用功能与地面无异,相反还不受地面噪声、尘灰及气候的影响。

地下贮库建筑:地下环境最适宜于储存物质,为使用方便、安全和节省能源而建造的地下贮库,可以用来贮存粮食、食品、油类、药品等,具有成本低、质量高、经济效益好,且节约大量地上仓库用地等特点。

地下工业建筑:在地下进行某些轻工业、某些手工业的生产是完全可能的,特别是对于精密性生产的工业,地下环境就更为有利。目前,地下工业建筑常见的主要类型有:地下核电站、地下精密机械厂、地下酿造厂、地下煤炭气化工程和地下水力发电厂等。

地下居住建筑:有窑洞式民居工程和覆土住宅及有地面建筑物的地下室住宅等。

地下市政管线:是指各种城市市政公用设施的管道、电缆等工程。

地下人防建筑:是为战备需要而建设的地下人员掩蔽部、地下指挥所、地下救护医院和地下备用电站等。

地下国防建筑:主要指为国防需要而建设的地下飞机库、地下潜艇基地、地下导弹发射井、地下弹药库及地下军事指挥所等。

地下宗教建筑:是为宗教活动而建设的地下宫殿、宗教艺术石窟和地下墓穴等工程。

2. 按存在环境及建造方式分类

按地下工程的存在环境及建造方式,可分为两类,即岩石中的地下建筑和土层中的地下建筑。

岩石中的地下建筑包括三种方式:一是现代城市在岩石中建设的各种上述地下建筑;二是开发地下矿藏、石油而形成的废旧矿井空间加以改造利用而形成的地下建筑,据现有资料统计,改造利用已没有价值的废旧矿井,用作兵工厂、军火仓库等,相对来说投资少,见效快,变废为宝,是充分利用地下空间资源的好途径;三是利用和改造天然溶洞,在这方面,我国广西、云南、贵州、四川及湖南等省均积累了丰富的经验,节省了大量开挖岩石的费用和时间。

土层中地下建筑根据建造方式分为单建式和附建式两类,单建式地下建筑,是指独立建在土中,在地面以上没有其他建筑物;附建式地下建筑,是指各种建筑物的地下室部分。我

国上海、天津市，均有很厚的土层，其中天津市的土层达 1000 余米，这些城市建设的地下建筑，均为土层中地下建筑。

3. 按开发深度分类

地下建筑按开发深度分为三类，即浅层地下建筑、中层地下建筑和深层地下建筑。浅层地下建筑，一般是指地表至 -10 m 的深度空间建设的地下工程，主要用于商业、文娱和部分业务空间；中层地下建筑，是指 $-30 \sim -10\text{ m}$ 的深度空间内建设的地下工程，主要用于地下交通、地下污水处理场及城市水、电、气、通信等公用设施之用；深层地下工程，主要指在 -30 m 以下建设的地下工程，可以建设高速地下交通轨道，危险品仓库、冷库、油库等地下工程。

1.2.2 地下建筑的特征

1. 可为人类的生存开拓广阔的空间

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而争占土地的矛盾日趋激化。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，有人曾大胆地估计，即使只开发相当于城市总容积 $1/3$ 的地下空间，就等于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。如图 1-1 所示，不仅开发利用本身创造提供了空间，而且用开掘出的弃土废渣填筑低洼地、河滩地等，也可变城市的无用地为有用地，如图 1-2 所示。

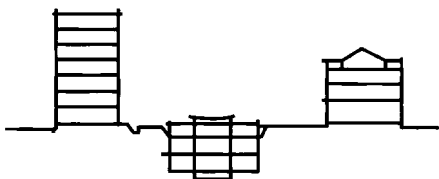


图 1-1 利用建筑间空地修地下建筑

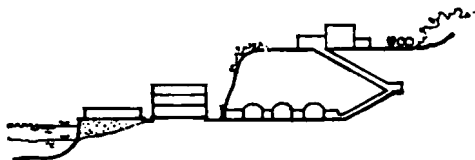


图 1-2 利用地下空间开挖的弃土废渣填筑河滩地

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，这样使得地下建筑周围有一个比较稳定的温度场，对于要求恒温、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贮存物资效果更为显著，在地下比在地面创造这样的环境容易，造价和运营费用较低。

3. 具有良好的抗灾和防护性能

地下建筑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，同时也能较有效地抗御地震、飓风等自然灾害，以及火灾、爆炸等人为灾害。

4. 社会、经济、环境等多方面的综合效益好

在大城市中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（有统计说明，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 $30\% \sim 60\%$ ），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、节省时间、提

高工作效率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

城市地下工程往往是在大城市形成之后兴建的,而且要与地面建筑、交通设施等分工、配合和衔接,因而它要通过各种土岩层或者河湖、建筑物基础和市政地下管道等。修建时既不影响地面交通与正常生活,又要使地面不沉降、开裂,绝对保证地面或地下建筑物与设施的安全,这就给地下工程增加了难度,为此必须有万无一失的施工组织设计和可靠的技术措施来保证。一般讲,地下工程的施工期较长,工程造价较高;但随着科技的进步,地下工程的某些局限性将会逐渐得到改善和克服。

1.2.3 地下建筑的基本属性

1. 综合性

地下建筑是埋设在城市地面以下的土或岩层中的工程结构物,其设计和施工都受到地质及其周围环境条件的制约,因此在规划、设计之前必须对工程所处环境作周密调查,尤其重要的是工程地质和水文地质的勘探,该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、技术经济等学科和洞室施工技术、施工组织等领域的知识以及电子计算机和工程测试等技术。因而地下建筑是一门涉及范围广阔的综合性学科。

地下建筑作为人类活动的地下物质空间,对空气、光和声,对人的生理与心理产生的影响等环境的要求越来越高,为此要求设计者还要具备地下建筑环境的知识。

2. 社会性

地下建筑是伴随着人类社会发展的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,地下建筑应成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

地下建筑是具有很强实践性的学科,是在早期广义的地下工程,像铁路的隧道、人民防护地下工程等工程实践过程中,通过总结成功的经验,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、岩体力学和流变力学等,是城市地下工程的基础理论学科。但地下建筑修建在土或岩层中,而各地的土岩层的组分、成因与构造变换复杂,局部与区域地应力难以如实地确定,即使进行实验室实验、现场测试和理论分析也是有很大局限性的;荷载不能准确核定,而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释疑,因此,在某种意义上说,地下建筑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;即使结构的设计,以工程类比为主要的经验法至今仍在广泛应用。在以工程类比为主要的经验法的基础上,只有通过新的工程实践,才能揭示新的问题,才能发展新理论、新技术、新材料和新工艺。

4. 技术、经济、建筑艺术和环境的统一性

符合功能要求的地下建筑设施作为一种地下物质空间艺术,首先要通过总体布局有机地

与地面建筑设施的配合与衔接;本身造型(各部尺寸比例、凹凸部线条)通风、照明与色彩面饰;安全出口与人行、活动线路等协调和谐加以体现出来。其次要通过符合地下建筑功能所要求的环境标准,利用附加于工程设施的局部装饰艺术完美地反映出来。第三,要求工程设施的所有结构、构造、装饰等不应造成地下建筑环境的污染,并能保证设施内空气新鲜、畅通、无异味,湿度、温度适宜,隔音防噪声,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清新舒适。第四,要使工程设施表现出民族风格、地方色彩和时代特征。总之,一个成功的、优美的地下建筑工程设施,能够为城市增添新的景观,创造新的地下物质活动空间,给人以美的享受,从而提高人民的生活质量。

1.3 地下建筑的发展

1.3.1 地下建筑的发展简史

人类对地下空间的利用,经历了一个从自发到自觉的漫长过程,大体可划分为五个时期。

1. 远古时期

从出现人类到公元前 3000 年。初始人类利用天然洞穴作为防风雨、避难的居住处所。考古发现,距今一万年前,被称为“新洞人”和“山顶洞人”的两种古人类居住地就在北京周口店龙骨山自然条件较好的天然岩洞中;我国黄河流域已发现挖掘出公元前 8000—前 3000 年的洞穴遗址 7000 余处,其中最早的是河南新郑裴李岗及河北武安磁山的窑址和窑穴,典型的村落遗址有西安半坡、临潼姜寨、郑州大河村等,住房多为浅穴,房中央有火塘。同时日本也发现有古人类居住的洞穴。掘土为穴,构木为巢,谓之“土木”,最早的土木工程就是地下工程。

2. 古代时期

公元前 3000 年至 5 世纪。从公元前 3000 年以后,世界进入了铜器和铁器时代,劳动工具的进步和生产关系的改变,导致生产力有很大发展,出现了古埃及、希腊、罗马及古代中国的高度文明。如公元前 4000 年,伊朗出现最早期的引水隧洞,称为“坎尔井”,长度从几公里至几十公里,每隔 20~30 m 设一竖井,用于出碴和通风,也成为取水的井口,在伊朗最长的有 80 km,至今仍在使用的,我国新疆也广泛采用;公元前 3000 年,古埃及人在金字塔下修建了许多甬道;公元前 2200 年,古巴比伦王朝修建了横穿幼发拉底河的水底隧道、公元前 1800—前 1200 年我国殷代墓葬群、公元前 312—前 226 年罗马地下输水道及贮水池、公元前 221 年—220 年,我国秦汉时期修建的地下粮仓,已具有相当的规模;以及公元前 206 年我国建成的秦始皇陵,从已发掘出的兵马俑坑群看可能是我国历史上最大的地下陵墓工程。

3. 中世纪时期

5 世纪至 14 世纪。欧洲经历了千年文化低潮,地下工程的开发处于停滞状态。而我国 7 世纪的隋朝在洛阳东北建造了面积达 600 m×700 m 的近 200 个地下粮仓,容量 445 m³,可存粮 2500~3000 t;宋朝在河北峰峰建造的军用地道,约长 40 km。自 4 世纪中叶佛教传入我国后,相继建成著名的云冈石窟、龙门石窟、敦煌莫高窟,以及甘肃麦积山和河北邯郸响堂山石窟等,这些石窟岩洞形成一个大型的雕刻艺术空间。我国在这一时期修建了大量的帝王陵

墓,如唐代的18座陵墓分布在陕西省乾县等六县,东西绵延达106 km。其中最具代表性的是唐高宗李治与武则天的合葬墓乾陵,规模宏大,气势雄伟。

4. 近代时期

15世纪初至20世纪初。从15世纪开始,欧洲出现文艺复兴,产业革命、科学技术开始走在世界的前列,17世纪炸药的使用和18世纪蒸汽机的应用,尤其是19世纪,诺贝尔黄色炸药的发明,使地下建筑工程迅速发展。1613年,伦敦建造了130 km长的地下公共污水下水干道,连接超过1600 km长的户用污水道,将污水引至下游处理厂,净化后再排回河中,成为现代下水道系统的蓝本。1681年法国修建的罗弗隧道将马赛港与内陆罗纳运河成功地连接起来,隧道长7 km,宽22 m,高15.4 m,通航水深4 m,可通行1000 t级的船舶。英国1843年修建了泰晤士河隧道,1845年建成世界上第一条铁路隧道,长600 m。1863年英国在伦敦建成世界第一条城市地下铁道,1871年,穿过阿尔卑斯山,连接法、意边境的仙尼斯峰铁路隧道,长12.85 km;1900年在巴黎、1902年在柏林、1904年在纽约相继建成地下铁道。

5. 现代

20世纪初至今。城市地铁的规模不断扩大,1927年在东京、1929年在芝加哥、1935年在莫斯科都相继建成地铁。我国1965年开始修建地铁,至今已有数座城市开通了地铁。20世纪60年代后,发达国家对地下空间的开发达到了空前的规模,地下建筑也从较为单一的交通和市政功能往更多的功能方面发展。进入20世纪80年代后,国际隧协(ITA)提出了“大力开发地下空间,开始人类新的穴居时代”的倡议,得到了世界各国的广泛响应。各国政府都把地下空间的利用作为一项国策来推行,地下建筑进入了大力发展的新时期。

1.3.2 国外地下建筑发展概况

1. 日本

日本各大城市的浅层地下空间已经得到了广泛开发,它开发了很多的地下街、地下铁道、地下综合体。比如,大阪的大型地下综合体,由地下商业街、地下广场、地下停车场和地铁车站组成。大阪200多万人口,每天有1/3的人在地下生活和工作,加上游客,往返地下的人数每天达百万以上。其梅田地下街是规模最大、最繁华的地下商业街,面积6万多 m^2 ,分上、中、下三层,层与层之间有螺旋形楼梯相通;在这里有500多家商店、3个大商场、38个进出口;而且还建有4个地下广场,分设在地下街拐弯处,也是地铁的中枢;地下街道纵横交错,还有一条人工地下河穿流其间,流水潺潺,清澈见底,同时具有花圃、群雕、壁画、喷泉,是颇具特色的地下建筑群。

东京火车站著名的八重街地下街,长6 km,直接与地下铁道、地下公路相连,面积6.8万 m^2 ,地下街内有141家商店,并与地面51座大厦相通,每天在这儿活动的人数超过300万人。据统计,日本已至少在26个城市中建造地下街146处,日进出地下街的人数达到1200万人,占国民总数的1/9。

2. 美国

美国一直提倡发展地下空间。比如,纽约的大型供水系统,完全置于地下岩层中,有一条长22 km、直径7.5 m的输水隧道,还有若干级调水用的大型洞室,每一级都是一项空间布置复杂的大型地下建筑。

南方城市达拉斯修建的大规模地下步行道系统,拥有29条步行道,将市内主要公共建筑

和活动中心在地下连接起来,夏季在地下行走很阴凉。

美国地下单体建筑也很有特色,如哈佛大学、加州大学、密执安大学、伊利诺斯大学等都建造了地下或半地下的图书馆,既安静,又保护了校园环境。

3. 北欧

斯堪地道纳维亚半岛地质条件好,这对于开发地下空间十分有利,因此北欧诸国发展了大量的地下建筑。

瑞典:地下供排水系统在世界上处于领先地位。大型供排水系统全部在地下,埋深 30 ~ 90 m;斯德哥尔摩市排水隧道总长 200 km,拥有大型地下污水处理厂 6 座,处理率为 100%,不但保护了城市水源,还使波罗的海免遭污染。1983 年,建造一套空气吹送的地下管道清运垃圾系统,3 ~ 4 年就收回了投资。斯德哥尔摩地区仅地下大型供热隧道就有 120 km 长。

芬兰:地下文化体育娱乐设施发达。如赫尔辛基的一座地下游泳馆,面积达 1 万多 m^2 ,该市的一座地下运动中心,面积 8000 m^2 ,内设体育馆、比赛馆、体育舞蹈厅、摔跤柔道厅、艺术体操厅和射击馆等。有一座地下艺术中心,内设 3000 m^2 的展览馆,2000 m^2 的画廊,以及有 1000 个座位的高质量音响效果的音乐厅,每年吸引 20 万参观者。在这些地下建筑的地面都是低密度的建筑,因而得以保留了开阔的绿化面积,创造了良好的空间环境。

挪威:世界上约 100 条最长的公路隧道中有 1/4 是在挪威。挪威的地下水电站也很发达,已建成地下电站引水隧道总长达 3500 km,全球 500 座地下水电站中约有半数是在挪威。

其他发达国家,如加拿大、法国、德国、澳大利亚等也都广泛拓展地下空间。

1.3.3 我国地下建筑发展概况

我国地下空间的现代开发于解放后不久就开始了,但较大规模的开发有两个阶段。

1. 第一次开发阶段

20 世纪 60 年代初至 20 世纪 70 年代中期。这是第一轮大规模的开发,但由于当时特殊的政治与社会背景,使得开发局限于人防工程,而且是一种搞政治运动式的低级开发,留下了许多后遗症,且形成了独立的管理与投资体系,未纳入城市的总体规划,具有布局不合理,与城市建设脱节等特点。问题的具体表现为:

(1) 建筑档次低。大批的早期简易地下人防工事,占人防总量的 70% 以上。其特点是空间狭小;结构性能与防水性能差;几十年封闲不用;改造困难;维护费用大。

(2) 缺乏规划与法规。我国过去在地下空间开发方面没有相应法规,这使得开发几乎处于一种无序的状态,不利于地下建筑互为连通以形成集聚效益,浪费了宝贵的地下资源。

2. 第二次开发阶段

自 20 世纪 80 年代初至今。我国进入了地下空间开发新的历史时期。

① 改造既有人防建筑。1986 年,国家提出了“平战结合”的方针,开始了对第一次开发阶段中遗留问题的大规模处理。例如:吉林市于 1987 年在市中心结合市政道路改造,修建了一座集交通、商业和人防三位一体的地下环形街,面积 5900 m^2 ,埋深 6 m,首开我国地下综合建筑的先河。沈阳市在火车站广场修建了地下综合体,包括地下人行道、地下商业街、地下停车场和人防工程,面积达到 40000 m^2 。南昌市的老福山地下环形街,建于五条街的交叉口之下,共有三层:最下层为由人防战备通道改造的地下娱乐场,埋深 16 m;中层为保留的原人防干道;上层为 1986 年新建的地下环形商业街,埋深 6 m,面积 4000 多 m^2 。

②实施科学规划。20世纪90年代以后,对城市地下空间的开发更为重视。南京、上海、长沙、青岛、杭州、长春、哈尔滨、深圳等许多城市都将地下空间开发列入了城市发展规划。大规模的规划城市建设开始了。以深圳为例,规划地下空间范围为 327 km^2 ,以地铁网络为骨架体系,逐步形成大型公共设施密集区、商业密集区、地铁换乘站、城市公共交通枢纽等发展区。如在益田与金田站之间,沿道路绿色浮岛下,将拓展出一个东西长 1200 m 、南北宽 200 m 、深 15 m 的地下商业街,具有商业功能、市民集散功能、交通功能。

③制定相关法规与规范。1997年建设部颁布第一个重要法规《城市地下空间开发利用管理规定》,2001年发布修改版。这预示着我国地下空间的开发有据可依了,虽然这一法规还不完善,有待进一步提高,但它的重要性是不言而喻的。此外,在铁路隧道、公路隧道、水工隧道、地下铁道等地下工程方面已都有了相应的各种规范,这使得地下建筑的建设进入了正常的发展时期。

1.3.4 地下建筑发展方向

地下空间是迄今尚未被充分开发的一种宝贵自然资源,具有强大的潜力和生命力。开发地下空间在技术上已比较成熟,在原有技术基础上发展新技术要比开发宇宙、海上的技术容易,更重要的是开发地下空间可以与原有城市上部空间得到协调发展。城市地下工程的开拓应遵循:人在地上,物在地下;人的长时间活动在地面,短时间活动在地下;先近后远,先浅后深,先易后难等原则已被实践证明是正确的。

城市地下建筑今后开拓发展的方向是:

1. 浅层和次浅层空间应全面、充分地开发利用

浅层和次浅层地下空间是指地表以下 10 m 以内和 $10\sim 30\text{ m}$ 的空间。这部分地下空间距地表较近,人员上下较方便,天然光线传输到选样深度还不太困难,是地下空间使用价值最高、开发最容易的宝贵地区。浅层地下空间宜安排商业、文化娱乐、体育及人员较多、较集中的业务活动等场所,在平面规划上与城市主要街道、地上地下交通系统相对应、衔接,便于人员进出、集散或换乘;以街道两侧建筑红线的宽度,加上两侧建筑物的地下室,可形成一条几十米甚至百米宽的地下街,从中心区逐步向外扩展延伸,最后形成一个与地面上道路系统相协调的地下街道网。这样的街道网可统一规划,形成地下交通通道、停车库、商娱体系及社区活动等多功能的地下建筑联合体。在这种情况下地面仅保留少量汽车与自行车道路,使主要街道实现步行化和大面积绿化,改善城市环境和景观。

2. 在次深层和深层空间建立城市配套设施的封闭性再循环系统

现时城市生活基本上处于一种开放性的自然循环系统中。依靠自然界取水,用后排入河湖海;能源也多为一次性使用,热效低;废弃物未经处理和回收而堆积,对环境造成二次污染。这种自然循环对自然资源造成很大浪费。为此,日本学者提出了在城市地下空间中建立封闭性再循环系统的构想,用工程的方法将多种循环系统组织在一定深度的地下空间中,故又称为城市的“集积回路”。拟在地下 $50\sim 100\text{ m}$ 深的稳定岩土层中建造内径为 11 m ,总长 55 km 的圆形隧道,其中布置上多种封闭循环系统,形成一个地上使用,地下输送、处理、回收、储存的封闭性再循环系统。虽然投资较大,但城市生活再循环的程度大大提高,对节省资源、提高城市生活质量,是一个具有方向性的尝试,将创造巨大财富。