

SUIDAO YU DIXIA
GONGCHENG
GAILUN

隧道与 地下工 程概论

齐伟 彭立志 徐燕 © 编

地质出版社

高等学校土木工程专业教材

隧道与地下工程概论

齐 伟 彭立志 徐 燕 编

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书的内容以隧道及地下工程的基本知识为主,包括隧道工程勘察与规划设计、地下工程设计方法、围岩分级、隧道工程支护结构、新奥法施工监控量测、地铁工程等。

本书适合于地质工程类相关人员及学生参考。

图书在版编目(CIP)数据

隧道与地下工程概论/齐伟等编. —北京:地质出版社,2011.8

ISBN 978-7-116-07281-7

I. ①隧… II. ①齐… III. ①隧道工程—概论②地下工程—概论 IV. ①U45②TU9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 145069 号

责任编辑:李丛蔚

责任校对:李 玫

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路 31 号,100083

咨询电话:(010)82324519(办公室);(010)82324565(编辑室)

网 址:<http://www.gph.com.cn>

电子邮箱:zbs@gph.com.cn

传 真:(010)82310759

印 刷:北京天成印务有限责任公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:12

字 数:290 千字

版 次:2011 年 8 月北京第 1 版

印 次:2011 年 8 月北京第 1 次印刷

定 价:28.00 元

书 号:ISBN 978-7-116-07281-7

(如对本书有建议或意见,敬请致电本社;如本书有印装问题,本社负责调换)

前 言

随着人类社会的发展和进步,地下空间的开发和利用越来越引起人们的重视,它被看作是人类生存和持续发展的重要补充空间。地下工程建设的数量越来越多,规模越来越大。科学预测指出:21世纪将是人类大力开发地下空间的世纪。我国自改革开放以来,地下工程建设蓬勃发展,尤其在交通运输方面,铁路及公路隧道不仅数量猛增,其规模也不断扩大,一大批大型及特大型隧道工程建设完成。城市的扩容以及城市经济的高速发展、对空间容量的迫切需求,使人们越来越重视城市地下空间的开发利用。为解决大城市交通难的问题,许多城市都在大力发展城市地下轨道交通(地铁),城市地下公用设施(地下共同沟)的规划和建设也成为城市未来发展的一个重点。

因为地下工程的发展形势大好,对相关专业人才的需求也在增加。我国许多高等院校纷纷在土木工程专业或交通工程专业下设立了地下工程专业方向,或者开设隧道与地下工程方面的专业课程。地下工程学作为一门“朝阳”学科正在蓬勃发展。

本教材是根据吉林大学土木工程专业的培养方案及教学大纲编写的。教材以现代隧道及地下工程理论为主导思想,以国家及行业新近颁布的各种技术规范、标准为准绳,力求全面系统地介绍和论述隧道及地下工程中关于隧道工程勘察设计、围岩分级、围岩压力、隧道结构与构造、隧道工程支护结构、施工监控量测等问题,着重阐述这些问题的基本概念、基本原理及基本方法,同时介绍这些研究领域的最新理论及工程技术成果。本教材能够让学生在学到专业基本知识的同时,还能够了解和掌握大量实际应用知识,为未来的工作实践和专业深造奠定坚实的基础。

隧道及地下工程是一项系统工程,在工程的规划设计、结构设计、施工设计以及施工管理和运营管理的建设全过程中,涉及地质、力学、材料、机械、电子通讯、经济管理及技术管理等众多学科的知识内容。就学科领域而言,隧道及地下工程属于土木工程与交通工程两大学科领域。本教材仅面向于土木工程学科下的隧道及地下工程,因此书中重点围绕隧道及地下工程结构体系的稳定性问题对相关的内容进行阐述,没有涉及隧道工程诸如照明、通风、信号通讯等辅助工程的内容,这体现了本教材的侧重面和专业特色。另外,由于近年来我国城市地铁建设的快速升温,这方面的技术人才亟需培养,为此本教材将地铁工程一章纳入其中,阐述了地铁隧道及地铁车站的规划设计、结构形式及设计施工的基本内容,使得本教材的内容比以往的同类教材有所扩展和丰富。

由于编者水平有限,书中难免有不足,恳请专家和读者批评指正。

编 者

2010年8月

目 录

前 言

0 绪 论	(1)
0.1 概述	(1)
0.2 隧道及地下工程的发展状况	(1)
0.3 地下工程的发展前景	(3)
0.4 地下建筑的类型	(7)
0.5 地下建筑的优缺点	(8)
1 隧道工程勘查与设计	(11)
1.1 隧道工程调查	(11)
1.2 隧道工程总体设计	(13)
2 地下工程设计方法	(20)
2.1 概述	(20)
2.2 传统理论及其存在的问题	(23)
2.3 新奥法设计	(27)
2.4 信息化设计及反分析法	(29)
3 围岩分级(类)及稳定性评价	(32)
3.1 概述	(32)
3.2 围岩分级(类)及稳定性评价的基本因素	(33)
3.3 国外围岩分级(类)的研究发展	(38)
3.4 我国工程岩体分级(类)的研究发展	(43)
4 围岩压力	(57)
4.1 围岩压力理论概述	(57)
4.2 围岩压力的影响因素	(60)
4.3 围岩压力的确定	(60)
4.4 围岩压力的实测方法	(70)
5 隧道结构与构造	(73)
5.1 隧道洞身结构	(73)
5.2 洞门与明洞	(78)
6 隧道工程支护结构	(84)
6.1 喷锚支护的作用原理	(84)
6.2 锚杆支护设计	(87)

6.3	喷射混凝土支护设计	(92)
6.4	喷锚支护设计	(95)
6.5	复合式衬砌结构	(104)
7	新奥法量测及监测技术	(109)
7.1	量测项目与内容	(109)
7.2	隧道内目测观察	(111)
7.3	隧道内空收敛位移量测	(113)
7.4	地表下沉量测	(118)
7.5	围岩内变形量测	(120)
7.6	锚杆拉拔力量测	(124)
7.7	钢架支撑压力量测	(126)
7.8	喷射混凝土层应力量测	(128)
7.9	声波测试技术	(130)
7.10	现场量测的应用	(143)
8	地铁工程	(147)
8.1	概述	(147)
8.2	地铁路网规划与线路设计	(148)
8.3	地铁区间隧道	(159)
8.4	地铁车站建筑物	(172)
	参考文献	(186)

0 绪 论

0.1 概 述

地下工程是指建造在岩土体中用于各种目的和用途的地下空间工程。在人类的工程活动中有大量种类繁多的地下工程,例如,铁路及公路交通中的穿山隧道,城市地下公共轨道交通(地铁),水利水电建设工程中的输水洞、泄洪洞及地下发电厂房等,采矿业的地下矿井、巷道,城市地下过街通道、地下商场、地下停车场等,高层建筑的深基础开挖与建筑,工业中的地下工厂、地下储库,以及军事和国防工程中的大量地下建筑设施等。

人类开发和利用地下空间的历史由来已久,早期的人类曾利用天然洞穴作为栖身之地。后来随着人类文明的发展和社会的进步,人类逐渐学会了建造地下建筑。我国古代修建的陵墓、石窟、地下粮仓、地下采矿井巷等已具有相当的规模和技术水平;湖北大冶铜录山保存完好的采矿遗址,是我国古代 3000 多年前西周时期劳动人民的智慧结晶,其中的竖井、斜井、平巷及其相互之间的通道具有相当高的建筑水准,反映了我国古代地下建筑已居世界领先水平。公元前 2180~2160 年间在古巴比伦城幼发拉底河下面建造的人行隧道;公元前 36 年修建的连接那不勒斯与普佐利(今意大利境内)之间的朴西里博隧道,至今仍在使用。从 15 世纪起的近代历史中,欧洲的文艺复兴以及产业革命使其科学技术开始走在世界的前列,地下工程得以迅速发展:1613 年英国伦敦开始建造地下隧道,1681 年法国建造了地中海比斯开湾长 170m 的运河隧道,1843 年伦敦建造了越河隧道,1863 年伦敦建造了世界上最早的地下铁道,1871 年连接法国和意大利、穿越阿尔卑斯山长 12.8km 的公路隧道开通。这些隧道及地下建筑都反映了人类建造地下工程的悠久历史和不朽业绩。

进入现代社会,人类文明和社会经济快速发展,地下建筑已遍及人类生产、生活和国民经济建设的各个领域。尤其是现在,人口向城市集中,使城市人口密集,城市功能恶化。为了保持城市功能及交通所需的空间,迫切需要大力开发利用地下空间。预计地下空间作为人类在地球上赖以生存的补助空间,在经济可持续发展中将占据重要地位,其利用程度和规模将会日益扩展。有规划地建造各类地下建筑,对于节省城市占地、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、提高工作效率和提高城市生活质量等方面,都将起到极其重要的作用,是现代化城市建设发展的必由之路,科学预测指出:21 世纪将是人类大力开发地下空间的世纪。

0.2 隧道及地下工程的发展状况

用于铁路、公路和城市轨道交通中的交通隧道是地下工程的典型代表。隧道工程按照

行业及特点可分为铁路隧道、公路隧道和城市地铁隧道三大类,它们既具有地下交通工程的共性,也具有各自的特点。铁路隧道和公路隧道是穿山而过的山岭隧道,一般建造在坚硬的岩体中,因此多数属于岩石隧道。在我国西北黄土地区,也有一些建造在黄土中的穿山隧道,它们都属于山岭隧道;而城市地铁隧道一般是建造在松软的土质地层中,有的地铁隧道穿越江河,因此被称为软土隧道和 underwater 隧道。地铁工程中除地铁区间隧道外,还包括大量的地铁车站,这是山岭隧道所没有的。山岭隧道或岩石隧道目前主要采用矿山法(钻爆法)施工,近年来兴起的掘进机施工法逐渐在山岭隧道工程中得到应用,使山岭隧道掘进技术得到了革命性的发展。城市地铁隧道(包括地铁车站)有明挖法、盖挖法、盾构法、顶进法以及水下沉管法等多种施工方法。另外,各类隧道的结构形式、设计方法以及辅助设施等也都存在差异。目前各行业及部门针对不同隧道及地下工程的特点,分别制定了行业规范及标准,在实际工作中应注意区别掌握。下面对铁路隧道、公路隧道和城市隧道 3 种隧道工程的发展状况作简要介绍。

0.2.1 我国的铁路隧道

根据不完全统计,新中国成立后至 2005 年末,我国建成的铁路隧道总数已达到 6874 座,总延长里程已达 4158km,连同新中国成立前已有的 664 座、总延长 156km 的铁路隧道,我国共拥有铁路隧道 7538 座,总延长 4314km。中国铁路隧道占世界的 1/5,居世界第一位。其中长度在 3km 以上的长隧道有 209 座(单线 176 座,双线 33 座);长度超过 5km 的特长隧道有 53 座(单线 42 座,双线 11 座)。具有标志性的隧道有西安至安康线上的秦岭隧道,为双向分离式单线隧道,全长 18.46km,最大埋深 1600m,地质条件复杂。在该隧道施工中采用了德国威尔特公司设计制造的全断面掘进机,实现掘进、出渣全面自动化,减少了超挖和对围岩的扰动,使我国铁路隧道建造技术上升到一个新台阶。另外还有大瑶山隧道(京广线衡广复线,14.3km)、军都山隧道(大秦线,8.46km)、米花岭隧道(南昆线,9.383km)、长梁山隧道(朔黄线,12.78km)、驸马岭隧道(京原线,7.032km)、沙木拉达隧道(成昆线,6.383km)、平型关隧道(京原线,6.189km)、关村坝隧道(成昆线,6.187km)、南岭隧道(京广线,6.062km)、奎先隧道(南疆线,6.154km)等。中国目前最长的铁路隧道是位于兰新线上兰州至武威段的乌鞘岭隧道,长 20.05km,最大埋深 1100m,轨面海拔在 2400m 以上。

0.2.2 我国的公路隧道

近 20 多年来,随着我国公路建设发展和公路等级的提高,我国公路隧道数量也在逐年增多。截止到 2004 年底,我国已建成公路隧道 2495 座,总延长 1245 余千米,尤其是近些年来我国高速公路建设迅速发展,一批大跨度隧道、连拱隧道及小净距隧道纷纷建成。具有标志性的大型隧道有:二郎山隧道(川藏公路),长 4160m;靠椅山隧道(京珠高速公路),长 5930m,最大开挖跨度 17.04 m,高度 12.24 m,开挖横断面积 165.45m²,其跨度、长度综合指标居国内第一、亚洲前列;缙云山隧道(成渝高速公路),为分离式双向隧道,左线 2527 m,右线 2473 m;鹧鸪山隧道(四川阿坝藏族自治州境内),317 国道,双向二级公路隧道,长 4448 m,路面高程 3335~3361m 等。我国目前最长的公路隧道是秦岭终南山分离式双向隧

道,长 18.04km,为亚洲第一、世界第二(世界上目前最长的公路隧道是挪威的莱多尔隧道,长 24.51km)。

这些大型隧道工程标志着我国铁路隧道和公路隧道的设计、施工技术水平已进入世界先进行列,是我国隧道发展史上的重要里程碑。

0.2.3 地铁工程

目前世界上已有 43 个国家的 118 个城市建有地铁,总长度 6000 多千米。1863 年,英国伦敦建造了世界上第一条地铁,当时只有 6km。现在伦敦的地铁运营里程达 465km,273 个车站,10 余条线路。美国纽约地铁 1904 年开始运行,目前运营里程 480km,468 个车站,30 多条线路。莫斯科地铁运营里程达 300km,150 个车站,9 条线路,是世界上最豪华的地铁,也是运送旅客最多、效率最高的地铁,每日发车 9000 列次,平均 2~3min 开出一列,日客运量达 1600 万人次,每年运送的乘客达 33 亿人次,解决了整座城市交通总运量的近 50%。法国巴黎地铁,运营里程 200km,367 个车站,16 条线路。日本东京地铁,运营里程 219km,207 个车站,10 条线路。另外,目前世界上还有 26 个国家的 35 个城市正在建设或筹备建设地铁,以解决这些城市日益增加的交通压力。

我国的地铁建设始于 1965 年的北京地铁 1 号线。至 2008 年底,全国已经有 10 个城市拥有 30 条城市轨道交通运营线路。根据近期发展规划,至 2015 年,将有 22 个城市建设 79 条轨道交通线路,总运营里程达 2259.84 公里,总投资将达 8820.03 亿元。

0.3 地下工程的发展前景

0.3.1 地下空间资源

随着社会生产力的巨大发展,人口和生活需求的增长与自然资源逐渐枯竭之间的矛盾越来越突出,已引起人们的普遍关注。

地球上每增加一个人,就需占用一定的生存空间,它包括生产粮食等生活必需品的生态空间和供人们居住及从事各种活动的生活空间。这两类空间基本上都以可耕土地为依托。因此,衡量生存空间质量的指标是人口密度和单位面积耕地所能提供的生活物质的数量,超过或低于一定限度后,就可能发生局部的甚至全面的生存空间危机。但是,在地球陆地表面上,人类的生存空间已经十分有限,因此,迫切需要探索开拓新的生存空间的途径。地下空间是迄今尚未被充分利用的一种自然资源,具有很大的开发潜力。

地下空间资源包括 3 个方面的含义:一是天然存在的资源蕴藏总量;二是在一定技术条件下可供合理开发的资源总量;三是在一定历史时期内可供有效利用的地下空间总量。

地球表面积为 $5.10 \times 10^8 \text{ km}^2$ 。地球表面以下为岩石圈(地壳),陆地下的岩石圈平均厚度为 33km,海洋下为 7km。从理论上讲,整个岩石圈都具备开发地下空间的条件,也就是说,天然存在的地下空间蕴藏总量为 $7.5 \times 10^{18} \text{ m}^3$ 。以目前的施工技术和维持人类的生存

所需花费的代价来看,地下空间的合理开发深度以 2km 为宜。考虑到在实体岩层中开挖地下空间需要一定的支撑条件,即在两个相邻岩洞之间应保留相当于岩洞尺寸 1~1.5 倍的岩体,若以 1.5 倍计,则在当前和今后一段时间内的技术条件下,在地下 2km 以内可供合理开发的地下空间资源总量为 $4.12 \times 10^{17} \text{ m}^3$ 。由于人类的生存和生活主要集中在陆地表面积 20% 左右的可耕地、城市和村镇用地的范围内,因此,可供有效利用的地下空间资源应为 $2.40 \times 10^{16} \text{ m}^3$ 。在我国,可耕地、城市和乡村居民点用地的面积约占国土总面积的 15%,按照上面的计算方法,我国可供有效利用的地下空间资源总量接近 $1.15 \times 10^{15} \text{ m}^3$ 。

由此可见,可供有效利用的地下空间资源的绝对数量仍十分巨大,从拓展人类生存空间的意义上看,无疑是一种具有很大潜力的自然资源。

0.3.2 城市可持续发展的要求

《2010 年世界人口状况报告》预测,到 2050 年,世界人口将达到 91.5 亿,其中近 50% 的人口将生活在城市范围内。使得居住在城市的人口超过居住在乡村的人口。城市人口的急剧膨胀、城市的生存环境和交通问题,以及 21 世纪城市持续发展的战略是当今世界最热门的话题。

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。伴随着我国城市化进程的加快,城市建设快速发展,城市规模不断扩大,城市人口急剧膨胀,许多城市不同程度上出现了建设用地紧张、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,成为我们亟待解决的重要课题。

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。城市化水平从 1989 年的不到 20%,提高到 2000 年的 35.7%,2010 年将达到 45%。城市化水平提高表现在城市数量增加和城市规模扩大。根据预测,到 2010 年中国的城市数量将从现在的 640 个增加到 1000 个,城镇人口将达到 4.5 亿~6.3 亿人。又根据气象卫星遥感资料判断和测算,1986~1996 年 10 年间,全国 31 个大型城市城区实际占地规模扩大了 50.2%。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,其中有的城市成倍增长,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。城市不能无限制的蔓延扩张,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,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 2 万人/ km^2 属于拥挤状况。我国上海城区人口平均密度为 4 万人/ km^2 ,局部地区为 16 万人/ km^2 ;北京城区的 4 个区平均为 2.7 万人/ km^2 ,均为超饱和和的状态,位于世界人口高密度之首。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 1990 年统计,我国城市人均绿化面积只有 3.9 m^2 ,上海市人均绿地面积仅 0.9 m^2 ,距离我国人均绿地面积 7 m^2 的规划指标及国家制定的人均 10 m^2 的绿化卫生标准还有相当大的差距。按联合国建议,城市公共绿化地应达到人均 40 m^2 ,莫斯科人均绿地为 44 m^2 ,伦敦为 22.8 m^2 ,巴黎为 25 m^2 。我国大中城市与上述要求及发达国家大城市相比,差距甚远。

交通堵塞、行车速度缓慢已成为我国许多城市普遍存在的突出问题,就连新兴城市深圳也不例外。如北京市干道平均车速比10年前降低了50%以上,而且正以每年2km/h的速度递减。交通堵塞的关键在于城市人均道路面积及道路面积与城市面积相比比例太低。根据1996年《国际统计年鉴》资料,日本东京人均道路面积为 11.3m^2 ,道路面积占城市总面积的15%;巴黎、莫斯科、伦敦、纽约这两项指标分别为 7.32m^2 (15%)、 9.10m^2 (8.12%)、 21.3m^2 (9.3%)、 13.9m^2 (12.38)。北京城区人均道路面积为 4.4m^2 ,道路面积占城市面积的8.1%;上海城区与发达国家相差更远,两项指标分别为 1.6m^2 和8.3%。上海每千米汽车拥有量为600辆,北京每千米汽车拥有量为500辆,是发达国家大城市相应拥有量的1倍甚至数倍。北京快速道路面积居全国之首,立交桥数量占全国城市立交桥之半。即使这样,改革开放以来北京道路面积仅增加了0.6倍,而同期机动车数量增加了10倍,2009年底,北京市机动车保有量已突破400万辆,预计2020年将达500万辆。道路的扩容远远赶不上车辆的增长。发达国家解决城市交通难的经验表明,发展以地铁为主的高效益、低能耗、轻污染的公共轨道交通才是根本出路。

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污水处理设施陈旧的问题,固体垃圾地表堆放,供电、通讯、供水、供热等公共基础设施落后于城市的扩展和城市人口的增加,必然造成城市环境相应恶化。垃圾围城现象普遍,我国每年产生生活垃圾 $1.46\times 10^8\text{t}$,还在以每年10%的平均增长量上升。生活垃圾只有2.3%得到处理,其余只能堆积,堆存量高达60多亿吨,占地30多万亩^①。把市政公用设施管道汇集起来,建立便于维修管理的多功能功用隧道——城市共同沟,是先进国家城市建设的经验之一。修建地下垃圾收集管道系统,修建地下垃圾焚烧厂,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,对发展中国家是难以承受的。因此在城郊结合部,利用荒地、滩地修建符合卫生标准的大型地下垃圾场,对生活垃圾实施卫生掩埋,是现阶段解决我国广大城市生活垃圾的有效途径。

对于人口和经济高度密集的城市,不论是战争或是平时的自然灾害,都会给城市带来人员的伤亡和财产的损失。众所周知,地下建筑具有良好的抗震、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,使城市总体抗灾能力有所提高,也是实现城市可持续发展的重要内容。

0.3.3 地下工程的远景规划

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设施和医治城市综合症、实施可持续发展的重要途径。1983年联合国经济社会发展理事会通过了利用地下空间的决议,决定把地下空间的利用包括在该组织下属的自然资源委员会的工作计划之中。1991年在东京召开的城市地下空间利用国际学术会议上通过了“东京宣言”,提出了这样一个观点:21世纪是人类开发利用地下空间快速发展的世纪。国际隧道工程技术协会提出了“更好地利用地下空间”的口号,其中1996年第22届年会的主题就是“隧道工程和地下空间在可持续发展中的地位”。

① 1亩=666.6 $\dot{\text{m}}^2$ 。

城市地下空间的开发利用,是城市经济高速发展和空间容量增长的迫切需求的客观需要。其标志是人均国民生产总值和城市地价的急剧升值。发达国家开发地下空间的历史表明,当人均国民生产总值超过 500 美元时,才能进入开发利用地下空间的阶段;人均国民生产总值超过 1000 美元时,开发利用地下空间将达到高潮。我国现阶段人均国民生产总值已达到 1600 美元,沿海地区人均国民生产总值超过 2000 美元,上海地区人均国民生产总值已超过 5000 美元。我国人口众多,土地资源短缺,仅为世界水平的 1/3。我国一些大城市人口众多,交通拥挤,环境污染的程度不亚于发达国家 20 世纪 60 年代经济高速发展的城市。进入 21 世纪以来,我国大城市地价急剧上升。北京四环线以内土地价格达到每平方米万元以上,上海市中心地段楼面价达到每平方米 2000 美元。每平方米土地的价格已大大超过同等面积的地下建筑价格。据调查,我国城市浅层地下建筑的造价不到地面建筑造价的 3~4 倍。目前,我国城市地下空间开发不需要支付或支付很少土地费用,因此开发地下空间就具有很大的吸引力。工程实践表明,地下空间开发在我国一些大中城市特别是沿海城市条件已趋成熟,而且是现代城市开发的必然趋势。

城市地下空间是一个十分巨大而丰富的空间资源,如果得到合理开发利用,其节省土地资源的效果是十分明显的。一个城市可开发利用的地下空间资源量一般是城市的总面积乘以开发深度的 40%。如取合理开发深度为 100m,以北京为例,其地下空间资源量为 $1193 \times 10^8 \text{ m}^3$,可提供 $64 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的建筑面积,将大大超过北京市现有的建筑面积。大连市城市空间利用规划纲要(讨论稿)中考虑了近期开发浅层地下空间(深度 30 m),其面积为城市建设用地的 30%(道路与绿地建设用地),再乘以 0.4,则其城市地下空间经济开发资源量为 $5.8 \times 10^8 \text{ m}^3$,可提供建筑面积 $1.94 \times 10^8 \text{ m}^2$,超过大连市现有房屋建筑面积($5921 \times 10^4 \text{ m}^2$)。

地下空间开发应做好立体规划,分层开发。地下第一层 3~5 m,布置公共事业管网的干线支线、共同沟等;地下二层深度 6~10 m,主要以地下商业街、地下停车场、地铁车站、地下文化娱乐场所为主;地下三层 10~30 m,开挖建设地铁隧道、地下排水沟、地下立体停车场等。放射性和有毒的固体垃圾,应存放在更深的地层中。

日本城市地下空间利用已达到相当规模,东京、横滨、大阪、名古屋等八大城市,地下铁路营运总里程达 500 多千米。各大城市有地下街 82 处,面积 $110 \times 10^4 \text{ m}^2$;地下机动车停车场 152 所,占停车场总数的 43%,可停车 30 万辆。49 个城市建有共同沟,总长度 300km。目前,日本正向深层次、多功能的地下空间开发。

20 世纪 60 年代以后,世界上一些发达国家和地区开始建造大型跨海隧道。日本青函隧道连接北海道与本州,总长 53.85km,穿越津轻海峡,其海底长度达 23.3km,是当前世界上最长的铁路水下隧道。经过长达 24 年的艰苦施工,直到 1988 年才终于建成了这条世界上最长的海底隧道,共耗资 5000 亿日元。

另一个世纪性工程是英法海底隧道,总长度约 50km,海底部分 38km。1986 年开工,1993 年 12 月建成通车,历经 7 年 7 个月。英法海峡隧道采用全断面隧道掘进机(TBM),直径 7.6~10m。它的总造价为 57 亿英镑。这一隧道是交通最繁忙、客运量最大、最现代化的海底铁路隧道。

受青函隧道、英法海峡隧道的鼓舞,在世界范围内引起一场海底隧道热。意大利计划建造横跨墨西哥海峡的隧道,把本土和西西里岛连接起来;日本和韩国两国正在计划建造穿越对马海峡、总长度达 250km 的海底隧道,连接日本福冈至韩国釜山,采用分段施工方案,其

第一条调查斜井已于 1986 年底动工；俄罗斯为了向美国输送石油和天然气，计划建造连接西伯利亚与美国阿拉斯加的白令海峡海底隧道，长度约 120km，预计将耗资 120 亿美元。此外，在丹麦大海峡、直布罗陀海峡、马六甲海峡、迭它海峡、波斯普鲁斯海峡、宗谷海峡等世界许多海峡都在进行海底隧道的规划和调查。

我国目前正在对建造琼州海峡隧道(连接广东省与海南省)进行可行性研究。除此之外，不少有识之士还提出了跨越渤海湾连接辽宁省和山东省的南桥北隧通道方案，跨越长江入海口连接上海—崇明—启东的江底隧道，京沪、京广高速铁路跨越长江的沉管隧道，还有人甚至提出了兴建台湾海峡隧道的设想，并就在台湾海峡建造隧道的区域稳定性问题进行论证。

海峡隧道以它全天候、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。长大海底隧道建设耗资巨大，技术要求高，施工难度大，建设周期长，特别需要长时间的工程地质勘察，有的项目不宜马上开工建设，但目前可以组织力量进行前期地质勘察和可行性研究，做好技术储备。随着经济发展，国力增强，技术进步，像琼州海峡隧道、渤海湾隧道、甚至台湾海峡隧道，在 21 世纪都有可能成为现实。

0.4 地下建筑的类型

地下建筑类型不同，其工程特点、设计、施工方法和施工组织也不相同。地下建筑有多种分类方法，常见的有以下几种：

0.4.1 按使用功能分类

- (1) 交通隧道，如铁路隧道、公路隧道、城市地下铁道及水下道路隧道；
- (2) 水工隧洞，如水力发电站的各种输水洞、为农业灌溉开凿的输水隧洞以及给水排水隧洞等；
- (3) 矿山巷道，如各类矿山的开采井巷及运输巷道；
- (4) 地下工厂，如水力或火力发电站的地下厂房以及各种轻、重工业的地下厂房等；
- (5) 地下仓储设施，如地下油罐、粮仓、地下冷库、液化气库以及放射性废料库等；
- (6) 地下民用设施，如地下商场、旅馆、地下游乐场、地下住宅以及地下街道等；
- (7) 城市基础设施，如地下自来水场、污水处理厂、动力电缆及通讯电缆和给排水管道的共同沟等；
- (8) 军事及国防地下工程，如武器库、弹药库、飞机库、地下军事指挥所、地下人防工程等；
- (9) 高层建筑的地下室、地下停车场等。

0.4.2 按断面形状分类

- (1) 圆形及椭圆形隧道；
- (2) 拱顶直墙形隧道、隧洞、洞室；
- (3) 拱顶曲墙形隧道；

(4)其他形状,如矩形、方形等。

0.4.3 按所处的地质体环境分类

(1)岩体地下洞室,包括人工洞和天然溶洞两种;

(2)土体地下洞室,包括黄土洞室和其他土层洞室,当洞室下部为岩石、上部为土体时,根据周围应力特点及防排水要求,也宜于归为土体地下洞室。

0.4.4 按埋藏深度分类

(1)当 $h/b \geq a$ 时为深埋地下建筑;

(2)当 $h/b < a$ 时为浅埋地下建筑。

式中: h 为洞顶边缘至地面的垂直距离; b 为洞室的跨度或直径; a 的取值按土压力理论计算约为 2.5。

0.5 地下建筑的优缺点

0.5.1 地下建筑的优点

0.5.1.1 有效地利用土地

开发地下空间,在有效使用土地方面有重要的作用。如果将建筑物的大部或全部功能放在地下,则地面可作其他用途,这将避免地面建筑物由于过分密集所产生的消极影响,从而提高土地开发利用的可能性。要求安静的地下建筑物,可以设置在距离产生噪音的高速公路、机场、工厂等很近的地方,而地面建筑则须考虑设置缓冲地带,要占用相当多的土地。地下建筑物的另一个重要特点是能够修建在陡峭的倾斜地上。地面建筑物一般不能建在坡度超过 20° 的倾斜地上,而地下建筑则使得过去被认为不好利用的城市高密度地区的倾斜地也能得到充分的开发。

0.5.1.2 提高交通通行率

密度越来越大的较紧凑的开发区,应当有一个高效率的大运量交通系统。开发利用地下空间,可以在同一地点布置住宅和工作场所,缩短人们上班路程,减少在路上所需要的时间并且降低能源的消耗量。另外,在地下,商业、工厂和仓库等设施能比较靠近地布置,因而可降低材料及商品的运输成本和能源消耗。除了交通运输上的高效率外,建筑物之间的行人往来和活动也更加方便和有效。在密集的地方修建地下建筑物不仅能够有效地利用土地,留出一定的开敞空间,而且能提供连接周围建筑物的室内步行通道,使行人和地面车辆互不混杂干扰。

0.5.1.3 节约能源

地下建筑的一个突出特点就是具有一定的节约能源的潜力。一般说来,建筑物与岩(土)层接触的部分与地表面积的比例越大,建筑物在岩(土)层中埋得越深,节能效果越好。这主要是由于地下建筑物与岩(土)层接触,渗透性降低,从而降低了供热和制冷的负荷。

0.5.1.4 对自然灾害的防护能力强

一般情况下,地震波的振幅随着与震源的距离和位于地下的深度增加而减小。地震时,地上建筑物因只有基础在地下而受到很大的剪力,地下建筑物在地震中受到的损坏要比地面建筑物轻。大多数地下建筑物都是用混凝土建造在土中或岩石中的,其建筑材料具有防火性能,能够防止火灾向其他建筑物蔓延,也可防止外部火灾的波及。因此,地下建筑物不容易受到火灾的危害。遭到轰炸和核攻击时,地下建筑物可用作庇护所。当然,防护并不是地下建筑物经常起的作用,从经济效益看,平时应做其他用途,民防则是第二位的。欧洲的地下铁道系统是在第二次世界大战中起到双重作用的突出事例。由于出入口有限,很容易进行监视和检查,可以减少非法闯入,尤其是保存重要的记录、资料、文件和储备紧急用的食品、燃料,是很安全可靠的。

0.5.1.5 环境效益好

地下建筑物有益于创造优美的环境,这对于许多建筑师和规划师具有很大的吸引力。特别是在城市中,可以改善自然环境。例如,在高密度的开发区,大面积硬地面和屋顶使地表径流不畅。大量雨水流入排水系统中,而地下建筑物留出了地面土层,可以把更多的水分保留在原地,减少建筑物密集地区的雨水排水量,有利于植物生长。

0.5.1.6 隔音与隔振

多数地下建筑物除了少量露出地面的部分,都被巨大的岩(土)体包围,因此能够降低或完全消除噪音和振动。这具有两个方面的好处:第一,地下建筑物可以用于要求安静和周围环境隔离的用途,例如,一些特殊的实验室以及只允许有轻微振动的生产车间等;第二,当地下建筑物内部产生噪音时,可以起到降低对外部环境干扰的作用。

0.5.1.7 维护管理简单

地下建筑物顶部和墙壁都被岩(土)层覆盖,使维护管理简化。地下建筑物的结构主要采用了混凝土等经久耐用的材料。此外,在地下建筑物中使用的是不需要更换和维护的高质量的防水和隔热材料及制品。地下建筑物结构长久耐用的原因是所使用的各种材料可避免因暴露在大气中遭受温度变化和冻融交替造成的损害。覆层使建筑材料免受紫外线的照射,也是建筑材料经久耐用的重要原因。

0.5.2 地下建筑的缺点

地下建筑物在地表面以下,自然会给设计和施工带来许多难题。为解决地下建筑的困

难问题和其他技术问题,所需要增加的费用可能成为地下建筑的缺点。

0.5.2.1 观景和自然光线受到限制

由于建筑物的一部分或全部在地下,外墙表面的大部分都被覆盖,自然采光和向室外观景受到限制。对于浅埋地下建筑,可以利用中庭和天窗以及靠近地表面的其他开口部,克服部分限制。

0.5.2.2 出入和通行受限制

大部分行人和车辆的往来都是在地面上进行的,地下建筑物给人和车辆进出造成一定的困难。交通是否方便,取决于地下建筑物接近地面的程度、场地的条件及与建筑物功能有关的进出要求。对于地下深层的矿山式地下空间的进出,如果只能通过很长的竖井就很困难,而且投资也很大。

0.5.2.3 防水问题

与地面建筑物相比,地下建筑物渗漏水的可能性更大。如果地下建筑物建造在地下水位以下,防水的问题就更为突出。修补地下建筑物漏水的困难主要在于很难找到漏水的位置,即使能确定漏水的位置,也要通过破坏性开挖建筑结构来进行修复,所需费用较高。

0.5.2.4 施工较困难

建造在地质体中的地下建筑会由于地质体的复杂性给建设施工带来困难。地质条件复杂的工程对施工技术有较高的要求。地下工程常常由于地质条件的变化而改变设计和施工方法,而地表工程很少有这样的情况。因此,地下工程一般工期较长,造价较高。

地下建筑的缺点不可忽视,然而,这些缺点并不构成绝对的障碍。通过精心设计和技术革新,可以最大程度地克服这些缺点。因此,随着生产力的提高和科学技术的进步,地下工程中的各种困难和障碍将不断被攻克,使地下空间更好地造福于人类。

1 隧道工程勘查与设计

1.1 隧道工程调查

建设隧道工程首先需要调查了解与之有关的各方面情况,获取各种相关资料,为工程建设提供依据。调查应分施工前调查和施工中调查两个阶段,施工前调查是工程设计的前期工作,包括地形地貌及地质调查、气象调查、环境调查、施工条件调查以及与工程有关的政策法规调查等。调查的范围和精度应符合相应设计阶段的要求。这些调查工作是后续工作的重要基础,调查做的越全面、深入细致、准确,越有利于后续工作的顺利开展。调查工作应首先明确各调查阶段的目的和任务,并按照相应的顺序进行。首先是各种信息资料的收集,根据收集掌握的资料有针对性地开展现场勘察,并由较大范围的初步勘察转入具体工程部位或线路的详细勘察。施工中的调查是在隧道建设过程中,随着开挖掘进的进行,对开挖暴露出的地质体进行实际勘察。调查的目的主要是验证预设计的围岩分级及支护设计与实际情况是否相符,评价围岩及支护结构的稳定状态,预报施工前方的地质条件,并解决施工中遇到的地质问题。

1.1.1 资料的收集

调查工作应从全面收集隧道工程区域以及相关的各方面资料开始。这些资料包括:地形地貌资料,地质资料,自然灾害资料,气象资料,环境资料,施工条件、相邻和类似工程资料,以及与隧道工程建设有关的政策法规资料等。

地形地貌资料:主要是工程区域的地形图及遥感照片,地形图分为两种比例尺,一种是 $1:50000\sim 1:25000$,另一种是 $1:2000$ 或 $1:1000$,前者主要用于隧道线路的规划,而后者主要用于隧道方案的比选及隧道的定位。遥感照片主要用于长大隧道的规划设计。这类资料应从国家测绘部门收集获得。

地质资料:应从地质部门收集包括工程区域在内的区域性地质图。区域地质普查(区测)地质图的比例尺一般为 $1:200000$ 或 $1:50000$,供线路规划设计之用。掌握区域地质资料十分重要,在宏观规划设计中起着避免重大失误的重要作用。在线路比选的详勘设计阶段,需要较大比例尺的地质图,甚至是工程地质水文地质图,应从相关部门及邻近工程单位收集。

气象资料:包括工程区域的气候、气温、降雨(雪)及水文、风力及风向等资料,应从气象及水文部门收集,或通过查阅各种资料汇编、年鉴等获取。

灾害资料:工程所在地区的地震、洪水、滑坡、泥石流、台风等自然地质灾害的历史资料