

高等学校土木工程专业教材

(第二版)

隧道与地下工程概论

SUIDAO YU DIXIA GONGCHENG GAILUN

● 齐伟 李明 代树林 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

(第二版)

齐伟 李明 代树林 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。

本书适合土木工程及地质工程类相关专业的教学用书,也可供相关专业的科研及生产人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

隧道与地下工程概论 / 齐伟等编. —2版. —北京:
地质出版社, 2013. 9

ISBN 978-7-116-08470-4

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 (2013) 第 208451 号

责任编辑: 李惠娣

责任校对: 王洪强

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)82324508 (邮购部); (010)82324514 (编辑室)

网 址: <http://www.gph.com.cn>

传 真: (010)82324340

印 刷: 北京地质印刷厂

开 本: 787mm×1092mm $\frac{1}{16}$

印 张: 13.5

字 数: 330 千字

印 数: 1—2000 册

版 次: 2011 年 8 月北京第 1 版·2013 年 9 月北京第 2 版

印 次: 2013 年 9 月北京第 1 次印刷

定 价: 26.00 元

书 号: ISBN 978-7-116-08470-4

(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

本书第一版于 2011 年 8 月出版，此后被多所院校选作教材。近年来，我国隧道及地下工程建设发展迅速，地下工程的规模和数量日新月异，尤其是城市地铁建设发展迅猛，第一版中的有些内容已经过时，需要更新。此外，这门课程属于专业入门课，后续课程还有“隧道施工方法与技术”以及“地下建筑结构”等，但第一版中没有包含隧道施工方法与技术等内容。然而，有些院校及专业需要通过这门课程全面了解隧道与地下工程的各方面知识，编者认为，从培养实用型专业技术人才的角度考虑，隧道施工方面的知识是必不可少的，所以我们在第二版中增加了“隧道施工方法与技术”一章，以满足这些院校及专业的教学需要。欢迎用书院校师生及时将教学需要和对本书的意见反馈给我们，我们将在以后的修订中逐步改正和完善。

本书由齐伟（吉林大学建设工程学院）、李明（吉林建筑大学土木工程学院）、代树林（吉林大学建设工程学院）和徐燕（吉林大学建设工程学院）共同编写，其中齐伟编写绪论、第一、三、六、七、九章，李明编写第二、四章，徐燕编写第五章，代树林编写第八章，全书由齐伟统稿。

编写过程中参考了国内外多部已出版的教材及学术专著，汲取了其中许多颇有价值的资料，为此谨向这些作者表示由衷的感谢。

由于编者水平有限，书中难免有不少疏漏和不足，恳请读者批评指正。

编 者

2013 年 8 月

第一版前言

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

第一版前言

0 绪 论	(1)
0.1 概述	(1)
0.2 隧道及地下工程的发展状况	(2)
0.2.1 我国的铁路隧道	(2)
0.2.2 我国的公路隧道	(2)
0.2.3 地铁工程	(3)
0.3 地下工程的发展前景	(3)
0.3.1 地下空间资源	(3)
0.3.2 城市可持续发展的要求	(4)
0.3.3 地下工程的远景规划	(6)
0.4 地下建筑的类型	(7)
0.4.1 按使用功能分类	(7)
0.4.2 按断面形状分类	(8)
0.4.3 按所处的地质体环境分类	(8)
0.4.4 按埋藏深度分类	(8)
0.5 地下建筑的优缺点	(8)
0.5.1 地下建筑的优点	(8)
0.5.2 地下建筑的缺点	(10)
1 隧道工程勘查与设计	(11)
1.1 隧道工程调查	(11)
1.1.1 资料的收集	(11)
1.1.2 地形与地质调查	(12)
1.1.3 气象调查	(12)
1.1.4 工程环境调查	(13)
1.2 隧道工程总体设计	(13)
1.2.1 总体设计的原则	(13)
1.2.2 隧道定位设计	(13)
1.2.3 洞口位置的选择	(15)
1.2.4 隧道平面线形设计	(16)

1.2.5	隧道纵断面线形设计	(17)
1.2.6	隧道的净空及建筑限界	(18)
2	地下工程设计方法	(20)
2.1	概述	(20)
2.1.1	地下工程的特殊性	(20)
2.1.2	地下工程设计方法	(22)
2.2	传统理论及其存在的问题	(23)
2.2.1	普氏理论	(24)
2.2.2	太沙基理论	(25)
2.3	新奥法设计	(27)
2.3.1	概述	(27)
2.3.2	新奥法的主要原则	(27)
2.3.3	新奥法的适用条件及要求	(28)
2.3.4	新奥法的优越性	(29)
2.4	信息化设计及反分析法	(29)
2.4.1	地下工程监测和信息化设计	(29)
2.4.2	反分析法	(30)
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)
3.2.1	地质因素	(33)
3.2.2	工程因素	(37)
3.3	国外围岩分级(类)的研究发展	(38)
3.3.1	RMR 分级法	(39)
3.3.2	RSR 分类法	(40)
3.3.3	Q 分类法	(42)
3.3.4	日本的工程岩体分级	(42)
3.4	我国工程岩体分级(类)的研究发展	(43)
3.4.1	国家标准《工程岩体分级标准》	(44)
3.4.2	我国铁路隧道围岩分级	(46)
3.4.3	我国公路隧道围岩分级	(51)
3.4.4	《锚杆喷射混凝土支护技术规范》(GB 50086—2001) 围岩分类	(53)
4	围岩压力	(57)
4.1	围岩压力理论概述	(57)
4.1.1	古典山岩压力理论	(58)
4.1.2	塌落体理论	(58)
4.1.3	弹塑性平衡理论	(59)
4.1.4	与时间有关的变形控制理论	(59)
4.2	围岩压力的影响因素	(60)

4.3	围岩压力的确定	(60)
4.3.1	松动围岩压力的确定	(61)
4.3.2	形变围岩压力的确定	(67)
4.4	围岩压力的实测方法	(70)
4.4.1	直接量测法	(70)
4.4.2	间接量测法	(71)
4.4.3	量测数据的处理	(72)
5	隧道结构与构造	(73)
5.1	隧道洞身结构	(73)
5.1.1	隧道横断面几何形状	(73)
5.1.2	隧道洞身支护衬砌结构	(75)
5.2	洞门与明洞	(77)
5.2.1	洞门	(78)
5.2.2	明洞	(80)
6	隧道工程支护结构	(83)
6.1	喷锚支护的作用原理	(83)
6.1.1	喷射混凝土的支护作用	(84)
6.1.2	锚杆的支护作用	(85)
6.2	锚杆支护设计	(86)
6.2.1	锚杆的类型	(86)
6.2.2	锚杆长度的确定	(88)
6.2.3	锚杆间距的确定	(90)
6.3	喷射混凝土支护设计	(91)
6.3.1	围岩的塑性滑移线方程	(91)
6.3.2	圆形洞室围岩破坏分析	(92)
6.3.3	喷射混凝土支护厚度的计算	(93)
6.4	喷锚支护设计	(93)
6.4.1	硬质裂隙岩体喷锚支护的设计与计算	(94)
6.4.2	软弱破碎岩体喷锚支护设计与计算	(95)
6.5	复合式衬砌结构	(102)
6.5.1	复合式衬砌受力变形特点	(102)
6.5.2	复合式衬砌的设计	(103)
6.5.3	复合式衬砌防水层的设计	(106)
7	新奥法量测及监测技术	(108)
7.1	量测项目与内容	(108)
7.2	隧道内目测观察	(110)
7.2.1	观察的目的	(110)
7.2.2	目测观察内容	(110)
7.2.3	观测围岩的破坏形态分析	(110)

7.2.4	根据目测观察结果修改设计并指导施工	(111)
7.3	隧道内空收敛位移量测	(112)
7.3.1	位移量测原理	(113)
7.3.2	内空收敛位移量测方法及设备	(113)
7.3.3	量测断面的设置	(114)
7.3.4	测点及测线的布置	(114)
7.3.5	量测频度	(115)
7.3.6	拱顶下沉量	(115)
7.4	地表下沉量测	(117)
7.4.1	量测方法及测点布置	(117)
7.4.2	测量频度	(118)
7.4.3	量测数据整理	(118)
7.5	围岩内变形量测	(119)
7.5.1	量测原理	(119)
7.5.2	量测方法及元件	(119)
7.6	锚杆拉拔力量测	(123)
7.6.1	量测目的	(123)
7.6.2	量测方法	(123)
7.6.3	量测试验要求	(125)
7.7	钢架支撑压力量测	(125)
7.7.1	量测方法及设备	(125)
7.7.2	测力计的安装	(127)
7.7.3	量测数据的分析	(127)
7.8	喷射混凝土层应力量测	(127)
7.8.1	量测方法	(128)
7.8.2	量测结果分析	(128)
7.9	声波测试技术	(129)
7.9.1	概述	(129)
7.9.2	声波探测基本原理	(130)
7.9.3	声波测试仪器	(132)
7.9.4	岩体声波探测基本方法	(135)
7.9.5	声波(弹性波)在岩体中的传播规律	(138)
7.9.6	声波测试在岩体工程中的应用	(139)
7.10	现场量测的应用	(143)
7.10.1	根据内空变位速度预报险情	(143)
7.10.2	根据内空变位速度修改设计	(143)
7.10.3	根据最终变位量修改开挖断面尺寸	(144)
7.10.4	根据内空变位速度确定二次支护衬砌时间	(144)
7.10.5	提高围岩等级、节约投资	(145)

7.10.6 降低围岩等级,加强支护,确保工程质量	(145)
8 隧道施工方法与技术	(146)
8.1 隧道施工概述	(146)
8.1.1 隧道施工基本概念	(146)
8.1.2 山岭隧道的常规施工方法	(147)
8.2 隧道主要开挖方法	(149)
8.2.1 全断面开挖法	(150)
8.2.2 台阶法	(151)
8.2.3 分部开挖法	(152)
8.3 隧道洞口施工	(154)
8.3.1 洞口地段的一般概念	(154)
8.3.2 洞口地段施工注意事项	(155)
8.3.3 洞口的施工方法	(156)
8.4 隧道预支护技术	(157)
8.4.1 超前锚杆	(157)
8.4.2 管棚	(158)
8.4.3 超前注浆小导管	(159)
8.4.4 超前深孔帷幕注浆	(161)
8.4.5 水平旋喷预支护	(163)
8.4.6 机械预切槽法	(164)
9 地铁工程	(166)
9.1 概述	(166)
9.1.1 地铁的发展	(166)
9.1.2 地铁在城市客运中的作用	(167)
9.2 地铁路网规划与线路设计	(167)
9.2.1 地铁路网规划设计的内容及原则	(167)
9.2.2 地铁路网类型	(168)
9.2.3 线路设计	(169)
9.3 地铁区间隧道	(178)
9.3.1 地铁区间隧道的限界	(178)
9.3.2 地铁区间隧道结构设计	(179)
9.4 地铁车站建筑物	(190)
9.4.1 地铁车站结构选型的原则与特点	(191)
9.4.2 地铁车站的结构形式	(192)
9.4.3 地铁车站结构的荷载内力计算与设计	(199)
参考文献	(205)

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，至今仍能使用。从 17 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間，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水下隧道。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三种隧道工程的发展状况进行简要介绍。

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 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）、驿马岭隧道（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。截至 2010 年底，我国已建成公路隧道 7384 座，总延长 5122 余千米，其中，特

长隧道 265 座，总长 1138km，长隧道 1218 座，总长 2020.8km。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 17.04m，高度 12.24m，开挖横断面积 165.45m^2 ，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 2527m，右线 2473m；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 4448m，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（目前世界上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

目前世界上已有近 50 个国家的 168 个城市建有地铁，总长度 7000 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 400 多千米，273 个车站，11 条线路。美国纽约的地铁 1904 年开始运行，目前运营里程 480km，468 个车站，26 条线路。莫斯科地铁运营里程达 300km，176 个车站，12 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 215km，384 个车站，16 条线路。日本东京地铁，运营里程 304km，285 个车站，13 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。

目前我国已有 16 座城市建有地铁，开通的轨道交通线路有 64 条，运营里程已达到 2000 余千米。其中，北京的地铁至今已有 17 条线路，运营里程达到 456km，地铁站 270 座，已跻身于世界发达国家大城市的水平。随着我国城市化建设的迅速发展，城市的扩容和城市人口的增多，预计我国在未来还将大力发展城市轨道交通事业，目前已经规划建设地铁将达到 6000km，总投资将超过 13000 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。

地下空间资源包括三个方面的含义: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 亿人,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。城镇人口的比例从 1989 年的不到 20%,提高到 2000 年的 35.7%,2011 年达到 51.27%,城镇人口已达到 6.9 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。

目前,我国首都北京市 61.5%的常住人口集中在市中心的城区(东城、西城、朝阳、海淀、丰台、石景山六个区),城区人口密度为 7837 人/ km^2 ,超过了世界上以人口密集著称的伦敦(5437 人/ km^2)和东京(5984 人/ km^2),而在首都功能核心区,人口密度更高达 2.2 万人/ km^2 。上海人口密度高达 9589 人/ km^2 ,其中中心城区 16828 人/ km^2 ,均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 2 km/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 11.3 m^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 7.32 m^2 (15%)、9.10 m^2 (8.12%)、21.3 m^2 (9.3%)、13.9 m^2 (12.38)。北京城区人均道路面积为 4.4 m^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 1.6 m^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 $\times 10^8$ 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

① 1 亩=666.6 m^2 。

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征、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”。

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30m),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3~5m,布置公共事业管网的干线支线、共同沟等;地下二层深度6~10m,主要以地下商业街、地下停车场、地铁站、地下文化娱乐场所为主;地下三层10~30m,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, 连接日本福岡至韩国釜山, 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、选它海峡、博斯普鲁斯海峡、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;