



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

地下建筑工程施工技术

DI XIA JIAN ZHU GONG CHENG SHI GONG JI SHU

周传波 陈建平 罗学东 王晓梅 编著



人民交通出版社

China Communications Press

要 容 内



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

地下建筑工程施工技术

DI XIA JIAN ZHU GONG CHENG SHI GONG JI SHU

周传波 陈建平 罗学东 王晓梅 编著



人民交通出版社

China Communications Press

内 容 提 要

本书以开挖和支护两项地下建筑工程的基本作业为主线,全面介绍了不同应用领域和不同施工条件下的地下建筑工程施工技术与工艺方法;内容注重理论联系实际,并吸收地下工程学科领域的有关最新理论与工程技术成果;以地下建筑工程施工技术内容为主,系统地介绍了与施工技术关系密切的施工监测、施工对环境的影响以及施工管理等内容。

本书作为地下建筑工程学科方向的本科生教材,也可供相关专业的教师、研究生和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

地下建筑工程施工技术 / 周传波等编著. —北京:人民交通出版社, 2008. 5

ISBN 978 - 7 - 114 - 07124 - 9

I. 地… II. 周… III. 地下工程 - 工程施工 - 施工技术
IV. TU94

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 055860 号

书 名: 地下建筑工程施工技术

著 作 者: 周传波 陈建平 罗学东 王晓梅

责任编辑: 高 培

出版发行: 人民交通出版社

地 址: (100011) 北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号

网 址: <http://www.ccpress.com.cn>

销售电话: (010) 85285838, 85285995

总 经 销: 北京中交盛世书刊有限公司

经 销: 各地新华书店

印 刷: 廊坊市长虹印刷有限公司

开 本: 787 × 1092 1/16

印 张: 22.25

字 数: 563 千

版 次: 2008 年 6 月 第 1 版

印 次: 2008 年 6 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978 - 7 - 114 - 07124 - 9

定 价: 37.00 元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

前 言

随着国家经济建设的发展,地下建筑工程施工技术应用领域越来越广泛,无论是在交通、市政、水利水电、矿床开采等工业民用建设领域,还是在现代化的军事建设领域都得到了广泛的应用。施工过程中遇到的复杂地质条件和环境,进一步促进了地下建筑工程施工技术的创新和发展,工程实践中出现了许多新技术、新方法。为适应新形势下地下建筑工程学科本科教学特点,并结合当前不同应用领域对地下建筑工程施工技术的要求,特编著了本教材。

教材编著特点是:以开挖和支护两项地下建筑工程的基本作业为主线,全面介绍了不同应用领域和不同施工条件下的地下建筑工程施工技术与工艺方法;内容注重理论联系实际,并吸收地下工程学科领域的有关最新理论与工程技术成果;以地下建筑工程施工技术内容为主,系统地介绍了与施工技术关系密切的施工监测、施工对环境的影响以及施工管理等内容。教材强调内容的系统性、完整性;由于受总篇幅限制,各章节内容编排上有详有略,主次分明。其中,带“*”的章节,可作为授课时的选学内容。

本书由中国地质大学(武汉)工程学院几位从事相关地下建筑工程学科教学科研较长时间的教师集体编写。全书共15章,周传波教授任主编,陈建平教授、罗学东副教授、王晓梅讲师为副主编。其中:第1、2、3、4章由周传波、陈建平编写;第5、6、7章由周传波编写;第8、9、10、11章由王晓梅编写;第12、13、14章由罗学东编写;第15章由陈建平、罗学东编写;周传波负责全书的统稿。

硕士研究生姚颖康、张亮、王鹏、贾建红、李扬、郑晓硕、彤增湘参与了书中部分章节的图文处理,在此表示感谢!

由于本书是多位编者合作的产物,加之编著者学术水平有限,书中的错误在所难免,恳请读者批评指正。

周传波

2008年2月 武汉

目 录

第一章 绪论	1
1.1 概述	1
1.1.1 含义与基本特征	1
1.1.2 地下空间应用历史	1
1.1.3 地下建筑工程建设发展前景	3
1.2 地下建筑的类型及特点	5
1.2.1 地下建筑的类型	5
1.2.2 地下建筑工程特点	6
1.3 地下建筑工程建设基本程序及原则	7
第二章 地下建筑工程施工概论	10
2.1 地下建筑工程施工技术概述	10
2.2 地下建筑工程施工方案	11
2.2.1 一次成巷方案	11
2.2.2 多次成巷方案	12
2.2.3 一次成巷方案与多次成巷方案比较	12
2.3 地下建筑工程施工特点	12
2.4 地下建筑工程施工技术发展	13
第三章 隧道钻爆法开挖施工技术	15
3.1 隧道爆破的基本概念	15
3.2 钻爆法隧道开挖方法	16
3.2.1 开挖方法	16
3.2.2 影响开挖方法的因素	18
3.3 隧道爆破技术	19
3.3.1 凿岩爆破基本参数	19
3.3.2 布孔技术	25
3.3.3 光面(预裂)爆破技术	47
3.3.4 隧道爆破设计	63
3.3.5 隧道爆破器材及起爆方法	68
3.4 凿岩机械与工具	75
3.4.1 凿岩机械	76
3.4.2 凿岩工具	79
3.5 隧道钻爆法施工通风与防尘	79

3.5.1	隧道施工通风	79
3.5.2	隧道施工防尘	86
3.6	装渣与运输	87
3.6.1	装渣	87
3.6.2	运输	90
3.6.3	卸渣	94
3.7	钻爆法开挖机械方案配套	95
3.7.1	方案配套的原则	95
3.7.2	常用的机械配套方案	95
第四章	竖井、斜井钻爆法开挖施工技术	98
4.1	竖井施工技术	98
4.1.1	概述	98
4.1.2	井口施工	98
4.1.3	竖井井身施工方法	98
4.1.4	竖井凿岩爆破	101
4.1.5	竖井装岩与提升	103
4.2	斜井施工	105
4.2.1	斜井开挖特点	105
4.2.2	斜井施工方法	106
4.2.3	斜井装岩	106
4.2.4	斜井提升	107
4.3	斜井、竖井施工治水	108
第五章	隧道支护施工技术	110
5.1	概述	110
5.2	锚杆支护施工	111
5.2.1	锚杆支护参数确定方法	111
5.2.2	不同类型锚杆施工要点	113
5.3	喷射混凝土支护施工	120
5.3.1	喷射混凝土基本特点及作用	120
5.3.2	喷射混凝土的设计要点	122
5.3.3	喷射混凝土工艺流程类型	123
5.3.4	喷射混凝土原材料及配合比	125
5.3.5	喷射混凝土机械设备	126
5.3.6	喷射混凝土的施工要点	129
5.4	数值模拟方法在优化锚喷支护参数中的应用*	133
5.4.1	引言	133
5.4.2	锚喷(网)支护形式与参数的初选	134
5.4.3	锚喷网支护参数数值模拟优化	136
5.4.4	结论与建议	143
5.5	钢拱架支护施工	144

5.5.1	钢拱架支护的性能特点	144
5.5.2	钢拱架支护设计要点	144
5.5.3	钢拱架构造和制作	145
5.5.4	钢拱架安设与施工	145
5.6	混凝土衬砌施工	146
5.6.1	混凝土衬砌施工工艺	146
5.6.2	模板工程	147
5.6.3	钢筋工程	149
5.6.4	混凝土工程	150
5.6.5	竖井衬砌施工	156
5.6.6	混凝土衬砌施工后的若干问题及其处理	157
5.7	隧道超前支护施工	159
5.7.1	超前锚杆	159
5.7.2	管棚超前支护	162
5.7.3	注浆法加固技术	166
第六章	隧道盾构法施工技术	169
6.1	概述	169
6.2	盾构基本构造	170
6.3	盾构类型	171
6.4	盾构机型选择	174
6.5	盾构施工	176
6.5.1	盾构的安装与拆卸	176
6.5.2	盾构推进	177
6.5.3	盾构掘进施工管理	178
6.6	盾构法施工时的地表变形及其控制	178
第七章	掘进机(TBM)施工技术	180
7.1	掘进机(TBM)法概述	180
7.1.1	掘进机法及其在国内外的应用	180
7.1.2	隧道掘进机分类与特点	181
7.2	隧道掘进机的基本构成和性能	183
7.2.1	TBM 工法的基本构成	183
7.2.2	TBM 的掘进速度	186
7.3	采用隧道掘进机法的基本条件	187
7.3.1	工程地质条件	187
7.3.2	机械条件	190
7.3.3	开挖长度	190
7.3.4	工程所在地的设施条件	190
7.4	隧道掘进机法的附属设施	191
7.4.1	TBM 附属设备设置原则	191
7.4.2	附属设备种类	191

7.4.3 集尘及通风设备	193
7.4.4 洞内超前钻孔设备	193
7.5 隧道掘进机法的支护技术	194
7.6 掘进机开挖隧洞经济分析和施工组织	195
7.6.1 经济分析	195
7.6.2 掘进机施工组织	195
第八章 隧道顶管法施工技术	197
8.1 概述	197
8.2 顶管法施工基本原理	198
8.2.1 施工内容	198
8.2.2 施工程序	201
8.3 常用顶管类型及特点	201
8.3.1 按管前挖土方式分类	201
8.3.2 根据工作面的稳定程度分类	203
8.3.3 按管内径大小和顶进距离分类	204
8.3.4 以推进管的管材来分类	204
8.4 常用顶管施工技术	205
8.4.1 手掘式顶管施工技术	205
8.4.2 泥水平衡式顶管施工	206
8.4.3 土压平衡顶管施工工法	209
8.5 顶管法施工若干关键技术问题	210
8.5.1 穿墙管与止水	210
8.5.2 测量与纠偏	211
8.5.3 管段接口处理	213
8.5.4 触变泥浆减阻	213
8.5.5 中继间	213
8.5.6 顶管法施工的其他主要技术	214
第九章 基坑工程施工技术	216
9.1 概述	216
9.2 基坑竖直与放坡开挖施工	218
9.3 基坑支挡施工	220
9.4 土层锚杆施工	223
9.4.1 锚杆类型	224
9.4.2 锚杆支护体系的构造	224
9.4.3 锚杆施工工艺	226
9.5 地下连续墙施工	228
9.5.1 地下连续墙的分类	228
9.5.2 地下连续墙的优缺点	229
9.5.3 成槽机具	230
9.5.4 地下连续墙施工工艺	231

第十章 盖挖法施工技术	238
10.1 概述.....	238
10.2 盖挖法特点及施工类型.....	239
10.3 盖挖顺作法.....	239
10.4 盖挖逆作法.....	240
10.4.1 盖挖逆作法概要.....	240
10.4.2 逆作法的特点.....	241
10.4.3 逆作法的适用场合和注意事项.....	241
10.4.4 逆作法的施工顺序.....	242
10.4.5 立柱结构的施工.....	243
10.4.6 逆作法的接头施工.....	243
第十一章 沉管隧道施工技术	246
11.1 概述.....	246
11.2 沉管隧道结构简介.....	247
11.2.1 沉管隧道结构的分类.....	247
11.2.2 沉管隧道的结构设计要点.....	250
11.3 沉管隧道施工工艺.....	252
11.3.1 沉管法施工的前期调查工作.....	252
11.3.2 临时干坞的构造与施工.....	253
11.3.3 管段制作.....	254
11.3.4 管段浮运.....	256
11.3.5 沟槽浚挖.....	256
11.3.6 管段沉放.....	258
11.3.7 水下连接.....	259
11.3.8 基础施工.....	260
11.3.9 覆土回填.....	262
11.4 沉管隧道施工特点.....	262
第十二章 新奥法(NATM)施工与监控量测	264
12.1 新奥法简介.....	264
12.1.1 新奥法的发展.....	264
12.1.2 新奥法的主要原则.....	265
12.2 监控量测在地下工程中的作用.....	266
12.2.1 确定合适的支护时间.....	266
12.2.2 为信息化设计与施工提供信息源.....	266
12.3 监控量测的主要内容.....	267
12.3.1 量测项目及断面、测点布置	268
12.3.2 主要量测项目的量测方法.....	271
12.4 量测资料的整理和反馈.....	275
12.4.1 量测资料的整理.....	275
12.4.2 量测资料的分析与反馈.....	276

12.5 隧道施工过程中的超前预报技术	279
12.5.1 工程地质调查与推断法	279
12.5.2 TSP 203 超前预报技术	280
12.5.3 超前地质钻探	281
12.5.4 地质雷达探测方法	281
第十三章 地下工程防排水施工技术	282
13.1 概述	282
13.2 地下工程中常遇的地下水	282
13.2.1 地下水分类	282
13.2.2 地下工程中常遇的地下水	283
13.3 地下工程防排水原则	284
13.4 地下工程排水	286
13.4.1 地表水的排除	286
13.4.2 人工降低地下水位	286
13.4.3 地下结构内排水	287
13.5 地下工程细部防水	287
13.5.1 变形缝防水	287
13.5.2 施工缝防水	289
13.5.3 后浇带防水	290
13.5.4 穿墙管防水	291
第十四章 地下工程施工中若干环境影响问题	292
14.1 概述	292
14.2 城市基坑开挖的环境土工问题	293
14.2.1 基坑边坡的失稳与防止措施	293
14.2.2 支挡结构的变形	294
14.2.3 基坑周围地表沉降变形	295
14.2.4 基坑失稳	295
14.2.5 基坑涌沙	296
14.2.6 基坑隆起变形	296
14.3 山岭隧道施工中的环境影响问题	296
14.3.1 弃渣的影响与处置	297
14.3.2 洞口边仰坡的破坏与处理	298
14.3.3 山岭隧道施工中地下水的影响问题	300
14.3.4 山岭隧道的其他环境影响问题	301
14.4 盾构掘进对环境的影响及防治	302
14.4.1 盾构掘进造成地层变形的原因分析	302
14.4.2 地层变形的控制措施	304
14.5 隧道施工对邻近建筑物的影响及对策	305
14.5.1 新建隧道对地中结构物的影响	306
14.5.2 新建隧道对地表结构物的影响	307

14.5.3	邻近建筑物隧道施工中既有结构物现状调查·····	307
14.5.4	邻近建筑物施工影响预测·····	308
14.5.5	邻近建筑物施工安全判断标准·····	309
14.5.6	邻近建筑物隧道施工对策·····	310
第十五章	地下工程施工组织与管理·····	312
15.1	地下工程施工组织·····	312
15.1.1	地下工程施工组织设计·····	312
15.1.2	施工方案·····	314
15.1.3	工程进度计划·····	319
15.1.4	施工场地设计·····	325
15.2	地下工程施工管理·····	330
15.2.1	施工企业工程质量管理·····	330
15.2.2	合同管理和风险管理·····	336
15.2.3	施工现场管理·····	338
参考文献 ·····		343



第一章

绪 论

1.1 概 述

1.1.1 含义与基本特征

地球表面以下是一层很厚的岩石圈,岩石圈表面不断风化形成土层。岩层和土层在自然状态下都是实体,只有在外部条件作用下才能形成空间。在岩层或土层中天然形成或经人工开发形成的空间称为地下空间(Subsurface space)。例如,石灰岩岩体由于水的冲蚀作用形成的空间称为天然溶洞;土层中含有地下水的空间称为含水层;人工采用各种技术开挖出来的空间称为地下建(构)筑空间。

建造在岩层或土层中的各种建筑物(Buildings)和构筑物(Structures),是在地下形成的建(构)筑空间,称为地下建筑(Underground buildings and structures)。地面建筑的地下室部分归为地下建筑;大部分处于岩石或土壤中的建筑物和构筑物常称为半地下建筑。地下建筑用途很广,如交通运输方面的地下铁道、公路隧道、地下停车场、过街和穿越障碍的地下通道;工业与民用的各种地下车间、电站、矿井、储藏库、商店、人防与市政(城市下水道、电缆隧道)地下工程;文化、体育、娱乐与生活等方面的联合建筑体,还有军事等方面的地下设施。

由于处于一定厚度的土层或岩层的覆盖下,因而具有良好的防护性能,可免遭或减轻包括核武器在内的空袭、炮轰、爆破、火灾等人为灾害,能较好地抵御地震、飓风等自然灾害;又由于地层具有良好的热稳定性、密闭性,故地下建筑有一个比较稳定的温度场,对于要求恒温、恒湿、超净的生产或生活用建筑非常适宜,尤其对低温或高温状态下储存物资效果更为显著。有规划地建造各种地下建筑工程,对节省城市占地、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,能起到极其重要的作用。

1.1.2 地下空间应用历史

人类利用地下空间的历史是与其文明史相呼应的,经历了一个从自发到自觉的漫长过程。推动这一过程发展的动力一是人类的自身发展,如人类繁衍和智能的提高;二是社会生产力的发展。人类对地下空间的利用史大体可划分为以下四个阶段。

远古时期,人类出现~公元前 3000 年。人类利用天然洞穴作为栖身住所。考古学家发现,距今 1 万年前,称为“新洞人”、“山顶洞人”的两种古人类居住地址就在北京周口店龙骨山自然条件较好的天然岩洞里;黄河流域已发现公元前 8000~前 3000 年的洞穴遗址 7 000 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。在日本、西亚、中东、欧洲、美洲、

北非也都发现了这一时期的古人类居住洞穴。

古代时期,公元前 3000 年~5 世纪。公元前 3000 年以后,世界进入了铜、铁器时期,劳动工具的进步和生产关系的改变,导致生产力有很大的发展,出现了古埃及、希腊、罗马及古代中国的高度文明。人类对地下空间的利用从单纯的居住进入了更广泛的领域。埃及金字塔下的墓穴、巴比伦幼发拉底河引水隧道,均为这一时代地下建筑的典范。我国秦汉时期(公元前 221 年~公元 220 年)的陵墓、采矿、军事、地下粮仓已具有相当的技术水准和规模。

中世纪时期,5 世纪~14 世纪。欧洲经历了封建社会最黑暗的千年文化低潮,地下空间的开发利用基本上处于停滞状态。这一时期我国地下建筑的开发多用于陵墓的建造和满足宗教的一些特殊要求,以及用于屯兵和储粮的军事目的。隋朝(7 世纪)在洛阳东北建造了面积达 $600\text{m}\times 700\text{m}$ 的近 200 个地下粮仓,其中第 160 号粮仓直径 11m,深 11m,容量 445m^3 ,可屯粮 2 500~3 000t;宋朝在河北峰峰建造的军用地道,长约 40km。自四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(从北魏到隋、唐、宋、元各朝),以及甘肃麦积山和河北邯郸响堂山石窟等,这些石窟岩洞形成了大型的雕刻艺术空间。

近代和现代。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,地下建筑工程迅速发展。1613 年建成伦敦地下水道;1681 年修建了地中海比斯开湾 170m 的连接隧道;1843 年建成越河隧道;1863 年伦敦建成世界上第一条城市地下铁道;1871 年穿越阿尔卑斯山,连接法、意的全长 12.8km 的公路隧道开通。

到 20 世纪 90 年代末,世界上已有 75 个国家和地区的 80 多个城市修建地下铁道,线路总长 5 200km;有 14 座城市地铁运营线路超过 100km。各国开凿的铁路隧道长 10km 以上的就有 41 条。

日本青函(青森—函馆)隧道连接北海道与本州,总长 53 850m,穿越津轻海峡,海底长度就达 13.3km。青函隧道工程,1939 年开始规划,1946 年实施调查,1971 年正式施工,至 1988 年 3 月投入运营,经历了半个世纪。英法海峡隧道总长 50km,其中海底长度 37km,1987 年动工,1994 年 5 月投入运营。各类地下电站也迅速增长,其中地下水电站的数目全世界已超过 400 座,其发电量达 40 亿瓦以上。地下电站的建设是十分巨大的工程,前苏联的罗戈水电站,土石方量 510万 m^3 ,混凝土用量 160万 m^3 ,开凿的隧道洞室 294 个,总长度达 62km。

据交通部统计,20 世纪 50 年代,我国仅有 30 多座隧道,总长约 2.5km。1964 年修建的北京至山西原平公路上,修建了两座 200m 以上的隧道,已是非常大的工程。1993 年发展到 682 座,总长 136km。隧道平均长度为 199m,均以二级以下的短隧道为主。新华网北京 2002 年 11 月 6 日交通部副部长胡希捷向 770 多名中外专家宣布,在我国有 8 600 多座铁路、公路隧道,总长度约 4 370 多公里,居世界第一,我国已成为世界上隧道和地下工程最多、最复杂、发展最快的国家。

目前我国较长的隧道有:大瑶山铁路隧道长 14 295m,1982 年施工,1987 年 5 月建成;秦岭铁路隧道,双线并长 18.46km;兰(州)新(疆)铁路乌鞘岭隧道全长 20.05km,是亚洲最长的陆地隧道;京—福高速公路美荪林隧道 2003 年 11 月贯通,双线总长 11.148km;秦岭终南山公路隧道,双洞双车道,单洞全长 18.004km。我国最长的城市地下隧道,南京玄武湖地下隧道,2.66km,双向 6 车道,2002 年竣工。我国第一条海底隧道,厦门“东通道”海底隧道全长 9km,总投资 32.8 亿元,预计 2010 年建成。

世界各国还修建了大量的地下储藏库,其建造技术得到不断革新。目前城市地下空间的开发利用,已经成为城市建设的一项重要内容。一些工业发达国家,将地下商业街、地下停车

场、地下铁道及地下管线等连为一体,成为多功能的地下综合体。大规模的开发和利用地下空间,已在缓解城市用地矛盾和城市现代化建设中起着至关重要的作用。

1.1.3 地下建筑工程建设发展前景

随着社会生产力的巨大发展,人口和生活需求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,就占用一定的生存空间,它包括生态空间,即生产粮食等生活必需品,和供人居住及从事各种活动的生活空间。这两类空间都是以土地为依托,随着人口的不断膨胀,人类现有的生活空间是十分有限的。因此,迫切需要开拓新的生存空间。

国际上提出一种普遍接受的观点:认为 19 世纪是“桥”的世纪,20 世纪是“高层建筑”的世纪,21 世纪将是人类开发和利用“地下空间”的世纪。

21 世纪人类面临人口、粮食、资源和环境的四大挑战。可持续发展作为国策摆在每个学科和产业面前,谁违背了可持续发展的国策,谁就会被淘汰。人类应顺应这一潮流,开拓新的空间资源。随着城市化进程的发展,我们每天可以看到,大片的土地被钢筋混凝土建筑和交通道路等设施所取代,并且无法再生,居住、交通、环境的矛盾日益突出。能否把地面沃土多留给农业和环境,把地下岩土空间多开发点给道路交通、工厂和仓库,从而使地下空间成为人类充分合理利用的空间资源,这是 21 世纪现代化城市建设的必由之路。

地下空间是迄今尚未被充分利用的一种自然空间资源,具有很大的开发潜力。地球的表面积为 $5.1 \times 10^{14} \text{ m}^2$ 。表面以下是岩石圈(地壳),陆地下的岩石圈平均厚度为 33km,海洋下 7km。理论上讲,天然存在的地下空间蕴藏总量有 $7.5 \times 10^{18} \text{ m}^3$ 。但随着地球深度的增加,其内部温度和压力随之加大,以目前的技术经济条件来看,地下空间的合理开发深度为 2km。考虑到地下实体中开挖地下空间,需要一定的支撑条件,即两个相邻岩洞间应保留相当于岩洞尺寸 1~1.5 倍的岩石实体;以 1.5 倍计,则当前和今后一段时间内的技术条件下,地下 2km 范围内的地下资源开发量为 $4.12 \times 10^{17} \text{ m}^3$ 。而人类生活主要集中于占陆地面积 20% 左右的可耕地、城市和农村用地的范围内,故可供有效利用的地下空间资源为 $2.40 \times 10^{16} \text{ m}^3$ 。在我国,农村、城市居民点及可耕地面积约占国土面积的 15%,这样计算,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,从拓展人类生存空间的意义上讲,体积庞大的地下空间是一种具有很大潜力的自然资源。

与建立太空城市、海洋城市、海底城市的一些设想相比,开发和利用地下空间是最现实的途径。首先,潜在的巨大空间资源为城市地下空间的开发利用提供了客观条件;其二,开发地下空间的技术已比较成熟,在已有的技术上进一步发展新技术要比开发宇宙技术、海洋技术容易得多;其三,也是最重要的一点是,开发陆地以下空间的最大优势在于不脱离原来的土地和原有的城市,此可与地上的城市空间得到协调发展,而要建立完全脱离地球的或远离陆地的城市,不仅要在建造技术上,而且在解决空气、水、粮食、能源等一系列问题上,都是一个个非常困难的课题。

因此,有理由认为,在城市的地下空间开发利用上,地下建筑在未来相当长的时间内有着非常广阔的前景。

国际上已把 21 世纪作为人类开发利用地下空间的世纪,世界各国也都作为国策去努力。日本提出要利用地下空间,把国土面积扩大数倍。我国也已开始大规模的进行地下工程开发

与建设。正在或即将开发的主要地下工程有：

一、铁路、公路隧道建设

我国铁路分布多集中在比较发达的东部地区，目前随着我国国民经济的不断发展和西部领域的不断开发，铁路正在或必定要向西南、西北等边远山区延伸。山区建路必多桥隧工程。如正在建设中的穿越秦岭山脉，打通包头—西安—安康—重庆—北海的西部大通道，由于该通道将穿山越岭，必然面临众多长大隧道工程；正在建设的西安至南京复线铁路神朔（神木—朔州）线、宝兰线（宝鸡—兰州）复线、渝怀（重庆—怀化）线铁路的相继开工，都已出现或必将出现大量的隧道建设。

我国过去修建的山区公路大多采用盘山道，长远来看其缺点突出：线路长、费时、耗油量多、车辆磨损大，且破坏植被、环境。如昆明—西双版纳，直线距离只有 400 多公里，而公路里程却有 800 多公里；四川、贵州、云南、广西等很多公路均是如此，更不用说通向世界屋脊的西藏公路了。随着经济和技术不断发展，我国也可以像发达国家那样，开凿较长的隧道，这样就可以快速地改善已有的交通状况。

西部大开发，计划在 5~10 年内完成连接西部地区的丹东至拉萨、青岛到银川等 8 条国道主干线的建设，打通滇藏、川藏、成都到樟木等 8 条省际间主要公路通道，都会出现大量的隧道工程建设任务。

二、地下海底隧道

目前，世界上许多国家正在进行海峡隧道的研究和筹建，如白令海峡（俄罗斯—美国）隧道、直布罗陀海峡隧道（西班牙—摩洛哥）、连接意大利本土和西西里岛的墨西拿海峡隧道等。

21 世纪，我国学者也在为修建连接大陆与台湾的台湾海峡隧道、连接大陆与海南岛的琼州海峡隧道进行积极筹划和可行性研究。早在 1998 年 11 月 25~27 日海峡两岸有关单位联合在厦门召开了“台湾海峡隧道学术论证研讨会”探索和研究台湾海峡隧道工程的有关学术问题。

此外，国内有关单位正在组织研究横穿渤海海峡，连接辽东半岛与山东半岛的南桥和北隧海峡通道，连接上海—崇明岛—南通的长江口越江通道（桥隧结合通道），以及横跨胶州湾连接青岛市区与黄岛开发区的青黄通道等工程。

三、城市地铁隧道

我国人口众多，截至 2002 年底，全国设市级城市 660 个，其中 100 万人口以上的特大城市已达 171 个，200 万人口以上的特大城市达 33 个，400 万人口以上的特大城市有 10 个。随着国家工业化的发展，会有更多的人口转向城市。现有的城市人口将大大增加，现有的中等城市将转为大城市。众所周知，大城市的交通已成大问题，堵车严重，交通事故频繁发生。解决这一问题的途径不外两种，一是高架桥、另一是建地铁。高架桥影响市容、且运输容量不大。从长远观点来看，城市地铁是解决交通问题的主要途径。纵观世界各座大城市，均有四通八达的地铁网，可以将乘客大量、快捷、安全、舒适地输送到四面八方。我国各主要大、中城市都在积极筹划和发展地铁交通，地铁工程建设将是我国 21 世纪城市地下空间开发的重点。

四、城市地下市政建设

世界上有许多国家城市建设向地下发展，如地下商场、地下冷藏库、地下仓库、地下游泳馆、地下污水处理厂等。修建地下民用建筑，可以更加充分利用城市面积；修建地下冷藏库有明显的优点，可以将十几、二十米厚的地层冷冻起来，即使停电半个月，温度仍可保持在零度以下。地下体育馆、游泳池等都是因此而保温性好，受到人们的青睐。

我国地少人多,每年由于城市发展,工业交通发展要多占去几千万亩的耕地,城市建设尽可能转入地下,迟早会被提到议事日程。

五、水利、水电地下工程

调水工程在我国已有若干工程实例,南水北调工程的开展,将会出现很多输水隧道。调水工程翻山越岭,必须打通隧道,如引滦入津工程修建的穿山输水隧道、引大入秦修建的盘道岭隧道长 10 多公里、引黄入晋工程修建的 21 公里长隧道等。

我国现有的水电资源均在高山峡谷地区,尤其是西南、西北地区,河谷狭窄,流量大,选择地下厂房往往是最佳方案。根据规划,上个世纪末计划建造总容量达 4 000 万千瓦以上的水电站,其中 40% 以上均为地下水电站。正在建设的三峡地下电站土建工程将于 2008 年 12 月完工,安装 6 台 70 万千瓦机组相当于再建 1.5 个葛洲坝水电厂或 2.3 个小浪底水电站。

而在东南、华北地区,水电资源相对少些,这些地区的主力电站多半是火力发电站。火力电站调峰能力差,电网运行不经济,环境污染大。因此,抽水蓄能电站已经或正在这些地区兴建。这些电站均以庞大复杂的地下洞室群作为建设工程的主体。

据统计,目前世界上已有 400 多座地下电站,而我国只有 40 余座。可以想象,对于我们这样国土辽阔、人口众多、发展迅速的国家,在今后几十年内必然要建造大量的地下水电站。

六、其他方面

(1) 国防建设工程

现代地下建筑起源于地下铁路和军事工程,国防地下工程建设是国家军事建设的重要内容之一。如军事指挥中心、武器库(飞机、舰艇库等)、军需品仓库均可以设置在地下;主要的军事工业工厂,导弹基地等当然有设置于地下的,这些地下设施除了满足一般的地下工程要求外,往往还要满足承受爆破冲击荷载的作用。

(2) 油库、汽库、核废料库

目前我国的石油天然气库建在地表,既占地又不安全,且钢材消耗量大。国际上某些发达国家将此建在地下,最大容量超过 300 万 m^3 ,我国也即将建立地下油库。我国目前发展核电站,处于刚起步阶段,以后还将兴建大量的民用核电设施,因此核废料必然越来越多,核废料的处理会成为一个严重的问题。发达国家如瑞典、美国等认为核废料密闭储藏在几百米深的地下洞库中比较理想,可以做到几百年甚至几千年内不向外泄漏渗透。我国在不久的将来也会遇到这一问题,需要提前做这方面的研究工作。还有矿业工程、民用建筑工程地下部分等,都需要涉及地下建筑工程,因此,地下建筑专业人才是大有用武之地的。

(3) 深部矿产资源开采

我国煤炭资源埋深在 1 000m 以下的为 2.95 万亿吨,部分有色金属矿山已进入采深超过 1 000m 的深部开采阶段,随着浅部资源的逐步枯竭,进行深部资源开采势在必行,这将会给采矿地下工程带来一系列问题,如地下工程稳定性、冲击地压等。

1.2 地下建筑的类型及特点

1.2.1 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。地下建筑常见的分类方法有四类:

一、按使用功能分类

①军用地下建筑:如地下指挥所、人员或装备隐蔽所、地下通讯站及战备电站等;

②交通地下建筑:公路、铁路隧道或城市地铁、人行地道等;

③市政地下建筑:城市地下自来水厂,地下污水处理厂,动力电缆、通讯电缆、给排水管道等的地下通道;

④地下采掘空间:各种矿体开采后形成的地下空间,在我国这些地下空间大多未被利用,可用来储藏核废料或其他物资;

⑤工业地下建筑:地下工厂、车间,如地下水电厂、地下精加工车间等;

⑥地下仓储设施:地下油、粮、气库,冷、热库,核废料库等;

⑦地下民用设施:地下游乐场、地下商场、地下旅馆、地下住宅、地下医院等。

二、按断面形状分类

①曲线型断面:圆形、椭圆形、曲墙拱形;

②半曲线型断面:直壁平底拱形、直壁仰拱形;

③直线型断面:如矩形、方形等。

三、按所处的地质条件分

①岩体地下洞石室:包括人工洞和天然洞两种;

②土体地下洞室:包括黄土洞室和其他土层洞室。当洞室上部为土层,下部为岩层时,根据其周围应力特征和防排水要求,也宜归为土体地下洞室进行设计。

四、按埋深分类

①当 $h/b \geq k$ 时,为深埋隧道;

②当 $h/b < k$ 时,为浅埋隧道。

其中, h 为毛洞的埋深, b 为毛洞的跨度; k 的取值与岩性有关,当为土层时,取为 2.5,当为坚硬岩石时,取值偏高,建议值为 1~2,但同时满足: $h \geq (2 \sim 2.5)h_0$ (h_0 为压力拱的计算高度)。

1.2.2 地下建筑工程特点

地下建筑工程是在岩体或土体中开挖的空间结构工程,与地面工程相比,地下工程在很多方面具有完全不同的特点,主要表现在以下几个方面。

(1)工程受力特点不同

地面工程是先有结构,后有荷载,经过施工形成结构后,再承受自重、风雪以及其他静载或动载;地下工程是先有荷载,后有结构,在岩土地质体内开挖,在工程开挖之前就存在着地应力荷载,所以地下工程是先有荷载,后形成结构。

(2)工程材料特性不确定性

地面工程结构材料多为人工制造,如钢筋混凝土、钢材、砖块等,这些材料与岩土体材料相比,在力学和变形性质等方面不仅无变异性,而且人们可以对其进行控制和改变。地下工程结构所涉及的材料包含两部分,其一部分支护结构材料性质是人工制造的,而另一部分作为地下结构重要组成的工程围岩是难以预测和控制的岩土地质体。这样的地质体不仅包含大量的断层、节理夹层等不连续介质,而且还存在着很大程度的不确定性,这种不确定性主要体现在两个方面:

①空间上的不确定性。对于地下工程围岩,不同位置围岩的地质条件存在差异(如岩性、