

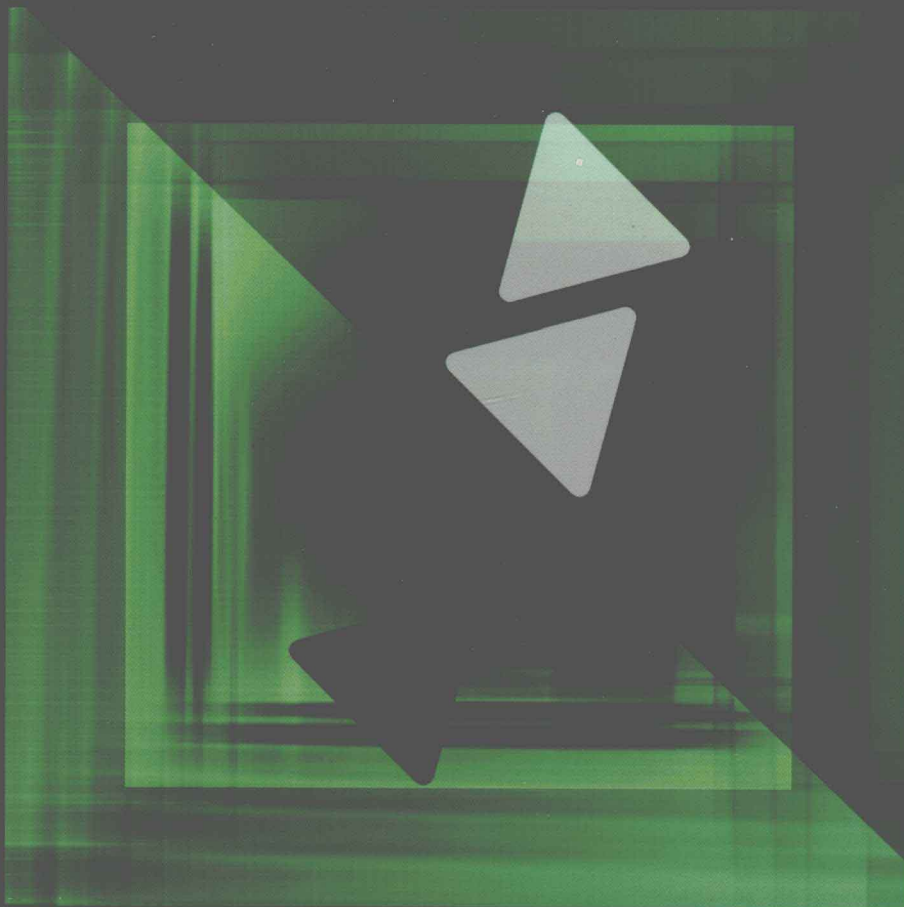


普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 城市地下工程

(第二版)

陶龙光 刘波 侯公羽 编著



科学出版社



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 城市地下工程

(第二版)

陶龙光 刘 波 侯公羽 编著

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

本书共 13 章,分上下两篇。上篇共 6 章,介绍了城市地下工程的主要建筑类型及其规划、理论与设计,包括城市地下空间规划理论与建筑设计、地下铁道、地下停车场、地下仓库、其他地下工程的有关技术;下篇共 7 章,介绍了城市地下工程的施工与工艺,包括明挖法、盖挖逆筑法、浅埋暗挖法、盾构法、特殊与辅助施工方法、地下工程的测试监控技术、地下工程的防水与治水、城市地下工程风险管理及安全技术等方面的知识。本书内容详实,书中附有典型工程实例,实用性强,结合作者近年的科研成果,反映了本学科领域的先进技术,对城市地下工程的设计和施工有重要参考价值。为便于教学及自学复习,各章附有复习思考题。

本书适合于从事岩土工程、交通土建工程、地下建筑与隧道工程、市政建设工程、矿山建设工程的设计、施工工程技术人员和管理人员,以及相关专业的高等学校教师、研究生和本科生阅读。

### 图书在版编目(CIP)数据

城市地下工程/陶龙光,刘波,侯公羽编著. —2 版. —北京:科学出版社, 2011

(普通高等教育“十一五”国家级规划教材)

ISBN 978-7-03-030243-4

I. ①城… II. ①陶… ②刘… ③侯… III. ①城市建设-地下工程-工程技术 IV. ①TU94

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 021433 号

责任编辑:王淑兰/责任校对:刘玉靖

责任印制:吕春珉/封面设计:王浩

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

1996 年 11 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2011 年 5 月第 二 版 印张:27 1/2

2011 年 5 月第四次印刷 字数:650 000

印数:5 251—8 250

定价:48.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(俊杰))

销售部电话 010-62134988 编辑部电话 010-62135235

**版权所有,侵权必究**

举报电话:010-64030229; 010-64034315; 13501151303

## 第二版前言

“城市地下工程”是土木工程类有关专业开设的一门新课，也是相关专业重要的必修或选修课程。

《城市地下工程》第二版，能入选教育部普通高等教育“十一五”国家级教材规划并得以出版，我们十分高兴，并希望也相信本书对相关专业的“城市地下工程”课程建设与教学发展会起到积极的推动作用。21世纪是城市地下空间建筑蓬勃发展的世纪，地下空间领域的开发与利用具有极为重要的意义，城市地下空间的利用可节约宝贵的土地资源，保护生态环境，促进低碳化生活，提高城市集约化建设，解决城市交通难题，且对战争、地震防护有突出的优越性，有利于城市可持续性发展。因此城市地下工程建设前景十分广阔。

《城市地下工程》一书，自1996年由科学出版社出版以来，已连续三次印刷，受到有关高等院校师生和工程技术人员的欢迎。然而，15年来城市地下空间开发利用有了很大发展，不仅更加受到人们的重视，而且在理论研究、设计、施工及设施设备方面都有了不少改进。这次再版，将在原有内容的基础上加以丰富、修改、补充，本着坚持对基本理论、基本方法和技术介绍为主的原则，尽量多介绍一些新技术和先进经验。尽可能反映国内外本学科领域的科技水平，先进技术。

第二版是为适应“大土木，宽口径”培养人才的方向需求，使教材服务于多学科、交叉学科和专业，特将教材分为上下两篇。上篇介绍城市地下工程主要建筑类型的规划，设计理论；下篇主要介绍技术方法与施工工艺；参考学时可控制在32~48学时。

第二版的内容除增加充实了城市地下工程试验、监测、数值模拟技术、城市地下工程风险管理与安全技术外，各章节补充了一些新的内容，丰富了近年来典型的工程实例，坚持理论联系实际，结合近年的科研成果，突出实用性的原则。为了便于读者复习和研讨，各章附有复习思考题；为了便于教学，配合本教材编制了电子多媒体课件，读者可从我校《城市地下工程》北京市精品课程的网站获取，可供参考使用。

本书由陶龙光、刘波、侯公羽等编著。第1章、第2章、第7章、第8章由陶龙光执笔，第3章、第11章、第13章由刘波执笔；第5章、第6章、第12章由侯公羽执笔；第9章由高全臣、刘波执笔；第4章由侯公羽、陶龙光执笔；第10章由陶龙光、刘波执笔。全书由陶龙光、刘波统稿。

作者十分感谢国家自然科学基金（50974126，50674095）、教育部新世纪优秀人才支持计划（NCET-08-0835）、教育部科学技术研究重点项目（109034）、北京市教育委员会产学研合作项目、北京市优秀人才支持计划（20071D1600700414）等项目的资助。

本书在编写过程中得到原书作者之一巴肇伦教授的大力支持和帮助；研究生唐林、钟海、徐薇、李鹏在资料搜集，插图绘制、文稿打印工作中付出了辛勤劳动；李涛、李希平、叶圣国、卓发成、高志强、刘纪峰、李岩、李东阳在资料收集或研究方面付出了努力；感谢美国 Charles Fairhurst 院士、Peter Cundall 院士、Roger Hart 博士、韩彦

辉博士在数值分析合作研究中的支持与帮助；感谢张检身教授、岳中琦教授、陈祥福教授、杨强教授、钟茂华研究员、陈湘生研究员、李晓研究员、周晓敏教授、雷风研究员、江玉生教授、唐孟雄教授、周浩亮高工、周予启高工、周勇高工、罗立平高工在研究中的大力帮助和有益建议，丰富了本书的实例；在此一并表示衷心的感谢。

作者十分感谢科学出版社对本书出版的支持，责任编辑的辛勤劳动，使本书得以顺利出版。

限于时间和水平，书中难免有错误和不当之处，敬请读者批评指正。

作者

2010年9月

于中国矿业大学（北京）

## 第一版前言

城市人口的增加,生产和交通工具的发展,带来了城市地面用地短缺的问题,因此,城市地下空间的开发与利用不仅引起了人们的高度重视,也得到了较快的发展。目前,世界各国城市地下空间的开发深度一般已达30m左右,有的更深一些。为了反映世界城市地下空间开发与利用的状况和技术水平,也为了向从事相关学科研究、设计、施工的工程技术人员和有关院校师生提供工作、学习的参考资料,我们编写此书,以满足城市地下工程发展的需要。

本书在收集了大量资料和数据的基础上,去粗取精,并融入了我们多年的教学、科研实践体会编写而成。书中重点介绍我国城市地下工程建筑的科研成果、设计与施工经验。在编写过程中注重论述基础知识、基本技能和基本理论,书中内容具有较强的理论性和实用性,对设计和施工均有重要的参考价值。我们相信本书的出版会对我国城市地下工程的发展起到添砖加瓦的作用。

全书共十三章,前五章侧重论述地下建筑物主要类型、规划与设计,后八章侧重介绍施工工艺与技术,并尽量附以实例。

本书由陶龙光、巴肇伦主编。前言、第二章、第十一章、第十三章由陶龙光执笔,第一章由巴肇伦执笔,第三章由陶龙光、周勇执笔,第四章、第五章、第九章由雷风执笔,第六章、第七章由郭瑞平、陶龙光执笔,第八章由高全臣执笔,第十章由周晓敏执笔。第十二章由陶龙光、雷风执笔,全书由陶龙光统稿。书中封面照片选自《隧道与地下工程施工技术安全管理和操作控制要点》。在编写本书过程中,得到了王梦恕工程院院士,教授级高级工程师张检身、陈福祥,正编审刘凤鸣及有关专家、教授的热情支持和帮助。研究生刘波、侯公羽、韩彦辉、杨松山在收集资料、校对方面付出了辛苦的劳动,在此一并表示衷心的感谢。

限于时间和水平,书中难免有不当和错误之处,敬请批评指正。

作者

1996年9月

# 目 录

第二版前言

第一版前言

## 上篇 理论与设计

第 1 章 绪论	3
1.1 城市地下工程的意义、特征及属性	3
1.2 城市地下工程的结构施工与建筑环境	7
1.3 城市地下空间利用与发展前景	12
复习思考题	14
第 2 章 城市地下空间规划理论与建筑设计	15
2.1 城市空间规划的基础理论	15
2.2 城市地下工程建筑设计	18
2.3 城市地下工程防灾与安全	22
复习思考题	24
第 3 章 地下铁道	25
3.1 概述	25
3.2 线路网的规划	32
3.3 线路	37
3.4 地铁车站	46
3.5 地铁施工对周围环境的影响	67
3.6 设备系统	78
3.7 地铁举例	86
复习思考题	91
第 4 章 地下停车场	92
4.1 概述	92
4.2 地下停车场的形式与规划	96
4.3 地下车场设计	104
4.4 地下停车场举例	120
复习思考题	122
第 5 章 地下仓库	123
5.1 概述	123
5.2 地下燃油、燃气库	124
5.3 地下粮库、冷库及商品库	136
5.4 地下废料仓库	141

5.5 布局与出入口的防护 .....	142
复习思考题 .....	143
<b>第6章 其他地下工程</b> .....	144
6.1 地下街与商娱综合体 .....	144
6.2 地下管道 .....	150
6.3 人防工程 .....	151
6.4 综合商娱体举例 .....	158
复习思考题 .....	160

## 下篇 施工与工艺

<b>第7章 明挖法</b> .....	163
7.1 敞口放坡法 .....	164
7.2 板桩法 .....	172
7.3 井点法降低地下水水位的设计与计算要点 .....	177
7.4 旋喷法 .....	186
复习思考题 .....	190
<b>第8章 盖挖逆筑法</b> .....	191
8.1 概述 .....	191
8.2 地下连续墙施工工艺 .....	192
8.3 桩基 .....	200
复习思考题 .....	208
<b>第9章 浅埋暗挖法</b> .....	209
9.1 超前导管及管棚法 .....	209
9.2 矿山法 .....	215
9.3 盾构法 .....	225
9.4 地下工程顶管法 .....	256
复习思考题 .....	265
<b>第10章 特殊与辅助施工方法</b> .....	266
10.1 沉井法 .....	266
10.2 沉管法 .....	283
10.3 冻结法 .....	300
10.4 围堰法 .....	315
10.5 注浆加固法 .....	316
复习思考题 .....	326
<b>第11章 地下工程的测试监控技术</b> .....	327
11.1 概述 .....	327
11.2 现场量测 .....	328
11.3 模型试验 .....	345
11.4 城市地下工程数值仿真与预控 .....	364



复习思考题·····	376
<b>第 12 章 地下工程的防水与治水</b> ·····	377
12.1 概述·····	377
12.2 地下工程的防水原则·····	377
12.3 防水材料·····	378
12.4 防水施工简介·····	381
12.5 地下工程渗漏水的修补施工·····	388
复习思考题·····	399
<b>第 13 章 城市地下工程风险管理及安全技术</b> ·····	400
13.1 概述·····	400
13.2 城市地下工程风险管理·····	400
13.3 城市地下工程防灾及安全技术·····	417
13.4 城市地下工程后评估·····	423
复习思考题·····	425
<b>参考文献</b> ·····	426

---

上 篇

# 理论与设计

绪论

城市地下空间规划理论与建筑设计

地下铁道

地下停车场

地下仓库

其他地下工程



# 第 1 章 绪 论

## 1.1 城市地下工程的意义、特征及属性

### 1.1.1 城市地下工程的涵义

城市是人类社会经济发展到一定阶段的产物，是人文、经贸、科学技术与文化复合而成的高度集中的社会实体，是一定地域范围内政治、经济、文化的中心。它包括国家或地区按行政区域划分而设立的首都、直辖市、市、镇、未设镇的县城及独立的工矿区和城市型的居民点。

1999 年全球人口突破 60 亿，增长速度最快的是城市人口，平均每年净增 2.5%，全球一半的人口居住在城市中。随着科学技术的进步，社会经济的不断发展，城市人口将进一步聚集，大城市、特大城市将继续形成。例如，我国“十二五”期末人口将达到 13.9 亿，城镇人口将首次超过农村人口突破 7 亿，我国城市 1950 年为 132 个，1990 年已发展到 436 个。市区人口达百万人以上的大城市，1949 年为 5 个，1990 年发展到 31 个，其中人口达到或超过 500 万以上的特大城市占 1/5 以上（香港和台北未计入）。

大城市和特大城市的中心地区人口密集，建筑物林立，空间拥挤，交通堵塞。特别是历史旧城或经改造发展起来的大城市，这些矛盾和问题尤为突出。

怎样合理规划城市的基础设施和制订城市各项技术经济指标，使其达到最大的经济和社会效益，使城市逐步具备高效、文明、舒适、安全的现代化城市的功能，是城市管理和建设者的首要任务。长期以来，城市交通、基础设施及城市容量的扩大主要是通过扩展城市用地来实现的，但城市用地的短缺，已成为矛盾的焦点。因此，合理开发与综合利用城市地下空间资源，不仅成为缓解当前存在的各种城市矛盾，满足某些社会和经济发展的特殊需要，而且为进一步建设现代化城市开辟了广阔的前景。城市地下工程正是在这样一个总的背景下应运而生。

城市地下工程是从事研究和建造城市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。

在城市地面以下土层或岩体中修建各种类型的地下建筑物或结构物的工程，均称为城市地下工程。它包括交通运输方面的地下铁道、公路隧道、地下停车场、过街或穿越障碍的各种地下通道等；工业与民用方面的各种地下制作车间、电站、各种储存库房、商店、人防与市政地下工程，以及文化、体育、娱乐与生活等方面的联合建筑体，等等。

### 1.1.2 城市地下工程的特征

#### 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。从宏观上看，人口的增加和生活需求的增长与土地等自然条

件的日益恶化和资源的逐渐枯竭引起的人类生存空间问题，应该说已达到了危机程度，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 30m 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。

不仅开发利用本身创造提供了空间，如图 1-1 所示，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。

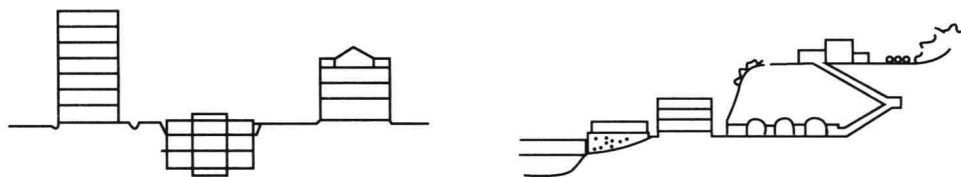


图 1-1 利用建筑物间空地建造地下建筑 图 1-2 利用地下空间开挖的弃土废渣填筑河滩地

## 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储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%~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。修建时既要不要影响地面交通与正常生活，又要使地面不沉陷、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或克服。

### 1.1.3 城市地下工程的历史沿革

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。

公元前 3000 年以前的远古时期，人类已开始利用天然洞穴作为防风雨，避寒暑的居住场所。公元前 3000 年到 5 世纪的古代时期世界进入铜器和铁器时代，生产力得到很大的发展，出现了像公元前 2200 年的巴比伦河底隧道、公元前 312~226 年的罗马地下输水道及储水池，以及公元前 208 年完工的我国秦始皇陵等地下陵墓工程。5 世纪至 14 世纪欧洲文化处于低潮，地下工程基本停滞。我国这时期出现了隋朝在洛阳东北建造的面积达 600m×700m 的近 200 个地下粮仓，其中第 160 号粮仓直径 11m，深 7m，容量为 445m<sup>3</sup>，可存粮 2500~3000t；宋朝时期在河北峰峰建造的军用地道（长约 40km）等地下工程。

近代，从 15 世纪欧洲出现文艺复兴，由于黄色炸药和蒸汽机的发明，地下工程也得到了迅速发展，1613 年英国建成伦敦地下水道，1681 年修建了地中海比斯开湾长 170m 的连接隧道，1843 年伦敦建成越河隧道，1863 年英国在伦敦建成世界第一条城市地下铁道，1871 年穿越阿尔卑斯山，连接法国和意大利的隧道长 12.8km 的公路隧道开通。到 20 世纪 90 年代初，世界上已有近 100 多个城市修建地下铁道。世界各国重视城市地下空间的开发与综合利用，修建了大量的地下存储库、地下停车场、地下商业街以及商媒体和地下管线等连接为一体的地下综合建筑群体。日本从 1930 年开始建设地下商业街，20 世纪 60 年代以后，大规模地开发利用地下空间，为缓解城市矛盾和在城市现代化建设过程中起着越来越重要的作用。

我国于 1969 年在北京建成第一条地下铁道，上海自 20 世纪 60 年代起，连续不断地修建了过江、引水、电缆及市政工程等 20 多条地下隧道，总长达 30km 以上。1995 年上海地铁 1 号线（长 16.1km）正式开通运营，1979 年香港全长 43.2km 的地铁移交投运。1980 年天津 7.4km 的地铁也投产。目前，北京、上海、广州等地都建成了多条地铁线路，修建了许多地下停车场、过街道、商业街以及多功能的地下建筑联合体，全国有近 30 座城市正在或准备建设地铁。我国有 1/3 的人口生活在城镇，随着经济的发展可以预见我国城市地下工程将进入蓬勃发展时期。

### 1.1.4 城市地下工程的基本属性

城市地下工程总体上讲是环境友好工程，可以充分利用地下空间，改善地面环境，增加绿地，节约能源；城市地下工程是一门综合性、实践性很强的交叉学科，其基本属性表现在如下几个方面。

#### 1. 综合性

城市地下工程是埋设在城市地面以下的土或岩层中的工程结构物。建造一项工程设施一般要经过勘察、设计和施工三个阶段，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、技术经济等专科知识和洞室施工技术、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。因而城市地下工程是一门涉及范围广阔的综合性学科。

城市地下工程作为人类活动的地下物质空间，对地下建筑的空气、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。由于施工条件的不同，有时还需要具备特殊施工方法的知识，如冻结法等。

## 2. 社会性

城市地下工程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，城市地下工程应成为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

城市地下工程是具有很强实践性的学科。在早期广义的地下工程，像矿业的地下开采、铁路的隧道、人民防护地下工程等等都是通过工程实践，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。但地下工程修建在土或岩层中，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，城市地下工程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；即使衬砌结构的设计，以工程类比为主的经验法，至今仍在广泛应用。在以工程类比为主的经验法的基础上，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

城市地下工程是实现高效、文明、舒适和安全的现代化城市的重要组成部分。人们力争最经济地建造既安全、适用又美观的地下建筑工程，但工程的经济性和各项技术活动密切相关。首先表现在工程选址、总体规划上，其次表现在工程设计与施工技术是否合理先进上。工程建设的总投资、工程建成后的社会效益与经济效益以及使用期间的维护费用多少等，都是衡量工程经济性的重要依据，这些都与技术工作密切相关，必须综合考虑。

符合功能要求的城市地下工程设施作为一种地下物质空间艺术，首先总体布局要有机地与地面建筑设施配合与衔接，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、人行、活动线路等应做到协调和谐。其次要按照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，反映出其艺术完美性。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，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，应该体现出技术、经济、建筑艺术和环境的统一性，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，提高人民的生活质量。

## 1.2 城市地下工程的结构施工与建筑环境

### 1.2.1 城市地下工程的结构形式与衬砌

城市地下建筑工程应根据其性能、用途选择不同的建筑形式，地下建筑与地面建筑结合在一起的为附建式（图 1-3 (a)），独立修建的地下建筑称为单建式（图 1-3 (b)）。其结构形式可以构筑成隧道形式，也可以构筑成和地面房屋布置相似的形式，在平面布局上可采用棋盘式或者房间式的布置，可为单跨、多跨，也可建成多层多跨的框架结构。它的横断面可根据所处部位的地质条件和使用要求，选用各种不同的形状，如最常见的有圆形、矩形、拱顶直墙、拱顶曲墙（当地基软弱时在底板处还可加设仰拱）、落地拱，等等。

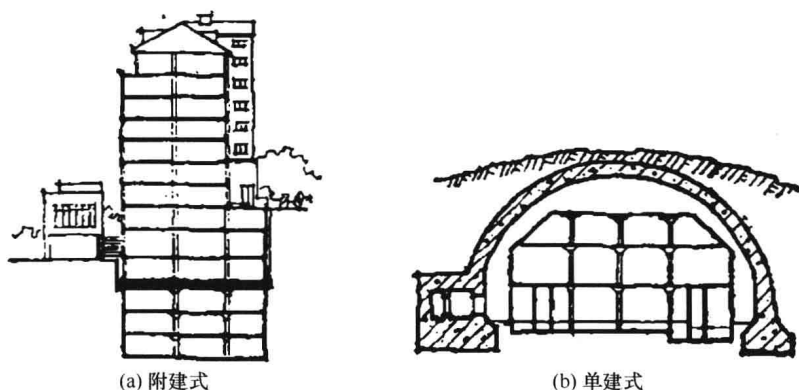


图 1-3 附建式和单建式地下建筑

衬砌是地下建筑物周边构筑的永久性支护结构。它的主要作用：一是承重，即承受围岩压力、地下水压力、结构自重以及其他荷载的作用；二是围护，除用来防止围岩风化与崩塌外，必须做到防水和防潮。为了保护人的健康和设备不锈蚀，在选择衬砌材料、结构构造与施工方法时，不仅要做到完全防潮劫湿，而且还要考虑到有利于地下环境的整治，如选材不伴生新污染、结构构造利于空气流通、减噪、明亮、美观艺术，等等。

根据施工方法的不同，大体可将衬砌分为下列 4 种：

#### 1. 模筑式衬砌

采用现场立模灌筑整体混凝土或砌筑砌块、料石，壁后空隙进行填实和灌浆，使与围岩紧贴。

#### 2. 离壁式衬砌

衬砌与围岩岩壁相隔离，其间的空隙不充填。为保证结构的稳定性，一般均在拱脚处设置水平支撑，使该处衬砌与岩壁相互顶紧。此种衬砌可做成装配式的，便于施工。它多在稳定或较稳定的围岩中采用。对防潮要求比较高的各类地下仓库尤为适合。

#### 3. 装配式衬砌

最常用的是圆形管片衬砌，由若干预制好的钢筋混凝土管片或混凝土砌块用拼



装机械在洞室中装配而成。管片之间和相邻环管片间的接头多用螺栓连接，若采用砌块，其接头则用镶榫错缝嵌合。管片衬砌多用于盾构或其他挖掘机械施工的工程中，装配完成后，要向管片后注浆充填密实，以保地层稳定性。此外，也可由若干钢筋混凝土构件拼装成各种断面形式的装配式衬砌，但根据结构加固和防水要求，有时在装配式衬砌内面再加设一圈现浇的钢筋混凝土内衬，因此，称之为复合式衬砌。

#### 4. 锚喷衬砌

用锚杆喷混凝土或锚杆钢筋网喷混凝土来加固并支护围岩的一种衬砌形式。锚杆沿洞周按一定间距布置并深入围岩一定深度，端头或全长锚固，用新奥法施工时，锚喷通常作为一次支护、根据断面收敛的量测信息，在其内圈再整体模筑二次衬砌，这种也称为复合式衬砌。

地下工程的衬砌设计和施工的要旨在于尽可能地发挥和利用围岩的自持（自稳）能力，使衬砌设计更经济合理。衬砌设计计算理论经历了若干个发展阶段，目前衬砌设计计算方法可归纳为四种方法。

##### 1. 以工程类比法为主的经验法

它是以前工程分类为基础，以已成工程的实践经验为样本，用概率统计的方法，核定出适应于各类围岩的结构形式和衬砌尺寸，这种方法至今仍然广泛采用。

##### 2. 收敛约束法

它是一种用测试数据反馈于设计的实用方法，通常以施工中洞室断面的变形量测值为依据。对于用新奥法施工的锚喷衬砌或复合衬砌中的锚喷支护，在施工中定期进行位移或收敛量测，并根据位移的绝对值或位移速率判断支护是否适当和变形是否趋于稳定。但判断的基准值目前尚只能根据已有工程的实践经验和量测数据进行分析而定。

##### 3. 作用—反作用模型

又称荷载—结构模型。其特点是将衬砌视为承载的主体，围岩作为荷载的来源和衬砌的弹性约束，当衬砌受到围岩主动压力作用时，将有部分衬砌向围岩方向变形而受到围岩的反作用力（即弹性抗力），以约束衬砌变形。局部变形理论（winkler）假定认为，围岩的抗力仅与该点的变形成正比。在假定抗力分布图形的基础上，可用结构力学的方法进行计算。这一设计理论适用于传统矿山法施工的整体式衬砌。

##### 4. 连续介质模型

它也可归之为连续介质力学法。包括解析法和数值法。对于复合式衬砌的初期支护和锚喷衬砌。认为它和围岩紧密接触，从而使围岩和衬砌形成一个整体，共同承受由于进行开挖而释放的初始地应力的作用，因此视其为连续介质采用连续介质力学的方法。数值法目前以有限元法为主，尚有加权残数法和边界元法等。有限元法将结构离散为有限个单元，各相邻单元在共同的节点上相互连续，根据单元刚度矩阵和各单元相互连续情况建立结构体系的总体刚度方程，按各节点位移推求各单元的应力。

### 1.2.2 城市地下工程的施工方法

城市地下工程成败的关键是施工问题。施工方法的选择应根据工程性质、规模、土