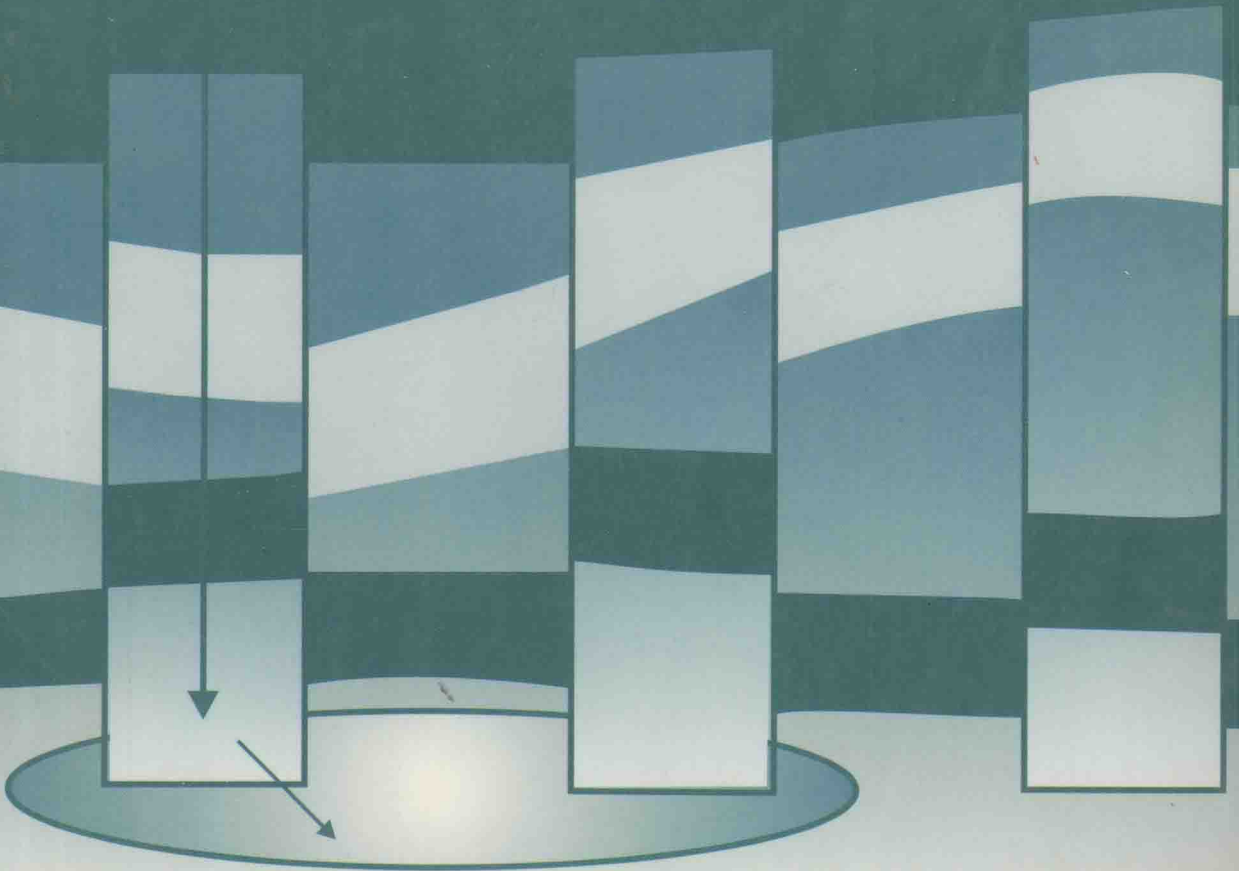


■ 陶龙光 巴肇伦 编著

# 城市

# 地下工程

科学出版社



# 城市地下工程

陶龙光 巴肇伦 编著

科学出版社

1999

## 内 容 简 介

本书共十三章，前五章介绍了城市地下工程主要建筑类型的规划、设计，包括地下铁道、地下停车场、地下仓库及其他地下工程的有关技术；后八章主要介绍城市地下工程的施工，包括施工方法、施工工艺、城市地下工程的测试与监控技术、工程后的评估等方面的知识。本书内容详实，书中附有实例，实用性较强，对城市地下工程的设计和施工有重要参考价值。

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

### 图书在版编目 (CIP) 数据

城市地下工程/陶龙光, 巴肇伦编著. -北京:  
科学出版社, 1996 11

ISBN 7-03-005717-1

工程… I. ①陶龙光 ②巴肇伦 IV. 地下工程: 市政工程  
中国版本图书馆 CIP 数据核字 (96) 第 22172 号

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

北京双青印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

\*

1996年11月第一版 开本: 787×1092 1/16

1999年5月第二次印刷 印张: 18

印数: 1 251—3 250 字数: 418 000

定价: 28.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈环伟〉)

# 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,世界各国城市内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。

本书是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的。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、陈祥福,正编审刘凤鸣,及有关专家、教授的热情支持与帮助。研究生刘波、侯公羽、韩彦辉、杨松山在搜集资料、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,书中不当和错误之处,敬请批评指正。

作 者

1996.9

# 目 录

前言 .....	(• iii •)
第一章 绪论 .....	( 1 )
第一节 城市地下工程的意义、特征及属性 .....	( 1 )
第二节 城市地下工程的结构施工与建筑环境 .....	( 5 )
第三节 城市地下工程的发展前景 .....	( 10 )
第二章 地下铁道 .....	( 13 )
第一节 概述 .....	( 13 )
第二节 线路网的规划 .....	( 17 )
第三节 线路 .....	( 22 )
第四节 地铁车站 .....	( 31 )
第五节 运营 .....	( 44 )
第六节 地铁举例 .....	( 54 )
第三章 地下停车场 .....	( 58 )
第一节 概述 .....	( 58 )
第二节 地下停车场的形式与规划 .....	( 62 )
第三节 技术标准与设计 .....	( 67 )
第四章 地下仓库 .....	( 82 )
第一节 概述 .....	( 82 )
第二节 地下燃油、燃气库 .....	( 83 )
第三节 地下粮库与冷库 .....	( 91 )
第四节 布局与出入口的防护 .....	( 94 )
第五章 其他地下工程 .....	( 95 )
第一节 地下街道 .....	( 95 )
第二节 地下管道 .....	( 100 )
第三节 地下防护工程 .....	( 102 )
第六章 明挖法 .....	( 107 )
第一节 敞口放坡法 .....	( 107 )
第二节 板桩法 .....	( 116 )
第三节 井点法降低地下水位的设计与计算要点 .....	( 120 )
第四节 旋喷法 .....	( 129 )
第七章 盖挖逆筑法 .....	( 134 )
第一节 概述 .....	( 134 )
第二节 地下连续墙施工工艺 .....	( 135 )
第三节 桩基 .....	( 143 )
第八章 浅埋暗挖法 .....	( 152 )
第一节 管棚法 .....	( 152 )
第二节 矿山法 .....	( 155 )
第三节 盾构法 .....	( 165 )
第四节 地下工程顶管法 .....	( 180 )

第九章 水域区施工 .....	( 186 )
第一节 沉井法 .....	( 186 )
第二节 沉管法 .....	( 203 )
第三节 围堰法 .....	( 219 )
第十章 冻结法 .....	( 221 )
第一节 概述 .....	( 221 )
第二节 地层冻结原理 .....	( 221 )
第三节 人工冻土的力学特性 .....	( 225 )
第四节 常规盐水冻结 .....	( 229 )
第五节 液氮冻结 .....	( 231 )
第十一章 地下工程的测试监控技术 .....	( 237 )
第一节 概述 .....	( 237 )
第二节 现场量测 .....	( 238 )
第三节 模型试验 .....	( 245 )
第十二章 地下工程的防水与治水 .....	( 261 )
第一节 概述 .....	( 261 )
第二节 地下工程的防水原则 .....	( 261 )
第三节 防水材料 .....	( 262 )
第四节 防水施工简介 .....	( 265 )
第五节 地下防水工程渗漏水的修补施工 .....	( 273 )
第十三章 城市地下工程后评估 .....	( 278 )
第一节 概述 .....	( 278 )
第二节 后评估的内容 .....	( 279 )
第三节 后评估所需资料、文件 .....	( 279 )
参考文献 .....	( 281 )

# 第一章 绪 论

## 第一节 城市地下工程的意义、特征及属性

### 一、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。

联合国人口基金会于1996年5月发表的年度报告指出：目前全世界人口总数为58亿，增长速度最快的是城市人口，平均每年净增2.5%，现今全世界城市居民已达26亿。报告预测“10年之内，全球一半以上的人口将居住在城市中”。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，我国的城市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年已发展到31个，这当中人口已达或超过500万以上的特大城市占1/5以上（香港与台北未计入）。

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、勘测、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。

## 二、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是很大。

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。

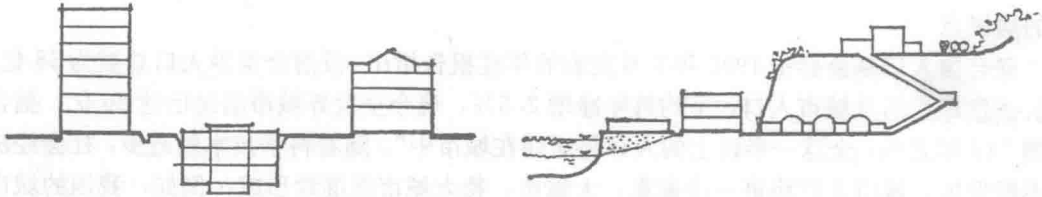


图 1-1 利用建筑间空地修地下建筑

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%~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。

### 三、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，大体可划分为四个时期：

**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、避暑寒的居住处所。考古发现，距今 10000 年前，被称为“新洞人”和“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中；我国黄河流域已发现挖掘出公元前 8000~3000 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。

**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 2200 年巴比伦河底隧道、公元前 1800~1200 年我国殷代墓葬群、公元前 312~226 年罗马地下输水道及贮水池，以及前 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。

**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 号仓直径 11m，深 7m，容量  $445\text{m}^3$ ，可存粮 2500~3000t；宋朝在河北峰峰建造的军用地道，约长 40km。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（北魏），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，这些石窟岩洞形成一个大型的雕刻艺术空间。

**近代时期。** 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 世纪黄色炸药的使用和 18 世纪蒸汽机的应用，使地下工程迅速发展。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，目前线路总长度将达 5000km（其中地下线路近 3000km）。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，60 年代以后，大规模的开发利用地下空间，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，一期工程自北京站至苹果园 24.17km，二期工程为环线 16.1km，西单至通县的三期地铁工程正在积极修建，不久即可开通；上海自 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。与此同时,北京、上海等地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,广州等城市的地铁已进入施工阶段。抗日战争时期和 70 年代我国许多城市修建的大量简易地下人防工程,其中已有相当一部分经改造修复用作商娱体场所。根据 1996 年国家统计局最新统计,1995 年,我国 12.1 亿人口中 28.85% (近 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。

#### 四、城市地下工程的基本属性

##### 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。因而城市地下工程是一门涉及范围广阔的综合学科。

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份、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，必须综合全面考虑。

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，提高人民的生活质量。

## 第二节 城市地下工程的结构施工与建筑环境

### 一、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，独立修建的地下建筑称为单建式（如图 1-3）示。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、穹顶直墙等等。

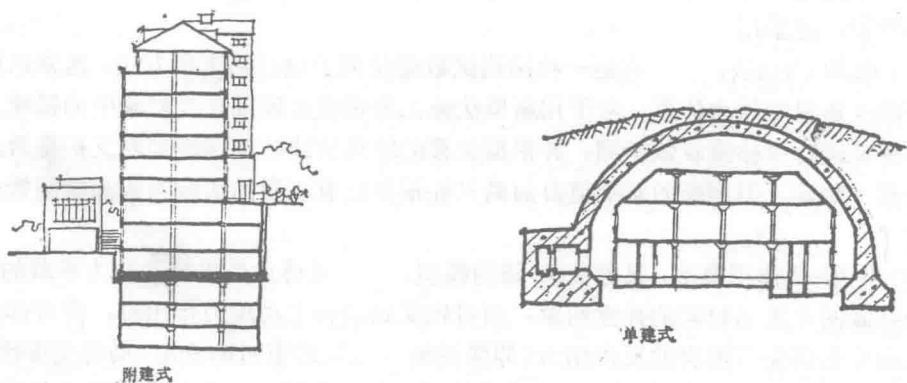


图 1-3 附建式和单建式地下建筑

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四种：

(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。它是以围岩分类为基础，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型式和衬砌尺寸。这种方法至今仍然被广泛采用。

(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化为有限个单元，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。

## 二、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、土岩层条件、环境条件、施工设备、工期要求等要素，经技术、经济比较后确定。应选用安全、适用，技术上可行，经济上合理的施工方法。对埋置较浅的工程，在条件许可时，应优先采用造价低、工期短的明挖法施工；根据地质条件和周围环境情况，明挖法可用敞口开挖，钢板桩或工字钢侧壁支护；近年常采用“地下连续墙”，盖挖逆筑法施工，可避免打桩的噪声与振动，减少明挖法对地面的影响；当埋深超过一定限度后，常采用暗挖法施工，暗挖最初多用传统的矿山法，20世纪中叶创造了新奥法，该法是尽量利用周围围岩的自承能力，用柔性支护控制围岩的变形及应力重分布，使其达到新的平衡后再进行永久支护，目前应用较广；对于松软含水地层可采用泥水加压或土压平衡式盾构施工；有时亦可采用顶管法施工；修建水底隧道除采用盾构法外，还可采用沉埋法，此法主要工序在地面进行，避免了水下作业，优点显著，应用日益广泛；在坚硬的岩层中可以用掘进机施工。施工方法分类见表1-1。

表 1-1 施工方法分类

序	施工方法	主要工序	适用范围
1	明挖法	1. 敞口放坡明挖：现场灌注混凝土结构或预制现场装配，回填	地面开阔建筑物稀少，土质较稳定
		2. 板桩护壁明挖：现场灌混凝土或预制构件现场装配、回填	施工场地较窄，土质自立性较差；工字钢，钢板桩、灌注桩等均可作为护壁板桩，也可用连续墙护壁
2	盖挖逆筑法	1. 桩梁支承盖挖法：打桩或钻孔桩，其上架梁，加顶盖，恢复交通后，在顶盖下开挖，灌注混凝土结构	街道地面交通繁忙，土质较坚固稳定
		2. 地下连续墙盖挖：修筑导槽，分段挖槽，连续成墙，加顶盖恢复交通，在顶盖保护下开挖，构筑混凝土结构	街道地面交通繁忙，且两侧有高大建筑物，土质较差
3	浅埋暗挖法	1. 盾构法：采用盾构机开挖地层，并在其内装配管片式衬砌，或浇注挤压混凝土衬砌	松软含水地层
		2. 顶进法：预制钢筋混凝土管道结构或钢结构，边开挖，边顶进	穿越交通繁忙道路、铁路、地下管网和建筑物等障碍物的地区
		3. 管棚法：顶部打入钢管，压注浆液，在管棚保护下开挖，立钢拱架，喷混凝土、浇筑混凝土结构	松散地层

续表 1-1

序	施工方法	主要工序	适用范围
4	矿山法	1. 台阶工作面法: 对较坚硬稳定岩层, 分部或全断面开挖, 锚喷支护或复合衬砌	坚硬或较坚硬稳定的地层
		2. 导洞法: 对松散不稳定地层, 采用小断面导洞分层分次顺序开挖、临时支护, 立全断面钢拱架, 喷混凝土, 浇注衬砌	较松散, 不稳定地层
		3. 掘进机法: 采用岩石掘进机掘进, 其后进行锚喷衬砌, 必要时二次衬砌	使用于含水量不大的各种岩层
5	水域区施工法	1. 围堰法: 筑堰排水后, 按明挖法施工	较浅的河、湖、海无地下补给水地区
		2. 沉埋法: 利用船台或干船坞把预制结构段浮运到设计位置的预先挖出的沟槽内, 处理好接缝, 回填土后贯通	过江、河或海底
		3. 沉箱(沉井)法: 分段预制工程结构, 用压缩空气排除涌水, 开挖土体, 下沉到设计位置	地下水位高, 涌水量大, 穿过湖或河流地区
6	辅助施工法 (配合上述有关施工方法使用)	1. 注浆加固法: 向地层注入凝结剂, 封堵地下水和增加地层强度后再进行土岩体开挖, 灌注混凝土结构	局部地层不稳定或发生坍塌跨落, 地下水流速 $< 1\text{m/s}$ 的地区
		2. 降低水位法: 采用水泵将施工区的地下水位降低, 以疏干工作面	渗透系数较大的地层
		3. 冻结法: 对松软含水冲积地层先钻冻结孔, 安装冻结管, 通过冷媒剂逐渐将地层冻结形成冻土壁在其保护下再开挖及构筑混凝土结构	松软含水较大地层

### 三、城市地下工程的建筑环境

环境是指围绕着人群的空间, 及其该空间中可以直接、间接影响人类生活和发展的各种自然因素的总体(此处不含社会因素)。地下建筑和地面建筑的环境则完全不同, 后者可以依靠天然采光、自然通风等获得较高质量的建筑环境; 而地下建筑被包围在岩石或土壤之中, 这就给地下建筑内部的空气质量、视觉和听觉质量, 以及对人的生理和心理影响等方面带来了一定的特殊性。再加上认识上的局限和物质条件的限制, 地下建筑功能所要求的环境标准往往不能定的太高, 除有特殊要求的工程以外, 一般应达到人在这种环境中能正常进行各种活动而没有不适感的舒适环境标准。在任何情况下, 都不允许地下建筑环境出现对人体产生致病、致伤、致死等危险的极限标准。

#### 1. 空气环境

评价地下建筑空气环境的指标有舒适度和清洁度。其中温度、湿度、二氧化碳浓度等是衡量空气冷热、干湿和清洁程度的主要指标。人体适宜温度范围大体上为  $16\sim 27^{\circ}\text{C}$ , 夏季偏高, 冬季偏低; 室内相对湿度的舒适值为  $40\%\sim 60\%$ 。日本制定最舒适的室内温度、湿度环境标准: 夏季温度  $25\sim 27^{\circ}\text{C}$ 、湿度  $50\%\sim 60\%$ , 冬季温度  $20\sim 22^{\circ}\text{C}$ 、湿度  $40\%\sim 50\%$ , 空气流动速度均为  $0.1\sim 0.2\text{m/s}$ 。我国因建筑供热和供冷均达不到发达国家水平, 室内温度

标准较低，一般公共建筑的设计标准为：夏季温度 27~29℃，冬季温度 16~20℃，相对湿度均为 40%~60%，室内气流速度夏季 0.2~0.5m/s，温湿度都较高时取大值，冬季保持在 0.1~0.2m/s。

地下建筑周围被具有较好热稳定性的岩土包围，因而在地表下一定深度的地温就趋于稳定，不再受大气温度的影响。如日本东京地表下 7m 处，年平均地温稳定在 15.5℃ 左右；我国在地表下 8~10m 处地温也基本稳定，大体长江流域为 17℃ 左右，长江以南各省达 20℃ 或更高，华北地区为 16℃ 左右，东北地区为 10℃ 左右。地温稳定并不等于地下建筑室内温度也是恒定的，因为受引入空气温度的影响。由于建筑物周围稳定温度场的存在，将引入的地上空气温度调节到适宜的程度要比地面容易，这也是地下建筑节能的主要原因之一。目前我国尚无地下建筑温、湿度的统一标准，有的单位经研究试验提出在全面空调条件下，夏季室温为 24~26℃，相对湿度不大于 65%，冬季 18~20℃，相对湿度不小于 55%，应该说这是一个较高的标准。清华大学童林旭教授提出在我国黄河以南冬季不供热地区，冬季室内温度为 10~16℃，相对湿度在 50%~70%；夏季室温在 24~29℃，相对湿度为 70%~80% 较为实际，已是不低的标准了。

地下建筑中温湿环境和气流速度等虽都达比较舒适的指标时，但人在此环境中停留较长时间后，仍出现头晕、烦闷、乏力、记忆力下降等不适现象，这与空气中负氧离子数量不足有关。据有关实验资料，当负氧离子浓度达 10000 人/cm<sup>3</sup> 时，人体的新陈代谢活动非常活跃，体力和精神处于最佳状态；如果负氧离子浓度小于 25 个/cm<sup>3</sup>，人体的正常生活活动将会发生障碍，以致出现各种不适症状。增加城市地下建筑中空气负氧离子浓度的可靠方法，除适当增加新鲜风量和改善空气含尘、含湿状况外，在通风系统中增设负氧离子发生器是比较有效的。

空气的清洁度主要由氧气、二氧化碳和一氧化碳三种气体的含量来衡量。氧含量在正常情况下应为 21%（体积比）左右，降到 10% 以下时开始有头晕、气短、脉搏加快等现象，5% 为维持生命的最低限度。根据每人每小时需吸入氧气 0.018m<sup>3</sup> 的指标，按室内人数多少即可确定所需的新鲜风量；一氧化碳是一种有害气体，日本环卫标准规定空气中一氧化碳含量不超过 1/10<sup>5</sup>，美国规定生产环境中不超过 5/10<sup>5</sup>，工作时间在 1 小时以内时可允许提高到 1/10<sup>4</sup>。地下停车库由于汽车废气中含有较高浓度的一氧化碳，因而规定停车室内不超过 1/10<sup>4</sup>；二氧化碳本身是无害气体，但室内二氧化碳浓度升高超过 3% 后，将使人感到头疼、呼吸急促，影响体内的酸碱平衡。二氧化碳浓度的极限值为 7~9%，达到 18% 以上时，人在几小时内死亡。日本规定最高不超过 0.1%，我国一研究成果提出地下建筑中二氧化碳浓度的建议标准为 0.07%~0.15%，最高不超过 0.2%。人对空气中二氧化碳浓度升高的不适感，往往与含氧量减少的不适感同时发生，因此加强通风保证所需新鲜空气量，可同时解决这两个问题。如按含氧量在 17%、二氧化碳在 0.5% 计算，则每人每小时需要新鲜空气 4.74m<sup>3</sup>。

另外，空气中的含尘量、细菌含量等也要随着环保标准要求的逐步实施，严格控制。

## 2. 光环境与声环境

光与声环境可称为视觉环境与听觉环境，衡量光环境质量的指标有照度、均匀度、色彩的适宜度等。在地下建筑封密的室内环境中，保持合适的照度是必要的，光线过强或过弱都会引起视觉疲劳，因此地下建筑中的照度标准，至少应不低于同类型同规模的地面建

筑。在出入口部位白天的照度应接近天然光照度，形成一个强弱变化的梯度，使人逐步适应，而夜间则相反。地下商业建筑根据国际照度标准(JIS)，百货商店营业厅内照度应为300~700lx，重点部位为1500~3000lx。为了使地下室内光环境尽可能接近太阳光的光谱，不宜全部采用光色偏冷的荧光灯，可夹杂以白炽灯或其他光源。在色彩上宜以偏暖色调为主，避免多用灰色或蓝色，以便视觉环境呈现出和谐淡雅的色彩使人精神爽适。

人在室内活动对声环境的要求是，声信号传递在一定距离内保持良好的清晰度，环境噪声水平低且控制在允许噪声级以下。

室内声源发出的声波不断被界面吸收和反射，使声音由强变弱的过程称为混响，反映这一过程长短的指标称为混响时间。如界面吸收的部分小，反射的部分大则混响时间长，超过一定限度就会影响声音的清晰度；反之则混响时间短，清晰度较高，但过短时声音缺少丰满度。控制和调节混响时间可根据声源频率特性，选用各种吸声材料和吸声构造，与装修相结合，通过计算与实测，使其达到满意水平。

我国提出的环境噪声容许范围最高值为60~85dB，理想值为35~40dB。根据国内几个地下商场测定因人员密集，往来频率高，再加上购物过程中的各种声响，使噪声强度平均达70dB左右，超过理想的安静标准许多。为控制噪声，一般采取隔离或封闭噪声源，来提高建筑结构的隔声质量，其次减弱噪声强度，包括改进设备、增大室内吸声量以缩短混响时间以及改变空间轮廓布置等等。

### 3. 地下建筑的心理环境

建筑内部环境在人的心理上引起一定的反应，积极方面的反应是舒适、愉快等；不适、烦闷等则属于消极方面的反应。若对某种环境的消极心理反应持续时间较长，或重复次数较多，可能形成一种条件反射，或形成一种难以改变的成见，称为心理障碍。由于地下建筑的特点极易引起幽闭、压抑，因此应努力提高地下建筑生理环境的质量—舒适度，利用现代科技成果改善地下建筑厅室内的光和声环境，解决天然光线和景物的传输问题，如结合下沉式广场，采用斜式逐层跌落方式，以便更多地引入阳光（见图1-4），或用开天井的办法引入阳光（如图1-5）增加建筑布置上的灵活性，提高建筑艺术处理的水平，以弥补地下建筑心理环境的不足。

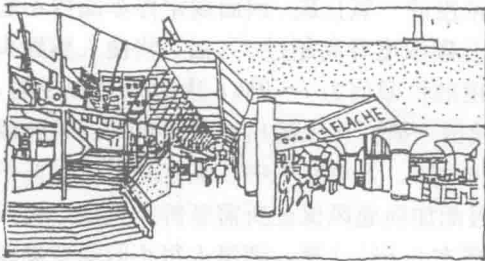


图1-4 地上与地下结合处理处

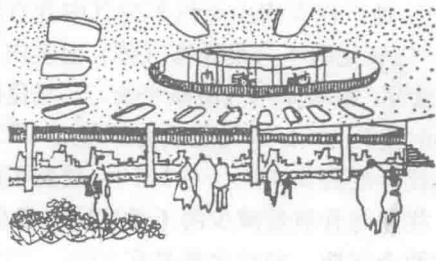


图1-5 天井采光通风

## 第三节 城市地下工程的发展前景

随着科技和经济的发展，城市的发展速度日益加快，无论是发达、较发达或发展中国



家的城市化进程都应遵循综合治理原则，未来的城市都期望达到高效、文明、舒适、安全的理想目标。当然，在不同历史时期，这些目标有不同的含义和标准，以现在的认识水平看，这些长远的目标可具体化为：用有限的土地取得合理的最高城市容量，同时又能保持开敞的空间，充足的阳光，新鲜的空气，优美的景观和大面积的绿地与水面；少用或不用常规能源的前提下，为所有居民提供不受自然气候影响的居住和工作条件；在自然和人为灾害的危险没有完全消除以前，保障所有居民的安全，使之不受灾害的威胁。为实现这些目标，必须探索、研究达到这些目标的途径和措施。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的发展（如图1-6）。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，先易后难等已被实践证明是正确的原则。

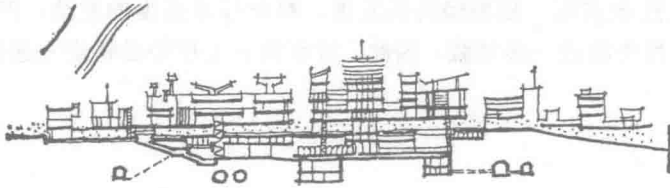


图1-6 地上与地下相结合的空间布局

城市地下工程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10m以内和10~30m的空间，这部分地下空间距地表较近，人员上下较方便，天然光线传输到这样深度还不太困难，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公用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50~100m深的稳定岩土层中建造内径为11m，总长55km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