

现代地下工程

黄小广 郭健卿 张生华 等编著



XIANDAI DIXIA GONGCHENG

中国矿业大学出版社

现代地下工程

黄小广 郭健卿 张生华 等编著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书共十二章,前六章介绍现代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、地下贮库及其他地下工程的有关技术;后六章主要介绍现代地下工程的设计与施工,包括设计理论与方法、施工方法与工艺,以及现代地下工程的防水、防潮与除湿技术等。本书内容详实,实例丰富,实用性较强,融入了作者多年的教学、科研及工程实践成果,对现代地下工程的规划、设计和施工有重要参考价值。

本书为岩土工程、交通土建工程、地下建筑与隧道工程、市政建设工程、矿山建设工程专业研究生、本科生的教材,也可供从事相关专业的工程技术人员和管理人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

现代地下工程/黄小广、郭健卿、张生华等编著. —徐州:

中国矿业大学出版社, 2003.9

ISBN 7-81070-777-9

I. 现... II. ①黄...②郭...③张... III. 地下工程
IV. TD94

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 084515 号

书 名 现代地下工程

编 著 黄小广 郭健卿 张生华 等

责任编辑 瓮立平 刘社育 白海新

出版发行 中国矿业大学出版社

(江苏省徐州市中国矿业大学内 邮编 221008)

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

印 刷 北京地质印刷厂

经 销 新华书店

开 本 787×1092 1/16 印张 18 字数 460 千字

版次印次 2003 年 9 月第 1 版 2003 年 9 月第 1 次印刷

印 数 1500 册

定 价 32.00 元

(图书若有印装质量问题,本社负责调换)

前 言

1991年12月，在东京召开的“城市地下空间利用国际会议”上，与会代表认为，从构成城市建筑物的发展史看，19世纪是桥的世纪，20世纪是高层建筑的世纪，21世纪是人类开发利用地下空间的时代。

在当今世界，人类正向地下、海洋和宇宙开发，这是总的发展趋势。向地下开发可以概括为地下资源的开发、地下能源的开发、地下空间的开发三个方面。地下空间的利用也正由“线”的利用向大断面、大距离的“空间”利用发展。科学预言：21世纪将是人类开发和利用地下空间的新世纪，并预测21世纪末将有三分之一的世界人口生活在地下空间。城市建设“向地下索取空间”是城市可持续发展的必由之路。

地下工程是一个综合性的技术领域。凡在地层内部天然形成或人工修筑的地下建筑物（空间）均称地下工程（或地下空间）。对人类来说，地下空间也是一种资源。

从宏观上说，地下空间的开发和利用目前主要分为以下三个方面：

（1）地下资源的开发，如金属矿物、煤炭和其他有益矿物的开采以及地下水的利用等。

（2）地下能源的开发，如地热、热水、石油、天然气、煤气等。

（3）地下空间的开发，如地下修建的生活、生产、交通、输送、贮藏、防灾等设施。

现代地下工程是高等学校土木工程专业大类（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、矿山建设工程等方向）的一门重要的必修专业基础理论课。

材料力学、结构力学、流体力学以及土力学、岩体力学和流变力学等是现代地下工程的基础理论课。现代地下工程的规划、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、地下建筑环境、技术经济等学科领域的知识。因而，现代地下工程也是一门涉及范围广阔的综合性学科。

本书是在收集了大量资料的基础上，结合作者多年的教学经验与科研成果编写而成。目的是为了把至今仍分散在各类文献和相关书籍中的一些成熟的规划、设计与施工的基本理论与方法及其相关内容加以完善、补充和发展，力争在反映当代地下工程发展状况和技术水平的基础上，让读者了解更多更新的技术成果和专业发展趋向。

全书共十二章，分两部分，前部分主要介绍地下建筑物（地下铁道、地下综合体、地下贮库、地下工厂和电站）的主要类型、规划与设计；后部分重点叙述现代地下工程设计与施工的理论、方法、工艺与技术。本书第一章、第三章由黄小广执笔，第五章、第八章由郭健卿执笔，第四章由张生华执笔，第十章由盛天宝执笔，第七章、第十二章由赵银学执笔，第十一章由李国富执笔，第九章第一节、第二节、第三节由邵强执笔，第九章第四节、第五节由贡小有执笔，第二章、第六章由王新生执笔；全书由黄小广统稿。

限于时间仓促，书中不妥之处在所难免，竭诚希望各位同行、专家及广大读者批评指正。

作 者

2003. 6

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 现代地下工程的基本特性	(1)
第二节 现代地下工程的基本设计原理	(6)
第三节 现代地下工程的施工技术	(13)
第四节 现代地下工程的发展前景	(15)
第二章 交通隧道	(18)
第一节 地下公路	(18)
第二节 水底隧道	(23)
第三节 海底隧道实例	(27)
第三章 地下铁道	(30)
第一节 概述	(30)
第二节 线网规划	(31)
第三节 限界	(35)
第四节 线路设计	(38)
第五节 地铁区间隧道及区间设备段	(46)
第六节 地铁车站	(49)
第七节 运营	(60)
第四章 城市地下综合体	(66)
第一节 概述	(66)
第二节 地下停车场	(68)
第三节 地下街	(81)
第四节 地下管道	(88)
第五章 地下贮库	(92)
第一节 概述	(92)
第二节 地下能源贮库	(93)
第三节 地下冷库	(104)
第四节 其他	(109)
第六章 地下工厂与地下电站	(111)
第一节 地下工业工程的合理布置	(111)
第二节 地下生产工厂	(112)
第三节 地下水力发电站	(112)
第四节 地下原子能发电站	(115)
第五节 废弃物地下处理设施	(116)
第七章 井筒工程	(118)

第一节 立井工程	(118)
第二节 斜井工程	(122)
第三节 井筒施工治水	(123)
第四节 支硐工程	(124)
第八章 明挖法	(129)
第一节 概述	(129)
第二节 明挖法	(129)
第三节 盖挖法	(138)
第九章 暗挖法	(142)
第一节 传统矿山法	(142)
第二节 浅埋暗挖法	(165)
第三节 新奥法	(166)
第四节 盾构法	(170)
第五节 掘进机法	(190)
第六节 顶管法	(198)
第十章 沉井与沉管法	(206)
第一节 沉井法	(206)
第二节 沉管法	(220)
第十一章 地下工程的辅助施工法	(233)
第一节 降低水位法	(233)
第二节 地下连续墙	(240)
第三节 冻结法	(246)
第四节 注浆法	(254)
第五节 管棚法	(260)
第十二章 城市地下工程的防水、防潮与除湿	(265)
第一节 水对地下工程的影响	(265)
第二节 地下工程的防水	(266)
第三节 地下工程渗漏的处理	(272)
第四节 地下工程的防潮与除湿	(273)
主要参考文献	(278)

第一章 绪 论

人类利用地下空间有着悠久的历史,20 世纪 70 年代以来,随着世界各国在现代化建设中城市化步伐的加速,大中型城市普遍出现人口密集、住房紧缺、交通阻塞、环境污染严重、能源匮乏等所谓的“城市综合病”,于是人们开始致力于城市地下空间的逐步大规模开发。1982 年联合国自然资源委员会指出:“地下空间是人类潜在的和丰富的自然资源”。20 世纪 80 年代国际隧道协会(ITA)提出“大力开发地下空间,开始人类新的穴居时代”的口号。1991 年 12 月,在东京召开的城市地下空间利用国际会议上,与会代表认为:从构成城市建筑物的发展史看,19 世纪是桥的世纪,20 世纪是高层建筑的世纪,21 世纪是人类开发利用地下空间的时代。日本提出了向地下发展,将国土扩大 10 倍的设想。许多国家将地下空间利用与开发作为一种基本国策,开始较大规模地进行地下空间开发与利用。

第一节 现代地下工程的基本特性

一、现代地下工程的涵义

地下空间是在岩层或土层中天然形成或经人工开发形成的空间。天然地下空间,按其原因为喀斯特溶洞、熔岩洞、风蚀洞、海蚀洞等。天然地下空间可以作为旅游资源加以开发利用,也可以作地下工厂、地下仓库、地下电站、地下停车场,战时亦可作为防空洞。人工地下空间包括两类:一是因城市建设需要开发的地下交通空间、地下物流空间、地下贮存空间等;二是开发地下矿藏、石油而形成的废旧矿井空间。改造利用废旧矿井,用作兵工厂、军火库等,投资少见效快,变废为宝,是充分利用地下空间资源的好途径。

现代地下工程是指在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设施。它包括交通运输方面的地下铁道、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、贮库、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。

现代地下工程研究的主要内容是从事研究和建造各种地下工程的规划、勘测、设计、施工、管理和维护的一门综合性应用科学与工程技术,是土木工程的一个分支。

二、现代地下工程的历史与发展

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,即从自然洞穴的利用向人工洞室方向发展;推动这一过程的,是人类自身的发展、是社会生产力的发展和科学技术的进步。从某种意义上讲,地下空间的利用历史是与人类文明史相呼应的,概括为五个时期:

1. 远古时期

从出现人类到公元前 3000 年的新石器时代,这是人类利用地下空间防御自然威胁的穴居时代。初始人类利用天然洞穴作为防风雨、避暑寒、躲野兽的居住处所。这个时代主要用兽骨等工具开挖出洞穴而加以利用。

2. 古代时期

公元前 3000 年至 5 世纪,是为城市生活而利用的时代,特点是开挖、砌筑。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,导致生产力有了很大发展,出现了古埃及、希腊、罗马及古代中国的高度文明。埃及金字塔(公元前 2530 年),古巴比伦河底隧道(公元前 2200 年),我国殷代墓葬群(公元前 1800 年~公元前 1200 年),罗马地下输水道及贮水池(公元前 321 年~公元前 226 年),秦始皇陵(公元前 206 年)和地下粮仓,均为时代的建筑典范,并且具有相当的技术水准与规模。

3. 中世纪时期

5 世纪至 14 世纪,矿石开采技术出现,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,隋朝在洛阳建筑了面积达 $(600 \times 700) \text{ m}^2$ 的近 200 个地下粮仓,宋朝河北峰峰开凿了长 40 km 的军用地道,还有著名的云冈石窟、龙门石窟、敦煌石窟等。

4. 近代时期

从 15 世纪开始,欧洲的产业革命,17 世纪诺贝尔发明的黄色炸药,成为开发地下空间的有力武器;蒸汽机的应用,使地下工程迅速发展。英国伦敦地下水道(1613 年)、越河(泰晤士河)隧道(1843 年用矩形盾构施工)、英国第一条铁路隧道(1845 年)、地铁(1863 年);法意勃朗峰 12.8 km 公路隧道(1871 年,穿越阿尔卑斯山)。

5. 现代时期

现代地下工程的迅速发展与现代地下空间的利用,在 20 世纪 60 年代和 70 年代达到了空前的规模。一些发达国家,开始建造各种交通隧道、水工隧道、大型公用设施隧道和地下能源贮库,城市地下空间的利用也占有一定比重。典型的地下工程主要有:① 地下铁道建设,到 21 世纪初,世界上已有 100 多个城市修建地铁。我国大瑶山铁道隧道,长 14.295 km,自 1981 年 11 月开始施工,于 1987 年 5 月建成;日本青函隧道 1988 年运营;英法海峡隧道 1994 年运营。瑞士的圣哥达隧道,长 13.32 km,法国的弗雷瑞斯隧道,长 12.7 km 等。② 现代地下电站建设,其中地下水力发电站的数目全世界已超过 400 座,其发电量达 $45 \times 10^5 \text{ kW}$ 以上,原苏联罗戈水电站开凿的隧道、硐室 294 个,总长 62 km;我国小浪底水电站的整个引水发电系统(除进水塔外)处于地下。

世界各国都非常重视城市地下空间的开发与综合利用,且修建了大量的地下贮库、地下停车场、地下铁道、地下商业街以及多功能的地下综合建筑群体。日本东京新宿副都心、大阪的梅田地下街,均达到现代化建筑水准。

为了合理开发利用地下空间,不断交流与提高地下工程规划设计与施工技术,地下空间利用的学术研究也相继开展起来。1970 年,联合国经济合作与发展组织在华盛顿召开了隧道工程咨询会议,标志着地下施工开凿技术国际隧道工程学会的建立;1976 年,美国地下空间学会成立,明尼苏达大学成立了地下空间研究中心,出版了《underground space》杂志,为双月刊,刊登世界各国在地下空间资源开发与利用方面的成就与经验;1977 年,在瑞典斯德哥尔摩召开了地下空间国际学术会议,第一次交流了与会各国开发地下空间的经验;1980 年 6 月,在联合国自然资源、能源和运输中心及瑞典政府各部(农业、商业、工业、住房和规划)及学术团体(岩石力学学会、隧道工程学会、工程地质学会)共同发起组织下,召开了有 40 个国家和国际组织的官员代表团约 1 000 人参加的国际地下空间学术会议,这次会议就环境保护、廉价仓库和节约能源等方面进行国际间的学术交流,会上产生了一个致各国政府开发利用地下空间资源,为人类造福的建议书,并建议在开发利用地下空间

资源中进行国际技术合作和经验交流。1988年9月,在中国上海举行第三届地下空间与掩土建筑国际学术会议。1999年7月,在中国西安召开第八届地下空间国际会议,会议中心议题是地下空间的跨世纪议程与展望。这些国际间的交流与合作,极大地促进了地下空间的开发与利用。

三、现代地下工程的分类

地下工程是建在地下的各种工程设施。现代地下工程发展迅速,类型多样。按照地下工程的用途、存在环境和建造方式及开发深度,现代地下工程的类型划分如下:

1. 按地下建筑的用途划分

地下工业建筑:地下采矿工程、地下核电站及水力发电厂、地下煤炭气化工程、各类地下工厂、车间等;

地下交通建筑:地下铁道、地下轻轨交通、地下步行道、地下停车场和各种铁路、公路隧道,水底隧道;

地下商业建筑:地下商业街、地下商场、影剧院及音乐厅、展览馆、餐厅、体育馆;

地下贮库建筑:各种地下贮库,包括油库、气库、液化气库、热库、冷库、档案库、物资库、放射性废物库等;

地下市政管线建筑:地下自来水厂、污水处理站、给排水管道、热力电力管线、煤气管道、通讯电缆管道等;

地下军用建筑:各种地下野战工事、指挥所、通讯枢纽、人员和武器掩蔽所、军火和物资库,救护医院、地下备用电站,地下飞机库、地下潜艇基地、地下导弹发射井等;

地下农业建筑:地下灌溉渠道及一些地下种植场等;

地下居住建筑:窑洞式和覆土住宅及地面建筑的地下室住宅等;

地下旅游建筑:天然洞室改建工程、洞中园林工程等;

地下宗教建筑:地下宫殿、宗教艺术石窟和地下墓穴等。

2. 按地下建筑的存在环境及建造方式划分

岩石地下建筑:利用和改造天然溶洞或废旧矿坑,新开凿的人工硐室等;

土中地下建筑:根据建造方式有单建式和附建式。单建式是指地下建筑独立建在土中,在地面以上没有其他建筑物;附建式是指各种建筑物的地下室部分。

3. 按建筑的建造方式与用途划分

隧道工程:各种铁路、公路隧道,城市地下铁道,水底隧道以及水工、电缆隧道;

地下构筑物:军事、人防工程、城市共同沟、水工构筑物、贮水池、游泳池;

地下建筑物:建筑物地下室、地下厂房、仓库、车库、地下车站、商业街等。

4. 按地下建筑的开发深度划分

浅层地下工程:地表至-10 m的深度空间建设的地下工程,主要用于商业、文娱和部分业务空间;

中层地下工程:-10 m~-30 m的深度空间建设的地下工程,主要用于地下交通、地下污水处理场及城市水、电、气、通讯等公用设施;

深层地下工程:-30 m以下的深度空间建设的地下工程,主要用于高速地下交通轨道、危险品仓库、冷库、油库以及矿业开采等地下工程。

四、现代地下工程的空间特性

地下工程形成的空间阴暗和潮湿,几乎完全与地面隔离,对人们来说不是一个舒适的空

间。其特性大致分为：

- (1) 构造特性，包括空间性、密闭性、隔离性、耐压性、耐寒性、抗震性；
- (2) 物理特性，包括隔热性、恒温性、恒湿性、遮光性、难透性、隔音性；
- (3) 化学特性，包括反应性等。

这些特性有的对地下空间有利，有的对地下空间不利。因此，在规划、设计地下空间时，应充分了解这些特性而加以充分利用。表 1—1 是现代地下工程的利用目的及利用特性。

表 1—1 现代地下工程的利用目的及利用特性

设施类型	名称	对象	利用目的				利用地下特性											
			经济	生活	当地条件	保存	环境	安全	恒温	恒湿	隔热	遮光	隔音	密闭	隔离	难透	空间	安全
生活				0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
功能	办公楼	医院、教会、体育 铁路、公路、地铁 电力 瓦斯 冷暖气	0	0	0		0										0	0
	地下街		0	0	0		0	0									0	0
	停车场		0					0					0		0		0	0
	仓库		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	文化设施			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			0	0
	交通设施			0	0		0	0					0		0		0	0
	能源供给设施		0	0	0		0	0	0		0				0		0	0
			0	0	0		0	0	0	0					0		0	0
	通信设施			0	0													
	上下水道设施			0	0		0	0								0	0	0
	废弃物处理设施	垃圾管道		0														
生产	生产工厂	水力、原子能	0		0		0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0
	发电设备		0		0		0	0						0	0	0	0	0
贮藏	能源贮藏设施	石油、天然气、电力	0		0		0	0	0		0	0		0	0	0	0	0
	粮食贮藏设施		0		0	0	0	0	0	0	0			0		0	0	0
	用水贮藏设施	饮用水、工业用水			0		0	0										
	核废弃物贮藏设施				0	0	0	0										
输送	铁道设施		0		0		0	0					0		0		0	0
	公路设施		0		0		0	0					0		0		0	0
	管道设施		0		0		0	0	0		0		0	0	0		0	0
防灾	避难设施	粮食、燃料、地下坝		0	0		0	0			0	0		0	0	0	0	0
	贮备设施			0	0		0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0
	供水设施			0	0		0	0						0	0	0	0	0

注：有 0 者表示地下设施被利用的目的及特性。

五、现代地下工程的特征

1. 无限性与制约性

地下空间资源的开发从理论上说几乎是无限的，因为地下空间是地球岩石圈空间的一部分。地球岩石圈的平均厚度为 33 km，目前城市地下空间的开发深度已达 30 m 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的。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。因此，在一定意义上说，地下工程建设是无限的。

同时，地下工程建设受到许多条件的限制，如地质情况，已有地下设施、已有建筑物较

深基础、土地的所有权与地价、施工技术、经济能力、开发后的综合效益及对城市的影响等。因此,现代地下工程建设又有一定的制约性,必须深入调查、科学论证与综合规划。

2. 层次性与不可逆性

地下工程有浅层、中层和深层之分,即地下工程具有层次性特点。一方面,城市地下工程建设总是从浅层开始,然后根据需要逐步向深层发展。另一方面,地下工程建设一旦实施,往往是不可逆的,不可能回到原来的状态,很难改造或消除,要想再开发也非常困难,它的存在势必影响将来附近地区的使用。

3. 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、隔热、隔音、安全、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质效果更为显著,在地下比在地面创造这样的环境容易,造价和运营费用均较低。

4. 抗灾害和防护性

地下建筑在处于一定厚度的岩土层的覆盖下,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;地下 30 m 以上地震加速度约为地表处的 40%,当地政府都把地下空间指定为地震时的避难所。

5. 社会、经济、环境等综合性

在现代化城市中有规划地建造地下各种建筑工程,对节省城市占地、节省能源(地下与地面同类建筑空间相比,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。

6. 施工条件的复杂性

地下工程施工时要通过各种岩土层或者水域、建筑物基础和市政地下管道等,修建时既要影响地面交通与正常生活,又要使地面不沉陷、开裂,绝对保证地面与地下建筑物与设施的安全,这就给地下工程施工增加了难度。为此必须有先进、科学、合理的施工组织设计和安全、可靠的技术措施来保证。地下没有阳光、潮湿、比较闭塞,一般地下工程的施工工期较长,工程造价较高;类型和规模相同的公共建筑,建在地下时的造价比在地面上修建要高出 2 倍~4 倍(不含土地价),但地面建筑若计及土地价后,日本地下街的造价仅为地面建筑的 $1/12 \sim 1/4$ 。以城市地面的轨道交通造价为 1,地上高架铁道为 3~5,地下铁道为 5~10,一般 1 km 地铁造价为 2 亿元~3 亿元(含车站及设备为 3 亿元~5 亿元);我国沪、穗地铁平均造价为 6.7 亿元/km。

六、现代地下工程的基本属性

1. 综合性

现代地下工程是埋设在地面以下的土岩层中的工程结构物。它的规划、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、建筑结构、建筑材料及设备、工程机械、地下建筑环境、技术经济等学科和硐室施工技术、特殊施工方法、施工组织等领域的知识以及计算机和工程测试等技术。因而现代地下工程是一门涉及范围广阔的综合性学科。

2. 社会性

现代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。

3. 实践性

现代地下工程是实践性很强的学科。早期广义的地下工程,像矿业的地下开采、铁路的隧道、人防地下工程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、流体力学以及土力学、岩体力学和流变力学等,是现代地下工程的基础理论学科。但地下工程修建在土或岩层中,局部与区域地应力难以如实地确定,载荷不能准确核定;而且在工程实践中,出现的许多新现象和新因素,用已有的理论很难释疑,因此,在某种意义上说,现代地下工程的工程实践常先行于理论(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)。

4. 统一性

现代地下工程是实现高效、文明、舒适、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又适用、和谐、美观的地下工程。首先,在工程选址、总体规划、工程设计与施工技术的合理与先进性,工程建设的总投资、建成后的社会效益与经济效益以及使用期间的维护费用等方面,必须综合全面考虑;其次,在总体布局、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、活动线路等方面要协调和谐,并注意环境标准和局部装饰艺术的反映;第三,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,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,工程设施要体现民族风格、地方色彩和时代特征。

第二节 现代地下工程的基本设计原理

一、现代地下建筑规划

城市地下空间开发利用规划对于指导城市地下空间的开发利用具有非常重要的作用。现代地下空间规划分为城市地下空间开发利用总体规划和城市地下空间开发利用详细规划。

1. 城市地下空间的总体规划

在编制《城市地下空间总体规划》之前,应编制《城市地下空间总体规划纲要》,主要就编制《城市地下空间总体规划》的一些重大原则性问题做出论证、分析与说明,其内容主要包括文字说明和规划图纸。

当《城市地下空间总体规划纲要》经过专家论证、上级主管部门审核原则同意之后,方可进行《城市地下空间总体规划》的编制,其内容主要包括城市地下空间总体规划文本和规划图纸;规划图纸包括:城市地下空间开发利用现状图、城市地下空间总体规划图、近期建设规划图、规划说明书。

2. 城市地下空间的详细规划

《城市地下空间总体规划》经过专家论证、评审,主管职能部门审核批准之后,可进行《城市地下空间详细规划》的编制。《城市地下空间详细规划》的规划对象,是城市地下空间开发利用的重点地区以及近期建设的城市地下空间工程周围地区;规划的目的是对这些地区的地下空间做出控制,并提出建设实施的规划方案。

编制《城市地下空间详细规划》,除按地面控制性详细规划的要求收集基础资料外,还应补充收集一些相关资料,并完成《城市地下空间详细规划》的文本、图纸和规划说明书。

二、现代地下建筑设计

1. 设计原则

(1) 舒适性。所谓舒适性是指在现代地下工程的建筑阶段应营造一种适合人在地下空间环境中活动的舒适的环境氛围。由于地下空间环境与人们所熟悉的地面建筑环境有着很大的差异,并使人的心理、生理产生了一系列的不良反映,进而影响到了城市地下空间的深层次开发利用。为此在现代地下工程的建筑设计阶段,应采取一些技术措施,例如,尽可能地将自然光、室内绿化和水体与山石三者之间错落有致地结合,赋予地下建筑极为生动的内涵,以此来最大限度地消除这些不良反映。

(2) 方位感。由于缺乏熟悉的参照物,致使人在地下空间丧失了对时间与空间的感觉,也由此而产生了如担心、恐惧之类的不良心理反映。在现代地下工程的建筑设计中,应通过营造舒适的环境、创造一种简洁而富有变化的空间结构来增强人在地下的方位感,同时还应以建筑行为学、环境心理学的研究成果为基础,通过在一些特殊的位置布置相应的诱导标志、设置独特的参照物等技术措施来进一步加强方位感,以此消除种种消极影响。

(3) 合理性。地下空间的合理性主要是指现代地下工程的建筑设计在功能布局上的合理性,从安全与防灾以及使用的舒适性等诸多方面考虑,一般在现代地下工程的上层安排人员活动场所,下层则安排停车场或者设备层。

(4) 便利性。是指现代地下工程的建筑设计,应体现出以人为本的规划与设计思想,使使用者处处感到便利。不同功能的地下建筑,便利性设计有着不同的原则和方法。

(5) 安全性。地下空间一方面对于空袭、地震等灾害具有良好的防灾性能,另一方面由于自身具有易封闭性,一旦内部发生火灾、爆炸等灾害,很难扑救,因而人员及财产的损失十分巨大。所以,安全性在现代地下工程的建筑设计中具有非常重要的作用。一般现代地下工程的安全性通过建筑设计技术与选用必要的安全设施来保证。

2. 设计技术

(1) 平面简洁明了。从安全角度出发,现代地下工程的平面应简洁明了,以减少一旦灾情发生后,人员慌乱迷路的可能性。因此,尽可能采用由纵横干道网组成的比较规则的网状通道系统,为减少单调感,可采取其他的建筑手法,如使两侧的商店布置丰富多彩,地铁车站布置壁画、雕塑,引入自然光、山水、设置建筑小品等。

(2) 禁止使用易燃装修材料。在现代地下工程中,建筑装修材料,包括柜台和货架的制作材料都不得使用易燃和可燃品。日本地下街以耐火极限在 1 h 以上的不燃装修材料为主。

(3) 防灾设施。① 设置防灾广场。根据国外现代地下工程经验,在地下街、大型的地铁站等人员地下空间设施中,如果每隔 50 m 设置一个地下广场,防灾效果明显。② 醒目诱导标志。③ 现代化管理设施。如上海地铁 1 号线的重要车站、人民广场地下街等,都装备了现代化的防灾监控系统。

三、现代地下建筑结构分析与设计

地下工程是修建在岩土介质中的建筑,要求从结构选型、埋置条件、载荷组合等诸方面,进行多方案的分析、比较,通过设计选择最佳方案,要求组成一个最合理的岩土结构体系,使得大部分外力由岩土介质承受。而不像地面建筑那样,只考虑内力和外力的平衡,去进行内力分析和选择截面。

1. 结构形式

现代地下工程应根据其性能、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。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硐室形式,在平面布局上可采用棋盘式或房间式的布置,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、直墙拱、曲墙拱(当地基软弱时在底板处还可加设仰拱)、落地拱、穹顶直墙等。

2. 衬砌结构分类

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、结构自重以及其他载荷的作用;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。

根据施工方法的不同,大体可将衬砌分为下列五种:

(1) 模筑式衬砌。现场立模浇注整体混凝土或砌筑砌块、料石,壁后空隙填实和灌浆,与围岩紧贴。

(2) 离壁式衬砌。衬砌与围岩壁相隔离,其间空隙不做充填,仅拱脚处局部扩大延伸与岩壁顶紧的衬砌,当围岩基本稳定时可采用离壁式衬砌。毛硐壁面常需喷浆维护,以防止围岩风化剥落。衬砌可做成装配式,便于施工。离壁式衬砌适用于围岩稳定或较稳定、对防潮要求比较高的各类地下贮库。

(3) 装配式衬砌。由若干预制好的混凝土管片或混凝土砌块用拼装机械在硐室中装配而成。常用圆形管片衬砌,装配完成后,向管片后注浆充填密实。有时在装配式衬砌内再加设一圈现浇混凝土内衬称复合式衬砌。采用装配式衬砌可加快施工速度,提高工程质量。

(4) 锚喷式衬砌。是由喷混凝土、钢筋网喷混凝土、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。有时作为初期支护与混凝土衬砌形成复合式衬砌。由于锚喷支护是一种柔性结构,故能更有效地利用围岩的自支承能力维护硐室稳定,其受力性能一般优于整体式衬砌,因而被认为是一种新型的地下结构形式。

(5) 复合式衬砌。分两次修筑、中间加设薄膜防水层的衬砌称为复合式衬砌。复合式衬砌的外层常为锚喷支护,内层常为混凝土整体式衬砌。

3. 结构设计方法

地下工程结构设计和施工的要旨:尽可能地发挥和利用围岩的自承能力,使衬砌设计经济合理。目前,地下工程结构设计计算方法可归纳为四种方法。

(1) 工程类比的经验法。它是以围岩分类为基础,以已成功工程实践经验为样本,用概率统计方法,核定出适应于各类围岩的结构形式和衬砌尺寸。此法被广泛采用。

(2) 收敛-约束法。它是用测试数据反馈于设计的方法。常用硐室断面的变形量测值为依据,根据已有工程经验和量测数据分析确定判断的基准值,即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。

(3) 作用-反作用模型。又称载荷-结构模型。例如,弹性地基圆环计算和弹性地基框架计算等算法。它是将衬砌视为承载的主体,围岩作为载荷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。即连续介质力学法(解析法、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力学的方法。数值法目前以有限元法为主,尚有权重残数法和边界元法等。

4. 设计技术

(1) 横向结构设计。假定沿纵向作用的载荷是均匀不变的,相对于结构纵向长度来说,结构的横向尺寸不大,力总是沿横向传递的。横向结构设计主要有载荷确定、设计简图、内力分析、截面设计和施工图绘制等几个步骤。

(2) 纵向结构设计。就是分析地下结构是否需要沿纵向分段,其纵向配筋设计,要考虑温度变化和地基不均匀影响,需要设置变形缝。

(3) 出入口设计。一般地下工程的出入口,结构尺寸较小但形式多样,有平硐、坡道、竖井、斜井、楼梯、电梯,人防工程口部则设有防护密闭门。出入口是关键部位,设计时要予以重视,做到出入口与主体结构强度相匹配,并有明显标志。

5. 设计计算载荷

(1) 载荷种类。作用在地下结构上的载荷,按其存在状态,可分为静载荷、动载荷和活载荷三类。静载荷(恒载)是指长期作用在结构上且大小、方向与作用点不变的载荷,如自重、岩土压力、水压力和永久设备自重等;动载荷指地下建筑物受到爆炸所产生的冲击波动载荷,或地震载荷;活载荷指在施工和使用期间,其大小和作用位置都可能变化的载荷,如楼面载荷、列车载荷、起吊载荷、注浆载荷等。此外,还有温度载荷、结构不均匀沉降引起的内力等。

(2) 载荷组合。上述几类载荷对结构并不是同时存在,需进行最不利工况的组合。先计算个别载荷单独作用下的结构各部件截面的内力,再进行最不利的内力组合,得出各设计截面的最大内力。最不利的载荷组合一般有静载、静载+活载、静载+动载。

四、现代地下建筑环境设计

地下建筑环境是指一般人能正常进行各种活动而没有不适感的舒适环境标准,维持生命的最低要求的最低标准,在任何情况下,都对人体不产生致病、致伤、致死等危险的极限标准。

1. 空气环境

地下建筑空气环境的评价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。

(1) 空气环境的舒适度。人体适宜温度大体上为 $16^{\circ}\text{C} \sim 27^{\circ}\text{C}$,夏季偏高,冬季偏低;室内相对湿度的舒适值为 $40\% \sim 60\%$ 。日本最舒适的室内环境标准:夏季温度 $25^{\circ}\text{C} \sim 27^{\circ}\text{C}$ 、湿度 $50\% \sim 60\%$,冬季温度 $20^{\circ}\text{C} \sim 22^{\circ}\text{C}$ 、湿度 $40\% \sim 50\%$,空气流动速度为 $0.1\text{ m/s} \sim 0.2\text{ m/s}$ 。我国设计标准为:夏季温度 $27^{\circ}\text{C} \sim 29^{\circ}\text{C}$,冬季温度 $16^{\circ}\text{C} \sim 20^{\circ}\text{C}$,相对湿度 $40\% \sim 60\%$,室内气流速度夏季 $0.2\text{ m/s} \sim 0.5\text{ m/s}$ (温、湿度都较高时取大值),冬季保持在 $0.1\text{ m/s} \sim 0.2\text{ m/s}$ 。

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 7 m 处,年平均地温稳定在 15.5°C 左右;我国在地表下 $8\text{ m} \sim 10\text{ m}$ 处地温也基本稳定,大体是长江流域为 17°C 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。

目前, 我国尚无地下建筑温、湿度的统一标准, 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℃, 相对湿度为 50%~70%; 夏季室温为 24℃~29℃, 相对湿度为 70%~80% 较为实际, 这已是不低的标准了。

地下建筑中温湿环境和气流速度等即使都达到比较舒适的指标, 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。增加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。

(2) 空气环境的清洁度。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 0.018 m³ 的指标按室内人数多少即可确定所需的新鲜风量。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、目眩、恶心、视觉识别域下降等; 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; 日本规定二氧化碳浓度最高不超过 0.1%, 我国建议标准为 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 4.74 m³。一氧化碳是一种有害气体, 最突出的毒性是它同血红蛋白具有极强的结合力, 人吸入一氧化碳后, 形成碳氧血红蛋白, 影响血正常吸收氧气, 造成人体内缺氧, 使人感到头疼、窒息甚至死亡; 日本环卫标准规定空气中一氧化碳含量不超过 1/10⁵, 美国规定生产环境中不超过 5/10⁵, 工作时间在 1 h 以内时可允许提高到 1/10⁴, 地下停车场由于汽车废气中含有较高浓度的一氧化碳, 因而规定不超过 1/10⁴。

另外, 环保标准规定, 空气中的含尘量不应超过 0.15 mg/m³, 空气中细菌含量不应超过 1 500 个/m³。

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。在地下建筑封闭的室内环境中, 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应较地面建筑高。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。根据国际照度标准 (JIS), 地下商业建筑的营业厅内照度应为 300 lx~700 lx, 重点部位为 1 500 lx~3 000 lx。宜采用白炽灯和荧光灯或其他光源, 色彩宜偏暖色为主。

人在室内活动对声环境的要求是, 声信号 (语言、音乐等) 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。

我国环境噪声容许范围最高值为 60 dB~85 dB, 理想值为 35 dB~40 dB。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; 其次采取减弱噪声强度, 包括改进设备、增大室内吸声量以缩短混响时间, 改变空间轮廓布置以减少聚焦等。

3. 心理环境

建筑内部环境在人的心理上会引起一定的反应, 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。