

普通高等教育城市地下空间工程系列规划教材

地下空间工程

刘勇 朱永全◎主编

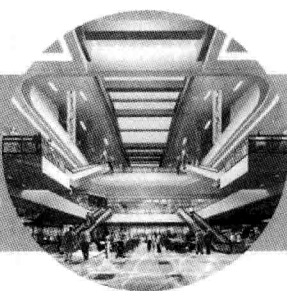


机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育城

教材

地下空间工程



刘 勇 朱永全 主 编

机械工业出版社

本书共分为7章,系统介绍了地下空间工程的设计与施工,主要内容
包括绪论、城市地下空间建筑设计、地下空间结构与构造、地下空间结构
设计计算方法、地下空间结构防水、地下空间工程施工、地下工程防护。
主要介绍了地下铁道、道路、停车场、储藏设施、商业街和人防等地下空
间工程的功能特征与结构构造要求;地下空间规划和建筑设计;地下
结构设计原理;明挖法、盖挖法、浅埋暗挖法、盾构法和顶进法等施工方
法。结合目前地下空间建设发展,补充介绍了设计与施工的新理论、新技
术和新方法。

本书理论与实践并重,经典理论、方法与现代新技术、新方法相结
合,引导学生掌握理论知识,注重培养学生解决实际工程技术问题的能力。
本书内容丰富、信息量大、知识结构系统。

本书可作为城市地下空间工程专业本科生的教材,也可作为相关专业
研究生和从事地下工程设计与施工人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

地下空间工程/刘勇,朱永全主编. —北京:机械工业出版社,2014.8
普通高等教育城市地下空间工程系列规划教材
ISBN 978-7-111-47556-9

I. ①地… II. ①刘…②朱… III. ①城市空间-地下建筑物-高等学校-
教材 IV. ①TU984.11

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第170022号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)
策划编辑:李 帅 责任编辑:李 帅 臧程程 林 辉
版式设计:霍永明 责任校对:刘怡丹
封面设计:鞠 杨 责任印制:李 洋
北京瑞德印刷有限公司印刷(三河市胜利装订厂装订)
2014年9月第1版第1次印刷
184mm×260mm·24印张·654千字
标准书号:ISBN 978-7-111-47556-9
定价:47.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
电话服务 网络服务

社服中心:(010)88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>
销 售 一 部:(010)68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>
销 售 二 部:(010)88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>
读者购书热线:(010)88379203 封面无防伪标均为盗版

前言



为了满足人类社会生产、生活、交通、环保、能源、安全、防灾减灾等的需求,地下空间,与土地及矿产资源一样,也是人类的一种宝贵的自然资源,广泛合理地利用地下空间成为21世纪城市发展的主题之一。我国城市地下空间利用已经取得了巨大的成就,在提高城市总体救灾抗灾能力、发展城市经济、改善城市环境、方便人民生活等方面都起了积极作用。城市地下空间的开发迅速,为满足城市地下空间工程专业本科教学的需求,编者编写了本书。

本书介绍了地下空间开发的现状与前景,主要介绍了地下铁道、道路、停车场、储藏设施、商业街和人防等地下空间工程的功能特征与结构构造要求;地下空间规划设计和建筑设计,地下结构设计原理,明挖法、盖挖法、浅埋暗挖法、盾构法和顶进法等施工方法。结合目前地下空间建设发展,补充介绍了设计与施工的新理论、新技术和新方法。

本书理论与实践并重,经典理论、方法与现代新技术、新方法相结合,引导学生掌握理论知识,注重培养学生解决实际工程技术问题的能力。本书内容丰富、信息量大、知识结构系统。

本书可作为城市地下空间工程专业本科生的教材,也可作为相关专业研究生和从事地下工程设计与施工人员的参考书。

本书的编写人员都具有丰富的教学经验,参加编写的有刘勇(第1、2章和第6章第6.9节)、孙明磊(第3章)、宋玉香(第4章)、张素敏(第5章)、朱永全(第6章第6.1~6.8节和第6.10节)、高新强(第7章)。本书由刘勇负责统稿,朱永全审定。

由于时间仓促,水平有限,书中难免有不足之处,恳请专家和读者批评指正。

编者

目 录

前言	
第1章 绪论	1
1.1 地下空间的概念	1
1.2 地下空间开发的历史	2
1.3 城市建设面临的问题	4
1.4 地下空间发展现状	6
1.5 我国城市地下空间利用中存在的主要问题	11
1.6 我国城市地下空间开发利用的发展趋势及前景	13
第2章 地下空间建筑设计	15
2.1 地下空间设施分类	15
2.2 地铁建筑设计	15
2.3 城市地下道路系统建筑设计	40
2.4 地下停车设施系统	54
2.5 地下储藏设施	65
2.6 地下街	81
第3章 地下空间结构与构造	92
3.1 地下空间结构分类	92
3.2 地铁结构与构造	95
3.3 其他地下空间结构与构造	126
第4章 地下空间结构设计计算方法	133
4.1 地下空间结构荷载	133
4.2 地下空间结构计算的力学方法	145
第5章 地下空间结构防水	185
5.1 地下水的类型和特征	185
5.2 地下空间结构防水设计	188
5.3 地下空间结构防水材料	191
5.4 地下空间结构混凝土结构防水	194
第6章 地下空间工程施工	200
6.1 施工方法的选择	200
6.2 明挖法施工	203
6.3 盖挖法施工	238
6.4 矿山法施工	246
6.5 浅埋暗挖法施工	251
6.6 盾构法施工	281
6.7 沉埋法施工	310
6.8 顶进法施工	320
6.9 排水与降水工程	336
6.10 施工监控量测	347
第7章 地下工程防护	357
7.1 概述	357
7.2 武器效应	359
7.3 地下工程防护原理及措施	365
7.4 地下防护结构动力计算基本原理	369
7.5 战时人员掩蔽所	375
参考文献	379

第1章

绪 论

1.1 地下空间的概念

1.1.1 地下空间

大部分有关地下空间的读物基本上都有如下定义：在地球表面以下的土层或岩层中天然形成或经人工开发而成的空间称为地下空间。

地下空间是人类宝贵的自然资源之一。联合国自然资源委员会于1981年5月把地下空间确定为重要的自然资源，对世界各国地下空间的开发利用给予支持。

1983年联合国经济和社会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。

为了更好地利用地下空间，国际隧道与地下空间协会于1990年在中国成都召开的第十六届年会上提出以下有关法规方面的政策宣言草案，并于1991年在英国伦敦第十七届年会上正式通过，宣言如下：

1) 地下空间与土地及矿产资源一样，也是人类的一种宝贵的自然资源，它的开发利用应认真规划，以确保这种资源不被破坏和浪费。

2) 地下空间的利用是不可逆的，一旦形成，土地将不可能回到原来的状态，它的存在也势必影响将来邻近地区的使用，这些特点就要求对地下空间的规划格外重视。

3) 为了决定地下空间的优先使用权，更好地处理可能发生的使用上的矛盾，给将来更重要的利用提供预留空间，国家、地区应该制定有关的准则、标准及分类。

1.1.2 城市地下空间

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21世纪是人类地下空间开发利用的世纪。1997年在加拿大蒙特利尔召开了第七届地下空间国际学术会议，其主题是“明天——室内的城市”。1998年在莫斯科召开了以“地下城市”为主题的地下空间国际会议。广泛合理地利用地下空间成为21世纪城市发展的主题之一。2001年11月原建设部修正后施行的《城市地下空间开发利用管理规定》中对城市地下空间所下的定义是“城市规划区内地表以下的空间”。GB/T 28590—2012《城市地下空间设施分类与代码》中对城市地下空间的定义为“城市地下空间是指为了满足人类社会生产、生活、交通、环保、能源、安全、防灾减灾等需求，而在城市规划区内地表以下进行开发、建设与利用的空间。”定义可以从以下几个层次来理解：

1) 规定了城市地下空间的范围为“城市规划区内”。城市是一个不断变化的各种能量高度

聚集的动态发展空间。从现代城市的发展历史来看,不同时期的城市有着不同的城市规模,这种变化更直观地反映在城市建成区和建设用地的线性甚至是跳跃性的增长上。而当前中国地下空间大规模集中开发利用的区域主要分布在城市。因此,规定的主要约束对象是城市。

2) 规定了城市地下空间的竖向范围为“地表以下的空间”。现代化城市空间发展的方向之一是向地下延伸。

3) 规定出台的时间。该规定最早制定于1997年,那时中国城市的土地资源供求矛盾还没有后来那么突出,城市地下空间的开发利用也更多地局限在人防和普通地下室,城市的决策者、管理者、运营者都还没有认识到地下空间对城市的重大战略意义。规定于2001年重新修订时,正是各地的开发区、科技园区使得城市的土地资源变得紧张起来的时候。地下空间的开发与国民经济发展密切相关。一般认为,人均GDP达到500美元后,就具备规模开发利用地下空间的条件;达到1000美元时,城市地下空间就进入规划和开发阶段;达到3000美元后,城市地面价格上涨,地下空间开发条件成熟,进入开发高峰时期。所谓开发地下空间的经济条件,一是城市地面价格上涨对开发地下空间的推力;二是开发地下空间的技术条件已经具备的拉力。2005年,中国人均GDP为1700美元,北京、上海等一些城市人均GDP超过3000美元,逐步形成地下空间开发热潮。

1.2 地下空间开发的历史

应该说人类最早对地下空间的开发利用可以追溯到远古穴居的山洞。从古罗马的下水道到现代城市中的地铁,东京的地下街、蒙特利尔的地下城,以及30年前还在建造的防空洞和“新人类”的地铁生活等,都是人类利用地下空间的成果。

1.2.1 四千年前的地下城市

土耳其卡帕多基亚的格尔里默谷地发现有4000年以前的巨大的可居住成千上万人的地下城市,其中最著名的一座城市坐落在今天代林库尤村附近。通往地下城市的通道隐藏在村子各处的房屋下面。人们在这里可以一而再、再而三地碰到通风洞口,这些通风洞口从地下深处一直延伸到地面。整个地带布满了地道和房间。地下城市是一种立体建筑,分成许多层,代林库尤村的地下城市仅最上层的面积就有 4000m^2 ,上面的五层空间加起来可容纳1万人,人们猜测,当时整个地区曾有30万人逃到地下躲藏起来。代林库尤村的地下城市有52口通气井和1.5万条小型地道,最深的通风井深达85m,地下城市的最下层还建有蓄水池,用以储藏水源。到今天为止,人们在这一地区发现的地下城市不下36座。卡帕多基亚地下城,如图1-1所示。



图1-1 卡帕多基亚地下城

1.2.2 克里科瓦大酒窖

摩尔多瓦以葡萄种植和葡萄酒酿造闻名于东欧地区,其规模宏大、别具特色的酒窖也可称作世界酒文化历史上的顶尖之作。克里科瓦大酒窖距离摩尔多瓦首都基希讷乌市仅十几千米,始建于1953年。当时,由于摩尔多瓦国内建设需要大量石料,人们凿山取石形成许多地

下隧道。酿酒专家发现,隧道中的石头具有吸湿的特性,隧道里的温度长年可保持在 $12\sim 16^{\circ}\text{C}$,湿度保持在97%,最适于酒的成熟和高品质酒的储藏,地下酒窖由此诞生。克里科瓦大酒窖的总面积为 64km^2 ,平均深 $50\sim 80\text{m}$,除拥有两个生产近10种葡萄酒和4种香槟酒的工厂外,还有一个酒博物馆。酒窖的规模宏大,其隧道四通八达,宽可容纳两辆货车并行,隧道总长度超过 120km ,堪称世界之最。酒窖的隧道都像城市的街道一样进行管理,昼夜灯火通明,十字路口有交通信号灯,每条隧道都以摩尔多瓦和世界的名酒命名。克里科瓦大酒窖如图1-2所示。

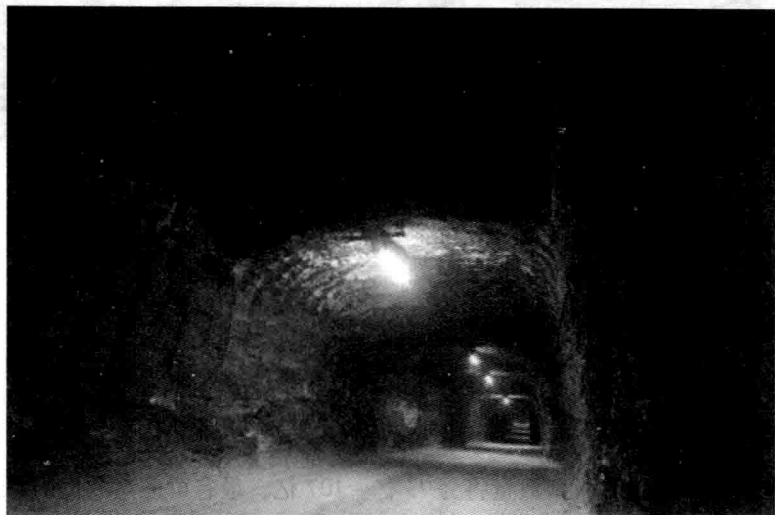


图1-2 克里科瓦大酒窖

1.2.3 我国以往的地下空间利用

自东汉时期起,佛教沿古丝绸之路传入我国的历程,也可以视作我国古代大规模岩洞开发利用的历程。从当时的西域到中原,一路下来,至今仍能感受到那些洞窟艺术的永恒魅力。我们先辈在很早的时候就已经认识到地下空间的某些自然特性,自远古起就有将粮食储藏于地下的传统。1971年,在洛阳东北曾发掘出公元7世纪隋朝建造的一座地下粮库群,整个库区面积为 4.2万 m^2 ,根据发掘出的遗物判断这座地下粮库一直沿用了数百年。军事目的也是我国古代地下空间的主要用途之一。1961年在河北一个矿区曾发现一个长达 40km 的宋代地道,从布置情况和出土文物分析,这个地道主要用于军事目的。在建造上,部分地下空间有立体交叉的构造和通风竖井。但是利用现代科技有计划大规模地建设则是从20世纪30年代开始的,20世纪60~70年代建设了一批地下工厂、早期人防工程和北京、天津地铁。

在我国西北地区,由于黄土高原特殊的地形、地质条件以及区域经济长期比较落后,至今仍有三四千万人居住在延续数千年的窑洞建筑中。随着对地下空间认识的不断深入,环境问题、资源问题和如何可持续发展日益成为我国发展所必须面对的课题,对窑洞这种建筑形式应认真对待、研究和引导,用现代技术加以改造,以适应现在的居住生活和环境条件,从而使这一独具东方特色的地下空间建筑长期为人类服务。西北地区窑洞如图1-3所示。

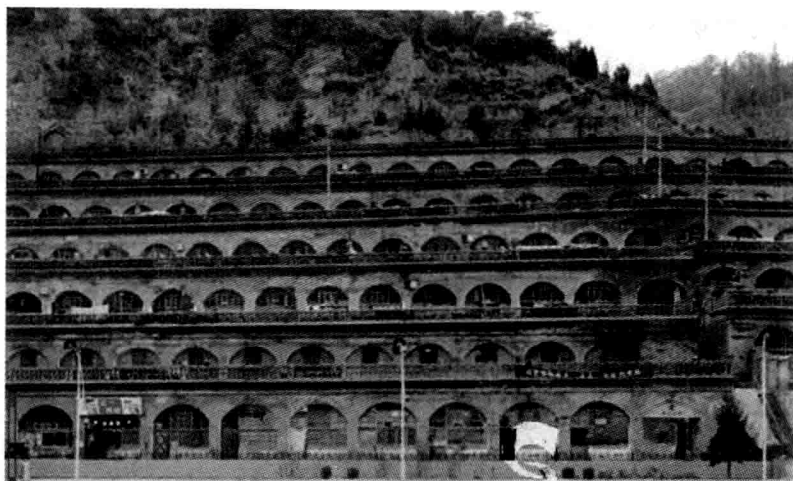


图 1-3 西北地区窑洞

1.3 城市建设面临的问题

1.3.1 世界及我国人口数量预测

专家们认为, 2050 年世界人口数量将为 73 亿~107 亿, 最有可能达到的人口总数为 90 亿左右。人们曾做过这样的计算: 如果世界人口按每年 1.67% 的年增长率继续增加, 到 2667 年时, 地球上除了南极洲以外, 所有的陆地表面都会挤满人。如果冰冷的南极也能居住的话, 也只能再为 7 年中增长的人口提供一个立足之处。

目前, 我国处在人口的增长势能仍需较长的时间来释放的惯性增长阶段。当前和今后十几年, 我国人口仍将以年均 700 万~1000 万的速度增长。21 世纪, 我国将先后迎来总人口、劳动年龄人口和老龄人口三大高峰。国家统计局数据表明, 2010 年至 2013 年我国大陆人口净增长分别为 639 万、644 万、669 万和 668 万。2013 年年底, 在我国大陆上居住着 136072 万人(不包括香港特别行政区、澳门特别行政区和台湾省) 约占世界总人口的 19%。

根据第六次人口普查数据直接推算, 我国综合生育率为 1.18, 考虑到出生漏报, 当前的综合出生率应在 1.5 以下, 人口总量高峰将出现在 2027 年前后。

1.3.2 城市人口

城市人口自从城市诞生以来, 就呈增长趋势。城市具有的高聚集性, 是城市人口增长的动力。新中国成立时, 全国有设市城市 143 个, 1994 年发展到 622 个, 44 年间新增城市 479 个, 平均每年新增 10.9 个。其中, 20 世纪 80 年代以来增长较快, 1981~1990 年的 10 年间, 新增城市 257 个, 平均每年新增 26 个。另据统计, 1949 年至 2000 年 11 月第五次人口普查时, 中国城市人口从 5765 万人发展到 45844 万人, 增长了 6.95 倍。

新中国成立以后, 中国城市人口经历了曲折的增长过程。到 1978 年, 中国的城市人口比例为 17.92%, 大致相当于西欧 1890 年的平均水平。但在随后的 27 年中, 国内城市人口比例逐步提升到 2005 年末的 42.99%, 表明中国已经进入了城市化快速发展期。《经济观察报》经济观察

研究院的《中国城市人口增长周期研究报告》认为,有理由相信这一比例到2025年将接近70%。生活在城市的人口将可能增长到10亿人。

1.3.3 城市发展带来的问题

随着城市的发展,人口的聚集可能造成资源紧张、环境污染。城市的两大基本特点是高密度的人口聚落形式和开放的物质流、能量流和信息流。鉴于城市人口的高度集中,决定了其所需的大量资源必须依靠外界输入,这些资源主要是土地资源、水资源和各种能源物资等。

土地作为一种资源,具有三个基本特征,即位置固定、面积有限和不可替代,其中与城市人口容量关系密切的是面积的有限性。城市中的土地资源更多的是作为一种空间资源,是一种能够为城市居民提供生活、居住、工作等各项活动所需场所的空间资源。由于城市居住、经济活动的高密度特性和城市不可能无限扩张的限制性,决定了城市土地资源的短缺特征。

水是城市赖以生存和发展的不可缺少、不可代替的特殊资源。人类最早的文明就是流域文明,河流哺育着人类,人类依水而居。历代著名城市无不傍水而建,并依靠必要的可供水源逐渐发展起来。水是城市生存的首要条件,也是城市经济持续增长和人口容量多少的决定性因素。

城市对水的需求一旦大到超过了水的供应,必将面临两种结局:一种是弃城迁移,原城消亡,如西域曾有楼兰等繁华古城,后来皆因缺水而消亡;另一种是花费高额代价引水使用,如引滦入津工程和南水北调工程。

能源是任何城市生存的先决条件,在现代城市中,一次能源主要是煤、石油、天然气、核燃料等化石燃料;二次能源主要是电能,它们对城市的生存和发展起着决定性作用。

(1) 得寸进尺的城市 在一个“没什么大不了”的年代,城市扩张异常迅猛。据卫星遥感资料判断和测算,1986~1995年的10年间,我国31个特大城市的城区,实际占地规模扩大了50.2%;而据国家土地管理局的监测数据分析,城区规模扩展都在60%以上,其中有的城市占地面积成倍增长,实际上占用了大量耕地。许多城市不顾自身条件,小城市要变中,中城市要变大,大城市要变特大,特大城市要国际化。据统计,我国600多个城市中有180个号称要建成国际大都市。

1981年我国城市建成区面积仅7438km²,1998年增加到21380km²,2005年增加到32500km²,为1981年的4倍多。全国18000多个建制镇用地超过20000km²,是1990年建制镇用地的2.4倍左右。城市和集镇大多位于地表平坦、土质良好、交通便利的区域,无论是新设城镇还是旧城镇的规模扩大,新占用的土地多为耕地,从而造成了近些年我国耕地的大量减少。

根据有关部门研究和统计,1998年全国通过土地批租的收入为507亿元,1999年为521亿元,2000年为625亿元,2001年为1318亿元,2002年为2452亿元,2003年更是达到了5705亿元。因此,在短时期内,各地出现了众多大规模的开发项目,并产生了“城市运营商”,在一定程度上可以说出现了“造城运动”。

(2) 拥挤不堪的城市 1953年世界汽车年产量突破1000万辆大关,1969年世界汽车年产量再破3000万辆大关。今天,我们这个地球上拥有65亿人口和7亿辆汽车,轿车文明冲击着今天的世界。

1956年我国有了第一个汽车制造厂,当年产出1600辆,1958年第一次造出了轿车,1960年汽车产量2.2万辆,1966年突破5万辆,1971年为10万辆,1980年为20万辆,1992年突破100万辆大关。目前,我国拥有3000多万辆汽车,其中轿车1000多万辆。如果此种上升势头继续下去,到2020年,我国汽车总量将突破1.4亿辆。

虽然人类进入了汽车文明时代,然而从某种意义上说,汽车也许是人类最坏的发明。大量生

产汽车不但加重了汽车生产环节本身的能源消耗,也让石油价格猛涨,让道路更拥挤,让空气质量更差。堵车这一愈演愈烈的“城市病”,正发展成为严重磨损社会运行效率的顽症。

同时,汽车的过度发展也必将减少我国的耕地。汽车消费需要一系列外部配套条件(如道路、停车场等)才能实现。有关专家计算,如果我国未来汽车保有量达到日本每两人拥有一辆的水平,全国汽车保有量将增加到 6.5 亿多辆。假定我国平均每辆汽车所耗土地面积与欧洲和日本一样为 0.02hm^2 (200m^2), 6.5 亿多辆汽车就要耗去 1300万 hm^2 ($13 \times 10^{10}\text{m}^2$), 这已经超过我国现有 2300万 hm^2 ($23 \times 10^{10}\text{m}^2$) 水稻田面积的一半。

1.4 地下空间发展现状

1.4.1 国外地下空间开发利用的状况及发展趋势

1. 国外地下空间开发利用现状

从 1863 年英国伦敦建成世界上第一条地铁开始,国外地下空间的发展已经历了相当长的一段时间。国外地下空间的开发利用从大型建筑物向地下的自然延伸发展到复杂的地下综合体(地下街)再到地下城(与地下快速轨道交通系统相结合的地下街系统),地下建筑在旧城的改造再开发中发挥了重要作用。同时地下市政设施也从地下供水、排水管网发展到地下大型供水系统,地下大型能源供应系统,地下大型排水及污水处理系统,地下生活垃圾的清除、处理和回收系统,以及地下综合管线廊道(共同沟)。

随着旧城改造及历史文化建筑的扩建,在北美、西欧及日本出现了相当数量的地下公共建筑,有公共图书馆和大学图书馆、会议中心、展览中心以及体育馆、音乐厅、大型实验室等地下文化体育教育设施。地下建筑的内部空间环境质量、防灾措施以及运营管理都达到了较高的水平。地下空间的利用规划从专项规划入手,逐步形成系统的规划,其中以地铁规划和市政基础设施规划最为突出。一些地下空间利用较早和较为充分的国家,如芬兰、瑞典、挪威和日本、加拿大等,正从城市中某个区域的综合规划走向整个城市和某些系统的综合规划。各个国家的地下空间开发利用在其发展过程中形成了各自独有的特色。了解其特色和经验,对我们具有重要的参考价值。

(1) 日本地下空间开发利用现状 日本国土狭小,城市用地紧张。1930 年,日本东京上野火车站地下步行通道两侧开设商业柜台形成了“地下街之端”。至今,地下街已从单纯的商业性质演变为包括多种城市功能,由交通、商业及其他设施共同组成的相互依存的地下综合体。1973 年之后,由于火灾,日本一度对地下街建设规定了若干限制措施,使得新开发的城市地下街数量有所减少,但单个地下街规模却越来越大,设计质量越来越高,抗灾能力越来越强,同时在立法、规划、设计、经营管理等方面已形成一套较健全的地下街开发利用体系。日本地下街的形态分为街道型、广场型和复合型,其规模也依据面积大小及商店数目分为小型(小于 3000m^2 , 商店少于 50 个)、中型($3000 \sim 10000\text{m}^2$, 商店 50 ~ 100 个)、大型(大于 10000m^2 , 商店 100 个以上)。据统计,日本至少在 26 个城市中建造地下街 146 处,进出地下街的人数达到 1200 万人/日,占国民总数的 1/9。日本是世界上兴建地下共同沟数量居于前列的国家之一。近年来,日本在新建地区(如横滨的港湾 21 世纪地区)及旧城区的更新改造(如名古屋大曾根地区、札幌的城市中心区)中都规划并实施了地下空间的开发利用。日本比较重视地下空间的环境设计,无论是商业街还是步行道在空气质量、照明乃至建筑小品的设计上均达到了地面空间的环境质量。在地下高速道路、停车场、共同沟、排洪与蓄水的地下河川、地下热电站、蓄水的融雪槽和防灾

设施等市政设施方面,日本充分发挥了地下空间的作用。

(2) 北美地下空间开发利用现状 北美的美国和加拿大虽然国土辽阔,但因城市高度集中,城市矛盾仍十分尖锐。美国纽约市地铁在世界上运营线路最长(443km),车站数量最多(504个),每天接待510万人次,每年接近20亿人次。纽约中心商业区有4/5的上班族都采用公共交通,这是因为纽约地铁突出了经济、方便和高效率等特点。纽约市大部分地铁站比较朴素,站内一般只铺水泥地面,很少有建筑以外的装饰。市中心的曼哈顿地区,常住人口10万人,但白天进入该地区人口近300万人,多数是乘地铁到达的。

四通八达、不受气候影响的地下步行道系统,很好地解决了人、车分流的问题,缩短了地铁与公共汽车的换乘距离,同时把地铁车站与大型公共活动中心通过地下道连接起来。典型的洛克菲勒中心地下步行道系统,在10个街区范围内,将主要的大型公共建筑通过地下通道连接起来。南方城市达拉斯,建设了一个不受夏季高温影响的有29条步行道的地下步行道系统,将市内主要公共建筑和活动中心通过地下通道连接起来。休斯敦市地下步行道系统也有相当规模,全长4.5km,连接了350座大型建筑物。

除此之外,美国地下建筑单体设计在学校、图书馆、办公楼、实验中心、工业建筑中也有显著成效。美国地下建筑单体设计较好地利用地下特性满足了功能要求,同时又合理解决了新老建筑结合的问题,并为地面创造了开敞空间。例如,美国明尼阿波利斯市南部商业中心的地下公共图书馆,哈佛大学、加州大学伯克利分校、密执安大学、伊利诺伊大学等处的地下及半地下图书馆,较好地解决了与原馆的联系并保持了校园的原有面貌。旧金山市中心叶巴布固那地区的莫斯康尼地下会议展览中心的地面上,保留了城市仅存的开敞空间,建设了一座公园。美国纽约市的大型供水系统,完全布置在地下岩层中,石方量130万 m^3 ,混凝土54万 m^3 。除一条长22km、直径7.5m的输水隧道外,还有几组控制和分配用的大型地下洞室,每一级都是一项空间布置复杂的大型岩石工程。

加拿大的多伦多和蒙特利尔市,也有很发达的地下步行道系统,以其庞大的规模、方便的交通、综合的服务设施和优美的环境享有盛名,保证了在漫长的严冬气候下各种商业、文化及其他事务交流活动的正常进行。多伦多地下步行道系统在20世纪70年代已有4个街区宽,9个街区长,在地下连接了20座停车库、很多旅馆、电影院、购物中心和1000多家各类商店,此外,还连接着市政厅、联邦火车站、证券交易所、5个地铁车站和30座高层建筑的地下室。这个系统中布置了几处花园和喷泉,共有100多个地面出入口。北美几个城市的地下步行道系统说明,在大城市的中心区建设地下步行道系统,可以改善交通、节省用地、改善环境,保证了恶劣气候下城市的繁荣,同时也为城市防灾提供了条件。它们的经验是要有完善的规划,设计要先进、管理要严格,其中重要的问题是安全和防灾,系统越大,问题越突出,必须予以足够的重视。通道应有足够数量的出入口和足够的宽度,避免转折过多,应设明显的导向标志。

(3) 北欧和西欧的地下空间开发利用 北欧地质条件良好,是地下空间开发利用的先进地区,特别是在市政设施和公共建筑方面。负担瑞典南部地区供水的大型系统全部在地下,埋深30~90m,隧道长80km,靠重力自流,芬兰赫尔辛基的大型供水系统,隧道长120km,过滤等处理设施全在地下。挪威的大型地下供水系统,其水源也实现地下化,在岩层中建造大型储水库,既节省土地又减少水的蒸发损失。瑞典的大型地下排水系统,不论在数量上还是在处理率上,均处于世界领先地位。瑞典排水系统的污水处理厂全在地下,仅斯德哥尔摩市就有长度达200km的大型排水隧道,拥有大型污水处理厂6座,处理率为100%。在其他一些中、小城市,也都有地下污水处理厂,不但保护了城市水源,还使波罗的海免遭污染。

瑞典是首先试验用管道清运垃圾的国家,在20世纪60年代初就开始研制空气吹送系统。

1983 年在一个有 1700 户居民的小区内建造了一套空气吹送的管道清运垃圾系统, 预计可以使用 60 年。由于与回收和处理系统配套建设, 4~6 年就可回收投资。瑞典斯德哥尔摩地区有 120km 长的地下大型供热隧道, 很多地区实现集中供热, 并正在试验地下储热库, 为利用工业余热和太阳能节约能源创造有利条件。

瑞典斯德哥尔摩市地下有共同沟 30km 长, 建在岩石中, 直径 8m, 战时可作为民防工程。

芬兰的地下空间利用除了众多的市政设施外, 就是发达的文化体育娱乐设施。邻近赫尔辛基市购物中心的地下游泳馆, 其面积为 10210m², 1993 年完成。1993 年完成的吉华斯柯拉运动中心, 面积 8000m², 可为 14000 位居民提供服务, 内设体育馆、草皮和沙质球赛馆、体育舞蹈厅、摔跤柔道厅、艺术体操厅和射击馆。为了保持库尼南小镇的低密度建筑和绿化的风貌, 1988 年建成的为 8000 户居民服务的 7000m² 的球赛馆也建于地下, 内设标准的手球厅、网球厅, 并有观众看台以及淋浴间、换衣间、存衣间、办公室。里特列梯艺术中心每年吸引 20 万参观者, 内设 3000m² 的展览馆, 2000m² 的画廊, 以及有 1000 个座位的高质量音响效果的音乐厅。北欧地下空间的利用, 与民防工程的结合是其一大特点。

巴黎建设了 83 座地下车库, 可容纳 43000 多辆车, 弗约大街建设有欧洲最大的地下车库, 地下四层, 可停放 3000 辆车。建设大量停车场是城市正常运转的重要条件, 停车场建于地下可节约大量土地。巴黎的地下空间利用为保护历史文化景观做出了突出的贡献。巴黎市中心的卢浮宫是世界著名的宫殿, 在无扩建用地, 原有的古典建筑又必须保持, 无法实现扩建要求的情况下, 设计者利用被宫殿建筑包围的拿破仑广场的地下空间容纳了全部扩建内容。为了解决采光和出入口布置, 在广场正中和两侧设置了三个大小不等的锥形玻璃天窗, 成功地对古典建筑进行了现代化改造。巴黎的列·阿莱地区是旧城再开发充分利用地下空间的典范, 把一个交通拥挤的食品交易和批发中心改造成一个多功能的以绿地为主的公共活动广场, 同时将商业、文娱、交通、体育等多种功能安排在广场的地下空间中, 形成一个大型的地下综合体。该综合体共四层, 总面积超过 20 万 m²。

前苏联也是地下空间开发利用的先进国家, 其地下空间开发利用的特点是地铁系统相当发达, 莫斯科地铁系统是世界上客运量最高的, 每年达 26 亿人次, 以其建筑上和运营上的高质量而闻名于世, 特别是其车站建筑风格, 每站都有其特色, 各转乘站的建筑布置相当巧妙, 在多达四条线路的相汇处, 乘客可以最少的时间达到换乘的目的。此外, 俄罗斯的地下共同沟也相当发达, 莫斯科地下有 130km 的共同沟, 除煤气管外, 各种管、线均有, 只是截面较小 (3m×2m), 内部通风条件也较差。

2. 国外地下空间开发利用发展趋势

(1) 综合化 国外地下空间利用发展的主要趋势是综合化, 其表现首先是地下综合体的出现, 欧洲、北美和日本等地区和国家的一些大城市, 在新城区的建设和旧城区的再开发过程中, 都建设了不同规模的地下综合体, 成为具有大城市现代化象征的建筑类型之一。其次, 综合化表现在地下步行道系统和地下快速轨道系统、地下高速道路系统的结合, 以及地下综合体和地下交通换乘枢纽的结合。第三, 综合化表现在地上、地下空间功能既有区分, 更协调发展的相互结合模式。

(2) 分层化与深层化 随着一些发达国家地下空间利用, 先进城市的地下浅层部分已基本利用完毕, 深层开挖技术和装备逐步完善, 为了综合利用地下空间资源, 地下空间开发逐步向深层化发展。例如, 美国明尼苏达大学艺术与矿物工程系系馆的地下建筑物多达 7 层, 加拿大温哥华修建的地下车库多达 14 层, 总面积 72324m²。深层地下空间资源的开发利用已成为未来城市现代化建设的主要课题。在地下空间深层化的同时, 各空间层面分化趋势越来越强。这种分层面

的地下空间,以人及其服务的功能区为中心,人、车分流,市政管线、污水和垃圾的处理分置于不同的层次,各种地下交通也分层设置,以减少相互干扰,保证了地下空间利用的充分性和完整性。

(3) 城市交通和城市间交通的地下化 城市交通和高密度、高城市化地区城市间交通的地下化,将成为未来地下空间开发利用的重点。交通拥挤是20世纪不变的城市问题,城市道路建设赶不上机动车数量的发展也是20世纪城市发展的规律,发展高速轨道交通也就成为主要的选择。21世纪人类对环境、美化和舒适的要求越来越严格,人们的环境意识和对城市的环境要求将越来越高。以前修建的高架路,如美国波士顿1950年建成的中央干道将转入地下。地下高速轨道交通将成为大城市和高密度、高城市化地区城市间交通的最佳选择。

据统计,城市规模越大、人口越多,采用地铁建设方式的比重越高。在轨道交通的建设方式上,人口在200万以上的城市采用地铁线路条数占77.50%,运营长度占90.5%;人口在100万~200万的城市,采用地铁线路条数占69.3%,运营长度占64.0%。即使采用轻轨,在市区也以地下为主,郊区铁路进入市区也转入地下,如蒙特利尔。作为新一代城市间地铁项目,瑞士正在研究开发在部分真空的地下隧道中运行的磁悬浮列车(飞机机身),设计运行速度400km/h,运量200~800名旅客,运行在高密度、高城市化地区城市间。1998年完成主要研究目标,并获得应用特许,目前正处于实验室试运行阶段。

(4) 各种联合掘进机(TBM)和盾构将成为地下隧道快速开挖的主要趋势 随着地下空间开发利用程度的不断扩展,开挖长大隧道以及遇到不良地层机会的增多,要求隧道开挖速度及开挖安全性越来越高,预计在硬岩采用TBM、软岩中采用各种盾构开挖的趋势将更加明显。

(5) 在钻爆法掘进中采用数字化掘进的趋势将加强 数字化掘进就是按照预定程序由计算机控制掘进,一个操作手可同时操作三个钻杆。孔位和孔深按设计程序来控制,开挖轴线测量可同时由激光完成,所以开挖断面的超挖减为最小并达到优化,提高了开挖速度。

(6) 地铁隧道断面将减小、成本将降低 由于采用线性电动机牵引地铁列车,减小了行走底架的尺寸,地铁截面积将减小一半以上,从而降低地铁造价。

(7) 微型隧道工程将加速发展 微型隧道是人进不去的隧道,直径一般在25~30cm。在隧道表面入口处采用遥控方式进行开挖和支护,这种方法快速、准确、经济、安全,所以适宜用于在高层建筑下、历史文化名胜古迹下、高速公路和铁路下、河道下安设管道。目前世界上采用微型隧道技术修建的管道长度已达5000km。由于地下管线不断增多,这种工程的应用将越来越广。

(8) 市政公用隧道(共同沟)在21世纪将得到更广泛的应用和发展 随着城市和生活现代化程度的提高,管线种类和密度、长度将快速增加,共同沟的发展将成为必然。

(9) 3S技术在地下空间开发中的作用得到加强 由于地下空间开挖中定位和地质地理信息、勘察现代化的需要,GPS(全球定位系统)、RS(遥感系统)和GIS(地理信息系统)技术在地下空间开发中的应用将会得到越来越广泛的推广。

1.4.2 我国城市地下空间开发利用现状

1. 开发利用现状

我国城市地下空间开发利用始于防备空袭而建造的人民防空工程。从1950年开始,我国人防工程建设从无到有,从小到大,有了很大的发展,取得了很大的成绩。1978年,第三次全国人防工作会议提出了“平战结合”的人防建设方针,1986年国家人防委、建设部在厦门联合召开了“全国人防建设与城市建设相结合座谈会”,进一步明确了平战结合的主要方向是与城市建设相结合。实行平战结合,与城市建设相结合,使人防工程除发挥战略效益外,还充分发挥了社

会效益和经济效益,并成为今天以解决城市交通阻塞和缓解城市服务设施紧缺为动因的城市地下空间开发利用的主体。据1985年统计,平战结合开发利用的人防工程达数千万平方米,年产值和营业总额110多亿元,上缴国家利税5亿多元,超过中央财政每年对人防建设的投入。

在城市交通改善方面,地下空间的开发利用发挥了积极作用。自20世纪60年代北京建成第一条地铁线路以来,经过40多年的发展,中国进入了城市轨道交通的蓬勃发展时期。截至2012年12月31日,在中国内地已有17个城市拥有了64条建成并正式运营的城市轨道交通线路,总里程达2008km。2012年末,全国有29个城市82条线路(含续建段)正在紧张建设中,总里程超过1900km。我国内地共有53个城市正在建设或规划新的城市轨道交通线路,总规划里程超过14000km。2012年内,不含续建段,新投入运营线路10条,其中杭州地铁1号线、苏州地铁1号线和昆明地铁机场线均是各自城市的第一条线路。这表示苏州、杭州和昆明正式加入运营城市的行列。

随着城市化进程的高速发展,城市道路系统中的隧道工程也有相当发展,如南京市中心鼓楼地下交通隧道、火车站前广场地下道、富贵山交通隧道等。我国不少城市如哈尔滨、上海、沈阳、成都、武汉、石家庄、乌鲁木齐、西安、厦门、青岛、吉林、大连、杭州、南京等地都建有数万至十多万平方米的地下综合体和地下街。哈尔滨市的数条地下街已连成一片,形成了规模不小的25万 m^2 的地下城。位于大连市站前广场的我国最大的城市地下综合体“不夜城”已于1997年建成并投入使用,其建筑面积147000 m^2 ,其内建有5层地下车库,还有购物中心、文化娱乐中心、餐饮中心等。

北京中关村西区建设时,将地上地下综合开发成高科技商务中心区——中关村广场,其总建筑面积150万 m^2 ,其中地上建筑100万 m^2 ,地下50万 m^2 ,项目总投资150亿元人民币。

中关村广场以海淀中街和北街为骨干,用地主体功能以金融资讯、科技贸易、行政办公、科技会展为主,并配有商业、酒店、文化、体育、娱乐、大型公共绿地等配套公共服务功能。地下为三层结构,其中一层是地下交通环廊、大型停车场以及超大型商业空间,汽车在交通环廊可以通达社区的每一个停车场,大型停车场解决了整个社区的停车问题,没有给地面造成额外压力;二层是物业和支管廊;三层是地下综合市政管廊。

中关村广场结合我国国情及自身的设计特点,营造了全国最大的立体交通网,创立了综合管廊+地下空间开发+地下环行车道的三位一体的地下综合构筑物模式,是将综合管廊作为载体,地下空间开发与地下环形车道融为一体的地下构筑物。此外,管廊内还专门预留了一个出口,它将与城铁春颐线接通,使有车一族或乘坐公交车的人们都可以在这里换乘地铁。这样使得中关村广场地上及地下、区内及区外均有机地形成一个整体,整个地下空间的开发集商业、餐饮、娱乐、健身、地下停车库于一体。

杭州市钱江新城核心区是以行政办公、商务贸易、金融会展、文化娱乐、商业功能为主,居住和旅游服务为辅的行政商务中心(CBD),核心区用地4.02 km^2 。杭州市钱江新城核心区地下空间总建筑面积约150万~200万 m^2 。其重点区域集中位于富春江路与新安江路和奉化路交叉口处的地下轨道交通站之间形成的南北轴以及市民中心东部市民公园、杭州大剧院、商务科技馆、高架城市阳台和市民中心西部中央公园、会展中心之间形成的东西轴之间。

新城地下空间功能主要包括地下交通、商业、文化、休闲、停车、防灾等。

2. 我国城市地下空间开发的形式及特点

目前我国地下空间的开发利用存在两种途径:一是旧有人防工程平战结合的改造和利用,二是新建城市地下空间,后者更具发展潜力。

地下空间开发利用的主要模式有:

(1) 地铁综合体型 结合地铁建设修建集商业、娱乐、地铁换乘等多功能为一体的地下综合体,与地面广场、汽车站、过街地道等有机结合,形成多功能、综合性的换乘枢纽,如广州黄沙地铁站地下综合体。

(2) 地下过街通道-商场型 在市区交通拥挤的道路交叉口,以修建过街地道为主,兼有商业和文娱设施的地下人行道系统,既缓解了地面交通的混乱状态,做到人车分流,又可获得可观的经济效益,是一种值得推广的模式,如吉林市中心的地下商场。

(3) 站前广场的独立地下商场和车库-商场型 在火车站等有良好的经济地理条件的地方建造的以方便旅客和市民购物为目的的地下商场,如沈阳站前广场地下综合体。

(4) 城市中心综合体型 在城市中心繁华地带,结合广场、绿化、道路,修建综合性商业设施,集商业、文化娱乐、停车及公共设施于一身,并逐步创造条件,向建设地下城发展,如上海人民广场地下商场、地下车库和香港街联合体。

(5) 历史风貌和景观保护型 在历史名城和城市的历史地段、风景名胜地区,为保护地面传统风貌和自然景观不受破坏,常利用地下空间使问题得以圆满解决,如西安钟鼓楼地下广场。

(6) 地下室利用型 一般高层建筑多采用箱形基础,有较大埋深、土层介质的包围,使建筑物整体稳固性加强,箱形基础本身的内部空间为建造高层建筑中的多层地下室提供了条件。将车库、设备用房和仓库等放在高层建筑的地下室中,是常规做法,改革开放以来,已累计建有超过 400 万 m^2 。

(7) 改建型 已建地下建筑、人防工程的改建利用是我国近年利用地下空间的一个主要方面,改建后的地下建筑常被用作娱乐、商店、自行车库、仓库等。

1.5 我国城市地下空间利用中存在的主要问题

我国在人口众多、经济落后的条件下,城市地下空间利用在 30 年左右的时间内取得了巨大的成就,在提高城市总体救灾抗灾能力、发展城市经济、改善城市环境、方便人民生活等方面都起了积极作用。但与开发利用地下空间历史悠久、经济实力雄厚的发达国家的先进城市相比,尚有不小差距。

1) 缺乏整体的城市地下空间开发利用的发展战略和全面规划。城市地下空间的开发利用是一项系统工程,既要研究地上和地下的协调,各个分系统之间的配合,又要进行资源调查和需求预测,并要考虑财力和筹资的可能,是一项决策性很强的工作。当前开发利用中存在很多问题的原因是缺乏科学的整体发展战略和全面规划。城市地下空间开发利用的目标是什么?重点是什么?如何实现这些目标?最终要为城市发展解决什么问题?都不能明确地回答。所以只能囿于固有观念和认识,或停止投资方的私利追求,各行其是,分散开发,前后失调,形不成规模,形不成城市的整体效益和效率。

20 世纪 80 年代后期以来编制的“人防建设和城市建设相结合规划”,一般是作为城市人防专项规划制定的,只解决城市战时防空袭的需要,仅部分工程局部地结合了城市交通和社会服务的需要。规划中没有形成独立的分系统,既缺乏各分系统之间、各个设施之间的有机结合,也缺乏地下和地面之间的协调,更没有未来深层地下空间开发的安排。由于没有全面的规划,没有明确的城市建设的整体目标,仅依靠人防建设和城市建设相结合规划不可能有力地促进城市交通问题、城市环境问题、城市建设用地问题的总体解决,甚至造成地下空间这种不可再生的宝贵资源一定程度上的浪费、流失和破坏。

2) 管理机构条块分割,形不成合力。缺乏科学的整体发展战略和全面规划的主要原因是体

制上管理机构的条块分割。城市地下空间的开发利用是一项新兴事业,当前没有一个城市机构有明确的管理地下空间开发利用的职能和职责。与其有关的城市行政管理机构有建委、土地管理局、城市人防办和市政公用事业局。其中有的机构有相应延伸的地下空间的建设规划和建设管理的职责,有的则有部分职责,如城市人防办负责人防工程的规划和修建,市政公用事业局负责市政设施管线在地下的规划与建设。除上述明确的或理应延伸明确的职责外,还有如城市地下空间开发利用的战略和政策法规的制定问题、资金筹集问题、宣传教育问题等都没有明确的机构负责。上述管理部门分头领导,职能交叉,分工界限不清,因而政出多门,相互矛盾,缺乏统一的工作协调,给城市地下空间的开发利用带来很大困难。

3) 城市地下空间开发利用无法可依。除人防工程建设的规划、标准和设计施工规范以外,从地下空间的所有权、使用权、管理权到地下空间开发战略、方针、政策、管理体制、建设标准、技术标准、设计施工规程等一系列问题基本上都处于无法可依的状态,一定程度上影响了地下空间的发展。没有使用权、管理权的法规,很少有人愿意涉足地下空间投资领域,而有的外商批租了地皮,则对地下空间无限制地使用,一些深层桩基和地下箱形基础影响到城市地下空间的开发利用。没有建设标准、技术标准和施工设计规程,项目达不到应有的水平,形不成系统的整体的效益,使工程事故、工程质量问题不易杜绝,出了问题既无法明确责任,也不易找到问题的原因。

4) 固有观念和认识误区影响了城市地下空间开发的积极性。由于早期大搞人防工程的群众运动,在部分领导和工程技术界留下了“地下空间阴冷潮湿,缺乏安全,登不了大雅之堂”的固有观念,以及“地下建筑造价远较地面建筑大,施工难度远较地面建筑高,利用价值远较地面建筑小”的认识误区,在开发时机上存在“我国经济基础较薄弱,开发地下空间为时过早”的不符合实际的滞后观念。“可持续城市化”的发展战略尚未深入人心,粗放发展的模式还占统治地位。因此,“把一切可转入地下的设施转入地下,腾出地面改善环境”的指导思想远没有普遍树立。在当前大力加强城市基本建设的背景下,地下空间开发利用没有受到应有的重视,以致许多市中心的街区改造、大面积的绿地建设和广场建设时没有相应地开发其地下空间。

5) 没有广开渠道、多种形式解决资金来源。广开渠道多方集资,已被实践证明是可行和有效的办法。由于管理体制的原因,以及观念上的滞后,在法规上没有及时制定鼓励私人人和外、台、港商投资的政策,因此开发地下空间的经费来源仍然局限于政府的人防拨款和城市高层建筑的人防易地建设费,对于有的城市引进私人人和外、台、港商投资以及有的城市发展沿线物业筹集开发地铁经费,收取地铁沿线房地产增值费的经验没有从积极方面加以总结、推广,影响了城市地下空间开发的规模。总的说来,城市地下空间的开发还停留在计划经济的思维定势中,而没有进入社会主义市场经济的思路轨道上来。

6) 平战结合处理不当,影响了地下空间开发的积极性。对于地下空间这一自然资源有其经济资源和战略资源两重性的特点认识不足,加上国家人防法的“城市地下交通工程及其他地下工程必须兼顾人民防空需要”的条款没有实施细则,以致有的地下空间开发项目没有实现城建和人防一举两得的效果。也有不少地下空间利用项目由于“人防建设必须服从、服务于国家经济建设”的观念不强,平战转化处理不当,致使出入口太窄,建筑开间太小,造成平时使用不便,影响经济和社会效益,也影响了进一步开发地下空间的积极性。

7) 已开发利用的地下空间功能较为单一,不同类型设施的开发比例不平衡。近年来地下空间开发的类别以商场居多,有的城市已从一点扩展到一条街或几条街。而城市中心区最为缺乏的地下停车场、市政设施,由于其经济效益较小,故开发很少。反过来,由于交通、市政设施的相对滞后,也影响了中心区综合效益的提高。单纯追求经济效益,地下空间开发的决策层次不高,