

城市地下综合体建筑物结构 防火设计研究

牟在根 隋 军 张举兵 编著

CHENGSHI DIXIA ZONGHETI JIANZHUWU JIEGOU
FANGHUO SHEJI YANJIU

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

城市地下综合体建筑物结构 防火设计研究

牟在根 隋 军 张举兵 编著

中国铁道出版社

2017年·北京

内 容 简 介

本书以城市地下综合体的火灾风险与防护问题为主要研究目标,内容涉及火灾中烟气和温度扩散过程的数值模拟、物理模拟、通风系统设计方案适用性研究,以及火灾荷载对风险的影响,并通过研究提出城市地下综合体建筑防火问题的概念设计原则和基于数值模拟、物理模拟的防火设计流程,运用多学科综合理论,采取多元综合研究方法,从理论和试验两个层面研究和探索了大型地下综合体建筑物的防火设计关键技术。其研究结果表明地下综合体建筑的设计方案中所提出的通风排烟方案,不会对邻近建筑分区造成较大影响,基本能够满足火灾条件下烟气控制的需求。

本书可以作为土木工程专业的学生及科研院校相关专业技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

城市地下综合体建筑物结构防火设计研究/牟在根,
隋军,张举兵编著. —北京:中国铁道出版社,2017. 11
ISBN 978-7-113-23944-2

I. ①城… II. ①牟…②隋…③张… III. ①城市空间—
地下建筑物—建筑设计—防火—研究 IV. ①TU96

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 264573 号

书 名: 城市地下综合体建筑物结构防火设计研究
作 者: 牟在根 隋 军 张举兵

策 划: 陈小刚
责任编辑: 陈小刚 编辑部电话: 010-51873193
封面设计: 王镜夷
责任校对: 孙 玫
责任印制: 高春晓

出版发行: 中国铁道出版社(100054,北京市西城区右安门西街8号)
网 址: <http://www.tdpress.com>
印 刷: 中国铁道出版社印刷厂
版 次: 2017年11月第1版 2017年11月第1次印刷
开 本: 710 mm×1 000 mm 1/16 印张: 11 字数: 199 千
书 号: ISBN 978-7-113-23944-2
定 价: 49.00 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版图书,如有印制质量问题,请与本社读者服务部联系调换。电话:(010)51873174(发行部)
打击盗版举报电话:市电(010)51873659,路电(021)73659,传真(010)63549480

前 言

随着我国城市化进程的发展,大城市的用地日趋紧张,城市地下空间的开发和城市地下综合体的建设日益受到政府和研究机构的关注。与地面建筑不同,城市地下综合体是体量庞大的地下空间,其消防安全是建设者最为关心的关键技术问题之一。当前关于城市地下空间消防安全的理论研究仍处于发展阶段,计算流体动力学技术和性能化防火设计理论的发展为其注入了动力。

本书以城市地下综合体的火灾风险与防护问题为主要研究目标,内容涉及火灾中烟气和温度扩散过程的数值模拟、物理模拟,通风系统设计方案适用性研究,以及火灾荷载对风险的影响,并通过研究提出城市地下综合体建筑防火问题的概念设计原则和新的基于数值模拟和物理模拟的防火设计流程。本书中运用多学科综合理论,采取多元综合研究方法,从理论和试验两个层面研究和探索大型地下综合体建筑物的防火设计关键技术。此外结合广州拟建的麓湖地下空间项目火灾烟气扩散过程的模拟试验,对地下空间火灾现象的发展及影响进行了研究,以及对地下综合体建筑火灾风险的分析方法进行了研究。在物理模拟试验方面,首先以氯酸钾和蔗糖为氧化剂与还原剂,通过改变两种试剂的配比,并设计了引燃电路,成功研制了一种可用于地下空间火灾烟气扩散过程模拟的发烟装置。按照 1:75 的比例,制作了麓湖地下空间的部分有机玻璃模型,对原型结构的停车场和商业区中厅发生火灾等 5 种工况的烟气扩散过程进行了试验研究,结果表明项目设计方案中所提出的通风排烟方案,不会对邻近分区造成较大影响,基本满足火灾条件下烟气控制的需求,使烟气控制在容许的范围内。

本书主要由北京科技大学的牟在根、张举兵,广州市市政工程设计研究院的隋军、宁平华以及北京金隅嘉业房地产开发有限公司的杨庆凯编著。在本书编写过程中,北京科技大学研究生马万航、周琦、冯雷等参与了编写工作,在此对他们表示诚挚的谢意。另外,本书在调研、编写以及相关论文的发表等过程中,还得到了国家自然科学基金研究项目(51578064)的大力支持,在此表示非常感谢。同时,本书参考和引用了很多已经公开发表的文献和资料,为此谨向相关作者表示真挚的感谢。

希望本书能对读者的学习和工作有所帮助。鉴于编者水平有限,书中难免有错误和不妥之处,敬请读者批评指正。

牟在根

于 2017 年 10 月北京科技大学

目 录

1 概 述	1
1.1 引 言	1
1.2 地下综合体的概念	7
1.3 地下综合体的分类和特点	9
1.4 国内外城市地下空间的发展状况	16
1.5 地下综合体火灾危险性及防控分析	18
2 火灾荷载与火灾场景	30
2.1 火灾燃烧学基础	30
2.2 建筑室内受限燃烧	39
2.3 火灾荷载	44
2.4 火灾场景设置	48
3 火灾烟气流动的计算	56
3.1 火灾烟气特性	56
3.2 对称烟羽流	63
3.3 烟层高度的计算	66
3.4 英国与日本烟气质量流量的计算	68
3.5 烟气流动的计算模型	70
4 建筑防火性能化设计方法	76
4.1 建筑防火设计内容	76
4.2 性能化防火设计方法的提出	77
4.3 性能化防火设计的基本步骤与方法	79
5 试验研究	82
5.1 有机玻璃模型设计与加工	82

5.2 试验记录设备..... 91

5.3 发烟剂配比研究..... 91

5.4 烟气扩散模拟试验 106

6 火灾风险空间分布研究 147

6.1 火灾风险的定义 147

6.2 火灾风险评估的基本原则 147

6.3 火灾风险评估与控制基本流程 148

6.4 火灾风险分析方法 149

6.5 分级标准及风险评价矩阵 152

6.6 火灾风险评估步骤 154

6.7 灰色聚类法在火灾风险评估中的应用 154

7 结 论 158

参考文献..... 160

1 概 述

1.1 引 言

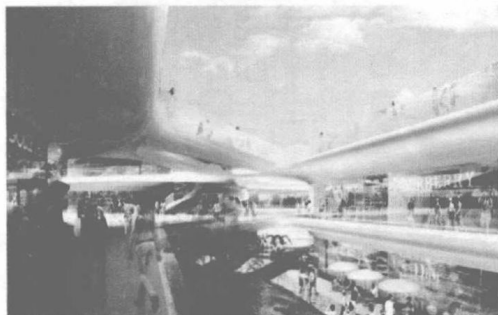
随着社会经济的不断发展,我国城市规模越来越大,大中城市的市内交通拥堵、用地紧张、人文历史景观保护与城市发展矛盾十分突出。为了缓解地面交通系统的压力,近年来地下交通系统得到了迅猛的发展,越来越多的地下综合交通枢纽开始大量地开发建设和投入使用。同时各行各业对地下空间的开发需求也越来越大,要求越来越高,发展越来越快。集地下商业、停车场、仓储、城市下穿车行隧道、人行过街隧道、地铁车站、人防工程等综合性质的城市综合地下空间成为一些大城市中心区地下空间新的发展趋势,如图 1-1 所示。



哈尔滨人和地下商业街



武汉地一大道地下商业街



武汉东湖地下商业街



广州时尚天河商业广场

图 1-1 部分大城市地下空间开发利用范例

地下综合体是在近三四十年间发展起来的一种新的建筑类型,欧洲、北美和日本等发达国家的一些大城市,在新城镇的建设和旧城市的再开发过程中,都建设了不同规模的地下综合体,称为具有现代大城市象征意义的建筑类型之一。

欧洲国家,如德国、法国、英国的一些大城市,在战后的重建和改建中,发展高速道路系统和快速轨道交通系统,因此结合交通换乘枢纽的建设,发展了多种类型的地下综合体,特点是规模大、内容多,水平和垂直两个方向上的布置都比较复杂。美国城市由于高层建筑过分集中,城市空间环境恶化,因此在高层建筑最集中的地区,如纽约的曼哈顿区、费城的市场西区、芝加哥的中心区等,开发建筑物之间的地下空间,与高层建筑地下室连成一片,形成大面积的地下综合体。加拿大的冬季漫长,半年左右的积雪给地面交通带来困难,因此大量开发城市地下空间,建设地下综合体,用地下铁道和地下步行系统将综合体之间和综合体与地面上的重要建筑物连接起来。日本地下街始建于1930年,20世纪50年代起开始大发展,到1983年,每天全国约有1200万人进出地下街,因此日本地下街在城市生活中和在城市地下空间利用的领域中,都占有重要的位置,在国际上也享有较高的声誉。东京地铁的线路图如图1-2所示,东京地铁涉谷站的站内地图如图1-3所示。

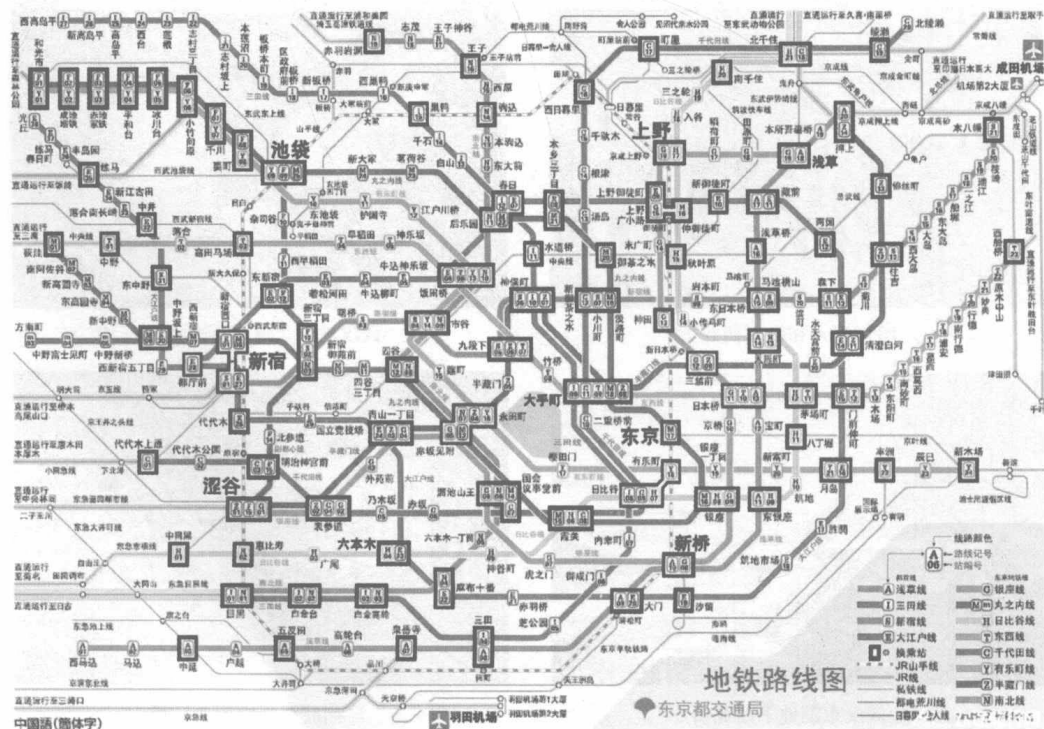


图 1-2 东京地铁线路图

近年来,我国有些大城市为了缓解城市发展中的矛盾,进行了建设城市地下综合体的尝试。据不完全统计,目前正在进行规划、设计、建造和已经建成使用的已近 500 个,规模从几千至几万平方米不等,主要分布在城市中心广场、站前广场和一些主要街道的交叉口,以在站前交通集散广场的较多,对改善城市交通和环境,补充商业网点的不足,都是有益的。

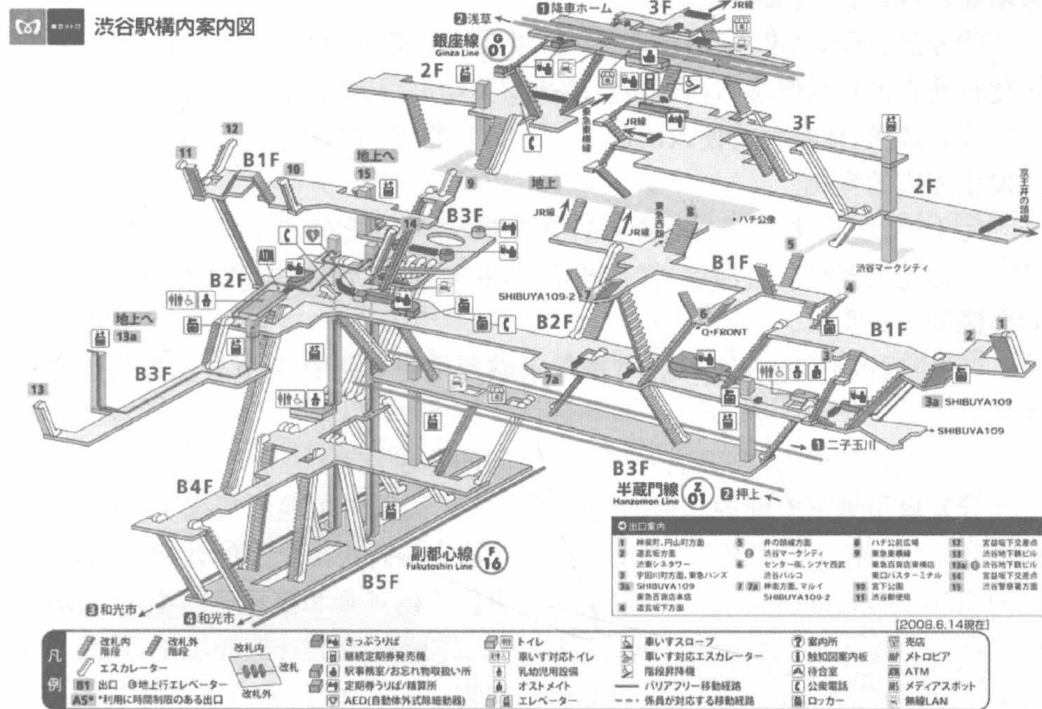


图 1-3 东京地铁涉谷站站内地图

从近几十年来城市地下空间利用的大量实践可以看出,开发和利用地下空间对于缓解城市发展中的各种矛盾,起到了非常积极的作用,在改善城市交通、节省城市用地、提高环境质量、加强城市抗灾能力、方便居民生活、改善居住条件、保存城市传统风貌等方面的作用十分明显。但是城市在发展过程中,在不同的发展阶段,所出现的矛盾和问题是不一样的。例如,许多发达国家已基本完成了城市化进程,那里的一些大城市已经经历了高速发展阶段各种矛盾的困扰,由于采取了各种治理措施,在相当程度上得到了缓解,当前面临的是进一步现代化和建设未来城市的问题。另一方面,这样一个历程正在发展中国家的许多大城市中重复发生。这个现象说明一个问题,即尽管各个城市的发展阶段不同,但是起支配作用的城市发展规律是一致的。因此,展望城市地下空间利用的前景,应当着重预计在相当长时期以后,在建设所谓未来城市中,地下空间应起的作用;

同时,应从为人类开拓新的生存空间的高度,认识开发城市地下空间的价值和意义。

(1)当前,人们在研究未来城市地下空间开发利用的方向时,应当从未来城市的特点出发。这些特点可能表现在以下几个方面:

①城市人口和规模基本稳定,人口结构发生变化,平均寿命延长,老龄化趋势增强,人口的文化素养提高。

②经济、技术高度发达,产业结构发生变化,脑力劳动者比重增加,社会的信息化将使人由直接参加劳动逐步转变为对劳动过程进行调节和控制。

③高技术、信息化将使人的起居、出行、工作、购物、社会活动等的内容与方式发生相应的变化。

④土地、水、原材料等自然资源的消耗量与拥有量之间的矛盾将日益尖锐化。

⑤常规能源(煤、石油等)将日渐枯竭,必须开发新能源以满足生活水平提高对能源的大量需求。

(2)根据以上特点,地下空间在未来城市中主要可在三个方面发挥应有的作用:

①在城市功能上,实现地上与地下空间的合理分工。

开发城市地下空间的总目的是在不过多扩大城市用地的情况下,使城市空间得到扩大,而扩大城市空间的最终目的,是使人们获得更多的开敞空间,更充足的阳光,更新鲜的空气,更方便的交通,更优美的景观和更舒适的生活。为此,应当使占人每天活动大部分时间的居住和工作留在地上自然环境中,而将其他各类活动,特别是短时间的活动,如出行、购物、文娱、体育、业务联系等移到地下空间中去。此外,只需少量人员加以管理的物流,如货物运输、邮件运输、垃圾运输,以及各种公用设施系统,就更应当到地下去。瑞典学者伯格·扬森提出,“让人留在地上,把物放到地下”(“Place things below the surface, and put man on the top”),也是类似的一种设想。

②建立城市基础设施的封闭式再循环系统。

尽管当代科学技术已相当发达,然而城市生活基本上处于一种开放式的自然循环系统中。例如,太阳能最多只是被动式利用,在阴天或夜间就无法利用;水资源主要是靠天上下雨,人们从自然界取水,使用后不加处理又排入自然界的江河湖海中;能源也多为一次性使用,热效率很低,大量余热、废热未经利用即排放空中。这样的自然循环对于自然资源来说是极大的浪费,必然形成一方面资源短缺而另一方面又在大量浪费的局面。这种现象在未来城市中应得到改变。日本学者尾岛俊雄提出了在城市地下空间中建立再循环系统的构想,就是变开放式的自然循环为封闭式的再循环系统。后者被称为城市的“集积回路”

(integrated urban circuit)。例如,集中的供热、供冷系统对于空气的使用来说就是一个封闭循环;污水经过处理后重复使用对于水的使用就成为一个封闭系统(现称“中水道”系统);垃圾经过焚烧或气化后回收热能,也是一种封闭循环系统;将电力供应或某些生产过程中散发的余热回收,再重复用于发电或供热等,都是封闭式的再循环系统。将这些系统统一组织在一定深度的地下空间中,将会对缓和城市发展与资源不足的矛盾起到积极的作用。尾岛俊雄建议在东京地下 50~100 m 深处建造一条直径为 11 m 的共同沟干线,其中布置上述多种再循环系统,形成一个地上使用,地下输送、处理、回收的封闭式再循环总系统。如果尾岛俊雄的构想中再加上热能的贮存与交换系统,则将更为完善。

③建立能源的地下贮存和交换系统。

对于未来城市中的居民,不但将获得更多的开敞空间,更宽敞的住宅,而且要有更高的居住和工作的环境标准。除了气候适宜的季节外,室内应进行全面的空气调节。目前在一些发达国家,室内环境已经相当舒适,但为此要耗费大量能源,像美国、瑞典等国,建筑能耗在全部总能耗中,都占 40% 以上,如果进一步提高标准和普遍采用空调,则能耗还将大大增加。在常规能源日渐枯竭的情况下,只能努力去寻找既保证生活舒适又节省能源的新途径。从当前的努力方向看,主要有两个方面,一是提高一次能源的利用效率,二是开发新能源,尤其是可再生能源。图 1-4 是美国河岸电力公司的地下抽水蓄能电站的构想图。

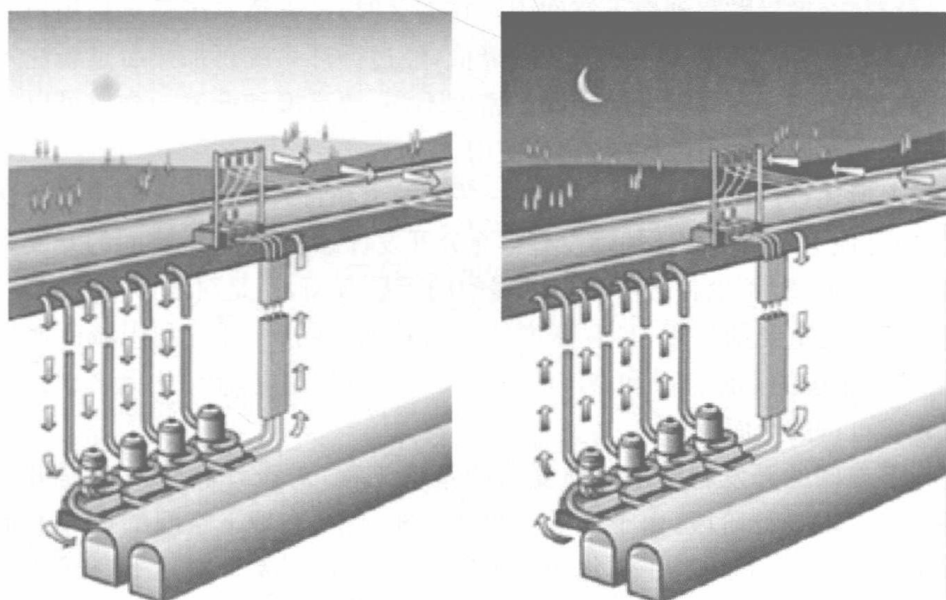


图 1-4 美国河岸电力公司的地下抽水蓄能电站构想图

即使像日本这样发达的国家,一次能源利用率也还不到 50%,其他部分都在生产、运输或使用过程中散失或废弃。从技术上看,提高一次能源的利用效率,主要从改进设备和最大限度地回收废弃能源两个方面着手。前者不属于本书讨论范围,对于回收废弃能源,地下空间可以提供比较有利的条件。例如,回收余热、废热的主要措施是将热能交换成热水用于区域供热,以及将电厂在低峰负荷时多余的电能转化为热能(如热水)或机械能(如压缩空气)贮存起来,供高峰负荷时使用。这样大量的热能或机械能的贮存,只有在地下空间中才有可能实现。再如,由于城市废弃物(垃圾)中的含热量越来越高,回收城市垃圾中的有机物和污水处理后的污泥中的热能,已在一些发达国家大城市中初步实现,这样一种能源回收系统,布置在地下空间中要比在地面上有利得多。日本的筑波科学城就建立一整套垃圾管道运送和焚烧处理系统,输送管道就布置在地下公用设施的“共同沟”中。同时,日本已经做出每年回收和利用废热折合石油 1 200 万~1 500 万 t 的规划。

在开发新能源方面,太阳能的潜力最大,可谓取之不尽,用之不竭,但目前太阳能利用受到集热器效率不高和热能贮存问题的障碍,还不可能大规模地进行开发。地下空间的热稳定性和封闭性,为大量贮存太阳能提供了可能性。具体来说,就是把用各种方法收集起来的太阳能,通过一定的介质(如水、空气、岩石等),进行热交换后贮存到地下空间中。在需要时,经管道系统输送到用户或再转化成其他能源。使用后的热能温度降低,经过循环系统再加热后重新注入地下空间贮存。由于不同温度的介质的密度不同,故高温和低温的介质可以分上下两层贮存在同一地下贮库中,循环使用。

综上所述,可以认为,地下空间在一些大城市和特大城市中已经得到广泛的利用,但是地下空间资源还远远没有被充分开发,因此城市地下空间的开发利用有着广阔的前景,不论在缓解城市发展中的矛盾方面,还是对城市未来的发展,都将起到十分重要的作用,具有高度的战略意义。同时,开发利用城市地下空间,必须与本国的具体情况和城市的不同发展阶段相适应,制订出既考虑长远需要又现实可行的全面规划。

地下空间的开发利用是一项复杂的系统工程,对设计和施工也提出了更高的要求。在设计阶段,由于地下空间处于地层中,在地下空间的设计上不仅要保证地下、地面和地上一体化的城市景观质量;同时要针对地下空间缺乏自然光、外向景观和封闭性等特点,在内部空间环境设计时应处理好地面、地下的易达性,使室内环境具有开发感、通透感、动态感和自然化等特点;在创造空间舒适和美感的同时应强调地下防灾的特殊设计。在地下结构设计上要考虑

地下结构与围岩形成一个统一的受力体系的特点,强调使用现代支护结构理论和方法。同时,由于地铁线网规划的深化,地铁换乘车站增加,换乘更加方便、快捷,但车站基坑深度、层数、车站换乘方式等方面更加复杂,对结构设计要求提高;地铁换乘车站建筑功能要求不断提升,要求增加结构跨度,减小车站内部结构构件数量及尺度以便于建筑相关布置等;地铁车站与其他交通体系换乘接驳的功能更为全面,导致结构形式更为复杂,结构构件受力采用传统平面计算模型计算已经不能满足要求。在施工阶段,地下建筑周围介质为岩石或土壤,因而给地下工程的施工提出了特殊的要求。因此,地下工程的施工经历了从手工开挖发展到盾构施工,并逐渐形成了以信息化为指导的地下施工新模式。城市环境保护及拆迁难度提高等,对地下空间的施工等方面限制更加苛刻,结构与既有建筑、管线等相互影响,制约地下建筑的设计施工。因此地下空间设计施工的方法不仅要满足地下工程本身的使用功能要求以及合理开发利用地上、地下有效空间,而且要考虑由于施工给周围环境带来的不良影响。

1.2 地下综合体的概念

由多种不同功能的建筑空间组合在一起的建筑,称为建筑综合体(building complex)。例如,在一幢高层建筑中,在不同的层面以及地下室中布置有商业、办公、娱乐、餐饮、居住、停车等内容,这些内容在功能上有些相互联系,有些却毫不相干。经过进一步的发展,不同城市功能也被综合布置在大型建筑物中,成为城市综合体(urban complex),当城市综合体随着城市的立体化再开发而伴生于城市地下空间中,则称为城市地下综合体(underground urban complex),简称地下综合体。当城市中若干个地下综合体通过地下铁道或地下步行系统联系在一起时,形成规模更庞大的综合体群(complex cluster)。

地下综合体的规模有大有小,其建设目的和功能却有所区别,有的以改善地面交通为主,有的以扩大城市地面空间,改善环境,或保护原有环境为主;有的是为了适应当地气候的特点而将城市功能的一部分转入地下空间。但地下综合体也有其相似之处,它们一般都包括以下一些内容:

(1)地下铁道(图 1-5)、公路隧道,以及地面上的公共交通之间的换乘枢纽,由集散厅和各种车站组成。

(2)地下过街人行横道(图 1-6)、地下车站间的连接通道、地下建筑之间的连接通道、出入口的地面建筑、楼梯和自动扶梯等内部垂直交通设施等。

(3)地下公共停车库(图 1-7)。



图 1-5 上海地铁人民广场站



图 1-6 北京长安街人行过街地道

(4)商业设施和饮食、休息等服务设施,文娱、体育、展览等设施,办公、银行、邮局等业务设施。

(5)市政公用设施的主主管线。

(6)为综合体本身使用的通风、空调、变配电、供水排水等设备用房和中央控



图 1-7 地下车库

制室,防灾中心、办公室、仓库、卫生间等辅助用房,以及备用的电源、水源、防护设施等。

1.3 地下综合体的分类和特点

1.3.1 地下综合体分类

城市地下综合体是具有多种城市功能的大型地下建筑集合。目前人类的空间危机最突出的表现,就是城市中心区的环境恶化。城市地下综合体能在一定程度上将地面的空间引入到地下,缓解城市中心区的拥挤状况,创造出良好的城市景观。同时,随着人类生产力的发展,以城市地下综合体为节点的地下空间网络也将出现,成为地下城市的雏形,并进一步为地上地下协同发展的未来城市的形成和运营提供保障。

城市地下综合体的产生是随着地下街和地下交通枢纽的建设而逐步发展的,其初期阶段是以独立单一功能的地下空间公共建筑而出现的,如 1930 年日本的早期地下街,欧洲国家战后建造的快速轻轨及道路交通枢纽系统等。伴随着社会的高度发展,城市繁华地带拥挤! 紧张的局面带来的矛盾日益突出,高层建筑密集,地面空间环境的恶化促进了地下空间向多功能集约化的方向发展,如纽约市曼哈顿、费城的市场西区、芝加哥市中心、多伦多市伊顿中心、蒙特利尔、日本的东京等都建设了大规模的地下综合体。

根据地下综合体的功能,可将其分为如下类型:

1. 新建城镇的地下综合体

在新建城镇或大型居住区的公共活动中心,与地面公共建筑相配合,将一部分交通、商业等功能放到地下综合体中,可节省土地,使中心区步行化并克服不良气候的影响。这种地下综合体布置紧凑,使用方便,地面和地下空间融为一体,很受居民的欢迎。

2. 与高层建筑群结合的地下综合体

附建在高层建筑地下室中的综合体,其内容和功能多与该高层建筑的性质和功能有关,可视为地面建筑功能向地下空间的延伸。例如纽约的曼哈顿区、芝加哥市中心区、多伦多市中心区等,地面空间多被占用,街道阴暗狭窄,行人与车辆混杂现象比较严重;为改善这种状况,常常将高层建筑地下室与街道或广场的地下空间同步开发,使之连成一片,形成一个大面积的地下综合体,把建筑空间、地面开敞空间和地下空间有机地融为一个整体,对改变城市面貌起了较好的作用。

3. 城市广场和街道下的地下综合体

在城市的中心广场、文化休息广场、购物中心广场和交通集散广场,以及交通和商业高度集中的街道和街道交叉口,都适合于建设地下综合体。首先,在这些地点,各种城市矛盾,特别是交通矛盾较为突出,因而也是城市再开发的主要位置;其次,广场和街道的地下空间比较容易开发,尤其是广场,建筑物和地下管线的拆迁问题和对地面交通的影响都较小。

1.3.2 地下空间结构设计特点

城市地下空间建筑选用结构类型应从建筑功能、地质情况、环境条件、建筑材料、施工方法等因素以及结合地下建筑的特殊性进行综合考虑。一般工程中可采用耐久性好、施工可塑性强的现浇钢筋混凝土结构;大空间的洞穴中可使用钢结构;对于地质条件较好的浅埋小跨度结构(如粮仓、隧道等)则可选用砌体结构。

在结构体系方面,地下建筑最常用的类型为框架结构、外墙内框结构、板墙结构、板柱结构、排架结构、拱壳结构。框架结构多用于高层建筑地下室、水电厂厂房、地下车站等;外墙内框结构、板墙结构,多用于有地下连续墙的工程;板柱结构是人防工程地下车库常用的结构体系;排架结构多用于洞穴中的单层厂房,不承受土压力;拱壳结构多用作结构的顶盖,主要承受土压力。结构体系的选型应在满足使用要求的前提下做到安全、经济、施工方便。

与地面土木工程结构相比,城市地下空间结构在以下几个方面存在着结构设计上计算上的特殊性: