

地下空间工程系列丛书

城市地下空间结构

编著 耿永常 李淑华
主审 高伯扬

哈尔滨工业大学出版社
·哈尔滨·

内 容 简 介

本书主要针对城市地下空间建筑的结构设计、选型及施工等,讲述了其设计的基本原理与方法,其主要内容包括武器及其爆炸效应、射弹侵彻与核爆动荷载、附建式结构、浅埋闭合框架结构、圆形与盾构结构、沉井结构、地下连续墙结构、拱型结构的计算方法与构造、地下结构有限元分析等内容。

本书可作为高等学校土木工程专业、岩土与地下工程专业的本科生教学用书,也可供相关领域的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

城市地下空间结构/耿永常等编著. —哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2005.6

(地下空间工程系列丛书)

ISBN 7-5603-2151-8

I.城… II.耿… III.地下建筑物—城市规划:空间规划 IV.TU984.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 033679 号

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006

传 真 0451-86414749

印 刷 黑龙江省地质测绘印制中心印刷厂

开 本 787×960 1/16 印张 16.5 字数 400 千字

版 次 2005 年 6 月第 1 版 2005 年 6 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 7-5603-2151-8/TU·52

印 数 1~3 000

定 价 22.00 元

开发城市地下空间，可节约宝贵的土地资源，保护自然生态环境，提高城市集约化程度，对战争及地震灾害的防护等具有十分突出的优越性，有利于城市的可持续性发展。

21世纪必将是城市地下空间建筑蓬勃发展的世纪，对地下空间领域的研究与开发，具有极其重要的意义。

王光远

中国工程院院士王光远题词

前 言

伴随着城市建设规模的不断扩大,城市地下空间开发已成为城市规划中重要的组成部分。开发利用地下空间具有很多优越性,主要表现在节约土地、增加城市空间容量、有利环境保护等,不仅如此,它还是城市防灾减灾及在战争中有效防御的最好的工程类型。

目前,地下空间功能已普及各个领域,如地下街、地下铁道、地下快速路、地下停车场、地下综合管廊及大型地下综合体等。可以说,地面城市的功能在地下都可以实现。由于地下的开发是在原有已建城市基础上进行的,因此,地下施工的复杂性出现了很多施工方法。地下结构良好的防炮、炸弹和核武器的冲击爆炸作用特点使其必须考虑荷载作用,这些因素都给地下建筑与结构带来设计与施工的难度。

21世纪是地下空间开发的世纪,我国大中城市在近几十年中将迎来开发地下铁道建设的高潮。这些都表明,地下工程专业人才的培养迎合了时代的要求。本书的编写正是基于这种时代背景而产生的。

新世纪土木工程专业毕业生应能在房屋建筑、隧道与地下建筑、公路与城市道路、铁道与交通工程、桥梁与矿山工程等领域从事技术与管理工作,这是新世纪对土木工程专业的要求。按照专业方向其课程分为建筑工程类、交通土建类、地下工程类三个系列,本书可作为地下工程方向的本科生专业教学用书,也可有选择地用于房屋建筑方向的地下结构课程用书。

地下结构涉及面很广,有软土与硬土、防护与非防护、土中与水中、深埋与浅埋、开敞与封闭等多种形式,不同种形式又有沉管(箱)、顶管(箱)、明挖与逆作、暗挖与盾构、沉井与支护等施工差别。本书中的内容属软土地下结构。

本书在编写过程中得到了哈尔滨工业大学土木工程学院领导和同事的帮助和大力支持,中国工程院院士王光远教授给予了充分肯定,在此谨向他们表示诚挚的感谢。在本书的资料整理、例题核算、公式校对及编写过程中谢玲燕、尚文红做了大量工作,在此向他们表示衷心的感谢。

由于时间紧迫与作者水平有限,书中疏漏及不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

作 者
2005年4月

目 录

第一章 概 论	(1)
第一节 地下空间结构类型	(1)
第二节 地下空间结构的设计理论与方法	(5)
第三节 地下空间结构设计原则及内容	(9)
第四节 地下空间结构荷载、材料与构造	(12)
第二章 武器及其爆炸效应	(22)
第一节 常规武器与核武器爆炸效应	(22)
第二节 现代高技术武器及其作用效应	(32)
第三章 射弹侵彻与核爆动荷载计算	(41)
第一节 射弹的冲击破坏作用	(41)
第二节 核爆动荷载	(49)
第四章 附建式结构	(56)
第一节 附建式结构特点和类型	(56)
第二节 附建式结构动荷载及动力计算	(67)
第三节 梁板式结构	(80)
第五章 闭合框架结构	(100)
第一节 概 述	(100)
第二节 矩形闭合框架的计算	(102)
第三节 按地基为弹性半无限平面的框架设计	(113)
第四节 矩形闭合框架构造	(122)
第六章 圆形结构	(125)
第一节 圆形结构与盾构施工	(125)
第二节 盾构机施工与装配式管片构造	(133)
第三节 圆型结构的计算	(139)

第四节	上海外滩观光隧道盾构技术实例	(152)
第七章	拱型结构	(161)
第一节	概 述	(161)
第二节	土压力及稳定性	(167)
第三节	单跨单层拱型结构的内力计算方法	(178)
第四节	单跨双层与单层多跨拱结构计算方法	(184)
第八章	沉井结构	(188)
第一节	概 述	(188)
第二节	沉井结构设计	(192)
第九章	地下连续墙结构	(213)
第一节	概 述	(213)
第二节	地下连续墙结构计算	(216)
第三节	地下连续墙接头与构造	(221)
第十章	有限单元法分析地下结构	(232)
第一节	概 述	(232)
第二节	矩阵力法在地下结构中的应用	(232)
第三节	有限单元法在地下结构中的应用	(244)
第四节	有限元分析软件在地下结构中的应用	(249)
参考文献	(256)

第一章 概 论

第一节 地下空间结构类型

现代城市地下空间建筑的大规模开发是城市建设发展到一定阶段的必然结果。根据城市建筑的功能要求,地下空间建筑从使用功能上可分为地下民用、工业、公共、交通、公用设施、综合体、特殊用途的地下空间(矿藏、埋葬、景观、洞穴等)等多种用途;根据岩土介质又可分为岩石与软土地下空间建筑,又称为坑道、地道、地下室等几种。这些分类基本上都是从建筑角度考虑的,而地下空间建筑又必须由一定的结构型式来保障其使用功能的实现。因此,地下空间建筑与结构是密不可分的,各自又包含着主要侧重内容,详见表 1.1。

表 1.1 地下空间建筑与结构的主要内容

建 筑	结 构
<ul style="list-style-type: none"> • 规划、规模、场地、地形、埋深 • 平面及剖面尺寸、与地形及地下的关系 • 功能分区及空间尺度 • 结构型式与材料 • 施工方法 • 结构构件的内外装饰及构造 • 建筑物理与防护防灾等 	<ul style="list-style-type: none"> • 结构及构件型式与施工方法 • 结构材料及等级 • 土质状况与荷载 • 结构防护与防灾 • 计算简图、结构力学与分析 • 结构强度与稳定性 • 结构构造与配筋 • 内外结构构件的型式及强度分析等

注:表中不含设备(电、水、风、暖等)内容。

由表 1.1 中看出,建筑与结构都要研究结构型式、施工方法与材料,它们既有共同的部分,又有各自的主要内容。

对于地下空间结构可以这样理解,能够保障地下空间建筑使用功能要求的,在各种荷载作用下具有足够强度与稳定性的结构型式。

显然,地下空间结构与地面空间结构具有不同的特征,地下空间结构的主要特征为:

- (1) 全埋或半埋在岩土中,承受岩土、水等荷载;
- (2) 由于地下防灾性能良好,对自然灾害中的风、雪、雨、地震等及人为灾害中包括核武器

在内的各种武器杀伤破坏作用的防护性能；

- (3) 不需考虑风荷载与立面造型；
- (4) 采光与通风需单独考虑；
- (5) 施工技术要求复杂及设备安装要求完善；
- (6) 具有较高的防潮、防水要求；
- (7) 造价较高。

与地面建筑工程比较,地下空间结构所考虑的因素更多,技术也更复杂,由于周围介质是岩土,因此,岩土力学计算是地下结构设计的重要基础。

一、地下空间结构的分类

1. 按结构形状划分

地下空间结构可按结构形状划分为矩形框架结构、圆形结构、拱与直墙拱结构、薄壳结构、开敞式结构等,见图 1.1。

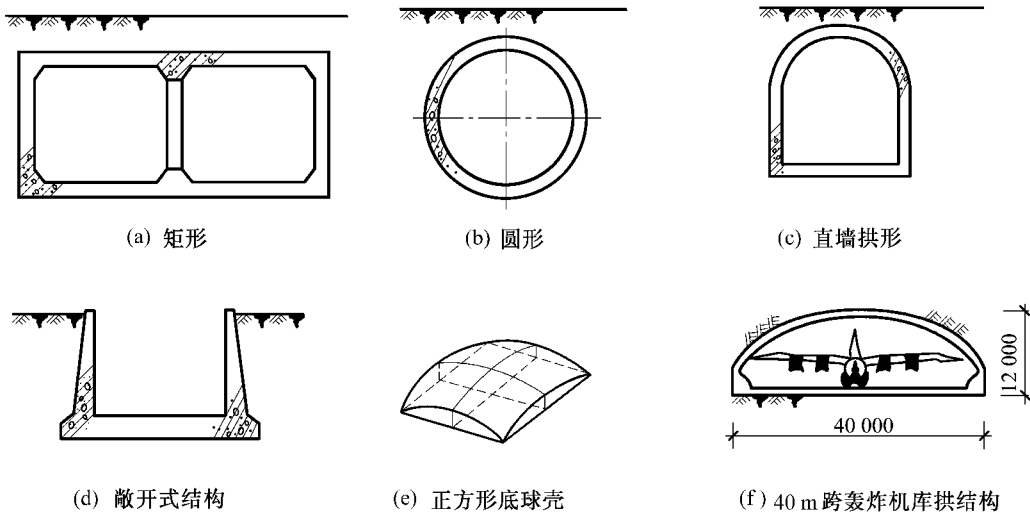


图 1.1 地下空间的结构型式

2. 按土质状况划分

地下空间的结构按土质状况可分为土层与岩层地下空间结构。土层结构即指在土壤内挖掘的结构,岩层结构指在岩石中挖掘的结构。这里不含水中结构,水中结构与岩土中结构又有较大差别,水中结构包括江河湖海内的水下结构,但包含水底岩土中的结构。岩石结构中又分为喷锚结构、半衬砌结构、厚拱薄墙结构等,见图 1.2。

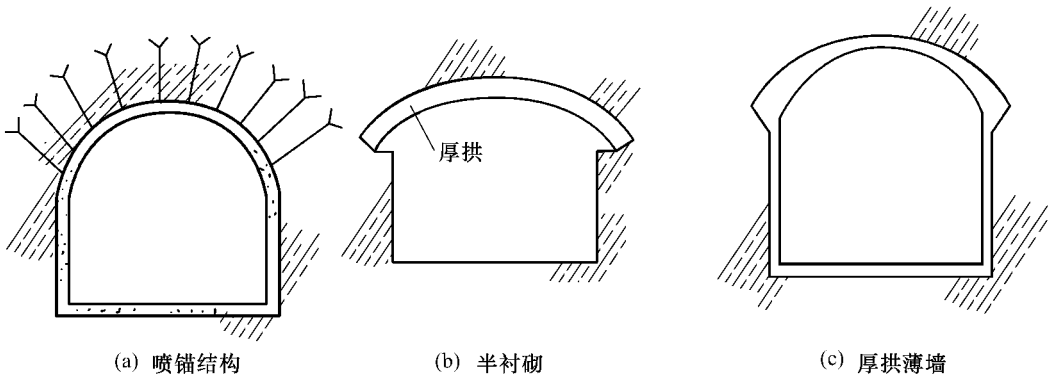


图 1.2 岩石中的地下空间建筑的结构型式

3. 按施工方法划分

地下空间的结构按施工方法可划分为掘开式(又称大开挖式)、暗挖式、盾构式、沉井式、连续墙式、沉箱(管)式、逆作式、顶管(箱)式等。

大开挖式是指直接在地面开挖所建造的地下空间建筑基坑,在其坑内建造完工程后将土回填的一种方法,基坑边坡可采用放坡、直立或支撑的形式而防止土的塌落。

暗挖式常用于在土中埋深较大的情况下,通过竖井在土中进行挖掘空间而建造的结构,这种方式又称为矿山法。

盾构式又称潜盾,系译意名称,是在地下采用隧道掘进机进行施工的一种方法,常用圆形,顶管工具头也属盾构范畴。其特点是可穿越海底、水底等地下修建隧道,隐蔽,自动化与机械化程度高,劳动强度低;一次掘进长度在 1 400 ~ 2 500 m 左右,其盾构直径最大为 14.14 m,属于超大直径型盾构。

沉井式是在地面预先建造好结构,然后通过井内不断挖土使结构借助自重克服土摩阻力不断下沉至设计标高的一种方法,常用于桥梁墩台、大型设备基础、地下仓(油)库、地下车站及国防工事等地下工程的建筑施工。

连续墙式是指在施工时先分段建造两条连续墙,然后在中间挖土并由底至上建造底板、楼板、顶板及内部结构的一种施工方法。

沉箱(管)式是指将预制好的结构运至预定位置,并使之下沉到设计标高的施工方法。

逆作式是在地下工程施工时不设支护体系,以结构构件作挡墙及支撑,由柱墙、顶板、楼板、基础的自上而下依次开挖和施工的一种方法,其特点是施工作业面小,可尽快恢复地面交通,对周围环境影响小,常为矩形结构。

顶管(箱)式是在起点和终点设置工作井(常采用沉井),在工作井壁设有孔作为预制管节的进口与出口,通过千斤顶将预制管节按设计轴线逐节顶入土中,对于较长距离情况,顶管常分段进行,该方法在城市中不影响交通及附近地面设施。

由于施工方法对结构的影响较大,常需要进行施工阶段与使用阶段的结构分析与设计。

4. 从与地面建筑的关系划分

城市建设中大部分地面建筑带有地下建筑,对于这种地面地下相连的地下建筑称为附建式(地下室)结构,反之称为单建式结构。目前,我国建设的多层建筑大多建有地下室,高层建筑则必须建有地下建筑。

5. 按埋深划分

根据地下空间结构在土中的埋深分为浅埋与深埋地下结构。深浅的定义较为模糊,较为不严格的概念认为,地下空间开发深度分为浅层(≤ 10 m)、次浅层(10 ~ 30 m)、次深层(30 ~ 100 m)、深层(≥ 100 m)。在规划与建筑上没有必要研究 10.1 m 是浅层还是次浅层哪个正确。但在结构中确定浅埋与深埋有较为明确的界线,如松散土层中的压力拱理论确定的深埋与浅埋的分界、土压理论中 $\partial q/\partial H = 0$ 对应 q_{\max} 时的 H_{\max} 的浅埋与深埋的分界(q 为土层压力值, H 为埋深)等,结构工程师认为,深埋与浅埋的界限是十分必要的,但目前还没有统一的划分方法。

二、地下空间结构构件

地下空间结构的主要构件组成有衬砌(lining)结构(被覆结构)和内部结构。衬砌类似于地面建筑的外墙,即围护结构(surrounding structure),它直接与土层接触,在岩石中将其划分为贴壁式与离壁式结构(图 1.3);离壁式结构起围护作用的外墙与岩体是脱离的,局部有支承。内部结构包括楼板、柱、隔墙、楼梯、梁等构件组成,外部结构指地下空间的围护结构,如拱、外墙等(图 1.4)。

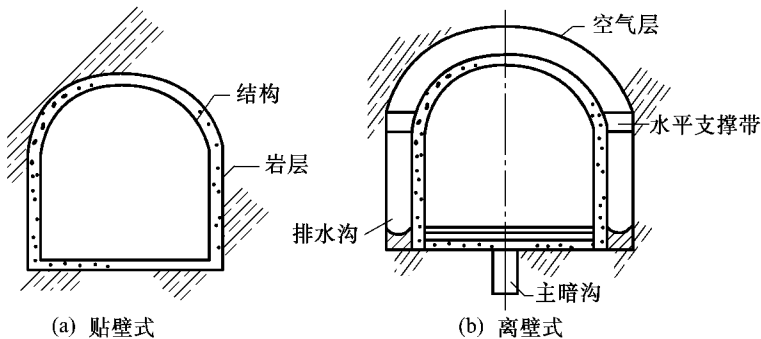


图 1.3 贴壁式与离壁式结构

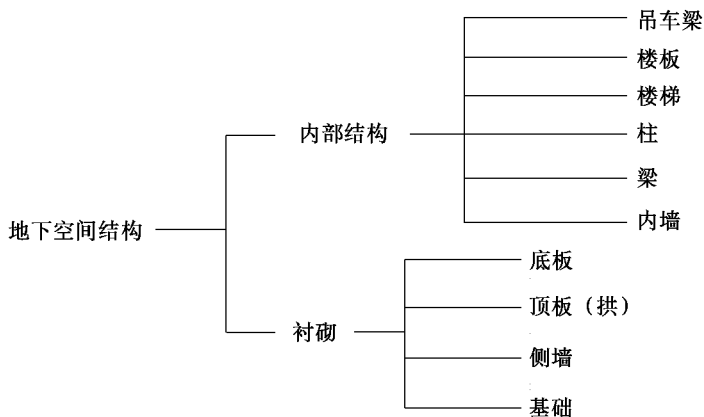


图 1.4 地下空间结构构件划分

第二节 地下空间结构的设计理论与方法

地下空间结构设计理论形成于 19 世纪初，基本上仿照地面结构的计算方法进行，经过较长时期的实践，特别是岩土学科与结构工程学的发展，形成了以地层对结构受力变形约束为特点的地下结构分析，伴随之后的计算机技术的出现推动了地下结构设计理论的更进一步发展。

地下空间结构理论发展主要有以下几个阶段。

一、19 世纪前期地下空间使用概况

原始社会人类利用天然的山洞或地下、半地下的穴洞避风雨、抵御野兽，如我国西安半坡村发掘出的仰韶文化（距今 3000~6000 年）的氏族部落遗址。在半地下穴居奴隶社会阶段，宗教在人们思想中占有重要地位，人们相信有脱离人之外的神灵，因此，大量的地下空间都被开发成与神有关的建筑，如著名的埃及金字塔，其主要目的是其内部空间的陵墓，又如新王朝时期的阿布辛贝·阿蒙神大石窟庙建在悬崖上，正面入口约 40 m 宽，30 m 高，立面有四尊国王雕像，高 20 m，内部空间有前后两个柱厅，八根神像柱，周围墙上布满壁画。详见图 1.5~1.7 所示。

奴隶社会中地下空间主要用于陵墓及石窟建设，人们公共生活方面也建有隧道、输水道、贮水池、住宅等。如公元前 2200 年巴比伦河底隧道，公元前 300 年的古罗马地下输水道及贮水池等都是杰出的代表。

封建社会时期，地下空间的用途扩展了，地下空间在延续陵墓与神庙石窟的建造过程中，

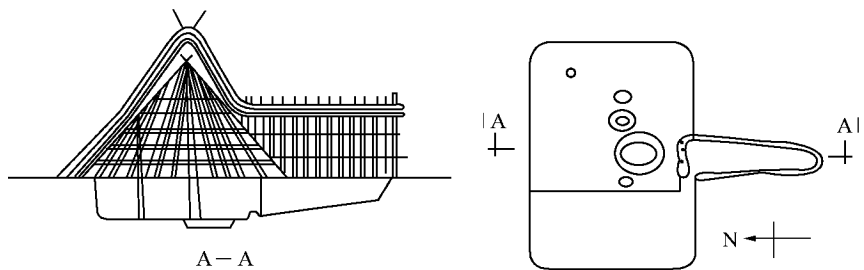


图 1.5 陕西西安半坡村原始半地下穴居

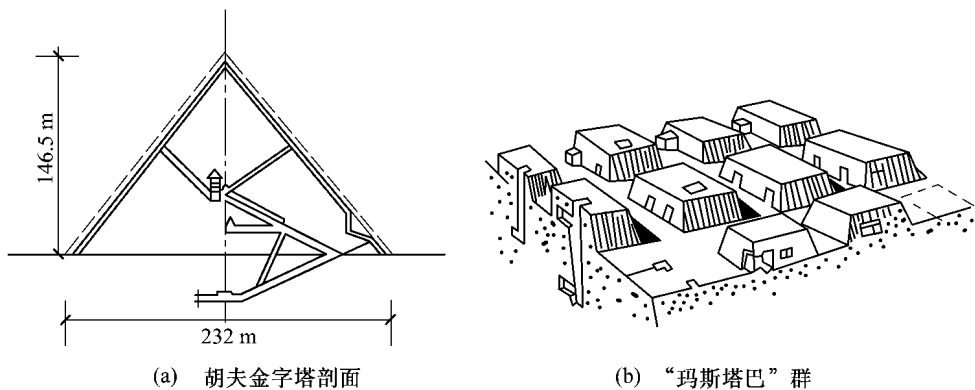


图 1.6 古埃及的地下空间利用

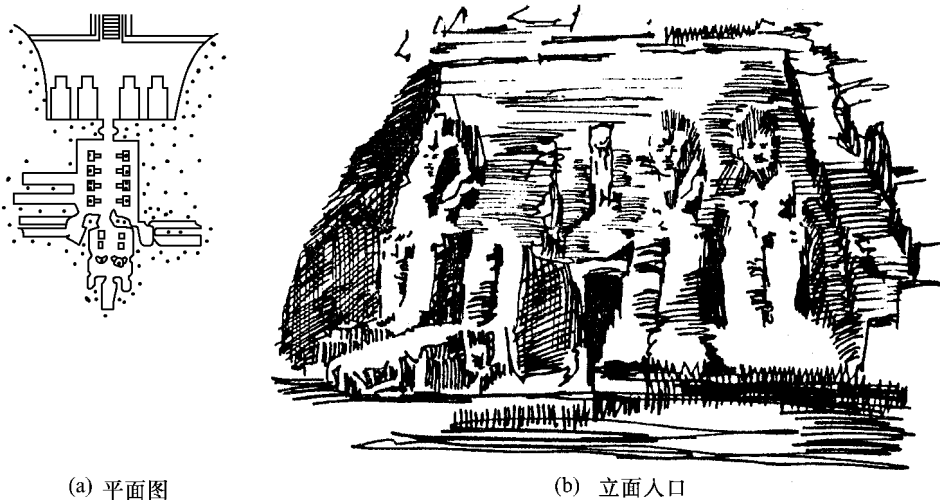


图 1.7 阿布辛贝·阿蒙神大石窟庙

规模越来越大,如我国山西大同、河南洛阳等地均凿掘出令人叹为观止的石窟群;地下空间也广泛用于粮仓、军事设施、生活居住等,如一直延续至今的窑洞,遍布我国河南、陕西、甘肃等地。

从原始社会至封建社会时期,地下空间并没有形成完整的结构分析理论,当时主要凭感觉和经验出发,以坚固为原则,重在建筑使用功能。在结构上充分利用岩土本身的坚固性,石砌地下建筑多采用矩形及拱形结构;岩石凿掘的空间大多为直墙拱形,充分利用岩石本身的强度与稳定性。如距今 50 万年前旧石器时代的天然崖洞居住处所,距今 5 万年前新石器时代母系社会的黄土壁体土穴。

二、19 世纪地下空间结构设计方法

19 世纪初,地下空间结构已有初步的计算理论,早期的材料多以岩土、砖石、木等构筑,由于估算粗糙,结构断面常取得很大,主观估算及经验占据主要地位。复杂的力学分析方法尚未出现,但基本的静力平衡条件已初步应用。

最早的地下结构计算方法为刚性结构的压力线理论。按压力线理论分析,地下结构是由刚性块组成的结构,其主动外荷载为地层压力,当处于极限平衡状态时,被视为绝对刚体所组成的结构可由静力计算方法直接求出其任意截面的内力。该方法估算的结构断面尺寸都很大。

19 世纪后期,混凝土及钢筋混凝土材料的出现,促进了工程结构的发展,设计中的主要方法为弹性结构分析理论,这种分析方法成为最基本的力学方法。

三、20 世纪地下空间结构设计方法

进入 20 世纪地下空间结构计算理论有了进一步发展。1910 年康姆烈尔 (O. Kommerall) 首先在计算整体式隧道衬砌时假设刚性边墙受有呈直线分布的弹性抗力,1922 年约翰逊 (Johnson) 等人在建议的圆形衬砌计算方法中也将结构视为受主动荷载和侧向地层弹性抗力联合作用的弹性圆环,被动弹性抗力的图形假设为梯形,抗力大小可根据衬砌各点有没有水平移动的条件加以确定。上述中的方法不足之处是过高估计了地层对结构的抗力作用,使结构设计偏于不安全,为弥补这一点,结构设计采用的安全系数常被提高到 3.5 ~ 4.0 以上。

1934 年,朱拉波夫 (Г. Г. Зурабов) 和布加也娃 (О. Е. Бугаева) 对拱形结构按变形曲线假定了镰刀形的抗力图形,并按局部变形理论认为弹性抗力与结构周边地层的沉陷成正比。该方法将拱形衬砌(曲墙式或直墙式)的拱圈与边墙整体考虑,视为一个直接支承在地层上的尖拱,按结构力学的方法计算其内力。该方法是根据结构的变形曲线假定地层弹性抗力分布图形,并由变形协调条件计算弹性抗力的量值。上述计算方法被认为是假定抗力阶段。

前苏联地下铁道设计事务所在 20 世纪 20 ~ 30 年代就提出过按局部变形弹性地基圆环理论计算圆形隧道衬砌的方法。1934 ~ 1935 年间,达维多夫 (С. С. Давыдов) 提出了应用局部变形弹性地基梁理论,1956 年纳乌莫夫 (С. Н. Наумов) 又将其发展为侧墙按局部变形弹性地基梁理论计算的地下结构算法。

1939 年和 1950 年,达维多夫先后发表了按共同变形弹性地基梁理论计算整体式地下结构的方法。1954 年奥尔洛夫 (С. А. Орлов) 用弹性理论进一步研究了这一方法。舒尔茨 (S. Schulze) 和杜德克 (H. Düddek) 在 1964 年分析圆形衬砌时不但按共同变形理论考虑了径向变形的影响,而且还计入了切向变形的影响。由于该分析方法以地层物理力学特征为根据,并能考虑各部分地层沉陷的相互影响,在理论上较局部变形理论有所进步。这可称为弹性地基梁理论阶段。

自 20 世纪 50 年代后,连续介质力学理论的发展使地下结构的计算方法也进一步发展。史密德 (H. Schmid) 和温德耳斯 (R. Windels)、费道洛夫 (В. Л. Федоров)、缪尔伍德 (A. M. Muirwood)、柯蒂斯 (D. J. Curtis) 等分别提出了用连续介质力学方法求圆形衬砌、水工隧洞衬砌的弹性解。塔罗勃 (J. Talobre) 和卡斯特奈 (H. Kastner) 得出了圆形洞室的弹塑性解。塞拉塔 (S. Serata)、柯蒂斯和樱井春辅采用岩土介质的各种流变模型进行了圆形隧道的粘弹性分析。上海同济大学对地层与衬砌之间的位移协调条件得出了圆形隧道的弹塑性和粘弹性解,这可认为是连续介质阶段。

20 世纪 60 ~ 80 年代,伴随着电子计算机的发展,数值计算方法在地下空间结构中得到进一步发展。1966 年莱亚斯 (S. F. Reyes) 和狄尔 (D. U. Deere) 应用特鲁克 (Drucker) - 普拉格 (Prager) 屈服准则进行了圆形洞室的弹性分析。1968 年辛克维兹 (O. C. Zienkiewicz) 等按无拉力分析研究了隧道的应力和应变,提出了可按初应力释放法模拟隧洞开挖效应的概念。1977 年维特基 (W. Wittke) 分析了围岩节理及施工顺序对洞室稳定的影响,以及开挖面附近隧洞围岩的三维应力状态。同济大学孙钧院士提出了某水电站大断面厂房洞室分部开挖的结构粘弹塑性分析。上述方法分析地下结构可被看作是数值方法阶段。

20 世纪 90 年代以后至今,除极限状态和优化设计方法成为地下空间结构分析方法的最新研究方向之外,地下结构监测与反演分析法 (反分析法) 也成为人们解决工程问题的最佳方案。结构优化方法是在各种可能设计方案中寻求满足功能要求的前提下,保证结构安全可靠度的最低造价设计。优化设计应该说是工程领域所追求的最佳设计,它不仅仅局限于结构领域,同时也要求工程项目从前期论证、规划、建筑方案、结构设计、方案施工及维护等一系列环节都要进行优化设计,王光远院士提出和建立的工程项目全局大系统优化思想及理论也是地下空间工程设计理论的发展方向。

第三节 地下空间结构设计原则及内容

地下空间工程设计遵循一定的原则,按照土建工程的基本建设程序,由可行性论证、勘察、设计与施工等环节所组成。在这些环节中,可行性论证是工程投资环节中极其重要的具有战略性决策性质的环节。勘测设计应视为是较为具体的技术环节,在这一过程中应经过方案比较并选择最满意的技术方案,包括勘察、规划、建筑结构设备设计、预算等。近十几年来,建筑规划与方案及概念结构设计,在可行性论证阶段已基本完成,设计阶段结束后即可进入施工阶段。

一、结构设计的过程与步骤

- (1) 熟悉地下空间建筑的可行性论证报告,按照论证报告中所规定的内容进行设计。
- (2) 了解建筑设计方案,确定关键结构技术,如结构型式、体系、承重方式、受力特点等。
- (3) 确定工程的荷载性质,包括是否具有防护等级要求,平战结合要求,水土压力,地面荷载状况(如地面部分是建筑还是道路)等。
- (4) 确定施工方法及埋置深度。地下空间结构受施工影响较大,常需进行施工阶段及使用阶段的荷载分析,有时还需进行动载(武器爆炸冲击)作用分析,并进行分析比较后方能确定其主要结构构件尺寸。
- (5) 估算荷载值及进行荷载组合,确定主要建筑材料。
- (6) 确定各结构部分的结构型式及布置,估算结构的主要尺寸及标高。结构标高与建筑标高是不同的,而轴线是相同的,结构标高常表达为结构净构件的顶或底面的标高,而建筑标高常表达为包括面层在内的最后使用阶段的标高。

(7) 绘制结构设计初步图。

(8) 估算结构材料及概算。

上述过程可以认为是初步设计(中小型工程)或技术设计(中大型工程)中所包括的内容。在初步设计经审批后即可进行施工图设计。

二、施工图设计内容

1. 荷载计算

根据建筑功能性质、设防等级、抗震等级、埋置深度、岩土性质、施工方案、水土压力、安全可靠度等多种因素确定荷载值。

2. 计算简图

根据结构型式及结构设计理论、岩土性质、计算手段提出既接近实际又能简化计算的合适简图。因为简图决定着计算理论的差别,此差别决定力学结果的变化,因而引起构件断面及材料强度的变化。

3. 内力及组合分析

根据施工、使用等不同阶段及所采用的计算手段(电算、手算、查表等进行内力计算,按最不利的状况进行组合分析)求出结构构件的弯矩、剪力和轴力(M 、 Q 、 N)值,并绘出受力图。

4. 结构配筋

由于地下空间结构大多为钢筋混凝土结构,因此需进行配筋设计。通过截面强度和抗裂缝要求求出受力钢筋,并确定分布筋及架立筋的数量及间距。钢筋应选择常用的规格,应尽量统一直径,以便购料和施工。

5. 构造确定

所有结构设计都有相应的构造要求来约束。构造要求是行业或构件设计中规范(或标准)规定的应该执行的定量或定性的一些措施,是多年工程实践经验及理论研究的总结,起着很重要的作用。所以,构造设计绝不可忽视。对构造要求的忽视有可能造成工程浪费或产生重大结构安全事故。

6. 施工图

根据设计及计算结果绘制结构平面布置图、结构构件配筋图、结构构造说明及节点详图、相关专业(风、水、电、建筑、通信、网络、煤气、防护等)需要设置的埋件、措施、洞口、预留及扩建图。

7. 图纸预算

一般认为工程有三算,即初步设计概算、施工图预算、竣工图决算。施工图完成后需根据当年的预算价格计算材料用量及费用,费用包括材料、人工、机械三项外加管理费。结构只是工程项目的组成部分。

三、地下空间结构设计原则

(1) 坚固适用、经济原则。坚持保障建筑功能为基本前提,做到坚固适用、经济、美观。

(2) 优化原则。对于可供选择的方案应选用经济的方案,当然是以不降低功能及安全度为基准。

(3) 严格使用规范与标准。地下结构规范、标准、条例有很多,甚至在国防、人防、公路、铁道行业中,还必须结合地面建筑的有关规范。设计中应遵循这些有关的规范与标准。

(4) 选择合适的计算工具。当前地下空间结构常用结构静力计算手册并补以手算,还有可供使用的相应的某种结构的设计软件。为了减轻工作量,应优先选择计算软件及查表方法,

既可保证速度,又可减少计算失误。

四、设计特点

地下空间结构可能会有两种不同荷载作用的情况,一种是无防护等级要求的一般地下结构,它所承受的荷载主要有静荷载与活荷载;另一种是不仅考虑一般意义的静活荷载,同时还要考虑在爆炸冲击作用下的瞬间动荷载。后一种即为具有防护等级要求的地下空间结构,可以看出,它是直接用于在战争状态下防包括核武器在内的武器的爆炸冲击作用。

1. 计算理论与方法

由于地下空间结构存在地层弹性抗力作用,因此,弹性抗力限制了结构的变形,改善了结构的受力状况。矩形结构的弹性抗力作用较小,在软土中常忽略不计,而拱形、圆形等有跨变结构的弹性抗力作用显著。在设计计算中如考虑弹性抗力的作用,应视具体的地层条件及结构型式而定。

地下空间结构的计算方法主要有结构力学分析法、弹性地基梁法、矩阵分析法、连续介质力学的有限单元法、弹塑性、非线性、粘弹性、粘弹塑性等计算方法。我国地下工程界著名学者孙钧院士与侯学渊教授把上述计算方法归为两大类:荷载结构法与地层结构法。

荷载结构法是把地下结构周围的土层视为荷载,在土层荷载作用下求结构产生的内力和变形,如结构力学法、假定抗力法和弹性地基梁法等。结构力学法用于软弱地层对结构变形的约束能力较差的状况(或衬砌与地层间的空隙回填、灌浆不密实时),反之,则可用假定抗力法或弹性地基梁法。此种方法在分析中把荷载与结构视为作用与反作用的关系。

地层结构法是把地层与结构(衬砌)视为一个受力变形的整体,并可按连续介质力学原理来计算衬砌和周边地层的计算方法。常见的关于圆形衬砌的弹性解、粘弹性解、弹塑性解等都归属于地层结构法。这是因为地层岩土材料的本构关系有线弹性、非线性弹性、粘弹性和粘弹塑性差别,由此便可建立上述多种关系的计算模型。地层结构法中只是对圆形洞室(指只有毛洞,不设衬砌)的解析发展得比较完善。

上述两大类法都可用数值计算方法进行分析,有限单元法、有限差分法、加权余量法和边界单元法等都属于数值计算方法。在地下工程中,由于材料非线性、几何非线性、岩层节理和其他不连续特征及开挖效应等因素的复杂性均可在有限单元法中得到适当的反映和考虑,因此,地下空间结构与岩土工程力学分析方法中发展最快的是有限单元计算方法。

2. 概率极限状态设计方法

钢筋混凝土结构计算最早采用的设计方法是以弹性理论为基础的“许可应力方法”,从20世纪40年代开始,出现了考虑材料塑性的按“破坏阶段”的设计计算方法,同时采用了按经验的单一安全系数。50年代又提出“极限状态”设计计算方法,单一安全系数改为考虑荷载、材料及工作条件等不同因素的分项安全系数法,这种按“极限状态”的设计方法一直沿用至今。