

高等学校规划教材

地下建筑结构

DI XIA JIAN ZHU JIE GOU

门玉明 王启耀 主编
刘增荣 陈志新 主审



人民交通出版社
China Communications Press

TU93/6

2007

高等学校规划教材

Dixia Jianzhu Jiegou

地下建筑结构

门玉明 王启耀 主编
刘增荣 陈志新 主审

人民交通出版社

内 容 简 介

本书介绍了地下结构的作用(荷载)计算、弹性地基梁理论、浅埋式地下结构计算、防空地下室设计、盾构隧道和顶管管道、沉井结构和沉管结构、整体式隧道结构、锚喷结构、基坑工程、地层与结构相互作用、地下建筑施工技术与施工组织等内容。

本书是普通高等学校土木工程和地质工程等专业的本科生教材,也可作为从事地下结构设计、施工和科学研究的技术人员、大专院校师生、短训班学员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

地下建筑结构 / 门玉明, 王启耀主编.—北京: 人民交通出版社, 2007.8

ISBN 978-7-114-06749-5

I.地… II.①门…②王… III.地下建筑物-建筑结构
IV.TU93

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第123954号

书 名: 地下建筑结构
著 者: 门玉明 王启耀
责任编辑: 高 培
出版发行: 人民交通出版社
地 址: (100011) 北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号
网 址: <http://www.ccpres.com.cn>
销售电话: (010) 85285838, 85285995
总 经 销: 北京中交盛世书刊有限公司
经 销: 各地新华书店
印 刷: 北京宝莲鸿图科技有限公司
开 本: 787×1092 1/16
印 张: 17.5
字 数: 436千
版 次: 2007年8月 第1版
印 次: 2007年8月 第1次印刷
书 号: ISBN 978-7-114-06749-5
定 价: 25.00元
(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

前言 *Qianyan*

随着社会生产力的巨大发展,人口出现快速增长,城市化的进程也在不断加剧。由于城市人口密度的增加和城市建设的扩容,可利用的地面空间越来越趋于紧张,城市建设对土地需求的增长与地面土地资源日益紧张之间的矛盾日显突出。因此,探索开拓新的生存空间的途径,已成为城市建设者们的一项重要的重要的研究课题。

地下空间是迄今尚未被充分利用的一种自然资源。从拓展人类生存空间的意义上看,合理开发与利用城市地下空间以满足未来城市发展的需要,是解决城市发展与土地资源紧张矛盾的最现实的途径,对地下空间的开发利用将成为 21 世纪的重大技术领域。

为适应大规模地下空间开发利用对高级技术人才的需要,近年来,许多高校为土木工程、地质工程专业陆续开设了地下建筑结构的课程,希望通过本课程的学习,使学生掌握或了解地下建筑设计的基本原理和方法,为以后从事地下建筑设计工作奠定良好的基础。本书正是为了适应我国高等学校土木工程、地质工程专业教育的这一发展和变化而编写的。

本书在编写过程中,参考了高等学校土木工程专业指导委员会编制的《地下建筑结构》教学大纲以及近年来国内出版的有关地下建筑结构的教材及专著。本书虽然是为土木工程和地质工程专业的本科生编写的,但也可供从事地下工程专业的技术人员参考。

本书由门玉明教授和王启耀副教授主编。西安建筑科技大学刘增荣教授和长安大学陈志新教授对书稿进行了认真的审阅并提出了宝贵的意见。书中的第 1、2、3、4、5、8、12 章由门玉明编写,第 6、7、9、10、11 章由王启耀编写。由于地下建筑结构涉及的知识面广,内容庞杂,目前在教学内容的选择上,还存在着仁者见仁、智者见智的状况。尽管我们在本书正式出版前,曾以讲义的形式在本科生和研究生教学中进行了反复使用和修改,但仍免不了存在错误和不足之处,敬请读者批评指正。

本书在编写过程中,参阅了许多学者的著作,并吸纳了其中的一些成果,在此对这些著作的作者表示诚挚的谢意。

感谢人民交通出版社对此书出版给予的大力支持,特别感谢土木与建筑图书出版中心的陈志敏副主任和高培编辑为此书出版所付出的辛勤劳动。

编 者

2007 年 3 月于西安



目录 *Mulu*

第 1 章 绪论	1
1.1 地下建筑的概念和功用	1
1.2 地下建筑的结构形式和适用条件	4
1.3 地下结构设计方法概述	7
1.4 地下建筑结构设计内容及计算原则.....	10
1.5 地下建筑的发展历史及前景.....	11
1.6 本课程的研究内容及任务.....	13
复习思考题	13
第 2 章 地下结构的作用(荷载)计算	14
2.1 地下结构的作用(荷载)分类.....	14
2.2 地下结构的作用(荷载)计算.....	15
2.3 地下结构的作用(荷载)组合.....	18
复习思考题	21
第 3 章 弹性地基梁的计算	22
3.1 按文克尔假定计算弹性地基梁的基本方程.....	22
3.2 按文克尔假定计算短梁.....	24
3.3 按文克尔假定计算长梁.....	31
3.4 按地基为弹性半无限平面体假定计算基础梁.....	35
复习思考题	39
第 4 章 浅埋式地下结构	41
4.1 浅埋式结构的形式、应用和设计要求	41
4.2 地基反力按直线分布时的闭合框架计算.....	42
4.3 将地基当做弹性半无限平面时的框架计算.....	43
复习思考题	51
第 5 章 防空地下室结构	53
5.1 防空地下室结构的特点和类型.....	53
5.2 防空地下室的建筑设计.....	56
5.3 防空地下室的结构计算.....	58
5.4 防空地下室的口部处理.....	67

5.5	防空地下室结构的构造要求	68
	复习思考题	71
第6章	盾构隧道和顶管管道	72
6.1	盾构隧道的功用和特点	72
6.2	盾构的基本构造及分类	73
6.3	盾构隧道的设计与计算	77
6.4	顶管管道的功用、特点和构成	85
6.5	顶管管道的设计与计算	87
	复习思考题	93
第7章	沉井结构和沉管结构	94
7.1	沉井的概念、构造和特点	94
7.2	沉井结构设计及计算	96
7.3	沉管的概念、特点和类型	102
7.4	沉管的设计与计算	104
7.5	管段连接和防水技术	108
	复习思考题	111
第8章	整体式隧道结构	112
8.1	隧道结构的特点及分类	112
8.2	隧道衬砌结构类型及材料	113
8.3	隧道结构的力学模型	118
8.4	整体式隧道结构的设计与计算	120
8.5	隧道洞门计算	135
	复习思考题	139
第9章	锚喷支护结构	141
9.1	锚喷支护原理、特点及设计原则	141
9.2	锚喷支护工程类比设计	144
9.3	锚喷支护结构的理论计算	150
9.4	锚喷支护监控设计	159
	复习思考题	162
第10章	基坑支护结构	163
10.1	概述	163
10.2	排桩、地下连续墙	166
10.3	锚杆体系	172
10.4	水泥土墙	175
10.5	土钉墙	178
10.6	逆作拱墙	181
	复习思考题	183

第 11 章 地层与结构的共同作用及其数值模拟	184
11.1 共同作用的概念	184
11.2 数值计算模型的建立	185
11.3 岩土材料的本构模型	187
11.4 地下工程施工的模拟	195
11.5 地下工程反分析	200
复习思考题	204
第 12 章 地下建筑施工技术与施工组织设计	205
12.1 概述	205
12.2 矿山法及浅埋暗挖法施工	206
12.3 掘进机、盾构、顶管施工	212
12.4 明挖法施工	219
12.5 沉管、沉井和沉箱施工	222
12.6 冻结、注浆、降水等辅助工法	225
12.7 地下建筑施工组织设计	230
复习思考题	240
附录一 弹性地基梁计算用表	241
附表 1 双曲线三角函数 $\varphi_1 \sim \varphi_4$	241
附表 2 双曲线三角函数 $\varphi_5 \sim \varphi_8$	242
附表 3 双曲线三角函数 $\varphi_9 \sim \varphi_{15}$	243
附表 4 基础梁受均布荷载的 σ 、 Q 、 M 系数	243
附表 5 基础梁受集中荷载的 σ 、 Q 、 M 系数	244
附表 6 基础梁受力矩作用的 σ 、 Q 、 M 系数	251
附表 7 均布荷载作用下基础梁的角变 θ	256
附表 8 两个对称集中荷载作用下基础梁的角变 θ	257
附表 9 两个对称力矩荷载作用下基础梁的角变 θ	259
附表 10 两个反对称集中荷载作用下基础梁的角变 θ	262
附表 11 两个反对称力矩荷载作用下基础梁的角变 θ	264
附录二 各级公路隧道建筑限界基本宽度	267
参考文献	268

第1章 绪 论

1.1 地下建筑的概念和功用

建造在土层或岩层中的各种建筑物(Buildings)和构筑物(Structures),统称为地下建筑(Underground Works)。地下建筑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;工业与民用方面的各种地下车间、地下电站、矿井、地下储藏库、地下商店、人防与市政地下工程;以及文化、体育、娱乐与生活等方面的地下联合建筑体,还包括军事方面的各种地下设施。地面建筑的地下室部分也归属于地下建筑。一小部分露出地面,大部分处于岩石或土壤中的建筑物和构筑物常称为半地下建筑。

地下建筑类型不同,其工程特点、设计、施工方法和施工组织也不相同。对地下建筑的分类有多种途径,常见的有:

(1)按使用功能分类

①工业建筑:包括地下仓库、地下油库、地下粮库、地下冷库、各种地下工厂(车间),及火电站、核电站的地下厂房等。

②民用建筑:包括各种人(民)防工程(如人员掩蔽部、指挥所和通讯枢纽、救护站和地下医院等),一些平战结合的地下公共建筑,如地下商业街、地下车库、地下影剧院、地下餐厅、地下招待所、地下物资储存仓库及地下住宅等。

③交通建筑:包括铁路和道路隧道、城市地下铁道、运河隧道和水底隧道等。

④水工建筑:包括水电站地下厂房和附属洞室,以及引水、尾水等水工隧洞、电缆洞和调压井等。

⑤矿山建筑:包括各种矿井(竖井和斜井)、水平巷道和作业坑道等。

⑥军事建筑:包括各种永备的和野战工事、屯兵和作战坑道、指挥所、通讯枢纽部、人员或装备掩蔽所、飞机和舰艇洞库、军用油库、导弹发射井,以及军火、炸药和各种军用物资仓库等。

⑦公用和服务性建筑:包括给排水管道、热力和电力管道、输油和煤气管道、通讯电缆,以及一些综合性的市政隧道等。

(2)按所处的地质条件和建造方式分类

①岩石中的地下建筑:包括在岩石中修建的地下建筑;利用石灰岩地区已有的天然溶洞、及经过加固和改造后的废旧矿坑而形成的各种地下建筑。

②土层中的地下建筑:包括采用明挖法施工的浅埋通道和地下室,以及在深层土体中采用暗挖法施工的深埋通道和地下建筑。

(3)按习惯称谓分类

当地下建筑独立地修建在地层内,在其地面直接上方不再有其他的地面建筑物,称为单建式地下建筑;各种地面建筑物的地下室部分,称为附建式地下建筑。

(4)按埋置深度分类

①深埋地下建筑。洞顶衬砌外缘至地面的垂直距离 h 与洞顶衬砌外缘的跨度或圆洞的直径 b 的比值

$$h/b \geq a \quad (1-1)$$

②浅埋地下建筑。洞顶衬砌外缘至地面的垂直距离 h 与洞顶衬砌外缘的跨度或圆洞的直径 b 的比值

$$h/b < a \quad (1-2)$$

式中 a 的取值,根据土压力理论计算约为 2.5。

国内有些设计部门建议,对于坚硬完整的岩体,其值可以降低为 1.0~2.0,但必须同时满足

$$h \geq (2.0 \sim 2.5)h_0 \quad (1-3)$$

式中: h_0 ——洞顶岩体压力拱的计算高度。

上述对地下建筑进行分类的因素中,工程所在位置、地层的性质、洞室的体型和埋置深度等,实质上又是由地下建筑的用途决定的。而洞室所在位置、地层性质、洞室体型和埋置深度等不同,对地下建筑所赋予的条件和影响也截然不同。

地下建筑由于处于一定厚度的土层或岩层的覆盖下,能满足一定的防护要求和创造特定的生产与生活环境。与地面建筑相比,地下建筑具有以下特点:

(1)自然防护力强

地下建筑上部有较厚的自然岩土覆盖,并可根据防护和使用要求确定其所需的自然覆盖层厚度,因而具有良好的防护性能,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。试验资料表明,大约 10m 厚的中等强度岩石,便可有效地防护 50kN 普通爆破弹的破坏作用;厚约 4~5m 的中等强度岩石,毛洞跨度不大于 5m 时,便可达到抵抗地面冲击波超压 1200kN/m² 的安全防护要求,而地面建筑则由于大部分暴露于地上,一般在 40kN/m² 的超压下即会完全破坏。同时地下建筑还可以利用天然岩土层的围护,对某些危险性产品的生产或储存起一定的隔离和限制作用,如弹药、油料等的生产或储存;将核电站设置在岩石地下建筑中要比设置在地面建筑中安全,防护距离也可相应的缩短。

(2)受外界条件影响小

由于地层具有良好的热稳定性和密闭性,因此,除口部地段外,地下建筑内部温度受外界影响很小,这对于大多数物资的储存非常有利。如在岩石中修建的地下冷库,可以不用或少用隔热材料,温度调节系统也比地面冷库简单,备用设备少,经常性的操作费用低,而且还具有良好的冷藏效果,即使在冷冻设备损坏或维修的情况下,也能在一周内保持一定的低温,使库内物资不发生变质。

另一方面,地下建筑的防震性和密闭性也比地面建筑要好,有利于抗震、抗振、排除地面尘土和电磁波的干扰,对于要求恒温、恒湿、超净、防微振、抗电磁波干扰的生产和生活用建筑非常适宜。

此外,利用地下建筑的密闭性,还可以将污水处理厂、核废料库等建于地下,这对于保护环境有着良好的效果。

(3)受地质条件影响大

岩土体的结构、强度及地下水位等,对于地下建筑的选址、平面的布置、净高和跨度的确定都有较大的影响。特别是在岩石地下建筑中,地质条件常常成为其选址和设计的重要依据。因此,岩石地下建筑的选址和规划设计必须在对较大范围内地下岩层做详细调查的基础上进行,以便选用最适合于地下建筑的区段,避开断层和高地应力区,选用合理的衬砌结构形式,并对地下水的影响采取一定的措施。

岩石地下建筑受地质条件的影响,还表现在围岩的稳定性、压力作用与地下建筑的跨度以及平面布置的密切关系。即在一般情况下,洞室的跨度越大,围岩越不稳定,地下建筑所受的围岩压力也越大。因此,岩石地下建筑在平面上不宜采用大跨、多跨或连续成片的布置,而应按使用要求,依据地质条件由若干个单体洞室组合而成,两平行洞室之间需要有一定厚度的岩柱以承受上覆岩体的部分荷载。

(4)需经通风、防排水、防潮、防噪声和照明等处理

地面建筑一般都是利用室内外空气压力(主要为热压和风压),用门窗进行自然通风,以保证室内生产、生活所需要的新鲜空气和适当的温度、湿度,并不断地排出污浊空气及生产、生活中所产生的余热余湿。但地下建筑与地面建筑不同,洞室内所需的空气必须从地面经洞口进入,排出的空气也要经洞口排至洞外。同时,由于地下温度比较稳定,单位时间内的传热量小,以及岩石裂隙中渗透水的存在等,使地下建筑内的余热、余湿难于自然散发,所以必须要有可靠的通风和防潮去湿措施,才能保证洞室的正常使用。如果地下建筑要求防护通风,则在通风系统上还要布置消波、除尘、滤毒等设施。所有这些都将对建筑设计及构造带来很大影响,使地下建筑具有明显的特殊性。

另一方面,由于洞室内完全见不到阳光,无论白天还是夜间,都需要人工照明。因此,特别是供平时使用的地下建筑,应考虑洞内的采光效果,使洞内有良好的工作环境。在洞口还要有灯光的过渡段(如采用光棚等),以适应人们视觉的调整。

此外,地下建筑多为封闭而狭长的空间,没有敞开的窗户,洞室内产生的各种声响传不出去。由于声的多次反射,声能衰减缓慢,因此混响声级强,混响时间长,在洞室内工作的人员,往往受到更为强烈的噪声干扰(指声源所产生的混响声级,直达声级是不会增高的)。洞内噪声常常影响讯息的传递(如讲话的清晰度受到影响),较强一点的噪声可能会引起人们耳鸣、头晕、头胀、烦躁、易疲劳、记忆力衰退等,严重影响人们的健康和降低工作效率。这就要求进行建筑设计时,必须正确掌握洞室内的各房间的使用特性,搞好洞内噪声的隔离和控制,并对洞室内进行必要的声学处理。

(5)施工条件特殊

地面建筑是采用“围”的办法构成使用空间,而地下建筑是使用“挖”的办法取得空间。因此,土石方工程量大,且由于地下施工作业面小、空间有限,环境潮湿,无论在施工方法和施工机具的使用上、构配件的材料和尺寸大小等方面与地面建筑都有区别。

由于地下建筑挖方工程量大,建设周期长,衬砌等结构费用高,再加上防护、通风、排水、防潮等的处理,所以总的来说,施工较复杂,一次投资较高。据资料介绍,一般岩石地下建筑的造价约比地面同类建筑的造价高出一倍左右。但在地质条件良好,施工机械化程度较高的情况下,有些地下建筑,如地下水电站就比地面同类型建筑的造价要经济。若将水电站的主厂房建在地下,不仅能获得最大的发电量,并在最低水位时能继续正常发电,还可使厂房选择在水道处于最良好的地质体中,且使有压引水管具有良好的垂直度,距离最短。压力管设于岩石中,可利用岩石承受水压力,从而大大简化水管的结构,节约大量的钢材和混凝土。

综合上述可以看出,地下建筑具有明显的特性,特别是从安全防护和具有良好的热稳定性和密闭性等方面创造的特殊条件,有着很大的优越性。加之它可以节约能源,保护环境,改善地面土地的利用,解决城市用地紧张和交通拥挤等矛盾,因此已作为现代城市和地区建设的新途径而逐渐被人们所掌握。有规划地建造各种地下建筑工程,对节约城市占地、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、提高工作效率和提高城市生活质量等方面,都会起到极其重要的作用。

1.2 地下建筑结构的结构形式和适用条件

地下建筑结构是地下工程的重要组成部分,其主要作用是承受地层和室内的各种荷载。它的结构形式应根据地层的类别、使用目的和施工技术水平等进行选择。按照结构形式的不同,地下结构可分为以下 8 类:

(1) 拱形结构

这类结构的顶部横剖面均属拱形,主要有:

① 半衬砌。

只做拱圈、不做边墙的衬砌称为半衬砌。当岩层较坚硬,整体性较好,侧壁无坍塌危险,仅顶部岩石可能有局部脱落时,可采用半衬砌结构。如图 1-1a)所示为半衬砌结构示意图,如图 1-1b)、c)所示表示落地拱。计算半衬砌时一般应考虑拱支座的弹性地基作用,施工时应保证拱脚岩层的稳定性。

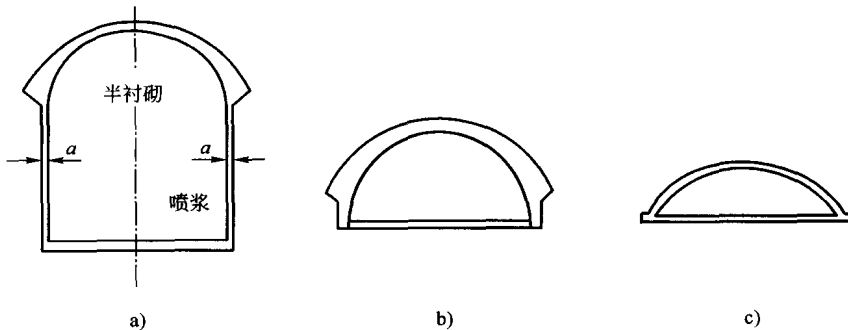


图 1-1 半衬砌结构

② 厚拱薄墙衬砌。

厚拱薄墙衬砌的拱脚较厚、边墙较薄。当洞室的水平压力较小时,可采用厚拱薄墙衬砌,如图 1-2 所示。这种衬砌的受力特点是将拱圈所受的荷载通过扩大的拱脚传给岩层,使边墙的受力减小,节省建筑材料和减少石方开挖量。

③ 直墙拱顶衬砌。

这是岩石地下工程中采用最普遍的一种结构形式。它由拱圈、竖直边墙和底板(或仰拱)组成,如图 1-3 所示。对有一定水平压力的洞室,可采用直墙拱顶衬砌。此类衬砌与围岩之间的间隙应回填密实,使衬砌与围岩能整体受力。

④ 曲墙拱顶衬砌。

曲墙拱顶衬砌由拱圈、曲墙和底板(或仰拱)组成,如图 1-4 所示。当围岩的垂直压力和水平压力都比较大时,可采用曲墙拱顶衬砌。如遇洞室底部地层软弱或为膨胀性地层时,应采用

底部结构为仰拱的曲墙拱顶衬砌,将整个衬砌围成封闭形式,以加大结构的整体刚度。

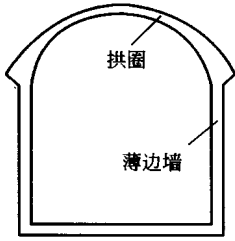


图 1-2 厚拱薄墙衬砌

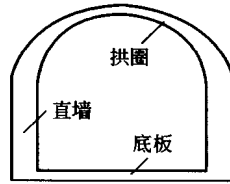


图 1-3 直墙拱顶衬砌

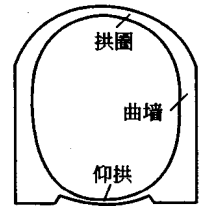


图 1-4 曲墙拱顶衬砌

⑤ 离壁式衬砌。

离壁式衬砌的拱圈和边墙均与岩壁相脱离,其间空隙不做回填,仅将拱脚处局部扩大,使其延伸至岩壁并与之顶紧,如图 1-5 所示。当围岩基本稳定时可采用离壁式衬砌。这时对毛洞的壁面常需进行喷浆围护,以防止围岩风化剥落。

⑥ 装配式衬砌。

由预制构件在洞内拼装而成的衬砌称为装配式衬砌,如图 1-6 所示。采用装配式衬砌可加快施工速度,提高工程质量。

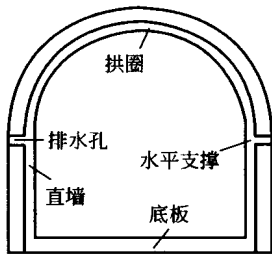


图 1-5 离壁式衬砌

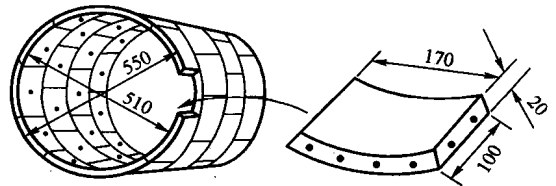


图 1-6 装配式衬砌

⑦ 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,如图 1-7 所示。复合式衬砌的外层常为锚喷支护,内层常为整体式衬砌。

(2) 梁板式结构

在浅埋地下建筑中,梁板式结构的应用也很普遍,如地下医院、教室等。这种结构常用在地下水位较低的地区,或要求防护等级较低的工程中。顶、底板做成现浇钢筋混凝土梁板式结构,而围墙和隔墙可采用砖墙。图 1-8 所示为一防空地下室的梁板式结构横剖面图。

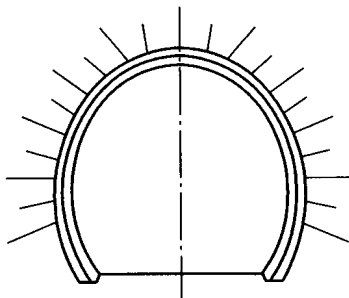


图 1-7 复合式衬砌

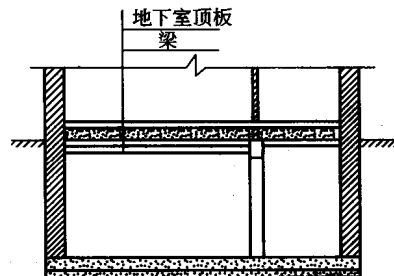


图 1-8 梁板式结构

(3) 框架结构

在地下水位较高或防护等级要求较高的地下工程中,一般除内部隔墙外,均做成箱形闭合框架钢筋混凝土结构。对于高层建筑,地下室结构都兼作为箱形基础。

在地下铁道、软土中的地下厂房、地下医院和地下指挥所,以及地下发电厂中也常采用框架结构。如图 1-9 所示为一地铁通道的横断面图。

沉井式结构的水平断面也常做成矩形单孔、双孔或多孔结构等形式。如图 1-10 所示为一矩形多孔沉井式结构的典型形式。

断面大而短的顶管结构常采用矩形结构或多跨箱涵结构,这类结构的横断面也属于框架结构。

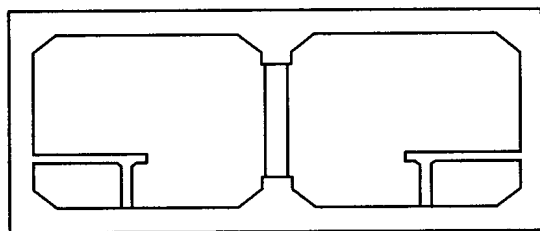


图 1-9 框架结构

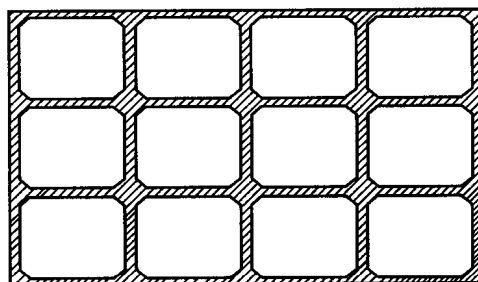


图 1-10 多孔沉井式结构

(4) 圆管形结构

当地层土质较差、靠其自承能力可维持稳定的时间很短时,对中等埋深以上土层的地下结构常以盾构法施工,其结构形式相应的采用装配式管片衬砌。该类衬砌的断面外形常为圆形,与盾构的外形一致,如图 1-6 所示。盾构一般是圆柱形的钢筒,依靠盾尾千斤顶沿纵向支撑在已拼装就位的管片衬砌上向前推进。装配式管片一般在盾构钢壳的掩护下就地拼装,经过循序交替挖土、推进和拼装管片,就可建成装配式圆形管片结构。将平行修建的装配式圆形管片结构横向连通,即可成为多孔式的隧道结构。

断面小而长的顶管结构一般也采用圆管形结构。

(5) 地下空间结构

地下立式油罐一般由球形顶壳、圈梁、圆筒形边墙和圆形底板组成,常称为穹顶直墙结构,如图 1-11 所示,它的顶盖就属于空间壳体结构。软土中的地下工厂有的采用圆形沉井结构,它的顶盖也采用空间壳体结构。而用于软土中明挖施工的一些地下仓库、地下商店、地下礼堂等的顶盖,也采用空间结构。

坑道交叉接头常称为岔洞结构,如图 1-12 所示为岔洞结构的一种形式。

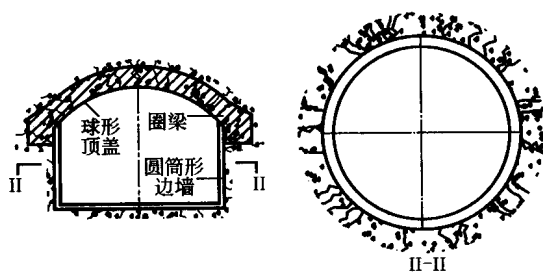


图 1-11 地下立式油罐

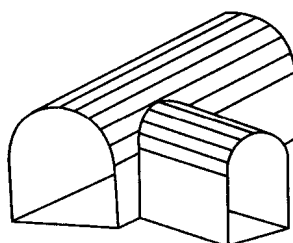


图 1-12 岔洞结构

(6) 锚喷支护

锚喷支护是在毛洞开挖后及时地采用喷射混凝土、钢筋网喷射混凝土、锚杆喷射混凝土或锚杆钢筋网喷射混凝土等方式对地层进行加固,如图 1-13 所示。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承能力维护洞室稳定,其受力性能一般优于整体式衬砌。

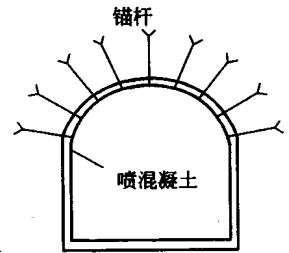


图 1-13 锚喷支护

(7) 地下连续墙结构

用地下连续墙方法修建地下结构比用明挖法和沉井法施工有许多优点和特色,当遇到施工场地狭窄时可优先考虑采用地下连续墙结构。用挖槽设备沿墙体挖出沟槽,以泥浆维持槽壁稳定,然后吊入钢筋笼架并在水下浇灌混凝土,即可建成地下连续墙结构的墙体。建成墙体以后,可在墙体的保护下明挖基坑,或用逆作法施工修建底板和内部结构,最终建成地下连续墙结构。如图 1-14 所示为地下连续墙墙体结构施工过程的示意图。

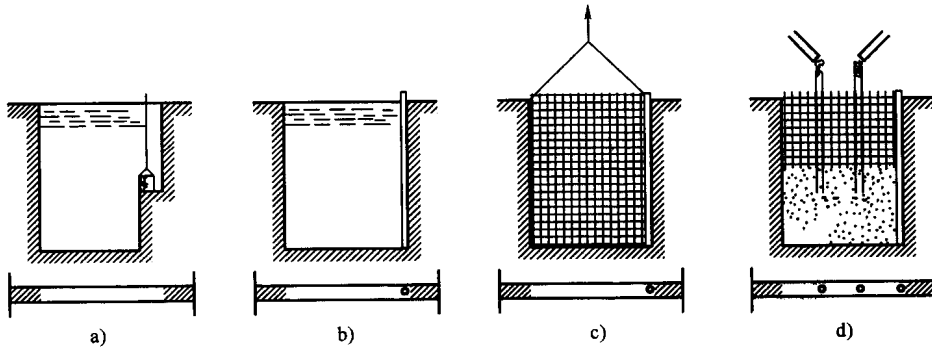


图 1-14 地下连续墙墙体结构施工过程的示意图

a) 开挖槽段; b) 放置接头管; c) 吊放钢筋笼; d) 浇注混凝土

(8) 开敞式结构

用明挖法施工修建的地下构筑物,需要有和地面连接的通道,它是由浅入深的过渡结构,称为引道。在无法修筑顶盖的情况下,一般都做成开敞式结构。矿石冶炼厂的料室等通常也做成开敞式的地下结构。如图 1-15 所示为水底隧道引道采用的开敞式结构的断面示意图。当遇到地下水压较大时,开敞式结构一般应考虑设置抗浮措施。

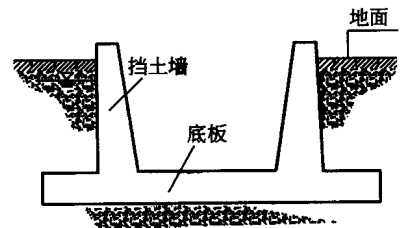


图 1-15 开敞式结构

1.3 地下结构设计方法概述

早期地下工程的建设完全依据经验,19 世纪初才逐渐形成自己的计算理论,开始用于指导地下结构物设计与施工。

在地下结构计算理论形成的初期,人们仅仅仿照地面结构的计算方法进行地下结构物的计算,这些方法可归类为荷载结构法,包括框架内力的计算、拱形直墙结构内力的计算等。然而,由于地下工程所处的环境条件与地面建筑是全然不同的,引用地面结构的设计理论和方法来解决地下工程中所遇到的各类问题,常常难以正确地阐述地下工程中出现的各种力学现象和过程。经过较长时间的实践,人们逐渐认识到地下结构与地面结构受力变形特点不同的事

实,并形成以考虑地层对结构受力变形的约束作用为特点的地下结构理论。20世纪中期,电子计算机的出现和现代计算力学的发展,大大推动了岩土力学和工程结构等学科的研究,地下结构的计算理论也因此有了更大的发展。

从地下结构设计理论发展的历史沿革,大致可分为以下几个阶段:

(1)刚性结构阶段

早期的地下建筑物大都是用砖石等材料砌筑的拱形圬工结构。这类材料的抗拉强度很低,为了保持结构的稳定,其截面尺寸通常都很大,结构受力后的弹性变形很小。这一时期的计算理论实际上是模仿石拱桥的设计方法,采用将地下结构视为刚性结构的压力线理论。这种理论认为,地下结构是由一系列刚性块组成的拱形结构,所受的主动荷载是地层压力,当地下结构处于极限平衡状态时,它是由绝对刚体组成的三铰拱静定体系,铰的位置分别假设在墙底和拱顶,其内力可按静力学原理进行计算。

对于作用在地下结构上的压力,认为是结构顶部上覆岩层的重力。其代表性的理论有海姆(A. Haim)理论、朗肯(W. J. M. Rankine)理论和金尼肯(A. Н. Диник)理论。不同之处在于他们对地层水平压力的侧压系数有不同的理解,海姆认为侧压系数为1,朗肯根据散体理论认为侧压系数

$$\lambda = \tan^2(45^\circ - \phi/2) \quad (1-4)$$

式中: ϕ ——岩土体的内摩擦角。

而金尼肯根据弹性理论认为侧压系数

$$\lambda = \frac{\mu}{1-\mu} \quad (1-5)$$

式中: μ ——岩土体的泊松比。

刚性设计方法只考虑衬砌承受其周围岩土所施加的荷载,没有考虑围岩自身的承载能力,也不计围岩对衬砌变形的约束和由此产生的围岩被动抗力,在一般情况下设计出的衬砌厚度偏大。

(2)弹性结构阶段

19世纪后期,混凝土和钢筋混凝土材料开始应用于地下结构中,与此同时,人们将超静定结构计算力学引入到地下结构计算中,并考虑了地层对结构产生的弹性抗力作用。

1910年,康姆列尔(O. Kommerall)在计算整体式隧道衬砌时,率先假设刚性边墙受有成直线形分布的弹性抗力作用,建立了将整体式结构的拱圈和边墙分开计算,并将拱圈视为支承在固定支座上的无铰拱的计算方法。其后,许多学者相继提出了假定抗力图形的计算方法,并采用了局部变形的文克尔假定。如Johnson(1922年)等人将地层弹性抗力分布假设为梯形;朱拉波夫(Г. Г. Зуробов)和布加耶娃(О. Е. Бусаева)假定抗力为镰刀形。由于假定抗力法对抗力图形的假定带有任意性,稍后人们开始研究将边墙视为双向弹性地基梁的地下结构计算理论。С. Н. Наймов在1956年将其发展为按局部变形弹性地基梁理论计算直边墙的地下结构算法。此后,共同变形弹性地基梁理论也被用于地下结构的计算。1939年和1950年,达维多夫(С. С. ДаВЫДОВ)两次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)进一步研究了按地层共同变形理论计算地下结构的方法。1964年,舒尔茨(S. Schuze)和杜德科(H. Dudek)在分析圆形衬砌时,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。

按共同变形理论计算地下结构,其优点在于它是以地层的物理力学特征为依据,并考虑了各部分地层沉陷的相互影响,在理论上比局部变形理论有所改进。

(3) 连续介质阶段

自 20 世纪以来,按连续介质力学理论计算地下结构内力的方法逐渐得到了发展。在初期,人们曾致力于建立这类计算理论的解析解,但由于遇到数学上的困难,迄今为止仅对圆形衬砌的计算有较多研究成果。自 20 世纪 60 年代以来,随着电算技术的普及和岩土介质本构关系研究的进步,地下结构的数值计算方法有了较大的发展,1966 年, S. F. Reyes 和 D. U. Deere 应用 Drucker-Prager 准则进行了圆形洞室的弹塑性分析。1968 年, 辛克维茨(O. C. Zienkiewicz)等按无拉应力分析了隧道的应力和变形,提出了可按初应力释放法模拟隧洞开挖效应的概念。1975 年, F. H. Kuhawy 用有限元法探讨了儿种因素对地下洞室受力变形的影响和开挖面附近隧洞围岩的三维应力状态,开始将力学分析引入非连续岩体和施工过程研究的计算。从 20 世纪 70 年代起,我国学者在这一领域也做了大量研究工作,已经建立的计算方法包括地下洞室的弹性计算法、弹塑性计算法、黏弹性计算法和弹黏塑性计算法等。

连续介质理论较好地反映了支护与围岩的共同作用,符合地下结构的力学原理。然而,由于岩土的计算参数(如原岩应力、岩体力学参数、施工因素等)难以准确获得,人们对岩土材料的本构模型与围岩的破坏失稳准则还认识不足。因此,目前根据连续介质理论所得出的计算结果,还只能作为设计参考依据。

(4) 现代支护理论阶段

20 世纪 50 年代以来,喷射混凝土和锚杆被用于隧道支护,与此相应的一整套新奥地利隧道设计方法随之兴起,形成了以岩体力学原理为基础的、考虑支护与围岩共同作用的地下工程现代支护理论。

新奥地利隧洞施工法的英文全名为 New Austrian Tunnelling Method, 简称为 NATM。新奥法认为围岩本身具有“自承”能力,如果能采用正确的设计施工方法,最大限度地发挥这种“自承”能力,可以得到最好的经济效果。它的要点就是:尽可能不破坏围岩中的应力分布,开挖之后立即进行一次支护,防止岩石进一步的松动,然后视需要进行二次支护。按新奥法设计的支护都是柔性的,能较好地适应围岩的变形。

新奥法在设计理论上还不很成熟,目前常用的方法是先用经验统计类比的方法做事先的设计,再在施工过程中不断监测围岩应力应变状况,按其发展规律不断调整支护措施。

地下结构理论的另一类内容,是关于岩体中由于节理裂隙切割而形成的不稳定块体的失稳分析,一般应用工程地质和力学计算相结合的分析方法,即岩石块体极限平衡分析法。这种方法是在工程地质的基础上,根据极限平衡理论,研究岩块形状和大小与塌落条件之间的关系,以确定支护参数。

近年来,在地下结构中主要使用的工程类比法,也在向着定量化、精确化和科学化发展。与此同时,在地下结构设计中应用可靠性理论,推行概率极限状态设计法,采用动态分析方法,即利用现场监测信息,从反馈信息的数据预测地下工程的稳定性,从而对支护结构进行优化设计等方面也取得了重要进展。

应当看到,由于岩土体的复杂性,地下结构设计理论还处在不断发展阶段,各种设计方法还需要不断提高和完善。后期出现的设计计算方法一般也并不否定前期的研究成果,各种计算方法都有其比较适用的一面,但又各自带有一定的局限性。设计者在选择计算方法时,应对其有深入的了解和认识。

国际隧道协会(ITA)在 1987 年成立了隧道结构设计模型研究组,收集和汇总了各会员国目前采用的地下结构设计方法。经过总结,国际隧道协会认为,目前采用的地下结构设计方法

可以归纳为以下四种设计模型:

- ①以参照过去地下工程实践经验进行工程类比为主的经验设计法。
- ②以现场量测和试验室试验为主的实用设计方法,例如以洞周位移量量测值为基础的收敛-约束法。
- ③作用-反作用模型,即荷载-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。
- ④连续介质模型,包括解析法和数值法。

由于地下结构的设计受各种复杂因素的影响,因此经验设计法至今仍占据一定的位置。即使内力分析采用了比较严密的理论,其计算结果往往也需要用经验类比来判断和补充。以测试为主的实用设计方法常受现场人员青睐,因为它能提供直觉的材料,以更确切地估计地层和地下结构的稳定性和安全程度。理论计算法可以用于进行无经验可循的新型结构设计,基于作用-反作用模型和连续介质模型的计算理论已成为一种特定的计算手段而受到人们的重视。当然,工程设计人员进行地下结构设计时,一般应进行多个方案的比较,以作出更为经济合理的设计。

1.4 地下建筑结构设计内容及计算原则

地下建筑结构设计内容包括横向结构设计、纵向结构设计和出入口设计。

(1) 横向结构设计

在地下建筑中,一般结构的纵向较长,横断面沿纵向通常都是相同的。沿纵向方向上的荷载在一定区段上也可以认为是均匀不变的,相对于结构的纵向长度来说,结构的横向尺寸不大,可认为力总是沿横向传递的。计算时通常沿纵向截取 1m 的长度作为计算单元,即把一个空间结构简化成单位延米的平面结构按平面应变进行分析。

横向结构设计主要分荷载确定、计算简图、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

横断面设计后,得到结构的横断面尺寸和配筋,但是沿结构纵向需配多少钢筋,是否需要沿纵向分段,每段长度多少等,则需要通过纵向结构设计来解决。特别是在软土地基和通过不良地质地段情况下,如跨活断层或地裂缝时,更需要进行纵向结构计算,以验算结构的纵向内力和沉降,确定沉降缝的设置位置。

工程实践表明:当隧道过长或施工养护注意不够时,混凝土会产生较大损伤,使沿纵向产生环向裂缝;在靠近洞口区段由于温度变化也会产生环向裂缝。这些裂缝会使地下建筑渗水漏水,影响正常使用。为保证正常使用,就必须沿纵向设置伸缩缝。伸缩缝和沉降缝统称为变形缝。

从已发现的地下工程事故来看,较多的是因为纵向设计考虑不周而产生裂缝,故在设计和施工时应予以充分注意。

(3) 出入口设计

一般地下建筑的出入口,结构尺寸较小但形式多样,有坡道、竖井、斜井、楼梯、电梯等,人防工程口部则设有洗尘设施及防护密闭门。从使用上讲,无论是平时或战时,地下建筑的出入口都是很关键部位,设计时必须给予充分重视,应做到出入口与主体结构强度相匹配。

在地下结构与计算中,应遵循以下原则: