

普通高等学校土木工程专业新编系列教材
中国土木工程学会教育工作委员会 审订

地下工程结构

(新1版)

D X G C J G

主 编 吴能森
副主编 熊孝波
王照宇



WUTP

武汉理工大学出版社

普通高等学校土木工程专业新编系列教材
中国土木工程学会教育工作委员会 审订

地下工程结构

(新1版)

主 编 吴能森
副主编 熊孝波 王照宇

武汉理工大学出版社
· 武汉 ·

内 容 提 要

本教材是土木工程专业地下工程方向本科系列教材之一,较系统地介绍各种类型的地下结构,着重基本概念、基本原理和方法,重点突出,注重实用。

全书共分14章。第1章为绪论,简要介绍地下空间开发与地下空间的利用形态、地下结构的概念及其作用、地下结构的形式与特点等;第2章重点介绍地下结构上的围岩压力和爆炸荷载;第3章主要介绍地下结构可靠指标的若干近似计算方法及地下结构体系的可靠度分析评价;第4章介绍地下工程结构设计的模型与方法;第5章至第14章,分别介绍了浅埋式地下结构、附建式地下结构、逆作法地下结构、基坑围护及支撑结构、沉井结构、盾构隧道结构、整体式隧道结构、沉管结构、顶管结构及箱涵结构、其他地下结构。

本书可作为普通高等学校土木工程本科专业地下工程方向的必修课教材和大土木其他专业方向的选修课教材,也可供从事相关专业的设计和施工技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

地下工程结构(新1版)/吴能森主编. —武汉:武汉理工大学出版社,2010.3
ISBN 978-7-5629-3076-1

- I. 地…
- II. 吴…
- III. 地下工程—结构设计
- IV. TU93

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 032213 号

出版发行:武汉理工大学出版社(武汉市洪山区珞狮路122号 邮编430070)

<http://www.techbook.com.cn> 理工图书网

经 销 者:各地新华书店

印 刷 者:武汉理工大印刷厂

开 本:880×1230 1/16

印 张:13.75

字 数:446千字

版 次:2010年3月第1版

印 次:2010年3月第1次印刷

印 数:3000册

定 价:25.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请向出版社发行部调换。

本社购书热线电话:(027)87394412 87383695 87384729

前 言

21 世纪是一个充满希望与活力、再创人类奇迹的世纪。人们普遍认为,21 世纪是人类开发利用地下空间的世纪。这对于从事地下工程领域学习和研究的人员来说,既是一种机遇,也面临巨大挑战。随着我国国民经济的发展和地下空间的开发与利用,需要许许多多具有创新思维和基础扎实的工程技术人才,对地下结构工程设计与施工技术的掌握显得愈发重要。因此现在的土木工程专业学生,很有必要学习地下结构工程的基本理论和基础知识。为了适应这一要求,编写了本教材。

本教材的编写注重基础性、通用性、实用性、新颖性和先进性,取材广泛、内容丰富,尽量反映当前国内外地下工程技术水平。本书不仅适合矿山、铁路、公路、水利水电和城市地下空间等方向开设地下工程课程的高等学校使用,也可供相关专业的教师、研究生和工程技术人员学习、参考。

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 2002 年编制的《地下建筑结构》教学大纲以及国内出版的有关地下工程和地下结构方面的专著或教材,主要参考文献列于书末,书中不再一一注明,特此说明并向作者表示诚挚的谢意!

本书由吴能森教授任主编,熊孝波副教授和王照宇副教授任副主编。各章编写分工为:第 1、2、5、6、7、10、12 章由吴能森教授编写;第 3、4、11、13 章由熊孝波副教授编写;第 8、9、14 章由王照宇副教授编写。陈海明参与了第 3 章部分内容的编写,王艳丽参与了第 4 章部分内容的编写,李芬副教授和王艳丽参与了第 11 章部分内容的编写。全书由吴能森教授校阅和统稿。

本书虽经多次修改,但由于时间仓促和水平所限,错误或不妥之处在所难免,敬请同行专家和读者批评指正,以便在再版中得到改正和完善,特此表示衷心的感谢。

本书得到了武汉理工大学出版社的大力支持和帮助,在此一并表示感谢!

编 者

2009 年 10 月

目 录

1 绪论	(1)
1.1 地下空间	(1)
1.1.1 地下空间开发	(1)
1.1.2 地下空间的利用形态	(2)
1.2 地下结构	(4)
1.2.1 地下结构的概念及其作用	(4)
1.2.2 地下结构的形式	(4)
1.2.3 地下结构的特点	(7)
1.3 本课程的内容和任务	(7)
思考题与习题	(8)
2 地下结构荷载	(9)
2.1 概述	(9)
2.2 地下结构的地质环境	(9)
2.2.1 围岩及其分级	(10)
2.2.2 围岩初始应力、释放荷载与地层抗力	(11)
2.3 围岩压力	(13)
2.3.1 围岩压力及其影响因素	(13)
2.3.2 垂直围岩压力计算	(13)
2.4 爆炸效应与爆炸荷载	(16)
2.4.1 核武器与常规武器的爆炸效应	(16)
2.4.2 核爆炸荷载	(19)
2.4.3 常规武器爆炸荷载	(24)
思考题与习题	(28)
3 地下结构可靠度理论	(29)
3.1 概述	(29)
3.1.1 地下工程结构的不确定因素	(29)
3.1.2 地下工程结构可靠度分析的特点	(30)
3.2 可靠度分析的基本原理	(30)
3.2.1 结构极限状态和极限状态方程	(31)
3.2.2 地下工程结构的可靠度	(31)
3.2.3 可靠度分析方法的四个层次	(34)
3.3 可靠度分析的近似方法	(34)
3.3.1 一次二阶矩法	(34)
3.3.2 验算点法	(35)
3.3.3 当量正态化法(JC法)	(37)
3.3.4 结构体系的可靠度分析	(39)
思考题与习题	(41)
4 地下工程结构的设计理论与方法	(42)
4.1 概述	(42)

4.1.1	地下工程结构计算方法的发展	(42)
4.1.2	地下工程结构的设计模型	(42)
4.2	经验设计方法	(44)
4.2.1	选择支护类型与参数原则	(44)
4.2.2	其他设计与施工原则	(45)
4.2.3	新奥法施工	(46)
4.3	荷载-结构法	(47)
4.3.1	荷载-结构模型的建立	(47)
4.3.2	隧道衬砌结构受力变形特点	(48)
4.3.3	支护结构的计算方法	(48)
4.4	地层-结构法	(48)
4.4.1	解析法	(49)
4.4.2	数值法	(49)
4.4.3	特征曲线法	(49)
4.5	地层-结构法的数值模拟及求解方法	(50)
4.5.1	地层的模拟	(50)
4.5.2	施工过程的模拟	(50)
4.5.3	结构的模拟	(51)
4.5.4	地层与结构的相互作用	(51)
	思考题与习题	(52)
5	浅埋式地下结构	(53)
5.1	概述	(53)
5.1.1	直墙拱形结构	(53)
5.1.2	矩形闭合结构	(53)
5.1.3	梁板式结构	(54)
5.2	矩形闭合结构	(54)
5.2.1	设计计算要点	(54)
5.2.2	构造要求	(58)
	思考题与习题	(61)
6	附建式地下结构	(62)
6.1	概述	(62)
6.2	附建式地下结构的形式	(63)
6.2.1	梁板式结构	(63)
6.2.2	板柱结构	(63)
6.2.3	箱形结构	(63)
6.2.4	框架结构	(64)
6.2.5	拱壳结构	(64)
6.2.6	外墙内框、墙板结构	(64)
6.3	附建式地下结构的设计要点	(65)
6.3.1	荷载组合	(65)
6.3.2	内力计算与截面设计方法	(66)
6.4	梁板式结构	(67)
6.4.1	顶板	(67)
6.4.2	侧墙	(70)

6.4.3	基础	(71)
6.5	防空地下室口部构件与构造要求	(72)
6.5.1	口部构件	(72)
6.5.2	构造要求	(74)
	思考题与习题	(77)
7	逆作法地下结构	(78)
7.1	概述	(78)
7.2	地下连续墙	(79)
7.2.1	地下连续墙施工方法、特点及适用性	(79)
7.2.2	地下连续墙的设计内容	(80)
7.2.3	地下连续墙的内力计算方法	(82)
7.3	中间支承柱	(85)
7.3.1	中间支承柱的结构形式	(86)
7.3.2	中间支承柱的做法	(86)
7.3.3	中间支承柱的承载力验算	(87)
7.4	逆作法施工的连接接头	(89)
7.4.1	地下连续墙接头	(89)
7.4.2	地下连续墙与梁的连接	(90)
7.4.3	地下连续墙与地下室底板的连接	(92)
7.4.4	中间支承柱与梁的连接	(93)
7.5	逆作法地下室结构浇筑	(94)
7.5.1	利用土模浇筑梁板	(94)
7.5.2	利用支模方式浇筑梁板	(94)
7.5.3	施工缝处的浇筑	(95)
	思考题与习题	(96)
8	基坑围护及支撑结构	(97)
8.1	概述	(97)
8.1.1	基坑围护的结构类型	(97)
8.1.2	基坑支撑的结构类型	(99)
8.1.3	基坑围护和支撑结构的选择	(100)
8.2	常见基坑围护结构及构造	(102)
8.2.1	桩(墙)式围护结构	(102)
8.2.2	水泥土墙重力式围护结构	(107)
8.3	基坑稳定性验算	(112)
8.3.1	坑底抗隆起稳定性	(112)
8.3.2	坑底抗渗流稳定性	(113)
8.3.3	整体稳定性	(114)
8.4	基坑变形估算	(114)
8.4.1	坑底隆起变形估算	(115)
8.4.2	坑外地表沉降估算	(115)
	思考题与习题	(117)
9	沉井结构	(118)
9.1	概述	(118)
9.1.1	沉井结构的概念、特点及应用	(118)

9.1.2	沉井设计一般要求	(118)
9.1.3	沉井的施工步骤	(119)
9.2	沉井结构的类型与构造	(119)
9.2.1	沉井结构的类型	(119)
9.2.2	沉井结构的构造	(119)
9.3	沉井结构的施工计算	(122)
9.3.1	下沉系数验算	(122)
9.3.2	抗浮稳定验算	(123)
9.3.3	沉井刃脚验算	(123)
9.3.4	沉井井壁计算	(125)
9.3.5	沉井底节验算	(126)
9.3.6	沉井底板计算	(127)
9.3.7	沉井封底计算	(127)
9.4	沉井施工引起的土体移动	(130)
9.4.1	沉井的影响范围	(130)
9.4.2	减少沉井对周围土体影响的措施	(130)
	思考题与习题	(131)
10	盾构隧道结构	(132)
10.1	盾构法	(132)
10.1.1	概述	(132)
10.1.2	盾构的基本组成	(133)
10.1.3	盾构类型	(134)
10.1.4	盾构几何尺寸的选定及推力确定	(136)
10.2	衬砌类型和构造	(138)
10.2.1	衬砌的形式与选型	(138)
10.2.2	衬砌的分类与比较	(138)
10.2.3	装配式钢筋混凝土管片构造	(140)
10.2.4	管片接头构造	(140)
10.2.5	其他构造	(142)
10.3	衬砌管片结构设计	(142)
10.3.1	设计原则	(142)
10.3.2	内力计算方法	(143)
10.3.3	荷载计算	(143)
10.3.4	衬砌内力计算	(145)
10.3.5	管片截面设计	(147)
10.4	隧道防水	(148)
10.4.1	衬砌的抗渗	(148)
10.4.2	管片制作精度	(148)
10.4.3	接缝防水材料	(149)
10.4.4	二次衬砌	(149)
10.4.5	其他	(149)
	思考题与习题	(150)
11	整体式隧道结构	(151)
11.1	概述	(151)

11.1.1	结构形式、受力特点和适用条件	(151)
11.1.2	隧道结构设计的一般技术要求	(152)
11.2	喷锚支护与复合衬砌结构	(153)
11.2.1	概述	(153)
11.2.2	围岩分级	(153)
11.2.3	喷锚支护设计	(154)
11.2.4	复合衬砌结构	(157)
11.3	半衬砌结构	(158)
11.3.1	计算图式、基本结构及正则方程	(159)
11.3.2	单位变位及荷载变位的计算	(159)
11.3.3	拱脚位移计算	(160)
11.3.4	拱圈截面内力	(161)
11.4	直墙拱结构	(162)
11.4.1	拱圈计算原理	(162)
11.4.2	边墙计算原理	(163)
11.5	连拱隧道结构	(163)
11.5.1	概述	(163)
11.5.2	连拱隧道的设计和计算方法	(164)
11.6	衬砌截面强度验算	(166)
	思考题与习题	(167)
12	沉管结构	(169)
12.1	概述	(169)
12.1.1	沉管法施工原理	(170)
12.1.2	沉管隧道的特点	(170)
12.2	沉管结构设计	(171)
12.2.1	沉管结构类型	(172)
12.2.2	沉管结构荷载	(172)
12.2.3	管段浮力设计	(173)
12.2.4	结构分析与配筋	(173)
12.3	管段防水	(175)
12.3.1	管段防水发展沿革	(175)
12.3.2	钢壳与钢板防水	(175)
12.3.3	卷材防水与涂料防水	(175)
12.3.4	变形缝与止水缝带	(176)
12.4	管段沉放与水下连接	(177)
12.4.1	管段出坞	(177)
12.4.2	管段浮运	(178)
12.4.3	沉设方法与设备	(179)
12.4.4	水下连接	(181)
12.5	沉管基础	(183)
12.5.1	沉管结构对地基的要求	(183)
12.5.2	基础处理	(183)
12.5.3	软弱土层中的沉管基础	(185)
	思考题与习题	(186)

13 顶管结构及箱涵结构	(187)
13.1 顶管结构.....	(187)
13.1.1 概述.....	(187)
13.1.2 顶管的分类.....	(187)
13.1.3 顶管施工的基本原理.....	(188)
13.1.4 顶管工程的设计计算.....	(188)
13.1.5 顶管施工的主要设备.....	(192)
13.2 箱涵结构.....	(196)
13.2.1 结构形式.....	(196)
13.2.2 箱涵的设计内容和步骤.....	(196)
13.2.3 作用在箱涵上的荷载.....	(196)
13.2.4 箱涵结构设计计算.....	(199)
13.2.5 沉降缝的设置.....	(199)
13.2.6 涵管顶进施工法.....	(200)
思考题与习题.....	(200)
14 其他地下结构简介	(201)
14.1 穹顶直墙衬砌结构.....	(201)
14.1.1 衬砌的结构形式与尺寸.....	(201)
14.1.2 衬砌构造.....	(202)
14.1.3 计算原理.....	(202)
14.2 洞门.....	(202)
14.2.1 洞门的形式.....	(203)
14.2.2 洞门尺寸和构造.....	(204)
14.2.3 洞门墙计算简介.....	(205)
14.3 岔洞.....	(206)
14.3.1 岔洞形式.....	(206)
14.3.2 岔洞的构造要求及计算方法.....	(207)
14.4 竖井和斜井.....	(207)
14.4.1 竖井的构造.....	(207)
14.4.2 斜井的构造.....	(208)
思考题与习题.....	(209)
参考文献	(210)

1 绪 论

本章提要

- (1) 地下空间开发与地下空间的利用形态;
- (2) 地下结构的概念及其作用;
- (3) 地下结构的形式与特点;
- (4) 本课程的内容和任务。

1.1 地下空间

1.1.1 地下空间开发

当代人类社会的生存和发展所面临的最大问题是人口爆炸式增长和生活需求的无止境增长与自然条件的日益恶化、自然资源的渐趋枯竭之间的矛盾。这一矛盾反映在生存空间上,表现为日益增多的人口与地球陆地表面空间容纳能力不足的矛盾。在城市发展上,则表现为扩大城市空间容量的需求与城市土地资源紧缺的矛盾,这种现象称为生存空间危机。

从耕地面积来看,在全球现有的 $15 \times 10^6 \text{ km}^2$ 耕地不再减少的情况下,如果 2050 年的世界人口达到 150 亿,土地供养人口的能力将达到极限。我国人口占世界人口的 22%,而人均耕地面积仅为世界平均水平的 30%,即使按较低的粮食消费标准计,在现有 $1 \times 10^6 \text{ km}^2$ 耕地不再减少的前提下,每公顷可耕地年产粮能力必须达到 9 600 kg,才能供养 16 亿人(2050 年)。也就是说,我国的生态空间将在 2050 年前后达到饱和,比世界平均水平提前 100 年。况且,要求可耕地不再减少是很困难的,仅 1993 年全国耕地减少量就相当于 13 个中等县的耕地面积。

从生活空间来看,要容纳不断增加的人口并提高生活质量,也需要大量的土地。1987 年,我国包括城市用地和农村居民点用地占国土总面积的 6.9%,约为 $6.62 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。到 21 世纪中叶,如果我国国民经济总体上达到当时中等发达国家的水平,则城市化水平必须从 1990 年的 19% 提高到 65% 左右,即城市人口要从 2.1 亿增加到 10.4 亿,净增 8.3 亿人。以城市人均用地 120 m^2 计,需要土地 $1 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。如果进入城市的农村人口中有 20% 放弃在农村的居住用地,按人均用地 160 m^2 计,可扣除 $2.66 \times 10^4 \text{ km}^2$,即总的生活空间用地需增加 $7.34 \times 10^4 \text{ km}^2$,约相当于台湾、海南两省面积的总和,这无疑将给我国本已十分有限的可耕地造成巨大的压力。

可见,要解决人类的生存空间危机,除了尽量控制人口和节约资源外,必须扩展地球陆地以外的空间。人类要扩展自己的生存空间,不外乎有三条途径:宇宙空间,海底地下空间,陆地地下空间。显然,在当前和今后相当长时期内,开发陆地地下空间是唯一现实的途径。地球表面积为 $5.15 \times 10^8 \text{ km}^2$,陆地下岩石圈(地壳)平均厚度为 33 km。岩石圈每加深 100 m,温度就升高 $1.5 \sim 3 \text{ }^\circ\text{C}$,压力增加 2.736 MPa,到地壳底部,温度估计在 $1\ 000 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右,压力可能超过 900 MPa。因此,以目前的施工技术水平和维持人的生存所花费的代价来看,陆地地下空间的合理开发深度以 2 km 为宜。考虑地下空间之间留出 1.5 倍岩洞尺寸的岩体作为支承,2 km 以内的地下空间资源总量为 $4.12 \times 10^{17} \text{ m}^3$;再考虑地球表面的 80% 被海洋、森林、沙漠、江、河、湖、冰川和永久积雪等占据,全球可供有效利用的地下空间资源应为 $0.824 \times 10^{17} \text{ m}^3$ 。在我国,可耕地、城市和乡村居民点用地的面积约占国土总面积的 15%,按照上面的计算方法,2 km 以内可

供有效利用的地下空间资源总量接近 $11.5 \times 10^{14} \text{ m}^3$, 折合成的建筑面积(以平均层高 3 m 计)约 $3.83 \times 10^{14} \text{ m}^2$ 。不同开发深度时可获得的地下空间资源及可提供的建筑面积见表 1.1。

表 1.1 我国可供有效利用的地下空间资源

开发深度(m)	可供有效利用的地下空间(m^3)	可提供的建筑面积(m^2)
2 000	11.5×10^{14}	3.83×10^{14}
1 000	5.8×10^{14}	1.92×10^{14}
500	2.9×10^{14}	0.96×10^{14}
100	0.58×10^{14}	0.19×10^{14}
30	0.18×10^{14}	0.06×10^{14}

从表 1.1 中可见,以目前技术水平完全能够达到的开发深度 30 m 计,可提供的建筑面积为 $0.06 \times 10^{14} \text{ m}^2$;当 2050 年我国生活空间用地占国土面积 7.3% 时,这部分土地面积为 $7 \times 10^5 \text{ km}^2$;假定建筑密度为 30%,平均建筑层数 4 层,则这些土地上可容纳的建筑总量为 $8.4 \times 10^{11} \text{ m}^2$,仅占地下空间所能提供建筑面积的 14%。值得注意的是,以上是按开发深度 30 m 计算的。可以预见,到 21 世纪末,合理开发深度达到 100~150 m,在技术上是完全可行的。

20 世纪 80 年代,国际隧道协会提出“大力开发地下空间,开始人类新的穴居时代”的倡议,得到了广泛的响应。日本也提出了利用地下空间,把国土扩大 10 倍的设想。各国政府都把地下空间的利用作为一项国策来推行,使地下空间利用获得了迅速的发展。尤其是近年来,随着全球高度信息化、国际城市化的发展,城市对办公、商业、交通及停车等场所的需求持续增长,导致大城市中心区的地上空间高密度化和地价暴涨,世界上不少特大城市对于经济、高效地开发利用地下空间的呼声越来越高。地下空间的利用,已扩展到各个领域,发挥着重要的社会、经济效益,成为国家重要的社会资源。概括地说,开发利用地下空间,最重要的原因是大城市空间的严重不足,其次是为了保护历史建筑物和城市景观环境,再次是要充分利用和发挥地下空间的优越性。

1.1.2 地下空间的利用形态

地下空间利用的发展过程与人类的文明历史是相呼应的。在原始时代,人类就会利用自然洞穴作为穴居,随着科学技术和人类文明的发展,这种利用也从自然洞穴向人工洞室方向发展,而且利用的范围逐渐扩大,到现在地下空间利用的形态已千姿百态,已远远超出为个人生活服务的利用领域,归纳起来大致有以下几方面。

1.1.2.1 为人类生存、确保安全加以利用的地下工程

为人类生存、确保安全加以利用的地下工程包括地下生活设施和地下储藏设施:① 地下生活设施主要指用于个人生活的地下住宅、储藏室、车库及掩体等设施,我国西北黄土地区广泛修建的窑洞和东北寒冷地区用挖地下洞的方法来储藏蔬菜,都是这方面应用的成功实例。② 地下储藏设施是指储藏能源、粮食、生产和生活用水及放射性废弃物处理等大中型公共地下设施。石油、液化天然气等能源传统上采用竖型地下贮槽储藏,第二次世界大战后,利用水封技术发展了横型地下贮槽储藏;生产和生活用水的地下储藏设施包括储藏农业用水的地下坝和饮用水的地下储槽等,地下坝的形态有平地坝和盆地坝两类;地下放射性废弃物处理设施,一般都设置在地下 500~1 000 m 深处,做法大致是从地面开挖竖井达到良好岩体后,修建水平的隧道群,放入废弃物后加以埋设。

1.1.2.2 伴随城市的现代化发展而加以利用的地下工程

伴随城市的现代化发展而加以利用的地下工程包括地下商业街、地下停车场、地下铁道、地下市政管道、能源供给设施和上、下水道设施等:① 地下商业街包括店铺、地下广场、防灾中心、公用通道、台阶及其他附属设施,从目前的利用情况看,有广场型、街道型、复合型三种基本类型。② 地下停车场按设置场所分为公路地下停车场、公园地下停车场、广场地下停车场和建筑物地下停车场。地下停车场大多数是用升降道与地面连接,升降道可分为自行式和机械式两类。③ 地下铁道具有运量大(是公共汽车的 6~8 倍)、

速度快、运输成本低、安全、可靠、舒适等显著的优越性,目前是发达国家大城市公共交通的主要手段。地下铁道由区间隧道和车站组成,区间隧道一般有箱形和圆形两种断面,明挖法多采用箱形断面,盾构法则采用圆形断面。地铁车站从列车空间看,有单层、双层和多层之分,车站站台形式大体分为侧式和岛式两种。④ 地下市政管道是指设置通信电缆、电气、天然气、上下水道等两种以上地下埋设物的隧道,也称为共同管道。目前,市政公共地下管道网已成为城市不可缺少的基础设施之一,它对维持和提高城市功能、创造良好舒适的生活环境极为重要。共同管道原则上设在车道的下面,其平面线形与道路中心一致。共同管道由一般地段和特殊地段组成,一般地段指标准断面地段,特殊地段指支线、进物孔、进人孔等。城市地下能源供给设施主要指电力、天然气、石油以及冷暖源的地下供应基地。地下上水道设施包括地下水源地设施、取水设施、净化设施和供水设施;地下下水道设施包括汇集和排放污水的地下管路设施和污水处理设施等。

1.1.2.3 伴随科学技术发展而利用的地下工程

伴随科学技术发展而利用的地下工程有地下水力发电站、地下原子能发电站、地下核能发电站以及地下工厂等。地下水力发电站通常埋设在地下 100~300 m 的坚硬岩层中,初始地压 5.0~10.0 MPa,断面形状一般都采用应力集中较小的接近椭圆形的马蹄形断面,但也有采用直墙式的。利用最新科研成果和卓有成效的实践经验,把地上的生产设施移到地下,可达到防止噪声、防爆、防火、防震、保护地面景观、利用恒温和恒湿物理特性、经济节约的效果。如根据在地面下 3~5 m 以上,地中温度几乎不变,而且湿度也几乎恒定的特性,把冷冻工厂、冷冻仓库等生产设施设在地下,其隔热性能好,储藏在内部的热量不易逸散。美国曾将该特性利用于苗木栽培,其所需光线由电灯供给,因温度管理成本低,故成绩斐然。

1.1.2.4 大规模国土有效利用的地下工程

大规模国土有效利用的地下工程主要指城市间、国家间的交通建筑,如大规模的铁路、公路、管道运输设施以及海峡通道工程等。交通建筑与地下空间利用有着密切的关系,如铁道和公路的输送目的,是在短时间内把输送对象送到目的地,因此要求高速铁路和公路的路线尽量直线化和水平化,为此在遇有山岭或其他障碍物时,大多数以修建隧道的方式通过。如连接日本北海道和本州,通过津轻海峡的海底隧道——青函隧道,全长 53.8 km(海底部分 23.3 km,陆上部分 30.5 km),是目前世界上最长的铁路隧道和海峡通道工程,其平均埋深 100 m;跨越英吉利海峡连接英国和法国的英法海底隧道,长度 50.5 km,其中海底长度 37.9 km,是世界上第二长的铁路隧道,同时也是世界上海底长度最长的海底隧道;规划设计中的日韩铁路、公路两用交通隧道,总距离超过 250 km,通过对马海峡将日本和韩国连接在一起,进而与中国大陆连接;目前,由西班牙、英国、摩洛哥等拥有海峡主权的国家,共同规划的直布罗陀海峡跨海通道,拟由连接欧洲和非洲的海底隧道及部分的海上桥梁所构成。此外,在城市中心的道路上,为了提高汽车通行的效率和从保护环境及预防灾害等目的出发,把汽车道路设在城市的地下,上部建设成绿化带,形成一个居住舒服的城市已是目前城市规划发展的方向。例如最近东京提出的修建 50 km 城市地下道路的建议,就是基于这种考虑。

1.1.2.5 防御和减少灾害的地下设施

防御和减少灾害的地下设施主要指用于防御风暴、洪水、地震等自然灾害和战争、火灾等人为灾害的地下工程,如防灾掩护体(防空洞)、人防地下室、水和粮食等储备设施、防御洪水灾害的地下坝和地下河等。人防地下室是指为保障人民防空指挥、通信、掩蔽等的需要,具有一定防护功能的地下室,主要包括两大类:一是为保障战时功能而单独修建的地下防护建筑;二是结合地面建筑修建的战时可用于防空的地下室。

上述地下工程的各种利用形态,按设施的水平来划分,可分为个人水平的设施、城市水平的设施和国家水平的设施。个人水平的设施:如住宅的地下室就是在地价高涨的情况下,为了扩大居住空间,而多由个人采取的措施。一般地说,个人水平的地下空间利用的特征,多是利用浅层。城市水平的设施:包括停车场、地下街等,主要是由经济利益决定的。而上下水道、能源供给、交通等基础设施,则主要是考虑环境、安全、便利等条件而建设的。这些设施,城市人口越集中,其地下利用的经济、环境、安全等方面的效果越显著,一些城市大量修筑地下停车场也是一个突出的实例。国家水平的设施:主要是从国家综合利用政策方面来考虑的,其中包括作为产业经济基础的生产、储藏、输送、国土保持、防灾等设施。如我国南水北调工程中跨黄(河)输水隧洞、京沪高速铁路越(长)江隧道以及西(安)安(康)线长达 18.4 km 的秦岭铁路隧道等都属于此。这些设施,更多的是从增强国力、促进经济发展、改善和提高人民生活水平出发考虑的,具

有重大的经济、技术意义。

综上所述,地下空间的利用是多方面的,已渗透到人类生活的各个领域,形成了功能广泛的工程系统和科学体系,并发展成为对国民经济发展具有重要意义的产业部门。它是一个横跨岩土、地质、结构、计算机、灾害防御等学科领域的大学科,也是 21 世纪重大的技术领域。

1.2 地下结构

1.2.1 地下结构的概念及其作用

地下空间的构筑和实现,首先要在地层中挖掘洞室,洞室开挖使地层的初始应力状态改变,释放荷载,产生变形并随时间的推进逐渐发展,因此洞室开挖后必须沿洞室周边修建永久性支护结构,即衬砌。同时,为了满足使用要求,有时尚需在衬砌内部修建必要的梁、板、柱、墙体等内部结构,从而形成地下结构工程,即地下结构由衬砌结构和内部结构两部分组成,如图 1.1 所示。衬砌结构主要是起承重和围护两方面的作用。承重,即承受岩土体压力、结构自重以及其他荷载的作用,满足结构强度、刚度要求;围护,即防止岩土体风化、坍塌,防水,防潮等,保持地下空间干燥、清洁,满足使用要求。

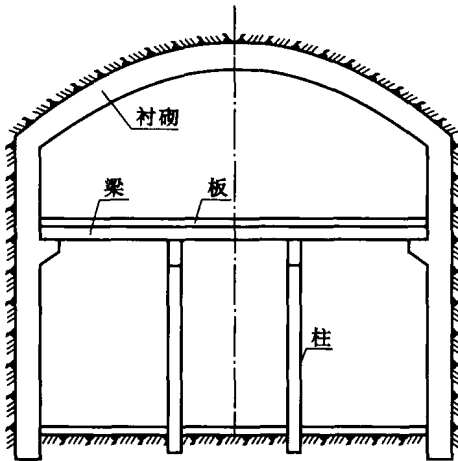


图 1.1 地下结构组成

简言之,地下结构是指在保留上部地层(山体或土层)的前提下,在开挖处能够提供某种用途的地下空间内修筑的结构物。根据地层介质的不同,地下结构可以分为两大类:一类是修建在土层中的地下结构;另一类是修建在岩层中的地下结构。

1.2.2 地下结构的形式

地下结构的形式主要由使用功能、地质条件和施工技术等因素确定。结构形式首先受使用要求制约,如人行通道,可做成单跨矩形或拱形结构;地质条件直接关系到围岩压力大小,如地质较差,应优先采用圆形断面;在使用功能和地质条件相同情况下,施工方法不同往往需要采用不同的结构形式,如盾构法衬砌采用装配式,矿山法衬砌多采用现浇或喷锚式。

根据地质情况的差异,地下结构形式可分土层和岩层内的两种形式,分述如下:

1.2.2.1 土层地下结构

(1) 浅埋式结构。这类结构的覆土厚度一般仅 5~10 m,通常采用明挖填埋法修建,平面呈方形、长方形或条形,当顶板做成平顶时,常用梁板式或框架结构,如图 1.2 所示。为节省材料,顶部可做成拱形,竖壁做成直墙拱形结构。

(2) 地道式结构。通常是采用暗挖法建造的直墙或曲墙拱形结构,如图 1.3 所示。

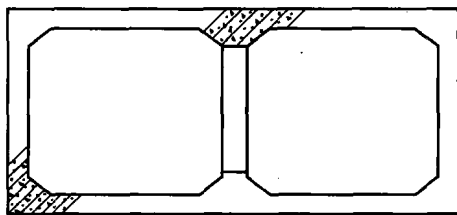


图 1.2 浅埋式结构

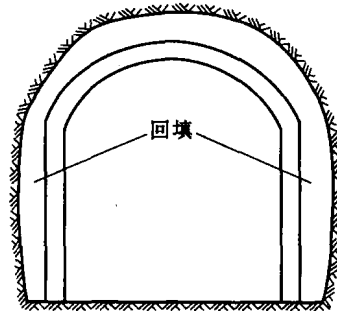


图 1.3 地道式结构

(3) 装配式圆形管片结构。圆形结构断面,由装配式管片拼装而成。适用于在中等埋深以上采用盾

构法施工的地下结构,如图 1.4 所示。

(4) 沉井式结构。沉井为一开口的井筒状结构,施工时在沉井底部挖土,顶部出土,主要利用结构的自重作用下沉,下沉到位后再做底板和顶板。其水平断面一般做成方形,也有圆形,可以单孔也可以多孔,如图 1.5 所示。

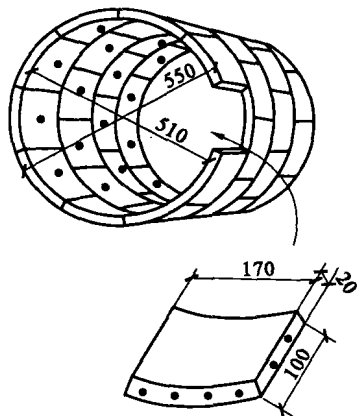


图 1.4 装配式圆形管片结构(单位:cm)

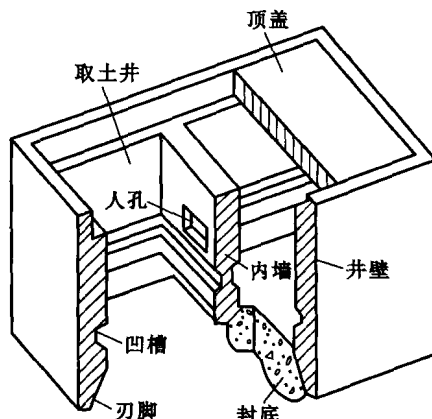


图 1.5 沉井式结构

(5) 顶管式结构。一种以千斤顶顶进就位的地下结构。在城市管道埋深较大、交通干线附近和周围环境对位移、地下水有严格限制的地段,常采用顶管式结构施工,如图 1.6 所示。其断面形式多采用圆形,也可以采用矩形或多跨箱涵结构。

(6) 沉管式结构。适用于建造过江管道或铁路隧道的一种地下结构,一般做成箱形结构,两端加以临时封墙。施工时将预制好的管段拖运至预定水面处,沉放至预先开挖的沟壑或河槽内,再连接成整体,如图 1.7 所示。

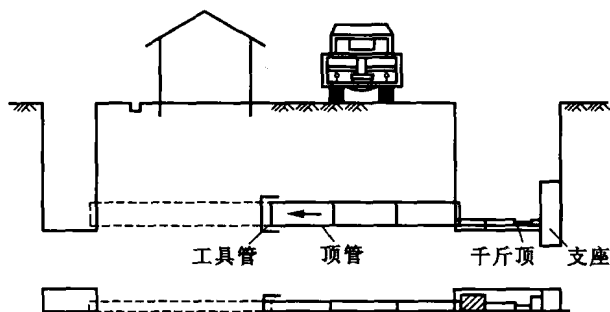


图 1.6 顶管式结构

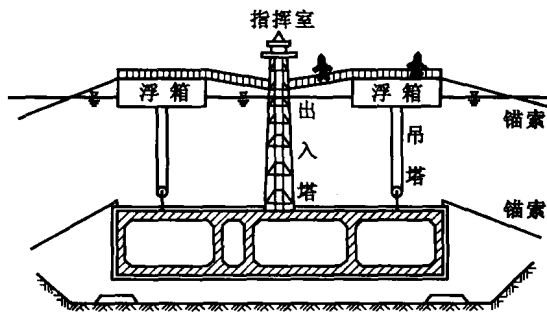


图 1.7 沉管式结构

(7) 基坑支护结构。基坑是由于建筑施工需要而由地面向下开挖的一个敞开的地下空间,其四周必须设置的垂直挡土结构,称为基坑支护结构,如图 1.8 所示。

(8) 附建式结构。是房屋下面的地下室,一般有承重的外墙、内墙(地下室作为大厅用时则为内柱)的板式或梁板式结构,如图 1.9 所示。

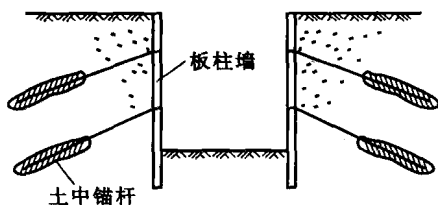


图 1.8 基坑支护结构

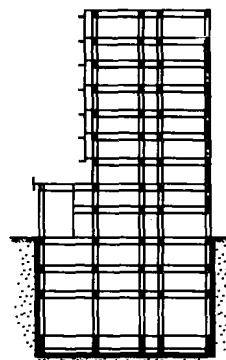


图 1.9 附建式结构

(9) 地下连续墙结构。先分段建造两条连续墙，然后在中间挖土，修建底板、顶板和中间楼层。地下连续墙的施工过程如图 1.10 所示。

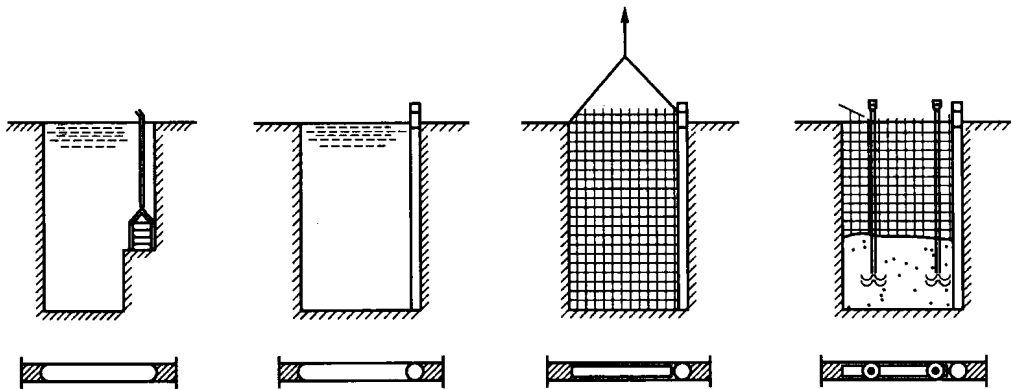


图 1.10 地下连续墙施工过程

1.2.2.2 岩石地下建筑结构

岩石中的地下结构通常称为衬砌结构，常见的有以下几种形式：

(1) 半衬砌结构。岩层较坚硬，岩石整体性好而节理又不发育的稳定或基本稳定的围岩，通常采用半衬砌结构，即只做拱圈，不做边墙。如图 1.11 所示。

(2) 贴壁式衬砌结构。指衬砌结构与围岩之间紧密接触，即在施工时将衬砌与围岩之间的空隙进行密实回填。根据岩层条件，可以做成厚拱薄墙衬砌结构、直墙拱形衬砌结构及曲墙拱形衬砌结构，分别如图 1.12(a)、(b)、(c) 所示。

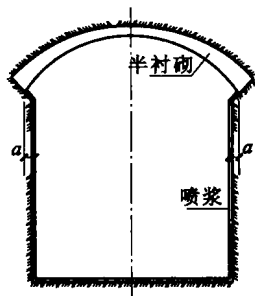


图 1.11 半衬砌结构

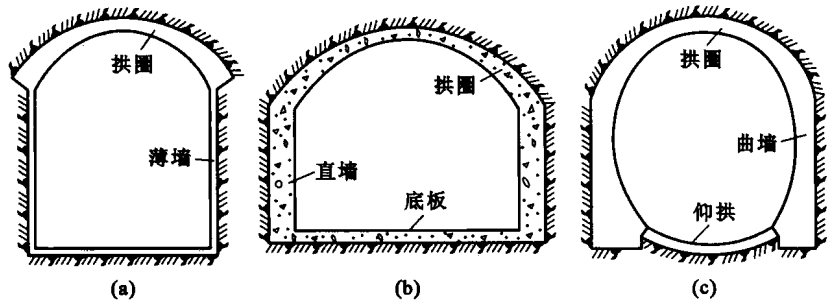


图 1.12 贴壁式衬砌结构

(a) 厚拱薄墙衬砌结构；(b) 直墙拱形衬砌结构；(c) 曲墙拱形衬砌结构

(3) 离壁式衬砌结构。衬砌结构与围岩相离，其间空隙不做回填，仅拱脚处局部支撑于岩壁上，如图 1.13 所示。当围岩稳定或基本稳定时可采用这种结构。离壁式衬砌结构的防水、排水和防潮效果较好，一般用于防潮要求较高的各类贮库。

(4) 喷锚支护结构。在地下条件较差的岩层中开挖地下洞室时，可采用喷混凝土、钢筋网喷混凝土、锚杆喷混凝土或锚杆钢筋网喷混凝土对围岩进行加固。这些加固形式统称为喷锚支护结构，如图 1.14 所示。喷锚支护结构可以做临时支护，也可作为永久衬砌结构。

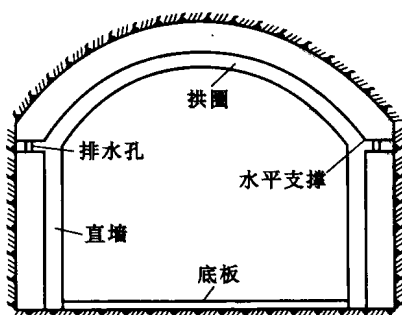


图 1.13 离壁式衬砌结构

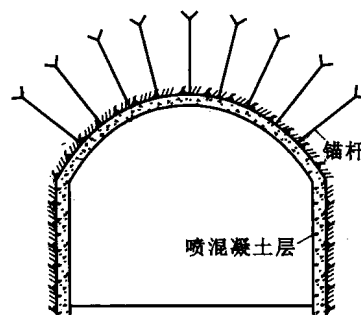


图 1.14 喷锚支护结构

(5) 复合衬砌结构。复合支护结构通常由初期支护和二次支护组成,防水要求较高时须在初期支护和二次支护间增设防水层,如图 1.15 所示。一般复合支护结构认为围岩具有自支承能力,支护的作用首先是加固和稳定围岩,使围岩的自支承能力可充分发挥,从而可以减薄支护结构的厚度。

(6) 穹顶直墙衬砌结构。穹顶结构是一种圆形空间薄壁结构。它可以做成顶、墙整体连接的整体式结构,也可以做成顶、墙互不联系的分离式结构。在我国,多采用后者,如图 1.16 所示。穹顶结构受力性能较好,但施工较复杂,适用于无水平压力或侧壁围岩稳定的岩层。

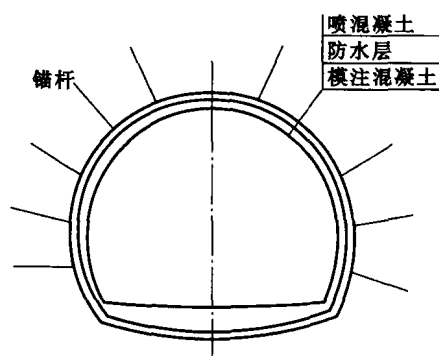


图 1.15 复合衬砌结构

(7) 连拱隧道结构。主要适用于洞口地形狭窄,或对两洞间距有特殊要求的中短隧道,按中墙结构形式不同可分为整体式中墙和复合式中墙两种形式。如图 1.17 所示。

1.2.3 地下结构的特点

地下结构与地面结构相比,在计算理论和施工方法两方面都有许多不同之处。其中,最主要的是地下结构所承受的荷载比地面结构复杂。这是因为地下结构埋置于地下,其周围的岩土体不仅作为荷载作用于地下结构上,而且约束着结构的移动和变形。所以,在地下结构设计中除了要计算因素多变的岩土体压力之外,还要考虑地下结构与周围岩土体的共同作用。这一点乃是地下结构在计算理论上与地面结构最主要的差别。

1.3 本课程的内容和任务

本课程是土木工程专业地下工程方向的一门专业核心课,也是土木工程专业其他专业方向的一门专业选修课。课程内容包括地下结构荷载、地下结构可靠度理论、地下结构设计理论与方法、浅埋式地下结构、附建式地下结构、逆作法地下结构、基坑围护及支撑结构、沉井结构、盾构隧道结构、整体式隧道结构、沉管隧道结构、顶管结构及箱涵结构等。学生通过本课程学习,应获得地下结构工程的基础知识,掌握地下结构特有的围岩压力和防空荷载的计算,了解地下结构可靠度理论,熟悉地下结构的设计理论与方法,掌握各主要地下结构的形式与组成、设计要点,了解其施工工艺,以便能够在今后的工作中正确选择与合理设计地下结构,同时为进一步学习其他专业课打下基础。

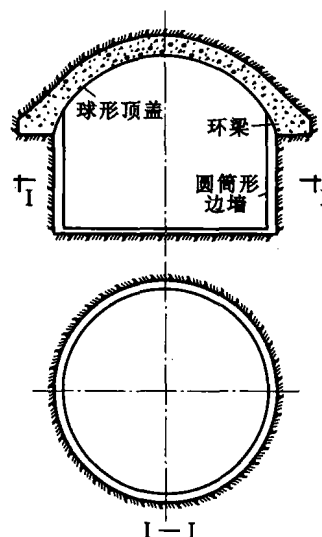


图 1.16 分离式穹顶直墙衬砌结构

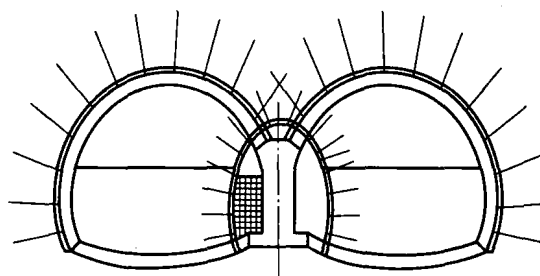


图 1.17 双连拱隧道结构