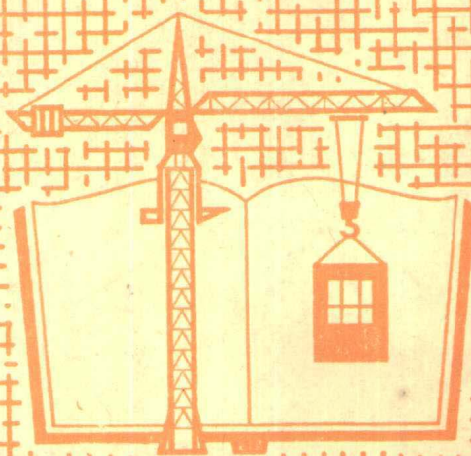


岩石地下建筑结构

重庆建筑工程学院 同济大学
哈尔滨建筑工程学院 天津大学



高等学校试用教材

中国建筑工业出版社

高等学校试用教材

岩石地下建筑结构

重庆建筑工程学院
同济大学
哈尔滨建筑工程学院
天津大学

·限国内发行·

中国建筑工业出版社

本书着重介绍衬砌结构设计的一般技术要求，几种常用衬砌结构的设计与计算，衬砌内力计算的角变位移法、不平衡力矩及侧力传播法和有限单元法，以及衬砌特殊部位和内部结构等。此外，还将一些推证和计算用表列入附录。

本书为高等学校地下建筑专业试用教材，也可作为本专业进修班用书，或供有关土木工程技术人員参考

高等学校试用教材
岩石地下建筑结构

重庆建筑工程学院

同济大学

哈尔滨建筑工程学院

天津大学

·限国内发行·

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
中国建筑工业出版社印刷厂印刷(北京阜外南礼士路)

开本: 787×1092毫米 1/16; 印张: 19¹/₂; 字数: 470千字

1982年12月第一版 1986年12月第二次印刷

印数: 4,701—7,300册 定价: 2.80元

统一书号: 15040·4360

前 言

《岩石地下建筑结构》是建工类地下建筑专业的一门专业课程。在过去的教学中，一直采用自编讲义，以此为基础，我们写成了这本教材。

本书着重介绍了衬砌结构设计的一般技术要求，几种常用衬砌结构的设计与计算，还介绍了衬砌内力计算的角变位移法、不平衡力矩及侧力传播法和有限单元法，以及衬砌特殊部位和内部结构等。对于教学中需要而先修课又可能没有介绍的内容，一律列入附录。此外，为了便于教学及实际工作者使用，还将分散于各文献上的计算用表，也编在附录内。地震区及不良地质条件下的衬砌设计与计算，暂未纳入。

本书由重庆建筑工程学院主编，参加编写的单位是同济大学、哈尔滨建筑工程学院、天津大学。编写分工如下：哈尔滨建筑工程学院祁瑞芳（第一、二、三章），重庆建筑工程学院罗济章（第四、十二、十三章），重庆建筑工程学院孙仁博（第五、六、九章、附录三、附录四），同济大学杨林德（第七、十一章、附录一、附录二），天津大学杜光兴（第八章），同济大学吴兆兴（第十章），附录五由各章提供。

本书由西安冶金建筑学院蔡西生、陈慧仪同志主审，参加审稿的还有各有关院校和设计等单位的王桐封、肖寅生、郑颖人、胡书海、姚成惠、陈荣、高伯阳、王懋义、李人樟等同志，审稿同志提出了不少改进意见。在本书编写过程中，重庆后勤工程学院、铁道部第二设计院等单位给予了大力支持。在此表示衷心感谢。

由于时间仓促，编者的教学经验、理论水平和实践经验均有限，教材中难免有不妥、错误之处，望读者批评指正。

编 者

一九七九年七月

目 录

第一篇 总 论

第一章 绪论	1
§ 1-1 概述	1
一、地下建筑结构的概念及其作用	1
二、地下建筑结构的主要内容	2
§ 1-2 地下建筑结构的衬砌类型	2
一、结构选型及其影响因素	2
二、衬砌的型式及适用条件	2
§ 1-3 地下建筑结构设计程序及内容	5
第二章 作用在衬砌上的荷载	6
§ 2-1 荷载的分类和组合	6
§ 2-2 结构自重	6
§ 2-3 围岩压力	8
一、围岩压力及其影响因素	8
二、确定围岩压力的方法	10
§ 2-4 弹性抗力	17
§ 2-5 其它荷载	18
第三章 衬砌设计的一般技术要求	21
§ 3-1 衬砌截面和几何尺寸的确定	21
§ 3-2 衬砌材料的选择	24
§ 3-3 衬砌结构的一般构造要求	26
一、混凝土保护层	26
二、变形缝	26
三、衬砌的超挖或欠挖	27
四、贴壁式衬砌的回填	28
五、岩体间壁确定	28
§ 3-4 衬砌截面强度校核	29

第二篇 衬 砌 结 构

第四章 半衬砌及厚拱薄墙衬砌	30
§ 4-1 概述	30
§ 4-2 半衬砌及厚拱薄墙衬砌构造	31
§ 4-3 半衬砌及厚拱薄墙衬砌计算	32
一、计算简图	32
二、拱圈内力计算的基本方程式	33
三、拱圈内力图	38

§ 4-4	拱脚弹性固定系数计算	39
§ 4-5	拱圈变位值计算	41
	一、变位计算的基本公式	41
	二、用积分法计算变位值	42
	(一)变截面圆拱	42
	(二)变截面抛物线拱	46
	三、变位积分的近似计算——辛普生法	48
§ 4-6	拱圈变位值及内力图校核	49
	一、对称问题的校核	49
	二、非对称问题的校核	50
§ 4-7	计算例题	50
第五章	弹性地基梁(局部变形)理论	58
§ 5-1	概述	58
§ 5-2	弹性地基梁的挠度曲线微分方程式及其初参数解	59
	一、弹性地基梁的挠度曲线微分方程式	59
	二、弹性地基梁的初参数解	60
	(一)梁跨间无荷载时的解	60
	(二)梁跨间有荷载时的解	62
§ 5-3	弹性地基短梁、长梁及刚性梁	66
§ 5-4	弹性地基梁解的应用举例	68
第六章	贴壁式直墙拱形衬砌	72
§ 6-1	整体式直墙拱形衬砌的尺寸拟定及构造	72
	一、衬砌拱圈矢跨比	72
	二、衬砌厚度	73
	三、墙基埋深	73
	四、衬砌背部的回填	74
	五、拱圈截面变化规律	74
	六、衬砌的配筋构造要求	75
§ 6-2	整体式直墙拱形衬砌的计算	77
	一、计算简图	77
	二、基本结构及基本方程式	79
	三、变位值的计算	80
	(一)拱圈弹性抗力 σ 及其变位 Δ_{i_0} 的计算	80
	(二)拱脚弹性固定系数	82
	四、衬砌内力计算	87
	(一)拱圈内力	87
	(二)边墙内力	87
	五、计算结果校核	89
§ 6-3	贴壁式直墙拱形衬砌的设计步骤及例题	89
§ 6-4	影响衬砌结构内力的因素分析	98
§ 6-5	衬砌轮廓的修正	104
§ 6-6	装配式直墙拱形衬砌的构造与计算	106
	一、型式及构造	106

二、计算特点	108
第七章 衬砌内力计算的其它方法	110
§ 7-1 概述	110
§ 7-2 角变位移法	111
一、基本原理	111
二、正负号规定	111
三、结点变位的求法	111
四、杆端截面内力的求法	116
五、结构任一截面内力的计算	116
六、计算步骤	116
七、关于拱部弹性抗力	117
§ 7-3 角变位移法例题	117
§ 7-4 不平衡力矩及侧力传播法	120
一、原理	121
二、固端力矩与固端侧力的计算	121
三、传播力矩与传播侧力的计算	121
四、分配力矩与分配侧力的计算	125
五、杆端最终力矩及侧力的计算	126
六、结构任一截面内力的计算	126
七、内力计算过程的校核	127
八、计算步骤	127
§ 7-5 不平衡力矩及侧力传播法例题	128
第八章 离壁式衬砌	136
§ 8-1 概述	136
§ 8-2 离壁式衬砌的构造	137
一、拱圈	137
二、边墙	137
三、水平支撑	138
四、衬砌与岩壁间的空隙尺寸	138
§ 8-3 作用在离壁式衬砌上的荷载	138
§ 8-4 离壁式衬砌的内力计算	139
一、计算简图	139
二、边墙为砌块、拱圈和水平支撑为整体结构的内力计算	139
三、边墙、拱圈和水平支撑为整体结构的内力计算	145
(一) 边墙下端为铰支座时的计算	145
(二) 边墙下端为固定支座时的计算	147
§ 8-5 例题	148
第九章 分离式穹顶直墙衬砌	153
§ 9-1 分离式穹顶直墙衬砌的构造	153
一、衬砌的几何尺寸	153
二、配筋及构造	154
§ 9-2 分离式穹顶直墙衬砌的计算	156

一、计算简图及荷载	156
二、穹顶与环梁的计算	157
三、环墙的计算	162
四、截面强度校核	163
§ 9-3 例题	163
第十章 喷锚结构	170
§ 10-1 喷锚结构的作用原理	170
一、洞室围岩的变形规律	170
二、喷锚与围岩的共同作用原理	171
三、喷锚的一般作用	172
§ 10-2 喷锚结构的类型和适用的地质条件	173
§ 10-3 喷混凝土的物理力学性能	176
§ 10-4 锚杆局部加固的设计原理和计算方法	178
一、锚杆加固拱顶危岩的计算	178
二、锚杆加固侧壁危岩的计算	179
§ 10-5 锚杆整体加固的设计原理和计算方法	179
一、按悬吊设计原理的计算方法	179
二、按组合拱设计原理的计算方法	181
§ 10-6 喷混凝土结构的设计原理和计算方法	183
一、局部加固原理和计算方法	183
二、组合拱设计原理和计算方法	185
§ 10-7 锚杆喷混凝土结构的设计原理和计算方法	187
一、按悬吊设计原理的计算方法	187
二、按组合拱设计原理的计算方法	188
三、按压剪破坏原理的计算方法	189
第十一章 衬砌内力计算的有限单元法	192
§ 11-1 概述	192
§ 11-2 衬砌内力的形成和计算原则	193
§ 11-3 组合法的计算简图	195
§ 11-4 力学原理	195
§ 11-5 刚度矩阵	198
§ 11-6 应力矩阵	201
§ 11-7 洞室开挖时“释放荷载”的推求	203

第三篇 衬砌特殊部位及内部结构

第十二章 衬砌特殊部位及细部结构	204
§ 12-1 偏压衬砌的设计和计算	204
一、荷载及基本尺寸的拟定	204
二、内力计算	205
§ 12-2 明洞的设计和计算	207
一、拱圈回填土石压力	208
二、直墙回填土石压力——侧向压力	211

§ 12-3 洞门墙的设计和计算	211
一、洞门的类型及构造	212
二、材料选择及基本尺寸的拟定	212
三、计算原理及公式	214
§ 12-4 端墙结构	217
一、端墙的类型及一般要求	217
二、端墙的计算	218
§ 12-5 岔洞结构	219
一、岔洞平面形式和接头形式	219
二、岔洞结构的构造处理	221
§ 12-6 竖井及斜井衬砌设计和计算	224
一、竖井的构造和计算	224
二、斜井的构造和计算	231
第十三章 地下建筑内部结构设计简介	233
§ 13-1 内部结构与衬砌的连接及构造	233
一、内部结构的梁板柱与衬砌的连接及构造	233
二、吊车梁的连接及构造	236
三、吊顶(或天棚)连接构造	239
§ 13-2 有内部结构的衬砌结构设计特点	240
一、单跨多层地下建筑结构的设计特点	241
二、有吊车的地下建筑结构的设计特点	242
附录一 跨变构件及弹性地基梁的角变位移方程	249
附录二 构件的形常数及修正形常数的计算	253
附录三 球面壳体理论简介	261
附录四 穹顶衬砌的环梁计算	271
附录五 围岩分类表及计算用表	277
附表5-1 人工岩石峒室围岩分类表	277
附表5-2 铁路隧道围岩分类表	278
附表5-3 人工洞室围岩物理力学参数表	280
附表5-4 铁路隧道围岩物理力学参数表	280
附表5-5 变截面圆拱单位变位系数 b_i 、 k_i 值	280
附表5-6 变截面圆拱单位变位系数 B_i 、 K_i 值	281
附表5-7 变截面圆拱单位变位系数 a_i 、 A_i 值	282
附表5-8 变截面圆拱弹性抗力内力系数 n_i 值	283
附表5-9 双曲线三角函数 $\varphi_1 \sim \varphi_8$ 表	283
附表5-10 双曲线三角函数 $\varphi_9 \sim \varphi_{15}$ 表	286
附表5-11 双曲线三角函数 φ_{16} 、 φ_{17} 表	287
附表5-12 圆拱形常数表	288
附表5-13 圆拱对称变形修正形常数及载常数表	290
附表5-14 集中力作用下等截面圆拱载常数表	294
附表5-15 函数 $\alpha_1 \sim \alpha_6$ 表	298
参考文献	300

第一篇 总 论

第一章 绪 论

§ 1-1 概 述

一、地下建筑结构的概念及其作用

地下建筑是修建在地层中的建筑物。它可以分为两大类：一类是修建在岩层中的，一类是修建在土层中的。本教材所研究的是修建在岩层中的地下建筑物，即岩石地下建筑。它是指在岩体中人工开挖的地下洞室或利用天然溶洞所修建的地下工厂、电站、贮库、掩蔽部等工业与民用建筑。

地下建筑从二十世纪开始用于工业生产，第二次世界大战期间地下建筑有了飞快发展。战后三十余年来，各国对地下建筑颇为重视，建筑技术水平不断提高，地下建筑类型和数量也日益增加，发展极其迅速。

地下建筑结构即埋置于地层内部的结构。修建地下建筑物时，首先按照使用要求在地层中挖掘洞室，然后沿洞室周边修建永久性支护结构——衬砌。为了满足生产使用要求，在衬砌内部尚需修建必要的梁、板、柱、墙体等内部结构。所以地下建筑结构包括衬砌和内部结构两部分，如图 1-1 所示。

衬砌主要是起承重和围护两方面的作用。承重，即承受围岩压力、结构自重以及其它荷载的作用；围护作用，即防止围岩风化、崩塌、防水、防潮等。

本书所研究的地下建筑结构主要指衬砌，而内部结构与地面建筑的设计基本相同。所以，书中仅介绍内部结构与衬砌连接部分的构造方案以及有内部结构的衬砌结构设计特点。

本书所研究的地下建筑结构的范围主要是岩石地下工厂，各类贮库及附属动力站，地下商店、医院等工业与民用建筑结构。而铁路隧道、地下水电站、水工隧洞、矿山井巷以及具有防护要求的军工地下建筑结构等，应按各有关部门所制定的技术规定进行设计。

地下建筑结构与地面建筑结构相比，在计算理论和施工方法两方面都有许多不同之处。其中，最主要的是地下建筑结构所承受的荷载比地面结构复杂。这是因为地下建筑结构埋置于地下，其周围的岩体不仅作为荷载作用于地下建筑结构上，而且约束着结构的移

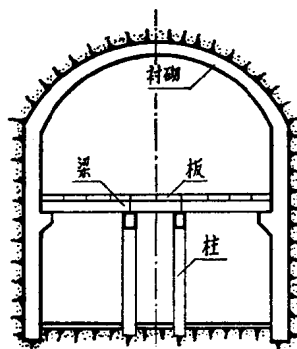


图 1-1 地下建筑结构示意图

动和变形。所以，在地下建筑结构设计除了要计算因素多变的围岩压力之外，还要考虑地下结构与围岩岩体的共同作用。这一点乃是地下建筑结构与地面建筑结构在计算理论上最主要的差别。

二、地下建筑结构的主要内容

本教材主要包括以下内容：

(一) 地下建筑结构设计的原则，程序与内容。

(二) 作用在衬砌上的荷载及其计算。

(三) 常用衬砌(半衬砌及厚拱薄墙衬砌，贴壁式直墙拱形衬砌，离壁式衬砌，分离式穹顶直墙衬砌，喷锚结构等)的设计与计算。

(四) 衬砌特殊部位及内部结构的设计与计算。其中，包括偏压衬砌，明洞，洞门墙，端墙，岔洞，竖井，斜井以及内部结构的设计与计算。

(五) 有限单元法在地下衬砌内力计算中的应用。

本教材主要以常用的各种拱形衬砌为主，重点掌握设计原理和计算方法。同时，注意理论联系实际，以达到应用基本原理和计算方法，能对常用的地下结构进行设计与计算。

为了加深对设计原理的理解，附录中附有跨变构件的角变位移方程；构件的形常数及修正形常数的计算；球面壳体理论简介；弹性地基环梁以及衬砌静力计算用表等。

§ 1-2 地下建筑结构的衬砌类型

一、结构选型及其影响因素

结构型式是否合理，对结构的承载能力和经济效果都有很大影响。在进行具体设计时，结构型式的选择应考虑使用要求、战备防护、工程地质及水文地质条件、围岩的稳定性以及其自身承载能力、施工条件、建筑材料和工程造价等多方面因素，其中围岩的稳定性对于结构型式的选择则起决定性作用。

合理的结构型式，应在满足生产使用要求的前提下，结构外形具有良好的受力性能。同时，应尽量使洞室土石方开挖量少及衬砌结构尺寸小，以达到安全适用、经济合理及技术先进的要求。

二、衬砌的型式及适用条件

岩石地下建筑的结构型式主要是直墙拱形、圆形、曲墙拱形等，此外还有一些其它类型的结构，如喷锚结构、穹顶结构等。最常用的是拱型衬砌，这是因为它具有以下优点：

1. 地下结构的荷载比地面结构大，且主要承受垂直荷载，因此，拱形结构就受力性能而言比平顶结构好(在垂直荷载作用下弯矩小)。

2. 拱形结构的内轮廓比较平滑，只要适当调整拱的曲率，一般都能满足地下建筑工程的使用要求，并且建筑布置比圆形方便，净空浪费也比圆形少。

3. 拱主要是承压结构，因此，适用于采用抗拉性能较差、抗压性能较好的砖、石、混凝土等材料构筑。这些材料造价低，耐久性能良好，易维护。

以下仅简单介绍我国常用的几种拱形结构，喷锚结构，以及穹顶结构等。

(一) 拱形衬砌

1. 贴壁式拱形衬砌

贴壁式拱形衬砌是指衬砌与围岩之间的超挖应进行回填的衬砌。其中，包括拱形半衬砌，厚拱薄墙衬砌，直墙拱形衬砌及曲墙拱形衬砌。

(1) 半衬砌结构

当岩层较坚硬，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。半衬砌结构，只做拱圈，不做边墙。它仅在毛洞顶部构筑一个直接支承在围岩上的拱圈承受围岩压力，两侧构筑不承受围岩水平压力的构造墙，如图1-2所示。

半衬砌具有结构简单，节省材料，施工方便等优点，所以应用比较广泛，例如应用在飞机库、地下电站等较大跨度的结构中。

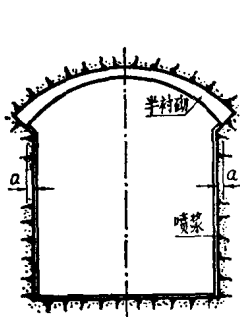


图 1-2 半衬砌结构

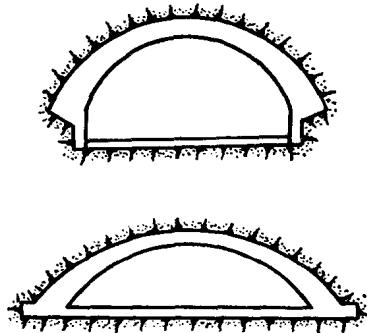


图 1-3 落地拱

为了保持拱脚支座稳定，防止拱脚支座风化塌落，或因爆破时拱脚支承面坍塌，应在拱脚处留出一个岩台。岩台的宽度 a (图1-2) 根据洞室跨度、地质条件及施工情况而定。

在修建跨度较大、高度较低的半衬砌时，常做成落地拱形式，如图1-3所示。其计算亦可按半衬砌考虑。

(2) 厚拱薄墙衬砌

厚拱薄墙衬砌的构造型式如图1-4所示。它的拱脚较厚，边墙较薄。

这样，可将拱圈所受的力通过拱脚大部分传给围岩，充分利用了岩层的强度，使边墙受力大为减少，从而减少了边墙的厚度，节省了建筑材料，减少了石方开挖量。

厚拱薄墙衬砌(及半衬砌)的拱脚是结构的关键部位，应按有关规定加固处理。薄边墙可采用喷混凝土，混凝土预制块或现浇混凝土。对于高边墙，要特别注意边墙的稳定。根据边墙所采用的衬砌材料，可采用锚杆，设置圈梁或设墙垛等以保证边墙的稳定。

厚拱薄墙衬砌可用于基本稳定的岩层中，对于稳定性较差但没有水平压力的围岩也可以采用。设计时其计算可按半衬砌处理。

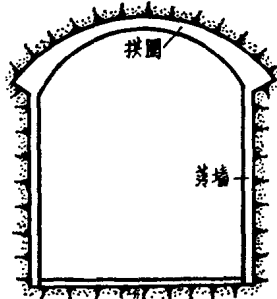


图 1-4 厚拱薄墙衬砌

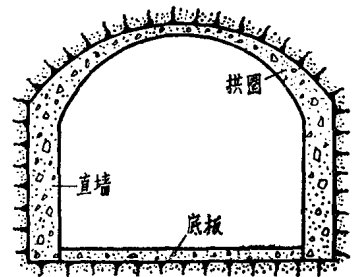


图 1-5 直墙拱形衬砌

(3) 直墙拱形衬砌

贴壁式直墙拱形衬砌的型式如图1-5所示。它由拱圈、竖直边墙和底板组成，衬砌与围岩的超挖部分都进行密实回填。直墙拱形衬砌是我国地下建筑工程中采用最早和较普遍的结构型式。

一般适用于洞室口部或有水平压力的岩层中，在稳定性较差的岩层中亦可采用。

直墙拱形衬砌，按其施工方法又可分为现浇和装配式两种。装配式钢筋混凝土衬砌，在我国地下建筑中已修建有一定数量。跨度一般在8米以内。这种结构在加快工程建设、节省劳动力、节约木材和降低造价等方面效果较显著，但目前使用还不够广泛。其主要原因是接头防水、吊装机具等尚存在一些问题，需进一步研究解决。

(4) 曲墙拱形衬砌

当遇到较大的垂直压力和水平压力时，可采用曲墙式衬砌。若洞室底部为较软弱地层，有涌水现象或遇到膨胀性岩层时，则应采用有底板或带仰拱的曲墙式衬砌，如图1-6所示。由于地下建筑工程的修建地段有较大的选择性，一般不会选在太差的岩层中，所以采用曲墙式衬砌的机会不多，故不详述。

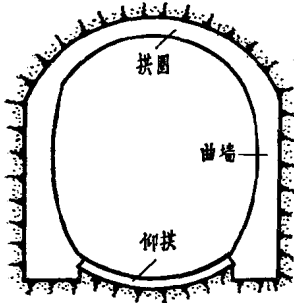


图 1-6 曲墙式衬砌

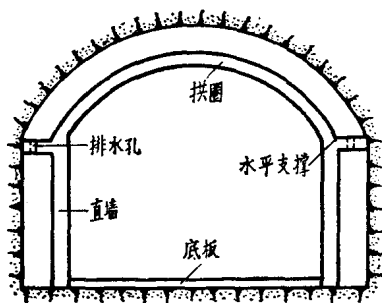


图 1-7 离壁式衬砌

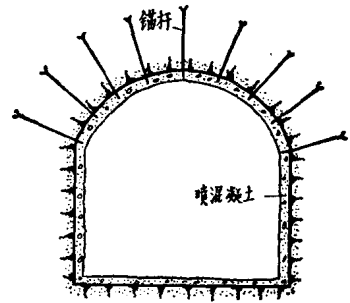


图 1-8 喷锚结构示意图

2. 离壁式衬砌

离壁式直墙拱形衬砌是指与岩壁相离，其间空隙不做回填，仅拱脚处扩大延伸与岩壁顶紧的衬砌。离壁式衬砌的基本型式如图1-7所示。拱脚处设置与岩壁顶紧的水平支撑，以保证结构的稳定。

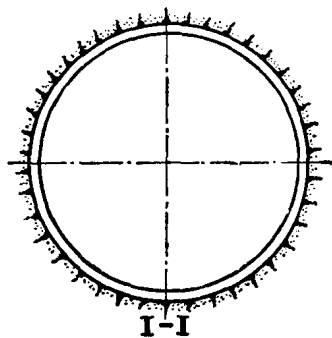
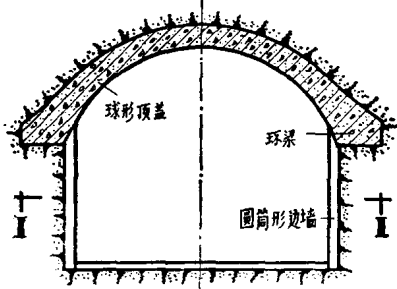


图 1-9 分离式穹顶直墙衬砌

离壁式衬砌防水、排水和防潮效果均较好，一般用于防潮要求较高的各类贮库。稳定的或基本稳定的围岩都可以采用离壁式衬砌。

为了防止围岩的风化剥落以及防止落石，最好在毛洞壁面加喷砂浆或混凝土。

(二) 喷锚结构

在地下建筑中，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来加固围岩。这些加固型式统称为喷锚结构如图1-8所示。喷锚结构是一种新型结构，目前在矿山、铁路隧道、地下厂房、地下电站、军工、国防各部门中已被广泛采用。

实践证明，喷锚结构在加强围岩稳定、加快工程建设、节省劳动力、节约木材和降低造价等方面，都具有显著的优越性。它不仅可用作临时支护，也可作为永久衬砌。喷锚结构的采用是地下建筑结构型式的重大变革。它适用于多种地层，具有广阔的发展前途，有条件时应优先采用。

(三) 穹顶直墙衬砌

穹顶直墙衬砌是一种圆底空间薄壁结构。它可以做成顶、墙整体联结的整体式结构；也可以做成顶、墙互不联系的分离式结构。目前，我国多采用后者。其基本构造如图1-9所示。穹顶采用钢筋混凝土球面壳体。圆筒形边墙可采用混凝土砌块、现浇混凝土或喷锚

结构。

穹顶直墙衬砌的受力性能较好，但施工比较复杂，一般用作地下油罐，地下回停车场等。它适用于无水平压力或侧壁围岩稳定的岩层。

§ 1-3 地下建筑结构的设计程序及内容

岩石地下建筑结构设计，应做到技术先进、经济合理、安全适用。

地下建筑结构设计是地下建筑工程设计的重要组成部分。它必须和工程地质勘测、建筑工艺、设备、施工组织设计紧密配合进行。

工程地质勘测工作对岩石地下建筑的设计和施工极为重要。在地下工程的建设中应坚持没有勘测就不能设计，没有设计就不能施工的基本建设程序。

进行地下建筑结构设计，首先要研究设计任务书，了解有关设计标准，技术规范，研究工程地质，水文地质及测量资料，调查施工技术条件和建筑材料供应情况。并对上述诸方面的情况进行分析，以作为设计的基本依据。

目前，进行地下建筑工程设计时，对于一般规模不太大的工程常采用扩大初步设计与施工图设计两个阶段。

扩大初步设计是按照设计任务书，根据国家建设方针并结合当时当地具体条件，从技术的可能性、经济的合理性及施工的现实性提出建设方案。其主要内容包括洞口选择，总平面布置，纵、横断面设计和结构选型，主要的技术经济指标和主要建筑材料的需要量，以及工程概算等。施工图设计是将扩大初步设计进一步具体化，提出施工详图，计算书和材料工程数量及财务预算等，以满足施工要求，为保证施工质量，加快施工进度提供便利条件。

对于较复杂和规模较大的地下工程，有时，也采用初步设计，技术设计和施工图设计三个阶段。初步设计一般要完成洞口、平面、纵、横断面设计和结构选型，以及主要技术经济指标。技术设计是根据对初步设计的审批意见进行修正，并对初步设计在技术上，经济上加以论证，其基本内容与扩大初步设计相同。

在扩大初步设计阶段，结构设计的主要任务是在建筑设计的基础上，进行技术经济比较，选择合理的结构方案和确定结构类型；确定结构的几何尺寸；估算主要工程材料数量及财务概算。扩大初步设计经上级批准后即可进行施工图设计。施工图设计阶段主要解决结构本身的强度、刚度和抗裂、稳定问题。提出施工详图，其主要内容大致如下：

- (1) 确定作用在结构上的荷载值；
- (2) 确定结构计算方法及计算简图；
- (3) 结构的内力分析和计算，并绘制内力图；
- (4) 结构强度及抗裂计算（当必要时）；
- (5) 确定配筋方案及构造细节；
- (6) 绘制施工详图及节点大样图；
- (7) 材料工程数量及财务预算。

第二章 作用在衬砌上的荷载

地下结构承受的荷载是比较复杂的。到目前为止，其计算方法还不够完善，有待进一步研究。本章所讨论的荷载以作用在衬砌上的静荷载为主。

§ 2-1 荷载的分类和组合

一、荷载的分类

地下结构所承受的荷载，按其作用特点及其使用中可能出现的情况分为以下三类，即主要荷载，附加荷载和特殊荷载。

(一) 主要荷载——长期及经常作用的荷载。其中，主要包括：结构自重；回填土层重量；围岩压力；弹性抗力；地下水静水压力和使用荷载。围岩压力是衬砌承受的主要静荷载，也是本章研究的主要内容。弹性抗力是地下结构所特有的一种被动荷载（见§ 2-4节）。使用荷载是在使用过程中，作用在衬砌上的荷载，如吊车荷载、设备重量、地下贮油库的油压力、车辆、人员等荷重。

(二) 附加荷载——非经常作用的荷载。这类荷载包括：灌浆压力；落石荷载；由温度变化或因混凝土收缩所产生的温差应力与收缩应力和施工荷载。如盾构法施工时千斤顶的作用力，装配式衬砌在施工过程中吊装机械的作用力等都属于施工荷载。施工荷载要根据实际情况确定。

(三) 特殊荷载——是指偶然可能发生的荷载，如地震力或战时发生的武器动荷载等。

二、荷载的组合

对于一个特定的地下建筑结构，上述几种荷载不一定都存在，也不可能同时作用在某段衬砌上。设计中应根据实际可能出现的情况进行荷载组合。所谓荷载组合，即是将有可能同时作用在衬砌上的荷载进行编组，并取其最不利者作为设计荷载，求得最危险截面中所产生的最大内力值，作为选择截面时的依据。

设计中需要考虑那几种组合，这要根据各种荷载可能出现的情况及其影响程度，以及所设计的地下结构的防护等级要求来定。一般来说，主洞室仅考虑主要荷载，包括围岩压力、回填层重量、衬砌自重以及使用荷载等。有防护要求的口部，其荷载按有关规定考虑。与地震荷载组合时，可参照有关抗震设计的具体规定。

§ 2-2 结 构 自 重

计算结构的静荷载时，结构自重必须计算在内。等直杆件，如墙、梁、板、柱的自重，计算简单，不予介绍。下面着重介绍衬砌拱圈自重的计算方法。

一、简化为垂直均布荷载

当拱圈为等截面或虽为变截面，但截面变化不大，以及拱圈自重所占比例较小时，一般将拱圈自重简化为垂直均布荷载，如图 2-1 所示，其值为：

$$q = \gamma d_0 \quad (2-1)$$

或
$$q = \frac{1}{2} \gamma (d_0 + d_n) \quad (2-2)$$

式中 q ——拱圈自重（吨/米²）；
 γ ——拱圈材料容重（吨/米³）；
 d_0 ——拱顶截面厚度（米）；
 d_n ——拱脚截面厚度（米）。

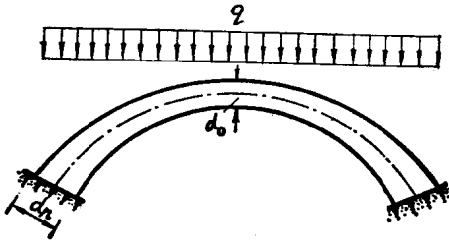


图 2-1 拱圈自重化为均布荷载示意图

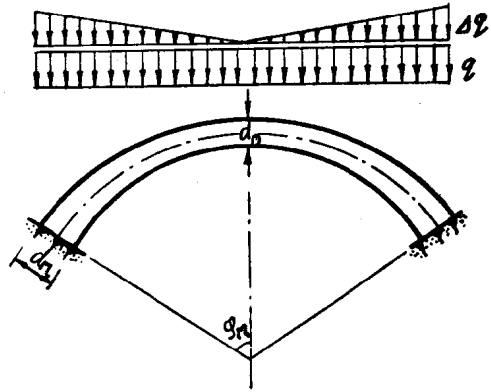


图 2-2 拱圈自重化为均布荷载和三角形荷载示意图

二、简化为垂直均布荷载和三角形荷载

对于拱脚厚度 d_n 远大于拱顶厚度 d_0 的变截面拱或矢高较大的等截面拱，可将拱圈自重分为两部分的和（图 2-2）。一部分按均布荷载计算，即 $q = \gamma d_0$ ，另一部分近似地按对称分布的三角形荷载计算，即：

$$\Delta q = \gamma \left(\frac{d_n}{\cos \varphi_n} - d_0 \right) \quad (2-3)$$

或再简化为
$$\Delta q = \gamma (d_n - d_0) \quad (2-4)$$

式中 Δq ——三角形荷载边缘处最大荷载强度（吨/米²）；
 φ_n ——拱脚截面与竖直线间夹角。

需指出，此种计算方法对于半圆拱不适用，因为，当 $\varphi_n = \frac{\pi}{2}$ 时， $\cos \varphi_n = 0$ ，则 Δq 趋于无穷大。

三、拱圈分成足够数量的小块

将衬砌沿轴线分成足够数量的小块，并用折线连接，求每块的自重，然后用近似积分法求出拱圈内力。

此种方法可用于结构自重占总荷载中所占比例较大，且精度要求较高的情况下。但此法计算时较为繁冗。

上述三种方法都是近似的计算方法，精确计算衬砌的自重比较复杂，且实际上必要性不大，一般多采用第一种方法计算。

§ 2-3 围 岩 压 力

一、围岩压力及其影响因素

(一) 围岩压力的概念

洞室开挖之前，地层中的岩体处于复杂的原始应力平衡状态。洞室开挖之后，围岩中的原始应力的平衡状态遭到破坏，应力重新分布，从而使围岩产生变形。如当变形发展到岩体极限变形时，岩体就产生破坏。如在围岩发生变形时及时进行支撑或衬砌，阻止围岩继续变形，防止围岩塌落，则围岩对衬砌就要产生压力，即围岩压力（即所谓地压）。所以，围岩压力就是指位于地下结构周围变了形或破坏了的岩层，作用在衬砌或支撑上的压力。它是作用在地下结构上的主要荷载。

围岩压力可分为围岩垂直压力，围岩水平压力及围岩底部压力。对一般水平洞室，围岩垂直压力是主要的，也是围岩压力中研究的主要内容。在坚硬岩层中，围岩水平压力较小，可忽略不计，但在松软岩层中应考虑围岩水平压力的作用。围岩底部压力是自下向上作用在衬砌结构底板上的压力，它产生的主要原因是某些地层遇水后膨胀，如石膏、页岩等，或是由于边墙底部压力使底部地层向洞室里面突起所致。岩石地下建筑大多修建在岩层较好的地带，底部压力很小，计算中一般不予考虑。

围岩压力既然是由于围岩的变形或破坏造成的，其大小与分布一定与导致围岩变形或破坏的很多因素有关。要确切地确定围岩压力，目前还是一个比较复杂而困难的问题，同时，也是一个急待解决的课题。

(二) 影响围岩压力的因素

影响围岩压力的因素很多，主要与岩体的结构、岩石的强度、地下水的作用、洞室的尺寸与形状、支护的类型和刚度、施工方法、洞室的埋置深度和支护时间等因素有关。现分述如下：

1. 岩体的结构

岩体一般受各种成因的结构面（如断层、节理、层理等）所切割，成为非均质不连续的岩体结构。一般把这种被结构面所切割成的分块岩体称为结构体。已有的实践和研究表明，大部分围岩的破坏主要是沿结构面的剪切滑移、拉开以及由于围岩的积累变形过度而引起围岩松动、破裂乃至坍塌。所以，愈来愈多的人认识到围岩稳定性的关键就在于岩体结构面的类型及特征。而岩体的稳定性受各种结构面的类型和特征所控制。

如火成岩系整体状结构，未曾或只经过轻微的区域构造变动，无断层及不良软弱结构面的组合，则岩体整体性强度高，在变形特征上可视各向同性体，设计时可不考虑围岩压力。为了防止围岩风化及考虑施工爆破影响，可设维护性衬砌。而碎状岩体结构，岩体完整性破坏较大，整体强度大大降低，并受断层等软弱结构面控制，则围岩不稳定，围岩压力较大，在设计中必须考虑作永久衬砌。

总之，岩体结构对于岩体强度和变形及由此产生的洞室破坏形式，都具有决定性的影响，也是控制围岩压力最重要的因素。

2. 岩体的强度

岩石的强度对于不同类型洞体的稳定性有很大影响。岩石的强度一般取决于岩石的矿