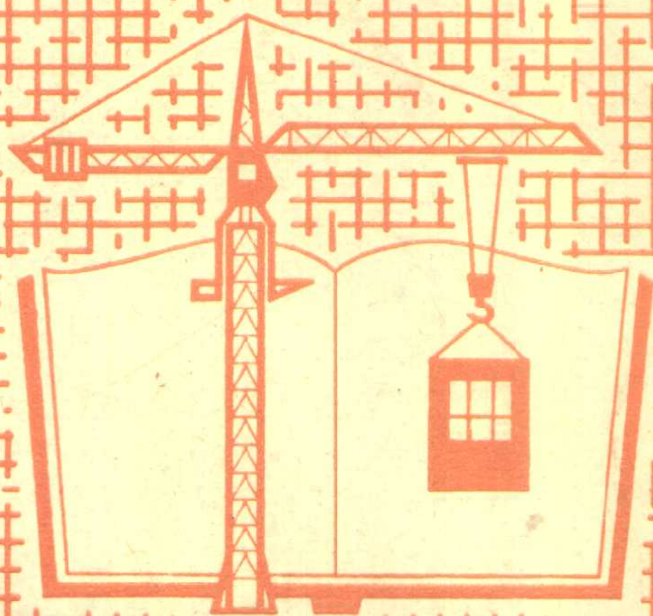


# 上层地下建筑结构

同 济 大 学 天 津 大 学  
哈 尔 滨 建 筑 工 程 学 院 同 济 大 学 分 校 编  
西 安 冶 金 建 筑 学 院 上 海 市 隧 道 建 设 公 司



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

# 土层地下建筑结构

同 济 大 学 天 津 大 学  
哈尔滨建筑工程学院 同济大学分校 编  
西安冶金建筑学院 上海市隧道建设公司

• 限国内发行 •

中国建筑工业出版社

## 编写说明

本教材主要根据加强基本理论、突出基本方法以及贯彻理论联系实际的原则进行编写。书中着重叙述土层地下建筑结构设计的基本原理，尽可能反映本专业的国内外先进技术水平，努力阐明技术内容的科学规律。

本教材虽由有关高等院校和生产单位共同合编，但由于时间紧、水平有限，其中定有不少谬误之处，请读者指正。

本教材由同济大学地下建筑教研室钱福元同志主编，天津大学土木系张崇文同志和同济大学分校路桥系郑汉璋同志主审。各章编写分工情况如下：第一章，侯学渊、夏明耀（均同济大学）；第二章，张立平（哈尔滨建筑工程学院）；第三章，李增福、陆继贻（均天津大学）、李树信（西安冶金建筑学院）；第四章，胡昌（哈尔滨建筑工程学院）；第五章，陆同寿（同济大学）；第六章，董云德（上海市隧道建设公司），第七章，钱福元（同济大学）；第八章，郑汉璋（同济大学分校）；第九章，郑汉璋（同济大学分校）、李树信（西安冶金建筑学院）、陆同寿（同济大学）；第十章，李桂花（同济大学）；第十一章，汪炳鉴、夏明耀（均同济大学）。

编写过程中曾得有关院校和单位的大力支持和协助，谨在此一并致谢。

# 目 录

第一章 概论	1
第一节 结构型式	1
第二节 设计内容	6
第三节 荷载	8
第四节 计算原则	9
第二章 附建式结构	12
第一节 概述	12
第二节 梁板式结构	19
第三节 装配式结构	27
第四节 口部结构	29
第三章 浅埋式结构	33
第一节 概述	33
第二节 矩形闭合框架的计算	36
第三节 构造要求	41
第四节 按地基为弹性半无限平面的闭合框架计算	45
第四章 地道式结构	57
第一节 概述	57
第二节 土层压力	59
第三节 单层单跨拱形结构内力计算	69
第四节 单跨双层和单层多跨连拱结构的构造和计算	76
第五节 设计中应注意的几个问题	86
第五章 沉井式结构	89
第一节 沉井的类型和构造	89
第二节 沉井结构设计计算	94
第六章 盾构法装配式圆形衬砌结构	112
第一节 衬砌型式和构造	112
第二节 衬砌圆环内力计算	115
第三节 衬砌断面选择	129
第四节 隧道防水及其综合处理	144
第七章 地下连续墙结构设计	147
第一节 概述	147
第二节 地下连续墙结构设计	148
第三节 地下连续墙接头设计	167
第八章 沉管结构	175
第一节 概述	175
第二节 沉管的结构设计	177

第三节	沉管的防水 .....	183
第四节	变形缝与管段接头 .....	184
第五节	沉管基础 .....	187
第九章	引道结构 .....	190
第一节	概述 .....	190
第二节	墙型支挡结构设计 .....	194
第三节	整体式引道结构计算 .....	201
第四节	引道结构算例 .....	203
第十章	矩阵力法分析地下拱形结构 .....	211
第一节	基本概念 .....	211
第二节	结构单元的内荷载 .....	213
第三节	柔度矩阵 .....	214
第四节	矩阵 $[F_{xx}]$ 和 $[F_{xP}]$ 的计算 .....	218
第五节	用矩阵力法解超静定结构小结 .....	221
第六节	矩阵力法分析圆形衬砌结构 .....	221
第七节	圆形衬砌结构的源程序 .....	239
第十一章	试验研究 .....	247
第一节	试验内容 .....	247
第二节	土压力量测 .....	248
第三节	基本参数的测定及应用 .....	258
第四节	相似材料模型试验 .....	263
第五节	试验成果分析 .....	269

# 第一章 概 论

## 第一节 结 构 型 式

在地下开挖出的空间中修建的结构物，称为地下建筑结构，如图1-1所示。图1-1(a)表示与土层接触的结构，称为衬砌或被覆，其作用是承受土层和爆炸等静动荷载，并防止地下水和潮气的侵入，衬砌结构是地下结构的主要组成部分，包括顶拱(也有做成平板)，侧墙和底板(也有做成仰拱)三部分。图1-1(b)包括衬砌和内部结构两部分，内部结构由柱子和楼盖等组成。

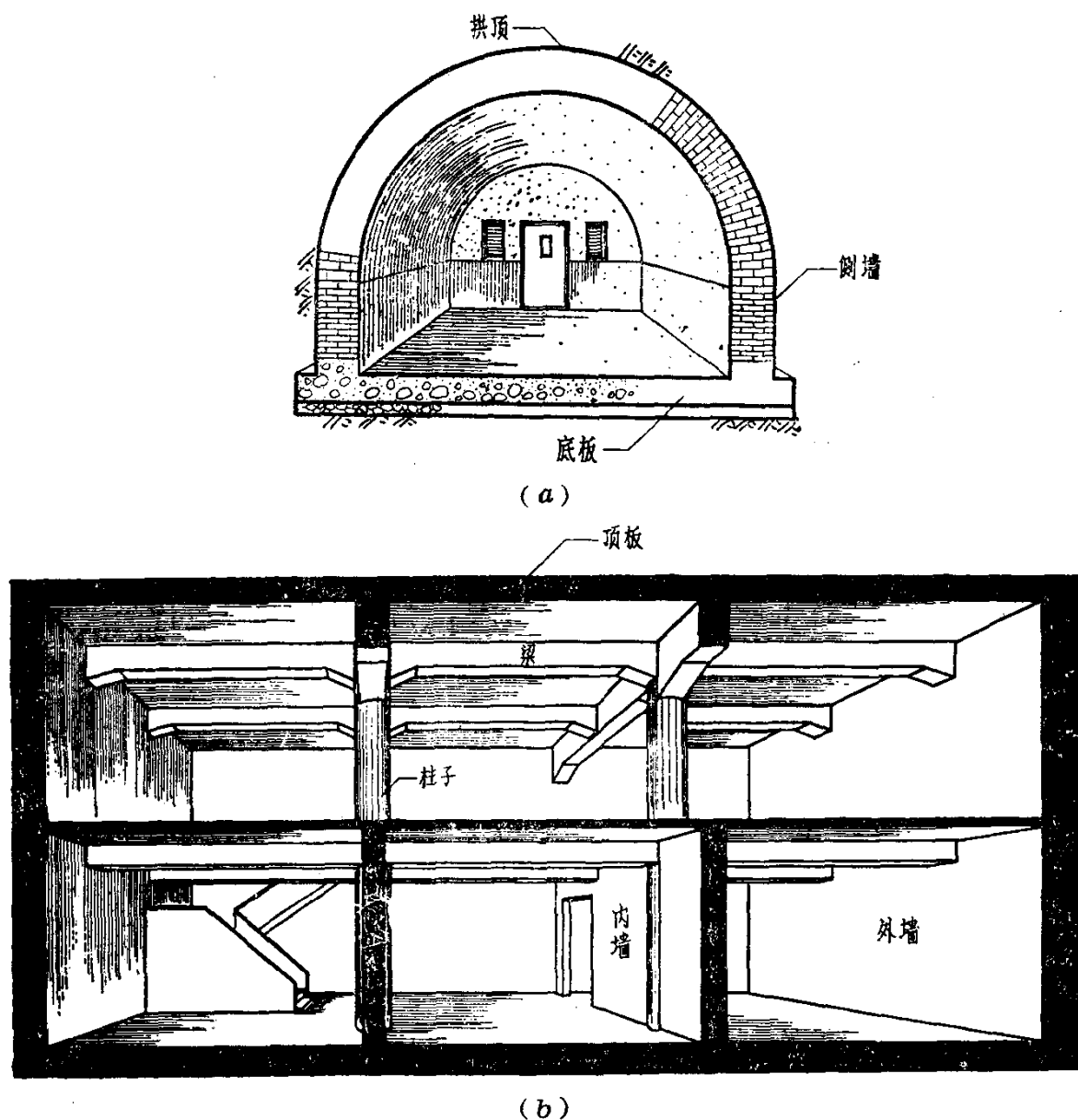


图 1-1

地下建筑工程，按地形条件的不同，有设置在平原和山地两类；按地质情况的差异，可分土层和岩层内的两种。

地下建筑工程较广，在国防、交通、市政、工业与民用等领域都有。例如：掩蔽部，指挥所，人行通道和地下医院等人民防空工程；军事工业及一些重要工业的生产车间，地下油库、地下冷藏库等重要的仓库；地下铁道、立交地道等城市交通隧道以及水底隧道等。此外，还有大量直接作战用的永备筑城和野战工事、海洋建筑和特殊工业。

地下结构的形状和尺寸根据其用途、地形、地质、施工和结构性能等条件而不同，通过勘测和初步设计来加以选用。按照其相对于地表面的位置，地下结构可以是水平的（称为水平坑道），倾斜的（称为斜井）和竖直的（称为竖井），如图 1-2 所示。按水平坑道埋置深度的不同，又可分为浅埋和深埋两种。土层中的浅埋结构根据个别地区经验，一般是指覆土厚度仅 5~10m 左右以内而不采用暗挖法修建的结构。

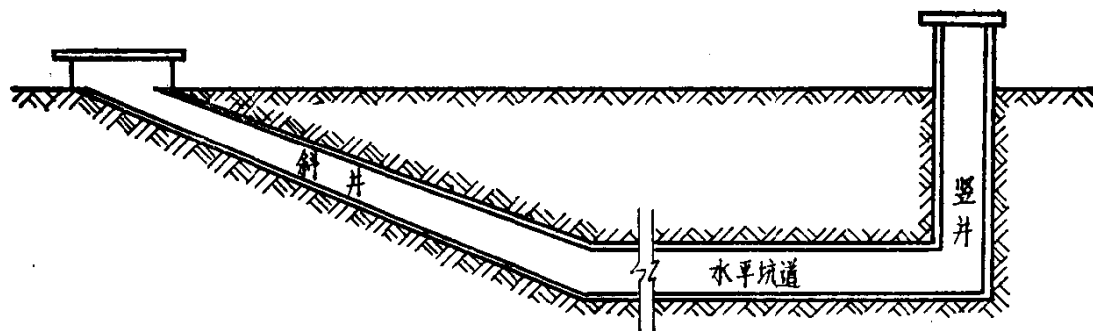


图 1-2

衬砌结构的断面型式主要由使用、地质和施工三个因素来综合决定。要注意到施工方法对地下结构的型式会起重要影响。

结构型式首先由受力条件来控制，即在一定地质条件的土水压力和一定的爆炸与地震等动载下求出最合理和经济的结构型式。地下结构断面可以有如图 1-3 的几种型式：矩形隧道，适宜于工业、民用、交通等建筑物的使用限界，但直线构件不利于抗弯，故在荷载较小，即地质较好、跨度较小或埋深较浅时常被采用。圆形隧道，当受到均匀径向压力时，弯矩为零，可充分发挥混凝土结构的抗压强度，当地质较差时应优先采用。其余四种型式系介于以上两者的中间情况，按具体荷载和尺寸决定，如顶压较大则用直墙拱形。大跨度结构可用落地拱，底板常做成仰拱式。



图 1-3

结构型式也受使用要求的制约，一个地下建筑物必须考虑使用需要，如人行通道，可做成单跨矩形或拱形结构；地下铁道车站或地下医院等应采用多跨结构，既减少内力，又利于使用；飞机库则中间不能设柱而常用大跨度落地拱；在工业车间中则矩形隧道接近使用限界，当欲利用拱形空间放置通风等管道时，亦可做成直墙拱形或圆形隧道。

施工方案是决定地下结构型式的重要因素之一，在使用和地质条件相同情况下，由于施工方法不同而采用不同的结构型式。

综合地质、使用、施工三因素，可归纳为下列几种结构型式：

1) 附建式结构：是房屋建筑下面的地下室，一般有承重的外墙、内墙（地下室作为大厅用时则为内柱）和板或梁板式顶底板结构，如图1-4所示。

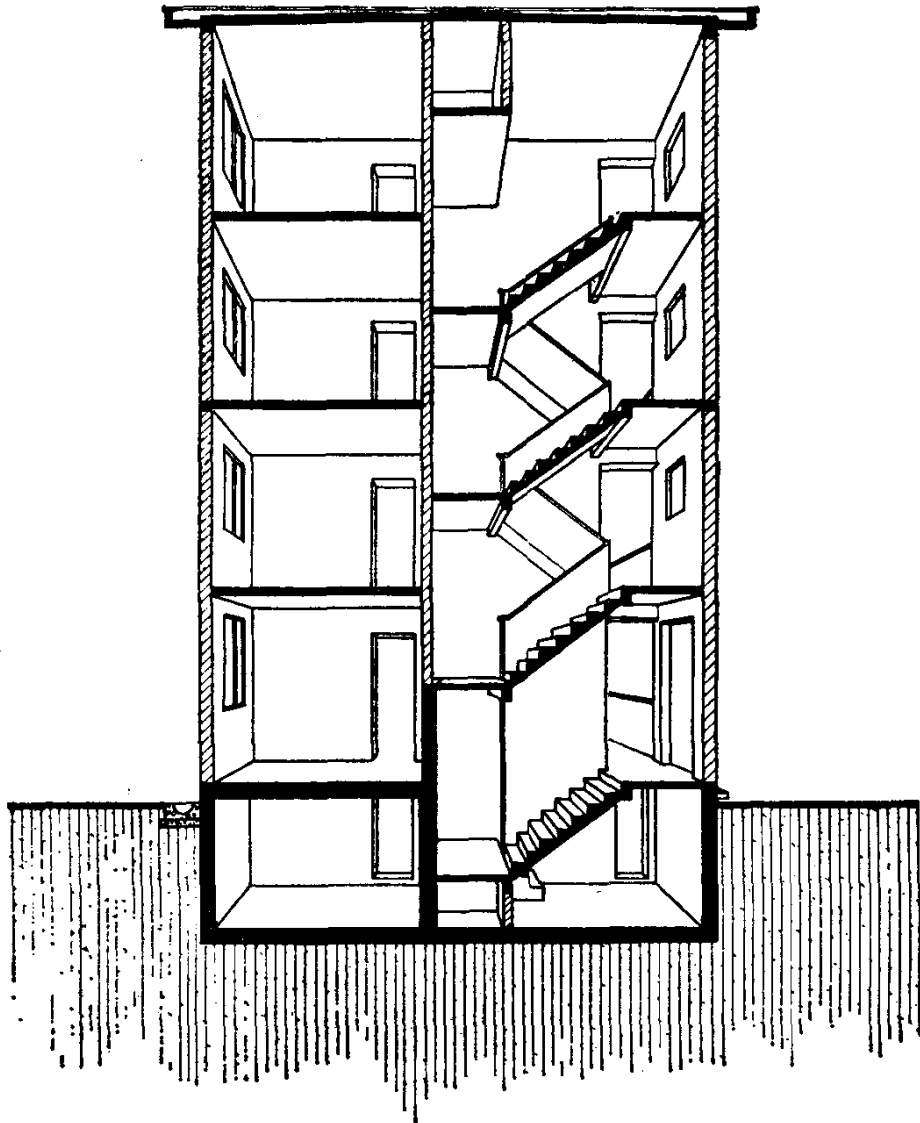


图 1-4

2) 浅埋式结构：平面呈方形或长方形，当顶板做成平顶时，常用梁板式结构。地下指挥所可以采用平面呈条形的单跨或多跨结构，为节省材料顶部可做成拱形；如一般人员掩蔽部常做成直墙拱形结构，如图1-5(a)；如平面为条形的地下铁道等大中型结构，则常做成矩形框架结构，如图1-5(b)(c)所示。

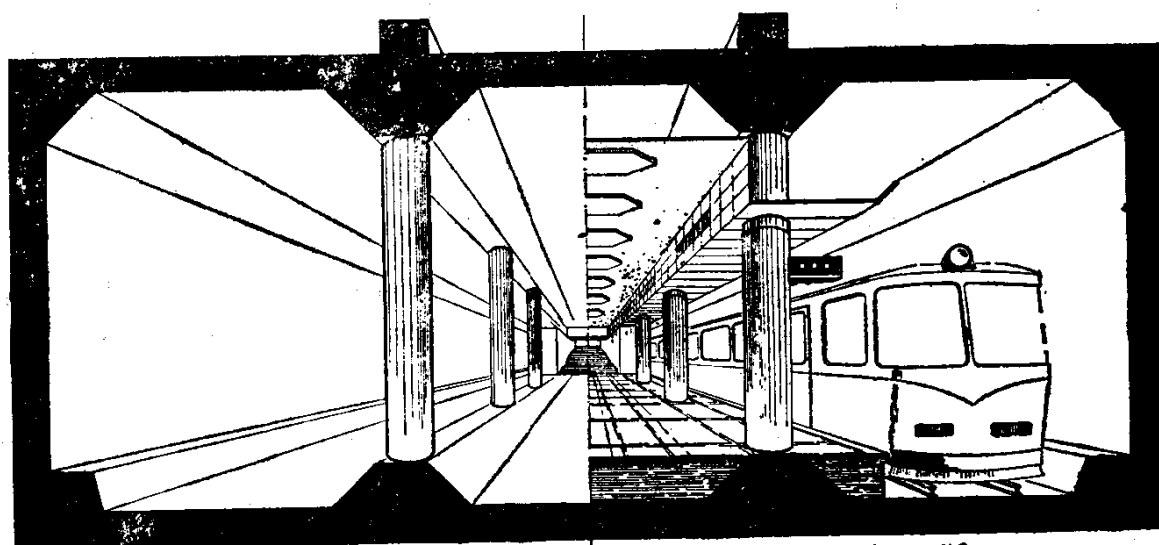
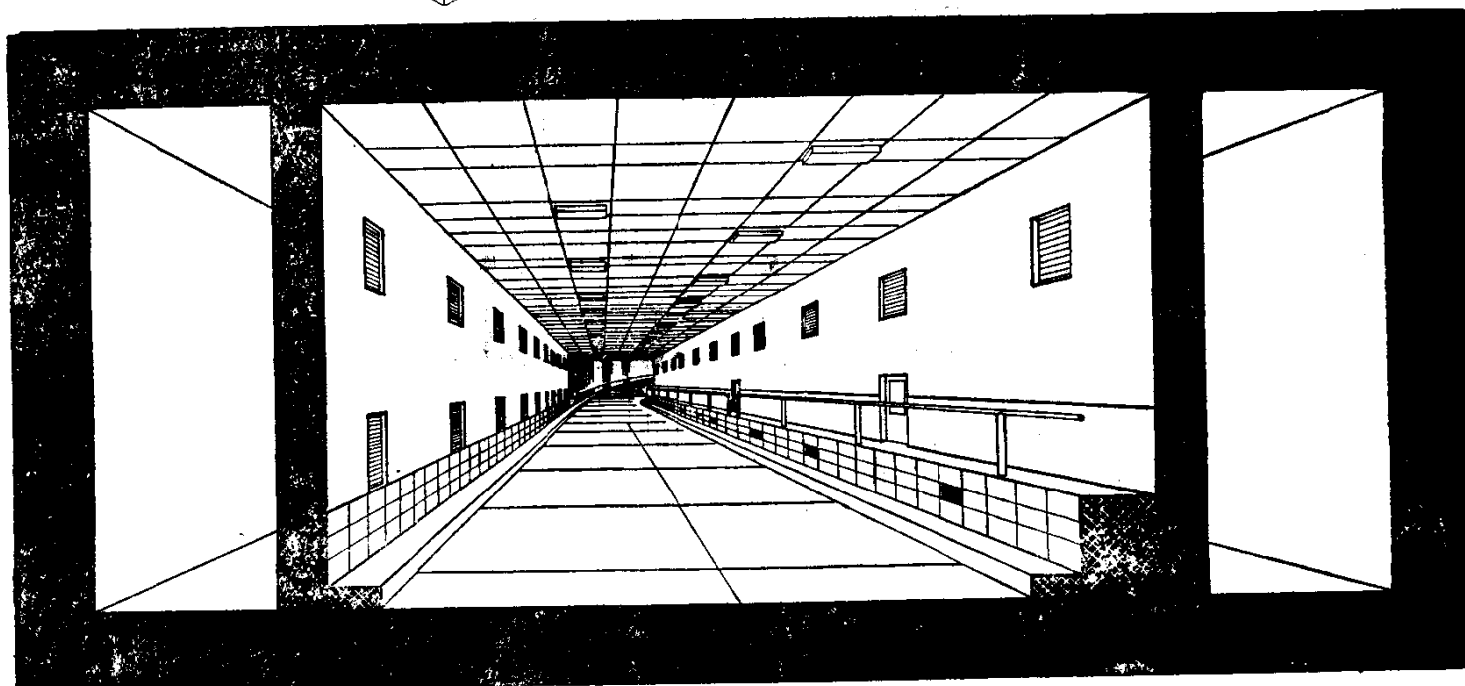
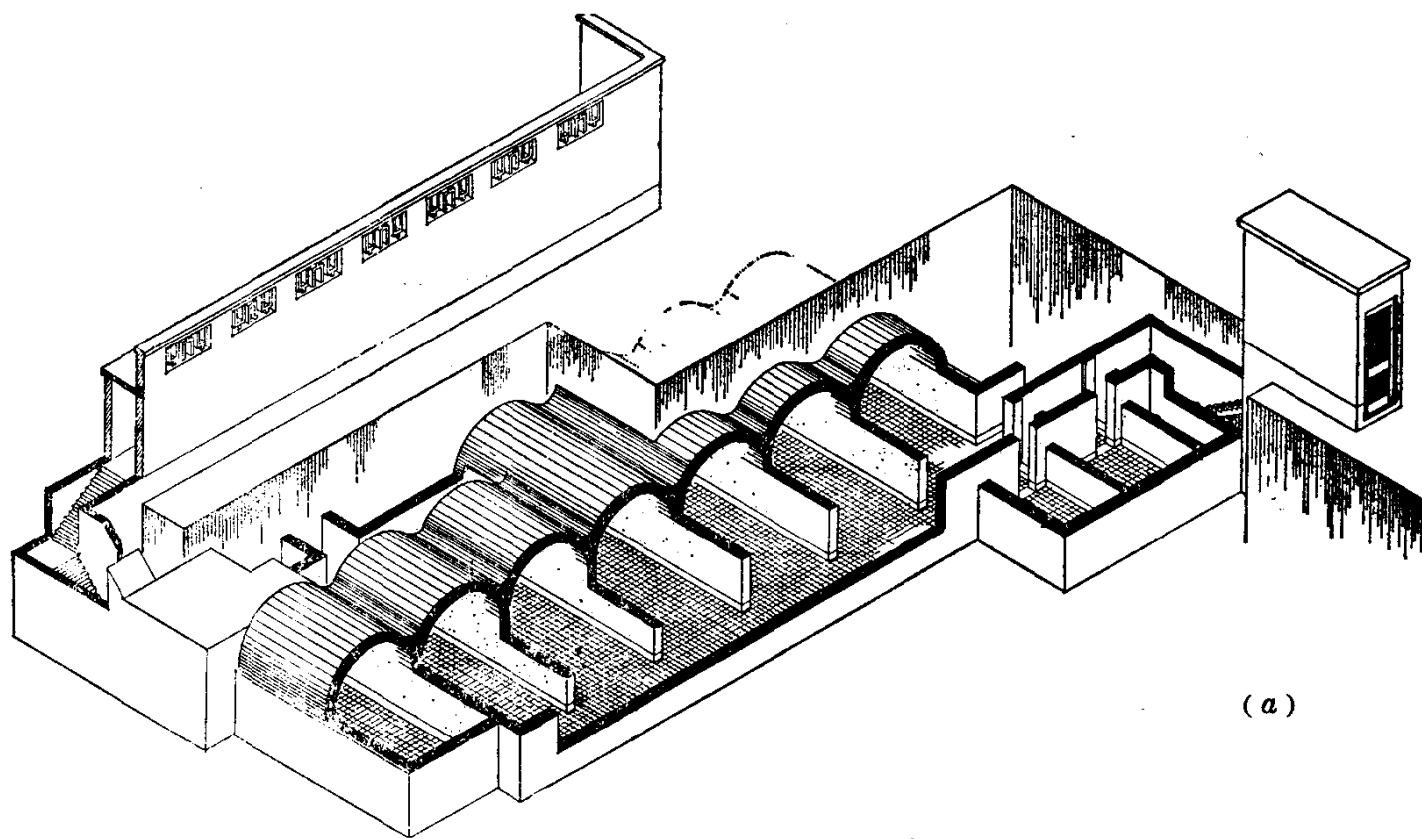
3) 地道式结构：采用矿山法暗挖施工，有直墙拱形结构（图1-6），或曲墙式结构。

4) 沉井法结构：沉井施工时需要在沉井底部挖土，顶部出土，故施工时的沉井为一开口的井筒结构，水平断面一般做成方形，也有圆形，可以单孔也可以多孔，沉毕后再做底顶板，如图1-7。

5) 盾构法结构：盾构推进时，以圆形为最宜，故常采用装配式圆形衬砌，也有做成方形和半圆形的，如图1-8。

6) 连续墙结构：先建造两条连续墙，然后在中间挖土，修建底板、顶板和中间楼层，如图1-9所示。





地下铁道车站结构图

地下铁道车站透视图

图 1-5

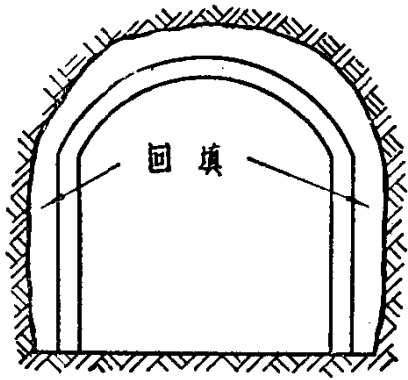


图 1-6

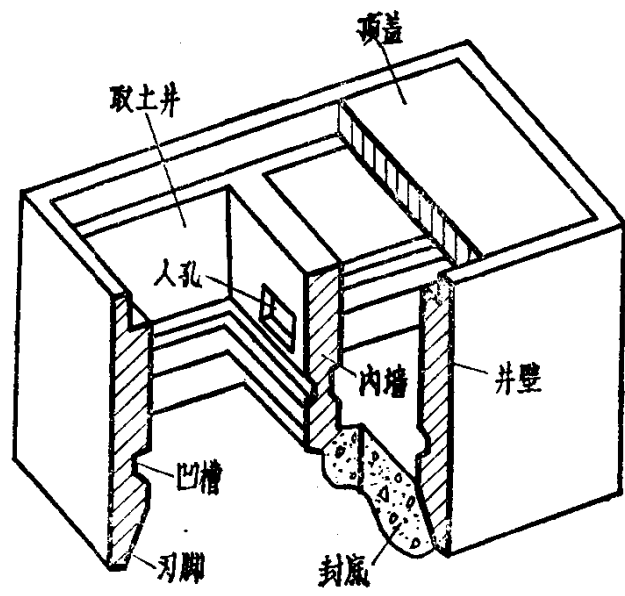


图 1-7

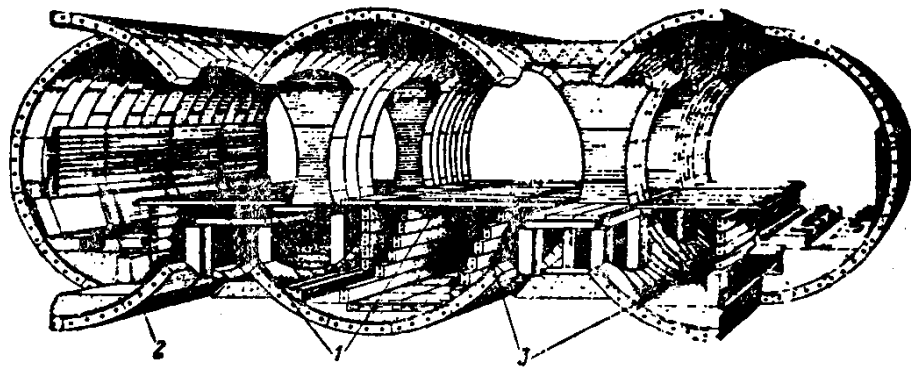


图 1-8

1—站台板；2—墙板；3—隔墙

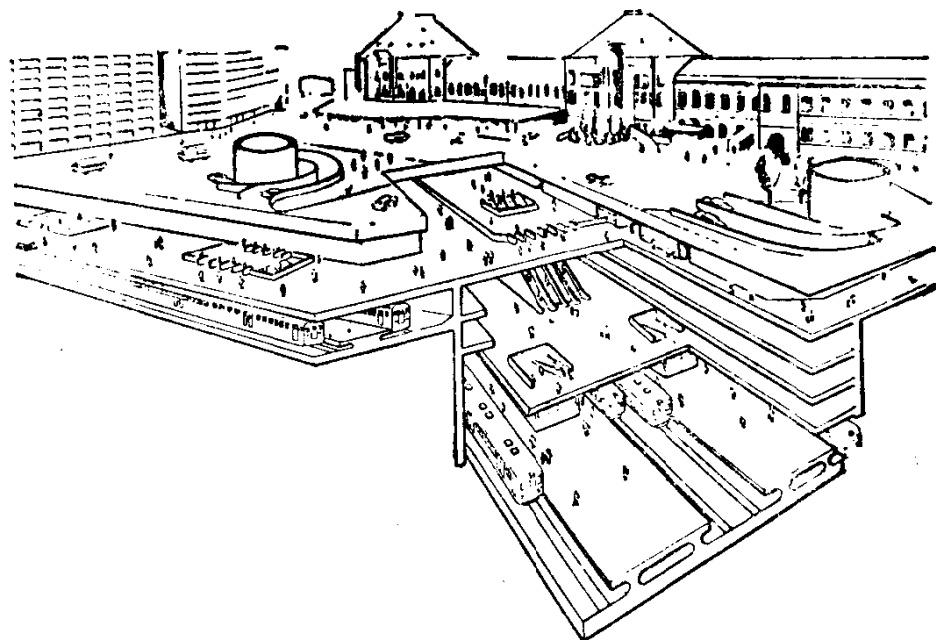


图 1-9

7) 沉管法结构：一般做成箱形结构，二端加以临时封门，运至预定水面处，沉放至设计位置，如图1-10所示。

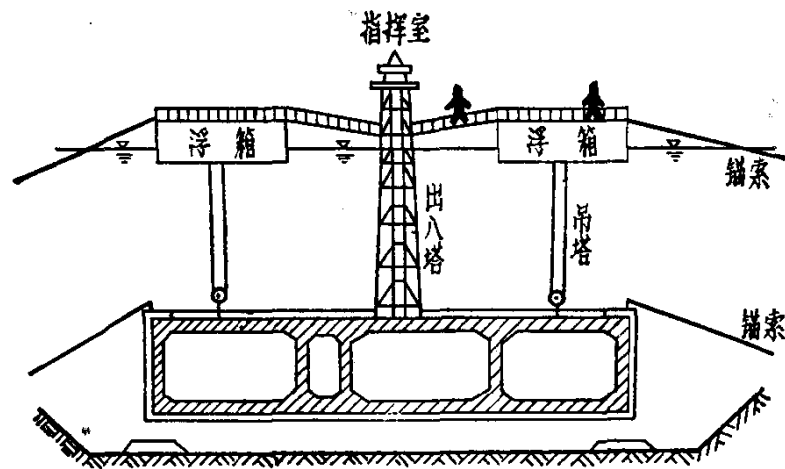


图 1-10

## 第二节 设计内容

修建地下建筑工程，必须遵循基本建设程序，进行勘测、设计与施工。设计分工艺设计、规划设计、建筑设计、防护设计、结构设计、设备设计和概预算等。每一个工程经过结构方案比较，选定了结构型式和结构平面布置图后，结构的具体工作还有三部分：

### 一、横向框架的设计

隧道结构的纵向较长，横断面沿纵向通常都是相同的。沿纵向在一定区段上作用的荷载也可认为是均匀不变的，同时，相对于结构纵长来说，结构的横向尺寸，即高度和宽度也不大，力总是向短向传递的。可认为荷载主要由横向框架承受，即通常沿纵向截取 1 m 的长度作为计算单元，如图1-11所示，从而将一个空间结构简化成单位延米长的平面结构进行分析。

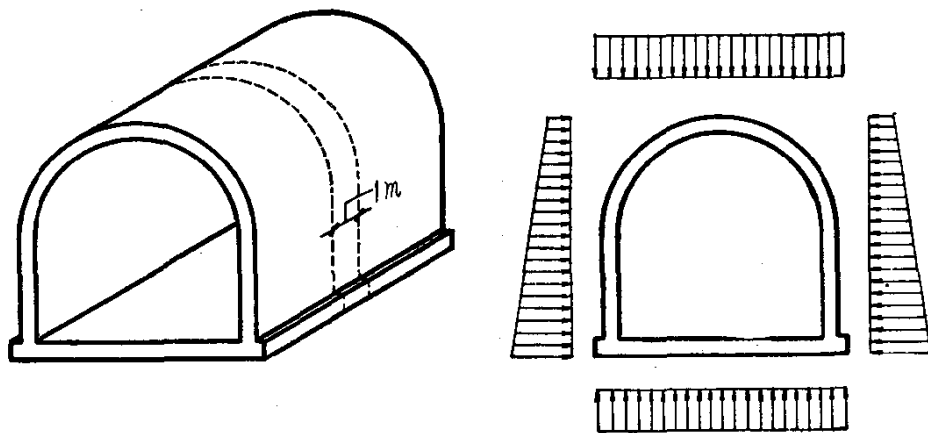


图 1-11

横向框架的结构设计分荷载确定、计算简图、内力分析、截面设计以及绘制施工图等几个步骤。内力分析时，常用一种简化图形来代替实际结构，这种简化图形称为结构的计算简图。计算简图应该基本上正确地反映结构的主要受力状态和支承条件。其简化的程度根据计算手段而定，一般应使内力计算得到最大可能的简化；当采用电子计算机时，可以在计算机容量范围内尽可能精确地反映实际结构。



## 二、隧道纵向设计

横向框架设计后，得到隧道横断面的尺寸和配筋，但是沿隧道纵向需配多少钢筋，沿纵向是否需要分段，每段长度多少等等，这就是纵向设计问题。

工程实践表明，当隧道过长或施工养护注意不够时，混凝土会产生较大收缩，使纵向隔一定距离  $l$  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。

为保证使用，地下结构纵向需设置伸缩缝。伸缩缝间距主要由材料、施工、土质和结构情况，参照各地实践经验确定。

当地基不均匀、两段结构的刚度或荷载悬殊可能产生相对沉降时，须设置沉降缝。伸缩缝和沉降缝统称变形缝。

变形缝间的隧道区段  $l$ ，可视作长度为  $l$ 、截面为箱形的弹性地基梁。一般产生纵向弯矩，使结构底板和侧墙下部受拉。考虑到荷载沿纵向可能不均匀分布以及地基土壤性质和反力不均匀，有时结构顶部也会受拉。为了抵抗弯曲、不均匀沉降以及收缩、温度等引起的纵向拉力，需在纵向设置构造钢筋。

从已发现的地下工程事故看，较多的是纵向设计考虑不周而产生裂缝，故应加强这方面的研究，并在设计和施工中予以重视。

## 三、出入口设计

一般地下工程的出入口，结构规模虽小但较复杂，有竖井、斜井、楼梯、三防房间，防护门等结构，如图1-12所示。从使用上讲，出入口是很关键的部分，设计时要予以重视。出入口结构应与主体结构等强度。

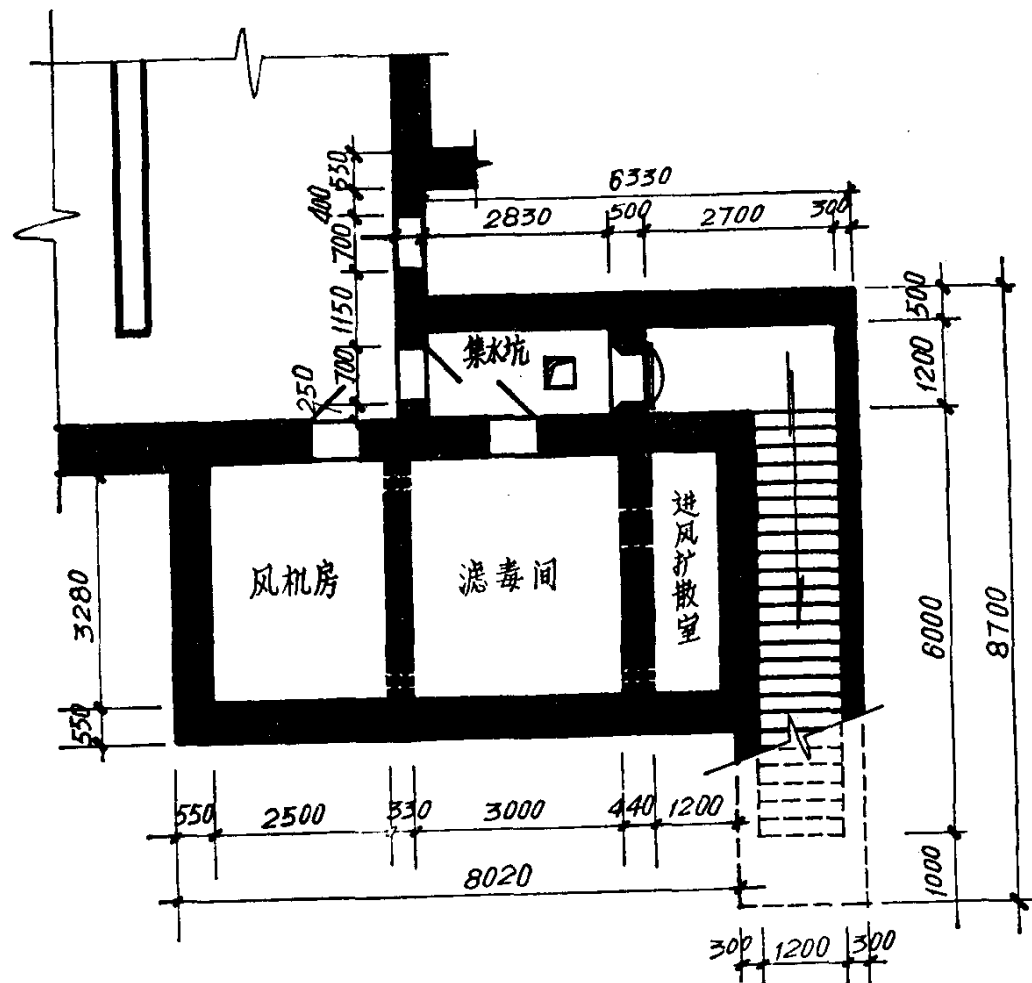


图 1-12

设计工作一般分为初步设计和技术设计（包括施工图）两个阶段。

初步设计中的结构设计部分，主要任务是在满足使用要求下，解决设计方案技术上的可能性与经济上的合理性，并提出投资、材料、施工等指标。

初步设计的内容大体是

- （一）工程防护等级，三防要求与动载标准的确定；
- （二）确定埋置深度与施工方法；
- （三）草算荷载值；
- （四）选择建筑材料；
- （五）选定结构型式和布置；
- （六）估算结构跨度、高度、顶底板及边墙厚度等主要尺寸；
- （七）绘制初步设计结构图；
- （八）估算工程材料数量及财务概算。

结构型式及其主要尺寸的确定，一般可通过同类工程的类比法，吸取国内外已建工程的经验教训，提出数据。必要时可用查表或近似计算方法求出内力，并按经济合理的含钢率初步配置钢筋。

将地下工程的初步设计图纸附以说明书后，送交有关主管部门审定批准后，才可进行下一步的技术设计。

技术设计主要是解决结构的强度、刚度和稳定、抗裂性等问题，并提供施工时结构各部件的具体细节尺寸及连接大样。

技术设计的主要内容是

- （一）计算荷载：按建筑用途、防护等级、地震级别、埋置深度和土层情况等求出作用在结构上的各种荷载值；
- （二）计算简图：根据实际结构和计算工具情况，拟定出恰当的计算图式；
- （三）内力分析：选择结构内力计算方法，得出结构各控制设计截面的内力；
- （四）内力组合：在各种荷载内力分别计算的基础上，对最不利的可能情况进行内力组合，求出各控制截面的最大设计内力值；
- （五）配筋设计：通过截面强度和裂缝计算得出受力钢筋，并确定必要的分布钢筋与架立钢筋；
- （六）绘制结构施工详图：如结构平面图，结构构件配筋图，节点详图，还有风、水、电和其它内部设备的预埋件图；
- （七）材料，工程数量和工程财务预算。

### 第三节 荷 载

#### 一、荷载种类

作用在地下结构上的荷载，按其存在的状态，可以分为静荷载，动荷载和活荷载等三大类。

（一）静荷载：又称恒载。是指长期作用在结构上且大小、方向与作用点不变的荷载，如结构自重、土壤压力和地下水压力等；

(二) 动荷载: 要求具有一定防护能力的地下建筑物, 需考虑原子武器和常规武器(炸弹、火箭)爆炸冲击波压力荷载, 这是瞬时作用的动荷载; 在抗震区进行地下结构设计时, 应计算地震波作用下的动荷载作用;

(三) 活荷载: 是在结构物施工和使用期间可能存在的变动荷载, 其大小和作用位置都可能变化, 如地下建筑物内部的楼面荷载(人群、物件和设备重量)、车间的吊车荷载, 地面附近的堆积物和车辆对地下结构作用的荷载以及施工安装过程中的临时性荷载;

(四) 其它荷载: 使结构产生内力和变形的各种因素中, 除由以上主要荷载的作用外, 通常还有: 混凝土材料收缩(包括早期混凝土的凝缩与日后的干缩)受到约束而产生的内力; 温度变化使地下结构产生内力, 例如浅埋结构土壤温度梯度的影响, 浇灌混凝土时的水化热温升和散热阶段的温降; 软弱地基或结构刚度差异较大时, 由于结构不均匀沉降而引起的内力。

材料收缩、温度变化、结构沉陷以及装配式结构尺寸制作上的误差等因素对结构内力的影响都比较复杂, 往往难以进行确切计算, 一般以加大安全系数, 和在施工、构造上采取措施来解决。中小型工程在计算结构内力时可不计上述因素, 大型结构应予以估计。

## 二、荷载组合

上述几类荷载对结构可能不是同时作用, 须进行最不利情况的组合。先计算个别荷载单独作用下的结构各部件截面的内力, 再进行最不利的内力组合, 得出各设计控制截面的最大内力。最不利的荷载组合一般有以下几种情况:

- (一) 静载;
- (二) 静载+活载;
- (三) 静载+原子爆炸动载;
- (四) 静载+炮(炸)弹动载;

地面建筑下的地下室(即附建式), 考虑动载作用时, 地面部分房屋有被冲击波吹倒的可能, 结构计算时是否考虑房屋的倒塌荷载需按有关规定。

## 第四节 计算原则

### 一、使用规范

当前在地下结构设计中试行的规范、技术措施、条例等有多种。有的沿用地面建筑的设计规范。设计时应遵守各有关规范等。

### 二、设计标准

(一) 根据建筑用途、防护等级、地震等级等确定设计地下建筑物的荷载。如按战术技术要求规定的防护等级承受核爆炸冲击波地面超压的一定级别以上的工事, 还应按一定口径的普通炸弹或火箭的直接命中进行计算。此外各种地下建筑工程均应承受正常使用时的静力荷载。

(二) 地下建筑工程建筑材料的选用, 一般不得低于表1-1所列数据。

钢材用 I, II 级。

防炮(炸)弹局部作用的整体式工程或遮弹层混凝土用300#。

(三) 地下衬砌结构一般为超静定结构, 其内力在弹性阶段按结构力学计算。考虑抗



表 1-1

材 料 名 称	现 浇 混 凝 土	预 制 混 凝 土	块 石	砖	砂 浆
标 号	150*	200*	200*	75*	50*

爆动载时，允许考虑由塑性变形引起的内力重分布。

#### (四) 截面计算原则

结构截面计算时，按总安全系数法进行，一般进行强度、裂缝（抗裂度或裂缝宽度）和变形的验算等。混凝土和砖石结构仅需进行强度计算，并在必要时验算结构的稳定性。

钢筋混凝土结构在施工和正常使用阶段的静荷载作用下，除强度计算外，一般验算其裂缝宽度，根据工程的重要性，限制裂缝宽度小于0.10~0.20mm，但不允许出现通透裂缝。对较重要的结构则不能开裂，即验算抗裂度。

钢筋混凝土结构在爆炸动载作用下只需进行强度计算，不作裂缝验算，因在轰炸情况下，只要求结构不倒塌，允许出现裂缝，日后再修固。

#### (五) 安全系数

结构在静载作用下的安全系数可参照有关规范采用。

对于地下结构，如施工条件差不易保证质量和荷载变异大时，对混凝土和钢筋混凝土

结构在动载下的安全系数 $K_{动}$  表 1-2

结 构 类 别	$K_{动}$
钢筋混凝土	1.0
混 凝 土	1.2
砖石砌体	1.7
三七灰土	2.0

结构需考虑用附加安全系数1.1。

静载下的抗裂安全系数不小于1.25，视工程重要性，可予提高。

结构在爆炸荷载作用下，由于爆炸时间较短，而荷载很大，为使结构设计经济和配筋合理，其安全系数可以降低，如表1-2所示。

#### (六) 材料强度指标

一般采用工业与民用建筑规范中的规定

值，亦应分别情况参照水利、交通和人防、国防等专门规范。

结构在动载作用下，材料强度可以提高；提高系数见有关规定。

### 三、计算理论

#### (一) 计算原理

地下结构的计算理论较多地应用以文克尔假定的基础的局部变形理论以及以弹性理论为基础的共同变形理论。

地下结构与地面结构不同之点在于地下结构周围都被土层包围着，在外部主动荷载作用下，衬砌发生变形，由于衬砌外围与地层紧密接触，因此衬砌向地层方向变形的部分会受到来自地层的抵抗力。这种抵抗力称为地层弹性抗力，属于被动性质，其数值大小和分布规律与衬砌的变形有关，因而，与其它主动荷载不同。弹性抗力限制了结构的变形，故改善了结构的受力情况。

地下结构在主动荷载作用下会发生变形，而地层阻止这种变形发展，给结构一定的弹性抗力，如图1-13所示。

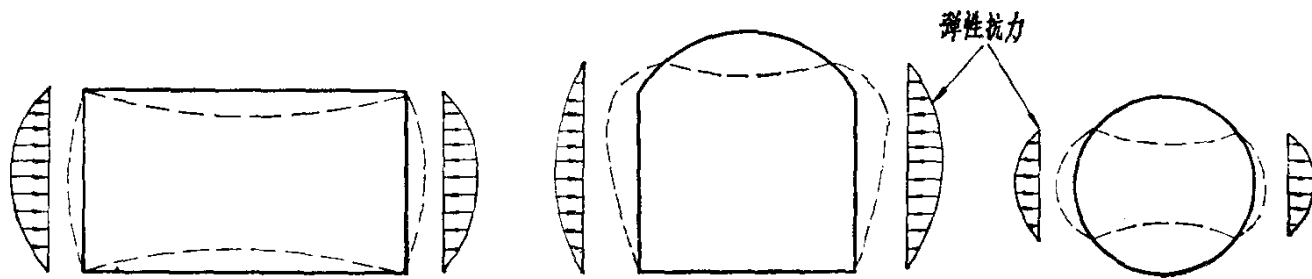


图 1-13

拱形、圆形等有跨变结构的弹性抗力作用显著。而矩形结构的抗力作用较小，在软土中常忽略不计。在计算中是否考虑弹性抗力的作用，以及如何考虑，应视具体的地层条件、结构型式而定。

### (二) 计算方法

土层地下建筑结构的计算方法有：一般结构力学法，弹性地基梁法(见本书第三章)，矩阵分析法(见本书第十章)。近来发展用连续介质力学的有限单元法来计算结构与地层的内力，并进而考虑弹塑性、非线性、粘弹性的计算方法。诚然，随着科学技术的发展，必然会创造出更切合实际的计算方法。

## 第二章 附建式结构

### 第一节 概 述

#### 一、附建式地下结构的特点

根据一定的防护要求，修建于较坚固的建筑物下面的地下室，称“防空地下室”或“附建式人防工事”。在个别情况下，在已建成的掘开式工事上部修建地面建筑物后，原来的工事即成为附建式工事；在已有的地面建筑内构筑掘开式工事，也可称为附建式工事。在工程实践中大量的是与上部地面建筑同时设计、施工的附建式工事，即防空地下室。防空地下室的构造，称“附建式地下结构”。附建式地下结构是整个建筑物的一部分，也是防护结构的一种型式，它既不同于一般地下室结构，也不同于单建式地下结构。我们从以下几方面来分析其特点。

由于防空地下室附建于上部地面建筑的下面，因此，它成为地面建筑物的一部分，可以结合基本建设进行构筑。在第二次世界大战以后，各国对修建防空地下室都很重视。在国外，有的国家规定，新建住宅和公共建筑物按人口定额修建地下室，由国家统一设计、建造，平时完成；有的国家给予经费补贴，鼓励私人建造住宅下的防空地下室。在我国，防空地下室是人防工程建设的重点。国家曾有过要求，今后在新建、改建的大、中型工业交通项目和较大的民用建筑中，要按建筑面积比例同时构筑防空地下室，并在本地区人防规划和城市规划的统一安排下，将经费、材料纳入基本建设计划，按照国家基本建设程序和要求，进行设计和施工。

结合基本建设修建防空地下室与修建单建式工事相比，有以下优越性：

1. 节省建设用地，这对大城市区尤为重要；
2. 便于平战结合（下面将进一步分析）；
3. 人员和设备容易在战时迅速转入地下；
4. 增强上层建筑的抗地震能力，在地震时防空地下室尚可作为避震室之用；
5. 上层建筑对战时核爆炸冲击波、光辐射、早期核辐射以及炮（炸）弹有一定的防护作用；防空地下室的造价比单建式的要低；
6. 便于施工管理，采用新技术，保证工程质量，同时也便于维护。

但是，由于地下室的土方量较大，结构构造比较复杂，给施工带来一些麻烦，影响上部地面建筑的施工速度，拖延工期；在战时，上层建筑遭到破坏时容易造成出入口的堵塞、引起火灾等不利因素。火灾是核爆炸的一个必然后果，上部结构与门窗破坏之后，为火灾蔓延提供了条件，在第二次世界大战期间，大型火灾是房屋破坏和人员伤亡的一个主要原因。因此，在防空地下室设计中，应使顶板上的覆土层厚度满足防火的要求。

前面提到，上层建筑在战时有一定的防护作用。那么，对于上部地面建筑来说，只有它满足一定的条件时，则其下面的地下室可按附建式工事设计，即考虑它的防护作用；当