

## 1.1 地下建筑结构的概念和特点

地下建筑结构是指在地面以下保留、回填或不回填上部地层,在地下空间内修建能够提供某种用途的建筑物。

### 1.1.1 工程特点

地下建筑结构设计不同于地上建筑结构设计,其设计的工程特点表现在:

(1) 地下空间内建筑结构替代了原来的地层,建筑结构承受了原本由地层承受的荷载。在设计和施工过程中,要最大限度地发挥地层自承载能力,以便控制地下建筑结构的变形,降低工程造价。

(2) 在受载状态下构建地下空间结构物,地层荷载随着施工进度发生变化,因此,设计要考虑最不利的荷载工况。

(3) 作用在地下建筑结构上的地层荷载,应视地层的地质情况合理简化确定。对于土体一般可按松散连续体计算;而对岩体,首先查清岩体的结构、构造、节理、裂隙等发育情况,然后确定是按连续还是非连续介质处理。

(4) 地下水状态对地下建筑结构设计 and 施工影响较大。设计前必须弄清地下水的分布和变化情况,如地下水的静水压力及动水压力、地下水的流向、地下水的水质对结构物的腐蚀影响等。

(5) 地下建筑结构设计要考虑结构物从开始构建到正常使用以及长期运营过程的受力工况,注意合理利用结构的反力作用,节省造价。

(6) 在设计阶段获得的地质资料,有可能与实际施工揭露的地质情况不一样,因此,在地下建筑结构施工过程中,应根据施工的实时工况,动态修改设计。

(7) 处在岩体中的地下建筑结构物,围岩既是荷载的来源,在某些情况下又与结构共同构成承载体系。

## 2 地下建筑设计(第3版)

(8) 当地下建筑结构的埋置深度足够大时,由于地层的成拱效应,结构所承受的围岩垂直压力总是小于其上覆地层的自重压力。地下建筑结构上的荷载与众多的自然和工程因素有关,它们的随机性和时空效应明显,而且往往难以量化。设计时必须考虑个体工程的特殊性,以及相关工程的普遍性。

### 1.1.2 设计特点

地下建筑设计的方法与地上建筑设计的方法相比,其设计特点有以下几个方面:

#### 1) 基础设计

(1) 深基础的沉降计算要考虑土的回弹再压缩的应力-应变特性;

(2) 处于高水位地区的地下工程应考虑基础底板的抗浮问题;

(3) 厚板基础设计,如筏型基础的板厚设计,应根据建筑荷载和建筑物上部结构状况,以及地层的性能,按照上部结构与地基基础协同工作的方法确定其厚度及配筋。

#### 2) 墙板结构设计

地下建筑结构的墙板设计比地上建筑结构要复杂得多,作用在地下建筑结构外墙板上的荷载(作用力)分为垂直荷载(永久荷载和各种活荷载)、水平荷载(施工阶段和使用阶段的土体、水压力以及地震作用力)、变形内力(温度应力和混凝土的收缩应力等),设计工作应根据不同的施工阶段和最后使用阶段,采用最不利的组合和墙板的边界条件,进行结构设计。

#### 3) 明挖与暗挖结构设计

地下建筑结构的明挖可采用钢筋混凝土预制件或现浇钢筋混凝土结构,而暗挖法施工一般采用现浇钢筋混凝土拱形结构。

#### 4) 变形缝的设置

地下建筑结构中设变形缝最难处理的是防水问题,所以,地下建筑结构一般尽量避免设变形缝。即使在建筑荷载不均匀可能引起建筑物不均匀沉降的情况下,设计上也尽可能不采用沉降缝,而是通过局部加强地基、用整片刚性较大的基础、局部加大基础压力增加沉降或调整施工顺序等来得到整体平衡的设计方法,使沉降协调一致。地下结构环境温差变化较地上结构小,温度伸缩缝间距可放宽,也可以通过采用结构措施来控制温差变形和裂缝,以避免因设置伸缩缝出现的防水难题。

#### 5) 其他特殊要求

地下建筑设计还应考虑防水、防腐、防火、防霉等特殊要求的设计。

## 1.2 地下建筑结构分类和形式

根据地下空间的特点,地下建筑结构按用途、几何形状和埋深的分类见表 1-1~表 1-3。

表 1-1 地下建筑结构按用途分类

序号	用途	功能
1	工业民用	住宅、工业厂房等
2	商业娱乐	地下商业城、图书馆等
3	交通运输	隧道、地铁、地下停车场等
4	水利水电	电站输水隧道、农业给排水隧道等
5	市政工程	给水、污水、管路、线路、垃圾填埋等
6	地下仓储	食物、石油及核废料存储等
7	人防军事	人防工事、军事指挥所、地下医院等
8	采矿巷道	矿山运输巷道和开采巷道等
9	其他	其他地下特殊建筑

表 1-2 地下建筑结构按几何形状分类

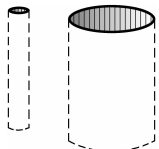
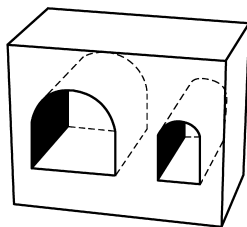
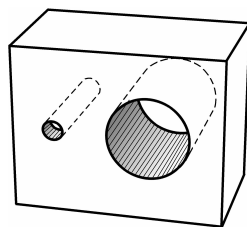
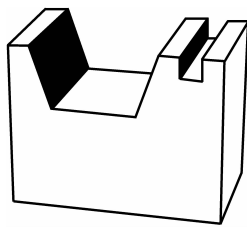
几何形状	施工	形式	方向	几何形状	施工	形式	方向
	钻孔或竖井	挖掘	垂直或倾斜		洞室或洞穴	天然或挖掘	水平或倾斜
	微型隧道或隧道	天然或挖掘	水平或倾斜或螺旋		竖壕或露天矿	明挖	倾斜或垂直

表 1-3 地下建筑结构按埋深分类

名称	埋深范围/m			
	小型结构	中型结构	大型运输系统结构	采矿结构
浅埋	0~2	0~10	0~10	0~100
中深	2~4	10~30	10~50	100~1 000
深埋	>4	>30	>50	>1 000

## 4 地下建筑设计(第3版)

典型的地下建筑形式如下:

### 1.2.1 居民住宅

窑洞可能是人类使用地下建筑结构最古老的形式。图 1-1 所示为我国农村的地下黄土窑洞。世界上许多地区的宗教和超常规使用的场所也被建在地下,如图 1-2、图 1-3 所示。图 1-2 为哥伦比亚锡帕基拉(Zipaquira)地下盐洞大教堂入口。图 1-3 为印度建在岩石中的阿楼拉(Ellora)佛教寺庙。

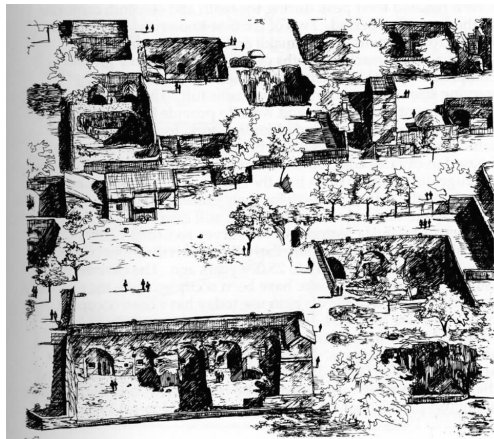


图 1-1 我国农村地下黄土窑洞

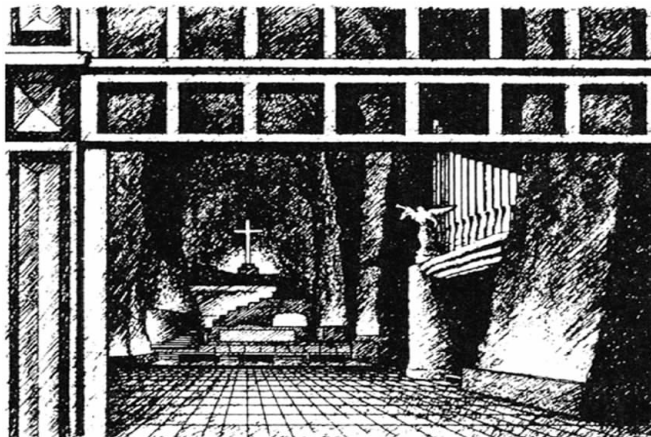


图 1-2 哥伦比亚锡帕基拉地下盐洞大教堂入口  
(Pinzon-Isaza, 1983 年)



图 1-3 印度建在岩石中的阿楼拉佛教寺庙

### 1.2.2 娱乐场所

地下建筑娱乐场所包括天然洞室探险、旅游观光、运动设施和社区中心。

图 1-4 为前捷克斯洛伐克的旅游小船穿过迈查尔(Machocha)溶洞。

图 1-5 为挪威加尔克(Gjorvik)的地下游泳池。

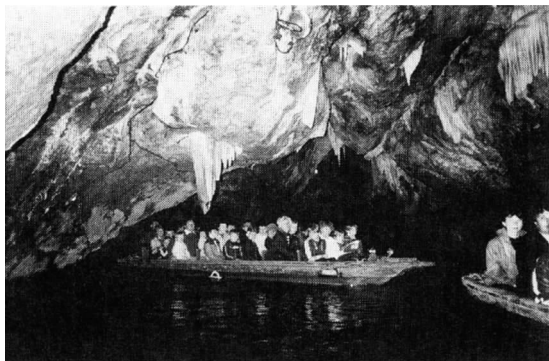


图 1-4 前捷克斯洛伐克的旅游小船穿过迈查尔溶洞



图 1-5 挪威加尔克的地下游泳池

图 1-6 为加拿大蒙特利尔(Montreal)地下步行街网络布置图(部分)。

图 1-7 为法国巴黎亚乐(Les Halles)地下街外景。

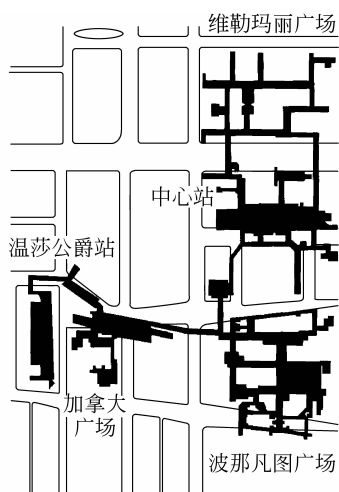


图 1-6 加拿大蒙特利尔地下步行街网络布置图(部分)



图 1-7 法国巴黎亚乐地下街外景

### 1.2.3 商业与教育设施建筑物

地下商业建筑物包括游览设施、展览馆和图书馆等。如建在哈佛大学校园里的内森·汞撒利·蒲赛(Nathan Mersh Pusg)图书馆(见图 1-8),英国牛津大学的拉德克利夫(Radcliffe)科学图书馆和日本东京七层深的国家国会图书馆。

教育设施建筑在地下建筑中占有重要地位,一般是浅埋明挖式建筑物,以防范火灾,使人容易从安全出口逃脱,如图 1-9、图 1-10 所示。明尼苏达大学的民用与矿产工程技术大楼,就是针对校园地表空

间的拥挤和明尼苏达州恶劣的天气而修建的。该工程表明,在明尼阿波利斯圣保罗开发地下空间存在巨大潜能。

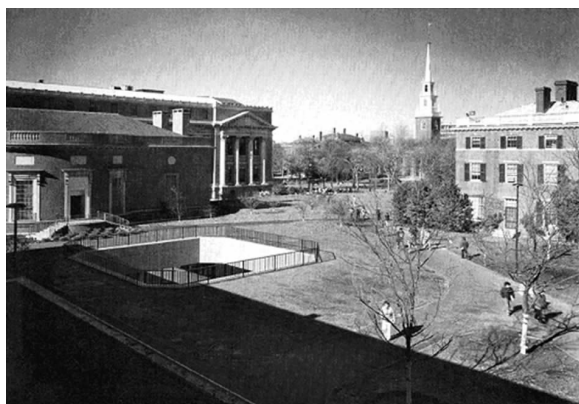


图 1-8 哈佛大学蒲赛图书馆



图 1-9 加利福尼亚旧金山莫斯科(Moscone)会议中心

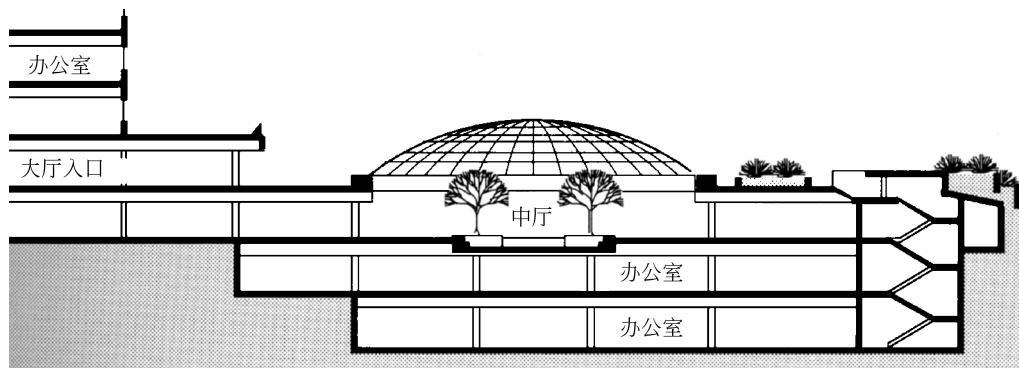


图 1-10 美国内布拉斯加州奥马哈建筑群

在芬兰的一个技术研究中心,一座由几个大型岩体洞室组成的地下研究实验室正常有 50 人在工作,但是在紧急避护时,它可容纳 6 000 人。

### 1.2.4 特殊设施

位于美国明尼苏达州橡树公园山庄的保密监狱,其部分结构建于地下,如图 1-11 所示。该监狱设置在一个浅峡谷的凹陷处,监狱外墙处于四周斜坡监视下,高大的外墙及观望塔也起着威慑作用,绝对安全。

在法国、印度、意大利、日本和美国,重大粒子物理实验等国家级研究设施都建在岩洞和隧道中。巨大的粒子碰撞实验室也建在地下,以避免偏高的辐射和从磁场逸出的加速电子束可能产生的严重后果。

在世界范围内的许多城市,有许多医疗设施和紧急事件应急设施都建在地下。除满足民防要求外,

也用作和平时期的医院。例如,上海考虑民防要求,在地下建有一个 430 张床位的医院。2006 年上海地下掩体改建 90 000m<sup>2</sup>,遇紧急情况时可容纳 20 万人在里面生活 7~15 天。

### 1.2.5 地下停车场

大城市修建地下停车场比较普遍。在高层住宅和大型交际活动场所,需要配套大量停车的地方,为了不破坏地表环境和大量占地,修建地下停车场成为解决方案之一。图 1-12 所示为法国巴黎地下停车场入口。



图 1-11 明尼苏达州橡树公园监狱

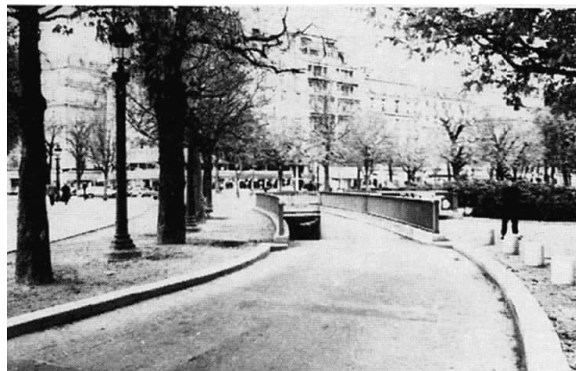


图 1-12 法国巴黎地下停车场入口

### 1.2.6 工业设施

工业设施是否建在地下,通常考虑三个因素:

- (1) 战时保护;
- (2) 地下环境的特殊属性;
- (3) 合理使用或降低费用。

“二战”期间,许多工业设施被迁到地下,以躲避空中侦察或者提供保护以避免被轰炸。在英格兰和伦敦,一些区域的地下系统被转换成了最高机密的工厂。德国于 1942 年 5 月签发了一项法令,使整个德国的航空业全面分散到地下。地下结构采用了跨度约 200m 的大跨土层覆盖壳结构。在“二战”中,日本也修建了超过 28 000m<sup>2</sup> 的地下工厂。

除了安全保护,可利用地下结构潜在的特殊属性,如稳定的热环境、低振动、有效控制通风、低渗透、岩石洞室抗地面荷载能力等。此外,从美学意义出发也促使一些工业设施全部或部分建在地下。

### 1.2.7 军事及民防设施

安全防卫及军事使用经常与地下使用相互联系。由于有限的进入点并在轰炸下得以保护,地下设施能提供安全的庇护。如导弹筒仓、地下潜水艇基地、弹药储库和一些多样性的特殊化设施。世界上许多国家已经逐步建立核爆炸和原子辐射掩体,以避免核打击和提供核反击的保护措施。美国较大的军

事指挥中心都建在深部的地下空间。例如,科罗拉多州的北美防空联合司令部(NORAD)入口如图 1-13 所示。图 1-14 为瑞典建在岩石中的潜水艇库室。

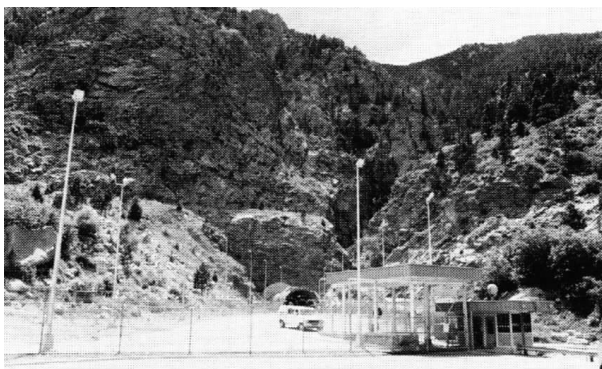


图 1-13 美国科罗拉多州的北美防空联合司令部防空指挥部入口

在北欧一些国家,许多民防工程都建在地下。如瑞典斯德哥尔摩的地下电信中心,挪威的地下国家档案馆等。

20 世纪 60 年代,我国城市掀起建设地下民防工程热潮(见图 1-15)。仅北京就修建了大约 5 000km 长的地道。世界上几个拥有核能力的国家,通过修建地下工程,完成了大量的地下核武器试验。

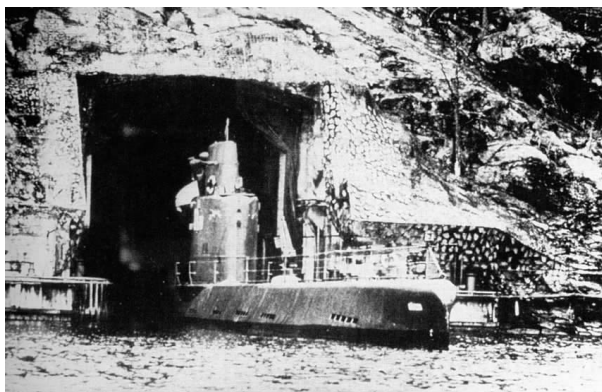


图 1-14 瑞典建在岩石中的潜水艇库室

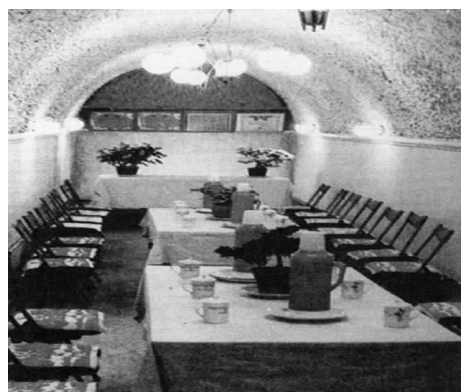


图 1-15 我国城市人防工程建筑

### 1.2.8 储藏建筑

#### 1. 食物储藏

地下食物储藏主要基于三个因素:

- (1) 环境适合食物保护;
- (2) 啮齿动物和大批滋生昆虫很容易被赶走;
- (3) 对预防入侵者偷窃或抢劫而言,食物供应更安全。

图 1-16 是一个 1 500t 的地下小麦储藏室的结构。图 1-17 是美国密苏里州堪萨斯城的地下储库。

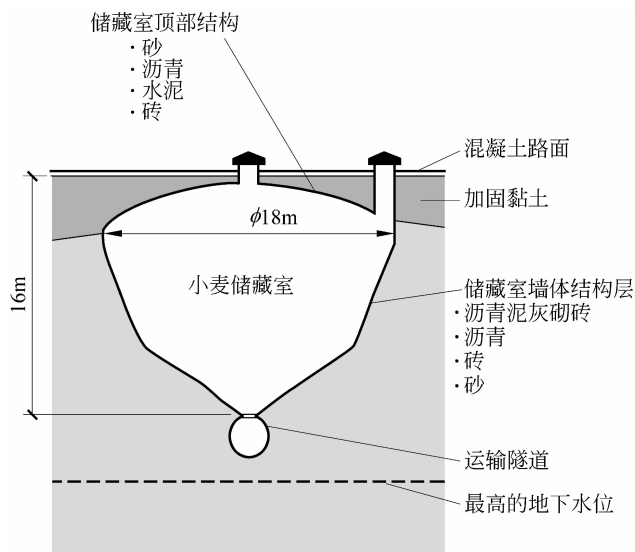


图 1-16 1 500t 的地下小麦储藏室

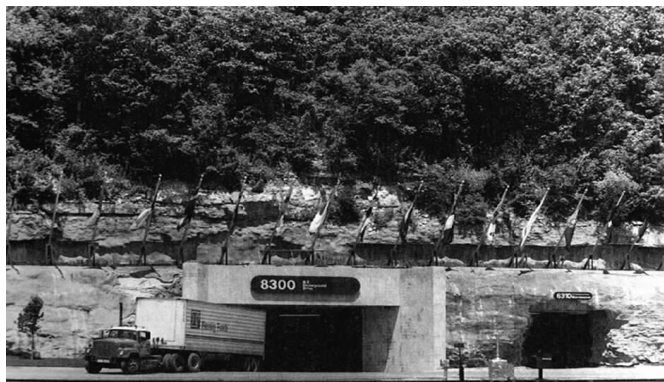


图 1-17 美国密苏里州堪萨斯城的地下储库

## 2. 石油与天然气存储

对工业化国家而言,石油和天然气是重要的经济能源和军事能源。因此,最近几年全世界范围内修建了大批的石油及天然气存储设施。第一个地下存储方案本质上是在地下洞室中存放传统油箱。然而,斯堪的那维亚人发明了在水位线以下岩体洞室中存储石油的方法,石油浮在水床上,同时被洞室四周的水封堵着,如图 1-18 所示。

## 3. 信息安全存储

出于对自然灾害或战争的考虑,许多国家和大公司对记录档案的安全存储非常重视。例如,美国摩

门宗教档案被保存在靠近犹他州盐湖城的一个很深的地下建筑物内。挪威的国家档案馆就坐落在有多层防护的岩体洞室建筑结构中。

### 1.2.9 交通运输

地下空间的交通运输形式主要有地铁、铁路隧道、公路隧道等(图 1-19~图 1-21)。

1882 年,第一座较大的、穿越瑞士阿尔卑斯山的铁路隧道——一个 15km 长的圣高达山铁路隧道竣工。随着城市的扩张,第一条地铁线路于 1863 年在伦敦开业通车。如今,世界上大约有 70 个城市使用了地铁,而且这个数字还在增加。

从 1891 年到 1984 年,我国建设的铁路隧道有 4 676 条,总里程达到 2 161km。

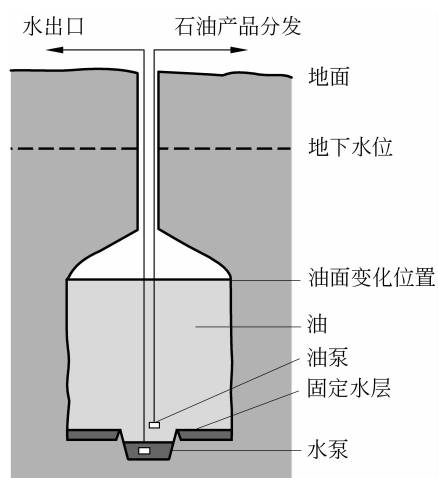


图 1-18 地下储油洞室剖面

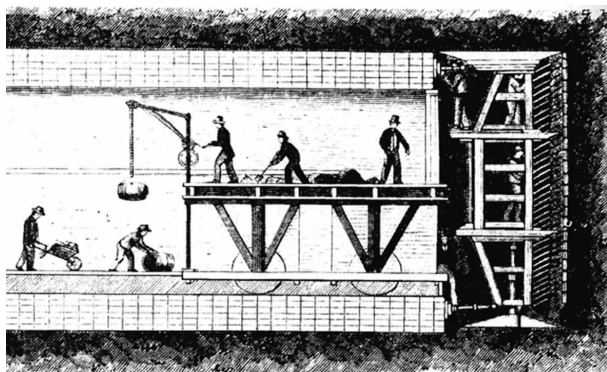


图 1-19 英国伦敦泰晤士河的一条水下隧道

该隧道采用布鲁内尔(Brunel)发明的开放型手掘盾构技术挖掘,于 1863 年完成。



图 1-20 美国华盛顿 D.C 某地铁站

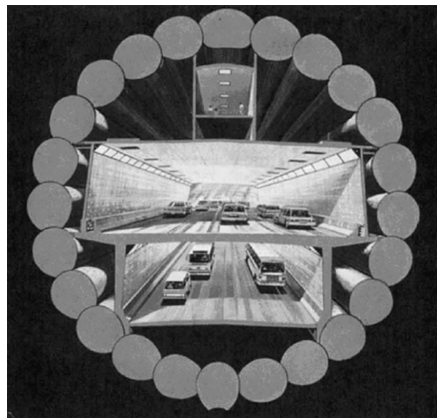


图 1-21 美国西雅图贝克山(Mt. Baker Ridge)隧道