



高等学校城市地下空间工程专业规划教材

# 地下结构设计

DIXIA JIEGOU SHEJI

赵延喜 戚承志 周宪伟◎主 编



张外借



人民交通出版社股份有限公司  
China Communications Press Co., Ltd.

高等学校城市地下空间工程专业规划教材

# 地下结构设计

赵延喜 戚承志 周宪伟 主编



人民交通出版社股份有限公司

China Communications Press Co., Ltd.

## 内 容 提 要

本书是高等学校城市地下空间工程专业规划教材,主要介绍城市地下工程结构的设计理论、原理和方法。全书共6章,包括绪论,地下结构荷载效应组合及设计方法,地铁车站结构设计,隧道结构设计,其他地下结构设计,地下工程抗震设计等。

本书采用纸质与数字化资源相结合的形式进行制作,既可作为城市地下空间工程专业的必修课程教材,也可以作为土木工程类相关专业选修课程教材,并可供从事地下空间规划、设计的工程技术人员参考使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

地下结构设计 / 赵延喜, 戚承志, 周宪伟主编. —  
北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2017. 2  
高等学校城市地下空间工程专业规划教材  
ISBN 978-7-114-13651-1

I. ①地… II. ①赵… ②戚… ③周… III. ①地下工程—结构设计—高等学校—教材 IV. ①TU93

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 022766 号

### 高等学校城市地下空间工程专业规划教材

书 名: 地下结构设计

著 者: 赵延喜 戚承志 周宪伟

责任编辑: 张征宇 赵瑞琴

出版发行: 人民交通出版社股份有限公司

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址: <http://www.cpress.com.cn>

销售电话: (010)59757973

总 经 销: 人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京盈盛恒通印刷有限公司

开 本: 787 × 1092 1/16

印 张: 13

字 数: 293 千

版 次: 2017 年 8 月 第 1 版

印 次: 2017 年 8 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-13651-1

定 价: 29.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

# 高等学校城市地下空间工程专业规划教材

## 编 委 会

主任委员:张向东

副主任委员:宗 兰 黄 新 马芹永 周 勇  
金 奕 齐 伟 祝方才

委 员:张 彬 赵延喜 郝 哲 彭丽云  
周 斌 王 艳 叶帅华 宁宝宽  
平 琦 刘振平 赵志峰 王 亮

# 序 言

近年来,我国城市建设以前所未有的速度加快发展,规模不断扩大,人口急剧膨胀,不同程度地出现了建设用地紧张、生存空间拥挤、交通阻塞、基础设施落后等问题,城市可持续发展问题突出。开发利用城市地下空间,不但能为市民提供创业、居住环境,同时也能提供公共服务设施,可极大地缓解中心城市密度,疏导交通增加城市绿地,改善城市生态。

为适应城市地下空间工程的发展,2012年9月,教育部颁布了《普通高等学校本科专业目录》(以下简称专业目录),专业目录里将城市地下空间工程专业列为特设专业。目前国内已有数十所高校设置了城市地下空间工程专业并招生,在这个前所未有的发展时期,城市地下空间工程专业系列教材的建设明显滞后,一些已出版的教材与学生实际需求存在较大差距,部分教材未能反映最新的规范或标准,也没有形成体系。为满足高校和社会对于城市地下空间工程专业教材的多层次要求,人民交通出版社股份有限公司组织了全国十余所高校编写“高等学校城市地下空间工程专业规划教材”,并于2013年4月召开了第一次编写工作会议,确定了教材编写的总体思路,于2014年4月召开了第二次编写工作会议,全面审定了各门教材的编写大纲。在编者和出版社的共同努力下,目前这套规划教材陆续出版。

这套教材包括《地下工程概论》《地铁与轻轨工程》《岩体力学》《地下结构设计》《基坑与边坡工程》《岩土工程勘察》《隧道工程》《地下工程施工》《地下工程监测与检测技术》《地下空间规划设计》《地下工程概预算》和《轨道交通线路与轨道工程》等12门课程,涵盖了城市地下空间工程专业的主要专业核心课程。该套教材的编写原则是“厚基础、重能力、求创新,以培养应用型人才为主”,体现出“重应用”及“加强创新能力和工程素质培养”的特色,充分考虑知识体系的完整性、准确性、正确性和适用性,强调结合新规范、增大例题、图解等内容的比例,做到通俗易懂,图文并茂。

为方便教师的教学和学生的自学,本套教材配有多媒体教学课件,课件中除教学内容外,还有施工现场录像、图片、动画等内容,以增加学生的感性认识。

反映城市地下空间工程领域的最新研究成果、最新的标准或规范,体现教材的系统性、完整性和应用性,是本套教材力求达到的目标。在各高校及所有编审人员的共同努力下,城市地下空间工程专业系列规划教材的出版,必将为我国高等学校城市地下工程专业建设起到重要的促进作用。

高等学校城市地下空间工程专业规划教材编审委员会  
人民交通出版社股份有限公司

# 前 言

21 世纪是人类开发利用地下空间的世纪。随着城市化进程的加速推进,城市地下空间的利用范围比以往更加广泛,包括居住、交通、商业、文化、生产、防灾、综合管廊等各种用途。尤其是我国各大城市纷纷上马地铁、轻轨、地下商业街、隧道等各类地下建筑项目,城市地下空间工程已成为土木工程的重要发展方向。

地下结构设计是高等院校城市地下空间工程、土木工程(地下结构方向)等专业的一门专业课程。本教材着眼于培养应用型本科人才,遵循高等学校城市地下空间工程专业人才培养方案,在教学改革和实践的基础上,对教学内容进行了详细论证和整合,同时兼顾其他相关专业的要求,使得本教材的适应性更强。

地下结构设计是一门理论性和实践性相结合的课程,概念较为抽象。本教材在编写过程中,突出基本知识、经典理论、成熟经验、常规方法的论述,使教材体现少而精,并兼顾本学科的发展和反映国内外先进技术。教材吸取了近年来国内外地下结构方向的相关研究成果、行业标准、规范等内容。基本知识、经典理论和常规方法的论述力求深入浅出,语言通俗易懂,文字简明扼要。教材结构新颖、内容丰富、图文并茂,紧密结合工程实际,强调工程应用性。通过学习,培养学生掌握地下结构基本理论和解决实际工程问题的能力。

本教材由南京工程学院赵延喜、北京建筑大学戚承志、黑龙江工程学院周宪伟担任主编,南京工程学院宗兰担任主审。本书具体编写分工如下:

第一章、第三章、第五章:赵延喜(南京工程学院)编写。

第二章:周宪伟(黑龙江工程学院)、赵延喜(南京工程学院)编写。

第四章:赵延喜(南京工程学院)、李德海(黑龙江工程学院)、韩红霞(河北工业大学)编写。

第六章:戚承志(北京建筑大学)编写。

本书在编写过程中参考了大量文献,这些著作作为本书的顺利成稿奠定了良好的基础,在此对这些文献的作者表示衷心的感谢。

限于编者的水平,书中难免有不当之处,恳请读者批评指正。

编 者

2017 年 6 月

# 目 录

第一章 绪论	1
第一节 地下结构的概念和分类	1
第二节 地下结构的形式	7
第三节 地下结构的设计程序	10
第四节 本课程的内容和特点	11
复习思考题	12
第二章 地下结构荷载效应组合及设计方法	13
第一节 地下结构荷载效应组合	13
第二节 地层压力计算	14
第三节 地层弹性抗力计算	31
第四节 地下结构自重及其他荷载计算	32
第五节 地下结构设计方法	33
复习思考题	38
第三章 地铁车站结构设计	39
第一节 地铁车站结构设计概述	39
第二节 地铁车站结构形式	39
第三节 明挖车站结构设计	46
第四节 暗挖车站结构设计	61
第五节 地铁车站结构防水设计	64
第六节 地铁车站结构设计实例	72
复习思考题	80
第四章 隧道结构设计	81
第一节 地铁区间隧道结构设计	81
第二节 明挖隧道结构设计	87
第三节 盾构法隧道衬砌结构设计	103
复习思考题	128
第五章 其他地下结构设计	129
第一节 沉管结构设计	129
第二节 沉井结构设计	141
第三节 顶管结构设计	148
复习思考题	157
第六章 地下工程抗震设计	158

第一节 震害现象及分析.....	158
第二节 地下结构地震反应的特点及其分析方法.....	162
第三节 地下结构抗震设计 .....	165
第四节 地下结构抗震设计的原则及结构措施.....	192
复习思考题.....	196
参考文献.....	197



# 第一章 绪 论

## 第一节 地下结构的概念和分类

### 一、地下结构的概念

地下结构是指在保留上部地层(山体或土层)的前提下,在开挖出的能提供某种用途的地下空间内修建的结构物。与地面结构不同,地下结构体系由周围地层与地下结构共同组成。地层既是承载结构的基本组成部分,又是形成荷载的主要来源。地下结构中,与地层接触部分,称为衬砌结构或支护结构,其具有承受所开挖空间周围地层的压力、结构自重、地震、爆炸等静动荷载的承重作用;同时又具有防止所开挖空间周围地层风化、崩塌的作用,并起到防水、防潮等围护作用。与地层不相接触部分,称为地下结构的内部结构。常见的地铁车站、隧道工程等均属于地下结构。地下结构组成如图 1-1 所示,图 1-2 为地铁车站结构。



图 1-1 地下结构的组成

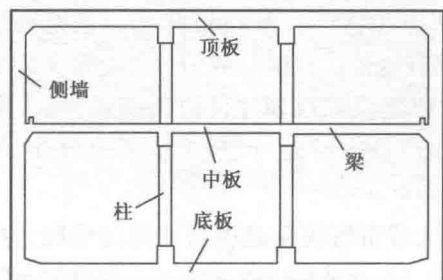


图 1-2 地下结构实例(地铁车站)

### 二、地下结构的分类

地下结构有许多分类方法,主要包括:按其使用功能分类、按周围围岩介质分类、按设计施工方法分类、按建筑材料和结构形式分类等。以下为几种比较常用的分类方法。



## 1. 按使用功能分类

### 1) 地下交通工程

地下交通工程主要有地铁、公路(市政)隧道、人行过街通道、海(江、河、湖)底隧道等,如图 1-3 ~ 图 1-6 所示。

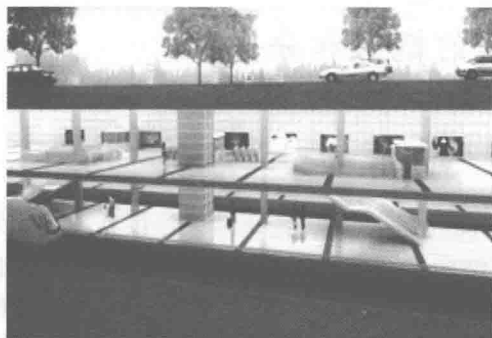


图 1-3 大连地铁 1 号线车站效果图

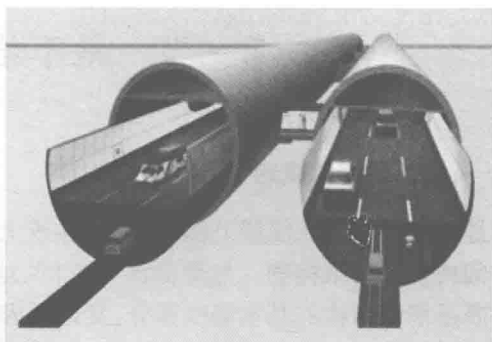


图 1-4 上海长江隧道效果图



图 1-5 南京某地下过街通道



图 1-6 南京九华山隧道

地铁工程已成为目前城市地下空间开发的热点和重点。自 1863 年第一条地铁线路在伦敦通车后,世界上已有 55 个国家约 170 座城市建有地铁。我国已成为世界上最大的城市轨道交通建设市场。截至 2015 年,全国已有 39 个城市建设或规划建设轨道交通,每天投资超过 7.8 亿元。预计到 2020 年全国拥有轨道交通的城市将达到 50 个,轨道交通达到近 6000km 的规模,投资将达 4 万亿元。

随着城市用地的日益紧张,隧道工程已成为大城市解决交通拥挤问题的重要选择。我国最长的城市隧道是厦门翔安海底隧道,隧道总长 8.7km,采用钻爆法施工。拟建的苏锡常南部高速公路常州至无锡段越湖隧道长达 11km,建成后将成为世界上最长的湖底隧道。上海长江隧道为目前世界上已建成直径最大的盾构隧道。

上海长江隧道起于浦东新区五号沟,穿越南港水域在长兴岛西南方登陆,全长 8.95km,其中穿越水域部分达 7.5km。隧道整体断面设计为平行的双管隧道,单管外径为 15m,内径为 13.70m,内设三条(3×3.75m)车道,即双向六车道,高速公路标准,设计车速为 80km/h。

## 2) 公共管道工程

公共管道主要有输水隧道、地下给(排)水管道、通信、电缆、供热管道、供气管道、共同沟等,如图 1-7~图 1-9 所示。



图 1-7 锦屏二级水电站引水隧洞



图 1-8 市政管道施工现场

锦屏二级水电站位于四川省凉山彝族自治州境内的雅砻江干流上,系雅砻江下游梯级开发的骨干水电站之一。地下厂房位于东雅砻江的大水沟,引水隧洞自景峰桥至大水沟厂址,共四条,开挖洞径 12m,衬砌后洞径 11m,隧洞平均长度为 16.6km,隧洞一般埋深为 1500~2000m,最大埋深达 2525m。

## 3) 地下工业建筑

地下工业建筑具有良好的安全防护作用和稳定的热环境、低振动、低渗透,可有效控制通风。如地下核电站、水电站厂房、地下车间、地下厂房、地下垃圾焚烧厂等,如图 1-10、图 1-11 所示。

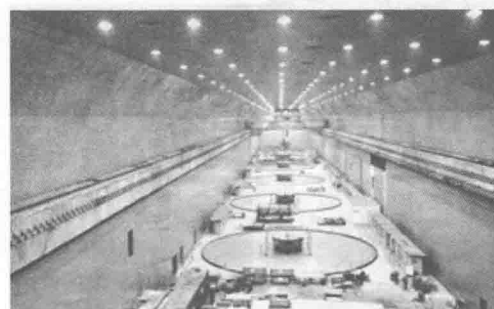


图 1-10 三峡地下水电站厂房



图 1-11 二滩水电站发电车间

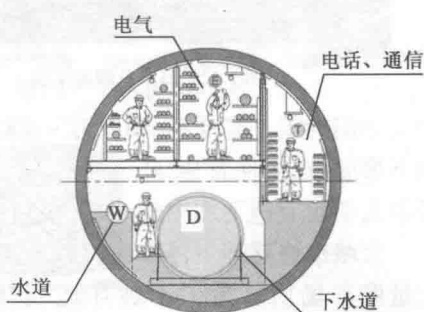


图 1-9 日本东京地下共同沟

中国三峡地下电站主要建筑物由引水系统、主厂房系统、尾水系统三部分组成。与地上建筑不同,地下电站从天花板开始施工,一层一层往下开凿,每层高约 10m。全部开挖完后,主厂房长 311.3m,高 87.24m,跨度为 32.6m,足有 29 层楼高,其高度和跨度均居国内地下水电站之最。

## 4) 地下民用建筑

地下民用建筑分为地下公共居住建筑和地下建筑。

地下居住建筑:供人们生活起居的场所,如中国窑洞、美国覆土住宅等。

地下公共建筑:各种公共活动的单体地下空间建筑,如地下商业街、地下商场、地下医院、地下旅馆、地下学校、地下图书馆、地下博物馆、地下展览馆、地下影剧院、地下歌舞厅、地下停车场等。图 1-12 为日本札幌地下街,图 1-13 为南京新街口地下街。



图 1-12 日本札幌地下街



图 1-13 南京新街口地下街

中国的黄土高原有 3500 万~4000 万人居住窑洞。突尼斯撒哈拉沙漠边缘分布 20 多个地下聚居点,居住着 9000 多人。美国的哈佛大学、加州大学伯克利工学院、密执安大学、伊利诺伊大学建有地下图书馆。瑞典建有地下电话交换台及国家档案馆。

大城市修建地下停车场比较普遍。在大型公共活动场所和城市人口密集地带,需要配套大量停车场所。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 1-14)。

南京博物院民国馆位于艺术馆地下三层(图 1-15),内设理发店、中药铺、书店、银楼等,都是 20 世纪初的装修风格。

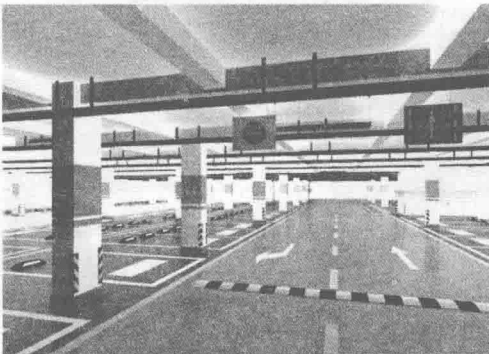


图 1-14 地下停车场

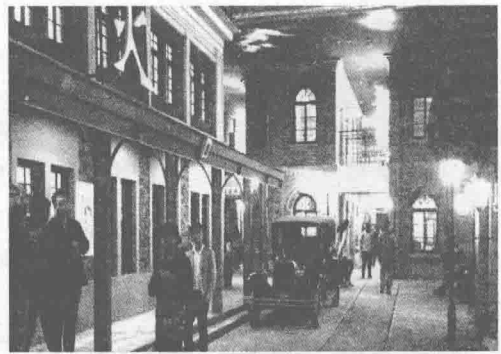


图 1-15 南京博物院民国馆

### 5) 地下军事工程

如人防掩蔽部、地下军用品仓库、地下战斗工事、地下导弹发射井、地下飞机(舰艇)库、防空指挥中心等。图 1-16 为某防空指挥部入口。图 1-17 为地下核导弹发射井。

### 6) 地下仓储工程

如地下粮、油、水、药品等物资仓库,地下垃圾堆场,地下核废料仓库,地下危险品仓库,地

下金库等。图 1-18 为上海中心大厦观复宝库。

观复宝库是上海目前顶级的第三方私人保管机构,它位于上海中心大厦地下 5 层,深达地下 25m,安防系数超过银行金库。宝库底板与整个上海中心大厦一起浇筑,厚度达 6m。金库的墙壁是 25cm 厚的钢筋混凝土,其中有 10mm 的夹层,同样防火、防爆、防钻。观复宝库内可实现智能恒温、恒湿,还配有全球先进的生物控制系统,可以实现防虫防蛀、漏水报警、空气颗粒物控制、24h 环境监测、智能控制照明等功能。



图 1-16 某防空指挥部入口

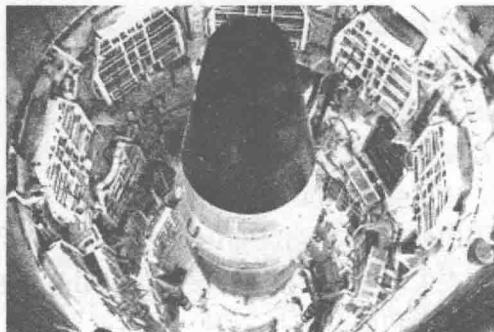


图 1-17 地下核导弹发射井



图 1-18 上海中心大厦观复宝库

## 2. 按四周围岩介质分类

按围岩介质不同,地下结构分为软土地下结构、硬土(岩石)地下结构、水底(悬浮)结构等。

## 3. 按照施工方法分类

按施工方法不同,地下结构分为明挖法(放坡、支护、降水)结构;盖挖法、逆作法结构;沉箱、沉井、沉管法结构;顶管法(大口径与微型顶管)结构;盾构法(SM)、岩石掘进机法(TBM)、新奥法、钻爆法结构等。

## 三、地下结构的特点

### 1. 工程特点

地下结构的设计不同于地面结构,具有以下工程特点。



### 1) 地质条件差

目前,我国城市地下结构埋深多在 20m 以内,而在此深度范围内大多为第四纪冲积或沉积层,或为全、强风化岩层,地层多松散无胶结,存在上层滞水或潜水。同时,我国部分城市,如武汉、南京、杭州、上海、宁波等,部分区域承压水位高,承压水含水层顶板埋藏浅,对地下结构施工影响巨大。城市地下结构的基本特点是地质条件差(多数情况下富含地下水),而在现阶段取得准确的地质及围岩力学参数和设计荷载参数等数据极其困难,导致地下结构与施工难度很大。

### 2) 周边环境复杂

由于各种原因,城市地下结构的修建滞后于城市建设,尤其是城市地铁工程,多建在建筑物已高度集中的地区,从城市道路下面及各种管线附近通过。施工往往引起地层变形和地表沉降。这些变形和沉降对邻近固有建(构)筑物和设施的损伤不可忽视。例如,施工将产生一定范围的地表沉降,当沉降达到临界值时,将会引起建筑物的倾斜、开裂等,严重的可导致建筑物功能丧失。城市中很多高层建筑采用的是桩基础,地下结构施工引起的地层移动会对桩基础施加轴向和侧向压力,这种力将可能导致既有结构的损害。因此,研究地下结构在施工过程中对周围环境的影响及其控制技术就显得尤为重要。

### 3) 结构埋深浅、与邻近结构相互影响

城市地下结构具有埋深浅的特点,多在 3~20m,由于城市地下管网设施、商业街、停车场等构筑物鳞次栉比,相互影响,相互制约,给工程的修建带来众多设计与施工技术方面的特殊难题。例如,城市中的地铁工程一般都处在密集的建筑群下,有些工程的基础与既有建筑物或构筑物的基础紧邻,产生相互作用;处于较浅位置的地下管线结构,与深部的大型停车场或地铁工程形成上、下位置临接关系;多条隧道的工程又形成平面上的临接问题,而现有工程的设计理论(强度控制设计)和常规施工技术已经难以满足保护地铁工程周围环境的要求。

研究地下结构和周边建筑物及其他构筑物之间的共同作用、邻近建筑物的变形以及在开挖过程中建筑结构的内在反应,进而研究其控制技术,是城市地下结构施工应该解决的问题。

### 4) 围岩稳定性难于判断

地下结构的围岩稳定问题一直是地下结构与施工研究的重点问题。对于城市地下结构而言,其地质、环境以及结构方面的特殊性给这一问题的研究增加了特殊的内容。现有较广泛使用的围岩稳定性理论认为:在地下工程施工过程中,地下工程周围岩体发生应力重分布,当这种重分布应力超过围岩的强度极限时,将造成围岩的失稳破坏。在浅埋条件下是否存在承载拱对其稳定性判别非常重要,有必要通过监测与研究解决。因此,围岩稳定性评价是与地下结构施工和运营密切联系的一项极为重要的研究内容。

## 2. 设计特点

地下结构设计时需要根据地下工程的特点,在安全的条件下有效和经济地设计地下结构。其主要设计特点有以下几个方面:

(1) 地下结构是在受载状态下构筑,主要承受地层垂直压力和侧向压力。

(2) 地下结构设计应充分考虑如何利用和改善地层的自稳范围与自稳时间。地层有一定的承载能力,地层种类和构造不同,自稳范围和时间在一个较大范围内变化。

(3) 地下工程设计应将地层变形控制在允许范围之内。

(4) 充分考虑地下水变化带来的地层参数的变化和静、动水压力的变化。

(5) 动态的设计过程。地下工程设计和施工有自己的模式,且随着施工过程的进展,变更设计特别多。

地下结构设计施工的基本特点是地质条件复杂,基础信息缺乏,对于城市地下结构又增加了周边环境复杂,其施工存在着很大的不确定性和高风险性。很长一段时期主要依赖工程技术人员的工作经验。新奥法诞生以来,随着岩土理论及监测技术、数据库管理技术、计算机辅助设计技术等方面的发展,使地下结构设计施工跨入了“信息化”时代。信息化设计与施工特别适合地下结构,具有解决不确定性问题的能力,可降低风险,建立针对重大坍塌和破坏事件的预警系统,从而实现施工的安全和经济目标。

### 3. 地下结构的计算特性

(1) 必须充分认识地质环境对地下结构设计的影响。由于地层的原始应力很难预先确定,围岩的工程性质复杂,地质物理力学参数的获得存在不确定性。因此,难以精确估计地质环境对地下结构设计的影响。

(2) 地下工程周围的地质体是工程材料、承载结构,同时又是产生荷载的来源,原岩应力由地质体和支护结构共同承载。支护上承受的荷载除与原岩应力有关之外,还和地质体强度、施工方法、施工流程(时间因素)、支护形式、结构形状等有关。

(3) 地下结构施工因素和时间因素会极大地影响结构体系的安全性。

(4) 地下工程支护结构安全与否,既要考虑到支护结构能否承载,又要考虑围岩会不会失稳,这两种原因最终都会导致支护结构被破坏。

## 第二节 地下结构的形式

### 一、常用的地下结构形式

地下结构形式主要受到三个因素的影响,即使用功能、受力情况(地质条件、水文条件和是否有爆炸与地震等特殊动载)、施工方法。尤其是地下结构中,与地层相接触部分的衬砌结构断面形式选取,更是受到这三个因素的制约。

地下结构主要的断面形式如图 1-19 所示。

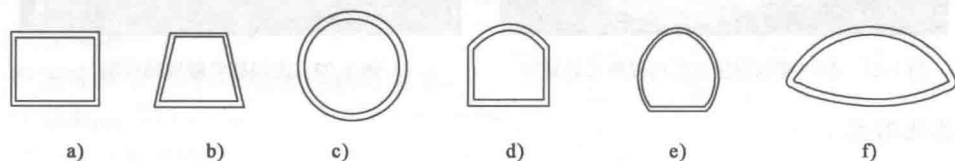


图 1-19 地下结构断面的几种形式

a) 矩形; b) 梯形; c) 圆形; d) 直墙拱形; e) 曲墙拱形; f) 扁圆形



### 1. 矩形

矩形断面形式,适用于工业、民用、交通等建筑物的界限。但直线构件不利于抗弯,故在荷载较小、地质条件较好、跨度较小或埋深较浅时采用。如地铁车站、明挖隧道往往采用矩形结构。图 1-20 为某水底隧道矩形断面效果图。

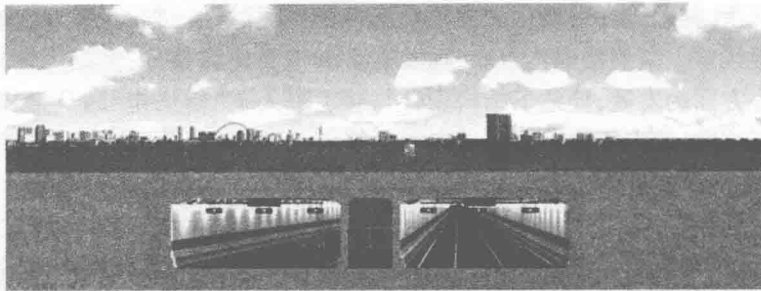


图 1-20 某水底隧道矩形断面效果图

### 2. 圆形

圆形截面,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。当地质条件较差或荷载较大时应考虑采用。盾构隧道往往采用圆形断面。图 1-21 为扬州瘦西湖隧道盾构段断面效果图。

### 3. 拱形

断面拱形截面分为直墙拱形和曲墙拱形,分别适用于顶部有较大围岩压力或顶部和两侧有较大围岩压力的地层中。钻爆法施工的地下结构往往采用拱形断面。图 1-22 为厦门翔安隧道洞口图。

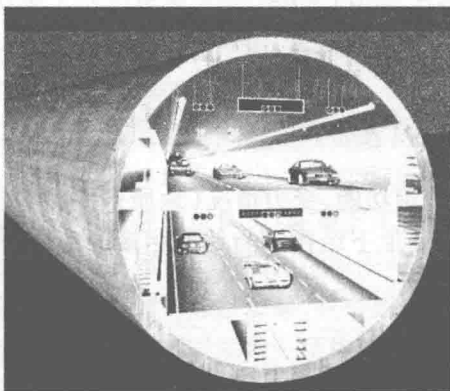


图 1-21 扬州瘦西湖隧道盾构段断面效果图

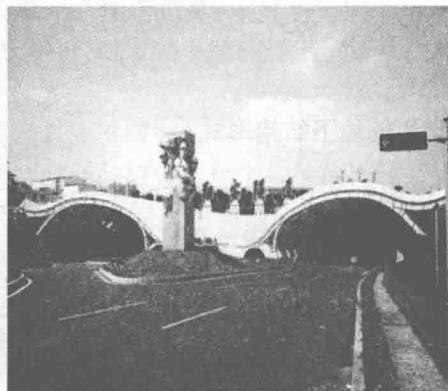
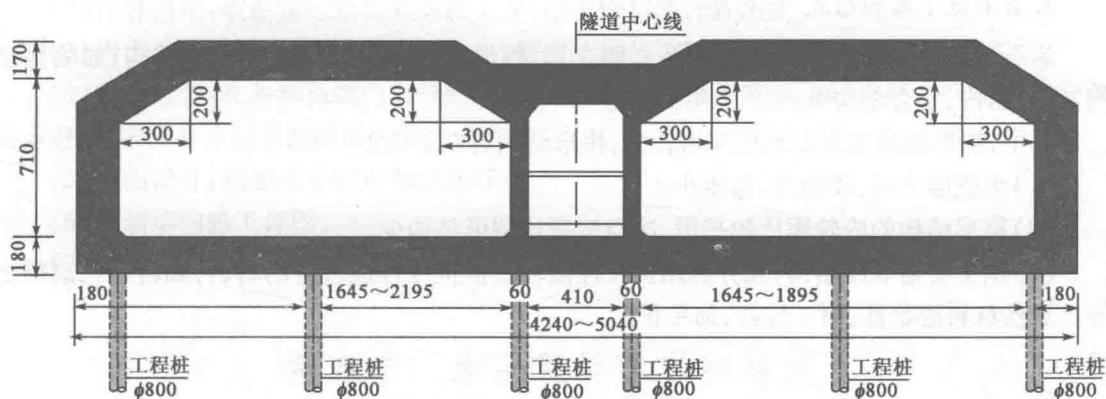


图 1-22 厦门翔安隧道洞口图

### 4. 其他形式

其他形式是介于以上三者的中间情况,按具体荷载和尺寸决定,如矩形断面若承载力不足,可将顶板改为折板。图 1-23 为某隧道折板结构断面图,图 1-24 为四川遂宁观音湖下穿隧道折板结构施工现场。





暗埋段隧道结构横断面图 1 : 150

图 1-23 某隧道折板结构断面图

## 二、地下结构断面形式选择

### 1. 土层地下结构形式

#### 1) 浅埋式结构

平面成方形或长方形,当顶板做成平顶时,常用梁板式结构或矩形框架结构,顶部也可做成拱形,以改善受力。

#### 2) 附建式结构

附建式结构是房屋下面的地下室,结构布置受上部房屋限制,有承重的外墙、内墙、内柱和梁板式顶底板结构。

#### 3) 沉井结构

开口的井筒结构,断面一般做成方形,也有圆形,沉毕后再做底顶板。

#### 4) 地下连续墙结构

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。还有“两墙合一”的做法。

#### 5) 盾构结构

盾构结构常采用装配式圆形衬砌,有时也做成方形或半圆形的。

#### 6) 沉管结构

一般做成箱形结构,两端加以临时封墙。

#### 7) 桥梁基础结构

桩基础和沉井基础。

#### 8) 其他结构

除上述地下结构之外,还包括顶管结构和箱涵结构等。



图 1-24 四川遂宁观音湖下穿隧道折板结构