



高等学校土木工程专业系列规划教材



Underground Structure Design

地下结构设计

· 地下工程方向 ·

主编 高波 周佳媚 曾艳华
主审 周晓军



WUHAN UNIVERSITY PRESS
武汉大学出版社



高等学校土木工程专业系列规划教材

地下结构设计

主 编 高 波 周佳媚 曾艳华
副主编 王英学 申玉生
主 审 周晓军



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

地下结构设计/高波,周佳媚,曾艳华主编.—武汉:武汉大学出版社,2018.12
高等学校土木工程专业系列规划教材

ISBN 978-7-307-19822-7

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

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第276545号

责任编辑:方竞男 路亚妮 责任校对:李嘉琪 装帧设计:吴 极

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件:whu_publish@163.com 网址:www.stmpress.cn)

印刷:北京虎彩文化传播有限公司

开本:880×1230 1/16 印张:14.75 字数:474千字

版次:2018年12月第1版 2018年12月第1次印刷

ISBN 978-7-307-19822-7 定价:45.00元

版权所有,不得翻印;凡购买我社的图书,如有质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。

高等学校土木工程专业系列规划教材

学术委员会名单

(按姓氏笔画排名)

主任委员:周创兵

副主任委员:方志 叶列平 何若全 沙爱民 范峰 周铁军 魏庆朝

委员:王辉 叶燎原 朱大勇 朱宏平 刘泉声 孙伟民 易思蓉

周云 赵宪忠 赵艳林 姜忻良 彭立敏 程桦 靖洪文

编审委员会名单

(按姓氏笔画排名)

主任委员:李国强

副主任委员:白国良 刘伯权 李正良 余志武 邹超英 徐礼华 高波

委员:丁克伟 丁建国 马昆林 王成 王湛 王媛 王薇

王广俊 王天稳 王曰国 王月明 王文顺 王代玉 王汝恒

王孟钧 王起才 王晓光 王清标 王震宇 牛荻涛 方俊

龙广成 申爱国 付钢 付厚利 白晓红 冯鹏 曲成平

吕平 朱彦鹏 任伟新 华建民 刘小明 刘庆潭 刘素梅

刘新荣 刘殿忠 闫小青 祁皓 许伟 许程洁 许婷华

阮波 杜咏 李波 李斌 李东平 李远富 李炎锋

李耀庄 杨杨 杨志勇 杨淑娟 吴昊 吴明 吴轶

吴涛 何亚伯 何旭辉 余锋 冷伍明 汪梦甫 宋固全

张红 张纯 张飞涟 张向京 张运良 张学富 张晋元

张望喜 陈辉华 邵永松 岳健广 周天华 郑史雄 郑俊杰

胡世阳 侯建国 姜清辉 娄平 袁广林 桂国庆 贾连光

夏元友 夏军武 钱晓倩 高飞 高玮 郭东军 唐柏鉴

黄华 黄声享 曹平周 康明 阎奇武 董军 蒋刚

韩峰 韩庆华 舒兴平 童小东 童华炜 曾珂 雷宏刚

廖莎 廖海黎 蒲小琼 黎冰 戴公连 戴国亮 魏丽敏

出版技术支持

(按姓氏笔画排名)

项目团队:王睿 白立华 曲生伟 蔡巍

特别提示

教学实践表明,有效地利用数字化教学资源,对于学生学习能力以及问题意识的培养乃至怀疑精神的塑造具有重要意义。

通过对数字化教学资源的选取与利用,学生的学习从以教师主讲的单向指导模式转变为建设性、发现性的学习,从被动学习转变为主动学习,由教师传播知识到学生自己重新创造知识。这无疑是锻炼和提高学生的信息素养的大好机会,也是检验其学习能力、学习收获的最佳方式和途径之一。

本系列教材在相关编写人员的配合下,逐步配备基本数字教学资源,主要包括:

文本:课程重难点、思考题与习题参考答案、知识拓展等。

图片:课程教学外观图、原理图、设计图等。

视频:课程讲述对象展示视频、模拟动画,课程实验视频,工程实例视频等。

音频:课程讲述对象解说音频、录音材料等。

数字资源获取方法:

- ① 打开微信,点击“扫一扫”。
- ② 将扫描框对准书中所附的二维码。
- ③ 扫描完毕,即可查看文件。

更多数字教学资源共享、图书购买及读者互动敬请关注“开动传媒”微信公众号!



丛书序

土木工程涉及国家的基础设施建设,投入大,带动的行业多。改革开放后,我国国民经济持续稳定增长,其中土建行业的贡献率达到 1/3。随着城市化的发展,这一趋势还将继续呈现增长势头。土木工程行业的发展,极大地推动了土木工程专业教育的发展。目前,我国有 500 余所大学开设土木工程专业,在校生达 40 余万人。

2010 年 6 月,中国工程院和教育部牵头,联合有关部门和行业协(学)会,启动实施“卓越工程师教育培养计划”,以促进我国高等工程教育的改革。其中,“高等学校土木工程专业卓越工程师教育培养计划”由住房和城乡建设部与教育部组织实施。

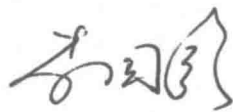
2011 年 9 月,住房和城乡建设部人事司和高等学校土建学科教学指导委员会颁布《高等学校土木工程专业本科指导性专业规范》,对土木工程专业的学科基础、培养目标、培养规格、教学内容、课程体系及教学基本条件等提出了指导性要求。

在上述背景下,为满足国家建设对土木工程卓越人才的迫切需求,有效推动各高校土木工程专业卓越工程师教育培养计划的实施,促进高等学校土木工程专业教育改革,2013 年住房和城乡建设部高等学校土木工程学科专业指导委员会启动了“高等教育教学改革土木工程专业卓越计划专项”,支持并资助有关高校结合当前土木工程专业高等教育的实际,围绕卓越人才培养目标及模式、实践教学环节、校企合作、课程建设、教学资源建设、师资培养等专业建设中的重点、亟待解决的问题开展研究,以对土木工程专业教育起到引导和示范作用。

为配合土木工程专业实施卓越工程师教育培养计划的教学改革及教学资源建设,由武汉大学发起,联合国内部分土木工程教育专家和企业工程专家,启动了“高等学校土木工程专业系列规划教材”建设项目。该系列教材贯彻落实《高等学校土木工程本科指导性专业规范》《卓越工程师教育培养计划通用标准》和《土木工程卓越工程师教育培养计划专业标准》,力图以工程实际为背景,以工程技术为主线,着力提升学生的工程素养,培养学生的工程实践能力和工程创新能力。该系列教材的编写人员,大多主持或参加了住房和城乡建设部高等学校土木工程学科专业指导委员会的“土木工程专业卓越计划专项”教改项目,因此该系列教材也是“土木工程专业卓越计划专项”的教改成果。

土木工程专业卓越工程师教育培养计划的实施,需要校企合作,期望土木工程专业教育专家与工程专家一道,共同为土木工程专业卓越工程师的培养作出贡献!

是以为序。



2014 年 3 月于同济大学四平路校区

前 言

本书是根据《高等学校土木工程本科指导性专业规范》及《土木工程卓越工程师教育培养计划专业标准》编写而成。本书是土木工程专业主干课程教材,亦可供从事实际工作的地下建筑设计人员参考。

本书理论与实践并重,经典理论、方法与现代新技术、新方法相结合,引导学生掌握理论知识,注重培养学生解决实际工程技术问题的能力;内容丰富、信息量大,知识结构较为系统。

本书结合铁路隧道、公路隧道和地下铁道,介绍了地下结构设计的基本原理和方法,着重阐述了围岩的工程特性、地下结构的结构形式和构造;并详细分析了结构力学方法、岩体力学方法和信息化设计方法。各章节编排联系紧密,内容深入浅出,便于学生学习和理解。

本书由高波、周佳媚、曾艳华担任主编,王英学、申玉生担任副主编。具体编写分工如下:第1章由高波、曾艳华编写,第2章由曾艳华编写,第3章由高波编写,第4章由周佳媚、曾艳华编写,第5章由周佳媚编写,第6章由申玉生编写。研究生蒙国往、严启、胡瑶瑶也参与了第4、5章的部分编写工作,全书由高波负责统稿。西南交通大学周晓军主审了本书。

由于编者水平有限,书中难免有错误和不足之处,恳请专家和读者批评指正。

编 者

2017年10月



真题在手 考试必过
——《地下结构设计》
课程考试真题试卷及
答案详解(三套)

目 录

1 概论	(1)	3.3.2 单层衬砌的构造原理与构造形式	(67)
1.1 地下空间和地下建筑	(2)	知识归纳	(72)
1.1.1 地下空间和地下建筑的概念	(2)	独立思考	(72)
1.1.2 地下空间和地下建筑的发展历程	(2)	4 结构力学的计算方法	(73)
1.2 地下结构体系的组成及结构形式	(4)	4.1 概述	(74)
1.2.1 地下结构体系的组成	(4)	4.1.1 常用的计算模型和计算方法	(74)
1.2.2 地下结构体系的结构形式	(5)	4.1.2 作用(荷载)的分类及效应组合	(77)
1.3 地下结构计算理论的发展与现状	(9)	4.1.3 衬砌截面强度检算	(79)
1.4 地下结构的计算特性、设计方法及力学模型	(12)	4.2 围岩压力	(80)
1.4.1 地下结构的计算特性	(12)	4.2.1 围岩压力的基本概念	(80)
1.4.2 地下结构的设计方法	(13)	4.2.2 变形压力	(82)
1.4.3 地下结构的计算模型	(14)	4.2.3 松动压力	(85)
1.5 地下结构设计的内容	(17)	4.2.4 地震及车辆荷载	(94)
知识归纳	(19)	4.3 不考虑弹性反力的计算方法	(98)
独立思考	(20)	4.3.1 弯矩分配法	(98)
2 岩土工程性质及分级	(21)	4.3.2 自由变形圆环的计算	(101)
2.1 岩石、岩体及围岩	(22)	4.3.3 半拱形结构计算	(104)
2.1.1 岩石、岩体及围岩的概念	(22)	4.4 假定弹性反力的计算方法	(109)
2.1.2 岩石、岩体及围岩的区别	(22)	4.4.1 假定弹性反力图形的圆形结构计算方法	(109)
2.2 围岩初始应力场	(22)	4.4.2 曲墙拱形结构计算	(115)
2.2.1 围岩自重应力场	(23)	4.5 弹性地基梁法	(120)
2.2.2 围岩构造应力场	(24)	4.5.1 直墙拱形结构计算	(120)
2.3 围岩的工程性质	(26)	4.5.2 弹性半无限平面上地面上的闭合框架的计算方法	(126)
2.3.1 岩石的力学性质	(26)	4.6 弹性支承法	(131)
2.3.2 岩体的力学性质	(28)	4.6.1 计算原理	(131)
2.4 围岩分级及其应用	(34)	4.6.2 力法计算圆形衬砌	(134)
知识归纳	(54)	4.6.3 矩阵位移法	(141)
独立思考	(55)	4.7 考虑施工荷载的设计方法	(147)
3 地下结构形式及构造	(56)	4.7.1 盖挖逆作法的设计方法	(147)
3.1 地下结构形式与施工方法的关系	(57)	4.7.2 盾构法中的施工荷载	(153)
3.2 地下结构的结构形式	(58)	知识归纳	(156)
3.2.1 按所处位置的地质条件分类	(58)	独立思考	(156)
3.2.2 按施工方法分类	(62)		
3.3 地下结构构造	(64)		
3.3.1 锚喷支护的组成及力学作用	(64)		

5 岩土力学方法	(158)	6 隧道现场监控量测及信息化反馈	(202)
5.1 岩体力学方法的基本概念	(159)	6.1 隧道监控量测的基本原理	(203)
5.1.1 围岩应力状态分析	(159)	6.2 现场监控量测的目的、内容和手段	(204)
5.1.2 洞室开挖后的应力场特征及力学效应	(161)	6.2.1 隧道现场监控量测的目的和任务	(204)
5.1.3 围岩应力和位移的线弹性分析	(166)	6.2.2 现场监控量测的内容与方法	(205)
5.1.4 围岩应力和位移的弹塑性分析	(170)	6.2.3 隧道量测项目和量测手段的选择	(214)
5.1.5 围岩与支护结构的相互作用	(178)	6.3 隧道量测数据的分析	(216)
5.2 数值法	(183)	6.3.1 量测数据的整理与分析	(216)
5.2.1 基础知识	(183)	6.3.2 隧道监控量测数据分析方法	(217)
5.2.2 地下工程有限元数值分析	(191)	6.4 隧道现场量测数据信息反馈与应用	(220)
5.2.3 复合式衬砌有限元分析	(195)	6.4.1 监测数据分析与应用	(220)
5.2.4 分步开挖及支护过程的模拟	(197)	6.4.2 信息反馈修正设计	(223)
5.2.5 隧洞开挖面空间效应的考虑	(199)	知识归纳	(224)
知识归纳	(200)	独立思考	(225)
独立思考	(201)	参考文献	(226)



数字资源目录

概 论

课前导读

▽ 内容提要

本章介绍了地下空间和地下建筑的发展历程，论述了地下结构体系的计算特性及力学模型，并简要介绍了地下结构计算理论的发展和地下结构的设计内容。主要内容包括地下空间和地下建筑的基本概念、地下结构体系的组成、地下结构的计算特性、设计方法及力学模型。

▽ 能力要求

通过本章的学习，学生应了解地下空间和地下建筑的发展历程、地下结构计算理论的发展及地下结构的设计内容，掌握地下空间和地下建筑的基本概念、地下结构体系的组成，地下结构的计算特性及力学模型。

1.1 地下空间和地下建筑 >>>

1.1.1 地下空间和地下建筑的概念

人类赖以生存的地球是一个表层为地壳、深处为地幔和地核的球体。地壳为一层很厚的岩石圈,表层岩石有的经风化成为土壤,形成不同厚度的土层。岩层和土层在自然状态下都是实体,在外部条件下才能形成空间。在岩石和土层中天然形成或人工开挖形成的空间称为地下空间。天然地下空间按成因有喀斯特溶洞、熔岩洞、风蚀洞、海蚀洞等;人工地下空间包括两类,一类是开发地下矿藏而形成的矿洞,另一类是因工程建设需要开凿的地下洞室。地下空间的开发利用为人类开拓了新的生存空间,并能满足某些在地面上无法实现的空间要求。因此地下空间被认为是一种宝贵的自然资源。

建造在岩层或土层中的各种建筑物(buildings)和构筑物(structures),是在地下形成的建筑空间,称为地下建筑(underground buildings and structures),地面建筑的地下室部分也是地下建筑。建造在地下的各种工程设施称为地下工程(underground engineering)。随着国民经济的发展和科学技术的进步,地下空间的应用越来越广泛。城市地铁、铁路、公路、水电站、商场、仓库、地下车库、工厂、体育场馆等许多工程都安排在地下,某些工程在特定情况下还必须安排在地下。

地下空间的利用为各类建筑工程物的选址开辟了广阔的前景。当前,地下空间作为一种重要的自然资源——一种新的国土资源加以开发,在国民经济的各部门和国防建设中都得到了世界各国的高度重视。联合国自然资源委员会 1982 年会议指出,地下空间是人类潜在的和丰富的自然资源。20 世纪 80 年代国际隧道协会(ITA)提出了“大力开发地下空间,开始人类新的穴居时代”的口号。许多国家将地下空间开发利用作为一项基本国策,已经开始或正在进行大规模的地下工程建设,地下空间的开发利用已经得到普遍的重视,21 世纪将是地下工程的世纪。

1.1.2 地下空间和地下建筑的发展历程

人类对地下空间的开发和利用有着悠久的历史,经历了从自发到自觉的漫长历程。远古时代人类就开始利用天然洞穴作为防雨避风的住所。随着人类文明的发展,人类进入了铜器和铁器时代,生产工具的改进和生产关系的改变,使奴隶社会中的生产力有了很大的发展,在其鼎盛时期形成了古埃及、古希腊、古罗马及古代中国的高度文明,这时期地下空间的利用也摆脱了单纯的居住要求,进入更广泛的领域。在这期间的数千年中,遗留至今或有历史可考的大型地下工程很多,如古埃及金字塔,实际上是建于公元前 2650—前 2500 年前后的一种用于墓葬的地下空间;再如公元前 22 世纪古巴比伦幼发拉底河河底隧道,我国秦汉时期的地下陵墓及地下粮仓等。

中世纪以后,在采矿、地下交通、市政建设、工业和水工地下工程等方面,地下空间的开发利用得到了广泛的发展。随着经济建设的需要和科学技术的进步,特别是 17 世纪炸药的使用和 18 世纪蒸汽机的发明并使用于凿岩,人们能在坚硬岩石中快速挖掘洞室,这样地下空间的开发和利用进入了一个较快速的发展时期。1613 年修建了伦敦水道,1681 年修建了地中海比斯开湾的连接隧道,1845 年英国建成第一条铁路隧道,1871 年建成穿越阿尔卑斯山连接法国和意大利的公路隧道,等等。

第二次世界大战期间,由于地下建筑物在防护方面的优越性十分明显,受到各参战国的高度重视,许多国家都将一些军事设施和工厂、仓库、油库等修建在地下。此外,将生产一些尖端产品的车间设在地下,能够满足恒温、恒湿、防震等生产工艺上的严格要求。

战后,随着经济的发展,对能源的需求与日俱增,从而开始了大规模的水利水电建设。有时在高山峡谷中修建水电站,由于施工场地的局限或者为了不破坏植被和生态环境,通常将水电站厂房建于地下。

随着世界人口的增长,城市面积扩大、土地减少、能源短缺、城市交通拥塞、环境污染及备战防灾诸方面的压力和问题不断出现,地下空间的开发和利用已成为建设现代化城市的重要标志。

20世纪以来,现代地下空间开发有了迅速发展,达到空前规模,主要用于建造各种隧道、水利水电地下工程、大型地下公用设施和地下能源储库等。特别是城市地下空间的开发和利用成了人们关注的热点,视其为新的国土资源。这一时期最典型的工程主要反映在城市地铁、长大隧道、地下水电站、城市地下公用设施等。到20世纪90年代初,世界上已有一百多个城市修建了地下铁道,线路总长超过3000 km;长度大于10 km的长大隧道近百座,包括穿越津轻海峡,总长53.85 km的日本青函隧道;穿越英法之间的英吉利海峡,其隧道总长51 km;长13.32 km的瑞士哥达隧道等。在我国,交通隧道的单洞长度纪录不断被刷新,20世纪80年代修建的当时国内最长的铁路隧道——长14.295 km的大瑶山隧道,大大改善了京广线的行车条件;1999年6月,长18.4 km的秦岭铁路隧道贯通,在西(安)(安)康铁路上发挥着十分重要的作用;2006年3月30日,亚洲最长的陆上隧道——长20.05 km的兰(州)新(疆)铁路乌鞘岭隧道正式建成通车。地下电站发展迅速,包括地下水电站、地下火电站、地下核电站和地下抽水蓄能电站等。其中,全世界的地下水电站已超过400座,著名的加拿大丘吉尔瀑布电站地下厂房长296 m、宽25 m、高47 m;举世瞩目的长江三峡水利工程,其地下电站部分主厂房长311.3 m,高87.24 m,跨度为32.6 m,其高度和跨度均居国内地下水电站之最。城市地下空间的开发利用在这一时期成为城市建设的重要内容。一些发达国家逐渐将地下商业街、地下停车场、地下铁道及地下综合管线工程等联为一体,成为多功能地下综合体。

为了合理利用地下空间,加强学术交流与提高地下工程规划设计与施工技术,地下空间开发利用的学术研究也非常活跃。1970年联合国经济合作与发展组织在华盛顿召开了有19个国家参加的隧道工程咨询会议,标志着国际隧道工程学会的成立。1976年,美国地下空间学会成立,并在明尼苏达大学建立地下空间研究中心,发行了*Underground Space*杂志。1977年,在瑞典首都斯德哥尔摩召开了地下空间国际学术会议,与会各国第一次交流了开发和利用地下空间的经验。1980年,联合国自然资源能源和运输中心及瑞典政府各部门、学术团体(岩石力学学会、隧道工程学会、工程地质学会)共同发起组织召开有40个国家和国际组织代表团约1000人参加的国际地下空间学术会议,这次会议产生了一个致各国政府开发利用地下空间资源为人类造福的建议书,并提出在开发和利用地下空间资源中进行国际技术合作和经验交流的建议。1988年在我国上海,1999年在我国西安相继召开了第三届和第八届地下空间国际学术会议。1991年在日本东京召开的城市地下空间利用的国际会议上提出了开发和利用地下空间的“东京宣言”,称地下空间是一种新型的国土资源。这些国际间的技术交流与合作,极大地促进了地下空间的开发和利用。

我国地下工程建设历史悠久。数千年前,我们的祖先就在我国北方的黄土高原建造了许多供居住的窑洞和地下粮食储备工程,至今仍有不少农民居住在不同类型的窑洞中。20世纪中期以来,我国地下工程建设有了很快发展。其一是人防工程。采取平战结合的方式,既保证了战略效益,又获得了社会效益和经济效益。其二是交通隧道工程。20世纪60年代开始的大规模三线建设,修建了为数众多的铁路、公路隧道。据相关资料统计,至2002年年底,我国共有铁路、公路隧道8600多条,总长度约4370 km,居世界第一。其三是方兴未艾的城市地铁建设。1965年在首都北京始建第一条城市地铁以来,已有天津、上海、广州、南京和武汉等城市建成营运或处于规划设计与施工准备阶段。其四是水利水电建设中的地下工程,特别是大型地下水电站厂房的建设,说明我国已具备开发大型或超大型地下空间的技术水平和能力。其五是城市地下商城、地下综合体等的建设,这表明我国城市已经开始大规模开发和利用地下空间。据相关报道,三峡库区水下博物馆已经建成;故宫拟建一个现代化地下展厅;上海已建成多条穿越黄浦江的水下隧道;横穿万里长江的水下隧道也于2004年相继在南京和武汉破土动工。可以预见,随着经济、科技的发展,我国地下空间的开发利用即将进入一个蓬勃发展的新时期。



地下结构体系的组成及结构形式拓展图

1.2 地下结构体系的组成及结构形式 >>>

1.2.1 地下结构体系的组成

在保留上部地层(山体或土层)的前提下,在开挖出能提供某种用途的地下空间内修筑的建筑物,统称地下结构。

地下结构和地面结构物,如房屋、桥梁、水坝等一样,都是一种结构体系,但两者之间在赋存环境、力学作用机理等方面都存在着明显的差异。地面结构体系一般都是由上部结构和地基组成。地基只在上部结构底部起约束或支承作用,除了自重外,荷载都是来自结构外部,如人群、设备、列车、水力等,如图 1.2.1(a)所示。而地下结构是埋入地层中的,四周都与地层紧密接触。结构上承受的荷载来自洞室开挖后引起周围地层的变形和坍塌而产生的作用力,同时结构在荷载作用下发生的变形又受到地层给予的约束。在地层稳固的情况下,开挖出的洞室中甚至可以不设支护结构而只留下地层,如我国陕北的黄土窑洞,证实了在无支护结构的洞室中,围岩本身就是承载结构。

由于地下结构周围的地层是千差万别的,洞室是否稳定不仅取决于岩石强度,而且取决于地层构造的完整程度。相比之下,周围地层构造的完整性对洞室稳定影响更大。各类岩土地层在洞室开挖之后,都具有一定程度的自稳能力。地层自稳能力较强时,地下结构将不受或少受地层压力的荷载作用,否则地下结构将承受较大的荷载直至必须独立承受全部荷载作用。因此,周围地层能与地下结构一起承受荷载,共同组成地下结构体系。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[图 1.2.1(b)],且洞室周围的地层在很大程度上是地下结构体系中承载的主体。地下结构的安全性首先取决于地下结构周围的地层能否保持持续稳定,并且应充分利用和更好地发挥围岩的这种承载能力。在需要设置支护结构时,支护结构能够阻止围岩不发生有害的变形,使其达到稳定的作用,这种合二为一的作用机理与地面结构是完全不同的。

除在坚固、完整而又不宜风化的稳定岩层中可以只开成毛洞外,其他在所有地层中的坑道都需要修建支护结构,即衬砌,或称为被覆。它是在坑道内部修建的永久性支护结构。因此,支护结构有 2 个最基本的使用要求:一是满足结构强度、刚度要求,以承受诸如水、土压力以及一些特殊使用要求的外荷载;二是提供一个能满足使用要求的工作环境,以便保持隧道内部的干燥和清洁。这两个要求是彼此密切相关的。

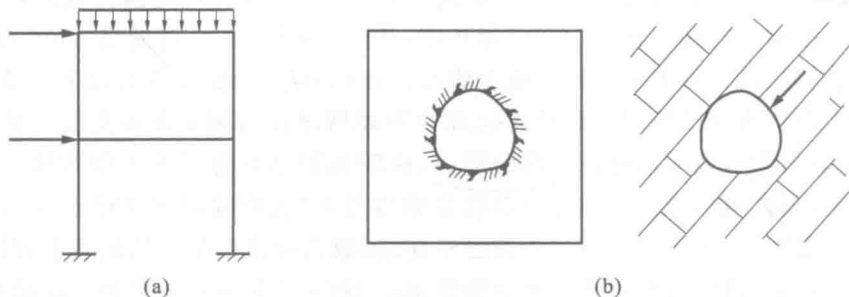


图 1.2.1 地下结构与地面结构的区别

(a)地面结构;(b)地下结构

支护结构即是我们所要研究的地下结构物。有时,在衬砌内部还设有为分割不同使用空间的梁、板、柱等内部结构。内部结构的设计和计算与地面结构相同。

1.2.2 地下结构体系的结构形式

因为地下结构周围的介质是千差万别的,所以不同地质条件需要的支护结构形式会有很大的不同,它直接影响地下结构上的荷载。因此,结构形式首先由受力条件来控制。通常,按使用目的其有如下几种基本类型。

(1) 防护型支护

防护型支护,如顶部防护,这是开挖支护中最轻型者,它既不能阻止围岩变形,又不能承受岩体压力,而是仅用以封闭岩面,防止坑道周围岩体质量的进一步恶化。它通常是采用喷浆、喷混凝土或局部锚杆来完成的。

(2) 构造型支护

在基本稳定的岩体,如大块状岩体中,坑道开挖后的围岩可能出现局部掉块或崩塌,但在较长时间内不会造成整个坑道的失稳或破坏。这种情况下常常使用构造型支护。其支护参数应满足施工及构造要求。

构造型支护通常采用喷混凝土、锚杆和金属网、模筑混凝土等支护类型。

(3) 承载型支护

承载型支护是坑道支护的主要类型。视坑道围岩的力学动态,它可分为轻型、中型及重型等。

对于承载型结构,其断面形式主要由使用、地质和施工 3 个因素综合决定。要注意施工方法对地下结构的形式有重要影响,并且会影响支护结构的计算方法。

当地质条件较好,跨度较小或埋深较浅时,常采用矩形结构;当地质条件较差、围岩压力较大,特别是承受较大的静水压力时,应优先采用圆形结构,可充分发挥混凝土结构的抗压强度;当地质条件介于两者之间时,按具体荷载的大小和结构尺寸决定。如以垂直压力为主时,则以直墙拱形结构为宜;跨度较大时,可用落地拱结构,且底板常做成倒拱形。

地层性质的这种差别不仅影响地下结构的选型,而且影响施工方法的选择。因地下结构在施工阶段同样必须安全、可靠,故采用不同的施工方法是决定地下结构形式的重要因素之一,在使用及地质条件相同的情况下,施工方法不同也会采用不同的结构形式。

此外,地下结构的选型还与工程的使用要求有关。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,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。

综合地质、使用、施工因素,衬砌的制造方式可归纳为下列几种结构形式:

(1) 就地灌注整体式混凝土衬砌

就地灌注整体式混凝土衬砌是在施工现场架设模板,在围岩与模板之间灌注混凝土使其成型的一种支护方法。其适用于矿山法施工,且围岩可以保持短时间的稳定,也适用于采用明挖法施工的衬砌形式。衬砌的表面整齐美观,进度快,质量容易控制。

采用矿山法施工时常用拱形结构形式,这种结构大多数由上部拱圈、两侧边墙和底部仰拱(或铺底)组成。其上部拱圈的轴线采用多心圆或半圆形,边墙可做成直边墙或曲边墙;当底部压力较大或有地下水时,应做成带仰拱的封闭式结构,如图 1.2.2 所示。根据地质条件的不同或者说是由于所受到的荷载不同,常需要采用不同的结构形式。

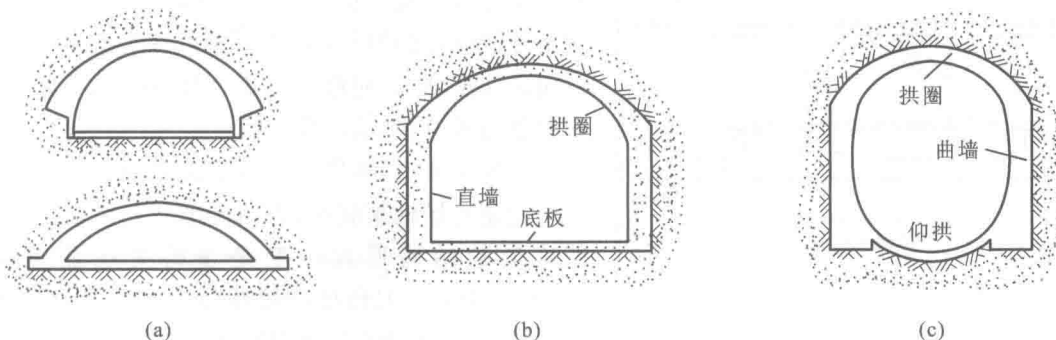


图 1.2.2 拱形衬砌

(a)落地拱;(b)直墙拱形衬砌;(c)曲墙拱形衬砌

在岩层较坚硬、整体性较好的稳定或基本稳定的围岩中,可采用半衬砌,边墙只设防护,施工时应保证拱脚岩层的稳定性。当使用要求较大跨度时,可以做成落地拱,如图 1.2.2(a)所示。

对水平压力较小的洞室可采用厚拱薄墙衬砌,其受力特点是可将拱圈所受的荷载通过扩大的拱脚传给岩层,使边墙受力减小,以节省建筑材料和减少土石方开挖量。

以竖直压力为主,而水平压力不大的洞室,一般采用直墙拱形衬砌,如图 1.2.2(b)所示。衬砌与围岩间的空隙应密实回填,使衬砌与围岩能整体受力。

对于岩层松散破碎、易于坍塌、具有较大的竖直压力和水平侧压力等情况,应采用曲墙拱形衬砌。遇洞室底部地层软弱或为膨胀性地层时,应采用底部结构为仰拱的曲墙拱形衬砌,将整个衬砌围成封闭形式[图 1.2.2(c)],以加大结构的整体刚度。

此外,两隧道垂直相接时的衬砌,称为交叉段衬砌(图 1.2.3);从 1 个双线隧道逐步拉开距离分离成 2 个单线隧道的过渡段部位,称为连拱隧道(图 1.2.4)。这些类型的隧道结构在计算时,应考虑空间效应。当图 1.2.4 中的 2 条隧道逐渐分离到 III—III 断面时,就成为 2 条近距离隧道。此时,一条隧道的施工会对另一条隧道产生非对称的荷载效应,引起它的应力和位移状态发生不利的变化,在设计和施工中都要考虑这种不利的荷载状态。

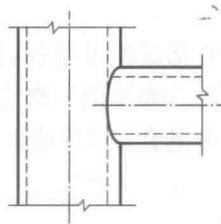
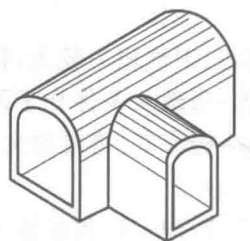


图 1.2.3 交叉段衬砌

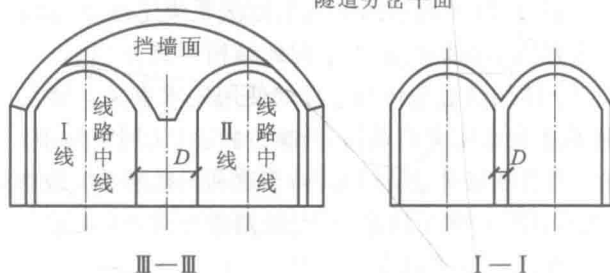
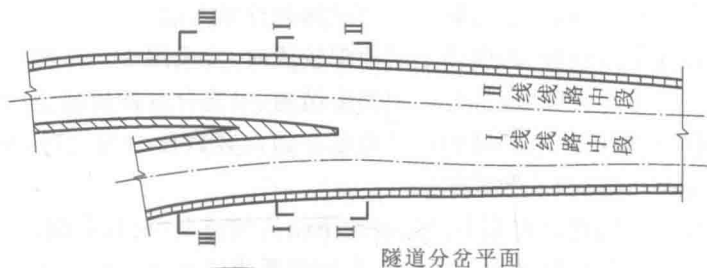


图 1.2.4 连拱形衬砌

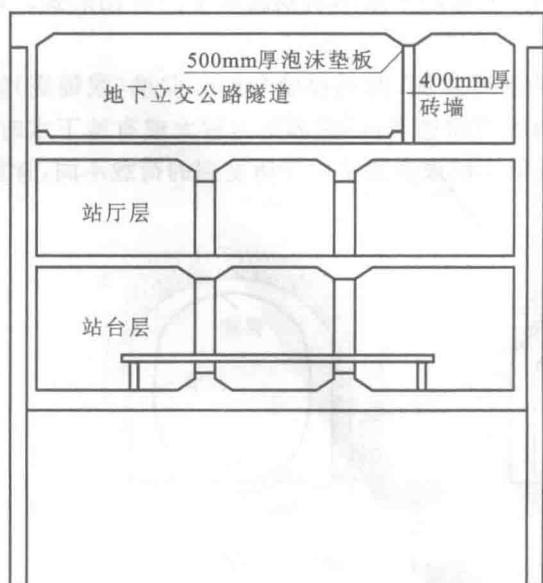


图 1.2.5 某地下铁道车站

采用明挖法施工常用的结构形式是矩形框架,其内部根据使用目的设有梁、柱或中墙,将整体框架分成多跨和多层。施工时常用桩或墙式支挡结构作为施工时的临时支护,它们也可作为地下结构墙体的一部分。在遇到施工场地狭窄时,特别是在交通繁忙的市区修建地铁车站,可优先考虑采用地下连续墙结构(图 1.2.5)。它是首先建成地下连续墙,之后可在墙体的保护下明挖基坑,修筑结构;或用逆作法施工,先修建顶板,回填路面,再开挖内部土体和修建边墙、内部结构及底板。

沉埋法施工(亦称水下明挖法)的衬砌结构形式,是在专门的制造场地预制的,其结构形式与制造方式有关。干船坞形的结构形式一般是多跨的钢筋混凝土管段[图 1.2.6(a)];船台形一般外形为八角形,用钢板焊接而成,内轮廓一般为单圆或双圆[图 1.2.6(b)]。

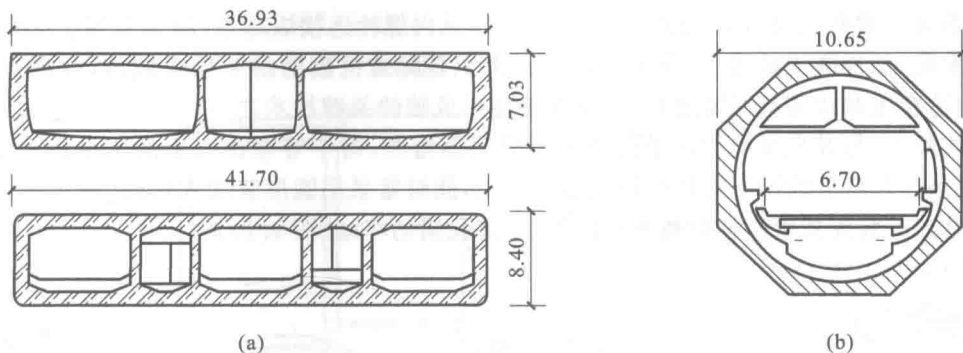


图 1.2.6 沉埋法施工的结构形式(单位:m)

(a)干船坞形结构形式;(b)船台形结构形式

用明挖法施工修建的地下构筑物,需要有和地面连接的通道,它是由浅入深的结构,称为引道,在无法修筑顶盖的情况下通常都做成开敞式的。图 1.2.7 为水底隧道引道采用开敞式结构时的断面示意图。遇地下水压较大时,开敞式结构一般均应考虑采取抗浮措施。

(2) 锚喷支护

锚喷支护常用于矿山法施工,它可以在坑道开挖后及时施设,因此,能有效地限制洞周位移,保护作业人员的安全,避免局部产生过大的变形。当围岩条件比较好,用锚喷支护可以获得长期的稳定,并达到使用要求时,可以将其作为永久结构(图 1.2.8);但常常是作为永久支护的一部分,与整体现浇的混凝土衬砌组成复合式衬砌(图 1.2.9)。由于锚喷支护是一种柔性结构,能更有效地利用围岩的自承能力维持洞室稳定,其受力性能一般优于整体式衬砌,因而被认为是一种新型的地下结构形式。

锚喷支护可以根据围岩的不同稳定情况,由喷混凝土、钢筋网喷混凝土、锚杆、钢筋网、钢纤维喷混凝土和钢支撑等不同的组合形式构成。

(3) 复合式衬砌

分 2 次修筑,中间加设薄膜防水层的衬砌称为复合式衬砌,如图 1.2.9 所示。复合式衬砌的外层常为锚喷支护,以利于及时架设,尽快使围岩和初期支护达到基本稳定。内层常为现浇整体式混凝土衬砌、喷混凝土或钢纤维喷射混凝土衬砌、装配式衬砌等不同的形式。

用喷混凝土做内衬的特点是与初期支护的结合状态好,但表面不光滑,还需再次处理,故目前较少使用。

用装配式衬砌做复合式衬砌的内衬时,2 层衬砌之间的空隙需压浆,英吉利海峡隧道(掘进机施工法)的内衬即是这种结构。

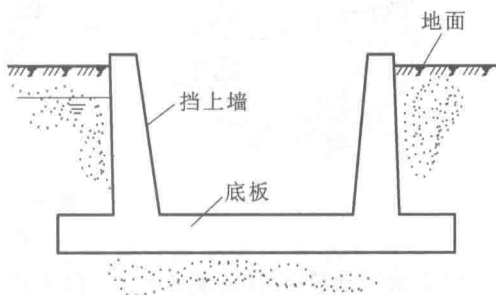


图 1.2.7 开敞式结构

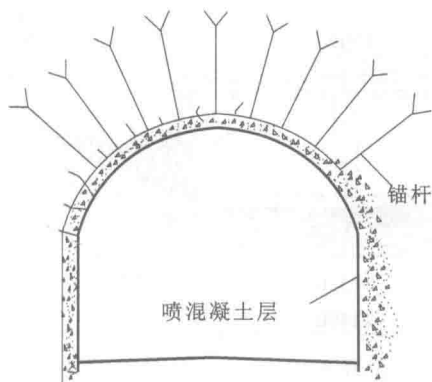


图 1.2.8 锚喷衬砌

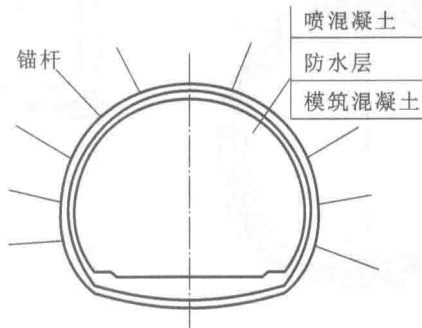


图 1.2.9 复合式衬砌

(4) 装配式衬砌

由工厂预制、在洞内拼装而成的衬砌称为装配式衬砌,每一个衬砌单元称为管片。一般由数块标准块

A、2块邻接块B和1块封顶块K拼装成一衬砌环,再用纵向螺栓连接成隧道(图1.2.10)。采用装配式衬砌可以使生产标准化,加快施工速度,提高工程质量。由于装配式衬砌的拼装接缝较多,常常是漏水的通道,所以,管片的制造精度和拼装精度要求较高,是修建隧道成败的关键技术之一。

遇地层土质较差、靠其自承能力可维持稳定的时间很短时,对中等埋深以上的土层地下结构常用盾构法施工;在地质条件较好的情况下可以使用掘进机施工,此时常采用圆形装配式衬砌[图1.2.10(a)]的结构形式。将平行修建的装配式管片横向连通,即可成为多孔道的车站[图1.2.10(b)]。

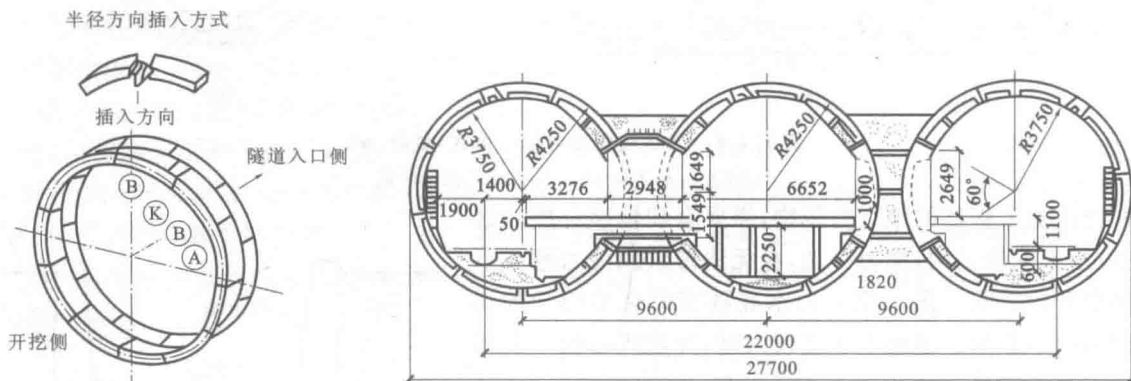


图 1.2.10 盾构法施工的装配式衬砌

(a)圆形装配式衬砌;(b)塔柱式地铁车站

用于盾构法施工的装配式衬砌,由于在盾尾内拼成圆环衬砌,在盾构向前推进时,要承受千斤顶推进的反力。同时,由于盾构的前进,装配好的衬砌环一旦暴露在盾尾外时,立即承受地层给予的压力,故要求衬砌:①能立即承受施工荷载和永久荷载,如围岩压力、机具压力,后者包括盾构推进时的千斤顶压力;②有足够的刚度和强度,不透水、耐腐蚀,具有足够的耐久性能;③装配安全、简便、构件能互换,且在管片刚被推出盾尾后即刻要承受向衬砌背后注浆的压力。

近年来,随着盾构形式的发展,相继出现了矩形、椭圆形、马蹄形、多圆等断面形式的盾构,装配式衬砌的形式也与之相应地得到发展。

用于矿山法施工的单线交通隧道的装配式衬砌如图1.2.11(a)所示。图1.2.11(b)为基辅地铁的单拱车站横断面,隧道埋置于不透水的致密黏土层中,拱圈和仰拱均由混凝土砌块组成,支承在2个圆形支墩上。图中所示结构由于管片间无受拉连接构件,所以,只适用于有一定自稳能力的地层。

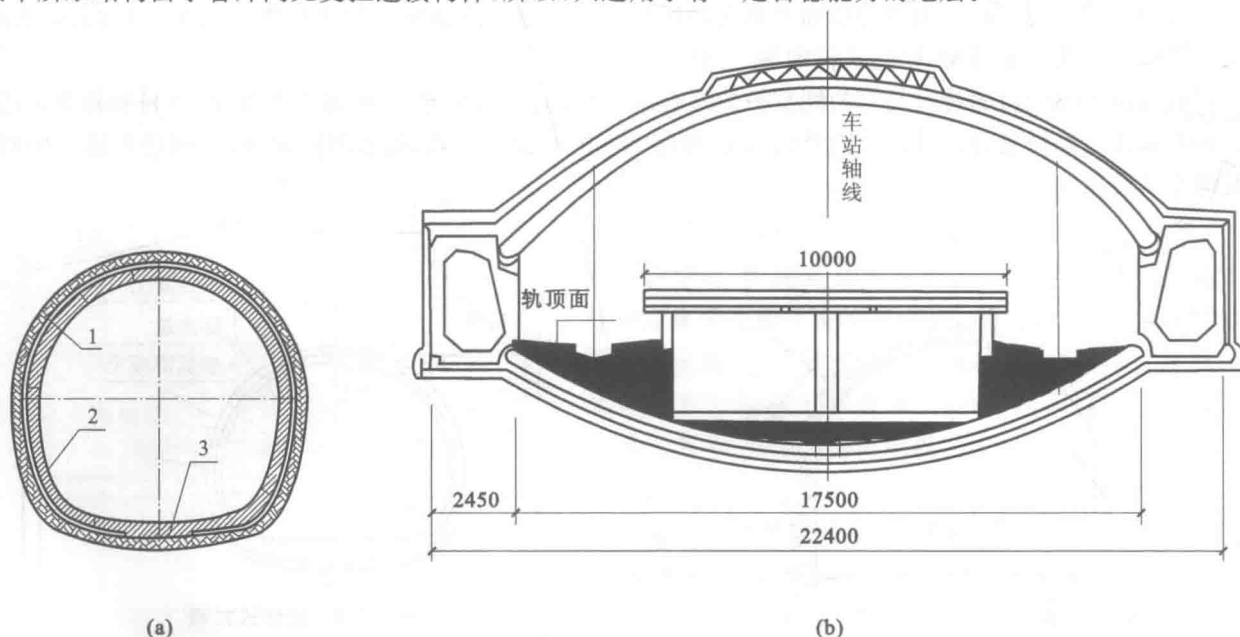


图 1.2.11 矿山法施工的装配式衬砌

(a)交通隧道;(b)基辅地铁车站

1—隧道初期支护;2—管片;3—混凝土平台