

高等院校土木工程专业选修课 **教材**

隧道与地下工程

■ 霍润科 主编 刘汉东 主审

SUIDAO YU DIXIA
GONGCHENG

中国建筑工业出版社

高等院校土木工程专业选修课教材

隧道与地下工程

霍润科 主编
刘汉东 主审

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

隧道与地下工程/霍润科主编. —北京: 中国建筑工业出版社, 2011. 1

(高等院校土木工程专业选修课教材)

ISBN 978-7-112-12825-9

I. ①隧… II. ①霍… III. ①隧道工程-设计②地下工程-设计 IV. ①U452.2②TU92

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 264844 号

本书共分 9 章, 系统地介绍了隧道与地下工程的勘察设计、主体及附属结构形式、洞室围岩稳定性分析及围岩分级、地下工程衬砌结构的计算、隧道与地下工程支护与施工等基础知识和基本理论, 强调围岩与支护结构在隧道与地下工程重要作用, 突出经验类比、理论分析、现场量测和超前地质预报等相结合的动态设计思想; 同时, 对隧道与地下工程常用分析软件 ANSYS 和 FLAC3D 进行了介绍。本书吸收了近年来最新设计理论和工程应用成果, 力求由浅入深, 简洁明了, 通俗易懂。

本书可作为普通高等院校教学用书, 还可作为从事隧道及地下工程设计、施工和科研人员的自学参考书。

责任编辑: 王 梅 咸大庆 刘瑞霞

责任设计: 李志立

责任校对: 王金珠 张艳侠

高等院校土木工程专业选修课教材

隧道与地下工程

霍润科 主编

刘汉东 主审

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京千辰公司制版

北京同文印刷有限责任公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 16 $\frac{3}{4}$ 字数: 400 千字

2011 年 2 月第一版 2011 年 2 月第一次印刷

定价: 28.00 元

ISBN 978-7-112-12825-9

(19500)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

本教材是为适应高等学校土木工程专业新的培养计划及新修订的隧道与地下工程领域的设计规范和标准，并结合作者多年的教学和科研实践编写而成。

本书系统地介绍了隧道与地下工程的勘察设计、主体及附属结构形式、洞室围岩稳定性分析与围岩分级、地下工程衬砌结构的计算、隧道与地下工程支护与施工等基础知识和基本理论，强调围岩与支护结构在隧道与地下工程重要作用，突出经验类比、理论分析、现场量测和超前地质预报等相结合的动态设计思想；同时，随着计算机技术在土木工程领域的应用和计算分析软件功能的日趋完善，使复杂地下工程的精确计算成为可能，为此本书对隧道与地下工程常用分析软件 ANSYS 和 FLAC3D 进行了介绍，可作为本科生的拓宽加深内容。

本书涵盖了隧道与地下工程的全部内容，吸收了近年来最新设计理论和工程应用成果，力求由浅入深，简洁明了，通俗易懂，除能满足普通高等院校教学要求外，还可作为从事隧道与地下工程设计、施工人员、科研人员及研究生的自学参考书。

本书由西安建筑科技大学霍润科、宋战平、牛泽林编写完成，其中第一章、第四章、第六章由霍润科编写；第二、三、五、九章由牛泽林编写；第七、八章由宋战平编写。

本书由霍润科统稿主编，刘汉东教授对书稿进行了认真审阅并提出宝贵意见和建议，在此深表感谢。

本书在编写过程中，参考了国内外许多学者的著作和成果，在此表示诚挚的谢意。由于编写水平有限，书中难免存在不足和错误之处，敬请读者批评指正。

感谢中国建筑工业出版社的大力支持，特别感谢王梅编审为此书出版所付出的辛勤劳动。

目 录

第1章 绪论

1.1 隧道与地下工程的基本概念与特点	1
1.2 隧道与地下工程分类	3
1.3 隧道与地下工程建设中遇到的工程问题	3
1.4 隧道与地下工程的设计方法	5
1.5 本学科的发展概况	7
1.6 本课程研究内容及任务	8

第2章 隧道与地下工程勘察与设计

2.1 隧道与地下工程勘察	10
2.2 隧道与地下工程设计	16

第3章 隧道与地下工程的主体结构及附属设施

3.1 隧道衬砌的类型	30
3.2 隧道结构构造的要求	35
3.3 洞门的构造	45
3.4 明洞的构造	48
3.5 隧道的内装	52
3.6 隧道的防水与排水	54
3.7 地下工程的主体结构构造	59
3.8 隧道与地下工程的附属设施	62

第4章 地下洞室围岩稳定性与围岩分级

4.1 概述	66
4.2 围岩的初始应力场	70
4.3 开挖洞室围岩应力场的弹塑性分析	75
4.4 松散介质围岩压力分析	87
4.5 动力荷载作用下隧洞的稳定性评价	91
4.6 围岩分级	96

第5章 隧道与地下工程结构计算

5.1 隧道与地下工程衬砌上的荷载	119
-------------------------	-----

5.2	隧道与地下工程结构体系的计算模型和方法	121
5.3	半衬砌结构的计算	126
5.4	曲墙式衬砌计算	131
5.5	直墙式衬砌计算	135
5.6	衬砌结构截面强度验算	140
第6章 隧道与地下工程数值分析法		
6.1	概述	146
6.2	地下工程有限元法原理及其基本单元类型	146
6.3	非线性有限元及岩土本构模型	158
6.4	地下工程弹塑性有限单元法	164
6.5	ANSYS在隧道与地下工程中的应用	166
6.6	FLAC3D在隧道与地下工程中的应用	175
第7章 隧道与地下工程喷锚支护设计		
7.1	概述	188
7.2	隧道与地下工程锚喷支护设计	188
7.3	隧道与地下工程联合支护	193
7.4	设置支护时间和结构刚度的合理选择	194
7.5	隧道与地下工程监控量测与数据分析	195
第8章 隧道与地下工程施工		
8.1	概述	203
8.2	隧道与地下工程施工方法	204
8.3	隧道与地下工程钻爆施工技术	206
8.4	隧道掘进机施工	224
8.5	城市地下空间的施工技术	231
8.6	不良和特殊地质地段隧道施工的处理措施	233
第9章 隧道与地下工程施工组织设计与施工管理		
9.1	隧道地下工程的施工组织设计	241
9.2	隧道地下工程施工管理	250
参考文献		260

第1章 绪 论

1.1 隧道与地下工程的基本概念与特点

伴随着世界人口的迅速增加和城市化建设步伐的加快,人类的生存环境不断发生变化,资源日趋匮乏,生存空间拥挤,交通堵塞,生态失衡和环境恶化等问题越来越成为制约经济与社会、环境发展的瓶颈。为此,世界各国政府除采取综合性治理措施外,把地下空间的开发和利用作为一项国策,开始进行大规模的地下工程建设,取得了重要的社会和经济效益。

1.1.1 隧道与地下工程的概念

地球表面以下是一层很厚的岩石圈,岩层表面风化形成不同厚度的土层。岩层和土层在自然状态下都为实体,在外部条件下可形成空间。在岩层和土层中天然形成或人工开挖形成的空间称为地下空间(Subsurface space)。天然地下空间按成因有喀斯特溶洞、熔岩洞、风蚀洞等;人工地下空间包括两类:一类是开发地下矿藏形成的(矿)坑道,另一类是因工程建设需要开挖的地下隧道。因此地下空间的开发利用为人类开拓了新的生存空间,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)或构筑物(Structures),是在地下形成的建筑空间,称为地下建筑(Underground buildings and structures)。地下建筑物一般是指建造在地下的矿井、巷道、输油或输气管道,输水隧洞,地下商业街、地下军事工程。所有建造在地层表面以下的建筑物或构筑物统称为地下工程(Underground engineering)。

这里需要说明的是,对于地下工程,不同的行业由于其领域侧重点的不同而形成不同的称谓。如公路和铁道部门称之为隧道及地下工程,在矿山行业称为巷道,水利水电部门称之为隧洞,军事部门称之为坑道,在市政工程部门又称为通道等。

隧道(tunnel)通常是指修筑在地下或山体内部,两端有出入口,供车辆行人等直接通行的交通工程。隧道要通过车辆,断面相对较大。由于隧道在缩短线路长度、穿越不良地质地段、提高道路的可靠性和安全性方面,以及日后运营阶段工程病害维修费用少,隐蔽性强等特点,50多年来,我国交通地下工程得到了迅速发展。据不完全统计,截至2003年,我国已建成铁路隧道6876座,总长度3670km,公路隧道为1972座,总长度超过1000km,成为世界上铁路公路隧道最多的国家之一。近年来,我国每年有180km的水工隧洞,270km的铁路隧道,300km的地铁隧道需要修建。

鉴于隧道在地下工程的重要地位及其不可替代的特征,本教材定名为隧道与地下工程。

1.1.2 隧道与地下工程的特点

1. 地下工程承受荷载条件复杂

按地下工程所处的周围地质环境不同,可分为岩石地下工程和土层地下工程,根据现代围岩级别的划分办法,也可统一将土层地下工程视为特殊类型的岩石地下工程。从围岩级别的多样性来看,直接作用于地下工程的围岩压力呈现出复杂多样的特点,有时,同一条地下工程往往要穿过级别不同的围岩条件;此外,地下围岩不仅是作用于地下结构的外在荷载,也是能约束地下结构变形和位移、参与地下结构共同作用的岩土体,组成一种共同受力的结构体系;同时,不同的施工方法,造成地下结构的受力状态也不同。因此,传统的地面工程设计计算理论不能简单地应用于地下工程的设计计算,地下工程的设计必将随围岩级别的不同而涉及更多的因素。

2. 施工环境特殊

不管是暗挖还是明挖,地下工程施工作业的空间是有限的,而且由于地下水的影响,不论对施工人员的心理,还是对施工机具的效率都会产生不利影响。当然,随着科学技术的不断发展,目前,地下工程的施工机具得到了显著的改善,各种大型高性能地下工程施工设备层出不穷,如隧道全断面掘进机(TBM)的出现,使隧道施工具有连续化、“工厂”化的特点,隧道掘进效率大幅提高。

3. 空间相对封闭,需要专门的照明、通风、除湿防潮措施进行维护

地下工程多为相对狭长而封闭的空间,洞内几乎见不到阳光,无论白天黑夜都需要人工照明;通风条件也受到限制,不能像地面建筑一样靠门窗自然通风,作为有人聚居的地下空间必须有专门的通风设施;地下水对地下工程施工、使用与维护造成的水患素来是地下工程的症结,地下工程都应考虑必需的、可靠的防排水措施,此外,洞口温差造成的水汽结露,也会使隧道内部及表面易出现凝结水,因此,还要设置必需的除湿防潮设施。

4. 受外界条件影响小

除洞口外,地下建筑内部环境温度稳定,受外界影响小,而且具有良好的蓄热性能和密闭性,适宜于建设对环境温度有特殊要求的工程,如地下冷库等;与地面工厂相比,地下工程具有良好的抗振性能,适宜于特殊精密仪器厂房建设;同时,地下工程有一定的埋置深度,对防核爆冲击波、毒气污染等袭击有一定的防护能力,是人防、国防工程的最佳选择。

5. 可有效利用土地资源

目前,大型地下停车场、发达的地铁网络、大型地下交通枢纽、城市地下商业街以及城市地下综合管线等地下工程的大量存在,是衡量一个城市发达程度的重要指标,地下空间资源的合理开发与利用是城市可持续发展的重要途径之一。交通隧道与桥梁是山区高等级公路、高速公路、铁路建设的常见工程项目,有时往往在全部投资中占有相当大的比重,之所以选择隧道与桥梁的方式,主要是它不仅可以节约基本建设投资,而且能缩短交通线路,创造更安全、便捷的交通条件,惠及运输业的发展。

尽管上述特点利弊参半,而且一般情况下地下工程建设的前期一次性投入比地面工程大,但当今世界地下工程的建设无论在规模上,还是在技术水平上,一直处在不断发展之中。这不仅反映了当前地下工程领域中活跃的研究和建设状况,而且对促进地下工程设计计算理论的发展完善、施工经验的交流具有积极深远的意义。

1.2 隧道与地下工程分类

隧道与地下工程有多种分类方法，常见的有以下几种。

1. 按使用功能分类

(1) 矿山巷道：包括各类矿物采掘后的洞室和输送矿石的巷道工程，这类工程通常只要在采矿过程中能维持洞室的稳定、安全，待采矿完成后，或者废弃或者转作其他用途。

(2) 地下交通工程：包括各种公路和铁路隧道、城市地铁、地下过街通道等。

(3) 地下工业工程：包括各种轻、重工业地下厂房、地下核电站、地下火电站等。

(4) 地下水工洞室：包括各种输水隧道、水电站地下厂房、地下抽水蓄能电站、地下水库等。

(5) 地下民用工程：包括地下商场、图书馆、体育场馆、展览馆、影剧院、医院、旅馆、住宅及其综合建筑体系——城市地下街道等。

(6) 地下仓储工程：包括粮食、油料、水果、蔬菜等的储存库，鱼、肉食品的冷藏库，车库，核废料存库等。

(7) 地下市政工程：包括地下自来水厂、地下污水处理厂、给水排水管道及煤气、供电、通信管线的综合工程等。

(8) 地下军事工程：包括各种野战工事、指挥所、通信枢纽、人员和武器掩蔽所、军火和物资库等。

2. 按所处地质环境（介质）分类

(1) 岩石地下工程：包括人工开挖洞室和天然溶洞两种。

(2) 土层地下工程：包括黄土洞室和其他土层洞室。当洞室下部为岩石，上部为土体时，根据其周围应力特点及防排水要求，也宜归为土层地下洞室进行设计。

3. 按施工方法分类

地下工程是采用不同的施工方法修建而成，可分为：浅埋明挖法地下工程、盖挖逆作法地下工程、矿山法隧道、盾构法隧道、顶管法隧道、沉管法隧道、沉井基础工程等。

4. 按埋置深度分类

各类地下工程都埋藏在地下不同深度处。按埋深可分为深埋地下工程和浅埋地下工程。

(1) 深埋地下工程： $h/b \geq a$ 时为深埋地下工程。

(2) 浅埋地下工程： $h/b < a$ 时为浅埋地下工程。

其中： h 为洞顶衬砌外缘至地面的垂直距离； b 为洞顶衬砌外缘的跨度或圆洞的直径。 a 的取值，根据土压力理论计算约为 2.5。国内有些设计部门认为，对于坚硬完整的岩体，其值偏高，建议取为 1.0~2.0，但必须同时满足 $h \geq (2.0 \sim 2.5)h_0$ ，其中 h_0 为洞顶岩土体压力拱的计算高度。

1.3 隧道与地下工程建设中遇到的工程问题

1. 初始应力

初始应力即在洞室未开挖前在岩土体中存在的应力。这主要是由地壳运动产生，特别

是在新构造运动活动区更为明显,如二滩水电站坝区 112 个钻孔中,有 58 个钻孔由于地应力作用使岩芯呈厚 2cm 的饼状块体,应力达到 19~25MPa。甘肃金川矿二矿区构造应力情况使该矿区巷道变形破坏有以下特征:顶拱混凝土坍落,沿长轴开裂,巷道呈桃形;洞室拱腰或拱脚发生斜向或纵向剪切裂缝,侧墙内鼓张开,并有纵向裂缝;拱顶下垂甚至被压平;底板鼓起,有些部位两轨高差达 17.5cm。为了弄清该矿区地应力情况,做了地应力量测,得最大主应力为 30MPa,且与二矿区 1250 巷道轴线垂直。

以上情况说明,在地下洞室建设中尤其在高地应力区,对地应力问题应给予充分重视,以保证施工安全和洞室正常运营。

2. 洞室塌方和片帮破坏

这种破坏是指洞室围岩发生突发性塌落和片滑、崩塌所引起的地质灾害,常发生在断层破碎带、膨胀岩、第四系松散岩层、不整合接触面、侵入岩接触带及岩体不利组合地段。这往往和洞室的开挖跨度、支护时间等因素有关。例如,猫跳河四级引水洞 0+92~0+109m 设计断面为圆形,直径 6.5m,由于未能及时支护,沿结构面形成 17m×9m×7m 的塌方;成昆线有隧道 415 座,在施工中有 25% 发生大规模塌方;京广线驿马岭隧道长 17km,通过 10 多处断层带,塌方达 60 余次;大秦线西坪隧道长 0.3km,穿过第四系黄土夹砂卵石层,一次塌方 9000m³,塌高 25m。按京广线大瑶山隧道 29 处塌方统计,拱部占 79.3%,拱脚占 13.8%,片帮占 6.9%。塌方不但影响工期,增加经费,而且人身伤亡有时非常严重。例如,意大利—瑞士间秦奇山隧道长 14.6km,塌方死亡 25 人。日本 1984~1997 年间隧道施工死亡 220 人,其中塌方造成的死亡占 26%。

3. 涌水和突水

涌水和突水是地下工程施工和运营中常见的地质灾害,常常引起严重的后果。出现部位为断层破碎带、松散岩体和岩溶区。

按 1988 年以来建成的铁路隧道统计,在施工中 80% 遇到水害,涌水量在 1×10⁴m³/d 以上有 31 座;在运营中有 1300 余座产生渗水,漏水问题占隧道总数的 30%。例如,京广线大瑶山隧道穿过 9 号断层时,突水量达 3×10³m³/d;成昆线沙水拉达隧道全长 6.4km,涌水量达 5.2×10⁴m³/d,因突水抢修停工 32d,通车后严重漏水 10 余处,治理 13 年耗资 800 余万元;襄渝线中梁山隧道 4km,无论在施工或运营中都产生大量涌水现象,经过几年的治理耗资数百万元。另如京广线南岭隧道、襄渝线大巴山隧道、川黔线娄关山隧道、京广线驿马岭隧道在施工中都发生过涌水和突水事故。在国外铁路隧道建设中,涌水、突水现象也是常见的地质灾害。如日本青函隧道 4 次突水量达 11.5×10⁴m³/d,死 34 人,伤 1300 人,总工期较原计划推迟 10 年之多。瑞士—意大利辛普伦 1 号隧道,为控制围岩压力和地下水耗资是原设计的 6 倍,拖延工期 1.5 年。

4. 山体变形

山体变形主要是指滑坡、错落等,常会对浅埋、偏压隧道造成危害。例如,襄渝线磨滩隧道建在滑坡体上,施工中隧道多次滑坡塌方,运营后衬砌变形,破坏后中线移动达 200~300mm,改线投资 3000 万元;青藏线关角隧道,由于受构造应力作用引起滑坡,使道床鼓起最大达 300mm,中线最大偏移达 140mm,整理费用达 2000 万元。在国外,由于隧道内水外渗引起边坡滑动实例也很多。例如,Kandersteg 隧道为无压隧道,后改为有压隧道,使衬砌出现裂缝,承压水渗漏到山坡岩体中,在不透水层阻隔下形成“上层

滞水”，岩石性质恶化，使山体发生大滑坡，附近居民生命财产损失巨大。

5. 岩溶塌陷

岩溶洞穴对洞室稳定存在着潜在威胁，常会因排水引起洞穴塌陷，地表水枯竭等。例如，贵昆线老虎嘴隧道遇到 $90\text{m} \times 120\text{m} \times 100\text{m}$ 洞穴；宜珙线轿顶山隧道，遇到 $80\text{m} \times (50 \sim 6)\text{m} \times (20 \sim 30)\text{m}$ 洞穴，都因处理困难，在洞内被迫绕行；襄渝线中梁山隧道因突水洞顶塌陷 29 处，使 48 个泉中有 37% 枯竭；京广线南岭隧道因突水突泥使地面 45 处塌陷，最大深达 5m；清江隔河岩水电站引水发电洞遇到 4000m^3 大岩溶洞穴，给施工带来许多困难，建设费用增加。

6. 泥石流

一般和突水相伴生，在洞室开挖中带来灾害。例如，京广线南岭隧道生潮垄段曾发生 3 次突泥，突泥量达 $1.2 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$ ，淹没坑道 177m，处理达 6 个月；大秦线军都山隧道两次突出泥、岩屑分别为 600m^3 和 1500m^3 ，淹没隧道造成巨大损失。

7. 岩爆及瓦斯等有害气体

岩爆现象属于动力学岩石力学问题，在矿山、公路铁路、水利部门洞室开挖中常会遇到，尤其是在高地应力区更为明显。在洞室围岩中由于构造应力作用会蓄积一定的应变能，洞室开挖后有了能量释放空间，使岩石发生碎化，弹落并伴有爆破声。统计资料指出，洞室开挖后 0.3~0.5h 内易发生岩爆，埋深往往大于 500~1000m，如我国成昆铁路关村坝隧洞埋深 1650m。日本大清水隧道开挖后岩爆持续 2~3 个月，射出块体 $(0.2 \sim 1.2)\text{m} \times (0.2 \sim 2.5)\text{m} \times (0.5 \sim 1.0)\text{m}$ 。岩爆不但威胁到施工人员安全，对支护物也会造成破坏，如渔子溪、映秀湾水电站，在施工中曾因岩爆引起人身事故和支护物的破坏。当洞室埋深超过 1500m 时，一般隧道温度可达 30°C ，瓦斯和有害气体在煤系地层洞室和煤矿区较为常见。

8. 核废料处理

自 20 世纪 50 年代兴建核电站以来，全世界 30 多个国家已建 438 座，发生核泄漏的有 2 座：一为美国三英里岛核电站，发生在 1979 年 3 月 28 日，使电站周围 80km 范围内生态环境受到污染，从 1979~1984 年间有 13000~46000 人受到过量的镭照射；二为前苏联的切尔诺贝利核电站，事故发生在 1986 年 4 月 26 日，因反应堆爆炸，有 203 人受伤，其中 29 人在 1 个月内死亡。受影响的区域为前苏联欧洲部分以及东欧、西欧、北欧一些国家。核废料需深层掩埋，一般应在 400m 以下，且保证一万年不泄漏。要解决这样的问题，不仅是岩石力学本身的任务，也涉及区域地质、地下水渗流、放射性元素迁移、热力学等学科。

总之，在地下工程建造中进行地质灾害研究和预报是一项极其重要的工作，这对工程建造、工期和人身安全等方面至关重要，加强这方面的研究，无疑将是摆在我们面前的一项艰巨任务。

1.4 隧道与地下工程的设计方法

1. 经验类比设计法

经验类比设计法即工程类比法，地下工程的基本特点是围岩地质环境复杂，要取得准

确的地质、围岩参数和设计荷载参数等数据极其困难，而且一些施工技术的机理复杂，如锚喷支护等，当前对其研究尚不完善，其计算理论不太成熟。因此，在相当长的历史时期内，经验判断对地下工程设计仍将起很大作用。目前，在实际地下工程的支护设计中往往采用工程类比法，我国多数锚喷支护设计规范都明确规定锚喷支护设计应以工程类比法为主。

地下工程的类比法设计程序为：分析工程地质条件，对拟建工程进行围岩分级，以围岩级别为依据，按照有关规范中提供的参数表或类似工程经验数据，查出支护参数，以此作为设计依据绘制施工图。目前，一些简单的岩石地下工程，如人防工程坑道静载段、矿区巷道等，当其地质条件清楚、断面尺寸不大、断面形状不复杂时，往往直接按工程类比设计法选定结构断面形式及尺寸，绘制结构施工图。

现行的工程类比设计往往都是一种半定量的设计，即只给出支护参数范围，设计者必须以丰富的设计经验作出合理判断，不能一味地以安全保险为目的选用最大值，否则就失去了类比设计给出的一定范围的价值，造成大量的浪费。

2. 理论设计方法

尽管工程类比法简单易行，只要地质条件吻合，则设计可靠性也较高。但毕竟每个地下工程都有其不同的特殊性，如围岩地质条件不可能完全一致，因此工程类比法的局限性是显而易见的。目前，在我国的地下工程建设中即使采用工程类比法，也要进行理论验算，对于无经验可参考的大跨度地下工程和洞群复杂的地下工程设计中，必须进行理论计算甚至要进行专门试验研究。

理论设计法就是以地下结构计算模型为理论基础，根据地质条件确定围岩压力，求出地下结构的内力，核算截面参数并绘制施工图。其设计程序为：分析工程地质条件，对拟建工程进行围岩分级，选定结构计算模型，初步拟定结构截面尺寸，确定结构所受的围岩压力，结构内力计算，截面配筋设计，结构稳定性验算及安全性评价，绘制结构施工图。其中，结构计算模型选定是关键，要综合考虑围岩地质特征、结构形式、洞室跨度、埋深、拟采用的施工方法等一系列因素，力求使计算结果符合实际受力情况。

3. 信息化设计（动态设计）方法

由于现场地质环境复杂，基础信息缺乏，地下工程设计无论采用理论计算法还是工程类比法，依据目前的技术水平，都不可能得到十分准确的结果。另外，由于工期、经费、勘测手段等因素的限制，在开挖前不可能将地质信息等施工中可能出现的因素了解得十分清楚，而必须通过开挖后所揭示的地质条件对围岩级别进行再认识和再确定，所有这些，将严重影响设计和施工决策的可靠性。设计文件中所拟定的断面尺寸、结构形式、支护参数、预留变形量和施工方法等设计参数均不是一成不变的，需要在开挖过程中重新评估和确认，必要时需作调整或修正。因此，地下工程的设计无法在开工前就做到一步到位，这就是地下工程有别于其他土木工程的重要特征。正因为如此，目前在地下工程设计中，广泛采用经验借鉴、理论分析、现场量测技术、信息反馈、超前预报和动态调整相结合的所谓地下工程信息化设计或动态设计法。

与地面工程比较，在地下工程的动态设计法中，勘察、设计、施工等诸环节之间有交叉、反复、变更等现象。在前期地质调查和试验资料的基础上，根据经验方法或通过理论计算进行预设计，初步选定支护参数。然后根据预设计进行施工，同时，还须在施工过程中

中进行监控量测、超前预报,对量测数据进行理论分析,获得关于围岩稳定性和支护系统力学和工作状态的信息,然后结合有关规范和经验,对预设计有关支护参数及施工方案进行调整,即修改设计、再施工、再量测、再反馈,直到建成一个长期稳定的地下结构体系。由此可见,动态设计方法与过去采用的一般设计方法相比,有了很大的进步。它不仅仅包括施工前的设计,还包括施工过程中的设计,即把过去截然分开的施工和设计两个阶段融为一体,构成了一个完整的动态设计过程。同时,这种方法并不排斥以往的各种理论计算、经验类比以及模型试验等设计方法,而是把它们最大限度地容纳在自己的理论系统中,使各种方法特有的优势得到了进一步的发挥,变一步到位为多步调整,使各种传统方法在一个动态系统中不断完善并发挥其应有的作用。

1.5 本学科的发展概况

人类对地下空间的利用经历了一个从自发到自觉的漫长过程。推动这一过程的,一是人类自身的发展,如人口的繁衍和智能的提高;二是社会生产力的发展和科学技术的进步。从历史的角度出发,可以将人类对地下空间的利用史划分为以下四个阶段:

1. 人类出现至公元前 3000 年的远古时期

人类利用天然洞穴作为群居和活动场所,考古学家发现,距今 10000 年前,被称为“新洞人”和“山顶洞人”的两种古人类居住地址就在北京周口店龙骨山自然条件较好的天然岩洞中。黄河流域已发现公元前 8000~公元前 3000 年的洞穴遗址 7000 余处。在日本、欧洲、美洲、西亚、中东、北非等地也都发现了这一时期的古人类居住洞穴,说明这种原始居住方式在当时已被广泛采用。

2. 公元前 3000 年至公元 5 世纪的古代时期

公元前 3000 年以后,世界进入了铜器和铁器时代,劳动工具的进步和生产关系的改变,导致生产力有了很大发展。古埃及、巴比伦、印度及中国先后建立了奴隶制国家,随着生产关系的改变和劳动工具的进步,人类开始把开发地下空间用于满足居住以外的多种需求,埃及金字塔、巴比伦幼发拉底河引水隧道,均为这一时代的建筑典范。

3. 公元 5 世纪至 14 世纪的中世纪时期

欧洲在中世纪经历了封建社会最黑暗的千年文化低潮,地下空间的开发利用也基本上处于停滞状态。在这一时期,我国地下空间的开发多用于建筑陵墓和满足宗教建筑的一些特殊要求。相继建成的云冈石窟、龙门石窟、敦煌莫高窟,这些石窟的形成和加工与以佛教故事为题材的浮雕艺术和壁画艺术融为一体,成为人类文化宝库中极为珍贵的部分。

4. 15 世纪开始的近代和现代

14 世纪至 16 世纪出现的欧洲文艺复兴,促进了社会生产力的提高和资本主义生产关系的萌芽,从此,欧洲的产业革命、科学技术开始走在世纪的前列,地下空间的开发利用也进入了新的发展时期。1613 年建成伦敦地下水道;1681 年修建了地中海比斯开湾 170m 的连接隧道;1843 年建成越河隧道;1863 年伦敦建成世界第一条城市地下铁道;1871 年穿越阿尔卑斯山,连接法、意的全长 12.8km 的公路隧道开通。

到本世纪初,世界上已有 46 个国家所属的 126 座城市建成了地下铁道,线路总长度达到 6964km。我国大瑶山铁路隧道,长 14.295km,自 1981 年 11 月开始施工,于 1987

年5月建成。日本青函隧道连接北海道与本州,总长53.85km,穿越津轻海峡,其海底长度达13.3km,青函隧道工程自1939年开始规划,1946年实施调查,1971年正式施工,至1988年3月投入运营,经历了半个世纪。英法海峡隧道总长50km,海底长度37km,于1987年动工,1994年5月投入运营。此外各类地下电站也迅速增长,其中地下水力发电站的数目,全世界已超过400座,其发电量达45亿W以上。地下电站的建设是十分庞大的地下工程,前苏联的罗戈水电站,土石方量为510万 m^3 ,混凝土用量达160万 m^3 ,开凿的隧道、洞室294个,总长度达62km。

在我国,据交通部统计,20世纪50年代,我国仅有30多座隧道,总长约2.5km。1993年发展到682座,总长136km。截至2001年,我国已成为世界上隧道和地下工程最多、最复杂、发展最快的国家。较长的隧道有:大瑶山铁路隧道长14.295km;秦岭铁路隧道,双线总长18.46km;兰(州)新(疆)铁路乌鞘岭隧道全长20.05km,是亚洲最长的陆地隧道,双洞双车道,单洞全长18.004km;我国最长的城市地下隧道,南京玄武湖地下隧道长2.66km,双向6车道,2002年竣工;我国第一条海底隧道,厦门“东通道”海底隧道全长9km,总投资32.8亿元,目前已开工建设。

近年来,世界各国对于地下空间的开发利用都十分重视。城市地下空间的开发利用,已经成为城市建设的一项重要内容,一些工业发达国家,逐渐将地下商业街、地下停车场、地下铁道及地下管线等连为一体形成多功能地下综合体。开发城市地下空间满足未来城市发展的需要,无疑将是解决城市发展与土地资源紧张矛盾的有效途径。可以预言,21世纪是人类开发利用地下空间的新时代。

1.6 本课程研究内容及任务

隧道与地下工程包括岩石地下工程与土层地下工程,而这两类工程在规划设计和施工工艺等方面,既有相似之处,又有显著区别。目前,隧道与地下工程还没有形成一门独立的学科,涉及的内容相当广泛,除建筑设计和规划的一些基本内容外,还有多个交叉学科知识。例如,水文与工程地质学,岩土力学,结构工程学,防护工程学,系统工程学等。同时,它会涉及一些设计施工工艺知识,如液体燃料储藏工艺,铁路公路设计工艺,地下工程施工工艺等,如果对这些工艺没有相当程度的了解,就无法有效的利用地下空间,满足施工工艺的特殊要求。

隧道与地下工程课程系统地介绍了隧道与地下工程的勘察设计、主体及附属结构形式、洞室围岩稳定性分析及围岩分级、地下工程衬砌结构的计算、隧道与地下工程支护与施工等基础知识和基本理论,强调围岩与支护结构在隧道与地下工程中的重要作用,突出经验类比、理论分析、现场量测和超前地质预报等相结合的动态设计思想;同时,随着计算机技术在土木工程领域的应用和计算分析软件功能的日趋完善,使复杂地下工程的精确计算成为可能,为此本书对隧道与地下工程常用分析软件ANSYS和FLAC3D进行了介绍。

本课程是土木工程学科的一门专业课,课程的主要任务是通过学习,使学生获取隧道与地下工程的基础知识,掌握地下工程设计的基本原理方法及施工工艺,能够根据地下工程所处的不同环境(介质)、使用功能和施工方法设计出安全经济的合理结构,同时,也

为了加深了解隧道与地下工程的结构类型和施工工艺，培养科学研究能力，树立严谨的科学态度。学习本课程，必须结合授课内容，重视和加强实践性教学环节的作用，只有这样，方能达到事半功倍的效果。

思考题

1. 隧道的概念是什么？如何理解隧道与地下工程的含义？
2. 简述隧道与地下工程的设计方法。
3. 隧道与地下工程会出现哪些工程问题？

第2章 隧道与地下工程勘察与设计

2.1 隧道与地下工程勘察

隧道是一项地下工程，修筑在岩土体之中。因此，它的设计、施工甚至运营都与建筑地区岩土体的特性及其所赋存的地质环境，即隧道通过地段的工程地质条件，有着密切的关系。隧道施工开挖的方法、支撑的形式、衬砌结构的类型，以及工程造价、施工管理等，都取决于其所处地段的地层岩性、地质构造、地下水以及可能遇到的不良地质等情况。

由此可见，为了较好地选定隧道的位置，保证隧道的正确设计和施工，必须对隧道所处位置的工程地质条件进行仔细的勘察和认真的分析研究。即配合隧道的勘察设计，必须进行相应的工程地质勘察工作。

由于隧道建筑物是整个铁路线上的一个组成部分，在一般情况下，隧道的位置应根据整个铁道线路的选定来加以确定。而在特殊情况下，如对于长大隧道，特别是工程地质条件复杂的长大隧道，其位置的选定则往往取决于工程地质条件的优劣。也就是说，长大隧道的位置需要根据地质条件来加以选择，因而隧道位置的选定又控制着线路的局部方向。

2.1.1 隧道与地下工程勘察、勘测的一般规定

隧道勘察、勘测的目的，在于查明隧道所处位置的工程地质条件和水文地质条件以及隧道施工和运营对环境保护的影响。为规划、设计、施工提供所需的勘察资料，并对存在的岩土工程问题、环境问题进行分析评价，提出合理的设计方案和施工措施，从而使隧道工程经济合理和安全可靠。

1. 隧道勘察的一般原则

隧道勘察阶段的划分应与公路设计阶段相适应，一般分为：可行性研究勘察，初步勘察，详细勘察。

(1) 可行性研究勘察

公路可行性研究按其工作深度，分为预可行性研究、工程可行性研究和我国隧道可行性研究现状。预可行性研究中的勘察主要侧重于收集与研究已有的文献资料；而在工程可行性研究中，需在分析已有资料的基础上，通过踏勘，对各个可能方案作实地调查，并对不良地质地段等重要工点进行必要的勘探，大致查明地质情况。

(2) 初步勘察

初勘是在批准的工程可行性研究报告所推荐的建设方案基础上，在初步选定的路线内进行勘察，其任务是满足初步设计对资料的要求。根据工程地质条件，优选路线方案，在路线基本走向范围内，对可能作为隧道线位的区间进行初勘，重点勘察不良地质地段，以

明确隧道能否通过或如何通过。提供编制初步设计所需全部工程地质资料。

初勘的工作步骤可按收集资料、工程地质选定隧道线位、工程地质调查、测绘、勘探、试验、资料整理等顺序进行。

1) 收集资料: 初勘也应收集已有资料, 包括可行性研究报告, 取得隧道所在位置的初步总平面布置地形图及有关工程性质、规模等文件。

2) 工程地质选定隧道线位: 初勘工作的任务是选择经济合理、技术可行的最优隧道位置方案。当测区内的工程地质条件比较复杂, 如区域地质的稳定条件差, 有不良地质现象, 尤其应注意工程地质选线工作。首先应从工程地质观点来选定隧道线位的概略位置, 然后充分研究并掌握沿线的工程地质条件, 尽可能提出有比较价值的方案进行比较, 将隧道选定在地质情况比较好的区间内, 以避免在详测时因工程地质问题发生大的方案变动。

3) 初勘资料整理: 初勘资料是工程地质勘察的原始资料, 包括调查、测绘、勘探、试验等资料, 应按有关规定填写, 并进行复核与检查。提交的资料包括图件、文字等, 要求清晰正确, 并符合有关规定和设计文件编制办法的规定。

(3) 详细勘察

详勘的目的是根据已批准的初步设计文件中所确定的修建原则、设计方案、技术指标等设计资料, 通过详细工程地质勘察, 为线位布设和编制施工图设计提供完整的工程地质资料。

详勘的任务是在初勘的基础上, 进行补充校对, 进一步查明沿线的工程地质条件, 以及重点工程与不良地质区段的工程地质特征, 并取得必需的工程地质的数据, 为确定隧道位置的施工图设计提供详细的工程地质资料。

详勘工作步骤可按准备工作、沿线工程地质调查、测绘、勘探、试验、资料整理等顺序进行。由于详勘工作需在初勘的基础上进一步查明隧道中线两侧的工程地质条件和不良地质区段的主要工程地质问题, 因此详勘工作更为详细、深入。最后提交的资料深度应满足施工图设计的需要。

2. 隧道勘测的一般规定

(1) 制订勘测计划

隧道工程地质勘测就是通过野外地质测绘, 配合勘探和测试工作, 查明隧道通过地段的地形地貌、地层岩性、地质构造、水文地质和不良地质现象等工程地质条件, 以便为隧道的位置选择和设计、施工提供所需的地质资料, 根据隧道地段的地质特征, 判定隧道围岩的类别, 明确主要的工程地质问题, 提出相应的工程处理措施。

勘测计划包括对既有资料的收集和调查、地质勘察、环境调查、施工条件调查、调查采取的方法等内容。

(2) 勘测工作的内容

隧道勘测工作一般包括搜集已有资料, 地形、地质的调查测绘, 工程地质及水文地质勘探及试验等工作。

(3) 勘测的两个阶段

隧道勘测分为设计阶段勘测和施工阶段勘测。各阶段的勘测内容、范围、精度等应根据规模及其使用目的确定, 并应符合有关规定的要求。

在勘测时, 首先进行大致、大范围的以全貌为目的的调查, 依次整理出调查所判明的