

隧道构造与施工

SUIDAO GOUZAO YU
SHIGONG

职业技术教育土木工程专业规划教材

ZHIYE JISHU JIAOYU TUMUGONGCHENG ZHUANYE GUIHUA JIAOCAI

卢刚 主编



西南交通大学出版社
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)

职业技术教育土木工程专业规划教材

隧道构造与施工

卢 刚 主编

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

隧道构造与施工 / 卢刚主编. —成都: 西南交通大学出版社, 2010.6

职业技术教育土木工程专业规划教材

ISBN 978-7-5643-0696-0

I. ①隧… II. ①卢… III. ①隧道工程—工程结构—职业教育—教材②隧道工程—工程施工—职业教育—教材
IV. ①U45

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 113911 号

职业技术教育土木工程专业规划教材

隧道构造与施工

卢 刚 主 编

责任编辑	孟苏成
特邀编辑	杨 勇
封面设计	本格设计
出版发行	西南交通大学出版社 (成都二环路北一段 111 号)
发行部电话	028-87600564 87600533
邮 编	610031
网 址	http://press.swjtu.edu.cn
印 刷	四川经纬印务有限公司
成品尺寸	185 mm×260 mm
印 张	11.75
字 数	292 千字
版 次	2010 年 6 月第 1 版
印 次	2010 年 6 月第 1 次
书 号	ISBN 978-7-5643-0696-0
定 价	20.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前 言

进入 21 世纪后,随着国民经济的迅速发展,交通建设的规模越来越大,在线路等级和行车速度方面的要求越来越高,这在无形中使得隧道在交通建设中的地位越来越重要。截至 2007 年底,全国有铁路隧道 5 941 座,合计 375.03 万延米,公路隧道 3 788 座,合计 184.18 万延米。

为了适应交通建设的新形势,不断发展和提高隧道施工技术水平,我们在总结隧道课教学的基础上,吸取国内外隧道建设的经验,结合国内隧道建设实际,将隧道构造、隧道施工、隧道养护等技术归纳在一起,编写了《隧道构造与施工》一书。本书可作为大中专土木工程专业隧道课的教学用书,同时也可作为从事隧道施工及养护的技术人员的参考书。

本书共分十章。主要介绍了隧道的构造、新奥法施工、传统矿山法施工、浅埋隧道施工、盾构法施工、TBM 施工、沉埋法施工、特殊地质地段施工、隧道养护等内容。

本书由武汉铁路桥梁学校卢刚主编。参加编写工作的有武汉铁路桥梁学校卢刚(第一章、第四章、第八章)、武汉铁路桥梁学校马福周(第二章)、武汉铁路桥梁学校张震宇(第三章)、武汉铁路桥梁学校张明锋(第七章)、齐齐哈尔铁路工程学校丁振娜(第五章、第十章)、齐齐哈尔铁路工程学校杨亮(第六章、第九章)。

在本书的编写过程中,我们得到了各兄弟院校和有关设计、科研及施工单位的领导、专家的支持和帮助,在此一并致谢!同时也感谢本书所列参考文献的诸位作者。

由于编者水平有限,书中难免出现缺点和疏漏,敬请读者批评指正。

编 者

2010 年 3 月

目 录

第一章 绪 论	1
第一节 隧道的概念及分类	1
第二节 隧道的发展概况	4
第二章 隧道的地质环境	8
第一节 概 述	8
第二节 工程地质基础知识	9
第三节 岩体及岩体结构	17
第四节 围岩应力	20
第五节 铁路隧道围岩分级	21
第三章 隧道构造	24
第一节 隧道净空	24
第二节 衬砌结构类型	27
第三节 洞门与明洞	30
第四节 隧道附属建筑物	33
第四章 隧道施工	35
第一节 概 述	35
第二节 开 挖	39
第三节 出渣运输	45
第四节 初期支护	49
第五节 监控量测	65
第六节 二次支护	70
第七节 传统的矿山法施工	75
第八节 辅助坑道	80
第五章 新奥法施工	86
第一节 概 述	86
第二节 新奥法施工	90
第三节 新奥法施工工程实例	92

第六章 浅埋隧道施工	95
第一节 明挖法施工	95
第二节 地下连续墙法施工	97
第三节 盖挖法施工	104
第四节 浅埋暗挖法施工	108
第七章 盾构法施工	119
第一节 概 述	119
第二节 盾构的分类与构造	121
第三节 盾构法施工	125
第四节 工程实例	129
第八章 其他施工方法	134
第一节 全断面掘进机施工	134
第二节 沉埋法施工	141
第九章 特殊地质地段的施工	156
第一节 富水断层破碎围岩	157
第二节 膨胀性和挤压性围岩	159
第三节 岩溶地质	163
第四节 黄土地质	166
第五节 岩爆地质	167
第六节 煤系地层	168
第十章 隧道养护	172
第一节 隧道养护管理的意义	172
第二节 隧道养护的一般规定	173
参考文献	181

第一章 绪 论

第一节 隧道的概念及分类

一、隧道的概念

在地层中修建的通道称为隧道。隧道是人类利用地下空间的一种形式。在土地资源减少和人口增长的双重压力下，大力开发和利用地下空间成为人类发展的必然选择和重要出路。

我国是一个多山的国家，山地、丘陵和高原等山区面积约占全国面积的 $2/3$ 。“逢山开道，遇水架桥”，在铁路、公路建设中，需要建造大量隧道，以克服平面或高程的障碍，改善线路质量，提高运输能力，降低运营成本。

隧道是地下工程建筑物，为保持坑道岩体的稳定，保证行车安全，通常需要修筑主体建筑物和附属建筑物。前者包括洞身衬砌和洞门，后者包括通风、照明、防排水、安全设备等。

隧道的施工与地面建筑物不同，空间有限，工作面狭小，光线暗，劳动条件差，施工难度大。常用的施工方法有传统矿山法、新奥法、TBM、沉管法、明挖法、盾构法等。

二、隧道的分类

隧道包括的范围很大，且种类繁多，从不同的角度来区分有不同的分类方法。从隧道所处的地质条件来分，可以分为土质隧道和石质隧道；从埋置的深度来分，可以分为浅埋隧道和深埋隧道；根据隧道的长度可以分为短隧道（铁路隧道规定 $L \leq 500$ m；公路隧道规定 $L \leq 250$ m）、中长隧道（铁路隧道规定 $500 \text{ m} < L \leq 3\,000$ m；公路隧道规定 $250 < L < 1\,000$ m）、长隧道（铁路隧道规定 $3\,000 < L \leq 10\,000$ m；公路隧道规定 $1\,000 < L \leq 3\,000$ m）和特长隧道（铁路隧道规定 $L > 10\,000$ m；公路隧道规定 $L > 3\,000$ m）；从隧道所在的位置来分，可以分为山岭隧道、水底隧道和城市隧道；按照用途来分，可以分为交通隧道、水工隧道、市政隧道、矿山隧道等。本书主要介绍交通隧道的构造和施工方法。

（一）交通隧道

交通线上的隧道（交通隧道）是隧道中为数最多的一种。它的作用是提供交通运输和人行的通道，以满足交通线路畅通的要求，一般包括有以下几种：

1. 铁路隧道

我国内地大多是山区，地势起伏、山峦纵横，铁路穿越这些地区时，往往会遇到高程障

碍。而铁路限坡平缓,无法拔起需要的高度,同时,限于地形又无法绕避,开挖隧道直接穿山而过最为合理。它既可使线路顺直,避免许多无谓的展线,使线路缩短,又可以减小坡度,使运营条件得以改善,从而提高牵引定数,多拉快跑。所以,在铁路线上,尤其是在山区铁路线上,隧道的方案常为人们所选用,修建的数目也越来越多。我国铁路采用隧道克服山区地形的范例是很多的。例如,川黔线上的凉风垭隧道,在穿越分水岭时,拔起高度小,展线短,线路顺直,造价也低,越岭高度降低了 96 m,线路缩短了 14.7 km,并避开了不良地质区域。宝成线宝鸡至秦岭一段线路上密集地设有 48 座隧道,总延长为 17.1 km,占线路总延长的 37.75%。

2. 公路隧道

公路的限制坡度和限制最小曲线半径都没有铁路那样严格。所以,过去在山区修建的公路为节省工程造价,常常选择盘山绕行,宁愿多延长一些距离,而避开修建费用昂贵的隧道,因而公路隧道为数不多。但是,随着社会经济和生产的发展,高速公路的大量修建,对道路的修建技术提出了较高的标准(要求线路顺直、坡度平缓、路面宽敞等),于是在道路穿越山区时,也出现了大量的隧道方案。隧道的修建在改善公路技术状态、缩短运行距离、提高运输能力以及减少事故等方面起到了重要的作用。例如穿越秦岭的终南山隧道,全长 18.1 km,它将翻越秦岭的道路缩短了 60 km,时间缩短 2 个多小时。

3. 水底隧道

当交通线路需要跨越江、河、湖、海、洋时,一般可以选择的方案有架桥、轮渡和隧道。当采用架桥方案时,需要考虑河道通航的净空要求,而桥梁受两端引线高程的限制,一时无法抬起必要的高度时,就难以克服净空限制这一矛盾。而轮渡方案限制了通行量,此时,采用水底隧道方案就可以解决净空限制和通行量小的矛盾。水底隧道方案的优点是不受气候影响,不影响通航,引道占地少,战时不暴露交通设施目标等,越来越受到人们的青睐。我国上海横跨黄浦江、全长 2 793 m 的延安东路南线越江水底隧道,把黄浦江两岸的交通连接起来,这在一定程度上改变了遇水架桥的思维定式。水底隧道方案的缺点是造价较高。

4. 地下铁道

地下铁道是解决大城市交通拥挤、车辆堵塞等问题,且能大量快速运送乘客的一种城市交通设施。它可以使很大一部分地面客流转入地下而不占用地面面积。它没有平面交叉,因而可以高速行车,且可缩短车次间隔时间,节省了乘车时间,便利了乘客的活动。在战时,还可以起到人防的功能。我国北京、上海、广州、天津、深圳、南京等城市已经建成的地下轨道交通系统,为改善城市的交通状况、减少交通事故起到了重要的作用。其他城市,如武汉、重庆、哈尔滨、成都等已在规划或正在修建地下铁道。

5. 航运隧道

当运河需要越过分水岭时,克服高程障碍成为十分困难的问题。一般需要绕行很长的距离。如果层层设立船闸则建设投资很大,运转和维修的费用也很高,而且过往船只延误时间很多。如果修建航运隧道,把分水岭两边的河道沟通起来,既可以缩短航程,又可以省掉船闸的费用,航运条件就大为改善了。

6. 人行地道

在城市闹区和横跨十字路口处，行人众多，往来交错，为了提高交通运送能力及减少交通事故，除架设街心高架桥以外，也可以修建人行地道来穿越街道或跨越铁路、高速公路等。这样可以缓解地面交通，少占用地面空间，同时也大大减少交通事故。

(二) 水工隧道

水工隧道是水利工程和水力发电枢纽的一个重要组成部分。水工隧道包括以下几种：

1. 引水隧道

引水隧道可进行水资源调动或把水引入水电站的发电机组，产生动力资源。引水隧道有的内部充水因而内壁承压，有的只是部分过水，因而内部只受大气压力而无水压，分别称之为有压隧道和无压隧道。

2. 排水隧道

指把发电机组排出的废水送出去的隧道。

3. 导流隧道或泄洪隧道

它是水利工程中的一个重要组成部分。它可疏导水流并起补充溢洪道流量超限后的泄洪作用。

4. 排砂隧道

用来冲刷水库中淤积的泥砂，并把泥砂裹带运出水库。有时也用来放空水库里的水，以便进行库身检查或修理建筑物。

(三) 市政隧道

指城市中为安置各种不同市政设施的地下孔道。由于城市不断发展，工商各业日趋繁荣，人民生活水平逐步提高，对公用事业的要求也越来越高。从城市空间的合理利用角度考虑，把某些市政设施安置在地下，既不占用地面面积，又不损伤市容的整齐。市政隧道有：

1. 给水隧道

城市自来水管网遍布市区，必须要有合理规划和布置的地下孔道来安置这些管道，地下孔道既不破坏市容景观，也不占用地面，并且可避免遭受人为的损坏。

2. 污水隧道

城市污水除一部分可以净化返用外，大部分的污水需要排放到城市以外的河流中去。这就需要地下排污隧道。这种隧道可能是本身导流排污，此时隧道的形状多采用卵形；也可能是在孔道中安放排污管，由管道排污。一般排污隧道的进口处，多设有拦渣隔栅，把漂浮的杂物拦在隧道之外，不致涌入造成堵塞。

3. 管路隧道

把供给煤气、暖气、热水等的管路放置在地下孔道中，经过防漏及保温措施，把这些能源送到目的地。

4. 线路隧道

城市中，多数输送电力的电缆以及通信的光缆都安置在地下孔道中，这样既可以保证不为人们的活动所损伤或破坏，又免得悬挂高空，有碍市容景观。这些地下孔道多半是沿着街道两侧敷设的。

在现代化的城市中，将以上四种具有共性的市政隧道，按城市的布局 and 规划，合建为一个隧道，称之为“共同管沟”。共同管沟是现代城市基础设施科学管理和规划的标志，也是合理利用城市地下空间的科学手段，是城市市政隧道规划与修建发展的方向。

5. 人防隧道

为战时的防空目的而修建的防空避难隧道。城市中建造人防工程是为了预防战争空袭的需要。人防工程是在紧急情况下人们避难所用的，因此，在修建时应考虑对生活环境的一般要求，除应设有排水、通风、照明和通信设备以外，还应考虑储备饮水、粮食和必要的救护设备，此外在洞口处还需设置各种防爆装置，以阻止冲击波的侵入。同时，要做到多口联通、互相贯穿，在紧急时刻，可以随时找到出口。

（四）矿山隧道

在矿山开采中，常设一些为采矿服务的隧道，从山体以外通向矿床，并将开采到的矿石运输出来，主要有：

1. 运输巷道

向山体开凿隧道通往矿床，并逐步开辟巷道，通往各个开采面。运输巷道是地下矿区的主要出入口和主要的运输干道。此种巷道多用临时支撑，仅供作业人员进行开采工作。

2. 给水隧道

送入清洁水为采掘机械使用，并将废水及积水通过泵，抽排出洞外。

3. 通风隧道

地下巷道穿过许多地层，将会有多种地下气体涌入巷道中来，再加上采掘机械不断排出的废气，和工作人员呼出的气体，使得巷道内空气变得十分污浊。如果地层中的气体含有瓦斯，在含量达到一定浓度后，将会发生危险。轻者将人窒息，重则引起爆炸。因此，为净化巷道中的空气，创造良好的工作环境，必须设置通风巷道，用通风机及时把有害气体和污浊空气排除出去，并把新鲜空气补充进来。

第二节 隧道的发展概况

隧道的发展历程与人民生活的水平和生产能力密切相关。古代的隧道都是修筑在可以自身稳定而无需支撑的岩层里，靠人的双手和原始的简单工具开挖。一座隧道往往需要十几年或几十年的漫长时间才能完成。自从发明安全炸药以后，人们就用爆破的方法取代了人工挖凿。机械钻孔出现以后，又进一步以钻机钻取炮眼，取代人力锤击钢钎这种落后方式。混凝土这一建筑材料出现后，支护坑道的方法就由砌筑的砖石结构改为就地浇灌的混凝土衬砌。

铁路的兴起,推动了铁路隧道的发展。许多国家都在铁路跨越山岭的地方以隧道的方式穿过,有效地改善了铁路线路的技术条件,提高了运输能力。以后,由于贸易的发展,国际间内河交通日趋联系密切,于是航运隧道也应运而生。城市交通越来越繁忙以致经常堵塞,又出现了地下铁道。近期,为了充分利用地下空间,又出现了各种用途的地下工程。在人们居住的地下,又开辟了一层新的世界。

一、隧道工程的历史

隧道的产生和发展是和人类的文明历史发展相呼应的,大致可以分为如下4个时代。

1. 原始时代

即人类的出现到纪元前3000年的新石器时代,是人类利用隧道来防御自然威胁的穴居时代。人们利用天然洞穴作为栖身之所,并且逐步会在平原地区自己挖掘类似天然洞穴的窑洞来居住。此时的隧道用兽骨、石器 etc 工具开挖,修筑在可以自身稳定而无需支撑的地层中。

2. 远古时代

从纪元前3000年到5世纪,即所谓的文明黎明时代,这是一个为生活和军事防御目的而利用隧道的时代。这个时代隧道的开发技术形成了现代隧道开发技术的基础。我国古代的帝王将相均在地下修建坟墓陵寝,如长沙的楚墓、洛阳的汉墓等,其中明朝的定陵更是壮丽堂皇,成为今人游览的名胜。我国古籍《左传》中曾有“隧而想见”和“晋侯……以隧”的记载,说明当时已经有通道式的隧道了。又如,古埃及金字塔的建筑就属地下建筑。纪元前2200年的古代巴比伦王朝为连接宫殿和神殿而修建了约1 km长的隧道,断面为3.6 m×4.5 m,施工期间将幼发拉底河水流改道,采用明挖法建造,该隧道是一种砖砌建筑。

3. 中世纪时代

约从5世纪到14世纪的1000年左右。这个时期正是欧洲文明的低潮期,建设技术发展缓慢,隧道技术没有显著的进步,但由于对地下铜、铁等矿产资源的需要,开始了矿石开采。

4. 近代和现代

即从16世纪以后的产业革命开始。这个时期由于炸药的发明和应用,加速了隧道技术的发展。如对有益矿物的开采,农田灌溉,运河、公路和铁路隧道的修建,以及随着城市的发展修建地下铁道、上下水道等,使得隧道的设计和施工技术得到极大的发展,其应用范围迅速扩大。

二、我国隧道工程的发展和成就

1949年前,我国经济不发达,隧道修建得不多。我国最早的交通隧道是位于今陕西汉中的“石门”隧道,它建于公元66年,是供马车和行人通行的。我国第一座铁路隧道修建在台湾,是基隆到台南的铁路线上一座长仅261 m的窄轨净空隧道。1907年在京包线上修建了八达岭隧道,这是由我国工程师詹天佑主持施工的。他是我国铁路工程界最早的卓越人才。

我国已成为世界上隧道最多、最复杂、发展最快的国家。截至2008年底,我国铁路隧道

有 6 102 座、3 938 913 延长米。其中,长度 10 000 m 以上的特长隧道 7 座,长度在 3 000 m 以上至 10 000 m 的长隧道 183 座,长度在 500 m 以上至 3 000 m 的中长隧道 1 901 座,长度不足 500 m 的短隧道 4 011 座。

7 座万米以上的特长隧道是京广线大瑶山隧道 (14 294.5 m),西康线秦岭一线隧道 (18 456 m)、二线隧道 (18 456 m),宁西线东秦岭隧道 (12 268 m),兰新线乌鞘岭左线隧道 (20 060 m)、右线隧道 (20 060 m),渝怀线圆梁山隧道 (11 070 m)。

全国公路隧道达 3 788 处、184.18 万延米,其中特长隧道 49 处、19.18 万延米。其他隧道情况分别为:长隧道 444 处、72.32 万延米,中隧道 577 处、40.94 万延米,短隧道 2 718 处、51.75 万延米。

由于我国山脉纵横,地形地势陡峻险要,地质十分复杂,因此各铁路线路中的隧道所占比重较大,施工难度也很大。其中,成昆线,线路总长 1 085 km,隧道长 340 km,占总长的 31%;襄渝线,线路总长 824 km,隧道长 286 km,占总长的 35%;其他如宝成、贵昆、京原、湘黔等线路,隧道所占比重也很大。

经过 60 年的隧道工程实践,我国已能在各种复杂地质如流沙、膨胀土、大量涌水、高原冻土、瓦斯、大型岩溶地区、岩爆等地层中修建隧道。京广线大瑶山隧道是我国山岭隧道采用重型机具综合机械化施工的开端,将隧道工程的修建技术和修建长大隧道的能力提高到一个新的阶段,缩短了同国际隧道施工先进水平的差距。西康线秦岭隧道的建成标志着我国已掌握现代隧道修建技术,进入国际先进行列。

三、国外隧道的发展情况

在国外,最早的地下工程是矿山的开采。用于交通线上的第一座隧道是公元前 2180 年在巴比伦城中幼发拉底河下修造的一条地下人行道。以后,为了灌溉农田,修了少量的给水隧道。随着生产工具和生产资料的进步,修建隧道的技术也相应提高,又为内河运输的需要,继续修建了一些航运隧道。位于法国的马赛至罗纳的水路干线,本来需要绕过地中海,但修了罗佛航运隧道以后,航程缩短为 7 km,而且快速平稳,巨型内河航船可以双向行驶,十分便利。

铁路事业兴起以后,对交通隧道起了很大的推动作用。蒸汽机车牵引的第一座铁路隧道,就是 1826 年—1830 年在英国利物浦至曼彻斯特的铁路上修建的隧道,全长 1 190 m。在此之后,陆续出现了更多的铁路隧道。火药的改进和钻眼工具的研制,促使修建隧道的技术有了明显的提高。以前不敢修的长隧道也一一完成了。1971 年日本在新干线上修建了大清水隧道,全长为 22 230 m;1988 年日本建成了位于本州和北海道两大岛之间横跨津轻海峡的铁路干线上的青函隧道,全长 53 850 m,在目前是世界上最长的铁路隧道。

由于欧洲汽车运输量急剧增长,迫切需要扩大公路网,因而随之出现了不少的公路隧道。奥地利修建了阿尔贝格公路隧道,长为 13 927 m;瑞士修建了圣哥达公路隧道,长为 16 918 m;挪威修建的 Aurland-Laendal 公路隧道,长度达 24 500 m,这是目前最长的公路隧道。

虽然近年来隧道工程已经取得了一定的成就和相应的发展,但是还存在着许多问题和缺点。从总体来看,隧道结构还比较粗大厚实,施工环境还很恶劣,工人劳动强度还很大,工

程进度较慢和工程造价较高。具体说,截至目前,我们对围岩的性质还没有摸透,计算模型的选用和计算理论还不完全符合实际,施工技术水平和管理工作还比较落后,人力和物力的消耗和浪费都较大,所有这些都有待隧道工作者去研究和解决。今后应当加强隧道环境和地质的现场量测及实验室的试验,以便对各种不同性质的围岩能模拟出较为符合实际的计算模型和计算理论;施工方面要进一步提高开挖技术和支护方法,配备完善的施工机械,从目前的半机械化程度,提高到全机械化,再进一步达到洞内无人、洞外遥控的高度安全化;要提倡采用科学的管理方法,用调查的信息,制订施工计划,又用实测的信息反馈不断调整计划,达到最优方案,实现质量高、进度快、浪费少、造价低的目的。

第二章 隧道的地质环境

第一节 概 述

隧道是一种地下工程，与房屋、桥梁、道路等地面工程相比，其与地质条件的关系更为密切。因其位于地表下一定深度，修建在各种不同地质条件的岩土层内，所遇到的工程地质问题比较复杂。从长期的工程实践来看，隧道工程的各种工程地质问题主要是围绕着围岩的稳定性而出现的。在这里，围岩是指地壳中受隧道开挖影响的那一部分岩体，或是指对隧道稳定性有影响的那一部分岩体。地壳中与工程建筑有关的那部分叫做岩体。（关于岩体的知识在本章第三节有专门的介绍。）

岩体或地层被挖开以前，一般来说是稳定的，但在开挖过程中及开挖以后，由于原有的平衡被打破，岩体性状发生变化，人们直接观察到的是大部分岩体或迟或早将出现或大或小的塌落，有的内壁还会发生明显的内挤位移，这是修筑隧道经常会遇到的问题。在工程实践中，人们根据岩体稳定性的差异，采取不同的工程措施（如施工程序和方法，支护结构的类型、数量和架设时间等）来保证围岩稳定。

影响岩体稳定性的因素有岩体力学性质，岩体结构状态和类型，地应力和岩体含水状况等。岩体被挖成隧道后的稳定程度称为隧道围岩的稳定性。隧道围岩的稳定性既与岩体稳定性有关，又与洞室形状、施工方法和支护结构有关。

长期以来，由于整体科学技术水平的限制和岩体结构本身的复杂多变，人们对围岩稳定性的认识和处理主要是依据长期积累的经验来进行，虽然局限于定性描述和经验判断的水平，但也是行之有效的，至今仍不可或缺。然而其不足也是显而易见的。借助于计算工具和过程结构测量技术的突破性发展以及工程实际的需要，人们开始对岩体稳定进行定量的分析，并形成了岩体力学这一新兴学科。随着人们对地下工程中的坍塌、内挤位移等现象建立力学模型进行定量分析，认为其都是岩体应力变化的结果。这些分析研究的结果还告诉人们应力变化不仅和岩体性质及所开挖的洞室有关，还和开挖方法及所做支护结构有关。使人们在此问题的认识上有了一个质的飞跃，进一步认识到了围岩稳定中围岩与支护合二为一的作用机理。现在在全世界范围内迅速推广的新奥法，即是在此背景下提出的。

新奥法是一个完整的地下工程修筑的概念和方法，即在岩体力学基础上，把修筑的支护结构及部分岩体看做是一个统一的承载体，共同承受原来由挖走的那部分岩体承受的荷载，而且可以通过适当的支护结构及施工手段，使岩体充分发挥自承能力，而需由支护结构承受的部分达到很小。

新奥法现已在地下工程中普遍应用，本书将在第五章中详细介绍。

当然，由于围岩的性质十分复杂，人们在定量分析时所设计的力学模型还不能完全反映

出围岩的真实性态,确定围岩特征参数的实验技术还不能完全满足工程精度的要求,因此当前理论分析结果还达不到十分准确的水平。这方面还有大量的工作要做。

鉴于目前中等职业学校土建类专业很多没有开设工程地质这门课,本章第二节将简单介绍工程地质基础知识;在其他各节中,将分别介绍岩体及岩体结构类型、围岩应力、隧道围岩分级等方面的知识。

第二节 工程地质基础知识

一、矿物和岩石

(一) 矿物

地壳是由岩石组成的,岩石是由矿物组成的,矿物则是地壳上的元素在自然地质环境中所形成的化合物或单质体。矿物是一种自然均质体,大部分为化合物,如石英(SiO_2)、方解石(CaCO_3)和正长石 [$\text{K}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$];少数为单质,如石墨(C)和天然硫(S)等。自然界中已发现的矿物有 3 000 多种,其中能够组成岩石的矿物称为造岩矿物,常见的对岩石有重要影响的、在鉴别岩石种类中起重要作用的矿物称主要造岩矿物,有 20~30 种。

造岩矿物都是固态的,固态矿物中大部分为结晶质,少数为非结晶质。结晶质矿物的内部质点(原子、分子或离子)在三维空间成有规律的周期性排列,形成空间格子构造。因此在适宜的条件下每种结晶质矿物都具有固定的规则几何外形,此即矿物固有的形态特征。如岩盐(NaCl)的立方晶体格架。这种晶体形态称为矿物晶体的自形晶。但在大多数情况下,自然界中的矿物受生长速度和周围自由空间环境的限制,虽内部质点结晶空间格子构造不变,但形成不了规则的外形,称为他形晶。岩石中的造岩矿物多为粒状的他形晶体的集合体。非晶质矿物的内部质点排列没有规律性,不具有规则的几何外形。非晶质矿物有玻璃质和胶体质两类。玻璃质是高温熔融体迅速冷凝而成,如火山喷出岩中的某些矿物;胶体质是由胶体溶液沉淀或干涸凝固而成。

矿物的力学性质主要有硬度和解理。硬度是矿物抵抗外力机械刻划和摩擦的能力。不同的矿物的硬度差别很大。通常采用摩氏硬度计,对比其中已确定硬度的十种矿物,来确定待定矿物的相对硬度。常见的造岩矿物中,硬度较高的如普通角闪石、辉石为 5~6,长石为 6,石英为 7;较低的如滑石为 1,高岭石为 1~2,石膏为 2,云母为 2.5~3;而方解石、萤石、磷灰石的摩氏硬度依次为 3、4、5。

矿物晶体在外力作用下沿一定晶面方向裂开的性能称解理,亦称劈开。裂开的晶面一般平行成组出现。不同矿物的解理发育程度不同。有的矿物容易沿一组解理面裂成薄片,称极完全解理,如云母;有的矿物容易沿三组解理面裂成块状或板状,称完全解理,如方解石破裂成菱形六面体;有的矿物容易沿二组解理面裂成板状或柱状,称极中等解理,如长石裂成板状,角闪石为柱状;有的矿物不易解理,称无解理,如石英等。无解理的矿物受力后沿任意方向发生的无规则断裂破碎称断口。

按化学成分的不同,自然界的造岩矿物有含氧盐、氧化物及氢氧化物、卤化物、硫化物

和自然元素五大类。其中以含氧盐中的硅酸盐、碳酸盐及氧化物类矿物最常见，构成了几乎99.9%的地壳岩石。这些矿物对岩石的地质特征的影响在下面叙述。

(二) 岩 石

岩石是矿物的天然集合体。矿物在地壳的自然地质环境中能够按一定的规律共生组合在一起，形成由一种或几种矿物组成的天然集合体。如花岗岩，由石英、正长石和少量角闪石、黑云母组成，石灰岩由方解石组成。其中，由两种或两种以上矿物组成的岩石称多矿岩，单由一种矿物组成的岩石称单矿岩。按岩石形成过程的不同，可将地壳中的岩石分为岩浆岩、沉积岩、变质岩三大类型。不同成因类型的岩石具有不同的地质性质，也是决定岩石不同工程性质的依据。

1. 岩石的形成过程

1) 岩浆岩

岩浆是存在于上地幔和地壳深处，处于高温高压状态下的以硅酸盐为主要成分的熔融体。岩浆按 SiO_2 含量多少可依次分为酸性的、中性的、基性的和超基性的，其颜色依次由浅至深，稀稠上由稠到稀，比重上由轻到重。所形成的岩浆岩石可分别称为酸性岩、中性岩、基性岩、超基性岩。

地下深处相对平衡状态下的岩浆，受地壳运动的影响，会沿着地壳中薄弱、开裂地带向地表方向活动，岩浆的这种运动称为岩浆作用。岩浆未上升达地表而在地壳中冷却凝固，称岩浆侵入作用；若岩浆上升冲出地表，在地面上冷却凝固，则称为岩浆喷出作用，亦称火山作用。

岩浆作用后期，岩浆冷却凝固形成的岩石称岩浆岩。侵入作用形成侵入岩，组成侵入岩的矿物成分基本上是结晶的，形成结晶结构；其位置越深，结晶程度越高，晶粒越大，如花岗岩、正长岩、闪长岩、辉长岩等深成岩为全晶质中、粗粒结构；而花岗斑岩、正长斑岩、辉绿岩等浅成岩为全晶质细粒结构或斑状结构。喷出作用形成喷出岩或火山岩，其矿物结晶较差，形成隐晶质结构，如流纹岩、安山岩、玄武岩；或形成非晶质的结构（亦称玻璃质结构），如黑曜岩、浮岩等。从构造上看，侵入岩均为块状构造，喷出岩具有块状、气孔状、杏仁状、流纹状等构造。侵入岩在地壳中整体形成岩基、岩盘、岩床、岩株、岩墙、岩脉等产状；而喷出岩主要形成岩钟和岩流等产状。岩浆岩中最常见的矿物成分，是石英、正长石、斜长石、黑云母、角闪石、辉石、橄榄石等，而在每种不同的岩浆岩中，以上几种中的两三种为主要矿物，可依此并结合岩石的结构、构造来确定岩石类型的名称。

常见岩浆岩代表性岩石，如花岗岩、花岗斑岩、流纹岩、正长岩、正长斑岩、闪长岩、安山岩、辉长岩、辉绿岩、玄武岩、辉岩等。岩浆岩约占地壳体积的 64.7%。

2) 沉积岩

由沉积物固结变硬而形成的岩石就是沉积岩。其占地壳岩石总体积的 7.9%，占地壳表面积的 75%。沉积岩是在地表或接近地表的常温、常压条件下，由原岩即早期形成的岩浆岩、沉积岩、变质岩，经以下四个作用过程形成的。

原岩的风化破碎作用：地表及地面以下一定深度的岩石，在气温变化、水溶液、气体及生物等自然因素作用下，逐渐地产生裂隙，发生机械破碎和矿物成分改变，丧失完整性的过程称为岩石的风化作用。原岩经过风化作用后，成为各种松散破碎物质，被称为松散沉积物，

是构成新的沉积岩的主要物质来源,可分为三类:大小不等的岩石或矿物碎屑物质,粒径小于 0.005 mm 的黏土颗粒(又称黏土物质)和以离子或胶体分子存在于水中的化学成分。

沉积物的搬运作用:原岩风化破碎产物除少部分残留原地外,大部分都要被搬运一定距离,搬运动力有结水、风力、重力和冰川等,有机械式搬运(主要搬运碎屑物质和黏土物质)和化学式搬运(搬运存在于水中的化学成分)两种方式。

沉积物的沉积作用:当搬运动力逐渐减少时,被搬运的碎屑和黏土沉积物按大小、形状、比重不同,会依次沉积下来,溶液中离子的沉积是在溶液浓度超饱和时,结晶析出而沉积的。胶体溶液中胶体分子沉积是在正负胶体相遇时中和后凝聚沉淀而沉积的。溶液中水的蒸发亦能促进沉积的进行。

成岩作用:沉积后的松散沉积物经下述四种成岩作用中的一种或多种作用后,方可形成新的坚硬、完整的岩石——沉积岩。一般经压固脱水作用、重结晶作用、胶结作用,新矿物生成。没有经过上述成岩作用的松散沉积物称为土。

由前述沉积岩的形成过程可知,沉积岩的主要矿物成分,既有来自于原岩中的矿物,也有新生成的矿物。沉积岩最主要的特征即是其沉积时形成的成层构造和层理构造特征,这种构造使其在性能上具有各向异性。沉积岩的结构主要为碎屑结构、泥状结构和化学及生物化学结构。

常见沉积岩有碎屑岩类的砾岩和砂岩,黏土岩类的页岩和泥岩,化学岩类的石灰岩、白云岩、石膏岩等。

3) 变质岩

地壳中先期生成的岩石,在温度(岩浆侵入地壳带来的热量,放射性元素蜕变生热和地热增温级引起)、压力(地应力)、化学性质比较活跃的流体(岩浆分化后期产物)作用下,其原有的地质特性(成分、结构、构造)被改变(一个方面或多个方面),使其具有新的地质特性,形成不同于原岩的新岩石,这个过程称变质作用,形成的新岩石称变质岩。

变质岩的主要构造特征是片理构造,即包括片麻状、片状、千枚状和板状四种变质程度由深到浅的构造,这些构造亦具有典型的各向异性;块状构造也较常见。变质岩的主要结构为变晶结构、压碎结构和变余结构。多数变质岩具有变晶结构,这种结构岩石变质程度较深,岩石中矿物变质程度较深,基本为显晶。常见变质岩有板岩、千枚岩、片岩、片麻岩、大理岩、石英岩、断层角砾岩等。

2. 矿物成分对岩石性质的影响

如前所述,自然界的造岩矿物以含氧盐中的硅酸盐、碳酸盐及氧化物类矿物最常见。常见的硅酸盐类矿物有长石、辉石、角闪石、橄榄石及云母石和黏土矿物等。这类矿物除云母和黏土矿物外,硬度大,呈粒、柱状晶形。因此,含这类矿物多的岩石(如花岗岩、闪长岩及玄武岩等)强度高、抗变形性能好。但该类矿物多生成于高温环境。与地表自然环境相差较大,在各种风力营力的作用下,易风化成高岭石、水云母等。其中,尤以橄榄石、斜长石等抗风化能力最差,长石、角闪石次之。

黏土矿物属层状硅酸盐矿物,主要有高岭石、水云母及蒙脱石三类,具薄片状或鳞片状构造,硬度小。含这类矿物多的岩石(如黏土岩、黏土质岩)物理力学性质差,并具有不同程度的胀缩性,特别是含蒙脱石多的膨胀岩,其物理力学性质更差。