

高等学校规划教材

贺永年 刘志强 主编

隧道工程

中国矿业大学出版社

高等学校规划教材

隧道工程

贺永年 刘志强 主编

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书内容包括铁路隧道、道路隧道、越江隧道和海底隧道等的设计与施工和管理方面的知识。全书共分七章,包括绪论、隧道结构及设计、山岭隧道施工和设计计算、盾构隧道施工、明挖隧道施工、沉管隧道施工以及隧道运营安全管理和维护。

本书是高等院校土木工程专业的教材,也可供交通工程、道桥工程、铁道建设、地下工程等其他相关专业的师生和工程技术人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

隧道工程/贺永年,刘志强主编. —徐州:中国矿业大学出版社,2002.7

ISBN 7-81070-544-X/U·3

I. 隧... II. ①贺... ②刘... III. 隧道工程—高等学校—教材 IV. U45

中国版本图书馆CIP数据核字(2002)第035085号

书 名 隧道工程

著 者 贺永年 刘志强 主编

责任编辑 张乃新 赖应得

出版发行 中国矿业大学出版社

(江苏省徐州市中国矿业大学内 邮编 221008)

印 刷 北京科技印刷厂

经 销 新华书店

开 本 787×1092 1/16 印张 16.5 字数 402 千字

版次印次 2002年7月第1版 2002年7月第1次印刷

印 数 2000

定 价 28.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

随着我国社会主义建设事业的迅速发展,加强交通和基础设施建设已成为一项十分紧迫的工作。近年来,交通工程和城市地下工程的建设,尤其是为了满足西部开发建设的需要,迫切需要大批的隧道和地下工程方面的技术人才。

煤炭高等院校土木工程专业教材编写委员会,结合煤炭高校土木工程专业改革、拓宽和建设的需要,于1996年制定了煤炭高校“九五”教材《隧道工程》编写规划,确定了中国矿业大学为主编单位,有关煤炭院校为参编单位。1997年,中国矿业大学提出了编写大纲,1998年10月,参加编写的7所院校汇聚徐州,共同商讨了《隧道工程》教材的编写方案和原则,并进行了分工。

隧道工程技术和矿山地下工程技术有许多相似之处,但更有其自身的规律和特点,本教材主要包括铁路隧道、道路隧道、越江隧道和海底隧道等的设计与施工及管理方面的知识,教材改变了我国传统《隧道工程》内容单一的状况,充实了近年来我国隧道设计与施工方面所取得的新成就,融合了编著者近年来开展的隧道工程方面的科研新成果,教材不仅适合煤炭院校土木工程专业(交通土建、矿井建设、地下工程等专业方向)学生的学习,也适用于交通工程、道桥工程、铁道建设、地下工程等其他相关专业方向的学生和工程技术人员学习和参考。

本教材由中国矿业大学贺永年教授和刘志强副教授担任主编。绪论由中国矿业大学贺永年编写;第一章和第八章由河北建筑科技学院杨万斌编写;第二章由西安科技学院王晓利编写;第三章第一、二、五节由安徽理工大学姜玉松编写,第三、四节由山东科技大学林登阁编写;第四章由焦作工学院曾宪桃编写;第五章第一、二、三节和第六章、第七章由中国矿业大学刘志强编写,第五章第四节由中国矿业大学翁家杰编写。全书由中国矿业大学贺永年、刘志强统稿。本书初稿承蒙中国矿业大学北京校区陶龙光教授审阅,并提出许多宝贵意见;在本书的编写和出版过程中,还得到了参编学校和有关领导的大力支持和帮助,在此表示衷心的感谢。

由于编者的水平有限和时间仓促,加之工程技术的不断发展,书中缺点和错误在所难免,敬请各位读者批评指正。

编 者

2000年4月

目 录

绪 论	(1)
第一章 隧道围岩分类与围岩压力	(6)
第一节 隧道围岩性质	(6)
第二节 隧道围岩分类	(7)
第三节 围岩压力及其确定	(16)
第二章 隧道结构及设计	(23)
第一节 隧道勘测设计程序及内容	(23)
第二节 隧道建筑设计	(26)
第三节 隧道结构设计	(36)
第四节 隧道运营设施及其设计	(43)
第三章 山岭隧道施工	(57)
第一节 山岭隧道施工方法	(57)
第二节 山岭隧道施工作业	(69)
第三节 隧道锚喷支护设计与施工	(81)
第四节 山岭隧道施工辅助作业	(95)
第五节 隧道掘进机施工	(103)
第四章 山岭隧道衬砌计算	(109)
第一节 结构力学方法	(109)
第二节 岩体力学方法	(123)
第五章 盾构隧道施工	(137)
第一节 盾构构造与分类	(138)
第二节 盾构隧道施工作业	(150)
第三节 盾构隧道衬砌结构及设计计算	(157)
第四节 盾构隧道辅助施工技术	(165)
第六章 明挖隧道施工	(183)
第一节 基坑的支护设计与施工	(183)
第二节 地下连续墙的设计与施工	(195)
第三节 明挖隧道衬砌结构与设计计算	(210)
第四节 明挖隧道施工辅助工作	(216)
第七章 沉管隧道施工	(220)
第一节 沉管隧道的结构与设计	(220)
第二节 沉管管段制作	(223)
第三节 管段的沉放作业	(230)
第四节 沉管基础处理	(239)

第八章 隧道运营安全、管理和维护	(244)
第一节 隧道运营安全和管理	(244)
第二节 隧道维护	(253)
主要参考文献	(257)

绪 论

一、隧道与隧道工程

隧道是一种地下工程结构物，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、水流及管线等通过的通道。隧道一般包括交通运输方面的铁路、公路、航运和人行隧道；城市地下铁道和海底、水底隧道；军事工程方面的各种国防坑道；水利发电工程方面的各种水工隧道或隧洞等。

隧道工程是指从事研究和建造各种隧道的规划、勘测、设计、施工和养护的一门应用科学和工程技术，它是土木工程的一个分支。

目前，大部分隧道的设置以交通运输为主要目的，穿越山岭、河流、港湾等障碍，修建地下铁道，缩短交通线路，改善线形，可提高车辆行驶速度，以获得良好的经济效益和社会效益。除此之外，在水电工程中设置各类水工隧道可实现引水、排水、通风等目的；在市政工程中，设置各类公共隧道可实现污水排放、管线铺设等目的。隧道的这些功能，决定了其一般在长度方向上有较大的尺寸，多数长度为几千米到十几千米，有的甚至更长。而横断面的尺寸则相对较小，一般仅几米到几十米。断面较小的隧道，一般不作为交通设施，仅用于污水排放和水、气管道、电缆、通讯线路等敷设用途，这些通道常常也被称为隧洞、导沟、管沟等。断面较大、长度较短的隧道所形成的地下空间，一般有其专用功能，如作为地下变电站、地下停车场、地下仓库、地下广场等。

人类最早修建隧道是为了采掘地下资源，而现代隧道建设的功能和目的已发生了根本的变化，当今隧道已成为现代交通事业的发展和改善社会生活基础设施的重要技术手段甚至是不可缺少的环节。

首先，利用隧道可以实现各种运输线路直线穿越山岭而不必盘山绕岭。对于山区的铁路和公路，尤其是受坡度限制较大的铁路线路，可以避免为线路的攀高而不得不铺设的大量盘山的展线，从而可以大大地缩短线路长度。对于一些受到地形限制的地方，采用山体中通过的办法，不仅仅可解决线路长短的问题，还可以解决线路难以克服的高程障碍问题，以及为翻越这些障碍所付出的代价过高的问题，甚至该方法是惟一的手段。20 世纪 90 年代我国能够为开发西部地区，大量建设进出山区的铁路和公路，改变以往所谓“难于上青天”的面貌，这和现代的隧道施工技术进步和成熟是完全分不开的。例如，已完成的襄渝线、成昆线等线路的隧线比超过了 30%，而在建的安康线的隧道线长要占到线路全长的将近一半。

其次，隧道还可以改善线路中的车辆运行状况和提高线路的运行能力。依靠隧道的穿越，不仅可以降低线路的坡度，避免车辆的爬坡，而且还可以减少为满足高程要求而设置的大量曲折拐弯线路，从而取消车辆的运行速度限制，大大提高车辆的拖运能力。正是这个因素，在目前的高速公路中，出现了许多经过开山凿岭修建起来的平直而宽阔、路面质量相当高的隧道通道。此外，隧道还可以实现立体交叉，减少了路网的结点，这是提高道路车辆通过能力、减少交通堵塞、改善城市路况的一项重要措施。对于车辆（公路、铁路

车辆及其相互之间)的交叉、人行与车辆之间的交叉是如此,对于航运之间以及河(路)与桥之间的交叉也是如此。为满足水上航运的要求,建设水下隧道可实现道路与水运的交叉,从而避免采用桥梁跨越使得航道净空高度不足而影响航道运输的问题,尤其是在城市河流设置水底隧道,是一个解决桥梁的跨越高程与引桥布置这一矛盾的好方法。

隧道是一项隐蔽在地下、水下或山体内部的重要结构。对于军事工程而言,具有特别重要的意义。在战争中依靠隧道或其他地下空间可保障备战物资和各类人员免受空袭威胁,并可作为获取胜利的手段。为战争中的防空等目的而修建的人防工程,是由许多隧道和其他地下结构构成的安全庇护所,是人们在战争时期的重要生活场所。

隧道在具有这些功能的同时,还存在有另一重要特点就是它不占据地面空间,这等于无形中增加了城市的有效面积,对于人口拥挤、道路密集、交通繁忙的城市来说,无疑是十分重要的。就是因为城市地下隧道具有不和地面建筑及地面交通占挤面积,地下交通可以专线运送,可以充分发挥能力高、速度快等优势,所以,目前世界上许多大城市普遍拥有发达的地铁或者正在大力建设地铁工程。这种地下隧道的隐蔽性还对城市的整洁和卫生相当有利,地面覆盖层对于地下交通的噪声有很好的屏蔽作用,城市中的生活和工业污水可以通过专门的污水隧道或铺设在地下的孔道中的管道排放,城市中有许多管线,如供水管线、煤气管线、供热管线、电缆管线、通讯管线、光缆线等,它们都要连接到整个城市的家家户户。通过地下隧道,或者单独地,或者组合在一起,形成所谓的“共同沟”,就可以避免这些管线布置在地面上的不安全性及其对环境造成的凌乱而破坏城市的整洁性。

城市地下隧道的兴起,也带动了整个城市地下工程的发展。地下有非常大的发展空间,不仅如此,地下空间的环境条件有许多地面所没有的优点,如地下空间的温度、湿度变化小,冬暖夏凉,不受风吹日晒的影响,防震抗震的条件优越等。正因为此,有人说“21世纪是地下工程的世纪”。日本还想通过地下开发来扩展其国土资源。我国的地下工程才刚刚兴起,21世纪我国的隧道工程和地下工程也势必会得到巨大的发展。

二、隧道的分类

隧道有多种分类方法。从地质条件上可以把隧道分为两大类,即岩石隧道和软土隧道。根据隧道所处的环境不同可分为山岭隧道(通常也是岩石隧道)、城市隧道、水底隧道、海底隧道、矿山隧道(巷道)等。从力学原理上可以根据隧道的埋藏深度分为深埋隧道与浅埋隧道。通常,按用途的不同可把隧道分成以下几类:

1. 交通隧道

交通隧道是交通线路为克服山岭、江河、海峡、港湾等障碍而修建的工程结构。根据交通的种类或用途,可分为:

铁路隧道——是铁路线路的一部分。隧道线长占整个线路的比例,称为隧线比。我国一些铁路线路的隧线比可到10%~40%。

公路隧道——通常布置在穿越山岭的公路上,尤其是目前高速公路所经常选择的线路通过方法。

地铁隧道——是城市地下铁道运输的主要线路。通常是专线运行,具有速度快、输运能力强等特点。

越江隧道和海底隧道——位于水下的交通隧道。可以避免架桥带来的困难和江海面上摆渡的风吹浪打影响。如上海黄浦江隧道、拟建的长江隧道、英吉利海峡隧道等。

航运隧道——运河为穿越山岭高坡的隧道。它不仅可以避免运河的绕道，而且也不用为克服高程差而修建船闸并可长期维持它的运行。

人行隧道——一般也称人行地道。常在道路交叉口，为行人穿越道路而设。有些地铁入口处也设有与地铁站连接的人行隧道。

2. 矿山隧道

矿井地下的隧道一般称为巷道，它是为采掘地下矿藏而修建的地下空间结构体。在这个地下空间中，矿车和行人要能够通达各个生产点，新鲜空气和风流要能够进行循环，地下涌水要集中排出，必要的设备、材料还要安置和堆放，因而这是一个庞大而复杂的地下空间，是由各种巷道（包括倾斜巷道）和硐室所构成的。矿山隧道一般都处在地下数百米到几千米的深度，与在地下仅几十米深的交通隧道不同，两者在力学处理方法上也不一样。此外，矿山隧道主要服务于生产，部分巷道具有临时性质，在资源采掘以后即可报废，这些巷道的支护设施相对比较简单；矿山隧道的断面一般也要比交通隧道的略小些，这些均导致了两种隧道的设计与施工有一定的区别。矿山井下的主要巷（隧）道有：

运输巷道——矿车或人行的主要通道，负责人员、矿藏、材料、设备的输运和通达。包括车场（矿车调运）中的各种巷道、石门（穿越岩层的巷道）、运输巷（顺岩层巷道）、材料巷等。

通风巷道——所有地下巷道都需要有风流，用于输送新鲜空气，排除有害气体和废气，调节降温。矿山井下有时还根据风流的要求，设有专门的通风道，以保证风量和风压，不使有害气体进入危险地区，不让新鲜风流与回风流混合。

专用设备、材料存放的巷道——如机车库、炸药库、变电所、水泵房等，此类巷道有的又称为硐室。

水仓——存放地下水的巷道。

其他还有联络巷道、人行巷道等。

3. 市政隧道

为解决城市居民的电、水、气、暖的供应和污物（水）的排放所开凿的地下通道。

管线隧道——用于铺设管线的隧道，这些管线有电缆线、通讯线、供水管、排水管、供暖管、供气管和热水供应管等。这些管线可以铺设在一个共用隧道中，又称为“共同沟”。

污水隧道——为城市中污水的排放而开凿的专门的地下隧道，直接用作排水道。一般这种污水隧道常常是城市下水管道的“总线”，将污水排出城市或输送去专门的处理工厂。

4. 水工隧道

水电和水利工程中修建的用于引水或排放水流，或其他专门用途的隧道工程。这些隧道统称为水工隧道。一般包括：

引水隧道——水电站将上方的水流引向发电机组的隧道。这种隧道所引导的有可能是具有压力的水流，称为压力隧道。压力隧道的结构设计和普通的隧道不一样，这是水工隧道的一个重要特点。

尾水隧道——水流通过发电机后的集中排放的隧道。

三、隧道工程与隧道技术的发展

隧道工程是随着社会的进步而兴起并不断发展的。

人类很早就知道利用自然洞穴作为居住场所，当社会发展到能够制造挖掘工具时，出现了人工开挖和利用地下空间的现象。到人类文明社会，随着采矿、运输、航运的兴起和农业灌溉特别是战争的需要，出现了各种人工开挖的隧道。早在 4 000 年以前，古代强盛的巴比伦王国就在幼发拉底河下开掘了一条最早的连接王宫与圣庙的地下通道；2 700 多年以前，在耶路撒冷就修建有一条战争用的引水隧道，长达 200 m；在埃及、印度、墨西哥也都发掘有许多古隧道。近代铁路和公路运输业的兴起，特别是蒸汽机车和汽车的出现，大大地促进了交通隧道建设及其规模的扩大。19 世纪在美国修建的世界上第一座火车隧道，长约 12 km。现在，世界上最长的隧道（日本青函海底隧道）达 53.85 km，隧道断面达到了四百余平方米。由于隧道施工技术的进步，城市地铁工程也在世界各地兴起，从 1863 年伦敦开始修建第一条地铁至今，世界上在建和在运转的地铁已遍布近百个城市。地铁的发展推动着地下城市建设工作的发展与进步。

我国古代地下隧道比较发达，很早就有土行孙“遁地”的故事。在西周时期，我国古代的采矿业已建成了相当完善的地下系统。从现代发掘的古代的皇帝陵寝发现，当时的地下建筑也已经具有相当的规模。如江苏徐州的古汉墓，左右两条平行通道，各长 83 m，平行度仅相差 20″，还配有供水井和完善的排水系统，其施工之精细令人叹观不止。近代，我国最早的铁路隧道于 1889 年台湾狮球岭修建；京包线上的八达岭隧道是由中国自己的工程师——著名的詹天佑先生 1907 年主持修建的。新中国成立后，特别是近 20 年来，我国的交通建设出现了突飞猛进的发展，尤其是在开发西部的过程中所修建的铁路和公路，要克服许多高山峻岭和地质条件复杂的困难，到 1996 年年底投入运行的隧道达 5 200 条，总长 2 548 km，成为世界之最。1999 年贯通的安康铁路秦岭隧道，采用了国际先进的 TBM 技术，隧道长度名列世界第 6 位，达 18.46 km。此外，我国从 20 世纪 50 年代起就开始研制软土隧道盾构施工设备，1963 年试验盾构掘进，1971 年上海黄浦江打浦路隧道建成通车，标志着我国隧道盾构施工技术的成功。

隧道的发展是和施工技术进步分不开的。1 500 年以前，我们的祖先已经在地下矿山的开发中使用了火药技术，1864 年诺贝尔炸药的发明以及几乎同期的凿岩机的出现是隧道施工技术的重大变革和进展，完全改变了地下岩石手工开挖的状况，直至今日，钻眼爆破法仍然是隧道施工的基本形式。

近半个多世纪以来，隧道技术和理论更是取得了重要的进步，主要成果有：

(1) 锚喷支护以及光面爆破技术的应用。锚杆是隧道支护技术的一项革新，改变了以往支护的被动作用性质，施工简单，效果显著。现在，光爆锚喷已成为隧道施工广泛应用的技术。

(2) 人工冻结加固岩土技术的成功应用。人工冻结是处理软土问题的一项有效手段，而且对控制施工影响和施工环境保护有重要的意义。

(3) 岩石隧道凿岩台车及钻、装、运、支等工序的成套机械设备的使用，大大提高了隧道施工的机械化程度。

(4) 大型掘进机（TBM）采用机械破岩方法，破岩的硬度甚至达到数百兆帕，并实现了整个隧道施工作业连续化，大大提高了隧道施工的现代化程度。

(5) 盾构技术的完善和广泛应用。原则上盾构施工已经可以在任何软土地层中应用，可施工任何断面形状的隧道工程。

(6) 水下隧道的沉管法的应用,促进了海底隧道、越江隧道的发展。

(7) 地下隧道工程的弹塑性(极限平衡)分析的理论成果,说明围岩不仅是地下结构的荷载因素,也和地下结构有同样对隧道的稳定作用。

(8) 支护—围岩共同作用原理的理论成果,指出了支护(衬砌)的荷载大小不仅与围岩有关,而且还受自身性质的影响。这是和地面工程的一个重要区别。

(9) 新奥法理论的发展。新奥法于1948年提出,1963年形成系统理论,表明它不仅是锚喷支护技术,更说明一种支护原理,强调隧道施工应遵循适当控制围岩变形的原则,要求全断面加固(底衬砌)以利用围岩的自承能力,以及二次支护方法和设计、施工、监测反馈相结合的方法。

(10) 有限元、边界元等数值计算方法和计算机技术在隧道结构设计与工程力学分析中的应用。

(11) 伦敦第一条城市地铁的修建和后来城市地铁的大规模和高规格的发展;英吉利海峡的海底隧道的成功铺设以及一些在复杂地质(水、火、瓦斯的涌入,破碎岩层,软土流砂层,极坚硬岩层等)中的地下隧道成功修筑,为后来的隧道工程发展积累了有用的经验,并为大规模地下工程开发创造了条件。

(12) 世界各国推行的隧道施工技术规范、标准化工作。1974年国际隧道协会(ITA)成立并每年召开一次年会,对促进各国经验交流和规范隧道技术起到了重要作用。

当前的隧道工程技术还有许多需要解决的问题,例如:

(1) 地质资料的可靠性和控制问题。精细勘测是实现隧道施工现代化的先决条件。目前,掌握地下千变万化的地质情况仍是隧道工程的一个主要困难。尽管从20世纪60年代开始,采用了一系列先进的地球物理方法,勘测工作的可靠性及其所提供的信息仍不能满足工程的实际要求。

(2) 隧道施工中还较多采用的钻爆法技术及其相应的配套方法还比较落后,而岩石掘进机的使用投入大、要求高、适应性较低,限制了它的普遍应用和推广。

(3) 锚喷支护技术的可靠性还不能得到保证,支护设计理论还缺乏可靠的基础,设计计算方法不统一,结果误差大。

(4) 至今,地下水的处理仍是隧道施工的重点难点,许多隧道发生的突水事件就说明该问题的严重性。处理涌水、漏水问题,特别是对于饱水地层和 underwater 隧道的建设,更是一项重要的课题。

(5) 隧道施工的环境影响问题,尤其是城市地下隧道建设,往往会造成地面沉降或爆破震动等。

总之,隧道工程仍具有投入高、劳动强度大、施工环境恶劣甚至有危险、技术难度大而整体技术水平相对较低的特点。21世纪,人类在开辟地下土地资源时将遇到比“上天”更难捉摸的“入地难”问题。目前,它正向着长、大、高(高水平的设计与施工技术)、深、难和现代化的方向发展。改变目前隧道工程施工中的落后与不足,提高和推进隧道工程技术与理论的发展,正是每一个地下工程工作者责无旁贷的重要责任。我国的隧道工程事业大有发展前途,隧道工程技术也必将走向世界的最前列。

第一章 隧道围岩分类与围岩压力

第一节 隧道围岩性质

一、岩石和岩土

隧道作为一种结构物，与地面构筑物的一个重要区别在于它处在岩石或土这种地质环境之中。隧道周围岩土介质的各种物理力学性质及其赋存条件，对隧道的设计、施工乃至运营都有重要的影响。

岩石是经过地质作用形成的由一种或多种矿物组成的天然集合体。按其成因，岩石可分为岩浆岩、沉积岩和变质岩三大类，不同类型岩石的物理、力学性质是不同的。在地壳岩石形成过程中，地质构造作用以及其他漫长的大自然作用破坏了岩石的完整性和连续性，产生了许多裂隙、节理和断层。常常把节理、裂隙、断层和沉积岩与由沉积岩变质的变质岩在生成过程中形成的层理和层面统称为结构面。把由结构面切割出的完整块体称为岩块，因此岩体也就可以认为是由岩块和结构面组成的复杂地质体。

绝大部分土是地表岩石，它是经过漫长地质历史年代的同化作用而生成的。经物理风化的土层矿物成分常与原生矿物一致，如石英、长石、云母等。原生矿物经化学风化形成新的次生矿物成分，主要有粘土矿物，如高岭土、伊利石和蒙脱石。这是土体中两种物理力学性质有明显区别的成分。风化后的土体还会受到水、风、冰川等的动力作用，经冲刷、搬运后沉积在一起的土体成分，就变得相对复杂，并可能形成一定的沉积构造。

土体经长期的高压、脱水、固结后，又会形成岩石。因此，岩石和土的区别只是颗粒胶结的强弱。由于土的胶结力弱，因此土的成分对土体的物理力学性质影响更为严重，而岩石则相反，有时甚至两者难以区别。

二、隧道围岩性质

把未经人为扰动（如挖掘、开采等）的岩体称为原岩。原岩内部存在的应力状态称为原岩应力状态，原岩应力在一定时期内可以认为是相对平衡的。当在原岩内进行隧道开挖后，隧道周围一定范围内岩体的平衡应力遭到了破坏，导致应力重新分布，引起隧道附近岩体产生变形、位移、甚至破坏，直到出现新的应力平衡为止。将开挖后隧道周围发生应力重新分布的岩体称为围岩，重新分布的应力称为二次应力或次生应力，围岩既可以是岩体，也可以是土体。

如果岩体的原岩应力状态是弹性状态，开挖后围岩的次生应力状态可能出现两种情况：一是围岩的次生应力状态继续保持弹性状态，弹性理论的基本定律仍然适用，这种情况围岩是稳定的，隧道可以不加支护；二是围岩的次生应力状态在隧道的某些部位超过了岩体的屈服极限，甚至强度极限，这时围岩就会出现过大的变形，进而破坏，为保持隧道的稳定，必须采取支护措施，强制围岩稳定。

地下水也是影响隧道稳定的重要因素。水对岩土有软化作用，并降低岩土体强度和质

量等级。在铁路隧道围岩分类中,对于块状硬质岩石和整体性软岩,常根据地下水类型、水质及其危害程度,要考虑降低岩石的质量等级1级;对于松散结构岩体,或者裂隙等结构面有泥质充填物时,还根据动静水压条件降低1~2级质量等级;对于土体的含水影响,可由其自身指标考虑,但遇到诸如高压饱和含水土层(流砂)等特殊的含水层,则要求单独处理。在高水位地下水的条件下施工隧道,还要注意疏排水工作及其影响,避免由于地下水的存在破坏土体结构。

对围岩的理论研究表明,围岩本身具有一定的自承载能力,充分发挥围岩的自承载能力,会大大降低隧道支护成本。隧道开挖后,适当控制围岩的变形,对隧道的维护具有重要意义。

第二节 隧道围岩分类

由于组成岩土体的成分、性质不同和岩土体结构的区别,特别是岩体中结构面发育状况的差异,以及围岩所处地质环境的不同等多种因素的影响,致使工程实际所遇到的围岩力学性质千变万化。因此,判别岩土体力学性质的好坏,并据此合理地选择工程地点,正确进行工程设计和确定既经济又安全的施工参数是岩土工程师的重要工作内容。

围岩分类的目的就是在对岩土体稳定性进行评价时提供一种客观而统一的比较手段和衡量标准,以便根据岩土体的质量为工程设计和布局提供合理的计算参数和实用指标,为工程选择合理的施工方法提供可靠的依据。

围岩分类早在1774年就开始了,当时欧洲人罗曼提出过石灰岩的分类,18世纪末俄国学者维尔涅尔曾将岩石定性地分为五类:松软岩、软岩、裂隙破碎岩、次坚硬岩和坚硬岩。而真正把岩石同工程联系起来是从19世纪后期才开始的,如雷哈(F.Reiha, 1897)根据开挖工具、炸药消耗量及人工等提出的围岩分类。20世纪50年代以后,围岩分类越来越受到重视,从而也促进了工程建设的发展。据统计,迄今各种各样的围岩分类方法已有百余种之多。

一、围岩分类方法

围岩分类需要满足科学性和实用性要求,围岩分类方法必须来源于实践,然后再返回到工程实践中去检验,并得到不断的完善。同时,任何一种围岩分类方法都是为一定目的服务的,它必然存在一定的局限性。因为这些方法都是针对某种类型岩石工程或专门需要而制定的。

(一) 围岩分类的几个基本问题

1. 围岩分类的基本内容

一个完整的围岩分类方法应包括三个组成部分,即分类因素、分类标准和工作指标,如图1—1所示。

分类因素是确定围岩级别所必须事先知道的定性或定量指标,通常分为基本分类因素和修正分类因素。分类标准是确定围岩级别的具体方法,它可以归结为经验分类法、数学理论分类法和经验与数学理论相结合的方法。这两部分构成围岩质量等级的评判分类,岩石和土各有不同的因素和内容。本书主要介绍岩石质量分类,土的分类在“土力学”中有专门介绍。第三部分工作指标应该包括围岩的物理力学参数、自稳能力及所能承受的极限

荷载、或者隧道支护的设计荷载、甚至是围岩的加固支护措施等。

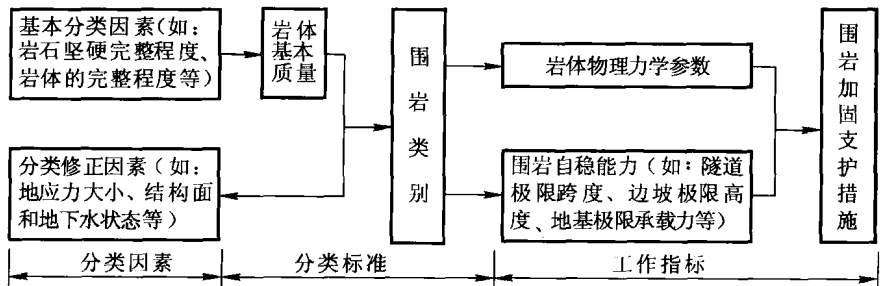


图 1—1 围岩分类方法的基本结构

2. 围岩分类因素的选择

围岩分类不可能包含全部众多因素，分类因素的选择一般应考虑如下几点原则：

(1) 从重性原则。分类因素必须涉及与岩体质量和稳定性相关的最重要、最基本的因素，过多的分类因素会使分类方法缺乏科学性，也缺乏实用性。

(2) 独立性原则。同一分类方法中，应避免影响因素的重复和搭接。比如岩石的坚硬程度可以用单轴抗压强度、点荷载强度或回弹指数来表示，作为分类因素只能采用其中的一个。

(3) 简易性原则。分类因素的各项指标必须容易获取，测试方法必须简单易行。有些力学参数，如岩体的变形模量能够很好地反映岩体质量的一个方面，但它的获取费时耗资，而且需要专门的技术，因此不宜作为分类因素。

3. 围岩分类因素权重的分配

在正确选定分类因素以后，各因素在确定围岩级别时，权重的分配就成为分类方法合理与否的关键。实践已证明，对于不同质量的岩体，各种因素的影响程度是不一样的。例如，在和差计分法中，权重体现在对各因素的评分上，虽然总评分对不同级别围岩一般是等距的，但考虑到对各因素的评分，最终各因素对岩体质量的影响仍然是不一样的；在乘商计分法中，各分类因素的权重则应是非线性的。

(二) 围岩分类方法

围岩分类目前仍没有一个统一的方法，各个国家、不同行业均根据各自的工程特点提出各自的围岩分类方法。综合分析这些方法，按分类因素的侧重点不同，主要有如下几种：

1. 以岩石强度或岩芯质量等单一指标为基础的分类方法

这类方法中最具代表性的是前苏联普罗托奇雅可诺夫（М.М.Протоdjяконов）提出的“岩石坚固性系数”即普氏系数分类法，它以岩石的普氏系数为指标，将岩石分为 10~15 个级别。最早的普氏系数 f 为

$$f = \frac{R_c}{10} \quad (1-1)$$

式中 R_c ——岩石饱和单轴抗压强度，MPa；

f ——岩石坚固性系数，即普氏系数。

1963 年，美国迪尔（D.U.Deere）提出的岩石质量指标（RQD）分类法也属此类分类方法，它以钻探时获取的大于 10 cm 的岩芯断块长度之和与钻孔总长度的百分比作为分

类指标，以 RQD 表示：

$$RQD = \frac{100\text{ mm 以上岩芯累积长度}}{NX\text{ 钻具直径 } 54.5\text{ mm 钻孔取芯总长度}} \times 100\% \quad (1-2)$$

虽然此类方法具有一定的缺陷，但用作工程初期对围岩质量的初步评价，也不失为一种简单实用的方法。普氏的坚固性系数分类方法目前在矿山中仍被经常采用。

2. 以岩体结构或构造为主的分类方法

中国科学院地质研究所是岩体结构分类方法的代表。这种方法认为岩体与一般连续介质的区别主要在于它是被各种各样的结构面切割而成的裂隙体，结构面的分布、组合关系及其性质在很大程度上控制着工程岩体的稳定性。同时认为，根据结构面切割程度的严重性，应采用不同的力学介质模型。这种分类方法在国内受到普遍重视，如煤炭系统的围岩分类、冶金系统的岩体分类以及建工系统的岩体结构类型分类，都是在上述岩体结构分类的基础上进行的；铁路隧道的围岩分类和水工隧道的围岩分类也是基于岩体结构的概念建立起来的。具体的分类情况见表 1—1。

表 1—1 中国科学院地质研究所岩体分类

岩体 结构 类型	类	代号	I		II		III			IV
		名称	整体块状结构		层状结构		碎裂结构			松散结构
	亚类	代号	I ₁	I ₂	II ₁	II ₂	III ₁	III ₂	III ₃	
		名称	整体结构	块状结构	层状结构	薄层状结构	镶嵌结构	层状碎裂结构	破碎结构	
岩体的完整性	结构面间距 /cm		>100	100~50	50~30	<30	<50	<50 (骨架岩层中较大)	<50	
	完整性系数 K _v		>0.75	0.75 ~ 0.35	0.60 ~ 0.30	<0.40	<0.36	<0.40	<0.30	<0.20
主要结构面及抗剪特性	级 别		存在 IV、V 级	以 IV、V 级为主	以 III、IV 级为主	以 III、IV 级显著	IV、V 级密集	II、III、IV 级均发育		
	类 型		刚性结构面	刚性结构面 局部为破碎结构面	刚性结构面 柔性结构面	柔性结构面	刚性结构面 破碎结构面	泥化结构面	破碎结构面	节理密集，呈无序状分布，表现为泥包块或块夹泥
	主要结构面摩擦系数 f		>0.75	0.40~0.60	0.30~0.50	0.30~0.40	0.40~0.60	0.20~0.40	0.16~0.40	<0.20
岩块饱和抗压强度 /MPa			>60	>30, 一般大于 60	>30	10~30	>60	<30, 骨架岩层在 30 上下	<30	无实际意义

注：结构面级别为：I—区域性巨型地质结构面（长数十公里，宽数米）；II—工程大型地质结构面（长数百米至数千米，宽 1 m~5 m）；III—工程岩体中型结构面（长数百米，宽<1 m）；IV—岩体小型结构面（长数米至数十米，宽<0.4 m）；V—岩体微型结构面（长数米，宽隐蔽）。

表中 K_v 为岩体完整系数，由下式确定：

$$K_v = \left(\frac{v_{mp}}{v_{rp}} \right)^2 \quad (1-3)$$

式中 v_{mp}——岩体横波速度；

v_p ——岩石纵波速度。

3. 以结构面参数或声波参数为基础的分类方法

此类方法有著名的节理岩体地质力学分类法（CSIR 方法），该分类方法由宾尼亚斯基（Z.J.Bieniawski）提出，并得到国际岩石力学学会（ISRM）的推荐。

CSIR 围岩分类法是根据岩体中五个实测参数，结合结构面的空间方位与开挖方向之间的相对关系，以综合评分值的代数和作为划分围岩级别的依据，即

$$CSIR = A + B + C + D + E + F \quad (1-4)$$

式中 A——完整岩石单轴抗压强度的分类评分值；

B——岩石质量指标的评分值；

C——结构面间距的分类评分值；

D——结构面状态（粗糙度、连续性等）的分类评分值；

E——结构面走向和倾角对隧道开挖影响程度的分类评分值；

F——地下水条件的分类评分值。

与 CSIR 方法类似的分类方法还有挪威地质学家巴顿（N.Barton）的岩体质量指标 Q 分类法，美国威克海姆（G.E.Wickham）的岩石结构评价 RSR 法等。

日本的围岩分类指标多采用岩体的弹性纵波速度，吉川惠也等人在《日本新奥法设计施工指南》（1983）中提出的隧道围岩分类（表 1—2）就是以弹性纵波速度为指标的分类方法，据资料介绍，该法曾经历 10 条隧道、171 个试验断面的检验，其中 20 个试验断面对比了围岩分类级别和实际设计相应的围岩分类级别，完全一致的达 70%，包括相近的则高达 95%。

表 1—2 新奥法设计阶段围岩分类 [日本]

围岩类别	硬 岩		中 硬 岩	软 岩	土 沙
	古生界或中生界的深成岩、火山岩、变质岩等	中生界页岩、火成岩及老第三纪硅质砂岩和页岩	新老第三纪岩层	新第三纪泥岩、粘土岩、砂岩、凝灰岩等，强度低于 20 MPa	洪积层、崩积土、表土
V	$v_p \geq 5.2$	$v_p \geq 5.0$	$v_p \geq 4.2Z$	—	—
IV	$5.2 > v_p \geq 4.6$	$5.0 > v_p \geq 4.4$	$4.2 > v_p \geq 3.4$	—	—
III	$4.6 > v_p \geq 3.8$	$4.4 > v_p \geq 3.6$	$3.4 > v_p \geq 2.6$	$2.6 > v_p \geq 1.5$ 且 $S_m \geq 6$	—
II	$3.8 > v_p \geq 3.2$	$3.6 > v_p \geq 3.0$	$2.6 > v_p \geq 2.0$ 且 $S_m \geq 4$	$2.6 > v_p \geq 1.5$ 且 $6 > S_m \geq 4$	—
I	$3.2 > v_p \geq 2.5$	$3.0 > v_p \geq 2.5$	$2.6 > v_p \geq 2.0$ 且 $4 > S_m \geq 2$ 或 $2.0 > v_p \geq 1.5$ 且 $S_m \geq 4$	$2.6 > v_p \geq 1.5$	$S_m \geq 2$
特殊围岩	$2.5 > v_p$	$2.5 > v_p$	$1.5 > v_p$ 或 $2 > S_m$	$1.5 > v_p$ 或 $2 > S_m$	$2 > S_m$

注：本表适用于覆盖层厚度大于 500 m，且隧道高度大于宽度的隧道分类； v_p 为围岩的弹性纵波速度，km/s；

$S_m = \frac{R_c}{\gamma H}$ ，称为围岩强度比； R_c 为围岩单轴抗压强度，kPa； γ 为围岩容重，kN/m³； H 为上覆岩层厚度，m。

二、围岩分类的国家标准

1994 年，经过专家讨论和推荐，《工程岩体分级标准》作为我国国家标准正式颁布执行。《工程岩体分级标准》是以现有行业和专业标准的共性作为制定的基础和出发点的，明确提出了岩体基本质量的概念和由定性划分、定量指标两种手段确定岩体基本质量的方法。

法。具体分级见表 1—3 和图 1—2。

表 1—3 岩体基本质量分级

岩体基本质量级别	岩体基本质量的定性特征	岩体基本质量指标 (BQ)
I	坚硬岩, 岩体完整	>550
II	坚硬岩, 岩体较完整 较坚硬岩, 岩体完整	550~450
III	坚硬岩, 岩体较破碎 较坚硬岩或软硬岩互层, 岩体较完整 较软岩, 岩体完整	450~350
IV	坚硬岩, 岩体破碎 较坚硬岩, 岩体较破碎~破碎 较软岩或软硬岩互层, 且以软岩为主, 岩体较完整~较破碎 软岩, 岩体完整~较完整	350~250
V	较软岩, 岩体破碎 软岩, 岩体较破碎~破碎 全部极软岩及全部极破碎岩	≤250

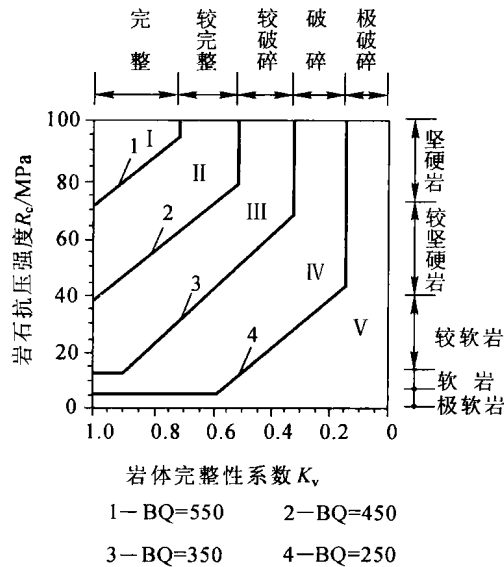


图 1—2 岩体基本质量分级图示

在定性划分岩体基本质量级别时, 岩石坚硬程度根据锤击声、回弹程度、击碎难易和浸水后的反应来确定; 岩体完整程度根据岩体中结构面的发育程度和结合程度 (如结构面的张开度、贯通度、起伏粗糙度和充填状况) 来确定。

定量划分岩体基本质量级别时, 根据岩体基本质量指标 BQ 的大小确定:

$$BQ = 90 + 3R_c + 250K_v \quad (1-5)$$

式中 R_c ——岩石单轴饱和抗压强度, MPa;

K_v ——岩体完整系数。

使用式 (1—5) 确定岩体基本质量指标时, 当 $R_c > 90K_v + 30$ 时, 应以 $R_c = 90K_v + 30$ 代入计算; 当 $K_v > 0.04R_c + 0.4$ 时, 应以 $K_v = 0.04R_c + 0.4$ 代入计算。