

隧道工程

高少强 隋修志 主编

中国铁道出版社

(京)新登字 063 号

内 容 简 介

本书共分十章,主要内容有:隧道围岩分级与围岩压力,隧道构造,隧道常规施工方法,新奥法施工,浅埋隧道施工,隧道其他施工方法,特殊岩土和不良地段隧道施工,施工辅助作业,施工组织,公路隧道等内容。

本书为高职高专学校土建类隧道课程的教学用书,也可供有关隧道施工技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

隧道工程/高少强,隋修志主编.—北京:中国铁道出版社,2003.10

ISBN 7 - 113 - 05525 - 7

. 隧... . 高... 隋... . 隧道工程 .U45

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 091713 号

书 名:隧道工程

作 者:高少强 隋修志 主编

出版发行:中国铁道出版社(100054,北京市宣武区右安门西街8号)

责任编辑:李丽娟

封面设计:马 利

印 刷:中国铁道出版社印刷厂

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16 印张:18.25 字数:470 千

版 本:2003 年 9 月第 1 版 2003 年 9 月第 1 次印刷

印 数:1~3 000 册

书 号:ISBN 7 - 113 - 05525 - 7/TU·749

定 价:26.00 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社发行部调换。

编辑部电话:(010)51873135 发行部电话:(010)63545969

前 言

随着我国交通事业的飞速发展,隧道作为铁路、公路线上的重要建筑物,无论在隧道的长度、施工技术上都发生了巨大的变化。目前,我国隧道数量和总长度居世界第一,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,隧道施工技术水平已接近国际先进水平,部分已达到国际先进水平。本教材正是在这一背景下,结合当代高等职业技术教育注重实践性和实用性的特点,按国家对高职高专这一层面学生的培养要求编写的。

本教材按最新铁路隧道、公路隧道设计规范和施工规范要求编写,内容包括铁路隧道、公路隧道两大部分。本教材力求简明,突出了实践性和实用性,在充分尊重和继承其他教材的基础上,比较全面、系统地介绍了隧道构造和施工方面的基本知识,广泛吸取了国内外施工现场的新技术、新方法、新工艺。在教学过程中应根据各专业的特点对教学内容加以适当调整,并依据隧道工程技术的发展,结合一定的工程实例组织教学。本教材可作为高职高专学校土建类隧道课程的教学用书,也可供隧道施工技术人员学习参考。

本教材由石家庄铁路工程职业技术学院高少强、隋修志主编,石家庄铁路工程职业技术学院胡振文主审。参加编写工作的有:隋修志(绪论、第四章),高少强、宓荣三(第一章),习淑娟(第二章),高少强(第三、八章),王海彦(第五、六、七章),候永会、王景奎(第九章),曹彦国(第十章)。

在本书编写过程中得到了有关学校和同仁的大力支持和帮助,在此一并表示最衷心地感谢。

由于编者水平有限,不妥之处恳请读者批评指正。

编 者

2003年8月

绪 论

隧道是一种修建在地下的工程结构物。随着人类文明及现代工程技术的发展,隧道以其位于地下这一特点,已被广泛地应用于交通、矿山、水利及国防等领域,现已成为土木工程的一个重要分支。交通运输类隧道与其他用途的隧道相比,不仅长度长,数量多,而且在施工中遇到的工程地质和水文地质条件也比较复杂,对其平面、纵断面、横断面及形状、尺寸要求都较严格。目前,隧道的勘测、设计和施工体系已日趋成熟。本课程旨在介绍交通类隧道的设计、施工及运营养护等方面的知识。

一、隧道的基本概念和用途

一般说来,隧道的修建是按照设计形状和尺寸在地下开挖出一个长形的通道,再做必要的支护,形成稳定的洞室以便使用。因此,所谓隧道,通常是指修建在地层中的地下通道。长期以来,除天然洞穴外,人类为了不同的需要,在地下修建了许多各种用途的工程建筑物,如位于地下的人防工程、工厂、仓库、街道、商店、停车场、陵墓等。这些地下建筑物虽然其用途、结构形式和构造有所不同,但都作为地下洞室而存在。因此,作为“地下通道”的隧道概念,也可以扩大到地下空间利用的各个方面,但断面过小的地下管道除外。

作为地下通道,隧道的主要用途有两方面:即用作交通运输通道和水流通道。因此,除了在公路、铁路建设中及挖掘运河时常要修建公路隧道、铁路隧道及航运隧道外,在水力发电、农田灌溉或为了向大城市供水等而修建的供水系统中,亦常常需要修建输水隧道。此外,在国防及市政等工程建设中,隧道也得到了广泛的应用,如人防工程、城市地铁、过街地道等。

二、隧道在交通运输方面的应用和分类

在公路和铁路上,隧道常用来穿越山岭和水流障碍。在城市交通运输中,隧道也常常被采用。按照穿越障碍或作用的不同,位于交通线上的隧道可分为山岭隧道、水底隧道和地下铁道等。

1. 山岭隧道

在山区修建公路和铁路时,往往会遇到高程障碍,而修建隧道克服高程障碍则有着明显的优势。它既可以使线路顺直,避免无谓的展线,使线路缩短,又可以减小线路坡度,使运营条件得以改善,从而提高运输能力,取得理想的经济效果。例如我国 20 世纪 80 年代末建成的京广线衡广复线,在坪石与乐昌之间,由于修建了长度为 14.295 km 的大瑶山隧道,避免了大量展线,且使线路顺直,线路长度较既有线缩短约 15 km,这一长度几乎为坪石至乐昌间既有线路长度的 $1/3$ 。再如,西安安康铁路上已经建成的秦岭隧道单线全长 18.456 km。这一隧道的修建,使得现今的线路较之 20 世纪 70 年代设计的穿越秦岭隧道方案缩短了 88 km,且能以最短距离通过 4 个地质大断裂带,节省工程造价约 10 亿元,真正实现了长距离、低坡度的运输方式,运输能力大大提高。秦岭隧道的长度目前在我国的铁路隧道中居于首位,列亚洲第二,世界第六。世界上已建成的最长的山岭隧道是日本的大清水双线隧道,长度为 22.28 km。19 世纪末

至 20 世纪初先后建成的两条平行的辛普伦隧道 (Simplon tunnel) (均为单线) 长度约 19.98 km, 是用来穿越阿尔卑斯山, 连通瑞士与意大利的, 其长度在世界铁路山岭隧道中目前仍处于第二位。

2. 水底隧道

交通道路遇到江河、海峡、海湾等水流障碍时, 虽然多采用桥梁或轮渡方案通过, 但考虑穿越地点的地形、地质、水文、航运、军事等因素, 也可能选取水底隧道作为穿越方案。世界上已建成的水底隧道 (包括铁路和公路) 已超过百座。日本青函海底隧道 (Seikan tunnel) (穿越津轻海峡), 长度约 53.85 km, 是当前世界上最长的铁路水底隧道, 它把日本的本州与北海道两大岛连结起来。我国解放后也相继修建了几座水底隧道。如上海的黄浦江隧道、广州的珠江地铁隧道、宁波的甬江隧道等。

3. 地下铁道

随着城市建设的飞速发展, 地面交通日益繁忙。为了有效缓解地面交通压力, 修建地下铁道已成为解决大城市中交通运输问题的重要手段之一。地下铁道不占地面空间, 而且安全、快捷、方便、运量大, 只是费用比较高。因此, 是否修建地铁, 要从政治、经济、技术和军事等诸多方面进行考虑。当前, 世界上已有 80 多座城市修建有地下铁道并投入了使用。我国已建成地下铁道的城市有北京、上海、天津、广州、香港、台北等城市。

三、隧道建筑物的组成

隧道建筑物总体上可分为主体建筑物和附属建筑物两大部分。

主体建筑物有洞身衬砌 (简称衬砌) 和洞门。衬砌是用来加固隧道洞身, 防止洞身周围地层发生风化剥落或坍塌的结构物; 洞门则用来加固隧道的出入口, 阻挡落石。两者共同保证车辆在隧道中的行车安全。

隧道的衬砌, 常采用由拱圈和边墙组成的拱形结构, 在地质条件较差的情况下则常设置仰拱而形成封闭式衬砌。

隧道的附属建筑物主要包括大、小避车洞及防排水设施。在隧道较长通风不良时, 还要修建通风建筑物。此外, 在隧道内还可能由于铁路电气化或通信信号等方面的需要而修建相应的附属建筑物 (如电缆槽、无人增音站洞及绝缘梯车洞等各种洞室); 公路隧道还需要增设许多其他运营设施 (照明、减光、交通监控等)。

四、隧道施工方法简介

隧道施工方法, 一般可分为明挖法和暗挖法两大类。

明挖法适用于浅埋隧道的施工。此种方法的特点是先从地面将隧道上方及内部地层挖开, 形成壕堑, 然后在壕堑中修建衬砌, 再在衬砌顶部进行土石回填。在修建浅埋的地下铁道时亦常采用明挖法施工。

暗挖法施工的特点是先在地层中按需要的形状和尺寸开挖出一个孔洞, 然后在其中修建衬砌。常用的暗挖法有矿山法、掘进机法及盾构法三种。

矿山法是用一般地下开挖方法来进行隧道施工。当隧道穿经岩石地层时, 通常均用钻眼爆破的方法进行开挖, 在进行必要的临时支护及清除开挖出来的石碴之后, 再修建永久性支护结构——衬砌。隧道的横断面视具体条件可分为几部分挖成, 亦可一次挖成。由于这种方法与矿山地下巷道的施工方法相类似, 故常称之为矿山法。

掘进机法是采用掘进机来进行隧道开挖的。在石质地层中修建圆形断面的隧道时,常用全断面隧道掘进机(TBM),像钻孔一样,一次便将隧道整个断面钻凿成形。掘进机除了具有掘进功能外,还兼有装碴及自动推进的功能。我国有一些输水隧道曾采用过隧道掘进机施工。目前已建成的秦岭隧道亦采用了先进的全断面掘进机设备进行施工,且取得了较好的效果。

在水底隧道、城市地下铁道和上下水道的建设中,由于经常通过松软的甚至含水的土层,故一般采用“盾构”法施工。“盾构”是一种兼有推进、防护、安装和掘进功能的壳体隧道开挖机。按其功能不同,可分为普通盾构、机械化盾构、气压盾构及泥水加压盾构等多种。上海黄浦江公路隧道、上海地铁一线隧道工程,就是采用盾构法施工的。

除了上述几类施工方法外,修建水底隧道时还采用过沉埋法及隧道沉箱法等特殊施工方法。

山岭隧道多采用矿山法施工,本课程主要讲述有关矿山法施工的基本知识。

五、我国隧道修建的概况

我国铁路修建始于1876年,即在19世纪中叶帝国主义列强侵入我国之后才开始的。从那时起至1949年新中国成立之前的70多年间,虽然也修建了21 000多公里铁路,但这些铁路的修建,常与帝国主义国家在我国争夺势力范围及掠夺我国资源财富有关,不仅标准不统一,而且铁路线亦多集中在东北、华北、华东及华南等人口稠密、经济发达的近海地区。这些地区的地势大多较为平坦,加之受当时隧道技术水平的限制,铁路选线时多采用展线(绕行)、大坡度或深开挖等方法来通过山岭,尽量避免修建隧道,故修建的隧道很少。据有关资料统计,几十年间建成通车的标准轨距铁路隧道仅238座,总延长约89 km,其中只有3座隧道长度超过3 km。

我国第一座铁路隧道是1887~1889年间建于基隆至台北间的一条窄轨铁路上(轨距1 067 mm)的狮球岭隧道,长度约261 m。

位于京张线上的八达岭隧道,是我国独立设计和施工的首批隧道之一,由我国杰出的工程师詹天佑博士主持修建。该隧道长约1 091 m,1907年动工,历经18个月就全部竣工。为了开辟工作面,曾在隧道中部挖凿竖井两处。八达岭隧道的修建,第一次显示了我国人民在铁路建设事业中的聪明才智,这一伟大成就与在当时条件下的艰苦奋斗精神,是值得今天从事铁路建设的工作者引以自豪和骄傲的,也是值得我们学习的。

新中国成立后,随着国民经济的发展,我国的铁路建设事业也发展很快,山区铁路的比重也越来越大。诸如在成渝、丰沙、宝成、鹰厦、川黔、湘黔、成昆、襄渝、枝柳、京原、京通及南疆等新建的山区铁路上,隧道的数量都很多。例如成昆线金口河至乌斯河一段,线路穿越大渡河峡谷地带,在长26 km的线路上,有隧道13座,总延长21 km,占这段线路长度的80%;襄渝线上陕西境内长267 km的铁路上,隧道总延长172 km,占该段线路总长的64.5%。在这些铁路上,隧道成群,桥隧毗连,它们与巍峨秀丽的山川自然风光交相辉映,形成了极为壮丽的人文景观。

迄今为止,我国建成的铁路隧道总座数已超过4 800多座,总延长里程已达2 000多公里。在已建成的隧道中,有11座隧道的长度已超过6 km。它们是:秦岭隧道(西康线、18.456 km)、大瑶山隧道(京广线、14.295 km)、军都山隧道(大秦线、8.46 km)、米花岭隧道(南昆线、9.383 km)、长梁山隧道(朔黄线、12.780 km)、驿马岭隧道(京原线、7.032 km)、沙木拉达隧道(成昆线、6.383 km)、平型关隧道(京原线、6.189 km)、关村坝隧道(成昆线、6.187 km)、南岭隧道(京广线、6.062 km)、奎先隧道(南疆线、6.152 km)。其中大瑶山隧道、军都山隧道、南岭隧道、长梁山隧道均为双线隧道。西康线上的秦岭隧道,是迄今为止我国修建的最长的铁路隧

道,它标志着我国铁路隧道的设计、施工和技术水平已进入世界先进行列,是我国隧道发展史上的重要里程碑。

近几年来,我国铁路建设事业迅猛发展,相继建成了南昆线、侯月线、宝中线、京九线,在这四条铁路线中,隧道都占有相当的比重(如表 1 所示)。

表 1 四大干线中隧道所占的比重

线 别	全长 (km)	隧道数量 (座)	隧长 (km)	隧长/ 线长 (%)
南昆线	862	250	190.8	22.1
侯月线	253.39	50	56.0	22.4
宝中线	500	66	59	11.8
京九线	2 583	126	61	2.36

随着公路建设和公路等级的提高,我国公路隧道数量也在逐年增多,到 2001 年底,全国公路以总里程 169.8 万 km(不含村道)的成绩位居世界第四,其中等级公路 133.6 万 km,高速公路通车总里程 1.9 万 km,居世界第二位。公路隧道 1 781 座,71 万延米,其中特长隧道 18 座。20 世纪 80 年代以来,随着我国高等级公路的修建,公路隧道建设的发展也非常迅速。公路隧道也越来越长,如鹧鸪山隧道长达 6 030 m,二郎山隧道长度也达 4 300 m。

在修建大量隧道的工程实践中,我国隧道工作者克服了许多极为复杂的地质情况及水文地质条件,从中积累了宝贵的经验。例如,有的隧道地层松软破碎,极易坍塌;有的隧道位于地下水发育的地层,施工时地下水(或夹泥沙)喷涌而出,每昼夜涌水量达 10 多万 m^3 ,造成淹没坑道的事故;有的隧道穿越煤层,遇到大量瓦斯;有的隧道施工时,洞内个别地段的温度高达 40℃ 以上;有的隧道虽然位于坚硬的岩层之中,但由于原始应力较大,隧道开挖约束部分解除之后,有岩块崩弹而出——即称之为“岩爆”的现象产生,给施工造成很大困难。位于川黔线上的某隧道,由于穿过山体内部的大型溶洞所形成的地下暗河,曾不得不在隧道内修建一孔跨度 32 m 的钢筋混凝土桥。实践证明,我国已能够在各种不良地质条件下修建隧道。

隧道设计与施工的着眼点,主要在于如何防坍、防水及提高施工速度。几十年来,我们虽然在隧道设计理论和施工技术上都取得了很大的进步,特别是目前的施工机械化程度已远远超过了 20 世纪 50 年代。但至 20 世纪 70 年代末以前,我国在隧道建设中,基本上仍然停留在传统的设计理论与施工方法上。例如:在支护结构的计算中,仅仅把支护结构作为承受围岩压力的承载结构,而没有考虑围岩本身的自承能力。施工时,虽然从 50 年代末起就已逐步在较坚硬的围岩中采用喷锚支护、光面爆破等施工技术,以及用全断面凿岩台车进行钻眼爆破,但这些基本上仍然是在传统观念指导下施工的,而且绝大多数的隧道都是分部小断面开挖、轻型凿岩机钻眼、小型装岩机械装碴及采用由小功率电瓶车牵引碴车的有轨运输,在需要临时支护的地层中,则常用木支撑,因此在隧道施工时,常常是工作面狭窄、坑道内支撑林立、断面堵塞,使得大型机械无法应用,人力、木料大量消耗,工作十分不便,施工速度也因而受到影响。

从 20 世纪 80 年代开始,在总结经验的基础上,我国隧道工程技术人员对世界上不少国家越来越广泛采用的“新奥法”(NATM)进行了更深入的研究与探讨,并已逐步应用在一些新建隧道的施工中。这种方法的根本点,在于如何在隧道的设计与施工中充分利用与发挥围岩的自承能力,使支护与围岩结为一体,共同确保隧道洞室的稳定。

在矿山法施工中,实施“新奥法”的技术措施主要有四项,即控制爆破、喷锚支护、应力与变形量测以及二次衬砌。施工时隧道断面一般分为上下两部分或全断面一次开挖成型。由于以

喷锚支护代替传统的木支撑,不仅有利于支护作业的机械化,而且洞内净空宽敞,也极有利于各种作业的大型机械配套施工,充分体现了“主动型”的新型支护技术的优越性。

大瑶山隧道就是在“新奥法”原理指导下进行设计与施工的。该隧道采用复合式衬砌结构,亦即开挖后先用喷锚进行第一次支护,然后通过量测并待围岩变形基本稳定后,再修筑模筑混凝土衬砌,习惯上称为二次支护。施工中采用无轨运输,并用高效率的全液压凿岩台车进行钻眼,用大容量的侧卸式装载机及自卸汽车进行装碴运输。此外,在喷锚支护和模筑混凝土作业中,也采用了混凝土喷射三联机、机械手及衬砌模板台车等大型机械设备。这样就使隧道施工中的钻爆、装碴运输及支护作业形成了三条机械化施工作业线。在这样一座大断面的双线隧道施工中,洞内出现了像露天作业一样的各种大型机械进退运用自如、运输车辆往来穿梭的景象,这在传统的施工方法中是难以想像的。

此后修建的长大隧道基本上都是按“大瑶山模式”施工的。大秦铁路上的花果山隧道(3 730 m)穿过一条宽约160 m的断层破碎带,断层顶面地面上有一水库,而隧道顶部距水库底最近处仅有32 m左右。在这样一种含水的破碎地层中进行施工,再加上该隧道又是一座双线隧道,其难度可想而知。但由于在该隧道中采用了预注浆固结法,开挖前先在该段地层中注浆,使隧道周围一定范围内的破碎地层凝成一体,既增加了围岩的坚固性与整体性,又防止了水库内的水涌入隧道。这样既保住了水库,又使该隧道安全地穿过了这一大断层,从而为在松软含水的围岩中应用“新奥法”修建隧道提供了宝贵的经验。

近几年来,在我国相继修建的隧道基本上是在“新奥法”原理指导下设计和施工的。众多隧道穿越的地层千差万别,地质和水文地质条件千变万化,但我国隧道工作者克服种种困难,充分发挥自己的聪明才智,正确运用“新奥法”的原理进行设计、施工,积累了在个别复杂地质条件下实施“新奥法”的成功经验,为我国今后大力推广和发展“新奥法”奠定了基础。除此之外,20世纪80年代以来,我国高等级公路的修建使得公路隧道的建设发展很快。例如,运用新奥法原理可以将矿山法应用到软弱围岩之中,甚至于第四纪地层中的浅埋市政隧道,以取代传统的明挖法或盾构法,我国隧道工作者称之为“浅埋矿山法”。

当然,尽管近年来我国隧道工程已经取得了一定的成就,隧道施工技术也取得了相应的发展,但是还存在许多问题和缺点。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,工程进度不快和工程造价较高。因此,我们对围岩的性质还应更深入地了解;计算模型的选用和计算理论还应更符合实际;施工技术水平和管理工作还应更进一步改进;人力和物力的消耗和浪费都应降低,所有这些都还有待我们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实验工作,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;进一步提高开挖技术和支护方法;配备完善的施工机械,从目前的半机械化提高到全机械化;要提倡采用科学的管理方法,根据调查的信息,制定施工计划,又根据实测的信息反馈,不断调整计划,达到方案优、质量高、进度快、造价低的目的。总之,只要我们以科学的态度不断实践和探索,就一定能把我国的隧道建设事业推向前进。

复 习 思 考 题

- 1.什么是隧道?试说明隧道工程在整个线路工程中的地位与作用。
- 2.隧道建筑物主要由哪些部分组成?
- 3.隧道常用的施工方法有哪些?
- 4.目前我国隧道工作者还面临哪些问题?如何解决?

第一章 隧道围岩分级与围岩压力

第一节 围岩分级

一、概 述

围岩是指隧道开挖后其周围产生应力重分布范围内的岩体(或土体),或指隧道开挖后对其稳定性产生影响的那部分岩体(或土体)。

隧道是地下工程,其稳定程度与周围岩体的性态有密切的关系,所以要研究围岩的特征。隧道的围岩特征状态是千变万化的,如从松散的流沙到坚硬的花岗岩,从完整的岩体到极破碎的断裂构造带等,都会因在其中修建隧道而表现出不同的稳定性(所谓稳定性,即在隧道开挖后不加支护的情况下其自身的稳定程度,可分为:充分稳定、基本稳定、暂时稳定、不稳定)。

根据长期的工程实践,人们认识到,各种围岩的物理性质之间存在着一定的内在联系和规律,因而可将稳定性相似的一类围岩划归为一级,并将全部围岩划分为若干级,这就是围岩分级。

围岩分级是选择隧道施工方法的依据,是进行科学管理及正确评价经济效益,确定结构荷载(松散荷载),确定衬砌结构的类型及尺寸,制定劳动定额、材料消耗标准等的基础。

二、围岩分级方法简介

随着各类地下工程的修建,人们对围岩分级的研究也有了很大的发展,现行的围岩分级法考虑了三个基本因素:其一,与岩性有关的因素,如岩石的强度和变形性质(抗压强度、弹性模量、弹性波速等),根据岩石的强度和变形性质可将岩石分为硬岩、软岩、膨胀岩等。其二,与地质构造有关的因素,如软弱结构面的分布与性态、风化程度等,其分级指标是采用评价岩体完整性或结构状态的岩石质量指标或地质因素等。这种分级指标在围岩分级中占有重要地位。其三,与地下水有关的因素。目前国内外的隧道围岩分级依其性质可分为4种(见表1-1-1)。

表 1 - 1 - 1 国内外的隧道围岩分级

分 级 法	表达式或分级情况	主要参数	事例说明	优 缺 点
以岩石强度和物理性质指标的分级法	1 我国解放初期的分级法	分为坚岩、次坚岩、松石及土四级	在我国成渝线的修建中使用过	实践证明这类方法有一定的片面性,与实际出入较大,如我国的老黄土,江西、福建等地的红砂岩,虽然强度低,但稳定性较好
	2 日本最初的国铁土石分级法	主要是以开挖岩(土)的难易程度(强度)来划分		
	3 前苏联的普氏(M·M·普洛托季雅可诺夫)分级法, $f = R_c / (100 \sim 150)$	分为10级	我国在20世纪60至70年代广泛应用,后经修正,考虑了地质条件的影响,即以岩石的物理指标分级	

续上表

分级法	表达式或分级情况	主要参数	事例说明	优缺点
以岩体构造、岩性特征及围岩稳定性为基础的分级法	1 泰沙基 (K.Terzaghi) 法	根据 3.0 m × 3.0 m 断面的坑道中实测的岩体构造和特征分为 9 级, 每级围岩都有相应的支护类型	在美国、英国等广泛应用	较好地反映了坑道围岩的稳定状态
	2 我国铁路隧道围岩分级	分为 6 大级	我国现行铁路规范规定的方法	
与地质手段关联的分级法	1. 弹性(纵波)波速分级 2. 岩石质量指标 RQD (Rock Quality Designation) 分级法, RQD = (单位长度中 10 cm 以上岩芯累计长度/单位钻孔长度) × 100 % 3. Q [Norwegian Geotechnical Institute Tunneling Quality Index (Q system)] 分级法, $Q = RQD \times J_r \times J_w / (J_h \times J_a \times SRF)$, J_h 、 J_r 、 J_a 、 J_w 分别为节理组数、节理粗糙度、节理蚀变值和节理含水折减系数, SRF 为应力折减系数, RQD 同前	将围岩分为 7 级 RQD > 90% 为优质; 75% < RQD < 90% 为良好; 50% < RQD < 75% 为好; 25% < RQD < 50% 为差; RQD < 25% 为很差 分为 9 级: Q = 400 ~ 1000 为特别好; Q = 100 ~ 400 为极好; Q = 40 ~ 100 为良好; Q = 10 ~ 40 为好; Q = 4 ~ 10 为中等; Q = 1 ~ 4 为不良; Q = 0.1 ~ 1 为坏; Q = 0.01 ~ 0.1 为极坏; Q = 0.001 ~ 0.01 为特别坏	日本于 20 世纪 70 年代应用此法	我国目前在工程中已有应用
理想的分析法 (人工智能专家系统)	以岩体为研究对象, 与地质勘探手段相联系, 有明确的工程对象和工程目的, 量化程度高, 采用先进的手段	根据岩体的强度、结构特征、结构状态、弹性波速、地下水等实测资料由计算机自动进行分级		经济、安全、可靠

三、我国铁路隧道的围岩分级法

在我国现行的《铁路隧道设计规范》(TB 10003—2001)中,明确规定了要采用以围岩稳定性为基础的分级法和按弹性波速度的分级法。

(一) 以围岩稳定性为基础的分级法

影响围岩稳定性的因素很多,除了工程地质条件,还有工程结构条件。该分级法主要考虑了围岩的结构特征和完整状态、岩石强度和地下水等工程地质条件中三方面的因素,把围岩分为 6 级,依其稳定性由好到差为 、 、 、 、 、 。

1 围岩的结构特征和完整状态

围岩体通常是被各种结构面切割成大小不等、形态各异、种类不同的岩石单元体(即结构体),围岩结构特征是指结构面和结构体的特征。

结构特征体现围岩体的受力特征,完整状态体现围岩体在受各种地质作用力下所表现的形态。把围岩的结构特征和完整状态相结合就组成了评价围岩稳定性的最直接最重要的指标。它与地质构造变动的特征(可分为轻微、较重、严重、很严重)、结构面的密集程度、节理(裂隙)发育程度(可分为不发育、较发育、发育、很发育)、风化程度(可分为全风化、强风化、弱风化、微风化)、岩层厚度[可分为厚层(大于0.5 m)、中层(0.1~0.5 m)和薄层(小于0.1 m)]的关系如下:

级	围岩级别	级
差	围岩的结构特征和完整状态	好
大	地质变动的剧烈程度、规模大小、次数多少	小
大	结构面的密集程度	小
大	节理(裂隙)的发育程度	小
大	风化程度	小
小	岩层的厚度	大

围岩结构类型及其特征见表 1 - 1 - 2。

表 1 - 1 - 2 围岩结构类型及其特征

类型	状 态	结 构 面 特 征				工程地质评价
		间距(m)	性 质	张开程度充填情况		
整体结构	巨块状	多数大于 1.0	多为原生型或构造型	多密闭, 延展不长		岩体的整体强度较大, 变形特征接近于均质、弹性、各向同性体
砌体结构	大块状	多数大于 0.4	以构造型为主	多密闭, 部分微张	少有填充	同上, 但要注意不利于岩体稳定的结构面组合, 如平缓节理
镶嵌结构	块石碎石状	多数小于 0.4	以构造型或风化型为主	大部分微张, 部分张开	部分为黏性土充填	岩体在整体上强度仍高, 但不连续性较为显著, 受过度震动易坍
压碎结构	碎石状	多数小于 0.2	以风化型或构造型为主	微张或张开		岩体完整性破坏较大, 强度受断层及软弱面控制, 并易受地下水影响, 岩体稳定性较差
松散结构	角砾碎石	—	—	—	—	岩体强度遭到极大破坏, 接近松散介质, 稳定性极差
松软结构	泥沙角砾状	—	—	—	—	同上, 但黏土性成分较多, 易于蠕动

很显然, 当风化作用使岩体结构松散、破碎、软硬不一时, 应结合因风化作用造成的各种状况综合考虑围岩的结构完整状态。围岩的结构特征和完整状态越好, 则围岩的级别越高。

2. 围岩岩石强度

围岩岩石强度是围岩体抵抗外力的一个重要方面,在结构特征和完整状态相同的情况下,围岩的稳定性主要取决于围岩岩石的强度。一般来说,无裂隙或少裂隙的围岩具有整体结构,其强度可用岩石试件的抗压强度或抗剪强度来表示,对于多裂隙的围岩体,其强度可用工程类比法判断。

岩石坚硬程度的划分见表 1 - 1 - 3。

表 1 - 1 - 3 岩石坚硬程度的划分

岩石类别		单轴饱和抗压强度 R_c (MPa)	耐风化能力		代表性岩石
			程度	现象	
硬质岩	极硬岩	> 60	强	暴露后 1~2 年尚不易风化	1. 花岗岩、闪长石、玄武岩、等岩浆岩; 2. 硅质、钙质胶结的砾岩及砂岩、石灰岩、白云岩等沉积岩; 3. 片麻岩、石英岩、大理岩、板岩、片岩等变质岩
	硬岩	30 ~ 60			
软质岩	较软岩	15 ~ 30	弱	暴露后数日至数月即出现风化壳	1. 凝灰岩等喷出岩类; 2. 砂砾岩、泥质砂岩、泥质页岩、炭质页岩、泥灰岩、泥岩、煤等沉积岩; 3. 云母片岩或千枚岩等变质岩
	软岩	5 ~ 15			
	极软岩	< 5			

当风化作用使岩石的成分改变、降低强度时,应按风化后的强度确定岩石的级别。

3. 地下水

地下水能软化围岩,降低围岩体强度;地下水能软化围岩体中的结构面,降低围岩体的抗剪强度,使围岩体容易滑动;地下水往往形成承压水体,促使围岩失去稳定。总之,地下水对于围岩的稳定性是不利的。

当遇有地下水时,按下列原则调整围岩的级别:

- (1) Ⅰ级及Ⅱ级的硬质岩石,可不考虑降级。
- (2) Ⅲ级围岩或Ⅳ级的软质岩石,应根据地下水的类型、水量大小和危害程度,调整围岩级别。当地下水影响围岩稳定,产生局部坍塌或软化软弱面时,可酌情降 1 级。
- (3) Ⅴ级、Ⅵ级围岩已成碎石状松散结构,裂隙中有黏土充填物时,可根据地下水的类型、水量大小、渗流条件、动水和静水压力等情况,判断对围岩的危害程度,酌情降 1 ~ 2 级。
- (4) 对于Ⅶ级围岩,在分级时已经考虑了一般含水地质情况的影响,但在特殊含水地层(如处于饱水或具有较大的承压水流时)还需另作处理。

根据以上的分级因素,《铁路隧道设计规范》的围岩分级见表 1 - 1 - 4。

表 1 - 1 - 4 铁路隧道围岩分级

围岩级别	围岩主要工程地质条件		围岩挖开后的稳定状态(单线)	围岩弹性纵波速度 v_p (km/s)
	主要工程地质条件	结构特征和完整状态		
	硬质岩石(单轴饱和抗压极限强度 $R_c > 60$ MPa):受地质构造影响轻微,节理不发育,无软弱面(或夹层);层状岩层为厚层,层间结合良好	呈巨块状整体结构	围岩稳定,无坍塌,可能产生岩爆	> 4.5

续上表

围岩级别	围岩主要工程地质条件		围岩挖开后的稳定状态 (单线)	围岩弹性纵波速度 v_p (km/s)
	主要工程地质条件	结构特征和完整状态		
	硬质岩石 ($R_c > 30$ MPa): 受地质构造影响较重, 节理较发育, 有少量软弱面(或夹层)和贯通微张节理, 但其产状及其组合关系不致产生滑动; 层状岩层为中层或厚层, 层间结合一般, 很少有分离现象; 或为硬质岩石偶夹软质岩石	呈大块状砌体结构	暴露时间长, 可能会出现局部不坍塌; 侧壁稳定; 层间结合差的平缓岩层, 顶板易塌落	3.5 ~ 4.5
	软质岩石 ($R_c < 30$ MPa): 受地质构造影响轻微, 节理不发育, 层状岩层为厚层, 层间结合良好	呈巨块状整体结构		
	硬质岩石 ($R_c > 30$ MPa): 受地质构造影响严重, 节理发育, 有层状软弱面(或夹层), 但其产状及组合关系尚不致产生滑动; 层状岩层为薄层、中层, 层间结合差, 多有分离现象; 或为硬、软质岩石互层	呈块(石)碎(石)状镶嵌结构	拱部无支护时可产生小坍塌, 侧壁基本稳定, 爆破震动过大易坍塌	2.5 ~ 4.0
	软质岩石 ($R_c < 5 \sim 30$ MPa): 受地质构造影响较重, 节理较发育; 层状岩石为薄层、中层或厚层, 层间结合一般	呈大块状砌体结构		
	硬质岩石 ($R_c > 30$ MPa): 受地质构造影响很严重, 节理很发育; 层状软弱面(或夹层)已基本被破坏	呈碎石状压碎结构	拱部无支护时可产生较大的坍塌, 侧壁有时失去稳定	1.5 ~ 3.0
	软质岩石 ($R_c < 5 \sim 30$ MPa): 受地质构造影响严重, 节理发育	呈块(石)碎(石)状镶嵌结构		
	土体: 1. 具压密或成岩作用的黏性土、粉土及砂类土; 2. 一般钙质、铁质胶结的碎石土、卵石土、大块石土; 3. 黄土(Q、Q ₂)	1和2呈大块状压密结构, 3呈巨块状整体结构		
	岩体: 软岩, 岩体破碎至极破碎; 全部极软岩及全部极破碎岩(包括受构造影响严重的破碎带)	呈角(砾)碎(石)状松散结构	围岩易坍塌, 处理不当会出现大坍塌, 侧壁经常小坍塌, 浅埋时易出现地表下沉(陷)或坍至地表	1.0 ~ 2.0
	土体: 一般第四系坚硬、硬塑黏性土, 稍密及以上、稍湿或潮湿的碎石土、卵石土、圆砾土、角砾土及黄土(Q ₃ 、Q ₄)	非黏性土呈松散结构、黏性土及黄土呈松软结构		
	岩体: 受构造影响很严重, 呈碎石、角砾及粉末、泥土状的断层带	黏性土呈易蠕动的松软结构, 砂性土呈潮湿松散结构	围岩极易坍塌变形, 有水时土砂常与水一齐涌出, 浅埋时易坍至地表	< 1.0 (饱和状态的土 < 1.5)
	土体: 软塑状黏性土、饱和的粉土、砂类土等			

注: 表 1-1-4 中“围岩级别”和“围岩主要工程地质条件”栏, 不包括特殊地质条件的围岩, 如膨胀性盐岩、多年冻土等。
层状岩层的层厚划分: 厚度大于 1.0 m 为巨厚层; 厚度大于 0.5 m, 且小于等于 1.0 m 为厚层; 厚度 0.1 ~ 0.5 m 为中厚层; 厚度小于 0.1 m 为薄层。

第二节 围岩压力及成拱作用

一、围岩压力

人们对围岩压力的认识,是从开挖洞穴后围岩的变形和坍塌的现象开始的。在隧道开挖、衬砌施工实践中,人们从支护结构的变形、开裂等现象进一步认识到围岩压力的存在。

在坚硬稳定的岩层中开挖坑道时,一般是不需要支护的,可是爆破时会发生围岩松动及暴露后受到风化,故仍需要修筑支护结构;在破碎的岩层或松软地层中修筑隧道,开挖坑道时,围岩由于扰动失去稳定而产生变形、松弛、错动、挤压、断裂、下沉或坍塌等现象。所有这些现象统称为围岩压力现象。为了阻止围岩的移动和崩落,保证坑道具有设计的建筑界限和净空,就需要架设临时支撑或修筑永久性支护结构。这种衬砌结构承受的压力,即围岩压力。它是作用于隧道支撑或衬砌结构上的主要荷载之一。

围岩压力按作用力发生的形态,一般可分为如下几种类型:

1. 松动压力

由于开挖而松动或坍塌的岩体以重力形式直接作用在支护结构上的压力称为松动压力。松动压力按作用在支护上力的位置不同,分为竖向压力、侧向压力和底压力。松动压力常发生在下列三种情况下:

- (1)在整体稳定的岩体中,可能出现个别松动掉块的岩石;
- (2)在松散软弱的岩体中,坑道顶部和两侧片帮冒落;
- (3)在节理发育的裂隙岩体中,围岩某些部位沿软弱面发生剪切破坏或拉坏等局部塌落。

2. 形变压力

形变压力是由于围岩变形受到与之密贴的支护如锚喷支护等的抑制,而使围岩与支护结构共同变形过程中,围岩对支护结构施加的接触压力。所以形变压力除与围岩应力状态有关外,还与支护时间和支护刚度有关。

3. 膨胀压力

当岩体具有吸水膨胀崩解的特征时,由于围岩吸水而膨胀崩解所引起的压力称为膨胀压力。它与形变压力的基本区别在于它是由吸水膨胀引起的。

4. 冲击压力

冲击压力是在围岩中积累了大量的弹性变形能之后,由于隧道的开挖,围岩的约束被解除,能量突然释放所产生的压力。

由于冲击压力是岩体能量的积累与释放问题,所以它与弹性模量直接相关。弹性模量较大的岩体,在高地应力作用下,易于积累大量的弹性变形能,一旦遇到适宜条件,它就会突然猛烈地大量释放。

二、坑道开挖前后围岩应力状态

1. 坑道开挖前围岩应力状态

坑道开挖前,地层是处于相对静止的状态。因为地层中任何一处的土石都受到其上、下、左、右、前、后土石的挤压,保持着相对的平衡,称为原始应力状态。它由上覆地层自重、地壳运

动的残余应力以及地下水活动等因素所决定。

为了研究方便,仅考虑由上覆地层自重所形成的原始应力,并取深度 h 上的一个单元体来作应力分析,如图 1-2-1 所示。该单元体受到三对大小相等、方向相反的压力作用,因此该单元体处于力的平衡状态和变形运动的相对静止状态。

在上覆地层自重作用下,竖直压力 P_z 为

$$P_z = \gamma h \quad (1-2-1)$$

式中 γ ——地层的重度;

h ——从地面到单元体所处的深度。

由于单元体的侧向变形受到周围地形的限制,便产生了侧向压力 P_x 和 P_y ,并由上覆地层自重和地层的物理力学性质所决定:

$$P_x = P_y = \mu P_z = \mu \gamma h \quad (1-2-2)$$

式中 μ ——侧压力系数。

根据侧向应变 (ϵ_x, ϵ_y) 为零的条件,并把地层看成各向同性的弹性体,可推导

$$\mu = \frac{\nu}{1 - \nu} \quad (1-2-3)$$

式中 ν ——泊松比,视地层性质不同, ν 值在 0.14 ~ 0.5 之间变化。

2. 坑道开挖后围岩应力状态

坑道开挖之后,围岩原来保持的平衡状态受到破坏,由相对的静止状态变成显著的变动状态,于是围岩在应力和变形方面开始了一个新的变化运动,出现了围岩应力的重分布和围岩向开挖的坑道空间变形,力图达到新的平衡。

从上述可知,坑道开挖以后,地层的一侧丧失了约束,平衡状态受到破坏,引起应力集中,围岩就可能向坑道内变形。变形的大小取决于应力变化的大小和围岩抵抗这些变形的能力。对于不同的岩质则有不同的情况。在坚硬且完整的围岩中,围岩体本身强度足以承受坑道周边应力,这时围岩是自承的,不需要支撑或衬砌提供外加平衡力。在松软的或裂隙围岩中,由于围岩体破碎,再加上在开挖坑道时受到爆破震动,因而在坑道周边一定范围内的岩体遭到严重的分割与破坏。同时围岩体本身强度低,不足以抵抗围岩的周边应力,因此这一部分岩体在坑道开挖之后,开始是产生向内的变形运动,其后则出现松动或坍塌。松动或坍塌的那一部分岩体便对支护结构施加压力,此压力即围岩压力。

三、围岩的成拱作用

在工程实践中人们发现,当隧道在多裂隙围岩(包括一般土层)中埋置较深时,作用在支护结构上的围岩压力远远小于其上覆层自重所造成的压力。这是什么缘故呢?这可以用围岩的“成拱作用”来作解释。在上述条件下,当坑道开挖后,如果任意让其变形、松动和坍塌,最后将会看到在坑道上方形成一个相对稳定的拱形洞穴,如图 1-2-2 所示。人们常称之为“天然拱”或“平衡拱”。它上方的一部分岩体承受着上覆地层的全部重力,如同一个承载环一样,并将荷载重力向两侧传递下去,这就是所谓围岩的成拱作用。

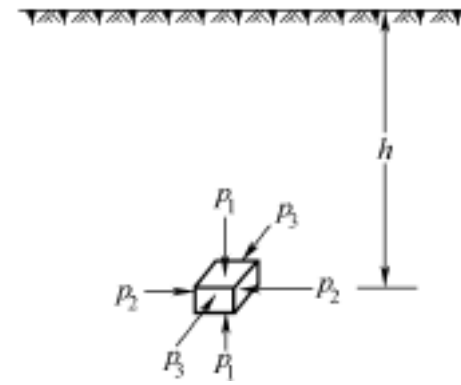


图 1-2-1 隧道开挖前任一处围岩受力状态

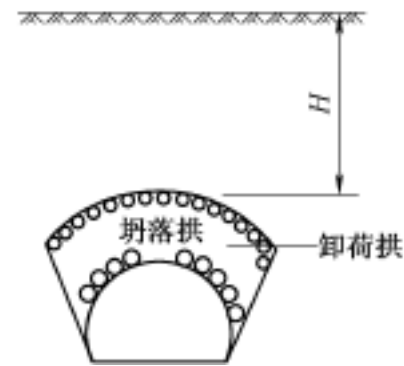


图 1-2-2 围岩成拱作用

四、影响围岩压力的因素

影响围岩压力的因素很多,一类是工程地质因素,主要包括原始应力状态、岩石的力学性质、岩体的结构面等;另一类是工程结构因素,包括施工方法、支护设置时间、支护本身的刚度、坑道形状和尺寸、埋置深度等。其中起决定作用的是围岩的地质条件,它是内因,其对围岩压力的影响已在围岩分级中述及。现将其他因素(都是外因)分析如下:

1.时间因素。不论何种围岩,在坑道开挖后的暴露时间均是越短越好。从另一个方面讲,就是要修筑永久性衬砌并使之能提供所需的支护力的时间不宜过迟。否则,要受到较大的松动围岩压力作用。按照一般混凝土衬砌的修筑方法,从开挖到做完衬砌并使之具有一定的强度,往往需要较长的时间,因此衬砌结构一开始就要受到很大的松动围岩压力,衬砌结构就要做得相对厚些。而采用喷射混凝土技术来支护围岩,可使围岩的暴露时间较短,能及时制止围岩的变形,防止变形过大而产生较大的松动压力,充分利用围岩自身的承载能力。

2.坑道的尺寸与形状因素。围岩压力是随着坑道的尺寸增大而增大的,当坑道有引起应力集中的形状,即有明显的拐角时,围岩压力相对较大。

3.坑道的埋深因素。当坑道的埋置深度在一定范围内时,围岩压力是随着埋深的增大而增大时;当坑道埋深超过此范围时,则围岩压力的大小基本不受埋深变化的影响。

4.支护因素。有支护的坑道围岩压力要比无支护的坑道小;支护及时要比支护晚的围岩压力小;支护与坑道周边密贴的越好则围岩压力越小;支护的刚度较小即柔性支护时,坑道的围岩压力相对较小。

5.爆破因素。采用爆破法开挖对围岩的稳定极为不利,尤其是对地质条件较差的围岩,爆破的扰动很大,能造成围岩压力过大,岩体松动甚至坍方。因此在隧道施工中应严格控制爆破用药量,提倡采用光面爆破、预裂爆破等先进的爆破技术。

6.超挖回填因素。衬砌背后的超挖部分在施工时回填不密实,使围岩得不到很好的支护而继续松动,严重时会造成围岩坍塌,引起衬砌裂损。

第三节 围岩压力的确定

围岩压力的确定方法一般有:现场量测法、理论计算法、统计法。量测法是用仪器实地量测围岩压力的大小,应该最具说服力。但因量测技术手段方面的因素影响,量测的结果往往不能充分反映真实情况。理论计算是用一些成熟的计算理论对围岩体作一些假定来实现对隧道围岩压力的计算,但因围岩的条件千变万化,所用的计算参数难免有与实际不合之处,故现阶段理论计算方法往往还需要配合其他的一些方法。通过对实际工程的围岩压力值的统计分析而形成的经验计算方法,因具有简单、可靠等特点而被广泛应用。目前,在实际工程中往往采用上述几种方法互相验证。

一、深埋隧道围岩压力的确定方法

我国《铁路隧道设计规范》(TB 10003—2001)规定,计算深埋隧道围岩压力时,其垂直及水平匀布压力作用的标准值可按以下各式及表确定。

1.垂直匀布压力

$$q = \quad \times h_a \quad (1-3-1)$$

$$h_a = 0.41 \times 1.79^s \quad (1-3-2)$$

式中 q ——垂直匀布压力, kN m^2 ;

——围岩重度, kN m^3 ;

h_a ——围岩压力计算高度, m ;

s ——围岩级别, 如 Ⅱ级围岩即 $s=2$ 。

计算深埋隧道围岩压力时, 尚应结合《铁路隧道设计规范》(TB 10003—2001)第 4.3.3 款一并考虑。

2. 水平匀布压力 (见表 1-3-1)

表 1-3-1 水平匀布压力

围岩级别	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ
水平匀布压力 e	0	$0.15 q$	$(0.15 \sim 0.30) q$	$(0.30 \sim 0.50) q$	$(0.50 \sim 1.00) q$

注: 式(1-3-1)和式(1-3-2)及表 1-3-1 适用于下列条件:

- (1) 不产生显著偏压力及膨胀性压力的一般围岩;
- (2) 采用钻爆法施工的隧道。

各级围岩的物理力学指标见表 1-3-2。

表 1-3-2 各级围岩的物理力学指标标准值

围岩级别	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ	Ⅵ
重度 (kN m^3)	26~28	25~27	23~25	20~23	17~20	15~17
弹性抗力 $k(\text{MPa} \cdot \text{m})$	1 800~2 800	1 200~1 800	500~1 200	200~500	100~200	< 100
变形模量 $E(\text{GPa})$	> 33	20~33	6~20	1.3~6	1~2	< 1
泊松比 μ	< 0.2	0.2~0.25	0.25~0.3	0.3~0.35	0.35~0.45	0.4~0.5
内摩擦角 ($^\circ$)	> 60	50~60	39~50	27~39	20~27	< 22
黏聚力 $c(\text{MPa})$	> 2.1	1.5~2.1	0.7~1.5	0.2~0.7	0.05~0.2	< 0.1
计算摩擦角 $c_c(^\circ)$	> 78	70~78	60~70	50~60	40~50	30~40

二、浅埋隧道围岩压力的确定方法

对浅埋隧道而言, 由于形不成天然拱而不能用深埋隧道的围岩压力的确定方法, 所以要通过研究浅埋隧道岩体的平衡条件, 找出新的方法。

1. 深埋、浅埋隧道的判定原则

一般情况下是以隧道上方岩层是否能形成天然拱为深埋隧道和浅埋隧道的分界原则, 但具体值较难确定, 目前在铁路隧道设计中是以实际统计资料值来确定的。

$$H_p = (2.0 \sim 2.5) h_a \quad (1-3-3)$$

式中 H_p ——深埋与浅埋隧道分界深度, m ;

h_a ——铁路隧道实际坍方体统计平均高度, m , 见式(1-3-2)。

当埋深 $h > H_p$ 时, 隧道为深埋; 当 $h < H_p$ 时, 隧道为浅埋。一般在松软的围岩中取最高限, 在较坚硬的围岩中取最低限, 其他情况视具体情况而定。当地面水平或接近水平时, 也可按表 1-3-3 所列值作为判别浅埋隧道的依据。