

中 等 专 业 学 校 教 材

隧 道

成都铁路工程学校	李天财	主 编
天津铁路工程学校	张攀柱	
成都铁路工程学校	何以余	主 审

中 国 铁 道 出 版 社

1990年·北京

前 言

本教材是根据铁路中等专业学校铁道工程、桥梁隧道专业教材编审委员会的意见,为扩大教材的使用范围,满足铁道部工程局和铁路局系统的中等专业学校教学需要,在1980年中国铁道出版社出版的,由何以余、李天财等编的《隧道》试用教材的基础上进行修订,教学时数为120学时。

在修订过程中,对原试用教材进行了必要的章节调整,如原试用教材第十二章隧道衬砌计算概念及工点设计调整为第三章隧道整体式衬砌的设计与计算和第十二章隧道位置选择与工点设计等。对部分比较陈旧和不常用的内容删除,增加了新的施工方法,如删除了原试用教材围岩压力的确定中的“偏压隧道围岩压力”和隧道施工测量中的“上下导坑的联测”等测量方法,增写了“新奥法”的施工新技术。

在修订中,力求做到各章节安排合理,有利于教学;力求叙述简练、条理清楚,以利学生接受;并注意选择教材内容时,做到实用性,能兼顾设计、施工和养护三者间的关系。

本书由成都铁路工程学校李天财、天津铁路工程学校张攀柱主编,成都铁路工程学校何以余主审。参加本书修订编写的有:天津铁路工程学校张攀柱(绪论、第十三章)、成都铁路工程学校李天财(第一、六、九章)、哈尔滨铁路工程学校栾景茂(第二、五章)、咸阳干部学院赵鸿江(第三、十三章)、成都铁路工程学校何以余(第四、八、十、十四章)、成都铁路工程学校林风增(第七章)、合肥铁路工程学校王继群(第十一章)。

在修订过程中,得到有关学校和同仁的支持和帮助,对书稿提出很多宝贵的修改意见,在此表示衷心的感谢。

编 者

1989年4月

内 容 简 介

本书是根据铁道部铁路中等专业铁道工程、桥隧专业教材编审委员会关于铁路局、工程局两个系统所用《隧道》教材的编写意见，在原《隧道》试用教材的基础上修订的。全书共分十四章，主要内容有：围岩分类及围岩压力；隧道整体式衬砌的设计与计算；隧道的施工方法、钻眼爆破、装碴运输；隧道的施工测量、位置选择及工点设计；运营隧道的病害防治等；同时还增加了新的施工方法——新奥法。

本书理论联系实际，既有先进性，又有实用性，同时系统性也较强，能够兼顾设计、施工、养护等几方面的关系。

本书可作为铁路中等专业学校桥隧专业和铁道工程专业用教材，亦可供从事隧道工作的工程技术人员参考。

中等专业学校教材

隧 道

成都铁路工程学校 李天财 主编
天津铁路工程学校 张攀柱

中国铁道出版社出版、发行
(北京市东单三条14号)

责任编辑 刘桂华 封面设计 翟·达

各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本：787×1092毫米 1/16 印张：18.75 字数：469千

1990年7月 第1版 第1次印刷

印数：1—7000册

ISBN7-113-00742-2/TU·168 定价：3.35元

目 录

绪 论

第一章 围岩分类及围岩压力	7
第一节 隧道围岩分类	7
第二节 围岩压力	13
第三节 围岩压力的确定	17
第四节 围岩压力的实测方法	27
第二章 隧道建筑物	35
第一节 铁路隧道的净空	35
第二节 洞身衬砌结构类型	39
第三节 明 洞	44
第四节 洞 门	48
第五节 附属建筑物	57
第三章 隧道整体式衬砌的设计与计算	65
第一节 衬砌断面设计	65
第二节 衬砌结构受力变形特点	69
第三节 隧道衬砌计算方法简介	71
第四节 衬砌截面的强度检算	78
第四章 隧道施工方法	80
第一节 断面法	80
第二节 分部开挖法	83
第三节 隧道掘进机与盾构	90
第四节 洞口与明洞的施工	92
第五章 辅助坑道	96
第一节 横洞与平行导坑	96
第二节 斜 井	99
第三节 简易竖井	104
第四节 隧道竣工后辅助坑道的处理	105
第六章 钻眼爆破	107
第一节 凿岩机具	107
第二节 爆破一般知识	111
第三节 钻爆设计	123
第四节 光面爆破与预裂爆破	136
第七章 装碴运输	142
第一节 装碴运输机具	143

第二节	装 碴	152
第三节	运 输	159
第四节	卸 碴	161
第八章	支 护	164
第一节	构件支撑	164
第二节	锚喷支护	166
第三节	模筑混凝土衬砌	182
第九章	辅助作业	191
第一节	压缩空气供应	191
第二节	施工供水和排水	195
第三节	施工供电与照明	198
第四节	施工通风及防尘	199
第十章	隧道施工测量	213
第一节	导坑延伸时的简易测量	213
第二节	用偏角法跨越曲线控制点测设中线	218
第三节	侧移中线	221
第四节	隧道开挖断面控制	226
第五节	洞口仰坡与洞门放样	227
第十一章	不良地质隧道施工	235
第一节	松散地层	235
第二节	坍 方	239
第三节	膨胀性地层	241
第四节	涌 水	241
第五节	溶 洞	242
第六节	瓦 斯	244
第十二章	隧道位置选择与工点设计	247
第一节	地形条件与隧道位置选择	247
第二节	地质条件与隧道位置选择	251
第三节	两个单线隧道与一个双线隧道的方案比较	253
第四节	隧道工点设计	254
第十三章	运营隧道病害防治	257
第一节	隧道养护工作概述	257
第二节	运营隧道有害气体防治	258
第三节	衬砌裂缝的整治	263
第四节	隧道漏水与水害整治	266
第十四章	新奥法	269
第一节	新奥法的理论基础	269
第二节	设 计	278
第三节	量 测	286
第四节	施 工	289

绪 论

修建隧道、利用地下空间，从原始时代起就已成为人类谋求生存的一种方式。随着人类文明及近代工程技术的发展，隧道以其位于地下这一特点，已成为土建工程中的一门重要学科。学习、研究与发展隧道的建筑技术，对从事土建工程的技术人员来说，是十分重要的。因此，在各种与土建有关的专业中，隧道常常是必修的专业课程之一。

一、隧道的定义和用途概述

关于隧道，目前还没有一个严格而统一的定义。一般说来，顾名思义，所谓隧道，人们通常是指修建在地层中的地下通道来说的。但长期以来，除天然洞穴外，人类为了不同的需求，已在地下修建了许多各种用途的工程建筑物（如位于地下的工厂、仓库、街道、商店、停车场、地下陵墓和庙宇等）。这些地下建筑物虽然其用途、结构型式和构造有所不同，但都是作为位于地下的孔洞而存在的。因此，单纯理解为“地下通道”的隧道概念，也可扩大到地下空间利用的各个方面。即也可以把各种用途的地下通道和洞室都称之为隧道。当然，净空面积太小的地下管道除外。

作为地下通道，隧道的主要用途有二：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，各种用途的输水隧洞亦常常成为它们的重要组成部分。上述用途的地下通道，在诸如采矿、国防及市政等工程建设中，亦均得到了广泛应用；特别是在采矿工程中，为了采掘深埋的地下矿藏而挖掘的各种矿山巷道，其数量最为众多，其丰富的建设经验，对于其他地下工程来说，也是非常宝贵的。

二、隧道在铁路上的应用和分类

在铁路上，隧道常用来穿越山岭和水流障碍，以及作为解决城市中繁忙的交通运输问题的一种手段。按照其穿越障碍或作用的不同，位于铁路上的隧道，可分为山岭隧道、水底隧道及地下铁道三种。

穿越山岭的隧道称为山岭隧道。在山区进行铁路建设，修建山岭隧道有明显的优点，它可以使铁路平缓顺直，从而能更好地满足现代化高速行车的要求，并取得理想的经济效果。例如我国新建成的衡广段第二线工程中，在坪石与乐昌之间，由于修建了长度为14.295km的大瑶山隧道，可使铁路长度较既有线路缩短约15km，这一数字几乎为坪石至乐昌间既有铁路长度的三分之一。大瑶山隧道的长度目前在我国的铁路隧道中居于首位；世界上已建成的最长山岭隧道是大清水隧道，长度为22.28km，它位于日本的上越新干线上，也是一座双线隧道；上世纪末至本世纪初先后建成的两座平行的辛普伦隧道（均为单线）、长度均约19.8km，是用来穿越阿尔卑斯山联通瑞士与意大利的，其长度在世界铁路山岭隧道中目前仍处于第二位。

在铁路建设中遇到江河、海峡、海湾……等水流障碍时，虽然一般多采用桥梁方案，但在对跨越地点的地形、地质、水文、航运、军事等因素进行综合考虑之后，也有可能选取水底隧道作为穿越方案较为适宜。世界上已建成的水底隧道（包括铁路和公路），其数量已超过百座。日本青函海底隧道（穿越津轻海峡），长度达53.85km，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联结在一起。

地下铁道的应用也很广泛，它是解决大城市中繁忙的地面交通运输问题的重要手段之一。当前，包括我国的北京、香港、天津等城市在内，世界上已有八十座以上的城市修建有地下铁道，并投入了使用。

本课程主要讲述有关铁路山岭隧道（简称“铁路隧道”）的基本知识。

为了设计、施工及养护管理上的方便，我国铁道部新颁布施行的《铁路隧道设计规范》，按隧道长度，把铁路隧道分为四种，即：

短隧道——全长500m及以下；

中隧道——全长500m以上至3000m；

长隧道——全长3000m以上至10000m；

特长隧道——全长10000m以上。

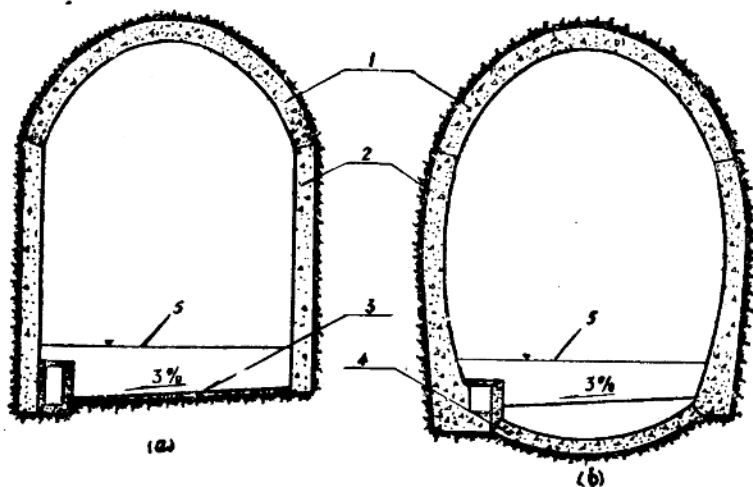
关于铁路隧道的分类，为了反映其不同方面的特点，当然还可以有其他的分类方法。例如按照隧道内线路的数目，有单线隧道、双线隧道……等之分；按牵引种类则可分为电化与非电化铁路隧道。诸如此类，不言自明，无须一一赘述。

三、铁路隧道建筑物的组成部分

隧道建筑物可分为主体建筑物和附属建筑物两大部分。

主体建筑物为洞身衬砌（简称“衬砌”）和洞门。衬砌是一种永久性的支护结构，用它来加固隧道洞身，防止洞身周围地层发生风化剥落或坍塌；洞门则用来加固隧道的出入口。两者共同组成来保证列车在隧道中的运行。

铁路隧道的衬砌、常采用由拱圈和边墙组成的拱形结构（图绪—1(a)），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（图绪—1(b)）。

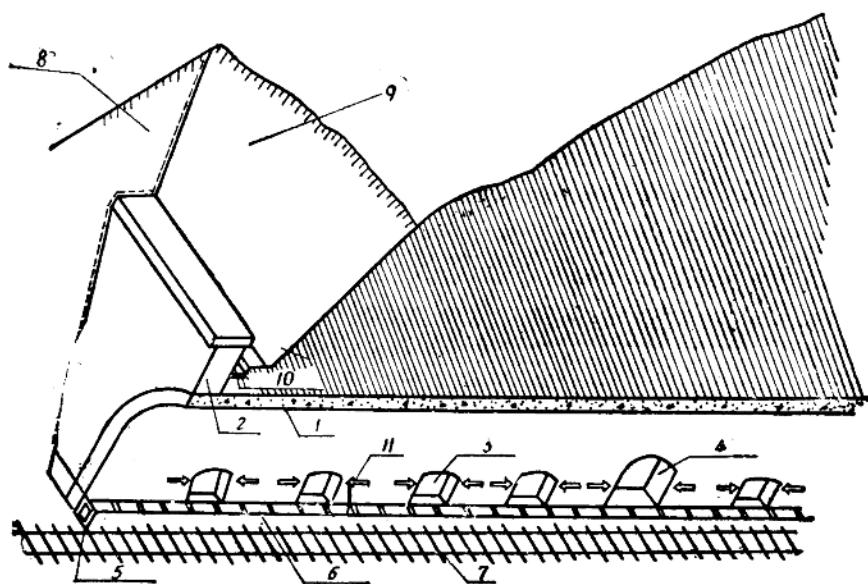


图绪—1

1——拱圈；2——边墙；3——铺底；4——仰拱；5——内轨顶面。

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）。

图绪—2 为一隧道概貌。



图绪—2

1——衬砌；2——洞门；3——小避车洞；4——大避车洞；5——洞内排水沟；6——水沟盖板；7——洞内线路；8——洞口路堑边坡；9——洞口仰坡；10——洞门墙顶排水沟；11——避车洞标志。

四、隧道施工方法简介

隧道施工方法，一般可分为明挖法及暗挖法两大类。

明挖法适用于浅埋隧道的施工。这种方法的特点是从地面将隧道上方的地层挖开，形成壕堑，然后在壕堑中修建衬砌及在衬砌顶部进行土石回填。用这种方法修建的铁路隧道，我国现场习惯上把它叫作“明洞”。修建浅埋的地下铁道时亦常采用明挖法。

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。

矿山法是用一般的地下开挖方法来进行隧道施工的。当隧道穿经岩石地层时，通常均用钻眼爆破法进行开挖；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几部分挖成，亦可一次挖成。由于这种施工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，象钻孔一样，一次便将隧道整个断面钻掘成型。掘进机除具有掘进功能之外，还兼有装碴及自动推进的功能。我国有一些输水隧洞，曾采用过隧道掘进机施工，并取得良好效果。

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,故盾构法用得很多。“盾构”是一种可以掩护隧道施工人员在地下安全作业的防护结构。按其功能不同,盾构又有普通盾构、机械化盾构、压气盾构及加压泥水盾构等多种。

除了上述几类施工方法之外,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、我国铁路隧道修建概况

我国的铁路建设始于1876年。也即在十九世纪中叶帝国主义势力逐步侵入我国之后才开始的。从那时起直至1949年新中国成立前的70多年间,虽然也修建了二万一千多公里铁路,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,加以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,尽量避免采用隧道,故修建的隧道很少。据有关资料介绍,几十年间建成通车的标准轨距铁路隧道仅238座,总延长约89km。其中只有三座隧道长度超过3km。

我国第一座铁路隧道,是1887~1889年间建于台湾基隆至台北间的一条窄轨铁路上(轨距1067mm)的狮球岭隧道,长度约261m。

位于京张线上的八达岭隧道,是我国第一批由我国杰出工程师詹天佑先生主持修建的隧道之一。该隧道长约1091m,1907年动工,经十八个月就全部竣工。为了开辟工作面,曾在隧道中部挖凿竖井二处。

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力量。这一伟大成就与在当时条件下的艰苦奋斗精神,是值得我国今日从事铁路建设的工作人员引以自豪和学习的。

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。山区铁路的比重也大大增加。在短短的三十多年间,我国又新建了三万多公里铁路。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线上,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26km的线路上,有隧道13座,总延长为21km,占这段线路长度的80%;襄渝线上陕西境内长267km的铁路上,隧道总延长达172km,为该段线路长度的64.5%。在这些铁路上,隧道成群,桥隧相连,与巍峨秀丽的山川自然景色相映,极为壮观。

迄今为止,我国新建成的铁路隧道,其总座数已超过四千座,总延长里程亦已达两千多公里。在已建成的隧道中,有八座隧道的长度已超过六公里。它们顺次为:大瑶山隧道、军都山隧道、驸马岭隧道、沙木拉打隧道、平型关隧道、关村坝隧道、南岭隧道;其中大瑶山、军都山、南岭三座隧道均为双线隧道。

在修建大量的隧道工程实践中,曾碰到过许多极为复杂的地质情况及水文地质条件。例如,有的隧道地层松软破碎,极易坍塌;有的隧道地下水发育,施工时地下水(或夹泥砂)喷涌而出,每昼夜涌水量多达十多万立方米,造成淹没坑道的事故;有的隧道穿过煤层,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(注:辛普伦隧道施工时曾遇到约54℃的地下高温);有的隧道虽然位于坚硬的岩层中,但却有“岩爆”现象产生,给施工造成困难;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32m的钢筋混凝土梁桥。通过对这些隧道工程地质问题的经历与处理，使我们获得并积累了非常宝贵的经验。

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。三十多年来，我们虽然在隧道设计理论和施工技术上都取得了很大进步，特别是目前的施工机械化程度已远远超过50年代。但直至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了喷锚支护、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进行的，而且极大多数的隧道都是分部小断面开挖、轻型凿岩机钻眼、小型装岩机装碴及采用由电瓶车牵引碴车的有轨运输，在需要临时支护的地层中，则常使用木料支撑，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。

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国外不少国家越来越广泛采用的“新奥法”开始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”的技术措施主要有三项，即锚喷支护、光面爆破以及应力与变形量测。施工时隧道断面一般均分上下两部分或全断面一次开挖成型。由于以锚喷支护代替传统的使坑道断面堵塞的木料支撑，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。

大瑶山隧道就是在“新奥法”原则指导下进行设计与施工的。该隧道采用复合式衬砌结构，亦即开挖后先用锚喷支护进行第一次支护，然后通过量测并待围岩变形基本稳定后，再用模注混凝土进行第二次衬砌，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，大容量的侧卸式装载机及自卸汽车进行装碴运输。此外，在锚喷支护和模注混凝土作业中，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、装碴运输及支护三项基本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，在洞内出现了象露天作业一样的各种大型机械进退运用自如、运输车辆往来穿梭奔驰的现象，这在传统的施工方法中是难以想象的。

大秦铁路也有不少隧道采用了“新奥法”的原理进行施工。其中花果山隧道（长3730m）穿过一条宽约160m的断层破碎带，断层顶部地面上有一水库，而隧道顶部距水库底最近处仅有32m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。这样就保住了水库，并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。

当然，“新奥法”的应用目前在我国还处于开始的阶段。相信在不久的将来，通过我们的不断实践与完善，很快就会在我国建立起一个用“新奥法”进行隧道设计与施工的一整套体系，把我国的隧道建设事业推向前进。

本课程的内容仍以传统的隧道设计理论与施工方法为主，但对“新奥法”的原理也将作

必要的介绍。

思 考 题

1. 什么叫隧道？试从隧道的广泛用途，论述学习、研究与发展隧道建筑技术的重要意义。
2. 在铁路上，为什么需要修建隧道？
3. 铁路隧道建筑物主要由哪些部分组成？常用哪些施工方法？
4. 修建隧道常遇见哪些工程地质问题？

第一章 围岩分类及围岩压力

铁路隧道是地下工程之一，其开挖方法、支撑形式、衬砌结构类型、隧道位置，以及工程造价、施工管理等，都与所处的地层条件发生着密切的关系，所以修建地下工程对围岩特征的研究是重要内容之一。

隧道所穿过的地层是千变万化的，可能遇到各种各样的地质现象。因此，为了正确地提供进行隧道设计及施工的基础资料，有必要从工程角度对隧道围岩加以研究并给以分类。

隧道围岩是指隧道（或坑道）周围一定范围内，对隧道（或坑道）稳定性能产生影响的岩（土）体。隧道周围的地层可以是软硬不一的岩石，也可以是松散的土，我们把土视为一种特殊的（风化破碎严重的）岩石，所以隧道周围的地层，不管是土体还是岩体，统称为围岩。

隧道围岩压力是指隧道开挖后，围岩作用在隧道支护上的压力，是隧道支撑或衬砌结构的主要荷载之一。其性质、大小、方向以及发生和发展的规律，对正确地进行隧道设计与施工有很重要的影响。

第一节 隧道围岩分类

隧道围岩分类是正确地进行隧道设计与施工的基础。一个较好的、符合地下工程实际情况的围岩分类，对改善地下结构设计，发展新的隧道施工工艺，降低工程造价，多快好省地修建隧道，有着十分重要的意义。

近年来，由于各种类型地下工程的大量修建，隧道围岩分类的研究也得到了很大的发展。各种各样的围岩分类法，都是为一定的工程目的服务的。如提供选择施工方法的根据和开挖的难易程度，确定结构上的荷载或给出坑道临时支撑与衬砌结构的类型和参考尺寸等等。

人们对围岩及其自然规律的认识是不断深化的。因此，对围岩分类也有一个发展过程。在早期，从国外情况来看，例如日本，最初主要借用适合于土石方工程的“国铁土石分类”来进行隧道的设计与施工，主要是根据开挖岩（土）体的难易程度（强度）来划分的。苏联在很长的时期内采用以岩石的坚固性来分类，采用一个综合性的指标 f 值，称为岩石坚固性系数。理论上坚固性是岩体抵抗任何外力作用及其造成破坏的能力，不同于强度和硬度，而实际上只反映岩石抗压强度的性能，很少考虑岩体的构造特征。在英、美等国，主要沿用太沙基（K. Terzaghi）提出的分类法，其中考虑到一些岩体的构造，岩性等影响，比较好地反映坑道围岩的稳定状况。目前美国也有用岩石质量指标（RQD）或坑道围岩在不支护条件下，暂时稳定的时间作为分类依据的。

在我国，五十年代初期，铁路隧道围岩分类，基本上是沿用解放前的以岩石极限抗压强度与岩石天然容重为基础的，这种分类，仅适用土石方工程的土石分类法，没有适合隧道围岩的专门分类，只是把隧道围岩分为坚石、次坚石、松石及土质四类，设计了与之相适应的

四种衬砌断面。这种分类等级少,适用范围较大,但过于粗略。

以后,我们是借用苏联的岩石坚固系数进行分类,即通常所谓的普氏系数(f 值)。按照这个分类法,把隧道围岩分为10级,并编制出与之相应的隧道衬砌标准设计。但在长期的大量地下工程实践中发现,这种单纯以岩石坚固性(主要是强度)指标为基础的分类方法,不能全面反映坑道围岩的固有状态。以后,逐渐认识到:坑道的破坏,主要取决于围岩的稳定性,而影响围岩稳定性的因素是多方面的,但是坑道围岩结构特征和完整状态,是围岩稳定性的基本因素,而坑道围岩体的强度,对坑道的稳定性有着重要的影响,地下水、风化程度也是坑道围岩丧失稳定性的重要原因。

1975年,从围岩的稳定性出发,编制了我国“铁路隧道围岩分类”,这个分类由稳定到不稳定(从Ⅵ至Ⅰ),共分六类,代替了多年沿用的从岩石坚固性系数来分类的方法。

从国内外的发展中可以看出,以坑道围岩的稳定性为基础进行分类是总的趋势。但分类指标方面,大多数正在从定性描述、经验判断的阶段向定量描述阶段发展。

一、围岩分类的基础

坑道围岩的稳定性,是指坑道开挖后围岩体自身在不支护条件下的稳定程度。

对坑道围岩稳定性有影响的因素:一是工程地质条件,如围岩结构特征和完整状态(破碎程度),岩体结构面(节理、裂隙、层理面、各种接触面、断裂面等)的性质(成因、产状、充填状况、组合关系等),岩石的物理力学性质,地下水情况等;二是工程结构条件,如坑道形状与尺寸,埋深,施工方法,支护类型等。

这些因素,对坑道稳定性影响是多方面的,程度也是不等的,在围岩分类中的重要性和作用也是不同的,企图在一种分类中全面反映所有影响围岩稳定性的因素是困难的,只能考虑一些带决定性的基本因素,在“铁路隧道围岩分类”中,主要考虑了坑道围岩结构特征和完整状态,围岩体强度,地下水对围岩稳定性的影响程度等三个因素,作为分类的基础。

(一)坑道围岩结构特征和完整状态

坑道围岩结构特征和完整状态,是确定围岩稳定性的基本因素,是表征围岩稳定性的一个问题的两个方面。结构特征是体现围岩体所经历的地质构造变动和外力作用下的特点,是评价围岩稳定性的定性指标之一;完整状态是体现围岩体被各种结构面所切割的块度大小及其特点,大体上是评价围岩稳定性的定量指标之一。其成因主要取决于地质构造变动的次数和强弱,一般说来,地质构造变动次数越多,越强烈,规模越大,围岩节理、裂隙、断裂、断层等就越发育,围岩就越破碎,其稳定性也就越差。因为地质构造运动的强弱,一般反映在围岩体中形成各种裂隙的规律和密集程度,所以对岩体来说,可以用节理(裂隙)的特征(如节理间距、张开程度、充填情况及被切割的块体大小、组合形态等)作为分类指标,将石质围岩结构分为整体、砌体、镶嵌、压碎、松散、松软六种类型,其特征见表1—1。

对土质围岩的稳定性分级是按土体的密实程度、力学强度、颗粒组成、稠度和水理性等条件,采用过去习惯用的硬土、普通土及松(软)土三类,其特征见表1—2。

在反映围岩受地质构造的影响程度上分为轻微、较重、严重、很严重四级,其作用特征概括如表1—3。对等级的划分还可辅以钻探、物探等地质勘探手段做进一步验证。

在坑道开挖后,可以直接观察结构面的情况,如结构面物质的组成,结构面的延展性或连续性,结构面的密集程度,结构面的平整和光滑程度,结构面的产状及不稳定组合形态等。并通过量测围岩节理裂隙的发育程度,按照定量指标(表1—4)来划分围岩的等级。

岩体结构类型及其特征

表 1—1

类 型	状 态	结 构 面 特 征				工程地质评价
		裂隙间距	性 质	张开程度	充填状况	
整体结构	巨块状	多数 $>1.0\text{m}$	多为原生型或构造型	多密闭, 延展不长		岩石在整体上强度较大, 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 $>0.4\text{m}$	以构造型为主	多密闭, 部分微张	少有充填	同上, 但要注意不利于岩体稳定的平缓节理
镶嵌结构	块(石)碎(石)状	多数 $<0.4\text{m}$	以构造型或风化型为主	大部分微张, 部分张开	部分为粘性土充填	岩体在整体上强度仍较大, 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 $<0.2\text{m}$	以风化型或构造型为主	微张或张开	部分为粘性土充填	岩体完整性破坏较大, 强度受断层及软弱面控制, 并易受地下水的影响, 岩体稳定性较差
松散结构	角砾碎石状					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, 但粘性土成分较多, 易于蠕动

土体分类及其特征

表 1—2

类 型	土 体 状 态		工程地质评价
	粘 性 土	非 粘 性 土	
III 硬土类	略具压密或成岩作用的粘性土, 老黄土	略具压密或成岩作用的非粘性土, 泥质胶结的碎、卵石土, 大块石或大漂石土	结构密实, 具有一定的结构强度, 小跨度时土体稳定
II 普通土类	一般第四系成因的可塑的粘性土, 新黄土	一般第四系成因的稍湿至潮湿的非粘性土, 包括一般碎、卵、砾石土	结构中等密实, 结构强度较小, 土体不够稳定
I 松软土类	软塑状粘性土	潮湿的粉细砂	易蠕动, 液化, 土体稳定性最差

围岩受地质构造影响程度的等级划分

表 1—3

等 级	地 质 构 造 作 用 特 征
轻 微	围岩地质构造变动小, 无断裂(层); 层状岩一般呈单斜构造, 节理不发育
较 重	围岩地质构造变动较大, 位于断裂(层)或曲折轴的邻近地段, 可有小断层, 节理较发育
严 重	围岩地质构造变动强烈, 位于褶皱轴部或断裂影响带内, 软岩多见扭曲及拖拉现象, 节理发育
很 严重	位于断裂破碎带内, 节理很发育, 岩体破碎呈碎石、角砾状

在判断某段坑道节理裂隙间距时, 应取较小间距平均值, 即取节理密集部分的平均间距, 以较有代表性的为准, 取间距时拱部与边墙范围均应同时考虑。

对于层状岩层, 围岩的稳定性与岩层厚度有关, 岩层越厚越稳定, 反之为不稳定。层状岩层在围岩分类中划分为三级: 厚层, 大于 0.5m ; 中层, $0.1\sim 0.5\text{m}$; 薄层, 小于 0.1m 。

围岩节理(裂隙)发育程度的划分

表 1—4

等 级	基 本 特 征
不 发 育	节理(裂隙) 1~2 组、规则, 为原生型或构造型、多数间距在 1 m 以上, 多为密闭、岩体被切割呈巨块状
较 发 育	节理(裂隙) 2~3 组、呈 X 形、较规则, 以构造型为主, 多数间距大于 0.4 m, 多为密闭部分微张, 少有充填物、岩体被切割呈大块状
发 育	节理(裂隙) 3 组以上, 不规则, 呈 X 形或米字形, 以构造型或风化型为主、多数间距小于 0.4 m, 大部分微张、部分张开, 部分为粘性土充填, 岩体被切割呈块(石)碎(石)状
很 发 育	节理(裂隙) 3 组以上, 杂乱、以风化型和构造型为主、多数间距小于 0.2 m, 微张或张开, 部分为粘性土充填、岩体被切割呈碎石状

(二) 围岩体的强度

围岩体的强度是指围岩在受力状态下, 对所产生的基本应力或力矩(拉、压、弯、剪)的抵抗能力, 它对抗道的稳定性有着重要的影响, 实质上它是围岩结构特征和完整状态的力学属性的一个定量反映。也是进行围岩分类的又一个基础条件。当围岩结构特征和破碎程度相仿时, 主要由岩体强度决定坑道围岩的稳定性。

对于土质围岩, 基本上由土体的抗剪强度所决定, 就是根据其胶结程度即内聚力与内摩擦角的大小来划分等级。其分类见表 1—2。

对于石质围岩, 它的强度从两种情况来考虑: 其一是无裂隙或少裂隙的岩体, 它的力学属性可视为均质的, 各向同性的连续介质; 岩体的强度, 一般可用岩石试件的抗压强度指标来表示, 围岩石质越坚硬, 稳定性就越高。其二是多裂隙的或有软弱结构面的岩体; 可视为不连续的、非弹性的、各向异性的介质, 它的强度主要取决于裂隙的产状、组合, 尤其是软弱面(即结构面)的强度。

在隧道围岩分类中, 根据对抗道支护的要求, 按岩石饱和单轴抗压极限强度(R_b)以及耐风化能力等, 把岩石大体上分为硬岩及软岩两大类, 见表 1—5。把 $R_b \geq 30\text{MPa}$ 作为软、硬岩的分界, 是根据岩石能否做为建筑石料而划分的。根据铁路施工实践, 当岩石的 $R_b \geq 30\text{MPa}$, 并有相当强的耐风化能力时, 一般都可用来做建筑石料。当 $R_b > 60\text{MPa}$ 时, 坑道顶部产生的拉应力不致使围岩丧失稳定, 故可以不采取任何支护措施。当 $R_b < 5\text{MPa}$ 时的岩(土)体, 则是属半岩质的, 或略具结构强度的土体。

岩石等级划分

表 1—5

岩石等级	饱和抗压极限强度 R_b (MPa)	耐风化能力		代 表 性 岩 石
		程度	现 象	
硬质岩石	>60.0	强	暴露后一、二年尚不易风化	1. 花岗岩、闪长岩、玄武岩等岩浆岩类 2. 硅质、铁质胶结的砾岩及砂岩、石灰岩泥质灰岩、白云岩等沉积岩类 3. 片麻岩、石英岩、大理岩、板岩、片岩等变质岩类
	30.0 以上 ~ 60.0			
软质岩石	5.0 以上 ~ 30.0	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. 泥砾岩、泥质砂岩、泥质页岩、炭质页岩、泥灰岩、泥岩、粘土岩、劣煤等沉积岩类 3. 云母片岩或千枚岩等变质岩类
	≤ 5.0			

应当指出,在多裂隙的围岩中,岩石试件强度并不能反映围岩体的强度,而是各种软弱结构面决定着整个岩体的力学强度和变形性质。这是当前岩石力学中研究的重要课题,由于目前尚无完善的方法来确定强度指标,很难作出定量判断,只能进行经验的定性处理。

从坑道稳定性的角度来研究软弱面,主要注意三个方面:软弱面的产状及其组合;软弱面的贯通性或连续性;软弱面的性质、粗糙度、闭合程度、充填状况等。

根据我国西南地区路堑边坡顺层滑动的统计资料表明:当软弱结构面的走向与线路中线交角 $\alpha > 45^\circ$,视倾角 $\beta < 10^\circ$ 时,一般不会产生顺层滑动。隧道围岩较路堑边坡处于有利的空间组合,一般认为 $\alpha > 30^\circ$, $\beta < 15^\circ$ (岩层面与水平面在隧道纵剖面上所夹成的角度,又称假倾角)时,可大致作为判断被软弱面切割的岩体是否会发生滑动的条件之一。

贯通的或连续的软弱面和软弱面的充填状况,也是造成岩体滑动或坍落的重要原因。前者在层状岩体中尤为显著。一般说来,不贯通的软弱面较贯通的有利;钙质充填的较泥质充填的有利;层面粗糙度大的较光滑的有利;原生的较经过构造变动的有利。

岩体软弱面是隧道施工发生坍方、偏压或衬砌变形、开裂的主要原因。软弱面的组合对隧道稳定性的影响,有时会造成很大偏压或异常地压,要作为特殊情况专门处理。

(三) 地下水的影响及其处理

大量隧道工程实践证明,水是使隧道丧失稳定的重要原因,地下水对围岩稳定性的影响主要有三个方面:

1. 软化围岩的作用——与岩质有关,许多软质岩石经水浸润后,其强度都有不同程度的降低。对某些岩层(如泥质岩层)水能使岩质软化;水对有些岩层(如岩盐)能起水溶作用;有些岩层(如无水石膏以及蒙脱石为主要成份的粘土等)遇水膨胀,造成极大的膨胀压力;对于土体,水则能促其液化或流动;但水对坚硬密致的岩石则影响较小。

2. 软化结构面的作用——泥质充填和具有软弱夹层的软弱结构面,遇水后液化变软或使填充物被冲走,降低了结构面的抗剪强度,使岩体易于滑动。

3. 承压水的水压作用——围岩受到水压作用后,更易失去稳定。

因此,在围岩分类中对软岩及破碎的岩层、有软弱结构面的岩层以及泥质岩层等,更应考虑地下水的影响。处理的方法是根据地下水对围岩的影响程度,分别采用不降级、降一级或降二级来考虑。

在Ⅵ类及Ⅴ类硬质岩石中,一般地下水对围岩稳定性影响很小,可不考虑降级。

对Ⅳ类或Ⅴ类的软质岩石,应根据地下水类型、水量大小和危害程度,调整围岩类别,当地下水影响围岩稳定产生局部坍塌或软化软弱面时,可酌情降低一级。

Ⅲ类、Ⅱ类围岩已成碎石状松散结构,裂隙中并有粘性土充填物,地下水对围岩稳定性影响较大,可根据地下水类型、水量大小、渗流条件、动水和静水压力等情况,判断其对围岩的危害程度,适当降低1~2级。

在Ⅰ类围岩中,分类已考虑了一般含水情况的影响,但在特殊含水地层(如处于饱和水状态或具有较大承压水流时)需另作处理。

除了上述围岩结构特征和完整状态、围岩体强度、地下水的影响三个基础条件外,风化作用对围岩稳定性也应当考虑。风化作用对围岩分类的影响,可从两方面考虑:

结构完整状态方面——当风化作用使岩体结构松散、破碎、软硬不一时,应结合因风化作用所造成的各种状况,综合考虑确定围岩的结构完整状态;

岩石等级方面——当风化作用使岩石成分改变、强度降低时,按风化后之强度确定岩石

等级。

二、我国铁路隧道围岩分类

我国的铁路隧道围岩分类是总结卅年来在修建铁路隧道经验的基础上，并参考国内外有关围岩分类的成果，从围岩稳定性出发，以围岩结构特征和完整状态为主要分类指标，即表 1—1 及表 1—2 所分的类型。同时考虑围岩主要工程地质特征（强度指标、构造影响程度、节理发育情况、软弱面存在与否及其产状组合、层状岩层的厚度及层间结合特征等）。按照开挖后坑道稳定状态，将围岩分为六类，从稳定到不稳定，见表 1—6。

铁路隧道围岩分类 表 1—6

类别	围岩主要工程地质条件		围岩开挖后的稳定状态 (单线)
	主要工程地质特征	结构特征和完整状态	
Ⅵ	硬质岩石(饱和抗压极限强度 $R_b>60\text{MPa}$)；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
Ⅴ	硬质岩石 $R_b>30\text{MPa}$ ；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，可能会出现局部小坍塌，侧壁稳定，层间结合差的平缓岩层，顶板易塌落
	软质岩石 $R_b\approx 30\text{MPa}$ ；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	
Ⅳ	硬质岩石 $R_b>30\text{MPa}$ ；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，层状岩层为薄层或中层，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
	软质岩石 $R_b=5$ 以上 $\sim 30\text{MPa}$ ；受地质构造影响较重，节理较发育，层状岩层为薄层、中层或厚层，层间结合一般	呈大块状砌体结构	
Ⅲ	硬质岩石 $R_b>30\text{MPa}$ ；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
	软质岩石 $R_b=5$ 以上 $\sim 30\text{MPa}$ ；受地质构造影响严重，节理发育	呈块(石)碎(石)状镶嵌结构	
	土：1.略具压密或成岩作用的粘性土及砂类土 2.黄土(Q_1, Q_2) 3.一般钙质、铁质胶结的碎、卵石土、大块石土	1、2呈大块状压密结构， 3呈巨块状整体结构	
Ⅱ	石质围岩位于挤压强烈的断裂带内，裂隙杂乱，呈石夹土或土夹石状	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)或坍塌至地表
	一般第四系的半干硬~硬塑的粘性土及稍湿至潮湿的一般碎、卵石土、圆砾、角砾土及黄土(Q_3, Q_4)	非粘性土呈松散结构，粘性土及黄土呈松散结构	
Ⅰ	石质围岩位于挤压极强烈的断裂带内，呈角砾、砂、泥松软体	呈松软结构	围岩极易坍塌变形，有水时土砂常与水一齐涌出，浅埋时易坍塌至地表
	软塑状粘性土及潮湿的粉细砂等	粘性土呈易蠕动的松软结构 砂性土呈潮湿松散结构	

表 1—6 侧重于单线隧道，其中“类别”和“围岩主要工程地质条件”两栏也适用于双线和多线隧道，因双线及多线隧道遇到的地质条件与表列地质分类条件没有不同之处，只是其跨度比单线增大，因此稳定性要相应降低，这可以采取相应的支护、衬砌措施来处理。依同样理由，分类亦适用于偏压隧道，其支护、衬砌类型应另行考虑。但对于膨胀性岩层、永