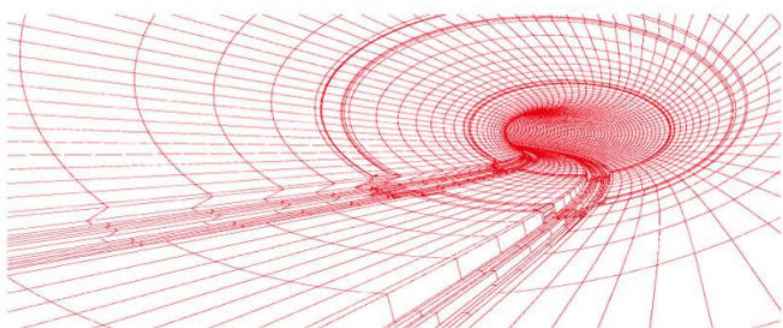


TUNNEL

隧道施工技术

主 编 颜炳玲 朱小辉

副主编 张红春 包塔娜



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

隧道施工技术

主 编 颜炳玲 朱小辉
副主编 张红春 包塔娜



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书为桥隧系列教材之一,全面地详细地讲述了隧道施工各个方面的知识。全书按照项目任务教学方法共分7个项目,主要内容包括:隧道基本常识、发展史及发展方向;隧道设计;超前地质预报与监控量测技术;隧道施工方法;隧道掘进方式与出渣技术;衬砌施工与注浆加固技术;隧道附属设施工程。

本书可作为高职高专桥隧专业、土木工程专业、建筑类专业学生学习用书,也可作为桥隧建筑企业职工培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

隧道施工技术 / 颜炳玲,朱小辉主编. —上海:
上海交通大学出版社,2018
ISBN 978-7-313-19479-4

I. ①隧… II. ①颜… ②朱… III. ①隧道施工—施
工技术—高等职业教育—教材 IV. ①U455

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 108692 号

隧道施工技术

主 编: 颜炳玲 朱小辉

出版发行: 上海交通大学出版社

邮政编码: 200030

出 版 人: 谈 毅

印 制: 上海天地海设计印刷有限公司

开 本: 787mm×1092mm 1/16

字 数: 418千字

版 次: 2018年7月第1版

书 号: ISBN 978-7-313-19479-4/U

定 价: 43.00元

地 址: 上海市番禺路951号

电 话: 021-64071208

经 销: 全国新华书店

印 张: 15.75

印 次: 2018年7月第1次印刷

版权所有 侵权必究

告读者: 如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话: 021-64366274

前 言

本书是高职高专工学结合课程改革规划教材,是在各高等职业院校积极践行和创新先进职业教育理念,深入推进“校企合作,工学结合”人才培养模式的大背景下编写而成。

本书以国家和交通运输部颁发的有关专业技术标准规范为依据,以职业岗位工作目标为切入点,紧紧围绕隧道施工过程来编写。在编写过程中充分体现工学结合的原则,即“学习的内容是工作,通过工作实现学习”,实现工作与学习的整合,理论与实践的整合,专业能力、方法能力和社会能力的整合,重点突出行业岗位对从业人员知识结构和职业能力的要求,充分体现了高等职业教育的特点。

本课程以道路桥梁工程技术类专业学生的就业为导向,根据行业专家对道路工程技术类专业所涵盖的岗位群,进行任务和职业能力分析,同时遵循高等职业院校学生的认知规律,紧密结合职业资格证书中相关考核要求,确定本课程的教学模块和教学内容。本教材内容的选择是由学校专任教师、行业和企业专家合作,共同确定课程内容。变学科型课程体系为任务引领型课程体系,设置了七个项目,分别是隧道基本常识、发展史及发展方向;隧道设计;超前地质预报与监控量测技术;隧道施工方法、隧道掘进方式及出渣技术;衬砌施工与注浆加固技术;隧道附属设施工程。其中项目一、项目六由朱小辉编写,项目二、项目七由张红春编写,项目三、项目五由颜炳玲编写,项目四由包塔娜编写。

在编写过程中,参考和引用了大量有关专业教材及有关规范、标准和科研成果,在此谨向有关作者表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中存在的错误或不足之处,恳请读者批评指正。

目 录

项目一 隧道基本常识、发展史及发展方向	1
任务 1.1 隧道的定义及其结构组成	1
任务 1.2 隧道的种类、规模和工程特点	2
任务 1.3 围岩的稳定性分级	6
任务 1.4 隧道工程简史及现状	12
任务 1.5 隧道及地下工程理论简介	16
任务 1.6 隧道工程的发展方向	18
项目二 隧道设计	22
任务 2.1 隧道平面设计	22
任务 2.2 隧道横断面设计	24
任务 2.3 隧道支护结构设计	31
项目三 超前地质预报与监控量测技术	47
任务 3.1 超前地质预报	47
任务 3.2 量测目的、仪器、内容和方法	51
任务 3.3 量测方法	53
任务 3.4 量测计划	61
任务 3.5 量测数据分析与反馈	65
项目四 隧道施工方法	71
任务 4.1 施工方法的分类及选择原则	71
任务 4.2 矿山法	73
任务 4.3 新奥法	74
任务 4.4 明挖法	85
任务 4.5 盖挖法	88
任务 4.6 盾构法	89
任务 4.7 掘进机法	94
任务 4.8 沉埋法	96

隧道施工技术

任务 4.9	洞口施工与进洞方法	98
任务 4.10	明洞施工	103
任务 4.11	不良地质条件下隧道施工	108
项目五	隧道掘进方式及出渣技术	121
任务 5.1	隧道开挖方法确定的原则	121
任务 5.2	掘进方式	125
任务 5.3	钻眼机具和爆破材料	130
任务 5.4	爆破方法	139
任务 5.5	出渣运输	155
项目六	衬砌施工及注浆加固技术	164
任务 6.1	支护的构造	164
任务 6.2	初期支护施工的三大原则	173
任务 6.3	锚杆	175
任务 6.4	喷射混凝土	180
任务 6.5	钢拱架	189
任务 6.6	超前支护	193
任务 6.7	注浆加固技术	196
任务 6.8	内层衬砌	203
项目七	隧道附属设施工程	211
任务 7.1	紧急停车带和避车洞	211
任务 7.2	隧道防排水设施	213
任务 7.3	压缩空气供应	220
任务 7.4	施工供水与排水	223
任务 7.5	供电及照明	227
任务 7.6	通风与防尘	233
参考文献		245

项目一 隧道基本常识、发展史 及发展方向

项目导读

每一个隧道施工技术的延伸都是建立在基本知识的基础上,如学习隧道衬砌施工技术的前提是知道隧道衬砌是什么。因此了解隧道的基本知识对后面章节学习隧道施工技术有着重要的意义。

建议采用案例教学法,观看隧道图片、简介和录像,学习并了解隧道基本常识和隧道工程的历史、现状和发展方向。

学习目标

1. 掌握隧道的定义及其结构组成。
 2. 理解隧道的种类和规模。
 3. 了解隧道及地下工程的历史、现状和发展方向。
 4. 掌握围岩的稳定性分级。
-
-

任务 1.1 隧道的定义及其结构组成

一、有关隧道的定义

- (1) 隧道:修筑在地下的通道建筑物。工程中,常将未加支护的毛洞称为坑道。
- (2) 围岩:隧道周围一定范围内,对隧道稳定有影响的那部分岩体。也可表述为,隧道周围一定范围内,受隧道工程施工和车辆荷载影响的那部分岩体。
- (3) 支护:为维护围岩稳定而施作的人工结构。

二、隧道的结构组成

隧道的结构组成是指隧道作为单位工程其结构是由哪些部分组成的,以及每一部分在总体中各起什么作用。按照现代隧道工程理论,隧道结构是由围岩、支护、洞门、附属设施四部分组成的。围岩是天然(且不可替代)的结构部分,也是隧道结构的主体。支护是帮助围岩获得稳定的人工结构部分。支护结构又分为初期支护和二次支护。洞门是明暗交界处的结构部分。附属设施是功能

性结构部分,附属设施包括(铁路隧道)大小避车洞、下锚段、人行横洞或(公路隧道)紧急停车带、人/车行横通道,洞内排水(沟槽)系统,电力电缆(管槽)系统,辅助通风(巷道)系统。隧道结构组成如图 1-1 所示。

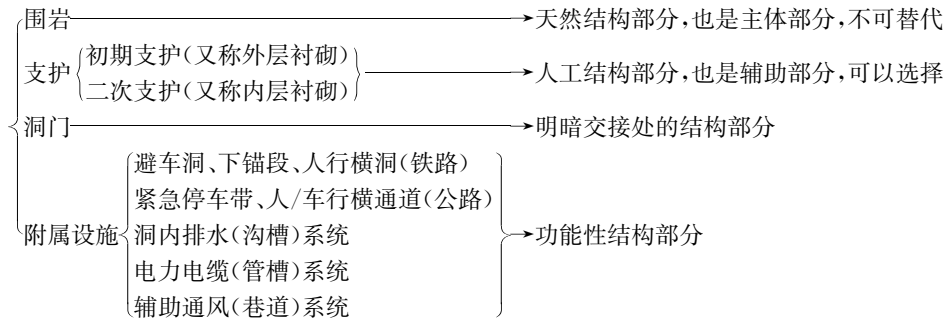


图 1-1 隧道结构组成

任务 1.2 隧道的种类、规模和工程特点

一、隧道的种类

隧道的种类很多,从不同的角度可有不同的分类方法。按隧道的作用可将其划分为交通隧道、输水隧道、市政隧道、矿山隧道四类。按隧道所处的地质条件来分,可以分为土质隧道和石质隧道;按埋置的深度来分,可以分为浅埋隧道和深埋隧道;按隧道所在的位置来分,可以分为山岭隧道、水下隧道、水底隧道和地铁隧道等。以下通过具有代表性的实例介绍各种类隧道。

1. 交通隧道

绝大多数隧道是为交通而建的。交通线上的隧道是提供交通运输的地下通道,可分为铁路隧道、公路隧道、航运隧道三种。

交通线上的隧道绝大多数是山岭隧道,多数的水底隧道和 underwater 隧道也是为铁路或公路交通而建,地铁隧道则是指建在城市地下铁路线上的隧道。

(1) 山岭隧道:是建在铁路、公路交通线上山岭区段的隧道。

绝大多数铁路、公路隧道是位于山岭地区的。我国典型的铁路隧道有京广铁路大瑶山隧道(双线,长 14.295 km),兰新铁路乌鞘岭隧道(2 座单线隧道各长 20.050 km)等;典型的公路隧道有西康高速公路秦岭终南山公路隧道(东线、西线隧道各长 18.020 km)。

(2) 水下隧道:是建在河床或海床以下地层中的交通隧道。

当交通线需要横跨河道或海峡,但水道通航需要较高的净空,而桥梁受两端引线高程的限制,无法抬起必要的高度而不适合采用桥梁通过时,或者受天气条件限制不宜采用轮渡或桥梁通过时,可采用水下隧道通过。它不但可以避免限制水道通航和天气条件对交通的影响,而且在战时有较好的隐蔽性。

水下隧道多采用盾构法施工或掘进机法施工。盾构法(Shield Method)主要适用于软岩地层施工,掘进机法主要适用于硬岩地层施工。

布鲁诺于 1843 年首次在伦敦泰晤士河下采用 $6.8\text{ m} \times 11.4\text{ m}$ 高宽的矩形盾构建成了全长 458 m 的世界上第一条水下隧道。1890 年,在美国和加拿大之间的圣可莱河下采用直径 6.4 m 的圆形盾构建成了 1 800 余米的水下铁路隧道。1969 年,我国上海采用直径 10.2 m 的圆形盾构建成长 2 793 m 的上海第一条黄浦江打浦路越江公路隧道。1984 年,上海采用直径 11.32 m 的圆形盾构建成了黄浦江延安东路越江公路隧道。2008 年,上海在崇明越江公路隧道采用的直径 15.42 m 的圆形盾构是目前世界上最大直径的盾构,隧道全长 7 500 m。2008 年,武汉长江穿江隧道采用直径 11.38 m 的圆形盾构,成功建成万里长江第一隧,全长 2 550 m。继此之后,南京又以直径 14.96 m 的圆形盾构,再次穿越万里长江。

日本于 1984 年在津轻海峡建成 53.85 km 长的海底铁路隧道。英法两国采用隧道掘进机,在英吉利海峡建成了海底铁路隧道(2 座铁路隧道,1 座服务隧道,各长约 50 km)。

(3) 水底隧道:是用沉埋法建在河床或海床上的交通隧道或输水隧道,也称为沉管隧道或沉埋隧道。

美国波士顿于 1894 年建成一条城市水底污水隧道,宣告了一种新的隧道建筑形式——沉埋法的成功诞生。底特律于 1904 年又建成水底铁路隧道。1959 年,加拿大迪斯(Deas)隧道工程中,成功地采用水力压接法进行管段水下连接,使得沉埋施工技术变得更加成熟,并很快就被世界各国推广采用。

我国台湾于 1984 年首先建成了高雄海底沉管隧道。1993 年,我国在广州珠江建成第一条沉管隧道(地铁、公路、市政共用,长 1.23 km),1995 年又在宁波南江建成第二条沉管隧道。我国香港特别行政区穿越维多利亚海湾连接九龙半岛与香港岛的通道中,已建成 5 座沉管隧道,而没有修建一座桥梁。这样既解决了交通问题,又不影响海湾船舶通航,同时,也很好地保持了海湾自然景观的美感。

(4) 地铁隧道:是建在城市地下铁路线上的隧道。

地下铁道可以缓解大城市交通拥挤、车辆堵塞等问题,它能够快速、高效、大量运送乘客。地下铁道主要建在地下,因此,地铁隧道在地铁线路中所占的比重就很大。如我国北京在 2008 年奥运会前,就建成地铁 198 km,2010 年建成 14 条地铁线路,总里程 300 km;2015 年将建成 19 条地铁线路,总里程将达到 561 km,其中大部分处在地下。又如英国伦敦地铁全长 408 km,地下长 167 km;美国纽约地铁全长 1 056 km,地下长占 1/3。

(5) 航运隧道:是建在水运交通线上的隧道。

在河道受山岭阻碍迂回曲折,流程较长而落差不大的条件下,可以用隧道穿越山岭,截弯取直河道,缩短船只通航航程。显然,这种隧道既可过水又可过船。

2. 输水隧道

输水隧道是指用于输送水流的隧道,主要用在水利工程中。输水隧道分为引水隧道、尾水隧道、泄洪隧道和排沙隧道。

(1) 引水隧道:又分为两种,一种是把江河之水引入用于农业灌溉、城市生活、工业生产或水库蓄能的输水隧道;另一种是把蓄水引入水力发电机组,驱动水力发电机发电的输水隧道,也称为进水隧道。

如陕西省南水北调引乾(佑河)济石(砭峪水库)工程中的秦岭终南山输水隧道,全长 18 余千米,是目前我国最长的输水隧道。

(2) 尾水隧道:是把从水力发电机排出的尾水输送出去的输水隧道。

(3) 泄洪隧道:是用于在洪水期间疏导排泄洪水的隧道。

(4) 排沙隧道：是利用水流的冲刷携带作用排泄水库中淤积的泥沙或排空水库里的水，以保持水利设施正常工作和便于进行水坝检修的输水隧道。

输水隧道按照水在隧道中的充满状态又分为有压隧道和无压隧道。有压隧道因隧道内部充满水而使隧道衬砌既承受围岩压力又承受向外的水压力；无压隧道因隧道内部未充满水，因此隧道衬砌过水部分既承受围岩压力又承受向外的水压力，不过水部分只承受围岩压力。

3. 市政隧道

市政隧道是城市中为供给城市用水、排放城市污水、安置各种市政设施、战时庇护人员和重要财产等的地下孔道。市政隧道分为给排水隧道、城市管沟、人行地道及人防隧道。

(1) 给排水隧道：给水隧道是用于城市供水的隧道，排水隧道是用于引流排放城市污水的隧道。

(2) 城市管沟：城市中供给燃气、暖气的管道，以及电力、通信电缆等，都是放置在地下的管沟中。这些地下管沟多设置在街道两侧人行道地面以下。城市管沟既可以保护各种管线不被破坏和稳定输送，又简化了城市街道地面公共设施，美化了市容。根据管线功能和安全的需要，可将不同管线安设在不同的管沟中，也可将以上几种管线安设于一个大的“共同沟”中。

(3) 人行地道：是建在城市地下专供人员通行的隧道，也称为过街地道。它主要是在城市交通繁忙地区，为改变人车混行状况，保证行人安全，提高车辆通过能力而修建的立体交叉地下人行通道。

(4) 人防隧道：是战争时期用于庇护人员、重要设备和财产免受袭击破坏，建造于城市（或乡村）的隧道。人防隧道工程除设有给排水、通风、照明和通信设备以外，在洞口处还设置有防爆装置，以阻止冲击波的侵入；并且常做成多口连通，互相贯穿，在紧急时刻，可以随时找到出入口的复杂结构形式。

4. 矿山隧道

矿山隧道又称为矿山坑道或巷道，是用于穿越地层通向矿床，以便开采矿体的隧道。矿山隧道主要分为运输巷道和通风巷道。

(1) 运输巷道：是从地面向地下开凿的通向矿床的运输通道，通过运输巷道到达矿体后再开辟采掘工作面。运输巷道一般应设置永久支撑，而采掘面只需按采掘工作的需要提供临时支撑。

运输巷道不仅是主要的运输通道，通常情况下给排水管道也安装在运输巷道中，以便送入清洁水供采掘机械使用，并将废水和地下水排出洞外。同时，运输巷道还可以与通风巷道或与通风机加管道构成空气对流的回路。

(2) 通风巷道：是为了补充新鲜空气，排除机械废气、工作人员呼出的气体，以及地层中释放的各种易燃、易爆、有毒、有害气体，防止燃烧、爆炸、窒息，保证坑道工作环境条件和人员设备安全而设置的巷道。通风巷道应与运输巷道或与通风机加管道构成空气对流的回路。

二、隧道的规模

隧道工程的规模大小，一般可从长度和开挖断面两个方面来加以区分。

(1) 我国公路（铁路）隧道的长度等级划分为：长度在 500 m 及以下为短隧道，长度在 500～1 000 m 为中长隧道（铁路隧道 500～3 000 m），长度在 1 000～3 000 m 为长隧道（铁路隧道 3 000～10 000 m），长度在 3 000 m 以上为特长隧道（铁路隧道 10 000 m 以上）。

(2) 我国铁路隧道的开挖断面等级划分为：断面积在 10 m² 及以下为小断面，断面积在 10～50 m² 为中断面，断面积在 50～100 m² 为长断面，断面积在 100 m² 以上为特长断面。

三、隧道工程的特点

规划、勘察、设计、施工各部门均应该考虑隧道工程的特点,隧道工程的特点可归纳为如下几点。

(1) 隧道工程主体结构埋设于地面以下,因此隧道周围区域的工程地质和水文地质条件对隧道施工能否顺利进行起着重要的,甚至是决定性的作用。地质条件不同,施工方案会有较大的差异。

例如,瑞士圣哥达铁路阿尔卑斯山隧道在施工中遇到高温(41°C)和涌水(660 L/min),给施工带来了很大的困难,最后延期两年才完成;我国在渝怀铁路圆梁山隧道工程中,虽然进行了长时间大量的地质勘察和预报,但仍然突发了岩溶性爆喷射型突泥($4\ 200\text{ m}^3$)、突水($1.45\times 10^5\text{ m}^3/\text{d}$,持续 8 min)。同样,兰新铁路乌鞘岭隧道也遇到了强流变地层(累计变形量达到 $50\sim 70\text{ cm}$),实际采用的初期支护参数比原设计参数要大得多。但是,西康铁路秦岭隧道,虽然工程规模很大,但整个施工过程进展顺利,没有发生坍塌等事故,究其原因,围岩稳定性很好是一个重要方面。

因此,隧道工程必须在勘测阶段做好详细的地质调查和勘探,尽可能准确地掌握隧道工程范围内的岩层性质、岩体强度、完整程度、地应力场、自稳能力、地下水状态、有害气体和地温状况等资料。并根据这些资料,初步选定合适的施工方法,确定相应的施工措施和配套的施工机具。此外,由于地质条件的复杂性和勘探手段的局限性,在施工中出现意外的地质情况是不可避免的。因此,在长大隧道的施工中,还可采取超前试验导洞(如日本青函隧道)、超前水平钻孔、超前声波探测等技术措施,进一步查清掘进前方的地质条件,预先掌握工程地质及水文地质的变化情况,以便及时采取必要的技术措施修改施工方法。

(2) 隧道是一个狭长的建筑物,作业面受限,施工速度比较慢,一些长大隧道的工期往往也比较长,因此,隧道工程多成为新建线路上的控制工程。

隧道工程不像桥梁、线路等工程可以将作业全面铺开。一般情况下,隧道只有进口与出口两个作业面,即使开设辅助坑道增创作业面,也十分有限。如何在有限的施工空间中最大限度地发挥施工管理的作用,是影响施工进度的关键所在。

在隧道施工中,尽可能多地将施工工序沿隧道纵向展开,进行平行作业,并解决好顺序作业与平行作业之间的关系,是节省时间、加快速度、缩短工期的有效途径。而对于长大隧道工程,则可以考虑设置适当数量的平行导坑、横洞、斜井或竖井等辅助导坑来增加工作面,以加快施工速度,缩短总工期。

(3) 与桥梁和线路工程相比,隧道施工受昼夜更替、季节变换、气候变化等自然条件的影响较小,因此一般均可以长年全天候稳定地安排施工,但在浅埋区段受地下水影响明显时,应注意规避。

(4) 地下工程的施工环境较差,在施工过程中还可能进一步恶化。如爆破产生有害气体、喷射混凝土产生粉尘等,必须采取有效措施加以改善;如采用人工通风、照明、防尘、排水等,使施工场地符合卫生条件,以保证施工人员的身体健康,提高劳动生产率。

(5) 隧道是一种埋设于地下的大型隐蔽工程,建成困难,建好困难,一旦建成后要更改就更困难。所以,在规划和设计中,应认真研究隧道与线路之间的关系,详细调查隧道区域地质等问题;在施工过程中,要使每一道工序都严格按有关规定进行,确保隧道工程质量达到标准要求,当工期与质量发生冲突时,应优先保证工程质量。

(6) 隧道大多穿越崇山峻岭,工地一般都位于偏僻的深山峡谷之中,往往远离已有交通线,运输不便,物资供应困难。

任务 1.3 围岩的稳定性分级

一、分级的目的和原则

1. 分级的目的

岩体所处的地质环境是千差万别的,围岩给隧道工程带来的问题也是各式各样的。人们对地下空间的要求是各不相同的,但对每一种特定要求下的地质环境和工程问题,不可能都有现成的经验,也没有必要逐一进行从理论到实验的全方位研究。因此,为了工程应用的便利,有必要将围岩按其稳定性的好坏(能力的强弱)划分为有限个级别,以便于针对不同的级别,确定支护参数和施工方法。

2. 分级的原则

由于围岩稳定与否是多种因素共同作用的结果,而且各因素之间还有一定的相互影响。因此,为了使分级合理,而分级方法又不至于太复杂,在对围岩稳定性进行分级时,不是同时将所有影响因素都考虑在分级之中,而是以几个主要影响因素作为分级指标,将围岩稳定性划分为几个基本级别。然后在此基础上,根据各次要因素和不确定因素对围岩稳定性的影响程度,对围岩稳定性的基本级别进行调整处理,隧道工程围岩稳定性分级的原则有如下几点:① 分级目的明确、形式简单、级数适中;② 分级指标清晰、便于识别、易于区分;③ 分级数据易得、便于定质、易于划分。

二、隧道围岩稳定性分级

1. 公路、铁路隧道围岩稳定性分级方法及分级表

我国公路交通部门颁行的《公路隧道设计规范》(JTG D70 - 2004)对围岩稳定性的级别划分趋于与我国铁路部门颁行的《铁路隧道设计规范》(TB 10003 - 2016)一致。《铁路隧道设计规范》推荐的围岩稳定性分级方法是:以围岩的结构特征、完整状态、岩体强度和围岩的弹性纵波速度 v_p 作为基本分级指标,将围岩划分为 I ~ VI 共六个基本级别;然后适当考虑地下水和地应力对围岩稳定性的影响程度,对基本级别予以适当修正,确定出围岩稳定性的最后级别,如表 1-1~表 1-3 所示。对施工阶段围岩稳定性级别的判定,则按施工阶段围岩稳定性级别判定卡来进行,如表 1-4 所示。

表 1-1 铁路、公路隧道围岩稳定性基本分级

围岩级别	围岩主要工程地质条件		围岩开挖后的稳定状态 (单线隧道断面)	围岩弹性纵波速度 $v_p/\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$
	主要工程地质特征	结构特征和完整状态		
I	硬质岩,饱和单轴抗压强度 $R_c > 60 \text{ MPa}$,受地质构造运动影响轻微,节理不发育,无软弱面或夹层,层状岩体为厚层,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

(续表)

围岩级别	围岩主要工程地质条件		围岩开挖后的稳定状态 (单线隧道断面)	围岩弹性纵波速度 $v_p/\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$
	主要工程地质特征	结构特征和完整状态		
II	硬质岩, $R_c > 30 \text{ MPa}$, 受地质构造运动影响较重, 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, 层状岩体为中层或厚层, 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	3.5~4.5
	软质岩, $R_c \approx 30 \text{ MPa}$, 受地质构造运动影响轻微, 节理不发育, 层状岩体为厚层, 层间结合良好	呈巨块状整体结构		
III	硬质岩, $R_c > 30 \text{ MPa}$, 受地质构造运动影响严重, 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, 层状岩体为薄层或中层, 层间结合差, 多有分离现象, 或为硬、软质岩石互层	呈块、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, $R_c = 5 \sim 30 \text{ MPa}$, 受地质构造运动影响较重, 节理较发育、层状岩体为薄层、中层或厚层, 层间结合一般	呈大块砌体结构		
IV	硬质岩, $R_c > 30 \text{ MPa}$, 受地质构造运动影响很严重, 节理根发育, 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, $R_c = 30 \text{ MPa}$, 受地质构造运动影响严重, 节理发育	呈块、碎(石)状镶嵌结构		
	土: (1) 略具压密或成岩作用的黏性土及砂类土 (2) 一般钙质、铁质胶结的碎、卵石土和大块石土 (3) 黄土(Q_1 、 Q_2)	(1)、(2)呈大块状压密结构, (3)呈巨块状整体结构		
V	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	围堰易坍塌, 处理不当会出现大坍塌, 侧壁经常出现小坍塌, 浅埋时易出现地表下沉(陷)或坍塌至地表	1.0~2.0
	一般第四系的半干硬至硬塑的黏性土, 及稍湿至潮湿的一般碎、卵石土, 圆砾、角砾及黄土(Q_3 、 Q_4)	非黏性土呈松散结构, 黏性土及黄土呈松软结构		
VI	软塑状黏性土及潮湿的粉细砂等	黏性土呈蠕动的松软结构, 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起涌出, 浅埋时易坍塌至地表	< 1.0 (饱和土 < 1.5)

注: (1) 表中“围岩级别”和“围岩主要工程地质条件”栏, 不包括膨胀性围岩、多年冻土等特殊岩土。

(2) 关于隧道围岩分组的基本因素和围岩基本分组及其修正, 可按国家现行《铁路隧道设计规范》(TB 10003-2016)附录 A 确定。说明如下:

- ① 本分级表适用于采用钻眼爆破掘进的隧道工程中。其中“级别”和“主要工程地质条件”栏不适用于膨胀岩、冻土等特殊地质条件; “围岩开挖后的稳定状态”栏只适用于洞径在 15 m 以下的隧道。
- ② 关于围岩的结构特征和完整状态、围岩受地质构造影响程度划分、围岩节理(裂隙)发育程度划分、岩石强度划分可参见有关地质资料。
- ③ 遇有地下水时, 按表 1-2 调整围岩级别。

表 1-2 地下水对围岩稳定性的影响与级别修正

地下水状态 基本分级	I	II	III	IV	V	VI
无水、岩体干燥	I	II	III	IV	V	VI
有少量水或水量较大	I 或 II ^①	II 或 III ^②	IV	V	VI	—

注：(1) 水量较大时，围岩级别调整为 II；有少量水时，围岩级别调整为 I。
 (2) 水量较大时，围岩级别调整为 III；有少量水时，围岩级别调整为 II。

表 1-3 地应力对围岩稳定性的影响与级别修正

地应力状态 基本分级	I	II	III	IV	V	VI
高应力	I	II	III	IV 或 V ^①	VI	已考虑
极高应力	I	II	III 或 IV ^②		VI	已考虑

注：(1) 围岩为较破碎的极硬岩、较完整的硬岩时，围岩级别调整为 IV；围岩为完整的较软岩、较完整的软硬互存岩时，围岩级别调整为 V。
 (2) 围岩为较破碎的极硬岩、较破碎及破碎的硬岩时，围岩级别调整为 III；围岩为完整或较完整的软岩、较完整或较破碎的较软岩时，围岩级别调整为 IV。

表 1-4 施工阶段围岩稳定性级别判定卡

工程名称	位置/km		距洞口距离/m				评 定	
	岩石类型(名称)		黏聚力 c /MPa: φ					极硬岩 硬岩 中硬岩 软硬岩 软岩 极软岩 土
单轴抗压极限强度 R_c /MPa		点荷载强度 I_x /MPa						
变形模量 E /MPa		泊松比 ν						
天然重量 γ /kN·m ⁻³		其他						
岩体完整状态	地质构造影响程度		轻微	较重	严重	极严重	完整 较完整 破碎 极破碎	
	地质结构面	间距/m	>1.5	0.6~1.5	0.2~0.6	0.06~0.2		<0.06
		延伸性	极差	差	中等	好		极好
		粗糙性	明显台阶状	粗糙波纹状	平整光滑有擦痕			平整光滑
	张开性	密闭 <0.1	部分张开 0.1~0.5	张开 0.5~1.0	无充填张开 >1.0	黏土填充		
	风化程度		未风化	风化轻微	风化颇重	风化严重		风化极严重
简要说明								
地下水状态	渗水量 L /min·(10 m) ⁻¹	<10 干燥或湿润	10~25 偶有渗水	25~125 经常渗水			干燥或湿润 偶有渗水 经常渗水	
初始应力状态	埋置深度 $H=()$ cm							
	地质构造应力状态							
	其他							
围岩级别		I	II	III	IV	V	VI	
备注								
记录者	复核者					日期		

2. 对分级中不便考虑的影响因素的处理

上述铁路、公路隧道围岩稳定性分级中,主要考虑的是工程地质等客观因素对围岩稳定性的影响,而未考虑人为因素的影响。对这些在分级中不便确定的影响因素,应按如下办法考虑和处理。

(1) 坑道横断面大小对围岩稳定性级别的影响:工程实践和对二次应力场的研究证明,在同级围岩中,坑道横断面(主要是跨度)越大,围岩稳定性表现越差,这种差异在分级时是不便考虑的。我国铁路部门也是仅以“单线隧道断面大小”为基准,进行围岩稳定性级别划分的。故隧道工程中,一般是将坑道横断面大小对围岩稳定性的影响放在确定围岩的应力、变形以及支护结构的类型、尺寸时考虑。同时规定分级表适用的坑道横断面尺寸范围,并要求施工时注意坑道横断面的增大或减小对围岩稳定性的影响,即隧道设计断面越大,围岩的相对稳定性越低;反之,相对稳定性提高。

(2) 坑道横断面形状对围岩稳定性级别的影响:工程实践和对二次应力场的研究证明,圆形或椭圆形坑道,围岩应力以压应力为主。这对发挥围岩的抗压性能和维护围岩的稳定是有利的。而矩形或梯形坑道,在顶板处的围岩中将出现较大的拉应力,极易导致围岩的张裂破坏而失稳。这种差异在分级时也是不便考虑的。故在隧道设计时应遵循自然拱的成拱作用规律;将隧道横断面(尤其是隧道顶部)设计为圆形或近圆形,并要求施工中尽量做到使坑道周边圆顺。

(3) 施工方法对围岩稳定性级别的影响:前已述及,隧道施工条件对围岩的稳定性影响是比较显著的,这种差异在分级时更是不便考虑的。所以,目前,大多数的分级方法是建立在相应的施工方法的基础上的。我国铁路隧道围岩稳定性分级,是以钻眼爆破掘进和暗挖法施工为条件。若将此分级应用于采用盾构法、掘进机法或明挖法施工的工程中,则是偏于安全的。

三、《锚杆喷射混凝土支护技术规范》(GB 50086 - 2001)围岩分级法

《锚杆喷射混凝土支护技术规范》(GB 50086 - 2001)围岩分级,如表 1-5 所示,其使用说明如下:

(1) 本分级适用于矿山、铁路、水电、建工和军工等部门的地下工程锚喷支护设计。

(2) 本分级采用多因素定性与定量指标相结合的分级方法。分级表中没有给出岩体质量系数,但给出了岩石单轴抗压强度和岩体完整性指标,所以,实际上也等于给出了岩体质量系数($S_m = K_v R_c / \sigma_{max}$)。

(3) 岩体结构类型的划分,主要考虑了岩体结构体的块度尺寸,如表 1-6 所示。

表 1-5 国家标准《锚杆喷射混凝土支护技术规范》(GB 50086 - 2001)围岩分级

围岩级别	主要工程地质特征		岩石强度指标		岩体声波指标		岩体强度应力比	毛洞稳定情况
	岩体结构	构造影响程度、结构面发育情况和组合状态	单轴饱和抗压强度 /MPa	点荷载强度 /MPa	弹性纵波速度 /km·s ⁻¹	完整性指标 K _v		
I	整体状及层间结合良好的厚层状结构	构造影响轻微,偶有小断层;结构面不发育,仅有两到三组,平均间距大于 0.8 m,以原生和构造节理为主,多数闭合,无泥质充填,不贯通;层间结合良好,一般不出现不稳定块体	>60	>2.5	>5	>0.75		毛洞跨度 5~10 m 时,长期稳定,一般无碎块掉落

(续表)

围岩级别	主要工程地质特征		岩石强度指标		岩体声波指标		岩体强度应力比	毛洞稳定情况
	岩体结构	构造影响程度、结构面发育情况和组合状态	单轴饱和抗压强度 /MPa	点荷载强度 /MPa	弹性纵波速度 /km·s ⁻¹	完整性指标 K _v		
II	同 I 级围岩结构	同 I 级围岩特征	30~60	1.25~2.5	3.7~6.2	>0.75	>2	毛洞跨度 5~10 m 时,围岩能较长时间(数月甚至数年)维持稳定,仅出现局部小块掉落
	块状结构和层间结构较好的中厚层或厚层状结构	构造影响较重,有少量断层,结构面较发育,一般为三组,平均间距 0.4~0.8 m,以原生和构造节理为主,多数闭合,偶有泥质充填;贯通性较差,有少量软弱结构面,层间结合较好,偶有层间错动和层面张开现象	>60	>2.5	3.7~5.2	>0.5		
III	同 I 级围岩结构	同 I 级围岩特征	20~30	0.85~1.25	3.0~4.5	>0.75	>2	毛洞跨度 5~10 m 时,围岩能维持一个月以上的稳定,主要出现局部掉块、塌落
	同 II 级围岩块状结构和中间结合较好的中厚层或厚层结构	同 II 级围岩,块状结构和层间结合较好的中厚层或厚层状结构围岩特征	30~60	1.25~2.5	3.0~4.5	0.5~0.75	>2	
	层间结合良好的薄层和软硬岩互层结构	构造影响较重,结构面发育一般为三组,平均间距 0.2~0.4 m,以构造节理为主;节理面多闭合,少有泥质充填;岩层为薄层或以硬岩为主的软硬岩互层,层间结合良好,少见软弱夹层,层间错动和层面张开现象	>60 软层 >20	>2.5	3.0~4.5	0.3~0.5	>2	
	碎裂镶嵌结构	构造影响严重,结构面发育,一般为三组以上,平均间距 0.2~0.4 m,以构造节理为主,节理面多数闭合;少数有泥质充填,块体间牢固咬合	>60	>2.5	3.0~4.5	0.3~0.5	>2	
IV	同 II 级围岩块状结构和层间结合较好的中厚层或厚层状结构	同 II 级围岩块状结构和层间结合较好的中厚层或厚层状结构特征	10~30	0.42~1.25	2.0~3.5	0.5~0.75	>1	毛洞跨度 5 m 时,围岩能维持数日到一个月的稳定,主要失稳形式为冒落和片帮
	散块状结构	构造影响严重,一般为风化卸荷带;结构面发育,一般为三组,平均间距 0.4~0.8 m,以构造节理、卸荷、风化裂隙为主,贯通性好,多数张开,夹泥;咬合力弱,构成较多的不稳定块体	>30	>1.25	>2.0	>0.15	>1	
	层间结合不良的薄层、中厚层和软硬岩互层结构	构造影响严重,结构面发育,一般为三组以上,平均间距 0.2~0.4 m,以构造、风化节理为主,大部分微张(0.5~1.0 mm),部分张开(>1.0 mm),有泥质充填,层间结合不良,多数夹泥,层间错动明显	>30 软层 >10	>1.25	2.0~3.5	0.2~0.4	>1	

(续表)

围岩级别	主要工程地质特征		岩石强度指标		岩体声波指标		岩体强度应力比	毛洞稳定情况
	岩体结构	构造影响程度、结构面发育情况和组合状态	单轴饱和抗压强度 /MPa	点荷载强度 /MPa	弹性纵波速度 /km·s ⁻¹	完整性指标 K _v		
V	碎裂状结构	构造影响严重,多数为断层影响带或强风化带;结构面发育,一般为三组以上,平均间距 0.2~0.4 m,大部分微张(0.5~1.0 mm),部分张开(>1.0 mm),有泥质充填,形成许多碎块体	>30	>1.25	2.0~3.5	0.2~0.4	>1	毛洞跨度 5 m 时,围岩能维持数日到一个月的稳定,主要失稳形式为冒落和片帮
	散体状结构	构造影响很严重,多数为破碎带、全强风化带、破碎带交汇部位,构造及风化节理密集,节理面及其组合杂乱,形成大量碎块体,块体间多为泥质充填,甚至呈石夹土状或土夹石状			<2.0			毛洞跨度 5 m 时,围岩稳定时间很短,约数小时至数日

注: (1) 围岩分级按定性分级与定量指标分级有差别时,一般应以低者为准。

(2) 本表声波指标以孔测法测试值为准。如果用其他测试方法时,可通过对比试验,进行换算。

(3) 层状岩体按单层厚度划分: 厚层>0.5 m, 中厚层为 0.1~0.5 m, 薄层<0.1 m。

(4) 一般条件下,确定围岩级别时,应以岩石单轴湿饱和和抗压强度为准;洞跨小于 5 m,服务年限短于 10 年的工程,确定围岩级别时,可采用点荷载强度或其他简易方法取代岩块单轴饱和和抗压强度指标,并可不做弹性波指标测试。

(5) 测定岩石强度,做单轴抗压强度试验后,可不做点荷载强度试验。

(6) $1 \text{ MPa} = 1.0 \times 10^6 \text{ N/m}^2 = 100 \text{ N/cm}^2$ 。

表 1-6 块状岩体按结构体块度的划分

岩体结构类型	整体状结构	块状结构	碎裂镶嵌与碎裂状结构	散体状结构
块度尺寸/m (以结构面平均间距表示)	>0.8	0.4~0.8	0.2~0.4	<0.2

(4) 地质构造影响程度和结构面发育情况参见有关表格。

(5) 对Ⅲ、Ⅳ级围岩,当地下水较发育时,应根据地下水类型、水量大小、软弱结构面多少及其危害程度,适当降级。

(6) 对Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ级围岩,当洞轴线与主要断层或软弱夹层夹角小于 30°时,应适当降级。

(7) 划分围岩级别通常分为两个阶段: 勘察阶段和施工阶段。勘察阶段初步划分围岩级别,主要根据隧洞开挖前获得的地质资料选定的洞轴线,以及沿洞轴线的地质剖面图,按分级表中的定性指标与岩石强度,初步确定各段围岩级别。施工阶段详细划分围岩级别,可参照以上方法,并结合实际围岩情况划分。

四、其他分级方法

用于隧道及地下工程的围岩分级方法,还有以下几种,需用时可查阅有关资料。

(1) 岩石坚固性系数(f)分类法和岩体坚固性系数(f_m)分类法。

(2) 泰沙基岩体荷载高度(h_q)分类法。