

SUIDAO YU
DIXIA GONGCHENG
XIUJIAN JISHU

隧道与地下工程 修建技术

◎ 崔玖江 著



科学出版社
www.sciencep.com

隧道与地下工程修建技术

崔玖江 著

科学出版社

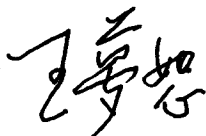
北 京

序

作者是我非常敬重的挚友。他对事业的热爱、对事业的执著,尤其是 40 多年来他在地下工程设计、施工、科研、咨询的全过程中表现出的尊重现场、尊重实践、决不空谈、理论联系实际、孜孜不倦的探索精神,认真总结工程技术的精神是相当可贵的,是值得我们学习的。所以,在阅读这本书时,我首先被作者这种高尚的情操所感动,这是设计好、施工好任何一项工程所必需的精神和重要前提。

作者从事了许多军用、民用工程的设计、施工和科研,并亲自感受了建成后的自豪和喜悦,也从中发现了许多成功和不足之处。作者出于对祖国负责、对后人启迪的心情,在百忙中把他从事隧道与地下工程设计、施工、科研的经验体会系统化,分为四篇二十九章把这些理念、观点奉献给读者,把具体的做法通过许多工程实例总结出来,以为读者借鉴和进行技术决策。这种写法生动而真实,内容丰富而明确。作者曾从事过水底隧道的设计和施工,编写了水底隧道修建技术,并用大量的理论和数据说明在青岛和黄岛间修建海底隧道是符合可持续发展的,技术上也是可行的。这种对工程论证的实事求是、坚持真理的道德和学风更是很可敬的。类似的事例举不胜举。作者在地下工程防水、注浆技术方面有许多新颖的创新点,在山岭隧道建设方面和地下铁道建设上,尤其对浅埋暗挖法的创新上大胆支持,他能公平、公正地洞察各种建设中的方法是否正确;这本书全面而真实地论述了这些方法和做法,书中对这方面工程技术的总结和对技术问题的分析具有很大的超前性。这本书的出版对目前地下工程的建设非常及时和必需,具有很大的指导性、实用性和先进性。我可以断言,书中的许多论点和评价将影响到本世纪末,会清晰地留在建设者的记忆中。

中国工程院院士



2004 年 9 月 20 日于北京

前 言

我从事隧道与地下工程建设事业达 40 余载,与隧道和地下工程结下了不解之缘,对它产生了深厚的感情。40 多年来,我走过了一条从工程设计到工程施工和工程建设管理,再回到工程设计和工程科研之路。在前进的道路上曾遇到许多障碍和困难,但在有关领导的鼓励支持下,在军内外战友、同行的帮助下,我努力工作,紧密结合工程实际,刻苦钻研隧道与地下工程技术,较好地完成了上级赋予的各项任务,同时将自己亲身经历的工程设计、施工和科研心得体会总结出来,并在国内、军内公开刊物上发表,冀与同行交流,共同提高,以促进隧道与地下工程技术的发展与进步。本书共分四篇,根据作者既往发表的文章和近几年从事地铁工程、水下隧道工程等的研究成果编辑整理而成。

第一篇,山岭隧道修建技术,着重阐述山岭隧道应用新奥法修建的支护机理、设计和施工的要点,同时介绍了日本应用新奥法修建隧道的经验。

第二篇,水下隧道修建技术,主要阐述水下隧道的设计及施工技术,并对国内外主要水下隧道工程实例和青岛-黄岛水下公路隧道修建方案、横穿台湾海峡海底隧道工程构想等做了较详尽介绍。

第三篇,隧道与地下工程防水技术,主要对隧道与地下工程防水技术做了较系统而全面的介绍,尤其对隧道复合式衬砌防水从材料选择到施工工艺、检验方法等做了较深入的阐述。

第四篇,地下铁道工程,收集了作者在北京地铁修建技术及试验研究方面的成果。

在本书问世之际,特向过去和现在对作者给予帮助的有关领导和战友、同行致以衷心的感谢。鉴于当今隧道与地下工程技术发展迅猛,以及作者能力与水平有限,书中难免有欠妥和不当之处,敬希读者与同行指教。

目 录

序

前言

第一篇 山岭隧道修建技术	1
第一章 应用新奥法在软弱岩层中修建坑道.....	3
第二章 日本推广应用新奥法的情况.....	7
第三章 新奥法技术及其在隧道工程中的应用	19
第四章 坑道开挖机械化作业	32
第五章 隧道与地下工程施工技术现状及问题对策	37
第六章 国外纤维配筋混凝土的研究与应用	43
第二篇 水下隧道修建技术	47
第七章 水下隧道设计与施工	49
第八章 水下岩石隧道修建技术	73
第九章 青函海底隧道的设计和施工	97
第十章 青黄海底公路隧道修建方案.....	122
第十一章 苏伊士运河 Ahmed Hamdi 水下公路隧道修建技术	135
第十二章 横穿台湾海峡海底隧道工程构想.....	150
第三篇 隧道与地下工程防水技术	159
第十三章 隧道防排水技术.....	161
第十四章 修建水下隧道的预注浆法.....	173
第十五章 苏伊士运河 Ahmed Hamdi 隧道防水技术	191
第十六章 我国隧道与地下工程防水技术概貌.....	206
第十七章 地下结构物变形缝渗漏水治理新技术.....	211
第十八章 隧道与地下工程防水技术的发展.....	217
第十九章 地下工程防水存在的主要问题与处理方法.....	225
第二十章 日本隧道与地下工程防水技术.....	230
第四篇 地下铁道工程	237
第二十一章 北京地铁修建方法刍议.....	239
第二十二章 浅埋暗挖法修建北京地铁复兴门折返线工程的关键技术	247

第二十三章	浅埋暗挖法修建地铁车站试验研究·····	258
第二十四章	北京地铁新线工程概况及建设特点、难点、管理要点·····	273
第二十五章	浅埋暗挖法修建北京地铁隧道与车站注浆技术·····	280
第二十六章	北京地铁复八线工程防治水技术·····	301
第二十七章	北京地铁区间隧道采用高密度聚乙烯(HDPE)膜防水层 ·····	308
第二十八章	北京地铁隧道复合式衬砌防水新技术·····	316
第二十九章	北京地铁新线工程地下结构防水技术·····	331

第一篇 山岭隧道修建技术

我国从 20 世纪 70 年代引入新奥地利隧道施工方法 (New Austrian Tunnelling Method, 简称新奥法), 并迅速推广应用, 取得了良好效益。本篇侧重介绍应用新奥法在软弱岩层中修建隧道的经验, 以及应用新奥法修建隧道的支护机理、设计及施工等的基本要点, 同时还介绍了日本应用新奥法修建隧道的情况。

第一章 应用新奥法在软弱岩层中修建坑道

某坑道所处位置,从地质构造上看正处于北东向构造体系与近东西向构造体系的复合部位,断层较多,地质构造复杂。坑道所通过的岩层大部分是硬绿泥角岩和红柱石角岩风化成的红黏土,其特点是:①岩石强度低,单轴抗压强度仅 $7\sim 45\text{kg}/\text{cm}^2$,且岩石含水量大于天然含水量时强度急剧下降,一般低于 $20\text{kg}/\text{cm}^2$;②流变特性明显,坑道开挖后自稳能力极差,施工中最大变形曾达 62cm ;③岩石遇水软化、泥化,对施工十分不利,为比较典型的软弱岩层。

20 世纪 60 年代末期,在该坑道附近,曾修建过一条坑道。由于对上述复杂的地质条件缺乏认识,仍沿用传统的方法设计和施工,即采用普通钻孔爆破法开挖、木支撑、直墙圆拱混凝土衬砌等。坑道竣工后不久,衬砌发生裂缝,地坪起鼓,致使难以使用,不得不花费较多的人力、物力予以处理。20 世纪 70 年代末,在修建这条坑道时,起初仍用传统方法设计和施工,结果是边掘进、边支护、边塌顶,因而坑道只掘进了 54m 就被迫停止作业。在这种情况下,坑道应该怎样修建,是摆在设计单位和施工单位面前的一大难题。设计单位和施工单位的工程技术人员开动脑筋想办法,提出按“新奥法”(即 New Austrian Tunnelling Method,缩写 NATM,简称新奥法)的原则修建这条坑道,即采用短台阶开挖法,紧跟作业面及时喷射混凝土、安设锚杆和挂钢筋网作为初期支护,对围岩变形进行监控量测,待围岩基本稳定后再做模注混凝土作为二次衬砌。鉴于围岩流变特性明显,坑道横断面设计成为“卵形”,即曲墙圆拱、底部作成仰拱。施工过程中,不论初期支护还是二次衬砌都是先做墙拱,再适时做仰拱。

经过三年多时间的工程实践和考察证明,在软弱岩层中修建坑道,采用“新奥法”修建是正确有效和安全可靠的。下面将具体施工方法简述如下。

1.1 开 挖

在开挖方法上,为了充分利用围岩的天然承载能力和减轻爆破对围岩的破坏,采用光面爆破开挖,并尽量采用全断面开挖的方法进行。在松软岩层中采用全断面开挖不易保持作业面的稳定,可根据断面积大小采用二级台阶或多级台阶开挖。

某坑道毛洞宽 4.65m ,高 5.85m ,因断面积不甚大,故采用二级台阶开挖,上部台阶高 2.65m ,下部台阶高 3.2m 。台阶长度视石质情况而定,一般情况下台阶长为 2.5m ,作业面与水平面夹角为 $70^\circ\sim 80^\circ$ 。光面爆破参数为:炮孔深一般为 1.2m ,周边孔间距 $0.3\sim 0.4\text{m}$,最小抵抗线 $0.6\sim 0.7\text{m}$,炮孔密度 $4\text{个}/\text{m}^2$,装药量 $0.4\text{kg}/$

m³。周边孔采用间隔装药,药卷直径 20mm,毫秒延期雷管非电导爆起爆。在岩层极为松软地段,则用风镐开挖。

1.2 喷射混凝土、安设锚杆和挂金属网

坑道开挖后,为保持作业面的稳定,立即对作业面施做喷射混凝土以封闭围岩。喷射混凝土厚 5cm,这一道工序十分重要,喷后即可出碴。待施作喷射混凝土 4h 后,开始安设锚杆和挂金属网。锚杆用全粘接水泥砂浆金属锚杆,杆体为圆钢,直径 18mm,长 3m,间距 0.75~1m,呈梅花形布置。金属网用直径 8~10mm 钢筋,网眼 20cm×20cm。锚杆与金属网安设完后,再喷射混凝土 10~15cm 厚即可。喷射混凝土为 200 号(C20),其中掺有 3%(占水泥用量百分比)的红星一型速凝剂。

1.3 打筑仰拱

及时打筑仰拱,使坑道形成闭合结构,对于在松软岩层中修建坑道是十分重要的。《新奥法基本思想和主要原则》一书中指出:“一个圆筒只有在筒体内没有切缝的情况下,才能相应地受力。因此,封闭隧洞底拱的时间(当底拱岩石不能完整受力时)是至关重要的因素。”实践证明,这一原则是正确的。如该坑道未打筑仰拱,围岩不够稳定,变形速率达 3.3mm/d;而打筑仰拱后,即坑道形成闭合结构,围岩趋于稳定,变形速率仅 0.1mm/d。该坑道掘进到 500 余米处时,由于未及时打筑仰拱,内空变位值曾高达 62cm,此时喷射混凝土开裂、起鼓,围岩松脱或挤出破坏,十分危险。后来,设计和施工人员进行研究,决定停止掘进,立即开挖底拱、打筑仰拱,内空变位才逐渐减小,围岩趋于稳定。在开挖底拱时,围岩会出现快速变形,为此一定要根据围岩变形动态,决定打筑仰拱的时机。一般情况下,每掘进 10m,就应打筑一段仰拱,但有时围岩变形量较小,为加快施工进度,可适当加长到 30~50m。

开挖底拱时,围岩变形速率较大,为减轻爆破对围岩的破坏,采用人工挖底拱的方法进行,其工序是:拆轻轨→挖底拱→铺设建筑排水管→安设仰拱锚杆→放置混凝土墩(便于辅轨运输混凝土)→编、焊钢筋网→铺轻轨→浇灌混凝土。

1.4 二次衬砌

为保证坑道结构稳定,按新奥法原则,该坑道采用复合式衬砌,即用锚网喷做初期支护,模筑混凝土做二次衬砌。由于该坑道墙拱在施做锚网喷和及时打筑仰拱后,内空变位很小。二次衬砌试验共打筑了三段,每段长 8m,分别为双层钢筋混凝土、构造配筋(单层筋)混凝土及素混凝土,衬砌厚均为 25cm,墙拱满灌并与围岩密

贴。试验段衬砌于 1982 年底完成,通过一年多时间量测,发现内空变位均较小,坑道结构安全。

1.5 围岩变形监控量测

监控量测是在软弱岩层中修建坑道的重要技术管理手段。该坑道施工中,设计和施工人员紧密配合,监控量测工作做得好,曾数次提出围岩变形预报,得以及时调整施工计划与作业方法,保证了工程安全。该坑道监控量测断面平均每 10~25m 设一个,监控量测手段主要有两种;一是用周边位移计量测坑道壁面点向内相对位移值;二是用钻孔位移计量测围岩深部位移。测点布置见图 1.1。

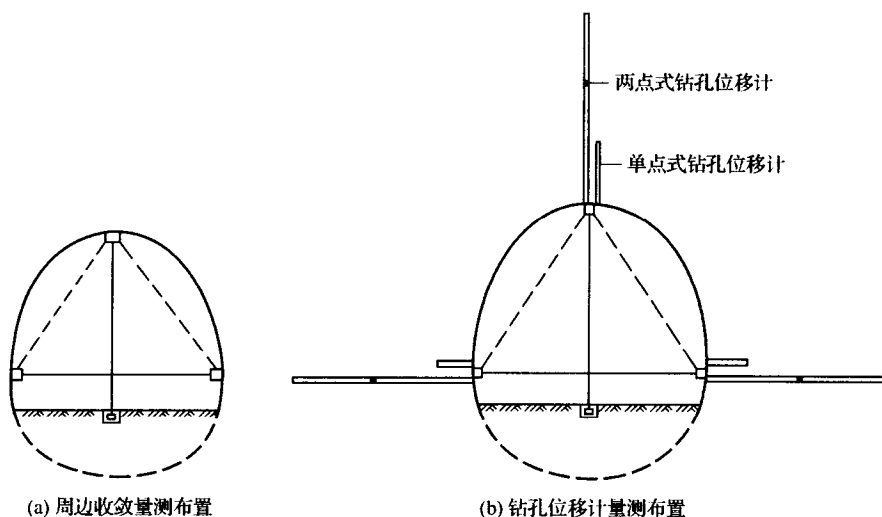


图 1.1 坑道围岩变形测点布置

周边收敛量测布置有 10 个断面,粘孔位移计量测围岩深部位移布置了 3 个断面,共设 48 个测点。通过监控量测取得的数据起到监视围岩动态和保证工程施工安全的作用。例如,坑道 A 口掘进到 98m 处,发现围岩变形速率加快、变形量增大,监控量测技术人员及时预报后立即停止掘进,并采取打设锚杆、挂金属网及喷射混凝土使围岩达到设计要求厚度,变形速率减缓,围岩趋于稳定,杜绝了塌方的发生。

1.6 施工中应注意的问题

(1) 为了减轻人为的破坏,坑道开挖一定要采用光面爆破,做到穿浅孔、密布眼、少装药、放小炮,力求减少超挖,确保坑道幅员规整。

(2) 要保证锚网喷的施工质量。在软弱岩层中修建坑道,做好锚网喷是保证工

程安全的基础。锚杆孔砂浆一定要饱满,钢筋网要紧贴喷射混凝土,喷射混凝土厚度要保证。当发现喷射混凝土有空鼓、脱落及严重裂缝的地方,一定要凿掉重喷。

(3) 坑道上、下台阶开挖后,立即先喷一层混凝土,保持围岩稳定。然后再打设锚杆、挂钢筋网和喷射混凝土。同时,要根据围岩监控量测得到的信息恰当确定台阶长度,适时开挖底拱和用混凝土打筑底拱,使坑道形成一闭合结构,以利安全。

(4) 加强对坑道围岩的保护。鉴于某坑道软弱岩层遇水软化、泥化等特点,为保证围岩稳定,防止塌方,施工中要防止围岩浸水,要尽量减少反坡施工。当遇到反坡施工时,每隔 100m 左右应设一集水坑,集水坑用混凝土做围护结构,并安装小型水泵,及时将积水排走。正反坡坑道施工都要做好排水边沟,边沟用水泥砂浆抹面,保证不渗漏水,同时要保证排水畅通。

实践证明,该坑道按新奥法原则设计、施工是可行的和安全的。如用传统的方法施工,不仅施工困难,而且工程安全没有保证。该坑道的安全建成,对于今后在埋深较厚(大于 100m)的软弱岩层中修建坑道,提供了有益的经验。但由于是初次尝试,还存在不少问题,如工序繁多(每掘进一个循环共有 28 道工序),日进度仅 0.5~1.0m;喷射混凝土回弹率较高,养护欠佳;有的锚杆孔砂浆还欠饱满;二次衬砌如何施做更好,都有待在实践中摸索,不断改进。

第二章 日本推广应用新奥法的情况

新奥法是 20 世纪 50 年代由奥地利 L. V. Rabcewicz 等人根据多年的矿山工程经验开创并发展起来的一种实用的隧道工程的设计、施工的理论与方法。它摒弃了原来隧道工程中应用厚壁混凝土衬砌结构支护松动围岩的理论,适时地采用薄壁柔性支护结构,调动了围岩的天然承载能力,变围岩为重要的支护结构组成部分,因而安全可靠,比较经济,尤其对于在松软岩层中构筑隧道是一种有效的方法。新奥法问世以来,在欧洲及其他地区得到了广泛应用,并收到了良好的效果。

日本于 1976 年开始推广使用这一技术。日本土木学会和隧道协会都专门成立了推广应用新奥法委员会,日本国有铁道所属单位都积极进行研究与试点,并用新奥法原理指导设计与施工,建成数十座隧道。日本是一个岛国,地质条件复杂,应用新奥法修建隧道意义重大,并且已取得不少经验,其经验值得借鉴。

2.1 应用新奥法前的隧道设计、施工方法

1953 年以前,日本隧道施工系在隧道开挖后,对围岩松动部分用木支架支撑,然后用手灌筑混凝土衬砌。1953~1956 年板田铁路干线改建,所修建的三座隧道(长 3619m),从美国引入钢拱架做临时支撑,为加快施工进度,混凝土衬砌作业采用移动钢模板台车。作用在隧道衬砌和支撑的荷载大小及状态,由于不十分清楚,只能按过去的实践结合现场试验加以确定。日本土木学会制定的《隧道规范》建议荷载高度采用围岩的松弛高度表示,并假定松弛的围岩均匀而垂直地作用在衬砌和支撑上。按这种理论,则要求支撑与衬砌紧贴围岩。实际上,这是难以做到的。隧道开挖后,由于围岩松动,随着时间的推移,变化越来越大。钢支撑加杆板或背板(钢拱支撑间距:围岩差的为 1m,围岩好的为 1.5m),在松动部分形成点支撑受力,不能完全约束围岩的松动;同时靠近作业面的钢拱支撑受爆破影响而发生松动,而且要经过一段时间才能进行衬砌作业,拱顶部分灌筑混凝土难以回填密实而有空隙。同时,衬砌混凝土厚度与围岩关系比较混乱,没有合理的计算方法,大都根据经验确定。日本《隧道规范》规定:当采用钢支撑时,衬砌混凝土设计厚度除特殊情况外,以表 2.1 数值作为标准。

《隧道规范》还指明:地质恶劣、覆盖土层较薄或受偏压时,增加衬砌混凝土厚度是无益的,最好进行充分的回填压浆或加钢筋补强。

按上述要求设计,往往与实际施工有出入,验证也很困难,给隧道建设留下了后遗症。因此,日本隧道工程技术人员意识到有必要对这种设计与施工方法进行改

革。

表 2.1 隧道衬砌混凝土厚度

断面净宽/m	衬砌混凝土厚度/cm
2	20~30
5	30~50
10	40~70

注:混凝土标号为 160~200 级,相当于 C16~C20。

2.2 对应用新奥法的认识

日本推广应用新奥法在开始阶段,认识上也不完全一致。过去用钢支撑,觉得安全;现在用锚杆和喷射混凝土,觉得不放心。1976 年在修建上越新干线中山隧道(全长 14.8km)遇到膨胀性围岩,采用两侧导洞开挖方法(钢支撑),围岩变形很大,导洞断面缩小到连矿车也进不去(最大变形近 80cm),后试验采用锚杆、喷射混凝土支撑,变形小多了,从而体会到它的优越性。中山隧道是日本按新奥法原则设计与施工的头一座。

新奥法的原理是建立在岩石力学与围岩变化机理基础上的。隧道开挖前,地层的应力是初始应力(或称一次应力);开挖后,应力要重新分布,初始应力转化为围岩应力(或称二次应力)。为了保持开挖后围岩的稳定,一般是架设临时支撑及做混凝土衬砌。支撑的受力状态与支架的架设时间和支撑材料的刚度有关。这种方法,不管施工技术水平如何高,都难免在支架或衬砌与围岩之间保留一定的空隙,而且支撑反力与围岩压力相比总是小得多。结果,必然引起围岩的变形,这时为保持围岩稳定,只能采取加固支撑措施,而新奥法则最大限度地利用围岩本身的强度和稳定性。由于喷射混凝土和锚杆支护,不仅弥补了围岩的缺陷,强化了围岩,而且喷射混凝土薄衬砌为柔性结构,极大地改善了隧道的受力状态。因此,新奥法比普通方法就优越得多。此外,采用新奥法设计与施工,要系统地进行地层压力、支撑压力、岩体和支撑变形等的连续测定,因此对锚杆的长度、间距和喷射混凝土厚度能够大体上做出定量的设计,而且能把测定的结果反馈到施工现场,以便据以进行增设锚杆、增减喷射混凝土厚度等,易于根据地质变化修改,所以能适应相当广泛的地质情况。

新奥法可用于软岩、中等坚硬岩石及坚岩。对于坚岩是否可只进行一次衬砌(即喷射混凝土),而不做二次衬砌(模筑混凝土),有的认为可以,但运营单位不同意,因此执行不了。

隧道是线形结构,开挖中,每爆破一炮都不一样,设计人员要深入现场,根据实际情况随时改变设计。对于地质情况,设计和施工技术人员要互通情报,互相配合,才能把新奥法应用好,才能充分发挥新奥法的作用。

2.3 新奥法的设计与施工

应用新奥法,首先要从围岩分类入手,然后根据围岩分类进行设计和确定施工方法,在施工中要加强监控量测工作。为使地质、设计、施工人员有所遵循,日本国有铁道对围岩分类、设计与施工都作了暂行规定。1983年3月日本将正式颁布有关适用于新奥法的围岩分类、设计标准、施工与量测规定。

2.3.1 围岩分类

围岩分类作用:确定一、二次衬砌厚度及隧道开挖、衬砌方式,计算材料及安排工程计划。

1976年在上越新干线中山隧道采用新奥法施工时,还没有适用于新奥法的围岩分类方法,1978年12月才提出暂时分类方法。经过一段实践,1982年3月汇总统计了几十座铁路隧道施工情况,修改了暂时分类方法。

修改的分类方法是:隧道开挖前先对地层按岩性及岩石坚硬程度进行分类;开挖后,则根据开挖作业面状态、岩石抗压强度、风化程度、裂隙发育程度,有无涌水等对围岩进行评定;最后,根据以上情况进行综合评价,评定出围岩等级,分为特级和Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ六个等级。

1. 开挖前的围岩判定法

(1) 岩层分类见表 2.2。

表 2.2 岩层划分

岩种	分 类
A	①古生层、中生层(粘板岩,沙岩,砾岩,燧石,石灰岩,辉绿凝灰岩等);②深成岩(花岗岩,花岗闪绿岩,辉长岩等);③半深成岩(石英斑岩,花岗斑岩,玢岩,辉绿岩等);④火山岩(玄武岩);⑤变成岩(结晶片岩,千枚岩,片麻岩,角岩等)
B	①剥离显著的变成岩;②细层理发育的古生层、中生层
C	①中生层的一部(页岩,沙岩,辉绿凝灰岩等);②火山岩(流纹岩,安山岩);③古第三纪层的一部(火山岩质凝灰岩,硅化页岩,沙岩,凝灰岩等)
D	古第三纪层至新第三纪层(页岩,沙岩辉绿凝灰岩,角砾凝灰岩,凝灰质沙岩……新鲜岩石单轴抗压强度均在 $200\text{kg}/\text{cm}^2$ 以上)
E	新第三纪层至洪积层(泥岩,粉沙岩,沙岩,沙砾岩,凝灰岩,扇状堆积物,崖锥积物,火山碎屑物……新鲜岩石单轴抗压强度约 $200\text{kg}/\text{cm}^2$ 以下)
F	洪积层至冲积层(黏土,粉沙,沙,沙砾,火山灰,火山沙砾,扇状地堆积物,段丘堆积物等)
G	表土,崩坏土

(2) 围岩分类标准。

1) 将表 2.2 的岩层进一步分类如下:硬岩——A、B、C 岩种;中硬岩——D 岩

种;软岩——E 岩种;F、G 岩种不列入岩石之内。

2) 在划分围岩时所定的硬岩、中硬岩、软岩不表示围岩的软硬状态,而是表示围岩由硬岩、中硬岩种、软岩种形成的。

3) 作为 B 岩种的,当判断困难时,可包括在 A 岩种中。

4) 根据弹性波速度的围岩分类标准,见表 2.3。

表 2.3 按弹性波速度划分的围岩分类

弹性波速度 围岩分类	$V_p =$ km/s											
	5.2	5.0	4.6	4.0	3.8	3.2	3.0	2.0	1.0			
硬岩围岩	V		IV		III		II		I		特	上限值 A、B 岩种 下限值 C 岩种
	5.0		4.4		3.6		3.0					
中硬岩围岩	V				IV		III		II		I 特	特
	4.2				3.4		2.6		2.0		1.5	
软岩围岩	超过 2.6 km/s 以上时作为中硬岩处理								II~I 特		特	
	2.6								1.5			
	← 一般围岩 →								← 特殊围岩 →			

5) 根据围岩强度比的围岩分类标准,见表 2.4。

围岩强度比

$$G_n = \frac{\sigma_c}{\gamma h}$$

式中: σ_c 为岩石单轴抗压强度(t/m²); γ 为岩石单位体积重量(t/m³); h 为覆盖层厚度(m)。

σ_c 约等于准岩石强度,即 $\sigma_c = \sigma_{cf} (V_p/V_{pt})^2$, σ_{cf} 为新鲜岩石单轴抗压强度; V_p 为岩层弹性波速度(km/s); V_{pt} 为钻孔取出岩芯弹性波速度(km/s)。

对特殊围岩,除表 2.3 和 2.4 中注明者外,下列情况亦属于特殊围岩:

- 1) 土砂围岩(从岩种划分为 F、G 及 A~E 岩种风化严重、变质严重者);
- 2) 破碎带;
- 3) 膨胀性围岩(蛇纹岩,变质安山岩,温泉余土等);
- 4) 液化状地层。

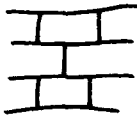
表 2.4 按围岩强度比的围岩分类标准

围岩强度比 围岩区分	$G_n=$										
	10.0	9.0	8.0	7.0	6.0	5.0	4.0	3.0	2.0	1.0	
中硬岩围岩	I									2.0	特
软岩围岩	II				6.0	II		4.0	I	2.0	特

2. 施工中(隧道开挖后)围岩评价

日本国铁为制定隧道开挖后围岩评价标准,他们调查了 332 个实际作业面。根据调查与分析,选出九种指标,分为四种情况作为评价指标(表 2.5)。

表 2.5 隧道开挖后围岩评价标准

状态	1	2	3	4
开挖状态	安定	从作业面脱落岩块	作业面发生挤出	作业面不能自立,倒塌或挤压
无支撑开挖面的状态	自立	随时间推移产生松弛与剥落,随后支撑	自立困难,边掘进,边支撑	开挖时有必要先行承受围岩压力
岩石抗压强度	锤子一击即弹回	锤击即碎	轻轻一击即碎	咬住锤头
风化,变质	无,健全	岩石随裂隙变色,强度下降	所有岩石都变色,岩石本身强度下降严重	岩石当初未固结,呈土沙状、黏土状很破碎
裂隙频度	间隔 $d > 1\text{m}$	$1\text{m} > d \geq 20\text{cm}$	$20\text{cm} > d \geq 5\text{cm}$	$5\text{cm} > d$, 破碎,当初未固结
裂隙状态	致密	部分开口	开口	夹有黏土层,当初未固结
裂隙形态	呈不规则方形或方形 	呈柱状 	层状、片状、板状 	当初未固结,呈土沙状、细片状
涌水	无或渗水	滴水	集中涌水	全面涌水
水对岩石恶化的影响	无	产生松弛	软弱化	崩坏,流出