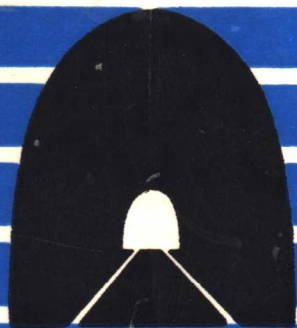


铁路隧道 围岩分级方法

沈中其 关宝树



铁路隧道围岩分级方法

沈中其 关宝树

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

内 容 简 介

本书包括围岩分级的现状、围岩分级的基础条件、铁路隧道围岩分级、铁路隧道围岩分级的量化评定、隧道围岩分级的判定方法及围岩分级的应用等六节。可供从事地下工程设计、施工的人员参考,亦可作为大专院校地下工程专业的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

铁路隧道围岩分级方法 / 沈中其, 关宝树编著. 一成都: 西南交通大学出版社, 2000.4
ISBN 7-81057-361-6

I. 铁... II. ①沈...②关... III. 铁路隧道 - 围岩分类
IV. U459.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 48998 号

铁路隧道围岩分级方法

沈中其 关宝树

*

出版人 宋绍南

责任编辑 毛文义

封面设计 郑 宏

西南交通大学出版社出版发行

(成都二环路北一段 111 号 邮政编码: 610031 发行科电话: 7600564)

<http://press.swjtu.edu.cn>

E-mail: cbs@center2.swjtu.edu.cn

四川森林印务有限责任公司印刷

*

开本: 787 mm × 1092 mm 1/16

印张: 7.75

字数: 185 千字

印数: 1~1 000 册

2000 年 2 月第 1 版

2000 年 2 月第 1 次印刷

ISBN 7-81057-361-6/U · 027

定价: 12.00 元

目 录

概 述	1
第一节 围岩分级的现状	4
一、以岩石强度或岩石的物性指标为代表的分级方法	4
二、以岩体构造、岩性特征为代表的分级方法	6
三、与地质勘查手段相联系的分级方法	9
四、以多种因素进行组合的分级方法	13
五、以坑道稳定状态为代表的分级方法	24
六、施工阶段的围岩分级方法	25
第二节 围岩分级的基础条件	34
一、几个基本概念	34
二、影响坑道围岩稳定性的因素	37
三、分级指标的选择	47
第三节 铁路隧道围岩分级	55
一、铁路隧道围岩分级的基础条件	55
二、铁路隧道围岩分级	58
第四节 铁路隧道围岩分级的量化评定	60
一、数量化理论	60
二、变量的确定	71
三、施工前围岩级别的预测	75
四、施工阶段围岩级别的判定	80
五、施工阶段围岩级别定量判定的修正	87
第五节 围岩分级的判定方法	94
一、地质判定方法	94
二、施工阶段掌子面摄影图像处理方法	96
三、专家系统的判定方法	101
四、模糊理论的判定方法	108
第六节 围岩分级的应用	113
一、坑道围岩稳定性分级及其特征	113
二、各类围岩的物理力学指标	114
三、支护结构的选择及其参数	115
四、围岩分级与施工方法的选择	117
结束语	118
参考文献	119

概 述

目前,地下工程的设计和施工在很大程度上还处在“经验设计”、“经验施工”的阶段。其中一个主要原因是:作为地下工程设计、施工的基础条件——坑道围岩分级还处在“经验分级”的阶段上。人们对于坑道围岩的认识,也就是说,对于与地下工程有直接关系的地质条件的认识还不充分,还不能客观地揭示出地质条件与地下工程之间本质的、内在的联系,因而也就不能客观地预测或判断坑道围岩的状态。

地下工程所遇到的地质条件,诸如地质构造、岩性、地下水……等,都是千变万化的。这就给地下工程的设计和施工带来了很大的、不可避免的“盲目性”。但也应指出,地下工程的某一种类型的支护结构,或某一种施工方法,在多数条件下都有很大的地质适应性。例如:上下导坑施工法,就可以适应大部分中等程度的地质条件;喷射混凝土作为支护手段,在采取一定措施的情况下,几乎可以适应绝大多数的地质条件。这就说明:针对不同的工程目的(爆破开挖、支护、掘进机掘进……等),是可以把之与相适应的地质条件进行一定的概括、归纳并加以分级的,从而为地下工程的设计、施工的模式化提供一定的基础条件。因此,国内外在最近十几年内,把地下坑道围岩分级作为地下工程设计基础研究内容之一,也是地下工程地质环境评估技术之一,从定性上、定量上进行了大量的探索和实践,并获得了一定成果。

下面以铁路隧道围岩分级方法的发展,简要说明我国隧道及地下工程围岩分级的发展情况。

铁路隧道围岩分级是隧道及地下工程设计施工的基础条件之一,是地下工程技术领域中的重要课题。我国铁路隧道围岩分级方法经历的历程,充分地说明了这一点。

解放前由于对地下工程和地质条件的关系认识不充分,再加上缺乏有效的地质勘察手段(方法),并没有明确的围岩分级方法。因此,解放前修建的铁路隧道,基本上是引用英国等国家的分级标准,如众所周知 K.Terzaghi 围岩分级标准。而解放后我国铁道隧道围岩分级方法的发展,大体上经历 4 个阶段:

第 1 阶段(1949~1954):解放初期,隧道围岩分级基本上是沿用解放前的以岩石极限抗压强度(R_c)及岩石天然容重(γ)为基础的,适用于土石方工程的土石分级法,并没有适合隧道工程的专门分级。例如新建成渝铁路时,就是把隧道围岩分为坚石、次坚石、松石和土质,以及与之相适应的 4 种衬砌断面。这种分级方法分级等级少、适应范围大,在当时土石方工程中应用很广。1951 年 7 月铁道部颁布的《中华人民共和国铁路隧道衬砌标准》就是以此围岩分级为基础而编制的。

第 2 阶段(1954~1975):隧道围岩主要是按岩石坚固性进行分级的。用以表征分级指标的是岩石坚固性系数,即通常所谓的普氏系数 f 。这个分级方法在前苏联应用极广,也应用于我国的各个地下工程,尤其是铁路隧道工程中。在 1960 年颁布的铁路隧道设计规范

中, f 值表示岩石在采掘过程中各方面的相对坚固性, 如人工破碎岩石时的破碎性、钻孔时的抗钻性、对炸药的抗爆性、支撑上的压力等。因此, f 值是一个综合的特性指标。在大多数岩石中, 这些物性(抗爆性、抗钻性、强度等)是相关的。即: 强度大的, 抗爆性、抗钻性也高。当时 f 值主要是指根据岩石单轴抗压强度 R_c 确定的。例如, 在岩质围岩条件下, f 值等于 R_c 的 $1/10$ (详见第 6 页)。因此, 在 1960 年颁布的《铁路隧道设计规范》(铁路基武(60)字第 708 号部令)中, 按照 f 值, 从 $15 \sim 0.6$, 把隧道围岩分为 10 级, 并编制了与之配套的隧道衬砌标准设计。这个分级一直在铁路隧道中应用了 20 多年。之间虽经几度修正, 在分级级别上有所变化, 如从 10 级变为 8 级(f 值从 $6 \sim 0.6$ 分为 8 级), 实质内容上, 也开始考虑隧道围岩的结构特征和完整状态等因素的影响, 但基本方法变化不大。

此后, 在工程实践的基础上认识到: 单纯依靠岩石抗压强度判断 f 值是不能充分反映围岩的基本特性和坑道的稳定状态的。基于这种认识, 现场人员在实践的基础上提出: 在决定 f 值时, 既要考虑岩石强度, 但格外重要的是也要考虑岩层的物理状态、风化状态以及破碎程度等。这实质上是把由强度决定的 f 值适当降低, 即:

$$f_{\text{岩体}} = K \cdot f_{\text{岩石}}$$

式中 K 是考虑围岩破碎程度、地下水状态等变化的系数。

如 60 年代的西南铁路建设指挥部山体压力战斗组提出的“岩体综合分级”、“2102 线隧道衬砌分级”等, 就反映了这种变化。为以后的围岩分级方法的发展, 打下了良好的基础。

第 3 阶段 (1975~1992): 在工程实践的基础上, 通过大量的调查研究, 1975 年 7 月 1 日试行的《铁路工程技术规范·第 3 篇——隧道》(1974 交铁基字 2960 号), 对铁路隧道围岩分级方法作了重大的修正, 建立了对国内地下工程具有深远影响的、以隧道稳定性为基础的铁路隧道围岩分级方法。改变了以前采用 f 值的分级方法。该方法是岩石强度、围岩完整状态及地下水影响 3 个因素来判断围岩稳定性和进行围岩分级的, 基本上将隧道围岩分为 6 级 (VI~I), 同时列出了表征单线铁路隧道的稳定状态的定性评述。至此, 我国的围岩分级方法与国际上通用的分级方法, 基本靠拢。该分级方法提出后, 推动了我国水电、公路等部门地下工程围岩分级方法的形成, 为建立我国工程岩体分级标准奠定了基础。从 1975 年开始采用新的分级方法后, 一直应用至今。之间, 规范虽经几度局部修正 (如 1986 年 7 月 12 日试行的《铁路隧道设计规范》(TBJ 3—85)), 但分级方法始终未变。

本分级方法同时作为 1990 年 12 月 1 日试行的《公路隧道设计规范》(JTJ 026—90) 的围岩分级方法, 予以实施。

为了与地质勘察手段联系在一起, 同时提出了按弹性波速度进行围岩分级的方法。

在这一时期, 人民铁道出版社出版了我国第一部铁路隧道围岩分级的专著——《铁路隧道围岩分类》(关宝树, 1978 年 11 月)。该书详细地说明了我国铁路隧道围岩分级方法的形成和发展, 说明了我国铁路隧道采用以稳定性为基础的围岩分级方法的基本内容。

第 4 阶段 (1992~): 应该指出: 铁路隧道围岩分级主要还是一个“经验”的分级方法。为了提高分级的可靠性, 消除人为的、主观判定的影响, 从 80 年代中期开始, 世界各国都把围岩分级研究的重点从经验判定向定量判定, 从设计阶段预判定向施工阶段判定方向发展。为适应这种发展趋势, 我国研究人员针对铁路隧道的工程特点, 根据大量的现场实地的判定数据, 采用数量化理论, 对铁路隧道勘察设计阶段的围岩分级进行了定量判定方法的研究, 并取得了重要的成果。1992 年铁道部颁布的《铁路隧道喷锚构筑法技术规

则》(TBJ 108—92),明确地确立了铁路隧道勘察设计阶段的围岩分级的定量判定方法。使围岩分级的判定,从完全经验判定向定量判定迈出了重要的一步。为了进一步提高分级判定的可靠性,从1996年又开始研究施工阶段围岩分级的判定方法。工程实践充分证实,只有施工阶段的判定才是最可靠、最可信、最客观的判定,才是决策隧道设计施工中各种问题的基础。1998年,以大量的工程数据、数理理论为基础的,施工阶段围岩级别的定量判定方法,也通过了部级鉴定。该分级方法明确了施工阶段围岩级别判定的基本因素和各因素在分级中的权值,并完成了铁路隧道围岩分级标准的建议稿。部分内容将体现在正在修订的隧道规范中。至此,铁路隧道围岩分级方法,形成了一个从勘测设计到施工的完整的、系统的体系。

为了与国家标准《工程岩体分级标准》靠拢,除原围岩分级的级别Ⅵ~Ⅰ级改为Ⅰ~Ⅵ级的顺序外,在实质内容上,还维持原来分级的框架。

为建立统一的评价工程岩体稳定性的分级方法,1995年发布了《工程岩体分级标准》(GB 50218—94)。这是我国第一部在岩石工程领域内建立起来的基准性的规定。该分级方法采用定性和定量相结合的方法对工程岩体进行分级。岩体的基本质量由岩石坚硬程度和岩体完整程度两个因素确定。除定性地确定两个因素外,提出可以采用点荷载强度指数确定坚硬程度和采用岩体完整性指数确定岩体完整程度的方法。

目前《水电地下工程、岩土工程勘察规范》(GB 50021—94)中的围岩分级也基本上是以此为基础编制的。

国外的情况也大致相仿。例如日本在1960年以前基本上是没有适合于隧道工程需要的隧道围岩分类的。在隧道设计、施工中也主要是采用适用于土石方工程的“国铁土石分级”。这个分级主要是根据开挖岩(土)体的难易程度分级的。但从1960年开始,着手采用弹性波速度进行分级的探讨,经过几年的探索、试验和实践,于1969年提出了按弹性波速度分级的建议。目前这个分级在日本隧道工程中正在广泛应用。

前苏联在很长时间内,坑道围岩都是采用按岩石坚固性分级的。由于方法简单易行,一直沿用到现在。目前仍然是独联体各国岩石统一分级的一个基础。从1960年开始前苏联在地下铁道建筑中也逐渐提出了以坑道稳定性为基础的分级建议。其中,岩石坚固性系数只是评价坑道稳定性的一个指标。从趋势上看,在隧道围岩分级上也逐渐抛弃了“ f ”值的分级方法。

英、美等国,过去主要是沿用K·泰沙基1946年提出的围岩分级方法并用以确定支护结构上的荷载值。这个分级(见表1-4)考虑了一些岩体的构造、岩性的影响,也包括一些具有特征性质的岩石在内。从一些分级比较看,它对围岩的论述较好地反映了坑道围岩状况和性质,因此,直到目前还广泛应用于岩石地下工程的设计中。1969年美国伊利诺斯大学研究的以钻探岩心的质量指标(RQD)分级的方法,在欧美各国应用很广,因为它与钻探技术的发展密切相关,而钻探又是隧道工程采用的最基本的地质勘查手段。

总之,铁路隧道围岩分级仍然处在“经验”的分级阶段,但较过去已经有了较大的突破。这就是近几年提出的以复合指标为基础的分级方法,它不仅重视经验指标在分级中的作用,也把分级指标的定量化与岩体力学的发展联系起来了。铁路隧道围岩分级就是这种分级方法的一个体现。

第一节 围岩分级的现状

坑道围岩分级是在地下工程实践的基础上发展起来的，是随着人们对地下工程、地质条件及两者间相互关系的认识不断深化、不断提高的基础上发展起来的。

所谓围岩分级，简言之，就是针对不同的工程要求，如爆破、开挖、支护、编制定额……等，而把与之相适应的地质条件进行分级，以满足地下坑道设计、施工的需要。目前，在实践中得到应用的坑道围岩分级，大体上有下述几种方法：

- (1) 以岩石强度或岩石的物性指标为代表的分级方法；
- (2) 以岩体构造、岩性特征为代表的分级方法；
- (3) 与地质勘查手段相联系的分级方法；
- (4) 以多种因素进行组合的分级方法；
- (5) 以坑道稳定状态为代表的分级方法。

一、以岩石强度或岩石的物性指标为代表的分级方法

在地下工程的初期，由于对地下工程与地质条件的关系认识不充分，再加上缺乏有效的地质勘查手段（方法），围岩分级也多单纯地以岩石强度作为分级指标。例如，我国解放前采用的坚石、次坚石、软石的分级方法，就是以岩石单轴极限抗压强度为代表的（表 1-1、表 1-2）。

表 1-1 岩石分级表

分 类	岩石试件极限抗压强度 (MPa)	岩石平均重度 (kN/m ³)
软 石	< 40	11.0~27.0
次坚石	40~100	22.0~30.0
坚 石	> 100	25.0~33.0

表 1-2 岩土分级表

分 类	岩石极限抗压强度 (MPa)	岩石平均重度 (kN/m ³)
松软土	—	—
普通土	—	15.0~19.0
硬 土	—	17.5~19.0
软 石	< 20	19.5~22.0
次坚石	40~100	27.0~29.0
坚 石	100~160	27.0~32.0
特坚石	160~250	28.0~33.0

上述分级除了考虑岩石极限抗压强度外，还引进了岩石的平均重度。当时的认识是：坑

道开挖后，它的稳定性主要取决于岩石的强度。岩石愈坚硬，坑道愈稳定；反之，岩石愈松软，坑道稳定性就愈差。实践证明，这种认识以及建立在这种认识基础上的围岩分级是不全面的，在某些情况下还会导致错误的判断。例如，老黄土在无水的条件下，坑道开挖后是相当稳定的，有些黄土人工洞室，在无支护条件下可以维持十几年、几十年之久。但如单纯地从岩石的抗压强度出发，其数值很小，就应属于坑道围岩稳定性很差的一级，就势必导致采用强力支护的措施。又如，在岩性相同的条件下，坑道稳定性与岩体的破碎程度或地质构造因素有极其密切的关系。在岩石强度虽高，但岩体破碎的情况下，坑道也是不稳定的。因此，这种单纯地以岩石强度为基础的分级方法，没有得到进一步的发展。

在这种分级法中，值得提出的就是前苏联的“岩石坚固性系数”分级法（或谓之 f 值分级法，或普氏分级法）（表1-3）。它在我国的地下工程中曾经得到广泛的应用。

f 值分级法是以岩石的综合物性指标为基础的。 f 值是表示岩石在采掘各个方面的相对坚固性的：如人工破碎岩石时的破碎性；钻炮眼或钻孔时的抗钻性；对炸药的抗爆性；支护结构上的地压等。因此 f 值是一个综合的物性指标。在大多数岩石中，这些物性（抗钻性、抗爆性、抗压强度……）是可以互换的，即抗压强度大的，抗钻性及抗爆性也高。因此， f 值能够反映岩石各方面的大致性能。但从确定 f 值的主要方法看，即 $f_{\text{岩体}} = (1/10) R_c$ （ R_c ——岩石单轴饱和抗压强度，MPa）， f 仍然是岩石强度指标的一个反映。因而这种分级法，实质上也是以岩石强度为基础的。

表1-3 普氏岩石坚固性系数分级表

围岩类别	坚硬程度	地 层	f
I	极度坚硬	最坚硬、紧密及坚韧的石英岩和玄武岩，在强度方面为其他岩层所不及者……	20
II	很 硬	很硬的花岗岩、石英玢岩、硅质片岩，比上述石英岩略弱的石英岩，最硬的砂岩及石灰岩……	15
III	坚 硬	花岗岩（紧密的）和花岗岩层，很硬的砂岩和石灰岩，石英质矿脉，硬的砾岩，很硬的铁矿……	10
III甲	坚 硬	石灰岩（坚硬的），不硬的花岗岩，硬的砂岩，硬大理石，黄铁矿，白云石……	8
IV	相当坚硬	普通砂岩，铁矿……	6
IV甲	相当坚硬	砂质片岩，片岩状砂岩……	5
V	普 通	硬的粘土质片岩，不硬的砂岩和石灰岩，软的砾石……	4
V甲	普 通	各种片岩（不硬的），紧密的泥灰岩……	3
VI	相 当 软	软片岩，软石灰岩，白垩，岩盐，石膏，冻结土，无烟煤，普通的泥灰岩，破碎的砂岩，胶结卵石和砂砾，掺石土……	2
VI甲	相 当 软	碎石土，破碎的片岩，松散的卵石和碎石，硬煤（ $f=1.4\sim1.8$ ），硬化粘土……	1.5
VII	软 地 层	粘土（紧密的），普通煤（ $f=1.0\sim1.4$ ），硬冲积土，粘土质土壤……	1
VII甲	软 地 层	略带砂性粘土，黄土，砂砾，软煤（ $f=0.6\sim1$ ）……	0.8
VIII	土质地层	种植土，泥炭，略带砂性沃土，湿沙……	0.6
IX	散粒地层	沙，漂砾，小砂砾，松散土，开采出的煤……	0.5
X	流砂地层	流沙，沼泽土，含水黄土和其他含水土壤（ $f=0.1\sim0.3$ ）……	0.3

普氏也曾指出，把 f 值应用到地下工程的设计、施工时，要考虑一定的地质条件。即把某一种岩石划归哪一类不能仅仅根据它的名称，还要根据它的物理状态。风化的、有节理的、

接近断层的……等岩石都要划到较低一类岩石中去。这实质上是把由强度决定的 f 值适当降低, 即

$$f_{\text{岩体}} = K \cdot f_{\text{岩石}}$$

式中 K 是考虑地质条件的折减系数。在这种情况下的 f 值应该称为岩体的 (或围岩的) 坚固性系数 ($f_{\text{岩体}}$), 而不是岩石的了。我国铁路隧道设计施工实践中所采用的 f 值实质上就是岩体坚固性系数。这一点后面还要作进一步说明。

法国隧道学会 (AFTES) 1979 年提出的围岩分级方法也是以此为基础的, 将围岩分为 10 级并提出了相应的支护结构的建议。但围岩分级的 f 值略有不同, 见表 1-4。并提出围岩分级的适应范围: 开挖断面尺寸 (高度或宽度或直径) 小于 10 m; 传统工法及埋深在净空断面的平均直径以上到 1000 m 以下。并附有附加基准, 如围岩变质状态、节理、地下水状态等的修正。

表 1-4 法国隧协建议的围岩分级

级别	状 态	例	f
I	强度极高的岩石	强度高的硅岩及玄武岩	20
II	强度充分高的岩石	强度非常高的花岗岩、斑岩、砂岩及石灰岩	13~19
III	耐久性充分的岩石	耐久性高的或白云化的花岗石、砂岩及石灰岩、大理岩、白云岩等	7~13
IV	强度颇高的岩石	普通的砂岩、硅质的片岩或片岩质砂岩	5~7
V	强度中等的岩石	中等强度的粘土质片岩、砂岩及石灰岩、致密的泥灰岩、硬度低的砾岩	3~5
VI	强度低的岩石	硬度低或裂隙发育的片岩或石灰岩、普通的泥灰岩、石膏、裂隙发育的砂岩、砾岩及压缩的沙砾土	1.3~3
VII	破碎岩石、高压密土	粘土、粘性冲积土、压密粘性土质砂、致密的砂和沙砾	0.9~1.3
VIII	中压密土	泥炭、粘土质砂、中压密湿砂	0.7~0.9
IX	低压密土	低压密塑性填土、饱和砂或沙砾	0.5~0.7
X	流动地层	淤泥、其他饱和塑性土	0.4

以岩石强度, 主要是抗压强度为基础的分级方法, 在选择钻孔机械, 在确定掘进机的类型等与开挖工艺有密切关系的问题上, 仍然具有重要的意义, 因为这些方法的有效性取决于岩石的强度或硬度。因此, 还不能忽视对岩石强度性质的研究。

二、以岩体构造、岩性特征为代表的分级方法

在这方面, 在地下工程应用较广的是 K·泰沙基的分级法 (表 1-5)。

这个分级是以坑道支护所受地压值为对象的。它把不同岩性、不同构造条件的围岩分为 9 级。每级围岩都有一个相应的地压范围值。分级是以有水条件为基础的, 当确认无水时, 4~7 级围岩的地压值应降低 50%。应该指出表 1-5 是根据早期阿尔卑斯山隧道导坑 (3.0 m × 3.0 m) 中的实地量测资料整理的。因此在围岩的定性描述上是比较概括的, 给定的地压值在大多数情况下是偏高的。最近的一些研究指出, 这个数值可以减小 70%。此外分级还缺少定量的描述。但应指出, 这个分级目前在欧、美各国的地下工程中, 仍然是广泛采用的一个分级方法。

表1-5 K·泰沙基围岩分级表

岩 层 状 态	岩石荷载高度 (m)	说 明
1. 坚硬的, 无损害的	0	当有掉块或岩爆时可设轻型支撑
2. 坚硬的, 呈层状或片状的岩层	0~0.5B	采用轻型支撑。荷载局部作用, 变化不规则
3. 大块, 有一般节理的	0~0.25B	
4. 有裂痕, 块度一般的岩层	0.25B~0.35(B+H _i)	无侧压
5. 裂痕较多, 块度小的岩层	(0.35~1.10)(B+H _i)	侧压很小或没有
6. 完全破碎的, 但不受化学侵蚀的	1.10(B+H _i)	有一定侧压。由于漏水, 隧道下部分变软, 支撑下部要作基础。必要时可采用圆形支撑
7. 挤压变形缓慢的岩层 (覆盖厚度中等)	(1.10~2.10)(B+H _i)	有很大侧压, 必要时修仰拱, 推荐采用圆形支撑
8. 同上, 但覆盖较厚	(2.10~4.50)(B+H _i)	
9. 膨胀性地质条件	与 (B+H _i) 无关, 一般达80 m 以上	要用圆形支撑, 激烈时采用可缩性支撑

注: 表中 B、H_i 分别为坑道宽度及高度。

我国铁路隧道, 1960 年左右在 f 值的基础上, 考虑了围岩的地质特征 (风化、破碎、裂隙……) 提出的岩体坚固性分级法, 列于表 1-6。在这里我们引进了岩体的概念, 这是对地下工程与地质条件的正确认识的一个反映。

表 1-6 铁路隧道采用的岩体坚固系数 $f_{\text{岩体}}$

$f_{\text{岩体}}$	围岩地质特征	岩层名称	天然重度 γ (kN/m ³)	内摩擦角 φ
≥ 15	坚硬密实稳固无裂隙和未风化的岩层	很坚硬的花岗岩和石英岩, 最坚固的砂岩和石灰岩等	26~30	—
≥ 8	坚硬密实稳固岩层, 有很小裂缝	坚硬的石灰岩和砂岩, 大理岩, 白云岩, 黄铁矿, 不坚硬的花岗石	25	80°
6	相当坚硬的较密实的稍有风化的岩层	普通砂岩, 铁矿	24~25	75°
5	较坚硬的较密实的稍有风化的岩层	砂质片岩, 片岩状砂岩	24~25	72° 30'
4	较坚硬的岩层, 可能沿着层面和沿着节理脱落, 已受风化的岩层	坚硬的粘板岩, 不坚硬的石灰岩和砂岩, 软砾岩	25~28	70°
3	中等坚硬的岩层	不坚硬的片岩, 密实泥灰岩, 坚硬胶结的粘土	25	70°
2	较软岩石	软片岩, 软石灰岩, 冻结土, 普通泥灰岩, 破碎砂岩, 胶结卵石	24	65°
1.5	软或破碎的地层	碎石土壤, 破碎卵石, 硬化粘土, 硬煤, 粘结的卵石和碎石	18~20	60°
1.0	软的或破碎的地层	密实粘土, 坚硬的冲积土, 粘土质土壤, 掺砂土, 普通煤	18	45°
0.6	颗粒状的和松软地层	湿砂, 粘砂土, 种植土, 泥炭, 软砂粘土	15~16	30°

前已指出, $f_{\text{岩体}}$ 实质上是把 $f_{\text{岩石}}$ 作适当地降低。降低的幅度, 则视围岩的地质条件而定。表 1-6 主要考虑的地质因素是岩性(软、硬)、风化程度、松散破碎程度等, 但都缺少定量的描述。

表1-7 成昆铁路隧道岩体综合分类表

类别	完整性	地质构造特征	结构面特征		风化状况	地下水位情况	施工情况	山体压力 (MPa)	岩土体物理力学指标 (MPa)	建议衬砌型式	岩层举例	附注
			节理	层理								
I	良好的	无明显的断层褶曲，节理间距较大，裂隙率1-3%，几乎没有张开节理	有一些零星节理，或虽有二组但节理间距较大，裂隙率1-3%，几乎没有张开节理	单独层厚常>0.4 m，或巨厚层，层间胶结良好，没有软弱层	风化极轻，而且不易风化	没有地下水，或有少量裂隙水	可断层面或全断面开挖，除非施工需要，一般不需支护，有时也发生掉石现象，开挖后需壁稳定	拱部均无明显的山体压力	岩体的抗压强度>0.75，混凝土与岩体间的粘着力>0.06	1.不衬砌 2.喷射混凝土(浆)支护	砂岩(非泥质)、石灰岩、花岗岩、片麻岩等	岩体压力为单线铁路隧道的数值，压力分布不均
II		只有个别小断层或平缓的小褶曲	多半有二组节理，间距0.3-1.0 m，(平均0.5 mm左右)，较宽1-3 mm，超过2 mm者较少，节理面较粗糙，多为硅质钙质充填，有个别张开节理，裂隙率0.1%-0.5%	单独层厚0.3-1.0 m，偶见<0.3 m者，层间胶结较紧密，仅有极个别软弱层	风化轻，亦不易风化	只有微量滴水(渗)水，或虽有少量裂隙水而不引起岩体软化者	拱部部分需支护，有时上导坑可用弧形导坑开掘，拱部支护时只有个别支护，拱部扩大后不需支护，侧壁直立稳定	拱部法向压力0.005-0.015，侧部侧压力0.005-0.008	岩体的抗压强度>0.65，混凝土与岩体间的粘着力>0.06	1.大拱脚喷射混凝土(浆)支护 2.大拱脚花边墙	砂岩、以砂岩为主的砂页岩互层、石灰岩、花岗岩、片麻岩、玄武岩等	岩体压力已考虑超载系数，即较实测数值增大1.5倍
III	中等的	构造作用较明显，局部处有小型的断层或褶曲	常有二、三组较发育的节理，间距0.2-0.8 m(平均0.4 m左右)，裂隙多在2-4 mm以内，部分为硅质、钙质、泥质充填，有少数张开节理，裂隙率0.3%-0.8%	单独层厚0.2-0.8 m，少数<0.2 m，层间胶结较好，有软弱层或有软弱夹层	风化较严重，可采取防护措施防止风化	有少量地下水，但岩体为不易软化的	拱部大部分需支护，拱部扩大后不需支护，拱部支护时只有个别支护，拱部扩大后不需支护，侧壁基本稳定	拱部法向压力0.015-0.033，侧部侧压力0.007-0.015	岩体的抗压强度>0.55，混凝土与岩体间的粘着力>0.05	1.大拱脚花边墙 2.大拱脚喷射混凝土(浆)支护 3.大拱脚薄边墙	砂岩、以砂岩为主的砂页岩互层、石灰岩、花岗岩、片麻岩、玄武岩等	
IV		有断层和褶曲，但规模小，不剧烈	多为三组较发育的节理，间距0.1-0.6 m(平均0.3 m左右)，裂隙宽可达3-6 mm，充填不充分的均有，张开节理充填不多，体裂隙率0.5%-1.0%，有时见少量风化节理	单独层厚0.1-0.5 m，层间胶结一般，有软弱层，但不占优势	风化稍重，比较容易风化	有的地方裂隙水较大，或虽有地下水但易于排导处理者	上下导坑均需支护，拱部有坍塌，拱部扩大后局部需支护，拱部支护时个别支护，拱部扩大后不需支护，侧壁稳定性较差，支护排架显著受力	拱部法向压力0.033-0.050，侧部侧压力0.010-0.020	岩体的抗压强度>0.45，混凝土与岩体间的粘着力>0.04	1.大拱脚薄边墙 2.大拱脚花边墙	砂岩、砂页岩互层、石灰岩、花岗岩、片麻岩、玄武岩、较好的硅质钙质片岩等	片理，劈理也是结构面
V	较差的	断层褶曲频繁强烈	有三组或更多的节理，间距平均在0.3 m以下，裂隙宽5-10 mm或更大，少部分有充填，节理面多未胶结，节理方向不规则，有时很密集，致使岩体十分破碎，体裂隙率>1.0%，有时风化节理相当多	单独层厚<0.3 m，且<0.1 m的较多，层间胶结不均，软弱层与硬质岩层交互层理的占优势	风化严重，很容易风化	多有地下水活动	拱部支护有时需加围护，开挖后坍塌范围会扩大，拱部扩大后需支护，排架受力大或有显著变形，灌注拱时有些支护很困难	拱部法向压力0.05-0.10，侧部侧压力0.015-0.030	岩体的抗压强度<0.45，混凝土与岩体间的粘着力<0.03		断层褶曲带，泥灰岩、页岩、千枚岩、片岩、煤系地层等	
VI	土质的											

说明: 1. 结构面产状 (包括节理、层理、片理等) 倾向不利于隧道——一般走向与隧道交角<30°，倾斜角30°~60°，又结构面胶结不好者，应考虑偏压问题。

2. 节理的“线裂隙率”，指沿一定方向的一段直线，平均单位长度内所穿过的条数。

3. 节理的“体裂隙率”，指单位岩体内，所有节理裂隙的总体积，占岩体体积的百分数。

4. 土质图岩如何分类及物理力学指标，有待进一步研究。

我国在修建成（都）昆（明）铁路时，结合对实测地压的量测数据的分析对比以及在施工过程中对围岩稳定性的观察，对岩体结构进行了一定的分析，提出了表 1-7 所列的“岩体综合分级”。

这个分级正确地指出，坑道围岩的稳定性主要取决于坑道围岩的地质构造特征、围岩的结构面状态、风化状态、地下水情况等，并依上述条件将岩质围岩分为 5 级。对各级围岩都建议了相应的施工方法、地压值及支护结构的类型。

为了适应隧道及地下工程技术发展的需要，俄罗斯也对 f 值进行了修正，即在决定 f 值时考虑裂隙的发育程度，乘一个系数，如表 1-8 所示。

表 1-8 考虑围岩裂隙发育程度的系数

抗压强度 裂隙发育程度分级	试件单轴极限饱和抗压强度(MPa)				
	10	20	40	80	160
实际上无裂隙的	1.7	1.4	1.2	1.1	1.0
微裂隙的	1.4	1.2	1.0	0.9	0.8
一般裂隙的	1.2	0.9	0.7	0.6	0.5
强裂隙的	0.9	0.7	0.5	0.4	0.3
破碎的	0.7	0.4	0.3	0.2	0.1

应该指出，上述分级都缺乏较为可靠的、有效的判断或预测方法，在一定程度上要等到隧道开挖后再进行分析、判断。分级都只有简单的定性描述，缺少相应的定量分析，因而在应用上受“经验”因素影响很大。

三、与地质勘查手段相联系的分级方法

随着工程地质勘探方法，尤其是物探方法的进展，如何能够根据地质勘查过程中采用的方法，预测围岩的状态，判断围岩的类型，逐渐成为围岩分级研究中一个重要的内容。

在这方面，日本按弹性波速度进行围岩分级的方法是一个很有前途的方法。理论与实践都证明，弹性波传播特征与岩石性质、岩性好坏、岩体结构以及所受应力等有密切关系。这种内在联系为采用弹性波速度进行围岩分级提供了可能。

在分级中，首先把处于良好、完整状态各类岩石、土壤等，按其生成条件、岩石性质分为七大类，参见表 1-9。然后，把各类岩石、土壤，按其弹性波速度的不同，又细分为若干等级，组成表 1-10 所示的按弹性波速度的分级表。

围岩的弹性波速度是一个综合的指标，它既可以反映岩石的软、硬，又可以表达岩体的状态。因此，在相同岩性的基础上，按其不同的岩体构造、破碎程度、胶结状态、裂隙的大小及其分布是能够进行分级的。表 1-10 的分级，用文字加以说明并结合地压状态可用表 1-11 形式表达。

表 1-9 各类岩石、土壤的分级

岩 性	岩 石 名 称
A	(1) 古生层 } 粘板岩、砂岩、砾岩、石灰岩、辉绿凝灰岩等 中生层 }

续表 1-9

岩 性	岩 石 名 称
<i>A</i>	(2) 深成岩: 花岗石、花岗闪绿岩、闪绿岩等 (3) 半深成岩: 石英斑岩、花岗斑岩、玢岩、辉绿岩、蛇纹岩等 (4) 火山岩: 玄武岩 (5) 变质岩: 结晶片岩、千枚岩、片麻岩等
<i>B</i>	(1) 剥离显著的变质岩 (2) 细层理发达的古生层、中生层
<i>C</i>	(1) 中生层的一部分(页岩、砂岩、辉绿凝灰岩等) (2) 火山岩、流纹岩、安山岩等 (3) 古第三纪层的一部分: 火山质凝灰岩、硅化页岩、砂岩、凝灰岩等
<i>D</i>	古第三纪层—新第三纪层: 泥岩、页岩、砂岩、砾岩、凝灰岩、角砾凝灰岩等
<i>E</i>	新第三纪层—洪积层: 粘土、砂岩、砂砾岩、凝灰岩、台地、岩锥、火山杂屑物等
<i>F</i>	洪积层—冲积层: 粘土、砂、砂砾、火山喷出物、扇状堆积物、岩锥、台地等
<i>G</i>	表土、崩落土

注: 洪积、冲积层的弹性波速度, 一般不含饱和水的比含饱和水的要大。

表 1-10 各类岩石、土壤按弹性波速度(km/s)分级

分类	1	2	3	4	5	6	7
<i>A</i>	>5.0	5.0~4.4	4.6~4.0	4.2~3.6	3.8~3.2	<3.4	—
<i>B</i>	—	>4.8	4.8~4.2	4.4~3.8	4.0~3.4	<3.6	—
<i>C</i>	>4.8	4.8~4.2	4.4~3.8	4.0~3.4	3.6~3.0	<3.2	—
<i>D</i>	>4.2	4.2~4.6	3.8~3.2	3.4~2.8	3.0~2.4	<2.6	—
<i>E</i>	—	—	>2.6	2.6~2.0	2.2~1.6	<1.8	<1.4
<i>F</i>	—	—	—	—	1.8~1.2	1.4~0.8	<1.0

表 1-11 按弹性波速度的围岩分级表

分级	岩性	地 质 状 况	地压状态
		裂隙、风化、破碎、胶结程度	
1	<i>A</i> 、 <i>C</i> 、 <i>D</i>	整体, 坚硬	无
2	<i>A</i> 、 <i>B</i> <i>C</i> 、 <i>D</i>	坚硬、裂隙间距 50~100 cm 裂隙少	
3	<i>A</i> 、 <i>B</i> <i>C</i> <i>D</i> <i>E</i>	裂隙多, 破碎, 间有小断层 中等软岩, 间有小断层, 裂隙间距 30~70 cm 裂隙少, 中等软岩 整体软岩	时有地压
4	<i>A</i> 、 <i>B</i> <i>C</i> <i>D</i> <i>E</i>	破碎, 裂隙多, 易风化 裂隙多, 破碎, 软岩, 小断层多 破碎, 软岩, 裂隙多 软岩, 胶结程度差	多有较大 地 压
5	<i>A</i> 、 <i>B</i> <i>C</i> <i>D</i> <i>E</i> <i>F</i>	破碎, 显著风化 破碎, 小断层多, 易风化 破碎, 软岩, 易风化 软岩, 胶结程度差 软岩, 胶结程度差	地压较大
6	<i>A</i> 、 <i>B</i> 、 <i>C</i> <i>D</i> 、 <i>F</i> <i>F</i>	破碎, 极度风化 破碎, 软岩, 易风化, 胶结程度差 胶结程度差, 易风化	
7		胶结程度非常差	

把地质勘查手段与围岩分级联系起来，这在分级上是一个重要的进展。这方面除了采用弹性波速度外，还有利用钻探时的岩心复原率的分级方法。美国伊利诺斯大学狄丽等人提出的所谓“岩心质量指标”RQD 就是一例。过去，地质人员通过岩心复原率对地质状态进行判断是经常采用的手段之一。但用来进行围岩分级，还是初次。

采用“岩心质量指标”进行围岩分级的建议列于表 1-12。

这个分级指出，岩心的采取状态——采取率、岩心的平均长度、最大长度等受到原始裂隙、硬度、均质性等的强烈影响。因此，岩心采取率是可以表达岩体质量的。同时指出，岩体质量好坏主要取决于 10 cm 以下的碎块的状态。因此，岩心复原率是以单位长度钻孔中，10 cm 以上的岩心占有比例来判断的，即

$$RQD(\%) = \frac{10\text{cm以上岩心累计长度}}{\text{钻孔长度}} \times 100$$

分级也给出了相应的地压值及可采取的支护系统。同时指出，在采用掘进机掘进时地压值可适当降低（约减少 20% 左右）。

表 1-12 按 RQD 的围岩分级（坑道直径 5~10m）

RQD	开挖隧道方法	可 采 用 的 支 护 系 统		
		钢 拱	锚 杆	喷 混 凝 土
优质的 RQD > 90	A. 掘进机	不需要，轻型钢拱 荷载高度 (0~0.2) B	不需要	不需要，局部使用
	B. 传统方法	不需要，轻型钢拱 荷载高度 (0~0.3) B	不需要	不需要，局部使用厚 5~8 cm
良好的 75 < RQD < 90	A. 掘进机	轻型钢拱，间距 1.6~2.0 m 荷载高度 (0~0.4) B	间距 1.6~2.0 m	不需要，局部使用厚 5~8 cm
	B. 传统方法	轻型钢拱，间距 1.6~2.0 m 荷载高度 (0.3~0.6) B	间距 1.6~2.0 m	局部需要，厚 5~8 cm
好的 50 < RQD < 75	A. 掘进机	轻型到中型钢拱，间距 1.6~2.0 m 荷载高度 (0.4~1.0) B	间距 1.3~1.6 m	拱顶厚 5~10 cm
	B. 传统方法	轻型到中型钢拱，间距 1.3~1.6 m 荷载高度 (0.6~1.3) B	间距 1.0~1.6 m	拱及边墙厚 ≥ 10 cm
差的 25 < RQD < 50	A. 掘进机	中等圆形钢拱，间距 1.0~1.3 m 荷载高度 (1.0~1.6) B	间距 0.65~1.3 m	拱及边墙厚 10~15 cm， 与锚杆共同使用
	B. 传统方法	中型或重型钢拱，间距 0.65~1.3 m 荷载高度 (1.3~2.0) B	间距 0.65~1.3 m	拱及边墙厚 ≥ 15 cm， 与锚杆共同使用
很差 RQD < 25 (不包括挤入土及膨胀土)	A. 掘进机	中型或重型钢拱，间距 0.65~1.3 m 荷载高度 (1.3~2.2) B	间距 0.65~1.3 m	拱及边墙厚 ≥ 15 cm， 与钢拱共同使用
	B. 传统方法	重型圆钢拱，间距 0.65 m 荷载高度 (2~2.8) B	间距 1.0 m	全断面厚 ≥ 15 cm，与 钢拱共同使用
很差 (挤入土及膨胀土)	A. 掘进机	加重型钢拱，间距 0.65 m 荷载高度达 75 m	间距 1.0 m	同上
	B. 传统方法	加重型钢拱，间距 0.65 m 荷载高度达 75 m	间距 0.65~1.0 m	同上

上述分级大体上是半定量的，并可在事前对坑道围岩进行一定的判断。但它的可靠性受到地质勘查技术发展水平、仪器的完善与否、技术的熟练程度等影响很大。例如岩心复原率，在同一机种的条件下，可能因钻工的水平不同而有很大差异。另外，它把岩体的很多错综复

杂的因素，统统用一个指标表达，就很难避免判断上的“主观”性。例如，弹性波速度低就可能有几种情况：①岩体完整，但岩质松软；②岩质坚硬，但岩体破碎；③出现于地形上局部高低差异显著的谷部……等。因此，在采用上述分级时，还要辅以其它方法，如地表测绘、岩性试验等加以综合分析判断。

最近利用钻孔内加载试验等各种方法测定岩体的物性值，而后基于这些测定值进行分级的方法有了很大的进展。表 1-13 是针对风化花岗石提出的。分级是根据岩体的变形性质和强度性质划分的：其中变形性质是以 $E_b \approx 0.3$ GPa 为界，把岩体分为两大类，并依其弹性波速度 (v_p) 的大小分为若干级，参见表 1-13a。花岗石的强度特性则决定于岩质方面的强度和裂隙的性质，即采用 RQD 和单轴抗压强度，如表 1-13b 所示。表 1-13 的设计值可基于千斤顶试验、岩块剪切试验等大量的原地试验结果决定。

虽然，这种分级采用的指标都是定量的，但它毕竟是在岩体中有限的范围内，在有限的应力条件下求出的，对岩体更大的范围，应力条件也不同的情况，直接引用是有困难的。

表 1-13 风化花岗岩分级表

(a) 变形性质的划分

划分方法			变形级别	推定变形系数 E_b (GPa)
$E_b \geq 0.3$	$v_p \geq 5.5$	$E_b \geq 3$	A_{-D}	≥ 3
		$E_b \geq 3$	B_{-D}	1.2~3
	$5.5 > v_p \geq 4.5$	$E_b \geq 1.2$	C_{H-D}	0.6~1.2
	$4.5 > v_p \geq 3.5$	$E_b \geq 0.6$	C_{M-D}	0.3~0.6
		$E_b < 0.6$		
	$3.5 > v_p \geq 2.5$	$E_b \geq 0.3$	C_{L-D}	0.15~0.3
$E_b < 0.3$	< 2.5	$E_b < 0.3$		
		$E_b \geq 0.15$		
		$E_b < 0.15$	D_{-H}	0.08~0.15

v_p : 孔内弹性波速度 (km/s); E_b : 孔内岩体变形系数 (GPa)

(b) 强度性质的划分

划 分 方 法			符号	$\varphi(^{\circ})$	C
RQD $\geq$ 25	$q_u\geq 30$	RQD $\geq$ 75	A	50	2~3
		75>RQD $\geq$ 50	B	45~50	1.5~2.5
		50>RQD $\geq$ 25	C _H	40~50	1.5~2.0
	$q_u < 30$	$E_b\geq 300$	C _M	40~45	0.5~1.5
		$E_b\geq 15$	C _L	35~40	0.5~1.5
		$E_b < 15$	D	30~35	0.5~1.0
RQD < 25		$E_b\geq 30$	C _M	40	1.0~1.5
		30> E_b >15	C _L	35	0.5~1.0
		15> E_b >8	D _H	37~45	0.1~0.5
		v_p =1.5~2.5			
		8> $E_b\geq 3$	D _L	35~42	0.01~0.08
		$v_p < 1.5$			
	3000> E_b	D _M	30~35	0~0.08	
	$v_p < 1.2$				

q_u : 单轴抗压强度 (MPa); φ : 内摩擦角; C: 粘结力 (MPa)

四、以多种因素进行组合的分级方法

上述的几种分级方法已逐渐说明,评价一种岩体的好坏,不能建立在单一的物性指标上,因为岩体的工程性质是岩体的变形性质、强度特性、透水性以及地质构造、初应力状态等各种参数的复杂组合。这个问题是岩体力学面临的重大课题之一。为了适当地解决这个问题,最近几年,在围岩分级上研究了把具有控制性的参数组合起来进行分级的方法。

岩石结构评价就是这种分级法的一种。首先它根据施工前有关岩体结构的地质资料,对隧道通过的岩体结构进行一般评价(表 1-14a),谓之参数 A 。然后再考虑与节理产状(走向、倾角和间距)与掘进方向有关的因素对坑道围岩稳定性进行评价(表 1-14b),谓之参数 B 。此外,分级还考虑了地下水对支护要求的影响(表 1-14c),谓之参数 C 。岩石结构评价(RSR)就是这三个参数评价数的总和,即:

$$RSR = \text{参数“}A\text{”} + \text{参数“}B\text{”} + \text{参数“}C\text{”}$$

其范围值由 25~100 不等。

这个分级的评价数是根据大量的统计资料分析出来的,有着一定的实用价值。

这个分级考虑了掘进方向与节理产状的关系。掘进实践指出:当掘进方向与节理产状呈不利组合时,坑道围岩就易于掉块或崩坍。此外,分级还考虑了地下水对坑道稳定的影响,也是值得注意的。

在这个基础上又出现了把 RQD 作为一个参数加上有关岩石强度、分离面的变质程度、粗糙度、裂隙水等指标的分级建议,如表 1-15 所示。表中对各项指标分别给出相应的评价数以及根据这些评价数总合所表达的坑道围岩的工程性质(壁面稳定时间、岩体抗剪强度、开挖难易程度)。

利用评价数进行分级的关键问题是判断各参数间的等价性。因此,应很好地研究显示分级结果的岩体性质和各参数评价数之间的统计关系。

1974 年巴顿(N.Barton)等人对 200 个隧道实例进行了统计分析,说明用六个参数表达的岩体质量 Q 与隧道永久支护的数量和形式之间有着一定的关系。它为隧道支护用的岩体工程分级提出了可靠的基础。

表 1-14 岩石结构评价(RSR)

(a) 参 数 “A” 一般地质状态					最大值 30			
岩 石 类 型					地 质 构 造			
岩 类	硬质	中等	软质	破碎	整体的	轻微断裂 或折皱	中等断裂 或折皱	强烈断裂 或折皱
火成岩	1	2	3	4				
变质岩	1	2	3	4				
沉积岩	1	2	3	4				
1 型					30	22	15	9
2 型					27	20	13	8
3 型					24	18	12	7
4 型					19	15	10	6