

• 土木工程学术前沿丛书 •

GONGLU SUIDAO WEIYAN
YAJI FENJI FANGFA

公路隧道围岩
级别分类方法

王明年 李玉文 著



西南交通大学出版社
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)

原交通部西部交通科技项目资助
四川省 2008 年度重点图书
土木工程学术前沿丛书

公路隧道围岩亚级分级方法

王明年 李玉文 著

西南交通大学出版社
· 成 都 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

公路隧道围岩亚级分级方法 / 王明年, 李玉文著. —成都: 西南交通大学出版社, 2008.9
(土木工程学术前沿丛书)
ISBN 978-7-5643-0001-2

I. 公… II. ①王…②李… III. 公路隧道—围岩分类—研究 IV. U459.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 121623 号

土木工程学术前沿丛书

公路隧道围岩亚级分级方法

王明年 李玉文 著

责任编辑	李 涛
特邀编辑	杨 勇
封面设计	本格设计
出版发行	西南交通大学出版社 (成都二环路北一段 111 号)
发行部电话	028-87600564 87600533
邮 编	610031
网 址	http://press.swjtu.edu.cn
印 刷	四川森林印务有限责任公司
成品尺寸	170 mm×230 mm
印 张	24.75
字 数	470 千字
版 次	2008 年 9 月第 1 版
印 次	2008 年 9 月第 1 次印刷
书 号	ISBN 978-7-5643-0001-2
定 价	49.80 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

作者简介

王明年，男，1965年3月出生，安徽舒城人，工学博士，教授，博士生导师，四川省作出突出贡献的博士学位获得者，成都市有突出贡献的优秀专家。现担任：中国土木工程学会隧道及地下工程分会风险管理专业委员会委员，中国岩石力学与工程学会青年委员会委员，科技部国际科技合作项目评价专家；《地下空间与工程学报》、《隧道建设》、《西部探矿工程》编委会委员。



近年来主持了多项国家级、省部级科研项目，获国家级科技进步二等奖2项，省部级科技进步特等奖1项，一等奖4项，三等奖2项，詹天佑铁道科学技术奖1项。

代表性的科研项目有：公路隧道围岩分级指标体系与动态分类方法研究；重叠隧道设计方法及施工技术研究；大断面黄土隧道合理支护参数及地表沉降控制技术研究；大断面黄土隧道施工方法与监控技术研究；海底隧道施工阶段围岩分级研究；海底隧道土建结构维修养护技术研究；海底隧道长期监测技术研究；相邻隧道安全施工技术研究；大断面隧道非接触量测技术研究等。

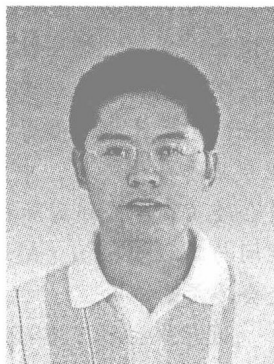
主要研究方向为：①隧道及地下工程设计理论；②隧道及地下工程施工力学；③隧道及地下工程维修和养护技术；④隧道及地下工程抗（减）震技术。

近年来，已在国内外各种学术期刊上发表论文120余篇，主编和参编专著5部。

作者简介

李玉文，男，1966年1月出生，四川乐至人，工学硕士，教授级高级工程师，四川省交通厅公路规划勘察设计研究院副院长，中国公路学会隧道工程分会理事，四川省公路学会理事，四川省公路学会隧道专业委员会主任委员，中标协公路工程委员会隧道专业工作委员会委员，《西部探矿工程》编委会委员。

曾先后荣获“四川省有突出贡献的优秀专家”、第二届“四川省优秀科技工作者”、中国公路学会“百名优秀工程师”、交通部新世纪“十百千人才工程第一层次人选”等称号。



长期从事公路隧道的设计和研究工作，主持和参与完成了多项国家、省部级及重大工程技术应用研究、设计工作。代表性的科研项目有：连拱隧道建设关键技术研究；双洞小净距隧道设计、施工关键技术研究；公路隧道围岩分级指标体系与动态分类方法研究等。

代表性的隧道设计有：广渝路华蓥山隧道，雅泸路泥巴山隧道，渝黔线、宜水路、广巴路、都汶路、邻垫路、攀田路、雅泸路、重庆万开路、云万路、云南小磨路及新河路隧道等。

相关研究、设计成果获国家优秀设计奖1项，部省优秀设计及科技进步奖5项。

前 言

近 20 年来,随着我国公路交通事业的发展,公路隧道的建设规模越来越大,已建成或正在修建的 5 km 以上的公路隧道有 30 余座,10 km 以上的公路隧道有 6 座,其中最长的 18 km 秦岭终南山公路隧道已投入运营。公路隧道已从单一的山岭隧道逐渐发展出城市隧道、水底隧道等,隧道结构形式也越来越复杂,出现了连拱隧道、小间距隧道、重叠隧道等。

为了适应公路隧道的建设需要,2004 年,由交通部(现交通运输部)西部交通科技项目立项,西南交通大学承担,四川省交通厅公路规划勘察设计院参与,开展了“公路隧道围岩分级指标体系与动态分类方法研究”(编号 200431800030)。通过研究,相关方面取得了多项创新性成果:建立了统一的围岩(岩质和土质)亚级分级标准,建立了完善的土质围岩亚级分级体系,建立了围岩亚级分级方法,建立了应用数码摄像技术自动获取围岩结构面发育程度参数方法,建立了施工阶段围岩亚级分级数量化理论方法,制定出《公路隧道围岩分级指南》,研制出围岩亚级分级软件系统,实现了围岩亚级分级的自动化。本书就是在总结该项研究成果,并全面吸收国内外已有研究成果的基础上写成的。

本书共分为 9 个部分。在全书编写过程中:四川省交通厅公路规划勘察设计研究院的江中平、钟勇、王凌云等在现场采集了大量资料。西南交通大学王玉锁完成了砂质土围岩分级研究;刘大刚完成了数码摄像技术自动获取围岩结构面发育程度参数方法研究及程序研制;陈炜韬完成了黏质土围岩分级研究;童建军完成了公路隧道围岩亚级与设计参数研究;张建国完成了公路隧道围岩分级指南和围岩分级程序研制;房敦敏完成了数量化理论进行围岩亚级分级研究和程序研制;刘彪完成了岩质隧道稳定性评价研究;魏龙海完成了碎石土围岩分级研究;李海军完成了岩质围岩物理力学指标值研究及亚级分级 BQ 值研究;另外,李培楠等同志做了大量的计算工作。在此对他们表示感谢。书中还引用了国内外已有的专著、论文、规范、研究报告等成果,在此对其作者一并表示感谢。

虽然我们尽了很大努力,但限于学识水平,错误之处在所难免,敬请读者批评指正。

著 者

2007 年 10 月

目 录

第 1 章 公路隧道围岩分级研究进展	1
1.1 国外围岩分级研究现状	2
1.2 国内围岩分级研究现状	29
1.3 公路隧道围岩分级应开展的工作	37
第 2 章 公路隧道围岩分级指标体系	42
2.1 围岩分级指标体系建立方法	43
2.2 岩质围岩分级指标体系	52
2.3 土质围岩分级指标体系	67
2.4 围岩分级指标体系	80
第 3 章 公路隧道围岩分级指标值获取方法	81
3.1 岩质围岩分级指标定性与定量值获取方法	81
3.2 土质围岩分级指标定性与定量值获取方法	123
3.3 数码摄像技术获取围岩结构面发育程度参数的方法	138
第 4 章 公路隧道围岩亚级分级标准	151
4.1 岩质围岩稳定性研究	152
4.2 土质围岩稳定性研究	176
4.3 围岩亚级分级标准	207
第 5 章 公路隧道围岩分级方法及其亚级分级	209
5.1 围岩定量分级方法	209
5.2 围岩定性分级方法	214
5.3 围岩数量化理论分级方法	216
5.4 岩质围岩亚级分级	227
5.5 土质围岩亚级分级	248
5.6 围岩亚级分级方法	258
第 6 章 公路隧道围岩亚级物理力学指标值	263
6.1 岩质围岩物理力学指标值	263
6.2 土质围岩物理力学指标值	296
6.3 围岩亚级物理力学指标值	307

第 7 章 公路隧道围岩亚级设计参数	309
7.1 双车道公路隧道设计参数的确定原则	309
7.2 双车道公路隧道各亚级围岩下设计参数的确定	311
7.3 双车道公路隧道各亚级围岩下初期支护参数的确定	315
7.4 双车道公路隧道各亚级围岩下的设计参数	318
第 8 章 公路隧道围岩亚级分级软件系统	320
8.1 围岩亚级分级软件系统概述	320
8.2 公路隧道围岩分级指标值输入	326
8.3 岩质围岩亚级分级	335
8.4 土质围岩亚级分级	341
8.5 公路隧道设计参数确定	346
8.6 成果输出	346
公路隧道围岩分级指南	347
1 总 则	347
2 主要术语和符号	348
3 围岩分级指标	350
4 围岩分级方法	358
5 围岩物理力学参数	367
6 隧道设计参数	369
附录 A 围岩分级指标值获取方法	370
附录 B K_v 、 J_v 测试的规定	373
附录 C 数码摄影技术获取围岩结构面发育程度参数方法	373
附录 D 施工阶段围岩级别判别卡	374
附录 E 砂质土和碎石土围岩 N 、 D_r 的确定方法	376
附录 F 岩质围岩基本质量指标的修正	377
附录 G 施工阶段岩质围岩数量化理论分级方法	378
附录 H 本指南用词说明	382
参考文献	383

第1章 公路隧道围岩分级研究进展

围岩是指隧道开挖所影响的那部分岩体或土体，或是对隧道稳定性有影响的那一部分岩体或土体。岩体是各种类别和尺寸岩块的组合体。它和岩石是两个既有联系又有区别的概念。岩石通常是由不同矿物，经由各种地质作用而构成。岩体是整个地质体的一部分，其内部有着许多结构面，有的是因构造作用形成的，有的是因其他原因如风化、变质等形成的。这些结构面把岩体分割成各种类型和尺寸的岩块，这些岩块在地应力作用下彼此联锁在一起，并处于平衡状态。可见，岩体的构成要素是：不同尺寸和类型的岩块（即存在结构面），岩块间的填充物及岩块间相互作用的应力状态。土体根据颗粒粒径情况可分为黏性土、砂性土、碎石土。^[1]塑性指数大于10的土称为黏性土，其中塑性指数大于10且小于或等于17的土为粉质黏土，塑性指数大于17的土为黏土。粒径大于2 mm的颗粒含量不超过总质量的50%且粒径大于0.075 mm的细粒含量超过总质量50%的土为砂性土。粒径大于2 mm的颗粒含量超过总质量50%的土为碎石土。

可见，公路隧道所处的围岩是十分复杂的，为了满足公路隧道设计、施工的需要，必须对公路隧道围岩分级进行研究。

在我国公路隧道建设中，采用的主要施工方法是钻爆法。在钻爆法施工隧道中，人们最关注的问题是钻眼、爆破、支护、定额等。公路隧道围岩分级是对一个连续有序的围岩系列，根据稳定性、爆破性、可钻性等单项量值或多项综合量值，将围岩划分成不同的等级。我国现行的国家标准和行业规范都是以隧道稳定性这一单项量值来进行围岩分级的。

目前，公路隧道围岩分级还处在经验分级的阶段上，它是在隧道工程实践基础上发展起来的，随着人们对隧道工程、地质条件及两者间相互关系认识的不断提高，公路隧道围岩分级也在不断深化。围岩分级是正确进行隧道设计、施工的基础，因而一个完善的，符合工程实际的围岩分级，对于改善隧道的结构设计、发展新的施工工艺、降低工程造价等都有十分重要的意义。鉴于此，国内外在近几十年来都把围岩分级作为隧道工程技术的重要研究内容之一，并从定性上、定量上、定性定量结合上进行了大量的探索和实践，取得了很多有意义的成果。

1.1 国外围岩分级研究现状

国外关于围岩分级的研究始于 1774 年, 由欧洲人罗曼提出的, 至今已有 230 多年的历史,^[2]在这段时间里, 国外学者对围岩分级进行了大量的研究, 并提出上百种分级方法。

1.1.1 岩质围岩分级研究现状

18 世纪末, 维尔涅尔提出岩石定性分类法,^[1]岩石分为松散的、软的、破碎的、次坚石和坚石五类, 并相应地提出哪些岩石属于哪一级别。

1822 年, 法国的莫氏根据矿物硬度不同, 用互相刻划的办法定出从滑石到金刚石的十级硬度, 称划痕硬度标。^[3]其后有很多学者对此进行了研究, 如雷蒙德、肖氏等。

1906 年, 俄国的普洛托吉雅柯诺夫利用坚固系数 f 值将围岩分为 10 级,^[3]具体情况见表 1.1。 f 值是表示岩石在采掘各个方面的相对坚固性, 是反映岩石的综合物性指标, 即 $f=(1/10)R_c$ (R_c 为岩石的极限抗压强度, 单位 MPa)。该式中, 岩石极限抗压强度超过 200 MPa, 都被定义为 $f=20$, 显然不合理。1955 年, 巴龙将公式改为 $f=R_c/30+\sqrt{R_c/3}$, 实际上是将 $f=20$ 的最硬岩石极限抗压强度推至 300 MPa。普氏曾经指出, 在把 f 值应用到地下工程时, 应该考虑地质对象的一些地质特征, 如风化特征、节理特征等。普氏对围岩分级的观点 (见表 1.1) 对我国初期的地下工程分级方法有重要的影响。

表 1.1 普氏岩石坚固性系数分级

等级	坚固性程度	围 岩 种 类	f
I	最坚固	最坚固、细致和有韧性的石英和玄武岩, 其他各种特别坚固的岩石	20
II	很坚固	很坚固的花岗质岩石, 石英斑岩, 很坚固的花岗岩, 比上一级较不坚固的石英岩, 最坚固的砂岩和石灰岩	15
III	坚固	花岗岩 (致密的) 和花岗质岩石, 很坚硬的砂岩和石灰岩, 石英质矿脉, 坚固的砾岩, 极坚固的铁矿	10
III _a	坚固	石灰岩 (坚固的), 不坚固的花岗岩, 坚固的砂岩, 坚固的大理岩和白云岩, 黄铁矿	8
IV	较坚固	一般的砂岩、铁矿	6
IV _a	较坚固	砂质页岩、页岩质砂岩	5

续表 1.1

等级	坚固性程度	围 岩 种 类	f
V	中等	坚固的黏土质岩石, 不坚固的砂岩和石灰岩	4
V _a	中等	各种页岩 (不坚固的), 致密的泥灰岩	3
VI	较软弱	较软弱的页岩, 很软的石灰岩, 白垩、岩盐、石膏、冻土、无烟煤、普通泥灰岩, 破碎的砂岩, 胶结砾石、石质土壤	2
VI _a	较软弱	碎石质土壤, 破碎的页岩, 凝结成块的砾石和碎石, 硬煤 ($f=1.4\sim1.8$), 硬化的土壤	1.5
VII	软弱	黏土 (致密的), 软弱的烟煤, 坚固的冲积层, 黏土质土壤	1.0
VII _a	软弱	轻砂质黏土、黄土、砾石、软煤 ($f=0.6\sim1$)	0.8
VIII	土质岩石	腐殖土、泥煤、轻砂质土壤、湿砂	0.6
IX	松散性岩石	砂、山麓堆积、细砾石、松土、采下的煤	0.5
X	流砂性岩石	流砂、沼泽土壤、含水黄土以及其他含水土壤 ($f=0.1\sim0.3$)	0.3

1911年, 比尔鲍美提出了根据岩石天然破碎状态确定岩石荷载的5级分级法。^[3]

1940年, 苏联的苏哈诺夫提出根据实际采掘方法来确定凿岩和爆破时岩石坚固性, 即用凿岩速度和钎头消耗等实际生产指标表示可钻性, 用炸药单耗等表示爆破性。^[3]并规定了一套标准测试条件, 当与标准条件不一致时则用一系列系数加以校正。

1946年, K·太沙基用围岩在隧道开挖中所形成的压力拱高度 H_p 对其进行了分级。^[3]此方法把围岩分为9级, 见表1.2。每级围岩都有一个相应的地压值范围。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, 该方法在定性描述上是比较概括的, 而且缺少定量的描述, 给定的地压值在多数情况下是偏高的。

表 1.2 K·太沙基围岩分级表

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	$0\sim0.5B$	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	$0\sim0.25B$	
4	有裂痕, 块度小的	$0.25B\sim0.35(B+H_t)$	无侧压

续表 1.2

	岩层状态	岩石荷载高度/m	说 明
5	裂隙较多, 块度小的	$(0.35 \sim 1.1)(B + H_t)$	侧压很小或没有
6	完全破碎的, 但是不受化学腐蚀的砾石和砂	$1.1(B + H_t)$	有一定侧压。由于漏水, 隧道下部分变软, 支撑下部要做基础。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)	$(1.1 \sim 2.1)(B + H_t)$	有很大侧压, 必要时修仰拱, 推荐采用圆形支撑
8	挤压变形缓慢的岩层, 但覆盖层较厚	$(2.1 \sim 4.5)(B + H_t)$	
9	膨胀性地质条件	与 $(B + H_t)$ 无关, 一般可达 80 m 以上	要用圆形支撑, 需要时采用可缩性支撑

注: 表中 B 、 H_t 分别为坑道宽度及高度 (m)。

1950 年, 苏联的什列依涅尔提出用底面面积为 $1 \sim 3 \text{ mm}^2$ 的截锥形圆柱压模在光滑岩块表面加载, 用产生第一次跃进破碎时的荷载 P 与压模底面面积 S 之比 $p = P/S$ (kN/mm^2) 作为史氏压入硬度标, ^[3] 据此将岩石分为脆性、塑脆性和塑性三大类, 建议用硬度和塑性系数两项指标作为岩石分级标准。塑性系数 k 是岩石破碎前所消耗的总能量与弹性变形能量之比, 这可从记录的应力-应变曲线中求得。

1950 年, 洗凡施设计了一种硬质合金钻具在实验室内做实钻实验, 以确定岩石的可钻性的装置, 开创了模拟试验确定岩石坚固性的途径。^[3] 1951 年, 英国的 R·谢费尔尔德在《岩石的物理性质与可钻性》一书中, 介绍了他所采用的微型钻机测定可钻性的方法。1969 年, 美国的 C·G·怀特又研制了一种能进行回转、冲击和回转-冲击三种钻进方式的微型试验钻机, 提出一套确定岩石可钻性的指数。

1950 年, 苏联的老普氏之子小普洛托吉雅柯诺夫提出了一种测定岩石坚固性系数 f 的简易方法, 称捣碎法。^[3]

1956 年, 美国的李温斯顿建立了变形能爆破漏斗理论, 提出了变形能系数的概念, 利用此系数可以对比岩石的爆破性, 计算炸药的单耗量和确定爆破参数。^[3]

1958 年, 劳菲尔以隧道稳定性为基础将围岩分为 7 类。^[3] 他认为隧道暂时稳定时间 t_s 可用下式表示:

$$t_s = \text{常数} \times L^{-(1+\alpha)} \quad (\text{h}) \quad (1.1)$$

式中 α ——隧道围岩质量系数, 视围岩类别在 0~1 范围变动, 极好的等于 0, 极差的等于 1。

L ——坑道无支护地段长度, 即开挖面至第一排支撑的距离 (m)。当 $L > B$ 时, 采用 L 值; 当 $L < B$ 时, 采用 B (B 为坑道跨度)。

1959 年, 美国的邦德提出用爆破功指数来确定岩石爆破性的方法。^[3]

1963 年, 日本的小野李提出以岩体纵波速度与岩石纵波速度相比较的办法来评价岩体完整性。^[3]早在 1950 年, 日本就利用岩体的纵波速度来评价岩体的完整性。岩体声波速度之所以低于岩石声波速度是由于岩体中存在裂隙, 于是提出了一个“裂隙系数”的概念, 用 $k = (v_m / v_r)^2$ 来表示, v_m 为岩体弹性波速, v_r 为岩石弹性波速。裂隙系数 $k < 1$, 而 k 值越大岩体越完整。他们进而将岩石的抗压和抗拉强度乘以裂隙系数作为岩体的准抗压和抗拉强度, 即:

$$\sigma_c = \left(\frac{v_m}{v_r} \right)^2 \cdot R_c \quad (1.2)$$

$$\sigma_t = \left(\frac{v_m}{v_r} \right)^2 \cdot R_t \quad (1.3)$$

式中: σ_c 、 σ_t 为岩体准抗压和抗拉强度; R_c 、 R_t 为岩石的抗压和抗拉强度。其中 R_c 、 R_t 可作为围岩强度分类的指标。

岩石声波速度不仅用于稳定性分级, 并且也被引用到确定岩石爆破性分级中, 如前苏联的哈努卡耶夫认为: 岩体的裂隙对于爆破具有非常重要的意义, 在 1950 年就提出了以岩石弹性纵波速度 v_r 和岩石密度 ρ 的乘积 (即岩石波阻抗率 ρv_r), 把岩石分为 3 级, 在 1969 年, 又与岩石的裂隙程度相结合发展成为 5 级爆破性分级方案。^[3]

1963 年, 加拿大的科茨从岩石力学角度, 提出了一种考虑岩石和岩体的 5 种特性, 以定性为主包含简单定量的岩石分类方法, 之后, 德国的伯顿将其引用, 并作了适当补充。^[3]此分级方法体现了综合考虑岩石坚硬程度和岩体完整程度的特点。

1966 年, 苏联在修建巴库地下铁道时, 曾对围岩稳定性进行了专门分级 (见表 1.3)。它从工程地质条件和各类岩层的性质、地下水的状态等方面, 把围岩分为 4 类,^[5]并对各类围岩的稳定破坏现象进行了分析。从分级表中可以看出, 它是稳定破坏的现象作为分级基础的。这种预测是很有参考价值的, 但它对坑道开挖后的稳定破坏分析是不充分的, 对与之相应的工程地质条件的描述也是不完善的。

表 1.3 苏联坑道围岩稳定性分级

稳定性分级	稳定性特征	描 述
极稳定	无支护能够自稳, 长时间可能出现掉块	整体的、大块状围岩, 可能存在一组基本的、局部的陡倾 (大于 $60^{\circ} \sim 70^{\circ}$) 的裂隙; 线路与走向的交角大于 $50^{\circ} \sim 60^{\circ}$; 裂隙是胶结的; 围岩干燥或弱含水; 黏土岩坚硬, 少数半坚硬; 个别裂隙可能漏水
稳 定	无支护能够自稳, 1 个月内可能出现掉块	微裂隙和中等裂隙的围岩; 基本裂隙可能有 3 组, 裂隙走向与线路交角大于 $20^{\circ} \sim 30^{\circ}$; 黏土岩坚硬和半坚硬; 个别裂隙可能漏水
中等稳定	无支护能够自稳, 1 周内出现崩塌	微裂隙和中等裂隙, 中等层厚; 裂隙主要有 3 组或由更多组构成, 走向与线路交角小于 $10^{\circ} \sim 20^{\circ}$; 黏土岩是硬塑性的; 沿裂隙有滴水或股水
稍稳定	无支护能够自稳, 1 天内出现崩塌	基本上是微裂隙的围岩, 中~厚层; 无胶结和软弱胶结的, 基本裂隙大于 3 组; 裂隙走向与线路交角小于 $5^{\circ} \sim 10^{\circ}$; 黏土岩是软塑性的; 围岩经常是含水的
不稳定	坑道必须全面对掌子面支护	围岩是强裂隙的、破碎的, 薄层; 基本裂隙超过 3 组; 裂隙是无充填的, 有滑面, 走向与线路交角小于 5° ; 黏土岩是软塑性的; 围岩含水或饱水

1967 年, 美国伊利诺斯大学狄尔等人研究出一种测定岩体完整性方法,^[3]即采用取芯钻钻取岩芯, 根据所得岩芯的完整程度确定岩石质量指标 RQD 。岩石质量指标 RQD 是以单位长度钻孔中 10 cm 以上的岩芯占有比例来判断的, 即:

$$RQD = \frac{10 \text{ cm 以上岩芯累计长度}}{\text{钻孔长度}} \times 100\% \quad (1.4)$$

根据 RQD 的大小将围岩分为 5 级, 见表 1.4。

表 1.4 根据 RQD 的大小对围岩分级

围岩状态	$RQD/\%$
很 差	<25
差 的	25 ~ 50
好 的	50 ~ 75
良好的	75 ~ 90
极好的	>90

此项指标在其后的许多围岩稳定性分级中被广泛采用。

1968年以来,日本以岩石力学委员会为主要代表,对围岩稳定性分级进行了长期研究,形成了根据弹性波速度进行铁路隧道围岩分级的规范方法,^[3]把围岩分为 I ~ V 个级别,特殊围岩分为 4 个级别,见表 1.5。其中,脚标 N (Normal)、S (Squeezing) 和 L (Loosening) 分别表示一般围岩、塑性化围岩和未固结围岩。

表 1.5 日本铁路隧道围岩分级标准

围岩种类	硬 岩			中硬岩	软岩	土砂	
围岩级别	A 岩种	B 岩种	C 岩种	D 岩种	E 岩种	F、G 岩种	
						黏性土	砂质土
V_N	$v_p \geq 5.2$		$v_p \geq 5.0$	$v_p \geq 4.2$			
IV_N	$5.2 > v_p \geq 4.6$		$5.0 > v_p \geq 4.4$	$4.2 > v_p \geq 3.4$			
III_N	$4.6 > v_p \geq 3.8$	$v_p \geq 4.4$	$4.4 > v_p \geq 3.6$	$3.4 > v_p \geq 2.6$ 且 $G_n \geq 5$	$3.4 > v_p \geq 2.6$ 且 $G_n \geq 6$		
II_N	$3.8 > v_p \geq 3.2$	$4.4 > v_p \geq 3.8$	$3.6 > v_p \geq 3.0$	$2.6 > v_p \geq 2.0$ 且 $5 > G_n \geq 4$	$2.6 > v_p \geq 1.5$ 且 $6 > G_n \geq 4$		
I_N	$3.2 > v_p \geq 2.5$	$3.8 > v_p \geq 2.9$	$3.0 > v_p \geq 2.5$	$2.6 > v_p \geq 2.0$ 且 $4 > G_n \geq 2$ 或 $2.0 > v_p \geq 1.5$ 且 $G_n \geq 2$	$2.6 > v_p \geq 1.5$ 且 $4 > G_n \geq 2$	$G_n \geq 2$	$D_r \geq 80$ 且 $F_c \geq 10$
I_S	$2.5 > v_p$	$2.9 > v_p$	$2.5 > v_p$	$1.5 > v_p$ 或 $2 > G_n \geq 1.5$	$1.5 > v_p$ 或 $2 > G_n \geq 1.5$	$2 > G_n \geq 1.5$	
I_L							$D_r \geq 80$ 且 $10 > F_c$
特 _S				$1.5 > G_n$	$1.5 > G_n$	$1.5 > G_n$	
特 _L							$80 > D_r$

注: v_p 为弹性波速度 (km/s); G_n 为围岩强度比; D_r 为相对密实度 (%); F_c 为细颗粒含有率 (%)。

表 1.5 中岩种的分类见表 1.6。E 岩种的新鲜岩石的单轴抗压强度大致在 20 MN/m^2 (200 kgf/cm^2) 以下。F、G 岩种的砂质土和黏性土,按以下标准划分:砂质土指细颗粒(粒径 $75 \mu\text{m}$ 以下的土粒子)的含有量不满 30% 的土;黏性土指细颗粒(粒径 $75 \mu\text{m}$ 以下的土粒子)的含有量超过 30% 的土。

表 1.6 岩 种 分 类

岩种	地 层 名 及 岩 石 名
A	古生层、中生层（黏板岩、砂岩、砾岩、辉绿凝灰岩、石灰岩等）； 沉积岩（花岗岩、花岗闪绿岩、闪绿岩等）； 半沉积岩（玢岩、花岗斑岩、石英斑岩、辉绿岩、蛇纹岩等）； 火成岩（玄武岩等）； 变质岩（结晶片岩、片麻岩、千枚岩等）
B	剥离显著的变质岩； 剥离显著的细层理的古生层、中生层
C	中生层的一部分（页岩、砂岩、辉绿凝灰岩等）； 火成岩（流纹岩、安山岩等）； 古第三纪层的一部分（火山质凝灰岩、硅质页岩、砂岩、凝灰岩等）
D	古第三纪层～新第三纪层（泥岩、页岩、砂岩、砾岩、凝灰岩、凝灰角砾岩等）
E	新第三纪层～洪积层（黏土、砂岩、砂砾岩、凝灰岩、火山碎屑物、岩锥、台地等）
F	洪积层～冲积层（黏土、砂、砂砾、火山喷出物、扇状堆积物、岩锥、台地等）
G	表土、崩积土等

对于表 1.6 中 E 岩种的泥质岩，在特殊情况下，应根据钻孔的施工状况和岩芯状况以及自然含水比 W 、蒙脱土的含有量 C 、浸水崩解度 D 等室内试验结果对围岩强度因吸水而降低的情况进行评价。根据评价结果对表 1.5 的围岩分级结果进行修正，评价时可参考表 1.7 的判断基准。^[4]

表 1.7 泥质岩围岩分级的判断基准

指 标 及 指 标 值		围岩分级		
		I_N	I_S	特 _S
地质条件	破碎质的泥质岩或凝灰岩		○	
钻孔施工条件	无水不能钻进			◎
钻孔岩芯状况	因应力释放，目视可见体积增加			◎
	岩芯采取率极差		△	
	产生岩饼现象		△	

续表 1.7

指标及指标值		围岩分级		
		I_N	I_S	特 _s
围压比	$G_n < 0.5$	◎		
	$0.5 \leq G_n < 1.5$	○		
	$1.5 \leq G_n < 2$	○		
	$2 \leq G_n$	○		
蒙脱土含量 C	$C \geq 20\%, W \geq 20\%$			
自然含水比 W	$C < 20\%, W < 20\%$			
浸水崩解度 D		○		
其 他	2 μm 以下含量大于 30%		△	
	液限大于 100%		△	
	围岩弹性波速度 $< 1.5 \text{ km/s}$		△	

注：◎ — 确实划分；○ — 划分可能；△ — 大致标准。

日本道路公团所采用的围岩分级见表 1.8。

该分级原则适用于埋深大于隧道宽度 2 倍以上，500 m 以内，除洞口段以外双车道公路隧道规划。

1972 年，美国的威克汉姆根据岩体地质结构、节理状态、含水情况提出了岩石结构评价 (RSR) 分类法：^[5]首先，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（见表 1.9），谓之参数 A 。然后再考虑与节理产状（走向、倾角和间距）和掘进方向有关的因素对坑道围岩稳定性进行评价（见表 1.10），谓之参数 B 。此外，分级还考虑了地下水对支护要求的影响（见表 1.11），谓之参数 C 。岩石结构评价就是这 3 个参数评价数的总和，即：

$$RSR = A + B + C \quad (1.5)$$

其范围值由 25~100 不等。

该分级法的评价数是根据大量的统计资料分析出来的，有一定的实用价值。这种分级法还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坍塌。此外，分级还考虑了地下水对隧道稳定性的影响。