

国家自然科学基金委员会、二滩水电开发有限责任公司
雅砻江水电开发联合研究基金项目（项目批准号：50539080）资助

隧道工程 岩体分级

王石春 何发亮 李苍松 著

Suidao Gongcheng
Yanti Fenji



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

责任编辑 / 张 波

封面设计 / Design  本格设计



隧道工程 岩体分级

Suidao Gongcheng
Yanti Fenji

ISBN 978-7-81104-755-4



9 787811 047554 >

定价: 34.00 元

2007

U452.1/3

2007

国家自然科学基金委员会、二滩水电开发有限公司
雅砻江水电开发联合研究基金项目（项目批准号 50539080）资助

隧道工程岩体分级

王石春 何发亮 李苍松 著

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

隧道工程岩体分级 / 王石春, 何发亮, 李苍松著. —成都: 西南交通大学出版社, 2007.11
ISBN 978-7-81104-755-4

I. 隧… II. ①王…②何…③李… III. 隧道工程—围岩分类 IV. U452.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 179887 号

隧道工程岩体分级

王石春 何发亮 李苍松 著

*

责任编辑 张 波

封面设计 本格设计

西南交通大学出版社出版发行

(成都市二环路北一段 111 号 邮政编码: 610031 发行部电话: 028-87600564)

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

四川锦祝印务有限公司印刷

*

成品尺寸: 170 mm×230 mm 印张: 12.25

字数: 248 千字

2007 年 11 月第 1 版 2007 年 11 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-81104-755-4

定价: 34.00 元

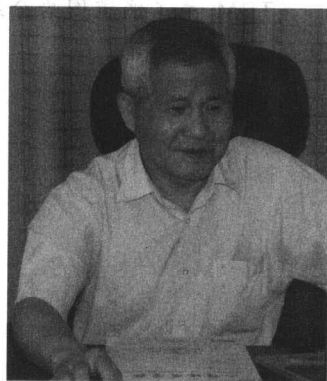
图书如有印装问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562



作者简介

王石春, 研究员, 注册岩土工程师, 1961年毕业于北京大学地质系构造地质专业。从事工程地质研究和岩土工程勘测设计、技术咨询工作40多年。曾任中铁西南研究院工程地质研究室主任及学术委员会副主任、中国地质学会工程地质专业委员会委员、四川省岩石力学协会副秘书长等职。在隧道工程地质、围岩分级、地质灾害的防治与预报等方面有较高的造诣, 是国务院政府特殊津贴专家、铁道部“有突出贡献中青年专家”、国家计委国际咨询公司专家、自然科学基金项目评议专家。



主持和参加过国家以及铁道部、交通部、文化部等部委的重大科研项目20多项。其中作为主要完成人完成的“大瑶山特长隧道修建新技术”获国家科技进步特等奖、“秦岭特长隧道TBM围岩分级及参数测试技术”获中国铁路工程总公司科技成果一等奖。此外, 获部级科技进步二等奖1项、三等奖2项、四等奖多项。

是《工程岩体分级标准》(GB50218—94)、《公路隧道设计规范》(JTG D70—2004)围岩分级章节主要编写人。

近20多年参加了新建铁路隧道、公路隧道等重大工程如广州地铁、南京地铁、深圳地铁、成都地铁以及三峡工程的工程地质方面的技术咨询和评审工作, 担任了多项重大隧道工程建设监理项目的顾问。

主要论文著作:

A Proposal for Rock Classification in Tunnel Engineering (第四届国际工程大会论文集, 1982, New Delhi)

《软弱岩中铁路隧道围岩稳定性及其控制》(岩石力学与工程学报, 1982年第1卷第1期)

《隧道岩体(围岩)分级探讨》(铁道部科学研究院西南研究所论文集,

中国铁道出版社, 1987 年)

《大瑶山隧道浅变质岩系围岩性态特征》(岩石力学与工程学报, 1988 年第 1 卷第 1 期)

《大瑶山隧道主要工程地质问题》(水文地质与工程地质, 1989 年第 2 期)

《隧道地质灾害与防治对策》(中国地质灾害与防治学报, 1992 年第 3 卷第 4 期)

《TBM 与地质因素综述》(世界隧道, 1998 年第 4 期)

《TBM 施工隧道围岩分级研究》(岩石力学与工程学报, 2002 年第 21 卷第 9 期)

作者简介

何发亮, 中铁西南科学研究院有限公司教授级高级工程师, 院副总工程师, 工程地质预报中心/工程地质研究室主任, 硕士研究生导师。生于 1962 年 11 月, 1984 年毕业于中山大学地质学系, 主要从事隧道围岩分级、声波探测技术应用和隧道施工地质超前预报研究。

1995 年任副研究员, 2002 年任教授级高级工程师, 同年被评为中国铁路工程总公司首批有突出贡献的中青年专家, 是中国铁路工程总公司专家委员会专家。

现任 IAEG 会员、中国地质学会工程地质专委会委员、四川省岩石力学与工程学会理事兼副秘书长、四川省声学学会理事、《铁路地质与路基》编委、四川省评标专家库和四川省地质灾害评估专家库在库专家。

获铁道部科技进步奖四等奖 1 项、总公司科学技术奖一等奖 1 项、铁道科学研究院科技成果三等奖 1 项。

主要论文著作:

《隧道地质超前预报》(西南交通大学出版社, 2006 年)

《隧道工程地质与声波探测技术》(西南交通大学出版社, 2005 年)

《全断面岩石掘进机隧道施工技术指南》隧道施工地质超前预报章节编写人

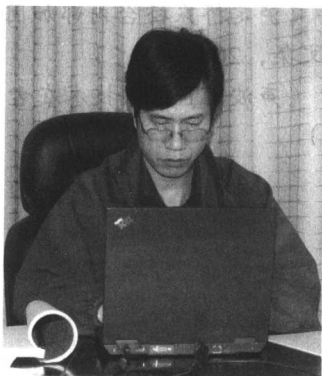
《岩体温度法隧道施工掌子面前方涌水预测预报探讨》(现代隧道技术, 2007 年第 2 期)

《隧道施工地质超前预报工作方法》(岩土工程学报, 2006 年)

《TBM 施工隧道围岩分级研究》(岩石力学与工程学报, 2002 年 9 月, 第 21 卷第 9 期)

《岩溶地区长大隧道涌水灾害预测预报技术》(水文地质工程地质, 2001 年第 5 期)

《声波探测技术的新发展及其应用》(中国铁道科学, 1999 年第 20 卷第 4 期)



《隧道施工期地质超前预报技术的发展》(现代隧道技术, 2001 年第 3 期)

《隧道施工期地质超前预报若干问题探讨》(第八次全国岩石力学与工程学术大会论文集, 2004 年)

《HSP 及 CT 法隧道施工期岩溶地质预报》(隧道地质超前预报技术交流研讨会论文集, 2004 年)

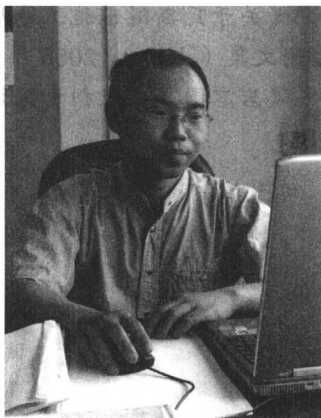
《声波 CT 技术在泸定桥东桥台内部结构探测中的应用》(文物保护与考古科学, 2001 年第 13 卷第 1 期)

《泸定桥东桥台内部加固效果检测》(第八次全国岩石力学与工程学术大会论文集, 2004 年)

《声波 CT 探测技术在古生物化石探测中的应用》(四川文物, 2000 年第 5 期)

作者简介

李苍松, 中铁西南科学研究院有限公司工程地质预报中心/工程地质研究室副主任, 国际环境与工程地质学会中国国家小组会员。生于 1971 年, 1990 年 9 月考入原长春地质学院水文地质与工程地质系, 1997 年 7 月硕士研究生毕业, 历任中铁西南科学研究院有限公司助理工程师、工程师、高级工程师。2005 年 11 月西南交通大学桥梁与隧道工程博士毕业。



自 1997 年参加工作以来, 作为主持或主要参加者, 完成省部级以上重点科研项目 6 项, 目前主持省部级重点科研项目 1 项, 主持横向科研课题多项, 获中铁总公司科技进步一等奖 1 项; 发表论文 40 余篇, 第一作者 18 篇, 第二作者 11 篇, 参与编写专著 2 部; 在隧道施工期地质超前预报、岩溶地下水作用机理研究等方面有较深入的研究。

负责完成或正在开展的科研项目有:

铁道部重点科研课题“渝怀线圆梁山隧道高水压富水区岩溶地到下水作用机理研究”子项——“岩溶涌突水量水压预测模型研究”, 2001—2003 年

铁道部重点科研课题“渝怀线圆梁山隧道地质超前预报”子项——“HSP 和声波 CT 技术在岩溶地质预报中的应用研究”, 2001—2003 年

TBM 突破不良地质地段的地质超前预报及施工预案研究, 2004—2007 年
渝怀铁路武隆隧道, 遂渝铁路荆竹岭隧道、龙凤隧道、桐子林隧道, 都汶高速公路董家山隧道、龙溪隧道, 贵州崇遵高速公路凉风垭隧道, 贵州镇胜高速公路黄果树隧道、五龙山隧道等多座岩溶隧道工程施工期地质超前预报

主要论文著作:

《应用三重空隙介质理论进行圆梁山隧道岩溶涌水量及水压预测研究》(第一届全国岩土与工程学术大会论文集(下册), 2002 年 9 月, 1319~1328)

《HSP 声波反射法应用于武隆隧道岩溶地质超前预报》(第八次全国岩石力

学与工程学术大会论文集, 2004 年 10 月, 751~755)

《昆仑山隧道渗漏水连通试验研究》(现代隧道技术, 2004 年第 41 卷第 5 期)

《HSP 声波反射法充填溶洞边界探测》(现代隧道技术, 2005 年第 42 卷第 3 期)

《渝怀线武隆隧道岩溶涌水量计算新方法》(中国铁道科学, 2005 年第 26 卷第 5 期)

《关于瓦斯隧道施工地质超前预报的探讨》(第二届全国岩土与工程学术大会论文集(上册), 2006 年 10 月, 30~36)

《岩溶围岩分级初步探讨》(工程地质学报, 2006 年第 14 卷第 6 期, 808~814)

绪 言

人类在生存和发展的过程中，不断地对地壳表层的环境进行利用和改造，其中自然洞穴的利用和人工洞穴的开凿可追溯至远古。人们通过实践，逐步积累了分辨何种自然洞穴可作为人居洞室和在哪些岩土中可开挖出较为稳定安全的洞库的知识。

随着人类文明的进步和工业、农业生产的发展，特别是工业革命以来，铁路公路交通、水利水电、采矿工程和城市建筑的逐步发展，各类地下工程大量兴建，人们对工程岩体质量及稳定性的认识日趋深入。实践表明，由于地下工程修建于地表以下一定深度的岩土体中，所遇岩土体的工程地质、水文地质条件复杂多变，要对工程岩体的质量和稳定状态做出预测是相当困难的。可以说，直至今天，就目前的工程地质勘察方法和技术水平，还很难在隧道及地下工程施工前准确无误地探明其所处工程岩土体的属性，这就给工程的设计和施工带来极大的困难，使设计施工不可避免地带有一定的盲目性。因此，根据已获取的有限的地质勘察资料和工程实践的经验和教训，寻找出一种对工程岩体的基本质量和稳定性做出预判的方法，无疑是指导隧道及地下工程施工的有效方法。也正因为如此，众多的工程地质和岩石力学工程者把工程岩体分级的试验研究作为研究方向。一百多年来，这方面的研究成果丰富，国内外学者提出了百种以上的工程岩体分级（分类）方法。

一个相对完善和合理的工程岩体分级，可以成为人们正确认识工程岩体属性的共同基础。它可以指导工程的设计和施工，既可以帮助合理选择设计理论、设计计算参数，又有助于选择合理的施工方法及施工工艺。同时，它还有利于工程地质学和岩石力学研究的深入。正确地对工程岩体的质量和稳定等级做出评判，对岩石工程的规划和选址、可行性评估、工程结构和岩体的加固设计、快速安全施工、投资预算以及结构物的安全和正常运行都具有重要的指导作用。显而易见，质量高、稳定性好的工程岩体，不需要或只需要很少的加固、支护措施，并且施工安全，利于结构稳定；质量低、稳定性差的工程岩体，则需要强有力的加固、支护措施，并且施工难度大，常发生坍

塌等灾害。所以,人们希望有一种能够在隧道和地下工程建设之前,对工程所处岩体质量和稳定性做出预判的方法或标准,工程岩体分级方法和标准就是为适应这一要求而产生的。

工程岩体分级目的不同,其分级方法和标准不同。诸如,以爆破、开挖为目的的分级,一般可以岩石的坚硬程度为主要指标进行划分;以工程岩体加固支护为目的的分级,多以影响岩体稳定性的岩石强度、岩体完整程度及地下水的状况等指标来综合评判;还有以掘进机、盾构机的掘进为目的的分级,则应综合影响岩体稳定性和可掘性的因素等指标来分级。目前,国内外多数为地下工程服务的工程岩体(围岩)分级,大多都是以围岩的支护设计为目的的稳定性分级。

实际上,为隧道工程设计提供的围岩分级是对围岩的预分级,需要在施工过程中不断加以修正。时下,要求隧道及地下工程施工地质超前预报提供施工掌子面前方岩体分级的情况已不鲜见。在隧道地质超前预报特别是施工地质超前预报阶段,根据隧道掌子面围岩岩体体积节理数(J_v)、岩石(体)声波测试结果,可确定围岩岩体完整性系数 K_v ,根据隧道洞内地质调查可确定主要结构面状态和岩体含水情况;但要确定岩石单轴饱和抗压强度 R_c ,必须取样进行岩石单轴抗压强度试验,且岩体的初始地应力状态无法确定。因此,目前的施工地质超前预报显然不可能提出掌子面到掌子面前方第一界面间围岩段隧道工程岩体的分级预报,只能给出建议级别预报;对第一界面与第二界面间及其后界面间工程岩体的分级更无从谈起。

作者从上世纪70年代至今一直从事隧道等地下工程的工程岩体(围岩)分级的试验研究和实践工作。主持了铁路隧道工程岩体分级方法研究、参与了隧道设计规范的修订,以及《新奥法施工指南》、《工程岩体分级标准》、《公路隧道设计规范》中关于隧道调查及围岩分级有关章节的编写工作。将几十年来从事工程岩体分级的经验和体会归纳总结出来,是作者多年的愿望。编写本专著目的之一是使自己对工程岩体分级的认识得到进一步提高;目的之二是与同仁们共同探讨工程岩体分级研究中的种种问题;目的之三是纠正时下对隧道及地下工程施工地质预报中一些不切实际的要求,以促进此项试验研究工作不断向前发展。

本书主要包括:国内外工程岩体分级现状、工程岩体分级的影响因素研究、主要量化指标的相关性研究、通用的工程岩体分级、隧道及其他地下工程岩体分级、TBM施工用的围岩分级、岩溶围岩分级研究。

在本书撰写过程中,参考或引用了中铁西南科学研究院有限公司(简称中

铁西南院)的试验研究成果和有关单位及个人的成果,如《工程岩体分级标准》编写组的专门论证报告、铁道部第一勘察设计院和中铁西南院共同主持的秦岭隧道 TBM 围岩分级的研究成果等。同时,在撰写过程中得到了中铁西南院领导和地质研究室的支持和帮助。

陈成宗研究员审阅了全书初稿,提出了许多指导性意见,李其凤同志、谷婷同志帮助完成了资料搜集、文稿处理等工作,在此向有关单位和个人表示衷心感谢。

作 者

2007 年 10 月

目 录

1 工程岩体分级现状	1
1.1 国内外分级概况	1
1.2 分级方法综述	4
2 国内外有代表性的分级简介	11
2.1 <i>RQD</i> 分级法	11
2.2 南非地质力学分级法 (<i>CSIR</i> 或 <i>RMR</i>)	11
2.3 缪勒分类法	13
2.4 岩体质量指标 <i>Q</i> 分类法 (<i>NGI</i> 法)	15
2.5 国内部分岩体分级	19
3 工程岩体 (围岩) 分级的因素	33
3.1 分级因素	33
3.2 分级因素的选择	35
3.3 工程岩体的定性描述与定性划分	36
3.4 岩体完整程度的定性划分	41
3.5 岩体基本质量分级因素定量指标的确定	44
3.6 隧道工程岩体 (围岩) 分级修正参数的确定	61
4 通用的工程岩体分级	74
4.1 概 述	74
4.2 《工程岩体分级标准》GB 50218—94 的特点	75
4.3 分级因素及其确定方法	77
4.4 工程岩体基本质量综合评定指标 <i>BQ</i> 值的确定	81
4.5 工程岩体基本质量分级	97
4.6 隧道及其他地下工程岩体 (围岩) 分级	97
4.7 各级岩体物理力学参数及结构面抗剪断强度参数建议	99

5 铁路隧道工程岩体(围岩)分级	100
5.1 铁路隧道工程岩体(围岩)分级的步骤与原则	100
5.2 铁路隧道工程岩体(围岩)分级方法	102
5.3 各级隧道围岩的稳定性评价	110
5.4 铁路隧道各级岩体(围岩)喷锚支护设计参数建议	112
5.5 应用实例	115
5.6 RMQ 分级与 1972 年隧道围岩分类及 Q 分级的关系	123
6 公路隧道围岩分级方法及实施	126
6.1 公路隧道围岩分级现状及修订的必要性	126
6.2 公路隧道围岩分级方法	127
6.3 公路隧道围岩分级	127
6.4 公路隧道围岩分级的实施	128
6.5 应用实例	134
7 掘进机(TBM)施工隧道围岩分级	139
7.1 TBM 工作条件(工作效率)与隧道围岩地质因素间的关系	139
7.2 TBM 施工隧道的地质工作及 TBM 工作条件的探查	147
7.3 隧道围岩 TBM 工作条件的分级方法与步骤	149
7.4 隧道裂隙围岩 TBM 工作条件的等级划分	151
7.5 秦岭隧道裂隙围岩 TBM 工作条件分级	153
8 岩溶围岩分级方法研究	158
8.1 岩溶围岩分级的基本概念	158
8.2 岩溶围岩的物理力学特性试验研究	159
8.3 岩溶围岩分级模型的建立	166
8.4 岩溶围岩分级应用实例	173
结 束 语	177
外国人名索引	179
参考文献	180

1 工程岩体分级现状

1.1 国内外分级概况

工程岩体分级是在大量岩石工程实践的基础上逐步形成和发展的。一百多年来,国内外提出的工程岩体分级方法泛百种之多,其中大部分分级是为地下工程的设计和施工服务的。

国外对工程岩体分级的研究开展较早,18世纪,俄国人就提出了将岩石分为坚石、次坚石、软石、破碎岩石和松散岩石等的五级岩石分级法;1861年欧洲人霍夫曼提出了按开采工具将岩石划分为六级的方法。这两个早期分级,主要是为施工服务的。

20世纪初,陆续出现了为支护设计和确定地压力服务的分级方法,如著名的普罗托吉亚柯诺夫的分级(普氏分级)(1926年)、太沙基的分级(1946年)。20世纪50年代以来,出现了以评价工程岩体(围岩)稳定和相应支护形式为目的分级,主要有劳弗尔根据毛洞稳定时间为指标的分级,迪尔(1969年)按岩石质量指标 RQD 值为指标的分级,巴顿(1974年,挪威)岩石质量系数 Q 分级,宾尼威斯基(1973年,南非)的节理化岩体的地质力学分级,以及日本国铁的按弹性波速度的分级,等等。

国内工程岩体分级的应用研究起步较晚,直至20世纪60年代后才逐步得到重视和发展,大致经历了3个阶段。

(1) 1954年以前——初期阶段。

新中国成立初期,为了确定施工定额和开挖方法,基本沿用新中国成立前的以岩石极限抗压强度和岩石天然重度为指标的分级方法,将岩石分为特坚石、坚石、次坚石、松石和土质5级(或4级),无隧道工程的专门分级。这种分级指标比较简单、粗糙,缺乏对岩体地质条件的定性描述和量化数据,设计难以应用。

(2) 1954—1972年——使用普氏分级阶段。

这一阶段,我国铁道、水电、冶金、煤炭、国防等工程部门都沿用普氏分

级。普氏分级以岩石坚固性系数 f_{sp} 为指标,这种分级较之以前的各种计算地压方法,较经济合理,因此较长时期内在前苏联和我国得到广泛的使用。但随着大量的工程实践应用,普氏分级的不足越来越明显。人们逐步认识到,单纯依靠岩石抗压强度得到的 f 值并不能充分反映工程岩体(围岩)基本特性和岩体的稳定状态,也由于该分级没有充分考虑岩体完整性、岩体结构特征等对岩体稳定性有极大影响的因素,致使其不能正确评价岩体的稳定性,用它计算的地压值也有很大的局限性。

1960年以后,一些部门陆续提出了修正的普氏分级方法。

铁道部1960年提出的“岩体坚固性系数分级”中,以岩体 f 值代替岩石 f 值的分级,即

$$f_{\text{岩体}} = K \cdot f_{\text{岩石}} \quad (1.1)$$

式中 K ——考虑了岩体破碎程度、地下水状态等的修正系数。

1965年“西南工程指挥部山体压力战斗组”又提出“岩体综合分级”,该分级对普氏分级的改进体现在以下三个方面:一是把岩体结构面特征作为分级的主要指标,而且对岩体结构面的描述具体化、量化;二是分级中引进了岩体强度概念,把岩体的“压、切”强度作为一项分级指标;三是将风化程度、地下水状况、施工情况等因素列为分级应考虑因素。

1966年水电部在《水工隧洞暂行设计规范》中提出了“凿岩压力系数与岩石抗力系数”分级。

上述分级概念和分级建议,由于当时社会等因素未引起足够重视,在工程实践中没有得到实际推广、应用,直至1972年前,基本上仍然沿用普氏分级方法。

(3) 1972年到现在——新的工程岩体分级方法不断提出和推广应用阶段。

随着我国岩石工程尤其是地下工程的大量修建和工程地质勘察技术方法和测试技术的发展,对隧道及地下工程所处工程岩体属性的认识日趋完善,为提出新的工程岩体分级方法提供了客观基础。在此期间,我国各部门纷纷将工程岩体分级列为试验研究课题,开展了大量的试验研究工作,并取得了丰硕成果。

1972年中国科学院地质研究所谷德振教授等提出了以岩体结构类型为主要划分依据的分级(分类)方法。

同年,铁道部和总参305部队也提出了以岩体结构特征定性描述和以岩石强度为基本因素,并综合考虑其他因素的新方法。

上述分级都将工程岩体(围岩)划分为5级或6级(5类或6类)。