

FANYINGLI YINGBIAN YANSHI LIXUE ZAI GONGCHENG ZHONG YINGYONG

反应力应变岩石力学 在工程中的应用

刘国霖 著

地质出版社

反应力应变岩石力学 在工程中的应用

刘国霖 著

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

内容简介

本书所讲内容是岩石力学新拓展的重要部分,是岩石力学正应力应变系统研究尚未涉及的另一面,是工程建设与地学研究必须考虑的重要因素,也是系统研究与计算中不能忽略的重要部分。书中探讨了反应力发生与变化演绎,反应力状态下的岩体力学特性,运用功能原理反演破释已知一些重大工程与自然地质灾害中、有隐藏的反向动力与新生的波子力,由反应力状态耦力场,诠释自然与岩土工程变形破坏的机理与演绎。书中3章至7章讨论了高坝大库、陡高边坡、泥石流、洞室岩爆、水库地震等众多重大问题反馈研究的成功实例。在勘测设计试验施工与监测中,应作一定的补充修正,以达工程建设实施中的经济与安全。

本书可以作为西部大开发地区土木工程与地学界及有关大专院校科研单位的重要参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

反应力应变岩石力学在工程中的应用/刘国霖著.

—北京:地质出版社,2009.11

ISBN 978-7-116-06382-2

I. ①反... II. ①刘... III. ①岩体应力-应变-岩石力学-应用-岩土工程-研究 IV. ①TU452

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第204511号

责任编辑:葛秀珍 陈磊

责任校对:杜悦

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路31号,100083

电话:(010) 82324508(邮购部);(010) 82324565(编辑室)

网址:<http://www.gph.com.cn>

电子邮箱:zbs@gph.com.cn

传真:(010) 82310759

印刷:北京地质印刷厂

开本:787mm×1092mm¹/₁₆

印张:11

字数:260千字

版次:2009年11月北京第1版·第1次印刷

定价:30.00元

书号:ISBN 978-7-116-06382-2

(如对本书有建议或意见,敬请致电本社;如本书有印装问题,本社负责调换)

序

刘国霖教授，从事水电工程地质工作，已经 55 年。

1953 年，刘国霖教授，由东北地质学院毕业后，即从事水电工程野外地质勘探工作，长达 31 年。主持了上犹江、拓林、天生桥（Ⅱ级）、黄龙滩、龙滩等水电站的地质勘探工作，进行宏观地质背景调查与微观地质现象分析的系统研究。工作中，他尊重前人工作成果，又不为结论所惑，一切以经过仔细调查研究的客观实际情况为准，所以对问题的认识与预测比较准确，成果获得中、外专家的好评。1983 年 7 月，缪勒教授（奥）在龙滩坝址考察四天，赞誉工程地质工作是第一流的。

1984 年，他调入高校工作。在教学中，他注意与生产、科研紧密联系。针对岩滩水电工程左岸坝基开挖进行了研究，经采用部分成果，减少其开挖量，获得了提前发电等经济效益。所作教学科研成果获湖北省高教的科技成果奖。在国家“七五”重点科技攻关课题中，承担了煤矿与陡高边坡技术两个专题的子课题研究，其成果被评为国内领先，部分成果达到了国际先进水平。

在半个世纪的工作中，刘国霖教授积累了丰富的工程实践经验，奠定了他坚实的理论基础。《反应力应变岩石力学在工程中的应用》一书，正是刘国霖教授工作的总结。

本书刘国霖教授作者认为：工程地质中，“反应力应变”是自然界存在的普遍现象，在地质自然众多变形迹象中，可以甄别出反向力流的踪迹。现有岩石力学理论多属正应力应变范畴，未系统包含“反应力应变”部分。应用现有岩石力学理论，预测预报工程问题与演变，经实际工程检验，往往不准，作灾变后的反演分析，给不出符合实际的满意成果。加入“反应力应变”因素，对灾变现象，可以获得明确的工程解。

进入 21 世纪，刘国霖教授对“反应力应变”进一步探索。边坡岩体在应力释放以后，仍然具有脉冲式继续变形的特点，研究边坡拉平势场力，分析其具有反复、多变特性的温差应力这一潜能。在此隐藏动力作用下，引发岩石力学与岩石水力学特性的衰变劣化，产生渐进式的脆断破坏，派生出不同规模的波子力。运用此方法，可以破解马尔帕塞拱坝、瓦央大滑坡的灾变形成机理的未解之谜。

本书主要内容如下：

第 1 章，从地壳表面应力的各种成因出发，分析所派生与形成的反应力的现象与特性。

第 2 章，讨论了“反应力应变”条件下的岩石力学。

第 3 章至第 7 章，分别对大坝基础、边坡崩滑、泥石流、洞室岩爆、水库地震的一些典型实例，作了形成机理的破解，计算结果与灾变实际几近一致。

第 8 章，对“反应力应变”岩石力学理念的初步总结。

《反应力应变岩石力学在工程中的应用》一书，内容新颖，概念清晰、观点独特。显然，本书在理论上具有探索性，为现行岩石力学的研究作了重要的补充。

1989年，朱可善老师要求我，协助他培养张永兴博士研究生。在这项工作中，刘国霖教授给予了热情的帮助。在“八五”国家重点科技攻关课题中，我负责“陡高边坡关键技术”专题的研究。刘国霖教授也给予了鼓励和协助。利用这个机会，在此表示深深的谢意。

在“陡高边坡关键技术”专题的研究中，1995年，根据多年的实践经验和理论研究，我（序者）提出了“卸荷岩体（石）力学”的新概念。

岩体（石）工程处于复杂应力状态，有应力集中区，也有应力释放区。在应力集中区岩体的力学条件为加载，在岩体的应力释放区，其力学条件为卸载。在加载应力区的岩体与应力卸载区岩体的受力方向不同，由于岩体节理的存在，其力学特性有本质的区别，相应的岩体力学参数当然有很大的差异。

但是，现行岩体（石）力学在岩体工程应力应变数值分析中，将岩体力学参数却统一选用了加载力学条件下的参数值，因而，其数学模型与工程物理力学模型不相吻合。因此，现行岩体（石）力学数值分析成果变形很小，而工程实践监测变形很大，不能正确反映工程锚固支护作用。特别是在高地应力区和大尺度工程中，石方开挖后，地应力释放，岩体（主要是节理）卸荷、损伤严重，因此，其岩体力学参数急剧衰减，远非初始条件。现行岩体（石）力学，对此均未充分考虑，因而导致了岩体工程应力应变数值分析成果有本质的异差。

“卸荷岩体（石）力学”的理论依据是，工程石方开挖、卸荷，引起了岩体的回弹、松弛与损伤，是工程实际的力学现象。刘国霖教授提出的“反应力应变”理论，依据的是自然界存在普遍的地质力学现象。

这两个概念，与常规的理论有一些本质的区别。但是，它们之间的实际的力学本质却非常的相似。

“反应力应变”理论研究属开创性的研究，其理论基础是实践。进行这一学术研究的方向无疑是十分正确的。希望引起科技界的注意和重视。

哈秋舫

2008年9月于北京

前言

岩体受内外营力作用,会产生体变与形变。岩体中应力随应变而增减,当岩体受正向力作用,会产生压缩性变化,如岩石受重力作用即如此。岩石受反向力作用,则产生松弛膨胀,形成反重力作用后果。后者称为反应力应变。反应力应变岩体的力学特性,是反向隐藏能——隐藏动力作用所展现的特性,是岩石力学的重要组成部分,为正应力应变未涉及的范畴。这是西部地区岩土工程所面临的挑战性课题,在“七五”、“八五”国家重点攻关课题研究时,参与和协助哈秋龄教授所作节理岩体卸荷岩体力学研究中,按系统工程原理,突破原有压应力应变思维范畴,进行反应力应变岩石力学的开拓性求索,紧密结合工程中的迹象,不断取得新理念的确证。也是作者长期在野外勘测实践中,对岩体力学的运用与发展,和在教学科研中的充实与提高,使新的理念不断完善而日益明确,是岩石力学体系在工程建设中发展完善的必然结果。

作者从事水电野外地勘工作 30 余年,后调入学校从事教学与科研,退休后仍从事国家重点课题攻关项目研究。进入 21 世纪达古稀之年后,仍关注有关边坡等地质灾害的信息。结合个人经历与掌握的情况,从事专题性的探讨,撰写了一些论文,在三峡大学学报自然科学版上刊登,部分为俄罗斯《文摘杂志》选登。得知一些院校与勘设单位也在进行这方面的相关研究,可是在国家“十一五”重点科研专题攻关研究中,却无相关指导性的意向与要求,所以其研究应属探索性。知音好友建议我出一本论文专辑供后人参考。对反应力应变岩石力学,作者在认识与最终理念的确立与完善,具与时俱进的过程:从陡高边坡节理岩体卸荷岩体力学;到边坡的拉平势场力;反应力应变中的匿动力;匿动力活动对静态物体形成渐进破坏与能量积聚,造成物质物理力学性迅速衰变与破坏,并产生新的波子力,形成突发性地质灾害,以及匿动力在地下洞室中对洞室稳定、岩爆的重要影响、地震与水库地震中的作用等,经不断探索并成功运用,对世界上大的工程地质灾害未解难题获初步破译。作者以前的每篇论文,对实际现象都有新颖论点,但非整体概念下的系列论证。2007 年应国家电力公司中南水电勘测设计研究院之邀,参与撰写“龙滩水电站前期工作的回顾与思考”,用反应力应变来解释一系列现象,获满意效果。经此对反应力应变岩石力学的理念更系统与自信,故撰写此专著,供工作与研究参考。为便于掌握本书所述新理念与对实例的剖析,针对反馈信息中所遇障碍,希望读者明确下述要点。

(1) 反应力是由单个或多个因子复合组成,具不稳定与多变特性,各因子均有其独自の力流场势,单个或复合式力流与物体重力,在其耦力场中形成综合作用合力,其方向、力的大小及影响变化较大。

(2) 温度及其造成物体间的温差应力,是反应力中的最主要因子,具暗能特性,是反向的匿动力,其具有时显、时隐、时大、时小,与气温季节性变迁呈对应性脉冲变化,亦受昼夜与晴雨变迁的影响。

(3) 岩体由表向里,受温变影响亦由大而小,故降温使岩体产生冷缩时,形成向表

部的拉升力流，具有较大的拉升破坏力，其矢量易被“物体降温时产生向心收缩”这一微观现象所形成的习惯概念所困惑，这是须突破的从众心理。

(4) 地壳表层的地质体，为表部裸露的半无限体，其应力椭球体一直处于不断变化的反复振荡中，当 $-\sigma_3$ 这一反向张应力所形成的惯性矩，大于物体重力矩，则产生旋转变形，发生弯曲性倾伏、开裂和块体的滚动，亦可形成拗抬甚至折断。

(5) 岩体具成岩缺陷与构造损伤，具非均一性和各向异性的机械特性，其压缩与拉张的物理力学特性，无相互关联。损伤的断裂结构面，在压力作用下，具有压缩和传力特性，可具一定机械强度值。但在拉力作用下，则产生裂面扩张，岩石的不连续结构面，不能承受张力。故岩体的拉张强度、不是格里菲斯理论所述岩块强度的 $1/8$ ，应是排除结构面后剩余连续部分的 $1/8$ ，是等效强度，随断裂面所占大小而变，运用时应慎重率定。

(6) 地表岩体部分是固液两相介质，亦有气相影响的多相介质体，受温度湿度变化影响，具熵情与墒情变化，静态下由墒变引起熵变，甚至形成烈变，进而加大墒变的反复恶性循环，造成岩体物理性与水理性的剧烈劣化，是地质灾害中不可忽略的重要因素。

(7) 匿动力作用会造成岩体脆性破坏而释放其积聚能量，并形成波子<纵横震波>冲击力，是不能忽视的重要反作用力。

本书属自不量力的标新立异之作，书中定有不当与谬误之处，敬请读者批评指正。作者的一些新见解，获朱可善教授的赞扬与鼓励，获李仲春教授级高工的支持与指点，特表谢意。本书出版获得三峡大学地质灾害防治研究院、三峡库区地质灾害教育部重点实验室及湖北长江三峡滑坡国家野外科学观测研究站的赞助，地质灾害防治研究院书记王尚庆教授的全力支持以及哈秋龄教授、魏金石教授的高度关注，特表深深的感谢。对三峡大学土木水电学院的热忱帮助，表示谢意。

目 次

序

前 言

0 绪论	(1)
0.1 岩石力学的形成与发展	(1)
0.2 岩石力学在我国的发展	(3)
1 地壳表层中的应力	(7)
1.1 构造运动所引起的应力	(7)
1.1.1 板块构造运动	(7)
1.1.2 地质力学学说	(8)
1.2 岩体的自重应力	(8)
1.2.1 面状剥蚀引起的地应力变化	(9)
1.2.2 刻切侵蚀引起的地应力变化	(9)
1.3 地下水形成的应力	(11)
1.3.1 静水压力与浮力	(11)
1.3.2 动水压力与渗透压力	(12)
1.3.3 承压水压力	(12)
1.3.4 固体膨胀力	(13)
1.4 温度应力	(13)
1.4.1 地热	(13)
1.4.2 太阳辐射能	(13)
1.4.3 变温层(带)中的应力情况	(14)
1.5 环境变迁中物理化学效应的应力	(20)
1.6 地震动应力	(20)
1.7 反应力与拉平势场力	(22)
1.8 小结	(26)
2 反应力条件下的岩体力学特性	(29)
2.1 岩石力学的物理基础	(29)
2.2 岩石力学强度理论发展中的抗张强度	(33)
2.2.1 最大正应变理论与岩石抗拉强度	(33)
2.2.2 莫尔强度理论与拉伸强度	(37)
2.2.3 应变能理论与拉伸歪变能概念	(40)
2.2.4 格里菲斯强度理论	(48)
2.2.5 经验系数法与霍克-布朗准则	(53)
2.3 熵熵联袂演绎在反应力应变中的效应	(64)
2.3.1 熵、熵情况演绎中地下水传导性与水力学性变化	(65)

2.3.2	熵演绎孕生匿动力和派生新生波子力	(67)
3	反应力应变在大坝工程中的应用	(71)
3.1	温度应力所展示的影响	(71)
3.1.1	上犹江水电站大坝变形中的温度影响	(71)
3.1.2	链子崖裂隙变形中的气温影响	(73)
3.1.3	三峡工程永久船闸陡高边坡的温度效应	(73)
3.1.4	失事工程中温度应力——匿能因素共识要点	(74)
3.2	法国的马尔帕塞双曲拱坝溃决	(75)
3.2.1	工程简介	(75)
3.2.2	当时的气候条件与失事情况	(75)
3.2.3	调查委员会的报告意见	(76)
3.2.4	形成机理中温度因素工程解	(78)
3.3	梅山连拱坝右岸坝基扰动	(80)
3.3.1	工程简介	(80)
3.3.2	扰动情况调查与成因的不同认识	(81)
3.3.3	温度影响形成的机理工程解	(82)
3.4	某水电站坝与山体抬升	(83)
3.4.1	工程情况简介	(83)
3.4.2	抬升情况与研究认识	(84)
3.4.3	形成机理解	(86)
4	反应力应变在山体大滑坡中的应用	(88)
4.1	边坡崩滑中的一些特殊事例	(88)
4.1.1	冬季陡坡的变形与崩滑	(88)
4.1.2	夏季陡坡崩塌的一些特殊事例	(89)
4.2	瓦央 (Vaiont) 滑坡	(91)
4.2.1	滑坡区地质条件	(91)
4.2.2	发生岩体滑坡的经过	(93)
4.2.3	岩滑机理分析	(95)
4.2.4	瓦央滑坡机理系统工程解	(96)
4.3	洒勒山滑坡	(97)
4.3.1	滑坡区地质条件	(97)
4.3.2	滑坡的经过	(99)
4.3.3	洒勒山滑坡的机理工程解	(101)
4.4	黄腊石滑坡变形中的匿动力	(102)
4.4.1	黄腊石滑坡的地质背景简介	(103)
4.4.2	缓倾角张性正断层成因机理的探索	(103)
4.4.3	简要说明	(108)
5	反应力应变在边坡泥石流中的作用	(109)
5.1	泥石流问题的概况	(109)
5.2	泥石流的几个实例	(110)
5.2.1	天生桥 (Ⅱ级) 水电站坝区的泥石流	(110)

5.2.2	黄龙滩水库中的泥石流	(111)
5.3	形成机理与反应力应变作用的影响	(112)
5.3.1	泥石流形成机制的必要条件	(112)
5.3.2	条件的差异性	(114)
5.3.3	反应力应变的影响	(115)
6	反应力应变在洞室岩爆中的应用	(118)
6.1	一般理论研究现状	(120)
6.1.1	岩爆机理的研究现状	(120)
6.1.2	煤爆——冲击地压机理的研究现状	(126)
6.1.3	岩爆, 冲击地压的防治	(128)
6.2	隧洞岩爆实例	(129)
6.2.1	天生桥(Ⅱ级)水电站引水隧洞岩爆情况简介	(129)
6.2.2	太平驿电站引水隧洞岩爆情况简介	(132)
6.2.3	锦屏二级水电站大水沟5 km 探洞岩爆情况简介	(133)
6.3	成因机理解	(135)
6.3.1	需重复和明确的共识	(135)
6.3.2	洞室的应力情况	(136)
6.3.3	岩爆形成机理与防治	(138)
7	反应力应变与地震及水库地震	(141)
7.1	地震理论与发展	(141)
7.1.1	构造地震及其形成机制	(141)
7.1.2	重力作用地震与形成机理	(142)
7.1.3	人类工程活动所引起的非自然性地震	(142)
7.2	水库地震几个实例	(147)
7.2.1	新丰江水库诱发地震	(147)
7.2.2	乌江渡水库诱发地震	(148)
7.2.3	邓家桥水库诱发地震	(149)
7.3	成因机理解	(150)
7.3.1	地震与水库地震信息中被遗漏或未引起重视的现象	(150)
7.3.2	反应力应变对水库诱震的影响	(151)
7.3.3	水对地震的影响	(154)
8	后语	(155)
8.1	提高对自然界认识的全面性	(155)
8.1.1	机遇与挑战	(155)
8.1.2	解放思想, 拓宽思路, 探索与创建岩石力学全面而完整的体系	(155)
8.1.3	提高对反应力应变认识与全面研究	(156)
8.1.4	坚持百花齐放百家争鸣的方针, 应鼓励科技的开拓创新	(156)
8.1.5	发展要点	(157)
8.2	加强对系统工程研究的全面认识	(157)
8.2.1	工程地质与岩石力学特性研究的真谛	(157)
8.2.2	需建立的系统工程思路	(157)
8.2.3	地质与岩石力学系统工程研究中具开拓性的必须要求	(158)

8.2.4 正确面对系统工程专业间的理论与实践 (159)

8.2.5 岩石力学研究中，应把握好基础地质研究与先进技术的运用 (160)

8.2.6 正确处理规程规范与创新 (160)

8.3 补充修改完善勘测设计施工试验监测的工作与研究 (160)

8.3.1 工程地质勘测研究 (161)

8.3.2 设计 (161)

8.3.3 施工 (162)

8.3.4 试验 (162)

8.3.5 监测 (162)

参考资料文献 (163)

0 绪 论

反应力应变的岩石力学,是岩石力学的重要部分,是过去被忽略而未全面涉及的部分,但要说明其特性,必须明确岩石力学的情况。

岩石力学是20世纪50年代迅速发展起来的一门新兴边缘性学科,当初与土力学共生,运用土力学的系统思路,采用材料力学的方法与理论作为其主要理论体系,研究工程岩体的变形与破坏,其与工程建设有密切联系。在地学研究中亦处于重要地位,运用宏、微观岩石力学概念,量化解释地质现象,揭示地壳形变演绎与断裂结构面的成生规律,其日益受到地学界、工程界和科技界的重视和发展。

0.1 岩石力学的形成与发展

岩石力学是从工程建设中形成,与工程建设紧密联系的一门新兴边缘性学科,其历史短,发展迅速,但形成过程漫长。已知公元前2世纪,李冰利用岩体热胀冷缩特性,采用火烤水淋法破裂岩体,开凿都江堰宝瓶口、劈山修渠,这属于岩石力学的萌芽。公元1世纪,我国劳动人民利用冲击破碎法,开凿深数百米的盐井。历代采矿,采用支护、回填、留柱等方法,以防岩体冒顶、偏帮、压裂破碎等地压现象,均属岩石力学具体运用,不过是凭直观经验、尚无系统理念。西方经第三次产业革命后,资本主义生产迅速发展,在人类经济建设活动中,岩石力学随之诞生,1878年海姆(A. Heim)提出深层岩体应力处于静水应力状态的假说。1926年施米德(H. Schmid)运用海姆假说,结合岩体弹性概念,解决洞室围岩应力分布。同期金尼克(A. Н. Диннику)提出岩体中天然应力状态的公式,普鲁托吉雅克诺夫(М. М. Прутоцьяконов)提出天然平衡拱理论,这些对岩石力学的探讨、为这一新兴学科提供了生长点。第二次世界大战后,各国大量兴建各项工程,面临一系列科学技术问题,促进了岩石力学的蓬勃发展。在此时期,多以连续介质、均质弹塑性理论以及极限平衡理论为主要计算原理。在试验方面,则以室内小试块的物理力学试验为主,但亦结合工程进行针对性的野外大型试验。同一期间,缪勒(L. Müller)等欧洲学者,开展了紧密结合实际情况的研究工作,创建了著名岩石力学奥地利学派,于1951年在萨尔茨堡举行以地质力学为主题的,第一次国际岩石力学讨论会。

1957年后,有关岩石力学著作不断涌现,标志着一门完整体系的独立新兴学科的诞生与兴起。在1957~1965年,拉布舍维奇(V. Rabcewicz)、缪勒、帕克(F. Pacher)等人在总结隧道工程的经验基础上,研究开发新奥地利隧道施工法,简称新奥法。该方法是基于岩石弹塑性理论,隧洞岩体动态观测资料有关岩体自护能力的变形时效概念以及岩体工程地质态势分类,以确定开挖工艺与支护方法。这是科学理念与经验融合的高超工艺,在欧洲获得成功运用并扩及世界各国,为岩石力学做出了很大的贡献。

1962年国际岩石力学学会成立。1966年在里斯本召开了国际岩石力学学会第一次大

会，基于马尔帕塞拱坝溃决、瓦央水库库岸巨型大滑坡的灾变教训，提出须重视工程地质岩石力学的更新知识，创造岩石力学性能定型判据。岩石力学的更新理念，多是从隧洞施工实践经验中总结建立。坝与边坡工程的岩石力学，亦借助隧洞的成果同时发展。岩石力学的发展，从初期的单一因素，发展为多因素的权值分类法，后锁定 1976 年权值分类标准的地质力学分类法，使设计所需岩石力学参数，由定性的经验法向科学检测的全面量化发展。早期的分类，有泰沙基（K. Terzaghi）于 1946 年提出的岩石载荷分类法，后为迪尔（V. Deere）等人修正，此法在美国地下工程中普遍运用近 50 年。考虑到岩体缺陷与损伤，对隧洞纵横向跨度自稳时间长短的影响，拉弗尔（H. Laffer）于 1958 年提出支撑时间分类法，后由帕克等人修正，形成以地层态势定性的新奥法分类，这是一种科学的经验尺度方法，具科学理论基础。1967 年迪尔以修正的岩心采取率，作岩石质量指标（RQD）的分类，现已作为钻孔岩心记录标准参数，并成为后期岩体权值系统——RMR 系统与岩体质量指标定量分类的 Q-系统的基本元素。当无钻孔岩心资料时，通过沿垂直与水平方向的节理线密度统计，按 1976 年普里斯特（Priest）公式求各个方向的 RQD 值。据此可评价大坝基础及边坡的岩体质量以及与其三维空间岩石质量的变化情况。1972 年威克汉姆（G. Wickham）等人，考虑了多参数权值系统的定量岩体分类，称岩石结构权值分类法（RSR）是针对隧洞围岩支护设计模式的岩体分类系统。这一分类法考虑了岩体强度类型与构造损伤程度的权值系统；岩体结构面产状要素与洞室施工结构相关性的权值系数；地下水对前两因素影响的权值系统；所得三权值评价参数之和，即为 RSR 值。RSR 分类法是为隧洞选择钢柱支护的一种有效方法。根据洞探等所掌握隧洞岩体质量确定 RSR 的预计值，绘制该直径隧洞在各典型地层段的支护需求草图，在研究隧洞支护时，引入支柱率原则。此原则必须先求泰沙基的岩石载荷支柱间距，然后除以所使用支柱尺寸的理论支护间距，得载荷支柱间距与相应所需理论间距的百分比，使 RSR 值与实际支护联系起来，辛海（Sinha）（1988）指出 RSR 法是泰沙基法的一种改良，而非一种独立系统。但 RSR 分类的主要贡献是创建岩体权值系统概念。

上述岩体分类未能全面反映岩体的复杂构造与结构、结构面状态及其所处场势情况，随建设发展不断要求岩石力学探索更新的研究方法，所以 RMR 与 Q 系统对岩体分类定量评价方法相继产生，使岩石力学研究，起了较能符合和满足实际要求的质的转变与飞跃。

RMR 系统分类称岩体权值系统分类，亦称地质力学分类，是比尼沃斯基（T. Bieniawski）1973 年提出，并在后期应用中获得很大改进。该分类考虑了岩石的单轴抗压强度；岩体质量指标；损伤破裂面间距；破裂结构面条件；水文地质条件五个参数的分级权值、加上结构空间展布与建筑物实施的相关影响所作的调整权值、由权值总数定出岩体等级，由岩体等级确定地下洞室岩体黏聚力强度（抗拉张破坏强度）、岩体内摩擦角及岩体平均支承时间。第六项为调整参数权值，具较具体的针对性，可在地下工程、坝基与边坡工程中运用。1980 年霍克-布朗（Hock-Brown）用 RMR 分类，确定岩体破坏时应力强度的理论公式。式中将岩体受力变化程度和其内摩擦角、建立与 RMR 在受扰动与未受扰动情况下的关系式。由于 RMR 中的参数权值已经多次修正，霍克提出，当 $RMR > 18$ 则采用 1976 年的规定，将 RMR_{76} 称为 GSI 地质力学指标分类。并据以求出岩体的抗压抗拉强度与 φ 、 c 值；岩体的变形模量、则依据 $RMR \approx 57$ 为界，分别采用比尼沃斯基与塞

拉芬提出的相应公式求解。于是则形成建筑物基础设计所需岩体力学参数选取的工程系统。在对岩石边坡稳定性评估方面,1985 年罗曼娜 (Romana) 根据野外资料,认识到岩石边坡稳定性,受不连续面力学特性控制、受结构面空间展布与边坡关系的影响,提出 RMR 系统中不连续面产状与边坡关系之参数改正的阶乘方法,删去原 RMR 系统中结构面方向改正因素,添加开挖方法改正权值,经修正成为 SMR 法,使 RMR 分类法适用于岩石边坡,包括软弱岩体、严重节理化岩体边坡稳定性的初步评估。这是对边坡地质灾害研究的重要贡献。综上所述,RMR 分类法提出,经发展中创新修正,已日臻完善。但 RMR 分类法忽视了三个重要性质,即各种节理粗糙度、充填节理的抗剪强度、地下洞室中岩石本身的荷载。1974 年巴顿 (N. Barton) 根据几百个工程实例,用 RMR 分类法优点,改进其缺陷与不足,提出隧洞围岩岩体质量指标分类法、Q—系统法。其使用岩石质量;节理组数;节理粗糙度值;节理蚀变度值;节理含水折减系数;应力折减系数六个参数值。形成岩石质量与节理组数的商,代表岩石块体的状态;节理粗糙度与节理蚀变度的商,代表块体间剪切强度指标;节理含水折减系数与应力折减系数的商,是表述有效应力状态。三个商值之积即为 Q 值。由 Q 指标与工程总结建立的关系式,求围岩顶拱压力及 Q 与等效尺度之间的关系,确定合适的支护措施,并建立 Q 与 RMR 之间的关系式。Q 系统是一种定量分类系统,是促进隧洞支护设计的工程系统,在 Q 系统中,巴顿等人认为:节理组数、糙度、蚀变度三个参数,比起节理方向来说起更重要作用,节理糙度与蚀变度,是指最不合适的节理,暗示了方向。当包含节理方向时,Q 分类就会显得通用程度不够,为避免复杂化,防止局限,使研究者主要精力集中于几个重要指标上。

在岩体分类法演进至对岩体宏观力学参数达定量化确定时,室内外试验技术,已满足高精度要求,这些现有野外地应力的压磁法、应力解除法测试、占孔水压致裂法的应力研究、平洞全断面径向千斤顶压法、水压法的岩体宏观变形模量测试、野外大三轴试验、流变试验、抗剪抗切试验以及动力法电法的探测等。关于不同粗糙度结构面的抗剪强度,在佩顿 (F. Patton) 对剪胀角研究的基础上,巴顿考虑了结构面糙度与其表面抗压强度,提出在不同应力条件下的抗剪强度公式。为配合岩体分类与抗剪强度野外定量研究,进行了野外相关物理力学性要求的快速测定。如施米特锤法、结构面糙度测量等。室内有全息性三轴试验、抗风化效应试验、结构面影响强度、变形试验、地质体模拟试验等。随电子计算机发展、数值分析法迅速发展完善,从有限元、边界元、离散元发展为自适应有限元、仿真模拟等。但其成果决定于参数的正确及物理模型与实际的一致。

0.2 岩石力学在我国的发展

我国运用岩石力学特性于工程建设中的历史较长,但发展形成系统学科的历史较短。新中国成立后,随着“一五”计划经济建设的实施,一些重点矿山、铁路、水利水电等重点建设项目上马,需要岩石力学为其服务,我国岩石力学进入了初创期。为满足岩土工程建设中对岩石物理力学特性参数的要求,用岩石力学理论与方法,探索解决工程建设中所面临的实际问题,中央与地方科研院所大专院校,逐步建立岩石力学专门研究机构,各生产设计单位,亦相应成立岩石力学试验与研究的科室小组。这时的工作特点,主要进行

室内岩块的物理力学性常规试验,按土力学方法布控制点取样和进行试验资料整理检验等。至“二五”计划经济建设期,逐步开展了各种项目的野外原位试验,这标志着岩石力学在我国的迅速发展,测试技术渐入新的学术水平。特别是1958~1960年,国家科学技术委员会组建了三峡岩基研究组,集中全国18个有关单位一百多位科技骨干,在陈宗基教授指导下,系统开展坝基、地下洞室、岩坡、岩石动力学、加固处理等岩石试验研究工作,培养出一批岩石力学科技骨干,为我国岩石力学发展奠定了基础。

进入20世纪70年代,一些大型、巨大型岩土工程上马,对岩石力学提出了更高要求,岩石力学迅速进入新的发展阶段,其特点是:

(1) 随着世界岩石力学的迅速发展与国际学术会议的不断召开,岩石力学科技资料极大丰富,中国科学院、水利科学院、长江水利科学研究院及各设计院,针对工程特点翻译了大量相关科研论文,促进了岩石力学认识水平提高与研究方法的改进。改革开放后,采用派出去请进来的办法,对岩石力学的发展有极大帮助与促进。

(2) 为满足大型岩土工程对岩石力学的迫切需要,从事岩石力学研究的技术人员迅速增加,学术交流异常活跃。随着岩石力学研究工作的发展,全国水利、水电、铁道、煤炭、冶金、地质等学会,都成立了岩石力学专业委员会或学科组。1978年我国以团体会员国加入国际岩石力学学会,成立了国际岩石力学学会中国国家小组,组织协调全国岩石力学的学术活动。经过多年筹备于1985年成立中国岩石力学与工程学会,下设高温高压岩石力学、岩石动力学、岩石破碎工程、地面岩石工程、地下岩石工程、岩石力学测试、数值计算及模型试验七个专业委员会。各省区亦建立了地方岩石力学与工程学会,大大推动了我国岩石力学发展。学会成立后,围绕大型工程组织国内外学术交流会、及国家重点科技攻关课题,受邀作工程问题的咨询、评估等,为国家建设做出巨大贡献。

(3) 对大型工程所面临的复杂自然条件,既要确保安全、亦需经济合理。在实践中,明确岩石与岩体,其力学性具明显差异,岩体力学是岩石损伤后的残余强度值,具不均一各向异性的巨大差异。在力的作用方向上,有相互制约的等效特性,过去凭经验,确定综合的模糊值,随着土木工程建设规模的日益巨大,一个参数的微小变化,都会影响经济效益与安全,因而突出了定量要求。岩体质量分类是必须的趋势,在迎来第一个科学春天之后,我国的岩体分类,呈现出百家争鸣的现象,其特点也是由隧洞开始,延拓至坝基与边坡,由定性向定量发展。隧洞从普氏分类、发展为岩体坚固性分类、至围岩稳定性分类。其代表性分类有:铁道部隧洞围岩分类、水电部隧洞围岩分类、国际喷锚规范围岩分类、总参坑道工程围岩分类、及科研院所等提出的岩体质量系数分类、围岩质量分类、岩体质量分级、块度模数等。对我国岩体分类与发展都起了推动作用。这些分类初期多属定性,具一定主观随意性。为了准确科学性的获取定量指标,各部门对岩体分类定量指标进行了研究。水电部将“水电地下工程岩体分类”课题,列入“六五”国家科技攻关内容,分析300多个工程的资料、并在一些工程的应用中,不断修改补充,使分类日臻完善。总参的坑道工程岩体分类,其完善与适用性,可与RMR分类、Q系统分类相提并论。RMR分类与Q系统分类,在我国获重视研究与实地运用。在RMR分类运用于岩石基础和高边坡时,作了正交各向异性的结构面统计与修正以及力的矢量与力学参数关系的正确选择,使之更符合工程地质的实际情况。

(4) 试验是在人工控制因素条件下取得所需参数的学科, 具较强的针对性和与自然实际情况的一致性, 故常规的室内大量岩块试验已基本终止, 代之而起的是一些特殊性试验, 如风化效应、结构面效应、围压效应、特殊状态下水理性效应、流变效应、不同方向波速测定等, 大力推行野外原位试验。依据所需, 选择进行野外大型真三轴试验、现场抗剪试验、洞室水压法、径向千斤顶法、声波穿透测试、应力测试、占孔高压水文地质试验等。须特别指出, 我国开展了下述前瞻性试验: 高围压下岩石抗压强度变化规律的三轴试验, 三维不等压条件下岩石强度、破坏机理与变形特性的真三轴试验, 探讨了中间主应力的影响; 高温、高围压三轴试验, 研究深部岩石特性; 弯曲、扭转、剪切的流变试验, 根据试验与分析, 研究岩石变形扩容、形成了岩石流变扩容理论。

(5) 在计算机日益迅速发展的形势下, 运用数值分析法, 研究岩体的宏观力学参数与应力应变成果, 远比对野外实际情况调查认识分类的重视, 并大力快速发展, 由弹性有限元、边界元、进而为离散元、块体元等分析法, 并进而迅速发展了自适应有限元法、数值流形法、界面元法、显式时间差分解析法、人工神经网络分析法等, 沿着缪勒所反对的方向迅速发展。这些计算软件, 针对实际情况建立, 应是科学正确的。但若所定岩体力学参数不准、物理模型不符, 均不能获取有效成果。用正应力应变软件, 剖析不了反应力应变所形成的现象和问题实质。

(6) 随着岩石力学的发展, 在理论研究方面也取得了显著成绩, 相关部门选译第三、四、五届国际岩石力学大会的部分重要论文汇编成集, 传递国外岩石力学的发展与最新成果, 推动了我国岩石力学的发展。改革开放后, 大学的岩石力学教材与专著出版如雨后春笋, 并各具特色。尤其是陈宗基教授在岩石流变力学研究, 谷德振、孙广忠教授的岩体结构力学的研究均起步较早, 在国际上占有重要地位; 石根华教授的全赤平投影块体理论、孙玉科教授的实体比例投影, 具简捷实用易理解掌握的特点。在“八五”国家重点攻关课题中, 哈秋龄教授提出高边坡节理岩体卸荷岩体力学、开始展开反应力应变的岩石力学研究, 具世界前沿性。高边坡节理岩体卸荷岩体力学, 是边坡特定时期的反应力应变作用, 在反应力释放后, 又恢复至正向的三维压力状态, 但仍存在反应变的脉冲式波动, 不符合流变原理, 亦不符合因工程影响所引起的力的演绎情况。依据动力地质学所述, 边坡处于拉平势场状态, 进行了拉平势场力研究。人工边坡应力在卸荷回弹释放后, 则反向拉张应力仅存被锁闭的残余应力, 并转为压力与剪切力而消散。边坡上的力, 有熵变形成的动、静水压力, 熵变形成温差应力, 另有岩体柱的重力, 这是岩体场中诸力的情况。当熵变为冷缩拉张温差应力时, 场力显现了拉平势场力流。熵与熵情具正反变化特性, 是反复可再生的作用力。重力与水压力有明显的物质属性, 是显性能; 温差应力是物体与热能影响的复合性力流, 具隐性, 正、反、大、小不断变化的特点, 其影响到处有展现, 但无人给予足够重视, 仅作为普通物理风化现象对待。作者研究发现, 这是一种巨大的暗能, 是一种反作用能源, 是产生反作用的匿动力, 在发展中又产生巨大的新生波子力, 是灾变中应加重视的作用力, 但被重力、水压力、构造地震作用力所屏蔽而被忽略。进行工程事故的功能反演, 即可滤出其魅力。正、反应力应变, 赋存于统一物体中, 随时、空、态变化而演变, 其所形成的一定迹象, 以反应力应变的最为明显, 因其发展缓慢、人们对之习以为常。岩土工程中的问题, 须岩石力学予以解决, 所以其应用效果很好, 但由于未含反应力应变, 显现了理论与方法上的跛脚性, 成果经实际检验有误, 预测

不准。马尔帕塞坝、瓦央高坡灾变事件，至今尚未很好破译，很多名人已逝，其不同见解仍留存。

本书主要从反应力的形成，工程问题中力学演绎，反应力下的岩石力学特性，设计理论与计算公式、勘测、试验、监测、施工防治等工作的补充修正作系统探索，以求在科学发展中达到人与自然的和谐。为上述目的，则须从地壳表层的态势特征入手，分析其所受诸力及其演绎，说明反向应力与其巨大影响。