

高等学校试用教材

岩体力学

武汉地质学院工程地质教研室
李铁汉 潘别桐 编

地质出版社

高等学校试用教材

岩 体 力 学

武汉地质学院 工程地质教研室

李铁汉 潘别桐 编

地质出版社

内 容 简 介

本书较全面而系统地讲述了岩体力学的基本理论、基本知识、基本方法及其在工程上的应用，也介绍了岩体力学这门科学近年来的一些主要进展。

本书是作为高等地质院校工程地质专业的试用教材而编写，但亦可供一般岩体力学研究工作者、有关科技工作者，以及一般高等院校有关专业师生参考。

岩 体 力 学

武汉地质学院 工程地质教研室

李铁汉 潘别桐 编

责任编辑：肖树芳

*

地质部教育司教材编辑室

地质出版社出版

(北京西四)

沧州地区印刷厂印刷

(沧州市河西街26号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

开本：787×1092¹/₁₆印张：183/8 字数：432,000

1980年12月北京第一版·1980年12月北京第一次印刷

印数1—4,290册·定价3.40元

统一书号：15038·教111

前 言

岩体力学是一门正在快速成长中的年青学科。它在许多方面还很不成熟，还很不完善。虽然这门学科发展速度较快，但就其现有的科学水平而言，它还远不能满足工程实践中提出来的各种迫切要求。特别是在地下洞室围岩变形与稳定性研究中，这个矛盾显得更为突出。

科学上不同学派、不同观点、不同研究途径的存在，是有利于科学发展的。对于一门年青的学科来说，提倡不同学术观点之间的交流和讨论，不仅不会引起混乱，而且有利于正确观点的发展，有利于科学水平的提高。

近年来，岩体力学在许多方面都获得了一些不同程度的进展。

据编者看来，最重要的进展有以下三个方面：

其一，是认识到岩体的空隙性，特别是裂隙空隙性，即软弱面网络的极端重要性。这种裂隙空隙性，不仅影响到岩体所有的工程性质，而且在大部分情况下，还直接控制着岩体的变形和破坏。

其二，是岩体中天然应力状态量测成果的积累，已经得出了一些可以信赖的重要结论。这些结论，一方面表明岩体力学中一些重要理论，诸如海姆静水压力假说、计算岩体中天然水平应力的金尼克公式、以静水压力状态为前提的芬纳方程，以及计算圆形洞室松动压力的卡柯—塔洛布尔公式等，在绝大多数情况下偏离实际太大，另一方面也缩小了弹性理论以及平面有限元分析法等的应用范围。同时，大量事实已证明，研究岩体中天然应力状态的异常重要性。

其三，是认识到岩体中软弱面网络的存在，必然导致岩体变形特性、强度特性，以及应力分布等的不连续性。一般来说，除了少数岩体可以近似地当作连续介质处理以外，绝大部分岩体都属于不连续介质。这种认识的获得，就对岩体力学工作者提出了研究建立适合分析不连续岩体的理论和方法的艰巨任务。近年来，已经有不少学者正在加强对这个课题的研究和探索。可惜，至今还没有看到具有实用价值的新理论和方法的出现。

本书基本上是建立在以上三方面认识的基础上，进行编写的。

本书是作为地质院校工程地质专业的试用教材而编写，但在内容的广度和深度上，也适当考虑到能够对一般岩体力学研究工作者、有关科技工作者，以及高等院校有关专业的师生，具有一定参考价值。

全书分为十二章。第一章至第八章为李铁汉编写，第九章至第十二章为潘别桐编写。编写大纲曾征求了有关单位的意见。在编写过程中，参阅了中国科学院武汉岩体土力学研究所、中国科学院地质研究所，以及长江水利水电科学研究院等单位的一些未刊资料。全书初稿完成后，编者所在教研室的部分同志分别对不同部分书稿进行了校阅，提出了一些修改意见。在1979年7月北京审议会上，孙广忠副研究员、陶振宇付教授以及全体与会同志，对全部书稿进行了审阅，并提出了不少的宝贵意见。主审单位为长春地质学院。编者对主审者，对所有提供资料、意见的单位和个人，在此一并表示谢意。

由于时间仓促，编者水平不高，书中会有不少缺点和错误，恳希所有读者，提出宝贵意见，以便进一步修改和提高。

编 者

一九七九年七月

目 录

前 言

第一章 绪 言	1
§1-1 岩体力学的研究任务	1
§1-2 岩体力学的研究内容和方法	2
§1-3 岩体力学的形成与发展	4
一、 岩体力学的形成	4
二、 岩体力学形成以后的发展	6
§1-4 岩体力学与工程地质学的关系	7
第二章 岩块与岩体的地质特性	9
§2-1 岩块	9
一、 岩块的组成	9
二、 岩块的结构与构造	10
三、 岩石的风化程度	12
四、 研究岩块的实际意义	13
§2-2 软弱面	14
一、 软弱面对岩体力学问题的影响	14
(一) 软弱面的胶结充填特征	14
(二) 软弱面的空间方向和位置	15
(三) 软弱面的连续性	15
(四) 软弱面的密度	17
(五) 软弱面的形态	18
(六) 软弱面的张开度	18
(七) 软弱面的组合关系	19
二、 软弱面的成因类型	20
(一) 软弱面的地质成因类型	20
(二) 软弱面的力学成因类型	21
§2-3 岩体	22
一、 岩体的组成及其特性	22
二、 岩体的成因与岩体的特性	24
三、 岩体的工程分类	25
(一) 岩块的工程分类	26
(二) 岩体的工程分类	27
第三章 岩石的物理及水理性质	32
§3-1 岩石的物理性质	32
一、 岩石的重量	32
(一) 岩石的比重	32

(二) 岩石的容重	32
二、岩石的空隙性	34
§3-2 岩石的水理性质	37
一、岩石的吸水性	38
二、岩石的水力传导性	40
(一) 单个裂缝中地下水的流动	40
(二) 岩体的水力传导性	41
第四章 岩块的力学性质	44
§4-1 基本的力学概念	44
§4-2 岩块的强度性质	46
一、岩块的单轴抗压强度	46
二、岩块的抗拉强度	50
三、岩块的三轴压缩强度与剪切强度	54
四、岩块强度性质的特征	59
§4-3 岩块的变形性质	60
一、单轴压缩条件下岩块的变形性质	60
(一) 连续加载条件下岩块的变形特征	61
(二) 循环荷载条件下岩块的变形特征	65
二、三轴压缩条件下岩块的变形特征	66
三、岩块的变形和破坏机理	67
(一) 破裂开始的条件	68
(二) 破裂在 $\tau = 0$ 、 $\sigma_3 < 0$ 条件下的发展	69
(三) 破裂在 $\tau > 0$ 、 $\sigma_3 > 0$ 条件下的发展	71
第五章 岩体的力学性质	73
§5-1 岩体的强度性质	73
一、原位剪切试验	73
二、软弱面的抗剪强度	75
(一) 泥化面的抗剪强度	76
(二) 层理面的抗剪强度	77
(三) 片理面的抗剪强度	78
(四) 光滑破裂面的抗剪强度	78
(五) 粗糙破裂面的抗剪强度	79
三、岩体的剪切强度	81
§5-2 岩体的变形性质	83
一、原位岩体变形试验	83
二、岩体的变形性质	86
(一) 岩体的法向变形性质	87
(二) 岩体的剪切变形性质	90
§5-3 时间因素的力学效应	92
一、加荷速度的力学效应	93
二、岩体的蠕变	94
§5-4 岩体中任一点破坏的判据	97

一、库伦-纳维尔判据	97
二、莫尔判据	99
三、格里菲斯判据	100
§5-5 岩体的破坏方式与破坏机理	101
一、岩体的破坏方式	101
二、岩体的破坏机理	102
第六章 岩体中的天然应力	105
§6-1 研究岩体中天然应力的意义	105
一、天然应力与区域稳定性的关系	106
二、天然应力与岩体稳定性的关系	106
(一) 天然应力与地下洞室围岩稳定性的关系	106
(二) 天然应力与边坡岩体稳定性的关系	107
(三) 天然应力与坝基岩体稳定性的关系	108
§6-2 岩体中天然应力的量测	110
一、钻孔位移法	110
二、钻孔应力法	112
三、钻孔应变法	116
四、钻孔水压张裂法	117
§6-3 岩体中天然应力量测的结果	118
一、岩体中的铅直应力	118
二、岩体中的水平应力	121
三、应力轴与水平面的相对位置关系	123
四、岩体中水平应力与铅直应力的比值	124
五、岩体中天然应力来源的理论解释	124
第七章 岩体边坡稳定性的分析	127
§7-1 岩体稳定性的分析方法	127
一、刚体极限平衡法	127
二、弹性理论和弹塑性理论分析法	129
三、有限单元计算法	130
§7-2 岩体边坡中的应力分布	131
§7-3 岩体边坡的破坏	133
一、岩体边坡破坏的基本类型	133
二、岩体边坡破坏的基本特征	136
(一) 平面滑动破坏的特征	136
(二) 双平面滑动破坏的基本特征	138
§7-4 岩体边坡稳定性的分析计算	139
一、岩体边坡稳定性分析的方法步骤	139
(一) 几何边界条件的分析	139
(二) 剪切强度参数和受力条件的确定	140
(三) 岩体边坡稳定性系数的计算和评价	142
二、平面滑动的稳定性计算	143
三、异向双平面滑动的稳定性计算	144

四、同向双平面滑动的稳定性计算	151
五、多平面滑动的稳定性计算	151
§7-5 边坡滑动体滑动速度的计算	153
第八章 坝基岩体抗滑稳定性的分析	155
§8-1 坝基的岩体力学问题	155
§8-2 坝基岩体稳定性的计算	156
一、坝基岩体滑动破坏的型式	156
二、坝基岩体承受的荷载	158
三 坝基岩体抗滑稳定性的计算	161
(一) 接触面抗滑稳定性的计算	161
(二) 坝基岩体内滑动稳定性的计算	163
§8-3 拱坝坝座岩体抗滑稳定性的计算	166
一、坝座岩体滑动的几何边界条件	167
二、坝座岩体抗滑稳定性的计算	168
第九章 地下洞室围岩稳定性分析	169
§9-1 围岩应力的计算	169
一、围岩重分布应力的计算	170
(一) 开挖后围岩仍保持弹性时的重分布应力计算	170
(二) 地下开挖后围岩出现塑性圈时重分布应力计算	176
二、内水压力引起的围岩附加应力计算	179
(一) 弹性厚壁筒理论	179
(二) 应用厚壁筒理论计算有压隧洞围岩附加应力	181
§9-2 围岩的变形和破坏	182
一、各类岩体围岩变形破坏的特点	182
(一) 坚硬块状岩体中围岩变形破坏特点	182
(二) 层状岩体中围岩变形破坏特征	183
(三) 碎裂岩体中围岩的变形破坏特征	184
(四) 松软岩体中围岩的变形破坏特征	185
二、洞室围岩位移的计算	186
(一) 开挖后围岩处于弹性状态时的位移计算	186
(二) 出现塑性圈时位移的计算	186
三、围岩破坏区范围的确定方法	187
(一) 确定完整围岩破坏圈厚度的弹性理论方法	187
(二) 应用弹塑性理论确定破坏圈厚度	188
§9-3 围岩压力计算	191
一、基本概念	191
二、围岩压力计算	192
(一) 形变压力的计算	192
(二) 松动压力计算	194
(三) 冲击围岩压力	199
(四) 膨胀围岩压力	200
三、围岩压力的实测	201

(一) 直接测量法	201
(二) 间接测量法	202
§9-4 围岩抗力和极限承载力计算	202
一、围岩抗力系数及其测定	202
二、围岩极限承载力的确定	204
(一) 自重应力作用下围岩极限承载力的确定	205
(二) 考虑天然应力时围岩极限承载力的确定	206
第十章 岩体力学中的有限单元分析法	207
§10-1 概述	207
§10-2 有限单元法的基本原理和步骤	208
§10-3 单元刚度矩阵	210
一、刚度和刚度矩阵的概念	211
二、恒定应变三角形单元刚度矩阵求解	211
(一) 线性位移函数及变形连续性	211
(二) 用结点位移表示应变	214
(三) 用结点位移表示应力	215
(四) 用结点位移表示结点力—单元刚度矩阵的建立	216
三、节理单元及其刚度矩阵	219
§10-4 荷载向结点移置	224
§10-5 结点平衡方程组和总刚度矩阵	227
§10-6 模拟岩体实际变形性质的迭代方法	236
一、初应力法	236
二、无拉力分析—应力赶移法	238
§10-7 计算模型、网格划分及成果整理分析	239
第十一章 岩体力学问题的模型模拟试验	247
§11-1 概述	247
§11-2 模型模拟试验的理论基础	248
一、量纲原理	248
二、相似理论	251
三、模拟试验的理论基础	253
§11-3 岩体力学问题的模型试验	254
一、力学相似的一般原则	254
二、相似材料和试验技术	256
§11-4 岩体力学问题的模拟试验	259
一、光弹性模拟试验	259
(一) 基本原理	259
(二) 在岩体力学中的应用	260
二、光塑性模拟试验	262
第十二章 岩体性质的保护和改善	263
§12-1 原岩性质的保护	263
§12-2 岩体性质的改善	265

一、岩体灌浆.....	266
(一) 浆液的力学性态.....	266
(二) 浆液类型及其在裂隙中的传播.....	267
(三) 防渗灌浆.....	269
(四) 固结灌浆.....	271
二、锚杆加固.....	273
(一) 锚杆作用的基本理论.....	274
(二) 锚杆类型和锚固力.....	275
(三) 锚杆参数的计算.....	278
主要参考文献.....	283

第一章 绪 言

§ 1-1 岩体力学的研究任务

岩体力学是力学的一个分支，它是研究岩体在各种力场作用下变形、破坏的规律和理论及其实际应用的一门科学。

岩体力学的研究任务，包括理论研究和实际应用研究两个方面。随着研究目的不同，岩体力学的研究任务，也就产生了差别。例如，大地构造研究人员，为了探索地壳构造运动的规律，需要研究岩体在高温高压下变形、破坏的规律和理论及其实际应用；采矿工程师和建筑工程师，根据采矿和各类工程建设的要求，需要研究在应力场作用下，边坡岩体、地基岩体、地下洞室围岩等变形、破坏的规律和理论及其实际应用；钻探和掘进人员，为了有效地破碎岩石，就需要研究岩石的破碎力学理论及其实际应用问题。本书是作为以各类工程建设和采矿工程为主要服务对象的岩体力学而编写，因此，它的主要研究任务，是由各类工程建设和采矿工程的要求来决定的。

在岩体表面或内部进行任何工程活动，均应符合安全、经济以及确保正常使用的原则。欲达此要求，必须通过准确地预测岩体的变形和稳定性、正确的工程设计，以及良好的施工质量等各项工作来保证。其中，准确地预测岩体在应力场作用下的变形和稳定性，进而从岩体力学观点出发，选择相对优良的工程地址，防止重大事故，保证施工顺利，并为合理的工程设计提供岩体力学依据，就是这门岩体力学的根本目的和任务。因此，我们所说的岩体力学，说得准确一点，应称为工程岩体力学。

从工程观点来看，岩体力学在理论研究方面的任务，有下列几个主要方面：

1. 岩体中应力积累和释放过程与岩体变形、破坏关系（包括岩体全过程应力应变关系、反复加荷卸荷等问题）的研究。
2. 岩体的强度理论：岩体的变形和破坏机理，以及岩体破坏判据的研究。
3. 岩体中天然应力的形成、分布及其对岩体稳定性影响的研究。
4. 岩体中裂隙水的赋存、运动规律及其力学效应的研究。
5. 岩体的力学属性，以及岩体变形和稳定性预测的数学力学分析理论的研究。
6. 喷锚支护作用机理的研究。

除了上述理论性较强的研究任务之外，岩体力学还具有大量的、复杂的、实用性较强的研究任务。

随着水利水电工程、采矿工程、道路工程、国防工程，以及重要工厂等工程建设的迅速发展，提出了大量的岩体力学课题，诸如坝基岩体的变形与稳定性；拱坝拱座岩体的变形与稳定性；水库库岸边坡、溢洪道边坡、船闸边坡以及渠道边坡的稳定性；露天矿坑边坡、道路路堑边坡，以及其它人工和天然边坡的稳定性；地下洞室周围岩体移动和地面沉降；以及岩体性质的改善与加固措施等。对这些问题能否做出正确的分析和评价，将会对工程建设和生产的安全性与经济性，产生显著的影响，甚至带来严重的后果。

在现代工程建设方面, 尽管工程设计与建筑技术日趋完善, 但是工程事故仍然屡见不鲜。尤其值得注意的是, 在许许多多工程事故之中, 由于岩体不均匀变形和岩体失稳酿成者, 占相当的比重。例如, 在一些世界闻名的工程事故中, 其中不少都是由这方面原因造成。1959年1月9日, 正在施工中的维加-德-捷腊坝被毁坏, 使丽瓦德拉义城遭受巨大损失, 并造成伤亡。该坝为一支墩坝, 坝高70呎(21.35米), 位于花岗岩地区。该坝毁坏的原因, 是由于坝墩产生不均匀沉陷, 致使各坝墩之间产生了过大附加应力而导致破坏。1959年12月2日, 法国南部马耳帕塞坝发生破坏, 使弗雷朱城西部和西北部被巨浪摧毁, 死亡400余人。该坝为一拱坝, 建成于1952年。坝高66.5米, 底宽6.76米, 顶宽1.5米, 半径105米, 顶部弦长180米, 弦长与坝高之比约为3.0。水库库容2500立方米。坝建在具有下伏片麻岩的石炭纪坚硬岩体上。该坝设计正确, 施工质量良好。发生溃坝的原因, 主要是由于左岸部分裂隙化片麻岩破坏所引起。1963年10月9日, 意大利瓦央水库在邻接大坝的库区左岸, 发生了体积约为2.5亿立方米的巨型岩体滑坡。由于该滑坡的滑动速度极快, 导致库水产生了高出坝顶150米(左岸)至250米(右岸)的水浪, 越坝而过, 造成洪水泛滥, 使2400人丧失了生命。1961年3月6日, 我国柘溪水库发生了塘岩光岩体滑坡。该滑坡位于近坝库区右岸, 体积达160万立方米。由于滑坡以高速突然滑入水库, 掀起巨大涌浪, 最大涌浪高达21米, 全部发生过程不超过1分钟。滑坡发生时, 主体工程尚未完建, 库水位已上升到148.9米(抬高水头约54米)。由于滑坡引起涌浪作用于坝体的正压力高达260吨每平方米, 因而摧毁了坝顶的临时挡水木笼, 使涌浪以数十米落差倾泻于下游施工场地, 造成了严重事故。

此外, 在地下洞室施工中, 围岩发生变形封闭、塌方、冒顶, 深埋地下洞室出现岩爆; 在工程运转期间发生衬砌开裂; 以及有压隧洞衬砌开裂、漏水, 进而引起斜坡岩体发生滑动等事例, 都是不胜枚举的。这些岩体变形和失稳问题的产生, 常常导致停工、停产和伤亡事故。例如, 盘古山钨矿一次大规模地压活动埋掉价值200万元的生产设备, 造成停产近三年的时间。再如, 解放前湖南锡矿山北区洪记矿井大陷落, 一次就使200多名工人丧失了生命。

上述重大事故的发生, 多半是对工程地区的工程地质条件研究不够, 对岩体变形和稳定性估计不足所引起。与此相反, 在不少情况下, 由于对岩体变形和稳定性问题估计得过分严重, 或者是由于工作者心中无数, 所以不得不从“安全”角度出发, 在岩体工程设计中采用过大的安全系数, 致使工程投资大大增加, 施工期限大大拖长, 造成了不应有的浪费。

总之, 岩体力学研究岩体工程实际课题的目的和任务, 就是要力求避免出现上述两个方面的情况, 并在正确评价岩体力学问题的基础上, 保证工程的设计、施工和运转, 做到安全、经济, 符合多快好省的原则。

§ 1-2 岩体力学的研究内容和方法

岩体力学服务的对象, 非常广泛, 它涉及到水利水电工程、采矿工程、道路工程、国防工程, 以及重要工厂等许多方面。不同的服务对象, 对岩体力学具有不尽相同的要求和不尽相同的研究内容。例如, 重力坝和拱坝, 对坝基和坝座岩体不均匀变形和切向位移限

制比较严格，而路堑、露天矿坑等许多岩体边坡，在保证岩体不致滑出的条件下，往往允许发生一定的变形；许多国防工程对岩体动态性能研究要求比较高，而非地震区的一般工程，却常常只需要研究岩体的静态性能。

岩体力学的研究对象，不是一般的人工材料，而是天然形成的岩体。由于岩体具有天然应力并发育有软弱面网络，所以它不仅具有弹性、脆性、塑性和流变性，而且还具有非均匀、非线性、非连续性，以及各向异性的特性。对于这样一种非常复杂的介质来说，不仅研究内容非常复杂，而且利用连续介质力学来处理，常常都会遇到难以克服的困难。

由于岩体力学服务对象的广泛性，主要研究对象的复杂性，就决定了岩体力学的研究内容，必然也是广泛而复杂的。但从工程观点看来，可将岩体力学的研究内容，大致归纳为以下几个方面：

1. 岩块与岩体的地质特性 岩块与岩体的许多性质，都是在形成它们的地质历史过程中形成的，因此，研究岩块与岩体的性质，必须首先研究它们的地质特性，并对其进行工程分类。

2. 岩石的物理性质及水理性质 在这些性质之中，岩块与岩体的空隙性，包括“孔隙性”和“裂隙性”，在很大程度上控制着岩块与岩体的力学性质。因此，研究空隙性，特别是研究岩块与岩体的裂隙性，是岩体力学中非常重要的研究内容之一。

3. 室内试验与岩块的力学性质 在岩体力学中，研究岩块力学性质的主要目的，是为了全面了解岩体的力学性质，或是在岩块力学性质接近岩体力学性质的条件下，通过岩块力学性质的研究，减少或代替原位岩体的试验研究工作。

4. 原位测试技术和方法与岩体的力学性质 岩体的力学性质是岩体力学最基本的研究内容。任何岩体力学的研究工作，基本上都可以划分为两个方面：（1）在详细的工程地质研究基础上，定量研究岩体的力学特性；（2）确定作用于岩体的应力物，并研究岩体的变形和稳定性。在上述两个方面的研究工作中，前者是基础，后者的研究理论和方法，将随着岩体力学属性的不同而不同。

5. 岩体中的天然应力及其量测理论和方法 在岩体的应力应变关系为线性条件下，岩体中的重分布应力场，都是由天然应力场和开挖岩体或对岩体加荷所引起的局部应力场二者迭加来确定的。因此，要确定重分布应力场，必须首先研究岩体中的天然应力场。

6. 边坡岩体、坝基岩体以及地下洞室围岩变形与稳定性等的分析 对这些问题能否作出正确的分析，将直接影响到拟建工程的安全性及经济性。

7. 模型拟试验、原型实测与长期观测 模型模拟试验，是解决岩体力学理论和实际问题的一种重要手段。原型实测与长期观测，既可以检验岩体变形与稳定性预测的正确性，同时还可以及时发现问题，作到防患于未然。此外，根据原型实测和长期观测积累起来的实际资料，还可以开展某些理论问题的研究。

8. 岩体性质的改善与加固

以上八个方面，就是岩体力学所要研究的基本内容。

研究内容在很大程度上决定着必须采用的研究方法。岩体力学的研究内容表明，在岩体力学研究中必须采用下列研究方法：

1. 工程地质研究法

要了解岩块与岩体的地质特性，必须运用工程地质研究法。例如，要了解岩石的矿物

组成、结构及构造特征,就需要采用以工程适用性为目的的岩矿鉴定法;要查清不同岩性或不同岩性组合岩体的空间分布、构造特征、软弱面网络的空间分布、各种类型软弱面形成的先后顺序、地下水的赋存和运动规律、地震地质背景,以及工程地质条件的未来变化等,就需要用地层学方法、地质与力学相结合的地质力学法,以及有关的工程地质勘测方法等。

2. 试验法

在岩体力学研究中,试验法是经常使用的一种非常重要的研究方法。它包括岩块工程性质的室内试验、岩体工程性质的原位试验、岩体中天然应力的量测、模型模拟试验,以及原型实测和长期观测等方法。试验法不仅可以获得岩体变形和稳定性分析中所必须的定量指标,而且还可以直接用以研究岩体的变形和稳定性,以及岩体力学中的许多理论问题。因此,应当高度重视并大力开展岩体力学的试验研究工作。

在岩体力学试验研究工作中,应当以原位岩体试验为主、岩块试验为付、注意试验条件如加荷方式、温度、时间、比例尺效应等的影响,加强试验资料的整理分析和充分利用,并应重视测试理论、测试仪器设备以及测试方法的研究。

3. 理论分析法

岩体力学在应用方面的主要任务,是预测岩体在不同力场作用下的变形和稳定性。因此,在岩体力学研究中,经常要运用理论分析法,诸如刚体极限平衡理论、弹性理论以及有限单元分析法等。

当前,理论分析方法还是一个非常薄弱的环节,因此,努力研究这一类方法,特别是研究适合于预测不连续岩体变形和稳定性的理论分析方法,是岩体力学极为重要的一项研究任务。

§ 1-3 岩体力学的形成与发展

岩体力学是在五十年代末期才形成的一门新兴学科。与土力学相比,岩体力学的历史是很短的。第一本“土力学”(K.太沙基著)于1925年出版,而第一本“岩石力学”(J.塔洛布尔著),直到1957年才出版。但是,从近二十年岩体力学发展的速度来看,却显著地超过了土力学。这说明采矿工程和各类与岩体有关的工程建设实践对岩体力学知识的迫切需要,也说明在研究岩体变形和稳定性方面,必须坚持定性定量相结合,即在充分定性研究的基础上,还必须提出定量的研究成果,以满足工程设计的实际需要。

在学习本课程的时候,概括地回顾一下岩体力学的形成与发展,不是无益的。

一、岩体力学的形成

岩体力学形成以后的历史是很短的,但其形成过程却是漫长的。早在1874年,隧道专家尔扎哈(F. Rziha)就开始从事研究作用于隧道围岩中的水平分力。1878年,海姆(A. Heim)提出水平分力必定具有和铅直分力相同的数量级,并在几篇论文中(1878~1912)强烈地强调了这一论点。本世纪初期,在采矿工程方面已有人从理论上研究和总结地下坑道围岩压力的规律。但在1920年以前进行的研究工作甚少,仅做了一些岩块在单轴压缩和单轴拉伸等简单应力状态下力学性质的试验工作,以及对坑道支架受力大小做了一

些研究。值得提出来的，是俄国MM普罗托奇雅阔诺夫于1926年提出来的“自然平衡拱”学说。这个学说把岩体假定为松散体，并认为坑道支架仅受坑道顶板以上自然平衡拱以内岩体重量的作用。对于松散岩体来说，普氏理论至今仍具有理论和实用价值。

1920年，瑞士联合铁路公司在阿尔卑斯山区南部刚刚建成的里通（Ritom）隧道发生了严重故障。检查结果表明，沿着隧道方向产生了许多纵向裂缝。岩层总的倾向河谷，并担心水的渗流可能引起岩体滑坡，故时隧道进行了修理和补强。

当时，瑞士联合铁路公司还正在建筑位于阿尔卑斯山区北部的阿姆斯特格（Amsteg）隧道。他们决定在第二个隧道中进行水压洞室试验。通过试验，才首次证明岩体具有弹性变形性质。几年以后，瑞士的施米德（H. Schmid）于1926年发表了一篇论文，在该论文中，他把海姆关于岩体中剩余应力的概念与以公式表示的岩体弹性变形的概念结合了起来，解决了地下圆形洞室围岩中的应力分布，对岩体力学理论作出了最初的努力。

在1925至1926年期间，金尼克（A.H. Динику）曾根据开挖前岩体中的天然应力状态条件，进行了确定矿井支架上的压力并计算支架的尝试。大概就是在这个时期，金尼克提出了确定岩体中天然应力状态的下列公式：

$$\sigma_v = \gamma h \quad (1-1)$$

$$\sigma_{H1} = \sigma_{H2} = \frac{\mu}{1-\mu} \gamma h \quad (1-2)$$

式中， σ_v ——地面以下某一点的铅直主应力；

γ ——岩体的容重；

h ——地面到所研究点的距离；

σ_{H1} 、 σ_{H2} ——水平方向的两个主应力；

μ ——岩体的泊松比。

根据1951年以来岩体中天然应力量测结果证实，公式（1—1）在绝大多数情况下基本正确，而公式（1—2）在绝大多数情况下与实际不相符合。

1938年，智利地质学家芬纳（R. Fenner）发表了一篇在许多方面与施米德观点相同的论文，并提出了在天然应力为静水应力状态时确定圆形隧洞围岩松动压力的芬纳方程。

同年，金尼克在天然应力状态为 $\sigma_v = \gamma h$ 、 $\sigma_H = \frac{\mu}{1-\mu} \gamma h$ 条件下，推导出了圆形隧洞围岩中重分布应力的计算公式。虽然在上述研究中，施米德、芬纳利用了不符合实际的海姆假说，金尼克利用了绝大多数情况下不符合实际情况的（1—2）式，但是，由于弹性力学和弹塑性力学理论的引入，使岩体力学向前迈进了一大步。

1946年，K.太沙基出版了“隧洞地质入门”一书，其中考虑了软弱面对岩体稳定性的影响，提出了至今仍有参考使用价值的隧洞围岩稳定性分类。

总的来说，在1920至1950年期间，以连续介质力学作为岩体力学研究的理论基础，是这一时期研究工作的主要特征。具体来说，这一时期主要研究了隧洞围岩中的应力分布及围岩压力、岩块的力学性质，以及部分国家还利用了水压洞室试验、平板载荷试验、压力环试验、壁面应力量测及光测弹性等方法，对岩体的力学性质和岩体稳定性问题进行了一定的研究。

1950年至1960年前后，是岩体力学全面发展的一个时期。其主要特点如下：

1.许多国家对地下洞室围岩稳定性、岩体边坡稳定性及地基岩体稳定性等三大问题,均在不同程度上先后全面开展了研究,并先后发表了一系列论文和专著。在这一时期,我国于1952年出版了“矿内地压与顶板管理论文专集”,并于1956年开始开展了原位岩体力学性质的试验研究。此后,随着社会主义建设事业,特别是水利水电建设事业的蓬勃发展,我国逐渐开始开展了较全面的岩体力学研究工作。

2.开始利用深孔应力解除法,对岩体中的天然应力进行实测研究。

2.对岩体的空隙性,特别是岩体的裂隙空隙性、岩体中的软弱面,以及岩块与岩体力学性质的各向异性等问题的研究,逐渐放到了重要地位,并在大力研究不同应力状态下岩块力学性质的同时,逐渐发展了原位岩体的各项测试技术和试验研究工作。

4.在评价岩体稳定性时,一方面是利用弹性理论和弹塑性理论来研究,另一方面又发展了定性图解分析法、定量图解分析法,以及块体极限平衡理论分析法。

5.在加固和稳定岩体措施方面,除了以往经常采用的排水、灌浆及支挡等办法外,出现了效果良好的岩体锚喷法。

1957年,法国J.塔洛布尔所著“岩石力学”一书出版。这是一本内容比较丰富的代表性著作,它从“岩体”概念出发,较全面系统地介绍了岩石力学的现代理论和试验研究方法,并讲述了岩石力学在水电工程上的应用。

1961年,在意大利罗马召开的第七次国际大坝会议上,宣读了许多岩体力学方面的报告,涉及到岩体力学的各个方面,讲述了这门新学科的研究方法和成就。此后,为了开展学术交流,于1962年5月在奥地利萨尔茨堡成立了“国际岩石力学学会”。

由上述可以认为,岩体力学发展到五十年代末期,已经形成了一门独立的学科。

二、岩体力学形成以后的发展

由于岩体力学在保证工程安全和经济方面的重要性,随着生产实践的发展,逐渐为人们更深刻地理解;1959年法国马耳帕塞坝的溃坝,1963年意大利瓦央坝库区巨型岩体滑坡的发生,更引起了世界各国对岩体力学研究的重视;加之,现代工程规模等级的不断增大,对岩体变形和稳定性定量评价提出了更高的要求,因而使岩体力学自形成以来获得了较快速度的发展。

从岩体力学发展成为一门独立学科约20年以来,由于水电、采矿、道路、国防、重要工厂等工程建设迅速发展的迫切需要,许多国家都大力开展了岩体力学研究工作。总的来看,这一时期的特点,是专门研究机构和学术活动组织显著增多,学术交流非常频繁,研究内容非常广泛,研究论文和岩体力学著作不断地大量涌现。从研究内容方面来看,许多学者都比较重视下列问题的研究,并已获得不同程度的进展:

1.岩块与岩体的地质特性 这是岩体力学形成以来,不同学派都普遍重视研究的一个课题。该课题在许多岩体力学著作中,例如,1957年出版的J.塔洛布尔著的“岩石力学”、1968年出版的K.G.斯塔格与O.C.晋基维茨主编的“工程实用岩石力学”、1972年出版的C.耶格著的“岩石力学与工程”,以及1974年出版的L.米勒编辑的“岩石力学”等著作中,都列为独立的章节来阐述。特别应当提出来的,是奥地利学派在对岩块与岩体地质特性详细研究的基础上,已经在岩体力学方面提出了一系列基本观点,这就为岩体力学的进一步发展,奠定了理论基础。