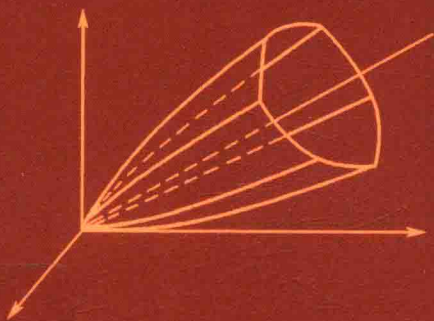




中央高校教育教学改革教材建设专项经费资助

工程岩体力学

刘 高 编著



兰州大学出版社
LANZHOU UNIVERSITY PRESS

中央高校教育教学改革教材建设专项经费资助

工程岩体力学

刘 高 编著



兰州大学出版社
LANZHOU UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

工程岩体力学 / 刘高编著. -- 兰州 : 兰州大学出版社, 2018. 7

ISBN 978-7-311-05382-6

I. ①工… II. ①刘… III. ①工程力学—岩石力学
IV. ①TU45

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第163462号

策划编辑 陈红升

责任编辑 魏春玲 陈红升 赵方

封面设计 郇海

书 名 工程岩体力学

作 者 刘 高 编著

出版发行 兰州大学出版社 (地址:兰州市天水南路222号 730000)

电 话 0931-8912613(总编办公室) 0931-8617156(营销中心)
0931-8914298(读者服务部)

网 址 <http://press.lzu.edu.cn>

电子信箱 press@lzu.edu.cn

印 刷 北京虎彩文化传播有限公司

开 本 787 mm×1092 mm 1/16

印 张 36.25(插页2)

字 数 731千

版 次 2018年7月第1版

印 次 2018年7月第1次印刷

书 号 ISBN 978-7-311-05382-6

定 价 72.50元

(图书若有破损、缺页、掉页可随时与本社联系)

前 言

岩体力学是一门处于迅速发展阶段的年轻学科,是地质工程专业以及土木工程、采矿工程、交通工程、水利水电等其它相关专业的支柱性基础课程,广泛应用于地质勘探、资源与能源、基础设施建设、国防及许多其它重要领域。

全书分为5部分。绪论(第1章)介绍岩体力学的基本概念、岩体的组成要素和基本特征、岩体力学研究(任务、内容、方法、步骤)及岩体力学发展与展望。岩体地质特征部分(第2章~第4章)从岩体的组成要素(岩石、岩体结构和赋存环境)方面详细介绍了岩体的本征属性。第2章介绍岩石的物质组成、结构特征和基本物理性质;第3章介绍岩体结构,包括结构面的成因、分类、基本属性及其描述、特殊结构面、结构体的基本特征以及岩体结构的分类与特征;第4章介绍了地应力场、渗流场和地温场等岩体赋存环境的基本特征及研究方法。岩体力学性质部分(第5章~第8章)基于岩体组成要素讲述岩体的基本力学性质及其影响因素、岩体评价及岩体力学参数的选取,第5章介绍岩石在各种受力条件下(包括单向压缩、单向拉伸、直接剪切和三向压缩等)的基本力学性质及其影响因素、岩石力学性质研究方法和指标选取等;第6章介绍各类型结构面在不同受力条件下的基本力学性质及其影响因素、力学性质参数的选取;第7章讲述岩体在不同受力条件下的力学性质及其影响因素、力学性质研究(方法、参数选取、综合分析);第8章介绍岩体的工程地质分类、岩体质量评价及其工程应用。岩体力学的计算与工程应用部分(第9章~第12章)基于岩体基本信息并结合具体岩体工程,讲述岩体力学计算和岩体工程设计的基本原理和方法。第9章为岩体力学计算基本原理,包括岩体地质力学模型、岩体力学介质、本构关系、强度准则及稳定性评价;第10章介绍不同岩体力学介质类型洞室的围岩应力分布、围岩压力、变形破坏、稳定性评价和初步设计;第11章为不同力学介质类型岩质斜坡(边坡)的重分布应力、变形特征及稳定性评价等;第12章介绍岩质地基的应力分布、变形破坏、承载力及稳定性评价。附录部分主要介绍岩体力学相关的先导基础理论和基本方法。

本书是基于编者多年岩体力学科学研究以及教学实践和教学研究,对试用多年

的教学讲义修订而成。编写过程中,吸收了岩体力学部分最新研究成果,参考了国内外同类教材及相关学科优秀教材的编写优点。作为“全程实战式岩体力学教学模式”的基础理论知识学习教材,本教材与“岩体力学例题与习题集”“岩体力学课程设计”和“岩体力学实验”共同组成岩体力学教学的完整教学材料,以解决岩体力学“不好教、不好学、不好用、不会用”的问题。

本书具有以下特点:

(1) 基于认知规律的网络化知识体系。以岩体力学的完整研究流程为明线(经线)、以岩体的组成要素或本征属性为暗线(纬线),构建系统化、模块化和网络化的知识体系,组织岩体力学知识点,使学生能够明确各知识点在完整岩体力学知识脉络中的位置以及在全生命周期岩体力学研究工作中的作用与地位。

(2) 理论与实践并举。始终以岩体组成要素作为岩体的本征属性,注重岩体力学的基本原理(地质特征、力学性质和力学响应),关注岩体力学的基本方法(试验与测试、参数取值、计算、综合分析与评价),强调岩体力学的工程运用(岩体工程初步设计理念)。

(3) 知识与能力并重。重点讲述岩体力学的基本概念、基本原理和基本方法,介绍岩体力学知识体系及其知识点,强调知识的运用能力。对于所涉及的高难理论,则重点介绍其基本原理和工程应用,而避免公式的繁琐推导(但阐明思路和方法,指导学生自行推导),便于学生自主学习,在掌握基础知识的同时,培养学习能力和知识迁移能力等综合能力。

(4) 丰富的内容及岩体力学相关资讯。每章的“本章知识点”列出知识点及其重点和难点,帮助学生明确学习内容;“概述”介绍本章知识点的目的、意义、作用以及所涉知识点的纵横联系;“脚注”提供相关知识点的溯源、不同见解、运用及其注意事项等附加信息,加深对该知识点的理解,拓宽知识并拓展能力。书末“附录”列出了与岩体力学密切相关且必需的部分先导课程基础知识,便于学生学习参考。

本书构思、选材和编写过程中,得到了韩文峰教授和聂德新教授的鼎力相助,凝聚了两位恩师的心血。本人指导的研究生为本书付出了辛勤劳动,参与了书稿的修改和文字核对工作。本教材前身的讲义使用过程中,兰州大学地质工程专业历届本科生提出了很多宝贵意见和建议。

囿于编者的水平,书中难免有不足甚至错误之处,敬请批评指正。

编者

2017年12月

目 录

1 绪论	001
1.1 岩体力学与岩体工程	001
1.2 岩体及其基本特征	002
1.3 岩体力学研究	007
1.4 岩体力学的发展与展望	014
2 岩石及其基本特征	022
2.1 概述	022
2.2 岩石的物质组成	023
2.3 岩石的结构	032
2.4 岩石的物理性质	045
3 岩体结构	068
3.1 概述	068
3.2 结构面及其分类	069
3.3 结构面的自然特征	079
3.4 特殊结构面	093
3.5 结构体	098
3.6 岩体结构	100

4	赋存环境	105
4.1	概述	105
4.2	地应力场	106
4.3	渗流场	131
4.4	地温场	141
5	岩石的力学性质	146
5.1	概述	146
5.2	单轴压缩状态下岩石的力学性质	150
5.3	单向拉伸状态下岩石的力学性质	161
5.4	剪切状态下岩石的力学性质	166
5.5	三向压力作用下岩石的力学性质	170
5.6	岩石的流变	179
5.7	岩石力学性质的影响因素	185
5.8	岩石的强度理论	195
6	结构面的力学性质	210
6.1	概述	210
6.2	法向应力作用下结构面的力学性质	211
6.3	剪切应力作用下结构面的力学性质	218
6.4	三向应力作用下结构面的力学性质	237
6.5	结构面的粘滑	240
7	岩体的力学性质	244
7.1	概述	244
7.2	法向作用下岩体的力学性质	246
7.3	剪切作用下岩体的力学性质	261
7.4	三向应力条件下岩体的力学性质	266
7.5	岩体力学性质的影响因素	267
7.6	岩体强度准则	281
8	岩体分类与岩体质量评价	292
8.1	概述	292

8.2	工程地质岩组	293
8.3	岩体质量	295
8.4	常用工程岩体质量分级体系	298
8.5	岩体质量评价的实践意义	310
9	岩体稳定性分析原理与方法	316
9.1	概述	316
9.2	岩体的力学介质与力学模型	322
9.3	连续介质岩体稳定性分析方法	325
9.4	板裂介质岩体稳定性分析	345
9.5	块裂介质岩体稳定性分析方法	350
10	洞室围岩稳定性分析	357
10.1	概述	357
10.2	围岩应力重分布规律	365
10.3	连续介质岩体洞室稳定性分析	377
10.4	碎裂介质岩体洞室稳定性分析	398
10.5	块裂介质岩体洞室稳定性分析	407
10.6	板裂介质岩体洞室稳定性分析	410
10.7	特殊洞室的稳定性分析	412
10.8	围岩-支护结构共同作用原理	421
11	岩质斜坡稳定性分析	427
11.1	概述	427
11.2	斜坡岩体应力场特征	428
11.3	岩坡的演化与稳定性分析	431
11.4	岩坡稳定性分析方法	443
11.5	块裂介质岩质斜坡稳定性	447
11.6	碎裂介质和软弱均匀介质岩质斜坡稳定性	466
11.7	板裂介质岩质斜坡稳定性	469
11.8	岩崩	477
12	岩基稳定性分析	479
12.1	概述	479

12.2	岩基中的应力分布	483
12.3	岩基的变形	491
12.4	岩基的承载力	497
12.5	坝基稳定性分析	504
12.6	拱坝坝肩岩体稳定性分析	520
附录 A 赤平极射投影与实体比例投影		525
A.1	赤平极射投影	525
A.2	实体比例投影	531
附录 B 流变模型		535
B.1	基本元件	535
B.2	岩体力学中常用流变模型	536
附录 C 矿物及其基本特征		544
C.1	矿物的化学成分与微观结构	544
C.2	矿物的性质	555
C.3	矿物类型及其基本特征	562
参考文献		569

1 绪论

本章知识点 (重点▲,难点★)

岩体力学的研究对象与服务对象

岩体的组成要素▲

岩体的基本特征▲

岩体的动态演化▲★

岩体力学的研究内容

岩体力学的研究方法

岩体力学的工作程序

岩体力学的发展史与展望

1.1 岩体力学与岩体工程

人类生活在地球表层, 依赖地质环境生存和繁衍, 资源开发、建筑物修建以及地质灾害防治等各类人类工程活动, 均与地质环境中的—定地质体密切相关。此处所指地质体 (geological body) 是具有一定物质成分和结构构造并占据—定地球空间的地质实体, 通常称为岩土体, 包括主要由土组成的土体和主要由岩石组成的岩体^①。更确切地, 在建筑工程领域^②, 岩体 (rock mass) 是地质历史过程中形成、已经遭受过变形和破坏、具有一定成分和结构并赋存于—定地质环境中的地质体。

在所有建筑工程中, 以地质体为工程结构、以地质体为建筑材料、以地质环境为建筑环境而修建的工程称为地质工程 (geological engineering)。其中, 构筑在岩体内部或表面的所有工程称为岩体工程 (rock engineering)^③。岩体工程涉及领域众多, 包括水力发电、水利资源开发与利用 (包括区域调水)、道路交通、工业民用建筑、矿产资源开采 (包括煤炭、金属、稀土)、油气开采、跨区域能源输送 (输油管道、输气管道、输电线路)、海洋、国防、高放废物地质处置、地质灾害预防和地震工程等, 此外, 地球物理和构造地质等相关领域也涉及岩体力学。所有具体的岩体工程都是由地基、边坡和地下洞室三大类工程的集成, 如水力发电工程就是由地基

① 工程建筑领域通常将地质体称为岩土体。严格意义上, 土体和岩体都属于地质体, 岩体只是地质体的一部分, 即狭义“岩体”。若考虑到外动力地质作用 (如风化) 对地壳浅表层岩体的巨大改造作用, 岩体风化或其它外动力地质作用的最终产物即是土体, 在此意义上, 岩体与地质体是同名词, 即广义“岩体”, 土体可视为特定演化阶段的岩体或—类特殊岩体。

② 其它学科也有“岩体”, 但其含义不同。如矿业工程中, 含可用矿物者称为矿体, 不含矿者为岩体; 岩石学中, 岩浆侵入体称为岩体, 先存的被侵入者为围岩。

③ “岩体工程”也称“岩石工程”, 两者为同义词, 英文术语均为 rock engineering。本书使用“岩体工程”。

(坝基、坝肩)、地下硐室(地下厂房、导流洞、各种交通洞等)和边坡(进水口边坡、坝肩边坡等)共同构成的一个综合工程系统。

岩体工程作用范围内的岩体称为工程岩体(rock mass related to engineering),未受岩体工程作用或岩体工程作用范围之外的岩体仍为天然岩体^①。

岩体工程作用使赋存环境发生改变(天然环境场→工程环境场),岩体及其性质随之改变(天然岩体→工程岩体);同时,这种变化将反过来影响岩体工程的安全。因此,不仅要研究岩体本身的力学性态,更应着重研究与岩体工程有关的工程岩体在工程力作用下的变形破坏规律和演化趋势及其应用,岩体力学应运而生^②。

岩体力学(Rock Mechanics)是研究岩体力学性态的理论和应用科学。工程岩体力学(Rock Mechanics for Engineering)是研究已经遭受过变形和破坏的岩体,在岩体工程使其环境变化时产生再变形和再破坏的规律和理论,进一步运用这些理论和规律预测岩体工程的稳定性,解决岩体工程建设中的实际问题的一门应用性科学。岩体力学主要研究岩体对其存在环境中的力场的响应;工程岩体力学强调工程目的,主要基于天然岩体研究成果进一步研究岩体对工程活动的响应。

总之,工程岩体力学(岩体力学)属力学的一个分支,是岩体与力学及其它相关学科的交叉学科。工程岩体力学的服务对象是各类岩体工程,研究对象是岩体(包括天然岩体和工程岩体),必要时尚需对岩体工程进行简单研究(包括工程的类型、规模、作用力水平及主要方向)。

1.2 岩体及其基本特征

1.2.1 岩体的组成要素

由岩体的定义可知,岩石(岩体的主要成分)、岩体结构(岩体的结构)和赋存环境(岩体赋存的地质环境)是岩体不可或缺的三大组成要素。岩石的类型和性质不同、结构面性质和发育特征不同以及所处地质环境(地应力场、渗流场和地温场等)不同,岩体的本质特征不同,从而具有不同的工程特性,表现为不同力学性质和力学响应。

① 天然岩体是自然系统,其行为和功能与岩体的组成要素(岩石、岩体结构和赋存环境)有关;工程岩体是人地系统,其行为和功能与天然岩体、岩体工程特点和施工因素等有关。工程岩体力学中所指岩体,既包括天然岩体,也包括工程岩体。

② 因历史原因,早期仅注重对岩石的研究,始称“岩石力学”。随着工程实践和理论研究的深入,尤其一些重大工程事故的发生,人们开始逐渐认识到,基于传统连续介质力学或土力学的岩石力学已不能胜任,于是逐渐形成“岩体”的概念,并采用新手段和方法开展研究,研究内容和研究方法得到了极大的丰富和完善。详见本章“岩体力学发展历史与展望”一节。因习惯的原因,国外一直沿用“岩石力学”这一称谓,我国“岩石力学”和“岩体力学”两种称谓并存。总之,现在的“岩石力学”与“岩体力学”是同义词,英文术语均为rock mechanics(国内也有用rock mass mechanics),内涵和外延上均较早期岩石力学有极大扩展。

1.2.1.1 岩石

岩石 (rock) 是地壳中由造岩元素经地质作用而形成的玻璃质或矿物的天然集合体。岩石具有一定物质组成、结构构造和变化规律的固体物质。

岩石是岩体的物质基础,是组成岩体的固相基质。从物质组成上看,岩体是一种岩石或多种岩石共生组合的地质体。岩石的地质特征(成因类型、物质成分、结构、岩性岩相变化、成层条件及厚度等)、物理性质和力学性质等决定着结构体特性,也在一定程度上决定了结构面的发育程度和特征,进而影响岩体的特性。

岩石是整个岩体力学工作的基础。

1.2.1.2 岩体结构

岩体在形成和改造过程中,内部发育了不同成因、规模和性质的众多地质界面,如层面、节理、断层和裂隙等。

岩体内已开裂或易于开裂的所有地质界面统称为结构面 (structure plane),包括物质分异面和不连续面^①。物质分异面 (differentiation plane of materials) 是建造过程中生成的结构面,如层面、层理、沉积间断面、岩性接触面、片理等;不连续面 (discontinuity) 是改造过程中产生的结构面,如节理、断层及裂隙等。

岩体被不同性质、产状和规模的结构面交叉切割成众多块体。岩体内由结构面切割而分离的块体称为结构体 (structure block)。结构体是结构面切割和围限所致,其大小和形状等特征完全受结构面特征控制,如结构面产状和组数决定了结构体形状,结构面发育程度决定了结构体规模。

结构面和结构体在岩体内的排列组合形式称为岩体结构 (rock mass structure)。结构面和结构体是岩体结构的基本要素(或称岩体结构单元),不同的岩体结构要素(如不同性质、自然属性和力学性态的结构面,不同强度、规模和形状的结构体)以及二者在岩体内不同的排列组合,使岩体具有不同结构特征,性质也因此而不同。

岩体结构是岩体区别于其它固体材料(包括岩石)的根本原因之一。岩体结构不仅决定了岩体的不连续性这一基本特征,而且控制着岩体的变形和破坏等力学特征。

岩体结构不仅是整个岩体力学工作的核心,也是关键。

1.2.1.3 赋存环境

赋存环境 (environment) 是指岩体存在所依赖的地质环境,包括地应力场、渗流场、地温场以及其它地球物理场。

赋存环境不仅决定了岩体的基本地质特征,并且影响着岩体的力学性质(包括力学介质、力学属性、力学响应),甚至在一定程度上控制着岩体力学性质。同一岩体处于不同地质环境,便有不同力学性质;赋存环境变化,岩体的力学性质也将发

^① 在国外,结构面被称为不连续面 (discontinuity)。近年来,“结构面 (structure plane)” 有开始流行的趋势。

生变化,已经不是原来的岩体。因此,岩体基本地质特征反映了岩体的环境,由岩体的基本地质特征可以推断岩体的形成环境。

岩体必须始终依存于其赋存环境而存在,脱离了赋存环境,便不能称作岩体,仅是岩石或岩块。赋存环境是岩体区别于其它固体材料(包括岩石)的根本原因之一。

赋存环境是整个岩体力学工作的难点,也是灵魂。

1.2.2 岩体的动态演化

岩体形成于特定的地质环境,后期受到多期次、不同类型的内外动力地质作用。因此,可从岩体的形成(建造)和改造两方面来研究和认识岩体的演化。

1.2.2.1 岩体的建造

岩体是在一定地质环境条件下形成的^①,岩体的形成包括岩石的形成、岩体结构的形成,并赋存于形成时的地质环境。

(1) 赋存环境的形成(成岩环境)

岩体形成时所处的地质环境即为成岩环境(diagenetic environment)。岩石学常用岩相(lithic facies / lithicfacies)来反映成岩环境^②,并分为沉积相、火成相和变质相^③。不同成岩环境形成不同岩体,如高温高压环境形成的变质岩,风化剥蚀及后期压密环境形成的沉积岩;不同环境形成的岩体始终具有与成岩环境相对应的特征(物质和岩体结构)。

岩体形成后便赋存于成岩环境之中,岩体建造阶段的赋存环境就是其生成时的环境场(地应力场、渗流场和温度场),如沉积岩形成时以自重应力为主、地下水为孔隙水、温度变化大;变质岩形成时以高地应力和高温为基本特征。

(2) 岩石的形成(岩石建造)

岩体建造过程中首先形成了岩石。不同成岩环境生成不同岩石,综合表现在岩

① 地质学中,将岩石的形成过程称为建造过程(formation)。

② 对于岩相,通常有3种理解:

◇岩相是岩层的生成环境(气候、温度、地层、时代等),可根据岩性、化石、地球化学特征等推断岩相。

◇岩相是岩石某些特征的组合(岩性、结构、构造、化石及其组合特征),是生成环境的物质表现。

◇岩相是岩石与其生成环境的组合。

③ 根据岩石建造特征,岩相可做如下划分:

沉积相分为海相、陆相和海陆过渡相。海相包括:滨海相、浅海相、半深海相、深海相;陆相包括:残积相、坡积相、洪积相、冲积相、湖积相、冰碛相、火山相等。

火成相分为侵入岩相和火山岩相。侵入岩相包括:深成相、中深层相、浅成相、超浅成相和喷出相;火山岩相包括:喷发相(溢流相、爆发相、侵出相)、火山通道相或火山颈、潜火山岩相或次火山相、喷发相。

变质相包括:沸石相、葡萄石-绿纤石相、蓝片岩相(蓝闪石-硬柱石相)、低绿片岩相、高绿片岩相、低角闪岩相、高角闪岩相、麻粒岩相、榴辉岩相等。

性上^①，如三大类岩石之间就具有不同的物质、结构和构造特征以及物理力学性质。

从物质组成上看，同种岩石或具有成生联系的不同岩石共生组合在一起而组成岩体。岩石学中，通常用岩石建造（formation）来表征岩石及其共生组合^②，并分为沉积岩建造、岩浆岩建造和变质岩建造^③。岩体形成时的岩石及其组合特征是岩体的物质基础，进一步决定了岩体基本地质特征。

（3）岩体结构的形成（原生岩体结构）

建造过程中，岩体内部形成相应原生结构—物质分异面。不同建造甚至同类建造的原生结构也因岩相（成岩环境）不同而异，如沉积岩中层面、层理、沉积间断面等，岩浆岩中的流纹、岩浆与围岩的接触带等，变质岩中的片理、板理等。

对岩体力学来说，原生结构明显地反映了岩体的各向异性程度。块状结构岩体一般均匀性高，呈各向同性；层状结构岩体的典型特征是成层性^④，表现出横观各向同性，即横向平面上性质相同而纵向上性质变化较大。

1.2.2.2 岩体的改造

在建造过程中形成的岩体，其岩石成分、原生岩体结构和赋存环境是与当时的物理化学环境相适应的，而且只适应当时的环境；当条件变化时，岩体也随之改变，以适应新的环境条件。内外动力地质作用综合作用下发生的改变称为改造（transformation），包括风化作用、卸荷作用（如剥蚀）、加载作用（如沉积）和构造作用等。改造作用使岩体的组成成分、岩体结构和赋存环境均发生全面改造。

（1）岩石的改造

建造过程中形成的岩石只适应于当时的物理化学环境。当改造作用使其环境变化时，岩石便随之发生变化。如三大岩类相互转化（构造作用下的变质岩、岩石熔融并侵入或喷发而形成岩浆岩、外动力地质作用形成沉积岩）；风化作用使岩石矿物风化而形成黏土矿物，沉积物不断加厚压密而成岩；结构面两壁岩石的蚀变等。

（2）岩体结构的改造

改造作用扩大了岩体的不连续性，如构造作用在岩体中产生了大至断裂、小到节理和劈理等不连续面（结构面），剥蚀作用使岩体卸荷而导致岩体内已有裂隙的扩大和新裂隙的产生，风化作用则沿上述不连续面对岩体结构加以改造。

① 岩性（lithology）是岩石的属性，包括颜色、成分、结构、构造等特征。岩性取决于岩相，岩性体现着岩相。

② 岩石建造是指在时间和空间上彼此有密切联系的各种岩石天然组合体。即在一定自然和地质环境下形成的并成为地壳发展某一阶段特有的各种岩石组合。

③ 沉积建造包括：碳酸盐岩建造、碎屑岩建造、复理石建造、磨拉石建造、含煤建造、含盐建造、泻湖建造、红色建造等。

岩浆建造包括：侵入岩建造、火山岩建造、混合岩建造等。

变质建造包括：变质岩建造、构造岩建造、风化岩建造等。

④ 岩体的成层性标志着地质作用的转化或间断，反映了岩体中岩性界面、地质间断面（古风化面、岩浆喷发间歇面等）和片状条状矿物富集面（片理、层理等）等弱面的存在，这些弱面直接控制着岩体介质的各向异性和不连续性，并影响岩体的成层条件和厚度。

(3) 赋存环境的改造

改造作用使岩体的应力状态、地下水活动及地热发生明显改变。如改造后,地应力场变得更为复杂,增加了构造应力和剥蚀残余应力;地下水主要赋存于岩体裂隙中;在构造活动强烈的地带,热流密度增大,地温梯度发生异常等。

1.2.2.3 岩体的动态演化

在一定地质环境中形成的岩体,必须依存于赋存环境,即始终与其赋存环境相适应、随地质环境变化而变化。

赋存环境是活动的且易变的,如构造运动、剥蚀、卸荷等自然营力容易导致地应力场、渗流场和地温场的快速而大幅改变^①。一旦赋存环境发生变化,为了与变化后的地质环境相适应,岩石和岩体结构必然发生相应改变,岩体物理力学性质也随之改变。在岩体形成之后的整个地质历史中,岩体已经遭受过多期次、反复、复杂、不均衡和多类型的内外动力地质作用的改造,岩体始终处于动态演化过程之中。在此意义上,赋存环境(尤其地应力场)是推动岩体动态演化的最根本因素。

现今的岩体即为岩体动态演化的产物,已经遭受过复杂的变形和破坏,从而具有特定的岩石组合、特殊的岩体结构和复杂多变的地质环境。岩体演变至今,还将在内外动力地质作用下按其自身进程和模式继续演变下去^②。

006

1.2.3 岩体的基本特征

受岩性、岩体结构和赋存环境的综合作用和控制,岩体具有非常复杂和特殊的性质(包括地质特征、物理性质和力学性质等),概括起来有不连续性、非均质性、各向异性和有条件转化性,其中最基本的是不连续性和有条件转化性。

(1) 不连续性

不连续性(discontinuity)指材料内相邻点具有不同特征的性质。岩体不连续性的根本原因是岩体内众多结构面的发育和存在,破坏了岩体原有完整性,结构面的性质及其排列和组合特征决定了岩体的地质特征、控制和影响岩体的工程特性。岩体不连续性综合表现在地质特征不连续性和物理力学性质不连续性两方面。

不连续性是岩体的最根本特征。岩体在本质上是不连续介质,有别于一般连续介质,这正是经典力学理论不能很好地分析和解决岩体力学问题的根本所在。

(2) 各向异性

各向异性(anisotropy)是指材料性质随取向不同而具有明显方向性差异的性质。岩体各向异性的根本原因是结构面具有优势方位以及岩体赋存环境具有各向异性,这就要求在研究岩体工程特性和进行岩体工程设计时,必须注意岩体中结构面

① 人类工程活动(如开挖)的作用速度和作用强度远甚于一般自然营力,对岩体的改变(主要是赋存环境的改变)远大于自然作用。

② 对于工程岩体,工程活动对其原有演化模式和演化进程有一定影响,工程岩体将在原有赋存环境和工程力叠加作用下向前演化。工程岩体力学的根本任务就是研究这种条件下的演化规律,包括演化模式及稳定状态等。

的优势方位与工程作用力之间的相对关系。

(3) 非均质性

非均质性 (heterogeneity) 是指材料性质随空间位置不同而异的性质。岩体是长期地质作用的产物, 岩石的非均匀性、结构面的发育以及赋存环境的各向异性等综合决定了岩体的非均质性特征。非均质性使岩体的地质特征和力学性质在不同部位存在显著差异, 表现为试验结果具有较大的离散性。

(4) 有条件转化性

有条件转化性 (conditional convertibility) 是指材料在一定条件下发生转化的性质。形成并赋存于一定地质环境中的岩体并非一成不变, 当赋存环境发生变化时, 其成分和结构均可能相应改变, 进而导致岩体的介质类型、力学属性和力学响应规律等发生转化甚至根本性变化, 如连续介质转化为块裂介质, 弹性变形转化为弹塑性变形, 延性破坏转化为脆性破坏等。岩体的有条件转化性特征在一定程度上增加了正确认识岩体的难度, 如岩体的“非确定性”和“相对性”等。

1.3 岩体力学研究

1.3.1 研究任务

岩体力学是伴随岩体工程而发展起来的。起初, 岩体工程规模小, 人们凭经验并借用土力学和经典力学来设计岩体工程或解决岩体工程建设中的问题^①。随着生活质量要求以及生产力水平的提高, 大量岩体工程开始涌现, 许多岩体力学问题需要解决, 如高坝坝基及坝肩岩体的变形与抗滑稳定性问题; 库岸边坡、船闸边坡、溢洪道边坡稳定性问题; 大型露天矿边坡稳定问题; 各类地下硐室变形破坏及其引起的地表塌陷问题; 特殊赋存环境条件下岩体工程的布局、设计和施工问题等。

因岩体变形和破坏而造成的岩体工程事故很多, 其中不乏震惊世界的惨痛例子, 如美国 St. Francis 重力坝溃坝 (1928-03-07)、法国 Malpasset 拱坝溃坝 (1959-12-02)、意大利 Vajont 水库近坝滑坡涌浪漫坝 (1963-10-09) 及我国湖南锡矿山北区洪记矿井大陷落 (中华人民共和国成立前)、湖南拓溪水电站近坝库岸滑坡 (1961-03-06)、江西盘古山钨矿地压灾害 (1967-09-24)、湖北盐池河磷矿山崩 (1980-06-30) 等, 均造成了重大人员伤亡和财产损失。

这些重大事故的根本原因是对工程区岩体的力学性质研究不够, 对工程作用下岩体的变形破坏估计不足, 从而没有采取合适的设计与施工。当然, 如果因为担心研究不足和认识不够 (或者对工程岩体变形破坏估计过于严重), 过度保守地采用过大的安全系数, 虽然可以保证工程“安全”, 但导致投资过大和工期过长。

因此, 与所有工程一样, 岩体工程也必须符合“安全、经济、合理”的原则。

^① 岩体力学是一门非常年轻的学科, 岩体力学的形成比土力学晚得多, 而且岩体远较土体复杂, 岩体力学至今尚不够成熟和完善。

岩体力学(工程岩体力学)的根本任务是:通过岩体力学研究^①,准确掌握岩体的基本特征和力学性质,预测未来工程作用下工程岩体内产生的次生应力、变形破坏及岩体稳定性,进而从岩体力学观点出发,选择相对优良的工程场址,为合理而经济的设计以及安全的施工和运营提供理论依据和技术支撑。

1.3.2 研究内容

岩体的基本特征不仅决定其固有的基本力学性质,而且决定了它对未来作用的力学响应。一方面,岩体是非常复杂的地质体,其力学性质和力学响应受其组成要素(成分、岩体结构和赋存环境)共同控制;另一方面,岩体的力学性质和力学响应与所受力源相关,因作用力的性质、水平和方向不同而异,致岩体(工程岩体)的力学响应和力学行为不同。因此,必须从岩体的组成要素和工程特点两方面,综合研究岩体的力学性质及变形破坏规律。

对于具体岩体工程(如水电、水利及区域调水、矿业、交通、土木建筑、石油、海洋、核电站建设、核废料地质处置、地热资源开发和地震预报等),规模和作用特点不同,工程岩体及其力学性质变化规律以及力学响应也就相应不同,加之不同岩体工程的重要程度及安全要求不同,对岩体的要求也相应不同,如大坝对坝基和坝肩的不均匀变形和抗滑稳定有严格限制(重力坝与拱坝的要求和重点也有所不同),而岩质边坡工程往往允许发生一定的变形(确保不产生滑动失稳的前提下);水电站地下厂房对围岩变形破坏严格控制,而采矿工程允许井巷发生一定的变形和破坏(不至于影响生产和安全);非地震区的一般工程主要研究岩体的静态特性,而许多国防工程或部分交通工程更关注岩体的动力响应。总之,研究对象的复杂性和服务对象的广泛性决定了工程岩体力学研究内容是广泛而庞杂的。

工程岩体力学是伴随工程建设的发展而发展的,其研究任务和研究内容随工程建设的发展而增多,且其任务和内容既来源于生产实践,又必须直接服务于生产实践,故工程岩体力学的研究内容既有理论的、也有实践的。前者主要包括天然岩体和工程岩体的各种特征、性质和规律;后者包括各种技术、方法和手段。

岩体力学狭义研究内容包括基本研究和专门研究,基本研究是指任何岩体工程都必须开展的研究,这是岩体力学研究首要的和先行的基础研究;专门研究是针对特殊岩体或特殊需求,基于先行基础研究而有针对性地开展的专题性岩体力学研究。

1.3.2.1 基本研究内容(常规研究内容)

(1) 岩体的工程地质特征

岩体是地质历史过程中形成,经历过多期次不同性质和不同强度的地质作用,遭受过不同程度的变形破坏,故岩体基本地质特征是岩体力学研究的基础。

(a) 岩石的基本地质特征,包括岩石的成因类型;岩石的物质组成;岩石的结构。

^① 这里所说的“岩体力学研究”包括岩体力学工程实践和理论研究的所有工作,不仅仅是狭义的研究。