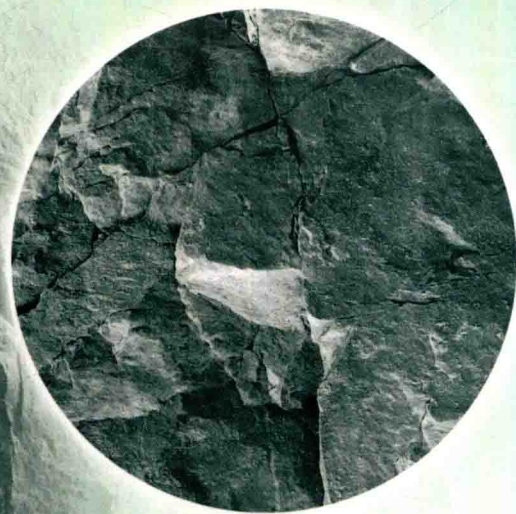


ADVANCED ROCK MECHANICS

高等岩石力学

刘传孝 马德鹏 编著



兼外借



黄河水利出版社

高等岩石力学

刘传孝 马德鹏 编著

黄河水利出版社

· 郑州 ·

内 容 提 要

高等岩石力学是深入研究岩石力学性能的理论与应用科学,是探讨岩石对其周围物理环境中力场的反映的力学分支。本书内容涉及土木工程学科相关领域,以使读者能够在掌握岩石力学基本知识的基础上,在脆性岩石断裂理论及岩石的流变性方面拓展认识,达到深入分析岩石破坏机理的水平。岩石破坏是开放的复杂系统,非线性科学理论是研究非线性复杂大系统问题的数理基础。以现代非线性科学为基础,结合岩石工程特点,探讨非线性动力学理论解释岩石破坏机理、应用于解决岩石工程问题的有效性,拓展了研究领域。

本书内容主要服务于岩土工程、结构工程、道路桥梁与隧道工程应用,既适宜于相关研究方向的工程技术人员使用,又可应用于土木工程学科研究生的培养。

图书在版编目(CIP)数据

高等岩石力学/刘传孝,马德鹏编著. —郑州:黄河水利出版社,2017. 8

ISBN 978 - 7 - 5509 - 1844 - 3

I. ①高… II. ①刘… ②马… III. ①岩石力学 - 高等学校 - 教材 IV. ①TU45

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 227589 号

组稿编辑:李洪良 电话:0371 - 66026352 E-mail:hongliang0013@163.com

出版社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼 14 层 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371 - 66026940、66020550、66028024、66022620(传真)

E-mail:hhsclcs@126.com

承印单位:河南承创印务有限公司

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:12.25

字数:283 千字

印数:1—2 000

版次:2017 年 8 月第 1 版

印次:2017 年 8 月第 1 次印刷

定价:36.00 元

序 言

岩石是自然界最复杂的材料之一,历经亿万年地质演变和构造运动的作用,岩石成为典型的非连续体、非均质体,具有很强的各向异性、流变性和非线性。本书在介绍岩石力学基本知识的基础上,通过实验室内及现场的岩石流变力学特性试验,深入分析岩石流变破坏机理及其工程应用。应用非线性动力学理论探究岩石破坏机理,尝试解决岩石破坏这一开放、复杂系统的演化问题,属于交叉学科范畴,拓展了研究领域。

本书共分 11 章,其中:第 1 章从岩石力学与岩体力学的异同出发,引出了岩石工程的地质问题;第 2 章介绍岩石应力状态;第 3 章介绍岩石强度准则与屈服准则;第 4 章介绍岩石力学解析方法,求解了平面问题、圆孔问题,并进行了弹塑性分析;第 5 章介绍岩石力学试验与变形;第 6 章介绍岩石力学有限元法、边界元法、有限差分法、离散元法等数值分析方法,指出了需要注意的问题;第 7 章为岩石力学物理模拟,重点介绍相似材料模拟试验;第 8 章简介了岩石断裂力学理论及准则;第 9 章简介了基于裂纹应力场的岩石损伤力学理论及其应用;第 10 章详细介绍了岩石的流变性及其试验研究途径,进行深井硐室围岩的流变力学特性试验,并比较深入地分析了围岩流变特性的分类关系;第 11 章介绍非线性科学与岩石非线性动力学,在充分阐述岩石(体)力学行为非线性本质特征的基础上,结合作者多年的研究成果,重点探讨了分形几何学、混沌动力学与岩石力学的关系,及其在岩石力学领域的应用现状、存在问题。本书的每章结尾均附有本章小结及思考题,全书最后附参考文献,以方便读者阅读。

本书引用了国内外许多学者的教材、著作及相关研究成果,是其知识结构比较完整、逻辑性较强、具有一定实用价值的前提条件。本书的第 1、2、3、4、5、6、7、8、9 章由刘传孝和马德鹏编著,第 10、11 章主要由刘传孝编著。本书的撰写得到了张晓雷、李茂桐、周桐、程传超、张冲、孟琪、李想等研究生的大力帮助,在此表示感谢!囿于作者水平,不当之处,敬请批评指正。

本书的出版得到了国家自然科学基金项目(51004098,51574156)和山东省自然科学基金项目(ZR2014DM019)的支持,谨致谢意!

作 者

2017 年 5 月 18 日 于泰山

目 录

序 言

第1章 岩石力学与岩体力学	(1)
1.1 岩石与岩体的性质	(1)
1.2 地质作用及地下工程的工程地质问题	(6)
本章小结	(12)
思考题	(12)
第2章 岩石应力状态	(13)
2.1 力与应力	(13)
2.2 岩石(体)应力状态	(15)
本章小结	(24)
思考题	(24)
第3章 岩石强度准则与屈服准则	(25)
3.1 强度准则与屈服准则概念	(25)
3.2 岩石强度准则	(25)
3.3 岩石屈服准则	(31)
3.4 Drucker 强化公设	(36)
3.5 全量理论与增量理论	(39)
本章小结	(41)
思考题	(41)
第4章 岩石力学解析方法	(42)
4.1 弹性力学平面问题	(42)
4.2 弹性岩体中的圆孔问题	(48)
4.3 圆形硐室问题的弹塑性分析	(50)
本章小结	(52)
思考题	(53)
第5章 岩石力学试验与变形	(54)
5.1 岩石变形的概念	(54)
5.2 岩石单轴压缩试验	(55)
5.3 岩石单轴拉伸试验	(60)
5.4 岩石剪切试验	(63)
5.5 岩石三轴试验	(65)
本章小结	(67)
思考题	(67)

第 6 章 岩石力学数值分析	(68)
6.1 岩石力学有限元法	(68)
6.2 岩石力学边界元法	(74)
6.3 岩石力学有限差分法	(75)
6.4 岩石力学离散元法	(76)
6.5 岩石力学数值分析中需要注意的问题	(79)
本章小结	(79)
思考题	(79)
第 7 章 岩石力学物理模拟	(80)
7.1 量纲分析原理概述	(80)
7.2 模型设计	(86)
7.3 材料配比	(89)
本章小结	(90)
思考题	(90)
第 8 章 岩石断裂力学	(91)
8.1 裂纹的起裂与传播	(91)
8.2 断裂力学理论基础	(94)
8.3 断裂韧度	(100)
8.4 断裂准则	(102)
本章小结	(105)
思考题	(105)
第 9 章 岩石损伤力学	(107)
9.1 损伤力学基础	(107)
9.2 损伤力学在岩石力学中的应用	(109)
9.3 基于裂纹应力场的岩石损伤理论	(111)
本章小结	(117)
思考题	(117)
第 10 章 岩石的流变性	(119)
10.1 岩石流变性概述	(119)
10.2 岩石流变力学研究	(121)
10.3 岩石流变力学试验研究	(138)
10.4 深井硐室围岩的流变力学特性试验	(145)
10.5 深井硐室围岩流变特性的分类关系	(158)
本章小结	(163)
思考题	(163)
第 11 章 非线性科学与岩石非线性动力学	(165)
11.1 岩土力学与工程系统	(165)
11.2 岩石(体)力学行为的非线性本质特征	(168)

11.3 分形几何学与岩石力学	(171)
11.4 混沌动力学与岩石力学	(180)
本章小结	(184)
思考题	(184)
参考文献	(185)

第1章 岩石力学与岩体力学

1.1 岩石与岩体的性质

1.1.1 岩石与岩体的区别与联系

岩石是在地质作用下产生的,由一种或多种矿物以一定的规律组成的自然集合体,构成了地球的固体部分。按成因岩石分为岩浆岩、沉积岩和变质岩三大类,每类又包含多种岩石。例如变质岩,在地壳组成中约占25%,包含2 000多种岩石。岩石的工程命名可以参考国际岩石力学学会(ISRM,1981)的标准。

岩体是地质体,它的形成与漫长的地质年代有关,它是一定工程范围内的自然地质体,经过各种地质运动,内部含有构造和裂隙。岩体具有多样复杂的特性,即使是由相同物质组成的岩体,其力学特性也可能有很大的差异,具有不均质性、地质体、受时间因素影响、受环境因素影响、含有缺陷的特点。

岩体描述必须包括岩石和节理两个方面,描述岩石的名称、颜色、矿物组成、蚀变性、母体、晶粒尺度及形状、重度、孔隙率、含水率、强度、硬度、各向异性、耐久性、塑性、膨胀性等。描述节理包括岩块的尺度和形状、节理组数及其类型、节理特征等。

岩石与岩体的重要区别就是岩体包含若干结构面。结构面是岩体形成过程中所遗留下来的地质界面,是岩体中各种不连续界面的总称。结构面无受拉强度,或受拉强度很小。根据国际岩石力学学会现场试验标准委员会的建议,结构面的描述可用10个节理特性参数,它们是产状、间距、连续状态、粗糙度、面壁岩石强度、裂隙开度、填充物、渗透性、节理组数和岩块尺寸,并且对这些参数都规定了测试方法。在岩石工程中,获取结构面上的各种参数,对于岩体分级、开挖和支护设计都是十分重要的。

此外,岩石与岩体的区别还在于岩体是非均质各向异性体,岩体内部存在着初始应力场,岩体内含有各种各样的裂隙系统,处于地下环境、受地下水等因素的影响。

1.1.2 岩石的成因及性质

1.1.2.1 矿物的概念

由于岩石是由矿物组成的,所以要认识和分析岩石在各种自然条件下的变化,进而对岩石及其组成的周围环境进行工程地质评价,就必须首先了解矿物。

矿物是天然形成的元素单质和无机化合物,其化学成分和物理性质相对均一和固定,一般为结晶质。结晶质为原子(或离子、离子团)按严格规律排列的固体。矿物晶体中离子等排列的格式称为晶体格架或泛称晶体构造,见图1-1。每种矿物均具有一定的晶体构造,反映在外形上均具有一定的晶体形状即晶形,晶形是区分矿物的重要依据。理想的

晶体为规则的几何多面体,如硅酸盐的正立方体晶体及石英的六方双锥晶形,见图 1-2。

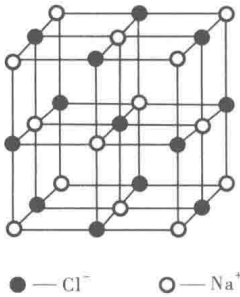
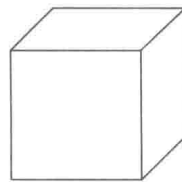


图 1-1 硅酸盐的晶体构造



(a)硅酸盐晶体



(b)石英晶体

图 1-2 矿物的晶形

自然界中已发现的矿物有 2 500 多种,但组成常见岩石的矿物仅数十种,这些组成常见岩石的矿物称为造岩矿物,其占地壳重量约为 99%,造岩矿物以硅酸盐为主。

自然界中的矿物,都是在一定的地质环境中形成的,随后因经受各种地质作用而不断地发生变化。每一种矿物只是在一定的物理和化学条件下才是相对稳定的,当外界条件改变到一定程度后,矿物原来的成分、内部构造和性质就会发生变化,形成新的次生矿物。

1.1.2.2 岩浆岩的成因

岩浆岩又称火成岩,是由岩浆凝固结所形成的岩石。岩浆位于上地幔和地壳深处,以硅酸岩为主要成分和一部分金属硫化物、氧化物、水蒸气及其他挥发性物质组成的高温、高压熔融体,一般分为基性岩浆和酸性岩浆两大类。基性岩浆富含铁、镁等氧化物,黏性小,流动性大;酸性岩浆富含钾、钠等氧化物和硅酸,黏性较大,流动性小。

岩浆经常处于活动状态中,当地壳发生变动或受到其他内力作用时,承受巨大压力的岩浆沿着构造薄弱带上升,侵入地壳或喷出地面。岩浆在上升过程中,由于压力减小,热量散失,经过复杂的物理化学过程,最后冷却凝结形成岩浆岩。

岩浆上升侵入周围岩层中所形成的岩石称为侵入岩。根据其规模及形成深度,侵入岩又可分为深成岩和浅成岩两大类。岩浆侵入地壳某深处(约距地表 3 km 以下)冷凝形成的岩石即为深成岩,由于形成时受岩体大小和环境温度的影响,组成岩石的矿物结晶良好。岩浆沿地壳裂缝上升,在地面以下较浅处(约距地表 3 km 以上)形成的岩石即为浅成岩,由于岩体较小,温度降低较快,组成岩石的矿物结晶细小。岩浆喷出地表形成的岩浆岩称为喷出岩。

1.1.2.3 沉积岩的成因

沉积岩是在地表环境中形成的,沉积物质来自于先前存在的岩石的化学和物理破坏产物。沉积岩是地壳表面分布最广的一种岩石,虽然它的体积只占地壳的 5%,但出露面积约占陆地表面面积的 75%。因此,研究沉积岩的形成条件及其特征性质对工程建筑具有实际意义。

沉积岩的形成是一个长期而复杂的地质作用过程,一般可分为风化剥蚀阶段、搬运阶段、沉积阶段和硬结成岩阶段。沉积岩主要由碎屑物质、黏土矿物、化学沉积矿物、有机质及生物残骸、胶结物组成。沉积岩的结构是指沉积岩的组成物质、颗粒大小、形状及结晶程度,分为碎屑结构、泥质结构、结晶结构、生物结构。沉积岩的构造是指沉积岩各个组成

部分的空间分布和排列方式,可分为层理构造、层面构造、结核和生物成因构造。

1.1.2.4 变质岩的成因

地壳中已形成的岩石(岩浆岩、沉积岩、变质岩),由于地壳运动和岩浆活动的影响,造成地质环境和物理化学条件的改变,在高温、高压和其他化学因素作用下,使岩石的成分、结构、构造发生一系列变化。由地球内力作用促使岩石发生矿物成分及结构构造变化的作用称为变质作用,由变质作用形成的岩石称为变质岩。

变质作用的因素指在变质过程中起作用的物理化学条件,即引起岩石变质的外部因素,促使岩石变质的因素主要有温度、压力、具化学活动性流体及时间。变质作用分为接触变质作用、区域变质作用、混合岩化作用、动力变质作用。

1.1.3 岩石的工程地质性质

岩石的工程地质性质包括物理性质、水理性质和力学性质三个主要方面。就大多数的工程地质问题来看,岩体的工程地质性质主要取决于岩体内部裂隙系统的性质及其分布情况,但岩石本身的性质起着重要的作用。这里主要介绍有关岩石水理性质的一些常用指标和影响。岩石的水理性质,是指岩石与水作用时的性质,包括吸水性、透水性、溶解性、软化性、抗冻性等。

1.1.3.1 岩石的吸水性

岩石在一定试验条件下的吸水性能称为岩石的吸水性。它取决于岩石孔隙数量、大小、开闭程度和分布情况,表征岩石吸水性的指标有吸水率、饱水率和饱水系数。

岩石吸水率(ω_1):是指岩石在常压条件下吸入水的质量(W_{ω_1})与干燥岩石质量(W_s)之比,用百分数表示。

$$\omega_1 = \frac{W_{\omega_1}}{W_s} \times 100\% \quad (1-1)$$

岩石饱水率(ω_2):是指在高压(150个大气压)下或真空条件下岩石吸入水的质量(W_{ω_2})与干燥岩石质量(W_s)之比,用百分数表示。

$$\omega_2 = \frac{W_{\omega_2}}{W_s} \times 100\% \quad (1-2)$$

这种条件下,通常认为水能进入所有张开型孔隙中。岩石饱水率反映总张开型孔隙发育程度,可用来间接判定岩石抗冻性和抗风化能力。

岩石饱水系数(K_s):是指岩石的吸水率(ω_1)与饱水率(ω_2)的比值,一般岩石的饱水系数为0.5~0.8。

$$K_s = \frac{\omega_1}{\omega_2} \quad (1-3)$$

1.1.3.2 岩石的透水性

岩石的透水性,是指岩石允许水通过的能力。岩石透水性的大小,主要取决于岩石中裂隙、孔隙及孔洞的大小和连通情况。岩石的透水性用渗透系数 k 来表示。渗透系数等于水力坡降为1时,水在岩石中的渗透速度,其单位用m/d或cm/s表示。常见岩石的渗透系数见表1-1。

表 1-1 常见岩石渗透系数

岩石名称	孔隙情况	渗透系数 k (cm/s)
花岗岩	较致密、微裂隙	$1.1 \times 10^{-12} \sim 9.5 \times 10^{-11}$
	含微裂隙	$1.1 \times 10^{-11} \sim 2.5 \times 10^{-11}$
	微裂隙及部分微裂隙	$2.8 \times 10^{-9} \sim 7.0 \times 10^{-8}$
石灰岩	致密	$3 \times 10^{-12} \sim 6 \times 10^{-10}$
	微裂隙	$2 \times 10^{-9} \sim 3 \times 10^{-6}$
	孔隙较发育	$9 \times 10^{-5} \sim 3 \times 10^{-4}$
片麻岩	致密	$< 10^{-12}$
	微裂隙	$9 \times 10^{-8} \sim 4 \times 10^{-7}$
	微裂隙发育	$2 \times 10^{-6} \sim 3 \times 10^{-5}$
砂岩	较致密	$2.5 \times 10^{-18} \sim 1 \times 10^{-13}$
	孔隙较发育	5.5×10^{-6}
页岩	微裂隙发育	$2 \times 10^{-10} \sim 8 \times 10^{-9}$
片岩	微裂隙发育	$1 \times 10^{-9} \sim 5 \times 10^{-8}$

1.1.3.3 岩石的溶解性

岩石的溶解性是指岩石溶解于水的性质,常用溶解度或溶解速度来表示。在自然界中常见的可溶性岩石有石膏、岩盐、石灰岩、白云岩及大理石等。岩石的溶解性不但和岩石的化学成分有关,还和水的性质有很大的关系。淡水一般溶解能力较小,而富含二氧化碳的水则具有较大的溶解能力。

1.1.3.4 岩石的软化性

岩石的软化性是指岩石在水的作用下强度及稳定性降低的一种性质。岩石的软化性主要取决于岩石的矿物成分、结构和构造特征。黏土矿物含量高、孔隙率大、吸水率高的岩石,与水作用容易软化而丧失其强度和稳定性。

岩石软化性的指标是软化系数(K_d),它等于岩石在饱水状态下的极限抗压强度(R_w)与岩石在风干状态下极限抗压强度(R_d)的比值。其值越小,表示岩石在水作用下的强度和稳定性越差。未受风化作用的岩浆岩和某些变质岩,软化系数大都接近于1,是弱软化的岩石,其抗水、抗风化和抗冻性强;软化系数 $K_d < 0.75$ 的岩石,认为是强软化的岩石,工程性质比较差。

$$K_d = \frac{R_w}{R_d} \quad (1-4)$$

1.1.3.5 岩石的抗冻性

岩石孔隙中有水存在时,水一结冰,体积膨胀,就产生巨大的压力。这种压力的作用,会促使岩石强度和稳定性遭到破坏。岩石抵抗这种冰冻作用的能力,称为岩石的抗冻性,可用强度损失率和质量损失率表示岩石的抗冻性能。

强度损失率(R_1)指饱和岩石在一定负温度($-25\text{ }^\circ\text{C}$)条件下,冻融10~25次(视工

程具体要求而定,有的要求冻融 100 ~ 200 次或更高),冻融前后的抗压强度之差与冻融前抗压强度的比值,以百分数表示。

$$R_t = \frac{R_{s2} - R_{s1}}{R_{s2}} \times 100\% \quad (1-5)$$

式中 R_{s2} ——冻融前饱和岩石抗压强度;

R_{s1} ——冻融后饱和岩石抗压强度。

质量损失率(W_t)是在上述条件下,冻融前后干试样质量之差与冻融前干试样质量的比值,以百分数表示。

$$W_t = \frac{W_{s2} - W_{s1}}{W_{s2}} \times 100\% \quad (1-6)$$

式中 W_{s2} ——冻融前干试样质量;

W_{s1} ——冻融后干试样质量。

岩石强度损失率与质量损失率的大小,主要取决于岩石张开型孔隙发育程度、亲水性和可溶性矿物含量,以及矿物颗粒间联结强度。张开型孔隙越多越大,亲水性和可溶性矿物含量越多,则强度损失率越高;反之则越低。一般认为,强度损失率 $R_t < 25\%$ 或质量损失率 $W_t < 2\%$ 为抗冻的岩石。此外,吸水率 $\omega_1 < 0.5\%$,软化系数 $K_d > 0.75$,饱水系数 $K_s > 0.6 \sim 0.8$,均为抗冻的岩石。

1.1.4 岩体的力学性能

工程岩体与实验室内测试的岩石试件的力学性能有着很大的差别,引起这种差别的主要因素有岩体的非连续性、岩体的非均质性、岩体的各向异性和岩体的含水性等,其中最关键的因素是岩体的非连续性。由于岩体内存在各种不同尺度规模的结构面,所以对于一般的工程岩体而言,宏观岩体一般应视为裂隙介质。有些结构面特别发育的岩体,甚至可以视为碎块体(或散体)介质。只有在坚硬岩体的局部,没有宏观的非连续面时,岩体才宜视为连续介质。

岩体中的结构面对岩体的力学性能有着重要影响。岩体的变形和强度,取决于构成岩体的岩石力学性能和结构面力学性能。由于结构面往往是岩体弱面,所以在一些岩体工程中,结构面的力学性能决定了工程的稳定性,如边坡的层面、大坝坝基中软弱夹层、井巷工程中的断裂破碎带等。

岩体结构面是在岩体生成过程中,以及生成后若干地质年代中,受地质构造作用而形成的,它包括微裂隙、片理、页理、节理、层面、软弱夹层、断层及断裂破碎带等。在工程地质中,把结构面划分为面、缝、层和带。面指岩块间刚性接触,无任何充填的劈理、节理、层面和片理等;缝指有充填物,而且具有一定厚度的裂缝;层指岩层中相对的软弱夹层,不仅由不同物质所组成,而且明显存在上下两个层面,具有一定的厚度;带指具有一定宽度的构造破碎带、接触破碎带等。

结构面弱化了岩体的力学性能,决定了岩体工程的稳定性,导致岩体的各向异性,成为岩体渗流的主要通道,所以结构面的力学性能是岩石力学研究的重要内容。

1.2 地质作用及地下工程的工程地质问题

1.2.1 地质作用

在自然界中所发生的一切可以改变地球的物质组成、构造和地表形态的作用称为地质作用。地质作用在自然界中普遍存在,只不过有的地质作用短暂而猛烈,易于观察,如地震、火山爆发等。有的地质作用长期持续、缓慢地进行,短期内不易觉察,如岩石风化、海陆变迁等。就最终结果而言,猛烈的地质作用可立即产生明显的结果,而缓慢的地质作用只要长期持续进行,同样可以产生甚至更为显著的结果,如世界上最强烈的地震,造成的地面最大位移不超过数米,而喜马拉雅山脉原来是海洋,3 000 万年以来以平均每年不超过 8 mm 的速度持续上升,已变成了今日最雄伟的高山。因此,研究地质作用,不仅要研究地质作用的猛烈程度,同时要研究时间因素的影响。

地质作用的动力来源,一是地球内部放射性元素蜕变产生内热;二是来自太阳辐射热,以及地球旋转力和重力。只要引起地质作用的动力存在,地质作用就不会停止。地质作用实质上是组成地球的物质以及由其传递的能量发生运动的过程。考虑动力来源不同,地质作用常被划分为外力地质作用与内力地质作用两类。

1.2.1.1 外力地质作用

由地球范围以外的能量所引起的地质作用称为外力地质作用。它的能量主要来自太阳辐射能、太阳和月球的引力能以及地球的自重能等。外力作用的主要类型有风化作用、剥蚀作用、搬运作用、沉积作用、成岩作用。

1.2.1.2 内力地质作用

由地球内部能如地球的旋转能、重力能、放射性元素蜕变的热能等所引起的地质作用称为内力地质作用。内力地质作用主要在地下深处进行,并可波及地表。它包括构造运动、地震作用、岩浆作用和变质作用。岩浆岩、变质岩等便是内力地质作用的产物。

1.2.2 地下工程的工程地质问题

地下硐室,系指在地下或山体内部的各种建筑物。地下硐室具有隔热、密闭、抗震、隐蔽性能好、不占耕地面积等许多优点,在国民经济各个部门中被广泛采用,如城市及交通建设中的地下铁道、地下仓库、地下商场、铁路隧道、公路隧道等,水利电力部门的地下厂房、引水隧洞、地下水库等,地下矿山的井巷硐室等,国防工程中的地下飞机场、地下试验站、地下掩蔽部及军事设备器材库等,石油、天然气地下战略储库,核废料地下处置库等。随着经济建设的高速发展,地下硐室的应用将会越来越广,规模也将越来越大。

地下硐室按成因分为人工硐室和天然硐室两大类。人工硐室指由人工开挖支护形成的地下硐室。天然硐室一般指由地质作用形成的地下空间,如可溶岩的溶洞等。地下硐室又可分为过水的和不过水的,有压(内水压力)的和无压的。

地下硐室周围的岩土体简称围岩。狭义上的围岩是指硐室周围受到开挖影响、大体相当于地下硐室宽度或平均直径 3 倍左右范围内的岩土体。围岩的性质直接影响着地下

洞室的稳定与安全。

地下洞室的工程地质问题主要包括洞室位置的确定、围岩压力分析、围岩的破坏形式、围岩稳定性的影响因素、保障洞室围岩稳定性的措施、岩体的工程分类等。

1.2.2.1 洞室位置的确定

地下工程建设的首要任务就是洞室位置的确定。洞室位置的选择除取决于工程要求外,主要受地形地貌、岩土性质、地质构造、地下水、地应力及物理地质现象等因素控制。在工程建设中要综合各方面因素,选择最佳洞室位置。

1.2.2.2 洞室围岩压力分析

地下洞室会发生变形甚至破坏,主要是由于围岩压力的作用。狭义上的围岩压力,是指围岩对洞室的支护结构(衬砌)的压力,广义上也指外部岩石对洞室围岩的压力。

洞室开挖前,岩土体一般处于天然地应力平衡状态。洞室的开挖破坏了天然地应力的平衡,使围岩应力重新分布,形成二次应力状态,作用在洞室支护结构上,就是围岩压力。在围岩压力的作用下,洞室产生变形。如果二次应力状态达到了围岩的强度,就会使围岩屈服。此时,如果不采取有效的支护措施,洞室就会发生破坏。正确确定围岩压力,对研究洞室围岩的稳定性有着非常重要的意义。

1.2.2.3 洞室围岩的破坏形式

1. 一般破坏

洞室开挖后,如果没有及时设置支护结构,当围岩应力超过了围岩强度时,便会失稳破坏。即使设置了支护结构,但支护结构抵抗围岩压力和变形的能力不足,也会造成支护结构和围岩的破坏失稳。一般地,洞室围岩的破坏可发生在洞室的顶板、两帮和底板。按发生的部位,破坏可分为冒顶、垮帮和底鼓。

2. 岩爆

在坚硬而无明显裂隙或者裂隙极细微且不连贯的弹脆性岩体中开挖洞室,如果洞室埋深不是很大,洞室净空面积也不太大,则围岩变形很小。例如花岗岩、片麻岩、闪长岩、辉绿岩、白云岩、致密灰岩和硬质细砂岩等,就属于这种坚硬岩石。但在这种条件下经常可遇到一种特殊的围岩破坏,洞室开挖过程中,洞壁岩石有时会骤然以爆炸形式,呈透镜体碎片或者碎块突然弹出或抛出,并发出类似射击的噼啪声响,有时伴有气浪冲击,即“岩爆”、“冲击地压”,也有人称其为“山岩射击”。被抛出或弹出的岩块或碎片,大者达几十吨,小者仅几公斤。由于应力解除,抛出的岩块体积突然增加,而在洞壁上留下的凹痕或凹穴的体积突然缩小,被抛出或弹出的岩块或碎片不能返回原处。岩爆对地下洞室常造成危害,可破坏支护结构,堵塞通道,或造成重大伤亡事故。

岩爆多发生在深度大于200~250 m的洞室中,有时深度不大,甚至在采石场或露天开挖中也可发生岩爆。岩爆本质上是在一定条件下围岩弹性应变能突然剧烈释放的过程,如机械开挖、施工爆破和重分布应力(有时有构造应力)的叠加,开挖断面的推进和渐进破坏,引起围岩应力向某些部位高度集中,引发岩爆。这是因为这些扰动或应力集中作用会造成围岩局部脆性破裂,引起围岩的弹性冲击与振荡。当这些冲击与振荡同步相遇时,围岩应力会突然增加到极大值,尤其是在围岩应力增高区内,应力已接近围岩极限强度,一旦受到扰动或应力集中作用,围岩便以爆炸形式,骤然而剧烈地破坏,形成岩爆。

3. 局部破坏

在稳定岩体中开挖硐室,虽然不发生大规模的失稳或破坏,但仍可能出现硐室周边围岩小块体的局部掉落破坏。例如,围岩中存在两组或两组以上的结构面和临空面的不利组合,结构面的风化潮解,施工中的爆破松动作用,都可能造成硐室围岩的局部破坏。局部落石破坏的形式主要表现为岩块沿弱面拉断、滑移、塌落或滑动,主要是由于围岩自重引起的,围岩应力属次要因素。

4. 围岩破坏导致的地面沉降

硐室围岩的变形与破坏,导致硐室周围岩体向硐室空间移动。如果硐室位置很深或其空间尺寸不大,围岩的变形破坏将局限在较小范围以内,不致波及地面。但是,当硐室位置很浅或其空间尺寸很大时,顶板围岩的塌落会波及地表,导致地面沉降。特别是在矿山工程中,地下开采常留下很大范围的采空区,围岩破坏后造成地面沉降,严重时出现地面塌陷和裂缝。矿山采空区上覆岩体变形与破坏,常有明显的分带性。

(1)塌落带。塌落带系指开挖空间顶板及上覆岩层因破坏而塌落的地带。塌落岩体破碎松散后,体积增大。随着塌落破坏向上扩展,采空区整个空间逐渐被破碎岩石填满,塌落过程也随之结束。

(2)裂隙带。塌落带上方为裂隙带。这一带岩体弯曲变形较大,位于采空区上方岩体的每一分层的下缘产生较大拉应力,两侧承受较大剪应力,因而岩体中出现大量裂隙,整体性遭到严重破坏。

(3)弯曲带。裂隙带以上、有时直至地面的这一带,称为弯曲带。从整体上看,该带岩体只在自重作用下产生弯曲变形而不再破裂,仅在弯曲部位两侧或在地面沉降区边缘、因弯曲变形而出现拉应力的部位,产生一些随深度增加而逐渐闭合的张性裂隙。

1.2.2.4 硐室围岩稳定性的影响因素

影响围岩稳定性的因素很多,也很复杂,有天然的,也有人造的。天然因素中经常起控制作用的主要有岩石特性、地质构造、岩体结构、地下水与岩溶作用、构造应力等,人为因素有硐室跨度、开挖方法、支护方式、支护时间等。

1. 岩石特性

在坚硬完整岩石中开挖硐室,一般围岩稳定性比较好。而在软弱岩石中建造硐室,则由于岩石强度低、抗水性差,受力容易变形和破坏,围岩稳定性比较差。

2. 地质构造

地质构造对围岩稳定性的影响很大。在地质构造运动中,坚硬和软弱岩层接触面常会发生错动,形成厚度不等的层间破碎带,大大破坏了岩体的完整性。硐室穿过坚硬和软弱相间的层状岩体时,易在接触面处变形或塌落。硐室轴线若与岩层走向近于直交,可使硐室通过软弱岩层的长度较短。若硐室轴线与岩层走向近于平行,而硐室不能完全布置在坚硬岩层里,硐室断面又通过不同岩层时,则应适当调整硐室轴线高程或左右位置,使围岩得到较好的稳定性。硐室应尽量设置在坚硬岩层中,或尽量把坚硬岩层作为直接顶板岩石。

褶皱的形式、疏密程度及其轴向与硐室轴线的交角不同,围岩稳定性是不同的。硐身横穿褶皱轴,比平行褶皱有利。硐室沿背斜轴部通过,顶板岩层向两侧倾斜,由于拱的作

用,有利于洞室顶板的稳定。而向斜则相反,两侧岩体倾向洞内,并因洞顶存在张裂,对围岩稳定不利。另外,向斜轴部多易储聚地下水,且多承压,更削弱了岩体稳定性。洞室通过复杂形式褶皱,如不对称的、平卧的、倒转的、扇形的或箱形的褶皱,挤压疏密程度和岩石破碎程度不同,地下水动力条件各异,对围岩稳定的影响不同,应作具体分析。

洞室通过断层时,断层带宽度愈大,走向与洞轴交角愈小,断层在洞内的出露距离便愈长,对围岩稳定的威胁便愈大。断层带破碎物质的碎块性质及其胶结情况也都影响围岩稳定性。此外,各类构造岩的透水性差异很大,地下水运移方式和富集情况也各异。断层带地下水的水动力条件,常是分析围岩稳定的重要依据。

3. 岩体结构

层状或块状岩体中的围岩破坏,常常是因为有不利于围岩稳定的岩体结构存在。围岩中几组结构面组合,构成一定几何形态的结构体、分离体,造成围岩的塌落、滑塌。但只有当围岩结构体或分离体的尺寸小于洞室尺寸时,洞室围岩才不稳定。

围岩分离体有楔形、锥形、棱形、方形等,常出现在顶板、底板或侧壁。围岩分离体的形状、大小和方位,都会对围岩稳定性产生不同的影响。

4. 地下水与岩溶作用

洞室通过含水层,便成为排水通道,改变了原来的地下水动力条件,裂隙水常以管状或脉状方式灌入洞内。在较大断层破碎带或延伸较远的张开裂隙中,常常有大量地下水涌出。如果洞室通过向斜轴部,地下水常以承压水的形式出现,流量和压力都很大。在灰岩中开挖的洞室如遇地下暗河或其他集中水流时,涌水量会突然增加。地下水通过断层、裂隙、破碎带或裂隙密集带流向洞内,水力梯度有时会很大,可能产生机械潜蚀,严重者可形成流砂。地下水还会使软弱夹层软化或泥化,使岩体强度大大降低。有压洞室还应考虑内水压力与外水压力对稳定性的影响。有的地下水对洞室混凝土衬砌还有一定侵蚀作用,也应引起足够重视。岩溶洞穴在我国西南地区很普遍,华北某些地方也有发育。东北岩溶溶洞数量不多,但也有个别溶洞长达几公里。大溶洞可作为地下建筑的场所,但有时反而对工程不利,威胁洞室围岩的稳定和施工人员及设备的安全。

5. 构造应力

构造应力具有明显的方向性,对地下洞室围岩的变形和破坏影响极大。在洞室布置及结构设计时,应尽量满足“等应力轴比”、“零应力轴比”或“无拉力轴比”,洞室轴线方向应尽量与最大主应力方向一致,较大尺度方向尽量与较大构造压应力方向一致。

6. 洞室跨度

不同用途的洞室跨度不同,围岩压力也不同。洞室跨度越大,围岩的变形压力和松动压力越大,围岩的稳定性也就越差。

7. 开挖方法

不同开挖方法指的是采用普通开挖方法(爆破方法)或者采用机械掘进方法。采用爆破方法开挖时,又分为普通爆破方法和光面爆破方法。大断面洞室的开挖,又分为全断面一次开挖和分步开挖。分步开挖又分为上导洞开挖和侧导洞开挖。开挖方法不同,对围岩的扰动程度不同,对围岩的稳定性影响也就不同。一般地,机械掘进对围岩的扰动最小,普通爆破开挖对围岩的扰动最大,光面爆破开挖对围岩的扰动介于前两者之间。

8. 支护方式

支护方式对围岩稳定性的影响主要体现在支护的刚度、及时性、密闭性及深入性。根据围岩-支护共同作用原理,支护结构的刚度不宜过大,也不宜过小。宜采用能及时封闭围岩、加固深部围岩的支护方式。

9. 支护时间

根据围岩-支护共同作用原理,支护设置不宜过晚,过晚会使围岩松动,使支护结构承受过大的松动压力;支护设置也不宜过早,过早会使支护承受的荷载过大,可能造成支护结构的破坏。由于围岩本身是一种很难用定量方法准确描述的介质,可结合围岩变形实时观测,逐步加强支护结构,从而达到既保持围岩稳定,又节约支护成本的目的。

1.2.2.5 保障硐室围岩稳定性的措施

根据对硐室围岩稳定性影响因素的分析可知,要保障硐室围岩稳定性,必须从两方面入手:一是尽量保护围岩原有稳定性;二是赋予围岩一定的强度,提高其稳定性。保障围岩原有稳定性的措施主要是采用合理的施工和支护方案,赋予围岩强度的措施主要是加固围岩。

1. 合理的施工方案

要保障围岩稳定性,应针对围岩稳定性程度,选择合理的施工方案。基本原则是尽量减少对围岩的扰动,及时封闭围岩,设置支护结构。对于大断面硐室,可采用分步开挖,例如上导洞施工法、侧导洞施工法、台阶法;对于断面不大的硐室,只要条件允许,就可以采用全断面一次性开挖掘进。不管是分步施工法还是全断面施工法,都可以分别采用爆破法和机械开挖法。

2. 合理的支护方案

支护包括支撑、衬砌与锚喷、锚注。支撑是临时性保护围岩的结构,主要是用木结构或钢结构的支架支撑围岩,手续简便,开挖后可立即设置,可防止围岩早期松动,是保障围岩稳定性的简单易行的办法。衬砌是永久性加固围岩的结构,即在硐室内用条石、混凝土预制块、现浇混凝土或钢筋混凝土砌筑一定厚度的内壁。由于传统的支护结构(支撑、衬砌等)不能与围岩均匀接触,围岩与支护结构之间易产生应力集中,使围岩或支护结构过早破坏。喷浆护壁、喷射混凝土、锚杆加固、锚注加固等,与前述衬砌有许多相同的作用,但成本低得多,既能加固硐壁,也能加固深部围岩,能充分利用围岩自身强度来保护围岩并使之稳定。

锚杆支护是目前地下硐室工程中大量使用的一种提高围岩稳定性的措施。将锚杆插入围岩,将硐周松动围岩锚固到深部稳定围岩上,防止围岩坍塌,如图 1-3 所示。锚杆的力学作用有悬吊作用、组合作用、改善围岩应力状态等。锚杆的悬吊作用是指锚杆可将不稳定的岩层悬吊在坚固的岩层上,以阻止围岩移动或滑落,如图 1-3(a)所示。组合作用是指在层状岩体中打入锚杆,把若干薄岩层锚在一起,类似于将叠置的板梁组成组合梁,如图 1-3(b)所示,从而提高了顶板岩层的自承能力;另一方面,深入围岩内部的(预应力)锚杆承受拉应力,锚杆锚固范围的岩体承受压应力,按一定间距排列的锚杆系统会造成锚杆加固范围内的压应力拱,也就是组合拱,如图 1-3(c)所示,提高了围岩的整体稳定性。锚杆的改善围岩应力状态作用是指在安装锚杆时施加预应力,锚杆系统对围岩造成一个