

岩石力学的地质 与物理基础

陶振宇 朱焕春 著
高延法 李广平

中国地质大学出版社

岩石力学的地质与物理基础

陶振宇 朱焕春 著
高延法 李广平



中国地质大学出版社

内 容 简 介

本书是作者在岩石力学地质与物理基础领域的最新研究成果。全书共分七章。第一章为绪论,后六章论述了岩石真三轴压力试验与强度理论,拉伸和压缩荷载作用下的岩石细观损伤力学模型,岩体地应力分布的一般特征,河谷地应力场的形成、分布与数值模拟方法及其应用,岩石中水的作用等方面的内容。

本书可供水利、水电、土木、建筑、交通、铁道、煤炭、冶金、地质、防护等部门的生产、科研和教学单位有关工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

岩石力学的地质与物理基础/陶振宇、朱焕春、高延法、李广平著. —武汉:中国地质大学出版社, 1996. 10

ISBN 7-5625-1018-0

I. 岩…

II. ①陶…②朱…③高…④李…

III. 岩石力学-地质基础-物理基础

IV. TU452

出版发行 中国地质大学出版社 (武汉市·喻家山·邮政编码 430074)

责任编辑 贾晓青 责任校对 徐润英

印 刷 中国地质大学出版社印刷厂

开本 787×1092 1/16 印张 10.375 字数 270 千字

1996 年 10 月第 1 版 1996 年 10 月第 1 次印刷 印数 1—300 册

定价: 18.50 元

前 言

本书是关于岩石力学地质与物理基础方面的一部专著，是笔者近几年来在这一领域中科研成果的整理和总结。

众所周知，当今的岩石力学正在蓬勃发展，各种不同观点的著作如雨后春笋，目前只侧重于岩石力学的某一方面的著作颇为多见，但从岩石力学学科发展的主流来看，从它区别于其他力学学科的特点来看，则必须着重研究岩石力学的地质与物理基础，而这方面的著作不多。这个问题涉及的面很广，也很复杂。在本书中，只就其中最基本的几个方面的问题进行了探索，相信这几个方面是岩石力学的地质与物理基础的最基本的课题。

本书着重研究以下几方面的问题：一是表征岩体的主要力学参数——岩石强度，并侧重于中间主应力对岩石强度影响的研究和岩石强度的损伤分析；二是岩石断裂系统即节理裂隙问题，着重于岩体中节理的分布特征及岩石细观损伤模型的研究；三是地应力问题，侧重研究地表沉积作用、成岩作用对地应力的影响和河谷地应力场的成因、分布及数值模拟；四是岩石中水的作用，特别是水力模型、突水机理问题。

这些研究成果，是笔者最近几年出版的三部专著，即《岩石力学的原理与方法》（陶振宇等，1991）、《节理与断层岩石力学》（陶振宇等，1992）及《裂隙岩体特性与洞群施工力学问题》（陶振宇等，1993）的继承和发展，它们彼此之间有一定的关联性，又相互独立。

本书初稿经黄乃安教授和唐辉明教授审阅，并提出了许多宝贵的意见。在笔者的研究工作中，曾得到武汉水利电力大学领导和有关单位的支持和帮助。对此一并表示衷心的感谢。

本书各章的执笔者为陶振宇（第一章第一、二、五节，第七章第一、二节）、朱焕春（第一章第三、四节，第五章和第六章）、高延法（第二章、第七章第四节）、李广平（第三章、第四章和第七章第三节），全书由陶振宇统稿。

高延法完成的部分工作得到了煤炭科学基金的资助。

在本书的写作过程中，限于水平，难免有缺点和错误，欢迎读者批评指正。

陶振宇

1996.8

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 概述	(1)
第二节 细观损伤力学的研究进展	(2)
第三节 岩石力学的地质基础	(3)
第四节 岩体几何的地质属性	(5)
第五节 裂纹相互作用的分析方法	(11)
第二章 岩石真三轴压力试验与强度理论	(19)
第一节 概述	(19)
第二节 岩石真三轴压力试验	(20)
第三节 应力空间岩石强度极限曲面统计及强度理论	(23)
第四节 岩石的细观结构模型与压缩破坏机理	(28)
第五节 裂隙岩体的损伤力学分析	(32)
第三章 拉伸荷载作用下的岩石细观损伤力学模型	(37)
第一节 概述	(37)
第二节 拉伸荷载作用下的岩石二维细观损伤力学模型	(37)
第三节 轴对称拉伸应力作用下的岩石细观损伤力学分析	(46)
第四节 三向不等拉伸荷载作用下的岩石细观损伤力学模型	(50)
第四章 压缩荷载作用下的岩石细观损伤力学模型	(54)
第一节 概述	(54)
第二节 压缩荷载作用下的岩石二维细观损伤力学模型	(55)
第三节 轴对称压缩应力作用下的岩石细观损伤力学模型	(62)
第四节 真三轴条件下的岩石细观损伤力学模型	(69)
第五节 节理岩体细观损伤分析与应用	(74)
第五章 岩体地应力分布的一般特征	(80)
第一节 概述	(80)
第二节 地表地质作用与地应力分布	(82)
第三节 岩体中的构造应力	(89)
第四节 岩性与地应力	(94)
第五节 岩石力学性质与地应力	(109)
第六章 河谷地应力场的形成、分布与数值模拟	(113)
第一节 概述	(113)
第二节 河谷地应力场的成因与分带	(114)
第三节 河谷相对走向与河谷地应力分布	(117)
第四节 河谷地应力场数值模拟方法与应用	(125)

第七章 岩石中水的作用.....	(136)
第一节 概述.....	(136)
第二节 岩体的水力模型.....	(136)
第三节 法向应力作用下单裂隙渗流规律的研究.....	(141)
第四节 矿井采场底板突水机理与开采安全性评价.....	(146)
主要参考文献.....	(156)

第一章 绪 论

第一节 概 述

近 30 年来,岩石力学获得了长足的进展,这与世界各国大规模的工程建设有着密切的关系。例如:英吉利海峡的连接英国和法国的海底隧洞工程;日本的青函海底隧洞;巴西的伊泰普水电站;我国正在开始建设的举世瞩目的三峡工程;等等。这些大型的工程建设,对岩石力学的发展给予了巨大的推动力。正因为如此,国内及国际上每年都举办了为数甚多的岩石力学方面的综合性或地区性、专题性的学术讨论会。根据某些资料粗略地统计,国际上每年发表的学术论文约以 3500 篇左右的速度递增,我们没有可能阅读全部文献,但从我们所接触到的大量的文献可以看出,岩石力学工作者的视野是各有不同的,所采用的技术途径和坚持的学术思想也很不一样,当然各人的研究方面、所获得的成果,也就有所差异,这是不足为奇的,但也有共同点,就是都围绕着天然岩石的基本特性,围绕着天然岩石的地质学方面和物理力学方面来进行的,这正是岩石力学与其他力学分支有所区别的基本点所在。在本书中,我们就是根据这一基本认识来进行写作的。

应该指出,岩石力学的物理基础,总是带有地质属性的,它可以称做岩石力学的地质与物理基础,这是因为,岩石力学具有以下三点基本意义。

首先,岩石力学的研究对象是地壳岩石,它是一种地质历史的产物,带有鲜明的地质特征。如果抛开其地质特征来研究它的力学特性,虽然在某些情况下也可能有一定的意义,但最终是行不通的,这已被多年的经验所证明,并且还将被以后的事实证明。

其次,岩石力学的理论基础是力学原理,历史也已经证明,曾有人想摆脱现有的力学原理,另行建立一套体系,也是行不通的。岩石力学的发展道路表明,既要利用传统力学原理有用的理论部分,还要注意与天然岩石的地质特征相结合,不注意这种结合也是不行的。

第三,岩石力学的主要服务对象是工程,而工程建设这种人类活动必然会在一定的荷载条件下和一定的边界条件下对天然岩石施加新的影响,不注意这种影响,只局限于考虑天然岩石的初始状态,也是不行的。

把这三个方面的因素集中到一起,就是岩石力学的地质与物理基础。目前,这方面的研究比较零散而缺乏系统性,在本书中,则着重于在这方面做些工作,具体内容如下。

第一,是岩性因素,这与岩石的矿物成分、结构、构造等许多方面有关。本书中主要探讨表征岩性因素的最基本的力学参数——强度问题。特别是进行了真三轴岩石试验,着重研究了中间主应力对岩石强度的影响。此外,我们还进行了损伤分析,用以计算相关的岩石强度,取得了良好的结果。

第二,是岩石的最主要特征——裂隙因素。我们首先讨论了岩体中节理裂隙分布对地质环境的依赖性,但对初始裂隙状态未做深入分析,因为岩石力学在这方面的研究,总是在工

程地质勘测成果的基础上来进行的。在这里,我们着重研究的是裂纹的相互作用问题,即岩石的细观损伤力学模型问题。

第三,是对岩体地应力这样一个古老的、与岩体地质特性紧密相联的问题进行了深入、系统的研究,讨论了地表沉积作用、成岩作用、岩石物理力学性质与地应力的关系;地壳浅层岩体中构造应力随埋深的变化。在此基础上,对河谷地应力场的形成过程、影响因素及其总体分布规律进行了系统分析;讨论了河谷相对于区域地应力场中的方位对河谷地应力场的影响;提出了河谷地应力场的新的数值模拟方法,并成功地应用于工程实践之中。

第四,是岩石中水的作用。在过去的工作中,我们曾对此做过一些论述。在本书中,我们侧重于单裂纹的水力特性的研究、岩石水力学模型的探讨以及对采矿工程中常遇到的突水问题的机理方面的研究。

第二节 细观损伤力学的研究进展

损伤力学主要是在 Kachanov (1958) 和 Robotnov (1963) 所建立的理论基础上发展起来的。Kachanov (1958) 在研究拉伸蠕变断裂时首先提出了连续性因子和有效应力的概念。Robotnov (1963) 在此基础上提出了损伤因子的概念。当时的工作局限于蠕变断裂。此后的研究者们利用连续介质力学方法,根据不可逆过程热力学原理,建立起了损伤力学。

从微观尺度到细观尺度的损伤来讲,材料的损伤破坏可分为两类:由微观的孕育形成、扩展和汇合成主要裂纹的脆性破坏过程;由空洞形成、长大和洞群汇合的韧性损伤破坏过程。损伤力学研究在各种加载条件下介质中上述损伤随变形发展并最终破坏的过程和规律。其研究方法主要有下面两大类。

其一,为宏观的即唯象学的方法,也叫宏观损伤力学或连续损伤力学。它采取宏观连续变量作为内变量来描述细观缺陷与离散的细观过程。这一方法虽然需要微观模型的启发,但并不需要直接从微观机制导出宏观量之间的理论关系式,而只要求所建立的模型以及由此模型导出的推论与实际相符。宏观方法的共同特点是引入损伤变量作为本构关系中的内变量,它能为模拟材料的力学性能的不断劣化提供简便的本构关系。但是,唯象学损伤模型不能对微裂纹的损伤演化过程给予恰当的描述,并且,其损伤内变量选取的人为性和任意性,使其损伤本构方程中引入的有关常数缺乏物理意义。

其二,为细观损伤力学。这种方法是根据材料的微观成分(如基体、颗粒空洞)单独的力学行为以及它们的相互作用来建立宏观的考虑损伤的本构关系,进而给出损伤力学的完整的问题的提法。它是有双重的含义:①利用连续介质力学来研究细观的变形与破坏现象;②利用考虑组织结构的本构关系来分析宏观的损伤演化问题。因此,细观损伤力学是宏观与细观的渗透、结合与桥梁。材料的细观损伤机制主要有两类:①微裂纹生成、扩展与汇合成主干裂纹,这一机制对应于材料的脆性损伤破坏过程;②孔洞形成、长大和汇合,这一机制对应于材料的韧性损伤破坏过程。

在 70 年代,损伤力学的研究目标之一是预测含有多个裂纹固体在有和没有液体充填条件的有效弹性模量,应用的方法是自恰方法。到 80 年代,研究者们考虑了几种不同的细观成分(空洞、夹杂、纤维和颗粒),研究了几种不同材料(金属、结构陶瓷、复合材料和地层岩石)的不同力学现象(空洞崩塌、相变增韧、纤维弯折和热弹性耗散),并对拉伸和压缩条件下的含多裂纹固体的宏观本构性能、含微结构材料的有效场和有效弹性常数、含多裂纹固体

的有效应力强度因子等问题进行了广泛讨论。

目前,细观损伤力学的研究方法主要有 Taylor 方法、自恰方法、直接的强裂纹相互作用方法和有效场方法等。

Taylor 方法主要是针对材料中裂纹的扩展问题提出的,它不考虑裂纹的相互作用,尽管如此,它是其他方法的基础。直接的强裂纹相互作用方法讨论了主裂纹与多个裂纹的相互作用、主裂纹与主裂纹的相互作用以及强裂纹的相互作用,显然,它在应用中有选择性地侧重对某一问题的分析。自恰方法(有效介质方法)认为单个裂纹可以作为均匀等效介质中的孤立裂纹进行处理,每个裂纹受到的应力场为外加应力场,它可以间接地考虑弱裂纹的相互作用。一般地,自恰方法只适用于裂纹密度较小的场合。有效场方法的基本假设是:任一裂纹所受到的应力场为外加应力场加上其他裂纹对它产生的附加应力场;在这种有效应力场作用下,介质中的裂纹表现为嵌入各向同性原始材料之中的孤立裂纹。有效场方法不仅适用于裂纹密度较大的场合,同时,其计算量也比自恰方法小,更重要的是,它能系统地考虑裂纹的相互作用问题。

岩石损伤研究主要是从 80 年代开始的,它主要考虑了岩体这种地质体中普遍存在的节理、裂隙。经过 10 多年的努力,这方面研究取得了很大的进展。总的来说,已取得的成果大多属于连续损伤力学或唯象学的范畴,它们可以给出简单且方便的岩石损伤本构方程,但同时也存在内变量的选取带有经验性和人为性的问题,使得本构方程中的有关常数项缺乏物理意义。但是,正是由于岩石宏观损伤力学暴露出的这些不足,促进了岩石细观损伤力学的发展。同时,只有从细观的角度弄清岩石损伤的规律,才能更好地把宏观与细观结合起来,达到相互渗透、相互结合,使岩石细观损伤力学的研究走向成熟。

岩石细观损伤的研究有下面几个亟待解决的问题:

- (1) 拉伸应力作用下的岩石细观损伤力学模型;
- (2) 受压荷载作用下的岩石损伤演化方程和本构关系;
- (3) 考虑裂纹闭合应力对损伤本构关系的影响;
- (4) 对于含长度大于间距的节理岩体,如何更有效地考虑裂纹的相互作用;
- (5) 中间主应力对岩石损伤演化的影响;
- (6) 各向异性损伤研究。

第三节 岩石力学的地质基础

岩石力学研究的对象是天然岩体,与一般固体材料不同的是,天然岩体的成因及其在地质历史上的历程对岩体目前的物理力学性质具有很大的影响。迄今为止,人们已经认识到了岩体的不连续性、不均匀性、各向异性及其岩体的力学行为不同于一般固体。近来的研究表明,在某些条件下,岩体为固-液两相介质,其力学行为更不简单地雷同于一般固体,所有这些,都是与岩体赋存、经历的地质环境有关。

在现阶段,研究含裂纹等地质缺陷的节理岩体的力学行为是岩石力学的重要研究课题。这里的裂纹或其他地质缺陷是在目前客观存在的。显然地,尽管人们引用了诸如断裂力学、损伤力学等理论,但是,它们都应该建立在对这些地质缺陷的形状、尺寸等几何特征乃至成因特征认识的基础上,这可能会涉及到更深层次之中。比如说,如果这种地质缺陷是细观的裂纹、孔隙及晶体接触界面,那么,对于不同类型的地质缺陷,可以一般性地对应着不同的地

质条件。岩石中细观的力学成因的裂纹可能主要与岩石经历的构造运动有关,那么,形成时代较早的岩石,经受构造运动的次数可能更多一些,这种裂纹可能会相应地多一些,并构成岩石中的主要地质缺陷。形成时代较新的岩石,尤其是新生代的沉积岩,岩石固结程度差,孔隙多,构造变动浅,这种原生的孔隙可能是主要的地质缺陷,或者,这种类型的地质缺陷会占一定比例。显然,这两种不同类型的地质缺陷,由于其成因不同,所处的受力环境也不一样,在同样外荷作用下,可以表现出不同的力学特征。

对于宏观节理,也存在类似的问题。在岩石损伤力学研究中,需要已知节理几何分布的某些参数值。这种参数值是通过取样统计方法获得的。在实际中,由于条件限制,不可能对研究区岩体的节理进行一一取样,取样是有选择性的,而统计结果则代表了总体的分布特征,这时,如何取样就显得比较重要。水利水电工程多位于深切河谷地区,在这些地区,河谷两侧岩体中因河谷侵蚀卸荷产生的裂隙较多,它的分布形式可能不同于构造节理,而构造节理的分布特征又可能依赖于地质构造环境。我们的初步研究结果显示,在褶皱轴部附近,节理间距服从负指数分布,迹长服从正态分布;而在断层区,间距服从对数正态或正态分布,迹长服从均匀分布。认识节理分布的这种地质属性,是准确地为后面的分析提供可靠参数的基础。

岩石结构特征受其成因条件的影响。人们已经认识到结晶程度好、晶粒大的岩石与结晶程度差、晶粒小的岩石之间的力学性质的不同,但是,从岩石成因差异来看,这种引起岩石结晶程度不同的成因条件的差别是比较小的。岩浆岩、沉积岩和变质岩代表了三大类成因条件相差悬殊的岩石,它可能在更深更广的范围内影响岩石的力学性质。我们对岩性与地应力的关系的研究表明,这三大类岩石中最大、最小水平应力随深度分布特征是不尽相同的,并显示出与岩石成因类型显著相关的特点(朱焕春等,1994)。

已经过去的地质作用过程同样可以影响岩石现今状态及其力学性质。例如,同一岩石,位于剥蚀作用区和沉积区,其结果可能是不一样的。剥蚀作用可以使岩体水平应力增高,增大岩体应力差,易于引起原有裂纹的扩展,承受外荷的能力可能要低一些。在沉积区,岩体水平应力相对低一些,有利于岩体处于良好的应力状态之中而表现出不同于剥蚀区的力学性质。更直接地,对于河谷地区地应力分布状况的认识,如果不从河谷发育过程去分析,是难以正确理解的。例如,在河谷地区实测的垂直应力普遍大于上覆岩体质量,主应力大小、方向在较小范围内可能有很大的变化等,都需要把河谷地应力场看成一个重分布应力场,这时就不宜再用自重应力加构造应力的方法来看待其应力状态。

在目前的研究水平下,把岩石力学的分析成果与地质分析相结合,可以提高岩石力学分析成果的应用水平和准确性。

在很多情况下,岩石力学数值计算得出的是岩石工程的应力场和位移场以及某种强度准则下的破坏区范围,但是,这并不意味着对岩体是否失稳有了明确的回答。这是因为岩体的失稳破坏受岩体结构条件及岩体受力条件两个方面的控制,目前的岩石力学数值计算,还不能真实地反映各种岩体结构特征,并且,人们对不同结构条件下的岩体的可能失稳方式的认知还不全面,更无法用数值模型来描述。例如,在层状岩层地区修建地下工程,围岩的破坏形式有掉块和屈曲等几种形式。屈曲破坏一般只产出在层厚不大的岩体中,且地下工程轴线走向与岩层走向近乎平行时才容易出现,另一方面,围岩应承受较高的与层面方向近乎平行的压力。

在岩石边坡工程研究中,这方面的问题似乎更突出一些。对于边坡这类地面工程,岩体

应力水平较低, 应力状态更主要地通过岩体地质条件起作用, 这一点在岩体自然边坡研究中表现得很突出。正是基于这一思想, 孙玉科等 (1988) 按边坡的工程地质岩组、岩体结构、地应力条件、破坏形式及水文地质条件等把边坡划分为 5 种地质模型, 并以此作为边坡稳定分析的基础。

在岩石力学数值计算中, 地质条件决不是简单地提供材料分区等表面上的参数资料, 它对确定计算边界条件、计算过程乃至成果分析等都是十分重要的。在水利水电工程建设中, 一般都是山高坡陡, 自然边坡常高达数百米。对于这样一个自然条件下形成的完整边坡而言, 坡脚的应力集中和上部的应力松弛是人所共知的。我们常常研究的是在其中某一段位置上由于人工开挖形成的人工边坡 (如航道边坡等) 的稳定性。显然, 这段位置在自然边坡中是处于下部、还是处于中、上部, 其初始地应力条件是完全不一致的。如果我们不考虑这一点, 而仅仅只依据人工边坡的范围等确定计算边界和计算条件, 仍然一味把其初始地应力场处理成同一格式, 即在计算域内也是坡脚应力集中、坡顶应力松弛, 就不一定符合实际。

当然, 岩体地质环境与应力环境并不是相互独立的, 而是相互统一的。例如, 结晶的岩浆岩结构致密、完整性好, 相应地, 它给赋存高地应力提供了条件, 在工程建设中, 应力响应会更显著。再比如说, 人们已认识到自然边坡中岩体结构类型与边坡变形破坏之间的密切关系, 事实上, 它是通过应力作用实现的。研究表明, 一般地, 层状边坡中的顺向坡的反向坡的岩体地应力条件都不利于边坡的稳定, 但顺向坡的岩体结构特征容易促使边坡的滑动破坏, 而反向坡中不具备这种条件。由于应力与结构两个方面都对边坡稳定不利, 因此, 顺向坡中的滑坡等灾害很突出, 而在反向坡中, 出现的则主要为蠕变变形、倾倒等破坏方式。

在拦河大坝坝基的防渗问题上, 也表现了地质与力学的统一问题。在水库运行前, 河谷地应力状态非常有利于与河谷走向平行的陡倾破裂面的闭合 (最大主应力与河谷走向垂直); 与河谷走向垂直的陡倾破裂面, 与次主应力方向垂直, 也比较有利于裂隙的闭合, 而那些缓倾裂隙, 其应力状态有促使它进一步发展的趋势。在这种条件下作帷幕灌浆, 显然, 最容易进浆的是缓倾裂隙, 其次为与河谷走向垂直的横向裂隙, 最不易进浆的是顺河谷裂隙。所以, 在灌浆中有可能出现某一组裂隙进浆良好, 而另一组裂隙不进浆的状况, 增大灌浆压力可能会导致易进浆裂隙的扩展, 并不能从根本上解决问题。由此可见, 水库运行前的坝基防渗帷幕可能不会有效地填堵坝基岩体的裂隙网络。水库运行后, 坝基岩体的应力状态发生变化, 裂隙的受力条件的变化可以导致裂隙几何特征的变化, 从而改变岩体的透水性。从这一方面讲, 坝基渗漏有其内在的必然性, 只有加深对这一问题的认识后, 才会有针对性地做好设计和加固。

一般地, 地质条件为我们确定问题的性质和总体状况提供了依据, 而力学分析有利于深化这种条件下的认识, 并同时反过来起到了主动地从本质上认识地质条件的作用。

第四节 岩体几何的地质属性*

一、概述

国际岩石力学学会 (ISRM, 1977) 曾规定了岩体不连续面的范畴, 即指岩体中的断层、

* 本节内容为水利水电科学基金资助项目研究成果之一。

大多数节理、软弱层面和软弱片理面、软弱带等各种力学成因的破裂面、带。与我国通常用的“结构面”这一概念相比,前者更强调了它的力学意义和工程意义,即为性质软弱的结构面。与此同时,ISRM(1977)还建议用产状、间距、连通性、粗糙度等11个指标描述岩体不连续面的几何特性。岩体不连续面分布及其几何特征表征了岩体几何特性。从迄今为止的研究成果看,在岩石力学及其相关领域的研究中,以对岩体不连续面的产状、间距、连通性(用迹长反映)和粗糙度的研究最多。

二、岩体不连续面分布概述

目前,岩石力学及其相关领域对岩体不连续面分布的研究主要侧重于用数学方法定量描述不连续面的某些几何特征。

(一) 不连续面产状

不连续面产状研究主要是针对节理而言的,最常用的描述方法为极点图和极点等密度图。它是通过极射赤平投影方法实现的,目前也可以直接用计算机辅助设计获得等密度图。

在定量描述一个地区岩体不连续面产状时,通常是首先进行大量的野外取样,然后在室内对样本进行统计学分析,用某一种尽量合理的分布函数加以描述,目前已经使用的分布函数有Fisher分布、Bi-variate分布、Bingham分布、Normal分布和Uniform分布等。岩体不连续面产状出现如此多样的分布模式,一方面是不连续面产状复杂多样,另一方面是对样本的来源及取样区地质条件缺乏必要的分析和比较,致使统计结果的适用条件不甚明了。Matheson(1988)在对含不连续面岩质边坡的设计中,注意到了不同边坡位置上不连续面产状的区别,提出了对岩体进行分区的设想,并强调由于分区特性的存在,使得对某一区内不连续面分布模式做内插或外推处理时,一定要有前提条件。

Matheson(1988)的观点实质上强调了不连续面产状的地质属性,肯定了岩体不连续面产状与地质条件的内在关系。一般地,一个时期内在某一地质构造单元内或其他因素控制区内的不连续面,是与此相对应的地应力场的作用结果,不连续面的产状很大程度上取决于地应力场的状态。

(二) 不连续面间距

在前人关于岩体不连续面间距的讨论中包含了两种情形:一是相对于若干大致相互平行的不连续面而言的,即为一组不连续面中相邻两条不连续面的间距,它承认了不连续面的分组特性;另一是指沿某一测线方向上与测线相交的任何不连续面的相邻两个交点之间的距离,它强调了不连续面分布的随机特性。显然,第二种情形中的不连续面间距与测线布置方向、位置有关。在岩石力学研究中,为便于定量描述岩体不连续面分布的几何特性,主要引用了第二种观点,但岩石损伤力学研究中所要求的节理间距与第一种情形相当。

最早专门讨论不连续面间距并用概率密度函数作定量描述的研究者是Priest和Hudson(1976),并且认为以测线测量为基础的不连续面间距的分布有如下三种形式:

(1) 负指数分布 表示与测线相交的不连续面随机性很强地分布于岩体中,其分布函数为

$$F(x)=1-e^{-\lambda x} \quad (1-1)$$

式中: x 为间距; λ 为分布参数。

(2) 均匀分布 表示所有的不连续面间距值达到某一极值时有共同的概率,它既可能是无序破裂的结果,也可以是累进式破坏的产物。

(3) 正态分布 表示不连续面以某一间距值为期望的随机分布形式, 其概率密度函数为

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\hat{\sigma}} e^{-\frac{(x-u)^2}{2\hat{\sigma}^2}} \quad (1-2)$$

式中: x 为间距; u 为均值; $\hat{\sigma}$ 为方差。

Hudson 等(1979)根据英国境内的 10 个测区内的大量不连续面的陆地摄影测量资料的判读结果, 分析了每一测区不连续面间距在某一规定测线方向上的分布, 结果表明它们都服从负指数分布。另一些研究者如 Barton(1978)的研究则显示出不连续面间距还可以服从对数正态分布。

在 Hudson 等(1979)的实例分析中, 只介绍了取样点的岩性和时代, 而对其地质构造背景——影响不连续面分布的最主要的地质条件则没有任何介绍。

Sen 和 Kazi(1984)在 Priest 等(1976)的基础上, 着重讨论了由于条件限制所能布置的测线长度不能满足精度要求时, 对不连续面间距的估计方法。对一有限长(长度为 L)的测线来说, 一些不连续面无法与它相交, 样本容量可能不足, 但是, 如果不连续面间距服从负指数分布, 则这部分能与测线相交的不连续面间距分布的概率密度函数为

$$f(x) = \frac{\lambda}{1 - e^{-\lambda L}} e^{-\lambda x} \quad (0 \leq x \leq L) \quad (1-3)$$

式中: 符号的意义与式(1-1)相同。

另一些学者如徐家谟等人则着重讨论了不连续面分布的等间距性或间距疏密分布的韵律性特征及其成因机制。此时, 对不连续面间距的理解是同一组不连续面内相邻两者之间的距离。

三、不连续面分布的地质属性

自然界中自然形成的任何不连续面, 都是地质作用的结果, 其中以地质构造作用形成的不连续面最常见。

地质学中常把岩体不连续面按其成因分为三大类型, 即原生型、构造型和次生型。这种分类不但容易掌握, 而且还从总体上反映了不连续面的形成时代、成因、产出方式、影响因素及分布特征等。例如: 次生的卸荷裂隙和风化裂隙一般只出现在地表附近, 前者多局限于地形起伏大的陡坡、陡崖附近。这对于认识一个地区不连续面的分布特征是非常重要的。

原生型不连续面如层面、片理面等与岩石同期形成, 具有延伸相对稳定的特征。构造型不连续面分布最广, 常与地质构造条件具有显著的依赖关系。下面着重介绍岩体不连续面产状、间距对地质构造的依赖性, 从而证明不连续面分布的地质属性。

1991 年初, 作者在贵州省乌江某水电工程场址区进行了为期 2 个月的实地调查, 收集了比较丰富的第一手资料, 为论证岩体不连续面(构造节理)分布的地质属性提供了保证(朱焕春等, 1995)。

该水电站位于乌江上游河段的三岔河与六冲河汇合处下游峡谷段内, 场址区内山势陡峻、河谷深切略呈“V”字型, 基岩裸露。坝址区地层为三叠系下统夜郎组中厚层—薄层—厚层细晶质灰岩, 层面发育。在区域地质构造上, 本区位于黔西山字型构造东翼与新华夏系的交接复合地区, 燕山期形成一系列 NE 向展布的褶皱与断裂带, 大坝下游 700m 处即为鸭池倒转向斜轴部。节理统计工作中的两个测点就选择在大坝下游鸭池倒转向斜轴部附近(西翼)和东翼的一断层附近(图 1-1)。

测点 I 处岩层受褶皱作用的影响弯曲强烈, 形成一个小型的向斜和一个小型背斜, 两者轴

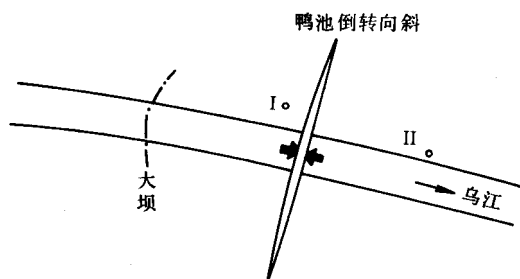


图 1-1 测点位置示意图

部相距仅 25m 左右。2 个小褶皱间岩层陡倾状产出,节理极为发育(图 1-2)。

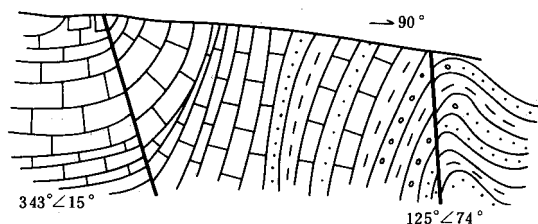


图 1-2 测点 I 处地质剖面示意图

测量工作从小向斜的西翼开始,经过该向斜轴部至小背斜的轴部止,测线全长 40m 左右。测线测量内容包括节理产状、在测线上的间距、测线至地面(高度为 1.80m±)范围内节理的迹长、半迹长和删截半迹长。总的来说,该测点处节理发育,但一般规模都较小,主要是限制在岩层内的小规模的节理,局部密集产出。节理多与层面垂直,因此,在小背斜和小向斜轴部附近呈放射状,这与地质学上的一般认识是相符的。

图 1-3 是在该测点处测得的与测线相交的 233 条节理产状的极点分布图。注意图中倾角的表示与通常所用的赤平投影图中的规定相反,这主要是实测节理的产状一般较陡、平缓节理较少而便于表示的缘故。图 1-3 表明,该测点处节理以 NE 和 NW 向为主,其他方向的节理也占一定的比例。NE 向节理倾向 SE,后者倾向 NE。这两组节理倾角的变化幅度都很大,从几度到几十度不等,但总的来看,以倾角为 30°~60°者居多,而实际上陡倾节理远不如平缓者多,但是,当测线近水平地布置时,倾角大的节理与测线相交的概率大,即被选为样本的概率大,所以,实测结果并没有完全真实地反映客观情形,这是测线测量方法本身固有的不足。

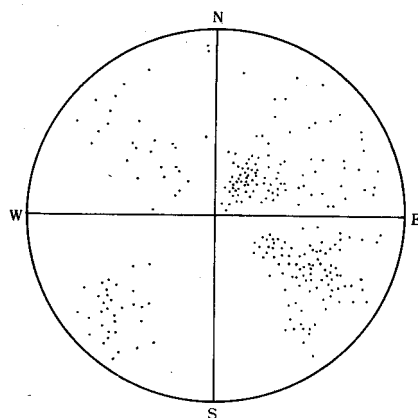


图 1-3 测点 I 处节理极点图

图 1-4 是根据测点 I 处获得的该测线上的节理间距分布直方图,它符合负指数分布特征,对这些数据进行统计学分析以后,可以写出在该测线上节理间距分布的概率密度函数为

$$f(x) = 0.038e^{-0.038x} \quad (1-4)$$

这里,节理间距的单位为 cm,平均间距 (cm) 为

$$\bar{x} = E(x) \approx 26 \quad (1-5)$$

测点 II 位于数条层间剪切带和—NE 走向的平移断层(产状为 135°∠70°)的影响范围内。受褶皱的影响,该处岩层呈陡倾状产出,产状一般为 150°~170°∠70°~80°,层间挤压剪切现象比较明显。在该测点处用测线测量方法对与测线相交的 233 条节理的产状、在测线上的间距及节理迹长进行了测量。图 1-5 是该测点处获得的节理产状的极点分布图,注意这里的倾角表示仍与传统方法相反,在大圆周处为 90°,在圆心为 0°,这也主要是因为节理以陡倾状产出,

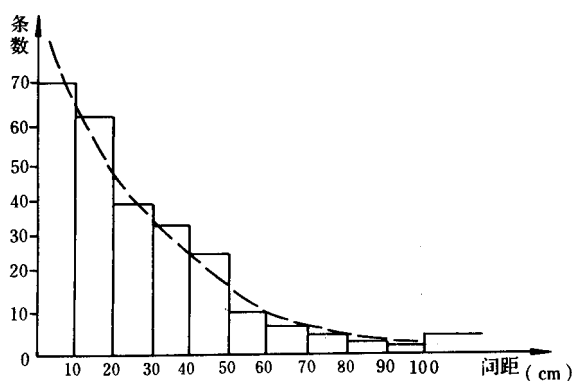


图 1-4 测点 I 处节理间距分布直方图

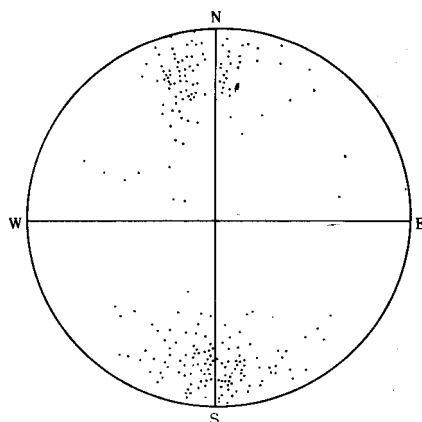


图 1-5 测点 II 处节理极点图

便于在图中表示。

图 1-5 比较清楚地显示出该测点处主要存在两组节理，其走向都近似 EW 向，倾向分别为南和北，倾角一般在 60° 以上，呈陡倾或陡立状产出。与图 1-3 相比，该测点处节理的产出特征与测点 I 处显然不同，主要表现在测点 I 处节理走向比较分散，倾角变化范围大且总体上较小；在测点 II 处，两组节理走向大致相近，倾向相反，倾角较大，呈陡倾的 X 型共轭状产出。从野外观测结果看，测点 II 处节理平直，延伸性好，一般在数米至 20 余米之间，加上陡倾状产出，因此易于与测线相交。这些都是与测点 I 处不同的。

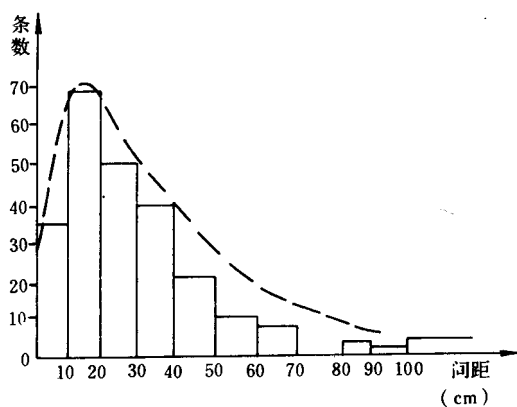


图 1-6 测点 II 处节理间距分布直方图

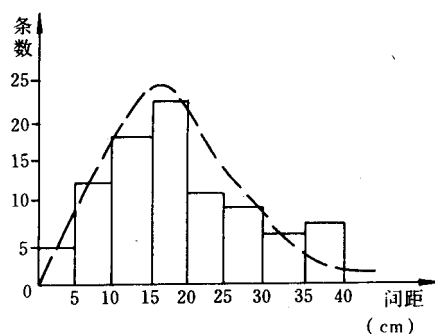


图 1-7 测点 II 处一段测线上节理间距分布直方图

图 1-6 是测点 II 处 233 条实测节理在测线上间距分布的直方图，它近似地服从对数正态分布。在测线上的平均间距为 22.5cm。

图 1-7 是测点 II 处层间剪切带影响范围内的 103 条实测节理在测线上的间距的直方图，它趋于正态分布。用正态分布模式对这些数据进行统计分析以后可得出间距的概率密度函数为

$$f(x) = \frac{1}{12.5} e^{-\frac{1}{50}(x-19.2)^2} \quad (1-6)$$

它们在测线上的平均间距为 19.2cm。

由此可见,在不同地质构造背景下用同样方法获得的不连续面在产状、间距等方面具有显著的差异性,表明岩体不连续面分布的几何特征可能受地质构造环境的严格控制,并因此规定了不连续面的地质属性。

事实上,岩体不连续面的产生是有条件的,而并不一定都具有随机性。作者在该工程场址区内选择节理统计时就发现节理相对集中出现是有条件的,除河谷岸坡卸荷裂隙极其发育以外,构造节理一般只相对集中地出现

在褶皱核部和断层、层间剪切带附近,因此,测点也只能相应地布置在这些部位,否则,即使布置很长的测线,也不一定得到满足要求的样本数。例如,从Ⅰ号测点下游的鸭池倒转向斜东侧至Ⅱ号测点的数百米距离内,上坝公路一侧开挖揭露的新鲜岩石中节理极其稀少,间距一般在数米以上。在右岸厂房区附近平硐内的勘测结果表明,该处节理以NE向为主(图1-8),而这一组节理的分布也与具体地质构造条件有关,并不是在任何地方都均匀分布,表1-1列出了该组节理在平硐内相对密集出现的部位。

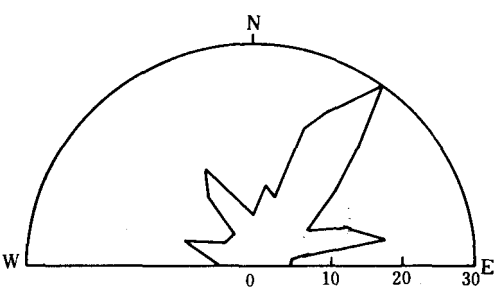


图 1-8 东风水电站地下厂房区节理玫瑰图

表 1-1 东风坝址区平硐内 NE 组构造节理密集带位置统计表

部位	硐号	密集带位置（从硐口计算，m）				
左岸	PD3	13.5~17.0				
	PD7	42.0~50.0				
右岸	PD9	53.5~56.0	58.0~59.0	73.5~81.0		
	PD2	36.0~41.0	51.5~54.0	63.0~64.0	122.0~127.0	152.0~153.5
		163.0~164.0		169.5~170.5	172.0~174.0	
	PD11	10.0~11.5		33.0~33.5		
	PD4	19.0~21.0	31.0~32.5	36.5~40.5	50.0~51.5	
岸	PD10	39.7~42.7				

岩体不连续面分布的地质属性不仅表现在其几何特征受地质构造条件的制约,还可以表现为受岩性的影响。1992年6月,作者在三峡库区进行了为期1个月的野外地质测绘工作,同时,对测区的构造节理的分布进行了现场测量和分析。测区岩性为侏罗系中统下沙溪庙组红色泥质粉砂岩夹砂岩,岩层产状平缓,位于丰都—忠县向斜NE端翘起部位附近,地质构造简单,未见断层,主要断裂为构造节理,其总体特点是:在坚硬的砂岩中,节理延伸长且间距大,分布稀疏;在软弱的红色泥岩中节理短小而密集。作者采用“观察窗”方法对砂岩和泥岩中节理密集部位进行了统计,在砂岩中窗口的尺寸为 $11.2 \times 6.8\text{m}^2$,在泥岩中为 $2.2 \times 4.1\text{m}^2$ 。统计结果表明,砂岩中节理的面密度为 $0.147\text{条}/\text{m}^2$,泥岩中为 $5.21\text{条}/\text{m}^2$,显然在泥岩中比砂岩中密集得多。表1-2列出了在该测区获得的节理产状、间距等特征,其结果同样表明了不同岩性层中节理分布特征的差异,即从本质上讲,是地质条件对节理分布的制约。

表 1-2 三峡库区某地节理统计成果

岩性	节理组	走向	倾向	倾角	间距 (cm)	迹长 (cm)
砂岩	J ₁	330°~360°	NE	52°~73°	160	234
	J ₂	290°~310°	SE	50°~70°	280	423
	J ₃	50°~58°	SE、NE	60°~70°	400	162
泥岩	J ₁	350°~20°	NEE、SEE	62°~72°	2.8	58
	J ₂	300°~310°	NE	68°~90°	63	193
	J ₃	70°~110°	SE、NE	°52°~72°	43	84

第五节 裂纹相互作用的分析方法

岩体不同于一般介质的特征首先是其结构面,包括裂隙、节理、界面裂纹等,其次是结构面分布的非均质性和各向异性。在一些条件下,岩体中节理的迹长常与间距相当,因此,岩石细观损伤力学的研究必须考虑裂纹的相互作用。

本节中将把有效场方法推广到裂纹扩展分析的细观力学领域,并引入二维和三维空间中的滤过的泊松点场理论,使有效场方法既能分析均质岩体中的相互作用裂纹,又能分析非均质岩体裂纹的相互作用,并同时适用于拉伸荷载和压缩荷载作用下裂纹的相互作用分析(陶振宇等,1992)。

一、滤过的泊松点场

这里,我们将滤过的泊松过程推广到三维空间中,得到滤过的泊松点场。由于泊松点场是滤过的泊松点场的基础,为此,先引入泊松点场的定义和几个重要的统计量,然后再引入滤过的泊松点场。

(一) 泊松点场的定义

一个在三维空间 U 中的泊松点场定义为具有下列性质的计数场 $\{N_V; V \subset U\}$:

(1) 在 V 中,点的数目 N_V 具有参数为 Λ_V 的泊松分布,即对于 $n=0, 1, 2, \dots$

$$P_r[N_V=n] = (n!)^{-1} \Lambda_V^n \exp[-\Lambda_V] \quad (1-7)$$

(2) $\{N_V; v \subset V\}$ 在任意不相重叠的区域 $V_1, V_2, \dots$ 中具有独立增量,即

$$P_r[N_{V_1}=n_1, N_{V_2}=n_2, \dots, N_{V_k}=n_k] = \prod_{i=1}^k P_r[N_{v_i}=n_i] \quad (1-8)$$

在所定义的空间中, Λ_V 既可能是连续函数,也可能具有跳跃点,若为连续函数,则可表示成

$$\Lambda_V = \iiint_V \lambda_V(x, y, z) dV \quad (1-9)$$

式中: λ_V 为强度函数,即点发生的局部平均率。

(二) 几个重要的统计量

1. 在 V 中存在 n 个有序泊松点,其位置如何

设泊松点 $r_1 \in \Delta V_1, r_2 \in \Delta V_2, \dots, r_n \in \Delta V_n$, 而 $V - \sum_{i=1}^n \Delta V_i$ 中无泊松点存在,则联合发生概率为

$$P_r[r_1 \in \Delta V_1, r_2 \in \Delta V_2, \dots, r_n \in \Delta V_n, \text{且任何点} \bar{r} \in V - \sum_{i=1}^n \Delta V_i]$$