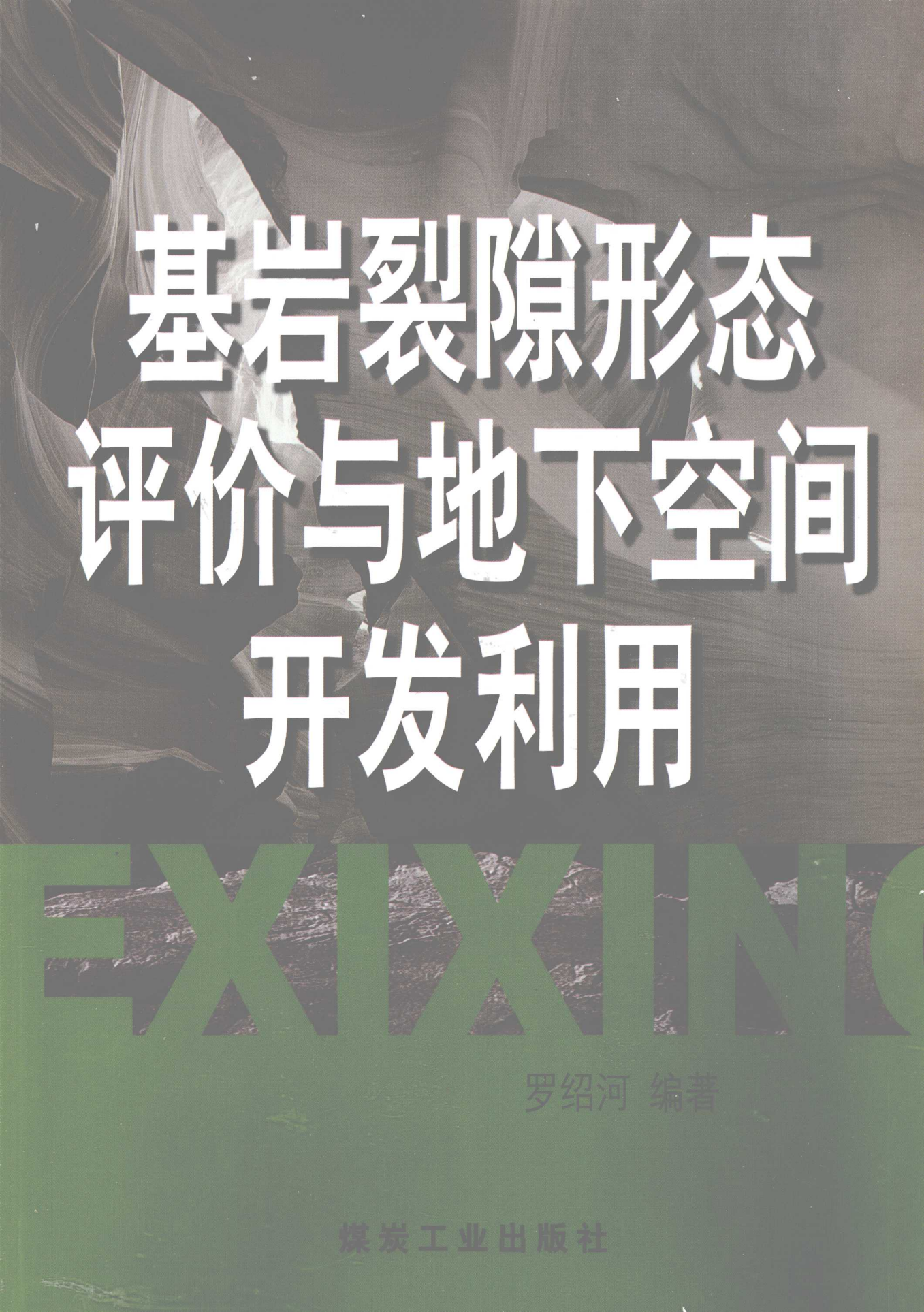




基岩裂隙形态 评价与地下空间 开发利用

EXXING

罗绍河 编著

煤炭工业出版社

国家自然科学基金项目
河南理工大学博士基金

联合资助

基岩裂隙形态 评价与地下空间开发利用

罗绍河 编著

煤炭工业出版社

·北京·

内容提要

本书介绍了基岩裂隙形态研究的背景、现状和存在的问题,提出了基岩裂隙的人工制作方法及其位置坐标的测量方法,在定义和计算裂隙张开度、张开角、尖灭方向等裂隙特性量的基础上,尝试进行了基岩裂隙的形态评价,并建立了基岩裂隙可视化的裂隙进展模型。此外,本书还介绍了地下空间开发利用的相关知识。

本书是基岩裂隙形态评价研究的专著,可供岩石力学、基岩水文地质、环境水文地质和地热工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

基岩裂隙形态评价与地下空间开发利用/罗绍河编著.
北京:煤炭工业出版社,2008.10
ISBN 978-7-5020-3405-4

I. 基… II. 罗… III. ①基岩-岩石破裂②地下工程-
工程地质 IV. TU452 TU94

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第151546号

煤炭工业出版社 出版
(北京市朝阳区芍药居35号 100029)
网址: www.cciph.com.cn
北京京科印刷有限公司 印刷
新华书店北京发行所 发行

*

开本 787mm×1092mm¹/₁₆ 印张 10
字数 231 千字 印数 1—1,100
2008年10月第1版 2008年10月第1次印刷
社内编号 6210 定价 30.00 元

版权所有 违者必究

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,本社负责调换

前 言

工程岩体稳定性研究一直是工程地质和岩体力学非常重要的研究课题。影响岩体稳定的因素很多,其中最主要的因素是存在于岩体内部的各种结构面。工程经验表明,工程岩体的失稳与结构面的发育程度、发育位置、产状、组合特征及其工程性质有着十分密切的内在联系。不管基础岩石如何坚固,只要岩体中存在不利的结构面构成软弱的地质界面或分割面,岩体就失去了其完整性和连续性,就有可能沿着这些结构面发生变形破坏。许多大规模的自然斜坡的崩落和滑坡、人工边坡、坝基和坝肩岩体的滑移失稳,以及地下开挖工程的坍塌、冒顶、底鼓和侧墙弯折破坏,都与岩体结构面的存在有着千丝万缕的联系。因此,开展岩体结构面的基础研究十分重要。基于以上情况,作者以岩体结构面中的张裂隙为研究对象,保持构成裂隙的两个面不分离,采取对裂隙断面研磨以及用数字显微镜对整个裂隙的各个研磨断面摄影,并将上述照片输入计算机测量的方法,计算了裂隙的隙宽、张开角、进展方向和裂隙面粗糙度等形态特性量,从而实现了对于基岩裂隙形态的测量和评价。该研究是不连续介质模型研究的基础性工作,而且对于地下工程的开发利用也具有指导意义。

本书共九章。第一章介绍了研究的背景、研究现状以及研究内容与方法;第二章介绍了试样的选定、裂隙的制作以及位置坐标的测量方法;第三章重点展示了各裂隙断面的计测结果,并尝试进行了裂隙面全体的三维表示;第四章假定上下裂隙面由众多相互成对的小三角形平面所构成,在定义和计算裂隙张开度、张开角、尖灭方向等裂隙特性量的基础上,对裂隙进展方向、裂隙张开度与边界条件的关系以及裂隙面的分形特性进行了讨论;第五章以基岩裂隙的可视化为目的,根据前章试验结果,尝试建立了裂隙进展模型;第六章介绍了地下空间开发利用的意义和国内外开发利用现状;第七章论述了地下空间的类型及其规划的任务、原则、基本内容和目标,重点论述了城市地下空间布局和布局规划;第八章介绍了地下空间工程技术,包括地层调查技术、设计技术和施工技术;第九章介绍了地下空间的灾害特征、防灾特点和防灾对策。

书中大部分内容选自作者的博士论文。该博士论文是作者在日本室兰工业大学後藤龙彦教授的精心指导下完成的。值本书出版之际,作者谨向导师表示衷心的感谢!此外,本书还引用了许多国内外专家学者村上良九教授、束昱教授、徐梅博士、张驰硕士等的文献资料,在此表示诚挚的感谢!

本书由国家自然科学基金项目(编号:40772153)、河南理工大学博士基金联合资助。

由于作者水平有限,书中错误和不当之处在所难免,敬请读者批评指正。

作 者
2008年6月

目 录

1 绪论	(1)
1.1 研究的背景和意义	(1)
1.2 国内外研究现状	(1)
1.3 存在的主要问题	(2)
1.4 研究内容和方法	(3)
2 试样制作及测量	(4)
2.1 试样的制作	(4)
2.2 试验顺序及坐标计测方法	(6)
3 裂隙计测结果及三维表示	(8)
3.1 裂隙面位置坐标的计测结果	(8)
3.2 裂隙面的三维表示	(8)
3.3 讨论及小结	(37)
4 裂隙的形态评价	(42)
4.1 裂隙面特性量的定义及计算方法	(42)
4.2 裂隙张开度的计算结果及其讨论	(46)
4.3 裂隙张开角	(48)
4.4 裂隙面的尖灭方向	(49)
4.5 关于诸特性量的若干讨论	(55)
4.6 小结	(61)
5 关于裂隙可视化的研究	(62)
5.1 概述	(62)
5.2 裂隙进展模型	(62)
5.3 计算方法	(65)
5.4 计算结果	(67)
6 地下空间开发利用概述	(87)
6.1 地下空间开发利用的意义	(87)
6.2 国内外地下空间开发利用现状	(88)
6.3 我国城市地下空间开发利用存在的主要问题	(91)
6.4 我国城市地下空间开发利用的发展趋势	(93)
7 地下空间开发与规划	(95)
7.1 城市地下空间的类型	(95)
7.2 城市地下空间规划的任务和原则	(96)

7.3 城市地下空间规划的基本内容	(98)
7.4 城市地下空间规划的目标	(99)
7.5 城市地下空间布局与形态规划	(100)
8 地下空间工程技术	(109)
8.1 概述	(109)
8.2 调查技术	(110)
8.3 施工技术	(125)
9 地下空间防灾	(137)
9.1 概述	(137)
9.2 城市地下空间的主要灾害及其特征	(139)
9.3 城市地下空间的防灾特点	(143)
9.4 城市地下空间的防灾对策及发展趋势	(145)
参考文献	(149)

1 绪 论

1.1 研究的背景和意义

近年来,随着人类对地下水资源需求的快速增长,地下工程数量的增多和规模扩大,水污染问题的加剧,特别是对放射性核废料地下处置问题关注度的上升,对基岩裂隙介质中地下水运动、污染物运移机制及其模型方法的研究成为水文地质学研究的一个热点。然而,由于基岩裂隙介质具有强烈的非均质性,其间的地下水流动及溶质运移十分复杂。目前,无论是在机理研究方面还是在实际应用方面,其研究程度远不能满足人类的需要。越来越多的研究表明,建立在典型单元体(REV)意义之上的平均流速和平均溶质运移的研究方法不足以用来描述基岩裂隙水流动和其中的溶质运移情况,必须建立裂隙水的非连续介质模型。为此,加强基岩裂隙的基础研究,查明基岩裂隙形态(包括隙宽、张开角、进展方向和裂隙面粗糙度等)并进行评价具有十分重要的意义。

另一方面,随着我国经济的迅猛发展,大规模的水电建设方兴未艾。作为大型水电构筑物稳定性及安全性评价主要内容的裂隙岩体的渗流应力耦合分析,是建设工程前期研究的重要组成部分。1959年法国 Malpasset 拱坝初次蓄水即发生溃决,据 Bellier 及 Wittke 分析,失事的原因就在于拱坝受荷后在坝基某些部位产生应力集中,改变了岩体初始渗透特性,而集中的渗透体积力使拱座失稳。即渗流的应力耦合作用导致了惨剧的发生。事故发生后,渗流应力耦合作用引起了各国学者的重视。在裂隙岩体的渗流应力耦合分析方面,国内外岩土工程学者陈平、杨延毅、M. Oda 等进行了大量的研究工作,其研究方法主要有等效连续介质法和离散介质法。事实上,不论那种方法,都迫切需要对岩石裂隙的形态作出正确的评价。

1.2 国内外研究现状

由于基岩裂隙的空间分布极其复杂,到目前为止国内外研究基岩裂隙形态的文献很少见。前人的工作主要局限在以下几个方面:

(1)裂隙宽度研究。前苏联学者鲁佩涅伊特将隙宽点在概率纸上,发现隙宽在单个裂隙长度上的分布与正态分布一致;Snow(1967)通过大量的野外测量和压水试验数据分析后指出,岩体中裂隙的宽度服从对数正态分布;Sharp(1970)在实验室对单一裂隙进行了测量,也发现裂隙的宽度遵循对数正态分布。日本学者木村 强(1992)经研究后指出,裂隙的宽度未必都服从对数正态分布,其分布受裂隙两面啮合状态的影响,当裂隙的两面完全啮合时,隙宽服从 δ 函数分布。

(2)裂隙面粗糙度研究。许多学者对裂隙面的粗糙度提出了各种描述方法或参数,杉本文男采用自乘平均平方根粗糙度、中心线平均粗糙度、十点平均粗糙度等统计方法表示粗糙度。Barton 和 Choubey(1977)用 JRC(节理粗糙系数)表示裂隙表面的粗糙度,并定义了从 0 到 20 的十种 JRC 值的典型曲线。1978 年,该曲线被国际岩石力学协会接受为节理粗糙度的表示方法。Mandelbrot(1982)的分形几何学发表后,分形几何引起了岩石力学界的浓厚兴趣并在许多岩石力学问题的研究中取得了突破性进展,分形维数被用来表征裂隙面的粗糙度。

(3)研究方法。Wang Erqi(2001)首先用水压破碎装置制作人工裂隙,然后用三维轮廓形状测定系统(探针测量方式,探头半径 $25\text{ }\mu\text{m}$)按照设定的间距分别测量两裂隙面的表面高度,最后将分开的两裂隙面重新叠合在一起,并根据两裂隙面的表面高度计算了隙宽的空间分布。坂口清敏(2002)以查明裂隙面形状和隙宽分布的尺度效应为目的,使用非接触型的激光表面测量仪,测定了规模达 1 m 的裂隙表面形状以及间隙分布。

在国内,田开明、万力等对基岩裂隙的野外测量进行了详细的研究。在裂隙的方位测量方面,采取了用地质罗盘直接在地表露头或地下坑道测量每个裂隙面,通过做裂隙极点图确定各方向组裂隙倾向及倾角的办法;在裂隙隙宽测量方面,采用的是塞尺,并根据隙宽沿裂隙长度方向变化很大的情况,借鉴前人的研究成果将其分别按正态分布和对数正态分布进行了统计。在钻孔及岩心裂隙几何参数的测量方面,分别采取了测井和取定向岩心的办法。在微裂隙几何参数的观测方面,则采取了取定向岩心、制作铸体和铸体大薄片的办法。在裂隙面的粗糙度研究方面,徐正凡引入了绝对粗糙度、当量粗糙度和相对粗糙度;谢和平(1988,1997)全面介绍了裂隙面的分维量测原理和方法,讨论了岩石裂隙粗糙性的分形描述。王金安(1997)通过间接拉伸方法制作断裂面,用激光表面测量仪对断裂面进行无接触测量,并计算了断裂面的分形参数。

1.3 存在的主要问题

从国内外对基岩裂隙形态的研究现状来看,尚存在许多问题,主要的有:

(1)把基岩裂隙形态作为一个整体提出来研究的报道还没有见到。

(2)基岩裂隙宽度究竟服从哪种分布,影响因素是什么,还不十分清楚,有必要进一步研究。

(3)在目前比较流行的,用接触式机械探针或非接触激光表面测量仪分别测量两个裂隙面的表面高度,进而计算裂隙宽度的隙宽获取方法中,必须将裂隙的两个面分开一个一个地测量,这种测量方法不仅改变了裂隙的天然状态,而且测量后对两个裂隙面的复位十分困难。

(4)在对隙宽的研究中,没有人对隙宽与裂隙产生位置、尖灭位置的相关性进行考察。笔者认为,裂隙按部位有产生位置和尖灭位置之分,位置不同,隙宽大小、裂隙形态和裂隙面的粗糙性也不同。

此外,用机械探针沿岩石裂隙表面滑行测量时,容易插入表面,引起表面划伤及测量误差;用激光表面测量仪测量花岗岩等含石英矿物多的岩石裂隙时,由于在石英结晶部或劈理面上发生激光的透过、全反射等,不能正确地测定裂隙表面的高度。

1.4 研究内容与方法

本研究以裂隙的隙宽、张开角、进展方向和裂隙面粗糙度等形态特性量为主要研究内容,包括试验研究和应用研究两个方面。对前者采取的研究方法是,以包含整个裂隙(从裂隙发生位置开始至裂隙尖灭位置为止的全部裂隙)的花岗岩试样为研究对象,保持构成裂隙的两个面不分离(即保持裂隙的原始状态),采取对裂隙断面研磨以及用数字显微镜对整个裂隙的各个研磨断面摄影,并将上述照片输入计算机,使用日本斯卡拉股份公司 SDM-200 软件对裂隙剖面曲线上点的坐标进行测量的方法,获得裂隙面上任一点的空间坐标。在此基础上,利用空间解析几何理论求解裂隙宽度、张开角、进展方向、裂隙面粗糙度等裂隙形态特性量,实现了对基岩裂隙形态的测量和评价。在应用研究方面,根据试验获得的知识,尝试建立了裂隙进展模型,并介绍了地下空间开发利用的有关问题。

2 试样的制作及测量

本研究需要有从裂隙产生位置到终止位置直观明了的试样。因此,尝试使用各种岩石制作张性裂隙。在岩石种类的确定上,选定了砂岩、石灰岩、花岗岩和凝灰岩等。在裂隙的制作方法上,采用了“对带有楔形开口的试样压裂”和“榔头打击”等方法。但是,因为不能对裂隙进展进行有效的控制,所以采取在岩块中打孔、充填膨胀剂的办法制作裂隙。本研究中采用矿物颗粒比较均一、裂隙观察容易进行的稻田花岗岩作为试验岩石。为使裂隙更加明晰,在裂隙中充填红色树脂以便进行裂隙位置坐标的测量。

2.1 试样的制作

2.1.1 试样岩石的选取

关于试样岩石,以沽列砂岩、秋吉石灰岩、稻田花岗岩、登别融结凝灰岩为对象,对裂隙制作的难易、做成裂隙的鲜明度以及树脂充填的影响等进行了试验。结果表明,登别融结凝灰岩的空隙率高,裂隙受空隙制约,而且充填剂也受其影响。沽列砂岩是以岩块状从现场采取的,既存裂隙多。秋吉石灰岩的内部存在不均一的部分,不合适。本研究采用了物理性质等不太分散、裂隙面明晰、充填剂基本不向裂隙以外场所渗透的稻田花岗岩。表 2-1、表 2-2、表 2-3 表示了稻田花岗岩的粒径以及力学的物性值。

表 2-1 稻田花岗岩中主要矿物的直径

矿物名称	颗粒直径/mm
石英	0.5~0.3
斜长石	0.5~0.3
钾长石	0.5~0.2
黑云母	0.5~0.2

表 2-2 稻田花岗岩三个方向的 P 波速度

方向	P 波速度/(km·s ⁻¹)
<i>r</i> 轴	3.85
<i>h</i> 轴	4.07
<i>g</i> 轴	4.30

表 2-3 单轴引张和压缩试验的强度、临界应变和杨氏模量

抗张强度 /MPa	临界张应变 /%	杨氏模量 /GPa	抗压强度 /MPa	临界压应变 /%	杨氏模量 /GPa
6.26	0.038	20.2	148.4	0.4	47.4

2.1.2 张性裂隙面的制作

为了制作张裂隙试样,选取了尺寸不同的两种稻田花岗岩并使用安静膨胀剂。如图2-1所示,左侧岩块A的尺寸为长121.8 mm,宽116.3 mm,高66.7 mm,断面中央被直径10 mm的钻孔贯通。岩块B的尺寸如图2-2左侧所示,长105 mm,宽60 mm,高40 mm,断面中央开了一个直径10 mm、深20 mm的钻孔。使用金属钻头制作钻孔,孔内充填安静膨胀剂制作张裂隙面。安静膨胀剂是为了解决膨胀作业的危险、振动、噪声等问题而研制出来,安静且计划性地使裂隙产生、岩石破碎的材料。膨胀剂的量(充填膨胀剂钻孔的直径)、岩块大小以及膨胀压的最大发生时间与裂隙进展状态有密切的联系。在这里,将安静膨胀剂放入钻孔后,肉眼观察裂隙的进展,裂隙长度达到预定值时立即取出钻孔内的膨胀剂,控制裂隙进展。但是,在实施控制过程中,岩块完全破裂成两半的情况较多。这里仅以岩块没有完全分离,即裂隙的尖端停留在岩块内的试样为对象。因而,从裂隙的产生位置到尖灭位置开展测量是可能的。

图2-1、图2-2的左侧分别表示了由岩块A、B制作的裂隙情况。可以看到,产生的裂隙与岩块的底面形成大体平行的裂隙对,从钻孔的孔壁开始向深部扩展。

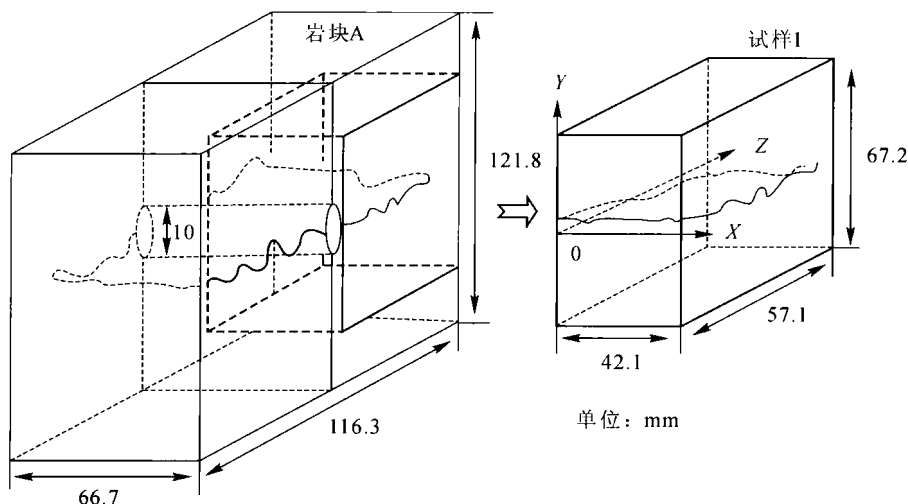


图2-1 产生于岩块A中钻孔旁边的张性裂隙示意图以及由此制作的试样1的尺寸和形状

2.1.3 向裂隙充填树脂

对于制作的裂隙,为抑制研磨时裂隙的扩大、防止岩粉的充填以及消除裂隙边界的不鲜明,向裂隙中充填了混入红色染料、黏性较低的树脂。本试验中使用的树脂为常温重合型树脂,改变硬化剂和速凝剂的混合比,可以调整树脂的固化时间。

被树脂充填的试样按照图2-1、图2-2右侧显示的尺寸加工,成为测量用试样。这里将由岩块A制作的试样称为试样1,由岩块B制作的试样称为试样2。众所周知,花岗岩内部存在潜在的弱面。试样1中制作的裂隙面与Rift面平行。然而,对于试样2,由于丧失了

观察弱面的机会,其关系不明。

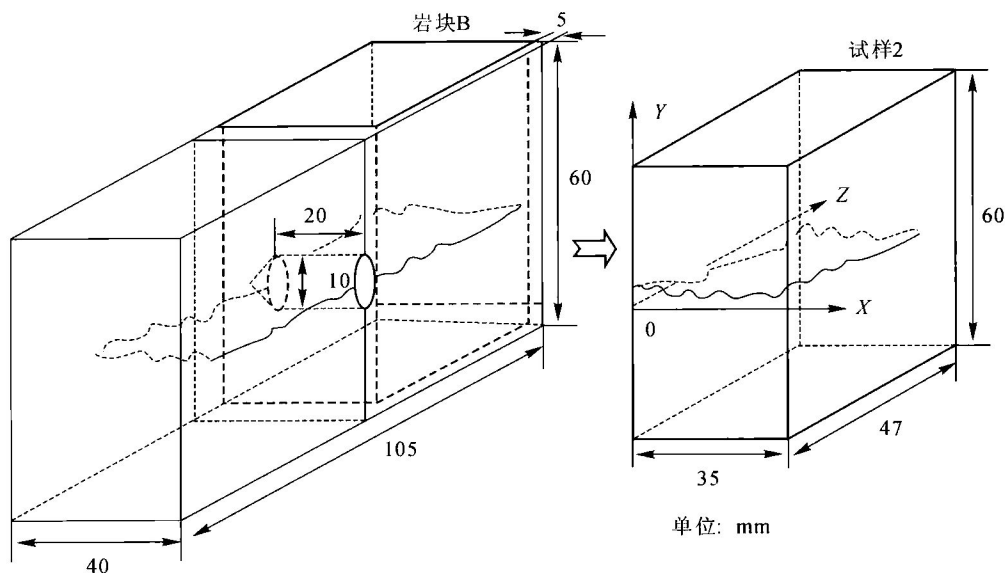


图 2-2 产生于岩块 B 中钻孔旁边的张性裂隙示意图
以及由此制作的试样 2 的尺寸和形状

2.2 试验顺序及坐标计测方法

对试样 1 及试样 2, 分别设定如图 2-1、图 2-2 右侧所示的坐标系。测量装置以及计测顺序表示在图 2-3 中。首先, 用 30 倍的数字显微镜观察包含裂隙的断面($X-Y$ 面), 对每一个断面照数枚照片。之后, 将照片传入计算机, 使用 Turbo CAD 软件计测裂隙的位置坐标。计测结束后, 再次研磨试样的 $X-Y$ 面。对于新的断面, 重复上述的摄影、计测, 得到从裂隙产生位置到尖灭位置的位置坐标数据。试样 1、试样 2 的计测断面分别为 24 和 21 个。

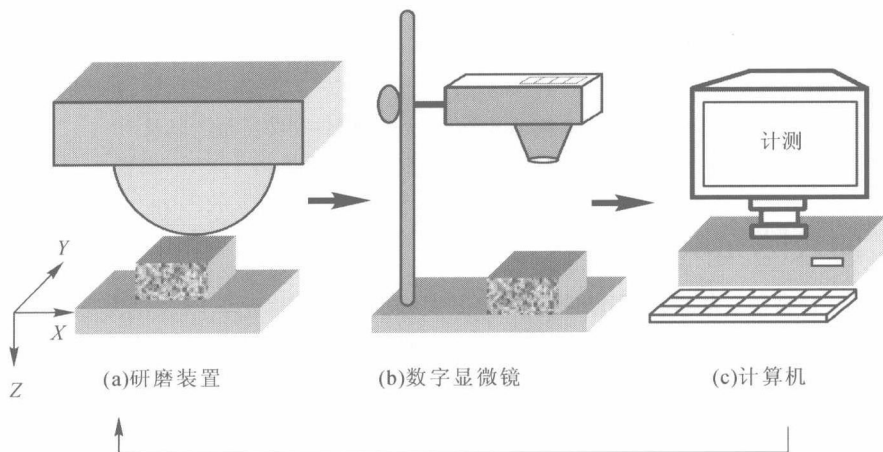


图 2-3 试验装置和观测过程示意图

关于各断面 X 轴方向的计测间隔,根据矢野隆夫等人的报告,“最好在计测对象裂隙全长的 $1/30$ ”,确定为 0.4 mm ,没有考虑构成花岗岩矿物的尺寸和形状。另一方面,关于 Z 轴方向的研磨厚度,考虑到表面研磨装置的性能及数据量,这里确定为 2 mm 。此外,关于计测精度,由于用微米计计测研磨厚度,因此精度也在此范围。

图 2-4 表示的是用数字显微镜拍摄的裂隙照片的一例。红色树脂将裂隙完全充填,裂隙面边界能够明晰地观察。此外,裂隙有两个面,这里将 y 坐标值大的一侧的面叫作上部裂隙面,小的一侧的面叫作下部裂隙面。

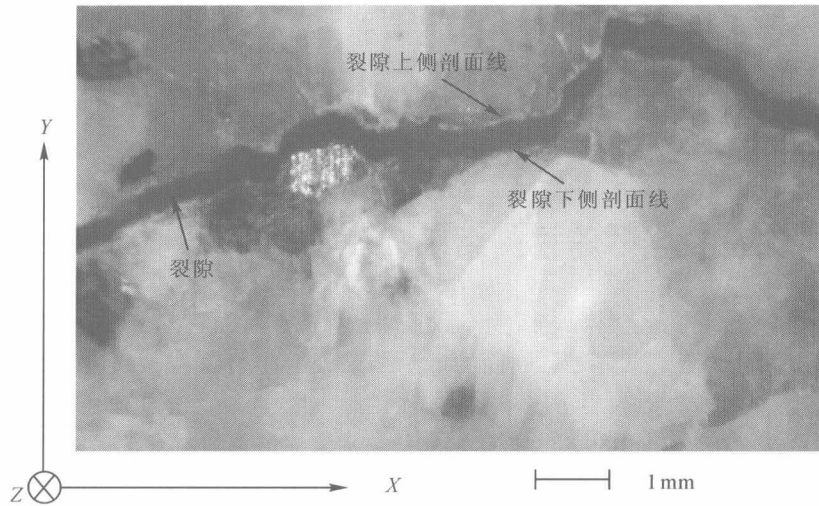


图 2-4 经树脂充填裂隙断面的例子

为将上述用 Turbo CAD 计测的位置坐标换算成实际尺寸,使用了 SMD-200 照片解析及测定软件。另外,显微镜观察时,在对象裂隙的周围有时也存在更小的支裂隙,这里仅以主裂隙为计测对象。

3 裂隙计测结果及三维表示

根据第二章叙述的方法得到了各断面上下裂隙面的位置坐标,以此计测结果为基础,在研究裂隙面的剖面形态及其上下裂隙面关联性的同时,尝试进行了计测裂隙面全体的三维表示。

3.1 裂隙面位置坐标的计测结果

裂隙面位置坐标的测定是以与钻孔轴平行的 $X-Y$ 断面为对象的。以大体上的等间隔设定测线并进行计测。试样 1 各断面的计测结果表示在图 3-1~图 3-23 中,图号数字越大代表离钻孔轴位置越远。

裂隙面与断面(研磨面)的交线称为交面线。因为一条裂隙有上部裂隙面 and 下部裂隙面两个面,所以在不同的断面(研磨面)上,均有两条交面线,分别称为上、下交面线。以任意一条交面线为准移动另一条交面线发现,虽然存在间隙,但两条交面线非常类似。实际上,上、下交面线的 Y 坐标之差即是该断面的裂隙宽,这里称为视裂隙宽。从图 3-1~图 3-23 可以看出,各断面的视裂隙宽度变化不大。接下来,我们研究与钻孔轴垂直的断面方向上、下交面线的情况,其结果表示在图 3-24~图 3-33 中。随着 Z 值增大,裂隙向尖灭方向靠近。如图所示,沿着 Z 轴正方向,即随着从钻孔壁面向深部靠近,视裂隙宽度渐渐地减小。

图 3-34~图 3-52 表示的是试样 2 与钻孔轴平行各断面交面线的计测结果。在这种情况下,上下交面线,或者说上下裂隙面也十分类似。 X 的值越大,越接近自由面,视裂隙宽度随着向自由面接近有变大的倾向。图 3-53~图 3-57 表示的是与钻孔轴垂直断面,即 $Y-Z$ 面的上下交面线,它们的变化特点与图 3-24~图 3-33 非常相似,随着向裂隙尖灭部接近,视裂隙宽度也渐渐地减小。此外,和与钻孔轴平行的断面相比,与钻孔轴垂直的断面中曲线的凹凸变化较小,这是因为观测点少造成的。

3.2 裂隙面的三维表示

为把握裂隙面全体的凹凸形态,以各断面的计测位置坐标为基础,尝试进行了裂隙面的三维表示。图 3-58 和图 3-59 分别是试样 1 的上、下裂隙面,图 3-60 和图 3-61 分别是试样 2 的上、下裂隙面。从图可知,裂隙面全体呈现复杂的凹凸形态。与试样 1 相比,试样 2 的裂隙面高低差稍微大一些,但均在 5 mm 以内。此外,裂隙面高的区域和低的区域之不同虽然被清楚地区分,但其与钻孔位置等的相关性尚看不出来。

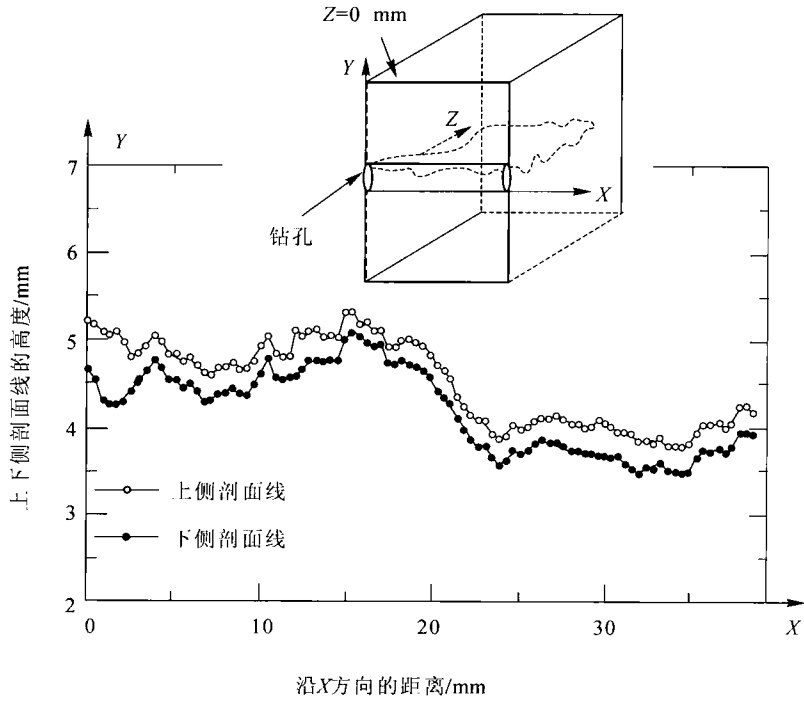


图 3-1 在 $Z=0\text{ mm}$ $X-Y$ 平面内的裂隙剖面(试样 1)

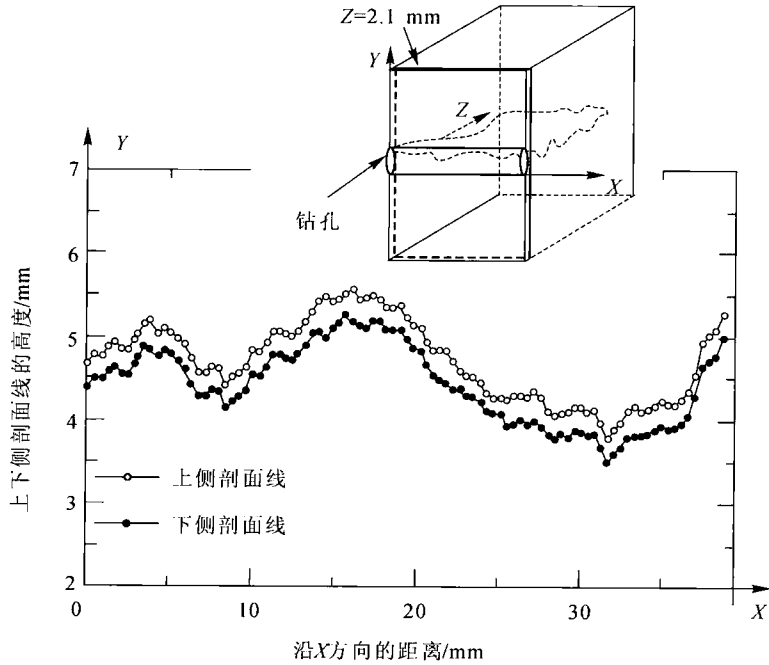


图 3-2 在 $Z=2.1\text{ mm}$ $X-Y$ 平面内的裂隙剖面(试样 1)

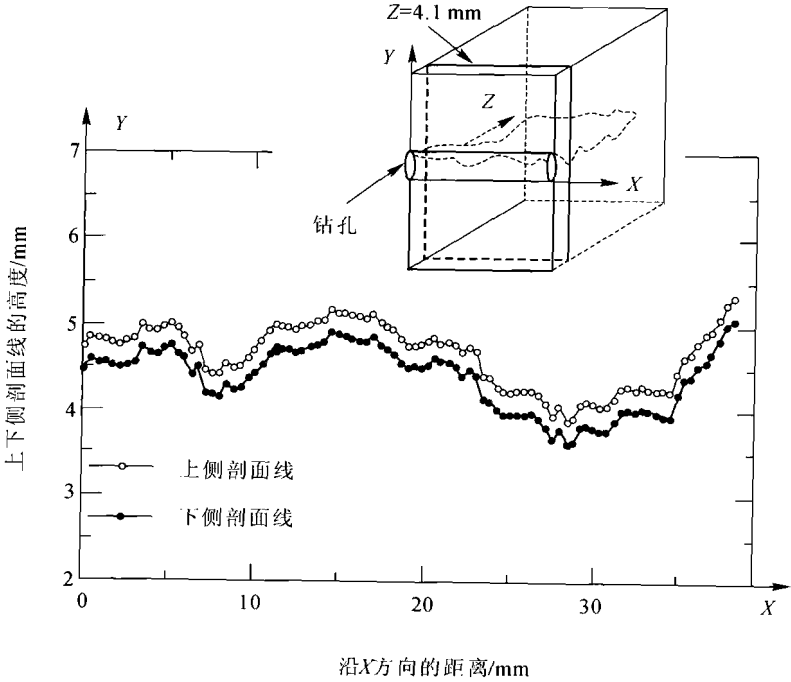


图 3-3 在 $Z=4.1\text{ mm}$ $X-Y$ 平面内的裂隙剖面(试样 1)

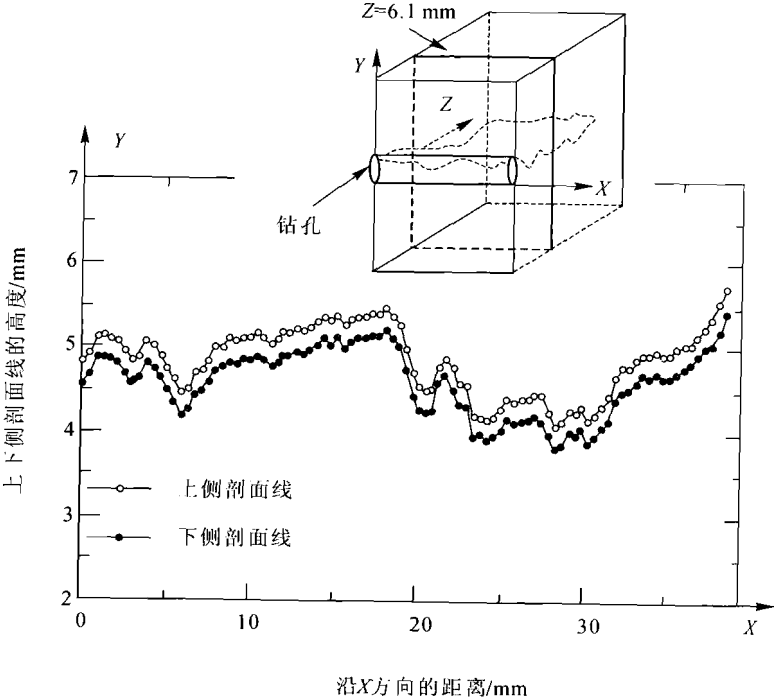


图 3-4 在 $Z=6.1\text{ mm}$ $X-Y$ 平面内的裂隙剖面(试样 1)

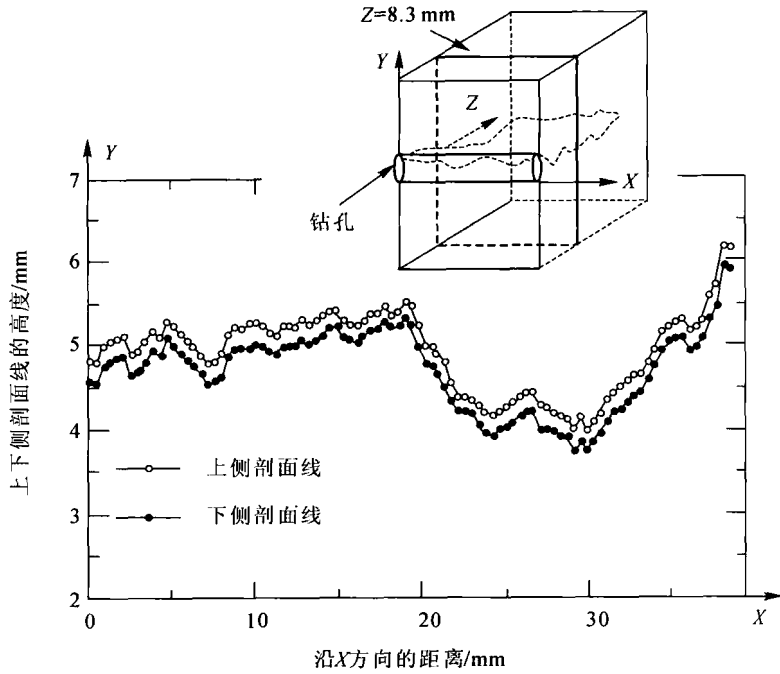


图 3-5 在 $Z=8.3\text{ mm}$ $X-Y$ 平面内的裂隙断面(试样 1)

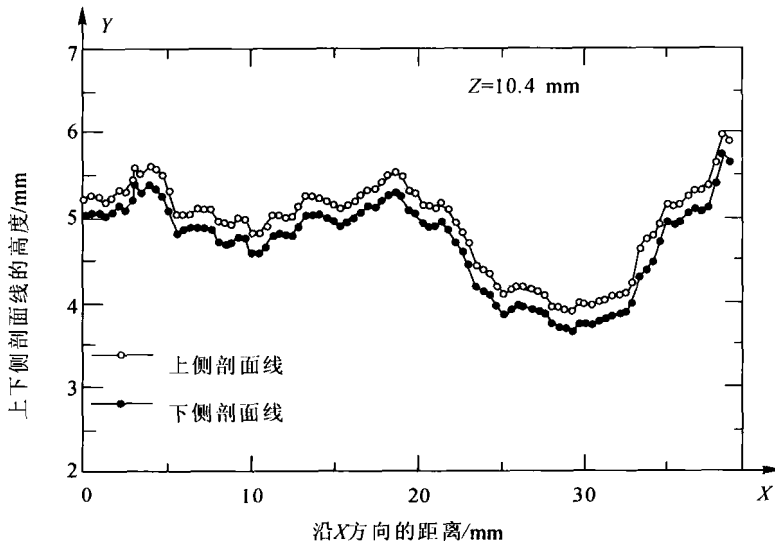


图 3-6 在 $Z=10.4\text{ mm}$ $X-Y$ 平面内的裂隙断面(试样 1)