

- 理论成果获国家教育部科技进步二等奖
- 应用成果获中国有色金属工业总公司科技进步三等奖

工程岩体 节理力学

夏才初 孙宗颀 著

同济大学出版社

1023104

工程岩体节理力学

夏才初 孙宗颀 著



同济大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

工程岩体节理力学/夏才初,孙宗颀著. —上海:同
济大学出版社,2002.5
ISBN 7-5608-2402-1

I. 工… II. ①夏…②孙… III. 岩土工程—节理
—岩体力学 IV. TU45

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 017334 号

工程岩体节理力学

作 者 夏才初 孙宗颀 著

责任编辑 郁 峰 责任校对 徐春莲 装帧设计 陈益平

出 版 同济大学出版社
发 行

(上海四平路 1239 号 邮编 200092 电话 021-65985622)

经 销 全国各地新华书店

印 刷 崇明晨光印刷厂印刷

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 10.75

字 数 275000

印 数 1—1000

定 价 20.00 元

版 次 2002 年 5 月第 1 版 2002 年 5 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 7-5608-2402-1/TU·435

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换

前 言

节理力学是研究岩体中节理的强度、变形和渗流等物理力学性质及其对岩体力学性质和岩体工程稳定性的作用规律的岩体力学分支学科,它从岩体经历自然和人类活动后含有众多的节理、裂隙等不连续结构面这一事实出发,从研究节理的力学性质入手,运用不连续面研究的手段、理论和方法来研究岩体力学理论和岩体工程的稳定性问题。

节理是岩体断裂后断裂两侧没有位移或仅有微量位移的一种断裂构造,在研究方法上,研究节理的力学性质、表面形态特征和渗流特征等物理力学性质的概念、理论和方法也适用于其他岩体结构面,因而,工程岩体节理力学的“节理”可泛指各种岩体的结构面和宏观裂隙。

岩体力学一直借用弹塑性连续介质力学理论来解决岩体工程问题,但岩体中存在着众多的节理裂隙等不连续面,这些不连续面对岩体的力学性质和岩体工程的稳定性起着重要的控制作用。随着人们认识问题的深入和技术水平的提高,他们已不满足于只用弹塑性连续介质力学理论来解决岩体工程问题,为了更好地解决岩体工程中岩石冒落、边坡滑移、岩层移动、渗流等问题,各种数值计算中引入节理单元、离散元法、块体理论、非连续变形分析和流形元法等研究岩体工程不连续性的数值方法相继出现,并得到了广泛的应用。然而,这些研究都必须在研究节理力学性质的基础上,以节理的几何和物理力学性质参数作为基本的输入参数。国际上对岩石节理力学性质的研究非常重视,1985年,国际岩石力学学会成立了岩石节理和断层力学专门委员会,并每两年召开一次国际岩石节理和断层力学会议,国际岩石力学学会的权威刊物《International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts》几乎每期上都有关于岩石节理物理力学性质研究的论文。与此相反,国内除了进行一些常规的室内和现场节理力学性质试验外,在这一方面少有深入的研究,尤其是对影响节理力学和渗流性质的主要因素的节理表面形态特征的研究基本处于定性描述的状态,大大影响了我国在该领域的研究水平。本书系统地论述了对岩体工程稳定性起控制作用的节理的表面形态特征和力学性质,内容包括节理表面形态测试仪器和技术、节理表面形态及其数学描述、节理闭合和剪切试验技术、节理闭合和剪切变形本构关系、节理剪切强度准则和剪切机理、节理渗流性质及其力学耦合性质等。本书以试验研究为基础,基本形成了数学推演、仪器研制、测试技术、试验研究、数值模拟和理论建模的较完整的工程岩体节理力学研究体系,是作者参与完成国家教委博士点基金项目(07170776)和主持完成的国家自然科学基金项目(49402037)的总结,同时本书也是上海市重点学科结构工程学科的建设内容之一。从该分支学科的系统性和完整性出发,也引用了不少国内外学者公开发表的资料,在此深表谢意。工程岩体节理力学理应包括上面已经述及的各种不连续性的数值计算方法,但受作者水平和经历所限,本书仅侧重于岩体节理力学性质的概念、理论和试验方法的研究,而且,书中可能还存在一些不足和错误之处,恳请读者批评指正。

作 者

2002年5月

目 录

前 言

第一章 节理概论	(1)
第一节 结构面的成因及地质特性	(1)
一、结构面的地质成因及其特性	(1)
二、节理的力学成因及其特征	(1)
第二节 节理的状态及其描述	(3)
一、节理面的结合和充填特征	(3)
二、节理面的形态特征及其描述	(4)
第二章 节理表面形态的测试仪器和测试方法	(6)
第一节 节理表面形态的室内测试仪器和测试方法	(6)
一、光学方法	(6)
二、机械触针式表面形态仪	(7)
三、RSP-I 型智能岩石表面形态仪	(8)
四、测试方法和数据修正	(11)
第二节 节理表面形态的现场测试仪器和测试方法	(13)
一、圆盘倾斜仪法	(13)
二、摄影测量法	(14)
三、剖面线法	(14)
四、现场分段测量方法	(16)
第三章 节理表面形态的数学描述及特征研究	(18)
第一节 节理表面形态的特征参(函)数	(18)
一、表面形态的高度特征参(函)数	(18)
二、表面形态的纹理特征参(函)数	(21)
三、节理表面形态的分形	(24)
四、表面形态特征参(函)数之间的关系	(26)
第二节 节理表面形态特征的理论研究	(26)
一、粗糙度和起伏度形态特征的数学描述	(27)
二、粗糙度和起伏度形态特征函数的组合	(29)
三、节理表面形态特征参数的性质	(30)
第三节 节理表面形态数值模拟	(33)

一、节理表面形态数值模拟的原理和程序·····	(33)
二、节理表面形态参数性质的数值模拟研究·····	(34)
第四节 节理表面形态特征的实测研究·····	(35)
一、实际节理表面形态的一般特征·····	(35)
二、岩石表面形态中的起伏度和粗糙度的分离理论·····	(36)
第四章 节理法向闭合性质和闭合模型·····	(40)
第一节 节理试样的采集与制备·····	(40)
一、天然节理的采集和制备·····	(40)
二、人工节理的采集和制备·····	(41)
第二节 节理闭合试验·····	(42)
一、节理闭合试验技术·····	(42)
二、节理闭合变形性质·····	(44)
第三节 节理闭合变形经验公式·····	(46)
一、节理闭合变形经验公式综述·····	(46)
二、节理的组合形态特征及初始开度·····	(48)
三、考虑节理组合形态特征参数的闭合变形经验公式·····	(50)
第四节 节理闭合模型·····	(52)
一、节理闭合模型综述·····	(52)
二、节理组合形态含起伏度的节理闭合模型·····	(54)
三、节理闭合变形模型的试验验证·····	(63)
四、节理闭合变形模型的比较·····	(65)
第五章 节理剪切试验及节理剪切本构关系·····	(68)
第一节 节理剪切试验原理和设备·····	(68)
一、剪切试验原理·····	(68)
二、剪切试验方式·····	(73)
三、直剪试验仪·····	(75)
四、直剪试验仪计算机辅助测试(CAT)系统·····	(80)
第二节 节理剪切变形性质及本构关系·····	(84)
一、节理剪切曲线及其经验公式·····	(84)
二、节理本构关系·····	(87)
第六章 节理剪切强度·····	(94)
第一节 节理剪切强度公式综述·····	(94)
一、Patton 剪胀公式和 Jaeger 负指数剪切强度公式·····	(94)
二、Ladanyi 和 Archambault 剪切强度公式·····	(97)
三、Barton 节理剪切强度经验公式·····	(98)
四、规则起伏度节理的剪切强度公式·····	(102)

五、Gerrard 的节理剪切强度总准则	(104)
第二节 考虑起伏度和粗糙度的节理剪切强度公式	(108)
一、理论分析	(108)
二、试验验证	(109)
第三节 节理剪切强度的影响因素	(110)
一、充填特征的影响	(111)
二、节理强度的尺寸效应	(112)
三、加载速率的影响	(115)
四、温度和湿度的影响	(116)
五、节理力学性质的时间效应	(119)
第四节 用节理表面形态参数预估其剪切强度	(120)
一、节理的模糊综合评判分级及摩擦系数预估	(120)
二、用节理表面形态参数预估其剪切强度的其他方法	(124)
第七章 节理的摩擦和剪切机理	(125)
第一节 节理摩擦机理	(125)
一、节理稳滑摩擦机理	(125)
二、节理粘滑摩擦机理	(130)
第二节 节理剪切模型	(133)
一、Yamad 剪切模型	(133)
二、孙宗荫剪切模型及其数值解法	(137)
第八章 节理的渗流及其力学耦合性质	(141)
第一节 渗透压力及其对节理的力学作用	(141)
一、静水压力和渗透压力	(141)
二、有效应力定律	(142)
三、渗透压力引起的节理壁面变形	(144)
第二节 节理渗流的水力学模型	(145)
一、等开度光滑节理水力学模型	(145)
二、粗糙节理水力学模型	(147)
第三节 节理渗流与应力的耦合	(149)
一、间接耦合	(149)
二、直接耦合	(150)
参考文献	(155)

第一章 节理概论

第一节 结构面的成因及地质特性

岩体与一般介质的重大差别在于它是由结构面纵横切割而具有一定结构的多裂隙体,岩体中的结构面对岩体的变形和破坏起着控制作用,结构面的地质和力学特性与其成因及其形成过程密切相关,只有以地质成因研究为基础,认识结构面自然特性,才能掌握结构面的地质特点,从而研究其力学特性。

一、结构面的地质成因及其特性

结构面是岩石中没有或具有低抗拉强度的力学不连续面的总称^[1],它是节理、弱层面、片理面、弱面等很多类型结构面的总术语。岩体内结构面的地质成因类型有三种^[2]:

(1) 原生结构面 主要指岩体形成过程中形成的结构面和构造面。如岩浆岩体冷却收缩时形成的原生节理面、流动面;与早期岩体接触的各种接触面;沉积岩体内的层理面、不整合面;变质岩体内的片理、片麻理构造面等。

(2) 构造结构面 它是在岩体形成后的地壳运动过程中在岩体内产生的各种破裂面,如断层面、错动面、节理面和劈理面等。

(3) 次生结构面 指在外营力作用下产生的风化裂隙面、卸荷裂隙面等。

构造结构面是岩体内最主要的结构面,它们彼此有一定的内在联系。

原生结构面除岩浆岩中的原生节理面外,一般多为非开裂式的,其结构面有一定的联结力。

次生结构面多为张裂隙,其结构面不平坦,产状不规则,大多为不连续的,它常使有效应力一致的一组或几组原生结构面和构造面显现为开裂式的,这种现象在边坡中极常见,但它发育的深度并不大。

二、节理的力学成因及其特征

根据构造地质学,岩石在断裂过程中产生的构造统称为断裂构造。凡断裂两侧的岩石沿断裂面没有位移或仅有微量位移的断裂,称为节理;如断裂两侧的岩石沿断裂面发生了较大位移,则称断层。断裂构造(节理和断层)是岩体中发育最广泛的一种地质构造。

任何节理都是在一定的条件下受了力的作用而产生的,从应力角度考察,直接形成节理的应力只有两种:一是剪应力,一是张应力。由此,根据节理的力学成因,可将其分为剪节理和张节理两种。

1. 剪节理

剪节理是由剪切面进一步发展而成,理论上,剪节理应成对出现,自然界里的实际情况也经常如此,不过,两组剪节理的发育程度可以不等。剪节理的峰值摩擦角一般为 $30^{\circ}\sim 50^{\circ}$,残余摩擦角一般为 $20^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 。剪节理具有如下主要特征:

(1) 剪节理产状较稳定,沿走向延伸较远,当穿过岩性差别显著的不同岩层时,其产状可能发生改变,反映岩石性质对剪节理方位有一定程度的控制作用。

(2) 剪节理面平直光滑,这是由于剪节理是剪破(切割)岩层面而不是拉破岩层面而形成的。在砾石、角砾岩或含有结核的岩层中,剪节理同时切过胶结物及砾石或结核,由于沿剪节理面可以有少量的位移,因此,常可借被错开的砾石确定其相对移动方向。

(3) 剪节理面上常有剪切滑动时流下的擦痕、摩擦镜面,但由于一般剪节理沿节理面相对移动量不大,因此,必须仔细观察才可察觉。擦痕也可以用来判断节理两侧岩壁相对移动的方向。

(4) 剪节理一般发育较密,即相邻两节理之间的距离较小,常密集成带,但节理间距的大小又同岩性与岩层厚度有着密切关系,硬而厚的岩层中的节理间距大于软而薄的岩层,同时,剪节理发育的疏密还与应力作用情况有关。

(5) 剪节理常呈现羽列现象,往往一条剪节理经仔细观察并非只有单一的一条节理,而是由若干条方向相同、首尾相接的小节理呈羽状排列而成。

(6) 剪节理两壁之间的距离(即张开度)较小,常呈闭合状,但后期的风化或地下水的溶蚀作用可以扩大节理的张开度。

擦痕是剪节理和断层两侧的岩壁相互滑动和摩擦留下的痕迹,擦痕常表现为一系列细而密的、较均匀且彼此平行的线条,或为一系列相间排列的擦脊和擦槽。它是剪节理和断层运动过程中由被压碎的岩石细屑在岩层面上碾磨刻划而成的。仔细观察,可以见到擦痕的一端粗而深,另一端细而浅。在硬脆岩石中,断层面被强烈摩擦后可以形成光滑的镜面,称摩擦镜面,其上常覆以炭质、硅质、铁质或碳酸盐质薄膜。

利用擦痕判断剪节理和断层两侧岩壁相对动向的方法很多,可用手摸,以较光滑方向指示对盘的动向,但仅靠手的感觉作出判断并不十分可靠;也可用以自粗而深的一端至细而浅的一端指示对盘的动向,但擦痕两端的粗细深浅有时并不明显。因此,比较可靠的方法是利用擦痕面上出现的阶步和反阶步。阶步是顺擦痕方向的局部阻力的差异或因剪节理和断层间隙性运动的顿挫而形成的垂直于擦痕的小台阶,其形态特征是将放平后在剖面上呈不对称的缓波状曲线,宛如风成波痕,可用较陡坡的倾向指示对盘的相对动向。反阶步形态与阶步大致相仿,但二者的显著区别是反阶步的缓坡和陡坡并不是以圆滑曲线连续过渡,而是以开口的折线相连接的。

2. 张节理

张节理是由于在一个方向的拉应力超过了岩石的抗拉强度,因而在垂直于张应力方向上产生的裂割式的破裂面。张节理的峰值摩擦角一般为 $40^{\circ}\sim 50^{\circ}$,残余摩擦角一般为 $30^{\circ}\sim$

45°。张节理具有以下主要特征：

(1) 张节理产状不甚稳定,往往延伸较短,单个节理短而弯曲,若干张节理则常以侧列关系出现。

(2) 张节理面粗糙不平,发育在砾岩中的张节理往往围绕砾石而过。在平面上观察张节理,虽可看出总的走向,但却明显呈不规则的弯曲状或规则锯齿状,后者是追踪先形成的两组共轭剪节理面形成的,故又称追踪节理。

(3) 张节理面没有擦痕。

(4) 张节理一般发育稀疏,节理间距较大,而且即使局部地段发育较多,也是稀疏不均,很少密集成带。

(5) 张节理两壁之间的距离较大,呈开口状和楔形,并常被岩脉充填。

第二节 节理的状态及其描述

一、节理面的结合和充填特征

节理面按其结合特征可分为闭合的、张开的和充填的(见图 1-1)三种。闭合节理又分为弱胶结的和压力愈合的两类,前者如层理、片理,常易开裂;后者常在高地应力作用下愈合成假胶结状态,因而又称隐节理,这些节理在风化、卸荷和振动等外力作用下又可开裂,成为显节理,例如,爆破法开挖隧洞和边坡时,洞壁和边坡的节理增加,河谷斜坡上常见的倾向河谷的缓倾角节理均是由于这一原因。

节理面的张开度是张开节理两岩壁间的垂直距离,介于两岩壁间的空间充满水或空气。两壁间含有充填物的节理称充填节理,充填节理两岩壁间的垂直距离称为充填节理面的宽度。国际岩石实验室和现场试验标准化委员会建议,按节理的张开度用表 1-1 所列的术语描述节理面的结合特征^[1]。在研究节理的力学性质时,通常将节理分成耦合的和非耦合的两类,如图 1-2 所示。

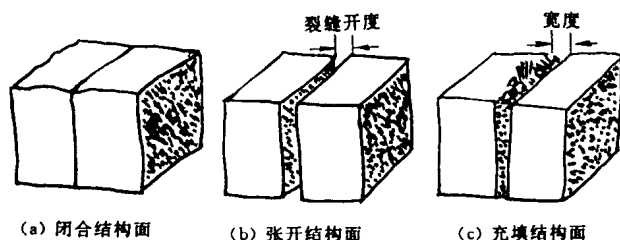


图 1-1 节理面的结合特征

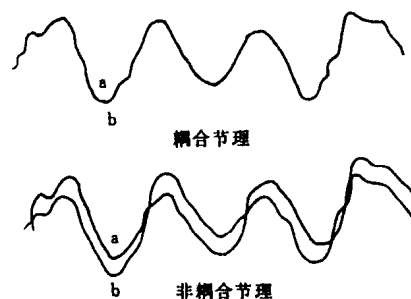


图 1-2 耦合节理与非耦合节理

表 1-1 节理面结合特征的术语及描述

节理张开度	描 述	结合特征
$<0.10\text{mm}$	很 紧 密	闭合节理面
$0.10\sim0.25\text{mm}$	紧 密	
$0.25\sim0.5\text{mm}$	部分张开	裂开节理面
$0.5\sim2.5\text{mm}$	张 开	
$2.5\sim10\text{mm}$	中等宽的	
$>10\text{mm}$	宽 的	张开节理面
$10\sim100\text{mm}$	很 宽 的	
$100\sim1000\text{m}$	极 宽 的	
$>1000\text{m}$	似 洞 的	

节理的充填特征主要是指节理的充填物性质和充填厚度等。节理内的充填物有胶结的和非胶结的两种。胶结充填节理的强度通常不低于岩体的强度,因此,它不属于软弱面,胶结充填分硅质、铁质、钙质和岩脉充填等类型。非胶结充填节理内的充填物主要是泥质材料,非胶结充填物中含膨胀性的不良矿物(如蒙脱石、高岭石、绿泥石绢云母、蛇纹石、滑石等)较多时,其力学性质最差;含非润滑性质的矿物(如石英和方解石等)较多时,其力学性质较好。充填物的性状主要是指充填物粒度或颗粒大小、含水量、渗透系数、超固结比等。充填物的厚度可分为以下四种类型^[3]:

(1) 薄膜充填 它是节理面岩壁附着一层 2mm 以下的薄膜,由风化矿物和应力矿物等组成,如粘矿物、绿泥石、绿帘石、蛇纹石、滑石等。虽然很薄,但由于充填矿物性质不良,也明显地降低了节理面的强度。

(2) 断续充填 充填物的厚度小于节理面形态高差,充填物在节理内不连续,形成断续充填,其力学性质取决于节理面的形态及充填物和岩壁岩石的力学性质。

(3) 连续充填 充填物的厚度稍大于节理面形态高差,其力学性质取决于充填物和岩壁岩石的力学性质。

(4) 厚层充填 充填物厚度大到数十厘米到数米,形成一个软弱带,其破坏有时表现为岩体沿接触面的滑移,有时则表现为软弱带本身的塑流破坏。

二、节理面的形态特征及其描述

节理的表面形态是节理表面空间展布的几何属性,节理的表面形态可按其规模大小分为起伏度和粗糙度两类。起伏度表征大规模的起伏,有起伏度的节理面如果互相镶嵌和接

触,在发生剪切位移时,起伏度不致被剪坏,节理面就要产生膨胀。粗糙度表征小规模的不规则凹凸点,在发生剪切位移时,它们将被剪坏。但在节理面岩壁强度高或所施加的应力较低时,也可能不被剪坏而产生剪胀。起伏度可分为平面形的、波浪形的和台阶形的三种;粗糙度可分为粗糙的、平坦的和光滑的三级。天然节理面的表面形态是起伏度和粗糙度的不同组合。图 1-3 所示为国际岩石力学学会建议的三种起伏度与三级粗糙度组合而成的九类不同的节理表面形态^[1]。

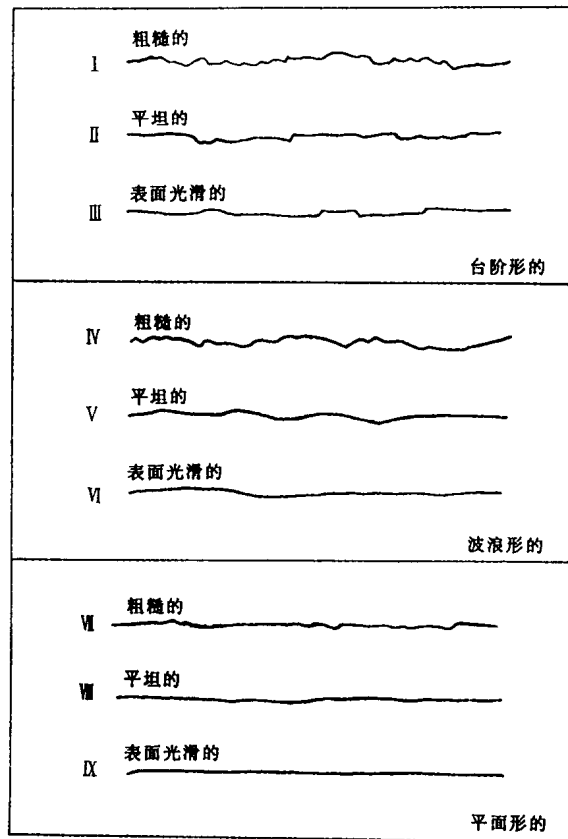


图 1-3 国际岩石力学学会建议的节理表面形态类型

节理的表面形态对其剪切强度等力学性质有极其重要的影响,对于没有发生位移和互相镶嵌的未充填节理,尤其如此。但节理的表面形态的重要性随节理张开度、充填物厚度、初始位移的增加而降低。

第二章 节理表面形态的测试仪器和测试方法

节理对岩体的力学性质起着主要的支配作用,而节理的表面形态与其力学性质密切相关。在节理的闭合和剪切的理论模型和经验公式中,只有包含节理表面形态参数才能正确反映节理的实际力学行为。因此,对节理表面形态进行精确测定,是研究节理变形和强度的力学机理、进而建立相应的模型的先决条件。

在工程上,对不同规模的节理及其不同级别的表面形态都感兴趣,因此,对不同规模节理的表面形态的测试方法都有报导^[4]。总结各种表面形态测试手段,主要可分为光学方法和机械方法两种,前者可以测出表面的三维空间形态,但它高差量程小,且费时;后者只能进行剖面线测量,然而对一组剖面线测得的结果进行组合是可以描述节理的三维形态的^[5]。

岩石表面形态起伏大,变化范围广,远比机械零件表面的形态复杂,所以,迄今没有公认的描述岩石表面形态特征的统一指标,这就要求岩石表面形态仪既能显示和记录通常的表面形态参数,也能较精确地记录岩石表面形态的剖面线,以便进一步分析研究。

第一节 节理表面形态的室内测试仪器和测试方法

一、光学方法

1. 立体显微镜^[4]

对于手标本尺寸的节理试件,可使用立体显微镜测量其表面形态。测量时,将试件置于显微镜物镜下,上下移动显微镜光学系统中的浮标,同时,节理试件平行于参考面移动,以保持浮标在该表面上,用函数记录仪记录水平运动和垂直运动,即可获得节理表面形态的轮廓性。其放大倍数可为 0.5~20 倍,记录仪上记录的剖面线最长可达 25cm,当放大倍数为 10 倍时,记录精度优于 0.1mm。

2. 激光形态仪^[6]

该仪器由激光探头、连接部件、显示部件、横向移动悬臂梁、多伺服控制器、岩芯平台和微机组成。用该系统测量是对被测表面上的一系列平行扫描线进行三维数值化,取 x 轴平行于扫描线方向,取 y 轴正交于 x 轴, z 轴垂直于被测表面的平面,即为高度方向。高度 z 是以激光探头的机械零点为原点的。测量时,先定好表面上的测量原点, x, y 方向的扫描线组和采样间隔;当探头沿 x 方向移动时,测量距表面的距离;测到一条扫描线的末尾时,在 y 方向步进一个位置,开始测量沿 x 方向的新扫描线,整个过程是自动的。扫描最大面积为 $30\text{cm} \times 30\text{cm}$,所用探头的量程为 $20\text{mm}(\pm 10\text{mm})$,分辨率为 $5\mu\text{m}$,在 x, y 方向的采样间隔均取 1mm。

由于激光形态仪采用半导体激光束的非接触式测量系统,测量时,对表面没有任何损害,也不存在探头被表面上突点卡住的现象,这是常规仪器所难于达到的。

3. 近距离摄影测量^[7]

近距离摄影测量是采用一个与微机相连的摄像机,微机内需配备一块图像处理板,从 CCD 摄像机产生的图像通过图像处理板由微机进行处理。

用一个标有“+”号(控制点)的平板作为控制场,岩石节理试样放置在平板的上面。为了增强整个节理表面上明暗度的均匀性,以便于点之间的比较处理,将一个坐标方格网图案投射到节理表面上,用 CCD 摄像机从两个不同的位置拍两个图像,节理表面上的空间坐标就能计算。近距离摄影测量的基本内容,如数据采集、数据还原、图像数值化处理等,近来已趋成熟,根据图像处理的需要可开发专用的程序。若采用 SonyXC-37 摄像机,CCD 板的尺寸是 6.8mm (V)×8.8mm(H),像素尺寸为 14μm(V)×17μm(H),因此,CCD 上的一个图像给出 480(V)×512(H)个像素,若整个像框测量 10cm 的节理试件,则其分辨率为 0.2mm。

二、机械触针式表面形态仪

机械触针式表面形态仪是机械工程中用于测量零件表面粗糙度的常用仪器,但一般行程和量程均较小。Tsan 在此基础上研制了机械触针式岩石表面形态仪^[7],其最大行程为 250mm,针尖在垂直方向的位移为 24mm,采样间隔 0.2mm,对于长 10cm 的剖面线,需测量 5min,采集到的信息被放大后通过 12 位 A/D 转换板输入微机。采样针尖的直径为 25μm,为了确保形态仪的分辨率,建议每测 20m 替换一根针尖。

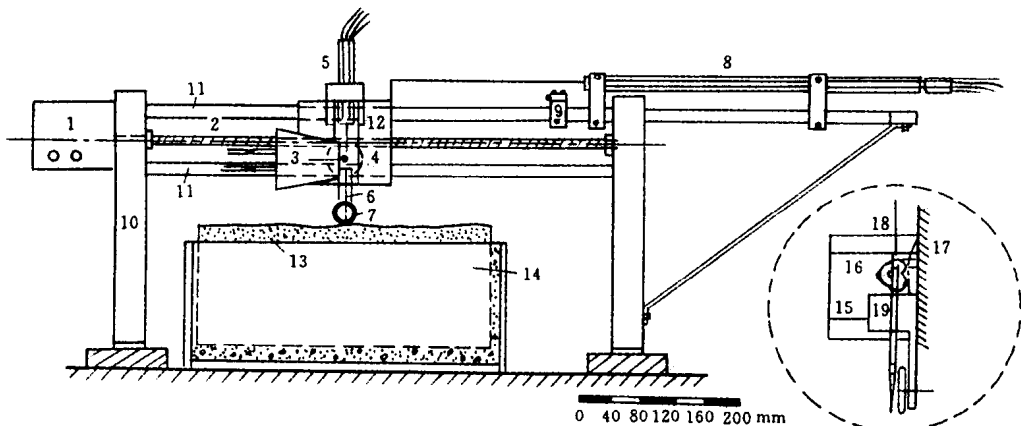


图 2-1 Weissbach 研制的表面形态仪

- 1—水平步进电机;2—精密丝杠;3—竖向步进电机;4—偏心轮;5—垂直位移传感器;6—触针;
7—滚动盘;8—水平位移传感器;9—限位开关;10—支架;11—导向杆;13—节理试件;
14—剪切盒;15—滑块;16—偏心盘;17—偏心接触件;18—传感器头;19—套管

图 2-1 是 Weissbach 研制的表面形态仪结构图^[8],它由支架、两个位移传感器和两个步进电机和丝杠滑块机构组成。水平位移传感器用来记录采样点的水平位置,垂直位移传感器则用来记录节理表面的形态高度。水平步进电机用于驱动滑块及其上面的垂直位移传感器作水平移动,垂直步进电机通过偏心轮机构,在采样时使触针降下与岩石表面接触,在水平步进移动时,将触针提离岩石表面,从而避免其被较高的表面凸点卡住,因而采样不是连续而是间隙性的。采样间隔可为 $0.03\sim 0.5\text{mm}$,可测量尺寸为 $410\text{mm}\times 280\text{mm}$ 的节理表面。高差的测量精度则取决于传感器的精度。水平位移和垂直位移或被绘在函数记录仪上,或用数值记录器数字化在穿孔磁带上。

该表面形态仪由于采用了一个偏心轮机构和间隙性的升降触针,使其在水平移动过程中离开试件表面,从而解决了水平移动时触针被卡住的现象,但它结构较复杂,尤其是测试结果记录在函数记录仪上或用数值记录器数字化于穿孔磁带上,数据后处理复杂,其精度又受数据输出设备和记录设备的影响。

三、RSP-I 型智能岩石表面形态仪^[9]

RSP-I 型智能岩石表面形态仪以机械触针式形态仪的原理和结构为基础,根据智能仪器的原理和设计思想,用微机作为形态仪控制、测试和记录的核心,既实现了微机对传感器水平移动和形态仪触针垂直运动的控制及采样间隔的软件选择,又实现了微机对形态仪信号的采集处理以及显示和记录。

1. 形态仪的原理和结构

RSP-I 型智能岩石表面形态仪由机械结构、驱动、测试以及记录 and 数据处理等几部分组成。仪器的控制、测试及数据处理均由计算机辅助测试(CAT)系统及相应的软件来实现,其特点是通过触针针尖感触被测表面某一剖面上的高差起伏,如图 2-2(a)所示,当位移传感器在被测表面上沿给定方向水平移动时,其触针在被测表面上随着表面几何形态的起伏变化而在垂直方向作上下运动,由于传感器是被固定的,并沿一水平参考线移动,因此,在传感器水平移动过程中,触针针尖的运动轨迹即为节理表面的形态起伏。

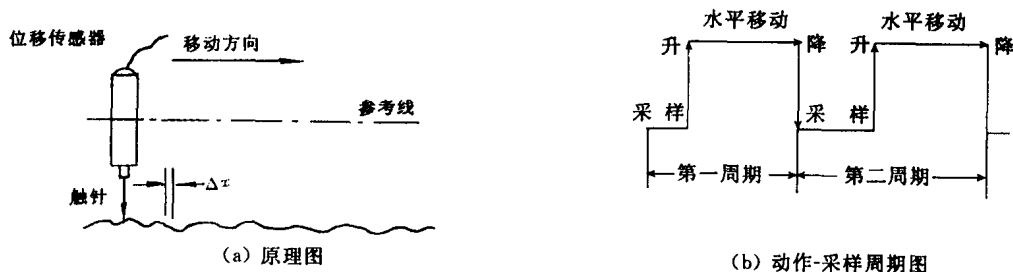


图 2-2 RSP-I 型智能岩石表面形态仪原理及动作-采样周期图

形态仪的机械部分由升降导向机构、丝杠滑块机构和工作平台三部分组成,其结构简图见图 2-3,其中,升降导向机构由偏心轮机构和导向机构组成,它们均安装在滑板总成上。

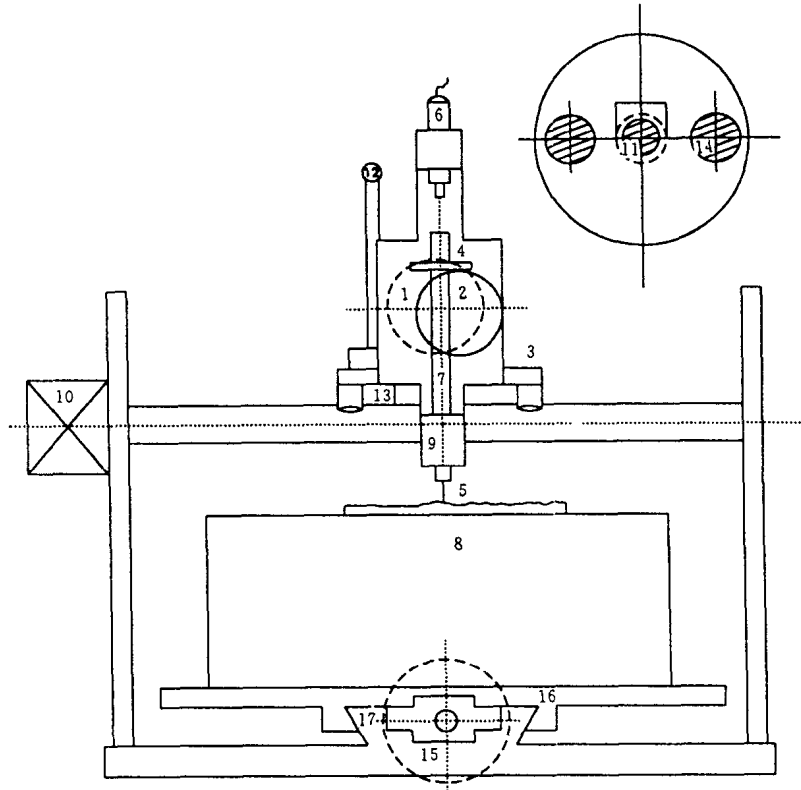


图 2-3 RSP-I 型智能岩石表面形态仪结构

- 1—升降步进电机；2—偏心轮；3—滑板总成；4—托盘；5—触针；6—位移传感器；7—导向杆；
8—节理试件；9—导向套；10—丝杠驱动步进电机；11—精密丝杠；12—离合器操纵杆；
13—离合器；14—水平导向杆；15—手轮；16—工作平台；17—燕尾槽导轨

形态仪机械部分的工作原理是：升降步进电机 1 的轴上安装有偏心轮 2，在滑板 3 水平移动前，升降步进电机驱动偏心轮推起托盘 4，使触针 5 离开被测试件表面，以避免在触针随滑板水平移动时被试件表面上较陡的起伏点卡住。水平移动完毕后，升降步进电机驱动偏心轮降下托盘，使触针针尖与被测试件 8 的表面接触，位移传感器 6 的触头与导向杆 7 的上端面直接接触，这样，被测表面的起伏由触针经导向杆传递到传感器触头，为使触针每次升降后针尖准确地落到预期的位置，触针上部与导向杆相连，导向杆在精密的导向套 9 中运动以达到导向的目的，触针的水平移动由步进电机 10 驱动精密丝杠 11 带动滑板水平移动来实现，滑板总成上的离合器 13 用来调节形态测量时滑板的起始位置，旋转离合器操纵杆 12，使离合器 13 处于与丝杠分离状态，这时，滑板可在两根水平导向杆 14 上自由地移动，从而，方便地把触针调到待测剖面线的起点。工作平台总成用于安放被测试件和调节测试剖面线的位置，先将试件安放在触针对准第一条剖面线的位置，测完一条被测剖面线后，摇动手轮 15 使工作平台 16 在燕尾槽导轨 17 上前后移动，从而可把触针调到不同的测试剖面线，测试时的顺序前进是由控制部分来完成的。

2. 计算机辅助测试(CAT)系统

该形态仪 CAT 系统由控制部分、测量部分和微机组成(如图 2-4)。控制部分包括两个步进电机及与其配套的一个控制箱和控制接口板;测量部分包括模数转换板和位移传感器及位移变送器;控制接口板和模数转换板均直接插于主机系统板上。计算机通过接口板和步进电机控制箱实现对形态仪步进电机的驱动和控制,并按图 2-2(b)所示的周期协调地动作。每经历一个采样—升—移—降周期,完成对被测表面上一个间隔的数据点的测量,这样依次将表面形态的信息由位移传感器经位移变送器放大,形成与被测剖面线高差起伏相应的模拟量,模数转换板将该模拟量采样、保持并转换为数字量。每测完一条剖面线,将其在屏幕上按一定纵、横向比例显示出来,并将相应的数据按一定格式存入数据文件。

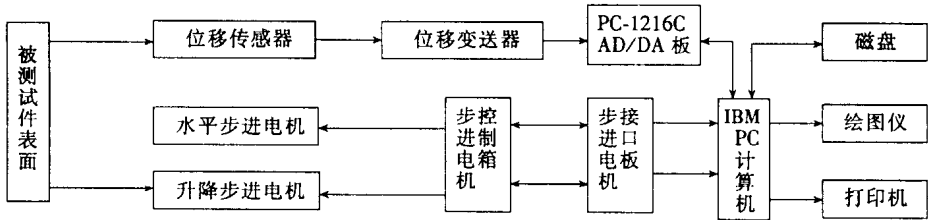


图 2-4 RSP-I 型智能岩石表面形态仪(CAT)原理框图

3. 形态仪 CAT 系统的软件开发

为方便地实现步进电机驱动和数据采集功能,程序用宏汇编语言编制。它除主程序段外,还有步进电机控制、采样滤波和屏幕画点等子程序段。为了避免采样时噪声干扰降低测试精度,用五点平滑法滤波对数据进行预处理。在运行程序后,先依次输入被测节理的数据文件名和待测剖面线数目,然后,输入当前待测剖面线的长度和采样间隔,按回车键即开始测试。测试到剖面线终点时自行停止,将已测试好的剖面线在屏幕上按一定纵、横向比例显示出来,并将相应的数据按一定格式存入数据文件。依次输入每条待测剖面线的长度和采样间隔并进行测试,直到测完该节理面上的所有待测剖面线为止。

对被测节理的几条剖面线,采用逐条存盘的方法依次存入同一数据文件,这样,当测试中出现问题而中断测试时,只丢失正在测的剖面线的数据。在系统软件中包含有再现和打印程序、形态参数计算程序等,以供初步的分析研究之用。典型的形态特征的节理表面剖面线测试结果见图 2-5。

4. 形态仪主要技术指标

为获得模数转换板的转换系数,需对测试系统预先进行标定,采用专门的标定程序和位移标定器在微机上直接标定,对于量程为 $\pm 5\text{mm}$ 的传感器,标定结果为 $C_D = 2.44\mu\text{m/bit}$,线性误差不大于满量程的 0.3%。

形态仪的实际精度取决于机械结构、位移传感器、位移变送器和模数转换板的综合精度,经湖南省计量局计量器具监督检查站检测,RSP-I 型智能岩石表面形态仪主要技术指标