

岩石结构面表面形貌的现场测量及分级^①

夏才初

(同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092)

孙宗硕

(中南工业大学资开系, 长沙 410083)

任自民 王立

(长江勘测技术研究所, 武汉 430010)

摘 要

提出了表面形貌轮廓线分段测量理论, 并以此为指导对岩石结构面进行了大量的现场形貌测量。运用模糊数学方法对结构面表面特性进行综合评判, 并对结构面按形貌特征进行分级。根据现场剪切试验资料, 建立了综合评判指数与结构面摩擦系数的关系。由此, 将用结构面表面形貌参数进行模糊综合评判来预计其摩擦系数的方法拓宽到工程现场应用范围。

关键词: 表面形貌 现场测量 模糊分级

岩体的变形和破坏受结构面力学性质的控制, 结构面的力学性质与其表面形貌密切相关。Patton^[1]剪切强度理论采用平均起伏角 i 来表示这一影响; Barton^[3]提出了十条典型的粗糙度轮廓线以定性地说它们之间的关系, 并用 JRC 值来表示对结构面力学性质的影响; Swan^[3]对结构面形貌进行了测量并计算了表面形貌参数, 在此基础上预计了结构面的剪切行为; 文献[4]选用三个表面形貌参数对结构面进行分级, 以预计其摩擦阻力。

本文研究了结构面表面形貌的现场测量理论和方法。根据现场剪切试验资料, 采用文献[4]的分级方法对现场结构面进行分级。提出了各类不同级别的结构面的摩擦系数预计值。

1 表面形貌轮廓线分段测量理论

常用轮廓线法测量岩石结构表面的形貌, 但结构面往往延伸较长, 而测试工具的量程有限, 因此, 在现场进行形貌测量时, 只能对结构面进行分段测量。在表面形貌参数计算时,

各测试数据必须都是相对于同一参考线, 而在分段测量时很难保证这一点。但测量时各分段的参考线是任意确定的, 它们相对于水平面的倾角是可以测定的, 这样, 各分段间参考线的夹角也就能确定了。另一方面, 前一分段的终点即为后一分段的起点。由此, 不同分段间数据点的位置关系就可以完全确定了。这样就可以把各分段的数据点转换成相对于同一参考线。为计算处理的方便, 可不失一般性地作如下处理: (1) 每个分段的参考线通过该分段的起始点; (2) 取过第一分段起始点, 以所测分段参考线倾角的均值为倾角的倾斜线作为结构形貌数据点的总参考线。将数据进行转换后再作坡度修正, 使之都相对于其最小二乘中心线。

设第 j 分段第 i 个数据点为 $Z_j(i)$, $i = 1, 2, \dots, n_j$; $j = 1, 2, \dots, IPR$, 则上述方法的程序实现步骤如下(图 1):

(1) 使每一个分段的参考线通过该分段的起始点, 即作计算:

$$Z_j(i) = Z_j(i) - Z_j(1) \quad (1)$$

^① 于 1992 年 11 月 30 日收到初稿

(2) 依前后分段首尾相接, 将数据修正到以过第一分段起始点, 所测的几个分段的参考线平均倾角为倾向的倾斜线 O_1O_2 为参考线, 即作计算:

$$\left. \begin{aligned} Z_j(i) &= Z_j(i) + (i-1)DX \\ &\quad \times \tan(\theta_j - \bar{\theta}) + Z_{j0} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$Z_{j0} = Z_{j-1}(n_j - 1); \text{ 并取 } Z_{10} = 0$$

式中 DX —采样间隔; θ_j —各分段参考线的倾角; $\bar{\theta}$ —所测几个分段参考线平均倾角

(3) 将数据修正到以轮廓线的最小二乘中心线 OX 作为高度坐标的参考线, 即作计算^[5]:

$$\left. \begin{aligned} Z(i) &= Z(i) - B_0 - TL \cdot i; \\ i &= 1, 2, \dots, n. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中 B_0 —轮廓线第一个数据处中心线相对于测量参考线 O_1O_2 的距离; TL —中心线在单位采样间隔内相对于参考线的增量; n —轮廓

线的数据总量

经此处理的数据序列, 其均值为零。

2 结构面表面形貌现场测量方法

我们以某大型岩体工程的结构面为研究对象进行结构面形貌的现场测量和分析研究。工程区基岩主要为闪云母斜长花岗岩, 从结构面发育程度及对工程的影响程度来看, 均以构造结构面为主。结晶岩体的断裂构造较发育, 成为影响岩体工程地质特性的重要因素。根据结构面生成条件、闭合状况、充填物性状等, 工程区结晶岩结构面分为熔融结构面, 硬性结构面及软弱结构面三种类型。熔融结构面有牢固的结晶联结, 强度与围岩相当, 在岩体变形及抗滑稳定性分析中无需单独考虑。软弱结构面

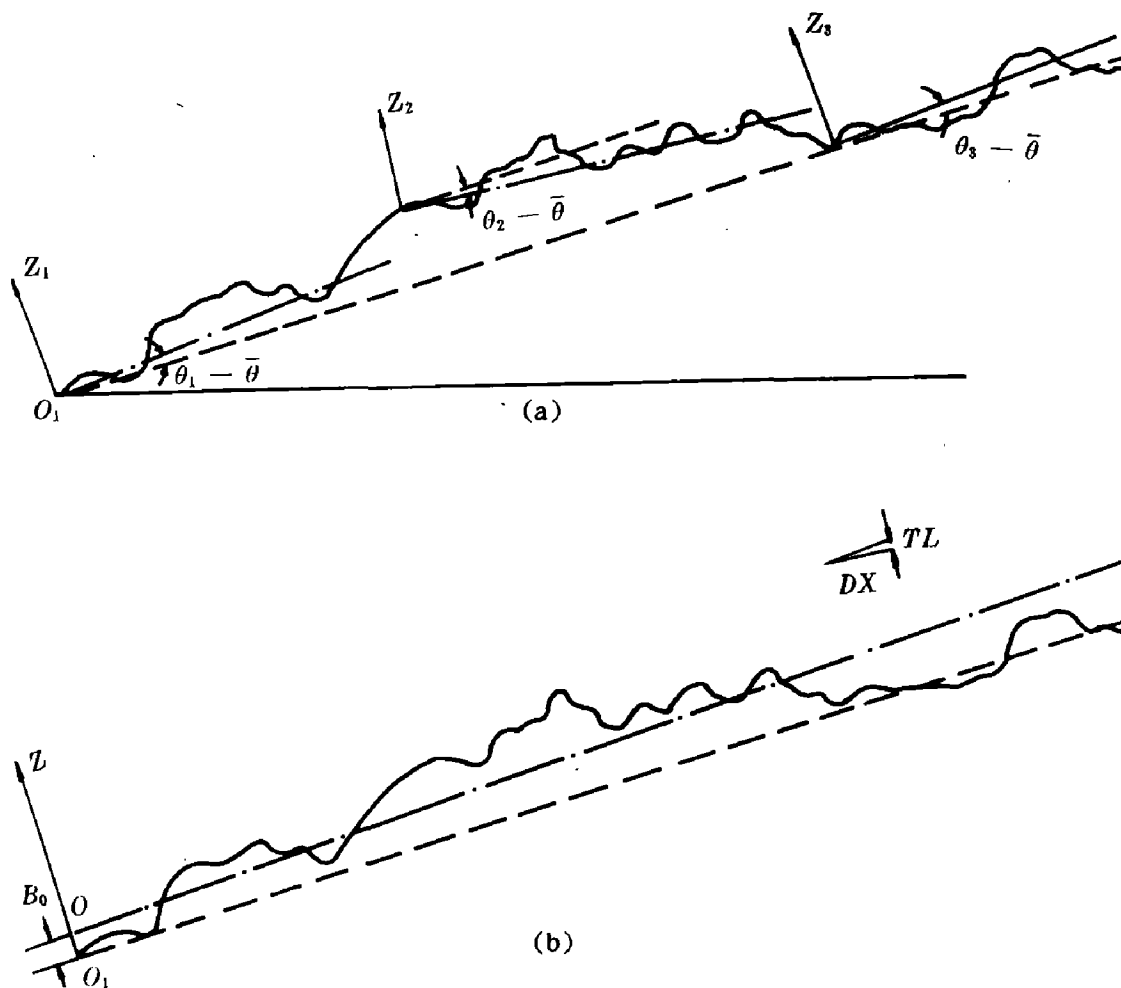


图1 轮廓线修正图

中夹有较两侧围岩为软弱的充填物。为数众多的是硬性结构面,其中不含软弱物质和碎屑物质,两壁坚硬岩石直接接触。

2.1 结构面表面形貌的现场测量方法

工程区域内为数最多的硬性结构面,即未全部充填的结构面的力学性质,除了受其岩性和壁面风化程度影响外,最主要的是其表面形貌。为此,需对这类结构面进行表面形貌的现场测量。为使测量结果具有代表性,选择测量的结构面包含了各种产状和各种形貌类型。

本次测量采用适合于野外测量的针梳。测量前,先量好待测结构面的产状,然后在结构面上沿预定方向(一般为倾向或走向)画一条测试线。再按针梳长将其分成若干段,依次首尾相接进行测量。测量时,将针梳置于测试线上,轻轻压下钢针使之与表面轮廓完全接触,按形貌轮廓线分段测量理论需同时测得针梳金属板的倾角,供修正用。再将针梳的轮廓线描在坐标纸上,便得到相对于金属板的轮廓线。

2.2 测量轮廓线的数值化

本文采用的TG-1017型数字化仪,其有效数字化面积可达 $50\text{ cm} \times 30\text{ cm}$,分辨率为 0.1 mm 。轮廓线输入采用定位精度高、功能丰富的鼠标器,它设有可编程定义的四个键,具有较丰富的操作命令,可实现逐点按键输入与触发连续输入。程序中定义鼠标器的红键为终止输入工作,其它三键均为触发连续输入。采样由软件实现,采样间隔为 1 mm 。输入时将描有轮廓线的坐标纸用胶带纸粘贴在数字化仪有效面板上,依次键入各分段轮廓参考线的倾角并进行数值化。一条测试线所有分段的数据都存入一个数据文件。再按形貌轮廓线分段测量理论对数据进行变换处理。最后作坡度修正并计算其形貌参数。

3 岩石结构面的分级

依表面形貌特征对岩石结构面进行分级的目的是试图用形貌参数预计其剪切阻力。有些形貌参数与结构面摩擦系数有很好的相关性,

但多参数综合评价比单参数评价的效果好^[4],故本文采用多参数综合评价。在多参数综合评价时选择参数的原则是:与所研究的问题关系密切,物理意义明确且易于测量和计算,参数间彼此独立。根据文献[4]及对结构面表面形貌的现场测量结果分析,选择三个表面形貌参数:表面起伏均方根 σ ,表面倾角均方根 i 和表面起伏均方根 σ 与微凸体半径 β 的比值,并运用模糊综合评判方法对结构面进行分级和评价其摩擦特性。

3.1 结构面模糊多因素综合评判的基本模型

设结构面按形貌分级的因素为

$$U = \{U_1, U_2, U_3\} = \{\sigma, i, \sigma/\beta\} \quad (4)$$

将结构面按形貌分成1~10级,即目标集为

$$V = \{I, II, III, \dots, X\} \quad (5)$$

第 i 个因素的单因素评价 $R_i = (r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{i10})$ 可看作是 V 上的模糊子集,其中 r_{ik} 表示第 i 个因素的评价对第 k 个等级的隶属度。在对结构面按形貌分级时,共有三个因素十个等级,其总评价矩阵为

$$R = \begin{Bmatrix} \tilde{R}_1 \\ \tilde{R}_2 \\ \tilde{R}_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} r_{11}, r_{12}, \dots, r_{1,10} \\ r_{21}, r_{22}, \dots, r_{2,10} \\ r_{31}, r_{32}, \dots, r_{3,10} \end{Bmatrix} \quad (6)$$

式中 $0 \leq r_{ij} \leq 1 \quad (i = 1, 2, 3 \quad j = 1, 2, \dots, 10)$

对这三个因素要进行总的权衡,即考虑这些因素分别对剪切阻力所起作用的大小,它可以用以下模糊子集 $\tilde{A}$ 表示:

$$\tilde{A} = a_1(\sigma) + a_2(i) + a_3(\sigma/\beta) \quad (7)$$

一般要求: $0 \leq a_i \leq 1, \sum_{i=1}^3 a_i = 1$ 。(7)式中括号内的字母分别表示 a_1, a_2, a_3 是 $\sigma, i, \sigma/\beta$ 对 $\tilde{A}$ 的隶属度。

模糊综合评判的广义数学模型为

$$\begin{aligned} \tilde{B} &= \tilde{A} \circ \tilde{R} = (a_1, a_2, a_3) = \begin{Bmatrix} r_{11}, r_{12}, \dots, r_{1,10} \\ r_{21}, r_{22}, \dots, r_{2,10} \\ r_{31}, r_{32}, \dots, r_{3,10} \end{Bmatrix} \\ &= (b_1, b_2, b_3, \dots, b_{10}) \end{aligned} \quad (8)$$

在广义模糊运算下, $\tilde{B}$ 中的各元素为:

$$b_j = \min\{1, \sum_{i=1}^m a_i, r_{ij}\} \quad (9)$$

3.2 隶属函数及权重的确定

为了求出(6)式中的模糊关系矩阵, 须建立各评定因素对结构面级别的隶属函数。由于决定结构面级别因素的复杂性, 建立合理的隶属函数是需要经过不断试验和经验总结的。我们欲求的是各基本因素的测定值属于某个级别的程度(即隶属度)。测定值是变化的, 但如果它们属于某一类, 那么测定结果必然云集于该类指标附近, 这种性质在数学上适合用高斯分布函数描述, 所以取隶属函数为高斯型:

$$u_j(x_i) = \exp - \left(\frac{x_i - m_{ij}}{c_{ij}} \right)^2 \quad (10)$$

式中 $u_j(x_i)$ 为第 i 个因素属于第 j 级的隶属度; x_i 为评定目标中的第 i 个因素的值; m_{ij} 第 j 级别第 i 个评判因素的中值; c_{ij} 为系数

为了确定 c_{ij} 值, 假定每个级别边界处的隶属函数值为 e^{-1} (见图 2), 则有:

$$\frac{d_{ij} - m_{ij}}{c_{ij}} = 1 \text{ 或 } c_{ij} = d_{ij} - m_{ij} \quad (11)$$

式中 d_{ij} 为评判因子第 j 级别第 i 个评判因素的边界值

这样, 总的评价矩阵为

$$R = \begin{bmatrix} \sigma \\ i \\ \sigma/\beta \end{bmatrix} = \{U_j(x_i)\}_{3 \times 10} \quad (12)$$

为了确定各因素的权重, 按各因素的重要程度, 制订了系列标准权重刻度即: 极次要 0.0、次要 0.2、一般 0.4、重要 0.6、很重要 0.8、特重要 1.0。

根据经验和分析, 取三个评判因子的权重

分配为:

$$A = (0.25, 0.6, 0.15) \quad (13)$$

3.3 结构面的模糊综合评价

多因素综合评价后得到一个等级模糊子集

$$B = \frac{b_1}{I} + \frac{b_2}{II} + \dots + \frac{b_{10}}{X} \quad (14)$$

式中 b_i 为等级 i 对 B 的隶属度, 一般把 B 归一化。

结构面的分级等级可以用如下公式计算:

$$JR = \sum_{j=1}^{10} b_j a_j^k / \sum_{j=1}^{10} b_j^k \quad (15)$$

式中 a_j 为第 j 级的 JR 规定值, $k = 2$

3.4 结构面分级成果

由上述分级模糊得到的现场结构面按形貌的分级结果见表 1。为了建立分级结果与结构面摩擦性质的关系, 我们收集了以往现场剪切试验得到的摩擦系数。由于在该工程范围内结构面所受的应力为中等偏低, 而且变化范围也不大, 因此, 可近似认为结构面的摩擦系数不随法向应力而变。

$$\left. \begin{aligned} \mu &= 0.549 + 0.044(JR), n = 7; \\ r &= 0.963 < 0.874 (\alpha = 1\%) \\ \mu &= 0.763 + 0.020\sigma; r = 0.318 \\ \mu &= 0.377 + 1.968i; r = 0.847 \\ \mu &= 0.736 + 0.124\sigma/\beta; r = 0.479 \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

由(16)式, 还可算出每个级别的结构面的摩擦系数。这意味着可在对结构面按形貌进行分类的基础上, 按级别预计其摩擦系数。预计时, 若 JR 接近某级范围的边界, 则 μ 也取该级范围的边界值, JR 接近某级范围的中值, μ 也取该级范围的中值。比较摩擦系数 μ 的预计值与实测值可知, 它们的最大误差不超过 0.05,

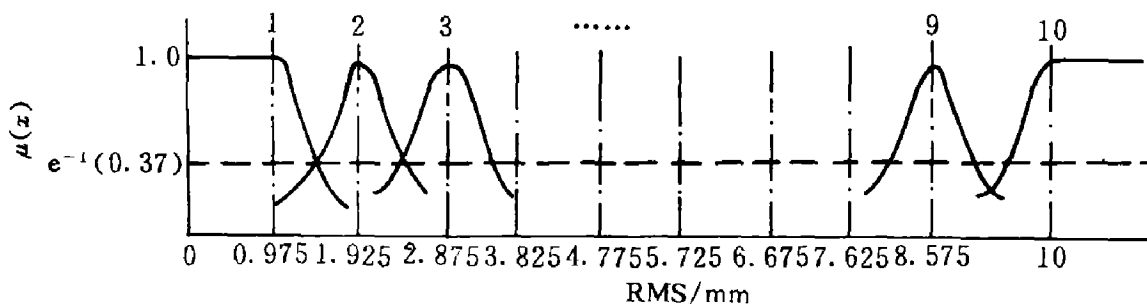


图 2 单因素对十个级别的隶属函数分布曲线

表1 结构面形貌参数等级及摩擦系数 μ 值

级 别	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
分 级 标 准	JR <1.5	1.5~ 2.5	2.5~ 3.5	3.5~ 4.5	4.5~ 5.5	5.5~ 6.5	6.5~ 7.5	7.5~ 8.5	8.5~ 9.5	>9.5
	μ <0.62	0.62~ 0.66	0.66~ 0.70	0.70~ 0.75	0.75~ 0.97	0.79~ 0.84	0.84~ 0.88	0.88~ 0.92	0.92~ 0.97	>0.97
按(16)式 计算 μ 值		0.64~ 0.66	0.66~ 0.70	0.70 0.74	0.74~ 0.79	0.97~ 0.84	0.83 0.86	0.88~ 0.92	0.92~ 0.97	>0.97
剪切试验 实测 μ 值			0.67		0.79 0.72		0.82	0.87 0.94	0.95	

说明该方法的精度高和可行性好。

了由文献[4]提出的该方法的适用范围,从而可减少现场剪切试验,节省大量人力物力。

4 结 论

(1)为适应现场结构面大范围的形貌测量,提出了表面形貌的轮廓线分段测量理论,这为现场形貌测试提供了理论依据,有利于指导现场形貌仪的研制。

(2)用针梳描绘、数字化仪数值化的现场形貌测量方法是可行的,其精度能满足工程要求。

(3)在表面形貌测量的基础上,采用模糊综合评判方法对结构面进行分级并预计其摩擦阻力,对于现场结构面也是可行的。这就拓宽

长江勘测技术研究所胡燕、荣亚红同志参加了部分现场测量工作。

参考文献

- 1 Patton F D. In: 1st Cong. ISRM, Lisbon, 1966, 1, 509.
- 2 Barton N R. Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr. 1976, 13, 255-277.
- 3 Swan G, Sun Zongqi. Rock Mech and Rock Eng, 1985, 18, 183-212
- 4 孙宗颀, 徐放明. 岩石力学与工程学报, 1991, 10(1): 63-73.
- 5 夏才初. 博士学位论文, 中南工业大学, 1991.