

水文地质工程地质选辑

18

岩石裂隙强度

地质出版社

岩石裂隙强度

水文地质工程地质选辑第十八辑



地质出版社

岩石裂隙强度

水文地质工程地质选辑第十八辑

成都地质学院工程地质教研室 编选

地质部书刊编辑室编辑

责任编辑 沈树荣

地质出版社出版

(北京西四)

地质出版社印刷厂印刷

(北京海淀区学院路 29 号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

开本: $850 \times 1168^{1/32}$ 印张: $7^{1/4}$ 字数: 192,000

1982 年 5 月北京第一版 1982 年 5 月北京第一次印刷

印数 1—2,880 册·定价 1.50 元

统一书号: 15038·新 779

目 录

国外对岩石裂隙抗剪性能的研究概况.....	1
裂隙粗糙程度与裂隙强度间的关系.....	41
岩石裂隙抗剪强度的理论与实践.....	67
岩石裂隙的摩擦和变形特性.....	124
表面性状和正应力强度对花岗岩裂隙抗剪性能的影响...	139
粘-滑的力学	160
凸起体的蠕动和粘滑.....	173
关于现场块体剪切试验的岩体抗剪强度.....	186
测试岩石裂隙的一种携带式剪切仪.....	207

国外对岩石裂隙抗剪 性能的研究概况

孔 德 坊

绪 言

第二次世界大战结束以来, 工程建设事业和采矿事业飞跃发展, 数量和规模都达到了过去不可想像的水平。随着这些工程事业的突飞猛进, 对于工程地质情况的查明和预测, 要求也日益提高。岩体中裂隙的力学性能, 就是迫切需要进行深入研究的一个重要方面。

任何一种建筑物都是修建在岩体上或岩体中的, 岩体的稳定性是关系到建筑物安全和稳定的首要问题。在建筑物形式和规模既定的条件下, 岩体的稳定性主要决定于岩体的力学性能。

事物的破坏总是始自其内部的薄弱环节, 岩体当然也不会例外。岩体是自然历史的形成物, 它是由形形色色纵横交织的裂隙(原生的和次生的、宏观的和微观的)所割裂的岩石。事实证明, 在一个岩体中, 裂隙面上的力学强度总是比裂隙之间的完整岩石的力学强度低, 有时低几倍, 有时低十几倍, 甚至几十倍。多年来的工程地质实践证明, 对裂隙强度研究的任何忽视, 都会造成不同程度的、甚至是极为严重的后果。

工程建筑物的发展是要求深入研究岩体裂隙力学性能的一个方面。另外, 近十几年来, 电子计算机的发展和日益广泛的应用, 改变了过去工程设计中因工作量过份庞大而在计算上力不能及的局面, 对于设计精度有了大大提高的可能性。但是, 提高设计精

度，在很大程度上又必须以精确的岩体力学性能指标数据为基础。这就又从另一个方面对岩体裂隙力学性能进行深入研究提出了进一步的要求。

从工程地质观点出发，对岩体力学性能的要求主要是抗拉和抗剪。正像人们所熟知的那样，裂隙面不能承受任何拉应力，其抗拉强度为零，当然也就毫无对其进行研究的必要。但是，裂隙却仍具有不同程度的承受剪应力的能力，所以不仅应当对其进行研究，并应根据具体情况在工程实践中加以合理的利用。

对于岩体裂隙的抗剪性能，国外研究者自五十年代即已开始研究，至六十年代末期，关于这方面的研究成果陆续地、大量地发表在涉及许多学科（如固体力学、应用力学、地球物理、土建、岩石力学、工程地质学等）的期刊杂志上。所研究的内容主要有两个方面，一是探讨裂隙面抗剪性能的预测准则，以使用新的、更合理的方法确定裂隙的强度，这一方面比较侧重于实用。另一方面则是探讨裂隙强度和剪切过程的物理机制。以下仅就裂隙面抗剪性能的预测标准和测定方法，裂隙面的粗糙程度对抗剪性能的影响以及裂隙面受剪过程中的滑动机制等三个问题的研究情况，作一简要介绍。

一、岩石裂隙抗剪性能的预测 准则和确定方法

岩体中的天然裂隙，从工程地质的观点看来，是一个预先存在着的、力学性能明显较弱的面。在这个面上，总是在不同程度上存在着尺寸极不相同的凸起体（asperity），而且在自然情况下或当裂隙面承受与其垂直的荷载时，这些凸起体往往在不同程度上互相嵌合着。同时，在裂隙中，有时基本上空无一物，而有时却又填充着颗粒大小很不相同的充填物。研究这样的裂隙的抗剪性能，显然，照搬一般用于完整岩石的库伦准则是完全脱离实际的；而利用无内聚力项的阿蒙顿（M. Amonton）定律，也是很不合理的。为了充分地考虑到凸起体在裂隙剪切过程中的作用，

使剪切公式逐渐符合于裂隙面的客观实际，自六十年代中期以来，许多研究者进行了大量的理论分析和实验研究，在书刊文献中讨论较多的有以下三种。

(一) 阿查德 (J. F. Archard) 准则

十八世纪二十年代，阿蒙顿为了研究机器中的摩擦阻力，发现了剪应力 τ 与正应力 σ 成直线正比关系，于1734年发表了后人所熟知并得到广泛应用的阿蒙顿定律，即

$$\tau = \mu \sigma \quad (1)$$

式中， μ 被称为摩擦系数。

这个著名的定律一直在各个领域中广泛沿用了很久。在本世纪中，随着生产的大规模发展，研究资料逐渐累积，而且对数据精度的要求也愈来愈高，开始发现，对一定的物体来说，摩擦系数并不是一个常数。换言之，即剪应力与正应力之间不是直线正比关系。五十年代以来，许多研究者〔如彭曼 (A. D. M. Penmen), 1952; 阿查德, 1958; 耶格 (J. C. Jaeger), 1959; 鲍登 (F. P. Bowden) 和泰伯 (D. Tabor), 1950, 1964; 等等〕在研究包括矿物和岩石在内的各种材料的摩擦时，都发现了这一特性。阿查德认为，对于存在着塑性变形的凸起体的裂隙面来说，摩擦应服从于阿蒙顿定律；而当裂隙面上是弹性变形的凸起体时，则

$$\tau = \mu \sigma^n \quad (2)$$

式中， μ 为常数； n 值与材料的强度和凸起体的形状有关，介于 $2/3$ 与 1 之间。默雷尔 (S. A. F. Murrell) 在研究达雷达尔砂岩时，在整个正应力范围中也得到了摩擦系数随有效正应力的提高而减低的趋势，表1中列出了他的实验结果。他将各对 τ 和 σ 取对数值，表示在图1中。 $\log \tau - \log \sigma$ 表现出良好的直线关系。对其进行最小二乘分析，得到

$$\mu = 2.10 \pm 0.09$$

$$n = 0.89 \pm 0.04$$

耶格曾利用安山岩裂隙试样进行了试验，发现 τ 与 σ 的关系

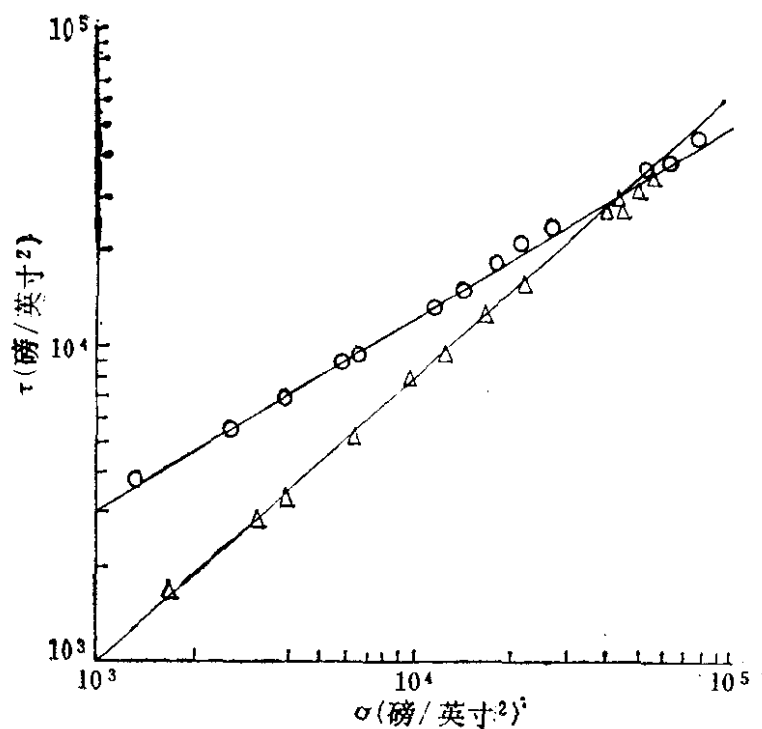


表 1

$\sigma_n MN/m^2$	μ
12.1	0.98
22.7	0.85
27.9	0.83
46.6	0.75
69.1	0.79
91.1	0.70
121.1	0.73
160.5	0.66
300.7	0.63
316.9	0.60
359.9	0.61
378.7	0.64
419.3	0.56
451.6	0.56

图 1 $\log \tau - \log \sigma$ 关系线

同阿查德所提出的规律一致。得出 $\mu=1.1$, $n=0.9$ 。

阿查德准则从表示裂隙抗剪性能中的 τ 与 σ 的关系来说, 比原始的阿蒙顿定律前进了一步, 说明了对同一物体也不应认为摩擦系数为常数, 有其理论上的意义。由于确定系数 μ 和 n 比较复杂, 因而在实际应用中是困难的。

(二) 帕顿 (F. D. Patton) 和戈尔茨坦 (M. Goldstein) 准则以及施奈德 (H. J. Schneider) 的修正

二十年以前, 纽兰德 (Newland) 和阿里 (Alley) 发现, 在粒状材料的剪切过程中, 试样剪切面以上的部分的运动方向与剪力方向偏离, 有上翘的现象, 而且所测得的抗剪角 ϕ 总是大于颗粒表面间正常的抗滑动摩擦角 ϕ_b , 从而对粒状材料的剪切提出了阿蒙顿定律的修正公式:

$$\tau = \sigma_n \tan(\phi_b + i) \quad (3)$$

式中 i 为剪胀角 (dilation angle), 即颗粒位移方向与剪力方向

的平均夹角。

六十年代中期，帕顿和戈尔茨坦等人在对岩石裂隙的抗剪强度的研究中，发现裂隙面的剪切与粒状材料剪切有某些相似的现象，从而将纽兰德和阿里的研究成果引进到对岩石裂隙强度的研究中来。他们认为，在较低的有效正应力作用下的剪切过程中，裂隙面上的凸起体基本未遭破坏，此时，摩擦定律可采用（3）式的形式；当有效正应力很高时，则裂隙面上的凸起体在剪切过程中基本上全被剪断，因此摩擦定律即应采用库伦关系式的形式，其中的参数 c 应表示凸起体的内聚力（图 2）：

$$\tau = c + \sigma_n \tan \phi \tag{4}$$

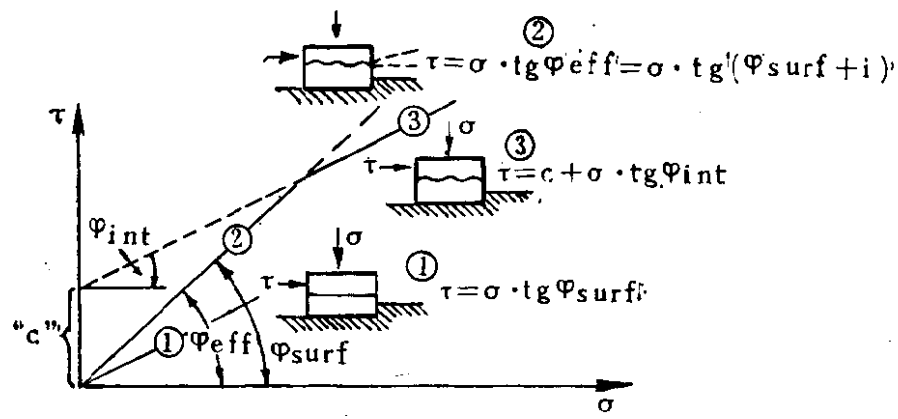


图 2 裂隙面的剪切和 τ - σ 关系示意图

从今天的研究水平来看，帕顿和戈尔茨坦的研究当然是极为粗略的，因为即使在极低的（大概只要不等于零）有效正应力下，在绝大多数天然裂隙面上的凸起体不可能完全或者基本上不遭破坏；而在很高的（按工程实践的标准）有效正应力下也不可能完全或者基本上都遭到破坏。这已都为后来的大量实践所证实。因而上述两式只代表两种极端情况，而这两种极端情况却都是在实践中不可能出现的。但是从人们对于岩石裂隙强度的认识来说，却具有非常重要的历史的和理论的意义。他们明确地指出了在岩石裂隙的抗剪强度中，除包括众所周知的与剪应力方向一致的摩擦组份而外，存在于裂隙面上的凸起体也起着非常重要的作用，

而且它们的作用方式和大小，随有效正应力的大小而不同。这还意味着，不仅完整岩石具有弯曲的峰值强度包络线，而且岩石裂隙的强度包络线也应是弯曲的。他们的研究虽然并没有完善到足以用于实践，但却给以后的研究指出了正确的方向。

近年来，施奈德利用模拟材料模拟了岩石裂隙的表面形态，研究了在裂隙的剪切过程中试样上半块的纵向（与剪应力方向垂直）变形、横向（剪应力方向）变形与有效正应力之间的关系，

试验结果列入图 3 中。图 3 表明，剪胀角 $i \left(= \frac{\Delta h}{\Delta s} \right)$ 随有效正应

力的增大而显著减小。他认为，对于同一裂隙来说，在有效正应力 σ_n 作用下的剪胀角 i 与有效正应力为零时的剪胀角 i_0 之间，存在着如下的指数关系：

$$i = i_0 e^{-k_i \sigma_n} \quad (5)$$

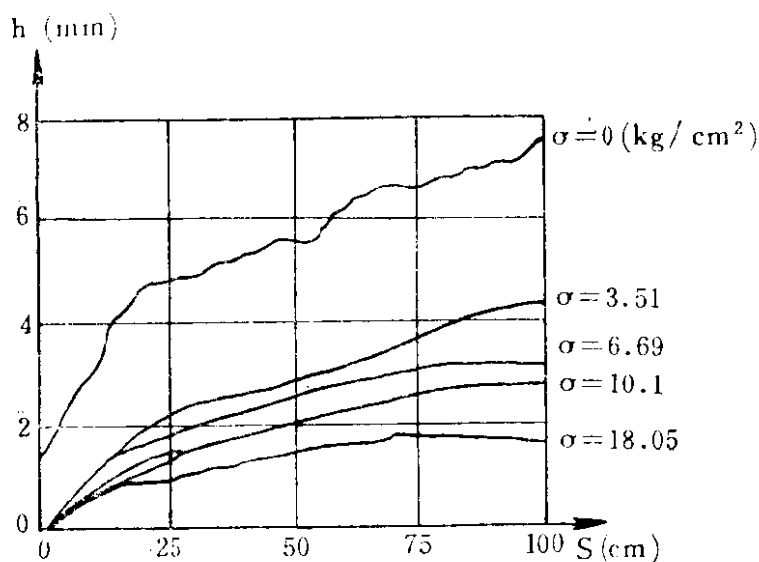


图 3 剪胀与正应力间的关系

式中 k_i 为系数，主要决定于材料的强度，而与裂隙面形态的关系不大。将其代入式 (3) 中，则

$$\tau = \sigma_n \tan(\phi_b + i_0 e^{-k_i \sigma_n}) \quad (6)$$

他在文章中虽然曾经指出，此式对他所实验的每种模型来说都是正确的，但是并未说明各种材料的 k_i 的具体数值以及确定

k_i 值的方法。

(三) 巴顿(N. R. Barton) 的研究

1. 强度准则的建立

巴顿的研究是从探讨峰值抗剪角 $\tan^{-1}\left(\frac{\tau}{\sigma_n}\right)$ 与峰值剪胀角 (d_n) 间的关系开始的。他利用粗糙程度(roughness)不同的八种模拟裂隙进行剪切试验,测定了峰值应力 τ 和 σ_n 以及峰值剪胀角 d_n , 并对各有关数据进行最小二乘分析, 计算出 $\tan^{-1}\left(\frac{\tau}{\sigma_n}\right)$ 与 d_n 的关系曲线, 将结果列入图 4 中。从图中得到如下的关系式:

$$\tan^{-1}\left(\frac{\tau}{\sigma_n}\right) = 1.78d_n + 32.88^\circ \quad (7)$$

从大量文献中可以看出, 岩石的基本摩擦角 ϕ_b 与残余摩擦角 ϕ_r 非常相近, 都介于 $25-35^\circ$ 。上式中的截距为 32.88° , 则与之相似。同时实验证明, 即使在正应力为 0 的情况下, 与平均平面夹角大于 $55-65^\circ$ 的凸起体也都会被剪断, 所以 $1.78d_n$ 项的数值不可能超过 $55-65^\circ$, 即 d_n 的最大值应介于 $30-40^\circ$, 也近于上述截距 32.88° 。因此, 可将式 (7) 右端近似地看作 $MC+C$ 的形式。实验结果表明, 无论是令 C 等于各个实验单值的平均值, 或者等于由最小二乘法计算出的 32.88° , $MC+C$ 均接近于 90° 。显然这是一种正应力为 0 (极小)、凸起体与平均平面夹角 $\geq 55-65^\circ$ (表面最粗糙) 的极端情况。如果令 $MC+C=$

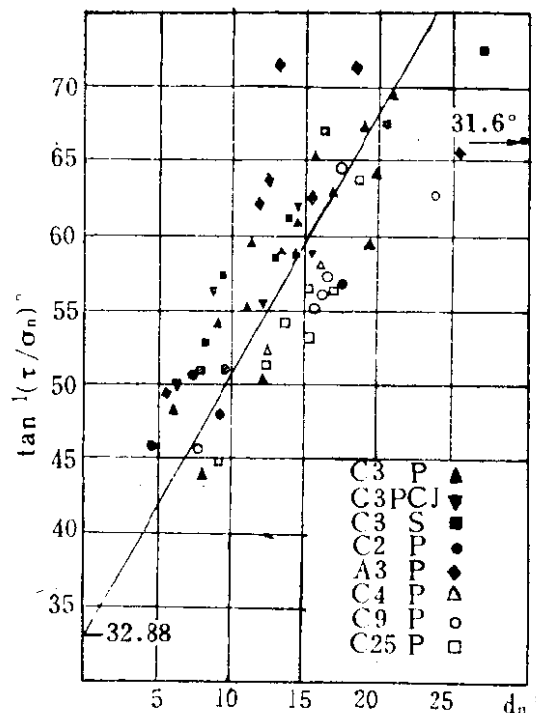


图 4 $\tan^{-1}\left(\frac{\tau}{\sigma_n}\right)$ 与 d_n 的关系

90°, 且 $C \simeq \phi_b$, 则 $M = \frac{90 - \phi_b}{\phi_b}$ 。为了计算上的方便, 当 $\phi_b = 30^\circ$ 时, 则可将式 (7) 写为

$$\frac{\tau}{\sigma_n} = \tan\left(\frac{90 - \phi_b}{\phi_b} d_n + \phi_b\right)$$

或者

$$\frac{\tau}{\sigma_n} = \tan(2d_n + \phi_b) \tag{8}$$

式 (8) 中的 d_n 为峰值应力下剪切过程中所表现出的峰值剪胀角, 它不仅与剪切前凸起体的高度有关, 而且还决定于材料的强度和正应力的大小。施奈德对裂隙表面形态和材料都相同的试样在不同正应力下进行剪切, 得到了剪胀作用 (dilation) 随正应力增加而降低的结果 (图 3), 已如前述。他还利用裂隙表面

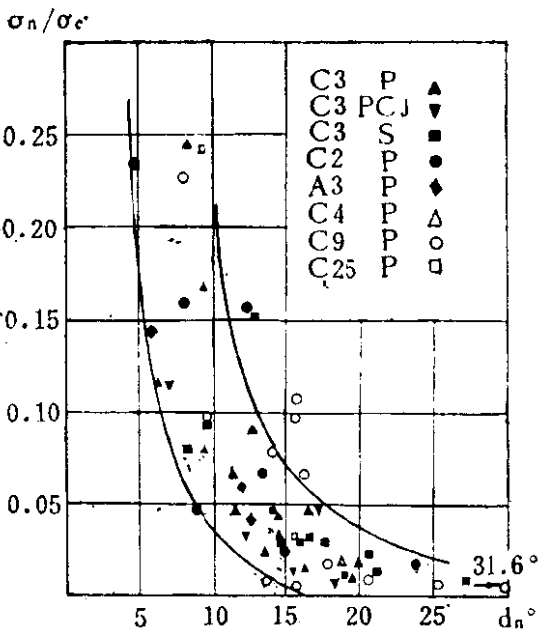


图 5 $\frac{\sigma_n}{\sigma_c}$ 与 d_n 的关系

形态相同而材料强度不同的试样在相同正应力下剪切, 也看到了剪胀作用随材料强度降低而明显减弱的趋势。如果同时考虑材料强度和正应力两种因素, 严格说来应决定于正应力与材料强度的相对大小。为此, 巴顿对模拟裂隙进行试验,

研究了 $\frac{\sigma_n}{\sigma_c}$ (σ_c ——材料的单轴抗压强度) 与峰值剪胀角的关系, 得到了如图 5 中所示的曲线。对纵座标采用对数值, 即得

$$\log_{10}\left(\frac{\sigma_n}{\sigma_c}\right) = -0.1056 d_n + 0.1184$$

对上式稍作简化近似, 得

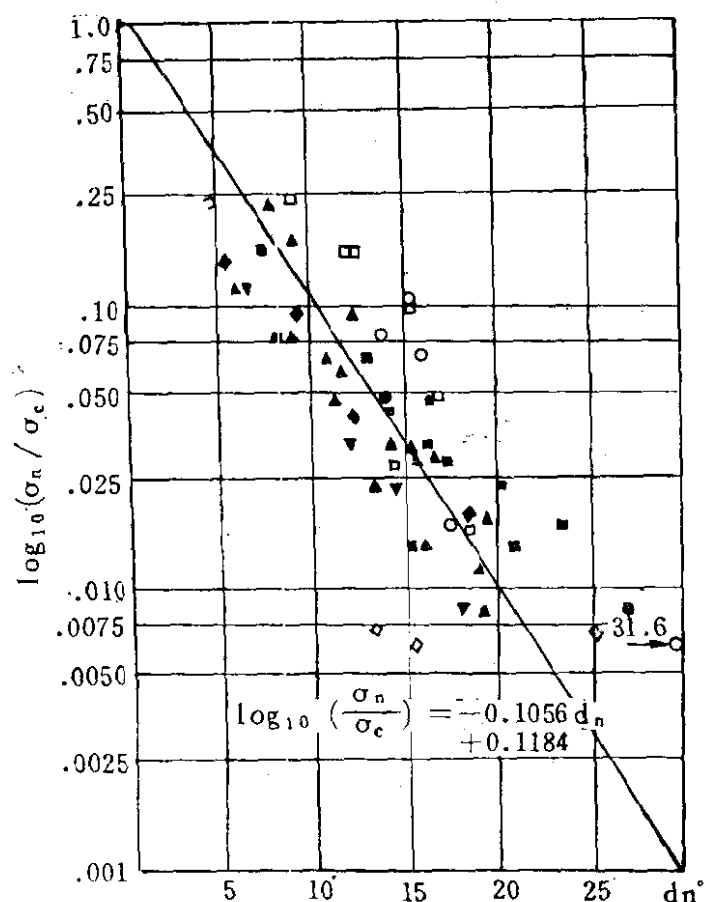


图 6 $\log_{10} \frac{\sigma_n}{\sigma_c}$ 与 d_n 的关系

$$\log_{10} \left(\frac{\sigma_n}{\sigma_c} \right) = -0.100 d_n$$

或

$$d_n = 10 \log_{10} \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_n} \right) \quad (9)$$

将其代入式 (8) 中, 则得

$$\frac{\tau}{\sigma_n} = \tan \left[20 \cdot \log_{10} \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_n} \right) + \phi_r \right] \quad (10)$$

在对式 (10) 的上述推导中, 如前所述, 是将 d_n 作为可能的最大峰值剪胀角考虑的, 即假定在正应力为 0 的条件下, 最粗糙裂隙面剪切过程中的剪胀角, 故可使其等于 ϕ_b 。式中对数项的系数, 表示剪切面的粗糙程度, 而数值 20 则是一种最粗糙的情况。当裂隙面极为光滑时 (如理想的磨光面), $d_n = 0$, 显然此系数也

应为 0。所以实际上也就是按裂隙粗糙程度的不同,它介于 0—20 之间,称之为裂隙粗糙度系数,以 JRC 表示。

此外,裂隙的剪切发生在裂隙面上,由于风化作用,裂隙面上及其附近的强度往往较岩体其它部位的强度为低。因此,在式 (10) 的对数项中,应以裂隙面的抗压强度取代一般的 σ_c 才具有更为实际的意义。前者常以 JCS 表示。

将 JRC 和 JCS 代入式 (10) 中,得

$$\frac{\tau}{\sigma_n} = \tan \left[\text{JRC} \cdot \log_{10} \left(\frac{\text{JCS}}{\sigma_n} \right) + \phi_b \right] \quad (11)$$

公式 (11) 即巴顿所提出的预测岩石裂隙抗剪强度的一般方程式。已经证实,在低的或中等的正应力下,即在一般工程建设中所遇到的问题中,采用此式能够得到比较精确的结果。但当正应力很高,或者在三轴应力条件下有效正应力 σ_n 提高到接近或超过单轴抗压强度 σ_c 时,则此式将产生一个不断增加的误差。误差的来源,一方面在于凸起体被剧烈破坏而使实际接触面积不断增大;另一方面,在三轴应力条件下因围限效应而使凸起体本身的抗压强度提高。此时,应以有侧限抗压强度 (即应力差 $\sigma_1 - \sigma_3$) 取代原式中的无侧限抗压强度 σ_c , 才是合理的。即

$$\tau = \sigma_n \tan \left[\text{JRC} \cdot \log_{10} \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_n} \right) + \phi_b \right] \quad (12)$$

式 (12) 中的对数项在意义上表示剪胀角,它是裂隙抗剪强度中的重要组成部分。其中在 JRC 和 JCS 所起的作用之间,有一定的相互依赖关系。从图 (7) 中可见,当 JRC 值高 (即裂隙较粗糙) 时, JCS 的作用也大,随 JRC 值的减小, JCS 的作用也降低。

式 (12) 包含着 JRC、JCS 和 ϕ_b 三个未知指标。精确地测定此三指标的数值,就有可能按不同的 σ_n 值精确地计算出相应的 τ , 从而作出峰值强度包络线,进一步确定出表征裂隙抗剪性能的内摩擦角 ϕ 和内聚力 C 值。

2. 裂隙抗压强度 JCS 值的测定

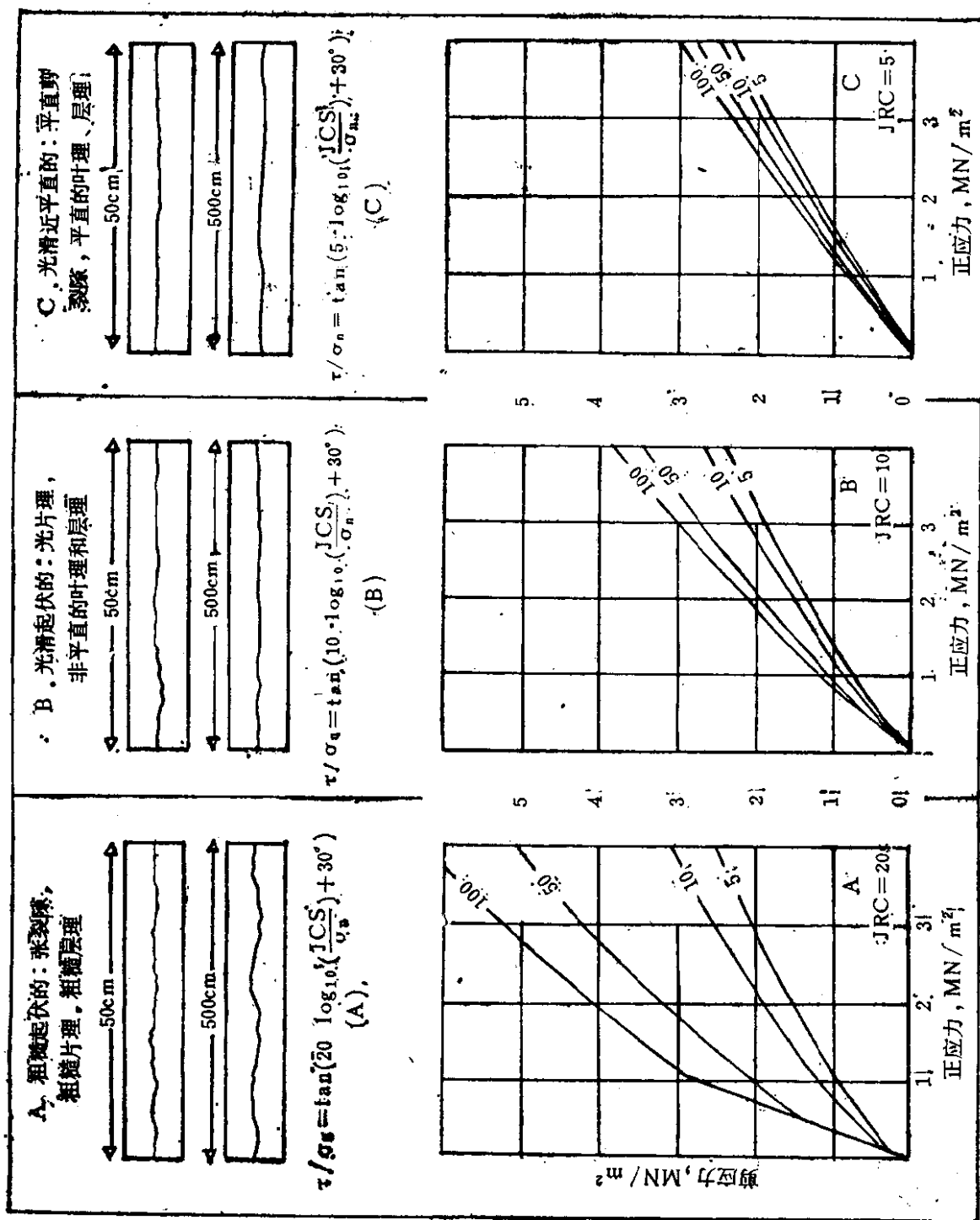


图 7 在对抗剪强度的作用中，JRC 和 JCS 间的相互依赖关系
(曲线上的数字表示 JCS 值)

测定 JCS 值的方法，随裂隙的风化特征而不同，大致可以分为两种情况。

在岩体（包括裂隙面）基本未遭受风化，或者虽经风化，但风化程度比较均匀的情况下，裂隙壁与内部岩体的强度没有值得考虑的差异，此时，可以利用岩心或石块进行常规单轴抗压试验或者点荷载试验以测定 JCS 值。

在一般情况下，岩体的风化程度是不均匀的，愈近裂隙壁则愈剧烈，愈向岩体内则愈微弱。控制裂隙（或岩体）强度的材料厚度可能仅为一毫米的几分之一至几毫米。显然，在这种情况下是无法取样的，而且即使取得一些样品也不可能进行上述试验。此时，可采用回弹仪试验。

回弹仪是一种非常简单仪器。它利用弹簧推动一个探头冲击所试验的表面，根据表面对探头的回弹能力，间接地表示表面的强度。试验中所得到的表示表面强度的指标为回弹数 R ，利用米勒（Miller）建立的如下经验关系式确定裂隙表面的单轴抗压强度 σ_c 。（以兆牛顿/米²，即 $\frac{MN}{m^2}$ 表示）：

$$\log_{10} \sigma_c = 0.000887R + 1.01 \quad (13)$$

式中 γ 为岩石的干容重（千牛顿/米³）。米勒还将此式表示为如图 8 所示的图表，可以根据测得的 R 和 γ 值直接查出 σ_c 值。

利用回弹仪测试，必须注意以下问题：

（1）测试方向：对于同一表面，当回弹仪垂直向下时回弹数最小，垂直向上时最大。式（13）和图 8 都是按照垂直向下时确定的。如果改变测试方向，应按表 2 进行修正。

（2）试样尺寸：在测试由岩体上取下来的试样时，试样的尺寸以试样受到测试的冲击时不致发生移动为准，一般以每边不小于 20 厘米为宜。如果试样过小，则应将其放置或夹持在一个重的底座上再进行测试。在原位测试时，则应注意有无“鼓声”（由于试件为岩壁的脱壳而产生的声音）以及裂隙是否太密。对脱壳或密集裂隙的表面，都会得出偏低的结果。

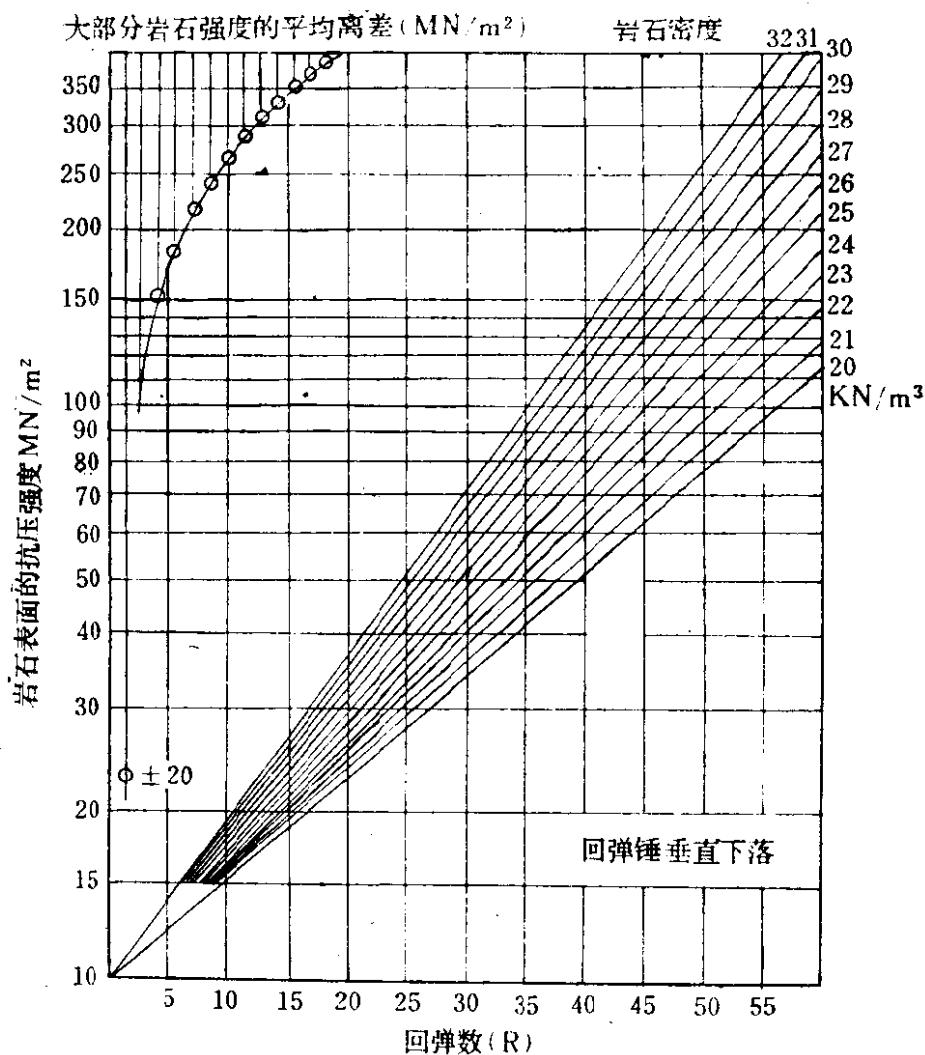


图 8 根据 R 和 γ 确定 σ_c 的图表

表 2

回弹数 R	向 下		向 上		水 平 $\alpha = 0^\circ$
	$\alpha = -90^\circ$	$\alpha = -45^\circ$	$\alpha = +90^\circ$	$\alpha = +45^\circ$	
10	0	-0.8	—	—	-3.2
20	0	-0.9	-8.8	-6.9	-3.4
30	0	-0.8	-7.8	-6.2	-3.1
40	0	-0.7	-6.6	-5.3	-2.7
50	0	-0.6	-5.3	-4.3	-2.2
60	0	-0.4	-4.0	-3.3	-1.7

(3) 试验数量：一般在一个有代表性的试样或在一平方米的原位裂隙面的不同位置上取得10个读数。为了排除造成读数偏