

水文工程地质

第三辑

科学技术文献出版社重庆分社

总 目 录

第一辑：工程地质部分

施工勘测时应用地球物理法研究土的工程地质特性	B. M. 朋达连科等	(1)
岩溶发育地区的工程地质勘察方法		(4)
最近土工学应注意的问题	松冈元	(10)
对具有清晰剪切带的地下洞穴的分析	K. 兰嘎根	(13)
现场楔体剪切试验——一种新的土试验技术	T. 米拉塔	(16)
蒙特利尔岛工程地质研究中的方法	R. H. 格里斯	(29)
滑动面的位置及其形成假说	中村浩之	(42)
边坡稳定性研究中等效模型的应用	G. 雷克等	(48)
滑坡稳定的分析法	西尾邦彦等	(57)
判断滑坡滑动面的测试手段	藤田寿雄等	(62)
泥石流	U. A. 马隆科夫斯卡娅	(68)
泥石流的调查研究现状	山内修	(71)

水文地质部分

利用人工染色孢子示踪岩溶区地下水流	G. D. 加得讷尔	(77)
褶皱山区地下径流的分带性	Б. И. 毕萨尔斯基等	(84)
根据水的动态分析研究地表水与地下水的相互联系	B. C. 科瓦列夫斯基等	(87)
关于秦野盆地水无川扇状地带的深层地下水问题	横山尚秀	(90)
无压地下水系的模拟	W. A. 穆勒伊等	(95)
海岸地区淡水注水井三维淡、盐水界面的计算	杉尾哲, 上田年古比	(99)
在地下水化学成份的形成中醋酸根离子的参与	落合敏郎	(109)
地下水物理勘探	C. Γ. 麦利卡诺维茨卡雅	(112)

第二辑：工程地质部分

第四纪沉积物的风化作用	T. Γ. 里亚申科	(1)
以考虑各层压密度的层厚换算法予测压密沉降速度的方法	稻田倍穗等	(10)
饱和粘土压密性状线性粘弹性的考察及其应用	安泉一哉	(15)
岩石和岩石裂隙带的抗剪强度	N. 巴顿	(23)
关于具有软弱岩石之岩石的破坏机制的基础研究	西田正等	(44)
利用地层电阻率系数法进行岩体评价	藤泉忠一等	(50)
滑动面的形成与滑坡发生条件的考察	中村浩之等	(55)

岩体分离面的表面形状 和抗剪强度的关系

吉 中 等

一、前 言

岩体的力学分析方法发展到今天, 岩体的真正力学性质如何? 又如何量的方面加以表示? 关于这样一些基本问题的未知点还很多。由于岩体中存在着各种不同规模的不连续面, 或者是由于变质和风化等局部变化的多样性等使问题的解决就困难了。

在岩体中, 节理、层理、断层等地质分离面和不连续面是作为基本组成要素而存在的, 抽掉它们的性质和存在就不能被认为是岩体了。如照片(略)近地表的花岗岩露头, 在几个方向的节理系中显示了典型的分离面分布的情况, 为了评价这样岩体的性质, 通常是进行现场岩体试验, 但是由于实施方面的限制, 试验面积不得不小于 0.4m^2 , 要根据这样的测定值预测像照片(略)所示那样广阔范围的岩体的性质则是困难的。因此, 要解决这样的问题, 除了按照岩体试验的要求进行实际调查之外, 还必须研究与更大范围的岩体有关的基本要素。

岩体的破坏不是由于构成岩石强度的作用, 而大多是沿着其已有的分离面发生的。特别是斜坡的破坏, 分离面的存在是决定性的因素。像坝基那样的大型地基, 其破坏与分离面的关系则更大。基于上述考虑, 本文以花岗岩的资料为中心, 论述分离面的有关性质, 其中重点是讨论对抗剪强度有很大影响的分离面的表面形状的调查方法、分离面的形态和表面形状与抗剪性能间的关系。

二、表面形状和糙度的测定方法

由于分离面上的凹凸体是由各种尺寸(从微观尺寸到数米)的起伏形状构成的, 所以测定时必须根据所研究对象的大小而改变方法。

(1) 岩体露头的表面形状和糙度的测定。

断面曲线的测定方法有几种, 最简单的是像图1(a)那样, 在岩体表面上放置一定长度的基准线, 然后记录下基准线与表面间的间隔变化。兰格斯(Rengers)发明了基准线长为 $20\sim 200$ 厘米的表面糙度计, 糙度计的深度为实际尺寸, 其长度可自动缩小 $1/5$ 。作者以下述方法进行了试测: 把基准线长度取为 100 厘米, 安放一个铁心(使其与基准线成直角)用手使其滑动, 并按 $1:1$ 的比例尺直接记录其移动情况, 用该方法可测定起伏差在数毫米以内的糙度。另外, 利用分离面的直角摄影和立体照片来分析糙度的方法也在试行中。

测斜仪——测定地层方位和倾角等的测斜仪和罗盘——的利用: 费克尔和兰格斯所采用的方法是在罗盘上安装一圆板, 把圆板任意地安放在分离面上测定其走向、倾向, 在若干个这样的点上进行测定, 然后求出表面粗糙角的分布和圆板尺寸的关系。选择 3、4 种类型的圆板尺寸 ($5.5, 11.0, 21.0, 42$ 厘米), 求出了尺寸和粗糙角间的关系(图

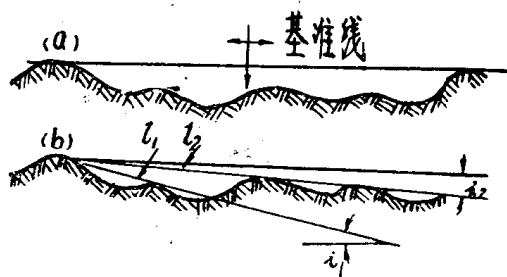


图1 表面形状和糙度测定方法

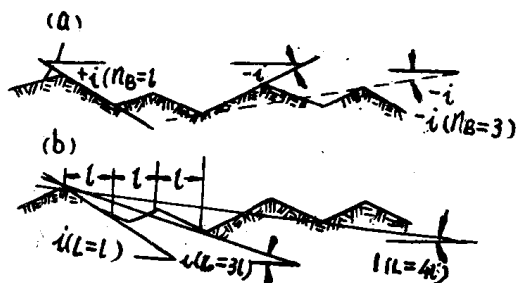


图2 断面曲线的表示方法

1(b))。

(2) 试样表面糙度的测定

可以用低倍率的触针型表面糙度测定器，也可以用测定深度的立体显微镜，以及一般市场上出售的测定器。

三、表面形状和糙度的表示方法

一般，固体表面，因其加工处理程度的不同而会具有各种各样的形状和糙度。这些形状和糙度具有复杂的形态和分布，不能用单一的指数关系表示，而具有统计量的属性。

对于用金属工具等切削加工面的形状的误差，规定了几种表示方法(JIS·B·0101, 0610, 1970)，不管那一种都是用高度单位表示的，即最大高度，10个点的平均糙度(中心线糙度等)。另外，在形状误差中还要把周期较短的糙度和周期较长的起伏差区别开来。岩体不像切削面那样具有明显的、规则的起伏性，因此可考虑用其独自的表示方法。

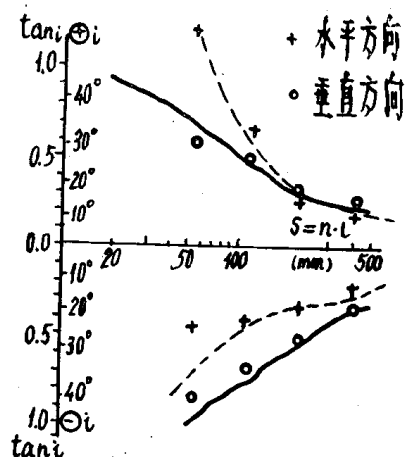


图3 最大粗糙角与单位长度的分布关系

断面曲线的表示法：对于任意长度的基准线，如果能够求得像图2所示那样的曲线，则建议下述两种表示方法，即像图2(b)那样以一定的单位长度 l 来均等划分基准线，然后求出各区间直线的坡度，以及像图2(a)那样，将转折点之间以直线联结，然后求出直线的坡度。在每一种情况下都要把区间长度依次增大；例如在后一方法中，依不断增长的次序联结各转折点，并求出所得直线的坡度，并由此求得角度分布与长度间的关系。兰格斯(Rengers)指出了上述关系(如图3)。而巴顿则用下式定义了糙度基线百分率A. B. (Asperity Base)，并求出了A. B. 与角度分布的关系：

$$A. B. = (n_B / N) \times 100\%$$

式中 N —包含在基线中的转折点的数； n_B —求坡角线的转折点间小于1的转折点数，参阅图2(a)

用测斜仪测定：由于在每一种单元长度(相当于圆板的直径)条件下都分别求出若干个点的三度空间方位，因此应像图4那样，用赤平投影方法把它们表示在等面积投影网上，就可求出不同单元长度条件下粗糙角的分布范围。像图3那样，可以由图中求出分离面任意方位上的粗糙角的分布，图4中的各闭合曲线是根据不同尺寸的圆板所测定的粗糙角范围绘制的。

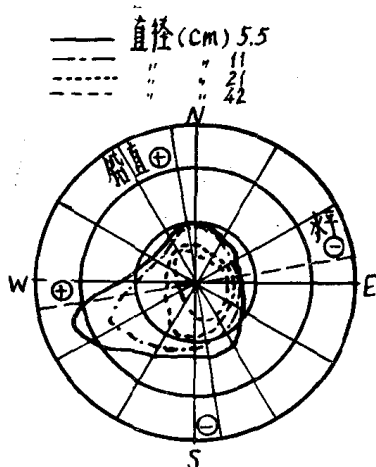


图4 以地质调查用的罗盘表示测定结果：用不同直径的测定圆板所测得的粗糙角的分布范围

四、花岗岩分离面的表面 形状和糙度的测定实例

对于花岗岩节理面，用图1(a)的方法取基准线长为100厘米，在现场共测定了75条测线，地点在爱媛县越智郡的大岛上，此岛产有称之为大岛花岗岩的优质石料。测定是沿节理面的走向和倾向二个方向进行的。断面曲线的例子表示在图5中。为了比较，在图5的下栏内放大表示了试验片极小区间内的粗糙情况的例子。分离面特征的实例表示在照片2(略)内

首先，利用图6研究了节理面形状的规律性，以找出各断面上肉眼可见的波的深度和宽度之间的关系（二个相邻的向上突的转折点之间的长度为波的幅度，例如图1(b)中的 l_1 是小波的幅度，与 l_1 垂直的最大深度为波的深度）。虽然对于这种关系必须按不同的方位加以表示，但是为了了解总体趋势，加之研究对象又是均一的花岗岩，故这里笼统地表示在一起。图6表明，在波的宽度和深度之间，总体来看是有比例关系的。从图6还可以看出，尽管表面的凹凸体是复杂的，但它们基本上是相互重合的。就平均情况而论，当基准线长(波长)为 L ，坡度为 i 时，

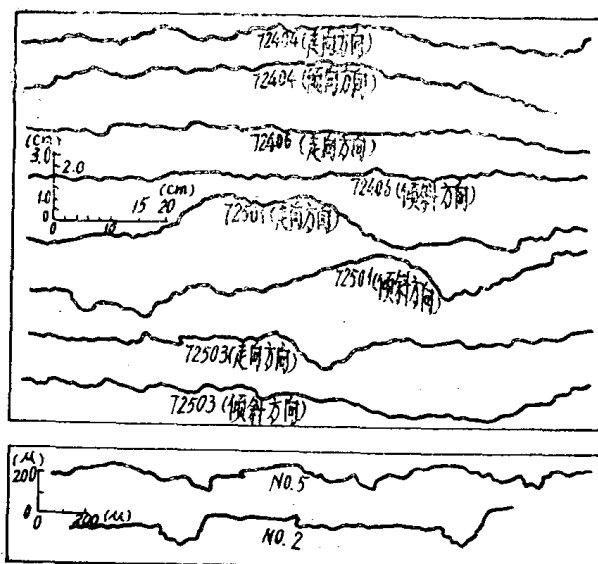


图5 自然节理面上的形状和糙度的测定实例

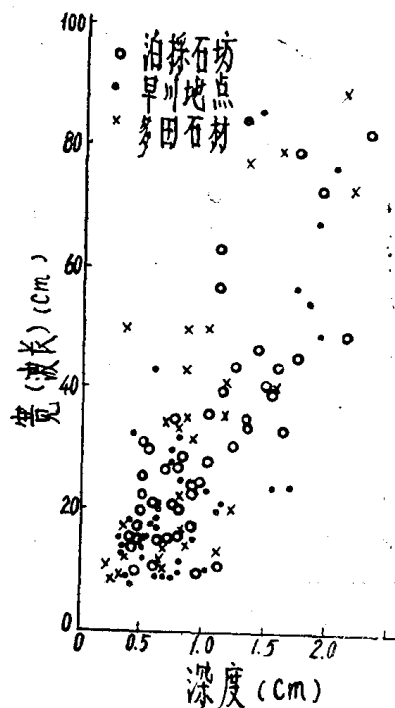


图6 断面曲线上凹凸部份的宽度和深度的关系

$(\frac{1}{2})^n \cdot L$ 的波具有 n_i 的角度。根据上述情况可以判明，诸分离面在上述糙度方面的形成机制是相同的。

其次，求出了图2(a)中的断面曲线上各转折点的直线的坡度分布。像第三节所说的那样，对应于各个A. B. 进行了角度计算，因为在每一测线中都是按相同的 n_B 求出 i 的，所以求算了它的平均值和标准偏差。为了计

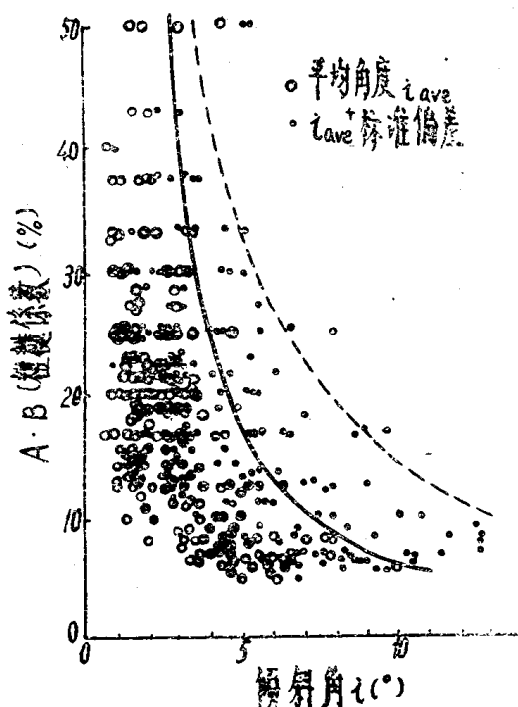


图7 A.B. (糙度系数百分率) 与倾斜角的关系

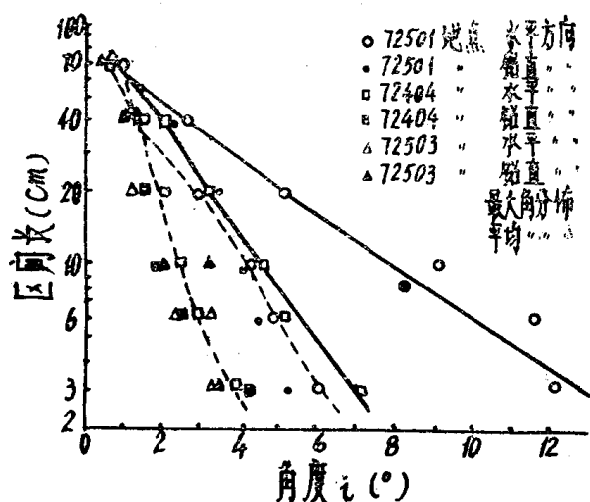


图8 单位区间长度与角度间的关系

算上的方便,分析时测定点的区间均取80厘米。图7是表示平均粗糙角和平均粗糙角+标准偏差与A.B.间的关系的图解。为了把全部测线的数据作出图来,虽然其分散性很大,但是如果注意其总的趋势和上限线,便可发现,岩体的A.B.与*i*之间的关系则表现为:*i*随A.B.的增大而急剧减少,约有50%的A.B.相当于80厘米的长度。

图8是按图2(b)的方法求出每种单位长

度的最大角度(但是取峰值段以下的值)和平均角度的,并以半对数坐标表出长度和角度的关系的。虽有分散性,但在同一测线中两者均具有直线关系。由于此分析中基准线长度是取100厘米,故当单位长度为100厘米时, $i = 0^\circ$ 。若单位长度采用更大的波长,且假定这时图8的关系也适用于更大的单位长度,则只要在图上平行移动此关系到所必要的长度就可以了。霍埃克(Hoek)认为单位长度取10米而 $i = 0^\circ$ 时的直线关系可相当于第五节所述的巴顿的 i_0 和垂直应力的关系,并建议将其用于斜坡的设计中。

五、关于分离面的表面糙度与抗剪性能间的关系的考察

巴顿根据模型试验和斜坡调查第一次明确地揭示,岩体分离面上的凹凸体对沿此面的抗剪强度有着很大的影响。这个概念表示在图9的模式中,即当正应力与材料的强度相比十分小时,破坏发生的形式主要是占有粗糙角*i*的分离面的滑移。当正应力十分大时(例如比单轴抗压强度大)破坏与角度*i*无关,而是以材料本身的剪断形式发生。图9表示含有分离面的岩体的抗剪强度,其 $\tau_f \sim \sigma$ 关系是以两条实线表示的。前者,根据滑移面上的应力条件,可得:

$$\tau = \sigma \tan(\phi_0 + i)$$

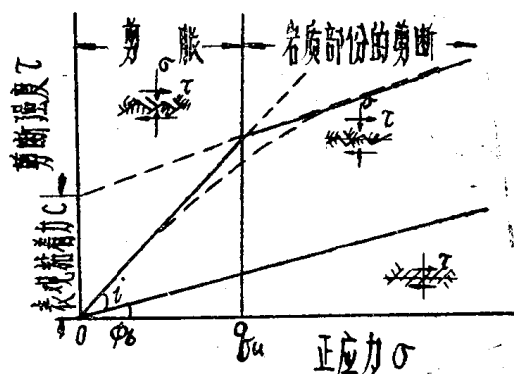


图9 节理面的剪切模式

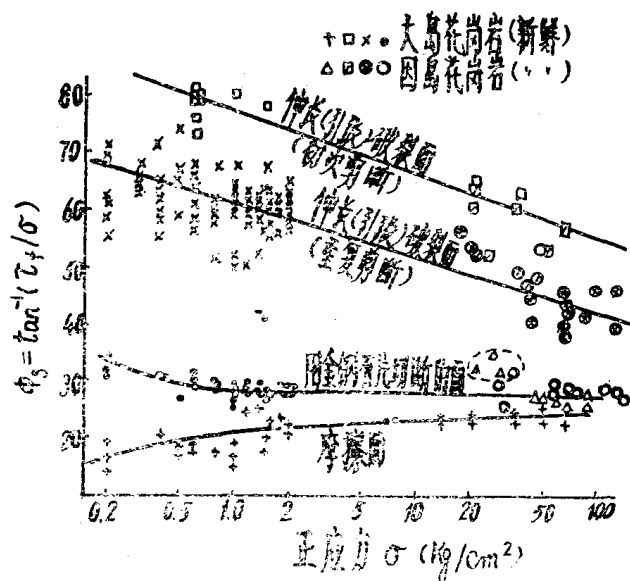


图10 正应力 σ 对切线摩擦角 ϕ_s 的影响

后者则可用材料本身的抗剪强度来表示。式中 ϕ_0 为库仑摩擦角。

但是，实际分离面上的凹凸体，正像上节所看到的那样，是非常复杂的，用什么样关系和上式联系起来则是个问题。在以往的研究中 τ — σ 的关系是以连结两条线的曲线来表示的（如图9中虚线所示），因此，与每 σ 所对应的 i （剪胀角），或者说与作用正应力 σ 相对应的特定值（有效粗糙角 i_e ）所表现出来的抗剪强度，乃是由沿凹凸面滑动和岩质部分的剪断二者迭加而构成的。下面着重叙述剪断面的尺寸对不同正应力下的有效粗糙角和抗剪强度的影响（尺寸效应）。当不同程度的糙度叠加在一起的面（如图5所示）遭受剪力作用时，此面的粗糙情况对抗剪性会有什么样的影响，这个问题可在花岗岩试件的室内试验中加以考察。图10以 ϕ_s （ $\tan^{-1}\tau/\sigma$ ）的形式表示具有各种糙度的新鲜花岗岩的人工分离面当其承受0.2~120公斤/厘米²的正应力 σ 时的抗剪强度。在 τ — σ 曲线上，因为当 $\sigma=0$ 时 $\tau \approx 0$ ，所以 ϕ_s 便是每一 σ 时的破坏曲线的切线的倾角。试件的单轴抗压强度为1000~1700公斤/厘米²，剪断面积为28厘米²，且各试验面具有如下的形状。通过压裂和点荷载而造成的引

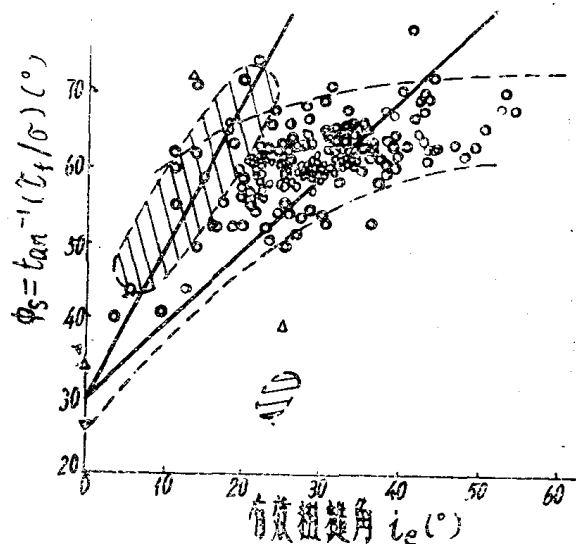


图11 最大剪应力时的剪胀角与 ϕ_s 的关系

张破裂面，其表面的特征乃是在1厘米左右的波长上迭加了结晶粒子破裂面的糙度。

用金刚石片切出的断面具有最大为30 μ 的糙度。由于波的高度是均一的，所以凹凸体不会啮合。研磨面则呈镜状。试验面全取湿润面。

尽管 σ 对 ϕ_s 的影响是复杂的，但仍可作如下的概括。引张破裂面的初次剪断和重复剪断之差，乃是由陡尖角的凹凸部份的剪断而造成的，而重复剪断与金刚石片切断面之差则主要是由于表面形状效应所造成的。像以往所知道的那样研磨面的 ϕ_s 之所以随 σ 增大而增大，其原因是由于在平滑的固体表面间的摩擦中存在有可见的不纯物膜的影响所致。

另外，在明显的形状效应的引张破裂面的剪断中会产生多大的剪胀角 $\tan^{-1}(dv/dh)$ （有效糙度角 i_e ），可根据实际的位错（水平 dh ，垂直 dv ）来求得。图11即是研究此 i_e 角与上述 ϕ_s 角间的关系的图解。图中还表示有巴顿根据石膏模型所测得的实验值。它乃是引张破裂面的初次剪断的峰值强度。花岗岩的数值是重复剪断值。由于切断面上的 i_e 实际上等于0，所以全部数据大体上都分布在虚线的范围内。引张破裂面上 i_e 变小的

范围相当于受高 σ 作用的部份，由于装置的不完善，没有取得此范围的测定值。从图11可以看出，除 i_e 超过 40° 的那段特别高的部分外而其余的部分相对于 ϕ_s 均显示出相当于 $2i_e$ 的最高的糙度效应，因此即使重复剪切也很少会发生单纯的滑移（相当于 $\phi_s = \phi_o + i_e$ 的情况），但仍然尚有啮合部分剪断的现象。

巴顿统计了相当于引张破裂面那样的粗糙面的峰值抗剪强度的 i_e 角，并得出如下关系式：

$$i_e = 20 \log_{10} \left(\frac{\sigma_c}{\sigma} \right)$$

式中 σ_c 是组成粗糙面的材料的单轴抗压强度。式中的20是糙度系数， $\log_{10}(\sigma_c/\sigma)$ 则相当于因正应力而产生的低减率。根据斜坡稳定性分析资料可以看出，把 σ_c 降低到 $\frac{1}{4}$ 时所求得的 i_e 可很好地与实际的稳定条件相吻合。这与下述的尺寸效应问题也有关。

当材料性质和糙度都相同的分离面在相同的 σ 作用下进行剪切时，其抗剪强度随着剪切面积的增大则逐渐接近于重复强度乃至残余强度；而并不显现出峰值强度。这种情况可用几个实例加以说明。在应力—应变关系方面，沿石英闪长岩节理面进行的试验是比较典型的例子；而在 τ — σ 的关系方面，沿石灰岩节理面所进行的大型野外现场剪切试验（剪断面积 4.4 m^2 ）则是很有代表性的。图12和图13即是表明这一情况，它说明了由于面积增大的影响而峰值强度或表观粘着力逐渐消失的情形，换言之，由高级次陡角度的凹凸体所组成的啮合部份对抗剪强度的影响随着其尺寸的增大而减小。

在一般情况下，分离面的真正接触面积 (A_t) 与总面积 (A) 相比则是极其微小的一部份，其比值 (A_t/A) 是作用于分离面的正应力 σ 的函数，具有随 σ 的增大而按比例增大的性质。一般认为，这种性质能使分离面的应力集中程度随着高级次糙度部份剪断面积的增大而增大，结果就易于引起接

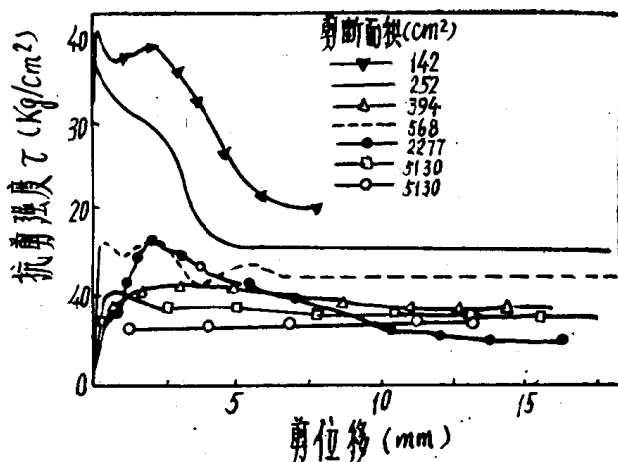


图12 不同剪切面积下剪应力-应变关系

石英闪长岩的节理面和所有的试验面与荷载轴均成 45° 角

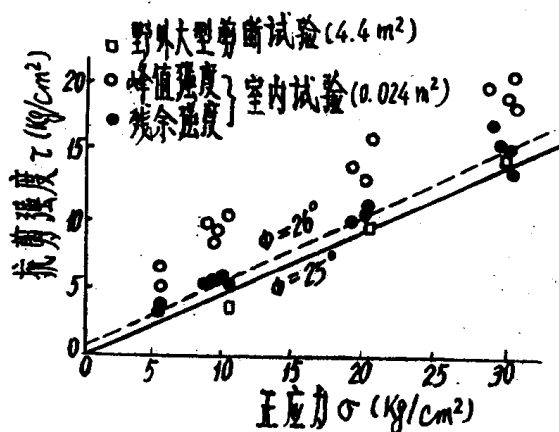


图13 剪切面积对抗剪强度的影响

触部份的变形和累进性破坏。这样在剪切面积不断增大的情况下，糙度对抗剪性能的影响会逐渐从高级次的糙度向较低级次的糙度转移。

巴顿和迪尔在研究由砂岩和石灰岩所组成的斜坡的稳定时发现，岩体分离面的抗剪强度与第一级次的大尺寸的凹凸体比与小尺寸的凹凸体的关系更为密切。另外，霍埃克对西班牙露天矿的斑岩斜坡（高10—30米）的9个斜坡崩坍点进行了分析，所得结论是，岩体破坏试件的抗剪试验值不是峰值强度而是残余强度。巴顿还在同一斜坡的分析中，将其有效粗糙角 i_e 的计算公式中的单轴抗压强度 σ_c 换成 $\frac{1}{4}\sigma_c$ ，所算出的结果合理地说明

表面性状和正应力强度对花岗岩 裂隙抗剪性能的影响

吉中尤之井等

一、前言

在前次的报告中,关于花岗岩裂隙面在较高正应力 σ_N 作用下的抗剪性能说明了如下两点:①基岩的风化程度几乎没有影响;②在给定的 σ_N (20—120 公斤/厘米²) 的范围内, σ_N 与抗剪强度间大体成直线关系,且由于表面糙度的影响而产生表观内聚力 c 。

在本文内,增加了低 σ_N 下的剪切试验的结果,论述了①前述表观内聚力 c 的性质;②抗剪强度和膨胀的关系;③湿度和裂隙充填物的影响等方面的问题。基于以上讨论,阐明具有各种糙度的裂隙在变化范围很大的 σ_N 作用下的抗剪性能的基本性质就是可能的了。粗糙面抗剪强度的测定,是以残余强

度为主;在粗糙面初次剪断时产生的峰值强度,乃是由于剪切面上特定突起的剪断而产生的,其分散性是很大的。即使在相同的平均剪应力下,如果剪断面积增大,结果就会发生很大的应力集中,这些凸起体很容易被破坏,峰值强度随之消失,从而具有近似于残余抗剪强度的性质。这种情况是伯奈克斯(1969)和普拉特,布莱克以及布雷斯(1974)等依据现场大型试验阐明的。另一方面,残余强度是不大受尺寸效应影响的量。基于这样的理由,本研究的重点则是求定遭受初次剪断后的抗剪强度。

二、研究方法和试样

考虑到为了能够较容易地大量取得性质

了斜坡的破坏情况。(在模型试验中 i_0 是根据单轴抗压强度求出的)

可以认为,在上述现场岩体的分析实例中,尺寸效应对抗剪强度的影响,如上所述所表现出来的现象是相同的。

六、结束语

本文以花岗岩的资料为中心,论述了决定岩体性质的基本因素之一的节理面等的分离面的形状、糙度的测定方法,以及它们与抗剪强度的关系。这些问题为阐明复杂的岩体性质提供了必要的基础资料。但是从现状

来看,表面形状的测定方法还不能说已发展得很完善了。同时在大尺寸分离面的性质和室内或一般规模的现场的试验结果的对比方面还存在着困难。但是,岩体分离面显著的地基破坏,多以这样的分离面为中心而发生,这是大家所熟知的。现场岩体试验最初的国际标准案之所以想把分离面的抗剪强度测定包括在其中,可以认为其原因也就在于此。

参考文献16种(略)

译自《土と基楚》1976年,24卷,1期
7—12页

杨淑碧译
王士天校

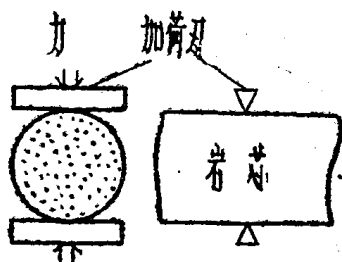


图1 岩芯点荷载张力破坏试验的方法

相同的试样，用于研究的花岗岩分离面选择了下列几种：①根据图1所示的点荷载法，将从同一岩块中采取出的岩芯（直径60cm）压裂而成的张裂面（以下简称EF面），②同样岩芯用金钢石片切开的面〔以下简称SC面（锯开面）〕和镜状磨光面（简称P面）等。

此外，还有用于测定岩面糙度的天然节理面（NJ面）。

以小坂式岩面糙度计^[7]（SE-O）测定SC面、P面和NJ面的粗糙情况，表示于图2内。虽然定量地表示各类岩面的粗糙情况是困难的，但就平均值而言，P面：深度 $d=1\times 10^{-5}$ 毫米，幅度 $l=5\times 10^{-3}$ 毫米；S面： $d=5\times 10^{-3}$ 毫米， $l=2\times 10^{-2}$ 毫米；EF面： $d=0.4$ 毫米， $l=1$ 毫米；NJ面： $d=1\times 10^{-2}$ 毫米。

所使用的岩石是爱媛县大岛（余所国）产的中粒花岗岩和广岛县因岛市大浜町的风化花岗岩。表1示出了这些岩石的物性指标。

剪切试验，在低正应力下（2公斤/厘米²以下）使用了土质试验用的下箱移动型的直

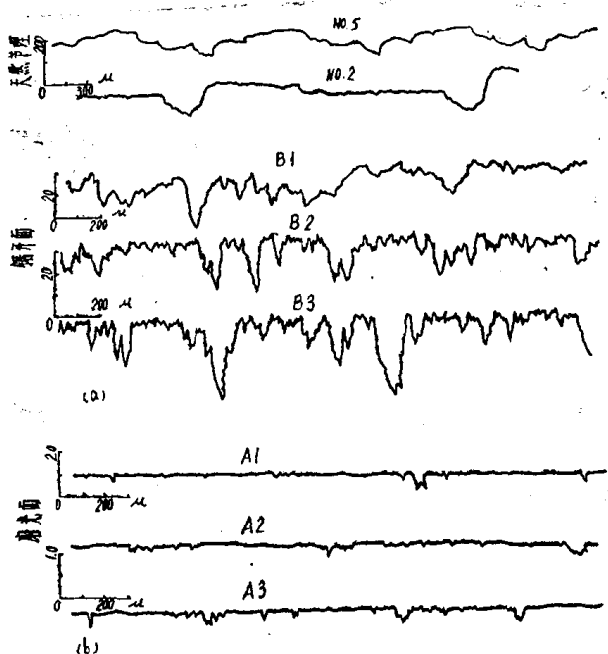


图2 分离面表面的粗糙情况

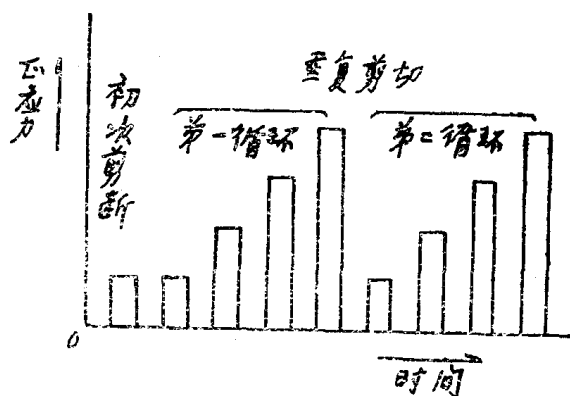


图3 剪切试验过程

表1

所使用的岩石的物性指标

	大岛花岗岩 (爱媛县宫洼町)	因岛花岗岩 (广岛县因岛市)
试样名称	EF № 1~19 SC № 1~4 P № 1~3	SC ₁ W~SC ₉ W
孔隙度 (%)	平均 0.61	0.95~5.30
单轴抗压强度 (kg/cm ²)	平均 1.764	约 200~1,900
压裂抗张强度 (kg/cm ²)	平均 87	约 20~120
肖氏强度	平均 95	约 50~100

剪试验机；在高的 σ_N 条件下，则使用了简易单面剪切试验机。剪切方法采用了固定正压力下的剪断；剪切速度则采用每分钟一次的速率。剪切过程如图3，在单独初次剪断之后使 σ_N 依次变化，相继进行两个循环的剪切。但是，由于每次剪断所发生的残余剪切位移作用而在下次剪切之前都会使其退回到原来的位置。

给与试样的条件是①湿度变化：要求有充分浸水的湿试样和在 110°C 下干燥的干试样两种；②剪切面上有无充填物：没有充填物；有粉土（花岗岩的切削粉末）和细砂（丰浦标准砂）充填。充填物的粒度和比重将在3.5节中叙述。

三、实验结果及其考察

3.1 初次剪断时的峰值强度

在糙面（EF面）分离面制成后的最初的剪切过程中，由于陡角度的凹凸部分的剪断和剪胀而产生很高的抗剪强度。低 σ_N 条件下的抗剪强度 τ_f 和 σ_N 的关系以及高 σ_N 条件下的 $\tau_f - \sigma_N$ 关系分别表示于图4和图5内。

假如把图5内的关系当作直线处理，就会得出 $75^\circ - 80^\circ$ 这样非常高的抗剪角。在剪

切面的含水状态方面，虽然有干、湿之分，但实验结果没有差别。虽然在图5的高 σ_N 范围内包括了各种风化岩石（单轴抗压强度 σ_c 约为246—2000公斤/厘米²）的资料，但是它们在所给定 σ_N 的范围内（ $\sigma_N \leq 60$ 公斤/厘米²）均并未显示出因基岩强度的不同而引起什么变化。

巴顿(1971)根据含砂石膏的模型试验提出了求算初次抗剪强度的下列公式：

$$\tau_f = \sigma_N \tan 70^\circ \dots \dots \text{当 } \sigma_c / \sigma_N \geq 100 \text{ 时}$$

$$\tau_f = \sigma_N \tan \left[20 \log_{10} \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_N} \right) + 30^\circ \right]$$

$$\text{当 } \sigma_c / \sigma_N = 100 - 1.0 \text{ 时}$$

在图6中，取 σ_c 为变参数时而示出 $\sigma_c = 500, 1000, 1500$ 公斤/厘米²的情况。正如该图所示，花岗岩的粗糙面与上式并不一定符合。其原因之一可认为是：正如前一篇文章所说的，花岗岩的风化达到孔隙度为6%的程度，主要是由于结晶颗粒的松弛而引起的（颗粒本身的强度变化很小）；另外，对于所给定的 σ_N 值来说，基岩的强度又十分高。

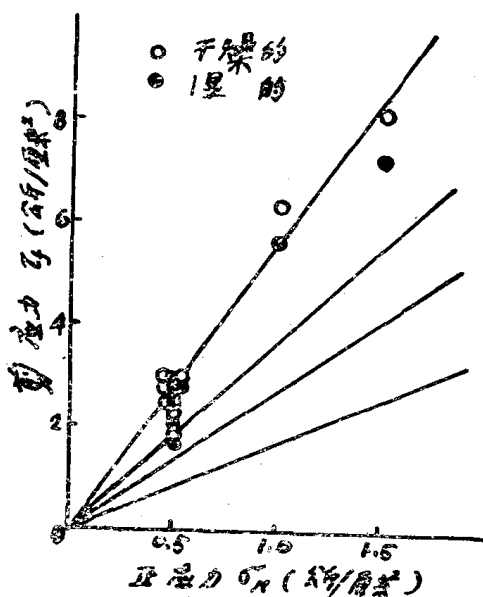


图4 粗糙分离面(EFS)的初次抗剪强度

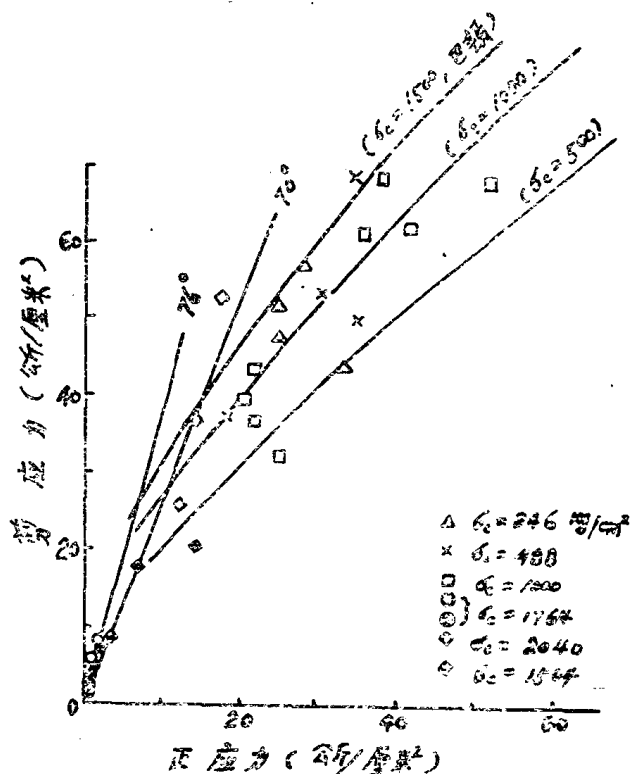


图5 初次抗剪强度和风化关系

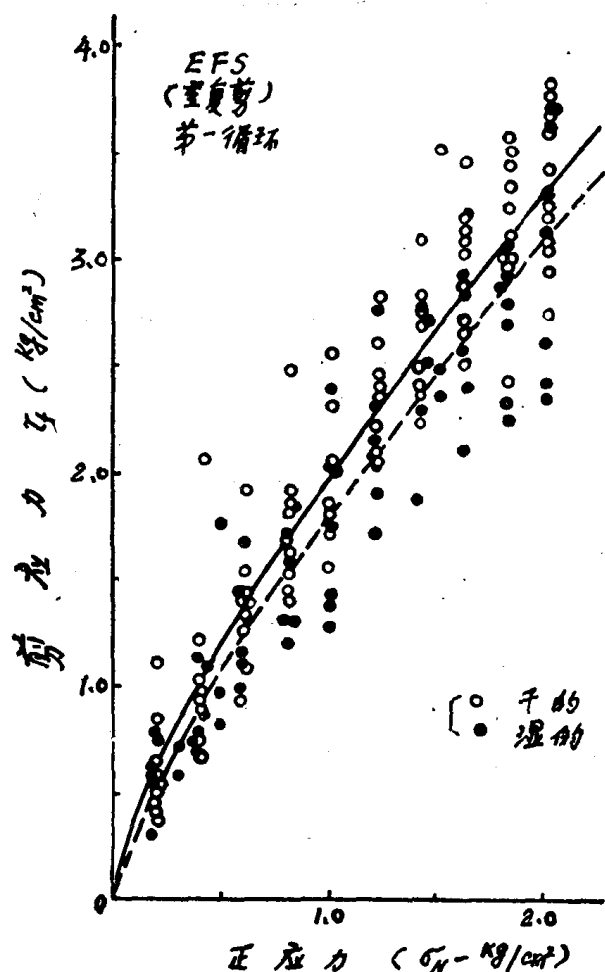


图6 重复剪切时的强度(第一次循环)

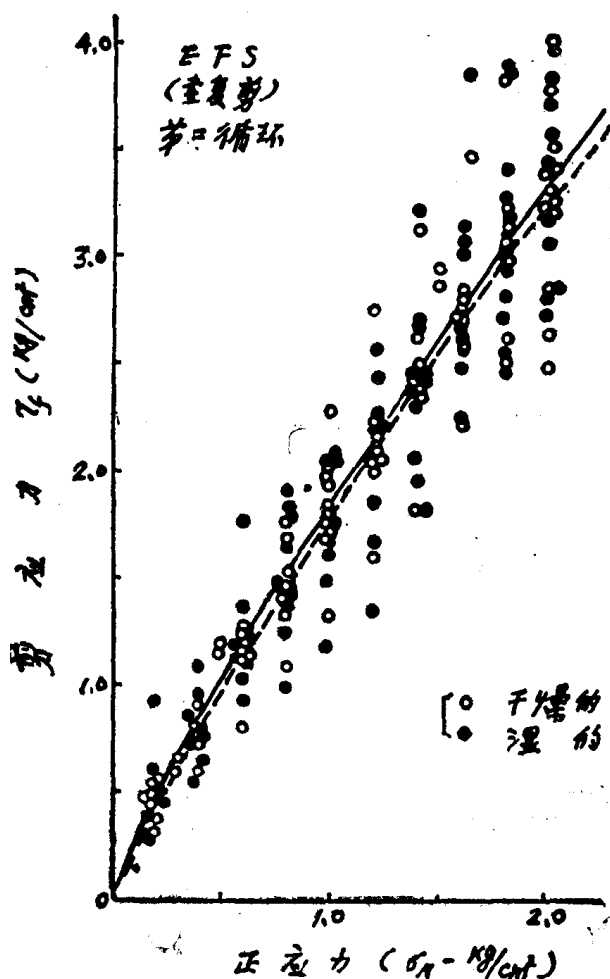


图7 重复剪切时的强度(第二次循环)

SC面和P面在初次剪切和重复剪切过程中,在其测定精度方面没有产生差异。这些面的性质将在3.2节中叙述。

3.2 重复剪切时的抗剪强度特性

在低 σ_N 范围内的初次剪断之后,使 σ_N 由0.2公斤/厘米²依次增大到2.0公斤/厘米²,并在各个 σ_N 阶段里测定 τ_f 。另外,为了估计因重复剪切而产生的 τ_f 的变化,上述使 σ_N 增大到2公斤/厘米²的操作进行了两个循环。图6,7表示EF面第一次循环和第二次循环剪切时的测定值。实线和虚线分别是干、湿两种条件下的平均值连成的曲线。图中表明:

①虽然重复剪切的结果总体上没有显著差别,但是当 $\sigma_N < 1$ 公斤/厘米²时,二次重复剪切的结果比较接近于直线,这表明,低 σ_N 范围对因岩面糙度所造成的凹凸不平的情况

是敏感的;②对于干、湿两种条件来说,干燥状态下的强度要稍高些;③随着 σ_N 的增大, τ_f/σ_N 逐渐减小, $\tau_f-\sigma_N$ 关系线的角度从70°左右连续地变到50°。

另外,EF面在高 σ_N 下的抗剪角平均为35°。如图8所示,以 $\tau_f-\sigma_N$ 间的双对数关系就可表示出其间的变化。高 σ_N 下的试样, σ_c 约为1000公斤/厘米²,它虽然比低 σ_N 下的试样弱,但是假如从3.1节中所述的事实来考虑,则试件的差别可以忽略不计。

按图8的趋势, $\tau_f-\sigma_N$ 间的关系可用 $\tau_f = a \cdot \sigma_N^m$ 近似地表示之,其中 $a = 1.8$, $m = 0.86$ 。

上述实验公式所表征的,是EF面遭受重复剪切时的抗剪强度。因为 τ_f 服从这样的幂函数法则,所以若以特定的 σ_N 区间表示 τ_f 时,

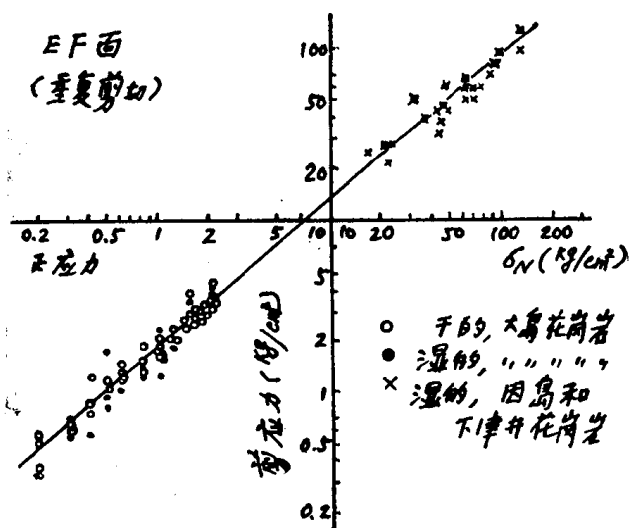


图 8 粗糙面的抗剪强度特性

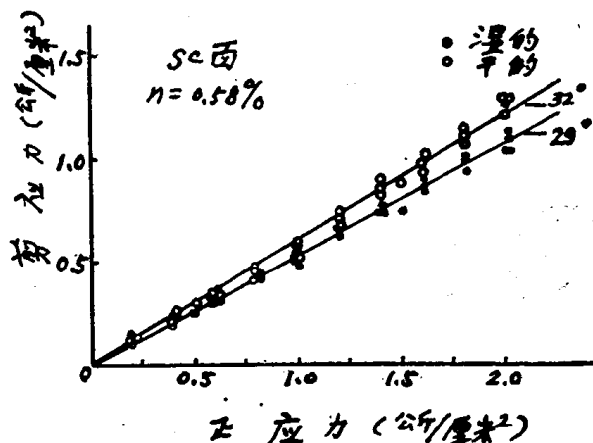


图9 SC面在低压范围内的抗剪强度

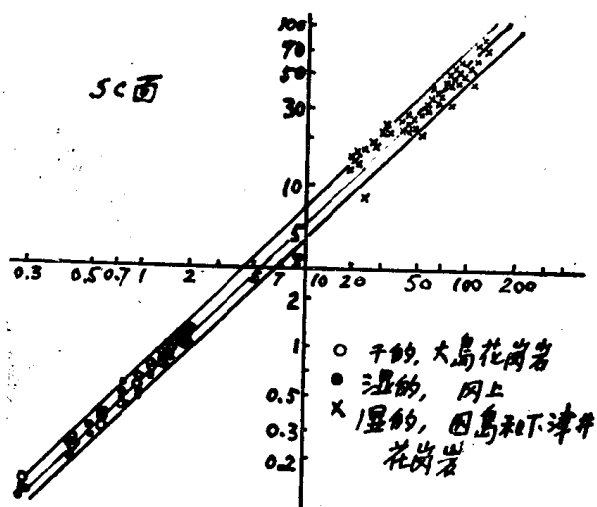


图10 SC面的抗剪强度特性

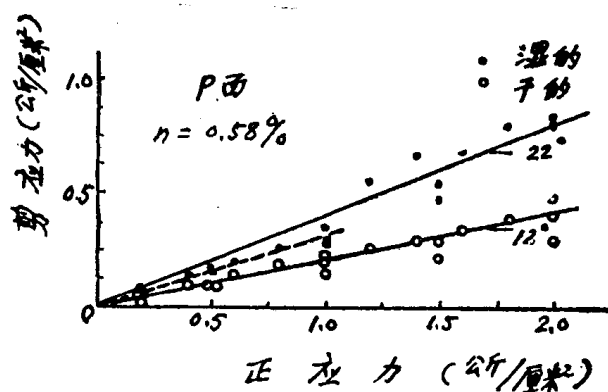


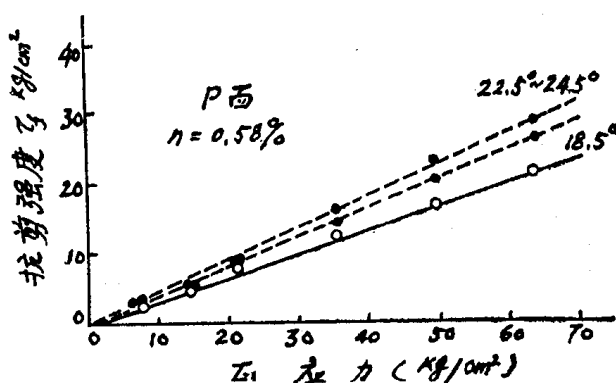
图11 P面的抗剪强度($\sigma_N = 2$ 公斤/厘米²)

表现内聚力就可显现出来了。幂函数法则问题在许多已有的文献中都讨论过了。

SC面(锯开面)的 $\tau_{\text{f}}-\sigma_{\text{N}}$ 关系如图 9 所示, 在干、湿两种状态下有明显的差别: 干的, 其抗剪角为 32° ; 湿的, 其抗剪角为 29° , 产生了约 3° 之差。因为在高 σ_{N} 下湿样的抗剪角平均约为 25° , 所以看来 SC 面也与正应力有某种程度的依存关系。

图10像图8一样,是用双对数坐标表示SC面全部资料的图解的。测定点大体沿 45° 线附近分布,如果应用前述的幂函数法则,则 $m=0.97-1.0$ 。

图11和图12分别表示 P 面在 $\sigma_N \leq 2.0$ 公斤/厘米² 和高 σ_N 区内的 $\tau_f - \sigma_N$ 关系。对于像

12 PS面的抗剪强度($\sigma_N \leq 70 \text{kg/cm}^2$)

P面那样平滑化了的面而言,正像以前的研究所阐明的那样,其湿润状态下的抗剪角较大,也就是说湿润状态为 22° ,干燥状态为 12° ,

相差约 10° 。在高 σ_N 下,如图12所示,角度都增大了,湿润状态为 23° ,干燥状态为 19° 。产生在P面上的这些特征,乃是由于固体表面能形成杂质被膜而会起润滑作用所致。但是,据说这类被膜具有这样一种性质:当其浸水和固体间接触点上的应力增大时就会消失。

下面将具有各种糙度的岩面在最大剪应力下的应力比 τ_t/σ_N 相对于 σ_N 的关系的成果概括于图13,其中包括P面和SC面湿润状态的资料以及干湿之差可忽略不计的EF面的资料。应力比仍然是以 $\tan^{-1}(\tau_t/\sigma_N)$ 的形式表示的。从图中可见,随着 σ_N 的增大,尽管P面和SC面具有像前述那样的各不相同的物理内容,但 $\phi_s/\tau_t-\sigma_N$ 关系图上各点与原点间的割线的坡度)却都渐近于 25° 左右。另外,对于EF面而言,初次剪断和重复剪切中的 ϕ_s 角均随 σ_N 的增大而降低,前者 $80^\circ \rightarrow 50^\circ$,后者 $70^\circ \rightarrow 40^\circ$;对应于 σ_N 由 0.2 公斤/厘米 2

到 100 公斤/厘米 2 的变化,两者的 ϕ_s 角均降低 30° 左右。

从这些资料可以看出,如果把花岗岩分离面的固有摩擦角 ϕ_μ 估计为 25° ,则可以认为:EF和SC面由于表面粗糙,使其表观摩擦角 ϕ_s 增大;P面,则由于被膜的存在而 ϕ_s 会降低。还有,对于P和SC面,如下述那样,以通常的精度($\frac{1}{100}$ mm)测定,未发现剪胀现象。对于EF面,剪胀角极大,显然这是 ϕ_s 增大的主要原因,另外,如果考虑到图2所示的各类面的粗糙情况,则显然除P面以外的所有的面都是原来的点接触,可以认为摩擦特性中的应力依存关系的原因也就在这里了。

3.3. 剪切位移特性

夹着分离面的上下两块岩体因发生相互剪切位移而会达到最大的强度。移动是三度

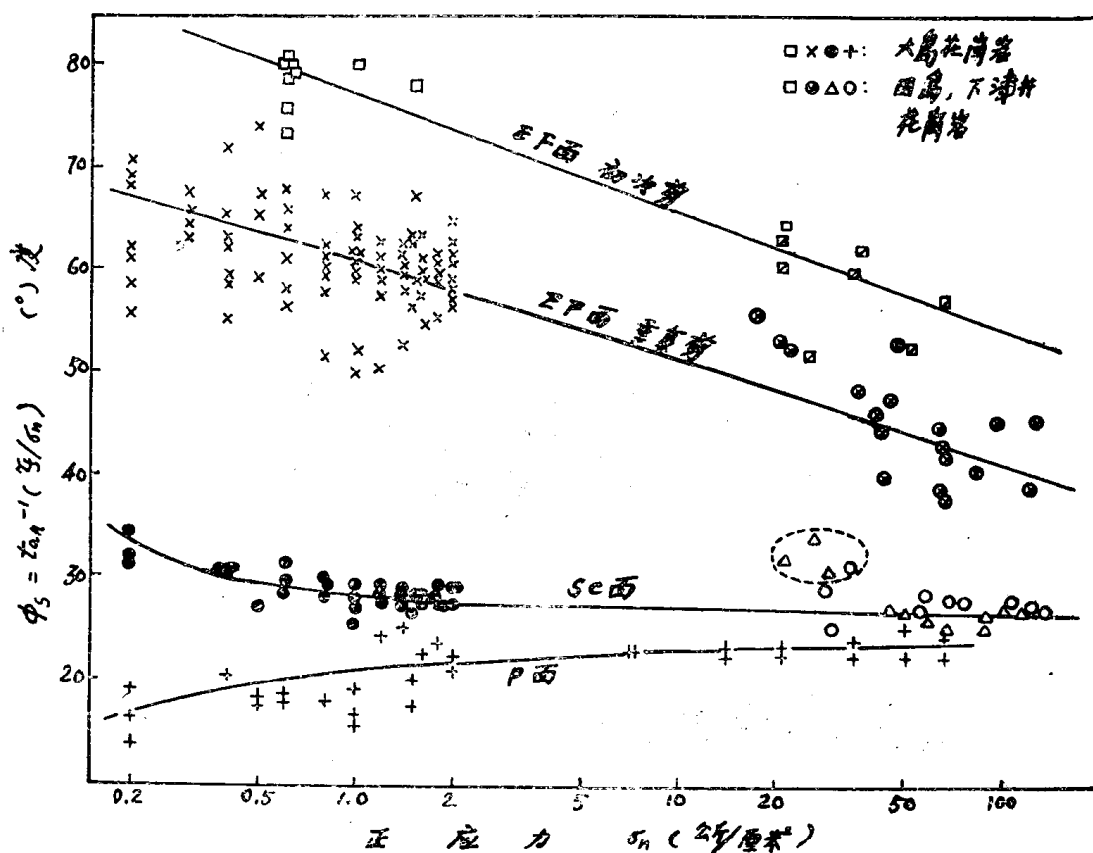


图13 抗剪强度对 σ_N 的依存关系

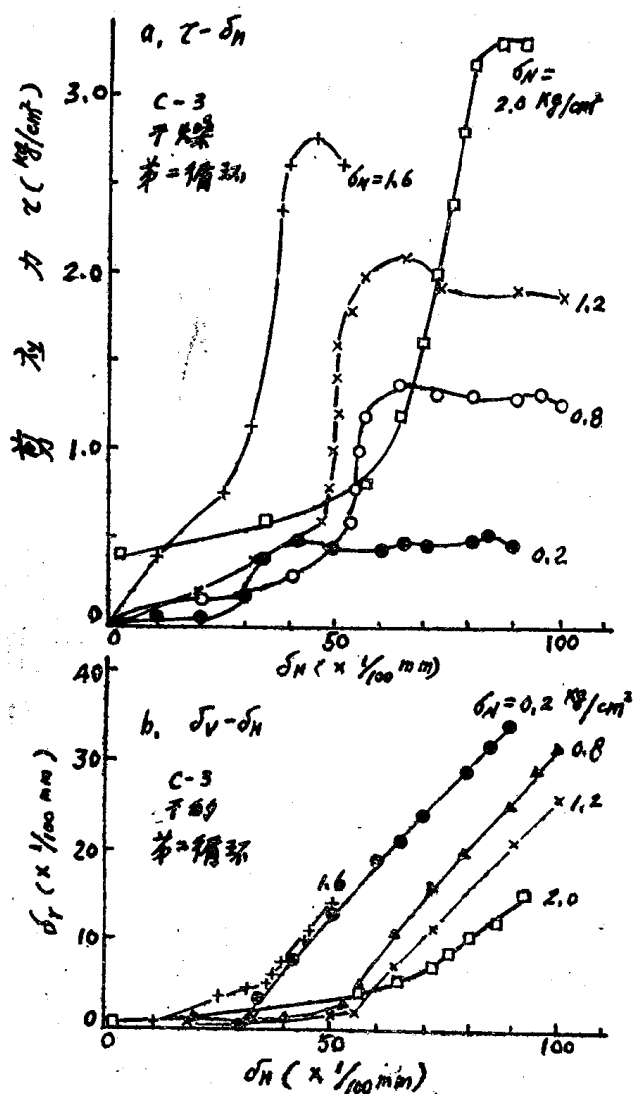


图14 剪切位移特性(a: $\tau-\delta_H$, b: $\delta_V-\delta_H$)

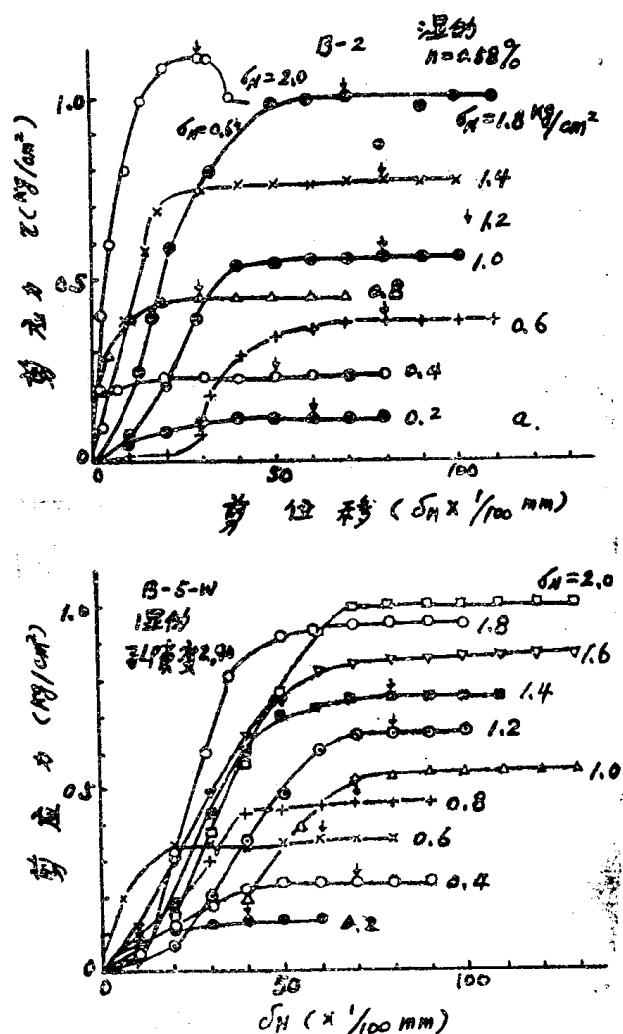


图15 剪切位移特性($\tau-\delta_H$)

空间的：通常剪力作用方向上的位移为 δ_H ，垂直方向上的位移为 δ_V 、转动*为 δ_R 。这些位移因岩面糙度(以三度空间表示的)、组成物的性质和 δ_N 以及位移的限制条件的不同而相异。

下面叙述每种粗糙面的位移特性。

EF面的 $\tau-\delta_H$ 和 $\delta_H-\delta_V$ 关系的实例示于图14。 $\tau-\delta_H$ 曲线通常是由初期的上升段和继而于 τ 峰值之后的水平曲线所组成。初期的上升段是由于表面凹凸部分的位移而造成的，从而有向较高的抗剪刚度方向变化的趋势，这主要是由于接触点间的接触角的变化

而引起的，这一点在 $\delta_V-\delta_H$ 关系曲线上清楚可见。 $\tau-\delta_H$ 关系线的坡度增大时 $\delta_V-\delta_H$ 的坡度也增大；剪胀角增大时，岩体就会出现表观体积膨胀(正膨胀)。直到 $\tau-\delta_H$ 曲线的峰值向残余强度转化之前剪胀角 d_n 大致都是以一定的角逐渐发展的。这些表明了 d_n 对于 τ_r 是起着重要作用的。

随着 δ_H^{**} 增大到 τ_r 时 d_n 即行降低，这表明岩石中抗剪强度的产生机制在由其凸起的上部滑动已转向对凸起本身的剪断。但是，在此阶段岩体风化影响之所以较小，可以认为是由于3.1节中所叙述的花岗岩的风化特性

* 原文误为回轴——译者注

** 原文误为 δ_H ，应改为 δ_H ——译者注

的缘故。

SC面的 τ — δ_H 关系如图15(a)所示,初期的上升曲线和与此曲线相连续的平缓曲线都是靠一定的滑动完成的。在SC面上 δ_v 大体为零。图15(a)是新鲜岩石(孔隙度 $n=0.61\%$),图15(b)是稍微风化的岩石($n=2.9\%$)。虽然两者之间在抗剪强度方面没有差别,但是当达到 τ_f 的 δ_H 时风化岩则要大些。

P面在干、湿两种状态下的 τ — δ_H 关系有很大的差别。干燥状态与SC面一样,如图16所示,但是湿润面则象图17那样,伴随着 δ_H 位移的进行显示出了具有振幅的所谓粘滑现象。因为在平滑的固体间的滑动中能经常观察到这种现象,所以霍斯金斯、耶格和罗森格伦(1968)等人在他们的研究中详细地描述了岩石中的这种现象。

在花岗岩体内,像P面那样的镜状、潮湿面可以在深处的并带有擦痕的剪切断裂带内观察到。本文仅指出P面的这种重要的粘滑位移特征。

P面也像SC面那样, d_n 为零。

最大剪应力的 δ_H 和 σ_N 关系,在评价分离面的剪切刚度时是必需的。图18(a),(b)是

EF面和SC面的 $(\delta_H)_{\max}$ — σ_N 关系图解。由图可见,EF面的分散性是非常大的,从而解释了粗糙面的下述特点:①岩面接合的微小差异控制着变形的刚度,② $(\delta_H)_{\max}$ 的上限值约为2%,③位移随 σ_N 的增大而减小。SC面显示了如下特点,即:与EF面相比,其分散性较小;在 $\sigma_N \leq 2$ 公斤/cm²范围内,位移在1%以下。上述图中的曲线是同一个面的 δ_H — σ_N 关系。

P面在干、湿条件下的性状是不同的,前者位移约为0.5%;后者由于粘滑现象而近似于平面位移。

3.4. 剪胀角 d_n 对抗剪强度的影响

图13所示的情况表明,产生 τ_f 时的 ϕ_s ,因面的粗糙度即对伴随剪切位移产生的膨胀影响因素的不同而有很大的差别。 $\tau_{\max}$ 点处 δ_v — δ_H 曲线的坡度 $\tan^{-1}(\delta_v/\delta_H) = d_n$ 和 $\tan^{-1}(\tau_f/\sigma_N) = \phi_s$ 间的关系表示于图19内。但是由于高 σ_N 范围的 δ_v 因装置不完善而未能测定,所以没有包含在图19内。虽然 $d_n = 0$ 是SC面和P面的共同特征,但因为P面有界面的润滑作用,所以只将SC面的 ϕ_s 的范围表示出来了。 $d_n > 0$ 是EF面的情况。虽然

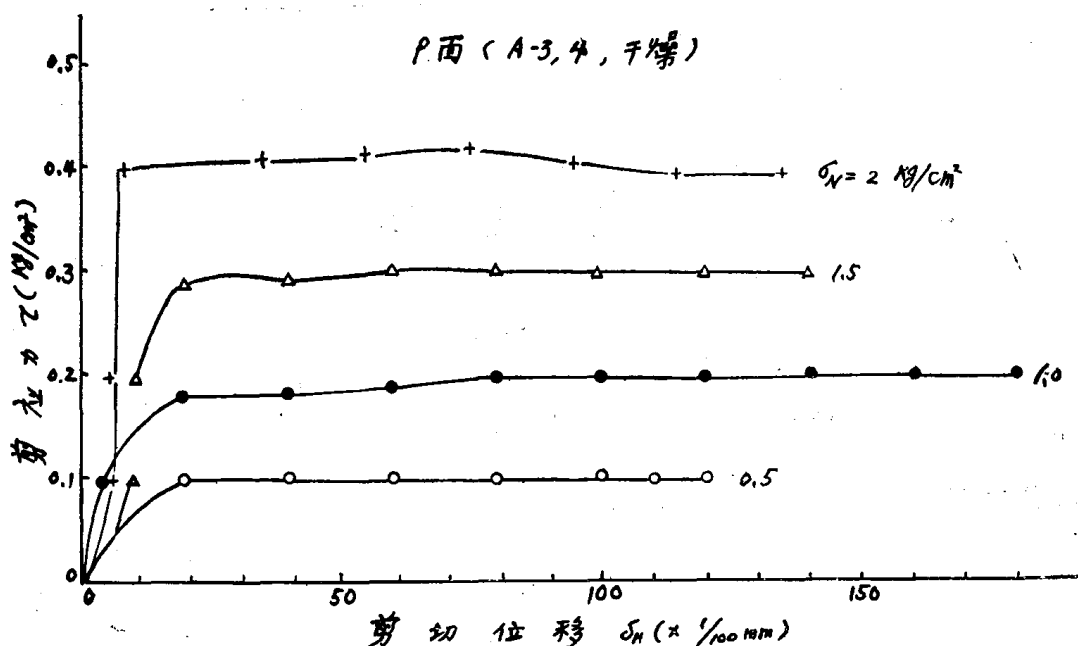


图16 干燥条件下P面的剪切位移特征

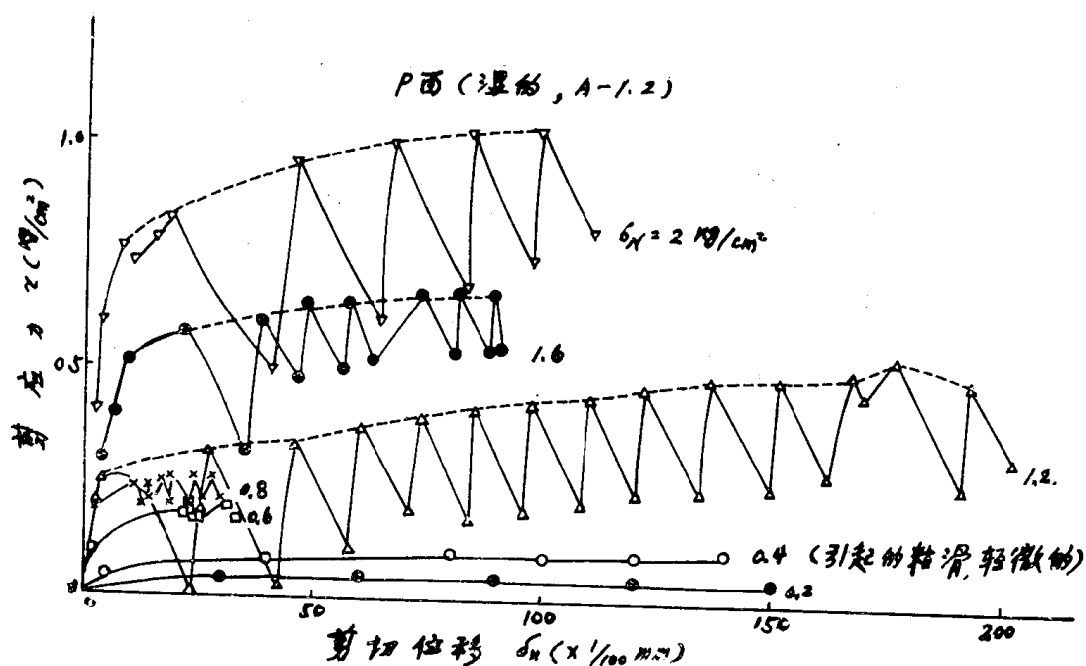


图17 湿润条件下P面的剪切位移特征

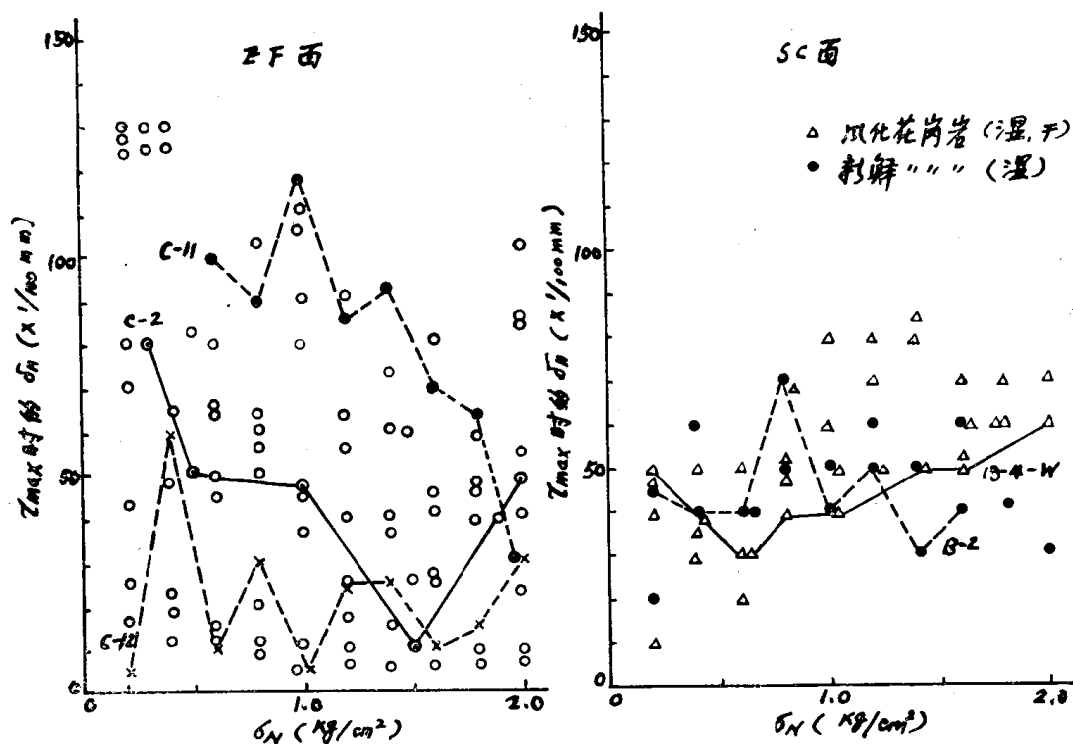


图18 最大剪应力 ($\tau_{\max}$) 时的剪切位移量

ϕ_s 随 d_n 的增大而增大；但是 d_n 超过 30° 之后， ϕ_s 的变化率就变小了。

一般来说，对具有规则凹凸角 i 的情况下的剪切，固体间的摩擦可以用抗剪强度 $\phi_s =$

$\tan^{-1}(\tau_f/\sigma_N)$ 即 $\phi_s = \phi_\mu + i$ 来评价。虽然图19内的 d_n 具有和 i 同样的内容，但是在 EF 面的 τ_f 中除膨胀之外就是固体剪切，所以 ϕ_s 则没有这样的简单关系。但是，在 d_n 为 30° 以下的