

全国水利水电地质勘察会议丛书之九

水工地質的岩石力學 性質及其新的計算方法

水利电力部东北勘测设计院等著

水利电力出版社



416037

混凝土坝在坚硬岩石地基上的抗剪强度

.....水利电力部东北勘测设计院 (2)

紫坪铺水电站坝基摩擦系数的选定

.....四川省水利电力厅水利水电设计院 (22)

黄河青铜峡水力枢纽工程坝基摩擦系数的选择

.....水利电力部西北勘测设计院 (33)

野外测定岩石弹性抗力系数和弹性模数的讨论

.....中国科学院 水利部水利科学研究院 (45)

地震法测岩石弹性模量试验总结.....水利电力部北京勘测设计院 (54)

混凝土壩在坚硬岩石地基上的抗剪强度

水利电力部东北勘测设计院

设计坚硬岩石地基上的混凝土坝时，混凝土与基岩及基岩本身的摩擦系数选择得是否恰当，直接影响着坝的稳定、造价与施工的工期。例如桓仁水电站撑墙坝的混凝土与基岩及基岩本身的摩擦系数由0.6提高到0.7，节省了混凝土15万方，折合人民币510万元。混凝土方的减少，相应的缩短了施工的期间，坝的稳定对下游人民生命财产的安全影响更无法估计，因此混凝土与基岩及基岩本身的摩擦系数的正确确定，有重大的实际意义。

一、坚硬岩石抗剪试验的分类

研究坚硬岩石的抗剪试验时，一般将它分为三种情况来研究，即抗剪、抗剪断与抗切。抗剪是假定岩石中间具有天然的裂隙面，于此裂隙面上岩石在一定的垂直荷重下受水平推力的作用而沿此裂隙面所产生的剪切现象。抗剪断是假定岩石完整没有裂隙，在一定垂直荷重下受水平推力的作用沿预定的剪切面所产生的剪切现象。抗切与抗剪断情况完全相同，只是岩石上没有垂直荷重而已。

混凝土坝建筑在坚硬岩石地基上，它具有两种不同物质类型的抗滑稳定情况：即混凝土与基岩的抗滑稳定和基岩本身的抗滑稳定。

1. 混凝土与基岩的抗滑稳定 混凝土在坝基上浇好后，由于混凝土的冷缩收缩与水分蒸发干缩的结果，体积缩小；而基

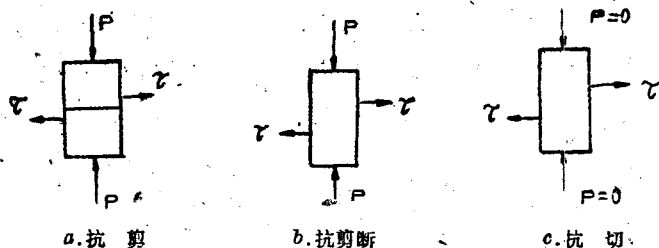


图 1

岩沒有收縮长度不变，因而混凝土沿基岩的表面发生相对的位置，在接触面处或其附近产生水平裂隙或相間的垂直裂隙。如桓仁水电站日伪澆搗的混凝土，从开挖露出的情况来看，混凝土与基岩的接触部分胶結得很好，一部分有水平方向的裂隙，局部地方有垂直方向的細小張开裂隙。又施工过程中，基础清理与混凝土澆搗质量的好坏，也影响着混凝土与基岩的胶結程度。

2. 基岩本身的抗滑稳定 在天然情况下，岩石产状很复杂，有块状的、层状的，也有呈片状的，产状要素也各不相同，裂隙发育情况各处也不一样，有些地方岩石很完整，沒有裂隙；有些地方岩石裂隙則很发育；裂隙中的充填物各处也不一致，有粘土充填的，也有方解石充填的。

因此，提供混凝土填混凝土与基岩及基岩本身的摩擦系数时，需詳細了解：(1)混凝土与基岩的抗剪；(2)混凝土与基岩的抗剪斷；(3)基岩的抗剪；(4)基岩的抗剪斷；(5)基岩裂隙中有充填物的抗剪。結合工地的工程地質条件和填的设计要求来选择恰当的设计計算指标。

二、各种不同情况抗剪試驗的特性及其物理意义

1. 混凝土与坚硬岩石及坚硬岩石本身的抗剪

現以桓仁水电站混凝土与第十一层安山凝灰集块岩及第十一层安山凝灰集块岩本身的抗剪試驗为例來說明。

甲、室內試驗

a. 試驗仪器与試样制备 試驗所用的剪力仪采用北京水利科学研究所設計的岩石应力控制式单面剪力仪。

試样制备 (1) 岩石試样的制备：試样取自坝址区钻孔的第十一层新鮮岩石，用鋸石机将岩心鋸成比 $5 \times 5 \times 5$ 公分稍大的立方体，然后在磨平机上用矿砂进行粗磨，等到試件上下四周都合乎規定尺寸再用 120 号金剛砂进行細磨，作成表面起伏差为 $0.1 \sim 0.5$ 公厘的表面，最后实际測得的起伏差为 $0.1 \sim 0.3$ 公厘。(2) 混凝土試样的制备：水泥沙浆按重量的配合比为 1:2.5，砂取自工地料場，水灰比为 0.55，用小型拌合机拌合后装在 $7 \times 7 \times 5$ 公分的鉄模內，使气泡排出，人工搗固，然后置于振动台上，振动半分鐘成型后，在温度为 20°C 左右的室內放 24 小时，脱模再放在相对湿度为 $90 \sim 100\%$ 的室內养护 28 天作成 200 号的混凝土試样。

b. 試驗經過及成果整理 在上一阶段的抗剪試驗中，由于剪力仪的最大垂直荷重設計能力只能达到 10 公斤/平方公分，因此試驗时所采用的三級垂直荷重分別为 3、6、9 公斤/平方公分，試驗所用的最大垂直荷重比坝的設計荷重小。試驗結果按庫倫氏直綫定律作图，岩石与混凝土的 $\text{tg}\varphi$ 值大于 1，个别甚至达到 1.3， C 值也很大，約为 1 公斤/平方公分左右，而岩石与岩石的 $\text{tg}\varphi$ 值却只有 0.5 左右， C 值等于負值。当时一般的看法是：抗压强度高約岩石的摩擦系数应当高于抗压强度低的摩擦系数，两者是一个正比例关系； C 值也不能为負值或大于 1 公斤/平方公分。試驗結果显然与大家的看法相矛盾。为了論証試驗成果是否正确，請北京水利科学研究所作校核試

驗，得出結果也是一樣，與此同時我們又校核了試驗所用的剪力儀，校核結果誤差不大，再次證明試驗成果是正確的。參閱羅奎所著“水工建築物地基的堅硬岩石抗剪程度”和“岷江紫坪鋪岩石摩擦系數試驗及資料整理中的一些問題”等文獻資料，亦出現當垂直荷重超過5公斤/平方公分或更大一些後， $P \sim \tau$ 關係曲線也不是一條直線，因此我們決定在後一階段的試驗中進行大垂直荷重的試驗，最大垂直荷重採用35公斤/平方公分，稍大於設計的最大垂直荷重32公斤/平方公分。（由於垂直荷重的加大超過了剪力儀的允許荷重，在試驗前將儀器改裝加固並進行了校正），並在垂直荷重較小的地方進行補點，以便正確求出 $P \sim \tau$ 關係曲線的形式。

試驗的結果匯總如下：

(1) 恒仁水電站第十一層安山凝灰集塊岩的物理力學性質：容重2.62克/立方公分，比重2.73，孔隙率4.35%，吸水率小於0.99%，水溶塊含量損失亦小於0.45%，間接凍融於硫酸鈉溶液中循環10次的重量損失不大於0.70%，於抗压56組試驗的算術平均值為1,220公斤/平方公分，變化範圍620~1,930公斤/平方公分，濕抗压54組試驗的算術平均值為736公斤/平方公分，變化範圍463~1,189公斤/平方公分，均方差216公斤/公分²，濕抗压當保證率 $\alpha=0.999$ 時的平均抗压為660公斤/平方公分。

(2) 第十一層安山凝灰集塊岩岩石與岩石抗剪強度試驗匯總如表1。

(3) 第十一層安山凝灰集塊岩岩石與混凝土的抗剪強度試驗匯總如表2。

由表1表2和圖2圖3可以看出 $P \sim \tau$ 關係曲線為一規則的曲線，當垂直荷重在1~10公斤/平方公分範圍內，該段曲線近

表1 第十一层安山凝灰集块岩岩石与岩石抗剪强度汇总表

垂直荷重 P (公斤/平方公分)	3	6	9	15	20	25	30	35
試驗組數	46	46	46	17	18	14	10	10
最大抗剪强度的算术平均值 τ_M (公斤/平方公分)	1.583	3.233	4.776	8.835	11.682	14.956	18.075	20.911
均方差 δ (公斤/平方公分)	0.218	0.480	0.611	0.666	1.283	1.775	0.524	1.254

表2

試驗組數	垂直荷重 P (公斤/平方公分)	最大抗剪强度算术平均值 τ_M (公斤/平方公分)	均 方 差 δ (公斤/平方公分)	不同保证率最大抗剪强度的保证值		保证率 $\alpha=0.999$ 时的标准偏差系数 $\lg \varphi$ 值 (乘以0.85后)
				$\alpha=0.99$	$\alpha=0.999$	
10	1	1.103	0.123	0.970	0.907	0.77
10	2	2.125	0.142	1.971	1.899	0.80
66	3	3.342	0.459	3.190	3.145	0.89
18	5	5.436	1.383	4.461	4.106	0.70
66	6	6.388	0.785	6.130	6.052	0.85
66	9	9.411	1.312	8.978	8.848	0.83
18	10	10.528	1.180	9.698	9.392	0.79
46	15	14.914	1.889	14.152	13.914	0.78
30	20	18.858	2.791	17.427	17.018	0.72
30	25	22.822	2.293	21.642	21.262	0.72
30	30	27.890	2.896	26.360	25.850	0.73
30	35	30.990	4.096	28.890	28.220	0.68

似一直线；当垂直荷重超过10公斤/平方公分后 $P \sim \tau$ 关系曲线便逐渐弯曲不成一条直线了，垂直荷重愈大，偏离上述直线的距离也越大，岩石与混凝土的 $P \sim \tau$ 关系曲线为一向下的弯曲曲线，而岩石与岩石的 $P \sim \tau$ 关系曲线相反，为一向上的弯曲曲线。

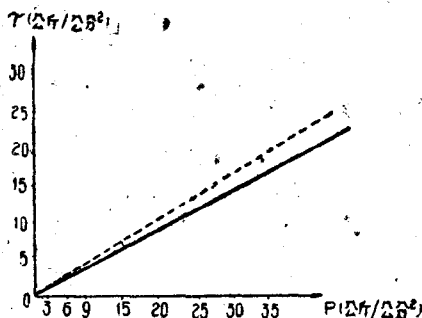


图2 第十一层安山凝灰集块岩岩石与岩石摩擦試驗
 $\tau \sim P$ 关系曲綫

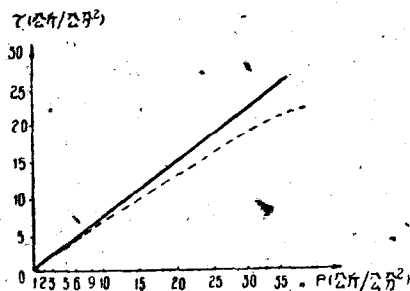


图3 第十一层安山凝灰集块岩岩石与混凝土摩擦試驗
 $\tau \sim P$ 关系曲綫

綫，此两曲綫可用方程式表示如下：

$$\tau_{cp}(\text{第十一层安山凝灰集块岩岩石与混凝土}) = 0.25 + 1.039P - 0.05P^2.$$

$$\tau_{cp}(\text{第十一层安山凝灰集块岩岩石本身}) = 0.0002P^3 + 0.62P - 0.529.$$

式中 τ ——平均抗剪强度；

P ——垂直荷重。

因此，当設計垂直荷重較大时，岩石与混凝土或岩石与岩石的抗剪試驗所采用的垂直荷重必須加大，使其等于設計的最大垂直荷重，絕不能按庫侖直綫定律将其延長来推算。否則，会得出不正确的結論。

$P \sim \tau$ 关系曲綫为什么各部分曲率不同，我們是这样解釋的，在垂直荷重 $1 \sim 10$ 公斤/平方公分范圍內，抗剪試驗所求得的抗剪强度主要是由于試件表面摩擦产生的 $\operatorname{tg} \varphi$ 值的大小决定于接触面的几何形状，表面起伏 S_1 愈大，两相邻凸出点的間距 S_2 愈短，則 $\operatorname{tg} \varphi$ 值愈大，即 $\frac{S_1}{S_2}$ 愈大；否則相反。見圖 4a、b、c。

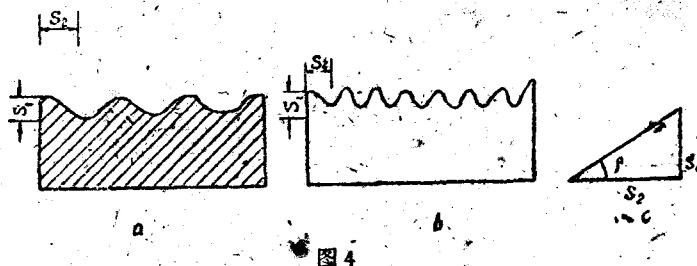


圖 4
 S_1 —表面起伏差； S_2 —凸出点水平間距的一半。

圖 4 中的 a、b 起伏差虽相等，但 a 图的 $\frac{S_1}{S_2}$ 小于 b 图的 $\frac{S_1}{S_2}$ ，則 a 图的 $\operatorname{tg} \varphi$ 值小于 b 图的 $\operatorname{tg} \varphi$ 值。此可由物理学上功的原理导出，見圖 5。

$$\tau S_2 = P S_1$$

$$\tau = P \frac{S_1}{S_2}$$

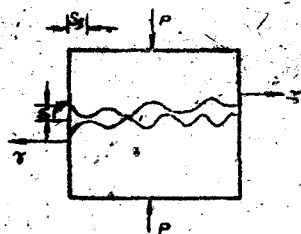


圖 5

和摩擦系数公式 $\tau = P \operatorname{tg} \varphi$ 相类似，則 $\frac{S_1}{S_2} = \operatorname{tg} \varphi$ (这里沒考虑

岩石的彈性和硬度)。

当垂直荷重超过 10 公斤/平方公分后, 由于垂直荷重逐渐增大, 岩石試样表面上的凸出点压入到另一試样也随之相应加深, 使接触面接触的几何形状改变, S_2 不变, S_1 增大, $\frac{S_1}{S_2}$ 或 $\operatorname{tg} \varphi$ 增大, 即抗剪强度增大, 凸出点担负过大的集中应力, 因而发生了抗剪断现象。

$$\tau_c = 0.02 \sim 0.08 RA$$

式中 τ_c ——岩石抗剪断强度;

R ——岩石抗压强度;

A ——試件凸出点压入到另一試件所引起的抗剪断的剪切面积, 此面积随垂直荷重的加大而加大。

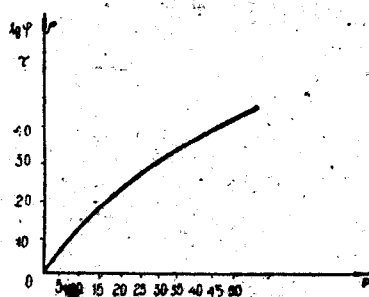
各类岩石的岩性不同, 抗剪断强度也就各异, 因此在岩石与混凝土的抗剪試驗中的 $P \sim \tau$ 关系曲綫后半部中反映了两种现象, 一为試样表面的摩擦, 一为試样部分凸出点的抗剪断, 混凝土抗剪断强度小, 因此两者之和的增加小于試样上面垂直荷重的增加, 故曲綫向下弯曲。在岩石与岩石的抗剪試驗中, 由于岩石的抗剪断强度大, 摩擦与抗剪断两者之和的增加大于垂直荷重的增加, 故曲綫向上弯曲。

检查試驗过的試件, 由接触面所发生的擦痕情况也可以看出: 在岩石与混凝土的抗剪試驗中, 仅在混凝土試件表面上发现有擦痕, 擦痕的数量、深度与垂直荷重的大小成正比, 垂直荷重愈大, 擦痕越多。岩石与岩石抗剪試驗中的擦痕数量深度与此类似, 在上述抗剪試驗中可以这样認為: 当垂直荷重小于 10 公斤/平方公分时是試样接触面的摩擦起主要作用, 当垂直荷重超过 10 公斤/平方公分后是接触面上凸出点的抗剪断起主要作用。

由于各类岩石的岩性不同，岩石表面的几何形状各异，有浑圆的，也有尖角的；有粗粒的，也有细粒的；有定向排列的，也有杂乱无章的。且各种岩石的抗剪断强度也相差很大，它与抗压有一定的比例关系， $\tau_c = 0.02 \sim 0.08P$ ，因此每种岩石的 $P \sim \tau$ 关系曲线也就各有其自己的形状，其他如岩石的弹性硬度也影响着 $P \sim \tau$ 关系曲线的形状。

表3 龙王庙水电站岩石与混凝土摩擦试验汇总表

试验组数 n		31	8	31	17	30	29	21
垂直荷重 P (公斤/平方公分)		5	10	15	20	25	35	45
抗剪强度	平均值 τ_{cp}	5.6	11.8	16.28	20.59	23.938	31.349	37.554
τ (公斤/平方公分)	不同保证率的强度值 $\alpha=0.99$	5.258	10.64	15.48	18.9	22.834	29.85	35.516
	度值 $\alpha=0.999$	5.144	10.02	15.22	18.13	21.87	29.35	34.801
均方差 δ (公斤/平方公分)		0.685	0.880	1.605	2.382	2.178	2.874	3.199
剪力	$\operatorname{tg} \varphi_{cp}$	1.12	1.18	1.085	1.029	0.957	0.896	0.83
系数	$\operatorname{tg} \varphi_{0.999}$	1.03	1.00	1.02	0.91	0.88	0.84	0.77

图6 龙王花岗岩与混凝土抗剪试验 $P \sim \tau$ 关系曲线

龙王庙水电站花岗岩与混凝土抗剪试验结果 $P \sim \tau$ 关系曲线亦与桓仁情况相似，为一向下弯曲的曲线。

在抗剪试验中，还发现有这样一个现象，抗压强度高的岩石与抗压强度低的岩石的摩擦试验 $\operatorname{tg} \varphi$ 值要大得很多；可能是由于抗压强度高

的岩石的凸出点压入到抗压强度低的岩石中去，使其紧紧地鑲嵌在一起，改变了抗压强度低的岩石的表面几何形状，因而增大了它们的抗剪和抗剪断强度之和。从試驗过的試样来看，在抗压强度低的岩石表面上出現有很多的擦痕，比同一种岩石摩擦出現的擦痕要多。

乙、野外試驗

試驗是在工地平硐內第十一层新鮮岩石上进行的，岩石与混凝土試样的大小均为 $50 \times 50 \times 50$ 公分，基岩的表面起伏差为 $1 \sim 3$ 公分。在基岩表面上先澆上一层 1 公分厚的砂浆，砂：灰 = 2:1；砂浆之上再澆混凝土，混凝土标号为 200[#]，水泥标号 400[#]，水灰比 0.5，每立方公尺水泥用量 240 公斤，坍落度 $2 \sim 3$ 公分。

砾石級配：

粒徑(公厘)	5~20	20~40	40~80	80~150
所占比例(%)	26	23	21	30

砂的級配：

粒徑(公厘)	5	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15	<0.15
所占比例(%)	0	15	20	20	25	15	5

砾石与砂的重量比 = 100:18。垂直荷重分別采用 12、24、36 公斤/平方公分，水平推力方向与填設計的水平推力方向一致，着力点是在混凝土試件离底部邊緣 1 高度处，用 300 吨油压千斤頂加荷，抗剪是在抗剪断試驗后将岩粉冲掉再放置于原来位置进行試驗。

試驗結果如表 4。

由于試驗时的垂直荷重級数少，不能很明显地看出它是一条向下弯曲的曲綫，但仔細地和室內曲綫对比，仍可看出它是一条向下弯曲的曲綫。野外試驗所得抗剪强度大于室內所得抗

表4 第十一层安山凝灰集块岩与混凝土野外抗剪試驗汇总表

垂直荷重 P (公斤/平方公分)	12	24	36
最大抗剪强度平均值 (公斤/平方公分)	18.6	28.2	35.1
剪变系数 $\tan \varphi = \frac{\tau}{P}$	1.55	1.18	0.98
試驗組数	2	2	2

剪强度，可能由于野外的 $\frac{\sigma_1}{\sigma_3}$ 比值比室内的要大和野外抗剪試驗岩石将要剪断試件向上发生变位而油压千斤頂不能压缩，因而使抗剪断加大。此現象可由压力表的压力突增看出。

2. 混凝土与坚硬岩石及坚硬岩石本身的抗剪断

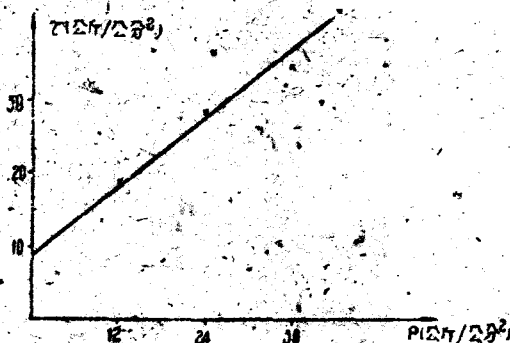


图7 第十一层安山凝灰集块岩与混凝土野外抗剪試驗 $\tau \sim P$ 关系曲线

甲、混凝土与岩石室内抗剪断試驗

a. 試驗仪器与試样制备 試驗所用的剪力仪同前，岩石試样为恒仁水电站第九层安山凝灰集块岩，取自鉆孔的新鮮岩石；試样規格为 $5 \times 5 \times 5$ 公分的立方块，接触面的表面处理是由石

工用小錘敲打作成 1 公厘左右的起伏差，形状无規律。砂浆的配合比是 2.5:1，水灰比 0.55，28 天后的抗压强度在 200 公斤/平方公分以上。

b. 試驗成果汇总如表 5。

第九层安山凝灰集块岩与 200[#] 混凝土

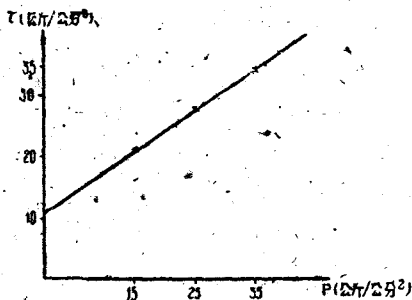
表 5

室内抗剪断試驗成果汇总表

垂直荷重 P (公斤/平方公分)	15	25	35
最大抗剪强度平均值 τ (公斤/平方公分)	21.5	28.25	35.25
剪 变 系 数 $\text{tg} \varphi = \frac{\tau}{P}$	1.43	1.13	1.01
試 驗 組 数	5	4	6

乙、野外試驗

a. 混凝土与岩石的抗剪断 試驗是在工地平硐內第十一层安山凝灰集块岩上进行的，試样的制备、仪器設備与加荷方法同混凝土与岩石野外抗剪試驗。



試驗成果汇总如表 6。

图 8 第九层安山凝灰岩与混凝土

b. 岩石与岩石的抗剪断

$P \sim \tau$ 关系曲线

試驗亦是在工地平硐內第十一层新鮮岩石上进行的，試样的大小为 $50 \times 50 \times 50$ 公分立方体，水平推力的方向与坝設計的水平推力方向一致，剪切面与岩层层面成 15° 夹角，水平推力着力点位于試件底部边缘 1/3 高度处，垂直荷重为均布荷重，用 300 吨油压千斤頂加压。

試驗成果汇总如表 7。

桓仁水电站第十一层安山凝灰集块岩与
混凝土野外抗剪断試驗汇总表

表 6

垂直荷重 P (公斤/平方公分)	12	24	36
最大抗剪强度平均值 τ (公斤/平方公分)	27.0	40.8	50.4
剪 变 系 数 $\operatorname{tg} \varphi = \frac{\tau}{P}$	2.25	1.70	1.40
試 驗 組 数	2	2	2

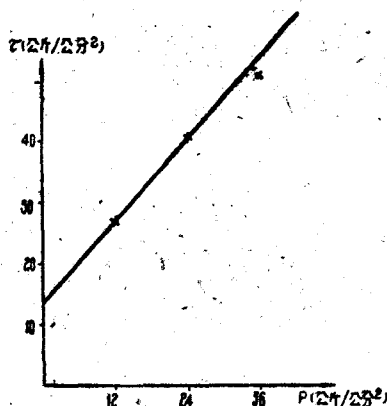
图 9 第十一层岩石与混凝土野外抗剪断 $\tau \sim P$ 关系曲线图

表 7 第十一层安山凝灰集块岩石本身野外抗剪断試驗汇总表

垂直荷重 P (公斤/平方公分),	15	30	45
最大抗剪断强度 τ (公斤/平方公分)	69	90	117.0
剪 变 系 数 $\operatorname{tg} \varphi = \frac{\tau}{P}$	4.6	3.0	2.6

由表 5 表 6 表 7 和图 8 图 9 图 10 可以看出混凝土与岩石或岩石与岩石抗剪断的 $P \sim \tau$ 关系曲线亦为一规则曲线, 和抗剪断試驗 $P \sim \tau$ 关系曲线相似, 唯其中的 C 值很大。混凝土与岩石

室內試驗的 C 值为 11.25 公斤/平方公分, 野外为 15 公斤/平方公分; 岩石与岩石野外的 C 值为 4.4 公斤/平方公分。而 $P \sim \tau$ 关系曲线形式在大垂直荷重下不管是什么岩石均为向下弯曲的曲线, 试样的抗压强度愈高, 曲线与直线分离处的垂直荷重愈大, 在垂直荷重较小时, 完全可按库仑直线定律作图。

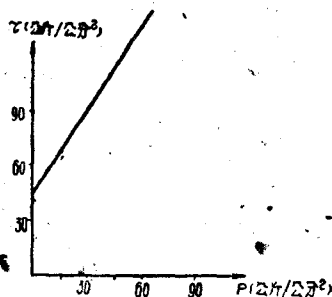


图 10 第十一层安山凝灰集块岩本身野外抗剪断 $P \sim \tau$ 关系曲线图

曾經有一部分同志有过这种看法: 認為考虑岩石抗剪强度时凝聚力与摩擦系数不能同时存在, 有凝聚力就不能有摩擦力; 或者有摩擦力就不能有凝聚力。我們認為这种看法是不正确的。凝聚力与摩擦力是同时存在的, 可以这样来分析: 由岩石抗剪断試驗的破裂面来看, 断裂面不是一个光滑的平面, 而是起伏不平的, 是沿着設計剪断面附近最薄弱处而断裂, 因此可以这样設想: 試件承受垂直荷重后試件内部各处便受到此垂直荷重的均布分力, 当施加水平荷重时, 此均布的垂直荷重将集中在将要断裂的薄弱面上凸出点的向前运动方向的一边, 此

上的 τ 值同抗剪試驗一样, 可以按功的原理推出 $\tau_i = P_i \cdot \frac{S_1}{S_2} = P_i \cdot \text{tg} \varphi$, 在向前位移的同时还将克服岩石的凝聚力 C_1 , 在凸出点的另一面則将发生拉力 C_2 , 此时总的抗剪强度为 $\tau = \tau_i + C_1 + C_2 = P_i \cdot \text{tg} \varphi + C_1 + C_2 = P_i \cdot \text{tg} \varphi + C_0$ 。

C 与 $\text{tg} \varphi$ 是同时存在的 τ 与 P 成函数 $\tau = f(P)$ 的关系。

抗剪断試驗在未破裂前岩石为一整体, 受剪将要破裂时的

接触面是完全吻合的，因此直线的角度系数将完全反映此接触面几何形状所具有的特性。垂直荷重增大， $P \sim \tau$ 关系曲线之所以均向下弯曲而不同抗剪试验有些向上，有些向下，其原因是接触面的完全吻合。当垂直荷重较小时，抗剪断强度直接反映接触面的几何形状。垂直荷重逐渐增大时，沿着此剪断面移动时的水平推力增加，抗剪断强度也要增大，否则由于垂直压力大，岩石的抗剪断强度小，使上部试件不可能沿破裂面上升，凸出部分阻止其沿剪切方向移动，此时若岩石中再有一个软弱面，而软弱面的几何形状的 $\operatorname{tg} \varphi$ 值小于前述的 $\operatorname{tg} \varphi$ 值，而 C 值稍大于前述的 C 值或等于前述 C 值，因 C 值与抗压成一定关系，变化小，但总的抗剪强度的增大小于前述总的抗剪断强度的增大，因此便沿着新的软弱面剪断，使曲线向下弯曲，或成为向下的折线；若总的抗剪断强度大于前述总的抗剪断强度，剪切时则仍将沿从前的软弱接触面移动，因接触面的 $\operatorname{tg} \varphi$ 值不变，因此曲线不会向上弯曲。

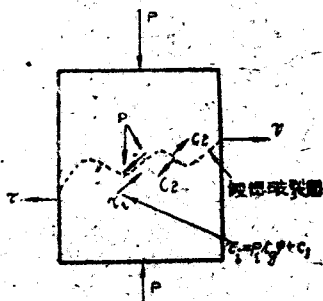


图 11

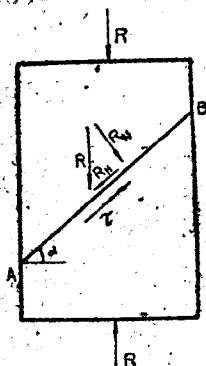


图 12

3. 混凝土与坚硬岩石及坚硬岩石本身的抗切