

128294

基本馆藏

水工建築物地基的 坚硬岩石抗剪强度

C. A. 罗 查 著

2
04

地质出版社

PDG

水工建築物地基的堅硬岩石抗剪強度

C. A. 罗 查 著

張 月 娟 譯

徐 緒 璦 校

地 質 出 版 社

1957 · 北 京

С. А. РОЗА
кандидат технических наук
**СОПРОТИВЛЕНИЕ
СКАЛЬНЫХ ПОРОД
ОСНОВАНИЯ ГИДРОТЕХНИЧЕСКОГО
СООРУЖЕНИЯ
СДВИГАЮЩЕМУ УСИЛИЮ**

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
ЛИТЕРАТУРЫ ПО СТРОИТЕЛЬСТВУ И АРХИТЕКТУРЕ
Москва—1952

在本書中研究堅硬和半堅硬岩石的抗剪強度問題，該問題對於正確地確定在堅硬岩石上設計的水工建築物地基的抗剪強度，具有重大的意義。

本書分析和綜合了岸石、變質岩、含碳酸鹽泥質膠結物的岩石、砂岩和泥質岩、砂質—泥質岩石、石灰岩和泥灰岩抗剪強度的一系列的研究結果。

本書供在堅硬和半堅硬岩石上設計和建造水工建築物的科學工作者及工程師之用。

水工建築物地基的堅硬岩石抗剪強度

著 者	С. А. 羅	查
譯 者	張 月	娟
校 者	徐 緒	癡
出 版 者	地 質 出 版 社	
	北京宣武門外永光寺西街3號	
	北京市書刊出版業營業許可證出字第050號	
發 行 者	新 華 書 店	
印 刷 者	地 質 印 刷 廠	
	北京廣安門內教子胡同甲32號	

編輯：孫際先 技術編輯：張華元 校對：洪梅玲
印數（京）1—1,060冊 1957年9月北京第1版
開本31"×43"/₂₅ 1957年9月第1次印刷
字數40,000 印張32/3
定價(10) 0.34 元

目 錄

1. 緒言	5
2. 堅硬岩石的抗剪強度	14
滑石 - 碳酸鹽類岩石	14
含碳酸鹽粘土質膠結物的岩石	25
砂岩及泥板岩	27
砂質 - 粘土質岩石	31
石灰岩	33
3. 堅硬岩石的抗剪斷強度	36
滑石 - 碳酸鹽類岩石	37
含碳酸鹽粘土質膠結物的岩石	37
砂岩及泥板岩	38
砂質 - 粘土質岩石	43
泥灰岩	44
頁岩	47
4. 堅硬岩石的抗切強度	51
5. 關於堅硬岩石的抗剪強度的變化特性	54
6. 測定堅硬岩石抗剪強度方法的原則	55
參考文獻	59

1. 緒 言

由于大型水工建筑物不断地兴建在坚硬及半坚硬岩石上面，因而研究这些岩石的抗剪强度的問題，就有了重大的意义。

但是，对于水工建筑物地基的坚硬岩石的抗剪性，却从未进行过系統的、綜合性的研究。

坚硬岩石的抗剪强度是岩石力学中的一部分。过去它在解决各种水力工程問題上的应用范围很狭窄，这就說明了对坚硬岩石抗剪强度的研究还是不夠的。

在研究坚硬岩石的抗剪强度时，往往忽略了火成岩、坚硬沉積岩和变質岩的抗剪强度的性質，以及抗剪强度与岩石完整性的关系。同时，也未考虑岩石成分和礦物状态对抗剪强度的影响。

为了降低建筑物造价，提高施工速度，研究抗剪力問題是地基勘察和水工建筑物設計机构的首要任务之一。

大家都知道，火成岩具有粒狀結晶。其粒徑决定于岩石的冷却速度。結晶过程愈慢，則顆粒愈大。顆粒之間并无膠結物質，但粘結力很大，往往超过顆粒本身的坚固性。

沉積岩中主要包括石灰岩和砂岩，其顆粒由膠結物質粘結。石灰岩主要是由海生动物殘骸（貝壳）中的碳酸鈣組成，这些殘骸为水溶液中沉淀的鈣鹽所膠結。砂粒沉積再經各种膠結物粘結后，便形成坚固性不同的各种砂岩；砂岩的坚固性取决于顆粒表面的形狀和膠結物質的种类（如：砂質，石灰質，鉄質和粘土質等等）。

由火成岩和沉積岩变成的片岩是最常見的变質岩。但是必須指出：岩石在变質过程中所形成的片理与岩石最初形成时所產生的層理是不同的。

坚硬岩石經常受到地質構造作用和其他一些有时比較快、有时又極慢的逐步破坏作用的影响。这种破坏作用或風化作用的產生是由于下列因素：温度的变化、水份和气体的作用等。該作用使岩石松散并遭到破坏。

由此可知，測定水工建築物地基內坚硬岩石的堅固性和將抗剪強度試驗結果正确地应用于整体岩石上，是一个多么复雜的問題。

在建築物地基的工程地質勘察中，并未將坚硬岩石象粘性和非粘性土一样地測定其抗剪強度。

坚硬岩石与土的区别，在于岩石各个顆粒間的結構联系很強。这种联系在火成岩中產生于岩石的一般結晶过程中；而沉積岩中，則產生于膠結物質的結晶过程中。有时，沉積岩顆粒間的結構联系具有粘性物質（如泥質頁岩）的性質。

一般都認為，坚硬岩石的結構联系比混凝土的結構联系強；并且認為，在評定坚硬岩石抗剪強度时，所產生的誤差不致影响筑于該类岩石上的建築物，虽然坚硬岩石的抗剪特性并未經過詳細研究。当然，这是不正确的，因为坚硬岩石的堅固性往往弱于混凝土。

规范及手册中的資料是符合設計要求的。例如，混凝土砌物沿坚硬岩石滑动和混凝土砌物相互間發生滑动时的摩擦系数等于0.65，而石砌物沿坚硬岩石滑动时的摩擦系数則为0.70。

研究坚硬岩石的抗剪強度要比研究粘性土壤的抗剪強度复雜得多。这不仅因为坚硬岩石的粘結性質不同，而且还必須考慮其所受變質作用，裂隙及填充物質的性質和各种風化營力作用的結果。

必須指出，为了更全面地利用当地的条件，以及查明建築物岩石基礎抗剪強度增大的可能性，研究建築物分布区内坚硬岩石的產狀和考慮坚硬岩石与混凝土的凝聚力对于降低建筑成本來說，是具有重大意义的。

在水工勘测中，一般很少研究坚硬岩石的抗剪強度，只有当建築物地基中有堅固性很小的坚硬岩石及半坚硬岩石，即極限抗压強度小于50公斤/公分²的时候才研究抗剪強度。

研究抗剪強度时，垂直应力的变化范围不大，即相当于所設計重

力式水工建築物底部的計算應力。

雖然如此，但是這些研究結果仍然很可貴，因為在蘇聯興建水工建築物的河谷和沿海地區常常是由堅固性較小的岩層構成，經過上述研究後對於某些堅硬的岩石來說，即可確定：

- (1) 岩石在外部壓力作用下，抗剪強度變化的一般規律；
- (2) 研究堅硬岩石抗剪強度的方法和原理，以及選擇堅硬地基上重力式水工建築物計算方法和原理。

對下列各類堅硬岩石曾進行了抗剪強度的研究：

- (1) 滑石碳酸鹽類岩石；
- (2) 碳酸鹽粘土質膠結岩石；
- (3) 砂岩及泥板岩；
- (4) 砂質—粘土質岩石；
- (5) 石灰岩及泥灰石。

研究資料擇自格爾奇科夫 (Е. А. Герчиков) [1]，馬爾齊羅索夫 (А. Х. Мартиросов) [2]，拉津 (Н. В. Разин) [3]，列寧格勒水電設計院 (ЛЕНГИДЭП) 的檔案資料，阿達莫維奇 (А. Н. Адамович)，納烏明科 (К. А. Науменко)，普羅楚漢 (Д. П. Прочухан)，赫雷斯托娃 (Е. Н. Хлыстова)，斯尼亞特科夫 (А. А. Снятков) 以及本書作者的著作。

上述研究所用的岩樣，全部取自設計建築物地區的坑孔中。取樣深度在奠基標高上或更深的地方。

堅硬岩樣用合金齒圓鋸鋸開，而松軟岩樣則用圓盤鋸或手鋸鋸開。樣品的面用金剛砂輪磨平，最後在磨輪上加工。

岩石的抗剪強度可根據下列試驗結果確定：

- (1) 同類岩塊間的剪切試驗；
- (2) 在試驗室或岩石埋藏地點進行岩石的抗剪斷試驗；
- (3) 固結在岩樣粗糙面上的混凝土的抗剪斷試驗。

大家都知道，岩石本身是非常不均勻的，即使取樣地點，岩石性質，試驗條件完全相同，但所得出的力學強度指標卻極不一致。這是由於岩石的結構、構造、性質、孔隙和裂隙、容重等等都不相同的緣

故。

Л.И.巴隆 (Барон) 曾对顯微結構差別不大未經風化的无裂隙的花崗岩作了專門的試驗。試驗結果說明：19个試樣的極限抗压強度为495—1600公斤/公分²，平均为990公斤/公分²。最大与最小值之比为3.2。具有風化痕跡(即顏色略變)的同一塊花崗岩的試樣，其極限抗压強度为508—1224公斤/公分²，平均为760公斤/公分²。比值为2.4。其他試驗者所求出的岩石極限抗压強度最大与最小值之比等于3.0。

取之同一砂岩的60个試樣的組平均極限抗压強度为360—1570公斤/公分²，而每組內最大比值为2.3；其他12个砂岩試樣的極限抗压強度为378—1400公斤/公分²，比值为3.7；6种頁岩試樣的極限抗压強度为401—805公斤/公分²，比值为2.0。

有些岩石随着堅固性的減小，其最大和最小極限抗压強度的比值逐漸增大。

下面所列舉的岩塊間的抗剪強度与堅硬岩石抗剪斷強度的測定結果也是变化多端的，這說明了岩石的不均匀性。

为了更明顯起見，將滑石—碳酸鹽类岩石的試驗結果制成曲綫。

可以設想，水工建筑物地基岩石由于遭受風化，其強度指标比上述变化要更大些。

由于成分不均匀，填料中有粗粒物質以及施工条件限制而引起的混凝土極限抗压強度的变化要小于堅硬岩石。

大家都知道，抗压試驗的結果不僅取决于試樣的形狀和大小，以及受压面的粗糙程度和摩擦力（如受压面塗以石蜡，則極限抗压強度約可降低50%），同时并与施加荷重的速度等等有关。此外应估計到，混凝土試樣的堅固性与建筑物混凝土的堅固性是不同的。不过，通过这些試驗仍可測出該材料堅固性的变化情况。

在某一使用25年的混凝土填段上，当打鑽时所取得的呈岩心狀的混凝土的專門試驗証明：相同試樣的極限抗压強度最大与最小比值是1.12至1.27，而高度与該試樣相同，但直徑为10公分的圓柱形試樣(各种岩心)的平均極限抗压強度为129—215公斤/公分²。取自其他混凝土填的試樣，作同样試驗后，得出的極限抗压強度則为161—481

公斤/公分²。

上述試驗結果証明，各种建筑物的混凝土的堅固性是不同的。因此應該估計到混凝土抗剪強度的变化是很大的。同时建筑物的岩石地基也具有类似的变化。因此，檢查有压建筑物的穩定性时，必須要用最簡明的方法來选定計算数据。

大家都知道，測定均一坚硬岩石和混凝土（为实验用而仔細制备的）的抗剪強度及抗剪断強度时，如果改变作用在岩石上的荷重，便能作出抗剪強度与荷重的关系曲綫。压力变化不太时关系曲綫很平緩，近于直綫。有时由于試驗点很分散也可能產生上述現象。試驗点分散是由于天然產狀坚硬岩石堅固性不等的緣故。

这种直綫关系的公式如下：

$$x = ay + b \text{ 公斤/公分}^2 \quad (1)$$

式中

x ——抗剪強度公斤/公分²；

y ——垂直于剪力方向的岩石上的压力公斤/公分²。

常数 a 和 b 不是摩擦系数，也不是凝聚力。因为即使 b 等于0时，系数 a 仍随岩石顆粒間凝聚阻力而变化。經多次观察証明，岩塊間相互錯动后，在其接触面上常發現該岩石的粉末。岩塊的粗糙面上，微粒的抗剪断強度，乃取决于粗糙岩面接触时的嵌入程度，这种嵌入的程度則与岩塊受压大小有关。

但是，本書內仍保留了直綫参数的常用名称，如摩擦系数 $a = \operatorname{tg} \alpha$ ，凝聚力 b 公斤/公分² = c 公斤/公分²；式中 α 为根据試驗所得各点作成的直綫与橫軸相交后的傾斜角。

因此，坚硬岩塊間抗剪強度的性質与相同岩石抗剪断強度的性質近似；其区别僅在于結構破坏的数量和原狀岩样的剪断面或混凝土与該岩石接触縫剪断面上的应力状态不同。粗糙的岩塊將使其互相連軸，并承受巨大的局部性应力。

抗剪断強度，此術語今后僅用于事先未确定剪力面的試驗中。

如果岩石上沒有垂直于剪力方向的压力时，則抗剪断強度也可称为抗切強度。

直接利用試驗方法測定抗切強度是很困難的，曾經這樣確定，即混凝土的抗切強度與其極限抗压強度有關。

根據斯克雷科夫的混凝土抗剪斷強度與垂直壓力間的關係曲線，拉津求得如下的極限抗剪斷強度 τ 與極限抗压強度的關係方程式：

$$\tau = 0.208 R \sqrt{1 + \frac{10.8\sigma}{R}} + 0.32 R$$

拉津設式中的 $\sigma=0$ ，又推算出如下的混凝土極限抗切強度與極限抗压強度的關係式：

$$\tau_0 = 0.24 R$$

根據其他的研究材料求出，在壓力機上混凝土抗切強度與極限抗压強度間的比例係數約為 0.20—0.35；麥爾什求出的比例係數為 0.13—0.22；而格伏茲傑夫求得的為 0.17—0.20。圖 1a 是表示混凝土的極限抗压強度、抗切強度和抗裂強度之間的關係曲線〔8〕。根據中央工業建築科學研究院試驗，所求出新舊混凝土接縫間抗切強度與極限抗压強度間的關係如下：

$$\tau_0 = 0.125 R - 0.175 R$$

堅硬岩石的抗切強度與極限抗压強度間的比值，遠小於混凝土的比值。花崗岩的比值平均是 0.07，斑岩—0.06，砂岩和石灰岩—0.08〔9〕。

拉津在砂岩或泥質岩上的建築物混凝土基礎塊作抗剪斷試驗，因水泥成分不同，所以求出的抗剪斷強度有時為 0.02—0.03R，有時則為 0.07R。根據其他研究者的試驗，當混凝土與砂岩的接縫用高級水泥特別加工後，抗切強度約為 0.125R。

由此得知，混凝土的抗切強度為 0.20R，而堅硬岩石的抗切強度則為 0.02R 至 0.08R。

上述試驗中，抗剪強度和抗剪斷強度是利用單剪儀測定的。

試驗用試樣的高為 2 公分，平均尺寸為 6×6 公分。試樣最小的面積是 9 公分²，最大的面積是 100 公分²。

野外試驗用試樣的最小面積為 20×30 公分，最大面積—150×150 公分。

由于均一細粒岩石的剪变系数和剪断系数与試样面積大小无关，所以不同大小試样的試驗結果，正如不同岩石的試驗結果一样，是可以相互比較的。因試驗条件或岩石性質的不同，剪切和剪变系数的数值是有差别的。

抗剪强度和抗剪断强度是在各种垂直压力下，根据最大水平剪力測定的。

作用在岩样上的每級垂直压力一直保持到假定的沉陷停止为止，即經30分鐘后岩样平均沉陷在0.002公厘以下；而每級剪力則延續到假定的位移停止，即經15分鐘后平均位移在0.01公厘以內。試样可在浸水或不浸水，順片理或垂直片理的情况下進行剪切試驗。

試驗后应能說明岩样上压力在1至5公斤/公分²（低压）、5至

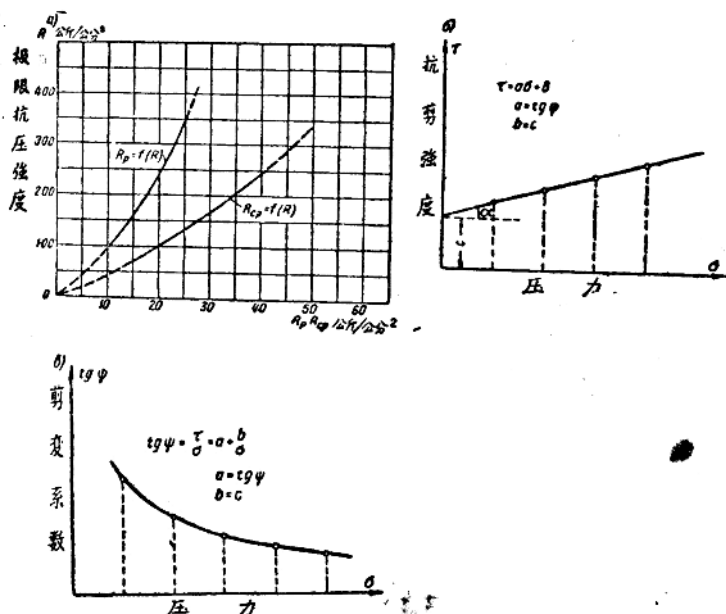


圖 1. 压力、剪力、剪切力、切力及拉断力間的关系曲线

a —混凝土； b 和 c —岩石

15公斤/公分²（中压）和15公斤/公分²以上时的剪力特性，并根据这种特性制成抗剪强度或抗剪断强度与压力的关系曲线（圖1、6），以及剪变系数或剪切系数与压力的关系曲线（圖1、a）。

当压力小时，由于没有“凝聚力”，所得的剪力系数是不变的，并且与压力无关。当压力大时，由于“凝聚力”的存在，当压力一改变，剪变系数或剪断系数也就随之变化。

在叙述坚硬岩石抗剪强度测定结果以前，先谈一谈修建在坚硬岩石上土工建筑物用混凝土抗剪强度的试验结果。

进行试验时，在距离混凝土块边缘相当于宽度1/3的地方施加垂直压力，以便试验室内的研究条件接近于基础受水平力时的状态。当混凝土块面积为430公分²，中心承受5吨压力时，其极限抗剪断强度为35公斤/公分²，而非中心受压时则为39公斤/公分²，計大10%。因此，下列混凝土试验结果中的抗剪强度是试样受平均压力时的抗剪强度。

试验用水泥的特性列于表1。

表 1

指 标	试 样 的 时 期		
	一 天	三 天	七 天
极限抗压强度（公斤/公分 ² ）	300	500	600
压力为11.6公斤/公分 ² 时的 极限抗剪断强度	25	30	35

当压力为11.6公斤/公分²时，试验用的混凝土的极限抗压强度和极限抗剪断强度与水泥含量的关系见表2。

平均荷重为2—10公斤/公分²时，根据混凝土块间抗剪强度的测定结果（每立方公尺混凝土耗用水泥200公斤），得出下列的直线关系：

表 2

每立方公尺混凝土中的水泥含量(公斤)	100	150	200	250	300	400
極限抗压强度公斤/公分 ²	59	98	146	193	240	311
極限抗剪强度公斤/公分 ²	20	34	39	41	42	43
兩强度之比	2.7	2.9	3.7	4.7	5.7	—

$$\tau = 0.70\sigma + 1.2 \text{ 公斤/公分}^2$$

式中 τ ——抗剪强度公斤/公分²;

σ ——混凝土塊上压力公斤/公分²。

自上式可以看出，混凝土塊間發生剪力时，“凝聚力”并不等于零。

当混凝土塊不受荷重沿斜面滑动时，所得斜面傾角的正切为0.77。

另一个边长为30公分的混凝土塊〔4〕間的抗剪强度，经过42次測定的結果是：当摩擦系数为0.58—0.80时，平均摩擦系数为0.68，剪切系数为1.34。

这些結果說明混凝土的性質是不同的。因此，对修建在岩石地基上的混凝土水工建筑物來說，必須測定坚硬岩石以及混凝土的抗剪和抗剪断强度。此外，并应計算混凝土和岩石地基間的凝聚力。远在1938年，德沃里亞辛〔4〕就已指出了这一計算的必要性。

德沃里亞辛曾經举出了許多实例，說明在修建混凝土坝时，虽然計算了凝聚力，但是事故却仍然發生。这些事故并不是由于沒有計算凝聚力，而是因为忽視了坚硬岩石地基的其他特点。

例如，宾夕法尼亞州奧斯金坝的倒塌并非坝体沿着坝基滑动，而是坝体与部分坝基岩石一起滑动所致。

蔡尔宾諾的謝拉 (Селла Цербина) (在意大利北部) 坝高16公尺，該坝运用后12年竟被一次猛烈的洪水冲毀。冲毀的原因并不是因地基向下游傾斜，而是由于地基岩石太軟弱，因此当洪水侵襲时，冲坏岩石深达20公尺。

高 35 公尺的格列諾堤 (Глено) 的倒塌同样也不是由于地基向下游傾斜所致，而却是因堤身砌体的質量太坏的緣故。

因此，在研究坚硬岩石地基时，必須全面地研究岩石的完整性，以便在計算建筑物穩定性时，能够正确地考慮凝聚力。

例如，德聶泊水力發電站的某些堤段，地基向下游的傾斜度为 16° ，虽然摩擦系数是 1.32，但堤身仍然很穩定。

卡馬拉茲堤的地基向下游的傾斜度为 $6-15^\circ$ ，堤身亦很穩定。

2. 坚硬岩石的抗剪强度

坚硬岩石的抗剪强度，是根据同类岩塊間滑动时的剪力与岩石所受压力的关系，以及混凝土塊沿岩石滑动时剪力与压力的关系來測定的。

滑石-碳酸鹽类岩石

在列宁格勒水电設計分院 (ЛЕНГИДЭП) 的土壤試驗室和水工科学研究院的土壤-地基試驗所中，已对滑石-碳酸鹽类岩石進行过研究工作。

由混凝土建筑物地基及兩側接触部取得的火成岩試样是蛇紋純橄欖岩和蛇紋岩。这些岩石中的節理異常發育而且不均匀。片理的傾斜度为 70 至 90° ，垂直于建筑物可能發生滑动的方向。在这一岩体内，具有產狀極不規則的滑石-碳酸鹽类岩石礦巢。滑石-碳酸鹽岩石成片理狀，有滑膩感，呈黃灰色。有些地方滑石-碳酸鹽类岩石進一步分解成为黃白色的滑石碎片和碳酸鹽粉末。

試样是由岩心鑽進时用 6 英寸鑽头所取的岩心中，或由試坑的原狀岩样中取得的。

滑石-碳酸鹽类岩石的平均物理力学指标見表 3。

对滑石-碳酸鹽类岩石的剪力系数曾進行了 11 次測定，而对純橄欖岩則進行了 2 次測定；測定时所用仪器兩框为 4×8 公分，每一試样的高度为 2 公分。

表 3

物理力学指标名称	数 值
比 重	2.95
干燥状态下的容重	2.79
吸 水 率	0.9 %
垂直于片理的极限抗压强度	220公斤/公分 ²
沿片理的极限抗压强度	160公斤/公分 ²

試驗結果可參看表 4 及圖 2，荷重範圍相當於混凝土建築物底部的計算應力。由圖 2 可以看出；試驗求出的各點很分散，這是多數堅硬岩石的特點。

表 4

指 标 名 称	剪 变 系 数			
	第一次剪切	第二次剪切	第一次剪切	第二次剪切
	$P =$ 3公斤/公分 ²	$P =$ 3公斤/公分 ²	$P =$ 2公斤/公分 ²	$P =$ 1公斤/公分 ²
滑石-硬質變類岩石剪变系数的平均值	0.54	0.46	0.51	0.41
最大的	0.59	0.56	0.56	0.48
最小的	0.44	0.37	0.37	0.30
最大与最小之比	1.3	1.5	1.5	1.6
純層狀岩的剪变系数平均值	0.59	0.53	0.58	0.66

第一次剪切后，調轉岩塊，在新鮮面上進行第二次剪切試驗。

第一次剪切时的剪变系数平均为0.52至0.56，而一个試样的剪变系数則为0.37。应当指出：在第二次受剪时，剪变系数將减小。

当剪力垂直于片理时，無論是沿岩塊的新鮮面，或是進行第二

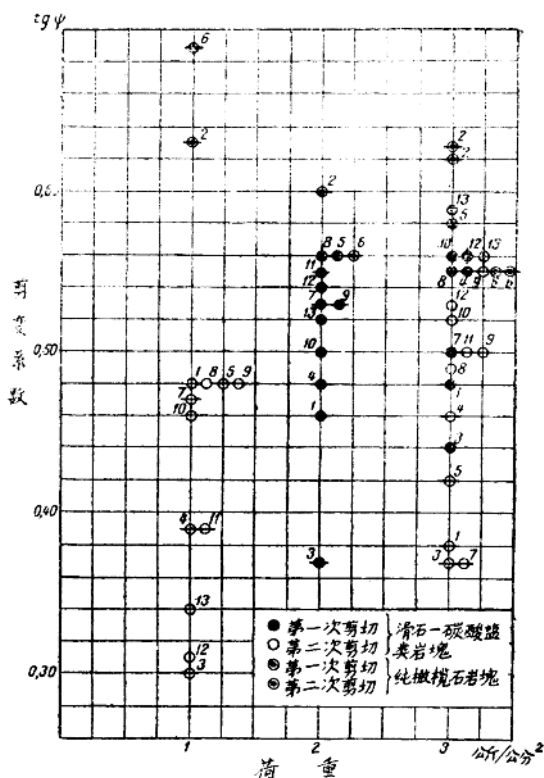


圖 2. 滑石-碳酸鹽类岩石岩塊間的抗剪强度。点旁的数字表示每一試样的两个岩塊的号碼，点上的水平綫或垂直綫则表示剪切面順片理或垂直于片理。

次剪切，試驗时其平均剪变系数均稍大于順片理剪切时的数值（圖 2）。

不同压力时純橄欖岩塊的剪变系数約为 0.60。

岩石承受不同荷重时的最大与最小剪变系数之比，平均为 1.5，这說明岩石不甚均一。