

# 岩石の圧縮破壊における 2, 3 の問題\*

石原 俊, 上野五郎

## 1. 緒言

物体の破壊現象は統計的要素がその本質に存在しており、殊に岩石は強度のばらつきが大きいので統計的見地から検討せねばならないし、又ばらつきの程度がわかれば鉱山現場などにおける各種設計上有利である。

岩石のような脆性物質では、圧縮破壊と引張り破壊ではその機構に大きい差があるが、筆者らはまず圧縮破壊を取上げて、応力—歪線図より破壊の進行を観察し、又圧縮強さやそのばらつきを結晶内部に存在する劈開亀裂などと関連させて研究した。

尙供試岩石は秋吉石灰岩、秋吉大理石の細粒と粗粒、及び稲田花崗岩の4種類である。

## 2. 応力—歪線図

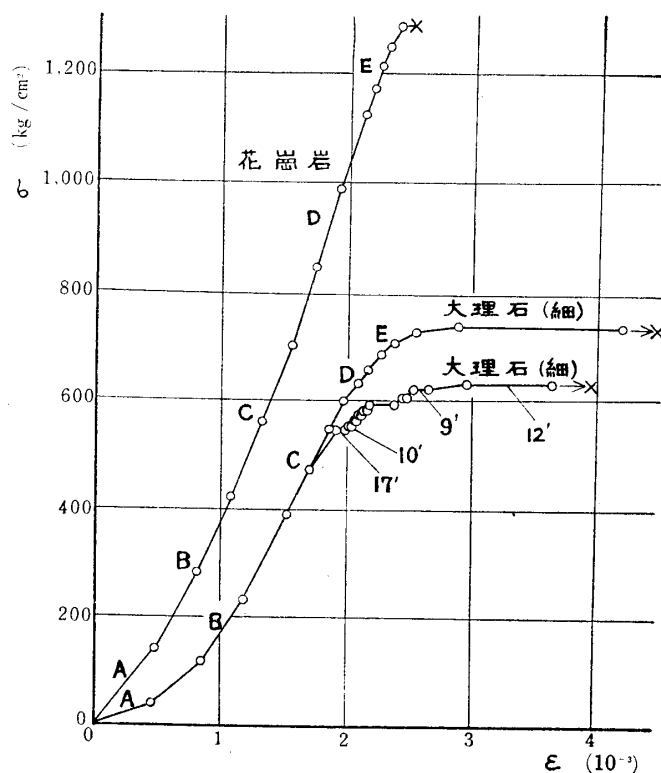
細粒大理石 (25×25×100mm 角柱)、花崗岩 (21φ×100mm 円柱) について破壊に到るまでの応力—歪線図を第1図に掲げる。

歪は電気抵抗線歪計を用い、曲げの影響を除くために試験片の表裏対称な位置にゲージを2枚貼りそれを直列にして測定した。

線図はS字型を示し、特に大理石でその傾向が著しい。従って縦弾性係数も応力によって変化し第1表のごとくなる。

低応力部分では弾性係数も低いけれども、ある応力—歪状態から一度除荷すれば残留歪を生じ、再負荷によって始めより高い弾性係数を示しつつもとの応力—歪状態に復帰することも観察されているので、この低弾性係数部分の存在は岩石の内部空隙が縮小することが原因ではないかと推察する。但し試験片の成形加工の過程でそのような空隙が増大するか否かは明らかでない。

破壊直前の低弾性係数部分及び水平部分はすべりによるものと考えられる。後に述



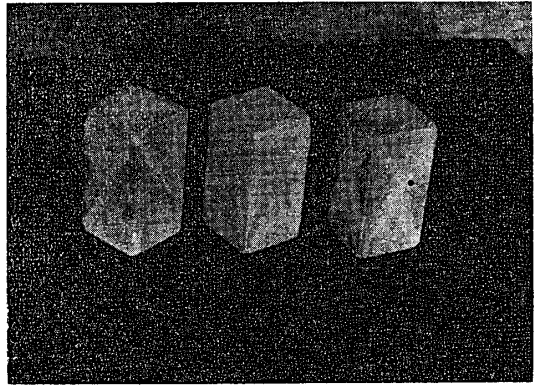
第1図 圧縮応力—歪曲線

第1表 縦弾性係数 (10<sup>5</sup>kg/cm<sup>2</sup>)  
(位置は第1図に示す個所)

位置	A	B	C	D	E
大理石	0.86	3.67	4.82	3.67	1.58
花崗岩	2.94	4.11	5.95	7.38	5.88

\* 昭和34年4月日本鉱業会春季大会講演会において発表

べる短柱の破壊試験の際、試験中破壊寸前の荷重の増加が停滞する時にその荷重を除いてやれば、大理石の場合明瞭な剪断線が観察される(第2図)ことからこのことが言えよう。又第1図の大理石の下方の線図は荷重速度が一定ではなく、その水平部に示す数字は階段的負荷で一定荷重で放置した時間を表わし、最初の水平部では17'次ぎでは10'で歪速度がほぼ0になったのである。それ以後では歪速度が減少傾向にあるのを確認してから荷重を次ぎの段階に増加したが、応力が大になるにつれ歪速度は大きくなりそれが0に近づく為



第2図 破壊直前の大理石(細)試験片

の時間も長くなるようであった。又破面の概形は上下の端面を底面とする錐面状となり、試験片の長さが大であればそれら錐面の中間は縦割れの亀裂で連絡され、短かければ上下錐面は直接に連絡される。

これらの事実は破壊の経過について示唆を与えてくれるものである。即ち岩石中には多くの欠陥が存在しているが、そのうちの弱いものは破壊応力の80%前後の応力で既に小さなすべりを起すが、局部的なものであって時間と共に安定状態に到達し他には波及しない。しかし応力が大になるにつれ小さなすべりを起す部分は多くなり互いに連絡するようになる。この小さなすべりは試験片内部全体に生ずるが、端面拘束などの条件の為に上下の錐面は最もすべりが発生しやすい部分と考えられ、錐面に沿うすべりがある限界以上に達するとき破壊が起るものとして大差ないであろう。

尚以上は大理石において顕著に現れて考察されたものであるが、花崗岩も破壊直前の弾性係数が相当低下し水平部分も存在するので同様な破壊の経過をたどるものと考えられる。従って岩石は一括して脆性物質であるとされてはいるが、圧縮応力下では程度の差こそあれ多少とも塑性的挙動をなし、特に大理石などはその傾向が強いとしてよいであろう。

### 3. 圧縮強さの分布

圧縮強さは各岩種につき一つの母岩塊から取出して同程度に仕上げた30~50個の試験片を用いて測定した。

圧縮強さは相当なばらつきを見せ、その分布は第3図の度数分布柱状図のごとくおおよそ左右対称、中高の形となる。この分布を正規確率紙によって検定すればほぼ正規分布をなすとしてよいようであったので、更に正規分布適合性の $\chi^2$ 検定を行えば次のごとくなる。

全体を適当な $k$ 階級に分けると、

$$\chi^2 = \sum_i^k (f_i - F_i)^2 / F_i < \chi_0^2$$

$$(f_i \geq 5, \sum f_i \geq 30)$$

但し  $f_i$ : 第 $i$ 階級に入る標本値個数

$F_i$ : 正規分布をなすと仮定したときの $f_i$ の期待値

$\chi_0^2$ : 自由度 $\phi = k - 1$ の $\chi^2$ 分布で $P_r\{\chi^2 \geq \chi_0^2\} = \alpha$ (危険率)で定まる $\chi_0^2$ の値。

が成立する時母集団は正規分布をなすと見なして差支えない。今細粒大理石を6階級、他をそれぞれ5階級に分けて計算すれば

大理石(細)  $\chi^2=3.44$   $\chi_0^2=9.24$  ( $\alpha=10\%$ )

大理石(粗) 3.18 7.78

石灰岩 2.10 7.78

花崗岩 3.53 7.78

従っていずれも正規分布として取扱って差支えない。

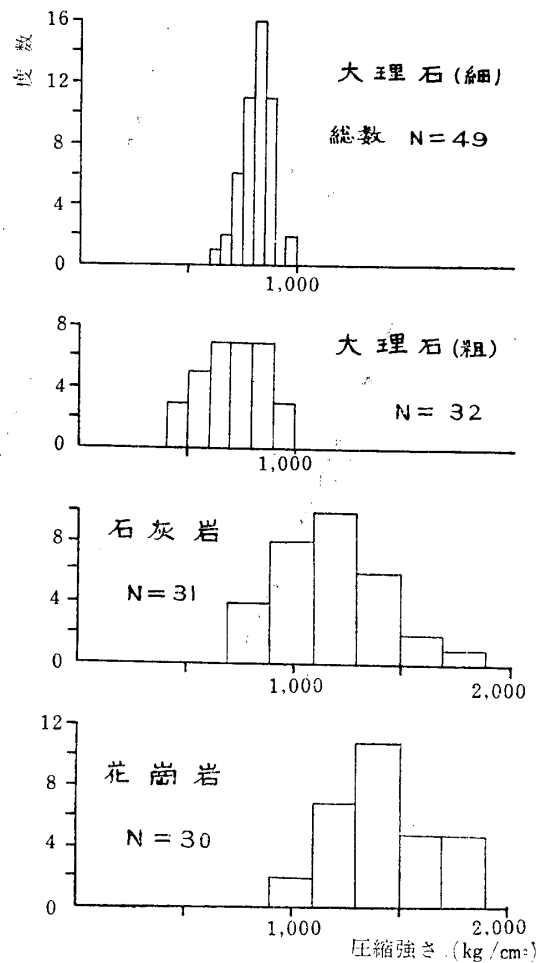
このことは従来主として金属などの引張り強さを対象として研究が進められ、確率論的立場から解釈されて来たところの分布状態と全く類似のものである。

ばらつきの程度を表わす量としては絶対的量である標準偏差よりも、その平均値に対する割合を%で表わした変動係数の方がより適切であるので、分布に関する統計量としては平均値及び変動係数を選び第2表に示す。備考欄に示すごとく岩種により形状に差があるがそれが分布状態に及ぼす影響は僅かであろう。

4. 平均圧縮強さ

平均圧縮強さは花崗岩、石灰岩、細粒大理石、粗粒大理石の順となる。大理石や花崗岩の薄片を作って観察すると結晶粒内部に多数の劈開面が発達しているし(第4図)、又破面は劈開面が連なって構成されているように観察されるので、強度が劈開面の大きさに関係するであろうと推察される。この劈開面の大きさは粒子径あるいは無負荷時に存在していた劈開亀裂の大きさと言いかえた方がよいかも知れない。Griffith, Orwanなどを始めとする人々の金属の脆性破壊に関する理論では、強度がいわゆる Griffith クラックの長さあるいは結晶粒直径の $1/2$ 乗に関係すると述べられているからである。

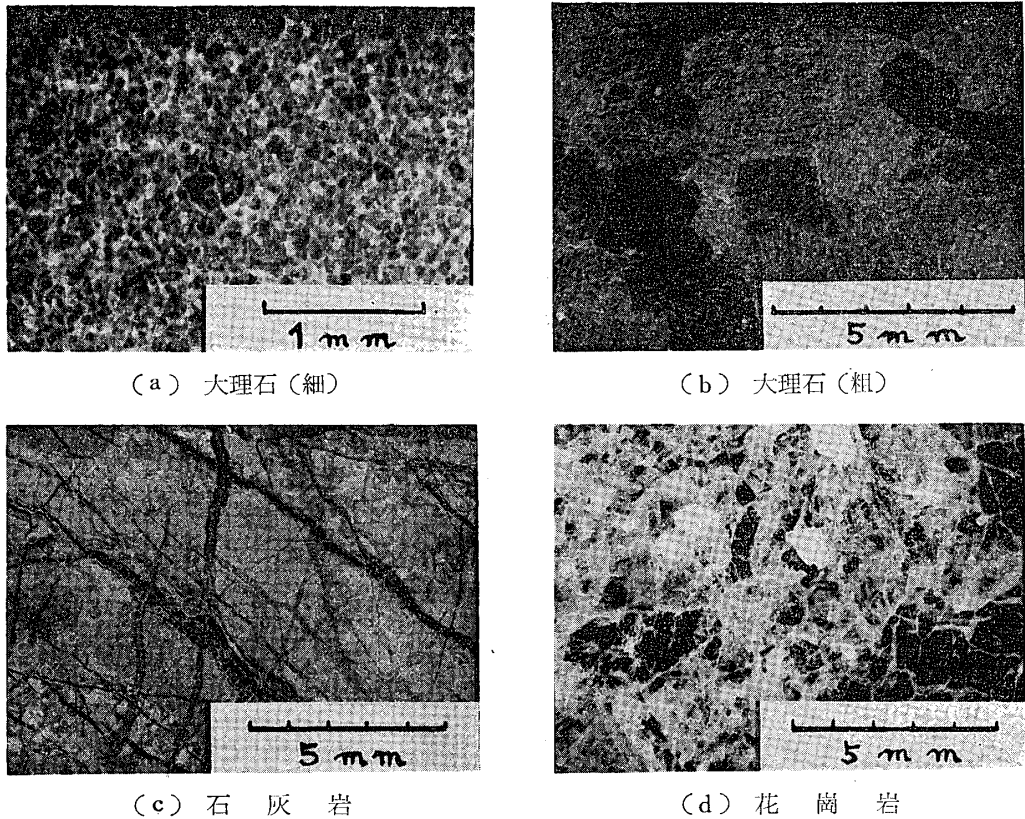
今同種の組織を有し、同じ形状で試験された細粒、粗粒両大理石についてみれば、平均圧縮



第3図 圧縮強さ度数分布

第 2 表

	比 重	平均圧縮強 kg/cm <sup>2</sup>	変動係数 %	ℓ mm	ℓ/√S	備 考
大 理 石(細)	2.70	809	8.7	0.09	0.0035	25×25×50mm 角柱
大 理 石(粗)	2.70	699	21.3	2.0	0.082	25×25×50mm 角柱
石 灰 岩	2.70	1,179	22.1	1.8	0.091	22φ×35mm 円柱
花 崗 岩	2.64	1,407	16.3	0.56	0.029	22φ×35mm 円柱
大理石(細・小)	2.70	683	10.8	0.09	0.0077	12×12×24mm 角柱
鑄 鉄			8.8			横 堀
ガ ラ ス			24.0			平 田



第4図 薄片写真(ネガ)

強さの比約8:7, 結晶粒径の比約1:20であって, 粒子径の大きい程平均圧縮強さは小さいことだけは認められるが, 粒子径に関する実験例が少ないのでこれ以上の検討はむづかしい。ただ金属の脆性破壊理論は主として引張りによるものであるので, 圧縮破壊との関連は尙研究を要するものであろう。

### 5. 変動係数

変動係数  $V\%$  は第2表のごとく細粒大理石, 細小大理石, 花崗岩, 粗粒大理石, 石灰岩の順序で大きくなって行く。(ここで細小大理石とは細粒大理石で寸法を約半分にしたもの41個について試験した結果である。その平均強さはもとの寸法の試験片に比し小さく出ているが, これは引張りなどの場合の寸法効果とは逆であって, 小断面積である為端面仕上げ, 荷重の偏りなどの影響が誤差となったと考えられ, 一方では結晶粒子径と断面積の関係から圧縮試験ではこのようになって当然とも考えられるので, なお検討を要するところであり, 平均強さについては参考とするに留める。もし誤りがあったとすれば変動係数は真値よりやや大なる方に偏るであろうが偏りは僅かであると推定されるので, そのことを含みつつ変動係数を採用することにする。)

先にも述べたごとく破壊には劈開面が大きい役割をもつが, 一つの結晶粒子を取り出してみればその中の劈開面の方向は一定である。従って上下の錐状面即ち破壊の起りうる面内に含まれる結晶粒子の数が多ければ破壊面に対する劈開面の方向の分布は全体として一様であり, 結晶粒子数が少なければ劈開面の方向の分布は不連続的になってゆくであろうし, 不連続的であればある程各試験片の強度は大きくばらついてくることも推定される。

このことは劈開亀裂を Griffith クラックと見なせば Griffith の理論と類似の考え方である。ばらつきの解釈としてはこの他にも破壊遅れの現象と関連する速度過程理論などがあるが、岩石の如く内部亀裂のよく発達したものでは Griffith と類似の考え方で充分であろうと考える。

薄片写真の任意の場所で直線を引き、それが結晶粒界によって分割された各線分の平均長さを  $\ell$  とすれば、 $\ell$  の値は平均粒子径に比例し、又無荷重時に存在する劈開亀裂の程度を示すものとも言える。石灰岩は非晶質であるが、薄片観察によれば夾雑物が網目状に入り込んで全体を無数に区切っているのをそれを粒子の集合と見なし、又最初に存在するクラックの長さは一応その網目によって限定されるとして  $\ell$  の値を求める。尙数百粒子以上にわたり主として粒界を連ねた大きい亀裂が存在することがあるが、このような大きい亀裂は筆者らが用いた程度の試験片では、その成形加工の途中で試験片を破壊させてしまうことが多いので一応無視することにする。

さて、無次元量  $\ell/\sqrt{S}$  ( $S$ は断面積)をとればこれは破壊面内に含まれる結晶粒子数などに対応する量と言えるから、これと変動係数との関係を図示すれば第5図となる。各点は非常によく一直線上に乗っている。非晶質である石灰岩や他と成分の異なる花崗岩までもが直線上に乗ったことは偶然とは言い切れない。この直線の方程式を最小二乗法によって求めれば

$$V=43.7(\ell/\sqrt{S})^{0.285}$$

が得られる。更に異質の岩種について実験する必要はあるが、圧縮強さのばらつきは  $\ell/\sqrt{S}$  に依存すると見なして差支えないと思われる。

## 6. 結 言

以上をまとめれば次のようになる。

(1) 岩石も圧縮応力下では多少の塑性的挙動を示し、花崗岩ではその傾向が小さく大理石では大きい。

局部的すべりは破壊応力の80%前後から観察された。

(2) 同一母岩より得た試験片の圧縮強さは正規分布をなすとして取扱って差支えない。

(3) 同種岩石の平均圧縮強さは粒子の大きい程小さくなる。

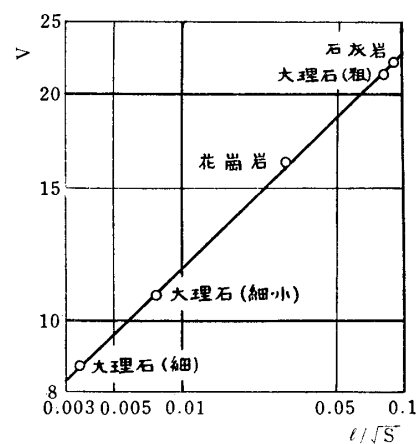
(4) 圧縮強さの変動係数  $V$  は8~22%に達した。

(5)  $V$  は  $\ell/\sqrt{S}$  に依存し、供試岩種の範囲内では  $V=43.7(\ell/\sqrt{S})^{0.285}$  が得られた。

尙最後に稲田花崗岩の入手に関して御厚意をいただいた東大藤井助教授、並びに実験に御協力をうけた板谷、坂部両君に感謝の意を表わします。

## 参 考 文 献

横堀武夫：材料強度学（技報堂）



第5図  $V-\ell/\sqrt{S}$