

1. 緒言

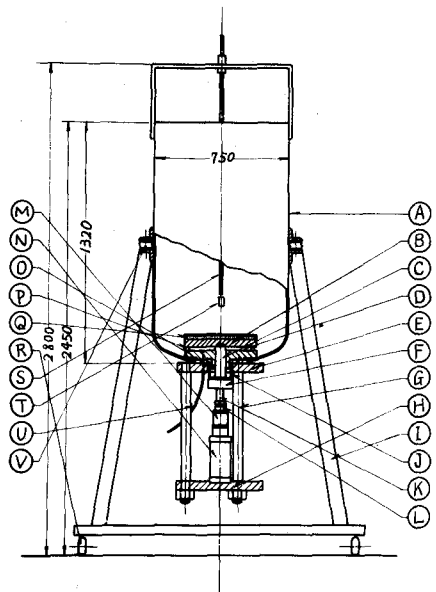
荷重速度あるいは変形速度によつて、岩石の力学的挙動が大きく変わることは、すでに従来より指摘¹⁾されているところである。しかしこの関係を実験的に明らかにするためには低速より高速に至るまでの一連の荷重試験を行ない、岩石の変形特性を知る必要がある。本研究では、低速、常速試験結果と対比出来るような岩石の高速試験を行なう目的で、試験時に発生する衝撃波の吸収、試験装置と岩石試料との接触時間等を考慮した水中爆発圧利用の高速荷重試験機を製作し、各種岩石試料について高速圧縮試験を行ない、岩石の力学的挙動について調べたので、ここにその概要を述べる。

2. 岩石試料

岩石試料としては、群馬県多胡郡吉井町産砂岩（多胡砂岩）、島根県八束郡宍道町産凝灰岩質砂岩（来待砂岩）、福島県いわき市常磐炭鉱産砂岩（石城砂岩）、大阪府泉南郡淡輪産砂岩（和泉砂岩）、福島県耶麻郡高郷村産凝灰岩（萩野凝灰岩）、岩手県東磐井郡大東町産大理石（東北大理石）、山口県美彌郡秋吉台地方産大理石（秋吉大理石）、宮城県登米郡石越町産安山岩（石越安山岩）、福島県須賀川市江持産安山岩（江持安山岩）、茨城県笠間市産花崗岩（稲田花崗岩）の10種類の岩石を用いた。試験にあつては、これら岩石試料を $30 \sim 35 \text{ cm} \times 60 \sim 70 \text{ mm}$ の角柱に整形し、試料軸の方向に相対して2枚の 120 g ワイヤストレンゲージを貼付けた。

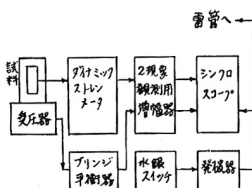
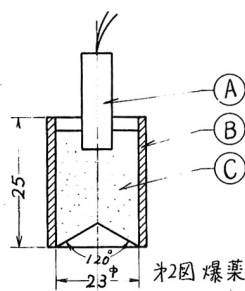
3. 試験装置ならびに試験方法

第1図は本研究に用いた水中爆発圧利用の高速荷重試験機である。実験にあつては、まず円筒型水槽 (A) の中に水を入れ、槽内の水面を受圧盤 (B) の上面より約1 mの高さに保つ。次に試料 (K) を所定の位置におき、油圧ジャッキ (N) を調節して、載荷盤 (F) と密着させる。爆薬 (T) としては、岩石の強度に応じて、8号電気雷管、新桐3号ダイナマイト4~7 gr. に6号電気雷管をつけたものを用いた。ダイナマイトを用いる場合は、爆発圧に方向性をもたせるため、Neumann effect を考慮して、第2図に示すようにダイナマイトを整形した。これら爆薬を第1図の爆薬支持棒 (S) の先端に結んで、水中の所定の深さまで入れるなお本研究では、受圧盤 (B) の上面より150~200 mmの位置に爆薬をおいた。一方岩石試料 (K) に貼付たワイヤストレンゲージ、受圧器に貼付た半導体ストレンゲージと測定装置とを第3図のプロックダイヤグラムに示すように結線する。測定に際しては、まず発破器にスイ



第1図 高速荷重試験機

ツチを入れると、第3図のシンクロスコープの掃引が開始すると同時に、水中に予じめ設置した爆薬 (T) の爆轟による爆発圧が受圧盤 (B) に加わり、ピストン (C) を介して、岩石試料を高速圧縮する。この時の岩石試料と受圧器のひずみ現象がそれぞれ広帯域ダイナミックストレメータとブリッジ平衡器を経て、シンクロスコープに描かれる。なお第4図は秋吉大理石、和泉砂岩試料による現象波形の一例である。本試験機の高速圧縮力は、主として、水中爆発圧により高速運動する全重量約80 kgの受圧盤 (B) ピストン (C) 載荷盤 (F) の可動部分がつ慣性力によるものである。なお水中爆発の際、発生する衝撃波はスポンジゴム層 (Q) 上記可動部分を支える環状ゴム (P) によつて極力吸収するようにしてある。また試験機全体の振動は試験機本体を架台 (I) に支えているゴムダンパ (V) により吸収される。

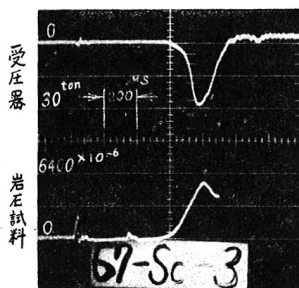


第3図 測定装置

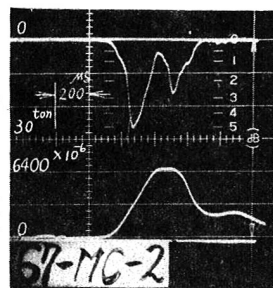
本研究では、上記高速試験の他に、油圧式100^{ton}材料試験機を用いて、岩石試料の破壊所要時間が数時間である低速試験、3～4分の常速試験、0.3～0.5秒の準高速試験を行なった。

4. 試験結果ならびに考察

第5図は、前記各試料について、圧縮強度とひずみ速度との関係を求めたものである。図をみると、和泉砂岩、江持安山岩、荻野凝灰岩、来待砂岩、多胡砂岩、石城砂岩の準高速から高速試験に至るまでの圧縮強度の増加はあまり目立たないが、石越安山岩、稲田花崗岩、秋吉大理石、東北大理石試料の圧縮強度は著しく増加している。すなわち、ひずみ速度に対する圧縮強度の増加率は岩種により著

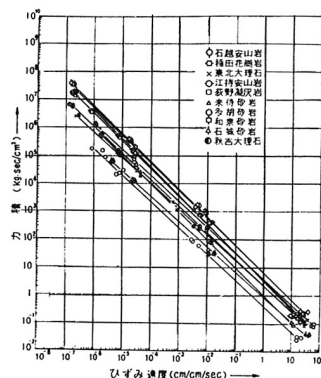


和泉砂岩試料

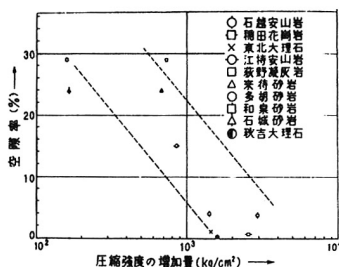


秋吉大理石試料

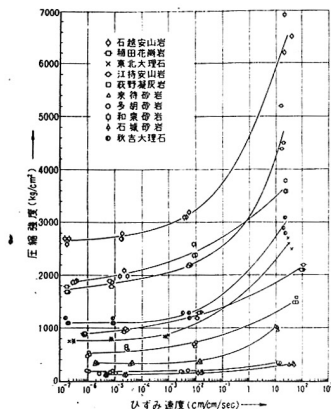
第4図 現象波形



第7図 岩石試料が破壊に至るまでの仕事量とあわす力積とひずみ速度との関係



第6図 空隙率と圧縮強度の増加量との関係 (ひずみ速度 10⁻⁴ ~ 10 cm/cm/sec)



第5図 圧縮強度とひずみ速度との関係

しく異なることがわかる。そこで岩石の変形に重要な役割りをもつと思われる空隙率と第5図におけるひずみ速度 $10^{-4} \text{ cm/cm/sec}$ より 10 cm/cm/sec に至るまでの間の圧縮強度の増加分との関係を第6図のように示すと、これらの間に明らかに相関性がみとめられる。すなわち、第6図によると、空隙率の大なる程、圧縮強度の増加率が低くなる傾向がみとめられる。これらの関係を模式的に考えてみると、いまかりに岩石の変形の大部分が造岩鉱物粒子間の空隙の量に支配されるものとする、空隙率の大なる程、変形速度に対する変形抵抗が少ないはずである。換言すれば、第6図にみられるように、空隙率の小さい岩石程、変形速度による変形抵抗増加率の増大のあることは充分考えられる。

また第7図は各岩石試料の破壊に至るまでの単位面積あたりの力積とひずみ速度との関係を示したものである。図をみると、ひずみ速度が増すにつれて力積、すなわち、岩石試料を圧縮破壊するに要する仕事量が減ずる傾向を有し、しかも両者の間に明瞭な相関性がみとめられる。そこで、各岩石試料について、力積とひずみ速度との関係を実験式で示すと、次のようになる。

多胡砂岩	$I = 0.38 \ E_v^{-0.949}$ --- (1)	糸待砂岩	$I = 1.0 \ E_v^{-1.00}$ --- (2)
石城砂岩	$I = 1.0 \ E_v^{-0.886}$ --- (3)	和泉砂岩	$I = 6.2 \ E_v^{-1.00}$ --- (4)
荻野凝灰岩	$I = 3.8 \ E_v^{-0.930}$ --- (5)	東北大理石	$I = 2.7 \ E_v^{-0.905}$ --- (6)
秋吉大理石	$I = 2.6 \ E_v^{-0.929}$ --- (7)	石越安山岩	$I = 6.3 \ E_v^{-1.00}$ --- (8)
江持安山岩	$I = 2.9 \ E_v^{-1.02}$ --- (9)	稲田花崗岩	$I = 3.5 \ E_v^{-0.996}$ --- (10)

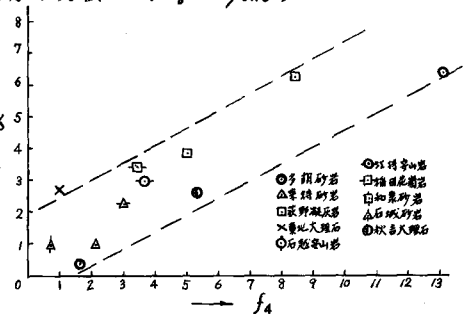
上式において

I : 岩石試料が圧縮破壊するまでに費やされる仕事量を示す力積 ($\text{Kg} \cdot \text{sec/cm}^2$)

E_v : ひずみ速度 (cm/cm/sec)

(1) ~ (10) 式をみると、ひずみ速度 (E_v) の指数はおおよそ -1 に近い値を示すので、力積 (I) とひずみ速度 (E_v) との関係は (12) 式に示す近似式によつてあらわれされるものと思われる。

$$I = \alpha \ E_v^{-1} \text{ --- (11)}$$



(11) 式において、 α は岩石の性質によつて定まる係数 (11) 式において、 α は岩石の性質によつて定まる係

数 (Kg/cm^2) である。(11) 式の α は、各種岩石の破碎抵抗を示す 1 つの指標と考えられることから、この α の値とプロトジャコソフの破碎指数 f_4 との比較を試みた。第8図は α と f_4 との関係を示したもので、図をみると、 α と f_4 との間にはかなり明瞭な相関性がみとめられる。なお f_4 の値は、北海製作所製のイー・ゲー・デー・アー・エヌ法による落錐式破碎抵抗測定装置を用いて測定した。

以上、変形速度と岩石の力学的挙動との関係の概略について述べたが、これらの関係をさらに明らかにするため、レオロジー的観点から考察してみる必要がある。一般に岩石の力学的挙動は、Burgers 模型でおおよそ説明されるといわれている。しかし破壊に至るまでの岩石の力学的挙動を論ずる場合は、より広範な挙動を説明出来る模型が必要となり、伊藤、

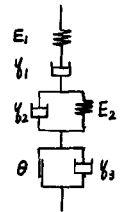


図9 6要素模型

寺田による粘塑性的模型等が提案されている³⁾。本研究では、第9図に示すような Burgers 模型に塑性流動を加味した6要素模型を用い、変形速度と岩石の力学的挙動との関係について、レオロジー的解析を試みた。第8図の模型のレオロジー方程式は、応力速度一定として、(12)式によつて示される。

$$\left. \begin{aligned} \dot{\epsilon} &= \frac{K}{E_1} + \frac{K}{E_2} (1 - e^{-\frac{E_2}{\gamma_2} t}) + \frac{\delta}{\gamma_1} \quad \text{---} \quad (\delta \leq \theta) \\ \dot{\epsilon} &= \frac{K}{E_1} + \frac{K}{E_2} (1 - e^{-\frac{E_2}{\gamma_2} t}) + \frac{\delta}{\gamma_1} + \frac{1}{\gamma_3} (\delta - \theta)^n \quad \text{---} \quad (\delta > \theta) \end{aligned} \right\} \text{---(12)}$$

(12)式において、 $\dot{\epsilon}$ ：ひずみ速度 (cm/cm/sec)、 K ：応力速度 (Kg/cm²/sec)、 E_1, E_2 ：弾性係数 (Kg/cm²)、 γ_1, γ_2 ：粘性係数 (Kg·sec/cm²)、塑性粘度 (Kg·sec/cm²)、 δ ：応力 (Kg/cm²)、 t ：時間 (sec)、 θ ：降伏応力 (Kg/cm²)。

(12)式の模型定数は、ひずみ速度($\dot{\epsilon}$)—応力(δ)曲線に対するあてはめ計算によつて求められる⁴⁾。本研究の高速試験結果を(12)式によつて解析する場合、応力速度一定という点で問題はあるが、一応この条件をみたすものとして、模型定数の算定を試みた。第1表は秋吉大理石試料の計算例である。第1表をみると、変形速度とともに、 E_1, γ_1, θ の増大、 γ_2, γ_3 の減少する様子がみられる。

5 結 言

オ1表 秋吉大理石試料による計算例

変形速度	No	E_1 (Kg/cm ²)	E_2 (Kg/cm ²)	γ_1 (Kg·sec/cm ²)	γ_2 (Kg·sec/cm ²)	γ_3 (Kg·sec/cm ²)	θ (Kg/cm ²)	n
低速	15	9.6×10^5	2.2×10^6	8.3×10^4	3.2×10^3	3.3×10^3	790	2.5
	19	1.7×10^6	1.3×10^6	1.9×10^4	1.4×10^3	2.1×10^3	780	3.2
常速	16	1.1×10^6	1.4×10^6	∞	2.4×10^3	7.4×10^3	780	2.0
	10	1.6×10^6	1.0×10^6	∞	5.1×10^3	5.8×10^3	900	2.1
準高速	21	5.0×10^6	6.1×10^5	∞	1.1×10^3	8.1×10^3	1000	2.0
高速	8	1.9×10^6	6.5×10^5	∞	1.3×10^3	1.5×10^3	1000	2.0
	2	9.4×10^5	1.4×10^6	∞	1.4×10^3	2.6×10^3	1100	1.8
	3	1.3×10^6	3.5×10^6	∞	2.8×10^3	2.5×10^3	1500	2.7

増加に対して、岩石の空隙支配がみられる。(2)変形速度と岩石を破碎するに要する仕事量をあらわす力積との間に相関性がみとめられ、これより岩石の破碎性を示す1つの指標が得られる。(3)変形速度と岩石の力学的挙動との関係について、6要素模型を用いて、レオロジー的解析を試みた。

上記研究を行なうにあつて、東北大学堀部富男教授に御指導をいただき、また東北大学牛田稔助手、村上孝助手、奥村清彦技官に御協力をいただきましたことを深く感謝致します。

参考文献

- 1) 例えば、石原研而：急速荷重を受ける岩の変形係数、第3回岩盤力学に関するシンポジウム講演概要、昭和40年11月、11～15頁
- 2) 例えば、平松良雄：西原正史：二・三の堆積岩のクリープについて、日本鉱業会誌、73巻、830号、昭和32年4月、493～497頁
- 3) 伊藤一郎・寺田孚：岩石の動的挙動に対する流動学的研究、日本鉱業会誌、78巻、893号、昭和37年10月、723～730頁
- 4) 例えば、河上房義・小川正二：くり返し応力を受けた締固め土の弾性係数および降伏応力について、土木学会論文集、第114号、昭和40年2月、8～16頁

Ryoji Kobayashi

It is the purpose of this study to find out the mechanical behaviours of rocks under various loading-rates which ranged from 1.0×10^{-1} kg / cm² / sec to 8.0×10 kg / cm² / sec. The high rates of loading have been obtained by the use of a high-speed compressive testing machine, while the lower rates of loading have been obtained by the use of a hydraulic testing machine.

In the case of the high-speed loading test, which is undertaken for the purpose of comparing with the low-speed loading test, the shock waves should be eliminated, so as not to expose the rock specimens to impact loading.

From the above consideration, a new high-speed compressive testing machine, which is applied to the rock specimen by using the underwater explosive, has been designed.

The results of this investigation, using 10 kinds of rocks, have been summarized as follows.

(1) The compressive strength of rocks increases with loading-rate, for instance, " AKIYOSHI " marble at the rate of about 2.6 in respect of the ratio of the high-speed compressive strength to that of the low-speed. In this case, the average loading rates of the high-speed test are about $2.5 \sim 2.6 \times 10^7$ kg / cm² / sec, and the average loading-rates of the low-speed test are about 1.0×10^{-1} kg / cm² / sec. For the reason of this rate effect, it may be concluded that the effect of the pore, which exists in the rock, should be considered for the occurrence of the rate effect.

(2) The impulse, which gives the energy of the rock breakage, decreases as the strain-rate increases, and this relation is approximately expressed by

$$I \propto \dot{\epsilon}^\beta$$

where

I : impulse, which gives the energy of the rock breakage (kg.sec / cm²)

$\dot{\epsilon}$: strain-rate (cm / cm / sec)

α, β : constants depending on the nature of rocks