高速静荷重下における

岩石の力学的性質 (第2報)*

正 会 員 小 林 良 二**

Mechanical Properties of Rocks under Dynamic Loading (2nd Report)

Ryoji KOBAYASHI

In the previous part of this article, it was shown that the compressive strength and the value of the secant modulus of elasticity of rock increase with increasing of the loading-rate.

This paper is concerned with the relation between the compressive strength and the strain-rate of rocks, between Poisson's number in the compressive test and the loading-rate, and between the tensile strength and the loading-rate.

The results of these investigations are as follows;

(1) The compressive strength of rocks increases with increasing of the strain-rate; for instance, the relation between the compressive strength and the strain-rate of marble is expressed by

$$\sigma_d = 730 + 26 \log v_d / v_0 + 2.6 (\log v_d / v_0)^{2.12}$$

where

σ_0 : strength in the low-speed loading test (kg. cm⁻²)

σ_d : strength in the test of voluntary loading speed (kg. cm⁻²)

v_0 : strain-rate in the low-speed loading test

v_d : strain-rate in the test of voluntary loading speed

(2) In the tests of various loading-rates, Poisson's number of rocks decreases with the increase of compressive stress, and when it approaches to 2 the rocks break down. Poisson's number on the same compressive stress in these tests, however, has a tendency to increase with increasing of the loading-rate. For instance, Poisson's number of sandstone on compressive stress of 200 kg.cm⁻² is about 5.0 in the low-speed loading test, about 5.5 in the conventional-speed loading test, about 7.2 in the high-speed loading test.

(3) The strength and the secant modulus of elasticity of rocks in the tension test increase with increasing of the loading-rate; for instance, the ratio of the high-speed tensile strength to the low-speed one is about 2.1, and the ratio of the modulus of elasticity in the high-speed test to that in the low-speed test is about 2.5 for marble. In these tests, the average loading-rate of the high-speed test is about 2.7×10^4 kg.cm⁻². sec⁻¹, and the average loading-rate of the low-speed test is about 9.9×10^{-3} kg. cm⁻². sec⁻¹.

1. 緒 言

岩石は弾性的性質の他に流性的性質を有している。それゆえ、岩石に加わる荷重速度の如何によつては、ある場合はより弾性的性質を示し、ある場合はより流性的性質を示す。本研究では荷重装置と岩石試料とが平衡状態にあるような試験、すなわち、静荷重試験を行なつて、荷重速度と岩石の力学的挙動との関係について調べた。

第1報¹⁾では、セメントモルタル、砂岩、大理石試料による低速試験 (試料破壊所要時間約 1~2 時間)、常

速試験 (約 3~4 分)、高速試験 (約 2~3 ミリ秒) の結果より、荷重速度、ひずみ速度と圧縮強さ、ヤング率との関係等について述べた。

本報において述べる研究では、上記荷重速度における圧縮試験の他に、試料の破壊所要時間が約30秒である準高速(I)試験、2~3 秒である準高速(II)試験を加え、岩石試料のひずみ速度と圧縮強さとの関係をさらに詳しく調べた。また圧縮における荷重速度とポアソン数との関係、引張りにおける荷重速度と引張り強さとの関係についても研究を行なつた。

2. 試 料

試料としては、岩手県大東町猿沢採石所産の2種類の

* 昭和40年3月5日受理, 昭和39年4月, 昭和39年9月 日本鉱業
大会にて講演

** 工博 東北大学工学部助教授 鉱山工学科

大理石、常磐炭産の2種類の石城砂岩を用いた。以後これらの試料を便宜上、大理石（Ⅰ）、大理石（Ⅱ）、石城砂岩（Ⅱ）、石城砂岩（Ⅲ）試料と名付けることにする。なおこのように試料の呼称をきめると、第1報において述べた大理石、石城砂岩試料は、大理石（Ⅰ）、石城砂岩（Ⅰ）に相当することになる。またこれら試料と対比する意味で、セメントと砂（-28mesh川砂）の配合比1:1のセメントモルタル試料も用いた。なおセメントモルタル試料の養生法は圧縮試験における同じである。これら試料を圧縮試験に対しては、大理石、石城砂岩試料は35mm×35mm×70mmの角嚢に整形し、また引張り試験に対しては、大理石、石城砂岩試料は32mm×32mm×250mmの角嚢、セメントモルタルは35mmφ×250mmの円嚢形に整形した。さらに試料軸方向のひずみを測定するため、試料の相対する側面に、それぞれ1枚ずつ計2枚のシングルワイヤストレンゲージ（抵抗120Ω、ゲージ長18mm）を試料軸の方向に貼付け、これら2枚のゲージを直列に結線した。またポアソン数を測定するための試料に対しては、試料の相対する側面に、2枚のクロスワイヤストレンゲージを貼付けた。

3. 実験装置および方法

本研究では、前述のように、荷重速度を低速、常速、準高速（Ⅰ）、準高速（Ⅱ）、高速の5段階まで変化させることができる。これら各速度の試験のうち、低速より準高速（Ⅰ）までの試験に対しては、試験装置として油圧式耐圧試験機、静ひずみ計、準高速（Ⅱ）に対しては油圧式耐圧試験機、狭帯域動ひずみ計、ペン書きオシ

ログラフ、また高速試験に対しては第1報で述べた岩石用高速荷重試験機、広帯域動ひずみ計、シンクロスコープを用いた。

圧縮試験装置ならびに方法については、すでに第1報において述べたので、本文では引張り試験についてのみ述べることにする。

岩石のごとき脆性物質の単軸引張り試験は、①試料が掴み部で破断されやすいこと、②試料に均等な引張り荷重を加えることが困難であること等のため、従来困難な試験の一つとされてきた。そこで著者は次に述べる岩石用単軸引張り試験器²⁾を用いて、引張試験を行ないおよそ満足すべき結果を得た。つぎに第1図に示す単軸引張り試験器の概略について述べる。図において試料(A)の両端を上部チャック(B)と下部チャック(C)に挿入し、ポリエステル系樹脂(D)で固定する。上部チャック(B)は外管(E)の上端に支えられ、下部チャック(C)は内管(F)の下端に密着しており、外管(E)内を内管(F)が滑動して下がると下部チャック(C)が押し下げられる。したがって図の矢印の方向に圧縮荷重を加えることにより試料には引張り荷重が加わることになる。また外管(E)、内管(F)に穿った小孔(G)はワイヤストレンゲージのリード線とり出し孔である。

低速、常速引張り試験の際は、上記引張り試験器と油圧式耐圧試験機とを用いて、試験を行なうが、高速引張り試験においては、引張り試験器を前報第1図の受圧器(Q)の上に密着して置き、さらに引張り試験器の上に5mm厚さの硬質ゴムを1枚載せ、この上にドロップハンマ(C)を落下させて、試料に均等な引張り荷重を加える。なお高速引張り試験に用いる受圧器(Q)は、その感度を高めるために黄銅製のものを用いた。黄銅製受圧器の構造ならびに寸法は高速圧縮試験用の硬鋼製受圧器と同じである。

4. 実験結果ならびに考察

4.1 変形速度と圧縮強さとの関係

前報において述べた実験結果より、試料の変形速度が増すにつれて、変形抵抗が増すという傾向が推測される。そこでこの関係をさらに究明する意味で、石城砂岩試料に対しては、荷重速度を低速、常速、準高速（Ⅰ）、高速の4段階に変えて試験を行ない、また大理石試料に対しては、低速、常速、準高速（Ⅰ）、準高速（Ⅱ）、高速の5段階に変えて試験を行なった。

ここにおいて、材料の変形速度と変形抵抗との関係について、従来の説を述べると、L. Prandtl は金属材料について、(2)式を得ている。

$$\sigma_d = \sigma_0 + a \log v_d/v_0 \cdots \cdots (2)$$

また H. Peutler, E. A. Davis が(2)式を修正して

第1図 岩石用単軸引張り試験器

第2-a図 石城砂岩(Ⅱ), 石城砂岩(Ⅲ) 試料による圧縮強さとひずみ速度比との関係

第2-b図 大理石(Ⅱ) 試料による圧縮強さとひずみ速度比との関係

(3) 式を提示している。

$$\sigma_d = \sigma_0 + b \log v_d/v_0 + c (\log v_d/v_0)^n \dots (3)$$

(2), (3) 式において,

- σ_0 : 低速荷重試験における強度 ($\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2}$)
- σ_d : 任意の荷重速度の試験における強度 ($\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2}$)
- v_0 : 低速荷重試験におけるひずみ速度
- v_d : 任意の荷重速度の試験におけるひずみ速度
- a, b, c, n : 常数

(2), (3) 式の考えにしたがつて, 岩石の変形速度と変形抵抗との関係を石城砂岩, 大理石試料について示すと第2図のようになる。第2図を画くにあたつて, まず低速試験における圧縮強さ, ひずみ速度の平均値を求め, これらの値をそれぞれ σ_0, v_0 とする。つぎに常速, 準高速, 高速荷重下における各試料の圧縮強さ, ひずみ速度を求め, これらの値を σ_d, v_d とする。

以上より圧縮強さ σ_d とひずみ速度比 v_d/v_0 との関係を半対数グラフにあらわしたのが第2図である。第2-a図をみると, 石城砂岩(Ⅱ), 石城砂岩(Ⅲ) 試料について, σ_d と $\log v_d/v_0$ との間にはほぼ直線の関係がみとめられる。すなわち, 本実験の範囲内では石城砂岩(Ⅱ), (Ⅲ) 試料について(2)式がおおよそ成立することになる。

一方, 第2-b図をみると, 大理石(Ⅱ) 試料については σ_d と $\log v_d/v_0$ との間には直線的というよりはむしろ曲線関係がみとめられ, これらの間には(3)式が良く適合するようである。このように試料の材質, 荷重速度範囲の如何によつては, $\sigma_d - v_d/v_0$ 線図が大分異なつた傾向を示す。石城砂岩(Ⅱ), (Ⅲ) 試料についても, 荷重速度をさらに速くした場合を考えると, 第2-a図に示す $\sigma_d - v_d/v_0$ 線図は直線ではなく, 曲線を

第3図 各圧縮速度における石城砂岩(Ⅲ) 試料の応力-ポアソン数線図

画くものと推測されるので, 岩石の σ_d と v_d/v_0 との関係は一般に(3)式によつて示されるものと考えられる。

4.2 変形速度とポアソン数との関係

つぎに石城砂岩(Ⅲ), 大理石(Ⅱ) 試料を用いて, 各荷重速度下における応力とポアソン数との関係を求めた。第3図は荷重速度を低速, 常速, 高速の3段階に変化させた場合の石城砂岩(Ⅲ) 試料による測定結果を示す。なお第3図は縦軸にポアソン数, 横軸に圧縮応力をとつてある。図をみると荷重速度の如何にかかわらず圧縮応力の増加にしたがつて, ポアソン数は次第に減じ, 完全塑性体におけるポアソン数の理論値2に近づいて, 破壊している。また同一圧縮応力におけるポアソン数は荷重速度が大になるにつれて, 大きな値をとる傾向がある。すなわち第3図について, 圧縮応力 200 kg/cm^2 における低速試験のポアソン数の平均値をとると, 約5.0, 常速試験の平均値は約5.5, 高速試験の平均値は約7.2となつた。これは荷重速度が速くなるにつれて, 試料は

第4図 高速荷重下における石城砂岩(Ⅱ) 試料の現象波形 (引張り試験)

流性変形する時間的余裕がなくなり、より弾性的挙動を示すようになるためと考えられる。大理石（Ⅰ）試料についても、これと同様の傾向が得られた。

4.3 引張り試験

前記単軸引張り試験器を用いて、引張りにおける荷重速度と岩石の力学的挙動との関係について調べた。岩石試料としては石城砂岩（Ⅱ），大理石（Ⅰ），セメントモルタル試料を用いた。なお引張り試験における荷重速度は低速，常速，高速の3段階に変化させた。

第4図の写真は高速荷重下における石城砂岩（Ⅱ）試料の測定例で、受圧器と試料のひずみ現象波形を示す。現象波形の立上りの部分は前報第3図の圧縮における現象波形に比べ滑らかである。これは引張り試料の両端をポリエステル系樹脂で固着してあるので、圧縮試験における如く、試料両端と荷重装置、受圧器との接触状態が試料の引張り過程にほとんど影響をおよぼさないためと考えられる。なおシンクロスコープの輝点掃引速度はブラウン管面上1cmを1ミリ秒にとつてある。これら現象波形より荷重速度、ひずみ速度、応力—ひずみ線図の求め方は圧縮試験におけると同様である。以上述べた高速荷重試験の他に、低速，常速試験も行なつて、第5図に示すような測定結果を得た。第5-a図はセメントモルタル試料，第5-b図は石城砂岩（Ⅱ）試料，第5-c図は大理石（Ⅰ）試料によるものである。また第1表は測定結果を各試料についてまとめたものである。第5図，第1表をみると、圧縮試験におけると同様、荷重速度とともに、試料の引張り強さ、ヤング率が増すという一般の傾向がみとめられる。例えば大理石（Ⅰ）試料について述べると、高速荷重（平均引張り速度 $2.7 \times 10^4 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$ ）

第1表 各引張り速度における試験結果

試料	実験の種別	試料番号	平均引張り速度 ($\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$)	引張り強さ ($\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2}$)	強度比	割線ヤング率* ($\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2}$)
セメントモルタル	低速	No. 1	9.5×10^{-3}	34	1	2.4×10^5
		2	9.9×10^{-3}	36		3.0×10^5
	常速	3	2.3×10^{-1}	40	1.3	3.9×10^5
		4	1.8×10^{-1}	51		4.5×10^5
	高速	5	2.8×10^4	62	1.8	5.1×10^5
		6	3.7×10^4	81		5.6×10^5
石城砂岩（Ⅱ）	低速	No. 1	1.0×10^{-2}	23	1	1.4×10^5
		2	9.9×10^{-3}	22		1.4×10^5
	常速	3	4.6×10^{-2}	22	1.2	1.7×10^5
		4	1.1×10^{-1}	32		2.3×10^5
	高速	5	2.1×10^4	47	2.0	2.5×10^5
		6	7.2×10^4	43		3.0×10^5
大理石（Ⅰ）	低速	No. 1	9.8×10^{-3}	22	1	1.1×10^5
		2	9.9×10^{-3}	19		1.5×10^5
	常速	3	8.5×10^{-2}	20	1.1	2.0×10^5
		4	1.3×10^{-1}	28		2.4×10^5
	高速	5	3.2×10^4	44	2.1	2.8×10^5
		6	2.2×10^4	42		3.8×10^5

* セメントモルタル，石城砂岩（Ⅱ）試料はひずみ 100×10^{-6} ，大理石（Ⅰ）試料は 50×10^{-6} における割線ヤング率

$\text{cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$ ）下における引張り強さは低速荷重（平均引張り速度 $9.9 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$ ）下におけるその約2.1倍，割線ヤング率は約2.5倍となつた。

また第5図をみると、試料破壊に至るまでの全ひずみ量が圧縮試験に比して不揃いであることに気がつく。これはつぎの理由によるものと考えられる。すなわち、試料の掴み部を除いた実試料長（本試験では150mm）に比べ、ひずみ量を測定するゲージ長（18mm）が小さいため、試料破断個所の位置によつて、ひずみ計により測定されるひずみ量が多少影響をうける。測定結果によれば、ゲージ貼付個所またはその近傍が破断する場合はひずみ測定量が大きくなる傾向がある。

第5-a図 各引張り速度におけるセメントモルタル試料の応力—ひずみ線図

第5-b図 各引張り速度における石城砂岩（Ⅱ）試料の応力—ひずみ線図

第5-c図 各引張り速度における大理石（Ⅰ）試料の応力—ひずみ線図

5. 結 言

岩石は弾性的性質の他に流性的性質を有し、荷重速度の如何によつて、その力学的挙動が異なる。本研究は岩石のこの性質を究明するため、より流性的と思われる軟岩を対象として、各荷重速度と岩石の力学的挙動との関係について調べた。

第1報では大理石(Ⅰ)試料、石城砂岩(Ⅰ),(Ⅱ)試料、セメントモルタル試料を低速(試料破壊所要時間1~2時間)、常速(約4分)、高速(2~4ミリ秒)荷重下におき、試料の力学的挙動を測定して、荷重速度、ひずみ速度とともに圧縮強さ、圧縮におけるヤング率が異なる値をとること等について述べた。

本報において述べる研究では、前記荷重速度の他に、準高速(Ⅰ)(試料破壊所要時間約30秒)、準高速(Ⅱ)(2~3秒)を加え、岩石のひずみ速度と圧縮強さとの関係をさらに詳しく調べた。また圧縮における荷重速度とポアソン数との関係、引張りにおける荷重速度と強さとの関係等を究明する目的で試験を行ない、次に述べる結果を得た。

(1) 石城砂岩(Ⅱ),(Ⅲ)試料、大理石(Ⅱ)試料について、ひずみ速度と圧縮強さとの関係を調べ、ひずみ速度が大になるにつれて、圧縮強さが増す一般的傾向を見出した。またこれらの間には H. Peutler らの提示した次式がほぼ成立すると考えられる。

$$\sigma_a = \sigma_0 + b \log v_a/v_0 + c(\log v_a/v_0)^n$$

上式において

σ_0 ; 低速荷重試験における強度 ($\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2}$)

σ_a ; 任意の荷重速度の試験における強度 ($\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2}$)

v_0 ; 低速荷重試験におけるひずみ速度

v_a ; 任意の荷重速度の試験におけるひずみ速度

b, c, n ; 常数

(2) 石城砂岩(Ⅲ)、大理石(Ⅱ)試料について、

荷重速度と岩石のポアソン数との関係を調べた結果、いずれの荷重速度のもとにおける試験においても、圧縮応力が増すとともにポアソン数が減じ、ポアソン数2に近くなって破壊している。また同一圧縮応力におけるポアソン数を比較すると、荷重速度が速いほどポアソン数が大きいという一般的傾向が認められる。例えば石城砂岩(Ⅲ)試料について述べると、圧縮応力 200 kg/cm^2 におけるポアソン数の平均値は、低速試験では約 5.0、常速試験では約 5.5、高速試験では約 7.2 となった。

(3) セメントモルタル、石城砂岩(Ⅱ)、大理石(Ⅰ)試料について、低速、常速、高速荷重のもとにおける引張り試験を行なった結果、引張り速度とともに引張り強さ、ヤング率が増す傾向がみとめられた。例えば大理石(Ⅰ)試料について述べると、高速荷重(平均引張り速度 $2.7 \times 10^4 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$) 下における引張り強さは低速荷重(平均引張り速度 $9.9 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$) 下におけるその約 2.1 倍となった。また割線ヤング率は約 2.5 倍となった。

謝辞 本研究を行なうにあたって、終始御懇切なる御指導を賜わった東北大学工学部鉱山工学科教授堀部富男先生に謹みて感謝申し上げますと共に、実験に協力された牛田稔助手、村上孝助手、奥村清彦技官、石黒匡治工学士、小松原正一工学士、三浦武工学士に感謝の意を表す。また試料採取その他に御高配を賜わった常磐炭砒の各位に深謝する。

なお本研究は文部省科学試験研究費によつてその一部が遂行されたことを付記する。

参 考 文 献

- 1) 小林良二：高速静荷重下における岩石の力学的性質(第1報)，日本鉱業会誌，80巻，911号，昭和39年5月，429~434頁
- 2) 堀部富男・小林良二・村上孝・奥村清彦：岩石のごとききぜい性物質の引張試験法に関する研究，東北鉱山，10巻，2号，昭和38年10月 59~64頁