各種荷重速度下における岩石の力学的挙動について*

堀 部 富 男** 小 林 良 二**

On Mechanical Behaviors of Rocks under Various Loading-Rates

by

Tomio HORIBE and Ryoji KOBAYASHI

(Faculty of Engineering, Tohoku University, Sendai)

The mechanical behaviors of rocks under various loading-rates which ranged from 1×10^{-2} kg/cm²/sec to 12×10^5 kg/cm²/sec, have been investigated in this paper. The higher rates of loading have been obtained by the use of a drop-hammer 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 it with the low-speed loading test, the shock waves should be eliminated perfectly, so as not to expose the rock specimens to impact loading. Or the rock specimens would only be definitely exposed to an elastic pressure.

From the above consideration, a new drop-hammer testing machine has been designed. It consists of an anvil, a drop-hammer and a cylindrical dynamometer. The anvil weighs about 800 kg and is mounted on four dampers. The drop-hammer weighs about 40 kg, having a damper in its body. On the other hand, the dynamometer is equipped with eight resistance-type wire strain gauges.

From the test, the following results were obtained, using sandstone, marble, or cementmortar.

(1) The compressive strength of rocks increases with the loading-rate, sandstone at the rate of about 1.6 in respect of the ratio of the high-speed compressive strength to that of low-speed, marble at the rate of about 1.9, and cementmortar at the rate of about 1.5. In these cases, the average loading-rates of the high-speed test are about $3.0 \sim 12 \times 10^5$ kg/cm²/sec, and the average loading-rates of the low-speed test are about $9.5 \sim 10 \times 10^{-2}$ kg/cm²/sec. Also, the values of the secant modulus of elasticity of rock increase with the loading-rate. Poisson's number of each rock decreases with the increase of the compressive load, but Poisson's number on the same compressive stress has a tendency to increase as the loading-rate.

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

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

where σ_o : strength in the low-speed loading test (kg/cm²)

σ_d : strength in the test of voluntary loading speed (kg/cm²)

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

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

(3) The strength and the secant modulus of elasticity of rocks in the tension test increase with 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-rates of the high-speed test are about 2.7×10^4 kg/cm²/sec, and the average loading-rates of the low-speed test are about 9.9×10^{-3} kg/cm²/sec.

(Received Mar. 1, 1965)

1 緒 言

岩石は弾性的性質のほか流性的性質を有している
ので、岩石に加わる荷重速度のいかんによっては、ある
場合はより弾性的挙動を示し、ある場合はより流性
的挙動を示す。したがって荷重速度と岩石の力学的挙

動との関係を調べることは、岩盤を対象とする諸現象
を解明する上に、きわめて重要である。しかしながら、
高速度における荷重試験が困難なために、荷重速度を
広範囲に変化させて、上記関係を研究した例は少ない
ようである。

本研究は特に静荷重試験を取り上げ、静荷重速度を
低速より高速まで変化させた場合の岩石の力学的挙動

* 原稿受理 昭和40年3月1日

** 正 会 員 東北大学工学部 仙台市桜小路

について述べたものである。

ここにおいて、高速静荷重と衝撃荷重とを明確に区別しておく必要がある。いま、棒の一端に衝撃力が働く場合を想定すると、棒全体が抵抗力を表わすのではなくて、衝撃に抵抗する応力が衝撃の働いた端から漸次他端に向って伝播していくと考えられる。衝撃荷重とはこのような応力状態をいうが、一方、高速静荷重ではあくまでも静力学的に棒の平衡を考えねばならない。このように、高速静荷重と衝撃荷重とは本質的にまったく異なった意味をもっている。なお、本文で用いている高速静荷重なる語は、「静荷重とは、材料試験機でごく静かに加えて繰り返さない荷重」という定義からすると、多少疑問をもつが、試料と荷重装置との間に静力学的な平衡状態を考慮し、また衝撃現象を極力排除するという本研究の主旨をよく表現していると思う。以下静荷重を単に荷重と述べることにする。

以上の考え方に基づいて、まず、試料の破壊が数 mm/sec で終わる落錐式高速荷重試験機を製作し、この試験機と油圧式耐圧試験機とを用いて、荷重速度を低速、常速、準高速(I)、準高速(II)、高速の5段階に変化させ、砂岩、大理石試料などについて、圧縮、引張試験を行なった。その結果、荷重速度、ひずみ速度と圧縮強度、引張強度、ヤング率、ポアソン数との間に、一定の傾向を見いだすことができた。

2 試料

岩石は弾性的性質のほかには流性的性質をもっている。そこで本研究のように、荷重速度と力学的挙動との関係を調べる場合は、より弾性的性質をもつ硬岩よりも、より流性的性質をもつ軟岩のほうがその力学的挙動に顕著な変化が現われるものと予測される。このような考えに基づいて、軟岩に属する常磐炭産の3種類の石城砂岩、岩手県大東町猿沢採石所産の2種類の大理石を試料とした。以後これら試料を石城砂岩(I)、石城砂岩(II)、石城砂岩(III)、大理石(I)、大理石(II)と名づける。またこれら試料と対比する意味で、セメントと砂(-28 mesh 川砂)の配合比1:1のセメントモルタルも用いた。これらの試料を圧縮試験に対しては、石城砂岩、大理石は35mm×35mm×70mmの角塊、セメントモルタルは35mmφ×70mmの円筒形に整形し、また引張試験に対しては、石城砂岩、大理石は32mm×32mm×250mmの角塊に、セメントモルタルは35mmφ×250mmの円筒形に整形した。なおセメントモルタル試料は4週間水中養生した後、これを水中より取り出し、さらに気乾状態において放置した。このような養生法をとると、材齢に多少の差があっても、強度に大きな影響を及ぼさないといわれている。また岩石については、その強度が岩石中に含まれる水分によって、著しい影響を受けることがあることは周

知の事からである。筆者らが2種類の石城砂岩について、強度と含水比との関係を調べ、次の結果を得ている。

$$\sigma_c = 520e^{-0.122w} + 120e^{-0.497w} \quad (1-a)$$

$$\sigma_c = 480e^{-0.179w} + 490e^{-0.947w} \quad (1-b)$$

上式において

σ_c ; 圧縮強度(kg/cm²)

w ; 含水比(%)

このように、岩石の種類によっては、その強度と含水量は密接な関係があるので、実験に先だって、試料の条件を整える必要がある。本研究では石城砂岩、大理石試料を整形後約4週間デシケータ中に放置した。

なお本研究では、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)を試料軸の方向に張付け、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張付けた。

3 実験装置および方法

3・1 試験機

本研究では、荷重速度を次のように5段階に変えている。すなわち、①試料破壊まで1~2時間を要する低速荷重、②約4分の常速荷重、③約30秒の準高速(I)荷重、④約3秒の準高速(II)荷重、⑤2~4 mm/secの高速荷重試験を行なった。①から④までの試験については油圧式耐圧試験機を用いたが、⑤については、次に述べる試験機を用いた。

高速荷重試験法としては、圧縮空気の膨張力を利用して、試料に高速荷重を加える方法があるが、この方法による試料の破壊所要時間は20ms程度のものである。この破壊所要時間を数ms程度までもっていくためには、別の方法を考えねばならない。

そこで本研究では落錐試験法を取り上げ、この方法について、まず予備試験を行なった。その結果、①試料に衝撃荷重が加わると、その瞬間、ドロップハンマと試料との接触面に衝撃波を生じ、この衝撃波が試料中を音速に近い速度で伝わり、その後試料が弾性圧縮される。この場合、試料はこの衝撃波により損傷を受ける可能性がきわめて大きい。②緒言において述べたように、高速荷重試験においては、受圧器と試料とドロップハンマとの間に、瞬間的であるにせよ平衡状態が必要であるから、試料には弾性圧縮のみが加わるように、試験装置をくふうしなければならない。そのためには衝撃波を極力吸収し、かつ試料とドロップハンマとの間に接触時間をもつようにすべきである。

以上の予備実験の結論に基づいて、Fig. 1に示すような岩石用高速荷重試験機を製作した。Fig. 1に

Fig. 1. Schematic diagram of drop-hammer testing machine.

において、重量約800kgの鋳鉄製アンビル(R)は床面におかれた4個の多段式ゴムダンパ(S)の上に載せられ、アンビル(R)が高速荷重を受けると、アンビル全体が約4c/sの減衰振動をなすように設計してある。またアンビル(R)の上には硬鋼製の受圧器(Q)がアンビルの上面中央に密着して載せられてある。この受圧器(Q)は外径80mm、高さ90mmの中空円筒型で、その内面に抵抗値60Ω、ゲージ長6mmのワイヤストレンゲージ8枚を張付け、4ゲージ法で結線してある。次に受圧器(Q)の上面に試料(P)を載せ、試料(P)の上に鉄板(O)を密着するように載せる。さらにドロップハンマ(C)と鉄板(O)との間に発生する衝撃波を吸収する意味で、鉄板(O)の上に硬質ゴム板(N)をおく。一方、ドロップハンマ(C)はハンマ本体と打撃部(I)とよりなり、打撃部(I)の一端はピストン状に精密加工され、この部分はハンマ本体内に精密加工されたシリンダにはめ合わせる。また他端には試料に打撃を加えやすくするため、硬鋼製の円板を付けている。

いまドロップハンマ(C)が落下し、試料に打撃を加えた場合を考えると、打撃部(I)はハンマ本体内のシリンダ内を滑動し、シリンダ内の空気はシリンダ底部とハンマ本体の側部とを通ずる直径0.2mmの小孔(H)を経て、大気中に抜ける。またハンマ本体のシリンダ内は、多孔性軟質ゴム板とあらかじめ多数の小孔をあけておいた硬質ゴム板との互層(J)によって充て

んされているので、ドロップハンマ(C)はエアクッションとゴムの弾性を利用したダンパを内蔵したことになる。またドロップハンマ(C)に固着されてある金具(E)は案内棒(A)にはめ合わされてあるので、ドロップハンマ(C)は案内棒(A)に沿って落下する。なお本試験機ではドロップハンマ(C)の落高は最高約250cmまでとれる。

実験に際しては、まずドロップハンマ(C)の輪金(D)とつり金具との間に麻糸をかけ、ドロップハンマ(C)を所定の高さまでつり上げる。次に麻糸を切断すると、ドロップハンマ(C)は案内棒(A)に沿って落下し、試料(P)に高速荷重を加え、試料を圧潰させる。この試料圧潰直後、ドロップハンマ(C)が受圧器(Q)を直接打たないように、案内レール(B)に取り付けられたストップ(G)とドロップハンマ(C)に固着してある金具(K)にねじ止めされてあるストップ(F)とによって、ドロップハンマ(C)の落下が止められる。なおストップ(G)にはダンパが装置されている。

以上高速荷重試験機について述べたが、D. Watstein⁶⁾もほとんど同じ構造の試験機を用いて、コンクリート試料に対する圧縮試験を行なっている。しかし高速荷重下における現象波形写真が発表されていないので、本研究における試験機とその性能を比較することができなかった。

引張試験を行なう場合は、Fig. 2に示す岩石用単軸引張試験器をFig. 1の受圧器(Q)の上に置く。次に単軸引張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。

Fig. 2. Apparatus for uni-axial tension test.

上部チャックは外管(E)の上部にささえられ、下部チャックは内管(F)の下面に密着しており、外管内を内管が滑動して下がると、下部チャックが押し下げられる。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荷重が加わることになる。また外管(E)、内管(F)にうがった小孔(G)はワイヤストレンゲージのリード線取り出し孔である。なお引張試験に用いる受圧器は黄銅製にして、構造ならびに寸法は前述の硬鋼製のものと同じである。

3・2 測定装置

低速荷重、常速荷重下における岩石の強度、ひずみの測定には、油圧式耐圧試験機と静ひずみ計とを用いて、それぞれの荷重に対応する試料のひずみを求めた。なおポアソン数を求めるにあたっては2台の静ひずみ計を用いて、荷重に対応する縦ひずみ、横ひずみを同時に測定した。また準高速荷重試験に対しては、油圧式耐圧試験機の载荷盤の上に前記受圧器を置き、その上に試料を載せて、荷重を加え、受圧器のひずみ、試料のひずみは狭帯域動ひずみ計を用いて、ペン書きオシログラフに描かせた。

圧縮における高速荷重試験には、Fig. 3 に示すような測定装置を用いた。測定装置の主要部は2台のシンクロスコープ、広帯域動ひずみ計2ユニット、パル

Fig. 3. Block diagram showing measuring equipment.

ス発生装置よりなり、ドロップハンマ(C)が落下すると、銀紙接点(M)がドロップハンマ(C)に取り付けられてある銀紙切断刃(L)によって切断され、それと同時に2台のシンクロスコープの掃引が開始し、試料のひずみ、受圧器のひずみは広帯域動ひずみ計を通して、2台のシンクロスコープにそれぞれの現象波形として描かれる。さらに2台のシンクロスコープの掃引速度は、圧縮試験ではブラウン管面上1 cmを2 ms、引張試験では1 msにとった。またポアソン数の測定には、3台のシンクロスコープ、広帯域動ひずみ計3ユニットを用い、3台のシンクロスコープを同時に掃引させ、

受圧器、試料の縦ひずみ、横ひずみの現象波形を求めた。なお受圧器に加わる高速荷重とその荷重によって生ずる受圧器の現象波形の高さとの関係はあらかじめ常用速度の荷重試験によって求めた。

4 実験結果ならびに考察

4・1 圧縮試験

前述の高速荷重試験機と測定装置とを用いて、石城砂岩(I)について行なった測定例を Fig. 4 に示す。

Fig. 4 の写真は高速荷重を受けて生じた受圧器と試

Fig. 4. Examples of oscillograms of "IWAKI" Sandstone (I) in high-speed compression test.

料のひずみを示す現象波形である。現象波形をみると、この波形はおおよそ図の直線部a-bと曲線部b-cとに分けてみることができる。他の現象波形についても、これと同様の傾向が現われている。このように現象波形の立ち上りの部分がなめらかな直線を描かないのは、主として鉄板と受圧器に対する試料上下面の接触状態によるものと考えられる。すなわち、試料が高速荷重を受ける状態について解析すると、試料上下面が鉄板、受圧器と完全に密着しているとは考えられないから、試料が荷重を受けると、まず鉄板、受圧器との局部的接触個所が強く押され、その個所が変形、崩壊してから、試料全体が荷重を受けることになる。したがって、試料上下面の局部的変形、崩壊が終わり、鉄板、受圧器と試料上下面とが密着するまでと、それ以降の現象波形とは多少異なった傾向を示すことになる。以上より、現象波形の立ち上りをなめらかにするには、なんらかの方法を用いて、鉄板、受圧器と試料との間を完全に密着させる必要があることがわかる。そこで一つの方法として、合成樹脂またはその他の物質で鉄

板, 受圧器と試料の上下面とを接着することも考えられるが, 試料両端の状態が普通行なわれている荷重試験の状態と異なるので, このような方法による高速荷重試験結果は, 低速, 常速, 準高速荷重試験結果と比較する上に不都合を生ずる. 以上試料上下面の接触状態について述べたが, この点についてはなお検討中である.

Fig. 5(a), (b) は荷重速度を低速, 常速, 高速の3段階に変えた場合の石城砂岩(I), 大理石(I)試料による応力-ひずみ線図である. なお, 高速荷重下における各試料の応力-ひずみ線図は Fig. 4 に示すような受圧器と試料のひずみ波形より求めたもので, 波形の立ち上りの点より同一経過時間におけるおのおのひずみ値を次々に測定することによって描かれる.

Fig. 5.(a) Stress-strain curves of "IWAKI" Sandstone (I) tested in compression at various loading-rates.

Fig. 5.(b) Stress-strain curves of marble (I) tested in compression at various loading-rates.

また常速荷重, 低速荷重下における応力-ひずみ線図は, 油圧式耐圧試験機の読みから算出した圧縮応力とその応力に対応する静ひずみ計の読みを次々取ることにより描かれる.

Table 1 は測定結果を各試料についてまとめたものである. なお表に記載されている強度比とは, 低速荷重試験における圧縮強度に対して, 常速, 高速荷重試験における圧縮強度の比を取ったものである. また試料のヤング率は, Fig. 5 の各試料の応力-ひずみ線図より, ひずみ 1.000×10^{-6} における応力の値を示す点

Table I. Results of compression test at various loading-rates.

Specimen	Speed of testing	No.	Average loading-rate (kg/cm ² /sec)	Compressive strength (kg/cm ²)	Ratio of strength	Secant modulus of elasticity at strain of 1.000×10^{-6} (kg/cm ²)
Cementmortar	Low-speed	1	9.8×10^{-2}	360	1	1.1×10^5
		2	9.7×10^{-2}	370		0.98×10^5
	Conventional-speed	3	3.8	420	1.2	1.7×10^5
		4	2.9	450		2.0×10^5
	High-speed	5	2.8×10^5	510	1.4	3.1×10^5
		6	3.3×10^5	530	1.5	3.3×10^5
		7	3.0×10^5	540	1.5	3.5×10^5
"IWAKI" Sandstone (I)	Low-speed	1	9.5×10^{-2}	350	1	0.73×10^5
		2	9.6×10^{-2}	380		0.78×10^5
	Conventional-speed	3	1.8	390	1.1	0.95×10^5
		4	1.9	400		1.1×10^5
	High-speed	5	3.1×10^5	550	1.5	2.1×10^5
		6	3.6×10^5	580	1.6	2.5×10^5
		7	4.8×10^5	570	1.6	2.7×10^5

Marble (I)	Low-speed	1	9.8×10^{-2}	750	1	3.8×10^5
		2	10×10^{-2}	840	1	4.4×10^5
	Conventional-speed	3	2.3	870	1.1	5.2×10^5
		4	4.0	850	1.1	5.6×10^5
	High-speed	5	8.8×10^5	1400	1.8	6.3×10^5
		6	12×10^5	1400	1.8	6.3×10^5
		7	11×10^5	1500	1.9	6.6×10^5

とグラフの原点とを結ぶ直線のこう配、すなわち、割線ヤング率より求めた。さらに平均圧縮速度とは現象波形の直線部のこう配を示す。すなわち、Fig. 4 の石城砂岩 (I) 試料の受圧器の現象波形について説明すると、直線部 a-b-d のこう配を意味する。ただし、この場合は、Fig. 4 の受圧器に加わる荷重を試料の断面積で除した値がこう配の大きさを表わすことになる。

Table I, Fig. 5 の測定結果から、圧縮速度を増すと、ヤング率、圧縮強度が増すという一般的傾向が認められる。たとえば、大理石 (I) 試料では高速荷重強度 (平均圧縮速度 $11 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2/\text{sec}$) は低速荷重強度 (平均圧縮速度 $9.9 \times 10^{-2} \text{ kg/cm}^2/\text{sec}$) の約 1.9 倍となった。また割線ヤング率は約 1.6 倍となった。

以上の実験結果から、試料の変形速度が増すにつれて、変形抵抗が増大するという傾向が予測される。そこで、この関係をさらに究明する意味で、荷重速度を低速、常速、準高速 (I)、準高速 (II)、高速の 5 段階に変え、石城砂岩 (II)、石城砂岩 (III)、大理石 (II) 試料を用いて、圧縮強度とひずみ速度との関係を調べた。

金属材料について、L. Prandtl は変形速度と変形抵抗との関係を (2) 式のように述べている。

$$\sigma_d = \sigma_0 + a \log \frac{v_d}{v_0} \quad (2)$$

また H. Peutler, E.A. Davis が (2) 式を修正して (3) 式を提示している。

$$\sigma_d = \sigma_0 + b \log \frac{v_d}{v_0} + c \left(\log \frac{v_d}{v_0} \right)^n \quad (3)$$

(2), (3) 式において

σ_0 ; 低速荷重試験における強度

σ_d ; 任意の荷重速度の試験における強度

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 ; 定数

そこで (2), (3) 式の考えに従って、岩石の変形速度と変形抵抗との関係をたとえば石城砂岩 (II)、石城砂岩 (III) について示すと、Fig. 6(a) のようになる。

Fig. 6 を描くにあたって、まず低速荷重試験における圧縮強度、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。次に常速、準高速、高速

Fig. 6. (a) Relation between σ_d and v_d/v_0 of "IWAKI" Sandstone (II) and "IWAKI" Sandstone (III).

Fig. 6. (b) Relation between σ_d and v_d/v_0 of Marble (II).

荷重下における各試料の圧縮強度、ひずみ速度を求め、これらを σ_d, v_d とする。

以上の測定結果を用いて縦軸に σ_d 、横軸に v_d/v_0 をとり描いたのが Fig. 6 である。Fig. 6(a) を見ると石城砂岩 (II)、石城砂岩 (III) 試料について、 σ_d と $\log v_d/v_0$ との間に (2) 式で示される直線の関係が認められる。また大理石 (II) については、Fig. 6(b) に示すように、 σ_d と $\log v_d/v_0$ との間に曲線関係が存在し、(3) 式がよく適合する。石城砂岩試料についても、荷重速度をさらに速くした場合は Fig. 6(a) に示すグラフは曲線の傾向をもつと推測されるので、一般に岩石の圧縮強度 σ_d とひずみ速度比 v_d/v_0 との間には (3) 式で示される関係が存在するものと考えられる。このように、変形速度が大になるにつれて、圧縮強度が大となるのは試料の変形速度が増すにつれて、試料を構成する粒子間のすべり抵抗が増すためと考えられる。

次に石城砂岩 (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。Fig. 7 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 Fig. 7 の縦軸にはポアソン数、横軸には圧縮応力をとってある。図を見ると、荷重速度のいかんにかかわらず圧縮応力の増加に従って、ポアソン数はしだいに減じ、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

Fig. 7. Stress-poisson's number curves of "IWAKI" Sandstone (III) tested in compression at various loading-rates.

な値をとる傾向がある。これは荷重速度が速くなるにつれて、試料は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。なお大理石(II)試料についても応力とポアソン数との関係を求めたが、石城砂岩(III)試料と同様の結果が得られた。

4・2 引張試験

前記単軸引張試験器を用いて、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。試料としては石城砂岩(II)、大理石(I)、セメントモルタルを用いた。Fig. 8 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を

Fig. 8. Examples of oscillograms of "IWAKI" Sandstone (II) in high-speed tension test.

示す現象波形である。現象波形の立ち上りの部分は Fig. 4 の圧縮における現象波形に比べなめらかである。これは引張試料の両端をポリエステル系樹脂で固着してあるので、圧縮試験におけるように、試料両端の接触状態が試料の引張過程に影響を及ぼさないためと考えられる。なおシンクロスコープの掃引速度はブラウン管面上1cmを1msに取ってある。これら現象波形から荷重速度、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ほかに、低速、常速荷重試験も行なって、Fig. 9(a), (b) に示すような測定結果を得た。Fig. 9(a) は石城砂岩(II)試料、Fig. 9(b) は大理石(I)試料によるものである。また Table II は測定結果を各試料についてまとめたものである。Fig. 9,

Fig. 9(a) Stress-strain curves of "IWAKI" Sandstone (II) tested in tension at various loading-rates.

Fig. 9(b) Stress-strain curves of Marble (I) tested in tension at various loading-rates.

Table II. Results of tension test at various loading-rates.

Specimen	Speed of testing	No.	Average loading-rate (kg/cm ² /sec)	Tensile strength (kg/cm ²)	Ratio of strength	Secant modulus [*] of elasticity
Cementmortar	Low-speed	1	9.5×10^{-3}	34	1	2.4×10^5
		2	9.9×10^{-3}	36		3.0×10^5
	Conventional-speed	3	2.3×10^{-1}	40	1.3	3.9×10^5
		4	1.8×10^{-1}	51		4.5×10^5
	High-speed	5	2.8×10^4	62	1.8	5.1×10^5
		6	3.7×10^4	81	2.3	5.6×10^5
"IWAKI" Sandstone (II)	Low-speed	1	1.0×10^{-2}	23	1	1.4×10^5
		2	9.9×10^{-3}	22		1.4×10^5
	Conventional-speed	3	4.6×10^{-2}	22	1.2	1.7×10^5
		4	1.1×10^{-1}	32		2.3×10^5
	High-speed	5	2.1×10^4	47	2.0	2.5×10^5
		6	7.2×10^4	43	1.9	3.0×10^5
Marble (I)	Low-speed	1	9.8×10^{-3}	22	1	1.1×10^5
		2	9.9×10^{-3}	19		1.5×10^5
	Conventional-speed	3	8.5×10^{-2}	20	1.1	2.0×10^5
		4	1.3×10^{-1}	28		2.4×10^5
	High-speed	5	3.2×10^4	44	2.1	2.8×10^5
		6	2.2×10^4	42	2.0	3.8×10^5

* Secant modulus of elasticity of cementmortar and "IWAKI" Sandstone(II) measured at strain of 100×10^{-6} and that of Marble(I) measured at strain of 50×10^{-6} .

Table II を見ると、圧縮試験におけると同様、荷重速度とともに、試料の引張強度、ヤング率が増すという一般的傾向が認められる。たとえば大理石(II)試料の強度について述べると、高速荷重(平均引張速度 $2.7 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2/\text{sec}$) 下における引張強度は低速荷重(平均引張速度 $9.9 \times 10^{-3} \text{ kg/cm}^2/\text{sec}$) 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。

5 結 言

岩石は弾性的性質のほかに流性的性質を有し、荷重速度のいかんによって、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、荷重速度と岩石の力学的挙動との関係について調べた。

この研究を行なうにあたって、最も重要なことは、いかにして、試料に高速荷重を加えるかということである。そこでまず、従来から行なわれている落錐試験を取り上げ、これについて予備実験を行ない、実験結果を種々検討して、次に述べる結論に達した。すなわち、高速荷重試験では試料に高速荷重を加える際、発

生する衝撃波を極力吸収し、試料が弾性圧縮のみを受けるようにくふうすべきである。この予備実験の結論に基づいて、4 個のゴムダンパに載せられた重量約 800kg のアンビルとダンパを内蔵した重量約 40kg のドロップハンマをもつ落錐式高速荷重試験機を製作し、この試験機を用いて、試料の破壊が 2~4 ms で終わる高速荷重試験を行なった。このほか、低速(試料破壊所要時間 1~2 時間)、常速(約 4 分)、準高速(I)(約 30 秒)、準高速(II)(約 3 秒)荷重試験を行なって次に述べる結論を得た。なお試料としては、常磐炭産の 3 種類の石城砂岩と岩手県大東町猿沢採石所産の 2 種類の大理石を用いた。

(1) 石城砂岩、大理石、セメントモルタルの圧縮強度は荷重速度とともに増し、たとえば大理石(I)試料では、高速荷重下における圧縮強度は低速荷重下におけるその約 1.9 倍となった。さらにひずみ速度と圧縮強度との関係を調べた結果、H. Peutler らの提示した次式がほぼ成立すると考えられる。

$$\sigma_d = \sigma_0 + b \log \frac{v_d}{v_0} + c \left(\log \frac{v_d}{v_0} \right)^n$$

上式において

σ_0 ; 低速荷重試験における強度

σ_d ; 任意の荷重速度の試験における強度

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

b, c, n ; 定数

またヤング率も荷重速度とともに増し、たとば大理石(I)試料について述べると、高速荷重試験における割線ヤング率は低速荷重試験におけるその約1.6倍となった。

(2) 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下においても、荷重を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。しかしながら同一応力におけるポアソン数を比較すると、荷重速度の速いほど、ポアソン数が大きいという一般的傾向が認められる。

(3) 各荷重速度の下における引張試験においても、荷重速度とともに、引張強度、ヤング率が増す。たと

えば、高速荷重下における引張強度は低速荷重下におけるその約2.1倍となった。また割線ヤング率は約2.5倍となった。

最後にこの研究に関し、有益なご助言を賜わった東北大学工学部精密工学科棚沢泰教授に深く感謝申し上げます。

(昭和39年11月11日 岩の力学国内シンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) たとえば妹沢克雄, “振動学” (上巻), p. 162 (1949) 岩波書店
- 2) たとえば湯浅亀一, “材料力学” (上巻), p. 12 (1954) コロナ社
- 3) 近藤泰夫, 坂静雄, “コンクリートハンドブック” p. 215 (1957) 朝倉書店
- 4) 堀部富男, 小林良二, 村上孝, 奥村清彦, 東北鉱山, 投稿中.
- 5) 勝田千利, 建築学会大会論文集, **29**, 268 (1943).
- 6) Watstein, D., ASTM STP, **176**, 155 (1955).