

岩石の力学的性質に関する一実験*

星野 寔** 根岸正充***

An Experimental Study on Mechanical Properties of Rocks

By Makoto Hoshino and Masamitsu Negishi

要 目

北海道各地に産する若干の岩石について乾燥状態における動的ヤング率、静的圧縮ヤング率、ポアソン比その他物理的性質を明らかにするとともにその測定方法について報告する。実験の結果、超音波縦波伝播速度 V_p から求めた動的ヤング率 E_d と一軸圧縮試験から求めた静的ヤング率 E_s の間にはかなり相関関係がある。 $E_d = 1.0 \sim 3.0 E_s$ の範囲にあり、概して $E_d = 1.5 \sim 2.0 E_s$ のものが多い。

岩石試験では供試体の表面にワイヤーストレイゲージをはり、ひずみを測定する場合十分な注意がなされなければならない。特に微粒硬質な火成岩系以外の岩石では供試体の応力およびひずみ分布が複雑になり、正確な実験値を得るのが困難な場合が多い。これらの場合のひずみは供試体の全体変位を測定しひずみを算出したもののほうが信頼性がある。

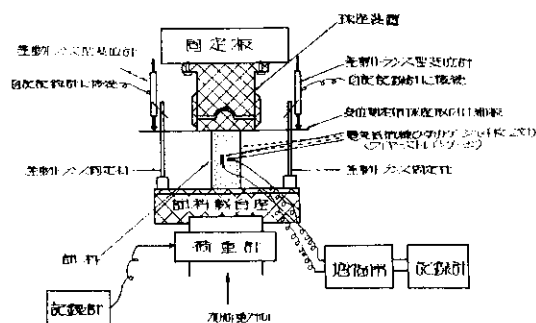
1. ま え が き

当地質研究室では、北海道各地に産する岩石の地質学的および力学的性質に関する一連の研究を実施している。当報文はそれらの一部であり、岩石の超音波縦波伝播速度、動的ヤング率、一軸圧縮下における静的圧縮ヤング率およびポアソン比などの測定方法とそれらの測定例について述べたものである。また当研究室で試作した岩石三軸圧縮試験機についてその装置と特徴と若干のデータについて述べた。

2. 一軸圧縮試験

(1) 実験装置

一軸圧縮試験装置を図-1に示す。岩石試料の軸方向荷重（以下軸荷重と呼ぶ）は電動式スクリュージャッキで加え、最大載荷重能力は50tである。ひずみ測定には二つの方法を用いた。一つは試料の中央部にワイヤーストレインゲージを軸方向とそれに垂直方向にはり、これ



圖一1 一軸壓縮試驗裝置

をストレインメーターおよび X-Y レコーダーに接続し、それぞれの応力における二方向のひずみを測定記録した。ワイヤーストレインゲージのゲージ長は 3 mm (共和電業 KK 製 KP・3・B2) である。もう一つは差動トランス型変位計を用い、試料の全体変位 Δl を測定し、各応力におけるひずみは $\Delta l/l$ で算出した。(l は載荷重前の試料の長さ) 変位計は図に示すとおり、試料の左右から等距離に 2 個設置した。試料の長さの変化 Δl は 2 個の変位計の変位 $\Delta l_1, \Delta l_2$ の相加平均 $\frac{\Delta l_1 + \Delta l_2}{2} = \Delta l$ とした。応力速度は 0.5~1.5 kg/cm²/sec の範囲になるよう設定した。

(2) 試 料

試料には北海道各地のダム予定地で実施した調査用ボーリングのコアを用いた。未風化でかつ顕著な亀裂の発達していない試料をとることに留意した。供試体は円柱状で直径 ϕ は4.00~5.00 cm、長さ L は8.20~10.20 cmであり原則として $L/\phi \cong 2$ とし少なくとも $L/\phi = 1.8 \sim 2.2$ とした。供試体の端面は廻転研磨機で1,000メッシュのカーボランダム、3,000メッシュのホワイトアランダムを用いてみがき、両端面の平行度の誤差は1/100 mm以内になるように仕上げた。供試体は乾燥炉で110°C、48~72時間乾燥させた後乾燥材を入れたデシケーター中に保存した。

(3) 実験と結果

① 動的ヤング率と静的圧縮ヤング率

動的ヤング率を求める方法は種々あるけれども当実験

* 昭 45, 4. 16 日本応用地質学会北海道支部講演会で発表 ** 地質研究室長 *** 同室主任研究員

では縦波伝播速度 V_p から求めた。 V_p は 100 KC の振動子を使い超音波パルス法により測定した。無限の大きさを持つ岩盤とすれば岩盤の動的ヤング率 $E_d = \frac{\rho V_p^2}{g} \cdot \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)}$ である。ただし、 ρ : 岩盤の密度、 g : 重力の加速度、 ν : ポアソン比である。しかし棒状に細い試料の場合は $E_d = \frac{\rho \cdot V_p^2}{g}$ で計算しても実用上さしつかえないとされている。試料の長さ L と直径 ϕ の比 $L/\phi = 2$ くらいになるとポアソン比の影響を受けて 10% 前後の誤差を生じるといわれている。当実験の試料の L/ϕ は前述のように 1.8~2.2 であるが $E_d = \frac{\rho \cdot V_p^2}{g}$ で動的ヤング率を求めた。静的圧縮ヤング率は前述の装置と方法で応力 σ -ひずみ ϵ 曲線を求めこれの直線部分の勾配より求めた。

σ - ϵ 曲線の一例を図-2 に示す。供試体に日高山脈西麓に存する中生代白亜紀の函淵砂岩層に属する海緑石を含む硬質砂岩である。 V_p と ρ から求めた E_d および応力 σ とワイヤーストレインゲージで測定したひずみ ϵ_1 から求めたヤング率 E_{s_1} 、応力 σ と変位計で全体ひずみを測

定しそれから算出したひずみ ϵ_2 から求めたヤング率 E_{s_2} および E_{s_1}/E_{s_2} 、 E_d/E_{s_2} を表-1 に示す。表-1 に見るとおり、ヤング率そのものの値は各測定方法により異なるけれども動的ヤング率 E_d との相関性は全体ひずみから出した E_{s_2} のほうがワイヤーストレインゲージによって計測した E_{s_1} よりも大きい。同様のことが他の岩種についてもいえる。その他の岩種については他の物理的性質とともにヤング率を表-3 に示す。

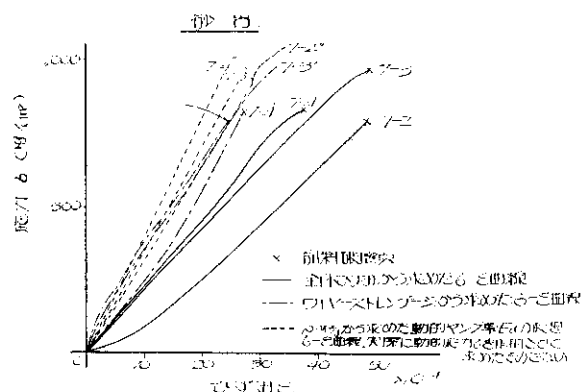


図-2 応力 σ -ひずみ ϵ 曲線

表-1 動的・静的ヤング率

岩石名	試料番号	動的ヤング率 $E_d (\times 10^4 \text{ kg/cm}^2)$	静的圧縮ヤング率 $E_{s_1} (\times 10^4 \text{ kg/cm}^2)$	静的圧縮ヤング率 $E_{s_2} (\times 10^4 \text{ kg/cm}^2)$	E_d/E_{s_2}	E_{s_1}/E_{s_2}
砂岩	7-2	32.0	31.7	18.2	1.74	1.76
"	7-3	35.9	28.6	21.1	1.36	1.70
"	7-4	40.3	34.5	23.0	1.49	1.75

また前述の方法により求めた動的ヤング率と静的ヤング率の関係を図-3 に示す。これによれば $E_d = 1 \sim 2 E_{s_1}$ 、 $E_d = 1.5 \sim 3 E_{s_2}$ の関係が認められおおむね $E_d = 1.5 E_{s_1}$ 、 $E_d = 2 E_{s_2}$ の関係にある。

② 静的圧縮ポアソン比

岩石の一軸圧縮下の静的ポアソン比の測定結果の例を図-4, 5 に示す。測定は前記の装置と方法によりワイヤ-

ーストレインゲージを使用して実施した。一般に岩盤のポアソン比 ν は 0.25 に近い値とされているが供試体試料の測定によれば ν は岩種によりかなり異なることを示して

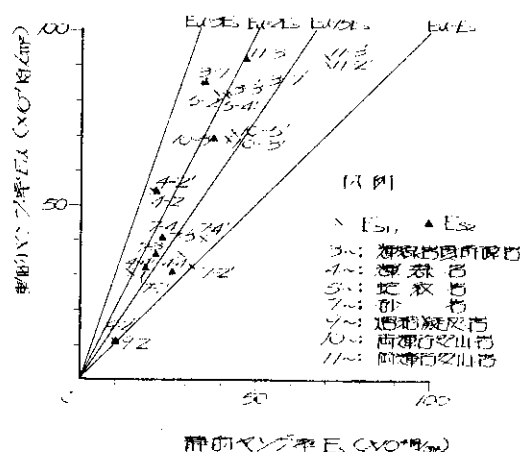


図-3 動的ヤング率 E_d と静的ヤング率 E_s

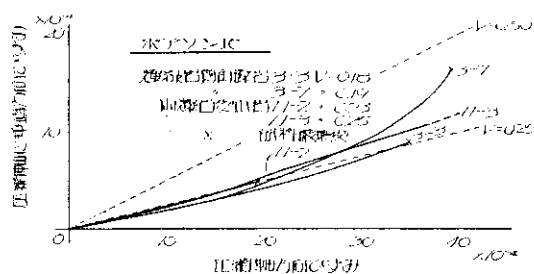


図-4 岩石のポアソン比 (その 1)

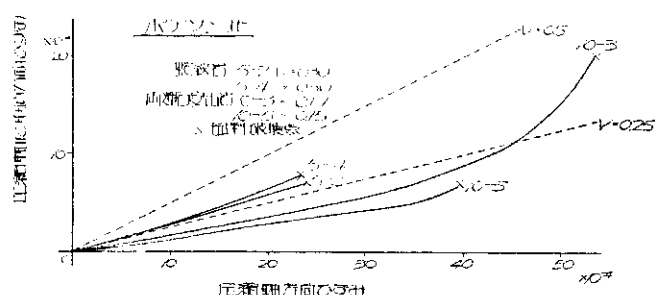


図-5 岩石のポアソン比 (その 2)

表-2 熔結凝灰岩(十勝岳)の測定値

岩石名	試料番号	封圧 (100 kg/cm ²)	最大破壊強度 σ_1 (kg/cm ²)	破断角 θ°	内部摩擦角 ϕ	動的ヤング率 $E_d(\times 10^4$ kg/cm ²)	静的ヤング率 $E_s(\times 10^4$ kg/cm ²)	E_{s_2}/E_d
熔結凝灰岩	9-9	0	399	23.5	43	13.2	7.9	0.60
"	9-12	0	391	22.0	46	11.1	7.4	0.67
"	9-6	50	944	27.0	36	10.3	8.1	0.79
"	9-13	100	1,233	29.5	31	10.1	10.4	1.03

注: 試験は乾燥状態の試料を用いて実施した。圧縮応力速度は 0.5~1.5 kg/cm²/sec. $E_d = \rho V_p^2/g$ ($\rho = G_{ad}$: 乾燥状態の密度)

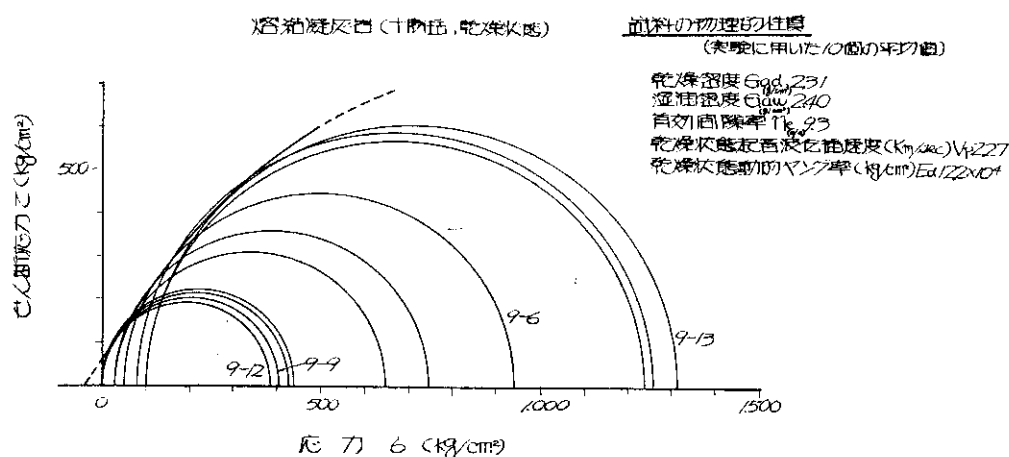


図-10 Mohr の応力円とそれらの包絡線

(2) 実験と結果

図-7~9に一軸および三軸圧縮下における熔結凝灰岩(十勝岳熔結凝灰岩: 新第3紀末期または第4紀初期)の応力 σ -ひずみ ϵ 曲線を示す。図-7の一軸圧縮試験では縦軸の応力 σ は軸圧 σ_1 であり図-8, 9の三軸圧縮試験では縦軸の応力 σ は軸圧 σ_1 と封圧 σ_3 の差応力 $\sigma_1 - \sigma_3$ である。これらの実験値を表-2に示す。破断角 θ は実験試料より実測して求め、内部摩擦角 ϕ は $\phi = 90^\circ \pm 2\theta$ から算出した。静的ヤング率 E_{s_2} はいずれも処女荷重に対する圧縮ヤング率である。図-7~9からも明らかなように E_{s_2} は σ の大きさによって変化するので表-2の E_{s_2} は比較上各試料とも $\sigma = 200 \sim 400$ (kg/cm²)の範囲の E_{s_2} を求めた。また $\rho V_p^2/g$ から求めた動的ヤング率 E_d を基準にとり E_{s_2}/E_d を求めて封圧の E_{s_2} に与える影響を示した。図-10に上記熔結凝灰岩のMohrの応力円とそれらの包絡線を示す。当実験に用いた試料の大きさは直径 $\phi \div 5.0$ (cm) 長さ $L \div 10$ (cm) $L/\phi \div 2$ である。

これらの結果から最大破壊強度、破断角、内部摩擦角静的圧縮ヤング率に対する封圧効果がある程度数値的に明らかにされる。これらの値が各岩種、岩体により異なることはもちろんであるが、他の物理的諸性質と比較することによって他の岩石にも参考値となると考える。

当報文に記載した岩石の物理的諸性質を表-3に示す。

4. あとがき

テストピースにおける岩石の諸性質について若干の実験例を記述した。岩石実験における寸法効果(size effect)は大きく、テストピースの実験値をもって岩盤の値とすることはできないが、筆者はこの種のデータを積み重ねて岩盤あるいは地山の強度に対する1つの基準を得ようと意図するものである。

最後にこの実験に際して御協力を頂いた当研究室副室長小林雄一、同室員内山進、松田啓三、前田明の諸氏に深謝する。

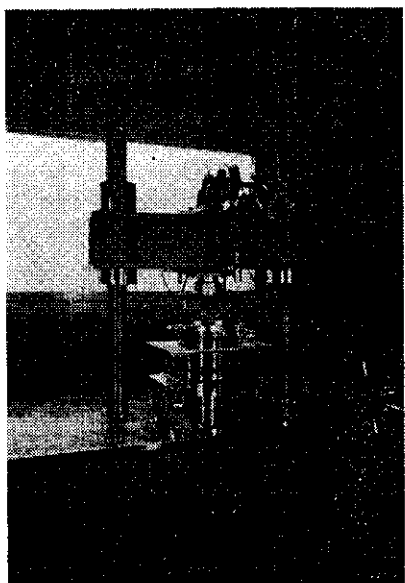
参考文献

- 1) 横堀武夫(1955): 材料強度学, p. 82~148, 技報堂.
- 2) J. C. Jaeger (1968): 弾性・破壊流動論, p. 125~131, 共立出版社.
- 3) 宮村摂三・他(1968): 地震・火山・岩石物性, p. 273~347, 共立出版社.
- 4) 岩石強度測定法特別委員会 堀部富男・他(1968): 岩石強度測定法実施基準案, 日本鉱業会誌, Vol. 84, No. 965, p. 1,479~1,487.
- 5) 梶田建夫・他(1969): 円柱状ぜい性材料供試体の一軸圧縮試験における加圧面拘束が変形状態および圧縮強度におよぼす影響について, 土木学会論文報告集第166号, p. 27~38.

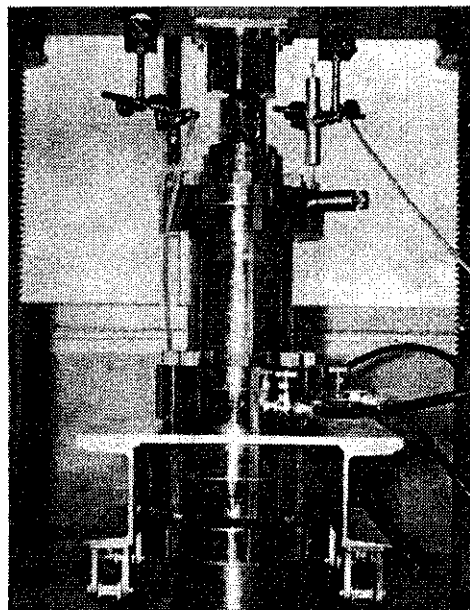
表-3 岩石試験値

岩石名	試料番号	時代・岩質	産地	乾燥密度 G_{ad} (g/cm^3)	湿潤密度 G_{aw} (g/cm^3)	有効 間隙率 n_e (%)	超音波 伝播速度 V_p (km/sec)	動的ヤング率 ($\times 10^4$ kg/cm^2)		$\frac{E_d}{E_s}$	$\frac{E_{s_1}}{E_{s_2}}$	ポアソン 比	一軸圧縮 強度 (kg/cm^2)
								E_d	E_s				
輝緑岩質角礫岩	3-3	先白亜紀 黒茶色 硬質	三石郡三石町 大字美河	2.88	2.90	1.2	5.28	81.9	41.7	測定せず	—	0.18	1,534
	3-7			2.89	2.90	1.1	5.27	85.0	52.6	34.5	1.52	0.19	1,722
輝緑岩	4-2	先白亜紀 緑色, 少し動力変 成作用を受けてい る。	"	2.81	2.84	3.1	4.34	54.0	20.2	20.3	1.00	0.18	596
	4-4			2.74	2.77	2.9	3.34	30.6	14.1	25.9	0.54	測定不可	511
蛇紋岩	5-2	先白亜紀 青黒色 塊状硬質	士別市温根別 町大字伊文	2.61	2.62	1.1	5.56	82.3	38.5	測定せず	—	0.30	916
	5-4			2.57	2.58	1.6	5.55	81.4	40.0	"	—	0.30	1,050
砂岩	7-2	白亜紀 海緑層含む 硬質	勇払郡穂別村 大字長和	2.50	2.57	7.3	3.54	32.0	31.7	18.2	1.76	測定不可	781
	7-3			2.54	2.61	6.6	3.72	35.9	28.6	21.1	1.36	"	968
"	7-4		"	2.53	2.60	7.0	3.95	40.3	34.5	23.1	1.74	"	820
熔結凝灰岩	9-9	新第三紀末または 第四紀初期 十勝熔結凝灰岩 灰白色粗粒	富良野市大字 西達布	2.31	2.40	9.2	2.37	13.2	—	7.9	1.67	—	399
	9-12			2.30	2.40	9.9	2.17	11.1	—	7.4	1.50	—	391
"	9-6		"	2.31	2.40	9.2	2.09	10.3	—	—	—	—	—
"	9-13		"	2.30	2.40	9.8	2.07	10.1	—	—	—	—	—
両輝石安山岩	10-3	新第三紀, 中新世 青灰色緻密, 硬質	虻田郡京極町 大字春日	2.63	2.67	3.5	5.07	69.0	41.7	37.7	1.11	0.17	1,480
	10-5			2.64	2.67	3.6	5.12	70.6	43.5	測定せず	—	0.15	1,415
両輝石安山岩	11-2	新第三紀中新世 硬質	茅渚郡森町大 字島崎	2.72	2.73	1.3	5.71	90.5	70.4	"	—	0.23	1,430
	11-3			2.73	2.74	1.2	5.73	91.5	70.4	46.5	1.97	0.25	—

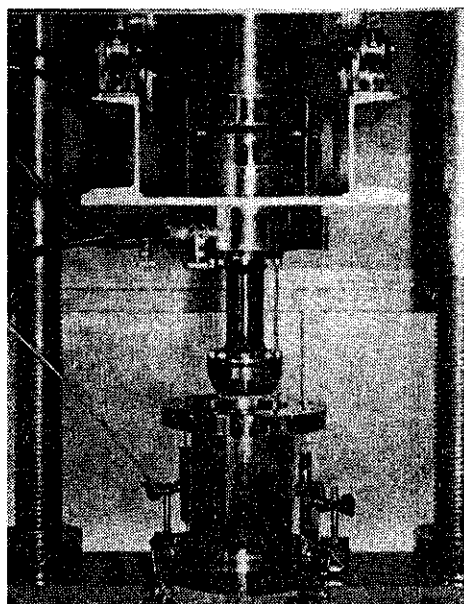
備考 乾燥密度 $G_{ad} = W_1/W_2 - W_3$, 湿潤密度 $G_{aw} = W_2/W_2 - W_3$, 有効間隙率 $n_e = W_2 - W_1/W_2 - W_3 \times 100 = (G_{aw} - G_{ad}) \times 100$ (%) W_1 : 乾燥重量 (110°C 48~72 時間乾燥) W_2 : 湿潤重量 (72 時間以上吸水) W_3 : 水中重量 E_s : ワイヤーストレイゲージで試料の局部ひずみを測定し圧縮ヤング率を出したもの。 E_{s_1} : 変位計で試料の全体変位を測定し圧縮ヤング率を出したもの。 E_{s_2} : 超音波伝播速度, 動的ヤング率, ポアソン比および一軸圧縮強度はすべて乾燥状態の試料の値である。応力速度は 0.5~1.5 $kg/cm^2/sec$ である。



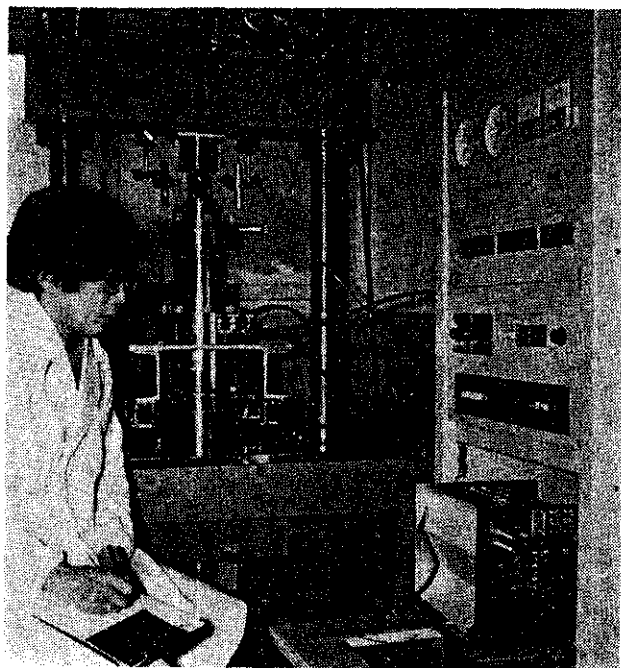
写真—1 一軸圧縮試験装置



写真—3 岩石三軸圧縮試験装置 (三軸室)



写真—4 岩石三軸圧縮試験装置 (三軸室内部)



写真—2 岩石三軸圧縮試験装置



写真—5 溶結凝灰岩試料