



Title	砂岩の一軸圧縮破壊強度と内部摩擦との関係
Author(s)	兼間, 強; KANEMA, Tsuyoshi
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 36, 59-67
Issue Date	1977-03-29
DOI	https://doi.org/10.14943/gbhu.36.59
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/14067
Type	departmental bulletin paper
File Information	36_p59-67.pdf



砂岩の一軸圧縮破壊強度と内部摩擦との関係

兼 間 強

北海道大学理学部地球物理学教室

(昭和51年12月20日受理)

Relationship between Uniaxial Compressive Strength and Internal Friction of Sandstone

By Tsuyoshi KANEMA

Department of Geophysics, Faculty of Science, Hokkaido University

(Received December 20)

Internal friction (Q^{-1} value) represents degree of anelasticity of matter. Mechanisms of internal friction of rocks are not well understood. At room temperature under atmospheric pressure, the main source of internal friction of rocks may be frictional dissipation as crack surfaces in mutual contact slide. In this case, the Q -value may depend on the frictional coefficient of crack surface and the crack density. On the other hand, compressive strength of rocks depends on various factors. One of the important factors is friction acting on the crack surface in rocks. In the present experiment, internal friction and uniaxial compressive strength of a sandstone are measured under two different conditions and the relationship between Q -value and uniaxial compressive strength is studied. One condition is that the specimens are naturally dried in the room and another condition is that specimens are previously dried at 300°C for 30 hours.

After a specimen has been dried in advance, its Q -value and uniaxial compressive strength increase remarkably. The high Q -value of the specimen dried at 300°C may imply that cohesion of grains in sandstone increases because of hardening of the cement of clay mineral on dehydration. This indicates that compressive strength increases and the number of acoustic emissions increases before fracture for the specimen dried at 300°C .

I. ま え が き

内部摩擦(Q^{-1} 値)は、物質の非弾性的性質を示す量で次式で定義される。 $Q^{-1} = \Delta E / 2\pi E$ (ΔE : 一周期に物体内部で消費される振動エネルギー, E : 物体の振動エネルギーの時間平均)。しかし、岩石の物理的性質を調べる際に、内部摩擦が積極的に利用されることは少なく、岩石試験においては、内部摩擦測定の意味は十分明確にされているとはいえない。

岩石の内部摩擦の様々な機構に関しては、JACKSON, and ANDERSON, (1970) による詳しい総合報告がある。いくつかの機構のうち、常温、常圧のもとにおける内部摩擦の主たる原因としては、振動エネルギーが岩石内部における既存のクラック面の摩擦によって消耗するとする説が有力である（例えば BORN (1941), WALSH (1966), GORDON and DAVIS (1968)）。この場合には、 Q^{-1} 値は、既存のクラック面の摩擦係数等に依存することになる。

本論文では、同一の砂岩の2つの状態（自然乾燥状態、強制乾燥状態）について、 Q^{-1} 値、一軸圧縮破壊強度、最終的な破壊に至るまでの微小破壊の発生頻度を測定した。この2つの状態では空隙率、組成、粒径等是不変である。従って今回の実験においては既存のクラック間隙に存在する水の脱水とか粘土質の膠着物質の脱水による硬化などに伴う、クラック面の摩擦抵抗の変化や、粒子の結合状態の変化に伴う、効果を調べることに重点がおかれる。一般に岩石の破壊強度は様々な因子（空隙率、既存のクラック、組成等）に依存するが、今回の2つの状態での破壊強度の相違は主として上述のような変化が原因となるだろう。従って、内部摩擦の原因を岩石内部のクラックの摩擦によるものとすれば、 Q^{-1} 値と破壊強度は、クラックの摩擦抵抗を介して関係した量となる。

以上の観点から、ここでは Q^{-1} 値の原因を、既存のクラック面の摩擦によるとする説の立場から考察し、破壊強度との関係を調べた。

II. 実験方法

試料は、浦河町上杵臼で採集した細粒緻密な砂岩で、その密度は 2.64 g/cc 、平均粒径は、 $0.3\sim 0.4 \text{ mm}$ である。

測定はこの砂岩の2つの状態についてなされた。1つは整形の後、室内で数週間、自然乾燥した試料であり、もう1つは 300°C で30時間乾燥し室温まで冷却した試料である。後者を強制乾燥した試料と呼ぶことにする。

Q^{-1} 値は縦振動共振法と撓み振動共振法によって測定した。Fig. 1に撓み振動による測定方法を示す。試料は、縦振動においては、 $1.0 \times 1.0 \times 20 \text{ cm}^3$ の直方体のもの、撓み振動においては、 $3.5 \times 1.0 \times 20 \text{ cm}^3$ の短冊型のものをそれぞれ使用した。駆動コイルにより試料を共振させ、検出コイルで振動を検出した。共振状態はオシロスコープで観測した。記録には、オシログラフとX-Yレコーダーを使用した。撓み振動についてはオシログラフの記録のみを利用した。この時、オシログラフの記録から共振周波数と、共振を止めた後の振動の対数減衰率が求まる。これらから Q^{-1} 値が次式により求まる。

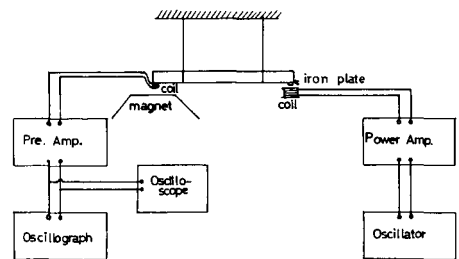


Fig. 1. Block diagram of the apparatus for the measurement of Q^{-1} value and resonance frequency.

$$Q^{-1} = \frac{\ln \tau}{\pi \cdot f_s \cdot t_{\frac{1}{\tau}}} \quad (1)$$

(但し、 $t_{\frac{1}{\tau}}$: 振巾が $\frac{1}{\tau}$ まで減衰する時間、 f_s : 共振周波数) この時ヤング率は次式から求まる。

$$E = \frac{48 \pi l^4 \rho}{m^4 a^2} \cdot f_s^2 \quad (2)$$

(l : 試料の長さ、 ρ : 密度、 a : 試料の厚さ、 $m=4.730$)。縦振動の Q^{-1} 値の決定には、共振周波数が約10kHz と高いため、X-Yレコーダに記録した共鳴曲線を用いた。この場合、 Q^{-1} 値は

$$Q^{-1} = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{\Delta f}{f} \quad (3)$$

で与えられる、ここで、 Δf は共鳴曲線の半幅値である。この時、棒を伝わる縦波の速度 V_L は $V_L = 2f_s l$ ないしは、ヤング率 E を用いて $V_L = \sqrt{E/\rho}$ と表わされる。

一軸圧縮破壊強度の測定には、直径2.5 cm、高さ5 cm の円柱の試料を使用した。端面は $\pm 1/50$ mm の精度で平行に仕上げた。完全乾燥した試料の破壊強度の測定には、乾燥炉から出し室温まで冷却した後に行った。破壊強度測定の際に観測した微小破壊の観測法を Fig.2 に示す。トランスデューサーは固有周波数 1 MHz の縦振動用のチタン酸バリウムで、倍率70 dB の増巾器(周波数特性は、2 kHz~300kHz で平坦)を通して、テープレコーダに記録した。測定の際の荷重速度は、5.0~6.0kg/s の範囲で行った。

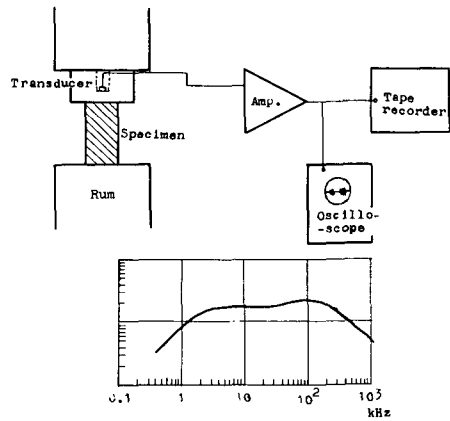


Fig. 2. Block diagram of the apparatus for the measurement of uniaxial compressive strength and acoustic emissions.

III. 実験結果

Fig.3 に自然乾燥した試料の Q 値、共振周波数 (f)、 300°C で30時間乾燥した後、室内に放置した時のそれらの変化、ならびに質量の変化 $\Delta W/W$ を示す。Fig.3 (b)が縦振動共振法による結果、Fig.3 (a)が撓み振動共振法による結果である。横軸の時間は室内に放置した時間である。Fig.3 で右端に自然乾燥した試料の値を示す。

縦振動による結果、撓み振動による結果共に変化の傾向は同じである。すなわち強制乾燥することによって Q^{-1} 値は約1/4に、共振周波数は約20%減少する。同時に質量も約2%減少する。その後、室内に放置しておくとも試料の質量は徐々に回復し、それに伴って Q^{-1} 値も回復してゆく。共振周波数に関してはそのような傾向は認められない。この質量の回復は強制乾燥された試料が空気

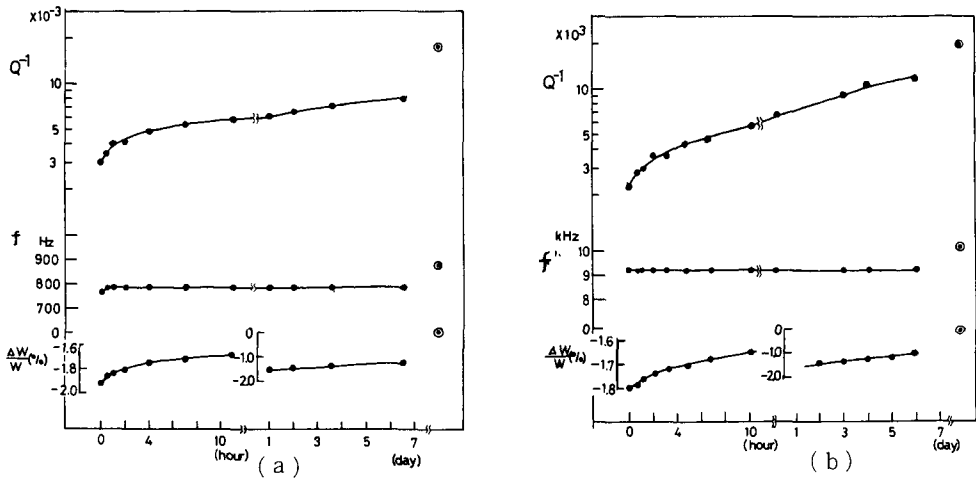


Fig. 3. Change of Q^{-1} value, resonant frequency (f) and mass of a specimen ($\Delta W/W$) with time, measured at room temperature under atmospheric pressure. The specimens have been dried at 300°C for 30 hours in advance. The mark (⊗) represents values of air dry specimen.

(a) by the flexural resonance method

(b) by the longitudinal resonance method

中の水蒸気を吸収するためと考えられる。従って 300°C の加熱乾燥によって失われた質量は砂岩中の空隙中に存在した水の蒸発に帰せられる。加熱温度から考えて、空隙の表面の吸着水も除去されるものと考えられる。Fig.3の結果から、 Q^{-1} 値の変化は砂岩中の水分に大きく依存していることがわかる。

Fig.4は、試料を水で飽和した後、室内に放置しておき質量の減少(砂岩中の水分が蒸発するため)に伴う、 Q^{-1} 値の変化を縦振動により測定し、Fig.3(b)の結果と組み合わせて飽和度 (S_r) について Q^{-1} 値をプロットしたものである。飽和度 (S_r) は次式から計算した。 $S_r = ((W - W_d) / (W_s - W_d)) \times 100$ (%) (W : 試料の質量, W_d : 完全乾燥した時の試料の質量, W_s : 飽和した時の試料の質量)。水による飽和は試料を約1週間水に浸したものであり、Fig.4の横軸の100%は必ずしも完全に試料が水で飽和されているとはいえない。二重丸は自然乾燥した試料の値である。Fig.4で特徴的なことは、飽和度が20%を境として飽和度に対する Q^{-1} 値の変化の程度が変わることである。すなわち、飽和度0%に近い試料では、微少な飽和度の変化が Q^{-1} 値により大きな影響を及ぼしている。この傾向は、撓み振動の結果にも認められる。Fig.5はFig.3aの結果から質量の変化に対する Q^{-1} 値をプロットしたものである。この図からも含水率が小さい範囲では、 Q^{-1} 値の変化が大きいことがわかる。

Table 1に、自然乾燥した試料と強制乾燥した試料の2つの場合について、一軸圧縮破壊強度と Q^{-1} 値、共振周波数を示す。強制乾燥した試料の値は、乾燥炉から出した直後の飽和度 (S_r) 0%の値である。破壊強度は試料を乾燥炉から出した後、室温まで冷却したのものについて測定した。この冷却に要した時間は1時間程度である。従って、Fig.3の結果から考えて、Table 1の強制乾

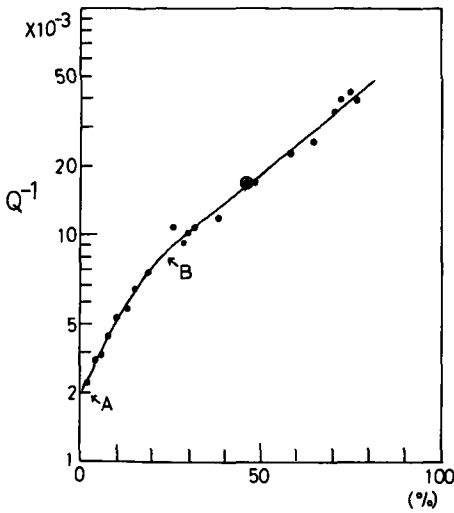


Fig. 4. Degree of the saturation of water versus Q^{-1} value.

Mark (●) indicates the value of air dry specimen.

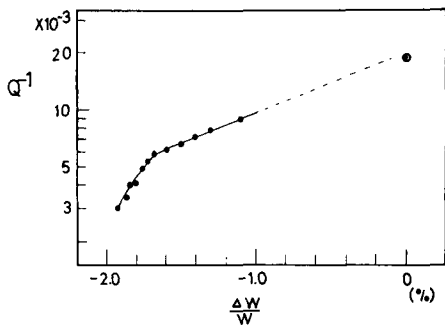


Fig. 5. Weight change versus Q^{-1} value.

The weight change is due to the change of water content in the specimen.

Mark (●) indicates the value of air dry specimen.

燥した試料の破壊時に対応する Q 値はもう少し小さくなっている。自然乾燥した試料の飽和度は約70%程度である。強制乾燥した試料の一軸圧縮破壊強度は、自然乾燥した試料のそれより平均40%大きくなっている。

Fig.6に同時に観測した微小破壊の発生頻度を示す。Fig.6aが自然乾燥した試料についてであり、Fig.6bが強制乾燥した試料についてである。横軸には荷重、縦軸には荷重100kg当りの微小破壊の発生数をとってある。図中の下向きの矢印は各々の試料の最終的な破壊点を示す。双方を比較してみると、強制乾燥した試料は破壊強度が高く、最終的な破壊強度の約70%あたりから微小破壊数が増加し始め、指数関数的に発生頻度が増加し破壊に至る。しかし、自然乾燥した試料では破壊直前まで顕著な微小破壊の増加が認められない。自然乾燥した試料と完全乾燥した試料では破壊強度のみならず、最終的な破壊に至る微小破壊の過程においても相違が認められる。

IV. 考 察

岩石の内部摩擦の原因としていくつかの機構が考えられる。例えば、構成鉱物の非弾性的性質の効果、既存のクラック面での摩擦による振動エネルギーの減衰、岩石に含まれている流体の粘性による効果等である。

自然乾燥した試料と完全乾燥した試料の Q^{-1} 値の相違の原因として、Fig.3a,b, Fig.4, Fig.5の結果を見る限り砂岩中に含まれている水があげ

られる。定性的には、この機構として、(1)空隙中に含まれている水の粘性による振動エネルギーの減衰、(2)既存のクラック面の摩擦係数の水による変化、(3)粒子境界に存在する粘土質の膠着物質の脱水による硬化と水による弱化的効果、などが考えられる。一般には岩石の内部摩擦の原因は単一の機構で説明できるものではなく、いくつかの機構の重ね合わせの結果であると考えられる。Fig.4から飽和度20%を境にして Q^{-1} 値に及ぼす水の効果に相違が認められる。ここを境にして内部摩擦の原因の主たる機構が変化すると予想される。水による飽和度が高い領域では空隙中

Table 1. Results of the measurements of Q, F and compressive strength under two different conditions.

F : Resonant frequency

* Result of the longitudinal resonance method.

Condition	Specimen	Q	F (Hz)	Specimen	Compressive strength (kg/cm ²)
Air dry	KS 1	60	875	No. 1	1,370
	KS 2	70	860	No. 6	1,530
	*KS 3	55	9,800	No. 11	1,530
				No. 16	1,340
Completely dry	KS 1	300	740	No. 2	2,060
	KS 2	330	760	No. 7	1,840
	*KS 3	450	9,200	No.12	1,920
				No.17	2,310

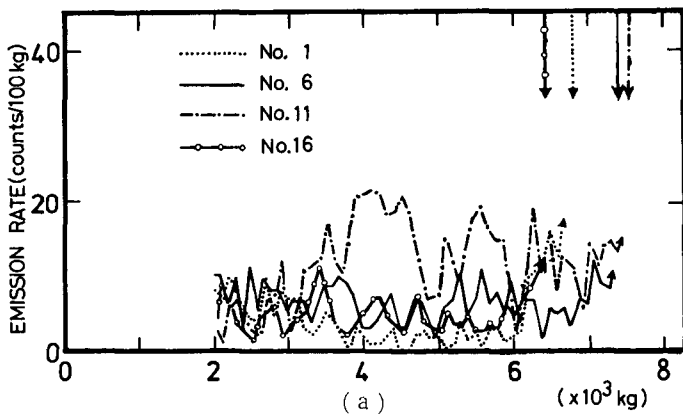
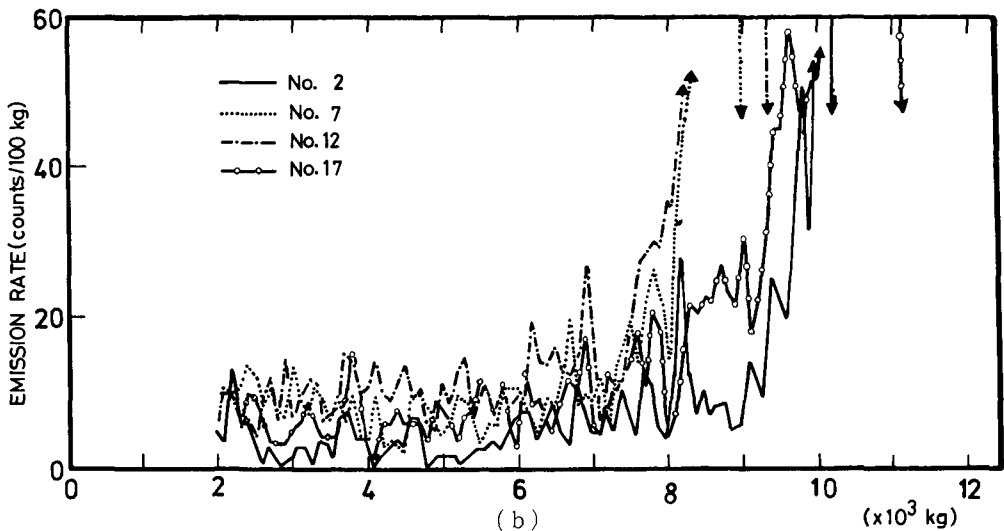


Fig. 6. Occurrences of acoustic emission with increasing load.

Nos. 1, 6, 11, 16; air dry specimen.

Nos. 2, 7, 12, 17: completely dry specimens at 300°C for 30 hours in advance.



の水の粘性の効果により、飽和度に比例して Q^{-1} 値が増加する。すなわち前述の(1)の機構が主たる原因であろう。飽和度が小さい領域では、岩石中の水は既存のクラックの接触状態に影響を及ぼしてくると推測される。その1つとして、クラック面の摩擦係数の変化が考えられる。

WALSH(1966)は岩石内部のクラック面での摩擦によって振動エネルギーが減衰する機構を提案している。一辺の長さ $2c$ の正方形のクラックが幾何学的にランダムに配置しているとする。振動の際に、各クラック面には、垂直応力 (σ_n)、剪断応力 (τ) が働き、各々の大きさは各クラックの幾何学的な位置に依存しモールの条件が決まる。この時 $\tau > \mu\sigma_n$ (μ : 摩擦係数) なる条件のクラックすなわち剪断応力 (τ) が摩擦抵抗 $\mu\sigma_n$ よりも大きいクラックは動き、摩擦によって振動の減衰に寄与することになる。動き得るクラックについてその効果を重ね合わせればよい。WALSH (1966) によれば、棒の縦振動の Q^{-1} 値は次式のようなになる

$$Q^{-1} = \frac{1}{15} \cdot \frac{E_0}{E} \cdot \frac{c^3}{v} \cdot \left[2\mu - \mu^2 \frac{3+2\mu^2}{(1+\mu^2)^{3/2}} \right] \quad (4)$$

(但し、 E_0 : 岩石のヤング率、 E : intrinsic なヤング率、 μ : 摩擦係数、 v : クラック一個分の占める体積、 c : クラックの一辺の長さ)。加熱乾燥に際しては熱応力によって新しいクラックが生じないよう急熱・急冷はさけた。試料のヤング率 E_0 の減少は約15%で大きな変化はない。Eも本質的な変化はないと考えられる。そこで上式を摩擦係数を変数として Q^{-1} 値の変化を評価したものがFig.7である。横軸に μ (摩擦係数)、縦軸に $Q^{-1} \cdot (E/E_0) \cdot (v/c^3)$ をとってある。 $\mu=0.4$ 付近で極大値をもつ曲線になる。 Q^{-1} 値は歪振巾が大きくなると歪振巾に依存して変化するが、今回の実験は歪振巾に依存しない微小歪の範囲で行なった。歪振巾に対して依存性をもつのは約 10^{-4} 以上であるが、この実験の際の歪振巾は 10^{-5} 程度である。) このような微小変位では、摩擦係数としては岩石のそれよりも鉱物の摩擦係数で代表されよう。JAEGER and COOK (1969) によれば、面が乾いた状態と湿った状態では、石英0.11~0.42 (湿)・0.19~0.65 (湿)、長石0.11~0.46 (湿) と面が湿ると摩擦係数は大きくなる。Fig. 4において飽和度が20%以上では空隙水の粘性による効果が主たるものだと考えられる。飽和度20%以下の変化をクラックの接触状態の変化によって減少したものだと考えてみる。Fig.4のA点からB点の Q^{-1} 値の差がWALSHの理

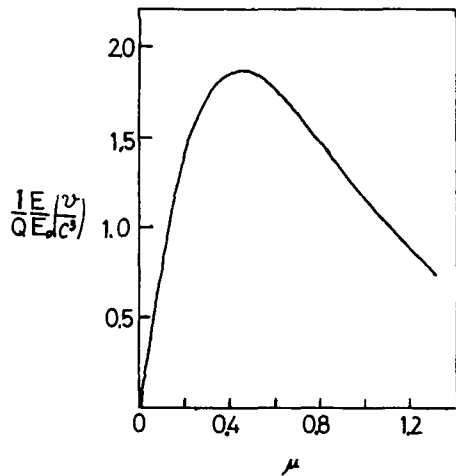


Fig. 7. Relationship among Q^{-1} value, frictional coefficient (μ) and material constants for longitudinal waves. E/E_0 is the ratio of effective and intrinsic Young's modulus, c^3/v depends upon the density of cracks just in contact. (after WALSH, 1966)

論で説明できるか否かという事である。完全乾燥することによって、既存のクラック面の摩擦係数が約0.4程度から約0.1に減少したとすれば、Fig.7から Q^{-1} 値は約1/4に減少することになる。Fig.4のA点とB点の Q^{-1} 値の摩擦係数の減少の結果として説明する事は可能である。

しかし一方既存のクラック面の摩擦係数が減少したのであろうとの推定は、一軸圧縮試験の結果と矛盾する。一軸圧縮試験の結果によれば、強制乾燥することによって試料の破壊強度は増加する。岩石の破壊は応力集中の起り易い既存のクラックの部分から始まると考えられるが、試料を強制乾燥することによってクラック面の摩擦係数が下ったとすれば摩擦抵抗も下る。それに対応して試料の破壊強度が上るといふことは考えられない。

そこで、 Q^{-1} 値を変化させると考えられる他の原因、すなわちクラック間隙の膠着物質の固着について考える。砂岩は石英粒子や鉱物粒子が膠結されてできた岩石である。この膠着物質は多くの場合、粘土質からなり、その乾燥に伴う脱水による硬化や水による弱化は岩石の物理的性質に影響を及ぼすと考えられる。強制乾燥によって、砂岩内部の粒子境界に存在するようなクラックは膠着物質の硬化によって固着すると考えられる。従って減衰に寄与する動き得るクラックの数が減少する。これはまた Q^{-1} 値を評価する(1)式において μ が非常に大きくなることを意味するものである。定量的な評価はできないが、Fig.7からわかるように Q^{-1} 値は減少することになる。従って、クラック間隙に存在する膠結物質の膠結の程度が Q^{-1} 値に強い影響を持つと考えた方が、より妥当である。

この考えは、圧縮破壊強度の実験結果と矛盾しない。強制乾燥した試料の既存のクラックは膠着物質の固着によって、その摩擦抵抗が大きくなっている。これらのクラックの強度は試料全体の強度に影響を及ぼし破壊強度が増加する結果となる。破壊に至る微小破壊の起り方をみても強制乾燥した試料では、破壊に至る前に顕著な微小破壊の増加が認められる。一方、自然乾燥した試料ではこのような傾向は認められない。これは自然乾燥した試料では粒子間の膠着物質が水によって弱化しており、これが潤滑剤の働きをして、試料が変型する際に顕著な音波を伴わないで変型すると推定される。一般に岩石は低封圧の下では体積膨張を起して破壊に至る。SCHOLZ(1968)は体積膨張には微小破壊の音波が伴うことを報告している。福島・木下(1975)は、砂岩の乾燥した試料と湿った試料について、その体積変化を測定し、双方の試料とも最終的な破壊応力の約70%付近から体積膨張を起し、乾燥した試料の破壊強度が顕著に大きくなることを示している。今回の実験についても、強制乾燥、自然乾燥した2つの試料共、体積膨張から破壊に至るといふ過程が起っていると考えられるが、自然乾燥した試料については、SCHOLZの報告しているような顕著な音波を伴う微小破壊活動が認められない。これは前に述べたように自然乾燥した試料は膠着物質が潤滑剤として働き、体積膨張に伴う変形が塑性的に進行し音波として観測し得なかつたと解釈される。

V. ま と め

砂岩の2つの状態(自然乾燥状態, 強制乾燥状態)について, Q^{-1} 値, 一軸圧縮破壊強度, 微小破壊の発生頻度を測定し, 次の結果を得た.

(1) 完全乾燥した試料の Q 値と圧縮破壊強度は自然乾燥した試料のものよりも大きい. また微小破壊の生じ方にも相違が認められ, 自然乾燥した試料では, 最終的な破壊に至る前に顕著な微小破壊の増加が認められないのが特徴である

(2) Q^{-1} 値の変化は岩石中の水分に依存するが, 飽和度20%以下の Q^{-1} 値の顕著な減少は, 脱水による粘土質の膠結物質の硬化によって, クラックが固着され減衰に寄与する動き得るクラックが減少するためと考えられる. 飽和度20%以下の Q^{-1} 値の顕著な減少は砂粒子の膠着の程度が増加したことによると解釈される.

(3) 強制乾燥した試料の破壊強度の増加, 2つの状態での微小破壊の生じ方のいずれも, 砂岩中の膠着物質に因るものとして説明できる. すなわち自然乾燥した試料の膠着物質は水による弱化によって潤滑剤の働きをして破壊強度を下げ, 破壊に至る前の音波を伴うような微小破壊活動を抑制する働きをするものである. このことは, Q 値の顕著な減少からも推測される.

文 献

- BORN, W. T., 1941. The attenuation constant of earth material. *Geophysics*, **6**, 132-148
- 福島篤・木下重教, 1975. 岩石の体積変化の測定—単軸圧縮下における岩石のダイラタンシーと破壊(第一報)—. 日本鉱業会誌, **90**, 699-704
- GORDON, R. B. and L. A. DAVIS, 1968. Velocity and attenuation of seismic wave in imperfectly elastic rock. *J. Geophys. Res.*, **73**, 3917-3955.
- JACKSON, D. D. and D. L. ANDERSON, 1970. Physical mechanism of seismic-wave attenuation. *Rev. Geophys.*, **8**, 1-63.
- JAEGER, J. C. and N. G. W. COOK, 1969. Fundamentals of Rock mechanics. *Methuen, London*, 59pp.
- SCHOLZ, C. H., 1968. Microfracturing and inelastic deformation of rock in compression. *J. Geophys. Res.*, **73**, 1417-
- WALSH, J. B., 1966. Seismic wave attenuation in rock due to friction. *J. Geophys. Res.*, **71**, 2591-2599.