岩石の強度ヤング率および弾性波速度

林 田 精 郎*

Strengths, Young's Moduli and Elastle Wave Velocities of Rock

By Yoshiro Hayashida

要 旨

岩石の強度はそれを構成する鉱物や岩片の粒径と密接な関係があり、最大粒径を Griffith のいう割れ目の長さに対応させることにより岩石の強度論に Griffith の破壊理論を導入することの正当性を立証することができる。また、岩石の強度とヤング率との間に一定の関係があることが理論的にも実験的にも知られたこと、および静ヤング率と動ヤング率とにはその傾向において大きなちがいがいから弾性波速度と強度との間に一定の関係がある、それは、岩相と地質時代を考慮して両者を比較することによつて明らかになった。

はじめに

岩石の一軸圧縮強度とヤング率の関係および一軸圧縮強度と縦波速度との関係を明らかにするために、和泉砂岩、各地から採取した花崗岩類、火山岩および固結度の低い神戸層群の各岩相などについて実験を行った。ここでは、これらの実験結果から明らかになった結論について述べてみたい。

従来から、多くの研究者により岩石の強度論なるものが論じられ、強度と弾性比による岩石の工学的分類、ひずみエネルギー説、Griffith の破壊理論および Orowan の破壊理論などの多くの研究があるが、強度とヤング率、強度と速度といった二つの物理量の相関については詳しい議論がなされていない。

Griffith の破壊理論では、岩石を構成している鉱物粒子の大きさと Griffith のいう割れ目の長さを関係づけることによつて、強度とヤング率との間に一定の関係があることを説明していると推論することができる。このような推論から、ヤング率と一定の関係がある速度も強度と何らかの関係がなければならないことになる。強度、ヤング率、速度にそれぞれ一定の関係があるとすれば、我々は、弾性波速度の測定から、現地山の強度を推定することができるという、大きな利益を得ることがで

きる。

この研究を行なうにあたり、試料の採取に協力して戴いた中央復建コンサルタンツ株式会社、川崎地質株式会社に、また、試料について地質学的な御指導をたまわりました当大学の諸先生方に感謝の意を表します。

実験方法

一軸圧縮強度、ヤング率、弾性波速度の測定は同一の試料で行うことは勿論である。試料の形状や、端面の仕上げの程度が一軸圧縮強度に大きな影響を与えることから、それらについては十分な注意がはらわれなくてはならない。当研究室では従来から円柱状の試料が用いられ、研究室内で成形をしているが、今回はかなりの量をボーリング試料によつた。端面の仕上げは前に報告したような精度で行われた。しかし固結度が低く粗粒である神戸層群の砂岩や、第三紀中新世の泥岩は湿式での成形はかなり難しく、乾式でグラインダーで仕上げたものもある。そのために端面の平行度は十分に希望条件を満足させることはできたが、端面の平滑の度合は必ずしも十分とはいえなかつたものもある。試料の形は1:2の円柱状のものであることはいうまでもない。

試料の湿潤の度合は強度や弾性波速度に影響があることから、乾燥状態で測定することにしたが、前にも報告したように堆積岩では 100°C 程度の温度でも、その力学的性質に変化が生ずることがあるので、加熱乾燥は

* 大阪市立大学理学部

行なわず、2 mmHg 程度の真空中で 2 日間以上乾燥したものをを用いることにした。しかし、一部にはわざわざ湿润にしたものもある。

荷重—ひずみ曲線は自動的に X-Y 型記録器で記録した、この場合、荷重は計力計の指針の回転に同期するようにし、ひずみ検出は固結度の低い第三紀層では接着型のひずみゲージの使用が困難であつたために、差動トランス型のもを用いた、このひずみ検出器は接着型のひずみ検出器で時々更正した。荷重増加の速度は自動制御され $1 \sim 2 \text{ kg/cm}^2/\text{sec}$ を基準とした。ヤング率の算出の方法にはいろんな方法があるが、今回は記録された荷重ひずみ曲線から破壊荷重の $1/2$ の点における接線ヤング率をもつて静ヤング率とした。

弾性波速度の測定は 50 kHz の縦振動子を用い、いわゆるパルス法で、時間の読取り精度は $0.1 \mu\text{s}$. であつたが、試料によつては振動波の吸収が大きく、 $0.5 \mu\text{s}$. 程度の精度に低下したものもある。試料の形や大きさがパルス波の速度に影響を与えることはよく知られているが、径 $40 \sim 60 \text{ mm}$ で長さ $80 \sim 120 \text{ mm}$ にした場合無限媒質の理論式が利用できる。Belikov の資料を引用するにあつて、一軸圧縮強度とヤング率は発表されたものを c.g.s. 単位に変換して用い、弾性波速度は弾性係数、密度などを用い、無限媒質の式により計算して利用したことを付記しておく。

測定結果

1) 強度とヤング率との関係

測定された一軸圧縮強度とヤング率とを両対数方眼紙にプロットすると、図—1～図—5 のようになる、図中には後述する式 (1) で代表されるいくつかの線を記入してある、しかし、Deere と Miller が提唱する弾性比 200 および 500 はまぎらわしいので記入していないが、それらは図中では 45 度の傾斜をもつ直線で示される。

図—2 花崗岩の一軸圧縮強度 σ と静ヤング率 E の関係

図—1 神戸層群の一軸圧縮強度 σ と静ヤング率 E の関係

図—3 和泉砂岩の一軸圧縮強度 σ と静ヤング率 E の関係

図—4 古生層粘板岩の一軸圧縮強度 σ と静ヤング率 E の関係

図—5 火山岩の一軸圧縮強度 σ と静ヤング率 E の関係

図—1～図—5 に記入された直線は

$$\log E = A \log \sigma + \log B \quad \cdots (1)$$

なる式で一般的に示される。ここで E はヤング率, σ は一軸圧縮強度, A , B はある定数である。

潜在クラックがあり, そのクラックに沿って破壊したとみられる古生層は別にして, その他の岩石について考察してみると, 式 (1) の定数を図から求められるが, 用いた試料の物理性にはかなりの幅があるので, ここで

は測定値の分布の範囲をみるようにしたい。

まず, 花崗岩類と神戸層群の各種の岩石では多くの測定値は

$$\log E = 2 \log \sigma + \log 2.07 \times 10^{-6} \quad \cdots (2)$$

$$\log E = 2 \log \sigma + \log 2.44 \times 10^{-7} \quad \cdots (3)$$

で示される二つの直線にはさまれる範囲に分布している。二つの岩石種によるちがいは, 花崗岩では一軸圧縮強度もヤング率も大きい方に, 神戸層群ではそれぞれこれらの小さい方に, また神戸層群では式 (3) の直線に近い方に最も粒径の小さい凝灰岩が, そして粗粒な砂岩は式 (2) の直線の近くに分布している。凝灰岩では湿潤にしたものは乾燥したものよりも式 (2) の直線の近くに分布するが図では区別されていない。

花崗岩は産地またわ岩質のちがいに粒度のちがいはあるが, この実験では中粒ないし粗粒のものが主であつたが詳しい粒度分析はしていない, ここに Belikov の資料から引用して図にしたものがある。それは図では細粒なものとして示され, 式 (1) の右辺第二項はかなり小さくなつていて, 神戸層群などでみられる傾向とよく一致しているように考えられる。また, 両岩石はともに風化により変質したものでは, 全体として式 (1) の右辺第二項が大きくなる傾向もみられる。

和泉砂岩では

$$\log E = 2 \log \sigma + \log 6.25 \times 10^{-7} \quad \cdots (4)$$

$$\log E = 2 \log \sigma + \log 10^{-7} \quad \cdots (5)$$

の二つ直線の間に分布するものが多い, そして用いた試料が均一であつたためか全体としてきれいな分布をしているけれども, 風化の影響を受けると式 (4) で示される線よりも左の方に分布する傾向がみられる。和泉砂岩では式 (2), (3) と式 (4), (5) を比較することにより明らかなように, 花崗岩や神戸層群よりもやや右によつて分布していることが解る。実験データが多くないので問題はあつても, 火山岩類の測定値は和泉砂岩でみられたように式 (4) と式 (5) の両直線の間に分布するが, 一部の明らかに潜在クラックがあつたと認められるものでは, 式 (4) の線よりもさらに左に分布している。

このように花崗岩, 神戸層群の各種岩石, 和泉砂岩および火山岩類でみられたような関係があり, それは一般化して

$$\log E = 2 \log \sigma + \log A \times 10^m \quad \cdots (6)$$

のかたちで示されることが解る。岩石は完全弾性体ではなく, また不均質で異方性のある物質であるために, 強度とヤング率との間に一定の相関関係があると考えることに対して強い批判はあるかも知れないが, 実際の測定結果は式 (6) で一般化される関係があるとみられ

る。しかし古生層などでみられたように潜在クラックその他により、試料そのものが著しく不均質で異方性の強い場合には、破壊に対して別の要素による影響があらわれるために問題が多くなる。

2) 強度と速度との関係

前節で用いた同じ試料について、それらの一軸圧縮強度を kg/cm^2 の単位で対数軸に、弾性波速度を km/sec

の単位で通常の日盛軸に示したのが図—6—図—12である、これらの図から、和泉砂岩が最もよく直線的にまとまった分布をしており、古生層が最もバラツキが大きい、神戸層群は岩相別にみるとかなりよくまとまった分布をしている。ここで面白いことは、最も固結度の低い神戸層群の砂岩では、同じ程度の弾性波速度で比較すると、より固結の進んだ岩石よりも速度の割に強度が大きいと

図—6 神戸層群の砂岩の一軸圧縮強度 S と弾性波速度 V との関係

図—8 第三紀層の砂岩、泥岩の一軸圧縮強度 S と弾性波速度 V との関係

図—7 神戸層群の凝灰岩泥岩の一軸圧縮強度 S と弾性波速度 V との関係

図—9 和泉砂岩の一軸圧縮強度 S と弾性波速度 V との関係

図—10 古生層粘板岩の一軸圧縮強度 S と弾性波速度 V の関係

図—12 花崗岩の一軸圧縮強度 S と弾性波速度 V との関係

図—11 火山岩の一軸圧縮強度 S と弾性波速度 V の関係

か他の第三紀層では小さく、1よりも小さい値を示す砂岩がある、これに対して和泉砂岩や更に固結が進み、どちらかといえば固結のために異方性の強くなつた古生層では A の値は大きくなっている。花崗岩や火山岩などの火成岩では A の値は 1.4~1.9 といった値のものが多く、結局、一軸圧縮強度と速度との間には各岩石種によつてそれぞれ異なつた関係がありそれらをまとめると図—13 のような関係があることが解る。

図—13 各種岩石の一軸圧縮強度 S と弾性波速度 V の関係

いえる。そしてこの傾向は和泉砂岩と他のより固結の進んだ岩石と比較したときにもみられる現象である。

ここで速度がゼロのときに $\log S$ の原点を通る直線を仮定して、これを図中に記入した、これらの直線は

$$V = A \log S \text{ (km/sec)} \quad \cdots \cdots (7)$$

であらわされる。ここに V は速度、A は係数、S は kg/cm^2 であらわされる一軸圧縮強度である。

ここで式 (7) の係数 A は固結度の低い神戸層群と

測定結果に対する考察

1) 強度とヤング率の関係

明らかに潜在クラックがあり、それに支配された破壊をした古生層は別にして、一軸圧縮強度とヤング率との間に式(6)で示される関係がある。そこで Griffith の破壊理論を再度考えてみる、

$$\sigma^2 = \frac{2\gamma K^2}{\pi C} E$$

から

$$\log E = 2 \log \sigma + \log \frac{\pi C}{2\gamma K^2} \quad \dots\dots (8)$$

を求めることができる、ここには E ヤング率、 σ は一軸圧縮強度、 C は Griffith の割れ目の長さの半分、 γ は岩石を構成する鉱物粒子の自由表面エネルギー、 K は脆性度、 π は円周率である。ここで、式(1)、式(6)、式(8)を比較してみると、右辺第一項は問題なく一致し、第二項は

$$\log \frac{\pi C}{2\gamma K^2} = \log A \times 10^9 \quad \dots\dots (9)$$

であることが解り、この第二項は Griffith の割れ目の長さと、鉱物粒子の自由表面エネルギーに関係するものである。岩石の造岩鉱物のもつ平均の自由表面エネルギーは大きなちがいがないとすると、式(9)は C のちがいによつて、ちがつた値になる。岩石は破壊するとき、鉱物粒子の境界、または、石英粒などでみられる微小なクラックなど、また鉱物粒の中には雲母や粘土鉱物のように異方性が強く他の鉱物に比して弾性係数の小さいものなどがあると、そこに応力の集中が発生して破壊へと進行することが考えられている。ということは Griffith の割れ目の長さとは造岩鉱物の大きさに関係があり、また、そのように考えることによつて Griffith の破壊理論がより理解しやすくなることから、式(8)の第二項を支配する要素として粒径を考えることになるわけである。ここで前述したように鉱物粒子の自由表面エネルギーの平均の値を 500 erg/cm^2 程度とすると、最大粒径の小さいものの程式(8)の第二項は小さくなる、例えば C が 0.1 cm では $\log 0.393 \times 10^{-6}$ に 0.01 cm では $\log 0.393 \times 10^{-7}$ となるように。さらに、図一1～図一5から式(8)の第二項のみを考察すると最大粒径が最も大きい神戸層群の砂岩では $\log 2.44 \times 10^{-7} \sim \log 2.07 \times 10^{-6}$ 、花崗岩類では $\log 2.44 \times 10^{-7} \sim \log 2.07 \times 10^{-6}$ 、和泉砂岩では $\log 6.25 \times 10^{-7} \sim \log 1.0 \times 10^{-7}$ となつている。粒径が最も小さいとみられる火山岩類が $\log 6.25 \times 10^{-7} \sim \log 1.0 \times 10^{-7}$ と和泉砂岩と似た値を示すのは 0.07 cm にもおよぶ大きな斑

晶があるためで、これは和泉砂岩の最大粒径と同等の大きさである。

結論として式(8)の第二項は鉱物粒の自由表面エネルギーと粒径に関係するもので、粒径と Griffith の割れ目の長さとを関係づけることによつて、強度とヤング率との関係がより理解しやすくなる、だから単に岩石の工学的分類の一方法として強度と弾性比でもつて岩石を分類することは岩石物性の本質論を忘れたやり方であるといえる。

2) 強度と速度の関係について

前節でみたように、一軸圧縮強度と静的ヤング率との間にはある相関関係があることが理解された、また一軸圧縮強度と弾性波速度については図一6～図一12でみられたように式(7)で表わされる関係がみられる、この式(7)の係数 A は岩相、岩質などのちがいによつて支配されることも明らかになった。

岩石のもつ弾性波速度のうちで、いわゆる縦波は、岩石の動ヤング率、密度、動ポアソン比などに関係する値であることはよく知られていることである。動ヤング率と静ヤング率とは必ずしも一致しない、動ヤング率は応力が著しく小さく、しかも応力速度が著しく大きい ($10^4 \sim 10^6 \text{ kg/cm}^2/\text{sec}$) ときのもので、岩石試料では一般に動ヤング率が大きな値を示すことが知られていて、このちがいは断熱弾性率 E_S と等温弾性率 E_T のちがいとして説明されており、一般的には次の式が用いられている、

$$\frac{1}{E_T} = \frac{1}{E_S} + \frac{T\alpha^2}{9C_P \cdot \rho} \quad \dots\dots (10)$$

ここで T は絶対温度、 C_P は比熱、 α は比膨張率、 ρ は密度である。式(10)の右辺第二項は一般的には大きくなく、両ヤング率の差は $1 \sim 10\%$ であるといわれている。

他方、別の面からみると、静的測定は応力速度が小さいために動的測定よりも内部タイムスケールの影響をより多く受けることも考えられる、この場合も静的ヤング率は小さくなり、実際には動ヤング率は静ヤング率の $2 \sim 3$ 倍になることもある。

式(10)の関係からみると、一軸圧縮強度と弾性波速度との間に相関関係があり、その関係は式(7)で示される。そして式(7)の係数 A は固結度に関係のあるもののようにみられることは前述したが、 A の値が小さいことは弾性波速度の割に強度が大きいことを、また A の値が小さい岩石はそれが大きいものよりも破壊に至るまでの全ひずみ量が相対的に大きく、 A の値の大きい岩石はより脆性的な破壊をすることを意味している。

以上のようなことから式(7)の A の値を堆積岩では固結係数または cementing 係数と考えてよいことが解

る。これに対して花崗岩類のような火成岩で A の値が比較的小さいのは風化とか、ゆるみとかにより微小なクラックが成長したためと考えられる。またこれらの岩石で A の値が相対的に小さいのは構成鉱物の粒径が大きいこととか、雲母などのように強度が特に低い、粒径の大きな鉱物を含んでいるとかの推論もできるが、それを立証するにたる資料は現在のところない。

古生層の粘板岩が見掛上係数 A の値が大きいのは、実験に用いたこれらの岩石は何らかの割れ目をもち、この割れ目が破壊強度を支配したとみられることから、弾性波速度が大きい割に強度が小さくなったためであると理解できる、それは安山岩などのように均質で異方性の少ない岩石で A の値が 1.9 となっていて古生層のそれよりもやや小さくなっていることからこうした推察をすることができる。

結局、係数 A は 0.5 前後から 2.0 までの範囲にあり、固結度が高く、異方性が顕著になつたもの程大きくなる傾向があるといえる。

結 論

岩石の一軸圧縮強度とヤング率との間には Griffith の破壊理論から予想される関係があり、Griffith の割れ目の大きさは鉱物粒の大きさと関係があることが明らかとなつてきた。これは、造岩鉱物のうちで、雲母族の各鉱物および粘土鉱物は (001) 面に平行に劈開がみられること、石英粒などでは鏡下でみても明らかのように割れ目が観察されること、また鉱物粒間も一種の割れ目とみることができることにより、これらの割れ目を Griffith の割れ目であると考えることができる、ということがある。このような見地により地質時代がことなり、さらに固結度合の異なる岩石でも、粒径を基準にした強度論を展開することができ、強度とヤング率との間には一定の関係があることが解る。

一軸圧縮強度と弾性波速度との関係については、コンクリート工学の方では古くから多くの研究がなされ、ある一定の関係があることが知られ、弾性波速度の測定により、コンクリートの破壊強度の推定に役立てられてきた。岩石についても、これらについて、かなり多くの研

究がなされてきたが、岩石はコンクリートに比して質的に多様であるために簡単には解決できなかつた。岩石を構成する主要鉱物は、堆積岩では石英、斜長石と他の岩石から由来した岩片と、これらの粒子間に成長している緑泥石、カオリン、モンモリロナイトなどの低温生成の鉱物や方解石、非晶質の硅酸、酸化鉄などである。これらの粒子間に成長した鉱物はコンクリートにおけるアルミン酸三石灰、ケイ酸三石灰などに相当し、粒子を結びつける役目を果しているが、岩石においてはそれらの存在割合は一定ではなく、岩相、地質時代などにより非常に変化に富んでいる。そしてこれらの bind 物質が岩石の力学的性質に大きな影響を与えていることは、モンモリロナイトを含む砂岩や泥岩の膨潤性、また膨潤性緑泥石を含むそれらの力学的性質からみて明らかである。このような考えから、弾性波速度と一軸圧縮強度とは、岩相と地質時代のちがいが、別の表現によれば岩相と固結に関する係数を導入することにより、関係を明らかにすることができた。

参 考 文 献

- (1) B. P. Belikov (大草重康訳) (1964) 岩石の弾性的および強度的性質 (その 1) 地調月報 Vol. 15 No. 12 pp. 783~800
- (2) B. P. Belikov (大草重康訳) (1965) 岩石の弾性的および強度的性質 (その 2) 地調月報 Vol. 16 No. pp. 45~78
- (3) 林田精郎 (1968) 堆積岩の粘弾性的性質, 応用地質 Vol. 9 No. 3 pp. 105~112
- (4) 井上正康, 大見美智人 (1969) 超音波伝播速度測定による岩石の圧縮強度の推定 水曜会誌 Vol. 16 No. 10 pp. 693~696
- (5) 山口梅太郎, 森田道明 (1969) 音波による岩石の動ヤング率の測定 日本鉱業会誌 Vol. 85 pp. 319~323
- (6) 林田精郎 (1969) 和泉砂岩の力学的性質 (I), 応用地質 Vol. 10 No. 3 pp. 111~117
- (7) 井上正康他 (1970) 岩石の弾性波伝播速度および弾性定数と含水との関係について (I) 応用地質 Vol. 11 No. 4 pp. 133~138
- (8) 林田精郎 (1970) 和泉砂岩の力学的性質 (2) 応用地質 Vol. 11 No. 4 pp. 127~131