割れ目岩盤の性状および強度

池田 和彦*

The Property and the Strength of Fissured Rock Masses

Kazuhiko IKEDA

Abstract

Cracks and fissures contained in rock masses influence remarkably their own strength or drillability. Fissures have a primary influence on mechanical and elastic properties of rock. Such interrelation can be represented by the following empirical equation.

$$n = \frac{5.0}{(k+m)^2} - 4.0$$

Where,

n : the frequency of fissures defined as the number of fissures per unit length (meter).

$k=v/V$ (v : the velocity of P-wave propagated in rock masses, V : the velocity of P-wave propagated in rock specimen)

This ratio k gives the index to degree of fissuring.

m : coefficient of uniformity, which depends on degree of weathering, porosity and strength.

The strength of fissured rock masses S_f can be estimated as

$$S_f = k^2 S_s$$

if the strength of non-fissured rock specimen S_s and the index to degree of fissuring k are assumed.

1. 緒 言

岩盤には一般に層理、片理、節理などの弱面の他、粘土のはさみ層、破砕帯などの不連続帯を含んでおり、これらの弱面や不連続帯は岩盤の強度に重大な影響を与える。トンネル、ダム、切取などの岩盤施工に際しては、このような弱面や不連続帯を含んだ岩盤全体の強度が問題となり、土木工事の計画および施工に当っては割れ目岩盤や破砕帯の性状および強度を適確に把握しなければならない。但し、ここに言う割れ目岩盤とは層理、片理、節理その他のひび割れを 1~2 m 間隔以内に含む岩盤を、破砕帯とは岩盤中とくに割れ目が多く、その間隔が 5~10 cm 以下で細片状に分離しやすく、場合によっては粘土層をはさんでいる部位を言うものとする。

割れ目岩盤の強度に関する研究としては、従来次の 3 方法がなされている。すなわち、(1) 欠損あるモデルや岩石試料の強度試験から岩盤の強度を評価する方法、

(2) 岩石試料や岩盤の割れ目状態や変質状態を調査し、これより岩盤の強度を評価する方法、(3) 現位置における大型岩盤試験から岩盤の強度を評価する方法である。

(1) については、人為的に欠損をつくった石膏モデルやボーリングコア、岩塊などから整形した割れ目のある岩石試験片の強度試験から研究されており、割れ目部分の強度^{1)~4)}、割れ目角度と強度および破壊機構との関係^{5),6)}が求められている。

(2) については、岩盤および採取した岩石試料の精査から岩盤の強度特性をいくつかに分類し、かつ強度特性についての分類と割れ目岩盤の強度との関係が研究されており、動弾性係数と静弾性係数との関係⁷⁾、プレシオメータによるボーリング孔壁の変形係数と、平板載荷試験による岩盤の変形係数との関係が求められている。岩盤の強度特性についての分類のうち、割れ目の性状の解明については主として割れ目の頻度の算定についての研究がなされており、ボーリングコアの採取率による割れ目頻度の算定法^{9),10)}、弾性波速度と割れ目頻度との関

* 地質計測株式会社

係¹¹⁾、音波の反射パルス量から割れ目の頻度や分布を算定する方法^{12),13)}が研究されている。

(3) については、現地で岩盤の供試体を作り、岩盤強度試験を行ない、岩盤の強度を解明する研究が行なわれており、岩盤試験から節理のある岩盤のせん断強さが求められており^{6),7)}、また岩盤試料と岩石試料とのせん断強さの比較がなされている¹⁴⁾。

本論文は土木工事着工前に一般に行なわれている地表踏査、ボーリング、岩石試料試験、弾性波探査などの地質調査結果を利用した割れ目岩盤の強度算定の研究である。第 2 章は割れ目岩盤の力学的性質を解明するための基礎的研究として、ボーリングコアから割れ目のない岩石試験片および種々の状態の割れ目が存在する岩石試験片を作製し、圧縮試験並びに弾性波速度測定を行なって、割れ目のある岩石と割れ目のない岩石の強度の比較、割れ目状態による岩石強度の変化、割れ目状態と弾性波速度との関係について検討した結果を述べている。第 3 章は岩盤に存在する割れ目の頻度および結合度は岩盤と岩石試験片との弾性波速度の比から求められることを明らかにして、この比を割れ目指数として定義し、割れ目指数の 2 乗と岩石試験片の強度から割れ目岩盤の強度が算定されることを述べている。

2. 割れ目のある岩石試料の力学的性質

2.1 岩石試験片および試験

割れ目の岩石試験片の強度、破壊の形態および弾性波伝播特性などについて検討するため、99 個の岩石試験片を作製し、弾性波伝播速度測定、圧縮試験などを行なった。これら試験片のうち No. 1~No. 79 の 79 個は古生代の粘板岩で、中央西線にえ川~日出塩間の大なぎトンネルの地質調査用のボーリングコアから作製したものであり、No. 80~No. 99 の 20 個は中生代の頁岩で、宮城県石巻市牛内町で採取した岩塊から携帯用コア採取器で作製した試験片である。

2.1.1 試験片の形状および寸法

本研究では整形の容易さと、稜の数が多くなると圧縮強さがほぼ一定になっていることから試験片の形状はすべて円柱形とした。

圧縮試験のための試験片の縦横比 (l/d) については一般に 1 以上が必要とされており、本試験では JIS 302 にしたがって大半の試験片の l/d は 2 としたが、整形の都合上、また割れ目の頻度が強度および弾性波速度に及ぼす影響を究明するため l/d を 3 にとった試験片もある。試験片の直径 d についてはボーリングコアから採取した試験片は孔径 36 mm, 46 mm, 56 mm のボーリング

コアであり、携帯用コア採取器 (孔径 25 mm) から採取した試験片の直径は 23 mm または 24 mm である。

2.1.2 試験片の含水状態

含水による強度低下、弾性波伝播速度の変動を勘案して、本研究では試験片を数週間自然乾燥した後、比重測定、弾性波速度測定、圧縮強度試験の順に試験を行なった。

2.1.3 試験片の割れ目状態

図-1 割れ目状態 (古生代粘板岩)

表-1 割れ目の状態による岩石分類

A_s	割れ目に部分的に空隙がある。割れ目に幅があり、割れ目に沿い風化が進んでいる。割れ目が非常に多い。
	No. 1~No. 30
B_s	割れ目が明瞭であるが、幅は殆んどなく、割れ目に沿い風化は見られる。割れ目に附随して、ヘア・クラックが数多く見られる。
	No. 31~No. 45, No. 60, No. 61
C_s	割れ目が見られるが、割れ目は密着している。割れ目に沿って風化は進んでいないが、ヘア・クラックが見られる。
	No. 46~No. 59, No. 62~No. 64, No. 68, No. 69, No. 71
D_s	割れ目は全く見られない。あるいは、ヘア・クラックが少し見られる。
	No. 65~No. 67, No. 70, No. 72~No. 79

試験片の割れ目の角度(試験片軸と割れ目とのなす角)および割れ目の状態の代表例は写真-1 および 図-1 に示すようである。No. 1~No. 79 の試験片について、割れ目状態を観察によって分類すると、表-1 に示すように A_s , B_s , C_s , D_s の 4 グループに分類される。

2.1.4 試 験

圧縮試験は東京衡機製造所製万能型材料試験機(最大容量 50 ton)を用いて行ない、荷重速度範囲を JIS 302 にしたがって、 $5 \text{ kg/cm}^2/\text{s}$ 程度とした。

試験片内を伝播する弾性波速度は、超音波パルス透過法により測定した。測定器は開発電子研究所製の岩石用超音波伝播測定器で、探触子の共振周波数は約 50 KHz、測定器の読取り精度は $0.1 \mu/\text{s}$ である。測定は、同一試料に対し発信、受信探触子の位置を正逆 2 通りに変え行ない、この差が 5.0% 以上の時は再測定を行ない、差が 5.0% 以下になる迄測定した。

2.2 試験結果ならびに考察

2.2.1 試験片の割れ目状態と圧縮強さとの関係

本研究に用いた試験片の割れ目は節理または層理で、その割れ目状態の代表例は写真-1 および 図-1 に示すようである。圧縮試験において、大部分の試験片はこの割れ目に沿って破壊をおこすので、割れ目と圧縮荷重による破壊面とは比較的一致し、割れ目の角度と破壊面の角度(破断角)とはほぼ同じである。破断角は、圧縮試験で破壊した破壊面のうち最も顕著なものを取り、試験片

軸となす角度(α)で表わしている。

No. 1~No. 79 の試験片について、圧縮強さ(S_c)と破断角(α)との関係を示したのが 図-2 である。なお、けい化した試験片 (No. 62, 63, 76, 77) は除いた。図-2 は割れ目状態の異なる多数の試験片による圧縮試験結果を示したもので、圧縮強さのばらつきが大きく、また破断角(α)と圧縮強さ(S_c)との間に傾向を見出すことが難しい。

いま、割れ目ある試験片の割れ目に沿う破壊を考えると、この破壊現象は Coulomb の破壊仮設で説明される。Coulomb によると、せん断面内のせん断応力(τ)とせん断面に作用する直応力(σ_n)に比例する力 $\mu\sigma_n$ とが加算された値の最大値が一定の極限に達したときに破壊するとしている。いま、

$$\tau_s = \tau + \mu\sigma_n$$

とおくと、

$$\tau_s = \sigma_c \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha - \mu \cdot \sigma_c \cdot \sin^2 \alpha$$

となり、

$$\sigma_c = \frac{\tau_s}{\sin \alpha (\cos \alpha - \mu \sin \alpha)} \dots\dots\dots (2.1)$$

上式において、 μ : 摩擦係数 ($=\tan \phi$)、 σ_c : 圧縮応力、 τ_s : せん断強さ、 ϕ : 内部摩擦角、 α : 破断面と試験片軸となす角。

いま、内部摩擦角(ϕ)とせん断強さ(τ_s)に、 $\phi=30^\circ$ と $\tau_s=30 \text{ kg/cm}^2$ 、 $\phi=35^\circ$ と $\tau_s=90 \text{ kg/cm}^2$ 、 $\phi=40^\circ$ と $\tau_s=130 \text{ kg/cm}^2$ 、 $\phi=50^\circ$ と $\tau_s=150 \text{ kg/cm}^2$ 、 $\phi=58^\circ$ と $\tau_s=170 \text{ kg/cm}^2$ 、 $\phi=60^\circ$ と $\tau_s=170 \text{ kg/cm}^2$ と

図-2 圧縮強さと破断角との関係 (試料番号 No. 1~No. 79)

$\tau_s=130 \text{ kg/cm}^2$, $\phi=50^\circ$ と $\tau_s=150 \text{ kg/cm}^2$, $\phi=58^\circ$ と $\tau_s=170 \text{ kg/cm}^2$, $\phi=60^\circ$ と $\tau_s=170 \text{ kg/cm}^2$ の数値をおき, (2.1) 式に従って計算すると 図-2 のような曲線群を描くことができる。図をみると 79 個の試験片はこれらの曲線群によりそれぞれ I, II, III, VI の 4 領域に分けられている。また, これらの領域は, 前述の試験片内の割れ目, 風化の状態で分類した A_s , B_s , C_s , D_s グループの分類とはほぼ一致している。すなわち, A_s グループ試験は ($\phi=30^\circ$, $\tau_s=30 \text{ kg/cm}^2$) $\sim$ (35° , 90 kg/cm^2), B_s グループは (35° , 90 kg/cm^2) $\sim$ (40° , 130 kg/cm^2), C_s グループは (40° , 130 kg/cm^2) $\sim$ (50° , 150 kg/cm^2), D_s グループは (50° , 150 kg/cm^2) $\sim$ (58° , 170 kg/cm^2) の曲線で囲れる領域内にある。なお, 図-2 は摩擦係数 (μ) の代りに内部摩擦角 (ϕ) を用いている。

上述のように, 内在する割れ目面に沿って破壊する岩石試料の圧縮強さは岩石自体の強さというよりはむしろ, 割れ目をつなぎとめている分離面自体の強さとすべきであると考えられる。

割れ目が明瞭でない比較的均質な岩石試料では, 岩石の内部摩擦角を ϕ とすると, 破断角 α と ϕ との間には次に示す関係がある。

$$\alpha = \frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2} \dots\dots\dots (2.2)$$

(2.2) 式によると, $\phi=30^\circ$ の試験片では $\alpha=30^\circ$, $\phi=60^\circ$ の試験片では $\alpha=15^\circ$ で破壊を生じる。しかし, 割れ目のある試験片では割れ目面で破壊が起こり, 割れ目の強さが同じでも割れ目面の角度によって圧縮強さが異なる。すなわち, 図-2 よりわかるように, 割れ目のある試験片では, 割れ目面の内部摩擦角を ϕ とすると, 割れ目の角度が $\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2}\right)$ のところにある時に, 最小の圧縮応力で破壊し, 割れ目の角度と $\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2}\right)$ との差が大きくなるにしたがって, 圧縮強さは大きくなる。顕著な割れ目面の角度と $\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2}\right)$ との差がある角度以上になる, すなわち割れ目面の角度が 図-2 の各曲線で囲まれた範囲の外の角度になると, その顕著な割れ目からの破壊は生じていない。これは割れ目の角度と $\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2}\right)$ との差が大きくなると, 割れ目面に沿うせん断に対する抗抗が非常に大きくなるので, その面に沿って破壊せず, 他の割れ目面か, あるいは割れ目面に関係なく, せん断応力が最大の面に沿って破壊するからである。本実験では, 50° より大きいあるいは 5° より小さい角度の割れ目に沿う破壊は生じていない。

割れ目のある岩石試験片が割れ目に沿って破壊する場合

合は, 岩石の圧縮強さは岩石自体の強度というよりは, むしろ割れ目をつなぎとめている分離面自体の強度と考えるべきである。割れ目のある岩石試料の圧縮強さは割れ目状態 (頻度, 結合度, 幅, 角度) によって異なり, 割れ目のある岩石の圧縮強さは, (2.1) 式より次式が算定される。

$$S_c = \frac{\tau_s}{\sin \beta (\cos \beta - \mu \cdot \sin \beta)} \dots\dots\dots (2.3)$$

ここに,

S_c : 圧縮強さ

τ_s : せん断強さ

μ : 内部摩擦係数 ($\mu = \tan \phi$)

ϕ : 内部摩擦角

β : 割れ目と荷重方向とのなす角 ($5^\circ < \beta < 50^\circ$)

(2.3) 式に示すように, 割れ目方向の強度は割れ目面のせん断強さ τ_s と内部摩擦角によって表わされ, 新鮮で割れ目がない試験片の圧縮強さが $1200 \sim 1400 \text{ kg/cm}^2$ 程度の岩石の場合, この岩石に割れ目があると, 割れ目方向の強度は $\tau_s=30 \sim 170 \text{ kg/cm}^2$, $\phi=30^\circ \sim 60^\circ$ で, 図-2 の曲線で囲れた範囲内にあり, 強度によって I $\sim$ IV に分類される。I $\sim$ IV ($A_s \sim D_s$) の各分類段階の割れ目状態は表-1 に示すようである。

割れ目の角度と強度との関係については, 割れ目の角度 β が $\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2}\right)$ の時最小の圧縮強さとなり, β と $\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2}\right)$ との差が大きくなるにしたがって, 圧縮強さは大きくなる。

中生代の頁岩からの試験片 No. 80 $\sim$ 99 については次の試験結果が得られた。すなわち, 層理面と試験片軸の方向とが平行な試験片 (表-2 のア, イ) の平均圧縮強さは 2800 kg/cm^2 , 平均破断角は 7° であるが, 層理面と試験片軸の方向とが直交している試験片 (表-2 のウ, エ) の平均圧縮強さは 2000 kg/cm^2 , 平均破断角は 9° となっている。No. 80 $\sim$ No. 99 の試験片の層理面は密着しているので, 表-1 の D_s に分類される密堅硬な岩石であり, 層理面からの破壊は生じていないが, 層理の存在は岩石の強度に多少影響を与えていると考えられる。

2.2.2 割れ目のある岩石試験片の弾性波伝播特性

岩盤内に存在する割れ目数, 割れ目角度, 風化の程度は, 岩盤内を伝播する弾性波速度に影響を与えることおよび, 岩石試料でも同じように割れ目状態によって試験片内を伝播する弾性波速度が異なることはすでに報告されている^{11), 15)}。本研究においても, No. 1 $\sim$ No. 79 の各試験片の弾性波速度と 表-1 に示す割れ目状態による

表-2 試験片の長さおよび層理の方向による速度と圧縮強度の変化
(試料番号 No. 80~No. 99)

(1) 層理に平行な場合								
供試体の分類	供試体の寸法 (平均)		個数	弾性波速度 (平均) (km/sec)	低下率 (%)	圧縮強度 (平均) (km/sec)	低下率 (%)	長さ/直径
	長さ (cm)	直径 (cm)						
ア	4.71	2.37	5	6.53	2.9	2,840	0.2	2
イ	7.06	2.35	5	6.34		2,770		3

(2) 層理に直角な場合								
供試体の分類	供試体の長さ (平均)		個数	弾性波速度 (平均) (km/sec)	低下率 (%)	圧縮強度 (平均) (km/sec)	低下率 (%)	長さ/直径
	長さ (cm)	直径 (cm)						
ウ	4.75	2.38	5	6.15	6.8	2,120	9.0	2
エ	7.00	2.34	5	5.73		1,930		3

(3) 層理の方向による速度及び圧縮強度 (破断角) の変化						
層理との関係	個数	弾性波速度 (平均) (km/sec)	低下率 (%)	圧縮強度 (平均) (kg/cm ²)	低下率 (%)	破断角 (平均) (度)
平行 (ア, イ)	10	6.43	7.6	2,800	27.8	7.0
垂直 (ウ, エ)	10	5.94		2,020		9.0

表-3 割れ目の状態と弾性波速度
(試料番号 No. 1~No. 79)

状態	個数	弾性波速度 (km/sec)
A _s	30	5.14
B _s	17	5.38
C _s	20	5.53
D _s	12	5.61

分類 A_s, B_s, C_s, D_s とを対比すると, 表-3 のように割れ目数が多くなるか, あるいは割れ目面の結合度が低くなるに従って, 試験片内を伝播する弾性波速度が低下している傾向がみとめられる。

本研究では岩石試験片の割れ目頻度を求める試みとして, 次に述べる試験を行なった。すなわち, 前述の No.

80~No. 99 の 20 個の頁岩試験片について弾性波速度を測定し, 表-2 に示すような結果を得ている。各試験片の弾性波速度を比較すると, 表-2 の (1) の弾性波速度測定方向が層理に平行な場合, (イ) グループの弾性波速度は (ア) グループのそれよりも 2.9% 低下しており, また (2) の層理に直角な場合, (エ) グループは (ウ) グループより 6.8% 低下している。なお, (イ), (エ) グループの試験片長は (ア), (ウ) グループのそれより約 3/2 倍長くとしている。これは試験片長が長い程, 弾性波速度が低下することを示すものであり, この理由として, 試験片長が長くなり, 試験片内に数えられる割れ目数が多くなるためと理解される。また一方, 層理方向と弾性波速度測定方向との関係において, 層理方向と速度測定方向とが直交している (ウ), (エ) グループは, 割れ目方向と速度測定方向とが平行な (ア), (イ) グループ

プに対して7.6%の速度減を示している。これは、弾性波が通過する割れ目数は(ウ)、(エ)グループの方が(ア)、(イ)グループより多いためと考えられ、この現象は割れ目数が弾性波速度に影響を与えることを示すものである。

表-2の(ウ)グループの試験片の割れ目数を基準にとり、これを1とし、他のグループの試験片の割れ目数はこれらの試験片長と(ウ)グループの試験片長との比、すなわち、相対割れ目数(n)であらわすことにすると、相対割れ目数(n)と弾性波速度との間には図-3に示される関係がみつめられる。なお、これらの試験片を採取した岩盤の弾性波速度は5.0 km/sである。これらの測定値から、相対割れ目数(n)と弾性波速度(V)との関係は(2.4)式によって示されることが考えられる。

$$V = a \cdot \exp(-bn) + v \quad \dots\dots(2.4)$$

上式において、 a 、 b は岩盤状態によってきまる常数、 v は現場測定によって求められる岩盤の弾性波速度である。また図-3に示される関係を(2.4)式について求めると次式のようになる。

$$V = 2.6 \cdot \exp(-0.81n) + 5.0 \quad \dots\dots(2.5)$$

図-3 割れ目による弾性波速度の低下
(試料番号 No. 80~No. 99)

3. 割れ目岩盤の力学的性質

3.1 岩盤と岩石試験片との弾性波速度の比較

3.1.1 坑道内における弾性波速度の測定

著者は施工中の約100箇所のトンネル内で掘さく後3~6ヶ月経た時期に坑内弾性波測定(1箇所のトンネル

図-4 坑内弾性波探査測定例(金山斜坑側壁)

における測定区間は 30~100 m) を行なって、岩盤の弾性波速度 (P 波) を測定した。同時に S 波速度も測定し、かつ測定区間で採取した岩塊から岩石試験片を作製して、弾性波速度、一軸圧縮強さ、圧裂強さなどの測定を行なった。また測定区間の地質状態、施工状態を調査した。これらの測定結果から、地質状況と弾性波速度との関係、岩盤の力学的性質を解明した。

測定は坑道内で切羽後方 30~300 m 間に測線を設定して、側壁に受信器を 2~5 m の等間隔に設置し、爆破によって生じた弾性波をキャッチするもので、その結果から走時曲線を求め、これを解析して岩盤の弾性波速度を求めた。図-4 は山陽新幹線新関門トンネル金山斜坑内における坑内弾性波速度測定の結果を示したものである。

3.1.2 岩盤の弾性波速度と地質状態

岩盤の強度あるいは風化、割れ目、破碎の程度などは弾性波速度と密接な関係があるといわれている^{15)~17)}。

岩盤の風化、固結、割れ目、破碎などの状態と弾性波

速度との関係を求めるため、まず地質条件を表-4 に示すように、A~F に分類した。この分類は風化、破碎作用を受けていない新鮮な岩盤から採取された岩石試料の弾性波速度、強度、比重などがほぼ同じものを同じグループとしている。坑道内で岩盤の弾性波速度測定、坑内地質踏査、測定区間から採取した岩石試料の試験などを行なった結果から判定すると、風化、破碎作用を受けておらず、新鮮で割れ目の少ない岩盤の弾性波速度 (v_c) は、表-4 に示すように、A, B 岩質; 4.8~6.0 km/s, C 岩質; 4.2~5.5 km/s, D 岩質; 3.6~4.5 km/s, E 岩質; 2.0~3.5 km/s となっており、A 岩質の圧縮強さは 1200~2000 kg/cm² 程度、E 岩質は固結度低く、岩石試料の圧縮強さは 50~300 kg/cm² 程度である。F 岩質の圧縮強さは 50 kg/cm² 以下であり、その弾性波速度は 2.8 km/s 以下で、含水状態による速度変化が大きく、飽和含水すると速度は大きくなる。

岩盤の風化、固結、割れ目、破碎などの状態と岩盤の弾性波速度 (v) との関係を A~F の各グループ別に求

表-4 岩 質 分 類

岩質分類	岩 種	弾性波速度 v_c (km/s)
A	古生代、中生代の堆積岩。多孔質の火山岩を除く火成岩。変成岩。	4.8~6.0
B	剝離著しい変成岩。薄層理の発達した古生代、中生代の堆積岩。	4.8~6.0
C	中生代の固結度の低い堆積岩。多孔質な火山岩。古第三紀の硅化砂岩、溶結凝灰岩など。	4.2~5.5
D	古第三紀の堆積岩。新第三紀下部の凝灰角礫岩。	3.6~4.5
E	新第三紀~洪積期の堆積岩。	2.0~3.5
F	洪積期~沖積期の堆積岩。	2.8 以下

(注) 弾性波速度 (v_c) は風化、破碎作用を受けていない、割れ目の少ない岩盤の測定値である。

図-5 調査トンネルの岩盤弾性波速度と岩盤状態

めると、図-5 が得られる。同図は横軸に岩盤の弾性波速度、縦軸に岩盤の弾性波速度に $(v/v_0)^2$ を乗じた値をとっており、岩盤は風化が進む程、固結度が低い程、割れ目が多い程、破碎が進む程弾性波速度は低下し、岩質および岩盤の弾性波速度から岩盤状態すなわち岩盤の力学的性質がほぼ推定できる。

3.1.3 岩石試験片と岩盤との弾性波速度の比較

岩盤とその岩盤より採取した岩石試験片との弾性波速度の関係を100個所のトンネル内の測定から求めたのが図-6である。図-6から岩盤の弾性波速度(v)と岩石試験片の弾性波速度(V)との比 $k=v/V$ を地質別に分類してまとめ、表-5に示す。 k の値は0.55~1.30の間にあるが、0.70~0.85の間が最も多く、全試験個数の

44%を示し、 $k>1$ に属するものは少なく、全試験個数の8%である。0.55以下の k が存在しないのは、 $k<0.55$ では岩盤は割れ目が非常に多いか、あるいは破碎帯となっていて、長さ2~3cm以上の棒状の試験片が作製できないからである。地質別に見ると、火成岩、古生代および中生代の堆積岩、変成岩の大部分は $0.7 \leq k < 1$ の間に、新生代の堆積岩では $k \approx 1$ のものが多い。

つぎに、弾性波速度比 k の値のもつ意義について考察する。

(a) $1 < k < 1.3$ の場合

一般に、 k の値は1より小さい。すなわち、普通岩石試験片の速度の方が岩盤の弾性波速度より大きいが、逆の場合もあり、本研究ではその割合は全試験個数の約

図-6 岩盤弾性波速度と試料弾性波速度との比較

表-5 $k=v/V$ の値

地 質	$k=v/V$					計
	$1.3 \geq k > 1$	$k \approx 1$	$1 > k \geq 0.85$	$0.85 > k \geq 0.70$	$0.70 > k \geq 0.55$	
火 成 岩	4 (10%)	2 (5%)	12 (32%)	18 (47%)	2 (5%)	38
堆積岩(古 生 層)	0	0	4 (20%)	15 (75%)	1 (5%)	20
堆積岩(第三紀層)	4 (10%)	17 (43%)	10 (25%)	7 (2%)	1 (2%)	39
変 成 岩	1 (10%)	0	0	7 (70%)	2 (20%)	10
計	9 (8%)	19 (18%)	26 (24%)	47 (44%)	6 (5%)	107

8% となっている。 $k > 1$ なる場合の岩盤状態を考察すると、

(i) 岩石試験片に圧縮荷重を加えつつ、弾性波速度を測定すると、圧縮荷重の増加に伴い弾性波速度を増すことは、すでに知られている^{18), 19)}。これら基礎研究から考察すると、地圧を受けている岩盤内の弾性波速度は、その岩盤より採取した岩石試料のそれより大きい場合もあり得る。すなわち、岩盤内より岩石試料を大気中に採取することにより、応力が解放され、あるいは膨張するような岩石試料はその組織がゆるみ、弾性波速度の低下をきたし、 $k > 1$ となる。

(ii) 異方性の著しい岩石では、試験片の弾性波速度は方向によって異なり、このような場合は試験片の測定方向によって試験片の速度の方が岩盤の速度より小さいことがある。

(iii) 含水率の高い岩石

著者がトンネル内で採取した岩石について、乾燥状態と飽和含水状態の縦波速度を測定した結果では 図-7 に示すようで、一般に飽和含水すると弾性波速度は増加している。しかし、固結度の低い(弾性波速度が小さい)岩石では逆に含水すると弾性波速度が低下しているもの

があり、これは含水によって固結度が低下するためと思われる。

飽和含水状態の弾性波速度は空隙の状態によって決まり、図-7 よりわかるように、空隙の少ないすなわち、弾性波速度が大きい岩石程含水による速度の増加は少ない。飽和含水すると、弾性波速度が大きくなるのは、岩石の中の空隙を水(弾性波速度; 1.45 km/s)で満たしているのと、空気(弾性波速度; 0.33 km/s)で満たしているのとの差によるものと考えられ、含水による速度の増加は最大 1.45 km/s で、水の数値とほぼ同じになっている。乾燥状態および飽和含水状態の弾性波速度 V_d , V_w の間には、図-7 から次の関係が存在する。

$$V_d \leq V_w \leq 0.7 V_d + 2.5 \text{ (km/s)} \quad \cdots (3.1)$$

ただし、 $3.5 \leq V_d \leq 7.0$

従って、含水率の高い岩石を採取して自然状態に放置して置くと試料の速度の方が低下する場合がある。

(b) $k \leq 1$ の場合

北陸本線親不知トンネル、北海道新幹線青函トンネル、東北新幹線第2有壁トンネル、山陽新幹線西庄トンネル、新関門トンネル、上越本線新清水トンネルおよび土讃線大志呂トンネルで、坑内における弾性波速測定、速度測

図-7 含水による弾性波速度 (P波) の変化

表-6 割れ目頻度と $k=v/V$ との関係

トンネル名	岩盤弾性波速度 v (km/s)	試料弾性波速度 V (km/s)	$k=v/V$	割れ目の頻度 (本数/m)	地 質
第 2 有 壁	2.00	2.00	1.00	0.1~0.5	凝 灰 岩
西 庄	4.40	4.40	1.00	0.5~0.8	流紋岩質凝灰岩
青 函	3.10	3.20	0.97	0.5~0.8	シ ル ト 岩
親 不 知	3.20	3.60	0.88	0.8	凝 灰 角 礫 岩
新 清 水	5.30	6.20	0.85	0.8~1.2	花崗せん緑岩
親 不 知	4.65	5.75	0.81	2	安山岩質凝灰岩
新 浅 水	4.20	5.60	0.75	3~4	花崗せん緑岩
大 志 呂	4.20	5.70	0.73	2~3	緑 泥 片 岩
新 関 門	4.30	6.00	0.71	4~5	チャート
大 志 呂	3.60	5.70	0.63	5~6	緑 泥 片 岩

定区間の割れ目状態の調査および岩石試料の弾性波速度の測定を行なって、 k と割れ目の単位長あたりの数すなわち割れ目頻度との関係を調査した。調査結果をまとめると、表-6 のようになる。7 トンネルの測定結果を検討すると、 $k \approx 1$ の場合は割れ目が非常に少なく、塊状であり、 k の値が小さくなるにつれて、割れ目の数が多くなっていることが注目される。

2.2.2 で述べたように、岩石試験片は其中に存在する割れ目の風化が進む程、弾性波速度の低下が大きく、岩盤もまた同じことが考えられ、弾性波が岩盤中に存在する割れ目を伝播する際の弾性波速度は割れ目状態によって異なり、50~250 m/s の範囲にある。

上述から、 k の値は割れ目の多少、幅、風化度、空隙率、強度に関係し、割れ目状態を表わす指数と考えられ、以後 k を割れ目指数と呼ぶことにする。

3.2 割れ目指数と割れ目状態との関係

3.1.3 で述べたように、割れ目指数 k が 1 に近いと割れ目は非常に少なく、マッシュであり、 k が小さくなる程割れ目は多くなり、 k の値によって割れ目の頻度が異なる。東北新幹線盛岡~青森間、北陸新幹線長野~富山間、中央新幹線甲府~飯田間、鹿児島新幹線熊本~鹿児島間のトンネルの地質調査で実施したボーリングについて、ボーリング孔内速度検層、ボーリングコアの弾性波速度測定およびボーリングコアの観察による割れ目頻度の算定を行なって、岩盤弾性波速度 (v) と、試料弾性波速度 (V) との比 k および割れ目の頻度 n (数/m) を求め、その結果をプロットしたのが 図-8 で、同図には

図-8 割れ目指数と割れ目頻度との関係

表-7 の値も含まれている。調査した地点の地質は、花崗岩、せん緑岩、はんれい岩、蛇紋岩、安山岩、第三紀の泥岩、砂岩、凝灰岩および凝灰角礫岩、中生代の頁岩、古生代の砂岩、粘板岩、ホルンフェルスおよび結晶片岩である。

図-8 で、各プロットを包絡する範囲を求めると、ほぼ同図に示した2曲線がえられ、これらの曲線は $n = \frac{5.0}{(k+0.1)^2} - 4.0$ と $n = \frac{5.0}{(k-0.1)^2} - 4.0$ で表わされる。図-8 から、 k が小さくなると、割れ目の単位長 (m) 当

りの数 (n) は多くなっている。同図で n と k との関係が曲線で囲まれた範囲内にあり、幅を持っているのは、割れ目の幅、風化度、空隙率、強度などの状態が割れ目によって違い、これらの状態の違いによって割れ目を伝播する弾性波の速度が異なるためである。

図-8 より、岩盤中の割れ目の頻度および割れ目状態と割れ目指数との間には次式で示すような関係があり、 n は k^2 に反比例して多くなる。

$$n = \frac{5.0}{(k+m)^2} - 4.0 \quad 1 \geq k \geq 0.4 \quad \dots (3.2)$$

m は割れ目の幅、風化度、空隙率、強度などの状態を表わす係数で、図-8 より、 $-0.1 \sim +0.1$ の間にある。 k が 0.5 より小さくなると、割れ目は非常に多くなり ($n > 20$)、割れ目の数を観察することは困難であり、この場合の岩盤は破碎帯か風化著しい変質帯である。

3.3 割れ目指数と岩盤の力学的性質との関係

3.3.1 理論式からの検討

一般に岩盤内を伝播する縦波の弾性波速度は次式によって与えられている。

$$v = \sqrt{\frac{1-\nu}{(1-\nu)(1-2\nu)} \cdot \frac{E}{\rho}}$$

上式において、

- v : 弾性波速度
- ρ : 岩盤の密度
- ν : 岩盤のポアソン比
- E : 岩盤の縦弾性係数

いま、割れ目岩盤の縦弾性係数および弾性波速度を E_0 , v 、割れ目のない岩石実質部の縦弾性係数および弾性波速度を E_s , V とし、 ρ , ν を割れ目の有無にかかわらず一定であるとする、上式より、

$$E_0 = E_s \left(\frac{v}{V} \right)^2 = E_s \cdot k^2 \quad \dots (3.3)$$

(3.3) 式より、割れ目のある岩盤の弾性係数は岩石試料 (割れ目がない) の弾性係数に割れ目指数の2乗を乗

じたものに等しくなる。さらに、岩石の縦弾性係数と圧縮強さとはかなり良い相関性があるので、岩盤の ρ , ν が割れ目の有無にかかわらずほぼ一定であると仮定すると、割れ目のある岩盤の強度は岩石試料の強度に k^2 を乗ずることによって得られることとなる。

3.3.2 割れ目のある岩石試験片の実験結果からの検討

第2章で述べた古生代の砂質粘板岩の79個の試験片の割れ目の圧縮強さを図-2、表-1によって、 A_s ; 100~300 kg/cm², B_s ; 400~600 kg/cm², C_s ; 700~900 kg/cm², D_s ; 900~1300 kg/cm² のように4分類すると、 $A_s \sim D_s$ の各岩石試験片を採取した岩盤の弾性波速度 v はボーリング孔内の速度検層および地上弾性波探査から表-7に示すようである。表-7の岩石試験片の弾性波速度 V は表-3による。割れ目状態 $A_s \sim D_s$ について、割れ目指数の2乗 $k^2 = \left(\frac{v}{V} \right)^2$ を求め、次に新鮮な割れ目のない岩石試験片の圧縮強さに割れ目指数の2乗を乗じて $S_{fc} = k^2 \cdot S_{sc}$ を算定すると表-7のようになる。ただし、割れ目のない新鮮な岩石試験片の圧縮強さ S_{sc} は図-2に示した試験片の圧縮強さの最高値 1300 kg/cm² としている。表-7で、割れ目指数から算定した圧縮強さ $S_{fc} = k^2 \cdot S_{sc}$ と試験片の試験結果の割れ目面の圧縮強さ S_0 とはほぼ一致し、割れ目のある岩盤の圧縮強さを試験片の割れ目の圧縮強さとする、割れ目指数から算定した岩盤圧縮強さは、ほぼ割れ目を考慮にいれた岩盤の圧縮強さと同じである。

3.3.3 原位置岩盤試験からの検討

割れ目指数から算定した岩盤強度と、原位置岩盤試験による岩盤強さとを比較検討するため信越本線米山・笠島間第1米山トンネルの米山方坑口付近で、坑内における弾性波速度測定、ジャッキ試験、岩石試料の弾性波速度測定ならびに強度試験を行なった。試験区間の地質は新第三紀の西山層に属する風化泥岩で、岩盤の弾性波速度 $v = 1.5$ km/s、岩石試料の弾性波速度 $V = 2.0 \sim 1.9$

表-7 割れ目指数から推定した岩盤強度

割れ目の状態	岩盤の弾性波速度 v (km/sec)	岩石試料の弾性波速度 V (km/sec)	$k^2 = \left(\frac{v}{V} \right)^2$	割れ目のある岩石試料の圧縮強さ S_0 (kg/cm ²)	割れ目指数から求めた圧縮強さ $S_{fc} = k^2 \cdot S_{sc}$ (kg/cm ²)
A_s	1.4~2.3	5.14	0.07~0.20	100~300	91~260
B_s	3.0~3.6	5.38	0.30~0.43	400~600	390~560
C_s	4.0~4.5	5.53	0.51~0.65	700~900	663~845
D_s	4.8~5.2	5.61	0.73~0.86	900~1300	950~1120

$S_{sc} = 1300$ kg/cm²

図-9 荷重-沈下曲線

km/s, 岩石試料の圧縮強さ $S_{s0}=30\sim50\text{ kg/cm}^2$ である。

ジャッキ試験は、坑道内の 7 箇所 (No. 1~No. 7) で、径 30 cm の剛体載荷板を介して、最大荷重 50 t の油圧ジャッキで階段荷重法により载荷して行なった。载荷速度は $5\text{ kg/cm}^2/\text{min}$ とし、ダイヤルゲージは 2 個設置した。試験結果、図-9 に示すような荷重-沈下曲線が得られ、岩盤の圧縮強さ S_0 は $15\sim25\text{ kg/cm}^2$ と推定される。なお、No. 2 は粘土層を挟んだ地層で、異常値と見なし除外した。

これらの試験結果を用いて、岩石試料の圧縮強さに割れ目指数の 2 乗を乗じて、岩盤圧縮強さを求めると、その値は $18\sim29\text{ kg/cm}^2$ の範囲にあり、ジャッキ試験による岩盤の圧縮強さ $15\sim25\text{ kg/cm}^2$ とほぼ一致する。

3.3.4 ま と め

以上述べた事項から、割れ目指数の 2 乗は割れ目岩盤の強度を示す係数と考えられ、新鮮な割れ目のない岩石試験片の強度 (S_s) に割れ目指数 (k) の 2 乗をかけて算定した強度は、割れ目のある岩盤の強度 (S_f) を表わすものと推定される。

$$S_f = S_s \cdot k^2 \dots\dots\dots (3.4)$$

4. 結 言

本研究は工事着工前の地質調査から得られる岩盤の弾性波速度と岩石試料の弾性波速度および強度とによる、割れ目・岩盤の性状・強度の算定の解明を目的として行なった。そのため、約 100 箇所の施工中のトンネル内で、弾性波探査、地質踏査、岩盤強度試験、盤圧測定、施工結果の調査およびトンネル内やボーリングコアから採取した岩石試料について岩石試験を行ない、その結果から岩盤および岩石試料の弾性波速度と割れ目岩盤の性状、強度との関係を述べた。

岩盤に存在する割れ目の性状 (割れ目の頻度、幅および結合度) は割れ目指数の 2 乗すなわち、岩盤と岩石試料との弾性波速度との比の 2 乗 $(v/V)^2$ から推定され、割れ目指数と割れ目の性状との間には (3.2) 式に示すような関係がある。割れ目指数の 2 乗 k^2 は、割れ目岩盤の強度に関する係数と考えられ、新鮮な割れ目のない岩石試験片の強度 S_s に k^2 を乗じることによって、割

れ目岩盤の強度 S_f が算定される。

$$S_f = k^2 \cdot S_s \dots\dots\dots (3.4)$$

参 考 文 献

- 1) H. Motoyama & R. C. Hirschfeld: The Effect of Joint Configurations on the Strength and Deformability of Model Rock Masses, S. M. Thesis at M.I.T., June, 1971, pp. 183~196.
- 2) 赤井浩一, 山本和夫, 有岡正樹: 結晶片岩の構造異方性に関する実験的研究, 土木学会論文報告集, 170, 1969, pp. 23~36.
- 3) E. T. Brown & D. H. Trollope: Strength of a Model of Jointed Rock, Proc. of ASCE, J., Soil Mech. & Found. Div., No. SM2, 1970, pp. 685~704.
- 4) M. D. Ruiz: Some Considerations Regarding the Shear Strength of Rock Masses, Sympo. on Rock Mech. of ISRM, Madrid, 1968, pp. 159~169.
- 5) J. C. Jaeger: The Behavior of Closely Jointed Rock, Proc. of 11th Sympo., Rock Mech., Berkeley, 1970, pp. 57~58.
- 6) T. Kawamoto: Macroscopic Shear Failure of Jointed and Layered Brittle Media, Proc., 2nd Cong., ISRM, 1970, pp. 215~220.
- 7) J. L. Serafim: Rock Mechanics Considerations in the Design of Concrete Dams, State of Stress in Earth's Crust, 1964, pp. 611~650.
- 8) 高橋幸蔵, 高田志郎, その他: 孔内測定を利用した岩盤調査, 土と基礎, Vol. 21, No. 3, 1973, pp. 15~23.
- 9) A. M. Muir Wood: Tunnels for Road and Motorways, The Quarterly Journal of Engineering Geology, Vol. 5, No. 1 & 2, 1972, pp. 111~126.
- 10) B. Maidl: Klassifizierung der Gesteine nach der Bohrbarkait, Rock Mechanics, 4, Ht1, June, 1972, pp. 24~25.
- 11) H. K. Helfrich, B. Hasselström & B. Sjögren: Complex Geoscience Investigation Programmes for Siting and Control of Tunnel Projects. The Technology and Potential of Tunnelling, Vol. 1, N. G. W. Cook, Joannesbourg, 1970, pp. 1~5.
- 12) G. Vogler und K. Thoma: Die Überwachung von Bruchvorgängen im Gebirge mit Programmierter Digitaler Eigenimpulsregistrierung über Tage, Bergakademie, Vol. 19, 1967, pp. 514~518.
- 13) 小林良二: ボアホール内挿入超音波パルス式検知計による岩盤内割れ目の分布について, 第 7 回岩盤力学に関するシンポジウム, 1972, 02, pp. 71~74.
- 14) 君島博次: 岩盤の破壊特性に関する現地試験について, 岩の力学国内シンポジウム, 1964, pp. 66~77.
- 15) J. H. Scott, etc.: The Relationship of Geophysical Measurements to Engineering and Construction Parameters in the Straight Creek Tunnel Pilot Bore, Colorado, Ins. Journ., Rock Mech. Mining Sci., Vol. 5, 1968, pp. 1~30.
- 16) I. G. Iliev: An Attempt to Estimate the Degree of Weathering of Intrusive Rocks from their Physicomechanical Properties, Proc. Ist. Cong., ISRM, Vol. 1, 1966, pp. 109~114.
- 17) 斉藤徳美, 河部 司, 九里尚一: 火山岩の風化に関する研究〔1〕, 物理探鉱, 第 27 巻, 第 1 号, 1974, 02, pp. 3~15.
- 18) F. Rummel: Changes in the P-Wave Velocity with Increasing Inelastic Deformation in Rock Specimens Under Compression, Proc. 3rd Cong. of I.S.R.M. (2), 1974, pp. 517~523.
- 19) M. S. King: Wave Velocities in Rocks as a Function of Changes in Over burden Pressure and Pore Fluid Saturants, Geophysics, Vol. 31, No. 1, 1966, pp. 50~73.
- 20) J. Geertsma & D. C. Smit: Some Aspects of Elastic Wave Propagation in Fluid-Saturated Porous Solid, Geophysics, Vol. 26, No. 2, 1961, pp. 169~180.
- 21) 井上正康, 大見美智人: 吸水による岩石中の弾性波伝播速度の変化について, 物理探鉱, 23 巻, 4 号, 1970, pp. 1~9.

(昭和 54 年 8 月 23 日受理)