

大成建設(株) 正会員 ○山 本 卓 也

同 上 岩 野 政 浩

同 上 里 優

同 上 亀 村 勝 美

1. はじめに

弾性波速度は、測定が容易でかつ場所と時間をとらないため、地盤の地質構造や断層などの調査にしばしば用いられており、わが国の岩盤分類の中で、岩盤の良好度を示す重要な指標として古くから採り入れられている。最近では、岩盤内の不連続面の分布と弾性波伝播挙動との関連性について、主として実験的に考察が進められており、弾性波速度の値を不連続性岩盤の力学・水理学的特性を表す指標として用いる可能性が検討されつつある。そこで、本研究では、弾性波速度が不連続面の存在により変化することに着目し、このような不連続面の性状と弾性波伝播挙動の基本的な関係を明らかにすることを目的とし、理論的考察を行った。さらに、与えられた不連続面の分布に対して、弾性波速度の計測値が得られた場合に、弾性波速度の遅れから不連続面の方向分布(どの方向に不連続面が卓越しているか)を表す関数を、ステレオロジーの考え方をを用いて推定する手法について検討した。また、この手法の妥当性を検証する意味で、幾つかの数値シミュレーションを行った。

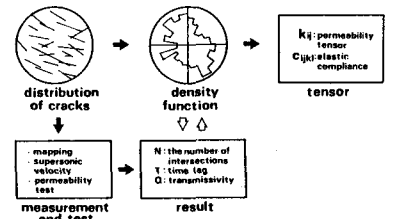
2. 不連続面の性質と弾性波速度の関係

図-1に岩盤の不連続面に関する1つの評価方法を示す。対象とする不連続面に対して、直接、密度関数を算定する代わりに、たとえば弾性波速度の計測値などから、何らかの変換により不連続面の密度関数を推定しようとするのが、この手法の流れである。この過程では、不連続面の性質と弾性波伝播挙動の基本的な関係が必要となる。そこで、まず、不連続面の存在による弾性波速度の変化について理論的な考察を加えた。ここでは、岩盤内を伝播する回折波と透過波の2種類の波を対象とする。

1) 回折波の場合 弾性波は、キ裂が開口しているような場合、キ裂を回り込むようにして通過する。このときの弾性波速度の遅れについては、理論解が得られている。たとえば、図-2のように θ だけ傾いた長さ $2l_0$ のキ裂に平面弾性波が入射した場合を考えると、図中の①および②の経路を通して回折するが、経路②が①に比べて短いので、結局キ裂の存在による弾性波の到達時間差は、経路②と③の違いにより生ずる。いま、キ裂の中心から C だけ離れた点での弾性波の時間遅れを Δt とすると、

$$\Delta t = \frac{l_0}{V_p} \left\{ \sqrt{\cos^2 \theta + (C/l_0 + \sin \theta)^2} - (C/l_0 + \sin \theta) \right\} \quad (1)$$

が成り立つ。上式は、キ裂の中心からの距離が長くなればなるほど、また、キ裂の傾きが大きくなればなるほど、弾性波の遅れは小さくなることを示す。有限要素法により、この遅れの様子を調べたものが、図-3である。しかしながら、原位置の岩盤では、地表面付近の風化部や、空洞周辺の破碎された領域などを除いて、完全にキ裂が開口していることは稀である。一般には、キ裂内に充填物を含んでいたり、応力によりある程度閉じていたりで、このような回折現象は起こりにくく、むしろキ裂を横切って透過してゆく波が支配的であると考えられる。そこで、次に弾性波がキ裂内を透過してゆく



(1) 図-1 岩盤の不連続面の一評価方法

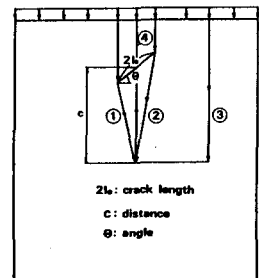


図-2 弾性波の伝播経路

場合について検討した。

ii) 透過波の場合 透過波は、キ裂内に粘土や水などの介在物が存在する場合に相当し、弾性波が透過波としての性質を示す場合は、弾性波の時間遅れを理論的に求めることが難しく、ここでは有限要素法を用い、これを調べてみた。

有限要素法では、キ裂をジョイント要素でモデル化した。ジョイント要素では、面の変形と面に発生する応力は次のように関係づけられる。

$$\sigma_n = K_n u_n \quad ; \quad \tau = K_s u_s \quad (2)$$

ここに、 σ_n, K_n, u_n は面に垂直な方向の応力、剛性、変形である。また、 τ, K_s, u_s は面に平行な方向の応力、剛性、変形である。 K_n および K_s は面の変形と応力を関係づけているが、それぞれ面の幅 w と弾性定数 E の関数である。すなわち、 $K_n = f(E/w)$ のような形で表現され、たとえば w が小さくなり、あるいは E が大きくなれば K_n, K_s も大きくなる。最初に、この面の剛性を表す K_n, K_s をパラメータとし弾性波速度の遅れと面の剛性との関係を調べた。解析結果を図-4に示す。これより、 K_n, K_s が大きくなると、弾性波速度の遅れが小さくなることがわかる。しかし、 K_n および K_s がある値を超えると、透過波よりもi)で述べた回折波が早く計測点に到達するので、弾性波速度の遅れは一定値に落ち着く。次に、キ裂の角度が弾性波速度に及ぼす影響を調べた。ただし、 K_n および K_s に大きな値を選び、計測点に必ず透過波が到達するようにした。解析結果を図-5に示す。これより、 $\theta = 90^\circ$ の付近を除いて弾性波速度の遅れがほぼ一定値になっていることがわかる。 $\theta = 90^\circ$ の付近では、透過波と回折波が区別できない状態にある。

以上の検討から、透過波の場合の弾性波の遅れは、キ裂面の剛性に依存し、キ裂の角度には無関係であることがわかる。従って、図-6に示すように、回折波が到達しない範囲内では、観測された弾性波速度の遅れは、キ裂の個数と等価であると考えられる。透過の状態を示す主応力図を図-7に示す。

3. 弾性波速度の異質性と不連続面の方向分布

i) 方法論 これまでの考察により、キ裂が存在することによって弾性波速度に遅れが生じ、弾性波速度の遅れが弾性波が通過した走査線上のキ裂の個数を計数したことになることが明らかになった。ここでは、ステレオロジーの手法を用いて、弾性波速度の遅れからキ裂の分布状態を求めることにする。いま、すべてのキ裂を、法線ベクトル n 、面積 A の円板であると仮定すると、 m 方向に弾性波の走査線をランダムに置いた場合、これがキ裂と交わるのは、図-8から分かるように、キ裂の中心が $|m \cdot n| A$ を断面とする円柱状の領域に入るときである。この領域の中には、キ裂密度を ρ 、キ裂の密度関数を $D(n, A)$ として、単位長さあたり、

$$|m \cdot n| \rho A D(n, A) d\Omega dA \quad (3)$$

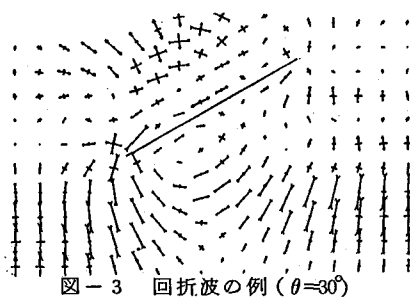


図-3 回折波の例 ($\theta=30^\circ$)

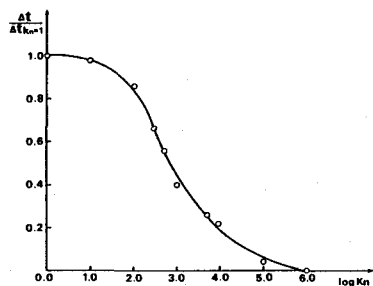


図-4 Δt と K_n の関係

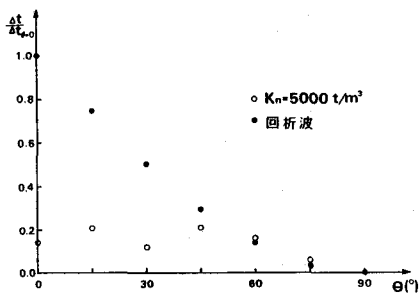


図-5 Δt と θ の関係

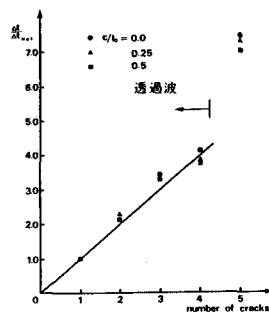


図-6 加算性の検討

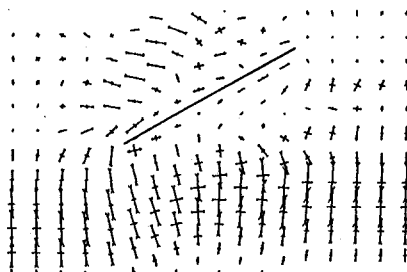


図-7 透過波の例 ($\theta=30^\circ$)

のキ裂が存在し、それだけの交点数が得られる。(3)式をすべての面積を持つキ裂およびすべての方向を持つキ裂について合計すれば、走査線と交わるキ裂の個数の期待値が得られる。これを $N(m)$ とすれば、

$$N(m) = \int_{\Omega} \int_A |m \cdot n| \rho A \cdot D(n, A) dA d\Omega \tag{4}$$

となる。 A についての積分を行うと、

$$N(m) = \int_{\Omega} |m \cdot n| P(n) d\Omega \tag{5}$$

$$P(n) = \int_r \frac{\pi}{4} \rho r^2 D'(n, r) dr \tag{6}$$

ここに、 $P(n)$ は法線ベクトル n を持つキ裂の密度関数である。(5)式は、キ裂の密度関数と走査線上で得られる交点数との変換式と考えられる。これを F で表せば、

$$N(m) = F \cdot P(n) \tag{7}$$

となる。もし、 F の逆変換が存在すれば、

$$P(n) = F^{-1} \cdot N(m) \tag{8}$$

となり、走査線 m 上で得られた交点数より、キ裂の方向分布を表す関数 $P(n)$ を求めることができる。これを、走査線の代わりに弾性波で行うのがこの手法のねらいである。このとき得られるのは、交点数ではなく、弾性波速度の遅れ $T(m)$ であるから、(5)式を参考にして、

$$T(m) = \int_{\Omega} |m \cdot n| Q(n) d\Omega \tag{9}$$

$$Q(n) = \int_r \int_t \frac{\pi}{4} \rho r^2 t E(n, r, t) dt dr \tag{10}$$

となる。ここに、 t は弾性波がこのキ裂に当たったときの時間遅れであり、 $E(n, r, t)$ は、 (n, r, t) なるキ裂の密度関数である。(9)式を逆変換すれば、

$$Q(n) = G^{-1} \cdot T(m) \tag{11}$$

から、キ裂の方向分布を表す $Q(n)$ を求めることができる。(11)式は陽な形で表せないので、一旦 $T(m)$ を球関数展開し、その展開係数にある係数をかけたものと、関数 $T(m)$ の基底関数から $Q(n)$ を構成するという方法をとった。

ii) 計算例 i)で述べた手法の妥当性を検証する意味で、以下の様な手順により数値シミュレーションを行った。

〔ステップ1〕 正規乱数を用い、キ裂を発生させる。

キ裂の分布 (ステレオ投影) 図-9

キ裂の分布 (三次元分布) 図-10

キ裂の分布 (シェード図) 図-11

〔ステップ2〕 あらゆる方向に弾性波による走査線を置き、走査線とキ裂の交差を判定して、単位長さあたりの弾性波の時間遅れを求める。

キ裂と弾性波の走査線 図-12

〔ステップ3〕 デニスネットて球面を離散化し、(11)式によりキ

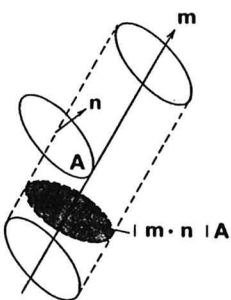


図-8 キ裂と走査線 (模式図)

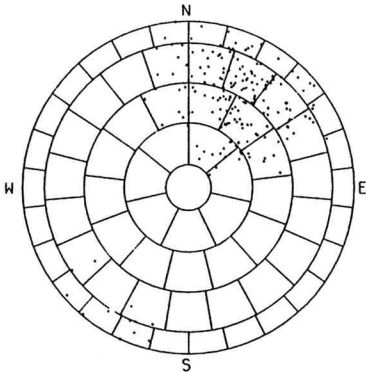


図-9 キ裂の分布 (ステレオ投影)

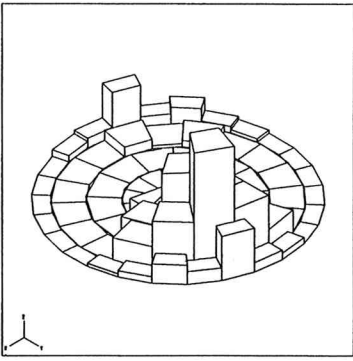


図-10 キ裂の分布 (三次元分布)

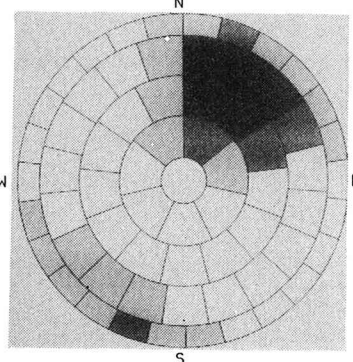


図-11 キ裂の分布 (シェード図)

裂の密度関数を推定する。

キ裂の密度関数（三次元図） 図-13

キ裂の密度関数（シェード図） 図-14

キ裂の密度関数（テンソル表示） 図-15

これらのシミュレーション結果は、走査線上のデータ、すなわち弾性波速度の遅れからキ裂の密度関数を推定してゆく手法の流れを示している。幾つかのシミュレーション結果から、以下のことがわかった。

① 走査線はあらゆる方向に置かれていることが理想的であり、一方向にのみ多く向いていても効果的ではない。

② $T(n)$ を球関数展開し、2次までの展開係数から、 $Q(n)$ を構成したものが与えられたキ裂の方向分布を最も良く表現する。4次以上の展開係数をとっても、誤差が増大してもとのキ裂の方向分布が表現できない。

③ この手法では、開口幅・剛性・弾性波速度の時間遅れ等のキ裂の性質に関する重みづけがなされていないため、キ裂の方向分布の主軸と弾性波速度の異方性の主軸が一致しない可能性がある。岩盤の剛性や透水性を考えた場合、キ裂の方向分布よりも弾性波速度の方がむしろ実際のキ裂の特性を反映すると思われる。

4. おわりに

本研究では、弾性波速度が岩盤内のキ裂の存在によって時間遅れを生じるという現象に着目し、弾性波速度という走査線を置いたときの時間遅れを測定することが、キ裂の個数を計数することと等価であるとして、弾性波速度の遅れからキ裂の方向分布を推定する手法について述べた。この手法における仮定を以下にまとめて示す。

- i) すべてのキ裂を円板で近似する。
- ii) キ裂の剛性は K_n, K_s ともある程度大きく、 $K_n \div K_s$ である。
- iii) 透過波が伝播する状態で、キ裂の個数が弾性波速度の時間遅れと比例関係にある。
- iv) ここで対象とするキ裂は、構造物の規模に比べて小さいが、高い密度で存在するキ裂である。

これらの仮定の中で、特にii)およびiii)は、キ裂そのものの性質にかかわるものであるため、原位置あるいは室内での実測値を蓄積してゆくことにより妥当性を検討しなければならない。

謝辞：数値計算のプログラミングにあたっては、芙蓉情報センターの久保 紳氏にご尽力いただきました。

参考文献

金谷健一：構造異方性によりひずみを決定するステレオロジーの理論、Journal of the Materials Science Society of Japan, Vol. 20, 1984, pp. 223-232

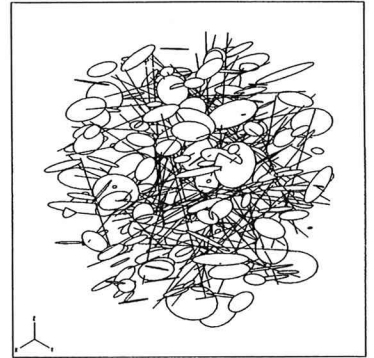


図-12 キ裂と走査線

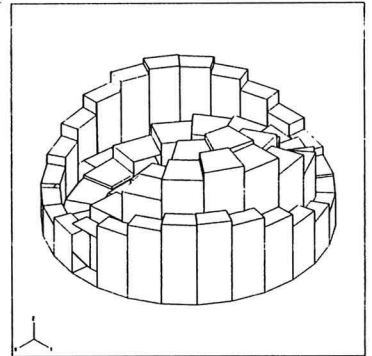


図-13 密度関数（三次元分布）

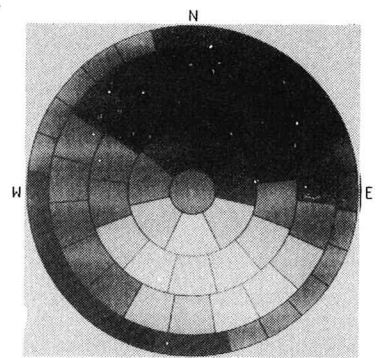


図-14 密度関数（シェード図）

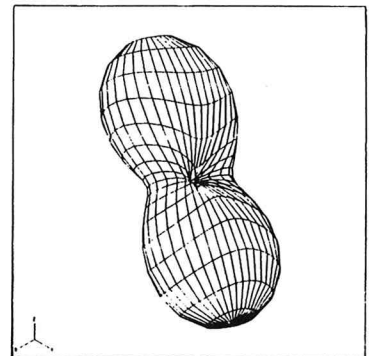


図-15 密度関数（テンソル表示）

(32) The Estimation of Crack Distribution by means of Elastic Wave

Taisei Corp. Takuya Yamamoto
Masahiro Iwano
Masaru Sato
Katsumi Kamemura

ABSTRACT

Seismic survey has been one of the important technique to detect the faults and geological status of the ground. And the velocity of elastic wave is used as the index for rock mass classification.

Recently, the relationship between the time lag of elastic wave and mechanical property of rock mass is studied experimentally. In this paper, the fundamental correlation between the behavior of elastic wave propagation and the characteristics of cracks is clarified and the methodology of transformation from time lag function to density function of cracks.

There exist two types of elastic wave progressing in discontinuous rock. When the elastic wave goes through open cracks, the velocity of elastic wave decreases because of the wave propagation evading cracks. On the other hand, the velocity of elastic wave across intact cracks delays according to the property of filling material, for example clay or water.

In the latter case, the relationship between the time lag of elastic wave $T(m)$ and the density function $E(n, r, t)$ of cracks is given as below.

$$T(m) = \int_t \int_r \int_\Omega |m \cdot n| \frac{\pi}{4} r^2 \cdot \rho t E(n, r, t) d\Omega dr dt$$

Where, $T(m)$: the time lag data per unit length of m -direction scan line, ρ : the density of cracks, $E(n, r, t)$: the density function of cracks with normal vector n , diameter r and time lag t .

Conclusions are summarized as follows.

- (1) The numerical technique of transformation from $T(m)$ to $E(n, r, t)$ is clearly described.
- (2) The second rank tensor of $E(n, r, t)$ shows good accordance with the given distribution of cracks on the following conditions:
 - i) crack is idealized as a disk
 - ii) linearity rule between time lag of elastic wave and the number of cracks is given
 - iii) normal stiffness K_n and shear stiffness K_s of a crack are both high value
 - iv) discontinuous rock is precisely surveyed with elastic wave
- (3) The time lag function does not always reflect the distribution of cracks because the width, stiffness and time lag of cracks are evaluated as constant.