

一軸圧縮状態での岩盤不連続面を透過する 弾性波伝播特性に関する基礎的研究

谷本親伯¹・岸田 潔²

¹正会員 工博 京都大学助教授 工学部土木工学教室 (〒606-01 京都市左京区吉田本町)

²正会員 工修 京都大学助手 工学部土木工学教室 (〒606-01 京都市左京区吉田本町)

本研究では、一軸圧縮状態で不連続面を有する岩石供試体を用い弾性波伝播試験を行い、不連続面を伝播する弾性波伝播挙動の解明を行う。実施には、滑らかなき裂を人工的に作成し、き裂頻度の異なるモデルおよび充填物厚さの異なるモデルを設定して弾性波伝播試験を行った。また、自然の不連続面を用い、不連続面の表面形状(ラフネス)が弾性波伝播挙動におよぼす影響を調べた。計測されたデータから弾性波速度および第一波振幅値を読み取り、不連続面の状態と速度および振幅値の関係を考察した。これらの結果は、原位置での弾性波ジオトモグラフィ解析結果を解釈する際に適用することで、不連続面の分布特性・性状を詳細に解明することができるものとする。

Key Words: rock joints, seismic wave, velocity, amplitude, joint roughness, joint frequency, filling material, uniaxial compression, geotomography

1. はじめに

トンネルや地下空洞等岩盤構造物を設計する際、事前調査として弾性波探査が用いられている。土木分野で用いられる弾性波探査は、主に屈折法であり、はぎとり法等によって表層からの地質構造の解明が行われてきた。弾性波速度と地質状態の間には、

- 1) 一般に速度の速いほど圧縮強度は大きく、特に同じ岩種ではこの傾向は強い。
- 2) 岩石は風化すると速度は遅くなり、風化の著しいものほど速度は遅い。
- 3) 破碎程度が激しいほど、速度は遅くなる。
- 4) 固結度の低いほど、速度は遅い。

等の関係が示されている¹⁾。

最近では、コンピュータの発達に伴い、ボーリング孔を用いて孔間弾性波探査を行ない、その結果をトモグラフィ手法を用いて解析し、弾性波速度分布による地盤の可視化を行なう手法の土木分野への適用が近年盛んに行われてきた²⁾。

これらの手法は、一応の成果を挙げているが、一般に弾性波速度でのみ評価をしており、実際の地山状況を十分に評価するものにはなっていないと考えられる。特に、不連続性岩盤においてその力学的特性・

水理学的特性を支配する岩盤不連続面の評価に関しては十分なものではない。

筆者らは、弾性波ジオトモグラフィにおいて速度解析だけでなく振幅減衰機構に着目した解析手法の開発を行ない、速度および減衰解析結果に基づいた地盤の評価手法の確立を行ってきた^{3)~6)}。この手法において重要なことは、解析によって得られる結果が、力学的特性や水理学的特性をどのように評価しているのかを考察する必要がある。

一般に、速度解析によって得られる結果は、一つの指標に過ぎず、不連続面を含んだ岩盤の力学的特性との関係は十分に解明されていない。Tanimoto and Ikeda⁷⁾は、一軸圧縮状態にある不連続面を含んだ供試体において、その開口幅が0.04mm以下、あるいは載荷圧が大きくなると、透過弾性波速度は変化を受けないことを示している。一方、透過弾性波の振幅値は、不連続面の状況(接触面積・開口幅・風化の程度)を鋭敏に反映することを示している。本研究では、このような結果を踏まえ、一軸圧縮状態での岩盤不連続面を伝播する弾性波挙動の計測(弾性波速度および振幅値)を行ない、岩盤不連続面の状態(ラフネス、き裂頻度、充填物)と弾性波伝播特性の解明を行なう。これにより、弾性波ジオトモグ

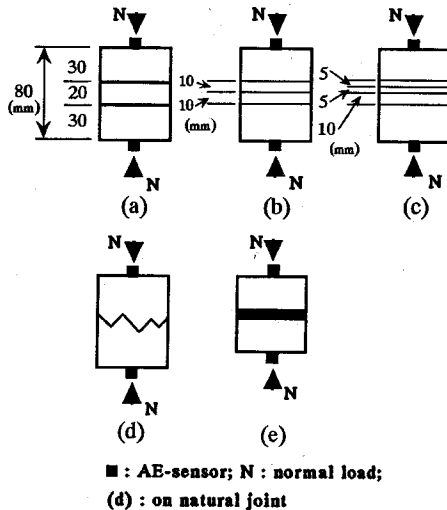


Fig. 1 Experimental set up on seismic behaviour at joint

フィーによって得られる速度分布・振幅減衰分布の詳細な解釈が行なえ、岩盤の力学的挙動を支配する不連続面を評価するのに有益な情報を得ることができるものと考えられる。

2. 実験準備

(1) 供試体

弾性波伝播試験を行うために Fig. 1 に示すような 5 通りの計測パターンを設定した。Fig. 1(a)-(c) に示すものはジョイントの形状が滑らかなもので、同じ長さの供試体中にジョイントを 2 本、3 本、4 本と増やすことによりき裂頻度の異なるモデルを設定し、弾性波伝播挙動を計測するものである。Fig. 1(d) は自然のジョイント形状を有する供試体の一軸圧縮状態での弾性波伝播挙動を計測するものである。また、Fig. 1(e) は滑らかな人工のジョイントの間に濾紙を挟み、濾紙の枚数を変化させることによりジョイントに充填物を含むこと、あるいは充填物の厚さおよび開口幅が、弾性波伝播挙動にどのように影響するのかを調べるものである。これらの供試体の端面および Fig. 1(a)-(c), (e) での人工のジョイントは、いずれも平行度・粗度ともに 1/100mm 以下で、接触に際しては、開口幅 0.01mm 以下では、面全体で接触している状態であると考える。

(2) 弾性波計測システム

Fig. 2 に弾性波の計測システムを示す。

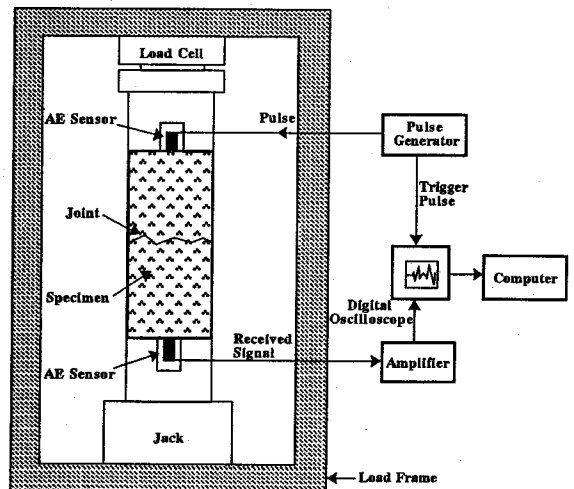


Fig. 2 Schematic illustration of experimental set up for seismic measurements

まず、パルスジェネレーター (MODEL145: WAVETEK 製) により供試体の一端に取付けた AE センサ (AE900S-WB: NF 回路設計ブロック製) を振動させ、供試体にパルス波 (振幅: 4.8V, 周波数: 65kHz) 一波長を入力し、供試体の他端に取付けた AE センサで受信する。受信した波は、プリアンプにより増幅された後、オシロスコープ (デジタルストレージオシロスコープ: NF 回路設計ブロック製) に表示される。表示された波は、コンピュータに取り込み初期走時および第一波振幅値の計測を行う。AE センサは、直径 12mm, 長さ 40mm で、原波形解析 (スペクトル解析) などを行う場合に使用する非共振型である。周波数特性は、100kHz ~ 1MHz で ± 10 dB, 広帯域で平坦である。また、AE センサの供試体への接着には、エレクトロニックワックス (宗電子工業製) を用いて行った。センサの供試体への接着による弾性波伝播挙動への影響も検討するため、同一の供試体において複数回センサの付け外しを行い、その度毎に出力波形を観察したが、いずれも同一の波形を得ることが出来た。したがって、センサの接着による弾性波伝播挙動への影響はほぼないものと判断する。

(3) ジョイント表面形状の測定

Fig. 1(d) に示すような自然のジョイントを有する供試体を実験する場合、実験前にジョイントの表面形状 (ラフネス) の計測を行い、ラフネスを定量的に評価した後、弾性波伝播試験を行う。

計測には、筆者らが開発したラフネス測定装置

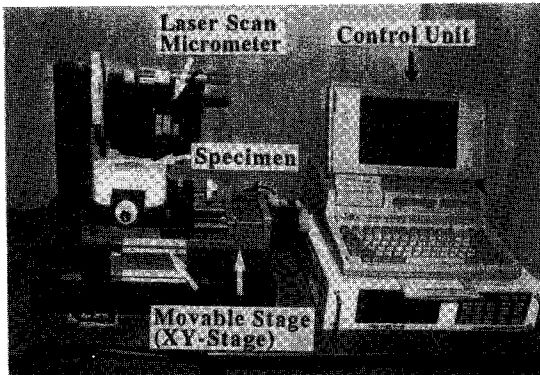


Photo 1 Apparatus of 3-D Roughness Profiler (TOK-SDRP)

(TOK-3DRP : Photo 1) を使用して行った⁹⁾。この装置は可動部、計測部、制御部によって構成され、計測されたデータはアンプを介してコンピュータに記録される。可動部は、鋳鉄製の防振台上にXYステージ (LTS-100XY(1) : シグマ光機製) を固定し、ステージの上には供試体を堅固にかつ再現性をもって固定可能な可動アジャスタを設置している。XおよびY方向のストロークは100mmである。計測にはレーザー変位計 (LB-045 : キーエンス製) を用いる。この変位計は、焦点距離が40mm±5mmで、分解能は最小4μmである。これらは、防振台の上に堅固に固定されているため、測定の際には振動が全く認められず、振動による測定誤差は無い。

測定間隔や測定測線数をコンピュータに入力することにより、自動的に不連続面を面的に計測できる。制御装置にはAS-NET (シグマ光機製) を用いている。これにより、XYステージを0.001mmの測定移動精度で稼働させることが可能である。

ここでは、弾性波伝播試験に用いた5種類の自然のジョイントを有する供試体のラフネスの計測を行った。円柱供試体の不連続面は傾斜を有するので、計測装置に設置して計測する際、不連続面の形状は楕円形となる。ここでの計測は、楕円形の長軸方向に沿って測線を49本設定し、長軸での測点数を512点とした。したがって、同一供試体内での測線間隔および測点間隔は一定であり、供試体はほぼ直径50mmの円形であるため、いずれの供試体も測点間隔は0.1mm、測線間隔は1mmとなる。計測されたラフネスの鳥瞰図の一例をFig. 3に示す。また、計測された5種類の自然のラフネスを筆者らの提案するMs値で評価した結果をTable 1に示す⁹⁾。このMs値は、ラフネスの凹凸を波形と考え、フーリエ変換を行い得られたパワースペクトルの強度と重心周波数によって決定されるものである。フーリエ変換には

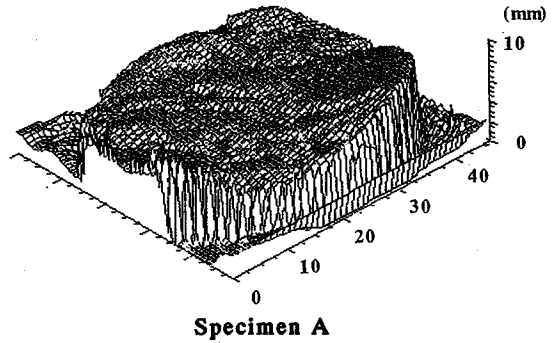


Fig. 3 Bird's-eye view of natural roughness

Table 1 Measured Ms - value of natural joint roughnesses

Specimen	Ms
A	9.121×10^{-3}
B	1.567×10^{-2}
C	3.262×10^{-2}
D	2.791×10^{-2}
E	1.112×10^{-2}

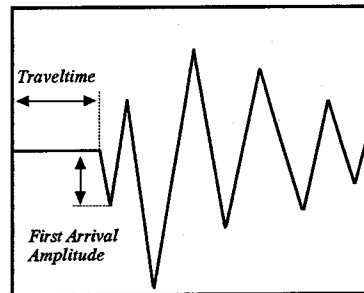


Fig. 4 Read-out of traveltime and first arrival amplitude

高精度で行うためBurgのMEM法⁹⁾を用いて行った。代表的なラフネスの評価法であるBartonらの示すJRC値¹⁰⁾とMs値の比較は文献⁹⁾に示す。

3. 円柱供試体での弾性波伝播挙動

(1) 予備実験

ここでは、室内弾性波伝播試験に用いる円柱供試体における弾性波伝播状況の検証を行った。なお、観測される波形の第一波目の振幅値を第一波振幅値、弾性波を入力してから受信点に到達するまでの時間を初期走時とする。初期走時と第一波振幅値の概念をFig. 4に示す。波形データは、GPIBボードと介してコンピュータにデジタルデータとして記録される。

初動の計測は、離散化されたデジタルデータが数居値を越えて変動する点を初動とした。また、振幅値については、後述する振幅比により無次元化して整理を行う。初動読み取りの数居値の設定やS/N比の向上などは、今後も検討すべき課題である。

石膏（配合比 水：焼石膏＝6：5，一軸圧縮強度13.3MPa）で作成した円柱供試体（直径50.0mm，長さ100.0mm，密度1.07g/cm³）を2本（供試体A，B）作成し，Fig.5に示すような形状に供試体を徐々に切断しながら弾性波伝播実験を行った。供試体Aは供試体長の間差点において周囲から中心に向かって供試体を徐々に切断する。供試体Bは，供試体長の間差点において一方向の端から直径方向に供試体を徐々に切断する。切断には，ロックソーを用い，切断後残された部分（接触部分）をノギスによって計測した。切断される幅は，およそ2mmである。切断面に残された接触部分の長さを d_e (Effective Diameter) とする。

弾性波計測システムは，Fig.2で示すものと同じであるが，ここでは一軸圧縮状態にせず計測を行った。用いた波形は，本実験で用いるものと同じである。

供試体Aは，供試体の中心部に向かって同心円状に弾性波伝播経路を特定できる。同心円の直径～弾性波伝播速度（Fig.6）の関係によると，同心円の直径が5mmまで減少しても弾性波伝播速度は変化しない。これは，弾性波伝播の最短経路が変化しないことを示している。

第一波振幅値に関する結果を整理する場合，切断状況が徐々に進行して行く各段階で観測された第一波振幅値 A をき裂の存在しない初期の状態で観測された第一波振幅値 A' で除した第一波振幅比（ FAR ）を用いる。

$$FAR = \frac{A}{A'} \quad (1)$$

ここで， A ：各段階で観測された第一波振幅値
 A' ：完全な円柱形の状態で観測された第一波振幅値

直径～第一波振幅比の関係（Fig.7）を見ると同心円の直径が20mmより小さくなると振幅比は減少する。

次に，供試体Bを用いた実験では，供試体長の中心で供試体の端から端に供試体を徐々に切断するため少なくとも切断面が中心を超えると弾性波伝播の最短経路が変化するのである。速度に関する結果（Fig.8）を見ると，切断面が中心を超えると見かけの弾性波速度 V_m は減少する。この見かけの弾性波速度は，供試体がこのように切断されているのが

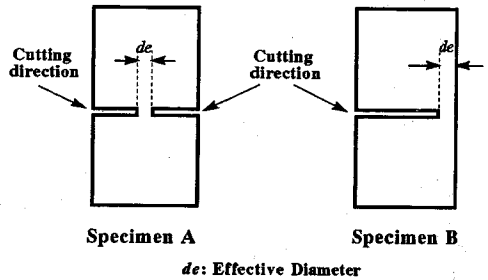


Fig.5 Schematic illustration of pre-experimental specimen for considering the seismic wavepath at cylinder

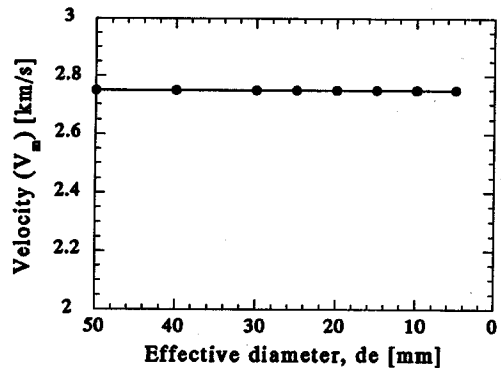


Fig.6 Velocity (V_m) vs. effective diameter at specimen A

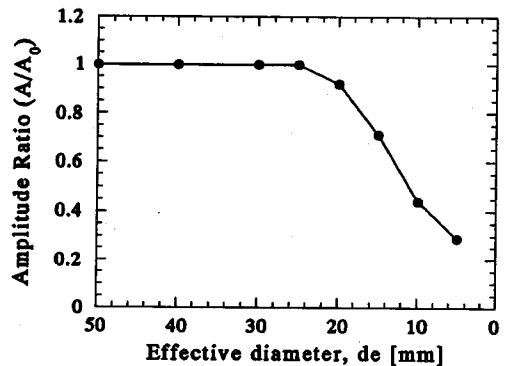


Fig.7 Amplitude ratio vs. effective diameter at specimen A

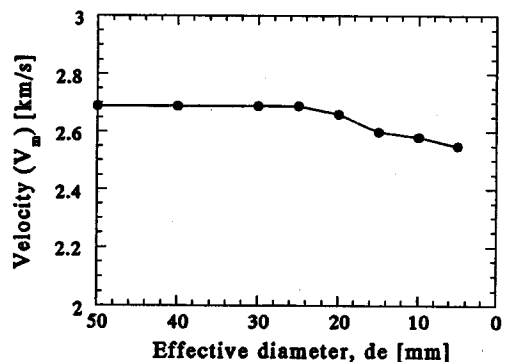


Fig.8 V_m vs. effective diameter at specimen B

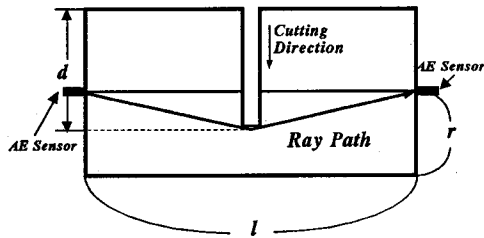


Fig. 9 The concept of ray path at specimen B

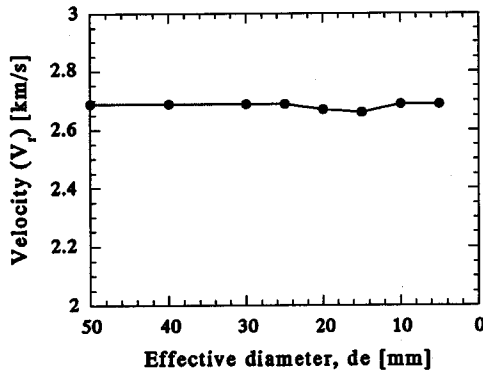


Fig. 10 V_r vs. effective diameter at specimen B

確認されていない場合、弾性波伝播経路は最短長であると考えるので、供試体長 l で観測走時を除して

$$V_m = \frac{l}{t} \quad (2)$$

ここで、 t : 観測走時

l : 供試体長 (ここでは100.0mm)

となる。これに対し、本実験の場合、実際の弾性波伝播最短経路 l' は、切断面が供試体の中心を超えると変化する。切断面が中心を超える場合の最短経路を、Fig. 9に示すようなモデルで考えると、

$$l' = 2 \sqrt{\left(\frac{l}{2}\right)^2 + (d-r)^2} \quad (3)$$

ここで、 l : 供試体長

r : 供試体半径

d : Fig. 9に示す切断深さ

となる。そこで、実際の弾性波伝播速度 V_r は、

$$V_r = \frac{l'}{t} \quad (4)$$

となる。この最短経路 l' を算出し各段階における V_r を求めたのがFig. 10である。 V_r はほぼ一定の値を示すことが確認できる。

次に、振幅比の結果 (Fig. 11) を見てみる。

Fig. 9に示す切断深さ d が10mmを超えると、第一波

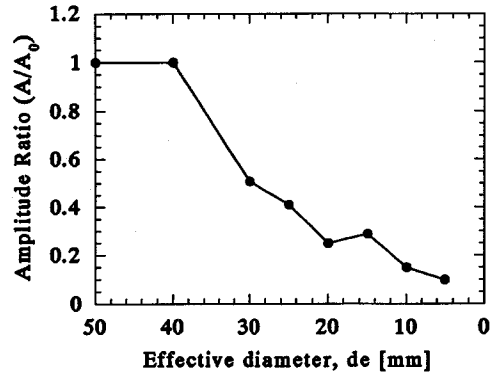


Fig. 11 Amplitude ratio vs. effective diameter at specimen B

振幅値は徐々に減少する。この結果は供試体Aを用いた場合の結果と一致する傾向を示している。すなわち、切断部分が供試体の中心から直径20mmの同心円内におよぶと第一波振幅値にその影響が現われはじめる。

以上より、この円柱供試体を用いた室内弾性波伝播実験において、弾性波速度、第一波振幅値を示す弾性波は、供試体の中心から半径10mmの範囲を伝播していることが確認できた。また、第一波振幅値には、側面からの反射波、供試体の表面波の影響はほとんどないことが確認された。したがって、不連続面を有する供試体における実験では、第一波振幅値および初期走時の計測を行う場合、供試体の側面反射・表面波・円筒形であるための境界条件の影響を受けずに不連続面透過による影響のみ観測できる。

(2) 弾性波伝播の考え方

一般に、弾性波伝播速度 (ここではP波) は、媒体の弾性定数を用いて

$$V_p = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (5)$$

ここで、 E : 弾性定数

ν : ポアソン比

ρ : 密度

と表される¹¹⁾。不連続面を含まない一軸圧縮状態の供試体を用いた室内弾性波伝播試験において弾性波伝播速度が変化する原因としては、応力状態が変化することによる供試体の物性の変化が挙げられる。これに対し、き裂等を含む供試体を用いた場合には見かけの弾性波伝播速度 V_m が変化する原因としては大きく二つが考えられる。

- (i) き裂が存在しない供試体と同じく、応力状態の変化に伴い、鉱物の結合性が増加やマイク

ロクラックの結合による岩石実質部分の物性の変化

(Ⅱ) き裂における接触点の変化 (弾性波伝播の経路の変化)

岩盤工学における弾性波伝播を考えた場合、後者が連続体における弾性波伝播と大きく異なる点である。初めにも述べたが、原位置岩盤には不連続面が存在し、原位置岩盤の力学的挙動はこの不連続面に支配される。一般に、ブロックが粗い表面上にそっと置かれるとき、実際に接触している表面積の割合はほとんどゼロであり、全接触力は3点以上の点接触で支えられている。これに、垂直拘束圧が増加すると点接触は弾性変形、圧潰、および引張りき裂の発生などによって広がり、新たな領域が接触することになる¹²⁾。同様に、充填物を含まない不連続面も完全に密着しておらず、多数の点あるいは一部の面で接触しており、不連続面に垂直荷重を載荷していくと接触面積は増加していくと考える。このような不連続面での噛み合わせ状況は、不連続面に対する載荷荷重と不連続面の形状(ラフネス)に起因して起こるものと考えられる。したがって、弾性波伝播状況も、垂直応力が増加し、接触点あるいは接触面積が変化すると伝播経路が変化することになり、これにともない速度(見かけの速度) V_m は変化することになると考える。また、破壊に至るまでの状況、すなわち最大可能閉塞量の範囲内の不連続面の変形であれば、応力の増加にともない新たな接触部分が生じ、最短経路が短くなり、見かけの弾性波速度 V_m は増加することになる。

次に、伝播する弾性波の振幅値について考えてみる。振幅の変化は、様々な要因によって起こると考えられる。まず、基本的に考えられることは、何ら物質的变化を受けない理想状態では、ある点で発信された振幅値 A_0 の波動は距離 r 離れた観測点では振幅値 A として観測され、次式のように示される。

$$A = A_0 \frac{k}{r} \quad (6)$$

ここで、 k :幾何減衰に関する定数

実際に媒体を通過する場合、振幅値 A は媒体内の内部粘性減衰を考慮にいれると、

$$A = A_0 \frac{k}{r} \exp(-\alpha r) \quad (7)$$

ここで、 α :内部粘性減衰定数

となる¹¹⁾。しかし、原位置の岩盤には不連続面が存在し、その状態(き裂頻度、開口幅、充填物の内部粘性減衰、ラフネスなど)により透過損失・反射・屈折・回折・散乱などが起こり振幅値が変化すると考えられる。筆者らはこの要因を総括的に取り扱うことで式(7)を次のような形式で示した^{3),4)}。

$$A = A_0 \frac{k}{r} \exp(-\alpha r) \cdot F(n, b, \beta, f) \quad (8)$$

ここで、 n :き裂頻度

b :開口幅

β :充填物の内部粘性減衰定数

f :透過弾性波の周波数

ここで用いた関数 F における個々のパラメータの影響を特定することにより、詳細な弾性波伝播挙動の把握が可能となり、関数 F に着目したジオトモグラフィ解析を行うことで、不連続面に着目した解析が可能となるものと考えられる。また、き裂頻度は、3つの算出方法がある¹³⁾。まず、スキャンラインを設定し、それと交差する不連続面の個数を数え、その個数を測線長で割ることにより得られるのが、1次元き裂頻度である。一方、サンプリングウィンドウを設定し、その範囲内に存在する不連続面のトレース長を計測し、トレース長の合計をサンプリングウィンドウの面積で除することにより得られるのが、2次元き裂頻度である。また、計測するのは非常に困難であるが、単位体積当たり存在する不連続面の面積の総和を体積で除したものが、3次元き裂頻度である。き裂頻度の次元はすべて長さの逆数である。Grossmann¹⁴⁾による定義では、3次元き裂頻度はJoint Indexと述べられている。本研究の実験結果で示すき裂頻度は、供試体に設定したき裂の本数を供試体長で除した1次元き裂頻度を用いる。単位は、1/mである。

一般に、充填物のある不連続面を弾性波が伝播する場合、第一波振幅値が変化するのは、岩石実質部分と充填物との音響インピーダンスの差から生じる透過損失であると考えられる。しかし、充填物を含まないような不連続面の場合、不連続面を境に岩石の物性が変化しないのならば、伝播経路内での音響インピーダンスの変化はなく、透過損失は起こらない。特に、本研究で扱うような不連続面の場合、不連続面の境に岩石の物性が変化することがなく、充填物を介さず直接接しているのであれば、音響インピーダンスの違いから第一波振幅値が変化することは説明できない。すなわち、先にも述べた接触面積の変化に伴う振幅値の変化は、音響インピーダンスからは説明できない。

そこで、充填物が存在しないき裂を有する供試体に限り、式(8)を新たに次のように表す。

$$A = A_0 \frac{k}{r} \exp(-\alpha r) \cdot F(P_c, p, s) \quad (9)$$

ここで、 P_c :一軸圧縮応力

p :実際の接触点での応力

s :実際の接触面積

この場合、式(1)で定義した第一波振幅比(FAR)は

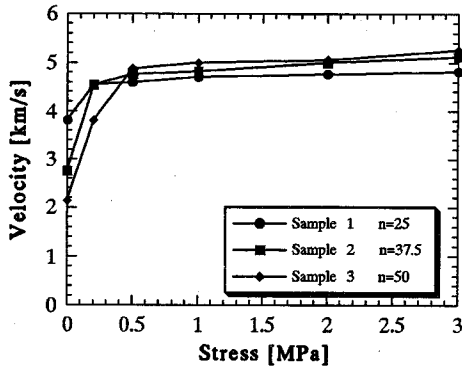


Fig. 12 Velocity on joint frequency under normal stress (n = 25, 37.5, and 50 [1/m])

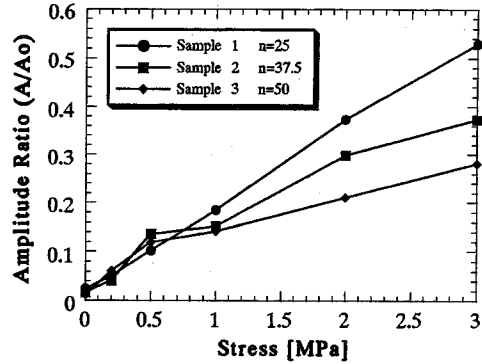


Fig. 13 Amplitude ratio on joint frequency under normal stress (n = 25, 37.5, and 50 [1/m])

$$FAR = \frac{A}{A_0 k_r \exp(-\alpha r)} = F'(P_c, p, s) \quad (10)$$

となる。

ここで示す式(8)~(10)は、次章で述べる実験結果の考察を行う際に用いる。すなわち、式(8)は、Fig. 1 (a)~(c), (e) に示されるモデルでの、式(9), (10)は、Fig. 1 (d) に示されるモデルでのそれぞれの不連続面を伝播する弾性波伝播特性を論じるのに用いる。また、これらの式は、弾性波減衰ジオトモグラフィー解析を実施する際に用い、関数 F および F' の特性を解析することで、き裂状態を把握するジオトモグラフィー法が可能となる。

4. 岩石供試体を用いた弾性波伝播実験

2章に示した供試体設定パターンを用い、一軸圧縮状態での弾性波伝播実験を行う。実験には、ボーリングコアから採取された円柱供試体を使用した。岩質は流紋岩質凝灰岩で、一軸圧縮強度はおよそ200MPa、基質部の弾性波速度は5.81~5.93 km/secである。実験を行う前に、2章で示した供試体が、実際の岩盤においてどのような状態を表すモデルなのかを考えてみる。Fig. 1 (a)~(c) で表されるモデル(実験1)は、不連続面が存在するがラフネスがなく、式(8)における関数 F のき裂頻度 n の影響を考察することが出来るモデルとなる。Fig. 1 (d) (実験2)は、5種類のラフネスが異なる供試体を用いており、ラフネスの違い、あるいはそれに伴う接触面積 s や接触応力 p の違いを考察するモデルである。Fig. 1 (e) (実験3) は比較的開口幅の大きく充填物を有するモデルとなり、式(8)のパラメータ b の影響を考慮するモデルである。

(1) 実験1の結果

Fig. 1 (a)~(c) を用いて計測した弾性波伝播速度に関する結果をFig. 12に示す。これによると、一軸圧縮応力が0.5MPa以上では滑らかな状態のき裂のき裂頻度 n が増加しても弾性波伝播速度に遅れは見られない。これは、前章で述べたき裂を含む供試体を用いた場合の見かけの弾性波伝播速度が変化する二つ要因(物性の変化と接触点の変化)のどちらにもこのモデル(滑らかなき裂を有する供試体)があてはまらないことによる。また、0.5MPa以下の応力状態では、いずれの供試体においても弾性波伝播速度が極端に低下することが確認できる。これは、低応力下ではいかに滑らかな面どうしても接触の状態が不安定であること、また、岩石内の微小クラックや間隙が閉塞することなどが原因としてあげられる。実際に、ほぼ同一深度で採取した円柱供試体を用いAE法による初期応力測定を行ったが、およそ0.32MPaでカイザー効果が見られた。このことより、初期応力状態(0.5MPa)までは供試体内の微小クラックが閉塞し、そのために弾性波伝播速度が増加するものと考えられる。

一方、計測された第一波振幅比の結果をFig. 13に示す。これによると、0.5MPaまでは第一波振幅比とき裂の本数との関係は明確に観察できないが、0.5MPa以上ではき裂の数が増加するにしたがって第一波振幅比は減少する傾向を示す。すなわち、式(8)におけるパラメータ n が増加すると第一波振幅値は減少することを示す。

以上のようなことから、滑らかなき裂が増加しても応力状態がある一定の状態になれば弾性波伝播速度は影響を受けないが、第一波振幅値はき裂の増加とともに減少することが確認できた。

(2) 実験2の結果

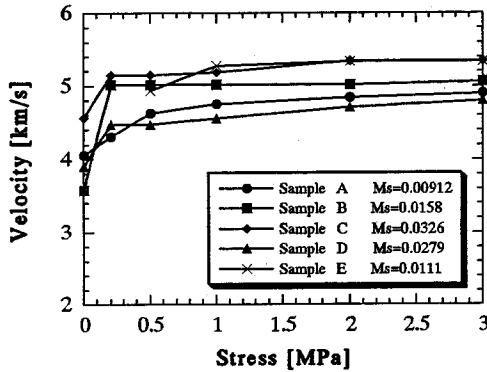


Fig. 14 Velocity on joint roughness under normal stress ($M_s = 9.12, 11.1, 15.8, 27.9, \text{ and } 32.6 \times 10^{-3}$)

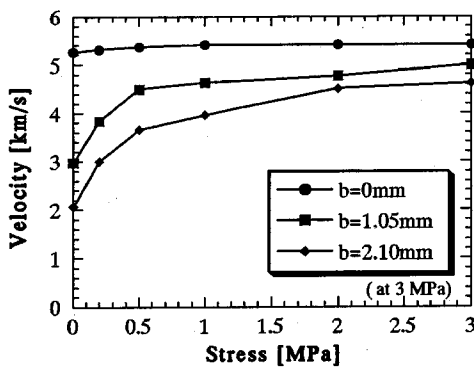


Fig. 16 Velocity on aperture under normal stress ($b = 0, 1.05, \text{ and } 2.10 \text{ mm at } 3 \text{ MPa}$)

Fig. 1 (d) に示すパターンで行った実験により得られた弾性波伝播速度と第一波振幅比の結果を Fig. 14, 15 に示す。弾性波伝播速度は、実験 1 の結果に比べてばらつきが見られるが、ほぼ一定であると考えられる。これに対し、第一波振幅比はかなり大きなばらつきが見られる。したがって、ラフネスを評価するには弾性波伝播速度より第一波振幅比の方が有効であると考えられる。

また、ラフネスを評価する M_s 値と第一波振幅比との関係を調べると、Sample A を除いて、 M_s 値が小さいほうが第一波振幅比が小さい傾向を示している。このことにより、自然のラフネスの状態を第一波振幅比により把握することが可能であると考えられる。しかし、このような自然の不連続面を有する供試体では面的に完全に密着することは不可能であり、自然のラフネスを有する供試体の第一波振幅比は、式 (9), (10) で示した関数 F' のパラメータ s (接触面積)、 p (接触応力) とラフネス形状により決定されるものと考えられる。本研究の結果からは、 M_s 値が小さい (滑らかな) ほうが第一波振幅比が小さい傾向を示しているが、ラフネスを弾性波伝播挙動から定量的

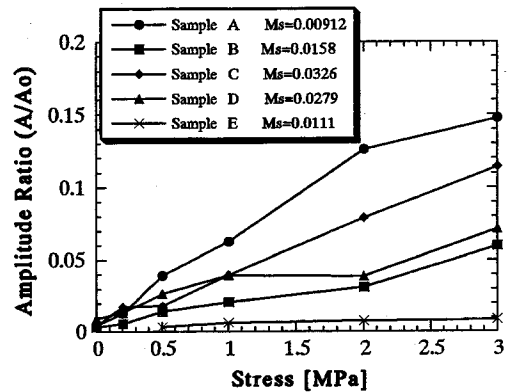


Fig. 15 Amplitude ratio on joint roughness under normal stress ($M_s = 9.12, 11.1, 15.8, 27.9, \text{ and } 32.6 \times 10^{-3}$)

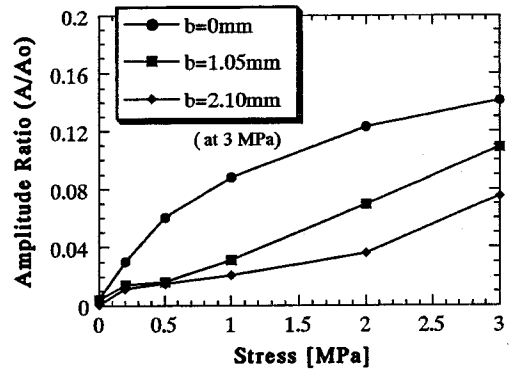


Fig. 17 Amplitude ratio on aperture under normal stress ($b = 0, 1.05, \text{ and } 2.10 \text{ mm at } 3 \text{ MPa}$)

に評価するには、本研究で行ったラフネス形状の評価を基に接触面積、接触応力、不連続面の形状から推定される開口幅¹⁵⁾、それにより考えられる最大可能閉塞量と弾性波伝播特性の関係を考察する必要があると考えられる。

(3) 実験 3 の結果

最後に、Fig. 1 (e) で計測された弾性波伝播速度と第一波振幅比の結果 Fig. 16, 17 に示す。ここで示す開口幅は、3 MPa の時のものである。

弾性波伝播速度の結果を見ると、いずれの応力状態においても、濾紙の枚数を増加させるに従い見かけの弾性波伝播速度は減少する。ここで、見かけの弾性波伝播速度は、

$$V_m = \frac{l+b}{t} = \frac{l+b}{\frac{l}{V} + \frac{b}{v}} \quad (11)$$

ここで、
 t : 初期走時
 V : 岩石実質部分の弾性波速度
 v : 充填物内の弾性波速度

l : 岩石実質部分の長さ

b : 充填物の厚さ

と算出するものである。この式を見ても明らかなように、見かけの弾性波伝播速度は充填物の弾性波速度と充填物の層厚に影響を受ける。Fig.16を見ると、濾紙の枚数の増加にともない、見かけの弾性波伝播速度はほぼ一定の割合で減少することが確認できる。

また、第一波振幅値(Fig.17)も濾紙の枚数が増加するにしたがって減少し、式(8)において開口幅(充填物の厚さ) b が増加すると第一波振幅値は減少することが確認された。

5. まとめ

本研究では、一軸圧縮状態において様々な不連続面を有する岩石円柱供試体の弾性波伝播実験を、き裂状態(頻度、ラフネス、充填物の有無)が弾性波伝播におよぼす影響について考察を行った。

実験結果から得られた知見をまとめると、以下のようになる。

- (1) 滑らかな人工のき裂を含んだ供試体において、き裂頻度を変化させても弾性波伝播速度には影響が現われないが、第一波振幅値にはき裂頻度の影響が確認された。
- (2) 5種類の自然のラフネスを有する供試体では、弾性波伝播速度には変化が見られなかったが、第一波振幅値では違いが確認された。また、ラフネスの形状特性と第一波振幅値には相関性があることも確認できた。
- (3) 充填物を含む供試体においては、弾性波伝播速度も第一波振幅値も充填物の厚さが増加するに従い減少することが確認できた。

以上のようなことから、き裂頻度およびき裂のラフネスを評価するには弾性波伝播速度より第一波振幅値の方が有効であり、充填物の有無の評価には、弾性波伝播速度と第一波振幅値の双方が有効である。

不連続面を有する岩石供試体を用い一軸圧縮状態での弾性波伝播挙動に関する研究では、供試体の乾湿状態¹⁶⁾や不連続面に薄いフィルムや薄い粘土層をはさんだ物¹⁷⁾などで行われている。これらの研究は、水分の弾性波への影響や充填物の材質による影響についての言及は見られるが、原位置の不連続面の状況や分布特性を考慮にいれた評価は見られない。

本研究の結果は、現位置において次のように応用することが可能となる。すなわち、現位置において弾性波探査を行い、ジオトモグラフィ法によって

速度解析および振幅解析¹³⁾を行うことにより速度分布図および減衰分布図を得ることが出来る。これら二つの解析結果を比較し現位置の状況の評価を行う場合、解析結果の個々の領域を大まかに次のような4つの分類を基に評価することが可能となる。

- i) 速度が速く減衰が小さい。
- ii) 速度が速く減衰が大きい。
- iii) 速度が遅く減衰が小さい。
- iv) 速度が遅く減衰が大きい。

本研究の結果を基に考えるとケースi)の場合、非常に硬質でき裂の少ないか、あるいはき裂が存在していても非常に密着性がよいものがある領域であると考えられる。ケースii)では、硬質の岩が分布しているが密着製の悪いき裂が多く集中している領域と考える。ケースiii)は、他に比べ岩石実質部分が軟質である領域で、き裂は少ないかあるいはき裂が存在しても非常に密着性の良いものがある領域であると考える。ケースiv)は、ケースiii)と同様に岩石実質部分が軟質であるか、充填物を含んだ密着製の良くないき裂が多く存在する領域であると考える。ここで考慮している減衰解析は、岩石実質部分の内部粘性減衰や伝播距離による幾何減衰を相対的に除去し、き裂による減衰のみを抽出するようにしたものである。例えば、ある解析領域の一部において速度は速いが減衰の大きいという結果を得た場合、一般によく用いられる速度解析の結果では、速度の速い非常に硬質の岩盤が分布している領域である、といった評価が得られるが、減衰解析と本研究の実験結果を組み合わせると、速度が速く減衰が大きい領域は、岩質は良好であるが密着性の高いき裂が集中しているか、あるいは接触状態の良くないラフネスを有するき裂が存在する、といった解釈が可能となる。実際に原位置での解析結果や減衰ジオトモグラフィの解析方法に関しては、詳細を別の機会に公表する。

以上より、本研究の結果を原位置で得られるジオトモグラフィの結果の解釈に適用することで、き裂の分布特性および性状まで解析することが可能となると考える。

参考文献

- 1) 池田和彦, 大島洋志: わかりやすい土木地質学入門 土木工学社, pp.82-83, 1975.
- 2) Sassa, K.: Applications of Geotomography to Rock Engineering, *Proc. of SEGJ Int'l Symp. on Geotomography*, pp.21-28, 1990.
- 3) 谷本親伯ほか: 弾性波周波数特性とジオトモグラフィに関する基礎的研究, 第23回岩盤力学に関するシ

- ンポジウム講演論文集, pp.11~13, 1991,2.
- 4) 谷本親伯ほか: 弾性波ジオトモグラフィにおける周波数特性に関する基礎的研究, 第24回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.450-453, 1992,2.
 - 5) 岸田潔ほか: 弾性波ジオトモグラフィの応用とき裂性状, 第25回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.266-270, 1993,2.
 - 6) 谷本親伯ほか: き裂における弾性波伝播挙動を考慮したジオトモグラフィに関する基礎的研究, 第9回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp.325-330, 1994,1.
 - 7) Tanimoto, C. and K. Ikeda: Acoustic and Mechanical Properties of Jointed Rock, *Proc. of 5th ISRM Congress*, pp.A15-18, 1983.
 - 8) 谷本親伯, 岸田潔: 3次元非接触式プロファイラーと最大エントロピー法を用いた岩盤不連続面ラフネスの定量化, 土木学会論文集, No. 511/III-30, pp.57-67, 1993, 3.
 - 9) Burg, J. P.: Maximum entropy sl analysis, *the 37th Annual International Meeting, Soc. of Explor. Geophys.*, 1967.
 - 10) Barton, N. and Choubey, V.: The shear strength of rock joints in theory and practice, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 10, pp.1-54, 1977.
 - 11) 佐々宏一, 芦田謙, 菅野強: 物理探査, 森北出版, pp.13-15, 1993.
 - 12) Goodman, R.E.: *Methods of Geological Engineering*, West Publishing Company, pp. 170-173, 1976.
 - 13) Tanimoto, C., et al.: Seismic Attenuation Geotomographic Technique in Designing a Large Underground Cavern, *Proc. of the 1994 ISRM International Symposium*, pp. 195-206, 1994.
 - 14) Grossmann, N. F.: New Developments in the In-situ Determination of Rock Mass Parameters, *Short course on Dam Foundations in Rock Masses*, LNEC, pp. 1-4, 1993.
 - 15) Iwano, M. and Einstein, H. H.: Stochastic analysis of surface roughness, aperture and flow in a single fracture, *Eurock '93*, Ribeiro e Sousa & Grossmann (eds.), pp. 135-141, 1993.
 - 16) Majer, E.L., et al.: Results of Fracture Research Investigation, *LBL report*, September 1989.
 - 17) Suarez-Rivera, F.R., et al.: Study on the transmission of shear waves across thin liquid films and thin clay layers, *Rock Mechanics*, Tillerson & Wawersik (eds), pp. 937-946, 1992.

(1994. 8. 19受付)

FUNDAMENTAL STUDY ON SEISMIC WAVE PROPAGATING PROPERTY THROUGH SEVERAL KINDS OF ROCK JOINT UNDER UNIAXIAL STRESS

Chikaosa TANIMOTO and Kiyoshi KISHIDA

Seismic geotomography technique has been applied at various kinds of civil engineering field. We consider that we can not obtain effective results so as to graspe rock joints at an unknown area, because the seismic propagating behaviour has not been clarified well. In this paper, we carried out the laboratory experiments measuring seismic propagating wave through rock joints under uniaxial stresses, and carried out the experimental comparisons between velocity and amplitude concerning with joint parameters such as joint frequency, joint roughness and aperture. Applying the knowledge of this study to the estimation of results obtained by the geotomography analysis, it becomes possible to understand joint distribution and physical properties at an objective area.