

(3) 弾性波周波数特性とジオトモグラフィーに関する基礎的研究

京都大学工学部	正会員	谷本	親伯
京都大学大学院	学生員	○ 岸田	潔
京都大学工学部	学生員	池内	正明
京都大学工学部	学生員	岡村	正典

Fundamental Study on Attenuation Tomography and Dependency of Frequency

Chikaosa TANIMOTO,	Kyoto University
Kiyoshi KISHIDA,	Kyoto University
Masaaki IKEUCHI,	Kyoto University
Masanori OKAMURA,	Kyoto University

Abstract

The seismic tomography technique has been recently developed in knowing the outline of a geological structure. The paper describes a possibility to find out the distributions of joint density and aperture in an objective area in association with the travel time tomography and the fundamental experiments which the authors have been carrying out recently. Based on the idea that the velocity of seismic wave or its change does not directly mean any physical property without knowing the mechanical behaviour of a single rock joint and multiple joints in many cases, the correlations between joint aperture, contact pressure, joint frequency, asperity, infilling material, propagating wave velocity and amplitude have been experimentally investigated through various specimens including artificial and natural joints in the wide range of contact pressure. It is suggested that, if damping effects in a continuous body and discontinuities can be separated by the fundamental studies, the so-called seismic attenuation tomography provides the distribution of joint density and the variation of respective joint apertures.

1. はじめに

近年、トンネル・ダム・大型地下構造物など、岩盤を基礎とする土木構造物のニーズが高まっている。これらを設計する際に、様々な調査・試験が行われてきている。多くの場合、供試体を取り出し、室内実験により岩の力学定数を求め、FEMなどシュミレーションが行われている。しかし、供試体を用いた室内実験には限界があり、現場の広い範囲を対象とすることは不可能である。これに対し、ジオトモグラフィーは、広範囲の未知の部分の推定し、可視化するものであって、この結果と力学試験の結果を総合的に判断したものは施工上非常に有効なものと考えられる。

一般に、ジオトモグラフィーは、透過波（弾性波・電磁波など）を用い、その伝播速度（伝播挙動）から地盤状態を推定する。すなわち、初動から地盤内の速度分布を推定するもので、今までにも様々な事例が報告されている。これに対して、弾性波のエネルギー変化に関するものとして、振幅ジオトモグラフィーがあ

る。振幅の変化する要因は、距離・内部摩擦・回折・拡散などがあげられ、これらの一つ一つが解明されると、精度の高い推定ができると考えられる。本研究では筆者らは、室内試験および原位置試験の両者から、弾性波伝播特性を調べ、振幅の変化する機構を調べようとした。

2. 室内試験

振幅の変化は、様々な原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、なんら物質的变化を受けない理想状態では平面波の場合、波面の到達距離が r 倍になれば、波面の面積は r の 2 乗倍となり、エネルギーは $1/r^2$ 倍となる。振幅は、エネルギーの平方根であるので、震源から距離 r での振幅は、

$$A = \frac{A_0}{r} \quad \dots\dots(1)$$

で示される。実際に媒体を通過する場合、粘性による減衰を生じ、

$$A = \frac{A_0}{r} \exp(-\alpha r) \quad \dots\dots(2)$$

となる。しかし、原位置の岩盤には、ジョイントが存在し、その状態（開口幅・充填物・傾斜方向・ラフネスなど）により、通過損失・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ている。この要因を総括的に β と仮定すると、実際の振幅に変化は次式のようになる。

$$A = \frac{A_0}{r} \exp(-\alpha r) \cdot \beta \quad \dots\dots(3)$$

従来の振幅ジョイントグラフィは、式(2)で考えられている。すなわち、式(3)で仮定した β も粘性減衰の項の中に含まれることになる。筆者らは、もし β がうまく表現できるなら通過損失・反射・回折などの影響が解明されることになり、不連続面の状態などがより明確に推定できるものと考えている。そこで、単一ジョイントを含んだ供試体による室内試験を行い、ジョイントの状態による振幅の変化を調べた。

室内試験は、モルタル供試体を作成し一軸圧縮状態で行った。モルタル供試体は、3種類の配合比（セメント：砂：水 = (A)1:1.36:0.44, (B)1:1:0.44, (C)1:1.36:0.48）のものを作成した。試験装置および計測システムは図-1に示す。試験方法は、まず一軸圧縮装置で荷重を与え、パルスジェネレーターから波形を発信し、供試体を通過してきた波形とパルスジェネレーターからの発振信号を同期してオシロスコープに入力し、初動、第一波振幅値を計測した。供試体への波形の入力にはAEセンサー（AE900S-WB：エヌエフ回路設計ブロック）を、受振側には圧電素子（7D-10-500BA：MURATA MFG. CO., LTD.）を用いた。供試体の条件は、配合比の異なるものに対してそれぞれ次のように変化させた。(a)ジョイントのないもの (b)

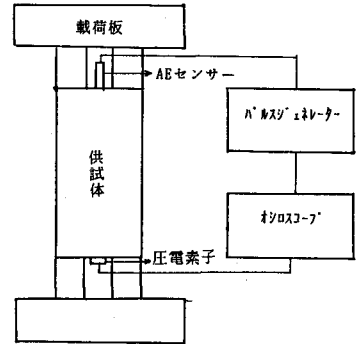


図-1 計測システム

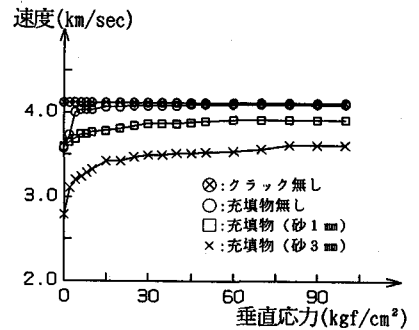


図-2 (a) 垂直応力～速度（供試体A）

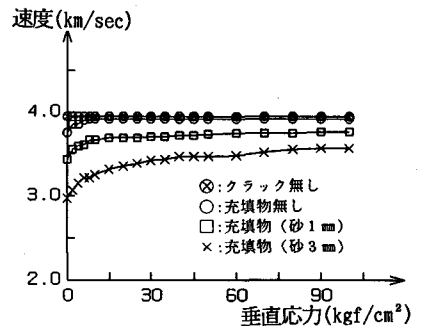


図-2 (b) 垂直応力～速度（供試体C）

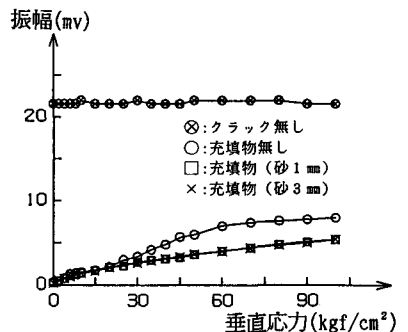


図-3 (a) 垂直応力～振幅（供試体A）

ジョイントを含むもの (c)ジョイントに1mmの充填物 (豊浦砂) のあるもの (d)ジョイントに3mmの充填物 (豊浦砂) のあるもの これらに対して、それぞれ拘束圧を0~100kgf/cm²に変化させて行った。

速度に関する結果を図-2に示した。供試体の違いによる影響は、ほとんど見られなかった。充填物の存在するものは当然速度が小さく、特に低拘束圧の時は徐々に増加し一定値に近づく傾向がみられた。

振幅の変化は図-3に示した。き裂の存在しないものに注目すると供試体の違いによる振幅の変化をよりよく示し、拘束圧による影響はそれほど強く受けていない。き裂の存在するものは、拘束圧が大きくなると振幅値は徐々に増加し、一定値に近づくことになるが、き裂のないものより小さい。これは、当然のことであって、き裂の存在や充填物によりエネルギーが大きく損失されていることを示している。また、このことは図-4に示す振幅比からも明かである。ここでの振幅比は、き裂のない振幅で除したもので、式(3)で仮定した β を示していることになる。充填物が存在する場合、拘束圧が大きくなると β は一定値 (この事例では0.3) に収束するものと考えられる。

周波数に関しては、供試体Bを用いて拘束圧と充填物の幅を変化させて、第一波目の周波数を読みとった。結果は表-1に示す通りである。拘束圧の増加にともない周波数は増加し、開口幅の広がりにより減少することが見られた。

3. き裂頻度を表す振幅減衰ジオトモグラフィーへのアプローチ

速度分布ジオトモグラフィーでは、連続体を想定し各セル内の速度分布を求めていくこととなる。例えば、ある2点間を3区間に分けると図-5(a)の様な速度分布となり、距離と時間の関係は図-5(b)のようになる。ここで、Tは観測された初動となる。これに対し、き裂頻度を考慮した振幅減衰ジオトモグラフィーでは、室内試験で求めた単一ジョイントに対する β がうまく表現できれば、式(3)は、n個き裂のある場合次のように書き換えられる。

$$A = \frac{A_0}{r} \exp(-\alpha r) \cdot \beta^n \quad \dots\dots\dots (4)$$

内部減衰定数 α は、速度分布との関係や岩種から推定することが可能であるとする受振点での距離と内部減衰を考慮した振幅値 A_1 が推定できることになり、ジョイントによる振幅値の変化だけを取り出すことができる。

$$A = A_1 \cdot \beta^n \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで対数をとると

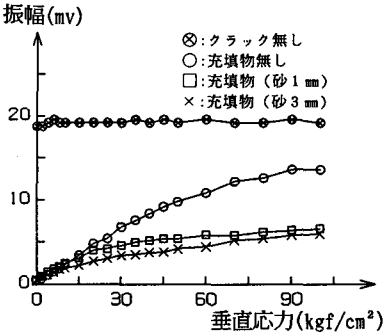


図-3 (b) 垂直応力~振幅 (供試体C)

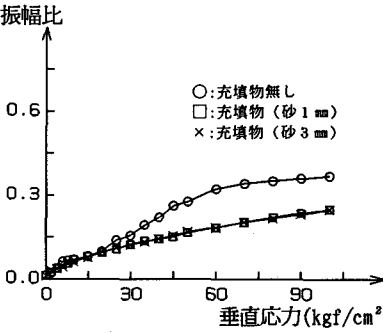


図-4 (a) 垂直応力~振幅比 (供試体A)

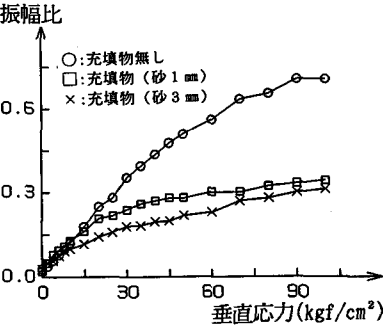


図-4 (b) 垂直応力~振幅比 (供試体C)

表-1 周波数の変化

	拘束圧 50kgf/cm ²	拘束圧 100kgf/cm ²
砂1mm	179kHz	227kHz
砂3mm	167kHz	200kHz

$$\ln \frac{A}{A_1} = n \cdot \ln \beta \quad \dots\dots\dots (6)$$

となる。そこで、概念的にひとつのセル内のき裂の個数の分布を図-5(c)とすると、き裂一つにつき $\ln \beta$ だけ振幅値が下がるのであれば、セル中に n 個き裂が存在すれば振幅値は $n \cdot \ln \beta$ だけ落ちることになる。これをもとに距離に対する振幅値の変化を描いたのが図-5(d)となる。ここで A_1 は、き裂のない場合の受振点で観測されるであろう振幅値で、 A は実際に観測される振幅値である。図-5(d)の関係を式で表すと次のようになる。

$$\ln \frac{A}{A_1} = \sum_{i=1}^n n_i \cdot \ln \beta \quad \dots\dots\dots (7)$$

n_i は各セル内のき裂数となり、速度分布と同様のアルゴリズムで求められるものと考えられる。

渡辺ら¹⁾は、粘性減衰以外の要因による振幅の変化の影響の除去を行い減衰特性分布を求めている。これに対し、筆者らは、内部粘性の影響をあらかじめ想定し、き裂による振幅変化だけに着目することにより、き裂頻度分布を表す振幅減衰ジオトモグラフィーが可能であるとする。本研究では、き裂による振幅変化の影響を β だけで表したが、実際には様々なき裂に対する β やその他のパラメータを用いて振幅の変化を表さなければ十分なき裂頻度ジオトモグラフィーを求めることはできないと思われる。

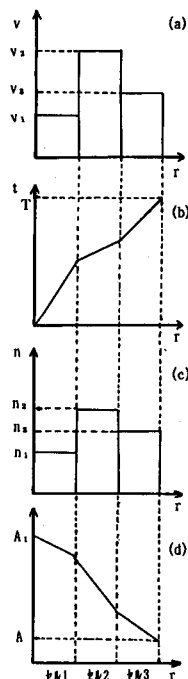


図-5
き裂頻度トモグラフィー
概念図

4. 原位置試験

振幅減衰ジオトモグラフィーの応用の可能性を調査するため、あるトンネル切羽面で原位置試験を行った。地質は花崗岩系である。受振点と発振点の配置は図-6に示すとおりである。また、図中のA-A'、B-B'での切羽面のスケッチは図-7に示す通りである。受振点は、ボーリング孔中の受振器をモルタルで全面充填することにより固定されている。

まず、初動を用いて速度解析を行った。計測データ数は580である。計算には形状関数として2次Bスプライン関数を用い、領域を 10×16 のメッシュに分割し平滑化制限付き最小二乗法を用いて20回繰り返し計算を行った²⁾。結果は、写真-1に示す通りである。

次に、得られた波形データから第一波振幅値を読みとった。発振点でのエネルギーの広がり方を考慮した補正³⁾と受振器の入射方向による影響の修正を行い、有効と思われる振幅データで解析を行った。データ数は355本で振幅値と距離の関係は図-8のようになる。このデータを用いて内部粘性減衰定数の分布を求めたものが写真-2である。

速度と相対減衰の結果は、多少異なったものとなった。切羽面のスケッチと比較すると、相対減衰分布の方がより正確な結果を表しているように思われる。速度解析では、発破信号による初動の算出に問題が残される。これが初動に誤差をもたらし解析に影響を及ぼ

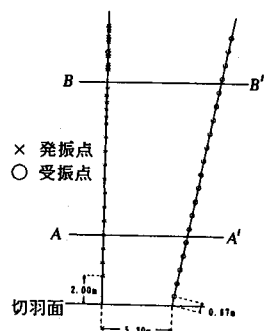


図-6
発振点・受振点の配置図

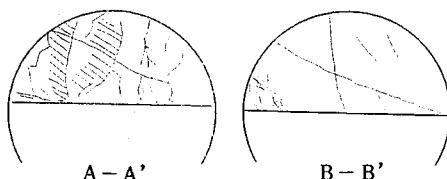


図-7 切羽面のスケッチ

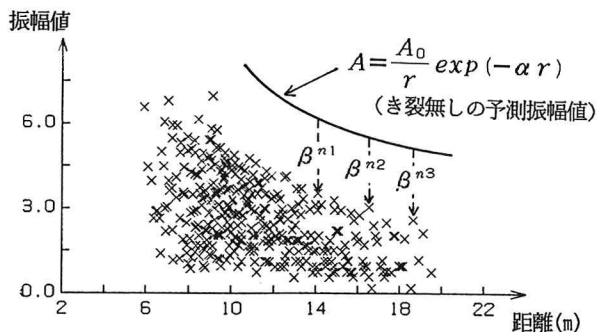


図-8 修正振幅データ

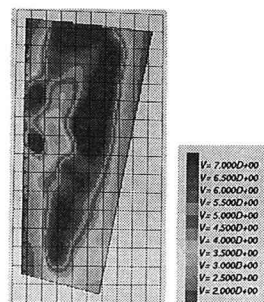


写真-1 速度分布

しているものと考えられる。また、解析領域でデータの多いところと少ないところがあり、少ないところでは結果的に弾性波が通りにくいという解析になっており、それが全体に影響しているように思われる。一方、粘性減衰の変化は、実際の岩盤の状態とよく対応していると考えられるが、振幅の変化は内部粘性よりもき裂により変化することが大きいと考えられるので、岩盤中に存在する不連続面の影響を検討する場合は振幅に着目した方が適当であると考えられる。

5. 結言

室内試験の結果から、振幅値の変化に影響を及ぼすのは物性よりき裂の存在・状態によることが大きいということがわかった。振幅を用いたジオトモグラフィーは、速度解析の計測および解析上の欠点を補うとともに、より鋭敏にき裂の頻度・状態を表すものと考えられる。現在、一般の振幅減衰ジオトモグラフィーでは内部粘性を示しているが、解析に用いる振幅値は内部粘性よりき裂によりより変化することを考慮すれば、今後はき裂の項をより検討し十分考慮していくことが必要であると思われる。その結果、き裂の頻度や状態を推定していくことが可能であると思われる。

最後に、現場試験に協力頂いた阪奈トンネルJ V、解析に協力頂いた大成建設技術研究所の諸氏に感謝の意を表したい。

<参考文献>

- 1) 渡辺 俊樹, 佐々 宏一: 振幅を用いたトモグラフィによる現場データの解析(2), 物理探査学会第83回学術講演会論文集, p118-121, 1990.
- 2) 下茂道人 他: 深部地下岩盤調査のための新しい弾性波ジオトモグラフィー法, 大成建設技術研究所報第21号, 1988.
- 3) Michael Fehler, Chris Pearson: ACOUSTIC RADIATION PATTERNS FOR BOREHOLE SOURCES, SPWLA TWENTY-SECOND ANNUAL LOGGING SYMPOSIUM, 1981.

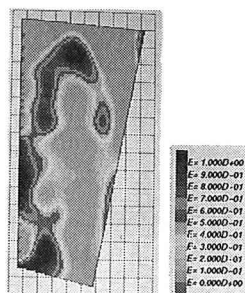


写真-2 相対減衰分布