

(92) 弾性波ジオトモグラフィーにおける周波数特性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	○ 松崎	聡
京都大学大学院	学生員	岸田	潔
京都大学大学院	学生員	安藤	拓

Fundamental Study on Frequency Dependency in Seismic Tomography

Chikaosa TANIMOTO, Satoshi MATSUSAKI, Kiyoshi KISHIDA
and Taku ANDO - Dept. of Civil Eng., Kyoto University

Abstract

The Geotomography technique has been conveniently applied in various fields. There are two kinds of analyses : namely, velocity distribution and energy distribution mappings. Propagating wave velocity analysis shows neither detailed joint behavior nor change of apertures. Then the authors have been carrying out the laboratory tests to investigate the change of propagating wave amplitude through a specimen with a single artificial joint under tconstant contact pressure. It is considered that, knowing damping effect in a discontinuous body, the distribution of joints and the variation of respective joint apertures can be detected by propagating wave amplitudes and it provides more useful and reliable information on jointed rock masses than the conventional method based on propagation velocity.

1. 緒言

岩盤構造物を設計・施工する場合、その原位置岩盤の力学的挙動を把握する事が重要である。しかし原位置岩盤の力学的挙動は不連続面に大きく左右される[1]。そのため不連続面の状態を把握せずに力学的挙動を想定してもほとんど意味の無いものとなる。さて、原位置岩盤を調査する一手法として弾性波ジオトモグラフィーが挙げられる。これは従来弾性波速度をインデックスとして地盤内の速度分布を可視化していくものであり、不連続面の状態に関する情報はほとんど得られていない。これに対し、エネルギー減衰を考慮にいたれた振幅解析を行い、波動の減衰機構を解明できれば、き裂情報を含んだよりよい解析が実施できる[2]。本研究では、特に入力する波形の周波数の変化がき裂によりどの様に影響されるのかを調べるため、室内試験とシミュレーションを行い、波動振幅減衰機構の解明を試みた。

2. 振幅減衰に関する考え方

波が媒体中を伝播すると、数々の要因により波のエネルギーは変化する。波のエネルギーと振幅値には相関関係があり、振幅値の変化を捉える事でエネルギーの変化を理解することができる。エネルギーの変化、すなわち振幅値の変化の主要な原因は、伝播距離に起因する幾何的減衰及び媒体の材質による内部粘性減衰が考えられる。しかし実際の岩盤中での伝播においては、不連続面により透過損失・拡散・分解などの現象が起り、それによる減衰は波形の減衰全体で大きな割合を占めるものと考えられ、そこを抽出して解析する事によりき裂情報を得ることができると考える。

ある点での振幅値 A_0 の波は距離 r 離れた観測点に伝播すると、幾何減衰と媒体の内部粘性減衰により次式のような振幅値 A となる。

$$A = \frac{A_0}{r^n} \exp(-\alpha r) \quad \dots\dots (1)$$

ただし、 α は内部粘性による媒体固有の減衰定数である。

しかもき裂を通過することによって波の振幅は著しく減衰すると考えられる。き裂の状態（き裂頻度 n 、開口幅 b 、充填物の粘性 β ）や波の周波数 f によって決定される因子を考慮する必要がある。これらの要因をすべて考慮に入れると、実際の振幅の変化は次式のようなものと考えられる。

$$A = \frac{A_0}{r^m} \exp(-\alpha r) \cdot F(n, b, \beta, f) \quad \dots\dots(2)$$

ここでは関数 F を積の形で導入したが、その適性は後述の実験やその他の実験を通じて関数 F の解明と併せて行わなければならない。この関数 F を解明することにより、振幅減衰ジオトモグラフィーをき裂の状態に関して評価することができると考える。

3. 室内試験

室内試験は花崗岩の円柱供試体（密度 2.60g/cm^3 ）を用いて一軸圧縮状態（一定 20kgf/cm^2 ）で行った。その試験装置と計測システムを図-1に示す。試験方法は、両端面にAEセンサー（AE900S-WB：エヌエフ回路ブロック）を取り付けた円柱供試体に、載荷板で一定の圧縮応力 20kgf/cm^2 をかけた。それと同時にパルスジェネレーターでサイン波形一波をAEセンサーから入力し、供試体を伝播してきた波を他方のAEセンサーで受信し、オシロスコープでその波形を測定し、初動と第一波振幅を読みとった。入力波の周波数は 10kHz から 200kHz までの範囲を 10kHz 毎に行い、それぞれ測定した。

次に供試体を二つに切り、きれいに整形して両端面に平行な単一ジョイントを持つ供試体を作成した。この供試体のジョイント内に充填物として豊浦標準砂（密度 1.98g/cm^3 ）を挟み、定応力下で同様の試験を行い、充填物による影響も考慮した。なお充填物の間隔は、 0.5mm 、 1mm 、 2mm の3種類とした。

4. 試験結果

き裂の無い岩石供試体で測定された弾性波速度を図-2に示す。速度は、低周波数域（ $10\sim 40\text{kHz}$ ）ではわずかに偏差を生じるが、 $50\sim 200\text{kHz}$ ではほぼ一定値（約 5.5km/sec ）に落ち着く。 40kHz 以下の入力周波数を用いる場合には、速度値が正確に評価されていない可能性があり注意する必要がある。また各周波数で求めた岩の弾性波速度を用いて充填物（標準砂）の弾性波速度を求めると図3のようになる。この値も高周波（ 70kHz 以上）になると偏差も小さくなっており、しかも充填間隔による影響も認められない。これらのことから、試験に用いたAEセ

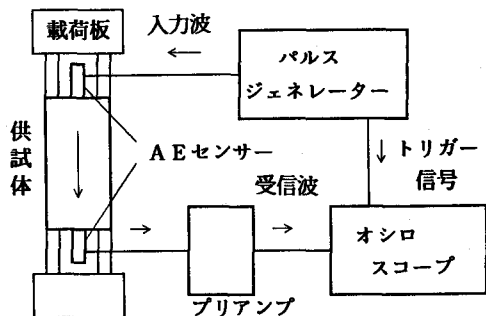


図-1 計測システム

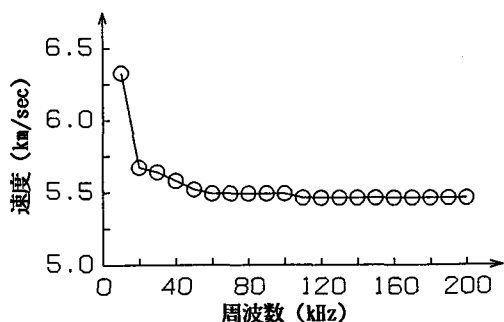


図-2 室内試験での周波数～岩の弾性波速度

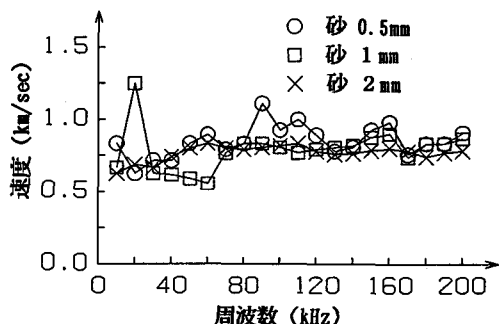


図-3 室内試験での周波数～標準砂の弾性波速度

ンサーの特性にもよるが、速度解析をする場合には、70～200kHzの周波数が適当であると思われる。シミュレーションでは、代表値として100kHzの時の弾性波速度を用いることにした。

次に、き裂のある場合の第一波振幅値をき裂の無いもので除したものを振幅比と定義して、この振幅比による評価を行った。き裂のない時の振幅値を(1)式、き裂のあるときの振幅値を(2)式とするならば、振幅比は関数Fになる。振幅比と入力周波数との関係を図-4に示す。振幅比とはき裂とその間の充填物の内部粘性によりどの程度エネルギーが減衰したかを表すパラメータであり、それは充填物間隔が大きくなるほど小さくなるといった定性的な傾向がある。入力周波数との関係を考察すると、50kHz以上ではほぼ一定値であるにもかかわらず、低周波数域(10～40kHz)においては振幅比を過大に評価している可能性が高く、室内試験をする際には注意を必要とする。換言すれば、高周波の波ほどき裂によるエネルギー減衰が起こりやすいと考えられる。

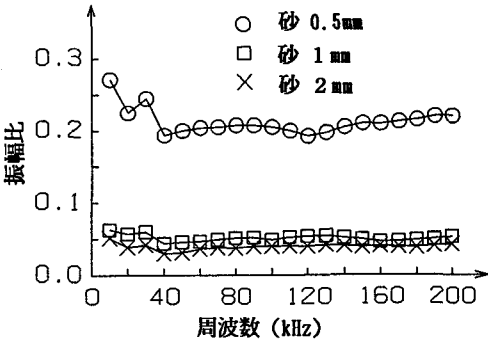


図-4 室内試験での周波数～振幅比

5. 一次元波動伝播シミュレーション

き裂を含む岩石供試体中を伝播する弾性波の入力周波数の変化による出力波形を調べるため、一次元弾性波動シミュレーションを行った。

一次元弾性体を仮定し、運動方程式と圧力pと粒子速度uとの関係式を媒体の音響インピーダンスZと波の伝播速度cを用いると次の微分方程式で示すことができる。

$$Z=\frac{\partial u}{\partial t}+c\frac{\partial p}{\partial x}=0,\frac{\partial p}{\partial t}+Zc\frac{\partial u}{\partial x}=0\qquad\cdots\cdots(3)$$

この式を、田中[3]によって示された特性曲線法で簡略化し、陽解法差分近似によって解いた。メッシュ分割は、長さの代わりに層の長さxを伝播速度cで割った伝播時間θを用い、Δθ間隔の時間メッシュとした。

実際にシミュレーションで用いたパラメータは表-1に示したが、それは実験結果をもとに決定した。したがって、1メッシュはΔθ=0.94(μsec)となり、岩実質部分では1■が2メッシュ、ジョイント部分では1■を14メッシュとして計算を行った。解の安定性・収束性を考慮すると

$$\frac{c\cdot\Delta\theta}{x}=0.05\qquad\cdots\cdots(4)$$

となり、次式の一次元波動伝播の解の安定・収束条件

$$0<\frac{c\cdot\Delta\theta}{x}\leq1\qquad\cdots\cdots(5)$$

を満足している。また、メッシュ間隔に関係なく誤差ゼロで解析可能であり、グリッド分散現象も見られなかった。

シミュレーションモデルも、実験を考慮してメッシュ分割し、ジョイント部の幅は、0.5mm, 1mm, 2mmとした。また、入力波周波数も実験同様に10～200kHzの範囲で10kHz毎に変化させた。

入力波周波数と振幅比(き裂のある

表-1 シミュレーション入力パラメータ

	岩石実質部分	ジョイント部分
伝播速度	5.49(km/s)	0.8065(km/s)
密度	2.60	2.0
インピーダンス	14.274	1.613

ものの第一波振幅値をき裂の無いものの第一波振幅値で除したものの)の関係を図-5に示す。

媒質1から媒質2へ波が入力する場合、その透過率 γ_{12} は媒質の媒質インピーダンスをそれぞれ Z_1 , Z_2 とすると、以下の式で表される。

$$\gamma_{12} = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad \dots\dots(6)$$

したがって、波が媒質1から薄層の媒質2へ、さらに媒質1と透過する場合の透過率 γ は以下のようになる。

$$\gamma = \gamma_{12} \times \gamma_{21} = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} \times \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad \dots\dots(7)$$

岩石部のインピーダンス $Z_1=14,274$ 、ジョイント部のインピーダンス $Z_2=1,613$ を式(7)に代入すると、 $\gamma=0.364$ となる。確かに、ジョイント幅1mmでは120kHz以降、2mmでは60kHz以降で振幅値は透過率と一致している。しかし、低周波数領域(10kHz~110kHz)では、ジョイント部内での重複反射波が重ね合わさるので透過率より大きくなる。

以上のように、ジョイント部の存在による弾性波の振幅への影響は入力周波数に依存しており、このモデルにおいては低周波数領域でジョイント部の開口幅の差異を評価できるものと考ええる。実際の実験と比較すると、実験は波動が3次的に伝播しており側面および両端面の反射波が存在し、また円柱供試体においては波動が分解したり、波長と供試体径との関係によっては波形のひずみ方向が供試体の中心と側面とは逆転するケースも考えられ[4]、傾向的に一致してこない。また、実験における振幅比がシミュレーションより小さくなるのは、ジョイント部での内部粘性が存在し、振幅比を大きく減少させているものと考えられる。実験結果から40kHz以下の周波数領域では振幅を過大に評価している可能性があると言ったが、こういった室内試験においては供試体の寸法と波長との関係も考慮する必要があり、すなわち弾性波試験においてもいわゆる「スケール効果」を考えていかねばならない。

6. 結言

室内試験より、波のエネルギーの減衰がジョイントの充填物の状態や入力周波数によって変化することが認められた。入力数波数が高いとエネルギー減衰も大きくなり、この結果入力数波数の影響を無視できないと思われる。シミュレーションでも同様の結果が得られたが、これは充填物の間隔と波の波長との関係により決まるものではないかと考えられる。この論文では充填物の間隔や周波数の影響しか考慮していないが、き裂の数や充填物の状態によっても波が変化すると考えられる。今回は周波数と振幅比の関係から考察を行ったが、これらの要因をできるだけ考慮した上で、(2)式の関数Fを見いだすことにより、き裂によるエネルギー減衰を考慮した弾性波ジョトモグラフィーを開発していくことができるものと期待している。

<参考文献>

- [1] 例えば 谷本 親伯 他：弾性波振幅減衰ジョトモグラフィーの開発に関する基礎的研究，第26回土質工学研究発表会講演集，p131~134，1991
- [2] 例えば 谷本 親伯 他：弾性波周波数特性とジョトモグラフィー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会論文集，p11~15，1991
- [3] 田中 一三：段発発破による発破振動の軽減（第2報），工業火薬，Vol.42，No.4，1981.
- [4] 実吉 純一 他監修：超音波技術便覧，p95~103

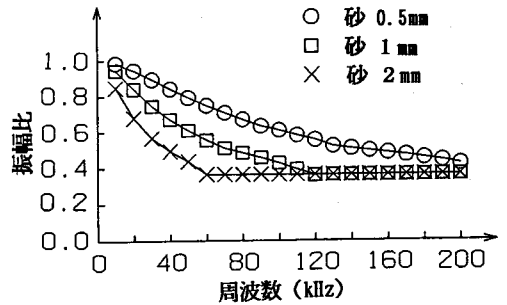


図-5 シミュレーションでの周波数～振幅比