

# (56) 弾性波減衰ジオトモグラフィーの応用とき裂性状

京都大学工学部 正会員 岸田 潔  
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 小田原雄一

## Application of Seismic Attenuation Geotomography to Jointed Rock

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

**Abstract :** Prior to the construction of rock structure, we must know the orientation and characteristics of major discontinuities in an objective area. From many kinds of investigations at ground surface and in boreholes, we can get only one-dimensional information, but that is not enough. In order to get two or three-dimensional information on discontinuous rock, the authors have applied the newly developed seismic attenuation geotomography technique in addition to the conventional seismic geotomography, which provides only the distribution of velocities. Based on the past research of ours, when the magnitude of joint aperture is less than 0.2mm in width and confining pressure at joints is less than 2MPa, velocity change does not suggest the influence of existing joints. The change of amplitude of propagating wave, however, can reflect the effect of joint. Because of the clear reduction of running energy at joint, we can detect the location of joint and the degree of the so-called loosening zone behind the free face. Also, the authors have carried out the fundamental laboratory test with stacked rock specimens corresponding to actual rock mass. The focal point of this paper is that the boundary condition, which means the setup of measuring lines (shot and receive points), highly affects the accuracy of the interpretation through the geotomography. And we have carried out seismic exploration using a cross-hole configuration and analyzed to compare the result with borehole survey.

### 1. 緒言

地下構造物を設計・施工する際には、原位置岩盤内に存在する断層・き裂等の情報をより詳細に入手する必要があるが、ボーリング孔や地表の観察のみでは基本的に局所的な情報しか得られないのが現状である。これに対し近年、探査の分野において弾性波ジオトモグラフィー手法を用いて原位置での未知の領域を二次元的もしくは三次元的に断面図として画像化できるようになり、土木の分野においても実用性が増してきた。

このジオトモグラフィーで画像化する場合、ほとんどが弾性波速度の分布として表される。ところで、岩盤工学の見地からはき裂状態の把握が大きなポイントとなるが、き裂の性状によって弾性波速度はあまり顕著な変化を示さないこともある。逆に言えば、速度分布からき裂状態を把握することは難しく、これに代わりエネルギーの減衰に着目した振幅減衰による評価が不可欠であり、これに関する研究を推進してきた。[1]

本論文では、数値モデルを用いてトモグラフィーの信頼性を考察し、次に実際に現場計測を行い、得られたトモグラフィー断面図とボーリング孔より得られた線的な情報との比較・検討を行い、き裂状態をどの程度まで推定し得るかを考察した。

### 2. 解析手法

解析の波線追跡には、Vidaleのアイコンナル方程式

$$\left(\frac{\partial t}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial t}{\partial y}\right)^2 = S(x, y)^2 \quad \dots\dots(1)$$

ただし、 $t = t(x, y)$  : 初期走時  
 $S(x, y)$  : スローネス値

を差分して求め、スローネス分布の再構成には、共役傾斜法を用いて行い、走時誤差が許容範囲内（今回は1%以内）に収まるまで繰り返し計算した。[2][3]

振幅解析では速度分布を求めた後その時の波線をそのまま利用した。振幅 $A_0$ の弾性波が長さ $r$ 、透過減衰定数 $\alpha$ の媒体を透過した後の波の第一波振幅を $A$ とすると、幾何減衰・粘性減衰を考慮して

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

ただし、 $k$  : 幾何減衰比例定数  
と表せる。[4] この式より $\alpha$ の分布は速度解析と同様のアルゴリズムで解くことができる。

### 3. 数値モデル実験

数値モデルには図-1のような簡単な水平層状速度モデルを考えた。発信点、受信点の配置図は、①縦二側面、②横二側面、③全周の三通りの方法で行った(図-2)。解析結果を図-3に示す。いずれの場合も③の方が収束性も良く、また結果も元のモデルに近いものになっている。特に②のように発信・受信の配置と平行な層では、元のモデルを再現するに至っていない。また速度変化の大きい部分では、その周辺もこれに伴い速度変化の影響が生じていることがわかる。

しかし実際に現場で調査する場合には地形的な制約もあり③のように調査できることはほとんどなく、有効な波線も取れないことが多い。こうした時には得られた断面図をそのまま解釈せずに、例えばボーリング孔によって得られる線的な情報を加味する必要がある。具体的な例は後述する。

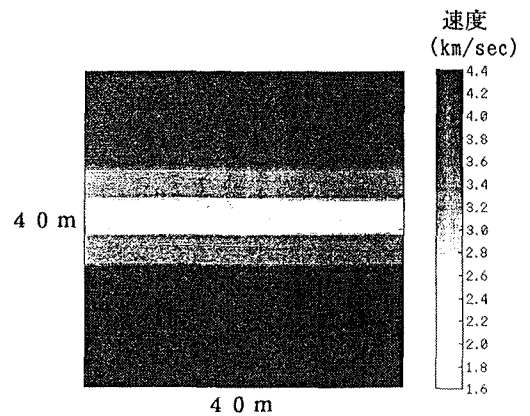


図-1 数値モデル

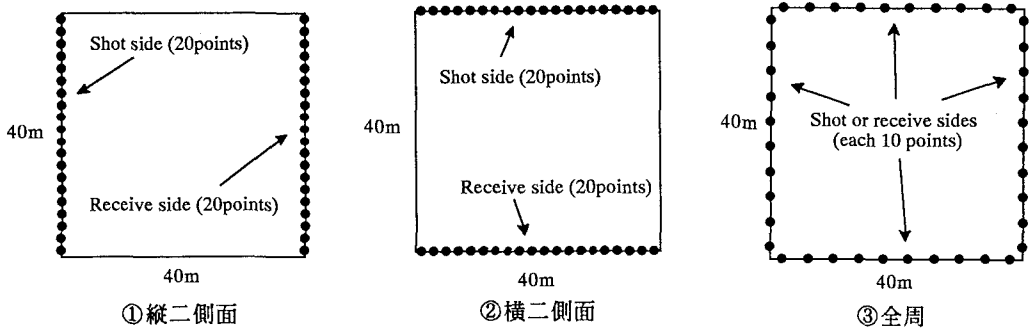


図-2 発信点、受信点の配置図

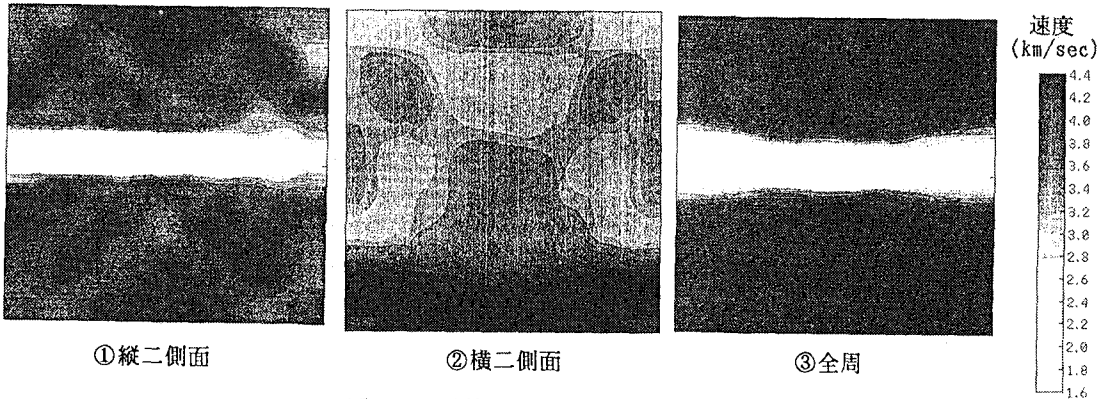


図-3 数値モデル解析結果

#### 4. 現場計測

調査地周辺は西日本内帯の美濃帯に属しており、岩種は珪化した粘板岩が主体である。弾性波ジオトモグラフィーは調査坑内に三本の垂直ボーリング孔（いずれも深さ70m、φ66mm、図-4参照）A、BおよびC孔を掘り、この三本のボーリング孔で作られる断面を用いて行った。発信には瞬発電気雷管、受信にはハイドロホン（ITI製）、受信波測定にはMcSEIS-16000（OYO製）を用いた。受信用ハイドロホンは水圧の変化を受信するため、地下水面下でしか測定できなかった。発信・受信の配置は1m間隔で測定し、各断面について発信受信を入れ換えた場合（リバース）も行った。

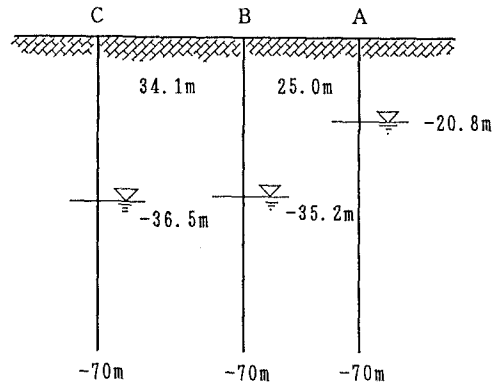


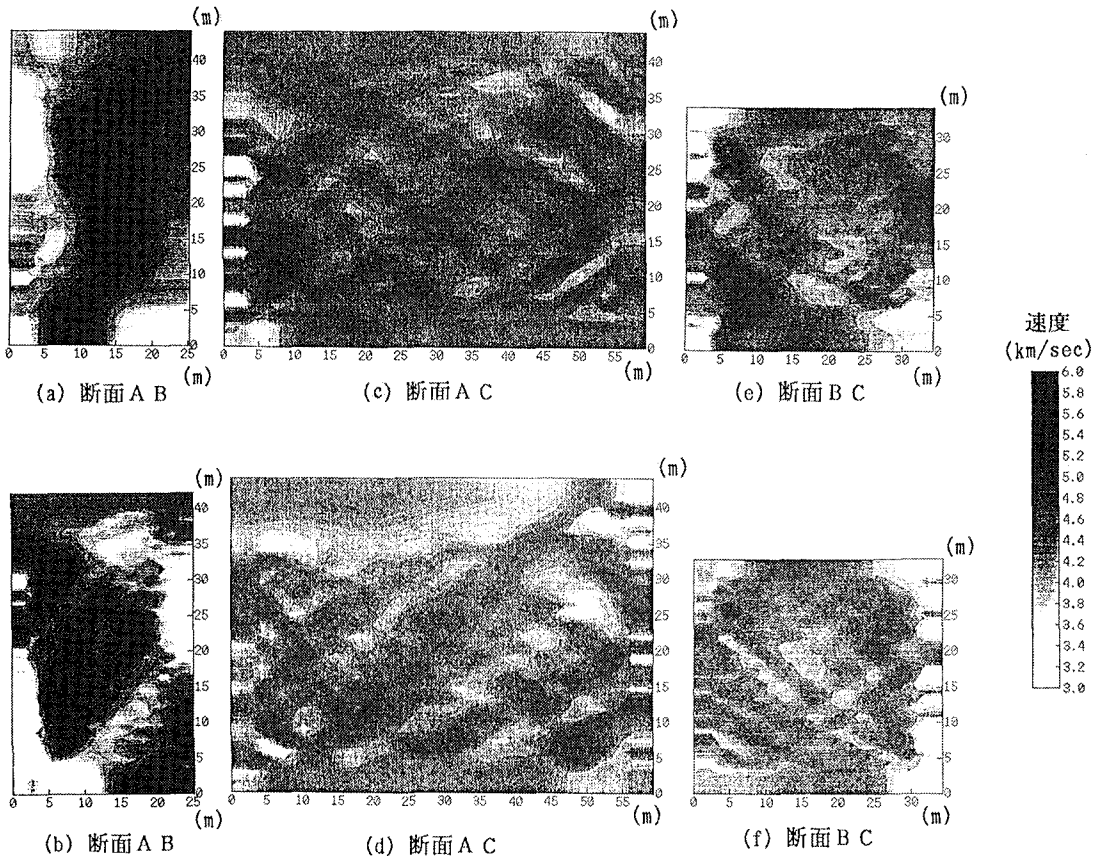
図-4 調査用ボーリング孔

表-1 断面と発信点・受信点・メッシュ分割

断面	発信孔	受信孔	メッシュ数	メッシュの大きさ	図-5
A B	A (43 個)	B (15 個)	20 個×28 個	1.26m × 1.58m	(a)
	B (32 個)	A (42 個)	28 個×44 個	0.90m × 0.96m	(b)
A C	A (45 個)	C (33 個)	40 個×30 個	1.48m × 1.47m	(c)
	C (33 個)	A (41 個)	40 個×30 個	1.48m × 1.47m	(d)
B C	B (32 個)	C (32 個)	30 個×30 個	1.14m × 1.10m	(e)
	C (34 個)	B (31 個)	30 個×30 個	1.14m × 1.14m	(f)

#### 5. 解析結果及び考察

解析メッシュ、速度解析結果をそれぞれ表-1、図-5に示す。いずれの断面においてもメッシュ数が波線数を上回らず、かつできるだけ正方形メッシュとなるように分割した。ほとんどの場合、5~10回の繰返



し計算で走時誤差を1%以内に収めることができた。

図-5で示すように、リバースした断面は必ずしも一致していないが、低速度帯の分布は部分的に推定できる。ボーリングによるき裂頻度(図-6)を比較すると、例えばB孔のき裂頻度の大きい部分(50~70m)で低速度帯が現れていることがわかる。

しかし、き裂の性状と弾性波速度との相関性に関しては、理論的にも実験的にも不明瞭な部分が多く、速度分布からき裂性状を把握させるまでには至っていない。そこで、ここでは断面ACに関し振幅減衰について解析し、その結果を図-7に示す。パラ

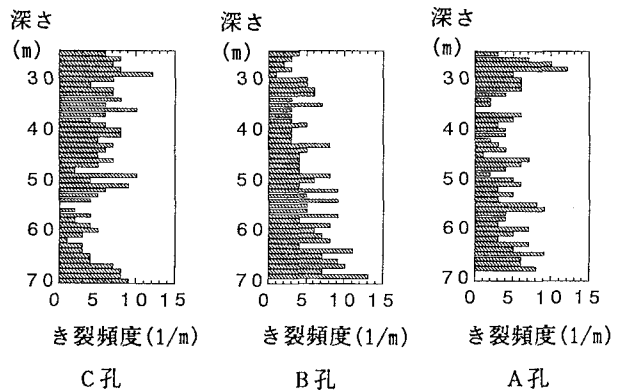


図-6 A, B, C孔におけるき裂頻度

メータとしては減衰定数 $\alpha$  [1/m] を用い、メッシュ分割は速度解析のそれと同じである。この図では、B孔のき裂頻度の大きい部分では波の減衰も大きくなっていることから、き裂の分布特性を表現していると考えられる。しかしこのような線的な情報との比較には限界があり、画像化された他の部分の信頼性を検討することはできない。

そこで筆者らは、A、BおよびC孔内のき裂情報をBSS (Borehole Scanner System) を用いて測定し、断面ACのき裂分布図を作成した(図-8)。図-7、8を比較すると、き裂の多く存在する部分と波の減衰の大きい部分とは位置的にかなり対応していると思われる。そこで二つの図を重ね合わせ、対応している部分を取り出すことにより、き裂の卓越している位置を推定するといった方法も可能であると思われる。

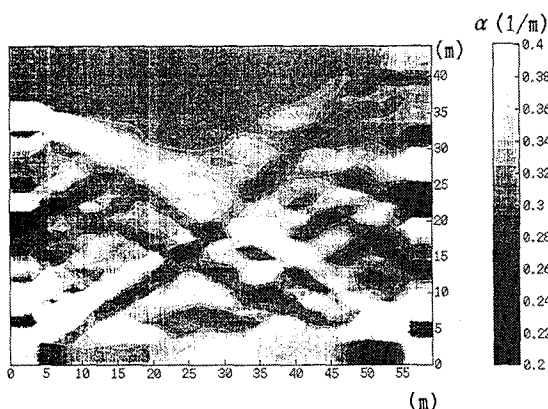


図-7 振幅減衰解析結果

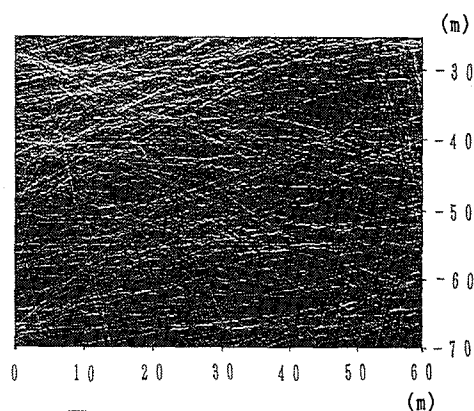


図-8 ポアホールスキャナーによるき裂分布図

## 6. 結言

今回は粘性による減衰をジオトモグラフィーに取り入れて画像化し、その結果の評価方法について述べた。実際に現場に適用する際のき裂の判定は、今回のようなBSSによるき裂分布図を作成し、それと比較・検討することにより、き裂の卓越している位置までは推定できる。すなわち、複数の解析結果によって、より信頼性の高い現場のデータとなり得る。岩盤工学では、このジオトモグラフィーをその一構成要素として位置づけるべきであり、他の構成要素との相互関係を考慮することで達成されるのである。今後はき裂の開口幅や風化度などによる分布図も検討していくことも必要である。

## 参考文献

- [1] 谷本 親伯 他, 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, 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
- [2] J. van Trier and W.W. Symes, "Upwind finite-difference calculation of traveltimes", Geophysics. Vol. 56, No. 6, pp812~821, 1991
- [3] John A. Scales, "Tomographic inversion via the conjugate gradient method, Geophysics. Vol. 52, No. 2, pp179~185, 1987
- [4] 谷本 親伯 他, 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, 第24回岩盤力学に関するシンポジウム講演会論文集, p450~453, 1992