

(100) 断層を含む軟岩地山のサイスミック・トモグラフィ探査

(株) 大林組技術研究所	正会員	桑原 徹
同 上	正会員	鈴木健一郎
同 上	正会員	平間邦興

Experimental exploration of seismic tomography in soft rock mass
including Tertiary fault zone

Tohru Kuwahara, Kenichiro Suzuki, Kunioki Hirama
Ohbayashi Corp., Tech. Res. Insit.

Abstract

We carried out the experimental exploration of seismic tomography using three boreholes of about 30 meters depth in the Tertiary system of pyroclastic rocks and mud stone. We tried to reconstruct the already well-known fault zone in this Tertiary system by tomographic technique. Measurement data were analyzed by BPT, ART and SIRT methods. Consequently, (1) main fault (1 meter width) and secondary fault (30 cm width) accompanied with weathering zone could be reconstructed by ART and SIRT methods, (2) distribution of travel time error in each cell is important factor for the judgement of convergence by iteration, (3) velocity of elastic wave calculated by previous-existed technique was sometimes different from those of tomography, and (4) result of tomography reflected those of soil and rock tests concerning fault materials and their host rock.

1. はじめに

近年、高レベル放射性廃棄物地層処分場の建設をはじめとする大深度地下空間の開発に当たり、深部岩盤の地質・岩盤物性・地下水流動の非破壊調査・試験技術の研究開発が大きく進められている。「ジオトモグラフィ探査技術」はこのような手法の一つである¹⁾。2)。「ジオトモグラフィ」は、原理的には医学分野で広く利用されているX線CTスキャンと同様なものであるが、地盤探査の場合は測定上の制約から解析上の精度や、測定装置をはじめとする計測技術に関して問題点が残されている。海外では良好な地質・岩盤条件下で優れた成果が得られているが、地質・地下水条件が全く異なる我が国では必ずしも同様な結果が得られ

るかは明らかではない。岩盤中の多数の亀裂、大小の断層、岩盤の変質帯、高い地下水位といったわが国特有の地質条件を考えると、「ジオトモグラフィ技術」の確立にあたり、既知の岩盤ブロック・模擬地盤などとともに、原位置岩盤に置ける実験的研究が重要であろう。

今回の報告は、軟岩に属する第三紀層の泥岩・凝灰岩層と、その中に分布する既知の典型的な第三紀の断層を対象にして、弾性波を利用したジオトモグラフィ、すなわち「サイスミック・トモグラフィ」をスーパーカ振源を用いて実施し、当技術の可能性や問題点を検討した。

2. 地質条件

調査対象地域の地質平面図は図-1に示す。調査地域は、主として第三紀層の火山れき凝灰岩・凝灰岩・泥岩・砂岩などからなり、2本の断層、すなわち主断層と副断層を含んでいる。主断層は幅1mの断層粘土からなるほぼ垂直に傾斜する正断層で、長さは全長で約8kmと報告されている⁹⁾、典型的な第三紀に活動した断層である。副断層は幅約30cmの変質帯からなるほぼ垂直の正断層であるが、主断層に切られておりその連続性は小さい。写真-1は主断層の状況を示す。

3. 測定方法と解析方法

3.1 測定方法

今回の調査は3本のボーリング孔を使用し、3断面計4ケースの探査実験を行なった。特にボーリング孔A、Bは、図-1に示すように両孔からなる測線が主断層に対してほぼ直交するように配置した。探査深度は調査地の基準面からGL-30mである。各断面の実験上の諸条件は表-1に示す。

図-2は測定系の模式図である。測定装置の概略は以下の通りである。

(1) 孔内発振装置（発火装置）

- ・日本電気（株）製 NE-19C型スパーク振源
発振エネルギー：20-50 Jule
発振周波数：0.5K-3.5KHz

- ・雷管及び火薬

(2) 受振器（ジオフォン）

- ・ジオスペース社製 HSJ-28型 小型地震計
地表用 12成分、孔内用 6成分

(3) データ収録器

- ・応用地質（株）製 MC-1300 型増幅器

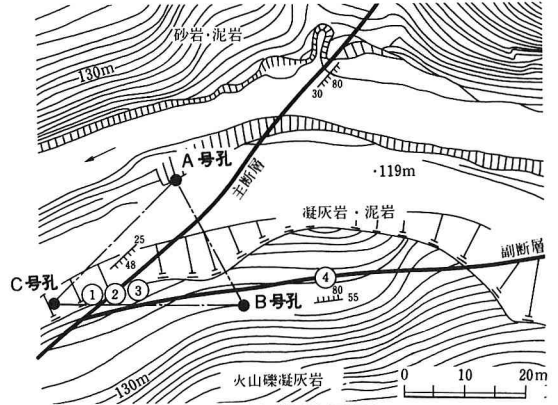


図-1 地質平面図



写真-1 主断層の状況

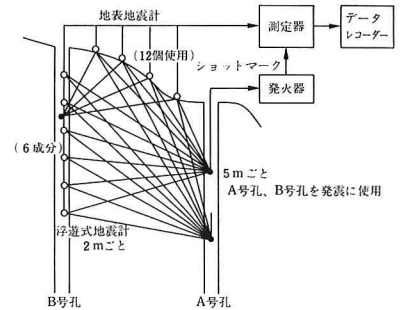


図-2 測定システム

表-1 実験条件

調査断面	孔間距離	測定パターン	孔内発振装置	発振点間隔	受振点間隔	主要解析法	セル数	波線数
A-B	23m	CH, UH, DH	雷管発破	5m	2m	ART 法	209	196
			スパーク	5m	2m	SIRT法	198	184
B-C	34m	CH, UH,	スパーク	5m	2m	SIRT法	306	161
C-A	24m	CH, UH, DH	スパーク	5m	2m	SIRT法	168	256

〔測定パターン〕 CH: クロスホール（孔間）測定、UH: アップホール（孔内発振、地表受振）測定、DH: ダウンホール（地表発振、孔内受振）、〔セルの大きさ〕約 水平 2m×深度 2m、〔波線経路〕直線波線、屈曲波線

3. 2 解析方法

今回はBPT法により速度構造の初期モデルを作成し、このモデルに基づきART法あるいはSIRT法により、地盤の速度構造を求めた。

セル内の波線経路は直線波線と屈曲波線の場合について求めた。屈曲波線は発振点から受振点までの直線の中間点から、左右直角方向に円の中心点を移動させて複数の円弧を作り、このうち計算した走時時間が最小になる円弧軌跡をもって経路とするものである。

4. 測定結果および解析結果

4. 1 測定結果

図-3は今回のクロスホールの測定記録の一例である。スパーカーによる記録波形は、雷管等の爆薬震源に比べて、エネルギーが小さいことや水圧の影響などにより初動の立ち上がりやや甘くなる傾向があるが、初動の読み取りには支障無かった。逆に爆薬震源による孔壁やケーシングの破損が無いこと、したがって発振孔、受振孔を入れかえて測定の精度を上げられること、スタッキングが容易であることなど、取り扱いが全体として容易であるという利点も多い。

4. 2 解析結果

(1) 収束性

今回の4ケースについて、直線波線経路の仮定の下でART法とSIRT法により、収束性について検討した。その結果、

- ・各セルを通過する波線の数(図-4)や長さ、各セルの走時残差の分布とあまり関係がない。

- ・繰り返し計算は5回までで走時残差はおおよそ収束し、5回以上になると逆に発散を始める場合もある。

- ・各セルの走時残差は解析領域の周辺部や地表面付近で大きく、これらの残差が繰り返し計算により小さくなり、全体の残差が平均として小さくなる。解析領域の中央部の残差はもともと小さい。(図-5)

- ・走時残差は全体としてSIRT法がART法より大きい。SIRT法の残差は繰り返し計算により急激に減少し、一方ART法では当初少ないため、残差は徐々に減少する。

(2) 波線ジオメトリ

図-6は、BC断面の直線波線と屈曲波線経路における、今回の測定解析における波線ジオメトリの例である。これはSIRT法で繰り返し計算5回のものである。

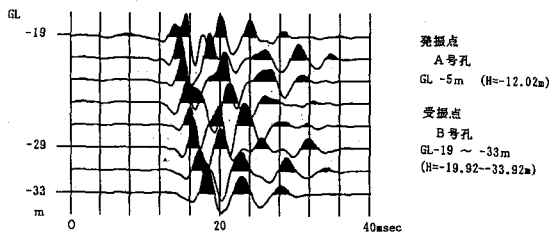


図-3 測定波形の例

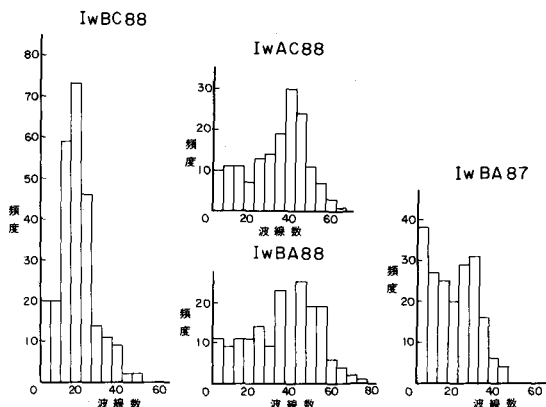


図-4 波線数の分布

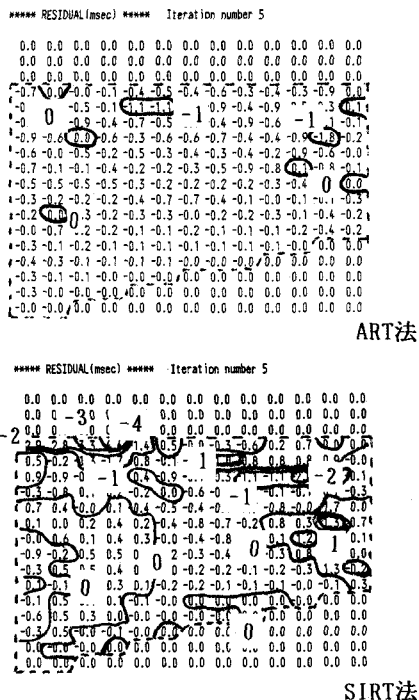
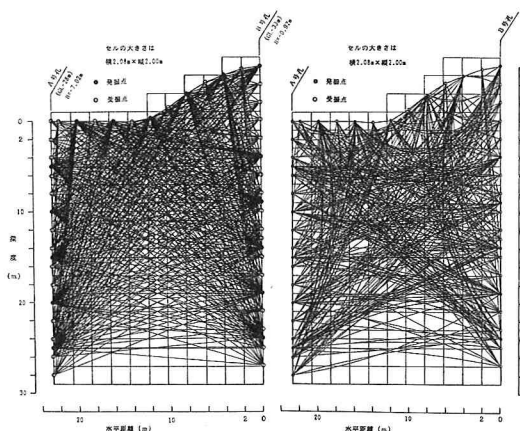


図-5 走時残差の分布



図－６ 波線経路

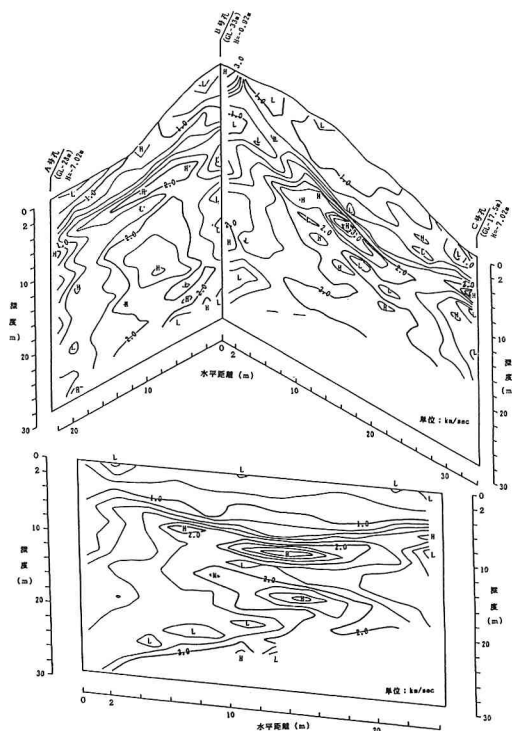
直線波線と屈曲波線の解析結果を比較すると、各断面とも全体の傾向は類似しているが、細部のパターンがかなり異なる。すなわち直線波線では断面の中央部の高速度帯が三角形に表現され、屈曲波線ではそれらの高速度部が上下に分割されている。また屈曲波線では結果として低速度部分が波線密度の粗の部分と一致し、より波線ジオメトリに対応したパターンとして表現されている。

(3) 断層の再現性

断層の再現性については表－２に示した。屈曲波線は必ずしも良く断層を再現しているわけではなく、直線波線の方が傾向を良く表わすことも多い。また副断層の方が良く再現されている。A－B断面の結果は２ケースについてあまり一致せず、実験の再現性という点では問題が残った。測定システムの相違、地下水位条件や風化の進行といった地盤条件の変化を微妙に受けているかもしれない。全体の傾向は直線波線によるSIRT法も良く合っているが、再生される速度値や地層の微妙な表現性は屈曲波線の方が良い。図－７は解析結果（SIRT法、屈曲波線、IT=5, 10）を平滑化してパネルダイアグラムにより空間的に表わしたものである。２次元解析断面から３次元的な空間分布の把握は比較的整合性のあるものとして表現できた。

(4) 各種弾性波速度の相互関係

ここでは、P S検層・ボーリングコアの超音波速度測定・サイスミックトモグラフィ・屈折法の結果について、A－B断面について比較検討する。P S検層の速度区分に従うと、表層が浅い場合検層で速度を決



図－７ 解析結果のパネルダイアグラム

表－２ 断層の再現性

断 面	地 質	直線波線	屈曲波線	発 振 源
A－B	主断層	△	○	雷管発破
	副断層	○	△	
A－B	主断層	△	△	スパーカ
	副断層	○	○	
B－C	主断層	○	△	スパーカ
	副断層	○	○	
C－A	低 速 帯	○	○	スパーカ

める走時点が少ないためか、検層とトモグラフィの結果はやや異なる。またトモグラフィを検層として解析すると、地震計の固定式と浮遊式との違いによるため

か、PS検層の結果よりも速度が大きくなった。コア速度とトモグラフィの結果は、細粒砂岩からなるA号孔で良い一致を示す。セル毎についてみると、コア速度と屈曲ART法に高い相関がみられる。屈折法とART法の結果を対比すると、第一層の速度についてはART法の結果は屈折法よりも30~40%速い。屈折法によると、第二層速度はB号孔に近い部分がA号孔付近よりも速い結果が得られているが、各ART法では逆の結果である。これはA号孔付近では「はぎ取り点」が少なく、屈折法の精度が低下したためと判断できる。⁴⁾

4. 3. 地質および土質的検討

主断層は幅1mの断層粘土からなり、露頭観察では断層に接する灰色細粒砂岩を起源としている。これらの粘土鉱物組成は表-3に示すが、断層粘土はスメクタイト、石英を多量に含み、母岩に対して総体的なスメクタイト、石英の増加、長石、クリストバライトの減少が見られる。砂岩には含まれない斜ブチル沸石も存在することから、凝灰岩の一部もこの断層に含まれるらしい。また断層粘土の土質試験、A、B号孔の代表的なコア試料の岩石試験結果は、表-4のようにまとめられる。これから断層部分は、特に強度・変形特性の点で劣化帯となっていることが分かる。副断層は幅30cmの変質帯からなるが、これはスメクタイトの存在からも裏付けられる。

主断層はトモグラフィの結果低速度帯として表現されているが、主断層部分は物質の変化とそれに伴う物性変化を生じており、弾性波速度の差として当然現れたと判断できる。しかし速度コントラストが小さいために、解析結果は直線、屈曲波線で変らなかったようである。一方副断層は、規模も小さく地山全体としては物性的には大差無いと思われるが、周辺部分の風化劣化が大きく、そのためトモグラフィの結果でも十分再構成されたと考えられる。

5. まとめ

- (1) 地表地質調査で確認されている軟岩地山中の断層に対してサイスミック・トモグラフィを実施した結果、これをある程度再構成することができた。
- (2) 解析にあたっては、各セルにおける走時残差の分布も収束性の判断にあたり重要である。
- (3) 従来手法で得られる弾性波速度とは一致しない部分もあり、今後の課題である。

表-3 地盤の粘土鉱物組成

試料番号 鉱物名	①砂岩	②主断層	③凝灰岩	④副断層
緑泥石		+		
雲母	+	+		
スメクタイト	++	+++	+++	+++
カオリナイト	+			
斜ブチル沸石		+	+++	+
長石	+++	++	+	+++
石英	++	+++	+	+
クリストバライト	++			
普通輝石	+			

+++：多い、++：中、+：少ない

表-4 岩の物理力学試験結果

試験試料	A号孔 (細粒砂岩)	主断層 (断層粘土)	B号孔 (火山れき凝灰岩)
試験結果			
単位体積重量(g/cm ³)	1.45-1.88	1.80-1.89	1.76-2.13
含水比(%)	29.7-36.1	31.3-42.9	14.4-26.2
真比重	2.584-2.657	2.641	2.420-2.650
間隙率	44.8-56.8	46.0-52.3	34.8-41.8
P波速度(km/sec)	1.50-1.82	1.54	1.66-2.74
S波速度(km/sec)	0.85-1.20	—	1.00-1.57
一軸圧縮強度(kgf/cm ²)	82.5-176.2	—	148.0-408.0
圧裂引張強度(kgf/cm ²)	10.8-32.3	—	16.6-39.8
静弾性係数(kgf/cm ²)	1.0-3.1×10 ⁴	—	1.5-6.9×10 ⁴
動弾性係数(kgf/cm ²)	3.1-5.3×10 ⁴	—	3.2-11.7×10 ⁴
静ポアソン比	0.10-0.20	—	0.06-0.33
動ポアソン比	0.05-0.35	—	3.2-11.7×10 ⁴
粘着力(kgf/cm ²)	—	0.35(cu)	—
内部摩擦角(度)	—	7(cu)	—

(4) スーパーカ振源は波の伝播距離など今後の課題もあるが、孔内用非破壊振源としては、取り扱いの容易性もあり有効なシステムである。

参考文献

- 1) Technical Report/SKB Annual Report 1985, (1986) pp. 1~33
- 2) Crosshole Investigations-SKB Final Report, TR 87-16, (1987)
- 3) 5万分の1 地質図幅「城端」および同説明書、通産省地質調査所, (1964), pp. 1~32
- 4) サイスミック・トモグラフィによる地盤調査例、大林組技術研究所報, No. 38, pp. 1-6, (1989)