

## 先進ボーリングを利用した弾性波トモグラフィによる切羽前方の地質予知

PREDICTION OF GEOLOGICAL CONDITION BEYOND A FACE BASED ON THE  
CROSSHOLE SEISMIC TOMOGRAPHY USING PILOT BORING

西野治彦\*・山本松生\*・河村精一\*\*・吉沢貞人\*\*・神山博\*\*

Haruhiko NISHINO, Matsuo YAMAMOTO, Seiichi KOUYAMA, Sadato YOSHIKAWA and Hiroshi KOUYAMA

We carried out in-situ experiment on crosshole seismic tomography, using horizontal pilot boring in tunnel. In this experiment, geological condition beyond a face was predicted by measuring a distribution of elastic wave velocity.

Comparing the geological condition predicted by seismic tomography with that obtained by observation, it was confirmed that a geological condition of ground was grasped with sufficient accuracy by means of crosshole seismic tomography using pilot boring in tunnel.

Keywords : NATM, in-situ test, crosshole seismic tomography, pilot boring

### 1. はじめに

山岳トンネルにおいて、掘削前に切羽前方の地質状況が把握できれば、掘削に伴う地山挙動や発生する事態を事前に予測して適切な対策を施すことができる。そのため、トンネル切羽前方の地質状況を予測することは、工事を安全かつ経済的に進めていくうえで重要な役割を果たす。特に、切羽前方の地質が極めて不良な場合や湧水の発生が予想される場合など、先進ボーリング等により切羽前方の地質状況を把握する意義は大きいと考えられる。

しかしながら、先進ボーリングから得られる地質情報は部分的かつ線的な情報であるため、その内容が全体的な地質状況を的確に示していない場合もしばしば認められる。そこで、全体的な地質状況を、広く面的に、しかも、詳細に把握する方法として、弾性波、電磁波、比抵抗などを用いた各種ジオトモグラフィの活用が提案されている。トモグラフィとは、医療用のX線CTスキャナーに見られるように、対象領域の周辺から領域内の様々な方向の投影データを収集し、領域内の面的なイメージを再構成する手法である。医療分野において多用されているトモグラフィ技術は、近年、地盤探査や土木の分野においてジオトモグラフィ技術として利用され、様々な適用例と有効性が報告されつつある<sup>1) 2) 3)</sup>。

筆者らは、実際の硬岩トンネルを対象に先進ボーリングを利用した弾性波トモグラフィを実施し、その結

\* 正会員 佐藤工業株式会社

\*\* 正会員 中部電力株式会社

果に基づいて切羽前方の地質予測を行った。本報告は、予測した地質状況とボーリング調査や掘削時の切羽観察から確認した実際の地質状況とを比較することにより、先進ボーリングを利用した弾性波トモグラフィの切羽前方予知への適用性を検討するものである。

## 2. 施工概要・地質概要

対象としたトンネルは、延長942m、掘削直径8.3mの水路トンネルであり、全長にわたり発破によるNATMを採用している。弾性波トモグラフィは、対象トンネルの終点、すなわち、隣接工区との工区界付近である30m区間において実施した。

調査区間(30m区間)の地質は、中生代ジュラ紀の砂岩層および砂岩・頁岩互層からなり、大部分が砂岩層であった。砂岩層はCII級～CM級の比較的良好な岩盤であるが、割れ目がかかり発達し、割れ目沿いに風化変質している部分も認められた。砂岩・頁岩互層はCL級主体のやや脆弱な岩盤であり、砂岩優勢の中に幅数cmの頁岩が縞状に認められた。写真-1に砂岩および砂岩・頁岩互層のコア写真を示す。

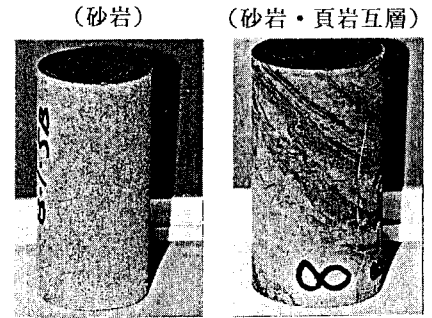


写真-1 コア写真

## 3. 調査方法

弾性波トモグラフィの調査位置平面図を図-1に示す。対象トンネルであるA工区の終点付近の30m区間を調査区間とした。既に掘削の終了した隣接工区(B工区)の左右側壁に設けた拡幅部から、未掘削である調査区間を挟むように2本のボーリングを行った。2本のボーリング孔とB工区の切羽を利用して弾性波トモグラフィを行い、弾性波速度分布を把握することにより切羽前方の地質状況を予測した。また、実際の地質状況を確認するため、2本のボーリングのコアを利用してコア観察やコアの超音波速度試験、また、その後のトンネル掘削時における切羽観察も併せて行った。さらに、掘削に伴う地山挙動を確認するため、内空変位計測も行った。調査および計測の詳細は以下のとおりである。

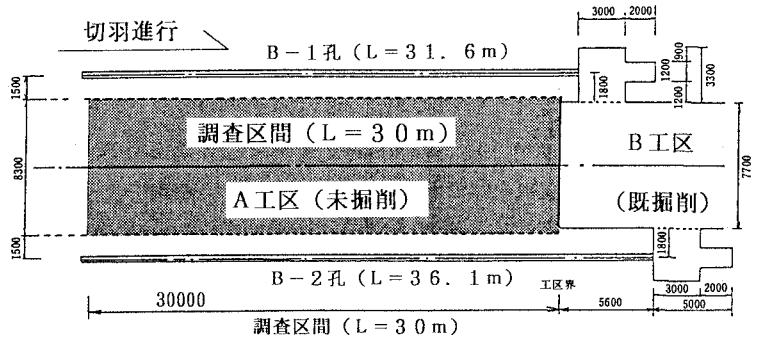


図-1 調査位置平面図

### (1) 弾性波速度の測定

弾性波速度の測定における起振点および受振点の位置と測定パターンを図-2に示す。起振には十分な起振力を得るために少量の火薬を用い、受振にはジオフォンを用いた。弾性波速度の測定においては、データ収録の際に非常に高い時間精度が必要であり、データ収録には高い時間分

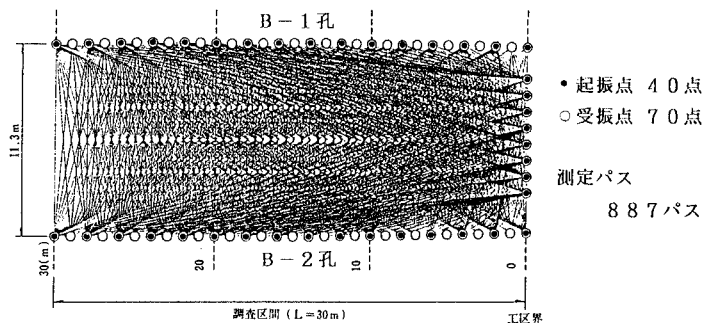


図-2 測定パターン

解能を有するデジタル収録システム（マックサイズ1600）を使用した。

### (2) 弾性波トモグラフィ

弾性波トモグラフィでは、まず、測定で得られた波形記録から初動走時を読み取り、起振点および受振点の位置座標を考慮して入力データの作成を行った。次に、対象領域を1辺1mの正方形セルに分割し、反復法<sup>4)5)</sup>により各セルの弾性波速度を算出して速度分布を求めた。反復法とは、設定した初期モデルに対して全ての起振点、受振点間の走時を計算し、この計算走時（理論走時）と実際に得られた観測走時との差が小さくなるようにモデルを逐次修正していく方法である。修正には、安定化処理付き最小自乗法（DLST）を用いた。解析のフローを図-3に示す。

### (3) ボーリング調査

2本のボーリングのコアを利用してコア観察を行い、岩種、岩盤等級、RQD、最大コア長等を観察した。また、超音波速度試験により岩石コアの超音波速度を求めた。

### (4) 切羽観察

調査区間を掘削する際に各切羽において切羽観察を行い、全体的な地質状況を確認した。各切羽で収集した主な地質情報は岩種、岩盤等級、破碎帯の有無、割れ目の状況、湧水状況などである。

### (5) 内空変位計測

調査区間30mにおいて、約5m間隔で6断面の計測断面No. 1～No. 6を設け、コンバージェンスメジャーにより水平1測線（スプリングライン）において内空変位計測を行った。計測断面位置を図-4に示す。

### (6) 理論解析による内空変位の算定

調査区間における地山挙動を解析的に確認するため、理論解析手法の1つであるEgger法により各計測断面の内空変位の予測を行った。調査区間ではCH級、CM級、CL級の岩盤が認められたことから、各計測断面とも、3種類の岩盤等級それぞれについて内空変位の計算を行った。各岩盤等級の地山物性は当サイトでの岩盤試験結果や既往の文献<sup>6)</sup>を参考にして表-1のように設定した。地山は完全弾塑性体とし、降伏条件はモール・クーロンの降伏基準を用いた。応力

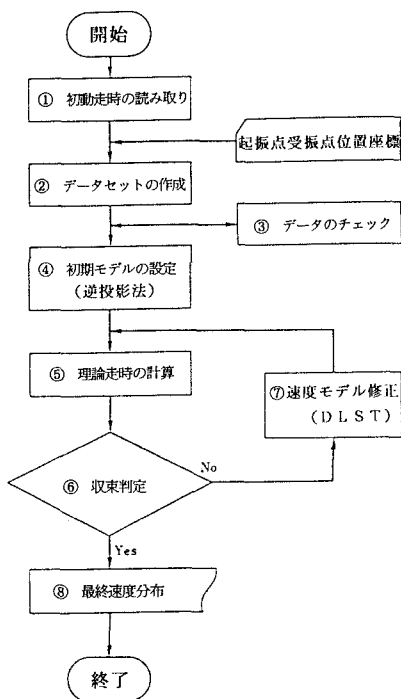


図-3 解析のフロー

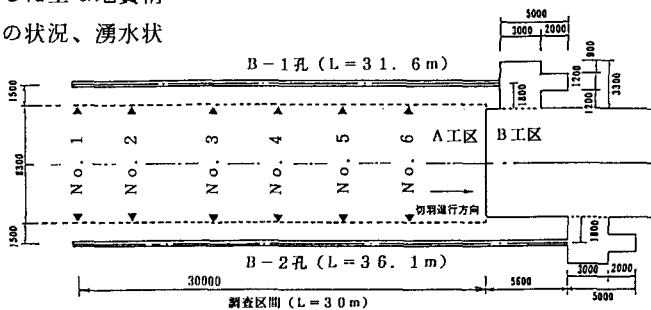


図-4 計測断面位置図

表-1 各岩盤等級における地山物性値

岩盤等級	C <sub>H</sub>	C <sub>M</sub>	C <sub>L</sub>
単位体積重量 $\gamma$ (t/m <sup>3</sup> )	2.6	2.6	2.6
弾性係数E (kg/cm <sup>2</sup> )	500000	300000	100000
ポアソン比 $\nu$	0.3	0.3	0.3
粘着力c (kg/cm <sup>2</sup> )	30	15	10
内部摩擦角 $\phi$ (°)	45	40	35

解放率は掘削後に100%応力が解放されるものとした。土被りは、各計測断面とも調査区間の平均的な土被り120mとした。支保パターンは、各計測断面において実際に施工された支保パターンをそれぞれ考慮しており、計測断面No. 1以外は全て同じ支保パターンである。

#### 4. 調査結果

弾性波トモグラフィ、ボーリング調査、切羽観察および内空変位計測の結果を以下に示す。

##### (1) トモグラフィ結果とボーリング結果

弾性波トモグラフィにより推定した切羽前方の弾性波速度分布を図-5に示す。ハッチングを施した部分は、弾性波速度が4.5 (km/s)以上の堅硬な領域および2.5 (km/s)未滿の脆弱な領域であり、それ以外の白地の部分は2.5~4.5 (km/s)の領域である。ここでは、弾性波トモグラフィの結果と実際の地質状況とを比較するため、ボーリングコアから得られた岩種、RQD、最大コア長、岩石の超音波速度も併せて示している。

##### (2) 切羽観察結果

トンネル掘削時の切羽観察から求めた地質展開図を図-6に示す。ここでは、切羽観察による岩種、電研式岩盤等級、割れ目の状況、湧水状況を示している。ハッチングを施した部分は、電研式岩盤等級がCH級主体の堅硬な部分およびCL級主体の脆弱な部分であり、それ以外の白地の部分はCM級主体の部分である。

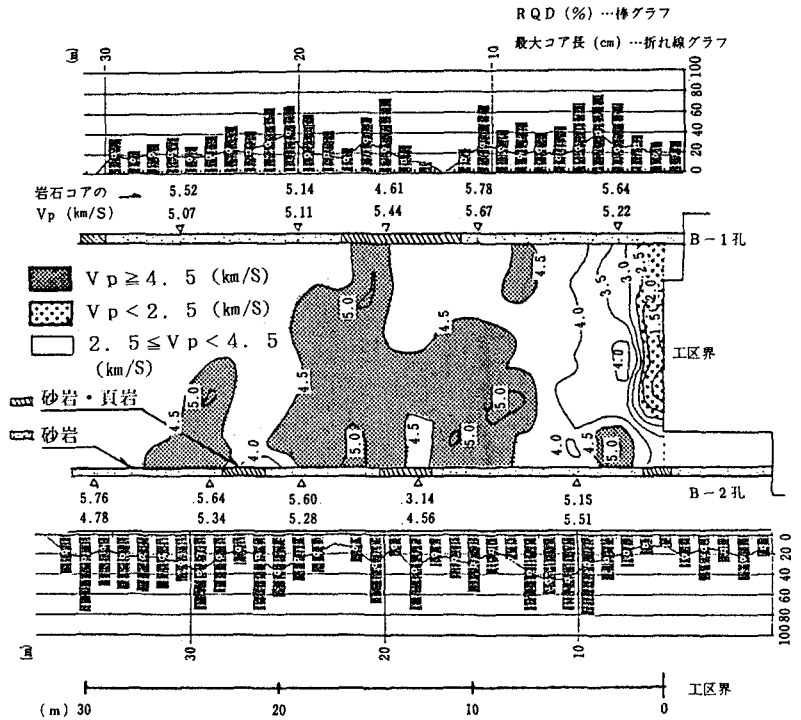


図-5 弾性波トモグラフィ結果およびボーリング結果

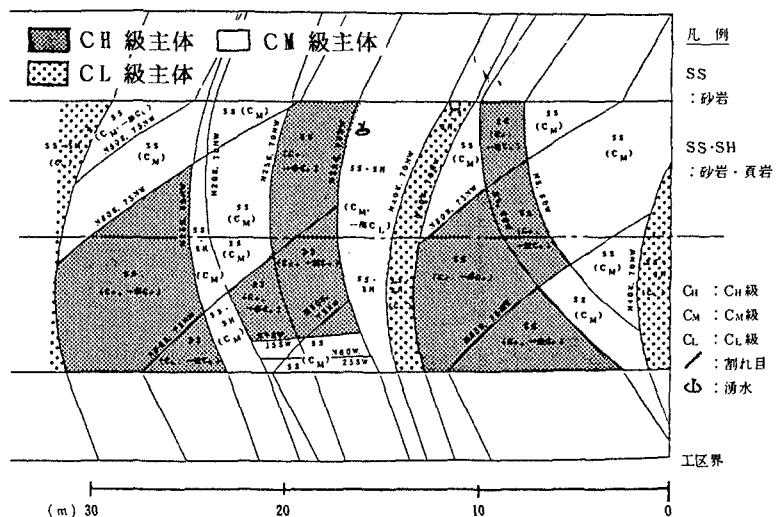


図-6 切羽観察に基づく地質展開図

(3) 内空変位計測結果

計測断面No. 1～No. 6における内空変位の経時変化を図-7に示す。計測断面No. 1～No. 5での内空変位は、量的にも経時的にもほぼ同様の傾向を示している。上半先進工法を採用しているため、内空変位は、上半切羽通過後に5mm程度で一旦収束するが、下半切羽通過に伴って再び増加しはじめ最終的に10mm程度となっている。ただし、B工区との工区界に最も近い計測断面No. 6での内空変位は他の計測断面よりも小さくなっている。これは、B工区掘削時に応力の一部が解放されたためと考えられる。

(4) 内空変位の計算値と実測値

Egger法で求めた各計測断面での内空変位の計算値を表-2に示す。ここでは、3種類の地山条件（CH級、CM級、CL級；表-1参照）でそれぞれ算出した内空変位の計算値に加えて、各計測断面における内空変位の実測値と切羽観察で確認された岩盤等級も併せて示している。

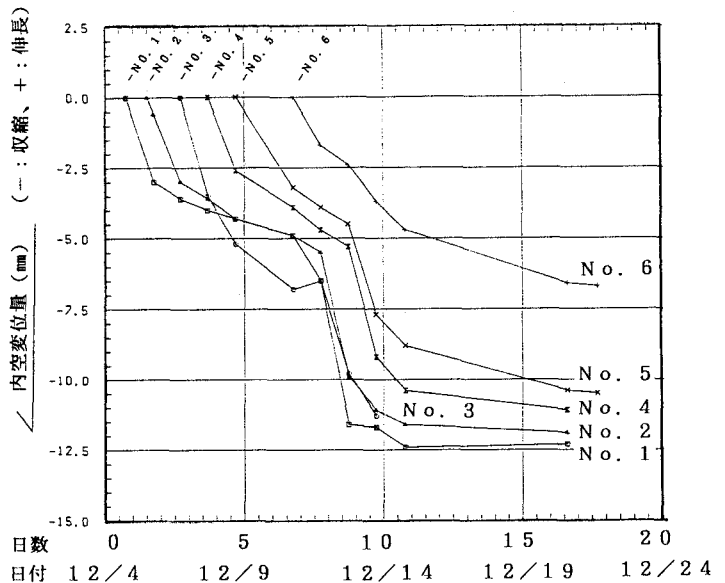


図-7 各計測断面での内空変位の経時変化

表-2 各計測断面での内空変位の計算値と実測値

		No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6
内 空 変 位	計 算 値	C <sub>H</sub> 級	5.6 mm		4.9 mm		
		C <sub>M</sub> 級	9.6 mm		8.4 mm		
		C <sub>L</sub> 級	29.6 mm		25.4 mm		
	実測値	12.9 mm	11.9 mm	11.3 mm	11.0 mm	10.5 mm	6.7 mm
切羽観察による 地山等級		C <sub>M</sub> 級主体	C <sub>M</sub> 級主体	C <sub>M</sub> ~ C <sub>H</sub> 級	C <sub>M</sub> 級主体	C <sub>M</sub> ~ C <sub>H</sub> 級	C <sub>M</sub> 級主体

(注) ・No. 1を除く、No. 2～No. 6断面は同一の支保パターンである。

・No. 6は、既に掘削の終了した隣接工区との工区界付近である。

・No. 1～No. 6は、いずれも土被り120mである。

5. 考察

今回の調査結果から、先進ボーリングを利用した弾性波トモグラフィの切羽前方予知への適用性について以下の知見を得ることができた。

(1) 弾性波トモグラフィによる切羽前方予知の有効性について

① 図-5のトモグラフィ結果において弾性波速度が4.5 (km/s) 以上となる領域では、図-6の切羽観察結果においてもCH級主体の良好な岩盤となっている。

②図-5のトモグラフィ結果によると、B工区との工区界付近は弾性波速度が2.5 (km/s) 未満と低い値を示しているが、これは、脆弱な砂岩・頁岩互層部に位置すること(図-6参照)や、B工区の掘削に伴う岩盤の緩みなどに起因するものと考えられる。

③これらの結果から、弾性波トモグラフィによる岩盤の良否と、切羽観察による岩盤の良否とは概ね一致しており、弾性波トモグラフィは切羽前方予知において有効な手段であると考えられる。

#### (2) 弾性波トモグラフィ結果とボーリング結果の整合性について

①図-5に示したトモグラフィ結果とボーリング結果とを比較すると、両者が示す岩盤の良否は概ね一致しており、ボーリング調査から切羽前方の地質状況にある程度把握できるものと考えられる。

②しかし、ボーリングコア状況からは複雑に分布する地質状況を詳細に把握することは難しく、全体的な地質状況を把握するためには、ボーリングコア状況に加えて必要に応じてジオトモグラフィの結果なども同時に考慮していくことが有効であると考えられる。

#### (3) 切羽前方予知による地山挙動の推定について

①表-2に示すように、切羽観察によれば、いずれの計測断面も地山等級はほぼCM級主体であることが確認できた。工区界付近である計測断面No. 6を除けば、いずれの計測断面においても、CM級岩盤で計算した内空変位(計算値)と、実際の内空変位(実測値)とがほぼ一致しており、Egger法により地山挙動が概略的に予測できることがわかる。

②上記の結果から、弾性波トモグラフィにより切羽前方の地山等級が把握できれば、掘削前においても、Egger法を用いて概略的な地山挙動を予測できると考えられる。

## 6. おわりに

実際の硬岩トンネルを対象に、先進ボーリングを利用した弾性波トモグラフィの切羽前方予知への適用性を検討した。今回の調査では、弾性波トモグラフィにより、相対的な岩盤の良否がかなりの確に判定できることが確認できた。今後は、様々な地質条件下における弾性波トモグラフィの実績を積み重ね、計測方法や解析方法を改善しながら精度の向上を図り、地山状況や地山挙動の推定に役立てていく所存である。

## 参考文献

- 1) 野口康二, 後藤真也, 古屋和夫, 芝本真尚, 西野治彦; トンネルにおける比抵抗トモグラフィの原位試験, 第8回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp.150-156, 1990年11月
- 2) K.Noguchi, T.Yuda, K.Furuya, M.Shibamoto, H.Nishino; In-situ Experimental Study on Resistivity Tomography in Tunnel, Proceedings of 7th International Congress on Rock Mechanics, Sep. 1991.
- 3) 菅原 捷, 神尾重雄, 斎藤秀樹, 島 裕雅; 岩盤調査におけるジオトモグラフィの適用性の検討, 第21回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.146-150, 1989年 2月
- 4) 大友秀夫; ジオトモグラフィ技術の現況, 物理探査, 第39巻, 第 6号, pp.58-71, 1986年12月
- 5) 斎藤秀樹, 大友秀夫; サイスマック・トモグラフィに関する数値実験 一起振点・受振点の配置が再構成像に及ぼす影響, 昭和61年度物理探査学会春期講演会講演予稿集, pp.41-42, 1986年 5月
- 6) 菊地宏吉, 藤枝 誠, 岡 信彦, 小林隆志; ダム基礎岩盤の耐荷性に関する地質工学的総合評価, 岩盤分類 応用地質特別号, pp.103-118, 1984年 8月