

パイロットセンサーにより計測した波形を用いてビットが地山を打撃する時刻（発振時刻）を求める。また、この発振時刻を用いて削孔振動の波形処理を行い、S/N比を向上させる。さらに、発振時刻と受振器に到達するまでの時間（観測走時）とビット位置のデータを用いてトモグラフィ解析を行うことにより、切羽前方地山の弾性波速度分布を把握する。

3. 現場実験

3.1 現場概要

実施場所は、奈良県南部の幅 8.5m、延長 980m、内空断面積 65m² の道路トンネルである。実験位置の地質状況を図-3に示す。地質は、四万十層群上部白亜系の堆積岩で、頁岩を主体として砂岩、緑色岩類、凝灰岩などを含有するメラングジュ層が分布する。実験は、出口側の坑口から 157m 手前の位置で行った。

3.2 発振時刻の把握実験

地山の弾性波速度を求めるためには、油圧式削岩機のビットが地山を打撃する時刻（発振時刻）が必要になる。削孔中は、孔内において打撃、回転を繰り返しているビットにセンサーを直接取り付け地山を打撃する時刻を計測することができない。そのため、ドリフタの振動を利用してビットの打撃時刻を把握することにした。図-4のように、ビットを地山に押し当てた状態にして打撃し、削岩機のドリフタ、およびビットに発生した振動を加速度計1と加速度計2で計測した。計測した振動波形を図-5に示す。長さ 3.66m のロッドを使用した場合は 0.709ms の時間差になり、ドリフタに設置した加速度計1の振動波形からビットの打撃時刻を求めることができる。また、事前の実験から、ロッドを接続すると打撃時刻が1本当たり 0.542ms の遅延が確認されており、パイロセンサーと受振点の初動の時間差から 0.709ms とロッドの追加接続による遅延時間（ロッド追加接続の本数×0.542ms）を引くことにより、発振点と受振点の走時を求めることができる。

3.3 計測手順と計測波形

削孔振動の計測では、図-1のように、トンネル切羽のモルタル吹付け面の7箇所（削孔位置と同じ高さで1.5m間隔）にφ55mm深さ20cmの孔を油圧式削岩機で削孔した。削孔した孔にモルタルを挿入して受振器を設置した（写真-1、写真-2）。また、トンネル切羽の左側と右側の2箇所において、切羽面から1.5m手前の側壁部からトンネル軸に対して15°の角度で切羽前方方向に削孔を行った。計測機器の仕様を表-1に示す。伝播距離が20m以上になるため、距離減衰により振動振幅の小さくなる削孔振動の走時を高い感度で計測する必要があることから、24bitのA/D分解能で24kHzのサンプリング周波数の計測装置を用いた。なお、トモグラフィ

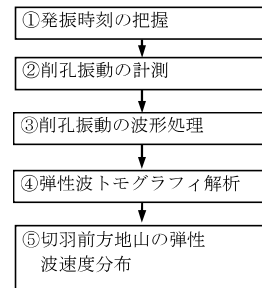


図-2 調査法の流れ

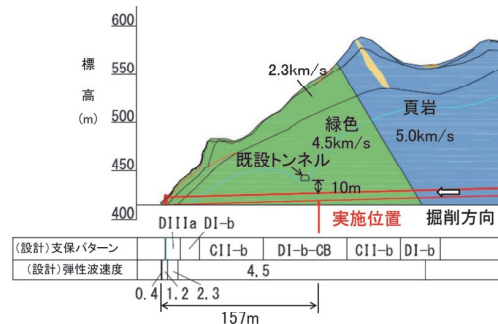


図-3 実験位置の地質状況

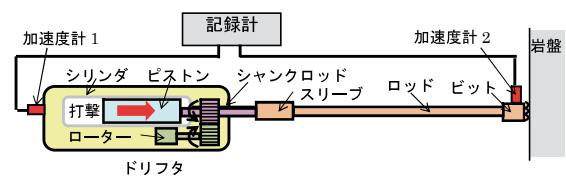


図-4 発振時刻の把握実験

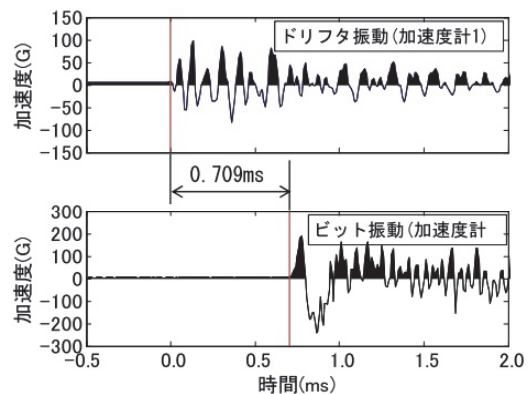


図-5 ドリフタ振動とビット振動の関係



写真-1 受振器設置状況 写真-2 パイロットセンサーの設置状況

フィ解析に必要な発振位置（ビットが地山を打撃した位置）のデータは、削孔層層において削孔長を計測する場合と同様にフィードの油圧回路に設置した油量計を用いて計測した。

3.4 振動波形の波形処理

削孔振動の波形処理手順を図-6に示す。以下に処理手順ごとに説明する。

a. 打撃ごとの波形に分割

削岩機に設置したパイロットセンサーと切羽面の受振器で受振した波形を、打撃ごとの波形列として図-7に示す。打撃ごとの波形は、パイロットセンサーで受振した波形の加速度振幅が±10Gを超えた時点を初動と見なして2msをプレトリガーとし、20msの波形を受振器で受振した波形を含めて抽出する。パイロットセンサーで受振した波形の初動付近を図-8に示す。これは、ピストンがシャンクロッドを打撃することにより発生した振動がドリフタのフレームを伝播したものであり、波形がパルス状にならないため、波の立ち上がりを読み取る初動に最大0.320msのばらつきが生じた。

b. 波形のスタッキング処理

ビットが地山を打撃する際、破碎したずりやビットと地山の間に挟まり、一様な打撃ができないことがあり、図-9に示した1回目の波形のように打撃による振動と異なる振動が入る場合がある。また、前述のパイロットセンサーの初動誤差により、図-10に示すように受振波形の初動位置（◀）が打撃ごとに0.3ms程度ばらつくことが分かる。複数回の振動波形をそのままスタッキング処理（波形データを時系列で足し合わせる処理）を行うと、S/N比が低下して初動の読み取りに誤差を生じるため、各波形間の相互相関関数を求め、相関係数の低い波形は振源として扱わない波形として除外した。この各波形間の相互相関関数²⁾は、式(1)～式(3)から計算することができる。

$$\mu(i) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N y_n(i) \quad (1)$$

$$C_k(i, j) = \frac{1}{N} \sum_{n=k+1}^N \{y_n(i) - \mu(i)\} \{y_{n-k}(j) - \mu(j)\} \quad (2)$$

$$R_k(i, j) = \frac{C_k(i, j)}{\sqrt{C_0(i, j)C_0(i, j)}} \quad (3)$$

ここに、

- $y(i)$: i 打撃による振動データの振幅値、 N : データ数、
- $\mu(i)$: i 打撃による振動データの平均値、 k : ラグ、
- $C(i, j)$: i 打撃と j 打撃による振動データの相互共分散関数、
- $R(i, j)$: i 打撃と j 打撃による振動データの相互相関関数

打撃10回分の振動波形に対して求めた相互相関関数の最大値を表-2に示す。 i が1から10の相関関数のうち平均値が最も大きくなるラグ（ここでは $i=8$ ）を用いて時間をシフトさせた波形列を図-11に示す。ラグを用いて時間をシフトさせることにより、各波形の初動

表-1 計測機器の仕様

計測機器名	計測項目	おもな仕様
受振器	地山振動	型式: MC型速度計
		出力: 104mV/cm/s
		共振周波数: 28Hz
パイロットセンサー	ドリフタ振動	型式: 圧電型加速度計
		出力: 0.103mV/G
油量計	削孔長	流量範囲: 0~80/min
		出力: 12V (パルス)
		最大圧力: 30MPa
記録装置		チャンネル数: 16
		分解能: 24bit
		サンプリング: 1.5~96kHz

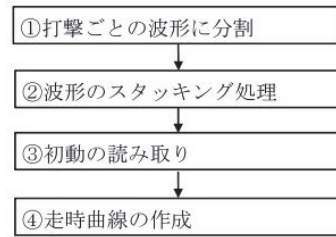


図-6 波形処理の手順

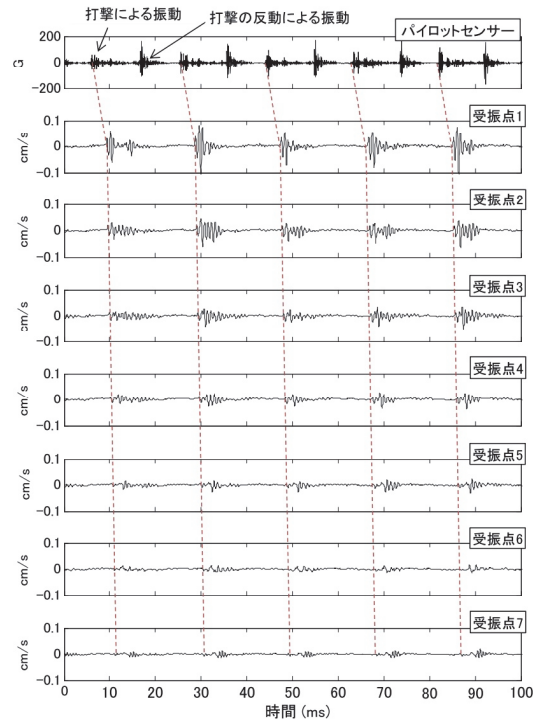


図-7 計測した振動波形例

位置が一致することが分かる。このうち、1回目と3回目の打撃による波形の相関値が0.78、0.88で0.9より小さくなっている。これは、図-9の受振波形列のうち1回目の打撃による波形には10ms付近、3回目の打撃による波形には7ms付近において他の打撃の波形に見られない振動を観測していることから、この影響を受けて相関値が低下していると推察される。したがって、0.9

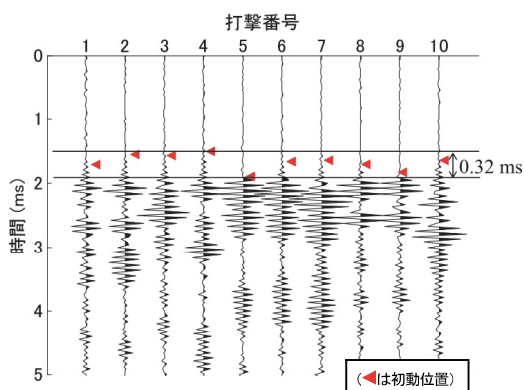


図-8 パイロットセンサーの波形

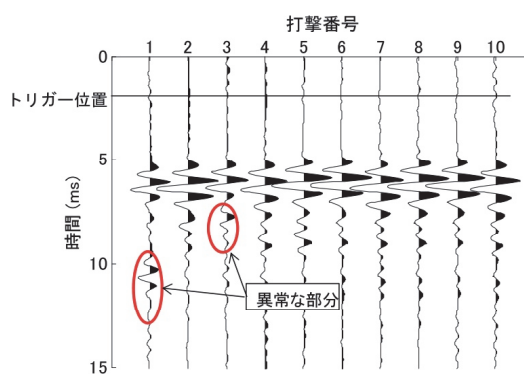


図-9 受振点1における受振波形

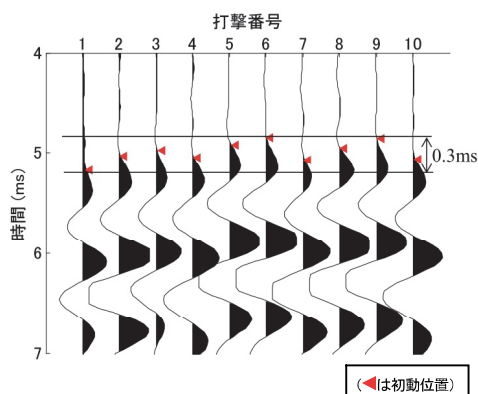


図-10 受振点1における受振波形の初動付近

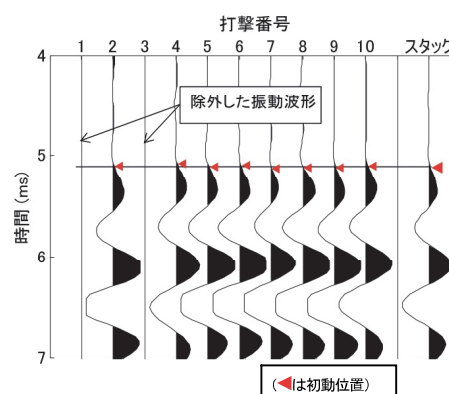


図-11 受振点1における受振波形のスタッキング

より小さくなる1回目と3回目の打撃による波形を除外してスタッキング処理する。

初動の時刻で整列した振動波形の時系列データを足し合わせる計算がスタッキング処理である。この処理により、ランダムノイズは打ち消しあうため小さくなる。

c. 初動の読み取り

ピットの打撃位置を発振点として弾性波は球面状に広がり、単位面積当たりのエネルギーは震源からの距離の二乗に反比例して減衰する。そのため、受振点で計測される波形の振幅値は距離が長くなると急激に減衰してノイズとの区別が難しくなる。そこで、スタッキング処理により、S/N比を向上させた各受振点の波形に対し、初動位置をピックアップして各波形の初動時刻を求める。

d. 走時曲線の作成

ドリフタ振動、および受振点1、受振点4、受振点7でのスタッキング処理した振動波形について、ドリフタ振動の最大振幅値の20%を閾値に設定して削孔長0.2m間隔で波形を整理した結果を図-12～図-14に示す。図中には、波形ごとに初動の位置(点)をピックアップし、この点を通る線を引くことにより求まる走時曲線(打撃により発生した弾性波(P波)が受振点に到達した時間と切羽からの削孔長の関係を表す)を示している。削孔長0.2mにおける走時は、受振点1で0.630ms、受振点4で1.683ms、受振点7で2.364msであり、削孔位置から

表-2 振動波形間の相互相関関数の最大値

i \ j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	R>0.9	平均値
1	1.000	0.815	0.843	0.763	0.780	0.816	0.781	0.818	0.804	0.793	1	0.821
2	0.815	1.000	0.879	0.872	0.914	0.945	0.888	0.921	0.945	0.870	5	0.905
3	0.843	0.879	1.000	0.865	0.884	0.887	0.829	0.863	0.838	0.862	1	0.875
4	0.763	0.872	0.865	1.000	0.949	0.915	0.934	0.936	0.903	0.929	7	0.907
5	0.780	0.914	0.884	0.949	1.000	0.971	0.948	0.962	0.946	0.945	8	0.930
6	0.816	0.945	0.887	0.915	0.971	1.000	0.952	0.964	0.957	0.926	8	0.933
7	0.781	0.888	0.829	0.934	0.948	0.952	1.000	0.960	0.949	0.941	7	0.918
8	0.818	0.921	0.863	0.936	0.962	0.964	0.960	1.000	0.979	0.969	8	0.937
9	0.804	0.945	0.838	0.903	0.946	0.957	0.949	0.979	1.000	0.948	8	0.927
10	0.793	0.870	0.862	0.929	0.945	0.926	0.941	0.969	0.948	1.000	7	0.918

離れた受振点になるほど、走時が大きくなることが分かる。受振点1～受振点7の走時曲線を整理した結果を図-15に示す。この走時曲線は、発振点と受振点の波線経路上の地山の弾性波速度値が反映されており、一般に直線ではなく複雑な形状になる。

3.5 削孔検層による地山評価

トンネル切羽の左側と右側の2箇所で行った削孔検層の結果について述べる。切羽前方地山の評価には、削孔時の油圧式削岩機の削孔速度、打撃圧やフィード圧などの機械データから求まる削孔エネルギーを用いた。

削孔エネルギーは、地山が軟質になるほど小さく、硬質になるほど大きくなる傾向がある。切羽左側の削孔エネルギーを図-16に、切羽右側の削孔エネルギーを図-17に示す。切羽左側の削孔エネルギーは、切羽から深さ2.8mの区間が200J/cm³程度にある。2.8m～10.3m

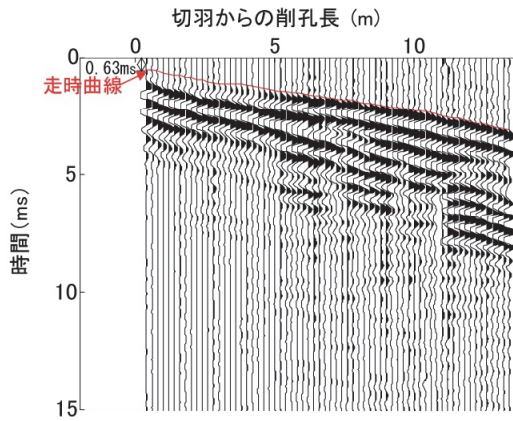


図-12 受振点 1 における受振波形列

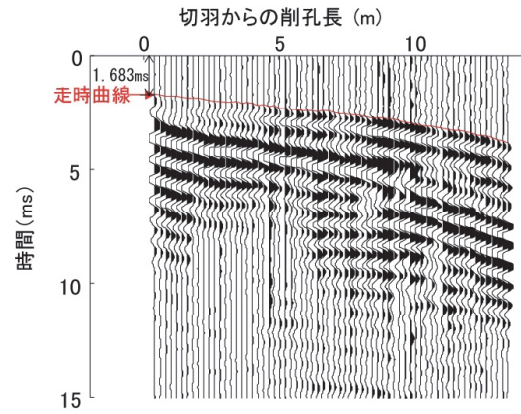


図-13 受振点 4 における受振波形列

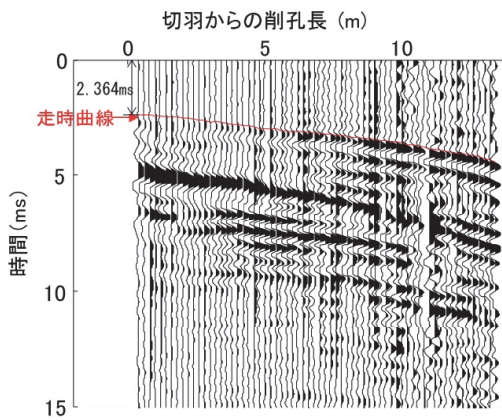


図-14 受振点 7 における受振波形列

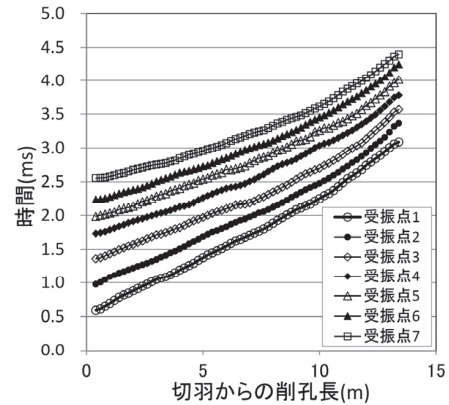


図-15 受振点における走時曲線

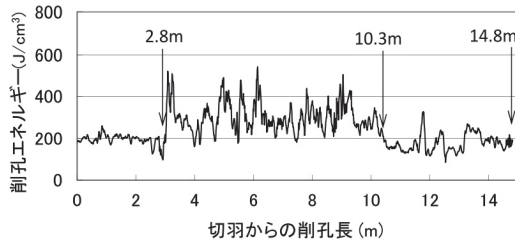


図-16 切羽左側の削孔エネルギー分布

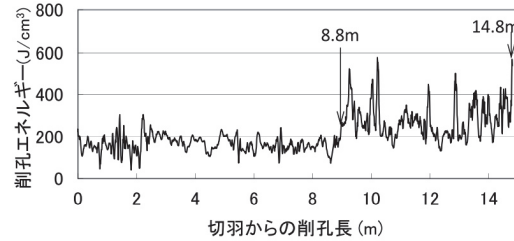


図-17 切羽右側の削孔エネルギー分布

の区間では、削孔エネルギーの最大値が $550\text{J}/\text{cm}^3$ 程度になり、値が大きく変動する。さらに、 $10.3\text{m}\sim 14.8\text{m}$ 区間では、再び $200\text{J}/\text{cm}^3$ 程度になる。

一方、右側の削孔エネルギーは、切羽から深さ 8.8m 区間が $50\sim 300\text{J}/\text{cm}^3$ の範囲にある。 $8.8\text{m}\sim 14.8\text{m}$ 区間では削孔エネルギーの最大値が $600\text{J}/\text{cm}^3$ 程度に増加し、変動の幅が大きくなる。

削孔エネルギーの大きさから削孔長で分けられた範囲について求めた削孔エネルギーの平均値を表-3に示す。左側の $2.8\text{m}\sim 10.3\text{m}$ と右側 $8.8\text{m}\sim 14.8\text{m}$ では、削孔エネルギーの平均値が $304\text{J}/\text{cm}^3$ と $276\text{J}/\text{cm}^3$ であり、同程度の値である。このことから左側の深さ 2.8m から右側

の深さ 8.8m は同じ層の境界面であり、境界が平面で連続していると仮定すると、切羽面に対して 20° 程度傾いていることが推測される。

3.6 トモグラフィ解析

調査対象領域を囲むように多数の発振点と受振点から物性値に関する情報を得る方法の総称をトモグラフィと呼ぶ。図-15の走時データを用いて走時トモグラフィ解析を行い、切羽前方地山の弾性波速度分布を求めた。解析は、観測走時とその時点の速度分布に対して波線法によって得られる理論走時との差を最小にするように速度分布を反復修正する方法³⁾を用いた。解析条件を表-4に示す。解析のセルの大きさは、 $1\text{m}\times 1\text{m}$ とし、受

表-3 削孔エネルギーの区間平均

切羽左側		切羽右側	
削孔長 (m)	区間平均 (J/cm ²)	削孔長 (m)	区間平均 (J/cm ²)
0~2.8	190	0~8.8	164
2.8~10.3	304	8.8~14.8	276
10.3~14.8	196		

表-4 トモグラフィ解析の解析条件

波線数	462
セル分割数	断面方向 : 16 切羽前方方向 : 14
セルサイズ	1m×1m
反復計算法	最小2乗法
収束判定誤差	2%
反復回数	20回

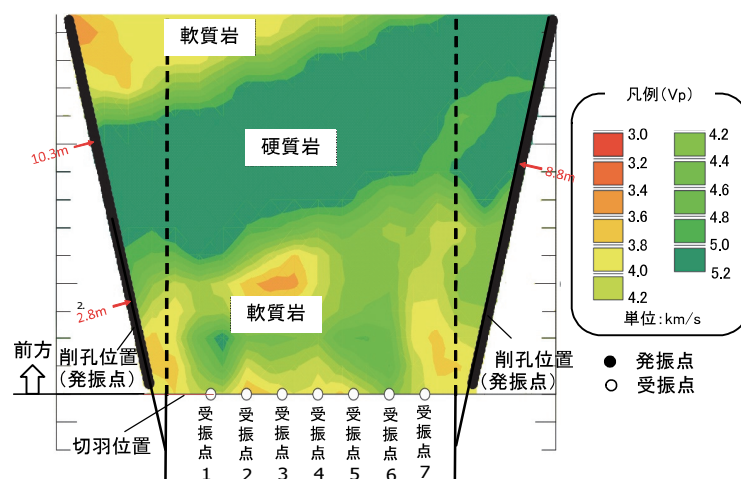


図-18 切羽前方地山の弾性波速度推定

振点と発振点が入るように解析領域をトンネルの断面方向に 16、切羽前方方向に 14 のセルに分割した。解析には最小 2 乗法を用い、観測走時と計算走時の相対 RMS 残差が収束判定誤差内に収まるように繰り返し計算を行った。なお、終了時の繰り返し計算回数 4 回で相対 RMS 残差は 1.8%である。

トモグラフィ解析で求めたトンネル切羽前方の弾性波速度分布を図-18 に示す。切羽付近には、弾性波速度が 3.5km/s~4.5km/s の地山が分布しているが、切羽前方の 3m 付近から 5km/s 程度の速度の速い地山が左から右に徐々に拡大して現れること、その地山が切羽前方に約 5m の厚さで断面方向から 20° の傾きで層状に存在していることが、弾性波速度分布の結果から予測される。削孔エネルギーの変化から地山変化が予想される位置を図中の矢印で示している。左側の削孔検層の削孔距離 2.8m から 10.3m の区間で弾性波速度が 4.4km/s から 5km/s になること、右側の削孔検層の 8.8m 付近では、5km/s の地山が出現しており、削孔エネルギーの結果と弾性波速度分布の結果は、比較的良好に対応している。

4. まとめ

開発した探査法では、削孔検層の際に切羽に受振器を設置して削孔振動を計測し、その波形から受振点と削孔位置の走時を読み取ってトモグラフィ解析を行うことにより弾性波速度分布を把握できる。得られる弾性波速度

分布は削孔エネルギーの結果ともよく整合し、有効であることを確認した。これまでの削孔検層では、地山の物性値を直接把握することが困難なこと、得られる情報が削孔位置の線状の地山評価であった。本手法を適用することにより、地山物性である弾性波速度を 2 次元平面で把握することが可能である。低速度帯の出現によるトラブルを未然に防ぎ、有効な事前対策により安全性の向上を期待できる。

5. あとがき

今後、トンネル現場への適用を通じて、岩質や探査深度など適用範囲について検討する。また、トモグラフィ解析の分解能を向上させるためには、波線数を増やす必要があることから、削孔したボーリング孔内に受振器を設置する方法も追加して実施する予定である。

【参考文献】

- 1) 塚本耕治ほか、「削孔検層システムによるトンネル切羽前方の地山予測」、奥村組技術研究所報、No.38、pp.76-79、2012
- 2) 北川源四郎、「時系列解析プログラミング」、岩波書店、pp.39-45、1993
- 3) 佐々宏一ほか、「建設・防災技術者のための物理探査」、森北出版、pp.120-124、1993