

# (101) ジオトモグラフィーによる地下空洞周囲緩み領域の評価について

動力炉・核燃料開発事業団

二宮康郎

正会員 ○ 杉原弘造

大成建設株式会社

正会員 伊藤克夫

正会員 亀村勝美

正会員 青木智幸

On The Evaluation Of Disturbed Zone Around A Drift By Means Of Seismic Tomography

Yasuo NINOMIYA, Power Reactor And Nuclear Fuel Development Corporation  
Kozo SUGIHARA, Power Reactor And Nuclear Fuel Development Corporation  
Katsuo ITOU, Taisei Corporation  
Katsumi KAMEMURA, Taisei Corporation  
Tomoyuki AOKI, Taisei Corporation

## Abstract

Recently, some projects have been planned to make facilities in deep underground space, because of its superior stable environment. To realize them, a lot of technical problems should be solved. Developing the techniques to evaluate the disturbed zone induced by underground cavern excavation may be one of the most important problems.

In-situ tests to measure the change and the distribution of mechanical/hydraulic properties of disturbed zone around a drift have been carried out. The test site is the PNC Tono Mine in Toki, Gifu. A test drift (3.0m width, 3.0m height, and 20m length) was newly excavated, parallel to the existing drift, at the depth of 140m in the sedimentary rocks. During the excavation, the ground displacements around the test drift were monitored from the existing drift. Only rock bolting was employed as the supporting measures of the drift. Many in-situ measurements have been carried out including seismic wave velocity, permeability, and initial stress measurements of the ground.

In this paper, the results of seismic tomography and refraction investigation in order to evaluate the distribution of seismic velocity due to the excavation are presented. The disturbed zone as velocity decreased area has been detected very clearly around the drift.

## 1. はじめに

近年、大深度地下空間開発に関する大きなプロジェクトが幾つか計画されているが、これらの実現のための研究開発課題の一つとして、地下空洞掘削に伴って空洞周辺に発生する緩み領域の分布形状や力学的・水理学的物性変化及びその発生メカニズムの解明が挙げられる。筆者らは、既設坑道から種々の計測を行いながら泥質岩中に新規に併設坑道を掘削し、掘削前後あるいは掘削中の坑道周囲の物性変化を捉える原位置試験を実施した。本報では、これらの試験の内、坑道周囲に発生する緩み領域の分布を捉える目的で実施した弾性波トモグラフィー調査結果について述べる。

## 2. 原位置試験の概要

試験は、岐阜県土岐市に位置する東濃鉱山内の既設坑道を利用して実施した。試験位置の地質は新第三紀の土岐夾炭累層で、砂岩・泥岩の互層から構成されている。図-1に試験施設の概要を示す。既設の坑道を計測坑道とし、予め種々のボーリングを行って事前計測及び計器の設置を行ってから、新規に連絡坑道・試験坑道を掘削した。試験坑道の支保は、全ての試験が終了するまで吹付コンクリートは施さずに、坑道径3mの半分当たる1.5mのロックボルト5本と金網のみによる支保とした。掘削中の岩盤変位を計測すると共に、弾性波トモグラフィー・透水試験については、掘削による坑道周囲の物性変化を捉えるために、掘削前後に試験を行って結果を比較検討した。

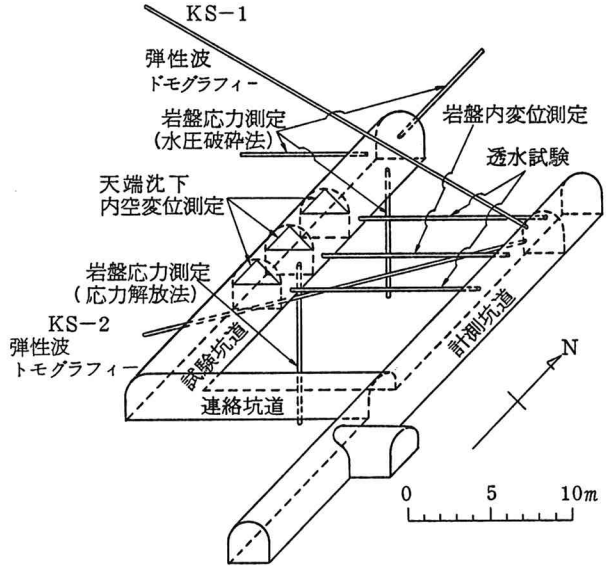


図-1 試験施設概要

## 3. 弾性波トモグラフィー調査

弾性波トモグラフィー調査は、試験坑道起点より11.3mの試験坑道軸に垂直な断面内で実施した。試験坑道掘削前に、計測坑道から試験坑道を挟むように斜め上下の方向に1本ずつのボーリングを行い、この孔間で弾性波速度を測定した。図-2に測定パターンを示す。図中、●は発振点、○は受振点である。試験坑道掘削後の測定では、坑道周囲の速度低下領域の検出精度を上げるために試験坑道内壁にも発振点・受振点を配置した。弾性波の発振には雷管を用い、受振には多連式の速度計を使用した。計測した弾性波の波形から初動走時を読み取りトモグラフィー解析に供するデータセットを作成した。データ数は、試験坑道掘削前のケースで571、掘削後のケースで874である。

解析に当たっては、領域を1m×1mの正方形のセルに分割した。また、セル分割位置の影響を小さくするた

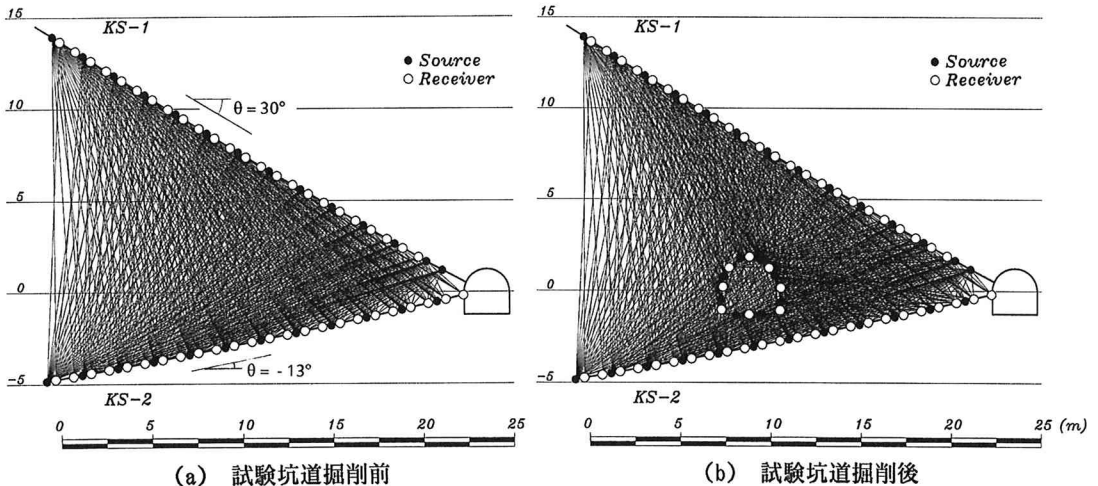


図-2 弾性波トモグラフィー・測定パターン

めに、セル分割の境界位置を上下・左右方向に0.5mずつ移動した2種類のセル分割を作成した。それぞれについて解析した結果を重ね合わせて平均を取り、0.5m角ごとのより細かい速度分布を求めた。解析アルゴリズム<sup>1)</sup>は反復法で、波線の屈折を考慮し、インバージョンにはDLST法を用いている。

図-3に解析結果を示す。図では得られた速度分布を濃淡及びコンターで表示した。(a)は試験坑道掘削前の岩盤の初期状態について調査した結果である。図を見ると、2.2~2.3km/sのほぼ様な弾性波速度を示している。本調査で使用した2本のボーリング孔から採取したコアについて約2m毎に弾性波速度を測定したところ、平均速度はKS-1で2.01、KS-2で2.22km/sであり、弾性波トモグラフィの結果と良く一致している。また、本地点の岩質は砂岩・泥岩互層で、泥質分の多い層では亀裂も存在するが、弾性波速度に及ぼす影響は少ない。一方、坑道中心より11m程度上方に速度の遅い層が見られる。ボーリングコアを見ると、坑道中心から12m上方の位置にボーリング沿いに1m程度の非常に亀裂の多い層が存在し、この部分のRQDは0であった。この層の影響でここより上部の速度が低く評価されているものと推定される。

(b)は、試験坑道掘削後の解析結果である。試験坑道から離れた領域の速度はほとんど変化しないが、試験坑道の周囲に速度の低下した領域が現れている。最も低下した部分で1.6km/s以下である。

(c)は、試験坑道掘削後の速度分布を試験坑道掘削前の地山の初期状態からの変化率で表したものである。これを見ると、試験坑道周囲を取り巻くように速度低下領域が分布している様子が良く分かる。速度の低下量は最大で25%程度(試験坑道の右側壁部)に達している。

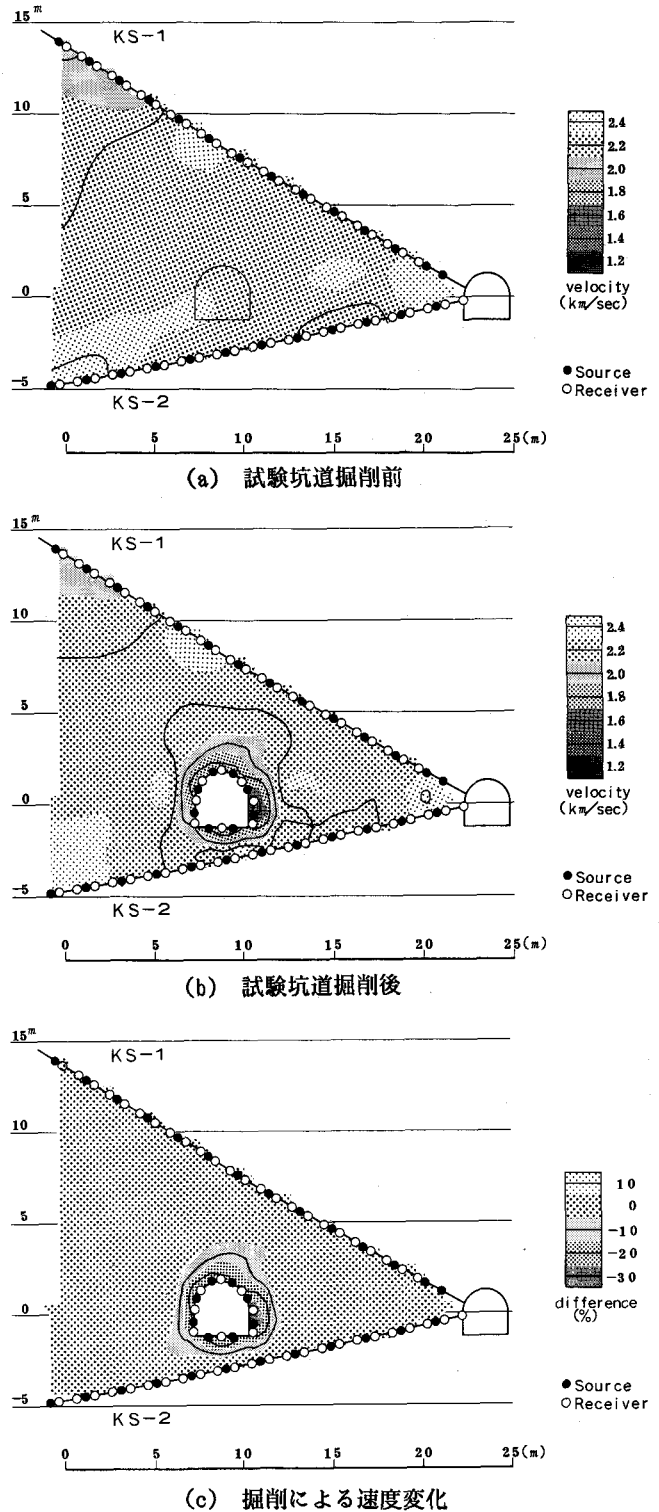


図-3 弾性波トモグラフィ・解析結果

#### 4. 屈折法弾性波探査

屈折法弾性波探査は、試験坑道の切羽に向かって右側の側壁部の岩盤に対して、試験坑道全長に亘って実施した。図-4に、計測位置を示す。測線は、スプリングラインと平行に50cm下がった位置とした。受振点は50cm間隔で計40点、発振点は約4m間隔で計6点である。

図-5に、解析結果を示す。図で、横軸は試験坑道起点からの距離を示し、右端は切羽位置である。また、上端の横軸は坑道のセンターを示し、縦軸は、水平断面上的の坑道センターから岩盤内部方向の距離を示している。これを見ると、坑壁部の岩盤の弾性波速度は、第1層の厚さが変化するものの全長に亘って2層構造をしていることが分かる。弾性波トモグラフィー調査断面位置について見ると、速度の低下した第1層の厚さは0.8mである。この断面の岩盤深部の速度は2.3km/sと弾性波トモグラフィーの結果と大変良く一致しているのに対し、側壁部の速度低下層は1.2km/sと屈折法の結果の方がかなり遅い結果が得られた。

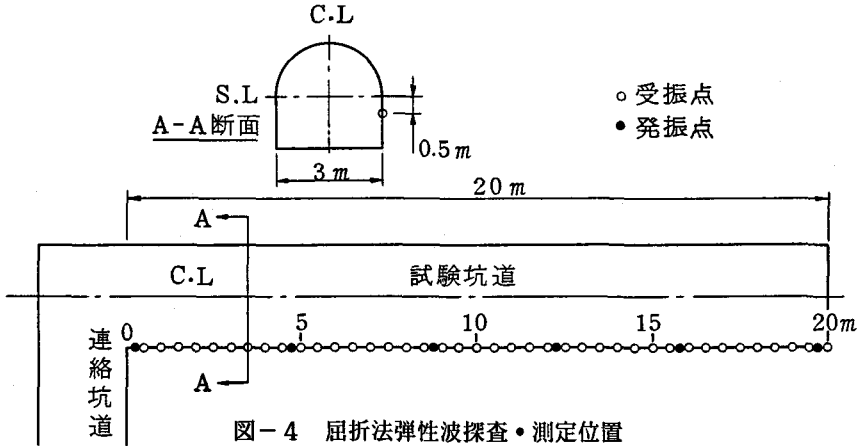


図-4 屈折法弾性波探査・測定位置

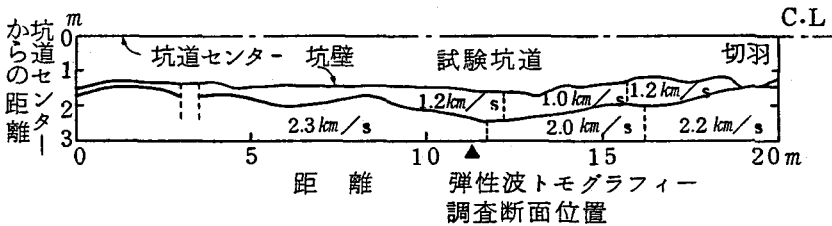


図-5 屈折法弾性波探査・解析結果

#### 5. 考察

弾性波トモグラフィー・屈折法共に試験坑道の掘削により坑道周囲に速度低下領域が現れたが、その速度分布に違いが見られた。図-6に、両者の坑道側壁部の岩盤の速度分布を示す。弾性波トモグラフィーの結果は速度が徐々に変化しているのに対し、屈折法では速度が2層に分かれている。また、屈折法では低速度層の厚さが0.8mと弾性波トモグラフィーのセル幅と同程度であった。

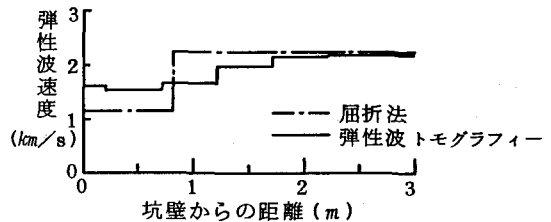
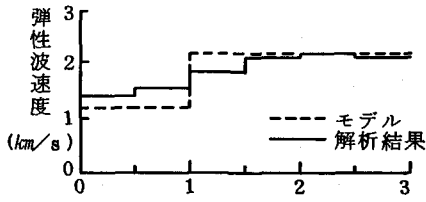
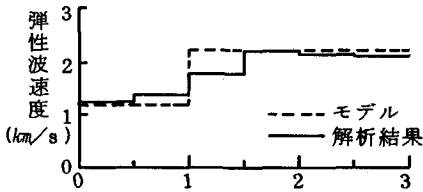


図-6 坑道側壁部の岩盤内速度分布



(a) 反復計算10回



(b) 反復計算20回

図-7 弾性波トモグラフィー・モデル解析結果

このような場合の弾性波トモグラフィーの解析上の特性を調べるために、均質な岩盤中の坑道周囲に厚さ1mの低速度層が存在するモデルを作成し、これについて実際の測定と同様な測定パターンで理論走時を計算し、そのデータセットについてトモグラフィー解析を実施した。低速度・高速度層の速度はそれぞれ1.2、2.2km/sとした。図-7に坑道側壁部の解析結果を示す。(a)は、解析中の反復計算回数が10回の結果である。これは、実測データの解析において、反復計算過程で収束と判定されたRMS走時残差に相当する計算結果である。これを見ると、低速度層の速度はモデルの速度よりまだ大きい値を示している。モデル解析では、計測誤差が無いためさらに収束が進み、反復計算20回まで計算を行った。結果を(b)に示す。これを見ると、低速度・高速度層共にモデルの速度をほぼ再現できている。しかし、速度分布は急な変化をせず高速から低速へ漸移的に

変化している。これは、弾性波トモグラフィーでは急な速度変化を平滑化して捉える特性があるためである。

以上検討したことから、弾性波トモグラフィーによって得られた坑道周囲の速度低下領域の速度は、実際は屈折法で得られた速度まで低くなっており、速度変化もより急激になっていると推定される。

## 6. まとめ

坑道掘削前後に弾性波トモグラフィー調査を実施し、得られた結果について屈折法弾性波探査結果等と比較検討することにより以下のことが分った。

- 1) 弾性波トモグラフィー調査により、坑道掘削によって坑道周囲の岩盤に坑道を取り囲むような速度低下領域が生じていることを捉えることができた。
- 2) 屈折法弾性波探査やモデル解析による検討を行った結果、実際の坑道周囲の速度低下領域は、弾性波トモグラフィーの結果よりもさらに速度が低く急な変化をしていることが推定された。この違いを生じた原因として、以下の弾性波トモグラフィーの解析上の特性が挙げられた。
  - ・データに計測誤差を含むために、十分に収束した解析結果が得られないことがある。
  - ・急激な速度変化を平滑化して捉える特性がある。

以上より、坑道掘削によって生じる緩み領域を弾性波速度の分布として捉える手法として、弾性波トモグラフィーが有効であることが示された。しかしながら、弾性波速度の低下と他の岩盤物性の変化等との相関関係についてさらに議論を進めるために、

- ① 坑道内からボーリングをするなど別の方法による坑道周囲の詳細な速度分布の測定
  - ② 坑道周囲の岩盤の強度・変形特性や透水性等、力学的・水理学的物性変化の測定
  - ③ 掘削による緩み領域の発生現象の数値シミュレーション
- 等について、さらに実証的研究を続けて行きたい。

## 参考文献)

- 1)大友、斎藤：「サイスマックトモグラフィーの数値実験」、土木学会第41回年次学術講演会、1986