

# 信号伝播モデル法を用いた トンネル覆工厚及び空洞厚の高精度解析システム

株式会社ソイル・ブレーション    ○駒崎 友晴, 渡邊 一  
山口大学名誉教授    田中 正吾

## 1. はじめに

一般に、電磁波レーダによるトンネル覆工厚及び空洞厚の解析は濃淡画像目視方式(以下、「B モード画像法」という)で行われているが、熟練者でないと精度のよい解析は困難である。加えて、空洞の存在が確認できても、覆工表面及び空洞の上面・下面からの反射波のダブリにより、空洞厚は正しく読み取れない。そこで、解析経験が少ない者でもトンネル覆工厚及び空洞厚を高精度に解析して図化するシステム(以下、「本解析システム」という)を開発した。以下では、従来の B モード画像法による解析方法について概説した後、本解析システムの原理・解析方法について述べる。また、本解析システムによるコンクリート試験体及び山岳トンネルでの検証結果例について紹介する。

## 2. B モード画像法による解析方法

B モード画像法では、図-1に示すような濃淡画像(受信器に得られた反射波形の振幅にしきい値を設け、振幅に応じて色分けして濃淡表示した画像)から、受信信号波形(A モード信号)も参考にしながら、トンネル覆工厚や空洞厚を経験的に読みとっている。

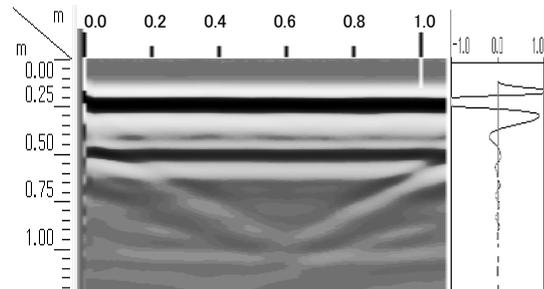


図-1 Bモード画像及び A モード信号の例

上図は、周波数400MHz のレーダを用いて、覆工コンクリート厚32cm, 空洞厚30cm のコンクリート試験体を対象に計測した B モード画像及び A モード信号を示したものであるが、熟練者でないと、両画像から覆工底面深度及び空洞底面深度を正確に読みとるのは困難である。

## 3. 本解析システムの原理・解析方法

### (1) 本解析システムの原理

本解析システムは、山口大学名誉教授田中正吾博士開発による信号伝播モデル法を用いている。この解析手法は、レーダにより得られる受信信号を、表面波、覆工底面波、空洞底面波の3つの反射波の1次結合(つまり重ね合わせ)で作られる合成波形でマッチング(合致)させることにより、3つの反射波を分離し、このときの各反射波の

伝播時間と極性により、レーダ走査線上の各ポイントで覆工厚・空洞厚を求めるものである(図-2 参照)。つまり、表面波、境界面波(覆工底面波, 空洞底面波としての)を適切なコンクリート試験体を用いて予め作成しておき、これらを適宜時間シフトしつつ、大きさを調整の上重ね合わせた合成波形を用いて実際の受信信号に合わせるように最適な伝播時間を求め、覆工厚及び空洞厚を計算する解析システムである。

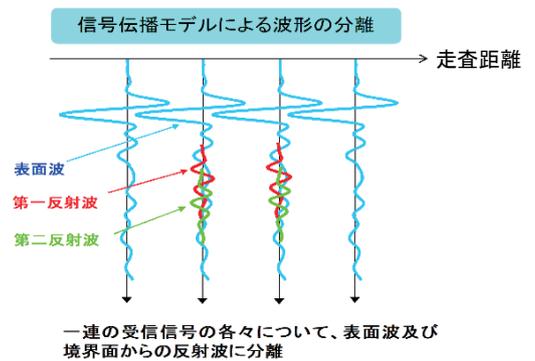


図-2 信号伝播モデルによる波形の分離

### (2) 本解析システムによる解析方法

本解析システムは、標準仕様として、周波数400MHz, サンプル数512, 収録時間25ns(解析対象深度: 最大1m 程度)のレーダデータに対応したものである。データ解析は、最初に「状況把握解析(MODE0)」を行い、その次に「詳細解析(MODE1)」を行う。

#### ① 状況把握解析(MODE0) ; 図-3参照

まず、解析にあたって状況把握解析を行う。つまり、解析時間を大幅に短縮化するため、覆工底面深度をほぼ正確に予測できる「かい離度」画像(受信信号に表面波と食い違う波形が現れる深度を表示させるための尺度[単位は deg]を画像化したもの)を考案した。このかい離度画像で濃度が濃くなる(濃い朱色となる)上端の際を点で結んで折れ線の「覆工底面深度プロファイル」を作成する。この際、支保工がある箇所では丸っぽい(上に凸の)濃淡画像が出現するが、この部分は無視する。次に、ミスマッチ角(受信信号と基本表面波の食い違いの尺度[単位は deg])のグラフから空洞の有無判定を行う。ミスマッチ角が小さければ「空洞なし」、大きければ「空洞あり」と判定するが、覆工厚が30cm 前後であれば、ミスマッチ角の閾値としては25(deg)程度が妥当である。覆工厚がそれ以上であれば若干小さめの値を採用するのが妥当であるが、あくまでこの値を参考にしつつ、走査方向のミスマッチ角の変化をみて閾値を決めるのが合理的である。

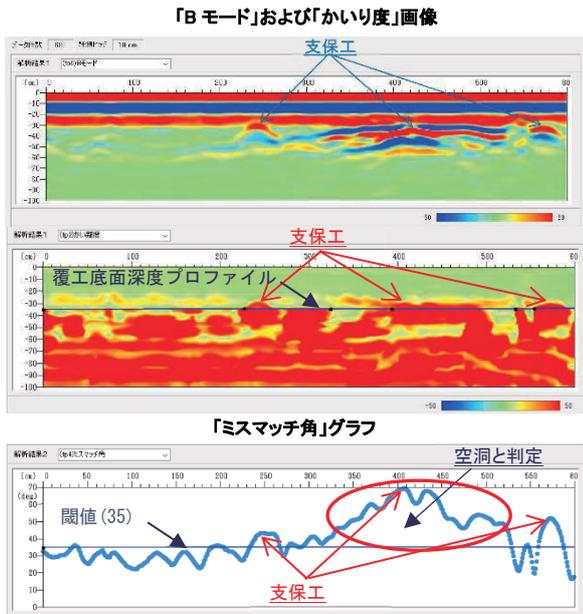


図-3 状況把握解析(MODE0)

② 詳細解析(MODE1)：図-4参照

状況把握解析後に【解析実行】を選択すれば、覆工底面と空洞底面の生の計測値のみならず平滑深度が表示される。なお、支保工位置付近では、支保工波の影響で覆工底面と空洞底面の深度計測値に誤差が生じるので、そのときは支保工前後の計測値で内挿することが合理的である。ところで、先に、空洞箇所の決定についてミスマッチ角を参照する方式を述べたが、空洞を仮定したときの覆工底面波と空洞底面波の振幅を出力した図の符号によっても、空洞箇所の妥当性が検証可能である。例えば、図-4の例では、走査距離にして270cmから530cm辺りまでの範囲で覆工底面波の振幅が正の値となっており、空洞があることを示している(通常は比誘電率の違いで空洞無しの場合ではゼロ近辺の値、あるいは負値)。

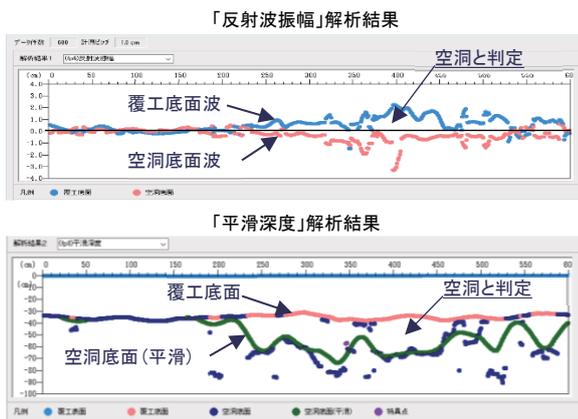


図-4 詳細解析(MODE1)

4. 本解析システムによる検証結果例

本解析システムによる検証結果例を以下に示す。

(1) 検証例①:コンクリート試験体での検証例

コンクリート厚32cm, 空洞厚30cm のコンクリート試験体に対し、エッジ効果の大きい両端を除く中央部の覆工厚計測値は31.8cm で、実測値(32.0cm)に対する誤差は

0.2cm, 空洞厚計測値は28.3cm で、実測値(30.0cm)に対する誤差は1.7cmであった。

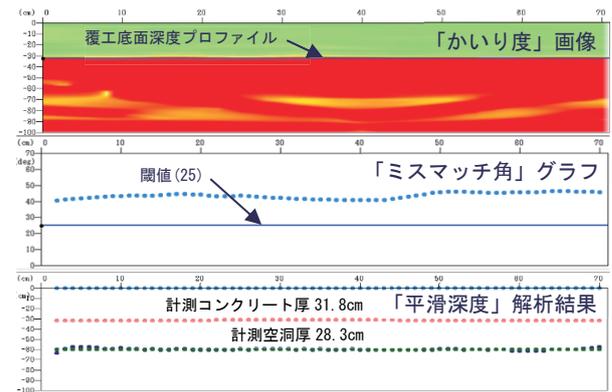


図-5 コンクリート試験体による検証結果

(2) 検証例②:山岳トンネルでの検証例

コア抜き位置(走査距離250cm)での覆工厚計測値は31.7cm で、実測値(24.5cm)に対する誤差は7.2cm, 空洞底面深度計測値は71.7cm で、実測値(74.0cm)に対する誤差は2.3cm。コア抜き位置と走査ラインの隔たりが40cm あるので、かなりの高精度計測。また、ここではミスマッチ角の閾値は23(deg)としたが、基準値25(deg)でもほとんど同一であった。

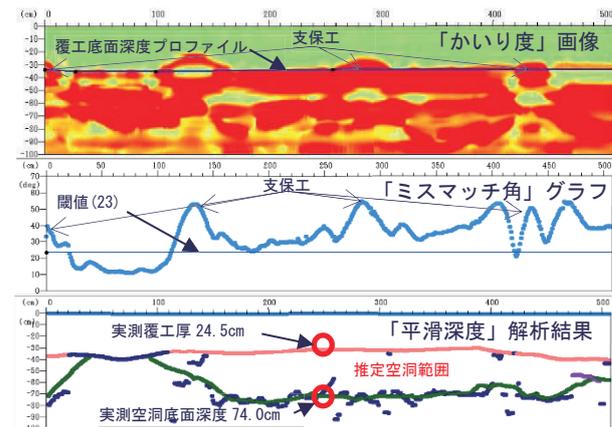


図-6 山岳トンネルでの検証結果

5. おわりに

上記の検証結果から、本解析システムが高精度であることが立証できた。本解析システムによれば、検査経験が少ない者でも短時間講習による教育・訓練で使用することができ、省人化・省力化によるコスト削減・工期短縮が可能である。今後は、周波数400MHz 以外のレーダデータ(300MHz, 800MHz 等)を対象とした解析システムへの拡張や支保工波の影響を除いた解析システムへの改善を行っていく予定である。なお、本解析システムは現在、NETIS(新技術情報提供システム)に登録申請中である。

《引用・参考文献》

- 1) トンネル覆工厚及び空洞厚の図化解析ソフト開発事業研究会(一社)全国地質調査業協会連合会:「覆工コンクリート厚・空洞厚解析システム」取扱説明書(案), 2021.1
- 2) 田中正吾:電磁波レーダーを用いた先端的非破壊検査技術,(社)日本非破壊検査協会, 2010