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

1. はじめに

ー般に、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りにより、 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。





上図は、周波数400MHz のレーダを用いて、覆エコンク 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 株式会社ソイル・ブレーン 〇駒崎 友晴,渡邉 一 山口大学名誉教授 田中 正吾

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。



(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,支保工位置近辺では,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 の箇所ではゼロ近辺の値,あるいは負値)。



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》

 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):「覆エコンク 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