

コンクリート構造物安全診断のための 電磁波レーダによる高精度埋設物探査法

1. はじめに

安全への関心の高まりとともに、トンネルやビルに代表されるコンクリート構造物の安全診断技術は、日々その重要性を増してきている。内部断面状態を非破壊探査できる電磁波レーダは、このような要求に応える技術の一つとして期待されるが、一般的なレーダ画像から埋設物形状を推定することは難しく、高精度な探査を実現する手法が望まれている。

本稿ではコンクリート構造物の安全性診断に焦点を絞り、電磁波レーダ技術を基盤として、コンクリート中の埋設物のパラメータを高精度に推定する新たな方法について検討した。

2. 電磁波レーダの探査原理と課題

電磁波が媒質中を伝播するとき、その媒質と誘電率が異なる境界面で反射が起こる。電磁波レーダはこの現象を利用し、図1に示すように送受信器を内蔵したアンテナ装置を走査しながら電磁波の送受信を繰り返し、埋設物からの反射波を受信する。

図2は、ある観測点での受信波形の模式図であり、送信器→受信器への直達波と反射波の受信時刻差より伝播時間 τ を得る(i 番目の観測点なら τ_i)。そして、光速を c 、媒質の比誘電率を ϵ とすると、反射点深さ D_i が、

$$D_i = \frac{c \cdot \tau_i}{2\sqrt{\epsilon}} \quad (1)$$

によって推定される。一般的なレーダ画像は、反射点が観測点直下に位置することを仮定し、この深さ情報を縦軸にとって観測順に横方向に並べて得られるものである。

ここで一つの問題が生じる。実際の電磁波の指向特性には広がりがあり、図1の位置関係のようにアンテナ装置が埋設物真上から外れている場合にも反射波を受信できる。すなわちこれは、埋設物の正確な位置・形状情報をレーダ画像から推定することは困難であることを意味する。

3. 電磁波伝播経路モデルの導入と埋設物の高精度推定法

埋設物の位置・形状推定には、各観測点で得られた伝播時間から、正しい反射点を推定する必要がある⁽¹⁾。そこで図3に示すような、電磁波の伝播・反射現象を正確に考慮した新たな電磁

波伝播経路モデルを導入⁽²⁾し、実験データとモデル間の整合を図ることで、反射点すなわち埋設物の位置・形状の高精度推定を実現する。

モデルでは、従来はアンテナ装置中心に位置すると見なしてきた電磁波送受信器を分離配置するとともに、反射点も観測点直下以外に位置することを許容する。いまアンテナ装置で獲得できる情報は伝播時間 τ 、換言すれば伝播距離 L のみなので、反射点は送受信器位置を焦点とした楕円軌跡上に位置する。一方、埋設物表面の反射ではスネルの法則が成立し、電磁波入射角と反射角が等しく、楕円と埋設物表面の軌跡は反射点で接する。

したがって、逆に埋設物表面の軌跡を仮定すれば、任意の観測点における電磁波反射点と伝播距離は幾何的に決定される。この性質を利用し、埋設物の位置・径を推定する。

本稿の範囲では、図3のとおり鉄筋・配管など円断面を推定対象とした。埋設物のパラメータとして、半径 r 、埋設深度 d および水平位置 x_c を与えると、 i 番目の観測点位置 Δx_i における理論伝播距離 L_i が導出される。そこで、

$$S^2 = \sum \left(L_i - \frac{c \cdot \tau_i}{\sqrt{\epsilon}} \right)^2 \quad (2)$$

で定義する残差平方和 S^2 を評価関数として最小化を図れば、埋設物の位置 (x_c, d) ならびに半径 r が推定できる。

結果、各値の推定精度は従来に比して大幅に向上することを確認した。図4は推定パラメータ値をもとに算出された理論伝播時間と実験値の比較であるが、両者はよく一致しており、推定精度の高さを裏づけている。

4. おわりに

本稿では、電磁波レーダによるコンクリート構造物の安全診断を念頭に、新たな電磁波伝播経路モデルに基づく埋設物探査(埋設物のパラメータ推定法)を提案した。提案法により大幅な推定精度の向上がもたらされ、電磁波レーダの適用可能性を大きく高める結果を得るに至った。

(原稿受付 2014年1月9日)

[高山潤也 信州大学]

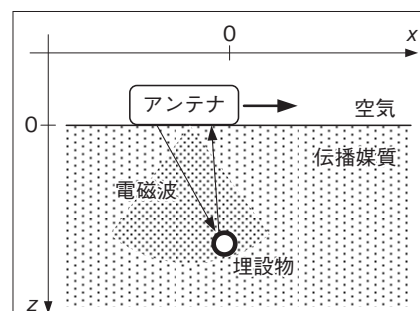


図1 電磁波レーダの探査原理

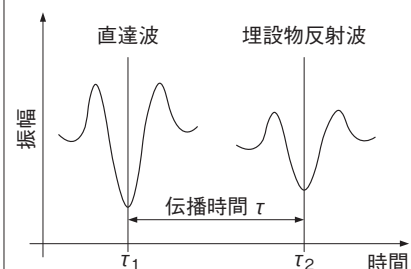


図2 受信波形の模式図と伝播時間

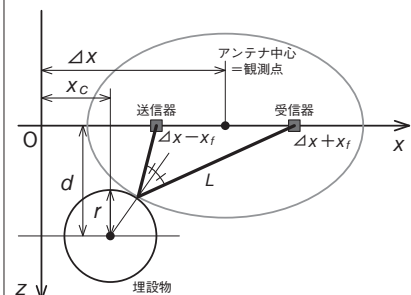


図3 電磁波伝播経路モデル

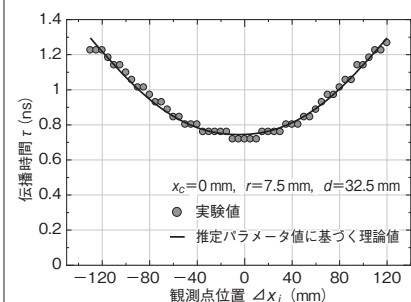


図4 推定パラメータ値に基づいた理論伝播時間値と実験値の比較

●文献

- (1) 高山潤也・田中隆行・早川 輝・大山真司・小林 彬, コンクリート構造物の診断・評価のための鉄筋および配管の位置・径推定と材質弁別, 計測自動制御学会論文集, 43-9 (2007), 741-748.
- (2) Yoshinaga, T., Ohtake, Y., Takayama, J. and Ohyama, S., Model-based Diameter Estimation of Reinforcing Bar Considering in Accurate Propagation Time Measurement of Microwave Radar, Proc. of SICE Annual Conference 2011, (2011-9), 2710-2715.