

SHF 帯地中レーダ信号の時変逆畳込み演算による RC 床版内部の損傷の高感度検知

東京大学 学生会員 ○山口 貴浩

東京大学 正会員 水谷 司

(株) 土木管理総合試験所 正会員 垂水 稔

1. はじめに

近年、インフラの老朽化が重要な社会問題となっている．特に道路構造物において、我が国では、今後 10 年間で、建設後 50 年を経過した橋梁は約 40%に達することが予想されている．また、道路構造物における橋梁床版の更新・修繕費用は、全体の約 60%に達していることがわかる¹⁾．

鉄筋コンクリート床版において、一般的な非破壊検査手法は目視点検および打音検査であるが、検査者の技量に依存し、コストや時間がかかるといった問題がある．そこで、車載した地中レーダにより、非接触・高速に損傷検知が可能であると考えられるが、図 1 に示す通り、検査員は複雑に重ね合わされた反射波のレーダ画像から、ミリメートルオーダーの水平クラックや土砂化の有無を定性的に判断している．また、地中レーダ法による床版探査について、検知精度の定量的な評価は行われていない．

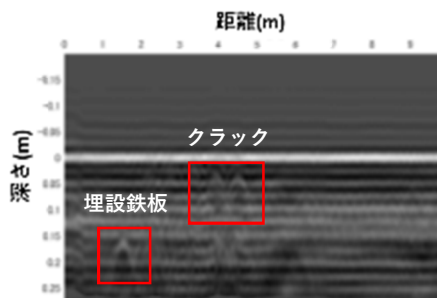


図 1 レーダ画像 (模擬損傷床版)

そこで本研究では、反射係数分布の推定に基づく、新たな損傷検知手法を確立した．また、従来の地中レーダの使用周波数帯域を大幅に上回る、SHF 帯を用いたレーダシステムを構築し、模擬損傷床版において検証を行った．

2. 時変逆畳込み演算による反射係数分布推定

多層媒質からなる床版の電磁気学的モデルにおいて、観測波 E_{obs} は、送信波 E_o と媒質境界位置 z での反射係数 $\Gamma(z)$ の畳込み演算から、式(1)により表される²⁾．ただし送信波 E_o は時変的に変化し、媒質境界位置 z の関数である．

$$E_{obs}(t) = \sum_n \Gamma(z_n) E_o(t - t_n, z_n) \quad (1)$$

計測された観測波 E_{obs} および、あらかじめ測定された送信インパルス波 $E_o(t, 0)$ から各媒質境界位置 z における送信波 $E_o(t, z)$ を推定することにより、式(2)、(3)から逆畳込み演算により反射係数分布 $\Gamma(z)$ を推定することができる．ただし本研究では、送信波 E_o に含まれるノイズの影響を低減するため、ウィーナフィルタ W を作用させ、送信波 E_o から構成される行列 $\mathbf{E}_o$ のランクの不足から、特異値分解により疑似逆行列 $\mathbf{E}_o^+$ を推定している．

$$\Gamma = \mathbf{E}_o^+ \mathbf{E}_{obs} \quad (2)$$

$$\mathbf{E}_o = [E_o(t - t_0, z_0) \quad E_o(t - t_1, z_1) \quad \cdots \quad E_o(t - t_n, z_n)] \quad (3)$$

一方、送信波 E_o の時変性はコンクリート層内部の電磁波の減衰に強く依存するが、コンクリート材料の SHF 帯における電磁気学的特性は分かっていない．そこで、図 2 に示す自由空間法により、あるコンクリート厚さ d での受信電界強度 $E_a(f)$ は、自由空間中での受信電界強度 $E_f(f)$ 、コンクリート板表面での透過による損失 R 、コンクリート材料の減衰定数 $\alpha(f)$ を用いて式(4)で表されるため、各周波数 f において、コンクリート厚さ d に対する計測対数受信電界強度比 $\log(E_a/E_f)$ をプロットし、近似直線の傾きから式(5)に示す減衰定数 $\alpha(f)$ の近似式を得ることができた (図 3、図 4)．

$$E_a(f) = R e^{-\alpha(f)d} E_f(f) \quad (4)$$

$$\alpha(f) = 6.8 \cdot 10^{-9} f \quad (Np \cdot m^{-1}) \quad (5)$$

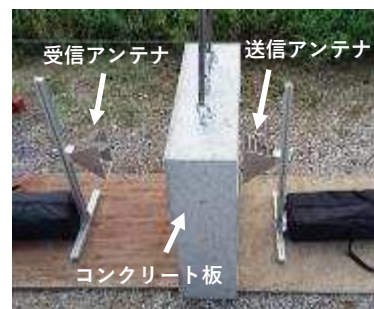
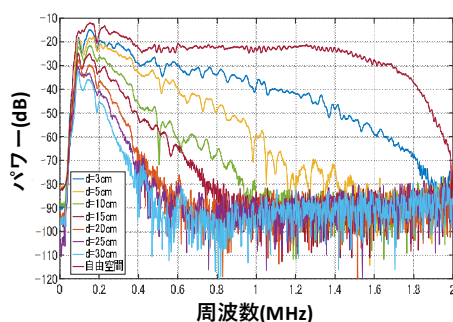
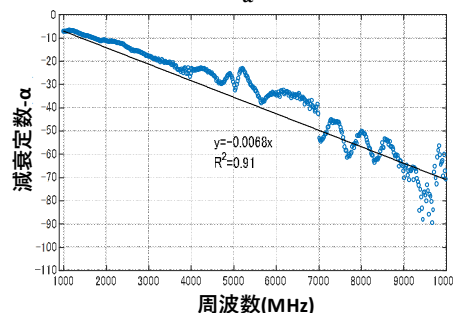


図 2 自由空間法による計測風景

図 3 受信波 E_a のスペクトル図 4 推定された減衰定数 $\alpha(f)$

キーワード 地中レーダ、床版探査、水平クラック、SHF 帯、時変逆畳込み演算、反射係数

連絡先 〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1 東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻橋梁研究室 TEL03-5841-6099

3. 模擬損傷床版における検証

推定手法の妥当性を検証するため、図5に示す、SHF帯(1-18GHz)に対応するダブルリッジホーンアンテナを用いた、手押し式の計測システムを構築した。

模擬水平クラックは、図6に示す所定の厚さのスペーサーとコンクリート製の蓋を用いて再現した。本稿では、実際の床版探査における損傷として最も妥当と考えられる、コンクリート表面下4cm(上側鉄筋直上)に存在する厚さ1mmの水平クラックについて、乾燥、内部が水で満たされた状態における解析結果を健全部と比較して示す。

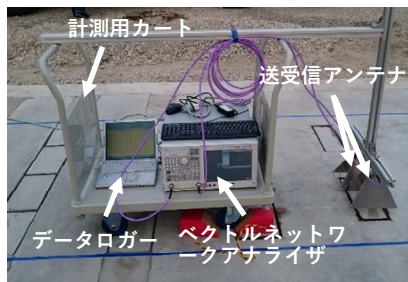


図5 計測システムの概要

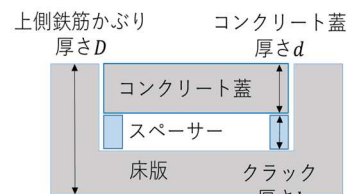


図6 模擬水平クラック模式図

4. 反射係数分布推定結果

図7から、健全部の異なる3地点で計測された波形に対して、水平クラックの位置および状態は明らかではない。また、図8から時変性を考慮しない逆畳込みでは、コンクリート材料の誘電率5に対して、反射係数は空気-コンクリート境界で0.4、水-コンクリート境界で0.8程度であるが、コンクリート表面に妥当な反射係数分布の負のピークを確認できるものの、コンクリート内部において明確なピークを確認することができなかった。

一方、図9からUHF帯(1-3GHz)における時変逆畳込みにおいて、水平クラックが水で満たされた場合にのみ、負のピークを確認できることがわかった。また、図10からSHF帯における時変逆畳込みにおいて、乾燥状態において正負のピーク、湿潤状態において明確な負のピークを確認できることがわかった。したがって、損傷内部の水の有無は、維持管理上重要な問題であるが、水が存在する場合損傷の検知は容易であることがわかった。また、SHF帯において、送信波の減衰による時変性を考慮することで、初めて1mm程度の乾燥水平クラックを検知できた。

5. まとめと今後の課題

本研究では、提案した時変逆畳込み演算により、自由空間法により推定されたコンクリート材料のSHF帯における減衰定数を用いて、模擬水平クラックで計測された波形から反射係数分布を推定した。その結果、SHF帯においてのみ、1mm程度の水平クラックを検知可能であった。現在、多点計測用のSHF帯地中レーダシステムの開発が進められており、実橋梁で得られた実際の3次元レーダ画像に対して、本手法の適用を検討している。

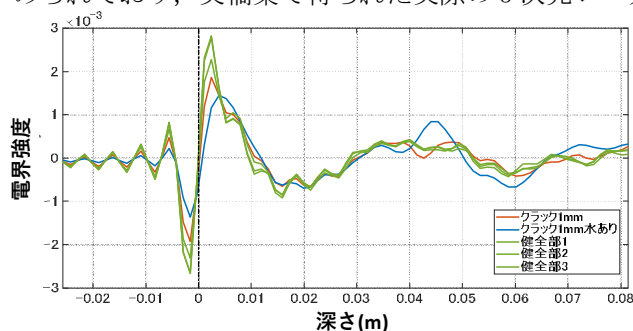


図7 各損傷位置での計測波形

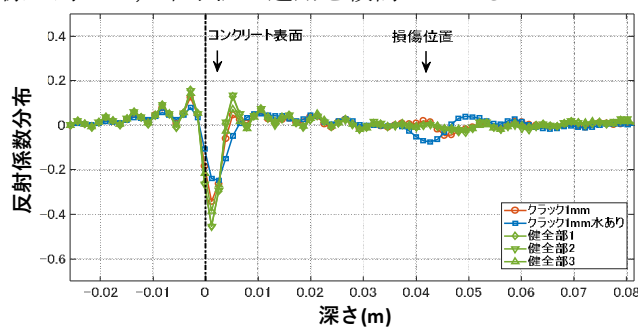


図8 減衰を考慮しない反射係数分布(時不変)

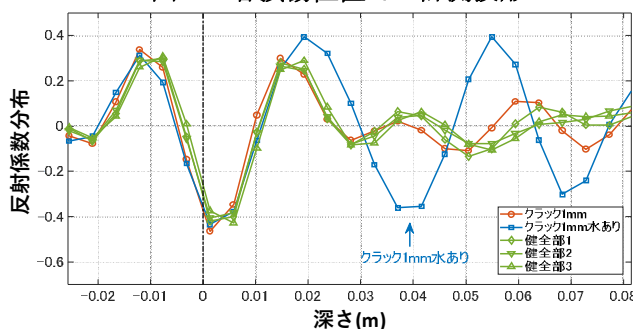


図9 減衰を考慮したUHF帯反射係数分布(時変)

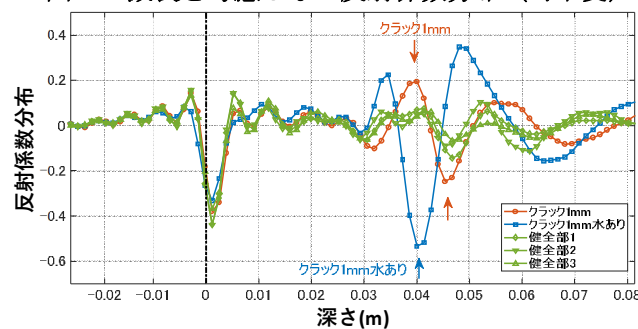


図10 減衰を考慮したSHF帯反射係数分布(時変)

参考文献

- 1) NEXCO3社: 東・中・西日本高速道路(株)が管理する高速道路における大規模更新・大規模修繕について
<https://www.c-nexco.co.jp/koushin/pdf/about.pdf> 2017.04.01 アクセス
- 2) Riad, S.M.: The Deconvolution Problem: An Overview, Proceedings of the IEEE, Vol.74 No.1 1986.