

土木構造物管理のための水分率の空間連続把握手法に関する研究

研究予算：運営費交付金

研究期間：令 5～令 7

担当チーム：地質チーム

研究担当者：矢島良紀、品川俊介、尾西恭亮、
梶山敦司

【要旨】

土木構造物の内部に侵入した水分は劣化促進の原因となる場合があるため、維持管理において構造物内部の水分率を非破壊かつ面的に把握することが重要である。一方、既往の手法は精度や効率性の点で課題が多く劣化診断への適用が困難であった。そこで本研究では、地中レーダ探査に着目し、測定データから電磁波の伝播速度を高精度に推定する方法や、伝播速度から得られた比誘電率と水分率の換算方法を検討した。その結果、これらの方法を確立し、地中レーダ探査によって構造物内部の水分率を迅速かつ面的に把握することが可能となった。

キーワード：水分率、誘電率、コンクリート、電磁波伝播速度、ゼロオフセット処理

1. はじめに

RC 床版、舗装、盛土などの土木構造物は、一般に内部に侵入した水分により劣化が促進し健全性が低下するため、維持管理においては構造物内部の水分を面的に把握し劣化進行範囲を推定することが重要である。一方、同じ構造物であっても表面付近と内部の水分率は多くの場合で異なるため、構造物内部の水分の測定が必要である。現在、土木構造物の水分状態を非破壊で高精度（1～2%）に把握する方法として RI 水分計による測定があるが、測定に時間を要し多数の地点の測定が難しいため面的な把握が困難であることに加え、構造物表面の水分の影響を大きく受けることが課題となっている。

このような現状に対し、構造物内部の水分を面的かつ迅速に観測できる地中レーダ（以下 GPR）による測定が活用できれば、水分状態やその面的な広がりに基づく構造物の健全性評価が可能となり、さらに水分の状態を継続的にモニタリングすることで、土木構造物の長寿命化および維持管理の効率化にも貢献できる。しかし、現在の GPR では、測定データから電磁波伝播速度を高精度で推定する方法や、比誘電率を水分率に変換する方法がなく、定量的な水分調査が行えないことが課題となっている。そこで本研究は、これらの課題を解決し、GPR を用いて構造物内部の水分率を面的

に、1%程度の精度で把握する技術の開発を目的として実施した。

2. GPR 記録による水分率推定にあたっての課題

GPR で記録された電磁波の伝播速度を用いた体積水分率（以下水分率）の推定は、図-1 に示す 3 つの工程を経て行う。このうち、伝播速度から比誘電率の変換（B）は理論解のため精度が高い。一方、電磁波の応答記録による伝播速度の決定（A）には、3.で後述する通り信号処理に改善の余地がある。また、比誘電率から水分率の換算（C）は、これまで精度の高い換算方法が提示されていないため、電磁波による定量的な水分率の測定が困難であった。このため、本研究は、GPR 記録から電磁波の伝播速度を推定するための精度の高い解析手法を提案すると共に、コンクリート等における電磁波の伝播速度と水分率の関係を明らかにし、GPR を用いた水分率の面的な推定を目標に実施した。

3. GPR による電磁波伝播速度の推定方法の高度化

3.1 伝播速度の決定精度の重要性

GPR を用いた水分率の正確な測定のためには、電磁波の伝播速度を正確に推定する必要がある。伝播速度の推定は、実務では多くの場合に点対象物の回折波形による速度解析が利用されている。アンテナと対象物までの位置関係の精度が高いことが重要で、解析に理想的な幾何条件に変換する初期処理の精度が大きく影響する。本報告では、(c)の方法の高精度化のため、これまで解析手順として明示されてこなかった初期処理

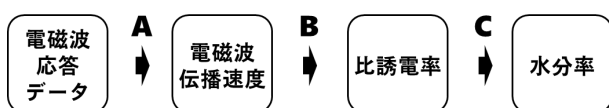


図-1 電磁波の伝播速度による水分率の測定手順

の一つであるゼロオフセット処理を改善した手法を以下のとおり検討したり。

3.2 GPR 送信波形

GPR 信号の解析にあたり基本的な分析を行うために、パルス方式の GPR の一般的な波形を扱うこととし、図-2 に示すような受信信号波形を数値計算により取得した。図-2 には、およそ 2 波長の長さの 2 つの波形が存在しており、1 つ目は直接波で、2 つ目の波形は散乱点からの反射波である。ゼロ時刻の取り方は調査目的や解析方法により異なり、走時解析をする場合には A が最も正確であるが、走時の決定精度の低下が懸念される場合は B が代替案となる。一方で実務調査においては、イベントの視認性が明瞭でありわかりやすいことから、図中 C をゼロ時刻とすることが多い。

本分析の数値記録は全て同一の仕様の FDTD 法による数値計算により求めた。セル間隔は 5mm で、PML は 10 セルに統一した。また、基本的な均質地盤の比誘電率は 16 で、散乱点の直径は 2cm、入力波は 400MHz のリッカー波形を疑似送信波とした。

3.3 ゼロオフセット処理

アンテナと対象物の位置関係を補正する初期処理のひとつにゼロオフセット処理がある。GPR のアンテナは、アンテナ上の残存エネルギーによるリングングノイズ抑制のため、一般に送信と受信に別のアンテナを用いているが、幾何計算を容易にするために送受信位置は同一として計算することが多い。ゼロオフセット処理は、解析精度向上のために、送受信位置をアンテナ間の中心とした仮想記録に変換する工程である。

図-3 はゼロオフセット処理の概念図であり L は長さ、 T は走時を表す。送受信アンテナ間距離 L_d をゼロ

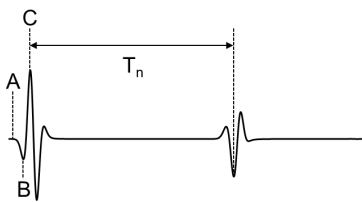


図-2 地中レーダ探査による典型的な受信波形

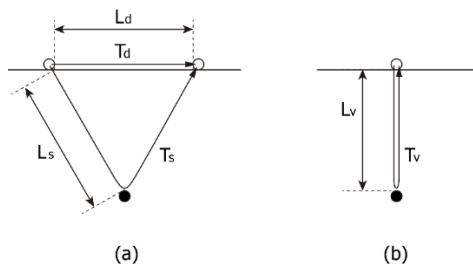


図-3 (a)実際の送受信アンテナ配置と(b)理想的なゼロオフセットの送受信アンテナ配置

とした仮想記録に変換することで、一連の後続処理の効果の向上が期待できる。

ここで、イベントの観測走時を図-2 で示す T_n とし、地盤の伝播速度を v 、光速を c とすると、各走時と長さは、以下の式で導出できる。

$$T_d = L_d \cdot \frac{1}{c} \quad (1)$$

$$T_s = T_n + T_d \quad (2)$$

$$L_s = \frac{1}{2} T_s \cdot v \quad (3)$$

$$L_v = \left(L_s^2 - \left(\frac{L_d}{2} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

ここで、GPR のアンテナ間距離は長さの次元であるのに対し、GPR の取得記録は時間単位であることから、次元を変換し統一する必要がある。すなわち、式(3)に示すように、地中の伝播速度の情報が必要となる。

図-4 に数値計算により分析した結果を整理して示す。図中の一般解析はゼロオフセット処理を実施しない、すなわち、以下の式により深度変換を行った場合の深度変換誤差を示している。

$$L_v = \frac{1}{2} T_n \cdot v \quad (5)$$

一般解析に対し、図-4 に示されているように、ゼロオフセット処理を実施すると換算深度の正確性が高まることがわかる。換算深度が正確ということは、設定速度が正確であることを意味している。

図-4 では散乱点（対象物）の深度が 50cm の場合の誤差が最も大きい。この理由は、地表面の応答の影響により、 T_d が単純に空中を伝播する走時と異なるためと考えられる。この T_d の誤りを評価するために、送受信点間距離を変えた場合の空中直達波の走時変化を図-5 に示す。図中の推定走時の点線はオフセット 0cm の記録からの光速の傾きを示す。この推定走時線との乖離が受信記録と理論値の T_d の相違と考えられる。

3.4 修正ゼロオフセット処理

アンテナが地表から離れると図-5 に現れる直達波の走時のずれは縮小するため、探査対象地盤においてアンテナを持ち上げて記録を取得することで、より正

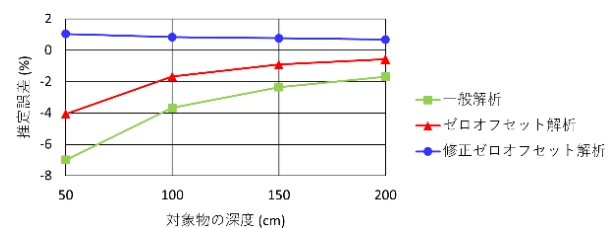


図-4 ゼロオフセット処理による深度の推定誤差

確な T_d を求められ解析精度の向上が期待できる。図-6 にアンテナを持ち上げた際の走時を示す。今回の分析条件では約4~6cmの浮上で遅延がほぼなくなった。修正した T_d を用いた場合のゼロオフセット処理（修正ゼロオフセット処理）の結果を図-4 に合わせて示す。修正ゼロオフセット処理により誤差が抑制されており、本手法を用いることで GPR 記録から電磁波伝播速度の推定が簡便にかつ大きく改善し、全ての条件で誤差が1%程度に収まることが確認できた。

4. コンクリート等の誘電率と水分率の換算式の導出

4.1 誘電率の測定方法

土・岩石・コンクリート等の土木構造物の構成物質においては、水が圧倒的に高い誘電率を示し、電場の周波数で変化する。水分子の回転（配向分極）の誘電緩和（周波数が高過ぎることにより分極を生じなくなる）は、100MHz 付近から徐々に発生し、1THz 付近で収束する。すなわち、水分を含む物質の誘電率は100MHz~1THzにおいて周波数により大きく変化する。そのため GPR でコンクリートや地盤を測定する際に用いる 100MHz~3GHz の周波数帯域の誘電率を測定する必要がある。

誘電率の測定方法は、物質の状態や周波数帯域に合わせて多数の方法が提案されている。固体物質に対し、低周波数帯域であれば静電容量法等を用いることができる²⁾が、本研究ではより高精度な測定を行うために、測定周波数帯域をより高周波な 1GHz 付近とするため S パラメータ法を用いることとした。

S パラメータ法は、対象物質への高周波信号の入力

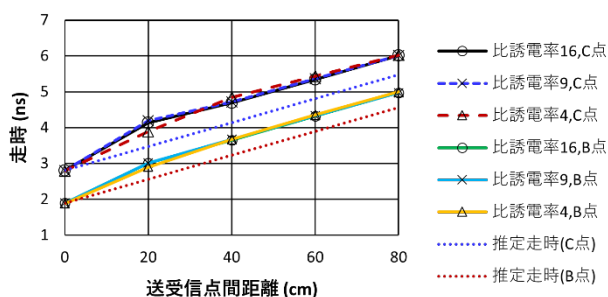


図-5 空中直達波の走時の相違

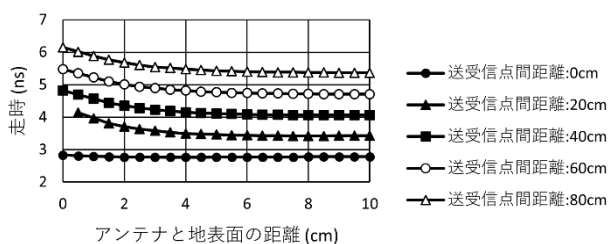


図-6 アンテナ浮上時の空中直達波の走時

において、反射係数や透過係数を測定することで対象物質の特性を評価する方法であり、誘電率の測定においては、対象物質を自由空間、同軸管内、導波管内に設置する3方式が提案されている。本研究では、供試体に用いるコンクリートの整形が容易であり、かつ測定精度の高い導波管方式で測定を行った。

測定に用いた誘電率測定装置を図-7 に示す。また、導波管の簡易な断面図を図-8 に示す。導波管は矩形で、内側の寸法は 195.5mm × 97.7mm であり、内寸等に基づく適合周波数は 0.96~1.4GHz である。これに、ネットワークアナライザ(Keysight P9370B)を接続し、反射係数 (S_{11}) と透過係数 (S_{21}) を測定する。測定値より NRW (Nicolson-Ross-Weir) 法³⁾⁶⁾に基づいた計算を行い、比誘電率を算出した。

4.2 コンクリート供試体

コンクリートは普通コンクリートとし、水セメント比を 40%、50%、60%とした3種類を用意した。骨材の最大粒径は 20mm、コンクリートのスランプ値は 120mm、空気量は 4.5%である。作成したコンクリートは2辺を導波管の寸法に合わせ約 195mm と約 97mm に切断し、厚さは約 30mm と約 50mm の2種類とし、入力波の共振により誘電率の測定感度が低下する周波数範囲の回避を図った。乾燥密度は、2.16~2.19 g/cm³ である。コンクリート供試体は、恒温恒湿の環境下で保管し、材齢 180 日を越えてから測定に用いた。水分率の調整は、水中や温湿度制御チャンバー内での保管により行った。

4.3 砕石層

砕石層は 2mm 厚の亚克力容器（内寸 190.4mm × 90.2mm × 51.4mm）に粒径 20~30mm、13~20mm、5~15mm の3種類の砕石を敷き詰めた。各々の間隙率は 0.51、0.48、0.54、密度は 1.38、1.38、1.41g/cm³ である。

4.4 比誘電率の測定結果

測定したコンクリートと砕石層の比誘電率を図-9 と図-10 に示す。砕石層はコンクリートよりも間隙率が高いことから水分率の取り得る範囲が広い。コンクリートでは下に凸の緩やかな曲線を描いており、また水セメント比に影響せずほぼ同様であることがわかった。一方で、砕石層はほぼ直線でも近似できる分布となり粒径の大きさによる相違はなかった。なお、砕石層における中程度の水分率の際の比誘電率について、粒径分布範囲を広くすることで間隙率が低下し、中程度の水分率の状態とすることができるとは、間隙率の違いにより異なる比誘電率と水分率の関係を示すことも想定されるため、今後の確認が必要である。

4.5 換算式

図-9と図-10に測定結果を回帰した2次曲線を点線で示す。これは比誘電率から水分率への換算式となり、コンクリートは(6)式、碎石層は(7)式となる。

$$\varepsilon_r = 310S_w^2 + 7S_w + 4.9 \quad (6)$$

$$\varepsilon_r = 5S_w^2 + 53S_w + 2.6 \quad (7)$$

ここで、 ε_r は比誘電率、 S_w は水分率を表す。なお、碎石層は比較的粒径が均質な場合等で間隙率が50%程度に対応した換算式である。

この換算式の導出により GPR 測定データから水分率が換算できるようになり、GPR 探査による構造物内部の水分の面的かつ定量的な評価が、1%程度の精度で可能となった。

5. まとめ

- 1) 地中レーダの電磁波の応答信号から伝播速度を求める際に、修正ゼロオフセット処理による比誘電率推定の精度向上手法を提示した。
- 2) コンクリート供試体等の誘電率を現場測定条件もふまえた上で高精度に測定可能な試験装置を構築し、水分率と比誘電率の関係式を導出した。
- 3) 水分率と比誘電率の関係が得られたことから、地中レーダ測定データからの換算による構造物内部の水分率の面的な把握が可能となった。

本研究の成果により、これまで困難であった構造物内部の水分率の面的な把握が可能となったことで、劣化が進行する範囲の推定が可能となった。これにより、土木構造物の維持管理において、必要な対応が適時に行えるようになることで構造物の長寿命化に貢献できる。

今後、GPR による構造物内部の面的な水分率把握方法について、一連の流れを手引きとしてとりまとめ、公表することで成果の実装や普及を図る予定である。また、碎石層は骨材や細粒成分の相違により比誘電率と水分率の関係が変化するため、引き続き分析を実施すると共に、実規模の構造物での検証についても検討を進めていきたい。

参考文献

- 1) 尾西恭亮・上田拓哉：表層地盤の波動伝播解析に基づく地中レーダの解析手続きの改善に関する考察、物理探査学会学術講演会講演論文集、152、pp.103-106、2025.6。
- 2) 佐々木靖人・藤井厚企・中村康夫：短波長帯の電磁波探査法を用いた岩質判別法—抵抗誘電率相関法—、日本地質学会学術大会講演要旨、99、p.569、1992.3。

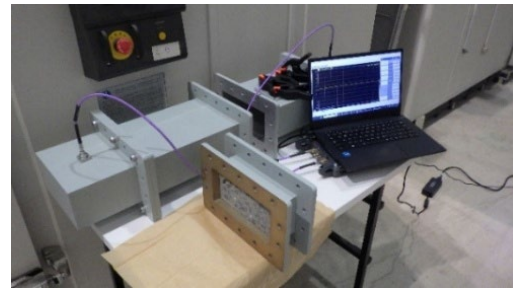


図-7 誘電率測定装置

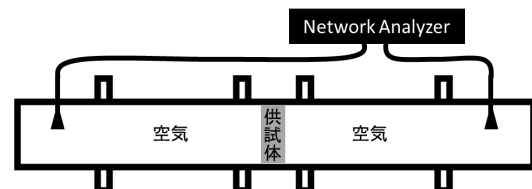


図-8 導波管の断面形状

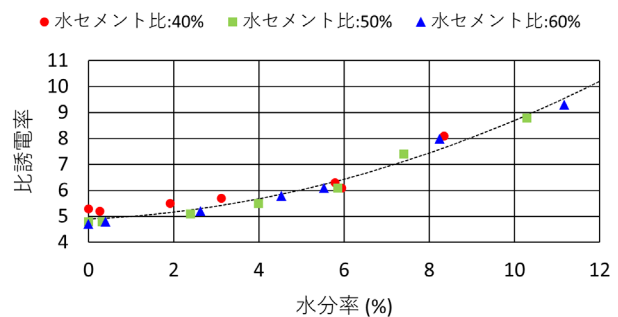


図-9 コンクリートの比誘電率と水分率

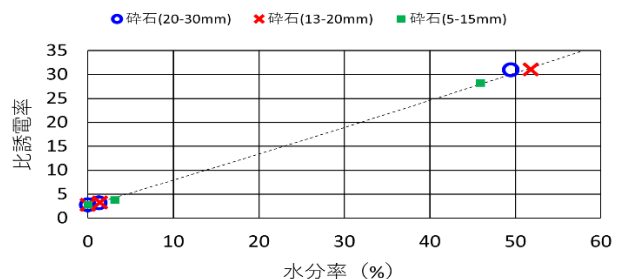


図-10 碎石層の比誘電率と水分率

- 3) Nicolson, A. M. and G. F. Ross : Measurement of the intrinsic properties of materials by timedomain techniques, IEEE Trans. Instrum. Meas., 19(4), pp.377-382, 1970.
- 4) Weir, W. B. : Automatic measurement of complex dielectric constant and permeability at microwave frequencies, Proc. IEEE, 62(1), pp.33-36, 1974.
- 5) Baker-Jarvis, J., M. D. Janezic, J. H. Grosvenor, and R. G. Geyer : Transmission/reflection and short-circuit line methods for measuring permittivity and permeability, Tech. Note 1355, National Institute of Standards and Technology, 112p., 1993.
- 6) Chen, L. F., C. K. Ong, C. P. Neo, V. V. Varadan, and V. K. Varadan, Microwave Electronics: Measurement and Materials Characterization, John Wiley & Sons Ltd., West Sussex, England, 537p., 2004.

A STUDY ON A METHOD FOR SPATIALLY CONTINUOUS ESTIMATION OF MOISTURE CONTENT FOR THE MANAGEMENT OF CIVIL ENGINEERING STRUCTURES

Research Period: FY2023-2025

Research Team: Geology Research Team,

Geology and Geotechnical Engineering Research Group

Author: YAJIMA Yoshinori

SHINAGAWA Shunsuke

ONISHI Kyosuke

KAJIYAMA Atsushi

Abstract: Moisture inside civil engineering structures may contribute to the acceleration of deterioration. Therefore, understanding the internal moisture distribution of such structures is essential for estimating areas susceptible to deterioration. In this study, to enable nondestructive areal measurement of moisture content inside structures, we improved the method for estimating electromagnetic wave propagation velocity and established a highly accurate conversion between relative permittivity and moisture content. The results demonstrate that ground-penetrating radar can be used to estimate moisture content inside structures areally and with high accuracy, enabling monitoring surveys of moisture content distributions for the diagnosis of deteriorated areas.

Keywords: Moisture content, Water content, Dielectric constant, Permittivity, Concrete, Velocity of electromagnetic wave, zero-offset analysis

論文リスト

- 学術誌等による成果普及

学会発表等その他（計 1 本）

- e-1) 尾西恭亮、上田拓哉：表層地盤の波動伝播解析に基づく地中レーダの解析手続きの改善に関する考察、物理探査学会学術講演会講演論文集、152、pp.103-106、2025.6