

令和 3 年 6 月 11 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16H04395

研究課題名(和文) 材料・構造物内部の水分量分布の定量的非破壊計測に関する研究

研究課題名(英文) Quantitative nondestructive evaluation of water content distribution in materials or structures

研究代表者

廣瀬 壮一 (HIROSE, SOHICHI)

東京工業大学・環境・社会理工学院・教授

研究者番号：00156712

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は材料あるいは構造物内部の水分量分布を超音波及び電磁波を用いた非破壊計測により推定することである。超音波非破壊計測では、層構造における超音波ガイド波の分散特性を利用することによって層構造内の滞水の有無の判定や滞水層厚さの推定が可能であることを示し、橋梁の鋼板接着部の健全性評価に応用した。電磁波計測では電磁波の反射係数からカルマンフィルタ理論によって土壌中における水分量を推定するアルゴリズムを構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

材料・構造物内部の水分の存在は、構造物の強度や寿命に大きな影響を及ぼすことから、構造物の維持管理を行う上で水分量の分布や時間変化を把握することが重要である。従来の水分量計測はあらかじめ内部に計測装置を埋め込むことによって「点」情報を得る手法が主流であった。本研究では超音波探触子や電磁波レーダなどの非破壊計測装置を用いて一度に広範囲な水分量分布を効率的に求めることを可能にしておき、得られた研究成果の意義は大きい。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to estimate the water content distribution inside materials or structures by nondestructive measurement using ultrasonic and electromagnetic waves. In the ultrasonic nondestructive measurement, it was shown that the presence of stagnant water in layered structures and the thickness of the water layer can be estimated by using the dispersion characteristics of ultrasonic guided waves in layered structures. In the field of electromagnetic wave measurement, we developed an algorithm for estimating the water content in soil using the Kalman filter theory based on the reflection coefficient of electromagnetic waves.

研究分野：応用力学

キーワード：ガイド波 分散特性 鋼板接着損傷評価 電磁波レーダ カルマンフィルタ スパース解

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

材料・構造物内部の水分の存在は、構造物の強度や寿命に大きな影響を及ぼす。橋梁や高架橋に用いられる鋼材は、水分の影響による腐食とそれに伴う減肉によって強度低下を引き起こす。また、コンクリートに関しては、養生のように水分によって強度発現が期待できる一方で、凍結融解作用による劣化の原因にもなりうる。地中の岩盤は間隙中に水分が存在するが、トンネルや坑道の掘削によりその表面が乾燥することで、地下水の流動を引き起こす。この流動は放射性廃棄物の地下空間への拡散を引き起こす要因となることが指摘されている。さらに、盛土に代表される土構造物は、水分量が強度に影響を及ぼすことが知られている。

材料・構造物内部の水分量を把握することができれば、構造物の現在の状態を把握することができる。さらに言えば、水分量の分布や時間変化を把握することで、将来的な劣化予測への応用が期待できる。水分量のモニタリングは、地盤工学や岩盤力学の分野で既に行われており、それらの多くは埋め込み型の計測装置を用いている。これらの計測は、固定された位置における局所的な計測であり、広域な水分量の分布を求めることは困難である。仮に上述した計測手法で水分量の分布を求める場合、計測装置を密に配置するしか手段がなく、経済的な理由から実施が難しい。それにもかかわらず、材料・構造物内部の水分量の分布を求める計測手法や推定手法に関する研究は報告例が少ない。土木構造物の効率的な品質・維持管理のため、水分量の分布の計測の必要性を再認識し、特に以下の条件を満たす計測技術が必要であるという考えに至った。

- ・材料・構造物内部の水分量分布を求めることができる
- ・構造物表面からの非破壊計測ができる
- ・効率的な計測を実現する

2. 研究の目的

本研究の目的は材料あるいは構造物内部の水分量分布を非破壊計測により推定することである。具体的な研究目標は以下の通りである。

目標 a: 材料・構造物内部の水分量分布と弾性波・電磁波の伝搬特性の関連性の評価

目標 b: 水分量の分布を求めるための非破壊計測手法の開発と実構造物への適用

目標 a の達成のため、はじめに簡易な供試体を用いた予備実験から、供試体内部の水分量とその分布の違いによる弾性波、電磁波の伝搬特性の変化を考察する。また、実験条件を反映させた理論解析や数値シミュレーションを実施し、伝搬特性に関する定量的な知見を得る。さらに、計測手法の開発に向けて、実験においてその特性をどの程度まで計測可能であるかを確認する。

目標 b の達成のため、目標 a で得られた知見をもとに、実際の構造物の計測状況を模した計測手法を開発する。計測には超音波探触子および電磁波レーダを用いる。計測装置の配置に関しては、理論解析と数値シミュレーションから算出し、その後実験を行って適正な配置を決定する。その後、開発した計測手法を用いて、実構造物内部の水分量分布を推定する。

3. 研究の方法

本研究は、超音波および電磁波を用いた材料・構造物内部の水分量分布を計測する手法を開発することを目的とする。それぞれの内容は、計測手法の開発と開発した手法の適用の2段階からなる。第一段階では予備実験を行い、水分量分布と波動の伝搬特性の関連性を理論解析や数値シミュレーションを援用して定量的に把握する。その後、本実験を通して、最適な計測装置の配置と水分量分布の推定アルゴリズムの構築を行う。第二段階では開発した計測手法を適切に選択し、様々な種類の実構造物内部の水分量分布を計測する。

超音波計測に関して、予備実験では非接触で超音波の送信・受信が可能な空気超音波法と接触型斜角超音波法を用いた。実験供試体はコンクリート及びコンクリート-接着剤-鋼板の層構造モデルであり、水分分布の違いによって波動の伝搬特性に生じる変化を観測した。次に本実験では、理論解析と数値シミュレーションを用いて最適な計測条件を求め、最後に実橋及び実橋から撤去された部位を用いてその有効性を検証した。

電磁波は、電磁波の反射・透過が比誘電率に依存し、水の比誘電率が空気と大きく異なる。そこで電磁波計測では、まずこの特性を利用した予備実験を行った。対象とする材料は土とベントナイトである。基礎実験に加えて実験条件を考慮した理論解析や数値シミュレーションを行い、定量的な伝搬特性の把握を行った。次に本実験では、予備実験で得られた水分量分布と電磁波の伝搬特性の関連性をもとに、水分量分布を推定するアルゴリズムを構築し、最後に適用性を確認する。

4. 研究成果

4-1 超音波計測

超音波計測の予備実験では空気超音波法と接触型斜角超音波法の両方に取り組んだが、空気超音波法は発信周波数の制御が難しく、コンクリート内部の水分量変化に対応する十分な超音波特性の感度が得られないことが判明した。一方、接触型の斜角超音波探触子を用いた実験では周波数の制御も容易で、試験体の表面に沿って伝搬するガイド波を計測することができた。得られたガイド波の分散特性を利用することによって、鋼板を接着させたコンクリートの剥離損傷部の滞水有無の判定や滞水層厚さの推定が可能であることが示唆された。いくつかの層構造モデ

ルにおけるガイド波の分散特性について理論解析を行った。例えば、図1は、鋼板(黒色)、コンクリート(灰色)、エポキシ樹脂(黄土色)、水(水色)の組み合わせからなる様々な層構造モデルに対して得られた超音波ガイド波の基本モードの位相速度分散曲線である。層構造に含まれる水の存在の有無や水の層厚の違いによってガイド波の分散特性が異なることが示され、水分量分布の計測のための理論的裏付けを得ることができた。

超音波計測の室内における本実験では、図2に示すような、一対の可変角斜角探触子によるガイド波の送受信の実験を実施した。両斜角探触子の角度を調整して位相速度を固定して探触子に付与する周波数を掃引した。例えば、ガイド波の位相速度が4000m/sとなるように可変角斜角探触子の角度 θ を設定して周波数を掃引した場合(図2の赤矢印)、もし鋼板上面に2mmの滞水層があれば約200kHzの周波数においてガイド波が励起される。このようにガイド波が最も発生する周波数を求め、理論分散曲線から得られた周波数と比較した結果、よい一致を得ることができた。これによってガイド波の送受信という簡単な計測手法で鋼板上の滞水層厚を推定できることを明らかにした。

室内実験によって超音波ガイド波の位相速度の分散特性による滞水状態の分別と滞水層厚の推定が可能となったことから、この手法を鋼板接着で補強後に撤去された床版と実橋梁の鋼板接着部に適用し、その有効性を検証した。撤去床版に対する検証実験では鋼板上の滞水の有無によってガイド波の励起周波数が変化することを明らかにした。実橋梁においては鋼板接着の健全部、滞水した剥離部、滞水なしの剥離部のそれぞれ部位でガイド波の励起周波数が異なることを明らかにした。このようなガイド波の励起周波数に着目すれば鋼板接着の損傷状態を定量的に評価できることを示した。

4-2 電磁波計測

電磁波計測では、まず材料・構造物内部の水分量が一定の方向に変化するとして、比誘電率が一方方向に変化する多層モデルを考え、電磁波の反射係数を解析的に求めた。その後、数値シミュレーションによって得られた反射係数に一致するように比誘電率を推定する逆解析アルゴリズムを構築した。その手法はアンセンテッドカルマンフィルタ(UKF)を用いた推定方法である。ただし、推定対象とする状態量ベクトルである比誘電率分布をウェーブレット変換することにより状態量にスパース性を持たせてソフト閾値作用素を適用させ、また、カルマンフィルタの繰り返し計算において誤差の挙動に応じて推定のためのパラメータを初期化するなどの工夫をした修正UKFを開発した。これによって比誘電率の推定精度の向上が確認された。一例を図3に示す。(a)と(b)はそれぞれ従来のUKFと修正UKFによって推定された比誘電率の分布を示したものである。(a)では真値(青線)と推定値(赤線)に若干の差異が見られるが、(b)では推定値がほぼ真値と一致し

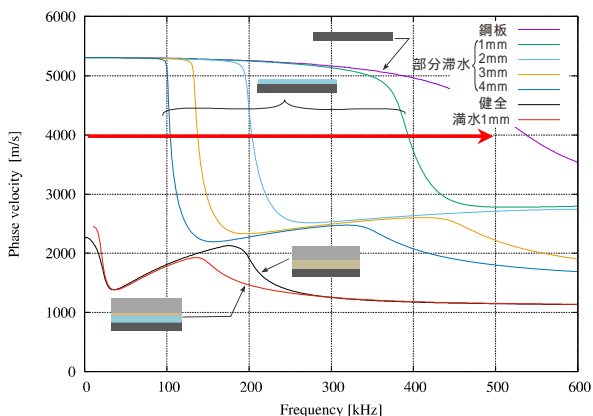


図1 理論層構造モデルに対して得られた超音波ガイド波の基本モード(鋼板モデルについては対称基本モード)の位相速度分散曲線。

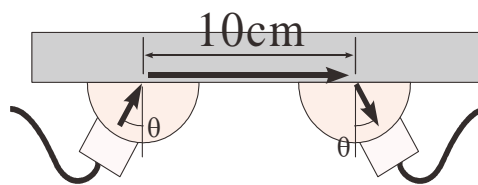


図2 超音波ガイド波の計測の模式図。

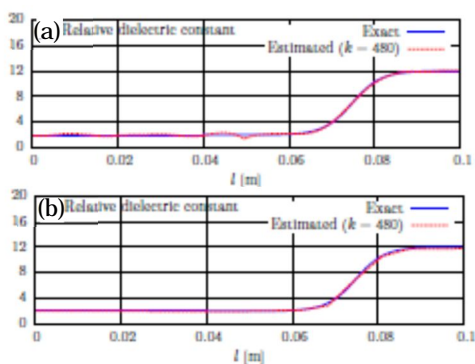


図3 (a)従来のUKFと(b)修正UKFによって逆解析された比誘電率の分布。

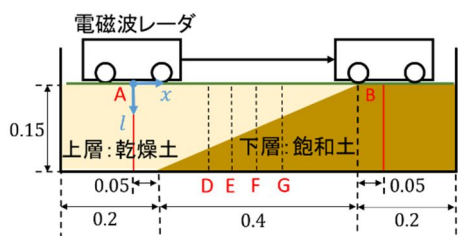


図4 電磁波レーダによる土中の比誘電率の計測。

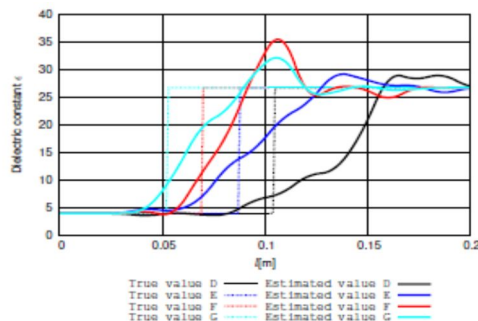


図5 電磁波レーダによる波形から推定された比誘電率分布。

ていて推定精度が向上していることがわかる。

開発した比誘電率の推定手法を実験によって確認した。図4のように飽和度の異なる土を配置し、 $x=0.15, 0.20, 0.25, 0.30$ [m]での点D,E,F,Gにおける深さ l 方向の比誘電率の分布をピーク周波数2.3GHzの電磁波レーダを用いて求めた。結果を図5に示す。乾燥土と飽和土の比率に応じた点D~Gの順に比誘電率の分布が得られた。しかし、乾燥土と飽和度の境界を明確に推定することはできなかった。その原因として用いた理論が1次元反射理論であり、電磁波の幾何拡散や斜めの境界の影響を考慮できていないことが考えられる。また、電磁波レーダをベントナイトの試験体に適用したが、反射電磁波の振幅が微弱で比誘電率を推定することはできなかった。また実構造物への適用についても現有の2.3GHzの電磁波レーダは不適であることがわかり今後の課題とした。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 TACHIBANA Hajime, HIROSE Sohichi, FURUKAWA Akira, NAKAMOTO Keisuke	4. 巻 8
2. 論文標題 ESTIMATION OF WATER PONDING ON STEEL PLATE ATTACHED TO THE BOTTOM SURFACE OF REINFORCED CONCRETE SLAB OF HIGHWAY BRIDGES	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of JSCE	6. 最初と最後の頁 144 ~ 153
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/journalofjsce.8.1_144	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 古川 陽, 斎藤 隆泰, 廣瀬 壮一	4. 巻 24
2. 論文標題 演算子積分時間領域境界要素法を用いた様々な材料の波動解析	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 計算工学	6. 最初と最後の頁 3931-3934
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 橋 肇, 廣瀬 壮一, 古川 陽, 中本 啓介	4. 巻 74
2. 論文標題 道路橋鉄筋コンクリート床版下面にある鋼板上の滞水状態の推定	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 土木学会論文集A1(構造・地震工学)	6. 最初と最後の頁 376-384
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejseee.74.376	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 廣瀬 壮一, 古川 陽, 橋 肇, 中本 啓介	4. 巻 30
2. 論文標題 ガイド波を用いた鋼板接着補強床版の損傷状態の非破壊評価	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 超音波TECHNO	6. 最初と最後の頁 103--106
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計25件（うち招待講演 6件 / うち国際学会 11件）

1. 発表者名 廣瀬 壮一
2. 発表標題 非破壊検査における数値シミュレーションの応用
3. 学会等名 2019 非破壊検査技術国際検討会（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 古川 陽, 廣瀬 壮一
2. 発表標題 UKFとしきい値作用素を用いた1次元比誘電率分布の推定
3. 学会等名 第65回理論応用力学講演会・第22回土木学会応用力学シンポジウム講演論文集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 廣瀬 壮一
2. 発表標題 インフラの点検・損傷評価 - 鋼板接着により補強された道路橋床版 -
3. 学会等名 一般社団法人 日本社会基盤安全技術振興協会 定時総会 併設 勉強会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Akira Furukawa, Sohichi Hirose
2. 発表標題 Time domain CQBEM for wave scattering in complex media
3. 学会等名 WAVES 2019 (14th International Conference on Mathematical and Numerical Aspects of Wave Propagation) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 A. Furukawa, T. Saitoh, S. Hirose
2. 発表標題 Time-domain finite element method for wave propagation in fluid-saturated porous solid
3. 学会等名 7th Asian Pacific Congress on Computational Mechanic (APCOM) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Sohichi Hirose
2. 発表標題 Non-destructive testing and assessment of concrete
3. 学会等名 1st International Conference on Concrete and Steel Technology Engineering and Design (CASTED2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 黒澤航, 古川陽, 廣瀬壮一
2. 発表標題 多層構造の反射特性に基づく岩盤の誘電率分布の推定手法の開発
3. 学会等名 第21回応用力学シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 松岡芳宜, 松野壮展, 橘肇, 中本啓介, 古川 陽, 廣瀬壮一
2. 発表標題 ガイド波を用いた鋼板剥離部における滞水の有無の判別
3. 学会等名 土木学会第73回年次学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 黒澤 航, 古川 陽, 廣瀬壮一
2. 発表標題 岩盤の不飽和領域を対象とした1次元誘電率分布の推定手法の開発
3. 学会等名 土木学会第73回年次学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 橘肇, 松野壮展, 廣瀬壮一, 古川 陽, 中本啓介, 松岡芳直
2. 発表標題 鋼板接着補強された鉄筋コンクリート床版の損傷検出アルゴリズムの構築
3. 学会等名 土木学会第73回年次学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Wataru Kurosawa, Akira Furukawa, Sohichi Hirose
2. 発表標題 Development of an estimation method for dielectric constant distribution in rock using unscented Kalman filter
3. 学会等名 Eighth Regional Symposium on Infrastructure Development in Civil Engineering(RSID8) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Sohichi Hirose
2. 発表標題 Recent Development of Nondestructive Evaluation (NDE) for infrastructures - NDE for degradation of reinforced structures
3. 学会等名 SeoulTech NDT Forum (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Sohichi Hirose
2. 発表標題 Nondestructive Evaluation for Reinforced Concrete Slabs of Bridges
3. 学会等名 2019 International Forum on NDT (Hangzhou) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 古川陽, 高木勘多, 廣瀬壮一, 山中義彰, 今井博
2. 発表標題 電磁波を用いた1次元誘電率分布の推定手法の開発
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 松野 壮展, 古川 陽, 廣瀬壮一
2. 発表標題 ガイド波を用いた鋼板上の滞水層厚の推定
3. 学会等名 土木学会第72回年次学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 黒澤 航, 高木勘多, 古川 陽, 廣瀬壮一, 今井 博, 山中義彰
2. 発表標題 UKFを用いた1次元誘電率分布の推定手法の開発と電磁波レーダー実験による検証
3. 学会等名 土木学会第72回年次学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 松野 壮展, 橘 肇, 古川 陽, 廣瀬 壮一
2. 発表標題 ガイド波を用いた鋼板接着補強床版の損傷状態の判別
3. 学会等名 日本非破壊検査協会平成29年度秋季講演大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hajime Tachibana, Sohichi Hirose, Akira Furukawa, Akinobu Matsuno and Keisuke Nakamoto
2. 発表標題 Detection of Water Ponding State on Steel Plate Using Guided Waves
3. 学会等名 Proc. 15th Asia Pacific Conference for Non-Destructive Testing(APCNDT2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Raphael Lee, Jason Ongpeng, Andres Oreta, Sohichi Hirose
2. 発表標題 Air-coupled Ultrasonic Test in Singly-reinforced Concrete Beam
3. 学会等名 5th ASEP Convention on Concrete Engineering Practice and Technology (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Sohichi Hirose
2. 発表標題 Advanced nondestructive testing for concrete materials and structures
3. 学会等名 5th ASEP Convention on Concrete Engineering Practice and Technology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Hajime Tachibana, Sohichi Hirose, Akira Furukawa, Yoshinori Shimada, Oleg Kotyaev, Keisuke Nakamoto
2. 発表標題 Detection of Water Ponding in Steel-plate-bonded Concrete Slab Using Ultrasonic Guided Waves
3. 学会等名 NDE/NDT for Highways & Bridges: SMT 2016 (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 藤本隼史, 古川 陽, 廣瀬壮一
2. 発表標題 飽和多孔質弾性体の高周波数域の波動問題に対する有限要素解析
3. 学会等名 土木学会第71回年次学術講演会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 廣瀬 壮一, 橘 肇, 小原 稔生, 古川 陽
2. 発表標題 鋼板接着床版における滞水検出のためのガイド波法
3. 学会等名 土木学会第71回年次学術講演会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 高木 勲多, 古川 陽, 廣瀬 壮一, 今井 博, 山中 義彰
2. 発表標題 電磁波の反射特性を利用した坑道周辺の誘電率分布の推定
3. 学会等名 土木学会第71回年次学術講演会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 松野壮展, 古川陽, 橘 肇, 廣瀬壮一
2. 発表標題 ガイド波を用いた鋼板上の滞水層厚の推定
3. 学会等名 第24回超音波による非破壊評価シンポジウム
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	古川 陽 (FURUKAWA Akira) (60724614)	東京工業大学・環境・社会理工学院・助教 (12608)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------