

MHz イメージャーによるコンクリート構造物、土壌の内部探査技術の 試験研究

Experiment and research of internal exploring technique for concrete and soil using MHz imager

新潟大学工学部 教授 安部 隆

(研究計画ないし研究手法の概略)

本研究では、現在開発中の電波帯の撮像素子(MHz イメージャー)技術を用いた土木構造物の非破壊探査の試験研究を実施する。本撮像素子は、従来法である電磁波レーダーやX線を用いた探査技術と比較し、小型(手のひらサイズ)・安価であり、従来法が得意とする誘電性変化(空隙、異物、含水量)に加えて、導電性変化(塩分、腐食、濃度変化)も含む複合的な変化を非破壊で同時評価できる。本試験研究では、本撮像素子の開発と同時に単一素子を用いて、セメントの試験片内部の塩害または凍害による目視できないレベルの劣化を評価できないか試みた。また、土壌の種類による浸透性、保水性について比較試験を実施し、土壌を総合的に評価する手法の開発を実施した。

研究手法について以下に説明する。センサとして、水晶発振回路を用いた複素容量センサを用いていた。本センサは、撮像部となる検出用キャパシタ(SC)を水晶振動子と直列に接続しており、SC面外に漏れ出るフリンジ電界を利用することで、被測定対象を非破壊で測定が可能となる。

以下に、本センサの等価回路について詳しく説明する。 R は等価直列抵抗、 L_1 は等価直列インダクタンス、 C_1 は等価直列容量、 C_0 は等価並列容量、 C_L はSCの複素容量である。本センサの共振周波数 F は、(1)式で表される。

$$F = \left(1 + \frac{C_1}{2(C_0 + C_L)}\right) \times \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}} \text{ (Hz)} \dots\dots\dots (1)$$

このとき、水晶振動子の等価回路中の成分である C_1 、 C_0 は、水晶振動子固有の値であり、不変である。 L_1 は変数成分であるが、 C_L と比較して変化が微小なために、固有値とみなすことができる。よって、本センサの共振周波数変化 ΔF は、(2)式で表される。

$$\Delta F = -\frac{\Delta C_L C_1}{2(C_0 + C_{L1})(C_0 + C_{L2})} \times \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}} \text{ (Hz)} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 C_{L1} 及び C_{L2} は、被検出対象を測定する前と後の複素容量であり、 ΔC_L は、 C_{L2} から C_{L1} を引いた値である。

本研究では、内部探査に使用するために局所測定に対応した撮像部となる複素容量検出用電極を設計・考案し、表面から内部の誘電・導電性変化を検出可能とした。原理的には、本素子を動かして被検出対象の表面をなぞるように探るまたはアレイ化により2次的に内部状態を非破壊で探査することができる。

(実験調査によって得られた新しい知見)

1. 撮像素子の開発

図1に新たに開発した素子を示す。アパーチャーを有する浮遊電極を配置することで図2に示すように配線などの実測定下においては不都合な応答を検出部の応答の約1000分の1に低減することに成功した。また、電極形状とサイズの最適化にも成功した。オープンな環境下での計測で、目的のものだけを局所的に測定する場合に、本技術は有効と考えられる。

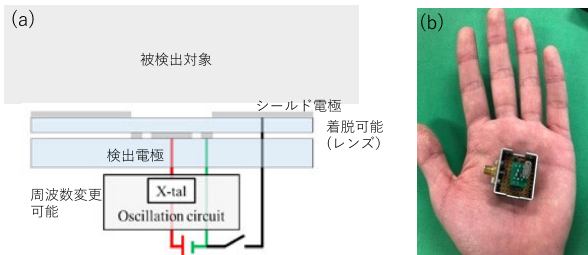


図1 測定子となる単一素子の形状(a)および自作専用回路

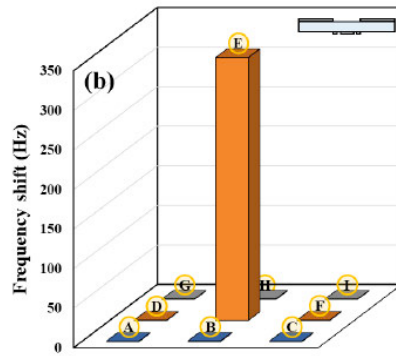


図2 素子部と周縁部の応答比較

2. セメント系構造物内部の劣化度推定

セメント試験片の測定対象として、本研究では、コンクリート構造物の表面や斜面の新色や崩落を防ぐのり面などによく利用されている、社会インフラの安全を守るコンクリート系材料の一つであるモルタルを用いて、塩害及び凍害の劣化度評価を実施した。

具体的には、表面に散水し、空隙中に水を浸透させることによる応答増幅及び経時変化から内部のひび割れ状態を診断する手法を考案し実際に評価を試みた。

モルタル試験片として、共同研究者の佐伯教授とデンカ株式会社が開発したクロルサーチを用いて凍害および塩害の影響の試験評価を実施した。劣化試験は長期間にわたる計測が必要であり、現在も野外に試験片を設置し劣化試験を計測中である。ここでは、予備研究として単一素子を用いて実験室内で実施した評価試験結果を示す。

まず、塩害劣化試験法と結果について報告する。無劣化、塩害劣化モルタル表面に散水し乾湿過程のモニタリングを実施した。実験方法は、SC上にモルタル試験片を配置し、水を滴下した。20時間静置し湿乾過程を測定した。また、無劣化モルタルは開封直後のものを使用し、塩害劣化モルタルは飽和塩水に室温で1ヶ月浸漬させたものを用いた。

次に、塩害劣化度別にモルタルの乾燥過程のモニタリングを実施し、塩害劣化の度合いを測定可能かについて評価した。実験方法は、モルタル試験片を塩分濃度0%、10%および26%の溶液にそれぞれ14日間浸漬後、十分に乾燥させた。乾燥後、純水に1時間浸漬させてから乾燥過程のモニタリングを行った。

図3に無劣化、塩害劣化モルタルの乾湿過程のモニタリング結果を示す。モルタルの空隙部に水分が浸透すると誘電率が増加するため、共振周波数は減少し、水分が減少すると誘電率が減少するため共振周波数は増加すると理論的に予想されるが実験結果はそれを裏付ける結果となった。上記の結果から、無劣化、塩害劣化モルタルともに水分の湿乾過程をモニタ

リングすることができると考えられる。より詳細に実験結果を比較すると、水の乾燥過程では、塩水浸漬したモルタルの方が共振周波数の上昇が緩やかになっており、乾燥に多くの時間を要していることが分かった。これは、モルタル中の空隙中に存在する塩化ナトリウムによる蒸気圧降下（ラウールの法則）により水の蒸発速度が遅くなったと考えられる。

次に、図4に塩害劣化度別に比較したモルタルの乾燥過程のモニタリング結果を示す。純水を含む濃度の異なる塩水に浸漬させたモルタル間で結果を比較すると、濃度26%の溶液に浸漬させたモルタルの方が周波数が緩やかに上昇しており水が蒸発しにくいことが分かる。これについても前述のラウールの法則で説明ができる。以上の結果から、本センサでモルタルの塩害劣化度を乾燥速度から測定可能であることが示された。

次に、凍害劣化試験法と結果について報告する。模擬的に凍害を発生させるため、モルタル試験片を水中で5時間以上凍結(-18℃)、水中で30分以上融解を行った。このような凍結融解サイクルをそれぞれ1回、10回および20回行うことで凍害劣化モルタルのモデルを作製した。本センサを用いて、凍害劣化の度合いを測定可能か評価するために、作製した凍害劣化モルタルに水を2ml滴下し、モルタルの湿乾過程のモニタリングを行った。

図5に凍結融解サイクルを行ったモルタルの湿乾過程のモニタリング結果を示す。水の浸透過程では、凍結融解サイクル数が多いほど、周波数の減少速度、すなわち浸透速度が僅かに早くなっていた。一方、乾燥過程においては凍結融解サイクル数が多いほど、周波数の増加速度、すなわち乾燥速度が早くなっていることがわかった。これは、微小なひび割れの形成による空隙の増加によるものと推定される。実際に、表面を観察すると、無劣化モルタルには見られなかった損傷が凍結融解サイクルを行ったモルタルには見られ、推定結果と一致した。一般的に凍害により微小な亀裂や剥離が発生することが知られておりその知見と一致している。以上より、凍結融解サイクル数が多いほど微小なひび割れや剥離といった損傷が多くなり、モルタルの表面積が増大したことで蒸発が起きやすくなったと考えられる。

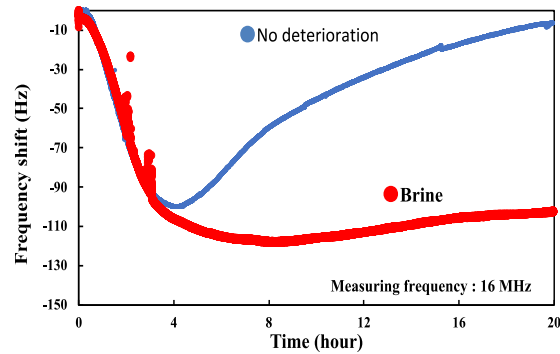


図3 無劣化および塩害劣化モルタルの乾燥過程の違いの非破壊評価結果

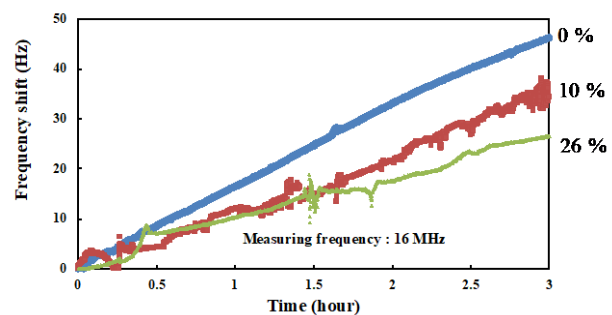


図4 塩害劣化度別モルタルの乾燥過程の測定結果比較

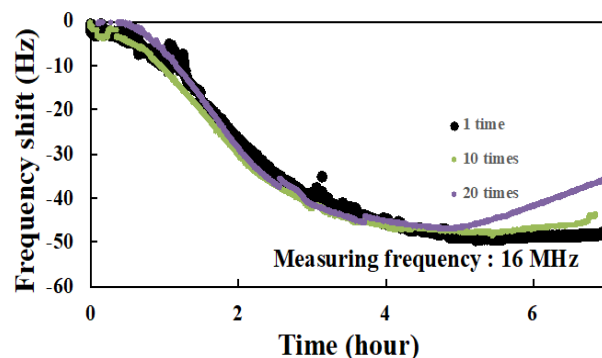


図5 凍害劣化モルタル湿乾過程の非破壊測定

3. 土壌状態内部の推定

本試験研究では、土壌の種類による浸透性、保水性について比較試験を実施し、土壌を総合的に評価する手法の開発についても実施した。代表的な土壌として、黒土、黄土および腐葉土について、土壌への水の浸透性、保水性について調べた。

図6に浸透性の違いによる応答の比較結果を示す。実験では、土壌内の空隙状態を見るために、散水による応答の経時変化に着目した。空隙部はほぼ気体の誘電率（1）であり、水の誘電率（約80、室温下）が高いために、水の浸透に伴って応答が大きくなる。ここで、水の内部への移動に伴う変化は空隙（多孔質）状態に依存するため、保水力等の内部状態を推定することができる。図より、比較的早い移動である重力水と浸透に時間を要する毛管水の違いが明瞭になり、腐葉土の場合は、表面付近の含水力が低く通気性が高いことが示された。一般的な土壌の違いによる水の浸透性、保水性を明示することができることが示された。本手法は、防災に関わる土壌状態の推定、さらには土壌の設計に有効と考えられる。なお、本研究発表は、速報ポスター賞に最終ノミネートされた（発表論文1）。

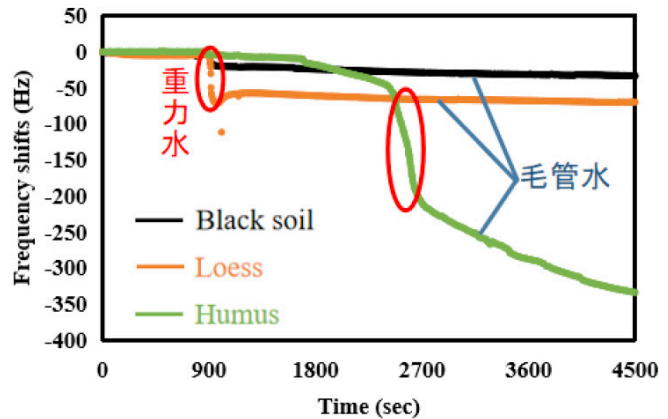


図6 土壌の種類による水の浸透性の非破壊測定

の誘電率（1）であり、水の誘電率（約80、室温下）が高いために、水の浸透に伴って応答が大きくなる。ここで、水の内部への移動に伴う変化は空隙（多孔質）状態に依存するため、保水力等の内部状態を推定することができる。図より、比較的早い移動である重力水と浸透に時間を要する毛管水の違いが明瞭になり、腐葉土の場合は、表面付近の含水力が低く通気性が高いことが示された。一般的な土壌の違いによる水の浸透性、保水性を明示することができることが示された。本手法は、防災に関わる土壌状態の推定、さらには土壌の設計に有効と考えられる。なお、本研究発表は、速報ポスター賞に最終ノミネートされた（発表論文1）。

4. まとめ

撮像素子となる構造を決定しアレイ化によるイメージングへ前進した。また、単一素子を用いて、非破壊で、セメント系構造物の劣化状況や土壌内部の状態を推定することができることがわかった。今後、本技術で何かできるかについて、実地調査を含めた使うことによる検証、さらには解析のアルゴリズムの開発を進めながら、同時に、製品化に向けたプロトタイプの開発を進めたいと考えている。

（発表論文）

- 1) LIU JIANI、寒川雅之、安部 隆、水晶発振回路式 MHz 帯複素容量センサを用いた土壌状態の非接触モニタリング、第38回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム、10P3-SSL-81、2021年11月（論文も投稿中）
- 2) 岩本啓吾、佐伯竜彦、寒川雅之、安部 隆、非接触式推奨複素容量センサを用いたモルタル劣化度の評価、令和4年度電気学会E部門総合研究会、2022年6月発表（論文も投稿予定）