

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 6月 3日現在

機関番号：16101

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2012

課題番号：23656298

研究課題名（和文）長大土構造物の浸水箇所を探知する閉回路レーダー法の開発

研究課題名（英文）Development of closed-circuit RADER to detect submerged points in large structures

研究代表者

上野 勝利（UENO KATSUTOSHI）

徳島大学・大学院ソシオテクノサイエンス研究部・准教授

研究者番号：70232767

研究成果の概要（和文）：

長大な土構造物の浸水箇所や空洞発生箇所を同定する、常時モニタリング方法を開発することが本研究の目的である。そこで地中に埋設した伝送線路によって形成される、長延長の閉回路中を伝播する高周波信号の反射特性から、延長上の水浸箇所や空洞化箇所を検出する「閉回路レーダー法」を提案した。平成23年度には、「閉回路レーダー法」を実現する装置の検討を行い、平成24年度に室内模型実験によって原理の確認を行った。

研究成果の概要（英文）：

The aim of this study is development of a monitoring system to determine the locations of submersion or cavitation in large long soil structures. The method, named "Closed circuit radar method", was invented to detect submersion points and cavitation points in long soil structures from the reflection characteristic of the high frequency signal transmitting through a buried transmission line. In 2011, the device for "closed circuit radar method" was examined, and the principle was confirmed by a series of laboratory model experiment in 2012.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・地盤工学

キーワード：地盤防災、地盤計測

1. 研究開始当初の背景

昨今の極端気象の影響によって、豪雨による地盤災害や土構造物の被害がたびたび発生している。土の変形強度特性の劣化や、排水時の土砂流失による空洞発生など、土構造物の浸水・漏水による被害を防ぐためには、土構造物内部の水分状態の継続モニタリングが必要である。しかし、経済的に実施できる調査手法は十分整備されていないのが現状である。

静電容量式の地下水位計や水分計の開発を行ってきた。ベースとなる静電容量計は組込みマイコンを用いて独自に開発したもので、3～4fFの分解能と32ビットのダイナ

ミックレンジを有している。高分解能広レンジであるため、原位置にて使用する水位計や水分計の電極形状の自由度が高い

システムであり、水分計は飽和状態から乾燥状態まで測定できる。現在、降雨による河川堤防内の含水比変化や、道路盛土内の地下水位変化の継続モニタリングを実施している。

これらのセンサは、狭い範囲で精密な測定を実施するものである。しかし長大構造物の延長全体を把握し、異常箇所を探知することはできない。異常箇所の探知方法を種々検討した結果、閉回路レーダー法の発想に至った。

2. 研究の目的

線状長大土構造物内部を継続的にモニタリングし、浸水・漏水や空洞の発生などの異常個所を探知するための「閉回路レーダー法」を開発し、地盤災害の被害低減に資することが本研究の目的である。

なお、「閉回路レーダー法」については、平成 25 年 6 月現在、企業との共同研究およびそれに伴う特許出願の可能性が生じたため、本報告書中では詳細を割愛する。詳細については出願あるいは公知となった段階で改めて報告する。

交付申請時に追加した課題である土構造物の水浸と空洞化を検出する静電容量式センサの研究結果について報告する。

3. 研究の方法

堤防や盛土などの維持管理のため、水分センサを埋設する際、センサ自身が水みちを形成してしまう恐れがある。そこで、絶縁された 1 対の電線を用い、フレキシブルで土の締固めとなじみの良いセンサとし、静電容量変化から地盤の浸水や空洞化を検出できる方法を開発した。静電容量型センサでは、浮遊容量の影響を避けるため、変換回路(センスアンプ)にセンサ電極を直結することが一般的である。しかし、地中深く埋設される水分計では、変換回路を埋設することは故障やコスト高の要因となる。そこで、接続ケーブル等の浮遊容量の影響を排除できる変換回路を開発した。単純な電線を地盤の浸水・空洞化センサとして利用することを試み、室内模型実験で確認した。

4. 研究成果

(1) 計測原理

図 1 に示す CR 積分回路によるキャパシタ C の充電時間から静電容量 C を求めている。キャパシタ C がセンサの役割を果たす。キャパシタ C の端子電圧 V_0 は、図 2 に示すように変化し、時間 t の関数

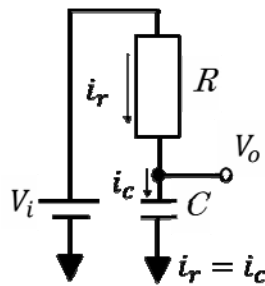


図 1 CR 積分回路

あらわされる。式 1 を整理して、 V_0 が基準となる電圧 V_{ref1} から V_{ref2} に達するまでの時間 $t = t_2 - t_1$ を考慮すると、静電容量 C は式 2 に示すように、時間 t に比例する。時間 t は原理的には無限の長さまで拡張することができるので、電圧入力による測定のようなレンジの上限の制約を受けず、高い分解能を保ちながら広いレンジで線形性のよい測定を行うことができることに気が付いた。実際の回路

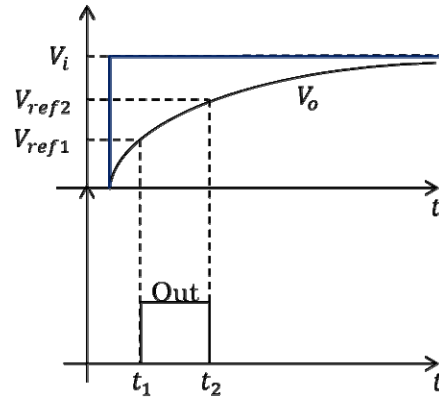


図 2 動作原理

$$V_o = V_i \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{t}{CR}\right) \right\} \dots (\text{式1})$$

$$C = \frac{t}{R \ln\left(\frac{1 - V_{ref1}/V_i}{1 - V_{ref2}/V_i}\right)} \dots (\text{式2})$$

では単安定マルチバイブレータと呼ばれる回路を用い、図 2 に示すような時間 t のパルスを出力している。ただし、線形性を高めるために、回路には独自の工夫を加えている。

長期モニタリングを行う上で、故障要因となるセンスアンプは交換できるように地上に設置し、埋設部は単純なセンサ電極のみとしたい。しかしながらセンサ電極とセンスアンプ間を接続するシールドケーブルも 1m 当たり 60~100pF 程度の静電容量を持ち、計測上の障害となる。そこで、2 つの方法により対応できるように工夫した。1 つの方法は上述の通り高い分解能と線形性を保ったまま、十分に広い計測レンジを付与することを実現した。もう一つの方法として、接続ケーブルが有する静電容量をアナログ的にキャンセルする回路を考案した。図 3 はその原理を示したものである。センスアンプにボルテージフォロワと呼ばれる非反転入力と同じ電圧を出力する回路を追加し、シールドの芯線と

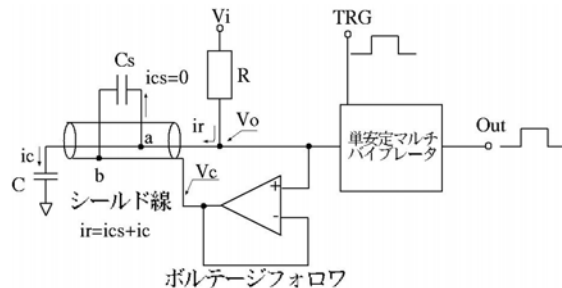


図 3 キャンセル回路の概略

外被が同電位となるようにした。これによりシールドの持つキャパシタ C_s の両端 a, b 点の電位差は 0 となり、充電電流 i_c は流れない。その結果、抵抗 R を流れる電流 i_r は $i_r = i_c$ となり、すべて測定対象の C を充電することに費やされる。以上によりシールドにより外部の影響を遮蔽しつつ、図 1 の原理通りの動作が実現できる。なお、時間 t の測定には組み込みマイコンを用いたクロック周波数 32MHz のカウンタを作成し、クロック数をカウントした。これにより分解能約 3fF、32bit レンジの静電容量計となる。プログラムは 0 から作成したアセンブリ言語による独自コードのため、他者の権利から独立している。動作も高速で、静電容量計 4ch、電圧入力 8ch を RS232C のテキストで出力した場合、毎秒 50 サンプル程度の計測が可能である。なお雑音除去の処理は行っているが、リニアライズなどの補正処理は行っていない。

(2) 線形性とキャンセル機能の確認 想定した線形性とキャンセル機能が実現できているか、検証を行った。検証には温度特性などが良好な CH 級積層セラミックキャパシタ（静電容量の公称値は 1.3, 10, 100, 200, 470pF を各 1 個、820pF を 2 個）と、高信頼な同軸ケーブルである RG-59B/U（静電容量 67pF/m）を用いた。それぞれのキャパシタを同軸ケーブル（長さ 1, 2, 3, 6, 11, 21, 31, 51m）を介して、キャンセル機能ありなし 2 種のセンスアンプに接続し、得られるカウント値を記録した。その結果を図 4 に示す。

キャンセル機能なしの場合、同軸ケーブルの長さ毎に回帰分析を行ったところ、係数はほぼ同じく 321.33 ~ 327.06 (count/pF)、 $R_2=0.9999$ であり、切片の値もほぼ同軸ケーブルの長さの一次関数となり、5nF 以上の広い範囲で良い線形性を示した。一方、キャンセル機能ありの場合、同軸ケーブルをまとめて行った回帰分析の結果は、同軸ケーブルの長さによらずに係数が 321.44 (count/pF)、 $R_2=0.9998$ の 1 本の直線となり、キャンセル

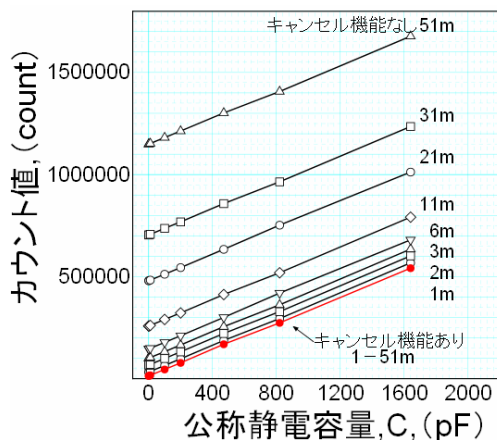


図 4 線形性とキャンセル機能の確認

機能なしの結果と同等の係数と線形性を示した。70 万カウント程度まで 1 カウント当たり約 3fF の分解能を保ちながら高い線形性を確保していることと、キャンセル機能が実現できたことが確認できた。

(3) 浸水・空洞検知実験 静電容量型センサによる地盤の浸水・空洞化を検知できるか、室内カラム実験により検証を行った。実験装置を図 5 に示す。底面を有する内径 100mm 長さ 1,000mm の透明な塩ビパイプを 2 本用意し、底部をナイロンチューブにて接続した。そのパイプの 1 本の断面中央に長さ

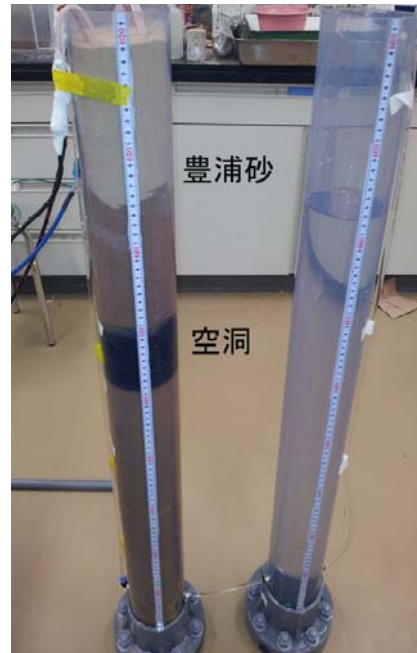


図 5 カラム実験

1,000mm の 300Ω フィーダー線（被覆はポリエチレン）を軸方向に張り、センサ電極とした。センサ電極はキャンセル機能なしセンスアンプに直結したものと、2m の RG-59B/U 同軸ケーブルを介してキャンセル機能ありセンスアンプに接続したものの 2 種類を用意した。センサ電極設置後、周辺に乾燥豊浦砂を詰め、地盤模型とした。空洞を有する地盤模型では、高さ 500mm 付近にポーラスストーンとスポンジを用いて空洞を作成した。空洞の寸法は 100mm、200mm、300mm の 3 種類とした。もう一本のパイプには水道水を供給し、水位を 100mm ごと上下させた際のカウント値を 5 分間記録し、平均値によって整理した。

図 6 は、空洞のない地盤について、乾燥状態から水位を上下した際の測定結果を示したものである。水位の上昇とともに地盤が浸水状態となり、ほぼ水位に比例してカウント値が上昇した。その後水位を低下させると、地盤は湿潤状態に保たれるため、カウント値はほぼ一定の値を保持したままとなった。また、キャンセル機能の有無による差は極わず

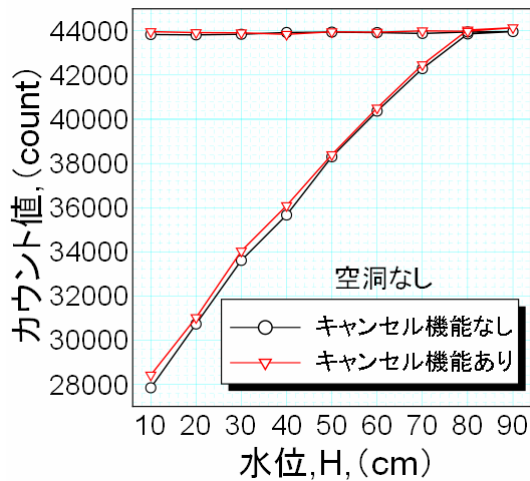


図 6 浸水水位とカウント値の関係

かであった。

測定されたカウント値は静電容量と線形関係にあるが、地盤工学的に普遍的な意味はない。そこでカウント値と地盤の浸水状態を関連づけるために、次の相対静電容量 C_r (%) を定義する(式 3)。ここで、 $C_{空气中}$ はセンサ電極全体が空気中にある時の測定値、 $C_{水中}$ はセンサ電極全体が水中にある時の測定値、 $C_{地中}$ はセンサ電極を地中に埋設し、目的となる測定を行ったときの測定値である。 C_r は、センサ電極を敷設した延長上での地盤の浸水率を意味している。

空洞を有するケースの結果について、水位と相対静電容量 C_r の関係を図 7 に示す。水位が空洞箇所を通過する際、電極が水没・露出するため C_r の値に変化が生じる。1 サイクルの水位変化の際に生じた C_r の増分 ΔC_r から、空洞寸法を式 4 のように評価した。ここで l はセンサ電極の長さである。図 8 に示すように、計測値から評価した空洞寸法 h_e は、実際の空洞寸法 h に比べ 7 割程度の値となった。このことから静電容量型センサを用いて経時的に地盤の浸水率をモニタリングすることにより、過小評価となるものの、降雨時などの短期間の変動から空洞寸法を評価可能であることが分かった。

$$C_r = \frac{C_{地中} - C_{空气中}}{C_{水中} - C_{空气中}} \times 100(\%) \dots (式 3)$$

$$h_e = \frac{\Delta C_r \times l}{100} \dots (式 4)$$

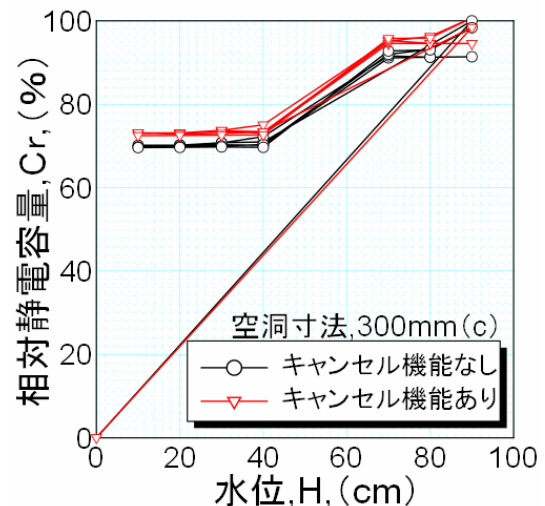
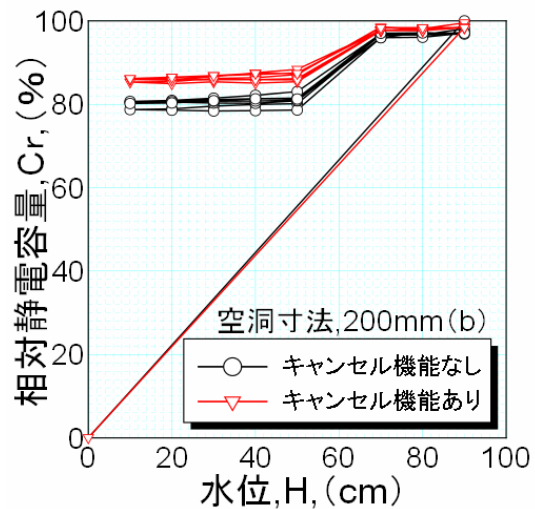
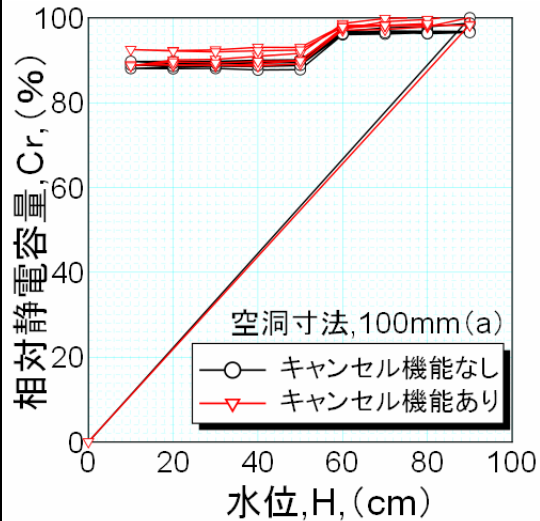


図 7(a-c) 水位と相対静電容量の関係

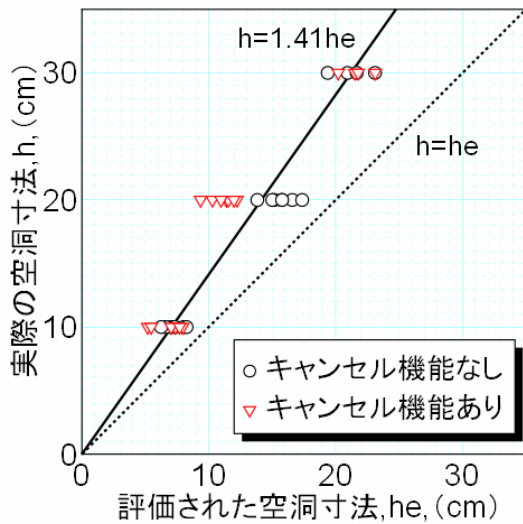


図 8 空洞寸法の評価結果

(4) 現場計測 静電容量型水分計による現場計測も行った。石川県小松市川辺町地内において、国土交通省北陸地方整備局金沢河川国道事務所の協力により、梯川の川辺樋管付け替え工事に合わせて、静電容量型土壌水分計 10 個を設置した。その様子を図 9 に示す。

周辺工事の影響もあり、試験測定のための状況であるが、2013 年 5 月から長期測定開始の予定である。また、測定開始直後は SD カードに記録する従来タイプのロガーで実施するが、現在無線や携帯電話回線を用いた通信の検討を室内で実施しており、システム構築後はリアルタイム測定に移行する予定である。



図 9 梯川堤防内に設置した静電容量式水分計

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者および連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 2 件)

① T. Takahara, H. Sugimoto, Relationship between damage of levee and its resonant frequency in Shinano River subjected to Niigata Chuetsu Earthquake in 2004, Proc. of 10th (Mitigation of Geo-Disasters in Asia, 査読なし, 2012, pp.33-40.

② T. Takahara, K. Ueno, H. Sugimoto, In situ Measurements using Developed High Resolution Capacitance Type Sensor and Its Performance Evaluation, Proc. Int. workshop on ICT in Geo-Engineering, JGS committee of ICTGE, 査読有、2012, pp.69-76.

〔学会発表〕(計 8 件)

① 上野 勝利ほか, 閉回路レーダ法による地下空洞の検知実験, 第 48 回地盤工学研究発表会, 2013 年 07 月 23 日, 富山国際会議場 (富山県)

② 石川 翔太, 上野 勝利ほか, 静電容量式センサーによる空洞評価の模型実験, 平成 25 年度四国支部技術研究発表会, 2013 年 05 月 11 日, 愛媛大学(愛媛県)

③ 上野 勝利, 高原 利幸ほか, 接続ケーブルの浮遊容量の影響を排除した静電容量センサンプ, 平成 24 年度地盤工学会四国支部技術研究発表会, 2012 年 11 月 16 日, 内子自治センター(愛媛県)

④ 高原 利幸, 上野 勝利, 静電容量式水分計の性能評価, 第 47 回地盤工学研究発表会, 2012 年 7 月 14 日, 八戸工業大学 (青森県)

⑤ 野々垣 遥也, 上野 勝利ほか, 静電容量式空洞センサーの模型実験による検証, 土木学会四国支部技術研究発表会, 2012 年 05 月 11 日, 高知工科大学 (高知県)

⑥ 上野 勝利, 高原 利幸ほか, 静電容量センサーによる土構造物の浸水・空洞化検知, 平成 23 年度地盤と環境に関するシンポジウム, 2011 年 12 月 2 日, 徳島大学 (徳島県)

⑦ 上野 勝利, 高原 利幸, 高見隼也他, WiFi 網と組込み Linux サーバーを活用した静電容量式地下水位計による地下水計測, 地盤工学会四国支部平成 23 年度技術研究発表会, 2011 年 11 月 11 日, 小豆島国際ホテル (香川県)

⑧高原 利幸、上野 勝利, 砂質堤体内の多点水分測定と降水量の関係, 第 46 回地盤工学研究発表会, 2011 年 7 月 5 日, 神戸国際会議場(兵庫県)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

上野 勝利 (UENO KATSUTOSHI)

徳島大学・大学院ソシオテクノサイエンス
研究部・准教授

研究者番号：70232767

(2) 研究分担者

高原 利幸 (TAKAHARA TOSHIYUKI)

金沢大学・環境デザイン学系・助教

研究者番号：20324098

(3) 連携研究者

なし