

## 低周波電磁波を利用した地中変位測定法の検討

メタデータ	言語: Japanese  出版者:  独立行政法人農業食品産業技術総合研究機構農村工学研究所  公開日: 2025-06-17  キーワード (Ja):  キーワード (En):  作成者: 浅野, 勇, 林田, 洋一, 増川, 晋, 田頭, 秀和, 遠目塚, 良一  メールアドレス:  所属:
URL	<a href="https://doi.org/10.24514/0002001337">https://doi.org/10.24514/0002001337</a>

# 低周波電磁波を利用した地中変位測定法の検討

浅野 勇\*・林田洋一\*・増川 晋\*・田頭秀和\*・遠目塚良一\*\*

目次	次		
I 緒 言.....	163	1 実験装置 .....	166
II フィルダムにおける地中変位測定の現状.....	163	2 実験方法 .....	166
III 低周波電磁波による地中変位測定原理.....	164	3 実験結果 .....	167
1 低周波電磁波を利用した 地中変位測定法の概要 .....	164	V 考 察.....	169
2 低周波電磁波の距離減衰の理論的考察 .....	164	VI 結 言.....	169
3 地中変位の計算 .....	165	参考文献.....	170
IV 地上における低周波電磁波の送受信実験.....	166	Summary.....	171

## I 緒 言

土質構造物の安全性を評価するためには地中変位測定が重要である。たとえば、フィルダムでは堤体の安全管理のために層別沈下計や岩盤変位計などを用いた地中変位測定が一般的に行われている。安中（1996）は52の農業用フィルダムを対象とした調査を行い、全体の78%に層別沈下計が、48%に岩盤変位計が設置されていたことを報告している。

一方、現状の地中変位測定法については、計測装置の寸法が大きく、堤体内へ異物を設置することになるため堤体の変形や浸透性状に影響を与えることが懸念される。また、計器の構造も複雑なため計測誤差も発生しやすい。さらに、計測は手動で行われることが多いため計測に手間がかかり、測定頻度を上げることが難しいなどの問題点が指摘されている。

このような地中変位測定法の問題点を改善するため、本研究では低周波電磁波に着目した地中変位測定法の検討を行った。筆者らはすでに地中において通信距離が100m程度であれば通信可能な低周波電磁波を利用した地中通信方法を開発している（向後ら、2006）。この研究の中で、地中においても低周波電磁波の強さが距離の3乗に比例して減衰することを確認した。低周波電磁波の強さが距離とともに規則正しく減衰すると仮定すれば、その減衰量から地中における変位測定センサの移動量を推定できる。さらに、低周波電磁波

を利用すれば地中通信も可能なため、地中通信によるデータ伝送と地中変位の測定を同時に行うことが可能である。

そこで、本研究では、低周波電磁波の強さの変化から地中変位を求めることができるという仮説の基本的な検討を試みた。具体的には、低周波電磁波の強さの変化と変位量の関係を求める地上実験を行い、その基本的な特性を検討することにした。なお、フィルダムへの適用を想定し、地上実験では計測距離30mで変位測定精度10mmを確保することを目標に実験水準を設定した。

## II フィルダムにおける地中変位測定の現状

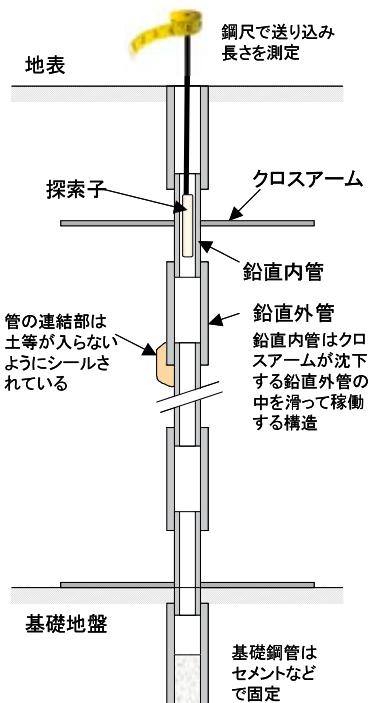
フィルダムに設置されている代表的な地中変位測定機器にはクロスアーム沈下計と岩盤変位計がある（（社）地盤工学会、2004）。Fig.1にクロスアーム沈下計の構成を示す。クロスアーム沈下計は、フィルダムなどの盛土内部の変形量を測定する計測器であり、層別沈下計とも呼ばれる。クロスアームは、鋼管などに長さ200cm、幅60cm程度の沈下板が剛結された構造であり、盛土の沈下に追従して可動する。計測では、鋼製テープの先端に探索子を取り付け管内に送り込み、探索子が沈下板を感知した時のテープの送り長さからクロスアームの変位を求める。沈下板の位置は沈下板の磁気やパイプの継目の段差から感知する。探索子を用いる方法は手動計測が必要のため測定に手間がかかるのが難点である。この難点を解消するため、電気式変位計を用いた自動計測方法が開発されている。この方法では、基礎岩盤に固定した支柱を管内に垂直に立上げ、支柱に電気式変位計を固定してクロスアームの移動量

\* 施設資源部構造研究室

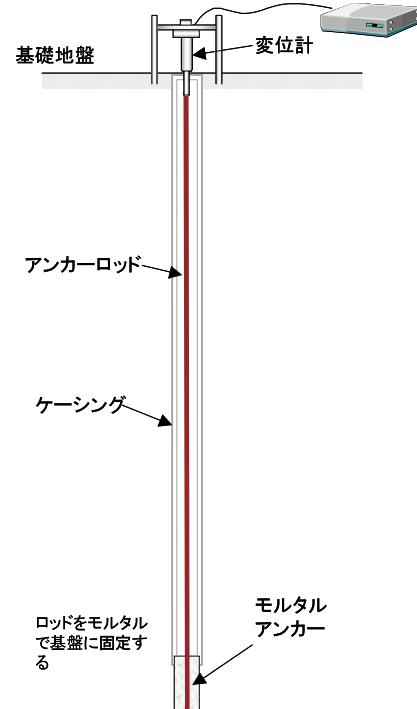
\*\*坂田電機㈱ 技術部設計課

平成20年12月15日受理

キーワード：地中変位測定、低周波電磁波、地中通信



**Fig. 1** クロスアームの概要図（手動式）  
Schematic view of cross arm pipe (Manual operation).



**Fig. 2** 岩盤変位計の概要図  
Schematic view of rock extensometer.

を計測する。つまり、基礎岩盤と支柱の変位量が等しいと仮定した計測が行われている。クロスアームの計測精度には探索子の精度（1～2mm）が記載されている場合が多いが、テープなどの伸び、固定端の移動および読み取り誤差などを勘案すれば実際の精度は探索子の精度より低いと推定される。旧建設省土木研究所（1994）の研究によればフィルダムの沈下量は最大でも堤高の2%程度である。つまり、堤高100mのダムでは最大200cm程度の沈下が予測される。一般的な土木計測器の精度が最大容量の1/100程度であることを考えれば、クロスアームについては1～2cm程度の精度が必要と考えられる。

**Fig.2**に岩盤変位計の構成の概要を示す。岩盤変位計は、基礎岩盤の相対変位を計測する。基盤表面からボーリングを行い、目標地点（固定点）にロッドを固定する。基盤表面までロッドを伸ばし、その変位を測定することで、基盤表面と固定点の相対的な変位を求める。旧建設省土木研究所（1994）が6ダムに設置された深度の異なる岩盤変位計の変位量（上載盛土高37～112mの範囲）を調べた結果、変位量は5～350mmの範囲にあった。この調査結果から推定すれば、少なくとも岩盤変位計についてはmmオーダーの計測精度が必要と考えられる。

以上述べたようにフィルダムの現状の変位測定用埋設計器は構造が複雑でかつ手動計測が必要なものが多く、計測のためのコストもかかる。このような現状を改善するための手段としてケーブルが無く寸法が小さい低周波電磁波を利用した地中変位測定法は有効と考えられる。

えられる。

### III 低周波電磁波による地中変位測定原理

**1 低周波電磁波を利用した地中変位測定法の概要**  
低周波電磁波を利用した地中変位測定法の概要を**Fig.3**に示す。計測に必要な計器は地上部の送受信装置と地中部に設置する変位測定センサである。送受信装置から低周波電磁波が変位測定センサに送信されると、電磁誘導によりセンサ内のアンテナコイルに電磁波の強さに比例した電圧が発生する。変位測定センサはこの電圧を測定し、その計測値を地上の送受信装置に地中通信で伝送する。得られた電圧値の変化からセンサの移動量が計算できる。

地中通信の通信可能距離はアンテナコイルの大きさに規定される。このため変位測定センサの寸法が重要な設計項目となる。センサの構造物に対する影響を考えればセンサの寸法はできるだけ小さい方が望ましいが、寸法が小さすぎると通信可能距離が低下する。今回は、変位測定センサの寸法をフィルダムへの埋設実績が豊富なワイヤレス間隙水圧計と同寸法（ $\phi 120\text{mm}$ , H205mm）とすることとした。また、送信周波数も同じく8.5kHzとした。参考のためワイヤレス間隙水圧計の構造と外形を**Fig.4**に示す。**Fig.4**で間隙水圧計を取り外した構造が変位測定センサの基本的な構造となる。

### 2 低周波電磁波の距離減衰の理論的考察

ここでは、低周波電磁波を利用した地中変位測定に

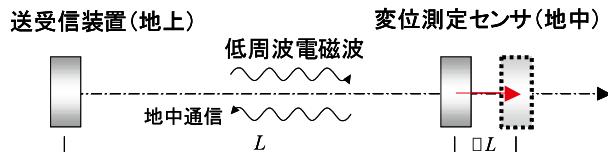


Fig. 3 低周波電磁波を利用した地中変位測定法の概要

Outline of the measurement of internal deformations with a low frequency electromagnetic wave.

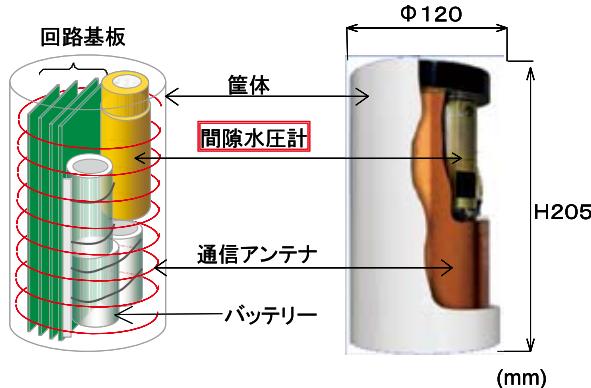


Fig. 4 ワイヤレス間隙水圧計の外形及び構造  
Structure of a wireless pore water pressure transducer.

必要な低周波電磁波の強さの距離減衰特性について述べる。農業用フィルダムの地中変位測定を想定すれば、堤体表面から測定センサまでの通信距離は最大でも100m程度である。一方、送受信装置に搭載されるアンテナコイルの直径は最大でも30cm程度である。このようにアンテナコイルの直径は通信距離に較べると十分小さい。このため、アンテナコイルの周辺における電磁界はFig.5に示すような微小ループアンテナ周辺に発生する電磁界として表すことが可能である。ここでは、この微小ループアンテナ周辺の電磁界の理論式に基づき低周波電磁波の強さについて考察を行う。

空気中におかれた面積  $S[m^2]$  の微小ループアンテナに角速度  $\omega [Hz]$ 、波長  $\lambda [m]$  の電流  $I[A]$  が流れると、ループの中心から距離  $r[m]$  離れた点、すなわち極座標  $(r, \theta, \phi)$  には、Fig.5に示すような電磁界が発生する。特性インピーダンスを  $Z_0$  とすると、この点の電界成分  $E_\phi$  および磁界成分  $H_r$  ( $r$  方向) 及び  $H_\theta$  ( $r$  方向と直交) は式(1)～(3)で与えられる(高村ら, 2006)。ここで  $j$  は虚数単位である。

$$E_\phi = \frac{Z_0 \pi (SI)}{\lambda^2 r} \left(1 - j \frac{\lambda}{2\pi r}\right) \sin \theta e^{j(\omega t - 2\pi r/\lambda)} \quad (1)$$

$$H_r = j \frac{2\pi (SI)}{\lambda^2 r} \left(0 + \frac{\lambda}{2\pi r} - j \left(\frac{\lambda}{2\pi r}\right)^2\right) \cos \theta e^{j(\omega t - 2\pi r/\lambda)} \quad (2)$$

$$H_\theta = -j \frac{\pi (SI)}{\lambda^2 r} \left(1 - \frac{\lambda}{2\pi r} - j \left(\frac{\lambda}{2\pi r}\right)^2\right) \sin \theta e^{j(\omega t - 2\pi r/\lambda)} \quad (3)$$

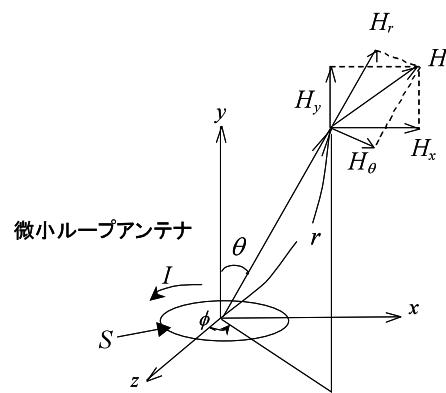


Fig. 5 微小ループアンテナ周辺の電磁界  
Electromagnetic field emitted by a small loop current.

本研究で対象とする通信距離は高々100[m]程度であり、使用する波長が35[km]程度であることを考えれば、式(2)において  $(\lambda/2\pi r)$  と  $(\lambda/2\pi r)^2$  項を比較した場合  $(\lambda/2\pi r)^2$  が主要な項となり、 $H_r$  は以下の近似解として取り扱うことができる。

$$H_r = \frac{SI}{2\pi r^3} \cos \theta e^{j(\omega t - 2\pi r/\lambda)} \quad (4)$$

また、 $E_\phi$  は  $H_r$  に較べ微小となるため、微小ループアンテナ近傍の電磁界は  $r^3$  に反比例する項、すなわち磁界成分が卓越する電磁界となる。このような磁界成分が卓越する電磁界を準静界と呼ぶ。地上部の送受信装置のアンテナコイルから低周波電磁波を発信し、準静界により地中部の受信アンテナに電磁誘導現象で励起された電気信号を読み取ることが地中通信の原理である。なお、詳細については割愛するが、透磁率及び導電率が均一である地盤中の電磁界は、空気中における電磁界と同様に距離の3乗に反比例し、磁界成分の卓越する準静界が、地盤の透磁率と導電率に応じた減衰を受けつつ伝播する(高村ら, 2006)。

### 3 地中変位の計算

実際の地中変位の測定では、送受信装置と地中部に設置する変位測定センサの間にリファレンス受信アンテナを設置し、リファレンス受信アンテナと変位測定センサの受信電圧の比(以下電圧比と呼ぶ)から地中変位を求めるにした。これは、電圧の比を取ることにより送信電流の変動や場所ごとに異なる可能性のある地盤の透磁率や導電率の影響をキャンセルするためである。高村ら(2006)が報告するように、土中の導電率は水分量に大きな影響を受けるため、このような比をとることで導電率の影響を完全にキャンセルできるかは不明であるが、花崗岩および堆積岩における低周波電磁波の伝播特性が空気中に比べてあまり低下しない研究結果(高村ら, 2006)が示されており、土中における低周波電磁波の伝播特性がこのような岩盤と同じであれば電圧比を用いることが有効と考えた。

計測装置の構成を Fig.6 に示す。ここで、送受信装置からリファレンスアンテナまでの距離を  $D[m]$ 、リファレンスアンテナから変位測定センサまでに距離を  $E[m]$ 、リファレンスアンテナおよび変位測定センサの受信電圧をそれぞれ  $V_r$ ,  $V_m$  とすれば、それぞれの受信電圧は  $H_r$  に比例するので、2つの受信電圧の比  $A$  (以下電圧比と呼ぶ) と距離  $D$ ,  $E$  の間に以下 (5) 式が成り立つ。距離  $D$  が既知であれば、電圧比  $A$  を計測することにより (5) 式から距離  $E$  を求めることができる。

$$A = \frac{V_r}{V_m} = \left( \frac{D+E}{D} \right)^3 \quad (5)$$

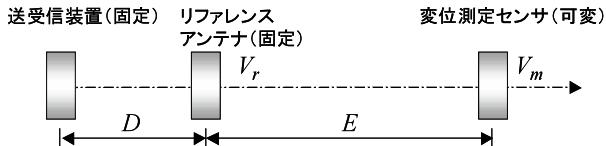


Fig. 6 計測装置の構成  
Sensor installation.

#### IV 地上における低周波電磁波の送受信実験

空気中における低周波電磁波の変化と変位量の関係を求めるために、地上実験を(独)農研機構農村工学研究所構内の散水器性能試験圃場で実施した。この圃場を選定した理由は、周囲にノイズ発生源の電線などが比較的少なく、環境ノイズが小さいためである。フィルダムへの地中変位測定を想定し、計測距離 30m で変位測定精度

10mm が確保できるかを目標とし、実験水準を決定した。

#### 1 実験装置

実験装置を Fig.7 に示す。また使用機材の仕様を Table 1 に示す。

#### 2 実験方法

受信電圧比と変位測定センサの移動量の関係を求めるための電圧 - 変位測定実験および変位測定センサの回転などが受信電圧に与える影響を調べるための影響要因確認実験を行った。

電圧 - 変位測定実験では、リファレンス受信アンテナの位置を  $D=5\text{m}$  と固定し、リファレンス受信アンテナと変位測定センサ間の距離を  $E=10, 15, 25\text{m}$  と変化させ、それぞれの距離で変位測定センサを送信軸方向に 0, 5, 10, 20, 50mm 変位させて電圧比を計測した (Fig.7)。送信軸方向のみの移動としたのは、送信軸の傾きやセンサの回転の影響を排除するためである。これらの影響についても影響要因確認実験で検討した。

影響要因確認実験では通信距離 15m の 1 ケースのみ実験を行った。式 (2), (3) から準静界の強さは、(1) 送受信機の出力 ( $I$ ), (2) 送信軸のずれ ( $\theta$  の影響), (3) センサの回転 ( $\theta$ ) の影響を受ける。これらの影響を確認するために以下の実験を行った。

- (1) 電圧変動実験：送受信機の電源電圧が変動した場合を想定し、電源電圧を 7.5V, 10.5V, 12.5V と変化させ受信電圧の変動を測定する。

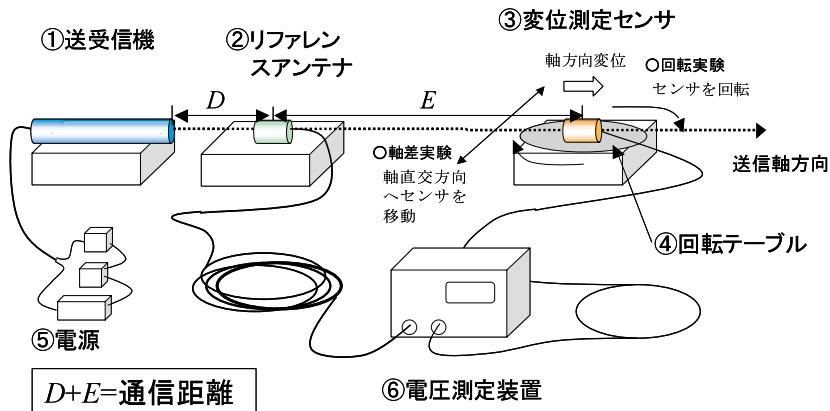


Fig. 7 実験装置  
Schematic view of experimental equipment.

Table 1 使用機材の仕様  
Specification of equipment.

機材名	仕様	機材名	仕様
①送受信機	孔内地中通信システム送信機 $\phi 48\text{mm}$ , H550mm	④回転テーブル	変位測定センサを回転させるためのテーブル
②リファレンスアンテナ	ワイヤレス間隙水圧計相当 $\phi 48\text{mm}$	⑤電源	乾電池を組み合わせて、7.5V, 10.5V, 12.0V を供給
③変位測定センサ	ワイヤレス間隙水圧計相当 $\phi 48\text{mm}$	⑥電圧測定装置	2つのアンテナの受信電圧を $\mu\text{sec}$ 単位で同期測定

**Table 2 実験条件**  
Experimental conditions.

実験シリーズ名	実験名	概要	実験水準			
			D[m]	E[m]	通信距離D+E [m]	センサ移動量 電圧変化量回転角
影響要因確認実験	電圧変位測定実験	電圧比とセンサ移動量の関係を求める	5	10,15,25	15,20,30	0.5,10,20,50[mm]
	電圧変動実験	電源電圧が電圧比に与える影響を調べる				7.5,10.5,12.5[V]
	軸差実験	送信軸のズレが電圧比に与える影響を調べる		10	15	0,10,20,40[cm]
	回転実験	センサの回転が電圧比に与える影響を調べる				0.5,10,30[°]

- (2) 軸差実験：変位測定センサが送信軸からずれた場合を想定し、変位測定センサが送信軸と直交方向に0, 10, 20, 40cm ずれたときの受信電圧の変動を測定する (Fig.7)。
- (3) 回転実験：変位測定センサが回転した場合を想定し、変位測定センサが送信軸に対して0, 5, 10, 30° 回転した場合の受信電圧の変動を測定する (Fig.7)。

実験条件を Table 2 にまとめます。

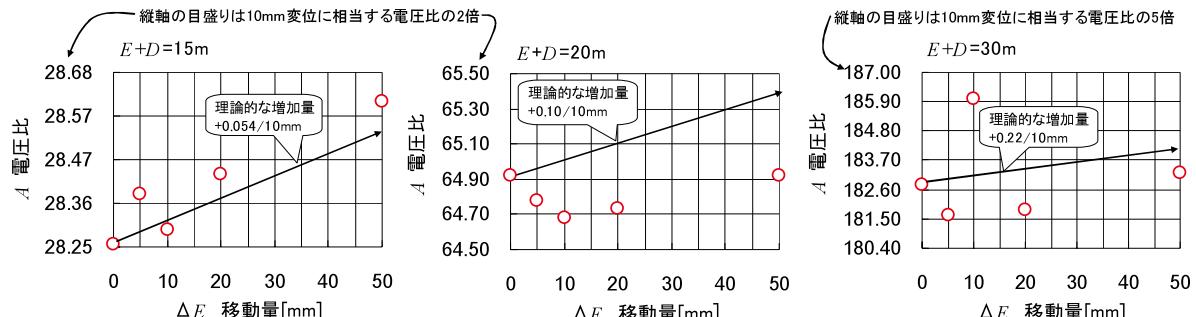
### 3 実験結果

#### a 電圧変位測定実験

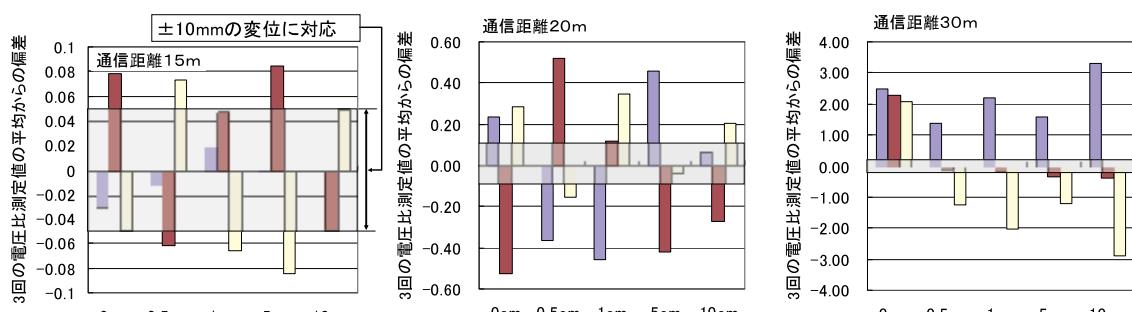
電圧－変位測定実験の結果を Fig.8 に示す。ここで電圧比は3回の測定の平均値である。各グラフには実線で

式(2)～(3)に基づき計算した理論値を追加した。グラフの縦軸の目盛りは軸方向変位10mmに対応する電圧比変化の倍数に設定してある。Fig.8より、通信距離が15mの場合は電圧比と変位量の間には正の相関関係があり、その増加量は理論的な増加量とはほぼ一致した。一方、距離が20m以上になると電圧比と変位量の間には明確な相関関係は認められなかった。距離15mにおける実測電圧比のバラツキが標準偏差程度と仮定すると変位測定精度は3～4cm程度と推定できる。

Fig.9に実測電圧比のバラツキを示す。各棒グラフの高さは3回の実測電圧比の平均からの偏差を表す。また、グラフに追加した四角形の網掛け領域は、変位測定センサが送信軸方向に±10mm変位した場合の理論的な電圧比変動範囲を示す。Fig.9から、実測電圧比のばらつ



**Fig. 8 変位測定センサの移動量と電圧比の関係**  
Relationship between the displacements of internal deformation sensor and the voltage ratios.

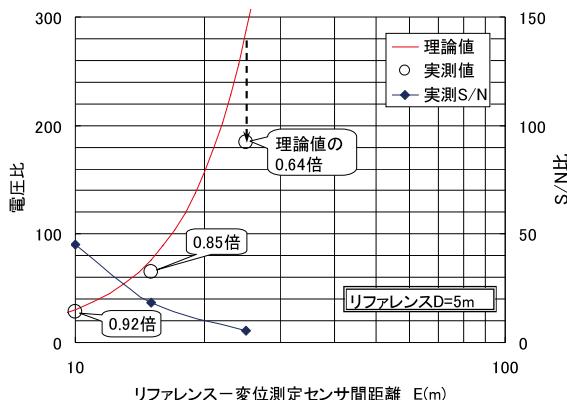


**Fig. 9 実測電圧比のバラツキ**  
Differences in the measurement voltage ratio data.

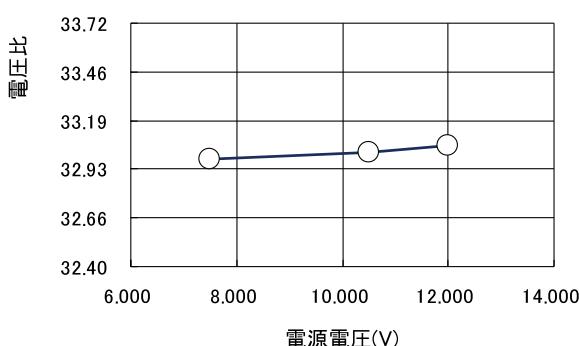
きは大きく、通信距離が20m以上になると後で述べるように±10mmの軸方向変位量に相当する電圧比変化量の4~10倍の範囲でばらつく。すなわち、通信距離が20m以上では実測電圧比のばらつきが大きく、変位測定精度を±10mm以内に確保することは難しい。

各実測電圧比のばらつきが軸方向変位量10mmに相当する電圧比変化の何倍程度発生しているのか試算してみる。通信距離15, 20, 30mにおける実測電圧比の標準偏差の平均は、それぞれ0.066, 0.395, 2.244であった。一方、通信距離15, 20, 30mにおける変位測定センサの軸方向変位量10mmに相当する理論電圧比変動量は、それぞれ0.054, 0.10, 0.22である。実測電圧比のバラツキがその標準偏差の平均で代表できると仮定すれば、標準偏差の平均を変位量10mmに相当する理論電圧比変動量で割ることにより、軸方向10mmの変位量に対する測定値のバラツキが推定可能である。計算を行うと、通信距離15, 20, 30mに対して実測電圧比は軸方向変位量10mmに相当する電圧比変動量の1.2, 4.0, 10倍程度ばらつくことが分かった。

**Fig.10**に理論的な電圧比と実測電圧比を比較したグラフを示す。実測電圧比は通信距離が15, 20, 30m（それぞれセンサの移動距離=0cm）の値である。グラフには実測S/N比（受信信号の大きさ/ノイズの大きさ）も同時に示した。理論値の算出は式(5)を用いた。グラフ



**Fig. 10** 理論的な電圧比と実測値の比較  
Comparison of theory values and voltage ratio data.



**Fig. 11** 電源電圧と電圧比の関係  
Relationship between the voltages of power supply and the voltage ratios.

から、通信距離20mまでは理論値と計測値はほぼ整合した。実測S/N比は通信距離が長くなるに従い急激に低下した。

### b 電圧変動実験

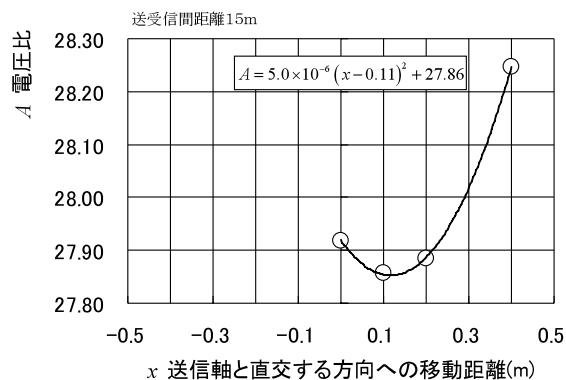
送受信機の電源電圧を7.5V, 10.5V, 12.0Vと変化させた場合の電圧比の変化を**Fig.11**に示す。電源電圧が増加すると電圧比も増加し、電源電圧1V当たりの電圧比の増加は0.017であった。これは、軸方向変位量に換算すると約3mmの変動に相当する。

### c 軸差実験

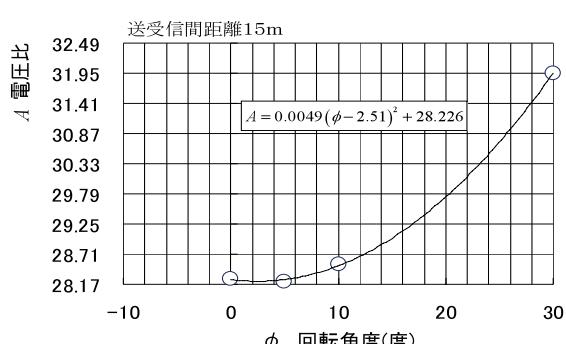
変位測定センサを送信軸に対して直交する方向に0, 10, 20, 40cm平行移動したときの電圧比の変化を**Fig.12**に示す。図には実線でデータを2次関数で近似した推定曲線を追加した。開始時の軸合わせが十分でなく、送信軸から10cm離れた点が極小値となつたが、電圧比の変化は2次関数で近似することが可能であった。理論電圧比から換算すると、変位測定センサの送信軸に対して直交する方向へのずれが±100mmの範囲であれば軸方向変位の変動を±10mm以内に収めることができる。

### d 回転実験

変位測定センサを送信軸に対して5, 10, 30°傾けたときの電圧比の変化を**Fig.13**に示す。図には実線でデータを2次関数で近似した推定曲線を追加した。理論電圧比から換算すると、変位測定センサの回転が送信軸に対



**Fig. 12** 送信軸に直交する変位と電圧比の関係  
Relationship between the sensor displacements in direction orthogonal to the transmission axis and the voltage ratios.



**Fig. 13** 変位測定センサの回転と電圧比の関係  
Relationship between the sensor rotations and the voltage ratios.

して $\pm 3.5^\circ$ 以内であれば軸方向変位に対する変動を $\pm 10\text{mm}$ 以内に収めることができる。

## V 考 察

地上実験から、低周波電磁波の強さの変化を利用した地中変位計測は、提案したシステムの仕様では計測距離30mで変位測定精度10mmを確保することが難しいことが示された。以下にその理由を示す。

電圧-変位測定実験の結果から、送信距離が20m以上になると電圧比と変位測定センサの移動量の間に明確な相関関係が見られないこと、送信距離15mでは両者に正の相関関係が認められるものの変位測定精度は3~4cm程度であることが明らかになった(Fig.8)。フィルダムにおける地中変位測定では少なくとも通信距離30mで1cm程度の測定精度が必要であるが、提案した計測システムの測定精度はこの条件を満たさない。さらに、実際のフィルダムにおける計測を想定した場合、地盤の透磁率および導電率の影響を受け低周波電磁波は空気中よりさらに減衰すると推測されるため(向後ら、2006)，地中変位測定法の精度は今回の地上実験より低下すると予想され、必要な精度を確保することは現実的に難しいと考えられる。

一方、変位測定センサの受信電圧に影響を与える要因を調べた影響要因確認実験の結果から、通信距離15mの条件下で、(1) 電源電圧1Vの変化は測定電圧比に対して軸方向変位量に換算して約3mmの変動を与える、(2) 変位測定センサの送信軸直交方向へのずれが $\pm 100\text{mm}$ 以内であれば測定電圧比に対する変動は軸方向変位量換算で $\pm 10\text{mm}$ 以内に収まる、(3) 変位測定センサの回転が $\pm 3.5^\circ$ 以内であれば測定電圧比に対する変動は軸方向変位量換算で $\pm 10\text{mm}$ 以内に収まることが明らかになった。変位測定センサの測定精度を10mm以内に確保するためには、これらの影響要因による電圧比変動を少なくとも測定精度の10%以内(=変位換算1mm以内)に収める必要がある。このためには通信距離15mの条件下で、電源電圧変化0.3V以内、送信軸のずれ $\pm 10\text{mm}$ 以内、測定センサの回転角 $\pm 0.35^\circ$ 以内を確保する計器設置条件が必要である。電源電圧の条件を除けば、これらの条件を満足する変位測定センサの地中設置は極めて難しい。

次に、なぜ今回の計測システムを用いて低周波電磁波の強さの変化から地中変位を求めることが困難であったかその理由について考察する。

実験から、通信距離が長くなると実測電圧比のバラツキは急激に増大する(Fig.9)。これは通信距離が長くなるにつれて受信信号レベルは急激に低下するがノイズレベルはほとんど変化しないため相対的にノイズの影響を強く受けるためと推測できる。一方、Fig.10から低周波電磁波の距離減衰は、通信距離が20mまではほぼ理論

値と実測値が一致するが、通信距離が30mになると実測値と理論値の乖離が大きくなる。この理論値と実測値の乖離の傾向は実測S/N比が低下するほど顕著である。すなわち、S/N比の低下が理論値と実測値の乖離の原因と推定できる。つまり、今回の実験では、低周波電磁波の距離減衰はほぼ理論通りであったが、距離に比例して急激にS/N比が低下し、そのために測定値のバラツキが大きくなり、理論値と実測値の乖離や測定精度の低下を生じさせた可能性が高いと考えられる。通信距離が15mの実験では実測S/N比が45であり、実測値と理論値がほぼ一致し、測定精度も高い結果が得られていることもこの仮説を裏付けるものである。

そこで、上で述べた測定精度の低さがS/N比の低さに起因するという仮説が正しいとした場合、提案するシステムに対してどのような改良を行えば良いのか考察する。通信距離15mにおける実測S/Nは45である。通信距離15mでの測定精度を3cmと仮定すれば、測定精度1cmを満たすためにはノイズの影響を1/3以下に低減する必要がある。つまり、現状の3倍のS/N比135が必要となる。同様に通信距離30mで測定精度1cmを満たすためには、30m地点でのS/N比が135になる必要がある。30m地点での実測S/N比は5.6であるので $135/5.6=24 \approx 25$ 、つまりS/N比を少なくとも25倍以上に向上させる必要がある。S/N比を向上させるためには、(1) 送信出力を増強する、(2) 受信ノイズを低減する、ことが必要である。しかし、送信出力を25倍以上にするためには送受信器のアンテナの体積を25倍以上にしなければならず、これは寸法的に不適当である。また、電波法の上限を超える可能性があり、使用が制限される可能性もある。一方、受信ノイズを1/25に低減するためには、計測基盤のノイズを低減する必要があり設計の見直しが必要となる。つまり、現時点の技術水準ではS/N比を向上させる改良は極めて困難である。

## VI 結 言

検討の結果、現状の計測システムの構成では低周波電磁波の強さの変化からフィルダムの地中変位を求めることは困難であることが分かった。しかし、空気中ではあるが、低周波電磁波の強さがほぼ理論どおり距離の3乗に比例して減衰すること、15mと短い通信距離の条件下ではあるが測定精度3~4cm程度で変位計測が可能であることが示された。このように、理論的には低周波電磁波の強さの変化から地中変位を求めることが可能と考えられる。すなわち、現状の仕様を用いた場合、通信距離が長くかつノイズが多い環境では測定精度を確保することは難しいが、通信距離が短くノイズが少ない環境では必要な精度を得られる可能性がある。たとえば、ダムの模型実験などで堤体の変位をケーブル無しで計測したい場合など、地中通信を利用した変位測定センサは十分

魅力的な計測手法となりうる。通信距離が短い場合はセンサ自体の寸法も小さくできるためそのような応用も可能と考えられる。また、室内であればノイズを遮断する電磁シールドなどの使用が可能であることも低周波電磁波の利用では有利な点である。

一方、フィルダムなどの通信距離が長くかつノイズが多い現場に対しては、低周波電磁波を利用した地中変位測定法を適用するための技術的なハードルは高い。しかしながら、何個かの変位測定センサを狭い間隔で設置し、個々が送受信機となりお互いの相対距離を低周波電磁波の強さの変化から求めるようなシステムであれば現在の技術を用いても変位計測が可能な場合もあると想定している。電子技術は日々進歩しており、本システムもその進歩に合わせ改良が進むと考えられる。今後も、地中変位測定以外についても低周波電磁波を利用した計測方法について検討を進めていく予定である。

## 参考文献

- 1) (社)地盤工学会 (2004) : 地盤調査の方法と解説, pp.605-651.
- 2) 建設省土木研究所ダム部フィルダム研究室 (1994) : フィルダムの挙動解析 (その2) - 変位, 浸透-, 土木研究所資料第3225号, pp.46-73.
- 3) 向後雄二, 浅野勇, 林田洋一, 遠目塚良一 (2006) : ワイヤレス隙水圧計の開発とフィルダムにおける観測, ダム工学, Vol.16, No.3, pp.165-176.
- 4) 高村尚, 奥津一夫, 須賀原慶久, 虎田真一郎, 大内仁 (2006) : 地下深部岩盤中における無線データ通信特性に関する検討, 原子力バックエンド研究, Vol.12, No.1-2, pp.21-23.
- 5) 安中正実 (1996) : 挙動観測による施設安全監視の重要性, 農土誌64(2), pp.1-5.

# A Study On The Measurement Of Internal Soil Deformation by A Low Frequency Electromagnetic Wave

ASANO Isamu, HAYASHIDA Yoichi, MASUKAWA Susumu,  
TAGASHIRA Hidekazu and TOHMETSUKA Ryoichi

## Summary

The aim of this research is to explore a method for measuring internal deformations by the field strength of a low frequency electromagnetic wave. Some experimental tests were conducted to investigate the basic characteristics of the low frequency electromagnetic wave in the air.

The results are as follows: (1) It is possible to obtain the deformation data at a 15m transmission distance, but it is impossible to measure over 20m transmission distances. The reason why we could not obtain the data were probably caused by noise factor at receiving points. The error of deformation measurements at a 15m transmission distance is approximately 3-4cm.

(2) In order to keep the deformation error within  $\pm 10\text{mm}$  at a 15m transmission distance, the sensor displacements in direction orthogonal to the transmission axis must be within  $\pm 10\text{mm}$ , and the sensor rotations must be within  $\pm 3.5^\circ$ .

In conclusion, since the accuracy of this method is not higher than conventional system and the installation conditions are very severe, it is very difficult to apply the proposed measurement method to the field measurement with the present specifications. But we think that there are some possibilities left for the proposed method because the method can be used for the short transmission distance, for example, laboratory model tests. We plan more study about the application of a low frequency electromagnetic wave for the field measurement in future.

**Keywords :** Measurement of internal deformation, A low frequency electromagnetic wave, Wireless transmission