

## ワイヤレス間隙水圧計の開発と現場への適用事例

キーワード 現場計測・間隙水圧

坂田電機(株) 正会員 樋口佳意  
 (独)農業工学研究所 正会員 向後雄二  
 東京電力(株) 正会員 高橋 章

### 1. はじめに

土構造物の現場計測管理を目的として、種々の埋設計器が用いられている。これらの埋設計器は一般に計測ケーブルを必要としており、このケーブルの存在によって以下のような問題を有している。

ケーブルの断線、絶縁低下、誘導雷などによりセンサの故障原因となる。

施工段階毎でのケーブルの処理が必要になり、施工工程を遅延させる場合もある。

ケーブル延長が長くなるとコストが上昇する。

ケーブルトレンチが水みちになったり、トレンチの転圧不足が生じる場合もあり、構造物の弱部になる可能性もある。

これらの問題を解決するための一つの方法として、ケーブルを有していないセンサの開発が必要であった。そこで、筆者らは、関西空港埋立工事などの海底地盤沈下計測で実績のある地中通信システム<sup>1)</sup>に着目し、低周波電磁波を用いたワイヤレス間隙水圧計を開発した<sup>2),3)</sup>。また、開発したワイヤレス間隙水圧計をフィルダム現場へ設置し、実用上の妥当性を確認した。本稿では、開発の概要を述べるとともに現場への適用事例を報告する。

### 2. 開発の概要

#### 2.1 既往の地中通信システム

無線通信で一般に利用されている電波は、誘電率の大きい地中や海中では距離に対する減衰が大きく、埋設計器に使用するには実用的でない。一方、低周波電磁波は、距離減衰があるものの伝搬する媒質の導電率や誘電率による影響が小さいため、地中での通信が可能である。

既往の地中通信システムを図1に示す。このシステムは、上述の原理を利用することで海底との無線通信を実現している。しかしながら、この地中通信システムは、無線通信のできるデータロガーであり、センサとの間にケーブルが存在している。使用目的によっては有効なシステムであるが、盛土現場などで使用する場合には寸法が大きく、土圧に対する耐圧性能も懸念された。

#### 2.2 ワイヤレス間隙水圧計の開発

図2に開発したワイヤレス間隙水圧計、図3に地上でデータを受信するシステムを示す。このワイヤレス間隙水圧計は、筐体、基盤、リチウム電池、アンテナコイル、間隙水圧計で構成されており、センサとデータロガーが完全に一体化されているため、ケーブルは全くない。また、一つのアンテナで送受信を行うため、既往の地中通信システムより大幅に小さくなった。このワイヤレス間隙水圧計の開発に際しては、以下の基本性能試験を行い、埋設計器としての妥当性を確認している。ここでは、各性能試験の結果を報告する。

筐体の強度特性・耐水圧特性試験

電池寿命試験

伝送特性試験

埋設方法確認試験

#### 2.2.1 筐体の強度・耐水圧試験

例えば、堤高100mクラスのフィルダムでは2MPa程度の鉛直土圧が発生する。したがって、筐体の条件は、この土圧に十分耐えるとともに変形に伴う接合部からの浸水が生じないものとなる。そこで、図4に示す3ケースの載荷方法で強度試験試験を行なった。なお、筐体にはFRP製の円筒容器を用いた。

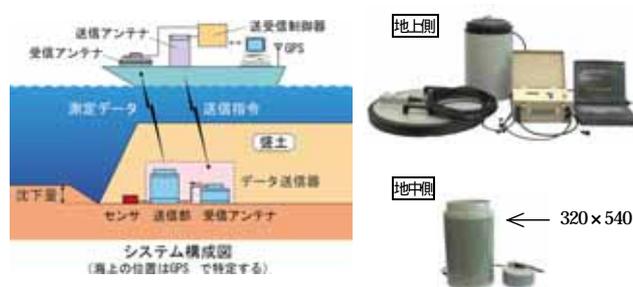


図1 既往の地中通信システム

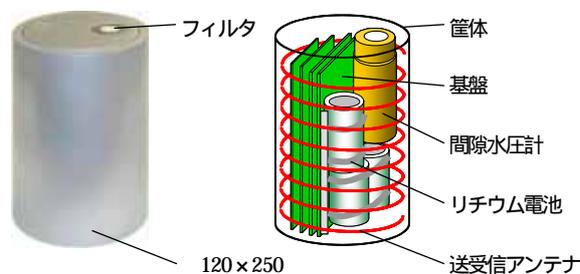


図2 ワイヤレス間隙水圧計



図3 データ送受信器(地上側)

試験の結果、全ケースで40 kN以上の強度を示し、ひずみの挙動も弾性範囲内であった。また、目視検査の結果、接合部の異常は確認されなかった。これらの結果から、土被り厚100m程度の土圧に対しても十分な強度を有していると考えられる。しかしながら、点載荷の場合、載荷点が管体にめり込む現象が確認された。この点を考慮すると、現場における埋設の際には、礫などが直接管体に接触しないように注意する必要がある。

耐水圧試験は、図5に示すような压力容器内で3MPaの水圧を一定時間与えることによって行った。その結果、内部への浸水も認められず十分な耐水圧性能を有していることが確認された。

### 2.2.2 電池寿命試験

ワイヤレス間隙水圧計の電池には、長期間電力を供給できるリチウム電池を用いている。通常、フィルダムでは10年以上を計測期間として要求される。そこで、1日1回の計測頻度で10年間に消費する電力量を想定し、リチウム電池の加速放電試験を行った。なお、放電の試験期間は1ヶ月、6ヶ月、2.5年、10年とし、それぞれの期間で10年間の消費電力量10.18Ahに相当するようにした。

図6に試験期間6ヶ月の電池寿命試験の結果を示す。この結果から、リチウム電池は定格容量を十分に上回る実用量を有しており、通電時も安定した電圧を供給していることがわかる。したがって、想定した10年間に電池性能はほとんど低下しないと考えられる。

### 2.2.3 伝送特性試験

低周波電磁波は通信距離が長くなると伝送する信号電圧が減衰する。また、送信地点・受信地点周辺におけるノイズ電圧が信号電圧と同程度の場合、信号とノイズの識別が難しくなる。もちろん、信号電圧を大きくすればノイズの影響の低減および通信の長距離化は可能である。しかしながら、信号電圧を増大させれば電池の消費量も当然大きくなり、センサの寿命が短くなる。したがって、長期計測と長距離通信を同時に成立させるためには、信号電圧の距離依存特性・通信限界距離の把握と現場ノイズの把握が必至となる。そこで、地上における信号電圧減衰特性試験ならびに実際の現場におけるノイズの調査を行った。

信号減衰試験は、図7に示すように送信アンテナと受信アンテナの距離を10mずつ最大100m変化させ、ノイズ電圧と各地点における信号電圧(受信電圧)を測定する方法で行った。図8に実験で得られた受信信号電圧~伝送距離の関係を示す。この結果から、伝送距離70m程度までは理論値とほぼ一致しており、70m以上では実測値が理論値より大きくなっている。また、伝送距離100mにおけるS/N比は2.8であり、データの送受信は十分可能であることが確認された。

現場ノイズの調査は、6箇所の既設ダム、2箇所の建設中ダムを対象に実施した。図9に調査結果の一例を示す。図中の値は、ノイズ電圧から通信可能な最大距離に換算した値である。この結果から、電力線などのノイズ発生源近傍において通信距離が短くなる傾向が見られる。また、ノイズの小さい箇所では100m以上の距離で通信ができる。ただし、ノイズは時間によって変化することもあるため、通信時刻の検討も必要であると考えられる。以上のことから、計測計画を策定する際、現場のノイズ特性や発生

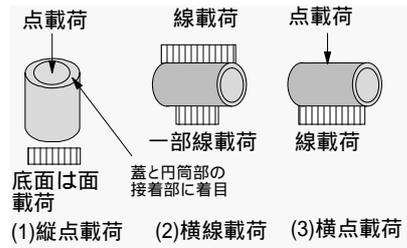


図4 載荷パターン<sup>2)</sup>

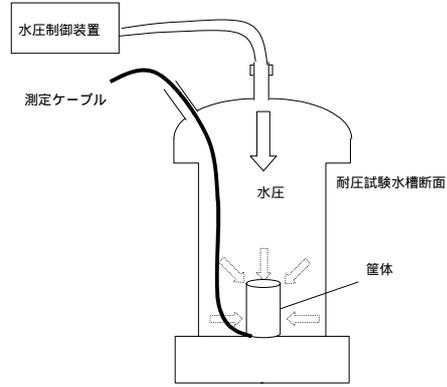


図5 耐水圧試験<sup>2)</sup>

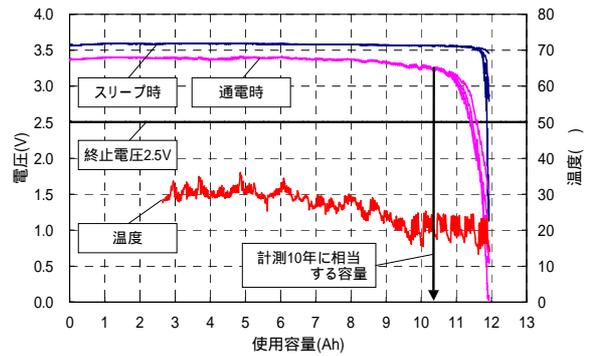


図6 電池寿命試験結果

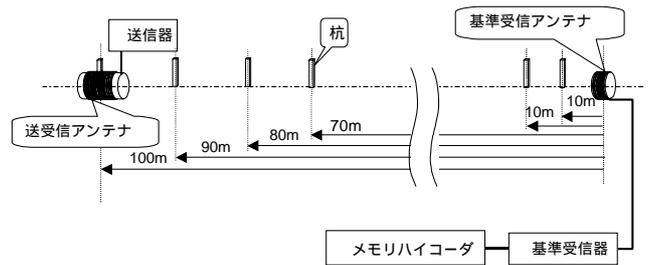


図7 信号電圧減衰特性試験

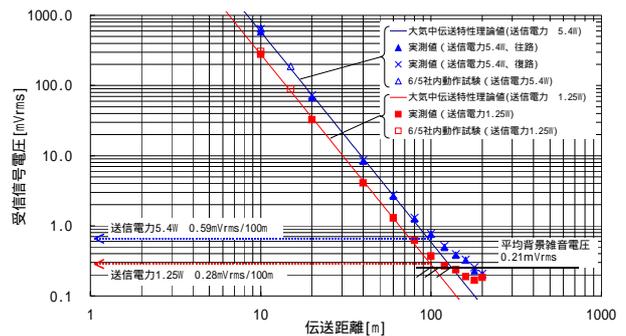


図8 受信信号電圧~伝送距離関係

状況を把握することによって、理想的なデータの受信箇所やワイヤレス間隙水圧計の配置が行えると考えられる。

### 2.2.4 埋設方法確認試験

低周波電磁波には指向性があるため、受信する方向によってワイヤレス間隙水圧計の信号電圧は変化する。一方、フィルダムなどの盛土で通常行われている間隙水圧計の埋設方法では、ワイヤレス間隙水圧計の管体が傾く可能性もある。したがって、効果的な伝送を確保するためには、ワイヤレス間隙水圧計に用いているアンテナの指向性を考慮した埋設方法の確立が必要となる。そこで、フィルダムのコア部への設置を想定した埋設方法確認試験を行った。

試験は、図10に示す従来法、コア抜き法の2ケースについて実施した。の従来法は、掘削したトレンチに計器を設置した後に転圧を行なう一般的な方法である。のコア抜き法は、既設の盛立面からコアを抜き、その孔に計器を挿入した後に転圧を行う方法である。計器には傾斜計を内蔵したワイヤレス間隙水圧計の管体を使用し、転圧完了までの傾斜を連続的に計測している。

図11に設置から転圧完了までにおける管体の傾斜角を示す。この結果から、コア抜き法での管体は $\pm 1^\circ$ 以内の傾斜であり、従来法に比して転圧による挙動が小さい。また、計器設置の時間も1/3程度である。したがって、ワイヤレス間隙水圧計の埋設方法として、コア抜き法が適当であると考えられる。

### 3. フィルダム現場への適用事例

上述した種々の試験により、ワイヤレス間隙水圧計の基本性能を確認し、埋設方法まで確立した。そこで、今回開発したワイヤレス間隙水圧計を実際のフィルダム現場に設置し、実用上の妥当性を確認した。

#### 3.1 設置位置

設置は2箇所のフィルダム現場で実施した。それぞれの現場における計器配置断面を図12、図13に示す。NダムではEL.337.5において、コアゾーンに2台、フィルタゾーンに1台設置し、KダムではEL.215.0において、コアゾーンに3台、ロックゾーンに2台設置している。

#### 3.2 設置方法

ワイヤレス間隙水圧計の設置手順を図14に示す。まず、既設盛立面からスクリーポイントを用いて削孔し、孔底および孔壁を整形する。そこへワイヤレス間隙水圧計を挿入し、鉛直に設置されていることを確認した上、埋戻しを行う。埋戻しは、礫が直接管体に接触しないようにし、他の盛立部と同程度の品質になるように入念に突固める。

ワイヤレス間隙水圧計の埋め戻し後の転圧は、図15に示すような仕様で実施した。現場によって転圧仕様や建設機械に多少の違いはあるが、概ね同様の方法を採用できると考えられる。

#### 3.3 設置状況

図16に設置の状況を示す。削孔から埋戻し完了までに要した時間は、概ね20~60分であった。この時間のバラツキは、既設盛立面の局所的な性状の違いによるものである。一方、一般の埋設計器では、ケーブル処理のため、さらに数時間以上の時間を必要とする。以上から、ワイヤレス間隙水圧計を使用することで、現場の作業効率は飛躍的に向上することが確認できた。

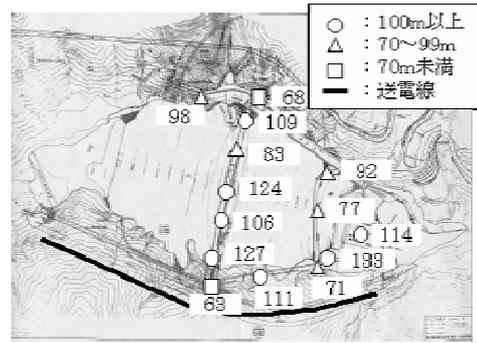


図9 ノイズ調査から得られた最大通信距離分布の一例

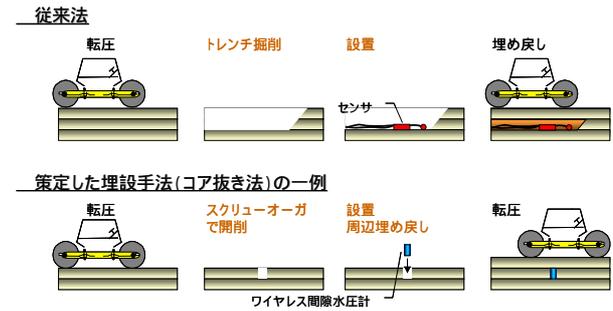


図10 試験方法<sup>3)</sup>

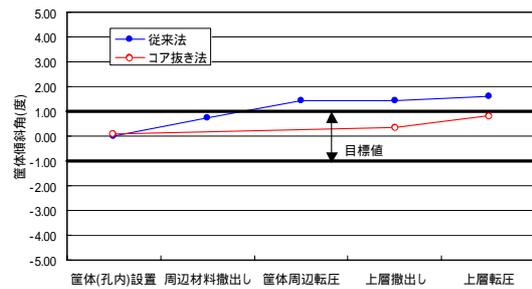


図11 転圧中における管体の傾斜角<sup>3)</sup>

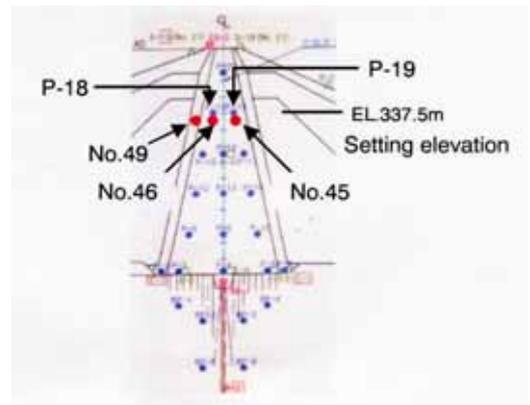


図12 Nダム計器配置

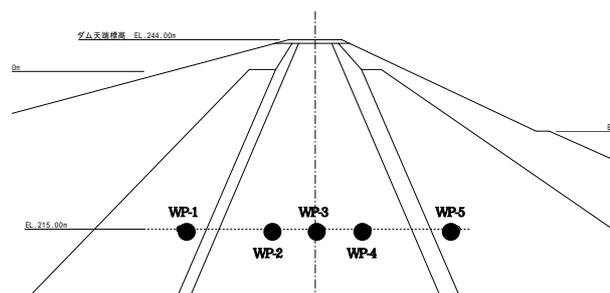


図13 Kダム計器配置

### 3.4 計測結果

図17にNダム、図18にKダムの計測結果を示す。なお、図17には、ワイヤレス間隙水圧計の近傍に設置されている従来型水圧計の計測結果を併記している。他方、図18にはワイヤレス間隙水圧計の計測結果のみ示している。これは、諸般の制約によって従来型間隙水圧計の近傍にワイヤレス間隙水圧計を設置できなかったためである。

図17を見ると、No.45（ワイヤレス）とP18（従来型）の間で僅かに値の差があるものの、ワイヤレス間隙水圧計と従来型間隙水圧計は概ね同様の挙動を示している。また、盛立の進捗に対応した過剰間隙水圧の発生・消散も的確に計測できている。一方、図18は図17と異なる挙動を示しているが、これは比較的急速に盛立を行ったためである。ワイヤレス間隙水圧計と比較する従来型間隙水圧計の計測結果はないものの、施行状況と一致する結果である。

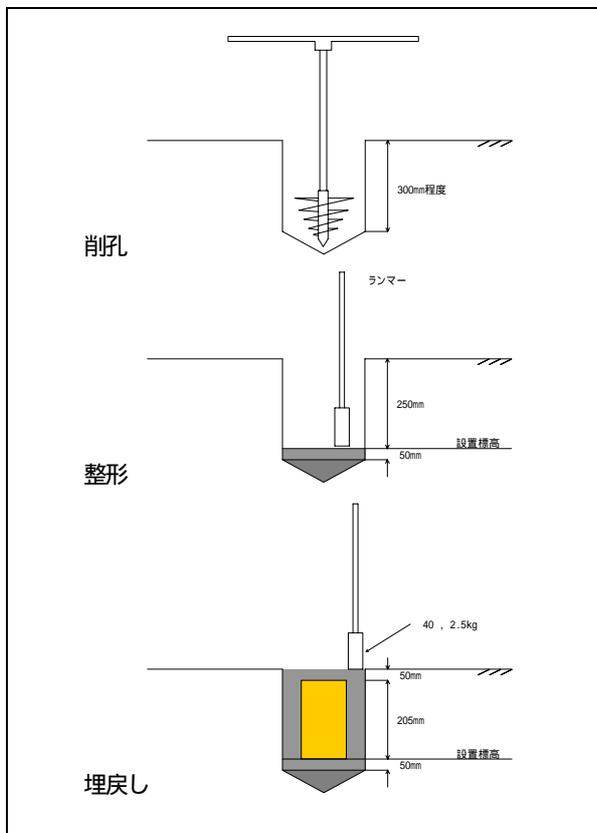


図14 ワイヤレス間隙水圧計の設置手順

計器埋戻し材料

記号	埋戻し材料（粒径）	転圧方法	回数（回）
a	削孔発生土（5mmふるい通過）	突固め	55回/層
b	コンタクトクレイ	突固め	55回/層
c	コンタクトコア（Dmax 50mm以下）		

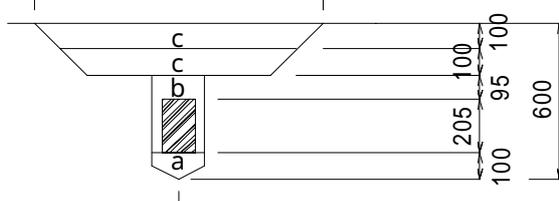


図15 転圧仕様



図16 設置状況

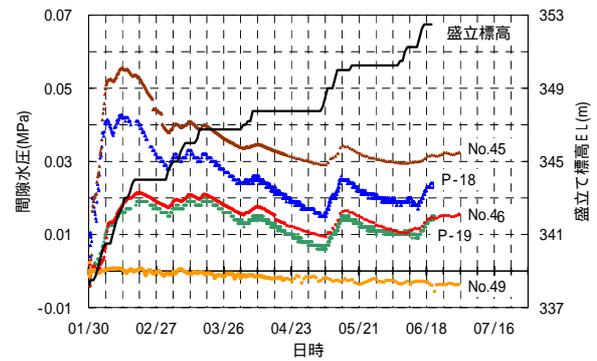


図17 Nダムにおける計測結果

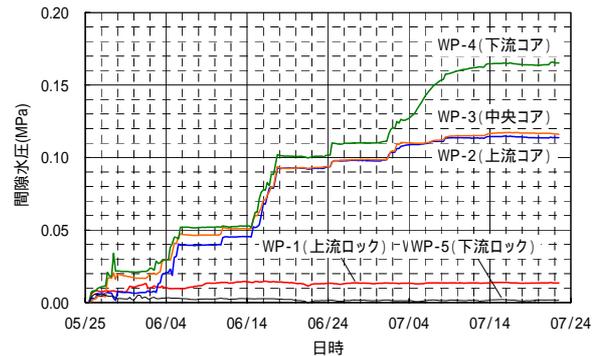


図18 Kダムにおける計測結果

### 4. おわりに

低周波電磁波を用いたワイヤレス間隙水圧計を開発し、実際のフィルダム現場へ適用した。その結果、ケーブルの存在に起因する埋設計器の諸問題が解消された上、現場の施工性も大幅に向上することが確認できた。引続き計測を行うことによって、データを蓄積するとともに、電池寿命の確認を行なう予定である。

なお、本研究は農林水産省官民連携新技術研究開発事業として行われた研究である。関係各位に深甚より感謝致します。また、現場実験を心よく見とめて頂いた農林水産省および東京電力㈱の関係各位に感謝します。

#### 〔参考文献〕

- 1) 田端竹千穂・水上純一・森川嘉之・浅香智昭：大規模埋立地における磁気伝送水圧式沈下計による沈下測定，海洋開発論文集，第19巻，2003，pp171-176．
- 2) 浅野勇・坂田進・矢野康明・林田洋一・向後雄二：低周波電磁波を用いたワイヤレス間隙水圧計の開発，第38回地盤工学研究発表会，2003．
- 3) 高橋章・向後雄二・遠藤真一：ワイヤレス間隙水圧計のフィルダム現場への適用，第38回地盤工学研究発表会 2003．