

論文

ワイヤレス間隙水圧計の開発とフィルダムにおける観測

向後 雄二¹ 浅野 勇¹ 林田 洋一¹ 遠目塚良一²Development of Wireless Pore Water Pressure Transducer
and Measurement at Embankment Dams

Yuji KOHGO Isamu ASANO Yoichi HAYASHIDA Ryoichi TOHMETSUKA

フィルダム盛土内の間隙水圧を計測するためにワイヤレス間隙水圧計を開発した。この間隙水圧計の特徴は、大きさと重さがフィルダム遮水材の最大粒径および単位体積重量と同程度である。このため、埋設後盛土内では異物として挙動することはない。地中での通信距離は 100 m 以上で、耐用年数も 10 年以上を確保した。本論文では、ワイヤレス間隙水圧計の基礎理論、開発における各種基礎試験、この計器を二つのフィルダムに埋設し、ケーブルのある計器との計測比較結果について述べた。結果は、どれも良好で、従来型の計測結果とおおむね一致した。

キーワード: フィルダム, 間隙水圧, 計測, 地中通信

1. はじめに

ケーブルのない埋設計器を開発することはダム技術者の夢であった。筆者らは世界に先駆け、ケーブルのないワイヤレス間隙水圧計を開発し、その夢を現実のものとした¹⁻⁹⁾。本論文では、ワイヤレス間隙水圧計の開発経緯、地中無線通信原理、性能確認試験、堤体への設置方法およびその挙動観測結果について述べる。

なお、ワイヤレス間隙水圧計は、平成 13~15 年度において実施された(独)農業工学研究所構造研究室と官民連携新技術研究開発組合(坂田電機株式会社、東京電力株式会社)との共同研究の成果である。

2. ワイヤレス間隙水圧計の概要

2.1 開発の背景

従来型埋設計器に付属するケーブルは、堤体およびその施工に対して障害物となる。ケーブルによるデメリットをまとめると次の通りである。

- ① 堤体の安全性を低下させる: ケーブルトレンチが水みちとなる可能性がある。
- ② 埋設計器の故障の原因となる: ケーブルに起因

する断線、絶縁低下および誘導雷の侵入は、埋設計器を故障させる原因となる。

- ③ 施工の障害となる: トレンチ掘削およびケーブル処理のため盛立作業が遅延する。
- ④ コストがかかる: ケーブルの延長が長くなるとケーブル費用が増大しコストが増す。また、トレンチの掘削等にコストがかかる。

以上の諸問題を根本的に解決するために、筆者らは埋設計器のワイヤレス化を検討している。実用化の第一弾としてワイヤレス間隙水圧計を開発することにした。間隙水圧計を選んだ理由は、間隙水圧センサーの完成度が他のセンサー(土圧計)などに比較して高いこと、およびダムへの設置数が多いためである。ケーブルを用いずに観測データを地上に送るためには、新たな地中通信の方法を確立することが必要である。しかし、一般の放送等に使用される電磁波を用いた地中通信では、電磁波が地中で大きく減衰するために、長距離の通信を行うことが不可能であった。そこで、筆者らは、地中での電磁波の減衰が少ない低周波電磁波を用いることにより、この問題を解決し、地中 100 m の

¹ 農村工学研究所 構造研究室² 坂田電機株式会社

地中無線通信を可能にした。後述するように低周波電磁波による通信技術が地中無線のコア技術である。

2.2 ワイヤレス間隙水圧計による計測の概要

ワイヤレス間隙水圧計によるフィルダムの間隙水圧計測システムの概要を図-1 に示す。この図には、比較のためケーブル付きの従来型間隙水圧計の設置方式も併記している。

ワイヤレス間隙水圧計を用いた計測では、ダム天端あるいは監査廊にデータ送受信装置を設置し、間隙水圧計との間でデータの送受信を行う。後で述べるように設置位置におけるノイズの大きさが通信距離を左右する。ノイズの大きさを計測し、設置位置を決めることが重要である。図-1 から明らかなように、従来型間隙水圧計を用いた場合には、堤体内にケーブルが張り巡らされるので、設置作業が煩雑で、コストも増加する。これに対しワイヤレス間隙水圧計を用いた場合には、堤体内にケーブルが存在せず、スッキリしていて、設置が簡単で、障害物も存在しないことがわかる。個々のワイヤレス間隙水圧計は ID 番号により識別されるため、複数設置した場合にも混信等の問題は生じない。また、従来型間隙水圧計との併設も可能である。

2.3 ワイヤレス間隙水圧計の仕様

ワイヤレス間隙水圧計は、堤高 100 m 程度のフィルダムに設置することができ、かつ 10 年以上安定した計測ができることを目標に開発を行った。計測期間を 10 年以上としたのは、盛立から試験湛水終了までを 10 年程度と見込み、その期間 + α を計測対象としたため

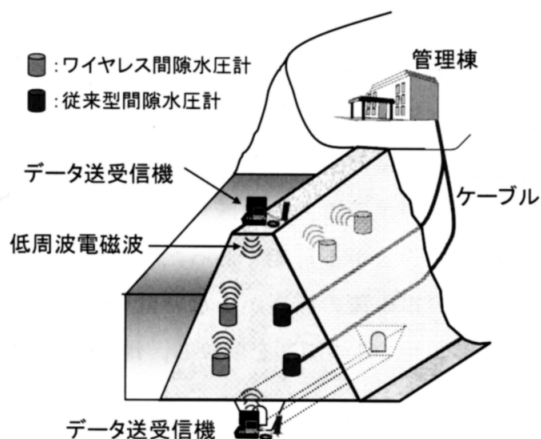


図-1 ワイヤレス間隙水圧計による計測概要

ある。以上を満足するための機器仕様として、耐水圧性能 3 MPa 以上、地中通信距離 100 m 程度および電池寿命 10 年以上を設定した。また、堤体に対して異物とならないように、計器寸法をフィルダムの遮水材の最大粒径以下に抑えるようにした。計器の目標設計仕様を表-1 に示す。

2.4 計器の寸法および構造

ワイヤレス間隙水圧計の外形と内部構造を図-2 に示す。形状は、直径 125 mm、高さ 205 mm の円筒形である。計器は、①筐体、②基板、③電池、④アンテナコイル、⑤間隙水圧計、の部分から構成される。基板部を小型化し、送受信アンテナを 1 つにまとめ、部品数を減らすことにより、全体を小型化した。また、消費電力を抑え、計測可能期間を延ばすために、基板部の省電力化を計った。また、安定した電力を得るために、高エネルギー密度のリチウム電池を使用した。筐体には、電磁波が透過しかつ強度の高い FRP を使用した。

3. 低周波電磁波による通信原理

3.1 通信の概念

ワイヤレス間隙水圧計の通信概念を図-3 に示す。ワイヤレス間隙水圧計はダム天端あるいは監査廊に設置

表-1 ワイヤレス間隙水圧計の仕様

通信周波数	8.5kHz
通信可能距離	土中100m以上
外形寸法	φ125×H205mm以下
計測頻度	1回/1日
通信頻度	1回/7日(定期送信1回/月)
電池寿命	10年以上

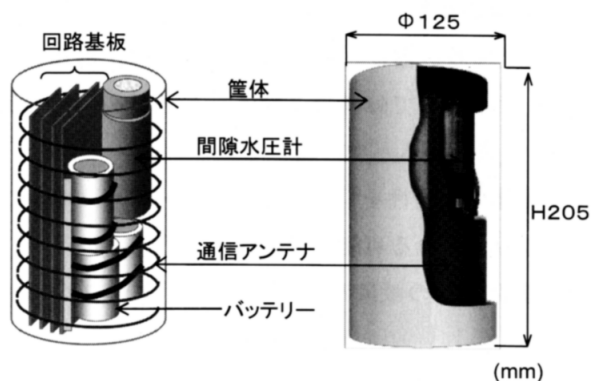


図-2 ワイヤレス間隙水圧計の構造と外形

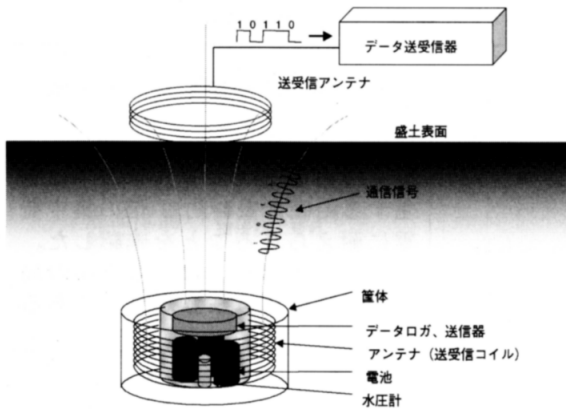


図-3 地中通信の概念図

されたデータ送受信装置との間で、低周波電磁波(8.5 kHz)を用いた双方向データ通信を行う。通信方法はデジタル方式である。微弱な信号の読みとり精度を上げるために、0, 1 のデジタル信号を位相変調し識別している。信号対ノイズ比(S/N 比)が 2 以上であればデータ送受信が可能である。コイルに発生する低周波電磁波には指向性があるため、ワイヤレス間隙水圧のコイルと送受信装置のコイルの軸が一致するような位置関係において、最も効率的な地中通信が可能となる(図-3)。したがって、ワイヤレス間隙水圧計の設置においては、ワイヤレス間隙水圧計本体を傾けず円筒の中心軸が鉛直になるように設置することが重要である。

地中通信で用いる低周波電磁波は、高周波電磁波に較べて距離減衰が大きい、次項で述べるように透過する媒質の導電率や誘電率にあまり影響を受けないという特徴がある。つまり、比較的近距离であれば、土中や水中においても電磁波は減衰せず、通信が可能となる。このような低周波電磁波の性質を最大限利用したのがワイヤレス間隙水圧計における地中通信である。

なお、通信で用いる周波数 8.5 kHz の電磁波は、電波法により無許可で使用できる範囲にある。また、ワイヤレス間隙水圧計の通信出力は 5 W と小さいため、機器から発生する磁界の強さは、機体から 7 cm 程度離れた距離では 300 mG と地球の地磁気と同程度になり、WHO の基準を十分に満足する。

3.2 通信原理

ここでは、微小ループアンテナ周辺に発生する電磁界の強さを表す理論式を基に低周波電磁波の性質について理論的な考察を行う。

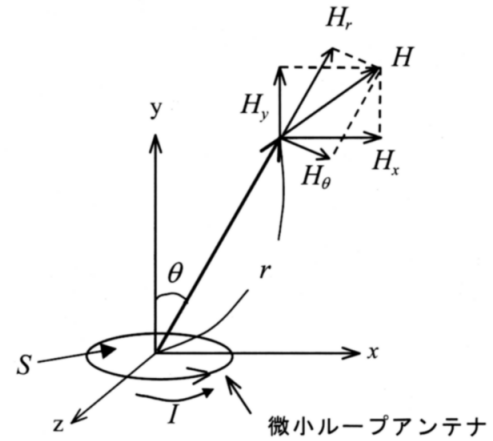


図-4 微小ループアンテナ周辺の電磁界

面積 S の微小ループアンテナに電流 I が流れると、ループの中心から距離 r 離れた場所には、図-4 に示すような電磁界が発生する。この電磁界の大きさ H_θ (θ 方向) および H_r (r 方向) は式(1)~(4)で与えられる¹⁰⁾。

$$H_\theta = \frac{j}{2\lambda} \frac{1}{\eta} \left(1 + \frac{1}{jkr} + \frac{1}{(jkr)^2} \right) \frac{\exp(-jkr)}{r} j\omega\mu IS \sin\theta \quad (1)$$

$$H_r = \frac{1}{\lambda} \frac{1}{\eta} \left(\frac{1}{jkr} + \frac{1}{(jkr)^2} \right) \frac{\exp(-jkr)}{r} j\omega\mu IS \cos\theta \quad (2)$$

$$k^2 = \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 = \omega^2 \varepsilon \mu - j\omega\mu\sigma \quad (3)$$

$$\eta = \frac{\omega\mu}{k} \quad (4)$$

ここに、 j : 虚数単位、 ω : 角速度、 λ : 波長、 k : 波数、 η : 媒質の特性インピーダンス、 ε : 媒質の誘電率、 μ : 媒質の透磁率、 σ : 媒質の導電率、である。

最も通信効率が良くなるように、ワイヤレス間隙水圧計と送受信装置のコイルの軸を一致させた場合を考えると、ワイヤレス間隙水圧計の受信電圧は鉛直方向の低周波電磁波の強さ H_y にほぼ比例する。 H_y は図-4 から次式で求めることができる。

$$H_y = H_r \cos\theta - H_\theta \sin\theta \quad (5)$$

式(5)の θ は一般的には微小な値となるため、式(5)の第2項は 0 に近づく。すなわち、 H_y の値は H_r の値によってほぼ決定される。

kr の値が 1 に較べて十分大きな場合は、式(1)、(2)の $1/jkr$ および $1/(jkr)^2$ 項は 0 になる。この場合、 H_r の値も 0 となり、同時に受信電圧も 0 となるため送受信は不可能となる。 kr が大きいことは電磁波の周波数が高いことを意味する。すなわち、高周波の電磁波では地中通信を行うことは困難となる。

一方、低周波電磁波を使用した地中 100 m 程度の通信を仮定すると、 kr の値は 1 に較べて十分小さな値となる。このとき、電磁界の大きさを表す式(1)、(2)の主要な項は $1/(jkr)^2$ 項となり、 H_r の大きさは式(6)で表すことができる。

$$|H_r| = \frac{IS \cos \theta}{2\pi r^3} \quad (6)$$

式(6)から明らかなように、 H_r の大きさは媒質の物性値(σ , μ および ϵ)とは無関係であり、 r^3 に反比例する。この r^3 に反比例する磁界は静磁界と呼ばれる。静磁界は、距離減衰は大きいが媒質の導電率および誘電率による影響は少ない特徴を有する。このため、比較的近距离であれば土中や水中においても電磁波が減衰せず通信することができる。ワイヤレス間隙水圧計では、この静磁界の性質を利用することにより、地中通信を可能にしている。

ダムは自重により変形するが、ダムが健全に築造されたならば、堤体自重による変形は堤高に較べ小さい。したがって、計器埋設時の回転等を小さくできるならば(5節で述べる方法を用いれば、この点を満足できる)、この項で述べた通信原理は実際においても満足できると考えられる。実際の土中での通信特性については、4.6 項で検討することにする。

4. ワイヤレス間隙水圧計の室内性能試験

4.1 基本性能試験項目

ワイヤレス間隙水圧計が表-1 に示した目標性能を満足するかどうか確認するために室内試験を行った。本項では室内試験の概要およびその結果について報告する。室内試験項目は以下の通りである。

- (1) 温度による通信特性変化試験
- (2) 筐体の強度試験
- (3) 筐体の耐水圧試験
- (4) 促進電池寿命試験

表-2 基本性能試験結果

温度特性	-10～+50℃で動作することを確認した。
強度特性	堤高 100 m 級のフィルダム中に発生する鉛直荷重の約 2 倍の集中荷重に耐えられることを確認した。ただし、載荷点における筐体の局所的な破壊には注意が必要である結果を得た。
耐水圧性	3 MPa の耐水圧性を確認した。
電池寿命	6 カ月の促進放電試験では 10 年間計測可能な電池容量を確認した。
伝送特性	地中 70 m, 空中 100 m の通信が可能であることを確認した。ただし、通信可能距離は周辺ノイズの影響を受けることに注意することが必要である。

(5) 伝送特性試験

試験結果の要約を表-2 に示す。この結果からワイヤレス間隙水圧計は設計における目標性能を満足することが確認された。

4.2 温度による通信特性の変化

環境温度を 0～40℃とし、ワイヤレス間隙水圧計が正常に稼働するか、および内蔵タイマの時間ずれを確認した。その結果、1 日当たり約 2 秒の時間ずれが発生したが、この時間ずれは計測開始後に調整可能な範囲にあり、計測に影響を与えるものではなかった。また、-10～+50℃の範囲で通信動作試験を行い、正常に通信が可能であることを確認した。

4.3 筐体強度試験

堤高約 100 m のフィルダムの堤体中に発生する最大鉛直土圧は約 2 MPa と推定できる。ワイヤレス間隙水圧計の筐体は、この圧に耐える必要がある。また、筐体に礫等が接触した場合は、その接触点に応力が集中し、筐体が局所的に損傷する可能性も考えられる。そこで、以上の状況を想定し、図-5 に示す 3 つの載荷パターンによる室内強度試験を行った。

試験では、筐体の破壊が最も起こりやすい状況を礫の接触と仮定し、点載荷を中心とした試験ケースを設定した。また、筐体の蓋と円筒の接合部に大きな変形が生じた場合、接合部からの漏水が懸念されるため、蓋の中心に点載荷を行う試験も行った。筐体に貼り付

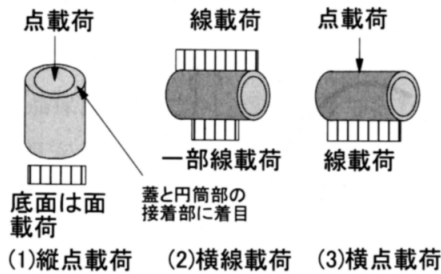


図-5 管体への载荷パターン

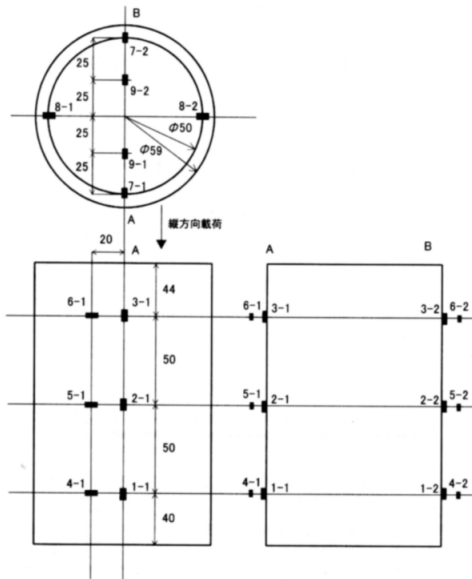


図-6 ひずみゲージの貼付位置

けたひずみゲージの位置を図-6 に、試験状況を図-7 に示す。

表-3 に試験結果を示す。すべての試験ケースで、載荷荷重に対して発生した管体のひずみは弾性範囲内に収まった。計測されたひずみの最大値は $4,000 \mu$ 程度であり FRP 材の限界ひずみ値 ($12,000 \mu$) の $1/3$ 程度であった。また、蓋接合部に変形が集中する傾向は認められなかった。

点载荷試験における載荷荷重 40 kN は、堤高 100 m のフィルダムに発生する鉛直荷重の 2 倍に相当する。点载荷条件は、等分布载荷よりも管体に局所的に大きなひずみを与える。ワイヤレス間隙水圧計に現実作用する荷重は等分布的であるため、今回の点载荷の条件は現実の荷重条件に比べ危険側の状態である。このような荷重条件に対して、管体の変形は弾性範囲にあったことから、管体の強度は十分であると判断した。た

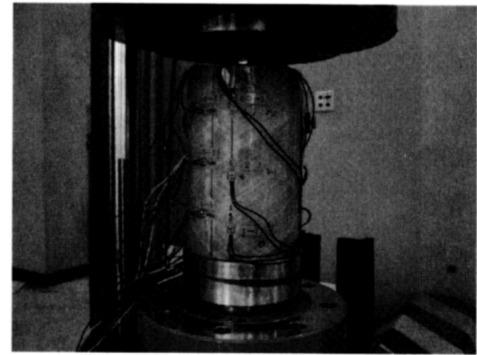


図-7 縦方向の点载荷試験状況

表-3 管体強度試験結果

試験パターン	最大荷重	試験結果
縦点载荷試験	約 40 kN	最大ひずみは、蓋と円筒の接合部に発生。ひずみは、 10 kN の荷重増加に対して、 $1,000 \mu$ 程度増加した。最大荷重時には $4,000 \mu$ 程度であった。荷重と発生ひずみの関係は弾性的であった。 35 kN を過ぎると、点载荷点で FRP がめり込む現象が確認された。
線载荷試験	約 50 kN	最大ひずみは、円筒中央の縦方向のゲージに発生。最大荷重時で約 $2,000 \mu$ であった。荷重と発生ひずみの関係はすべての位置で弾性的であり、管体の破壊もみられなかった。
横点载荷試験	約 40 kN	ひずみの発生パターンは横点载荷試験とほぼ等しかった。 35 kN 程度の荷重で縦点载荷試験と同じく載荷点がめり込む現象が観察された。

だし、点载荷試験では、載荷点として用いた鋼鉄製の丸棒が FRP 材にめり込み、FRP 材が局所的に破壊する現象が観察された(図-8)。このめり込み破壊は、管体の機能を直ちに喪失させるものではないが、ワイヤレス間隙水圧計の埋設においては管体に直接礫などが接しないような工夫を施すべきであることが明らかにされた。この工夫として、埋設に際しては、管体周りには最大粒径 2 mm 以下の盛土材を充填することとした。



図-8 荷点点での管体のめり込み

詳細については、5 節で述べる。

4.4 耐水圧試験

耐圧容器の中にワイヤレス間隙水圧計を設置し、3 MPa の水圧をかけ、漏水が発生すると通電するセンサを用いて漏水の有無を確認した。図-9 に耐水圧試験の概要を示す。ここでは、既往の間隙水圧計で用いる耐水試験に準拠して段階的に水圧を制御した(1 MPa: 12 時間保持, 1.5 MPa: 43 時間保持, 3 MPa: 7 時間保持)。試験の結果、漏水は認められなかった。また、水圧による筐体の変形は、供試体の蓋中央部が外側から押され、陥没するような変形モードを示した。筐体の最大ひずみは、蓋の中央部で発生し、水圧 3 MPa の時、約 1,700 μ (圧縮側)であった。これは FRP のひずみ限界値の 14%に相当するが、弾性範囲内であり、耐水性には問題ないと判断した。以上から、ワイヤレス間隙水圧計は 3 MPa の水圧に十分に耐えうる構造であることを確認した。

4.5 電池寿命試験

ワイヤレス間隙水圧計には、10 年以上の計測期間が要求される。したがって、少なくとも 10 年以上安定した電力供給が可能な電池が必要である。このような長期間の電力を供給できる電池としてリチウム電池を用いた。本試験では、リチウム電池の促進放電室内試験を行い、リチウム電池が 10 年間の計測に対して必要な電力を供給できるか確認した。ワイヤレス間隙水圧計に用いた電池の仕様は表-4 に示す通りである。

(1) ワイヤレス間隙水圧計の予想消費電力量

予想消費電力は、標準的な稼働パターンを設定し決定した。主な設定は、1 日 1 回の頻度での計測、1 週間に 1 度の送受信である。この場合の 10 年間での消費電力を計算すると 10.18 Ah となった。

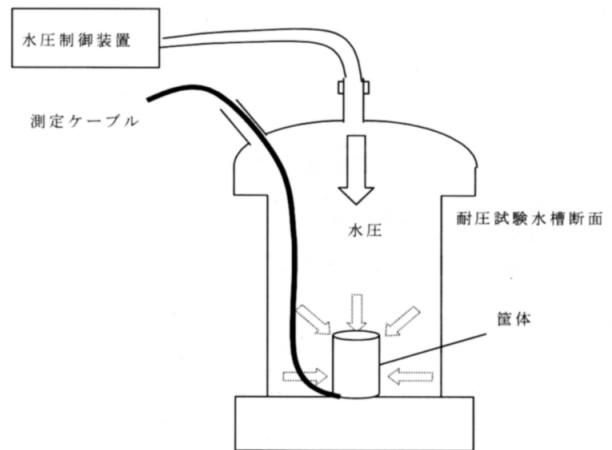


図-9 耐水圧試験の概要

表-4 リチウム電池の仕様

電池容量 (Ah)	自己消費電量 (%)	最大放電電流 (mA)
13.0	2.0 以下	2,000

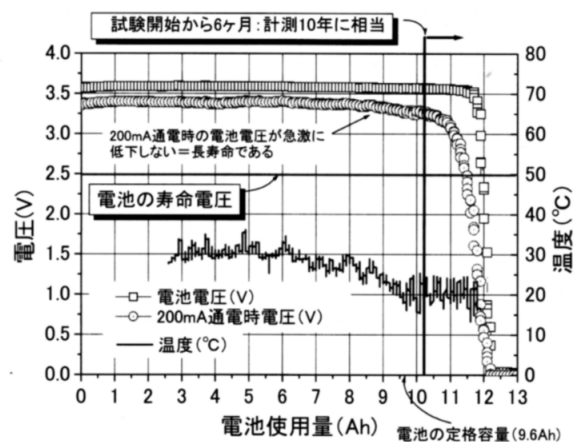


図-10 電池の促進寿命試験結果

(2) 電池寿命試験の概要

リチウム電池に対して、試験期間 1 カ月、6 カ月、1.0 年、2.5 年、10 年に設定した促進電池寿命試験を継続中である。電池の促進寿命試験とは、試験期間中にワイヤレス間隙水圧計の 10 年間の予想消費電力(10.18 Ah)に相当する規則的な負荷を電池に与え、電池の消耗を測定する試験である。

(3) 6 カ月促進寿命試験結果

6 カ月の促進寿命試験の結果を図-10 に示す。□ と ○ はそれぞれスリープ時および最大負荷時 (200 mA)

に測定した電池電圧である。図中の定格容量とは、電池に連続して最大放電電流である 2,000 mA を通電した場合に製品保証されている電池容量であり、電池寿命の一つの目安となる。図-10 から、リチウム電池の電力消費の特性をまとめれば以下の通りである。

- ① 6 カ月経過しても、200 mA 通電時の電池の電圧は 2.5 V を越えており、リチウム電池は定格容量(9.6 Ah)以上の実効電池容量を有する。
- ② 6 カ月が経過し、電池の電力消費量が 10.18 Ah に達しても、200 mA 通電時の電池電圧は 3 V 以上を示した。促進試験ではあるが想定される 10 年間安定した電圧が供給可能であることが確認された。

以上から、促進試験の範囲内では、このリチウム電池は設計仕様を十分に満足することが確認された。

4.6 伝送特性試験

ワイヤレス間隙水圧計がデータ送受信を行うためには、受信位置での信号とノイズを識別するために、信号対ノイズ比(S/N 比)が 2 以上であることが必要である。このように、ワイヤレス間隙水圧計のデータ送受信は、周辺ノイズの大きさに大きな影響を受ける。データ送受信に影響を及ぼす要因を列挙すれば以下の通りである。

- ① 送受信間の距離
- ② 送受信地点のノイズ
- ③ アンテナの向き
- ④ 送受信間に存在する堤体材料の影響

以下、上述した 4 つの要因がデータ送受信に及ぼす影響について述べる。

(1) 限界通信距離の予測

ワイヤレス間隙水圧計の通信限界距離を予測するためには、送受信間距離と受信位置での信号強度の関係を明らかにする必要がある。送受信間の距離が長くなるほど、受信側に到達する信号の強さは小さくなり、ある限界距離以上になると信号が周辺環境ノイズに埋もれ認知することができなくなる。

低周波電磁波の距離減衰特性を求めるためには、媒質、アンテナの向きおよび送信出力条件を一定とした条件下で、送受信間距離を変化させた時の信号強度とノイズ計測を行えば良い。このような試験を均一な土

中に行えば、正確な距離減衰特性を求めることができる。しかし、土中で送受信距離を変化させる試験を行うことは現実的には極めて難しい。そこで、まず、大気を媒質(大気中)とした試験を行い、計測器の基本的な距離減衰特性を求めた。土中における距離減衰特性については、施工時の実ダムにおいて実験することとした。すなわち、盛土面にデータ送受信器を、監査廊にワイヤレス間隙水圧計を設置し、盛土の上昇(進行)とともに、送信距離が増加する試験を実施した。ただし、この試験では、間隙水圧計は監査廊内に設置されているために、監査廊の鉄筋による影響を受け実際の土中より距離減衰が大きくなるが、おおまかに土中での電送特性を把握することができる。また、現実問題としては、監査廊から計測されることも考えられるので実際の電送特性を把握する上でも重要な試験である。

(2) 大気中における信号減衰特性試験

大気中におけるワイヤレス間隙水圧計の信号減衰特性を調べるために、(独)農業工学研究所構内で距離減衰試験を行った。試験では、ワイヤレス間隙水圧計と同じ送信周波数 8.5 kHz の送信機(送信電力 5.4 W と 1.25 W)を使用し、送信アンテナと受信アンテナの距離を 20 m 間隔で変化させ、受信電圧と平均ノイズの測定を行った。試験における機器の配置を図-11 に示す。

図-12 は、試験で得られた伝送距離と受信電圧の関係である。図中には平均ノイズの値(0.21 mVrms)を記した。図の記号は実測値を、実線は距離の 3 乗に反比例するとして計算した理論値を示す(3.2 項参照)。伝送距離が 70 m 程度までは、ワイヤレス間隙水圧計の距離減衰特性は、ほぼ理論値に一致することがわかる。しかし、伝送距離が 70 m を越えると、実測値は理論値より大きくなる。これは、周辺ノイズが受信電圧に加算され、測定電圧が見かけ上大きくなったためと推測される。

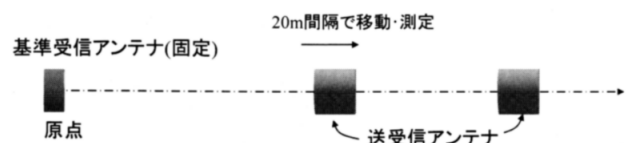


図-11 送信受信機器の配置

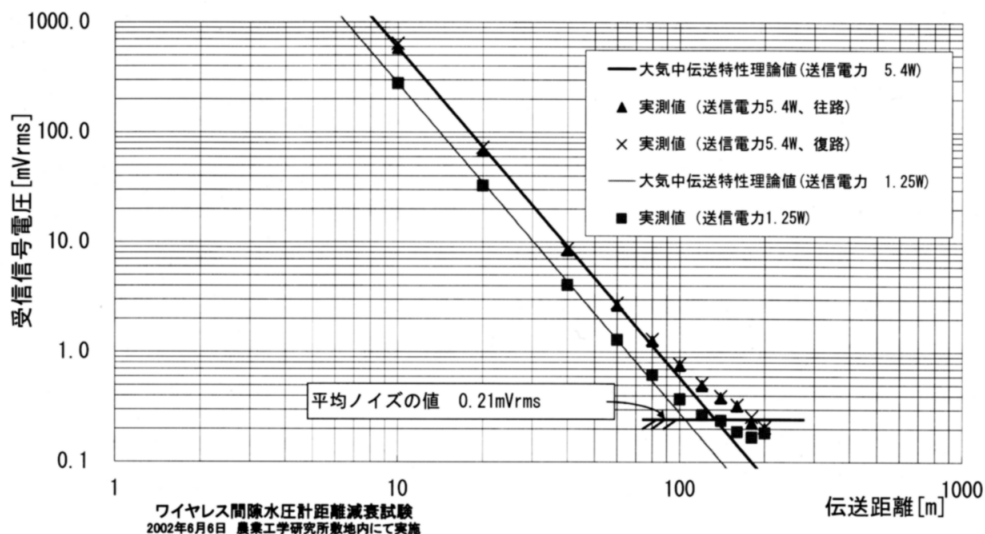


図-12 大気中での距離減衰特性試験結果

送信電力が 5.4 W のとき、伝送距離 100 m における受信電圧は 0.59 mVrms、受信位置での平均ノイズ電圧は 0.21 mVrm であるから、 $S/N=0.59/0.21=2.81>2$ となり、信号を十分認識することができる。以上から、本試験におけるノイズレベルの条件下では、ワイヤレス間隙水圧計は 100 m 以上の通信が可能であることが明らかである。

(3) 土中での信号減衰特性試験

受信電圧と伝送距離の関係を図-13 に示す。シンボルが実測値であり、実線は図-12 で求めた大気中の距離減衰線を平行移動した線である。実線は土中の受信電圧実測値と良く一致していることがわかる。このことは、媒質が堤体材料の場合でも、低周波電磁波は大気中と同様に距離の 3 乗に反比例して減衰することを示している。盛土面のノイズレベルから S/N 比を計算した結果、この実験では通信限界距離は約 70 m となった。実測では、距離が 65 m を越えた時点で通信が不能になった。これは監査廊の鉄筋の影響によるものと考えられる。現場におけるノイズレベルの変化によって通信可能距離は変化するが、ここでは通信可能距離はほぼ予測値と一致した。

(4) 既設ダムにおけるノイズ調査

ワイヤレス間隙水圧計を設置する際、設置位置におけるノイズを把握することは極めて重要である。ダムには発電施設、電力線等さまざまなノイズ発生源がある。ノイズレベルが大きければ、S/N 比が小さくなり

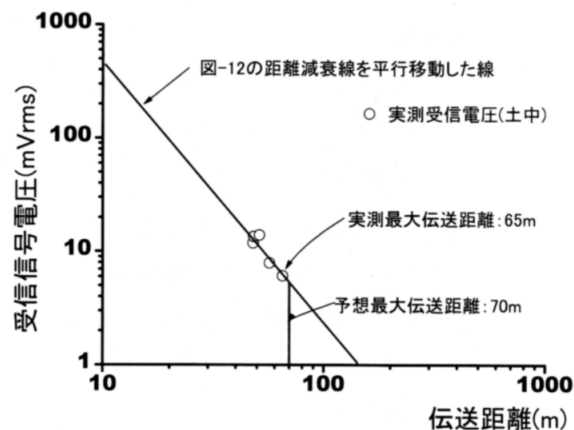


図-13 土中での距離減衰試験結果

通信距離が短くなる。効率的な通信を行うためには、ノイズ調査を行い、ノイズが最も小さくなる地点にデータ送受信機器を設置することが望ましい。既設ダムにおけるノイズ調査の一例を図-14 に示す。ノイズレベルは、図の記号の位置に送受信機を設置した場合のワイヤレス間隙水圧計の通信可能距離（図中の数値）として示されている。

5. ワイヤレス間隙水圧計の設置方法

ワイヤレス間隙水圧計の設置は従来型間隙水圧計の設置法に較べると極めて簡便である。建設中の盛土面にスクリーポイント等を用いて穿孔し、その孔の中に間隙水圧計を設置し、埋め戻すだけで設置は終了す

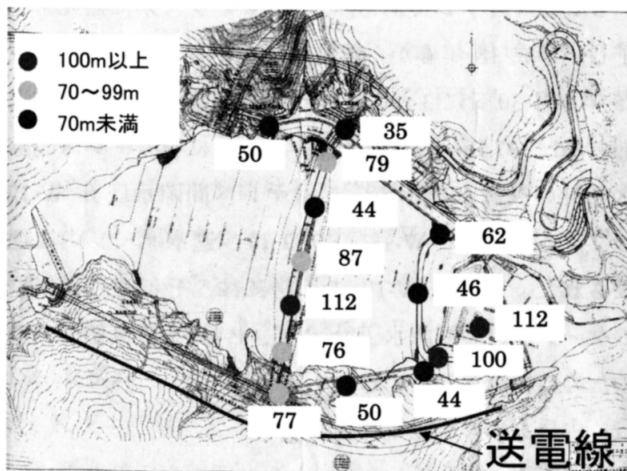


図-14 既設ダムにおけるノイズ調査の例

る。筆者らはこの方法を「コア抜き法」と呼んでいる。コア抜き法は従来のトレンチを掘削し計器を設置する方法に比べると短時間で計器の設置が可能であり、アンテナ軸を鉛直に保つこともできる。また、堤体に損傷を与える可能性も少ない。

九州農政局管内中岳ダムで行ったコア部におけるワイヤレス間隙水圧計の設置手順を図-15に示す。

設置前の準備として以下の2点が必要である。

- ① 設置する前にワイヤレス間隙水圧計を浸水し、間隙水圧計の受感部を飽和させる。この段階で計器の初期値を計測する。
- ② 盛立て面の孔の掘削を容易にするために、ワイヤレス間隙水圧計の設置地点を中心に半径約1m範囲の盛土材料は100mm以上の礫をあらかじめ除去しておくが良い。

盛土面の締固めが終了した後、スクリューポイントを用いて計器設置位置に孔を開ける。コア材を2mmフルイでふるった材料を孔の底に5cm巻きだし、2.5kgランマーで50回以上良く突き固める。十分突き固めた孔の底に間隙水圧計を水圧計のフィルタ面が下になるように設置する。このとき、間隙水圧計が垂直に設置されるように、蓋の上で水平レベルをとる(図-16)。ワイヤレス間隙水圧計と孔壁との隙間は、2mmアンダーのコア材を5cm厚で巻きだし、突き棒により100回以上良く突き固める。さらに、間隙水圧の上面と同じ高さになるまで突き棒を用いてコア材を間隙水圧計と孔の間の隙間に締め固めていく。間隙水圧計の上面の

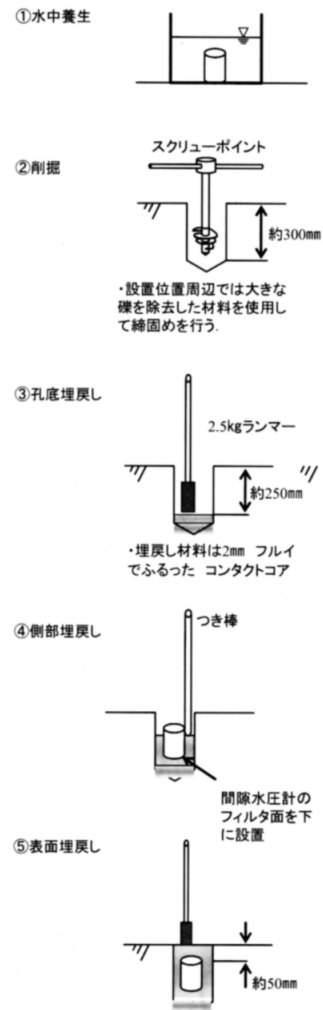


図-15 コア抜き法によるワイヤレス間隙水圧計の設置手順



図-16 ワイヤレス間隙水圧計の孔への設置状況

覆土は53mmアンダーのコア材を用いて、8cm巻きだしの2層で、1層ごと2.5kgランマーで75回突き固める。それ以降の盛土は通常の転圧仕様に従う。埋設作業は約40分であった。これは、従来型間隙水圧計の作業時間の1/10以下である。

6. ワイヤレス間隙水圧計による実ダムの間隙水圧観測結果⁶⁾

ワイヤレス間隙水圧計は、現在、農林水産省の4つのフィルダムに設置されている。ここでは、九州農政局管内中岳ダムおよびKダムでの実測結果について述べる。

6.1 中岳ダム

(1) 中岳ダムの諸元および計器位置

中岳ダムは鹿児島県末吉町に建設中の堤高 69.9 m, 堤頂長 312.5 m, 堤体積 1,575 千 m³ の中心遮水ゾーン型

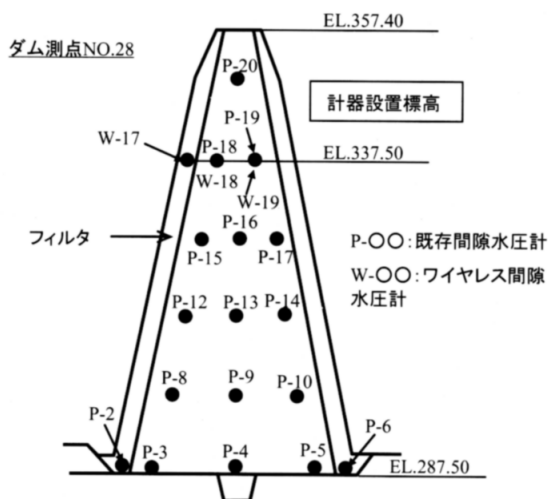


図-17 間隙水圧計設置位置(中岳ダム)

ロックフィルダムである。平成16年9月末に盛立を完了し、平成18年春から試験湛水を予定している。平成15年1月30日に3台のワイヤレス間隙水圧計を堤体上部のEL.337.5mに設置した。図-17にワイヤレス間隙水圧計の設置点を示す。ワイヤレス間隙水圧計W-17はフィルタ内に、W-18, W-19は、遮水ゾーン内に埋設された。W-18, W-19の近傍には、それぞれ従来型のケーブル付の間隙水圧計P-18, P-19も計測値の比較のために埋設されている。

(2) 中岳ダムの挙動観測結果

図-18は、中岳ダムのワイヤレス間隙水圧計と従来型間隙水圧計による間隙水圧の計測結果を示したものである。2004年8月から11月までの期間で従来型間隙水圧計の値が乱れているのは、台風による計器の故障およびその後の調整のためである。この図から以下の挙動が観察された。

- ① 盛土標高の上昇とともに間隙水圧は上昇した。盛土完了後は、ワイヤレス間隙水圧計の計測値は徐々に減少した。
- ② 台風により従来型間隙水圧計の計測値に乱れが発生するまでは、ワイヤレス間隙水圧計と従来型間隙水圧計の計測値はほぼ同様の経時変化傾向を示した。

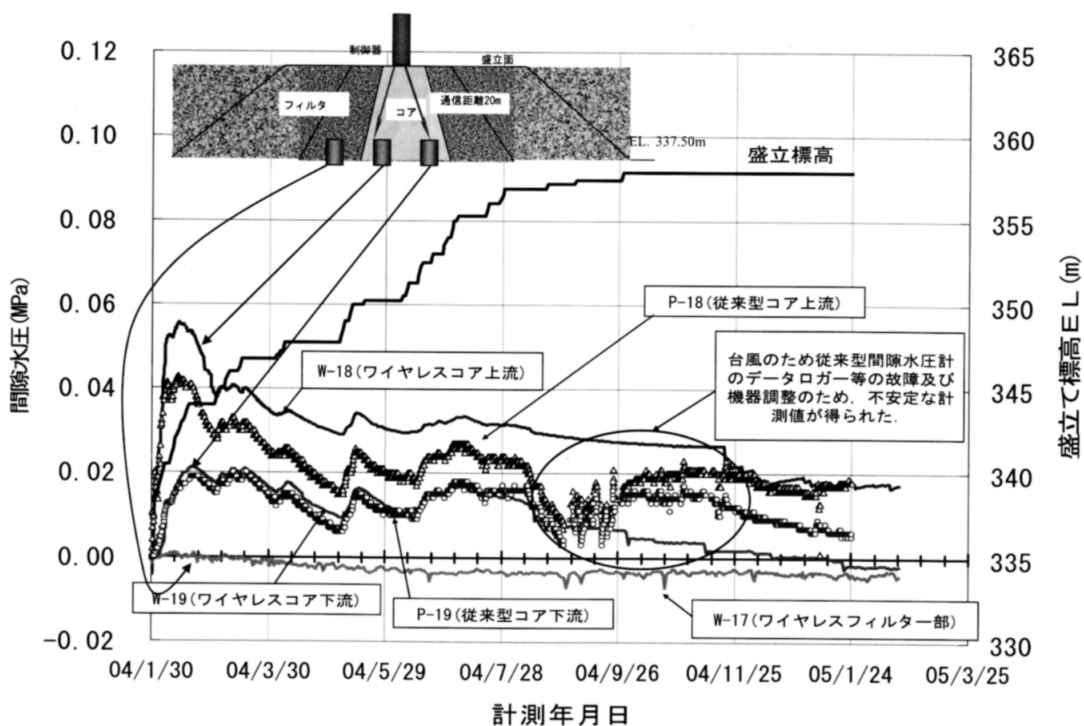


図-18 中岳ダムにおける従来型およびワイヤレス間隙水圧計計測値の経時変化

③ フィルタ内に設置されたワイヤレス間隙水圧計 (W-17) の値は、負圧を示した。これは湛水がまだ開始されていないために、フィルタゾーン内が不飽和状態にあるためと考えられる。この状況を考えれば、計測値は妥当な値である。

以上から判断すると、従来型間隙水圧計とワイヤレス間隙水圧計の挙動傾向は良く一致しており、ワイヤレス間隙水圧計による計測結果は良好と判断された。

6.2 K ダム

(1) K ダムの諸元および計器位置

K ダムは、堤高 50.0 m、堤頂長 256.0 m、堤体積 801 千 m^3 の中心遮水ゾーン型ロックフィルダムである。平成 13 年 9 月から盛立を開始し、平成 16 年末に 594 千 m^3 の盛立てを完了した。5 台のワイヤレス間隙水圧計が堤体中位標高の EL. 215.0 m に設置された。図-19 に最大断面におけるワイヤレス間隙水圧計の設置位置を示す。なお、コア内のワイヤレス間隙水圧計の近傍には従来型のケーブル付の間隙水圧計 (図-19 の P-37, P-38, P-39) も埋設されている。

(2) K ダムの挙動観測結果

図-20 は、K ダムのワイヤレス間隙水圧計と従来型間隙水圧計で計測された間隙水圧の経時変化を示す。この図から以下の傾向が明らかとなった。

① コア内に設置されたワイヤレス間隙水圧計 (WP2, WP3, WP4) の計測値は WP4 を除けば従来型間

隙水圧計の実測値とほぼ一致した。WP4 の値も他の間隙水圧計の値と絶対的な値は若干異なるものの、挙動傾向は同様である。

② 盛土の進展に伴い、間隙水圧の値が階段状に変化する現象および盛土休止期間に間隙水圧が減少する傾向は、他のフィルダムにおいても一般的に観察される傾向である。ワイヤレス間隙水圧計の値も、これらの一般的な挙動と整合した値を示している。

③ フィルタ内に設置されたワイヤレス間隙水圧計の計測値はほぼ 0 付近で横ばいに推移した。湛水が開始されていない状況を考えれば、計測値は妥当である。

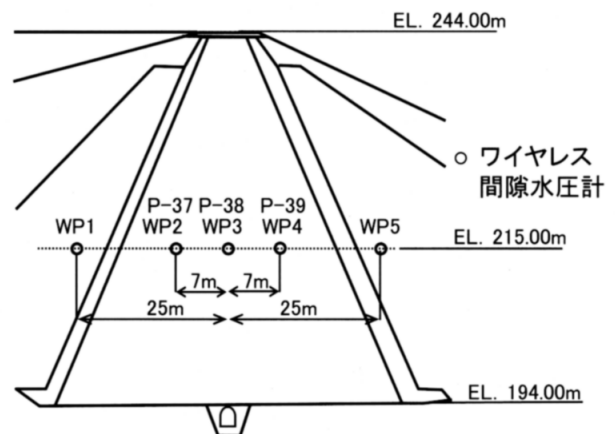


図-19 間隙水圧計設置位置(K ダム)

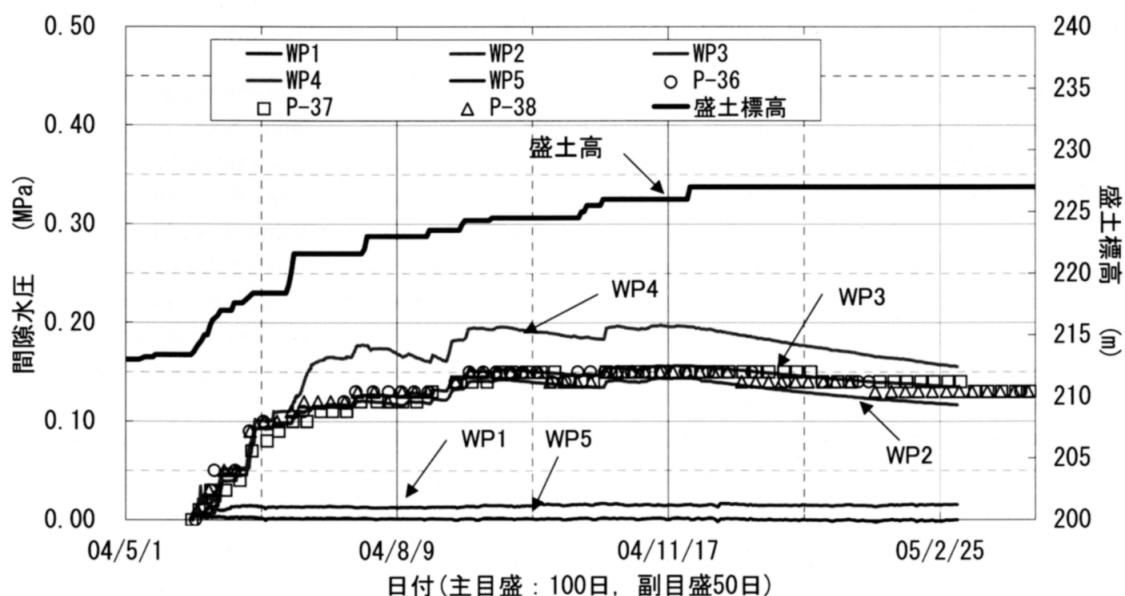


図-20 K ダムにおける従来型およびワイヤレス間隙水圧計計測値の経時変化

以上の挙動から判断すると、中岳ダムと同じく、従来型間隙水圧計とワイヤレス間隙水圧計の挙動傾向は良く一致しており、ワイヤレス間隙水圧計の計測結果は良好と判断された。

7. おわりに

平成 18 年 2 月現在、農林水産省関係のフィルダムに埋設されたワイヤレス間隙水圧計の総数は、約 30 台である。現状では、すべてのワイヤレス間隙水圧計は、故障も欠測もなく順調に計測が継続されている。いくつかのダムでは、ワイヤレス間隙水圧計の設置後、激しい雷雨に遭遇しているが、雷による故障は発生しておらず、当初の設計目標通り高い耐雷性を有していることが確認されている。

今後は、ボーリング等により再設置が可能なワイヤレス間隙水圧計の開発、他の埋設計器に対するワイヤレス化を目標に研究開発を継続する予定である。また、同時に、ワイヤレス間隙水圧計を埋設したダムに対して、試験湛水が終了するまで計測を続け、機器の安定性を確認する予定である。

最後に、本研究の遂行にあたって、現場を提供していた曾於農業水利事務所および間隙水圧計の挙動データを提供していただいた東伯農業水利事業所の関係各位に、ここに記して感謝を表します。

参考文献

- 1) 向後雄二, 浅野 勇, 林田洋一: ワイヤレス間隙水圧計の開発とフィルダム現場への適用, SDERD, 57, 7-18, 2002
- 2) 浅野 勇, 向後雄二, 高橋 章, 遠目塚良一: ワイヤレス間隙水圧計の開発, 第 14 回ダム工学研究発表会講演集, pp. 31-33, 2003
- 3) 高橋 章, 向後雄二, 遠藤真一, 角江俊明, 大槻哲也: 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, pp. 1271-1272, 2003
- 4) 樋口佳意, 向後雄二, 高橋 章: ワイヤレス間隙水圧計の開発と現場への適用事例, (社)地盤工学会関西支部地盤の環境・計測技術に関するシンポジウム, pp. 61-64, 2004
- 5) Kohgo, Y., Asano, I. and Hayashida, Y.: On wireless pore water transducer for fill-type dams, Proc. 4th Int. Conf. Dam Engineering, Nanjing, A. A. Balkema, pp. 441-450, 2004
- 6) 浅野 勇, 向後雄二, 林田洋一: ワイヤレス間隙水圧計の開発(その 2), ARIC 情報, No. 78, 54-58, 2005
- 7) 浅野 勇, 向後雄二, 林田洋一: ワイヤレス間隙水圧計の開発(その 1), ARIC 情報, No. 77, 85-92, 2005
- 8) 浅野 勇, 向後雄二, 林田洋一, 樋口佳意: ワイヤレス間隙水圧計の現場計測について, 第 40 回地盤工学研究発表会, pp. 1393-1394, 2005
- 9) 向後雄二, 浅野 勇, 林田洋一: ワイヤレス間隙水圧計によるフィルダムの間隙水圧の測定, 平成 17 年度農業土木学会大会講演会, pp. 908-909, 2005
- 10) 松本欣二: 電波工学入門, 朝倉書店, pp. 83-84, 1978

(2006 年 5 月 9 日 受理)

The purposes of this paper are to introduce wireless pore water pressure transducer and to indicate the performance of the transducers installed within embankments of dams. Some experimental tests were conducted to investigate the design specifications. It was confirmed from these tests that the transducers could express more than 100 m underground-communication, the lives were more than 10 years, and the waterproof was more than 3 MPa etc. The installation procedure was also investigated. The wireless transducers and conventional pressure gauges with cables were installed into two real embankment dams constructing by the Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries, Japan. The pore water pressure values measured with these wireless transducers were compared with those of the conventional pressure gauges. It was found from the results that both values measured were consistent.

Key words: embankment dam, pore water pressure, field measurement, wireless transducer