

ワイヤレス間隙水圧計の長期計測性能の検証

林田洋一*・遠目塚良一**・浅野 勇*・増川 晋*・田頭秀和*

目 次

I 緒 言	243	IV 電池容量試験	249
II ワイヤレス間隙水圧計の概要	243	1 試験装置および試験条件	249
III 実ダムにおける試験計測結果	244	2 試験結果	250
1 A ダム	244	3 実ダムにおける試験計測結果との比較	251
a 試験の概要	244	4 耐用年数を満たす方策と課題の検証	252
b 試験結果	245	VI 結 言	253
2 B ダム	247	参考文献	253
a 試験の概要	247	Summary	254
b 試験結果	247		

I 緒 言

フィルダムなどの盛土構造物には、施工時、運用時の構造物の安全性を確認するため、間隙水圧計や土圧計などの埋設計器が設置されている。これらの多くは対象とする物理量を電気信号に変換する電気式計器であり、電源の供給及び計測データの伝送のための導電ケーブルが必要であった。このため、(1) ケーブル敷設用トレンチの掘削、ケーブル敷設、埋め戻し工程に伴う盛土作業効率の低下、(2) ケーブルの断線、絶縁低下や誘導雷による埋設計器の故障による計測の不安定化、等の問題点が指摘されてきた。そこで筆者らは、フィルダムにおける施工性の向上、埋設計器による計測の安定性の向上を目的に、低周波電磁波を用いた地中通信技術を活用した導電ケーブルを必要としないワイヤレス埋設計器の開発を行い、当時農水省が建設中の2基のロックフィルダムに試験的に従来のケーブル式センサと併設し、開発されたワイヤレス間隙水圧計テストモデルの適用性を検証してきた(林田ら, 2008)。開発時には計測頻度:1回/日、通信頻度:1回/週、の使用条件で10年以上の計測を可能と想定したが、実際に設置されたテストモデルは設置後5年半程度経過時にデータ回収不可能な状況に至った。本報告では、これまでにテストモデルにより計測されたデータと従来のケーブル式センサによるデータとを比較検討し、ワイヤレス間隙水圧計による計測結果の妥

当性について検証する。また、テストモデルは想定動作期間10年よりも大幅に短い期間で通信途絶状態に至った原因を、電池容量試験および実ダムでの電池電圧データから解明し、ワイヤレス間隙水圧計の動作期間を長期化するための方策を検証する。

II ワイヤレス間隙水圧計の概要

低周波電磁波は透過する媒質の導電率や誘電率による影響をあまり受けて、比較的距離であれば土中や水中においてもその減衰は少ない。このような低周波電磁波の特性と、0および1のデジタル信号を位相変調し識別するデジタル通信技術を活用し微弱な信号の読みとり精度を上げることによって信号対ノイズ比(S/N比)が2以上であれば、地中においても最大約100mの双方向無線データ通信が可能である。ワイヤレス間隙水圧計は、この技術を活用し、堤高100m程度のフィルダムにおいて10年以上安定した計測ができることを目標に、耐水圧性能3MPa以上、地中通信距離100m以上、電池寿命10年以上、堤体に対しての異物とならないよう計器寸法をフィルダム遮水材の最大粒径以下に抑えることを設計仕様とし、独立行政法人 農林工芸研究所、坂田電機株式会社、東京電力株式会社が農林水産省農村振興局官民連携新技術研究開発事業により平成13～15年度に共同開発したものである。試験的に実ダムへの埋設を行ったワイヤレス間隙水圧計テストモデルの外形と内部構造をFig.1に示す。計器は、①回路基板、②通信アンテナ、③電池、④間隙水圧計、⑤筐体により構成される。基板部の小型化、省電力化、送受信アンテナの統合、部品数の削減、高エネルギー密度のリチウム電池の使用によ

* 施設資源部構造研究室

** 坂田電機株式会社

平成21年12月14日受理

キーワード: ワイヤレス間隙水圧計, フィルダム, 長期計測性能

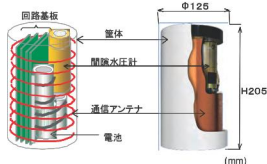


Fig.1 ワイヤレス間隙水圧計の概要
Schematics of the wireless pore water pressure transducer

り、設計仕様を満たす小型化に成功した。形状は、直径125mm、高さ205mmの円筒形である。電源には装置内部に直列で搭載された3個のリチウム電池を利用しており、テストモデルによる使用電池容量を短期間で確認するための室内電池負荷試験結果から、計測頻度:1回/日、通信頻度:1回/週、の使用条件で10年以上の計測が可能と推定した。なお、間隙水圧計は従来のケーブルセンサと同等のものを使用している。

テストモデル開発後の基板の改良等により開発終了時には同一寸法で2倍のリチウム電池を搭載することが可能となり、併せてスリプ時、測定時における電池の消費電流は大幅に削減された。現在では農水省所管の5フィルダムに75台のワイヤレス埋設計器が設置されているが、そのうち2台は通信途絶状態にある(浅野ら, 2009)。ワイヤレス埋設計器は設置工程を短期化できるなどのメリットがあるものの、①計器に付帯する電池寿命までしか測定できない、②電池寿命は現在約10年程度である、③低周波磁界を用いた通信機であり、環境ノイズで送信距離に影響する可能性がある、④データ受信機が必要になるが、送信側と受信側の設置位置には注意を要する、といったことが現状での課題点として指摘されている(財団法人ダム協会, 2009)。

III 実ダムにおける試験計測結果

2基の実ダムにおいて、ワイヤレス間隙水圧計の設置手法を検討し、その簡便性を確認するための埋設試験を実施した。併せて、ワイヤレス間隙水圧計が従来のケーブル式間隙水圧計と同等な計測が可能なこと、ワイヤレス間隙水圧計が想定動作期間を満足することを確認するために、長期計測試験を実施した。

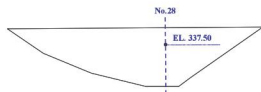
1 Aダム

a 試験の概要

Fig.2に示すAダムは、堤高69.9m、堤頂長312.5m、堤体積1,575千 m^3 の中心進水ゾーン型ロックフィルダムである。No.28断面EL.337.50mに設置されているケー

ブル式間隙水圧計(P18およびP19)の近傍にワイヤレス間隙水圧計(WP-2およびWP-3)を試験的に設置し両者の比較を行っている。また、上流側フィルタ内にワイヤレス間隙水圧計(WP-1)を試験的に設置している。これらの間隙水圧計の設置位置の概要をFig.3に示す。コアに埋設するワイヤレス間隙水圧計は、ケーブル式間隙水圧計が設置されるNo.28断面から1.5m離れたケーブルトレンチ先端の一段高い箇所(向後、2006)で設置した。コア抜き法による作業手順を概説すると、①設置を容易にするためワイヤレス間隙水圧計の埋設位置周辺を約1 m^2 掘削し整形する、②埋設のための穿孔及び整形を行い、設置標高を確認する、③ワイヤレス間隙水圧計を静置する、④粒度調整した盛土材で計器周辺を人力により締め固め覆土する、⑤計器周辺を覆土後、掘削箇所を重機により盛土材で埋め戻す、⑥振動ローラー等により締め固める、となる。なお、この一連の作業に要する時間は、1時間弱である。ケーブルトレンチ、ケーブル式間隙水圧計の設置、ワイヤレス間隙水圧計の設置、ケーブルトレンチの埋め戻し状況をFig.4~7に示す。Fig.5およびFig.6に示すようにケーブル式間隙水圧計、ワイヤレス間隙水圧計ともに計器周辺部は木槌等を用いた人力で締め固めを行っている。埋設に当たってはケーブル式間隙水圧計の周辺にコンタクトコア材、ワイヤレス間隙水圧計の周辺にコア材の2mmふる

【縦断面】



【横断面 No.28断面】

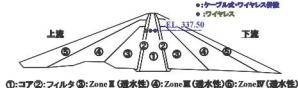


Fig.2 Aダムの概観と間隙水圧計設置位置
Schematics of the arrangement of transducers at A dam

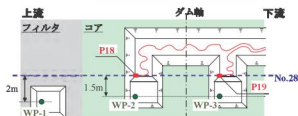


Fig.3 間隙水圧計設置平面の概要
A schematic of the location for the transducers

い過通分を用いている。ケーブルトレンチの埋め戻しにはコンタクトコア材を用い、ローラーまたはランマにより転圧している。上流フィルタ内のワイヤレス間隙水圧計(WP-1)は、Fig.3に示すようにNo.28断面から2m左岸側に離れた位置にコア抜き法により設置している。

b 試験結果

No.28断面のEL.337.50mにおける間隙水圧計の経時計測結果をFig.8～10に示す。Fig.8はWP-1、Fig.9はP18およびWP-2、Fig.10はP19およびWP-3の結果を示している。なお、それぞれに築堤時の盛り立て標高の経時変化と試験湛水開始後の設置標高における貯水圧の経時変化を併記している。貯水圧は貯水位と設置標高の差に水の密度を乗じて算出しており、貯水位が設置標高以下の場合には0としている。

ワイヤレス間隙水圧計については、2009年3月5日にデータ回収を実施した際には全ての計器から送信データを受信することができたが、2009年7月9日にデータ回収を実施した際にはWP-1、WP-3からの送信データは受信できず、WP-2のみデータの回収が可能であった。後述するが、このことはワイヤレス間隙水圧計に内蔵された電池の内部抵抗が原因であると考えている。このことから、ワイヤレス間隙水圧計テストモデルは設置から5年半程度でその計測寿命を迎えたこととなる。

設置当初の築堤時から試験湛水期間を経てデータ回収が不能となるまでの期間についてフィルタに埋設したWP-1と貯水圧とを比較した結果をFig.11に示す。また、ケーブル式間隙水圧計とワイヤレス間隙水圧計の計測値を比較した結果をFig.12およびFig.13に示す。ここで、計器設置から初期湛水時に貯水位が設置標高に達するまでの期間を“期間1”、その後一旦満水位まで到達した貯水位が設置標高まで低下する期間を“期間2”、貯水位低下後再び貯水位が設置標高に達するまでの期間を“期間3”、それからデータの回収が不能となるまでの期間を“期間4”としている。Fig.11より、フィルタに埋設したWP-1の計測値と算定した貯水圧とは初期湛水時の“期間2”においてはWP-1が高い値を示すものの2度目の湛水時にあたる“期間4”では両者はほぼ等しくなっている。初期湛水時にWP-1の計測値が高くなった原因は不明であるが、その後の結果からWP-1は適切な計測を行ってきたものと考えている。

Fig.12およびFig.13から、コアに埋設したケーブル式間隙水圧計とワイヤレス間隙水圧計では、若干値が異なるものの、全期間を通して両者は良い一致を示すことがわかる。以上の結果より、ワイヤレス間隙水圧計は従来のケーブル式間隙水圧計と同等な計測が可能であることを確認した。



Fig.4 ケーブルトレンチおよび間隙水圧計設置位置の概観
Views of cable trench and the location for the transducers



Fig.5 ケーブル式間隙水圧計の設置状況
Views of setting up the transducers with cable



Fig.6 ワイヤレス間隙水圧計の設置状況
Views of setting up the wireless transducer



Fig.7 ケーブルトレンチの埋め戻し状況
Views of burying the cable trench

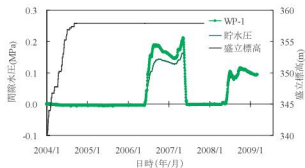


Fig.8 WP-1 による間隙水圧の経時変化
Time history of the pore water pressure measured by WP-1

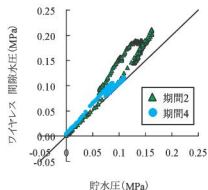


Fig.11 貯水圧と WP-1 との比較
Comparison between the pressure of reservoir water and pore water pressure measured by WP-1

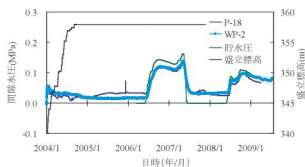


Fig.9 P18 および WP-2 による間隙水圧の経時変化
Time history of the pore water pressures measured by P18 and WP-2

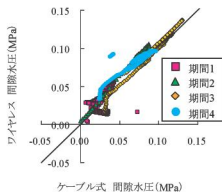


Fig.12 P18 と WP-2 との比較
Comparison between the pore water pressures measured by P18 and WP-2

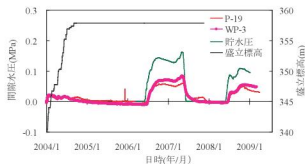


Fig.10 P19 および WP-3 による間隙水圧の経時変化
Time history of the pore water pressures measured by P19 and WP-3

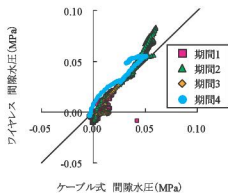


Fig.13 P19 と WP-3 との比較
Comparison between the pore water pressures measured by P19 and WP-3

2 B ダム

a 試験の概要

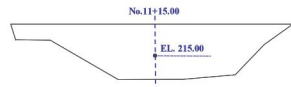
Fig.14 に示す B ダムは、堤高 50.0m、堤頂長 256.0m、堤体積 801 m^3 の中心進水ゾーン型ロックフィルダムである。EL.215.0m に設置されているケーブル式間隙水圧計 (P35, P36, P37, P38, P39) の近傍に、ワイヤレス間隙水圧計 (WP-1, WP-2, WP-3, WP-4, WP-5) を試験的に設置し両者の比較を行っている。これら間隙水圧計の設置位置の概要を Fig.15 に示す。ワイヤレス間隙水圧計は、ケーブル式間隙水圧計が設置される No.11+15.00 断面から 5m 左岸側に離れた箇所にコア抜き法で設置している。半透水性ゾーン (ゾーン 2U またはゾーン 2D) およびコアにおけるワイヤレス間隙水圧計の設置状況をそれぞれ Fig.16 および Fig.17 に示す。A ダム同様にケーブル式間隙水圧計、ワイヤレス間隙水圧計ともに計器周辺部は木植等を用いた人力で締め固めを行っている。埋設に当たっては、コアでは、ケーブル式間隙水圧計の周辺にコンタクトクレイ材およびコンタクトコア材を用いている。また、ワイヤレス間隙水圧計の接地部にコア材の 5mm 程度の通過分、周辺部にコンタクトクレイ材を用いている。なお、ケーブルトレンチお

よびワイヤレス間隙水圧計設置のための掘削部の埋め戻しには、コンタクトコア材を用いている。半透水性ゾーンではケーブル式間隙水圧計の周辺は 50mm 以下に調整した半透水性材料 (ゾーン 2U 材またはゾーン 2D 材)、ワイヤレス間隙水圧計の周辺は 5mm 以下に調整した半透水性材料または砂を用い、ケーブルトレンチおよびワイヤレス間隙水圧計設置のための掘削部の埋め戻しには半透水性材料を用いている。

b 試験結果

No.11 断面 EL.215.00m 周辺における間隙水圧計の経時計測結果を Fig.18 ~ 22 に示す。Fig.18 は P35 および WP-1, Fig.19 は P36 および WP-2, Fig.20 は P37 および WP-3, Fig.21 は P38 および WP-4, Fig.22 は P39 および WP-5 の計測結果を示している。また、それぞれに築堤時の盛り立て標高の経時変化と試験湛水開始後の埋設標高における貯水圧の経時変化を併記している。なお、貯水圧は貯水位と設置標高の差に水の密度を乗じて算出しており、貯水位が設置標高以下の場合には 0 としている。

【縦断面】



【横断面 No.11+15.00 断面】

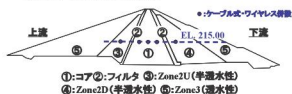


Fig.14 B ダムの概観と間隙水圧計設置位置
Schematics of B dam and the arrangement of the transducers

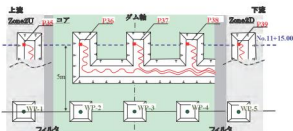


Fig.15 間隙水圧計設置平面の概要
A schematic of the location for the transducers



Fig.16 半透水性ゾーンにおけるワイヤレス間隙水圧計の設置状況

Views of setting up the wireless transducer in semi-pervious zone



Fig.17 コアにおけるワイヤレス間隙水圧計の設置状況
Views of setting up the wireless transducer in core zone

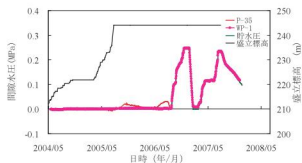


Fig.18 P35 および WP-1 による間隙水圧の経時変化
Time history of the pore water pressures measured by P35 and WP-1

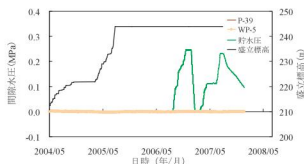


Fig.22 P39 および WP-5 による間隙水圧の経時変化
Time history of the pore water pressures measured by P39 and WP-5

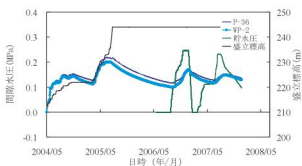


Fig.19 P36 および WP-2 による間隙水圧の経時変化
Time history of the pore water pressures measured by P36 and WP-2

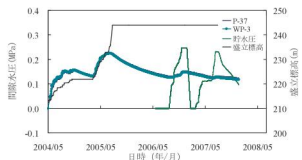


Fig.20 P37 および WP-3 による間隙水圧の経時変化
Time history of the pore water pressures measured by P37 and WP-3

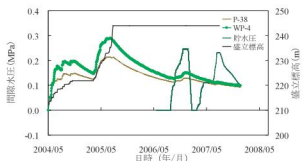


Fig.21 P38 および WP-4 による間隙水圧の経時変化
Time history of the pore water pressures measured by P38 and WP-4

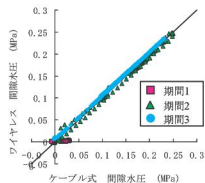


Fig.23 P35 と WP-1 との比較
Comparison between the pore water pressures measured by P35 and WP-1

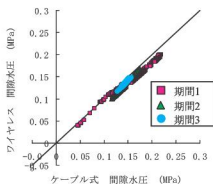


Fig.24 P36 と WP-2 との比較
Comparison between the pore water pressures measured by P36 and WP-2

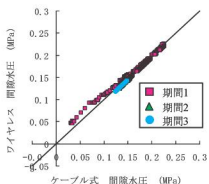


Fig.25 P37 と WP-3 との比較
Comparison between the pore water pressures measured by P37 and WP-3

ワイヤレス間隙水圧計については、2007年12月27日にデータ回収を実施した際には全ての計器から送信データを受信することが可能であったが、その後データの回収を実施していない。Aダムと同様のテストモデルを設置していることから、2009年10月時点でデータ回収不能と推定されたため、データ回収を試みずに試験を中止した。

築堤時から試験湛水期間を経た2007年12月27日までの期間について、ケーブル式間隙水圧計とワイヤレス間隙水圧計の計測値を比較した結果をFig.23～27に示す。ここで、埋設時から初期湛水時に貯水位が当該標高に達するまでの期間を“期間1”、その後一旦満水位まで到達した水位が設置標高以下に低下し、再び貯水位が設置標高に達するまでの期間を“期間2”、それから2007年12月27日までの期間を“期間3”としている。Fig.23～27より、P38およびWP-4以外では、ケーブル式間隙水圧計とワイヤレス間隙水圧計が全期間を通して良い一致を示していることがわかる。一方、“期間1（埋設時から初期湛水時に貯水位が埋設標高に達するまで）”において、WP-4がP38と比較し、かなり大きな過剰間隙水圧の発生を示している。しかしながら、その増減の

傾向は一致しており、貯水位が埋設標高に達して以降の“期間2、3”において、両者の値はほぼ等しくなっている。“期間1”において両者の値が異なった理由として、設置位置や設置方法の違いが過剰間隙水圧発生量の違いとして現れたことが考えられるが、それらの影響は貯水により緩和されたのではないかと考えている。以上の結果から、Aダムと同様に、Bダムにおいても、ワイヤレス間隙水圧計は従来のケーブル式間隙水圧計と同等な計測が可能であることが確認された。

IV 電池容量試験

1 試験装置および試験条件

ワイヤレス間隙水圧計に用いる電池性能を評価するため、ワイヤレス間隙水圧計を模擬した実験装置を作製し、室内電池負荷実験を実施した。試験装置はFig.28に示す負荷回路ブロックからなり、R1、R2、R3、R4は、それぞれスリープ時、受信待機時、計測時、データ送信時の消費電力を模擬した負荷抵抗である。ここで、時計のみが動作している状態をスリープ時、地上からの送信要求が受信可能な受信待機状態を受信待機時、間隙水圧の測定を行う測定状態を計測時、地上へのデータ送信を行う送信状態をデータ送信時としている。また、電圧計により、各負荷をかけた際の電池電圧を計測している。各負荷回路ブロックの設定値をTable 1に、電池負荷試験における負荷パターンをFig.29に示す。本試験では、計測条件として1日に1回の計測及びデータ送信を設定した。このため、1回の負荷パターン中に受信待機、計測、データ送信の各負荷を1回負荷し、スリープ負荷は常時

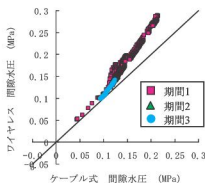


Fig.26 P38とWP-4との比較
Comparison between the pore water pressures measured by P38 and WP-4

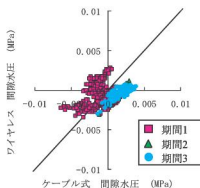


Fig.27 P39とWP-5との比較
Comparison between the pore water pressures measured by P39 and WP-5

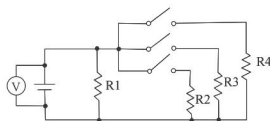


Fig.28 試験装置回路図
Schematic of a circuit testing the battery

Table 1 負荷条件設定値
Specifications of the test condition

負荷条件	試験ケース	抵抗値	定格電流	負荷時間
R1 スリープ	case1	3.3 k Ω	1 mA	常時
	case2	6.6 k Ω	0.5 mA	
	case3	16.5 k Ω	0.2 mA	
	case4	66.0 k Ω	0.05 mA	
R2 受信待機	共通	432.2 Ω	8 mA	180 s
R3 計測	共通	39.3 Ω	80 mA	10 s
R4 送信	共通	14.1 Ω	200 mA	18 s

負荷している。

ワイヤレス間隙水圧計は、動作期間 10 年を目標としているが、開発期間が目標動作期間に比べ短かった。そこで、Fig.29 に示す負荷パターンで 10 年間に消費される電力を模擬できるよう、1 日に実施する負荷パターンの頻度を変えた 4 つの促進試験ケースを実施し、電池容量の検証を行った。Table 2 に示すように、“case1”では、Fig.29 に示す負荷パターンを 1 日に 20 回繰り返すことで、想定期間中に消費される電力を 0.5 年で消費するよう模擬されている。同様に、“case2”では 1 日に 10 回、“case3”では 1 日に 4 回、“case4”では 1 日に 1 回繰り返すことで、試験期間を想定動作期間 10 年の 1/10、1/4、1 倍となるようにしている。なお、これに併せて、スリープ負荷時の負荷抵抗は Table 1 に示すように設定している。

試験に用いたリチウム電池のカatalog仕様を Table 3 に示す。この電池は無負荷状態であっても、一年当たり公称容量の 3% を放電するため、長期間の使用を考えると場合には、電池の自己消費量は無視できない。また、終止電圧 2.0V に至った時点で、安定した動作が保証されなくなる。

2 試験結果

各試験ケースにおけるスリープ負荷時、送信負荷時の

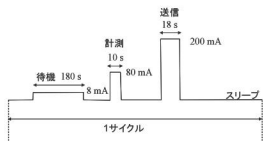


Fig.29 負荷パターンの概要
Schematic of the loading pattern

Table 2 試験ケース
Test series

試験ケース	試験期間	1 サイクル時間	負荷頻度
case1	0.5 年	72 分	20 回 / 日
case2	1 年	144 分	10 回 / 日
case3	2.5 年	6 時間	4 回 / 日
case4	10 年	24 時間	1 回 / 日

Table 3 電池仕様
Specifications of the battery

公称容量	13.0Ah
公称電圧	3.6V
終止電圧	2.0V
自己消費率	3% / 年 以下

電池電圧の経時変化を Fig.30 に示す。なお、各ケースともに 4 個の電池を用いて同時に試験を実施しており、Fig.30 に示す結果は、その平均値である。

Fig.30 より “case1, 2, 3” と “case4” では、送信負荷時の電池電圧計測結果の傾向が大きく異なることがわかる。前者 3 つのケースでは、試験期間中 3.0V 以上の電圧を維持し、試験期間終了頃に急激に電圧が減少し、終止電圧である 2.0V を経て 0V になる。スリープ負荷時の電池電圧も同様の傾向を示している。このような挙動は、試験期間中に電池容量が使い切られたためだと考えられる。一方、“case4” の場合、送信時の電池電圧が経時的に緩やかに減少し、終止電圧に至るのに対して、スリープ負荷時の電池電圧は公称電圧値の 3.6V を保持している。このことから、“case4” については、電池容量が使い切られることなく送信負荷時の電池電圧が終止電圧に至ったものと考えられる。

このことを確認するため、Fig.29 に示す負荷パターン中の電池電圧と各負荷抵抗値から、負荷パターン中の電流値を算出した。これに負荷時間を乗じ、負荷パターン中に消費される電池容量を算出した。これを、送信負荷時の電池電圧が、終止電圧 2.0V に至るまでの実動作期間分積算することで、実動作期間中の負荷時使用容量を求めた。また、Table 3 に示すように使用した電池は 3% / 年の自己消費が見込まれることから、初期容量 13.0Ah の 3% にあたる 0.39Ah/ 年 に実動作期間を乗じ、実動作期間中の自己消費容量を算出した。これら実動作期間中の負荷時使用容量と自己消費容量を足し合わせ、実動作期間中における実使用容量とした。また、実動作期間中における実使用容量と電池の公称容量の割合を容量使用率とした。各試験ケースにおける、実動作期間、負荷時使用容量、実使用容量、容量使用率を Table 4 に示す。また、各試験ケースにおけるスリープ時、受信待機時、計測時、送信時の各消費容量および自己消費容量の内訳比較を Fig.31 に示す。これらの結果から、case1, 2 および 3 では電池容量がほぼ全て消費されているのに対し、“case4” では 26% 程度の電池容量が消費されず残っていることが確認された。

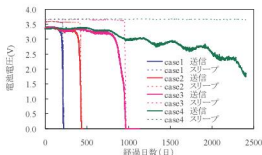


Fig.30 スリープおよび送信負荷時における電池電圧の経時変化
Time histories of the battery voltage measured
on the sleep and data sending condition

Table 4 試験結果から算定した容量使用率
Electric capacities calculated from the test results

試験ケース	想定試験期間	実動作期間	負荷時使用容量	使用容量	容量使用率
case1	0.5 年	0.57 年	13.0 Ah	13.3 Ah	102.3 %
case2	1 年	1.14 年	13.0 Ah	13.4 Ah	103.1 %
case3	2.5 年	2.49 年	11.4 Ah	12.3 Ah	94.6 %
case4	10 年	6.45 年	7.0Ah	9.6 Ah	73.8 %

一般に電池を負荷抵抗に接続し電流を流した場合、電池の起電力（無負荷の状態の端子電圧）よりも端子電圧は低くなる。この原因は負荷抵抗と直列に接続された電池内部の抵抗によるものと考えられ、電池の内部抵抗と表現される。電池の内部抵抗によって起こる電圧降下は、流れる電流の大きさに比例するため、負荷抵抗に供給する電流が小さい場合は、その影響がほとんどない。一方、大きな電流が流れる場合には、電圧降下の影響が問題となる。一般に電池の内部抵抗は、放電による電池の劣化により増大する。その原因のひとつは、電池の極板の有効面積の減少だと考えられる。ワイヤレス間隙水圧計テストモデルに使用している塩化チオニリチウム電池は、放電により、負極であるリチウム電極表面に LiCl 膜が生成し内部抵抗が増加する。

そこで、電池の内部抵抗が試験結果に与えた影響を確認するため、“case3” および “case4” について内部抵抗を試算した。試算に当たっては、スリープ負荷時の電池電圧が起電力に等しいと仮定し、送信負荷時の電池電圧値とその際に算定される電流値から次式により電池の内部抵抗を算出した。

$$R_{in} = (V_{\text{sleep}} - V_{\text{send}}) / I_{\text{send}} \quad \dots\dots (1)$$

$$I_{\text{send}} = V_{\text{send}} / R_{\text{send}} \quad \dots\dots (2)$$

ここに、 R_{in} ：電池の内部抵抗（ Ω ）、 V_{sleep} ：スリープ負荷時の電池電圧（V）、 V_{send} ：送信負荷時の電池電圧（V）、 I_{send} ：送信負荷時の電流（A）、 R_{send} ：送信負荷抵抗（ Ω ）である。

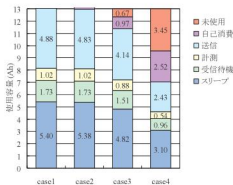


Fig.31 各負荷による使用電池容量の内訳
The electric capacity items consumed by each loading

算出した電池内部抵抗の経時変化を Fig.32 に示す。

Fig.32 より、算定された電池内部抵抗は 750 日経過頃までは “case3、4” とともに同様な傾向を示す。その後、“case3” では電池内部抵抗の増加率が急増し、Fig.30 において送信負荷時の電池電圧が終止電圧 2.0V に低下した 900 日経過頃には電池内部抵抗が 10 Ω に達している。一方、“case4” では経時的に電池の内部抵抗が増加しており、その関係は指数関数として次式で近似することができる。

$$R_{in} = 1.0094 \exp(0.0009 t) \quad \dots\dots (3)$$

ここに、 R_{in} ：電池内部抵抗（ Ω ）、 t ：経過日数（日）である。

なお、Fig.30 に示される周期的な電池電圧値の増減や Fig.32 で示される電池内部抵抗値の周期的な増減は、温度変化と密接な関係にあることが温度計測データより判明している。

以上の電池容量および電池内部抵抗に関する検証結果から、“case4” では電池容量は残存しているものの、電池内部抵抗が時間経過により増大し、比較的大きな電流が流れる送信負荷時に電圧降下が起こり、電池電圧が終止電圧を下回る結果となることが明らかとなった。

3 実ダムにおける試験計測結果との比較

A ダムでは、実際のワイヤレス間隙水圧計テストモデルにおいて、データ送信時の電池電圧の経時変化を測定している。埋設当初からデータ回収時毎に測定されたデータ送信時の電池電圧の結果を Fig.33 に示す。なお、

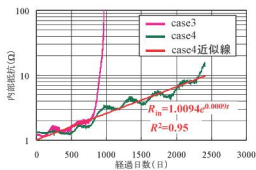


Fig.32 電池内部抵抗の経時変化
Time histories of the internal resistance

比較のため、電池負荷試験における“case4”の結果を併記している。テストモデルと電池負荷試験では、使用している電池の本数が異なる。このため、Fig.33では電池負荷試験の“case4”の結果を補正し、両者の比較を容易にしている。

Fig.33 から、A ダムにおける試験計測結果、電池負荷試験結果ともに約 500 日経過頃から電池電圧の低下率が大きくなり、その後はほぼ一定の低下率で電池電圧値が減少している。このことから、電池負荷試験の結果同様、A ダムにおいて埋設後約 5 年半でワイヤレス間隙水圧計のデータ回収が不能となった原因は、電池容量が完全に消費されたためではなく、電池内部抵抗の経時的な増加によりデータ送信時に電圧降下が発生し、電池電圧が終止電圧を下回ったためと考えられる。ワイヤレス間隙水圧計テストモデルの開発終了時までは、電池負荷試験における“case1”および“case2”の結果しか得られておらず、ワイヤレス間隙水圧計は想定動作期間の 10 年で電池容量をほぼ消費するものと判断した。しかしながら、電池内部抵抗の経時的な増加の影響は考慮しなかった。このことが、A ダムにおいてワイヤレス間隙水圧計が想定動作期間の 10 年を大きく下回る約 5 年半で、通信途絶状態に至った原因だと考えられる。

4 耐用年数を満たす方策と課題の検証

ワイヤレス間隙水圧計の想定動作期間は、計測頻度：1 回/日、通信頻度：1 回/週、の使用条件で設定している。一方、電池容量試験では、計測頻度：1 回/日、通信頻度：1 回/日、の使用条件を想定しており、使用条件が異なる。そこで、Fig.31 に示す“case4”の送信負荷時の使用電池容量を、計測頻度：1 回/日、通信頻度：1 回/週、の使用条件となるよう補正し、想定動作期間 10 年分に換算した負荷時使用電池容量を算出した。これに、10 年分の自己消費容量を足し合わせた結果、想定動作期間 10 年間に消費される使用電池容量は 11.6Ah となり、電池の公称容量 13.0Ah を下回る。このことから、計測頻度：1 回/日、通信頻度：1 回/週、の使用条件の場合、電池容量は、想定動作期間 10 年を十分に満足すると考

えられる。

電池容量が満足することが確認されたことから、想定動作期間中のワイヤレス間隙水圧計テストモデルの正常な動作を保証するためには、電池の内部抵抗の経時的な増加に起因する電圧降下の影響を適切に評価し、これを低減する必要がある。

データ送信時の電圧降下の影響を低減するためには、データ送信時の消費電流を小さくすればよい。そのためには、データ送信回路の省電力化、使用する電池の個数を、並列で増加させることが考えられる。後者の方策は、前者に比べ容易である。このことから、ここでは、電池の並列化による耐用年数の延長の可能性を検証する。なお、電池内部抵抗の増加傾向は、電池を並列化することにより、前出の電池負荷試験の結果と異なる可能性が考えられる。しかし、ここでは、電池の内部抵抗は式 (3) に示す近似式で表現されると仮定し考察を行う。

電池を並列化することで、電池一本当りが流す電流は減少する。このため、並列化数を n とすることで電池一本当りの消費電流は $1/n$ となるため、電池の消費容量も $1/n$ となる。

また、並列化数を n とした場合の t 年後の送信負荷時の電池電圧は次式により試算できる。

$$V_{sent}(t, n) = V_{nomi} - V_m(t, n) \quad \dots\dots (4)$$

$$V_m(t, n) = 1.0094 \exp(0.0009 t) \frac{I_{sendout}}{n} \quad \dots\dots (5)$$

ここで、 $V_{sent}(t, n)$ ：送信時電池電圧 (V)、 V_{nomi} ：公称電池電圧 (V)、 $V_m(t, n)$ ：電池内部抵抗による電圧降下量 (V)、 $I_{sendout}$ ：送信時定格電流 (A)、 t ：経過日数 (日)、 n ：電池並列数である。

なお、無負荷時の電池電圧は容量が無くなるまで公称電圧 3.6V を維持すること、送信時に消費される電流は常に定格電流 0.2A に等しいと仮定する。

式 (4)、(5) から試算した電池並列数と経過日数に伴う送信時電池電圧の変化を Fig.34 に示す。

Fig.34 から、電池を 2 並列とした場合、少なくとも 3000 日 (8.2 年) は送信時電池電圧が終止電圧を上回り、

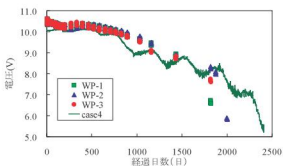


Fig.33 A ダム送信時の電池電圧の変化
Time histories of the battery voltage measured
on the data sending condition in A dam

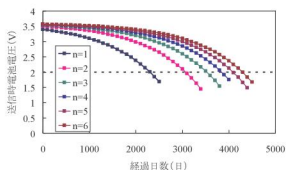


Fig.34 電池並列数と経過日数に伴う送信時電池電圧の変化
Changes of the battery voltage estimated by equation (4) and (5)

正常に動作するものと推定される。同様に、耐用年数 10 年を満足するためには 4 並列以上の電池並列数が必要であることがわかる。なお、ここで得られた結果は、テストモデル相当のワイヤレス間隙水圧計にのみ適用可能であり、それ以外の基板を有するものについては別途検証が必要である。

上記の検証結果から、電池内部抵抗によるデータ送信時の電圧降下の影響を、電池の並列化により緩和し、ワイヤレス間隙水圧計の長期性能が向上することが示された。しかしながら、電池を並列化すると、未消費のままの電池容量が増大するため、結果的に電池容量の無駄が多くなり経済性が悪くなる。今後の課題として、効率的な電池運用が可能な基板および電源システムの開発が重要となる。

V 結 言

平成 13 ～ 15 年度の官民連携新技術研究開発事業により開発したワイヤレス間隙水圧計のテストモデルに関して、実ダム設置後 5 年半にわたり計測された結果から、従来のケーブル式間隙水圧計と同等な計測が可能ことが明らかとなった。その結果、施工時の利便性と併せ、ワイヤレス間隙水圧計の有効性が示された。しかしながら、実ダム設置後、想定動作期間 10 年を下回る 5 年半で通信途絶状態となった。その原因は、ワイヤレス間隙水圧計内部に搭載されたリチウム電池の内部抵抗が経時的に増大し、大きな電流が必要となるデータ送信時に電池が電圧降下を起こし、正常に動作しなくなったためであることが明らかとなった。開発時には消費される電池容量については検証を行い、計測頻度：1 回/日、通信頻度：1 回/週、の使用条件で、10 年以上の計測が可能と想定した。しかしながら、電池内部抵抗の経時的な増

加については、検証を実施しなかった。ワイヤレス間隙水圧計により長期計測を実施する際は、今回提案を行った評価手法により、電池の内部抵抗の状態を評価することが重要である。また、ワイヤレス間隙水圧計の長期性能の検証には実時間規模での検証が不可欠である。

今回明らかにしたワイヤレス間隙水圧計の長期計測化への対応については、更なる研究開発による改良が必要となる。現在稼働しているワイヤレス間隙水圧計は、テストモデルと比べ、電池量、回路基板ともに改良されており、電池内部抵抗による電圧降下の影響が緩和されていると考えられる。このため、これら計器の挙動について、継続的にデータの検証を行い、その長期計測性能を評価していくことが重要である。

末筆になりましたが、本研究に当たり、データの提供等ご尽力いただきました関係各機関の皆様へ謝意を表します。

参考文献

- 1) 林田洋一・向後雄二・浅野 勇・増川 晋・田頭秀和 (2008)：低周波電磁波を用いたワイヤレス計測システム、農業農村工学会誌 第 76 巻 第 9 号 13-16
- 2) 浅野 勇・林田洋一・田頭秀和・増川 晋 (2009)：ワイヤレス埋設計器の現状について、平成 21 年度ダム工学会研究発表会・講演会 講演集 1-4.
- 3) 財団法人日本ダム協会 (2009)：フィルダムの施工、587-589、財団法人日本ダム協会
- 4) 向後雄二・浅野 勇・林田洋一・遠目塚良一 (2006)：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、ダム工学, Vol.16, No.3, 165-176

Long Term Performance of Wireless Pore Water Pressure Transducers

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

Summary

We have developed wireless transducers to measure pore water pressure in the fill dams. We call them “the Wireless Pore Water Pressure Transducers”. This transducer has no wire cables for applying electrical energy and sending measured data. For these features, it is easy to set up in fill materials of dam because we don't have to dig and bury long cable trenches during constructions. To examine performance of wireless transducers, we have measured pore water pressures by them and compared the data with that measured by ordinary pore water pressure transducers with cable set up near them in two rock fill dams since 2004. Then, we clarify that wireless transducers can measure pore water pressure correctly and steadily as well as ordinary pore water pressure transducers with cable.

However, after five and half years, the wireless transducers set up in two rock-fill dams became out of order and don't send measured data. We supposed that the wireless transducer would work well for more than ten years because we examined electrical capacities consumed by its working and compared them with that of the built-in batteries. Then we examine a reason why the wireless transducers become out of order. From a result of electrical capacity test of batteries that have been performed since 2002, voltages of battery on data sending conditions gradually become lower and reach the final voltage but electrical capacities of batteries remain fully. This phenomenon is observed in the data measured by the wireless transducers set up in one rock fill dam.

In the results of study, we can clarify that increase of internal resistances of battery cause voltage drops on data sending conditions and in order to prolong lives of wireless transducers we have to reduce influences of internal resistance of battery. Then we propose a method to reduce voltage drops on data sending conditions caused by internal resistances of batteries.

Keywords: Wireless transducer, Fill dams, Long term performance