

# 地中無線通信技術による建造物の計測と維持管理計測への適用

坂田電機株式会社 正会員 ○須賀原慶久  
坂田電機株式会社 正会員 樋口 佳意  
坂田電機株式会社 正会員 才田 誠  
坂田電機株式会社 正会員 石坂 周平  
坂田電機株式会社 川嶋 実

## 1. はじめに

現場計測技術は、情報化施工や災害の検知・予警報などとして利用されてきており、社会資本整備や国土防災において貢献してきた。しかしながら、その一方で、現場計測で使用されるセンサの多くがケーブルを必要としており、ケーブルに起因する問題が存在していることも事実である。このようなことから、筆者らは、これまで困難とされてきた地中や水中でも無線データ通信が可能な地中無線通信技術を開発し<sup>1)</sup>、種々のケーブルレスセンサとして応用するとともに、実用化後 10 年の間に様々な分野で実績を積んできた。

一方、厳しい財政状況の中、これまで整備されてきた多くの社会資本ストックが更新時期を迎えるとともに、既設建造物の維持管理も必至となってきたり、現場計測技術も構造物と同様に総合コスト縮減・合理化・長寿命化が求められている。このようなニーズに対し、地中におけるデータ伝送の無線化は有効な技術と考えられる。

データ通信の媒体として自然界では海水、淡水、地盤があり、地盤中には鉄筋コンクリート構造物や空洞など種々の建造物がある。本稿では、地中無線通信技術の現状と種々の構造物における事例を紹介するとともに、地中無線技術の適用範囲や通信距離など、維持管理時代における有効性や課題について述べる。

## 2. 地中無線通信技術の概要

地中無線通信技術は、土中、岩盤中、水中、空气中でデジタル無線伝送が可能な通信技術である。空中で使用される一般的な無線通信手段に用いられる高周波電磁波(電波)は、地中や水中における減衰が激しく実用性が無い。本技術は、可聴音と同程度の低い周波数帯域の電磁波(低周波電磁波)を使用することで、地上無線に用いられる高周波電磁波に比べて空中での減衰は大きいものの、地中や水中など導電率の高い媒質中でも通信手段として用いることが出来る。図 1 に、各媒質中において実際に通信した際の距離に対する受信信号レベルを 10m 地点で正規化した伝送特性を示す。図 1 より、地表(空气中)もしくは地中では伝送特性に大きな差が見られず、減衰率は概ね距離の 3 乗に反比例している。また、導電率の高い海中においては、地中より大きく減衰しており、通信可能な距離が短くなっていることが分かる。

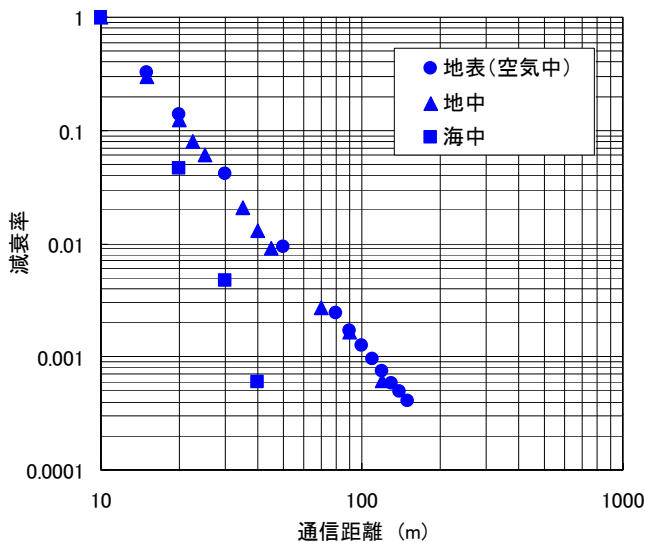


図 1 各媒質中における通信距離と減衰率の関係 (1200Hz 送信器の場合)

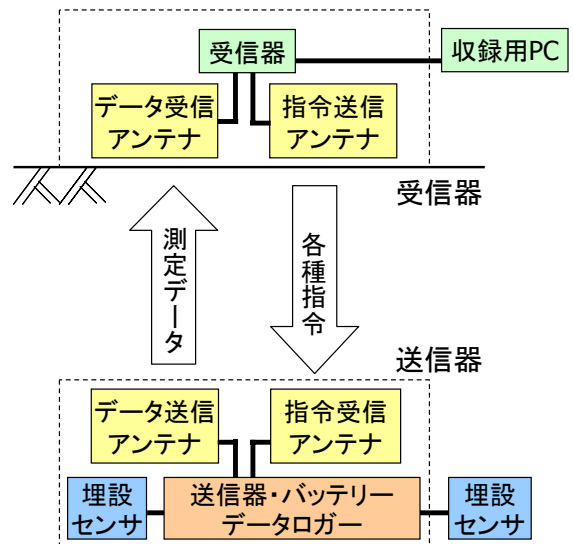


図 2 通信システムの構成例

本技術による通信システムの構成例を図 2 に示す。通信システムは、地中もしくは水中に埋設される送信器と、地上に設置される受信器から構成される。送信器は、測定データを送るデータ送信アンテナ、受信器からの指令を受け取る指令受信アンテナ、データロガー、バッテリーおよびセンサから構成され、センサは送信器内部に内蔵される場合と、周辺に設置される場合がある。受信器は、データ受信アンテナ、指令送信アンテナ、受信器本体、収録用 PC から構成され、可搬型受信器の場合は、バッテリーが搭載される。地中に埋設される送信器はケーブルレスで運用されるため、通常外部から電源を供給することが出来ない。よって、内蔵バッテリーで運用する必要があることから、計測目的に合わせたバッテリーの容量を選択する必要がある。

### 3. 海上埋立構造物の計測

#### 3.1. 従来の計測方法の課題

海中の埋立工事等では、盛土荷重の増加に伴う海底地盤の沈下や地中の水平変位を計測する必要がある。また、供用後の施設管理のために沈下を計測することは重要である。従来は、海底のセンサから地上までケーブルにより接続して計測を行っていたが、沈下に伴うケーブルの断線やケーブルルート確保が問題であった。また、沈下計測の場合、沈下板と鋼管を用いた鋼製沈下板による観測が一般に行われているが、沈下板近傍だけは周辺よりも慎重な盛土作業が求められる。また、埋立が進み鋼管が海上に突出するまでの期間は海中での計測作業が必要になる。

本項では、地中無線通信技術を利用し、海底の挙動を計測した事例を紹介し、効果と課題について述べる。

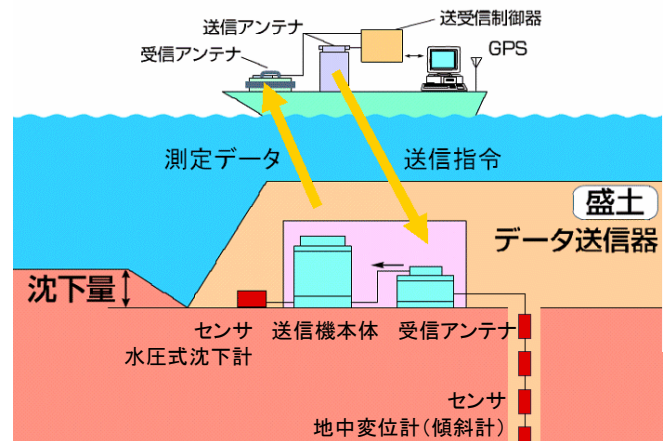


図 3 地中無線通信技術による海底計測システム

#### 3.2. 地中無線通信技術による計測

地中無線通信技術を用いた海底計測システムの概略を図 3 に示す。沈下を計測する場合には水圧式沈下計を接続しており<sup>2)</sup>、地中水平変位を計測する場合には複数の傾斜計を接続している。計測データは、データロガーを内蔵した送信器から無線で発信され、海上の計測作業船で受信して回収される。海底の送信器は内蔵されたバッテリーで動作し、運用可能期間はおよそ 10 年程度である。海底に設置する送信器を図 4 に示す。

地中無線通信で使われる低周波電磁波は、図 1 のように通信媒体（海水中、地中）によって減衰率が変化する。海上空港島のような埋立による構造物の場合、埋立の進行に伴い通信媒体が海水から地盤に変化し、通信距離が長くなる方向に媒体が変化する<sup>3)</sup>。つまり、沈下が大きくなっても、通信媒体が海水より通信効率の高い地盤に置き換わることから、地上に盛土や構造物が構築されても十分通信できることを意味している。また、主に沈下によるケーブル断線が招く計測不能のリスクが軽減され、より安定した計測が長期間可能となる。このようなことから、地中無線通信技術を用いた海底計測は、埋立工事から地上構造物の供用期間まで一貫して連続的に計測することが可能であり、工事からその後の維持管理まで貢献できる技術と言える。

今後は、より供用期間中の計測期間を延ばすために、システムの運用可能期間の更なる延長が望まれる。また、この技術は沈下や地中水平変位の計測に限らず応用可能なため、これからの港湾構造物等で利用されていくことが期待される。



図 4 海底に設置する送信器

### 4. ダム構造物の計測

#### 4.1. 従来の計測方法の課題

フィルダムのような盛土構造物において、ダム堤体内などの盛土内には間隙水圧計や土圧計、沈下計といったセンサが埋設される。これらのセンサは、センサから伸びたケーブルを監査廊等に配置してあるデータロガーや測定システムに接続するため、ダム軸方向に掘削したトレンチ内にケーブルを配線し、そのトレンチを埋め戻すという方法が一般的である。このため、ケーブルルートが水みちになったり、転圧不足となりやすいなど、構造物の品質から見て弱点になる可能性を有している。さらに、規模が大きくなると、ケーブルの費用に加え、計器設置・ケーブル配線のための土工量の増加、配線中の盛立工事中断などの施工性低下など、施工コストへの影響も大きくなる。また、ケー

ブルは施工中の断線や絶縁低下といった計測不能状態の原因ともなる。ロックフィルダムに設置されたケーブル付間隙水圧計の生存率は、盛立完了後7年経過した時点で50%程度に低下するという報告もある<sup>4)</sup>。このようなことから、本項では地中無線通信技術を応用して開発されたワイヤレス間隙水圧計を用いたロックフィルダムでの事例を紹介し、ワイヤレスセンサを導入した場合の効果、維持管理への適用性と課題について述べる。

#### 4.2 地中無線通信技術による計測

図5にワイヤレス間隙水圧計の概略構造を示す。ワイヤレス間隙水圧計<sup>5)</sup>は、アンテナ、データロガー、間隙水圧計、バッテリーで構成されている。データロガーには、複数の測定スケジュール（測定頻度）を登録することができ、地上側の受信器からの指令によって任意に設定の変更が可能である。このため、ダムの安全管理において経過年数で区分されているⅠ～Ⅲ期の時期に応じて測定頻度の変更が可能となり、センサの運用可能期間をダムの安全管理に必要な10年以上とすることができる。また、通信距離は概ね100m程度である。

計測機器からケーブルがなくなることにより、大きく分けて3つのメリットがある。第1に計測対象である構造物自体への影響を減らすことができる。これは、ケーブルルートが原因の水みちの形成が無く、転圧不足といった弱部の形成の原因を作らない。第2に計測自体の安全性の向上が見込まれることである。施工中のケーブル断線や、誘導雷によるセンサの故障、長期運用に伴うケーブル絶縁性の低下といった、ケーブルに起因する計測不能状態を引き起こす可能性が無い。第3に、施工面から見た場合、短時間で設置可能であることに加え、ケーブル配線のためのトレンチ掘削や埋戻しが不要であるため、材料コスト・時間コスト縮減にも大きく貢献している。図6にフィルダムにおけるケーブルレス計測システムの概要を示す。

最近では、図7に示すようなボーリング孔内に設置するタイプも実用化されており、維持管理を目的とした既設の土構造物への設置等、ワイヤレス間隙水圧計が有効に利用できる範囲は広がっている。なお、これらのワイヤレス間隙水圧計は、このようなケーブルレス化による計器の延命、総合コスト縮減により、これからの土構造物の維持管理に貢献できるものと考えられる。課題は、機器のサイズと通信距離である。通信距離を長くすると機器の大きさが大きくなる。今後は機器のサイズを小さくしながらも通信距離を向上させることが望まれる。



図5 ワイヤレス間隙水圧計

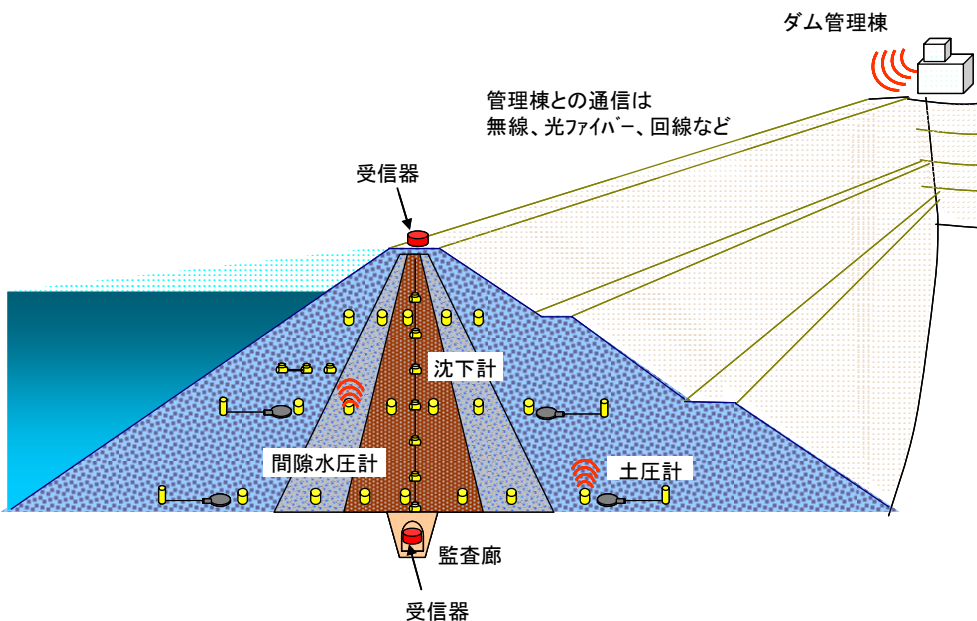


図6 フィルダムにおけるケーブルレス計測システム

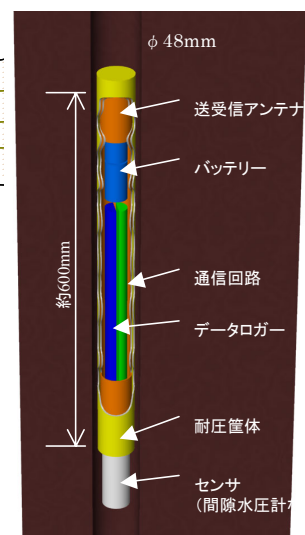


図7 孔内用送信機

## 5. 河川構造物の計測

### 5.1. 従来の計測方法の課題

近年、梅雨期の集中豪雨や度重なる台風の上陸で全国各地において都市部の浸水や土砂災害が発生した。その中でも、平成16年7月に発生した新潟、福島豪雨災害では河川堤防が決壊し、甚大な被害を発生させた。河川堤防の多くは長い治水の歴史を経て造成されたものであるため、材料や施工方法が場所によって異なる上に堤体の強度も不均一であり、またそれらの情報も不明確である。このようなことから、堤防の質的強化や適切な維持管理が緊急の課題となっており、そのための「河川堤防モニタリング技術ガイドライン」<sup>9)</sup>等も整備されてきている。

一般に堤防破壊の要因は、河川の流水による侵食、堤体内や基礎地盤への河川水の浸透、堤防の越水が挙げられる。このうち、侵食については、従来から土砂が流出すると電波を発信する侵食センサが用いられてきたが、センサが水面に浮上しないと検知されないという課題があった。一方、堤体や基礎地盤においては浸潤線の変化を水位計や間隙水圧計でモニタリングされているが、ケーブルが水みちになる可能性が懸念されていた。

また、洪水による土砂流出、河床変動など土砂の移動実態調査では、礫にマーキングしたトレーサーを目視で実施するケースが多いが、河床変動の大きな河川ではトレーサーが土砂に埋没するなどトレーサーの追跡も困難であった。

このような侵食、浸潤線変化、トレーサーの課題を克服するため、地中無線通信技術を用いた計測機器が開発されており、河川維持管理への適用性と課題について述べる。

### 5.2. 地中無線通信技術による計測

図8に、地中無線通信技術を用いた侵食計および4項で上げた孔内用送信器に水圧式水位計を組み合わせた河川堤防モニタリングシステムの概要を示す。地中無線通信技術を用いた侵食計は堤防の高水敷に埋設され、洪水時に高水敷が侵食されるとセンサが流出し、同時に信号をリアルタイムに発信する。堤防内水位はケーブルレス水位計で測定され、侵食計と同じ受信機でデータを収録する。地中無線通信技術を用いた河川堤防モニタリングシステムにより、構造物に与えるダメージをより少なくし、河床の変化や浸潤線の変化をリアルタイムに把握することが可能になり、河川堤防の維持管理に貢献できると考えられる。

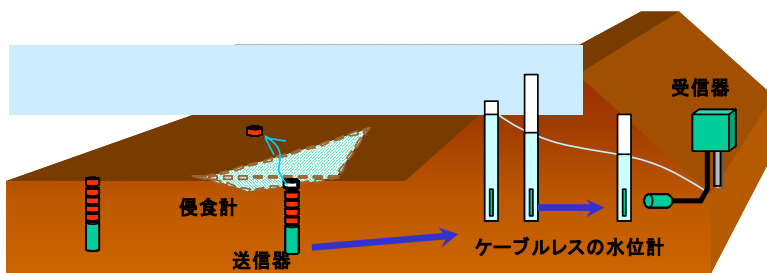


図8 河川堤防モニタリングシステム

土砂の移動実態調査用のトレーサーに地中無線通信技術の技術を応用した例を図9に示す。小型の低周波電磁波発信器を現地礫に埋め込み、この礫（トレーサー）を河川上流に設置して、洪水によって移動した礫（トレーサー）の位置を追跡するものである<sup>9)</sup>。図10に発信器を示す。特長は、トレーサーが水中や堆積土砂に埋没しても探知が可能となったことである。発信器は個々に異なる周波数の低周波電磁波を発信するため、周波数によってIDを識別することができる。また、トレーサーが転倒することによって低周波電磁波の発信を始め、その後約1ヶ月間発信し続ける。探知機が発信器の10m以内であれば探知可能であり、これまでの調査では確認できなかった堆積土砂中や水中での流下位置の確認ができるようになった。この計測手法を用いることで、今後の土砂管理手法、数値解析手法の精度向上を図ることができ、今後の河川の維持管理において重要な土砂移動のメカニズムをより正確に把握できると考えられる。

しかしながら、緊縮財政の中、これらの堤防モニタリングシステムやトレーサーを流域全体に配置するには経済的に困難なため、物理探査などによる一斉点検や光ファイバセンサなどによる広域的なモニタリングで絞られた箇所随時導入されていくことが期待される。

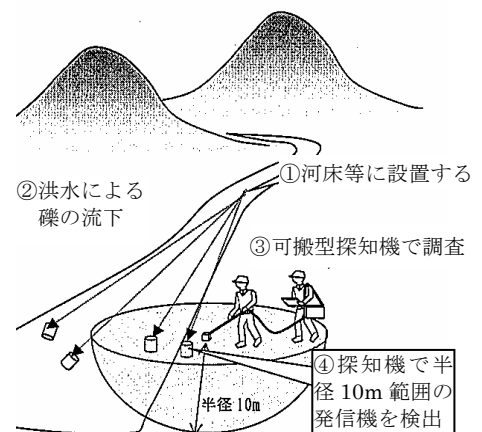


図9 土砂移動モニタリングシステム

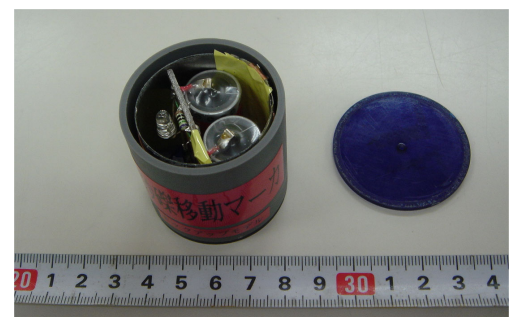


図10 トレーサー（発信器）

## 6. 地下構造物の計測

### 6.1. 従来の計測方法の課題

地下構造物には、下水道、鉄道、道路、共同溝などのトンネル構造物、廃棄物の地層処分施設などがあり、施工時における安全管理や設計へのフィードバック、近接施工時の保全対象としての安全管理、供用期間の遮水性能や耐力の確認として種々のモニタリングが行われている。一般に、これらのモニタリングには、部材の応力やひずみを計測する方法、構造物の沈下や変形などの変状を計測する方法があり、計測実績は相当数になる。しかしながら、鉄筋応力など部材内部を計測する場合にはセンサケーブルの引出し口が応力集中などで弱部になりやすく、部材外部に取り付けるセンサにおいてもケーブルの存在がボトルネックになっており、絶縁低下による故障や施工効率の低下などの課題がある。計測位置から監視場所までのケーブルのルートも問題となる場合がある。

また、遮水性能を要求される構造物においては、ケーブルが遮水部を横断することによって、遮水機能そのものを損なう恐れがある。地層処分における人口バリアでは、ケーブルの存在が水みちになり、バリアを乱すような場所でのケーブルレス化は重要である。これまで、地中無線通信技術の適用が検討されており<sup>10)</sup>、花崗岩中で100m以上の通信を行った実績もある<sup>11)</sup>。このようなことから、地中無線通信技術を応用したシールドセグメントの計測システムを紹介するとともに、維持管理への適用性と課題について述べる。

### 6.2. 地中無線通信技術による計測

セグメントの施工時の挙動を把握するシステムの概略を図11に示す。特長は、セグメント製作時にセンサとデータロガー内蔵の地中無線通信データ送信装置をセグメントに埋め込み、セグメント表面はケーブルレスで連続計測することが可能となっている<sup>12)</sup>。これにより、現場のセンサとデータロガーを結線する作業は不要となり、セグメント運搬から組立、さらにはシールド推進中まで、連続して計測することが可能となった。また、計測データの収録は、地上もしくは近接する別の地下構造物からも可能である。これは、下水等の人が内部に入るのが難しい地下構造物であっても、無線でデータ回収が可能であることを示している。

このようにケーブルレスで計測することにより、構造物へのダメージを最小限に抑えることが可能になるばかりでなく、施工から供用後まで一貫した計測することで維持管理に必要な履歴を知ることが可能となる。

また、このような計測技術は、シールドのセグメントに限らずコンクリート構造物全般で有効であり、効率的かつ効果的な構造物の維持管理に貢献するものと考えられる。しかしながら、本計測手法は新設時に導入する場合に有効な手段であり、既存ストックの更新時期が迫っている中、既設構造物へ適用する設置方法等の検討が課題である。

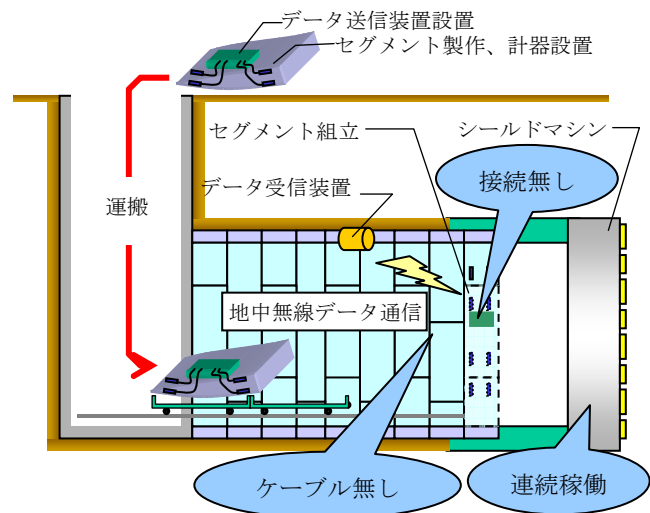


図11 セグメント挙動計測のシステム

## 7. おわりに

地中無線通信技術を利用した計測機器のケーブルレス化は、従来のケーブル等を用いた計測方法と比べて以下のような利点がある。

- ① 構造物へのダメージが少なくできる。
- ② ケーブルに起因する計測機器の故障・欠測を回避することが可能。
- ③ 計器設置時間の短縮による総合コスト縮減

また、維持管理計測としてみた場合、以下のような利点がある。

- ① 施工から供用まで一貫した連続計測が可能となるため、合理的な維持管理に必要な種々の挙動等の履歴を知ることができる。
- ② 計測対象内部に立ち入る必要が無く、地上や周辺の地下構造物からデータを収録することが出来る。

一方、以下のような課題が考えられる。

- ① 埋設される送信器が内蔵の電池で動作することから、運用可能期間が有限となってしまう。種々の計測目的に合わせて必要な運用期間が得られるように、長寿命化を図る。
- ② 通信可能距離の延長

### ③ 機器の小型化

本技術は、これからの維持管理時代に貢献できる技術であると考えられる。今回紹介した事例は、ほんの一部であり、より多くの分野での利用が期待される。

#### 参考文献

- 1) 遠目塚良一、坂田文男：無線による地中通信システムの開発、最近の地盤計測技術に関するシンポジウム、pp.21-26
- 2) 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、土木学会海洋開発論文集、第 19 巻、pp.171-176
- 3) 藤井敦、鈴木慎也、森川嘉之、中山淳：磁気伝送水圧式沈下計による大規模埋立地の沈下計測、地盤の環境・計測技術に関するシンポジウム 2005、pp.17-24
- 4) 松本徳久、尾芦直人、池田隆：フィルダムの挙動計測に関する調査、建設省土木研究所資 No.2070
- 5) 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、pp.1269-1270
- 6) 高橋章、向後雄二、遠藤真一、角江俊昭：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
- 7) 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、ダム工学会第 14 回研究発表会講演集、pp.31-33
- 8) 国土交通省河川局治水課：河川堤防モニタリング技術ガイドライン（案）、国土交通省ホームページ
- 9) 西川友幸、高橋正行、細野貴司、江島敬三、谷 弘行、伊藤力生、才田 誠：安倍川砂防における低周波を用いた土砂移動実験、平成 17 年度砂防学会研究発表会概要集、pp.136-137
- 10) 高尾肇、杉山和稔、高村尚、奥津一夫、中山淳：高レベル放射性廃棄物の地層処分におけるモニタリングに係わる計測・伝送技術の検討、土木学会第 57 回年次学術講演会講演概要集、pp.397-398
- 11) 吉村公孝、杉山和稔、奥津一夫、新保弘、高村尚、須賀原慶久、後藤知英：地中無線通信技術の放射性廃棄物地層処分モニタリングへの適用性検討、物理探査学会第 109 回学術講演会講演論文集、pp.202-205
- 12) 佐藤幸二、新井孝弘、才田誠、金崎伸夫：セグメントの施工時挙動計測に適応する連続計測システムの計画と実施について、地下空間開発における調査・計測に関するシンポジウム、pp.21-26