報　告

「地中無線通信システム」を用いた地盤の無線調査技術

Ground Investigation by Using "Underground Wireless Communication System"

樋口佳意（ひぐち　けい）
坂田電機㈱計測工事部　課長

遠目塚　良一（とおめつか　りょういち）
坂田電機㈱技術部　課長

1. はじめに

現場計測技術は，情報化施工や土砂災害等の予警報として利用されてきており，社会資本整備や国土保全に大きく貢献してきた。しかしながら，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多数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通信可能な地中無線通信技術を開発し[1]，ワイヤレスセンサとして実用化するとともに，実用化後十数年の間に様々な分野で実績を積んできた。

一方で，これまでに整備されてきた多くの社会資本ストックは，厳しい財政状況の中で更新時期を迎えるとともに，維持管理も必至となってきており，総合コストの縮減・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，地中無線通信技術はICTの一つとして社会資本ストックの維持管理にも貢献できる技術として期待できる。

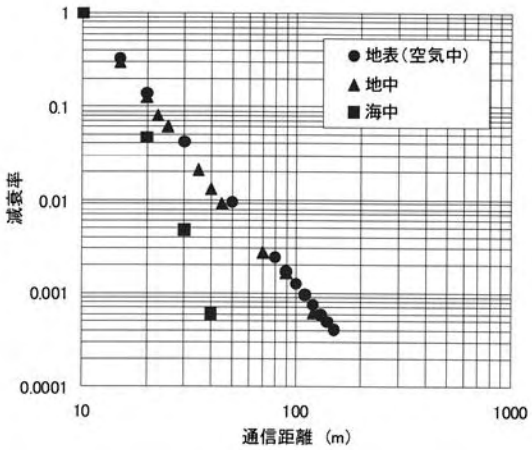
本稿では，地中無線通信技術について概説するとともに，既往の計測技術の課題に対する地中無線通信システムの適用事例を紹介する。

2. 地中無線通信システムの概要

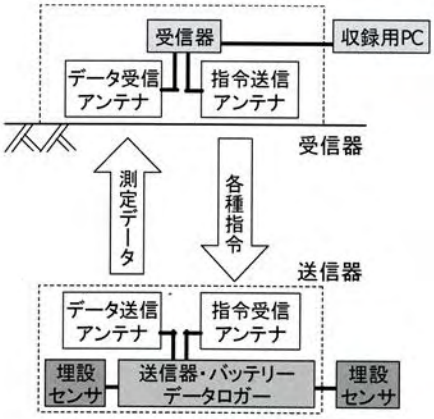
地中無線通信技術は，土中，岩盤中，水中，空気中でデジタル無線伝送が可能な通信技術である。空中で使用される一般的な無線通信手段に用いられる電波（高周波電磁波）は，地中や水中における減衰が激しく実用性が無い。しかし，可聴音と同程度の低い周波数帯域の電磁波（低周波電磁波）を使用した地中無線通信は，高周波電磁波に比べて空中での減衰は大きいものの，地中や水中などの導電率の高い媒質中でも通信手段として用いることができる。

地中無線通信の特性を示す一例として，通信距離に対する電磁波強度の減衰率について実測した結果を図―1に示す。地中における減衰率は地表（空気中）の場合とほとんど差がなく，距離の3乗に反比例して減衰する。これに対し，海中では地中より大きく減衰し，通信可能な距離が短くなっていることがわかる。このような特性を基に必要なアンテナ仕様や電池容量をあらかじめ検討することができる。

地中無線通信システムの構成例を図―2に示す。本システムは，地中もしくは水中に埋設される送信器と，地上あるいは海上に設置される受信器とから構成される。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できない。このため，内蔵バッテリーで運用する必要があり，計測目的に合わせたバッテリー容量を選択する必要がある。



図―1　地中無線通信の減衰特性



図―2　地中無線通信システムの構成例

3. 埋立て構造物での事例

3.1 従来の計測方法の課題

埋立て工事では，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も必要となる。このような埋立て構造物の計測は，従来，海底のセンサから地上までケーブルにより接続して行っていたが，沈下に伴うケーブルの断線やケーブルルートの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ていた。また，埋立て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であった。

3.2　地中無線通信システムの適用例

埋立て工事で適用した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[2]，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地中無線で送信され，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，運用可能期間はおおむね10年程度である。

地中無線通信で使われる低周波電磁波は，図―1に示したように通信媒体（海水中，地中）によって減衰率が変化する。海中の埋立て工事の場合，埋立ての進捗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[3]。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計測は，埋立て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。また，この計測技術は沈下や側方流動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。

4.　ダム構造物での事例

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では，盛土内や基礎地盤に間隙水圧計，土圧計，沈下計といったセンサが埋設される。フィルダムの場合，これらのセンサから伸びたケーブルは，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される。このため，ケーブルルートが水みちになったり，トレンチ部が転圧不足となるなど，構造物の品質から見て弱部になる可能性を有していた。さらに，構造物の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，ケーブルの存在は施工中の断線事故や絶縁低下といった計測不能状態の原因にもなり，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[4]。

4.2　地中無線通信システムの適用例

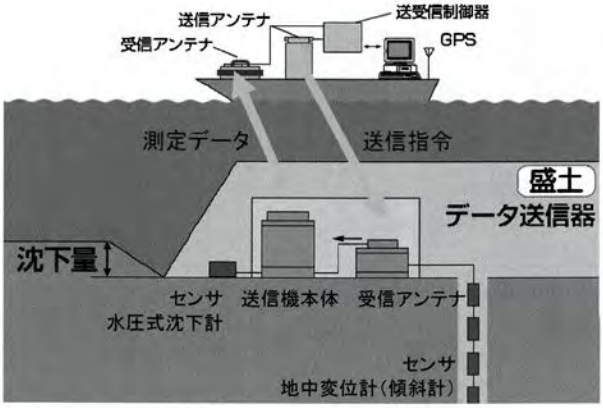
地中無線通信技術を応用したワイヤレス間隙水圧計の概略構造を図―4に示す。ワイヤレス間隙水圧計[5]は，アンテナ，データロガー，間隙水圧計，バッテリーで構成されている。データロガーには，複数の測定スケジュール（測定頻度）を登録することができ，地上側の受信器からの指令によって任意にスケジュールの切替が可能である。このため，ダムの安全管理において経過年数で区分されているⅠ～Ⅲ期の時期に応じて測定頻度の変更が可能となり，センサの運用可能期間をダムの安全管理で必要な10年以上とすることができる。また，通信距離は最長100 m程度である。

このようなセンサのワイヤレス化により，上述した課題が解消されると期待でき，現在多くのダムで採用されている[6),7)]。また，最近ではボーリング孔内に設置するタイプも実用化されており，土圧計や沈下計にも応用されている。

5.　河川構造物での事例

5.1　従来の計測方法の課題

河川構造物の一つである堤防の破壊は，河川水による侵食，堤体内や基礎地盤への河川水の浸透，堤防の越水が主な原因である。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



図―3　埋立て工事での地中無線通信システム

図―4　ワイヤレス間隙水圧計

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や河床変動などの土砂移動実態調査では，礫にマーキングしたトレーサーを目視で探す方法で実施されてきた。しかし，河床変動の大きな河川ではトレーサーが土砂に埋没し，トレーサーの追跡が不可能となる課題があった。

5.2　地中無線通信システムの適用例

地中無線通信技術を利用した河川堤防モニタリングシステムの概要を図―5[8]に示す。侵食センサは，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信号を発信しながら流出する。堤防内水位はワイヤレス水位計で測定され，侵食計と同じ受信器でデータ信号が受信される。このような河川堤防モニタリングは「河川堤防モニタリング技術ガイドライン」[9]などでも緊急課題とされており，地中無線通信システムの貢献が期待される分野である。

地中無線通信技術を土砂移動実態調査のトレーサーに応用した例[10]を図―6に示す。トレーサーに使用する礫は調査地の河川で採取し，IDを持った地中無線通信の発信器を埋め込んだ後，調査地に戻して洪水等の出水を待つ。洪水によってトレーサーが移動すると無線信号が送信され始め，その後約1ヶ月間発信し続ける。この間に地上からトレーサーの位置を探査することで，土砂の移動距離が確認できる。このような方法により，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。

6.　地下構造物での事例

6.1　従来の計測方法の課題

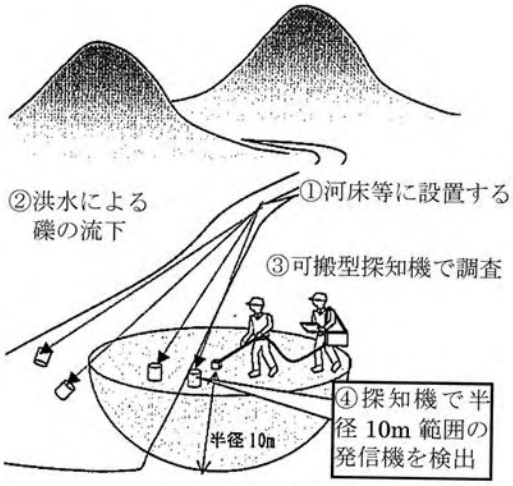
地下構造物には下水道，鉄道，道路，共同溝などのトンネル構造物，廃棄物の地層処分施設などがあり，施工時における安全管理や設計へのフィードバック，近接施工時の保全対象としての安全管理，供用期間の遮水性能や耐力の確認として種々のモニタリングが行われている。一般に，これらのモニタリングには，部材の応力やひずみを計測する方法，構造物の沈下や変形などの変状を計測する方法があり，計測実績は相当数になる。しかしながら，鉄筋応力など部材内部を計測する場合にはセンサケーブルの引出し口が応力集中などで弱部になりやすく，部材外部に取り付けるセンサにおいてもケーブルの存在がボトルネックになっており，センサの故障や施工効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

6.2　地中無線通信システムの適用例

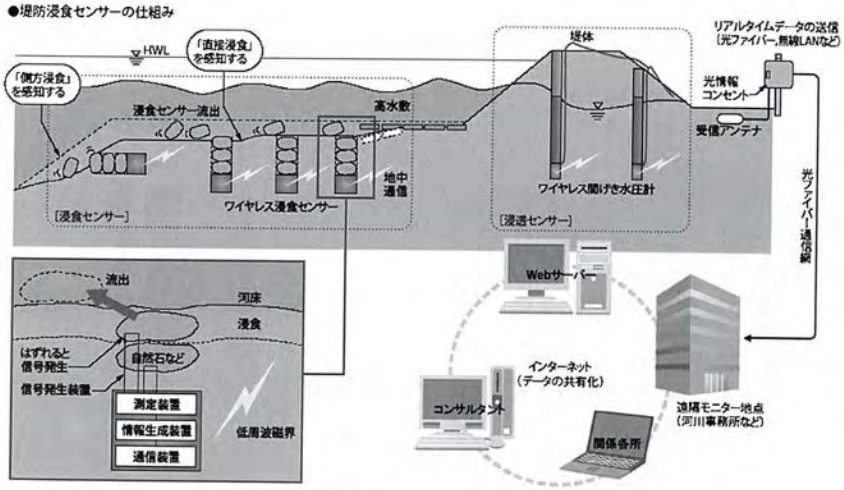
(1)　シールドトンネルの例

シールドトンネルでは，センサと地中無線通信システムをセグメントに埋め込むことによって，センサとデータロガーを現場で結線する作業は不要となり，セグメント運搬・組立から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[11]。また，計測データは地上や近接する別の地下構造物からも無線で収集可能であるため，人の立入りが難しい地下構造物であっても計測が可能となった。

高度成長期に整備された下水道などでは，合理的な補修や維持管理が求められており，セグメント計測に適用した地中無線通信システムは今後の調査計測技術として



図―6　土砂移動調査



図―5　河川堤防モニタリングシステム

有効な手法になると期待できる。

(2) 放射性廃棄物の地層処分の例

放射性廃棄物の地層処分のように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ことが最大の課題である。このため，放射性廃棄物の地層処分における人工バリアではワイヤ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[12]，花崗岩中で100 m 以上の通信を行った実績もある[13]。これから実用が期待される分野である。

(3) 開削工事の例

開削工事では，掘削に伴うリバウンドが問題となる場合がある。このようなリバウンド計測には従来から層別沈下計が利用されているが，掘削前に設置しておく必要があったため，センサケーブルが掘削時の障害となり，施工効率を低下させる原因となっていた。このような障害も地中無線通信システムで解消することが可能であり，建築分野では実用されてきている。

7. 砂防・地すべり分野での事例

7.1 従来の計測方法の課題

集中豪雨や地震などに伴う土石流，地すべり，崖崩れなどの土砂災害は，年平均で約1 000件以上発生しているにもかかわらず，災害発生前に避難勧告等が発令された事例は非常に少ない。その理由の一つに，土砂災害は突然発生し，**雨量情報だけでは土砂災害の切迫性を感じにくい**ということがある。このようなことから，斜面崩壊を無線で検知する観測手法が開発されてきたが，崩壊時に土砂に埋没して無線通信が不可能になったり，積雪時に通信不能になるなどの課題があった。

また，地すべり観測においては，すべり面が多層となる場合にセンサケーブルが断線されてしまうなどの課題があった。

7.2 地中無線通信システムの適用例

地中無線通信を利用した斜面崩壊検知センサは，所定の角度以上に傾くと，無線信号でIDを発信する。これを受信器で受信することにより，斜面崩壊の発生時間と発生位置の特定が可能となった[14]。また，埋設することが可能なため，動植物の接触などによる誤動作もほとんど生じることはない。

地すべり分野では，孔内傾斜計や地下水位計などに利用され[15]，すべり面が多層に存在する場合でも断線することなく観測可能なことが確認された。また，この他にも，ボーリングしながらすべり面を探査する調査やインバー線を必要としない伸縮計なども開発されている。

8. おわりに

地中無線通信技術を利用したセンサや計測事例を紹介してきた。ワイヤレスセンサは，データロガーと一体となっているため単体での価格は従来のセンサより割高になるが，センサのケーブルが不要になることのメリットは非常に大きく，構造物へのダメージや故障・欠測を回避するだけでなく，計器設置時間の大幅な時間短縮による総合コスト縮減を図ることも可能である。

一方，ワイヤレスセンサの欠点としては，従来型センサのようなケーブルを介した導通確認などのメンテナンスが行えないこと，駆動電源が有限となってしまうこと，通信距離が他の無線通信手段に比べて短いことが挙げられる。今後の課題としては，地中無線通信システムの超長寿命化や通信距離の延伸，中継通信の検討などが残されている。

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, 1999.
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, 2003.
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, 2005.
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料 No. 2070, 1984.
5) 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, 2003.
6) 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，地盤の環境・計測技術に関するシンポジウム発表論文集，pp. 61～64, 2004.
7) 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講演集，2005.
8) 日経 BP 社：日経コンストラクション（4/28号），pp. 58～59, 2006.
9) 国土交通省河川局：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.
10) 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, 2005.
11) 樋口佳意・坂根良平・高橋　晃・新井孝弘・桐谷祥治：ヒンジセグメントの施工時挙動計測―連続計測システムの概要と適用検討―，土木学会第61回年次学術講演会講演集，Ⅵ-080, 2006.
12) 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, 2002.
13) 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, 2003.
14) 樋口佳意・永江　祐・田村圭司・内田太郎・伊藤洋輔・秋山浩一：地中無線通信システムを活用した斜面崩壊検知センサの開発と現場への適用，第48回日本地すべり学会研究発表会講演集，pp. 120～121, 2009.
15) 大前勝稔・備前信之・樺元純一・松本宏彰・樋口佳意・永江　祐：観測機器の併用による地すべり観測の有効性について，第48回日本地すべり学会研究発表会講演集，pp. 130～131, 2009.

（原稿受理　2010.4.13）