

地すべり
/ Landslides

日本地すべり学会誌

Journal of
the Japan
Landslide
Society

Vol.55, No.5 (245)
September 2018



広告掲載誌



株式会社 廣業社
☎ 03-3571-0997



公益社団法人

日本地すべり学会

The Japan Landslide Society

複数のすべり面を持つ地すべり監視のためのワイヤレスセンサ

Wireless sensors for monitoring landslide with multiple slip surfaces

中里裕臣^{a)}*, 田頭秀和^{a)}, 永江 祐^{b)}, 遠目塚良一^{b)}, 中山健二^{c)}, 樺元淳一^{d)}

Hiroomi NAKAZATO, Hidekazu TAGASHIRA, Tasuku NAGAE, Ryoichi TOMETSUKA, Kenji NAKAYAMA and Junichi KABAMOTO

Abstract

In a large-scale landslide, two or more slip surfaces might often occur according to activity of second order landslides. For this case, it is difficult to observe the deeper slip surface for a long term by using a conventional wired sensor so that a shallower slip surface may break the cable or the observation borehole. For the solution of the above issue, we developed the wireless sensors that combined the radio equipment with the underground displacement sensor and the pore water pressure sensor and installed those sensors in the bore holes. In this paper, we show the observation data for five years or more, and clarify the site applicability and the effectiveness of these sensors.

Key words: wireless sensor, multiple slip surfaces, pore water pressure, underground displacement

和文要旨

大規模な地すべりでは2次すべりの活動により複数のすべり面が存在する場合があります。有線で電源供給や観測を行うセンサでは、浅層すべり面の活動により深層すべり面の監視を長期間行うことが困難である。このような問題の解決のため、筆者らは地中無線通信装置と地中変位センサ及び間隙水圧センサを組み合わせたワイヤレスセンサを開発し、ボーリング孔内に埋設した。本論文ではこれらのワイヤレスセンサの5年以上に亘る観測結果を示し、その現場適用性と有効性を明らかにする。

キーワード: ワイヤレスセンサ, 複数すべり面, 間隙水圧, 地中変位

1. はじめに

2009年融雪期に発生した山形県鶴岡市七五三掛地すべり防止区域(農村振興局所管1991年指定, 以下七五三掛区域とする)における地すべり災害では、5月半ばにはBブロック(図-1)で最大15cm/日を超える移動量を示した。これに対し、深さ約25~30mのすべり面周辺の被圧地下水を除くためのディープウェルを中心とする地下水排除工が実施され、同年7月にはBブロックにおける地すべり活動は沈静化した(寺田ほか, 2010)。

一方、七五三掛区域ではBブロックの東側のDブロック下部において2008年度の挿入型孔内傾斜計観測により深度51mと深度86mにすべり面が把握されていた。そして2009年度の調査によりDブロックでは5~10mm/月の継続的な地表移動量と深度100mを越える活動的すべり面の存在が新たに把握された(土屋・寺田, 2012)。その後、Dブロックでは2010年から2015年にかけて100mmを超える地表移動量が観測された(図-1)。このような複数の活動的なすべり面をもつ地すべりについては、地中センサの情報を信号・電源ケーブルで接続した地上装置で観測する従来技術では、より浅層のすべり面や深層すべり面自身の活動によりケーブルや観測孔の破断が生じる。このため、深層すべり面の長期的な変位状況や間隙水圧等を継続的に観測する技術開発が重要な課題となっている。



図-1 調査位置図およびDブロック水平変位ベクトル
Fig.1 Index map of the Shimekake landslide and horizontal displacement vectors in the D block

上記課題への対応を目的として、これまでフィルダム等を対象に開発されてきたワイヤレスセンサ技術(向後ほか, 2006)を応用し、すべり面位置、変位方向及び変位量を同時に観測可能で、浅層の地すべり活動による信号ケーブル破断の影響を受けないワイヤレス地中変位計を開発するとともに、複数のすべり面を観測対象とするワイヤレス間隙水圧計を用意して、七五三掛区域に埋設し、2010年1~2月より観測を開始した。本論文では、これらのワイヤレスセンサ観測システムについて紹介し、センサ設置以降の観測結果と現場適用性について検討する。

* 連絡著者 / corresponding author
a) 農研機構農村工学研究部門
Institute for Rural Engineering, NARO
〒305-8609 つくば市観音台2-1-6
2-1-6, Kannondai, Tsukuba, Ibaraki, Japan
b) 坂田電機株式会社
Sakatadenki Co., Ltd.
c) 川崎地質株式会社
Kawasaki Geological Engineering Co., Ltd.
d) 農林水産省
Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries

2. ワイヤレスセンサ

2.1 概要

ワイヤレスセンサは、フィルダム盛土内の埋設計器に付属するケーブルに起因する、①ケーブル敷設のためのトレンチが水みちとなる可能性がある、②ケーブル断線や誘導雷などによる故障の原因となる、③施工の障害になる、などの諸問題を解決するために開発された（向後ほか, 2006）。その基幹となる技術は、地中での減衰が少ない低周波電磁波を搬送波とするデジタル通信である。向後ほか(2006)によれば、外形 $\phi 125\text{mm} \times 205\text{mm}$ のFRP製筐体に通信アンテナ、間隙水圧計、送受信器及びデータロガー、リチウム電池を内蔵したワイヤレス間隙水圧計を開発し、8.5kHz, 5.4Wの送信器により土中距離70mでの通信が確認された。そして、林田ほか(2008)では間隙水圧・土圧併用型ワイヤレスセンサが紹介され、林田ほか(2010)は5年半に亘る実ダムでの運用事例を示すとともに、課題として長期運用に伴う電池の内部抵抗増加を指摘し、その対策として電池の並列化を提案した。

地すべり調査の分野においても、地中の変位及び間隙水圧の観測は重要であり、様々な観測法、センサが開発されてきた。しかし、複数のすべり面を持つ活動的な地すべりではセンサと地上の計測器をつなぐケーブル及び観測孔の破断により、より深部のすべり面に対する長期的な観測が困難であった。この問題に対し、農林水産省農村振興局農村政策部農村環境課・農林水産省中国四国農政局農村計画部資源課(2011)は、2008年11月から2010年3月にかけて $\phi 86\text{mm}$ ボーリング孔内に設置可能な小径のワイヤレスセンサにより、1孔で2深度の間隙水圧計と、1孔で4深度の埋設型傾斜センサを無線化し、活動的な深度5mのすべり面の観測を行った。そして、従来型の挿入型孔内傾斜計及び部分ストレーナ水位観測孔に設置した圧力式水位計との比較により、ワイヤレスセンサにより従来型計器と同等の観測結果が得られ、複数のすべり面を持つ地すべりでの有効性を示した。しかし、導入コストが高く埋設後の維持更新が不可能であることから、短期的な適用では調査コスト増となることが課題としてあげられた。

七五三掛区域では、D-1ブロック上部のBV20-1孔における2008年11月からの挿入型孔内傾斜計観測により深度51mと深度86mにすべり面が確認されたが、“51mすべり面”の活動により2009年3月にはそれ以深の観測が不能になった。さらにDブロックではその後も深度100mを超えるすべり面が確認された。このため、本研究では浅層すべりの影響を受けず、深部のすべり面の挙動を長期的に把握することを目的として、ワイヤレス地中変位計及びワイヤレス間隙水圧計を試作・埋設し、観測を行った。

ワイヤレス通信用アンテナはコイルの軸方向に指向性があり、コイル径が大きいほど送受信効率が上がる。フィルダムでは盛立と同時にセンサを設置するため、センサ

サイズの自由度が高いが、地すべりではボーリング孔内にセンサを設置するため、設置孔掘削コストとの兼ね合いで、地上方向に軸を持つコイルとそれを納めるセンサ容器の外径を抑える必要がある。今回の設計・試作では、掘削径86mm~116mmを想定してセンサ外径を決定し、観測期間は5年間以上を目標として電源設計を行った。観測方法は埋設センサに所定の観測頻度で蓄積されたデータを、電波法の規制を受けない8.5kHzの低周波電磁波により地上の送受信器からの指令通信により数ヶ月毎にダウンロードする半自動計測とした。さらに、観測頻度は地すべりの移動状況に応じて変更できるようにあらかじめ数パターンを用意し、埋設後の変更を可能にした。

2.2 ワイヤレス地中変位計

開発したワイヤレス地中変位計は、変位量を検知する埋設型のすべり面変位計（伸縮計）とすべり面位置及び変位方向を検知するためのパイプ歪み計を組み合わせ、これにデータ伝送用の地中通信システムを加えたものである（図-2）。1孔で複数の種類のデータを取得することには、相対的に調査コストを低減させる狙いがある。

パイプ歪み計は、変位の方向を検知するために、8方位に歪みゲージを配置した4軸型（図-2）で、1深度の歪み計の外形は $\phi 53.5\text{mm} \times 200\text{mm}$ で、歪み計と歪み計の間は所定の長さのVP40塩ビ管で接続する。2深度分8chのデータを収録するパイプ歪み計送信器は、外形 $\phi 76\text{mm} \times 1250\text{mm}$ で耐水圧は2MPaである。送信出力は15Wであり、内蔵電池は、3個を直列につないだ公称3.6V, 13.0Ahのリチウム電池を3並列とし（以下、単に並列とよぶ）、長期運用に伴う電池の内部抵抗増加対策（林田ほか, 2010）とした。

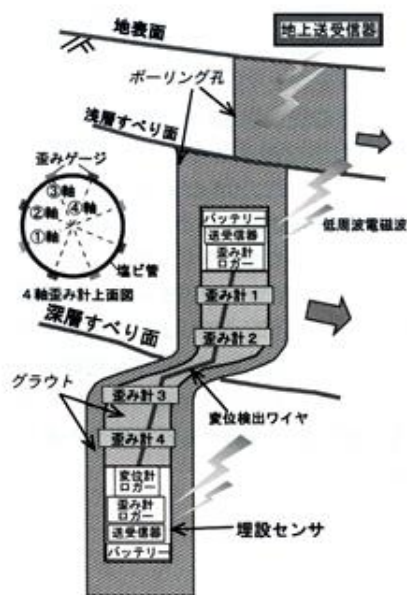


図-2 ワイヤレス地中変位計概念図

Fig. 2 Conceptual diagram of a wireless underground displacement sensor

すべり面変位計は、せん断変位によるワイヤの伸縮を撓曲抵抗で検知し、データの収録・送信を行うもので、測定範囲は0~1000mmである。すべり面変位計の外形は最大径 $\phi 67\text{mm} \times 1050\text{mm}$ 、容器耐水圧は2MPaで、送信出力は5Wとして、内蔵電池は2並列とした。

それぞれの送信機の記録容量は3600回（古いデータは上書き）で、観測頻度は2回/日, 1回/週, 1回/月、毎時を設定した。各観測頻度に対応する電池寿命はそれぞれ4.2年, 9.2年, 12.4年, 0.7年と試算されたため、観測期間を5年以上とするため、融雪期を含む12月~5月は2回/日, 6月~11月は1回/週とした。

設置に際しては、センサの動作確認を優先事項として、すべり面深度が比較的小さく設置の確実性が高いと想定されたB-局10地点（ボーリング深度37.0m）を選定した（図-1）。設置孔の地質は、深度3.0mまでが崩積土、深度21.0mまでが強風化粗粒玄武岩、深度26.7mまでが強風化泥岩、深度37.0mまでが凝灰角礫岩であり、近傍の調査観測資料および設置孔のコア観察から強風化泥岩下部の深度25.0m付近にすべり面が想定された。このため、深度22.0~27.0m間をすべり面変位計観測対象区間とし、この間に4深度のパイプ歪み計を配置した。パイプ歪み計用ロガー及び送信機は上部2深度と下部2深度分をワイヤレス地中変位計全体の上部と下部に分けて配置し、想定すべり面区間を歪みゲージのリード線が通過しない構造とした。すべり面変位計送信機は、基岩側の下部パイプ歪み計送信機の上側に配置し、変位検出ワイヤはパイプ歪み計の内側を通し、ワイヤ上端は上部パイプ歪み計送信機下側に固定する構造とした（図-3）。ワイヤレス地中変位計全体の長さは10.8mに達するため、各部は固定せずに搬入し、組み立てながら埋設することとした。

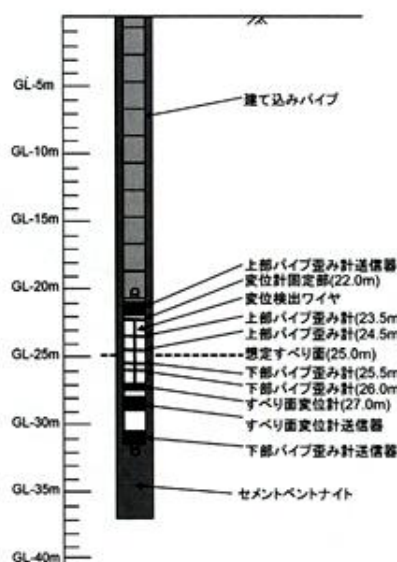


図-3 B-局10孔ワイヤレス地中変位計設置図

Fig. 3 Layout of the wireless underground displacement sensors in the B-Kyoku10 borehole

2.3 ワイヤレス間隙水圧計

ワイヤレス間隙水圧計設置孔(W-BV20-1孔、ボーリング深度92.0m)は、2層のすべり面が確認されたBV20-1孔の5m横とし、それぞれのすべり面の上下に間隙水圧計を配置し、最上部の有線センサ以外をワイヤレスセンサとした（図-4）。1孔で多深度にセンサを配置することには、ワイヤレス地中変位計と同様に調査コストを相対的に低減させる狙いがある。BV20-1では地表から深度51.4mまでが風化粗粒玄武岩、深度108.0mまでが泥岩であり、泥岩中には深度85.0~87.2mに風化凝灰岩、深度88.7~90.8mに礫岩が挟まれ、上位の“51mすべり面”は風化粗粒玄武岩と泥岩の境界に、下位の“86mすべり面”は風化凝灰岩層挟在部に相当する。

3深度のワイヤレスセンサの測定範囲は0~1.0MPaとし、外形は $\phi 76\text{mm} \times 2545\text{mm}$ 、容器の耐水圧は2MPaである。間隙水圧受圧部はセンサ上端もしくは下端から0.6mの位置にあり、その外側にはフィルターとして不織布を巻き、上下にナイスシール（応用計測サービス社製）を遮水材として取り付けた。送信出力は15Wで、内蔵電池は3並列とした。

それぞれの送信機の記録容量は3600回で、観測頻度と対応する試算電池寿命は毎時(3.8年), 1回/週(9.2年), 1回/月(12.4年)である。こちらも観測期間を5年以上とするため、観測頻度は12月~5月を毎時, 6月~11月を1回/週とした。

最上部の有線センサは、測定範囲0~0.7MPa（坂田電機製EPP-5807-5）とし、地上に設置したデータロガーにより通年毎時観測することとした。

ワイヤレス間隙水圧計の設置方法は、下部ワイヤレス

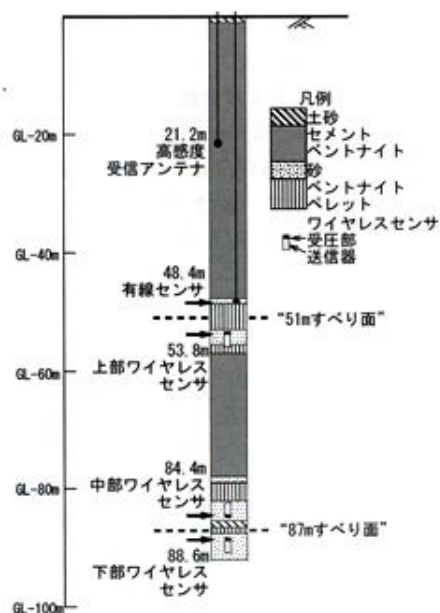


図-4 W-BV20-1孔ワイヤレス及び有線間隙水圧計設置図

Fig. 4 Layout of the wireless and wired pore water pressure sensors in the W-BV20-1 borehole

センサを除きベントナイトペレットにより下部遮水部を形成後, センサを設置し, ナイスシール養生後に所定深度まで砂充填し, その後ベントナイトペレットにより上部の遮水部を形成することを基本とした。

間隙水圧に影響を及ぼすW-BV20-1近傍の対策工として, ディープウェルDW-D-2(掘削深度90.0m)は2010年7月から2013年6月まで稼働した。DW-D-12(掘削深度100.0m)は2013年4月以降稼働している。

3. 現地適用結果

3.1 埋設

有線センサでは, ケーブルを利用して所定の深度に設置できるが, ワイヤレスセンサのボーリング孔内への設置には工夫が必要となる。2カ所のセンサ埋設手順は以下の通りである。

3.1.1 ワイヤレス地中変位計

ワイヤレス地中変位計全体の最大径は, 下部パイプ歪み計送信器とすべり面変位計送信器などを接続するソケット部で $\phi 91\text{mm}$ となり, これに対する設置孔の掘削径は $\phi 116\text{mm}$ (深度26.5mまで内径 $\phi 130\text{mm}$ ケーシング)とした。ワイヤレス地中変位計の設置では, まず最下部のアイボルトにロープを固定し, センサを組み立てながら挿入した。その後, 上端に建て込み用ねじ加工VU50塩ビ管を接続し, パイプ歪み計を所定の方向に保ちつつ, これを継ぎ足して降下させ, ロープにて再下端深度を確認して孔内に固定した。次にケーシング深度までセメントベントナイトモルタル(以下CBモルタルとする)でグラウトし, すべり面変位計までを固定した。最後にケーシングを抜管後, 建て込み用パイプの内外を地表までCBモルタルでグラウトした。なお, パイプ歪み計部の塩ビ管は有孔管とし, 管内の変位検出ワイヤの周辺までグラウトされるように留意した。

3.1.2 ワイヤレスおよび有線間隙水圧計

ワイヤレスセンサの外径は, 設計段階では $\phi 86\text{mm}$ 掘削に対応させるため, $\phi 76\text{mm}$ としたが, 掘削機材の都合で, 掘削孔径は深度75.0mまでは $\phi 179\text{mm}$ (ノンコア掘削)とした。そこから掘止め深度92.0mまでを $\phi 116\text{mm}$ (コア掘削)として, W-BV20-1孔では深度87.0mの泥岩破碎部を“87mすべり面”とした。

センサ設置工程の実際は以下の通りであった。

- ・下部ワイヤレスセンサは, 受圧部の深度を88.6mとして, センサ下側に高さ調整用のスペーサを接続し, テグスで吊り下げたが途中で切断し, 孔内水中を孔底に落下(その後の動作は正常)。
- ・錘付測量テープでセンサ上端深度を確認後, 深度87.5mまでを砂, “87mすべり面”を含む深度86.5mまでをベントナイトペレットで充填し遮水部形成。
- ・充填材の降下能率を上げるため, 充填材は深度80m付近までねじ加工VP50塩ビ管を建て込み, 水を循環させながら投入。以下, 充填材投入はこの方法によった。

- ・ケーシング引き上げ時に孔壁崩壊により深度85.4mまで土砂堆積。
- ・中部ワイヤレスセンサの上台とするため深度85.0mまで砂充填。
- ・中部ワイヤレスセンサをロープで吊り下げ, 受圧部深度を84.4mとして設置。ロープはねじれて回収できなかったため, 孔内に落下させた。
- ・深度82.0mまで砂, 深度79.0mまでベントナイトペレットを充填し遮水部を形成。その後孔壁保護のため深度78.0mまで砂充填。
- ・深度57.1mまでCBモルタル充填。
- ・深度55.7mまでベントナイトペレット充填。
- ・上部ワイヤレスセンサをフック付ロープで吊り下げ, 受圧部深度を53.8mとして設置。フック付ロープは回収した。
- ・深度53.2mまで砂, “51mすべり面”を含む深度48.7mまでベントナイトペレットを充填し遮水部形成。
- ・深度48.7mまで砂充填後孔壁崩壊により48.4mまで土砂堆積。
- ・有線センサの受圧部深度を48.4mとして設置。
- ・深度47.8mまで砂を充填し遮水部形成。
- ・水循環用塩ビ管を孔内に残し, 有線センサのケーブルを固定し, 周囲に深度0.8mまでCBモルタル充填。
- ・水循環用塩ビ管内は深度25.0mまでCBモルタルで充填し, 深度21.2mに地表からの通信が困難な場合に備えて高感度受信アンテナを設置。
- ・塩ビ管外は地表まで土砂埋め戻し。

3.2 データ回収

ワイヤレスセンサのデータ回収は, 地上の送受信器(坂田電機製EO-029-1, 送信出力25W)からの指令通信により行うのが基本となる。一方, 地中の送信器側では通信待ち受けの消費電力を低減するため, 通信可能な時間帯が送信器毎, 観測頻度毎にプログラムされている。これに合わせて, 1~2ヶ月に1回の頻度で半自動観測を行った。

当初, ダム現場での実績から, 送受信器単体で深度100mまでの通信が可能と想定していた。しかし, 送信器深度55.7mまでの3台のワイヤレス地中変位計送信器と上部ワイヤレスセンサ(間隙水圧計)送信器までは地上送受信器単体での通信が可能であったが, 深度80m以上の中部, 下部ワイヤレスセンサ(間隙水圧計)送信器では地上からの指令通信によるデータ回収ができなかった。このため, 地上からの指令送信には直径5mのループアンテナを用い, 地中からの信号受信には深度21.2mに設置した高感度受信アンテナにより, 深部の送信器からのデータ回収を行った。

3.3 観測結果

3.3.1 ワイヤレス地中変位計

ワイヤレス地中変位計は2010年1月28日から観測を開始し, 2016年7月までは観測頻度を変更しながら運用し,

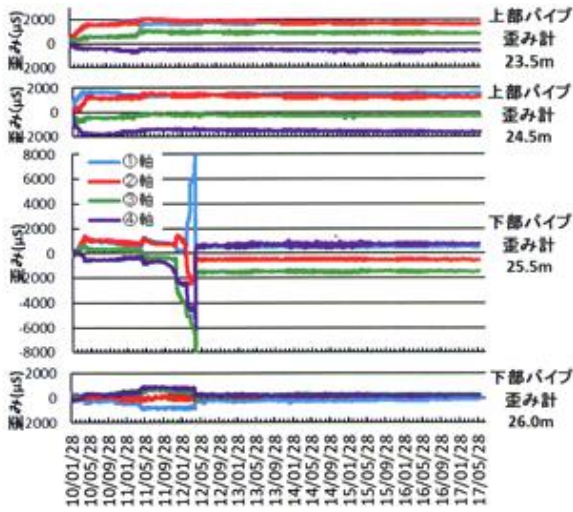


図-5 パイプ歪み計観測結果

Fig. 5 Observation data of pipe strain meters

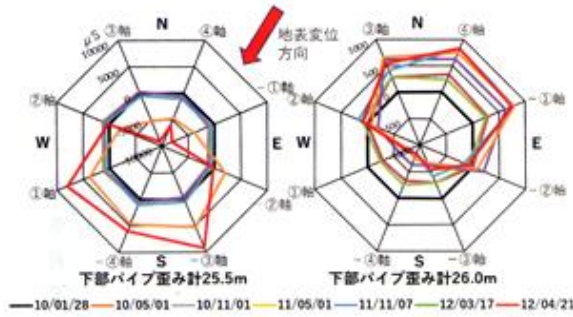


図-6 下部パイプ歪み計方向別観測結果

Fig. 6 Direction radar chart of lower pipe strain meter data

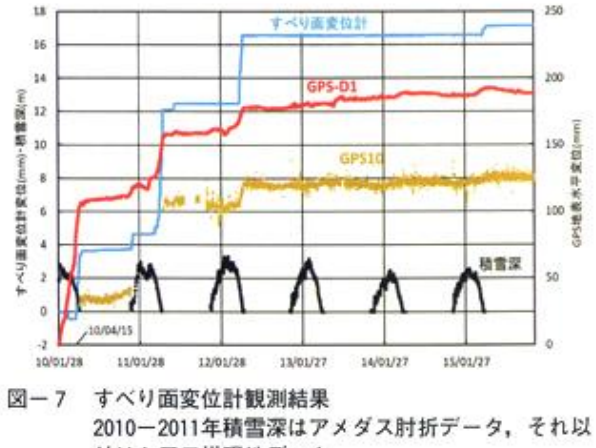


図-7 すべり面変位計観測結果

2010-2011年積雪深はアメダス肘折データ, それ以外は七五三掛現地データ

Fig. 7 Observation data of slip surface displacement meter (2010-2011 snow depth: AMeDAS Hijiori data, the others: Shimekake data)

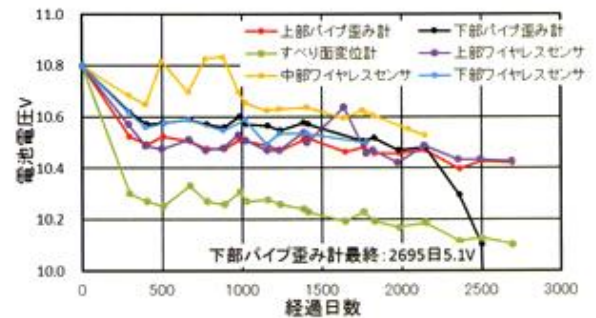


図-9 電池電圧経時変化

Fig. 9 Time histories of the battery voltage

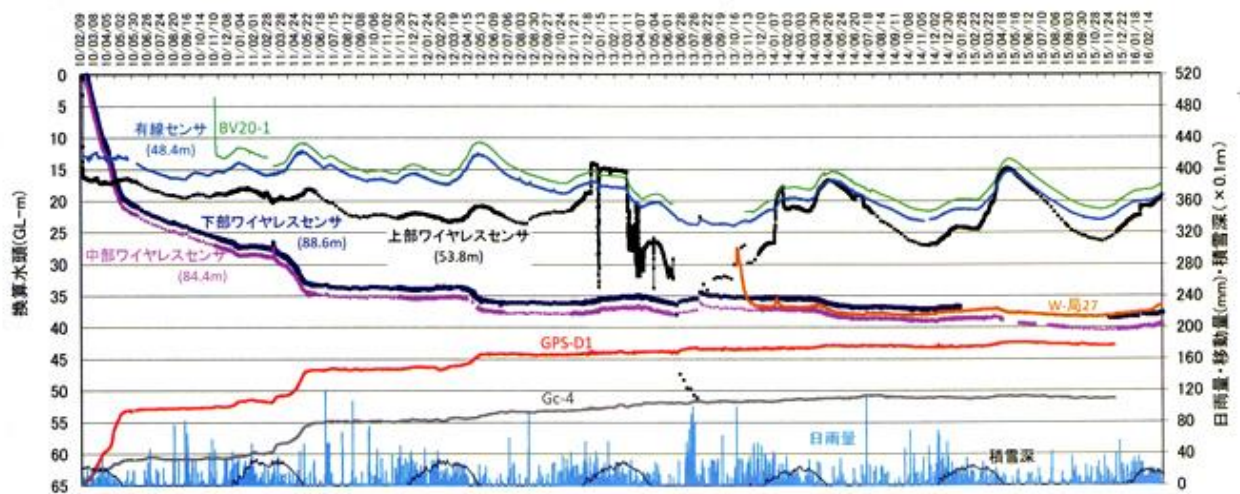


図-8 間隙水圧計観測結果

(2010-2011年積雪深はAMeDAS肘折データ, それ以外と日雨量は七五三掛データ)

Fig. 8 Observation data of pore water pressure sensor (2010-2011 snow depth: AMeDAS Hijiori data, the others and daily precipitation: Shimekake data)

それ以降は1回/週に固定した。2017年6月7日までは3台の送信器が稼働していたが、7月19日には下部パイプ歪み計送信器からの応答が途絶した。

図-5のパイプ歪み計観測結果では、各深度で設置直後から累積的な変化が認められ、深度25.5mでは最大±8000 μ Sに及ぶ歪みが観測され、この付近の深度にすべり面が推定される。下部のパイプ歪み計は、2012年の融雪期に大きな歪みを観測して以降は2深度ともに指示値が0に近づき変化を示さなくなっており、この時点で歪みゲージもしくは歪みゲージとロガー間のリード線の破断が生じたと推定される。上部のパイプ歪み計は2010年、2011年の融雪期に変化が捉えられ、最大±2000 μ S程度まで歪みが累積したが、その後は各成分で一定値を示している。

図-6には下部パイプ歪み計(25.5m及び26.0m)の4軸の歪みデータを、①~④軸では計測値のとおり、-①~-④軸では計測値の正負を逆として方向別、時間別にプロットした。深度25.5mでは南西から南南東方向の軸で歪みの増加を示し、深度26.0mでは逆に北北西から北東方向の軸で歪みの増加を示す。このような歪みの増加方向の逆転はすべり面の上下の歪み分布の特徴で、後述する室内せん断実験においても確認された。このため、B-局10地点では深度25.5~26.0mにすべり面があると考えられる。さらに、南南西方向を中心とする歪みの集中は、GPS地表変位観測によって得られた南南西方向への変位ベクトル(図-1)と調和し、地すべり変位方向を示すと考えられる。

すべり面変位計については、観測開始から比較対象のGPSによる地表変位データのある2015年12月2日までの観測結果を図-7に示す。GPS-D1の水平変位は、2010年1月28日を初期値とする1時間セッションのトレンドモデル解析値(松田ほか、2002)である。B-局10の地上部であるGPS10の水平変位は、2010年4月15日を初期値とする6時間セッションの解析値である。なお、GPS10では観測当初は測量用三脚を受信器架台とし、2010年4月15日に初期値を測位後、4月29日から連続観測を開始し、2010年12月16日から2011年5月11日は積雪のため欠測した。そして2011年12月18日以降は高さ3.5mの二重管式支柱を受信器架台とし、通年観測を行った(中里ほか、2013)。

観測開始から2.5ヶ月間はGPS-D1で地表変位が継続するのに対し、すべり面変位計は0からマイナスの値を示し、それ以降に引張応答が確認された。その後、GPSによる水平地表変位量とほぼ同期して、融雪期の変位を記録している。しかし、地表変位量がGPS-D1の全期間で189mm、GPS10の全期間で124mmであるのに対し、地中変位量は全期間で17.1mmであり、有意に小さい。この原因については次章で検討する。

3.3.2 ワイヤレスおよび有線間隙水圧計

ワイヤレスおよび有線間隙水圧計は、下部ワイヤレス

センサで2010年2月9日より、中部ワイヤレスセンサで2月10日より、上部ワイヤレスセンサで2月13日より、最上部の有線センサで2月17日より埋設順に観測を開始した。このうち上部ワイヤレスセンサと有線センサは2017年7月19日現在で稼働中だが、下部と中部のワイヤレスセンサ送信器は、2016年3月~4月で応答がなくなった。5年間の動作目標は達成したものの、年々増大した電磁ノイズの影響で受信に失敗することが多く、送信のリトライが増えたため、上部ワイヤレスセンサより早く電池寿命を迎えたと考えられる。

下部ワイヤレスセンサが稼働した2010年2月9日から2016年3月11日までの観測結果を、周辺のデータと合わせて図-8に示す。まず、“51mすべり面”の上下の間隙水圧変化を見ると、すべり面上位の有線センサではDW-D-12の掘削が始まる2012年末までは、融雪期にGL-12mまで水頭上昇を示したが、DW-D-12が稼働した2013年融雪期には明瞭な水頭上昇を示さず、その後の融雪期の水頭上昇はGL-15mまでとなっている。この水頭変化は、深度51mで破断したBV20-1挿入型孔内傾斜観測孔(中里・井上、2013)の孔内水位変化と同様である。すべり面下位の上部ワイヤレスセンサでは、DW-D-12の掘削前までは有線センサよりも低い水頭を示し、その差が広がる傾向にあったが、2012年度末のDW-D-12の掘削時には有線センサよりも高い水頭を示し、同孔の2013年4月以降の本格稼働により7月末にはすべり面深度付近まで水頭が低下した。そしてDW-D-12の2回のポンプ停止(2013年7月30日~8月10日、2014年1月5日~1月23日)を経て2014年以降の融雪期には有線センサと同じレベルまで水頭上昇を示すようになった。このような変化の原因としては、近傍のディープウェルの影響により、局所的に地下水流動部の変化が生じたことが推定される。

次に、“87mすべり面”の上下では、“51mすべり面”の上下のセンサとは異なる水頭変化を示す。すべり面下位の下部ワイヤレスセンサでは上位の中部ワイヤレスセンサよりも1~2m高い水頭を示し、2回の大きな勾配変化と積雪期に対応した上下を示しつつ、全体として低下傾向を示す。水頭低下の勾配変化は2010年4月と2011年の4月にあり、いずれも積雪期の終了に相当している。初期の水頭低下は進水部形成時の水圧の解消過程と推定され、その後の低下傾向はDブロック全体に対する地下水排除工の効果の影響と考えている。2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震の直後には、下部ワイヤレスセンサで1.1m、中部ワイヤレスセンサで1.6mの水頭上昇が見られた。2012~2013年の積雪期以降に明瞭な、積雪深の増減とともに水頭が1~2m上下する変化は、D-1ブロックで同じ深部すべり面を対象に設置されたW-局27孔(すべり面深度70mに対するセンサ設置深度68m)の有線間隙水圧計にも認められる。この水頭変化は、積雪深のピーク後の3月下旬から4月上旬にピークを迎え、

“51mすべり面”の上下で間隙水圧がピークを迎え、GPSによる地表変位が継続する4月後半には低下する。防災科学技術研究所(2017)によると、調査地に近い山形県西川町志津における2016/17年冬期の最大積雪深3mに対応する積雪荷重が1500kgf/m²(水柱高1.5m)であることから、この変化の要因の一つに積雪荷重が考えられる。しかし、水頭上昇のピークは融雪期にかかっているため、今後の検討が必要である。なお、下部、中部ワイヤレスセンサでは欠測が認められるが、これは前述のノイズの影響により受信の失敗が頻発したことによるものである。

地表変位との比較では、融雪期の変位は“51mすべり面”上下の水頭変化に対応している。しかし、Dブロック全体の変位を示すと考えられるブロック中央部のGc-4とD-1ブロックとDブロック全体を合わせた変位を示すと考えられるGPS-D1の地表変位を比較すると、2010年以降の変位量はほぼ同じであり“51mすべり面”での変位は小さいと推定される。“87mすべり面”上下の水頭変化と地表変位との対応も不明瞭であることから、“87mすべり面”変位と間隙水圧変化の関係については、W-BV20-1孔のデータだけでなく、Dブロック全体のデータを総合して検討する必要がある。

3.4 電池電圧の推移

6台のワイヤレス送信器の電池電圧について、それぞれの完成日の電圧を10.8Vとして、完成日以降の経過日数に応じた変化を図-9に示す。全センサが目標の5年間動作を達成し、電源設計の妥当性が確認されたが、ノイズの影響により想定以上に通信負荷をかけた下部、中部ワイヤレスセンサ送信器が6年を経過したところで通信不能となった。それぞれ最終の電圧確認は1818日目(4.98年)10.45Vと2143日目(5.87年)10.53Vであり、それ以前に大きな電圧降下等の変化は認められなかった。次に通信不能となった下部パイプ歪み計送信器では、2361~2499日目まで電圧降下速度が大きくなり、2695日目には5.10Vとなり、2737日目のデータ回取では通信不能となった。このような電池寿命直前の電圧変化はリチウム電池の特性であり、下部パイプ歪み計送信器の記録から、電池電圧確認の頻度を上げることで、電池寿命の予測が可能になると考えられる。

4. 室内せん断実験

4.1 すべり面変位計による地すべり現地と室内実験における観測地中変位量の検討

図-7について、七五三掛区域におけるすべり面変位計データとGPSによる地表水平変位量を詳しく比較する。

すべり面変位計は観測開始から2010年2月27日まで無感期間を示し、4月16日までに最大0.4mmの圧縮変位を示し、その後5月12日までに引張に転じてから4.0mmの変位を示す。一方、ほぼ同じ期間の地表水平変位はGPS10で35mm(4月15日~5月12日)、GPS-D1で26mm

(4月16日~5月12日)であり、変位の収束時期は地表と地中でほぼ同時である。その後もすべり面変位計は地表変位とは同期して累積変位を示すが、前述の通り2015年12月までの総地中変位量17.1mmに対し、GPS-D1では189mm、GPS10では124mmと地表変位量は大きく異なる。

そこで、既知のせん断変位量に対する埋設状態のすべり面変位計の観測値を確認するため、地すべり変位を模擬した室内せん断実験を図-10の装置により2種類の条件で行った。1回目の実験では上下に分割した土槽底部にボーリング孔を模した2mのVP50塩ビ管2本を固定し、1本の管内にはすべり面変位計をセットした後砂充填した。もう1本の管には0.2m間隔で4段の4軸パイプ歪み計をせん断面を中心に配置し、既知深度のせん断に対する4軸パイプ歪み計の応答を確認した。土槽内は、まず下部土槽と4軸パイプ歪み計用塩ビ管内にCBモルタルを充填し、固化(一軸圧縮強度0.22MN/m²)後、上面を平滑に整形し、せん断面にはテフロンシートを敷設した。その後、上部土槽を設置し、CBモルタルを充填し下部土槽と同様に固化させた。

変位実験は、50kNアクチュエータにより上部土槽を0.1mm/分で変位させ、アクチュエータ前進量に対するすべり面変位計及び4軸パイプ歪み計の応答を観測した。すべり面変位計ではこの実験においても初期無感期間が確認され、上部土槽変位25.0mmに対し、すべり面変位計観測値は1.1mmであった(図-11(a))。最終的に85.0mmまで上部土槽を変位させたが、塩ビ管はわずかに屈曲したのみで(図-12(a))、モルタル側が変形した。この結果から、軟質な移動土塊に対しすべり面変位計に高強度の保護管を用いると、保護管がクリープ層的に挙動し、正確な変位量が得られない期間が長くなると考えられる。また、変位検出ワイヤ周辺の砂充填では無感期間の短縮に寄与しておらず、初期の応答性を高めるには変位検出ワイヤ周辺を剛な材料で満たす必要性を指摘できる。水平なせん断面に対し圧縮変位が観測された要因としては、ワイヤが動き出す際にすべり面変位計内の張力によりワイヤが引き込まれたためと考えている。

2回目の実験では、同じ土槽と2本のVU50塩ビ管を用いて、片方の塩ビ管を保護管としてすべり面変位計を設置した。土槽に充填したCBモルタルの一軸圧縮強度は1.8MN/m²と大きくし、塩ビ管内部にもCBモルタルを充填した。変位速度は0.1mm/分である。1回目(図-11(a))と2回目(図-11(b))を比較すると、2回目の実験でも初期無感期間が認められるが、すべり面変位計が引張に応答しはじめるのが1回目では土槽変位8.0mmに対し2回目では土槽変位5.0mmである。土槽変位25.0mmに対応するすべり面変位計変位は1回目の1.1mmから2回目の2.8mmに変化し、実変位に対する追従性が向上した。これは変位検出ワイヤ周辺の剛性を増し、保護管強度を相対的に下げたことの効果と考えられる。

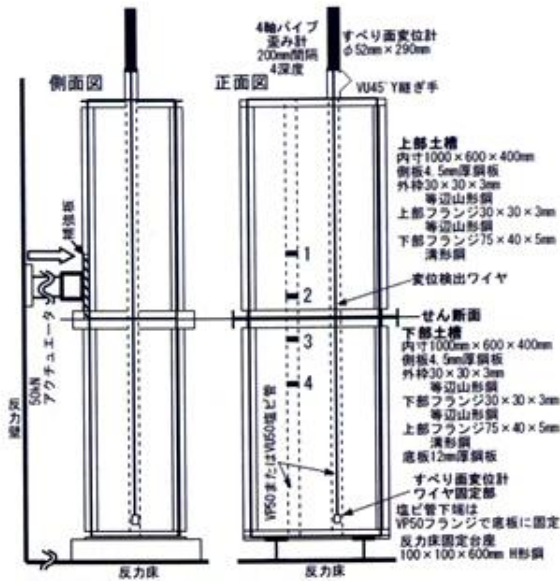


図-10 室内せん断実験装置

Fig. 10 Laboratory equipment for shear tests

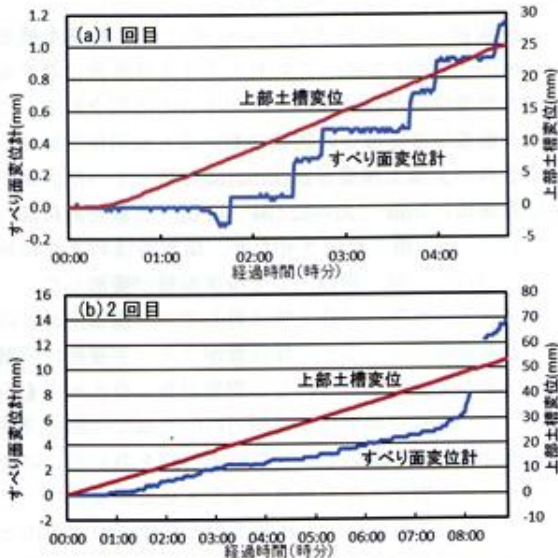


図-11 すべり面変位計変位と土槽変位の比較

Fig. 11 Comparison between measured and true displacement

さらに、2回目の実験では土槽変位が大きくなるとすべり面変位計変位の増加率の増大が見られ、55mmせん断後の保護管には破断が確認できた(図-12(b))。

これらの実験から、保孔管内のワイヤの伸縮による地中変位計測における初期無感期間、圧縮変位の発生及びせん断変位量の過小評価が再現された。地表変位量に対し地中変位量が小さく観測される要因として、森屋ほか(2008)が東北地方の新第三系地すべりについて明らかにした地表ほど変位量大きい粘性流動タイプに相当することや、菅・山本(2006)が指摘したすべり面付近のクリープ層の影響などがあげられる。B-局10孔近傍の

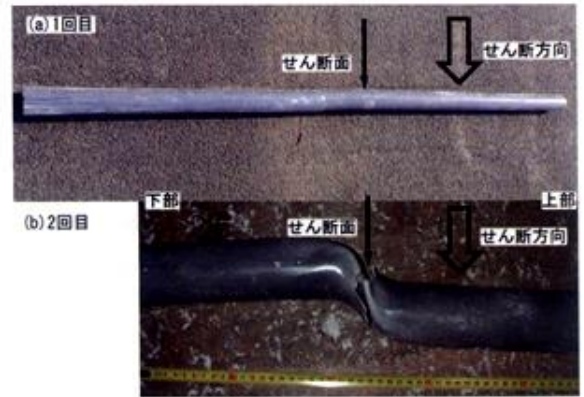


図-12 せん断実験後の保護管の状況

Fig. 12 Views of protecting tube after the shear test

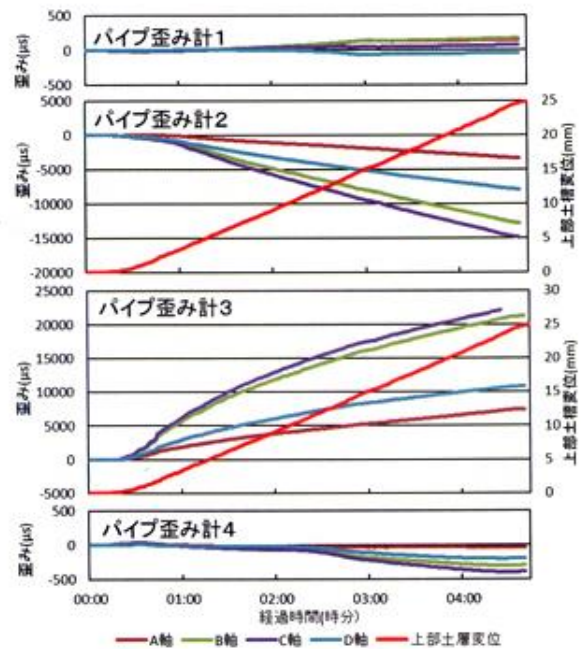


図-13 パイプ歪み計観測結果

Fig. 13 Observation data of pipe strain meters

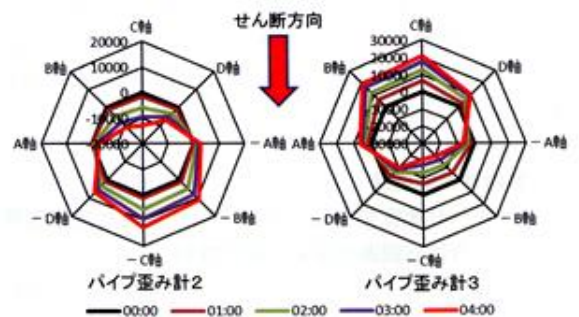


図-14 パイプ歪み計2,3の方向別観測結果

Fig. 14 Direction radar chart of pipe strain meter data of No. 2 and No. 3