

特殊環境下での使用に耐えうる地すべり観測装置の開発

研究予算：運営費交付金

研究期間：平 19～平 21

担当チーム：地すべりチーム

研究担当者：藤澤和範、千田容嗣

【要旨】

地すべり災害現場では、土塊の動きを捉えた計測データが求められている。しかし、移動量の大きい地すべりや、地すべり土塊がぬかるみ、流動化し、到達範囲の予測が難しい地すべり(以下、これらを「特殊環境下」と称す)を適切・迅速に計測する技術は確立されているとは言えない。そこで、このような地すべり形態を有し従来の観測装置では計測が難しいと思われる事例の特徴の整理及び代表事例のアンケート調査を行い、計測機器に必要とされる性能を検討した。その要求される性能に基づき、6種類の計測機器を試作し、これらの計測機器の設置試験及び性能試験を実施した。

キーワード：地すべり、特殊な環境下、計測機器の開発、性能試験、設置試験、

1. はじめに

地すべり災害現場では、土塊の動きを捉えた計測データが求められている。特殊環境下の地すべりでは、移動量が大きい、あるいは土砂や水に埋没することがあるために観測機器が計測不能に陥る場合がある。また、土砂崩落の危険性があるため立ち入りができず計測機器が設置できない場合がある。このような現場条件の厳しい箇所での計測手法は確立されてない。そこで、昭和 55 年以降に発生した地すべり災害のうち、従来の観測装置では計測が難しかったと思われる特殊環境下の 35 災害事例を抽出し、その中から、最近発生した代表的な 5 事例について管理者へのアンケートを行い、これまでは設置や計測が困難であった特殊な地すべり環境下で求められている計測技術を調査した。この結果を踏まえ、土木研究所と民間企業 4 社とで共同研究¹⁾を実施し、特殊な地すべり環境下でも使用可能な 6 種類の観測装置とその設置方法に関する研究開発を進めた。

2. 特殊環境下の地すべりの特徴

2.1 調査方法

1) 調査対象とする地すべり災害

昭和 55 年以降に発生した地すべり災害のうち、従来の観測機器では計測が難しかったことが想定されるものを対象とした。但し、地震に起因するものは含まない。

2) 事例調査を行った資料

事例調査に使用した資料は、①土木研究所災害報

告資料、②日本地すべり学会誌、③砂防学会誌、④日本応用地質学会誌、⑤土木技術資料、⑥土砂災害の実態(財団法人 砂防・地すべり技術センター、毎年発行)、⑦日本の地すべり—災害事例写真集—(砂防広報センター,2000)、⑧その他である。

2.2 調査結果

上記で抽出された 35 災害事例を地質条件及び発生規模により、下記 4 つのタイプに分類した。なお、変成岩、花崗岩類、第四紀堆積層分布域での特殊地すべり災害については事例が少ないため、ここでは省略した。また、沖縄泥岩地すべりは、1 事例しかないが、泥濘化(土塊中の水分が多く、移動土塊が非常に乱された状態)する特殊な地すべりであるため、新第三紀層地すべりと区別した。

①新第三紀層泥岩地すべりタイプ(写真 2.1)

新第三紀層の泥岩を主体とした地すべりと新第三紀層泥岩・火山岩複合地すべりを合せたタイプとした。

②沖縄泥岩地すべりタイプ(写真 2.2)

沖縄県に分布する島尻泥岩層分布域で見られる泥濘化する地すべりのタイプとした。なお、このタイプは、①と同じ新第三紀層泥岩を主体とするものであるが、島尻泥岩の特殊性を考慮し別のタイプとした。

③岩盤崩壊性地すべりタイプ(写真 2.3)

古生層、中生層、古第三紀層の堆積岩類を主体とした急峻斜面での地すべりに多いタイプとした。

④第四紀層火山岩類地すべりタイプ(写真 2.4)

未固結堆積物を多く含む、第四紀層火山岩類を主体とした地すべりのタイプとした。



写真 2.1 ①新第三紀層泥岩地すべりタイプ (石倉地区)



写真 2.2 ②沖縄泥岩地すべりタイプ (北上原地区)



写真 2.3 ③岩盤崩壊性地すべりタイプ (宇井地区)



写真 2.4 ④第四紀火山岩類地すべりタイプ (八幡平澄川地区)

2.1 で整理した各地すべりタイプの特徴を踏まえ、従来の観測機器では計測が難しい地すべりでの観測機器の機能及び設置に要求される要件を下記に示す。

なお、代表的な 6 事例について、県の担当者を対象に観測機器に関するアンケート調査を実施したのでその意見も反映させた。

(1) 観測機器の機能に関する要件

①泥濘化した地すべり現場での計測

- ・土塊中の水分が多く、乱れた土塊に埋没しやすく、外力が働く状況下でも対応できること

②長期間にわたる継続計測 (数日～数ヶ月)

- ・電源の確保ができること

③急変する変位量の連続計測

- ・速い変化量 1～5 (m/h) に対応した計測ができること
- ・変位量の急速な変化 (変位量 mm オーダー→m オーダー) に対応できること

④大変位量 (m オーダー) の計測

- ・メートル単位の大変位での対応ができること

⑤地すべり現象の面的把握

- ・広範囲の測定あるいは多数の観測機器が設置できること (小型化で安価)

(2) 観測機器の設置に関する要件

⑥泥濘化した状況での設置性

- ・地すべり地外からの投入ができること
- ・あるいは地すべり地に立ち入りした場合、短時間で容易に設置ができること

⑦急峻な斜面 (斜面傾斜 30°以上) での設置性

- ・急峻な斜面でも測定ができること
- ・資機材は、人力で運搬できる大きさ・重さであること

⑧遠隔地での設置性

3. 観測機器の開発

3. 1 観測機器の要件

- ・電気消費量が少ないことあるいは電源が確保できること
- ・観測対象地へのアクセスが困難でも計測ができること

⑨植生の被覆や積雪地での設置性

- ・融雪期、積雪初期への対応ができること
- ・植生が被覆した環境でも計測できること

特に、③、④と⑦は、岩盤崩壊性地すべりに特化できる要件であり、他の要件は各地すべりタイプに共通した要件である。

3. 2 開発した観測機器の概要

共同研究を通じて開発した6種類の観測機器の概要を下記に示す。

1) 加速度センサを応用した地表傾斜計システム

加速度センサを応用した地表傾斜計システム（以下「IT 地盤傾斜計システム」と呼ぶ）は、ボーリング孔内に設置する多段式傾斜計として確立された、重力加速度方向を検知する加速度センサを用いた傾斜計に改良を加え、地盤の微小な傾きの変化を速やかに多点計測ができるようにしたものである。本システムの特徴は、CAN 通信(耐ノイズ性が高いデジタル通信)を用いて1本のケーブルで最大50台(ケーブル2~3本使用時の最大計測数は100台)の傾斜角度が計測できること、計測範囲が $\pm 20^\circ$ と大きいこと、また、打設した単管にセンサを挿入・固定するだけで迅速に設置ができることである。

このような特徴から、地すべりによる傾斜変動量の大きい地点での多点計測が可能であり、滑落崖背後の地表部へ速やかに設置し、派生的に発生する地すべりの有無やその範囲の把握に有効である(図-3.1)。

2) 地盤伸縮計の改良による大変位伸縮計

地盤伸縮計の改良による大変位伸縮計(以下、「大変位伸縮計」と呼ぶ)は、通常の地すべりより移動量や移動速度が大きな地すべりを連続計測できる地盤伸縮計である。計測原理そのものは従来の地盤伸縮計と基本的に同様であるが、張力を与えるばねを改良して計測範囲を延長した。また、設置方法は応急緊急対応を想定し、インバー線の保護管やその支柱は設けず速やかに計測を開始することを優先した。

本伸縮計の特徴は、移動量6mまでの大きな変位をインバー線の張替え作業を行わず精度良く連続計測できること、またロガー機能、通信機能、警報出

力機能を内蔵し、監視システムの構築が容易にできることである。

このような特徴から、移動量や移動速度が大きくなることが予想される現場での地すべり移動量を欠測なく連続的に計測したい場合に有効である(図-3.2)。

3) 地中無線通信技術を応用した変位計システム

地中無線通信技術を応用した変位計(以下、「無線式距離計測システム」と呼ぶ)は、変位センサ(発信器)から出力される低周波数(約1kHz)電磁波を受信器(受信アンテナならびに測定器)で受信し、その受信強度から変位センサと受信アンテナ間の距離を計測するシステムである。

本システムの特徴は、媒質による反射や減衰の少ない低周波数の電磁波の特徴を生かして、発信器が土中や水中に埋まっても計測可能なこと、また15~30mといった大変位を数cmの精度でインバー線の張替えや保護管の再設置を必要とせずに計測できることである。このような特徴から、計測機器が土砂に埋まることが予想される現場での地すべり移動量(距離)を連続的に計測する場合に有効である(図-3.3)。

4) 音響を応用した移動量計システム

音響を応用した移動量計システム(以下、「音響式距離計測システム」と呼ぶ)は、地すべり土塊内にラジコンヘリから音源センサを投下設置し、それが発する音波を複数のマイクで受信し、その音波の到達時間差から音源センサまでの距離を計測するシステムである。

本システムの特徴は、ラジコンヘリによる遠隔操作で離れた地点から安全に音源センサを投下設置できること、また測定範囲が200m程度と長いことである。このような特徴から、従来は計測ができなかった移動量の大きな地すべりの移動量や速度を計測したい場合に有効である(図-3.4)。

5) 振動デバイスを応用した土砂感知センサ

振動デバイスを応用した土砂感知センサ(以下、「振動デバイス式土塊到達検知システム」と呼ぶ)は、コンクリートの充填状態を確認するシステムとして確立された「コンクリート充填検知システム」を改良し、センサに接触する物体の周波数特性から地すべり土塊(水・土砂)の到達(接触)を検知する警報装置である。

本システムの特徴は、コンクリート充填状況の検知などに利用されている既存の振動デバイス部を改

良することにより、水と土砂の識別ならびに想定外の衝撃等を受けた際のセンサの故障が検知できるようになったこと、また複数の振動デバイスをシート状のものに貼付け迅速な敷設設置ができることである。このような特徴から、地すべり土塊の進行方向に広く敷設しておくことによって、崩落土砂や泥濘化・流動化した移動土塊の到達範囲を検知できる(図3.5)。

6) 接点信号発信器を応用した崩壊検知センサ

接点信号発信器を応用した崩壊検知センサ(以下、「転倒式土塊到達検知システム」と呼ぶ)は、押し出された地すべり土塊により傾いたセンサを判別し、その情報を地すべり地外の安全な観測局に発信する簡便で安価な警報装置である。本システムの特徴は、投げ込みにより安全かつ面的に多数のセンサを迅速に設置できること、また所定の角度を超える傾斜あるいは転倒が発生すると安全な位置で信号を受信でき、一度転倒しても再び起き上がり繰り返し転倒を検知することである。このような特徴から、容易に地すべり土塊の到達範囲を検知する場合に有効である(図-3.6)。



図-3.1 IT地盤傾斜計測システム

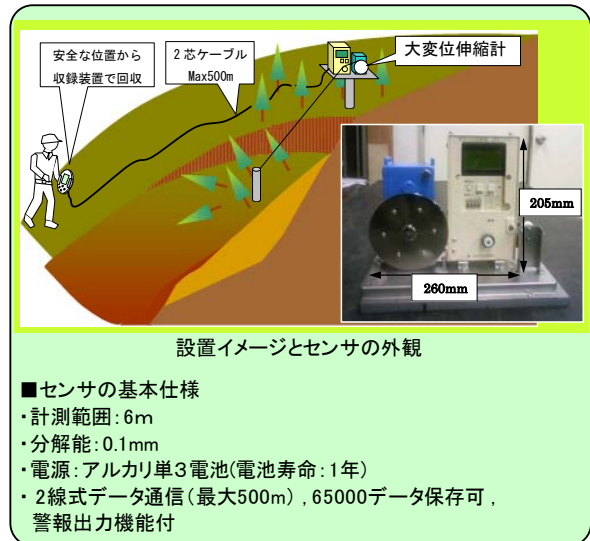


図-3.2 地盤伸縮計の改良による大変位伸縮計

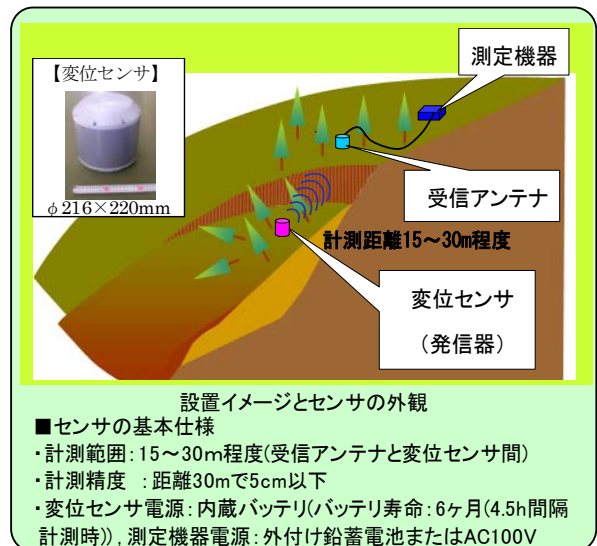


図-3.3 無線式距離計測システム

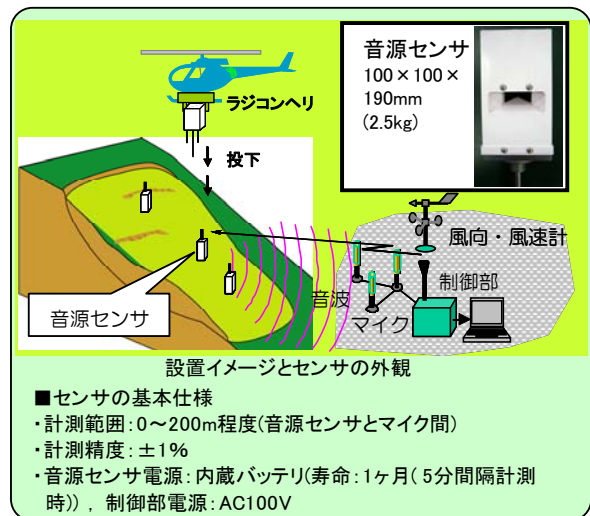


図3.4 音響式距離計測システム

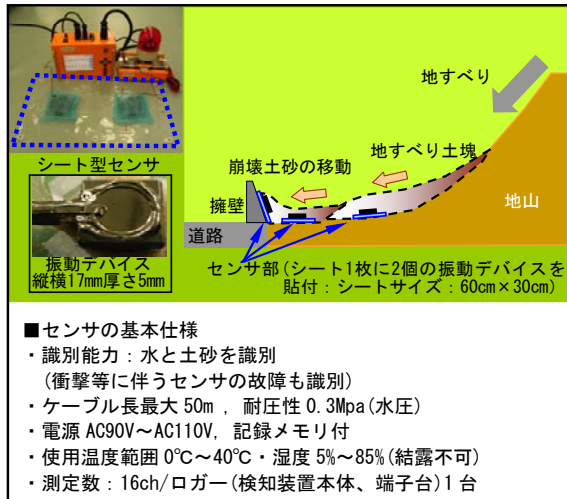


図 3.5 振動デバイスを用いた土砂感知センサ



図-3.6 転倒式土塊到達検知システム

4. 性能試験、設置試験

4.1 IT地盤傾斜計測システム

1) 山岳道路斜面における計測

①観測の概要

地すべり背後地付近の斜面地盤の傾きを計測することにより、地すべり背後地の崩壊拡大や影響範囲の監視という目的を検証するため、地すべり頭部に設置された地盤伸縮計を併設して設置し、その動きを対比した。

試験地周辺は、近年にも初生地すべりが多く発生している地域であり、河川浸食作用により急峻な地形を呈している。本計測実験地は、崖錐斜面や崩壊地形に囲まれた尾根地形を呈し、斜面上部の緩斜面の存在などから、クリープ変形による山腹のゆるみが進展していると想定される岩盤斜面である。

センサは、このゆるみ領域、すなわち想定される

初生地すべりの頭部に設置された既設地盤伸縮計の不動杭及び移動杭近傍に4ヶ所、初生地すべり地背後斜面に1ヶ所の計5箇所に設置した(図-4.1)。

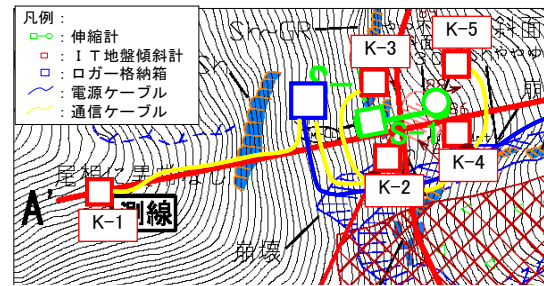


図 4.1 設置概要図

②観測結果

初生地すべり地内に設置した IT 地盤傾斜計システムの計測結果を地盤伸縮計の計測結果と併せて図 4.2 に示す。これによると、8/27 以降の IT 地盤傾斜計測システムのデータに斜面下方への累積傾向を示す微小な傾動が観測されている。累積速度がやや遅くなる 9/14 以降もほぼ一定の変位が継続して見られており、山腹のクリープ変形運動の進展を捉えているものと考えられる。また、今回の観測で特徴的なことは、地盤の変位を IT 地盤傾斜計測システムの傾動が地盤伸縮計の変位に先行して捉えたことである。階段状の変位傾向を示す地盤伸縮計(地表面の水平移動量計測)に比べ、早期から微小な変位を累積測定できる地盤傾斜計(地表面の傾動計測)は、微小な変位を持続的に示すクリープ変形の計測に優位であると考えられる。

2) 水没した斜面における計測

①観測の概要

地すべり末端部が水面下にある場合、その変状範囲や規模を適切に計測・把握することは困難である。IT 地盤傾斜計は、陸上での計測を想定して開発されたものであるが、0.5MPa(50m 防水)の耐水圧性能を有することから、貯水池の湛水後における水没斜面の計測手法としての適用性の検証ならびに解決すべき課題の明確化を目的とした実証実験を行った。具体的には、水没前の地すべり末端斜面に IT 地盤傾斜計を横断的に設置し、IT 地盤傾斜計の耐久性能及び陸上近傍にある既往計測データとの比較などによるデータの応答状態を確認した(図 4.3)

②観測結果

観測の結果、いずれの IT 地盤傾斜計も H21.10.9 の湛水に伴うセンサの水没以降において、温度に追従するように、斜面に直交する上流方向(西～西南西)に累積性を示す傾動が継続して見られる(図 4.4)。

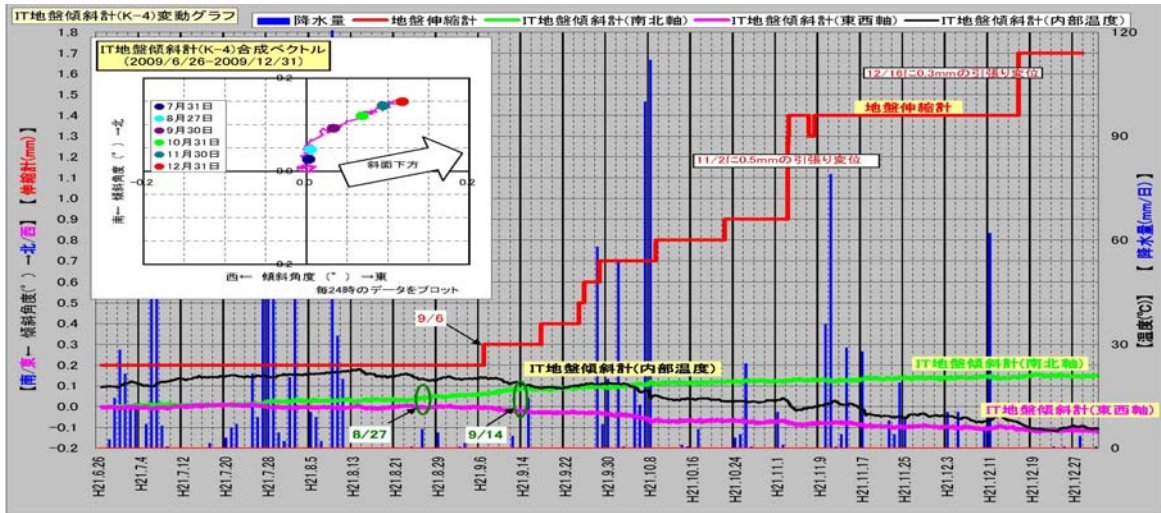


図 4.2 観測結果 (IT 地盤傾斜計)

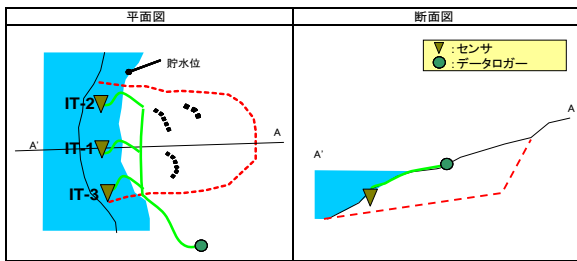


図 4.3 水没した斜面での計測配置概要図

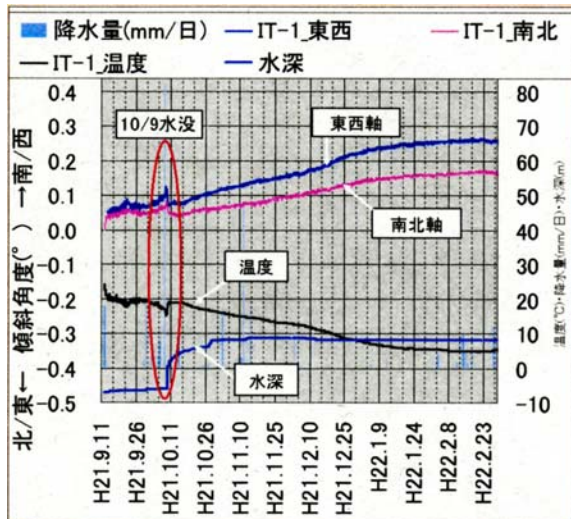


図 4.4 観測結果 (IT 地盤傾斜計測システム)

この傾動には、傾斜運動方向と地すべり地形との相関がなく、また近傍の観測データでは明瞭な変位が認められないことなどから、斜面変動を捉えたものではなく、センサの温度による影響を強く受けているものと考えられる。

4.2 大変位伸縮計

1) 観測の概要

大変位伸縮計が従来型の伸縮計と同等の性能を有することを検証するため、地すべり地に設置してある既存の従来型の地盤伸縮計2台 (S-1、S-2) の近傍に大変位伸縮計を設置し、観測を実施した (図 4.5)。

観測期間は、平成 2008 年 2 月 14 日～11 月 1 日までの約 8.5 ヶ月である。

2) 観測結果

S-1' 及び S-1 の変動図を図-4.6 に示す。約 8.5 ヶ月の観測期間に計測された変位量は、ほぼ同等な動きを示し、累積変動量は、従来型の伸縮計 S-1' は 2,378mm、大変位伸縮計 S-1 は 2,298mm で、その差は 80mm であった (図-4.6)。この差は、両者は隣接しているが、数 10cm 離れているために生じたものであると考えられる。

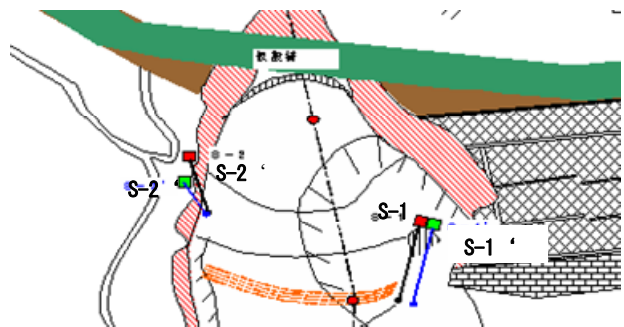


図 4.5 計測配置概要図

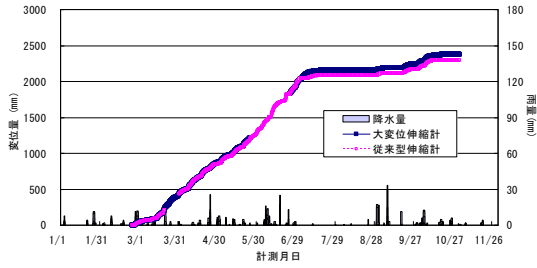


図-4.6 観測結果（大変位伸縮計）

4.3 無線式距離計測システム

1) 観測の概要

無線式距離計測システムの距離計測の精度を検証するため、地すべり地に設置してある既存の従来型の地盤伸縮計の近傍に大変位伸縮計を設置し、観測を実施した（図 4.7）。観測期間は、平成 2009 年 11 月 25 日から 12 月 5 月である。

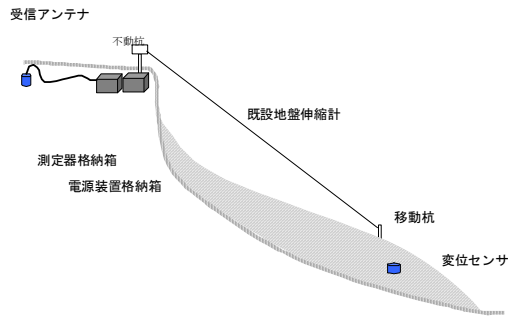


図 4.7 計測概念図

2) 観測結果

ここで示すデータは、約 9 日間の観測データであるが、距離 20.20m に対して平均 20.30m、標準偏差 0.06m であった（図 4.8）。現在、観測を継続しているが、積雪のため伸縮計のデータが入手できない。そのため、検証は、来年度に実施する予定である。

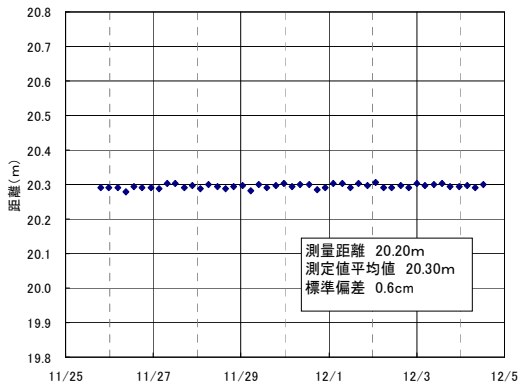


図 4.8 観測結果（無線式距離計測システム）

4.4 音響式距離計測システム

1) 観測概要

流水の音等、自然が発するノイズが計測に影響を及ぼすと考えられるため、溪流を挟んで約 50m 離して 4 台の音源センサとマイク 3 台を設置した（写真 4.1,4.2）。音源センサは、周波数が 1.4kHz で、7.1mSec、約 125db の音を発するものである。観測期間は、平成 21 年 11 月 26 日から 12 月 2 日の 6 日間である。

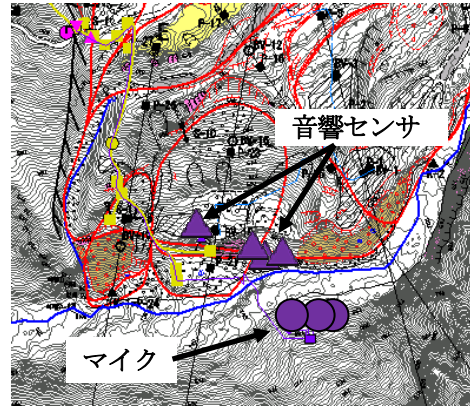


写真 4.1 観測位置



写真 4.2 観測機器

b) マイク、風速計、温度計

2) 観測結果

①ノイズの影響

川に最も近いマイク 2 は、センサからの音と流水の音とを識別できなかった。流水等のノイズの影響が想定される場合、ノイズの発生源からある程度の距離を離してマイクを設置する必要がある。

②観測精度

観測のできたマイク 1、3 について考察を行う。

観測結果のうち、草等の遮るものがない場合（実測距離 45.1m）及び草等の遮るものがある場合（実測距離 53.4m）の結果を示す。

①草木の遮るものがない場合

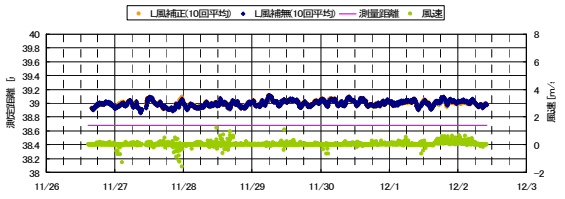
距離 45.1m に対して平均 45.4m、最小値 45.2m、最大値 45.5m という観測結果が得られた（図 4.9）。

なお、データの取得率は 91.9% であった。

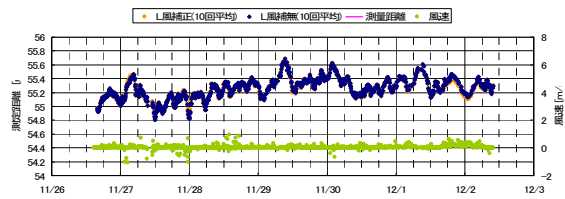
②草木が遮っている場合

距離 53.4m に対して平均 55.2m、最小値 54.8m、最大値 55.7m、データの取得率は 64.6% という観測結果が得られた（図 4.9）。

以上より、流水からある程度の距離を離してセンサ及びマイクを設置する必要があること、また、データが取得できたが、草木の遮るものがあると、その影響を受けることがわかった



(a)草木が遮っていない場合

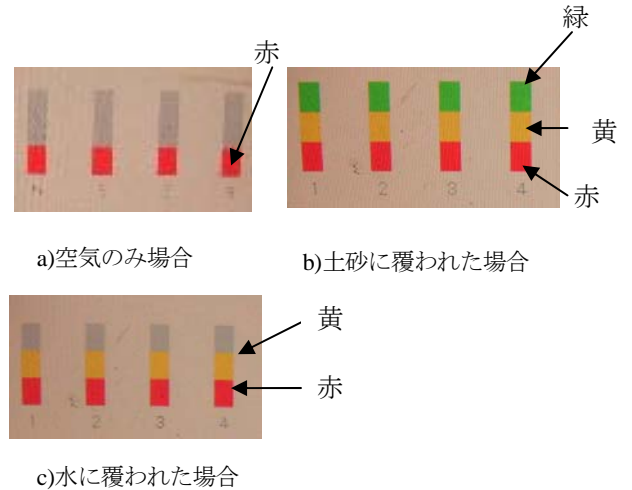


(b) 草木が遮っている場合

図 4.9 観測結果 (音響式距離計測システム)



写真 4.3 検知装置



c)水に覆われた場合

※検知装置は上から、緑、黄色、赤を表示する

写真 4.4 検知装置の表示

4.5 振動デバイス式土塊到達検知システム

地すべり現場を模擬した大型模型土槽にセンサを設置し覆土応答試験及び湧き水応答試験を実施した。なお、検知装置は、センサが何も覆われていないと、赤い表示のみを示すが、センサが土砂に覆われると、赤い表示に黄色と緑色の表示が追加され、水の覆われると、赤い表示に黄色の表示が追加される (写真 4.3, 4.4)。

1) 覆土応答試験

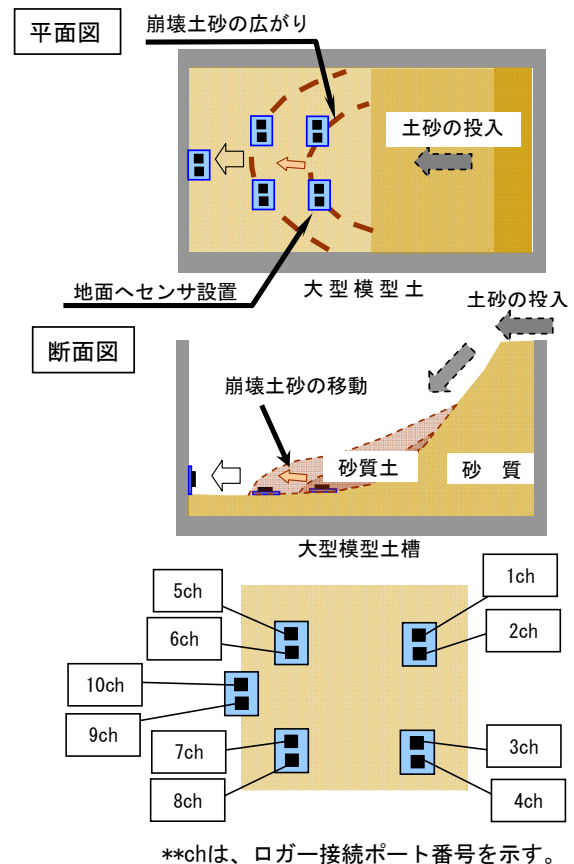
①実験概要

大型土槽内に作製した自然斜面と見立てた斜面の下部に2台のセンサを貼り付けたシートを3列に配置し、上部より土砂を投入し、土砂の被覆状況とセンサの反応状況を確認した (図 4.10)。なお、土砂の投入は、すべてのセンサに土砂が達した4回行った。

②実験結果

センサの応答状況を表 4.1 に示す。センサ上部が土砂に覆われると、土に接触した反応 (黄及び緑のランプの点灯が追加) を示した。

以上より、センサが土砂に覆われると、良好に検知装置が反応することが確認された。



**chは、ロガー-接続ポート番号を示す。

図 4.10 覆土応答試験に関する配置概要図

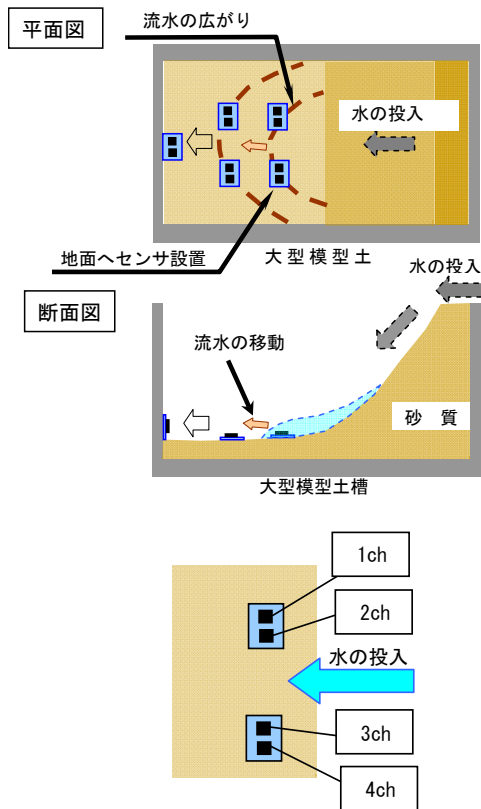
表 4.1 覆土試験結果

	実験前	投入1回目	投入2回目	投入3回目	投入4回目
1ch	空気	土砂	土砂	土砂	土砂
2ch	空気	土砂	土砂	土砂	土砂
3ch	空気	土砂	土砂	土砂	土砂
4ch	空気	土砂	土砂	土砂	土砂
5ch	空気	空気	空気	空気	土砂
6ch	空気	空気	空気	土砂	土砂
7ch	空気	空気	空気	土砂	土砂
8ch	空気	空気	空気	空気	土砂
9ch	空気	空気	空気	空気	土砂
10ch	空気	空気	空気	空気	土砂

2) 湧き水応答試験

①試験概要

覆土応答試験と同様、大型土槽内に作製した自然斜面と見立てた斜面下部にシートを配置し斜面上部より、水を注入し、水の湛水状態とセンサの反応状況を確認した(図 4.11)。



**chは、ロガー接続ポート番号を示す。

図 4.11 湧き水応答試験に関する配置概要図

②実験結果

センサの応答状況を表 4.2 に示す。センサ上部

まで水に覆われる(水没する)と、良好に、水に接触した反応(黄のランプの点灯が追加)を示した。

表 4.2 湧き水応答試験結果

	実験前	水没後
1ch	空気	水
2ch	空気	水
3ch	空気	水
4ch	空気	水

4. 6 転倒式土塊到達検知システム

勾配を変化させた時の反応状況の確認(転倒試験)及び投げ込みによる設置状況の確認(投下実験)を実施した。

1) 転倒実験

①実験概要

土の上にセンサを置き、斜面勾配を10度、20度、30度、40度に変化させ、反応の有無を確認した(写真4.5)。なお、センサは40度以上の傾きになると、検知機器のランプが点灯するように設定した(写真4.6)。



写真 4.5 転倒試験



写真 4.6 検知装置の反応

②実験結果

実験結果を表-4.3 に示す。設定どおり、斜面勾配が40度以上になると、センサが転倒し、反応することが確認された。

表 4.3 転倒試験結果

試験回数	傾斜角度	センサ:No.1	センサ:No.2
1 回目	10 度	正 常	正 常
	20 度	正 常	正 常
	30 度	正 常	正 常
	40 度	40度:転倒・警報	40度:警報
2 回目	10 度	正 常	正 常
	20 度	正 常	正 常
	30 度	正 常	正 常
	40 度	35度:転倒・警報	35度:警報
3 回目	10 度		正 常
	20 度	正 常	正 常
	30 度	正 常	正 常
	40 度	38度:転倒・警報	38度:転倒・警報
平 均	10 度	正 常	正 常
	20 度	正 常	正 常
	30 度	正 常	正 常
	40 度	38度:転倒・警報	38度:転倒・警報

2) 投下実験

①実験概要

地すべり滑落崖の上から、25～30m離れた地点にセンサを転がすあるいは投げ込み、センサの設置状況を確認した(図 4.12)。斜面の傾斜は、20～40 度である。



図 4.12 投下実験概要図

②実験結果

各回とも、地面を転がってから止まり、上下方向は正しく設置された。

また、25～30m離れた地点からの投げ込みや転がしであったが破損することなく設置できた(写真 4.7)。

5. まとめ

従来の計測機器では計測が困難な、移動量の大きい地すべりや、地すべり土塊がぬかるみ、流動化し、到達範囲の予測が難しい地すべりを対象に、移動量の計測や土塊の到達の検知が可能な6種類の観測機

器の開発を行った。

現在、4箇所のフィールドで実用化に向けた試験を実施している。今後、試験により得られた結果をもとに観測機器の性能を検証し、必要に応じて改良していく予定である。



写真-4.7 センサの設置状況

参考文献

- 1) 独立行政法人土木研究所・川崎地質(株)・曙ブレーキ工業(株)・坂田電機(株)・(株)共和電業：厳しい条件下での使用に耐える地すべり観測装置の開発 共同研究報告書第393号,平成21年6月
- 2) 千田容嗣、坂本孝之、藤澤和範：特殊な地すべり環境下でも使用可能な観測装置の紹介(その1)、土木技術資料51-10,2009.10
- 3) 千田容嗣、坂本孝之、藤澤和範：特殊な地すべり環境下でも使用可能な観測装置の紹介(その2)、土木技術資料51-11,2009.11
- 4) 千田容嗣、坂本孝之、藤澤和範：特殊な地すべり環境下でも使用可能な観測装置の紹介(その3)、土木技術資料51-12,2009.12
- 5) 坂本孝之、藤澤和範、千田容嗣、石田孝司、山邊晋、西條敦志、増子実、後藤知英、立野恵一：特殊な地すべり環境下でも使用可能な観測装置、第48回日本地すべり学会研究発表会講演集,pp248-249,2009.8
- 6) 千田容嗣、藤澤和範、石田孝司、坂本孝之、山邊晋、西條敦志：加速度センサを応用した地盤傾斜計の設置方法に関する試験報告、第48回日本地すべり学会研究発表会講演集,pp245-246,2009.8
- 7) 千田容嗣、藤澤和範、石田孝司、坂本孝之、国見敬、増子実、大久保智美：音響を活用した距離計測システムにおけるノイズの除去方法に関する一考察、第48回日本地すべり学会研究発表会講演集,pp108-109,2009.8