

## 研究成果報告書

研究開発課題名	地すべり地域における信頼性と精度の高い被圧地下水分布把握技術及び間隙水圧観測技術の研究開発
研究総括者	塚田 基治
研究開発組合	株式会社エルデ・ジャパン 坂田電機株式会社
試験研究機関	独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構 農村工学研究所

## 1 事業の実施内容

## 1.1 事業の背景及び目的

地すべり災害の主原因は、すべり面に作用する間隙水圧の上昇と考えられており、すべり面周辺地層に存在する被圧地下水層の流動を把握することが重要である。

しかし、この被圧地下水層の流動性状を的確に把握することは非常に困難である。また、まず地中変位観測孔を掘削してすべり面を把握し、次に部分ストレーナを有する水位観測孔を新たに掘削する必要がある、調査ボーリングに時間と経費を要している。

そこで、被圧地下水の分布状況と被圧水圧力をリアルタイムで計測するシステムに、高品位サンプルを採取可能なボーリング技術を活用したサンプラーを組合わせた「一体型サンプラー」を開発することにより、1本の調査ボーリングでよりの確な地質情報と地下水状況を把握し、的確な位置で精度の高い間隙水圧測定を実施する技術を開発する。

## 1.2 事業の内容及び実施方法

## 1.2.1 ボーリング技術を確立するための研究開発

## (1) 気泡工法における高速層流状態の維持

一般的なボーリング技術である送水式ボーリング工法では、特に脆弱部を圧送水により流亡させ、地すべり地の地盤性状を詳細に把握することは極めて難しい。また、気泡ボーリング工法では、一般に掘削水が少なくて済み、孔壁を荒らさず高品位コア採取が可能であるが、地下水位以深でのボーリングが不可能である場合があった。

よって、従来の問題点を解決し地下水の有無の影響を受けない気泡を掘削流体として活用した気泡工法(以下、本気泡工法と略す。)を本研究のボーリング工法として採用する。

本研究では、「一体型サンプラー」を使用することによって、本工法の最も重要な特異性である、気泡流の高速層流状態の維持が困難になることが危惧されたため、原材料の配合比や送圧の最適化をおこなった。

ここで、本気泡工法について説明する。

気泡発生装置より発泡生成された硬膜二重層の完全発泡した気泡が、ボーリングロッド等を介し、サンプラー先端に取り付けられたビットより噴出される間は、高速層流状態が維持されているため、掘削中に湧水現象が発生すると瞬時に乱流状態となり、圧力が変化する。この現象は圧力計等でモニターが可能であるから、この圧力変動を把握すると同時に孔口で湧水量が把握できるので、ほぼ正確な被圧水層の深度を知ることができる。同様な原理で逸水箇所に対してもほぼ正確な深度を把握することができる。

(2) 現場実証実験地の地質、地盤性状に適合した本気泡工法を活用する場合の一体型サンプラー専用掘削刃

本研究における現場実証実験で使用するビットは、基本的に本気泡工法が保有している不安定地盤（破碎帯、礫層、亀裂性地盤等）専用掘削刃を活用する。本研究においては、当初、形状等に関して改良する必要はないと結論した。

しかし、パイロットボーリング孔において、想定外の地質性状であることが判明したため、工学的モデルを再考し、改良品を新たに試作して対応した。

1.2.2 間隙水圧測定に適合した測定環境作りに必要な施工方法（工法）の研究開発

「一体型サンプラー」は間隙水圧をリアルタイムで計測する条件として、送信器より上部 3m 以上（掘削刃先端から上部 5m）は金属製ケーシングパイプを使用できないため、当該区間は裸孔状態で掘進する必要がある。

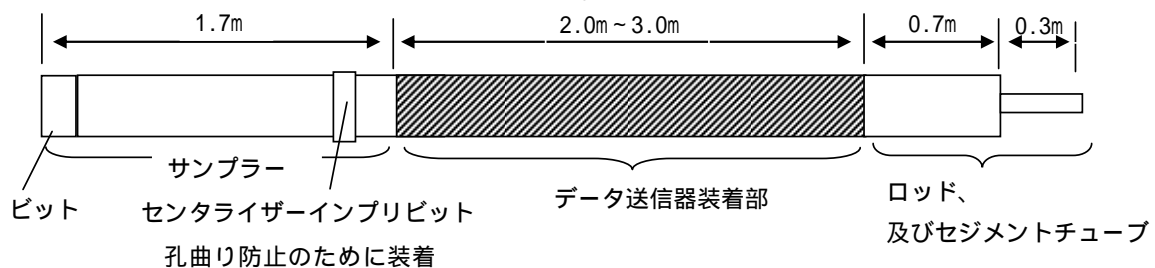


図 1-2-1 「一体型サンプラー」の概要図

したがって、本研究では「一体型サンプラー」によるサンプリング及びリアルタイム間隙水圧測定と、その後、直ちに実施される原位置間隙水圧測定に対し、これら全てに悪影響を与えず、且つ施工性に優れた孔壁保護工法の研究開発をおこなった。

本研究では高分子・重合反応特性である「凝集・凝固現象」を活用した、図 1-2-2 に示すような孔壁保護施工法の適用性を検討した。

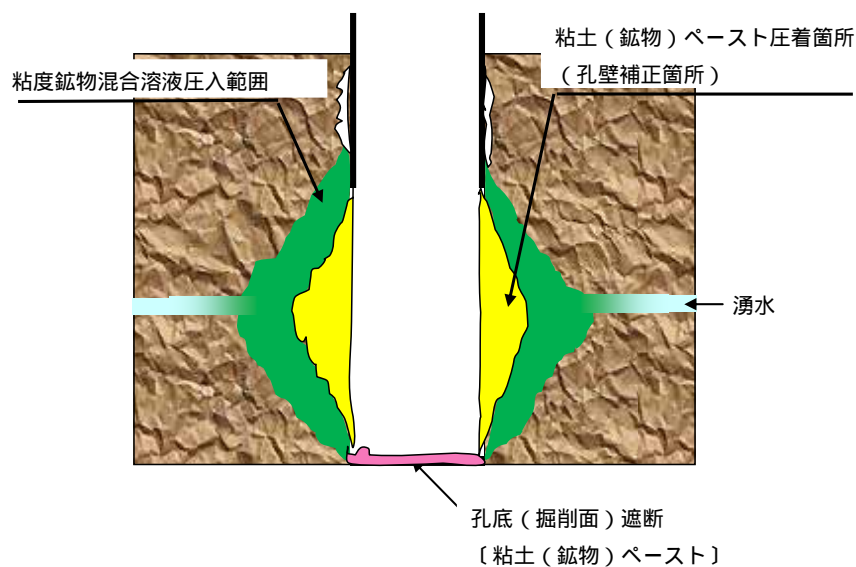


図 1-2-2 孔壁保護（養生）施工

1.2.3 ボーリング施工中に誘発・確認された被圧水（間隙水圧）の観測・測定が可能なシステム開発とこれに伴う測定・計測器の研究開発

システム構成を  
図 1-2-3 に示し、各  
部の具体的な実施  
方法を以下に示す。

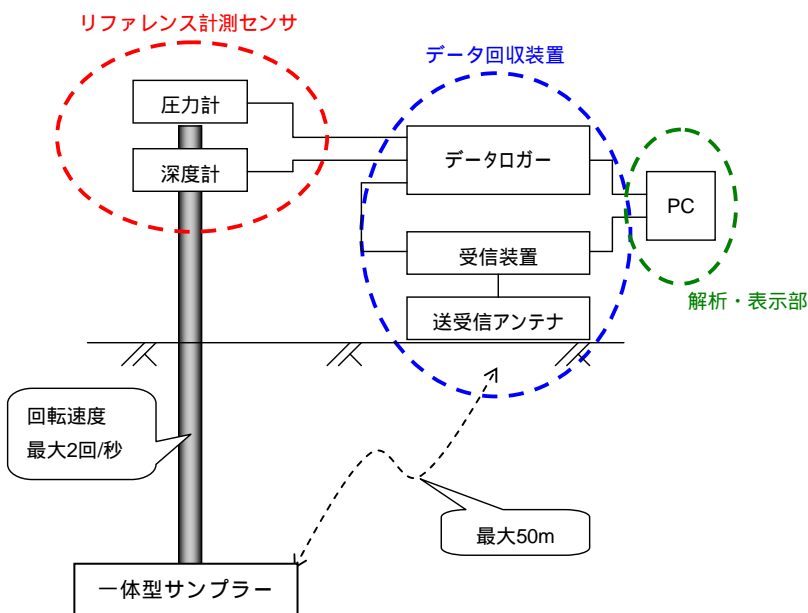


図 1-2-3 システム構成

(1) 「一体型サンプラー」

一体型サンプラーはワイヤレス圧力計をサンプラーに取付けて構成され、ビット先端付近の水圧データを測定・保存する。データ保存する目的は、地上でデータ受信できなくなった場合でも、掘削完了後に測定データを回収して解析することができるようにするためである。

送信頻度は、毎分（最短）～毎時（最長）まで設定可能とする。

ヘッドカップリングやケーシングによる電磁波減衰を考慮して設計する。

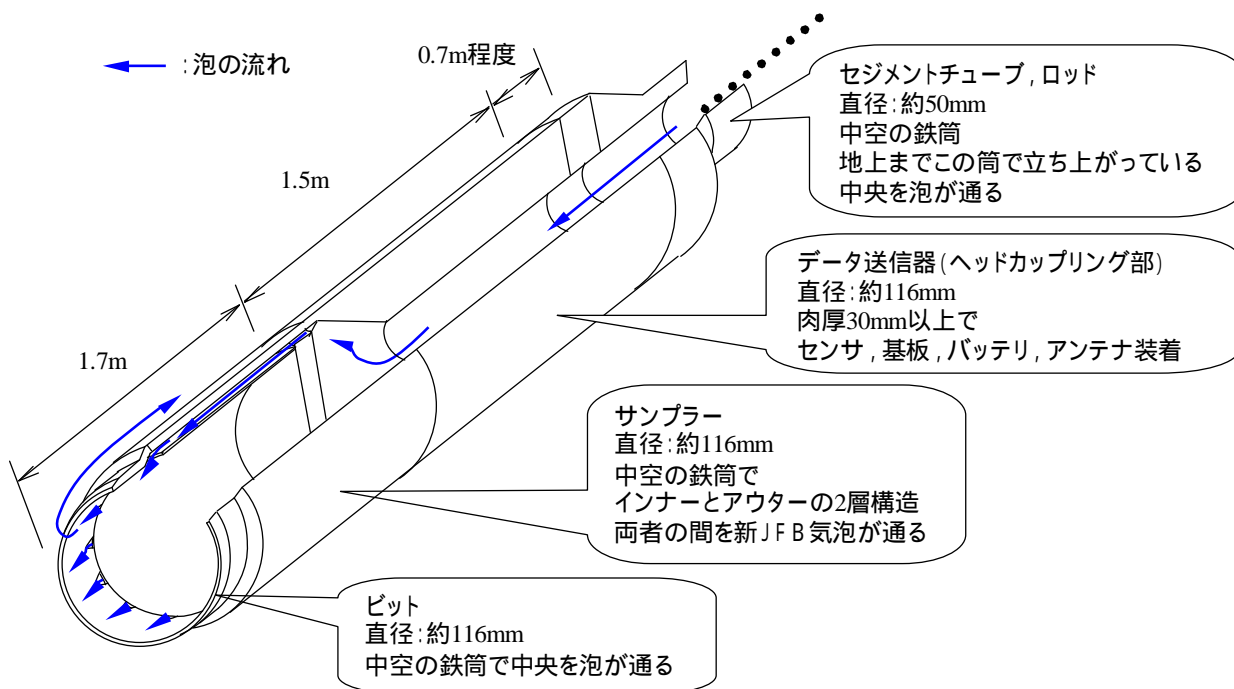


図 1-2-4 「一体型サンプラー」の概要

## (2) リファレンス計測センサ

掘削深度を推定するためにワイヤをスイベルに取り付けてワイヤ変位を測定する。  
変位測定センサは掘削マシン本体に据付け、スイベルの上下に伴うワイヤの伸縮を計測する。

また参照データとして地上の気泡発生装置の送気圧を測定する。

## (3) データ回収装置

ワイヤレス圧力計の測定データを地中無線通信で収録する受信器と、地表の掘削深度計測センサと硬膜二重層送圧の測定装置で構成する。

## (4) 解析・表示部

データ回収装置から各データを収集し、掘削深度におけるビット先端圧力と地上の硬膜二重層送気圧力の関係を表示・保存する。

## (5) セルフチェックなど

「一体型サンプラー」のバッテリー電圧、地上側システムのバッテリー電圧をモニタリングすることで、システムの健全性をチェックする。

## 1.2.4 長期間にわたり、地すべり動向、及び地下水性状（間隙水圧、流向、流速、透水係数等）を観測・測定するために必要な測定・計測器の研究開発

計測センサは 116mm 掘削孔への適用を考慮し、48mm の最大外径を機器開発の優先的な制限事項として、観測項目の選定，測定頻度の検討をおこなう。

上記検討結果をもとに、地すべり総合観測用データ送信器の基礎設計をおこない、必要となる電力計算を実施し、搭載するバッテリー容量を求める。

以上の結果を総合して、地すべり総合観測用データ送信器の開発，設計をおこなう。

## 1.2.5 実証試験

現場実証試験は、事前地質情報及び参照観測データが豊富な農林水産省直轄地すべり対策事業庄内あさひ地区（山形県鶴岡市七五三掛地すべり地）において実施させていただいた。

まずパイロット孔ボーリングにより以下に示す 4 項目の性状を把握する。

工学的地層モデルの確認（既存資料との整合性と相違点）

地下水の流動特性

掘削刃の適合性

掘削流体である本気泡工法硬膜二重層の最適気泡流体

その後、本孔ボーリングにより、パイロット孔ボーリングによって得られた性状との整合性確認と「一体型サンプラー」の適用性確認ならびに被圧水層の検討を行う。

本孔ボーリングでは、被圧水が確認された特定区間（GL-17.5m～GL-20.0m、GL-24.5m～GL-27.0m）のみに本技術を適用し、それ以外の区間は送水式ボーリングにて掘削した

さらに、本孔には観測で得られた被圧水層の深度に地すべり総合観測用データ送信器を設置し、長期観測データを取得する。

## 1.3 事業着手時に想定した技術的問題点への対応

技術的問題点	対応
<p>地盤性状が非常に脆弱で、ボーリング中に孔壁の崩壊が起きた場合、リアルタイムで計測を行っている間隙水圧等にどの程度の影響が出るかが問題となる。</p>	<p>ボーリング中の地下水流動に関しては、既存資料により十分に地盤性状を確認すること。また、気泡の有効特性を十分に活用することで対応する。</p>
<p>長期における原位置間隙水圧測定（試験）の実施においては、長時間にわたり、孔内の測定区間に位置する被圧水が湧水噴出されるため、この水脈付近の孔壁は崩壊してしまう可能性がある。</p> <p>よって、長期観測等に対する測定環境整備方法が問題となる。</p>	<p>孔内に位置する被圧水脈による孔壁崩壊防止策が重要である。よって、以下に示す 3 項目で対応する。</p> <p>a) 既存の資料による地すべり状況の推測・検討 b) 変動、変位に充分対応可能なストレナの作成と、孔壁保護管（パイプ）としての使用 c) 上記保護管の寸法、形状等に関しては、孔内に設置する測定器の仕様に適合・対応したものとす。</p>
<p>ボーリング時の地中間隙水圧変化を圧入孔口の圧力変化から判断するためには、ビット先端も圧力センサを配置し、その測定値と圧入孔口の圧力変化との関係を検証する必要がある。そのため、ビット内に取付可能なセンサ・測定回路ならびにデータ伝送装置が必要となる。</p>	<p>ビット内の圧力測定のうち、センサについては目詰まりを避けるためフィルタを使用しない盤圧測定型とし、データ伝送については低周波電磁波を通信手段とすることにより土中からの無線データ収集が可能な装置を開発することで、ビット先端の圧力と圧入孔口の圧力との関係把握を行う。</p>

## 1.4 事業の実施体制

## (1) 研究開発組合内の役割分担

個別研究テーマ	(株)エルデ・ジャパン	坂田電機(株)
測定計測器の市場技術調査、並びに研究開発	-	
ボーリング技術確立のための研究開発		-
ボーリング施工中に被圧水がリアルタイムに測定可能なシステム開発、機器の研究開発		
機器の信頼性と精度の確認試験	-	
間隙水圧測定(試験)のための環境整備に必要な施工技術の開発		-
高品位なサンプル採取、並びに現場における試験の実施。実証試験結果の評価		
地すべり動向、並びに地下水性状の測定、計測器の研究開発	-	
長期観測・測定の実施		
データの考察、取りまとめ、及び、本調査手法のマニュアル化		

## (2) 試験研究機関と研究開発組合の役割分担

個別研究テーマ	農村工学研究所	共同研究組合
測定計測器の市場技術調査、並びに研究開発	-	
ボーリング技術確立のための研究開発		
ボーリング施工中に被圧水がリアルタイムに測定可能なシステム開発、機器の研究開発		
機器の信頼性と精度の確認試験	-	
間隙水圧測定(試験)のための環境整備に必要な施工技術の開発		
高品位なサンプル採取、並びに現場における試験の実施。実証試験結果の評価		
地すべり動向、並びに地下水性状の測定、計測器の研究開発		
長期観測・測定の実施		
データの考察、取りまとめ、及び、本調査手法のマニュアル化		

1.5 事業の年度計画と実績

個別研究テーマ	平成 22 年度		平成 23 年度		平成 24 年度	
	上期	下期	上期	下期	上期	下期
測定計測器の市場技術調査、並びに研究開発		■				
ボーリング技術確立のための研究開発		■	■	■	■	■
ボーリング施工中に被圧水がリアルタイムに測定可能なシステム開発、機器の研究開発		■	■	■		
機器の信頼性と精度の確認試験		■	■	■	■	■
間隙水圧測定（試験）のための環境整備に必要な施工技術の開発		■	■	■	■	■
現場における試験の実施。実証試験結果の評価			■	■		
地すべり動向、並びに地下水性状の測定、計測器の研究開発	■	■	■	■		
長期観測・測定の実施			■	■	■	■
データの考察、取りまとめ、及び、本調査手法のマニュアル化			■	■	■	■

注) ■ は計画、■ は実績。

1.6 研究開発の概要、結果、課題等

1.6.1 ボーリング技術を確立するための研究開発

本気泡工法で標準としている「二重硬膜生成剤」の配合比率を 1 として、配合比率を 0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0 と変化させたときの流動特性と気泡性状を図 1-6-1 に示す実験装置で確認した。

また、送気圧力を 0.04MPa (0.4kgf/cm<sup>2</sup>)、0.08MPa (0.8kgf/cm<sup>2</sup>) として、前記配合比率による流動特性と気泡性状を把握し、最適な組合せを確認した。

コンプレッサの送気圧力を 0.04MPa にしても、配合比 0.7~1.6 において層流状態維持を確認できた。また、0.08MPa にすると、化学的安定性、物理的堅牢性が一層向上することが判明した。

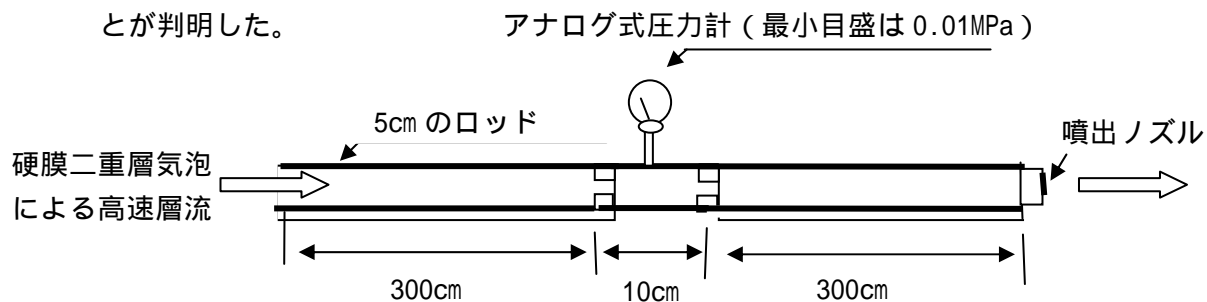


図 1-6-1 実験装置モデル

## 1.6.2 間隙水圧測定に適合した測定環境作りに必要な施工方法（工法）の研究開発

粘土鉱物混合溶液（粘土鉱物水溶液と機能性高分子の混合溶液）は 0.08%、0.16% の 2 つの希釈濃度で実験を行い、より粘性が高く孔内注入の可能な 0.16% のものと、水と粘土鉱物を混ぜて団子状にした粘土鉱物ペーストを使用して、孔壁保護と同時に密閉区間が施工可能となるよう、孔壁保護施工工法を確立した。

## 1.6.3 ボーリング施工中に誘発・確認された被圧水（間隙水圧）の観測・測定が可能なシステム開発とこれに伴う測定・計測器の研究開発

「一体型サンプラー」は圧力センサ、アンテナ、制御回路とバッテリーで構成される。開発にあたっては、H13 官民連携新技術開発事業により開発したワイヤレス間隙水圧計の成果を基に、アンテナ部の設計変更と筐体設計ならびにインターバル測定・送信プログラムの開発を行った。

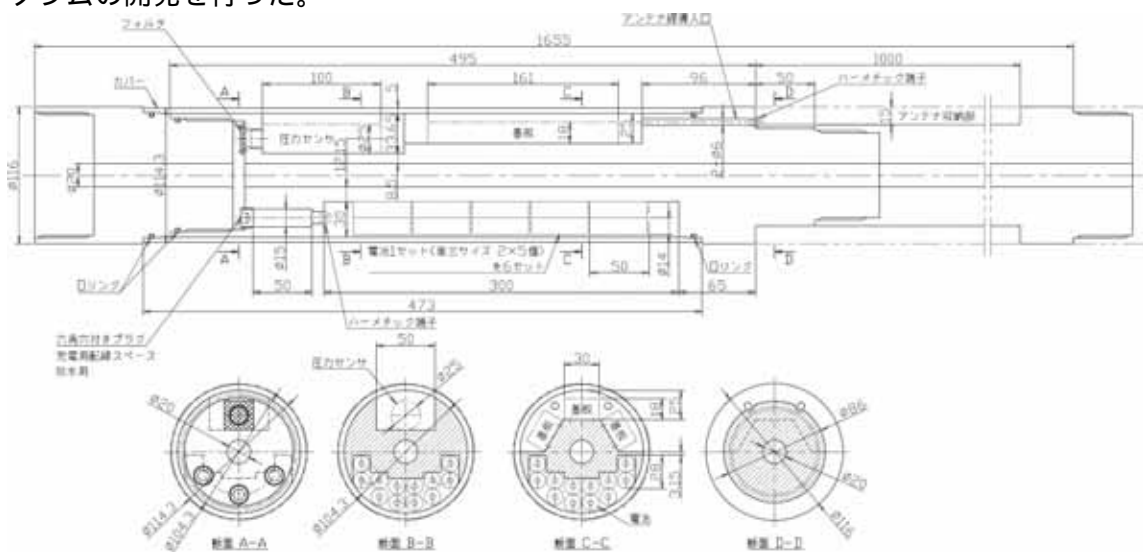


図 1-6-2 「一体型サンプラー」

## (1) アンテナの開発

鋼製ボーリングロッドにアンテナが巻かれることから、送信電磁波が金属物によって減衰することが想定された。

減衰量を推定するためにアンテナの近傍に金属体を配置した場合の減衰確認実験をおこなった結果、金属体が近傍にある場合は共振周波数が 20Hz 程度ズレること、および信号強度が最大で 8% 減衰することが確認できた。

また離隔を 50mm 以上とると、金属体の影響はほとんどなくなることが確認できた。

実証試験地の山形県七五三掛地区では、環境ノイズが数 mV であることが確認されていたため、以下の方針でアンテナ仕様を設計した。

- ・ アンテナを巻くロッドはアンテナ両端から 100mm 以上長くしておくことで、上下にボーリングロッドが足されても、送信性能に影響が出ないようにする。
- ・ 距離 50m の伝送にはワイヤレス間隙水圧計と同等の性能で十分通信可能であるが、ボーリングロッドは長大であるため、マージンを見てワイヤレス間隙水圧計に比べて 20% 以上の出力増とする。ただし、回路やバッテリーの仕様が許せば、出力増とする。



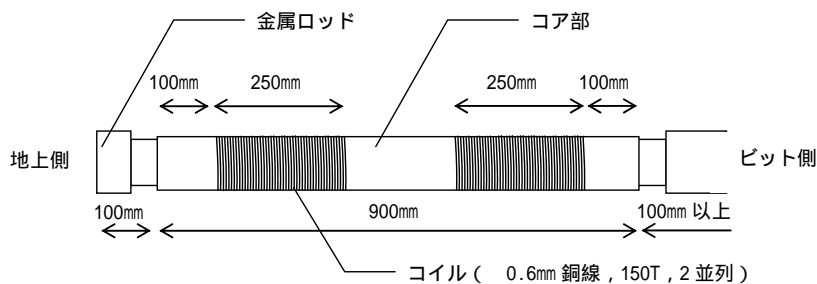


図 1-6-3 送信アンテナ仕様

減衰確認実験の結果とワイヤレス圧力計用に製作したアンテナの性能確認結果を以下に示す。

掘削状態の模擬として、アンテナのビット側には送信器収納用金属筒を、地上側には 116mm × 1000mm の金属筒を仮接続した状態で、送信信号強度確認実験をおこなった。

図 1-6-4 に実験結果を示す。

ワイヤレス間隙水圧計に比べて、概ね 2 倍の信号強度を得ることができた。

以上のように目標仕様を満足するアンテナを製作することができた。なお、アンテナ外装は絶縁材料であるセラミック材でコーティングし、耐摩耗性を確保するとともに、通信性能に影響しないよう配慮した。

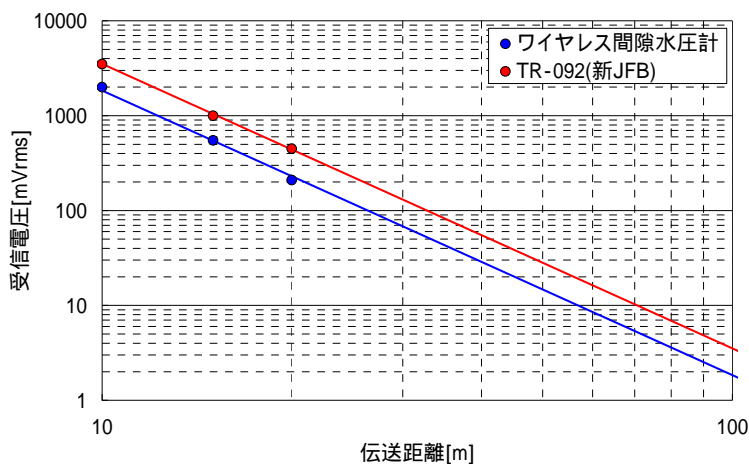


図 1-6-4 送信性能確認結果

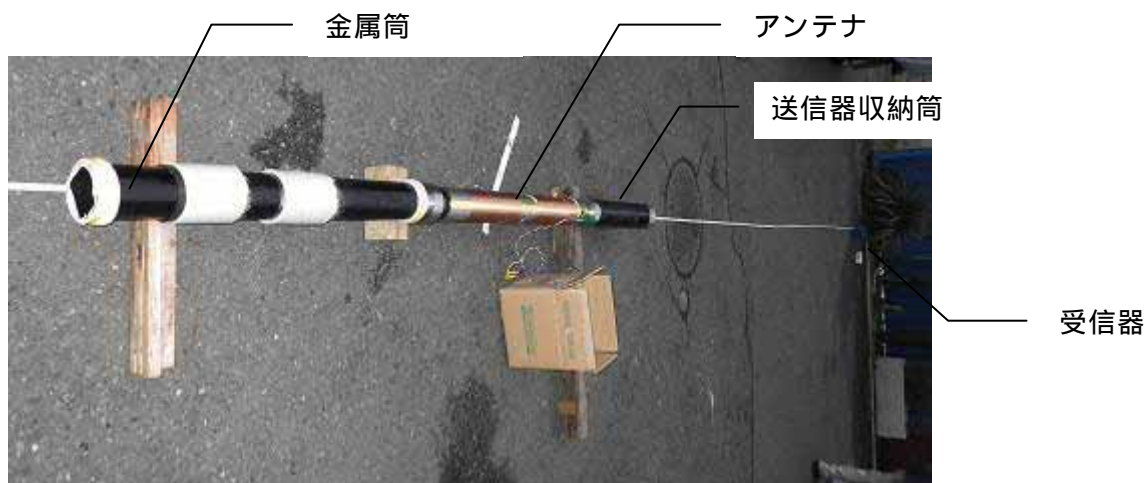


図 1-6-5 アンテナ性能確認試験状況

#### 1.6.4 長期間にわたり、地すべり動向、及び地下水性状（間隙水圧、流向、流速、透水係数等）を観測・測定するために必要な測定・計測器の研究開発

##### (1) 観測項目の選定

現在は有線式のセンサが一般的であり、縦伸縮計，孔内傾斜計，パイプひずみ計，水位計などが使用されているが、すべり面付近の性状を正確に長期に渡って捉えられるセンサはない。

このようなセンサを無線化すれば、センサが設置される層を挟んで上下で完全に止水するなどして、観測範囲を観測対象深度付近に限定することができる。またすべり面が複数の場合浅層すべりの影響を受けず深層すべり面の観測が可能となる。

以上のことと、埋設計器の最大外径 48mm の実現可能性を考慮して、観測項目を間隙水圧計による間隙水圧計測，縦伸縮計によるすべり面変位計測とした。また地下水の流入出状況の変化は水温の変動に現れる可能性があるため、間隙水圧計の近傍で温度計による水温計測も実施することとした。

測定頻度は毎時 1 回とし、5 年以上の運用を可能とすることとした。

##### (2) 地すべり総合観測用データ送信器の基礎設計

従来の地中通信では磁界による通信方式を採用している。これはアンテナを比較的コンパクトにまとめられるためである。

しかし、今回想定している 86～116mm 程度のボーリング孔では、磁界用のアンテナは寸法的な制約によりほとんど通信距離をとることができない。したがって電界による通信方式を採用することとした。

電界通信では、送信側，受信側とも電極間隔を大きく取れば取るほど信号強度は大きく取ることができる。

##### (3) 必要電力の算出

5 年運用の前提でエネルギー密度の高いリチウム一次電池を使用して本体長さを 2 倍にすることとし、通信距離 50m を満足する仕様とした。

(右表)

動作状態	消費電力 (W)	1 回あたりの通電時間 (s)	備考
測定	2.2	10	
送信	10	1000	50m 通信時
スリープ	0.00033	測定・送信以外	

毎時測定，1 週間に 1 回データ送信の場合、1 日に必要な電力は以下となる。

測定： $2.2 * (10 / 60 / 60) * 24 = 0.1467 \text{ Wh}$

送信： $10 * (1000 / 60 / 60) / 7 = 0.3968 \text{ Wh}$

スリープ： $0.00033 * (24 - 10 / 60 / 60 * 24 - 1000 / 60 / 60 / 7) = 0.0079 \text{ Wh}$

よって 0.5514Wh が 1 日の運用に必要な電力である。

(4) 地すべり総合観測用データ送信器の開発

以上をもとに開発したデータ送信器の外観図を図 1-6-6 に示す。

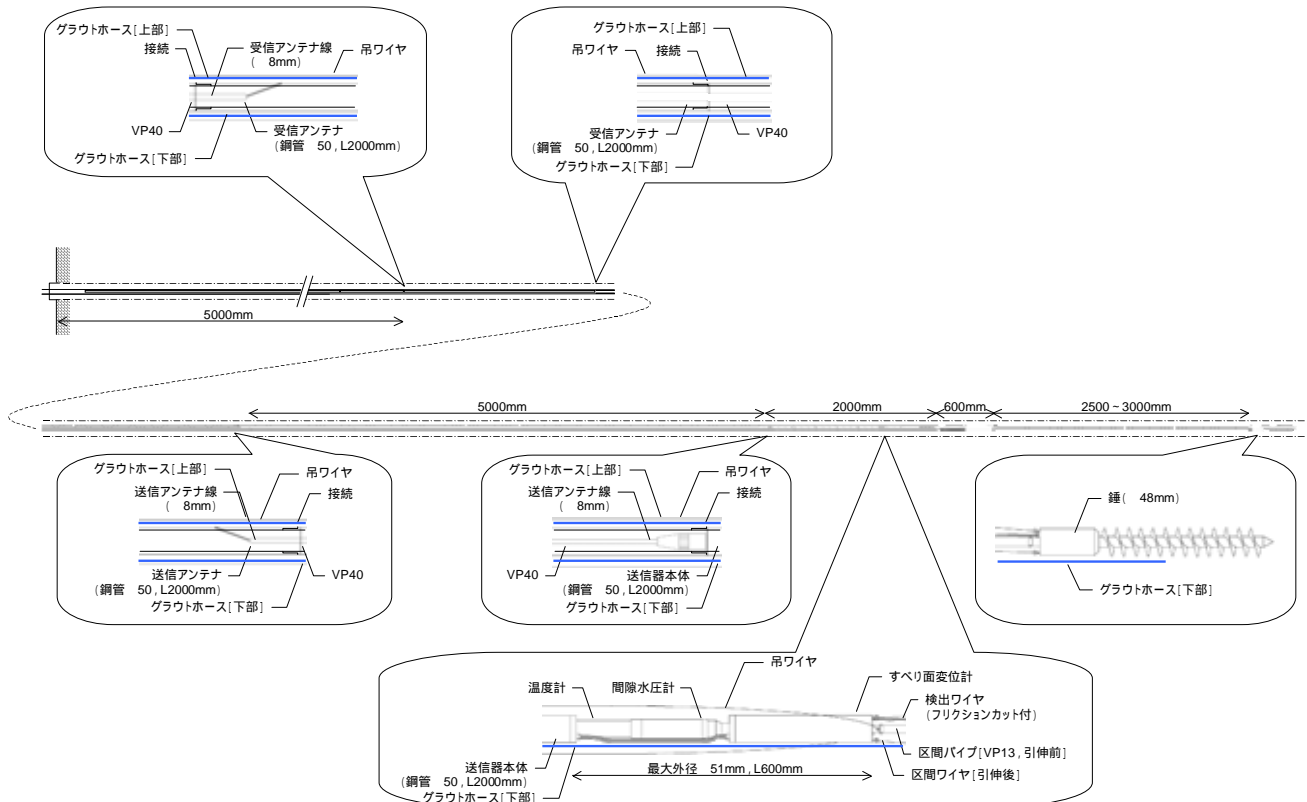


図 1-6-6 地すべり総合観測用データ送信器外形

(5) プログラムの開発

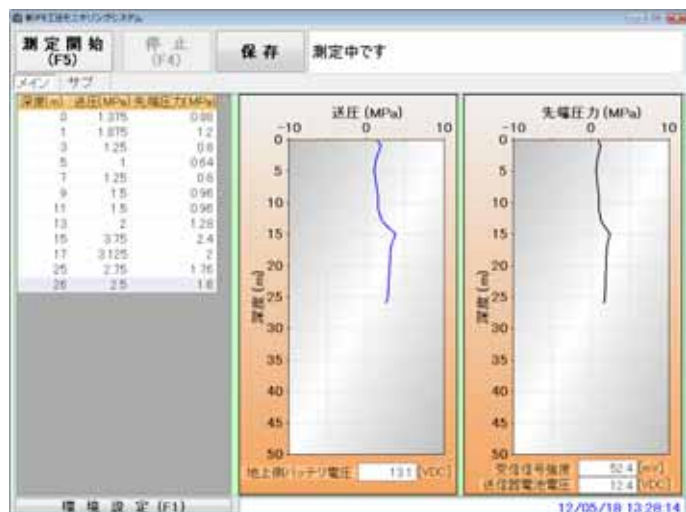
掘削しながらデータを確認する必要があるため、測定 送信 受信のサイクルを一連の流れとして、設定されたインターバルでこの動作を実行するようなプログラムとした。

(6) 解析・表示部

測定データを回収し、CSV 形式のテキストデータとして保存するとともに、測定結果を解析して画面に表示す。画面表示例を右図に示す。

掘削中はデータを定期的に回収するが、コアサンプルの採取は深度 1m ごとにおこなうため、ワイヤレス圧力計は概ね 1 時間以内毎にボーリング孔内を上下することになる。

従って、1 日の掘削で同一深度のデータが複数個収録されることになるが、被圧水の性状は最初にその深度に到達したときに得られた圧力データが最も正確に表していると考えられるため、本装置ではその深度の最初の圧力データのみを採用することとした。



## 1.7 実証試験（現場適用）の概要、結果、課題等

### 1.7.1 パイロットボーリング孔

#### 工学的地層モデルの確認

提供された既存資料（ボーリングコア写真、及びボーリング柱状図）より地質を 5 種類に分類し、各々の地質に対する工学的地層モデルを想定したが、パイロットボーリングにより当初既存資料からの推定モデルと異なる結果が得られた。

#### 地下水の流動特性

地下水は GL-15.15m より毎分 1.6 リットル、水温 14.5 の湧水が確認された。（添付資料図 A - 1 パイロット孔簡易柱状図に地下水状況をまとめた）

なお、地すべり層に分布する被圧水の特徴は、ボーリングにより被圧層に達すると被圧水が瞬時に噴出し、その水圧と湧水量が一気に増加するが 1 分程度経過すると落ち着き、被圧力と湧水量は平衡となる。

現場実証実験孔で「一体型サンプラー」を使用したサンプリングとリアルタイムで間隙水圧を測定する深度は、関係各位のご指導によって GL-18.23m 付近と GL-25.65m 付近の 2 箇所に決定した。

一方、パイロット孔のサンプリング調査深度は当初 GL-30m を予定したが、既存資料より想定した地層断面との相違が判明したと併せて、地質構造にも既存資料との相違が確認されたため、最終的に GL-40m までとした。

#### 掘削刃

実証試験場所の地質は、既存資料より想定した性状とパイロットボーリングにおける本気泡工法のサンプルを比較すると、地質学の観点では大差ない。

しかし、工学的観点で考察すると、想定していた地層に比べ遥かに不安定であり、亀裂は開口亀裂（オープンクラック）も多方向に多数確認され、微細亀裂（ヘアクラック）も地層全体に無数存在している。これに伴う風化も相当に進行していると推測される層が多数存在していた。

このような地質性状により、工学的特性は想定していた弾性領域が相当に狭くなった。

一方、亀裂領域と塑性領域との占有比率の判断を変形歪から推定することは難しい。

以上のような性状を有する地層であるために、非常に脆く弾性限界が相当に低く、粘性と塑性の領域が混沌としている。

よって、現場実証実験孔（本孔）では最適なビットを試作し、その効果を確認した。

#### 掘削流体である本気泡工法の硬膜二重層の最適気泡流体

硬膜二重層の最適な気泡流体を創作するため、パイロットボーリング施工中に可能な限りの研究・実験を行った結果を報告する。

##### ）被覆剤（硬膜泡保護剤）

気泡剤濃度を低下させ、被覆剤の濃度を通常使用濃度の 2 倍に高めることで重合反応の阻止と硬膜泡の弾性強度の低下を防止させている。

##### ）圧縮空気

気泡は、圧縮圧力、送気量を通常使用の値に制御して使用しても高速層流状態は維持されることを確認した。

## 1.7.2 実証実験孔

### 高速層流状態の維持確認

本気泡工法の基本的原理である「硬膜二重層」の気泡流動が、長尺である「一体型サンプラー」によるサンプリングを実施した際も「高速層流状態」が維持されたことが確認できた。

### 地下水流動特性リアルタイム測定の確認

本テーマについては 2 区間の実施であるが、地下水の被圧状態を把握するためのリアルタイム測定は可能であると確認できた。

特に「一体型サンプラー」に組み込まれたワイヤレス圧力測定装置からのデジタル様式による圧力測定値と、本気泡工法気泡発生装置に取り付けられたブルドン管によるアナログ様式の圧力測定値の差異とタイムラグは殆ど無く、本気泡工法における硬膜二重層の高速層流状態は、実証試験の深度内では理論通りに作用することが確認された。

より信頼性の高い検証には深度 25m 以深での適用確認を行う必要がある。

### 掘削刃

パイロットボーリングより得た情報を基に設計基準を再構築し、「ハイブリッドビット」と「破碎岩用ダイヤモンドビット」を試作した。

GL-24.5m～GL-27.0m の区間で、サンプリングと間隙水圧測定を実施し、基本的なデータは取得し一定の有効性を確認したが、これらビットの適用限界を確認・評価するには至っておらず、汎用化に当たっては今後の検証が必要である。

1.7.3 ボーリング施工中に誘発・確認された被圧水（間隙水圧）の観測・測定が可能なシステム開発とこれに伴う測定・計測器の研究開発

2011年12月17日に山形県七五三掛地区で実証試験をおこなった。

そのときの計器配置図を図1-7-1に示す。

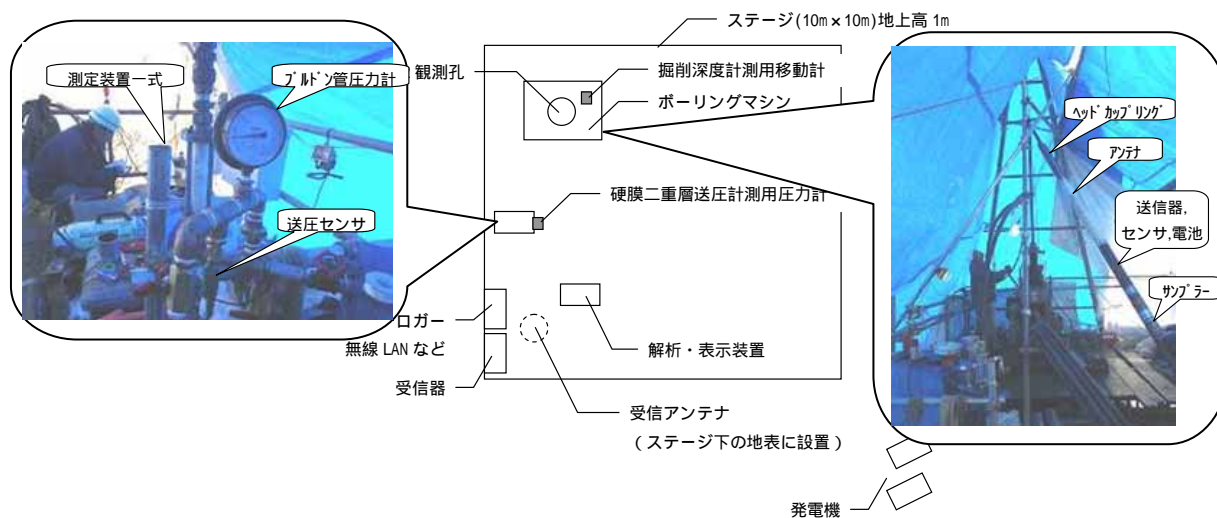


図 1-7-1 実証試験計器配置図

実証試験深度はGL-25m付近であったが、アンテナはビット先端から約2m上部に位置するため、通信距離に換算すると23m強となる。

また、GL-21mから地表までは金属ケーシングで覆われていたため、ロッド降下/引上げ中はデータ受信できなかったが、試験深度のGL-25mでは掘削にともなう送気圧と先端圧のデータがリアルタイムで取得できた。

実証試験で得られたデータをまとめて図1-7-2に示す。

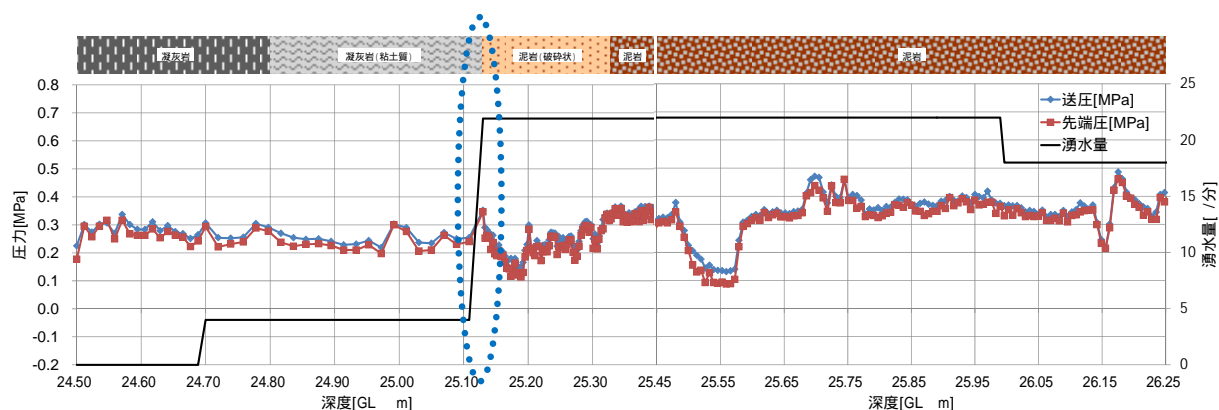


図 1-7-2 実証試験結果

GL-25.13mでは、送圧/先端圧が約0.1MPa増加し、湧水量も22/分に増加した。また、回収した極めて乱れの少ないサンプルの柱状図（グラフ上部）も踏まえると、1本のボーリングですべり面の可能性がある不連続面を特定できたと考えている。

本試験では送気圧とビット先端圧は高い相関があり、深度25m以浅では地表での送気圧測定と湧水量観測で被圧水を推定できる可能性が高いことも確認された。ただし、本試験は1回のみであり、更に調査実績を重ねて有効性の検証をおこなう必要がある。

1.7.4 長期間にわたり、地すべり動向、及び地下水性状(間隙水圧、流向、流速、透水係数等)を観測・測定するために必要な測定・計測器の研究開発

パイロット孔と観測孔の位置関係とすべり面と想定される破碎部の深度を右図に示す。

初回設置機材は送信回路の不良でデータ送信できなかったため、送信回路を見直し送信器の再製作をおこなって2012年12月に上記観測孔から約10m離れた位置で掘削をおこない、再設置をおこなった。

約4か月間ではあるが、観測データが取得できている。同じ観測区間を部分ストレナ仕上げとしたパイロット孔の水位計データと比較すると、水位変化がやや大きく現れることからより観測区間に限定された水圧変化が把握可能になったとみられる。

これらの破碎部がすべり面であるか否かについては、今後の長期観測により確認していく必要がある。

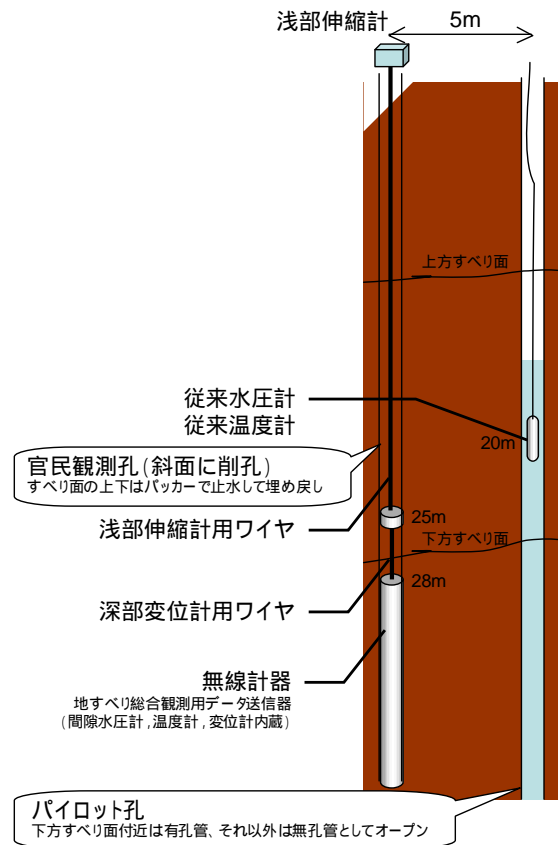


図 1-7-3 パイロット孔と観測孔の機器配置

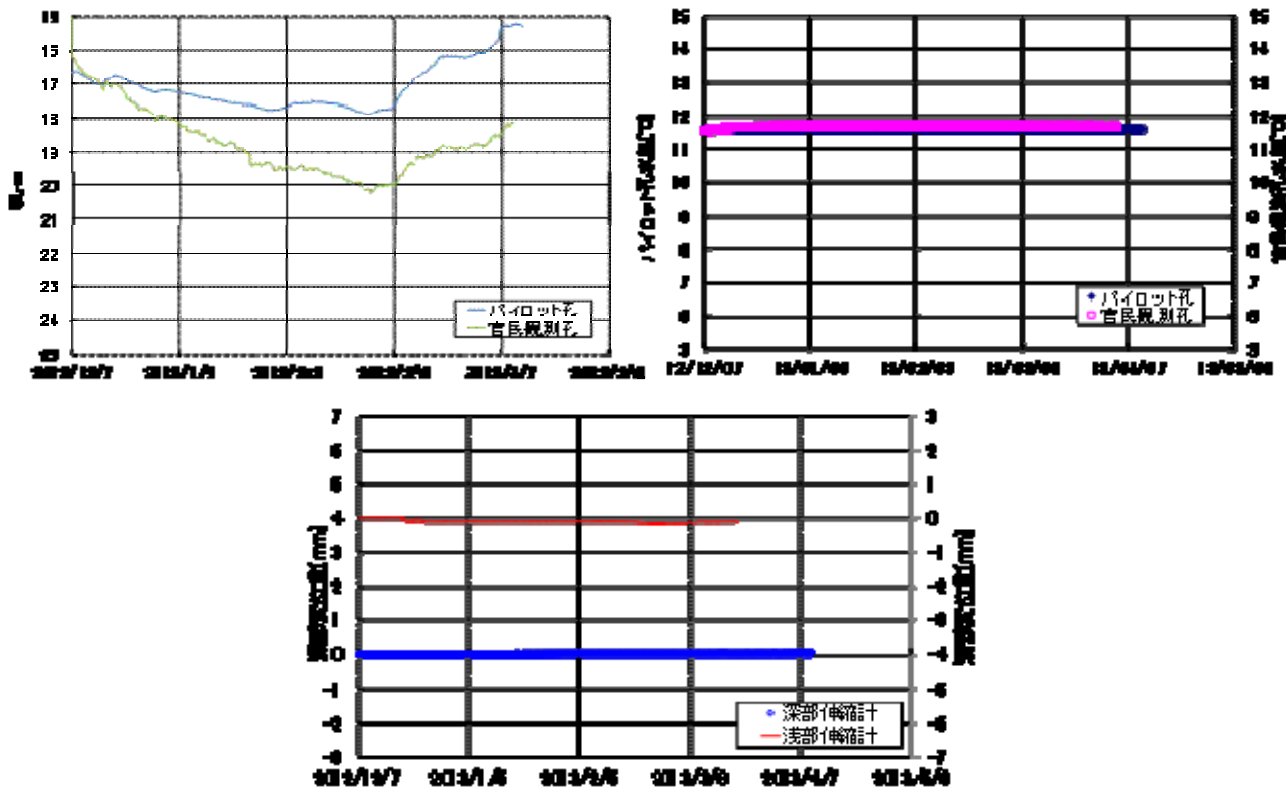


図 1-7-4 観測データ

## 2 事業の成果

### 2.1 成果の内容

#### (1) 本研究開発目的に適合したボーリング技術の確立をするための研究開発

本気泡工法・硬膜二重層の気泡性状

「一体型サンプラー」を使用しても気泡性状に支障のないことは基礎実験で確認した。

本実験場所の地質は地すべり地域特有の不安定性状であったため、硬膜泡の起泡剤濃度を低減させ、その分、保護層となる不活性界面活性剤の濃度を高めた。

掘削刃

上記 に示したような地質性状を有するため、ビットの設計思想を再考し、本実験場所の地質性状に適合させたものを試作し、使用した。

以上、 と の関連技術をユニットシステムに活用すべく研究（開発）したが、本実験では施工回数が1回のみであり、その評価にはさらに実証実績を積む必要がある。

一方、パイロットボーリングでは、当初期待していた精度の地質情報、及び地下水の湧水と逃水の深度、また湧水した場合、その水量と圧力も簡易的ではあるが明確に把握された。

#### (2) 間隙水圧測定に適合した測定環境作りに必要な施工方法の研究開発

検討した粘土鉱物混合溶液等により、5mの長尺な区間をケーシングパイプ等の金属素材を使用しない方法で孔壁を保護し、本施工を無事に行うことができた。

パイロット孔では GL-18.23m において毎分 12 リットル、GL-25.65m において毎分 44 リットルの湧水を確認した。このため本工法施工区間は GL-17.5m～GL-20.0m と GL-24.5m～GL-27.0m の計 5.0m とした。パイロット孔からの水平距離 5m 地点の本孔においては、パイロット孔の上位の湧水に対応する被圧水は認められなかったが、下位の湧水に対応した被圧水が確認され、GLI-25.13m から毎分 22 リットルの湧水がみられた。パイロット孔と本孔の被圧水応答の違いは、パイロット孔における圧力解放の影響が考えられる。

#### (3) ボーリング施工中に誘発・確認された被圧水（間隙水圧）の観測・測定が可能なシステム開発とこれに伴う測定・計測器の研究開発

GL-25.13m において、先端圧力が約 0.1MPa 増加し、湧水量も増加したことからコアサンプルの性状から、本システムですべり面の可能性がある不連続面をリアルタイムに特定できたと考えている。

また、コンプレッサ送圧とビット先端圧は高い相関があり、深度 25m 以浅では地表での送圧観測だけで被圧水圧を推定できる可能性が高いことも確認された。

一方、通信性能としては深度 50m では信号強度とノイズ強度の比率（S/N）が通信限界の 2 程度であったため、S/N 3 を目標とした性能向上が必要であることがわかった。

#### (4) 長期間にわたり、地すべり動向、及び地下水性状（間隙水圧、流向、流速、透水係数等）を観測・測定するために必要な測定・計測器の研究開発

従来工法であるワイヤレス間隙水圧計では、ダムや河川堤体など広範な用途に対応できるよう設計していたが、すべり面付近の間隙水圧測定に特化した設計とした。

また、最大外形 48mm を目標としたため、通信方式には深度方向の自由度が高い電界通信を採用した。



長期間にわたり地すべり動向を把握するためには、間隙水圧に加えて土中温度やすべり面変位を測定することが望ましいため、間隙水圧、温度、すべり面変位の測定が可能な無線計測器として「地すべり総合観測用データ送信器」を開発した。これにより従来別孔で観測されていた間隙水圧と変位を 1 孔で観測可能となった。

開発した送信器は実証試験孔に設置して、現在観測中である。

## 2.2 目標の達成度

### (1) 成果から得られる効果

地すべり地域における間隙水圧測定（試験）を目的としたボーリングで生じる諸事不都合（問題点）が解決できる。また、ボーリング中に地盤の間隙水圧分布と高品位のコアが得られるため、別途の試験や観測によらず、すべり面もしくは被圧区間を精度良く求められ、観測センサを的確な位置に設置することができる。

上記により、調査孔数を低減し調査コスト縮減に寄与するとともに、地すべり動向、及び地下水性状に関する信頼性と精度の高い観測を長期間にわたり実施することを可能とした

上記により、地すべり災害における工学的メカニズムと地盤・地質構成及び性状の整合性を把握することで、地すべり災害に最も有効な防止対策と、近い将来起こりうる地すべり災害の予測に繋がる基礎的資料が得られる。

以上のことから、地すべり調査分野以外にも地下水排除工等の土木建設工事において、対策工の最適化が得られ、コストの削減を可能とするなど、効果は大と考える。

### (2) 従来工法との比較

#### 1) 比較する従来工法

従来工法の「送水式ボーリング工法」では、掘削流体として清水、又は泥水を使用するため、詳細な地下水状況を把握することは、1本のボーリングでは困難である。

また、不安定地盤におけるボーリングコアの品質は劣悪なものとなり、コア判定によるすべり面の判定が困難な事例も見受けられる。

更には、掘削されたボーリング孔を利用した地中変位計測によるすべり面深度の判定、地下水検層による地下水流動層の調査を行ってから間隙水圧の観測深度を決定しているため、地質調査やすべり面調査を行う調査孔とは別に、間隙水圧計測のための観測孔を別途設けなければならず、1孔で精度と信頼性の高いデータを得ることは困難であった。

#### 2) 従来工法に対する優位性

##### 経済性

ボーリング単価は増額となるが、本気泡工法送圧の測定により、地下水流動層を特定するために実施していた湧水圧試験や地下水検層の一部を代替することで、総合コストを削減できる可能性がある。

##### 工 程

対象地盤の不安定性に比例して、掘進速度は従来工法より速くなる。また、従来工法ではコア採取が難しい逸水層などの層に遭遇しても安定してサンプリングできる

ため、結果として全工程は従来と同等以下の日数となる可能性がある。

なお、掘削能率の比較計算は以下の通りで、新技術の方が約 1.48 倍の向上となる。

比較計算モデル（116mm ボーリング 協会歩掛による）

本技術...1 日当たりの掘進率は、礫混じり土砂・玉石混土砂平均で 2.3m

従来工法...1 日当たりの掘進率は、礫混じり土砂・玉石混土砂平均で 1.55m

#### 品質

地すべり地帯で代表される破碎帯等の不安定地盤における良質なサンプル採取と併せて、詳細な地下水状況（的確な地下水湧出箇所、及び湧水量の把握）が可能となる。これに対し、従来工法では不安定地盤のコアリングは困難である。

#### 安全性

長大な「一体型サンプラー」による作業効率の低下に注意を要するが、本気泡工法サンプリングシステム、圧力計測システムともに、有害物質等の使用や高所作業等の危険作業も伴わないため、従来工法と同等程度の安全性は確保されている。

#### 施工性

##### 1) 現場条件

作業空間は従来工法で約 12m<sup>2</sup>だが、新技術では最低 25m<sup>2</sup>以上は必要となる。

搬入条件は従来工法と同等である。

掘削水は、従来工法では 1 分間に 40 リットル～50 リットル程度が必要であるのに対し、本技術では 1 日の作業に 10 リットル～30 リットル程度で済むため、相当に軽減される。

##### 2) 施工管理

従来工法では、オペレータの経験と勘に頼るが、本技術では「普及マニュアル」により標準化をおこなうため、施工性は全体を通して向上する。また、ボーリング孔を利用した原位置試験を同一孔で施工できるため調査としての施工性は高い。

#### 周辺環境への影響

従来工法は泥水処理対策が必要である。本技術は、植物性油脂を主原料とした界面活性剤を使用するが、環境ホルモンも含まず、土中のバクテリアにより 28 日の短期間で完全に生分解されるため、周辺環境には殆ど影響を及ぼさない。

### 2.3 成果の利用に当たっての適用範囲・留意点

ほとんどの地盤に適用可能だが、従来工法に比べて特に有効と考えられるのは間隙水圧の作用により不安定化しやすい破碎帯、強風化岩盤、火山性泥流層などである。

掘削深度は 150m 程度までの実績はあるが、無線伝送可能深度は最大 50m 程度であるためリアルタイムモニタリングはこの深度内に限定される。

ただし、「一体型サンプラー」には測定データ保存機能があるため、50m 以深であってもコアサンプル取出し時に保存データを回収し、性状判定に供することが可能である。

なお、設計耐圧が 1MPa であるため、深度 100m 以浅が適用深度の上限となる。また全長 1.7m で 120kg の質量であるため、保管、運搬には十分注意が必要である。

ビット先端から上の 5m 区間はケーシングがないため、この間に被圧層が複数ある場合は分離できない可能性がある。

## 3 普及活動計画

- 3.1 想定される利用者  
地方自治体，農政局，国土交通省（河川局），地質調査・設計コンサルタント、地質調査会社など
- 3.2 利用者への普及啓発等の方法  
農業農村工学会など学術講演会での成果公表，技術展示，ホームページ掲載
- 3.3 利用者に対するサポート体制、参考資料等  
普及マニュアルを公開，メール，電話，現地指導などで対応
- 3.4 特許・実用新案等の申請予定  
2013年6月 特許申請予定

## 4 研究総括者による自己評価

項目	自己評価	自己評価の理由
研究計画の効率性・妥当性	B	研究計画の効率性については、平成22年度の開始時期が遅れた（平成23年1月～のスタートとなった）ことと、東日本大震災による資材及びオペレータの調達困難などの事情が重なり、常々遅れ気味であった。 しかし、当初計画における様々な問題点は、研究開発により解決できたことにおいて、妥当性は充分であったと評価した。
目標の達成度	B	被圧地下水の位置を詳細に把握すると同時に間隙水圧をモニタリングすることに対しては想定通りの結果となり、目標を達成できたが、実証実験の回数が僅かであるため、より多くのデータによる評価が必要と感じた。
今後の普及可能性	A	本研究開発のような地下水の湧水箇所、及び湧水量と間隙水圧測定とコアサンプルを1孔で同時に把握する技術は他に存在しない。 また、地すべり調査以外でもダム調査、工事等活用範囲が非常に広ため、普及の可能性は充分にあると考えられる。
<p>総合コメント</p> <p>技術的には成果が得られたことから、研究開発目的は達成できたと考えている。</p> <p>一方、現場実証実験においては東日本大震災の影響は大きく、常々遅れ気味となってしまったことや、特に「一体型サンプラー」について改良，改善を必要とすることなど、実用化に重点を置いた研究開発が不十分であり、継続対応が必要である。</p>		

注) 評価結果欄は、A、B、Cのうち「A」を最高点、「C」を最低点として3段階で記入する。

## 5 今後の課題及び改善方針

## 5.1 ボーリング技術の確立、並びに間隙水圧測定（試験）に適合した測定（試験）環境作りに必要な施工方法（工法）の研究開発

従来工法である送水式ボーリング工法で採取したコアサンプルと本気泡工法により得られたコアサンプルとの比較、またその整合性判断において、近年多用されている増粘剤を添加したボーリング水による影響を検討する必要があると考える。

地下水の流動特性のリアルタイム測定により、実証試験深度では本気泡工法における硬膜二重層の高速層流状態で使用する気泡流の特異性が理論通りに作用することが確認されたが、本システムの適用性評価にはより深い深度でリアルタイム測定をおこなう必要がある。

## 5.2 ボーリング施工中に誘発・確認された被圧水（間隙水圧）の観測・測定が可能なシステム開発とこれに伴う測定・計測器の研究開発

「一体型サンプラー」が全長 4.4m、質量 200kg と大掛りな精密機械であるため、容易に運搬・取扱いできないだけでなく、保管場所も限られる

ボーリングマシンの稼働ノイズを考慮すると目標通信性能を十分満足できていないボーリング作業に支障がなく、掘削深度を正確に測定可能なセンサが必要

、についてはトレードオフとなるので、ノイズが極力小さい通信環境を確保し、必要な送信出力を減らすことで装置の小型化に結び付けたい。

また、本システムを適用する上では、ビット先端から上の 5m 区間でケーシングを引き上げる必要があり、この間に被圧層が複数ある場合は分離できない可能性がある

## 5.3 長期間にわたり、地すべり動向、及び地下水性状（間隙水圧、流向、流速、透水係数等）を観測・測定するために必要な測定・計測器の研究開発

データ送信が決まった日時におこなわれるので、事前に運用計画を立案する必要がある。

ヘルスチェック機能として、電極間抵抗測定も必要である。

本体全長が長い場合、山間部で搬送車から観測孔まで運搬する場合など取扱いに注意が必要である。

以上の課題解決と性能の改良・改善をおこない、実用性・信頼性の高い製品としたい。

また、受信システムでも以下の対応などを検討する必要がある。

受信電極の配置をなるべく狭い範囲で収まるようにする。（浅い深度の孔内が安定しているのであれば、孔内に受信電極を 2 本とも配置するなど）

受信器は鉛バッテリーで運用可能なため、太陽電池などの独立電源化は容易である。

FOMA 網や衛星網を利用した遠隔へのデータ転送手段を設けることができれば、一元管理やトラブル発生時の対応も迅速におこなうことが可能となる。