

技術紹介

8

地下水位計測に適した水位計の開発と 斜面崩壊予測への応用

Development of Water Level Sensors Suitable for Groundwater Monitoring and Their Application in Landslide Prediction

早川 将太郎	Shotaro Hayakawa	商品開発センター
松崎 政彦	Masahiko Matsusaki	商品開発センター 主任
田村 博規	Hironori Tamura	商品開発センター 主任
市川 真太郎	Shintaro Ichikawa	商品開発センター 技術マネージャー

キーワード: 静電容量センシング、IoT、斜面崩壊、地下水位

Keywords: Capacitive sensing, Internet of things, Landslide, Groundwater level

要 旨

近年、気候変動の影響が日本国内において顕著となり、災害の発生頻度が増加しています。特に山間部に位置する地方都市では、土砂災害や小規模河川の氾濫のリスクが高まりつつあり、防災システムを活用した災害予測の重要性が増しています。しかし、現在の防災システムでは予測精度に課題があり、誤差によって適切な避難判断が遅れ、被害が拡大する事例も見られます。したがって、より精度の高い予測技術の開発が求められています。

当社は土石流の前兆現象である斜面崩壊のメカニズムに着目し、地下水位と斜面の変形を静電容量型水位計と加速度計によってリアルタイムに観測することで、斜面崩壊予測システムの予測精度を向上させました。また、水位計の精度向上を図るためエンコーダー技術で用いられるグレイコードを電極配列に採用し、より正確な水位測定を実現しました。

本稿では、当社が開発した斜面崩壊予測システムの構成と、水位計測の精度向上を目的とした電極配列の工夫について紹介します。

SUMMARY

In recent years, climate change has increased the number of natural disasters, and especially in Japan, where there are many mountainous areas, disasters continue to occur in the mountains. A significant number of residents living at the foot of the mountains or in the mountain valleys face increasing risks of landslides and small-scale-river flooding, underscoring the need for accurate disaster prediction.

However, current disaster prevention systems have limitations in prediction accuracy, which sometimes lead to delayed evacuation decisions and exacerbate damage.

Our landslide prediction system has been focused on groundwater levels and slope deformation, which are precursors to landslides, and monitors them using capacitive water level sensors and accelerometers, to provide high accuracy. Additionally, to improve measurement accuracy, we apply Gray codes—a binary system used in encoders to minimize errors—to the electrode arrangement of water level sensors.

This paper presents our system and an improved electrode design for groundwater level measurement.

1. はじめに

近年、気候変動の影響により異常気象が激甚化・頻発化する傾向にあります。我が国においては豪雨の発生頻度に有意な増加傾向がみられ、降水量 50 mm/h 以上の豪雨の発生頻度は 1976 年の統計開始以降の最初の 10 年から直近の 10 年で約 1.4 倍に増加しています。¹⁾このような豪雨は、線状降水帯に見られるように狭い地域に短時間で集中するため、特に地方においては大規模な土砂災害を引き起こすリスクが高まります。例えば、2014 年 8 月に発生した広島での土砂災害では、多くの犠牲者が出る深刻な被害が発生しました。この災害では、豪雨による直接的な被害だけでなく、降雨予測と実際の降雨量に大きな乖離が生じた結果、避難勧告の判断に難しさが伴ったと報道されています。^{2), 3)}この事例は、局地的な気象現象の予測が非常に難しいことを示しています。

こうした課題に対応するため、気象庁が提供するレーダー観測結果（ナウキャスト）や、国土交通省の X バンド MP (Multiparameter) レーダーによる三次元降雨データといったオープンデータを活用して災害の予測が進められています。しかし、局所的な気象の予測は依然として難易度が高く、レーダー推定値には誤差が含まれることが指摘されています。^{4), 5)}また、現在のゲリラ豪雨の早期探知・予報システムでは、危険な積乱雲を見逃すことはありませんが、実際に危険な豪雨に発展しなかったケースでは空振り率が約 20%に達するとされています。⁶⁾予報の空振りが続くと、住民の避難行動が鈍化し、オオカミ少年効果が引き起こされる可能性があり、防災システムには予測精度の高さが必要であることが指摘されています。⁷⁾

このような背景を受け、当社はデジタル技術を取り入れた土砂災害の防災システムの開発を進めるとともに、その予測精度の向上に取り組んでいます。具体的には、土石流の前兆現象である「斜面崩壊」のメカニズムに着目し、その物理現象をモニタリングすることで信頼性の向上を目指しています。斜面崩壊は地下水位が上昇し斜面表層の土砂や岩石が地中の特定の面を境にして滑り落ちる現象であり、予測精度の向上には、地下水位の上昇を高精度に観測する防災システムが欠かせません。そこで、当社は地下水位を静電容量型水位計によって計測し斜面の変形を加速度計により計測する防災システムを開発しました。加えて、静電容量型水位計の精度向上を目的として、エンコーダーなどで使用されるグレイコードを電極配列に採用することで、高い信頼性を実現しました。

本稿では、当社の防災システムである斜面崩壊予測システムの構成と地下水位計測に適した水位計の電極配列の工夫について紹介します。

2. 土砂災害の防災システムについて

斜面崩壊は、斜面表層の土砂や岩石が地下の特定の面を境にして滑り落ちる現象です。特に大雨時には、降水によって地下水位が上昇し、土砂の間隙に水が浸透することによって間隙水圧が増加します。この増加した水圧が、土壌のせん断強度を弱めるため、斜面の安定性が急激に低下します。また地下水の浸透に伴い、斜面自体が変形することがあります。それらの変化は、斜面崩壊の前兆となり得ます。そのため、地下水位の上昇、斜面の変形を観測することで、斜面崩壊の予測が可能とされています。⁸⁾そこで、地下水位の上昇と斜面の変形をリアルタイムで監視し、その相関関係を明らかにすることで、斜面崩壊の前兆を捉え、住民の避難や災害リスクの軽減につなげることができると考えました。構築した斜面崩壊予測システムの全体構造を図1に示します。

まず地下水位の上昇を検出するため、市販の単管パイプを打ち込みパイプ内に水位計を挿入します。一般的に、崩壊する表層の厚さは地表下 0.5 ～ 2 m 程度とされており、厚さに応じた長さの単管パイプの底面に水位計を設置することで地下水位の上昇を適切に検出することができます。⁹⁾ 水位計は、地下水位データを 1 分周期で取得し、LPWA (Low Power Wide Area) といわれる無線通信技術を用いてデータを送信します。LPWA は低消費電力かつ長距離通信が可能なため、メンテナンスフリー、人手がいらない、設置が楽など効率的なデータ伝送を実現します。

斜面の変形は当社の高精度 MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 加速度計 JA-70SA (図2) を使用し、加速度データを二階積分することで変位としてとらえます。加速度データの二階積分は高いサンプリング周波数が必要ですが、電力消費を抑えるため雨量計をトリガ信号として使用し降雨時に自動起動し降雨がないときは電源をオフにする仕組みを構築しました。

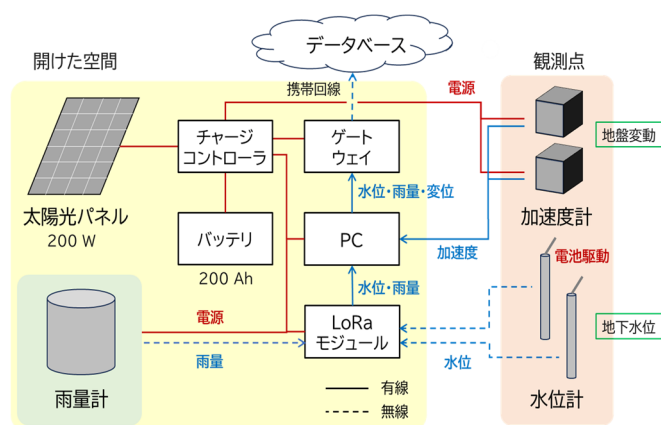


図1. 斜面崩壊予測システムの全体



図2. MEMS 加速度計 JA-70SA

3. 地下水位測定に適した水位計

一般的な静電容量式水位計は、温度あるいは汚泥などの外部環境により誘電率が変動すると検出精度が悪化していました。また、配線数が検出電極の増加に比例して増大することで、寄生容量の増加や配線スペースの制約が生じ、精密な検出を妨げていました。これらの課題に対して当社の静電容量式水位計は、容量をデジタル値に変換して二値判別を行うことで静電容量検出回路の動作域を絞ることにより、これらの課題を克服しました。図3に検出の仕組みを示します。

液面レベルの検出は、誘電体（液体）が電極に触れることで発生する静電容量の変化を利用して行います。電極は列状に配置され、それぞれの列で電極間隔が倍々に広がります。したがって、[0]列の電極間隔は d_0 とすると、[1]列は $2d_0$ 、[2]列は $4d_0$ 、[3]列は $8d_0$ と設定され、このような配置により異なる分解能で液面レベルを高精度に測定できます。電極は、各列内で赤・緑の電極ペアが交互に配置され、液面の高さが変化すると、それに応じて電極ペア間の静電容量の大小関係が交互に切り替わります。大小関係は誘電率に依存しないため、外部環境の影響を受けません。この切り替わりをビット値として認識し、赤の容量が緑より大きい場合は「1」、緑が赤より大きい場合は「0」と判定されます。この構造は二進数カウントに基づいています。各列に設定された電極間隔がビット桁に対応するため、各列での容量変化を二進数で表現でき、 d_0 をかけることで液面の高さを算出します。静電容量の微小な変化を正確に検出するためには、閾値の設定精度が非常に重要です。本システムでは、電極ペアの静電容量を電圧信号に変換し、その信号を増幅回路で処理した後、デジタル値に変換して二値判別を行います。この処理により、柔軟に閾値を設定できます。

またデジタル式の液面レベル検出では、検出用の電極が増えるにつれて配線の数が増加するという課題があります。例えば、タッチパネルに用いられる電極の選択方式は一般的に行列で考えられ、正方形行列である場合電極の総数を n とすると $2\sqrt{n}$ 本の配線が必要です。一方で、二進数カウントに基づくビット桁ごとの電極列ごとに比較ペア分の配線のみを使用することにより、エレメントから回路への配線数は $2\log_2 n$ 本に抑えられます。この方法は、特に数百以上の電極を使用する場合において、配線数の大幅な削減が可能となりました。

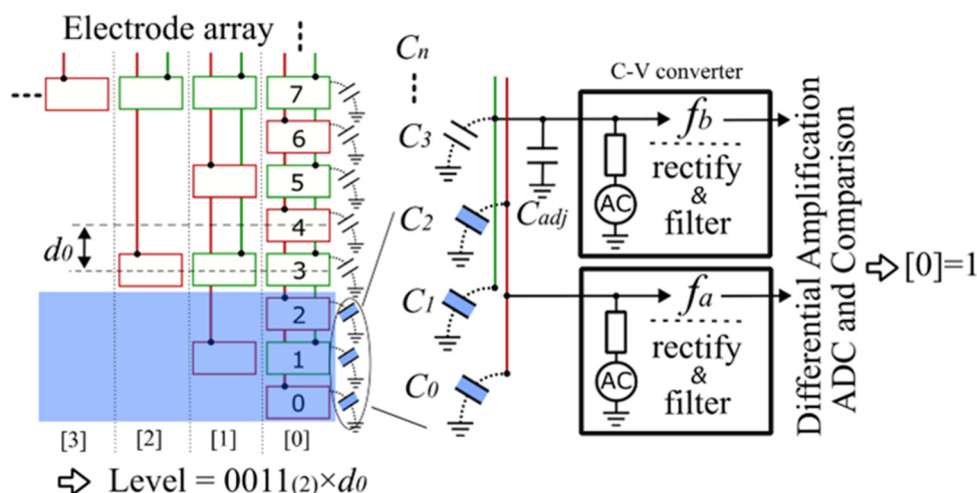


図3. 二値比較による水位計の原理

しかしながら、本静電容量式水位計においては、地下水位の誤認識が懸念されます。地下水位の上昇は極めて緩やかであると予想されるため、複数のビットが「0」または「1」に同時に切り替わらなければならないタイミングでずれが生じ、意図しない水位を出力する可能性があります。

上記の課題を解決するために、水位の変化に伴い複数の電極が切り替わることによる誤認識を防ぐため、ハミング距離を 1 に保つ処理手法を考案しました。この手法では、エンコーダーなどで広く使用されているグレイコードを電極配列に適用することで、電極の切り替え時に発生する誤差を低減することを目的としています。

グレイコードは、隣接する値同士で一度に 1 ビットのみが変化する特殊な二進数のコード体系であり、通常の二進数とは異なり、値が変化する際に複数ビットが同時に変わることがありません。この性質を活用することで、水位の変化に応じた電極の切り替えを順次 1 ビットずつ行うことが可能となり、電極の切り替えタイミングのずれによる測定誤差を最小限に抑えることができます。具体的には、2 進数を $b = b_n b_{n-1} \cdots b_1 b_0$ に対して、対応するグレイコード $g = g_n g_{n-1} \cdots g_1 g_0$ は、式 1 のように計算されます。

$$g_i = b_i \oplus b_{i+1} \quad \text{式 1}$$

ただし、最上位ビットは、対応する 10 進数が 2^{n-1} の倍数でのみ変化します。

この手法を導入することで、従来の手法で発生していた多ビットが切り替るタイミングでの測定誤差を抑え、信頼性の高い水位計測を実現することができます。さらに、地下水位のように緩やかに変化する水位に対しても、グレイコードの 1 ビットずつ順次変化する特性が効果を発揮します。

<検出原理>

グレイコードを採用した 4 ビットの水位検出回路の構成を図 4 に示します。この回路では、スイッチの ON/OFF によって電氣的な経路が変化し、各ビットに対応する静電容量を判別回路の入力 a または b のいずれかに接続する仕組みとなっています。具体的には、0 ビットはスイッチ S1 および S2、1 ビットは S3 および S4、2 ビットは S5 および S6、3 ビットは S7 および S8 に対応しています。特に、S8 には S7 との比較のため、S7 のノミナル容量と同等のチップコンデンサ (C99) が搭載されており、容量比較が可能となります。そして、判別回路にて a と b の大小比較が行われます。そこで得られた結果から、水位を決定します。

判別回路のフローチャートを図 5 に示します。まず、すべてのスイッチを OFF にして前回の測定状態をリセットします。次に、現在の測定ステップ k に対応する S_{k+1} と S_{k+2} を ON にします。その後、 a_k と b_k の容量を比較し、 $a_k > b_k$ の場合は k ビットの値を「1」とし、 $a_k \leq b_k$ の場合は「0」とします。この処理を $k = 0, 1, 2, 3, \dots, n$ と繰り返し、すべてのビット値を決定します。

取得した各ビットの値を合計することで、最終的な測定値 g を求めます。 g は

$$g = 2^n + 2^{n-1} + \cdots + 2^1 + 2^0 \quad \text{式 2}$$

で計算され、この値に対応する 10 進数に変換して水位として出力します。例えば、回路図 4 に示されるように水位が 7 mm の場合、対応するグレイコードは 0100 (2 進) となり 10 進数に変換すると 4 になりますが、出力を 7 mm と設定する必要があります。全ての処理が完了したら、測定を終了します。この変換により、グレイコードを用いた測定の精度を向上させ、誤認識のない水位計測が可能となります。

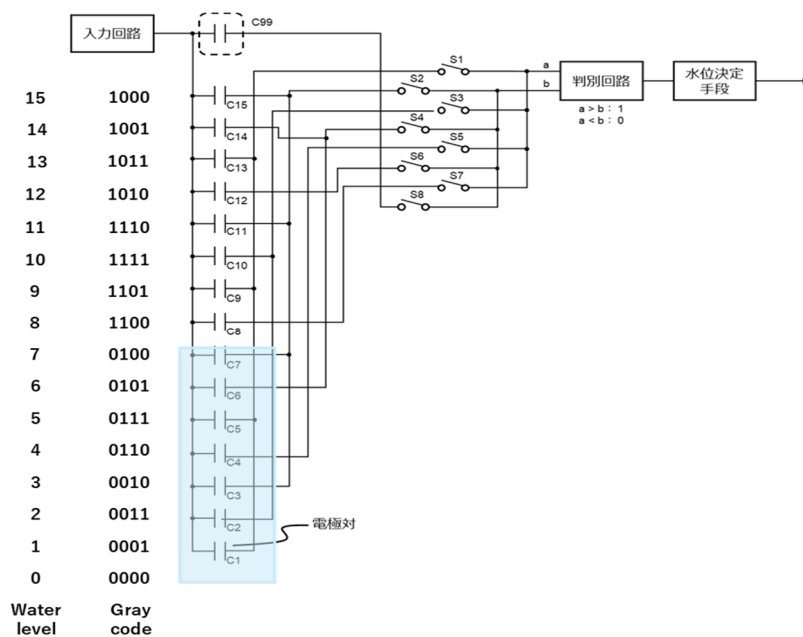


図 4. グレイコードを用いた検出回路

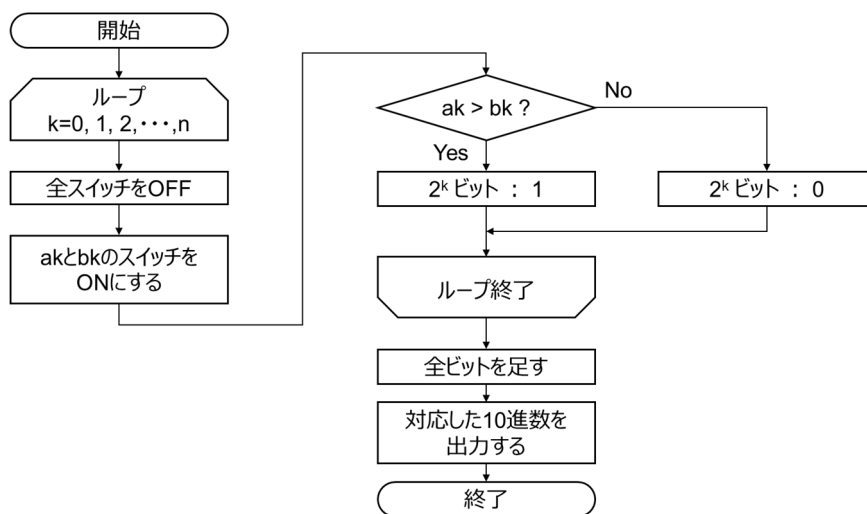


図 5. 水位を判別するためのフローチャート

<動作確認>

水位測定系を図 6 に示します。水道水の入ったボトルから水位計の入ったメスシリンダにチューブポンプを用いて水を輸送しました。その際、地下水位を再現するため、毎秒 0.2 mm のペースで緩やかに水位を上昇させました。そして、その水位変化をターミナルソフトで表示させ観測しました。

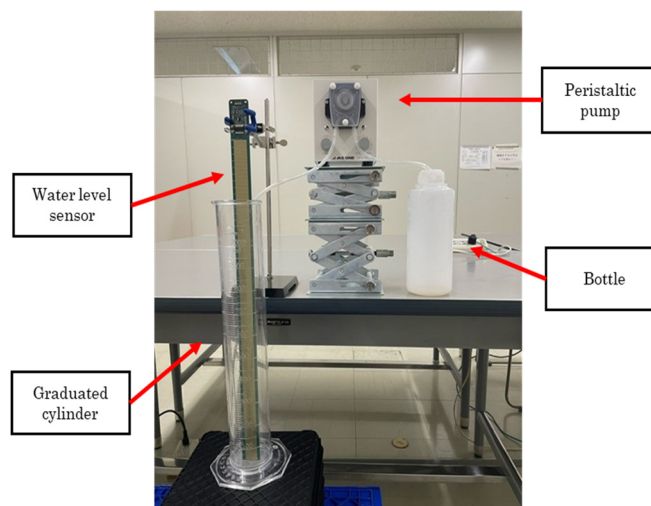


図 6. 水位測定系

<結果>

グレイコードの有効性を検証するため、グレイコードを使用しない場合の水位測定結果（一部）を図 7 に、使用した場合の水位測定結果を図 8 に示します。17 mm から 20 mm に変化する際に誤作動が発生しました。これは、20 mm の位置に対応する電極が複数あり、全てが同時に切り替わることでできなかったことが原因です。

一方で、グレイコードを使用した場合、誤認識を防ぎ、正確な水位の観測に成功しました。グレイコードの特性により、複数の電極が同時に変化することがなくなり、正確な水位計測が可能になります。結果として、全体としての水位検出精度が向上し、安定した水位の監視が可能となりました。

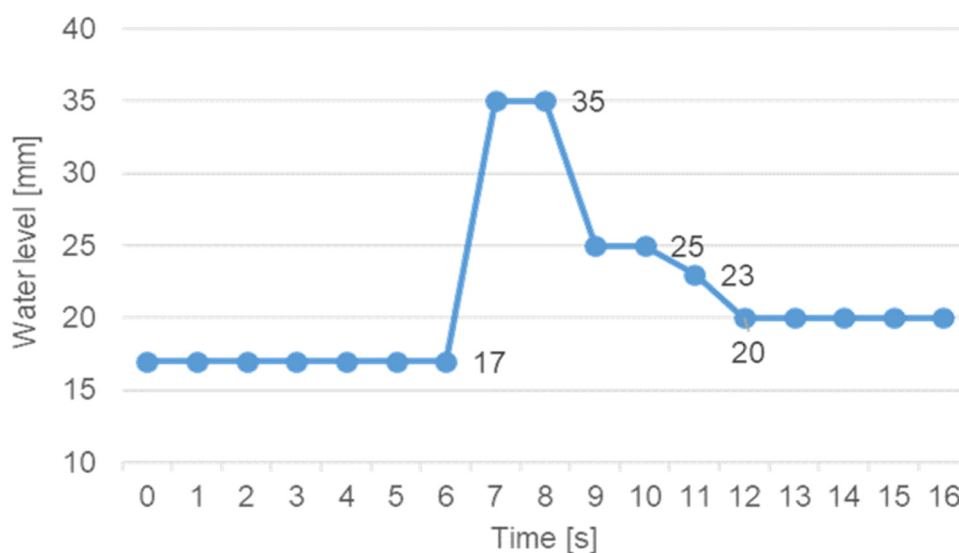


図 7. グレイコード使用前の水位測定結果(一部)

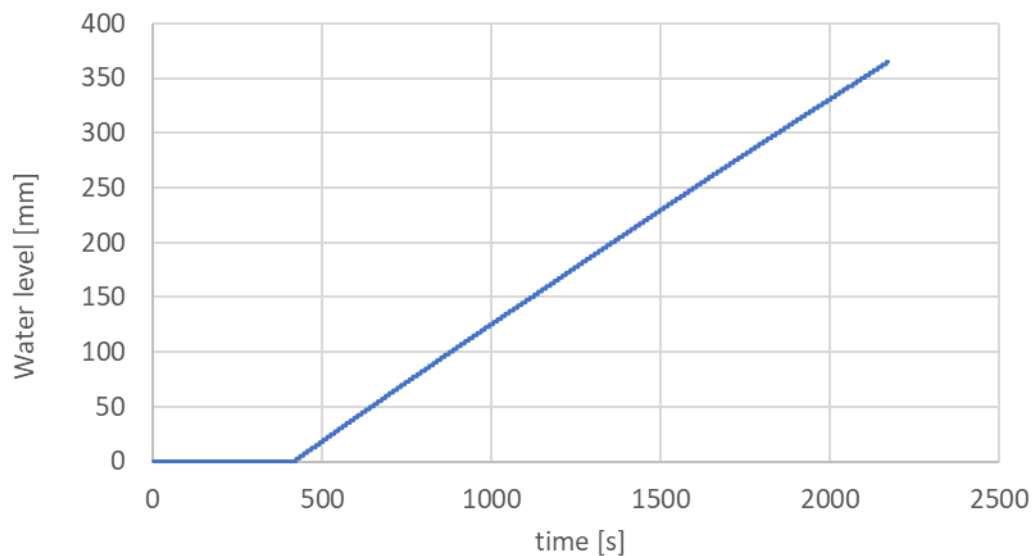


図 8. グレイコードを使用した水位測定結果

<土入れ評価>

地下水位の計測が可能かどうかを評価するため、メスシリンダを使用した実験を行いました。本実験の地下水位測定系を図 9 に示します。メスシリンダ内には赤土を水位 170 mm の高さまで詰め、定量ポンプを用いてメスシリンダの底部から水を供給しました。このように下部から水を供給したのは、実際の地下水位の変動を忠実に再現するためであり、さらにエアホールの発生を抑制し、土壌内の含水量を均一にする効果が期待できるためです。

実験では、地下水位の上昇を定量ポンプで調整し、水位計の出力変化を時間の経過とともに記録しました（図 10）。得られたデータを解析した結果、地表面（赤い点線で表示）を基準として、地下水位から地表面より高い水位まで連続的に正確に測定できることを確認しました。このことから、考案する測定方式は地下水位の動的な変動にも対応でき、防災システムに実用性を持つことが実証されました。



図 9. 地下水位測定系

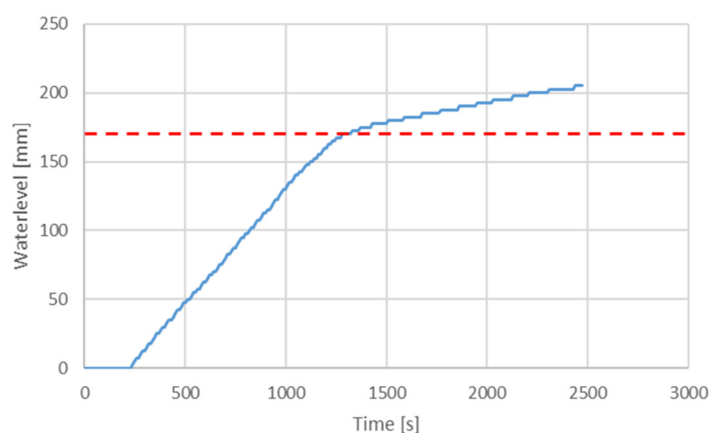


図 10. 地下水位測定

4. まとめと今後の展望

本稿では地下水位計測に適した水位計の電極配列の工夫と斜面崩壊予測システムの構成について紹介しました。従来の水位計の課題であった検出精度の問題に対し、グレイコードを用いた電極配列の工夫により安定した水位検出を可能にしました。また、地下水位の変動を模擬した実験では、地下水位から通常水位まで連続的かつ正確に計測できることが確認できました。

今回ご報告した斜面崩壊予測システムは長野県茅野市の山中に設置され、現在データを取得しています。

今後は地下水位の上昇と斜面の変形をリアルタイムで監視し、その相関関係を明らかにすることで、避難の指標となる閾値の設定を目指していきます。さらに、近年日本各地で整備が進んでいる三次元地盤モデルを活用し、本システムを他の地域にも適用できる手法の開発を進めていきます。

5. 謝辞

本開発において斜面崩壊予測システムの開発に多大なご協力をいただきました公立諏訪東京理科大学の菊地輝行准教授に深く感謝申し上げます。

【参考文献】

- 1) 国土交通省, “序章 気候変動に伴う災害の激甚化・頻発化”, 国土交通白書 2022
- 2) 産経新聞, “広島土砂災害 なぜ遅れた避難勧告 民間予想雨量 1 ミリの情報に頼った市. 2014.8.30”, <https://www.sankei.com/article/20140831-SOLYCC5IJ5NINKBUYBY76FQE2A/>.
- 3) 中国新聞デジタル, “避難勧告大幅遅れ 広島市長「非常に残念」. 2014.8.21”, <https://www.chugoku-np.co.jp/articles/-/6270>.
- 4) 野村康裕, 中谷洋明, “土砂災害警戒避難のための線状降水帯等の自動抽出システム”, 建設機械施工, Vol.71, No.10 (2019).
- 5) Lucie Almasiova, “A Relationship Between Radar Reflectivity and Rainfalls Recorded by The Ground Gauges”, International Conference on Military Technologies (ICMT) 2015, pp.285-288.
- 6) 中北英一, 高尾充政, 新保友啓, 山口弘誠, 中川勝広, “フェーズドアレイレーダを用いたゲリラ豪雨発達初期の積乱雲詳細解析”, 京都大学防災研究所年報, No.62 B (2019).
- 7) 及川康, 片田敏孝, “避難勧告等の見逃し・空振りが住民対応行動の意思決定に及ぼす影響”, 災害情報, No.14 (2016).
- 8) 防災科学技術研究所 自然災害情報室 防災基礎講座, “自然災害について学ぼう 15.斜面崩壊・地すべり”, https://dil.bosai.go.jp/workshop/01kouza_kiso/15houkai.html.
- 9) 土砂災害防止広報センター, “学び伝える土砂災害を防ぐ、備える、学ぶ、伝える”, <https://www.sabopc.or.jp/library/collapse/>.