

電波位相差変位計測システムを用いた 斜面変位計測

吉崎 互*
大山 巧*

Field-test of Radio Phase Difference Displacement Measurement System

Wataru Yoshizaki, Takumi Oyama

要 旨

屋外斜面の地すべりなどにおける斜面や岩盤等の変位に対して、複数計測点を非接触で三次元計測することを目的とした電波位相差変位計測システムの開発を進め、測位計算法の開発やフィールドでの計測・評価を通じて計測システムとしての検証を行ってきた。

このような計測要求については、土木現場における工事期間中の安全管理、社会インフラにかかわる斜面や道路などにおける維持管理で、地すべりなどに至る現場の変状を素早くとらえ、的確な対策を検討するために有用な情報を与える計測技術は欠かせないという観点から、従来の局所的な観測・計測機器に加えて広範囲にわたる面的な観測を連続的に評価する計測手法が望まれている背景がある。

また、一般的に岩盤等の挙動をモニタリングする計測手法には次の特性を持つことが要求される⁽¹⁾。

- (1) 崩壊等の前兆現象が突発的に生じるため、リアルタイムで挙動をとらえることができること
- (2) 広範囲の面的な挙動をとらえることが可能なこと
- (3) 正確な挙動を把握するための三次元計測が可能なこと
- (4) 遠隔でモニタできるシステムを構築できること

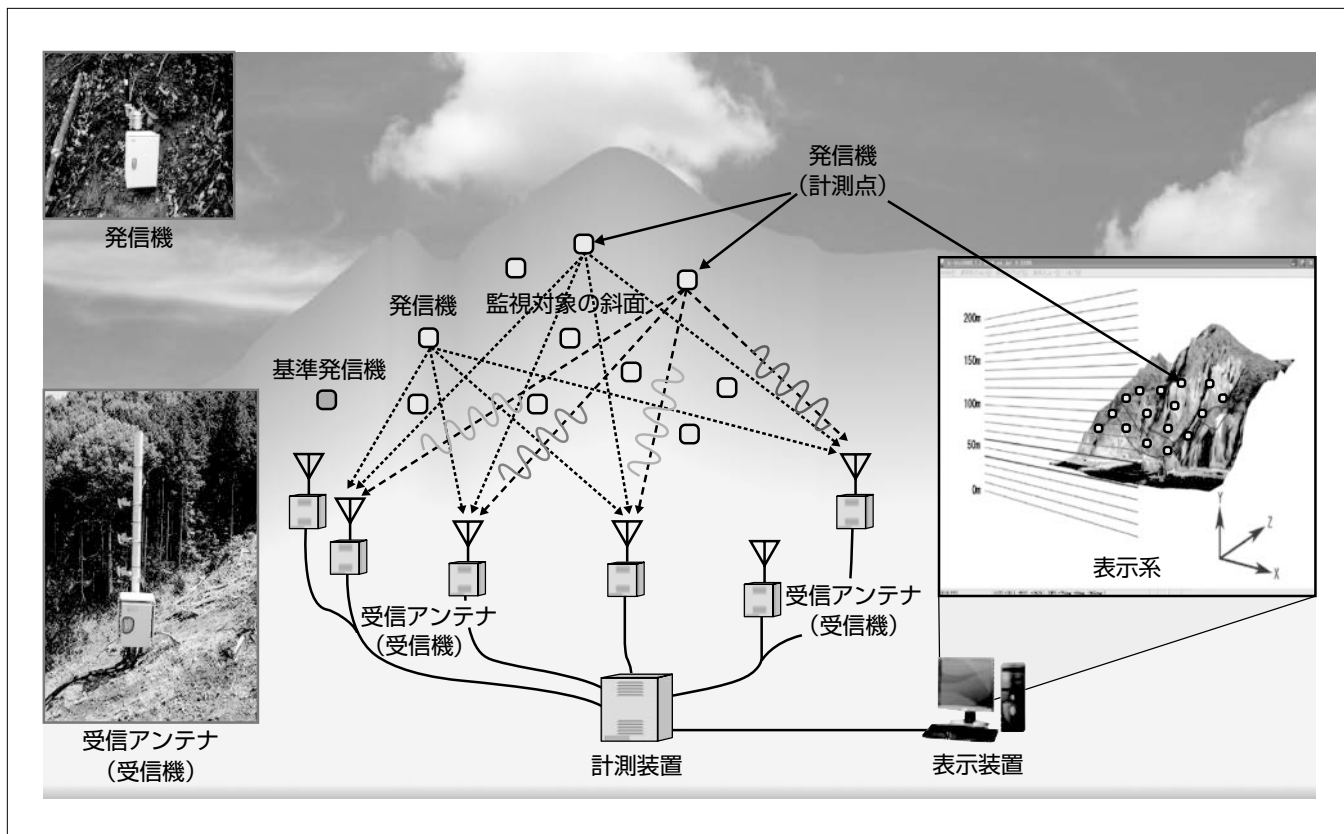
電波位相差変位計測システムは、

- (1) 計測点発信機はワイヤレスであり非接触で計測が可能
- (2) 発信機は増設が容易に可能で、複数点の同時計測が可能
- (3) 三次元の変位計測がリアルタイムで可能

という特長を持ち、300m離れた観測点から計測点の数mm～数cmの変位を三次元計測する性能を持っている。

これらの性能は、将来の予測解析につながる計測装置として構築が可能であると考えている。

特集
II



電波位相差変位計測システム

電波位相差変位計測システムは、計測点に設置した小型発信機の送信電波を受信アンテナ(受信機)で受信し、受信機間の位相差を基に三次元の変位量を計測するシステムである。複数計測点をリアルタイムで非接触計測できる特長を持ち、斜面等の変位量計測システムとして開発を行っている。

*通信機製作所

1. ま え が き

電波位相差変位計測システムは、複数の変位計測点に小型電波発信機を取り付け、受信アンテナ間の信号位相差から各計測点の変位を算出する計測システムであり、電波の特徴を生かして、複数計測点を非接触でリアルタイム計測を可能にしたシステムである。

これまで行ったフィールド検証で、100~300m以上離れた観測点から、計測点の数mm~数cmの変位量を計測する実験などを経て計測原理の検証を行うとともに、屋外環境下での連続計測の評価を通じて、計測装置としての適用性を検証してきた。

本稿では、システムの概要と計測原理及びフィールド検証の状況や、この計測システムを用いた斜面の変位計測などの計測システムとしての応用について述べる。

2. 電波位相差変位計測システム

2.1 システムの概要

電波位相差変位計とは、計測点に設置した電波発信機の電波を周囲に配置した複数の受信アンテナ(受信機)で受信した電波の位相差から計測点位置を推定する電波を利用した測位方式である。位相差による測位の原理はGPS(Global Positioning System)を利用した相対測位法と共通である。

この方式は計測場所に応じてローカルな計測構成が可能であり、GPS衛星が見えないようなロケーションでも使用できるという利点がある。また、発信機から受信アンテナ間の計測距離は標準で300m離れた計測が可能である(オプション構成で500mの計測が可能)。

図1に電波位相差変位計測システムの基本構成を示す。

計測点の電波発信機には免許不要の特定省電力方式を用いており、小型化と電池での駆動が可能でワイヤレスな計測点として設置できる。

発信機は1システム構成当たり100台の管理が可能で、複数計測点の設定及び増設が容易にできる。また、発信機の計測周期は計測装置を通じて、数分から数時間を任意に設

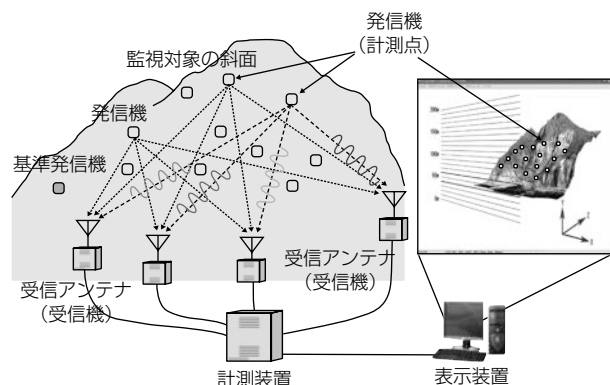


図1. 電波位相差変位計測システム基本構成

定することが可能である。

基準発信機は計測点発信機と同様の構成で受信システムの位相特性経時変化の校正処理などに用い、受信アンテナと基準発信機は固定点に設置される。

受信機は理論上4台以上の構成で発信機位置の計算が可能で、標準は8台構成となっており、1台が計測できない場合でも残りの受信機で計測可能なロバスト性も考慮した構成となっている。

計測装置,表示装置はデジタル処理部と発信機位置の計算処理部の構成となっており、受信電波を基に位相差の検出と発信機位置の測位計算を行い三次元計測データとして出力する。

この計測データはCSV(Comma Separated Values)データとなっており保存が容易で、かつインターネット等の回線を利用して、パソコン等を用いて離れた場所から監視(配信)が可能である。

2.2 計測原理

計測点に設置した電波発信機は、あらかじめ設定された計測周期ごとに電波を送信する。送信された電波は、発信機を囲む位置に設置した少なくとも4台の受信アンテナ(受信機)で受信し、ダウンコンバータされた後A/D(Analogue/Digital)変換器でデジタル信号に変換され、帯域通過フィルタ処理などで発信機ごとの信号(位相情報)を抽出し、相関器等で受信アンテナ間の観測位相差を求め、そこから得られる等位相差面の交点から三次元の座標、すなわち発信機の位置を求める⁽²⁾⁽³⁾。

このとき、受信アンテナ、計測発信機の初期位置は既知の情報として扱い、初期位置における観測位相差からの変動量を計測することで発信機初期位置からの変位量を算出している。

図2に電波位相差変位計測の基本原則を示す。

2.3 計測精度

電波位相差変位計測における計測精度(計測生データのばらつき幅)の目安は、機器精度、設置精度、空界雑音誤差からなる観測位相誤差(ϵ_ϕ)と計測点発信機に対する受

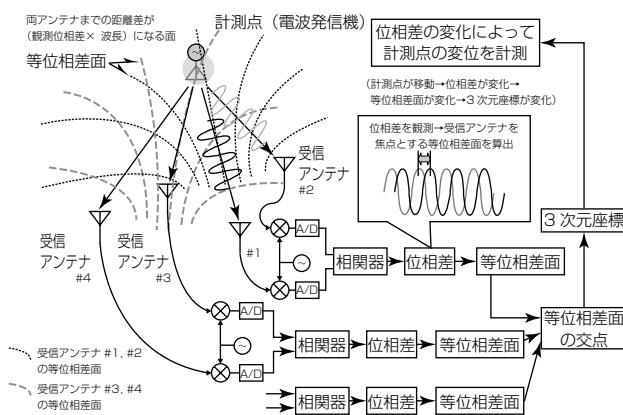


図2. 電波位相差変位計測の基本原則

信アンテナの幾何学的配置に依存する誤差感度：DOP (Dilution of Precision)が関係し、式(1)で見積もられる。

$$\varepsilon_{total} = \lambda / 2 \pi \times DOP \times \varepsilon_{\phi} \dots \dots \dots (1)$$

ε_{ϕ} は観測位相誤差(rad)のrms値であり、 λ は使用する電波の波長を表す。機器精度で、屋外長期間連続計測ではケーブルなど受信系統の位相特性経時変化の影響が現れるが、これらの特性も同時に推定し補償することで、観測位相誤差は設置精度と交界雑音誤差が支配的とみなしておおむね見積もることができる。

なお、ここでの計測精度の指標は生データのばらつき幅でありこのデータを基に平滑化処理等によって得られる計測値はより高い精度が得られることを共同実験、フィールド検証で確認している⁽¹⁾。

3. フィールド検証

3.1 屋外での計測精度の実験・検証

屋外での精度検証を目的とした計測実験を行い計測原理、精度の検証を行った。図3に実験での配置を示す。

ほぼ中央に発信機(送信周波数は2.4GHz帯)を設置し、それをL字に囲むように受信機8台(各受信機に受信アンテナ4台)を配置した構成としている。DOP値を表1に示す。

実験は1分周期で計測を行い、計測点発信機を斜面の変

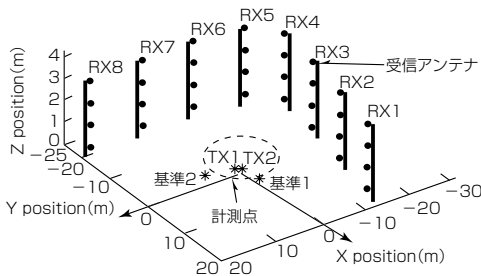


図3. 計測点と受信アンテナの配置

位に見立てて24分ごとに1mmずつY軸方向に強制変位を行い、変位量と計測生データの検証を行っている。

このときの計測生データと、生データを移動平均した結果を図4に示す。

DOP値0.4の配置条件下で、計測生データでmm変位に対する追従性を確認でき十分な基本性能を持っていることを確認した。また、簡易な移動平均結果でも平滑効果と応答性の良い結果が得られた。

このときの計測データのばらつき幅は、 $\lambda : 12\text{cm}$, $\varepsilon_{\phi} : 0.34\text{rad}$, DOP値0.4の条件で式(1)から、約3mm (rms)と見積もられるが、図4でのばらつき幅は1~2mm程度で、観測位相誤差、計測生データとも想定内の結果であり、システム方式の妥当性を検証した。

3.2 屋外でのフィールド検証

(1) 市街地環境での変位量に対する追従性の評価

車両等の障害物が往来する市街地環境下で、3mmステップの変位量に対する追従性評価並びに外来電波(高周波ノイズ)の影響検証を実施した。

X方向に約50m, Y方向に約100mの敷地で、図5に示す

表1. 実験検証での受信アンテナのDOP値

	XDOP	YDOP	ZDOP	Total DOP
TX	0.4	0.4	3.5	3.5



図4. Y軸方向強制変位と計測生データ

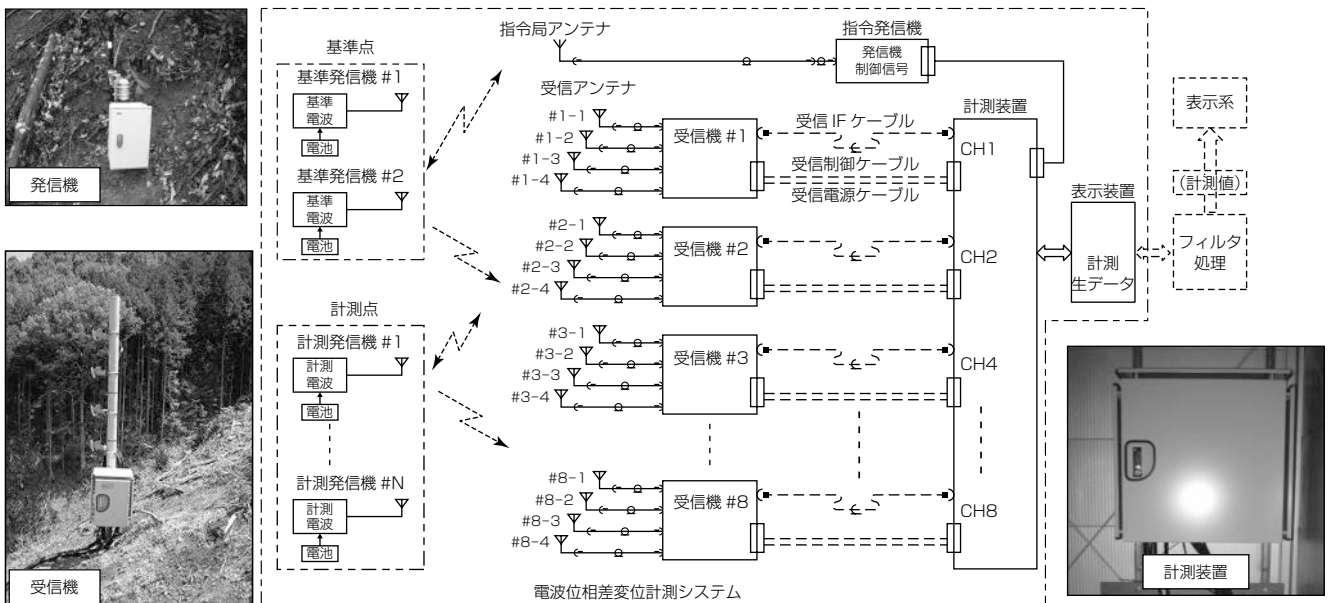


図5. フィールド検証用機器の構成

表 2. フィールド検証での受信アンテナのDOP値

	XDOP	YDOP	ZDOP	Total DOP
TX	0.5	0.3	4.0	4.0

機器構成で、発信機をコの字に囲む形で受信機を配置している。DOP値を表 2 に示す。

2分周期で計測を行い、計測点発信機を3mmステップでY軸方向に強制変位を行い計測データの検証を行った。

このときの計測生データを図 6 に、生データを基に等速直線運動をモデルとした平滑化処理の結果を図 7 に示す。

計測生データでは、周囲の障害物往来などの影響でばらつき幅の変動が一部に見られるが、3mm変位量を識別可能な結果が得られた。また、図 8 に示す平滑化処理結果からは、ばらつきのランダム成分に対する処理効果が現れているとともに、応答遅延も少ないという結果が得られている。DOPが十分に小さい場合、簡易な平滑化処理で応答性の良い計測結果が得られることが分かる。

Z(沈下)方向の変位計測についても、今回のY方向DOPに近付ける配置をとれば同程度の計測結果が得られることを、観測した位相差データなどから検証した。

通常の外来電波や周囲の高周波雑音等の影響は、受信機S/N(Signal to Noise)が確保できる配置・計測距離であれば計測に大きな影響は出ないことも確認している。

(2) 工事現場における連続計測評価

計測コンサルタントと共同で、作業現場における連続計測での動作検証とフィルタ処理との接続検証を実施した。

計測は、掘削現場の上方周囲に発信機を設置し、それを取り囲む左右に受信アンテナ(受信機)を配置し、10分周期で計測を行っている。DOP値はXとY方向が3、Z方向が4程度となっている(図 5 の構成を参照)。

この計測では、計測生データを基に計測コンサルタントでフィルタ処理を行い、処理結果を計測値として評価を行っている。

フィルタ処理は、日射による取付柱の変動要因等も加味した平滑化処理を行っている。その結果を図 8 に示す。

計測結果は作業に伴う斜面の変位を計測しているが、光波測量の結果と比較し、いずれの計測でも観測された変位は微少であり、作業で現場斜面が不安定化することはなかったことが示されると同時に、電波位相差変位計測が十分な適用性を備えていることが確認できる結果が得られた。

4. む す び

これまでのフィールド検証を通じ、斜面における変位量の連続計測に対して、変位計測システムとして十分な適用性を持っていることを確認できた。

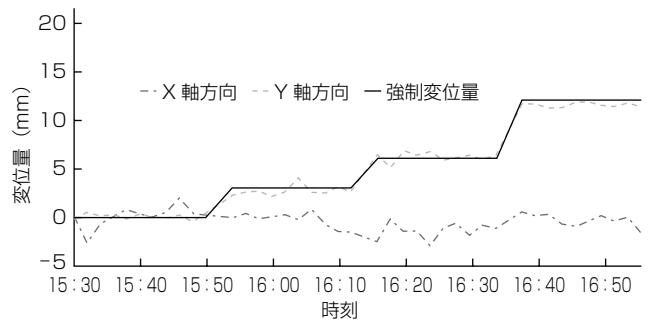


図 6. Y軸方向強制変位(計測生データ)

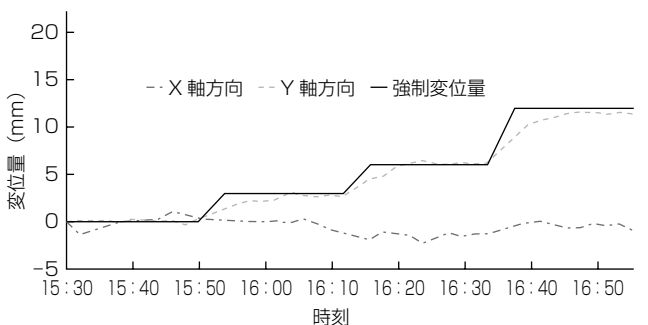


図 7. Y軸方向強制変位(平滑化処理)

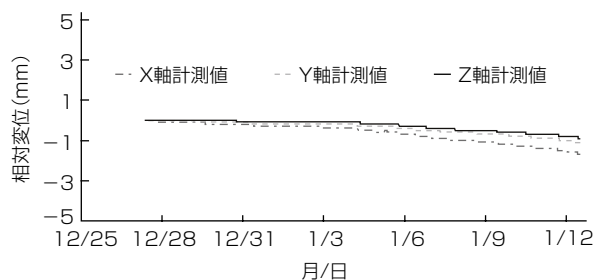


図 8. 連続計測データ(フィルタ処理)

今後は、“道路法面、ダム周囲の斜面の状態監視計測” “トンネル坑口や鉄道構内などにおける工事中の地盤表面の計測”などの適用分野を広げるための共同実験とフィールド検証を展開するとともに、計測市場へ出して客先評価を受けるステップに移る計画である。

参 考 文 献

- (1) 西川啓一, ほか: 電波位相差を用いた変位計測システムの長期野外実験, 地盤工学会 地盤の環境・計測技術に関するシンポジウム2006, 15~20 (2006)
- (2) 岡村 敦, ほか: 多点震動変位の位相差による計測法, 電子情報通信学会技術研究報告, SANE2000-145 (2001)
- (3) Okamura, A., et al.: A Multi-point Radio Displacement Measurement Method for Testing Quake-proof Structure, Proc. of ASME PVPC, PVP-Vol. 445-1, 83~90 (2002)