

斜面安全監視のためのGPS自動変位計測システム

岩崎 智治*・清水 則一**・増成 友宏**・佐藤 渉***・原口 勝則***・大島 洋志****

要 旨

斜面の安全監視において、地表面変位を計測することは非常に重要であるが、長期間にわたり高精度の地表面三次元変位計測を安定して実施することは容易ではない。そこで、GPS (Global Positioning System)の適用が考えられてきた。

GPSは1980年代から斜面の変位計測に適用されていたが、精度、使いやすさ、コストの面で課題があり一般的な計測手法として普及が遅れていた。そこで筆者らは、安価で使いやすいGPS機器の開発や高精度化の研究を進めてきた。また、それらの成果を用い、さらに、計測したデータを集約し一括して自動解析し、計測結果をインターネットによってユーザーに配信するWebシステムを構築し、より実用的かつ総合的なGPS自動変位監視システムを開発した。本稿では、斜面安全監視のためのGPS自動変位計測システムの概要と地すべり計測への適用事例について述べる。

Key words : 斜面安全監視 safety management of slopes, GPS Global Positioning System, 自動計測 monitoring deformation, インターネット Internet

1. はじめに

斜面の安全監視において、地表面変位を計測することは非常に重要である。しかし、広大な地すべりや大規模切土斜面において長期間にわたり高精度の地表面三次元変位計測を安定して実施することは容易ではない。そこで、20年以上以前から、GPS(Global Positioning System)の適用が考えられてきた。

GPSは米国が運用するGPS衛星からの電波を計測点および基準点のGPS受信機で同時に受信し、基準点からの相対的な三次元座標を求めるシステムである。GPSは雨・霧等の天候に左右されることなく三次元位置座標が取得でき、基準点を計測点から数百mを越える遠方に設置することが可能で、微小な変位から極めて大きな変位まで、計測点を移設・再設置することなく計測できる等、斜面の地表面変位計測を行ううえで多くの利点がある。

GPSの変位計測への利用は1980年代から始まり^{1),2)}、わが国においても、地すべりや大規模切土斜面などで試験的

に利用された^{3),4)}。しかし、当初は測量用のGPS機器や解析ソフトを流用して計測されたため、手作業となり手間がかかり利用しにくく、斜面変位計測としての精度も不十分で、しかも計測コストが高い等の問題があり、斜面の安全監視への実用的な利用は進まなかった。

そこで、筆者らは1990年代半ばごろから、斜面変位計測に特化した小型・軽量・安価なGPS自動計測機器の開発^{5),6)}と高精度化の研究⁷⁾を進め、mm単位の三次元変位の自動計測を実現した⁸⁾。また、これらの研究成果を統合し、インターネットを活用して全国各地のGPSの現場計測データを一元的に自動解析処理することで解析作業の効率化を実現し、計測結果を配信するシステムを開発した。すでにこのシステムは、トンネルの情報化施工^{9),10)}、ダム堤体斜面の監視^{11),12)}、大規模地すべり計測¹³⁾等に利用されている¹⁴⁾。

本稿では、筆者らが開発したGPS自動変位計測システムの概要と地すべり計測への適用事例について述べる。

2. GPS自動変位計測システムの概要

GPSによる変位計測では、人工衛星から発信される搬送波位相を観測する干渉測位¹⁵⁾と呼ばれる方式を用いる。この測位法では、基準点と計測点にセンサー(アンテナ、受信機)を設置し、各点で観測された位相データを基線解析プログラムによって解析し、基準点からの相対座標を求

* 国際航業(株) Kokusai kougyo Co., Ltd.(会員)

E-mail : tomoharu_iwasaki@kkc.co.jp

** 山口大学大学院理工学研究科 Yamaguchi University Graduate School of Science and Engineering

*** 国際航業(株) Kokusai kougyo Co.,Ltd.

**** shamen-net 研究会 Society for shamen-net(会員)

め、座標の経時的变化から変位を得る。ここでは、以上の処理を自動的に行うシステムについて概要を述べる。

2.1 センサーおよび自動計測システム

図-1に計測現場に設置するGPS機器の構成図を示す。現場では、地すべり計測などの斜面計測用に開発したGPSセンサー(L1帯1周波、図-2)を計測点と基準点に設置する。GPSセンサーはアンテナユニットと制御ユニットからなるシンプルな構成で測量用GPS機器と比較すると小型・軽量・安価である。現場に複数設置したGPSセンサー

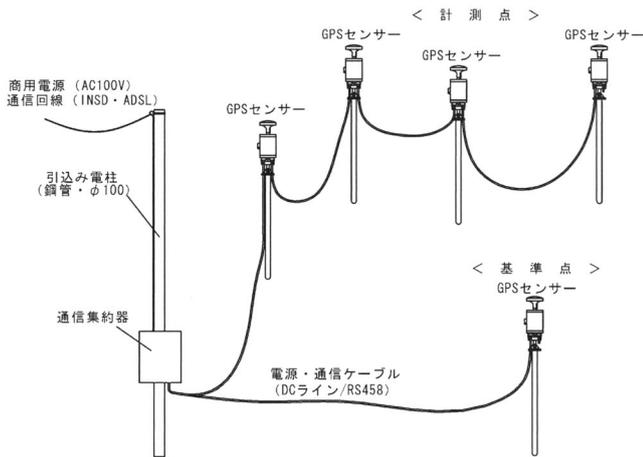
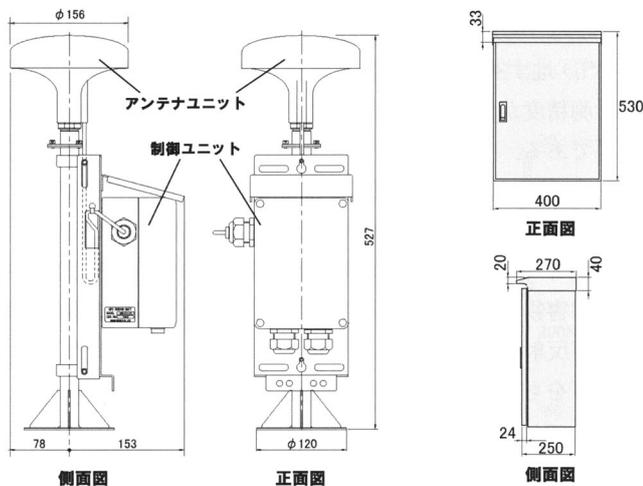


図-1 現地に設置するGPS機器の構成図



(a) GPSセンサー (b) 通信集約器

図-2 GPSセンサーと通信集約器の外形

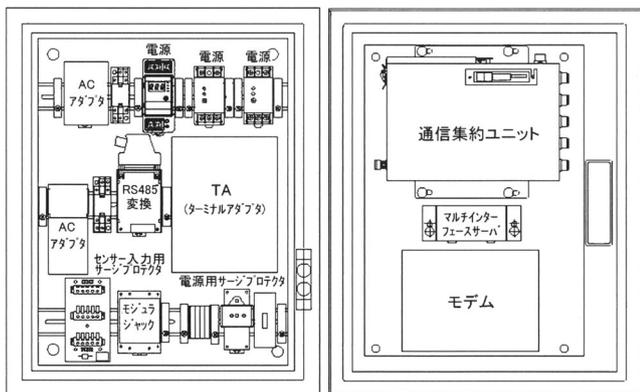


図-3 通信集約器の内部構造

を通信集約器(図-3)と電源・通信ケーブルで数珠つなぎ(daisy chain方式)で接続する。

通信集約器には、GPSセンサーとのデータ通信およびデータ記録等を行う通信制御ユニットのほかに、ISDN通信用のTA(ターミナルアダプタ)やアナログ通信用のモデム、電源装置等が組み込まれている。TAやモデムを変更すれば、携帯電話通信やADSL通信にも対応可能である。なお、GPSセンサーの制御ユニットと通信集約器には、耐雷素子を組み込むことで雷による故障を低減している。

以上のような機器構成とすることで、従来の測量用GPS機器を流用して自動計測を行う場合に計測点や基準点ごとに必要であったGPS受信機、電源装置、記録装置、通信装置等を現場に1か所だけ設置する通信集約器に集約することができ、機器数を大幅に減じることでシンプル・安価な機器構成となり、設置、メンテナンス、操作が容易な仕組みが構築される。

2.2 自動解析・配信システム

本システムでは、インターネットを活用して解析作業やデータ配信等のサービスを提供するASP方式(Application Service Provider)を導入した。この方式の利点は、日本各地から回収されたデータを監視センターで一括して解析処理するため、従来は現場ごとに必要であった解析処理システムの導入が不要となり、1現場あたりの解析処理コストが低減されることである。また、インターネットを使うことで、従来のアナログ通信に比較して通信コストも安価になる。インターネットを用いたGPS自動変位計測システムの概念図を図-4に示す。

現地に複数設置したGPSセンサーでは、30秒ごとにGPS衛星からの電波を受信(1エポック:30秒)し、そのデータを通信集約器に送信する。通信集約器では、1時間分の受信データをまとめて1ファイルに記録し(1セッション:1時間)、ISDNやADSL、FOMA等のインターネット回線で監視センターにある解析サーバーに送信する。

解析サーバーでは、毎時1時間分の受信データを使用し

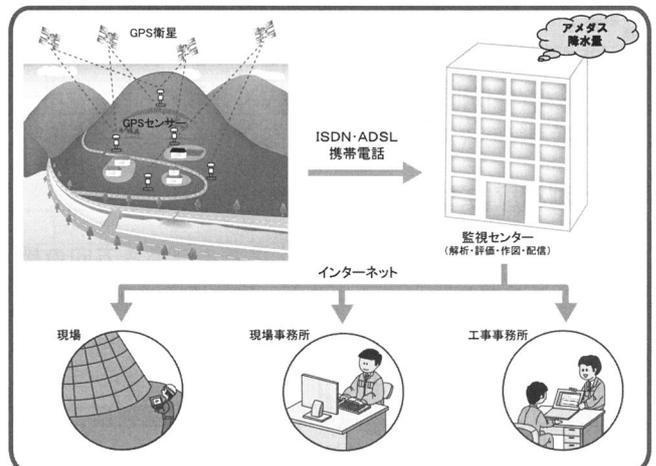


図-4 インターネットを用いたGPS自動変位計測システムの概念

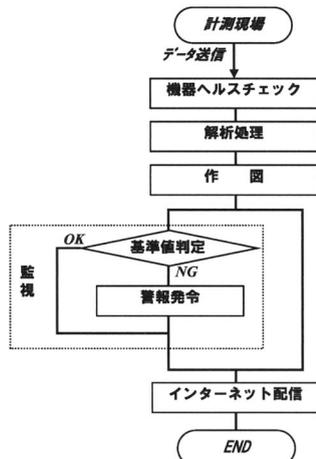


図-5 監視センター作業フロー

て、基線解析(座標計算)および各種の精度向上のための解析処理(後述)を実施して地盤変位量を算出する。したがって、当該システムの計測頻度は1回/時となる。算出された変位量は、インターネットを介して関係者に常時配信される。

2.3 インターネットによる結果配信とデータ監視

監視センターでは、図-5の作業フローに従って、データを受信した後に機器ヘルスチェック・解析・作図・配信・監視(基準値超過判定・警報発令)を行う。

各計測現場からのデータを受信すると、機器ヘルスチェックを行い、現地の機器が正常に作動していることを確認して、静的干渉測位法¹⁵⁾による基線解析を行い変位量を算出する。

得られた変位量は、図-6のような各種図表にとりまとめ・作図されて、毎時インターネットを通じて配信される。インターネットが利用できれば時間や場所にかかわらずPCや携帯電話で計測結果をモニターできるため関係者間の情報共有が容易となる。なお、現場ごとにID/PWを設定しアクセスを制限することで情報セキュリティを確保している。

また、監視センターでは、累積変位量や変位速度等のさまざまな管理基準値を設定することができ、管理基準値を超える変位が計測された場合には、PCや携帯電話へのメールや電話連絡等々の方法で警報を発令することができる。

3. 計測精度向上のための技術

GPSの一般的な計測精度は、水平および高さ方向の標準偏差をそれぞれ σ_h, σ_v とすると、次のように表される¹⁶⁾。

$$\sigma_h = 5 \text{ mm} + 1 \text{ ppm} \times D \quad (1)$$

$$\sigma_v = 10 \text{ mm} + 2 \text{ ppm} \times D \quad (2)$$

ここで、 D は計測点と基準点の間の距離で、基線長と呼ばれ、単位は[km]である。基線長 D が1 km程度以下の場合に、2章に示したシステムで連続計測を実施すると、実際

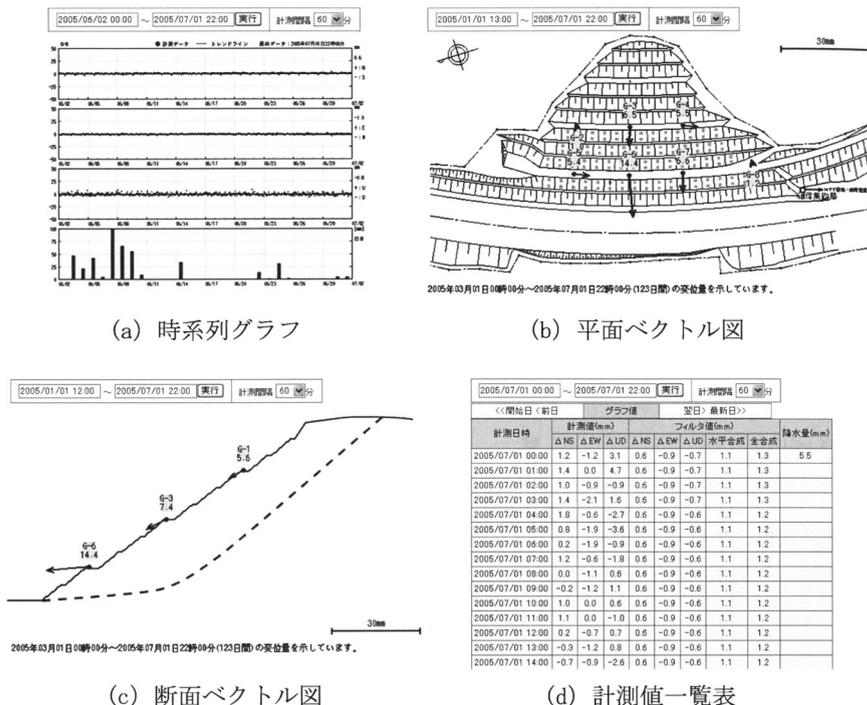


図-6 インターネットによる結果配信イメージ

の標準偏差はもう少し小さい値(上記の値の1/3~1/2程度)となるが、計測結果はランダム誤差を含み、実際の計測値は真の値を中心として水平成分で $\pm 2 \sim \pm 5 \text{ mm}$ 、高さ成分では $\pm 5 \sim \pm 10 \text{ mm}$ の範囲にバラついて分布することが多い⁸⁾。地すべりや切土のり面等での斜面計測ではmm単位の計測精度が要求されるため、さらなる計測精度の向上が必要である。

一方、GPS計測には固有の誤差要因¹⁵⁾があり、とくに、人工衛星からセンサーの間に電波が伝わる際に生じる“電波遅延”、センサー背面の勾配や周囲の樹木などが上空を遮る障害物となる“上空障害物”の影響、周辺構造物等に電波が反射したのち受信するマルチパス、などが計測精度の低下をもたらすため、その対処法が必要である。

ここでは、上記のランダム誤差と、GPS固有の電波遅延のうち大気遅延および上空障害物による誤差に対して、計測精度の向上を図る方法について述べる。

3.1 ランダム誤差への対応—トレンドモデルによる平滑化处理

一般の観測誤差(ランダム誤差)を含んだ計測結果から真の値を推定するためにトレンドモデル¹⁷⁾を適用する。ここで、トレンドモデルとは、多項式回帰モデルに確率構造を導入したトレンド成分モデルをシステム方程式(3)とし、観測方程式(4)とあわせて次のように連立させるものである。

$$\Delta^k u_n = v_n \quad (3)$$

$$y_n = u_n + w_n \quad (4)$$

ここで、上式において u_n は経時的に推移する真の変位、および、 y_n は実際に計測される変位である。また、 w_n は

観測ノイズ(計測誤差:平均値0, 標準偏差 σ の正規分布), および, v_n はシステムノイズ(モデル誤差:平均値0, 標準偏差 τ の正規分布)である. Δ は時間差分演算子であり, 添字 k は差分の階数を意味する.

式(3)および式(4)で表したトレンドモデルにおいては, 計測変位 y_n から真の変位 u_n だけでなく, 計測誤差を表す標準偏差 σ , モデル誤差を表す標準偏差 τ を推定することができる. さらに, モデルの次数 k もデータとの統計的フィッティング度によって自動的に求められる. この点はあらかじめ関数を仮定する一般的な推定法と異なるところで, 柔軟性の高い方法といえる.

トレンドモデルは, 理論的には計測値の誤差が正規分布である限り, その標準偏差 σ の大きさによらず真の値を推定することができ, 水平方向だけでなく高さ方向に対してもmm単位の計測が可能となる. 実際, 筆者の一人はトレンドモデルを適用して, GPSによって1~2mmの変位や, 0.1mm/日程度の速度を持つ変位を検出できることを現場計測を通して明らかにした^{7),8)}. その結果, GPSによる変位計測の実用性と信頼性が一気に高まり, 実務への適用に大きく道が開かれた.

3.2 大気遅延補正と上空障害物の影響の低減

3.2.1 大気遅延補正

GPSの電波は, 伝搬経路上にある大気(対流圏と成層圏)を通過するとき位相の遅れ(大気遅延)を生じ, GPSで得られた位置に大気遅延による誤差が生じる. 気象状況は日々または季節ごとに変化するので, 高精度計測では大気遅延の影響を無視できないことがある. とくに, 基準点と計測点の高低差が大きい場合の高さ方向の変位については, 大気遅延の影響に注意する必要がある.

干渉測位法における基線解析においては, 一般に, 実際の気象状況にかかわらず標準的な大気(気圧1,010hPa, 気温20°C, 相対湿度50%)を仮定して大気遅延補正式を適用している. そのため, 計測現場における現実の気象の変化には対応していないことになり, どのように適正に補正するかは重要な課題である¹⁵⁾.

GPS電波の伝播経路に沿った気象に基づく誤差は, 基線解析の理論に基づき各計測点で測定される電波の位相の差を取ることで相殺されるので, 筆者らは, 基線長が1~2km程度以下の比較的狭い範囲における変位計測においては, 誤差の要因となるのは地表付近の気象であると推定し, 地表気象データを用いて大気遅延量を推定する修正

Hopfield モデル¹⁵⁾を適用すれば, 適正に大気遅延に基づく誤差の補正ができることを示した^{18),19)}.

ある地すべり斜面(図-7参照, 基線長1km, 高低差155m)における1年間の変位計測結果に対して気象補正を行った事例を図-8に示す. 図-8(a)は, 基準点と計測点間の天頂方向の大気遅延量差, とくにwet項と呼ばれる水蒸気圧に起因する遅延量差を地表気象データから推定したものである. 一方, 図-8(b)は, 計測点の高さ方向変位で, 計測結果には大気遅延量差にほぼ相似した変化がある. この変化は, 実際の斜面の挙動としては不自然であり, 大気遅延の影響と考えられる.

図-8(c)は, 大気遅延の影響を地表気象データと修正Hopfield モデルを用いて推定し, これを用いて基線解析

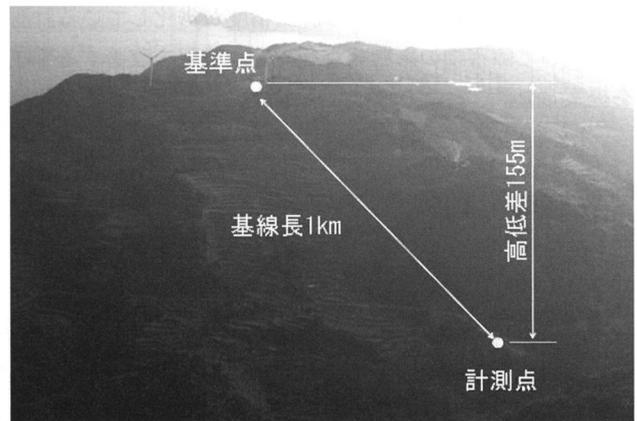


図-7 大気遅延量補正の適用現場¹⁹⁾

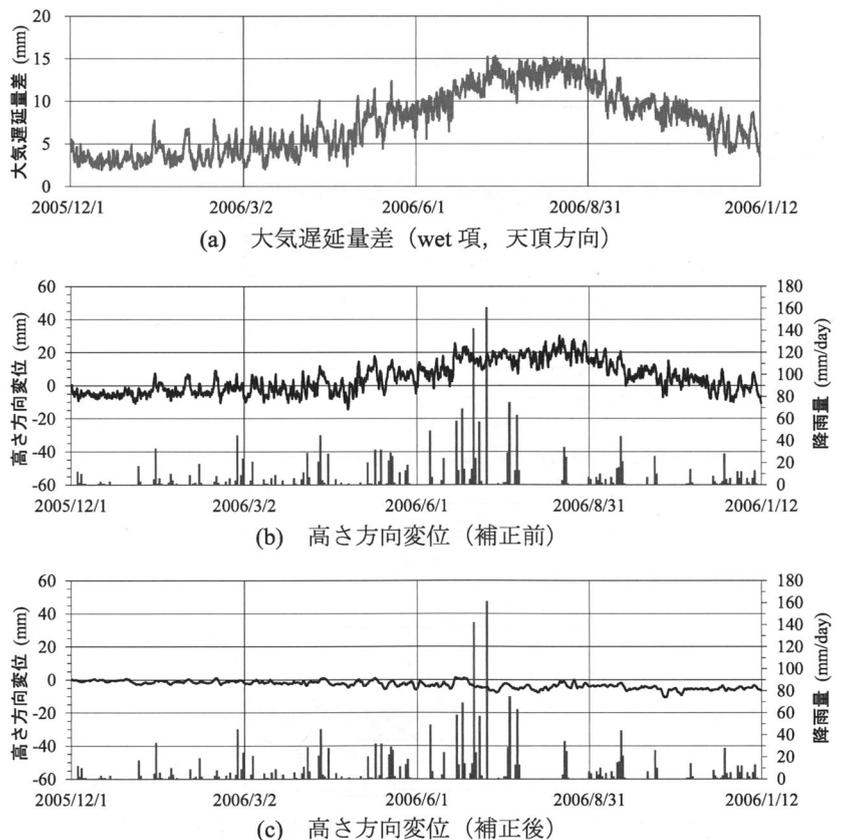


図-8 大気遅延量差と高さ方向変位の計測結果¹⁹⁾

を行った結果である。5月から11月にかけての大気遅延量差にはほぼ相似した変化が減少し、地すべり変動としての沈下傾向が示されている。また、補正前に顕著であった日程度の短周期変動が小さくなっていることがわかる。

3.2.2 上空障害物の影響低減—マスク処理

計測点の背後斜面や周辺の樹木などの障害物があると、受信した電波に乱れが生じる。上空障害物の影響についてはこれまでも指摘されているものの、対策としては、上空視界が良好な位置を選んで計測する、あるいは、障害物を排除するなどが推奨されるにとどまっている。しかし、現場によっては、用地などの問題で計測点の選定や障害物の排除に制限があり、なんらかの方法で上空障害物の影響を抑えて一定の精度を保証する実用的な方法が望まれる。

そこで、上空障害物があり計測精度が劣化している計測点について障害物の影響調査を行い、精度を改善する手法を提案した²⁰⁾。この方法は、樹木などの上空障害物の背後

にある人工衛星からの電波を受信すると誤差が生じるため、上空障害物の背後を移動する人工衛星からの受信電波を用いずに基線解析を実施するものである。実際には、図-9(a)の計測点の上空写真において上空障害物の領域を図-9(b)のように指定し、その領域を通過する人工衛星の受信データを用いないで解析する処理(マスク処理と呼ぶ)を行う。

図-9(a)に示すように背面に樹木のある環境の切土斜面上の計測点に対して、マスク処理前後の結果を図-10に示す。図-9(b)には、計測結果において大きな誤差のある時間帯の衛星配置(数字は衛星番号)を矢印で示したが、図中点線で囲んだ衛星がマスクされ、それらの電波は利用されない。このようなマスク処理によって、樹木の影響で大きく乱れていた計測値(図中○)は、緯度、経度、高さのいずれの成分に対しても大きく改善されている(図中●)。標準偏差は、緯度、および経度方向が6.9mmから1.8mmに、高さ方向は13.0mmから3.9mmに大きく改善したことがわかる²⁰⁾。

以上のように、GPS変位計測にとって最も大きな誤差要因である大気遅延と上空障害物に対する対策が可能となり、これまで適用が困難な観測条件であっても高精度で三次元変位を計測できるようになった。

4. 長者地すべりでの適用事例^{21), 22)}

本研究で開発したGPS自動変位計測システムの適用事例として、長者地すべりでの計測事例を示す。

4.1 計測地の概要

長者地すべり²³⁾は、高知県吾川郡仁淀川町長者地内、仁淀川水系長者川の右岸に位置し、幅200m、長さ900mにわたり、平均傾斜約20°をもって長者川に向かって滑動している。地質的には、古生層粘板岩の間に挟まれた蛇紋岩境界層地すべりである。

長者地すべりは、昭和38年の台風9号を機に激しく活動を始め年間2m程度の移動が観測されていたが、その後地すべり調査が実施され、集水井や排水トンネル等の対策工の施工により現在は年間数cm以下に収束している。

4.2 GPS計測点の配置

GPS計測点は、長者地すべりブロックの下部にG-1、G-2を、長者川を挟んだ対岸の地すべり末端隆起部にG-4の計3基を設置した(図-11)。また、基準点K-1は、長者川対岸の露岩部に設置した。

4.3 GPS計測結果

GPS自動変位計測システムによる地表面変位の計測は、平成18年11月1日から開始し、約1年半の計測期間中に欠測や故障はなく、安定した計測が継続された。

図-12にG-2の時系列グラフを示す。図の上から順にNS(南北)、EW(東西)、UD(上下)方向の変位量、近傍のアメダス観測点(本川)の日雨量、最下段は変位速度で30日当

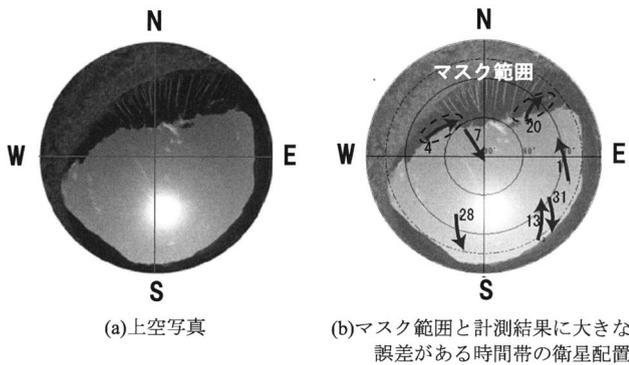


図-9 計測点上空写真とマスクの設定²⁰⁾

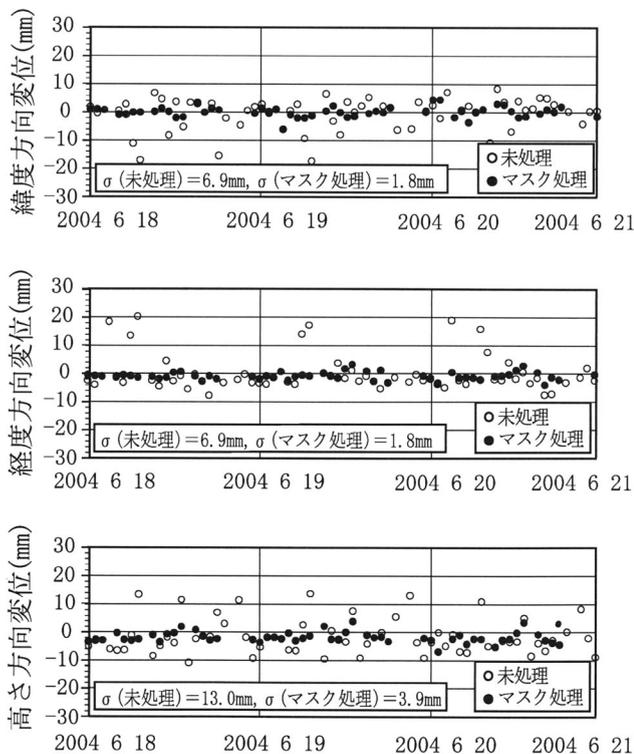


図-10 マスク処理による結果²⁰⁾

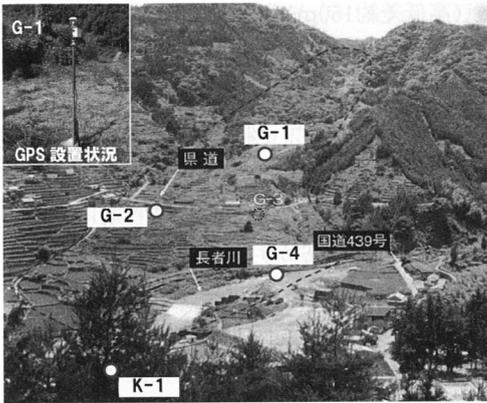


図-11 長者地すべりの全景とGPSの配置²¹⁾

たりの変位量を示している。図のように、計測開始(2006/11/1)から現時点(2008/4/1)までの約半年間の累積変位量は、N方向に65.5mm、W方向に3.8mm、沈下方向に8.4mmである。また、100mm/日を超える降雨時には比較的急激な変位増加が認められる。本計測時点では、排水トンネルの着工直後であり、地下水排除工の効果がまだ発揮されていないためと考えられる。

図-13の変位ベクトル図は、GPSで計測された三次元変位量を平面図および断面図上にベクトル表示している。

これらGPSで計測された変位ベクトルは、すべり方向とほぼ一致しており、GPSによる地表面変位計測が非常に実用的であることが推察される。とくに、G-4の断面変位ベクトルは、明瞭な隆起方向の変位を示しており、G-4付近が地すべり末端隆起部に位置していることがわかる。一般に、地すべり末端部は境界が不明瞭で変位計測も難しいが、GPSにより境界の判別を明確化できる可能性が示唆される。

図-12, 13に示したグラフは、インターネットを用いて常時最新の結果が配信されるから、複数の斜面管理者がリアルタイムに計測情報を共有することが容易である。

5. 七五三掛地すべりでの計測事例⁴⁾

つぎに、七五三掛地すべりでの計測事例を示す。

5.1 七五三掛地すべりの概要

山形県の月山西麓の鶴岡市大網地区に位置する七五三掛地すべり区域(農村振興局所管、面積A=239.45ha)では、2009年の融雪期から梅雨期にかけて大規模かつ活発な地すべりが発生した。活動の最盛期には延長700m、幅300~400mの範囲が50~150mm/dayの速度で変動し、2月下旬に地

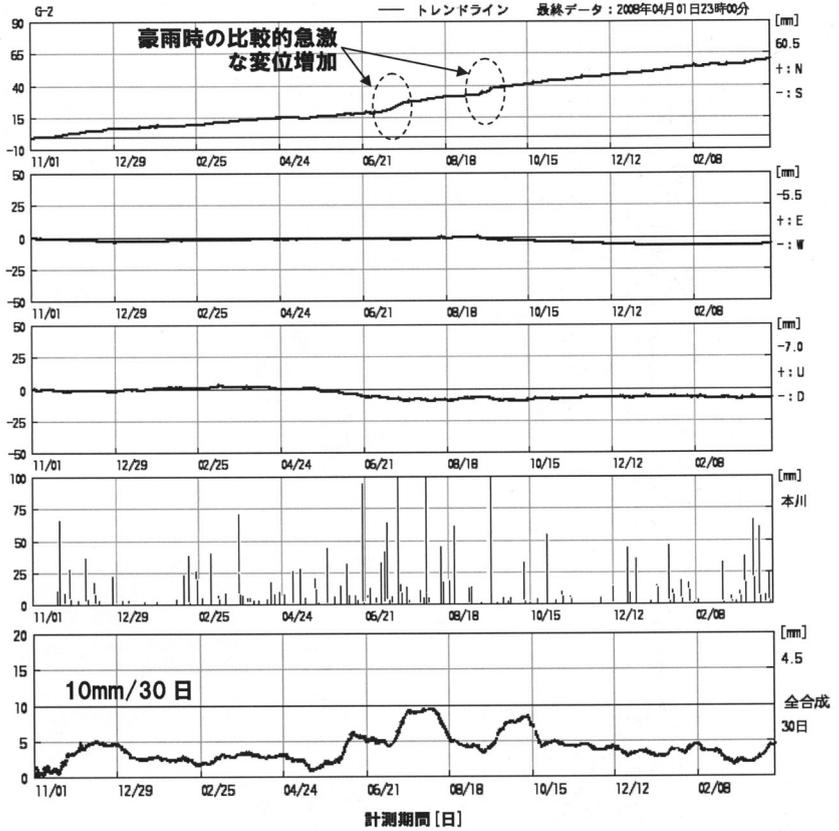


図-12 G-2の変位量の時系列グラフ²²⁾

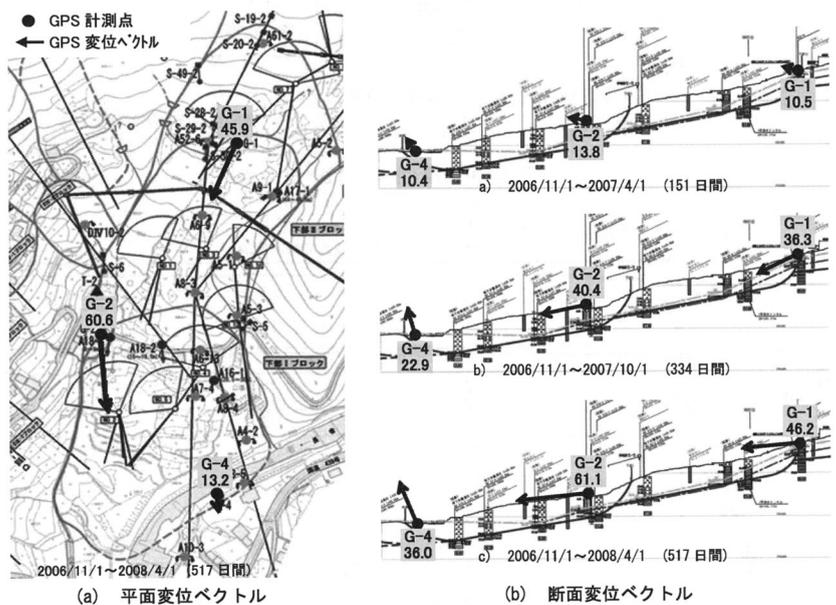


図-13 変位ベクトル図²²⁾

すべり活動の兆候が発見されてから7月上旬に沈静化するまでの4か月余りの間の累積変位量は大きいところで6mmにも達した。

5.2 GPS計測点の配置

GPS計測点は、地表面の亀裂分布を基に推定した活動ブロック内に9か所とその周辺域に6か所の計15か所に配置し(図-14)、5月中旬から順じ計測を開始した。なお、GPS基準点は地すべり頭部から約1,500m離れた国道沿い

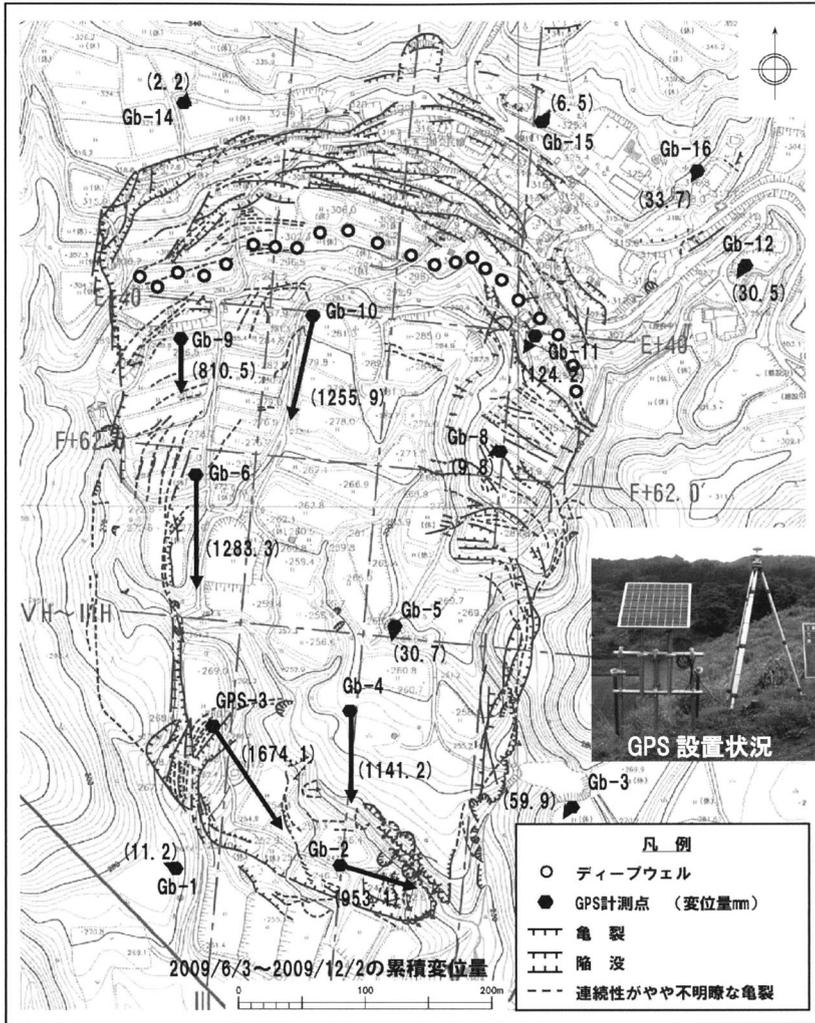


図-14 GPS計測結果(水平変位ベクトル)¹³⁾

(高低差約150m)に設置した。

5.3 GPS計測結果

図-14に、GPS計測で得られた水平変位ベクトルを示す。図中のベクトルは、ほとんどのGPS計測点で計測を開始した2009年6月3日を初期値とし、積雪期に入る12月2日までの6か月間の累積変位量である。ただし、Gb-5およびGb-8が活動ブロック内ながら累積変位量が小さいのは、計測開始が2009年6月30日と遅れたためである。

図-14から、活動ブロック周辺部の計測点の累積変位量が2～30mm程度であるのに対し、活動ブロック内の計測点では800～1,600mm程度と2オーダーも大きい累積変位量を示すことがわかった。このことは、活動ブロックの冠頭部や側方に明瞭な滑落崖(落差1～2m程度)が形成されていることと調和的である。また、活動ブロック境界付近に設置したGb-11の累積変位量は124mmと中程度の値を示している。

活動ブロック内のベクトル方向に注目すると、上部～中部の計測点はほぼ南方向に移動しているが、末端部の計測点では移動方向が南東方向を示し、当該地すべりは計測点Gb-4とGPS-3の間に位置する谷地形を境に移動方向が変化していることがわかった。

次に、累積変位量大きい活動ブロック内の計測点について変位量の推移を時系列的に考察する。図-15にGPSで得られた変位量の時系列グラフを示す。上段は水平変位量、中段は鉛直変位量、下段は現地の日降水量である。

当該地では、今回の地すべりの誘因と考えられる主動域のすべり面付近および土塊内の地下水を直接排除する目的で、緊急対策としてディープウェルによる地下水排除工が実施された²⁴⁾。

ディープウェルは、まず活動ブロック上部の全幅にわたって計22基が配置され(図-14参照)、2009年6月下旬から22孔で揚水を開始した。図-15のGPS計測結果を見ると、ディープウェルの近傍に位置するGb-11では揚水開始とほぼ同時に変位の累積がなくなった。また、その他の計測点についても全孔の揚水開始後1週間が経過した7月初旬には変位の累積が収束しており、緊

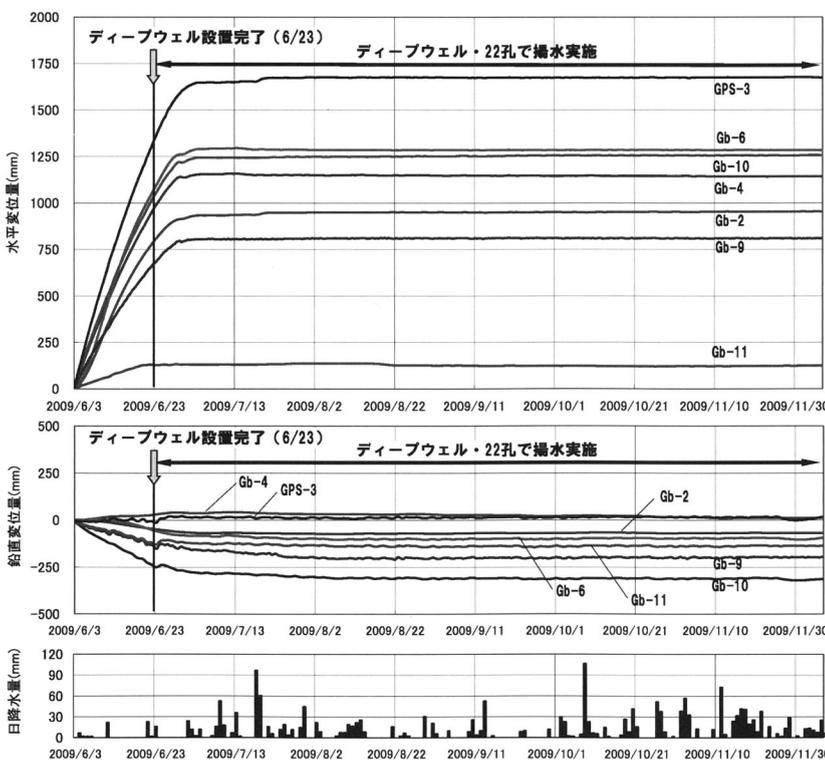


図-15 GPS計測結果(上：水平変位量，中：鉛直変位，下：日降水量)¹³⁾

急対策として実施されたディープウェルの対策効果が顕著に現れていると考えられる。

以上のように、当該地に導入したGPS自動変位計測システムは、計測開始から欠測なく地すべり変位を計測することができ、緊急対策工の効果判定に非常に有用であった。

6. ま と め

本稿では、斜面安全監視を目的として開発したGPS自動変位計測システムの概要と地すべり計測への適用事例について述べた。以下に、本研究の成果を列挙する。

- ①斜面変位計測に特化した小型・軽量・安価なGPS自動計測機器の開発、および、高精度化の研究を進め、mm単位の三次元変位の自動計測を実現した。
- ②インターネットを活用したASP方式を導入し、複数の現場計測データを一元的に自動解析処理することで解析作業を効率化し、1現場あたりの計測コストを低減した。
- ③管理基準値を超える変位が計測された場合に警報を発令することで、常時の斜面安全監視体制を構築できる。
- ④インターネットを介して時間や場所にかかわらず計測結果を確認できるため、関係者間の情報共有が容易となり、迅速な斜面状況の把握と早期の対応が可能となる。

以上のように、本研究で開発したGPS自動変位計測システムは、斜面安全監視に有用であると考えられる。今後は、欧州や日本等が測位衛星を配備する計画であり、それらの測位衛星も利用するGNSS(Global Navigation Satellite Systems: 全地球航法衛星システム)の導入に取り組み、より高精度で安定性の高い自動変位計測を実現したい。

謝辞 本稿の執筆に際して、東北農政局から多大なご協力をいただいたこと、および現場計測に協力いただいた関係者各位に謝意を表します。

引用文献

- 1) 櫻井春輔・清水則一(1990): GPS(汎地球測位システム)の地盤変位計測への応用, 土と基礎, Vol.38(387), pp.65-72.
- 2) 清水則一・櫻井春輔(1993): GPSの岩盤変位計測への適用, 資源と素材, Vol.109(1), pp.1-7.
- 3) 福岡浩・佐々恭二・平原和朗・島通保・日浦啓全(1990): 人工衛星測位(GPS)による地すべり移動観測, 第29回地すべり学会研究発表会講演集, pp.170-174.
- 4) 櫻井春輔・清水則一・古谷茂成・皿海章雄(1993): GPSによる切取り斜面の変位計測, 土木学会論文集, Vol.475, III-24, pp.137-142.
- 5) 近藤仁志・M. Elizabeth Cannon・清水則一・中川浩二(1996): GPSによる地盤変位モニタリングシステムの開発, 土木学会論文集, No.546/VI-32, pp.157-168.
- 6) MASUNARI, T., TANAKA, K., OKUBO, N., OIKAWA, H., TAKECHI, K., IWASAKI, T., and SHIMIZU, N.(2003): GPS Continuous Displacement Monitoring System, 6th Int. Sympto. on Field Measurements in Geomechanics, FMGM 03, pp.537-543.
- 7) 清水則一・安立寛・小山修治(1998): GPS変位モニタリングシステムによる斜面変位計測結果の平滑化に関する研究, 資源素材学会誌, Vol.114(6), pp.9-14.
- 8) 松田浩朗・安立寛・西村好恵・清水則一(2002): GPSによる斜面変位計測結果の平滑化処理法と変位計測予測手法の実用性の検証, 土木学会論文集, No.715/III-60, pp.333-343.
- 9) 平野宏幸・白田芳彦・神澤幸治・宮田和・清水則一(2009): 地すべり地におけるトンネルの切羽補強工と早期閉合による変位制御に基づく情報化施工, 土木学会論文集F, Vol.65, No.3, pp.364-380.
- 10) 平野宏幸・白田芳彦・神澤幸治・宮田和・清水則一(2011): トンネル施工時における地すべり斜面の三次元変位計測へのGPS変位計測システムの適用とその評価, 日本地すべり学会誌, Vol.48, No.2(200), pp.7-18.
- 11) 山口嘉一・小堀俊秀・横森源治・大野 誠・岩崎智治(2005): GPSを用いたフィルダム外部変形計測に関する一考察, ダム工学, Vol.15, No.2, pp.137-148.
- 12) 曾田英揮・佐藤信光・自閑茂治・岩崎智治(2010): GPS計測を用いたフィルダムの堤体計測の高度化の検討, ダム技術, Vol.282, pp.4-16.
- 13) 岩崎智治・荒川隆嗣・中里裕臣・増成友宏・清水則一(2011): GPSを主体とした大規模地すべり発生時の計測システムの構築, 日本地すべり学会誌, Vol.48, No.2, pp.26-32.
- 14) 清水則一(2011): GPSによる変位計測技術の変遷と展望, ダム技術, No.296, pp.4-12.
- 15) 土屋淳・辻宏道(2002): 新・GPS測量の基礎, 日本測量協会.あるいは, P. Misra and P. Enge(2010): 精鋭GPS 基本概念・測位原理・信号と受信機, 改訂第2版, 測位航法学会訳.
- 16) 日本測量協会(2007): 国土交通省公共測量作業規程.
- 17) 北川源四郎(1993): 時系列プログラミング, 岩波書店.
- 18) 増成友宏・清水則一(2007): GPSによる地盤変位計測における気象の影響の補正方法の検討, 土木学会論文集F, Vol.63, No.4, pp.437-447.
- 19) 増成友宏・武地美明・船津貴弘・清水則一(2009): 現場気象データを用いたGPS変位計測の補正について, 土木学会論文集F, Vol.65, No.3, pp.356-363.
- 20) 増成友宏・武地美明・田村尚之・船津貴弘・清水則一(2008): GPS変位計測における上空障害物の影響とその低減法, 土木学会論文集F, Vol.64, No.4, pp.394-402.
- 21) shamen-net研究会(2007): GPSによる地すべり地表面計測の実用性検証①. 第46回地すべり学会研究発表会研究発表講演集, pp.313-316.
- 22) shamen-net研究会(2008): GPSによる地すべり地表面計測の実用性検証②. 第47回地すべり学会研究発表会研究発表講演集, pp.347-348.
- 23) 全国地すべり対策協議会(1972): 長者地すべり, 地すべり記録集, No.6.
- 24) 荒川隆嗣・三浦智明・嵐田豊彦・山科真一(2010): 山形・七五三掛地すべりに関する緊急対応, 平成22年度日本地すべり学会シンポジウム講演論文集, pp.27-30.

(2011年9月7日受付, 2011年10月13日受理)

GPS Automatic Displacement Monitoring System for Safety Management of Slopes

Tomoharu IWASAKI, Norikazu SHIMIZU, Tomohiro MASUNARI, Wataru SATO,
Katsunori HARAGUCHI and Hiroshi OSHIMA

Abstract

Monitoring deformations is a key technology for assessing the stability, predicting the risk, managing the safe operation, and reducing the project cost. Although various types of instruments and systems have been developed to achieve successful monitoring, those can be applied to measure one or two dimensional displacements only in local area during short term.

In order to overcome such limitations, a new type of GPS displacement monitoring system has been developed by the authors. It can continuously monitor the three-dimensional displacements of the ground surface automatically with high accuracy for long term. Besides it provides monitoring results through the internet in real time, and users can see them at anytime and anywhere.

In this paper, the system is outlined and the practical application results are described.

Key words : safety management of slopes, GPS, monitoring deformation, Internet