

GPS による斜面変位計測結果の平滑化処理法と 変位挙動予測手法の実用性の検証

松田浩朗¹・安立 寛²・西村好恵³・清水則一⁴

¹ 学生会員 修(工) 山口大学大学院 理工学研究科 博士後期課程(〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

E-mail : matsuda@rock.civil.yamaguchi-u.ac.jp

² 正会員 修(工) (株)オリエンタルコンサルタンツ 九州支社(〒812-0011 福岡県福岡市博多区博多駅前 3-10-24)

(元 山口大学大学院 理工学研究科 博士前期課程)

³ 正会員 修(工) (株)東亜測器(〒220-0051 神奈川県横浜市西区中央 1-27-13)

(元 山口大学大学院 理工学研究科 博士前期課程)

⁴ 正会員 博(工) 山口大学教授 工学部社会建設工学科(〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

大規模斜面の安定性の監視を目的として、GPSを用いた変位計測システムの開発研究を進めている。本研究では、GPSによって連続計測した変位をトレンドモデルを用いて平滑化し、従来のGPS測量の精度を上回る変位計測が可能であることを実験と実測結果を用いて検証する。また、平滑化した計測結果を用いて変位挙動を予測する手法を提案し実測結果に適用しその妥当性を検証する。

Key Words : GPS, continuous displacement monitoring, smoothing, trend model, large slopes, prediction of displacement behavior

1. はじめに

大規模な掘削斜面や地すべり地などの変位挙動の監視は、安全な施工や防災の観点から重要である。斜面の変位計測には数々の計測手法があり、1980年代後半から、GPS(Global Positioning System:人工衛星測量システム)¹⁾が、特に広大な領域の変位計測を目的として適用され始めた²⁾⁻⁷⁾。

筆者らはGPSの長大斜面の変位計測に対する適用の可能性に着目し⁸⁾⁹⁾、実測を通してその適用性を明らかにした¹⁰⁾。さらに、リアルタイム変位計測を目的としたGPS変位モニタリングシステムを共同開発し¹¹⁾¹²⁾、露天掘り斜面や地すべり斜面の変位計測に適用してきた¹³⁾¹⁴⁾。開発したシステムは観測方式としてキネマティック方式¹⁾を採用し、同時に複数の計測点の変位をリアルタイムに連続計測できるという従来のGPS測量にはない特徴を持つものである。また、地すべり変位の連続計測に対して、リアルタイム性はないが、安定した観測が可能なスタティック方式に基づく省電力小型の受信機¹⁵⁾を用いている¹⁶⁾。

GPSのアンテナと受信機などのハード面はこの10年

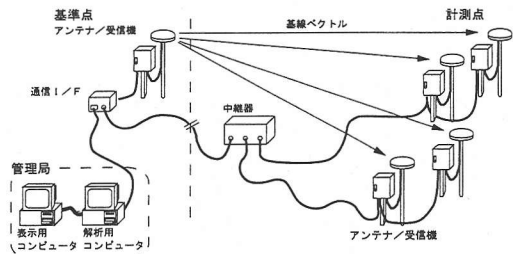
で機能の向上、小型化、ならびに価格の低廉化が進んだものの、計測結果の処理法および計測結果に基づく挙動予測など、斜面の安全評価に結びつくソフト面の開発については、まだ十分進展していないように思われる。そこで筆者らは、GPSによって連続計測される変位を適切に前処理し、さらに、時系列データの平滑化手法の一つであるトレンドモデル¹⁷⁾を適用することによって、従来のGPS測量の精度をしのぐ計測結果を得る可能性を数値シミュレーションによって示した¹⁸⁾。

本論文は、トレンドモデルによる平滑化手法を現場実験や斜面の実測結果に適用し、さらに平滑化した計測結果を用いて将来の変位挙動を予測する手法を示し、それらの実用性について検証することを目的とする。

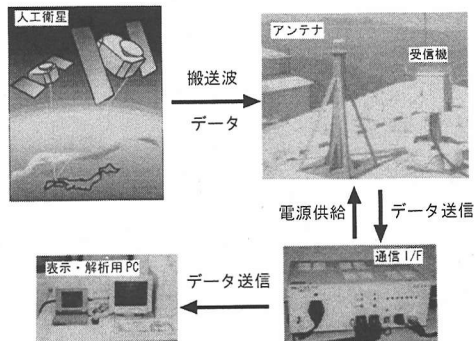
2. GPSによる変位計測と計測結果の平滑化手法

(1)GPSによる変位計測

本研究ではGPSの相対測位法によって変位を計測する。すなわち、相対測位法では、基準点と計測点に



(a) システム概要



(b) システム外観

図-1 GPS変位モニタリングシステム¹¹⁾

それぞれアンテナと受信機を設置し、計測点の基準点からの3次元相対座標（世界測地系；WGS-84に基づく座標系¹¹⁾）を得る。時間の経過に従って計測点の座標を計測すると、座標の推移から計測点の変位を求めることができる。

本研究では、キネマティック方式によりオンラインでデータ処理するリアルタイム計測システム¹¹⁾（以下、オンラインシステムと呼ぶ）と、スタティック方式によりオフラインでデータを処理する受信機¹⁵⁾を用いるシステム（以下、オフラインシステムと呼ぶ）を利用する。

オンラインシステムは、①アンテナと受信機、②中継・通信器、③解析・表示部の3つの要素から構成される¹³⁾。つまり、図-1(a)および(b)に示すように、アンテナと受信機を基準点および計測点に設置し、それらを同軸ケーブルによって中継機と通信I/Fに接続し、さらに管理局に設置した解析と表示用のパーソナルコンピュータに接続する。電源はケーブルによって供給され、人工衛星から受信した信号とデータはケーブルを通してコンピュータに送られ設定した時間間隔で解析し、結果は直ちに表示される。この間すべて自動処理される¹¹⁾。

一方、オフラインシステムでは、基準点と各計測点にアンテナと受信機をそれぞれ独立して設置し、電源は受信機に接続したバッテリーによって供給する。人工衛星から受信した信号とデータは受信機内のメモリ

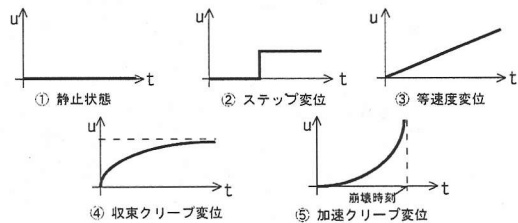


図-2 変位モード¹⁸⁾

に一旦保存し、それらをコンピュータにダウンロードして解析して変位を得るため、データ取得と解析がオフラインとなっている^{15),16)}。

(2) 計測結果の平滑化手法

GPSの一般的な測量精度は水平方向に対して、 $5\sim 10\text{mm} + 1\text{ppm} \times \text{基線長}$ 、上下方向に対して $10\sim 20\text{mm} + 2\text{ppm} \times \text{基線長}$ とされている⁹⁾。実際、筆者らはGPSを用いた変位計測においても同様の結果を得ている¹⁰⁾。しかしながら、斜面の安全監視を目的とした変位計測に適用する場合、より高い精度で計測できることが必要である。そこで、筆者らは時間方向に連続的に計測した変位に対して、平滑化手法のひとつであるトレンドモデル¹⁷⁾を適用することを提案した¹⁸⁾。その際、トレンドモデルでは観測ノイズを正規分布と仮定しているため、観測ノイズが正規分布とみなせるかどうかを χ^2 検定によって調査した¹⁸⁾。

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とし、観測方程式と連立させるものである。

$$\Delta^k u_n = v_n \quad (\text{システム方程式}) \quad (1)$$

$$y_n = u_n + w_n \quad (\text{観測方程式}) \quad (2)$$

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 の正規分布に従うと仮定）、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 の正規分布に従うと仮定）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(1)および式(2)で表したトレンドモデルにおいては、真の変位 u_n 、確率差分方程式の階数 k （モデル次数と呼ぶ）、計測誤差を表すパラメータ σ （観測ノイズの分散）、モデル誤差を表すパラメータ τ （システムノイズの分散）が未知である。これらのパラメータは、カルマンフィルタのアルゴリズムを適用し、観測ノイズおよびシステムノイズの分散値（ σ および τ ）の尤度が最大となるように推定する。また、モデル次数 k はAIC（赤池情報量基準）が最小となるように推定する¹⁷⁾。

トレンドモデルには、あらかじめ平滑化するための関数形を与えなくてよいこと、計測データに追従しすぎることがなく偶然変動の影響を受けにくいこと、などの特徴がある¹⁷⁾。

なお、実際の適用においては、計測データが取得される毎に逐次平滑化を行う。その際にパラメータ k , σ , ならびに τ とも同時に更新され、各時点における最適な平滑化結果を得ることができる。

3. トレンドモデルによる実測値の平滑化結果

筆者らは、文献18)において、数値シミュレーションによって、トレンドモデルがGPSによる連続変位計測結果に対して有効であることを示している。ここでは、さらに実測値に対してトレンドモデルを適用し、その実用的な有効性を検証する。

本研究では準静的な地盤変位を対象とし、動的変位は扱わないことにする。そこで、地盤変位として図-2に示すような5種類の変位モード、すなわち、①静止状態、②等速度変位、③突発的変位、④収束クリープ変位、⑤加速クリープ変位、を想定する。実際の変位はこのような単純なモードではなく、より複雑に挙動すると思われるが、本研究では上記の5つのモード、もしくはその組み合わせによって実際の変位挙動が表されると仮定する。

ここで、GPS計測における計測精度は受信環境や計測点間の基線長に影響を受ける。本論文で示したすべての結果は、計測点間の基線長1km未満、また受信を遮る障害物があまり存在しないなど、GPS計測において比較的良好な計測環境で計測された結果である。

(1) 静止状態

静止状態にある計測結果として、後述(5.(1))の露天掘り鉱山において得られたデータを一例として用いる。計測点は掘削の影響を避けるために掘削位置から数100m離れた場所に設置し(後述の図-13, No.29付近に設置、基準点No.28との基線長は約187m)、リアルタイムキネマティック方式によって1時間周期で計測されている。周囲および上空には障害物はなく、計測期間中は概ね5個以上のGPS衛星から電波を受信した。

図-3に、緯度、経度および高さ方向について約1ヶ月間の計測結果と、それぞれトレンドモデルを適用した平滑結果(以下、簡単に平滑化結果という)を示す。○は計測値、実線は平滑化の結果を示す。いずれの変位方向においても、ばらつきのある計測結果に対し

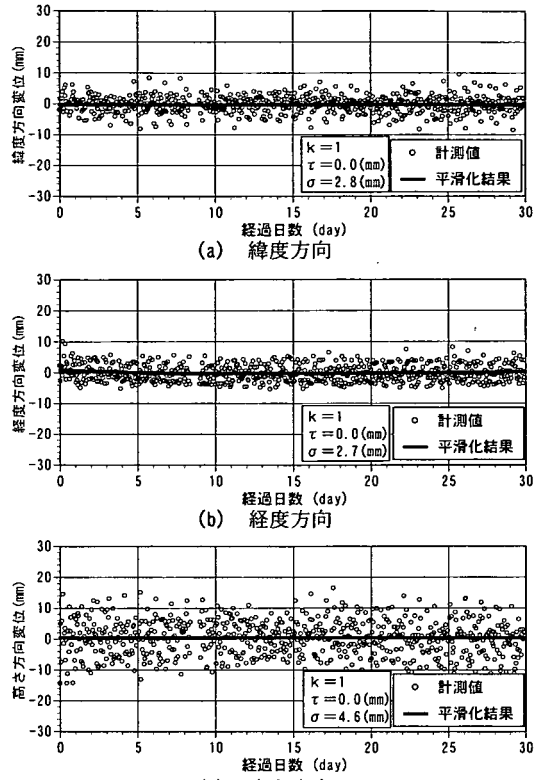


図-3 静止状態

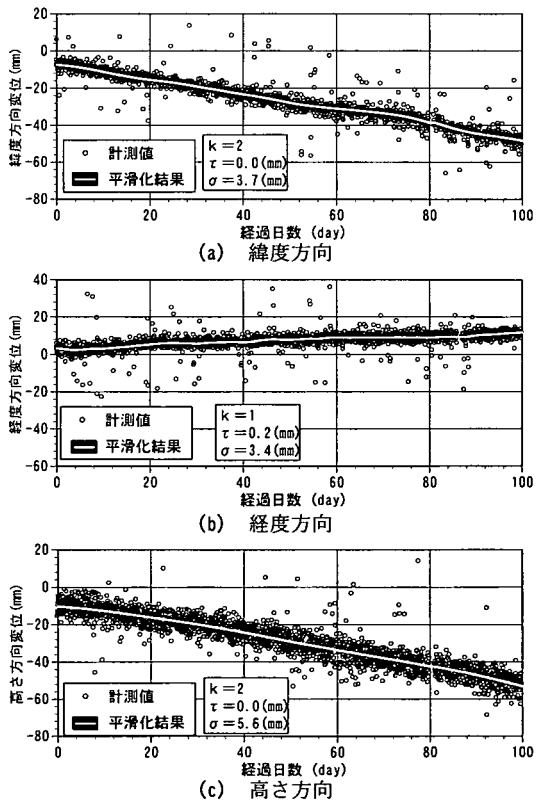


図-4 等速度変位

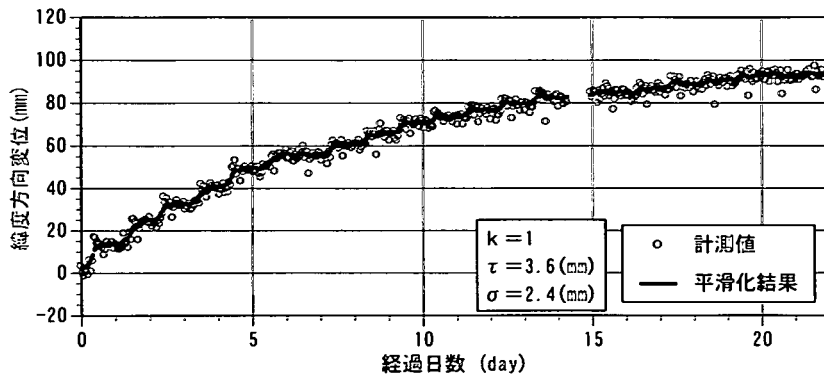


図-5 ステップ変位

表-1 与えた変位と平滑化結果

経過日数 (day)	与えた変位 (mm)	平滑化結果 (mm)	誤差 (mm)
1	12.5	11.8	-0.7
2	10.9	10.2	-0.7
3	9.6	8.7	-0.9
4	8.3	8.3	0.0
5	7.4	8.3	0.9
6	6.4	6.7	0.3
7	5.6	4.8	-0.8
8	4.9	5.1	0.2
9	4.3	5.1	0.8
10	3.7	2.9	-0.8
11	3.3	3.0	-0.3
12	2.9	3.0	0.1
13	2.5	2.6	0.1
14	2.2	2.5	0.3
15	2.0	1.9	-0.1
16	1.7	2.2	0.5
17	1.4	1.4	0.0
18	1.3	2.0	0.7
19	1.2	0.7	-0.5
20	1.0	0.5	-0.5
21	0.8	0.7	-0.1
22	0.8	0.8	0.0

て、平滑化結果は変位がほぼ0で、計測点が静止している結果を示している。なお図中に、前述したアルゴリズムで得られたモデル次数 k （本研究では $k=1$ 、2から最適値を導出）、システムノイズ σ 、ならびに観測ノイズ τ の値を示している。変位計測誤差（標準偏差）の推定値は、緯度方向は $\sigma_{lat}=2.8\text{mm}$ 、経度方向は $\sigma_{lon}=2.7\text{mm}$ 、高さ方向は $\sigma_{hei}=4.6\text{mm}$ である。これは、計測結果から直接求めた標準偏差とほぼ同じ値であり、トレンドモデルによって計測誤差も正しく推定されることが示された。また、それらの値は、GPS測量の標準偏差（緯度・経度方向 $5\sim 10\text{mm}+1\text{ppm}\times$ 基線長、高さ方向 $10\sim 20\text{mm}+2\text{ppm}\times$ 基線長）と比べて約1/2の値となっている。その理由は、繰り返し連続的に計測していること、および、文献13)で提案したデータ処理法を用いていることによるものと考えられる。

さらに、トレンドモデルを適用することで、ある幅でばらつきを持った計測結果に対して真の値の推定値を安定した1本の線として得ることができる（図-3の平滑化結果の線）。特に、GPSによる高さ方向の計測精度は水平方向の精度に比べ劣るにもかかわらず（図-3においてもばらつきが大きい）、トレンドモデルの平滑化結果は緯度・経度方向の結果と同様に安定した平滑化結果を与えている。このことは、トレンドモデルを用いることの利点と考えられる。

(2) 等速度変位

等速度変位の計測結果として、後述(5.(2))の地すべり斜面において得られたデータを一例として用いる（図-4）。計測点は図-15のNo.210付近に設置され、基準点との基線長は約192mでリアルタイムキネマティック方式によって1時間周期で計測されている¹⁹⁾。周囲および上空には大きな障害物はなく、計測期間中は概ね5個以上のGPS衛星からの電波を受信した。

この計測結果にトレンドモデルを適用すると、平滑化結果は図-4に示す実線のようになる。特に、図-4(b)に示す経度方向の変位に着目すると、この変位は約100日間で10mm程度の変位、つまり変位速度が約0.1mm/日である。斜面の安全監視において0.1mm/日は注意を要する一つの基準値¹⁹⁾として用いられることもある。緯度、および高さ方向についてはそれぞれ約0.5mm/日、および約0.4mm/日の変位速度を捉えている。トレンドモデルを適用することによって、このような微小な変位速度の変位を検出することが可能であることを示している。

(3) 突発変位

これまで動きのなかった状況から突発的に生じる変位を検出することは安全管理において重要である。ここでは、どの程度の突発変位を検出できるかを調査する。

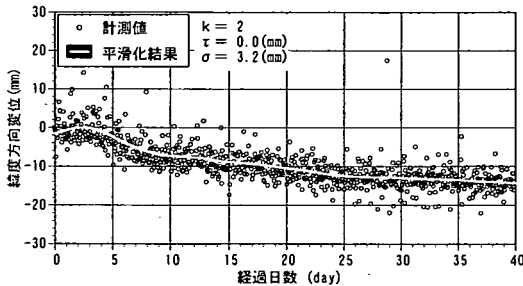


図-6 収束クリープ変位

突発的な変位を模擬するために、静止状態とみなせる点に設置されたGPSアンテナに人為的に移動変位を与え、その計測結果にトレンドモデルを適用して、どの程度正確に変位を検出できるか調査する実験を行った²⁰⁾。すなわち、1日1回、表-1に示すように0.8~12.5mmの移動変位をアンテナに与え（実際には1mm読みのスチール尺の目盛りに沿ってアンテナを移動させる。1mm以下の値は目視で与えた。）、これを真の値とし平滑化結果と比較する。図-5に計測結果と平滑化結果を、また表-1に与えた変位と平滑化結果の比較を示す。なお、本研究では、真の値と比較する平滑化結果として、移動変位を与えた12時間後の平滑化結果を採用した。これらの結果から、階段状に生じる突発的な変位を、ほぼ正確に、すなわちいずれの変位に対しても両者の差は1mm未満(表-1参照)で計測されることがわかる。

本実験においては、連続計測結果にトレンドモデルを適用することで、1mm程度以上の突発的な変位を検出できる可能性が示された。

(4) 収束クリープ変位

徐々に変位が増加し最終的に一定値に達する収束クリープ変位の実測結果に対してトレンドモデルを適用した。図-6は地すべり地で計測された変位のなかで、収束クリープ挙動を示す結果である。なかには異常値と思われる値が含まれる計測結果に対して、平滑化結果は乱されることなく収束クリープ挙動を追随している。

一方、前節の実験(図-5)においては、実験変位は突発変位の値を徐々に小さくし、全体としては収束するクリープ変位を模擬していた。図-5において、突発的な変位を検出しながら、全体としては収束クリープを追随していることが分かる。

以上のことから、収束クリープ挙動に対してもトレンドモデルは有効であることが示された。

(5) 加速クリープ変位

加速クリープ変位についてはGPSによる実測値が

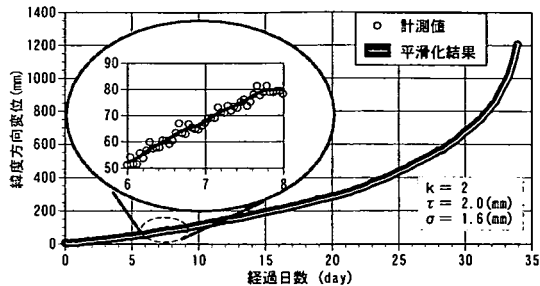


図-7 加速クリープ変位

ないため、過去に発生した斜面崩壊変位の伸縮計による計測値²¹⁾を真値とし、静止計測点においてGPSによる実測結果(計測周期1時間)の観測ノイズをそれに加え、シミュレーションのため計測変位を作成した。計測変位と平滑化結果を図-7に示す。計測開始初期の小さな変位から崩壊近くの変位に至るまで、加速クリープ変位に対してもトレンドモデルが適用できることが示された。

以上のように、実測結果においてもトレンドモデルは5種類の変位モード、すなわち①静止状態、②等速度変位、③突発的な変位、④収束クリープ変位、⑤加速クリープ変位のいずれに対しても、予め変位挙動を想定する、また平滑化の関数形を設定する必要がなく有効に適用できることが分かった。

4. 平滑化結果に基づく変位挙動の予測

トレンドモデルは得られたデータの平滑化を行うもので、将来の挙動を予測することには直接適用できない。しかし、変位計測で重要なことは、精度良く計測できることだけでなく計測結果に基づき将来の挙動を予測することである。そこで本章では、平滑化結果を利用して収束性のクリープ変位に対する最終変位の予測方法、および加速クリープ変位に対する崩壊時刻の予測方法をそれぞれ示す。

(1) 収束クリープ挙動の最終変位の予測

収束クリープの予測手法として、浅岡らが圧密沈下予測に対して提案した方法²²⁾を利用する。まず、収束クリープ変位の模式的な経時変化を図-8(a)に示す。ここで、変位を等時間間隔で抽出し、時刻 t_{i-1} および t_i における変位をそれぞれ u_{i-1} および u_i とし、図-8(b)のように横軸 u_{i-1} 、縦軸 u_i のグラフ上にプロットする。変位が収束する場合は、 $u_{i-1}=u_i$ となる。プロット点(図中□)は、変位の増分が正であれば直線 $u_{i-1}=u_i$ より上方に、一方、負であれば下方にプロットされる。時間

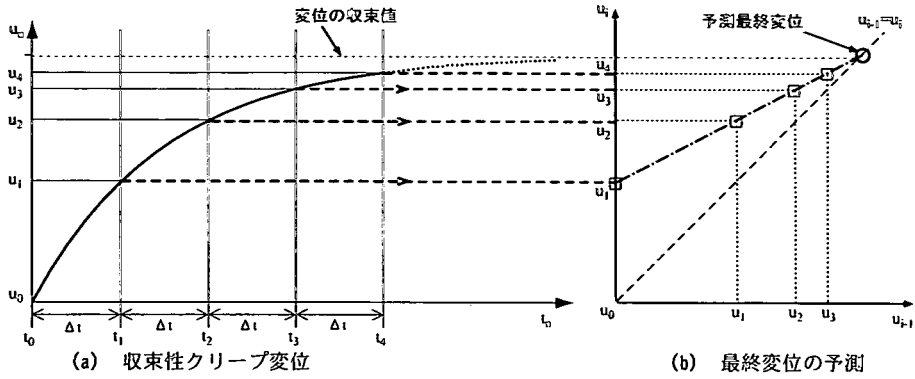
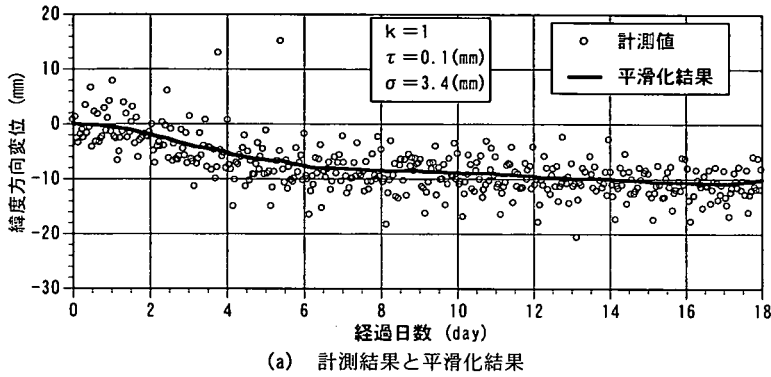
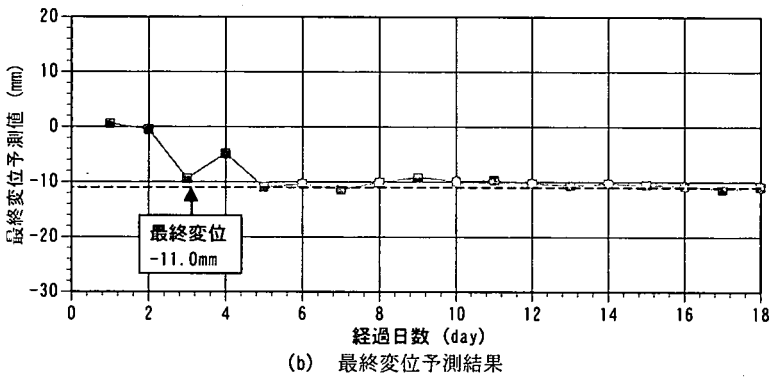


図-8 最終変位予測法



(a) 計測結果と平滑化結果



(b) 最終変位予測結果

図-9 最終変位の予測

の経過とともに u_{i-1} と u_i の差が小さくなり、図上の点 (u_{i-1}, u_i) は $u_{i-1} = u_i$ の直線に近づき、最終的には直線 $u_{i-1} = u_i$ に到達する。この性質を利用して次の手順で最終変位を予測する。

まず、平滑化結果から変位を等時間間隔で抽出し、図-8(b)の記号口のようにプロットする。次に、口に対して回帰式直線式 $u_i = \alpha u_{i-1} + \beta$ をあてはめ、最小二乗法を用いてパラメータ α, β を求める。この直線と $u_{i-1} = u_i$ を表す直線との交点が最終的な変位の予測値 $u_{\infty} = \alpha u_{i-1} + \beta$ となる。この方法は、厳密には収束クリープ変位が $u_i = u_{\infty}(1 - e^{-t/T})$ (u_{∞} : 最終変位, T : 遅延時間)

の形である場合においてのみ正しいが、本研究では最終変位予測の近似手法として用いる。

図-9(a)は地すべりにおいて実測された収束クリープ変位で、この結果に対して、上記の方法を適用し最終変位の予測を行う。計測データは、最終変位が約-11mm(南方向の変位)、および収束に要する日数は18日である。平滑化結果から1日間隔で変位を抽出し、3日目から1日ごとに上述の方法で最終変位の予測を行った。図-9(b)に予測結果を示す。図-9(b)において■印は、予測を行った時刻に対する予測最終変位である。計測後5日目に最終変位-11mmをほぼ予測して

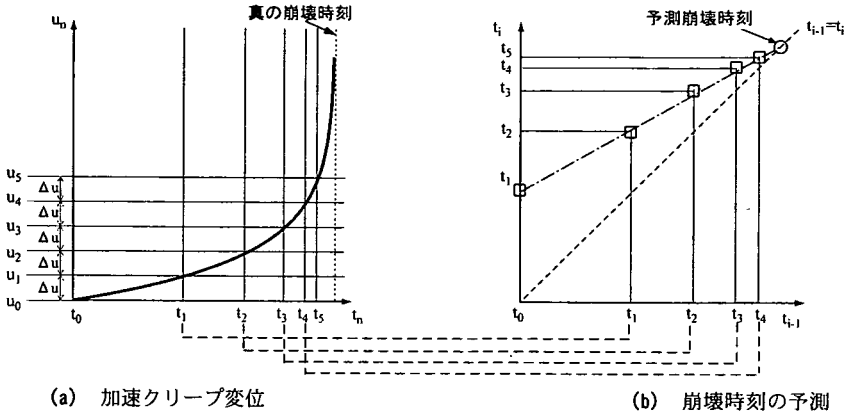


図-10 崩壊時刻予測法

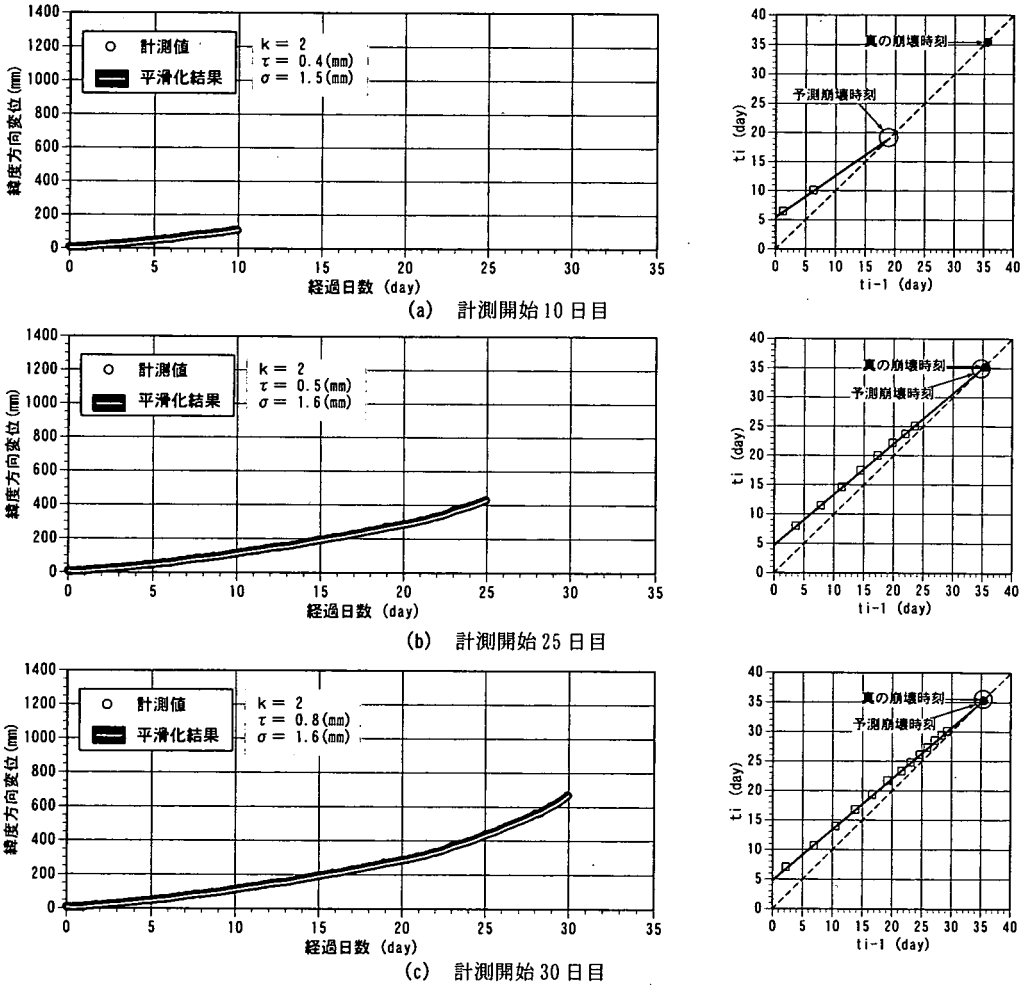


図-11 崩壊時刻予測の一例

いる。GPS変位計測システムから直接得た変位が図-9(a)に示されているようなばらつきを示しているにもかかわらず、トレンドモデルと上記の方法によって、良好に最終変位を予測できることが示された。

(2) 加速クリープ変位の崩壊時刻の予測

加速クリープ変位の模式的な経時変化図を図-10(a)に示す。ここでは斜面崩壊予測のための斎藤の方法²³⁾と、前節で述べたクリープ変位予測の方法を組み合わせることで崩壊時刻の予測を行う。

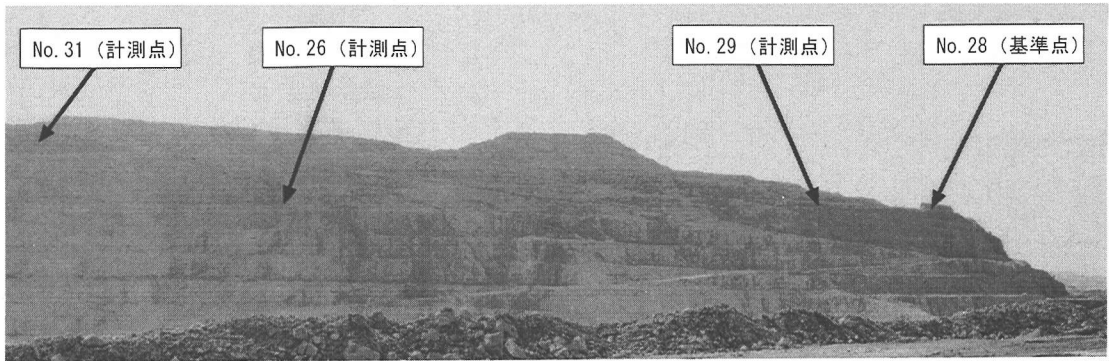


図-13 露天採掘鉱山における受信機の設置状況

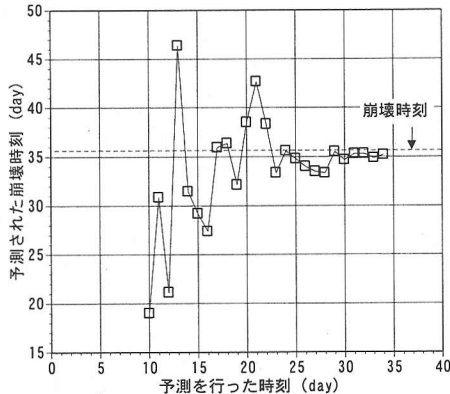


図-12 崩壊時刻の予測結果

斜面崩壊へ至る加速クリープ変位は、崩壊時刻において変位は発散する。図-10(a)において、等変位間隔で時刻データを抽出し、図-10(b)のように t_{i-1} と t_i をプロットする。それらの点に最小二乗法を適用して得られた直線と $t_{i-1}=t_i$ を示す直線との交点が斜面崩壊の予測時刻となる。本研究においては、変位計測は等時間間隔で行われているため、平滑化した結果に対して3次スプライン関数を用いて加速クリープ変位の近似曲線を得る。その近似曲線に対して、等変位間隔の時刻 t_i を求める。

以上の予測手法を用いて、図-7に示す加速クリープ変位に対して崩壊時刻の予測を行った。この斜面は計測開始後35~36日で崩壊している。50mmの等変位間隔で時刻 t_i を取得し、崩壊時刻の予測は観測開始10日目から1日毎に行った。観測開始から10日目、25日目および30日目の予測結果を図-11に示す。図-11(a)に示す観測開始から10日目の予測結果では、予測された崩壊時刻は約20日目となっており、真の崩壊時刻35~36日とは約15日の差となっている。しかし、観測開始から25日目および30日目の予測結果では、それぞれ崩壊時刻を約35日と予測しており、ほぼ正確な結果となっている(図-11(b), および図-11(c))。崩壊時刻の予測の推移を図-12に示す。横軸は予測を行った時刻を、縦軸は各時刻において予測された崩壊

時刻をそれぞれ示している。図より、観測開始25日目までは崩壊時刻の予測値は変動しているものの、それ以降は真の崩壊時刻35~36日におおむね収束している。比較的簡単な方法ではあるが、この例では、崩壊の1週間前に数時間の誤差で崩壊時刻をほぼ正確に予測することができた。

5. 現場計測への適用

本章では、GPS変位モニタリングシステムとトレンドモデルによる平滑化を合わせた計測方法を、露天掘り鉱山斜面および地すべり地に長期適用した結果を示す。

(1) 露天採掘鉱山岩盤斜面

露天採掘鉱山では、一般的に採掘期間が数10年におよび、また斜面の規模は長さ、および高さとも数100mを超える。そのため、広大な領域に有効で長期計測に耐える経済的な計測システムが必要とされている。本研究では、山口県内にある石灰石露天採掘鉱山において本計測システムを適用した。GPSアンテナと受信機は斜面頂部に4ヶ所設置し、内1点を基準点としている(図-13)。なお基準点No.28から計測点の距離はそれぞれNo.29が145m、No.26が598m、No.31が711mである。また、変位は1時間周期で計測しており、試験運用期間(1997.11~1999.11)を経て現在は本格的な安全監視を行っている²⁴⁾。

図-14に一例として、No.26における約1年間の計測結果を示す。計測結果は±5~20mmの幅でばらついているが、トレンドモデルによる平滑化結果からいずれの方向にも問題となるような変位が生じていないものと判断される。

なお、図-14は変位計測を1時間間隔で行った結果である。緯度方向変位(図-14(a))の平滑化結果はやや波打っている。この原因として電波のマルチパスや衛星配置などによるデータの周期性などが考えられるが、詳細は不明である。ただし、計測間隔を長くすると滑

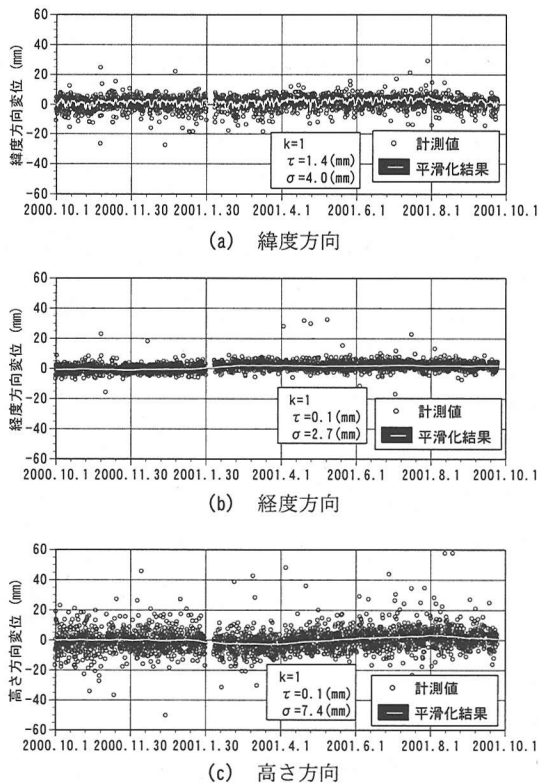


図-14 露天採掘鉱山岩盤斜面における計測結果および平滑化結果 (No. 26)

らかな良い結果が得られることが分かっている²⁵⁾。

本システムは試験運用期間も含め、これまで安定した計測結果を示しており、より鉱山の長期的な安全監視が期待されている。

(2) 地すべり斜面

地すべり斜面においても、広大な領域を長期間観測する必要があり、岩盤斜面に比べて変位も大きいことが予想される。図-15に示す地すべり斜面において、GPSアンテナと受信機を5ヶ所に設置した。計測は1996年から行われており、当初は5。(1)の露天採掘鉱山と同様のオンラインシステムを利用した(1996.11~1998.7)¹⁴⁾。なお、地すべりブロック外に設置された基準点No.198から計測点間での距離はそれぞれNo.196が120m、No.197が43m、No.209が81m、No.210が192mである。

図-16に1999年からはじめたオフラインシステムによるNo.196の計測結果の一部を示す。計測結果から南西下方向に600mmを超える大きな変位が生じていることがわかる。緯度方向の変位は1999年6月頃に一旦収束する挙動を見せたが、その後再び増加している。また、経度方向変位は1999年6月頃まで3。(2)で示したように微小な変位速度(0.1mm/日)で推移

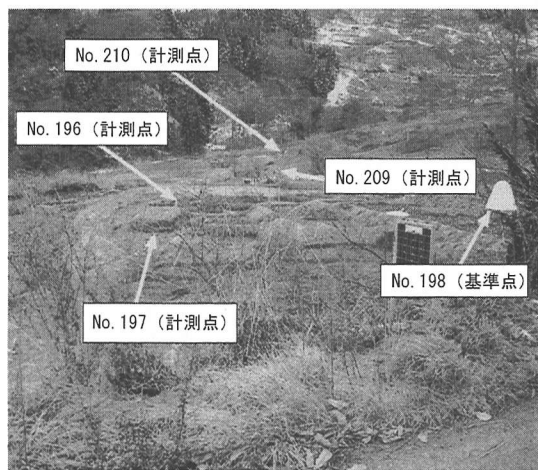


図-15 地すべり地における受信機の設置状況

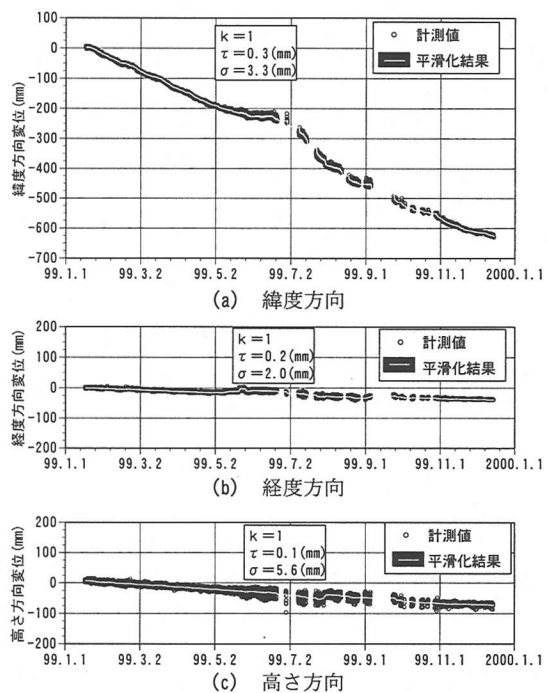


図-16 地すべり斜面における計測結果および平滑化結果 (No. 196)

している。トレンドモデルは、以上のような微小な変位挙動から複雑かつ大きな変位まで自動的に平滑し、ばらつきのある計測値に対して真と思われる挙動を推定する。このことから、長期的な連続計測に有効であることが示された。また、GPS計測の特徴として3次元挙動をつぶさに把握することができる。

6. 結論

本論文では、GPS変位モニタリングシステムとト

トレンドモデルを合わせた計測方法の妥当性を現場実験, および実測結果によって検証し, さらに平滑化した計測結果を用いて変位を予測する手法を示した. その結果をまとめると次のようになる.

(1) 本手法の適用性を検証するにあたって, 斜面変位として, ①静止状態, ②等速度変位, ③突発的変位, ④収束クリープ変位, ⑤加速クリープ変位, の5つの変位モードを想定し, 実測された計測結果を用いてそれぞれの変位モードに対してトレンドモデルを適用した. いずれのモードに対してもばらつきのある計測結果に対して真と考えられる3次元変位を滑らかに推定できることが示された.

(2) GPSによる計測変位をトレンドモデルによって平滑化を行うことで, 1mm程度以上の突発変位を, また速度が0.1mm/日の変位を検出できる可能性が示された. これは従来のGPS変位計測の精度を凌いでいる.

(3) 収束クリープ変位に対して最終変位値の予測手法を示した. この予測手法を用いて, 地すべり斜面において計測された収束クリープ変位の最終変位を予測したところ, 計測後の早い段階に数mm程度の誤差で最終変位を予測することができた.

(4) 崩壊に至るような加速クリープ変位に対して崩壊時刻の予測手法を示した. この予測手法を用いて, 過去に計測された斜面崩壊変位に基づく模擬計測データを用いて崩壊時刻を予測したところ, 崩壊の約1週間前に数時間の誤差で予測することができた. しかしながら, この予測方法に一般性を持たすためにはデータの整理方法 (たとえば変位間隔のとり方) など, さらに検討が必要である.

(5) 露天採掘鉱山斜面および地すべり斜面の変位をGPS変位モニタリングシステムで計測し, その計測結果をトレンドモデルにより平滑化した. 複雑な挙動を示す計測結果に対しても, 全体を精度良く, 1つのモデルで平滑化することができた. そして長期計測に対して, 小さな変位から大きな変位に至る挙動に追従できることが示された.

以上のことから, GPSによる斜面変位計測はトレンドモデルによる平滑化を用いることで, 十分実用上利用できると考えられる.

謝辞: 本論文に示した露天採掘鉱山斜面, および地すべり斜面における計測結果は, それぞれ秋芳鉱業(株), および, (株)日さく, から提供いただいた. また, 受信機のハード面の開発は古野電気(株)による. 関係者各位に深く感謝の意を表す. なお, 本研究の一部は石灰石鉱業協会の研究奨励金 (1996-97, 1999-2000) を受けたことを記し謝意を表する.

参考文献

- 1) 日本測地学会編: 新訂版 GPS, 日本測量協会, 1989.
- 2) Strange, W. E.: GPS determination of groundwater withdrawal subsidence, *J. Surv. Eng.*, Vol.115, No.2, pp.198-217, 1989.
- 3) Dong, D. D. and Bock, Y. K.: Global Positioning System network analysis with phase ambiguity resolution applied to crustal deformation studies in California, *J. Geophys. Res.*, Vol.94, pp.3949-3966, 1989.
- 4) Blodgett, J. C.: Monitoring land subsidence in Sacramento valley, California, using GPS, *J. Surv. Eng.*, Vol.112, No.2, pp.112-130, 1990.
- 5) 福岡寛, 江崎豊充, 児玉信之: GPS測量による地すべり移動観測, *土と基礎*, Vol.45, No.6, pp.29-31, 1997.
- 6) Moss, J. L., McGure, W. J. and Page, D.: Ground deformation monitoring of a potential landslide at La Palma, Canary Island, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, Vol.94, pp.251-265, 1999.
- 7) Gili, J. A., Corominas, J. and Rius, J.: Using Global Positioning System techniques in landslide monitoring, *Eng. Geol.*, Vol.55, No.3, pp.167-192, 2000.
- 8) 櫻井春輔, 清水則一: 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, No.4, pp.65-72, 1992.
- 9) 清水則一, 櫻井春輔: GPSの岩盤変位計測への応用, *資源・素材学会誌*, Vol.109, No.1, pp.1-7, 1993.
- 10) 櫻井春輔, 清水則一, 古谷茂也, 皿海章雄: GPSによる切取り斜面の変位測定, *土木学会論文集*, No.475/III-24, pp.137-142, 1993.
- 11) 近藤仁志, M. Elizabeth Cannon, 清水則一, 中川浩二: 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, 1996.
- 12) 清水則一, 小野浩, 近藤仁志, 水田義明: 長大残壁の安全監視へのGPS変位計測システムの応用に関する現場実験, *資源・素材学会誌*, Vol.112, No.5, pp.283-288, 1996.
- 13) 清水則一, 小山修治, 小野浩, 宮下耕一, 近藤仁志, 水田義明: GPS変位モニタリングシステムの連続観測による安定性の検証と計測結果の処理方法の提案, *資源・素材学会誌*, Vol.113, No.7, pp.549-554, 1997.
- 14) 清水則一, 安立寛, 荒井正, 会津隆士: 地すべり監視におけるGPS変位モニタリングシステムの適用, *土と基礎*, Vol.48, No.2, pp.25-27, 2000.
- 15) 坂尾和男, 清水則一: 省電力小型GPS受信機の性能調査, *山口大学工学部研究報告*, Vol.49, No.2, pp.219-224, 1999.
- 16) 松田浩朗, 西村好恵, 清水則一, 荒井正, 会津隆士: ソーラーパネル電源を用いたGPS受信機による地すべり変位の連続観測, 第35回地盤工学研究発表会, pp.2483-2484, 2000.
- 17) 北川源四郎: 時系列解析プログラミング, 岩波書店, 1993.
- 18) 清水則一, 安立寛, 小山修治: 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, No.6, pp.397-402, 1998.
- 19)土木学会：岩盤斜面の調査と対策, pp.172-175, 1999.
- 20)西村好恵, 松田浩朗, 安立寛, 清水則一：GPS変位モニタリングシステムによる連続計測結果の評価, 第51回土木学会中国支部研究発表会, pp.395-396, 1999.
- 21)土木学会：岩盤斜面の安定解析と計測, pp.161-166, 1994.
- 22)Asaoka, A. and Matsuo, M.: An inverse problem approach to settlement prediction, *Soil and Foundations*, 20(4), pp.53-66, 1980.
- 23)斎藤迪孝：実証土質工学, 技報堂, pp.157-159, 1992.
- 24)松田浩朗, 西村好恵, 清水則一, 吉富功, 今行忠：秋芳鉱山における残壁のGPSによる長期変位計測, 第22回西日本岩盤工学シンポジウム論文集, pp.73-76, 2001.
- 25)Shimizu, N. and Matsuda, H. : Practical applications of the Global Positioning System for the assessment of slope stability based on the Displacement Monitoring Approach (Key-note lecture), *Proceedings of ISRM Regional Symposium (the 3rd Korea-Japan Joint Symposium) on Rock Engineering*, pp.57-70, 2002.

(2001.11.30 受付)

APPLICABILITY OF THE TREND MODEL FOR SMOOTHING MEASURED DISPLACEMENTS BY USING GLOBAL POSITIONING SYSTEM AND METHODS FOR PREDICTING DISPLACEMENT BEHAVIOR

Hiroaki MATSUDA, Hiroshi ADACHI, Yoshie NISHIMURA and Norikazu SHIMIZU

The GPS displacement monitoring system has been developed to monitor the stability of large slopes by the authors. In this research, the trend model is used for smoothing displacements measured by the system, and the applicability of model is investigated through the field experiments and practical monitoring. It is verified that the trend model is useful for improving the measurement accuracy of the conventional GPS surveying. Methods for predicting the final displacement and the failure time of slopes from continuous monitoring results are proposed, and their applicability is also verified.