

GPS連続モニタリングシステムによる斜面変位計測結果の評価法

千葉県 正会員 ○島村陽子
 山口大学大学院 学生会員 安立 寛
 山口大学工学部 正会員 清水則一

1. はじめに

道路建設や造成工事における長大斜面の建設、地滑り地域の防災、また、露天採掘によって形成される大規模残壁に対する安全管理手法への関心が高まってきた。本研究では、比較的容易に精度の良い計測結果を得ることのできる変位挙動に着目し、その評価手法について検討する。計測には広範囲にわたってリアルタイムに変位を自動計測できるGPS連続モニタリングシステム¹⁾を用いる。この計測結果から変位精度の向上と最終変位の予測を行い、斜面の安定性を評価する方法を開発することが本研究の目的である。本論文では、上述のシステムによって実際に計測されたデータを用いて、

①実測結果を直接用いてフィルタリング法を適用して予測する方法

②実測結果をまず平滑化し、その結果を用いて予測する方法

の適用性について数値シミュレーションにより検討した。①の手法は、連続的に得られる観測値を処理することが容易であるが、収束する変位挙動に適用が限定される。一方②の手法は、観測値を得るごとに平滑結果も変わってくるため連続的な観測値の処理には手間がかかるが、多様な変位に適用することができる。

2. 計測結果のフィルタリング処理と最終変位の予測

本手法は地盤変位の挙動を支配する状態方程式と、GPS測量の幾何学的拘束条件（図-1参照）から導かれる観測方程式を連立させ、適応フィルタリングを用いて現状の変位の推定および最終変位の予測を行う²⁾。地盤変位は

$$a_{i0}u(t) + a_{i1}\frac{du(t)}{dt} = p_i(t) \text{ の式で表せられるクリープ的な挙動を考える。ここ$$

で、 a_{ij} は地盤変位のクリープ特性を表す粘弾性モデルの定数、 $p_i(t)$ は掘削や載荷などに対する外部擾乱項である。この方法は新しい観測値を得るごとに、クリープ変位の特性を推定すると同時に最終変位を予測するところに特徴がある。観測値は、真と仮定した値を平均値とし、実際の計測誤差を加えたものを用いる。ここでは、真の変位を $u_f = 30(1 - \exp(-t/7.5))\text{cm}$ (t : 時間, 最終変位 30cm, 30日で収束値の98%に達する(以後これを収束日数とする))と仮定した。

実測誤差を用いて様々なシミュレーションを行った結果、本手法の解析精度は特に観測間隔、観測誤差、変位初期の変位量に影響を受けることが分かった。ここで、精度よく予測するために定量的にどの程度の観測間隔が必要かについて検討するに当たり、初回の変位量と観測誤差の標準偏差の関係に着目した。初回の変位量とは変位はじめてから次の観測値を得るまでの時間とする。初回の変位量が観測誤差の標準偏差の大きさの数倍となるまでの時間を観測間隔とし、それぞれの変位量に対し4通りの観測値を作成してシミュレーションを行った。図-2に各方向の結果を示す。縦軸は真の最終変位と予測した最終変位の差から求めた相対誤差である。この結果から緯度方向での最適な観測間隔は、標準偏差の約5倍の変位が得られるまでの時間を観測間隔にすれば良いことがわかった。また、緯度方向の誤差の標準偏差は0.2~0.3cmで得られているので、最適な観測間隔は1~1.5cmの変位が得られるまでの時間であると言える。他の方向についても同様の検討を行った結果、経度方向で1~1.5cm、高さ方向で約

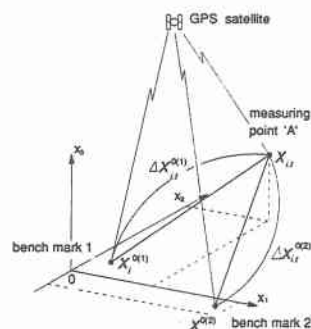


図-1 拘束条件

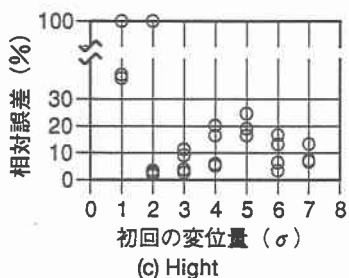
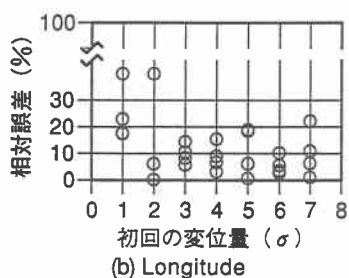
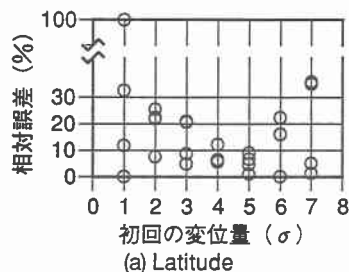


図-2 最適観測間隔

1.5cmの変位が得られるような時間を観測間隔とすれば良いことがわかった。

図-3に、最終変位を5~50cmとし、各方向の最適な観測間隔で解析した結果を示す。この結果、最終変位が20cm以上の挙動に対しては有効と考えられるが、10cm以下の場合

は必ずしも有効とは言えないようである。

3. 計測結果の平滑化とその結果を用いた最終変位の予測

本研究で用いる計測結果に適用する平滑化モデルには、GPSの計測誤差は正規分布的に発生していることからトレンドモデルを採用した³⁾。トレンドモデルとは、平滑化のモデルと真の変位挙動の間に確率的な誤差(平均値0, 標準偏差 σ の正規分布)を設定したものであるといえる。

図-4に最終変位5cm, 収束日数30日のクリープ変位で、1時間間隔で計測した8日分のデータを平滑化した結果を示す。初期に平滑値と真の変位の間に多少の差が見られるが、その後は真の変位を正しく推定していることが分かる。次に最終変位の予測を行う。平滑値又は観測値を一定の間隔で取りだすと、変位の差($u_i-1 < u_i$)が現れ、やがてその差はなくなる($u_i-1 = u_i$)。 u_i-1 に対する u_i を図上にプロットし、それらの点を最小2乗法を適用して得られた直線と $u_i-1 = u_i$ の線の交点が最終変位の予測値となる。ただし、平滑値にお

いては初期に見られる真値との差の影響を無くするため、最初のプロット点を除いて最小2乗検定を行う。図-5に平滑値、観測値を48時間間隔で取りだした結果の一例を示す。これより最終変位が比較的小さい変位でも最終変位の予測が可能であり、観測値を用いるよりも平滑値を用いた方が精度良く予測できることが分かった。なお、本手法において平滑値を取りだす間隔をどのように定めるかは、今後の課題である。

4. 結論

①のフィルタリング法は、水平方向で約1cm, 高さ方向で約1.5cmの変位が得られるまでの時間を観測間隔にすると良い。収束値が10cm以上の変位には有効である。

②の平滑値から予測を行う方法は、5cm程度の比較的小さな収束値でも予測が可能である。

以上が本研究の結論である。これらをふまえて図-6に示すフローチャートを、斜面の変位挙動に対する評価手順として示す。

謝辞：本研究では秋芳鉱山において計測したデータを用いた。関係者各位に感謝の意を表す。また本研究は、石灰石鉱業協会の奨励金を受けて遂行したことを付記する。

参考文献 1) 清水・小山 他：資源と素材 vol.113, p549, 1997, 2) 清水・江上 他：土木学会論文集, No.487/III-26, p275, 1994, 3) 清水・安立 他：資源と素材 (掲載予定), 1998.

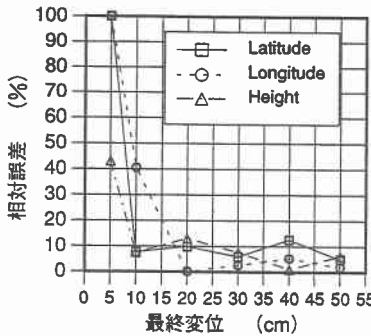


図-3 適用限界

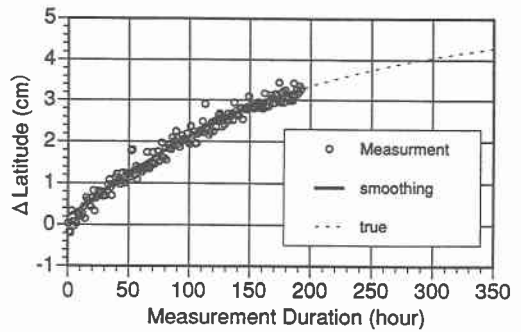


図-4 平滑化の状態

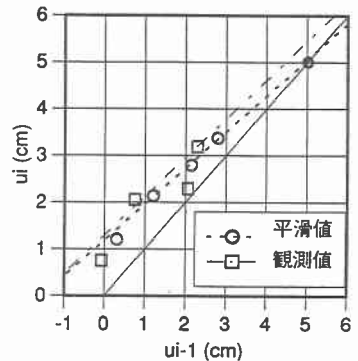


図-5 最終変位の予測

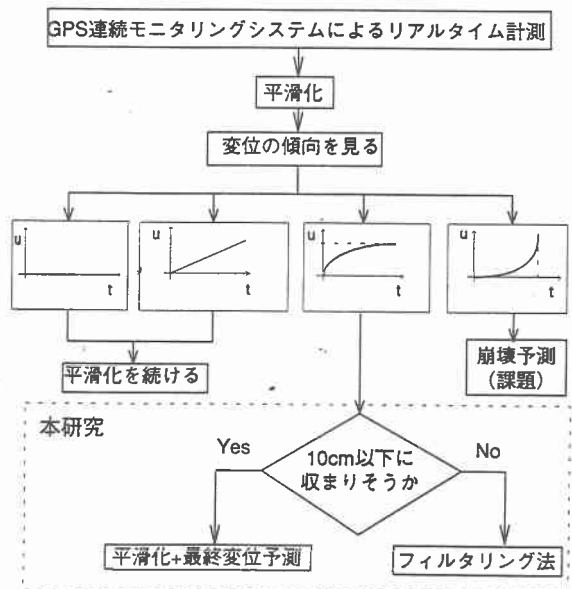


図-6 斜面の計測変位の評価の流れ