

(61) GPSを用いた斜面の移動監視に関する研究

Monitoring of Slope Movement Using Global Positioning System Surveying

江崎哲郎*・斉藤玄敏**・松本信也***・村瀬一隆***

Tetsuro ESAKI, Hiroyuki SAITO, Shinya MATSUMOTO and Kazutaka MURASE

Abstract

The Global Positioning System (GPS) and total station surveys were conducted together to monitor movement of a large cut slope. The data obtained in the study have been analysed and presented in this paper, focusing on the method to process the GPS data and the comparison of displacement detection accuracy between GPS and total station. After improvement by adopted net adjustment procedure and an arithmetic mean method, the result from GPS are more accurate than the total station. It is proving that GPS is one of the reliable tools for detecting displacement in monitoring of slope movement.

1. はじめに

GPS (Global Positioning System) は、GPS衛星から送られる電波を受信し、受信点の位置を三次元的かつ高精度に得られる測位システムである。このシステムは測地学の分野をはじめ、地盤や地殻を扱う分野等で広範な活用がすすめられつつある。

地盤環境の立場からは、開発行為に起因する災害の防止や経年的な地盤の移動現象を計測、評価するために、GPSを地盤環境の監視システムとして利用することが考えられ、著者らはこれまで雲仙普賢岳の火山活動に対する山体移動の監視 [1] やボーリング試錘位置への船舶の誘導と位置の確定 [2] にGPSを適用するなど、GPSの新たな応用分野を模索しつつ計測条件、計測時間、要求精度に応じたGPSの適応性の検討を行ってきた。

本研究では、GPSによる地盤の移動現象の計測、評価の一環として、地形的に測定条件の厳しい山間部における斜面の移動監視にGPSを適用し、基線解析、網平均解析、算術平均等を行い、同一計測期間に行ったトータルステーションによる計測結果との比較から、GPSの測定精度、変位検出能力ならびに斜面の移動監視への適応性について検討する。

2. 計測の概要

2. 1 計測地の概要

計測地は、Fig.1に示すように幅約200m、標高280mの東向き開析斜面である。河床(標高75m)より標高180mまでは40°前後の急傾斜が続きその上方では20°前後の緩傾斜となっている。河床より標高95mまでは河刻を受けた軟岩の岩崖、それより上方では主として黒色粘板岩から構成され、風化が進み、岩質的にも軟化したものが多く、構造的に著しく乱れた崖錐堆積物状の岩相を示している。

この斜面は、法面掘削により平成2年5月に急傾斜部の一部が崩壊し [3]、引き続きその上部の二次崩壊の可能性が懸念されていたが、各種対策工や法面整形が実施され、崩壊部及びその周辺斜面は安定状態にある。しかし、豪雨時には標高210mに位置する抑止杭上部の緩傾斜部において異常な動きが計測されることがあり、崩壊地上部の緩斜面を中心に定期的に監視が続けられている。

2. 2 GPSの計測方法と計測点の配置

斜面の初期の移動を正確に検出するには、数mmオーダーの精度が必要と考えられる。本計測では

* 正会員 工博 九州大学教授 工学部環境システム工学研究センター

** 正会員 工博 九州大学助手 工学部環境システム工学研究センター

*** 学生会員 九州大学 工学部環境システム工学研究センター

GPSの測位法の中で最も精度が良いスタティック法によって平成6年6月から11月まで月1回、計6回の計測を行い、これと同時期にトータルステーション(以後、T.Sと表記する.)による計測も実施した。

エポック間隔(データ取得間隔)は15秒、データ取得時間は山間部における電波の受信状況を考慮して8時間とし、各月の計測時間帯は衛星配置が同じ状態となる時間帯に設定した。受信機には、4000SSE-GSS/U(Trimble Navigation社製;保証精度:水平方向 5mm+1ppm×(基線長),垂直方向 10mm+1ppm×(基線長))を用いた。

固定点は、BS-1, ND-1, ND-2, TTYの4点とした。これらの点はいずれも地盤の移動が無いと思われる場所を選定しており、BS-1はT.Sの固定点でもある(本論文中では、GPSと同様に、T.Sの基準点を固定点、T.Sの斜面上の計測点を移動点と呼ぶことにする)。また、他の3点は計測斜面をほぼ正三角形で取り囲み、多方向から監視が行えるように配置している。移動点は、T.Sとの比較を行うためT.Sの計測点に隣接し、かつ監視が必要とされる緩傾斜部全体を総合的に監視できる配置となるようにKM-7, KM-12, KM-15, KM-18, KM-24の5点に設置した(Fig.1参照)。

各計測点を設置する際は、アンテナの据え付け誤差を抑えるために、三脚をコンクリートで地面に固定し、アンテナ据え付けネジを三脚の頭部に接着し、アンテナをねじ込むだけで初めに設置した状態が再現できるようにしている。

3 解析結果

3.1 解析手法

基線解析では、大量の計測データの一括処理と管理が可能なGPS自動運転、自動解析監視システムであるGARDシステム(日立造船システム(株)社製)を用い、網平均計算にはGPSurveyソフトウェア(Trimble Navigation社製)を用いた。

本計測における基線長は最長のものでも約630mであるので、短基線の基線解析に有効な一周波解析を行った。また、解析パラメータ(仰角マスク、反復回数、サイクルスリップ許容時間、ノイズ除去指数、レシオ)は推奨値に設定した。

3.2 網平均による固定点の解析

移動点の変位を正確に検出するためには、固定点の座標値をできる限り正確に求め、計測期間中は不動であること、計測結果に著しい誤差やシステム上のエラーが存在しないことを確認する必要がある。

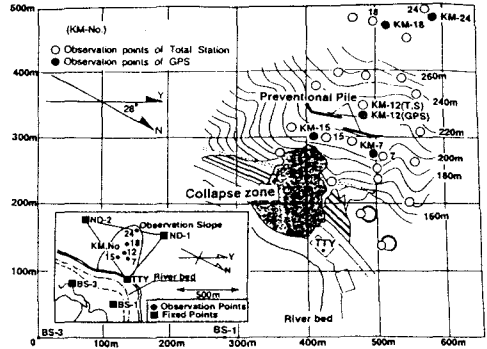


Fig.1 GPS observation net for slope movement.

Table 1 Coordinates of GPS base points (WGS-84) and those of standard deviations after net adjustment.

	Latitude	S.D. (mm)	Longitude	S.D. (mm)	Height (m)	S.D. (mm)
BS-1	32.879014°	0.524	133.171961°	0.537	219.8094	1.453
ND-1	36.558978°	0.551	12.062750°	0.591	343.7328	1.567
ND-2	23.867873°	0.519	17.028572°	0.532	311.0663	1.425
TTY	33.137237°	0.440	27.884784°	0.482	148.7764	1.279

(WGS-84)

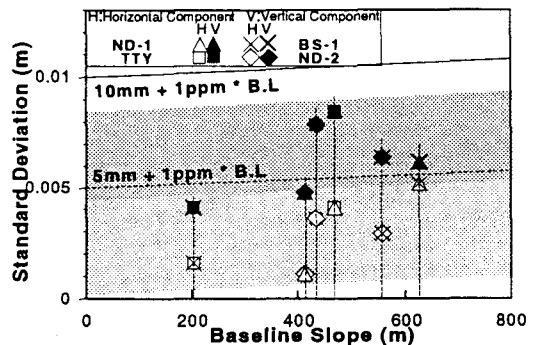


Fig.2 A relationship between baseline slope and standard deviation.

この確認を行うため、6月から11月までの固定点の全計測データに対して網平均 [4,5] を行った。

Table1に、網平均により得られた各固定点の座標値とその標準偏差を示す。座標値はWGS-84系で表している。各固定点の座標値の標準偏差は、水平方向で0.6mm以内、垂直方向で1.6mm以内であることから、計測結果には著しい誤差やシステム上のエラーは存在せず、信頼性の高い座標値が得られている。特に、固定点TTYの標準偏差は他の固定点よりも小さく、最も信頼性の高い固定点といえる。

網平均により得られた各固定点の座標値を用いて固定点相互の基線解析を行った。Fig.2に基線長に対する基線ベクトルの水平成分と垂直成分の誤差(標準偏差)を示す。誤差(標準偏差)の表示は、TTYを基準としたBS-1の解析結果の場合はBS-1の記号を用い、BS-1を基準としたTTYの解析結果の場合はTTYの記号を用いている。図中の破線は水平方向の保証精度、実線は垂直方向の保証精度を示している。基線ベクトルの水平成分及び垂直成分の誤差は、水平方向で1.1mm~5.2mm、垂直方向で4.1mm~8.5mmと全て保証精度内に収まっていることから各固定点ともに不動であるといえる。

3. 3 移動点の解析結果

固定点と移動点間の基線解析を行った結果、KM-18を除く移動点の解析結果は全て保証精度内に収まっており、特定の方向性をもった変位は検出されなかった。

Fig.3にKM-18の解析結果(固定点TTY)を示す。6月を基準日とし11月までの水平変位の経時変化を示している。縦軸を南北方向、横軸を東西方向にとり、それぞれ北と東を正としている。破線で示した円は水平方向の保証精度を表している。KM-18は斜面の傾斜方向に累積で約3cm変位している。

これは他の固定点からKM-18を解析した結果にも同様に現れていたため、GPSにより得られたKM-18の変位と斜面の移動との関連性の調査を計測地で行った。KM-18周辺にはき裂等の斜面が移動した痕跡は認められなかったが、三脚を設置した地盤の局所的な不等沈下によって、アンテナがGPSで検出された変位とほぼ同量かつ同方向に傾斜していることが判明した。GPSで検出されたKM-18の変位からアンテナの変位を差し引くと、補正後の変位は保証精度内に収まるので、GPSで検出されたKM-18の変位は三脚を設置した地盤の局所的な不等沈下によるものと考えられる。従って、各移動点の変位は保証精度内に収まることから斜面に移動はないと判断できる。

3. 4 算術平均による移動点の解析結果

3. 2節の結果から、移動点の解析についても水平成分で1.1mm~5.2mm、垂直成分で4.1mm~8.5mmの誤差を含む可能性を有している。しかし、本計測では固定点を4点設けているので、各固定点の計測結果を各方向成分について算術平均を行うことにより、誤差を低減でき、変位の累積量と方向性をより正確に求められる可能性がある。

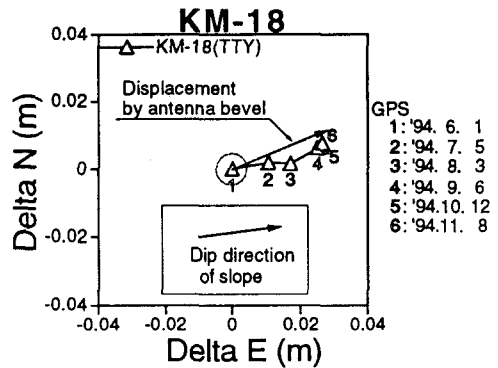


Fig.3 Horizontal movement of KM-18 detected by GPS using a base point TTY.

Table 2 Standard deviation at the point of KM-12.

	Delta N (m)	Delta E (m)	Delta U (m)
KM-12(BS-1)	0.002	0.002	0.005
KM-12(ND-1)	0.001	0.002	0.007
KM-12(ND-2)	0.001	0.001	0.008
KM-12 (TTY)	0.001	0.001	0.002
KM-12 (arithmetic mean)	0.001	0.001	0.003

各固定点から得られた移動点の変位ベクトルは、次式を用いて平均する。

$$\overline{\Delta L} = \frac{(\rho_{BS-1} \cdot \overline{\Delta l_{BS-1}} + \rho_{ND-1} \cdot \overline{\Delta l_{ND-1}} + \rho_{ND-2} \cdot \overline{\Delta l_{ND-2}} + \rho_{TTY} \cdot \overline{\Delta l_{TTY}})}{(\rho_{BS-1} + \rho_{ND-1} + \rho_{ND-2} + \rho_{TTY})} \quad (1)$$

ここに、 $\overline{\Delta L}$ は算術平均によって得られる6月の計測値を基準値とした各月の変位ベクトル、 $\overline{\Delta l}$ は6月の計測値を基準値とした各月の変位ベクトルである。 ρ は重み係数で、各月の基線解析結果の標準偏差の逆数である。

Table 2に各固定点からKM-12を計測した結果の誤差(標準偏差)と算術平均後の誤差(標準偏差)を示す。Delta Nは南北方向、Delta Eは東西方向、Delta Uは垂直方向の誤差(標準偏差)をそれぞれ示している。各方向成分ともに算術平均後の誤差は各固定点からKM-12を計測した結果の誤差よりも小さくなっており、特に垂直方向の誤差は大きく減少する。これは他の移動点を解析した結果でも同様であった。

この結果から、各固定点からの移動点を解析した結果に算術平均を行うことにより、誤差を低減することができ、斜面の移動が生じた時には変位の累積性及び方向性をより正確に求めることができる。

4. GPS と T.S の精度比較

4. 1 T.S の計測方法

T.S (保証精度: $5\text{mm} + 3\text{ppm} \times (\text{基線長})$) による計測は2ヶ所の固定点 BS-1 と BS-3 から行った。固定点と移動点間の基線長と高度角を正、反3回ずつ計測を行い、その平均値を計測値として採用する。

T.S では、移動点の水平変位と垂直変位は次のようにして求める。まず、BS-1 と BS-3 の各々の計測値から、BS-1 から移動点までの水平距離、BS-1 を基準とした移動点の比高、BS-3 から移動点までの水平距離、BS-3 を基準とした移動点の比高をそれぞれ算出する。

水平変位は、BS-1 と BS-3 の座標を同一の水平面に投影し、その水平面内において、BS-1 を中心とし BS-1 から移動点までの水平距離を半径とする円と BS-3 を中心とし BS-3 から移動点までの水平距離を半径とする円の交点の座標を求め、基準日からの差を水平変位とする。

垂直変位は、BS-1 と BS-3 は標高が異なるので、BS-1 の標高に BS-1 の計測値から求めた比高を加えた値と BS-3 の標高に BS-3 の計測値から求めた比高を加えた値の和を2で割り、得られた値を移動点の標高とし、基準日からの差を垂直変位とする。

4. 2 固定点が2点の場合の T.S の誤差特性

固定点が2点の場合の T.S 計測において、4. 1 節で述べた方法で3次元的な変位を求めると、その水平成分の誤差は固定点と移動点の幾何学的配置に支配され、ある特定の方向に大きな誤差を生じる。

Fig.4 に固定点が2点の場合の T.S の水平変位の誤差特性の概念図を示す。BS-3 を原点とし、BS-3 から BS-1 を結ぶ方向を Y 軸、それに直交する方向を X 軸とする。また、BS-3 と BS-1 の中点から移動点を結ぶ方向を Y' 軸、それに直交する方向を X' 軸とし、Y' 軸と Y 軸のなす角を θ とする。T.S で得られた BS-1 から移動点までの水平距離と BS-3 から移動点までの水平距離のそれぞれにある範囲の誤差が含まれると、誤差の分布形状は菱形状になり、Y' 軸方向の誤差に対して X' 軸方向の誤差が大きくなる。また、Y' 軸と Y 軸のなす角 θ が小さくなるにつれて X' 軸方向の誤差は Y' 軸方向の誤差に対して大きくなる。

Table 3 Standard deviation of baseline slope and height at the point of KM-12 measured by GPS using a base point TTY and total station using a base point BS-1.

	T.S		GPS	
	Delta B.L (m)	Delta U (m)	Delta B.L (m)	Delta U (m)
S.D	0.001	0.002	0.002	0.002

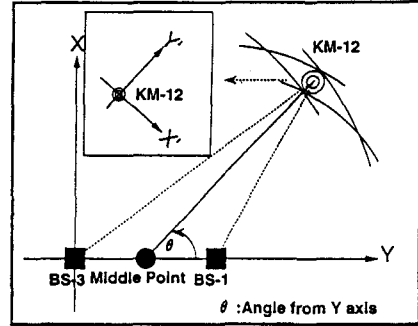


Fig.4 Schematic of horizontal error property in a measurement of total station using two base points.

Table 4 Standard deviation of displacement components at the point of KM-12 detected by GPS after arithmetic mean and total station using two base points BS-1 and BS-3.

	T.S		GPS			
	Delta Y (m)	Delta X' (m)	Delta Y' (m)	Delta X (m)	Delta Y (m)	Delta U (m)
S.D	0.001	0.003	0.002	0.001	0.001	0.003

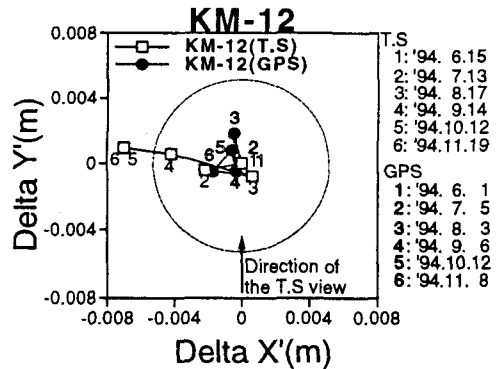


Fig.5 Horizontal movement of KM-12 detected by GPS after arithmetic mean and total station using two base points BS-1 and BS-3.

本計測では、Y'軸とY軸のなす角 θ が各移動点で37~49°の範囲になっており、X'軸方向の誤差が比較的大きく現れてくる可能性が高い。

4. 3 固定点が1点の場合のGPSとT.Sの精度比較

固定点が1点の場合、T.Sは移動点の変位を3次元的に求めることはできないので、ここでは、基線長と垂直変位(T.Sでは基線長と高度角から求める)についてGPSとT.Sの精度比較を行う。

Table 3にGPSとT.Sによる基線長の誤差(標準偏差)と垂直変位の誤差(標準偏差)を示す。GPSはTTYからKM-12を計測した結果、T.SはBS-1からKM-12を計測した結果である。基線長の誤差を比較するとT.Sの誤差は1mmであるのに対しGPSは2mm、垂直変位の誤差はT.SとGPSともに2mmと等しかった。ただし、GPSとT.Sでは基準となる固定点が異なっており、基線長はGPSで約200m、T.Sで約400mである。このことを考慮すると固定点が1点の場合、基線長の計測精度に関してはT.Sの方がGPSよりも僅かながら優れているといえる。

4. 4 算術平均後のGPSと固定点が2点の場合のT.Sとの精度比較

Table 4に、T.Sで固定点BS-1とBS-3からKM-12を計測した結果とGPSで各固定点(BS-1,ND-1,ND-2,TTY)からKM-12を計測した結果の算術平均の誤差(標準偏差)を示す。T.Sの誤差特性を考慮し、GPSはWGS-84系から、T.Sは局地座標系から各々T.SのX'Y'系に座標を変換し、水平変位のX'成分とY'成分の誤差(標準偏差)と垂直成分の誤差(標準偏差)を示している。水平成分の誤差を比較すると、GPSはX'軸、Y'軸方向共に誤差が1mmとなっている。一方、T.SはY'軸方向は1mmとGPSに等しいがX'軸方向には3mmある。このことから、GPSの方が精度が良く、また、水平方向の誤差に方向性がないことがわかる。垂直方向の誤差は、T.Sの誤差は2mmであるのに対し、算術平均後のGPSの誤差は3mmとT.Sが1mm小さかった。

Fig.5に、KM-12のGPSとT.Sによる水平変位を示す。6月の計測値を基準値として各月の水平変位の経時変化を示している。GPSとT.Sの水平変位を比較すると、算術平均後のGPSの誤差には方向性が見られないのに対し、T.Sには理論的な誤差特性と同様にX'軸方向に大きく誤差が現れている。

5. まとめ

本研究では、GPSを斜面の移動監視に適用し、網平均計算、算術平均、トータルステーションとの精度比較等から、測定精度、変位検出能力について検討を行った結果、以下の知見を得た。

- 1) 固定点の解析結果より、本計測の測定精度は、水平成分で1.1mm~5.2mm、垂直成分で4.1mm~8.5mmである。
- 2) 各固定点から移動点を解析した結果を算術平均にすることにより誤差を低減することができる。特に垂直方向の誤差の低減に有効である。斜面に移動が生じた時にも変位の累積性及び方向をより正確に求めることができると考えられる。
- 3) T.Sでは、固定点の配置は計測斜面の対面に限定されるため、水平方向の誤差に方向性が生じないように固定点を配置することは実質的に困難である。しかし、GPSは水平方向の誤差に方向性はなく、1つの固定点でも信頼性の高い固定点を用いて計測を行うことや、複数固定点を設け計測結果を算術平均することによって、三次元的な変位をT.S以上の精度で検出することが可能である。
- 4) 計測期間中に斜面の移動はなく、斜面の移動が実際に生じた場合のGPSの有効性を明らかにすることはできなかったが、本研究で得られた結果より、GPSは斜面の移動監視に有効な手段となり得ることが示された。また、GPSはリモート化、オンライン化を行うことが可能であるので、自動運転、自動監視可能な監視システムを構築することにより、その有効性はさらに高まると考えられる。

参考文献

1. 江崎哲郎他(1991): GPSを用いた地盤環境の監視, 第24回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.484-488.
2. 江崎哲郎他(1992): GPSを用いた地盤環境の監視(続報), 第25回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.161-165.
3. Kuroki, K. et al. (1995): Forecast time and analysis of rupture mechanism using video-tape records for a rock failure of a cut slope, Proc. 8th Int. Congr. Rock Mechanics. ISRM. pp.399-402.
4. 土屋淳・辻宏道(1992): やさしいGPS測量 日本測量協会
5. 土屋淳・辻宏道(1992): GPS測量と基線解析の手引, 日本測量協会