論文

GPS 変位モニタリングシステムの連続観測における 安定性の検証と計測結果の処理方法の提案*

清水 則一¹ 小山 修治² 小野 浩³
宮下 耕一⁴ 近藤 仁志⁵ 水田 義明⁶

Field Experiments and Data Processing for Continuous Measurements by the GPS Displacement Monitoring System

by Norikazu SHIMIZU¹, Shuji KOYAMA², Hiroshi ONO³
Koichi MIYASHITA⁴, Hitoshi KONDO⁵ and Yoshiaki MIZUTA¹

1. Faculty of Engineering, Yamaguchi University, Ube 755
2. Graduate School of Engineering, Yamaguchi University
3. Mining Section, Karasawa Mine, Sumitomo Osaka Cement Co. Ltd.
4. Mining Section, Shuho Mining Ind. Co.
5. System Products Development & Marketing Headquarters, Furuno Electric Co., Ltd.

The authors are developing a real-time displacement monitoring system by using the Global Positioning System to assess the stability of large slopes. This paper presents the results of field experiments for long-term continuous measurements and discusses the stability and properties of the data obtained by the system. The measured values include random errors, deviations, and largely scattered errors. In order to choose the acceptable data from the original data, including the above errors, a data processing method is proposed in this paper. Applying the proposed method, the system can provide stable and reliable data.

Field experiments for displacement measurements were also conducted to verify the applicability of the system to continuous displacement monitoring. It is concluded that the system can detect at least 5 mm displacements in the horizontal direction and 10 mm displacements in the vertical direction in real time. The accuracy is better than that of the conventional off-line GPS method.

KEY WORDS: Displacement Monitoring System, Large Slopes, GPS, Field Experiments

1. は し が き

露天採掘における長大斜面の安全管理について関心が高まり、数々の手法の開発が進められている。筆者らは、長大斜面の安全監視を目的として、GPS (Global Positioning System) を用いた変位計測システムの開発と現場実験を行っている¹⁾²⁾。そのシステムは、1)広範囲にわたり斜面表面の三次元変位を多点同時計測できる、2)変位は自動計測によってリアルタイムに連続的に得られる、3)計測結果はただちに管理局において CRT 上に表示され集中管理できる、などの特徴を有している。前報ではシステムの概要と、露天採掘現場における計測実験の結果について述べた¹⁾。そして、本システムによって、従来のオフライン処理による GPS 測量、また、1" 読みのトータルステーションによる測量とはほぼ同程度の精度で、現場において変位を連続的にかつリアル

タイムに計測できることが示された。しかしながら、長期的な連続観測における計測結果の安定性を保証する対策などが課題であった。

本研究においては、まず前報と同じ露天採掘現場において 2 週間程度の連続観測を行い、連続観測に対する計測結果の安定性を調査し、計測結果の乱れを除去する方法について提案する。そして、さらに長期間の連続観測において、人為的に計測点を移動させる変位計測シミュレーション実験を行い、本研究で提案する計測結果の乱れの除去法を適用してその妥当性と本システムによる変位計測の精度の把握を行う。

2. システムの概要

計測システムの内容については、すでに他に詳細に述べているので¹⁾⁻³⁾、ここでは簡単にその概要を示す。本システムは、1)アンテナ・受信機、2)中継・通信機、3)解析・表示部の 3 つの要素から構成されている。そして、アンテナ・受信機を基準点および計測点に設置し、それらを多芯シールド線および同軸ケーブルを用いて中継・通信機に接続し、さらに管理局に設置した解析・表示部に接続する (Fig. 1)。システムを現場に設置した後に、1)基準点座標の計測あるいは入力、2)計測点の初期座標を求めるための初期化計測、および、3)人工衛星からの電波受信と計測点の

* 1997 年 1 月 6 日受付 4 月 22 日受理

1. 正会員 工博 山口大学助教授 工学部社会建設工学科

2. 山口大学大学院工学研究科社会建設工学専攻

3. 住友大阪セメント(株)栃木工場唐沢鉱業所

4. 秋芳鉱業(株)生産部

5. 古野電気(株)システム機器事業部

6. 正会員 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科

[著者連絡先] FAX 0836-35-9429 (山口大・社会建設)

キーワード: 変位監視システム, 長大斜面, GPS, 現場実験

Fig. 1 Schematic diagram of GPS displacement measurement system.

座標解析を繰り返して行う周期計測，という順序に従って変位を計測する。後に述べる実験では，各計測点において同時に電波を10秒間受信し，そのデータ（搬送波位相の積算値，衛星軌道情報など）を用いて座標解析（1点につき約3秒）を行う。

本研究で用いたシステムの基本機能は前報のシステム^{1)~3)}と同じであるが，観測データが少なくなることなどによって座標計算が収束しなくなった場合に自動的にシステムがリセットされ初期化が開始される点と，電波を受信するのに都合のよい仰角の高い衛星に早く切り替わるようにして解析の安定性を増す，などの改善を加えている。

3. 連続観測実験

3・1 観測結果

これまで筆者らは，本システムの開発のために，現場における性能調査として数時間程度の連続観測を行ってきた。しかし，実際に斜面の安全監視に使用する場合，より長期の連続観測を行う必要があり，システムは長期にわたる連続使用に耐えられるものでなくてはならない。そこで，連続観測における本システムの安定性と計測結果のふるまいを把握するために，まず2週間程度（1995年268~273日，275~281日，ただし数字は1月1日からの通算日）の連続観測を行った。

実験は，前報と同じ秋芳鉾山（山口県秋芳町）の斜面頂部（Fig. 2およびFig. 3）において行った。計測の基準点および変位計測点No.1とNo.3では，アンテナ・受信機をコンクリート製の基礎の上に固定した。なお，計測期間中は掘削工事は観測地点から十分遠方で行われていたため，計測点においては工事に伴う変位は生じず，アンテナ・受信機は静止していたと考えられる。

Fig. 4に変位の計測結果を代表して，計測点No.3の275~281日における計測結果を示す。なお，他の計測期間およ

Fig. 2 Slope and measurement points.

Fig. 3 Plan of the experiment site and location of the measurement points.

び計測点においてもFig. 4と同様の結果を得ている。GPSによって直接求められる量は計測点の座標であるので，計測座標と初期座標との差をとって変位の計測値とする。先に述べたように，人工衛星からの電波を10秒間受信し，そのデータを用いて1点につき約3秒の解析を行うので，変位は約20秒ごとに得られる。いずれの計測点も静止しているため，正しくは変位の計測値は0となるべきであるが，Fig. 4にみられるような誤差が生じている。計測結果の分布の特性を知るために計測値を1mm幅のヒストグラムに表しFig. 5に示す。Fig. 4およびFig. 5から，次のことが分かる。すなわち，1)計測結果のほとんどは，緯度（Latitude）および経度（Longitude）方向については計測結果の平均値 ± 10 mm，また，高さ（Height）方向については計測結果の平均値 ± 20 mmの範囲に収まっておりおおむね正規分布に従うようである，2)計測値の分布の平均値は真の値（ここでは0）から偏差している，3)通常の計測値の範囲を大きくはずれる乱れがしばしば生じている（Fig. 5の両端）。

上記の1)については，正常に計測ができたときの誤差で，GPS測量で一般に考えられている誤差，すなわち，アンテナと受信機の雑音，衛星配置の変化，衛星電波のマルチパス，電離層・対流層の影響による電波伝播の揺らぎ，衛星軌道計算の誤差，などによるものと考えられる。これらの要因には，ランダムなノイズ成分と系統誤差を生じる可能性のあるものが含まれている。しかし，正常に計測ができていない範囲では，観察期間を長めにとれば結局はランダムなノイズ成分とみなせるものが多いため，結果として正規分布を示していると考えられる。本研究では，このような誤差をひとまとめにして偶然誤差として取り扱う。

また，2)については観測開始直後の計測点の座標を基準座標としたことによる偏差，と考えられる。3)については，正常に計測

Fig. 4 Measurement results (measurement point No. 3).

Fig. 5 Distribution of measurement results (measurement point No. 3).

できなかった結果である。その原因としては、受信衛星数が座標演算に必要な数未満となった、補正しきれないサイクルスリップ（電波の受信が途中でとぎれること）が生じた、強力な雑音を受け受信機の動作に問題が生じた、GPS 衛星の信号に不備があった、などが考えられるが、確かな原因を特定することは困難である。いずれにしても、正しい変位を推定するためになんらかの方法によって、2)および3)の誤差を計測値から除去し、偶然誤差のみを含むデータに処理することが必要である。

なお、ここで実施した2週間の連続観測において、本システムはハード面およびソフト面ともに順調に稼働した。また、本連続観測実施後、そのままの状態でも約半年間システムを現場に放置し、その後、後述の変位シミュレーション実験のためにシステムを再起動させた。そして、再起動後直ちにここに示したと同様の計測結果が得られた。以上の結果、半年程度野外に設置された状態であっても特にメンテナンスを行うことなく、システムは安定した計測を継続することが示された。

一方、日常的な天候の変化に対してGPS測量は影響を受けないことが知られているが、豪雨や雷雨、あるいは、降雪の際のアンテナへの積雪は、電波強度の低下を招きサイクルスリップが生じやすくなるため、それらは計測結果の安定性に影響を及ぼすので注意しなければならない。また、大気圧、気温、湿度などの気象条件は、人工衛星からの電波の対流圏伝搬遅延に影響を及ぼし計測結果の誤差の要因となる⁴⁾⁵⁾。すなわち、衛星と受信点間の電波遅延の大きさが、衛星と受信点の組み合わせによって異なるため、それが座標計算の際の誤差となる。これに対して、本システムでは、修正 Hopfield モデル⁴⁾を用いてその影響を補正している。なお、修正 Hopfield モデルでは、一般に、平均海水面の標準的な大気圧、気温、相対湿度の値（それぞれ、1,010 hPa, 20℃, 50%）を既定値として用いるため、観測時にそれらの値を測定する必要はない。実際の変位計測結果から判断すると、観測期間中の気象変化の影響は特に受けなかったものと思われる。なお、参考までに観測期間中の天候は、秋吉台科学博物館（現場から北東約4 kmに位置する）の記録によると、268～273日では、おおむね晴れ、気温10.9～25.4℃、湿度76～98%、気圧1,019～1,023.9 hPa、また、275～281日では、曇りあるいは小雨、気温10.3～25.7℃、湿度61～98%、気圧1,017.4～1,025.7 hPaであった。

3・2 計測結果の処理法

まず、Fig. 5のヒストグラムにおいて、偶然誤差とみなせる範囲外にある大きな乱れを示す計測結果の除去について考える。

本システムにおいて計測点の座標は、人工衛星から受信したL1波（周波数1,575.42 MHz、波長約19.0 cm）の位相から2重位相差をとり、得られた観測方程式を用いて最小自乗法によって計算される³⁾。その方法は原理的には従来のキネマティック方式⁵⁾⁶⁾における計算と同じであるが、サイクルスリップの自動判断および自動処理ができるように工夫されている³⁾。このような過程を経て計算される座標値が大きく変動する理由としては、3・1において述べた要因が考えられるが、それらを特定することは難しい問題である。

そこで、本研究では、変動の原因を直接に特定しなくても、リアルタイム計測中に迅速にしかも有効に変動の大きい計測値を除去できる方法を考える。もちろん、変動の原因を特定してそれに基づいた対処を行うことが望ましいが、その点については今後の課題とする。

本研究では、最小自乗法によって座標値を求める際に計算される座標値の標準偏差の推定値に着目する。その標準偏差は、計算

Fig. 6 Rejection ratio for large scattered data and acceptable data (measurement point No.3).

された座標値の確からしさを表す指標となり得るので、その値に制限値を設けることによって、標準偏差が制限値以上の場合、その座標は計算上精度が低いとみなし棄却するのである。問題は、その制限値をいくらに設定するかである。

Fig. 6は、計算した座標値を棄却する標準偏差の制限値と変動の大きい計測値の除去率 (Rejection ratio) の関係を表す (図中■●▲)。ここで、除去率は標準偏差の制限によって除去されたデータ数と、除去されるべき変動の大きい観測値 (ヒストグラムの両端にある計測値, Fig. 5 参照) の数の比で定義する。たとえば, Fig. 6 から, 制限値を 2 cm とした場合, いずれの成分も大きな変動を示す計測値の 95 % 以上が除去されることが分かる。

また、このように制限値を設けた場合、本来のばらつきのなかにある (除去されるべきでない) 計測値であるにもかかわらず、除去されてしまう計測結果がある。その誤除去率 (ヒストグラムの両端以外にある計測値の中で除去されるデータ数とものの計測値の数との比) も Fig. 6 にあわせて示している (図中□○△)。例えば、制限値を 2 cm とすると、誤除去率は緯度・経度方向では数 % であるが、高さ方向では 30 % となり、採用すべき計測結果を数多く除去することになる。

したがって、制限値としては除去率が高く、かつ、誤除去率が低くなるよう設定すべきである。

本研究では、Fig. 6 に基づき除去率がおおよそ 95 % 以上となるように、かつ、誤除去率がおおよそ 5 % 以下となるように、緯度および経度に対して標準偏差の制限値を 2 cm、高さに対しては 4 cm と設定することにする。

次に、Fig. 5 のヒストグラムにおいて、計測結果の平均値は真の値 (不動であるので 0) から幾分偏差している。この偏差は、計算した座標値から変位を求める際に、観測開始直後、最初の計算座標を初期値にとったことによると考えられる。そこで、観測直後の計測点が移動していない期間の計測値の平均を初期座標として採用し、後続の計測値からその初期座標を引けばこの偏差はなくなるものと思われる。ここでは、変動の大きい値を上述べた方法で除去した計測結果を対象として偏差を取り除く。

実際の計測では、観測開始後なるべく早い段階で偏差が修正されることが望ましい。そこで、本研究では観測開始後、各座標成分について 1 日間の計測値の平均をとり、それを後続する計測値から差し引くことにする。ただし、計測値を平均する期間を 1 日としたのは、衛星配置の影響を地球 2 周回分 (衛星の地球周回周期は約 12 時間) で平均し、さらに、電離層および対流圏の影響を昼夜で平均することができるからである。Table 1 に 1 日間の平均と観測期間の計測値の平均を示す。高さ方向の平均にはいく

Table 1 Average value of measurement results of the first one day (measurement point No.3).

meas. point	Longitude	Latitude	Height
1 day	-0.23	-0.42	0.16
Total period	-0.32	-0.45	0.03

(meas. point: No.3, period: 275~281, unit: cm)

Fig. 7 Measurement results applied the proposed method (measurement point No.3).

Fig. 8 Flowchart of the proposed method for data processing.

Fig. 4 に示した計測結果に対して上に述べた方法を適用した計測結果を Fig. 7 に示す。Fig. 7 において、図上、計測結果の開始が Fig. 4 と比べて 1 日遅れているのは、先に述べた偏差を取り除く処理をしたためである。処理をしない場合 (Fig. 4) と比べると、変動の大きい計測値はおおむね除去され、0 からの偏差もなくなっていることが分かる。以上の手順をとりまとめて、Fig. 8 にフローチャートとして示す。

Table 2 に、計測点 No.1 および No.3 の全期間 (1995 年 268~273 日, 275~281 日) の計測結果に対して Fig. 8 の方法で処理した後の計測値の平均と標準偏差を示す。それらの値が、本システムの変位計測の精度の基準となる。その値は、従来のオフ

Table 2 Average value and standard deviation of measurement results applied the proposed method.

(a) No.1				
period	268~273		275~281	
	Ave.	Std.	Ave.	Std.
Latitude	0.06	0.46	-0.06	0.45
Longitude	-0.02	0.35	-0.06	0.34
Height	-0.10	0.94	-0.09	0.89

(b) No.3				
period	268~273		275~281	
	Ave.	Std.	Ave.	Std.
Latitude	0.04	0.54	-0.03	0.50
Longitude	-0.02	0.36	-0.10	0.34
Height	-0.08	1.08	-0.16	1.01

(Ave:Average, Std:Standard deviation, unit:cm)

ライン処理のキネマティック方式およびスタティック方式による計測精度⁴⁾⁵⁾と同等もしくはそれ以上のよい結果となっている。

以上のことから、本方法によって本システムのリアルタイム計測結果がかなり改善されることが示された。ただし、この方法は、今回実施した計測結果から試行錯誤的に得られたものであり、変動の大きい計測結果を除去するための標準偏差の制限値、および、偏差を除くために計測結果を平均する期間に対して、ここで示した値に理論的根拠があるわけではない。しかし、それらの値は、少なくとも本システムを今回と同様の地形条件と計測点位置の関係に対して適用する際には有効と考えられる。もし、斜面の勾配や向きなど観測条件が今回の現場と大きく異なる場合は、その現場に適した標準偏差の制限値と平均期間を決めるための試験観測を行う必要があるかもしれない。いずれにしても、Fig. 8 に示した提案方法を適用することで計測結果は改善されるものと考えられる。

なお、Fig. 7 から分かるように、提案法では大きな変動を示す計測値を必ずしもすべて除去できるわけではない。先に述べたように変動の原因の特定とより効果のある方法の検討は今後の課題である。

4. 変位計測シミュレーション実験

さらに長期の連続観測（約 4 週間）を実施し、期間中に変位計測のシミュレーション実験を行う。その際、3. において提案した計測結果の処理方法を適用して、その妥当性と変位計測の精度を調べる。この実験では変位計測点を No. 1~3 の 3 カ所とし、それぞれ、経度（計測点 No. 1）、緯度（計測点 No. 2）、高さ方向（計測点 No. 3）にアンテナに変位を与え、それらを計測した。変位は、まず Fig. 9 に示す銅製の台にアンテナと受信機を固定し、経・緯度および高さ方向にネジを回転させることによって、mm 単位で与えられる。与える変位の量は、1 回につき、経度および緯度方向に対して 5 mm、高さ方向に対して 10 mm とした。計測開始後最初の 4 日間は変位を与えず静止状態の観測を行い、その後、4 回変位を与えその間連続観測した。

計測結果に Fig. 8 に示した処理方法を適用した結果を、計測点 No. 1~3 に対してそれぞれ Fig. 10~12 に示す。いずれの計測点においても各変位成分は、Fig. 8 の処理方法の適用により、変動の大きい計測値のうち 95 % 以上のデータが除去された。また、Table 3 に与えた変位に対する計測値の平均値および標準偏差を示す。

Fig. 10(b)および Table 3(b)、ならびに、Fig. 11(a)および Table 3(a)から、それぞれ経度および緯度方向の計測変位は、いずれもほぼ正確に与えた 5 mm ごとの変位を追従していることが分かる。特に経度方向の変位の計測精度は緯度方向の精度より

Fig. 9 Antenna and receiver set on the device for displacement simulation experiments.

Fig. 10 Measurement results for displacement simulation experiments (measurement point No. 1).

やや優れていることが分かる。また、Fig. 12(c)および Table 3 (c)から、高さ方向の変位は、経度および緯度方向の変位に比べて計測の正確さは落ちるが、ほぼ 1 cm 単位で変位を計測することが可能と考えられる。このような方向による精度の違いは、前報において述べたように、GPS 測位の特性で衛星の配置（軌道）によるものと考えられている³⁾。さらに、変位を与えていない成分の計測値についても、Fig. 8 の処理方法の適用により大きな変動もなく、3. で得られた結果と同様の結果が得られた。なお、参考までに観測期間中の天候は、秋吉台科学博物館の記録によると、晴れの日数は 13 日、曇りは 11 日、雨は 4 日、気温 $-1.6 \sim 16.7^{\circ}\text{C}$ 、湿度 54~99 %、気圧 1,008.1~1,027.5 hPa であった。

以上の結果から、本研究で提案した計測結果の処理方法は簡易な方法であるにもかかわらず、その適用によって計測結果の精度

Fig. 11 Measurement results for displacement simulation experiments (measurement point No. 2).

Fig. 12 Measurement results for displacement simulation experiments (measurement point No. 3).

Table 3 Measurement results of displacement simulation experiments.

(a) Δ Latitude (cm)		
Exact displacement	Measurement	
	Average	Standard deviation
0.0	-0.01	0.47
0.5	0.60	0.49
1.0	1.12	0.47
1.5	1.62	0.48
2.0	2.17	0.50

(b) Δ Longitude (cm)		
Exact displacement	Measurement	
	Average	Standard deviation
0.0	-0.01	0.34
0.5	0.50	0.33
1.0	0.96	0.34
1.5	1.49	0.35
2.0	2.05	0.36

(c) Δ Height (cm)		
Exact displacement	Measurement	
	Average	Standard deviation
0.0	-0.08	0.89
1.0	0.79	0.84
2.0	2.20	0.84
3.0	3.26	0.85
4.0	4.33	0.88

は向上し、少なくとも経度・緯度方向の変位は 5 mm、高さ方向は 10 mm を単位とした計測が可能であることが示された。これらの精度はオフライン処理の GPS 測量においてはおおむね実現されることが確認されているが⁷⁾、同時多点のリアルタイム連続計測としては、筆者らの知る限りでは他に例のない性能である。

5. 結 論

本研究では、筆者らが開発している変位モニタリングシステムを用いて、まず、2 週間程度の連続観測を行いシステムの安定性の検証およびその計測結果に基づいて観測データの処理方法の提案を行った。そして、その方法を約 4 週間の変位計測シミュレーション実験結果に適用して妥当性を確認した。その結果、緯度・経度方向では 5 mm、高さ方向では 10 mm を単位とした変位の連続計測が可能であることを明らかにした。

現在、システムの性能の向上を図るために、ハードおよびソフト面などの改善を進めている。また、より長期の連続観測や観測条件の不利な場合に対する実験を行う予定である。さらに、精度の改善のために、現在 10 秒に固定している観測時間を任意に延長できるオプションの追加、観測結果の平滑化や予測手法の開発などを課題として研究を進めている。

本研究の一部は、石灰石鉱業協会の研究奨励金（平成 7、8 年度）の援助を受けて遂行した。ここに記して感謝の意を表す。

引 用 文 献

- 1) 清水則一・小野 浩・近藤仁志・水田義明：資源素材学会誌，Vol. 112，No. 5，p. 283-288，(1996)
- 2) Shimizu, N., Kondo, H., Ono, H. and Mizuta, Y. : Proc. the 8th FIG Int. Symposium on Deformation Measurements, p. 47-54, (1996)
- 3) 近藤仁志・M. Elizabeth Cannon・清水則一・中川浩二：土木学会論文集，No. 546/IV-32，p. 157-168，(1996)
- 4) Leick, A. : GPS Satellite Surveying, 2nd ed., John-Wiley & Sons, p. 307-311, (1995)
- 5) 土屋 淳・辻 宏道：GPS 測量の基礎，日本測量協会，(1989)
- 6) 土屋 淳・今給黎哲郎：GPS 測量と基線解析の手引き（改訂版），日本測量協会，(1994)
- 7) 桜井春輔・清水則一・古谷茂也・血海章雄：土木学会論文集，No. 475/III-24，p. 137-142，(1993)