

GPSによる切取り斜面の変位測定*

櫻井春輔**・清水則一***・皿海章雄****・
古谷茂也****

長大斜面や大規模露天掘りピットなどのような、広範囲な領域における地盤の変位測定に GPS 測量を適用することを考えた。本報告では、GPS 測量による変位測定の精度をシミュレーション実験を行い調査し、さらに、実際の長大切取斜面の変位測定に GPS を適用してその実用性を明らかにした。

Key Words : Global Positioning System, displacement measurements, cut slopes, monitoring

1. はしがき

地盤構造物の工事においては、情報化施工の普及とともに地盤の変位挙動を計測することがますます重要となっている。そのため、種々の計測機器の開発が進められており、それらを用いることによって地盤の変位が、かなり正確に測定できるようになった。しかし、これまでに開発されてきた計測機器は主として、たかだか数 10 m 規模の局所的な地盤の変位挙動を測定するものが多い。そのため、長大斜面や大規模露天掘りピットなどのように、広範囲な領域において地盤の変位を測定する必要がある場合には、それが可能な計測機器や計測方法が開発されることが望まれる。このような要求に応える方法として、GPS (Global Positioning System) は大きな可能性を持っているように思われる。

GPS は、アメリカ合衆国が開発している人工衛星を用いる新しい測量システムである。それは、人工衛星から送られる電波を受信して、非常に離れた 2 点間の相対的な位置を三次元的に精度良く測定するシステムである^{1)~3)}。さらに、観測点間の視通を必要としないこと、天候に影響されにくいこと、測量作業の人員と時間の省力化が図れることなど従来の測量法より優れた特徴がある。そこで、GPS によって繰り返し観測点の位置 (座標) を測定すれば、位置の移動量が測定でき、広い領域における地盤の変位を比較的容易に求めることが可能と考えられる。

これまで、石油採鉱や地下水汲上げなどによる広域地盤沈下^{4)~8)}、地滑り変位⁹⁾、地殻変動^{10)~12)}、地震活動に

伴う地盤変位^{13),14)}、また、構造物の変位^{15)~17)}などの測定に GPS 測量の適用が試みられている。しかしながら、GPS がまだ開発途上の技術であるため、その実際への適用性については十分に明らかにされていない。特に、土木工事の環境下における現場変位計測への適用例は、著者の知る限りにおいてあまりないようである。

そこで、本研究では、まず GPS 測量による変位測定の精度をシミュレーション実験によって調査する。そして、長大切取斜面の変位測定に適用し、GPS 測量が実際の土木工事の環境下においてどの程度の測定精度を有しているかを明らかにする。

2. GPS 測量の概要

GPS 測量は大きく分けて、単独測位と相対測位があり、高精度測量を行う場合には後者を用いる。また、相対測位の代表的な測量方法には、スタティック測量およびキネマティック測量がある。

スタティック測量は、複数の観測点にアンテナと受信機を固定して、それぞれの点において同時に少なくとも 3 個以上の人工衛星からの電波を受信し、観測点間の相対座標を求める方法である。観測時間は、衛星の個数および基線長によって異なるが、4 衛星を同時受信できる場合、1~2 時間程度を目安としている。キネマティック測量は、基準となる点にアンテナと受信機を固定し、もう一つのアンテナと受信機を次々と観測点に移動させて、基準点と観測点との相対座標を求める方法である。この方法においては、1 観測点における観測時間は数秒~数分程度で良い。いずれの相対測位においても、受信したデータは一旦受信機内のメモリーに記憶させ、観測終了後、コンピュータに受信内容を転送し、解析によって観測点の座標を求める。

GPS 測量によって得られる座標は、図-1 に示すような地球中心に原点をおいた WGS 84 と呼ばれる国際

* 本報告は一部、19)、20)に発表している。

** 正会員 工博・PhD 神戸大学教授 工学部建設学科
(〒657 神戸市灘区六甲台町)

*** 正会員 博(工) 山口大学助教授 工学部社会建設工学科

**** 学生会員 神戸大学大学院工学研究科土木工学専攻

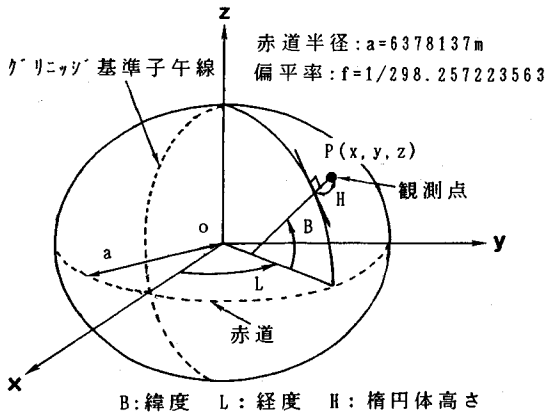


図-1 世界測地座標系 (WGS 84)

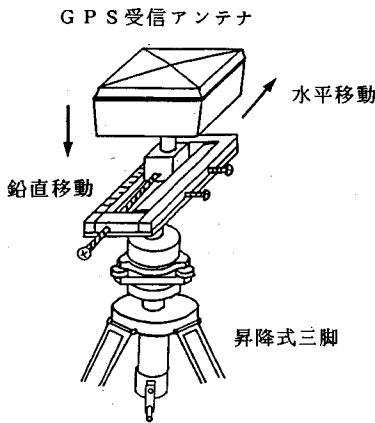


図-2 アンテナ移動装置

測地座標系に基づいている。なお、GPS測量の詳細は文献1)~3)を参照されたい。

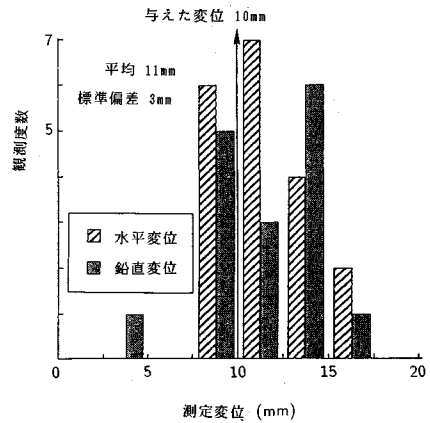
3. GPS測量による変位測定実験

GPS測量による変位測定の精度は、レベル測量や光波測距儀を用いた測量結果と比較することによって調べることができるが、ここではより直接的な方法で精度を調べる実験を行う。すなわち、受信アンテナを人為的に正確に微小量移動させ、その移動量をGPSによって測定するもので次の手順にしたがう。

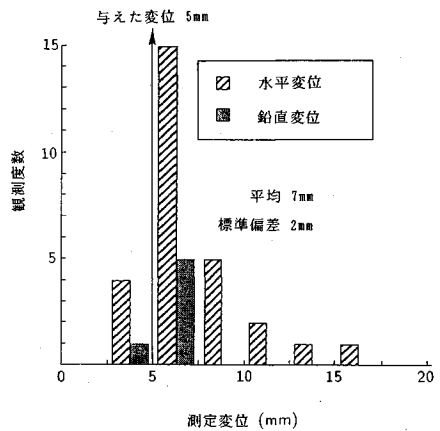
① まず、受信アンテナを、地盤変位をシミュレートするためのアンテナ移動装置に設置する。その装置は図-2に示すように、アンテナを水平に移動させる器具と上下に移動させる昇降式三脚から構成される。また、基準点(不動点)はアンテナを移動させる測点から数10m離れた位置に設置した。

② 移動装置によってアンテナを、水平あるいは鉛直方向にあらかじめ定めた大きさだけ移動させる。

③ 移動させる前後でアンテナの位置(座標)をGPS測量によって測定する。



(a) ケース1 (与えた変位10mmの場合)



(b) ケース2 (与えた変位5mmの場合)

図-3 GPS測量による変位測定のシミュレーション実験の結果

④ 移動前後の座標から移動ベクトルの絶対値(アンテナの移動量)を計算し、それを測定変位とする。

⑤ この測定変位をアンテナに与えた移動量と比較する。

なお、本実験では8チャンネルのL1波・C/Aコード受信機(機種:4000 SST, データ解析プログラム:TRIMVEC-PLUS, 共にTrimble Navigation社製)を用い、人工衛星が5個以上観測できる時間帯を選び、キネマティック測量法(一回の観測時間2分, データ取得間隔15秒)を適用した。また、実験はほぼ水平な地表面上で上空には障害物がない場所を選んで行った。

アンテナに10mmおよび5mmの移動量を、水平方向と鉛直方向に与えた場合について、実験結果をそれぞれ図-3(a)および(b)に示す。移動量が10mmの場合、測定変位の平均値は11mm, 標準偏差は3mm, また、移動量が5mmの場合、測定変位の平均値は7mm, 標準偏差は2mmとなった。この結果から、GPS測量

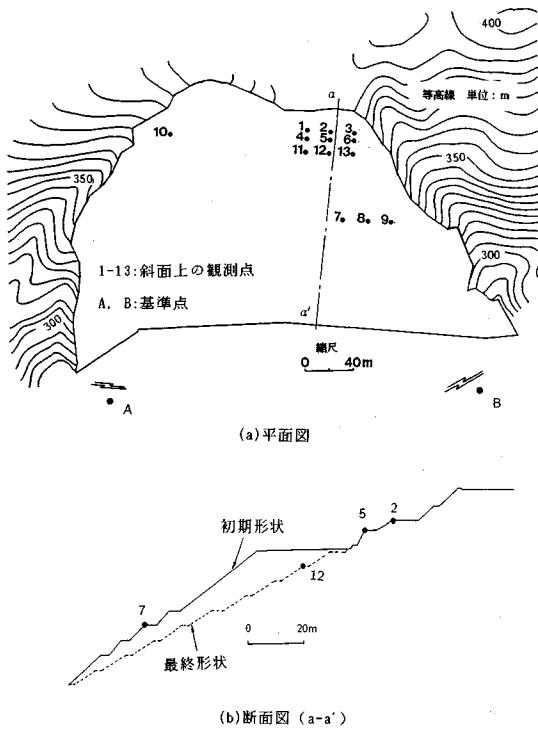


図-4 GPS測量を行う斜面

によって少なくとも 10 mm の変位が検出できるものと考えられる。なお、GPS における標準的な測量法はスタティック測量であるが、ここでは実験の効率を考えキネマティック測量を用いた。一般的にはスタティック測量はキネマティック測量より精度が良いことが知られているため、スタティック測量を用いれば少なくとも本実験の結果と同等の精度で変位測定が行えるものと考えられる。

4. 長大切取斜面への適用

実際の工事の環境下における、GPS 測量による変位測定の精度を調べることを目的として、長大切取斜面の変位計測を行う。

(1) 対象斜面と観測点位置

変位測定を行う斜面は風化砂岩と頁岩の互層からなり、斜面の高さおよび幅はそれぞれ、約 120 m および 200 m である (図-4 参照)。測量の基準点として図-4 に示すように、斜面から約 600 m 離れた地点に A および B 点を、また、斜面上に当初 10 点 (1~10)、後に 3 点 (11~13) を追加し、合計 13 の観測点を設置した。

(2) GPS 測量による変位測定

前にも述べたように、これまでの研究では、沈下あるいは測線長の変化を従来測量法による結果と比較することで、GPS 測量の精度を調べている^{5), 7) - 9)}。しかし、変位の三次元成分について両者を比較した例はないよう

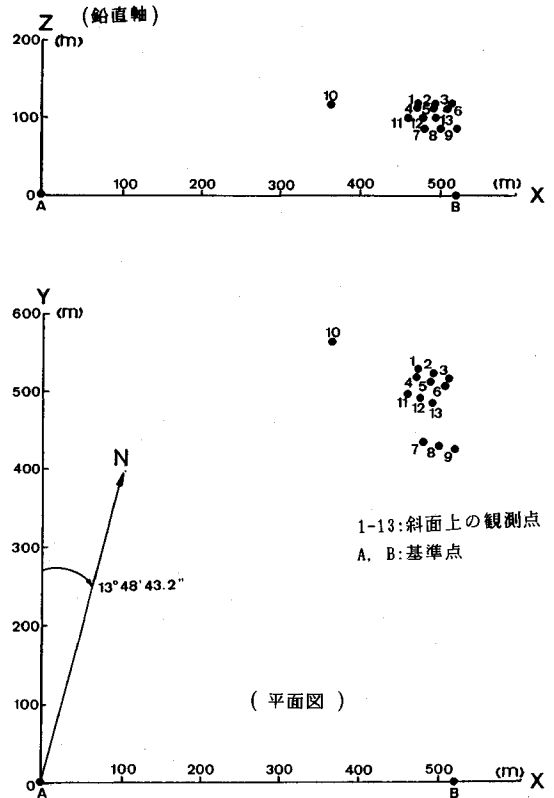


図-5 GPS 測量による観測点座標

ある。それは、GPS 測量の座標系 (図-1) が一般の測量座標系と異なるため、両者の結果を直接比較できないからである。筆者らは、通常の測量結果と GPS 測量結果を三次元的に比較する簡易な方法を提案している^{18), 19)}。ここでは、その方法を用いて GPS 測量による測定変位を従来測量の座標系に変換し、変位の三次元成分の測定精度を調べる。なお、本観測では、2. の実験と同じ GPS 受信機を用いて、スタティック測量 (データ取得間隔は 15 秒) を行う。

斜面上の観測点の変位は次のようにして求める。まず、斜面から十分に離れた不動と見なせる位置に基準点 A および B を設ける。基準点 A と B および斜面上の観測点に対してスタティック測量を実施する。次に基準点 A を仮原点として B 点の座標を確定し、さらに斜面上の観測点に対して基準点 A および B との相対座標をそれぞれ求める。そして、2つの基準点 A および B からの相対座標の各成分を算術平均して観測点の座標を確定する。そのような方法で斜面上の全ての観測点の座標を求め、それを初期座標とする。日をおいて同様な観測を行い、各観測点の座標を確定して、その座標と初期座標との差を求めれば、それが観測点の変位となる。

一方、GPS 測量の精度を調べるために、トータルステーションを用いて、基準点 A および B から斜面上の

表一 GPS 測量とトータルステーション測量による変位測定結果の比較 (1991年7月1日～8月12日の間)

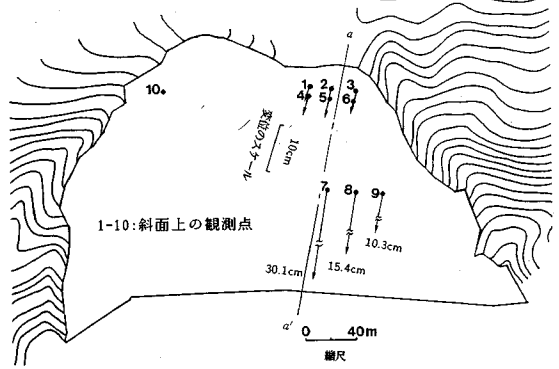
観測点	変位の成分	GPS	TS	観測値の差 (GPS-TS)
2	du	-0.014	-0.014	0.000
	dv	-0.027	-0.038	0.011
	dw	-0.033	-0.033	-
8	du	-0.026	-0.025	-0.001
	dv	-0.162	-0.168	0.006
	dw	-0.089	-0.085	-0.003
10	du	0.006	0.005	0.001
	dv	0.007	-0.003	0.010
	dw	-0.002	-0.014	0.012

(単位: m)

TS: トータルステーション

du, dv, dw: X, Y, Z軸方向の変位成分

-: 測点2についてはGPSとTSによって得たZ座標を一致させて座標変換¹⁾を行った



(a) 平面図

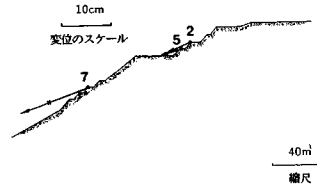
表二 GPS 測量とトータルステーション測量による変位測定結果の比較 (1991年9月25日～11月26日の間)

観測点	変位の成分	GPS	TS	観測値の差 (GPS-TS)
5	du	0.002	0.005	-0.003
	dv	-0.004	-0.001	-0.003
	dw	0.006	0.011	-0.005
10	du	-0.005	-0.003	-0.002
	dv	-0.034	-0.029	-0.005
	dw	-0.040	-0.005	-0.035
12	du	-0.004	-0.001	-0.003
	dv	-0.023	-0.025	0.002
	dw	-0.008	0.001	-0.007

(単位: m)

TS: トータルステーション

du, dv, dw: X, Y, Z軸方向の変位成分



(b) 断面図 (a-a')

図六 GPS 測量による変位ベクトル (1991年7月1日～8月12日の間)

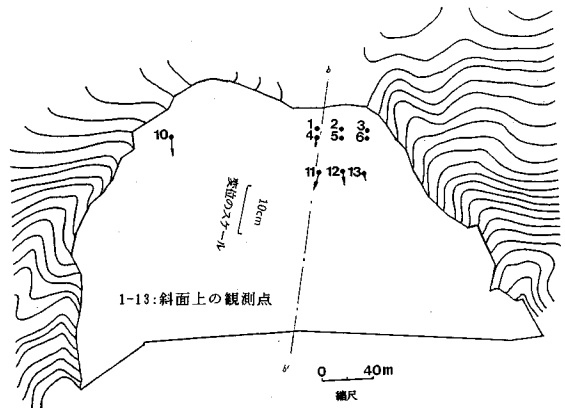
いくつかの観測点に対して、三次元的な位置の測量を行う。なお、本観測では、距離精度 5 mm + 5 ppm, 最小読みは角度が 1 秒, 距離が 1 mm の高精度トータルステーション (DTM-1: Nikon) を用いる。

(3) 測量結果

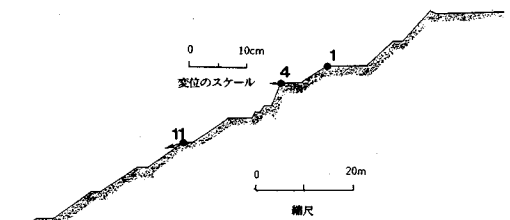
GPS 測量は、約 1 カ月間隔で 4 回実施した。図-5 に、4 回目の GPS 測量によって得られた基準点および観測点の位置を示す。図の XYZ 座標は、トータルステーション測量における座標系である。すなわち、Z 軸は鉛直上向きに、X 軸は基準点 A から B に向かう方向にしている。また、X-Y 面は鉛直軸に直交する水平面である。なお、本スタティック測量においては、一測線の観測時間は 90～180 分とした。また、同時に観測した人工衛星は平均 4～5 個であった。

表一に、1～2 回目の観測において、GPS およびトータルステーションによって得られた変位を比較して示す。同表から両測定値の差は大きくても 10 mm 程度であることが分かる。図-6 にこの場合 (1～2 回目) の GPS 測量によって得られた斜面上の観測点における変位ベクトルを示す。この図において明らかなように、観測点 7～9 に非常に大きい変位が検出された。

表二には、3～4 回目の観測において、GPS およびトータルステーションによって得られた変位を比較して



(a) 平面図



(b) 断面図 (b-b')

図七 GPS 測量による変位ベクトル (1991年9月25日～11月26日の間)

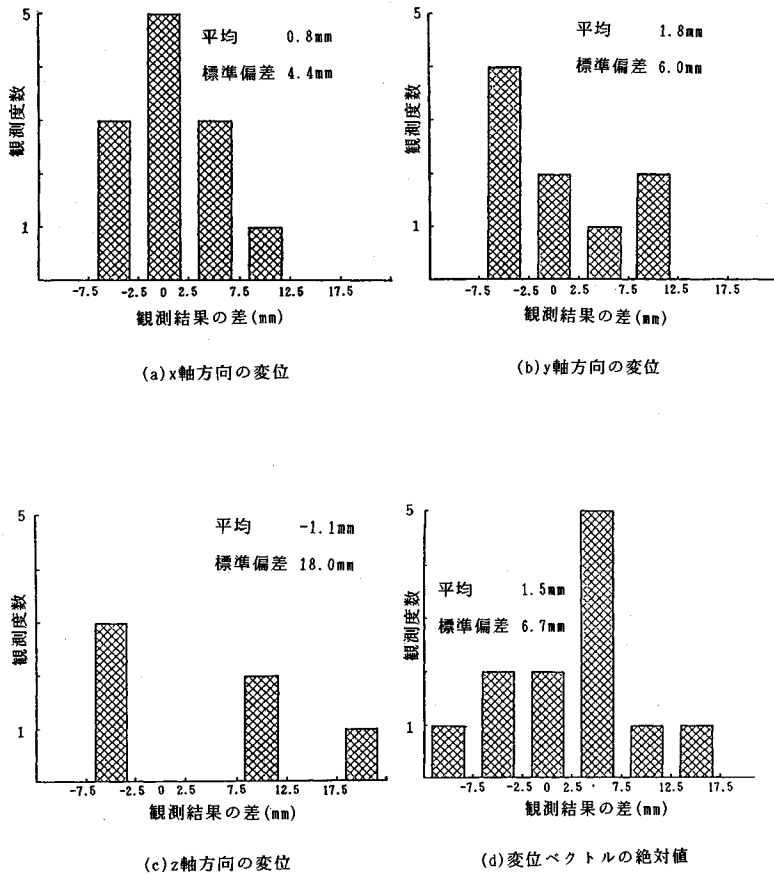


図-8 GPS測量とトータルステーション測量による変位測定結果の比較(全観測データ)

示す。この結果においても、両測定値の差は概ね10mm以内となっている。図-7にこの場合のGPS測量によって得られた斜面上の観測点における変位ベクトルを示す。観測点10, 11および12に比較的大きな変位が生じていることがわかる。

図-8に、観測期間中に得られた全測定変位について、GPSおよびトータルステーション測量による結果の差をヒストグラムにして示す。本観測の結果、水平方向の変位については、両者の差の標準偏差は、xおよびy方向についてはそれぞれ4.4mmおよび6.0mmであり、鉛直方向(z方向)の変位については18mmとなった。

以上の結果から、水平方向変位は±10mmより良い精度で、また、鉛直変位は±20mm程度の精度で測定できるものと考えられる。なお、鉛直方向の測定精度が水平方向より劣る理由は、観測できる衛星が上空に限られている(地球の裏の衛星からの電波は受信できない)ためであると一般に考えられている¹⁾⁻³⁾。

5. 結 論

本研究によって得られた結論を以下に示す。

1. 変位測定シミュレーション実験の結果、GPS測量によって、水平方向および鉛直方向とも、10mm程度の地盤変位を検出できることが示された。

2. 実際の掘削工事の環境下において、長大切取斜面の変位をGPS測量(スタティック測量)によって測定したところ、高精度トータルステーション測量の結果と比べて、水平方向は10mm以内、鉛直方向では20mm程度の差で変位を測定できることがわかった。

本研究の結果、GPS測量は長大斜面の変位モニタリングに十分利用できる可能性のあることが明らかとなった。

謝辞: 本研究は財団法人建設工学研究所の助成を受けて実施した。ここに感謝の意を表します。また、GPS測量の実施に御協力頂いた神戸大学大学院学生川嶋幾夫君、および、現場において御便宜を図って下さった関係者に感謝します。

参考文献

- 1) 日本測地学会編著：新訂版 GPS—人工衛星による精密測位システム—，(社)日本測量協会，1989.
- 2) Wells, D.(ed.) : Guide to GPS Positioning, Canadian GPS Associates, 1986.
- 3) Leick, A. : GPS Satellite Surveying, John Wiley & Sons, 1990.
- 4) Bock, Y. : Monitoring of deformations with GPS, Proc. Deformation Measurements Workshop on Modern Methodology in Precise Engineering and Deformation Surveys II, MIT, pp.96~111, 1986.
- 5) Murria, J. and J. Abi Saab : Engineering and construction in areas subjected to subsidence due to oil production, Proc. 5th Int. (FIG) Sympo. on Deformation Measurements and 5th Canadian Symposium on Mining Surveying and Rock Deformation Measurements, Fredericton, pp.367~373, 1988.
- 6) LaScola, J. C. and M. A. Trevis : Longwall mine subsidence surveying an engineering technology comparison, ditto, pp.298~307, 1988.
- 7) Strange, W. E. : GPS determination of groundwater withdrawal subsidence, J. Surveying Engineering, ASCE, Vol.115, No.2, pp.198~217, 1989.
- 8) Blodgett, J. C. : Monitoring land subsidence in Sacramento valley, California, using GPS, J. Surveying Engineering, ASCE, Vol.116, No.2, pp.112~130, 1990.
- 9) Barbarella, M., G.Bitelli, G. Folloni, A. Gubellini, P. Russo and L. Tomassini : Deformation surveys of landslides using terrestrial measurements and space techniques, 4) 同じ, pp.50~61, 1988.
- 10) Lambert, S. R. and D. A. Tyler : Monitoring crustal deformation in Eastern Maine using GPS, J. Surveying Engineering, ASCE, Vol.115, No.1, pp.138~147, 1989.
- 11) Dong, D. D. and Y. Bock : Global Positioning System network analysis with phase ambiguity resolution applied to crustal deformation studies in California, J. Geophy. Res., Vol.94, pp.3949~3966, 1989.
- 12) 木股文昭他 15 名 : 中部・関東地域の南部における GPS 干渉測位 (1989~1990), 測地学会誌, 第 36 巻, 第 4 号, pp.219~230, 1990.
- 13) 関口渉次・大見士朗・藤縄幸雄・島田誠一・江口教雄・岡田義光 : GPS による伊東沖の地震火山活動後 1 年間に於ける初島—伊東間の基線変化, 防災科学技術研究所報告, 第 46 号, pp.21~27, 1990.
- 14) 太田一也, 他 11 名 : 雲仙岳火山活動に関連した山体崩壊に関する合同研究報告, 環境システム工学研究センター研究活動報告, 第 4 号, 九州大学, pp.35~45, 1992.
- 15) Goad, C. C. : Kinematic survey of Clinton lake dam, J. Surveying Engineering, ASCE, Vol.115, No.1, pp.67~77, 1989.
- 16) DeLoach, S. R. : Continuous deformation monitoring with GPS, ditto, pp.93~110, 1989.
- 17) McLellan, J. F., T.R. Porter and P.St.J.Price : Pipeline deformation monitoring using GPS survey technique, ditto, pp.56~66, 1989.
- 18) 清水則一・桜井春輔・川嶋幾夫 : GPS における WGS-84 の地上直交座標系への変換方法について, 土木学会第 46 回年次学術講演会, IV 部門, pp.566~567, 1991.
- 19) 桜井春輔・清水則一・皿海章雄・古谷茂也・川嶋幾夫 : GPS 測量による観測点座標および測定変位の精度について—短い基線に対する測量結果—, 建設工学研究所報告, 第 33 号, pp.277~298, 1991.
- 20) 清水則一・桜井春輔・皿海章雄・古谷茂也 : GPS による長大斜面の変位モニタリング, 第 24 回岩盤力学に関するシンポジウム, 土木学会, pp.440~444, 1992.

(1992.10.9 受付)

APPLICATION OF GLOBAL POSITIONING SYSTEM (GPS) TO DISPLACEMENT MEASUREMENTS OF CUT SLOPES

Shunsuke SAKURAI, Norikazu SHIMIZU, Akio SARAGAI and Shigeya FURUTANI

The Global Positioning System (GPS) is an innovative surveying system using artificial satellites. This system has the potential to measure ground deformation in various geotechnical engineering projects. Since GPS is a quite new and under-developed technology, its accuracy of measurements and practical applicability are not yet well known. In this paper, the accuracy of GPS displacement measurements is investigated by an experiment and the GPS surveying is applied to measuring displacements during cutting a rock slope. It is the conclusion of this study that the GPS has great potential, and is extremely useful for monitoring of high cut slopes.