

GPS測量を用いた土工事の出来形測定システムの開発

藤岡 晃*・菊田勝之*・清水則一**・
桜井春輔***

人工衛星を利用した測量システムである GPS を用いた土工事の出来形測定システムの開発を行った。本研究では、特にアンテナ自動水平保持装置とリシケージプログラムを開発した。本論文では、このシステムの詳細について述べ、実際の測定に適用して、従来法と比較し本システムの有効性を確認した。

Key Words : earthwork progress measurement GPS (global positioning system)

1. はしがき

出来形とは、一般に工事の進捗段階における構造物の形状のことを意味し、その測定は工事の施工管理において重要である¹⁾。土工事における出来形測定は、計画形状の確認および工事の進捗度合の把握だけでなく、工事を安全に行う上からも特に重要である。

土工事では、出来形測定の対象となる領域が広大な場合が多く、迅速性、経済性および作業性に優れ、しかも精度良く出来形が測定できる方法が望まれる。一般に土工事の出来形測定には、スタジア測量および空中写真測量を用いている²⁾。前者においては、トータルステーションの普及により、作業が容易となり、しかも精度良く測定できるようになった。しかし、大規模な工事を対象とする場合、測量作業に時間を要し、迅速性に欠け工事の進捗に追従できないことがある。後者は、広範囲な測量には適しているが、トータルステーション測量に比べると精度が劣るうえ、測量作業が大がかりとなり頻繁に行うことが難しい。そのような空中写真測量による方法の欠点を補うため、画像処理技術を用いた出来形測定システム³⁾、また、小型カメラを用いた出来形測定システムが提案されている⁴⁾。

一方、近年人工衛星を用いる測量システムである Global Positioning System (GPS) が注目されている。それは、人工衛星から送られる電波を受信し、観測点の三次元座標を求めるシステムである⁵⁾⁻⁷⁾。特に、二点間の相対座標を求める相対測位法は、(1)長基線に対し高精度測量が期待できること、(2)観測点間の視通を必要としないこと、(3)雨天・夜間でも測量できること、

(4)作業員一人でも測量することが可能なことなど、従来の測量法に比べて優れた利点を有している。

そこで、GPS を出来形測定に用いるならば、上述の特徴によって、従来より迅速かつ経済的な測定システムを構築することが可能と考えられる。本研究は、大規模な土木工事を対象として、GPS を用いた出来形測定システムの開発を行うことを目的とするものである。

2. GPS 測量の概要

GPS 測量には大別して、単独測位法と相対測位法がある⁸⁾⁻⁷⁾。前者は、航法援助を目的とした測量法で、すでに広く一般に利用されている。後者は、精密測量として、測地測量⁸⁾、地殻変動測量⁹⁾、地盤変位測量¹⁰⁾⁻¹⁴⁾および工事測量¹⁵⁾などに応用され始めている。ここでは、本研究で用いる相対測位法について、スタティック方式とキネマティック方式についてそれらの概要を述べる。

(1) スタティック方式

スタティック方式は、複数の観測点にアンテナを固定して、それぞれの点において同時に人工衛星から電波を受信し、基準点からの相対座標を求める方法である(図-1(a)参照)。測量に必要な観測時間は、衛星の個数および基線長によって異なるが、基線長が数 km 以内の場合、1~2 時間程度を目安としている¹⁶⁾。上述の応用例⁸⁾⁻¹⁵⁾は、すべてスタティック方式を用いて行われている。

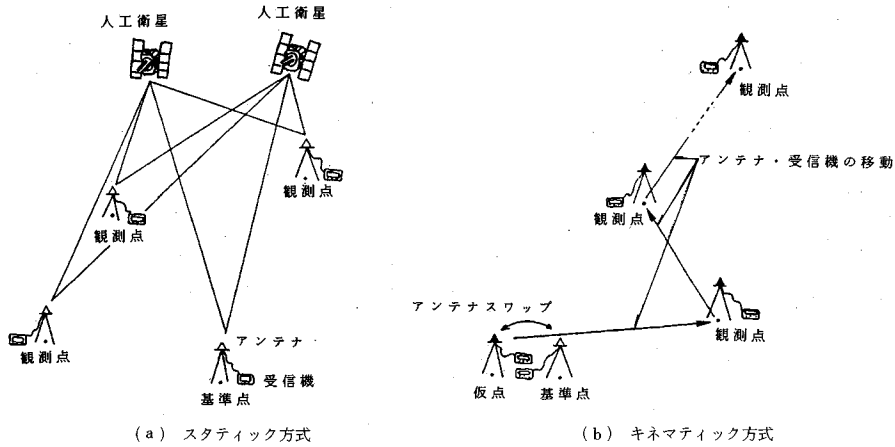
(2) キネマティック方式

キネマティック方式は、基準となる点に一個のアンテナを固定し、もう一個のアンテナ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(図-1(b)参照)。この方法によると、一つの観測点における観測時間は、数秒~数分程度でよいため、多数の観測点の座標を効率よく求めることができる。ただし、この方法は、観測を始めてから最低 4 個の衛星の電

* 正会員 工修 (株)フジタ技術研究所
(〒223 横浜市港北区大柵町74)

** 正会員 博 (工) 山口大学助教授 工学部社会建設工学科

*** 正会員 工博, Ph. D. 神戸大学教授 工学部建設学科



図一1 GPS 測量概念図

波をアンテナ移動中において、途切れることなく受信しなければならない。

なお、上に述べたいずれの測量方法においても、人工衛星から送られるメッセージを受信し、さらに搬送波の位相を測定(積算)して、それらを受信機に内蔵されたRAMに一旦記憶させる。そして、観測終了後に、データをコンピュータにダウンロードし、解析することによって観測点座標を求めるものである。その詳細は参考文献^{5)~7)}に述べられている。

3. GPS を用いた出来形測定システム

(1) システムの構想

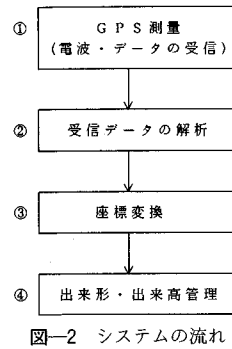
図一2に本研究で開発するGPS出来形測定システムの流れを示す。本システムは4つの部分から構成されている。

① GPS 測量

出来形測定では、現場において広範囲にある観測点をできる限り迅速に多数測量する必要がある。その場合、スタティック方式を用いると多大な時間を要することになるため、本研究では一点当たりの観測時間が短いキネマティック方式を採用することにする。キネマティック方式は多数の観測点に対して、効率よくしかもスタティック方式と同程度の精度で測量することが可能である^{17), 18)}。しかし、アンテナをいかに迅速にかつサイクルスリップ^{*}を起こすことなく移動させるかが重要な問題となる。

② 受信データの解析

受信データの解析方法は、現在までに概ね完成されている^{7), 16)}ので、これまでに提案されている方法を用いる



図一2 システムの流れ

こととする。

③ 座標変換

解析によって得られる観測点の座標は、世界測地座標系(WGS-84: World Geodetic System-84⁹⁾、図一3参照)に基づいているため、これを直接測量結果として用いることには問題がある。すなわち、実際の土木工事においては、一般に日本測地座標系に基づいた座標を用いるので、GPS測量によって得られる座標を目的にあった座標系に変換しなければならない。

④ 出来形・出来高管理

得られた観測点座標から、出来形の算定および出来高の管理を行う。

本研究は、以上に述べたシステムの構成要素のうち、①および③に焦点を絞り開発を行うものである。

(2) 開発事項

本研究における具体的な開発事項について述べる。

a) アンテナ自動水平保持装置

広大な領域における出来形測定をキネマティック方式によって迅速に行うために、観測点間の移動に車両を用いることを考える。そのとき、走行中および観測中にサイクルスリップが生じないように、アンテナを水平に保つ必要がある。すなわち、アンテナが移動中に傾斜する

^{*} 衛星からの電波が、障害物や雑音電波などの影響で受信中に中断することがある。その場合、測定している位相の連続性が失われる。この状態が発生したことをサイクルスリップを起こしたという⁵⁾。

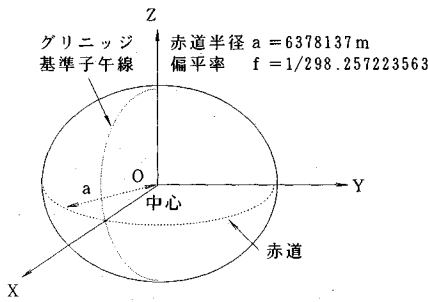


図-3 WGS-84 (World Geodetic System-84)

と、人工衛星からの電波が受信できなくなることがある。その場合、一つ前の観測点に戻って観測を継続するか、一旦、観測を中断し既知点から再度観測を始めなければならない。いずれの場合も、作業効率が著しく損なわれる。そこで、GPS 測量の作業効率と確実性を高める目的で、車両で移動中のアンテナを自動的に水平に保つ装置の開発を行う。

b) リンケージプログラム

GPS 測量の結果は、すでに述べたように準拠楕円体に基づく WGS-84⁵⁾ で表されるので、その結果を一般の土木工事に利用する場合、日本測地座標系に変換しなければならない。そこで、多数の観測点に対する GPS 測量の結果を迅速にかつ正確に変換するプログラムが必要である。本研究では、GPS 測量の解析結果と、出来形・出来高管理プログラムを直接結び付けるリンケージプログラムを開発する。

4. アンテナ自動水平保持装置

本研究においては、造成地のように比較的起伏の多い広範な領域を対象とする。そこで、アンテナを移動車に搭載して迅速に測量を行うことを考える。移動車には登坂能力 30° の軽車で小型の車両 (表-1 参照) を用いることにした。ここでは、その車両に搭載するアンテナ自動水平保持装置について述べる。

(1) 装置の概要

a) 目標制御精度

本研究で開発するアンテナ自動水平保持装置は、走行中および停止中において、アンテナをほぼ水平に保持するものである。GPS 測量においては、大気層による電波の伝搬経路の曲がりによる誤差を少なくするため、また、地上付近の障害物を避けるために、一般に水平面から 15° 以上にある人工衛星からの電波を受信することが望ましいと言われている⁹⁾。そこで、本研究では仰角 15° 以上の人工衛星を受信対象とする。一方、アンテナは地上付近の障害物などによる多重伝搬⁹⁾を避けるため、アンテナ水平面の感度を低く設計しており、その近傍から入射される電波についてサイクルスリップが生じ

表-1 移動車の仕様

車体部		アンテナ水平保持装置			
車種	950-AMX (クボタ)	重量	40kg		
主要寸法	500kg	全長	450mm		
		全幅	450mm		
		全高	360mm		
登坂能力	30°	制御範囲	±30°		
主要寸法	全長	2400mm	性能	走行時7分計水平保持精度	±5°
	全幅	1400mm		停止時7分計水平保持精度	±0.5°
	全高	1800mm			

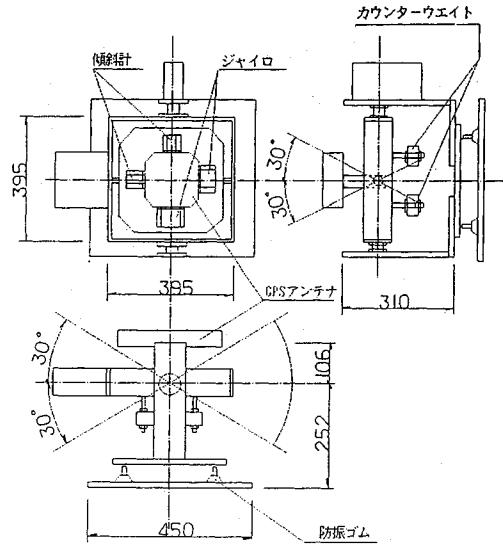


図-4 アンテナ自動水平保持装置

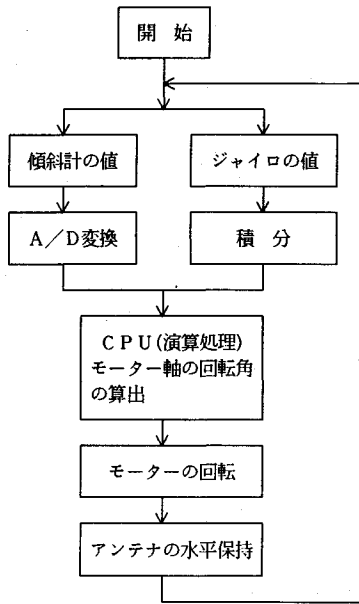
る可能性がある¹⁹⁾。したがって、アンテナが大きく傾くと高度の低い衛星についてサイクルスリップが生じる恐れがあるため、移動中においてアンテナが大きく傾かないようにする必要がある。

以上のような条件を考慮し、車両移動中におけるアンテナの水平保持精度を、安全性を見込んで±5°に設定し装置の設計を行った。一方、移動車を停止して測定する際の水平保持精度は、±0.5°を目標とした。また、アンテナを水平に保持するための制御範囲は、小型移動車の登坂能力が30°であるため、±30°に設定した。

b) 装置

上記目標精度のもとに開発したのが、図-4に示すアンテナ自動水平保持装置である。この装置は、アンテナ面の傾斜角を計測する傾斜計と角速度を計測するジャイロをそれぞれ2軸方向(ピッチ・ロール角)に1台ずつ設置した。また、アンテナ面を水平にする駆動部にはDCモータを使用している。

この装置は、従来からある船舶搭載アンテナの水平保持装置(2軸方向)²⁰⁾に改良を加え、陸上の凹凸地での急激な揺れに対しても水平を保持できるように制御部に



図—5 制御ブロック図

次に示す工夫を加えた。

c) 制御方法

アンテナ自動水平保持装置は、上述の傾斜計とジャイロの計測データを取り込み、アンテナ面の傾斜角に応じた修正量を算定し、DC モータを駆動させることによりアンテナ面を水平に保持する方法をとる。すなわち、車両走行中における急激な地面起伏に基づくアンテナ角度の変化に対しては、応答性の早いジャイロからのデータで制御を行い、停止時などの変化の少ない場合には傾斜計のデータを使い精度良く制御を行うものである。

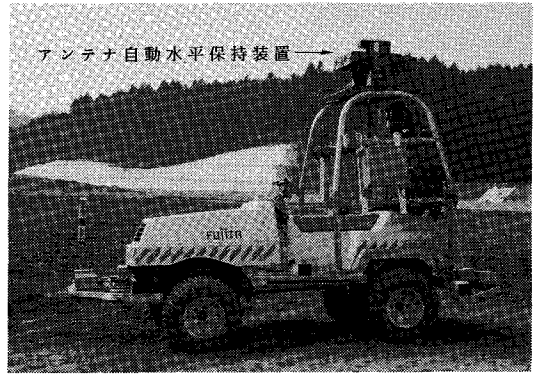
なお、機械的なカウンターウエイトを装備し、重量バランスによる水平保持も行っている。

図—5 に本装置の制御ブロック図を示す。

(2) 精度検証実験

アンテナ自動水平保持装置の水平精度の検証を行うため、装置を移動車両に搭載し(写真—1)、荒造成地で実験を行った。本実験においては、車両走行速度を約 5 km/h として、①平坦地(砂利道)、②一定勾配地(アスファルト舗装面)、③凹凸の激しい路面(造成地)に対して、車体とアンテナ面に設置した傾斜計でアンテナ自動水平保持装置の水平精度の検証を行った。走行距離は、いずれの実験においても 500 m 程度である。実験①～③について、結果の一部をそれぞれ図—6～8 に示す。それらの図から次のことがわかる。

図—6 および 7 に示すように平坦地や一定勾配地の場合、走行中の水平保持精度は概ね 5° 以内に保たれている。また、図—8 のように凹凸の激しい路面で車体が急激に揺れた場合、車体の動きに追従できなくなり、水平



写真—1 移動車両 (アンテナ自動水平保持装置搭載)

保持精度が 5° を越える場合があるが、10° を越えることはない。以上の結果、本実験で与えた条件の範囲では目標とした水平保持能力が概ね達成された。しかしながら、現段階では、迅速性および複雑な地形への適用などに問題が残されており、今後改良する必要があると思われる。

5. リンケージプログラムの開発

GPS 測量によって得た座標を日本測地系における平面座標系に変換するプログラムを開発する。

(1) 座標変換法

本研究では、以下に示す座標変換法¹⁵⁾を用いる。

a) WGS-84 座標の平行移動

WGS-84 に準拠している観測点の GPS 測量結果 (X_G, Y_G, Z_G) を平行移動して、東京測地系における座標 (X_T, Y_T, Z_T) として表す⁵⁾。

$$\left. \begin{aligned} X_T &= X_G + X_0 \\ Y_T &= Y_G + Y_0 \\ Z_T &= Z_G + Z_0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ただし、(X_0, Y_0, Z_0) は平行移動量で、ここでは筑波の国土地理院の VLBI 観測点の位置をもとに計算された値⁵⁾ $X_0 = 146.63 \text{ m}$, $Y_0 = -507.89 \text{ m}$, $Z_0 = -681.46 \text{ m}$ を用いる。

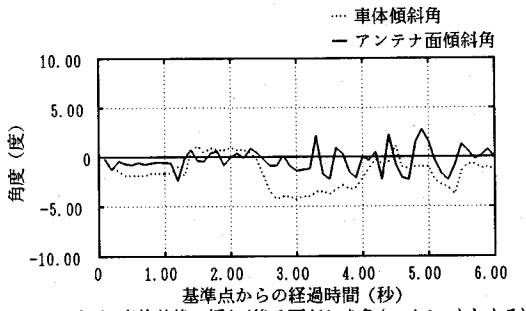
b) 経度、緯度および楕円体高さの計算

(X_T, Y_T, Z_T) から次式⁵⁾によって経緯度 (B, L) および楕円体高さ (H) を求める。

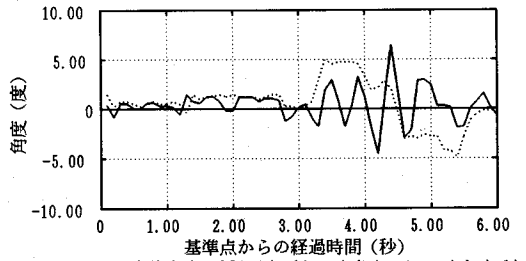
$$\left. \begin{aligned} L &= \tan^{-1}(Y_T/X_T) \\ (N+H)\cos B \cos L - X_T &= 0 \\ H &= Z_T/\sin B - N(1-e^2) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $N = a/(1 - e^2 \sin^2 B)^{1/2}$, $e^2 = f(2 - f)$ 、ただし、 a および f はベッセル楕円体の赤道半径および扁平率である。なお、式 (2) の第 2 式は B に関する非線形方程式であるが、Newton-Raphson 法を用いれば容易に解くことができる¹⁵⁾。

c) 平面直角座標系への変換

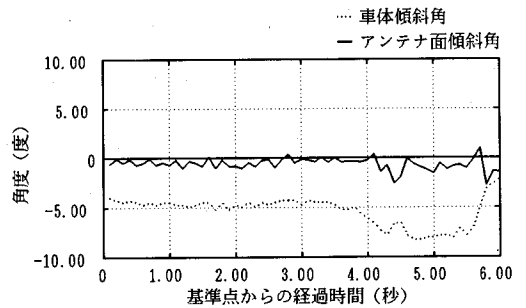


(a) 車体前後の揺れ(後ろ下がりを負(マイナス)とする)

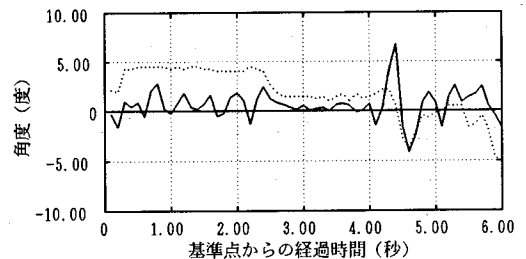


(b) 車体左右の揺れ(右下がりを負(マイナス)とする)

図-6 平坦地での測定結果



(a) 車体前後の揺れ(後ろ下がりを負(マイナス)とする)

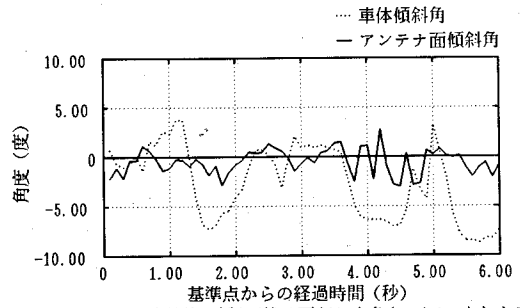


(b) 車体左右の揺れ(右下がりを負(マイナス)とする)

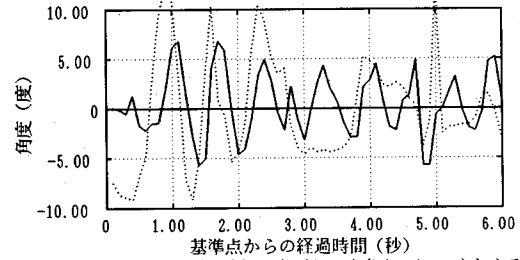
図-7 一定勾配地での測定結果

式(2)の結果から平面直角座標系 (X, Y) を通常の Gauss-Kruger 投影法²¹⁾によって求める。

上記の方法によって、平面直角座標系における基準点からの相対座標は、従来測量法による値とほぼ同程度の精度で求められることが明らかとなっている¹⁵⁾。なお、本研究では、観測点間の高さは楕円体高さの差 ΔZ を用いる。



(a) 車体前後の揺れ(後ろ下がりを負(マイナス)とする)



(b) 車体左右の揺れ(右下がりを負(マイナス)とする)

図-8 凹凸の激しい路面での測定結果

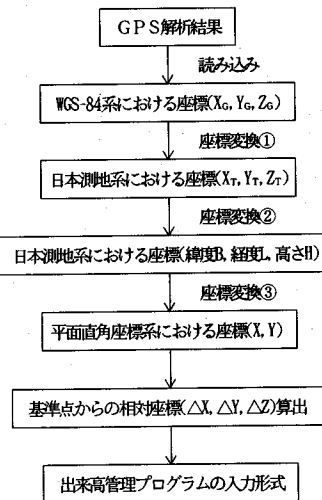


図-9 リンケージプログラムのフローチャート

(2) リンケージプログラム

(1) に示した座標変換法を用いて、キネマティック測量によって得た多数の観測点の座標を一括して変換し、出来形管理プログラムの入力データを容易に得ることのできるリンケージプログラムを開発する。そのフローを図-9に示す。

6. 現場における実証実験

ここでは、本研究で開発したシステムを実際の造成地における土量測定に適用し、その妥当性を検証する。

(1) 概要

実験は頂部面積が約 1 ha の盛土を使い、その土量を

表-2 実験で使した機器

GPS受信機	
機種	4000SST(Trimble Navigation)
性能	1周波受信機 L1波, C/Aコード解読
寸法	30cm(W)×35cm(L)×13cm(H)
重量	7.2kg
GPSアンテナ	
機種	キネマティックアンテナ
寸法	15.87cm(W)×15.87cm(L)×5.17cm(H)
重量	1.4kg
トータルステーション	
機種	GTS-310(トプコン)
性能	最小読み 距離1mm 角度1"

本システムおよびトータルステーションによる従来法を用いて測定し、両者の結果を比較するものである。

本システムの場合、以下の手順で測定する。

- ①まず、基準点を設置し、アンテナ水平保持装置を搭載した移動測定車を用い、観測点を任意に取りキネマティック方式で測量する。
- ②受信データの解析を実施し、座標値を求める。
- ③リンケージプログラムによって、GPS測量結果の座標変換および出来高管理プログラムの入力データを作成する。
- ④出来高管理プログラムにデータを転送し、土量算定を行う。

一方、トータルステーションによる従来法を用いて、以下の手順に従い測定する。

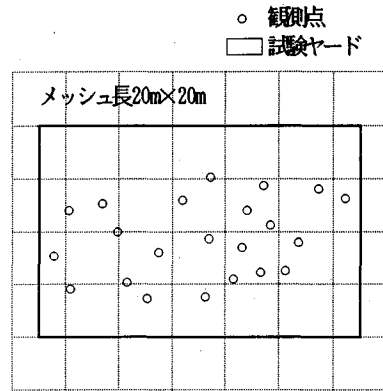
- ①基準点到トータルステーションを設置する。
- ②ターゲットを任意に取った観測点に移動し、その点の座標値および標高を求める。
- ③その結果から出来高管理プログラムを用いて、土量算定を行う。

本研究で用いたGPS受信機およびトータルステーションの諸元を表-2に示す。なお、本実験ではキネマティック方式による測量は、データ取得間隔0.5秒および1観測点の観測時間を7~8秒として行い、測量結果から土量を算定するために文献22)の出来高管理プログラムを用いることにする。

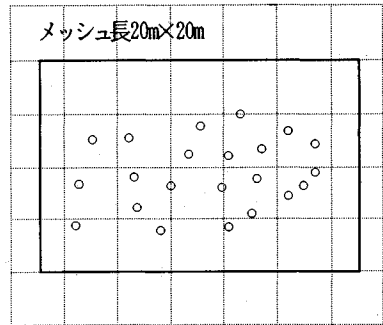
(2) 測定結果

実験ヤードの盛土頂部の平面図を図-10に、また、土量算定結果を表-3に示す。図-10において、観測点位置が、GPS測量とトータルステーション測量とで異なっているのは、観測点をそれぞれランダムに取ったためである。なお、観測点の数は22点であり、両測量において同数である。

実験の結果、本システムによって算定した土量は、ト



(a) GPS測量の場合



(b) トータルステーション測量の場合

図-10 観測点平面図

表-3 土量算定結果の比較

	トータルステーション	GPS測量
観測点数	22点	22点
土量算定精度	31.495m ³	31.672m ³ (+0.6%)

トータルステーションによるものと比較して、その差は0.6%程度である。これは、高さの差に換算すると20mm弱であり、土量算定上特に問題となる差ではないと考えられる。

本実験から、本システムは従来法程度の精度を有し、また、アンテナ自動水平保持装置搭載の移動車を用いることにより、現場におけるGPS測量の作業性が向上することが分かった。本実験は比較的小規模な現場において行ったが、GPS測量はより長基線に対しても適用可能であること、また、トータルステーションでは最低2人の測定者が必要であるのに対して本システムでは測定者1人でよいこと、さらに、基準点からの視通のないところにも、基準点を移すことなく測点を設けることができること、などから本システムは、測定範囲が大規模であるほど優れた方法になるものと思われる。

7. む す び

本研究では、GPSを用いた土工事の出来形測定システムを開発した。そのシステムは、①キネマティック方式、②受信データの解析、③座標変換、④出来形・出来高管理によって構成されている。ここでは特に、①および③に関して、アンテナを車両に取り付けるアンテナ自動水平保持装置、および解析結果と出来形・出来高管理プログラムを結びリンクージソフトの開発に焦点を絞って、基礎的な研究を行った。

アンテナ自動水平保持装置は、荒造成地における実験の結果、所定の水平保持精度を達成できることを確認した。また、WGS-84に基づく座標を日本測地座標系に変換し、さらに出来形・出来高管理プログラムに結びリンクージソフトを作成した。そして、本システムを実際の土量測定に適用して、従来の方法と同程度の精度で土量を算定できることを示し、また、作業性に優れていることを明らかにした。しかしながら、本研究で開発したアンテナ自動水平保持装置については、迅速性と複雑な地形に対する適用性に、まだ課題が残されている。

はじめに述べたように、GPS測量は長距離高精度測量法であること、基準点の視通を要しないこと、一人で作業が可能なこと、天候に左右されないことなど、従来の測量法より優れた数々の特徴を有している。したがって、本研究で開発したシステムは、現段階では比較的平坦な条件で施工されている土工事に適用が限られているが、今後改良を加えれば、より大規模で複雑な工事に対しても適用することが可能となる。

参 考 文 献

- 1) 土木学会編：土木工学ハンドブック第55編工事管理，技報堂出版，p.2247, 1989.
- 2) 浅井喜代治・坂井敬治・深見真一：造成工事における電算機の利用，土木施工，Vol.32, No.5, pp.17-27, 1991.
- 3) 服部進・村井俊治・柴崎亮介：写真測量を利用した出来形計測・管理システムの研究，写真測量とリモートセンシング，Vol.27, No.2, pp.32-42, 1988.
- 4) 日経コンストラクション：数分の写真撮影で出来形を測る，4-12, pp.42-47, 1991.
- 5) 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.
- 6) Wells, D.(ed.)：Guide to GPS Positioning, Canadian GPS Associates, 1986.
- 7) A. Leick：GPS, Satellite Surveying. John Wiley & Sons, 1990.
- 8) Bock, Y., R.I. Abbot, C.C. Counselman III, S.A. Gourevitch and R.W. King：Establishment of three-dimensional geodetic control by interferometry with the Global Positioning System, J. Geophysical Research, Vol.90, No.B9, pp.7689-7703, 1985.
- 9) 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.
- 10) Murria, J. and J. Abi Saab：Engineering and construction in areas subjected to subsidence due to oil production, Proc. 5th Int.(FIG) Symposium on Deformation Measurements and 5th Canadian Symposium on Mining Surveying and Rock Deformation Measurements, Fredericton, the University of New Brunswick Grafic Services, pp.367-373, 1988.
- 11) Strange, W.E. GPS determination of groundwater withdrawal subsidence, J. Surveying Engineering, ASCE, 115(2), pp.198-217, 1989.
- 12) Blodgett, J.C.：Monitoring Land subsidence in Sacramento valley, California, using GPS, J. Surveying Engineering, ASCE, 116(2), pp.112-130, 1990.
- 13) 清水則一・桜井春輔・血海章雄・古谷茂也：GPS(人工衛星測量システム)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講演論文集，pp.440-444, 1992.
- 14) Shimizu, N. and S. Sakurai：Application of the Global Positioning System(GPS) for monitoring a high cut slope, the 6th Federation Internationale des Geometres(FIG) Symposium on Deformation Measurements, Hanover, 1992(in press).
- 15) 桜井春輔・清水則一・古谷茂也・血海章雄：GPSによる大型放射光施設(Spring-8)の基準点測量，土木学会47回年次学術講演会(IV部門)，pp.648-649, 1992.
- 16) Trimble Navigation：Trimvec-Plus User's Manual(GPS測量ソフトウェア使用説明書(D1版))，1991.
- 17) Goad, O.C.：Kinematic Survey of Clinton Lake Dam, J. Surveying Engineering, ASCE, Vol.115, No.1, pp.67-77, 1989.
- 18) 清水則一・桜井春輔：GPSの岩盤変位計測への適用，資源と素材，Vol.109, No.1, pp.1-7, 1993.
- 19) B.R. Schupler and T.A. Clark：How different antennae affect the GPS observables, GPS WORLD, Vol.2, No.10, pp.32-36, 1991.
- 20) 多摩川精機(株)：空間安定駆動装置カタログ，1989年11月.
- 21) 森忠次：測量学Ⅰ基礎編，丸善，pp.11-13, 1979.
- 22) 中西馨・原英行：大規模造成工事における測量業務のシステム化，建設の機械化，日本建設機械化協会，Vol.408, No.2, pp.39-45, 1984.

(1992.8.28 受付)

DEVELOPMENT OF A SYSTEM FOR EARTHWORK PROGRESS MEASUREMENTS BY USING THE GLOBAL POSITIONING SYSTEM

Akira FUJIOKA, Katsuyuki KIKUTA, Norikazu SHIMIZU and Shunsuke SAKURAI

In this study, a new system for earthwork progress measurements by using the Global Positioning System (GPS) has been developed. The GPS is an innovative satellite surveying system under development by the US Department of Defense. This paper describes the developments of a device able to control the antenna automatically and a computer program developed for the transformation of coordinates obtained by GPS surveying to the ordinary plane coordinates.

In order to verify the practical applicability of the system developed in this study, a case study was conducted, and it can be concluded that the system is useful and effective for practical earthwork progress measurements.
