

高層構造物の出来形計測手法についての実験的研究

黒台昌弘¹・大林成行²・沖政和³・笠博義⁴

¹正会員 工修 ハザマ土木本部(〒107-8658 東京都港区北青山2-5-8)

²正会員 工博 東京理科大学理工学部土木工学科(〒278-8510 千葉県野田市山崎2641)

³正会員 ハザマ土木本部(〒107-8658 東京都港区北青山2-5-8)

⁴正会員 工博 ハザマ土木本部(〒107-8658 東京都港区北青山2-5-8)

最近の土木建築構造物は、ますます長大化・高層化の傾向にあり、これらに対応できる出来形計測手法が期待されている。本研究では、GPSの新しい適用方法として、出来形計測の1つである高層構造物の鉛直施工精度の計測に注目している。本研究では4つの実験を通じて、高層構造物の鉛直施工精度の計測にGPSを中核とした計測手法が適用可能かどうかについて検討するとともに、実用化に向けた計測手法を提案するものである。実験の結果、高さ100~160mの地点でもGPSによる計測が可能であり、また、従来行われてきた鉛直器等を用いた手法と比べて10mm程度の較差で鉛直施工精度を計測することが可能であることが判明した。

Key Words: GPS, high-rise structures, perpendicularity

1. はじめに

近年の土木建築構造物は、コンピュータ技術の革新による設計・施工技術の進歩等により、これまで見られなかった巨大あるいは高層と形容される構造物が増えてきている。例えば、明石海峡大橋は中央支間長約2000m、主塔の高さ約300mと、非常に長大かつ高層な構造物である。また、現在工事が進められている第二東名・名神高速道路等においては、山岳部を道路が縦貫するため、高さ100mを超える橋梁がいくつも計画されている。このような巨大な構造物を、限られた工期内に効率的かつ経済的に施工するためには、合理的な設計施工技術やそれに対応した施工管理が非常に重要となってくる。

この施工管理の1つとして、構造物の仕上がり形状を把握する出来形計測がある。例えば、高層構造物の鉛直方向の仕上がり精度を計測することがこれにあたる。ところが、構造物が高層になるほど計測する範囲が広がるため、従来行われてきた鉛直器等を用いた手法では計測が困難な場合があり、構造物の大きさに柔軟に対応できる新しい出来形計測手法の開発が望まれている。

こういった従来計測手法の問題点を解決できる技術の1つとしてGPSを導入した計測手法を挙げる

ことができる。GPSは計測距離にあまり影響を受けずに、3次元的な位置を迅速に把握できるといった特徴があり、構造物の出来形を計測するには有効な技術であると考えられている。すなわち、GPSを利用した新しい概念に基づく計測手法によって、より精度良く簡便に高層構造物等の出来形を把握することが可能となり、結果的に高層構造物の施工効率や施工精度の向上が期待できる。

2. 研究の目的と流れ

本研究では、GPSの新たな適用分野として、高層構造物の出来形を把握する技術に着目している。GPSをこのような技術に適用した例としては、高層構造物頂部の変動モニタリングへの適用が数例^{1)~3)}見られるが、高層構造物の出来形計測手法としてのGPSの利用は見あたらない。したがって、実工事への適用を考える場合には、実験等を通じて、高層構造物の出来形計測手法の基本的な性能や実用化に際しての問題点等を明確にしておく必要がある。

そこで、本研究では、高層構造物の出来形計測の対象として「構造物の鉛直性」に着目し、従来計測手法に代わる新しい手法を提案し、様々な実験を通じて、実用化に向けた指針を得ることとした。本研究

表-3. 1 従来から実施されている構造物の鉛直施工精度の計測手法

| | 計測装置 | 特 徴 | | 適用上の問題点 | 実施工での評価(H:構造物の高さ) | | |
|------|----------------------|----------|------|---|-------------------|----------|-------|
| | | 計測精度 | 作業時間 | | H<50m | 50≤H≤100 | H>100 |
| 内部計測 | トランシットの求心器 | 数mm | 5分/回 | 見通し穴必要 より高層になるほど求心点が不明瞭 | △ | × | × |
| | 下げ振り | 数mm | 5分/回 | 下げ振りの長さが長いほど精度劣化 高層になれば、風による影響あり 見通し穴必要 | ○ | △ | △ |
| | 鉛直器 (視準型) | 1/40000 | 5分/回 | 上下方向の見通しが必要 | ○ | ○△ | △ |
| | レーザー鉛直計 | 1/200000 | 5分/回 | レーザーが上層部まで届く開口部が必要 より高層になるほどレーザー光が不明瞭 | ○ | ○ | △ |
| 外部計測 | トランシット トータルステーション | 約±10mm | 1分/回 | 十分離れた地点から視準する必要あり 精度は気温、天候の影響大 | ○△ | △ | △ |

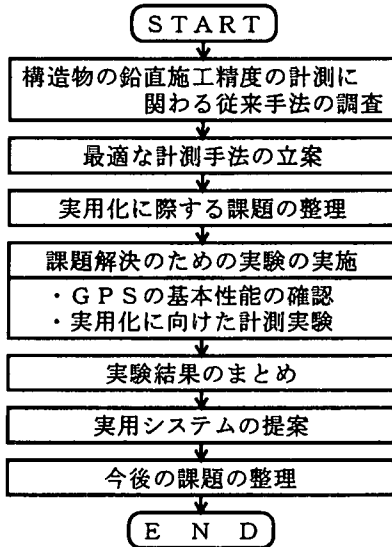


図-2. 1 本研究の流れ

の流れを図-2. 1に示す。まず、従来手法の調査結果から現状技術の問題点を整理し、最適な計測手法に必要な機能を列挙する。また、実用化に際する課題についても整理する。次に、このような課題を解決するための実験を実施し、実験結果を検討することによって、実用化に供する計測手法を提案する。なお、ここで言う鉛直性とは、構造物が鉛直方向に正確に施工されているかどうかの状態を意味し、後述するように「鉛直施工精度」という指標を用いて鉛直性を把握することとした。

3. 高層構造物の鉛直施工精度の計測について

(1) 従来手法の概要とその問題点

橋脚の主塔や高層ビルなどでは、構造物の形状や輻輳する他の作業を考慮して、表-3. 1に示すような計測手法を用いて鉛直施工精度を確認している。この表のように、鉛直施工精度の計測手法は構造物の内部での計測と外部からの計測に分けられる。

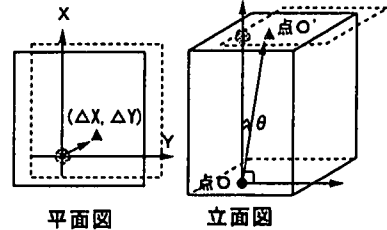


図-3. 1 鉛直施工精度の表現方法

内部での計測には、求心、下げ振り、鉛直器(視準型)、レーザー鉛直計等を用いた手法がある。これらはすべて構造物内部の開口部を利用して行われるもので、より高層になるほど機器の据え換え等が生じ、計測誤差が累積するといった欠点を有している。また、開口部が他の作業によって閉じられることもあり、計測が不可能となる状況も生じる。

一方、外部からの計測にはトランシットやトータルステーションを用いた手法がある。この手法では、対象とする構造物を異なる方向(普通は90度異なる2方向)から視準し、構造物の傾きを計測するものである。このような機器は仰角の増加に応じて計測誤差が大きくなる特性を持っているため、仰角が小さくなるように視準距離を長くとる場合が多い。ところが、視準距離が長いために、対象物までの視通を確保するのが難しい場合があること、計測結果が気象条件の影響を受けやすくなること等の弊害も生じる。

(2) 鉛直施工精度の考え方を導入した新しい計測手法の提案

a) 鉛直施工精度の考え方

本研究では、構造物の鉛直性を評価する際に「鉛直施工精度」という指標を用いるが、これには図-3. 1のように2種類の表現方法が考えられる。1つは、構造物の上下方向の基準となる軸の傾きを角度や割合で表示する方法で、計測高さに対して10秒あるいは1/50,000といった標記がなされる。これに対して、計測高さに影響されない方法として、同一鉛直軸上

に存在する上下層部の測点の平面的なずれを、座標差($\Delta X, \Delta Y$)として表現する方法がある。なお、実工事においてこのような管理基準値を設定する場合、計測機器の公差や構造物の設計目標値、さらに構造物の変形等を考慮する必要がある。

例えば、前者の方法で、構造物の鉛直施工精度の管理基準(許容範囲)を1/50,000と設定した場合、高さ100mでは2mm、高さ400mでは8mmのように高さ毎に異なった基準が設定される。すなわち、高層ほど計測許容誤差範囲が広くなり、構造物の正確な鉛直方向の施工管理が困難になるものと考えられる。したがって、高層構造物の場合でも、管理基準値が高さによらず一定となる後者の方法、すなわち、座標差による管理の方が現実的であると考えられる。また、公共座標系に基づく座標値を採用すれば、計測地点が変わっても、X方向やY方向は常に一定の方角を示すことになり、前者の角度管理を行った場合にはできなかった傾きの方角も示すことができる。このように、座標差を用いて鉛直施工精度を表現した場合は、いわゆるベクトルの長さと同じ向きが同時に表現できるという利点がある。

座標差を用いた鉛直施工精度の計測手法は以下のように考えることができる。上層部の測点O'の座標を($X_{0'}, Y_{0'}$)、下層部の測点Oを(X_0, Y_0)とすると、X方向の鉛直施工精度(ΔX)、Y方向の鉛直施工精度(ΔY)は、単純に以下のように記述できる。

$$\left. \begin{aligned} \Delta X &= X_{0'} - X_0 \\ \Delta Y &= Y_{0'} - Y_0 \end{aligned} \right\} (1)$$

すなわち、何らかの手段で上層部と下層部の測点の座標値を計測できれば、構造物の鉛直施工精度を単純な計算によって求めることが可能となる。

b) 新しい計測手法の条件

前述の従来手法の問題点と本研究で導入した鉛直施工精度の考え方に基づいて、計測対象構造物が高層になった場合でも適用できる計測手法が具備する条件を整理すると以下の通りである。

①計測手法について

- ・構造物内部での上下方向の視通が不可になっても計測が可能。
- ・他の作業に極力影響を与えない。また、他の作業から影響を受けない。
- ・計測結果に対して信頼性確保のための検証手段を有する。

②計測結果、計測精度について

- ・高さに影響されることなく一定の計測精度が確保できる。
- ・計測結果が直接座標値として表現できる。
- ・計測対象構造物までの距離(計測距離)や気象条

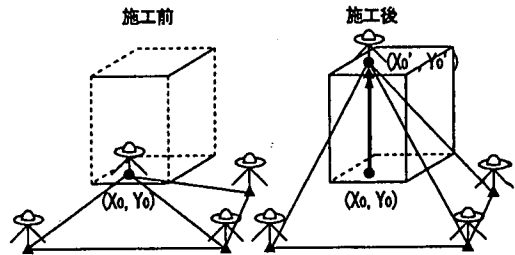


図-3. 2 GPSを用いた鉛直施工精度計測手法の概念図

件に影響されにくい。

c) 新しい計測手法の考え方

上述の条件をまとめると、①構造物の外部から計測可能であること、②構造物の高さに影響されることなく高精度な計測が保障されること、③計測結果が直接座標表示されること、の3点に要約できる。これらの要件を満足する手法として、従来手法の見直し、新しい計測装置の検討等を行った結果、測点間の見通しが必要でない、任意の地点の3次元座標が得られるといった特長を持っているGPSを導入した計測手法が適切な手法であるものと考えられた。

そこで、本研究で提案するGPSを用いた鉛直施工精度計測手法の概念図を図-3. 2に示すとともに、その考え方を以下に記述する。

まず、構造物周辺に配置した複数の座標既知点から、下層部の測点Oの座標値(X_0, Y_0)を求める。次に、上層部の測点O'($X_{0'}, Y_{0'}$)を計測し、式(1)によって鉛直施工精度を計算する。施工の進捗によっては、下層部の測点OをGPSによって計測できない場合も考えられる。この場合はトランシット等を用いて座標値を求めるか、後述するGPS偏心測量という手法により求めるか、あるいは施工前にGPSによって求めておくといった手法が考えられる。

なお、本研究で提案する新しい計測手法の中核をなすGPSの詳細な特徴については、これまでに多くの文献^{11)~13)}に示されているので、ここでは紙面の都合で割愛する。また、構造物の高層部でのGPSによる実測は理論的には可能であるが、それを実証した実験は少ない。したがって、新しい計測手法の実用化に向けて、実際に施工中の構造物において、高層部でのGPSの適用性や鉛直施工精度の計測の問題点について検討しておく必要がある。

(3) 実用化に向けた課題の整理

前述のようにGPSを用いた高層構造物への適用事例が少ない^{11)~13)}こともあって、鉛直施工精度の計測手法にGPSを導入した場合の評価基準が明確でない。そこで、本節では本研究で提案する計測手法の基本性能に加えて、実施工に適用する場合の課題を

表-3.2 実用化に向けた課題の整理

| 課題 | 検討内容 | 実験番号 |
|--------------|--------------------------------------|------|
| ①構造物本体の揺れの影響 | 実験施設における実測を通じて影響の有無を判断 | 1 |
| ②鉛直線偏差 | 計測精度を向上させるための有効な補正方法を、実測データに基づいて検討 | 2, 4 |
| ③受信障害物の配置 | データ受信の障害となる構造物とデータ受信位置との関連性を検討 | 3 |
| ④施工機械の稼働 | タワークレーンが受信位置上空を旋回する場合のデータ受信状況を確認 | 3 |
| ⑤計測時間 | 効率的な計測手法を検討するため、データ受信時間と計測精度との関連性を把握 | 3 |
| ⑥下層部測点の計測方法 | 下層部測点がGPSによって計測できない場合の方法について検討 | 4 |
| ⑦計測精度 | 高層構造物上層部での計測の可否とともに、計測精度について検討 | 1~4 |

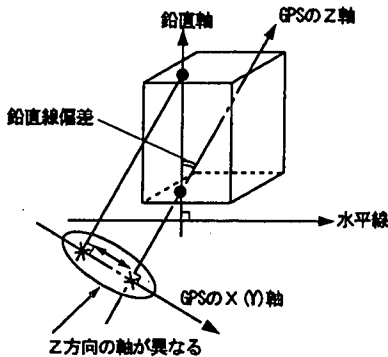


図-3.3 鉛直線偏差について

整理した。その結果を表-3.2に示す。

まず、高層構造物上でのGPSの基本性能として、①構造物本体の揺れの影響、②鉛直線偏差といった2つの問題が挙げられる。①については、高橋脚等は風によって微妙に動揺しており、そのような環境の中での実測が可能かどうか検討するものである。

②の鉛直線偏差とは、従来測量における鉛直軸(重力方向)とGPS固有座標系のZ軸が形成する角度のことを意味する。具体的な例を図-3.3に示すが、同一鉛直軸上にあるはずの2点をGPSで計測した場合、GPSのZ軸が鉛直軸に対して傾いているため、GPS計測による結果が同一のZ軸上にはないという現象が生じ、この傾きが鉛直方向に合致するよう補正する必要がある。

次に、実工事への適用を考えた場合は、③~⑥の課題について検討が必要である。検討内容は表中に示すが、特に⑥については実施工への適用を考えた場合、非常に重要な検討事項である。すなわち、提案した計測手法において、下層部の測点をGPSによって計測できない場合はトランシット等の測量機器を用いた手法が考えられるが、上層部・下層部の測点を計測した機器の相違による計測結果の整合性の問題が新たに生じてくる危惧がある。したがって、下層部の測点についてもGPSで計測ができるような手法を考える必要がある。

最後に、本計測手法の全体の評価として計測精度

についての検討がある。本研究で取り扱うような計測分野では、計測値や座標値の真値を把握することは実際問題として不可能であるため、評価基準をどのように設定するのが重要になる。そこで、本研究で提案する計測手法を評価する場合には、各実験場所や施工現場で最も適切と思われる従来手法(鉛直器(レーザー型、視準型)を用いた計測、トータルステーションによる距離計測)による結果との比較を試みた。つまり、既に利用されている従来手法の結果がその手法の適用対象となる構造物の高さにおいて、実用上問題のない精度であるものと考え、この結果を基準として新しい計測手法による計測結果と比較することによって、計測精度を評価するものとした。なお、従来手法による鉛直施工精度の目安として、鉄骨精度測定指針⁵⁾によれば、高さ92mを越える構造物では30mm以内の許容範囲が設けられている。

4. GPSを用いた計測手法の性能評価

本章では、3章で整理した課題を検討することを目的に4つの実験を実施した。各々の実験の目的や内容は表-3.2で示した7つの課題に相当し、それぞれの課題に対して実施した実験の番号を表中右側に示した。以降では、4つの実験について、その概要と得られた結果を整理し、本章の最後で実用化に向けた鉛直施工精度計測手法を提案する。

(1) 実験1(基本性能の把握、その1)⁶⁾

a) 実験概要

実験1では、従来技術の1つであるレーザー鉛直計により求めた鉛直上方の測点の平面座標を基準値として、この値とGPS計測により求めた値とを比較することにより、構造物本体の動揺が計測結果に及ぼす影響を考察し、計測精度を把握する。

実験場所の概要を図-4.1に示す。高さ108mの実験タワーの地上部に点Oを、最上階に点O'を設置し、タワーから離れた地点にGPSの基準点となる点Aと点Bを設置した。次に、レーザー鉛直計を実

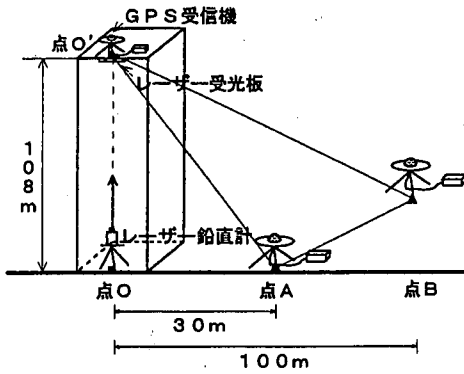


図-4.1 実験場所の概要(実験1)

表-4.1 使用した計測機器

| 種類 | 機種 | 計測精度 |
|---------|--------------|-----------|
| レーザー鉛直計 | MET2L(マキ) | 1/100000 |
| GPS受信機 | GP-R1D(トプコン) | 水平精度:±5mm |

表-4.2 実験結果(単位:m)

| 点O' | レーザー鉛直計 | GPS(平均) | 差 |
|-----|------------|----------------------------------|-------|
| X座標 | -36410.128 | -36410.126 ($\sigma=0.003$) | 0.002 |
| Y座標 | -42018.122 | -42018.113 ($\sigma=0.002$) | 0.009 |

験タワーの吹き抜け部分の点Oに設置し、最上階でレーザーを受光して、点Oを鉛直上方に盛り替えた点O'を求め、点A、B、O'の3点にGPSを設置した。そして、1時間のスタティック測位を3回実施して点O'の座標を求めた。なお、点Oの座標値はトータルステーションを用いて別途求めた。使用した機器は表-4.1の通りである。

b) 実験結果の整理

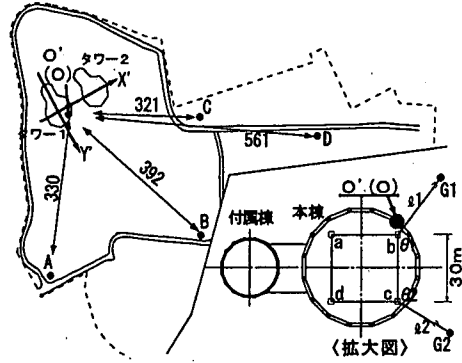
表-4.2に示すように、GPSによる計測の結果はレーザー鉛直計による値と比較して、X座標で2mm、Y座標で9mmとなった。また、ここで使用した実験タワーのような細長い建造物の最上階では、レーザー光の受光位置の変動から判断すると、風の影響により数cm程度の揺れが観測されたが、計測結果からは数cmもの差は認められていない。この理由としては1時間の受信データを解析することによって受信データが平均化され、タワーの揺れを平滑化した解析が行われていることが推定される。

以上より、従来技術であるレーザー鉛直計の計測結果にも計測誤差を含んでいるが、XY座標とも10mm以内の較差で鉛直施工精度の計測が可能であることが確認できた。

(2) 実験2(基本性能の把握、その2)"

a) 実験概要

まず、タワー周辺に地上基準点として点A、B、C、



注) 数値は点O'と各地上基準点間の距離(単位:m)

図-4.2 実験2の測点配置図

表-4.3 使用した計測機器

| 種類 | 機種 | 計測精度 |
|---------|---------------|-----------|
| レーザー鉛直計 | DL2(WILD) | 1/200000 |
| GPS受信機 | GP-R1DY(トプコン) | 水平精度:±5mm |

Dを配置した。次に、施工中の地上から160mのフロア(41階)において、周囲にGPSデータの受信障害物が少ない位置に点O'を設置し、その鉛直下方に点O(2階)を設置した(図-4.2)。鉛直施工精度の計測対象とした点O'と点Oは、直接レーザー鉛直計で視準できる位置関係ではなかったため、設計図上で平面的に同じ位置にある箇所をトラバース測量によって求めた。したがって、設計図通りに施工されていれば、この2点は平面的には一致するはずである。

また、本工事において規定されていた建造物の鉛直性の計測精度(従来手法による計測精度)は、距離計測誤差=5mmと人為的誤差=5mmを合わせて±10mmとされていたため、実験2ではGPSを用いた計測の許容誤差を、設計値に対して±10mmと設定した。

実験は、GPSデータ受信におけるタワー本体の振動の影響を極力少なくするため、型枠等を揚重するタワークレーンとコンクリート圧送のためのポンプが停止する夜間に実施した。そして、4点の地上基準点と点O'については、1回あたり3時間のデータ受信を合計3回(A、B、Cセッション)実施した。また、この作業と並行して下層部の点Oの座標値を地上基準点4点を基にしたトラバース測量によって求めた。そして、上下の測点の座標値を比較することによって建造物の鉛直施工精度を求めた。

b) 計測結果の整理

i) 計測の信頼性の確認

図-4.3にA、B、C各セッションにおけるGPSデータの処理結果を示す。ここに示したRMS(標準偏差)とは2つの測点間のGPS計測の精度を示すもので、値が小さいほど計測精度がよいことを

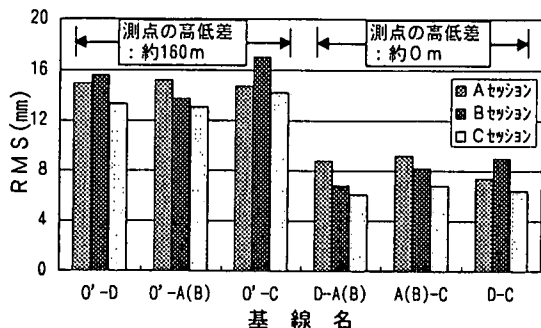


図-4.3 GPSデータ処理結果

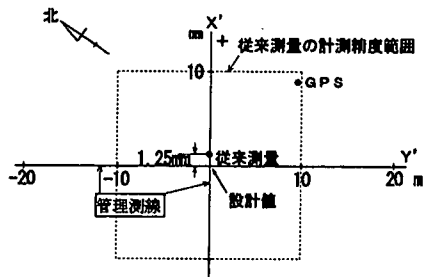


図-4.4 鉛直施工精度計測結果の比較

表す。まず、同一基線におけるセッション間の較差は各基線とも数mmであり、安定したデータ処理が行われたことが分かる。また、今回の計測では、最もRMSの値が小さいCセッションを最終成果とした。

ところで、Cセッションでは地上基準点間(測点間の標高差0m)の計測結果のRMSが6mm前後であることに対して、点O'と地上基準点間の計測(測点間の標高差160m)では約2倍の13mmとなっている。測点間に標高差があるGPS計測の場合、GPSデータが大气中を通過する際の伝搬遅延量が問題となり、この遅延量を算定する場合に測点間の気象条件の相違が計測結果に影響を与えられている⁴⁾。したがって、前出のRMSの差の出現理由としては、地上160mもの上層部に位置する点O'と地表面との気温差、湿度差、気圧差等が受信したGPSデータに何らかの影響を与えている可能性があることが考えられる。したがって、本来は、取得したデータと気象データの関連性について詳細な検討が必要であるが、本実験で受信したデータの精度については、基線長に対するRMSの大きさ(1/20,000(基線O'-C))から高精度の計測ができていると判断できる。

ii) 鉛直施工精度の計測結果

図-4.4に計測結果を示す。トランシットを用いた従来手法による複数回の計測値の平均値では、設計値と比較して、X'方向に1.25mmの変動が見られる。一方、本手法ではX'方向に9mm、Y'方向に約10mm傾いているとの結果が得られた。この結果では

表-4.4 水準測量の信頼性について

| 地上基準点の 水準値の誤差 | 点O'座標値の変動量 | |
|------------------|------------|---------|
| | 東西方向のズレ | 南北方向のズレ |
| +10mm | -7.7mm | +5.9mm |
| +100mm | -12.8mm | +5.1mm |

単純に試算すると従来手法の方が10倍程度も精度が良いと判断できるが、従来手法の結果は1000mも離れた2つの基準点を測距した結果を補正した数値であり、この測距結果には5mm程度の誤差(2mm+2ppm×D, Dは測点間距離)が含まれた結果であると考えられる。したがって、本実験で実施した計測が従来手法より精度が劣るものと判断するにはさらに検討が必要である。また、GPSによる計測手法では、前述のように、上層部、下層部の測点ともにGPSによる計測が望ましいとしているが、今回は下層部の測点をトラバース測量によって求めており、このことが計測精度に影響を及ぼしている可能性が考えられる。この点については実験4において検討するが、本実験では、得られた計測結果が設計値に対して±10mmの範囲内に収まっており、GPSを用いた高層構造物の鉛直施工精度計測は従来技術と同様に適用可能であると考えられる。

c) 鉛直線偏差について

この問題は、GPS特有の問題として必ず取り上げられる問題である。特に高低差のある測点間の計測を実施する場合は測点間のz座標値の差が大きくなるにしたがって、この偏差による影響が増大する傾向があることから、通常よりも正確に補正する必要がある。この偏差の補正は、地上基準点における水準測量結果とGPS計測結果を一致させるような処理⁹⁾が行われるため、基準となる水準測量は非常に高精度に実施しておく必要がある。

例えば、表-4.4は前出の参考文献8)に示された方法を用いて、本実験の実測データから試算したものであるが、地上基準点の1つの水準値に10mmの測量誤差が含まれていたとすると、上層部の測点が北に約6mm、西に約8mm移動することを示している。100mmの誤差を内包する場合も、同様に考えることができる。このように測点間の高低差が大きい計測では、鉛直線偏差を高精度に補正することが重要であることが判る。

(3) 実験3(実用化に向けての検討、その1)⁹⁾

a) 実験概要

高層構造物の施工中にGPS計測を実施する場合は、施工機械の稼働や上層部における構造物の形状によりデータの受信障害(GPSデータの遮断)が発

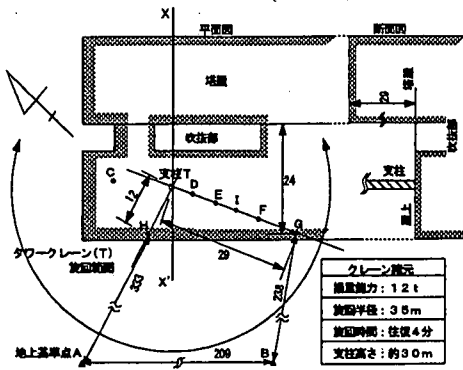


図-4.5 実験3の測点配置状況(単位:m)

表-4.5 使用した計測機器

| 種類 | 機種 | 計測精度 |
|------------|--------------|------------|
| トータルステーション | GTS-4(トプコン) | 水平精度: ±3mm |
| GPS受信機 | GP-R1D(トプコン) | 水平精度: ±5mm |

生することが予想されるため、このような現象が計測結果に与える影響を把握しておく必要がある。また、これに対する対策の1つとして、データ受信時間の短縮が有効であると考えられるので、この点についても合わせて検討した。実利用を前提とした計測手法の検証では、このような検討も重要な意味を持っている。

実験場所は施工中の高層ビル現場の屋上(高さ:100m)であり、測点の配置や構造物の形状、タワークレーンの位置は図-4.5の通りである。地上基準点を2点設け、ビル屋上では実験効率を考慮して2台の受信機を順に測点上にセットして作業を行なった。また、GPSの計測精度を確認するため、各測点間の距離をGPSとトータルステーションで求め、両者を比較した。使用した機器を表-4.5に示す。

b) 実験結果の整理

i) データ受信位置と障害物との位置関係について

稼働中の現場における実験可能時間帯と測点数の関係から、1回1測点あたりの計測時間の長さ制限があったため、スタティック測位(受信時間1時間)と精度が同等とされている⁴⁾クイックスタティック測位(受信時間15分)により実測を行った。

図-4.5に示すように、幅の広い形状をしている構造物の一部(塔屋)が受信位置の東側の上空をほとんど遮っているため、実験当初より受信確率が低くなることは予想されていた。図-4.6に実験結果を示す。構造物壁面より最も離れた位置にある点G、H(共に離間24m・仰角50°)において、約50%の確率で計測ができているが、この2点以外では結果が得られていない。このことから、本実験ではこのような幅の広い障害物の付近で計測を実施する場合

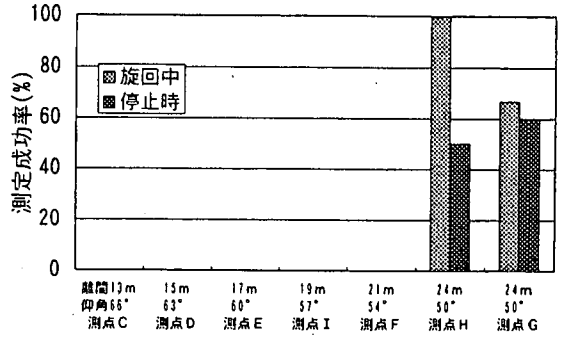


図-4.6 実験3の結果

表-4.6 距離計測結果の比較

| 方法 | クレーン旋回時 | クレーン停止時 | トータルステーションとの差 |
|------------|---------|---------|---------------|
| スタティック | — | 31.495m | 4mm |
| クイックスタティック | 31.495m | — | 4mm |
| トータルステーション | 31.491m | | |

は、仰角が50°以下となるように測点を配置する必要があることが判明したが、この仰角の基準値は実験時刻の衛星配置に影響するものであり、一般論としてはさらに検討を要するものと考えられる。

ii) 施工機械稼働時の受信状況について

前述の実験において計測結果が得られた点G、点Hについて、クレーンの旋回による電波の遮断について検討した。クレーンのブームが受信位置の直上を通過する度にGPSデータが遮断されるため、計測不可能であると予想されたが、図-4.6に示すように、旋回中でも十分計測できることが確認できた。なお、クレーン停止時より旋回中の方が測定成功率が高い傾向にあるが、これはクレーン旋回中の時間帯の方が衛星配置や衛星個数といった衛星条件が整っていたことが理由として考えられる。

iii) 計測精度、受信時間の検討

高層部でのGPS計測の精度を確認するために、点Gと点H間の計測距離を比較した。GPSによる計測については、クレーン停止状態で改めて1時間のスタティック測位を行なった。表-4.6に点間距離の比較結果を示す。このように従来測量とGPS計測の結果の較差は4mm程度であり、スタティック測位、クイックスタティック測位共に、計測精度の面では問題のないことが示された。ここで、クイックスタティック測位については、クレーン停止時には、実験実施時刻と衛星飛来時刻の関連から点G、点Hで同時にデータ受信が成功したケースがなかったため、クレーン旋回時のデータにより比較検討した。前述の検討結果によりクレーンの稼働がGPS計測に与える影響は少ないものと判断されるので、このような比較ケースとした。

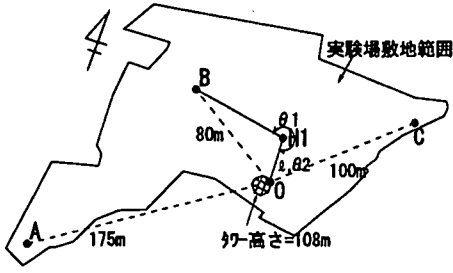


図-4.7 実験4の概要図

(4) 実験4 (実用化に向けての検討, その2)¹⁰⁾

a) 実験概要

構造物の施工中には、下層部の測点にGPSを直接設置することができないため、従来のトラバース測量により下層部の測点座標を得る手法が考えられる。事実、実験1と2では、その手法により鉛直施工精度を求めたが、この手法では次のようなことが懸念される。すなわち、上下の測点を異なった機器で計測した場合、各々の計測結果に内包される誤差(器械誤差、人為的誤差等)が異なるため、場合によっては鉛直施工精度の数値に影響を及ぼすことが考えられる。したがって、上層階の測点をGPSで計測する場合は、下層部の測点もGPSで求める方がより誤差が少なくなるものと考えられる。

以上のような理由から、実施工での計測を模擬するような実験ケースを設定し、実用化に向けた計測手法の指針を得るために、下層部測点の計測手法について検討することとした。さらに、実測データに基づき、実験2で実施した鉛直線偏差が計測に及ぼす影響を把握するための試算も行った。

また、本実験で採用したGPSによって下層部の測点を求める手法とはGPS偏心測量といわれるもので、詳細は文献11)に譲るが、その基本的な概念を図-4.7に示す。まず、GPSデータが受信できない下層部の測点Oから少し離れた地点に、GPSデータの受信可能な測点H1を設置する。次に、点B, H1, Oの間の位置関係(水平角 θ_1 、偏心距離 l 、高度角 θ_2)をトータルステーション等で求めておき、この結果とGPSデータを合わせて解析することによって、あたかも下層部の測点でGPS計測を行ったかのような結果を得ることができる。この手法は文献11)にも示されているが、GPSデータの直接受信が困難な測点でも、直接受信した場合と同様の精度が確保できることが確認されている。

なお、本実験では、表-4.7に示すように、直接上層部の測点を視準するタイプの鉛直器を用いてタワー下層部の測点Oを上層部に移設し、点O'を設

表-4.7 使用した計測機器

| 種類 | 機種 | 計測精度 |
|----------|---------------|------------|
| 鉛直器(視準型) | PD3(ソキ7) | 水平精度: ±6mm |
| GPS受信機 | GP-R1DY(トブコン) | 水平精度: ±6mm |

表-4.8 実験4の検討ケース

| ケース | GPS設置測点 | 方法 | データ解析測点 | 実施工における計測時期 |
|-----|-----------------|-------|-----------------|-------------------|
| ① | A, B, C, H1, O' | GPS | A, B, C, H1, O' | 施工中 |
| ② | A, B, C, H1, O' | GPS | A, B, C, O' 上部 | 施工中 (ケースAとの比較) |
| | | | A, B, C, H1 下部 | |
| ③ | A, B, C, O' | GPS | A, B, C, O' 上部 | 施工前 |
| | A, B, C, H1 | GPS | A, B, C, H1 下部 | |
| ④ | A, B, C, O' | GPS | A, B, C, O' 上部 | 施工中 |
| | A, B, C, O | トラバース | A, B, C, O 下部 | |

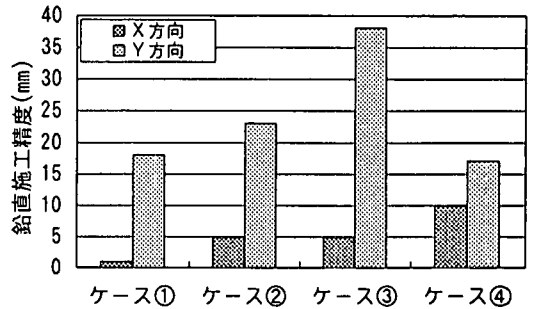


図-4.8 実験4の結果

置した。すなわち、従来手法によって設置された点O'は点Oの鉛直上方に位置するものとして、以降の議論を進めている。

b) 実験結果の整理

i) GPSデータ解析方法の検討

実施工での計測を想定して、表-4.8に示すような検討ケースを設定した。ケース①はこの実験で検討するGPS偏心測量を用いた方法であり、ケース②はケース①のデータ処理方法の有効性を検討するために設定したものである。ケース③は上下の測点ともにGPSで求めるものであるが、下層部は上層部が施工される前に計測し、上層部は施工中に計測することを想定している。ケース④は実験1, 2で実施した方法で、下層部の測点をトラバース測量により求め、上層部の測点をGPSにより求めるものである。以上、本実験では、4つのケースの比較により鉛直施工精度の計測手法の検討を行った。

実験の結果を図-4.8に示す。濃色がX方向、薄色がY方向の鉛直施工精度(mm)を示している。なお、ケース①~③のX方向の値が計測機器が持っている精度よりも小さい値となっているが、これは基線ベクトル演算の過程で点Oや点O'の座標値の誤差が最も小さくなるように最適化されたことによるものである。

表-4. 9 鉛直線偏差の計測結果の影響

| 地上基準点の 水準値の誤差 | | 座標値の変動量 | |
|------------------|-----|---------|-------|
| | | X方向 | Y方向 |
| +1 mm | 点O' | -1 mm | +1 mm |
| | 点O | 0 mm | 0 mm |
| +10mm | 点O' | -9 mm | +3 mm |
| | 点O | 0 mm | 0 mm |

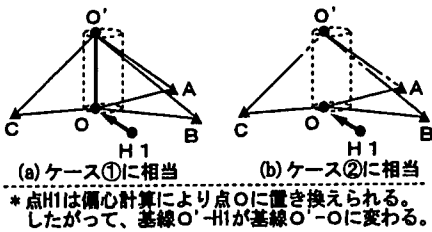


図-4. 9 基線ベクトル構成

まず、ケース①とケース③の比較により、ケース①の方が計測精度がよいことが判る。このことから次のようなことが言える。すべての測点でGPSデータを同時受信したということは、ほぼ同量同質のデータが取得できたと考えることができる。逆にケース③では点O(H1)を求めるための計測と点O'を求めるための計測の時刻が異なっており、両者の計測で共通する点A, B, Cであっても、受信している衛星やその個数が異なり、同量同質のデータは取得できていないことになる。すなわち、ケース①とケース③との鉛直施工精度の差は、受信したデータにこのような差があることに起因していることが判る。次に、ケース①とケース④を比較することにより、特にX方向については、上下間で異なる計測手法による鉛直施工精度の計測よりも、同じ手法による計測の方が精度の良い結果が得られることが判る。

また、図-4. 9によりケース①(図中(a))とケース②(図中(b))を比較する。このケースの比較は測点間のベクトルO'-O(H1)を求めるか否かの問題に帰着できる。GPSによる位置計測は測点間のベクトルを決定することであり、このベクトルが決定されて初めて2点の位置が正確に定められる。すなわち、(b)のようにベクトルO'-O(H1)が存在しないということは、点O', 点Oの3次元的な位置関係が正確に決定できないということであり、このことは鉛直施工精度の差として明確に現れている。

以上の結果から、図-4. 9(a)に示すように、上下の測点で同時にデータを受信して、基線ベクトルO'-O(H1)を得るケース①の方が精度の良い結果が得られることが明らかとなった。すなわち、本実験において、新しい計測手法として具体的なデータ受信方法やGPS偏心測量等のデータ処理方法を示すことができ、このことは新手法の実用化に向けての重要な成果であると考えられる。

また、図-4. 8において、X方向よりもY方向

の計測精度が悪いことが示されているが、この理由としては、実験場所の地理的な制約から、地上基準点を点O'の周辺に形良く配置できなかったことが考えられる。すなわち、地上基準点が点O'を中心にしてX方向に広がり、Y方向には狭い形状をしていたことが計測結果に影響を及ぼしたものと考えられる。このような地上基準点の配置と計測結果との関連性の検討については、現場での制約条件に影響されるものであり、今後の検討課題の1つである。

以上の結果と図-4. 4に示した高さ160mでの結果から、GPSによる計測は従来手法に対して10mm程度の較差の範囲で計測可能であると考えられる。

ii) 鉛直線偏差の検討

実験2と同様に、水準測量の不正確さが上層部の測点座標に及ぼす影響について実測データに基づいて検討した。その結果を表-4. 9に示す。このように地上基準点の水準測量の値に1mmの誤差が含まれているとすると、上層部の点O'が1mm移動することが判る。また、10mmの誤差がある場合は最大で10mm程度の変化が見られる。これに対して地上基準点とほぼ同じ標高に位置する点Oの座標は全く変動していない。すなわち、高層にある測点ほど鉛直線偏差の影響を受けやすいことが判る。したがって、本実験のような対象とする測点間の高低差が大きい計測では、基準点の標高をより正確に測量し、鉛直線偏差を高精度に補正することが重要である。また、逆に高層部の測点に要求される計測精度によって基準点の水準測量の許容精度が決定できることが判る。

(5) 実用化手法の提案

GPSを用いた高層構造物の鉛直施工精度の計測手法の検討として、目的を設定して4つの実験を行ってきた。その結果、少なくとも高さ160mの高層構造物上でも10mm前後の精度で計測が可能であることが示された。特に、実験4で得られた「上下間の測点のベクトルO'-Oが必要」といった結果は興味深い点であると同時に、検討してきた計測手法を実用化させるために非常に重要なポイントである。

以上の結果を総括し、図-4. 10のように建設工事におけるGPSを用いた鉛直施工精度の計測の実用化手法を提案する。本手法はGPSによる計測を中心に構成されており、計測時期、すなわち衛星の配置や個数の相違によって計測結果に異なった大きさ・方向の誤差が生じるといったGPSの欠点を補うため、全測点での同時受信を前提としている。このことにより、図-4. 10のようにO'-Oベクトルを含む立体的な基線網が形成でき、点O'と点Oを別々に求めるよりも精度良く2点間の位置関係を

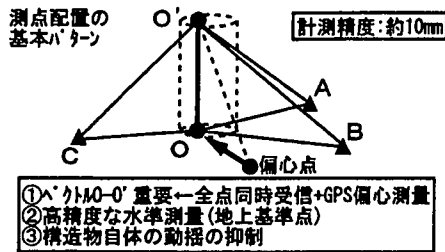


図-4.10 新しい計測手法

把握することができる。このように本研究では、実際の計測手順を念頭において、精度面からの裏付けを基に計測の具体的な方法を明確にしている。また、ここで提案する計測手法の性能について、次のように考えることができる。

①計測精度

$$E = E_G + E_L + E_E \approx 10 \text{ mm} \quad (2)$$

但し、E：GPSによる計測手法の精度

E_G ：GPSの位置精度、 $5 \text{ mm} + 1 \text{ ppm} \times D$ 、Dは基線長

E_L ：鉛直線偏差の補正に必要な水準測量の精度、数mm

E_E ：機器設置誤差、数mm

②高さ方向の計測限界

従来手法は構造物が高層になるほど計測精度の低下が懸念されるが、ここで提案する新しい手法は高さによる影響を受けないことが最大の長である。したがって、実際に計測作業を行う場合には、この利点を最大限に活用するために、次の点に留意する必要がある。まず、実験2で指摘したように標高差のある地点でのGPS計測では、気温、湿度等の気象条件の差異が計測結果に影響を与える可能性がある。したがって、GPSデータ受信地点の気象データを収集すると共に、既に研究されている気象データとGPSデータとの関係等¹²⁾を把握して、気象条件の差異を考慮したデータ処理を行う必要がある。また、構造物は高層になるほど風等の外力による動揺が大きくなる。強風時や風向がある方向に卓越している場合には、高層部の動揺とGPSによる計測結果との関連性が不明確となることが考えられるので、計測タイミングを考慮した作業が必要である。

5. まとめ

(1) 本研究のまとめ

本研究では、高層構造物の出来形計測の一手法として、測量機器として普及しているGPSの活用を考え、いくつかの実験を通じて様々な観点から考案した手法を検討してきた。その結果、地上100~160mという高層においてもGPS計測が可能であるこ

とが確認できたばかりでなく、「高層構造物の鉛直施工精度計測」といった技術に対して、一つの新しい手法を提案することができた。このことは、施工管理へのGPSの適用において、近年ではリアルタイム処理が主流となっていることに対して、改めて基準点測量以外のスタティック測位の有用性を示すことができたものと言える。

(2) 将来展望

本論文では、鉛直施工精度の計測手法と精度について主に議論してきたが、計測作業を含めた構造物の施工効率については次のように考えられる。

GPSを用いた計測手法は、人為的なミスを低減でき、長時間のデータ受信により安定した解析結果が得られるといった大きな長を持っている。反面、受信障害物の位置を考慮することや1~3時間程度の計測時間が必要なこと等、計測作業には従来手法にはなかった留意が必要である。しかし、構造物の施工全体に視野を移すと、本研究で提案した手法は他工種の進捗に与える影響がほとんどないことから、新しい計測方法の実施タイミングや従来手法との効果的な組み合わせ等を事前に計画することにより、結果的に計測を含めた施工全体の効率化が図れるものと考えられる。例えば、日々の日常計測は従来手法で行い、適当な間隔(例えば月1回、高さ50m毎等)で実施する定期計測へ本手法を適用するといった利用方法も考えられる。

最近では、設計、施工から維持管理の段階まで、設計データ、施工データといった建設工事に関わる情報を一連の流れの中で電子情報として管理しようとする「CALS」構想がよく掲げられる。GPSを用いた本手法は電子情報に基づくものであり、このような流れの中でも適切な手法と位置づけられる。

謝辞：本研究の実施にあたり、都市基盤整備公団総合研究所技術試験場の実験施設を利用させていただきました。ここに記してお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 内山雅之：マシンコントロール及びモニタリングへの応用，日本航海学会GPS研究会GPSシンポジウム'98 テキスト，p.177，1998.
- 2) GUO, J. and GE, S. : Research of Displacement and Frequency of Tall Building under Wind Load Using GPS, Proceedings of the 10th International Technical Meeting of Satellite Division of the Institute of Navigation 1997 Part 2, pp.1385-1388,

- 1997.
- 3) LEACH, M., HYZAK, M. and HOROSCHAK, S. : Validation and Analysis of Result from a Bridge Motion Monitoring Experiment, Proceedings of Annual Meeting Institute Navigation, VOL. 49th, pp. 519-527, 1993.
 - 4) 土屋淳, 辻宏道: G P S 測定の基礎, 日本測量協会, 1995.
 - 5) 日本建築学会: 鉄骨精度測定指針, 1991.
 - 6) 黒台昌弘, 沖政和, 斉藤栄一: G P S を用いた鉛直位置出しシステム開発のための基礎的実験, 土木学会第49回年次学術講演会講演概要集第VI部, pp. 338~339, 1994.
 - 7) 須沢覚, 黒台昌弘: G P S を用いた高層建築物の鉛直施工精度計測実験について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A, pp. 379~380, 1996.
 - 8) 建設省国土地理院: 基準点測量作業規程, pp. 40-41, 1995.
 - 9) 黒台昌弘, 沖政和: 山岳工事における G P S 計測適用のための基礎的実験, 土木学会第50回年次学術講演会講演概要集第VI部, pp. 114~115, 1995.
 - 10) 黒台昌弘, 沖政和: 山岳工事を対象とした G P S 測量適用に関する一提案, 土木学会第51回年次学術講演会講演概要集第VI部, pp. 268~269, 1996.
 - 11) 建設大臣官房技術調査室監修: 建設省公共測量作業規程, pp. 17-18, 日本測量協会, 1996.
 - 12) 日本測地学会編著: 新訂版 G P S, pp. 222-231, 日本測量協会, 1989.

(1999. 3. 4 受付)

EXPERIMENTAL STUDY ON MEASURING METHODS FOR WORK PROGRESS OF HIGH-RISE STRUCTURES

Masahiro KURODAI, Shigeyuki OBAYASHI, Masakazu OKI
and Hiroyoshi KASA

Civil works and structures have a tendency to more huge or more high-rise, and therefore a new measuring methods for work progress of these civil works is desirable. In this paper, for new application of GPS, measuring of the perpendicularity of high-rise structure - one of work progress measuring of these structures - is described. The applicability of GPS for high-rise structures measurement is confirmed by 4 tests. The results of those tests are shown as follows: 1) this measuring methods is available at 100m - 160m from ground level. 2) the measuring error is about 10 mm regardless of height of structures.