

ビデオポジションスケール (VPS) の開発

菅野 照雄
河村 宗夫

§ 1. はじめに

構造物の施工時、竣工後のいずれにおいても、ある部分の変位を計測する必要がしばしば起こる。例えば、プレストレストコンクリート橋などではコンクリートのクリープによってたわみ量が日を追って変化し、また鉄骨構造物では太陽熱や溶接熱によって形状変化が起こる。従来からこのような変位は、ある場合は測量によって観測したり、ある場合は計測が困難なためそれを省略していた。また、塔や煙突などの振動性状は振動計によって観測されるものの、その振幅を直接計測することはなかなか実現できなかった。

筆者らは、このような種々の構造物の変位を光を使うことによって離れた場所で自動的に計測することのできる多目的計測装置を開発した。この装置は一種の画像式計測装置であるため、ビデオポジションスケール (VPS と略す) と呼んでいる。図-1 に VPS 開発の要因を示す。

写真-1 は、筆者らが試作した VPS (Model-2) の外観である。構造物を見通せる適当な場所にこれを設置し、構造物上の変位を計測すべき部分にはターゲットとして電球を取付けておけば、構造物の変位を2次的に自動計測することができる。本報は VPS の原理を述べ、その特長と他の計器との比較、精度の検討、および実際の計測への適用例についてまとめたものである。

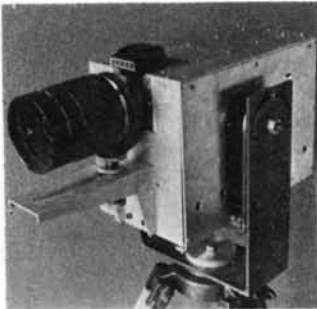


写真-1 VPS (Model-2) の外観

§ 2. VPS の動作原理

図-2 のように、構造物上の変位を計測すべき部分に光源 (白熱電球) を取付けると、そこから発せられる光の一部は離れた場所に設置した VPS のレンズに到達し、内部の CCD イメージセンサという撮像素子の上に光の像が投影される。CCD イメージセンサは1辺が 10ミクロン程の大きさのフォトエレメントが、全く規則正しくマトリックス状に並んだ構造をしている一種の半導体部品で、個々のエレメントは独立に光に反応し、その輝度に比例した電荷を蓄積する。したがって、背景に比べて光源が十分明るければ、どのフォトエレメントに光源の像が写っているかを電氣的に判別することができるので、レンズの倍率による実大長への変換を行なうことによって構造物の変位を確実に計測することができる。

図-3 は、VPS に使っている CCD イメージセンサの動作を模式的に示したものである。イメージエリアと呼ばれる部分に、前述のようにフォトエレメントが縦 512 個、横 384 個配列されている。これらのフォトエレメントは各々独立に光に反応するものの、縦方向には互に連結されていて、図のように垂直駆動パルスを与えると自分がそれまで蓄えていた電荷をとなりの (すぐ下の) フォトエレメントに送り出す。すなわち、全エレメントの情報が1段下へシフトする。そして、最下段のフォトエレメントの情報は水平レジスタと呼ばれる部分に入ってくる。次に、水平駆動パルスを図のように水平レジスタの左側から与えると、水平レジスタの各エレメントは情報を1つずつ右にシフトしていき、最も右側のエレメントからは外部に情報が出力される。水平レジスタの全情報が外部に押し出されたら、再び垂直駆動パルスを与えてイメージエリアの情報を一斉に1段下にシフトする。この動作をくり返すことによって、イメージエリアのすべての情報を1つずつ順次とり出すことができ、しきい値を用いた判別によって電球の像であるか否かを区別することができる。一方、水平駆動パルスはカウン

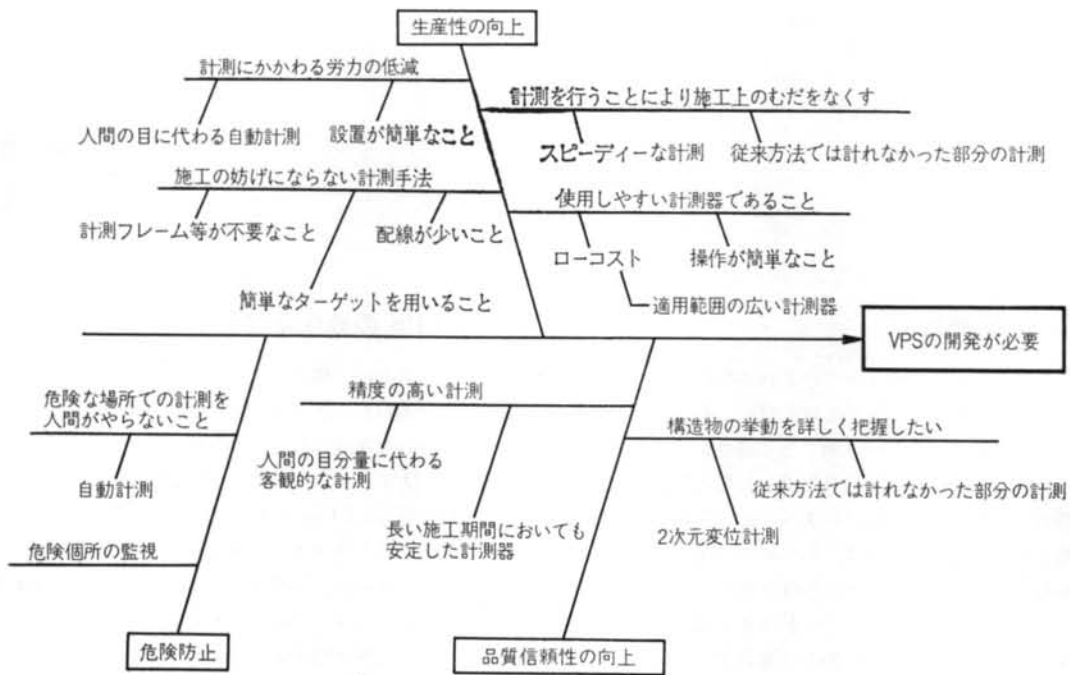


図-1 VPS 開発の要因

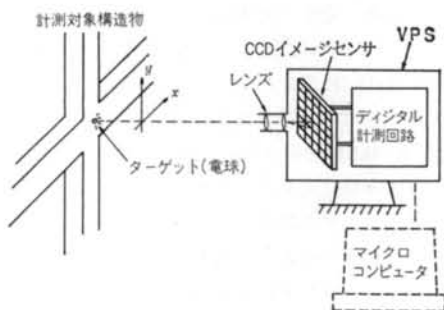


図-2 VPS の原理

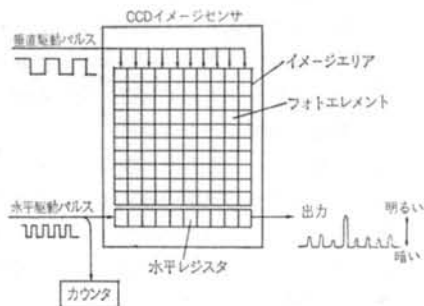


図-3 CCD イメージセンサの動作原理

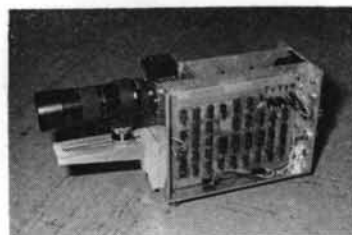


写真-2 VPS の内部

タによってカウントされているので、電球の像であると判別されたときのカウント値を知ることができる。この値は、それまでに情報を取り出し終ったフォトエレメントの数に等しいから、それをフォトエレメントの横の並びの数 (384) で除した商はイメージエリア最下段からの像の縦方向位置を表わし、除算の余りは最右列からの像の横方向位置を表わしている。このようにして、像の位置を全くデジタル的に求めるため、アナログ式計器のようなドリフト等が全くない。

ところで、CCD イメージセンサはもともと撮像素子としてテレビカメラ用に開発されたもので、ここ 1~2 年の間にやっと市場に出回るようになってきた。しかし、軽量堅固でイメージエリアのひずみが全くないなど

(1) CCD イメージセンサの分解能が有限であるための誤差	偶然誤差
(2) VPS とターゲット間の距離の計測における誤差	系統誤差
(3) 変位方向が視線軸に垂直でないための誤差	系統誤差
(4) 装置の機械的変形による誤差	系統誤差
(5) 大気密度分布のための光の屈折による誤差	系統誤差
(6) レンズの収差による誤差	系統誤差

表-1 VPS の誤差要因

極めて優れた性質を持っているため、利用範囲が急速に広がりつつある。また、上記のような CCD の使用方法そのものは筆者らが考案したわけではない。筆者らの VPS 開発の主要部分は、このような方法に従って実際に CCD イメージセンサを動作させ、像の位置データを出力するデジタル計測回路(図-2 参照)の開発である。このデジタル計測回路については、現在特許出願中である。写真-2 は VPS の内部である。

VPS は、基本的にはそれ自身で像の位置データを出力するわけであるが、大抵の場合は図-2 のように外部にマイクロコンピュータを接続し、データ集録、グラフ化、自動計測コントロールなどをさせながら使用することが多い。

§ 3. VPS の精度

VPS は、物差しで長さを計るといような直接計測ではなく、光を利用した間接計測を行なう装置である。したがってその精度は、表-1 に示すような多数の誤差要因による総合誤差によって決まる。このうち、(4)は装置の機械的剛性を高めることによって、他の誤差より小さくすることができる。(5)は気象条件によって複雑に変化するため定量的把握が難しく、VPS に限らずレーザや一般の測量など光を用いたあらゆる計測に共通する問題であるため、ここでは考えず別途検討する。また、(6)はイメージエリアのサイズが 5mm × 8mm と小さいため、VPS では非常に小さい。そこで以下、(1)~(3)に限って検討することにする。

§ 2. で述べたように、VPS はイメージセンサのどのエレメントに光源の像が写っているかをデジタル的に求めるわけであるが、実際には図-4 (a)のように複数のエレメントにまたがって像が写るような使い方をし、それらのエレメントの重心を算出して像の位置としている。いま、像位置の最小分解値がいくらであるかを検討するために、図-4 (b)のように 1 次元方向についてのみ考える。同図のように、一定の大きさの光源が少しずつ

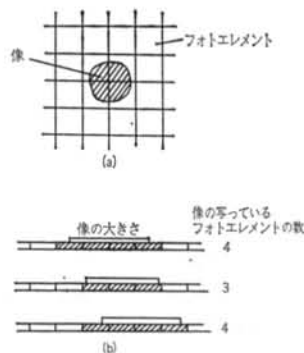


図-4

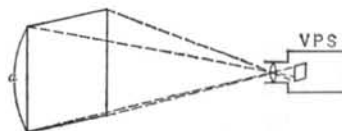


図-5 視野

移動していったとき、その像の写る範囲に属するエレメントは、総数を 1 だけ増減させながら移動していく。そこで、一般的に像の写る範囲に属するエレメントのナンバーを $i, i+1, i+2, \dots$ とし、それらの総数が n のときの重心を C_n 、像が移動して総数が $n+1$ になったときの重心を C_{n+1} とすると、

$$C_n = \{i + (i+1) + (i+2) + \dots + (i+n-1)\} / n$$

$$C_{n+1} = \{i + (i+1) + (i+2) + \dots + (i+n-1) + (i+n)\} / (n+1)$$

$$\therefore C_{n+1} - C_n = \frac{1}{n+1} \sum_{k=i}^{i+n} k - \frac{1}{n} \sum_{k=i}^{i+n-1} k = \frac{1}{2}$$

すなわち、1つのエレメントの大きさの 1/2 を最小分解幅として期待できることになる。VPS で用いているイメージセンサのエレメント数は 384 × 512 であるから、分解能はこの 2 倍の 768 × 1024 分解と考えるとよい。

これは具体的には次のようになる。VPS は、一般の写真と同じようにレンズを用いて像を写すため、種々の焦点距離をもつ交換レンズによって自由な大きさの視野を設定することができる。図-5 のように視野の縦の長さを a とした場合、イメージセンサだけについて考えれば $a/1024$ が縦方向の分解能ということになる。したがって、適当な焦点距離のレンズを用いて a が仮りに 1m になるようにして VPS を使用したとすれば、縦方向の分解幅は約 1mm になる。また、別のレンズによって a が 10cm になれば分解幅は 0.1mm となる。すなわち、VPS の分解能は何ミリという絶対的な値を持っているのではなく、視野の約 1/1000 (縦方向) という相対的なもので、実際の分解幅はレンズ交換によって比較的自由に決める

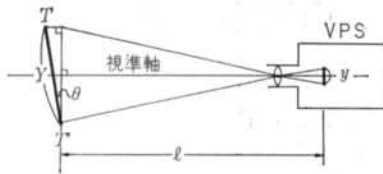


図-6

ことができるのである。なお、横方向の分解幅はフォトエレメントが正方形ではなく長方形であるため、縦方向の分解幅の約1.6倍と粗くなる。以上は静的計測の場合の精度であって、動的計測では方式が変わるため分解能はもっと低くなり、縦方向200分解、横方向380分解となる。

ちなみに、測量に用いられるトランシットで、高級な製品の分解能は角度6秒程度、視野が1度20分程度であるから、これを上記にならって計算すると、

$$\frac{1 \text{度} 20 \text{分}}{6 \text{秒}} = \frac{4800}{6} = 800 \text{ 分解}$$

となる。したがって、VPSは静的計測ではこれとほぼ同等の分解能をもっていることになる。

図-6において、ターゲットTがT'の位置まで変位したとき、その変位YがVPSのイメージセンサ上でyという長さに写るものとする。また、YはVPSの視準軸に垂直な面からθだけ傾いているとする。レンズの焦点距離をfとすると、

$$Y = \frac{1}{\cos \theta} \cdot \frac{l-f}{f} y$$

なる関係式が成立する。焦点距離fはきわめて正確にわかっているものとすれば、前述の表-1の(1)、(2)、(3)の誤差はそれぞれy、l、θの誤差に対応する。このうち、yについてはイメージセンサの最小分解幅をpとすれば、前述のようにただかpの誤差に収まるのであるから、誤差の分散σ_y²はσ_y²=p²とおけば十分である。偶然誤差に属するものとしてはyの誤差だけであるから、偶然誤差に基づくYの分散σ_Y²は誤差伝播の法則により、

$$\sigma_Y^2 = \left(\frac{\partial Y}{\partial y}\right)^2 \sigma_y^2 = \left(\frac{1}{\cos \theta} \cdot \frac{l-f}{f}\right)^2 p^2 = Y^2 \cdot \left(\frac{p}{y}\right)^2$$

また、lおよびθは系統誤差をもち、それらの大きさをδl、δθとすれば、Yに与える系統誤差dYは、

$$\begin{aligned} dY &= \frac{\partial Y}{\partial l} \delta l + \frac{\partial Y}{\partial \theta} \delta \theta = \frac{1}{\cos \theta} \cdot \frac{y}{f} \delta l + \frac{\sin \theta}{\cos^2 \theta} \cdot \frac{l-f}{f} y \cdot \delta \theta \\ &= Y \cdot \frac{\delta l}{l-f} + Y \cdot \tan \theta \cdot \delta \theta \end{aligned}$$

よって、これらを総合したYの誤差Mは、

$$M = \sqrt{\sigma_Y^2 + (dY)^2}$$

$$\begin{aligned} &= \sqrt{Y^2 \cdot \left(\frac{p}{y}\right)^2 + \left(Y \cdot \frac{\delta l}{l-f} + Y \cdot \tan \theta \cdot \delta \theta\right)^2} \\ &= Y \sqrt{\left(\frac{p}{y}\right)^2 + \left(\frac{\delta l}{l-f} + \tan \theta \cdot \delta \theta\right)^2} \end{aligned}$$

また、Yの総合精度(相対誤差)をRとすれば、

$$R = \frac{M}{Y} = \sqrt{\left(\frac{p}{y}\right)^2 + \left(\frac{\delta l}{l-f} + \tan \theta \cdot \delta \theta\right)^2}$$

この式によって、実際に誤差がどのくらいになるかの例を計算してみよう。いま、Yが100mmの変位であり、その像の相対的大きさy/pが100であったとする。前述のように、VPSの分解能は縦方向が約1000分解であるから、この場合は視野の10分の1だけを用いているわけで、このまま変位Yを1000mmまで計測することができる。lやθの誤差が0であれば、精度はR=√(1/100)²=0.01、すなわち1mmとなる。もし視準距離が10m、その誤差が5cm、Yの傾きθが0.1radian(5.7°)だけずれていたとすると、精度は、

$$R = \sqrt{\left(\frac{1}{100}\right)^2 + \left(\frac{50}{10 \times 1000} + \tan 0.1 \times 0.1\right)^2} = 0.018$$

すなわち、1.8mmとなる。

§ 4. VPSの特長と他の計器との比較

VPSの特長をまとめると次のようになる。

- (1) 計測対象物に接触することなく、離れた場所から変位を計測することができる。
- (2) 人間の目に頼ることなく、自動的に計測される。
- (3) X・Y 2次元の変位が計測できる。
- (4) 視野の約1/1000(縦方向)、1/760(横方向)の分解能をもつ。
- (5) 視野内に複数のターゲットを設置し、各々の2次元変位を計測できる。
- (6) 原理が純デジタル方式のため、温度変化や経年変化による測定誤差が全く発生しない。
- (7) すべて半導体部品で構成されており、寿命は半永久的である。
- (8) コストが安い。
- (9) 1秒間に25回のスピードで連続計測ができるので、振動変位等も計測できる。
- (10) 操作が簡単である。

このうち、(1)~(3)を同じように備えている他の方式の計器が市販されているので、これらとVPSの比較を項目(4)~(8)について行なった結果を表-2に示す。比較した計器の1つは、最近流行しているレーザー光線を使ったも

	VPS	T社レーザーセオドライト	Z社非接触2軸変位計測装置
分解能	レンズ交換により、距離に関係なく視野の約 $\frac{1}{1000}$ (縦方向) および $\frac{1}{760}$ (横方向) 例: 焦点距離1000mmのレンズを用いた場合、200m離れた場所で1mmの変位を識別できる。	レーザースポットの径が、 距離 50 m のとき 5mmφ、 160 m のとき 10mmφ、 200 m のとき 20mmφ となる。	レンズ交換により、距離に関係なく視野の $\frac{1}{500}$ (電氣的分解能は $\frac{8}{100000}$ であるが、直線性における誤差が0.2%あるため $\frac{1}{500}$ と等価になる)。
ターゲット	10W~100Wぐらいの白熱電球。 計測すべき点が視野の中に複数ある場合は、切換えて点燈させることにより何点でも計測できる。	レーザービームは1本であり、基本的には1点しか計測できない。プリズム等を用いる方法があるが、高価なものになってしまう。	視野を白と黒に2分するターゲット板を用いる。1点しか計測できない。
安定度と寿命	CCD イメージセンサ上のフォトエレメントの位置をカウントするという完全なデジタル方式のため温度変化、経年変化などによる誤差が全く生じない。また CCD をはじめすべて半導体で構成されているので、寿命は半永久的である。	レーザービームを受光し、その位置に比例したアナログ電圧を発生するセンサを用いて計測するため、アナログ回路の温度変動、経年変動が起り得る。また、レーザー発振器の寿命は5000時間ぐらいしかないため、交換や装置の定期的再調整が必要である。	装置の原理そのものが、磁力によって電子ビームを走査させるというアナログ方式のため、温度変動、経年変動が起り得る。したがって、定期的再調整が必要であり、長期連続計測には適さない。
コスト	装置が約100万円。ターゲットは白熱電球であるからきわめて安い。	レーザー発振器が約120万円。受光して自動計測する装置がさらに100~200万円。	一式約800万円。

表-2 VPSと他の非接触変位計測装置との比較

のとして代表的といえるT社のレーザーセオドライト、もう1つは従来から非接触変位計測装置として有名なZ社の非接触2軸変位計測装置である。

同表のように、すべての点でVPSが優れている。特に、計測対象点が視野内に2点以上あるような場合は、VPSが圧倒的に有利である。ただ、レーザー光線には平行光線に近いという性質があるため、どんな物体に当てても光のスポットが得られるという特徴がある。したがって、変位を自動計測する必要がない場合には、標尺に当たっているスポットの位置を人間が目を読むという方法により、割合ローコストな計測ができる。

また最近では、画像処理に類するようなデータ処理が次第に広まってきており、マイクロコンピュータの普及とあいまって、安価な簡易画像処理システムが市販されるようになってきた。この種のシステムを使えばVPSと同じように2次元変位計測がさらに安価に実現できるかのように思われるが、これらはすべて市販の監視用テレビカメラによって対象物をとらえる方式のものであり、精度の点で実際の変位計測には使用できない。すなわち、これらの安価なテレビカメラはビジコン等の撮像管を用いており、偏向コイルから発生する磁力によって電子ビームを上下左右に走査させるわけで、ビーム位置の精度、安定度は長期間の変位計測などに要求される性能をとて満たすものではない。

さらに、このようにテレビカメラを利用した計測ではカメラの出力であるビデオ信号を解析して計測データを得ることになるが、ビデオ信号の1フレームから像の位置を求める操作は基本的にはアナログ演算であり、やはり構成部品の安定度が計測データの精度を直接左右することになる。これに対してVPSでは、前述のとおりCCDイメージセンサのフォトエレメントが物理的、絶対的に位置のスケールを決めており、この部分での計測データの変動の余地が原理的に存在しない。

§ 5. VPSの適用例

5.1 構造物試験における非接触変位計測

写真-3は、研究所大型実験棟内で行なわれた新型耐震壁の性能試験の様相である。この試験の場合、図-7に示すようにコンクリート壁体上にA、ブレースの支持点にBという2点の変位を計測するためにVPS1台を使用した。A点、B点はそれぞれ異なる動き方をし、しかも上下左右2次元の変位を行なうため、従来のような変位計を用いて計測しようとすると非常に複雑な機構の治具を用いなければならないが、VPSを用いることによって極めて簡単に計測することができた。図-8は、こうして計測したA点の水平方向の変位と、荷重の関係

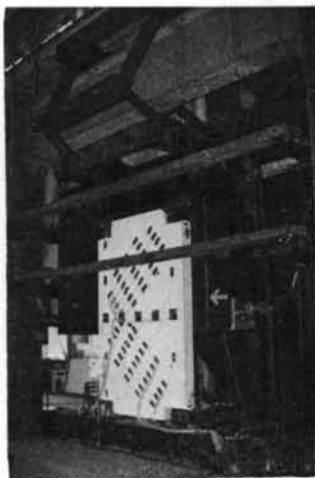


写真-3 耐震壁の実験

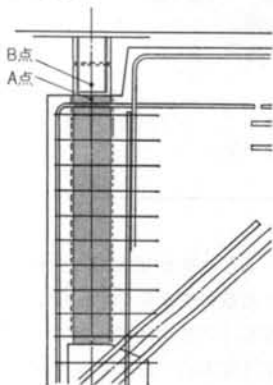


図-7 耐震壁の変位計測位置

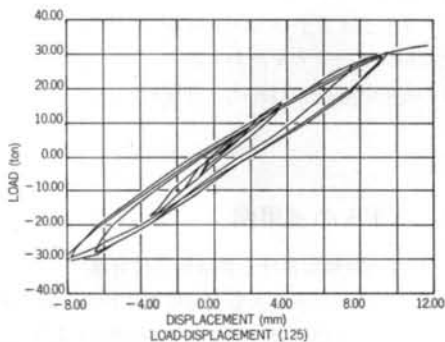


図-8 荷重-変位計測データを表わすグラフである。

5.2 振動変位の計測

写真-4は、振動台によって行なった医療機器の振動試験の様相である。機器の上部にターゲットとして豆電球を取付け、約10m上方の固定点にVPSを設置し、医療機器の地震時における挙動を計測した。結果の一例を



写真-4

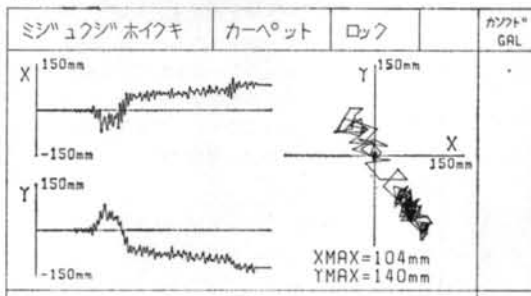


図-9 振動変位計測結果



写真-5

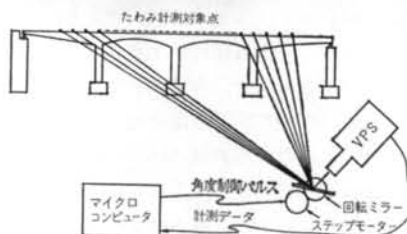


図-10 多点たわみ計測

図-9に示すが、X・Y平面上の2次元変位がVPSによって確実にとらえられている。

また、レンズに望遠レンズを用いれば視準距離を自由に伸ばすことができるので、高い塔や煙突の振動変位も計測することができる。

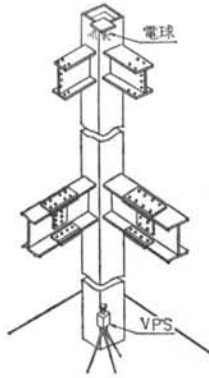


図-11 鉄骨柱の傾角の計測

5.3 橋梁等のたわみの計測

橋梁のたわみ計測のように計測フレームを設けることが実際上不可能な場合には、光を利用した計測が大いに威力を発揮する。写真-5は月夜野利根川橋の施工風景で、ここでは56年6月にVPSを設置し、コンクリートのクレーブ等による桁のたわみを連日計測している。たわみ計測の対象点は橋軸に沿って最大33点にもなるが、図-10に示すように回転ミラー機構を組み合わせ、1台のVPSで全点のたわみを自動的に計測している。視準距離は、最も近い点で約100m、最も遠い点では約300mである。

5.4 鉄骨柱の傾角の自動計測

図-11のようにVPSを鉛直に設置し、柱頭部にターゲットを取付ければ、柱頭のX・Y方向の位置、すなわち柱の傾角を自動的に計測することができる。このような計測を鉄骨超高層建築や特殊大構造建築などに適用することにより、施工精度の向上、作業の省力化に効果をあげることができる。

§ 6. おわりに

以上のように、VPSはその特長を生かすことにより種々の応用方法において効果を発揮するものと筆者らは考えているが、開発からまだ1年も経過しておらず、その本格的応用および評価は今後に残されている。コストの面では、たった1つのCCDイメージセンサがVPSのコストの約1/3を占めており、今後CCDの生産が増えることにより一般の半導体のように確実に値段が下がるものと予想され、VPSのコストはかなり下がるものと思われる。また、筆者らは現在VPSの小形化、従来からの各種測量機器との一体化、そしてさらに一般的な画像計測への応用などについて検討している。今後これの有効利用に関する各方面からの助言をいただければ幸いである。

