

CCD カメラによるプレストレスコンクリート橋のたわみ管理システム

野田行衛*・中山良直**・新井達夫***

大型のプレストレスコンクリート橋（連続箱桁橋と斜張橋）では、サイクル施工が行われることから設計・施工および現場の施工管理がきわめて複雑になる。本研究は、主に張り出し施工中の構体のたわみ測定に用いたCCDカメラを利用した自動計測システムの開発について述べたもので、実橋で行った測定結果についても良好であったことを示した。これにより、設計から現場たわみ管理までの一貫したシステムの自動化が可能となった。

Key Words: CCDcamera, design module, automatic measuring module, construction control system.

1. はじめに

近年のプレストレスコンクリート橋（以下PC橋）においては、機械化施工による大型橋梁が盛んに建設され始め、片持ち張り出し施工による多径間の箱桁橋やPC斜張橋は一般的な形式となってきている。

PC橋の大型構造物では、サイクル施工が行われることから施工状況に応じた解析が必要であり、特に施工に伴い構造系が変化する不静定構造物においては設計計算量が膨大になる。

一方、現場においては、設計計算に基づき、出来形管理、プレストレス力の緊張管理、たわみ管理（標高の管理）などを行なながら施工を進めなければならず、施工期間も長くなる。

この中のたわみ管理は、橋梁全体の外観のみならず、供用時の使用性にも影響を与えることから、きわめて重要な意味を持つ。

たわみ管理の難しさは、ブロック施工時の形状の誤差に与える因子が多く、さらにそれらの因子が不確定であるために出来上がる形状が予測しにくいことである。このために、現状では施工中の各種の誤差要因を計測分析する方法が取られ、1ブロック毎に型枠セット時、プレストレス力導入後、コンクリート打設後の高さをレベル測量でを行い、設計値を補正するため多くの労力と時間を要していた。

ところで、これまでにも土木構造物に関する計測の自動化のためにCCDカメラを利用した例が報告^{1)~3)}されており、著者らもPC橋の張り出し施工のための設計とたわみ管理の一連したシステムの開発を行ってきた。

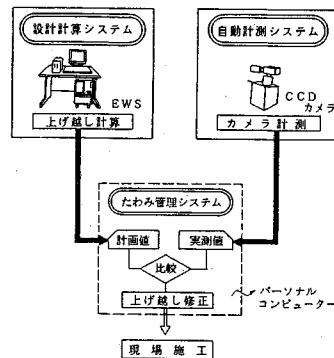


図-1 全体システム構成

しかし、たわみ管理システムを張り出し施工現場の施工管理手段として利用する場合、現場の地形条件により一定した測定精度の確保がむつかしいという問題があった。これは、見通しの悪い山間部などにおいては適切なカメラの設置場所が確保できにくいことが原因で、測定距離が長くなることから大気の影響なども受けやすく、精度の向上には限界があった。

本論文はさきに発表した内容^{4)~6)}に、地形条件に左右されない方法として、リレー式ターゲットを導入した橋面上での計測管理例とカメラ測定そのものの精度の検討結果を追加報告するものである。

2. 全体の概要

本論のシステムは、近年施工数がきわめて多くなったPC箱桁橋およびPC斜張橋の場所打ち片持ち張り出し工法の設計計算と図化および自動計測による現場たわみ管理の自動化を同時に可能にしたもので、設計計算と図化および施工管理まで一貫したシステムが特徴である。全体のシステム構成を図-1に示す。

PC橋の架設系から完成系にいたる計算においては荷重の組み合わせの要素が多いこと、また構造系が次々に

*正会員 工修 川田建設㈱ 開発部
(〒114 東京都北区滝野川6-3-1)

**川田建設㈱ 技術部

***正会員 川田建設㈱ 開発部

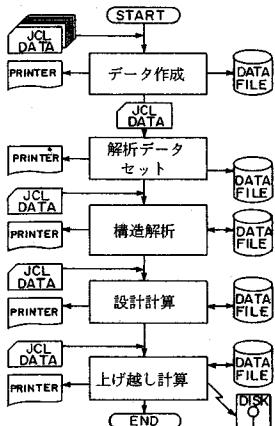


図-2 設計計算システムの流れ図

変化することから計算ステップが膨大な数になり、また最適なケーブル配置を求めるために繰り返しトライアル計算を行わなければならない。

従来の場合、一般にこれらの計算は別々のプログラムを組み合わせて行い、結果の集計を行っていたため多大な労力と時間を要していた。

設計計算システムは、施工手順に従って各ステップ毎に断面力を算出し、これらを累積しながら応力照査を行うものであり、同時に個々の荷重に対して、たわみの計算も行われる。

設計計算は道路橋示方書に従っており、PC箱桁橋の計算システムの流れを図-2に示す。

ここでの特徴はクリープ解析を従来の簡易法によらず、Dischingerの基本式を用いて厳密に計算しており、各ブロックの材令差を考慮している点である。これにより、施工中のクリープ変形を精度良く把握でき、より正確なたわみ管理が可能となる。

設計計算において算出された応力は集計され、図化される。また、個々のたわみ量も集計され、各ブロック毎の上げ越し量が求められる。これらのたわみ計算値は、EWS（エンジニアリング ワークステーション）からパーソナルコンピューター用のデーターに転送され、各施工ステップ毎の上部工変形図を描く。

上げ越し量とはブロック施工時における各ブロック総目の高さを表したもので、橋体完成後クリープおよび乾燥収縮がすべて終了した段階で計画線形になるように決定される。

自動計測システムはCCDカメラを使用して、橋面上のターゲットの重心位置を計測することにより標高を自動的に測定するシステムであり、従来のレベル測量に相当するものである。

計測方法や計測時間はコンピューターにより制御されることから、人為的な計測ミスを避けることができ、また計測時間に拘束されないという利点がある。

たわみ管理システムは、設計計算システムで得られた計画値と自動計測システムにより測定した施工中の構造物の高さの値とを比較しながら上げ越し量を修正し、管理するものである。

たわみ管理システムを迅速に機能させるためには、実際の形状を常時測定し、正しい情報を保有することが不可欠であり、これにより次のステップの現場施工の予測が可能になる。

3. CCDカメラによる自動計測システム

(1) システムの構成

CCDカメラによる計測システムは測定部、回転部、制御部の3つの部分からなる。

測定部は、ターゲット、ターゲットを見るためのレンズやCCDカメラおよびモニターからなる。

回転部は、橋面上に取付けた多数のターゲットや不動点の方向にカメラを正確にセットするためのステッピングモーター、回転台およびそれらをコントロールするパルス制御装置からなる。CCDカメラはステッピングモーターに直接取付けられ、回転誤差を極力小さくしている。

制御部は、測定部と回転部を制御したり、計測データを解析し、保存する機能をもち、各種の制御ボードとパーソナルコンピューターおよび結果を表示するためのディスプレイとプリンターからなる。

制御ボードには、画像処理用のものやモーター制御用のボードがあり、それぞれコンピューターに内蔵される。

橋梁の規模がきわめて大きい場合やある特定の部分を独立して計測するためには、1台のカメラでは十分な測定精度が確保できず、複数のカメラが必要となる場合がある。

複数のカメラを1つのシステムで制御するにはマルチビューアーを使用する方法があり、マルチビューアーをCCDカメラの間に介すことにより、カメラを4台まで増設することが可能になる。

計測システムの全体構成を図-3に示す。

現場におけるカメラの設置方法には、地上に固定する方法と橋脚上（柱頭部）に固定する方法が考えられる¹⁾。

地上に固定する場合は、橋脚の変形を含めた上部工のたわみを常に測定することが可能であるが、一般に張り出し架設を行う場所は深い谷や河川などがあり、カメラの設置場所は制限を受ける。

一方、柱頭部に固定する場合は、従来のレベル測量と同様に橋脚の沈下量などは測定されず、また橋脚の傾斜に対しても考慮しなければならない。しかしながら、測定距離が短いこと、カメラの傾きが余りないこと、さらに設置場所が確保しやすいことなどの利点がある。

(2) 使用機器⁴⁾

a) CCDカメラ

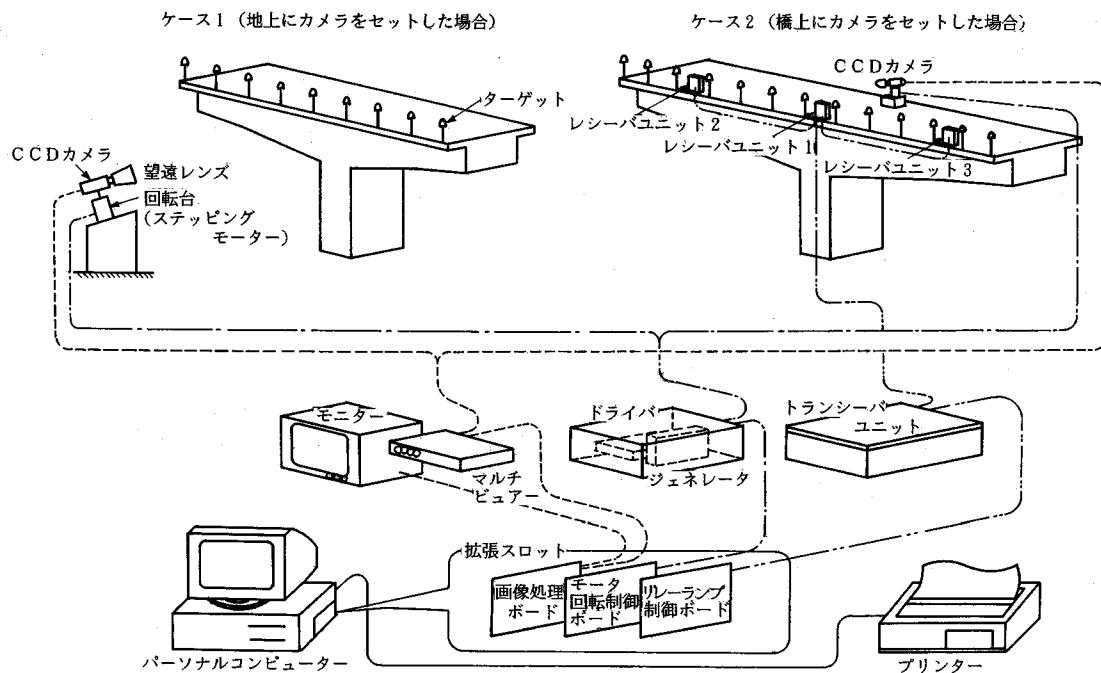


図-3 計測システムの全体構成

CCDカメラはスクリーン部に光を感じる微細なセンサーを格子状に並べた固体撮像素子(Charge Coupled Device)を用いたもので、画像のひずみが小さく、解像力に優れ、振動や衝撃にも強く、また外部の電気的ノイズにも影響を受けにくいなどの特徴を有する。

CCDカメラによる計測では、カメラの解像力やレンズの性能により測定精度が影響を受けることから、センサーの数(画素数)の多いカメラを使用する必要がある。

しかしながら、画素数が余りにも多いと、画像処理の時間が長くなることや膨大なコンピュータの記憶メモリーが必要となることから、他の計測誤差のバランスから決定することが経済的と言える。

カメラのスクリーン上に映し出されるターゲットは、レンズの倍率により大きさを変えることができ、カメラの設置位置、ターゲットの大きさなどを考慮してカメラを選択することが必要である。

b) 画像処理ボード

画像処理ボードはCCDカメラの撮像装置から取り込まれた画像に対して2値化の処理を行い、目的とする画像を抽出し、その画像の周長、面積、フェレ径、重心座標などを求める機能を有する。

c) ターゲット

ターゲットは橋面上の高さの標点となるもので、各ブロックの先端に取り付ける。その他に後述するように、

カメラの水平回転面を補正するための不動点となる。

たわみの管理は、このターゲットの重心位置を測定し、管理することにより行うことから、多少の衝撃などが加えられても移動しないような堅固なものとする必要がある。

画像処理により重心位置を求める関係から、ターゲットは明暗のコントラストを有するものが良く、しかも重心を求める画像は円形状になるようにすることが望ましい。これは、カメラの覗く角度が変化してもターゲットの画像の形状を一定にし、計測精度を確保するためのものであり、このためには、ターゲットを球形にすることが効果的である。

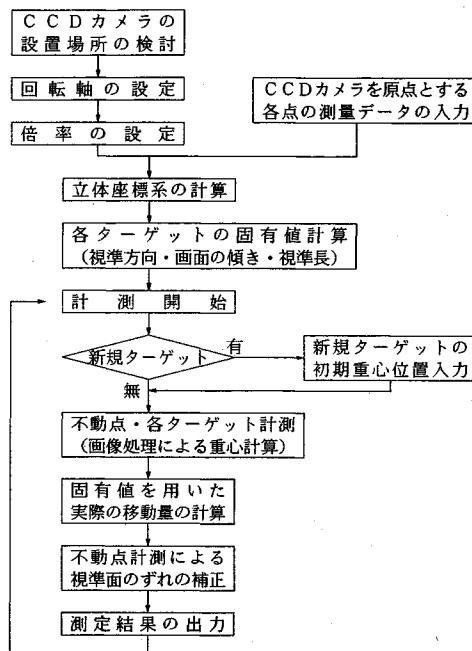
夜間計測のターゲットは発光体のものを使用する必要があるが、カメラの設置位置によっては目的とするターゲット以外の標点もカメラ内に映し出されることがある。

この場合一画面全体を解析すると、画面内の同レベルの明るさの画像は同時に処理されてしまうことから、これを避けるためには、解析する部分を指定するか、あるいは目的とするターゲットのみを発光させるリレー式の装置を工夫することが必要である。

4. 計測原理と方法

(1) 計測の手順

本計測の基本は、CCDカメラで上部工に取付けたタ

図-4 計測方法の流れ図⁴⁾

ターゲットをモニター画面に映し出し、画像処理によりモニター画面上での重心位置を計算し、その移動量から桁の高さ変化を求めるものである。計測と計算方法の流れを図-4に示す。

(2) 計測値の計算方法

a) 基本データー

まずははじめに橋梁架設現場の地形条件を考慮して、カメラの最適な設置場所が決定されるが、その位置を原点として不動点と架設予定の橋梁の位置関係を測量により求め、立体空間座標を決定する。

図-5はカメラと橋梁との座標関係を示したものである。カメラから不動点A、Bまでの水平、鉛直距離と不動点A、B間の水平角($\angle C Q D$)を与えることにより立体空間の外形が形成され、CCDカメラ水平面内の正面方向(点G)と視準面内の正面方向(点F)が得られる。

さらに、不動点から橋梁端支点までの水平角($\angle A Q G_1$, $\angle B Q G_2$)を与えることにより各ターゲットまでの視準長と視準面内での視準方向角(正面方向の点Fからの角度)が決定される。

これらは、ターゲットの重心移動量や補正值を計算したり、カメラの回転位置を決定するための基本データーとなるものである。

b) ターゲット移動量の計算

画面上に映し出されたターゲットの重心位置は、後述する方法で計算されるが、ここでは重心位置の鉛直方向移動量の計算方法について述べる。

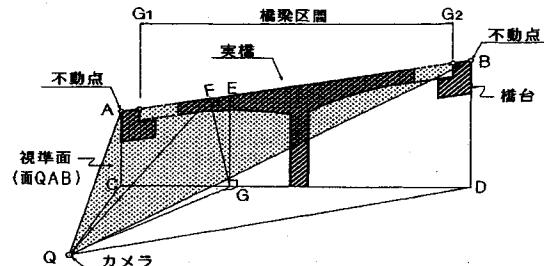


図-5 立体空間座標

CCDカメラを傾けた状態でセットした場合、映し出される画面の軸と求めようとする橋梁のたわみ方向が一致しないため、重心の実移動量を求める場合にはカメラから求めた値を補正しなければならない。図-6はこれらの関係を示したもので、 x と y 軸は画面上の軸を表わす。

基準水平面は、各ターゲットのたわみ方向の基準面となるもので、計測ごとのターゲット重心距離はこの基準面からの垂直距離を計算して求める。しかし、このためには各ターゲット位置の固有の基準水平面を求めておく必要がある。

この面は画面上においては画面中心を通る直線式として表わせ、すなわち、

$$K_1 \cdot x + K_2 \cdot y + K_3 = 0 \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

となる。ただし、この係数 K_1 , K_2 , K_3 は ϕ の関数であり、この計算式についてはc)で述べる。

したがって、計測されたターゲットの重心座標を (X, Y) とすると、基準面からのたわみ方向の距離は式(2)から求められる。

$$L = \frac{|K_1 \cdot X + K_2 \cdot Y + K_3|}{\sqrt{K_1^2 + K_2^2}} \quad \dots \dots \dots \quad (2)$$

たわみ方向の重心実移動量 ΔH は、計測値を $\Delta H'$ 画素、基準となる視準距離(例えば100m)におけるCCDカメラの1画素あたりの実長を K_{mm} 、ターゲットまでの距離を ℓ とすると、式(3)から求められる。

$$\Delta H = \frac{K}{100} \times \ell \times \Delta H' \quad \dots \dots \dots \quad (3)$$

次に視準面のずれの補正について述べる。

本システムにおいてはカメラをモーターで回転させながら各ターゲットを視準する方法をとることから、視準面が常に同一であることが望ましいが、温度などの影響により必ずしも同一とはならず、このため毎回の計測時

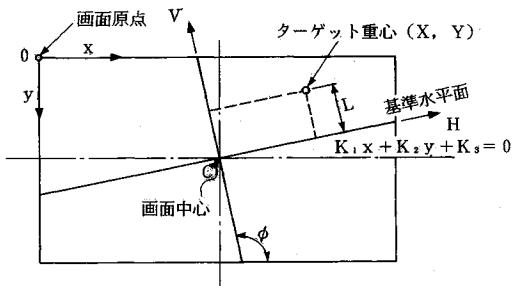


図-6 画面上のターゲット重心高さ

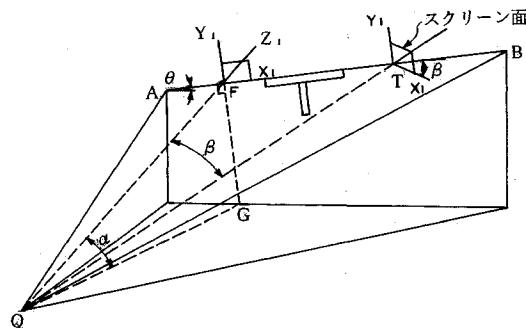


図-8 視準方向による補正

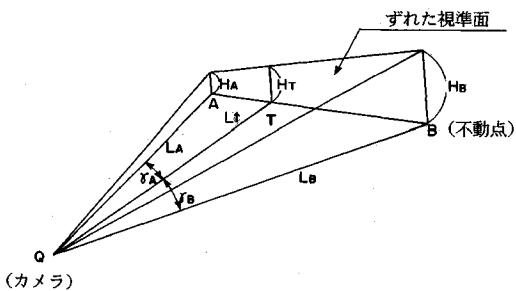


図-7 視準面のずれ補正

に視準面の水平度補正をしなければならない。（例えば、視準方向が $0^\circ 01'$ ずれたとしても、100mの先方では29.1mmのたわみ量として計測される。）

これらの誤差ができるだけ小さくするために、2点の不動点を設け、計測毎にその点を計測し、計測開始時点の視準面とのずれ量を求めて補正を行う。

2か所の不動点における移動量が H_A , H_B とすると、各ターゲットのずれ量 H_t は次式により求められる。

(図-7)

$$H_t = \frac{\frac{H_A}{L_A} \cdot \gamma_B + \frac{H_B}{L_B} \cdot \gamma_A}{\gamma_A + \gamma_B} \cdot L_t \quad \dots \dots (4)$$

ここで、 L_A , L_B は不動点までの距離、 γ は不動点とターゲットの視準方向角である。

c) 画面の傾きによる影響

図-8は、カメラと実橋との幾何学的な関係を示したもので、QABが視準面である。AB ⊥ QFとなるF点は、カメラ真正面の点であり、この点を原点とした空間座標系を(x_1 , y_1 , z_1)とし、 x_1 は橋軸方向、 y_1 はカメラの回転軸方向、 z_1 は視準方向に一致するものとする。

仮に、橋梁の縦断勾配 θ がなく、橋梁を含む水平面内にカメラを設置することができるとして、回転軸の傾

きは鉛直となり、画面の縦軸と鉛直方向が一致する。この状態であれば、画面縦軸方向のターゲットの移動量の計測から直接鉛直たわみが求められ、補正の必要はない。

次に、カメラを傾けた状態で視準方向角 β がゼロのF点のたわみを計測する場合について考える。この点では仰角の影響があるため、実際のたわみの方向と画面の鉛直方向とは異なるが、画面上では同一の方向に見える。しかしながら、カメラのスクリーン上では y_1 方向のたわみを測定することになり、実際のたわみよりも小さい値(α の余弦成分)として計算される。

さらに、多数のターゲットを視準するために、視準方向角 β が加わると、両軸は一致しなくなり、画面の水平軸 x と鉛直方向 V の角度は ϕ ($\neq 90^\circ$)となる。

直接の計測値を補正するための ϕ は α , β , θ の関数として表わすと最終的に次のようになる。

$$\cos \phi = \frac{1}{\sqrt{1 + \tan^2 \beta}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \tan^2 \theta}} \times \left(\tan \theta - \frac{\tan \alpha \cdot \tan \beta}{\sqrt{1 + \tan^2 \theta}} \right) \dots \dots (5)$$

5. 計測精度に与える影響要因

本システムは橋面上に固定したターゲットの重心位置のデータを継続的に測定管理し、既設橋体の形状をリアルタイムに認識することができるものである。

長大スパンの橋梁では1橋脚あたりの施工期間が数ヶ月に及び、この間の計測の精度を長期間に渡って確保しなければならない。

測定精度に影響する要因には、一般の測量時と同様に大気の状態のほかに、CCDカメラの分解能とターゲット周辺のコントラストなどが挙げられる。

(1) CCDカメラの分解能^{1), 2)}

ターゲットの重心位置を求めるには、カメラに映し出

されたターゲットの形状を標本化 (sampling)，すなわち二次元の連続した画像を離散的な点の集合に変換することから始められ，画素 (pixel) に分解される。

しかしながらこの画素の濃淡値については，連続的な値となっており，画像処理のためには連続的な濃淡値を離散的整数値に変換しなければならない。この操作は量子化 (quantization) と言われ，各々の濃淡値に対して与えられた整数値が濃度値である。

白から黒の連続的な濃度値は 256 (8 ビット) のレベルに分けられ各濃度値に対応した濃淡の度合いを濃度階調と称している。

画像解析を行うにあたりターゲットの形状を認識するには，この階調 (しきい値) を与えて，画像を白と黒の領域に分割されなければならず，この操作が画像の 2 値化 (binarization) である。

一般に白の領域は 1，黒の領域は 0 として取り込まれ，それぞれ対象物領域，背景領域に分けられ，この関係を式で表すと次のようにになる。

$$B(m, n) = \begin{cases} 1, & f(m, n) \geq T \\ 0, & f(m, n) < T \end{cases} \quad \dots \dots \dots \quad (6)$$

ここで，

(m, n) ; 画素， $f(m, n)$; 画像， $B(m, n)$; 2 値画像， T ; しきい値

ターゲットの重心位置は，このように得られた 2 値画像のターゲット部分の面積と 1 次モーメントから計算され，画素の数と固定軸からの距離がわかれば容易に求められる。

これらは力学における重心位置を求めるのとまったく同じであり，重心座標を (i_x, i_y) とすると次のようになる。

$$i_x = \frac{\sum_m \sum_n m \cdot f(m, n)}{\sum_m \sum_n f(m, n)} \quad \dots \dots \dots \quad (7)$$

$$i_y = \frac{\sum_m \sum_n n \cdot f(m, n)}{\sum_m \sum_n f(m, n)}$$

ここで $f(m, n)$ は，ターゲットの 2 値画像である。

カメラの分解能 (あるいは解像力) はカメラの持つ画素数により決まるが，測定の精度に直接的に関係するのは，1 画素あたりに相当する対象物の大きさである。

ここで簡単化のために 1 次元的な場合の分解能について考えて見よう。

基準となるターゲットの寸法を H_0 ，カメラの焦点

距離を F ，カメラからの距離を L_0 とすると，スクリーン上での寸法 h は次のようになり，このときの画素数 M がこの長さに対応する。

$$h = \frac{F}{L_0} \cdot H_0 \sim M \quad \dots \dots \dots \quad (8)$$

ここで注意しなければならないのは，カメラに映し出された画像の画素数は対象物の長さを直接表すものではなく，相対的な数値であることである。

1 画素に相当する実長さ ΔH_0 は，

$$\Delta H_0 = \frac{H_0}{M} \quad \dots \dots \dots \quad (9)$$

と表せる。

ΔH_0 が小さいほど測定精度は向上することは明らかであり，従って，精度を高めるためにはカメラに映る対象物の画素数 M を大きくする必要がある。

カメラに映し出されるターゲットの画素数を大きくするには画素数の多いカメラを使用することのほかに，上式からも分かるように，焦点距離の長いレンズを使用したり，ターゲットとカメラの距離を短くしたり，ターゲットの大きさを増すことによっても可能となる。以上のこととは一次元の場合についてだけではなく，二次元の場合についても同様なことが言える。

(2) ターゲット周辺のコントラスト

解析するターゲットの画像の大きさは大気中の光の屈折などの影響を受けることのほかに，CCD カメラの場合ターゲット周辺のコントラストが重要な意味をもつ。

これは対象物領域を白，背景領域を黒に 2 値化する場合，周辺の明るさが変化すると，しきい値が一定のままの状態では 2 値化されるターゲットの面積が一定とはならないためである。すなわち，式(6)と(7)の $f(m, n)$ が変化するため，一般には重心位置は誤差を生じる。しかしながら，重心座標は面積と一次モーメントから計算されるために誤差の程度は，長さや周長などの一次元の測定よりも相対的に小さくなる。

実際には，ターゲット周辺の画像から微妙な変化が生じ，太陽光線の影響を直接受ける昼間の測定においては，一般に精度は悪くなる。

これを避けるためには，測定ごとにターゲットの画像の面積を一定にするように，しきい値を周辺の明るさに応じて調整する必要がある。

しかしながら，最も良いのは，大気が安定し，しかもターゲット周辺の明るさが常に一定に保たれる夜間に測定を行うことで，しきい値も変化させる必要がなく，光源が白，暗闇が黒となりきわめて好都合である。

一方，既設の構造物にとっても温度差の影響が小さくなる夜間から夜明けに測定することにより正確な値を得ることができる。

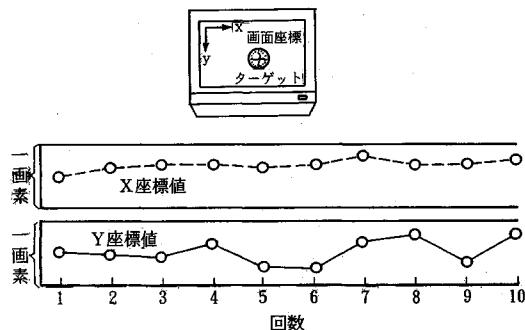
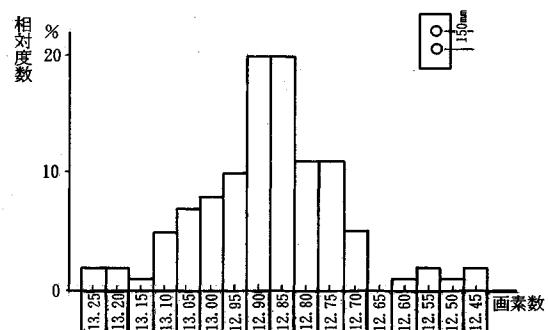
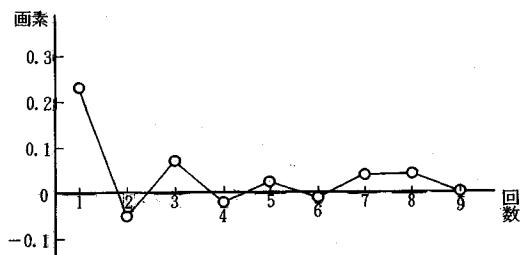
図-9 重心座標の測定精度¹⁰⁾

図-11 重心間距離の測定精度

図-10 画像の取り込み回数と測定精度¹¹⁾

6. 計測精度の結果

(1) 重心位置の計測精度

大気の影響がほとんどない状態でターゲットの重心座標を連続的に測定しても、必ずしも同一の値とはならず、いくらかの誤差が生じる。図-9は、画素数480×500のCCDカメラを用いて重心座標を求めたもので、最大値と最小値の幅はX座標では0.2画素、Y座標では0.5画素程度ある。しかし、これらの誤差は発散するものではなく、ある値を中心に収束する傾向にあり、したがって、画像の取り込み回数を増やし、平均化することにより真の値に近づけることが可能である。

図-10は取り込み回数をどの程度にすべきかを調べたもので、ターゲットのY軸方向の重心座標を9回測定し、その平均値と各回数までの平均値との誤差量を示したもので、この結果から4～5回測定した重心座標を平均すれば収束することが分かる。

(2) 重心間距離の精度

各ターゲットの基準となる1画素あたりの大きさを求めたり、実際の変形量を測定する場合の計測において最も重要なのは重心間の距離測定である。

CCDカメラによる精度を調べるために、実際の施工

現場において白黒のターゲットを取り付けて100回の測定を行った。ターゲットは対象物領域をφ100mmの円形とし2個の重心間隔を150mmに設定した。

図-11は測定した重心間距離を画素数で表わしたヒストグラムで、ほぼ左右対象の正規分布をした結果となった。測定値は、12画素から13画素の範囲でバラつきがあったが、平均は12.85画素で、標準偏差Sは0.12画素であった。

従って、平均値±S内、すなわちこの場合1.5mm以内の誤差に含まれる確率は75%であり、±3S内にすべて含まれた。

(3) レベル測量との比較

従来のレベル測量では微動レベル器とスタッフにより高さを測定しており、スタッフの最小目盛りは5mmで、白黒交互の帯状の幅で表示され、それ以下は目分量にて読み取っている。

レベル測量の精度を確認するために、張り出し長さが63.5mのPC橋の各ブロック先端の高さ(18点)を5回測定し、各点における誤差の幅を求めた。

表-1は、柱頭部中央の標高を421.012mとした時の各点の高さの測定結果である。

この試験においては、レベルの据え替え誤差も含まれており、一般に行っている測量方法に準じた。

この結果からレベル測量では、2～4mm程度のバラツキがあり、誤差の幅はほぼ3mm以内におさまることが分かった(図-12)。

次にレベル測量とカメラ計測との比較をするために、張り出し長が20.5m(第5ブロック)の片側にコンクリート打設したときの上部工の変形量を測定した結果を示す。

コンクリート打設前の高さをゼロとし、柱頭部の高さに対する相対的なたわみの測定値について比べた(図-13)。

表-1 レベル測量結果

測点	標高値(m)					範囲 (mm)
	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	
柱頭部先端	421.132	421.131	421.132	421.132	421.133	2
第1ブロック	421.226	421.226	421.226	421.229	421.227	3
2ブロック	421.314	421.314	421.315	421.317	421.317	3
3ブロック	421.411	421.410	421.410	421.412	421.413	3
4ブロック	421.532	421.532	421.532	421.535	421.533	3
5ブロック	421.635	421.635	421.635	421.637	421.638	3
6ブロック	421.739	421.739	421.741	421.741	421.741	2
7ブロック	421.945	421.944	421.945	421.946	421.947	3
8ブロック	421.946	421.945	421.947	421.948	421.947	3
9ブロック	422.071	422.071	422.078	422.080	422.079	3
10ブロック	422.190	422.190	422.191	422.192	422.193	3
11ブロック	422.308	422.307	422.308	422.310	422.310	3
12ブロック	422.426	422.425	422.425	422.426	422.428	3
13ブロック	422.573	422.571	422.571	422.573	422.574	3
14ブロック	422.708	422.707	422.708	422.709	422.710	3
15ブロック	422.856	422.854	422.854	422.856	422.856	2
16ブロック	422.991	422.988	422.987	422.990	422.990	4
17ブロック	423.141	423.139	423.138	423.140	423.140	3

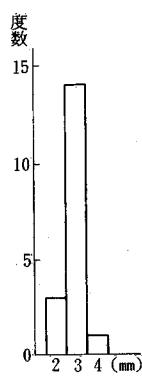


図-12 レベル測量のバラツキ

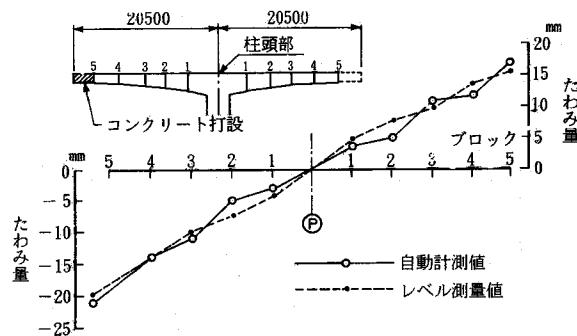


図-13 自動計測とレベル測量の比較

カメラとターゲット間の距離は、ほぼ70mである。

各ブロック先端の10点における測定結果では、両方法の間に最大3mmの違いがあった⁴⁾。

これは、表-1に示したようにレベル測量の誤差範囲は平均±1.5mmと考えられ、また、この測定条件下におけるCCDカメラの誤差範囲は、前節での測定結果からやはり±1.5mm程度であることから、この程度の誤差が生じたものと思われる。

7. 現場たわみ管理の適用例

(1) 短期計測

張り出し工法により施工されたPC2径間ラーメン橋(以下A橋)に、CCDカメラを用いた自動計測システムを適用し、施工中の1サイクルについて継続的に測定を実施した結果について述べる。

カメラは図-14に示すように地上にセットし、計測の対象とするターゲットは張り出しの先端の2点とした。

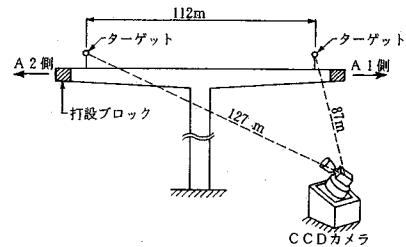


図-14 A橋計測図

カメラとターゲット間の視準距離はそれぞれ127mと87mであった。

コンクリートの打設は、先にA2側を1ブロック分打設し、その後A1側の打設が行われた。この時の鉛直および水平方向の変位をカメラによって測定した結果を図-15に示す。この図から打設の開始(7:00)とともに構造系全体が回転を起こしA2側に倒れるが、A1側の打設終了時には倒れがもとに戻り、コンクリート重量増加分の鉛直たわみが約20mm生じている。このように本システムは水平変位をも測定できる点が特徴である。

コンクリート打設後5日間の鉛直変位量を1時間毎にカメラを用いて測定した結果を図-16に示す。

変動荷重による鉛直変位の計算値と実測値を経時的に比較したものであるが、全般的な挙動はほぼ計算値と一致している。現場作業がない場合、例えば11日などは養生日であるにもかかわらず、たわみが変化しているが、これらは温度差による影響である。これらの影響のない早朝の測定においては、計測値と計算値は良く一致していることが分かる。

(2) 長期測定

カメラを橋上にセットした場合の実施例として、張り出し施工したPC箱桁橋(以下B橋)の長期測定結果について述べる。測定期間は2ヶ月間で、計測時刻は午前3時とした。もちろん、これらはすべてコンピューターにより制御され、無人で行われた。また、カメラとターゲットとの距離が短く、その間の角度が小さいことから一画面に多数のターゲットが映し出されるためにリレー式の装置を用いた。

計測条件は図-17に示すように、各ブロック先端に発光するターゲットを取り付けて、全点を各施工段階に1回計測した。

図-18は第12ブロックの型枠をセットした時点の橋体形状を自動計測により求めたもので、点線が計画値、実線は計測値を表しており、リアルタイムにディスプレイ上で設計値と比較することが可能である。

図-19はA2側の第8ブロックと第12ブロック先端の2点に着目し、経時的な鉛直変位を計測した結果を示す。カメラからの視準距離は約29mと44mであった。ここではカメラの測定値の精度を調べるために、レベルによる測量も行っている。

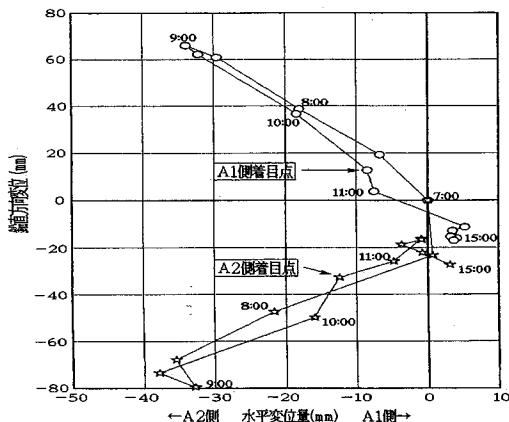


図-15 コンクリート打設時の桁の変位

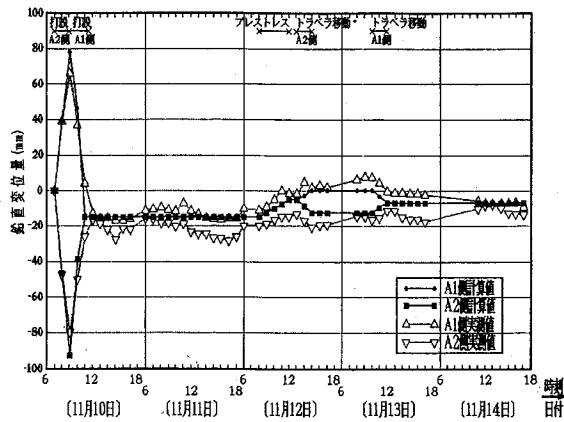


図-16 施工サイクルの経時的たわみ測定結果

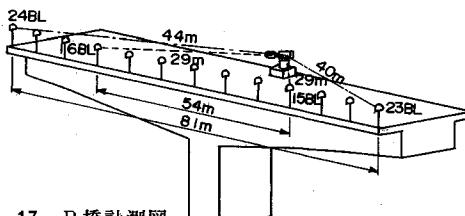


図-17 B橋計測図

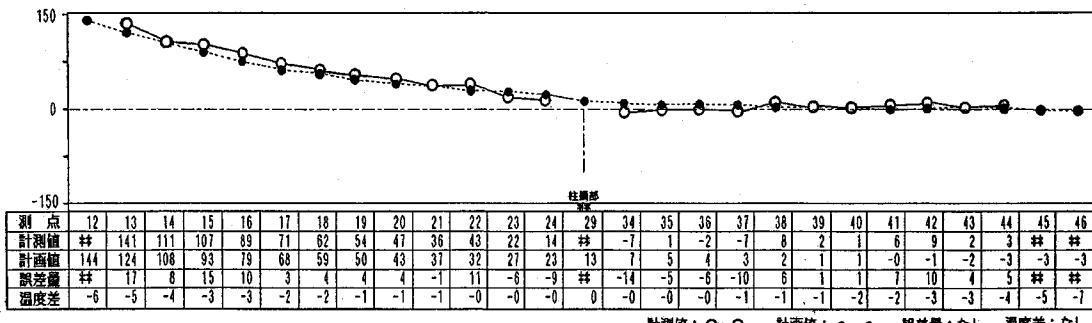


図-18 たわみ管理の例

この結果の計測値と計画値の違いには施工誤差のほかに温度差などの影響が含まれる。

カメラ計測とレベル測量との差はほぼ5mm以内の範囲に含まれ、長期的な計測においても本システムの精度はレベル測量と同程度と考えられる。

8. 結 論

今回の設計計算、CCDカメラによる自動計測および現場のたわみ管理システムの開発における成果を要約すると以下のようになる。

- 1) カメラとターゲットの距離を考慮して、適切な倍率のレンズを選択することにより、比較的安価なCCDカメラでも十分な測定精度を有する。
- 2) CCDカメラを橋面上に設置した長期測定においては、安定した測定精度が得られ、レベルの測定精度はほ

ぼ確保できる。

3) 夜間の無人計測が可能であることから、構造物の温度差の影響や測定時の大気の影響を排除しやすく、構造物の正確な状態が把握できる。

4) 天候に左右されることなく、リアルタイムに構造物全体の高さ計測が可能で、施工中の上げ越し量修正の判断データを提供する。

5) PC長大橋においては設計方法およびサイクル施工を伴う施工法はほぼ定着しており、設計計算から施工管理までの一貫したシステムの構築は、特殊例を除いて、大幅な省力化が実現できる。

6) 設計と施工管理の一貫したシステムは、設計技術者と現場技術者とのギャップを補うことができ、設計から建設過程でのミスを防止しやすい。また、施工過程でのデータを蓄積することにより、設計時に反映させる資料

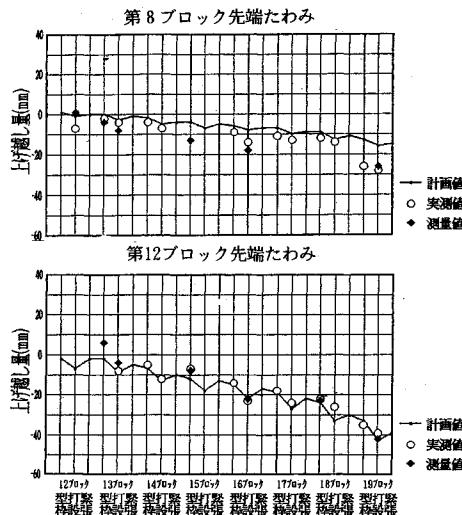


図-19 鉛直変位量測定結果

として利用できるという利点がある。

今回開発したシステムは、設計と施工管理の一部を合理化したものであるが、今後の課題として施工の合理化も含めたさらに大きなトータルのシステム化に結びつけて行く必要があろう。

本開発を始めてからすでに7年が経過し、その間プログラム開発と現場での試行錯誤を繰り返し行ってきた。

計測試験結果に対し貴重な御意見を頂きました緒先生方と各官庁の方々に心よりお礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 中村克己・樋清一郎・国島正彦・渡辺泰充：月夜野大橋上部工の設計・施工、プレストレストコンクリート、Vol.25, No.1, pp.80~89, 1983年1月。
- 2) 石川勇、ほか：P & Z工法における施工管理システム、橋梁、Vol.19, No.5, pp.10~pp.19 1983年。
- 3) 小桜義隆・鳥居邦夫・高田孝次：CCDカメラを利用した平面形状の計測システムとその応用、土木学会論文集、No.435/VII-15, pp.89~94, 1991年9月。
- 4) 森本洋三・野田行衛・大沢浩二・橋吉浩：FCC工法におけるPC橋のたわみ管理、プレストレストコンクリート、Vol.30, No.2, pp.14~20, 1988。
- 5) 森本洋三・野田行衛・中山良直・新井達夫：PC斜張橋の施工管理システムについて、プレストレストコンクリート、Vol.32, No.4, pp.34~41, 1990。
- 6) 森本洋三・野田行衛・中山良直：FCC工法における設計・施工管理システム、第27回プレストレストコンクリート研究発表会、pp.81~82, 1987年11月。
- 7) 西川健之・高野喜代・大沢浩二：大倉大橋のたわみ管理、第1回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム、pp.173~176, 1990年11月。
- 8) 尾崎弘・谷口慶治：画像処理～その基礎から応用まで、共立出版、pp.179~184, 1989。
- 9) 土屋裕・深田陽司：画像処理、テレビジョン学会編、コロナ社、1992年3月。
- 10) 渡辺泰充・中山等・野田行衛：コンクリートの非破壊検査方法、コンクリート工学、Vol.27, No.3, pp.78, 1989年3月。
- 11) 玉川ダム男神橋施工管理計画業務委託施工管理報告書、財国土開発技術研究センター、pp.145~168, 1988年12月。

(1993.4.6 受付)

THE DEFLECTION CONTROL SYSTEM FOR PRESTRESSED CONCRETE BRIDGES BY CCD CAMERA

Yukie NODA, Yoshinao NAKAYAMA and Tatsuo ARAI

In Long-span prestressed concrete bridges (box girder or cable stayed bridge), the design and construction control become increasingly complex as construction proceeds with step by step process.

This paper presents the method and operation of an automatic levelling module by CCD camera and the experimental results by this system.

Successful application of the system showed the system would be an effective and efficient construction aid.