

FCC 工法における PC 橋のたわみ管理 (設計および自動計測システムについて)

森 本 洋 三*
野 田 行 衛**
大 沢 浩 二†
橋 吉 宏††

1. はじめに

近年、構造物の大型化や施工の機械化に伴って、設計および施工管理に対する高精度化や、施工時の安全確保のための常時管理システムの必要性が高まっている。

一方、環境条件の変化や社会的ニーズの多様化から、設計・施工や管理は複雑化しており、現場技術者や管理者の負担は増加する傾向にあり、作業のロボット化や省力化を進めることが急務となっている。

一般に PC 大型構造物の設計においては、施工状況に対応した解析が必要であり、施工に伴い構造系が変化する場合には多くの計算を必要とする。

また、現場での形状管理についても、施工中の各種要因による誤差を計測分析し、補正するために多くの労力と時間を要していた。

従来、これらの問題を解析するためには、高価で大がかりな装置を必要としたが、最近のマイクロコンピュータや、ハイテク関連機器の発達によって比較的安価で小型のものが利用できる環境となってきている。

ここでは、その一例として大型コンピュータによる片持架設工法の設計解析プログラムと、それに連動した現場でのマイクロコンピュータによるたわみ管理システムの概要と適用について報告する。

2. 全体システムの概要

今回開発したシステムは、図-1 に示すように、設計計算システムとたわみ管理システムから構成され、設計から施工管理まですべて自動化したものである。

設計計算システムは、片持架設工法により施工される PC 橋の設計計算と上げ越し計算を、大型コンピュータにより一貫処理することで、架設ステップの忠実なトレースを可能にし、設計業務の省力化を目的としたもの

である。

上げ越し計算結果は、現場たわみ管理用に大型コンピュータからマイクロコンピュータにデータ転送され各施工ステップ毎の上部工線形が図化される。また、各荷重によるたわみ量も図化され、データ入力のミス防止にも役立てることができる。

一方、たわみ管理システムは、既設上部上の形状を TV カメラを用いて自動的に計測するシステムを導入し、計画値との比較を行うことにより、施工精度の向上を旨とするものである。

たわみ管理のための自動計測システムは、従来のレベル測量の煩雑さを解消することのほかに、測定の精度向上にもつながるものである。

3. 設計計算システム

本システムは、近年増加しているケーブルシステムおよびバーシステムによる片持架設に適用するものとして開発されており、施工段階に伴った鋼材応力の変化や、

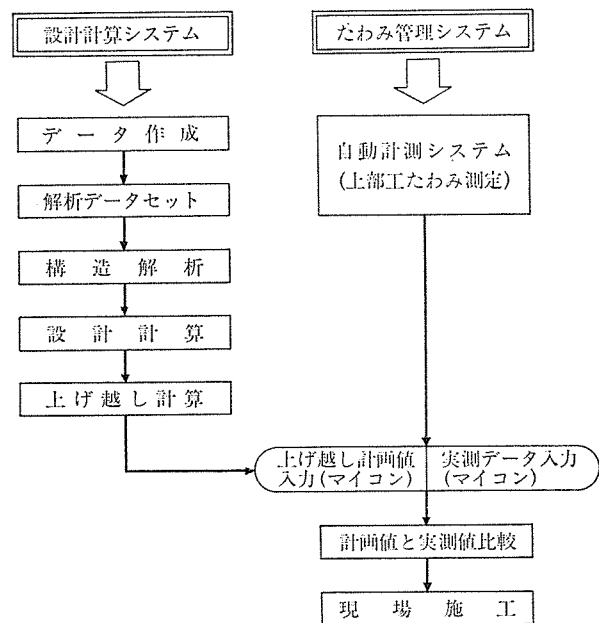


図-1 全体システム図

* 川田建設(株)技術部技術開発課
** 川田建設(株)技術部技術開発課
† 川田建設(株)技術部技術二課
†† 川田工業(株)技術本部研究室

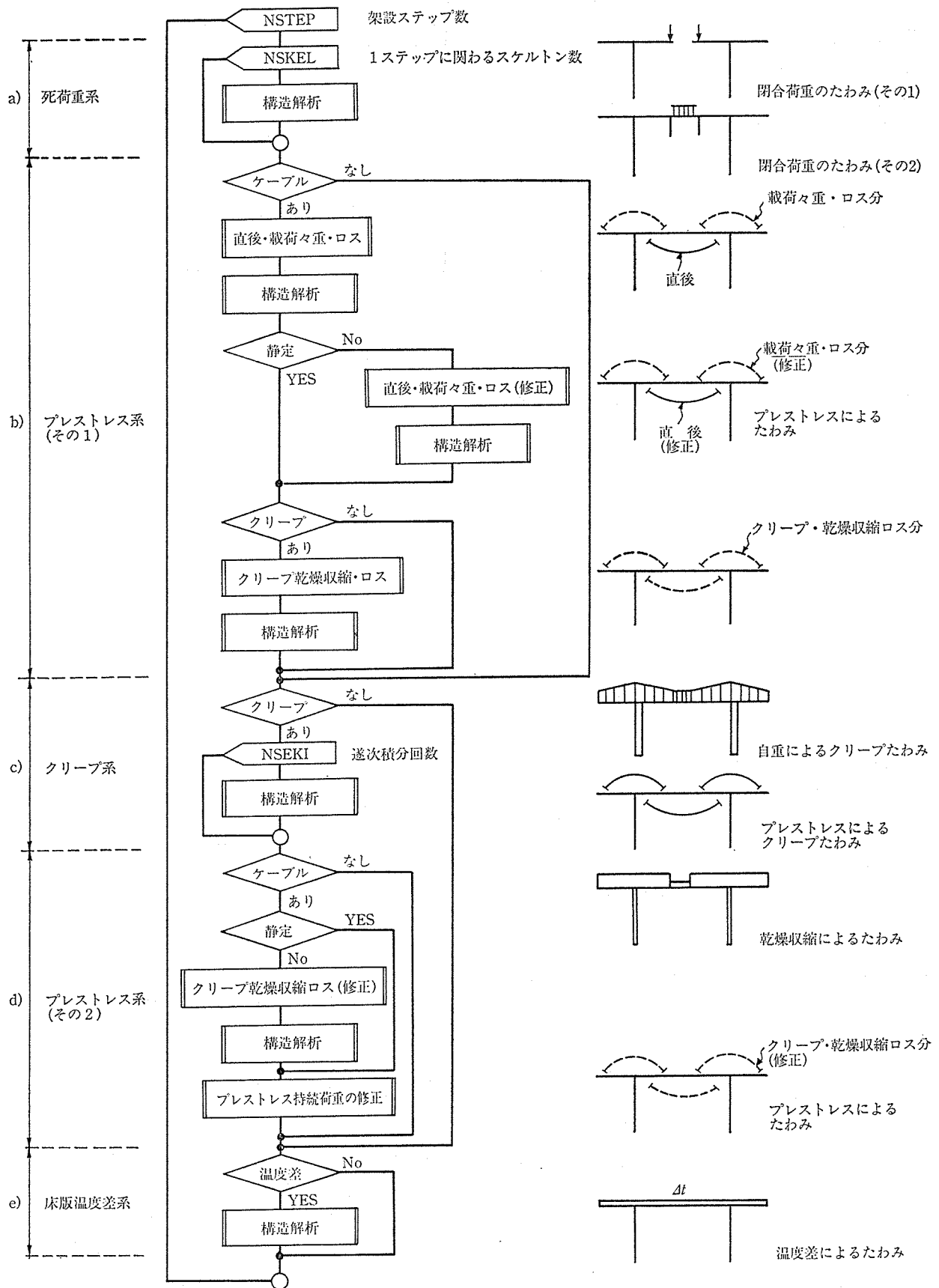


図-2 架設系構造解析フロー図

◇報告(投稿)◇

橋体の材令差による影響を十分反映することが可能であるとともに、移動支保工による分割施工等についても対応可能となっている。また、解析途上において、ベント等の仮設部材の設置・撤去、および連続桁の場合の中間支点の仮拘束の解放のような処理も考慮できる。

構造解析は、変位法によっており、その流れを 図-2 に示す。

死荷重系は、自重、橋面、トラベラー、吊支保工、作業荷重などの固定荷重に対する断面力の解析を行う。

プレストレス系(その1)では、各施工段階の PC 鋼材の追加および張力変化に伴うプレストレス 2 次力の解析を行う。ここでは、弾性変形、クリープ乾燥収縮およびレラクゼーションによる鋼材応力度のロス量を考慮して計算する。

クリープ系では、構造系やコンクリート材令の変化に伴うクリープ 2 次力の解析を行う。

従来用いられている Dischinger の簡略式の代わりに、以下に示す基本式を用い厳密な計算を行っている。

$$\epsilon_b(t) = \frac{\sigma_b(t)}{E_b} + \int_0^t \frac{\sigma_b(t)}{E_b} \cdot \frac{d\phi(t)}{d\tau} \cdot d\tau + \epsilon_s(t)$$

- ここに、 $\epsilon_b(t)$: 時刻 t におけるコンクリートひずみ
- $\sigma_b(t)$: 時刻 t におけるコンクリート応力
- $\phi(t)$: 時刻 t におけるクリープ係数
- $\epsilon_s(t)$: 時刻 t における乾燥収縮度
- E_b : コンクリートの弾性係数 (=const)

プレストレス系(その2)では、不静定構造に対してプレストレス 2 次力の変化量およびクリープ系で解析したクリープ 2 次力を考慮し、プレストレスの変化および 2 次力の変化を計算し、作用断面力を再度修正する。

床版温度差系では、不静定系において生じる断面力の解析を行うとともに、架設系(一般に静定)においても上げ越し管理用の参考たわみ値を計算している。

次に、設計計算は、大別して主方向と横方向に分類されるが、本システムでは、主方向だけを扱い、横方向に関しては別に開発されているマイクロコンピュータにより行うものとしている。主方向の設計計算は、図-3 に示す流れで行っているが、最初からすべて実行する必要はなく、設計の進行にあわせて段階的に実行することができる。また、鉄筋の追加、せん断鋼棒の実配置ピッチに対する計算等も可能である。さらに、合成応力度等の計算結果を描画する自動化プログラムも備えている。

最後に、施工管理データとして、架設ステップ毎の上げ越し量、緊張力等も計算できる。これらは、架設系構造解析の結果を基にして計算され、マイクロコンピュータへデータ転送することにより、管理データを保存

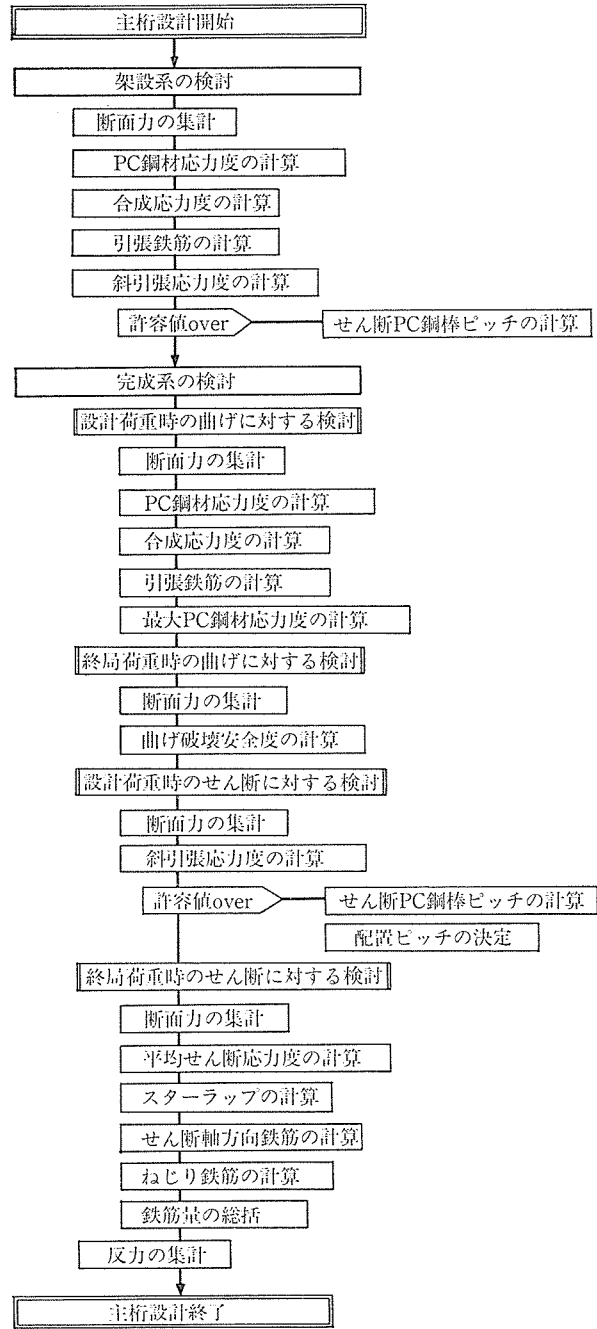


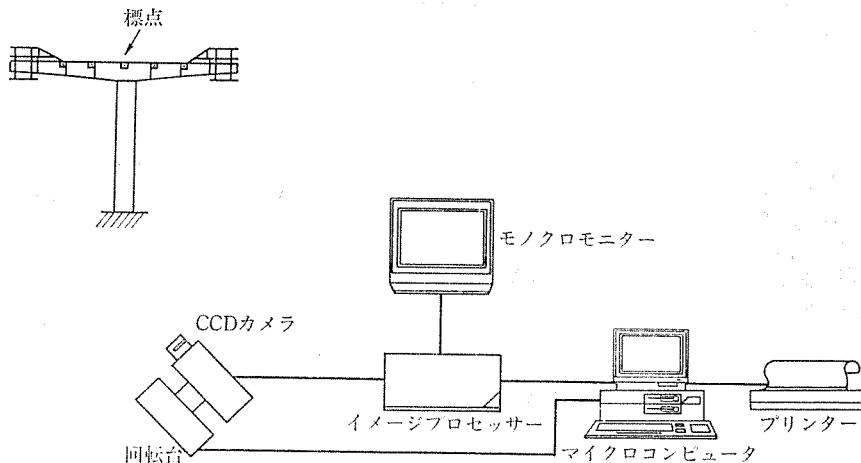
図-3 主桁の設計計算フロー図

し、現場において実測値との比較や補正が可能である。

4. 自動計測システム

TV カメラを用いた自動計測システムは、非接触型変位計として使用する CCD カメラ、カメラからの電気画像信号を処理するイメージプロセッサ(画像処理機)、またそれらを制御するマイクロコンピュータから構成されるもので、本システムの構成を図-4 に示す。以下に、システムの使用器機、桁形状計測方法、ならびに計測結果例を示す。

4.1 計測システム使用器機



図—4 計測システム構成

図—4 に示したシステムにおける各構成器機は、FA (ファクトリー・オートメーション) の分野でロボット の視覚部として一般化されているもので、最近の著しいエレクトロニクス技術の進歩により、低コストで容易に取扱いが可能となった器機である。以下にその概要を説明する。

(1) CCD カメラ

CCD カメラは、画像を電気信号に変換する方法として、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 (CCD) を用いたものである。この方式のカメラは、画像のひずみが小さく高解像度が得られ、耐振、耐衝撃的に優れ、外部の電氣的ノイズにも影響されない等の特徴を有する。

CCD カメラを用いた測定精度は、カメラの解像度とレンズの性能に影響される。カメラの解像度はセンサー素子 (画素) 数により決定され、本計測システムでは水平方向と鉛直方向の有効画素数が 490×384 のカメラを用いたが、さらに分解能のよいものであれば精度の向上が期待できる。またカメラには、市販のカメラレンズを取り付けることが可能であり、計測には 85~500 mm の各種望遠レンズを用意した。

(2) イメージプロセッサ (画像処理機)

イメージプロセッサ (画像処理機) は、ある標点の形状認識や TV 画面座標上における重心位置、面積等を計測するために用いる器機であり、CCD カメラから送信される電気画像信号に対して画像処理を行うものである (図—5 参照)。基本的な原理については文献 2) を参照されたい。たとえば、標点の形状を判定するには画像処理機能として 2 値化処理機能を用いる。2 値化とは、ある明るさを基準に画像を明暗に分解する機能であり、スレッシュレベル (明暗のしきい値) により基準値を変えることができる。もし標点が周囲よりも明るい場合に

は、このような処理により標点だけを画面に映し出すことができる。この標点が映し出された画面に対し、マイクロコンピュータを用いて、TV 画面座標上での面積や重心位置等を求める演算処理ができる。

(3) 標 点

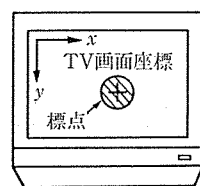
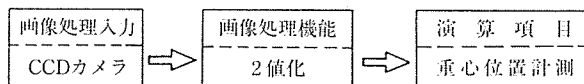
重心位置や面積等を求められる標点は、周囲と明るさの異なるもの、すなわち形が明確に判定できるものであればよい。本計測では図—6 に示す標点を用いたが、発光体の使用も可能である。

(4) 回 転 台

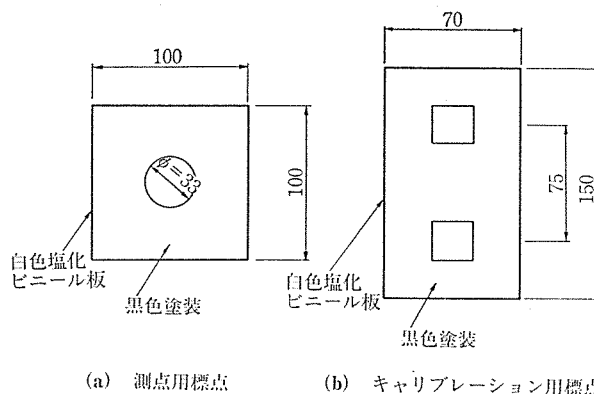
TV カメラを用いて桁形状を測定する場合、次節で示すように、TV カメラを回転させる必要がある。この TV カメラの回転部には、マイクロコンピュータ制御によるステッピングモーターを使用しており、自動的に目標とする標点位置にカメラをセットすることができる。本計測システムで用いたステッピングモーターの最小分解能は、560°/50 000 であり、約 2.6" である。

4.2 計測方法

TV カメラによる計測は、上部工を視準できる回転軸



図—5 画像処理概要



図—6 標 点

◇報告(投稿)◇

をセットした TV カメラで上部工各測点に取り付けた標点の TV 画面座標上での重心位置をイメージプロセッサを用いて計測し、その移動量から桁の高さの変化量を求める計測方法である。その計測方法の流れ図を図一

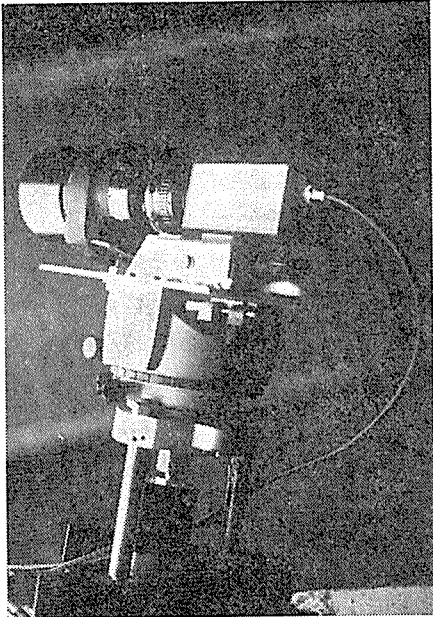


写真-1

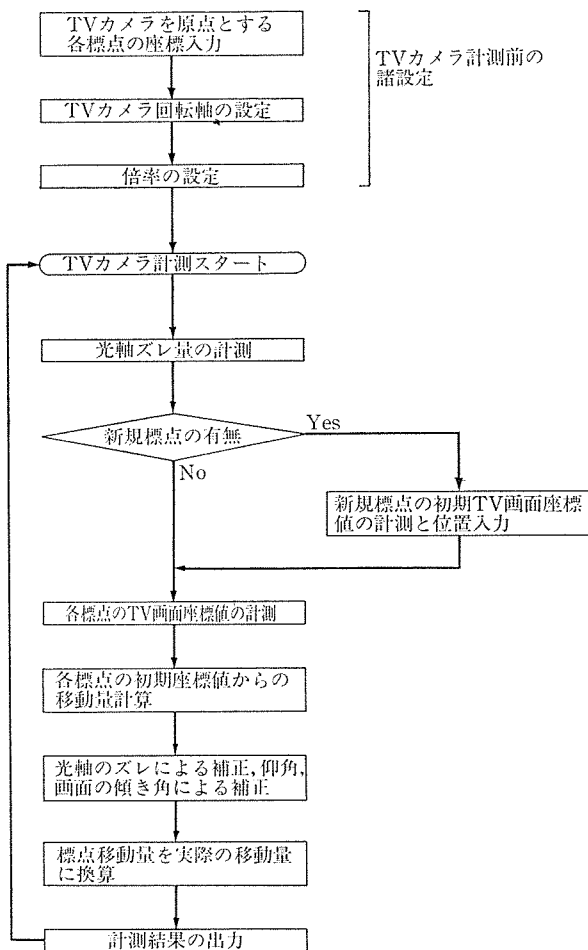


図-7 計測方法の流れ図

7 に示し概要を以下に説明する。

(1) TV カメラ計測前の諸設定

a) 各標点の座標入力

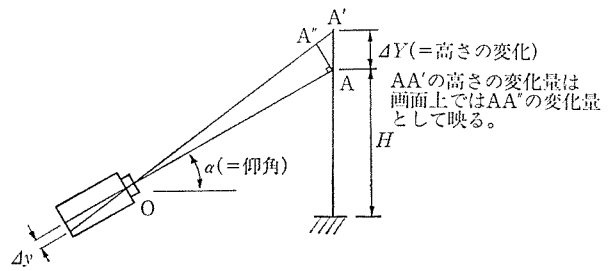
TV カメラを原点とする各標点取付け場所の (X, Y, Z) 座標を記録する。各座標値は上部工線形表と簡単な測量から求められ、標点と TV カメラの距離や仰角等の幾何計算に用いられる。

b) TV カメラの回転軸設定

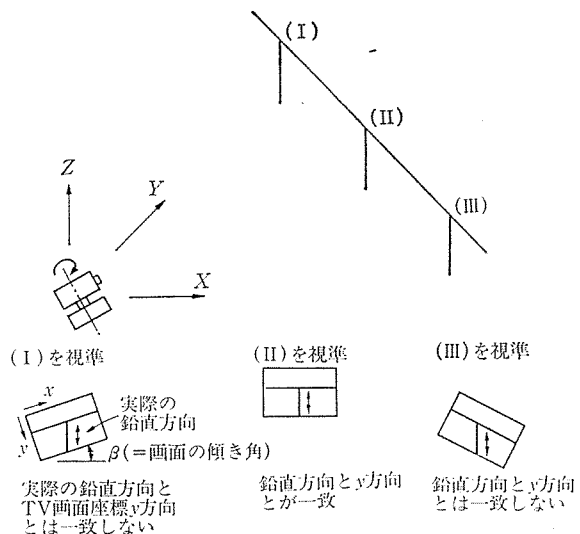
上部工の線形が直線勾配またはそれに近いならば、TV カメラを回転させると画面上の視野に常に上部工が映る平面が存在する。この時の TV カメラの回転面が視準平面であり、カメラの光軸と上部工とが直交する点を除いて、画面は傾いて映る(図-8 参照)。この平面は、幾何学的に、TV カメラの位置(座標原点)と任意の2標点の座標値によって決定され、各標点における画面の傾斜角も幾何計算により求められる。

c) 倍率の設定

上部工のある標点と同一位置に2つのマーク間の距離が既知であるキャリブレーション用の標点(図-6 (b) 参照)を取り付け、そのマーク間の距離を TV カメラにより計測し、実際のスケールと TV 画面座標との関



(a) 仰角による補正



(b) 画面の傾き角による補正

図-8 TV 計測における補正

係倍率を設定する。

(2) TV 計測

a) 光軸ズレ量の計測

TV 計測において、測定時の温度等の気象条件により TV カメラ本体や回転台等に微小な変形が生じ、それとともに光軸もわずかながら変化する。このような光軸のズレ量を補正するために、不動点となる標点を設定しておき、各測定時における不動点の画面座標上での位置関係から、各標点の光軸のズレによる補正量を算定する。

b) 新規標点

新規標点を取り付ける場合は、取付け時の標点の TV 画面座標値を計測し、光軸のズレによる補正を行ってマイクロコンピュータに記録する。

c) 各標点の高さの変化量計測

既設標点の高さの変化量の計測は、新規標点取付け時と測定時での TV 画面座標上の標点の移動量に補正を加えて行う(図-8 参照)。補正は、光軸のズレ、仰角ならびに画面の傾き角に対して行い、前述に設定した倍率により標点の移動量を実際の移動量に換算し、高さの変化量とする。

4.3 計測結果例

張出し施工中の上部工の変形量を、本計測システムで計測した結果を示す。また同時に、レベルによる計測も行い、両者を比較することによって計測方法の妥当性を検討した。

(1) TV カメラ計測概要

a) 測定対象

山間部に位置する PC ラーメン橋(支間 60m)の張出し施工時に対して、TV カメラを用いた高さ計測を試行した。計測は、第4~第5ブロック施工中におけるコンクリート打設前・打設中・打設後、プレストレス導入前後、トラベラー移動前後に実施し、レベルによる高さの計測と並行して行った。

b) TV カメラの設置

TV カメラは、橋体から約 80m 離れた地点に設置した。CCD カメラの性能は前述のとおりであり、レンズには 500mm 望遠レンズを装備した。カメラを含めた本計測システム使用器機は室内仕様であるために計測ハウスを用意し、カメラもその中に設置したが、カメラの基礎についてはコンクリート基礎とした。

c) 標点の設置

標点は、前述したように周囲と明るさの異なるものであればよく、本計測では図-6(a)に示す黒色板に白色円形部を有する板を用いた。標点の大きさは、計測精度の関係上、TV 画面上でその直径が 10~30 画素程度になるように白色円形部の直径を設定した。標点を取り付

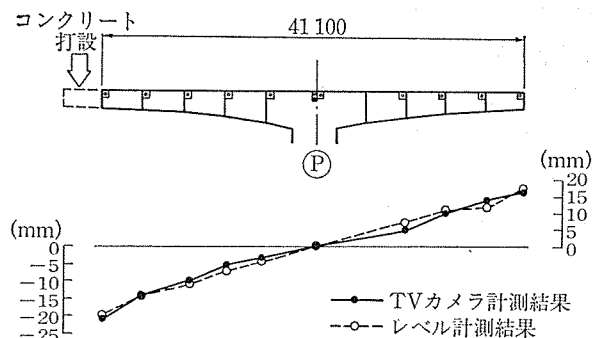


図-9 TV カメラ計測結果

けた位置は、柱頭部および各施工ブロック打継目の床版側面部であり、図-6(b)に示す倍率設定キャリブレーション用の標点は、柱頭部に設置した。

(2) 計測結果

TV カメラを用いた計測結果例として、張出し第5ブロックコンクリート打設時(片持ブロック打設終了時)の結果を、レベルによる計測結果とあわせて図-9に示す。ここに示した施工時は、コンクリート打設中にアンバランスモーメントが生じ、TV 計測を実施した施工時の中では最も高さの変化量が大い施工段階である。図中における実線は TV カメラを用いた計測結果、破線はレベルによる計測結果であり、両計測をほぼ同時刻に行った結果である。なお両計測の比較は、コンクリート打設前後の高さの変化量の比較によって行った。また、レベルによる高さの読みとりは 1mm 単位で読みとり、TV カメラ計測による高さの表示も 1mm 単位とし、TV 計測では小数点以下の数値は四捨五入した。

両者を比較すると、たわみ量の大きさに関係なく、1~2mm の誤差を生じた。この結果から、両者はほぼ一致していると考えられ、本 TV 計測手法の妥当性を確認することができた。

本 TV 計測手法を適用する場合、TV カメラの設置場所、レンズの倍率および標点の大きさを適当に選定すれば、精度のよい測定ができるものと思われる。また、回転台の安定度や CCD カメラの解像度の向上も測定精度に影響を及ぼすと考えられ、今後のエレクトロニクス技術の一層の革新が望まれるところである。

5. 現場たわみ管理

たわみ管理は、上げ越し計算から得られた架設中の計画標高にもとづいて、実際の橋体の標高を架設中に管理することである。

上げ越し計算では、各々の荷重に対して生じるたわみ量をもとに、各ブロック施工時の型枠セット高さや各施工ステップ毎の桁線形を算出する。

架設時は、予定の計画線形を目ざして施工を行うが、

◇報告(投稿)◇

一般に実際の桁線形と計画値とは誤差が生じる。

誤差の要因には、当初想定した荷重や剛性の差によるもののほかに、クリープ、乾燥収縮、温度の違い、また下部工の沈下等が考えられる。

表-1 に誤差要因についてまとめる。

架設中に実際の桁標高と計画値が大きくずれる場合には、その原因を究明し、再度上げ越し計算のやり直しが必要となる。

一方、架設中の誤差がある許容範囲内にある場合にも、誤差をできる限り早期に吸収し、計画線形に近づけながら施工の方がより正確なものとなる。

したがって、誤差を次の施工ステップで反映させ、計画上げ越し量の修正を行う必要があるが、計画上げ越し量の修正には、外見上折れ角が生じないなめらかな線形となるよう配慮すべきである。

図-10 は、たわみ管理例を示したもので、実線が計画値、破線が自動計測による実測値を示す。

これにより、1つの橋脚の桁形状のみでなく、各橋脚の桁形状の関係が明確になる。

本計測システムでは、作業が終了した夜間の測定も可能であり、橋体の安定する時間に合わせて形状測定を短時間に実施することができる。

6. おわりに

本報告で示した設計およびたわみ管理システムは、設計における省力化と、現場技術者に対して各種管理データを提供するものである。

このシステムの一部を構成する計測装置は、人間の目を持ち多くの情報を収集するロボットであり、現場に設置されたマイクロコンピューターは、データを整理し判断を容易にするための頭脳の一部と考えられる。

したがって、これらのシステムを利用することによって、現場での管理作業の省力化や迅速化が可能になるとともに、将来のための管理データの蓄積にも役立つものと考えている。

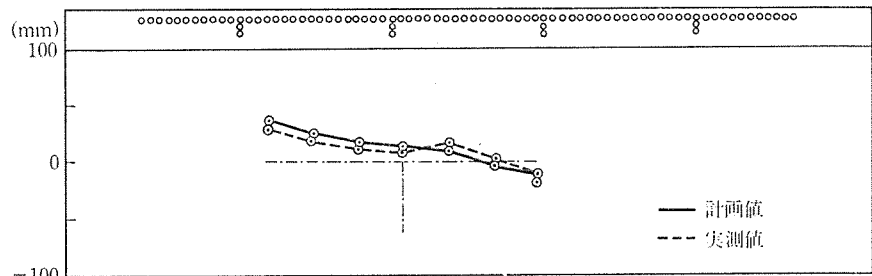
最後に、本システムは現在開発途上にあり、今後多くの実験を重ね機能の評価を加えてゆく必要はあるが、計測装置の改良や管理における総合判断システムの確立に

たわみ管理表

P1(1)張出し
型枠セット時

62/3/23 16:00

天候	温度	湿度	温度差
はれ	15	50	5



標点	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
計画値	---	---	---	---	35	23	15	12	9	-1	-12	---	---	---	---	---	---	---
実測値	---	---	---	---	32	20	14	10	12	0	-7	---	---	---	---	---	---	---
誤差	---	---	---	---	-3	-3	-1	-2	3	1	-5	---	---	---	---	---	---	---
温度差	---	---	---	---	0	0	0	0	0	0	-1	---	---	---	---	---	---	---

図-10 たわみ管理例

表-1 たわみ誤差要因

項目	項	目
荷重に関する項目	トラベラー、型枠重量	
	コンクリート重量	
	プレストレス力	
	橋面の機材荷重(クレーンなど)	
剛性に関する項目	トラベラー剛性	
	型枠剛性	
	上部工剛性	
	橋脚剛性	
その他	クリープ、乾燥収縮	
	上下床版温度差	
	下部工の沈下	
	測量誤差	

よって、施工における安全確保と高品質化等に寄与するものと考えている。

参考文献

- 1) 北島, 越後: 「TV カメラとマイコンを利用した標高計測システムに関する一考察」, 川田技報, Vol. 3, 1983
- 2) 田村: 「コンピュータ画像処理入門」, 日本工業技術センター編, 総研出版, 1985
- 3) 石川, その他: 「P & Z 工法における施工管理システム」, 橋梁, 1983.5
- 4) 中村, 樺, 國島, 渡辺: 「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
- 5) 三藤, 渡辺, 坂東, 中川: 「マイクロコンピューターを利用した PC 橋の現場自動計測」, 土木学会第 7 回電算機利用に関するシンポジウム, 1982.10

【昭和 62 年 7 月 31 日受付】