◇報　　告◇

PC 斜張橋の施工管理システムについて

森　本　洋　三*
野　田　行　衛**
中　山　良　直†
新　井　達　夫††

1. はじめに

現在，PC 橋梁構造物の施工に対する日本の技術は，施工された橋梁の規模や，施工方法および管理面などを含め，総合的に判断しても世界のトップレベルにあるといっても過言ではない。

一方，PC 斜張橋に関して言えば，1963 年に初めて島田橋が施工されてからも支間の長大化は進まず，支間が 100 m を超えるのに約 25 年を費やしている。しかし，最近になって支間 250 m に達する橋梁や，高速道路橋として 200 m 程度のものが施工されるなど，支間の長大化が急速に進んできている。

PC 斜張橋とは，プレストレストコンクリートの主桁と PC 鋼材とコンクリートの塔より成っている構造形式を言うのが一般的であるが，このように複数の構成部材から成り立っていることにより，構造上の自由度が高いほか，景観的にも優れた構造である。

しかし，このように構成部材が多いことは，施工管理上の管理項目が多くなることであり，特に長大斜張橋の施工に当たっては，主桁のたわみや斜材ケーブルの張力のみでなく，塔の変形および桁・塔の応力についても管理を行う必要がある。

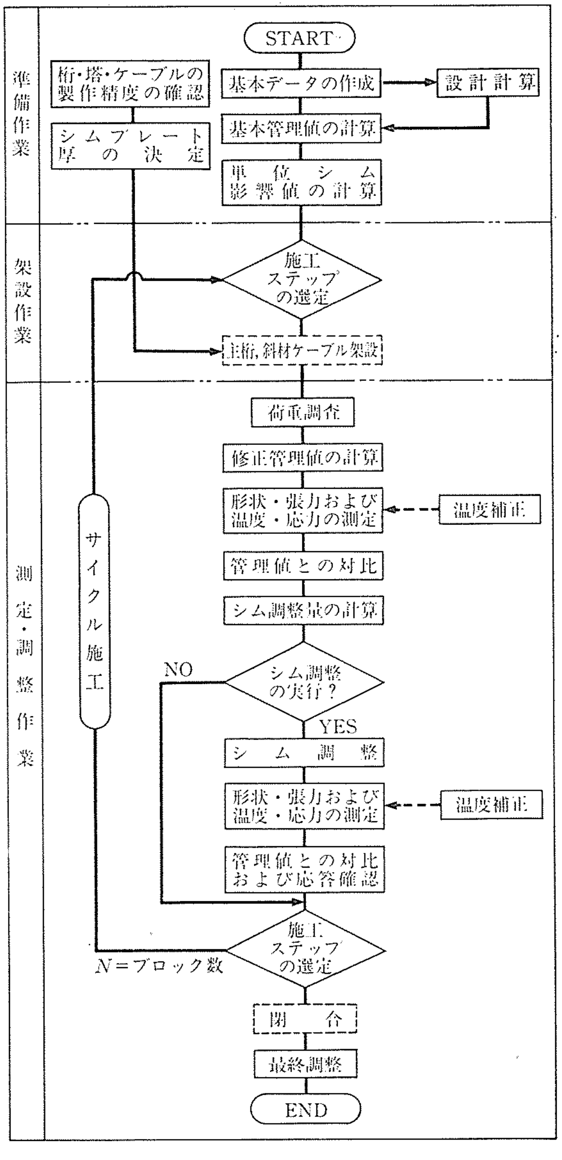
このように管理が要求され，管理項目が多く管理期間が長い場合には，コンピュータ等により計測やデータ解析処理およびデータ管理を一元化して行い，工事管理を迅速にかつ合理的に行うことが必要になる。

このような観点から，今回片持ち架設による PC 斜張橋の施工管理システムを開発したので，ここにその概要を紹介する。

2. 全体システムの概要

張出し施工による斜張橋は，架設段階ごとに不静定次数が増大し，構造物は大型化する。このため架設段階ごとの施工管理は重要な項目であるものの，管理のための労力と時間も他の橋梁に比して多大なものとなる。

斜張橋の架設中の管理項目としては，構造物の形状，斜材張力が主体で，その他に応力の管理などがあるが，斜張橋のような大型で複数の部材からなる構造物においては，温度変化，温度差などの影響を無視することはできず，必ず温度管理も必要とする。



図—1 施工管理フロー

* Youzou MORIMOTO：川田建設（株）開発部技術開発課
** Yukio NODA：川田建設（株）開発部技術開発課
† Yoshinao NAKAYAMA：川田建設（株）開発部技術開発課
†† Tatsuo ARAI：川田建設（株）開発部技術開発課

ここで述べるシステムは，斜張橋架設現場における精度管理を1台のパーソナルコンピュータですべて行うもので，大容量の計算を必要とする場合には不向きであるが，現場においてすばやく対応できるメリットがある。ここでは，施工ステップごとの精度管理は，自動的に実行されるようにシステム化されている。全体の施工管理の流れを 図—1 に示す。

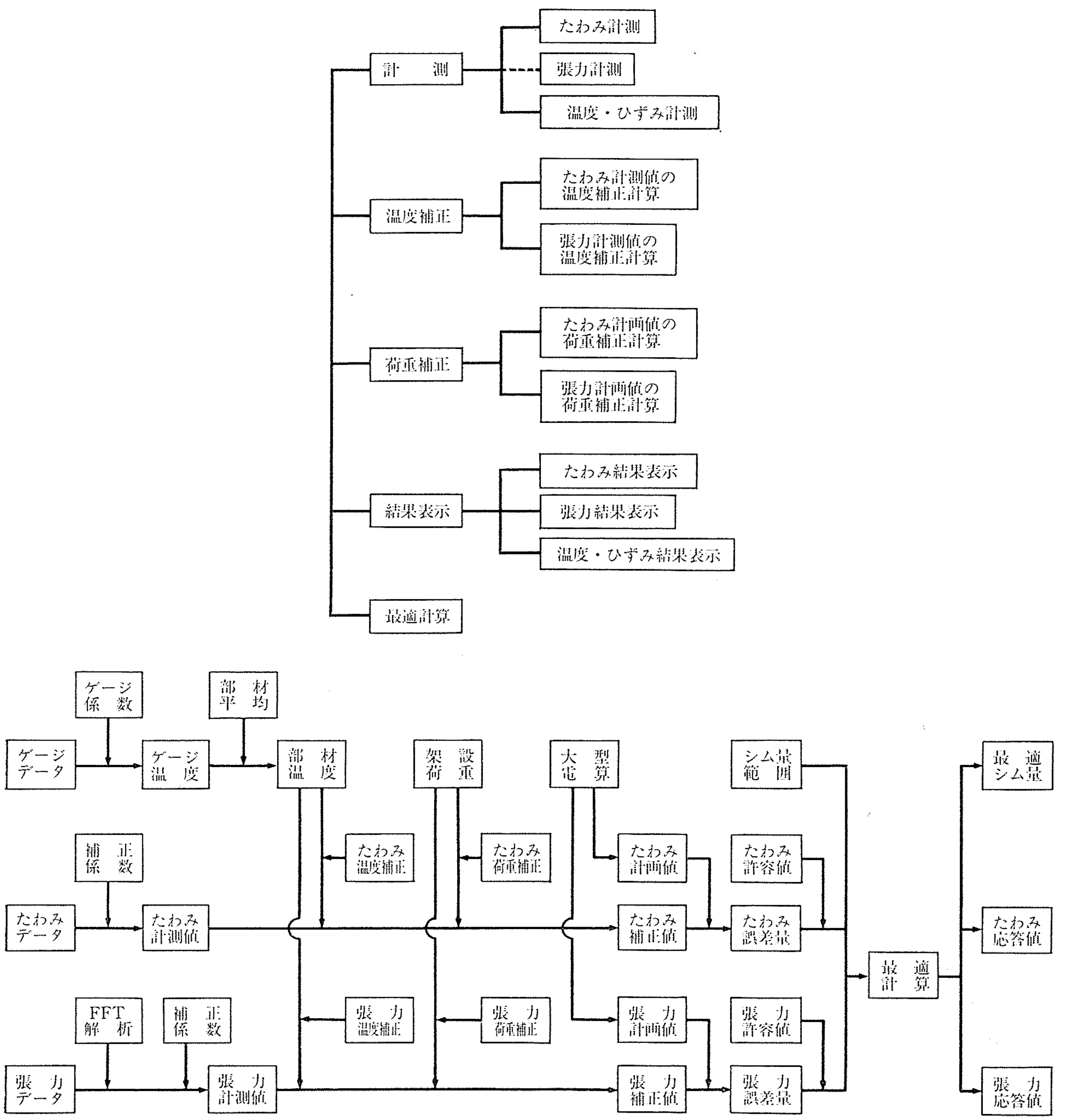
本システムは，計測システム，補正計算，計画値との比較計算，張力調整量の最適計算を行う計算プログラムからなっている。図—2 にプログラムの構成とデータの流れを示す。

計測システムでは，塔や主桁の形状，斜材ケーブル張力，コンクリートのひずみ，温度データを自動的に計測することができる。

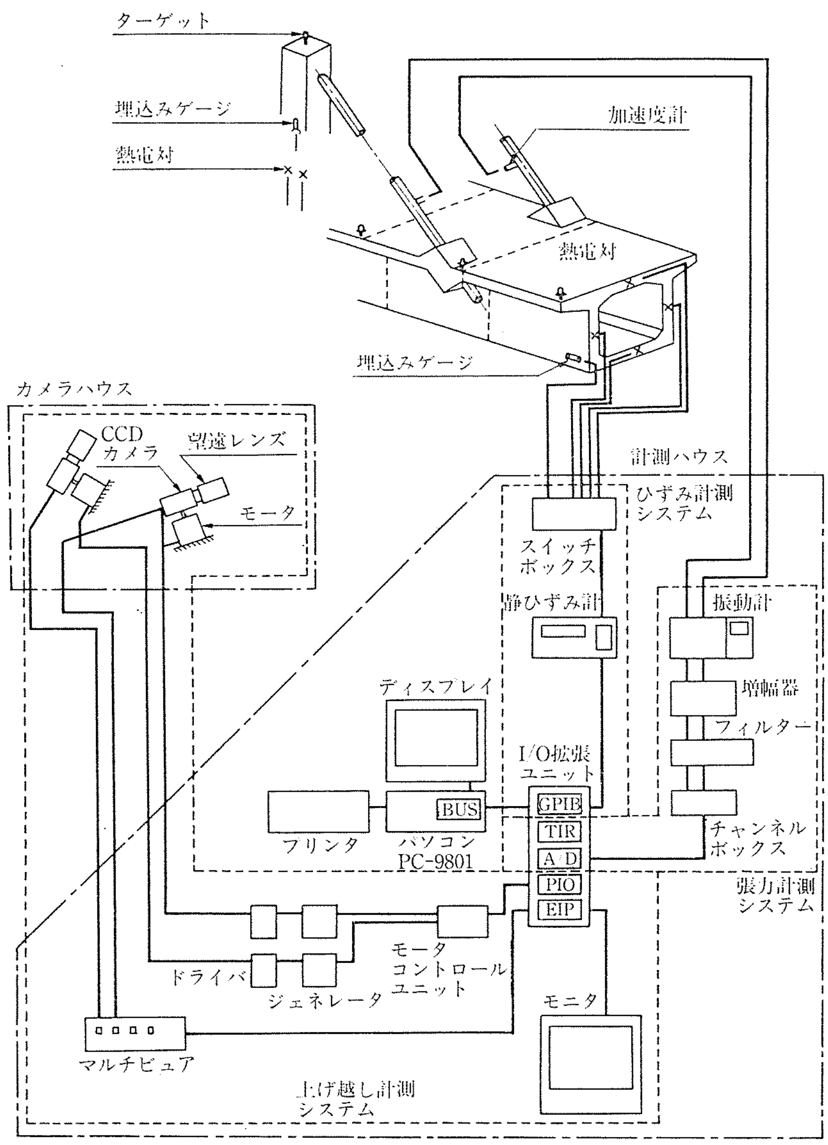
斜材ケーブル張力の測定としては，常時微動の測定による振動法を適用し，パソコン内で A/D 変換，FFT スペクトル解析により固有振動数を求め，張力換算する方法を採っている。

コンクリートのひずみは，静ひずみ計から直接データを取り込み，グラフ化するシステムで，表面ゲージ，コンクリート埋込みゲージ，有効応力計，熱電対などに対応することができ，無人測定および解析も可能である。

塔の倒れや主桁のたわみは，被測定物にターゲットを取り付け，テレビカメラ（CCD カメラ）による自動計



図—2　プログラムの構成とデータの流れ



図—3　計測システム

測を行う。大型の斜張橋では，1台のカメラによる計測には無理があるため，複数台の CCD カメラを使用し，各部材の変形を別々の カメラ で 測定する 方法を採用した。このように数台のテレビカメラを制御することにより，塔の変形，桁の左右たわみなどを同時に測定できるシステムとなっている。

計測システムの全体構成を 図—3 に示す。

計測システムで得られたデータは，現場の状況に合わせて温度，荷重の補正を行い，大型コンピュータでの設計計算による管理値と比較できる形で出力する。

ここで計測された誤差量により，架設中の微調整を実行するかどうかの判断を行い，許容誤差量を超える場合には，最適計算により斜材ケーブルの調整力が決定される。

誤差調整は，基本的には斜材ケーブル長を調整することにより行うが，最適計算は，その場合の調整長さを示すシム厚（挿入する鉄板厚）を決めるものである。

シム量（厚）の算定は，管理項目や調整対象の斜材ケーブル本数が多い場合には，最適化手法を用いて行うのが一般的であるが，最適化手法についても各種の提案がなされている。

本システムでは，①張力，形状の各管理項目の誤差の2乗和を最小とするシム量の組合せを得る目的関数を適用し，最小2乗法による最適シム量を求める方法と，②斜材ケーブルと形状に対する許容誤差を設定し，繰返し計算による最適シム量を求める2つの方法を採用している。

前者の場合は，特定ケーブルのみで調整するなどの制約条件がないことにより，合理的シム量に算定できるが，算定されたシム量が実状にそぐわない場合もあり，技術者の判断による修正が必要になる。これに対し，後者の場合は，現場の状況や管理者の判断が反映されることから，特定の斜材ケーブルで微調整を行う場合などには適する方法である。したがって，架設中のシム量調整に対しては，後者の方法を採用し，構造系完成後の全体調整に対しては前者を使用するものとした。

3. 計測方法

3.1 たわみ計測

精度の高い構造物を造るためには，施工中つねに，各施工ブロックの先端にたわみや，塔頂部のたおれなどを監視し，計画値との差が大きい場合には，直ちに修正しなければならない。

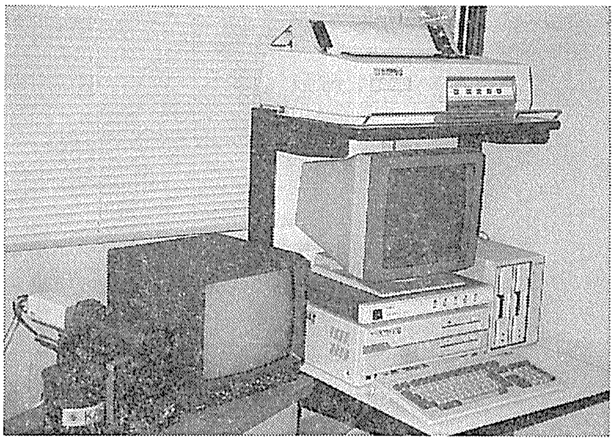
そこで，各施工ブロックの先端や塔頂部には，たわみ計測用にターゲットを取り付けておく。テレビカメラによる計測は，写し出したターゲットの重心が解析できればどのようなものでも良いが，全方向に等距離を持つ円形が好ましい。また本装置は光学系であるため，ターゲットに発光体を用いるなどの方法で，大気の安定している夜間に計測を行うことが好ましい。

モニター画面上でのターゲット重心の移動量を，画像処理を行って計算し，その結果を実際の長さに変換する

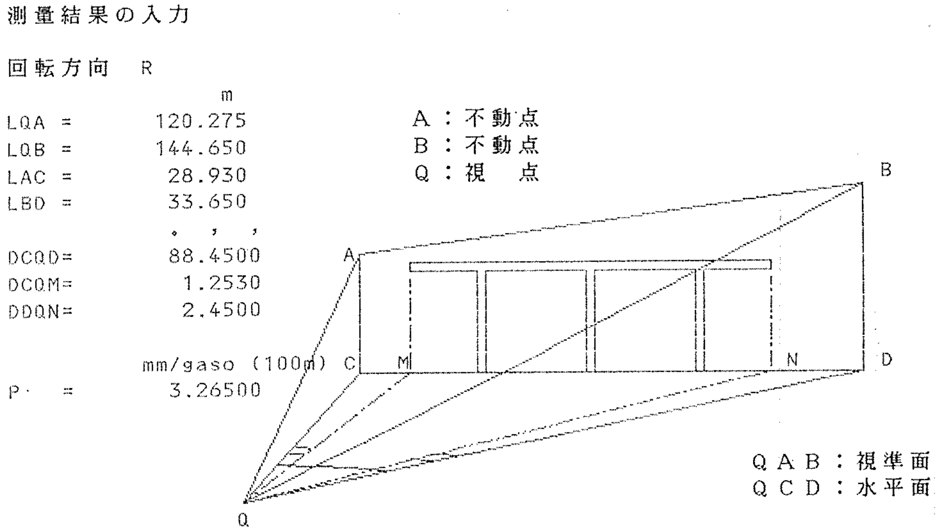
ことにより，主桁のたわみ量や塔のたおれ量を求める。テレビカメラは，モータ付きの回転台に取り付けられており，パソコンの操作によって視準方向を任意に変えることができる（図—4）。

橋梁架設地点が見晴らしの良い場所であれば，橋全体が見える位置にカメラを設置すればよい。しかし，山間部などで見通しが悪い場合は，分割して計測する必要が生じるため，数台のカメラを制御することにより各種の状況での計測が可能となる。また，海上に架設する場合や，特に地形条件が悪く，カメラを地上に設置できない場合などには，望遠レンズの代わりにオートフォーカスレンズ等の使用を考えれば，橋桁上にカメラを設置して計測することが可能である（写真—1）。

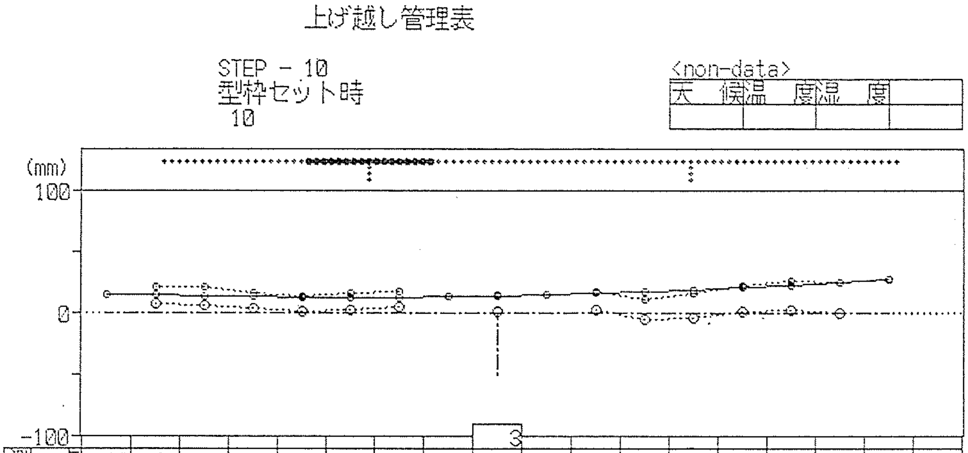
計測の精度については，これまでに適用した結果から



写真—1　TV カメラ計測



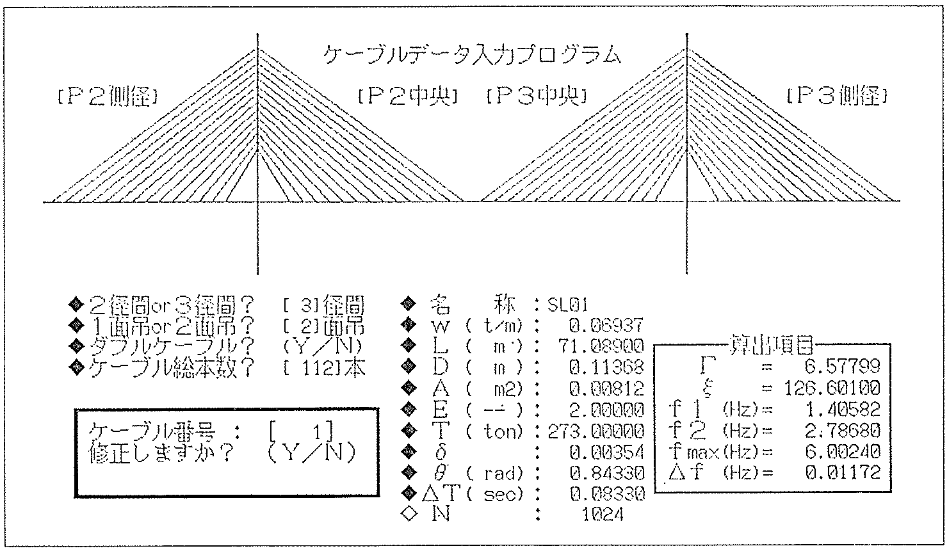
図—4　TV カメラ計測プログラム例



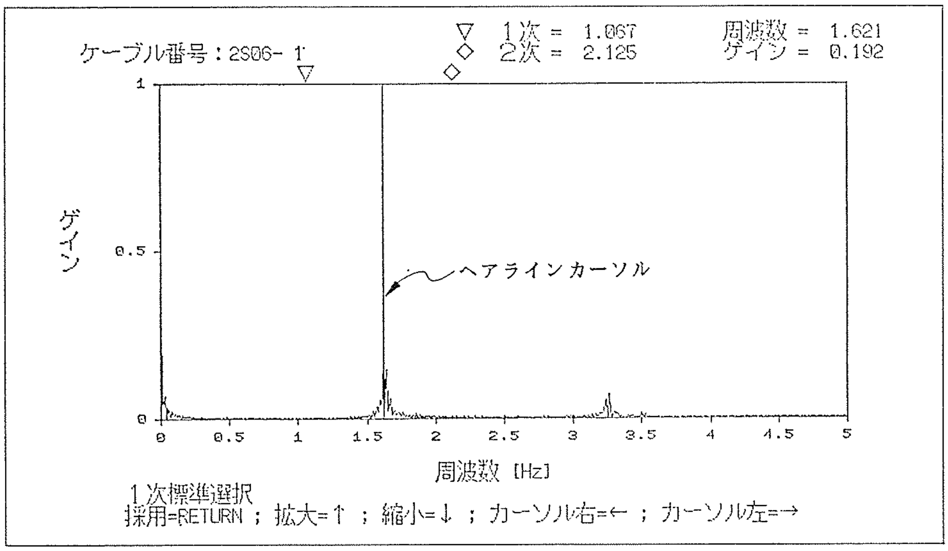
測点	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37
計測値	**	22	21	17	14	16	18	**	15	**	18	12	16	23	26	25	**	--
管理値	15	15	14	14	13	13	13	14	14	15	16	18	19	21	23	25	28	--
誤差値	**	7	7	3	1	3	5	**	1	**	2	-6	-3	2	3	-0	**	--
温度値	-1	-1	-1	-1	-0	-0	-0	0	0	0	-0	-0	-0	-1	-1	-1	-1	--

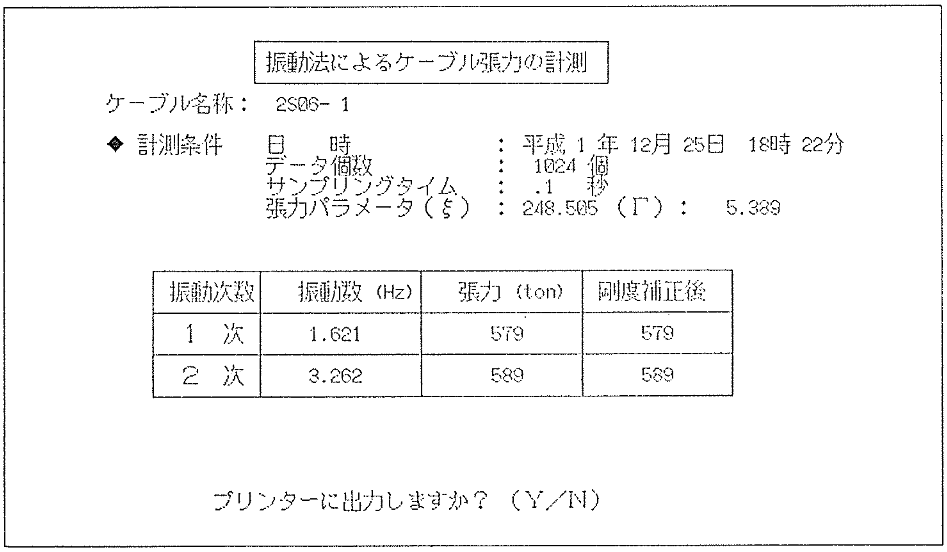
計測値：○---○　管理値：○—○　誤差値：○---○　温度値：なし

図—5　TV カメラによるたわみ測定結果



図—6　張力測定プログラム例




振動法によるケーブル張力の計測

ケーブル名称 :　2S06- 1

◆ 計測条件　日　時　: 平成 1 年 12月 25日　18時 22分
データ個数　: 1024 個
サンプリングタイム　: .1 秒
張力パラメータ (ξ)　: 248.505 (Γ) :　5.389

振動次数	振動数 (Hz)	張力 (ton)	剛度補正後
1 次	1.621	579	579
2 次	3.262	589	589

プリンターに出力しますか？ (Y/N)

図—7　張 力 測 定 出 力 結 果

判断すると，視準距離 300 m 程度の場合，ほぼ数 mm 程度の誤差範囲内に収まると考えられ，従来のレベル測量に比べて同等以上の精度と考えている。

計測は，タイマー等による自動処理が可能であり，夜間測定等含め定期的に測定データを取り込むことができる。図—5 は，たわみ計測結果をディスプレイに表示させた例である。

3.2 張力計測

張力は，斜材ケーブルの常時微動を計測して固有振動数を求め，振動法により張力に換算する方法を採っている。

固有振動数は，斜材ケーブルに取り付けたサーボ型加速度計より得られる加速度データをパソコンに取り込み，パソコン内でデジタル変換（A/D 変換）し，さらに FFT スペクトル分析により求めている。

振動法によって振動数を張力に換算する場合には，斜材ケーブルの曲げ剛性およびサグの影響を考慮した実用算定式を用いて計算を行っている[4]。しかし，解析による剛性と実際の斜材ケーブルでは，曲げ剛性などに若干の差が生じることが予想される。そこで，実際に使用する斜材ケーブルの張力を振動法と油圧ジャッキの両方で算出し，補正係数を求め，これにより実際の計測値と解析値の対応を取っている（図—6)。

張力計測を行うに当たって，各斜材ケーブルの全長，傾斜角等のデータや各施工ステップにおける斜材ケーブルの架設本数等のデータを作成しておく必要があるほかに，本測定の前にキャリブレーション用測定を行い，斜材ケーブルの補正係数を求めておくことが必要である。

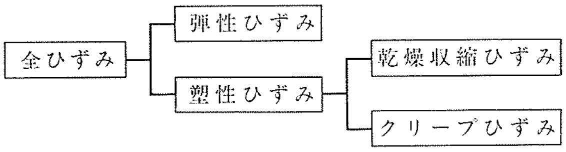
また，斜材ケーブルの張力測定は張出し状況ごとに任意に指定することができるが，一度に測定可能なケーブルは4本までである。計測は，一連のシステムがデータの取込みから A/D 変換，さらに FFT 解析までを自動的に行い，ディスプレイに「振動数-パワースペクトル」図（図—7）を表示する。そこで，1次および2次振動数を選択すると各振動数における張力の計算値と補正値を得ることができる。

3.3 温度・ひずみ計測

たわみ計測値・張力計測値は，計測時の気象条件によって大きく左右される。したがって，たわみ計測や張力計測を行う場合には，温度による主桁のたわみや塔のたおれ，張力の変化を補正するための計測が必要である。また，架設中における部材の応力についても確認できる状況にしておくことが望ましいことはいうまでもない。

熱電対や各種ゲージによる計測は，静ひずみ計とパソコンを GP-IB ボードで接続することによって，パソコン上の操作だけで自動的に計測しデータ処理することができ，任意の状態で画面上に表示することも可能である。

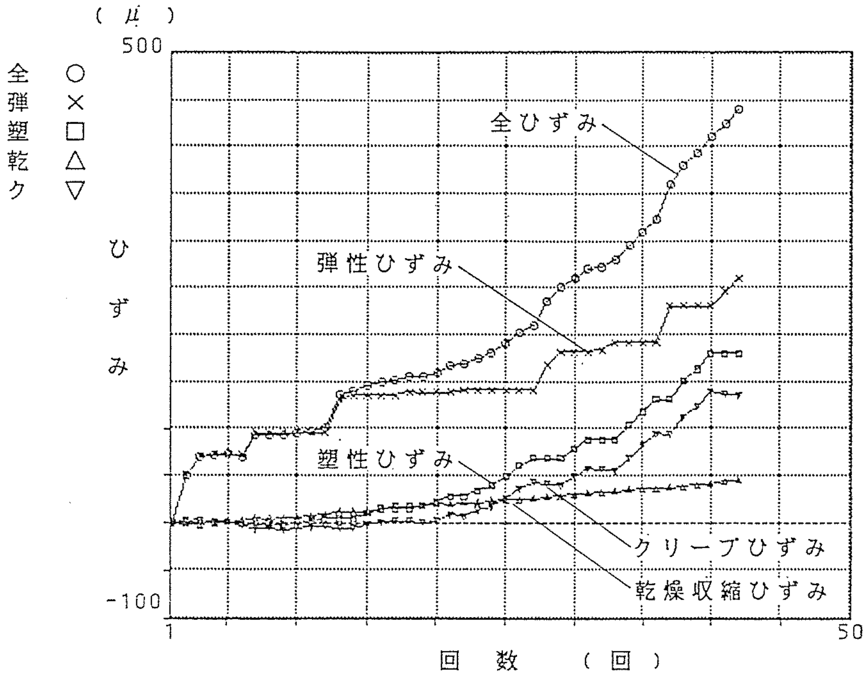
また，各計測段階が外荷重変化段階か外荷重無変化段階かを指定することによって，全ひずみを弾性ひずみと塑性ひずみに分けることができ，乾燥収縮用の供試体等による乾燥収縮ひずみ補正値を用いることで，全塑性ひずみからクリープひずみを算出することができる。



図—8 は，ひずみを各成分ごとに分けて表示した例である。

4. 補正方法

架設中のたわみ・張力の計画値は，仮定した架設荷重に対して計算しており，主桁・斜材ケーブルなどの温度は，通常 20℃ で一定であると仮定している。しかし，



図—8 ひずみ測定結果

実際の架設中においては，架設荷重が仮定値と異なっていたり，考慮していない荷重が載っている場合がある。また，温度についても，部材ごとに異なっていたり，気象条件によって温度変化が生じていたり，直射日光などの影響によって部材内部に温度差が生じることが考えられる。

このような架設荷重の仮定誤差，温度変化・温度差は，架設中の主桁のたわみや斜材張力に対して大きく影響を与えるため，施工時の実際の条件に合わせて補正する必要がある。つまり，施工荷重の差については，仮定した架設荷重との差分をリストアップし，それによるたわみ・張力の補正量を，任意形平面骨組解析プログラムで計算する。また，温度変化・温度差に関しても，たわみ・張力計測時の温度計測結果を用いて，標準温度状態（20℃，部材の温度差なし）におけるたわみ・張力補正量を計算しておく。

たわみ・張力計測から求められた結果に，上記の補正を加えることによって，荷重・温度の補正を行った計測値が得られる。これと計測値を比較すれば，純粋な施工誤差量が得られる。次に示す最適プレストレス補正量の算定は，ここで求められた誤差に対して行うことになる。

5. 最適シム量の計算方法

架設中の構造物では，斜材ケーブル，主桁の剛性や重量の誤差などの設計的要因や，斜材ケーブルの製作誤差，主桁や塔の施工誤差などの施工的要因，さらに気候などの自然条件により斜材張力や主桁の形状に誤差が生じる。このため，1サイクルの施工ごとあるいは架設完了後に斜材ケーブルの張力調整（シム調整）が必要となる場合がある。

前述したように本システムでは，最適のシム量を求める計算方法として架設中と架設完了後の2つの状態に分け，算出方法を使い分けている。以下では，架設中の最適シム量算定の方法について簡単に説明する。架設完了後の最適シム量算出方法については文献5）および他の文献を参照されたい。

架設中のシム調整は，原則として数本の斜材ケーブルのみで調整を行うものとし，その範囲内で斜材張力と主桁のたわみ量の誤差を最小にすることを目的としている。

ここでは，架設された斜材張力とたわみの誤差を対象とし，実際の誤差と施工中の許容誤差の比率を各測点で求め，誤差比率がすべての点で1.0未満の場合にはシム調整を行わず，比率が1.0を超える場合に調整量の計算を行う。

表—1　最適シム量計算例

最適誤差比の計算	最大誤差比 F(8) 0.51		計算回数 495		非収束回数		パターン		経過時間 00:27:32	
最適シム量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
	···	···	···	···	−50	−53	−21	0	0	0
	***	0	0	0	0	−10	0	···	···	····
	···									
応答誤差比（たわみ）	···	···	···	···	0.51	0.11	0.06	0.06	0.01	0.01
	***	0.00	0.00	0.46	0.08	0.17	0.26	···	···	···
	···									
応答誤差比（張　力）	···	···	···	···	0.23	0.28	0.50	0.51	0.12	0.21
	***	0.03	0.14	0.25	0.47	0.20	0.48	···	···	···
	···									

最適シム量を求める計算法は，基本的にはトライアンドエラーの繰返し計算である。すなわち，あらかじめ許容誤差量と挿入可能なシム調整量の範囲を設定しておき，計算された誤差比が最大となる点を抽出し，その点の誤差を最も効果的に下げるシム調整箇所（一般には特定の斜材）のシム量を単位量だけ変更させ，応答計算を行う。この結果から，さらに誤差比が最大となる点を探して直し，シム量を再び変更する。これを最大誤差比がある程度収束するまで繰り返し行い，シム量を求め，これを最適シム量とするものである。これらの計算は，条件によっては必ずしも収束するとは限らず，技術的な判断が要求されるケースもありうる。

表—1は，繰返し計算による最適シム量の結果の一部を示す。

6. おわりに

最近，工事管理において情報化施工という言葉が多く聞かれるようになってきている。これは，工事において複雑化する管理の一元化に対する要求，コンピュータの小型化や性能向上などとともに，建設技術者の不足等もその必要性を生み出してきたといってもよい。

当社においても，情報化施工の一環として，片持ち架設におけるたわみ計測管理システムを開発し，多くの実施工橋梁に適用してきた[2]。

今回，斜張橋の計測管理システムの開発を行ったのは，片持ち架設におけるたわみ管理システムで，計測に対する精度上の要求をほぼ満足する結果が得られたことや，斜張橋のように規模が大きく，管理項目や管理情報が多く複雑な構造物に対して一層効果があるものと考えたためである。

今後，本システムの使用により斜張橋全体の施工管理精度の向上が図られ，施工や管理データの収集保管，さらにこれらのデータの検索が容易になるなど副次的な効果も期待される。またこれらのデータの蓄積を行っていくことによって，将来的には斜張橋施工管理に関するエ

キスパートシステムなどへの発展が考えられ，貴重なデータの集積になると考えている。

今回の計測管理システムの開発においては，複合構造斜張橋なども対象として行っているが，鋼桁架設段階の無応力形状などを求めるために立体大変形の解析が必要になるなど，パーソナルコンピュータでは能力的に不足な面がある。しかし，簡易解析（平面的な取扱いのみで管理が可能な）の範囲に限定すれば，適用が可能と考えられる。

本システムでは，画期的な管理解析手法を提示しているわけではないが，実用に十分耐えられるものと確信している。しかし，今後最適張力管理解析を含め，実橋における検証を行い改良を進めていくことで，施工管理システムの完成度を向上し，一層品質の良いPC斜張橋の施工を行っていきたいと考えている。

参考文献

1) 森本，野田，中山：PC斜張橋の施工管理システム，川田技報，Vol. 9, 1990年
2) 森本，野田，中山，町田，橘：FCC工法におけるたわみ管理システムの開発，川田技報，Vol. 7, 1988年
3) 西岡，片山，内海，前田，町田，越後：本四斜張橋 櫃石島橋の面材架設時施工管理システムの開発，川田技報，Vol. 6, 1987年
4) 新家，広中，頭井，西村：振動法によるケーブル張力の実用算定式について，土木学会論文報告集，第294号，1980年
5) 藤沢：斜張橋架設時のシム量決定方法，橋梁と基礎，Vol. 18, No. 9, 10, 1984年
6) 古川，井上，中山，石堂：多目的計画法を用いた斜張橋の架設時精度管理システムに関する研究，土木学会論文報告集，第374号，1986年
7) 加藤：男神橋(FCC工法)の設計と施工，橋梁，Vol. 5, 1988年
8) 渡辺，中山，野田：コンクリートの非破壊検査法（原理と手法），コンクリート工学，Vol. 27, No. 3, 1989年

【1990年3月9日受付】

◀刊行物案内▶

新しいPC技術とその展望

（第16回PC技術講習会テキスト）

頒布価格：4 000円（送料450円）

内　　容：（1）プレキャスト・セグメントを用いたWT断面道路橋と吊床版歩道橋（チェコスロバキヤの例），（2）プレストレストコンクリートによる合成床版について，（3）北陸自動車道親不知海岸高架橋（PC橋）の設計と施工，（4）支保工によるPC橋施工上の留意点について，（5）橋梁支承部に設置されている制震構造と代表的PC橋，（6）海外のPC構造物の近況