

【システム解説】

ケーブル構造物の施工管理システム

Control System during Construction of Cable-Suspended Structures

前田 研一*
Ken-ichi MAEDA

作田 孝行**
Takayuki SAKUTA

西土 隆幸**
Takayuki NISHIDO

町田 文孝**
Fumitaka MACHIDA

富沢 光一郎** 内海 靖***
Kouichiro TOMIZAWA Yasushi UCHIUMI

1. まえがき

ケーブル構造物の現場施工管理に際しては、管理システムの良否が、品質管理上のみならず工程管理上からも、重要な意味を持っている。このような観点から、最新技術を取入れ、マイコン制御による測定システムと大型電算機のオンラインによる解析システムとを一体化した最新システムを開発した。

本文は、この管理システムについて、開発の歴史、橋梁、建築ケーブル構造物（吊橋、斜張橋、ニールセン系アーチ橋、吊屋根建築）への使用実績を述べた後、最新バージョンの概要と特色を説明するものである。さらに、その仮想適用例を示し、経済性および使用性について検証するものである。

2. 開発の歴史と使用実績

ケーブル構造物の施工管理システムを構成する測定システムと解析システムは、主に次のような機能を有する必要がある。すなわち、前者は、ケーブルの張力、支持あるいは被支持構造の形状、および、各部の温度、温度差の各種測定である。他方、後者は、大変形にも対処できる有限変位理論による架設計算、誤差解析、および、誤差調整の最適化計算の各種解析である。しかも、これらの機能は、架設現場でのリアルタイムの適用が前提であることから、経済性のみならず使用性においても極めて優れたものでなければならない。

したがって、著者らは、種々のケーブル構造物の施工経験を生かすとともに、急速な進歩を続けている測定技術、コンピュータ技術を取入れて施工管理システムを開発およびバージョンアップしてきた。以下に、最新バー

ジョンに至るまでの歴史と使用実績を示す。

(1) 本川大橋（ニールセン系アーチ橋、1977年完成）

本橋は、ケーブル直吊り架設工法による橋長171.6mのものであり、誤差調整の最適化計算（張力に着目しシム厚最小の目的函数を用いた）プログラムを開発して最初に使用した^{1),2)}。

(2) 合掌大橋（2径間非連続桁斜張橋、1979年完成）

本橋は、完全張出し架設工法による支間割144+46+144mのものであり、有限変位理論に基く大変形架設計算および誤差解析プログラムを開発して最初に使用した^{3),4)}。（写真-1参照）

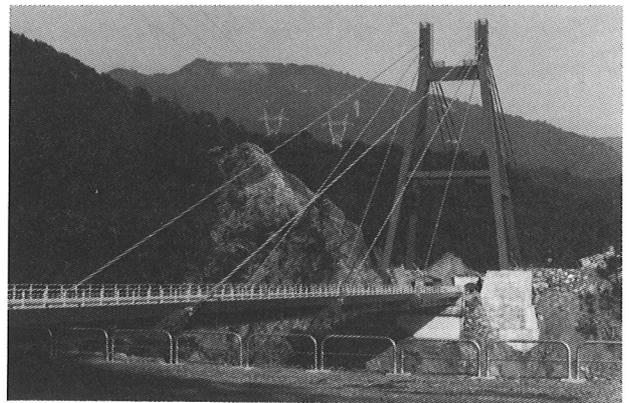


写真-1 合掌大橋

(3) やすらぎ橋（PC単径間斜張橋、1981年完成）

本橋は、現場打ち完全張出し架設工法による橋長80.5mのものであり、誤差調整のためのシム厚最適化計算プログラムを斜張橋の施工管理に初めて使用した。さらに、周波数カウンターを用いた振動法によるケーブル張力測定システムを開発し、最初に使用した。なお、HiAmケーブルの温度測定に際しては、ダミー供試体を製作して

* 川田工業(株)技術本部中央研究室室長 ** 川田工業(株)技術本部中央研究室 *** 川田工業(株)技術本部技術部長大橋課

サーミスタ温度計によって測定した^{5),6)}。(写真-2 参照)

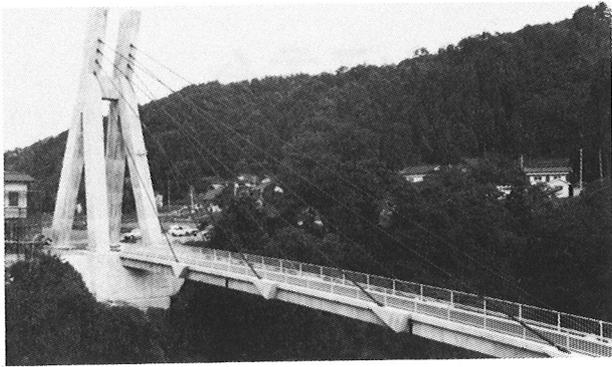


写真-2 やすらぎ橋

(4) 因島大橋 (3径間2ヒンジ吊橋, 1983年完成)

本橋は、架設ヒンジ工法による支間割250+770+250mのものであり、温度ゲージと静ひずみ計を組合せた主ケーブル表面温度の自動測定システム、および、FEMの手法による内部温度分布計算プログラムを開発して最初に使用した^{7),8)}。また、補剛桁形状の測定においては、光波測距儀を組合せた高精度(1"読み)のセオドライトを用い、最大1.5kmの位置から点光源のターゲットを視準することによる集中観測を行って省力化を図った。さらに、マイコン制御による測定システムと現場オンライン端末による解析システムとを一体化させた施工管理システムを開発して最初に使用し、成果品として完成度の高い図表を架設現場においてリアルタイムでプロッターにより描画した^{9),10)}。(写真-3 参照)



写真-3 因島大橋

(5) 瀬底大橋 (ニールセン系アーチ橋, 1984年完成)

本橋は、フローティングクレーン一括架設工法による橋長141.5mのものであり、FFTリアルタイムアナライザーを用いた振動法によるケーブル張力測定システムを開発し、製作工場での予備試験結果を反映させながら架設現場で最初に使用した。また、ニールセン系アーチ橋の現場に最初にマイコンを導入し、竣工図書にそのまま使用できる図表をリアルタイムでプロッターにより描画

した^{11),12)}。(写真-4 参照)

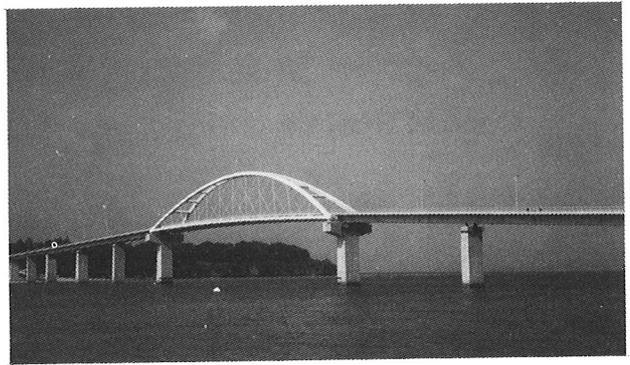


写真-4 瀬底大橋

(6) EXPO'85鉄鋼館 (吊屋根建築, 1985年完成)

本建築は、前面の展示ホール部分(幅30m×奥行15m×高10m)を吊構造としたものであり、FFTリアルタイムアナライザーを用いた振動法によるケーブル張力測定システム、および、誤差調整の最適化計算プログラムを吊屋根建築の施工管理に初めて使用した^{13),14)}。(写真-5 参照)



写真-5 鉄鋼館

3. 最新システムの概要と特色

最新バージョンは、構造型式、規模、架設環境、管理要領等に対して柔軟に対応できるように開発されており、種々の特色がある^{15),16)}。これらの特色を中心に、システムの概要を箇条書きにして説明する。

- ① マイコン制御による測定システムと、インテリジェント端末としてデマンド機能およびリモートバッチ機能による大型電算機のオンライン使用の解析システムとが一体化されている。
- ② ケーブルによって支持あるいは被支持される構造の形状の測定方法としては、通常の方法によるもの他に

一種のマノメータである水パイプ、レーザー式変位計なども想定している。また、ケーブル張力の測定方法としては、FFTリアルタイムアナライザーによるものを、温度の測定方法としては、熱電対あるいは温度ゲージによるものを、それぞれ想定している。

③ 解析システムの入力データの作成は前処理プログラムによって自動化あるいは省力化されており、仮設荷重の突然の変動などにも対処できる。そして、ケーブルのサグ、2次曲げによる影響を含むケーブル構造物特有の非線形性を考慮した架設計算を、任意の大次元平面骨組モデルを対象として容易に行える^{17),18)}。

④ ねじれ、面外変形についても、平面モデルによる非線形性を考慮した釣合い形状および断面力状態の収束計算結果を基に立体骨組モデルのデータファイル（事前に作成済み）が自動修正され、その状態を基準とした立体骨組モデルを対象とする線形化計算によって、実用上十分な精度で補正できる。

⑤ 現場計測は、各管理項目の単なる測定の外、随時にキャリブレーション的な測定も実施し、特に荷重、剛性などの実際の値を可能な範囲で推定することとしている。なお、剛性の把握には、振動法によるケーブル張力算定式に必要な2次曲げ剛性も含まれる。

⑥ 支持あるいは被支持構造の製作形状に対応する無応力形状、ケーブルの制作長に対応する無応力長、および、温度、荷重、断面諸量などのデータを直接に変化させることによって、種々の要因による誤差解析を容易に行え、架設時に許容した誤差が完成時に及ぼす影響すなわち残留誤差などの把握も行える。

⑦ 誤差調整のためのシム厚の算定は、管理項目あるいは調整対象のケーブル本数が多い場合には最適化手法を適用できる。最適化手法¹⁹⁾としては、

i) ケーブル張力に許容誤差を設定して、その範囲内でシム量が最小となる組合せを得る目的関数を適用し、最適シムを求める方法。ここに、この方法の場合、制約条件を有することによって繰返し計算を必要とする反面、許容誤差を具体的に設定できるとともに、施工不能の過大なシム量を除去できる長所がある。

ii) 同様の原理を形状にも適用し、張力および形状について独立に求めた最適シムの加重平均を用いる方法。ここに、この方法の場合、同様の長所、短所の他に、張力と形状の両者を実際的に調整できる利点がある。

iii) 張力、形状など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、一種の最小自乗法によって最適シムを求める方法。ここに、この方法の場合、制約条件がないことによつ

て非常に合理的に算定できる反面、重み係数によっては算定されたシムが過大となることなどの短所がある。また、張力、形状などの各管理項目を同時に調整でき、理論上は非常に有効であるといえるが、架設現場の実際には実用に供さなかった例²⁰⁾も報告されている。

などの方法があり、一長一短がある。しかも、3種の方法とも一回の計算で最適解が得られる保証はなく、種々の設定条件（制約条件、重み係数）について計算して得られたシム量の値、および、それによる誤差の低減の度合を比較、検討する必要がある。したがって、ここでは、上記の3種の方法を全て容易に行え、より効率のよい調整データを選択できるようにしている。

⑧ プロッター図化機能などを駆使した後処理プログラムによって、理論値と実測値との比較図、誤差調整の状況図、完成時の残留誤差図、および、閉合時における形状管理図などの竣工図書用の図表を、架設現場においてリアルタイムで作成できる。

4. 最新システムの仮想適用例

最新バージョンをケーブル構造物の施工管理に適用した仮想適用例として、中央径間長300mのマルチケーブル型式3径間連続トラス斜張橋を対象に説明する。

一般的な施工管理要領は図-1のようであり、これに対応する管理システムの構築案を図-2に示す。

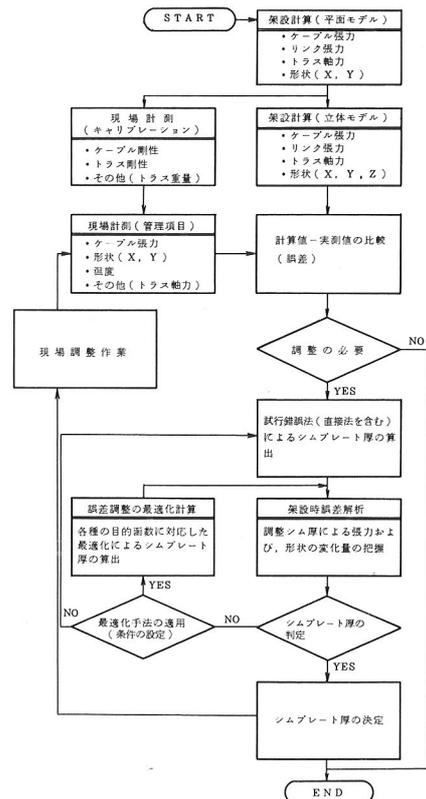


図-1 施工管理要領

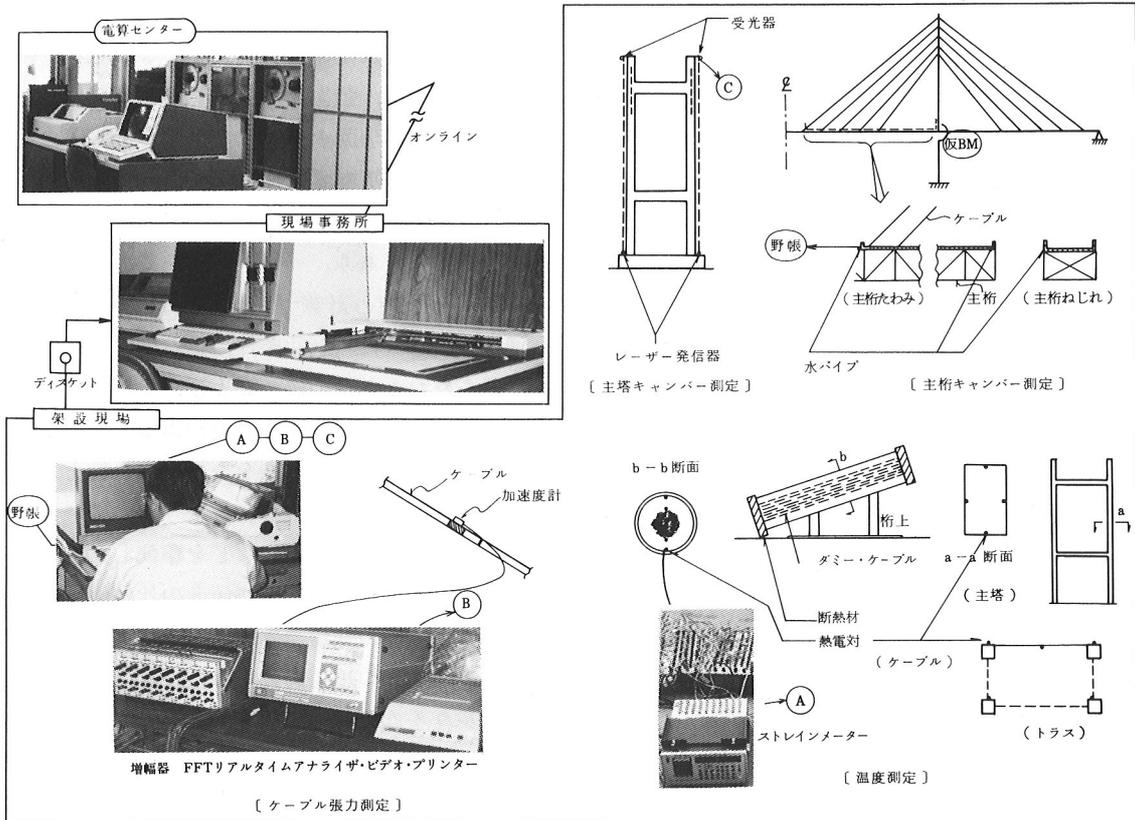


図-2 システム構築案

図-1の管理要領、および、図-2のシステム構築案による適用を仮想した場合の図化結果の一部を図-3～図-10に示す。ここに、図-3は形状図、図-4、5は、想定したある架設ステップにおける計算値-実測値の比較図をケーブル張力、主桁形状および主塔倒れについて示したものである。また、図-6、7は、シム量と誤差調整の状況図、完成時に残留する誤差の状況図、図-8、9、および、図-10は、それぞれ、主桁閉合時における形状管理図、断面力図、および、主桁閉合後における調整シム量の一覧表を示したものである。

ただし、これらの図表は想定の場合の予想される成果品の一部を単に示したものであって具体的な施工管理方針などを表わすものではないし、一方、本システムがどのような管理方針に対しても柔軟に対処できることは明らかである。例えば、閉合後での調整シム量の一覧表である図-10は、不要の場合もあるはずである。また、図化はあくまでもソフト的に得られるものであることからユーザーの任意に変更が可能であり、立体的な表示なども容易に可能であることはいうまでもない。

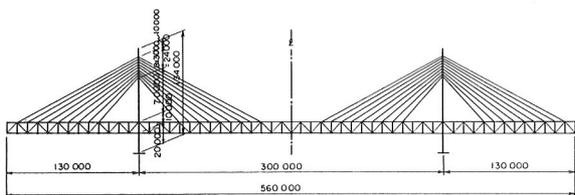


図-3 形状図

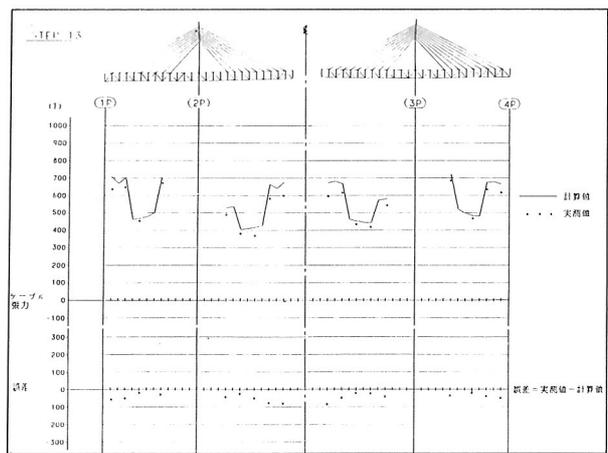


図-4 計算値-実測値の比較図 (張力)

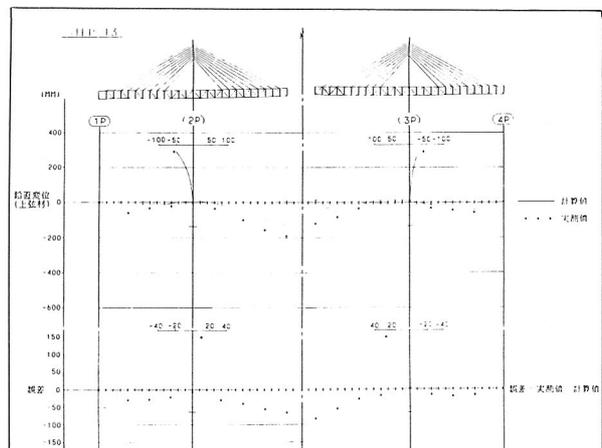


図-5 計算値-実測値の比較図 (形状)

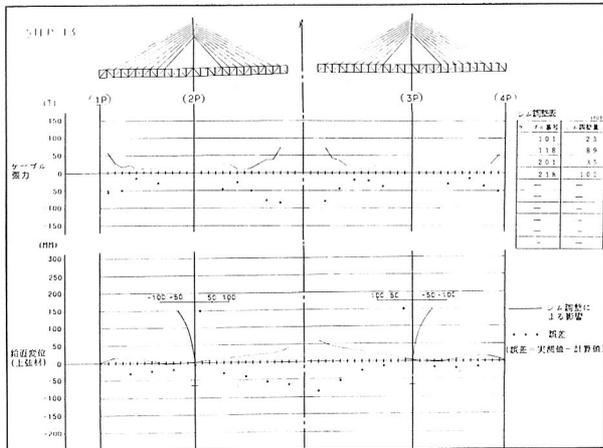


図-6 シム量と誤差調整の状況図

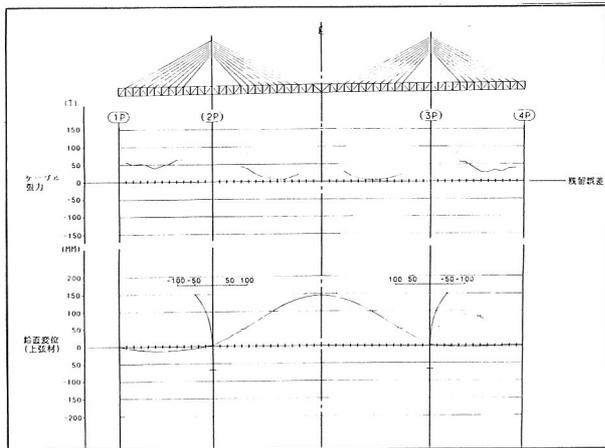


図-7 完成時に残留する誤差の状況図

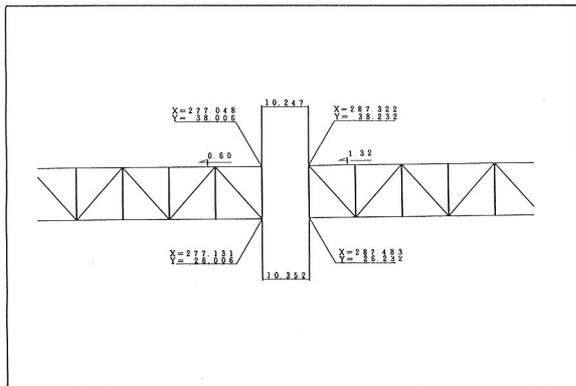


図-8 閉合時での形状管理図

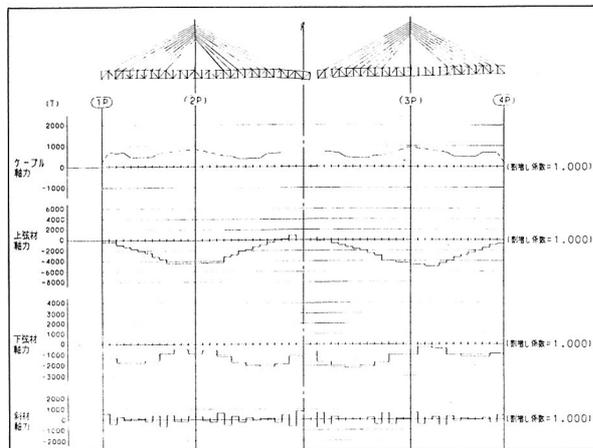


図-9 閉合時での断面力図

ケーブル 番号	張力誤差 ΔT (t)	直接法		最適化手法 (1)			最適化手法 (2)		
		Δ (mm)	ϵ_{max} (t)	k (Σ)	$\frac{1}{2} \Delta$ (mm)	ϵ_{max} (t)	k (Σ)	$\frac{1}{2} \Delta$ (mm)	
側	1501	135	-300	10	3.78	-55	10	0.00	-100
	1502	-140	-170	10	3.78	62	10	0.00	21
	1503	85	-252	10	3.78	-33	10	0.00	-70
	1504	70	-237	10	3.78	-30	10	0.00	-65
	1505	-105	-121	10	3.78	62	10	0.00	45
後	1506	50	-214	10	3.78	-36	10	0.00	-59
	1507	35	-191	10	3.78	-39	10	0.00	-46
間	1508	50	-183	10	3.78	-47	10	0.00	-50
	1509	55	-168	10	3.78	-48	10	0.00	-48
	1510	95	-154	10	3.78	-49	10	0.00	-48
	1511	135	-141	10	3.78	-54	10	0.00	-50
中	1512	-140	184	10	3.78	62	10	0.00	14
	1513	95	50	10	3.78	-60	10	0.00	-100
	1514	85	41	10	3.78	-60	10	0.00	-100
	1515	80	36	10	3.78	-55	10	0.00	-97
央	1516	80	25	10	3.78	-57	10	0.00	-98
	1517	-120	121	10	3.78	52	10	0.00	7
後	1518	60	18	10	3.78	-38	10	0.00	-88
	1519	85	2	10	3.78	-47	10	0.00	-95
間	1520	-125	89	10	3.78	45	10	0.00	1
	1521	145	-12	10	3.78	-52	10	0.00	-92
	1522	210	-27	10	3.78	-62	10	0.00	-97

(最適化手法-シム量最小 $\alpha=200$)

図-10 閉合時での調整シム一覧表

これらの仮想適用結果からは、本システムを適用することによって、施工管理データ、および、それに関する竣工図書にそのまま使用できる成果品が、施工現場でリアルタイムにプリンター出力あるいはプロッター描画され、システム操作の容易さなどを考えれば、経済性および使用性の極めて高いケーブル構造物の施工管理システムになり得るものであることが十分に予測されると思われる。

5. あとがき

本文は、ケーブル構造物の施工管理システムについて、著者らが開発した最新バージョンを基に報告したものである。ケーブル構造物は急速な増加傾向にあり、しかも、設計の自由度は非常に高く、施工管理もより複雑である。したがって、ここに紹介したようなシステムの使用はいまや不可欠であり、これからもハイ・テク時代の進展につれて大きく変遷していくものと思われる。特に、光学的変位計の導入、および、FFTのソフト処理などは既に実用化の段階にある。今後、さらに新たなバージョンを完成した際に、再度報告する機会が与えられれば幸いである。

参考文献

- 1) 垣見・中島・藤井・宮本：本川大橋の設計、施工と載荷試験、橋梁と基礎、Vol.13, No.8, 1979.
- 2) 藤井・中崎・黒田・宮本：本川大橋工事報告、川田技報、Vol.1, 1978.
- 3) 倉島・松橋・荒谷・西岡：新滝橋（合掌大橋）の施工、橋梁と基礎、Vol.13, No.6, 1979.
- 4) 西岡・松野・松田・前田：合掌大橋（旧名：新滝橋）工事報告、川田技報、Vol.2, 1981.

- 5) 得能・森本・越後：やすらぎ橋の設計と施工，橋梁と基礎，Vol.16, No.5, 1982.
- 6) 得能・越後・古村・松川：やすらぎ橋の設計と施工，川田技報，Vol. 3, 1983.
- 7) 三品・中崎・前田・藤井：主ケーブル温度推定誤差による長大吊橋の架設誤差問題と解析法，橋梁と基礎，Vol.13, No.9, 1979.
- 8) 三品・中崎・前田：吊橋の主ケーブル温度推定誤差による補剛桁架設誤差問題と解析法，川田技報，Vol. 2, 1981.
- 9) 香川：因島大橋の補剛桁架設工事，橋梁と基礎，Vol.18, No.1, 1984.
- 10) 高桑・原・枝・寺井・高田・内海：因島大橋補剛桁工事報告，川田技報，Vol. 4, 1985.
- 11) 大舛・中田・田盛・渡辺：瀬底大橋の設計と施工，橋梁と基礎，Vol.19, No.11, 1985.
- 12) 木船・沖田・渡辺・古田・西土：瀬底大橋の設計と施工，川田技報，Vol. 4, 1985.
- 13) 津山：科学万博一つくば '85の鋼構造物 鉄鋼館，JSSC, Vol.21, No.223, 1985.
- 14) 梅澤・小口：EXPO '85鉄鋼館の鉄骨工事とケーブル架設工事，川田技報，Vol. 5, 1986.
- 15) 前田・内海・斉藤：斜張橋の設計支援システムと施工管理システム，第10回電算機利用に関するシンポジウム論文集，1985.
- 16) 前田・内海：斜張橋の施工管理システム，橋梁と基礎，(投稿中).
- 17) 野村・中崎・内海・前田：ケーブル橋梁構造（吊橋，斜張橋）の設計，架設計算プログラム，川田技報，Vol. 3, 1983.
- 18) 野村・中崎・内海・前田・斉藤：吊橋・斜張橋の設計，架設計算プログラムシステム-KASUS-，橋梁，Vol.21, No.5, 1985～(9回連載予定).
- 19) 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, No.10, 1984.
- 20) 野中・川人：名港西大橋の施工，橋梁と基礎，Vol.19, No.4, No.5, 1985.