

## 鋼構造の完成検査法に関する一提案

A PROPOSAL TO THE METHOD OF INSPECTION FOR THE STEEL  
STRUCTURE IN ITS COMPLETION

小桜義隆\*・鳥居邦夫\*\*・高田孝次\*\*\*・長谷川鎔一\*\*\*\*

By Kunio TORII, Yoshitaka KOZAKURA, Kohji TAKADA  
and Syuichi HASEGAWA

An inspection system of a steel structure is proposed. This system is divided into two sub-systems. One is a system for measuring members constructing the structure. Utilizing a CCD camera, one can spare much time for surveying. Data obtained are stored in a micro-computer system.

Another is a simulation system. This system simulates shop assembly which is carried out in the shop yard. In case that the products do not fulfill the codes of the specification, an appropriate instruction is output. This simulation system was proved to be practicable by applying the actual data which were previously prepared for verification.

## 序 論

鋼橋、鉄塔、水門、海洋構造物等の大型鋼構造物の製作過程においては、製品の加工が完了すると、その完成状態を確認する検査手段として、仮組立工程が組み込まれている。この工程は、現場での組立てに先立ち、製作工場の仮組立ヤードで、各部材を原則として無応力状態で組み立てるものであり、部材の接合の良否、および形状の確認等を行うことを目的としている。

特に、鋼橋の場合に限れば、仮組立工程が橋梁の全製作工程の中に占める割合は、橋梁の種類によって若干の差はあるが、約10~20%と言われており、製作費の多大な部分を占めている。また、他の工程がコンピューター、NC機械の導入等で自動化、合理化が進む中で、この工程だけが手つかずのまま残っているのが現状である。

以上のような背景から、筆者等は構造物の完成状態を保証するシステムを提案する。このシステムは2つのサブシステムによって構成される。1つは、部材単品の形状を測定する計測システム、もう1つは、その測定されたデータを基に、計算機で組み立て状態をシミュレート

することにより、製品の検査を行うデータ処理システムである。ここで提案されるシステムを導入すれば、経済的効果は言うに及ばず、現仮組立工程における組立ヤードでの危険を伴う作業からの解放、さらには工場敷地の利用効率における著しい改善を期待できると考えられる

## 1. 計測システム

このシステムは、CCDカメラを利用し、その視野に入った測定対象となる部材の連結部のボルト孔および格点等を自動的に計測し、得られた3次元座標値より、部材の形状を把握しようとするものである。その際の測定精度は、20m程度の長さに対して、 $\pm 0.5$ mm以内の誤差に収めることを目標としている。

本システムで採用する計測装置の概要を図-1に、また、その各部名称を表-1に示す。この装置は高分解能のCCDカメラを搭載した自動測角儀であり、部材の測定点の検出にはCCDカメラを、また、角度 $\theta$ 、 $\phi$ の読み取りにはカメラと一体化されたロータリーエンコーダ、リニアスケールをそれぞれ用いる。なお、測角儀は図-1に示すように、ガイドフレーム8上を移動することができ、その移動量により基線Bを定める。これらの計測機器は、パーソナルコンピューター12が、CCDカメラ用のコントローラ10とサーボ系のコントローラ9、11を同時制御することにより作動させるメカニズムとなっている。この装置の特徴として主に2つ挙げられる。

\* 正会員 工博 長岡技術科学大学建設系助教授  
(〒949-54/新潟県長岡市上富岡町 1603-1)

\*\* 正会員 工修 (株)横河橋梁製作所設計部

\*\*\* 工博 長岡技術科学大学機械系助教授  
(同上)

\*\*\*\* 正会員 工博 (株)横河橋梁製作所常務取締役

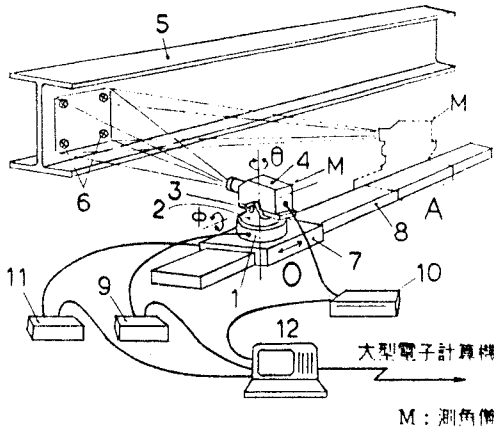


図-1 計測装置

表-1 計測装置の各部名称

番号	名称
1	ロータリーエンコーダ
2	台
3	水平軸
4	CCDカメラ
5	被測定物
6	ターゲット
7	サドル
8	ガイドフレーム
9	測角儀電子制御ユニット
10	CCDカメラ電子制御ユニット
11	測角儀移動用電子制御ユニット
12	パーソナル・コンピュータ

まず第一に、測定点の検出に CCD カメラを用いたことにより、従来用いられて来た測量機器とは異なり、測定者は目標とする標的をカメラの視野に入れさえすればよく、多数の測点を一括して高精度で測定できるから、所要時間が飛躍的に短縮される。CCD カメラは 図-2 に示すように、ピクセル数 2000 のライン型 CCD センサーを受像面上に水平に置き、これをモーターで上下 3000 ステップ移動させることにより、画面を 2000×3000 個 (1画素=13μm) にデジタル化して読み取る方式のものである。したがって、広範囲の被測定物を 2000×3000 の高分解能で読み取ることが可能となる。

第二に挙げられる特徴は、図-3、表-2 に示す高性能の測角儀である。この図で、CCD カメラは水平軸 ( $\phi$  軸)、鉛直軸 ( $\theta$  軸) の両軸回りに回転することができる。 $\theta$  軸回りの回転は、パルスモーター 5 でウォームギア 6 を回転させることにより、ウォームホイール 7 を廻すメカニズムになっている。この場合、ウォームホイールのバックラッシュの影響を軽減するため、ウォームホイールと台 8 との間に設けられたリール 18 の左右に均等の錘り 19 を釣り下げている。また、ウォームホイ-

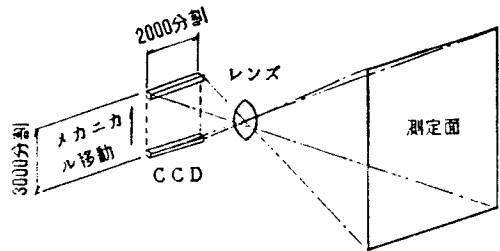


図-2 CCD カメラの原理

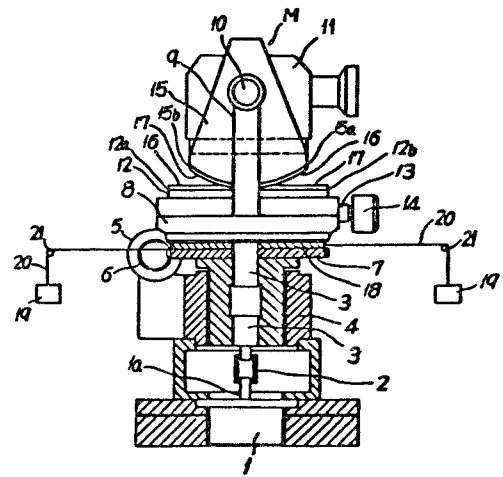


図-3 測角儀

表-2 測角儀の各部名称

番号	名称	番号	名称
1	ロータリーエンコーダ	12	リニアスケール
2	カップリング	13	送りねじ軸
3	垂直軸	14	パルスモータ
4	空気軸受け	15	扇形板
5	パルスモータ	16	スチールテープ
6	ウォームギヤ	17	同上
7	ウォームホイール	18	リール
8	台	19	重錘
9	プラケット	20	索
10	水平軸	21	ガイドロッド
11	CCDカメラ		

ルとロータリーエンコーダ 1 (1秒読み、累積誤差 3秒以内) は垂直軸 3 により連結されており、実際の回転角はそのロータリーエンコーダから読み取られる。一方、水平軸 10 を中心とする扇形板 15 の円弧面の両端 15a, 15b と、円弧の接線方向に置かれたリニアスケール 12 (累積誤差 3秒以内) の両端をそれぞれスチールテープ 16, 17 で結合しているので、リニアスケールの移動量から水平軸回りの回転角  $\phi$  が得られる。なお、この場合の回転運動は、パルスモータ 14 でリニアスケールに付した送りねじ 13 を廻すことにより行われる。

以上に述べた測角儀は高精度の要求に応じて構成されたものであり、特に、精度を支配する軸受けに高性能の空気軸受け 4 (回転誤差 0.5~0.9μm) を使用したことが大き

い特徴である。これは従来のボールベアリングに較べ、精度と耐久性の点で格段に優れたものである。

## 2. データ処理システム

ここでは、計測システムにより得られた、部材形状を与える3次元座標値を基にし、コンピュータを用いて部材の仮組状態を照査するシステムを提案する。

本システムは図-4に示すような手順にそって処理される。筆者等は、さきに鋼主桁の部材測定および仮組立実測<sup>9)</sup>を行った結果、部材を無応力状態で図面通りに組むことはさして厳しい条件ではなく、ほとんどの場合にクリアできそうであることを確認できたので、部材の組立てはすべて無応力状態で行うことにした。

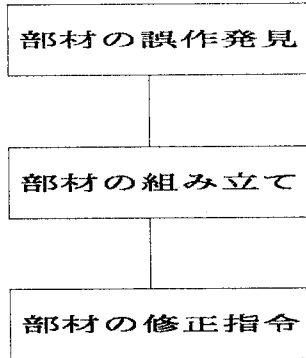


図-4 仮組立のシミュレーション手順

### (1) 部材の誤作発見

この過程では、計測システムによって得られた部材寸法と設計寸法とを比較した場合に、その誤差が  $\Delta_{all}$  以上であればこの部材を誤作とみなして作り直すこととする。ここで、 $\Delta_{all}$  の値は一応の目安として、10mm を与えることとした。

### (2) 部材の組立て

文献 3) により、部材添接部のボルト孔一群の孔明精度は良好であることが判明しているから、ボルト孔一群のうち4隅の孔を組立基準と考え、ボルト孔の余裕を利用して、これらの孔の位置をできるだけ設計値に近づけるように組み立てることとする。

図-5 に部材の組立て方法のフローを示す。以下、組立方法 (No. 1~No. 2) および添接可否の判定について詳しく述べる。

#### (a) 組立方法 No. 1

製作誤差の生じた部材を組み立てる場合は、部材の形状が出来るだけ設計値に近い状態になるように配置するのが最善の策である。この際に使用されるデータは、添接部のボルト孔位置の測定値である。この値と、その設計値との誤差の二乗和が最小となるように部材を配置することとする。すなわち、図-6 において、OXY を仮

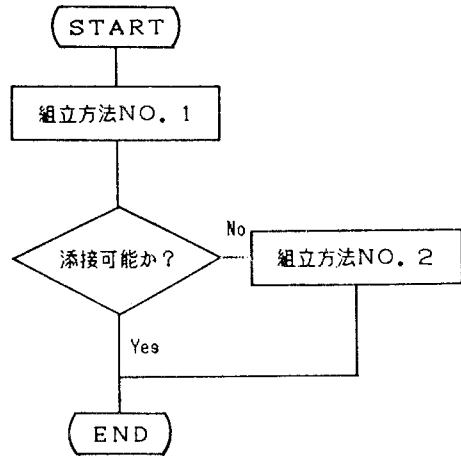


図-5 部材の組立フロー

組時の全体座標系として最小二乗法を適用し、

$$g = \min \sum_{i=1}^{16} d_i \dots \dots \dots (1)$$

ただし、

$$d_i^2 = (X_i - X_{oi})^2 + (Y_i - Y_{oi})^2$$

$(X_i, Y_i)$  : 部材のボルト孔座標測定値

$(X_{oi}, Y_{oi})$  : 同 設計値

が成立するように部材の位置を定めるという最適化問題として定式化できる。この式は制約条件が存在しなければ、 $X_{oi} = X_i, Y_{oi} = Y_i$  を成立させることができるからその意味を失う。これに、部材の形状が保持されるという、以下に示す拘束条件を付加しなければならない。

$$f_k = \phi_{i,j} = (X_L - X_R)^2 + (Y_L - Y_R)^2 - L_k^2 = 0 \dots (2)$$

$f_k$  : 測定点群間を漏れなく結んで三角形網を作ったときの網を構成する  $k$  番目の線分に関する制約条件式

$\phi_{i,j}$  :  $k$  番目の線分が  $i$  点と  $j$  点を結ぶものであることを示す

$X_L, Y_L, X_R, Y_R$  : 線分両端の計測座標値

$L_k$  : 計測寸法

この制約条件の取り扱い方によって2通りの解法が考えられる。

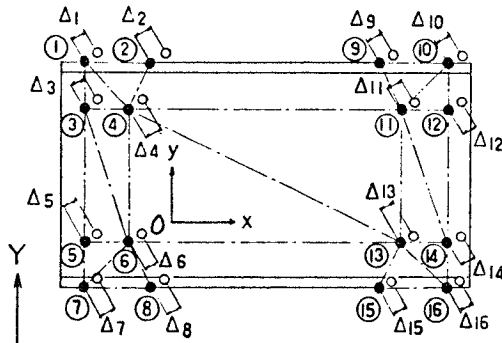
#### 【解法 1】

上記の拘束条件に *Lagrange* の未定乗数を乗じてこれを (1) 式に加え、

$$G = \text{Min} \left( g - \sum_{k=1}^{29} \lambda_k \cdot f_k \right) \dots \dots \dots (3)$$

$\lambda_k$  : *Lagrange* の未定乗数

(3) 式のような無条件に極小値を求める問題として解く方法である。この方法は定式化が著しく簡単なため、プログラミングには適している。しかし、未知数が  $X, Y$  (それぞれ 16 個) に、 $\lambda_k$  (29 個) が加わるため、メモリーを



注) 1. ○印は設計時のボルト孔位置  
2. ●印は組立部材のボルト孔位置

図-6 組立方法 No. 1

食ううえ、計算時間を要するという欠点を有する。このシステムがパーソナルコンピュータ(ラム 640 Kbyte 程度)で動くことをめざしているので、この欠点はかなりの痛手となる。

【解法 2】

部材局部座標系として、図-6 に示すような OXY を用意し、部材が剛体であることを次式のように表わす。

$$\begin{Bmatrix} X_i \\ Y_i \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_{m,i} \\ y_{m,i} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} X_0 \\ Y_0 \end{Bmatrix}$$

(i=1, 2, 3, ..., 16) .....(4)

$\theta$  : 大座標系に対する局部座標系の回転角

$x_{m,i}, y_{m,i}$  : 測定した局部座標値

$X_0, Y_0$  : 局部座標原点の計算大座標値

これを式 (1) に代入すると、

$$g = g(X_0, Y_0, \theta) \rightarrow \min \text{ .....(5)}$$

のように、3変数  $X_0, Y_0, \theta$  を求める問題となる。これは、(2) の制約条件式を式 (1) に代入して得られたと解釈できる。この方法によれば、メモリーを大幅に節約でき、計算時間もかなり短縮できるが、定式化の作業は煩雑である。いずれの方法を採用するかは、使用するコンピュータ等、状況によって選択するのが適当であろう。

目的関数が非線形であるため、その最小化にあたっては、Newton-Raphson 法を適用した。このようにして、順次部材を組み立てる方法を組立方法 No. 1 とする。

(b) 添接可否の判定

部材の組立配置が完了すると、今度は連結部添接板の配置を行う。配置方法は部材の組立方法と同様にして、図-7 で

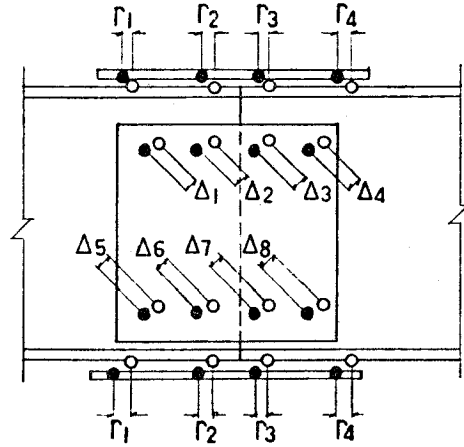
$$\sum d_i^2 \rightarrow \min \text{ (ウェブの場合)}$$

$$\sum r_i^2 \rightarrow \min \text{ (フランジの場合)}$$

$d_i$  : ウェブ添接板と母材の孔ずれ

$r_i$  : フランジ添接板と母材の孔ずれ

となるように各々の添接板を母材に重ねる。この場合、 $d_i, r_i$  の最大値を探し、これが規定値を超過しているか



注) 1. ○印は組立部材のボルト孔位置  
2. ●印は添接板のボルト孔位置

図-7 添接板の配置

どうかによって、添接の可否を判定する。

例えば、M 22 の H.T. ボルトを使用した場合、ボルト孔径は 24.5φ であるから、ボルトの幹が母材を貫通するには、

$$(d_i, r_i) \max < 2.5 \text{ mm}$$

の条件を満たせば添接可能と判定する。

(c) 組立方法 No. 2

組立方法 No. 1 で主桁の配置を行った際、製作誤差が大きいために添接不可能と判定される場合が生じる。No. 1 では、桁を設計値にできるだけ近づけて配置するという制約があった。ここでは、この制約を解除し、添接不可能となる部分の孔ずれを他のボルト孔の余裕で吸収させることにより組直しを行う方法を考える。

例えば、図-7 の連結部で添接不能と判定された場合を想定する。この場合に隣接する添接板があれば、それらを温存しておき、その部分のボルトをゆるめ、両主桁のボルト孔に対して、着目する添接板の孔ずれ  $d_m$  と温存した添接板の孔ずれ  $d_{r,i}$  との 2 乗和が最小となるよう主桁を再配置する。すなわち

$$w \sum d_m^2 + \sum d_{r,i}^2 \rightarrow \min$$

を満足するよう部材を配置し直す。ここで  $w > 1$  は重みであり、着目した添接板の孔ずれを縮小するために設けたパラメーターである。以上のようにして再配置が終われば、これに先と同様の要領で添接板を重ね直す。このルーチンを添接可能となるように限りなく繰り返す。こうしてできる完成形状は、かなりの誤差を含む結果となるが、No. 1 とは異なり、添接できることを優先したアルゴリズムを採用しているのでやむを得ない。所定の仮組精度を満足していればよいとする方針である。

(3) 部材の修正指令

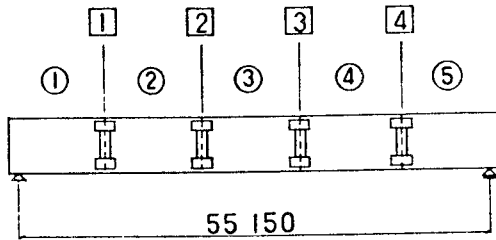
全部材の組立てが終わりしだい、組立て座標値からキャンパー、支間長等を求め、これらの値が所定の許容誤差に収まっているか否かの判定を行う。もし収まっていないければ、部材の修正指令を与える。この場合、修正部材を最小限に留めることが肝要である。今後、修正方法は施工法も考慮に入れたアルゴリズムを確立する必要があると考えられる。

一法としては、添接板の片側は孔を明けず、部材測定を行なって得られたデータを使用し、このシステムにより計算された値に一致させて残りの側の孔を明けることが考えられる。この方法を採用すると、添接不能の事態は起こり得ないから、No. 2 のルーチンは不要となる。

3. データ処理システムの検証

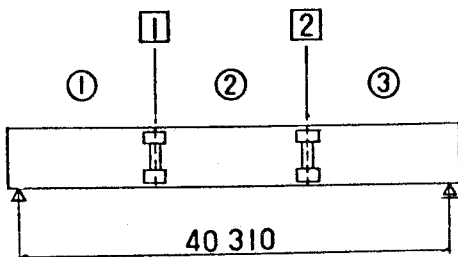
前章のデータ処理システムを検証する意味で、この章では数値計算を実測値を用いて行った結果を示す。計算は計測システムから得られたデータを基に行うのが本来の姿である。しかし、今回得られた実測データは、本計測システムを使用して得られたものではないから、最初のデータを取り込む部分に変更を加え、マニュアルでインプットすることとした。

文献 3) では、主桁の部材および仮組立測定を行って



注) 1. 口内の値はジョイント番号  
2. 口内の値は部材番号

図-8 中略プレートガーダー (TYPE-1)



注) 1. 口内の値はジョイント番号  
2. 口内の値は部材番号

図-9 鋼単純 I 型合成桁 (TYPE-2)

おり、TYPE-1 として、図-8 に示す桁を 4 連 (1GA, 1GB, 2GA, 2GB)、また、TYPE-2 として、図-9 のような桁を 2 連 (GA, GB) それぞれ測定した。これらの測定データのうち、処理に必要なものは、部材測定データのみである。

以下、上述した 6 連の主桁についての数値計算結果を前章 図-4 の手順に従って述べることにする。

(1) 部材誤作発見

部材の計測寸法と設計寸法との比較は、図-6 に示すようなボルト孔間距離を結ぶ三角網の辺長で行った。その結果、最大誤差は TYPE-1 の 1GA 桁 ② 部材の 5.4 mm (図-6 の ④~⑩ 部分) であった。ここで、先に述べたように、 $\Delta$ all を 10 mm としているのので、誤作はなかったものと判定される。

(2) 部材の組立て

部材の組立てに使用した方法を表-3 にまとめた。TYPE-1 の 1GA, 2GB 桁を除くと他は組立方法 No. 1 のみで部材の配置が決まっている。この手順は各部材のボルト孔位置にできるだけ近づけようとするものであるから、各部材の製作精度は非常に良好であったと言える。

表-3 部材の組立方法

TYPE	桁名	部 材 番 号									
		1		2		3		4		5	
1	1GA	A	B	A	B	A	B	A	-	A	-
	1GB	A	-	A	-	A	-	A	-	A	-
	2GA	A	-	A	-	A	-	A	-	A	-
	2GB	A	-	A	-	A	B	A	B	A	-
2	G A	A	-	A	-	A	-	-	-	-	-
	G B	A	-	A	-	A	-	-	-	-	-

注1) A:組立方法NO. 1 注2) 使用ボルトM22  
B:組立方法NO. 2

(3) 部材の修正命令

今回は、仮組立精度の判定を支間長、キャンパーについて行った。なお、精度の規定値は鋼道示<sup>9)</sup>に則った。表-4 に支間長に関する結果を、文献 3) の実測結果と併せて示した。全ての桁は許容誤差内に収まっており、実際に工場で仮組立てされた結果と同程度の精度が得られていることが分かる。

図-10 には、キャンパーに関する結果を示す。実線は計算結果を、破線は実測結果を表わす。誤差は計算値、実測値ともに許容範囲内にあることが分かるが、計算値の方が良い結果を示している。これは、計算値を基にパイロットホールを明け、これをガイドにして現場架設を行えば、より精度の高い結果が得られることを示し

表-4 仮組立支間長

(単位mm)

TYPE	桁名	設計寸法	数値計算結果		仮組立実測結果*		許容誤差
			計算値	誤差	測定値	誤差	
1	16A	55 129.0	55 131.1	+2.1	55 130.9	+1.9	±15.5
	16B		55 127.5	-1.5	55 127.5	-1.5	
	26A		55 129.3	+0.3	55 133.4	+4.4	
	26B		55 125.0	-4.0	55 128.6	-0.4	
2	G A	40 285.0	40 282.1	-2.9	40 282.0	-3.0	±14.0
	G B	40 283.3	40 283.3	-1.7	40 283.0	-2.0	

注) \* は文献3)の結果である

表-5 ボルト孔の最大ずれ量

(単位mm)

TYPE	桁名	ジョイント番号			
		1	2	3	4
1	16A	2.3 (UF)	2.3 (W)	2.4 (UF)	1.9 (LF)
	16B	1.2 (UF)	2.4 (LF)	0.9 (W)	1.0 (LF)
	26A	1.1 (UF)	1.1 (UF)	1.3 (W)	1.4 (W)
	26B	1.1 (W)	1.0 (W)	2.4 (W)	0.7 (W)
2	G A	1.0 (W)	1.5 (W)	—	—
	G B	1.2 (W)	0.8 (W)	—	—

注) (UF):上フランジ (LF):下フランジ (W):ウェブ

ている。

表-5 は最終的に得られた組立形状に対して、添接の可否判定を行った結果を示したもので、表中の数値は各ジョイントに含まれる孔群の孔ずれ量の最大値を表わす。これ等は全て孔ずれの許容値 2.5 mm (使用ボルト M 22) 以内に収まった。

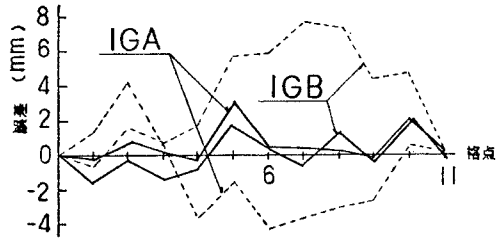
ここで許容値を超過する場合には、当該添接板の作り直しの指令を出すことになるが、先にも述べたとおり、計算値が出るのを待って、これにしたがって孔を明けける方法もある。

### 結 論

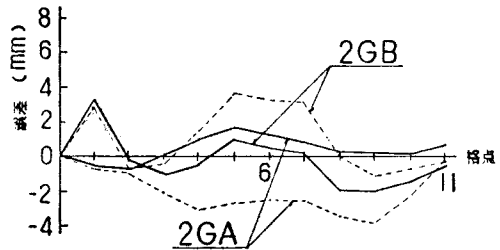
大型鋼構造物の完成形状を検査するには、現在のところ製作工場内の組立ヤードで部材を完成状態に組み立てることにより確かめる方法が採られている。この方法は最も確かな検査法と言えるが、半面経済性、安全性等において極めて不利な点が多い。そこで、筆者等は現仮組立に代わるシステムを提案した。そのシステムは、計測システムとデータ処理システムの2つのサブシステムから構成される。

計測システムは既往の三角測量法を採用しているが、データをトランシット等の従来用いられてきた測量機器を利用するのではなく、CCD カメラを採り入れた測量機械システムを新たに作り、このカメラの視野にはいったターゲット群を一括してコンピューターのメモリー内に短時間で取り込むことを可能にした。

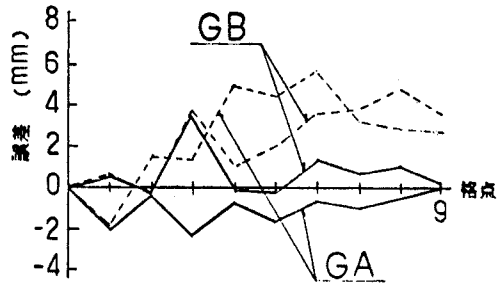
データ処理システムは、計測システムから得られたデータを基にして、実際の仮組立に近いシミュレーション



(a-1) TYPE-1



(a-2) TYPE-1



(b) TYPE-2

注) 1. ——— : 数値計算結果  
 2. - - - - : 文献3)の実測結果  
 3. 許容誤差 : -5 +15 mm

図-10 キャンバー誤差

を行い、製品の完成検査を行うものである。このシステムに実橋の部材に関するデータを入力してこのシステムを検証した。その結果、本システムが十分実用に耐えるものであることを証明できた。さらに、アウトプットされたデータを製作現場や架設現場に伝えることにより現在より精度のよい橋梁を架設することが可能であることが判明した。

現在完成しているシステムは主桁にだけ着目しているので2次元的な取り扱いで十分である。しかし、床組等の2次部材まで考慮したものは3次元的な取り扱いが

要求される。これを現在開発中であるが、これの完成を待って初めて真に実用に耐えるシステムであると言うことができよう。また、プレートガーダーに限らず箱桁やトラスのようなポピュラーな構造物に関するシステムの制作も今後の課題として残されている。

#### 参 考 文 献

- 1) 高田・鳥居・長谷川・寺口：CCD カメラを利用した大型構造部材の計測，昭和59年度精機学会春期大会学術講演会論文集。
- 2) 国井・小桜・鳥居：鋼橋の仮組立省力化システムについて，土木学会第39回年次学術講演会講演概要集第1部，昭和59年。
- 3) Kozakura, Y., Torii, K. and Takada, K.: "A Study of the Errors of Steel Bridge Members and their Effect on the Accuracy of their Shop Assembly", Proc. of JSCE, Structural Eng./Earthquake Eng., Vol. 2, No. 1, pp. 245 S~254 S, April (1985).
- 4) 田中敬一：レーザと計測極限への挑戦，共立出版，昭和58年。
- 5) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，II鋼橋編，丸善，昭和56年。
- 6) 塚本哲男：CCDの基礎，オーム社，昭和57年。
- 7) 伊理正夫：数値計算，朝倉書店，昭和56年。
- 8) 田島・近藤・天野：微分積分，培風館，昭和49年。
- 9) 小林・福田他：数学公式集，共立出版，昭和57年。

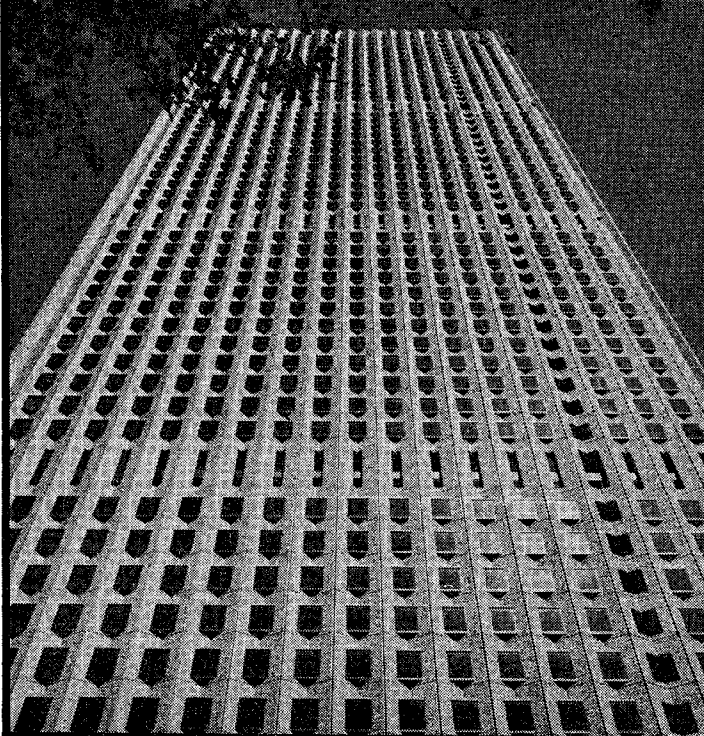
(1984.10.26・受付)

### ●ご案内●

論文集第6部門編集小委員会では、情報化施工、海外工事、施工システム、施工マネジメント、技術情報、先端技術、パブリックアクセプタンス (AP)、建設労務、契約・積算、建設諸法、などの土木技術や技術開発の論文を募集しております。

さらに、上述のほかにも、工事の企画から調査・設計を経ての積算・施工、あるいは検査・補修技術、品質・コスト・安全・工程などの管理手法や環境・公害対策など、また、新素材や機械に関するもの、そして業際的に発展する新技術開発とその商品化など一般のニーズに応える業績を幅広く募集しております。

大成建設本社ビル(新宿センタービル)



# 未来に 伝える

建設は人々の生活や文化を現代に伝えるとともに、社会の基盤づくりにも大きな貢献をしてきました。大成建設も一世紀をこえる歴史の中で、創造する喜びをもちながら、生活と深く関連した「建設」を、今日もつづけています。



## 大成建設

本社/東京都新宿区西新宿1-25-1 電話(03)348-1111