

鋼橋の仮組立てを省略するためのシステムの開発について

鳥居 邦夫*・高田 孝次*・豊山 晃*・藤野 和建*・
栗田 正則*・小桜 義隆**

A Study for a Development of Inspection System Instead of Shop Assembling of Steel Bridge Members

Kunio TORII, Koji TAKADA Akira TOYAMA, Yoritake FUJINO
Masanori KURITA and Yoshitaka KOSAKURA

An inspection system of steel bridge fabrication is presented in this paper. This system gives a guarantee of the probability of erection to steel bridge members fabricated in the factory. At present, this is performed by shop assembling. In our experiment the shop assembling process was simulated with a computer system. This was enabled by a strict measuring system of each member using CCD cameras.

Key words: Inspection Shop assembly/Steel bridge/Simulation/CCD camera

1. 序 論

鋼橋の架設においては、工場で製作した構成部材を架設現場へ運搬して組み立てるのが最も一般的な方法である。工作機械や電気設備等が完備していない現場で製作の不具合を発見しても手直しが不可能な場合が多いことがその理由である。これは工場内で殆ど完成に近い状態にまで組み上げることができる造船や製鋼等には見られない条件である。このような事情の下で鋼橋部材製作に対して、すべての官公庁の示方書が仮組検査を義務付けている。これは至極妥当な工程であり、これによって、架設可能であることを立証し、且つ、製作精度の測定や誤作を発見することが可能であり、仮組立以外にこれらの要求を満たす他の方法は現存しない。

しかし、この工程はかなりの工数、広大な敷地を要して製作コストを引き上げ、また、天候に支配されて製作スケジュールを圧迫し、高所作業のもたらす人身事故の危険性を有している。

筆者等は仮組立をコンピュータを用いてシミュレートすることで、この工程を省略することの検討を続けて来

た。これを可能とするには、鋼橋を構成する多くの部材の製作精度を正確にしかも敏速に且つ採算のとれる範囲で測定できることが必須の条件である。従来行なわれてきた測定法はすべてこの条件を満たすことができず、新しい測定法の開発が待たれた。近年、CCD素子の開発が著しく、信頼性の高いCCDカメラが市販されるようになってきた。筆者等はこれに着目し、CCDカメラを利用して部材を測定する方法の開発に努めた結果、一応の成果を得ることができた。さらに、得られた測定結果をもとに仮組立のシミュレーションを行なうプログラムを同時に開発した。⁵⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾⁽¹²⁾ここでは、これらの成果について述べることにする。

2. 部材測定法

2.1 測定法の原理

図1において、空間内の任意点Pの三次元座標値を確定するには基線OAの長さBと水平角 θ_L , θ_R および鉛直角 ϕ_L , ϕ_R を知ることが必要十分である。従来の測量法では、長さはテープあるいは光波測距儀を用いて測定し、角度はトランシットあるいはセオドライトを用いて測定する。しかしこの方法を鋼橋部材の寸法測定に適用することはできない。角度の測定が所要の精度(相対誤差1/20,000程度)を満足することができないからである。目的に叶う方法としては次のようなものが考えられる。

原稿受付：昭和61年3月31日

新潟県技術賞受賞

* 長岡技術科学大学

** 株式会社横河橋梁製作所

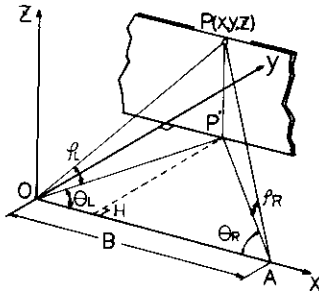


Fig. 1 The Principle of Triangle Measurement.

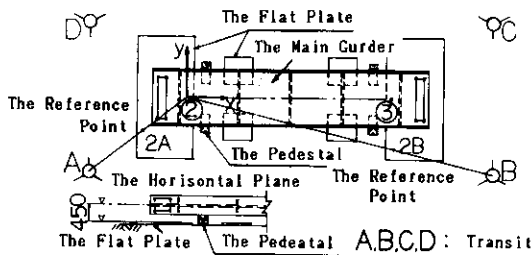


Fig. 2 The Way of Member Mesuring.

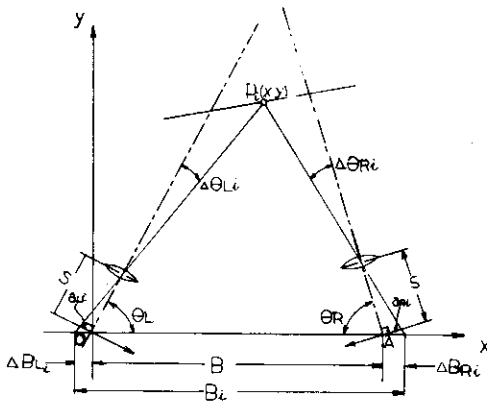


Fig. 3 The Way of Mesuring with CCD Camera.

図2のAおよびBにトランシットを据えたのち、部材を鋼板上に置き、その部材の測定点②に関する2点A, Bからの引照点2A, 2Bを鋼板に罫書く。罫書き終わったら部材を取り除き、所要の測定点をトランシットでそれぞれAおよびBと引照点を結ぶ直線の延長の交点②を求めれば、これが測定点の投影点となる。こう

して得られた投影点間の距離（例えば②～③間）をステールテープで直接測定すれば目的を果たすことが出来る。筆者等が行なった実験では、この方法により測定誤差を0.5 mm以内に抑えられることが判明した。¹⁾測定精度は満足できるが、測定に長時間を要するのがこの方法の難点である。実験の結果によれば、従事者が測定に習熟した段階でも4本/日を超えることができなかった。最も簡単な橋梁でも部材数が必ず100を超えることを考えれば、測定に要するコストは許容限界を遙かに上回っているとせざるを得ない。そこで考えられたのが次に述べる方法である。

CCDカメラを、その受像面とレンズの主軸との交点がFig. 3の点O, Aに来るように設置する。取り付けられた測角機によって左右のカメラの主軸の向き、 θ_L , θ_R , ϕ_L , ϕ_R を読む。さらに、左右のカメラの受像面上の点O, Aを原点とする局部座標値で夫々 (a_L, b_L) , (a_R, b_R) の位置にターゲットPiの像を結んだとする。このとき、この点の水平角および鉛直角は次式で計算できる。

$$\begin{aligned}\theta_{Li} &= \theta_L + \tan^{-1}(a_{Li}/S) = \theta_L + \Delta\theta_{Li} \\ \theta_{Ri} &= \theta_R + \tan^{-1}(a_{Ri}/S) = \theta_R + \Delta\theta_{Ri} \\ \phi_{Li} &= \phi_L + \tan^{-1}(b_{Li}/S) = \phi_L + \Delta\phi_{Li} \\ \phi_{Ri} &= \phi_R + \tan^{-1}(b_{Ri}/S) = \phi_R + \Delta\phi_{Ri}\end{aligned}\quad (1)$$

また、基線長はFig. 3に示したようにBではなく、これより若干長くなって

$$B_i = B + S(\sin\Delta\theta_{Li}/\sin\theta_{Li} + \sin\Delta\theta_{Ri}/\sin\theta_{Ri}) \quad (2)$$

となる。

これで必要十分な値が得られたので、次式によりP_iの空間座標値が計算できる。

$$\begin{aligned}x_i &= B_i \cdot \cos\theta_{Li} \cdot \sin\theta_{Ri} / \sin(\theta_{Li} + \theta_{Ri}) \\ y_i &= B_i \cdot \sin\theta_{Li} \cdot \sin\theta_{Ri} / \sin(\theta_{Li} + \theta_{Ri}) \\ z_i &= B_i \cdot \tan\phi_{Li} \cdot \sin\theta_{Ri} / \sin(\theta_{Li} + \theta_{Ri})\end{aligned}\quad (3)$$

2.2 測定装置の概要

カメラは2台あるのが望ましいが1台でも測定は可能である。試作した測角機の概要をFig. 4に示す。CCDカメラは鉛直軸廻りに360°回転できる。軸の駆動にはパルスモーターを用い、1パルス当たり18°の回転を行なう。回転角はパルスを数えるのではなく、軸に直結したロータリーエンコーダ（1"読み、累積誤差3"以内）で読み取っている。Fig. 5に累積回転誤差 $\delta\theta_i$ の測定結果を示す。分散が非常に小さく、キャリブレーションを行なうことにより良好な精度が得られることを示している。

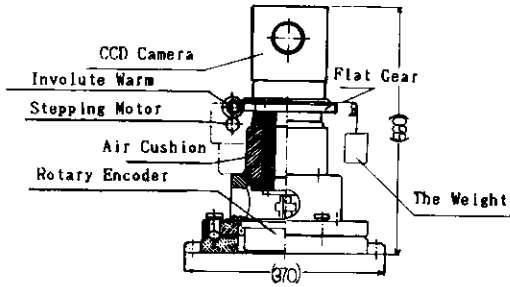


Fig. 4 The Trial Machine.

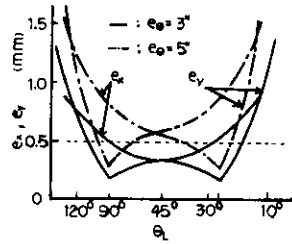


Fig. 7 Magnitude of Errors of Mesurment.

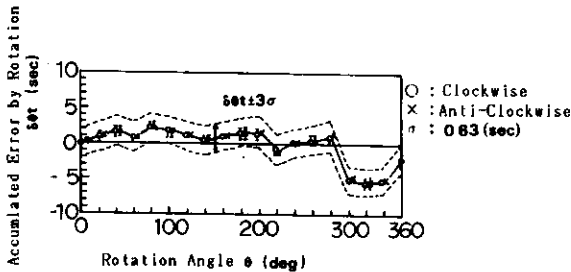


Fig. 5 Rotation Angle Errors of Vertical Axis.

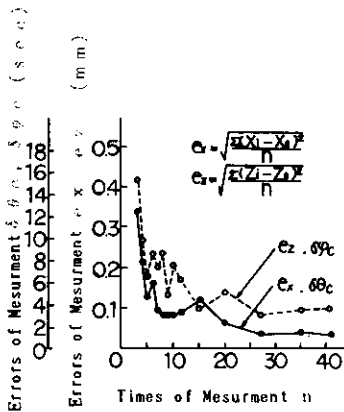


Fig. 6 Errors of CCD Camera.

回転台上に登載した CCD カメラはピクセル数 200 のライン型 CCD センサーが水平に置かれており、これをモーターで上下に 3,000 ステップ移動させることにより、画面を 2,000×3,000 画素にデジタル化して読み取ることができるになっている。この鉛直移動の精度は必ずしも満足の行くものではないが、対象物を繰り返し測定することによって分解能を高めることができる。Fig. 6 は繰り返し回数と分解能との関係を実験によって求めた結果を示したものである。測定を繰り返すことは

かなり有効であるが、回数を 10 回程度にするのが適当で、これ以上繰り返しても分解能はよくならないことを示している。

2.3 カメラの位置が測定精度に及ぼす影響

図 1 において、基線長 B と被測定物との距離 $P'H$ との比は測定精度に大きな影響を及ぼす。Fig. 7 にこれを示す。横軸は $\theta_L = \tan^{-1}(2 \cdot H/B)$ にとり、縦軸は $P'H = 10,000 \text{ mm}$ としたときの測定誤差を示す。但し基線長の測定誤差は 0.1 mm とし、実線は測角誤差 $3''$ の場合を示し、一点鎖線は $5''$ の場合を示す。

θ_L が $30^\circ \sim 120^\circ$ の間で誤差は大差なく、広い角度に視野を広げて測定できることを示している。

2.4 本測定法の評価

本測定法によって部材測定を行なった結果、10 m 離れたターゲットを 0.5 mm 誤差で読取ることが出来ることを証明した。¹⁰⁾これは要求精度 (相対誤差 $1/20,000$) を満足するものである。

測定に要する時間はカメラの台数が 1 台の場合と 2 台の場合とでは異なる。2 台の場合は 1 視野の測定に要する時間は数分であり、これに部材の搬入搬出に要する時間とターゲット設置の時間を加えなければならないが、工場内に専用の設備を設ければ、1 部材あたり 20 分程度に短縮することが可能であると考えられる。これはじゅうぶん実用性のあるものである。

測角儀製作に要した費用は ¥6,000,000 程度であるが量産によりコストダウンを見込める。セオドライト (測定値をデジタル信号で取り出せるもの) が ¥3,000,000 程度であることから考えて決して高価なものではないことがわかる。

これらの点を評価すると本測定法は実現の可能性の高

い方法であると結論できるであろう。

3. 完成検査

3.1 検査の種類

仮組検査は序論で述べたような要件を満たさなければならない。併し橋梁の製作に関係する当事者が全ての要件を求めるわけではなく、立場によってその要求項目が異なる。仮組を省略する場合には全ての立場の要求に応えられるようなソフトウェアシステムを用意できていることが望ましい。

筆者等は次のようなシステムを用意し、この要求に応えようとした^{(1),(2),(3),(6)}。

1. 品質検査システム
2. 架設保証システム
3. 仮組シミュレーションシステム

1は鋼橋を構成部材の集合体と見做し、橋梁としての品質を量的に表示しようとしたものである。発注者や製作工場の品質管理責任者に必要なものであると考えられる。

2は部材を架設現場へ持込んだ場合に架設可能であることを保証するものである。製作工場の責任者が必要とするものである。

3は仮組の作業をシミュレートすることで誤作を発見したり、著しく精度の悪い部材を発見したりし、更には最適な組み立て方を架設担当者に示すことのできるものである。以下に順次詳述する。

3.2 品質検査システム

鋼橋の構成部材は製作誤差を有している。さらに、ボルトは穴はボルトの幹より若干大きめに明けるのが普通であるから、架設時には部材がスプライスプレートを介してどのように継がれるかを予測することはできない。即ち、橋梁格点の完成位置は統計的なばらつきをもったものになる。完成形状が理想状態に近いほど品質がよいのであるから、完成形状からのずれを量的に表すことができるばいわけである。そこで格点の位置が統計量であることに着目し、マハラノビスの汎距離を導入し、これを品質の指標とすることにした。完成橋梁のマハラノビスの汎距離は次式で与えられる。

$$D^2 = (x - \mu)^T \cdot \Sigma^{-1} \cdot (x - \mu) \quad (4)$$

D: マハラノビスの汎距離

x: 格点の位置 (ベクトル)

μ : 構造物の理想値 (ベクトル)

Σ : 構造物の格点位置の分散・共分散行列

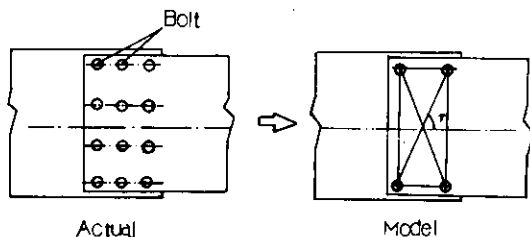


Fig. 8 Modeling of The Joint.

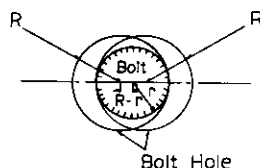


Fig. 9 Geometrical Condition.

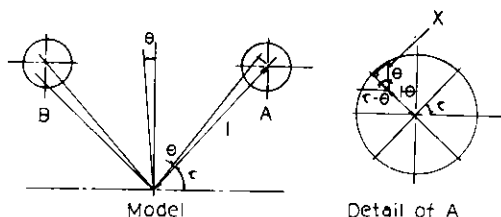


Fig. 10 The Detail of The Joint.

格点が n 個あるとき、 D^2 は自由度 n の x^2 分布に従うことに注目すると、 x^2 の確率値と比較することにより当該橋梁が何%の確率の位置の品質であるかが判定できる。合格橋梁のボーダーラインを設定することにより合否の判定も可能である。

3.3 架設保証システム

鋼橋の現場継ぎ手は一般に高張力ボルトにより添接継手が用いられる。継手には多数のボルト穴が明けられるがこれ等はテンプレートあるいはNC孔明機を使用して穿孔するため、それらの相対的な位置関係の狂いは極く小さいと見てよいからスプライスは Fig. 8 のようにモデル化できる。複剪で2枚のスプライスプレートが互換性を有する場合、ボルトの幹が3枚の板の穴を貫通できる条件は次式で与えられる。

$$d \leq (R - r) \quad (9)$$

d: 穴ずれ量

R: 穴径

r: ボルト幹径

Fig. 9 はこれを示したものである。ここで、上記の制限

を満たしながら、板を反時計回りに微小角度 θ だけ回転させる。すると、Fig. 10 を参照して移動可能距離は

$$x = -l \cdot \theta \cdot \cos(r - \theta) + d^2 - l^2 \cdot \theta^2 \cdot \sin(r - \theta) \quad (11)$$

x : 移動可能距離

θ : 回転角

r : 添接孔群の対角線交角の半分

l : 添接孔群の中心から最遠穴までの距離

で表される。この式より θ の最大値は次式のようになる。

$$\theta_{\max} = d/l \quad (12)$$

これは r で依らない。これを 11 式に代入すると格点の動ける範囲が求まる。このときの r と x/l の関係を図示したのが Fig. 11 である。この関係を利用し、製作時に生じた誤差を吸収できるかどうかを判定するのがこのシステムである。

3.4 仮組シミュレーションシステム

構成部材の寸法を CCD カメラで計測し、このデータをもとに、コンピュータを用いて橋梁の全体像を作り上げるのがこのシステムである。

対象プレートガーダーに限ることとし、主桁は下記の目的関数を最小ならしめるように組み立てる。

$$g = \min \Delta_i^2 \quad (13)$$

$$\Delta_i^2 = (X_i - X_{io})^2 + (Y_i - Y_{io})^2$$

(X_i, Y_i) : 部材端部格点座標の測定値

(X_{io}, Y_{io}) : 部材端部格点座標の設計値

付帯条件

$$\phi_{ij} = (X_i - X_j)^2 + (Y_i - Y_j)^2 + L_k^2 = 0$$

K : K 番目の部材を表す

この場合の ij は部材の左右端を表す。

L : 部材計測長

その結果、部材端部の格点は穴ずれを生じることになるが、これが穴の余裕の範囲を超える場合には調整を行なう。調整したにもかかわらず、ボルトが貫通しない場合には最小の手直して済む部材を捜し、修正指令をアウトプットする。

こうして主桁を組み終えると 2 次部材の組み込みに入る。この場合主桁の場合とは異なり、弱軸回りの曲げと戻りの変形を許容することとし、2 次部材を払い込むの

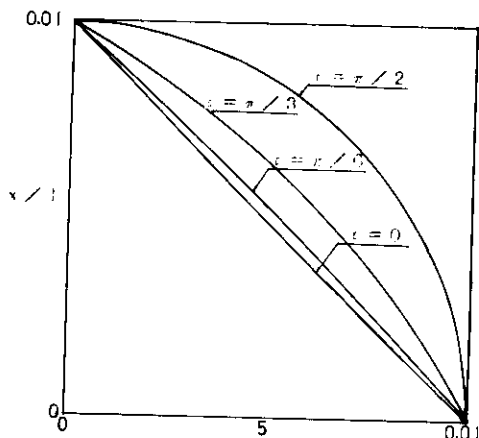


Fig. 11 The Movable Limits of The Bolt.

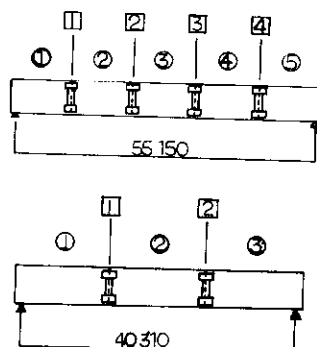


Fig. 12 The General Plan of The Girders.

に主桁の配置を変えることはしない。これで払い込み不能の場合は部材修正となる。

このシステムを Fig. 12 に示す 2 橋に対して適用した結果を Fig. 13 に示す。計算結果はいずれも実際の仮組で得られた形状よりも設計値に近く、計算値に基づいて主桁にパイロットホールを穿てば架設時に管理が容易でしかも精度のよい仕上りを達成できることを証明できた。

4. 結 論

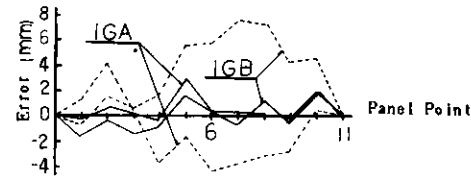
鋼橋の仮組工程を省略し、コンピュータを使用して完成検査を行なう方法を示し、良好な結果が得られることを示した。さらに、これを支える部材計測装置についても所要の精度で経済的に測定出来ることを示した。

本システムは橋梁の計測に留まらず、広い範囲への応用が可能であり、現在これを開発中である。また、測定

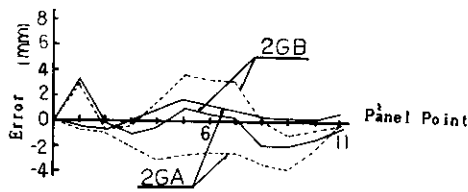
装置にとりつけられた回転装置は視野を広げるために設けたものであるが、必ずしもコストに見合う効果が期待できるものとは限らない、これを取り除いたより簡便な装置をも開発中である。

参考文献

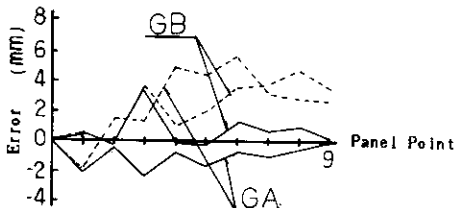
- 1) 中平幸房, 鳥居邦夫コンピュータによる仮組検査に関する一考察 土木学会年次学術講演概要集 p187, 1981.10.
- 2) 中平幸房, コンピュータによる仮組検査に関する一考察, 長岡技術科学大学院修士論文, 1982, 3
- 3) 池田邦夫, 鋼橋の仮組立に代る完成検査モデルの開発, 長岡技術科学大学院修士論文, 1983, 3
- 4) 国井好幸, 仮組立省力化システムの開発, 長岡技術科学大学院修士論文, 1984, 3.
- 5) 高田孝治, 鳥居邦夫他, CCD カメラを利用した大型構造部材の計測, 精機学会春期大会講演会論文集 p919 1984. 4.
- 6) 国井好幸, 小桜義隆, 鳥居邦夫他, 鋼橋の仮組立省力化システムについて土木学術講演概要集 p333 1984. 10.
- 7) 片山生一, 仮組立自動化システムの開発, 長岡技術科学大学院修士論文, 1985, 3.
- 8) Kozakura, Y., Ttrii, K., Takada, K., "A study for Abberation of Separated Members and Shop assembled Members of the Steel Bride" Proceeding of JSCE No. 356/I 1985-4
- 9) 高田孝治, 船木達也, 大型構造部材の製作精度検査システム, 精機学会春期大会学術講演会論文集, 1985, 4
- 10) 鳥居邦夫, 小桜義隆, 高田孝治, 鋼橋の完成検査法に関する一提案, 土木学会論文集, 第 361 号/VI-2 p79 1985. 8.
- 11) 白石典之, 鋼橋における自動仮組システムの開発長岡技術科学大学院修士論文, 1986, 3.
- 12) 船木達哉, CCD カメラを利用した大型構造部材の三次元計測, 長岡技術科学大学院修士論文, 1986, 3.



(a-1) TYPE-1



(a-2) TYPE-1



(b) TYPE-2

1. ————— : Results of Calculation
2. - - - - - : Results of The Exppiriment (ref.3)
3. Tolerance : $-5 + 15$ mm

Fig. 13 Fabrication Errors of Girders.