

I-8 仮組立シミュレーション法に関する2、3の検討

Studies on Simulation System of Shop Assembly Omission

林 健治* 西園 広之** 小林 伸吾**
Kenji HAYASHI Hiroyuki NISHIZONO Shingo KOBAYASHI

【抄録】 I桁橋や箱桁橋のような単純な構造の橋梁では、その製作工数を低減する有力な方法として仮組立の省略が挙げられ、橋梁メーカーにとっては、製作工程における仮組立の省略が最も重要な課題の一つとなっている。そこで、著者らは、橋梁の3次元形状計測システムと仮組立シミュレーション・システムから構成される数値仮組立検査システムを開発した。本研究では、仮組立シミュレーション法について検討し、最適化法に基づく手法の妥当性を検証する。また、実橋の仮組立検査や現場での架設形状管理を通して、数値仮組立検査システムの妥当性・信頼性を検証し、数値仮組立検査の実用化の第一歩とする。

【Abstract】 For the steel bridge fabricators, it becomes one of the most important task to omit the process of shop assembly in simple type bridges, such as plate/box girder bridges, providing to maintain the quality of fabrication despite saving the man-hour. The authors have developed a new system that simulated the shop assembly in the process of fabrication, and which contained the system measuring the 3-dimensional configuration of bridge members. In this paper, the simulation technique based on the optimization one is verified to be appropriate, and the simulation system is proved to be reliable and practicable enough through comparison between the simulation results and the actual results measured in case of shop assembly and construction.

【キーワード】 仮組立省略、シミュレーション、数値仮組立検査

【Keywords】 Shop assembly omission, Simulation, Numerical shop assembly inspection

1. はじめに

近年、第二東名・名神高速道路の建設計画に見られるように、ライフサイクルコストの低減を狙いとして、構造の合理化・簡素化が積極的に進められている¹⁾。橋梁の製作においても、構造の簡素化により仮組立を省略しようとする動きがあり、橋梁メーカーにとっては仮組立省略が最も重要な課題の一つとなっている²⁾。

仮組立の省略を可能にする要素技術および周辺技術には、つぎのようなものが上げられる。

- ①部材精度を保証する高精度加工・組立技術³⁾
- ②部材の3次元形状を計測するシステム⁴⁾
- ③仮組立のシミュレーション技術^{2), 5)}
- ④仮組立時の無応力状態の再現法と形状調整法⁶⁾
- ⑤シミュレーション結果に基づく形状管理技術

従来より部材精度を確保する観点から、①に関する研究は仮組立省略の研究に関わらず実施されているが、系統的な取扱いを行った研究は少なく、今後の課題と考えられる。②については、最近の計測機

器の進歩を受けて、橋梁のような大断面の部材(20~30m)を1.0mm以内と非常に精度よく計測できるシステムが開発されている⁷⁾。また、その実用性についても実測データより検証されている^{4), 5)}。

仮組立のシミュレーション技術③については、幾何学的な形状のみに着目して、CADにより接合の状態、部材間の取り合いおよび全体形状・寸法を把握する方法⁸⁾(以下では、幾何学的配置法と呼ぶこととする)と、ボルト孔を基準として設計値に対する実測値の孔ずれを最小にするという、最適化の概念に基づくシミュレーション法(最適配置法と呼ぶことにする)が提案されている²⁾。部材の孔加工を後孔とする場合(後者の方法が前提となる)と、先孔とする場合(前者の方法もしくは孔の余裕度を考慮した位置決めが必要となる)では、その取り扱いが異なるので、その違いを明確にすることは有意義と考えられる。

④については、鉸桁のような面外剛性の比較的弱い部材では、仮組立時の支持状態によって変形が異

連絡先: *)〒441 豊橋市明海町1番地 トピー工業(株) 技術研究所 TEL. 0532-25-5354

**)〒322 鹿沼市さつき町13-1 トピー工業(株) 鹿沼製造所 TEL. 0289-76-3151

なることも想定されるので、その影響を加味し、無応力状態を精度よく再現できる方法を採用する必要がある。また、上記の最適化法によりシミュレーションを実施しても、仮組立形状の要求精度を満足しない場合には、何らかの調整が必要となる。その一例として、現場継手部のボルト孔間距離などを調整することにより仮組立形状の精度を保証する方法⁶⁾が提案されている。

仮組立のシミュレーション情報を活用することにより、より合理的な架設が行えることは言うまでもない。しかしながら、⑤に関して実施例⁶⁾は十分であるとは言い難く、今後のデータの蓄積を待たねばならない。計測法については、計測データの精度保証、データの整合性や計測手法の一貫性などの観点から、部材計測と同様の方法により架設時の形状管理を実施することが望ましい。したがって、トータルステーションを用いた3次元形状計測システム⁴⁾は、橋梁の部材検査や形状管理に適した計測システムであると言うことができ、今後、計測法の中心となることが予想される。

以上の観点から、著者らは、鋼橋の仮組立の省略を可能にする数値仮組立検査システム（その概要を図-1に示す）を開発した。本システムは、3次元形状計測システム⁴⁾と仮組立シミュレーション・システムから構成され、パーソナル・コンピュータ内で仮組立形状のシミュレーションとその組立精度の照査が行われる。本研究では、仮組立シミュレーション

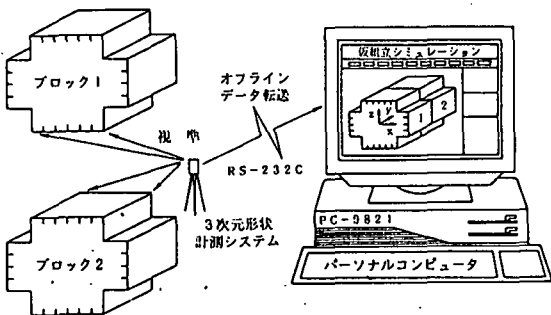


図-1 数値仮組立検査システムの概要

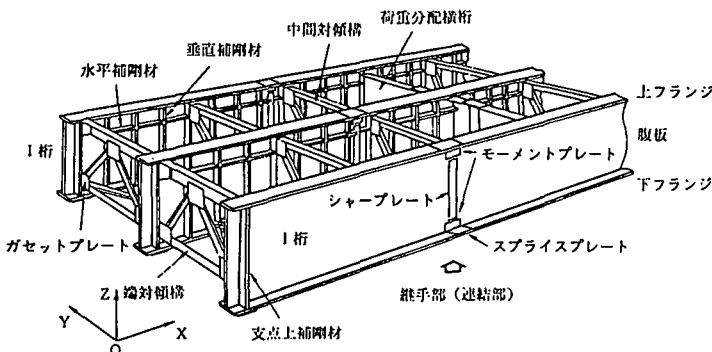


図-2 プレートガーダー橋の構成

法を中心に数値仮組立検査システムの概要を述べ、実測データに基づく数値実験を通してシミュレーション法の妥当性や手法による結果の差異を調べる。また、工場内での実橋の仮組立検査および架設現場における組立形状の計測結果に基づき、システムの妥当性および信頼性を検証する。

2. 数値仮組立検査システム

仮組立の前提は、各部材が正しく製作されていることであり、その目的は次のとおりである⁸⁾。

- ①部材が正しく工作されたか否かの確認
- ②部材の接合が良好であるか否かの確認
- ③組立状態が所定の形状を有するか否かの確認
- ④架設手順への影響の確認
- ⑤母材、溶接部に欠陥があるか否かの確認
- ⑥付属物の取付け状態の確認

数値仮組立検査システムとしては、上記の①～③の部材精度および仮組立精度を照査し、④の架設手順への影響をシステム内で把握できることが不可欠である。

2.1 数値仮組立の作業手順

数値仮組立検査システムの概要を図-1に示す。図-2に示すプレートガーダー橋では、主桁の連結は添接板をボルト締めすることにより実施される。また、主桁相互の横方向の連結は、対傾構や横構などの部材を介して、ガセットプレートの部のボルト締結により実施される。それゆえ、仮組立シミュレーションにおける計測の基準点は、これらのボルト

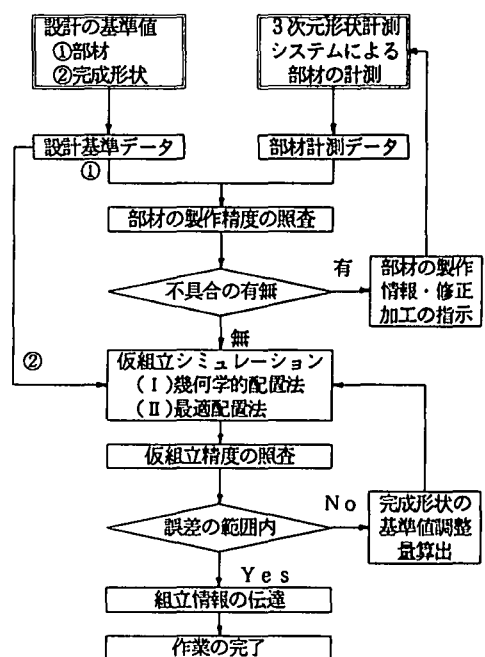


図-3 数値仮組立の作業手順

孔位置となり、3次元形状計測システム⁴⁾により測定される。数値仮組立の作業手順を図-3に示す。ここで、作業手順は、以下のように要約することができる。

- 1) 設計の基準データとして、部材①に関するデータと完成形状②（無応力状態における組立形状）に関するデータを用意する。
- 2) 3次元形状計測システム⁴⁾を用いて部材計測を行い、各部材の計測データを用意する。
- 3) 部材に関する設計基準データと計測データを比較し、各部材が所定の製作精度を満足するか（管理目標値内に収まっているか）否かを照査する。
- 4) ここで、要求精度を満足しない（不具合が発生した）場合、部材の修正・加工情報を指示し、修正部材の計測を再度実施する。
- 5) 部材に不具合がない場合、完成形状②の設計基準データを用いて、仮組立の数値シミュレーションを行う。ここで、ボルト孔あるいはエッジ・端面を基準に、最適な位置決めを行う。
- 6) シミュレーション結果に基づき、仮組立精度の照査を行う。完成形状に関して、その寸法・形状が許容誤差の範囲内であるか否か吟味する。
- 7) ここで、許容誤差の範囲内に収まっていない場合、ボルト孔の余裕度、現場継手部のすき間などを利用して、誤差を打ち消す方向に調整量⁹⁾を設け、完成形状の設計基準値を補正し、再度、シミュレーションを実施する。
- 8) 要求精度を満足するまでシミュレーションを繰り返す。要求精度が満足された場合、シミュレーションを完了し、後工程（架設作業）に組立情報を伝達する。

以上の作業手順の中では、添接部のボルト孔が先孔であるか、後孔であるかについては触れられていないが、本研究では、後孔を中心として考える。これは、後述する形状調整法⁹⁾を考えた場合、後孔とする方がシミュレーション原理が明確であり、実用性も兼ね備えているものと考えられるためである。

2. 2 幾何学的配置法

2次元あるいは3次元のCAD⁹⁾を利用する場合には、この幾何学的配置法が中心となる。この方法は現場溶接継手の接合状態や塔柱のメタルタッチ⁹⁾の状態をシミュレーションする方法に応用できる。また、簡便な方法であることから最適配置法の補間法としても使用することができる。その概要を図-4に示す2次元の幾何学的配置モデルを用いて述べる。但し、NC孔明けにより、ボルト孔は所定の間隔に孔明けされているものとし、四隅の孔を基準に

して幾何学的な配置を検討すればよいものとする。

部材(n)と部材(n+1)について、X-Z軸を基準に部材計測により得られたた座標データをそれぞれ点L₁、R₁を原点、L₂、R₂をそのx、x₁軸方向として座標変換を行い、z-x軸とz₁-x₁軸に関する座標データを得る。つぎに、z₁-x₁軸に関するデータを

$$x_1 = x - B \quad (1)$$

を用いて、x-z軸に平行移動する。ここで、Bはボルト孔間距離を表し、第1回目のシミュレーションでは、設計基準値を用いる。

部材(n+1)のデータを部材(n)のx-z軸に関する座標データに変換し、改めて部材(n)のデータを部材(n+1)と同様にx₁-z₁軸に関して平行移動と座標変換を行い、部材(n-1)の座標データに結合される。以上の操作を左端まで順次繰り返す。

部材をすべて結合した後、x-z軸で表示された全データを基準軸のX-Zに関して、平行移動と座標変換の処理を行う。このような処理により得られた完成形状のデータが、支間長や現場継手部のすき間に対する要求精度を満足しない場合には、Bの値を調整して、再度シミュレーションを実施する。但し、この方法でキャンバー調整を行うことは困難である。

つぎに、通りについてはX-Y軸を基準にして同様な処理を行えばよい。また、先孔の場合、各部材を結合する前に部材と添接板を結合し、これを一部材としてもう一方の部材と同様な方法で結合することによりシミュレーションを行うことができる。

3次元の幾何学的配置については、2次元の場合が軸（あるいは線と言うことができよう）を中心に平行移動・座標変換を行っていた部分を面に置き換えればよい。ここで、計測データから端面（仮想的な面）を決定するには、立体幾何の平面の方程式¹⁰⁾を用い、計測データの誤差を考慮して最小自乗法を適用する必要がある。

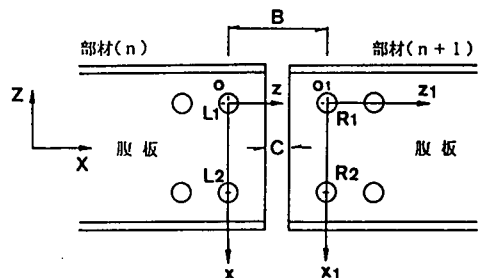


図-4 幾何学的配置法（2次元モデル）

2. 3 最適配置法

部材の製作精度がよく、製作誤差が許容誤差より

も十分に小さい場合には、前述の幾何学的配置法により実用上問題ない結果が得られるものと推測される。しかし、実用面から考えると、製作誤差を排除することは不可能であり、ある程度の誤差を許容する方が合理的である。

製作誤差を有する部材を組み立てる場合、部材の形状ができるだけ設計値に近い状態になるように配置する方が得策である。この考えから、添接部のボルト孔位置の測定値と設計値の誤差の自乗和を最小にするように部材の位置決めを行う方法が提案されている²⁾。図-5の2次元最適配置のモデルを用いて、具体的にこの方法を示す。

いま、空間固定された座標系に対して部材そのものを移動させる幾何学的変換¹⁾により、部材の再配置を行うものとする。図-5のモデルにおいて、X-Z座標系を仮組立時の全体座標系として次式の目的関数Fが最小となるように、各部材を配置する。

$$F = \sum \Delta D_i^2 \quad (2)$$

ここに、

$$\Delta D_i^2 = (X_i - X_{i0})^2 + (Z_i - Z_{i0})^2 \quad (3)$$

であり、iは測定点の数、(X_i、Z_i)はボルト孔等の計測座標値、(X_{i0}、Z_{i0})はボルト孔等の設計座標値を表す。

局部座標系x-zを部材内に任意に採り、平行移動と回転の幾何学的変換を施すと、次のようになる。

$$\begin{aligned} x_i &= X \cos \theta - Z \sin \theta + \Delta x \\ z_i &= X \sin \theta + Z \cos \theta + \Delta z \end{aligned} \quad (4)$$

ここに、θは全体座標系に対する局部座標系の回転角を表し、(x_i、z_i)は計測データの局部座標値を、(Δx、Δz)は平行移動量を与える。

式(4)を式(2)に代入すると

$$F = F(\Delta x, \Delta z, \theta) \quad (5)$$

となり、最適配置の問題は3つの変数Δx、Δz、θを同定する問題に帰着される。式(5)の目的関数は非線形であるため、その最小化にあたっては準ニュートン法に属するレーベンベルグ・マルカート法¹⁾により定式化を行った。

以上の取扱いは後孔を前提としている。添接板や二次部材の孔加工を後孔としていることにより、個々の部材について最適配置を行うことが全体の最適配置につながっている。換言すれば、部分最適化による方法が全体最適化による方法と等価となっている。しかし、先孔の場合には、このような取扱いができない。添接板のボルト孔間距離および現場継手部のすき間などが制約条件となり、結果として、この場合の仮組立シミュレーションは制約条件付き非線形最適化問題を解くことに帰着される¹⁾。なお調整法に関する取扱いは、基本的に幾何学的配置法の場合と同様である(ボルト孔間距離BやZ軸方向の設計基準値を調整することにより、キャンパー誤差Δδや支間長誤差ΔLを低減する)。

つぎに、3次元の最適配置について検討する。式(3)に対応する式として次式を扱う。

$$\Delta D_i^2 = w_1 (X_i - X_{i0})^2 + w_2 (Y_i - Y_{i0})^2 + w_3 (Z_i - Z_{i0})^2 \quad (6)$$

ここに、w₁、w₂、w₃は各成分の重みを表し、拘束条件として用いられる。式(4)に対応する式としては、X、Y、Z軸まわりの回転をα、β、γ、平行移動量をΔx、Δy、Δzとすると、

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = R(\alpha, \beta, \gamma) \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} \quad (7)$$

となる。ここに、Rは方向余弦から構成される係数行列を表す。式(6)、(7)を式(2)に代入すると、式(5)に対応する次式を得る(なお、添字iは省略した)。

$$F = F(\Delta x, \Delta y, \Delta z, \alpha, \beta, \gamma) \quad (8)$$

それゆえ、3次元の最適配置問題は6つの変数Δx、Δy、Δz、α、β、γを同定する問題に帰着される。

式(6)の重みw₁を零とすると、自動芯出しのアルゴリズムと一致する¹²⁾。なお、式(8)の定式化や誤差の調整法は2次元の場合と同様であるので、ここでは省略する。

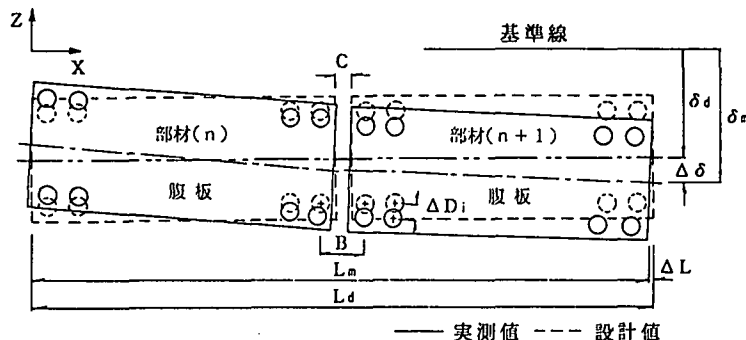


図-5 最適配置法(2次元モデル)

3. シミュレーション法の適用例

まず、完成形状のシミュレーション法である前述の幾何学的配置法と最適配置法の妥当性を検証するために、以下に示す適用実験を行った。また、最適配置法を用いて、塔柱の3次元切削条件の選定等を行った。さらに、钣桁の数値仮組立を実施し、実仮組立および現場組立との結果の差異を比較した。ここで、計測された部材の座標値と設計座標値との差や隣接するボルト孔間距離の相対差の管理目標値は一応の目安として±5mmとした。その他の管理目標値は道路橋示方書の規定¹³⁾に準じた。なお、3次元計測の概要については省略する(詳細は、文献4)を参照されたい)が、測定精度は±0.3mmであったことを付記する。

3.1 シミュレーション法による差異

主桁の部材配置については、2次元的な取扱いでも実用上問題ないと考えられる。この観点から、支間36,200mm、3本主桁の钣桁について仮組立のシミュレーションを実施した。図-6に各部材の測定位置と連結部の取り合い(ボルト孔位置の点9、10と点5、6を基準とした)を示す。

2次元の幾何学的配置法を使用して、仮組立時の形状のシミュレーションを行った結果の一例(中主桁GB)を図-7に示す。この結果は、別途、上記

のボルト孔を基準にして2次元のCADで配置した結果と当然のことながら一致する。ここで、右上の図中に支間長、キャンバーの設計値と実測値(括弧書きの数値)が示されている。J₁~J₄は現場継手部を表す。また、下側の数値は下フランジ側の値、中間の数値は腹板側の値、上側の数値は上フランジ側の値を示す。連結部の数値はボルト孔間距離を表す。なお、シミュレーションによる座標値と設計座

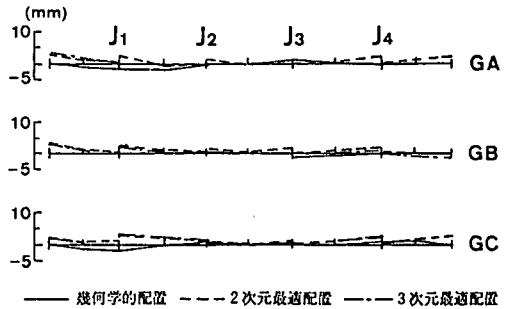


図-8 キャンバー誤差(許容誤差:-5mm~+10mm)

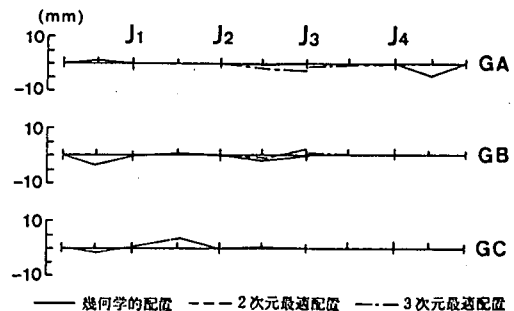


図-9 通り誤差(許容誤差:±12mm)

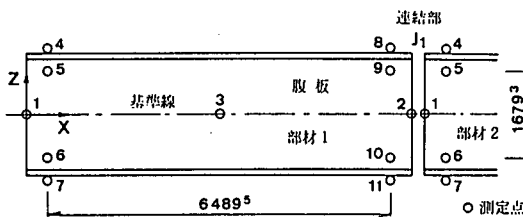


図-6 主桁の測定点と連結部

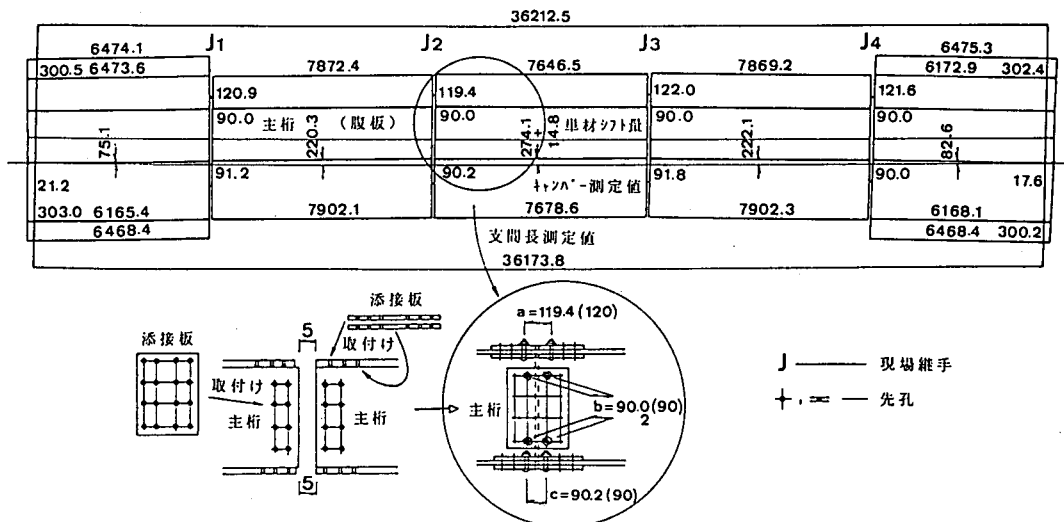
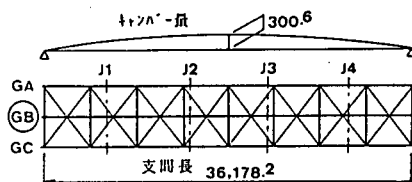


図-7 中主桁(GB)のシミュレーション結果

標値との差は最大で4mmであり、十分な部材精度を保有する（調整は行わなかった）。

シミュレーションによる値は、仮組立を行った際の実測値と比較して、支間長では、最大2.4mm（GA桁）、キャンバーでは最大3.8mm（GB桁）の差異しか見られず、両者は比較的良好な対応を示している。また、通りについても、最大で+2.8mm（GC桁）の差であり、両者はよく対応している。

つぎに、2次元幾何学的配置法による値と2次元最適配置法および3次元最適配置法による値とを比較した結果を図-8、9に示す。それぞれ各主桁の設計基準値に対するキャンバー誤差と通り誤差を表している。なお、通りについては、幾何学的配置法と2次元最適配置法による結果がほぼ一致したので図では後者の結果が前者に重なって識別できない。

両図から明らかなように、若干の差異は認められるが、本適用例の範囲内では、ほとんど有意差はない。これは、部材精度が規定値を十分に満足するケースでは、何れの方法でも実用上問題なく、シミュレーションを実施することができることを意味する（さらに、部材精度が十分に確保されれば、完成形状をシミュレーションしなくともよい、という方向にも発展できる可能性を有する）。なお、式(6)の重み w_2 を零として、3次元最適配置を行った結果は、2次元最適配置による結果とほぼ一致したことを付記する。

以上のように、本適用例の範囲内では、幾何学的配置法と最適配置法の妥当性は明らかであり、汎用性の観点から、最適配置法はより実用であると言える。

3.2 3次元ブロックの最適配置

図-10に示す塔柱ブロックについて、3次元最適配置法によりシミュレーションした結果を図-11に示す⁹⁾。ここで、各座標軸（矢印）の大きさは、座標軸方向の単位誤差量（1mm）を表す。また、○印は測定点、破線は設計（基準）値、実線は（a）では実測値、（b）では3次元最適配置法によるシミュレーション結果、（c）では（b）の状態から芯出しを行い、Y-Z端面を切削した場合のシミュレーション結果を表す。なお、本ブロックは塔柱を製作後、両端面をフェーシングマシンにより切削し、中仕上げを行ったものである。

（a）の状態から（b）のように配置することにより製作誤差は低減され、誤差が均一化されている。式(6)の w_1 を零（ $w_2 = w_3 = 1$ ）として最適配置¹²⁾を行った（c）の結果は、Y-Z端面の切削条件を与えるが、（b）の結果と比較してあまり大き

な差異は認められない。これは、Y-Z端面の出入り誤差が最大で $\pm 0.1\text{mm}$ と小さく、本計測システムの測定精度の範囲内では、この段階で再度切削を行う必要がないことを示唆するものである。それゆえ、各切削段階において、（b）と（c）のシミュレ

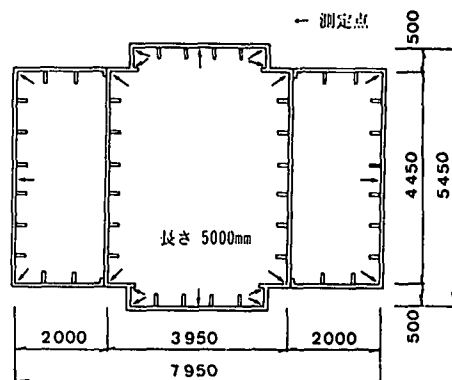


図-10 塔柱ブロックの寸法と測定位置

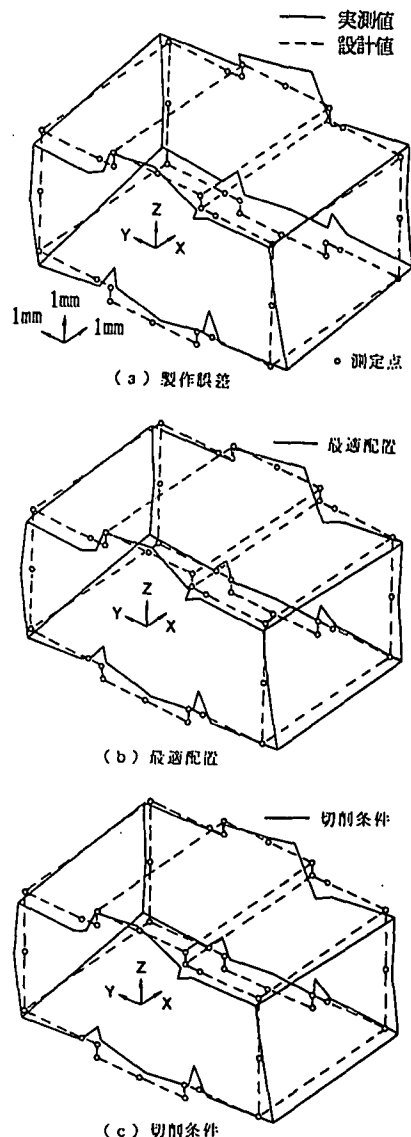


図-11 計測結果とシミュレーション結果

ション結果を比較することにより、再度切削が必要か否かの判定を行うことができる。

以上のように、3次元最適配置法は、ブロックのや切削条件を決定する上で実用上有意義な情報を提供することができる¹²⁾。したがって、同法の妥当性は明らかである。

3.3 実仮組立および現場計測との比較

本システムの妥当性を検証するために、図-12に示す橋長33.1mの鋼桁の仮組立検査と現場計測を実施した。計測・検査の対象は、4本主桁から構成される部分(G1~G4)である。

各主桁は連結部を2箇所有し、12本のI桁部材から構成される。また、ガセット取り付け部が7箇所あり、横桁と対傾構の総数は21本である。

ターゲットの取り付け箇所は、I桁部材では主に部材端上下フランジとウェブのボルト孔位置、ガセット取り付け部のボルト孔位置であり、横桁や対傾構もガセット取り付け部のボルト孔位置である。これらの測定点の総数は約1200である。なお、現場計測では、桁のキャンバーと通りを計測することを目的としたため、1本の主桁に対して測定点に対傾構・横桁と主桁との交差部の7箇所とし、全点で28点に絞った。なお、G1桁の桁中央における設計キャンバーは181mmであり、仮組立検査時には桁中央のキャンバーが4mmほど上げ越しとなるように調整した。

現場継手部のすき間は、5mm以内となっているので、計測誤差や作業の簡便性を考慮すると、予め2mmのすき間が生じるように、各連結部において設計座標値を並進移動させる方が実用的であると考えられるが、ここでは、並進移動させずにシミュレーションを行った(部材配置を行った結果、すき間がマイナスとなった場合には、零となるように対応する座標値を並進移動させた。後述のシミュレーション結果では、現場継手部の上下フランジ中央、16箇所の中ですき間が-0.3mm以下となる部位は5箇所であり、その最小値は-1.0mmであった)。

シミュレーション法には、3次元最適配置法を用いた。シミュレーションの主体は主桁であり、横桁などの2次部材については部材長や対角長を出力するに留め、幾何学的配置法の適用は省略した。

12本のI桁部材を個々に最適化した解を全体の最適解として取り扱い、部材の配置を行った。図-13は、設計値を基準として主桁のキャンバーについて数値仮組立シミュレーションによる推定値、実仮組立を実施した際の測定値および架設現場における測定値を比較したものである。

推定値と仮組立時の測定値との差は、-0.8mm~4.5

mmであり、架設時の測定値との差は-4.4mm~5.9mmである。桁中央のキャンバーが181mmであることを考え併せれば、推定値は測定値にほぼ対応する、と言っても差し支えない。また、特に、仮組立時の計測値に関して、桁中央のキャンバーを4mmほど上げ越し調整したことを考慮すると、推定値と測定値はよく対応している。それゆえ、本シミュレーションによ

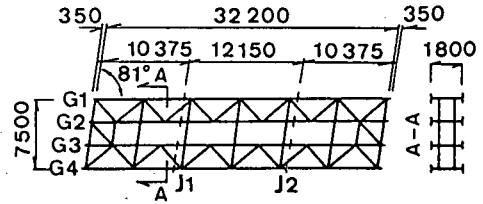


図-12 対象とするI桁の配置図

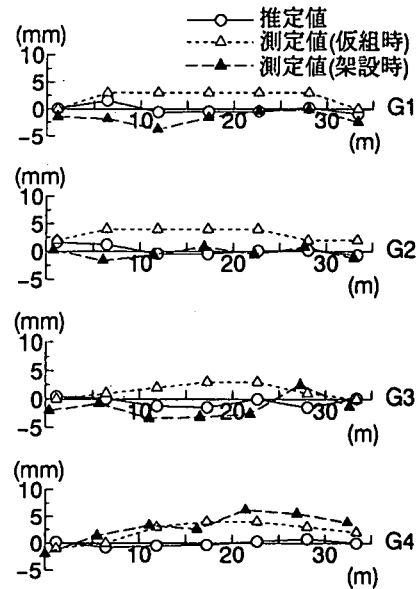


図-13 キャンバー誤差(許容誤差:-5mm~+10mm)

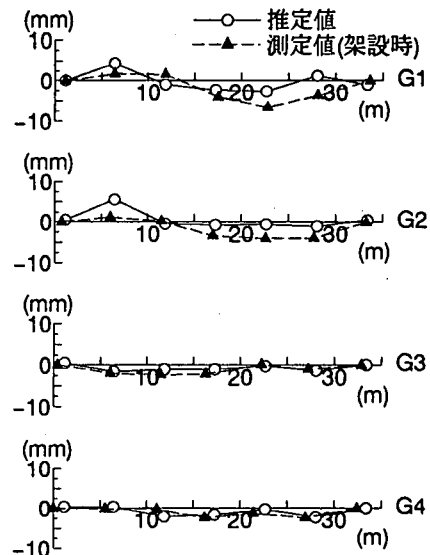


図-14 通り誤差(許容誤差:±11mm)

り、仮組立時や架設時における主桁のキャンバーを推定することが可能であると判断できる。なお、シミュレーション結果から、添接板の孔加工を精度よく行えば、設計基準値に対するキャンバー誤差（許容値： $-5\text{mm}\sim 10\text{mm}$ ）をかなり小さくすることができるものと考えられる。

2本のI桁部材を連結する場合、ウェブの添接板のボルトは最小でも4本必要となる。ボルト孔の余裕度を考慮して部材の連結により継手部で最大 $\pm 1.0\text{mm}$ の誤差を生じるものと仮定する。同様に、3次元計測による継手部の座標位置の計測誤差も $\pm 0.3\text{mm}$ とする。1本の主桁について考えるものとする。各部材の両端のボルト孔間距離は、それぞれ $10,365\text{mm}$ 、 $12,065\text{mm}$ 、 $10,365\text{mm}$ であり、上下フランジ近傍のボルト孔間距離は $1,590\text{mm}$ である。したがって、ボルト孔の余裕度によるキャンバーの変化量は $\pm 8.9\text{mm}$ であり、計測誤差による変化量は $\pm 2.7\text{mm}$ となる。これらの結果から、キャンバーについては、推定値から $\pm 11.6\text{mm}$ 変動する可能性がある。逆に言うと、キャンバーの測定値は、この範囲内に収まるものと考えられる。それゆえ、適切な管理・調整を行えば、規定値¹³⁾を十分満足させることができる。

図-14は、通り誤差に関して、シミュレーションによる推定値と架設現場における測定値を比較したものである。ここで、仮組立時の測定結果には触れていないが、G4桁中央の通りについては、推定値が -1.6mm 、測定値が -2.0mm であり、ほぼ対応したことを付記する。通りについては、推定値と測定値の差は $-4.8\text{mm}\sim 3.6\text{mm}$ であり、G1桁とG2桁では幾分差異が認められるが、ほぼ誤差の傾向が類似し、何れも許容値（ 11mm ）内に収まっている。それゆえ、通りについても、本シミュレーションにより、現場における状況を推定することが可能であると考えられる。

連結部の面外変形は、ウェブ相互の添接により拘束されるので、ボルト孔の余裕度に起因する通り誤差は無視して差し支えない。また、計測誤差の影響もこの理由により少ないものと考えられる。通り誤差は、直接的には部材の面外変形に起因するものであるから、連結部の面外方向の部材回転角の影響を調べる必要があるが、道路橋示方書⁵⁾では、部材回転角に関する規定は盛り込まれておらず、その影響を評価することはできない。しかしながら、キャンバーよりも、その誤差は少ないものと考えられる。

その他、支間長、桁の出入り、桁の中心間隔、桁の高さ、桁の鉛直度、フランジの直角度、フランジ幅、部材長等についても推定値と仮組立検査時の測定値との比較を行ったが、何れもほぼ対応し、規定値内に収まっていたことを付記する。

以上の結果から、本システムを用いて数値仮組立を実施することにより、実仮組立の状態や現場架設における組立の状態を精度良く推定・評価することができ、本システムは、橋梁の最終形状を照合する完成検査法に適合すると言っても差し支えない。また、このようなシステムを適用することによって、従来の検査では得られなかった3次元誤差情報も容易に提供することができ、信頼性の高い検査システムを提案することができる。

4. おわりに

本研究では、橋梁の仮組立省略を可能にするシミュレーション手法に関して2、3の検討を行い、幾何学的配置法と最適配置法に基づくシミュレーション法の有効性を明らかにするとともに、シミュレーション結果の差異についても検討を加えた。また、数値仮組立検査システムの妥当性および実用性を検証するために、実際に仮組立を行った物件について部材計測や仮組立シミュレーションを行い、併せて現場計測も実施した。その結果から、最適配置法に基づくシステムは、橋梁の完成形状を検査する有効な手法となることが判明した。

今後、種々の橋梁の仮組立シミュレーションに本法を適用し、その妥当性を検証するとともに、仮組立の省略を可能にする個々の部材の要求精度を明らかにしたい。最後に、本研究に対して有意義なご示唆・ご助言を賜ったトピー工業(株)鉄構事業部技術開発部井上茂司氏、同鹿沼製造所石川雄一氏に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 山縣：省力化に対応した橋梁構造、JSSC No. 13、1994
- 2) 小桜ほか：鋼構造の完成検査法に関する一提案、土木学会論文集、No. 361、VI-2、1985
- 3) 例えば、奥本ほか：船殻の高精度加工・組立システム、石川島播磨技報、Vol. 32、No. 6、1992、および、石山ほか：線状加熱曲げ加工法の自動化、石川島播磨技報、Vol. 34、No. 2、1994
- 4) 林ほか：鋼橋の3次元計測に関する基礎的研究、橋梁と基礎、93-7、1993
- 5) 大熊ほか：大スパン立体屋根の製作と三次元計測システムの開発、川崎重工技報、No. 114、1992
- 6) 中川ほか：鋼橋の仮組立形状シミュレーションシステム橋梁と基礎、94-3、1994
- 7) (株)ソキア：三次元測定システム“MONMOS”、1991
- 8) 日本道路協会：鋼道路橋施工便覧、丸善(株)、1985
- 9) 前田ほか：塔の製作技術の確立に関する研究、トピー鉄構技報、No. 9、1993
- 10) 例えば、峯村：BASICによるコンピュータグラフィックス、森北出版、1990
- 11) 例えば、大野：数値計算ハンドブック、オーム社、1990
- 12) 焼野ほか：長大橋主塔精度管理システムの開発、石川島播磨技報、Vol. 32、No. 2、1992
- 13) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説、丸善(株)、1995