I-325　鋼橋仮組立てシミュレーション解析モデルの解法に関する研究

奥山ボーリング㈱　正員　渡辺　真史
長岡技術科学大学　正員　鳥居　邦夫
㈱横河橋梁製作所　正員　小櫻　義隆

1.まえがき：鋼橋の完成検査を行なう仮組立工程では、仮組立ヤードで部材を組み立てる際の安全性、また広大な敷地を使用するなどの経済性に関する問題等が指摘されている。そこで、著者等はこの仮組立工程を自動化するためのシステム（鋼橋の完成検査システムと呼ぶ）を開発している。本システムは、図１に示すように部材計測システムとデータ処理システムの２つのシステムで構成されている。部材計測システムでは、製作の完了した個々の部材の形状及び寸法をＣＣＤカメラにより三次元測定する。データ処理システムでは、その計測データを基に各部材の三次元部材座標値を用いて仮組立のシミュレーションを行なう。

ここでは、データ処理システムで採用しているシミュレーション解析モデルの解法を改良を行なったので、その成果について述べる。

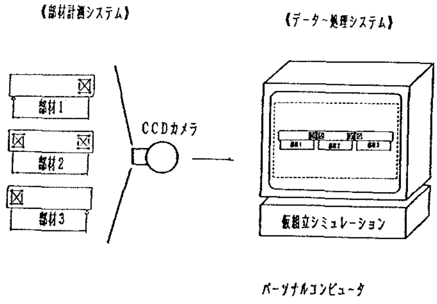


図1.鋼橋の完成検査システム

2.従来の解析方法：主桁の仮組立シミュレーションモデルでは、ＣＡＤ，ＣＡＭで製作された設計ボルト孔座標値を目標にして、計測部材のボルト孔ずれ誤差の２乗和が最小となるように各部材を配置し、全体の組立形状を確認している。この場合のモデルは、孔ずれ誤差の２乗和（目的関数）を部材を挙動させるための未知変数（部材座標系原点の組立座標値等）で偏微分した式をゼロとおくことによって得られる非線形連立方程式を解く問題（最小化問題）に帰着できる。この解法として、著者等は、ポピュラーなニュートン法を適用してきた。しかし、本解法は、かなりの計算時間を要しているので、その効率化を図ることが課題であった。

3.改良型の解析方法：本研究では、定式化が比較的簡単な逐次近似解法を適用することにより従来の解法（ニュートン法）の問題点を解決することにした。

図２は、仮組立のシミュレーションモデルを簡略化した二次元モデルである。このモデルによると、部材の組立座標値は、

$$Xs \equiv r \cdot \cos\beta$$
$$Zs \equiv r \cdot \sin\beta \qquad (1)$$

のようになる。そこで、孔ずれがゼロとなるような組立条件を以下のように与える。

$$F(\beta) = Xs - Xi = 0$$
$$H(\beta) = Zs - Zi = 0 \qquad (2)$$

式(2)の条件式は未知変数βの非線形関数である。いま、未知数の近似値をβ_0補正量を$\Delta\beta$として$\beta \equiv \beta_0 - \Delta\beta$と定義した場合、式(1)は、

$$Xs(\Delta\beta) = r \cdot \cos(\beta_0 - \Delta\beta)$$
$$Zs(\Delta\beta) = r \cdot \sin(\beta_0 - \Delta\beta) \qquad (3)$$

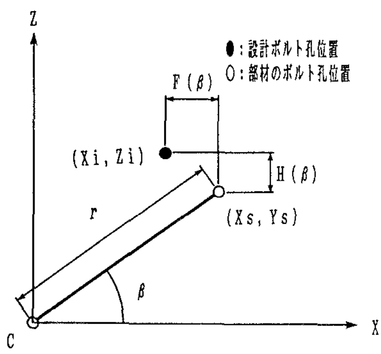


図2.仮組立の二次元モデル

のように書表すことができるので、式(2)の条件式は、$F(\Delta\beta)=0$，$H(\Delta\beta)=0$のような$\Delta\beta$の関数に置き換えることができる。そこで、この２つの条件式を近似値β_0の近傍でテーラー展開し、２次以上の項を無視して線形化する。この線形化した式を残差で表し、その２乗和を

$$G \equiv 1/2 \cdot (\delta F(\Delta\beta)^2 + \delta H(\Delta\beta)^2) \qquad (4)$$

の目的関数とする。この式(4)の目的関数が最小となるように部材を配置する。式(4)のＧの最小化は、

$$\partial G / \partial \Delta\beta = 0 \qquad (5)$$

の線形方程式を満たすような補正量$\varDelta\beta$を求める問題に帰着される。したがって、この式を整理すると次ような改良型の正規方程式が誘導できる。

$$a \cdot \varDelta\beta = S \qquad (6)$$

ただし、a，S：近似値β_0の係数

式(6)の$\varDelta\beta$が求まれば、$\beta \equiv \beta_0 - \varDelta\beta$を新たに近似値にして再度補正量$\varDelta\beta$を求めるという繰返し計算を行なうこととする。

4.解法の相違：従来の解法では、式(2)の組立条件（孔ずれ）の２乗和を目的関数とし、その目的関数を最小にするようなβを直接求めていた。この場合は、目的関数をβで１階偏微分した式をゼロとする非線形方程式の解としてニュートン法を適用してきた。ニュートン法では、この非線形方程式の傾き（多変数の場合はヤコビ行列）が必要となるため、さらにβで方程式を偏微分しなければならない（傾きは数値的に求める方法もある）。以上のように、

①改良型の解析方法は、微分作業を１回行なうのに対し、従来の解法は２回行なわなければならない。

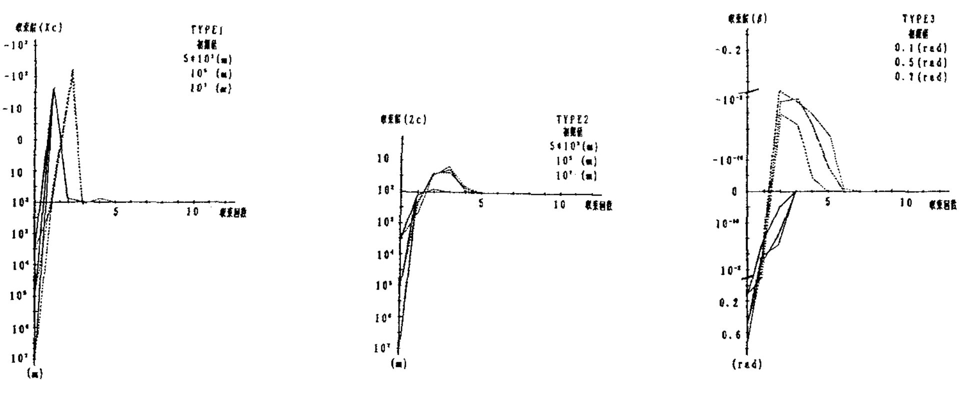
②目的関数として、従来の解法では組立条件（βの関数）を直接用いたのに対し、改良型の解析方法では、その組立条件をテーラー展開により線形化（$\varDelta\beta$の関数）した値を用いた。

等の相違がある。

5.数値解析：図３は、図２の部材座標系原点Cの組立座標値（Ｘｃ，Ｚｃ）を解放し、βも含めた未知数３個の２次元モデルの収束状況である。改良型の解析方法は、３回程度で各変数が収束している。一方、従来の解析方法は５～７回の繰返し計算が必要だった。このことは、改良型の解析方法は従来の解析方法と比べて収束性が極めて良く、その比率は約半分であることを示している。今度は鈑桁橋（実橋）の主桁の組立シミュレーションモデルで両解法の比較を行なった。本橋は５主桁で、各主桁は５部材で構成されており、全部材数は２５本である。シミュレーションによると、従来の解析方法では、ＮＥＣ　ＰＣ－９８０１　ＶＸ　コンピューターの所要時間が１時間２５分であったのに対し、改良型の解析方法ではわずか１５分に短縮され、約６倍も高速処理されたことになる。

6.結論：本研究では仮組立のシミュレーションモデルの解法を改良した。改良した逐次近似解法は従来のニュートン法よりも①定式化が容易である、②収束性が極めて良い、③計算時間が短いなど優れた点が多く、より実用的であることが確かめられた。このことにより、既存のシミュレーションモデル（鈑桁橋）を、従来型の解析方法から改良型の解析方法へと全面的に改良した。

現在、本システムは、鈑桁橋に関しては完成状態にある。また、新たに開発した箱桁橋のシステムでは、本解法を導入して実験検証を行なっている段階である。



注）――――：改良型の解法　…………：従来の解法

図３　収束状況