

## 鋼橋の施工精度に関する確率論的考察

## PROBABILISTIC STUDY ON CONSTRUCTION ACCURACY OF STEEL BRIDGES

竹村勝之\*・坂井藤一\*\*・赤尾 宏\*\*\*

By Katsuyuki TAKEMURA, Fujikazu SAKAI and Hiroshi AKAO

Because of the presence of various kinds of imperfections (or errors) introduced during construction processes of bridges, the geometrical shape and stress distribution do not always conform to those intended by designers when completed. Such construction errors represent important quality characteristics of the bridge. The authors present a methodology to evaluate stochastically the effects of imperfections, such as the variation of dead load and stiffness parameters and dimensional imperfections of each member, upon construction accuracy of bridges by applying stochastic finite element method. The effects of cable length adjustment, which is usually taken at the erection of cable systems, on construction accuracy are also taken into account. Through numerical examples, some useful and important informations concerning the quality control of steel bridges are obtained.

Keywords: bridge, construction accuracy, stochastic F. E. M., quality control

## 1. ま え が き

構造物は、設計・製作・架設という工程を経て完成に至るが、これらの施工工程においては、さまざまな理由で種々の誤差が発生する。このため、構造物完成時の寸法形状や部材応力状態は、設計者の意図するものとは必ずしも一致しない。このような設計における“ねらいの品質”と施工後の“できばえの品質”の差異（施工精度）を小さくするため、示方書により種々の守るべき事項が定められ、各工程において必要な検査が実施されているが何らかの誤差の発生は避けられない。

鋼橋を対象とした場合、各施工工程で発生する誤差要因と完成時の施工精度との因果関係は、トラスやアーチ、斜張橋、吊橋といった高次不静定構造物になるほど複雑化する。また、これら構造物が長大化するほど誤差要因も多様化するとともに、活荷重に対する死荷重応力の比率も増大するので、死荷重状態での精度管理をより厳密に行う必要がある。

そのためには、各種の誤差が施工精度に及ぼす影響を

\* 正会員 工修 川崎重工業（株）鉄構・機器事業部  
（〒136 江東区南砂 2-4-25）

\*\* 正会員 工博 川崎重工業（株）鉄構・機器事業部（同上）

\*\*\* 正会員 川崎重工業（株）鉄構・機器事業部  
（〒675-01 兵庫県加古郡播磨町新島 8 番地）

定量的に評価し、施工に際して重点的に品質管理の対象とすべき誤差要因の明確化、さらには設計段階へのフィードバックを含めて、品質を改善するための有効な方法を見出すことが必要と思われる。

鋼橋の施工工程において発生する各種の誤差の大きさは、確率的に変化する不規則変動量と考えられる。したがって、これらが施工精度に及ぼす影響を定量的に把握するには、確率論的アプローチが必要となる。この観点から従来より、吊橋を対象とした撓度理論解析<sup>1),2)</sup>や、応力法有限変位解析<sup>3)</sup>による検討が試みられ、また斜張橋を対象とした検討事例<sup>4)</sup>などいくつか報告されているが、多様な橋梁形式への適用性、確率的に発生する誤差の影響の組合せ方法などにおいて不十分な面が感じられる。

本論文は、より一般的な観点から鋼橋の施工精度を確率論的に論じ、施工精度を改善するための方策について2～3の考察を加えるものである。すなわち、鋼橋の施工中に発生する種々の誤差について検討を加え、これらを構造系に含まれる不確定要因とみなして、完成後の施工精度を確率有限要素法により評価する方法を提示する。さらに斜張橋やニールセン橋などのケーブルを使用した橋梁の架設に際して一般的に実施されるケーブル長さの調整（シム調整）の、精度改善効果を定量的に把え

ている。

構造系としては骨組構造を想定し、各種の誤差を、部材の重量・剛性・長さ、および継手部の目違いと角折れで代表させることとした。ここで施工精度とは、これら部材を組み立てた後の完成状態での形状や部材断面力の設計値との差異を指すものとする。確率有限要素法による解法としては、線形近似理論による方法<sup>5)</sup>と摂動法による方法<sup>6)</sup>が一般に用いられるが、ここでは定式化が比較的簡単であり、土質問題<sup>7)</sup>や耐震問題<sup>8)</sup>にも有効に應用されている線形近似理論による方法を用いている。確率変数としてとらえた施工精度が、シム調整によりどの程度改善できるかを検討する場合には、各誤差の二乗和を最小とするシム量決定法の考え方<sup>9)</sup>を用いることにした。

数値計算例を通じて、いくつかの基本的事項について検討し、また、二径間斜張橋を例にとり、設定された誤差量のもとでの施工精度の評価結果、および施工精度を改善するための方策について検討を加えた。

## 2. 部材の誤差と施工精度

### (1) 部材の誤差

鋼橋の設計、部材製作、現場架設を通じて発生する誤差の種類は多岐にわたり、またそれらの誤差間の相互関係はきわめて複雑である。

設計段階では、構造解析におけるモデル化誤差があり、また重量や剛性の設計値も厳密値ではない。工場製作の段階では、入手材料の誤差から始まり、切断代や溶接縮み代を考慮した寸法を原板に書く際の誤差、ガス切断、組立、溶接誤差などが生ずる。これらの種々の誤差が積み重なり、部材の寸法的な誤差として現われる。また、これら部材を現地で組み立てて架設する際には、下部工や支承の位置のずれによる誤差や、部材間継手部での寸法的な誤差が生ずる。このように各工程での誤差の影響が組み合わさって、完成状態での形状や応力分布に設計時想定されたものとのずれ、すなわち施工誤差が生ずるものと考えられる。

このように、各工程における種々の誤差が、相互に関連しながら伝播して最終的な施工精度に影響を及ぼすこととなるが、本論文では種々の誤差を、それらの集約されたものとして図-1に示すような部材の誤差で代表させて取り扱っている。ここで、 $W$  は死荷重、 $A$ 、 $I$ 、 $E$  は剛性パラメーター、 $\Delta u$  は部材長誤差、 $\Delta v$ 、 $\Delta \theta$  は継手部の目違い、角折れ誤差を表わしている。

#### a) 重量(死荷重)の誤差

部材の死荷重( $W$ )は、部材を構成する各要素の体積に材料の単位重量を乗じたものの総和で表わされる。したがって死荷重誤差は、板厚等の幾何学的寸法の誤差

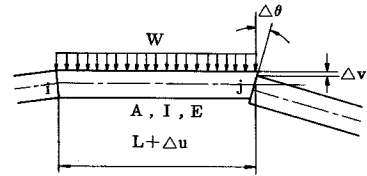


図-1 部材の誤差

と単位重量のばらつきに起因する。

鋼桁の幾何学的寸法のばらつきに関する実測データは数少ないが、建設省土木研究所で行われた鋼I桁および鋼箱桁の断面積の実測結果<sup>10)</sup>によると、設計値に対する相対誤差の平均値( $\mu$ )は、1~2%程度プラス側となり、標準偏差( $\sigma$ )もI桁で1.77%、箱桁で1.65%でばらつきの原因は主として鋼板厚のばらつきによるものとされている。なお、道路橋に用いる鋼板の厚さの許容値は<sup>11)</sup>、JISによるほか、マイナス側の許容差に対しては公称板厚の5%以内となっており、上記の $\sigma$ 値はこの許容値の1/3程度の値に相当する。

コンクリート床版や舗装厚の誤差は、鋼桁自重誤差よりも大きな誤差要因と推定される。道路橋RC床版の厚さの許容誤差は<sup>11)</sup>、+20mmおよび-10mmとなっており、実測例<sup>12)</sup>によると $\mu = +5.1$ mm、 $\sigma = 4.1$ mmの値が報告されている。

材料の単位重量としては、一般に示方書で定められた値が用いられる。鋼の単位重量のばらつきは、4桁目の値が変わる程度で小さいが、コンクリートの場合には、示方書で与えられた値に対し-1%~+2%程度のばらつきを示す<sup>10)</sup>。RC床版の場合には、鉄筋量によってさらにばらつきが大きくなるものと予想される。

上記のような要因のほかに、設計計算における精度上の問題がある。すなわち、設計に際しては仮定死荷重のもとで計算を行い、設計後の精算死荷重との差が許容範囲(一般に±5%程度)になるまで繰り返す。許容範囲に収束したときの死荷重を設計死荷重と称するので、実際値との間にはある程度のギャップが存在することになる。

部材全体の死荷重にどの程度の誤差があるかは、データ不足と同時に、部材の断面構成や設計精度にも依存し、その実態を把握することは困難である。なお、英国における鋼道路橋の新しい基準BS 5400では、全死荷重のばらつき量として、平均値、標準偏差ともに設計値の5%を採用している<sup>12)</sup>。また、アメリカ合衆国における建築物を対象としたものでは、平均値+5%、標準偏差10%としている<sup>13)</sup>。これらの値は、上記のような誤差とともに、補修などに伴う将来的な死荷重の変動も考慮して定められているものと推察される。

#### b) 剛性の誤差

部材の剛性は、断面積 ( $A$ )、断面 2 次モーメント ( $I$ ) および弾性係数 ( $E$ ) によって評価される。

死荷重の場合と同様、フランジ板厚やウェブ高、ケーブル素線径などのばらつきが、断面 2 次モーメントや断面積の誤差の要因となる。これら寸法は、材料検査や製作後の部材および仮組立検査でチェックされるとしても、許容値 (たとえば桁高の場合、 $\pm 3 \sim 4 \text{ mm}$ ) に入る程度の誤差は考慮する必要がある。また、設計計算における仮定剛度と設計後の剛度の差も、死荷重誤差の場合と同様に問題となり、その許容限度は死荷重の場合よりも大きく  $\pm 10 \%$  とされている場合が多い。

上記のほか、設計計算におけるモデル化誤差が大きな誤差要因になると考えられる。断面形状によっては、有効幅を考慮して剛度評価を行うが、実際の構造物は必ずしもその仮定に沿った性状を示さないであろう。同様に、非合成 RC 床版、横構、継手の添接板などの二次的部材の全体剛性への寄与が考えられ、事実、種々の実橋の静的載荷試験によると、測定たわみが計算たわみよりも数割程度小さくなる場合が多い。このような剛性評価におけるモデル化誤差の大きさは、死荷重状態に対しては構造物の施工方法や順序などとも関連するが、いずれにしても無視できない誤差要因となる。

また弾性係数も、示方書により用いるべき値が決められているが、実際には確率変数である。特に多数の素線をより合わせたケーブル部材の弾性係数には、かなりのばらつきがあるものと思われる。

c) 部材寸法と継手部の誤差

製作・架設工程中に、部材や部材を連結する継手部に種々の誤差が生ずる。部材長誤差 ( $\Delta u$ ) は、部材の製作寸法誤差と現場継手部のすき間からなる。わが国の道路橋における製作寸法の許容精度は  $\pm 2 \sim 4 \text{ mm}$  であり<sup>11)</sup>、トラスやアーチ等の複雑な構造ほど、また短い部材ほど厳しくなっている。実橋の寸法検査による測定データの標準偏差は、許容値の  $1/2 \sim 1/3$  程度になる。現場継手部のすき間の許容値は  $3 \text{ mm}$  であり、溶接継手の場合には溶接収縮も影響する。

継手部の目違い ( $\Delta v$ ) は、ボルト孔明け誤差などにより生じ、 $1 \sim 2 \text{ mm}$  程度までを許容しているが、橋梁全体の施工精度へ及ぼす影響は小さいと推定される。

継手部の角折れ ( $\Delta \theta$ ) の要因としては、製作段階では部材のそりと部材端面精度 (直角度) が考えられる。また架設段階では、ボルト継手の場合にはボルト孔のわずかな余裕による仕口部の角度変化、溶接継手の場合には溶接角変形を伴う。

以上のような部材の誤差を確率変数として取り扱うが、それらの統計的データは、材料や製作寸法の検査データなどを除いて必ずしも十分ではない。その理由として、

誤差の発生機構が複雑であることと同時に、測定そのものが困難なことが挙げられる。

(2) 施工精度

(1) で述べたような種々の誤差や、下部工の誤差などの影響により、施工後の橋梁の形状や応力は、設計時に想定したものと若干異なったものとなる。形状誤差は、最終出来形検査時に計測され、許容値以内かどうかチェックされる。許容値は橋の規模によって異なるが、その根拠は必ずしも明確ではない。

一方応力分布に関しては、計測が困難なことから、どの程度の誤差が生じているかを判定することは通常難しいが、特殊な例として斜張橋やニールセン橋などのケーブルを用いた橋梁では、振動法などにより応力分布の指標となるケーブル張力を知ることができる。このため、これら橋梁の施工に際しては、一般に張力測定が行われ同時に精度改善のためにケーブル長さの調整が行われる。

実橋における張力測定には測定誤差が含まれるため、測定値は真値と異なるが、実測値と設計における目標張力の差を張力誤差として、これらの比をヒストグラムで表わすと、図-2、3 のようになる。図-2 は 3 橋<sup>14)~16)</sup>、図-3 は 8 橋<sup>17)~23)</sup> (うち 1 橋は未発表のもの) のデータをもとにしている。

斜張橋の場合には、2 本のケーブルを除いて張力誤差は、ほぼ  $\pm 10 \%$  以内に入る。変動係数は  $6 \%$  であるが精度の悪い 2 本を無視すると  $4 \%$  弱になる。

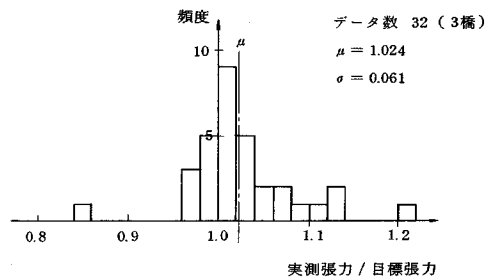


図-2 斜張橋のケーブル張力誤差

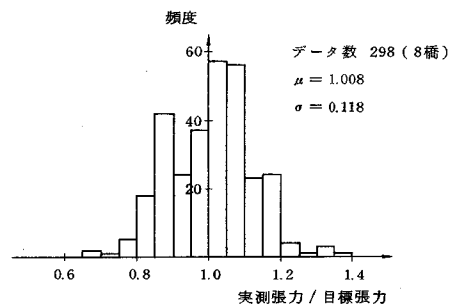


図-3 ニールセン橋のケーブル張力誤差

ニールセン橋梁の場合には、張力比の平均値が1.0に近い。しかし、個々の橋梁ごとにとみると、設計値に対して全般的に+側や-側へ偏ったものも多い。変動係数は、斜張橋の場合の約2倍となる。ほとんどの橋が、非合成RC床版橋であることや、目標とする張力が小さく、測定誤差が入りやすいことなどが、誤差の大きくなる理由と思われる。

3. 施工精度の予測

(1) 部材組立後の施工精度

構造物は、図-1に示すような部材の集合体であり、任意の位置にある部材は、図-4に示す等価なはり部材に置換することができる。

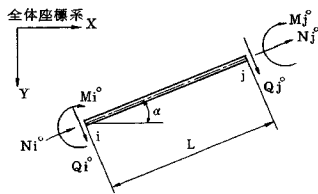


図-4 等価なはり部材

等価はりの剛性マトリックスは、剛性パラメーター  $A$ ,  $I$ , および  $E$  の関数で表わされる。また、部材の材端力ベクトル  $F^0$  は、

$$F^0 = \begin{pmatrix} N_i^0 \\ Q_i^0 \\ M_i^0 \\ N_j^0 \\ Q_j^0 \\ M_j^0 \end{pmatrix} = \frac{WL}{2} \begin{pmatrix} \sin \alpha \\ -\cos \alpha \\ -L \sin \alpha / 12 \\ \sin \alpha \\ -\cos \alpha \\ L \cos \alpha / 12 \end{pmatrix} - \bar{k} \begin{pmatrix} \Delta u_i \\ \Delta v_i \\ \Delta \theta_i \\ \Delta u_j \\ \Delta v_j \\ \Delta \theta_j \end{pmatrix} \quad (1)$$

で表わされる。ここで、右辺第1項は部材の死荷重  $W$  による材端力、第2項は寸法誤差  $(\Delta u_i, \dots, \Delta \theta_j)$  を含む部材を、正規の寸法の部材に置換したことにより生ずる材端力であり、 $\bar{k}$  は部材座標系における剛性マトリックスである。

死荷重や剛性パラメーター、寸法誤差を確率変数とすると、部材の剛性マトリックス、材端力ベクトルも確率変動量となる。材端力とつり合った力が不平衡力として節点に作用し、これらを集めることにより構造物全体の荷重ベクトル  $P(\cdot)$ 、剛性マトリックス  $K(\mathbf{r})$  を構成することができる。ここで、 $\mathbf{r}$  は部材の誤差を総称したものである。構造物全体のつり合い方程式は、微小変形理論の仮定のもとで次のように表わされる。

$$P(\mathbf{r}) = K(\mathbf{r}) \cdot X(\mathbf{r}) \quad (2)$$

ここで  $X(\mathbf{r})$  は、変位ベクトルである。

本研究において議論の対象とするものは、部材組立後の構造物の形状や断面力の設計値との差異である。そこで、式(2)を次のように分解する。

$$P_D + \bar{p} + \Delta p = (K_D + \bar{k} + \Delta k) \cdot (X_D + \bar{x} + \Delta x) \quad (3)$$

ここで、 $P_D$ ,  $K_D$  および  $X_D$  は設計値を、 $\bar{p}$ ,  $\bar{k}$ ,  $\bar{x}$  ならびに  $\Delta p$ ,  $\Delta k$ ,  $\Delta x$  は実際値と設計値の差異の平均値、変動成分を表わす。式(3)を展開し、設計値間の関係式

$$P_D = K_D \cdot X_D \quad (4)$$

を用いて平均値成分と変動成分に分けると、変位誤差は

$$\bar{x} = \bar{K}^{-1} (\bar{p} - \bar{k} \cdot X_D) \quad (5)$$

$$\Delta x = \bar{K}^{-1} (\Delta p - \Delta k \cdot \bar{X}) \quad (6)$$

で表わされる。ここで、 $\bar{K} = K_D + \bar{k}$ ,  $\bar{X} = X_D + \bar{x}$  であり、おのこの、剛性マトリックス、変位ベクトルの平均値を意味する。また、 $\Delta k$  と  $\Delta x$  の積の項は微小として無視した。式(5), (6)より、変位誤差の平均値、変動成分は、剛性マトリックスの平均値を用いて求められ、剛性誤差の平均値  $\bar{k}$  の荷重効果は、設計時に決定される製作キャンパー  $(-X_D)$  に比例していることがわかる。

部材の断面力  $F$  に関しても、変位の場合と同様である。変位から断面力に変換するマトリックスを  $S$  とすると、式(3), (4)に対応する方程式は、

$$F_D + \bar{f} + \Delta f = (S_D + \bar{s} + \Delta s) \cdot (X_D + \bar{x} + \Delta x) + F_D^0 + \bar{f}^0 + \Delta f^0 \quad (7)$$

$$F_D = S_D \cdot X_D + F_D^0 \quad (8)$$

で表わされる。ここで  $F_D^0$ ,  $\bar{f}^0$  および  $\Delta f^0$  は、式(1)の材端断面力を、設計値、設計値との差異の平均値、変動成分に分解したものである。式(7), (8)より、部材断面力の誤差の平均値、変動成分はおのこの次式によって表現される。

$$\bar{f} = \bar{S} \cdot \bar{x} + \bar{s} \cdot X_D + \bar{f}^0 \quad (9)$$

$$\Delta f = \bar{S} \cdot \Delta x + \Delta s \cdot \bar{X} + \Delta f^0 \quad (10)$$

ここで、 $\bar{S} = S_D + \bar{s}$  は断面力マトリックスの平均値であり、 $\Delta s \cdot \Delta x$  の項は微小として無視した。

式(5)および(9)で表わされる変位、断面力の誤差の平均値は、通常の方法により容易に解析することができる。

式(6)および(10)で表わされる変動成分は、確率変数である種々の部材の誤差  $\mathbf{r}$  の関数であり、その1次近似式は、 $r_j (j=1, \dots, m, m$  は誤差個数) に関する偏微分をとることにより、

$$\Delta x \doteq H_x \cdot \Delta \mathbf{r} \quad (11)$$

$$\Delta f \doteq H_f \cdot \Delta \mathbf{r} \quad (12)$$

で表わされる。ここで  $\Delta \mathbf{r}$  は、誤差  $\mathbf{r}$  の変動成分であり、マトリックス  $H_x$ ,  $H_f$  の  $j$  列ベクトル  $\partial x / \partial r_j$  および  $\partial f / \partial r_j$  は、

$$\frac{\partial x}{\partial r_j} = \bar{K}^{-1} \cdot \left\{ \frac{\partial p}{\partial r_j} - \frac{\partial k}{\partial r_j} \cdot \bar{X} \right\} \dots\dots\dots (13)$$

$$\frac{\partial f}{\partial r_j} = \bar{S} \cdot \frac{\partial x}{\partial r_j} + \frac{\partial s}{\partial r_j} \cdot \bar{X} + \frac{\partial f^0}{\partial r_j} \dots\dots\dots (14)$$

で表わされ、おのおの誤差要因  $r_j$  の単位量による変位、断面力を意味する。なお、 $r_j$  に関する偏微分は、平均値においてとられたものである。

式 (12), (13) より、部材組立後の施工精度の共分散マトリックス  $C_{xx}$ ,  $C_{ff}$  および  $C_{xf}$  は、

$$C_{xx} = E [\Delta x \cdot \Delta x^T] = H_x \cdot C_{rr} \cdot H_x^T \dots\dots\dots (15)$$

$$C_{ff} = E [\Delta f \cdot \Delta f^T] = H_f \cdot C_{rr} \cdot H_f^T \dots\dots\dots (16)$$

$$C_{xf} = E [\Delta x \cdot \Delta f^T] = H_x \cdot C_{rr} \cdot H_f^T \dots\dots\dots (17)$$

により求まる。ここで、 $C_{rr}$  は部材の誤差  $r$  の共分散マトリックスである。 $C_{xx}$  や  $C_{ff}$  の対角項から施工精度の標準偏差を、また非対角項や  $C_{xf}$  からそれらの相関係数を求めることができる。

(2) ケーブル調整の精度改善効果

一般の鋼部材から構成される橋梁の場合には、現場における寸法調整は事実上困難となるが、斜張橋やニールセン橋の場合には、ケーブル部材の特徴を生かしてケーブル長さの調整（シム調整）が通常行われている。その作業の目的とするものは、

- 寸法精度や弾性係数などにおいて、鋼製部材に比して信頼性が低いケーブルの誤差を吸収すること
- 施工精度の指標としてのケーブル張力が比較的容易に測定できるため、積極的に橋梁全体の施工品質の改善をはかること

などが考えられる。以下では、確率変数として把握された部材組立後の構造物の施工精度が、シム調整によりどの程度改善されるかを評価する場合の解析法を示す。

シム調整に際しては、一般に桁の鉛直たわみやケーブル張力の誤差が調整の対象となる。これらを  $y$  とし、それ以外のものを  $z$  とすると、シム調整後の施工精度  $y_1$ ,  $z_1$  は次のように表現することができる。

$$y_1 = y + A \cdot e \dots\dots\dots (18)$$

$$z_1 = z + B \cdot e \dots\dots\dots (19)$$

ここで、 $A$ ,  $B$  は各ケーブルの単位シム量による影響マトリックスであり、 $e$  は各ケーブルのシム量である。調整前の施工精度  $y$ ,  $z$  の確率特性は、(1) で述べた方法によりすでに求められている。

シム量  $e$  の決定法としては、最適化手法に基づくいくつかのもの<sup>9),14)</sup> が提案されているが、ここでは調整の対象とする施工精度の二乗和を重みつきで最小化するように決定される場合<sup>9)</sup> を考える。目的関数  $Q$  は、

$$Q = y^T \cdot g \cdot y_1 + y^T \cdot g \cdot y + e^T \cdot A^T \cdot g \cdot A \cdot e + 2 y^T \cdot g \cdot A \cdot e \dots\dots\dots (20)$$

で表わされる。ここで  $g$  は、各管理項目の重み係数を

対角項に設定した対角マトリックスである。

目的関数  $Q$  を最小にするシム量は、  
 $\partial Q / \partial e_j = 0 \dots\dots\dots (21)$

から得られる  $n$  個 ( $n$  は、ケーブル本数) の方程式を連立して解くことにより求められ、結果をマトリックス表示すると次式のようになる。

$$e = -(A^T \cdot g \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot g \cdot y \dots\dots\dots (22)$$

式 (22) を、式 (18), (19) に代入すると、

$$y_1 = y - A \cdot (A^T \cdot g \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot g \cdot y = y - A_1 \cdot y \dots\dots\dots (23)$$

$$z_1 = z - B \cdot (A^T \cdot g \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot g \cdot y = z - B_1 \cdot y \dots\dots\dots (24)$$

となり、シム調整後の施工精度が調整前のものと関係づけられる。

シム調整後の施工精度  $y_1$ ,  $z_1$  の平均値  $\bar{y}_1$ ,  $\bar{z}_1$  は、  
 $\bar{y}_1 = \bar{y} - A_1 \cdot \bar{y} \dots\dots\dots (25)$

$$\bar{z}_1 = \bar{z} - B_1 \cdot \bar{y} \dots\dots\dots (26)$$

により容易に求めることができる。また、 $y_1$  の変動成分  $\Delta y_1$  は、

$$\Delta y_1 = y_1 - \bar{y}_1 = (y - \bar{y}) - A_1 \cdot (y - \bar{y}) = \Delta y - A_1 \cdot \Delta y \dots\dots\dots (27)$$

で表わされ、その共分散マトリックス  $C_{y_1 y_1}$  は、

$$C_{y_1 y_1} = E [(\Delta y - A_1 \cdot \Delta y) \cdot (\Delta y - A_1 \cdot \Delta y)^T] = C_{yy} + A_1 \cdot C_{yy} \cdot A_1^T - A_1 \cdot C_{yy} - (A_1 \cdot C_{yy})^T \dots\dots (28)$$

で求められる。同様にして、

$$C_{z_1 z_1} = C_{zz} + A_1 \cdot C_{yy} \cdot B_1^T - B_1 \cdot C_{yz} - (B_1 \cdot C_{yz})^T \dots\dots (29)$$

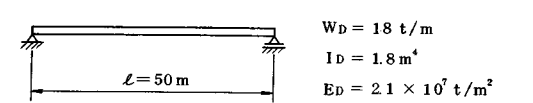
$$C_{y_1 z_1} = C_{yz} + A_1 \cdot C_{yy} \cdot B_1^T - A_1 \cdot C_{yz} - (B_1 \cdot C_{yy})^T \dots\dots (30)$$

なる共分散マトリックスが得られる。すなわち、シム調整前の共分散から、シム調整後の共分散マトリックスを算定することができる。

4. 数値計算結果および考察

(1) 基本的事項の検討

鋼橋の施工精度は、数多くの誤差の組み合わせた結果として現われる。この場合、誤差間の相関性が大きな意味をもつと考えられるため、図—5に示すような単純ばりを対象として2—3の基本的事項について検討する。誤差としては、図中に示す設計値に対して、死荷重には平均値+2%、標準偏差3%、また断面2次モーメントには平均値、標準偏差ともに5%の誤差がある場合を想定する。なお、このほりは、次に検討する斜張橋モデルの主桁に相当するものである。



図—5 単純ばり

a) 死荷重と剛性の相関性の影響

死荷重と剛性は、ともに板厚等の寸法的な誤差の影響を受けるため、これら誤差間にはいくらかの相関性があるものと推測される。相関の程度が施工精度に及ぼす影響を検討するため、図-5の単純ばりを10分割したモデルを用いて、各要素の死荷重と断面2次モーメント間の相関係数  $\rho$  を-1~1に変化させて計算した。ただし、死荷重間および断面2次モーメント間は、互いに独立と仮定した。

はりの曲げモーメント誤差は、静定構造であるため剛性誤差と無関係になり、したがって、相関係数の影響も受けない。

一方、たわみは両方の誤差の影響を受け、その誤差の平均値は、剛性誤差の影響が死荷重誤差の影響を上回り、径間中央で1.1 mm 程度反りかげんとなる。また、径間中央のたわみの標準偏差は、図-6に示すように、相関性が大きくなるほど死荷重と剛性誤差の影響が相殺し、小さくなる。通常正の相関があると考えられるので、独立と仮定すると安全側となる。

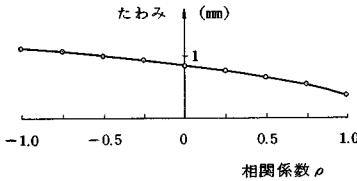


図-6 たわみの標準偏差 (l/2点)

b) 分布死荷重の相関性と部材数の影響

鋼橋を構成する各部材の死荷重は部材間で等分布するものとして、スパン方向分布死荷重の相関性と部材数の施工精度に及ぼす影響を検討する。

空間的な変動量の相関は指数関数で表わされることが多い(たとえば文献5)ので、部材間距離  $\Delta x$  離れた部材の死荷重の相関係数が次式で表わされるものとする。

$$\rho = \exp \left[ -\frac{\kappa |\Delta x|}{l} \right] \dots \dots \dots (31)$$

ここで  $l$  は、スパン長である。相関の程度を表す定数  $\kappa$  の値として、0, 3, 10 および無限大の4通りを考える。 $\kappa=0$  の場合は  $\rho=1$  (完全相関) となり、 $\kappa$  が無限大の場合は  $\rho=0$  (無相関) となる。 $\kappa=3, 10$  は両者の間で、その場合の  $\rho$  を図-7に示す。

全スパン  $l$  の部材分割数を変えて、死荷重が上記の相関性を有する場合のスパン中央の曲げモーメント誤差の計算結果を図-8に示す。 $\rho$  が小さいほど誤差応答は小さい。また部材数の影響は  $\rho$  が小さい場合に顕著であり、部材数が多くなるほど応答は小さくなる。すなわち、

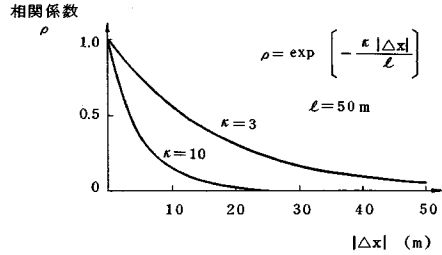


図-7 相関係数  $\rho$

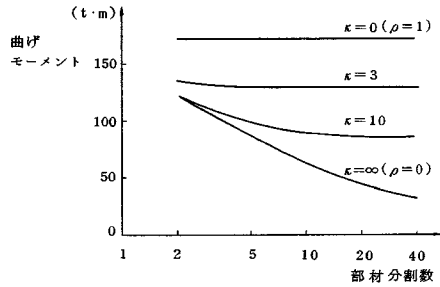


図-8 曲げモーメントの標準偏差 (l/2点)

死荷重の相関が小さい場合には、各部材の影響の相殺効果が期待できるが、相関が大きくなるにつれその効果が削減され、部材数が増えても誤差応答はあまり変化しない。

実施工における部材の長さは、種々の条件よりある程度限定されるが、精度予測に際しては、これら部材重量の相関性にも十分関心を払う必要がある。

以上のような検討のほか、塔状構造物を各種の寸法誤差のあるブロックで積み上げた場合の施工精度についても検討した。静定構造であるため、個々の寸法誤差がそのまま塔の形状誤差として現われ、断面力の誤差は生じない。また、誤差の組合せによる形状誤差の標準偏差は、継手部角折れ誤差間の相関性に著しく敏感であることが判明した。この点については、次の例題でより詳細に述べる。

(2) 斜張橋の解析

a) 解析条件

図-9に示す2径間斜張橋を対象として、部材組立後の施工精度およびシム調整による精度改善効果を検討する。主桁は長さ12.5 mの28部材から、また塔は6個の部材からなるものとする。主要パラメータの設計値とその誤差を表-1に、また各部材の寸法誤差を表-2のように設定した。これらは、必ずしも十分なデータに基づくものでなく、誤差の影響の相対比較のための目安として定めたものである。なお塔は、 $A=0.8 \text{ m}^2$ 、 $I=1.5 \text{ m}^4$ とし鋼部材とケーブルの弾性係数は、2.1および  $2.0 \times 10^7 \text{ t/m}^2$  で、誤差がないものとした。構造系に含まれる誤差の総数は134個であり、簡単化のためこれら

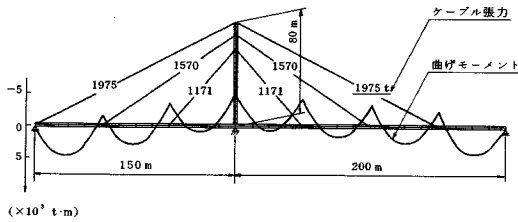


図-9 解析モデル

表-1 設計値とその誤差

	設計値	平均値	標準偏差
死荷重	$W_D = 1.8 \text{ t/m}$	$1.02 W_D$	$0.03 W_D$
主桁剛性	$I_D = 1.8 \text{ m}^4$	$1.05 I_D$	$0.05 I_D$
ケーブル剛性	$A_D = \begin{cases} 0.06 \text{ m}^2 \\ 0.03 \text{ m}^2 \end{cases}$	$1.02 A_D$	$0.01 A_D$

表-2 寸法誤差

	標準偏差	備考	
ケーブル長	2 mm	1部材当り	
ブロック長	1.5 mm	同上	
角折れ	主桁	$1/5,000 \text{ rad.}$	1継手当り
	塔	$1/10,000 \text{ rad.}$	同上

は統計的にみて互いに独立であるものと仮定した。

なお、本解析モデルにおける設計の目標とする死荷重状態でのケーブル張力と曲げモーメントは、表-1に示す設計値のもとで図-9に示すように決定されているものとする。プレストレス導入により、主桁の曲げモーメントは平滑化され、塔にも曲げモーメントが生じない。また製作反りも小さくなり、特に主径間側の中央部付近では死荷重たわみ(約1m)の1割程度となっている。

b) 部材組立精度

表-1に示す設計値の誤差の平均値が施工精度に及ぼす影響は、式(5)および(9)から算出される。設計値の2%の死荷重誤差により主径間側の上段ケーブル取付部近傍で16mm程度の変位誤差(同位置で設計上生ずる変位は、約80mm)が生じ、この付近および中間支点上で300tm程度の正負の負げモーメントが生ずる。一方、剛性誤差は、死荷重によるたわみやケーブル張力誤差を打ち消し、桁の曲げモーメント誤差に相乗する影響を与える。これは、主桁剛性の平均値が設計値よりも大きいため、死荷重による変形量が設計時に見込んだもの(製作反り)に満たなくなり、ケーブルも弛緩して死荷重の主桁分担率が増加するためと考えられる。

これら誤差の組合せによる施工精度の平均値は、主に死荷重誤差に起因する。設計値に対する比率において、主桁剛性誤差の方が相対的に大きいにもかかわらず、施工精度への影響が小さくなるのは、プレストレス導入により製作反りが小さくなったことが原因である。したがって、プレストレスを導入して曲げモーメントを平滑

化する設計法は、剛性誤差の施工精度への影響を削減する効果があるといえる。

誤差の変動成分によって生ずる主桁、塔およびケーブルの施工精度の標準偏差を、誤差の種類別に示すと図-10ようになる。形状誤差に最も大きな影響を与えるものは死荷重誤差で、次いで主径間や塔頂付近ではブロック長誤差が、側径間側や塔下部では角折れ誤差の影響が卓越する。ケーブル長誤差の影響は小さいが、これはケーブル本数が少ないためと考えられる。また、剛性誤差の影響は、平均値の場合と同様な理由により無視し得るほど小さい。

一方、曲げモーメントに関しては、桁端部や塔上部を除いて角折れ誤差に起因するものが卓越しており、特に中間支点部や塔基部においては、その影響が組合せ誤差によるものの8~9割に達する。また、ケーブル張力は、死荷重、角折れ、ケーブル長およびブロック長誤差によりほぼ均衡した影響を受けるが、バックステーケーブルに関しては、死荷重誤差の影響が特に大きくなる。これは、このケーブルが橋梁全体の重量のバランスを調整する機能をもつことによるためと思われる。

種々の誤差に対する力学的な因果関係により、種々の位置における施工精度間には何らかの相関性がみられる。組合せ誤差による主径間の鉛直変位や塔の水平変位には正の強い相関性が、またこれらと側径間側鉛直変位間には負の相関が認められた。主桁の曲げモーメントは、位置にある程度離れると相関性が小さくなる。また、塔に関して相対するケーブルの張力間には正の相関がある。

本計算例では、死荷重や角折れ誤差が施工精度に大きな影響を与えたが、ここでこれらの誤差の相関性が、施工精度に及ぼす影響を検討する。隣接部材の死荷重間に正の相関ある場合には、(1)で検討したように独立とする場合よりも大きな誤差応答を示すと思われる。しかしながら、式(31)において $x=10$ 程度の相関であるとすると、部材長との関係から独立と仮定してほぼ妥当と思われる。

一方、品質特性として最も重要な曲げモーメントに最も顕著な影響を及ぼす角折れ誤差に関しては、相関性が重要な意味をもつ。いま仮に、隣接する継手部の角折れに $\rho=-0.5$ の相関係数を考慮すると、角折れ誤差による施工精度は、図-10の▲印で示したものになる。相関性を考慮することにより、施工精度は独立と仮定した場合の3~5割程度と大幅に改善される。これは、角折れ部近傍で生ずる誤差の影響が、負の相関により互いに打ち消し合うためである。このことは、誤差の組み合わせた影響を削減すること、すなわち先行工程での誤差を後工程で吸収することが効果的な精度改善法であることを

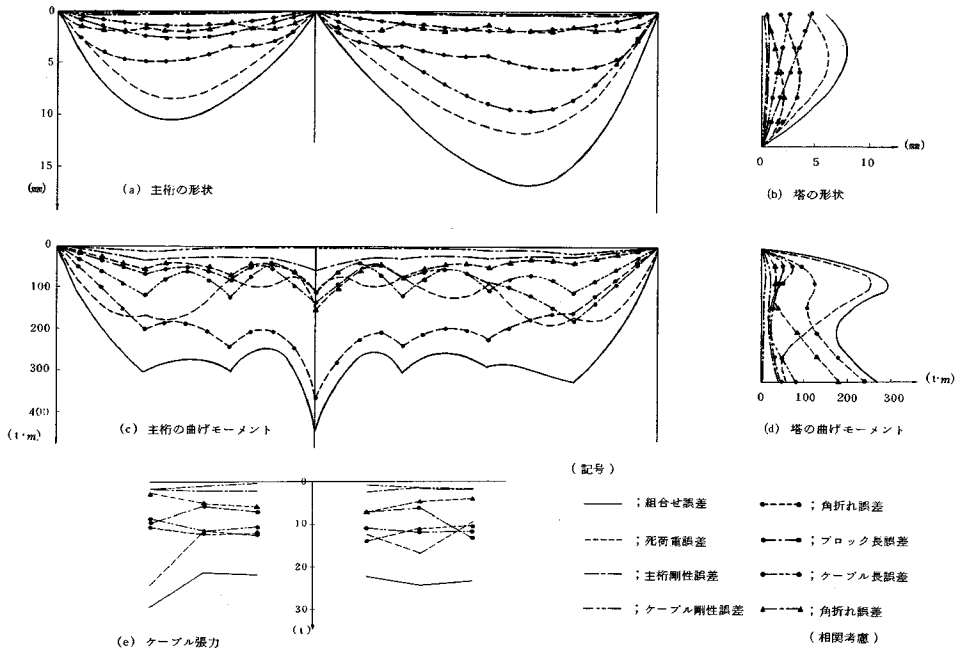


図-10 施工精度の標準偏差 ( $\sigma$ )

示唆するものである。

c) シム調整後の施工精度

部材組立後の施工精度をシム調整により改善する場合の考え方として、形状改善を目的とする形状調整、ケーブル張力を設計値に合わせる張力調整、および両方を同時に改善する形状・張力調整の3通りのケースを考える。形状管理の対象とするものは、桁の鉛直変位12個(25m間隔)および塔の水平変位6個とした。また、形状・張力調整の場合の重み係数は、本モデルにおける両者の誤差の調整に際する重みがほぼバランスするように1mmの形状誤差と1tの張力誤差が等価となるように設定した。

以上の条件のもとで計算した施工精度の推定範囲( $\mu \pm 2\sigma$ )を図-11に示す。実線は部材組立精度を、また破線はシム調整後の施工精度である。施工精度は、数多くの独立な誤差の影響の和として表わされるので、中心極限定理により正規分布に従うものと考えられ、したがって、平均値 $\mu$ 、標準偏差 $\sigma$ を用いて評価された( $\mu \pm 2\sigma$ )の範囲は、危険率5%の品質保証限界に相当する。

形状調整により、形状誤差は微小( $\pm 7$ mm以下)となるが、ケーブル定着部付近の曲げモーメントやケーブル張力の誤差は大きくなる。一方、張力調整を行うと、ケーブル張力や塔の曲げモーメントの誤差が完全になるが、形状や主桁曲げモーメントの誤差の平均値、変動幅とも大幅に大きくなる。したがって、形状と張力を

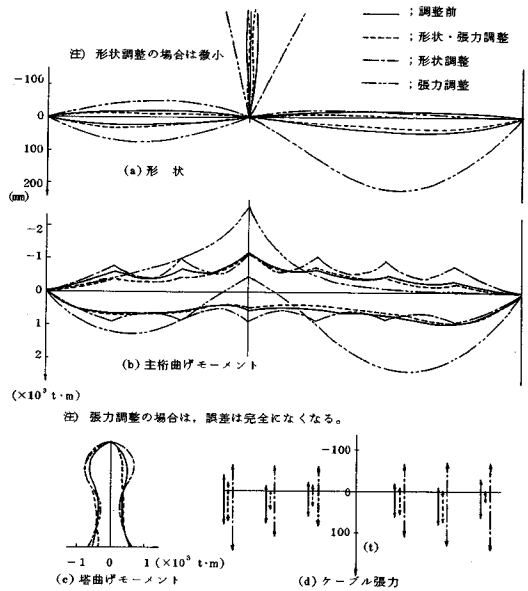


図-11 組合せ誤差による施工精度 ( $\mu \pm 2\sigma$ )

同時に管理した調整を行う必要があるが、この場合の精度改善効果は、主径間側の変位やケーブル張力にみられる程度で、品質特性として重要な曲げモーメントの変動幅は調整前と大差がない。

シム調整の精度改善効果を、誤差の種類別に検討すると興味ある結果が得られた。まず死荷重誤差の場合には、形状調整を行うと、主桁の形状や曲げモーメントの精度



が最もよくなるが、ケーブル張力誤差が増大する。張力調整は、図—11と同様、主桁の形状や曲げモーメント精度の大幅な悪化を招き、形状・張力調整後の精度は調整前と大差がない。張力調整は、死荷重分布の実態に応じて主桁とケーブルが荷重分担をしている状態から、死荷重誤差をすべて主桁に分担させる状態へ強制的に変えることを意味すると思われ、誤った調整法となる。曲げモーメントの平滑化という設計の考え方に沿えば、誤差の影響をケーブルに委ねる形状調整が最も好ましい方法と思われる。

角折れ誤差による施工精度を図—12に示す。形状調整を行うと、曲げモーメントやケーブル張力の精度が低下し、張力調整の場合は、その反対に形状誤差が大きくなる。形状・張力調整によりケーブル張力の精度がかなり改善されるが、形状や曲げモーメントの変動幅は調整前と差がない。同様なことは、主桁剛性誤差の場合にもみられ、これらの誤差に対しては、シム調整がトータルの精度改善の手段とはなり得ない。

シム調整が施工精度の改善に有効となるのは、ケーブル自身の誤差（長さ、剛性）および主桁や塔のブロック長誤差に対してである。これらの誤差に起因する形状や断面力誤差は、どの調整法によっても完全に吸収し得る。ただし、ブロック長誤差の場合には、主桁の橋軸方向および塔の高さ方向の座標に誤差が生ずる。桁端部や塔頂に伝播するこの誤差の標準偏差は、ブロック長誤差の標準偏差にその方向のブロック数の平方根を乗じたものとなる。桁端部でのこの誤差は遊間で処理でき、塔高の微

小な誤差も品質という面からみて何ら問題はないと考えられるが、主径間部で閉合する3径間斜張橋の場合には、閉合により形状や断面力誤差が生ずると予想される。このような場合でも、現場計測結果をもとに閉合ブロック寸法を調整するなど、先行工程での誤差を後工程で吸収することが、精度改善にきわめて有効な方法となる。

実際の構造物では、種々の誤差が混在しているため、形状と張力を同時に管理する必要がある。しかしながら調整効果のあるケーブル自身の誤差やブロック長誤差の影響が相対的に小さいため、大きな精度改善効果は期待できない。誤差曲げモーメントは、 $\mu \pm 2\sigma$  レベルで評価すると、4車線活荷重による最大・最小曲げモーメントの2~3割程度に相当し、応力換算で最大100 kg/cm<sup>2</sup>程度となる。ケーブル張力誤差は、目標値の±5%以内にはほぼ収まり、変動係数は調整前で2%弱、形状・張力調整後で1%程度となる。

以上は、ある条件のもとでの施工精度を試算したものであるが、誤差の大きさをパラメータ的な取り扱いをする場合には、図—10に示すような誤差の種類別の施工精度への寄与割合が参考となる。また、本論文で考慮した誤差以外のもの、たとえば下部工の誤差なども施工精度に影響を及ぼすことにも注意する必要がある。

5. 結 語

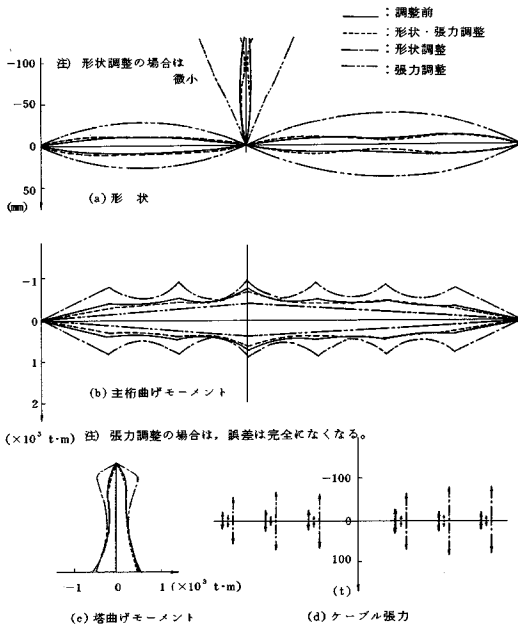
鋼橋の施工工程中に生ずる各種の誤差を部材の誤差に代表させ、これらを確率変数として部材組立後の施工精度、さらに組立後にシム調整を行った場合の精度改善効果を確率有限要素法により評価する方法を提示し、数値計算例によりその有効性を検討した。得られた成果をまとめると、

(1) 提示した本解析法は、鋼橋の施工に際して重点的に管理の対象とすべき誤差要因を明確化したり、施工精度の管理目標の設定、設計段階で考慮すべき誤差応力の定量化などに対し、非常に有効である。

(2) 各種誤差間の相関性は、施工精度に著しい影響を及ぼす。このことは、誤差の組合せによる影響を削減すること、すなわち先行工程での誤差を後工程で吸収することが効果的な精度改善法であることを示唆するものである。

(3) 斜張橋を対象とした試算例によると、形状の精度は死荷重誤差、曲げモーメントの精度は角折れ誤差の影響に最も敏感となる。剛性誤差の影響は、プレストレスを導入して製作反りを小さくすることにより、小さくすることができる。

(4) 斜張橋の架設に際するシム調整の精度改善効果は、誤差の種類によって様相を異にする。ケーブル自身の誤差などに対しては、効果的な調整法となるが、角折



図—12 角折れ誤差による施工精度 ( $\mu \pm 2\sigma$ )

れ誤差などの場合には、調整による精度改善効果をあまり期待できない。

今後調査・検討すべき事項としては、各種誤差のデータの集積が挙げられる。測定そのものが困難なものもあるが、施工精度の定量化に際する基本となるものである。地道な努力を積み重ねていく必要がある。また、橋梁の構造形式が変わると、種々の誤差の影響がどのように現われるかも興味ある研究対象になると思われる。

なお、定量化された誤差応力を設計的にどのように考えるかは大きな問題となるが、この点については、設計体系全体からみたより高い次元からの検討が必要と思われる。

最後に、本論文は、最近わが国で開催された2つの国際会議で発表<sup>24), 25)</sup>した内容に、さらに加筆してとりまとめたものであることを付記する。また、本研究の実施に際しては、京都大学名誉教授 小西一郎先生から種々のご助言を得た。ここに、御礼を申し上げる次第である。

#### 参 考 文 献

- 1) 長谷川・原田：補剛トラスの部材長誤差による吊橋の変位・応力について，土木学会論文報告集，第229号，pp.1~9，1974年9月。
- 2) 長谷川・原田・飯田：吊橋の製作施工誤差による変位・応力，橋梁と基礎，Vol.9，No.1，pp.24~32，1975年1月。
- 3) 落合・北原・山本：吊橋製作施工誤差と補剛ゲタ断面力・変位，橋梁と基礎，Vol.11，No.3，pp.24~31，1977年3月。
- 4) 田井戸・成瀬・大志万：大和川橋梁の製作と架設，橋梁と基礎，Vol.16，No.2，pp.44~49，1982年2月。
- 5) Handa, K. and Anderson, K. : Application of Finite Element Methods in the Statistical Analysis of Structures, Proc. of 3rd. ICOSAR, June, 1981.
- 6) 中桐・久田：確率有限要素法入門，培風館，1985年5月。
- 7) 桜井・土居：有限要素法による斜面の信頼性解析，土木学会論文報告集，第330号，pp.87~97，1983年2月。
- 8) 山田・古川・北島：長大吊橋タワーピア系の地震応答に及ぼす不確定要因の影響に関する研究，土木学会論文報告集，第293号，pp.23~33，1980年1月。
- 9) 藤澤：斜張橋架設時のシム量決定方法，橋梁と基礎 Vol.18，No.9，pp.1~11，1984年9月。
- 10) 土木学会編：構造物の安全性・信頼性，pp.63~66，1976年10月。
- 11) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，Ⅱ鋼橋編，1980年2月。
- 12) 前田：イギリスの新しい橋梁基準 BS 5400 の紹介，橋梁と基礎，Vol.15，No.2，pp.20~25，1981年2月。
- 13) Galambos, T. V., Ellingwood, B., MacGregor, J. G. and Cornell, C. A. : Probability Based Load Criteria ; Assessment of Current Design Practice, Proc. of ASCE, ST 5, pp.963~966, May, 1982.
- 14) 松村・新家ほか：斜張橋のケーブル張力計測と張力調整，橋梁と基礎，Vol.13，No.8，1979年8月。
- 15) 倉田・松橋ほか：2径間非連続桁斜張橋の構造特性と実橋試験，橋梁と基礎，Vol.15，No.1，1981年1月。
- 16) 高橋・斉藤ほか：ぼたん橋の設計と施工，橋梁と基礎，Vol.17，No.2，1983年2月。
- 17) 呉工事部：徳島県ニールセン式ローゼゲたの概要，石川島播磨技報，Vol.13，No.5，1973年9月。
- 18) 日端・日野・岩下：石森橋の架設，橋梁と基礎，Vol.15，No.5，1981年5月。
- 19) 垣見・中島ほか：本川大橋の設計・施工と載荷試験，橋梁と基礎，Vol.13，No.8，1979年8月。
- 20) 遠藤・池田ほか：アルパカーキ橋（ニールセン形式歩道橋）の設計と施工，橋梁と基礎，Vol.15，No.2，1981年2月。
- 21) 松村・亀井ほか：正平橋の設計と現場載荷実験，橋梁と基礎，Vol.12，No.9，10，1978年9，10月。
- 22) 岸田・二宮：七曲歩道橋の計画と施工，橋梁と基礎，Vol.15，No.6，1981年6月。
- 23) 日置・山本・別富：豊項大橋の設計と施工，橋梁，Vol.20，No.3，1984年3月。
- 24) Takemura, K. and Akao, H. : Probabilistic Evaluation on the Effects of Initial Imperfections on Cable Stayed Bridges, Proc. of 4th ICOSAR, Kobe, May, 1985.
- 25) Takemura, K. and Sakai, F. : Estimation of Construction Accuracy of Steel Bridges, Proc. IABSE Symposium, Tokyo, September, 1986.

(1986.7.18・受付)