

技術ノート

キーワード

PC斜張橋
施工管理
TV計測
最適シム量
パソコン制御

PC斜張橋の施工管理システム

Quality and Safety Control System during Construction
of Prestressed Concrete Cable-Stayed Bridge

森 本 洋 三*
Yozo MORIMOTO

野 田 行 衛*
Yukie NODA

中 山 良 直**
Yoshinao NAKAYAMA

1. はじめに

わが国におけるPC斜張橋の歴史は30年に満たず、最大支間が100 mを超えるものは、今のところ呼子大橋 (250 m)、新綾部大橋 (110 m)の2橋だけである。しかし、この橋梁形式は景観上・構造上優れており、経済面からも他の形式に十分対抗できるものである。このため、近年、PC斜張橋の施工が急速に増えてきている。

そこで、著者らはPC斜張橋の施工管理システムの開発を行った。本システムでは、主桁の施工としてカンチレバー工法を対象としており、次のような特徴がある。

- ① 主桁のたわみ量と塔のたおれ量、斜材の張力、部材の温度などの各計測は、すべてパソコンで制御する。
- ② たわみ量や張力の計測値は、計測時の部材温度・架設荷重を考慮して補正を行う。
- ③ 最適シム量の算出は、熟達者でなくても容易に行える。
- ④ 計測、データ計算、管理に要する人手・時間を大幅に縮小できる。

本文では、今回開発したPC斜張橋の施工管理システムについて紹介する。

2. システムの構成

本システムは、図-2 に示すような機器で構成されている。

パソコンやモニタなどは、現場事務所内や、橋面上などに計測ハウスを作り、その中に置く。

CCDカメラとモータは、橋体を側面から一望できる場所に設置する。ただ、地形的な条件が悪く橋梁全体を見

渡すことができない場合には、カメラハウスを何カ所かに作る必要があるが、CCDカメラとモータは、1台のパソコンで4台まで制御できる。

3. プログラムの構成

プログラムの構成は、図-1 に示すように、大きく5本に分かれており、それぞれ次のような機能、特徴を有する。

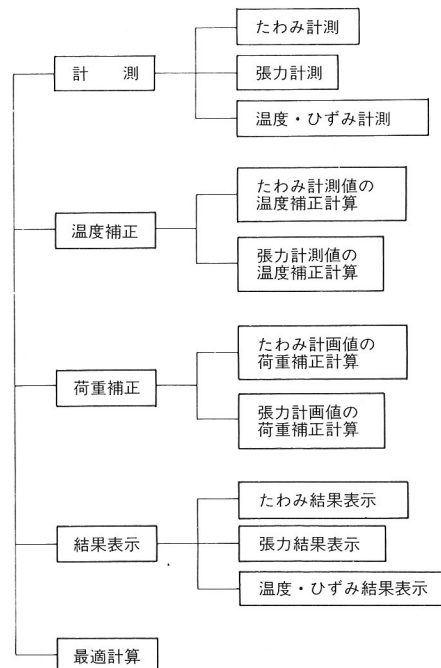


図-1 プログラムの構成

(1) 計測

a) たわみ計測¹⁾

たわみを着目する位置(施工ブロックの先端や塔頂部

*川田建設(株)工事本部開発部技術開発課課長 **川田建設(株)工事本部開発部技術開発課

など)にターゲット用の光源を取り付け、望遠レンズ付きのCCDカメラで視準し、モニタ画面上に映す。モニタ画面上でのターゲット重心の移動量を画像処理によって計測し、それを実際の長さに換算することによって、主桁のたわみ量、塔のたおれ量を計算する。CCDカメラはモータを備えた回転台に取り付けられており、パソコンによって視準方向を任意に変えることができる。

たわみ計測の準備段階として、橋梁とCCDカメラの位置関係を光波測距儀などで測量し、パソコンに入力しておく。これにより、各ターゲットの視準方向や実長への換算係数などが得られる。

計測は、大気状態や部材温度、荷重状態が安定している夜間に行うことが望ましい。計測者は計測開始時刻をセットするだけでよく、モータの回転、画像処理、たわみ量計算は、完全に自動化されている。なお、ターゲットごとにマニュアル操作で計測を行うことも可能である。

b) 張力計測²⁾

張力は、斜材の固有振動数を計測し、次に示す実用算定式³⁾を用いて求める。

① $\Gamma < 3$ の場合(逆対称1次振動)

$$T = \frac{w}{g} (f_2 l)^2 \left\{ 1.02 - 6.26 \frac{C}{f_2} \right\} \quad (\xi \geq 10)$$

② $\Gamma \geq 3$ の場合(対称1次振動)

$$T = \frac{4w}{g} (f_1 l)^2 \left\{ 0.857 - 10.89 \left(\frac{C}{f_1} \right)^2 \right\} \quad (3 \leq \xi \leq 17)$$

$$T = \frac{4w}{g} (f_1 l)^2 \left\{ 1 - 2.2 \frac{C}{f_1} - 2 \left(\frac{C}{f_1} \right)^2 \right\} \quad (17 \geq \xi)$$

$$T = \frac{4w}{g} (f_1 l)^2 \quad (\xi > 100)$$

ただし、 f_1 、 f_2 ：計測した1次、2次の固有振動数

$$C = \sqrt{\frac{EIg}{wl^4}}, \quad \xi = \sqrt{\frac{T}{ET} \cdot l}$$

$$\Gamma = \sqrt{\frac{wl}{128EA(\delta)^3 \cos^5 \theta} \left(\frac{0.31\xi + 0.5}{0.31\xi - 0.5} \right)}$$

斜材の固有振動数は、風などによって生じる常時微小の加速度記録を、加速度計からパソコンに取り込んでA/D変換し、FFT解析を行って求める。固有振動数から張力を計算する実用算定式は、斜材の曲げ剛性を含んでいるために、その影響によって誤差が生じる可能性がある。したがって、実際に使用する斜材を用いて、振動法と油圧ジャッキの両方で張力を算出し、キャリブレーション値を求めておく必要がある。

また、ケーブルサグによる影響を取り除くために、加速度計を水平方向にセットし、鉛直面と直交する面の振動数を計測する。

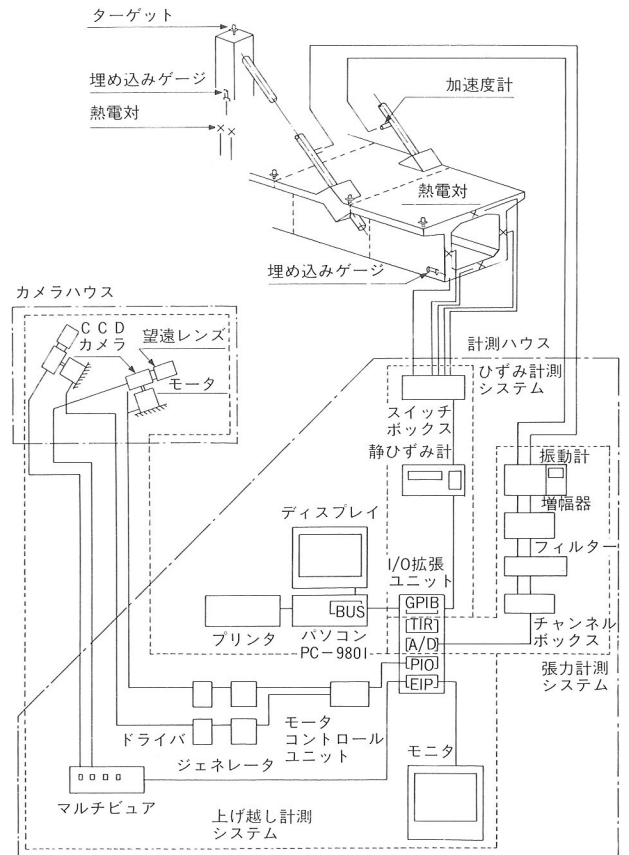


図-2 システムの構成

現場における計測作業としては、パソコンで計測開始の指示を与えれば、システムがデータの取り込みからFFT解析まで自動的に行い、スペクトル図をディスプレイに表示する。そこで、計測者が1次、2次の固有振動数を選択すれば張力が得られる。

c) 温度、ひずみ計測

たわみ計測値、張力計測値は、主桁・塔・斜材の温度の影響を受ける。したがって、計測値と計画値を比較する際には、部材温度を20℃の状態に補正する必要がある。また、架設中に応力が大きくなる部材については、埋め込みゲージや有効応力計をコンクリート内に埋め込んで、常に応力状態を監視しておく。

乾燥収縮用の供試体を用意して、乾燥収縮ひずみを計測し、荷重状態が弾性荷重か塑性荷重かを指定すれば、全ひずみを弾性ひずみと塑性ひずみに分けることができる。そして、塑性ひずみから乾燥収縮ひずみを差し引けば、クリープひずみが得られる(図-3参照)。

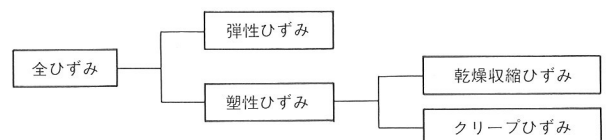


図-3 ひずみの成分

(2) 温度補正

架設中の張出し状態のときには、たわみ量・張力は、部材温度の影響を大きく受ける。そのために、たわみ計測時、張力計測時の温度計測結果から各部材の温度と温度差を求め、主桁・塔・斜材の温度を設計計算上の温度(通常20℃)とし、主桁・塔の温度差を0℃とした状態に補正する必要がある。部材の平均温度・温度差は、パソコン内で温度測定点での温度から計算されるので、これを使って、任意形平面骨組解析プログラムによって、たわみ・張力の温度補正量を計算する。このデータを計測データ用ディスクに登録しておけば、計測値に対して温度補正がなされる。

(3) 荷重補正

たわみ・張力の計画値は、施工前に架設荷重を仮定して計算したものである。したがって、実際の架設荷重状態が計算仮定値と異なる場合には、架設荷重の違いによるたわみ・張力の補正を行うことが必要である。

そこで、たわみ計測・張力計測時に、架設荷重の作用位置と大きさをリストアップし、そのデータを使って任意形平面骨組解析プログラムで架設荷重の違いによるたわみ・張力を算出する。この荷重補正量も温度補正と同様に、計測データ用ディスクに登録しておく。

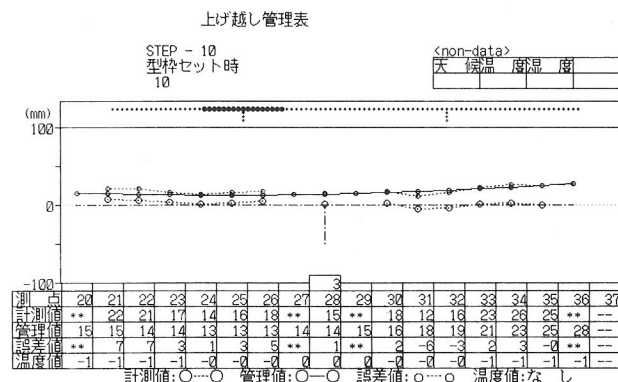


図-4 上げ越し管理

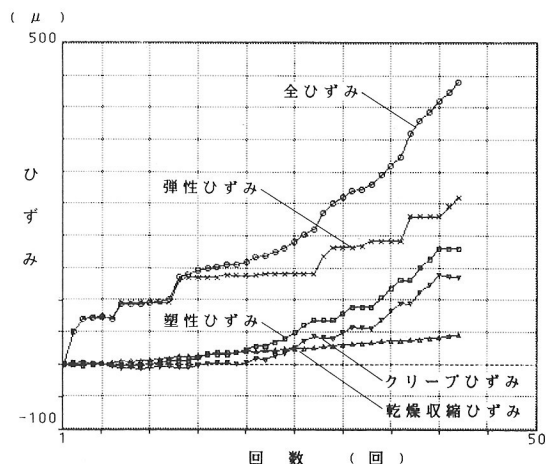


図-5 コンクリートひずみ

(4) 計測結果

たわみ、張力、温度、ひずみの各計測値は、いつでもディスプレイ表示、プリントアウトができるようになっている。上げ越し管理の結果表示の例を図-4に示す。図-5のコンクリートひずみは、荷重状態を入力して、全ひずみを各成分ごとにパソコン内で集計し、グラフ表示したものである。

(5) 最適計算

たわみ量の誤差と張力の誤差は、シム調整を行うことによって、できるだけ小さくする必要がある。シム調整量の計算方法としては、これまでにいくつかの例が提案されているが^{4),5)}、いずれの方法も、合理性・実用性などの多角的視野から考えると、改善の余地が残されているように思われる。そこで、本システムにおいては、以降で述べるような方法を考案し、使用している。

4. データの流れ

各種計測機器から得られたデータを使って、最適シム量を求め、たわみ・張力の応答値を計算するまでのデータの流れは、図-6に示すとおりである。

熱電対などのゲージからのデータは、静ひずみ計からパソコンに送られるので、ゲージ係数を使って温度に換算し、主桁や斜材など各部材の平均温度・温度差を計算する。たわみデータは、モニタ画面上での座標値として得られるので、それを実際のたわみ量に換算する。張力データは、加速度記録として取り込まれるので、それをパソコン内でFFT解析して振動数に直し、斜材剛度などを用いて張力を算出する。

たわみ・張力の計測値は、部材温度の補正、架設荷重の補正を行って、たわみ・張力補正值とし、それを、あらかじめ大型電算機で計算しておいた計画値と比較し、誤差量を算出する。

たわみ・張力誤差量に対して許容値を設定し、シム量の調整範囲を制限して最適計算を行い、最適シム量とたわみ・張力の応答値を求める。

5. 最適シム量の計算方法

(1) 最適シム量の考え方

斜張橋は、高次の不静定構造物である。そのために、斜材・主桁の剛性誤差、重量誤差などの設計的要因や、斜材の製作誤差、主桁・塔の施工誤差などの施工的要因が複雑に絡み合い、斜材張力、主桁のたわみ量に誤差が生じてくる。したがって、架設中や架設完了時に行う“シム調整”(ケーブルソケットと定着装置の間にシムプレートと呼ばれる薄い板を挿入し、斜材長を変えることによって、これらの誤差を小さくする方法)が、施工管理の重要な1項目となっている。

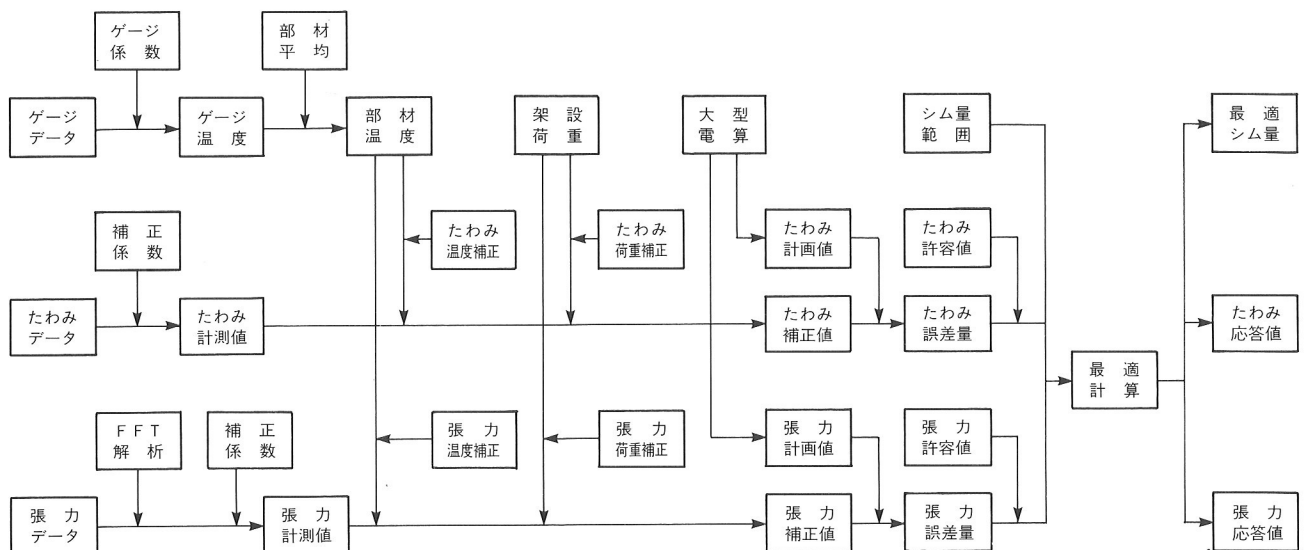


図-6 データの流れ

シム調整量を決定するうえでの課題は、

『斜材張力と主桁のたわみ量の誤差を
少ないシム調整個所数で、
いかに小さく抑えるか』

であり、これを満足することが、最適シム量の必要条件である。

(2) 許容誤差量の設定

シム調整量を算出するうえで、まず、誤差量の評価が問題となる。斜材張力誤差15tと、たわみ量誤差20mmとでは、どちらの誤差の方が大きいかは、一概に即断することはできない。ところが、許容誤差量を設定し、誤差比という無次元量で比較を行えば、その大小関係を数学的に比べただけでよい。例えば、斜材張力の許容誤差量を10t、たわみ量のそれを25mmとすると、誤差比はそれぞれ15/10、20/25となり、斜材張力の誤差の方が重大であることが明らかである。

許容誤差量の設定は、構造物の規模、施工条件などによって変更すべきであり、現場施工管理者の判断に委ねられる。

(3) シム調整量の範囲の設定

次に、シム調整量の範囲についてであるが、50mmのシムしか入っていない個所から70mmのシムを抜いたり、逆に500mmのシムを挿入するなど、計算上の最適シム量が施工的には不可能なことがある。

そこで、あらかじめ各個所におけるシム調整量を設定することにより、施工可能な範囲内の最適シム量を計算する。また、シム調整量の範囲を0mmに設定すれば、その個所ではシム調整を行わないので、シム調整個所数を任意に制限することができる。

(4) 最適シム量の計算方法

前述のように、許容誤差量とシム調整量の範囲を設定

しておき、基本シム量を挿入した場合の応答値計算を行い、誤差比を計算する。誤差比が最大となっている点を探し、その点の誤差を最も効果的に下げるシム調整個所のシム量を単位量だけ変更する。なお、変更後のシム量が、設定した調整範囲を超える場合には、その次に効果的なシム調整個所のシム量を変更する。

変更後のシム量を使って応答値計算を行い、最大誤差比となる点を探し直し、シム量を再び変更する。これを繰り返すことによって、最大誤差比は0に近づいていくが、ある程度の値になると、それ以上は収束しなくなる。収束しないと判断されたら繰り返し計算を終了し、そのときのシム量を最適シム量とする。

ただ、この計算方法では、局所的な最適シム量が求まるにすぎない。そのために、基本シム量を、シム調整の全個所を0mmとする場合、あるいは1カ所だけ調整範囲の最大値とし、残りの個所を0mmとする場合の各組合せ

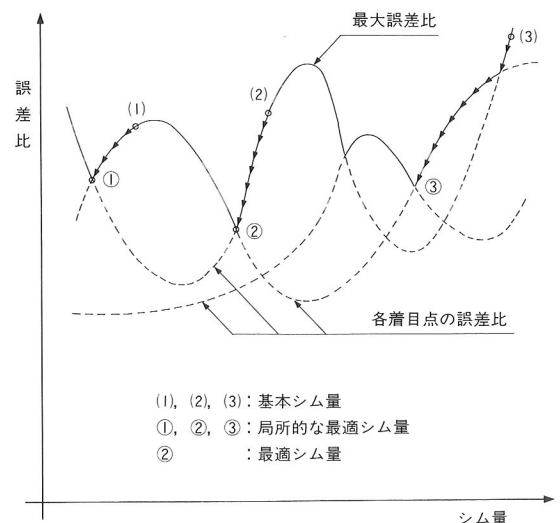


図-7 最適シム量計算の概念図

について、幾通りかを計算し、真の最適シム量、またはそれに近い値となるようにする。

図-7は、ある基本シム量から繰り返し計算を行って局所的な最適シム量に至るまでの概念図である。

(5) 最適シム量の計算手順

架設中の計測は、各ステップで行うことを原則とする。そして、誤差比を計算し、最大誤差比が1.0未満の場合にはシム調整を行う必要はない。しかし、最大誤差比が1.0を超える場合には、まず、最上段と第2段の斜材についてのみシム調整を行うものとして最適シム量を算出し、シム調整作業量の縮小化を図る。しかし、その時の応答値の最大誤差比が1.0を超える場合には、全段の斜材を対象とした最適シム量の計算を行い、誤差を供用時まで持ち越さないようにする必要がある。

構造系完成後には、全段の斜材を対象とした最適シム量の計算を行い、精度の高い構造物に完成させる。

6. おわりに

本システムをPC斜張橋に適用した例はまだないが、たわみ計測システムは、男神橋⁶⁾、大倉大橋、登俣第2橋で既に適用しており、また、張力計測システムは、櫃石島橋²⁾、西羽賀橋などの鋼斜張橋で使用されたものと同じものである。それらの結果から、両計測システムについては、精度、作業性の面において優れていることが実証されている。

近い将来に、本システムを導入して施工管理を綿密に行い、精度の高いPC斜張橋を架設する機会を得ることを大いに期待するものである。

参考文献

- 1) 森本・野田・中山・町田・橋：FCC工法におけるたわみ管理システムの開発、川田技報、Vol.7, 1988年。
- 2) 西岡・片山・内海・前田・町田・越後：本四斜張橋櫃石島橋の面材架設時施工管理システムの開発、川田技報、Vol.6, 1987年。
- 3) 新家・広中・頭井・西村：振動法によるケーブル張力の実用算定式について、土木学会論文報告集、第294号、1980年。
- 4) 藤沢：斜張橋架設時のシム量決定方法、橋梁と基礎、Vol.18, No.9, 10, 1984年。
- 5) 古川・井上・中山・石堂：多目的計画法を用いた斜張橋の架設時精度管理システムに関する研究、土木学会論文報告集、第374号、1986年。
- 6) 加藤：男神橋(FCC工法)の設計と施工、橋梁、Vol.5, 1988年。