

ケーブル構造物架設時の精度管理システムの再構築

Reconstruction of Quality Control System during Cable Structure Construction



永谷 秀樹*¹
Hideki NAGATANI

要 旨

ケーブル構造物においては、製作・架設誤差によるケーブル張力および構造形状の設計値に対する誤差調整を効率的に実施するため、架設時の精度管理システムがある。ここでは、計測機器およびIT技術の進歩によるシステムの再構築（シム調整解析プログラム開発を含む）と、実橋梁でのシステムの適用性について確認・考察した結果について報告する。

キーワード：精度管理システム，シム調整量最小法，重み付き最小二乗法，エクセルVBA

1. まえがき

斜張橋やニールセンローゼ橋などのケーブル構造物は、高次不静定構造物であり設計時に最適なケーブル張力が設定されている。そのため、架設時におけるケーブル張力および構造形状の再現が必要となる。この再現すべきケーブル張力と構造形状が管理値となる。また、設計・製作・架設の各段階において生じた各種の設計値との不整合が、ケーブル張力・構造形状に影響を与え管理値に対して誤差が発生する。

そこで、これらの誤差を許容される範囲内にバランス良く収めるためにケーブル長の調整（シム調整）を適切に行う必要がある。この適切な調整シム量を精度良く、安全に、かつ工程のスムーズな進捗を目指して行うため、情報化施工としてコンピュータにおける計測・解析システムで構成された精度管理システム（形状管理システム）が適用される。

当社では、斜張橋を主たる対象として1990年にオンラインによるリアルタイム処理の精度管理システムとして、計測装置制御とシム調整量決定のための解析を一体化した精度管理システムを開発した¹⁾。このシステムはMS-DOS上で稼働するものとして開発されていた。そのため、制御を行う計測機器の進歩、IT技術の進歩にともなう再構築を行っており、その内容と精度管理システムの概要について今後の技術継承も兼ねて報告する。

2. システム構成と再構築の目的

(1) システム概要と再構築の目的

精度管理のシステム構成を図-1に、精度管理全体の概要を図-2に示す。このシステムは、①事前解析、②現場計測、③シム調整解析の各システムから構成されている。

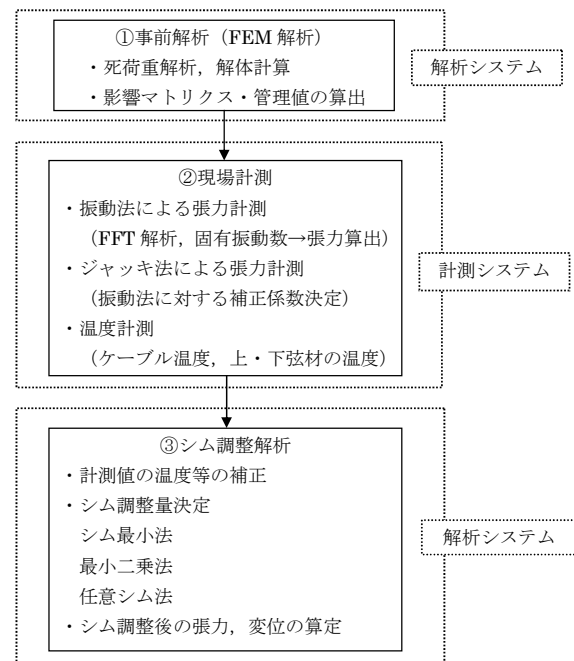


図-1 精度管理システムの全体構成

*¹ 橋梁事業本部 技術本部技術部技術開発グループ 担当リーダー

今回の再構築における主たる目的は、各システムを個別に分離することである。特に現場計測に関しては、計測装置および計測方法の進歩が速く、システムの陳腐化も速くなるためシステムの維持管理に多くの労力と費用が必要となる。また、構造物ごとに計測装置、計測項目などが異なり効率的な計測を行うためにはシステムの構造物ごとのカスタマイズも必要となる。よって、精度管理システムの適用頻度と運用を考慮して、現場計測はアウトソーシングを前提として分離したシステムとした。

(2) 事前解析 (解析システム)

事前解析は、各架設状態における構造物のケーブル張力および構造形状などの管理値、現場における温度変化の管理値への影響、およびシム調整による管理値への影響を算出するための解析である。以下にこの算出方法について概要を示す。

ケーブル張力および構造形状の管理値の算出は、架設状態の構造系に対して架設時の荷重により生ずるケーブル張力および構造形状などの管理値を算出する。管理値の算出は、設計における構造解析モデルを再現した立体骨組モデルを用いたFEM解析により行うものとする。斜張橋のように変形量大きい構造物の場合には有限変

位解析を用いた解体計算を実施するのがよいが、ニールセンサー橋のように変形量が小さい場合には解体計算を省略した微小変形解析も適用可能である。

現場における各部材の温度計測結果に対して、標準温度に対する温度変化による管理値への影響値の算定を行う（通常は各部材が単位温度（+10℃）変化した場合の管理値への影響量の算定している）。この算出された影響値から温度補正マトリクスを作成し、シム調整解析における温度補正に使用する。

各ケーブルのシム調整による管理値に対する影響値の算定を、前述の管理値を算出した解析モデルを用いて行う。算定方法は、ケーブル毎に単位シム調整量（通常は-1.0cm）に相当する温度荷重を載荷して、各管理値に対する影響値を算出する。この算出された影響値からシム調整による影響値マトリクスを作成する。

(3) 現場計測 (計測システム)

現場計測は、ケーブル張力、主塔・主桁の変位等の構造耐力に関係する管理項目に対して実施する。ここでは、特にケーブル張力の現場計測システムの実施例として、各ケーブルに固定した加速度計による振動計測などについて概要を示す。

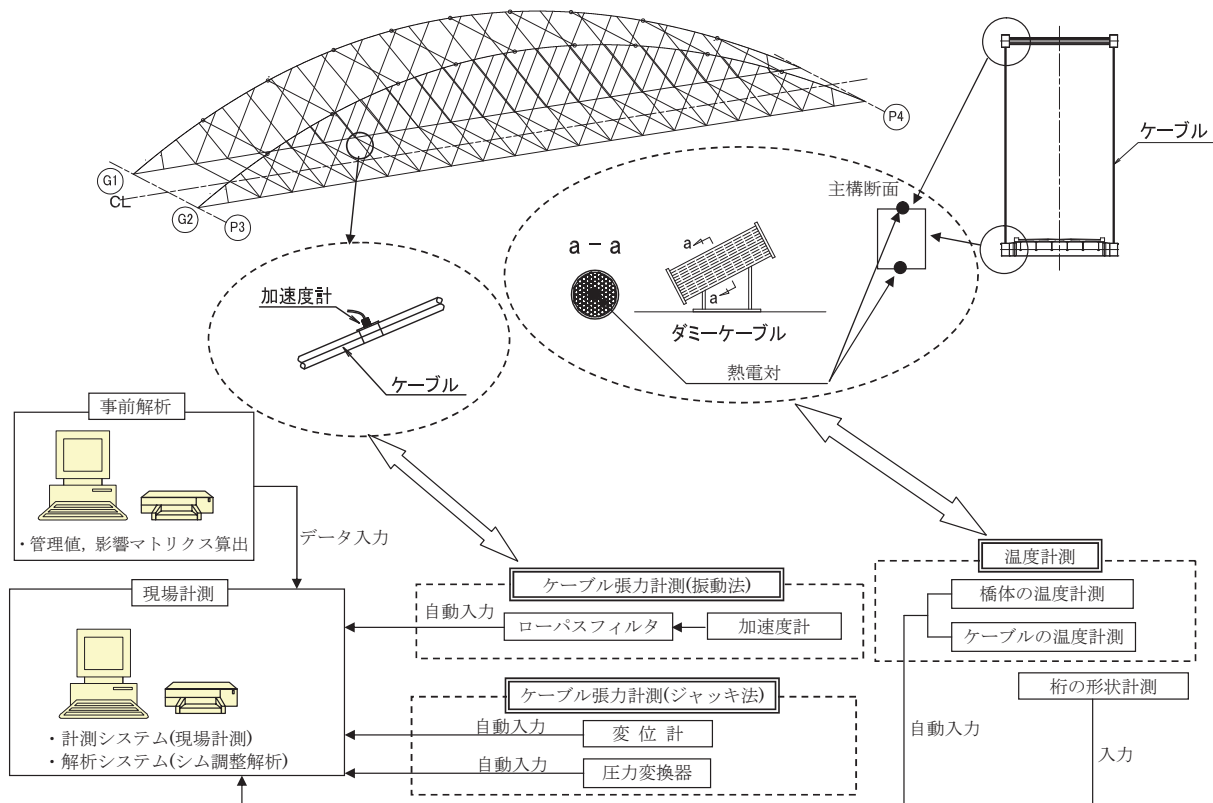


図-2 精度管理の概略



図-3 ケーブル定着部のジャッキ変位測定状況



図-6 加速度計設置状況

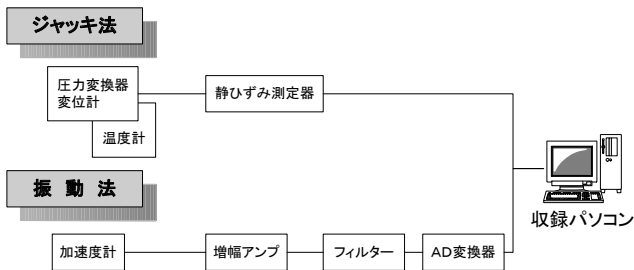


図-4 計測システムブロック図

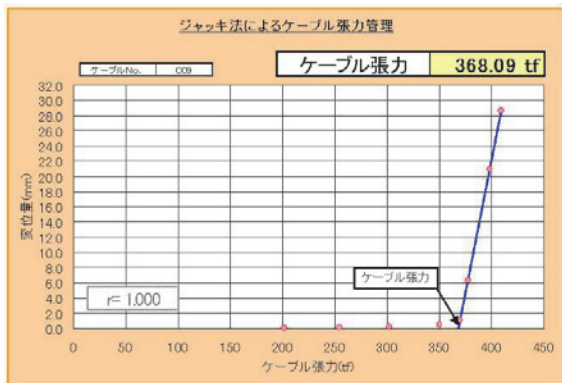


図-5 ジャッキ法によるケーブル張力算出例

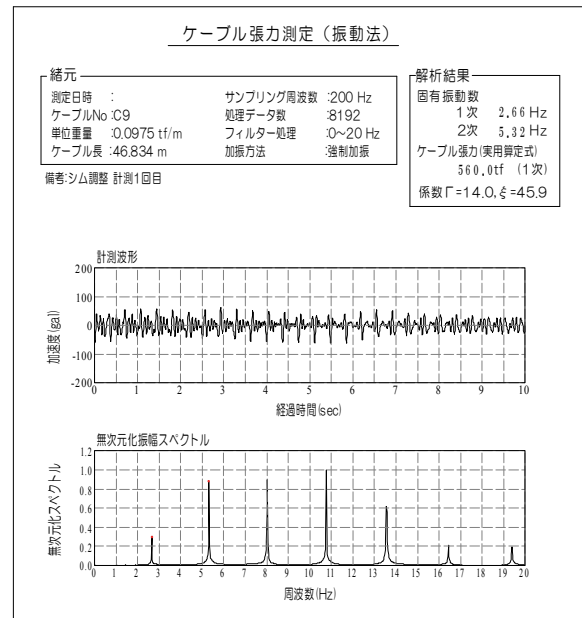


図-7 振動法によるケーブル張力算出例

なお、最近では、レーザードップラー速度計 (LDV) を用いた振動計測も実施されている²⁾。LDVは、固定式の加速度計に比較して高所での作業や配線の取り回しが不要となるため、作業の安全性や効率性の向上が期待できる。また、LDVは加速度計と比較して低周波数領域の応答特性が良いため、固有振動数が長い (1Hz以下) のケーブルの固有振動数を常時微動から同定することも可能であり、その適用について今後検討する必要がある。

ケーブル張力計測システムは、①ジャッキ法、②振動法の2つの計測法に対応するものとして構成され、各方法の利点を生かして精度の高い張力管理を実施する。

1) ジャッキ法 (直接法)

圧力計により油圧ジャッキの油圧を計測するとともに高感度変位計によりジャッキ変位 (遊間変位) を測定し、ジャッキ圧と遊間変位の関係からケーブルに導入されている張力を算出する (図-3~5参照)。

なお、ケーブル張力導入時に使用するジャッキの油圧などを用いて測定するため、真値に近い結果を得ることが可能であるが、常にジャッキが設置されていることが必要であるため、適用箇所は限定される。

2) 振動法

ケーブルに加速度計を固定し、加振による振動を計測

しケーブルの持つ固有振動数を求め、固有振動数とケーブル張力との関係式³⁾よりケーブルに導入されている張力を算出する。振動法は、機材が小さく作業性が優れるため、架設時および完成後のいかなる時期におけるケーブル張力計測に適用でき、測定も短時間で行うことが可能である。しかし、この方法はサグの影響、ケーブル剛性、定着部の境界条件など不確定要素による誤差を伴う場合があるので注意する必要がある(図-6, 7参照)。

3. シム調整解析(解析システム)

シム調整解析は、構造特性、誤差傾向に配慮して、以下の3種類(①シム量最小法、②重み付き最小二乗法、③任意シム法)の算定方法を単独あるいは複合して適用することによりシム調整量を算出するものとする。ただし、最終的なシム調整量は、シム調整の施工性、工程に配慮して担当技術者の技術的判断により決定することが重要である。

今回、このシム調整解析のプログラムを新たに作成した。プログラムは、今後のメンテナンスの容易さと使用性に配慮してエクセルVBAによるものとした。事前解析との連動は、事前解析により作成された温度補正マトリクス、シム調整による影響値マトリクスのテキストデータをエクセルに読み込むものとした。なお、現場計測値の標準温度への温度補正についてもこのプログラムのなかで実施するものとしている。

以下に前述の3種類のシム調整量算定方法とその適用性などについて概説する。

(1) シム量最小法

シム量最小法はケーブル張力のみを対象とし、張力が許容誤差内となる制約条件のもと、シム調整量を、調整量の二乗和を目的関数とし、これを最小にするように共役勾配法により最適化問題を解いて調整量を決定する⁴⁾。シム調整量とケーブル張力との関係、目的関数は以下の通りである。

また、シム調整量の算出には、 f に対して許容される最大値 f_{max} や計算回数を用いて制御を行う収束計算を行う。

$$f = [\Delta I]^T \cdot [\Delta I] \quad \dots (1)$$

$$[\Delta I] = [D] \cdot ([\Delta T + [\epsilon]^{j+1}]) \quad \dots (2)$$

$$[\epsilon] = [X][\Delta I] - [\Delta T] = [X][\Delta I] + [T_i] - [T_0] \quad \dots (3)$$

ここで、

$[X]$: ケーブル張力への影響マトリクス ($n \times n$),

$[\Delta I]$: シム調整量, f : 目的関数

$[\Delta T]$ ($= [T_0] - [T_i]$): ケーブル張力の管理値 $[T_0]$ と計測値 $[T_i]$ との差)

(2) 重み付き最小二乗法

ケーブル張力や構造形状などの管理項目の誤差の二乗和を最小とするシム調整量を求めるものとして以下の目的関数 f を定義する。なお、管理項目全体の誤差応答を適切に低減させるため、シム調整量自身と各管理項目毎に重み係数を導入する。この目的関数をシム量調整量での偏微分がゼロとなるものとしてシム調整量を算出する⁵⁾。

$$f = \sum_{i=1}^m \rho_i \cdot R_i^2 + \rho_0 \sum_{j=1}^n S_j^2 \quad \dots (4)$$

シム調整量は、 $\frac{\partial f}{\partial S_j} = 0$ より以下のように決定される。

$$[S] = -[[A]^T \cdot [\rho] \cdot [A] + \rho_0 \cdot [E]]^{-1} \cdot [A]^T \cdot [\rho] \cdot [r'] \quad \dots (5)$$

ここで、

n : シム調整を行うケーブル本数

m : ケーブル張力、変位等の管理項目数

$[S]$: シム調整量

$[A]$: 影響マトリクス (m 行, n 列の矩形マトリクス)

$[R] = [z] + [r']$, $[R]^T = [R_1, R_2, \dots, R_m]$

$[z]$: 管理項目の応答量

$[r']$: 誤差応答 (= 計測値 - 管理値)

$[\rho]$: $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_m$ を対角とする $m \times m$ の対角行列

ρ_i は i 番目の管理項目に対する重み係数

ρ_0 はシム調整量自身を減少させる重み係数

$[E]$: $n \times n$ の単位行列

(3) 任意シム法

シム調整量を任意に与えることにより、シム調整後のケーブル張力、変位への影響を確認するものである。既知となるシム調整量から、次式より各管理項目のシム調整量による応答量が算出され、応答誤差との比較を行うものである。

$$[z] = [A] \cdot [S] \quad \dots (6)$$

(4) 各シム解析の適用性と組合せ

シム調整量最小法は、ケーブル張力のみを着目対象としてシム調整量を決定するため、構造形状については誤差低減制御を行うことが不可能である。しかし、ケーブ

ル張力変動が構造形状に与える影響が小さい構造物（ニールセンローゼ橋）については有効であり、ケーブル張力を許容値内に収めるためにシム調整量の総和が小さくなるように効率よく決定できる。

これに対して、重み付き最小二乗法は、シム調整量に対してケーブル張力が鈍感で張力変動が構造形状に与える影響が大きい構造物について、ケーブル張力と構造形状をバランスよく調整することが可能である。また、技術者は、施工性、出来形に配慮して重みを適切に設定することによりシム調整量を任意に制御可能である。ただし、結果として調整箇所が多くなり施工性が低下する可能性がある。

したがって、今回開発したプログラムは各解析法の長所を活かして組合せて適用可能なものとし、シム調整量最小法で決定した調整量を任意に選択して重み付き最小二乗法へ既定値（数値は変更も可能）としてエクセル上で入力できるものとし、ケーブル張力と構造形状の誤差調整の効率の向上を図っている。

4. 実橋梁への適用

(1) 概要

この新しいシステムをニールセンローゼ橋である美浦大橋の精度管理に適用している、その構造概要を図-8

に示す。本橋の橋梁諸元および工事報告については文献6)を参照されたい。また、この精度管理における管理項目および計測項目を表-1に示す。総ケーブル本数が78本、主桁キャンバー計測点が44点で合計管理項目が122となり、ニールセンローゼ橋では最大規模の精度管理であり、現場計測およびシム調整量の決定を限られた時間の中で効率よく行う必要があった。

表-1 管理項目および計測項目

項目	管理項目	計測項目	計測位置	備考
ケーブル張力	○	○	全ケーブル	2×38本/1橋面=76本
主桁キャンバー	○	○	横桁位置	2×22点/1主桁=44点
橋体温度	-	○	スパン1/4点	上弦材、ケーブル、補剛桁 各4箇所/1断面
				温度補正用計測

計測システムについては、既存の情報化施工用のシステムを本橋用にカスタマイズして計測を行った。また、各計測結果はエクセルデータとしてシム調整解析システムに入力している。

(2) シム調整結果

ケーブル張力誤差とキャンバー値に関して、調整前の計測結果と3種類のシム調整解析結果に基づく調整後の予測値を、代表してG1に関して図-9, 10に示す（図中の凡例での各解析方法の名称は略称とする）。計測結果では、ケーブル張力は部分的に許容誤差値を超える箇所があり、全体的にも誤差を小さくする必要があると考えられる。ただし、構造形状である補剛桁のキャンバーは

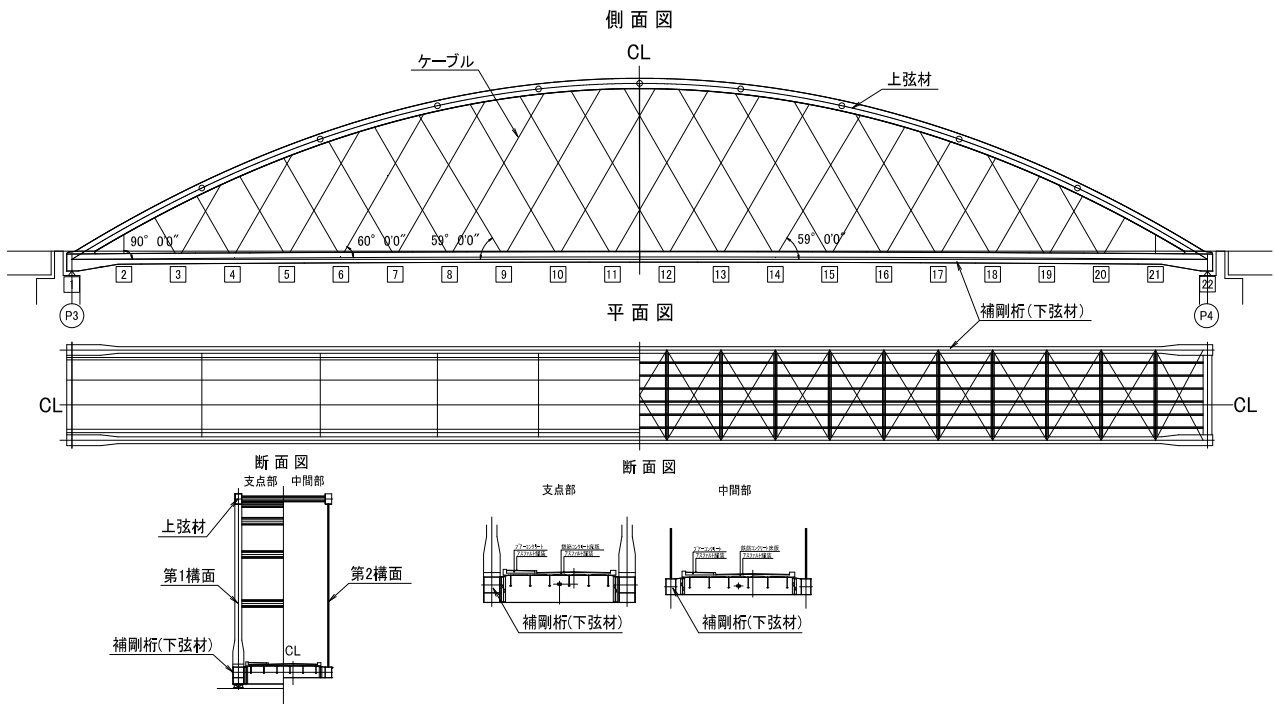


図-8 ニールセンローゼ橋（美浦大橋）の構造概要

許容値に対して十分な余裕をもっている。

各手法の解析結果（調整後の予測値）は、ケーブル張力、キャンパー値ともに許容値内にバランス良く収まっている。各手法の解析結果を比較すると、シム調整量最小法は最もケーブル張力の誤差値が小さくなっているが、キャンパー値については逆に誤差が大きくなる結果となっている。これに対して、重み付き最小二乗法および任意シム法は、ケーブル張力についてはシム調整量最小法に比較して若干誤差が大きくなるが、キャンパー値については誤差が小さくなる。なお、今回の重み付き最小二乗法における重みは、ケーブル張力とキャンパー値の単位の違いによる誤差値の大きさから、両者の比を1000としている。

本橋の精度管理においては3回の現場計測と2回のシム調整を実施している。図-11に、G1におけるケーブル張力に対する各計測結果とシム調整解析による予測値の比較を示す。なお、第1回目のシム調整は、最初に管理値に対する誤差を極力小さくするため76本のケーブル中66本の調整を行っている。

この図より、第2回目の計測値と予測値はNo.33のケーブル除いてよく一致しており、誤差も非常に小さくなっている。そこで、第2回目のシム調整はNo.33のケーブルのみを調整するに留めた。第3回目の計測値と予測値はよく一致しているため、この両者の第2回目の不一致の原因については現場での調整不良も予測される。

このように、本橋では1回のシム調整により、全ての管理項目について誤差を許容値内に収めることができおり、効率的な精度管理が実施できたと考えられる。

(3) 考察

シム調整量最小法は、ケーブル張力を許容誤差内に収め、シム調整量の絶対値の総和が最小となるように収束計算を用いてシム調整量を決定する方法である。

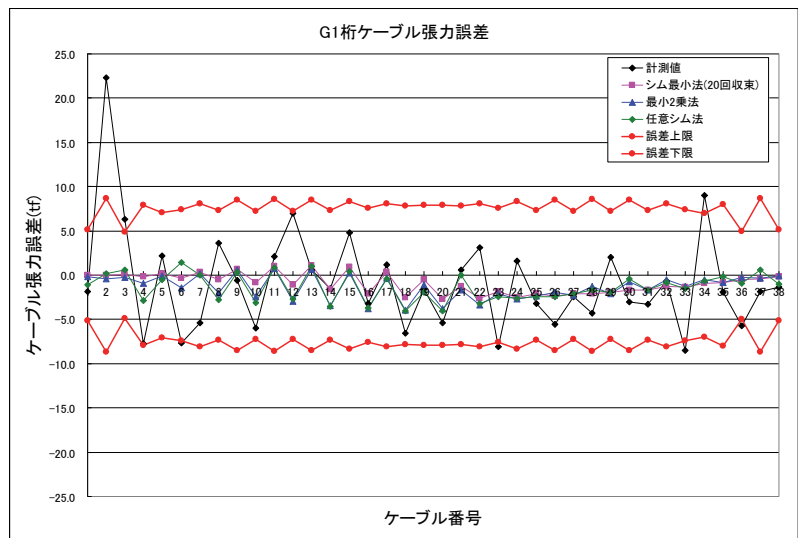


図-9 ケーブル張力に対する計測値と各解析結果の比較

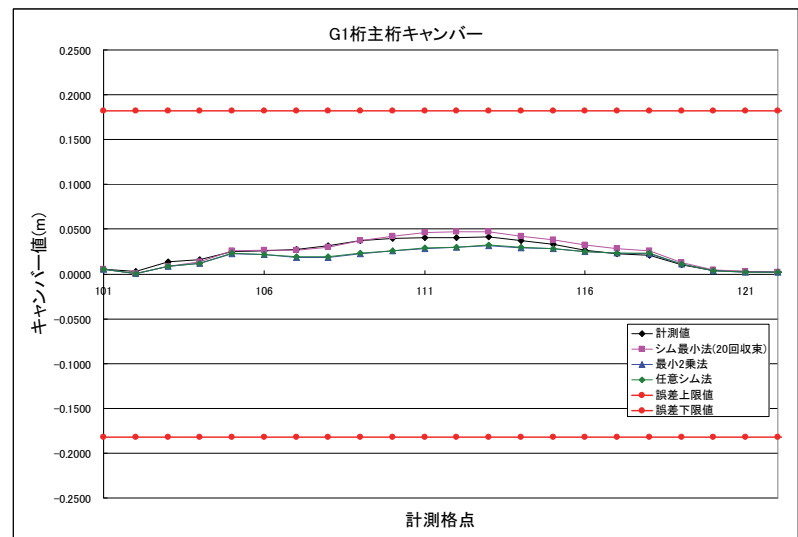


図-10 キャンパー値に対する計測値と各解析結果の比較

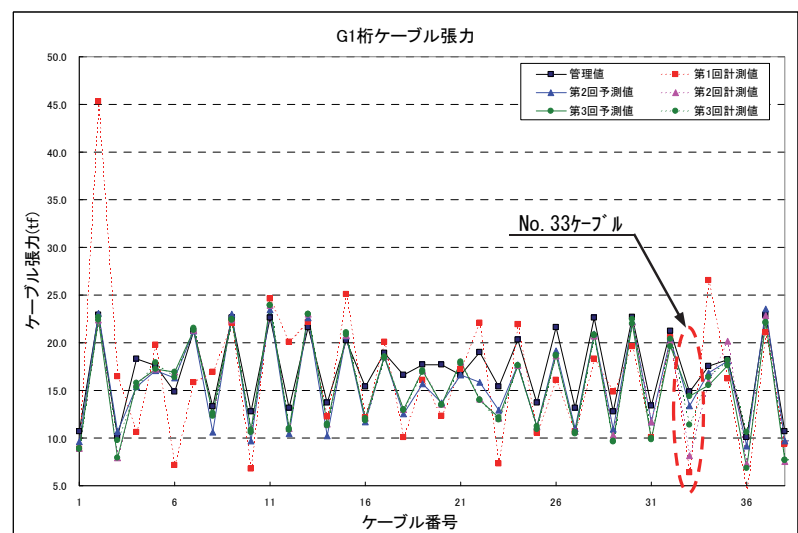


図-11 ケーブル張力に対する計測値と予測値の比較

この収束過程について、収束計算回数とシム調整量の二乗和との関係を図-12示す。この図より、美浦大橋のようなニールセンローゼ橋では20回程度の収束計算回数で、シム調整量は最小となることが確認できる。

図-13に、ケーブル張力誤差に関するシム最小法と最小二乗法の比較を示す。ここで、シム調整量最小法については、収束計算回数1回および7回と収束値の3種類の値を示しており、同時にシム調整前の状態である第1回計測結果も示している。

この図より、シム調整量最小法の収束値は、当初の計測誤差と同様の傾向を明確に残したまま、許容誤差内に調整しており合理的である。1回だけの計算では影響値マトリクスの逆行列をケーブル張力の誤差値に対して乗ずるのみとなるため、ケーブル張力誤差は重み付き最小二乗法によるものより小さく最小となる。しかし、シム調整量の総和は大きなものとなるため合理的ではないと考える。なお、ケーブル張力誤差に関しては、シム調整量最小法の収束計算7回の値は、重み付き最小二乗法による値により近いものとなった。

なお、ここではキャンバー誤差に関する結果の詳細は省略するが、最小二乗法については、当初の計測誤差を小さくする方向に調整がなされているが、シム調整量最小法について総じて誤差が大きくなる結果となった。本来、キャンバー値の誤差がケーブル張力によるものであれば、シム調整最小法においてもキャンバーの誤差は小さくなると考えられるが、今回の場合のキャンバー値の誤差はケーブル張力の誤差に起因したものではないため（製作・架設誤差等による）ため本法ではキャンバー値の調整が適当にできなかったものと判断され、シム調整量最小法の適用にあたっては、キャンバー調整に対して注意する必要がある。

図-14に、シム調整量最小法の収束計算回数に対するシム調整量の比較を示す。この図より、収束計算1回に対して、収束計算7回でもシム調整量は大きく減少していることが確認でき、最終的な収

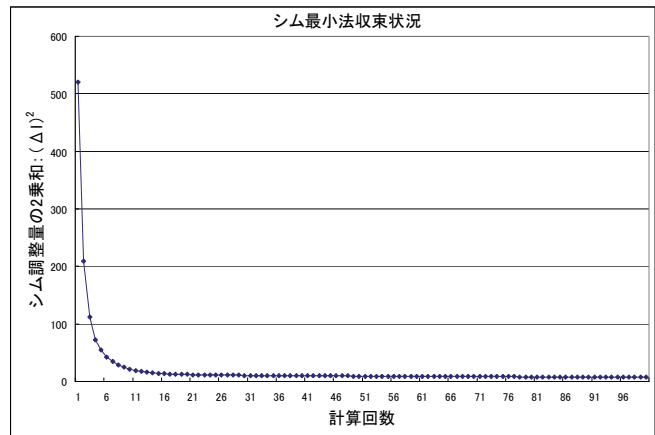


図-12 シム調整量の二乗和と収束計算回数の関係

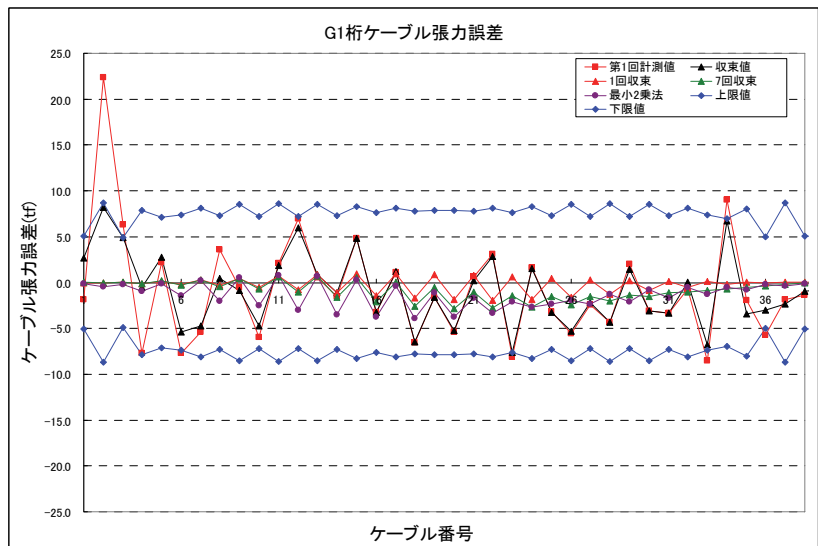


図-13 シム調整量最小法と最小二乗法によるケーブル張力誤差の比較

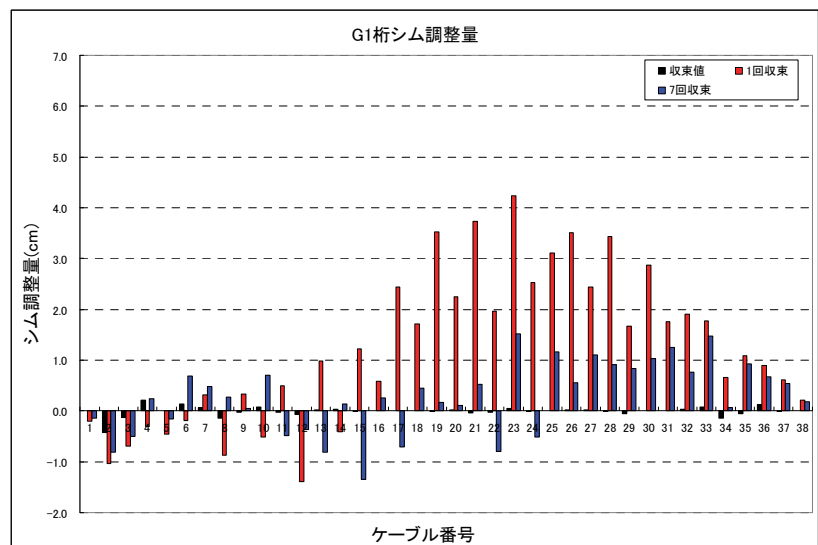


図-14 シム調整量最小法の収束計算回数に対するシム調整量の比較

束状態では特にその傾向が顕著である。

図-15に、シム調整量に対してシム調整量最小法と重み付き最小二乗法との比較を示す。この図より、両手法によりケーブル張力誤差がほぼ同等となる収束計算回数7回の値を用いて両手法を比較すると、シム調整量最小法の方が全体として調整量が小さくなっていることが分かる。さらに、その収束値についてはシム調整量を大幅に低減できることが確認できる。

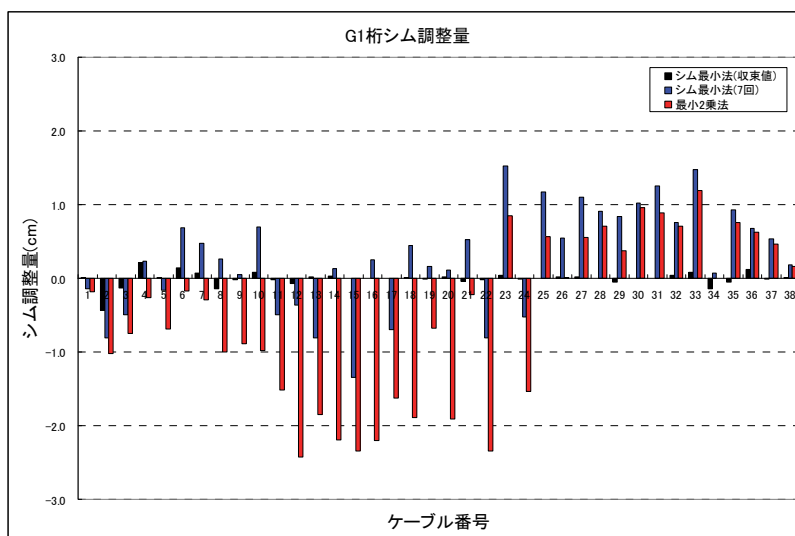


図-15 シム調整量最小法と最小二乗法によるシム調整の比較

5. まとめ

精度管理システムの再構築として、シム調整解析を主な対象としてプログラムの開発を行い、実橋への適用結果から適用性と使用性について問題無いことを確認した。

今回適用したシム調整解析手法は、非常にシンプルなものである。しかし、実際の精度管理においては、現場の作業状況などの理由により使用者の技術的判断が必要となる場合が多く、その点においてシンプルなシステムは柔軟に対応可能と考える。シム調整量最小法と重み付き最小二乗法を対象となる橋梁に適した形で複合的に使用することにより、効率的に品質の高い精度管理を実施することが重要である。

6. あとがき

精度管理システムから計測システムを独立させたことは、システムの維持管理において大幅に労力とコストを削減できると考える。従来のシステム開発時に比べ、現在は計測技術、IT技術などが飛躍的に進歩しており、今後もその時代に適した計測手法を採用することを望む。

一方で、シム調整解析については使用者の技術的判断を基に実施することを基本として、従来のシステムで用いていた手法を踏襲している。設計と現場施工に関するある程度の知識がある技術者であれば、このシステムで十分対応可能と考えられるが、さらなる効率化を求めて最適化を行うことも期待する。

なお、事前解析については、解析手法においては特に改良の余地はあまり考えられないが、モデル化、データ

作成などのケーブル構造の解析に対する知識を整理して共有する必要性を感じており、今後の課題としたい。

最後になりましたが、このシム解析プログラムの開発に際し、技術的な協力を頂いた京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻の大島准教授と当時その研究室の研究生でプログラムの作成をして頂いた金氏に深く感謝し、紙上を借りてお礼を申し上げます。

<参考文献>

- 1) 能登宥愿：斜張橋架設時の精度管理システムの開発、宮地技報No.7pp.10-16,1991.2
- 2) 最新センシング技術の適用性に関する研究部会報告書、鋼橋技術研究会、2014.3
- 3) 頭井，新家，濱崎：振動法によるケーブル張力実用算定式の補正理論、土木学会論文報告集No.525, 1995.10
- 4) 松村，新家，頭井，寺西：斜張橋のケーブル張力計測と張力調整、橋梁と基礎13巻9号，1979.9
- 5) 藤沢：斜張橋架設時のシム量決定方法（上）、橋梁と基礎18巻9号，1984.9
- 6) 小林，佐々木，越中：美浦大橋の架設、宮地技報 No.27 pp.28-33,2014.6

2015.3.8受付