

ケーブル系構造物の張力管理について

TENSION CONTROL FOR CABLE-BASED STRUCTURES

佐藤 悠樹* 中本 啓介*
Yuki Sato Keisuke Nakamoto

ニールセンローゼ橋のようなケーブルを有する橋梁の場合、構造物の応力状態がケーブル張力に敏感に反映されるため、ケーブル張力やアーチ形状を計測し、設計時の応力状態を保証することを目的にケーブル調整を行う。一般に、ケーブル張力の計測には、ケーブルの固有振動数から張力を算定する振動法が利用されている。当社においては、最近の約10年間で4橋のケーブル系橋梁の実績があり、張力管理を行っている。本稿では、近年の施工実績を踏まえ、計測機器および周辺技術の進展による当社保有の張力管理システムの更新状況と、施工実績よりケーブル張力調整、管理時の留意点について示す。

キーワード：振動法、固有振動数、キャリブレーション、ケーブル張力、シム調整

1. はじめに

ニールセンローゼ橋などのケーブル系構造物は、高次の不静定構造物であり、設計時に想定した構造系を実現するためには、設計上のケーブル張力管理、構造形状の出来形管理が重要である。現場施工においては、現場条件からの制約、架設工程を考慮し、出来形形状を含め構造物全体のバランスを考慮しながらシムによる張力調整が行われる¹⁾。そのため、最適なシム調整量を算出し、現場作業を安全にかつ円滑に進めるためには、ケーブル張力を簡易で精度よく計測できる張力管理システムが必要となる。

当社保有の張力管理システム²⁾(CCS: Cable Control System)は、解析ソフトと計測システムから構成される。解析ソフトは、線形解析、有限変位解析、影響値計算、最適シム調整量の算出で構成されている。計測システムは、現場計測に特化した機材と計測ソフトを用いて、ケーブル張力を効率的に算定するシステムで構成されている。張力管理システムは、1990年代から開発・運用されており、定期的なシステム更新を実施している。本稿では、張力計測に関わるPC等の周辺機器(以下、張力計測システム)の更新について紹介し、張力管理の施工手順および実績における適用実績について示す。

2. 張力計測システムの更新

近年の更新では、主に張力計測システムの改良を行っている。PC等の周辺技術の進展にあわせて、装置の小型化および張力算定ツール^{3,4)}などの資産の移行を行っている。現場計測状況における張力計測システムを写真-1に示す。加速度計の出力信号をAD変換し、WindowsPC上の専用ソフトを使用して張力を算定する。主要な機材は、加速度計、AD変換器、およびノートPCで構成されている。図-1に移行した専用ソフ

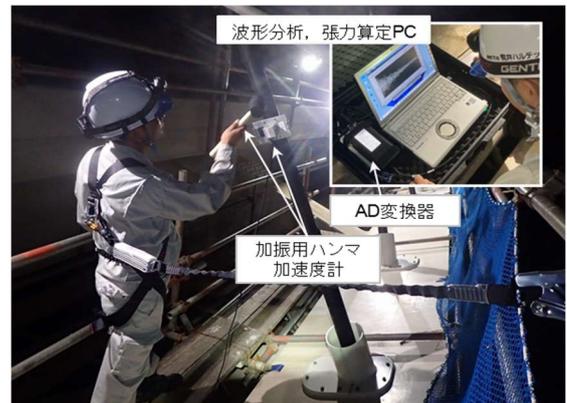


写真-1 現場計測状況と計測システム



図-1 張力計測システム概要図

* 技術開発本部 技術研究部

トの概要を示す。このソフトはメニュー形式で、波形収集から固有振動数の分析、張力算定までを連続して実行できる。さらに、機材は外部電源を必要としないため、持ち運びながらの張力計測が可能であり、作業性を向上させた。

3. 張力管理の施工手順

ケーブル張力管理に着目した場合の標準的な施工手順を図-2に示す。張力管理は大別して、事前解析、現場計測、張力調整の3つに区分される。

以下に、施工実績を踏まえた、それぞれの留意点を図-2のフローに沿って示す。

3.1 事前解析

事前解析では現場条件により、適切な管理値を解析により算定する。ケーブル張力における誤差の許容値は、ケーブルの余裕張力を上限とし、下限は測定法の適用範囲内に設定されるが、一般的な規準はなく^{1,5)}、工事ごとに定められている。

(1)管理値の算出

管理値の算出には立体骨組モデル等を用いて解析を行い、各施工ステップにおけるケーブル張力および構造形状（変位等）などを事前に算出する。このとき、通常的设计計算では考慮されない足場工など、実際の現場状況に即した荷重条件で検討を行う。

また、シム調整が管理値に及ぼす影響（以下、影響値）を把握するため、ケーブル1本ごとに、1mmのシム調整を行った際のケーブル張力とキャンバーの変動を構造解析により求め、影響値マトリックスを作成する。シム調整による影響値の例を図-3に示す。任意のケーブルに対し、シム調整+1mmを行った場合の影響値の分布が確認できる。シム調整量の選定にあたっては、影響値マトリックスにより、隣接ケーブルの張力の変化を予測しながら、全てのケーブルが管理値以内に収まるように選定する。なお、張力調整はキャンバーにも影響するため、構造物全体のバランスを考慮して検討を行う。

さらに、計測精度を向上させるためには、アーチリブや補剛桁などの温度変化による影響値マトリックスを作成し、実測値の補正に反映する。

(2)張力許容誤差の設定

ケーブル張力の許容誤差について、主構の耐荷力とケーブルの許容張力を超えない範囲で設定する。また、許容誤差による安全性については、各部材に発生する追加発生分の張力を考慮し、許容値以下であることを確認する。

3.2 現場計測

(1)ケーブル張力計測

ケーブル張力計測は、ジャッキ法、振動法および高次振動法が挙げられる。各計測方法の特性を把握し、現場状況に合わせて適用する。以下に各計測方法の特徴を示す。

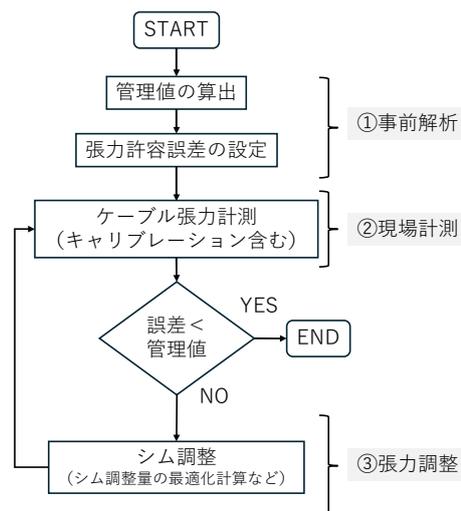


図-2 ケーブル張力管理の施工手順

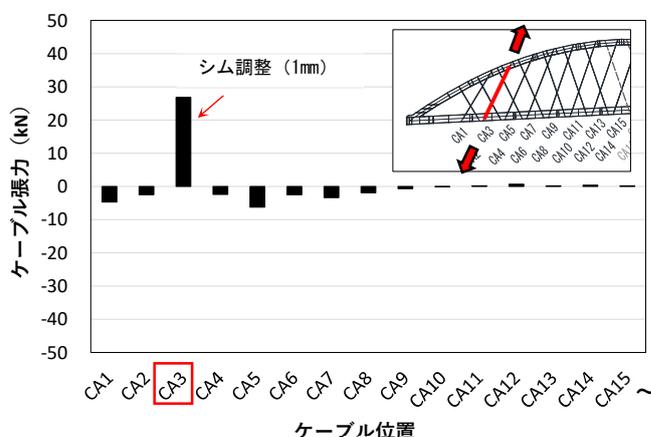


図-3 シム調整による影響値の例

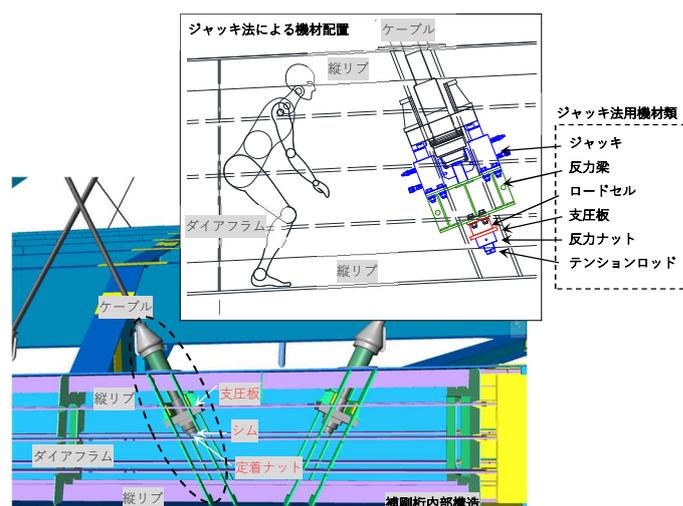


図-4 ジャッキ法における狭隘部での機材配置の例

i) ジャッキ法（直接法）

ジャッキ法はジャッキ反力からケーブル張力を推定するものである。ジャッキ法における機材配置の例を図-4に示す。この方法は、正確に張力を計測できる一方で、図に示すように計測のたびに狭隘部でのジャッキの移動が必要となり、多

くの工数を必要とする。後述するキャリブレーションや桁端付近の高張力となるケーブルに適用する場合がある。

ii) 振動法

振動法はケーブルの固有振動数から弦理論に基づきケーブル張力を算定する^{6,7)}ものであり、写真-1に示したように、ケーブルに加速度計を固定し、プラスチックハンマー等によりケーブルを打撃して加振を行い、FFT で周波数を分析して固有振動数を求める。また、1~2 次の固有振動数に着目しているため、張力算定までの時間が2~3分程度と短く、振動モードもわかりやすいため、取り扱い易い特徴がある。そのため、一般的に広く採用されており、当社保有の張力計測システムにも採用している。

張力算定の基となっている弦理論の境界条件は両端固定を想定しているため、ケーブル同士の干渉等が生じないように計測を行う。

iii) 高次振動法

振動法と同様にケーブルの固有振動数から弦理論に基づきケーブル張力を算定するものである。振動法に比べ、高精度での張力算定が可能とされており、現地でのキャリブレーションが省略できるといった特徴が挙げられる⁸⁾。ただし、固有振動数特定のため、複数の加速度計を適切なケーブル位置に設置する必要がある。加えて、複数の振動数を用いて算定するため、張力算定までの時間に5~15分程度の時間を要する。

(2)キャリブレーション

振動法および高次振動法における算定式の見掛けの曲げ剛性の補正係数を算出するため、キャリブレーションを行う。キャリブレーションは、対象橋梁に使用されているケーブル長および曲げ剛性を考慮し、ケーブルのグルーピングを行い実施する。対象となるケーブルには、加速度計、油圧ジャッキを取り付け、ケーブルの固有振動数とジャッキ反力(=ケーブル張力)を計測する。あわせて、ジャッキ加圧時の変位量(=ケーブルの伸び)を計測する。

キャリブレーションによる、ケーブル張力とケーブルの伸び関係を図-5に、あわせて、同時に計測したケーブル張力と振動数の関係を図-6に示す。ここで示す理論値の算定では、図-5の青点線上に位置する張力と近似するように、見掛けの曲げ剛性の補正係数を設定し、算出している。換言すれば、青点線上に位置する張力範囲が振動法の適用範囲となる。各図には、施工ステップに応じた設計張力レベルを破線で示している。張力レベルが小さい鋼桁架設時等では、振動法の適用範囲外となる。

張力算定式の適用範囲は、ケーブルの長さ、曲げ剛性、サグなどの条件によって異なる⁶⁾が、実績では完成時の設計張力の20~30%以下となるレベルでは、適用外となることがあ

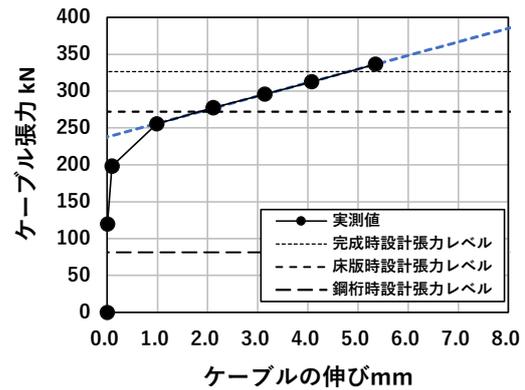


図-5 ケーブル張力と伸びの関係

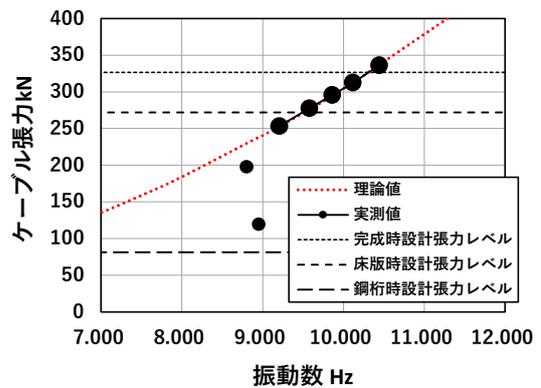


図-6 ケーブル張力と振動数の関係

る。ここで図示した結果では、鋼桁架設時の設計レベルでは、振動法は、適用外となることが確認できる。

3.3 張力調整

張力調整では、現場計測により算定された張力が、事前解析で設定した管理値以内となるように、適宜張力の導入・解放を行う。その際、キャンパー計測とあわせながら構造物全体の出来形を調整する。

シム調整では、前述のシムの影響値マトリックスを使用し、張力の変化を予測しながら適切なシム調整量を選定する。最小二乗法や GA などを適用することで、シム調整量を決定する。詳細については文献3)を参照されたい。条件にもよるが、GA などでは完全な収束解を得ることが難しく、最終的には人的判断が必要となるのが実状である。また、近年の AI 技術の進展もあり、今後の取組みの一つとして期待される。

以上、図-2のケーブル張力管理の施工手順について留意点を示した。なお、ケーブル系構造物における昨今の基準は、日本道路協会より、令和3年に発刊された文献1)の便覧に整備されている。この便覧には、本稿では示されていないニールセンローゼ橋に関する架設方法やケーブル施工、施工管理に関する具体的な手順や留意点が示されている。

4. 最近の施工実績

最近の当社で実施したケーブルを有する橋梁の施工事例と

して、西普天間橋梁⁹⁾の例を紹介する。橋梁形式はニールセンローゼ橋であり、ケーブル張力調整には、振動法を適用した。橋梁諸元については、本技報の工事紹介（橋梁）を参照されたい。

4.1 振動法を適用したケーブル張力調整

西普天間橋梁は歩道を有した広幅員（18m）の橋梁であり、景観等を考慮して、ケーブル本数は全 60 本が採用されている。ケーブル張力の管理値は、構造特性を踏まえた事前検討により設定した。

一般的にケーブルの張力調整は鋼桁架設完了時に行われるが²⁾、本橋梁は広幅員の RC 床版を有するため、鋼桁架設完了時の死荷重割合が完成系に比べて小さく、過半数のケーブルで振動法が適用外となっていた。このため、鋼桁架設完了時には、計測可能なケーブルのみ張力調整を実施し、振動法が適用外となるケーブルについては、よれの有無や定着部シム板の設置状況、桁の出来形管理に留め、最終的な張力調整は床版打込み完了後に行う方針とした。

床版打込み完了時の張力調整に際しては、床版および桁の応力照査を行い、余裕を考慮して管理値を設計張力の±30%に設定した。作業としては、3 回の張力調整と確認計測を含む 4 回の張力計測を実施した。張力計測は夜間に行い、ケーブル 1 本あたり 3 分程度のペースで計測を行った。張力調整は昼間の作業時間を考慮し、1 日当たり 10 本を上限とした。なお、張力調整はシム板を用いて実施し、影響値マトリックスにより、調整時の隣接ケーブルへの影響を予測しながら調整を行った。

ケーブル張力の計測結果を図-7 に示す。グラフは設計値と実測値の誤差を示している。すべての張力を管理値内に収めることができ、平均して 10%程度の誤差に収まった。また、出来形管理についても良好な値を得ることができた。

4.2 その他の実績

通常の張力管理とは異なる事例として、歩道橋の並木橋の施工実績がある¹⁰⁾。この橋梁は、2 径間連続鋼床版斜張橋であり、通常の張力管理および出来形管理に加え、下部構造の条件により支点反力の精度管理が求められた。そこで、反力管理には桁支点部にロードセルを設置して高精度な監視を行った。張力計測については、施工条件により現地でのキャリブレーション作業を必要としない高次振動法を採用した。張力管理は、支点反力および出来形形状をリアルタイムでモニタリングしながら実施された。工事詳細については文献¹⁰⁾を参照されたい。

5. おわりに

当社が保有する張力管理システムの更新と、実施工を踏まえた張力管理の施工手順、ならびに実橋への適用実績を紹介

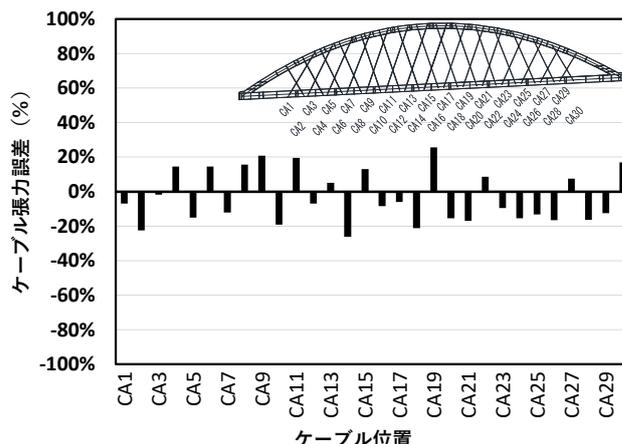


図-7 ケーブル張力計測結果

した。

事前解析や張力算定方法は、ほぼ確立された技術であり、今後改良の余地は少ないが、適切に張力管理を行うためには、現地計測のノウハウの技術継承を行うとともに、周辺技術の進歩にあわせて、定期的な計測システムの改良が必要となってくる。本稿がケーブル系橋梁を施工する際の一助となることを期待する。

参考文献

- 1) (公社) 日本道路協会：道路橋ケーブル構造便覧，pp.347-362，2021
- 2) 有村英樹，玉田和也，細見雅生：Cabel Control System の紹介（その 1），駒井技報，Vol.13，pp.53-61，1994
- 3) 有村英樹，高瀬和男：遺伝的アルゴリズム法を用いたケーブル張力調整システムの開発，駒井技報，Vol.18，pp.30-42，1999
- 4) 林裕也，中本啓介：鋼単純ニールセンローゼ橋を対象としたケーブル調整システムの比較，駒井ハルテック技報，Vol.2，pp.48-53，2012
- 5) (社) 土木学会：鋼斜張橋—技術とその変遷— [2010 年版]，pp.117-126，2011
- 6) 新家ら：振動法によるケーブル張力実用算定式について，土木学会論文報告集，第 294 号，pp.25-32，1980
- 7) 頭井ら：振動法によるケーブル張力実用算定式の補正，土木学会論文集，No.525/I-33，pp.351-354，1995
- 8) 山極ら：高次の固有振動数を利用した線材の張力と曲げ剛性の同定法，日本機械学会論文集（C 編），66 巻 649 号，pp.7-13，2000
- 9) 渋谷大輔，今大介，山野修：西普天間橋梁上部工工事，駒井ハルテック技報，Vol.14，pp.57-62，2025
- 10) 水田礼治，本條順一，山内隆：並木橋架設工事，駒井ハルテック技報，Vol.13，pp.49-50，2024