

## 第 I 部門

## ニールセンローゼ橋における張力推定手法の改良

京都大学工学部地球工学科 学生員 ○高鶴 憲正  
 京都大学大学院工学研究科 正会員 古川 愛子  
 神鋼鋼線工業（株） 非会員 鈴木 実

## 1. 研究の背景と目的

ニールセンローゼ橋はケーブル構造物の一つであり、2本または2本以上のケーブルが交点クランプで連結されている。施工及び維持管理する上でケーブルの張力が設定張力を満足しているか確認する必要がある。現在は交点クランプを取り外し、高次振動法<sup>1)</sup>等を各ケーブルに適用することで張力を推定している。しかし、交点クランプの取り外し・取り付けに多くの労力や時間がかかる。そこで山田らは交点クランプを取り付けたまま張力を推定する手法<sup>2)</sup>を提案したが、ケーブルの両端を単純支持と仮定しているため、固定端であると考えられる模型実験では精度良く張力を推定することができなかった。そこでケーブルの両端が回転ばねであるとして定式化し、山田らの手法よりも推定精度を向上させることを本研究の目的とする。

## 2. 張力推定手法の提案

まず単一ケーブルの張力推定手法である高次振動法について説明する。加速度センサを設置したケーブルを加振し、得られた加速度波形をフーリエ変換することで固有振動数 $f_i$ を求めることができる。ケーブルの密度 $\rho$ 、断面積 $A$ 、長さ $L$ とモード次数 $i$ の固有振動数 $f_i$ を式(1)に代入すると、未知数である張力 $T$ と曲げ剛性 $EI$ に関する式が次数の数だけ立式でき、それらに最小二乗法を適用して張力を推定することができる。

$$f_i^2 = \frac{\pi^2 EI}{4\rho AL^4} i^4 + \frac{T}{4\rho AL^2} i^2 \quad (1)$$

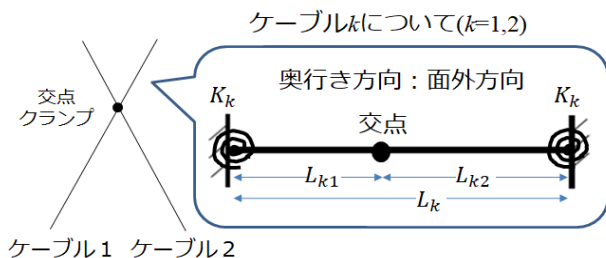


図1 モデル図

本研究では図1に示すような、交点クランプを有し両端が回転ばねである2ケーブルモデルを対象とした新たな張力推定式を考える。ケーブルを張力のかかったはりとし、面外方向たわみの振動方程式は式(2)で表せる。2ケーブルが交点クランプにより1点で結合された状態、かつ両端回転ばねの境界条件のもと式(2)を解くと式(3)が得られる。式(3)は山田らの手法に回転ばねを考慮したものであり、交点変位で除して正規化したため交点変位が0となる場合に成立しないことが判明した。そこで交点変位が0となる場合を考慮するため交点変位に相当する項を式(3)にかけると式(4)が得られる。

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} - T \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{E_1 I_1}{E_2 I_2} \cdot fun1^i + fun2^i = 0 \quad (3)$$

$$\left( \frac{E_1 I_1}{E_2 I_2} \cdot fun1^i + fun2^i \right) \cdot fun3^i \cdot fun4^i = 0 \quad (4)$$

ここに、 $funN^i (N=1,2,3,4)$ は $i$ 次固有振動数と各ケーブルの張力、曲げ剛性( $E_1 I_1, E_2 I_2$ )、回転剛性、密度、断面積、長さを含む関数であり、下付き文字はケーブル番号を示す。密度、断面積、長さ、面外方向の固有振動数を式(4)に代入した時に左辺が0になるという制約条件を用いて2本のケーブルの張力 $T_1, T_2$ を推定する。副次的に、2本のケーブルの曲げ剛性と回転剛性も推定される。式(4)は高次振動法の式(1)と異なり、固有振動数の次数を特定する必要がないという利点がある。

## 3. 模型実験による検証

提案式の妥当性を検証するために、山田らの模型実験結果を用いて張力の推定を行った。実験装置の概要は図2に、推定に用いたケーブル諸元を表1に示す。推定には9個の固有振動数を用いた。推定結果を表2に示す。ロードセルで測定した張力を真値とした。上段が本研究で提案した両端回転ばね式(4)を用いた推定結果、下段が山田らの両端単純支持式を用いた推定結果である。

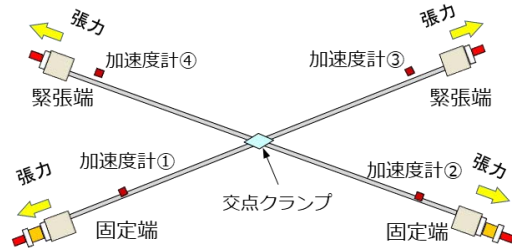


図2 実験装置の概要

表1 ケーブルの構造諸元

| ケーブル<br>$k$ | 密度<br>$\rho_k$<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | 断面積<br>$A_k$<br>[m <sup>2</sup> ] | 長さ<br>$L_k$<br>[m] | 左側支点から<br>クランプまでの<br>長さ $L_{kl}$ [m] |
|-------------|----------------------------------------|-----------------------------------|--------------------|--------------------------------------|
| 1           | 8401.578                               | 0.000532                          | 7.835              | 3.995                                |
| 2           | 8401.578                               | 0.000532                          | 7.836              | 3.951                                |

表2 張力推定結果

| 用いた式       | 真値         |            | 張力<br>(推定値/真値)         |                        |
|------------|------------|------------|------------------------|------------------------|
|            | $T_1$ [kN] | $T_2$ [kN] | $T_1$ [kN]<br>(推定値/真値) | $T_2$ [kN]<br>(推定値/真値) |
| 両端<br>回転ばね | 103.6      | 150.4      | 100.0<br>(0.965)       | 154.4<br>(1.027)       |
| 両端<br>単純支持 |            |            | 142.5<br>(1.376)       | 142.0<br>(0.944)       |

提案手法は山田らの手法と比べて張力の推定精度が高く、ケーブル 1, 2 共に誤差 5%以内の精度で推定できている。これは、提案手法がケーブル両端の境界条件と交点での変位が 0 となるモードを考慮できているからであると考えられる。

#### 4. 実橋実験による検証

提案式の妥当性を検証するために実橋実験を行った。2本のケーブルが交差する4ケースに対して実験を行った。推定に用いたケーブルの密度と断面積を表3に、ケーブル長と張力を表4に示す。交点クランプを取り外し、回転剛性を考慮した高次振動法により推定した張力を真値と見なした。ここでは、得られた12次までの固有振動数のうち主要な1次モードを含む6個(1次モードと、2~12次モードから5つ)を用いて全ての組合せで推定した( ${}_{11}C_5 = 462$ 通り)。推定に用いる固有振動数の数を増やすほど計測ノイズなどの影響が大きくなり推定精度が下がることが確認できたため、ここでは固有振動数を6個用いた。例としてケースNo.1の張力の推定結果を図3に示す。ほとんどの固有振動数の組合せで誤差20%以内の精度で推定されているが、一部の組合せでは精度が悪くなっている。他のケースでも同様の傾向が見られた。そこで、大きく外れた値を除くために上下5%のデータを除去して残りの90%のデータを平均したものを図4に示す。全てのケースについて誤差10%以内の精度で張力を推定できていることが分かる。

表3 ケーブルの密度と断面積(すべてのケーブルで共通)

| 密度 $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ] | 断面積 $A$ [m <sup>2</sup> ] |
|--------------------------------|---------------------------|
| 9374                           | 0.0018755                 |

表4 ケーブル長さと張力の真値(No.4の $T_2$ は未計測)

| ケース No. | $L_1$ [m] | $L_{11}$ [m] | $L_2$ [m] | $L_{21}$ [m] | $T_1$ [kN] | $T_2$ [kN] |
|---------|-----------|--------------|-----------|--------------|------------|------------|
| 1       | 14.550    | 11.163       | 13.579    | 11.163       | 448.76     | 489.67     |
| 2       | 18.297    | 11.163       | 16.775    | 11.163       | 377.95     | 383.73     |
| 3       | 21.120    | 11.163       | 20.658    | 11.163       | 398.33     | 391.45     |
| 4       | 20.658    | 11.163       | 21.120    | 11.163       | 421.03     |            |

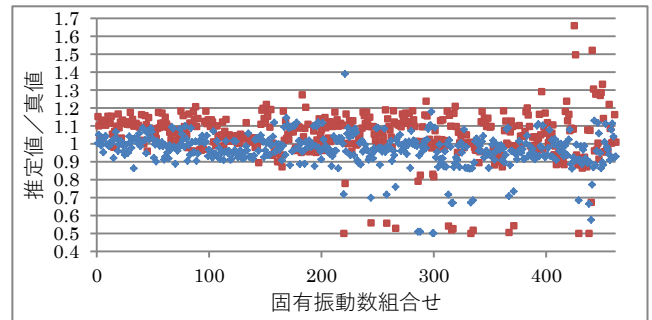


図3 張力推定結果(ケースNo.1)

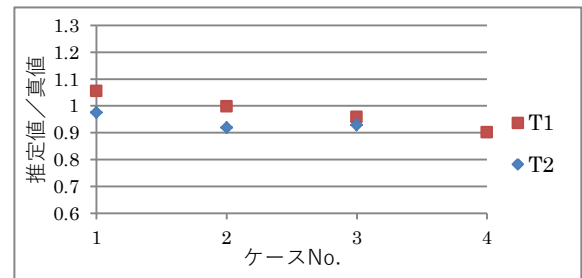


図4 張力推定結果(平均)

#### 5. 結論

ニールセンローゼ橋のように交点クランプが設置されている2本のケーブルの張力推定手法を改良した。改良点は、ケーブル両端を回転ばねであるとしたことと、交点での変位が0となるモードを考慮したことである。模型実験では、山田らの手法よりも高い精度で張力を推定できた。実橋実験では、全てのケースで誤差10%以内の精度で張力を推定することができた。

#### 参考文献

- 山極伊知郎, 宇津野秀夫, 遠藤浩司, 杉井謙一: 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, 2000年9月
- 山田哲, 古川愛子, 小林亮介: 固有振動数を利用した交点クランプを有するケーブルの張力推定手法の開発, 第75回土木学会年次学術講演会, CS10-40, 2020年9月