

ニールセンローゼ橋における3本のケーブルの張力同時推定手法

京都大学大学院工学研究科 正会員 ○古川 愛子
 京都大学大学院工学研究科 非会員 高鶴 憲正
 神鋼鋼線工業(株) 正会員 武市 知大

1. 研究の背景と目的

ニールセンローゼ橋はアーチ橋の一種であり、複数のケーブルが交点クランプによって連結されているという特徴を有する。ケーブルは橋梁のたわみや振動を抑える重要な働きをしており、施工・維持管理する上でケーブル張力が設定張力を満足しているか確認する必要がある。現在は一度交点クランプを取り外し、各ケーブルに単一ケーブルの張力推定手法である高次振動法¹⁾を適用している。しかし、交点クランプの取り外し・再取り付けには多大な労力と時間がかかる。そこで既往研究²⁾では、1個の交点クランプで連結された2本のケーブルの張力推定する手法を提案した。

日本では交点クランプが2段のニールセンローゼ橋が最も多く、高次振動法や2ケーブルの張力同時推定手法では取り外す交点クランプ数や加振回数が多くなってしまう。そこで本研究では、2個の交点クランプで連結された3本のケーブルの張力を同時に推定する手法を提案し、張力推定をさらに効率化させることを目的とする。

2. 本研究で提案する張力推定手法

図1に示すような2個の交点クランプで連結された3ケーブルの張力推定式を導出する。3本のケーブルにはそれぞれケーブル番号 $k(k=1, 2, 3)$ を付ける。

ケーブルを張力のかかったはりと見なすと、面外方向の振動方程式は式(1)で表せる。

$$E_k I_k \frac{\partial^4 w_{kd}}{\partial x_{kd}^4} + \rho_k A_k \frac{\partial^2 w_{kd}}{\partial t^2} - T_k \frac{\partial^2 w_{kd}}{\partial x_{kd}^2} = 0 \quad (1)$$

ここで、 T_k はケーブル張力、 $E_k I_k$ は曲げ剛性、 ρ_k は密度、 A_k は断面積である。また、 $d(d=1, 2, 3)$ はケーブル区間を示すインデックスであり、 w_{kd} はケーブル k の区間 d における面外方向変位である。式(1)の一般解に両端固定端の境界条件と交点クランプ位置での条件を適用し整理すると、 i 次の固有振動数 f_i が満たすべき制約式が式(2)のように得られる。

$$1 - \frac{fun1^i}{fun2^i} = 0 \quad (2)$$

$fun1^i$ と $fun2^i$ はどちらもケーブル1, 2, 3のパラメータで構成される式である。 $fun1^i$ を $fun2^i$ で割ることで正規化している。これらは非常に長い式であるため、具体的な式の記載は省略する。

式(2)において、未知数はケーブル1, 2, 3の張力と曲げ剛性の合計6個である。3本のケーブルの密度、断面積、長さ、面外方向の固有振動数 f_i を代入し、残差二乗和平方根を目的関数とする最小化問題を解くことで、3ケーブルの張力と曲げ剛性を同定することができる。本研究では局所解を避けるためにMultiStart法を用いた。

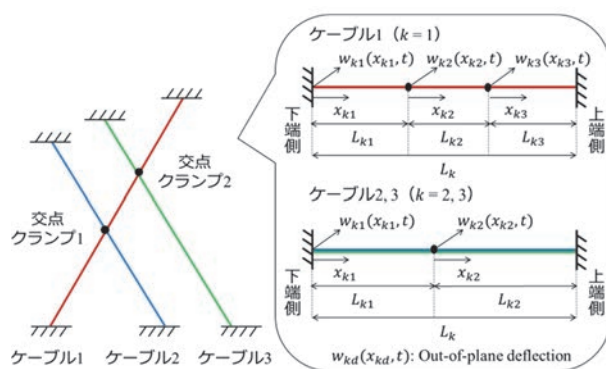


図1 対象3ケーブルモデル

3. 数値実験による妥当性検証

提案手法の妥当性検証のため数値実験を行った。数値実験では、有限要素法の固有値解析により計算した面外方向の固有振動数を式(2)に代入して張力を推定する。幅広い3ケーブルモデルを網羅できるように、6つの実橋から複数の3ケーブルをモデル化し、張力や曲げ剛性を様々に変えた全40モデルで検証を行った。

1次から9次まで9個の固有振動数を用いた時の張力推定結果を図2に示す。ほとんどのモデルで誤差1%以内の精度で張力を推定できているが、一部のモデルでは推定誤差が1%を超えている。一部のモデルで推定誤差が大きくなるのは、これらのモデルに式(2)を満たさないモードが存在しているからである。モード形状の分析により、交点クランプ位置での変位が0のモードで式(2)の $fun2^i$ が0となり、制約式を満足しないことが判明した。このような固有振動数を除去するため、1次から12次までの固有振動数のうち、主要な1次モードを含む、制約式の絶対値を小さくする9個を用いることとした。この方法による張力推定結果を図3に示す。全てのモデルで誤差0.3%以内の精度で張力を推定することができた。

キーワード ニールセンローゼ橋, ケーブル張力推定, 交点クランプ, 固有振動数
 連絡先 〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂 TEL 075-383-3250

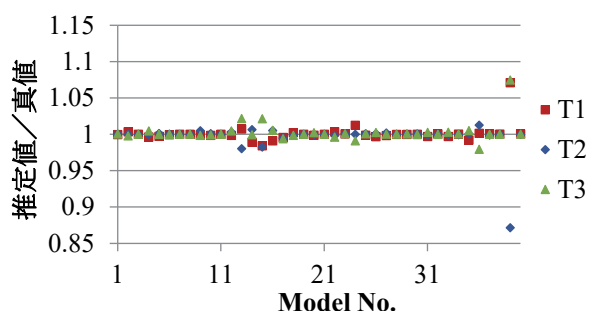


図2 張力推定結果 (1~9 次使用)

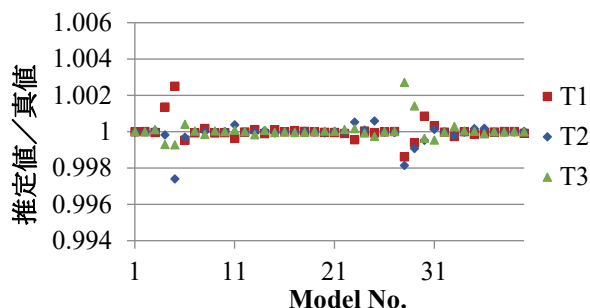


図3 張力推定結果 (1~12 次から 9 個選択)

4. 実橋実験による妥当性検証

橋梁 A を対象に実橋での検証を行った。橋長は 180.6 m であり、図 4 に示す 4 ケースを対象として張力推定を行った。それぞれのケースにおけるケーブル長を表 1 に、張力と曲げ剛性の真値を表 2 に示す。交点クランプが設置されていない単一ケーブルに高次振動法を適用し、推定値を張力と曲げ剛性の真値とした。

加振ケーブルや加速度計設置位置によって、固有振動数の計測漏れが生じ得る。本実験では、加振ケーブルと加速度計設置位置を変えて、図 5 に示す全 4 通りの計測パターンを検証した。計測パターン 1 では全てのケーブルを加振し、加振ケーブルの加速度記録を用いる。計測パターン 2 では、ケーブル 1 を加振時の加速度計 1, 2, 3, 4 の記録を用いる。計測パターン 3 ではケーブル 1 を加振時の加速度計 1, 2, 計測パターン 4 ではケーブル 2 を加振時の加速度計 3 の記録を用いる。計測パターン 1 から 4 にいくほど張力推定にかかる労力は減るが、固有振動数の計測漏れが多くなる。

数値実験と同様、小さい方から 12 個の固有振動数のうち、最小固有振動数を含む、制約式の絶対値を小さくする 9 個を用いて推定を行った。代表して計測パターン 3 の張力推定結果を図 6 に示す。全てのケースで誤差 5% 以内の精度で張力を推定することができた。計測パターン 1, 2 と同程度の精度であり、ケーブル 1 の加速度記録のみでも十分な精度で張力を推定できることが分かった。一方で計測パターン 4 では推定誤差は 10% 前後であった。

5. 結論

2 個の交点クランプで連結されている 3 本のケーブルの張力を同時に推定する手法を提案した。12 個の固有振動数のうち、最小固有振動数を含む、制約式の絶

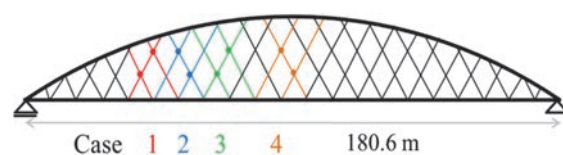


図4 橋梁 A の模式図と検討ケース

表1 ケーブル長

Case No.	L_1 [m]	L_2 [m]	L_3 [m]	L_{11}, L_{21} [m]	L_{31} [m]	L_{12} [m]
1	22.249	17.205	19.902	8.195	16.795	8.6
2	22.174	26.132	24.021	8.195	16.795	8.6
3	27.397	24.199	25.951	8.195	16.795	8.6
4	28.066	28.066	28.259	8.195	16.795	8.6

表2 張力と曲げ剛性の真値

Case No.	T_1 [kN]	T_2 [kN]	T_3 [kN]	EI_1 [kN·m ²]	EI_2 [kN·m ²]	EI_3 [kN·m ²]
1	189.49	169.27	161.51	20.23	19.17	23.27
2	172.38	194.36	201.30	22.24	20.20	20.20
3	215.24	149.30	171.44	22.95	22.38	21.56
4	162.71	162.33	231.56	21.14	22.13	21.74

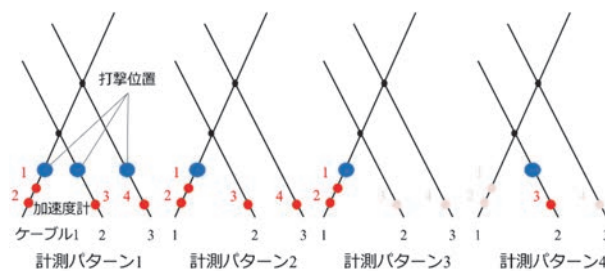


図5 固有振動数の計測パターン

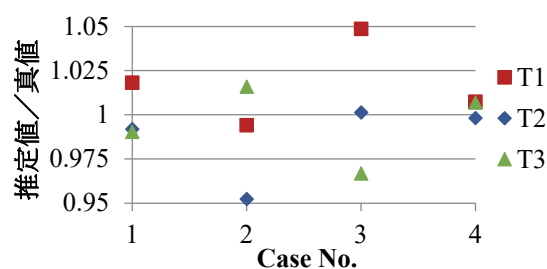


図6 張力推定結果 (計測パターン3)

対値を小さくする 9 個を用いることで張力推定精度が向上した。数値実験では全てのモデルで誤差 0.3% 以内、実橋実験では全てのケースで誤差 5% 以内の精度で張力を推定することができ、提案手法の妥当性が示された。

参考文献

- 1) 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, pp.2905-2911, 2000 年 9 月。
- 2) 高鶴憲正, 古川愛子, 鈴木実: 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改良, 第 76 回土木学会年次学術講演会, I-34, 2021 年 9 月。