

# 制振機構を有するケーブルにおける張力等の算定に関する共同研究

古川愛子\*1

## 1. 研究の目的

斜張橋等のケーブル系橋梁では、施工及び維持管理上、ケーブルの張力を把握する必要がある。現行の実務では、ケーブルの固有振動数から張力を推定する高次振動法<sup>1)</sup>が用いられている。しかし近年、ケーブルの振動を低減するためにダンパー（制振装置）が取り付けられるようになり、ダンパーがケーブルの固有振動数を変化させるため高次振動法では正確に張力を推定できないと考えられる。これを受けて、主桁側の1か所にダンパーを有するケーブルの張力推定手法を開発してきた<sup>2)</sup>。本研究では新たに、主桁側と主塔側の2か所にダンパーを有するケーブルの張力推定手法の提案する。

## 2. 研究の方法

ケーブルを張力のかかった梁とみなすと、時間 $t$ における位置 $x$ の面外方向たわみ $y(x, t)$ は式(1)の偏微分方程式に従う。

$$\rho A \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial t^2} + EI \frac{\partial^4 y(x, t)}{\partial x^4} - T \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial x^2} = 0 \quad (1)$$

ここで、 $\rho A$ 、 $EI$ 、 $T$ はそれぞれ、ケーブルの単位長さ当たりの質量、曲げ剛性、張力である。

たわみを  $y(x, t) = Y(x)\exp(i\omega t)$  のように変数分離形で表し、式(1)に代入して得られるモード関数 $Y(x)$ の常微分方程式を解くと、 $Y(x)$ の一般解は以下のように表される。

$$Y(x) = C_1 \cos \alpha x + C_2 \sin \alpha x + C_3 \cosh \beta x + C_4 \sinh \beta x \quad (2)$$

本研究では、ダンパーを2つ有するケーブルを図1のようにモデル化する。式(2)を両端固定の境界条件と、各ダンパー位置での連続条件のもと解くと、 $i$ 次モードの固有振動数 $f_i$ の実数部 $Re(f_i)$ 、張力 $T$ 、曲げ剛性 $EI$ 、ダンパーの複素剛性 $k_1^*$ 、 $k_2^*$ 、 $i$ 次モードの固有振動数の実数部に対する虚数部の比（虚実比） $H_i = Im(f_i)/Re(f_i)$  が満たすべき制約式  $F_i(Re(f_i), T, EI, k_1^*, k_2^*, H_i) = 0$  が固有振動数 $i$ の数だけ得られる。 $\rho A$ は既知とする。ここで、ダンパーの複素剛性は複素数であるため、固有振動数 $f_i$ は複素数となる。ケーブルの自由振動波形のフーリエ変換によって推定される固有振動数が実数部  $Re(f_i)$  に相当し、虚実比  $H_i$  は減衰項に相当する。なお、関数  $F_i$  も複素数となる。

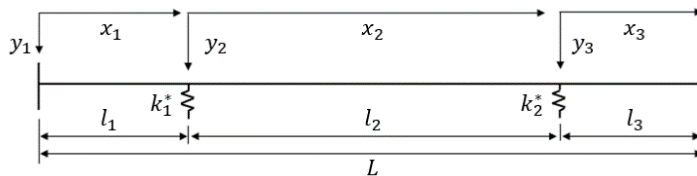


図1 モデル図

\*京都大学大学院・工学研究科・准教授

本研究では、 $F_i$ の実数部と虚数部それぞれの二乗和を最小とする式(3)で表される最適化問題を解くことにより、 $i$ 次モードの固有振動数の実数部 $Re(f_i)$ から  $T, EI, k_1^*, k_2^*, H_i$ を推定する。

$$\min \sum_{i=1}^n Re\{F_i(f_i, T, EI, k_1^*, k_2^*, H_i)\}^2 + Im\{F_i(f_i, T, EI, k_1^*, k_2^*, H_i)\}^2 \quad (3)$$

ここで、 $n$ は推定に用いる固有振動数の数である。減衰項を精度よく推定することが困難であるため、本研究では虚実比  $H_i$ を未知数として扱う。

### 3. 得られた成果

提案手法の妥当性を検証するため、数値実験と模型実験を行った。

数値実験では、実橋データを元に、高減衰ゴムダンパーが主桁側と主塔側に計2個設置されたケーブルモデル10通りを用いた。有限要素法で求めた固有振動数を式(3)に入力して、張力とその他のパラメータの推定を行った。張力については推定誤差2%以内の非常に良い精度で推定することができた。

模型実験では、直径15.2mm、長さ6731mmのPC鋼より線をケーブルに用いた。ダンパーの数は0個、1個、2個の3通り、張力は20kN、30kN、60kNの3通りとし、設置位置を様々変えて計29通りの実験を行った。本実験で用いたダンパーの複素剛性は、実数部が定数、虚数部が定数と振動数の二乗に比例する項の和で表されるタイプのダンパーである。ケーブルをハンマーで打撃したときのケーブルの振動（加速度波形）を計測し、加速度波形をフーリエ変換することによって固有振動数を推定した。低いものから9個の固有振動数を式(3)に入力して、張力とその他のパラメータの推定を行った。ロードセルで計測した張力を真値と見なし、張力推定値と比較したところ、推定誤差10%以内の良い精度で張力を推定できていることを確認した。

### 4. 謝辞

本研究は、神鋼鋼線工業株式会社との共同研究として執り行われたものです。研究遂行にあたり、実験を担当した神鋼鋼線工業株式会社の関係者各位と、数値解析を担当した京都大学学生の合田賢輝君に心より感謝申し上げます。

### 発表論文

- 1) 合田賢輝, 古川愛子, 鈴木実: 主桁側と主塔側にダンパーを有するケーブルの張力推定手法の開発, 2022年度土木学会関西支部年次学術講演会, 口頭I-22, 2022年5月.
- 2) 合田賢輝, 古川愛子, 鈴木実: ダンパーを二つ有するケーブルの張力推定手法の開発, 第77回土木学会年次学術講演会, 2022年9月.

### 参考文献

- 1) 山極伊知郎, 他: 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) 古川愛子, 廣瀬克也, 鈴木実: 固有振動数を利用したダンパー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-135, 2021年9月.