

京都大学工学部地球工学科 学生員 ○廣瀬 克也
 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 小林 亮介

1. 研究の背景と目的 ケーブル構造は斜張橋や吊り橋等の巨大な構造物に採用されていることが多く、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。現在はケーブルの固有振動数を利用する高次振動法と呼ばれる方法¹⁾で張力を推定している。しかし近年橋梁にはケーブルの振動を低減するためにダンパーと呼ばれる制振装置が設置されており振動特性が変化する影響で高次振動法では正確な張力を推定できていないと考えられる。そこで本研究ではダンパーが設置された場合も考慮したケーブルの張力推定手法の提案を目指している。

2. 張力推定手法の提案 高次振動法では以下のようにして張力推定が行われている。まず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し固有振動数を求め張力推定式(1)に代入すると未知数 T , EI の式が次数の数だけ立式できるので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。ここで i :モード次数, f_i :モード次数 i の固有振動数, L :ケーブル長, T :張力, EI :曲

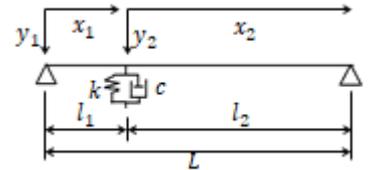


図1 モデル図

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

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

$$f_i^2 = \frac{\pi^2 EI}{4\rho AL^4} \left(i + \frac{\phi_i}{\pi}\right)^4 + \frac{T}{4\rho AL^2} \left(i + \frac{\phi_i}{\pi}\right)^2 \quad (3)$$

げ剛性, A :断面積, ρ :密度である。しかしこの場合ダンパーの影響を考慮していない。そこで本研究では図1のようなダンパー（ばね定数 k , 減衰係数 c , 取り付け位置 l_1 ）を有する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みなすと振動方程式は式(2)で表せ、ダンパーを有し且つ両

端単純支持の境界条件のもと解くと式(3)が得られる。ただし ϕ_i は式(4)を、 α_i , β_i は式(5)を満足する値である。なお、 k^* はダンパーの種類によって変わる。本研究では粘性せん断ダンパー

$$\tan\phi_i = \frac{\frac{k^*}{EI} \beta_i \sin^2 \alpha_i l_1}{\alpha_i \beta_i^3 + \alpha_i^3 \beta_i - \frac{k^*}{EI} \frac{\alpha_i (1 + e^{-2\beta_i L} - e^{-2\beta_i l_1} - e^{-2\beta_i l_2})}{2(1 - e^{-2\beta_i L})} + \frac{k^*}{EI} \beta_i \sin \alpha_i l_1 \cos \alpha_i l_1} \quad (4)$$

$$\alpha_i = \sqrt{\left(\frac{T}{2EI}\right)^2 + \frac{\rho A (2\pi f_i)^2}{EI} - \frac{T}{2EI}} \quad \beta_i = \sqrt{\left(\frac{T}{2EI}\right)^2 + \frac{\rho A (2\pi f_i)^2}{EI} + \frac{T}{2EI}} \quad (5)$$

と高減衰ゴムダンパーを想定し、前者は $k^* = k + j2\pi f_i c$, 後者は複素剛性ばね $k^* = ku + jkv$ でモデル化する。 j は虚数単位である。以降式(3)~(5)を提案式と呼ぶ。提案式において f_i は複素数であるため、計測で得られる固有振動数が f_i の実部に相当するとして張力を推定する。

表1 ケーブルのパラメータ

ケーブルNo.	ケーブル長	張力	単位重量	曲げ剛性
	L (m)	T (kN)	ρA (kg/m)	EI (kN・m ²)
10	25	1650	30.1	106.4
20	25	3300	30.1	106.4
30	200	1650	30.1	106.4
40	200	3300	30.1	106.4
50	200	5340	94.7	1111

表2 ダンパーのパラメータ

ダンパーNo.	ばね定数	減衰	取付位置
	k (kN/m)	損失係数 v	
0	0	0	0
1	0	0.63	7
2	280	0.63	7
3	560	0.63	2
4	560	0.63	4.5
5	560	0.63	7
6	1120	0.63	7
7	560	0	7
8	560	0.33	7
9	560	1.3	7

3. 数値実験による検証 提案式の妥当性を調べるため数値実験を行った。まず、有限要素法(FEM)を使用し様々なダンパー付きケーブルモデルの固有振動数を求めた。用いたケーブルとダンパーの値をそれぞれ表1, 2に示す。モデル No.はケーブル No.とダンパーNo.の和で表す。なお、複素剛性ばねの u と v は損失係数 γ より $u = 1/\sqrt{1+\gamma^2}$, $v = \gamma/\sqrt{1+\gamma^2}$ と設定した。粘性せん断ダンパーの k と c には複素剛性ばねの k , $kv/2\pi f_1$ を代入した。FEMの要素長はケーブル長の500分の1とした。そして次数とそれに対応する固有振動数を提案式に代入し張力を推定した。使用する次数の数について高次振動法では未知数は2つであるが精度を良くするために5つの次数を用いるのが良いとされている¹⁾。提案式には張力 T , 曲げ剛性 EI , ダンパーの変数 k , c (または ku , kv) の4つの未知数が含まれるため4次以上必要である。しかし実証実験の計測では7次までしか固有振

Katsuya HIROSE, Aiko FURUKAWA and Ryosuke KOBAYASHI

hirose.katsuya.86w@st.kyoto-u.ac.jp

動数を計測できていないケースが見られたので本研究では7次までを用いて張力推定を行った。結果を図2, 3に示す。それぞれ、粘性せん断ダンパー、高減衰ゴムダンパーの場合である。縦軸は設定値と推定値の比であり1に近づくほど精度が高いことを示している。設定値とは表1の張力の値のことである。双方のモデルともに高次振動法よりも提案式の方が精度は向上していることが確認でき、提案式の張力推定精度は誤差±5%以内であることが分かった。

4. 模型実験による検証 提案式の妥当性を検証するため模型実験を行った。実験装置の概要は図4に示す。ケーブル長は16.78mで、表3のようにダンパーの種類や設置位置を変えて18ケース実施した。高減衰ゴムのほうが防振ゴムより損失係数が大きいことが分かっている。ロードセルで測定した張力を設定値とみなした。高減衰ゴムダンパーモデルを適用した推定結果を図5に示す。提案式は赤の十字マークである。試験体No.1~10, 16において良好な精度であるがそれ以外は誤差が大きい。その原因を表4に示す。試験体No.16~18にて実験で求めた固有振動数と設計値を用いたFEMによる固有振動数を比較すると実験では赤枠の3次と6次の固有振動数が読み飛ばされていることが分かった。1,2,4,5,7,8,10次の固有振動数を1,2,3,4,5,6,7次の固有振動数として提案式に代入しており、計測された次数と提案式の次数が一致しなかったため正しい張力が推定できなかったと考えられる。そこで実験での読み飛ばしを考慮し、読み取れた固有振動数の次数を正しく設定して推定し直した結果を図5に黄緑でプロットしてある。計測された固有振動数の次数を正しく設定できれば精度良く張力推定できると考えられる。

5. 結論 1) ダンパーを有するケーブルにおいて、ダンパーを想定した提案式を用いることで高次振動法よりも精度良く張力を推定できると考えられる。2) 計測された固有振動数において理論値の次数と異なる場合があるため推測された張力等からFEMでフィードバックして抜けている固有振動数が無いか確認する必要があると考えられる。

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, 2000年9月

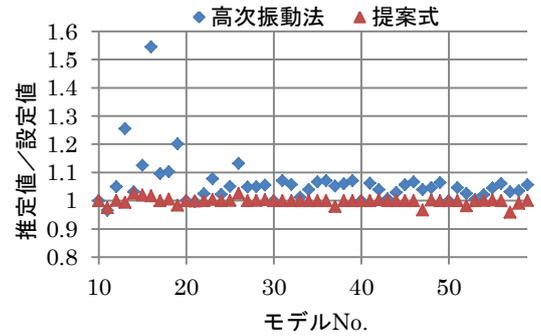


図2 張力推定精度(粘性せん断ダンパー)

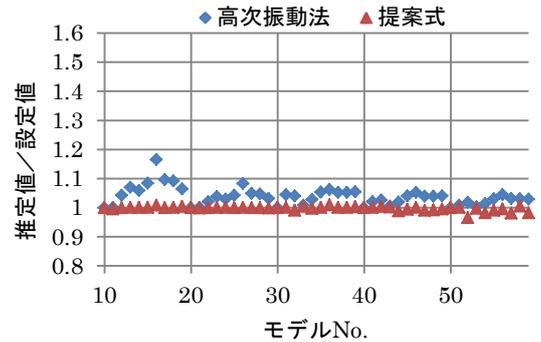


図3 張力推定精度(高減衰ゴムダンパー)

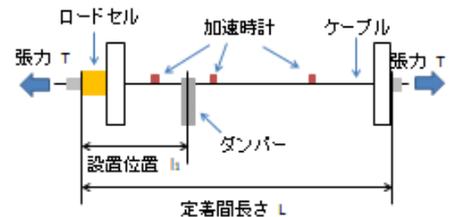


図4 実験装置の概要

表3 各試験体のダンパー設置条件

試験体No.	ケーブル設定張力(kN)	ダンパー		
		種類	数	設置位置(m)
1	80	無し	-	-
2	82.9	防振ゴム	2	0.9633
3	82.9	防振ゴム	4	0.9633
4	82.9	高減衰ゴム	2	0.9633
5	82.9	高減衰ゴム	4	0.9633
6	82.9	防振ゴム	2	1.69
7	82.9	防振ゴム	4	1.69
8	82.9	高減衰ゴム	2	1.69
9	82.9	高減衰ゴム	4	1.69
10	82.9	防振ゴム	2	2.535
11	82.9	高減衰ゴム	2	2.535
12	82.9	高減衰ゴム	4	2.535
13	82.9	防振ゴム	2	3.38
14	82.9	高減衰ゴム	2	3.38
15	82.9	高減衰ゴム	4	3.38
16	82.9	防振ゴム	2	5.07
17	82.9	高減衰ゴム	2	5.07
18	82.9	高減衰ゴム	4	5.07

表4 FEMと実験の固有振動数比較

No.		1次	2次	3次	4次	5次	6次	7次
16	FEM	10.70	20.05	24.88	33.53	42.91	49.79	57.60
	実験	11.25	20.63	25.30	34.06	44.13	50.31	57.50
17	FEM	10.76	20.00	24.82	33.49	42.74	49.68	57.58
	実験	11.38	22.00	34.56	46.06	58.56	69.19	82.31
18	FEM	11.22	21.86	25.17	34.00	44.28	50.28	57.73
	実験	11.56	23.31	34.94	46.69	58.65	70.38	82.38

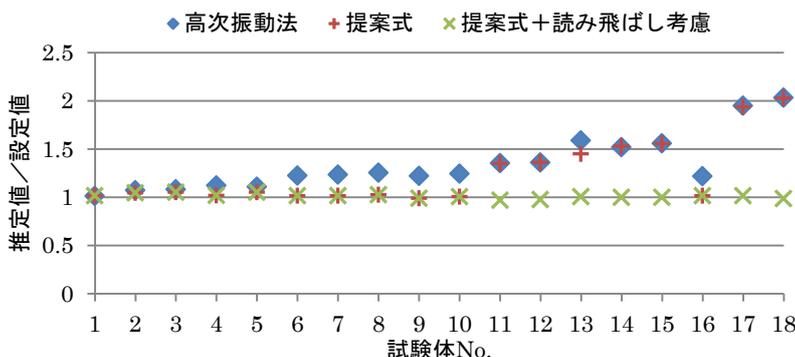


図5 提案式による張力推定精度