

## 炭素繊維複合材ケーブルの減衰自由振動特性に関する基礎的研究

## Fundamental Study on Damped Free Vibration Characteristics of Carbon Fiber Composite Cable

中村一史\*, 中川康治\*\*, 田島 遼\*\*\*, 前田研一\*\*\*\*, 張 治 成†, 謝 旭††, 榎本 剛†††, 牛島健一†††  
 Hitoshi Nakamura, Koji Nakagawa, Ryo Tajima, Ken-ichi Maeda, Zhicheng Zhang, Xie Xu,  
 Tsuyoshi Enomoto and Ken-ichi Ushijima

\* 博(工), 首都大学東京大学院 助教, 都市環境科学研究科 都市基盤環境学域(〒192-0397 八王子市南大沢 1-1)

\*\* 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 博士前期課程(〒192-0397 八王子市南大沢 1-1)

\*\*\* 修(工), 相模原市役所 都市建設局 土木部 緑土木事務所(〒252-5172 相模原市緑区中野 633)

\*\*\*\* 工博, 首都大学東京大学院 教授, 都市環境科学研究科 都市基盤環境学域(〒192-0397 八王子市南大沢 1-1)

† 博(工), 浙江大学 教授, 建築工程学院 交通工程研究所(中国浙江省杭州市紫金港校区安中大楼)

†† 博(工), 浙江大学 講師, 建築工程学院 交通工程研究所(中国浙江省杭州市紫金港校区安中大楼)

††† 東京製綱 炭素繊維ケーブル部 新事業推進本部(〒103-8306 東京都中央区日本橋 3-6-2)

Recently, a Carbon Fiber Composite Cable (it is hereafter called a CFCC) has been applied for cable-supported footbridges since it is lightweight, high strength and high-corrosion resistance. However, the weight saving of a cable also induces the vibration problem due to wind action and vehicle excitation. It is necessary to investigate the damping characteristics. In this paper, two kinds of experimental studies were conducted for the purpose of clarifying the damping performance of CFCC comparing with a steel wire.

*Key Words: CFCC, Damped Free Vibration, Logarithmic Decrement, Amplitude-Dependent*

キーワード: 炭素繊維複合材ケーブル, 減衰自由振動, 対数減衰率, 振幅依存性

## 1. 緒言

炭素繊維複合材料ケーブル (Carbon Fiber Composite Cable, 以下, CFCC と略称する)<sup>1)</sup>は, 従来の鋼製ケーブルに比べて, 耐食性に優れ, 高強度かつ軽量で, 自重を大幅に低減できる特徴を有している. 近年, 耐食性に優れた CFCC の特徴を活かし, 塩害に対する防錆対策として, PC 桁橋の外ケーブル<sup>2)</sup>や, PC 斜張橋の斜ケーブル<sup>3),4)</sup>などへ適用されはじめている. また, より大規模な構造物への適用を視野に入れて, 5,000~12,000kN 級の耐力を有するケーブルの研究開発<sup>5)</sup>が国内外で行われている. さらに, 長大斜張橋への適用を検討した結果<sup>6)</sup>からは, 鋼製ケーブルに比べて斜ケーブルのサグが大幅に低減されること, また, 設計上, 大きな問題はなく, 軽量化によって各部材のコストを低減できる可能性も確かめられている.

一方, ケーブルの軽量化は, 風などによる振動が発生しやすくなり, 減衰を含めた振動特性やその対策についても検討しておく必要がある. これまでも鋼製ケーブルと対比しながら CFCC の振動実験が行われてきた<sup>7),8)</sup>

が, より線タイプのケーブルを対象としたものである.

一般の鋼斜張橋では, 機械的な性質に優れた平行線タイプのケーブルが多用されており, ケーブル素線の基本的な減衰性能を把握しておくことも重要である.

そこで, 本研究では, CFCC の基本的な減衰特性を明らかにすることを目的として, 鋼素線と対比しながら実験的な検討を行った. 素線の伸び方向に着目した縦振動実験, および, 面外方向に着目した横振動実験により, 減衰自由振動波形を計測し, 鋼素線と対比して, CFCC の基本的な減衰特性の把握を試みた.

## 2. 縦振動実験による振動特性の検討

## 2.1 ケーブル素線の材料特性と実験条件

縦振動実験で使用したケーブル素線の材料特性値を表-1 に示す. ここでは, CFCC との比較のために, ほぼ同じ有効断面積を有する鋼素線も対象とした. なお, 鋼素線は, 吊形式橋梁に適用されている平行線ストランドの亜鉛メッキ鋼素線である. 表より, CFCC の素線は, 鋼素線と比べて, 弾性係数は若干低くなるものの, 重量

は約 1/5, 強度は 1.5 倍程度である. また, CFCC は, 一方方向の炭素繊維に樹脂を含浸し, 硬化させて製作される

表-1 縦振動実験に用いたケーブル素線の材料特性

ケーブルの種類	弾性係数 $E$ (GPa)	引張強度 $\sigma_t$ (MPa)	単位質量 $w$ (g/m)	直径 $\phi$ (mm)	有効断面積 $A$ (mm <sup>2</sup> )
CFCC	152	2,980	29.9	5.0	15.2
Steel	204	1,999	163.8	5.16	20.9

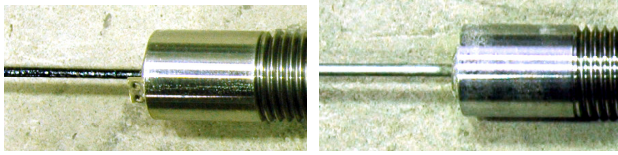


写真-1 素線の定着部 (口元部)

表-2 付加質量ケースと素線の張力

ケース	W-1	W-2	W-3	W-4
質量 $W$ (kg)	518.5	952.7	1,252.3	1,550.9
張力 $T$ (kN)	5.08	9.34	12.27	15.20
引張応力 $\sigma$ (MPa)	CFCC 334	614	807	1,000
	Steel 243	447	587	727

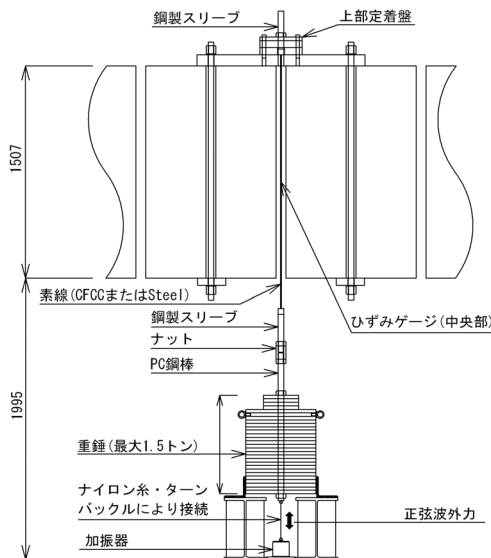


図-1 縦振動実験のセットアップ



写真-2 実験治具の設置状況

が, 補強のために周方向にも繊維をラップさせている. したがって, CFCC では, 同じ直径の鋼素線と比べて, 有効断面積は若干小さくなり, 表面層には小さな凹凸が生じている.

ケーブル素線に張力を導入するため, その両端部には, 写真-1 に示すように, 鋼製スリーブ (外径 37mm, 内径 20mm, 長さ 310mm, S45C) を配置し, 膨張剤を充填することで素線を固定した. 素線の長さは, 1,800mm (両端定着部における口元間の距離) とした. ここでは, 2種類の素線をそれぞれ CFCC, Steel と略称する.

縦振動実験のセットアップ状況を図-1 に示す. まず, 片側の鋼製スリーブを上部定着盤にボルトで固定した. さらに, その下端の鋼製スリーブに, 鋼板 (重錘) と一体化した PC 鋼棒を, ナットで接続することで, 付加質量を与え, 鉛直方向に加振する形式とした. その付加質量は, 吊り下げる鋼板の数量を変化させて, パラメトリックに検討した. 表-2 に, 付加質量ケースを示す. 付加質量は, 実橋で導入されるレベルの引張応力を考慮して, 500~1,500kg の範囲で 4 ケース設定し, 素線の張力  $T$  は, 付加質量  $W$  に一致すると仮定した.

素線に振動を与えるために, 加振器 (加振能力: 49N) を用いた. 図-1, 写真-1 に示すように, 加振器の駆動部とケーブル中央部とを, ナイロン糸で接続し, 加振器で正弦波外力を与えた. 図-2 に, 素線のひずみに着目した減衰自由振動波形の一例を示す. まず, 加振器を用いて, 素線を含む構造系の固有振動数で強制振動を与えて共振状態とする. 次に, 一定振幅の定常状態となった際に, ナイロン糸を切断し, 減衰自由振動させる. この時の減衰自由振動による素線のひずみ振幅を, 素線の中央部に設置したひずみゲージを用いて, サンプリング間隔 1/1,000 sec で計測した.

## 2.2 実験結果と考察

図-3 に, 素線の張力と伸びひずみの関係を示す. 素線の張力  $T$  は, 表-2 に示したように, 付加質量  $W$  と仮定した. 伸びひずみは, ひずみゲージによる実測値と, 素線の張力  $T$ , 弾性係数  $E$ , 長さ  $L$  および有効断面積  $A$  から計算される理論値を示している. 図より, CFCC では, 実測値と理論値は良い一致を示すこと, また, Steel では実測値は理論値より若干小さくなるのが解る. こ

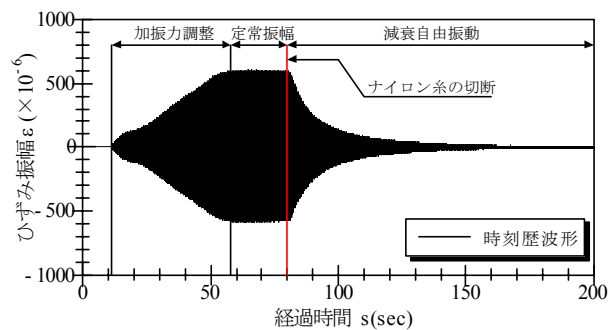


図-2 縦振動による減衰自由振動波形の一例

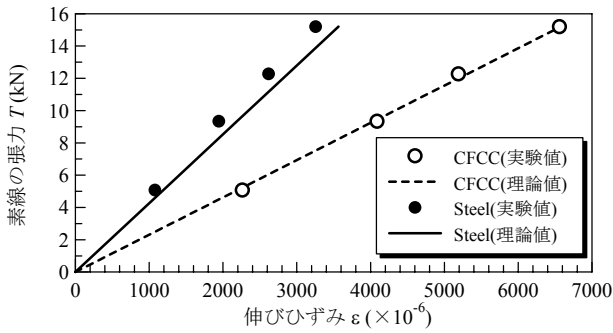


図-3 素線の張力と伸びひずみの関係

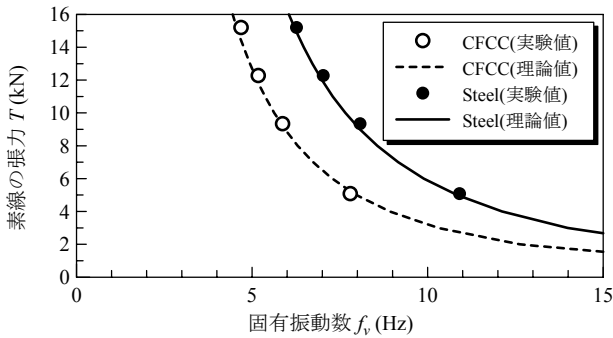


図-4 素線の張力と固有振動数の関係

これは、鋼素線の場合、付加質量なしの状態初期曲げが生じ、それが十分に除去できなかったためと考えられる。しかしながら、両者の差異は小さく、以下の縦振動実験では、ひずみ振幅で評価するため、実用上は問題ないといえる。

図-4 に、素線の張力と固有振動数の関係を示す。固有振動数の測定値は、ひずみの時刻歴波形のフーリエスペクトルから得られる卓越振動数から算出した。なお、固有振動数の理論値は、一質点系ばねの振動の理論式に基づいて算定した。すなわち、ばね定数を  $k_v$ 、一質点系の重量を  $W$ 、重力加速度を  $g$  ( $9.8\text{m/sec}^2$ ) とすれば、一質点系ばねの振動数  $f_v$  (素線の伸び方向の固有振動数) は、式(1)で表現される。

$$f_v = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_v \cdot g}{W}} \quad (1)$$

ここで、素線の伸び剛性  $EA$  を考慮すれば、ばね定数  $k_v$  は、式(2)で表現される。

$$k_v = \frac{EA}{L(1+T/EA)} \quad (2)$$

また、重量  $W$  は  $T/g$  であり、これらより素線の伸び方向の固有振動数  $f_v$  を与える式(3)が導出される。

$$f_v = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_v \cdot g}{T}} \quad (3)$$

図より、付加質量の増加に伴って、固有振動数は低下すること、また全ての付加質量ケースで、固有振動数は、実測値と理論値で良い一致を示すことが解る。なお、張力が同じである場合、CFCCの固有振動数は、Steelに比べて小さくなるが、これは、CFCCの弾性係数  $E$  および有効断面積  $A$  は Steel に比べて若干小さく、CFCCの伸び

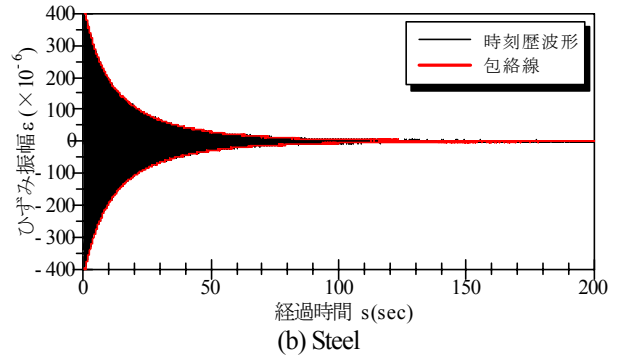
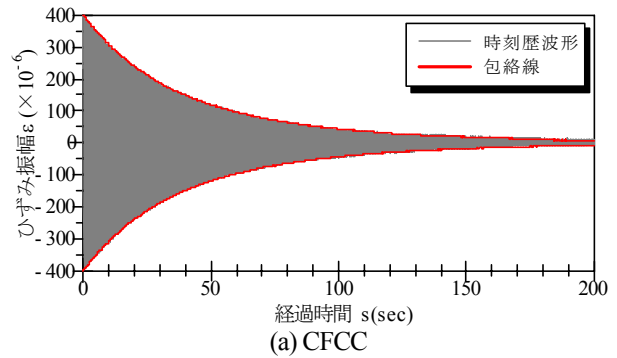


図-5 縦振動 ( $T=5.08\text{kN}$ ) による減衰自由振動波形

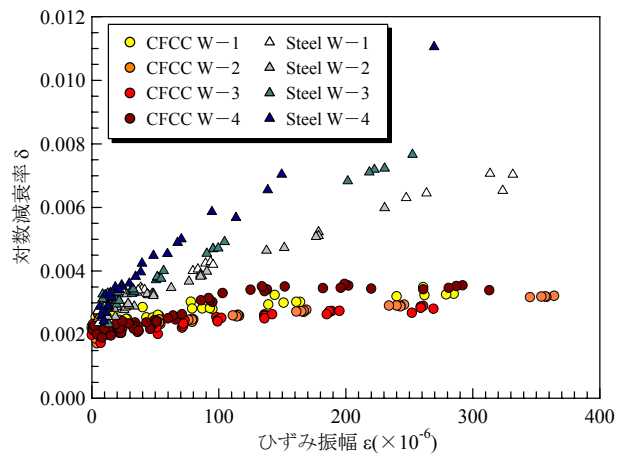


図-6 ひずみ振幅と対数減衰率の関係

剛性  $EA$  が Steel に比べて低下することによるものである。

実験結果の一部として、図-5 に、張力  $T=5.08\text{kN}$  時におけるひずみの減衰自由振動波形を示す。図より、CFCC、Steel とともに、良好な減衰自由振動波形とその包絡線が得られていることが解る。図中の包絡線は、減衰自由振動波形をバンドパスフィルタで卓越振動数付近の成分を抽出した後、ヒルベルト変換を行って算定した値である。また、CFCC と Steel の比較から、Steel の方が固有振動数は高いものの、ひずみ振幅の収束は速いことが解る。

両者の減衰特性を比較するために、得られた減衰自由振動波形の包絡線から、ひずみ振幅に対する対数減衰率を算出した。図-6 に、ひずみ振幅と対数減衰率の関係を示す。図-6 は、それぞれの付加質量に対して、縦振動実験を 5 回行って、それらの全ての結果をプロットしたものである。図より、Steel では、付加質量の増加に伴



表-3 回帰直線による縦振動の対数減衰率の評価

付加質量	張力 T(kN)	A(×10 <sup>3</sup> )		δ <sub>0</sub>		相関係数 R	
		CFCC	Steel	CFCC	Steel	CFCC	Steel
W-1	5.08	0.450	1.31	0.00216	0.00283	0.903	0.988
W-2	9.34	0.330	1.50	0.00204	0.00251	0.959	0.992
W-3	12.27	0.301	2.00	0.00205	0.00272	0.874	0.993
W-4	15.20	0.587	3.03	0.00204	0.00269	0.896	0.991
平均値		0.417	1.96	0.00207	0.00269	—	—

って、対数減衰率が大きくなり、振幅依存性も顕著になるのに対して、CFCC では、付加質量が増加しても対数減衰率はほとんど変化せず、振幅依存性も小さいことが解る。また、両者ともに、ひずみ振幅が小さくなるにしたがって、対数減衰率が一定値に収束することも解る。

そこで、対数減衰率の振幅依存性を比較するために、次式により、付加質量ケースごとに回帰直線を算定した。

$$\delta_v = A \cdot \varepsilon + \delta_{v0} \quad (4)$$

ここに、δ<sub>v</sub>は縦振動の対数減衰率、Aは勾配、εはひずみ振幅、δ<sub>v0</sub>はε=0時の対数減衰率の収束値である。

表-3に、式(4)の回帰直線の係数を示す。係数Aより、振幅依存性は、Steelの方が大きいこと、また、δ<sub>v0</sub>より、対数減衰率の収束値は、CFCCの方が小さいことが確かめられる。CFCCは、一方向の炭素繊維で構成されているため、伸び方向の剛性、強度が卓越し、強い異方性を示す材料であり、材料レベルにおいては、一般の金属と比べても減衰性能は高くないといわれている。したがって、CFCCの対数減衰率の収束値はSteelに比べて小さくなる傾向は、材料の相違によるものと考えられる。さらに、CFCCの振幅依存性は、Steelに比べて低くなったが、その傾向は、より線タイプのケーブルを対象に比較検討した結果<sup>8)</sup>と類似の挙動であり、ひずみエネルギーに基づいて減衰特性が評価できるものと考えられる。

### 3. 横振動実験による振動特性の検討

#### 3.1 実験条件

横振動実験で使用したケーブル素線の材料特性値を表-4に示す。CFCCは、縦振動実験で使用した素線と同一であるが、鋼素線は、直径がわずかに小さいこと以外は、縦振動実験で使用したものとほぼ同じである。また、ケーブル素線の両端部についても、縦振動実験と同一の仕様であり、素線の長さLは、4,900mm(両端定着部における口元間の距離)とした。

横振動実験のセットアップ状況を図-7に示す。まず、片側の鋼製スリーブを、ロードセルを備えた上部定着盤にボルトで固定した。さらに、その下端の鋼製スリーブは、反力床に定着されたH形鋼にボルトで固定した。なお、下部の鋼製スリーブが固定されたH形鋼の張り出し部は、反力床に設置されたH形鋼のアンカーに、万力を用いて固定した。

素線の張力は、下端の鋼製スリーブで調整し、その値は、上部定着盤に設置したロードセルで計測を行った。

表-4 横振動実験に用いたケーブル素線の材料特性

ケーブルの種類	弾性係数 E (GPa)	引張強度 σ <sub>t</sub> (MPa)	単位質量 w (g/m)	直径 φ (mm)	有効断面積 A (mm <sup>2</sup> )
CFCC	152	2,980	29.9	5.0	15.2
Steel	200	2,192	150.8	5.0	19.6

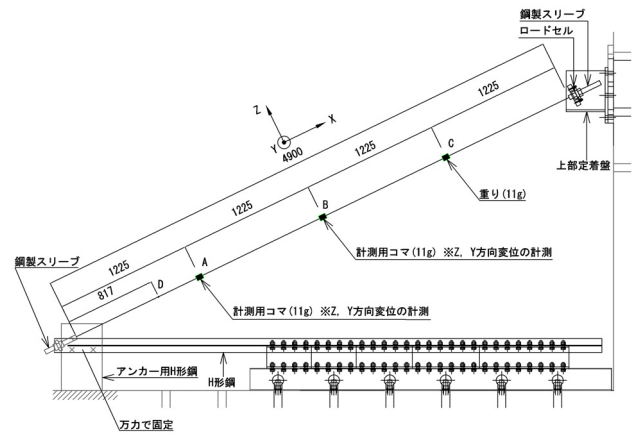
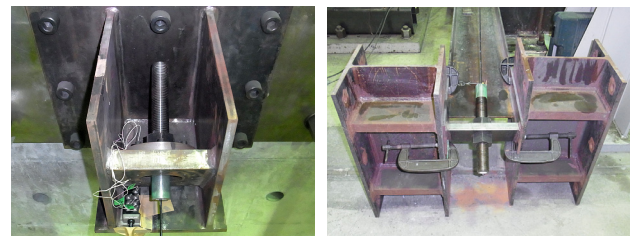
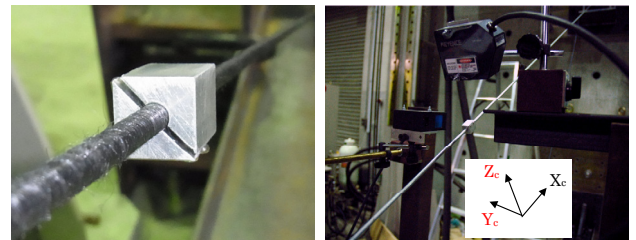


図-7 横振動実験のセットアップ



(a) 上部 (ロードセル) (b) 下部

写真-2 素線の両端部の支持状況



(a) 計測用コマ (11g) (b) レーザー変位計

写真-3 計測装置の設置状況

表-5 素線の導入張力と引張応力

導入張力 T(kN)	1.0	1.6	2.2
引張応力 σ(MPa)	CFCC 66	105	145
	Steel 51	82	112

表-6 着目モードに対する加振点と変位計の設置位置

着目モード	1次モード	2次モード	3次モード
加振点	B (L/2) 点	A (L/4) 点	D (L/6) 点
変位計の設置位置	B (L/2) 点	A (L/4) 点	B (L/2) 点

ここでは、素線の張力もパラメータとして検討を行った。表-5に、素線の導入張力と引張応力を示す。ここで対象とした導入張力は、実験装置の規模、および、固有振動数に配慮して、実橋で導入されるレベルや、前述の縦振動実験で検討した範囲と比べてかなり小さい値としている。

また、素線に対して鉛直(Z)方向および水平(Y)方

向の変位を、レーザー変位計を用いて計測した。計測位置を、図-7に併記している。本研究では、3次の高次モードまで検討を行うため、写真-2に示すように、計測用コマおよびレーザー変位計を、図-7、表-6のように設定した。加振点は、着目モードの腹の位置とし、鉛直(Z)方向に強制変位を与え、解放することで素線を減衰自由振動させた。なお、計測用コマ(11g)は、構造系に影響を与えないようにアルミニウム合金で作製し、A(L/4)点、B(L/2)点に設置したが、質量の対称性に配慮して、C(3L/4)点にも同じ質量の重り(11g)を設置した。サンプリング間隔は、固有振動数の関係から、CFCCで1/2,000 sec、Steelで1/500 secとした。

### 3.2 楕円振動を伴う減衰自由振動波形の評価

計測された減衰自由振動波形から減衰の評価を行うが、楕円振動が観察され、特に、単位質量が小さなCFCCでその傾向が顕著であった。そこで、本研究では、素線の軸線に対して、鉛直(Z)方向変位および水平(Y)方向変位の時刻歴波形の包絡線をそれぞれ算出し、素線の静止位置からZ方向およびY方向の対辺距離(以降、これをR方向包絡線と呼ぶ)を次式より算定し、評価することとした。

$$R_{env} = \sqrt{Y_{env}^2 + Z_{env}^2} \quad (5)$$

ここに、 $R_{env}$ はR方向包絡線、 $Z_{env}$ 、 $Y_{env}$ は、Z方向、Y方向の包絡線である。減衰の評価フローを図-8に示す。フローの中で、⑤以外については、縦振動実験と同じ評価方法であり、その内容を以下に示す。

まず、①では、各着目点において、Z方向、Y方向の変位を計測し、サンプリングデータを収集する。次に、②において、FFT処理により各モードの固有振動数を算出した後、③では、バンドパスフィルタ処理により、着目モードの減衰自由振動波形を抽出し、④において、ヒルベルト変換により包絡線を算出する。ここまでの処理によって、サンプリングデータは、各時刻において、Z

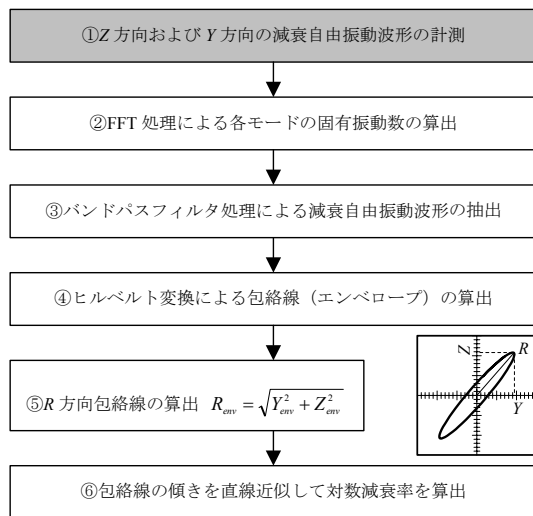


図-8 減衰の評価フロー

方向、Y方向の包絡線の値に変換されている。さらに、⑤において、式(5)により、楕円振動を伴う振動波形の包絡線の値(R方向包絡線)を算定する。最後に、⑥において、R方向の包絡線の値を1/5~1/10にデータ数を間引きした上で、自然対数で表示された包絡線の値の時刻歴データ1,000個分を直線近似し、その傾きから対数減衰率を算出する。なお、対数減衰率は、直線近似の相関係数Rが0.95以上となる値を採用することとし、その時の変位振幅は、データ1,000個分の平均値とした。

このフローにしたがって、計測された減衰自由振動波形から包絡線の評価した結果の一例を、図-9に示す。

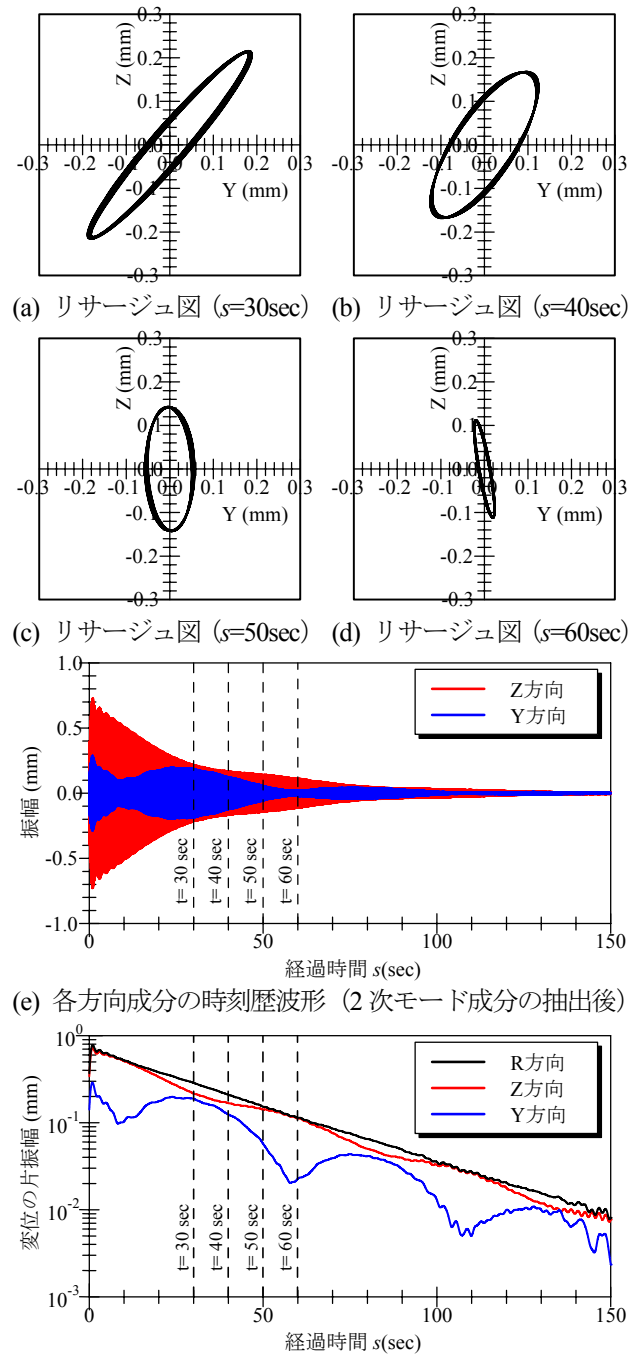


図-9 減衰自由振動波形における包絡線の評価の一例 (CFCC, T=1.0kN, 2次モード加振, L/4点の変位振幅)

これは、張力 1.0kN の CFCC を 2 次モードの加振点 (A 点) で加振した時、A 点で計測した Z 方向および Y 方向変位の時刻歴波形を、バンドパスフィルタにより処理を行って、2 次モードの変位成分のみを抽出した値に対して評価を行った結果である。(a)~(d)は、経過時間  $s=30, 40, 50, 60$  sec における 1 秒間のリサージュ図を示したものである。また、(e)は、各変位成分の時刻歴波形を、(f)は、対数表示された変位の片振幅と経過時間の関係を示したものである。これらの図より、変位は、Z 方向成分が支配的であり、経過時間とともに徐々に減衰するが、Y 方向変位との連成により、楕円振動を伴う減衰振動と

なっている。その楕円振動の軌跡からは、長軸と短軸の長さの比率とその角度が時間とともに変化することが解る。したがって、(f)より、Z 方向変位のみでは、減衰の評価が困難であるといえる。一方、Y 方向変位の影響も考慮して、式(5)で評価した R 方向包絡線は、楕円振動による影響が除去されており、減衰の評価が可能であることが確かめられる。対数減衰率の算定にあたっては、この評価手法に基づいて検討を行うこととした。

### 3.3 観測された減衰自由振動波形と固有振動数

計測結果の一例として、張力 1.0kN において、1 次~3 次モード加振による減衰自由振動波形を、CFCC, Steel について、図-10 に、比較してそれぞれ示す。

図より、1 次モード加振では、2 方向成分が連成するものの、良好な減衰自由振動波形であるのに対し、2 次モード加振では、複数のモードが連成し、うなりを伴ったような時刻歴波形となることが解る。一方、3 次モード加振では、このような挙動は、2 次モード加振ほど、顕著ではないものの、1 次モード加振と比べるとやや強く表れていることが確かめられる。

図-11 に、張力 1.0kN, 2 次モード加振における一例として、CFCC, Steel のリニアスペクトルを示す。図より、2 次モードの最大点で加振しても、1 次モードの振動が卓越すること、また、さらに影響が小さくなるが、3 次モードの成分も計測されていることが解る。Z 方向, Y 方向では、ほぼ同じ固有振動数が卓越し、CFCC の固有振動数は、Steel のおよそ 2 倍であることが解る。これは、CFCC は、Steel に比べ、単位重量が小さいことに起因す

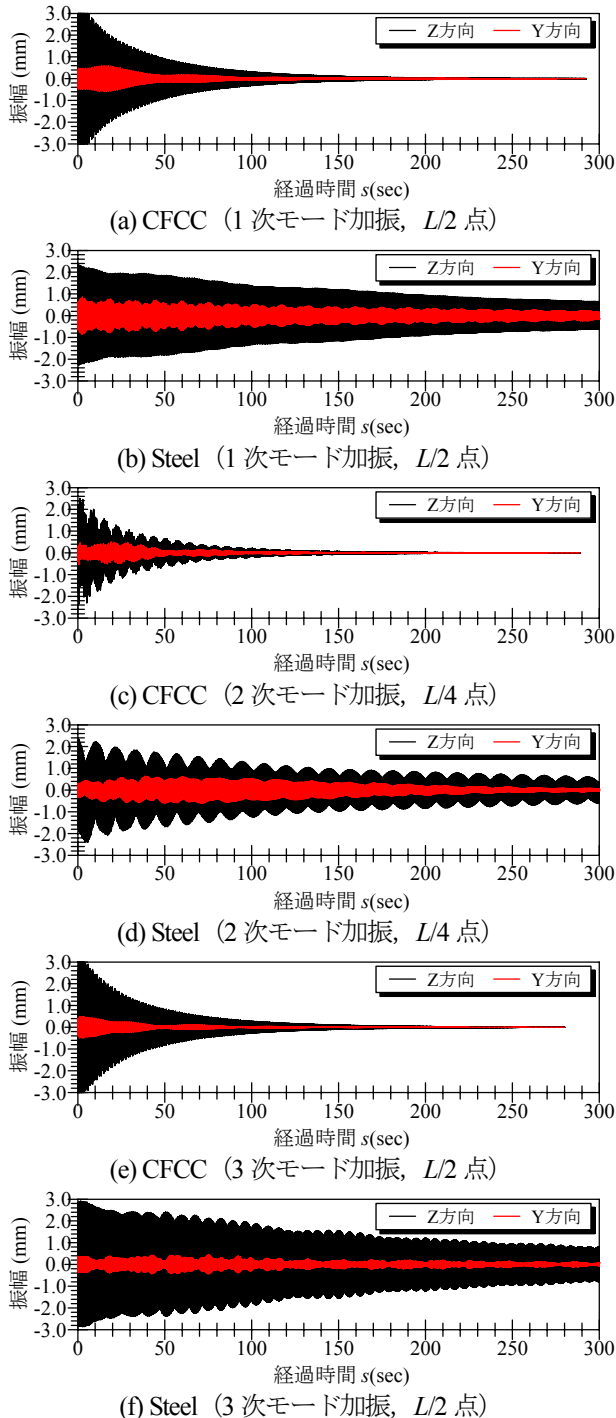


図-10 横振動実験による減衰自由振動波形 ( $T=1.0\text{kN}$ )

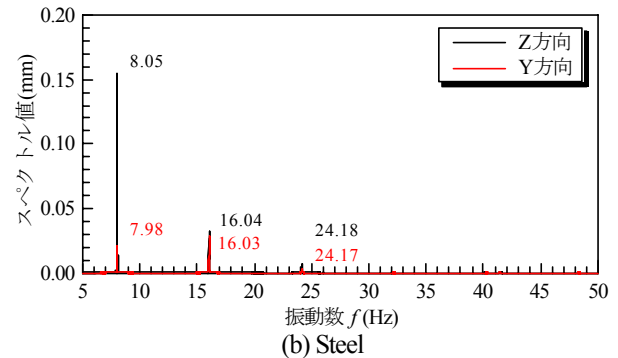
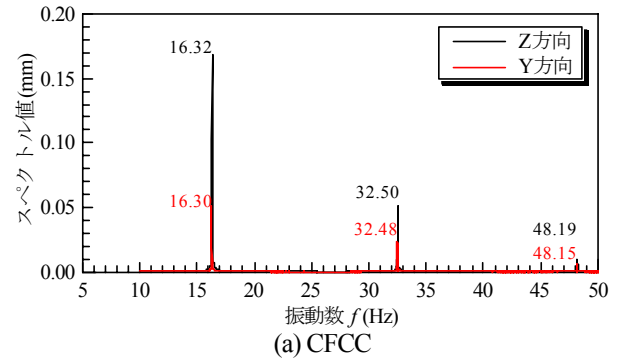


図-11 横振動実験によるリニアスペクトル ( $T=1.0\text{kN}$ , 2 次モード加振,  $L/4$  点)



るものである。

表-7 に、全ての実験ケースの固有振動数を比較して示す。固有振動数の実測値は、各実験ケースにおいて 5 回計測し、Z および Y 方向の値を平均して示している。また、表中には、張力を考慮した骨組構造モデルによる固有振動解析<sup>7)</sup>に基づく解析値を併記している。なお、モデル化にあたっては、素線の総質量に対する計測用コマおよび重りの質量の割合が比較的大きく、基本的な弦の振動から算出される固有振動数とは異なることから、それらの質量の影響も考慮した。また、素線の曲げ剛性やサグが固有振動数に及ぼす影響はわずかであったことから、素線を 100 分割した軸力要素で、サグを無視してモデル化し、両端の境界条件はピン結合とした。

表より、前述したように、CFCC の固有振動数は、Steel のおよそ 2 倍であることが解る。また、実測値と解析値を比較した場合、概ね理論通りの固有振動数特性であるものの、高次モードほど両者の差異が大きくなり、CFCC より Steel の方が、その傾向が大きいといえる。

### 3.4 減衰特性の検討

減衰特性については、3.2 節で述べた評価方法により、検討を行った。算定結果の一例として、図-12 に、張力をパラメータとして、1 次モードで加振した時の 1 次モードの対数減衰率と片振幅の関係を示す。これらは、各張力に対して、5 回の計測を行って、それらを全て表示したものである。

まず、CFCC の対数減衰率は、Steel に比べて大きいこと、また、素線の種類に関わらず、張力が大きくなるほど、対数減衰率が小さくなることが解る。さらに、CFCC では、振幅の増加に伴って対数減衰率が大きくなるような、振幅依存性がやや見られるものの、Steel では、振幅依存性は小さいことが解る。これは、縦振動実験により計測された対数減衰率とは、全く逆の傾向を示している。

さらに、図-13 に、張力 1.0kN において 1~3 次モードで加振した時、各モードに対応する対数減衰率と片振幅の関係を示す。各モードの加振点と片振幅の着目点(変位計の設置位置)は、表-6 に示した通りであり、高次モードになるほど大きな強制変位が与えられないため、変位振幅が小さくなっている。また、プロット点は、5 回の計測結果の全てを表示している。

図より、1 次モード加振と同様に、CFCC の方が、Steel よりも対数減衰率が大きいこと、また、振幅依存性はさ

らに小さくなるものの、CFCC の方がやや大きいことが確かめられる。

以上のことから、CFCC、Steel の対数減衰率は、振幅がゼロになるにしたがって、ほぼ一定値に収束する傾向が見られたことから、縦振動実験と同様に、次式の回帰直線で評価を行った。

$$\delta_h = B \cdot d + \delta_{ho} \quad (6)$$

ここに、 $\delta_h$  は対数減衰率、 $d$  は変位の片振幅、 $B$  は勾配、 $\delta_{ho}$  は  $d=0$  時の対数減衰率の収束値である。

表-8 に、回帰直線による横振動の対数減衰率を評価した結果を示す。これは、各実験ケースにおいて、5 回の計測結果を、式(6)により評価した結果である。係数  $B$  より、振幅依存性は、CFCC の方が大きいこと、また、

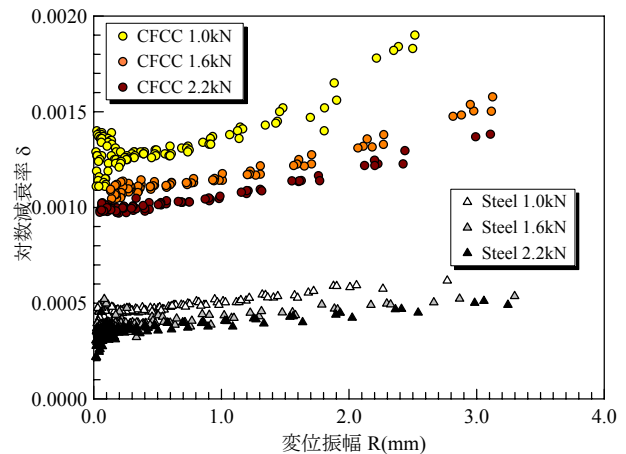


図-12 1 次モードの対数減衰率と振幅の関係

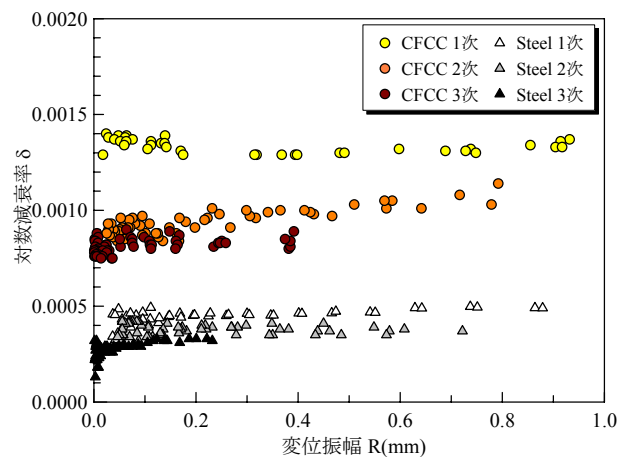


図-13 張力 1.0kN における対数減衰率と振幅の関係

表-8 回帰直線による横振動の対数減衰率の評価

張力 $T$ (kN)	次数	$B(\times 10^{-4})$		$\delta_{ho}$		相関係数 $R$	
		CFCC	Steel	CFCC	Steel	CFCC	Steel
1.0	1 次	1.97	0.76	0.00122	0.00043	0.847	0.825
	2 次	2.46	0.77	0.00089	0.00037	0.803	0.288
	3 次	1.22	4.06	0.00081	0.00034	0.324	0.608
1.6	1 次	1.42	0.54	0.00104	0.00037	0.964	0.746
	2 次	2.9	2.96	0.00080	0.00028	0.739	0.569
	3 次	5.3	4.14	0.00068	0.00026	0.801	0.682
2.2	1 次	1.14	0.54	0.00097	0.00034	0.967	0.746
	2 次	4.13	0.86	0.00072	0.00026	0.848	0.202
	3 次	0.41	4.06	0.00067	0.00026	0.137	0.607

表-7 固有振動数の比較

素線 張力 $T$ (kN)	CFCC			Steel			
	1.0	1.6	2.2	1.0	1.6	2.2	
実測値	1次	16.34	20.93	24.75	8.00	10.20	11.96
	2次	32.67	41.75	49.35	15.99	20.74	24.50
	3次	48.27	61.80	73.06	25.01	31.44	36.95
解析値	1次	16.52	20.77	24.35	7.77	9.83	11.52
	2次	32.97	41.65	48.82	15.63	19.73	23.11
	3次	49.00	61.42	71.93	23.58	29.68	34.72

$\delta_{no}$ より、対数減衰率の収束値は、CFCCの方が大きいことが確かめられる。なお、一部のケースで、相関係数が小さくなっている。これは、図-12、図-13から解るように、変位振幅がゼロ付近では、対数減衰率の収束値がある範囲でばらつくためである。

### 3.5 計測された対数減衰率の妥当性の評価

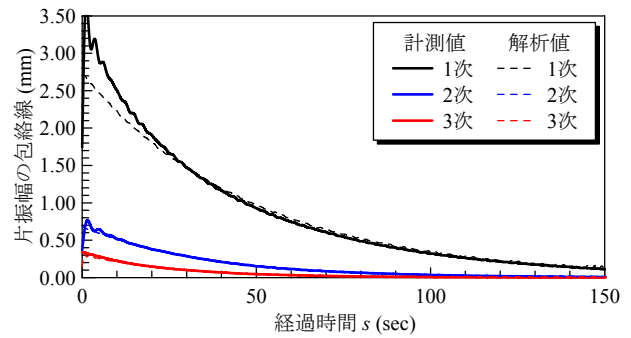
各モードに対する対数減衰率は、表-6で示したように、着目するモードの振幅が最大となる点で加振し、その点において、算定された収束値である。このように算定された対数減衰率の妥当性と有用性を検証するために、複数のモードが混在する2次モード加振に着目して、モード法に基づいた線形時刻歴応答解析<sup>7)</sup>を行った。解析に考慮した振動モードは1~3次モードであり、それらの固有モードと固有振動数は、前述したように、素線を100分割した軸力要素でモデル化して、固有振動解析により算定した。また、対数減衰率は張力1.0kN時の1~3次モードの収束値とした。各モードの重ね合わせによる時刻歴応答解析では、時間ステップは1/1,000secとし、初期条件として、実験と同一の加振点(L/4点)において、計測された変位に相当する値を、強制変位として与えた。

図-14に、L/4点における変位振幅の包絡線を、計測値と解析値と比較して示す。これは、1~3次のモード成分が含まれた減衰自由振動波形であるため、3.2節で述べた評価手法にしたがって、モード別に分離した包絡線で表示している。図より、振動の開始時点では、計測値の振幅が、解析値よりやや大きめに評価されている。これは、減衰に振幅依存性が考慮されていないことによるものであるが、CFCC、Steelともに良い一致を示すことから、横振動実験により算定された対数減衰率の収束値を用いれば、実用上十分な精度で、素線の減衰自由振動を評価できることが確かめられた。

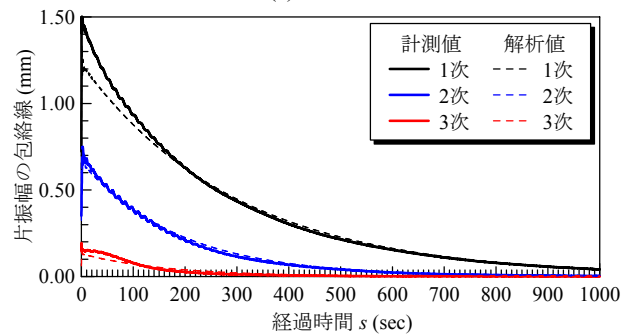
## 4. 結言

本研究では、CFCCの基本的な減衰特性を明らかにすることを目的として、鋼素線と対比しながら2つの実験的な検討を行った。それらの結果からは次のことがいえ

- (1) 素線の伸び方向の減衰自由振動特性から、CFCCの対数減衰率は、鋼素線に比べて小さく、その振幅依存性も小さいことが解った。
- (2) 複数の振動モードが混在し、面外の2方向の変位成分が連成した減衰自由振動波形に対しては、各モードに分離した上で、2方向の包絡線のデータを合成すれば、対数減衰率を合理的に算定できることが確かめられた。
- (3) 素線の面外方向の減衰自由振動特性から、CFCCの対数減衰率は、鋼素線に比べて大きく、その振幅依存性も大きいことが解り、伸び方向の減衰特性とは



(a) CFCC



(b) Steel

図-14 2次モード加振におけるL/4点の変位の計測値と解析値の包絡線 (T=1.0kN)

全く逆になることが確かめられた。

- (4) 素線の面外方向の減衰自由振動特性は、各モード別に計測された対数減衰率を動的応答解析で考慮すれば、実用上十分な精度で評価できることが確かめられた。

以上のことから、横振動実験においては、縦振動実験とは全く異なる挙動を示すことが明らかとなった。本研究の範囲では、その物理的な意味や、減衰特性のメカニズムまでは、明確にすることはできなかったが、主に2つの要因が考えられる。

まず、実験装置など、実験条件の制約から、対象とする張力範囲が異なることが挙げられる。横振動実験においても実橋で導入されるレベルの引張応力を考慮して検討を行う必要がある。

また、CFCC素線では、鋼素線と比べて、軽量であり、表面には小さな凹凸があることから、張力が小さい場合には、素線の表面粗さや軽量化によって、空力減衰が高くなっていることなどが考えられる。

今後は、これらの点に留意しつつ、実験的な検討を実施するとともに、エネルギー的に減衰を評価する手法<sup>10)</sup>を適用して、減衰特性のメカニズムを解明したい。

## 参考文献

- 1) 東京製鋼株式会社：CFCC技術資料，1989.4
- 2) Grace, N. F., Navarre, F. C., Nacey, R. B., Bonus, W., and Collavino, L.: Design-Construction of Bridge Street Bridge - First CFRP Bridge in the United States, PCI Journal, Vol.47, No.5, pp. 20-35, 2002.



- 3) Christoffersen, J., Hauge, L., Bjerrum, J.: Footbridge with Carbon-Reinforced Polymers, Denmark, Structural Engineering International, Vol.9, No.4, 1999.
- 4) Rohelder, W. J., Tang, B., Doe, T. A., Grace, N. F., and Burgess, C. J.: CFRP Strands Application on Penobscot Narrow Cable Stayed Bridge, Transportation Research Board Journal, January 2008.
- 5) 前田研一編：FRP 橋梁—技術とその展望—，土木学会，構造工学シリーズ 14，pp.24-29，2004.1
- 6) 中村一史，田島 遼，前田研一，張治成，謝 旭：CFCC を用いた長大斜張橋の試設計と静的構造特性，日本鋼構造協会，鋼構造年次論文報告集，Vol.15，pp.181-186，2007.11
- 7) 大久保浩弥，大塚久哲，押尾祐三，榎本剛：新素材斜張橋ケーブルの力学挙動に関する基礎的考察，土木学会，第 45 回年次学術講演会講演概要集，VI，pp.88-89，1990.9
- 8) Xie Xu, Hitoshi Nakamura, Ken-ichi Maeda, Zhicheng Zhang, Tsuyoshi Enomoto: Theoretical Analysis and Experimental Test on Damping Characteristics of CFRP Stay Cables, Engineering Mechanics, Vol.27, No.3, pp.205-212, 2010.3 (in Chinese)
- 9) マイダスアイティジャパン：midas Civil 2009 理論マニュアル，2009.
- 10) H. Yamaguchi, Y. Fujino: Modal Damping of Flexural Oscillation in Suspended Cables, Struct Eng./Earthquake Eng., JSCE, Vol.4, No.2, pp. 413-421, 1987.

(2011 年 9 月 14 日受付)