

# 斜張橋ケーブル制振用ダンパーの設計基準の高度化

Improvement of design criteria for cable damper of cable-stayed bridge

2020 年 9 月

16WA007 今西 修久





## 【 目 次 】

|       |                                |     |
|-------|--------------------------------|-----|
| 第 1 章 | はじめに                           | 1   |
| 1. 1. | 概説                             | 1   |
| 1. 2. | 研究背景および目的                      | 1   |
| 1. 3. | ケーブル制振用ダンパーの設計                 | 2   |
| 第 2 章 | 既往の研究                          | 3   |
| 2. 1. | 粘性せん断ダンパーに関する研究                | 3   |
| 2. 2. | 高減衰ゴムダンパーに関する研究                | 4   |
| 2. 3. | その他ケーブル制振用ダンパーやケーブル振動に関する研究    | 6   |
| 第 3 章 | 対象橋梁と発現した振動の概要                 | 7   |
| 第 4 章 | 現地加振試験による高減衰ゴムダンパーの対数減衰率       | 14  |
| 4. 1. | 現地加振試験方法                       | 14  |
| 4. 2. | 対数減衰率の算出                       | 15  |
| 4. 3. | 加振試験結果                         | 15  |
| 4. 4. | 複素固有値解析による加振試験対象ケーブルの対数減衰率     | 18  |
| 4. 5. | 加振試験結果のまとめ                     | 23  |
| 第 5 章 | 複素固有値解析による高減衰ゴムダンパーの付加減衰評価     | 24  |
| 5. 1. | 各モデルのモデル化方法                    | 24  |
| 5. 2. | 複素固有値解析結果                      | 30  |
| 5. 3. | 解析ケースごとの分析                     | 47  |
| 5. 4. | 複素固有値解析結果総括                    | 72  |
| 第 6 章 | 強制加振解析による高減衰ゴムダンパーの付加減衰評価      | 73  |
| 6. 1. | 解析モデルと解析方法                     | 73  |
| 6. 2. | 高減衰ゴムダンパーの履歴減衰                 | 74  |
| 6. 3. | 強制加振解析による付加減衰                  | 77  |
| 6. 4. | 高減衰ゴムダンパーがケーブル振動モードに及ぼす影響とその評価 | 113 |
| 6. 5. | 現地加振試験と強制加振解析                  | 114 |
| 第 7 章 | 高減衰ゴムダンパーの付加減衰推定式              | 123 |
| 7. 1. | 推定式の補正                         | 123 |
| 7. 2. | 補正した推定式での付加減衰算出結果              | 123 |
| 7. 3. | 補正係数を考慮した推定式を使用する場合の留意点        | 131 |
| 第 8 章 | まとめ                            | 132 |
|       | 謝辞                             | 133 |
|       | 参考文献                           | 133 |
|       | 付録                             | 136 |



# 第1章 はじめに

## 1.1. 概説

昭和 40 年代後半からの日本国内での斜張橋建設は、昭和の終わりから平成の初期にその建設量のピークを迎えた。その後の公共工事の縮減に伴い斜張橋の建設量は減少傾向にあるが、その優れた構造特性から現在もコンスタントに建設されている。また、エクストラードボード橋やケーブル補剛構造など、経済性に優れる新たなケーブル構造も採用されている。これら斜張橋などの建設量の増加とともに、ケーブルの風による振動問題が顕在化し、その制振対策について多くの研究が行われてきた。研究や実橋観測の結果および実験結果などについては、各種技術検討委員会において、振動のメカニズムや特徴のほか、対策につても検討され、その成果が取りまとめられている<sup>1)2)3)4)</sup>。また、その成果は、道路橋耐風設計便覧<sup>5)</sup>にも反映されており、ケーブルの風による振動を検討する際の参考とされている。

斜張橋のケーブルによく用いられるポリエチレン被覆ケーブルでは、特に渦励振やレインバイブレーションなどの風による振動が問題となることがある<sup>6)7)8)9)10)</sup>。これらケーブル振動の制振対策としては、ケーブルに高減衰ゴムダンパーや粘性せん断ダンパーを設置して減衰を付加することにより振動を抑える構造力学的対策や、ケーブル表面への突起の設置やインデント加工などケーブル周辺の風の流れを変えることで空気力による加振力を低減させ振動を抑える空気力学的対策がある。これらは、橋梁規模やケーブル諸元に応じ、既往の制振対策の事例や実績を踏まえた検討が行われ、どちらか一方の対策或いは両方の対策が採用されているが、風洞試験による確認が必要なこともある空気力学的対策に比べ、机上計算による対策検討が可能な構造力学的対策が採用されることが多い。桁側のケーブル定着部に比較的容易に設置可能なダンパーによる制振対策は、橋面からの維持管理が可能であり、ケーブル制振の主要な対策のひとつであると考えられる。高減衰ゴムダンパーにあつては、取付構造がコンパクトで外観上も目立たず景観面のメリットもあり、既設橋への対応も可能なことから、今後のニーズも期待される。

## 1.2. 研究背景および目的

ケーブル振動の発現条件は、風速、風向、降雨などがあるが、現状では明確になつておらず、振動振幅の推定や振動の繰り返し回数を事前に把握することは難しい。このようなことから、ケーブルの構造諸元より振動の発生が想定される場合に制振対策を検討し、必要に応じて対策を実施している。しかし、制振対策として構造力学的対策を実施したにもかかわらず、ケーブル振動が発現する事例が確認されている。

本研究では、ケーブル制振対策として高減衰ゴムダンパーを設置した斜張橋のケーブルにレインバイブレーションが発現しケーブル被膜や高減衰ゴムダンパーに損傷が生じた事例に着目し、設計法の観点からその原因について検討を行い、ケーブル制振用ダンパーの設計基準を高度化することを目的とする。そのため、高減衰ゴムダンパーの設計時に想定していた付加減衰とケーブルの現地加振試験で得られた対数減衰率、付加減衰を求めるための既往の簡易推定式、複素固有値解析による付加減衰、強制加振解析による付加減衰、について検討する。

### 1.3. ケーブル制振用ダンパーの設計

高減衰ゴムダンパーを用いた場合のケーブル制振用ダンパーの設計は、一般的には次のような手順で行われる。

#### (1) 設計条件の設定

##### ① 設計振幅

利用者に不安感を与えない程度の振幅としてケーブルの直径程度とする。この程度の振幅としておけば、ケーブルと定着部近辺の部材との接触や、ケーブルの曲げによる疲労は生じず、構造面の安全性は確保される。

##### ② 付加減衰

レインバイブレーションや渦励振に対する制振対策としては、既往の対策事例より、0.02～0.03 程度以上の構造減衰（対数減衰率）を付加することで概ね制振効果が確認されていることから、この値以上とし、できるだけ大きな構造減衰の付加を目指す。

##### ③ 制振対象振動モード

既往の振動事例から、1～4 次モード程度か、あるいは、ケーブルの振動数が 3Hz 程度より小さくなる範囲の振動モードを対象とする。

#### (2) ダンパー取付位置の設定

施工性や景観性等に配慮し、ダンパーの取付位置を設定する。

#### (3) 解析

図 1-1 に示すような解析モデルを作成し、複素固有値解析により高減衰ゴムダンパーのばね定数と構造減衰との関係を求める。

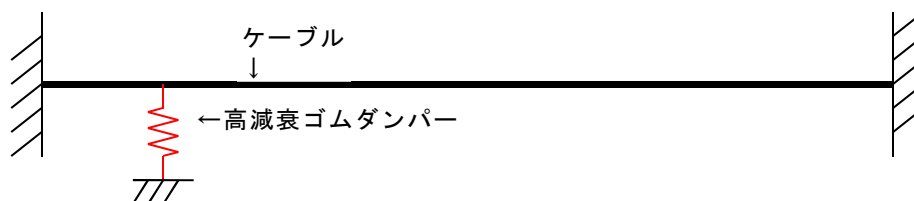


図 1-1 解析モデル

#### (4) 照査

最も構造減衰が大きくなるばね定数に近い高減衰ゴムダンパーとその個数を選定する。選定した高減衰ゴムダンパーと個数からばね値を計算し、そのばね値で複素固有値解析を行い、制振に必要な構造減衰が得られているかを確認する。

以上のとおりであるが、複素固有値解析による設計は多大な労力が必要となることから、簡易な推定式により構造減衰を求める方法について研究がなされ、ダンパーの種類に応じていくつかの式が提案されている。設計実務では、これらの式を用いることが一般的である。

## 第2章 既往の研究

### 2.1. 粘性せん断ダンパーに関する研究

粘性ダンパーの付加減衰に関する研究は、米田らをはじめ複数行われており、主要な研究<sup>11)~14)</sup>を表 2-1 に示す。

表 2-1 各文献の付加減衰推定式とその基本式

| 文献                     | 推定式  | 基本式  |
|------------------------|--|--|
| 米田<br>ら <sup>11)</sup> | $\delta = \begin{cases} \delta_{\max} \times \frac{C}{C_{\text{opt}}(1-0.3)} & \{0 < C \leq C_{\text{opt}}(1-0.3)\} \\ \delta_{\max} & \{C_{\text{opt}}(1-0.3) < C \leq C_{\text{opt}}\} \\ \delta_{\max} \times \left\{ 1.0 - \frac{0.18}{C_{\text{opt}}(1-0.3)} \times (C - C_{\text{opt}}) \right\} & \{C_{\text{opt}} < C \leq 2.5 C_{\text{opt}}\} \\ \delta_{\max} \times \left\{ 0.614 - \frac{0.09}{C_{\text{opt}}(1-0.3)} \times (C - 2.5 C_{\text{opt}}) \right\} & \{2.5 C_{\text{opt}} < C \leq 4.0 C_{\text{opt}}\} \end{cases}$ $\delta_{\max} = \frac{\sin^2 n \pi x_i / l}{w \times l \times f_n / g} \times C_{\text{opt}} \times \alpha \quad C_{\text{opt}} = \frac{6.25}{P_c} \quad P_c = \frac{\sin^2 n \pi x_i / l}{w \times l \times f_n / g} \times \frac{l}{x_i}$ | <p>ダンパーを有する梁の減衰振動（振動エネルギー＝ダンパー吸収エネルギー）<sup>15)</sup></p> $\delta = \frac{\sin^2 n \pi x_i / l}{w \times l \times f_n / g} \times C$ <p>※ ダンパーによる振動系の変化は考慮しない<br/>これに基づき、複素固有値解析の結果を整理し、左記の近似的な推定式を提案</p> |
| 鳥野<br>ら <sup>12)</sup> | $\bar{C}_s \leq 1.2 \quad \bar{\lambda}_s = 0.08 \bar{C}_s^3 - 1.16 \bar{C}_s^2 + 2.08 \bar{C}_s$ $\bar{C}_s \geq 1.2 \quad \bar{\lambda}_s = -0.0012 \bar{C}_s^3 + 0.0373 \bar{C}_s^2 - 0.3614 \bar{C}_s + 1.3460$ $\bar{\lambda}_s = \frac{\lambda_s}{\lambda_s^0} \quad \bar{C}_s = \frac{C_s}{C_s^0}$ $\lambda_s^0 = 3.3 \eta$ $C_s^0 = \frac{C_1^0}{s} \quad C_1^0 = \frac{W L f_1}{g \eta \sin^2 \pi \eta} \quad f_1 = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{gT}{W}}$   | 同上   |
| 春日<br><sup>13)</sup>   | $\delta = \frac{2 \pi C}{2 M^* \omega_n} \{ \phi_1(x_i) - \phi_2(x_i) \}^2$ $= \frac{2 \pi C}{2 M^* \omega_n} \{ \phi_1(x_i) \}^2 e^{-0.72 \alpha c}$ $C_{\text{opt}} = \frac{1}{0.72 \alpha} \quad \delta_{\max} = \frac{\{ \phi_1(x_i) \}^2}{n^2 \pi \frac{x_i}{L} (1 - \frac{x_i}{L})}$ $= \frac{T L}{0.72 \omega_n x_i (L - x_i)}$   | 同上   |
| 藤野<br>ら <sup>14)</sup> | $\xi_i = \pi^2 \left( \frac{c}{m L \omega_{01}} \right) i \left( \frac{x_c}{L} \right)^2$ $\xi_{\max} = 0.52 \frac{x_c}{L}$ $C_{\max} = 0.10 \frac{m L \omega_{01}}{i x_c / L}$  | <p>弦の運動方程式</p> $T \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = m \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} + c \frac{\partial v}{\partial t} \delta(x - x_c)$   |

文献 14)を除き、基本としている式はいずれも、文献 15)のダンパーを有する梁のたわみ振動において、梁が 1 サイクルに消費する振動エネルギーがダンパーが 1 サイクルに吸収したエネルギーに等しいことから求められた付加減衰の式である。それぞれの文献の付加減衰推定式は、この式をベースに、複素固有値解析の結果に基づき、近似的に求めたものとなっている。

一方，文献 14)は振動理論をベースに，Kovacs<sup>16)</sup>の結果を参考にしながら減衰評価曲線を設定している．結果として文献 12)と 14)は非常に近いものとなっていることが同文献に示されている．また，文献 11)・12)・14)・16)の各付加減衰推定式による最適粘性減衰と付加減衰の比較も行われており，最適粘性減衰に関しては Kovacs の誤差が大きく，11)12)14)はほぼ同じ値となることが示されている．付加減衰については，11)12)14)16)のいずれもほぼ同じであるとなっている．ただし，13)は精度にやや問題があるとされている．このほか，簡易な振動実験による付加減衰推定式の評価も行われており，推定式に対する実測値の比が 0.5～1.0 の間にばらつくこと，最大値が予測値の 60%程度となること，この原因についてははっきりしないこと，が述べられている．加えて，ケーブル全長に対するダンパー位置の比が小さい場合，ケーブルの曲げ剛性によるモード形の変化が減衰効果に敏感な影響を与えうること，ダンパーの剛性効果，の可能性が述べられているが，詳細な検討はなされていない．

## 2.2. 高減衰ゴムダンパーに関する研究

高減衰ゴムダンパーの付加減衰に関する研究は，春日らによって行われているものがある<sup>18)</sup>．これは先の文献 13)の粘性せん断ダンパーの付加減衰推定式を高減衰ゴムダンパーに拡張したものである．高減衰ゴムの履歴減衰を複素ばねとしてモデル化し，文献 13)の付加減衰推定式を次式のとおり高減衰ゴムダンパーに適用できる形にしている．

$$\delta_{(D)} = \frac{2\pi[\varphi_1(X_i)]^2}{2M\omega_n} \frac{Kv}{\omega_n} e^{-0.72 \frac{\omega_n X_i (L-X_i) Kv}{TL} \frac{2}{\omega_n \gamma}} \quad (\text{式 2-1})$$

ここに， $\varphi_n(X_i) = \sin(n\pi X_i/L)$ ：モード関数

$n$ ：モード次数

$X_i$ ：高減衰ゴムダンパー取付位置

$L$ ：ケーブル長

$K$ ：高減衰ゴムダンパーせん断弾性ばね定数

$\nu = 4\gamma/(4 + \gamma^2)$ ：高減衰ゴムダンパー複素ばね虚数成分<sup>※注</sup>

$\gamma$ ：高減衰ゴムダンパー損失係数

$M = \mu L/2$ ：ケーブル換算質量

$\omega_n = n\pi/L \times \sqrt{T/\mu}$ ：ケーブルの  $n$  次の固有円振動数

$T$ ：ケーブル張力

$\mu$ ：ケーブルの単位質量

また，付加減衰が最大となる高減衰ゴムダンパーの最適なせん断ばね定数および最大付加減衰は次のとおりである．

$$K_{opt} = \frac{1}{0.72 \frac{\omega_n X_i (L-X_i)}{TL}} \frac{\omega_n \gamma}{2\nu} \quad (\text{式 2-2})$$

$$\delta_{max} = \frac{\{\varphi_i(X_i)\}^2}{n^2 \pi^2 \frac{X_i}{L} \left(1 - \frac{X_i}{L}\right)^2} \frac{\gamma}{2} \quad (\text{式 2-3})$$

なお，式 2-1 の指数関数部分は，ダンパーを設置したケーブルの振動形を図 2-1 のように考え，ダンパーの減衰力  $F_D$  によるダンパー位置の振動モードの減少を考慮するた

めの低減係数で，以下で近似している．

$$\varphi_1(X_i) - \varphi_2(X_i) = \beta \varphi_1(X_i)$$

$$\beta = e^{-0.36\alpha C}$$

$$\alpha = \frac{\omega_n X_i (L - X_i)}{TL}$$

低減係数を考慮することで，ダンパー位置での振動モードが比較的良好一致することが文献 13)で示されている．ただし，これを高減衰ゴムダンパーに展開した文献 18)においては，高減衰ゴムダンパーのせん断ばね定数  $K$  の大きい範囲で誤差が生じることが報告されているが，対数減衰率が最大値となる近傍では誤差が小さく，設計においては対数減衰率が最大となるようばね値を設定することから，実用上問題ないとしている．以下に

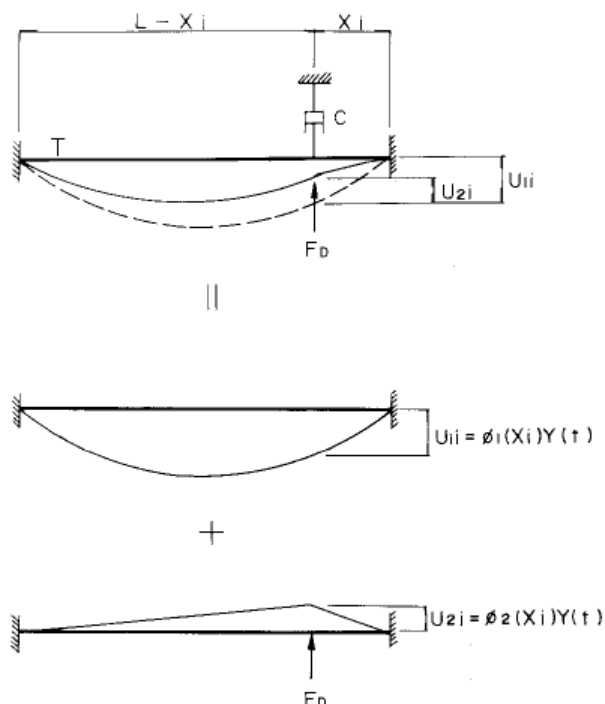


図 2-1 振動モード（文献 13 より抜粋）

文献 18)の抜粋を示すが， $K$  が 50tf/m を超えるあたりから誤差が大きくなり，複素固有値解析結果に比べて最大で 50%程度対数減衰率を小さく推定する結果となっている．低減係数も  $K$  の大きい範囲で誤差が生じているが，対数減衰率ほどの誤差はない．

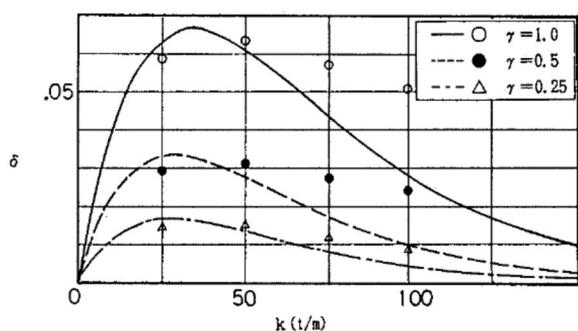


図 2-2 弾性ばね定数と対数減衰率の関係

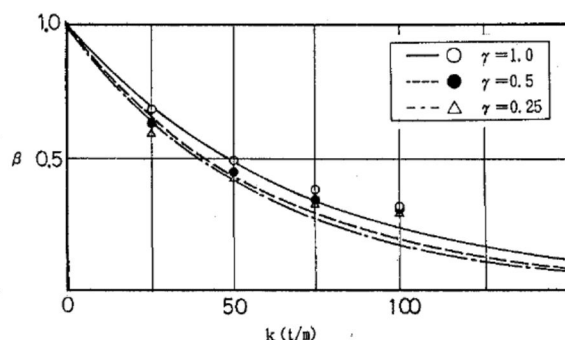


図 2-3 弾性ばね定数と低減係数の関係

図 2-2 ばね定数と付加減衰推定式および低減係数（文献 18 より抜粋）

なお，式 2-1 の高減衰ゴムダンパーの複素ばねの虚数成分  $v = 4\gamma/(4 + \gamma^2)$  は，設計実務においては  $v = \gamma/\sqrt{1 + \gamma^2}$  が用いられている．設計実務で用いている複素ばねの実数成分  $u$  や虚数成分  $v$  は，複素ばね  $K^*$  と損失係数  $\gamma$  および損失角  $\delta$  から，以下に示す複素平面における関係から，次のとおりとなる．

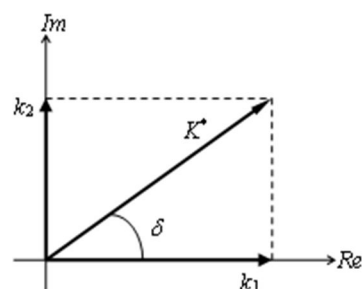
$$\text{複素ばね } K^* = k_1 + ik_2 = k(u + iv)$$

$$k_1 = k \cos \delta, \quad k_2 = k \sin \delta$$

$$k_2/k_1 = \tan \delta = \gamma$$

$$u = \cos \delta = 1/\sqrt{1 + \tan^2 \delta} = 1/\sqrt{1 + \gamma^2}$$

$$v = \sin \delta = \tan \delta / \sqrt{1 + \tan^2 \delta} = \gamma / \sqrt{1 + \gamma^2}$$



ここで、仮に損失係数 $\gamma = 0.5$ とした場合、 $u = 0.8944$ 、 $v = 0.4472$ 、となり、 $v/u = \gamma$ が成立する。一方、春日らの $u = (4 - \gamma^2)/(4 + \gamma^2)$ 、 $v = 4\gamma/(4 + \gamma^2)$ 、の関係を用いた場合、 $u = 0.8824$ 、 $v = 0.4706$ 、となり、 $v/u = \gamma$ は成立せず、損失係数を大きく見積もることになる。よって、設計実務においては複素ばねと損失係数および損失角から求めた $u = 1/\sqrt{1 + \gamma^2}$ 、 $v = \gamma/\sqrt{1 + \gamma^2}$ を使用している。

### 2.3. その他ケーブル制振用ダンパーやケーブル振動に関する研究

前述までのほか、複数のダンパーの併用<sup>20)</sup>やモード減衰評価における伸びと曲げの影響<sup>21)</sup>など、種々の研究が行われているが、高減衰ゴムダンパーに関するものは少なく、対数減衰率の推定式に関しては前述のとおり文献18)のみである。

一方、ケーブル振動に関する研究は非常に多く行われている。確認した文献については、本論文の巻末に参考として、文献4)に示されている文献一覧を抜粋転記しているので、これによる。



### 第3章 対象橋梁と発現した振動の概要

本研究の対象とする橋梁は図 3-2 に示す橋長 600m の 5 径間連続鋼・コンクリート複合斜張橋で、ケーブルは 2 面吊の 9 段配置となっており、全部で 72 本ある。ケーブルおよびケーブル制振用高減衰ゴムダンパーの諸元と設計張力での設計上の付加減衰は表 3-1～表 3-4 に示すとおりである。これら高減衰ゴムダンパーは全てのケーブルの桁側定着部近傍のケーブル定着鋼管に設置されている。

対象橋梁においては、これまでに、10 分平均風速が 10～25m/s の範囲で降雨を伴う気象条件の下、塔の風下側に位置するケーブル（C01～C04，C16～C18）において、ケーブルの 1～5 次の固有振動モードに相当する振動数のケーブル振動が、目視等により確認されている。振動の発現状況から、レインバイブレーションが生じたと考えられている。レインバイブレーションの発現は、供用前の最終荷重状態ではない時点の台風接近時に確認され、供用後も何度か台風時および春先の強風時において振動が確認された。振動によりケーブル被覆や高減衰ゴムダンパーに損傷が生じたことから、ダンパー個数の見直しなどが行われた。

なお、ダンパー個数の見直しにあたっては、高減衰ゴムダンパーのダンパー位置での変位すなわち設計変位についても検討が加えられている。通常、設計変位は 5mm を採用することが多い。これは、先行して採用の進んでいた粘性ダンパーが設計変位 5mm で製品化されていたことによると考えられる。一般的に、ケーブル制振の目標は、ケーブル振動の腹の位置での最大振幅が利用者に不安感を抱かせないと考えられるケーブル直径程度、として設定される。対象橋梁の場合、最大径は 130mm であることから、この程度が対策目標となる。これを高減衰ゴムダンパー位置での変位に換算すると、最大の 1 次モードでは 13mm となる。これに対し、高減衰ゴムダンパーの既製品の設計変位は 5mm であり、これを採用することで制振目標は達成できる。ただし、高減衰ゴムダンパーが物理的に取り得る変位が 10mm であることから、設計変位 10mm に対する付加減衰についても計算し、必要なダンパー個数が設定されている。次頁以降に示す表 3-1～表 3-2 は設計変位 5mm，表 3-3～表 3-4 は設計変位 10mm でそれぞれ付加減衰を計算したものである。

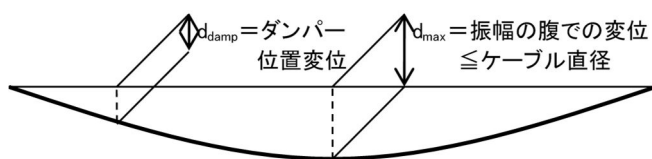


図 3-1 設計変位

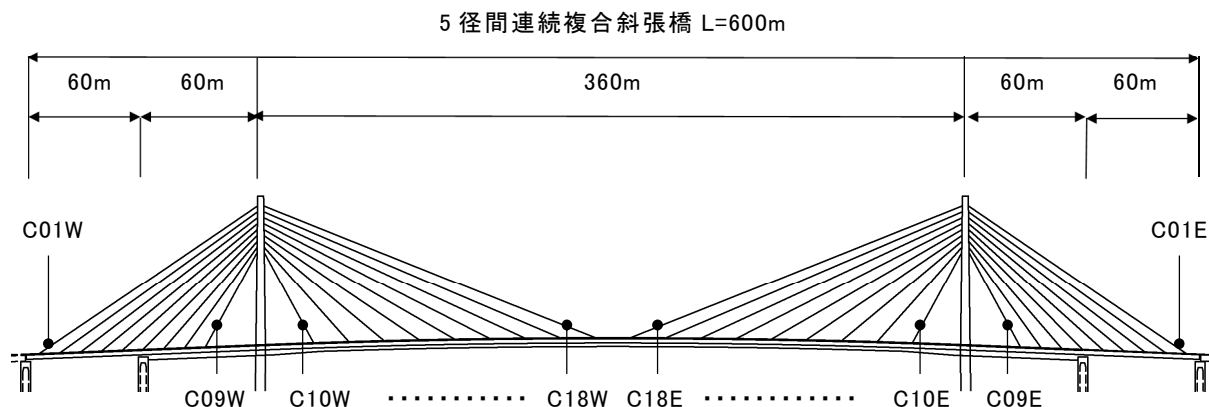


図 3-2 対象橋梁側面図

表 3-1 対象橋梁のケーブルおよび高減衰ゴムダンパーの諸元（その 1）

|                                |                |                              |                   |                   | ケーブル番号   |          |          |          |          |          |          |          |          |
|--------------------------------|----------------|------------------------------|-------------------|-------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 項目                             |                | 記号                           | 単位                |                   | C1       | C2       | C3       | C4       | C5       | C6       | C7       | C8       | C9       |
| 高減衰ゴムダンパー再計算結果（付加減衰・スクルーション数等） | ケーブル諸元         | 素線数                          | N                 | 本                 | 211      | 211      | 187      | 187      | 139      | 109      | 109      | 121      | 121      |
|                                |                | 外径                           | D                 | mm                | 130      | 130      | 120      | 120      | 105      | 95       | 95       | 100      | 100      |
|                                |                | 単位質量                         | m                 | kg/m              | 68.4     | 68.4     | 60.2     | 60.2     | 44.9     | 35.5     | 35.5     | 39.4     | 39.4     |
|                                |                | 単位重量                         | w                 | kN/m              | 0.671    | 0.671    | 0.590    | 0.590    | 0.440    | 0.348    | 0.348    | 0.386    | 0.386    |
|                                |                | 長さ                           | L                 | mm                | 137,820  | 127,470  | 117,190  | 107,070  | 96,960   | 86,550   | 77,430   | 68,200   | 59,210   |
|                                |                | 張力 (D+PS)                    | T                 | kN                | 3,124    | 3,408    | 3,023    | 2,615    | 2,138    | 1,463    | 1,547    | 1,824    | 1,986    |
|                                |                | ダンパー位置                       | xi                | mm                | 4,540    | 4,370    | 4,190    | 4,020    | 3,750    | 3,540    | 3,350    | 3,150    | 2,970    |
|                                | 対数減衰率          | 1次                           | $\delta$ C1       | -                 | 0.005    | 0.005    | 0.005    | 0.005    | 0.005    | 0.005    | 0.005    | 0.005    | 0.005    |
|                                |                | 2次                           | $\delta$ C2       | -                 | 0.005    | 0.005    | 0.005    | 0.005    | 0.005    | 0.005    | 0.005    | 0.005    | 0.005    |
|                                |                | 3次                           | $\delta$ C3       | -                 | 0.005    | 0.005    | 0.005    | 0.005    | 0.005    | 0.005    | 0.005    | 0.005    | 0.005    |
|                                | 空気密度           | $\rho$                       | kg/m <sup>3</sup> |                   | 1.23     | 1.23     | 1.23     | 1.23     | 1.23     | 1.23     | 1.23     | 1.23     | 1.23     |
|                                | 振動数            | 1次                           | f1                | Hz                | 0.775    | 0.875    | 0.956    | 0.974    | 1.126    | 1.173    | 1.348    | 1.578    | 1.897    |
|                                |                | 2次                           | f2                | Hz                | 1.550    | 1.751    | 1.913    | 1.947    | 2.251    | 2.346    | 2.697    | 3.156    | 3.794    |
|                                |                | 3次                           | f3                | Hz                | 2.326    | 2.626    | 2.869    | 2.921    | 3.377    | 3.519    | 4.045    | 4.735    | 5.691    |
|                                |                | 4次                           | f4                | Hz                | 3.101    | 3.502    | 3.826    | 3.894    | 4.503    | 4.692    | 5.393    | 6.313    | 7.587    |
|                                |                | 5次                           | f5                | Hz                | 3.876    | 4.377    | 4.782    | 4.868    | 5.628    | 5.865    | 6.741    | 7.891    | 9.484    |
|                                |                | 6次                           | f6                | Hz                | 4.651    | 5.252    | 5.738    | 5.841    | 6.754    | 7.038    | 8.090    | 9.469    | 11.381   |
|                                | スクルーション数       | ダンパー無                        | Sc                | -                 | 32.9     | 32.9     | 34.0     | 34.0     | 33.1     | 32.0     | 32.0     | 32.0     | 32.0     |
|                                | ケーブル換算質量       | M                            | kN/m/g            |                   | 4.72     | 4.36     | 3.53     | 3.22     | 2.18     | 1.54     | 1.37     | 1.34     | 1.17     |
|                                | モード関数          | 1次                           | $\phi$ 1          | -                 | 0.103304 | 0.107494 | 0.112088 | 0.117679 | 0.121205 | 0.128142 | 0.135503 | 0.144594 | 0.156932 |
|                                |                | 2次                           | $\phi$ 2          | -                 | 0.205503 | 0.213742 | 0.222764 | 0.233724 | 0.240622 | 0.25417  | 0.268506 | 0.286149 | 0.309976 |
|                                |                | 3次                           | $\phi$ 2          | -                 | 0.305503 | 0.317513 | 0.330631 | 0.34652  | 0.356492 | 0.376008 | 0.396556 | 0.42169  | 0.455337 |
|                                |                | 4次                           | $\phi$ 2          | -                 | 0.402234 | 0.417605 | 0.434332 | 0.4545   | 0.467105 | 0.491647 | 0.517291 | 0.548368 | 0.589415 |
|                                |                | 5次                           | $\phi$ 2          | -                 | 0.494661 | 0.512857 | 0.532559 | 0.556165 | 0.570831 | 0.599179 | 0.628484 | 0.66352  | 0.708887 |
|                                |                | 6次                           | $\phi$ 3          | -                 | 0.581794 | 0.602166 | 0.624073 | 0.6501   | 0.666139 | 0.696831 | 0.728085 | 0.764727 | 0.810791 |
|                                | 固有円振動数         | 1次                           | $\omega$ 1        | -                 | 4.871    | 5.500    | 6.009    | 6.117    | 7.073    | 7.370    | 8.471    | 9.916    | 11.918   |
|                                |                | 2次                           | $\omega$ 2        | -                 | 9.741    | 11.001   | 12.018   | 12.234   | 14.146   | 14.740   | 16.943   | 19.832   | 23.836   |
|                                |                | 3次                           | $\omega$ 2        | -                 | 14.612   | 16.501   | 18.027   | 18.352   | 21.219   | 22.110   | 25.414   | 29.749   | 35.755   |
|                                |                | 4次                           | $\omega$ 2        | -                 | 19.483   | 22.001   | 24.037   | 24.469   | 28.291   | 29.481   | 33.886   | 39.665   | 47.673   |
|                                |                | 5次                           | $\omega$ 2        | -                 | 24.354   | 27.502   | 30.046   | 30.586   | 35.364   | 36.851   | 42.357   | 49.581   | 59.591   |
|                                |                | 6次                           | $\omega$ 3        | -                 | 29.224   | 33.002   | 36.055   | 36.703   | 42.437   | 44.221   | 50.829   | 59.497   | 71.509   |
|                                | 高減衰ゴムダンパー      | 損失係数<br>(0℃、20℃、40℃)         | $\gamma$ 0        | -                 | 0.76     | 0.76     | 0.76     | 0.76     | 0.76     | 0.76     | 0.76     | 0.76     | 0.76     |
|                                |                |                              | $\gamma$ 20       | -                 | 0.63     | 0.63     | 0.63     | 0.63     | 0.63     | 0.63     | 0.63     | 0.63     | 0.63     |
|                                |                |                              | $\gamma$ 40       | -                 | 0.63     | 0.63     | 0.63     | 0.63     | 0.63     | 0.63     | 0.63     | 0.63     | 0.63     |
|                                |                | 虚数成分<br>(0℃、20℃、40℃)         | $\nu$ 0           | -                 | 0.6051   | 0.6051   | 0.6051   | 0.6051   | 0.6051   | 0.6051   | 0.6051   | 0.6051   | 0.6051   |
|                                |                |                              | $\nu$ 20          | -                 | 0.5330   | 0.5330   | 0.5330   | 0.5330   | 0.5330   | 0.5330   | 0.5330   | 0.5330   | 0.5330   |
|                                |                |                              | $\nu$ 40          | -                 | 0.5330   | 0.5330   | 0.5330   | 0.5330   | 0.5330   | 0.5330   | 0.5330   | 0.5330   | 0.5330   |
|                                |                | 最適せん断ばね定数理論値<br>(0℃、20℃、40℃) | Kv0               | kN/m              | 621      | 704      | 653      | 590      | 517      | 376      | 421      | 530      | 614      |
|                                |                |                              | Kv20              | kN/m              | 584      | 663      | 614      | 555      | 487      | 354      | 396      | 498      | 578      |
|                                |                |                              | Kv40              | kN/m              | 584      | 663      | 614      | 555      | 487      | 354      | 396      | 498      | 578      |
|                                |                | 単位せん断ばね定数                    | Ko20              | kN/m <sup>2</sup> | 280      | 280      | 280      | 280      | 280      | 280      | 280      | 280      | 280      |
|                                |                | ダンパー設置数                      | n                 | 個                 | 4        | 4        | 4        | 4        | 4        | 3        | 3.5      | 4        | 4        |
|                                |                | 基本せん断ばね定数                    | K20               | kN/m <sup>2</sup> | 1120     | 1120     | 1120     | 1120     | 1120     | 840      | 980      | 1120     | 1120     |
|                                |                | せん断ばね定数温度変化率                 | 0℃                | -                 | 1.70     | 1.70     | 1.70     | 1.70     | 1.70     | 1.70     | 1.70     | 1.70     | 1.70     |
|                                |                |                              | 20℃               | -                 | 1.00     | 1.00     | 1.00     | 1.00     | 1.00     | 1.00     | 1.00     | 1.00     | 1.00     |
|                                |                |                              | 40℃               | -                 | 0.71     | 0.71     | 0.71     | 0.71     | 0.71     | 0.71     | 0.71     | 0.71     | 0.71     |
|                                |                | 設計せん断ばね定数<br>(0℃、20℃、40℃)    | K' 0              | kN/m              | 1904     | 1904     | 1904     | 1904     | 1904     | 1428     | 1666     | 1904     | 1904     |
|                                |                |                              | K' 20             | kN/m              | 1120     | 1120     | 1120     | 1120     | 1120     | 840      | 980      | 1120     | 1120     |
|                                |                |                              | K' 40             | kN/m              | 795      | 795      | 795      | 795      | 795      | 596      | 696      | 795      | 795      |
|                                | 付加減衰率<br>(0℃)  | 1次                           | $\delta$ 1        | -                 | 0.0161   | 0.0212   | 0.0193   | 0.0165   | 0.0123   | 0.0120   | 0.0113   | 0.0157   | 0.0242   |
|                                |                | 2次                           | $\delta$ 2        | -                 | 0.0159   | 0.0210   | 0.0191   | 0.0162   | 0.0121   | 0.0118   | 0.0111   | 0.0154   | 0.0236   |
|                                |                | 3次                           | $\delta$ 2        | -                 | 0.0156   | 0.0206   | 0.0187   | 0.0159   | 0.0118   | 0.0114   | 0.0107   | 0.0149   | 0.0227   |
|                                |                | 4次                           | $\delta$ 2        | -                 | 0.0152   | 0.0200   | 0.0181   | 0.0153   | 0.0114   | 0.0110   | 0.0103   | 0.0141   | 0.0214   |
|                                |                | 5次                           | $\delta$ 2        | -                 | 0.0147   | 0.0193   | 0.0174   | 0.0147   | 0.0109   | 0.0105   | 0.0097   | 0.0133   | 0.0198   |
|                                |                | 6次                           | $\delta$ 3        | -                 | 0.0142   | 0.0185   | 0.0166   | 0.0139   | 0.0103   | 0.0098   | 0.0090   | 0.0122   | 0.0180   |
|                                | 付加減衰率<br>(20℃) | 1次                           | $\delta$ 1        | -                 | 0.0263   | 0.0303   | 0.0299   | 0.0286   | 0.0254   | 0.0258   | 0.0258   | 0.0314   | 0.0402   |
|                                |                | 2次                           | $\delta$ 2        | -                 | 0.0260   | 0.0300   | 0.0295   | 0.0282   | 0.0250   | 0.0253   | 0.0253   | 0.0307   | 0.0392   |
|                                |                | 3次                           | $\delta$ 2        | -                 | 0.0255   | 0.0294   | 0.0289   | 0.0276   | 0.0244   | 0.0246   | 0.0245   | 0.0297   | 0.0376   |
|                                |                | 4次                           | $\delta$ 2        | -                 | 0.0249   | 0.0286   | 0.0280   | 0.0267   | 0.0235   | 0.0237   | 0.0235   | 0.0282   | 0.0354   |
|                                |                | 5次                           | $\delta$ 2        | -                 | 0.0241   | 0.0276   | 0.0270   | 0.0256   | 0.0225   | 0.0225   | 0.0222   | 0.0264   | 0.0328   |
|                                |                | 6次                           | $\delta$ 3        | -                 | 0.0232   | 0.0264   | 0.0257   | 0.0243   | 0.0213   | 0.0212   | 0.0207   | 0.0244   | 0.0298   |
|                                | 付加減衰率<br>(40℃) | 1次                           | $\delta$ 1        | -                 | 0.0326   | 0.0351   | 0.0360   | 0.0365   | 0.0351   | 0.0364   | 0.0375   | 0.0428   | 0.0500   |
|                                |                | 2次                           | $\delta$ 2        | -                 | 0.0322   | 0.0347   | 0.0356   | 0.0360   | 0.0346   | 0.0358   | 0.0368   | 0.0419   | 0.0488   |
|                                |                | 3次                           | $\delta$ 2        | -                 | 0.0316   | 0.0341   | 0.0348   | 0.0352   | 0.0337   | 0.0348   | 0.0357   | 0.0404   | 0.0468   |
|                                |                | 4次                           | $\delta$ 2        | -                 | 0.0308   | 0.0331   | 0.0338   | 0.0340   | 0.0326   | 0.0335   | 0.0341   | 0.0384   | 0.0441   |
|                                |                | 5次                           | $\delta$ 2        | -                 | 0.0299   | 0.0320   | 0.0325   | 0.0326   | 0.0311   | 0.0318   | 0.0322   | 0.0360   | 0.0408   |
|                                |                | 6次                           | $\delta$ 3        | -                 | 0.0287   | 0.0306   | 0.0310   | 0.0309   | 0.0294   | 0.0299   | 0.0300   | 0.0332   | 0.0371   |
|                                | 最小付加減衰率        | $\delta$ min                 | -                 |                   | 0.0142   | 0.0185   | 0.0166   | 0.0139   | 0.0103   | 0.0098   | 0.0090   | 0.0122   | 0.0180   |
|                                | 合計対数減衰率        | $\delta$ (C+D)               | -                 |                   | 0.0192   | 0.0235   | 0.0216   | 0.0189   | 0.0153   | 0.0148   | 0.0140   | 0.0172   | 0.0230   |
|                                | スクルーション数       | ダンパー有                        | Sc                | -                 | 126.1    | 154.8    | 147.0    | 128.7    | 101.5    | 94.8     | 89.8     | 110.2    | 147.0    |

※ 上表のせん断ばね定数および付加減衰は高減衰ゴムダンパーの設計変位を 5mm とした場合を示している。

表 3-2 対象橋梁のケーブルおよび高減衰ゴムダンパーの諸元（その 2）

|                |                              |        |        | ケーブル番号   |          |          |          |          |          |          |          |          |     |     |
|----------------|------------------------------|--------|--------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----|-----|
| 項目             |                              |        |        | 記号       | 単位       | C10      | C11      | C12      | C13      | C14      | C15      | C16      | C17 | C18 |
| ケーブル諸元         | 素線数                          | N      | 本      | 109      | 109      | 109      | 109      | 139      | 163      | 187      | 199      | 187      |     |     |
|                | 外径                           | D      | mm     | 95       | 95       | 95       | 95       | 105      | 115      | 120      | 125      | 120      |     |     |
|                | 単位質量                         | m      | kg/m   | 35.5     | 35.5     | 35.5     | 35.5     | 44.9     | 53.0     | 60.2     | 64.3     | 60.2     |     |     |
|                | 単位重量                         | w      | kN/m   | 0.348    | 0.348    | 0.348    | 0.348    | 0.440    | 0.520    | 0.590    | 0.631    | 0.590    |     |     |
|                | 長さ                           | L      | mm     | 56,650   | 69,080   | 83,420   | 98,990   | 115,550  | 132,410  | 149,750  | 167,180  | 184,720  |     |     |
|                | 張力 (D+PS)                    | T      | kN     | 1,882    | 1,558    | 1,306    | 1,249    | 1,845    | 2,274    | 2,646    | 3,013    | 2,782    |     |     |
|                | ダンパー位置                       | xi     | mm     | 2,880    | 3,200    | 3,570    | 3,960    | 4,390    | 4,780    | 5,180    | 5,540    | 5,850    |     |     |
| 対数減衰率          | 1次                           | δ C1   | -      | 0.005    | 0.005    | 0.005    | 0.005    | 0.005    | 0.005    | 0.005    | 0.005    | 0.005    |     |     |
|                | 2次                           | δ C2   | -      | 0.005    | 0.005    | 0.005    | 0.005    | 0.005    | 0.005    | 0.005    | 0.005    | 0.005    |     |     |
|                | 3次                           | δ C3   | -      | 0.005    | 0.005    | 0.005    | 0.005    | 0.005    | 0.005    | 0.005    | 0.005    | 0.005    |     |     |
| 空気密度           | ρ                            | kg/m3  | 1.23   | 1.23     | 1.23     | 1.23     | 1.23     | 1.23     | 1.23     | 1.23     | 1.23     | 1.23     |     |     |
| 振動数            | 1次                           | f1     | Hz     | 2.033    | 1.517    | 1.150    | 0.948    | 0.877    | 0.782    | 0.700    | 0.647    | 0.582    |     |     |
|                | 2次                           | f2     | Hz     | 4.065    | 3.033    | 2.300    | 1.895    | 1.755    | 1.564    | 1.400    | 1.294    | 1.164    |     |     |
|                | 3次                           | f3     | Hz     | 6.098    | 4.550    | 3.450    | 2.843    | 2.632    | 2.346    | 2.101    | 1.942    | 1.746    |     |     |
|                | 4次                           | f4     | Hz     | 8.130    | 6.066    | 4.599    | 3.790    | 3.510    | 3.128    | 2.801    | 2.589    | 2.328    |     |     |
|                | 5次                           | f5     | Hz     | 10.163   | 7.583    | 5.749    | 4.738    | 4.387    | 3.910    | 3.501    | 3.236    | 2.910    |     |     |
|                | 6次                           | f6     | Hz     | 12.196   | 9.100    | 6.899    | 5.686    | 5.265    | 4.692    | 4.201    | 3.883    | 3.492    |     |     |
| スクルーション数       | ダンパー無                        | Sc     | -      | 32.0     | 32.0     | 32.0     | 32.0     | 33.1     | 32.6     | 34.0     | 33.5     | 34.0     |     |     |
| ケーブル換算質量       | M                            | kN/m/g | 1.01   | 1.23     | 1.48     | 1.76     | 2.59     | 3.51     | 4.50     | 5.38     | 5.56     |          |     |     |
| モード関数          | 1次                           | φ 1    | -      | 0.159036 | 0.145015 | 0.134041 | 0.125346 | 0.119073 | 0.113169 | 0.108457 | 0.103918 | 0.099329 |     |     |
|                | 2次                           | φ 2    | -      | 0.314023 | 0.286965 | 0.265663 | 0.248714 | 0.236451 | 0.224883 | 0.215634 | 0.206711 | 0.197675 |     |     |
|                | 3次                           | φ 2    | -      | 0.461017 | 0.422847 | 0.392491 | 0.36816  | 0.350466 | 0.333708 | 0.320268 | 0.307265 | 0.294066 |     |     |
|                | 4次                           | φ 2    | -      | 0.596277 | 0.54979  | 0.512234 | 0.481798 | 0.459493 | 0.438246 | 0.421123 | 0.404492 | 0.387549 |     |     |
|                | 5次                           | φ 2    | -      | 0.716358 | 0.66511  | 0.622732 | 0.587837 | 0.561982 | 0.537152 | 0.51701  | 0.49734  | 0.477199 |     |     |
|                | 6次                           | φ 3    | -      | 0.818206 | 0.766369 | 0.721991 | 0.684603 | 0.656475 | 0.629158 | 0.606797 | 0.584802 | 0.562128 |     |     |
| 固有円振動数         | 1次                           | ω 1    | -      | 12.771   | 9.529    | 7.225    | 5.954    | 5.513    | 4.913    | 4.400    | 4.066    | 3.657    |     |     |
|                | 2次                           | ω 2    | -      | 25.542   | 19.058   | 14.449   | 11.908   | 11.027   | 9.827    | 8.799    | 8.133    | 7.314    |     |     |
|                | 3次                           | ω 2    | -      | 38.313   | 28.587   | 21.674   | 17.862   | 16.540   | 14.740   | 13.199   | 12.199   | 10.972   |     |     |
|                | 4次                           | ω 2    | -      | 51.085   | 38.116   | 28.899   | 23.816   | 22.053   | 19.654   | 17.598   | 16.266   | 14.629   |     |     |
|                | 5次                           | ω 2    | -      | 63.856   | 47.646   | 36.124   | 29.770   | 27.567   | 24.567   | 21.998   | 20.332   | 18.286   |     |     |
|                | 6次                           | ω 3    | -      | 76.627   | 57.175   | 43.348   | 35.724   | 33.080   | 29.480   | 26.398   | 24.398   | 21.943   |     |     |
| 高減衰<br>ゴムダンパー  | 損失係数<br>(0℃、20℃、40℃)         | γ 0    | -      | 0.76     | 0.76     | 0.76     | 0.76     | 0.76     | 0.76     | 0.76     | 0.76     | 0.76     |     |     |
|                |                              | γ 20   | -      | 0.63     | 0.63     | 0.63     | 0.63     | 0.63     | 0.63     | 0.63     | 0.63     | 0.63     |     |     |
|                |                              | γ 40   | -      | 0.63     | 0.63     | 0.63     | 0.63     | 0.63     | 0.63     | 0.63     | 0.63     | 0.63     |     |     |
|                | 虚数成分<br>(0℃、20℃、40℃)         | ν 0    | -      | 0.6051   | 0.6051   | 0.6051   | 0.6051   | 0.6051   | 0.6051   | 0.6051   | 0.6051   | 0.6051   |     |     |
|                |                              | ν 20   | -      | 0.5330   | 0.5330   | 0.5330   | 0.5330   | 0.5330   | 0.5330   | 0.5330   | 0.5330   | 0.5330   |     |     |
|                |                              | ν 40   | -      | 0.5330   | 0.5330   | 0.5330   | 0.5330   | 0.5330   | 0.5330   | 0.5330   | 0.5330   | 0.5330   |     |     |
|                | 最適せん断ばね定数理論値<br>(0℃、20℃、40℃) | Kv0    | kN/m   | 601      | 445      | 333      | 287      | 381      | 430      | 462      | 491      | 428      |     |     |
|                |                              | Kv20   | kN/m   | 565      | 419      | 314      | 270      | 359      | 405      | 434      | 462      | 403      |     |     |
|                | 単位せん断ばね定数                    | Kv40   | kN/m   | 565      | 419      | 314      | 270      | 359      | 405      | 434      | 462      | 403      |     |     |
|                |                              | Ko20   | kN/m2  | 280      | 280      | 280      | 280      | 280      | 280      | 280      | 280      | 280      |     |     |
|                | ダンパー設置数                      | n      | 個      | 4        | 4        | 3        | 2.5      | 3        | 3.5      | 3.5      | 3.5      | 3        |     |     |
|                | 基本せん断ばね定数                    | K20    | kN/m2  | 1120     | 1120     | 840      | 700      | 840      | 980      | 980      | 980      | 840      |     |     |
|                | せん断ばね定数温度変化率                 | 0℃     | -      | 1.70     | 1.70     | 1.70     | 1.70     | 1.70     | 1.70     | 1.70     | 1.70     | 1.70     |     |     |
|                |                              | 20℃    | -      | 1.00     | 1.00     | 1.00     | 1.00     | 1.00     | 1.00     | 1.00     | 1.00     | 1.00     |     |     |
|                |                              | 40℃    | -      | 0.71     | 0.71     | 0.71     | 0.71     | 0.71     | 0.71     | 0.71     | 0.71     | 0.71     |     |     |
|                | 設計せん断ばね定数<br>(0℃、20℃、40℃)    | K' 0   | kN/m   | 1904     | 1904     | 1428     | 1190     | 1428     | 1666     | 1666     | 1666     | 1428     |     |     |
| K' 20          |                              | kN/m   | 1120   | 1120     | 840      | 700      | 840      | 980      | 980      | 980      | 840      |          |     |     |
| K' 40          |                              | kN/m   | 795    | 795      | 596      | 497      | 596      | 696      | 696      | 696      | 596      |          |     |     |
| 付加減衰率<br>(0℃)  | 1次                           | δ 1    | -      | 0.0234   | 0.0095   | 0.0087   | 0.0090   | 0.0115   | 0.0100   | 0.0116   | 0.0129   | 0.0129   |     |     |
|                | 2次                           | δ 2    | -      | 0.0228   | 0.0093   | 0.0085   | 0.0088   | 0.0114   | 0.0099   | 0.0114   | 0.0128   | 0.0127   |     |     |
|                | 3次                           | δ 2    | -      | 0.0219   | 0.0090   | 0.0083   | 0.0086   | 0.0111   | 0.0096   | 0.0112   | 0.0125   | 0.0125   |     |     |
|                | 4次                           | δ 2    | -      | 0.0206   | 0.0085   | 0.0079   | 0.0083   | 0.0107   | 0.0094   | 0.0109   | 0.0122   | 0.0122   |     |     |
|                | 5次                           | δ 2    | -      | 0.0190   | 0.0080   | 0.0075   | 0.0079   | 0.0103   | 0.0090   | 0.0105   | 0.0118   | 0.0119   |     |     |
|                | 6次                           | δ 3    | -      | 0.0172   | 0.0074   | 0.0070   | 0.0074   | 0.0097   | 0.0086   | 0.0101   | 0.0113   | 0.0114   |     |     |
| 付加減衰率<br>(20℃) | 1次                           | δ 1    | -      | 0.0399   | 0.0245   | 0.0225   | 0.0221   | 0.0243   | 0.0221   | 0.0232   | 0.0239   | 0.0232   |     |     |
|                | 2次                           | δ 2    | -      | 0.0389   | 0.0240   | 0.0221   | 0.0217   | 0.0240   | 0.0218   | 0.0229   | 0.0236   | 0.0230   |     |     |
|                | 3次                           | δ 2    | -      | 0.0372   | 0.0231   | 0.0214   | 0.0211   | 0.0234   | 0.0213   | 0.0225   | 0.0232   | 0.0226   |     |     |
|                | 4次                           | δ 2    | -      | 0.0350   | 0.0220   | 0.0205   | 0.0204   | 0.0226   | 0.0207   | 0.0218   | 0.0226   | 0.0221   |     |     |
|                | 5次                           | δ 2    | -      | 0.0324   | 0.0206   | 0.0194   | 0.0194   | 0.0217   | 0.0199   | 0.0211   | 0.0219   | 0.0215   |     |     |
|                | 6次                           | δ 3    | -      | 0.0293   | 0.0190   | 0.0181   | 0.0183   | 0.0205   | 0.0189   | 0.0202   | 0.0210   | 0.0207   |     |     |
| 付加減衰率<br>(40℃) | 1次                           | δ 1    | -      | 0.0503   | 0.0377   | 0.0347   | 0.0333   | 0.0341   | 0.0316   | 0.0317   | 0.0313   | 0.0302   |     |     |
|                | 2次                           | δ 2    | -      | 0.0490   | 0.0369   | 0.0341   | 0.0327   | 0.0336   | 0.0312   | 0.0313   | 0.0310   | 0.0299   |     |     |
|                | 3次                           | δ 2    | -      | 0.0470   | 0.0356   | 0.0331   | 0.0319   | 0.0328   | 0.0305   | 0.0307   | 0.0304   | 0.0294   |     |     |
|                | 4次                           | δ 2    | -      | 0.0442   | 0.0339   | 0.0317   | 0.0307   | 0.0317   | 0.0296   | 0.0298   | 0.0297   | 0.0287   |     |     |
|                | 5次                           | δ 2    | -      | 0.0408   | 0.0317   | 0.0300   | 0.0293   | 0.0303   | 0.0285   | 0.0288   | 0.0287   | 0.0279   |     |     |
|                | 6次                           | δ 3    | -      | 0.0370   | 0.0293   | 0.0280   | 0.0276   | 0.0288   | 0.0271   | 0.0275   | 0.0276   | 0.0269   |     |     |
| 最小付加減衰率        | δ min                        | -      | 0.0172 | 0.0074   | 0.0070   | 0.0074   | 0.0097   | 0.0086   | 0.0101   | 0.0113   | 0.0114   |          |     |     |
| 合計対数減衰率        | δ (C+D)                      | -      | 0.0222 | 0.0124   | 0.0120   | 0.0124   | 0.0147   | 0.0136   | 0.0151   | 0.0163   | 0.0164   |          |     |     |
| スクルーション数       | ダンパー有                        | Sc     | -      | 142.2    | 79.1     | 76.8     | 79.5     | 97.4     | 88.5     | 102.2    | 109.4    | 111.6    |     |     |

※ 上表のせん断ばね定数および付加減衰は高減衰ゴムダンパーの設計変位を 5mm とした場合を示している。

表 3-3 対象橋梁のケーブルおよび高減衰ゴムダンパーの諸元（その 3）

|                                   |                |                              |                   |                   | ケーブル番号   |          |          |          |          |          |          |          |          |
|-----------------------------------|----------------|------------------------------|-------------------|-------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 項目                                |                | 記号                           | 単位                |                   | C1       | C2       | C3       | C4       | C5       | C6       | C7       | C8       | C9       |
| 高減衰ゴムダンパー<br>計算結果（付加減衰・スクルーション数等） | ケーブル諸元         | 素線数                          | N                 | 本                 | 211      | 211      | 187      | 187      | 139      | 109      | 109      | 121      | 121      |
|                                   |                | 外径                           | D                 | mm                | 130      | 130      | 120      | 120      | 105      | 95       | 95       | 100      | 100      |
|                                   |                | 単位質量                         | m                 | kg/m              | 68.4     | 68.4     | 60.2     | 60.2     | 44.9     | 35.5     | 35.5     | 39.4     | 39.4     |
|                                   |                | 単位重量                         | w                 | kN/m              | 0.671    | 0.671    | 0.590    | 0.590    | 0.440    | 0.348    | 0.348    | 0.386    | 0.386    |
|                                   |                | 長さ                           | L                 | mm                | 137,820  | 127,470  | 117,190  | 107,070  | 96,960   | 86,550   | 77,430   | 68,200   | 59,210   |
|                                   |                | 張力 (D+PS)                    | T                 | kN                | 3,124    | 3,408    | 3,023    | 2,615    | 2,138    | 1,463    | 1,547    | 1,824    | 1,986    |
|                                   |                | ダンパー位置                       | xi                | mm                | 4,540    | 4,370    | 4,190    | 4,020    | 3,750    | 3,540    | 3,350    | 3,150    | 2,970    |
|                                   | 対数減衰率          | 1次                           | $\delta$ C1       | -                 | 0.005    | 0.005    | 0.005    | 0.005    | 0.005    | 0.005    | 0.005    | 0.005    | 0.005    |
|                                   |                | 2次                           | $\delta$ C2       | -                 | 0.005    | 0.005    | 0.005    | 0.005    | 0.005    | 0.005    | 0.005    | 0.005    | 0.005    |
|                                   |                | 3次                           | $\delta$ C3       | -                 | 0.005    | 0.005    | 0.005    | 0.005    | 0.005    | 0.005    | 0.005    | 0.005    | 0.005    |
|                                   | 空気密度           | $\rho$                       | kg/m <sup>3</sup> |                   | 1.23     | 1.23     | 1.23     | 1.23     | 1.23     | 1.23     | 1.23     | 1.23     | 1.23     |
|                                   | 振動数            | 1次                           | f1                | Hz                | 0.775    | 0.875    | 0.956    | 0.974    | 1.126    | 1.173    | 1.348    | 1.578    | 1.897    |
|                                   |                | 2次                           | f2                | Hz                | 1.550    | 1.751    | 1.913    | 1.947    | 2.251    | 2.346    | 2.697    | 3.156    | 3.794    |
|                                   |                | 3次                           | f3                | Hz                | 2.326    | 2.626    | 2.869    | 2.921    | 3.377    | 3.519    | 4.045    | 4.735    | 5.691    |
|                                   |                | 4次                           | f4                | Hz                | 3.101    | 3.502    | 3.826    | 3.894    | 4.503    | 4.692    | 5.393    | 6.313    | 7.587    |
|                                   |                | 5次                           | f5                | Hz                | 3.876    | 4.377    | 4.782    | 4.868    | 5.628    | 5.865    | 6.741    | 7.891    | 9.484    |
|                                   |                | 6次                           | f6                | Hz                | 4.651    | 5.252    | 5.738    | 5.841    | 6.754    | 7.038    | 8.090    | 9.469    | 11.381   |
|                                   | スクルーション数       | ダンパー無                        | Sc                | -                 | 32.9     | 32.9     | 34.0     | 34.0     | 33.1     | 32.0     | 32.0     | 32.0     | 32.0     |
|                                   | ケーブル換算質量       | M                            | kN/m/g            |                   | 4.72     | 4.36     | 3.53     | 3.22     | 2.18     | 1.54     | 1.37     | 1.34     | 1.17     |
|                                   | モード関数          | 1次                           | $\phi$ 1          | -                 | 0.103304 | 0.107494 | 0.112088 | 0.117679 | 0.121205 | 0.128142 | 0.135503 | 0.144594 | 0.156932 |
|                                   |                | 2次                           | $\phi$ 2          | -                 | 0.205503 | 0.213742 | 0.222764 | 0.233724 | 0.240622 | 0.25417  | 0.268506 | 0.286149 | 0.309976 |
|                                   |                | 3次                           | $\phi$ 2          | -                 | 0.305503 | 0.317513 | 0.330631 | 0.34652  | 0.356492 | 0.376008 | 0.396556 | 0.42169  | 0.455337 |
|                                   |                | 4次                           | $\phi$ 2          | -                 | 0.402234 | 0.417605 | 0.434332 | 0.4545   | 0.467105 | 0.491647 | 0.517291 | 0.548368 | 0.589415 |
|                                   |                | 5次                           | $\phi$ 2          | -                 | 0.494661 | 0.512857 | 0.532559 | 0.556165 | 0.570831 | 0.599179 | 0.628484 | 0.66352  | 0.708887 |
|                                   |                | 6次                           | $\phi$ 3          | -                 | 0.581794 | 0.602166 | 0.624073 | 0.6501   | 0.666139 | 0.696831 | 0.728085 | 0.764727 | 0.810791 |
|                                   | 固有円振動数         | 1次                           | $\omega$ 1        | -                 | 4.871    | 5.500    | 6.009    | 6.117    | 7.073    | 7.370    | 8.471    | 9.916    | 11.918   |
|                                   |                | 2次                           | $\omega$ 2        | -                 | 9.741    | 11.001   | 12.018   | 12.234   | 14.146   | 14.740   | 16.943   | 19.832   | 23.836   |
|                                   |                | 3次                           | $\omega$ 2        | -                 | 14.612   | 16.501   | 18.027   | 18.352   | 21.219   | 22.110   | 25.414   | 29.749   | 35.755   |
|                                   |                | 4次                           | $\omega$ 2        | -                 | 19.483   | 22.001   | 24.037   | 24.469   | 28.291   | 29.481   | 33.886   | 39.665   | 47.673   |
|                                   |                | 5次                           | $\omega$ 2        | -                 | 24.354   | 27.502   | 30.046   | 30.586   | 35.364   | 36.851   | 42.357   | 49.581   | 59.591   |
|                                   |                | 6次                           | $\omega$ 3        | -                 | 29.224   | 33.002   | 36.055   | 36.703   | 42.437   | 44.221   | 50.829   | 59.497   | 71.509   |
|                                   | 高減衰<br>ゴムダンパー  | 損失係数<br>(0℃、20℃、40℃)         | $\gamma$ 0        | -                 | 0.76     | 0.76     | 0.76     | 0.76     | 0.76     | 0.76     | 0.76     | 0.76     | 0.76     |
|                                   |                |                              | $\gamma$ 20       | -                 | 0.62     | 0.62     | 0.62     | 0.62     | 0.62     | 0.62     | 0.62     | 0.62     | 0.62     |
|                                   |                |                              | $\gamma$ 40       | -                 | 0.62     | 0.62     | 0.62     | 0.62     | 0.62     | 0.62     | 0.62     | 0.62     | 0.62     |
|                                   |                | 虚数成分<br>(0℃、20℃、40℃)         | $\nu$ 0           | -                 | 0.6051   | 0.6051   | 0.6051   | 0.6051   | 0.6051   | 0.6051   | 0.6051   | 0.6051   | 0.6051   |
|                                   |                |                              | $\nu$ 20          | -                 | 0.5269   | 0.5269   | 0.5269   | 0.5269   | 0.5269   | 0.5269   | 0.5269   | 0.5269   | 0.5269   |
|                                   |                |                              | $\nu$ 40          | -                 | 0.5269   | 0.5269   | 0.5269   | 0.5269   | 0.5269   | 0.5269   | 0.5269   | 0.5269   | 0.5269   |
|                                   |                | 最適せん断バネ定数理論値<br>(0℃、20℃、40℃) | Kv0               | kN/m              | 621      | 704      | 653      | 590      | 517      | 376      | 421      | 530      | 614      |
|                                   |                |                              | Kv20              | kN/m              | 581      | 660      | 611      | 552      | 485      | 352      | 394      | 496      | 575      |
|                                   |                |                              | Kv40              | kN/m              | 581      | 660      | 611      | 552      | 485      | 352      | 394      | 496      | 575      |
|                                   |                | 単位せん断ばね定数                    | Ko20              | kN/m <sup>2</sup> | 160.888  | 160.888  | 160.888  | 160.888  | 160.888  | 160.888  | 160.888  | 160.888  | 160.888  |
|                                   |                | ダンパー設置数                      | n                 | 個                 | 4        | 4        | 4        | 4        | 4        | 3        | 3.5      | 4        | 4        |
|                                   |                | 基本せん断ばね定数                    | K20               | kN/m <sup>2</sup> | 643.552  | 643.552  | 643.552  | 643.552  | 643.552  | 482.664  | 563.108  | 643.552  | 643.552  |
|                                   |                | せん断ばね定数温度変化率                 | 0℃                | -                 | 1.70     | 1.70     | 1.70     | 1.70     | 1.70     | 1.70     | 1.70     | 1.70     | 1.70     |
|                                   |                |                              | 20℃               | -                 | 1.00     | 1.00     | 1.00     | 1.00     | 1.00     | 1.00     | 1.00     | 1.00     | 1.00     |
|                                   |                |                              | 40℃               | -                 | 0.71     | 0.71     | 0.71     | 0.71     | 0.71     | 0.71     | 0.71     | 0.71     | 0.71     |
|                                   |                | 設計せん断ばね定数<br>(0℃、20℃、40℃)    | K' 0              | kN/m              | 1094     | 1094     | 1094     | 1094     | 1094     | 821      | 957      | 1094     | 1094     |
|                                   |                |                              | K' 20             | kN/m              | 644      | 644      | 644      | 644      | 644      | 483      | 563      | 644      | 644      |
|                                   |                |                              | K' 40             | kN/m              | 457      | 457      | 457      | 457      | 457      | 343      | 400      | 457      | 457      |
|                                   | 付加減衰率<br>(0℃)  | 1次                           | $\delta$ 1        | -                 | 0.0340   | 0.0385   | 0.0384   | 0.0374   | 0.0339   | 0.0346   | 0.0349   | 0.0417   | 0.0521   |
|                                   |                | 2次                           | $\delta$ 2        | -                 | 0.0337   | 0.0381   | 0.0379   | 0.0368   | 0.0334   | 0.0340   | 0.0342   | 0.0409   | 0.0508   |
|                                   |                | 3次                           | $\delta$ 2        | -                 | 0.0331   | 0.0374   | 0.0371   | 0.0360   | 0.0326   | 0.0331   | 0.0332   | 0.0394   | 0.0487   |
|                                   |                | 4次                           | $\delta$ 2        | -                 | 0.0323   | 0.0363   | 0.0360   | 0.0348   | 0.0314   | 0.0318   | 0.0318   | 0.0375   | 0.0459   |
|                                   |                | 5次                           | $\delta$ 2        | -                 | 0.0312   | 0.0351   | 0.0347   | 0.0334   | 0.0301   | 0.0303   | 0.0300   | 0.0352   | 0.0425   |
|                                   |                | 6次                           | $\delta$ 3        | -                 | 0.0300   | 0.0336   | 0.0331   | 0.0317   | 0.0284   | 0.0284   | 0.0280   | 0.0324   | 0.0386   |
|                                   | 付加減衰率<br>(20℃) | 1次                           | $\delta$ 1        | -                 | 0.0336   | 0.0352   | 0.0367   | 0.0382   | 0.0381   | 0.0399   | 0.0416   | 0.0461   | 0.0518   |
|                                   |                | 2次                           | $\delta$ 2        | -                 | 0.0332   | 0.0348   | 0.0362   | 0.0376   | 0.0376   | 0.0393   | 0.0409   | 0.0452   | 0.0505   |
|                                   |                | 3次                           | $\delta$ 2        | -                 | 0.0327   | 0.0341   | 0.0355   | 0.0368   | 0.0366   | 0.0382   | 0.0396   | 0.0436   | 0.0484   |
|                                   |                | 4次                           | $\delta$ 2        | -                 | 0.0318   | 0.0332   | 0.0344   | 0.0356   | 0.0354   | 0.0367   | 0.0379   | 0.0415   | 0.0457   |
|                                   |                | 5次                           | $\delta$ 2        | -                 | 0.0308   | 0.0320   | 0.0331   | 0.0341   | 0.0338   | 0.0349   | 0.0358   | 0.0388   | 0.0423   |
|                                   |                | 6次                           | $\delta$ 3        | -                 | 0.0296   | 0.0307   | 0.0316   | 0.0324   | 0.0320   | 0.0328   | 0.0334   | 0.0358   | 0.0384   |
|                                   | 付加減衰率<br>(40℃) | 1次                           | $\delta$ 1        | -                 | 0.0329   | 0.0331   | 0.0354   | 0.0380   | 0.0398   | 0.0422   | 0.0447   | 0.0477   | 0.0509   |
|                                   |                | 2次                           | $\delta$ 2        | -                 | 0.0325   | 0.0328   | 0.0349   | 0.0375   | 0.0392   | 0.0415   | 0.0439   | 0.0467   | 0.0496   |
|                                   |                | 3次                           | $\delta$ 2        | -                 | 0.0320   | 0.0321   | 0.0342   | 0.0366   | 0.0382   | 0.0404   | 0.0426   | 0.0451   | 0.0476   |
|                                   |                | 4次                           | $\delta$ 2        | -                 | 0.0312   | 0.0313   | 0.0332   | 0.0354   | 0.0369   | 0.0388   | 0.0407   | 0.0429   | 0.0448   |
|                                   |                | 5次                           | $\delta$ 2        | -                 | 0.0302   | 0.0302   | 0.0319   | 0.0339   | 0.0353   | 0.0369   | 0.0385   | 0.0402   | 0.0415   |
|                                   |                | 6次                           | $\delta$ 3        | -                 | 0.0290   | 0.0289   | 0.0304   | 0.0322   | 0.0334   | 0.0347   | 0.0359   | 0.0371   | 0.0377   |
|                                   | 最小付加減衰率        | $\delta$ min                 | -                 |                   | 0.0290   | 0.0289   | 0.0304   | 0.0317   | 0.0284   | 0.0284   | 0.0280   | 0.0324   | 0.0377   |
|                                   | 合計対数減衰率        | $\delta$ (C+D)               | -                 |                   | 0.0340   | 0.0339   | 0.0354   | 0.0367   | 0.0334   | 0.0334   | 0.0330   | 0.0374   | 0.0427   |
|                                   | スクルーション数       | ダンパー有                        | Sc                | -                 | 223.7    | 223.1    | 240.8    | 249.1    | 221.2    | 213.7    | 210.8    | 239.5    | 273.3    |

※ 上表のせん断ばね定数および付加減衰は高減衰ゴムダンパーの設計変位を 10mm とした場合を示している。

表 3-4 対象橋梁のケーブルおよび高減衰ゴムダンパーの諸元（その 4）

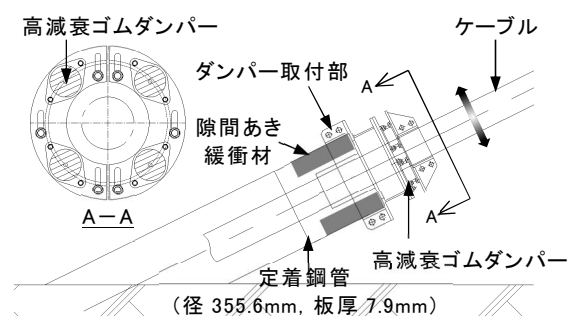
|                               |                              |          |        | ケーブル番号  |          |          |          |          |          |          |          |          |          |     |
|-------------------------------|------------------------------|----------|--------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----|
| 項目                            |                              |          |        | 記号      | 単位       | C10      | C11      | C12      | C13      | C14      | C15      | C16      | C17      | C18 |
| 高減衰ゴムダンパー計算結果（付加減衰・スクルーション数等） | ケーブル諸元                       | 素線数      | N      | 本       | 109      | 109      | 109      | 109      | 139      | 163      | 187      | 199      | 187      |     |
|                               |                              | 外径       | D      | mm      | 95       | 95       | 95       | 95       | 105      | 115      | 120      | 125      | 120      |     |
|                               |                              | 単位質量     | m      | kg/m    | 35.5     | 35.5     | 35.5     | 35.5     | 44.9     | 53.0     | 60.2     | 64.3     | 60.2     |     |
|                               |                              | 単位重量     | w      | kN/m    | 0.348    | 0.348    | 0.348    | 0.348    | 0.440    | 0.520    | 0.590    | 0.631    | 0.590    |     |
|                               |                              | 長さ       | L      | mm      | 56,650   | 69,080   | 83,420   | 98,990   | 115,550  | 132,410  | 149,750  | 167,180  | 184,720  |     |
|                               |                              | 張力（D+PS） | T      | kN      | 1,882    | 1,558    | 1,306    | 1,249    | 1,845    | 2,274    | 2,646    | 3,013    | 2,782    |     |
|                               | 対数減衰率                        | ダンパー位置   | xi     | mm      | 2,880    | 3,200    | 3,570    | 3,960    | 4,390    | 4,780    | 5,180    | 5,540    | 5,850    |     |
|                               |                              | 1次       | δ C1   | -       | 0.005    | 0.005    | 0.005    | 0.005    | 0.005    | 0.005    | 0.005    | 0.005    | 0.005    |     |
|                               |                              | 2次       | δ C2   | -       | 0.005    | 0.005    | 0.005    | 0.005    | 0.005    | 0.005    | 0.005    | 0.005    | 0.005    |     |
|                               | 空気密度                         | 3次       | δ C3   | -       | 0.005    | 0.005    | 0.005    | 0.005    | 0.005    | 0.005    | 0.005    | 0.005    | 0.005    |     |
|                               |                              | ρ        | kg/m3  | 1.23    | 1.23     | 1.23     | 1.23     | 1.23     | 1.23     | 1.23     | 1.23     | 1.23     | 1.23     |     |
|                               | 振動数                          | 1次       | f1     | Hz      | 2.033    | 1.517    | 1.150    | 0.948    | 0.877    | 0.782    | 0.700    | 0.647    | 0.582    |     |
|                               |                              | 2次       | f2     | Hz      | 4.065    | 3.033    | 2.300    | 1.895    | 1.755    | 1.564    | 1.400    | 1.294    | 1.164    |     |
|                               |                              | 3次       | f3     | Hz      | 6.098    | 4.550    | 3.450    | 2.843    | 2.632    | 2.346    | 2.101    | 1.942    | 1.746    |     |
|                               |                              | 4次       | f4     | Hz      | 8.130    | 6.066    | 4.599    | 3.790    | 3.510    | 3.128    | 2.801    | 2.589    | 2.328    |     |
|                               |                              | 5次       | f5     | Hz      | 10.163   | 7.583    | 5.749    | 4.738    | 4.387    | 3.910    | 3.501    | 3.236    | 2.910    |     |
|                               |                              | 6次       | f6     | Hz      | 12.196   | 9.100    | 6.899    | 5.686    | 5.265    | 4.692    | 4.201    | 3.883    | 3.492    |     |
|                               | スクルーション数                     | ダンパー無    | Sc     | -       | 32.0     | 32.0     | 32.0     | 32.0     | 33.1     | 32.6     | 34.0     | 33.5     | 34.0     |     |
|                               | ケーブル換算質量                     | M        | kN/m/g | 1.01    | 1.23     | 1.48     | 1.76     | 2.59     | 3.51     | 4.50     | 5.38     | 5.56     | 5.56     |     |
|                               | モード関数                        | 1次       | φ 1    | -       | 0.159036 | 0.145015 | 0.134041 | 0.125346 | 0.119073 | 0.113169 | 0.108457 | 0.103918 | 0.099329 |     |
|                               |                              | 2次       | φ 2    | -       | 0.314023 | 0.286965 | 0.265663 | 0.248714 | 0.236451 | 0.224883 | 0.215634 | 0.206711 | 0.197675 |     |
|                               |                              | 3次       | φ 2    | -       | 0.461017 | 0.422847 | 0.392491 | 0.36816  | 0.350466 | 0.333708 | 0.320268 | 0.307265 | 0.294066 |     |
|                               |                              | 4次       | φ 2    | -       | 0.596277 | 0.54979  | 0.512234 | 0.481798 | 0.459493 | 0.438246 | 0.421123 | 0.404492 | 0.387549 |     |
|                               |                              | 5次       | φ 2    | -       | 0.716358 | 0.66511  | 0.622732 | 0.587837 | 0.561982 | 0.537152 | 0.51701  | 0.49734  | 0.477199 |     |
|                               |                              | 6次       | φ 3    | -       | 0.818206 | 0.766369 | 0.721991 | 0.684603 | 0.656475 | 0.629158 | 0.606797 | 0.584802 | 0.562128 |     |
|                               | 固有円振動数                       | 1次       | ω 1    | -       | 12.771   | 9.529    | 7.225    | 5.954    | 5.513    | 4.913    | 4.400    | 4.066    | 3.657    |     |
|                               |                              | 2次       | ω 2    | -       | 25.542   | 19.058   | 14.449   | 11.908   | 11.027   | 9.827    | 8.799    | 8.133    | 7.314    |     |
|                               |                              | 3次       | ω 2    | -       | 38.313   | 28.587   | 21.674   | 17.862   | 16.540   | 14.740   | 13.199   | 12.199   | 10.972   |     |
|                               |                              | 4次       | ω 2    | -       | 51.085   | 38.116   | 28.899   | 23.816   | 22.053   | 19.654   | 17.598   | 16.266   | 14.629   |     |
|                               |                              | 5次       | ω 2    | -       | 63.856   | 47.646   | 36.124   | 29.770   | 27.567   | 24.567   | 21.998   | 20.332   | 18.286   |     |
| 6次                            |                              | ω 3      | -      | 76.627  | 57.175   | 43.348   | 35.724   | 33.080   | 29.480   | 26.398   | 24.398   | 21.943   |          |     |
| 高減衰ゴムダンパー                     | 損失係数<br>（0℃、20℃、40℃）         | γ 0      | -      | 0.76    | 0.76     | 0.76     | 0.76     | 0.76     | 0.76     | 0.76     | 0.76     | 0.76     |          |     |
|                               |                              | γ 20     | -      | 0.62    | 0.62     | 0.62     | 0.62     | 0.62     | 0.62     | 0.62     | 0.62     | 0.62     |          |     |
|                               |                              | γ 40     | -      | 0.62    | 0.62     | 0.62     | 0.62     | 0.62     | 0.62     | 0.62     | 0.62     | 0.62     |          |     |
|                               | 虚数成分<br>（0℃、20℃、40℃）         | ν 0      | -      | 0.6051  | 0.6051   | 0.6051   | 0.6051   | 0.6051   | 0.6051   | 0.6051   | 0.6051   | 0.6051   |          |     |
|                               |                              | ν 20     | -      | 0.5269  | 0.5269   | 0.5269   | 0.5269   | 0.5269   | 0.5269   | 0.5269   | 0.5269   | 0.5269   |          |     |
|                               |                              | ν 40     | -      | 0.5269  | 0.5269   | 0.5269   | 0.5269   | 0.5269   | 0.5269   | 0.5269   | 0.5269   | 0.5269   |          |     |
|                               | 最適せん断ばね定数理論値<br>（0℃、20℃、40℃） | Kv0      | kN/m   | 601     | 445      | 333      | 287      | 381      | 430      | 462      | 491      | 428      |          |     |
|                               |                              | Kv20     | kN/m   | 563     | 417      | 312      | 268      | 357      | 403      | 432      | 460      | 401      |          |     |
|                               |                              | Kv40     | kN/m   | 563     | 417      | 312      | 268      | 357      | 403      | 432      | 460      | 401      |          |     |
|                               | 単位せん断ばね定数                    | Ko20     | kN/m2  | 160.888 | 160.888  | 160.888  | 160.888  | 160.888  | 160.888  | 160.888  | 160.888  | 160.888  |          |     |
|                               | ダンパー設置数                      | n        | 個      | 4       | 4        | 3        | 2.5      | 3        | 3.5      | 3.5      | 3.5      | 3        |          |     |
|                               | 基本せん断ばね定数                    | K20      | kN/m2  | 643.552 | 643.552  | 482.664  | 402.22   | 482.664  | 563.108  | 563.108  | 563.108  | 482.664  |          |     |
|                               | せん断ばね定数温度変化率                 | 0℃       | -      | 1.70    | 1.70     | 1.70     | 1.70     | 1.70     | 1.70     | 1.70     | 1.70     | 1.70     |          |     |
|                               |                              | 20℃      | -      | 1.00    | 1.00     | 1.00     | 1.00     | 1.00     | 1.00     | 1.00     | 1.00     | 1.00     |          |     |
|                               |                              | 40℃      | -      | 0.71    | 0.71     | 0.71     | 0.71     | 0.71     | 0.71     | 0.71     | 0.71     | 0.71     |          |     |
|                               | 設計せん断ばね定数<br>（0℃、20℃、40℃）    | K' 0     | kN/m   | 1094    | 1094     | 821      | 684      | 821      | 957      | 957      | 957      | 821      |          |     |
|                               |                              | K' 20    | kN/m   | 644     | 644      | 483      | 402      | 483      | 563      | 563      | 563      | 483      |          |     |
|                               |                              | K' 40    | kN/m   | 457     | 457      | 343      | 286      | 343      | 400      | 400      | 400      | 343      |          |     |
| 付加減衰率<br>（0℃）                 | 1次                           | δ 1      | -      | 0.0519  | 0.0337   | 0.0309   | 0.0302   | 0.0326   | 0.0298   | 0.0308   | 0.0314   | 0.0305   |          |     |
|                               | 2次                           | δ 2      | -      | 0.0506  | 0.0330   | 0.0304   | 0.0297   | 0.0321   | 0.0294   | 0.0305   | 0.0311   | 0.0302   |          |     |
|                               | 3次                           | δ 2      | -      | 0.0484  | 0.0318   | 0.0295   | 0.0289   | 0.0314   | 0.0287   | 0.0299   | 0.0305   | 0.0297   |          |     |
|                               | 4次                           | δ 2      | -      | 0.0456  | 0.0303   | 0.0282   | 0.0279   | 0.0303   | 0.0279   | 0.0291   | 0.0297   | 0.0290   |          |     |
|                               | 5次                           | δ 2      | -      | 0.0421  | 0.0283   | 0.0267   | 0.0265   | 0.0290   | 0.0268   | 0.0280   | 0.0288   | 0.0282   |          |     |
|                               | 6次                           | δ 3      | -      | 0.0382  | 0.0261   | 0.0249   | 0.0250   | 0.0275   | 0.0255   | 0.0268   | 0.0276   | 0.0271   |          |     |
| 付加減衰率<br>（20℃）                | 1次                           | δ 1      | -      | 0.0524  | 0.0430   | 0.0396   | 0.0376   | 0.0372   | 0.0349   | 0.0342   | 0.0332   | 0.0319   |          |     |
|                               | 2次                           | δ 2      | -      | 0.0510  | 0.0421   | 0.0389   | 0.0370   | 0.0367   | 0.0344   | 0.0338   | 0.0329   | 0.0315   |          |     |
|                               | 3次                           | δ 2      | -      | 0.0489  | 0.0407   | 0.0377   | 0.0360   | 0.0358   | 0.0337   | 0.0331   | 0.0323   | 0.0310   |          |     |
|                               | 4次                           | δ 2      | -      | 0.0460  | 0.0387   | 0.0362   | 0.0347   | 0.0346   | 0.0327   | 0.0322   | 0.0315   | 0.0303   |          |     |
|                               | 5次                           | δ 2      | -      | 0.0425  | 0.0362   | 0.0342   | 0.0330   | 0.0331   | 0.0314   | 0.0311   | 0.0305   | 0.0294   |          |     |
|                               | 6次                           | δ 3      | -      | 0.0385  | 0.0334   | 0.0319   | 0.0311   | 0.0314   | 0.0299   | 0.0297   | 0.0292   | 0.0283   |          |     |
| 付加減衰率<br>（40℃）                | 1次                           | δ 1      | -      | 0.0518  | 0.0478   | 0.0440   | 0.0412   | 0.0391   | 0.0371   | 0.0354   | 0.0337   | 0.0321   |          |     |
|                               | 2次                           | δ 2      | -      | 0.0505  | 0.0468   | 0.0432   | 0.0405   | 0.0385   | 0.0366   | 0.0350   | 0.0333   | 0.0317   |          |     |
|                               | 3次                           | δ 2      | -      | 0.0484  | 0.0452   | 0.0419   | 0.0395   | 0.0376   | 0.0359   | 0.0343   | 0.0327   | 0.0312   |          |     |
|                               | 4次                           | δ 2      | -      | 0.0455  | 0.0429   | 0.0402   | 0.0380   | 0.0364   | 0.0348   | 0.0334   | 0.0319   | 0.0305   |          |     |
|                               | 5次                           | δ 2      | -      | 0.0420  | 0.0402   | 0.0380   | 0.0362   | 0.0348   | 0.0334   | 0.0322   | 0.0309   | 0.0296   |          |     |
|                               | 6次                           | δ 3      | -      | 0.0381  | 0.0371   | 0.0355   | 0.0341   | 0.0330   | 0.0319   | 0.0308   | 0.0296   | 0.0285   |          |     |
| 最小付加減衰率                       | δ min                        | -        | 0.0381 | 0.0261  | 0.0249   | 0.0250   | 0.0275   | 0.0255   | 0.0268   | 0.0276   | 0.0271   | 0.0271   |          |     |
| 合計対数減衰率                       | δ（C+D）                       | -        | 0.0431 | 0.0311  | 0.0299   | 0.0300   | 0.0325   | 0.0305   | 0.0318   | 0.0326   | 0.0321   | 0.0321   |          |     |
| スクルーション数                      | ダンパー有                        | Sc       | -      | 275.5   | 199.0    | 191.4    | 191.8    | 215.1    | 199.2    | 216.2    | 218.4    | 218.3    |          |     |

※ 上表のせん断ばね定数および付加減衰は高減衰ゴムダンパーの設計変位を 10mm とした場合を示している。

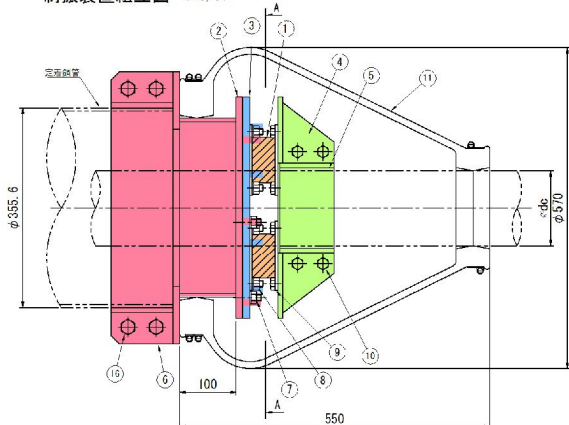


高減衰ゴムダンパーの取付位置の概要図および取付部の構造を右図および下図に示す。

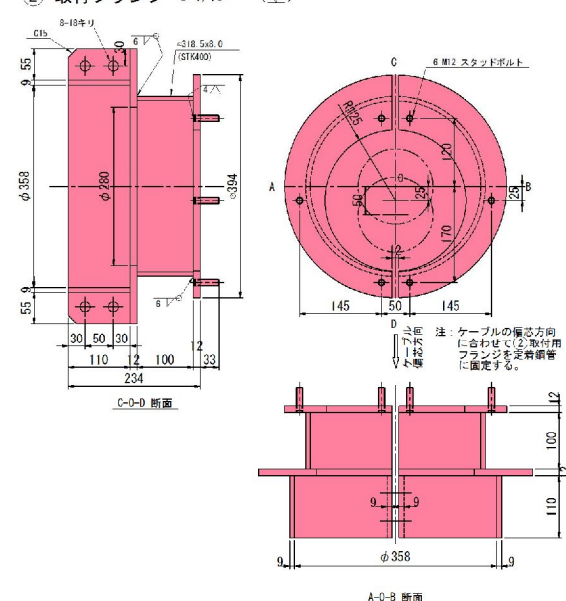
定着鋼管内には、ケーブル振動発現時にケーブル被覆や高減衰ゴムダンパーが損傷しないよう、隙間あき緩衝材が設置されている。隙間は高減衰ゴムダンパーの設計変位 10mm を確保している。



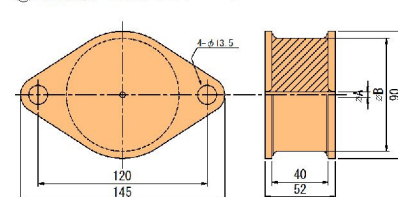
制振装置組立図 S=1/10



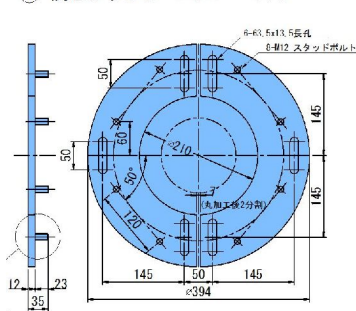
② 取付フランジ S=1/10 (▽)



① 高減衰ゴムダンパー S=1/4



③ 調芯フランジ S=1/10 (▽)



④ ケーブルフランジ S=1/10 (▽)

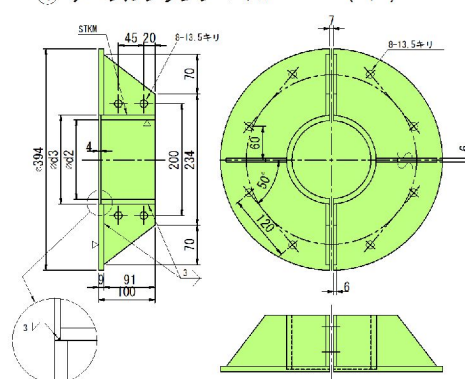
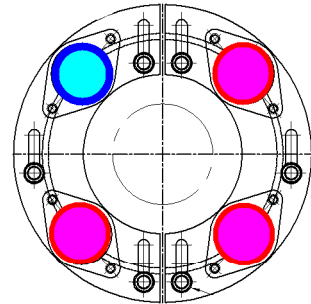


図 3-3 高減衰ゴムダンパー取付構造図

高減衰ゴムダンパーは 2 種類のタイプを組合せて配置し，所定のばね値が得られるようにしている．

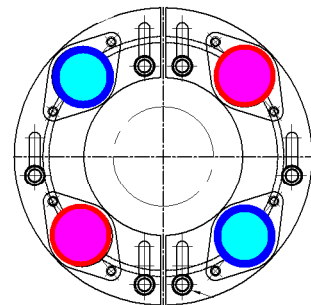
(1) 2.5 個

$\phi 80 \times 1$  個 +  $\phi 57 \times 3$  個を右の配置とする。



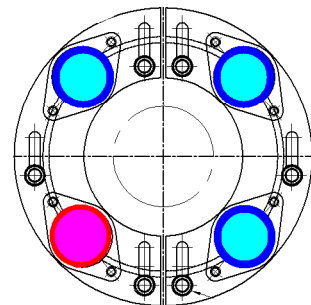
(2) 3.0 個

$\phi 80 \times 2$  個 +  $\phi 57 \times 2$  個を右の配置とする。



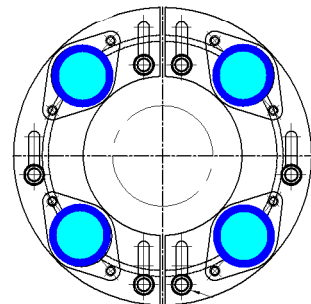
(3) 3.5 個

$\phi 80 \times 3$  個 +  $\phi 57 \times 1$  個を右の配置とする。



(4) 4.0 個

$\phi 80 \times 4$  個 +  $\phi 57 \times 0$  個を右の配置とする。



## 第4章 現地加振試験による高減衰ゴムダンパーの対数減衰率

高減衰ゴムダンパーによる付加減衰の設計値と実際の高減衰ゴムダンパーの対数減衰率との違いを把握するため、現地でケーブルの人力加振を行ってケーブル加速度の自由減衰振動波形を計測し、その波形から高減衰ゴムダンパーが設置されたケーブルが有する対数減衰率を求める。

### 4.1. 現地加振試験方法

試験は各ケーブルに対し、1次～3次モードそれぞれの振動数で3回ずつ人力による加振を行い、自由減衰波形は3軸の加速度計で計測した（2016年11月8日09:30～14:10、15.3℃～20.1℃＜平均18.6℃＞、曇～雨、風速2.2m/s～6.9m/s＜平均5.2m/s＞；伏木富山観測所）。計測結果から求めた対数減衰率は3回の加振試験結果の平均値をとった。加速度計の設置状況および人力加振の状況を写4-1、写4-2に示す。



写 4-1 加速度計設置状況



写 4-2 人力加振状況

表4-1に現地加振試験を行ったケーブルの諸元（張力は過去に計測された実測張力）を示す。同表のケーブルの1次～3次モードの振動数を用いて加振した。

表 4-1 現地加振試験を行ったケーブルの諸元

| 項目                         | 記号       | 単位   | C01E    | C02E    | C17E    | C18E    | C17W    | C18W    |
|----------------------------|----------|------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| ケーブル素線数                    | $N$      | 本    | 211     | 211     | 199     | 187     | 199     | 187     |
| ケーブル外径                     | $D$      | mm   | 130     | 130     | 125     | 120     | 125     | 120     |
| ケーブル質量                     | $m$      | kg/m | 68.4    | 68.4    | 64.3    | 60.2    | 64.3    | 60.2    |
| ケーブル重量                     | $w$      | kN/m | 0.671   | 0.671   | 0.631   | 0.590   | 0.631   | 0.590   |
| ケーブル長                      | $L$      | mm   | 137,820 | 127,470 | 167,180 | 184,720 | 167,180 | 184,720 |
| 張力 (D+PS)                  | $T$      | kN   | 3,443   | 3,805   | 2,949   | 3,203   | 3,062   | 3,545   |
| ダンパー位置                     | $X_i$    | mm   | 4,540   | 4,370   | 5,540   | 5,850   | 5,540   | 5,850   |
| ダンパーばね                     | $K$      | kN/m | 644     | 644     | 563     | 483     | 563     | 483     |
| 損失係数                       | $\gamma$ | -    | 0.62    | 0.62    | 0.62    | 0.62    | 0.62    | 0.62    |
| 振動数                        | 1次       | Hz   | 0.81    | 0.92    | 0.64    | 0.62    | 0.65    | 0.66    |
|                            | 2次       | Hz   | 1.63    | 1.85    | 1.28    | 1.25    | 1.30    | 1.31    |
|                            | 3次       | Hz   | 2.44    | 2.77    | 1.92    | 1.87    | 1.96    | 1.97    |
| ダンパー形状 $\phi 80 \times 40$ |          | 個    | 4       | 4       | 3       | 2       | 3       | 2       |
| ダンパー形状 $\phi 57 \times 40$ |          | 個    | 0       | 0       | 1       | 2       | 1       | 2       |

※ダンパーばね及び損失係数は気温20℃における値を示し、これらの周波数依存はない。



## 4.2. 対数減衰率の算出

図 4-1 に C01E ケーブルの 1 次モード 1 回目の加速度波形と対数減衰率の算出方法を示す。対数減衰率は、得られた加速度波形からバンドパスフィルタで対象とするモードの減衰波形のみ取り出し、その波形から同図に示す式で求める。

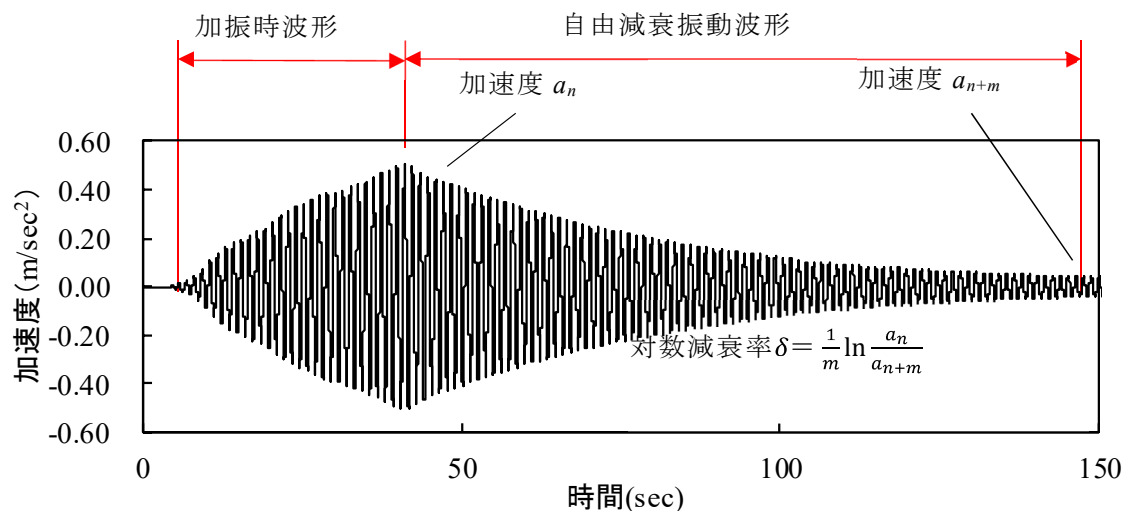


図 4-1 対数減衰率算出方法

## 4.3. 加振試験結果

表 4-2 に加速度計位置とその位置での加振振幅を、表 4-3 に現地加振試験から求めたケーブルの対数減衰率と振動数を、表 4-4 に簡易推定式で算出したケーブルの対数減衰率を示す。同表で灰色の網掛け部分は現地加振時に高減衰ゴムダンパーの定着部鋼管への取付部にガタつきが確認されたため、参考値である。また、表中“－”は加振試験をしておらず計測値はない。なお、対数減衰率の簡易推定式は以下のとおりである。

$$\delta_{(D)} = \frac{2\pi[\varphi_1(X_i)]^2 K v}{2M\omega_n} e^{-0.72 \frac{\omega_n X_i (L-X_i) K v}{TL \omega_n \gamma}} \quad (\text{式 4-1})$$

ここに、 $\varphi_n(X_i) = \sin(n\pi X_i/L)$  : モード関数

$n$  : モード次数

$X_i$  : 高減衰ゴムダンパー取付位置

$L$  : ケーブル長

$K$  : 高減衰ゴムダンパーせん断弾性ばね定数

$v = \gamma/(1 + \gamma^2)$  : 高減衰ゴムダンパー複素ばね虚数成分※注

$\gamma$  : 高減衰ゴムダンパー損失係数

$M = \mu L/2$  : ケーブル換算質量

$\omega_n = n\pi/L \times \sqrt{T/\mu}$  : ケーブルの  $n$  次の固有円振動数

$T$  : ケーブル張力

$\mu$  : ケーブルの単位質量

表 4-2 加速度計位置とその位置での加振振幅

| 項目     |     | 単位 | C01E  |       |       | C02E  |       |       | C17E  |       |       |
|--------|-----|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 加速度計位置 |     | m  | 7.719 |       |       | 7.395 |       |       | 8.797 |       |       |
| 加振振幅   | 試験数 |    | 1回目   | 2回目   | 3回目   | 1回目   | 2回目   | 3回目   | 1回目   | 2回目   | 3回目   |
|        | 1次  | m  | 0.019 | 0.015 | 0.011 | 0.005 | 0.005 | 0.004 | 0.011 | 0.012 | 0.013 |
|        | 2次  | m  | 0.008 | 0.011 | 0.011 | 0.002 | 0.003 | 0.002 | 0.012 | 0.015 | 0.013 |
|        | 3次  | m  | 0.005 | 0.010 | 0.008 | 0.001 | 0.001 | 0.002 | 0.013 | 0.011 | 0.013 |
| 項目     |     | 単位 | C18E  |       |       | C17W  |       |       | C18W  |       |       |
| 加速度計位置 |     | m  | 9.303 |       |       | 8.797 |       |       | 9.25  |       |       |
| 加振振幅   | 試験数 |    | 1回目   | 2回目   | 3回目   | 1回目   | 2回目   | 3回目   | 1回目   | 2回目   | 3回目   |
|        | 1次  | m  | 0.013 | 0.017 | 0.012 | 0.009 | 0.013 | 0.013 | 0.009 | 0.013 | 0.013 |
|        | 2次  | m  | 0.017 | 0.019 | 0.017 | 0.011 | 0.015 | 0.014 | 0.011 | 0.015 | 0.014 |
|        | 3次  | m  | 0.018 | -     | -     | 0.011 | 0.010 | 0.008 | 0.011 | 0.010 | 0.008 |

表 4-3 対数減衰率および振動数の計測結果

| モード | C01E             |        |        |        |       | C02E             |        |        |        |       |
|-----|------------------|--------|--------|--------|-------|------------------|--------|--------|--------|-------|
|     | 対数減衰率 $\delta_E$ |        |        |        | 振動数   | 対数減衰率 $\delta_E$ |        |        |        | 振動数   |
|     | 1回目              | 2回目    | 3回目    | 平均     | Hz    | 1回目              | 2回目    | 3回目    | 平均     | Hz    |
| 1次  | 0.0262           | 0.0279 | 0.0263 | 0.0268 | 0.827 | 0.0352           | 0.0349 | 0.0362 | 0.0354 | 0.991 |
| 2次  | 0.0244           | 0.0239 | 0.0237 | 0.0240 | 1.638 | 0.0267           | 0.0311 | 0.0317 | 0.0298 | 1.946 |
| 3次  | 0.0213           | 0.0209 | 0.0213 | 0.0212 | 2.462 | 0.0260           | 0.0264 | 0.0266 | 0.0263 | 2.934 |
| モード | C17E             |        |        |        |       | C18E             |        |        |        |       |
|     | 対数減衰率 $\delta_E$ |        |        |        | 振動数   | 対数減衰率 $\delta_E$ |        |        |        | 振動数   |
|     | 1回目              | 2回目    | 3回目    | 平均     | Hz    | 1回目              | 2回目    | 3回目    | 平均     | Hz    |
| 1次  | 0.0176           | 0.0178 | 0.0180 | 0.0178 | 0.675 | 0.0419           | 0.0402 | 0.0422 | 0.0414 | 0.639 |
| 2次  | 0.0243           | 0.0242 | 0.0230 | 0.0238 | 1.326 | 0.0337           | 0.0332 | 0.0375 | 0.0348 | 1.256 |
| 3次  | 0.0302           | 0.0295 | 0.0307 | 0.0301 | 1.988 | 0.0284           | -      | -      | 0.0284 | 1.881 |
| モード | C17W             |        |        |        |       | C18W             |        |        |        |       |
|     | 対数減衰率 $\delta_E$ |        |        |        | 振動数   | 対数減衰率 $\delta_E$ |        |        |        | 振動数   |
|     | 1回目              | 2回目    | 3回目    | 平均     | Hz    | 1回目              | 2回目    | 3回目    | 平均     | Hz    |
| 1次  | 0.0243           | 0.0270 | 0.0287 | 0.0267 | 0.683 | 0.0298           | 0.0330 | 0.0337 | 0.0322 | 0.673 |
| 2次  | 0.0333           | 0.0324 | 0.0352 | 0.0336 | 1.340 | 0.0322           | 0.0361 | 0.0366 | 0.0350 | 1.325 |
| 3次  | 0.0221           | 0.0201 | 0.0190 | 0.0204 | 2.011 | 0.0254           | 0.0262 | 0.0262 | 0.0259 | 1.992 |

表 4-4 簡易推定式で求めたケーブルの対数減衰率

| モード | 簡易推定式による対数減衰率 $\delta$ ( $=\delta_D+\delta_0$ ) |        |        |        |        |        |
|-----|---|--------|--------|--------|--------|--------|
|     | C01E  | C02E   | C17E   | C18E   | C17W   | C18W   |
| 1次  | 0.0388  | 0.0399 | 0.0381 | 0.0374 | 0.0384 | 0.0374 |
| 2次  | 0.0384  | 0.0395 | 0.0377 | 0.0371 | 0.0380 | 0.0371 |
| 3次  | 0.0378  | 0.0388 | 0.0371 | 0.0366 | 0.0374 | 0.0365 |

表 4-5 加振試験による対数減衰率の簡易推定式に対する比率

| モード | 加振試験による対数減衰率の簡易推定式に対する比率 |      |      |      |      |      |
|-----|--------------------------|------|------|------|------|------|
|     | C01E                     | C02E | C17E | C18E | C17W | C18W |
| 1次  | 0.69                     | 0.89 | 0.47 | 1.11 | 0.70 | 0.86 |
| 2次  | 0.62                     | 0.76 | 0.63 | 0.94 | 0.89 | 0.94 |
| 3次  | 0.56                     | 0.68 | 0.81 | 0.78 | 0.55 | 0.71 |

表 4-3 に示すとおり、いずれのケーブルも対数減衰率 $\delta$ は 0.02 よりは大きいものの、C18E の 1 次モードを除き、全てのケーブルで表 4-4 に示す簡易推定式で算出したケーブルの対数減衰率を下回っている（表 4-5）。なお、同表のケーブルの対数減衰率は、高減衰ゴムダンパーによる付加減衰にケーブル自身が有している対数減衰率を加算した値である。ケーブル自身が有する対数減衰率は既往実験等から 0.002~0.02 程度であることが報告されており<sup>11)12)13)</sup>、振幅や張力により小さな値となることが知られているが、ここでは高減衰ゴムダンパーの設計で通常用いる $\delta_0=0.005$ としている。

簡易推定式は、高減衰ゴムダンパーの変形量 10mm でのダンパーばね（表 4-1）で付加減衰を計算しているが、加振試験時に高減衰ゴムダンパーに生じた変形量はこれと異なる。図 4-2 に加振試験時の高減衰ゴムダンパーの変形量と対数減衰率の関係を整理した。同図より、データのばらつきはあるものの、変形量が大きくなれば対数減衰率が大きくなる傾向があり、対数減衰率の振幅依存性が確認できる。

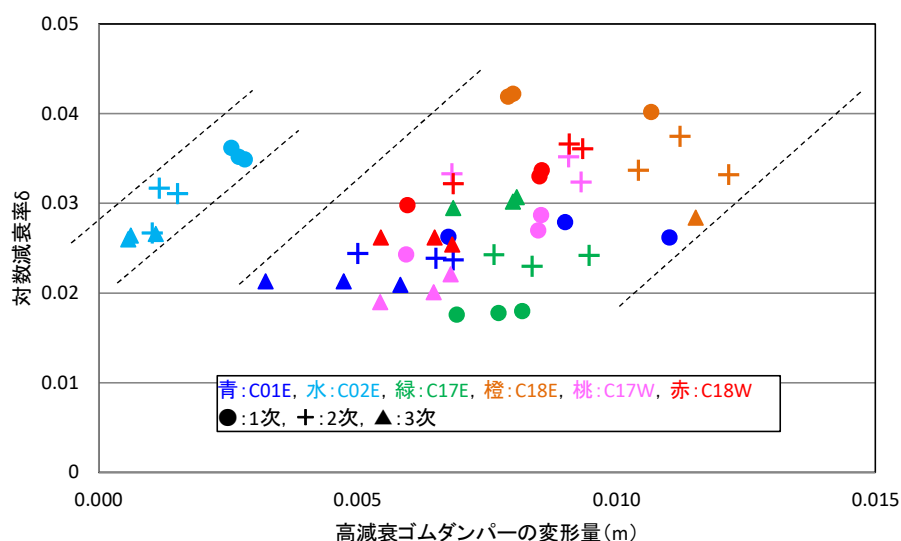


図 4-2 高減衰ゴムダンパー変形量と対数減衰率

#### 4.4. 複素固有値解析による加振試験対象ケーブルの対数減衰率

簡易推定式による対数減衰率と現地加振試験による対数減衰率に差がみられることから，より厳密な対数減衰率を把握するため，図 4-3 に示すモデルで複素固有値解析を行って対数減衰率 $\delta_{dc}$ を求め，簡易推定式同様，これにケーブル自身が有する対数減衰率 $\delta_0=0.005$ を加えてケーブル全体の対数減衰率を計算した．

表 4-6，表 4-7 に計算結果を示す．なお，複素ばねの係数は次のとおり算出する．ここでは，文献 18 ではなく，設計実務で用いている式としている．これについては 2.2 で述べたとおりである．

$$u = 1/\sqrt{1+\gamma^2} , \quad v = \gamma/\sqrt{1+\gamma^2} \quad (\text{式 4-2})$$

また，複素固有値解析のモデル化の詳細（節点分割，弾性ばね値，複素ばね係数等）については，第 5 章で示す．

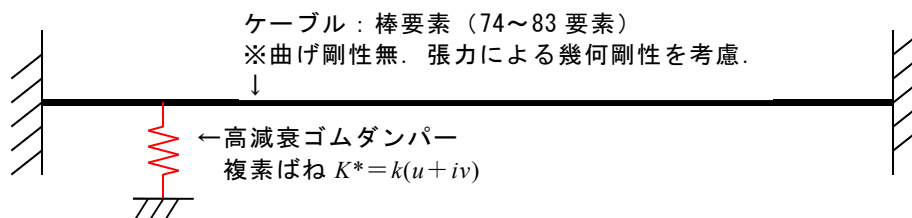


図 4-3 複素固有値解析モデル

表 4-6 複素固有値解析で求めたケーブルの対数減衰率

| モード | 複素固有値解析による対数減衰率 $\delta_{dc} + \delta_0$ |        |        |        |        |        |
|-----|--|--------|--------|--------|--------|--------|
|     | C01E                                     | C02E   | C17E   | C18E   | C17W   | C18W   |
| 1次  | 0.0347                                   | 0.0354 | 0.0352 | 0.0337 | 0.0352 | 0.0333 |
| 2次  | 0.0348                                   | 0.0354 | 0.0352 | 0.0337 | 0.0352 | 0.0334 |
| 3次  | 0.0348                                   | 0.0355 | 0.0353 | 0.0338 | 0.0353 | 0.0334 |

表 4-7 複素固有値解析による対数減衰率の簡易推定式に対する比率

| モード | 複素固有値解析による対数減衰率 $\delta_c$ / 簡易推定式 $\delta$ |      |      |      |      |      |
|-----|---|------|------|------|------|------|
|     | C01E  | C02E | C17E | C18E | C17W | C18W |
| 1次  | 0.90  | 0.89 | 0.92 | 0.90 | 0.92 | 0.89 |
| 2次  | 0.90  | 0.90 | 0.93 | 0.91 | 0.93 | 0.90 |
| 3次  | 0.92  | 0.91 | 0.95 | 0.92 | 0.94 | 0.91 |

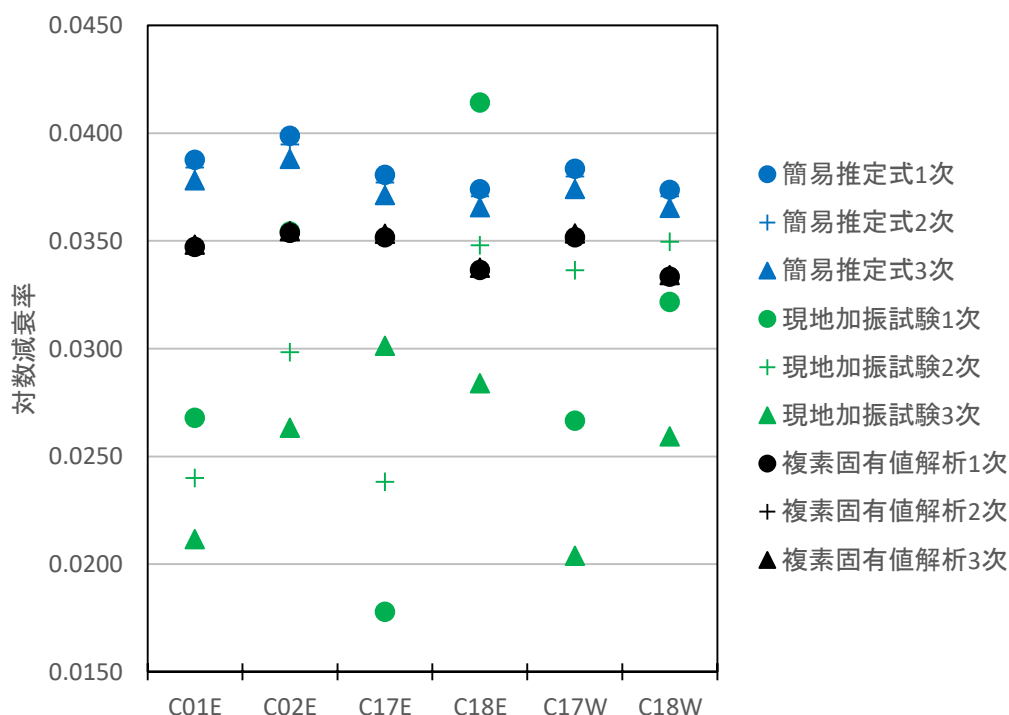


図 4-4 簡易推定式・現地加振試験・複素固有値解析による対数減衰率

表 4-6, 表 4-7 から明らかなとおり, 複素固有値解析結果は全て簡易推定式に比べて小さい値となっており, その差は 10%程度である. ここで改めて各結果をプロットしたものを図 4-4 に示すとともに, 複素固有値解析結果 $\delta_c$ を基準に現地加振試験結果 $\delta_E$ と簡易推定式 $\delta$ を整理すると表 4-8 のとおりである.

表 4-8 現地加振試験結果および簡易推定式と複素固有値解析結果

| モード | 現地加振試験による対数減衰率 $\delta_E$ / 複素固有値解析 $\delta_c$ |      |      |      |      |      |
|-----|--|------|------|------|------|------|
|     | C01E   | C02E | C17E | C18E | C17W | C18W |
| 1次  | 0.77   | 1.00 | 0.51 | 1.23 | 0.76 | 0.96 |
| 2次  | 0.69   | 0.84 | 0.68 | 1.03 | 0.95 | 1.05 |
| 3次  | 0.61   | 0.74 | 0.85 | 0.84 | 0.58 | 0.78 |
| モード | 簡易推定式による対数減衰率 $\delta$ / 複素固有値解析 $\delta_c$    |      |      |      |      |      |
|     | C01E   | C02E | C17E | C18E | C17W | C18W |
| 1次  | 1.12   | 1.13 | 1.08 | 1.11 | 1.09 | 1.12 |
| 2次  | 1.11   | 1.12 | 1.07 | 1.10 | 1.08 | 1.11 |
| 3次  | 1.09   | 1.09 | 1.05 | 1.08 | 1.06 | 1.09 |

同図・表より明らかなとおり, 現地加振試験で求めた対数減衰率 $\delta_E$ は全般に複素固有値解析の $\delta_c$ に比べて小さく, 0.51~1.23 の範囲にある. 一方, 簡易推定式による対数減衰率 $\delta$ は全般に複素固有値解析で求めた対数減衰率 $\delta_c$ に比べて大きく, 1.05~1.13 倍となっている.

現地加振試験で最も比率の小さい C17E は、現地加振試験の際に高減衰ゴムダンパーの定着部鋼管への取付部にがたつきが確認されたケーブルであることから、これを除外したとしても、現地加振試験で得られた対数減衰率と複素固有値解析では、最大 40% 程度現地加振試験結果が小さくなっている。式 2-1 からみわかつとおり、計算上の対数減衰率は高減衰ゴムダンパーのせん断弾性ばね定数  $K$  とケーブル張力  $T$  の影響を大きく受けることから、C01E および C18W の 1 次モードに着目し、これらの影響について考察する。 $K$  および  $T$  が計算で用いている値に対し 0.2 倍から 2.0 倍まで変化するときの付加減衰の変化を図 4-5 に示す。横軸は  $K$  および  $T$  の変化を、縦軸は  $K$  および  $T$  を変化させたときの付加減衰を示す。

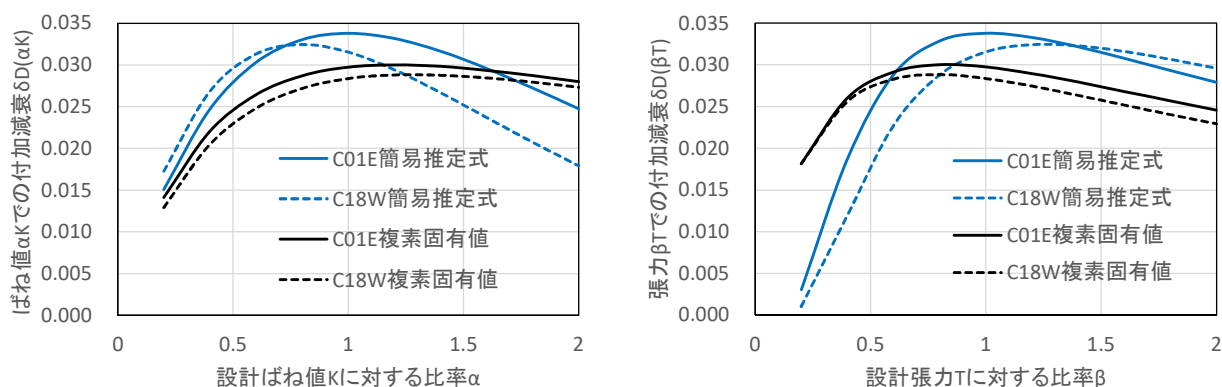


図 4-5 高減衰ゴムダンパーせん断弾性ばね定数およびケーブル張力と対数減衰率の関係

#### (5) 高減衰ゴムダンパーせん断弾性ばね定数 $K$ が付加減衰に及ぼす影響

複素固有値解析による  $K$  と付加減衰の関係は、C01E および C18W とともに概ね  $\alpha=1.2$  で付加減衰は最大値となり、 $\alpha=1.0$  より小さくなるにつれて低下し、 $\alpha=1.2$  より大きくなる側は付加減衰の顕著な低下はない。ばね値の大きい範囲で簡易推定式と複素固有値解析の結果に誤差が生じることがわかっており<sup>7)</sup>、同様の傾向が確認できる。これは、ダンパー設置に伴うケーブル振動モード形状の変化（ダンパー位置でモードが小さくなる）を、モード関数  $\varphi_n(X_i) = \sin(n\pi X_i/L)$  に近似的に求めた低減係数を乗じることで表現していることが一つの理由と考えられる。ただし、簡易推定式と複素固有値解析ともに、ばね値が小さい範囲では付加減衰が大きく低下する傾向にある。

高減衰ゴムダンパーせん断弾性ばね定数はせん断ひずみの量や温度変化により変動し、その関係は図 4-6 に示すとおりである。

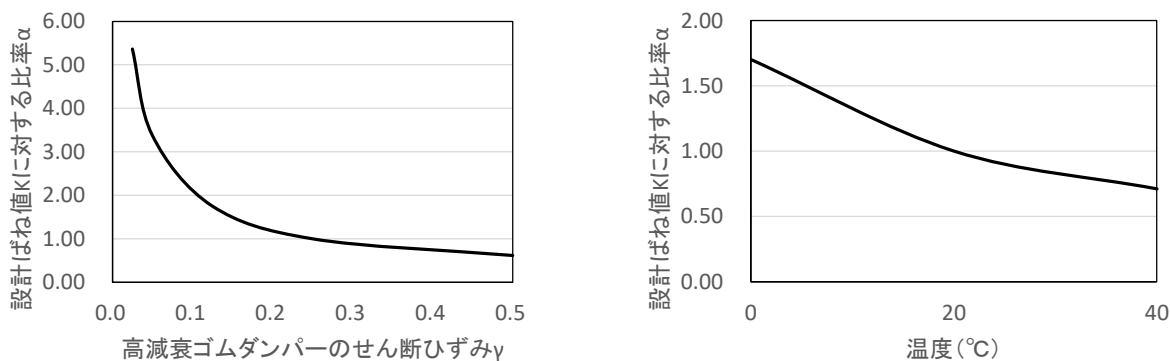


図 4-6 せん断ひずみや温度と高減衰ゴムダンパーせん断弾性ばね定数の関係

現地加振試験時の高減衰ゴムダンパーの変形量や気温から高減衰ゴムダンパーのばねとそれに基づく対数減衰率を複素固有値解析で求めた結果が表 4-9 である。

表 4-6 の結果に対し1.01～0.68倍と同等か低下する結果となっており，変形量が小さい C02E ではばね値が 3～5 倍となり低下の程度も大きい。

表 4-9 現地加振条件に合わせた複素固有値解析結果

| モード | C01E      |             | C02E      |             | C17E      |             | C18E      |             | C17W      |             | C18W      |             |
|-----|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|-------------|
|     | $\delta$  | K<br>(kN/m) | $\delta$  | K<br>(kN/m) | $\delta$  | K<br>(kN/m) | $\delta$  | K<br>(kN/m) | $\delta$  | K<br>(kN/m) | $\delta$  | K<br>(kN/m) |
| 1次  | 0.0350    | 744         | 0.0332    | 1659        | 0.0331    | 903         | 0.0336    | 651         | 0.0342    | 796         | 0.0333    | 796         |
|     | 1.01 (比率) |             | 0.94 (比率) |             | 0.94 (比率) |             | 1.00 (比率) |             | 0.97 (比率) |             | 1.00 (比率) |             |
| 2次  | 0.0345    | 1000        | 0.0239    | 3700        | 0.0332    | 903         | 0.0339    | 562         | 0.0343    | 796         | 0.0334    | 796         |
|     | 0.99 (比率) |             | 0.68 (比率) |             | 0.94 (比率) |             | 1.01 (比率) |             | 0.97 (比率) |             | 1.00 (比率) |             |
| 3次  | 0.0340    | 1143        | 0.0240    | 3700        | 0.0334    | 903         | 0.0339    | 528         | 0.0330    | 982         | 0.0324    | 982         |
|     | 0.98 (比率) |             | 0.68 (比率) |             | 0.94 (比率) |             | 1.00 (比率) |             | 0.93 (比率) |             | 0.97 (比率) |             |

ところで，高減衰ゴムダンパーの取付部にがたつきのあった C17E の 1 次モードの対数減衰率が計算値に比べて非常に小さいという結果から，高減衰ゴムダンパーの取付部の剛性が対数減衰率に大きく影響を与える可能性があることがわかる．簡易推定式や複素固有値解析では，図 4-3 に示したとおり，高減衰ゴムダンパーのせん断弾性ばねのケーブルと反対側は固定支点が前提となっている．高減衰ゴムダンパーの取付部にがたつきがあるということはこの固定支点が何らかの剛性を有する弾性支点になっていたと考えられる．このような状態では高減衰ゴムダンパーのせん断弾性ばねとこの弾性支点のばねが直列ばねとなり，見かけ上高減衰ゴムダンパーのせん断弾性ばね定数が小さくなることから，対数減衰率が小さくなった可能性が考えられる．図 4-7 に示す取付部の定着鋼管の曲げ変形や鋼管断面の断面変形をばね値として考慮した場合の高減衰ゴムダンパーとこれら剛性との合成ばね値は表 4-10 に示すとおりである．ここで，鋼管の断面諸元は， $\phi 355.6\text{mm}$ ， $t=7.9\text{mm}$  としている．鋼管断面の断面変形は，鋼管軸方向に高減衰ゴムダンパーの取付金具が設置される 110mm の部分のみ取り出し，断面変形方向に単位荷重  $P$  を載荷した際の断面変形量  $d$  から，断面変形のばね値  $K=P/d$  として剛性を算出している．鋼管の曲げ剛性は非常に大きく合成ばね値は高減衰ゴムダンパー単独のばね値とほぼ同等であり，その影響はほとんどないと考えられる．一方，取付部の鋼管断面変形をばねで評価した場合，合成ばね値は C01E で 0.640 倍，C18W で 0.703 倍になり，複素固有値解析による付加減衰がそれぞれ 0.894 倍，0.918 倍に低下する．断面変形は仮定の下での割り切った剛性だが，取付部剛性が付加減衰に影響することがわかる．

現地加振試験の対数減衰率に見合うよう簡易推定式を用いて高減衰ゴムダンパーせん断弾性ばね定数を逆算すると，設計上の値に対し，C01E は 0.462 倍，C18W は 0.940 倍となる．せん断ひずみや温度変化が高減衰ゴムダンパーせん断弾性ばね定数に影響を及ぼすこと，高減衰ゴムダンパー取付部の剛性が見かけ上高減衰ゴムダンパーせん断弾性

ばね定数を低下させることを考慮すると、逆算により得られた高減衰ゴムダンパーせん断弾性ばね定数程度となる可能性はあると考えられる。

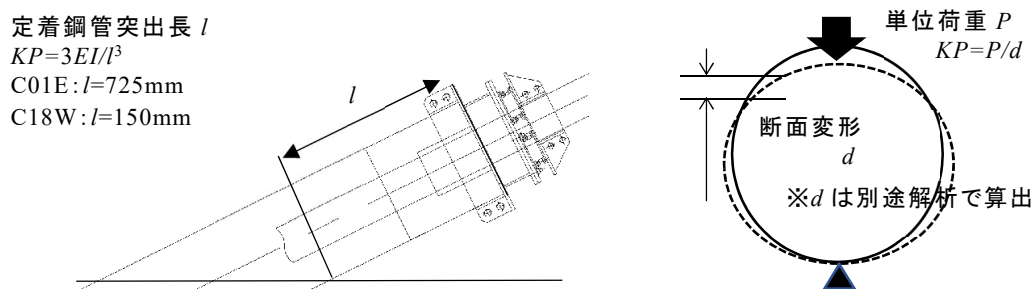


図 4-7 定着鋼管の曲げ変形および断面変形

表 4-10 高減衰ゴムダンパー取付う剛性を考慮した複素固有値解析結果

| 高減衰ゴムダンパー取付部の剛性の考え方 |      | ダンパーばね     | 鋼管ばね       | 合成ばね      | 比率<br>$a=K/KD$ | 付加減衰<br>$\delta_{Dc}(1次)$ |
|---------------------|------|------------|------------|-----------|----------------|---------------------------|
|                     |      | $KD(kN/m)$ | $KP(kN/m)$ | $K(kN/m)$ |                |                           |
| 定着鋼管の曲げ変形を考慮した場合    | C01E | 644        | $2.05E+05$ | 642       | 0.997          | 0.0297                    |
|                     | C18W | 483        | $2.32E+07$ | 483       | 1.000          | 0.0283                    |
| 鋼管断面の断面変形を考慮した場合    | C01E | 644        | 1143       | 412       | 0.640          | 0.0266                    |
|                     | C18W | 483        | 1143       | 339       | 0.703          | 0.0260                    |

このほか、本橋のように定着鋼管内に隙間あき緩衝材が設置されている場合、ダンパーとの併用により対数減衰率が変化する可能性も考えられる<sup>14)</sup>。設計上の隙間は 10mm としていることから、加振振幅が 10mm を超えている場合、その可能性は否定できないが、自由減衰波形を確認した範囲内ではその影響は明確には出ていない。

定着鋼管の変形や隙間明け緩衝材に加え、定着部のがたつきなどの影響は、本加振試験で定量的な整理ができなかったため、構造設計における配慮事項として、後で改めて整理することとする。

#### (6) ケーブル張力 $T$ が付加減衰に及ぼす影響

簡易推定式による  $T$  と付加減衰の関係は、C01E は設計に用いたばね値と同様の  $\beta=1.0$ 、C18W は  $\beta=1.2$  で付加減衰は最大となり、この値から離れるにつれて低下するが、特に  $T$  が小さくなる側で低下の程度が大きい。一方、複素固有値解析による  $T$  と付加減衰の関係は、C01E および C18W とともに概ね  $\beta=0.8$  で付加減衰は最大値となり、この値から離れるにつれて低下するが、簡易推定式と同様に  $T$  が小さくなる側で低下の程度が大きい。

$T$  の小さい範囲では対数減衰率の変化が大きいものの、 $T$  は実測張力を用いており、 $T$  の変動は実際の本橋の交通量からすると小さいものと考えられる。したがって、 $T$  が付加減衰に及ぼす影響は少ないと考えられる。



#### 4.5. 加振試験結果のまとめ

高減衰ゴムダンパーの設計時に想定していた簡易推定式による対数減衰率とケーブルの現地加振試験で得られた対数減衰率および複素固有値解析結果との比較を実施した結果、以下のことがわかった。

- ・ 現地加振試験から求めた対数減衰率は、一部を除いて全般に簡易推定式で算出した値より小さく、データのばらつきはあるものの振幅が大きくなるにつれて増加する傾向が確認された。
- ・ 簡易推定式で算出した対数減衰率は複素固有値解析より 1.05～1.13 倍大きく、現地加振試験は複素固有値解析の 0.51～1.23 倍で一部を除き全般に複素固有値解析より小さい。
- ・ 高減衰ゴムダンパーせん断弾性ばね定数は高減衰ゴムダンパーのせん断ひずみや温度の影響を受け、ばね定数が設計値の 0.8～1.2 倍を下回る範囲では付加減衰が大きく低下するが、現地加振試験の振幅や温度の範囲では一部振幅のごく小さい場合を除き付加減衰の顕著な低下はない。
- ・ 高減衰ゴムダンパー取付部の定着鋼管の曲げ剛性による影響はほとんどないが、鋼管断面の変形剛性の影響で高減衰ゴムダンパーせん断弾性ばね定数が見かけ上小さくなり、付加減衰が低下する。
- ・ せん断ひずみや温度変化および高減衰ゴムダンパー取付部の剛性を考慮すると、現地加振試験と同程度の対数減衰率となる可能性がある。
- ・ ケーブル張力が小さくなる範囲では付加減衰が低下するが、ケーブル張力は実測張力を用いており、温度変化や活荷重による張力変動は小さいことから、付加減衰に与える影響は少ない。

## 第5章 複素固有値解析による高減衰ゴムダンパーの付加減衰評価

第4章において、簡易推定式と複素固有値解析による付加減衰の比較を行ったが、これらの差は春日らの文献 19 で示された差に比べて大きいことが分かった。ケーブル諸元が異なることが要因の一つと考えられるが、現地加振試験結果との差も大きいことから、複素固有値解析にあたり無視や簡略化した条件の影響について考察する。

新家らの振動法によるケーブル張力の実用算定式<sup>27)</sup>では、サグ、ケーブルの曲げ剛性、傾斜角等がケーブルの固有振動数と張力の関係に影響を及ぼすことから、これらを考慮した算定式を提案している。高減衰ゴムダンパーの付加減衰は張力の影響を受けることは、簡易推定式からも明らかで、第4章で示したとおりである。よって、ケーブル張力に影響する、サグ、ケーブルの曲げ剛性、傾斜角について、付加減衰への影響を検討する。

検討の方法としては、これまで一般的に用いられてきた、1)水平直線モデルによる複素固有値解析をベースに、2)サグを考慮したモデル、3)ケーブルの曲げ剛性を考慮したモデル、4)ケーブルの傾斜を考慮したモデル、5)前述の2)と4)、6)前述の3)と4)、7)前述の2)と3)と4)、について付加減衰を計算することで行う。

### 5.1. 各モデルのモデル化方法

#### (1) 基本モデル

基本モデルは、下図に示す水平直線モデルとする。節点分割は、桁側ケーブル定着点、塔側ケーブル定着点、高減衰ゴムダンパーの設置位置付近を 1m 程度、それ以外を 2m とし、C01・C02・C03 ケーブルは全 75 節点（74 要素）、C17・C18 ケーブルは全 84 節点（83 要素）でモデル化する。ケーブルの質量は離散化したこれら各節点に要素長に応じて与える。ケーブルを構成する要素は、軸方向のみ剛性を有する棒要素（トラス要素）としてモデル化する。ただし、棒要素には死荷重およびプレストレスによる初期張力を与え、これによる幾何剛性を考慮する。解析ソフトは DYNAS2E（伊藤忠テクノソリューションズ）を用いる。

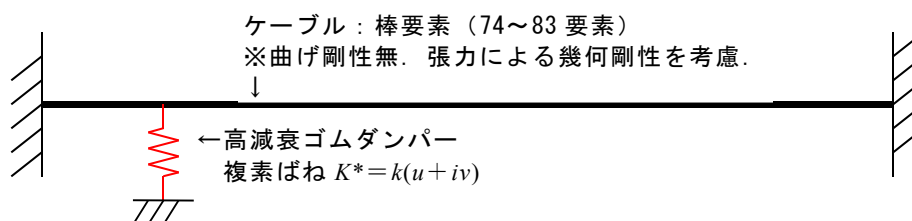


図 5-1 基本モデル（水平直線モデル）

表 3-1～表 3-4 の高減衰ゴムダンパーの諸元より、複素ばねの実部および虚部の係数は次の式で求める。

$$u = 1/\sqrt{1+\gamma^2}, \quad v = \gamma/\sqrt{1+\gamma^2} \quad (\text{式 5-1})$$

表 5-1 に節点分割結果、表 5-7 および表 5-8 に複素ばね算出結果を示す。節点分割結果の黄色網掛けは高減衰ゴムダンパーが取り付け節点を示す。

表 5-1 各ケーブルの節点分割（基本モデル）

| 節点番号 | C01      |         | C02      |         | C03      |         | C17      |         | C18      |         |
|------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|
|      | x座標(m)   | y座標(m)  | x座標(m)   | y座標(m)  | x座標(m)   | y座標(m)  | x座標(m)   | y座標(m)  | x座標(m)   | y座標(m)  |
| 1    | 0.0000   | 0.0000  | 0.0000   | 0.0000  | 0.0000   | 0.0000  | 0.0000   | 0.0000  | 0.0000   | 0.0000  |
| 2    | 1.1350   | -0.0167 | 1.0925   | -0.0136 | 1.0475   | -0.0119 | 1.1080   | -0.0193 | 1.1700   | -0.0228 |
| 3    | 2.2700   | -0.0330 | 2.1850   | -0.0269 | 2.0950   | -0.0235 | 2.2160   | -0.0383 | 2.3400   | -0.0453 |
| 4    | 3.4050   | -0.0492 | 3.2775   | -0.0401 | 3.1425   | -0.0350 | 3.3240   | -0.0570 | 3.5100   | -0.0674 |
| 5    | 4.5400   | -0.0650 | 4.3700   | -0.0530 | 4.1900   | -0.0462 | 4.4320   | -0.0755 | 4.6800   | -0.0893 |
| 6    | 5.7250   | -0.0812 | 5.5325   | -0.0664 | 5.3525   | -0.0584 | 5.5400   | -0.0938 | 5.8500   | -0.1110 |
| 7    | 6.9100   | -0.0971 | 6.6950   | -0.0796 | 6.5150   | -0.0704 | 6.7650   | -0.1136 | 7.1800   | -0.1352 |
| 8    | 8.9100   | -0.1234 | 8.5350   | -0.0999 | 8.1950   | -0.0872 | 7.9900   | -0.1332 | 8.5100   | -0.1590 |
| 9    | 10.9100  | -0.1487 | 10.3750  | -0.1196 | 9.8750   | -0.1034 | 9.3400   | -0.1544 | 9.8600   | -0.1828 |
| 10   | 12.9100  | -0.1732 | 12.2150  | -0.1386 | 11.5550  | -0.1191 | 11.5900  | -0.1888 | 12.3600  | -0.2259 |
| 11   | 14.9100  | -0.1968 | 14.0550  | -0.1569 | 13.2350  | -0.1343 | 13.8400  | -0.2222 | 14.8600  | -0.2677 |
| 12   | 16.9100  | -0.2196 | 15.8950  | -0.1746 | 14.9150  | -0.1489 | 16.0900  | -0.2546 | 17.3600  | -0.3081 |
| 13   | 18.9100  | -0.2415 | 17.7350  | -0.1916 | 16.5950  | -0.1629 | 18.3400  | -0.2858 | 19.8600  | -0.3472 |
| 14   | 20.9100  | -0.2625 | 19.5750  | -0.2079 | 18.2750  | -0.1764 | 20.5900  | -0.3161 | 22.3600  | -0.3850 |
| 15   | 22.9100  | -0.2827 | 21.4150  | -0.2236 | 19.9550  | -0.1893 | 22.8400  | -0.3452 | 24.8600  | -0.4214 |
| 16   | 24.9100  | -0.3021 | 23.2550  | -0.2386 | 21.6350  | -0.2017 | 25.0900  | -0.3733 | 27.3600  | -0.4565 |
| 17   | 26.9100  | -0.3205 | 25.0950  | -0.2529 | 23.3150  | -0.2136 | 27.3400  | -0.4003 | 29.8600  | -0.4903 |
| 18   | 28.9100  | -0.3381 | 26.9350  | -0.2666 | 24.9950  | -0.2249 | 29.5900  | -0.4263 | 32.3600  | -0.5228 |
| 19   | 30.9100  | -0.3549 | 28.7750  | -0.2796 | 26.6750  | -0.2356 | 31.8400  | -0.4512 | 34.8600  | -0.5540 |
| 20   | 32.9100  | -0.3708 | 30.6150  | -0.2919 | 28.3550  | -0.2458 | 34.0900  | -0.4751 | 37.3600  | -0.5838 |
| 21   | 34.9100  | -0.3858 | 32.4550  | -0.3036 | 30.0350  | -0.2554 | 36.3400  | -0.4979 | 39.8600  | -0.6123 |
| 22   | 36.9100  | -0.4000 | 34.2950  | -0.3146 | 31.7150  | -0.2645 | 38.5900  | -0.5196 | 42.3600  | -0.6395 |
| 23   | 38.9100  | -0.4133 | 36.1350  | -0.3249 | 33.3950  | -0.2731 | 40.8400  | -0.5403 | 44.8600  | -0.6653 |
| 24   | 40.9100  | -0.4258 | 37.9750  | -0.3346 | 35.0750  | -0.2811 | 43.0900  | -0.5599 | 47.3600  | -0.6898 |
| 25   | 42.9100  | -0.4374 | 39.8150  | -0.3436 | 36.7550  | -0.2885 | 45.3400  | -0.5785 | 49.8600  | -0.7130 |
| 26   | 44.9100  | -0.4481 | 41.6550  | -0.3519 | 38.4350  | -0.2954 | 47.5900  | -0.5960 | 52.3600  | -0.7349 |
| 27   | 46.9100  | -0.4580 | 43.4950  | -0.3596 | 40.1150  | -0.3017 | 49.8400  | -0.6124 | 54.8600  | -0.7554 |
| 28   | 48.9100  | -0.4670 | 45.3350  | -0.3666 | 41.7950  | -0.3075 | 52.0900  | -0.6278 | 57.3600  | -0.7747 |
| 29   | 50.9100  | -0.4752 | 47.1750  | -0.3729 | 43.4750  | -0.3127 | 54.3400  | -0.6421 | 59.8600  | -0.7925 |
| 30   | 52.9100  | -0.4825 | 49.0150  | -0.3786 | 45.1550  | -0.3174 | 56.5900  | -0.6553 | 62.3600  | -0.8091 |
| 31   | 54.9100  | -0.4889 | 50.8550  | -0.3836 | 46.8350  | -0.3216 | 58.8400  | -0.6675 | 64.8600  | -0.8244 |
| 32   | 56.9100  | -0.4945 | 52.6950  | -0.3879 | 48.5150  | -0.3251 | 61.0900  | -0.6786 | 67.3600  | -0.8383 |
| 33   | 58.9100  | -0.4992 | 54.5350  | -0.3916 | 50.1950  | -0.3282 | 63.3400  | -0.6887 | 69.8600  | -0.8509 |
| 34   | 60.9100  | -0.5031 | 56.3750  | -0.3946 | 51.8750  | -0.3306 | 65.5900  | -0.6977 | 72.3600  | -0.8621 |
| 35   | 62.9100  | -0.5061 | 58.2150  | -0.3969 | 53.5550  | -0.3326 | 67.8400  | -0.7057 | 74.8600  | -0.8721 |
| 36   | 64.9100  | -0.5083 | 60.0550  | -0.3986 | 55.2350  | -0.3339 | 70.0900  | -0.7126 | 77.3600  | -0.8807 |
| 37   | 66.9100  | -0.5095 | 61.8950  | -0.3996 | 56.9150  | -0.3348 | 72.3400  | -0.7184 | 79.8600  | -0.8880 |
| 38   | 68.9100  | -0.5100 | 63.7350  | -0.3999 | 58.5950  | -0.3350 | 74.5900  | -0.7232 | 82.3600  | -0.8939 |
| 39   | 70.9100  | -0.5095 | 65.5750  | -0.3996 | 60.2750  | -0.3348 | 76.8400  | -0.7269 | 84.8600  | -0.8986 |
| 40   | 72.9100  | -0.5083 | 67.4150  | -0.3986 | 61.9550  | -0.3339 | 79.0900  | -0.7295 | 87.3600  | -0.9019 |
| 41   | 74.9100  | -0.5061 | 69.2550  | -0.3969 | 63.6350  | -0.3326 | 81.3400  | -0.7311 | 89.8600  | -0.9039 |
| 42   | 76.9100  | -0.5031 | 71.0950  | -0.3946 | 65.3150  | -0.3306 | 83.5900  | -0.7317 | 92.3600  | -0.9046 |
| 43   | 78.9100  | -0.4992 | 72.9350  | -0.3916 | 66.9950  | -0.3282 | 85.8400  | -0.7311 | 94.8600  | -0.9039 |
| 44   | 80.9100  | -0.4945 | 74.7750  | -0.3879 | 68.6750  | -0.3251 | 88.0900  | -0.7295 | 97.3600  | -0.9019 |
| 45   | 82.9100  | -0.4889 | 76.6150  | -0.3836 | 70.3550  | -0.3216 | 90.3400  | -0.7269 | 99.8600  | -0.8986 |
| 46   | 84.9100  | -0.4825 | 78.4550  | -0.3786 | 72.0350  | -0.3174 | 92.5900  | -0.7232 | 102.3600 | -0.8939 |
| 47   | 86.9100  | -0.4752 | 80.2950  | -0.3729 | 73.7150  | -0.3127 | 94.8400  | -0.7184 | 104.8600 | -0.8880 |
| 48   | 88.9100  | -0.4670 | 82.1350  | -0.3666 | 75.3950  | -0.3075 | 97.0900  | -0.7126 | 107.3600 | -0.8807 |
| 49   | 90.9100  | -0.4580 | 83.9750  | -0.3596 | 77.0750  | -0.3017 | 99.3400  | -0.7057 | 109.8600 | -0.8721 |
| 50   | 92.9100  | -0.4481 | 85.8150  | -0.3519 | 78.7550  | -0.2954 | 101.5900 | -0.6977 | 112.3600 | -0.8621 |
| 51   | 94.9100  | -0.4374 | 87.6550  | -0.3436 | 80.4350  | -0.2885 | 103.8400 | -0.6887 | 114.8600 | -0.8509 |
| 52   | 96.9100  | -0.4258 | 89.4950  | -0.3346 | 82.1150  | -0.2811 | 106.0900 | -0.6786 | 117.3600 | -0.8383 |
| 53   | 98.9100  | -0.4133 | 91.3350  | -0.3249 | 83.7950  | -0.2731 | 108.3400 | -0.6675 | 119.8600 | -0.8244 |
| 54   | 100.9100 | -0.4000 | 93.1750  | -0.3146 | 85.4750  | -0.2645 | 110.5900 | -0.6553 | 122.3600 | -0.8091 |
| 55   | 102.9100 | -0.3858 | 95.0150  | -0.3036 | 87.1550  | -0.2554 | 112.8400 | -0.6421 | 124.8600 | -0.7925 |
| 56   | 104.9100 | -0.3708 | 96.8550  | -0.2919 | 88.8350  | -0.2458 | 115.0900 | -0.6278 | 127.3600 | -0.7747 |
| 57   | 106.9100 | -0.3549 | 98.6950  | -0.2796 | 90.5150  | -0.2356 | 117.3400 | -0.6124 | 129.8600 | -0.7554 |
| 58   | 108.9100 | -0.3381 | 100.5350 | -0.2666 | 92.1950  | -0.2249 | 119.5900 | -0.5960 | 132.3600 | -0.7349 |
| 59   | 110.9100 | -0.3205 | 102.3750 | -0.2529 | 93.8750  | -0.2136 | 121.8400 | -0.5785 | 134.8600 | -0.7130 |
| 60   | 112.9100 | -0.3021 | 104.2150 | -0.2386 | 95.5550  | -0.2017 | 124.0900 | -0.5599 | 137.3600 | -0.6898 |
| 61   | 114.9100 | -0.2827 | 106.0550 | -0.2236 | 97.2350  | -0.1893 | 126.3400 | -0.5403 | 139.8600 | -0.6653 |
| 62   | 116.9100 | -0.2625 | 107.8950 | -0.2079 | 98.9150  | -0.1764 | 128.5900 | -0.5196 | 142.3600 | -0.6395 |
| 63   | 118.9100 | -0.2415 | 109.7350 | -0.1916 | 100.5950 | -0.1629 | 130.8400 | -0.4979 | 144.8600 | -0.6123 |
| 64   | 120.9100 | -0.2196 | 111.5750 | -0.1746 | 102.2750 | -0.1489 | 133.0900 | -0.4751 | 147.3600 | -0.5838 |
| 65   | 122.9100 | -0.1968 | 113.4150 | -0.1569 | 103.9550 | -0.1343 | 135.3400 | -0.4512 | 149.8600 | -0.5540 |
| 66   | 124.9100 | -0.1732 | 115.2550 | -0.1386 | 105.6350 | -0.1191 | 137.5900 | -0.4263 | 152.3600 | -0.5228 |
| 67   | 126.9100 | -0.1487 | 117.0950 | -0.1196 | 107.3150 | -0.1034 | 139.8400 | -0.4003 | 154.8600 | -0.4903 |
| 68   | 128.9100 | -0.1234 | 118.9350 | -0.0999 | 108.9950 | -0.0872 | 142.0900 | -0.3733 | 157.3600 | -0.4565 |
| 69   | 130.9100 | -0.0971 | 120.7750 | -0.0796 | 110.6750 | -0.0704 | 144.3400 | -0.3452 | 159.8600 | -0.4214 |
| 70   | 132.9100 | -0.0812 | 122.6150 | -0.0664 | 112.3550 | -0.0584 | 146.5900 | -0.3161 | 162.3600 | -0.3850 |
| 71   | 134.9100 | -0.0650 | 124.4550 | -0.0530 | 114.0350 | -0.0462 | 148.8400 | -0.2858 | 164.8600 | -0.3472 |
| 72   | 136.9100 | -0.0492 | 126.2950 | -0.0401 | 115.7150 | -0.0350 | 151.0900 | -0.2546 | 167.3600 | -0.3081 |
| 73   | 138.9100 | -0.0330 | 128.1350 | -0.0269 | 117.3950 | -0.0235 | 153.3400 | -0.2222 | 169.8600 | -0.2677 |
| 74   | 140.9100 | -0.0167 | 130.0000 | -0.0136 | 119.0750 | -0.0119 | 155.5900 | -0.1888 | 172.3600 | -0.2259 |
| 75   | 142.9100 | 0.0000  | 131.8800 | 0.0000  | 120.7550 | 0.0000  | 157.8400 | -0.1544 | 174.8600 | -0.1828 |
| 76   |          |         |          |         |          |         | 159.1000 | -0.1332 | 176.2100 | -0.1590 |
| 77   |          |         |          |         |          |         | 160.4150 | -0.1136 | 177.5400 | -0.1352 |
| 78   |          |         |          |         |          |         | 161.6400 | -0.0938 | 178.8700 | -0.1110 |
| 79   |          |         |          |         |          |         | 162.7480 | -0.0755 | 180.0400 | -0.0893 |
| 80   |          |         |          |         |          |         | 163.8560 | -0.0570 | 181.2100 | -0.0674 |
| 81   |          |         |          |         |          |         | 164.9640 | -0.0383 | 182.3800 | -0.0453 |
| 82   |          |         |          |         |          |         | 166.0720 | -0.0193 | 183.5500 | -0.0228 |
| 83   |          |         |          |         |          |         | 167.1800 | 0.0000  | 184.7200 | 0.0000  |

## (2) サグ

ケーブルのサグは次の式で求める．

$$s = \frac{w}{2H} x(L - x) \quad (\text{式 5-2})$$

ここに、 $w$  : ケーブルの単位長さ重量  
 $H$  : 水平張力  
 $x$  : ケーブル定着点からの距離  
 $L$  : ケーブル定着点間の距離

上式で求めたサグを、複素固有値解析のために離散化したケーブルの各節点の鉛直方向座標から減ずることでモデル化する．

## (3) ケーブルの曲げ剛性

対象橋梁で用いられている SWPC の断面二次モーメントを複素固有値解析のために離散化したケーブルの各要素に与えることでモデル化する．そのため、ケーブルをモデル化する要素としては曲げ剛性を考慮することができる梁要素を用いる．断面二次モーメントの値はケーブルメーカー提示のものとするが、複数の素線からなる SPWC では、単純に全素線を考慮した断面二次モーメントでは過大評価のため、ケーブルメーカーの試験結果から、最も実験値に近い  $0.5 \times EI$ 、すなわち全素線を考慮した断面二次モーメントの  $1/2$  を考慮する．なお、基本モデルと同様に、梁要素には、死荷重およびプレストレスによる初期張力を与え、これによる幾何剛性を考慮する．

表 5-2 ケーブルの断面二次モーメント

| ケーブル   | 素線数 | 径   | 自由滑動       | 完全固着       | 完全/2       | 断面積        |
|--------|-----|-----|------------|------------|------------|------------|
|        | N   | D   | Ir'(m4)    | Ir(m4)     | Ir/2(m4)   | Ar(m2)     |
| C01・02 | 211 | 130 | 2.4870E-08 | 5.8066E-06 | 2.9033E-06 | 8.1200E-03 |
| C03・18 | 187 | 120 | 2.2040E-08 | 4.5705E-06 | 2.2853E-06 | 7.1970E-03 |
| C17    | 199 | 125 | 2.3450E-08 | 5.1602E-06 | 2.5801E-06 | 7.6580E-03 |

## (4) ケーブルの傾斜

実際のケーブルの定着点の 3 次元座標から鉛直面内における傾斜角度を計算し、これに基づき基本モデルの節点座標に対し、桁側ケーブル定着点を中心に回転することでモデル化する．傾斜角は下表のとおりである．

表 5-3 ケーブルの傾斜角度

|        | C1     | C2     | C3     | C17    | C18    |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 傾斜角度 度 | 34.402 | 36.016 | 37.915 | 23.353 | 21.827 |

表 5-4～表 5-6 に、サグ、傾斜、サグおよび傾斜、を考慮した場合の節点座標を示す．

表 5-4 各ケーブルの節点分割（サグ考慮）

| 節点番号 | C01      |        | C02      |        | C03      |        | C17      |        | C18      |        |
|------|----------|--------|----------|--------|----------|--------|----------|--------|----------|--------|
|      | x座標(m)   | y座標(m) | x座標(m)   | y座標(m) | x座標(m)   | y座標(m) | x座標(m)   | y座標(m) | x座標(m)   | y座標(m) |
| 1    | 0.0000   | 0.0000 | 0.0000   | 0.0000 | 0.0000   | 0.0000 | 0.0000   | 0.0000 | 0.0000   | 0.0000 |
| 2    | 1.1350   | 0.0167 | 1.0925   | 0.0136 | 1.0475   | 0.0119 | 1.1080   | 0.0193 | 1.1700   | 0.0228 |
| 3    | 2.2700   | 0.0330 | 2.1850   | 0.0269 | 2.0950   | 0.0235 | 2.2160   | 0.0383 | 2.3400   | 0.0453 |
| 4    | 3.4050   | 0.0492 | 3.2775   | 0.0401 | 3.1425   | 0.0350 | 3.3240   | 0.0570 | 3.5100   | 0.0674 |
| 5    | 4.5400   | 0.0650 | 4.3700   | 0.0530 | 4.1900   | 0.0462 | 4.4320   | 0.0755 | 4.6800   | 0.0893 |
| 6    | 5.7250   | 0.0812 | 5.5325   | 0.0664 | 5.3525   | 0.0584 | 5.5400   | 0.0938 | 5.8500   | 0.1110 |
| 7    | 6.9100   | 0.0971 | 6.6950   | 0.0796 | 6.5150   | 0.0704 | 6.7650   | 0.1136 | 7.1800   | 0.1352 |
| 8    | 8.9100   | 0.1234 | 8.5350   | 0.0999 | 8.1950   | 0.0872 | 7.9900   | 0.1332 | 8.5100   | 0.1590 |
| 9    | 10.9100  | 0.1487 | 10.3750  | 0.1196 | 9.8750   | 0.1034 | 9.3400   | 0.1544 | 9.8600   | 0.1828 |
| 10   | 12.9100  | 0.1732 | 12.2150  | 0.1386 | 11.5550  | 0.1191 | 11.5900  | 0.1888 | 12.3600  | 0.2259 |
| 11   | 14.9100  | 0.1968 | 14.0550  | 0.1569 | 13.2350  | 0.1343 | 13.8400  | 0.2222 | 14.8600  | 0.2677 |
| 12   | 16.9100  | 0.2196 | 15.8950  | 0.1746 | 14.9150  | 0.1489 | 16.0900  | 0.2546 | 17.3600  | 0.3081 |
| 13   | 18.9100  | 0.2415 | 17.7350  | 0.1916 | 16.5950  | 0.1629 | 18.3400  | 0.2858 | 19.8600  | 0.3472 |
| 14   | 20.9100  | 0.2625 | 19.5750  | 0.2079 | 18.2750  | 0.1764 | 20.5900  | 0.3161 | 22.3600  | 0.3850 |
| 15   | 22.9100  | 0.2827 | 21.4150  | 0.2236 | 19.9550  | 0.1893 | 22.8400  | 0.3452 | 24.8600  | 0.4214 |
| 16   | 24.9100  | 0.3021 | 23.2550  | 0.2386 | 21.6350  | 0.2017 | 25.0900  | 0.3733 | 27.3600  | 0.4565 |
| 17   | 26.9100  | 0.3205 | 25.0950  | 0.2529 | 23.3150  | 0.2136 | 27.3400  | 0.4003 | 29.8600  | 0.4903 |
| 18   | 28.9100  | 0.3381 | 26.9350  | 0.2666 | 24.9950  | 0.2249 | 29.5900  | 0.4263 | 32.3600  | 0.5228 |
| 19   | 30.9100  | 0.3549 | 28.7750  | 0.2796 | 26.6750  | 0.2356 | 31.8400  | 0.4512 | 34.8600  | 0.5540 |
| 20   | 32.9100  | 0.3708 | 30.6150  | 0.2919 | 28.3550  | 0.2458 | 34.0900  | 0.4751 | 37.3600  | 0.5838 |
| 21   | 34.9100  | 0.3858 | 32.4550  | 0.3036 | 30.0350  | 0.2554 | 36.3400  | 0.4979 | 39.8600  | 0.6123 |
| 22   | 36.9100  | 0.4000 | 34.2950  | 0.3146 | 31.7150  | 0.2645 | 38.5900  | 0.5196 | 42.3600  | 0.6395 |
| 23   | 38.9100  | 0.4133 | 36.1350  | 0.3249 | 33.3950  | 0.2731 | 40.8400  | 0.5403 | 44.8600  | 0.6653 |
| 24   | 40.9100  | 0.4258 | 37.9750  | 0.3346 | 35.0750  | 0.2811 | 43.0900  | 0.5599 | 47.3600  | 0.6898 |
| 25   | 42.9100  | 0.4374 | 39.8150  | 0.3436 | 36.7550  | 0.2885 | 45.3400  | 0.5785 | 49.8600  | 0.7130 |
| 26   | 44.9100  | 0.4481 | 41.6550  | 0.3519 | 38.4350  | 0.2954 | 47.5900  | 0.5960 | 52.3600  | 0.7349 |
| 27   | 46.9100  | 0.4580 | 43.4950  | 0.3596 | 40.1150  | 0.3017 | 49.8400  | 0.6124 | 54.8600  | 0.7554 |
| 28   | 48.9100  | 0.4670 | 45.3350  | 0.3666 | 41.7950  | 0.3075 | 52.0900  | 0.6278 | 57.3600  | 0.7747 |
| 29   | 50.9100  | 0.4752 | 47.1750  | 0.3729 | 43.4750  | 0.3127 | 54.3400  | 0.6421 | 59.8600  | 0.7925 |
| 30   | 52.9100  | 0.4825 | 49.0150  | 0.3786 | 45.1550  | 0.3174 | 56.5900  | 0.6553 | 62.3600  | 0.8091 |
| 31   | 54.9100  | 0.4889 | 50.8550  | 0.3836 | 46.8350  | 0.3216 | 58.8400  | 0.6675 | 64.8600  | 0.8244 |
| 32   | 56.9100  | 0.4945 | 52.6950  | 0.3879 | 48.5150  | 0.3251 | 61.0900  | 0.6786 | 67.3600  | 0.8383 |
| 33   | 58.9100  | 0.4992 | 54.5350  | 0.3916 | 50.1950  | 0.3282 | 63.3400  | 0.6887 | 69.8600  | 0.8509 |
| 34   | 60.9100  | 0.5031 | 56.3750  | 0.3946 | 51.8750  | 0.3306 | 65.5900  | 0.6977 | 72.3600  | 0.8621 |
| 35   | 62.9100  | 0.5061 | 58.2150  | 0.3969 | 53.5550  | 0.3326 | 67.8400  | 0.7057 | 74.8600  | 0.8721 |
| 36   | 64.9100  | 0.5083 | 60.0550  | 0.3986 | 55.2350  | 0.3339 | 70.0900  | 0.7126 | 77.3600  | 0.8807 |
| 37   | 66.9100  | 0.5095 | 61.8950  | 0.3996 | 56.9150  | 0.3348 | 72.3400  | 0.7184 | 79.8600  | 0.8880 |
| 38   | 68.9100  | 0.5100 | 63.7350  | 0.3999 | 58.5950  | 0.3350 | 74.5900  | 0.7232 | 82.3600  | 0.8939 |
| 39   | 70.9100  | 0.5095 | 65.5750  | 0.3996 | 60.2750  | 0.3348 | 76.8400  | 0.7269 | 84.8600  | 0.8986 |
| 40   | 72.9100  | 0.5083 | 67.4150  | 0.3986 | 61.9550  | 0.3339 | 79.0900  | 0.7295 | 87.3600  | 0.9019 |
| 41   | 74.9100  | 0.5061 | 69.2550  | 0.3969 | 63.6350  | 0.3326 | 81.3400  | 0.7311 | 89.8600  | 0.9039 |
| 42   | 76.9100  | 0.5031 | 71.0950  | 0.3946 | 65.3150  | 0.3306 | 83.5900  | 0.7317 | 92.3600  | 0.9046 |
| 43   | 78.9100  | 0.4992 | 72.9350  | 0.3916 | 66.9950  | 0.3282 | 85.8400  | 0.7311 | 94.8600  | 0.9039 |
| 44   | 80.9100  | 0.4945 | 74.7750  | 0.3879 | 68.6750  | 0.3251 | 88.0900  | 0.7295 | 97.3600  | 0.9019 |
| 45   | 82.9100  | 0.4889 | 76.6150  | 0.3836 | 70.3550  | 0.3216 | 90.3400  | 0.7269 | 99.8600  | 0.8986 |
| 46   | 84.9100  | 0.4825 | 78.4550  | 0.3786 | 72.0350  | 0.3174 | 92.5900  | 0.7232 | 102.3600 | 0.8939 |
| 47   | 86.9100  | 0.4752 | 80.2950  | 0.3729 | 73.7150  | 0.3127 | 94.8400  | 0.7184 | 104.8600 | 0.8880 |
| 48   | 88.9100  | 0.4670 | 82.1350  | 0.3666 | 75.3950  | 0.3075 | 97.0900  | 0.7126 | 107.3600 | 0.8807 |
| 49   | 90.9100  | 0.4580 | 83.9750  | 0.3596 | 77.0750  | 0.3017 | 99.3400  | 0.7057 | 109.8600 | 0.8721 |
| 50   | 92.9100  | 0.4481 | 85.8150  | 0.3519 | 78.7550  | 0.2954 | 101.5900 | 0.6977 | 112.3600 | 0.8621 |
| 51   | 94.9100  | 0.4374 | 87.6550  | 0.3436 | 80.4350  | 0.2885 | 103.8400 | 0.6887 | 114.8600 | 0.8509 |
| 52   | 96.9100  | 0.4258 | 89.4950  | 0.3346 | 82.1150  | 0.2811 | 106.0900 | 0.6786 | 117.3600 | 0.8383 |
| 53   | 98.9100  | 0.4133 | 91.3350  | 0.3249 | 83.7950  | 0.2731 | 108.3400 | 0.6675 | 119.8600 | 0.8244 |
| 54   | 100.9100 | 0.4000 | 93.1750  | 0.3146 | 85.4750  | 0.2645 | 110.5900 | 0.6553 | 122.3600 | 0.8091 |
| 55   | 102.9100 | 0.3858 | 95.0150  | 0.3036 | 87.1550  | 0.2554 | 112.8400 | 0.6421 | 124.8600 | 0.7925 |
| 56   | 104.9100 | 0.3708 | 96.8550  | 0.2919 | 88.8350  | 0.2458 | 115.0900 | 0.6278 | 127.3600 | 0.7747 |
| 57   | 106.9100 | 0.3549 | 98.6950  | 0.2796 | 90.5150  | 0.2356 | 117.3400 | 0.6124 | 129.8600 | 0.7554 |
| 58   | 108.9100 | 0.3381 | 100.5350 | 0.2666 | 92.1950  | 0.2249 | 119.5900 | 0.5960 | 132.3600 | 0.7349 |
| 59   | 110.9100 | 0.3205 | 102.3750 | 0.2529 | 93.8750  | 0.2136 | 121.8400 | 0.5785 | 134.8600 | 0.7130 |
| 60   | 112.9100 | 0.3021 | 104.2150 | 0.2386 | 95.5550  | 0.2017 | 124.0900 | 0.5599 | 137.3600 | 0.6898 |
| 61   | 114.9100 | 0.2827 | 106.0550 | 0.2236 | 97.2350  | 0.1893 | 126.3400 | 0.5403 | 139.8600 | 0.6653 |
| 62   | 116.9100 | 0.2625 | 107.8950 | 0.2079 | 98.9150  | 0.1764 | 128.5900 | 0.5196 | 142.3600 | 0.6395 |
| 63   | 118.9100 | 0.2415 | 109.7350 | 0.1916 | 100.5950 | 0.1629 | 130.8400 | 0.4979 | 144.8600 | 0.6123 |
| 64   | 120.9100 | 0.2196 | 111.5750 | 0.1746 | 102.2750 | 0.1489 | 133.0900 | 0.4751 | 147.3600 | 0.5838 |
| 65   | 122.9100 | 0.1968 | 113.4150 | 0.1569 | 103.9550 | 0.1343 | 135.3400 | 0.4512 | 149.8600 | 0.5540 |
| 66   | 124.9100 | 0.1732 | 115.2550 | 0.1386 | 105.6350 | 0.1191 | 137.5900 | 0.4263 | 152.3600 | 0.5228 |
| 67   | 126.9100 | 0.1487 | 117.0950 | 0.1196 | 107.3150 | 0.1034 | 139.8400 | 0.4003 | 154.8600 | 0.4903 |
| 68   | 128.9100 | 0.1234 | 118.9350 | 0.0999 | 108.9950 | 0.0872 | 142.0900 | 0.3733 | 157.3600 | 0.4565 |
| 69   | 130.9100 | 0.0971 | 120.7750 | 0.0796 | 110.6750 | 0.0704 | 144.3400 | 0.3452 | 159.8600 | 0.4214 |
| 70   | 132.9100 | 0.0812 | 121.9375 | 0.0664 | 111.8375 | 0.0584 | 146.5900 | 0.3161 | 162.3600 | 0.3850 |
| 71   | 133.2800 | 0.0650 | 123.1000 | 0.0530 | 113.0000 | 0.0462 | 148.8400 | 0.2858 | 164.8600 | 0.3472 |
| 72   | 134.4150 | 0.0492 | 124.1925 | 0.0401 | 114.0475 | 0.0350 | 151.0900 | 0.2546 | 167.3600 | 0.3081 |
| 73   | 135.5500 | 0.0330 | 125.2850 | 0.0269 | 115.0950 | 0.0235 | 153.3400 | 0.2222 | 169.8600 | 0.2677 |
| 74   | 136.6850 | 0.0167 | 126.3775 | 0.0136 | 116.1425 | 0.0119 | 155.5900 | 0.1888 | 172.3600 | 0.2259 |
| 75   | 137.8200 | 0.0000 | 127.4700 | 0.0000 | 117.1900 | 0.0000 | 157.8400 | 0.1544 | 174.8600 | 0.1828 |
| 76   |          |        |          |        |          |        | 159.1900 | 0.1332 | 176.2100 | 0.1590 |
| 77   |          |        |          |        |          |        | 160.4150 | 0.1136 | 177.5400 | 0.1352 |
| 78   |          |        |          |        |          |        | 161.6400 | 0.0938 | 178.8700 | 0.1110 |
| 79   |          |        |          |        |          |        | 162.7480 | 0.0755 | 180.0400 | 0.0893 |
| 80   |          |        |          |        |          |        | 163.8560 | 0.0570 | 181.2100 | 0.0674 |
| 81   |          |        |          |        |          |        | 164.9640 | 0.0383 | 182.3800 | 0.0453 |
| 82   |          |        |          |        |          |        | 166.0720 | 0.0193 | 183.5500 | 0.0228 |
| 83   |          |        |          |        |          |        | 167.1800 | 0.0000 | 184.7200 | 0.0000 |

表 5-5 各ケーブルの節点分割（傾斜考慮）

| 節点番号 | C01      |         | C02      |         | C03     |         | C17      |         | C18      |         |
|------|----------|---------|----------|---------|---------|---------|----------|---------|----------|---------|
|      | x座標(m)   | y座標(m)  | x座標(m)   | y座標(m)  | x座標(m)  | y座標(m)  | x座標(m)   | y座標(m)  | x座標(m)   | y座標(m)  |
| 1    | 0.0000   | 0.0000  | 0.0000   | 0.0000  | 0.0000  | 0.0000  | 0.0000   | 0.0000  | 0.0000   | 0.0000  |
| 2    | 0.9374   | 0.6419  | 0.8847   | 0.6431  | 0.8279  | 0.6448  | 1.0143   | 0.4379  | 1.0834   | 0.4339  |
| 3    | 1.8747   | 1.2837  | 1.7693   | 1.2863  | 1.6558  | 1.2896  | 2.0286   | 0.8759  | 2.1667   | 0.8678  |
| 4    | 2.8121   | 1.9256  | 2.6540   | 1.9294  | 2.4836  | 1.9345  | 3.0429   | 1.3138  | 3.2501   | 1.3017  |
| 5    | 3.7495   | 2.5675  | 3.5387   | 2.5725  | 3.3115  | 2.5793  | 4.0572   | 1.7517  | 4.3334   | 1.7356  |
| 6    | 4.7281   | 3.2376  | 4.4800   | 3.2569  | 4.2303  | 3.2949  | 5.0714   | 2.1897  | 5.4168   | 2.1695  |
| 7    | 5.7068   | 3.9077  | 5.4214   | 3.9412  | 5.1490  | 4.0105  | 6.1928   | 2.6738  | 6.6483   | 2.6628  |
| 8    | 7.3585   | 5.0388  | 6.9113   | 5.0244  | 6.4768  | 5.0447  | 7.3142   | 3.1580  | 7.8798   | 3.1560  |
| 9    | 9.0103   | 6.1698  | 8.4013   | 6.1076  | 7.8046  | 6.0789  | 8.5501   | 3.6916  | 9.1298   | 3.6567  |
| 10   | 10.6620  | 7.3009  | 9.8912   | 7.1907  | 9.1323  | 7.1130  | 10.6098  | 4.5809  | 11.4447  | 4.5838  |
| 11   | 12.3137  | 8.4319  | 11.3812  | 8.2739  | 10.4601 | 8.1472  | 12.6695  | 5.4702  | 13.7596  | 5.5110  |
| 12   | 13.9655  | 9.5629  | 12.8712  | 9.3571  | 11.7879 | 9.1814  | 14.7292  | 6.3595  | 16.0744  | 6.4381  |
| 13   | 15.6172  | 10.6940 | 14.3611  | 10.4402 | 13.1156 | 10.2156 | 16.7889  | 7.2488  | 18.3893  | 7.3653  |
| 14   | 17.2690  | 11.8250 | 15.8511  | 11.5234 | 14.4434 | 11.2498 | 18.8486  | 8.1381  | 20.7042  | 8.2924  |
| 15   | 18.9207  | 12.9561 | 17.3411  | 12.6066 | 15.7711 | 12.2839 | 20.9083  | 9.0274  | 23.0191  | 9.2195  |
| 16   | 20.5725  | 14.0871 | 18.8310  | 13.6897 | 17.0989 | 13.3181 | 22.9680  | 9.9167  | 25.3339  | 10.1467 |
| 17   | 22.2242  | 15.2181 | 20.3210  | 14.7729 | 18.4267 | 14.3523 | 25.0277  | 10.8060 | 27.6488  | 11.0738 |
| 18   | 23.8759  | 16.3492 | 21.8109  | 15.8561 | 19.7544 | 15.3865 | 27.0874  | 11.6953 | 29.9637  | 12.0010 |
| 19   | 25.5277  | 17.4802 | 23.3009  | 16.9393 | 21.0822 | 16.4206 | 29.1471  | 12.5846 | 32.2785  | 12.9281 |
| 20   | 27.1794  | 18.6113 | 24.7909  | 18.0224 | 22.4100 | 17.4548 | 31.2068  | 13.4739 | 34.5934  | 13.8553 |
| 21   | 28.8312  | 19.7423 | 26.2808  | 19.1056 | 23.7377 | 18.4890 | 33.2665  | 14.3632 | 36.9083  | 14.7824 |
| 22   | 30.4829  | 20.8734 | 27.7708  | 20.1888 | 25.0655 | 19.5232 | 35.3262  | 15.2525 | 39.2231  | 15.7096 |
| 23   | 32.1347  | 22.0044 | 29.2608  | 21.2719 | 26.3933 | 20.5573 | 37.3859  | 16.1418 | 41.5380  | 16.6367 |
| 24   | 33.7864  | 23.1354 | 30.7507  | 22.3551 | 27.7210 | 21.5915 | 39.4456  | 17.0311 | 43.8529  | 17.5639 |
| 25   | 35.4381  | 24.2665 | 32.2407  | 23.4383 | 29.0488 | 22.6257 | 41.5053  | 17.9204 | 46.1677  | 18.4910 |
| 26   | 37.0899  | 25.3975 | 33.7306  | 24.5215 | 30.3766 | 23.6599 | 43.5650  | 18.8097 | 48.4826  | 19.4182 |
| 27   | 38.7416  | 26.5286 | 35.2206  | 25.6046 | 31.7043 | 24.6941 | 45.6247  | 19.6990 | 50.7975  | 20.3453 |
| 28   | 40.3934  | 27.6596 | 36.7106  | 26.6878 | 33.0321 | 25.7282 | 47.6844  | 20.5883 | 53.1123  | 21.2724 |
| 29   | 42.0451  | 28.7906 | 38.2005  | 27.7710 | 34.3598 | 26.7624 | 49.7441  | 21.4776 | 55.4272  | 22.1996 |
| 30   | 43.6968  | 29.9217 | 39.6905  | 28.8541 | 35.6876 | 27.7966 | 51.8038  | 22.3669 | 57.7421  | 23.1267 |
| 31   | 45.3486  | 31.0527 | 41.1805  | 29.9373 | 37.0154 | 28.8308 | 53.8635  | 23.2562 | 60.0570  | 24.0539 |
| 32   | 47.0003  | 32.1838 | 42.6704  | 31.0205 | 38.3431 | 29.8649 | 55.9232  | 24.1455 | 62.3718  | 24.9810 |
| 33   | 48.6521  | 33.3148 | 44.1604  | 32.1036 | 39.6709 | 30.8991 | 57.9829  | 25.0348 | 64.6867  | 25.9082 |
| 34   | 50.3038  | 34.4458 | 45.6503  | 33.1868 | 40.9987 | 31.9333 | 60.0426  | 25.9241 | 67.0016  | 26.8353 |
| 35   | 51.9556  | 35.5769 | 47.1403  | 34.2700 | 42.3264 | 32.9675 | 62.1023  | 26.8134 | 69.3164  | 27.7625 |
| 36   | 53.6073  | 36.7079 | 48.6303  | 35.3532 | 43.6542 | 34.0016 | 64.1620  | 27.7027 | 71.6313  | 28.6896 |
| 37   | 55.2590  | 37.8390 | 50.1202  | 36.4363 | 44.9820 | 35.0358 | 66.2217  | 28.5920 | 73.9462  | 29.6168 |
| 38   | 56.9108  | 38.9700 | 51.6102  | 37.5195 | 46.3097 | 36.0700 | 68.2814  | 29.4813 | 76.2610  | 30.5439 |
| 39   | 58.5625  | 40.1010 | 53.1002  | 38.6027 | 47.6375 | 37.1042 | 70.3411  | 30.3706 | 78.5759  | 31.4711 |
| 40   | 60.2143  | 41.2321 | 54.5901  | 39.6858 | 48.9653 | 38.1384 | 72.4008  | 31.2599 | 80.8908  | 32.3982 |
| 41   | 61.8660  | 42.3631 | 56.0801  | 40.7690 | 50.2930 | 39.1725 | 74.4605  | 32.1492 | 83.2056  | 33.3254 |
| 42   | 63.5178  | 43.4942 | 57.5700  | 41.8522 | 51.6208 | 40.2067 | 76.5202  | 33.0385 | 85.5205  | 34.2525 |
| 43   | 65.1695  | 44.6252 | 59.0600  | 42.9354 | 52.9485 | 41.2409 | 78.5799  | 33.9278 | 87.8354  | 35.1796 |
| 44   | 66.8212  | 45.7562 | 60.5500  | 44.0185 | 54.2763 | 42.2751 | 80.6396  | 34.8171 | 90.1503  | 36.1068 |
| 45   | 68.4730  | 46.8873 | 62.0399  | 45.1017 | 55.6041 | 43.3092 | 82.6993  | 35.7064 | 92.4651  | 37.0339 |
| 46   | 70.1247  | 48.0183 | 63.5299  | 46.1849 | 56.9318 | 44.3434 | 84.7590  | 36.5957 | 94.7800  | 37.9611 |
| 47   | 71.7765  | 49.1494 | 65.0198  | 47.2680 | 58.2596 | 45.3776 | 86.8187  | 37.4850 | 97.0949  | 38.8882 |
| 48   | 73.4282  | 50.2804 | 66.5098  | 48.3512 | 59.5874 | 46.4118 | 88.8784  | 38.3743 | 99.4097  | 39.8154 |
| 49   | 75.0800  | 51.4114 | 67.9998  | 49.4344 | 60.9151 | 47.4459 | 90.9381  | 39.2636 | 101.7246 | 40.7425 |
| 50   | 76.7317  | 52.5425 | 69.4897  | 50.5175 | 62.2429 | 48.4801 | 92.9979  | 40.1529 | 104.0395 | 41.6697 |
| 51   | 78.3834  | 53.6735 | 70.9797  | 51.6007 | 63.5707 | 49.5143 | 95.0576  | 41.0422 | 106.3543 | 42.5968 |
| 52   | 80.0352  | 54.8046 | 72.4697  | 52.6839 | 64.8984 | 50.5485 | 97.1173  | 41.9315 | 108.6692 | 43.5240 |
| 53   | 81.6869  | 55.9356 | 73.9596  | 53.7671 | 66.2262 | 51.5827 | 99.1770  | 42.8208 | 110.9841 | 44.4511 |
| 54   | 83.3387  | 57.0666 | 75.4496  | 54.8502 | 67.5539 | 52.6168 | 101.2367 | 43.7101 | 113.2989 | 45.3783 |
| 55   | 84.9904  | 58.1977 | 76.9395  | 55.9334 | 68.8817 | 53.6510 | 103.2964 | 44.5994 | 115.6138 | 46.3054 |
| 56   | 86.6422  | 59.3287 | 78.4295  | 57.0166 | 70.2095 | 54.6852 | 105.3561 | 45.4887 | 117.9287 | 47.2326 |
| 57   | 88.2939  | 60.4598 | 79.9195  | 58.0997 | 71.5372 | 55.7194 | 107.4158 | 46.3780 | 120.2435 | 48.1597 |
| 58   | 89.9456  | 61.5908 | 81.4094  | 59.1829 | 72.8650 | 56.7535 | 109.4755 | 47.2673 | 122.5584 | 49.0868 |
| 59   | 91.5974  | 62.7219 | 82.8994  | 60.2661 | 74.1928 | 57.7877 | 111.5352 | 48.1566 | 124.8733 | 50.0140 |
| 60   | 93.2491  | 63.8529 | 84.3894  | 61.3493 | 75.5205 | 58.8219 | 113.5949 | 49.0459 | 127.1882 | 50.9411 |
| 61   | 94.9009  | 64.9839 | 85.8793  | 62.4324 | 76.8483 | 59.8561 | 115.6546 | 49.9352 | 129.5030 | 51.8683 |
| 62   | 96.5526  | 66.1150 | 87.3693  | 63.5156 | 78.1761 | 60.8902 | 117.7143 | 50.8245 | 131.8179 | 52.7954 |
| 63   | 98.2044  | 67.2460 | 88.8592  | 64.5988 | 79.5038 | 61.9244 | 119.7740 | 51.7138 | 134.1328 | 53.7226 |
| 64   | 99.8561  | 68.3771 | 90.3492  | 65.6819 | 80.8316 | 62.9586 | 121.8337 | 52.6031 | 136.4476 | 54.6497 |
| 65   | 101.5078 | 69.5081 | 91.8392  | 66.7651 | 82.1594 | 63.9928 | 123.8934 | 53.4924 | 138.7625 | 55.5769 |
| 66   | 103.1596 | 70.6391 | 93.3291  | 67.8483 | 83.4871 | 65.0270 | 125.9531 | 54.3817 | 141.0774 | 56.5040 |
| 67   | 104.8113 | 71.7702 | 94.8191  | 68.9314 | 84.8149 | 66.0611 | 128.0128 | 55.2710 | 143.3922 | 57.4312 |
| 68   | 106.4631 | 72.9012 | 96.3091  | 70.0146 | 86.1426 | 67.0953 | 130.0725 | 56.1603 | 145.7071 | 58.3583 |
| 69   | 108.1148 | 74.0323 | 97.7990  | 71.0978 | 87.4704 | 68.1295 | 132.1322 | 57.0496 | 148.0220 | 59.2855 |
| 70   | 109.7665 | 75.1634 | 99.2889  | 72.1810 | 88.7981 | 69.1637 | 134.1919 | 57.9389 | 150.3368 | 60.2126 |
| 71   | 111.4182 | 76.2945 | 100.7788 | 73.2642 | 90.1258 | 70.1979 | 136.2516 | 58.8282 | 152.6517 | 61.1397 |
| 72   | 113.0699 | 77.4256 | 102.2687 | 74.3474 | 91.4929 | 71.2320 | 138.3113 | 59.7175 | 154.9666 | 62.0669 |
| 73   | 114.7216 | 78.5567 | 103.7586 | 75.4306 | 92.8600 | 72.2662 | 140.3710 | 60.6068 | 157.2814 | 62.9940 |
| 74   | 116.3733 | 79.6878 | 105.2485 | 76.5138 | 94.2271 | 73.2994 | 142.4307 | 61.4961 | 159.5963 | 63.9212 |
| 75   | 118.0250 | 80.8189 | 106.7384 | 77.5970 | 95.5942 | 74.3326 | 144.4904 | 62.3854 | 161.9112 | 64.8483 |
| 76   |          |         |          |         |         |         | 146.5501 | 63.2747 | 164.2261 | 65.7755 |
| 77   |          |         |          |         |         |         | 148.6098 | 64.1640 | 166.5410 | 66.7026 |
| 78   |          |         |          |         |         |         | 150.6695 | 65.0533 | 168.8559 | 67.6297 |
| 79   |          |         |          |         |         |         | 152.7292 | 65.9426 | 171.1708 | 68.5568 |
| 80   |          |         |          |         |         |         | 154.7889 | 66.8319 | 173.4857 | 69.4839 |
| 81   |          |         |          |         |         |         | 156.8486 | 67.7212 | 175.8006 | 70.4110 |
| 82   |          |         |          |         |         |         | 158.9083 | 68.6105 | 178.1155 | 71.3381 |
| 83   |          |         |          |         |         |         | 160.9680 | 69.4998 | 180.4304 | 72.2652 |

表 5-6 各ケーブルの節点分割 (サグおよび傾斜考慮)

| 節点番号 | C01      |         | C02      |         | C03     |         | C17      |         | C18      |         |
|------|----------|---------|----------|---------|---------|---------|----------|---------|----------|---------|
|      | x座標(m)   | y座標(m)  | x座標(m)   | y座標(m)  | x座標(m)  | y座標(m)  | x座標(m)   | y座標(m)  | x座標(m)   | y座標(m)  |
| 1    | 0.0000   | 0.0000  | 0.0000   | 0.0000  | 0.0000  | 0.0000  | 0.0000   | 0.0000  | 0.0000   | 0.0000  |
| 2    | 0.9374   | 0.6281  | 0.8847   | 0.6321  | 0.8279  | 0.6355  | 1.0143   | 0.4202  | 1.0834   | 0.4128  |
| 3    | 1.8747   | 1.2565  | 1.7693   | 1.2645  | 1.6558  | 1.2711  | 2.0286   | 0.8407  | 2.1667   | 0.8258  |
| 4    | 2.8121   | 1.8850  | 2.6540   | 1.8970  | 2.4836  | 1.9069  | 3.0429   | 1.2614  | 3.2501   | 1.2391  |
| 5    | 3.7495   | 2.5138  | 3.5387   | 2.5297  | 3.3115  | 2.5428  | 4.0572   | 1.6824  | 4.3334   | 1.6527  |
| 6    | 4.7281   | 3.1706  | 4.4800   | 3.2032  | 4.2303  | 3.2488  | 5.0714   | 2.1036  | 5.4168   | 2.0665  |
| 7    | 5.7068   | 3.8276  | 5.4214   | 3.8768  | 5.1490  | 3.9550  | 6.1928   | 2.5695  | 6.6483   | 2.5373  |
| 8    | 7.3585   | 4.9370  | 6.9113   | 4.9436  | 6.4768  | 4.9759  | 7.3142   | 3.0357  | 7.8798   | 3.0084  |
| 9    | 9.0103   | 6.0471  | 8.4013   | 6.0108  | 7.8046  | 5.9973  | 8.5501   | 3.5499  | 9.1298   | 3.4869  |
| 10   | 10.6620  | 7.1580  | 9.8912   | 7.0786  | 9.1323  | 7.0191  | 10.6098  | 4.4075  | 11.4447  | 4.3741  |
| 11   | 12.3137  | 8.2695  | 11.3812  | 8.1470  | 10.4601 | 8.0413  | 12.6695  | 5.2662  | 13.7596  | 5.2625  |
| 12   | 13.9655  | 9.3818  | 12.8712  | 9.2158  | 11.7879 | 9.0640  | 14.7292  | 6.1258  | 16.0744  | 6.1521  |
| 13   | 15.6172  | 10.4947 | 14.3611  | 10.2853 | 13.1156 | 10.0871 | 16.7889  | 6.9864  | 18.3893  | 7.0430  |
| 14   | 17.2690  | 11.6084 | 15.8511  | 11.3552 | 14.4434 | 11.1106 | 18.8486  | 7.8479  | 20.7042  | 7.9350  |
| 15   | 18.9207  | 12.7228 | 17.3411  | 12.4257 | 15.7711 | 12.1345 | 20.9083  | 8.7105  | 23.0191  | 8.8283  |
| 16   | 20.5725  | 13.8379 | 18.8310  | 13.4968 | 17.0989 | 13.1589 | 22.9680  | 9.5740  | 25.3339  | 9.7229  |
| 17   | 22.2242  | 14.9537 | 20.3210  | 14.5683 | 18.4267 | 14.1838 | 25.0277  | 10.4384 | 27.6488  | 10.6187 |
| 18   | 23.8759  | 16.0702 | 21.8109  | 15.6405 | 19.7544 | 15.2090 | 27.0874  | 11.3039 | 29.9637  | 11.5157 |
| 19   | 25.5277  | 17.1874 | 23.3009  | 16.7131 | 21.0822 | 16.2348 | 29.1471  | 12.1703 | 32.2785  | 12.4139 |
| 20   | 27.1794  | 18.3053 | 24.7909  | 17.7863 | 22.4100 | 17.2609 | 31.2068  | 13.0377 | 34.5934  | 13.3133 |
| 21   | 28.8312  | 19.4240 | 26.2808  | 18.8601 | 23.7377 | 18.2875 | 33.2665  | 13.9061 | 36.9083  | 14.2140 |
| 22   | 30.4829  | 20.5433 | 27.7708  | 19.9343 | 25.0655 | 19.3145 | 35.3262  | 14.7754 | 39.2231  | 15.1160 |
| 23   | 32.1347  | 21.6634 | 29.2608  | 21.0091 | 26.3933 | 20.3419 | 37.3859  | 15.6458 | 41.5380  | 16.0191 |
| 24   | 33.7864  | 22.7841 | 30.7507  | 22.0845 | 27.7210 | 21.3698 | 39.4456  | 16.5171 | 43.8529  | 16.9235 |
| 25   | 35.4381  | 23.9056 | 32.2407  | 23.1604 | 29.0488 | 22.3981 | 41.5053  | 17.3893 | 46.1677  | 17.8291 |
| 26   | 37.0899  | 25.0278 | 33.7306  | 24.2368 | 30.3766 | 23.4268 | 43.5650  | 18.2626 | 48.4826  | 18.7360 |
| 27   | 38.7416  | 26.1507 | 35.2206  | 25.3138 | 31.7043 | 24.4560 | 45.6247  | 19.1368 | 50.7975  | 19.6440 |
| 28   | 40.3934  | 27.2743 | 36.7106  | 26.3913 | 33.0321 | 25.4856 | 47.6844  | 20.0120 | 53.1123  | 20.5533 |
| 29   | 42.0451  | 28.3986 | 38.2005  | 27.4693 | 34.3598 | 26.5157 | 49.7441  | 20.8881 | 55.4272  | 21.4639 |
| 30   | 43.6968  | 29.5236 | 39.6905  | 28.5479 | 35.6876 | 27.5462 | 51.8038  | 21.7653 | 57.7421  | 22.3756 |
| 31   | 45.3486  | 30.6493 | 41.1805  | 29.6271 | 37.0154 | 28.5771 | 53.8635  | 22.6434 | 60.0570  | 23.2886 |
| 32   | 47.0003  | 31.7757 | 42.6704  | 30.7067 | 38.3431 | 29.6084 | 55.9232  | 23.5224 | 62.3718  | 24.2029 |
| 33   | 48.6521  | 32.9029 | 44.1604  | 31.7869 | 39.6709 | 30.6402 | 57.9829  | 24.4025 | 64.6867  | 25.1183 |
| 34   | 50.3038  | 34.0307 | 45.6503  | 32.8677 | 40.9987 | 31.6724 | 60.0426  | 25.2835 | 67.0016  | 26.0350 |
| 35   | 51.9556  | 35.1593 | 47.1403  | 33.9490 | 42.3264 | 32.7051 | 62.1023  | 26.1655 | 69.3164  | 26.9529 |
| 36   | 53.6073  | 36.2886 | 48.6303  | 35.0308 | 43.6542 | 33.7382 | 64.1620  | 27.0485 | 71.6313  | 27.8721 |
| 37   | 55.2590  | 37.4185 | 50.1202  | 36.1131 | 44.9820 | 34.7717 | 66.2217  | 27.9324 | 73.9462  | 28.7924 |
| 38   | 56.9108  | 38.5492 | 51.6102  | 37.1960 | 46.3097 | 35.8057 | 68.2814  | 28.8174 | 76.2610  | 29.7141 |
| 39   | 58.5625  | 39.6806 | 53.1002  | 38.2795 | 47.6375 | 36.8401 | 70.3411  | 29.7033 | 78.5759  | 30.6369 |
| 40   | 60.2143  | 40.8127 | 54.5901  | 39.3635 | 48.9653 | 37.8749 | 72.4008  | 30.5901 | 80.8908  | 31.5610 |
| 41   | 61.8660  | 41.9455 | 56.0801  | 40.4480 | 50.2930 | 38.9102 | 74.4605  | 31.4780 | 83.2056  | 32.4863 |
| 42   | 63.5178  | 43.0791 | 57.5700  | 41.5330 | 51.6208 | 39.9459 | 76.5202  | 32.3668 | 85.5205  | 33.4128 |
| 43   | 65.1695  | 44.2133 | 59.0600  | 42.6186 | 52.9485 | 40.9820 | 78.5799  | 33.2566 | 87.8354  | 34.3406 |
| 44   | 66.8212  | 45.3482 | 60.5500  | 43.7048 | 54.2763 | 42.0186 | 80.6396  | 34.1473 | 90.1503  | 35.2696 |
| 45   | 68.4730  | 46.4839 | 62.0399  | 44.7914 | 55.6041 | 43.0556 | 82.6993  | 35.0391 | 92.4651  | 36.1998 |
| 46   | 70.1247  | 47.6202 | 63.5299  | 45.8787 | 56.9318 | 44.0930 | 84.7590  | 35.9318 | 94.7800  | 37.1312 |
| 47   | 71.7765  | 48.7573 | 65.0198  | 46.9664 | 58.2596 | 45.1309 | 86.8187  | 36.8254 | 97.0949  | 38.0639 |
| 48   | 73.4282  | 49.8951 | 66.5098  | 48.0547 | 59.5874 | 46.1692 | 88.8784  | 37.7201 | 99.4097  | 38.9978 |
| 49   | 75.0800  | 51.0336 | 67.9998  | 49.1435 | 60.9151 | 47.2079 | 90.9381  | 38.6157 | 101.7246 | 39.9330 |
| 50   | 76.7317  | 52.1727 | 69.4897  | 50.2329 | 62.2429 | 48.2471 | 92.9979  | 39.5123 | 104.0395 | 40.8693 |
| 51   | 78.3834  | 53.3127 | 70.9797  | 51.3228 | 63.5707 | 49.2867 | 95.0576  | 40.4099 | 106.3543 | 41.8069 |
| 52   | 80.0352  | 54.4533 | 72.4697  | 52.4133 | 64.8984 | 50.3267 | 97.1173  | 41.3085 | 108.6692 | 42.7458 |
| 53   | 81.6869  | 55.5946 | 73.9596  | 53.5043 | 66.2262 | 51.3672 | 99.1770  | 42.2080 | 110.9841 | 43.6859 |
| 54   | 83.3387  | 56.7366 | 75.4496  | 54.5958 | 67.5539 | 52.4081 | 101.2367 | 43.1085 | 113.2989 | 44.6271 |
| 55   | 84.9904  | 57.8793 | 76.9395  | 55.6879 | 68.8817 | 53.4495 | 103.2964 | 44.0099 | 115.6138 | 45.5697 |
| 56   | 86.6422  | 59.0228 | 78.4295  | 56.7805 | 70.2095 | 54.4913 | 105.3561 | 44.9124 | 117.9287 | 46.5134 |
| 57   | 88.2939  | 60.1669 | 79.9195  | 57.8736 | 71.5372 | 55.5335 | 107.4158 | 45.8158 | 120.2435 | 47.4584 |
| 58   | 89.9456  | 61.3118 | 81.4094  | 58.9673 | 72.8650 | 56.5761 | 109.4755 | 46.7202 | 122.5584 | 48.4046 |
| 59   | 91.5974  | 62.4574 | 82.8994  | 60.0615 | 74.1928 | 57.6192 | 111.5352 | 47.6255 | 124.8733 | 49.3521 |
| 60   | 93.2491  | 63.6037 | 84.3894  | 61.1563 | 75.5205 | 58.6627 | 113.5949 | 48.5319 | 127.1882 | 50.3008 |
| 61   | 94.9009  | 64.7507 | 85.8793  | 62.2516 | 76.8483 | 59.7067 | 115.6546 | 49.4392 | 129.5030 | 51.2507 |
| 62   | 96.5526  | 65.8984 | 87.3693  | 63.3474 | 78.1761 | 60.7511 | 117.7143 | 50.3475 | 131.8179 | 52.2018 |
| 63   | 98.2044  | 67.0468 | 88.8592  | 64.4438 | 79.5038 | 61.7959 | 119.7740 | 51.2567 | 134.1328 | 53.1542 |
| 64   | 99.8561  | 68.1959 | 90.3492  | 65.5407 | 80.8316 | 62.8412 | 121.8337 | 52.1669 | 136.4476 | 54.1078 |
| 65   | 101.5078 | 69.3457 | 91.8392  | 66.6382 | 82.1594 | 63.8869 | 123.8934 | 53.0781 | 138.7625 | 55.0626 |
| 66   | 103.1596 | 70.4962 | 93.3291  | 67.7362 | 83.4871 | 64.9330 | 125.9531 | 53.9903 | 141.0774 | 56.0187 |
| 67   | 104.8113 | 71.6475 | 94.8191  | 68.8347 | 84.8149 | 65.9795 | 128.0128 | 54.9035 | 143.3922 | 56.9760 |
| 68   | 106.4631 | 72.7994 | 96.3091  | 69.9338 | 86.1426 | 67.0265 | 130.0725 | 55.8176 | 145.7071 | 57.9345 |
| 69   | 108.1148 | 73.9521 | 97.7990  | 71.0334 | 87.4704 | 68.0740 | 132.1322 | 56.7327 | 148.0220 | 58.8943 |
| 70   | 109.7665 | 75.1048 | 99.2690  | 72.1330 | 88.7982 | 69.1215 | 134.1919 | 57.6487 | 150.3368 | 59.8552 |
| 71   | 111.4182 | 76.2575 | 100.7390 | 73.2326 | 90.1258 | 70.1690 | 136.2516 | 58.5658 | 152.6517 | 60.8175 |
| 72   | 113.0699 | 77.4102 | 102.2090 | 74.3322 | 91.4540 | 71.2165 | 138.3113 | 59.4838 | 154.9666 | 61.7809 |
| 73   | 114.7216 | 78.5629 | 103.6790 | 75.4318 | 92.7822 | 72.2640 | 140.3710 | 60.4028 | 157.2814 | 62.7456 |
| 74   | 116.3733 | 79.7156 | 105.1490 | 76.5314 | 94.1305 | 73.3115 | 142.4307 | 61.3228 | 159.5963 | 63.7115 |
| 75   | 118.0250 | 80.8683 | 106.6190 | 77.6310 | 95.4890 | 74.3590 | 144.4904 | 62.2437 | 161.9112 | 64.6786 |
| 76   |          |         |          |         |         |         | 146.5501 | 63.1647 | 164.2261 | 65.6461 |
| 77   |          |         |          |         |         |         | 148.6098 | 64.0857 | 166.5410 | 66.6146 |
| 78   |          |         |          |         |         |         | 150.6695 | 65.0067 | 168.8559 | 67.5841 |
| 79   |          |         |          |         |         |         | 152.7292 | 65.9277 | 171.1708 | 68.5546 |
| 80   |          |         |          |         |         |         | 154.7889 | 66.8487 | 173.4857 | 69.5261 |
| 81   |          |         |          |         |         |         | 156.8486 | 67.7697 | 175.8006 | 70.4986 |
| 82   |          |         |          |         |         |         | 158.9083 | 68.6907 | 178.1155 | 71.4721 |
| 83   |          |         |          |         |         |         | 160.9680 | 69.6117 | 180.4304 | 72.4466 |



## 5.2. 複素固有値解析結果

前述の7種類のモデル化に加え，設計変位 5mm と 10mm の高減衰ゴムダンパーばね，  
0℃・20℃・40℃の高減衰ゴムダンパーばね，について複素固有値解析を行った．解析  
ケースと名称は次のとおりである．

$$\left\{ \begin{array}{c} \text{ケーブル} \\ \text{C01} \\ \text{C02} \\ \text{C03} \\ \text{C17} \\ \text{C18} \end{array} \right\} \times \left\{ \begin{array}{c} \text{設計変位} \\ \text{d05} \\ \text{d10} \end{array} \right\} \times \left\{ \begin{array}{c} \text{温度} \\ \text{t00} \\ \text{t20} \\ \text{t40} \end{array} \right\} \times \left\{ \begin{array}{c} \text{ケース} \\ 1) \text{基 本} \\ 2) \text{サ グ} \\ 3) \text{曲げ剛性} \\ 4) \text{傾 斜} \\ 5) \text{傾斜サグ} \\ 6) \text{傾斜曲げ} \\ 7) \text{全 考 慮} \end{array} \right\} = 210$$

解析に用いた複素ばねは，式 5-1 を用い設計変位 5mm および 10mm それぞれに対し  
て以下の表のとおりである．

表 5-7 解析に用いる複素ばね（設計変位 5mm）

| ケーブル   |                               |             |      | C01    | C02    | C03    | C17    | C18    |
|--|-------------------------------|-------------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 高減衰<br>ゴムダンパー<br>諸元  | 設計せん断<br>ばね定数<br>(0℃,20℃,40℃) | K'0         | kN/m | 1094.0 | 1094.0 | 1094.0 | 957.3  | 820.5  |
|  |                               | K'20        | kN/m | 643.6  | 643.6  | 643.6  | 563.1  | 482.7  |
|  |                               | K'40        | kN/m | 456.9  | 456.9  | 456.9  | 399.8  | 342.7  |
| 複素バネ<br>$K=K'(u+iv)$<br>K':設計せん断<br>バネ定数<br>u: 複素バネ実部<br>v: 複素バネ虚部 | 損失係数<br>(0℃,20℃,40℃)          | $\gamma$ 0  | —    | 0.76   | 0.76   | 0.76   | 0.76   | 0.76   |
|  |                               | $\gamma$ 20 | —    | 0.62   | 0.62   | 0.62   | 0.62   | 0.62   |
|  |                               | $\gamma$ 40 | —    | 0.62   | 0.62   | 0.62   | 0.62   | 0.62   |
|  | 複素バネ実部                        | u0          | —    | 0.7962 | 0.7962 | 0.7962 | 0.7962 | 0.7962 |
|  |                               | u20         | —    | 0.8499 | 0.8499 | 0.8499 | 0.8499 | 0.8499 |
|  |                               | u40         | —    | 0.8499 | 0.8499 | 0.8499 | 0.8499 | 0.8499 |
|  | 複素バネ虚部                        | v0          | —    | 0.6051 | 0.6051 | 0.6051 | 0.6051 | 0.6051 |
|  |                               | v20         | —    | 0.5269 | 0.5269 | 0.5269 | 0.5269 | 0.5269 |
|  |                               | v40         | —    | 0.5269 | 0.5269 | 0.5269 | 0.5269 | 0.5269 |
|  | 複素バネ実部係数                      | K'u0        | kN/m | 871.0  | 871.0  | 871.0  | 762.2  | 653.3  |
|  |                               | K'u20       | kN/m | 547.0  | 547.0  | 547.0  | 478.6  | 410.2  |
|  |                               | K'u40       | kN/m | 388.3  | 388.3  | 388.3  | 339.8  | 291.3  |
|  | 複素バネ虚部係数                      | K'v0        | kN/m | 662.0  | 662.0  | 662.0  | 579.2  | 496.5  |
|  |                               | K'v20       | kN/m | 339.1  | 339.1  | 339.1  | 296.7  | 254.3  |
|  |                               | K'v40       | kN/m | 240.8  | 240.8  | 240.8  | 210.7  | 180.6  |



表 5-8 解析に用いる複素ばね（設計変位 10mm）

| ケーブル   |                               |             |      | C01    | C02    | C03    | C17    | C18    |
|--|-------------------------------|-------------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 高減衰<br>ゴムダンパー<br>諸元  | 設計せん断<br>ばね定数<br>(0℃,20℃,40℃) | K'0         | kN/m | 1904.0 | 1904.0 | 1904.0 | 1666.0 | 1428.0 |
|  |                               | K'20        | kN/m | 1120.0 | 1120.0 | 1120.0 | 980.0  | 840.0  |
|  |                               | K'40        | kN/m | 795.2  | 795.2  | 795.2  | 695.8  | 596.4  |
| 複素ばね<br>$K=K'(u+iv)$<br>K':設計せん断<br>ばね定数<br>u:複素ばね実部<br>v:複素ばね虚部 | 損失係数<br>(0℃,20℃,40℃)          | $\gamma$ 0  | —    | 0.76   | 0.76   | 0.76   | 0.76   | 0.76   |
|  |                               | $\gamma$ 20 | —    | 0.63   | 0.63   | 0.63   | 0.63   | 0.63   |
|  |                               | $\gamma$ 40 | —    | 0.63   | 0.63   | 0.63   | 0.63   | 0.63   |
|  | 複素ばね実部                        | u0          | —    | 0.7962 | 0.7962 | 0.7962 | 0.7962 | 0.7962 |
|  |                               | u20         | —    | 0.8461 | 0.8461 | 0.8461 | 0.8461 | 0.8461 |
|  |                               | u40         | —    | 0.8461 | 0.8461 | 0.8461 | 0.8461 | 0.8461 |
|  | 複素ばね虚部                        | v0          | —    | 0.6051 | 0.6051 | 0.6051 | 0.6051 | 0.6051 |
|  |                               | v20         | —    | 0.5330 | 0.5330 | 0.5330 | 0.5330 | 0.5330 |
|  |                               | v40         | —    | 0.5330 | 0.5330 | 0.5330 | 0.5330 | 0.5330 |
|  | 複素ばね実部係数                      | K'u0        | kN/m | 1515.9 | 1515.9 | 1515.9 | 1326.4 | 1136.9 |
|  |                               | K'u20       | kN/m | 947.6  | 947.6  | 947.6  | 829.2  | 710.7  |
|  |                               | K'u40       | kN/m | 672.8  | 672.8  | 672.8  | 588.7  | 504.6  |
|  | 複素ばね虚部係数                      | K'v0        | kN/m | 1152.1 | 1152.1 | 1152.1 | 1008.1 | 864.1  |
|  |                               | K'v20       | kN/m | 597.0  | 597.0  | 597.0  | 522.4  | 447.8  |
|  |                               | K'v40       | kN/m | 423.9  | 423.9  | 423.9  | 370.9  | 317.9  |

次ページ以降に各ケーブルの全ケースの複素固有値解析結果を示す。同図は、横軸にモード，第 1 縦軸に対数減衰率，第 2 縦軸にケース 2～7 の基本ケースに対する対数減衰率の比率，を示している。また，横軸の下には第 1 縦軸および第 2 縦軸の値を示している。

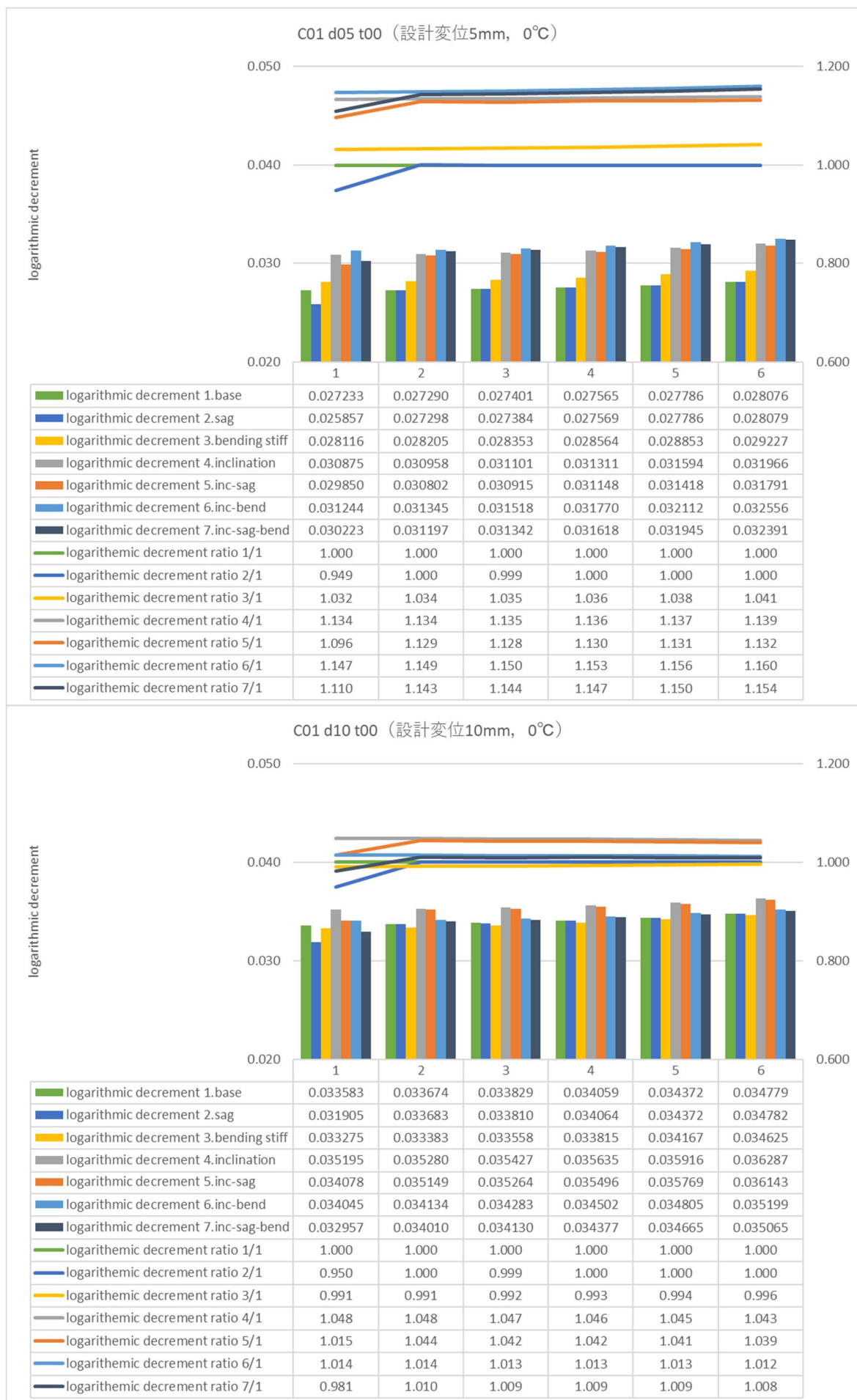


図 5-2 C01 ケーブル 0°C (上 ; 設計変位 5mm, 下 ; 設計変位 10mm)

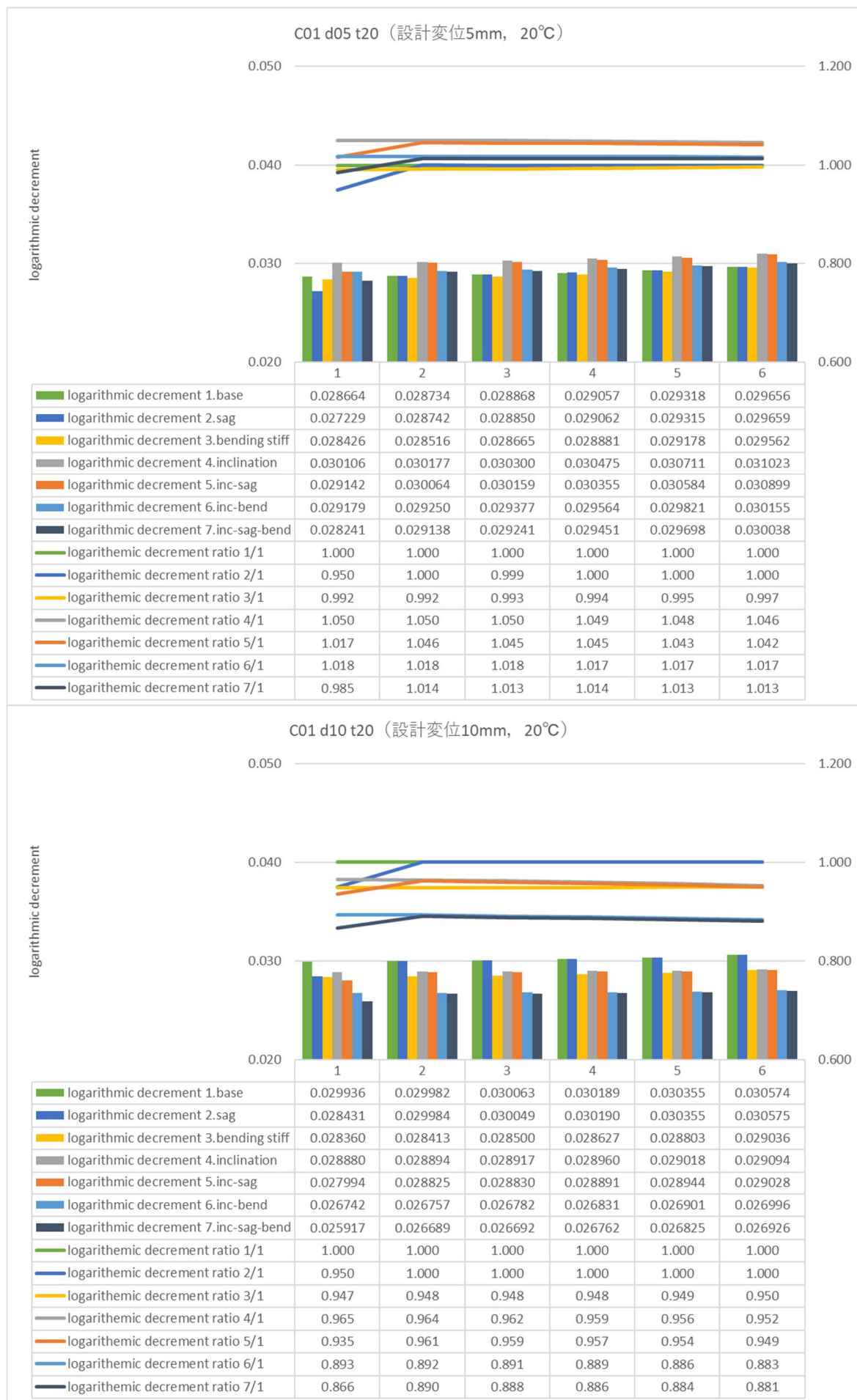


図 5-3 C01 ケーブル 20°C (上 ; 設計変位 5mm, 下 ; 設計変位 10mm)

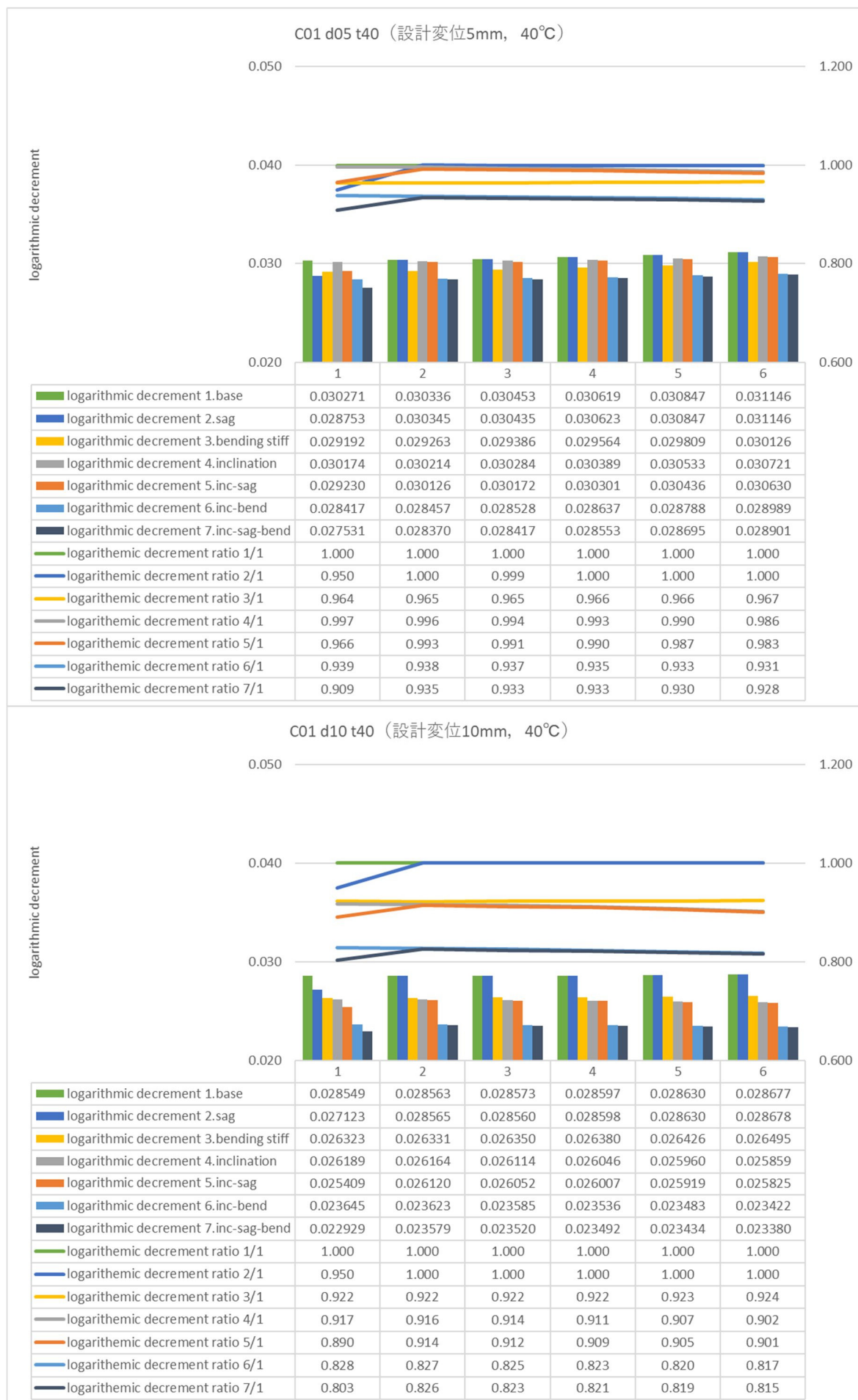


図 5-4 C01 ケーブル 40°C (上 ; 設計変位 5mm, 下 ; 設計変位 10mm)

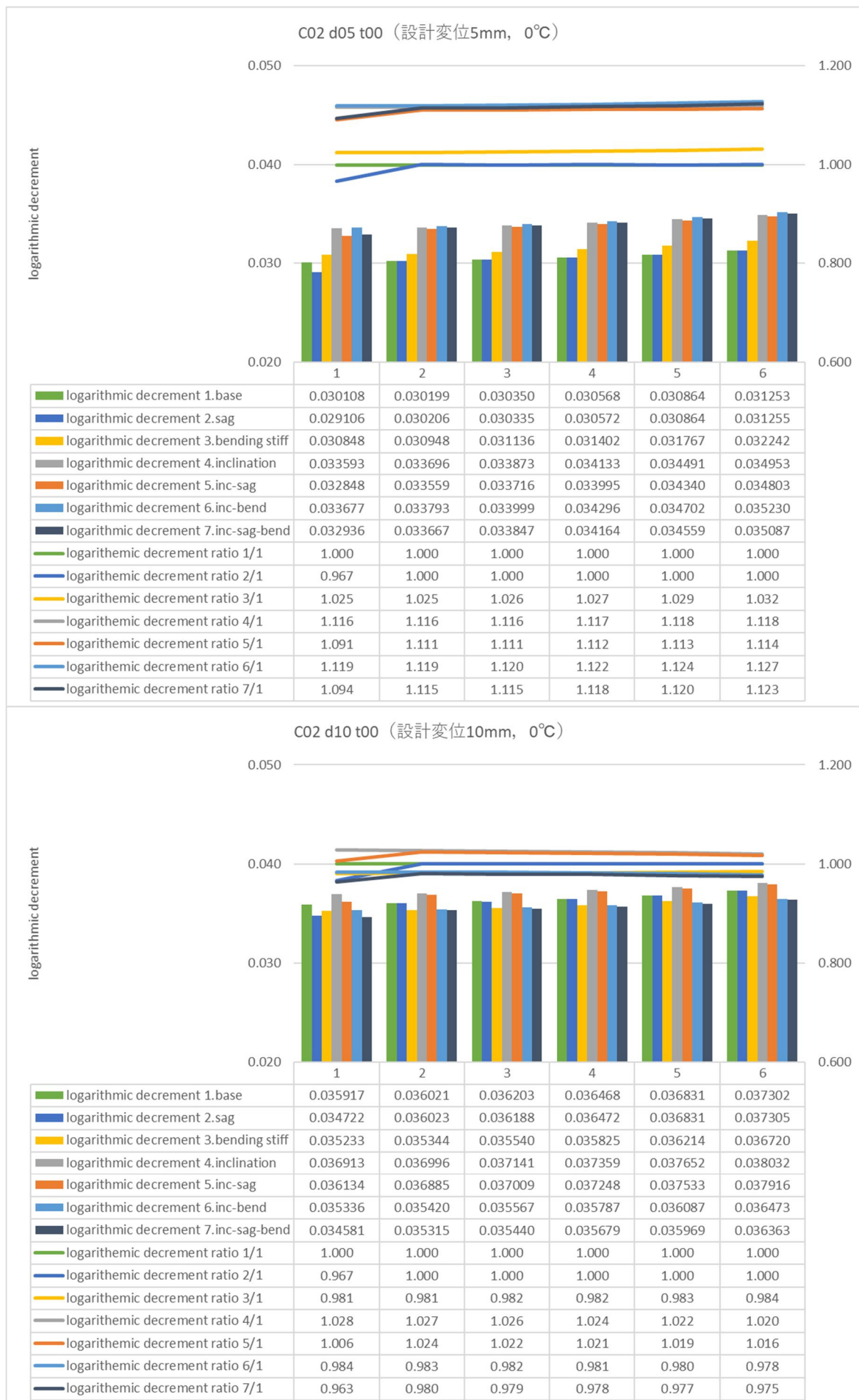


図 5-5 C02 ケーブル 0°C (上 ; 設計変位 5mm, 下 ; 設計変位 10mm)



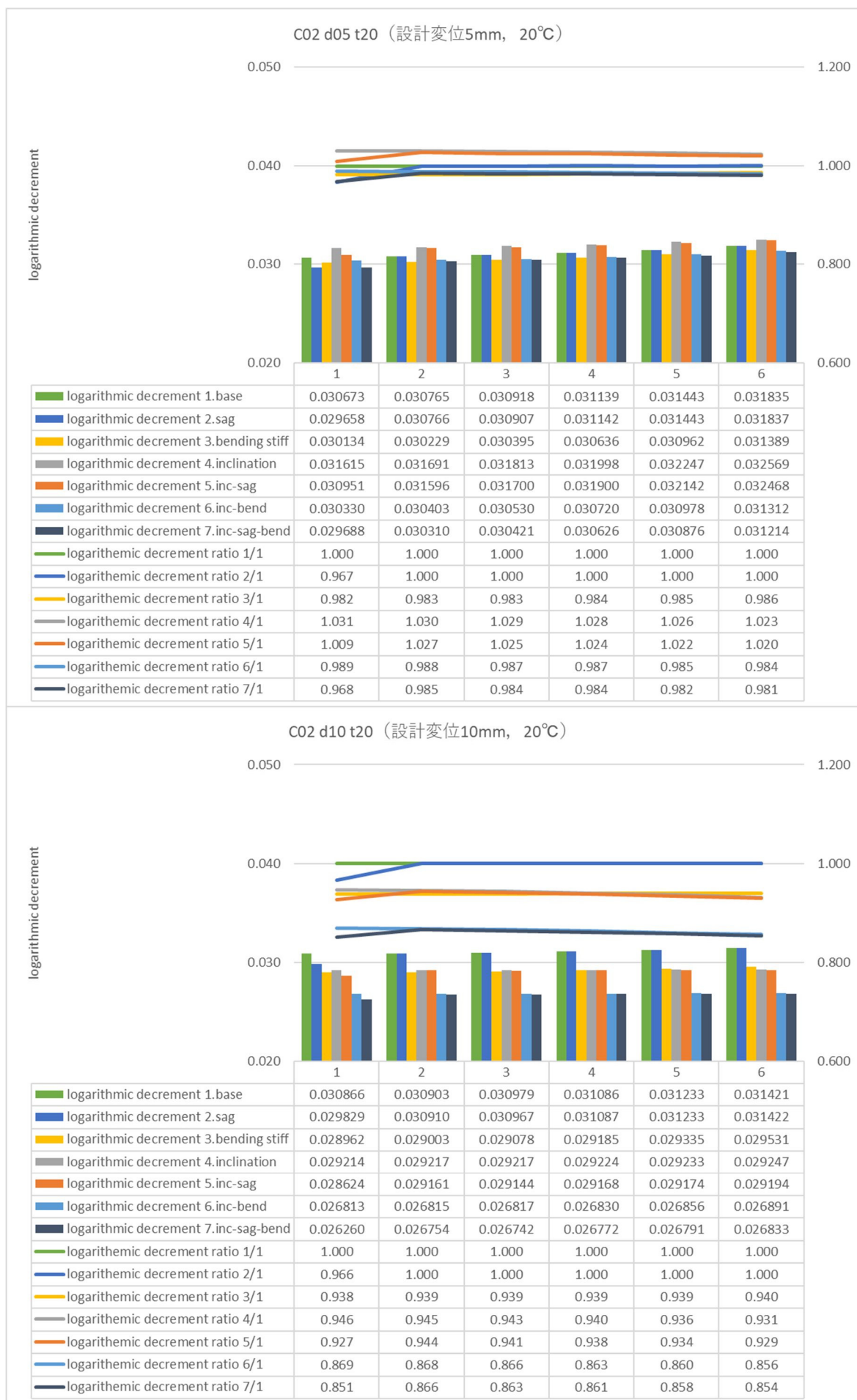


図 5-6 C02 ケーブル 20℃ (上 ; 設計変位 5mm, 下 ; 設計変位 10mm)

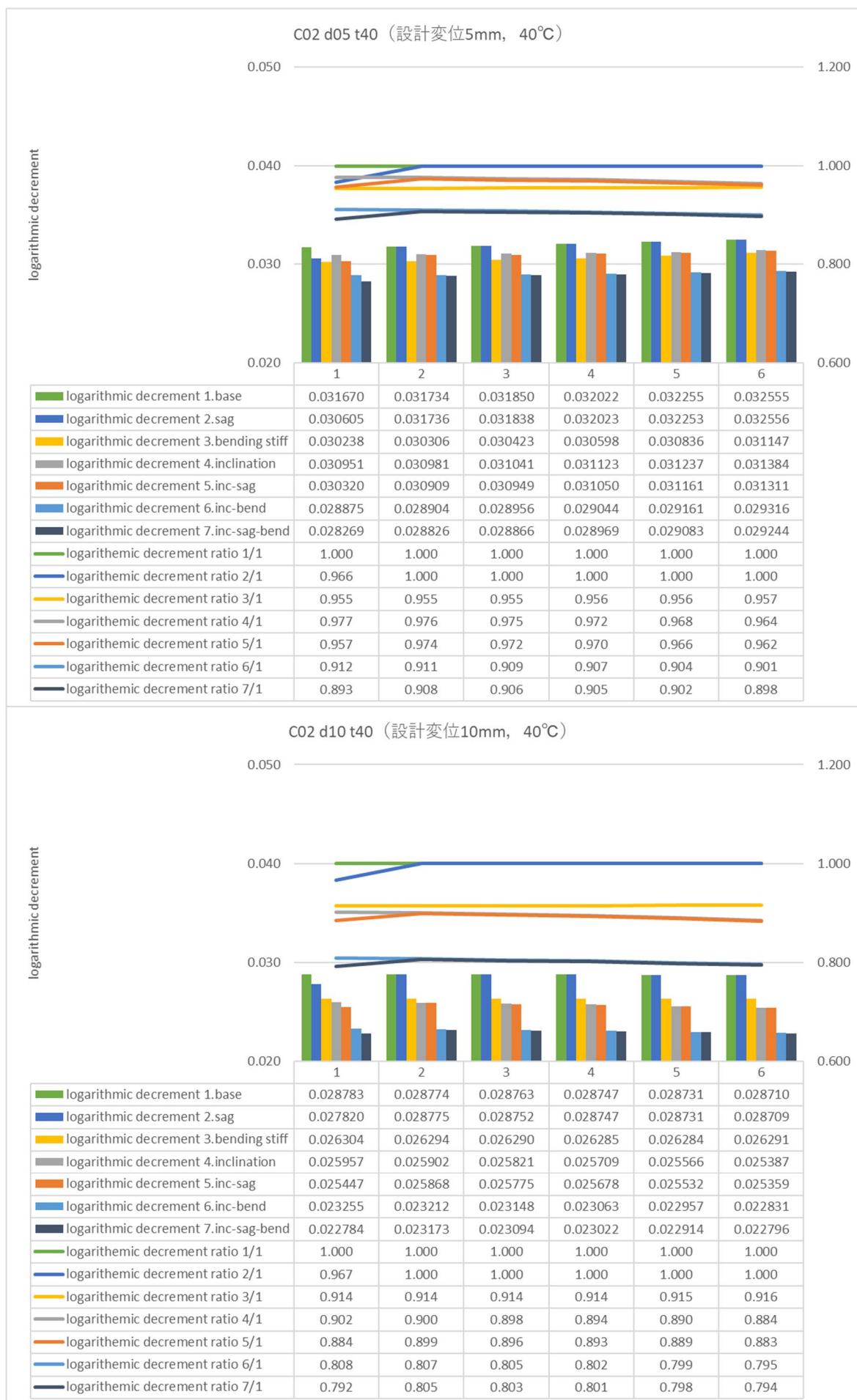


図 5-7 C02 ケーブル 40℃ (上 ; 設計変位 5mm, 下 ; 設計変位 10mm)

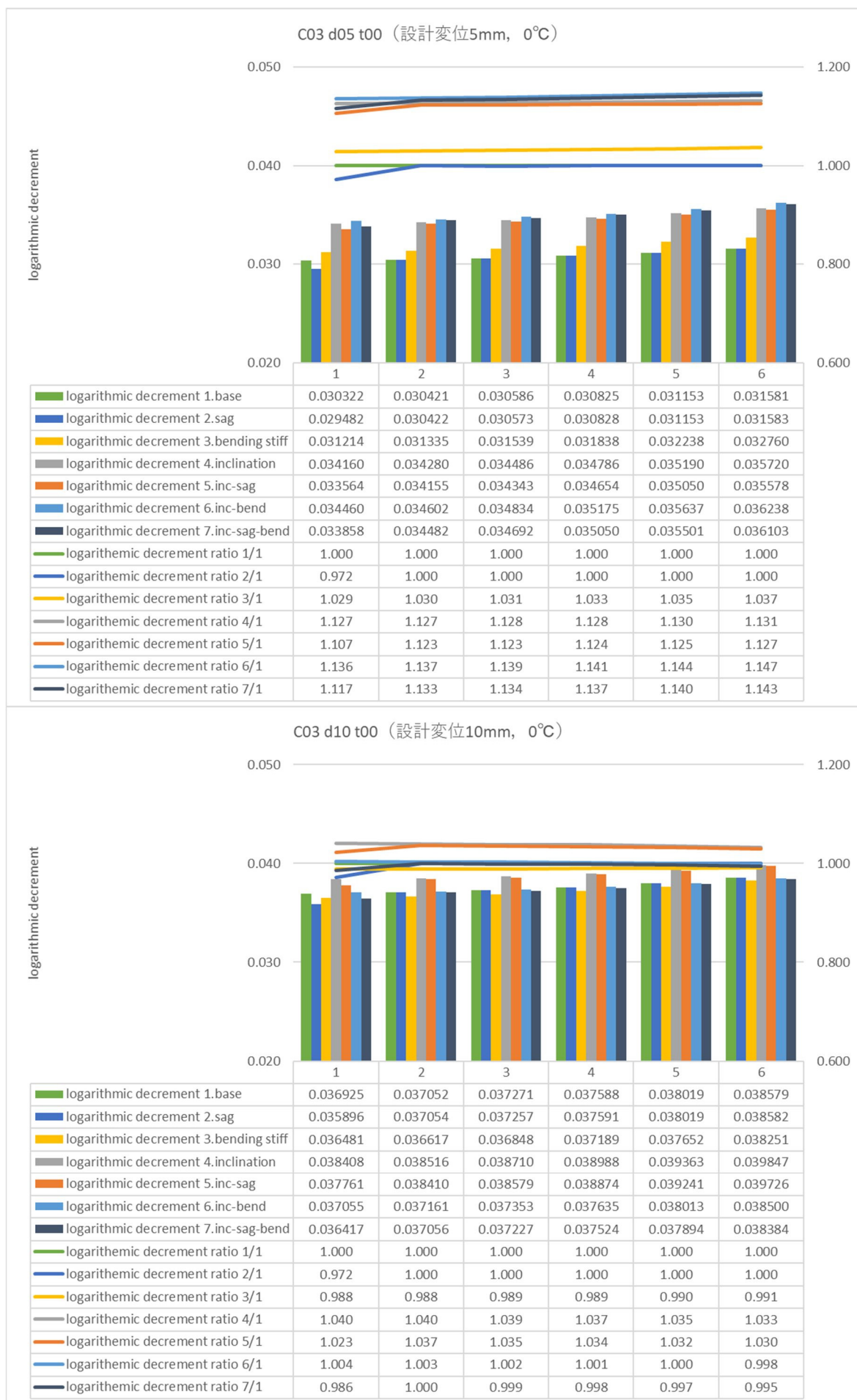


図 5-8 C03 ケーブル 0°C (上 ; 設計変位 5mm, 下 ; 設計変位 10mm)



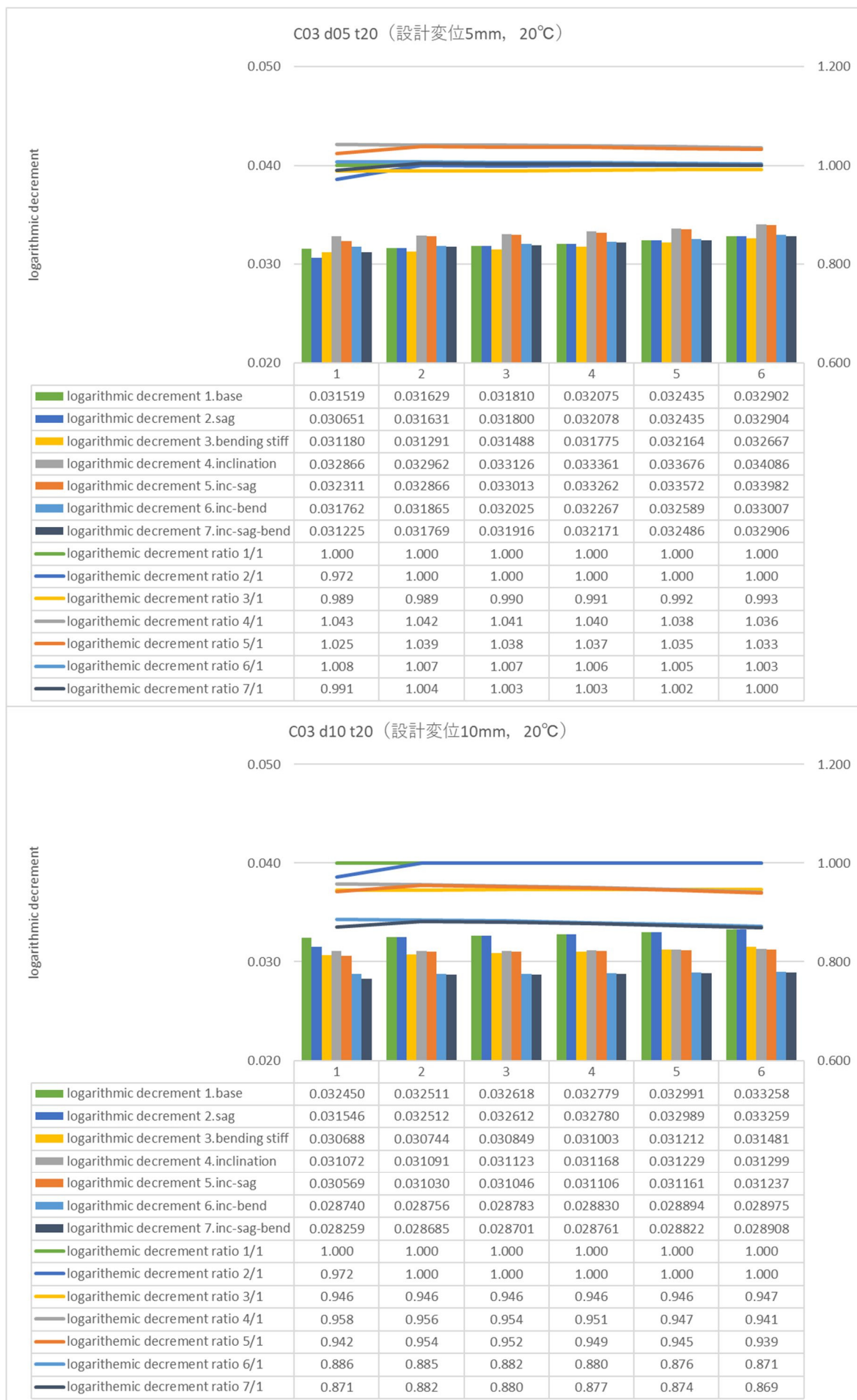


図 5-9 C03 ケーブル 20℃ (上 ; 設計変位 5mm, 下 ; 設計変位 10mm)

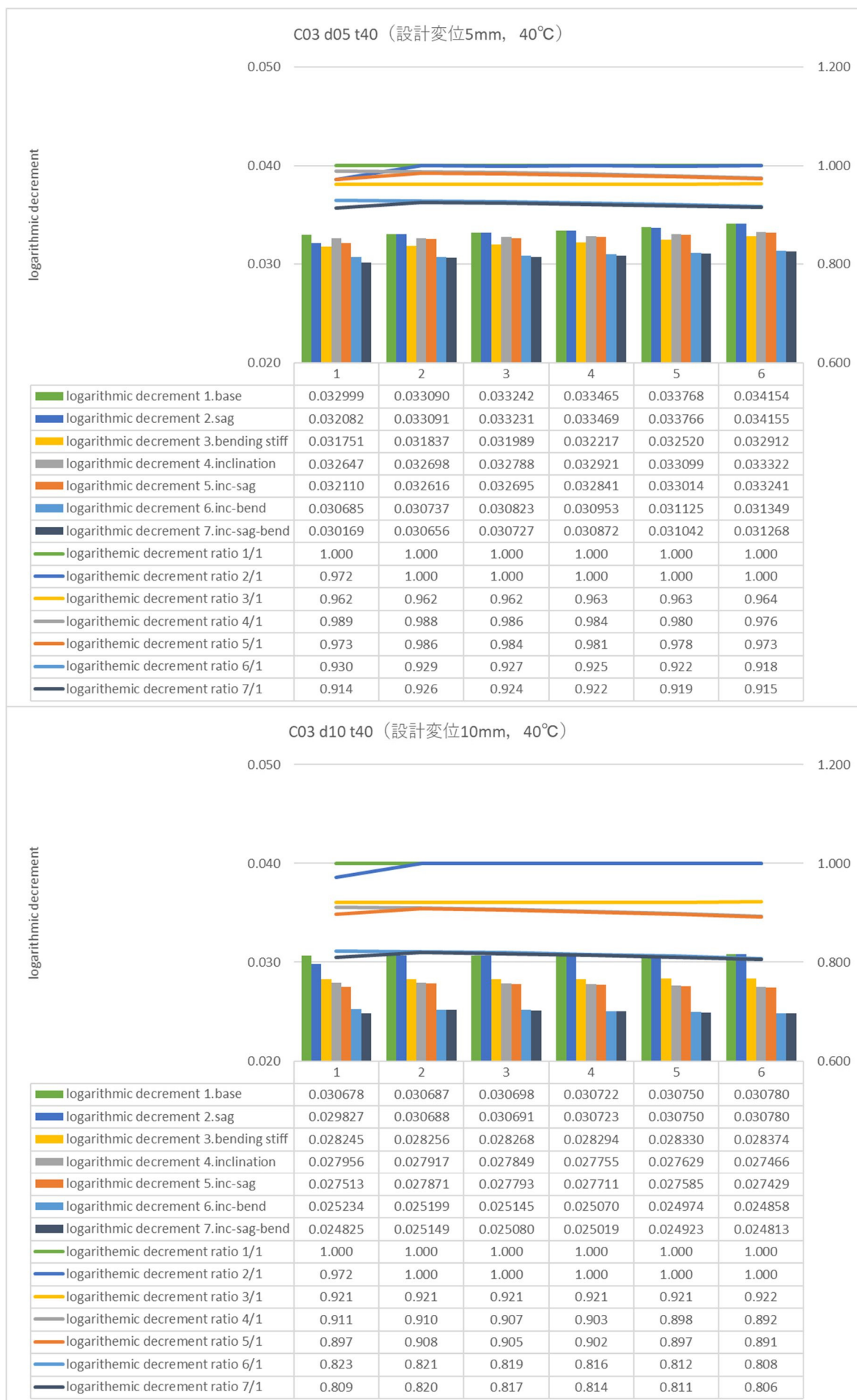


図 5-10 C03 ケーブル 40℃ (上 ; 設計変位 5mm, 下 ; 設計変位 10mm)

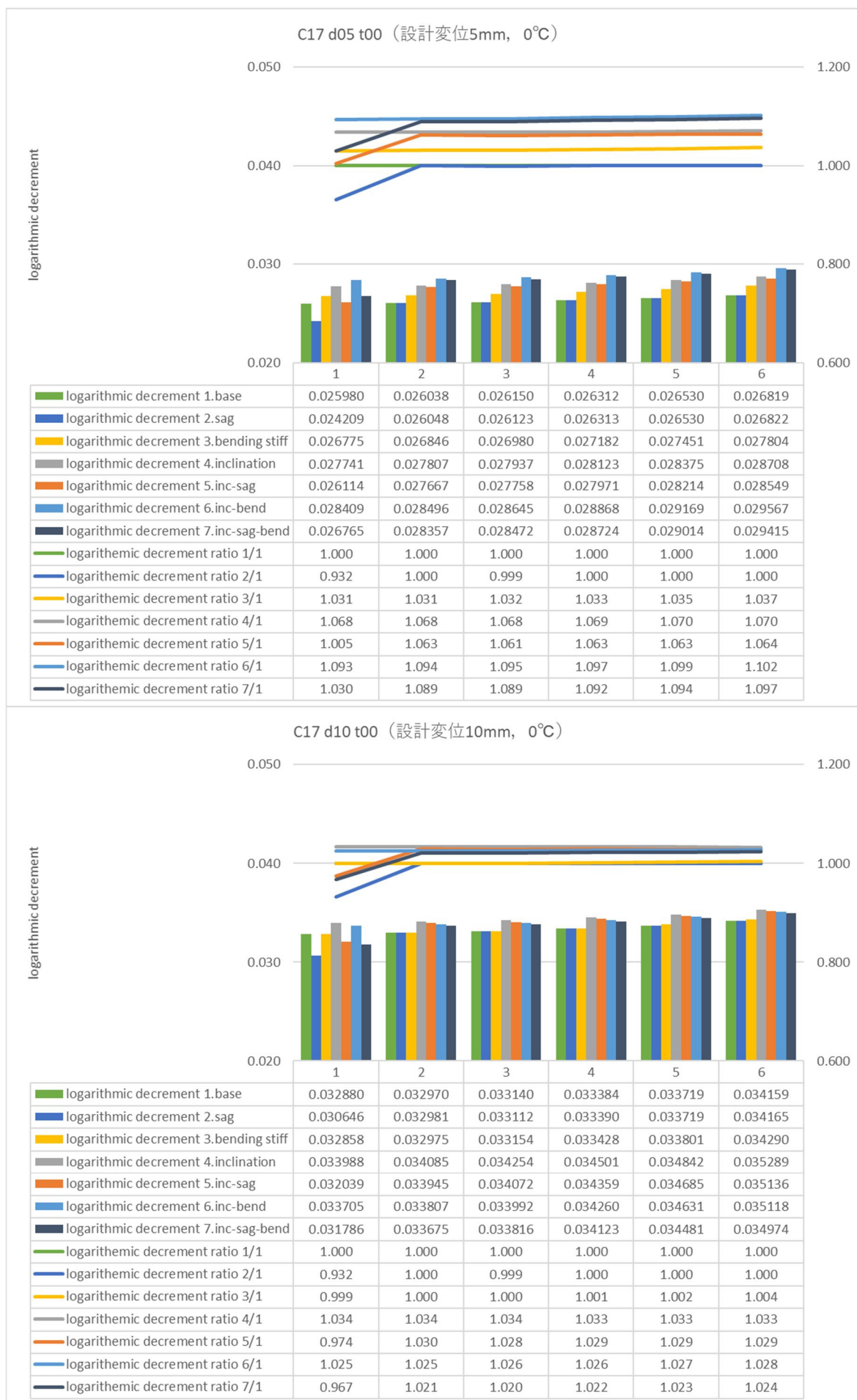


図 5-11 C17 ケーブル 0°C (上 ; 設計変位 5mm, 下 ; 設計変位 10mm)

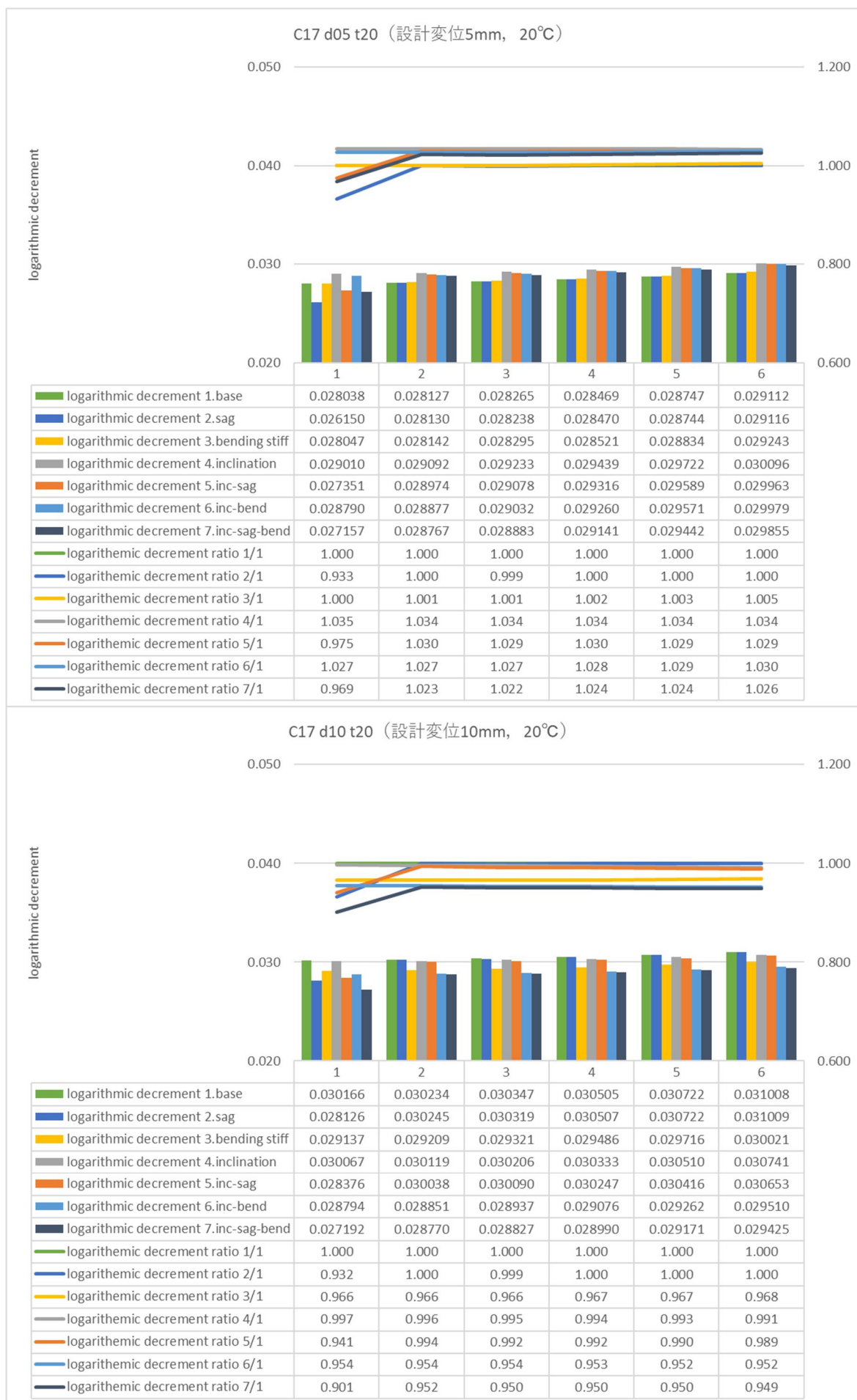


図 5-12 C17 ケーブル 20℃ (上 ; 設計変位 5mm, 下 ; 設計変位 10mm)



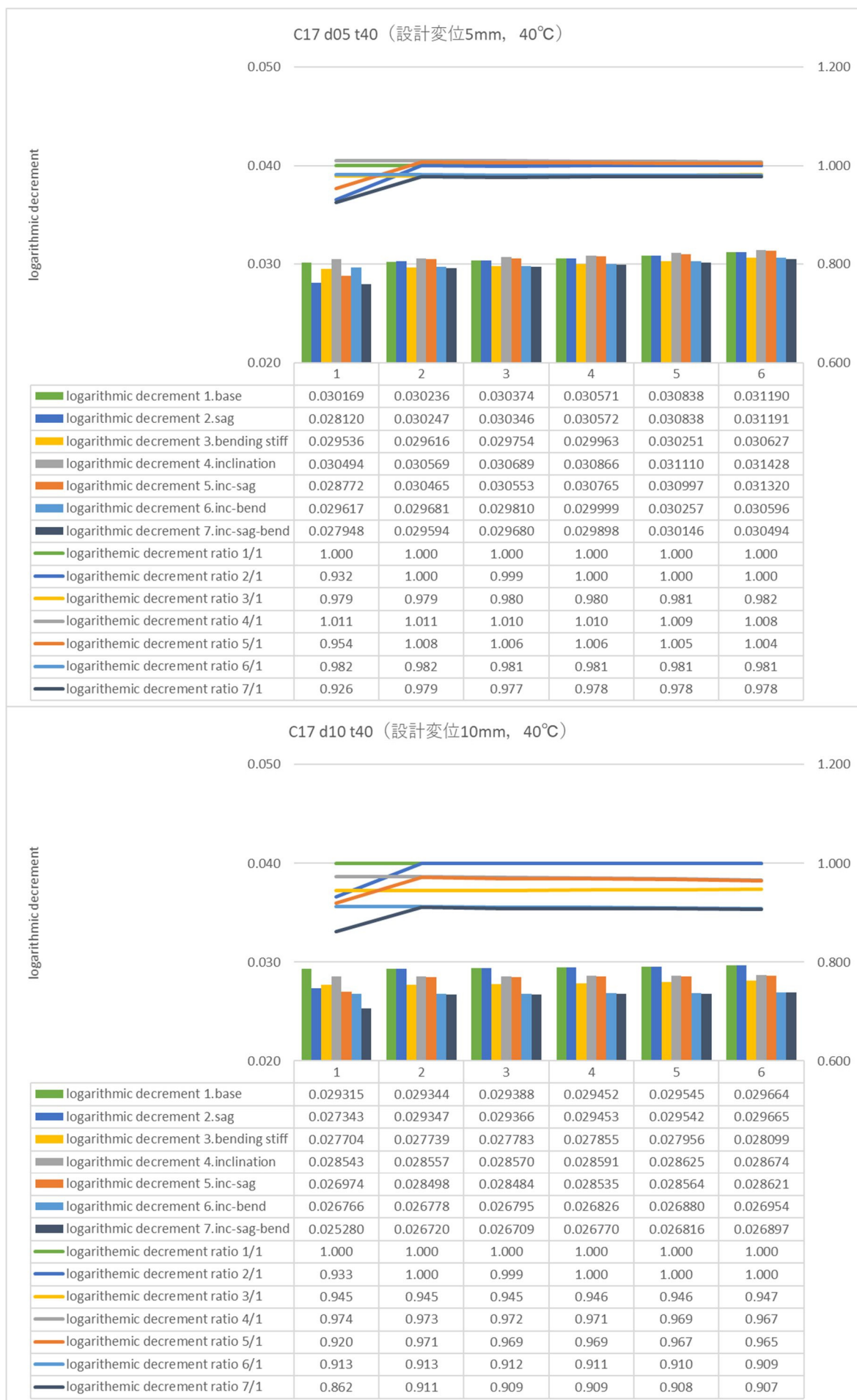


図 5-13 C17 ケーブル 40°C (上 ; 設計変位 5mm, 下 ; 設計変位 10mm)

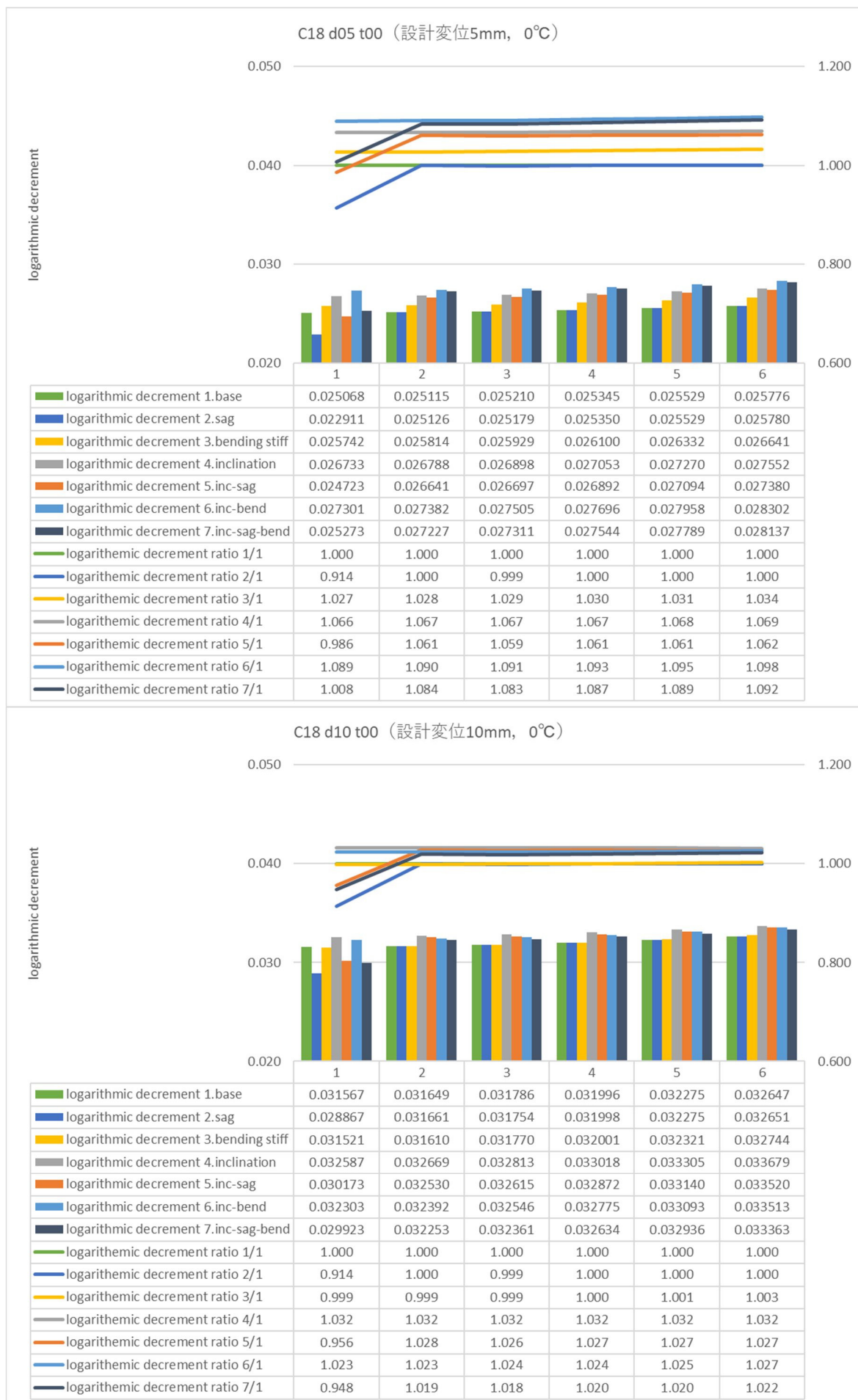


図 5-14 C18 ケーブル 0°C (上 ; 設計変位 5mm, 下 ; 設計変位 10mm)

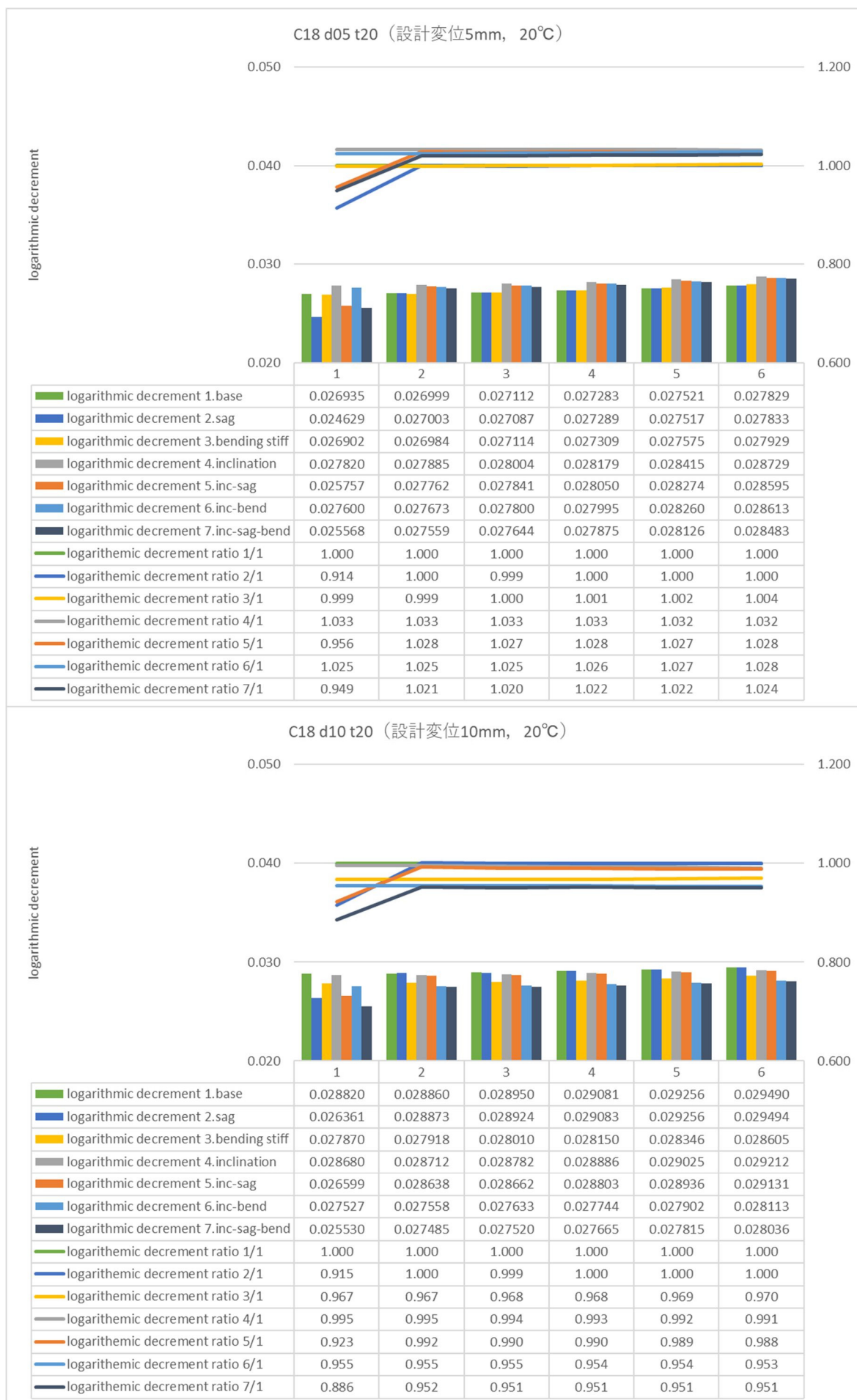


図 5-15 C18 ケーブル 20℃ (上 ; 設計変位 5mm, 下 ; 設計変位 10mm)

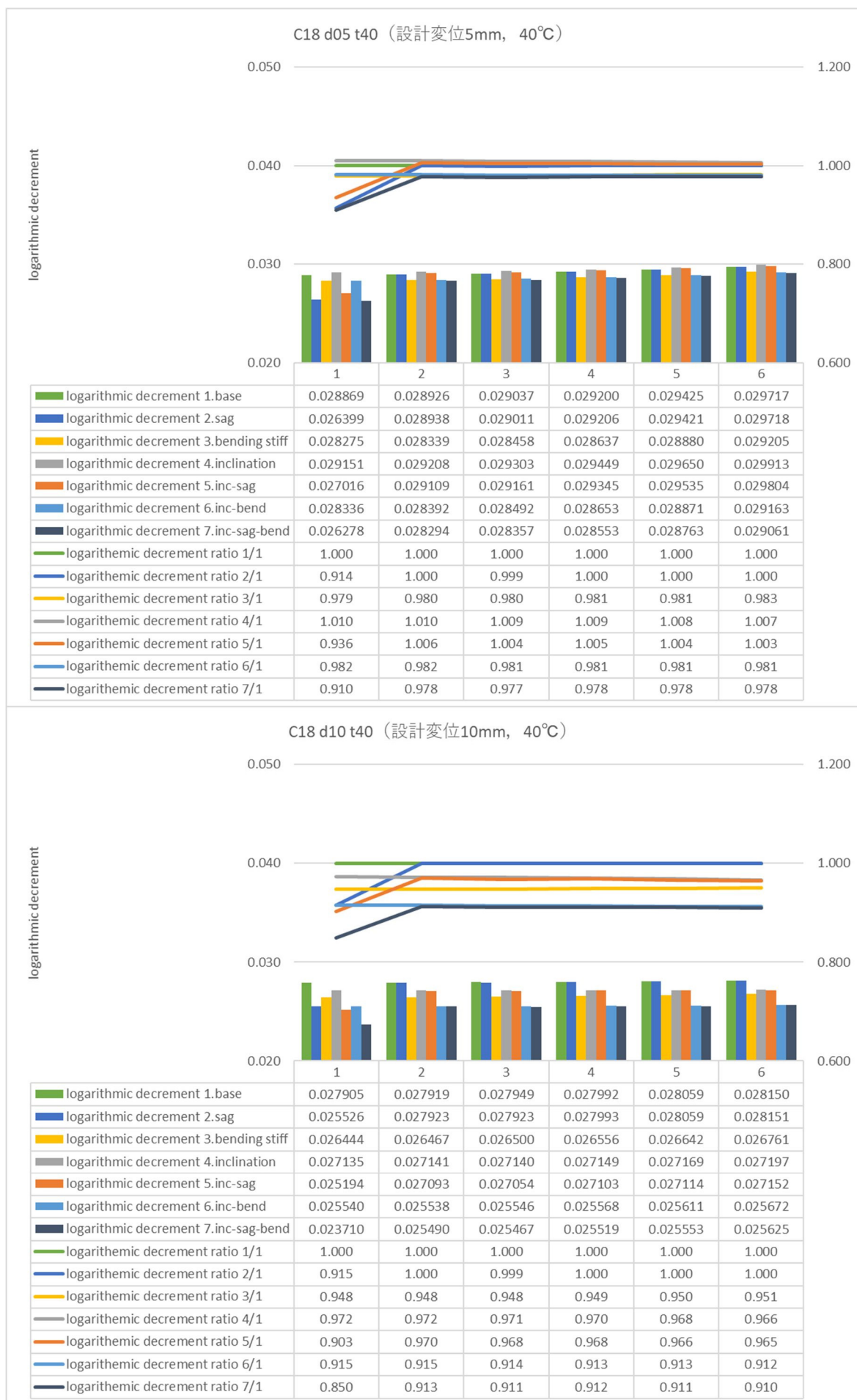


図 5-16 C18 ケーブル 40℃ (上 ; 設計変位 5mm, 下 ; 設計変位 10mm)



### 5.3. 解析ケースごとの分析

#### (1) サグの影響

サグが対数減衰率に及ぼす影響を把握するため、サグ比と対数減衰率比に着目して次ページ以降のとおりグラフに整理した。グラフは、横軸をサグ比（サグ  $s$ /ケーブル長  $L$ ）、縦軸を対数減衰率比（2 サグ考慮モデル対数減衰率/1 基本モデル対数減衰率）、としている。

同図から明らかなとおり、サグの影響は1次モードのみ顕著に表れており、サグが大きくなるにつれて基本モデルに対する対数減衰率の減少率が大きくなる。サグ考慮モデルの全ケースの1次モードに着した減少率は、下のグラフに示すとおりサグ比に1次比例しその相関は高い。

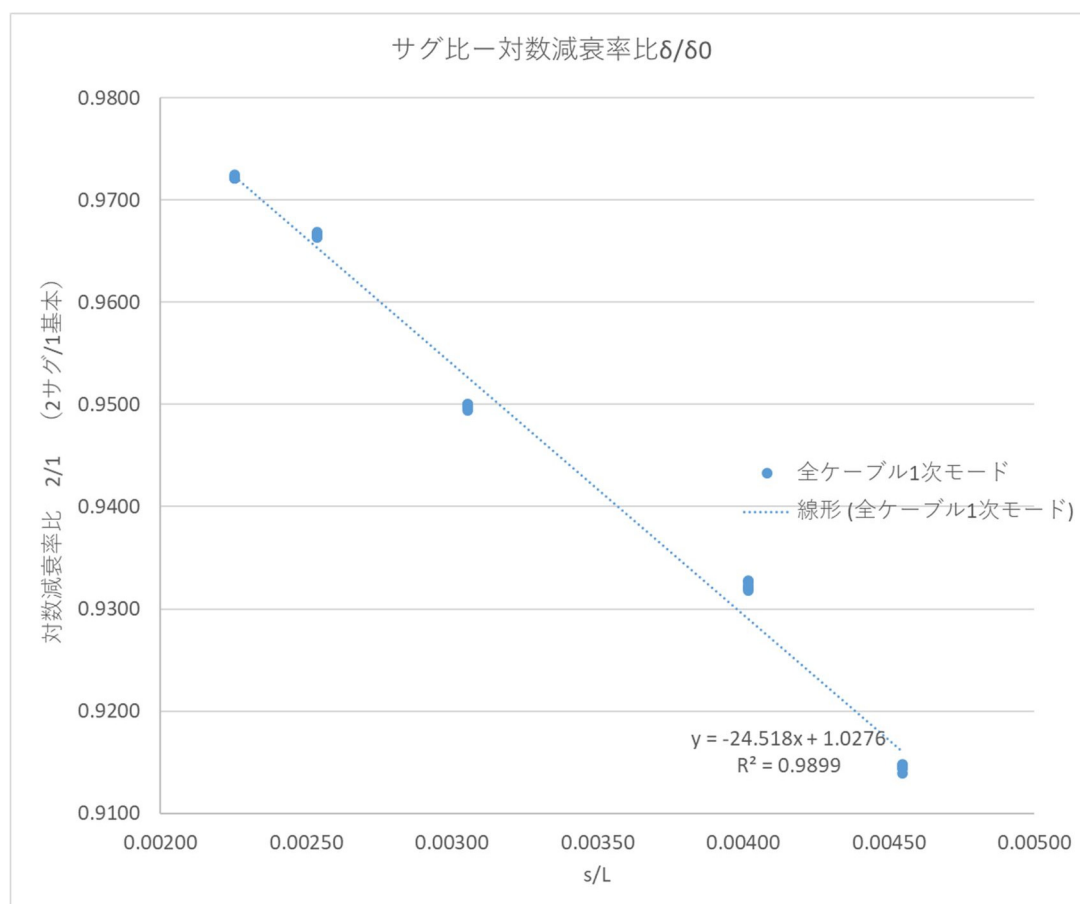


図 5-17 サグ考慮モデル全ケースの1次モード着目の対数減衰率比

1次モード以外では、3次モードや5次モードでごくわずかに対数減衰率の減少の傾向が見られるが、1%未満であり無視できると考えられる。1次モードの形状がサグの形状に近いため、その影響が顕著に出たものと考えられる。

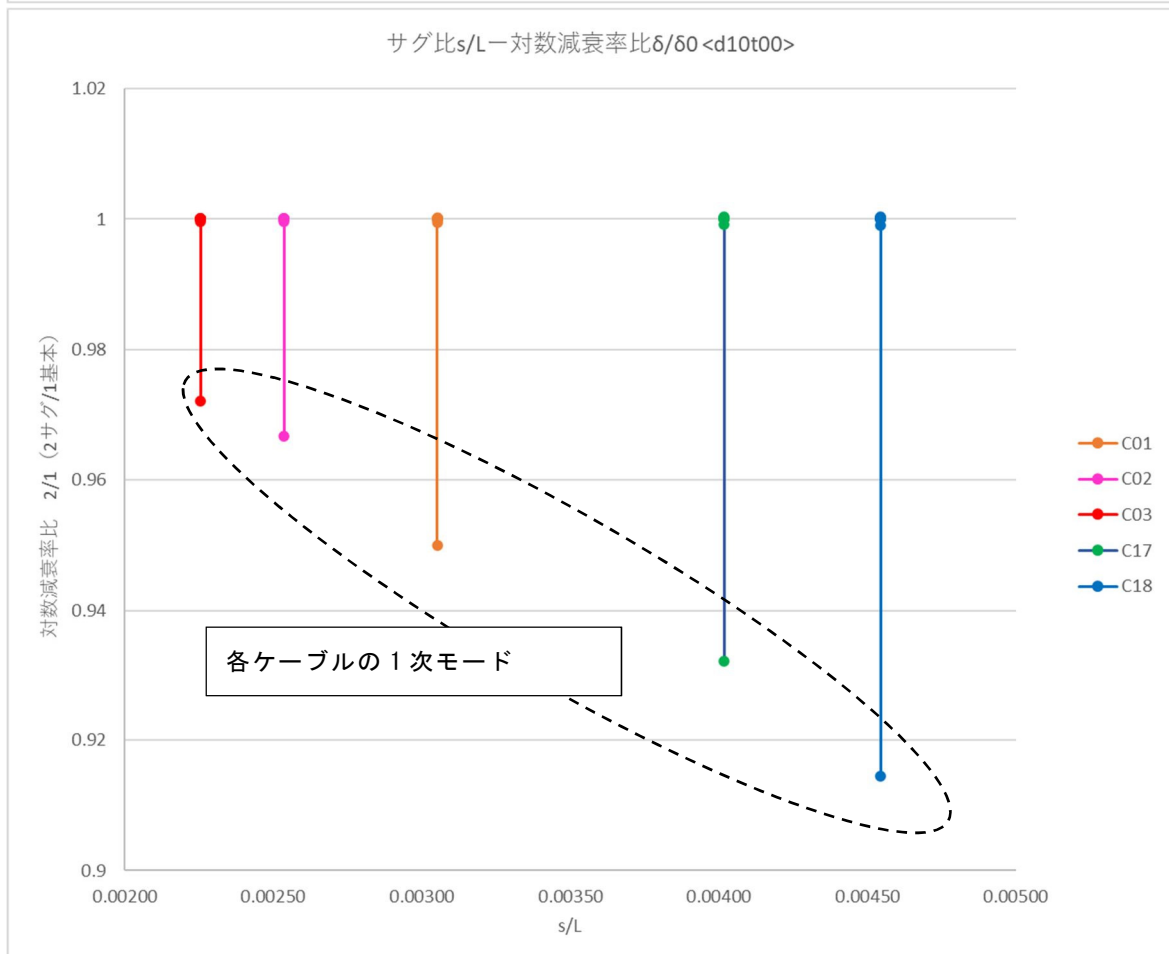
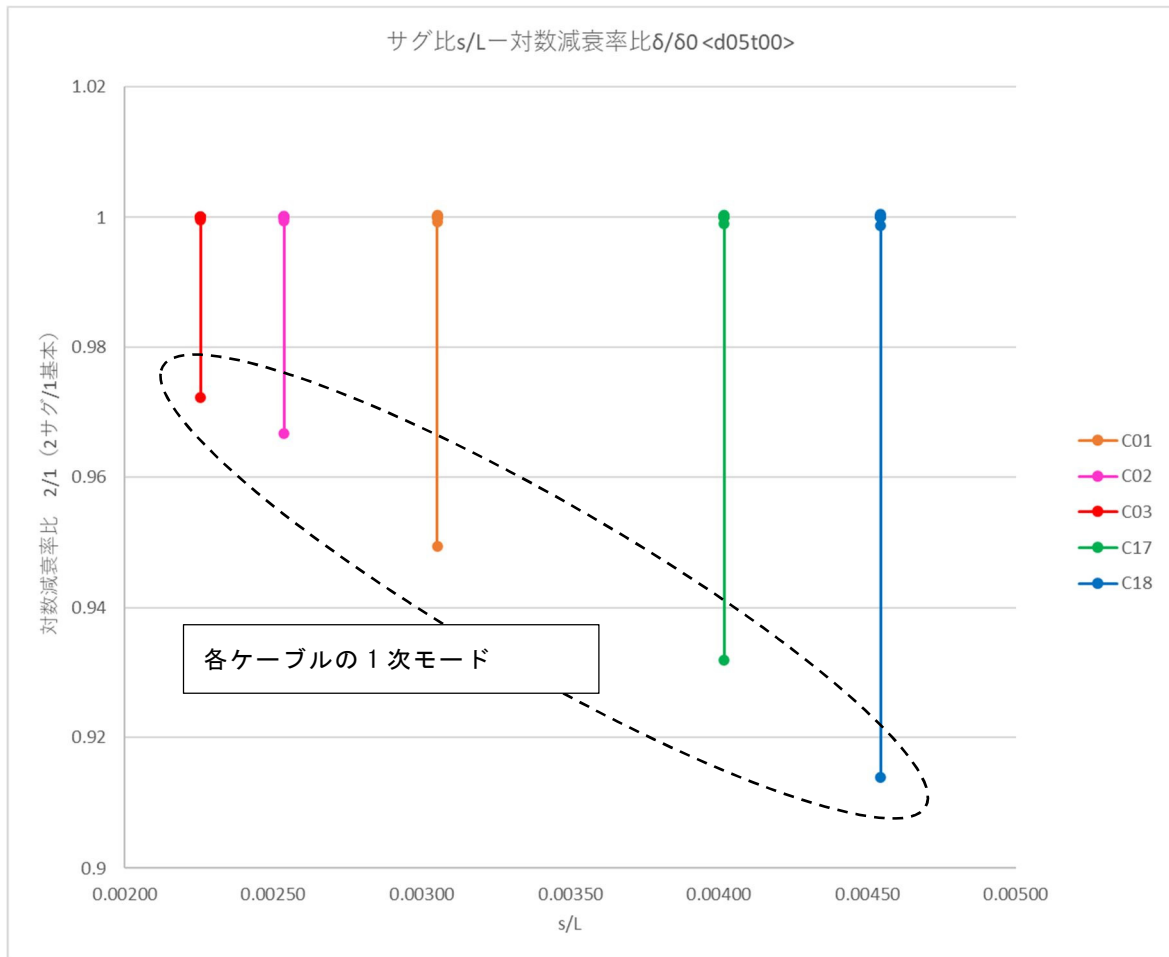


図 5-18 サグ比と対数減衰率比 0°C (上 ; 設計変位 5mm, 下 ; 設計変位 10mm)

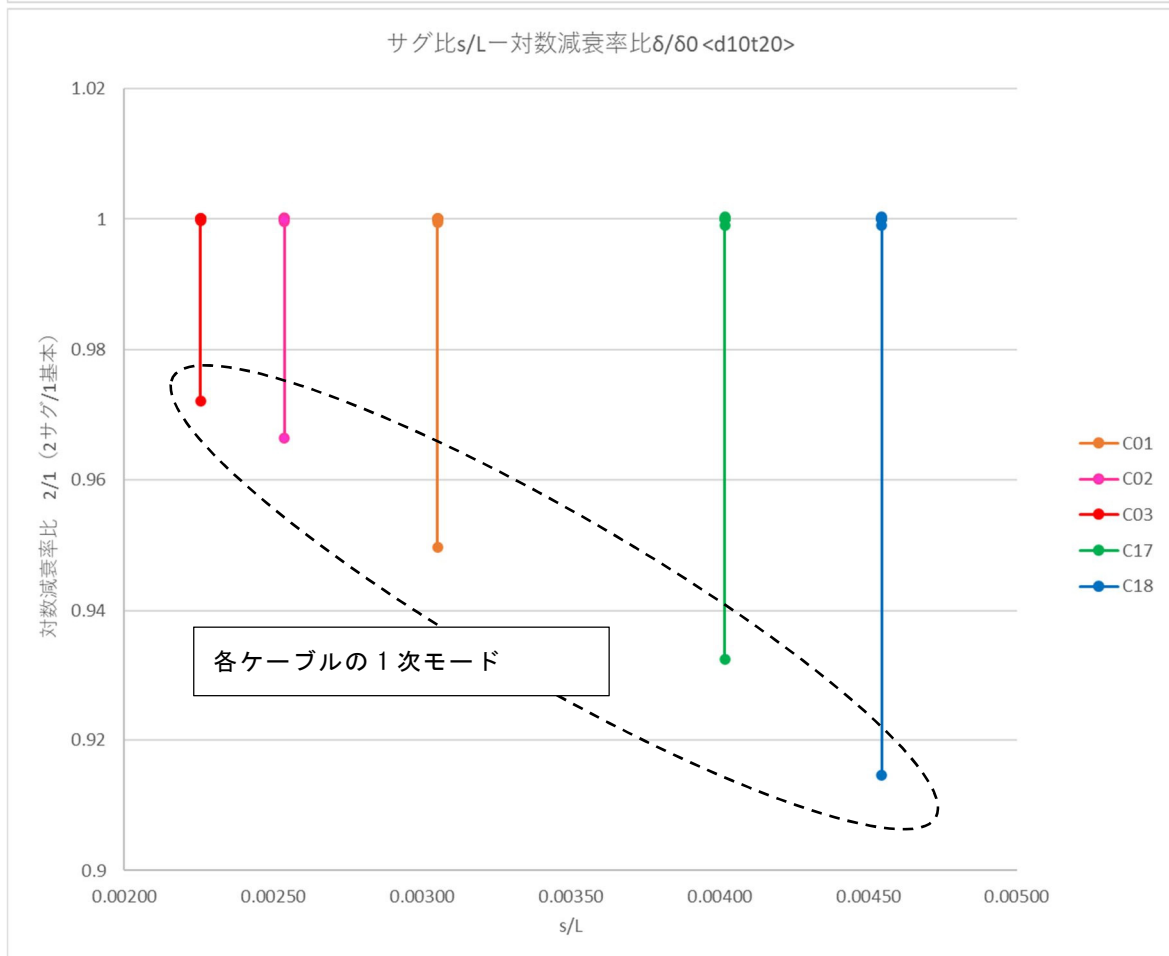
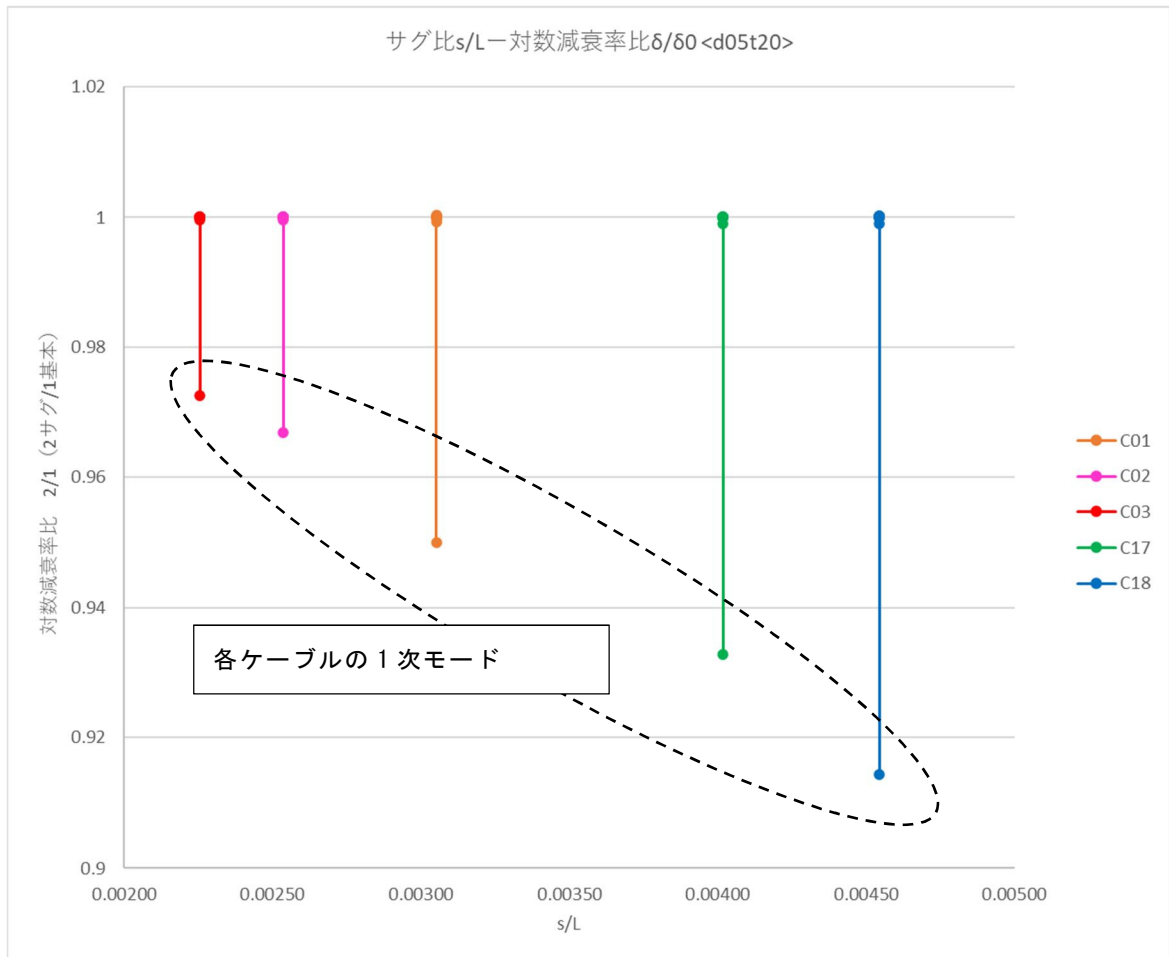


図 5-19 サグ比と対数減衰率比 20°C（上；設計変位 5mm，下；設計変位 10mm）

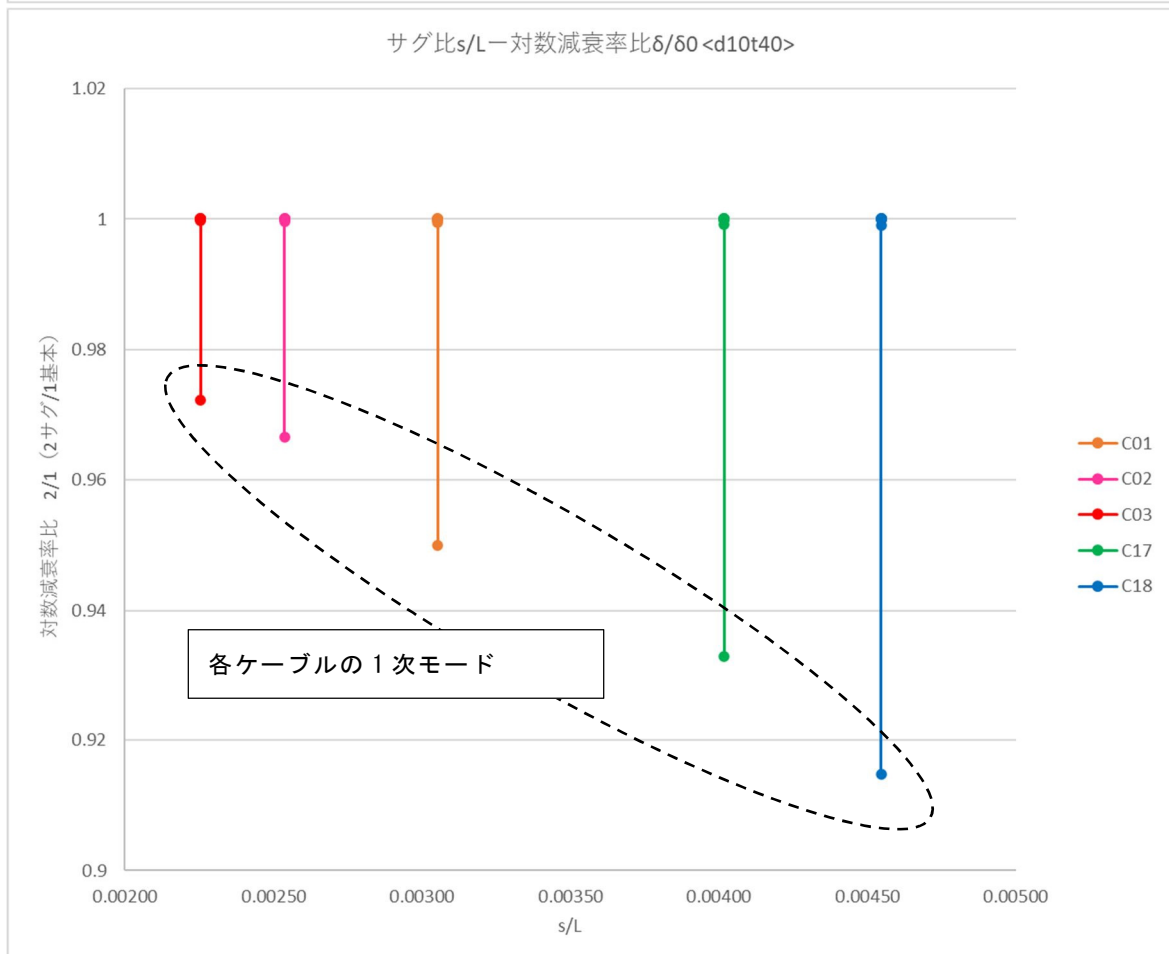
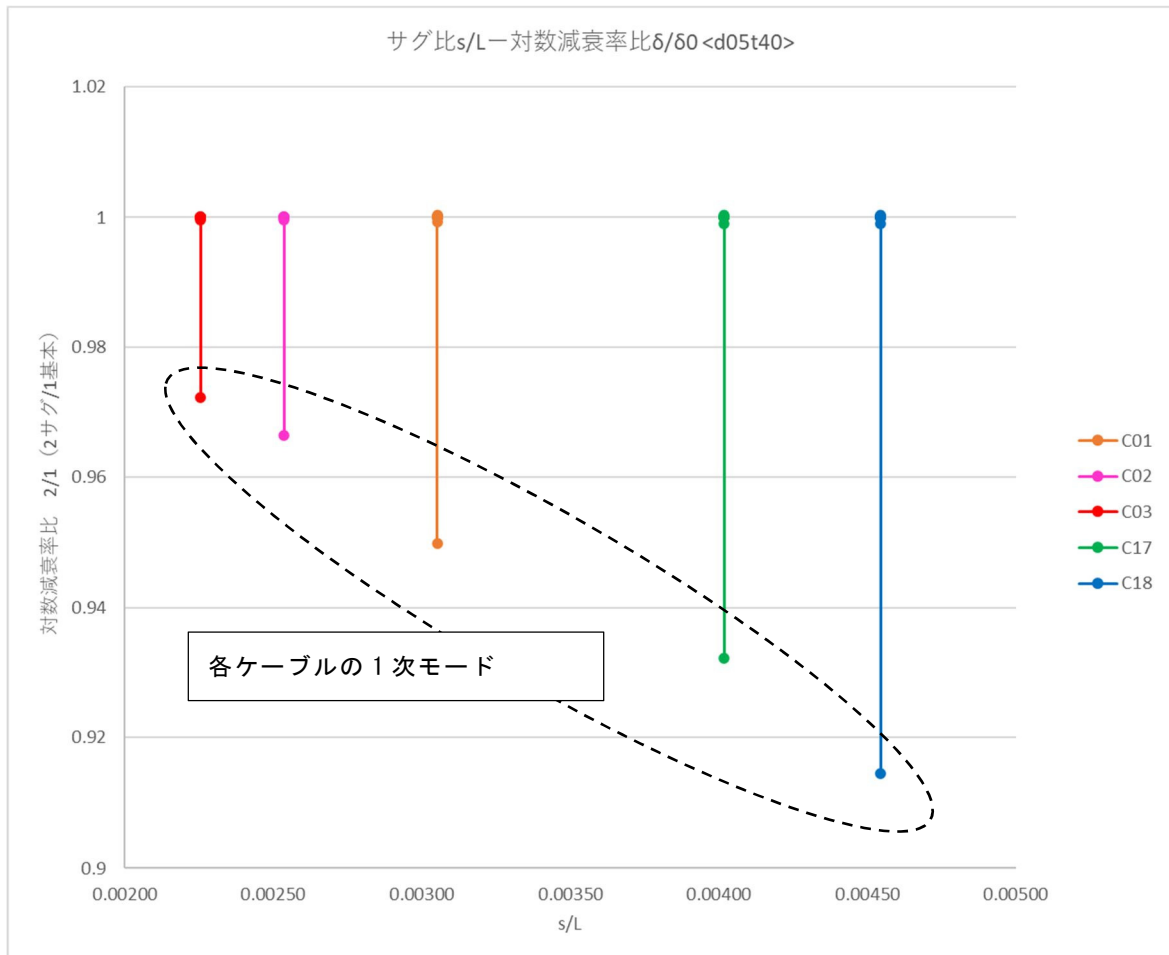


図 5-20 サグ比と対数減衰率比 40°C（上；設計変位 5mm，下；設計変位 10mm）

## (2) ケーブル曲げ剛性の影響

前述の文献 14 で述べられているケーブル曲げ剛性等の固有振動数への影響を決定する無次元パラメータ $\Gamma'$ を用い、ケーブルの曲げ剛性が対数減衰率に及ぼす影響について整理した結果を次ページ以降のグラフに示す。グラフは、横軸を $\Gamma'$ 、縦軸を対数減衰率比（3 曲げ剛性考慮モデル対数減衰率/1 基本モデル対数減衰率）、としている。

$$\Gamma' = \sqrt{\frac{\mu L}{128EA(s/L)^3 \cos^5 \theta}} \quad (\text{式 5-3})$$

ここに、 $E$  : ケーブルのヤング係数

$A$  : ケーブルの断面積

$\theta$  : ケーブルの傾斜角

ここでは、曲げ剛性のみの影響を確認するため、ケース 3)の解析モデルに合わせ、サグはなし（サグ 0 とすると式が成り立たないためサグ比 1 とした）、ケーブルの傾斜角は 0 度、として無次元パラメータ $\Gamma'$ 求めている。

同図から明らかなとおり、ケーブルの短いグループ（C01・C02・C03）と長いグループで傾向が異なり（C17・C18）、短いグループはグループ内での相対的な関係は設計変位や温度に関わらず同じである。長いグループはグループ内での相対的な関係が設計変位や温度で異なる。このデータだけではそれらの傾向は明確ではないが、ケーブルの長さ、設計変位や温度すなわち高減衰ゴムの硬さ、の影響を受けることがわかる。また、ケーブル長の短い方が高減衰ゴムの硬さによる対数減衰率の増減幅が大きい。ケーブル径にもよるが、ケーブル長が短い方がケーブルの曲げ剛性は相対的に大きく、この影響もあると考えられる。

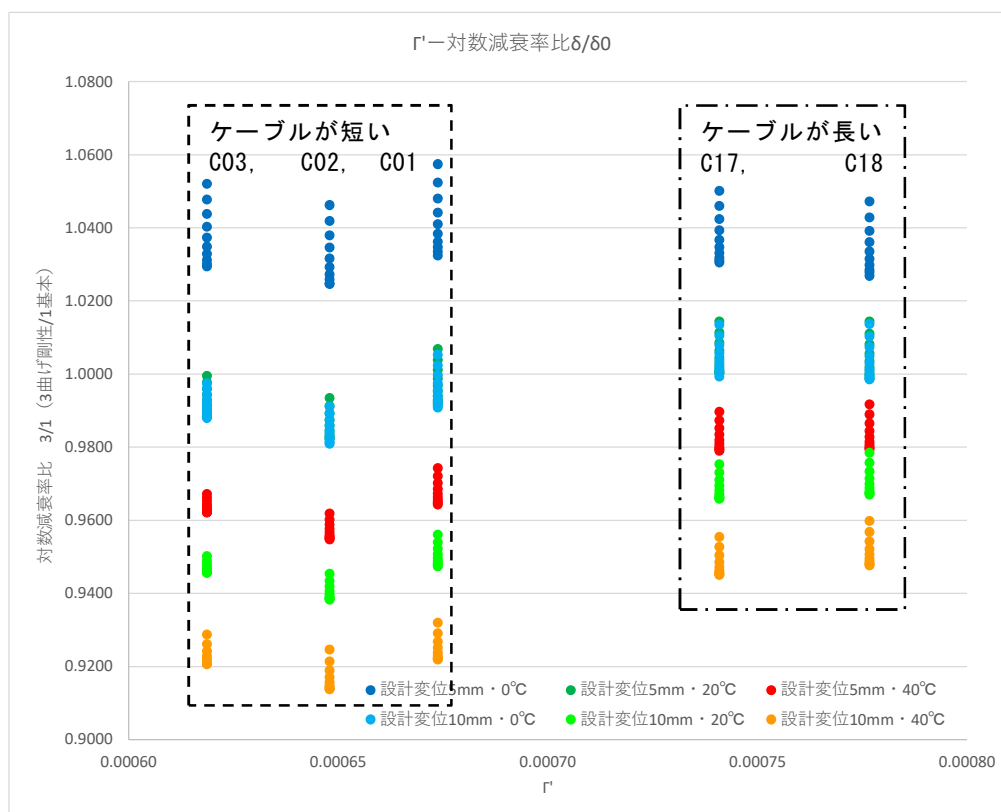


図 5-21  $\Gamma'$  と対数減衰率比（ケース 3）全解析結果）

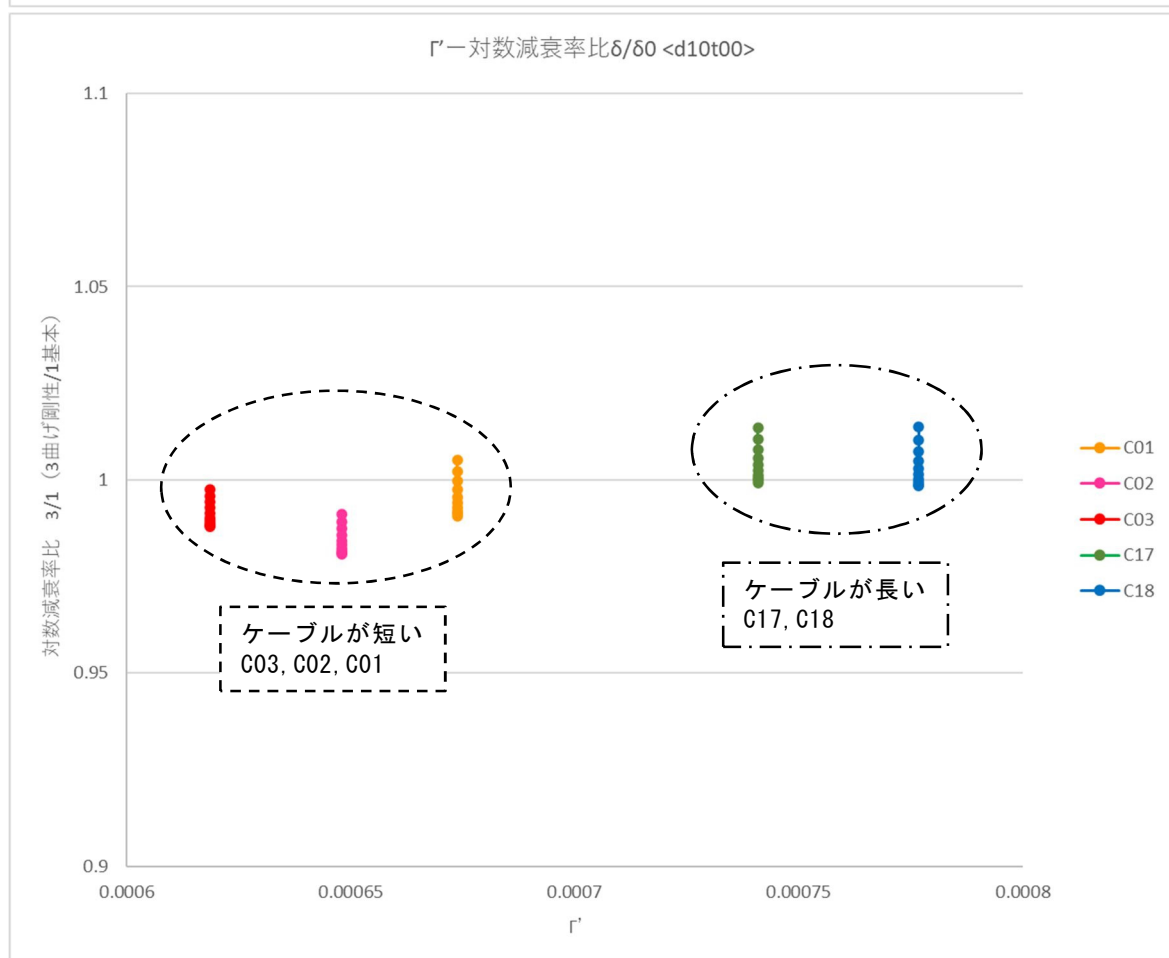
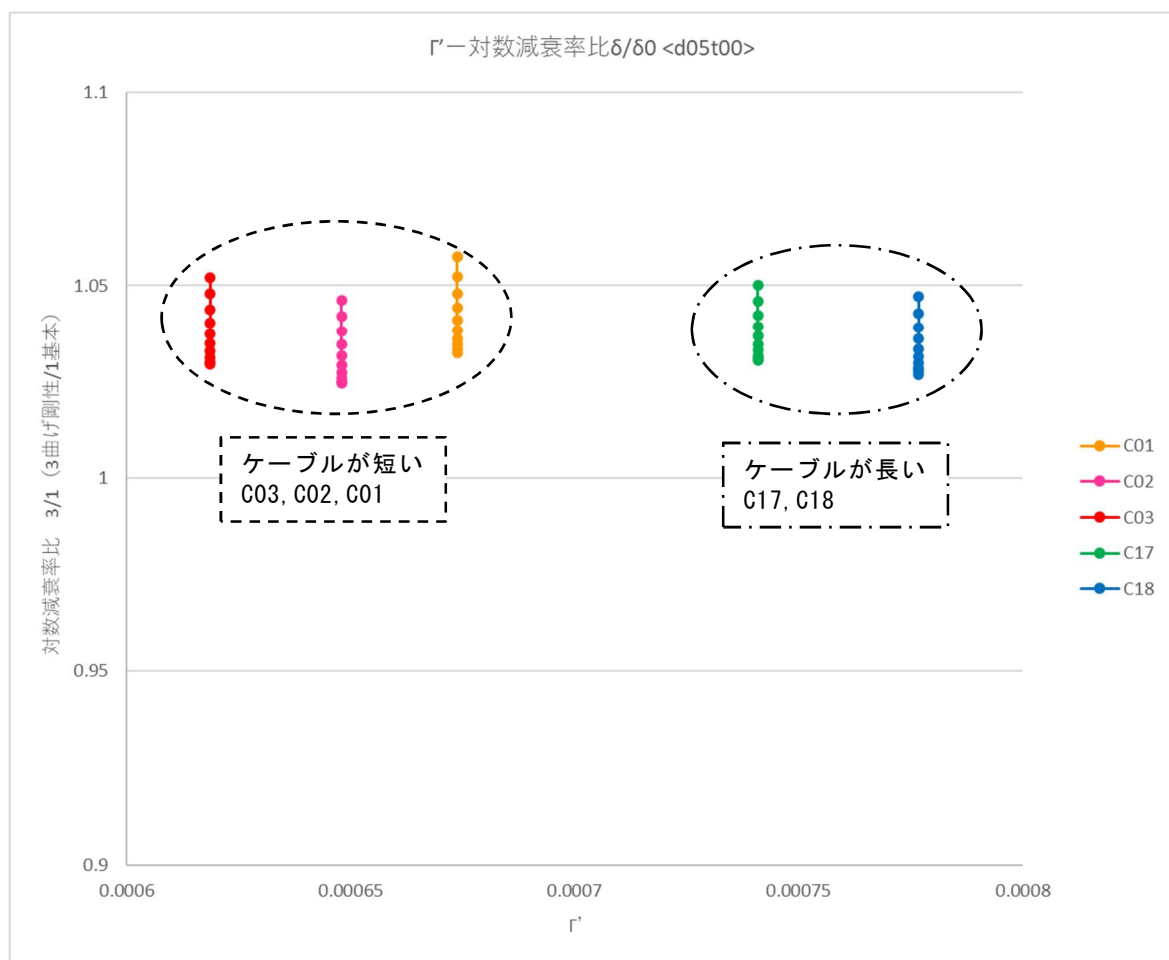


図 5-22  $\Gamma'$  と対数減衰率比 0°C (上 ; 設計変位 5mm, 下 ; 設計変位 10mm)

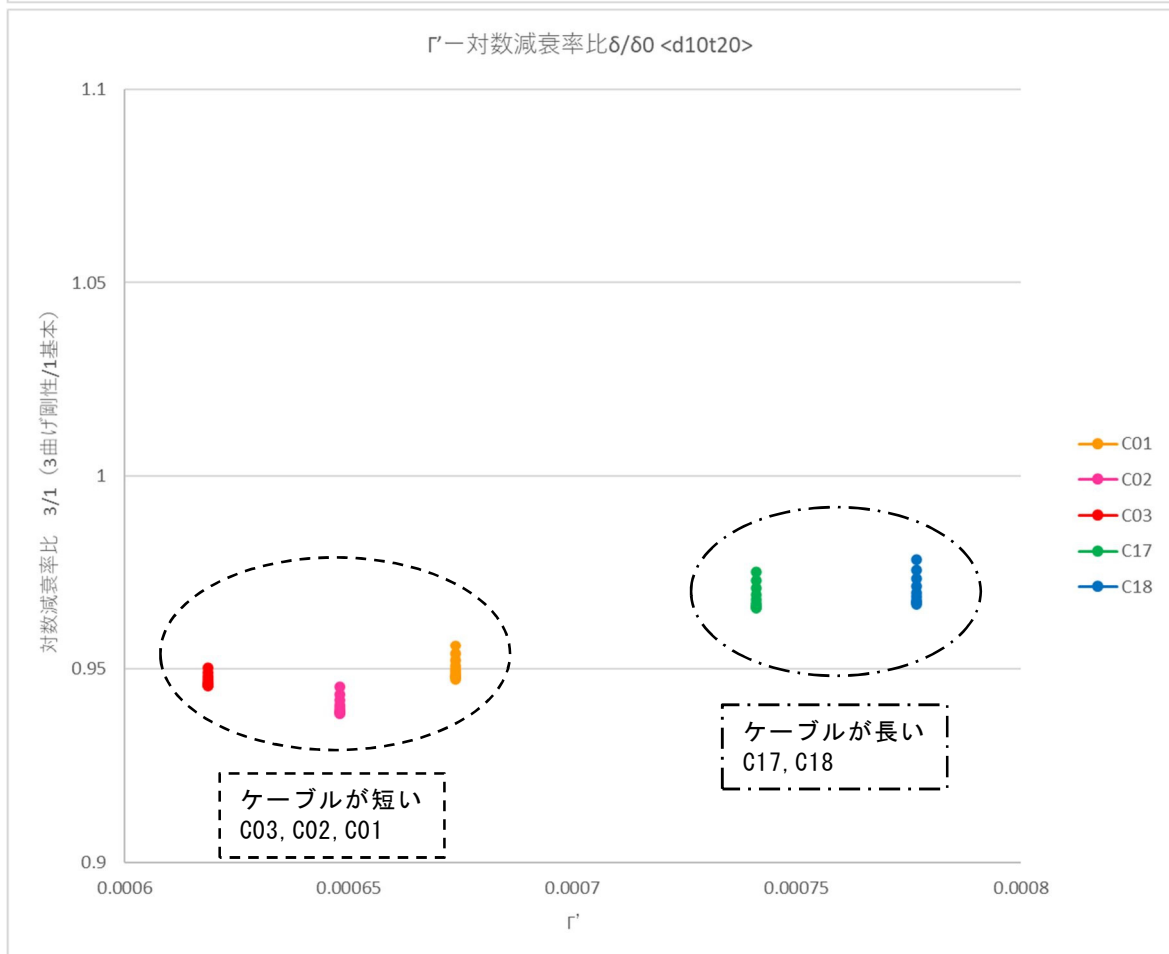
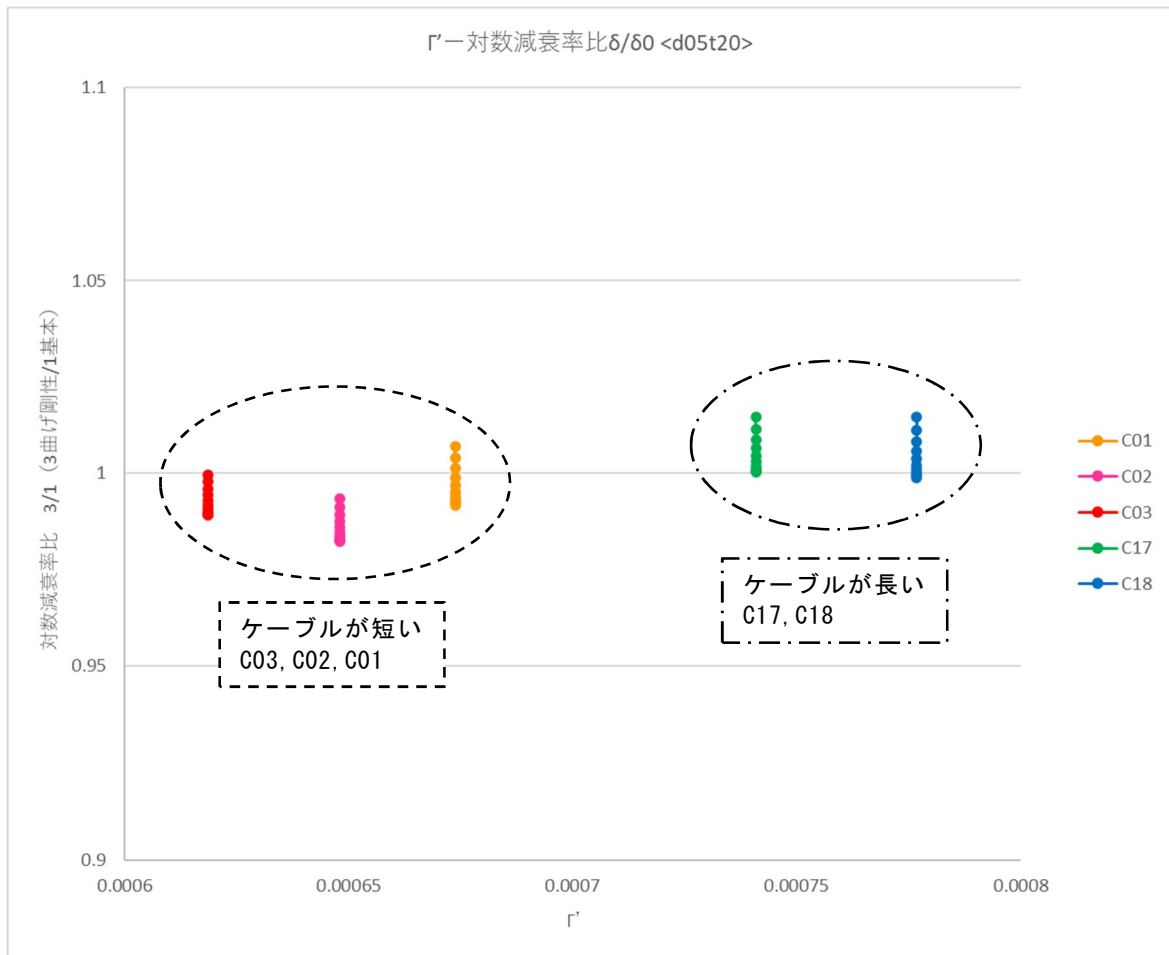


図 5-23  $\Gamma'$  と対数減衰率比 20℃ (上 ; 設計変位 5mm, 下 ; 設計変位 10mm)

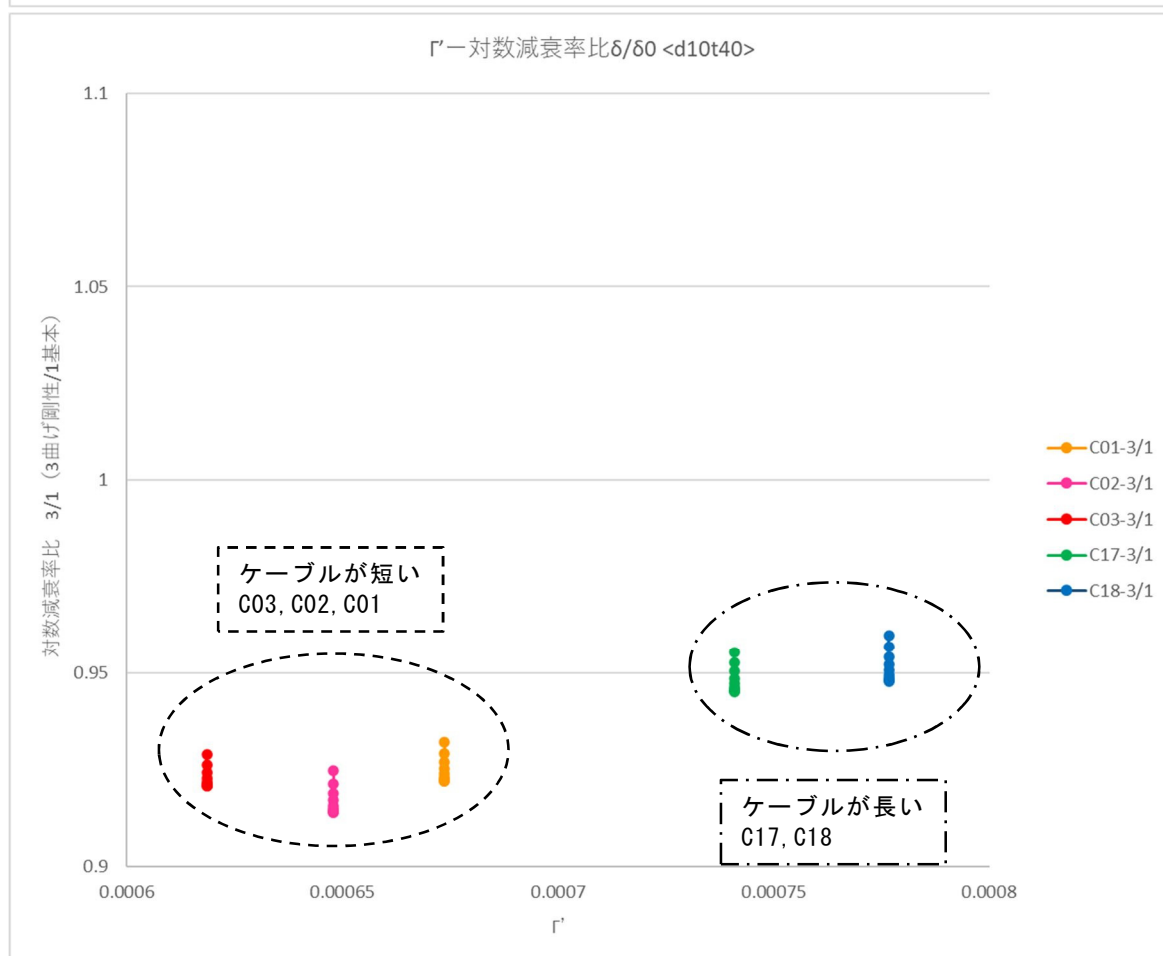
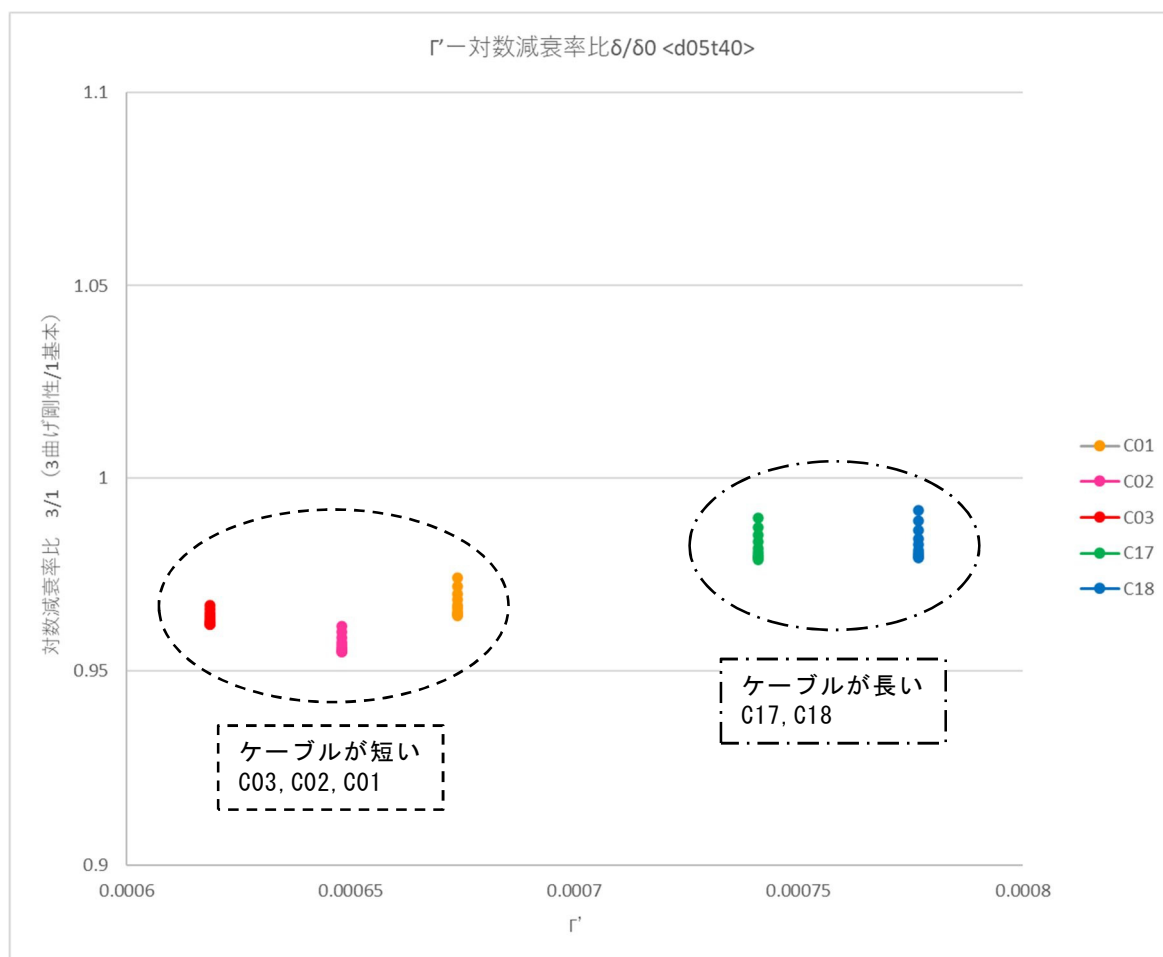


図 5-24  $\Gamma'$  と対数減衰率比 40°C (上 ; 設計変位 5mm, 下 ; 設計変位 10mm)



以上の整理を踏まえ、ケーブルの曲げ剛性を梁の曲げ剛性と同様に考え、単純梁の集中荷重  $P$  と集中荷重点でのたわみ  $y$  の関係をケーブルに適用し、これをケーブル剛性  $K_{cb}$  (kN/m) とすると、次のとおり表すことができる。高減衰ゴムダンパー位置での振動モード減少が対数減衰率に影響することから、高減衰ゴムダンパーによる減衰力を集中荷重とし、その設置位置を荷重集中点とした場合のケーブル剛性である。

$$K_{cb} = P/y = 3EI/(x^2(L-x)^2) \quad (\text{式 5-4})$$

ここに、 $E$  : ケーブルのヤング係数

$I$  : ケーブルの断面 2 次モーメント

$L$  : ケーブルの長さ

$x$  : 高減衰ゴムダンパー位置

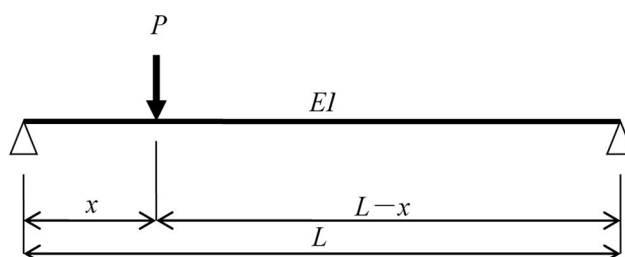


図 5-25 集中荷重を受ける単純梁

$K_{cb}$  で整理した結果を次ページ以降のグラフに示す。グラフは、横軸を  $K_{cb}$ 、縦軸を対数減衰率比 (3 曲げ剛性考慮モデル対数減衰率/1 基本モデル対数減衰率)、としている。同図から明らかとなおり、ケーブル剛性の大きいグループと小さいグループで傾向が異なり、小さいグループは大きいグループに比べて高減衰ゴムダンパーのばね値の違いによる対数減衰率の変動が小さい。ケーブル剛性の大きいグループは、図 5-21 では  $\Gamma'$  の増加と C01・C02・C03 の対数減衰率比が比例関係になかったが、 $L$  や  $x$  を考慮した  $K_{cb}$  で整理すると、 $K_{cb}$  が増加に比例して対数減衰率比が小さくなる傾向となる。このことから、ケーブルの曲げ剛性の影響は、高減衰ゴムダンパー位置もパラメータに含めて整理することが妥当であったことがわかる。

一方、ケーブルの高減衰ゴムダンパー位置での曲げ変形は、 $K_{cb}$  が大きいほど小さくなるが、それに応じて必ずしも対数減衰率が大きくなるわけではなく、設計変位や温度 (高減衰ゴムダンパーの剛性) によって傾向が異なる。よって、対数減衰率は高減衰ゴムダンパーの剛性とケーブル剛性のバランスという視点も含んだ整理が必要と考えられる。これについては、サグや後述する傾斜角の影響も踏まえ、改めて考察する。

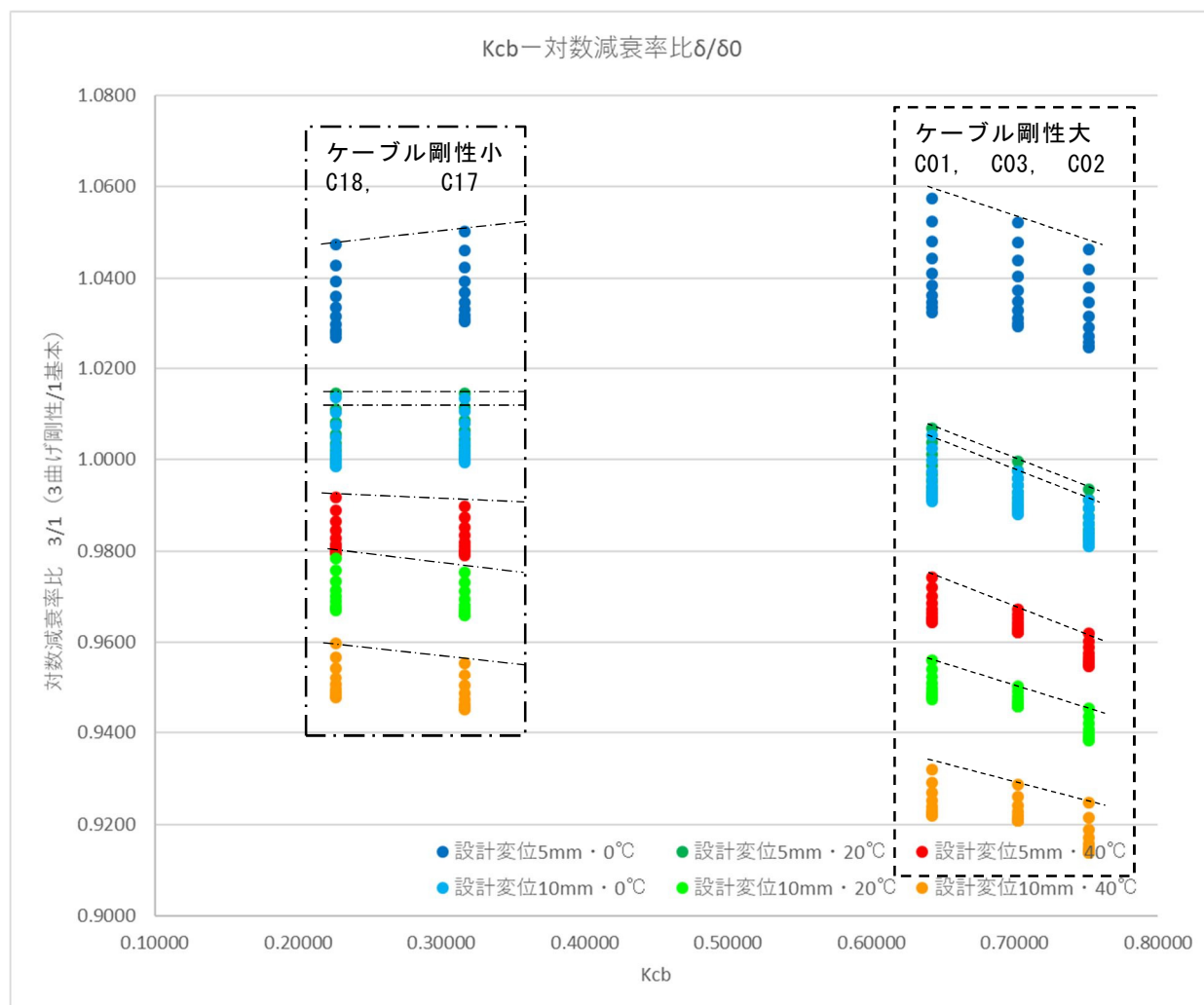


図 5-26 ケーブル剛性  $K_{cb}$  と対数減衰率比（ケース 4）全解析結果）

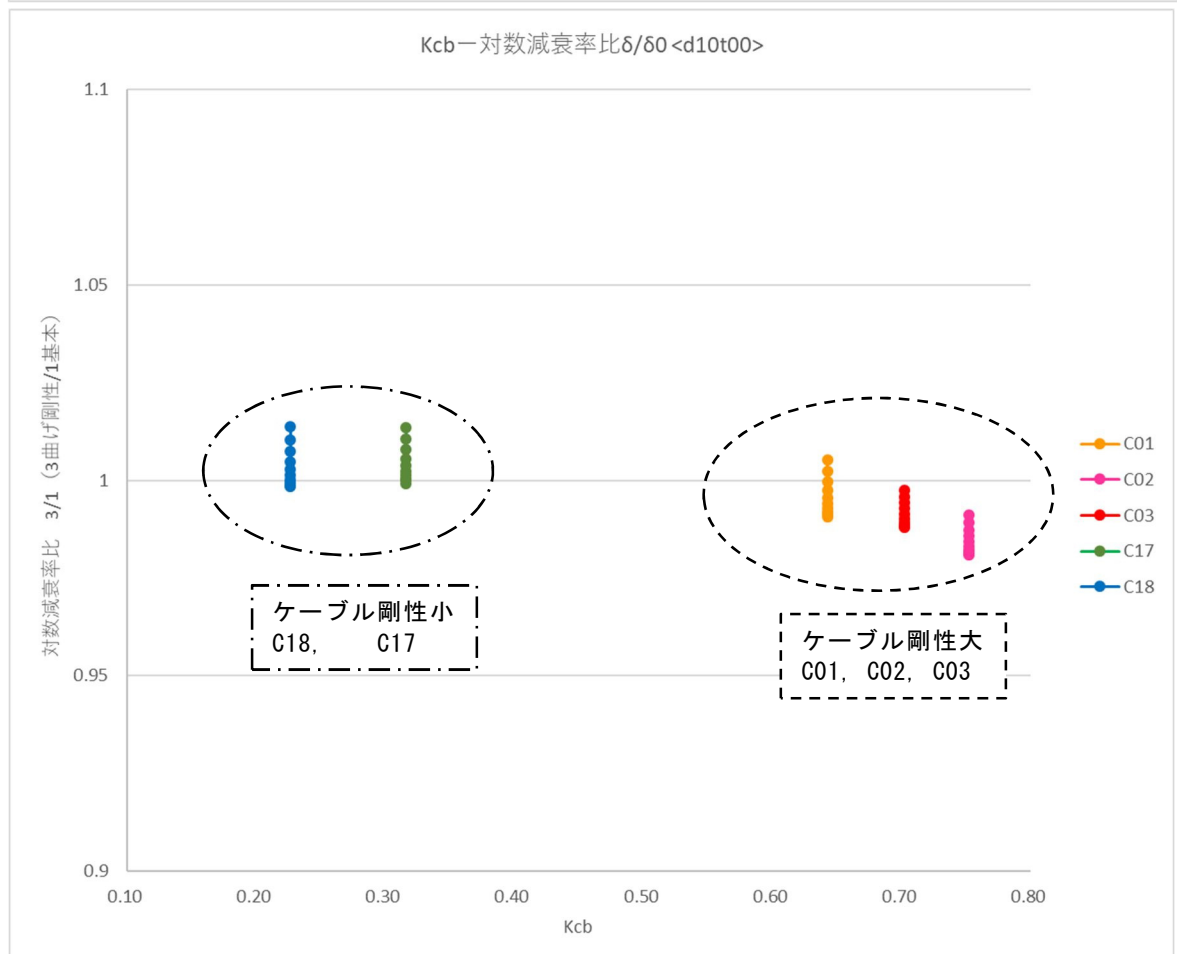
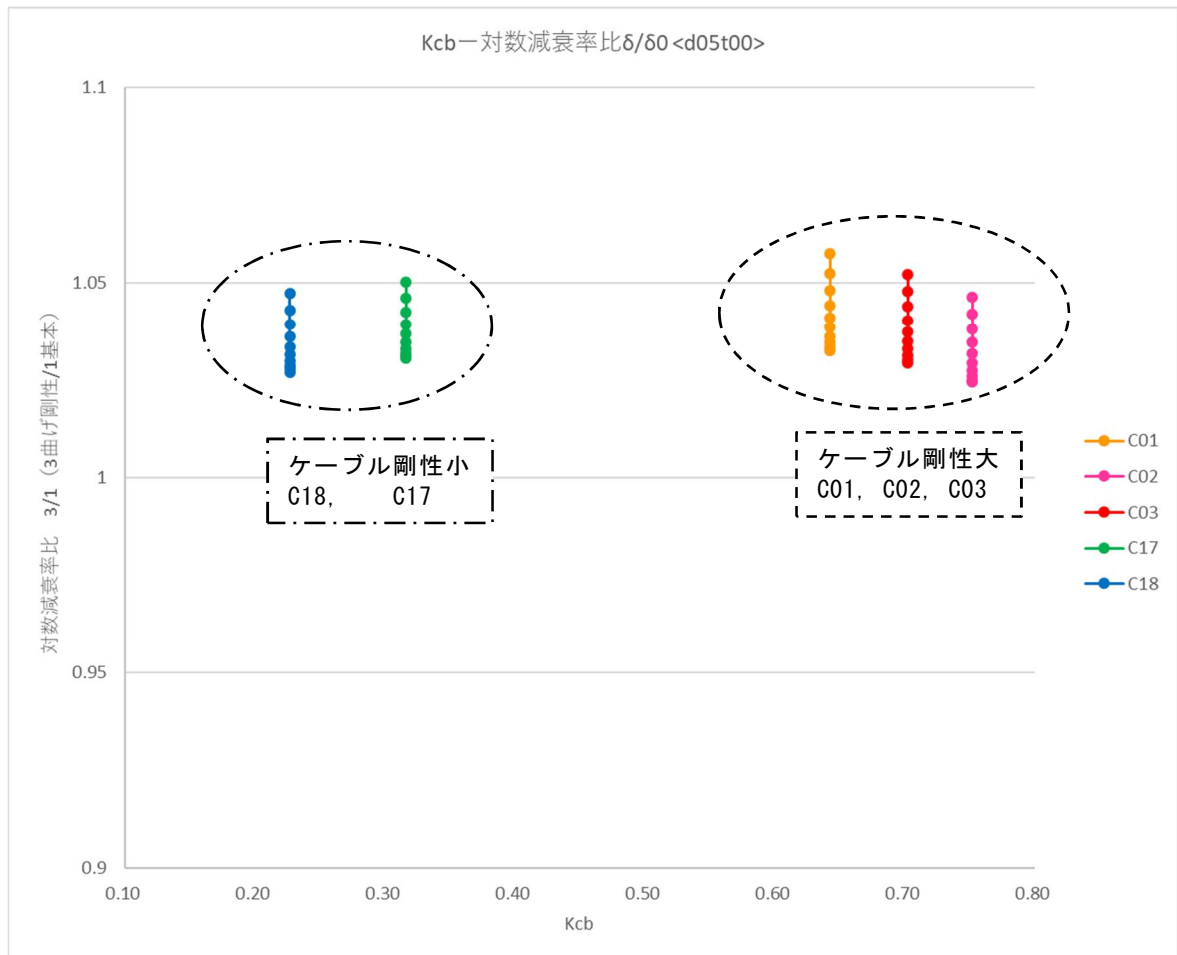


図 5-27  $K_{cb}$  と対数減衰率比  $0^\circ\text{C}$  (上 ; 設計変位 5mm, 下 ; 設計変位 10mm)

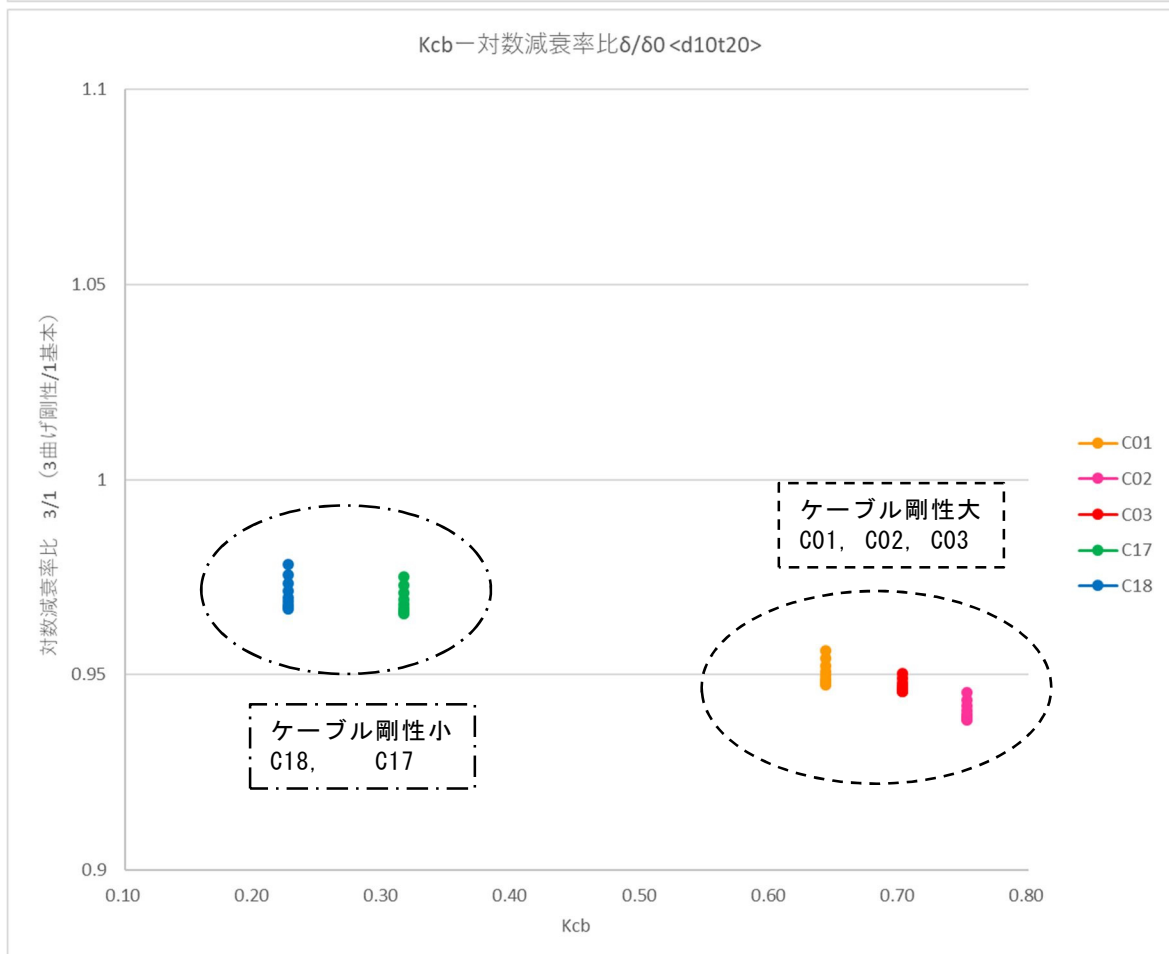
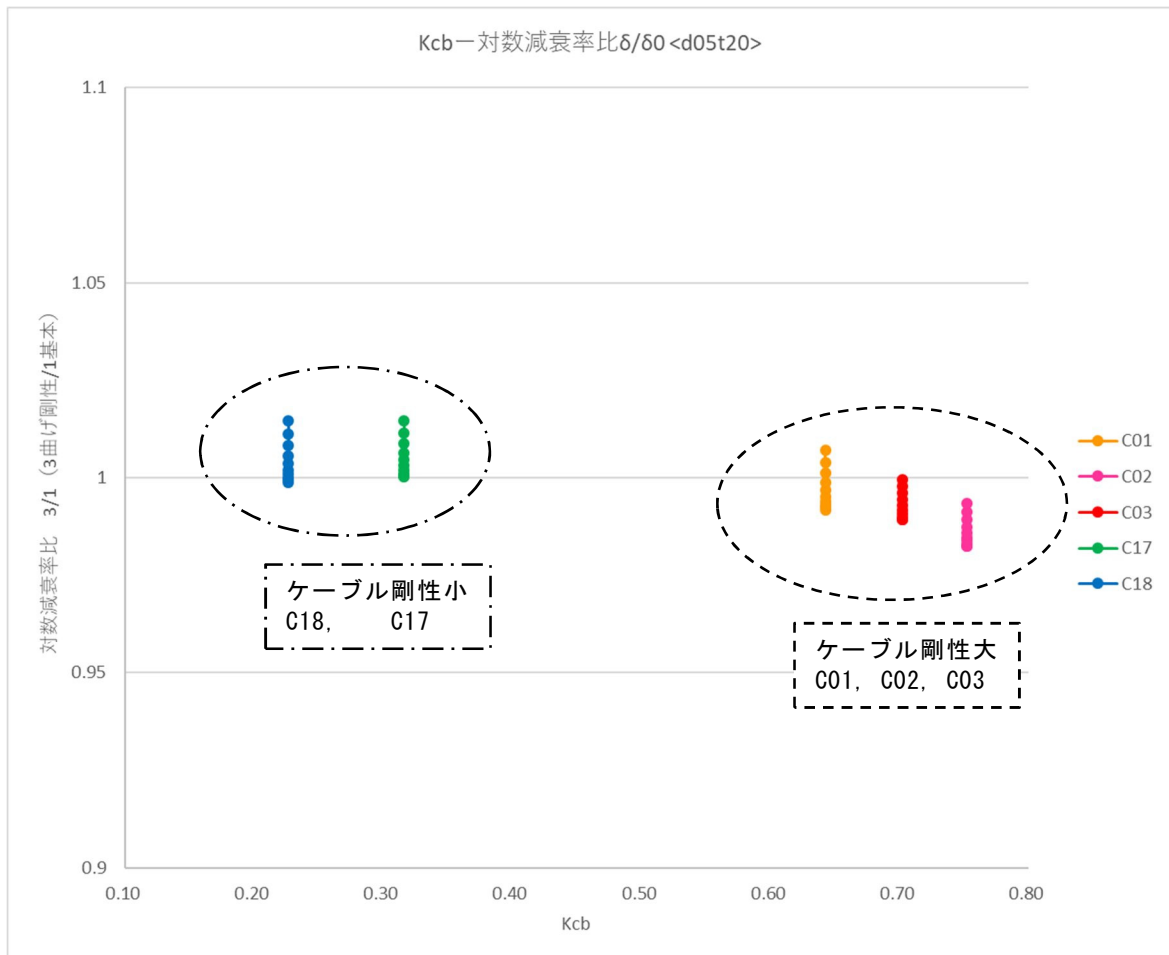


図 5-28  $K_{cb}$  と対数減衰率比 20°C (上 ; 設計変位 5mm, 下 ; 設計変位 10mm)

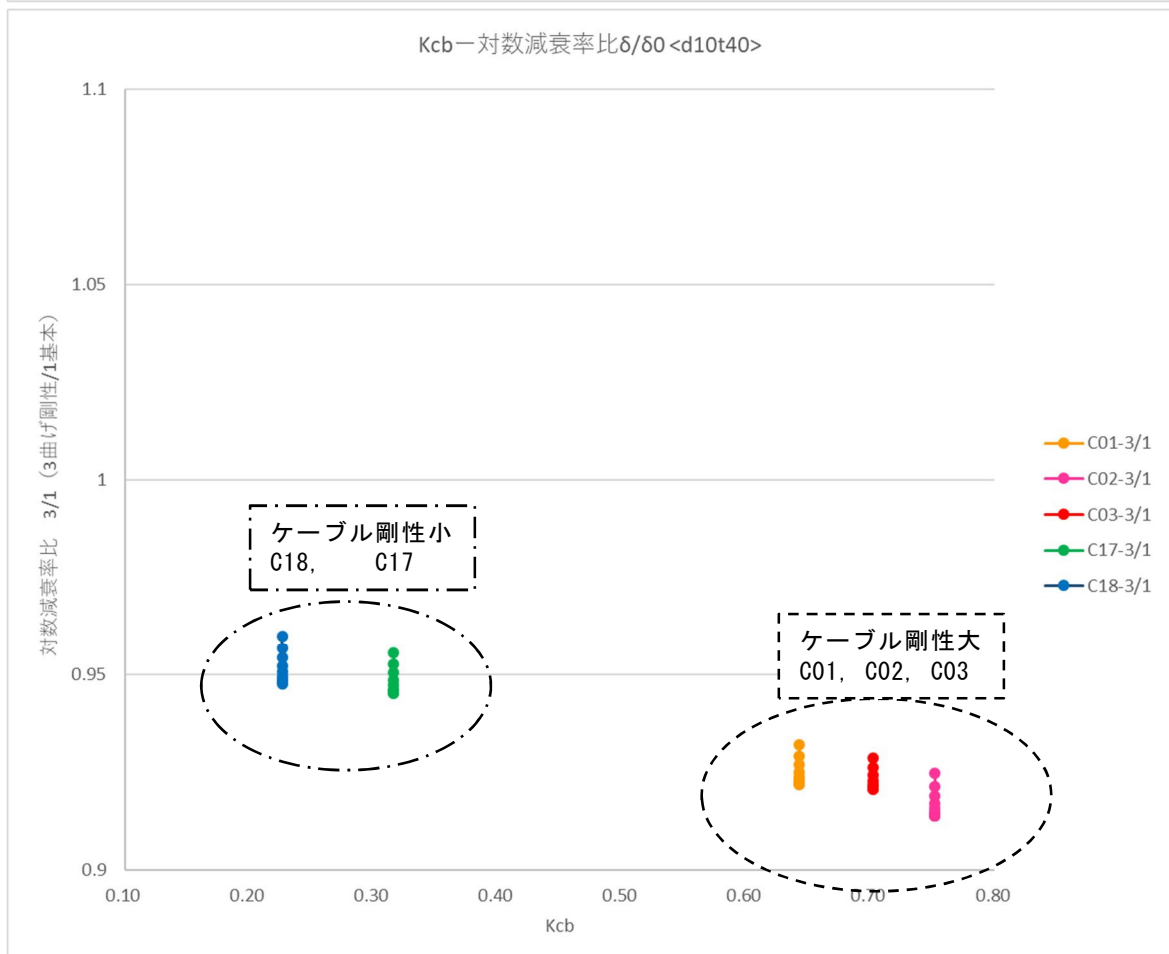
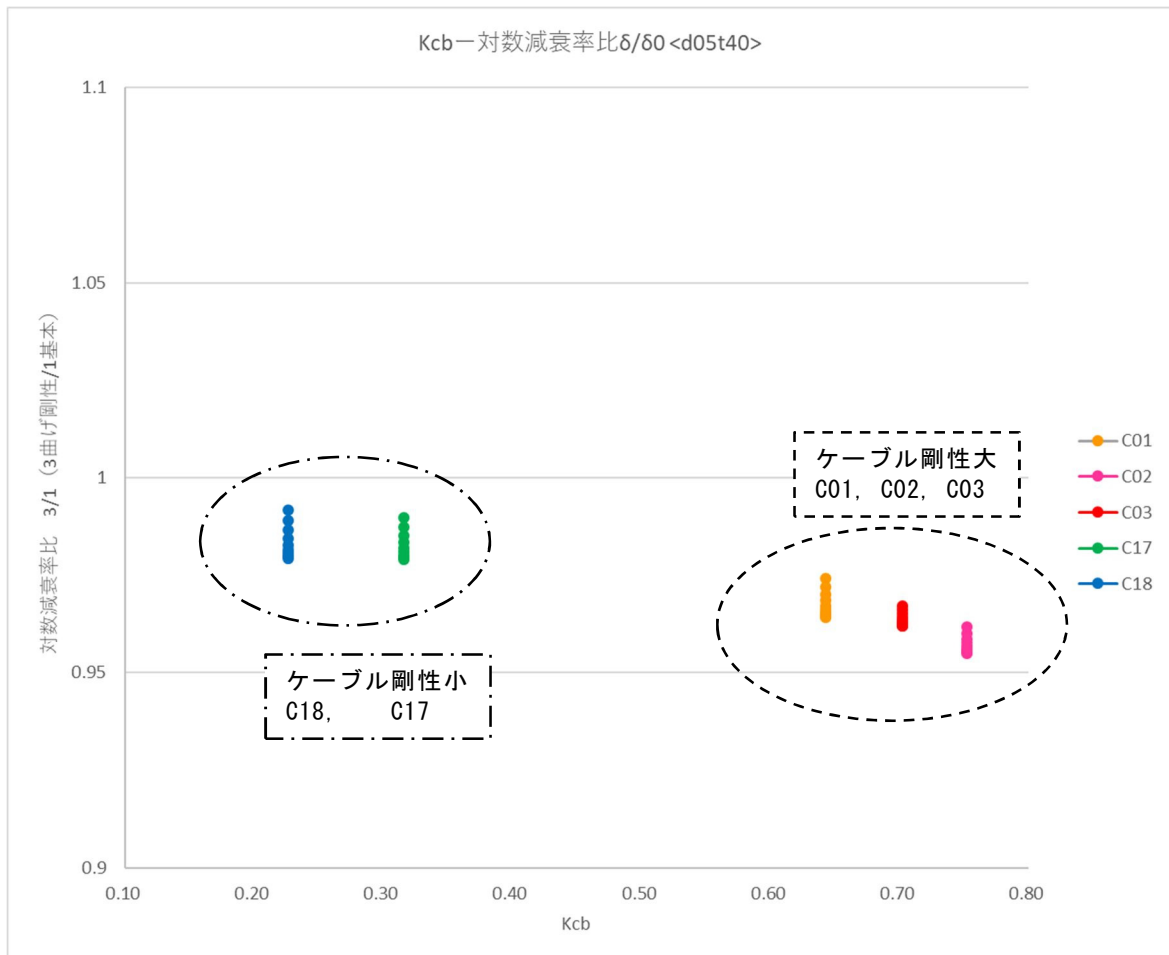


図 5-29  $K_{cb}$  と対数減衰率比 40°C (上 ; 設計変位 5mm, 下 ; 設計変位 10mm)

### (3) 傾斜角の影響

傾斜角が対数減衰率に及ぼす影響を把握するため、傾斜角と対数減衰率比に着目して次ページのとおりグラフに整理した。グラフは、横軸を傾斜角（度）、縦軸を対数減衰率比（4 傾斜考慮モデル対数減衰率/1 基本モデル対数減衰率）、としている。

同図から明らかなとおり、傾斜角の大きいグループ（C01・C02・C03）と小さいグループで傾向が異なり（C17・C18）、小さいグループはグループ内での相対的な関係は設計変位や温度に関わらずほぼ同じである。これは曲げ剛性の影響について整理した図 5-21 と同様の結果である。斜角の大きいグループはグループ内での相対的な関係が設計変位や温度（高減衰ゴムダンパーの剛性）で異なる。ケーブルの曲げ剛性の影響の整理結果（図 5-21）と同様に、このデータだけではそれらの傾向は明確ではないが、ケーブルの長さ、設計変位や温度すなわち高減衰ゴムダンパーの剛性、の影響も考慮した整理が必要であると考えられる。

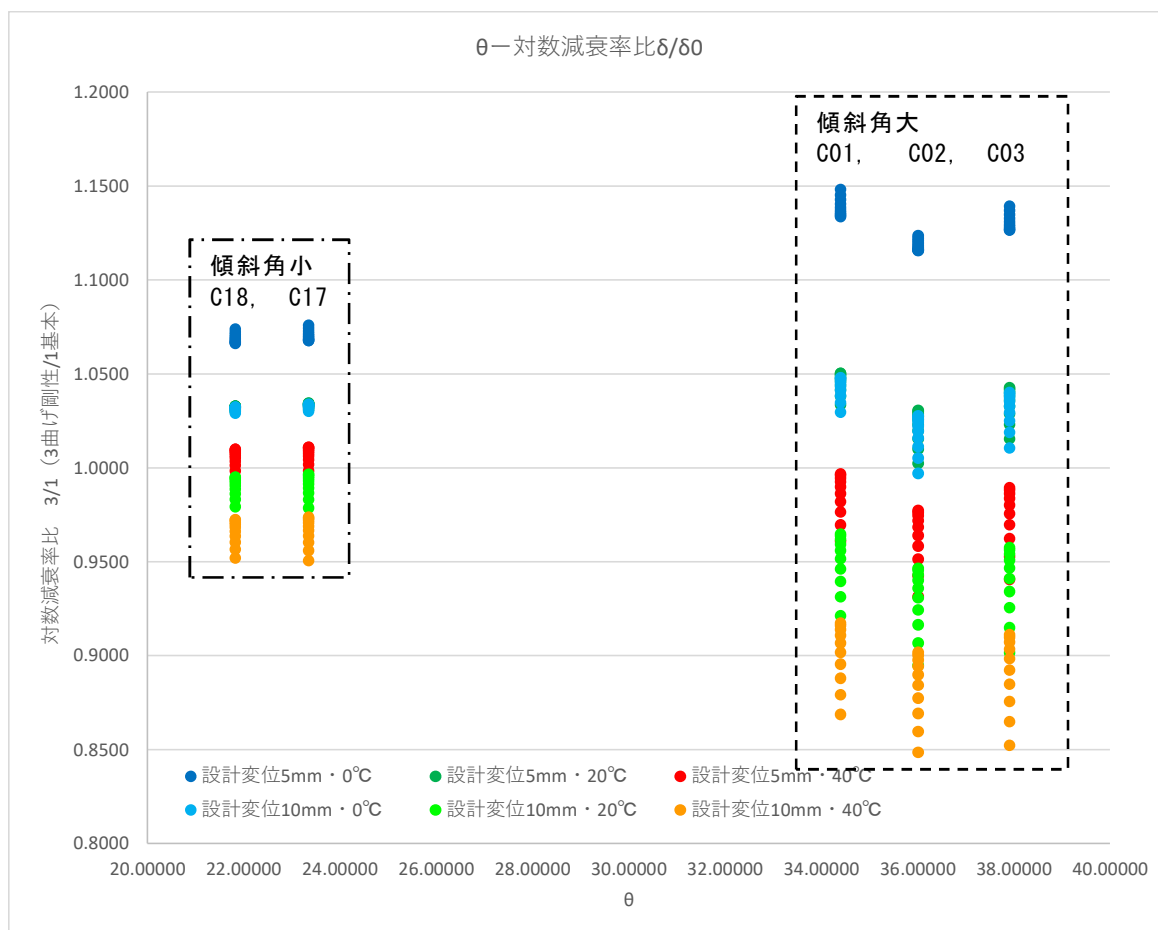


図 5-30 傾斜角 $\theta$ と対数減衰率比（ケース 4）全解析結果）

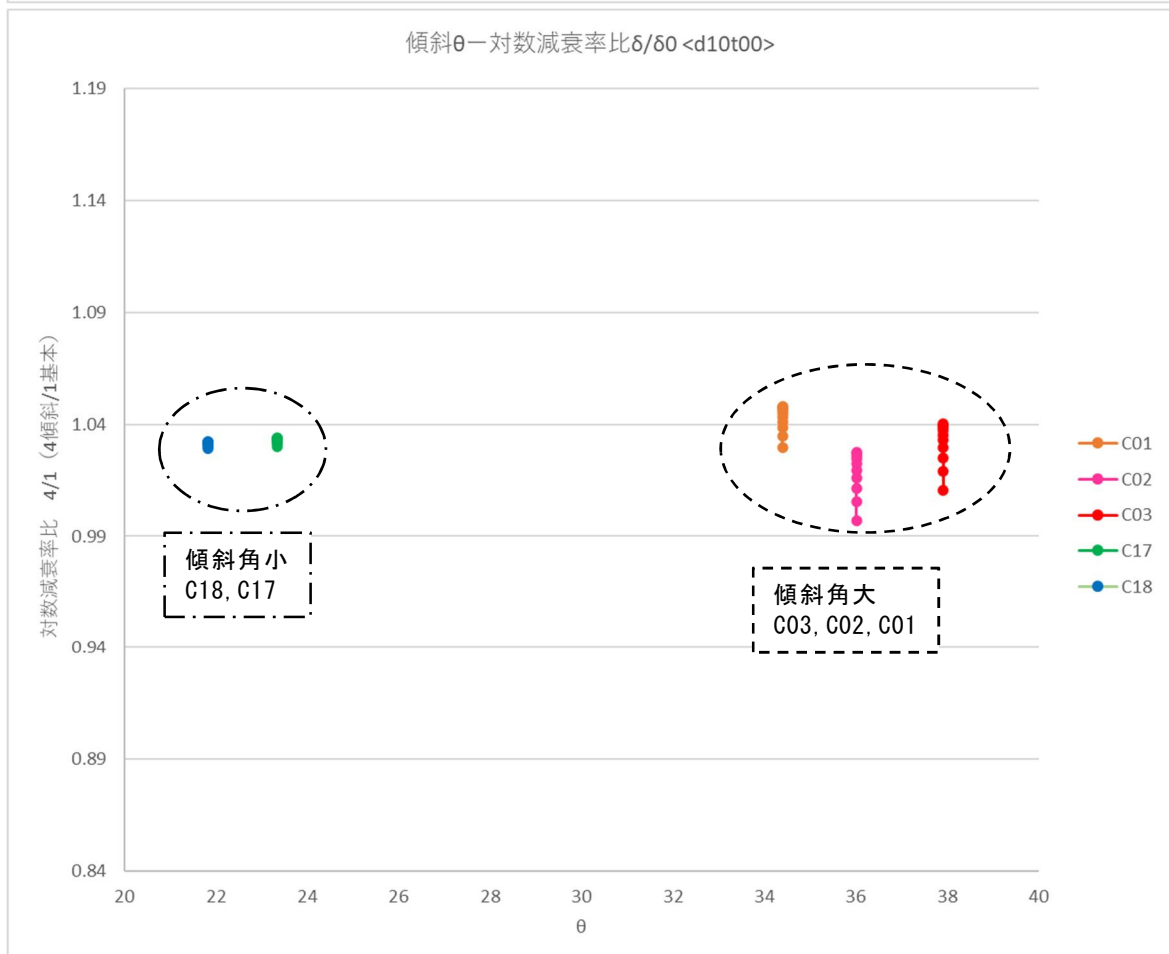
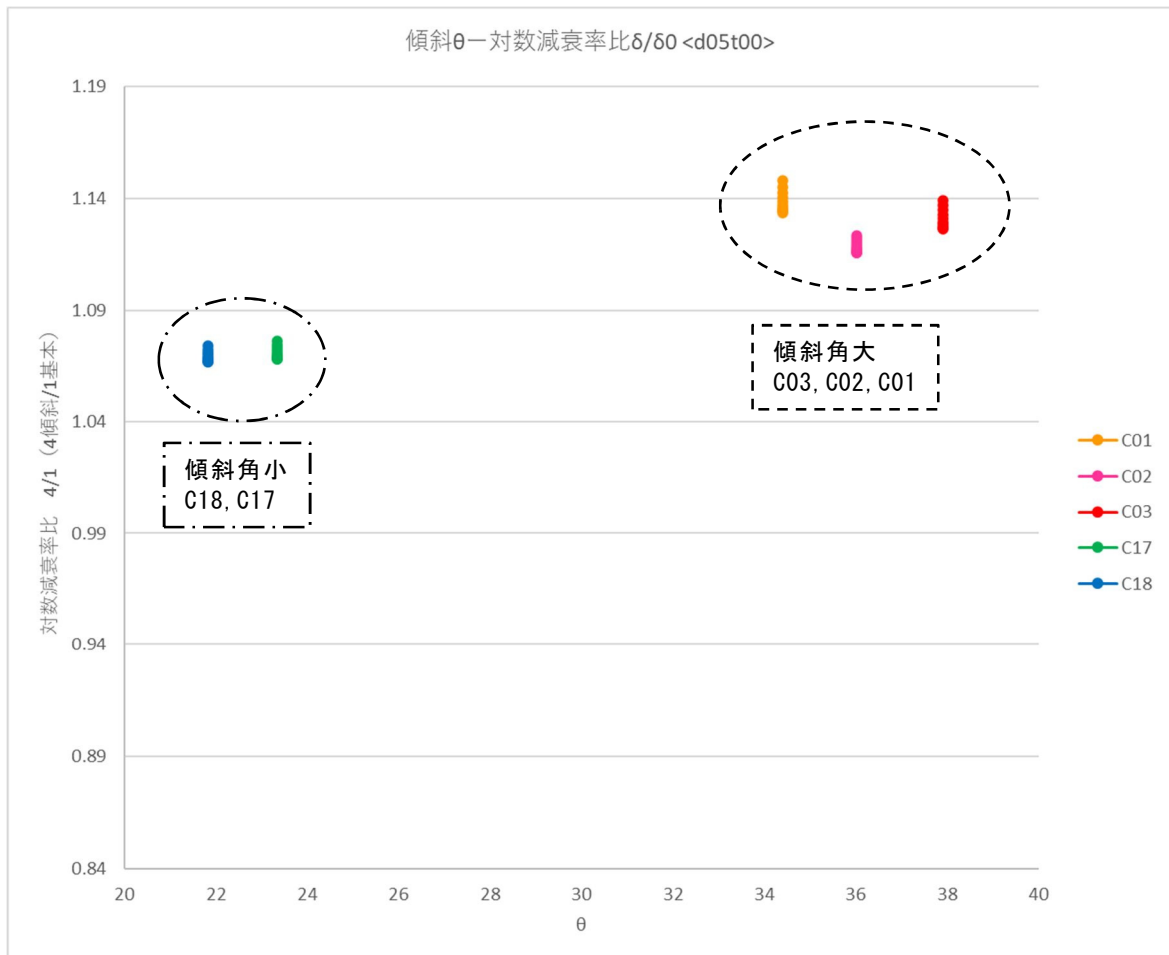


図 5-31 傾斜角と対数減衰率比 0°C (上 ; 設計変位 5mm, 下 ; 設計変位 10mm)

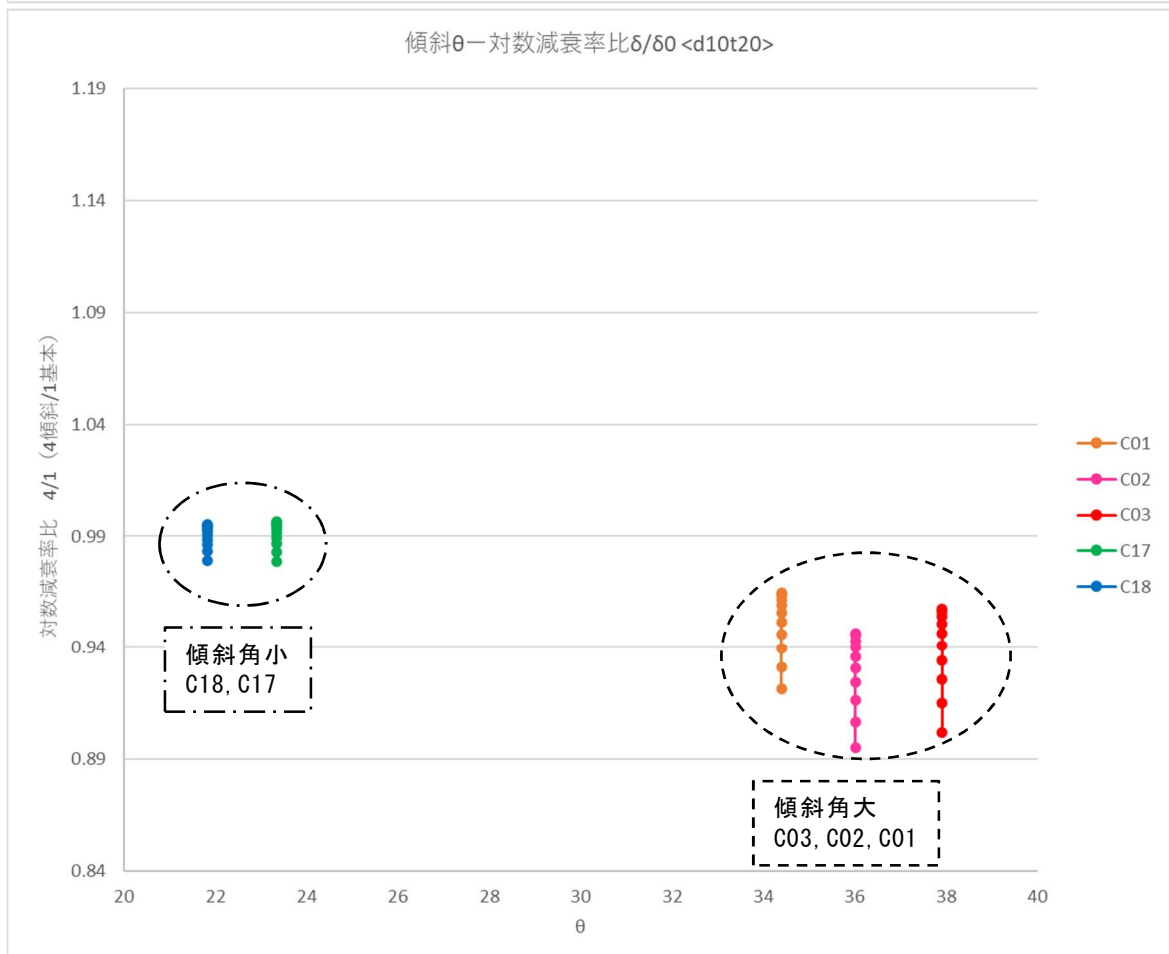
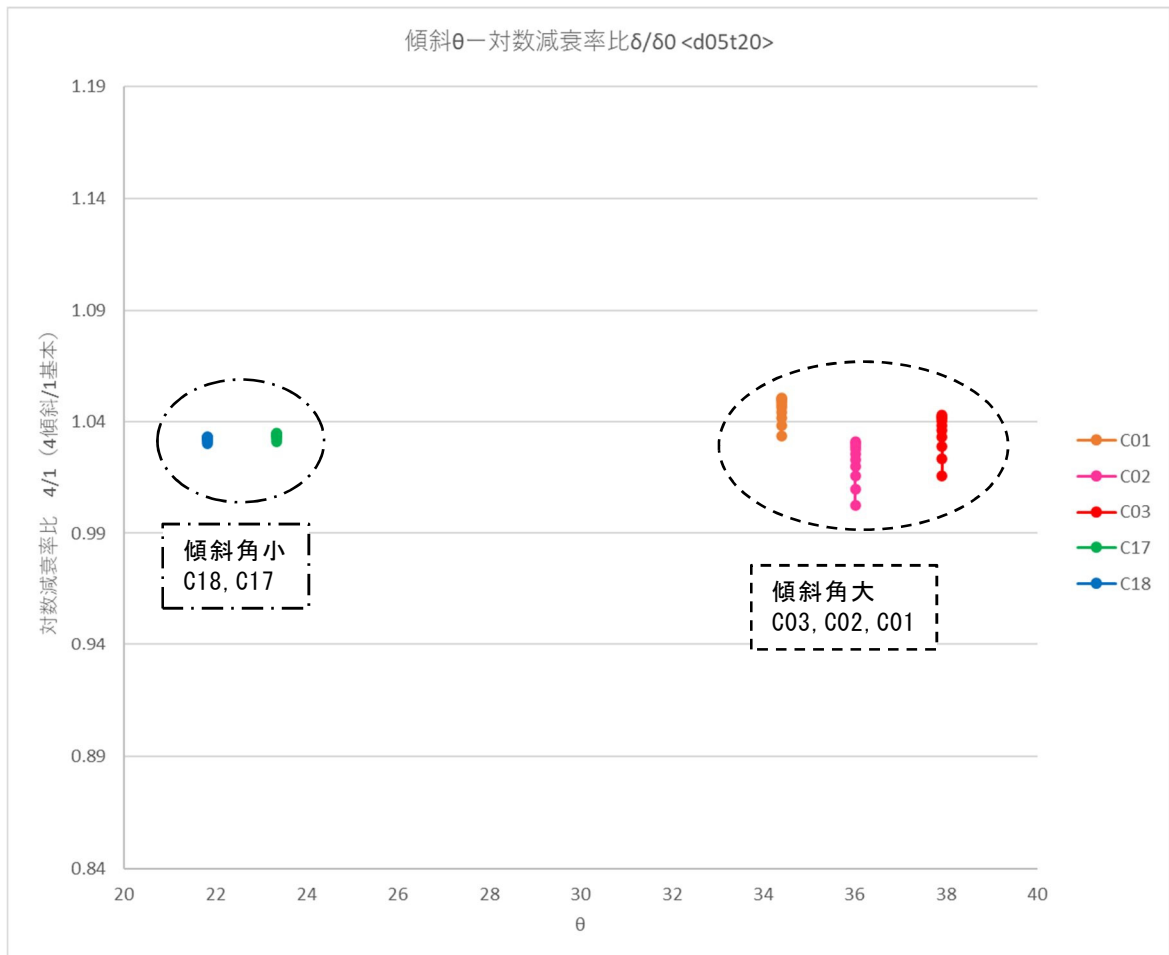


図 5-32 傾斜角と対数減衰率比 20°C (上 ; 設計変位 5mm, 下 ; 設計変位 10mm)



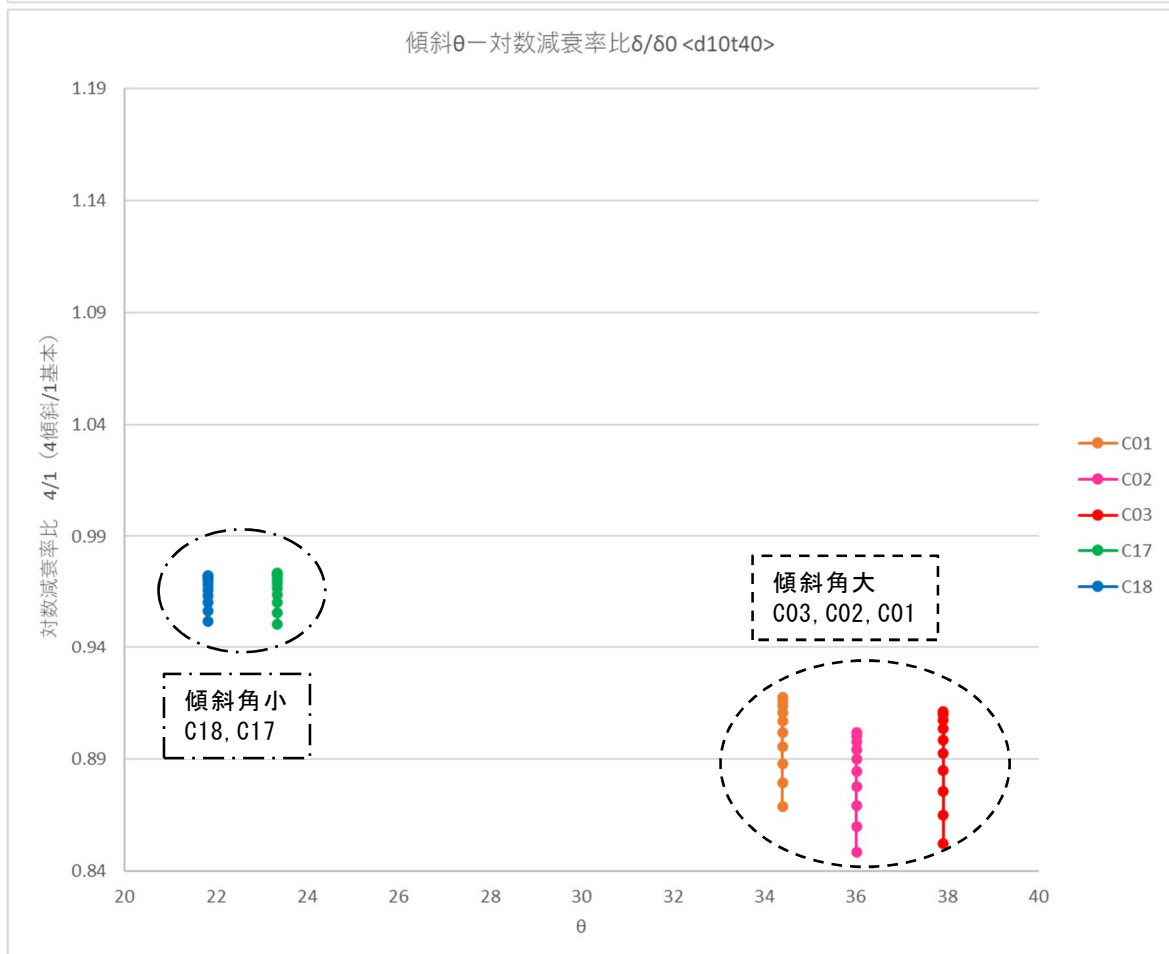
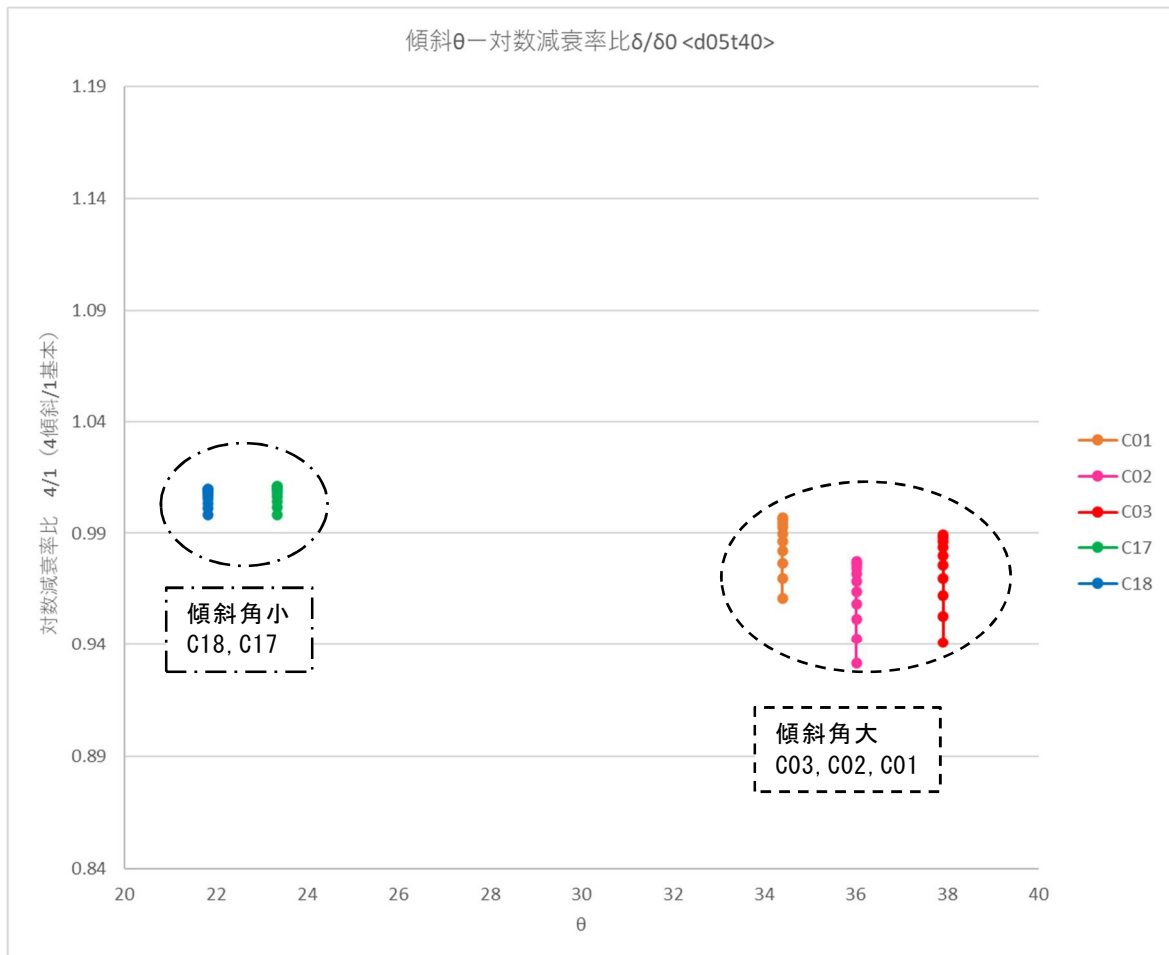


図 5-33 傾斜角と対数減衰率比 40℃ (上 ; 設計変位 5mm, 下 ; 設計変位 10mm)

#### (4) 傾斜・サグ・曲げ剛性の影響

ここでは前述までの単一の影響ではなく、それらを組合せた場合の対数減衰率に及ぼす影響について検討する．組合せのパターンとしては、5)傾斜・サグ、6)傾斜・曲げ剛性、7)傾斜・サグ・曲げ剛性、があるが、もっとも実際のケーブルの状態に近いケース7)に着目する．

データ整理のパラメータとしては、ケース 2)～4)の整理結果を踏まえると、1 次モードのみに影響するサグ比を用いることは、他のモードも考慮した場合に適切ではないと考えられる．曲げ剛性や傾斜角とは明確な相関関係が得られず、高減衰ゴムダンパーの剛性とケーブル剛性のバランスも考慮した整理が必要であることが曲げ剛性の影響の整理の中でわかっている．文献 20)では、高減衰ゴムダンパーばねの剛性とケーブル張力に起因したケーブル剛性との比を無次元パラメータとして定義し、整理している．

ここで、高減衰ゴムダンパーによる付加減衰の推定式を改めて振り返ると、高減衰ゴムダンパーの剛性  $K$  およびケーブルの固有円振動数  $\omega_n$  が含まれている． $\omega_n$  はケーブルを仮に 1 質点系のばねマスに置き換えて考えた場合、そのばねすなわちケーブル剛性によって決まる．これらを踏まえ、高減衰ゴムダンパーのせん断ばね定数と、ケーブルの硬さを表すばね、の比を用いて整理する．このとき、高減衰ゴムダンパーの設置位置がケーブルの端部に近いことから、ケーブル全長に対する設置位置の比を高減衰ゴムダンパーのばねに乗じることで、その影響を考慮する．具体には、次のような無次元パラメータを導入することとした．

$$\kappa = \frac{K_d x}{K_c L} \quad (\text{式 5-5})$$

ここに、 $K_d$  : 高減衰ゴムダンパーのせん断ばね定数

$K_c$  : ケーブルの硬さを表すばね定数で次のとおり定義する．

$$K_c = n^2 \pi^2 T / L \quad (\text{式 5-6})$$

これは、ケーブルの固有振動数  $f = n/2L \times \sqrt{T/\mu}$  と、

ケーブルを 1 質点系のばねマスと仮定したときの

固有振動数  $f = 1/2\pi \times \sqrt{K_c/M}$  ( $M=\mu L$ ) が等しいとして

$K_c$  をケーブルの硬さを表すばねとしたものである．

ただし、 $n=1$  とする．

$x/L$  : ケーブル長に対する高減衰ゴムダンパーの設置位置の比

なお、曲げ剛性の影響の考察では、式 5-4 に示すケーブル剛性による整理も必要としているが、式 5-6 のケーブルばねにはそれを含んでいない．これは、表 5-9 に示すとおり、 $K_{cb}$  は  $K_c$  や  $K_d$  に対し非常に小さく、式 5-5 で計算される  $\kappa$  への影響は無視できる程度であることによる．

$\kappa$  で整理した結果を図 5-36～図 5-40 に示す．グラフの横軸を無次元パラメータ  $\kappa$ ，縦軸を対数減衰率比（7 傾斜・サグ・曲げ剛性考慮モデル対数減衰率/1 基本モデル対数減衰率），としており、1 次モードから 6 次モードまで示している．同図には各モードの  $\kappa$  と対数減衰率比を 2 次関数で近似した曲線もあわせて示している．

同図から明らかなおとおり、全てのケーブルにおいてモードごとの  $\kappa$  と対数減衰率比は

2 次曲線で近似でき、その相関は非常に高い。2 次モードから 6 次モードはモード次数によらずひとつの 2 次曲線での近似が可能であるが、1 次モードはサグの影響から近似曲線は異なるものとなる。また、ケーブル長が短く傾斜角が大きいことに加え曲げ剛性が大きい C01・C02・C03 とケーブル長が長く傾斜角が小さいことに加え曲げ剛性が小さい C17・C18 では同じ 2 次曲線の近似でもグラフの傾きが異なっている。これらを踏まえ、1 次モードと 2 次モードから 6 次モード、C01・C02・C03 と C17・C18 でそれぞれ分けて整理したグラフを次ページの図 5-34, 図 5-35 に示す。それぞれ分けることにより良い相関が得られる。

表 5-9  $K_{cb}$  および  $K_c$

| 側径間<br>PC桁側 | ケーブルNO    |                    | C01      | C02      | C03      | C04      | C05      | C06      | C07      | C08      | C09      |
|-------------|-----------|--------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|             | 張力(D+PS)  | kN                 | 3,124    | 3,408    | 3,023    | 2,615    | 2,138    | 1,463    | 1,547    | 1,824    | 1,986    |
|             | 弾性係数      | kN/mm <sup>2</sup> | 196.000  | 196.000  | 196.000  | 196.000  | 196.000  | 196.000  | 196.000  | 196.000  | 196.000  |
|             | 断面2次      | mm <sup>4</sup>    | 2.90E+06 | 2.90E+06 | 2.29E+06 | 2.29E+06 | 1.27E+06 | 7.79E+05 | 7.79E+05 | 9.55E+05 | 9.55E+05 |
|             | ケーブル長     | m                  | 137.820  | 127.470  | 117.190  | 107.070  | 96.960   | 86.550   | 77.430   | 68.200   | 59.210   |
|             | ダンパー位置    | m                  | 4.540    | 4.370    | 4.190    | 4.020    | 3.750    | 3.540    | 3.350    | 3.150    | 2.970    |
|             | ケーブル剛性Kcb | kN/m               | 0.643    | 0.752    | 0.702    | 0.838    | 0.591    | 0.459    | 0.576    | 0.912    | 1.191    |
|             | ケーブルばねKc  | kN/m               | 223.7    | 263.9    | 254.6    | 241.0    | 217.6    | 166.8    | 197.2    | 264.0    | 331.0    |
|             | Kcb/Kc    | -                  | 0.003    | 0.003    | 0.003    | 0.003    | 0.003    | 0.003    | 0.003    | 0.003    | 0.004    |
|             | ダンパーばねKd  | kN/m               | 1,120.0  | 1,120.0  | 1,120.0  | 1,120.0  | 1,120.0  | 840.0    | 980.0    | 1,120.0  | 1,120.0  |
|             | Kd/Kc     | -                  | 5.006    | 4.245    | 4.399    | 4.646    | 5.146    | 5.035    | 4.970    | 4.243    | 3.383    |
| 中央径間<br>鋼桁側 | ケーブルNO    |                    | C10      | C11      | C12      | C13      | C14      | C15      | C16      | C17      | C18      |
|             | 張力(D+PS)  | kN                 | 1,882    | 1,558    | 1,306    | 1,249    | 1,845    | 2,274    | 2,646    | 3,013    | 2,782    |
|             | 弾性係数      | kN/mm <sup>2</sup> | 196.000  | 196.000  | 196.000  | 196.000  | 196.000  | 196.000  | 196.000  | 196.000  | 196.000  |
|             | 断面2次      | mm <sup>4</sup>    | 7.79E+05 | 7.79E+05 | 7.79E+05 | 7.79E+05 | 1.27E+06 | 1.73E+06 | 2.29E+06 | 2.58E+06 | 2.29E+06 |
|             | ケーブル長     | m                  | 56.650   | 69.080   | 83.420   | 98.990   | 115.550  | 132.410  | 149.750  | 167.180  | 184.720  |
|             | ダンパー位置    | m                  | 2.880    | 3.200    | 3.570    | 3.960    | 4.390    | 4.780    | 5.180    | 5.540    | 5.850    |
|             | ケーブルばねKcb | kN/m               | 1.082    | 0.712    | 0.470    | 0.320    | 0.361    | 0.362    | 0.359    | 0.316    | 0.227    |
|             | ケーブルばねKc  | kN/m               | 327.9    | 222.6    | 154.5    | 124.5    | 157.6    | 169.5    | 174.4    | 177.9    | 148.6    |
|             | Kcb/Kc    | -                  | 0.003    | 0.003    | 0.003    | 0.003    | 0.002    | 0.002    | 0.002    | 0.002    | 0.002    |
|             | ダンパーばねKd  | kN/m               | 1,120.0  | 1,120.0  | 840.0    | 700.0    | 840.0    | 980.0    | 980.0    | 980.0    | 840.0    |
|             | Kd/Kc     | -                  | 3.416    | 5.032    | 5.436    | 5.621    | 5.330    | 5.782    | 5.620    | 5.509    | 5.651    |

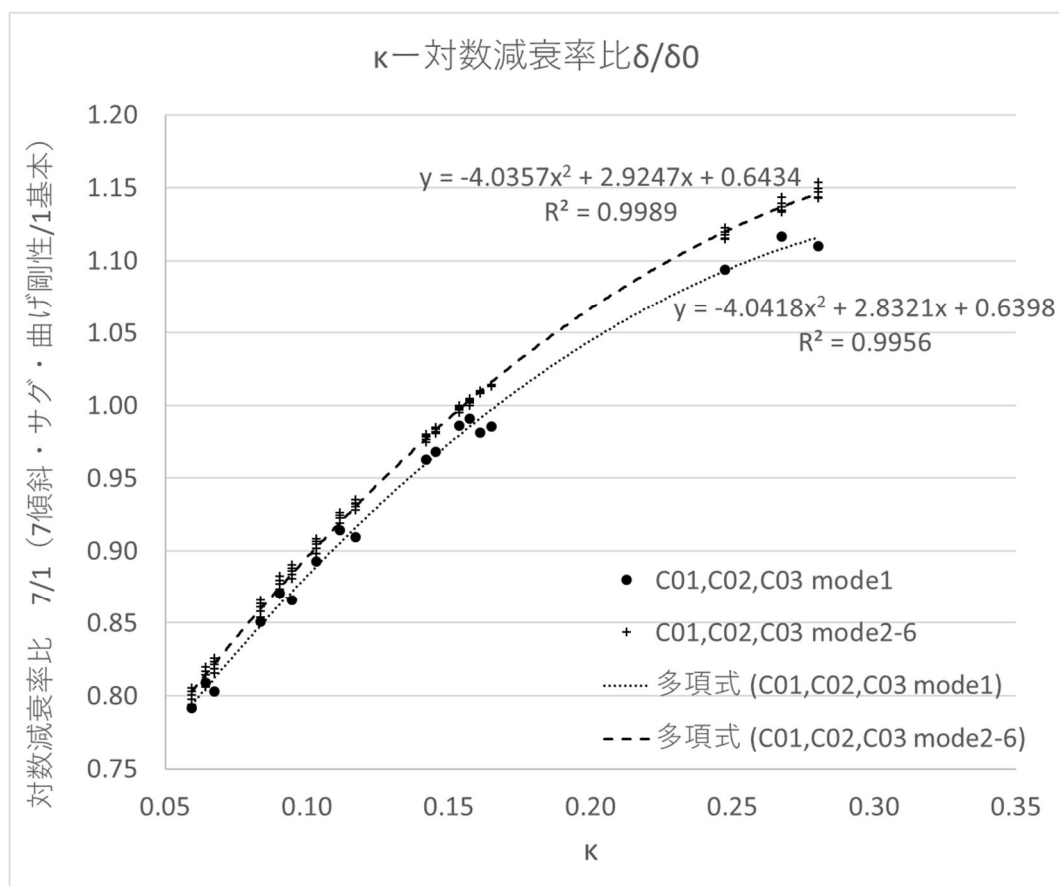


図 5-34 C01・C02・C03 のκと対数減衰率比

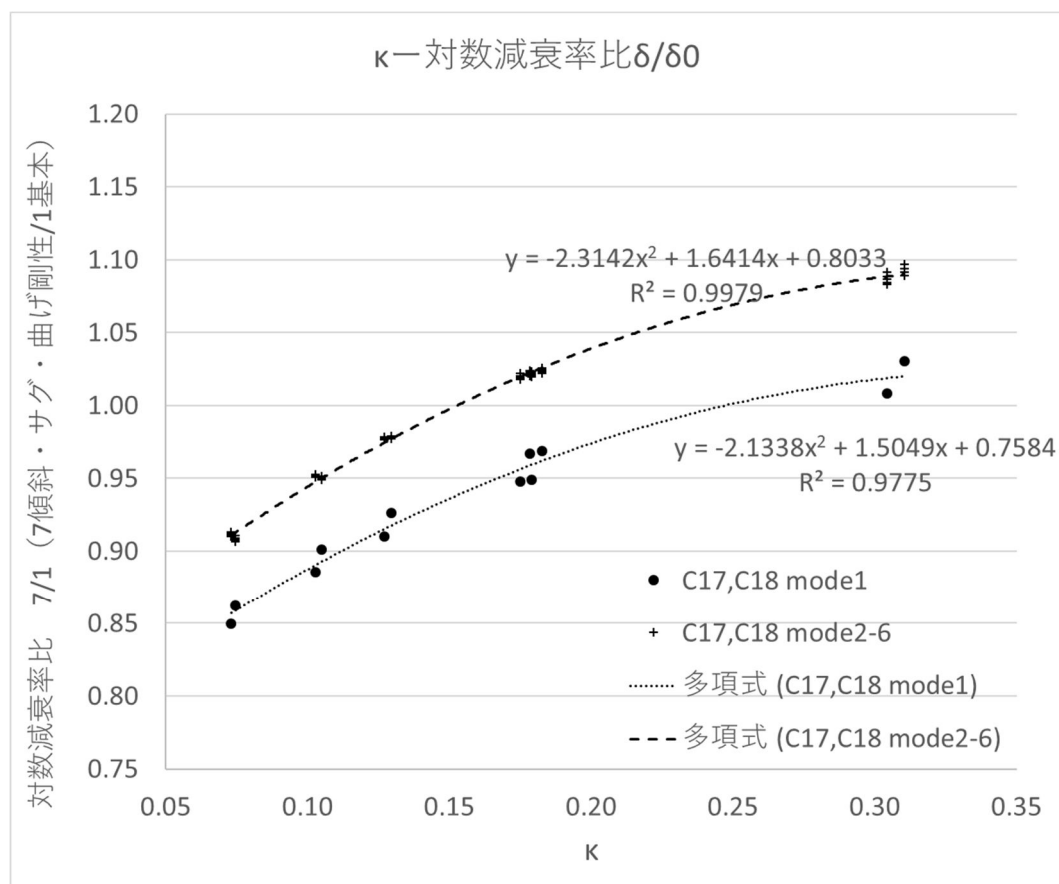


図 5-35 C17・C18 のκと対数減衰率比

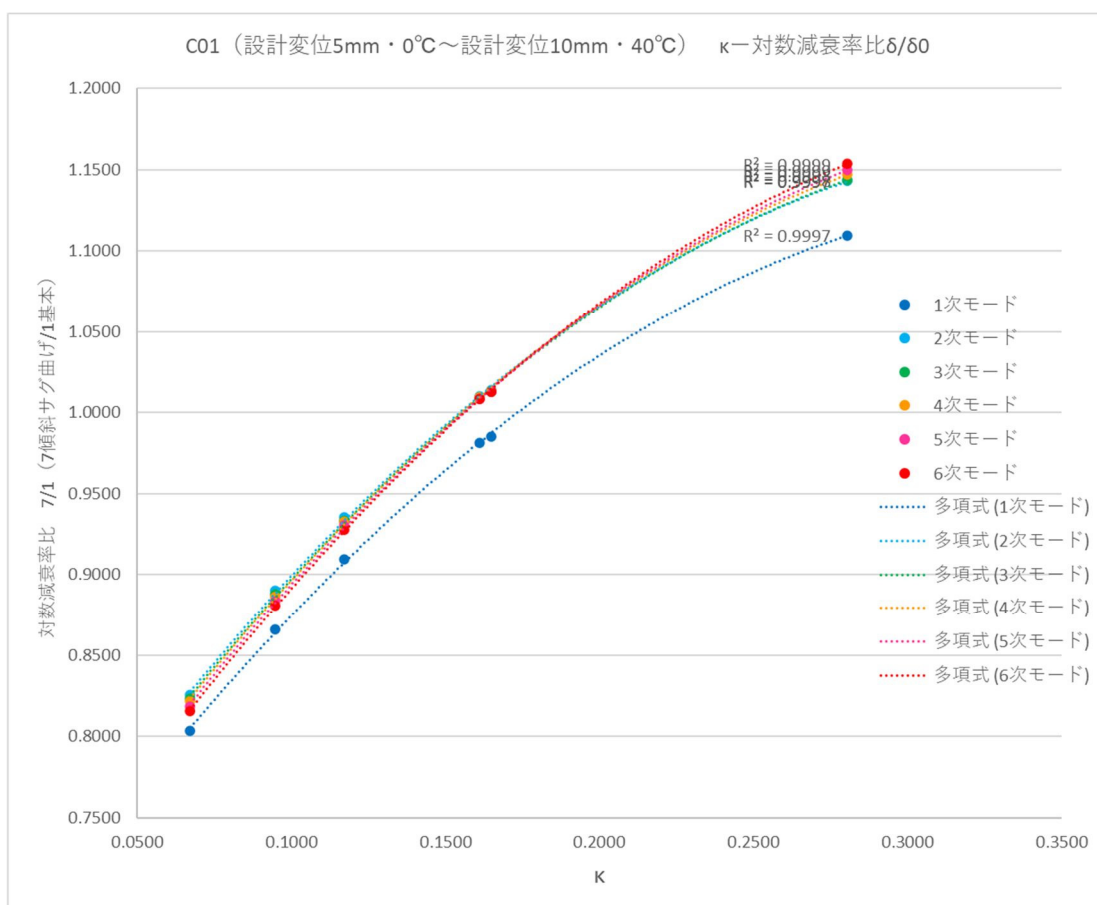


図 5-36 C01  $\kappa$  と対数減衰率比

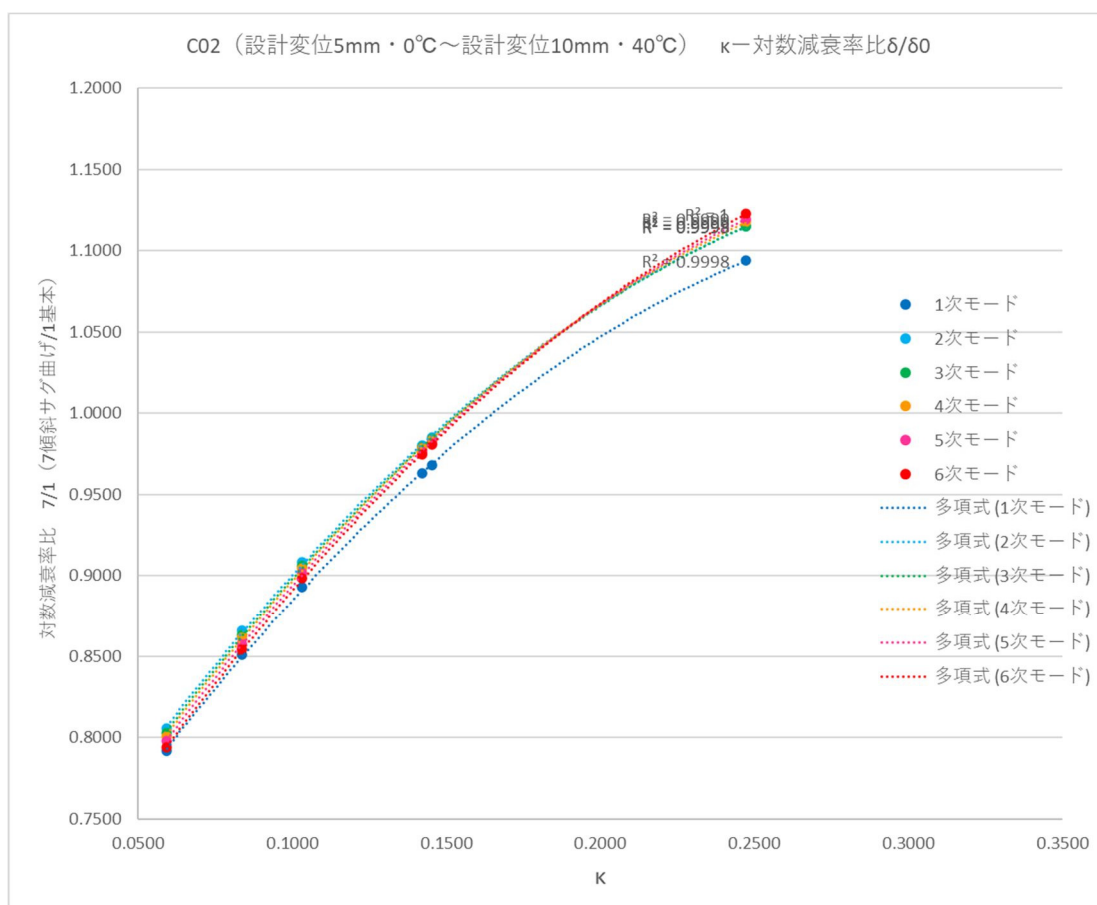


図 5-37 C02  $\kappa$  と対数減衰率比

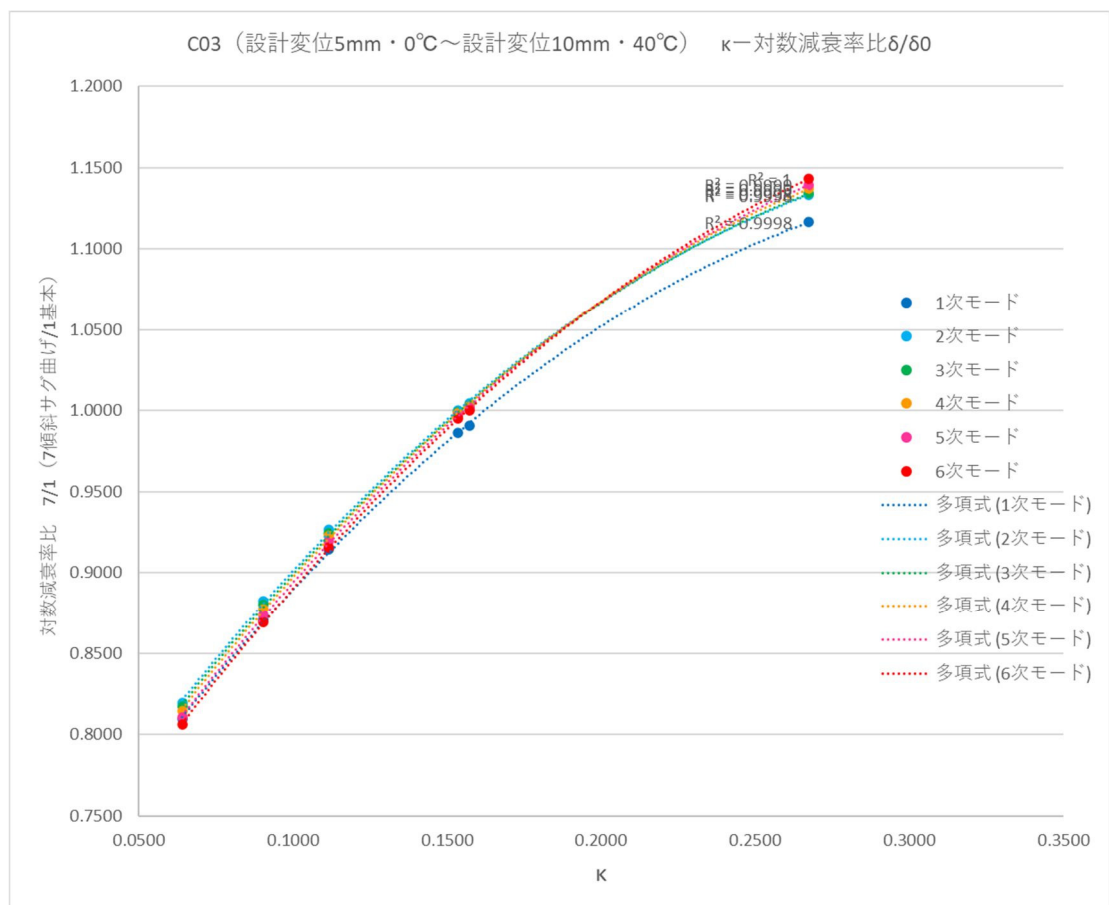


図 5-38 C03  $\kappa$  と対数減衰率比

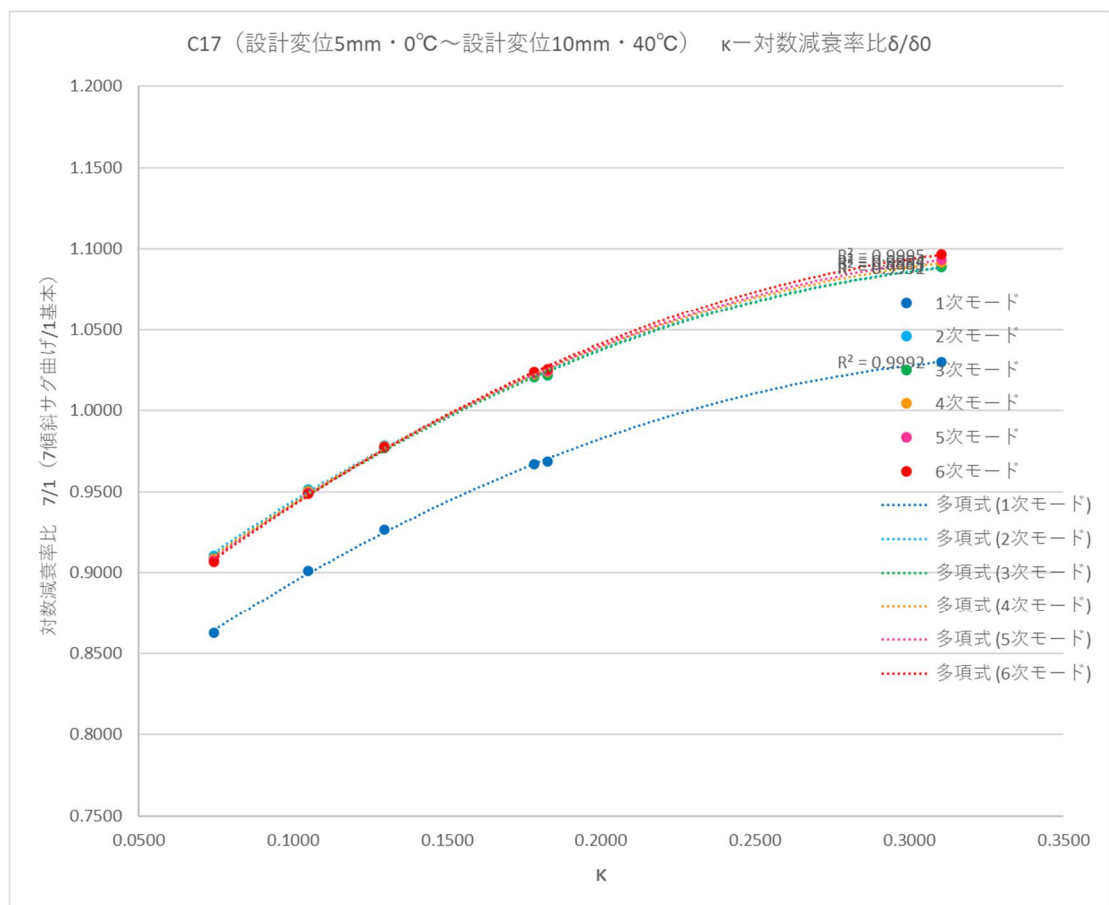


図 5-39 C17  $\kappa$  と対数減衰率比

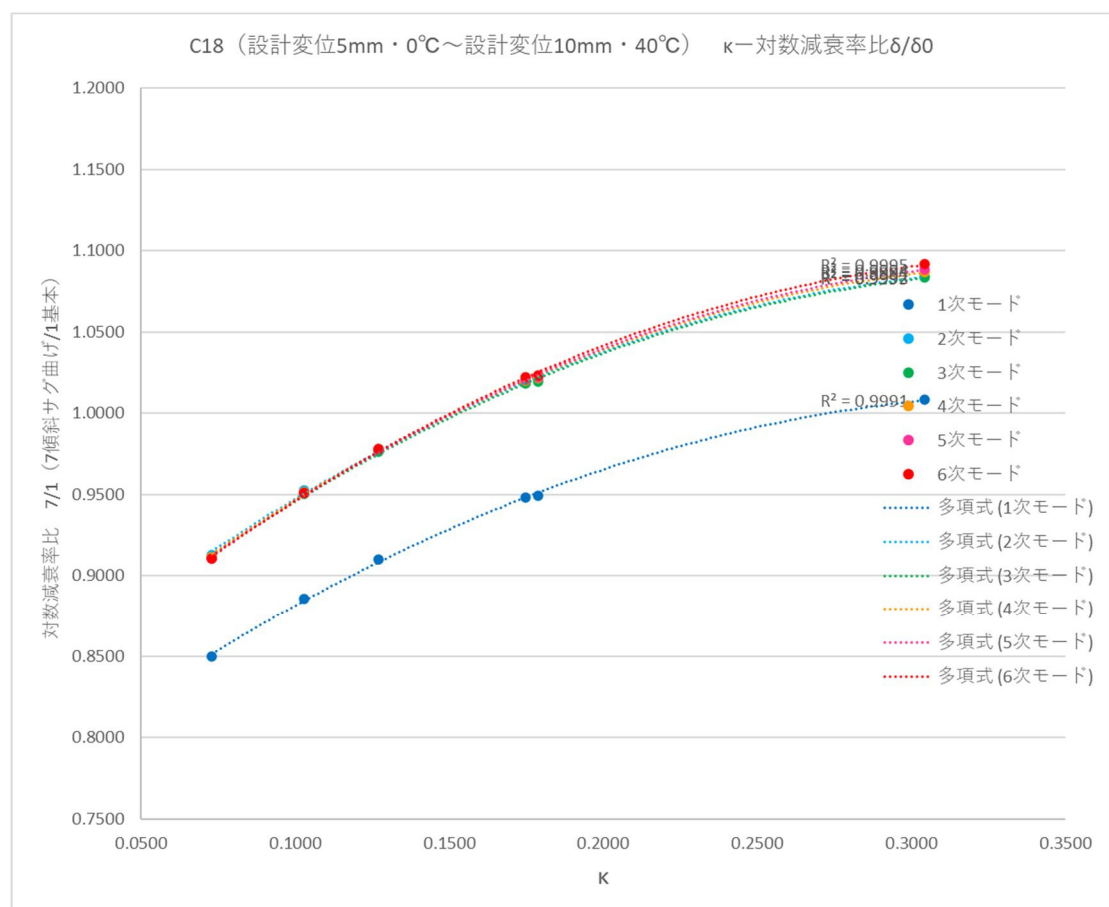


図 5-40 C18  $\kappa$  と対数減衰率比

1 次モードと 2 次モードから 6 次モードの差は(1)の整理結果より，サグ比と相関があると考えられる．そこで，全ケーブルの，2 次モードから 6 次モードの対数減衰率比に対する 1 次モードの対数減衰率比を整理した結果を図 5-41 に示す．

同図より，1 次モードの対数減衰率は 2 次モードから 6 次モードに対し，サグ比の増加に比例し減少することがわかる．よって，サグの影響を受ける 1 次モードは，2 次モードから 6 次モードの対数減衰率に，グラフに示すサグ比に関する 1 次関数を，低減係数として乗じることで算出することが可能である．

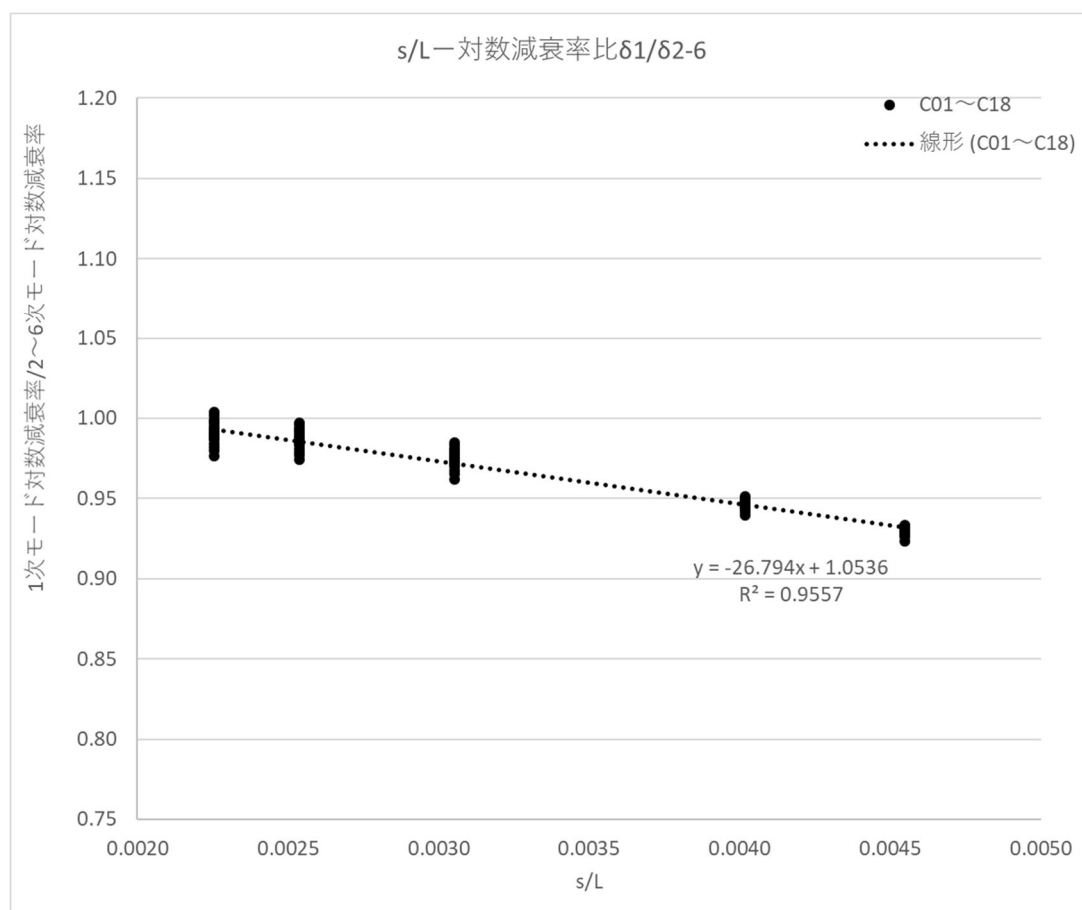


図 5-41 サグ比  $s/L$  と対数減衰率比

ところで， $C01 \cdot C02 \cdot C03$  と  $C17 \cdot C18$  は図 5-42 に示すとおり，明らかに傾向が異なる．同図では 2 次モードから 6 次モードに着目した  $\kappa$  と対数減衰率比のグラフであるが，図 5-35 に示す  $C17 \cdot C18$  の近似曲線で求めた対数減衰率比を，図 5-34 に示す  $C01 \cdot C02 \cdot C03$  の近似曲線で求めた対数減衰率比で除した値も灰色でプロットしている．このプロットから明らかなとおり， $C01 \cdot C02 \cdot C03$  と  $C17 \cdot C18$  の関係は， $\kappa$  に関する 3 次関数で表すことができる．

結果， $C01 \cdot C02 \cdot C03$  に対してのみ補正係数を定義し， $C17 \cdot C18$  は同図に示す 3 次関数を乗じればよい．これにより，高減衰ゴムダンパー位置でのケーブル剛性  $K_{cb}$  や傾斜角の影響を考慮することができる．これらの影響を考慮し 3 次関数を乗じる範囲は，(2)(3)の整理結果から， $K_{cb}$  が  $0.64\text{kN/m}$  より小さく，かつ，傾斜角が  $34^\circ$  より小さい場合となる．ただし， $K_{cb}$  が  $0.64\text{kN/m} \sim 0.32\text{kN/m}$  の範囲，および傾斜角が  $24^\circ \sim 34^\circ$  の範



囲は、複素固有値解析結果がないことから、この範囲にあるケーブルは複素固有値解析を行い、3次関数を乗じた補正係数の妥当性について確認する必要がある。

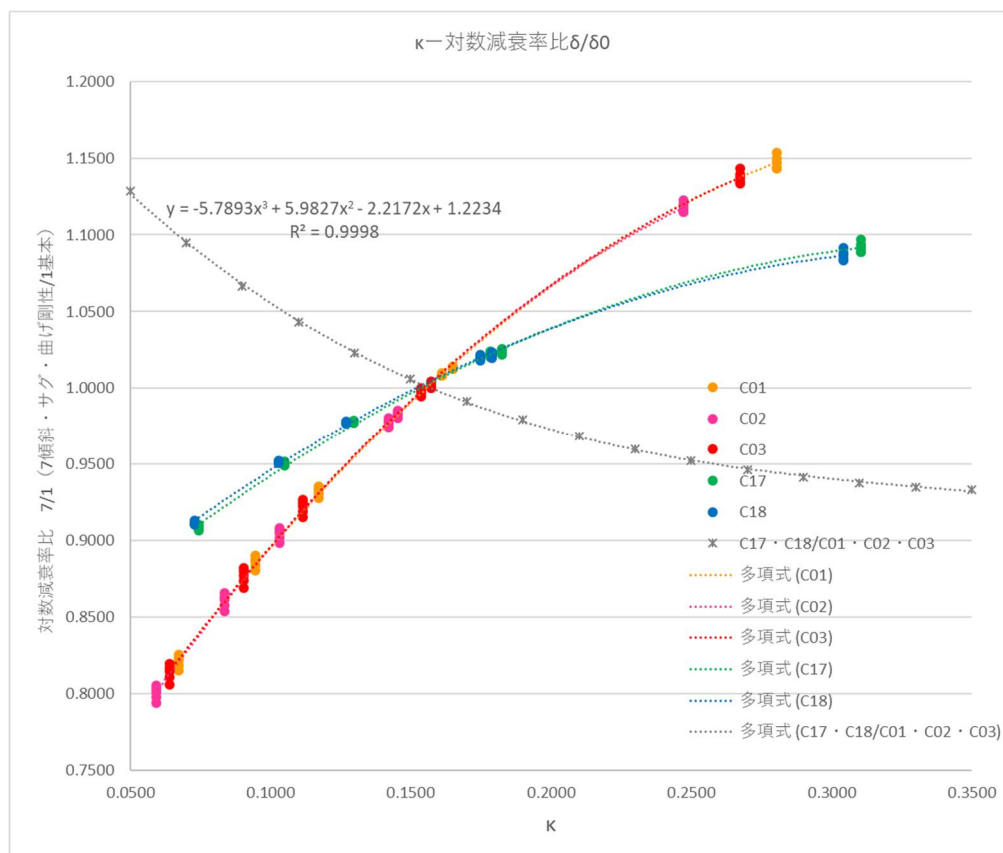


図 5-42 C01・C02・C03 と C17・C18 の  $\kappa$  - 対数減衰率比 (2~6 次モード)

本研究の対象としている橋梁の全ケーブルの  $K_c$  を表 5-10 に示す。同表には文献 11), 13), 18), 19), 20), 26) の  $K_c$  も参考として示している。同表から、C01・C02・C03 と C17・C18 とを分ける明確な境界は定められない。参考文献では 26) が鋼斜張橋であるが、その他は桁の種別や傾斜角が不明である。26) はケーブル長と張力が本橋と近くケーブルばねは同程度であることは確認できる。しかし、この式の明確な適用範囲を示すことはできない。よって、本研究では、明らかに傾向が異なることから、C01・C02・C03 と C17・C18 のそれぞれで、 $\kappa$  と対数減衰率比の関係を整理することとしている。

表 5-10  $K_c$  整理結果

| 側径間<br>PC桁側 | ケーブルNO       |      | C01     | C02     | C03     | C04    | C05     | C06     | C07     | C08    | C09    |
|-------------|--------------|------|---------|---------|---------|--------|---------|---------|---------|--------|--------|
|             | ケーブルばね $K_c$ | kN/m | 223.7   | 263.9   | 254.6   | 241.0  | 217.6   | 166.8   | 197.2   | 264.0  | 331.0  |
|             | 傾斜角          | °    | 34.402  | 36.016  | 37.915  | 40.172 | 42.890  | 46.559  | 50.534  | 55.979 | 62.799 |
| 中央径間<br>鋼桁側 | ケーブルNO       |      | C10     | C11     | C12     | C13    | C14     | C15     | C16     | C17    | C18    |
|             | ケーブルばね $K_c$ | kN/m | 327.9   | 222.6   | 154.5   | 124.5  | 157.6   | 169.5   | 174.4   | 177.9  | 148.6  |
|             | 傾斜角          | °    | 62.087  | 49.646  | 41.110  | 35.160 | 30.879  | 27.696  | 25.261  | 23.353 | 21.827 |
| 文献          | 文献NO         |      | 11      | 13      | 18      | 19     | 20      | 20      | 26      | 26     | 26     |
|             | ダンパー種類       | -    | 粘性      | 粘性      | 高減衰ゴム   | 高減衰ゴム  | ゴム+粘性   | ゴム+粘性   | 高減衰ゴム   | 高減衰ゴム  | 高減衰ゴム  |
|             | 張力 (D+PS)    | kN   | 5,394   | 2,942   | 2,942   | 3,138  | 6,325   | 4,217   | 2,663   | 1,566  | 737    |
|             | ケーブル長        | m    | 200.000 | 200.000 | 200.000 | 55.973 | 100.000 | 250.000 | 196.640 | 82.260 | 66.380 |
|             | ケーブルばね $K_c$ | kN/m | 266.2   | 145.2   | 145.2   | 553.3  | 624.3   | 166.5   | 133.6   | 187.9  | 109.6  |

#### 5.4. 複素固有値解析結果総括

複素固有値解析で得られる対数減衰率は、サグ、ケーブル曲げ剛性、傾斜角、およびこれらの組合せの影響を受けることが分かった。

- A) サグを考慮すると、1 次モードの対数減衰率に影響を与え、サグ比に 1 次比例して最大 9%程度低下する。
- B) ケーブル曲げ剛性を考慮すると、ケーブルによっては最大 9%程度対数減衰率が低下する場合と、最大 6%程度増加する場合がある。  
ただし、曲げ剛性と対数減衰率との間に明確な相関は確認できない。
- C) 傾斜角を考慮すると、ケーブルによっては最大 15%程度対数減衰率が低下する場合と、最大 15%程度増加する場合がある。  
ただし、傾斜角と対数減衰率との間に明確な相関は確認できない。
- D) サグ・曲げ剛性・傾斜角を考慮すると、ケーブルによっては最大 20%程度対数減衰率が低下する場合と、最大 15%程度増加する場合がある。
- E) 高減衰ゴムダンパーのせん断ばね定数とケーブルの硬さを表すばね定数の比、およびケーブル長に対する高減衰ゴムダンパー設置位置の比、からなる無次元パラメータ  $\kappa$  を用いることで、対数減衰率への影響を  $\kappa$  の 2 次の多項式で表現することができる。
- F)  $\kappa$  による対数減衰率の変化は、ケーブル剛性が大きく ( $K_{cb} > 0.64\text{kN/m}$ ) 傾斜角の大きい ( $\theta > 34^\circ$ ) C01・C02・C03 と、ケーブル剛性が小さく ( $K_{cb} < 0.32\text{kN/m}$ ) 傾斜角の小さい ( $\theta < 24^\circ$ ) C17・C18 とで分けて整理する必要がある。
- G) C17・C18 の対数減衰率比は、C01・C02・C03 の対数減衰率比に  $\kappa$  の 3 次関数を乗じることで求めることができる。
- H) 2 次モードから 6 次モードの対数減衰率比に、サグ比の 1 次関数による低減係数を乗じることで、サグ比の影響を受ける 1 次モードの対数減衰率比を求めることができる。

## 第6章 強制加振解析による高減衰ゴムダンパーの付加減衰評価

第4章において、現地加振試験結果と簡易推定式や複素固有値解析の対数減衰率を比較したが、現地加振試験では高減衰ゴムダンパー定着部の構造の影響を受けることが分かった。簡易推定式や複素固有値解析との比較は、このような構造の影響を除去して行う必要がある。よって、ここでは現地加振試験を解析で模擬することで定着部の影響を受けない対数減衰率を求めることとする。

### 6.1. 解析モデルと解析方法

#### (1) 解析モデル

極力実構造に近いモデル化とするため、複素固有値解析のケース 7)と同じモデル化（傾斜、サグ、曲げ剛性を考慮）を基本とし、次のとおりとする。

- ・ ケーブルは曲げ剛性を有する梁要素とする。
- ・ ケーブルの梁要素には張力を与えてそれによる幾何剛性を考慮する。
- ・ ケーブルの両端部は全方向の自由度を拘束する固定支点とする。
- ・ 高減衰ゴムダンパーはばね要素とする。
- ・ ばね要素の一端はケーブル、他端は全方向の自由度を拘束する固定支点とする。
- ・ ばね要素は履歴減衰を有する非線形ばねとし、骨格曲線は橋梁の免振ゴム支承に用いられるものと同じバイリニア型とする。

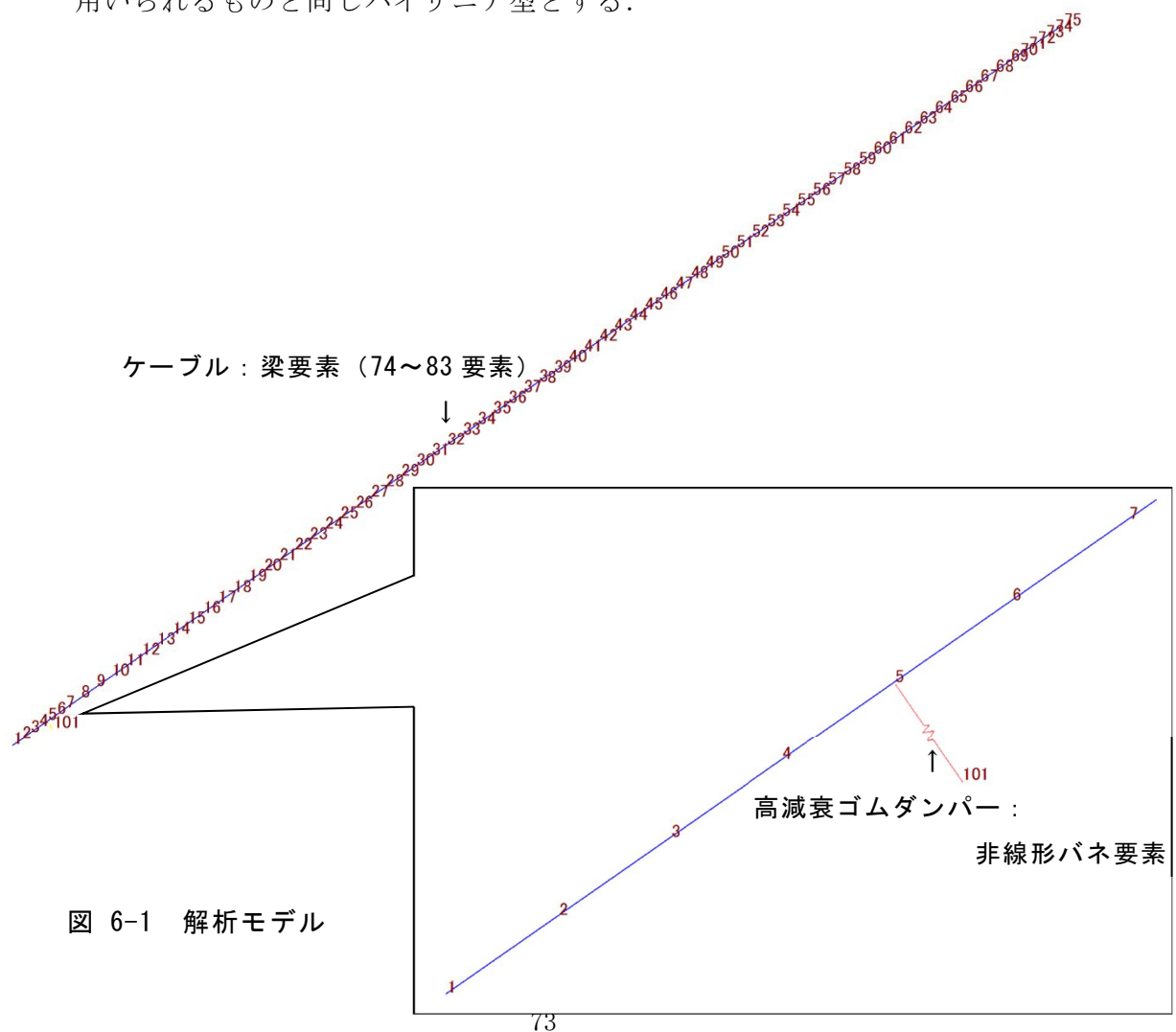


図 6-1 解析モデル

## 6.2. 高減衰ゴムダンパーの履歴減衰

高減衰ゴムダンパーの非線形履歴は、ダンパー製作メーカーの性能試験結果の荷重変位関係を用いる。以下に高減衰ゴムダンパー1 個に対する試験結果を示す。この資料の履歴ループからバイリニア型履歴曲線の定義に必要な数値を決定する。次ページにその設定結果を示す。

### 【検査方法】

サーボパルサー試験機によるせん断変形試験

入力波形：正弦波4波(3波目を採用)

周波数：2.0[Hz]

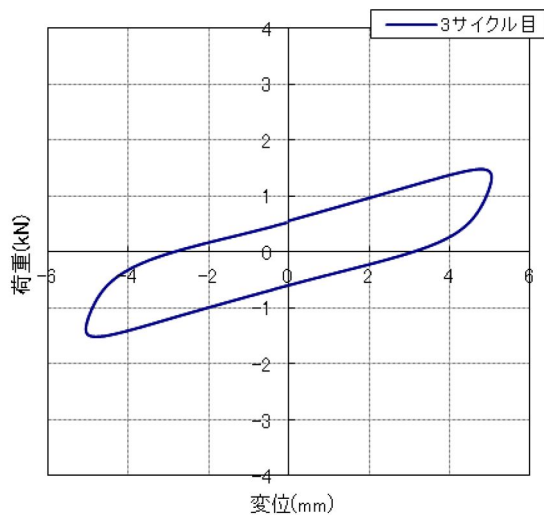
せん断ひずみ：±12.5[%](ゴム高さ=40[mm]の時、せん断変形=±5[mm])

温度：室温(23±5℃)

試験頻度：1/16個

サイズ：80-10-40

| 製品番号           | ばね定数 K[kN/m] |     | 損失係数 $\tan \delta$ |      | 判 定 |
|----------------|--------------|-----|--------------------|------|-----|
|                | 規格値          | 実測値 | 規格値                | 実測値  |     |
| RH1220147/0150 | 280±56       | 268 | 0.63 以上            | 0.64 | 合 格 |
| RH1350003/0004 |              | 268 |                    | 0.65 | 合 格 |
| RH1350005/0006 |              | 270 |                    | 0.65 | 合 格 |



履歴ループ(RH1220147/0150)

### 【備考】

図 6-2 高減衰ゴムダンパーのせん断変形試験

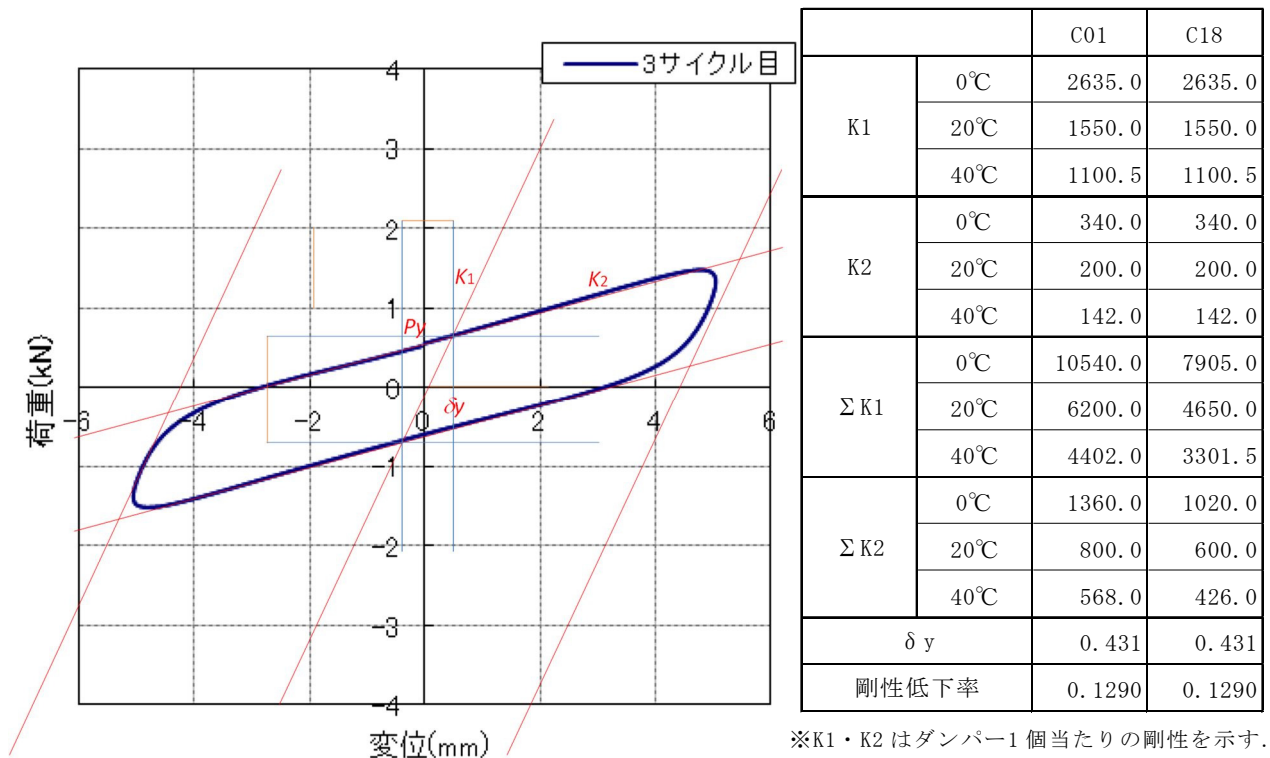


図 6-3 履歴曲線の設定

## (2) 強制加振方法

強制加振はケーブルの高減衰ゴムダンパー設置位置の節点に下図に示す加振力を与えることとし，その周波数は対象ケーブルの固有振動数とする．固有振動数は複素固有値解析のケース 7)の結果を用い，加振サイクルは，短いケーブルに対し，1 次モードの 20 サイクルを基本に，6 次モードまでモード次数  $n$  に対し， $20n$  サイクル，長いケーブルに対し  $30n$  サイクルとする．

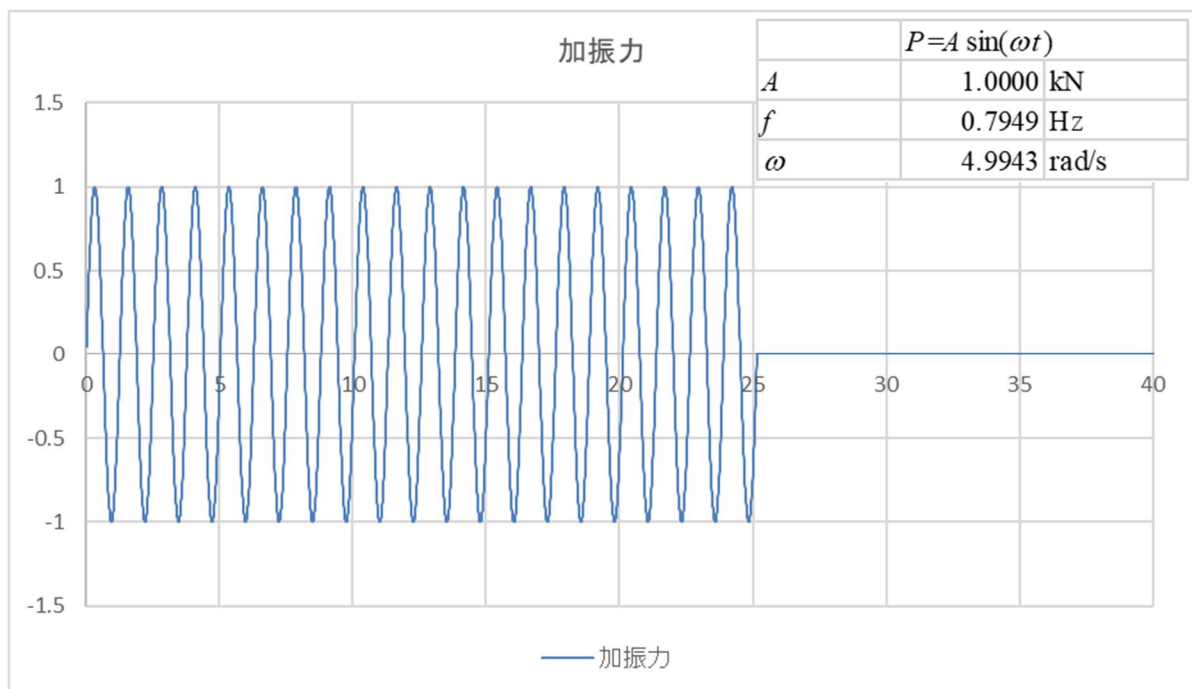


図 6-4 C01 ケーブル 20°Cでの強制加振力

加振方向をケーブル軸に直角方向とするため、下図に示すとおり水平方向と鉛直方向の2方向に加振し、合力がケーブル軸直角方向となるようにする。強制加振力の係数  $A$  は図中の値を基本に、高減衰ゴムダンパーの非線形ばねの応答変位が設計変位の 10mm を超えるようトライアルしながら設定する。設計変位 5mm については、10mm を超える変位から自由減衰振動が進行する中で結果を得ることができる。

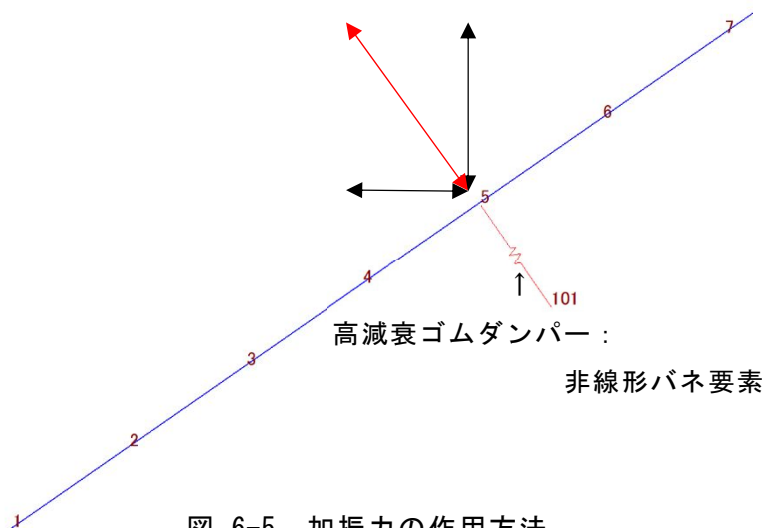


図 6-5 加振力の作用方法

### (3) 解析方法

非線形時刻歴応答解析（直接積分法：Newmark  $\beta$  法）とし、強制加振後の自由減衰振動を計算するため、加振力 0 の時間を加振モード次数およびケーブルに応じて適宜加算し、解析時間は 250 秒～50 秒とし、自由減衰波形で減衰振動が得られていることを確認する。解析ソフトは MIDAS/Civil を用いる。

なお、減衰は高減衰ゴムダンパーによる付加減衰のみを評価するため、ダンパーの履歴減衰以外のケーブル自身が有している構造減衰などは考慮しないこととする。

### (4) 付加減衰評価方法

解析により得られた自由減衰振動波形から対数減衰率を計算する方法は、現地加振試験結果と同様の方法とする。自由減衰振動波形は、振動モードが最大となる節点のものを用いることとする。よって、加振振動モードごとに固有値解析結果から設定することとする。

### (5) 解析対象

対象ケーブルは複素固有値解析と同様とし、解析ケースは以下のとおりとする。

表 6-1 強制加振解析ケース

| 対象   | C01       | C02       | C03       | C17       | C18       |
|------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 設計変位 | 5mm, 10mm | 5mm, 10mm | 5mm, 10mm | 5mm, 10mm | 5mm, 10mm |
| 温度   | 0・20・40℃  | 20℃       | 20℃       | 20℃       | 0・20・40℃  |

### 6.3. 強制加振解析による付加減衰

#### 6.3.1. 付加減衰評価節点

##### (1) 振動モードと最大変位節点

固有値解析により、1～6 次の振動モード形状および最大変位が生じる節点を把握し、付加減衰を評価する節点を設定する。以下に C01（20℃時）のモード図を示す。

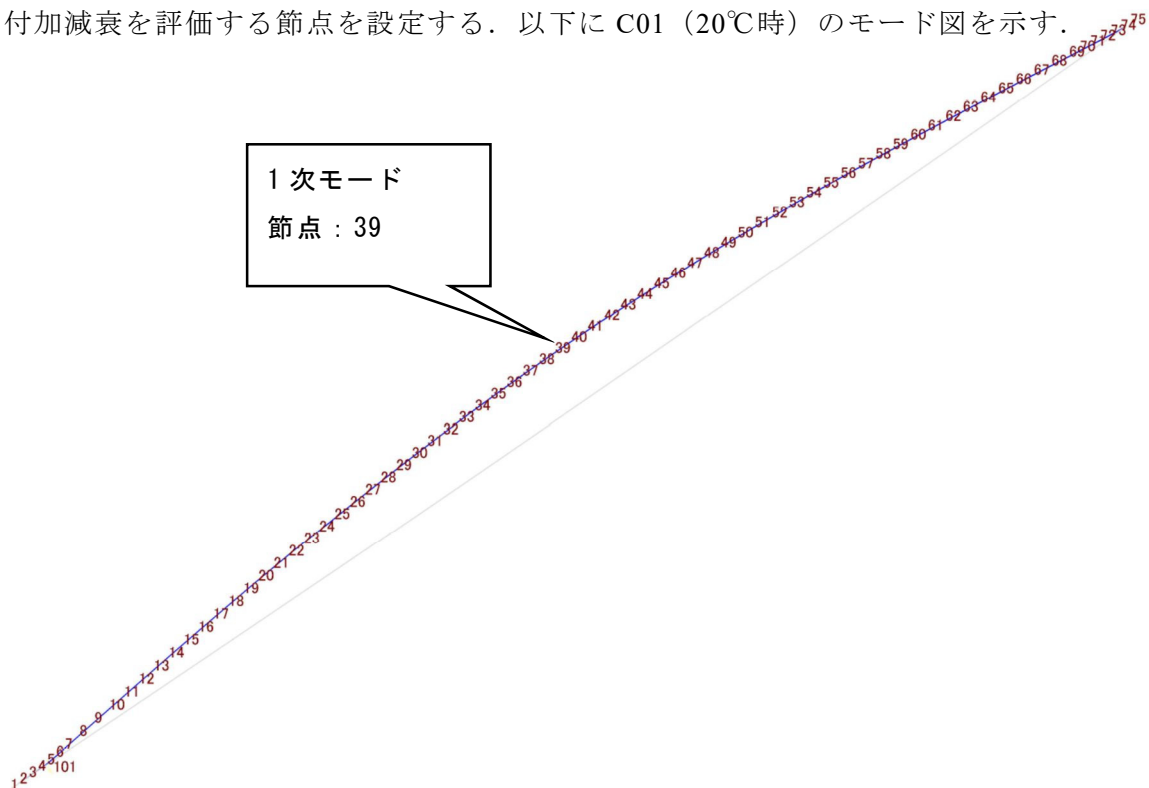


図 6-6 C01 1次モード図

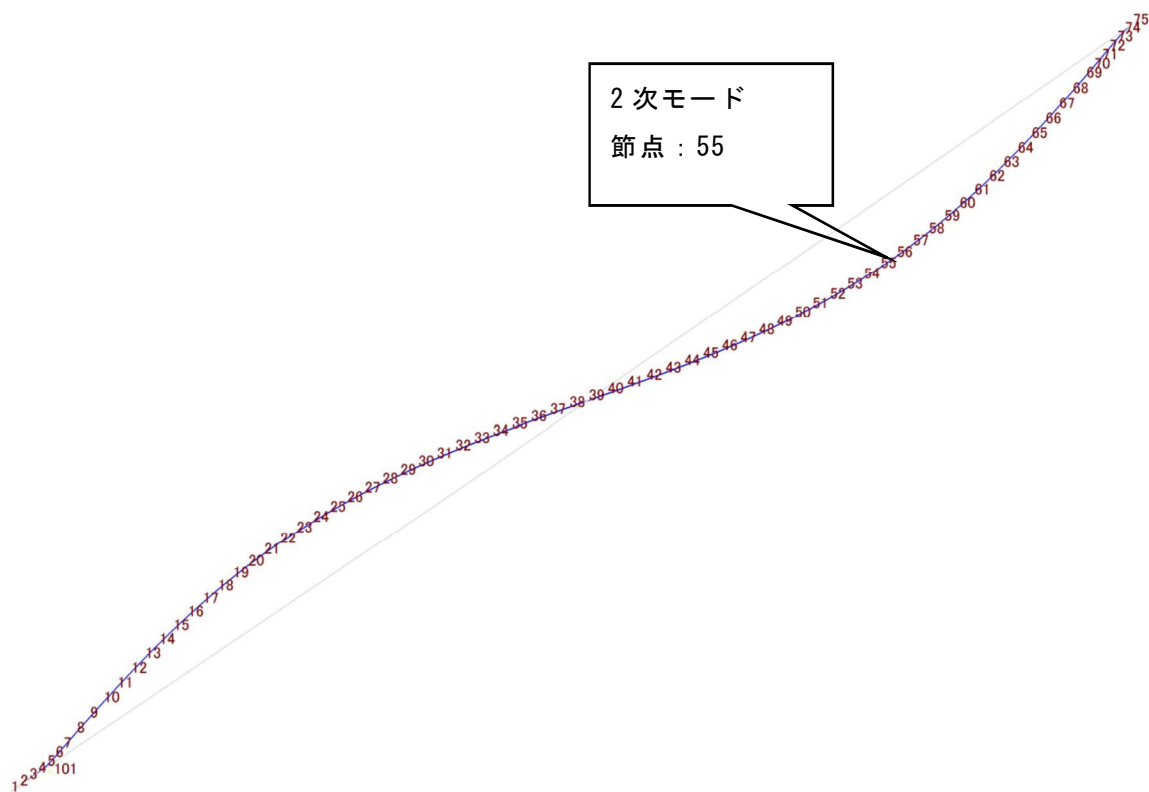


図 6-7 C01 2次モード図

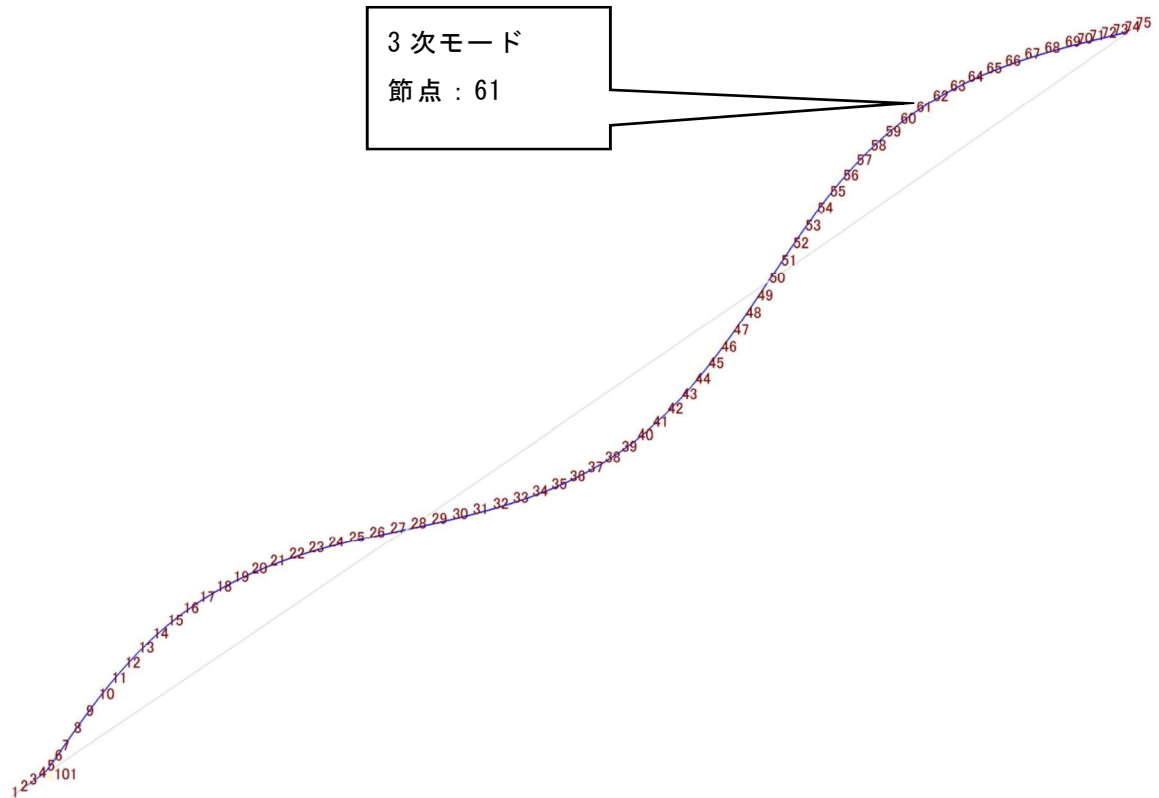


図 6-8 C01 3 次モード図

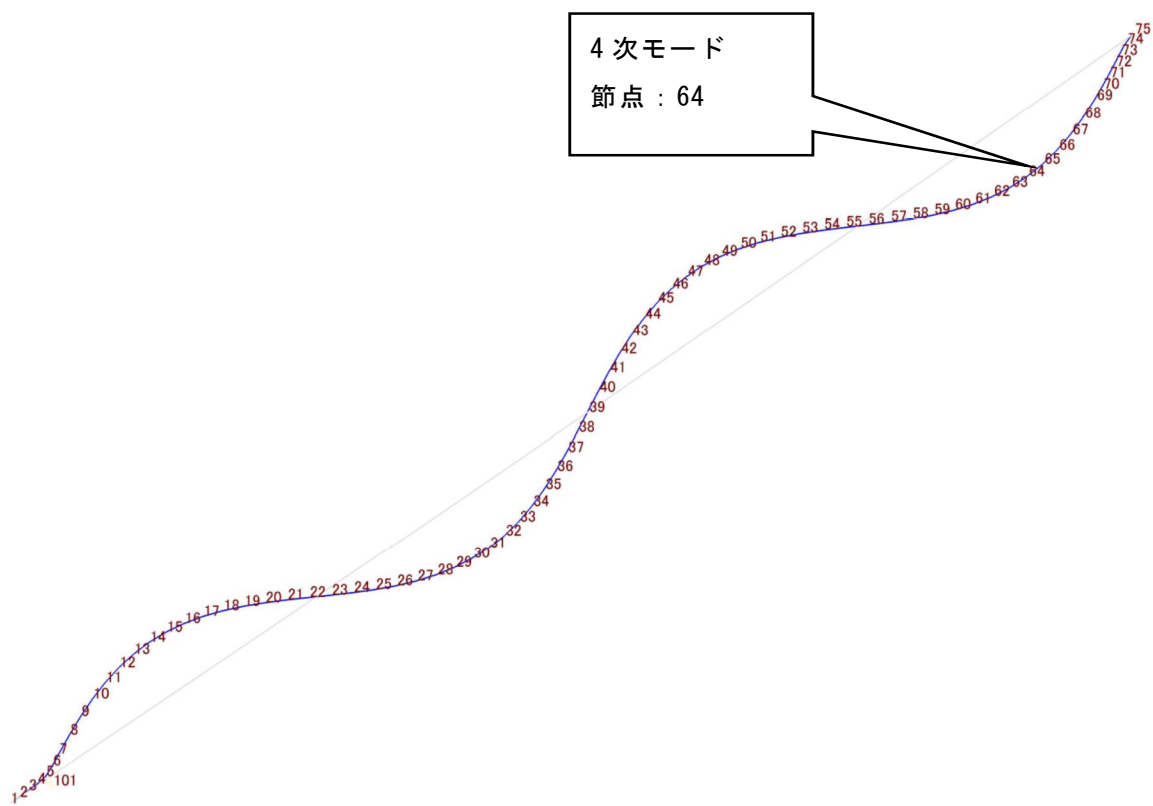


図 6-9 C01 4 次モード図



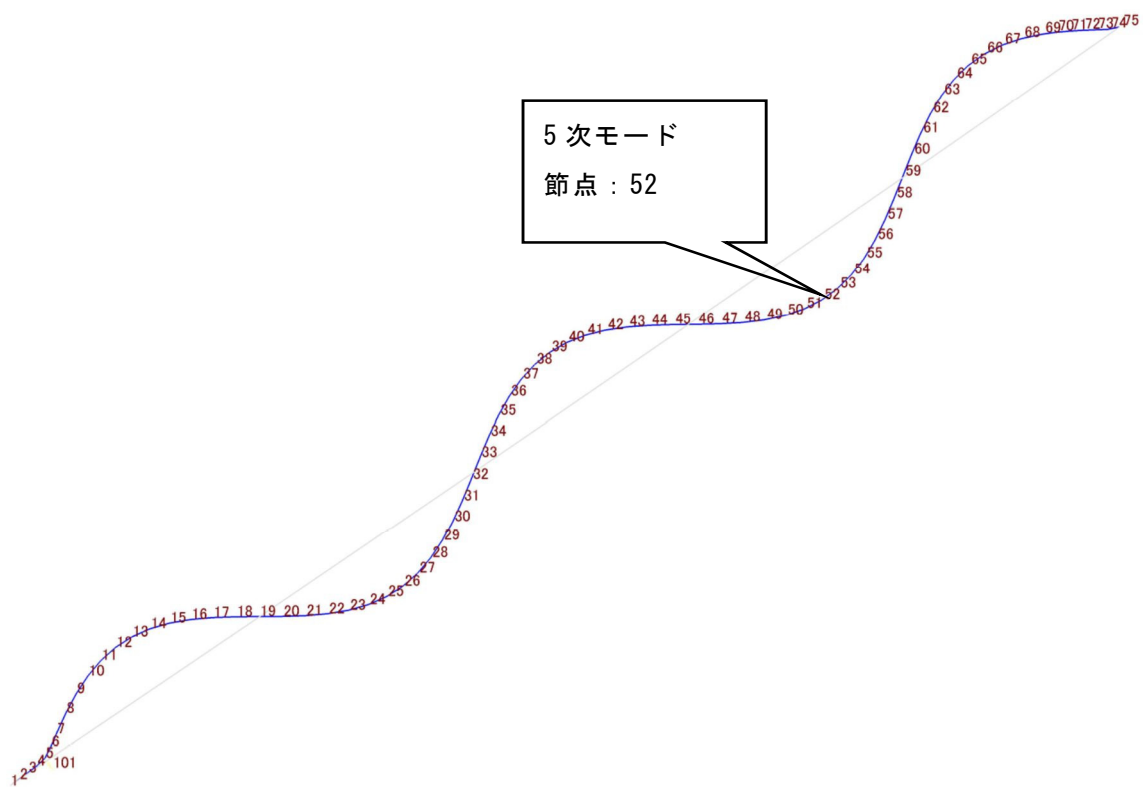


図 6-10 C01 5 次モード図

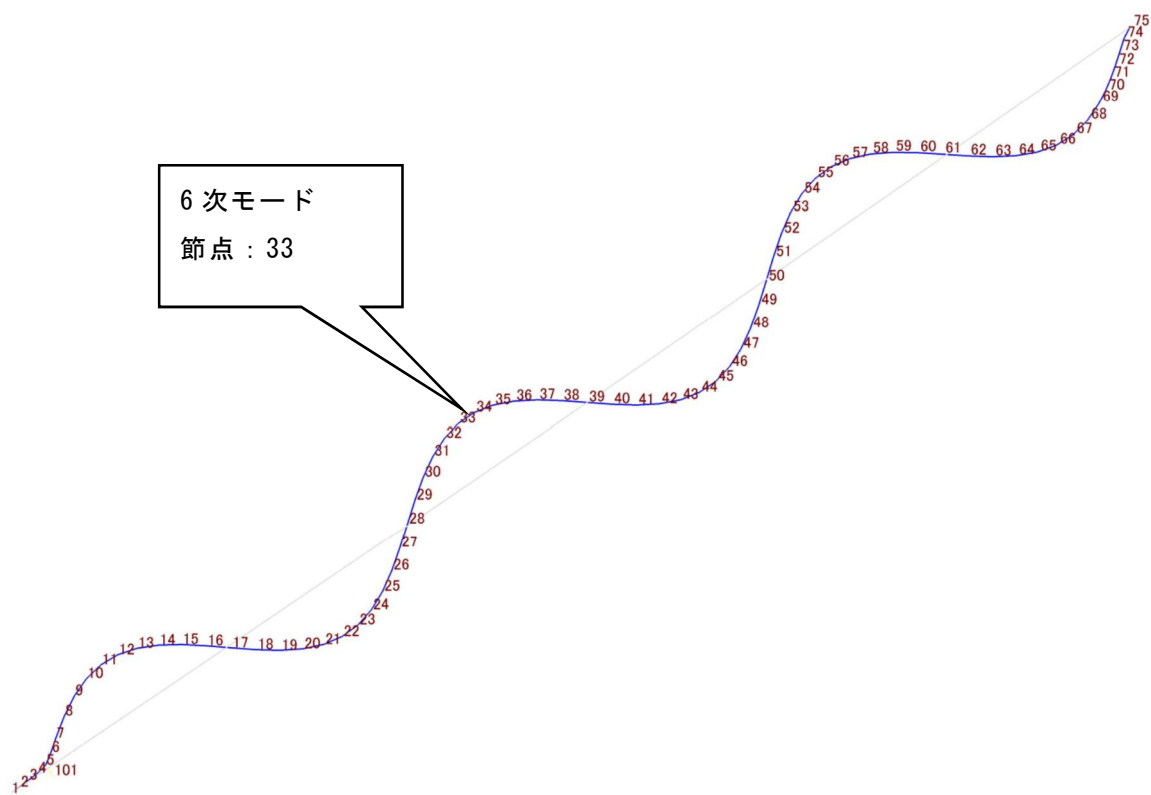


図 6-11 C01 6 次モード図

同様にして各ケーブルについて同様にして最大変位が生じる節点について整理した。  
結果を以下に示す。

表 6-2 最大変位発生節点 (C01・C02)

| 設計変位   |          | d05    |        |       | d10    |       |       | 採用節点 |
|--------|----------|--------|--------|-------|--------|-------|-------|------|
| 温度     |          | 0      | 20     | 40    | 0      | 20    | 40    |      |
| C01    | mode1    | 39     | 39     | 39    | 39     | 39    | 38    | 39   |
|        | mode2    | 56     | 55     | 55    | 55     | 55    | 55    | 55   |
|        | mode3    | 61     | 61     | 61    | 61     | 61    | 61    | 61   |
|        | mode4    | 64     | 64     | 64    | 64     | 64    | 64    | 64   |
|        | mode5    | 52     | 52     | 52    | 52     | 52    | 52    | 52   |
|        | mode6    | 22     | 33     | 33    | 33     | 44    | 44    | 33   |
| ダンパーばね | kd(kN/m) | 1904.0 | 1120.0 | 795.2 | 1094.0 | 643.6 | 456.9 |      |
| 振動数    | fm1(Hz)  | 0.804  | 0.801  | 0.798 | 0.800  | 0.797 | 0.795 |      |
|        | fm2(Hz)  | 1.595  | 1.589  | 1.584 | 1.589  | 1.582 | 1.578 |      |
|        | fm3(Hz)  | 2.394  | 2.384  | 2.378 | 2.384  | 2.374 | 2.367 |      |
|        | fm4(Hz)  | 3.192  | 3.180  | 3.171 | 3.179  | 3.166 | 3.157 |      |
|        | fm5(Hz)  | 3.992  | 3.976  | 3.965 | 3.976  | 3.959 | 3.948 |      |
|        | fm6(Hz)  | 4.793  | 4.774  | 4.761 | 4.773  | 4.752 | 4.740 |      |
| 設計変位   |          | d05    |        |       | d10    |       |       | 採用節点 |
| 温度     |          | 0      | 20     | 40    | 0      | 20    | 40    |      |
| C02    | mode1    |        | 39     |       |        | 39    |       | 39   |
|        | mode2    |        | 56     |       |        | 55    |       | 55   |
|        | mode3    |        | 61     |       |        | 61    |       | 61   |
|        | mode4    |        | 64     |       |        | 64    |       | 64   |
|        | mode5    |        | 52     |       |        | 52    |       | 52   |
|        | mode6    |        | 33     |       |        | 44    |       | 33   |
| ダンパーばね | kd(kN/m) |        | 1120.0 |       |        | 643.6 |       |      |
| 振動数    | fm1(Hz)  |        | 0.901  |       |        | 0.897 |       |      |
|        | fm2(Hz)  |        | 1.794  |       |        | 1.786 |       |      |
|        | fm3(Hz)  |        | 2.692  |       |        | 2.680 |       |      |
|        | fm4(Hz)  |        | 3.591  |       |        | 3.574 |       |      |
|        | fm5(Hz)  |        | 4.490  |       |        | 4.469 |       |      |
|        | fm6(Hz)  |        | 5.391  |       |        | 5.365 |       |      |

表 6-3 最大変位発生節点 (C03・C17・C18)

| 設計変位   |          | d05 |        |    | d10 |       |    | 採用節点 |
|--------|----------|-----|--------|----|-----|-------|----|------|
| 温度     |          | 0   | 20     | 40 | 0   | 20    | 40 |      |
| C03    | mode1    |     | 39     |    |     | 39    |    | 39   |
|        | mode2    |     | 56     |    |     | 56    |    | 56   |
|        | mode3    |     | 61     |    |     | 61    |    | 61   |
|        | mode4    |     | 64     |    |     | 64    |    | 64   |
|        | mode5    |     | 66     |    |     | 66    |    | 66   |
|        | mode6    |     | 67     |    |     | 67    |    | 67   |
| ダンパーばね | kd(kN/m) |     | 1120.0 |    |     | 643.6 |    |      |
| 振動数    | fm1(Hz)  |     | 0.985  |    |     | 0.980 |    |      |
|        | fm2(Hz)  |     | 1.963  |    |     | 1.953 |    |      |
|        | fm3(Hz)  |     | 2.945  |    |     | 2.931 |    |      |
|        | fm4(Hz)  |     | 3.928  |    |     | 3.909 |    |      |
|        | fm5(Hz)  |     | 4.912  |    |     | 4.888 |    |      |
|        | fm6(Hz)  |     | 5.898  |    |     | 5.868 |    |      |

| 設計変位   |          | d05    |       |       | d10   |       |       | 採用節点 |
|--------|----------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| 温度     |          | 0      | 20    | 40    | 0     | 20    | 40    |      |
| C18    | mode1    | 43     | 43    | 43    | 43    | 43    | 43    | 43   |
|        | mode2    | 61     | 61    | 61    | 61    | 61    | 61    | 61   |
|        | mode3    | 67     | 67    | 67    | 67    | 67    | 67    | 67   |
|        | mode4    | 70     | 70    | 70    | 70    | 70    | 70    | 70   |
|        | mode5    | 43     | 57    | 57    | 57    | 57    | 57    | 57   |
|        | mode6    | 61     | 73    | 73    | 73    | 73    | 73    | 73   |
| ダンパーばね | kd(kN/m) | 1428.0 | 840.0 | 596.4 | 820.5 | 482.7 | 342.7 |      |
| 振動数    | fm1(Hz)  | 0.612  | 0.610 | 0.609 | 0.610 | 0.608 | 0.606 |      |
|        | fm2(Hz)  | 1.199  | 1.195 | 1.192 | 1.194 | 1.190 | 1.187 |      |
|        | fm3(Hz)  | 1.800  | 1.793 | 1.788 | 1.793 | 1.785 | 1.781 |      |
|        | fm4(Hz)  | 2.399  | 2.390 | 2.384 | 2.390 | 2.380 | 2.374 |      |
|        | fm5(Hz)  | 3.000  | 2.989 | 2.981 | 2.988 | 2.976 | 2.968 |      |
|        | fm6(Hz)  | 3.601  | 3.587 | 3.578 | 3.587 | 3.571 | 3.562 |      |

| 設計変位   |          | d05 |       |    | d10 |       |    | 採用節点 |
|--------|----------|-----|-------|----|-----|-------|----|------|
| 温度     |          | 0   | 20    | 40 | 0   | 20    | 40 |      |
| C17    | mode1    |     | 43    |    |     | 43    |    | 43   |
|        | mode2    |     | 61    |    |     | 61    |    | 61   |
|        | mode3    |     | 67    |    |     | 67    |    | 67   |
|        | mode4    |     | 70    |    |     | 70    |    | 70   |
|        | mode5    |     | 72    |    |     | 57    |    | 57   |
|        | mode6    |     | 73    |    |     | 73    |    | 73   |
| ダンパーばね | kd(kN/m) |     | 980.0 |    |     | 563.1 |    |      |
| 振動数    | fm1(Hz)  |     | 0.675 |    |     | 0.672 |    |      |
|        | fm2(Hz)  |     | 1.328 |    |     | 1.322 |    |      |
|        | fm3(Hz)  |     | 1.993 |    |     | 1.984 |    |      |
|        | fm4(Hz)  |     | 2.658 |    |     | 2.646 |    |      |
|        | fm5(Hz)  |     | 3.323 |    |     | 3.308 |    |      |
|        | fm6(Hz)  |     | 3.989 |    |     | 3.970 |    |      |

最大変位が生じる節点はモードごとに異なるが、この節点を減衰評価節点に選定することの妥当性は、モード別に主要な節点の対数減衰率を求めることで確認することとし、PC 桁側の C01 および鋼桁側の C18 の 20℃時を代表として整理した結果を以降に示す。

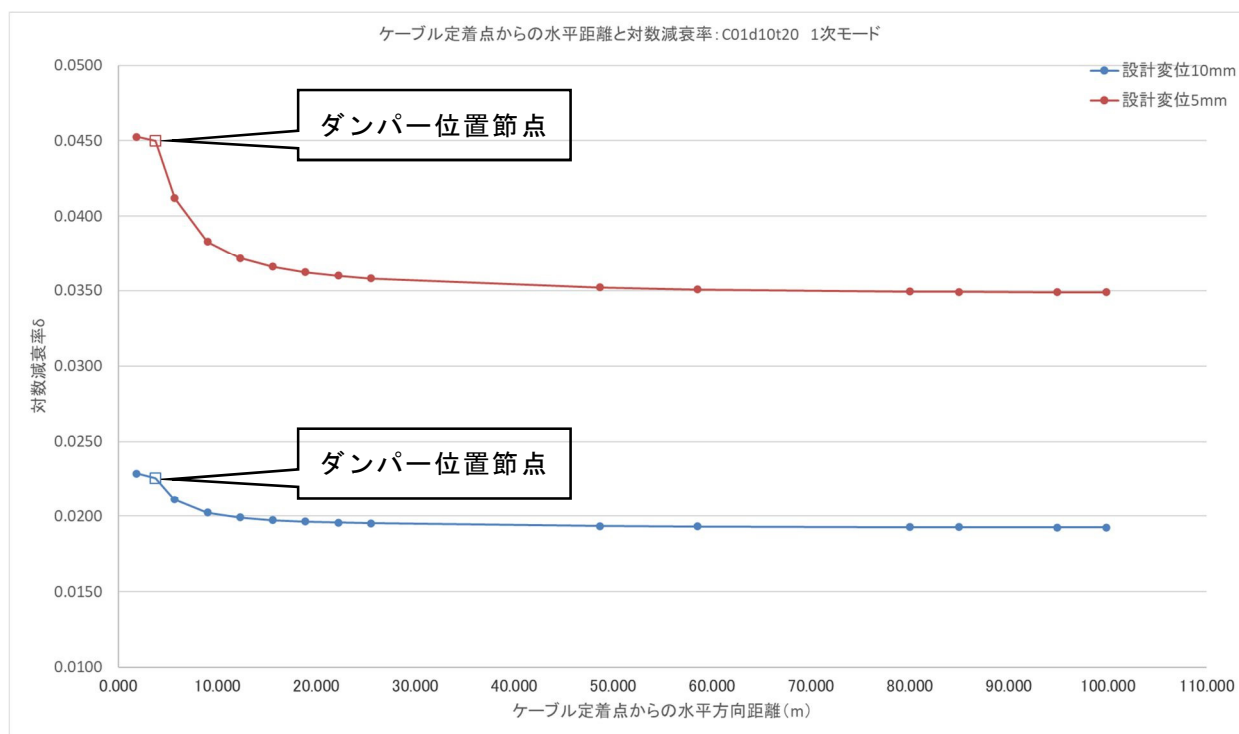


図 6-12 C01 20℃ 1 次モード ケーブル軸方向対数減衰率分布

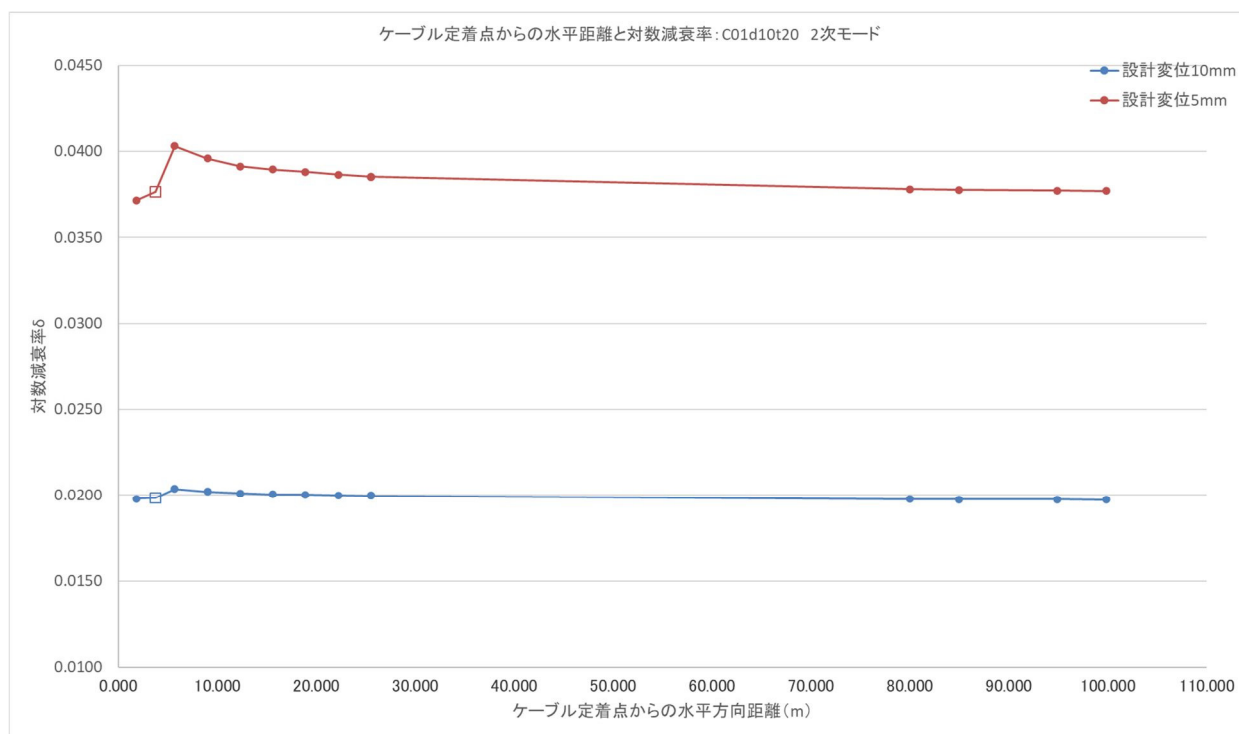


図 6-13 C01 20℃ 2 次モード ケーブル軸方向対数減衰率分布

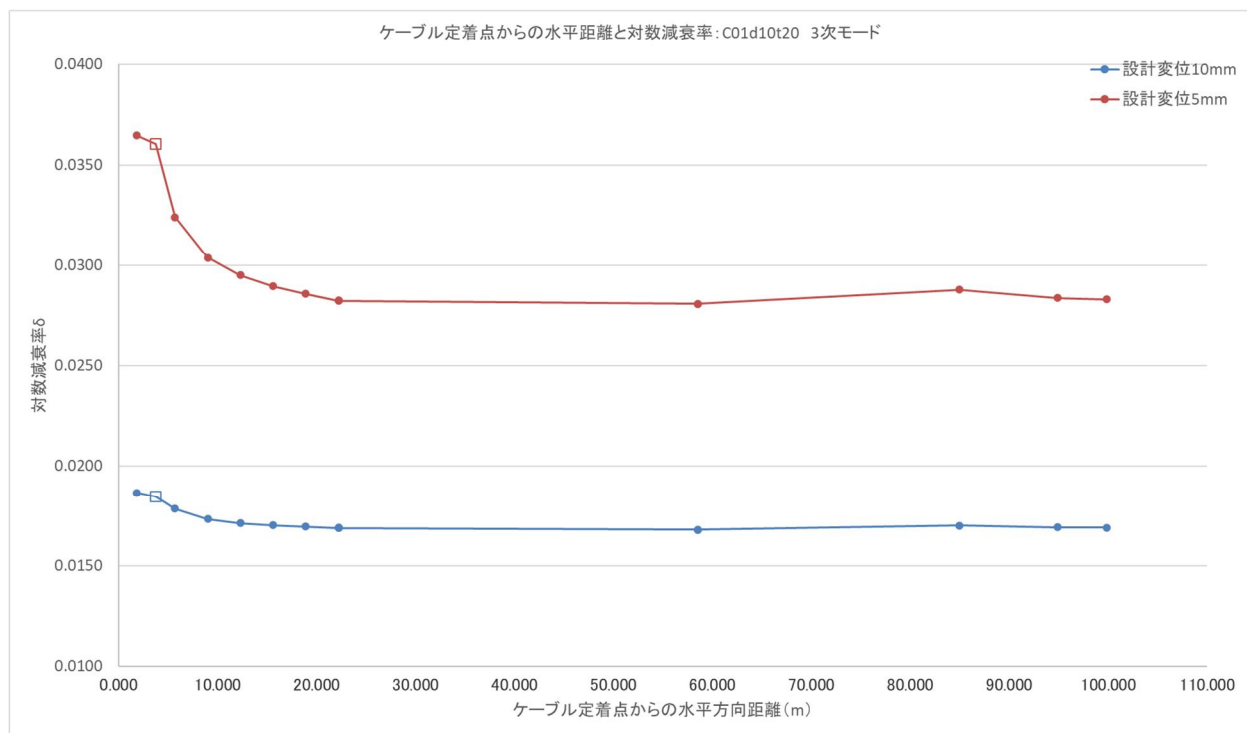


図 6-14 C01 20°C 3 次モード ケーブル軸方向対数減衰率分布

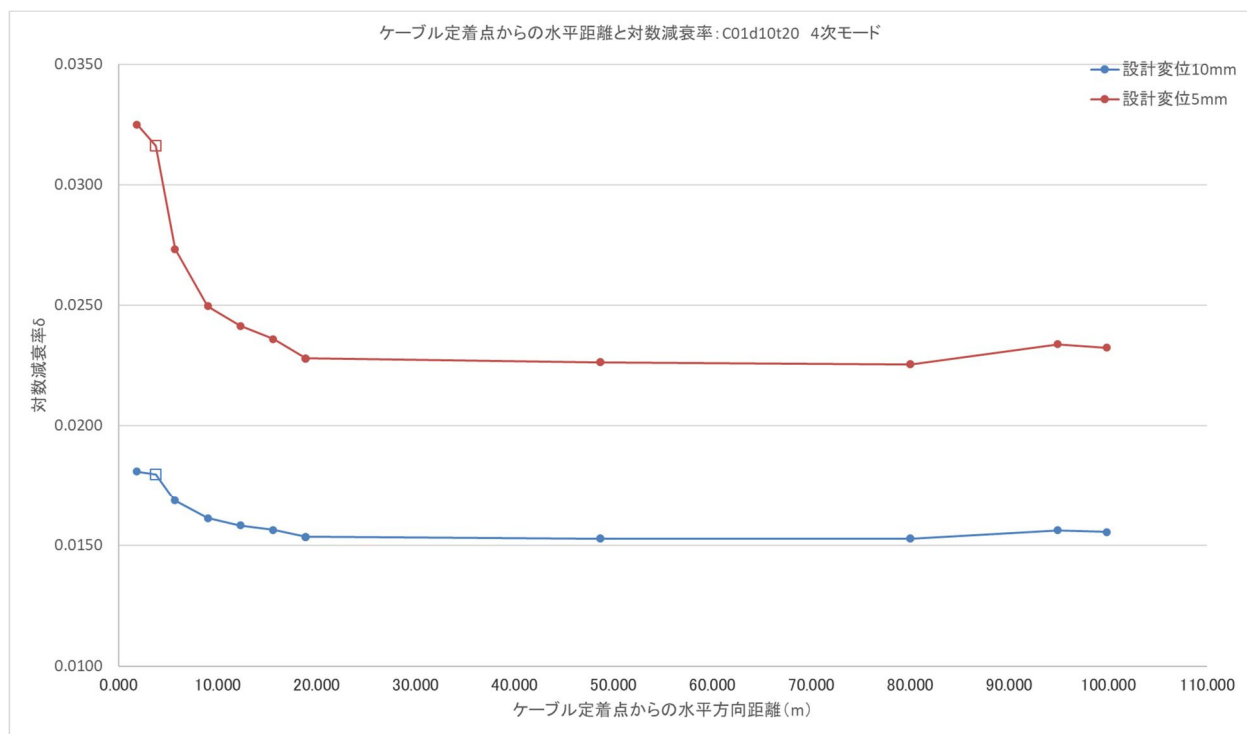


図 6-15 C01 20°C 4 次モード ケーブル軸方向対数減衰率分布

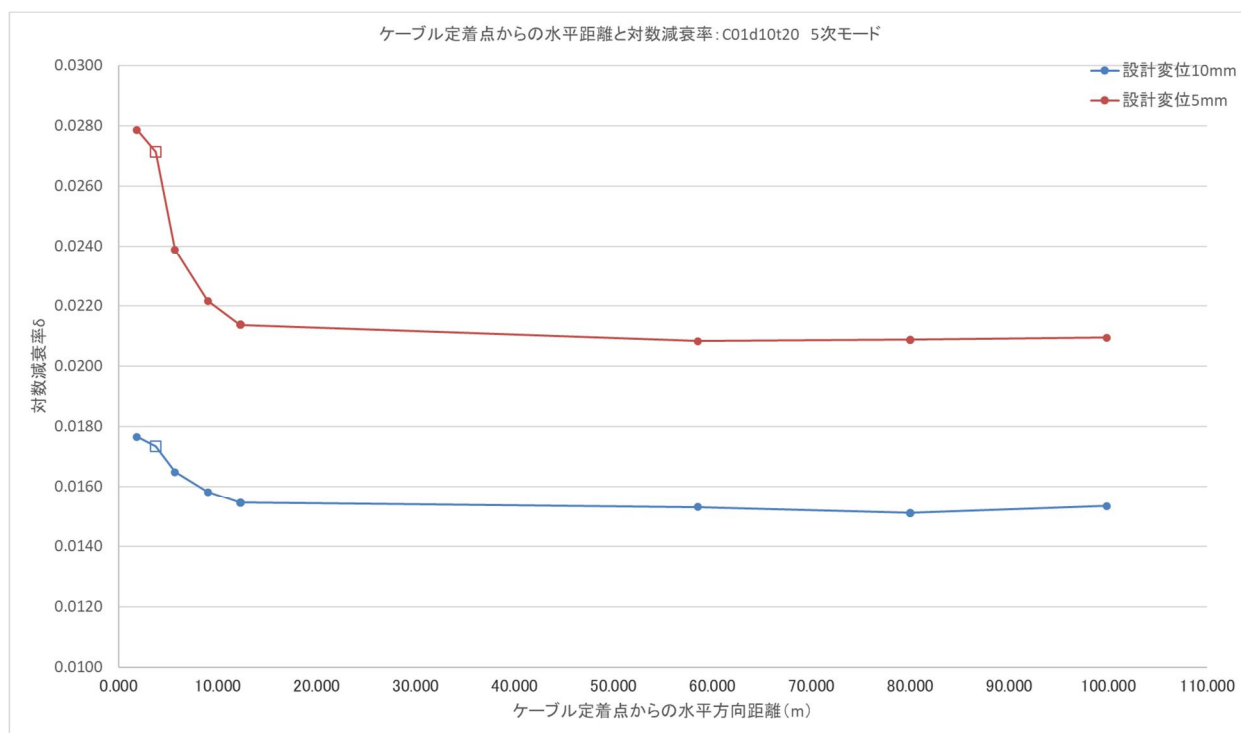


図 6-16 C01 20°C 5 次モード ケーブル軸方向対数減衰率分布

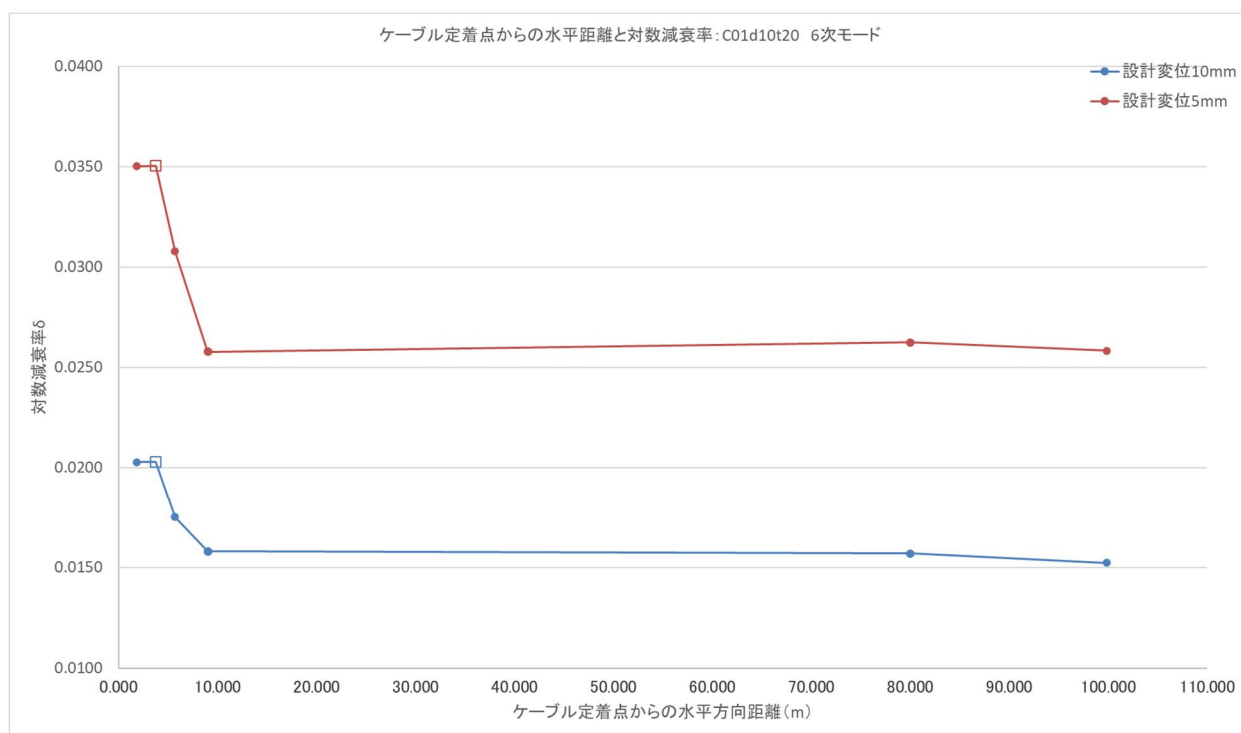


図 6-17 C01 20°C 6 次モード ケーブル軸方向対数減衰率分布

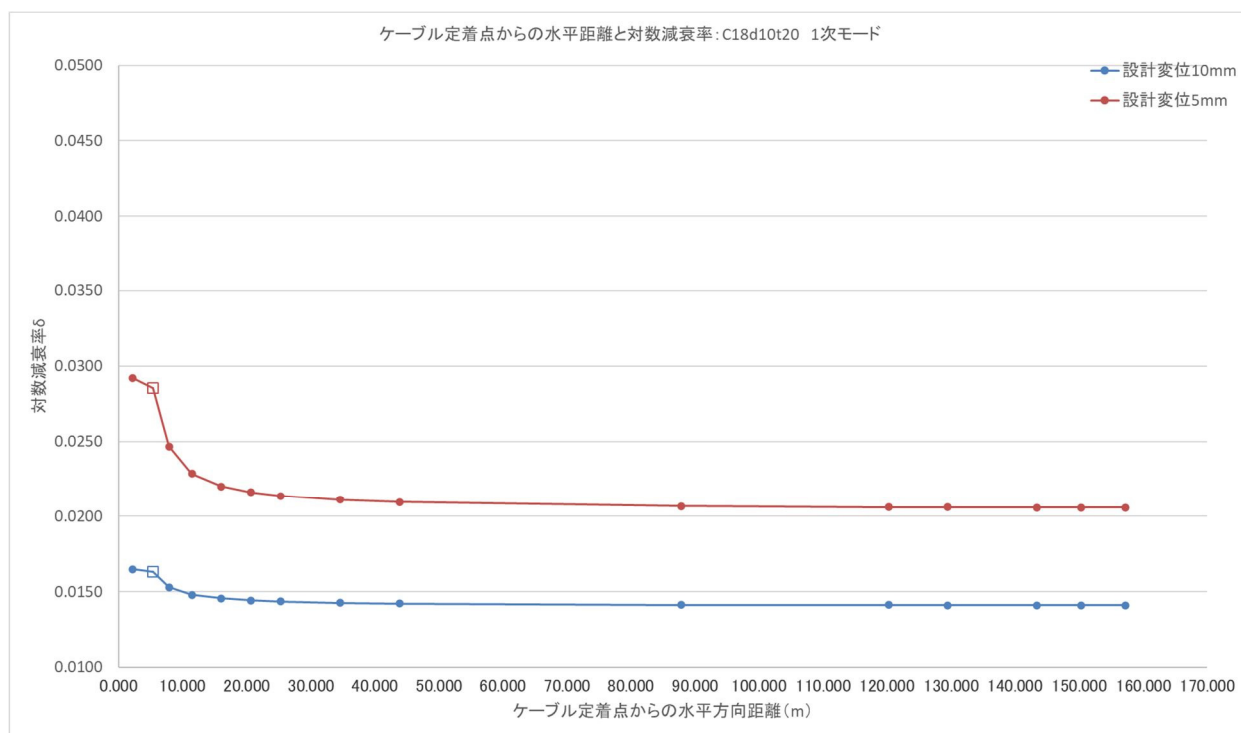


図 6-18 C18 20°C 1次モード ケーブル軸方向対数減衰率分布

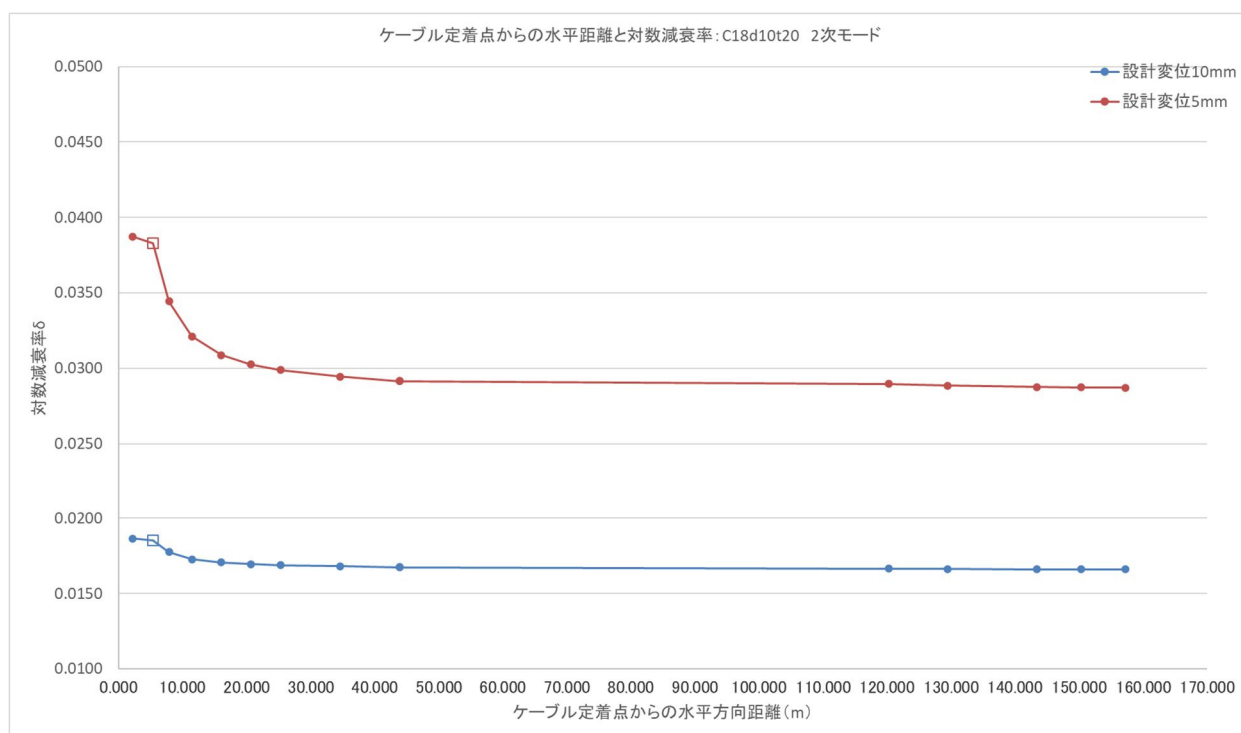


図 6-19 C18 20°C 2次モード ケーブル軸方向対数減衰率分布

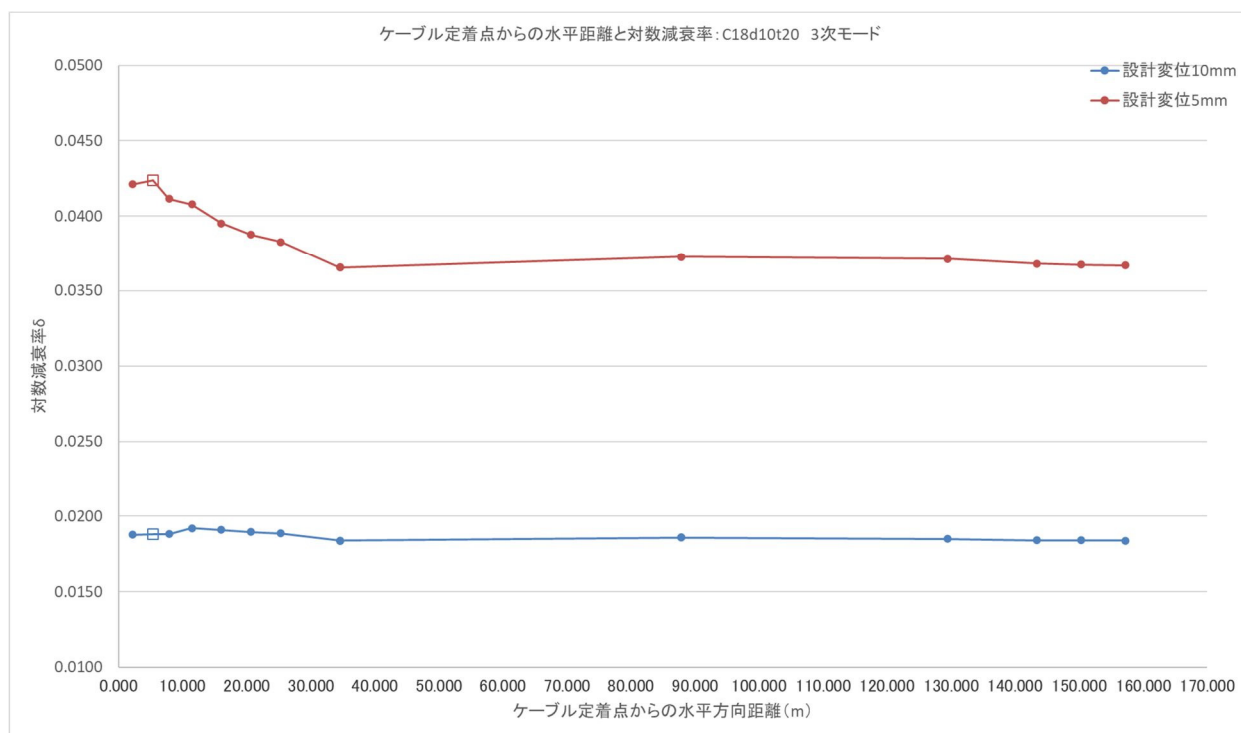


図 6-20 C18 20°C 3 次モード ケーブル軸方向対数減衰率分布

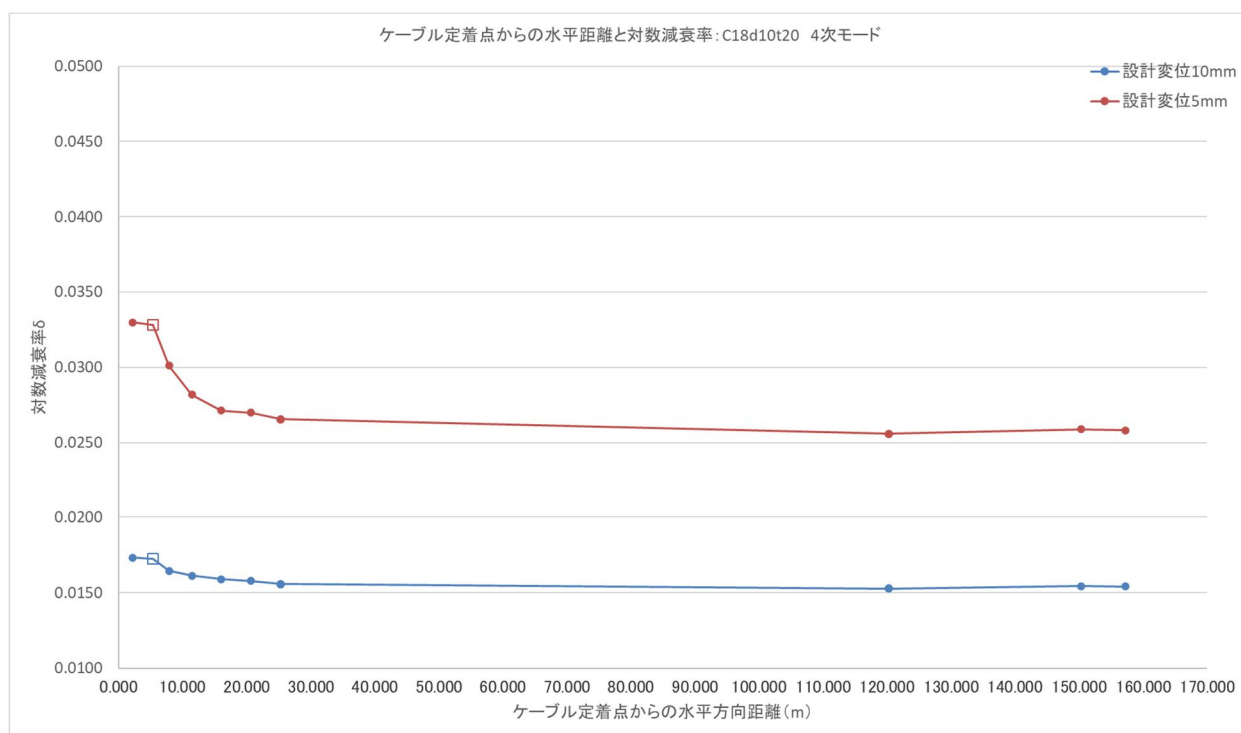


図 6-21 C18 20°C 4 次モード ケーブル軸方向対数減衰率分布



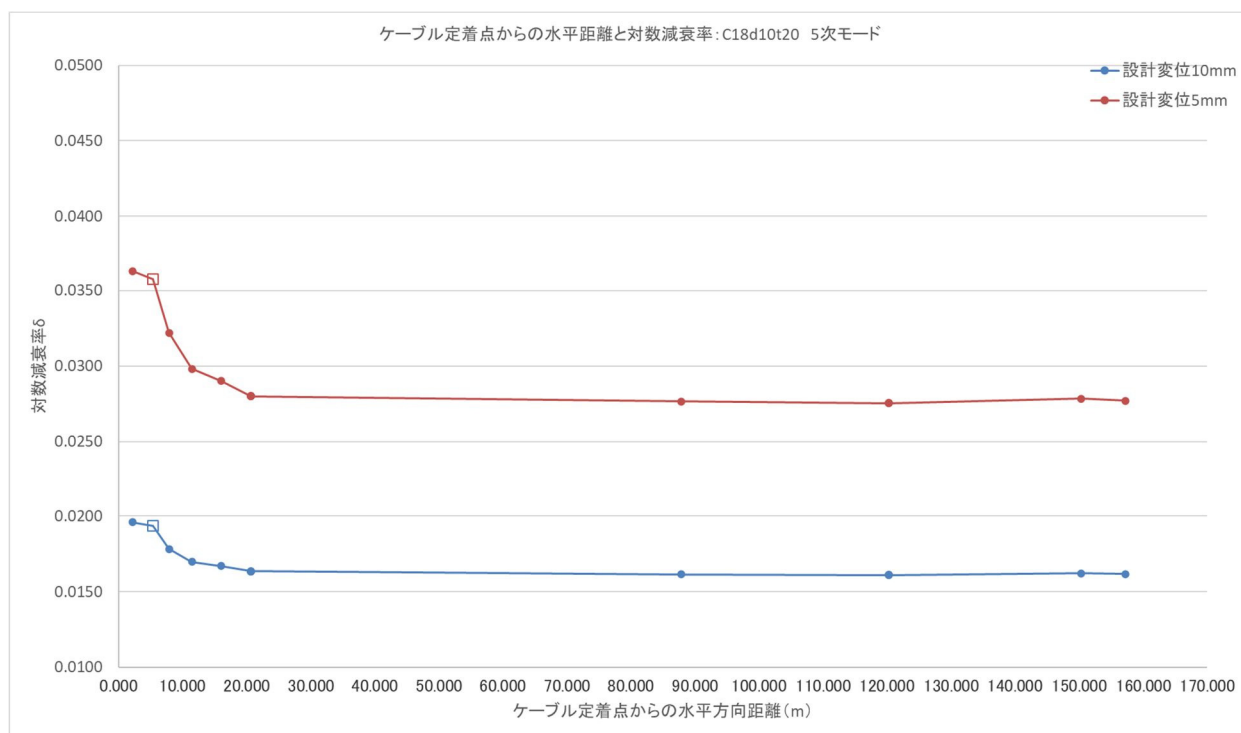


図 6-22 C18 20°C 5 次モード ケーブル軸方向対数減衰率分布

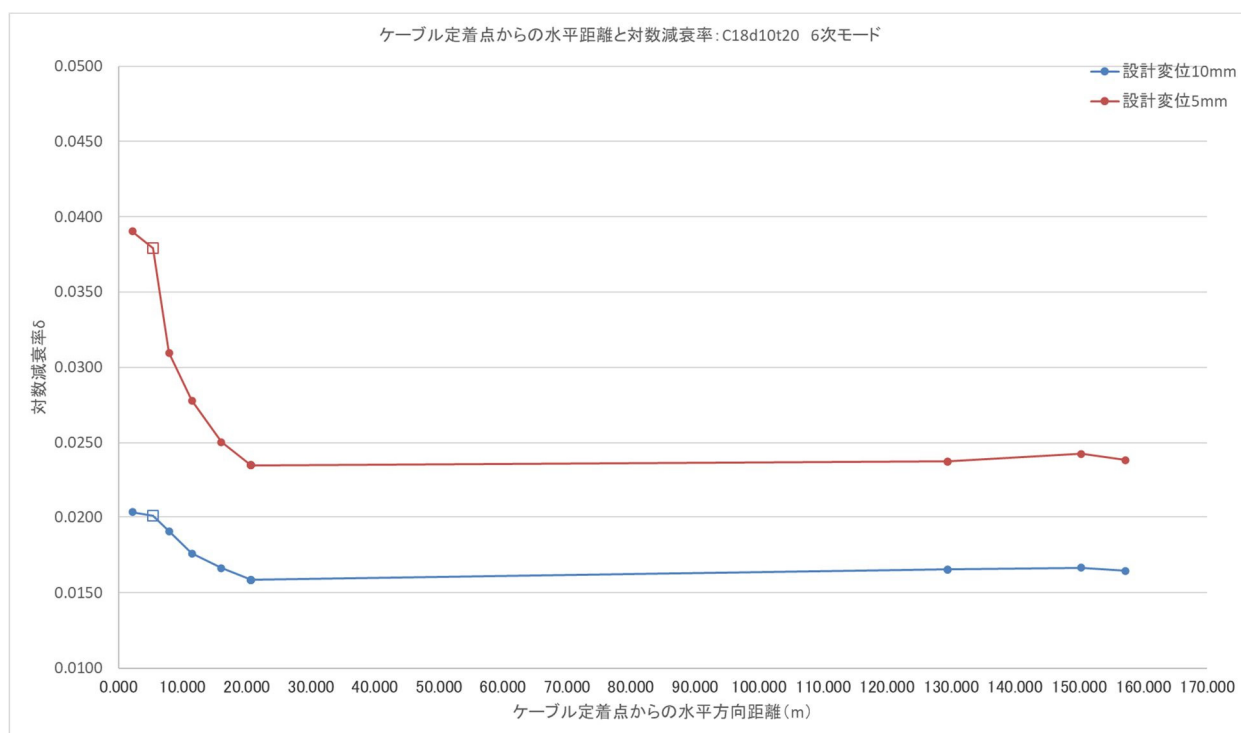


図 6-23 C18 20°C 6 次モード ケーブル軸方向対数減衰率分布

以上のとおり，ケーブル軸方向の対数減衰率の分布について整理した結果，ダンパー位置に近いほど対数減衰率は大きく，ダンパー位置から離れると対数減衰率は小さくなり，ダンパーからケーブル長の 1/4 程度離れると，概ね一様な値となる．1 次モードを除き，モードによって中間部の節点がプロットされていないものがある．これは振動の節やそれに近く変位が僅かで対数減衰率が正しく算出されないことによる．対数減衰率の算出方法は現地加振試験と基本的には同様である．

これらを踏まえると，付加減衰を評価するにあたっては，振動の節やその近傍ではなく，ダンパー位置から離れた節点とする必要がある．よって，グラフ中最も右側にある節点で評価することとし，C01・C02・C03 では節点 64（主塔側定着点：節点 74），C17・C18 では節点 73（主塔側定着点：節点 83）とする．

なお，この結果から，現地加振試験における計測機器取付位置が得られる対数減衰率に影響する可能性があることに留意する必要があると言える．

## (2) 波形処理

強制加振解析で得られた高減衰ゴムダンパーの変位，

高減衰ゴムダンパーの変位が 1～6 次の各モードで 10mm を超える程度まで加振後に自由減衰振動している状態で付加減衰評価節点の結果となっている．バンドパスフィルター処理後の付加減衰評価節点変位から正のピーク値を抽出したグラフを図 6-24，ピーク値を 5 サイクルずつで対数減衰率を計算したグラフを図 6-25 に示す．

対数減衰率は時間とともに変化するため，自由減衰振動が始まったのち，ダンパー変位 10mm となる前後 5 データの平均値，およびダンパー変位が 5mm となる前後 5 データの平均値，をそれぞれ設計変位 10mm および 5mm の付加減衰としている．これは，高減衰ゴムダンパーの履歴減衰をバイリニア型の非線形ばねとしてモデル化しており，時々刻々ばね値が変化するためである．

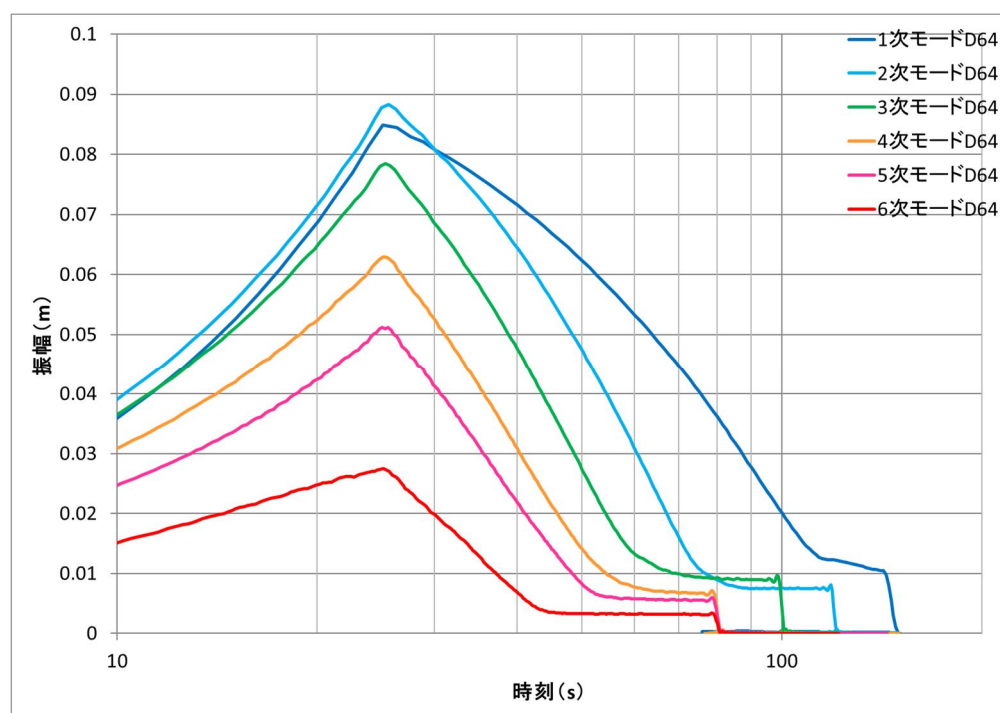


図 6-24 C01 20℃ 1～6 次モード自由減衰波形ピーク値ピックアップ

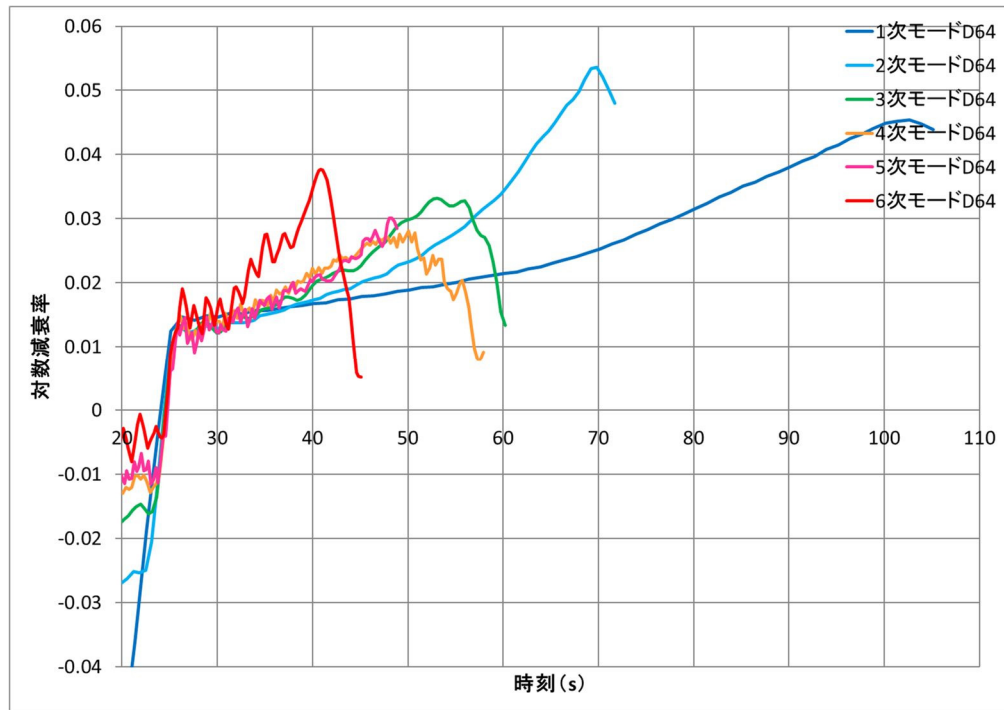


図 6-25 C01 20℃ 1～6 次モード 対数減衰率時刻歴

### 6.3.2. 付加減衰計算結果

他のケースについても同様に整理を行い，図表化した結果を次ページ以降の表 6-4～表 6-8，図 6-26～図 6-30 に示す．これらを複素固有値解析の基本ケースで除した比率で表したものを表 6-9～表 6-13，図 6-31～図 6-35 に示す．また，に強制加振解析結果を追加プロットしたものを図 6-36～図 6-40 に示す．これらから次のことがわかる．

- ・ 全てのケースで設計変位 5mm の強制加振解析結果の対数減衰率は設計変位 10mm より大きく，ケーブルごとに単純平均すると，C01 : 1.65 倍，C02 : 1.73 倍，C03 : 1.72 倍，C17 : 1.55 倍，C18 : 1.67 倍，で 1.5 倍以上の差がある．
- ・ 設計変位 5mm の強制加振解析結果は設計変位 10mm に比べて複素固有値解析結果に近く，複素固有値解析に対し，ケーブルごとに単純平均すると，C01 : 0.91 倍，C02 : 1.04 倍，C03 : 0.97 倍，C17 : 0.90 倍，C18 : 0.99 倍，となる．ただし，モードや温度によってばらつき，個々の対数減衰率は複素固有値解析と合わない．
- ・ 設計変位 10mm の強制加振解析結果は複素固有値解析結果に比べて小さくその差は大きく，複素固有値解析に対し，ケーブルごとに全モード全温度で単純平均すると，C01 : 0.60 倍，C02 : 0.69 倍，C03 : 0.63 倍，C17 : 0.58 倍，C18 : 0.59 倍，となり概ね 0.6 倍程度である．ただし，モードや温度でのばらつきが大きい．
- ・ 高減衰ゴムダンパーばねの硬い設計変位 5mm の強制加振解析結果は設計変位 10mm に比べてモードごとのばらつきが大きい．
- ・ 強制加振解析結果は複素固有値解析の基本ケースに対し，最大で 1.35 倍，最小で 0.37 倍となる．
- ・ 強制加振解析結果は無次元パラメータ  $\kappa$  と明確な相関はない．

表 6-4 C01 付加減衰計算結果一覧

| ケーブル   | 設計変位<br>温度    | モード | 対数減衰率  |        |        |        |        |     |
|--------|---------------|-----|--------|--------|--------|--------|--------|-----|
|        |               |     | 複素固有値  |        | 推定式    | 強制加振   | 現地加振   |     |
|        |               |     | 基本     | 傾斜サグ曲げ |        | 傾斜サグ曲げ | 実測1    | 実測2 |
| C01d05 | ■ C0100d05t00 | 1   | 0.0272 | 0.0302 | 0.0161 | 0.0237 |        |     |
|        |               | 2   | 0.0273 | 0.0312 | 0.0159 | 0.0341 |        |     |
|        |               | 3   | 0.0274 | 0.0313 | 0.0156 | 0.0237 |        |     |
|        |               | 4   | 0.0276 | 0.0316 | 0.0152 | 0.0210 |        |     |
|        |               | 5   | 0.0278 | 0.0319 | 0.0147 | 0.0191 |        |     |
|        |               | 6   | 0.0281 | 0.0324 | 0.0142 | 0.0225 |        |     |
|        | ■ C0100d05t20 | 1   | 0.0287 | 0.0282 | 0.0263 | 0.0333 | 0.0268 |     |
|        |               | 2   | 0.0287 | 0.0291 | 0.0260 | 0.0377 | 0.0240 |     |
|        |               | 3   | 0.0289 | 0.0292 | 0.0255 | 0.0278 | 0.0212 |     |
|        |               | 4   | 0.0291 | 0.0295 | 0.0249 | 0.0232 |        |     |
|        |               | 5   | 0.0293 | 0.0297 | 0.0241 | 0.0209 |        |     |
|        |               | 6   | 0.0297 | 0.0300 | 0.0232 | 0.0257 |        |     |
|        | ■ C0100d05t40 | 1   | 0.0303 | 0.0275 | 0.0326 | 0.0347 |        |     |
|        |               | 2   | 0.0303 | 0.0284 | 0.0322 | 0.0350 |        |     |
|        |               | 3   | 0.0305 | 0.0284 | 0.0316 | 0.0278 |        |     |
|        |               | 4   | 0.0306 | 0.0286 | 0.0308 | 0.0252 |        |     |
|        |               | 5   | 0.0308 | 0.0287 | 0.0299 | 0.0236 |        |     |
|        |               | 6   | 0.0311 | 0.0289 | 0.0287 | 0.0264 |        |     |
| C01d10 | ■ C0100d10t00 | 1   | 0.0336 | 0.0330 | 0.0340 | 0.0156 |        |     |
|        |               | 2   | 0.0337 | 0.0340 | 0.0337 | 0.0185 |        |     |
|        |               | 3   | 0.0338 | 0.0341 | 0.0331 | 0.0147 |        |     |
|        |               | 4   | 0.0341 | 0.0344 | 0.0323 | 0.0135 |        |     |
|        |               | 5   | 0.0344 | 0.0347 | 0.0312 | 0.0124 |        |     |
|        |               | 6   | 0.0348 | 0.0351 | 0.0300 | 0.0148 |        |     |
|        | ■ C0100d10t20 | 1   | 0.0299 | 0.0259 | 0.0336 | 0.0184 |        |     |
|        |               | 2   | 0.0300 | 0.0267 | 0.0332 | 0.0197 |        |     |
|        |               | 3   | 0.0301 | 0.0267 | 0.0327 | 0.0167 |        |     |
|        |               | 4   | 0.0302 | 0.0268 | 0.0318 | 0.0159 |        |     |
|        |               | 5   | 0.0304 | 0.0268 | 0.0308 | 0.0153 |        |     |
|        |               | 6   | 0.0306 | 0.0269 | 0.0296 | 0.0156 |        |     |
|        | ■ C0100d10t40 | 1   | 0.0285 | 0.0229 | 0.0329 | 0.0178 |        |     |
|        |               | 2   | 0.0286 | 0.0236 | 0.0325 | 0.0179 |        |     |
|        |               | 3   | 0.0286 | 0.0235 | 0.0320 | 0.0161 |        |     |
|        |               | 4   | 0.0286 | 0.0235 | 0.0312 | 0.0158 |        |     |
|        |               | 5   | 0.0286 | 0.0234 | 0.0302 | 0.0152 |        |     |
|        |               | 6   | 0.0287 | 0.0234 | 0.0290 | 0.0183 |        |     |

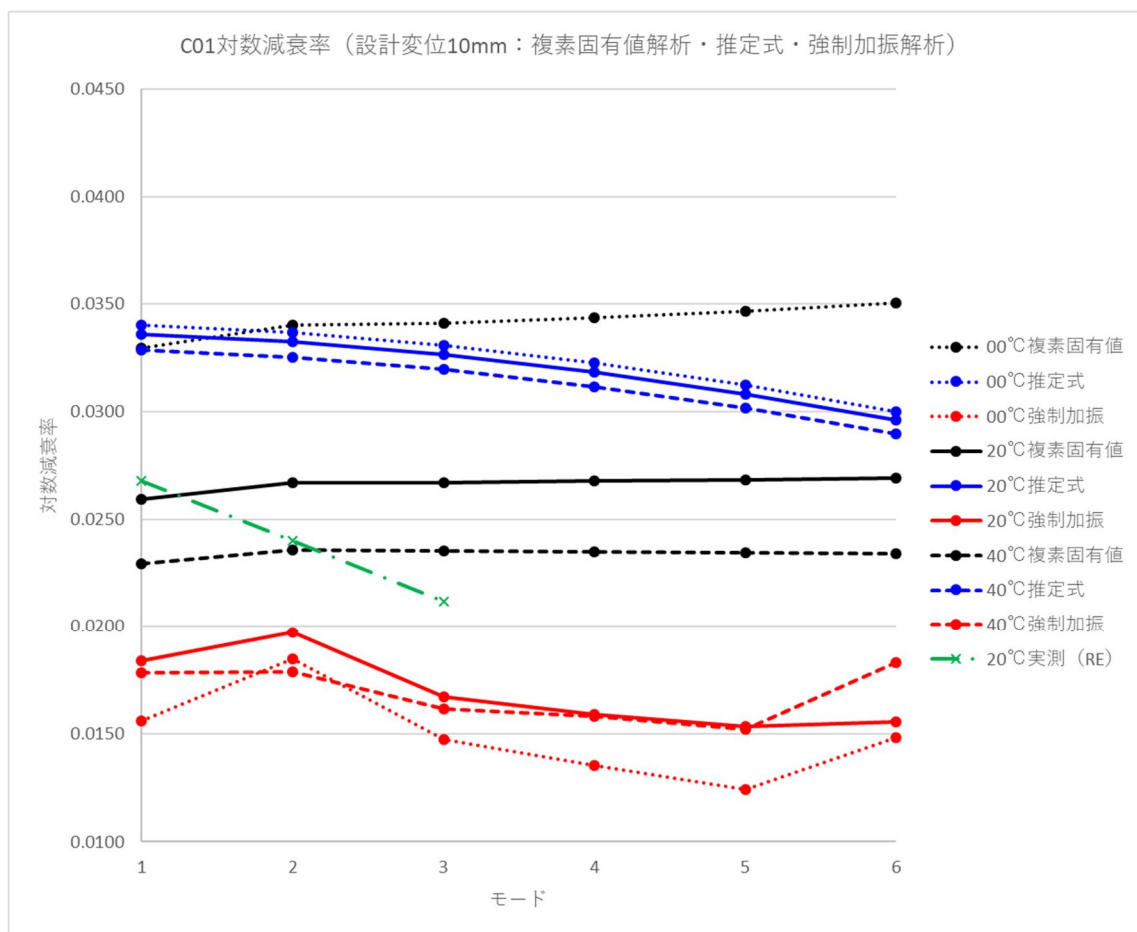
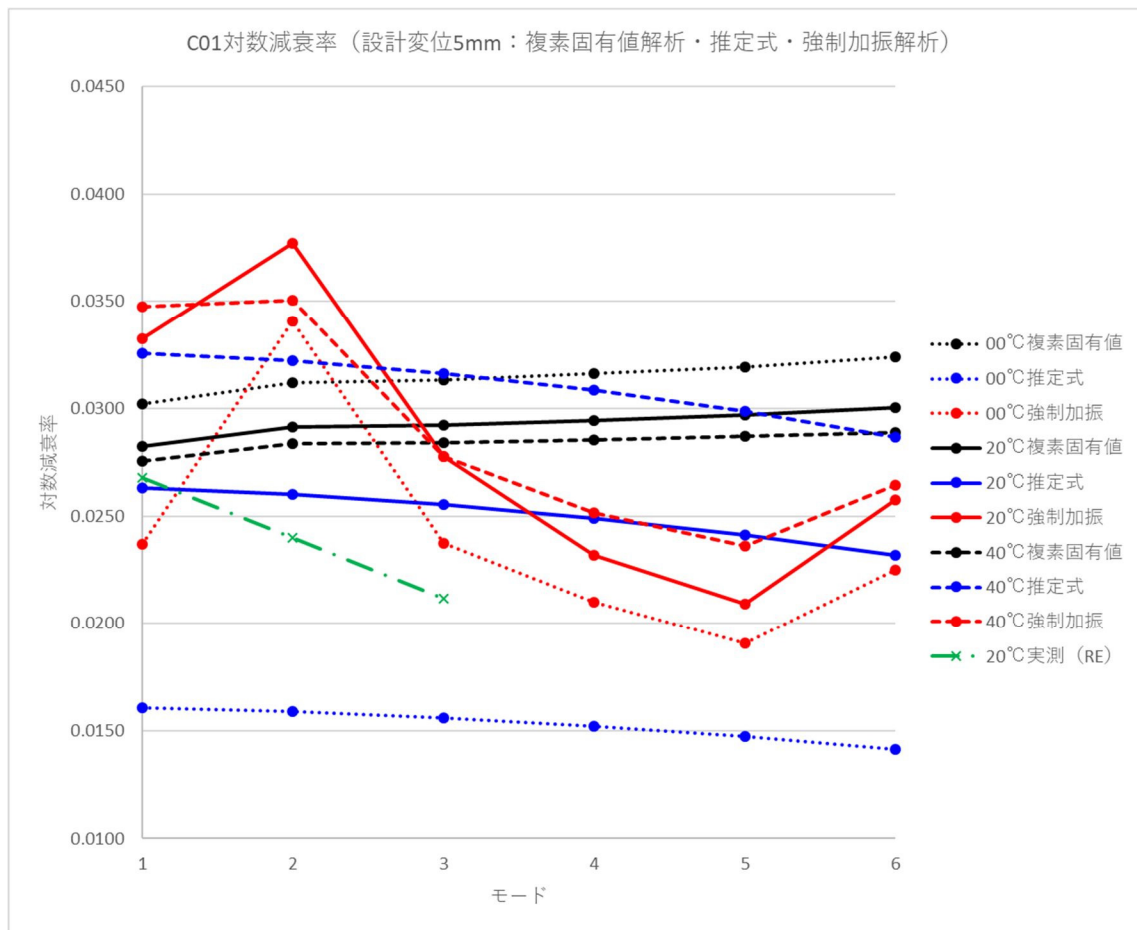


図 6-26 C01 付加減衰計算結果（上；設計変位 5mm，下；設計変位 10mm）

表 6-5 C02 付加減衰計算結果一覧

| ケーブル   | 設計変位<br>温度    | モード | 対数減衰率  |        |        |        |        |     |
|--------|---------------|-----|--------|--------|--------|--------|--------|-----|
|        |               |     | 複素固有値  |        | 推定式    | 強制加振   | 現地加振   |     |
|        |               |     | 基本     | 傾斜サグ曲げ |        | 傾斜サグ曲げ | 実測1    | 実測2 |
| C02d05 | ■ C0200d05t00 | 1   | 0.0301 | 0.0329 | 0.0212 |        |        |     |
|        |               | 2   | 0.0302 | 0.0337 | 0.0210 |        |        |     |
|        |               | 3   | 0.0304 | 0.0338 | 0.0206 |        |        |     |
|        |               | 4   | 0.0306 | 0.0342 | 0.0200 |        |        |     |
|        |               | 5   | 0.0309 | 0.0346 | 0.0193 |        |        |     |
|        |               | 6   | 0.0313 | 0.0351 | 0.0185 |        |        |     |
|        | ■ C0200d05t20 | 1   | 0.0307 | 0.0297 | 0.0303 | 0.0435 | 0.0354 |     |
|        |               | 2   | 0.0308 | 0.0303 | 0.0300 | 0.0331 | 0.0298 |     |
|        |               | 3   | 0.0309 | 0.0304 | 0.0294 | 0.0279 | 0.0263 |     |
|        |               | 4   | 0.0311 | 0.0306 | 0.0286 | 0.0285 |        |     |
|        |               | 5   | 0.0314 | 0.0309 | 0.0276 | 0.0247 |        |     |
|        |               | 6   | 0.0318 | 0.0312 | 0.0264 | 0.0326 |        |     |
|        | ■ C0200d05t40 | 1   | 0.0317 | 0.0283 | 0.0351 |        |        |     |
|        |               | 2   | 0.0317 | 0.0288 | 0.0347 |        |        |     |
|        |               | 3   | 0.0318 | 0.0289 | 0.0341 |        |        |     |
|        |               | 4   | 0.0320 | 0.0290 | 0.0331 |        |        |     |
|        |               | 5   | 0.0323 | 0.0291 | 0.0320 |        |        |     |
|        |               | 6   | 0.0326 | 0.0292 | 0.0306 |        |        |     |
| C02d10 | ■ C0200d10t00 | 1   | 0.0359 | 0.0346 | 0.0385 |        |        |     |
|        |               | 2   | 0.0360 | 0.0353 | 0.0381 |        |        |     |
|        |               | 3   | 0.0362 | 0.0354 | 0.0374 |        |        |     |
|        |               | 4   | 0.0365 | 0.0357 | 0.0363 |        |        |     |
|        |               | 5   | 0.0368 | 0.0360 | 0.0351 |        |        |     |
|        |               | 6   | 0.0373 | 0.0364 | 0.0336 |        |        |     |
|        | ■ C0200d10t20 | 1   | 0.0309 | 0.0263 | 0.0352 | 0.0203 |        |     |
|        |               | 2   | 0.0309 | 0.0268 | 0.0348 | 0.0195 |        |     |
|        |               | 3   | 0.0310 | 0.0267 | 0.0341 | 0.0162 |        |     |
|        |               | 4   | 0.0311 | 0.0268 | 0.0332 | 0.0201 |        |     |
|        |               | 5   | 0.0312 | 0.0268 | 0.0320 | 0.0165 |        |     |
|        |               | 6   | 0.0314 | 0.0268 | 0.0307 | 0.0171 |        |     |
|        | ■ C0200d10t40 | 1   | 0.0288 | 0.0228 | 0.0331 |        |        |     |
|        |               | 2   | 0.0288 | 0.0232 | 0.0328 |        |        |     |
|        |               | 3   | 0.0288 | 0.0231 | 0.0321 |        |        |     |
|        |               | 4   | 0.0287 | 0.0230 | 0.0313 |        |        |     |
|        |               | 5   | 0.0287 | 0.0229 | 0.0302 |        |        |     |
|        |               | 6   | 0.0287 | 0.0228 | 0.0289 |        |        |     |

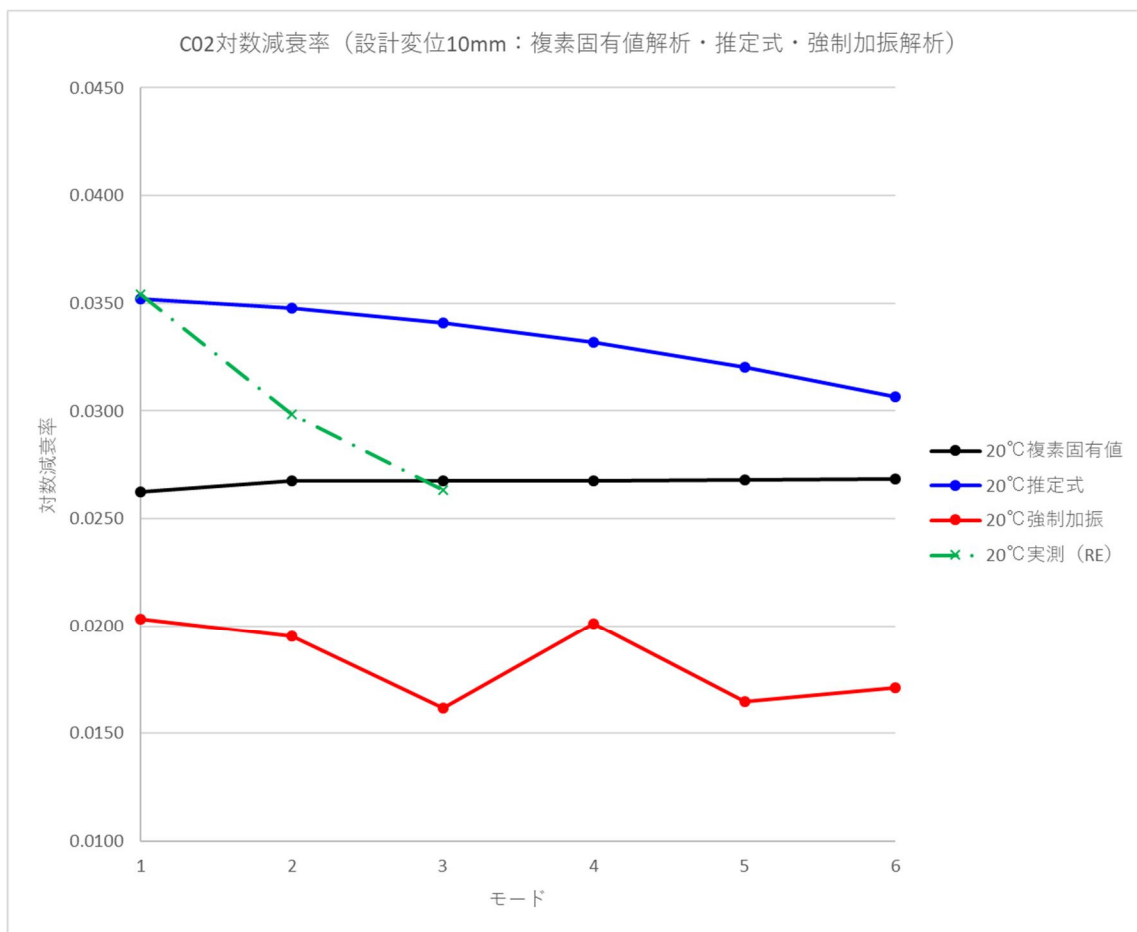
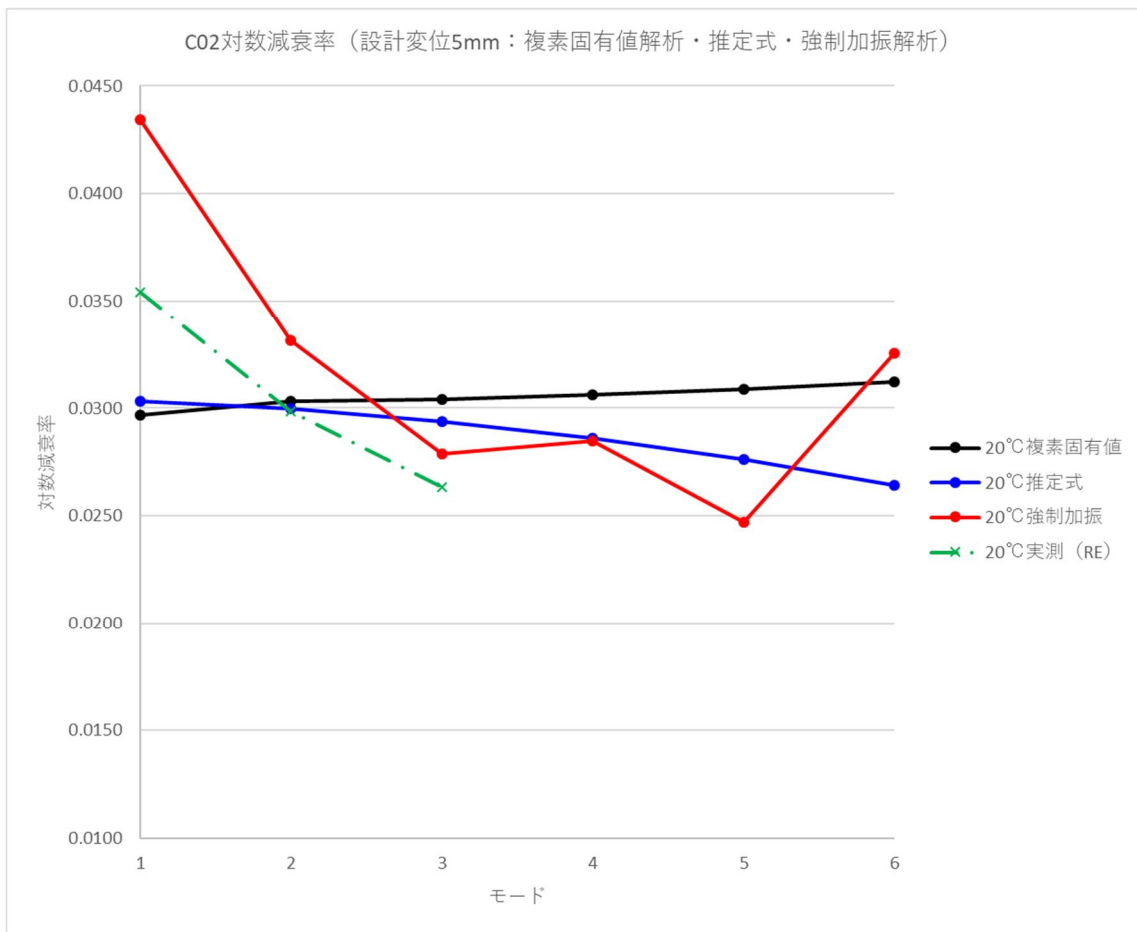


図 6-27 C02 付加減衰計算結果（上；設計変位 5mm，下；設計変位 10mm）

表 6-6 C03 付加減衰計算結果一覧

| ケーブル   | 設計変位<br>温度    | モード | 対数減衰率  |        |        |        |      |     |
|--------|---------------|-----|--------|--------|--------|--------|------|-----|
|        |               |     | 複素固有値  |        | 推定式    | 強制加振   | 現地加振 |     |
|        |               |     | 基本     | 傾斜サグ曲げ |        | 傾斜サグ曲げ | 実測1  | 実測2 |
| C03d05 | ■ C0300d05t00 | 1   | 0.0303 | 0.0339 | 0.0193 |        |      |     |
|        |               | 2   | 0.0304 | 0.0345 | 0.0191 |        |      |     |
|        |               | 3   | 0.0306 | 0.0347 | 0.0187 |        |      |     |
|        |               | 4   | 0.0308 | 0.0350 | 0.0181 |        |      |     |
|        |               | 5   | 0.0312 | 0.0355 | 0.0174 |        |      |     |
|        |               | 6   | 0.0316 | 0.0361 | 0.0166 |        |      |     |
|        | ■ C0300d05t20 | 1   | 0.0315 | 0.0312 | 0.0299 | 0.0390 |      |     |
|        |               | 2   | 0.0316 | 0.0318 | 0.0295 | 0.0360 |      |     |
|        |               | 3   | 0.0318 | 0.0319 | 0.0289 | 0.0330 |      |     |
|        |               | 4   | 0.0321 | 0.0322 | 0.0280 | 0.0246 |      |     |
|        |               | 5   | 0.0324 | 0.0325 | 0.0270 | 0.0254 |      |     |
|        |               | 6   | 0.0329 | 0.0329 | 0.0257 | 0.0287 |      |     |
|        | ■ C0300d05t40 | 1   | 0.0330 | 0.0302 | 0.0360 |        |      |     |
|        |               | 2   | 0.0331 | 0.0307 | 0.0356 |        |      |     |
|        |               | 3   | 0.0332 | 0.0307 | 0.0348 |        |      |     |
|        |               | 4   | 0.0335 | 0.0309 | 0.0338 |        |      |     |
|        |               | 5   | 0.0338 | 0.0310 | 0.0325 |        |      |     |
|        |               | 6   | 0.0342 | 0.0313 | 0.0310 |        |      |     |
| C03d10 | ■ C0300d10t00 | 1   | 0.0369 | 0.0364 | 0.0384 |        |      |     |
|        |               | 2   | 0.0371 | 0.0371 | 0.0379 |        |      |     |
|        |               | 3   | 0.0373 | 0.0372 | 0.0371 |        |      |     |
|        |               | 4   | 0.0376 | 0.0375 | 0.0360 |        |      |     |
|        |               | 5   | 0.0380 | 0.0379 | 0.0347 |        |      |     |
|        |               | 6   | 0.0386 | 0.0384 | 0.0331 |        |      |     |
|        | ■ C0300d10t20 | 1   | 0.0325 | 0.0283 | 0.0367 | 0.0208 |      |     |
|        |               | 2   | 0.0325 | 0.0287 | 0.0362 | 0.0182 |      |     |
|        |               | 3   | 0.0326 | 0.0287 | 0.0355 | 0.0197 |      |     |
|        |               | 4   | 0.0328 | 0.0288 | 0.0344 | 0.0168 |      |     |
|        |               | 5   | 0.0330 | 0.0288 | 0.0331 | 0.0152 |      |     |
|        |               | 6   | 0.0333 | 0.0289 | 0.0316 | 0.0176 |      |     |
|        | ■ C0300d10t40 | 1   | 0.0307 | 0.0248 | 0.0354 |        |      |     |
|        |               | 2   | 0.0307 | 0.0251 | 0.0349 |        |      |     |
|        |               | 3   | 0.0307 | 0.0251 | 0.0342 |        |      |     |
|        |               | 4   | 0.0307 | 0.0250 | 0.0332 |        |      |     |
|        |               | 5   | 0.0308 | 0.0249 | 0.0319 |        |      |     |
|        |               | 6   | 0.0308 | 0.0248 | 0.0304 |        |      |     |



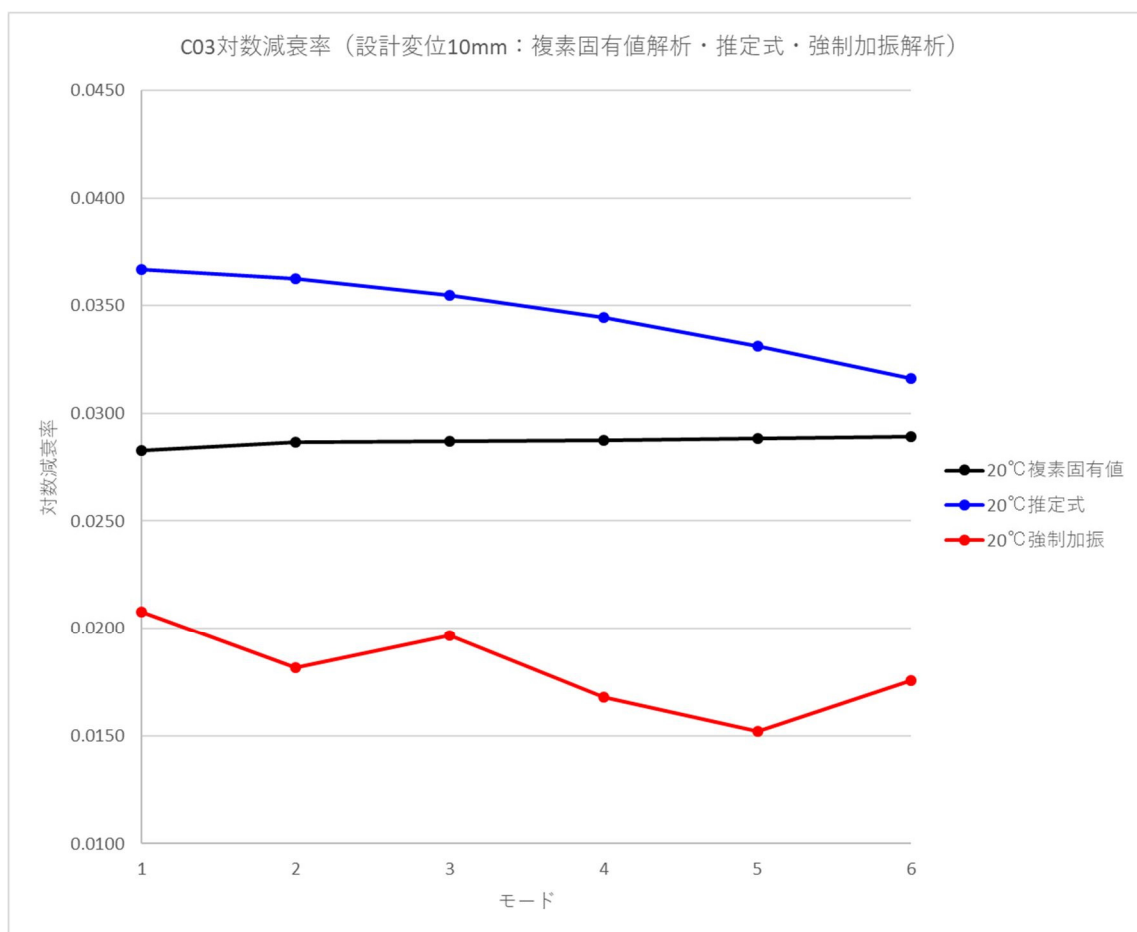
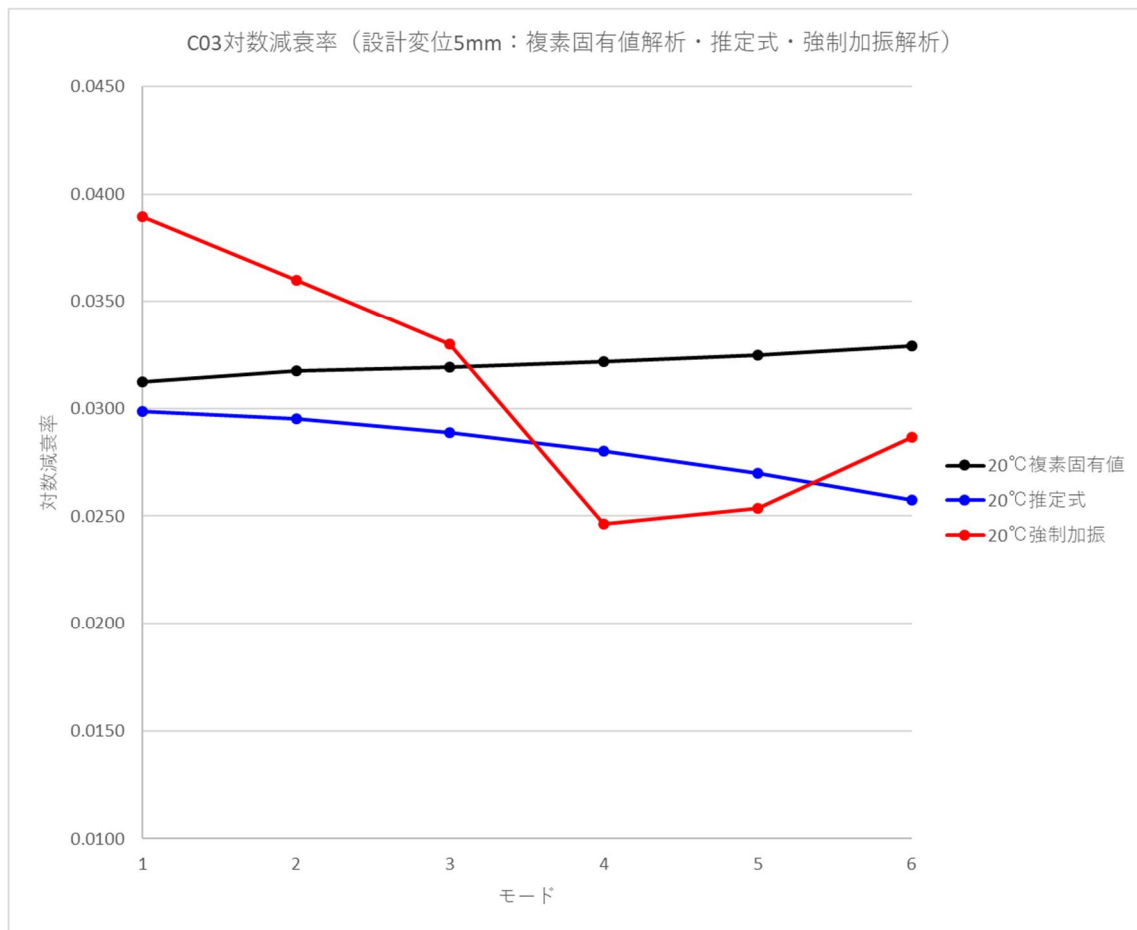


図 6-28 C03 付加減衰計算結果（上；設計変位 5mm，下；設計変位 10mm）

表 6-7 C17 付加減衰計算結果一覧

| ケーブル   | 設計変位<br>温度    | モード | 対数減衰率  |        |        |        |        |        |
|--------|---------------|-----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|        |               |     | 複素固有値  |        | 推定式    | 強制加振   | 現地加振   |        |
|        |               |     | 基本     | 傾斜サグ曲げ |        | 傾斜サグ曲げ | 実測1    | 実測2    |
| C17d05 | ■ C1700d05t00 | 1   | 0.0260 | 0.0268 | 0.0129 |        |        |        |
|        |               | 2   | 0.0260 | 0.0284 | 0.0128 |        |        |        |
|        |               | 3   | 0.0261 | 0.0285 | 0.0125 |        |        |        |
|        |               | 4   | 0.0263 | 0.0287 | 0.0122 |        |        |        |
|        |               | 5   | 0.0265 | 0.0290 | 0.0118 |        |        |        |
|        |               | 6   | 0.0268 | 0.0294 | 0.0113 |        |        |        |
|        | ■ C1700d05t20 | 1   | 0.0280 | 0.0272 | 0.0239 | 0.0229 | 0.0178 | 0.0267 |
|        |               | 2   | 0.0281 | 0.0288 | 0.0236 | 0.0250 | 0.0238 | 0.0336 |
|        |               | 3   | 0.0283 | 0.0289 | 0.0232 | 0.0283 | 0.0301 | 0.0204 |
|        |               | 4   | 0.0285 | 0.0291 | 0.0226 | 0.0298 |        |        |
|        |               | 5   | 0.0287 | 0.0294 | 0.0219 | 0.0269 |        |        |
|        |               | 6   | 0.0291 | 0.0299 | 0.0210 | 0.0224 |        |        |
|        | ■ C1700d05t40 | 1   | 0.0302 | 0.0279 | 0.0313 |        |        |        |
|        |               | 2   | 0.0302 | 0.0296 | 0.0310 |        |        |        |
|        |               | 3   | 0.0304 | 0.0297 | 0.0304 |        |        |        |
|        |               | 4   | 0.0306 | 0.0299 | 0.0297 |        |        |        |
|        |               | 5   | 0.0308 | 0.0301 | 0.0287 |        |        |        |
|        |               | 6   | 0.0312 | 0.0305 | 0.0276 |        |        |        |
| C17d10 | ■ C1700d10t00 | 1   | 0.0329 | 0.0318 | 0.0314 |        |        |        |
|        |               | 2   | 0.0330 | 0.0337 | 0.0311 |        |        |        |
|        |               | 3   | 0.0331 | 0.0338 | 0.0305 |        |        |        |
|        |               | 4   | 0.0334 | 0.0341 | 0.0297 |        |        |        |
|        |               | 5   | 0.0337 | 0.0345 | 0.0288 |        |        |        |
|        |               | 6   | 0.0342 | 0.0350 | 0.0276 |        |        |        |
|        | ■ C1700d10t20 | 1   | 0.0302 | 0.0272 | 0.0332 | 0.0153 |        |        |
|        |               | 2   | 0.0302 | 0.0288 | 0.0329 | 0.0176 |        |        |
|        |               | 3   | 0.0303 | 0.0288 | 0.0323 | 0.0172 |        |        |
|        |               | 4   | 0.0305 | 0.0290 | 0.0315 | 0.0187 |        |        |
|        |               | 5   | 0.0307 | 0.0292 | 0.0305 | 0.0172 |        |        |
|        |               | 6   | 0.0310 | 0.0294 | 0.0292 | 0.0141 |        |        |
|        | ■ C1700d10t40 | 1   | 0.0293 | 0.0253 | 0.0337 |        |        |        |
|        |               | 2   | 0.0293 | 0.0267 | 0.0333 |        |        |        |
|        |               | 3   | 0.0294 | 0.0267 | 0.0327 |        |        |        |
|        |               | 4   | 0.0295 | 0.0268 | 0.0319 |        |        |        |
|        |               | 5   | 0.0295 | 0.0268 | 0.0309 |        |        |        |
|        |               | 6   | 0.0297 | 0.0269 | 0.0296 |        |        |        |

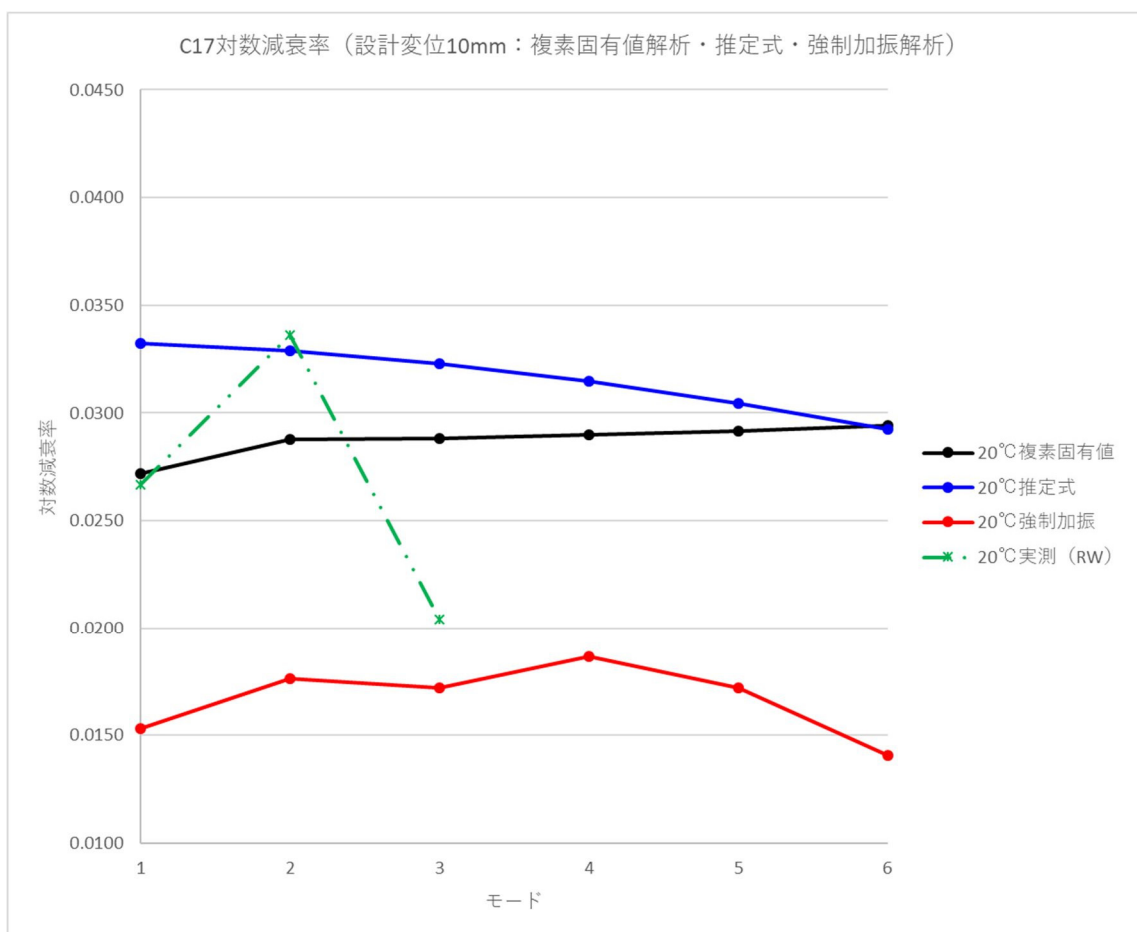
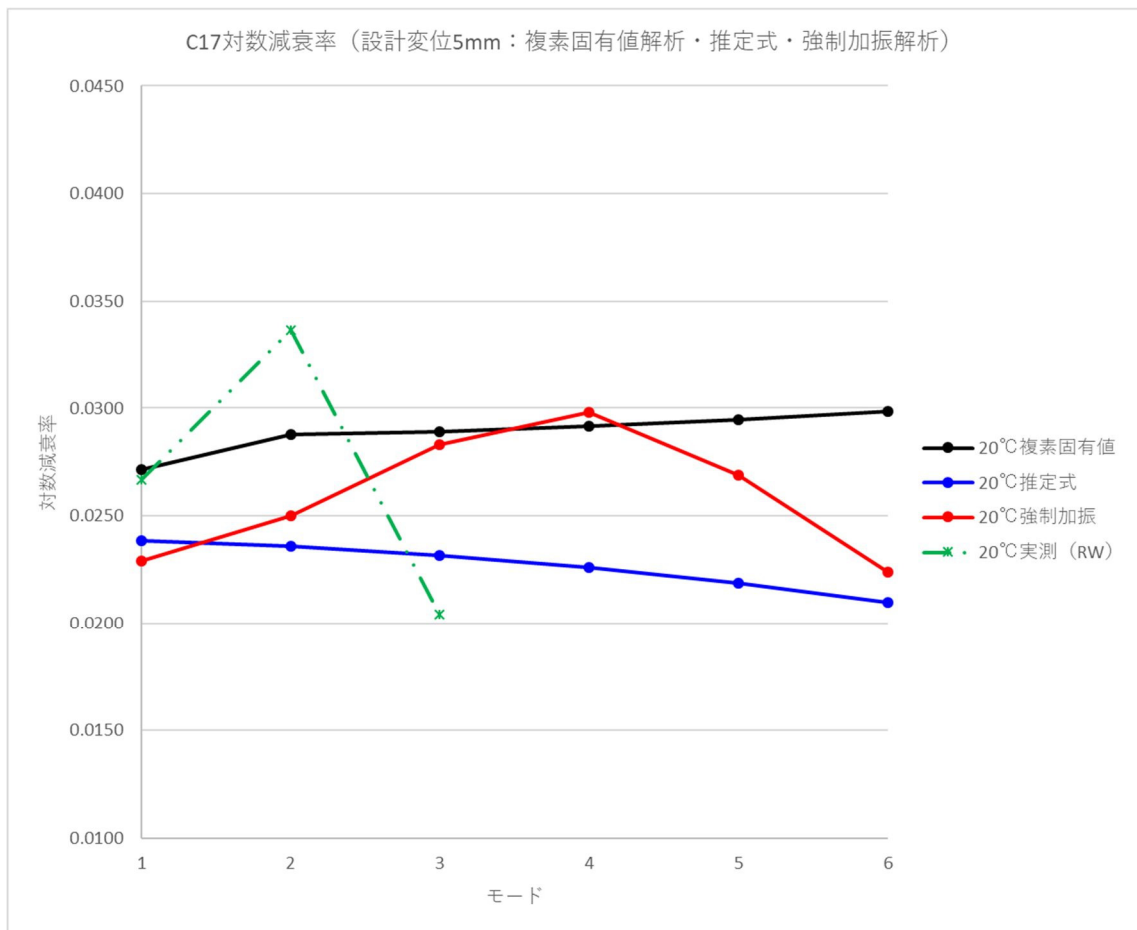


図 6-29 C17 付加減衰計算結果（上；設計変位 5mm，下；設計変位 10mm）

表 6-8 C18 付加減衰計算結果一覧

| ケーブル   | 設計変位<br>温度    | モード | 対数減衰率  |        |        |        |        |        |
|--------|---------------|-----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|        |               |     | 複素固有値  |        | 推定式    | 強制加振   | 現地加振   |        |
|        |               |     | 基本     | 傾斜サグ曲げ |        | 傾斜サグ曲げ | 実測1    | 実測2    |
| C18d05 | ■ C1800d05t00 | 1   | 0.0251 | 0.0253 | 0.0129 | 0.0164 |        |        |
|        |               | 2   | 0.0251 | 0.0272 | 0.0127 | 0.0244 |        |        |
|        |               | 3   | 0.0252 | 0.0273 | 0.0125 | 0.0262 |        |        |
|        |               | 4   | 0.0253 | 0.0275 | 0.0122 | 0.0205 |        |        |
|        |               | 5   | 0.0255 | 0.0278 | 0.0119 | 0.0210 |        |        |
|        |               | 6   | 0.0258 | 0.0281 | 0.0114 | 0.0165 |        |        |
|        | ■ C1800d05t20 | 1   | 0.0269 | 0.0256 | 0.0232 | 0.0206 | 0.0414 | 0.0322 |
|        |               | 2   | 0.0270 | 0.0276 | 0.0230 | 0.0292 | 0.0348 | 0.0350 |
|        |               | 3   | 0.0271 | 0.0276 | 0.0226 | 0.0367 | 0.0284 | 0.0259 |
|        |               | 4   | 0.0273 | 0.0279 | 0.0221 | 0.0260 |        |        |
|        |               | 5   | 0.0275 | 0.0281 | 0.0215 | 0.0277 |        |        |
|        |               | 6   | 0.0278 | 0.0285 | 0.0207 | 0.0238 |        |        |
|        | ■ C1800d05t40 | 1   | 0.0289 | 0.0263 | 0.0302 | 0.0224 |        |        |
|        |               | 2   | 0.0289 | 0.0283 | 0.0299 | 0.0317 |        |        |
|        |               | 3   | 0.0290 | 0.0284 | 0.0294 | 0.0392 |        |        |
|        |               | 4   | 0.0292 | 0.0286 | 0.0287 | 0.0299 |        |        |
|        |               | 5   | 0.0294 | 0.0288 | 0.0279 | 0.0282 |        |        |
|        |               | 6   | 0.0297 | 0.0291 | 0.0269 | 0.0234 |        |        |
| C18d10 | ■ C1800d10t00 | 1   | 0.0316 | 0.0299 | 0.0305 | 0.0117 |        |        |
|        |               | 2   | 0.0316 | 0.0323 | 0.0302 | 0.0150 |        |        |
|        |               | 3   | 0.0318 | 0.0324 | 0.0297 | 0.0156 |        |        |
|        |               | 4   | 0.0320 | 0.0326 | 0.0290 | 0.0134 |        |        |
|        |               | 5   | 0.0323 | 0.0329 | 0.0282 | 0.0159 |        |        |
|        |               | 6   | 0.0326 | 0.0334 | 0.0271 | 0.0125 |        |        |
|        | ■ C1800d10t20 | 1   | 0.0288 | 0.0255 | 0.0319 | 0.0141 |        |        |
|        |               | 2   | 0.0289 | 0.0275 | 0.0315 | 0.0166 |        |        |
|        |               | 3   | 0.0290 | 0.0275 | 0.0310 | 0.0184 |        |        |
|        |               | 4   | 0.0291 | 0.0277 | 0.0303 | 0.0156 |        |        |
|        |               | 5   | 0.0293 | 0.0278 | 0.0294 | 0.0161 |        |        |
|        |               | 6   | 0.0295 | 0.0280 | 0.0283 | 0.0164 |        |        |
|        | ■ C1800d10t40 | 1   | 0.0279 | 0.0237 | 0.0321 | 0.0146 |        |        |
|        |               | 2   | 0.0279 | 0.0255 | 0.0317 | 0.0160 |        |        |
|        |               | 3   | 0.0279 | 0.0255 | 0.0312 | 0.0191 |        |        |
|        |               | 4   | 0.0280 | 0.0255 | 0.0305 | 0.0159 |        |        |
|        |               | 5   | 0.0281 | 0.0256 | 0.0296 | 0.0146 |        |        |
|        |               | 6   | 0.0282 | 0.0256 | 0.0285 | 0.0151 |        |        |

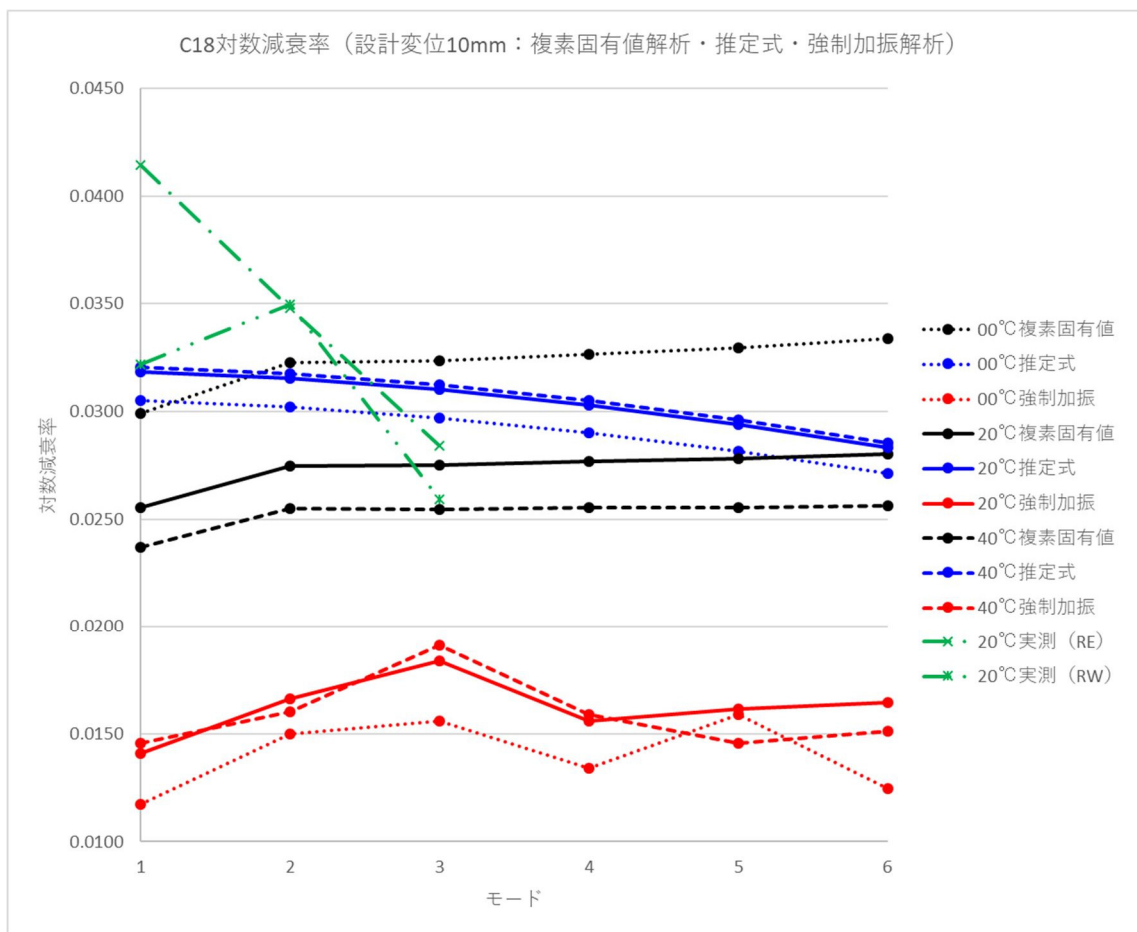
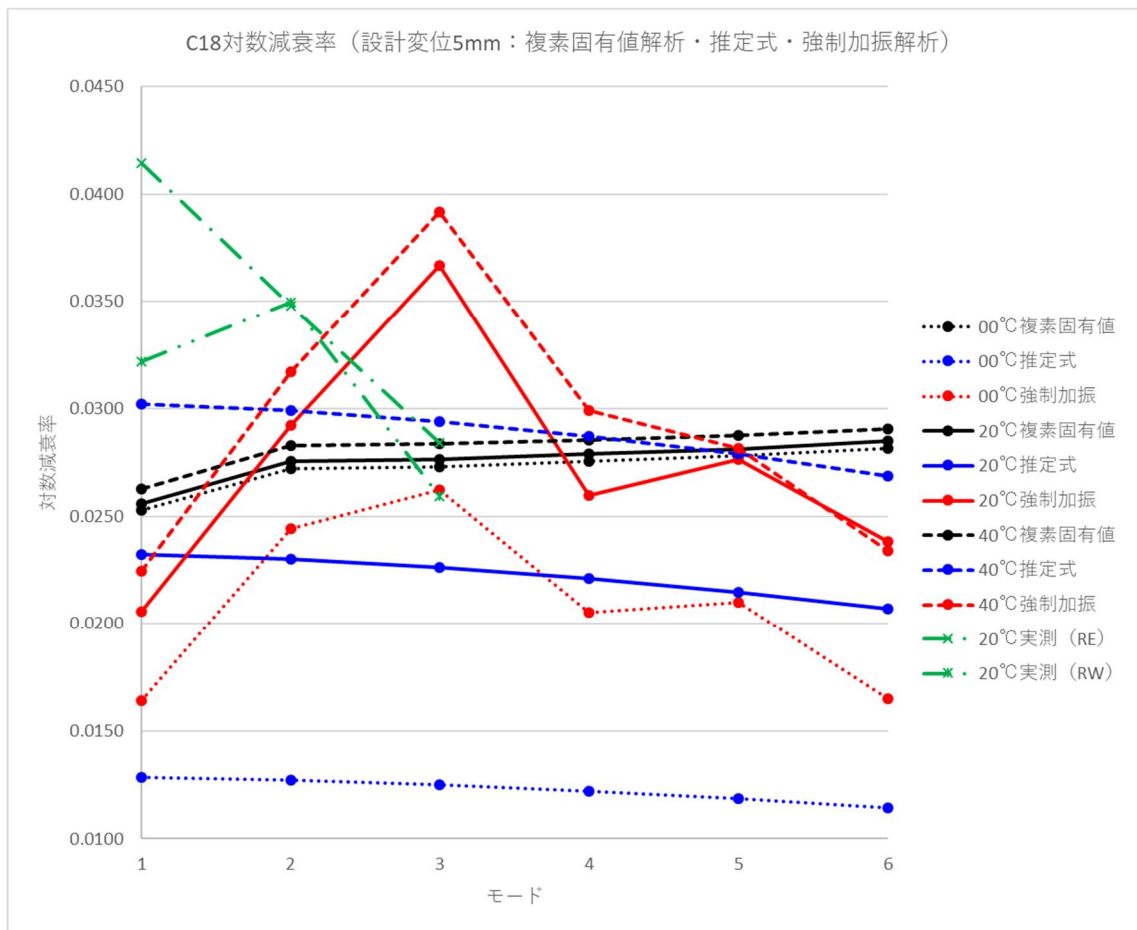


図 6-30 C18 付加減衰計算結果（上；設計変位 5mm，下；設計変位 10mm）

表 6-9 C01 付加減衰計算結果一覧（基本ケースに対する比率）

| ケーブル   | 設計変位<br>温度   | モード | 対数減衰率 比率 |        |        |        |     |
|--------|--------------|-----|----------|--------|--------|--------|-----|
|        |              |     | 複素固有値    | 推定式    | 強制加振   | 現地加振   |     |
|        |              |     | 傾斜サグ曲げ   |        | 傾斜サグ曲げ | 実測1    | 実測2 |
| C01d05 | ■C0100d05t00 | 1   | 1.1098   | 0.5899 | 0.8700 |        |     |
|        |              | 2   | 1.1432   | 0.5824 | 1.2489 |        |     |
|        |              | 3   | 1.1438   | 0.5697 | 0.8665 |        |     |
|        |              | 4   | 1.1470   | 0.5522 | 0.7617 |        |     |
|        |              | 5   | 1.1497   | 0.5303 | 0.6858 |        |     |
|        |              | 6   | 1.1537   | 0.5041 | 0.8017 |        |     |
|        | ■C0100d05t20 | 1   | 0.9853   | 0.9172 | 1.1601 | 0.9350 |     |
|        |              | 2   | 1.0141   | 0.9052 | 1.3119 | 0.8352 |     |
|        |              | 3   | 1.0129   | 0.8850 | 0.9620 | 0.7332 |     |
|        |              | 4   | 1.0136   | 0.8574 | 0.7984 |        |     |
|        |              | 5   | 1.0130   | 0.8225 | 0.7135 |        |     |
|        |              | 6   | 1.0129   | 0.7811 | 0.8682 |        |     |
|        | ■C0100d05t40 | 1   | 0.9095   | 1.0754 | 1.1477 |        |     |
|        |              | 2   | 0.9352   | 1.0617 | 1.1553 |        |     |
|        |              | 3   | 0.9331   | 1.0388 | 0.9114 |        |     |
|        |              | 4   | 0.9325   | 1.0074 | 0.8218 |        |     |
|        |              | 5   | 0.9302   | 0.9679 | 0.7652 |        |     |
|        |              | 6   | 0.9279   | 0.9209 | 0.8484 |        |     |
| C01d10 | ■C0100d10t00 | 1   | 0.9813   | 1.0136 | 0.4643 |        |     |
|        |              | 2   | 1.0100   | 1.0001 | 0.5485 |        |     |
|        |              | 3   | 1.0089   | 0.9778 | 0.4352 |        |     |
|        |              | 4   | 1.0093   | 0.9470 | 0.3977 |        |     |
|        |              | 5   | 1.0085   | 0.9083 | 0.3609 |        |     |
|        |              | 6   | 1.0082   | 0.8624 | 0.4264 |        |     |
|        | ■C0100d10t20 | 1   | 0.8657   | 1.1224 | 0.6134 |        |     |
|        |              | 2   | 0.8902   | 1.1087 | 0.6580 |        |     |
|        |              | 3   | 0.8879   | 1.0861 | 0.5552 |        |     |
|        |              | 4   | 0.8865   | 1.0546 | 0.5260 |        |     |
|        |              | 5   | 0.8837   | 1.0152 | 0.5054 |        |     |
|        |              | 6   | 0.8807   | 0.9682 | 0.5089 |        |     |
|        | ■C0100d10t40 | 1   | 0.8031   | 1.1519 | 0.6239 |        |     |
|        |              | 2   | 0.8255   | 1.1391 | 0.6262 |        |     |
|        |              | 3   | 0.8231   | 1.1184 | 0.5647 |        |     |
|        |              | 4   | 0.8215   | 1.0896 | 0.5531 |        |     |
|        |              | 5   | 0.8185   | 1.0535 | 0.5318 |        |     |
|        |              | 6   | 0.8153   | 1.0104 | 0.6375 |        |     |

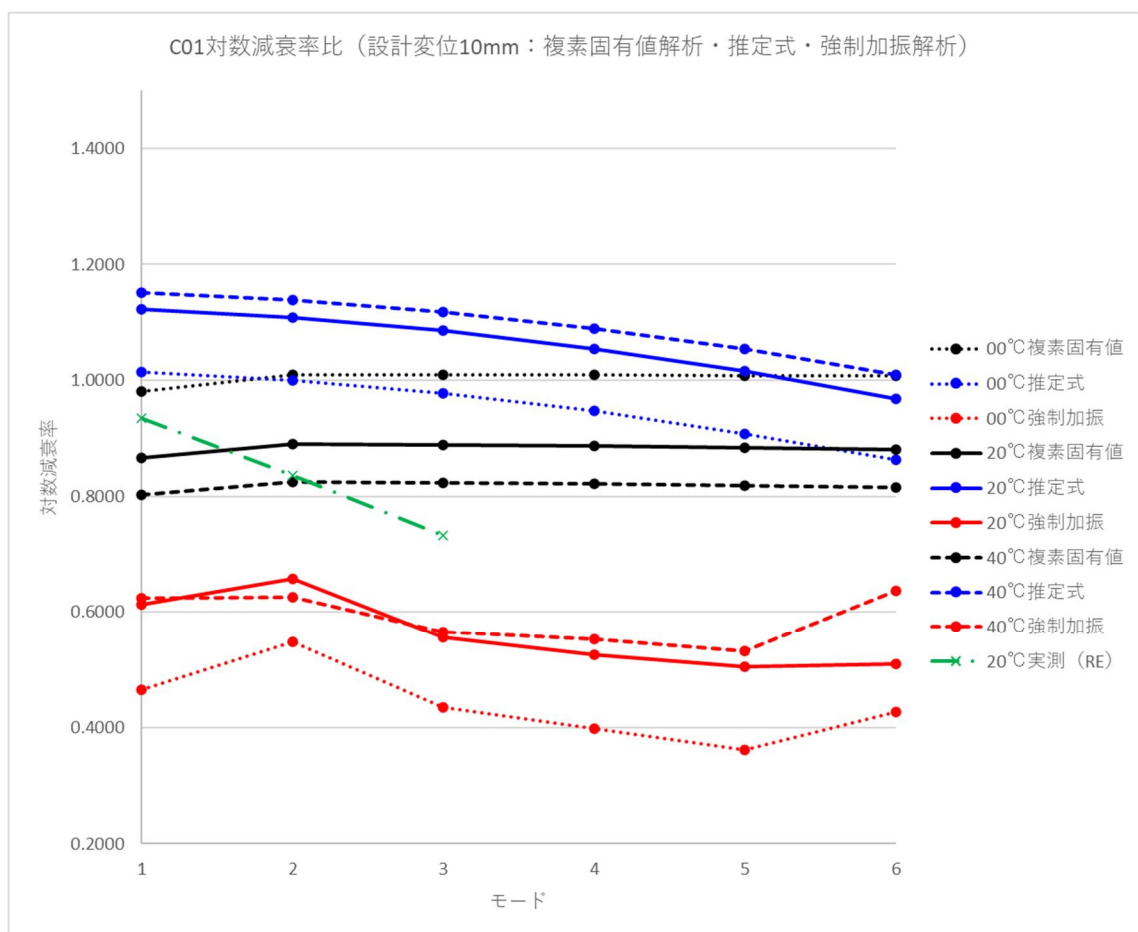
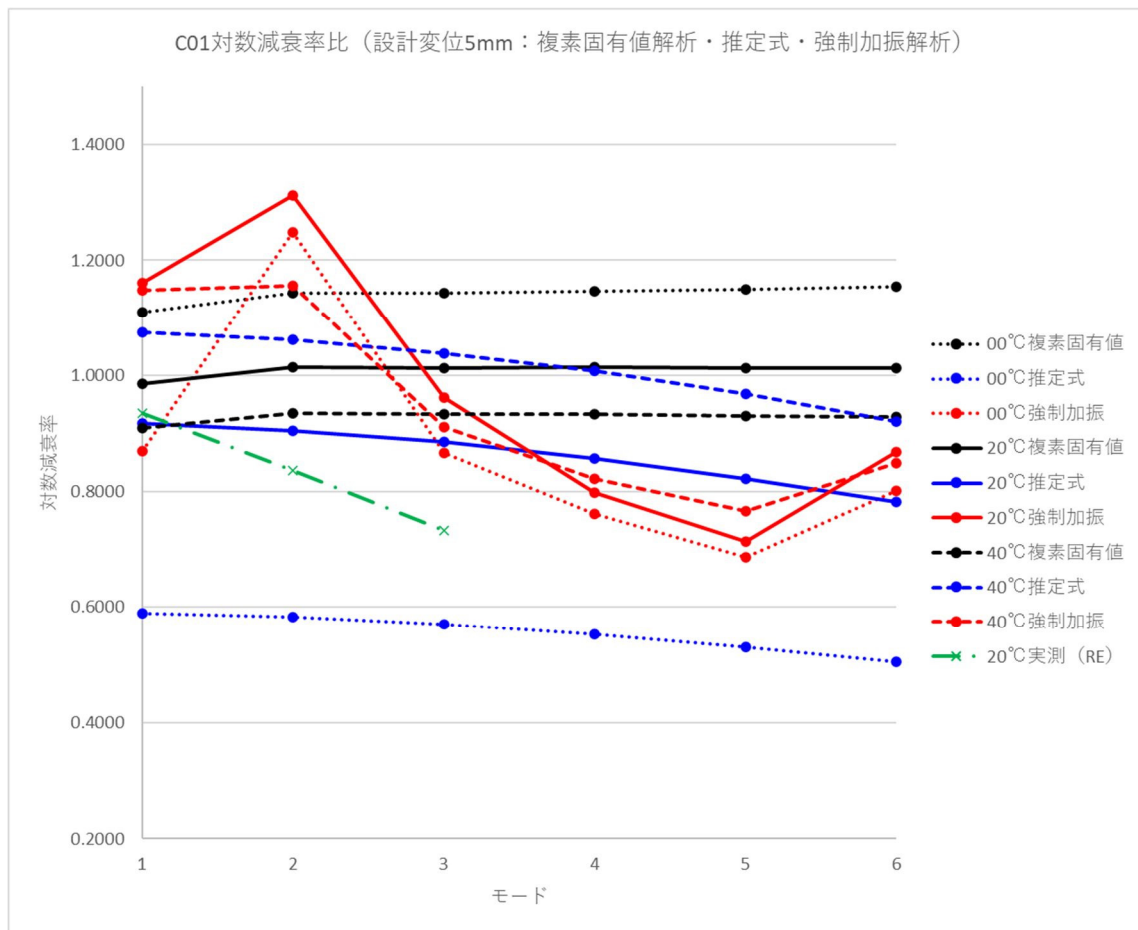


図 6-31 C01 付加減衰比率（上；設計変位 5mm，下；設計変位 10mm）

表 6-10 C02 付加減衰計算結果一覧（基本ケースに対する比率）

| ケーブル   | 設計変位<br>温度    | モード | 対数減衰率 比率 |        |        |        |     |
|--------|---------------|-----|----------|--------|--------|--------|-----|
|        |               |     | 複素固有値    | 推定式    | 強制加振   | 現地加振   |     |
|        |               |     | 傾斜サグ曲げ   |        | 傾斜サグ曲げ | 実測1    | 実測2 |
| C02d05 | ■ C0200d05t00 | 1   | 1.0939   | 0.7054 |        |        |     |
|        |               | 2   | 1.1149   | 0.6951 |        |        |     |
|        |               | 3   | 1.1152   | 0.6783 |        |        |     |
|        |               | 4   | 1.1176   | 0.6553 |        |        |     |
|        |               | 5   | 1.1197   | 0.6265 |        |        |     |
|        |               | 6   | 1.1227   | 0.5923 |        |        |     |
|        | ■ C0200d05t20 | 1   | 0.9679   | 0.9884 | 1.4166 | 1.1552 |     |
|        |               | 2   | 0.9852   | 0.9740 | 1.0768 | 0.9697 |     |
|        |               | 3   | 0.9839   | 0.9505 | 0.9013 | 0.8517 |     |
|        |               | 4   | 0.9835   | 0.9184 | 0.9147 |        |     |
|        |               | 5   | 0.9820   | 0.8779 | 0.7851 |        |     |
|        |               | 6   | 0.9805   | 0.8301 | 1.0227 |        |     |
|        | ■ C0200d05t40 | 1   | 0.8926   | 1.1094 |        |        |     |
|        |               | 2   | 0.9084   | 1.0944 |        |        |     |
|        |               | 3   | 0.9063   | 1.0694 |        |        |     |
|        |               | 4   | 0.9047   | 1.0350 |        |        |     |
|        |               | 5   | 0.9017   | 0.9918 |        |        |     |
|        |               | 6   | 0.8983   | 0.9408 |        |        |     |
| C02d10 | ■ C0200d10t00 | 1   | 0.9628   | 1.0729 |        |        |     |
|        |               | 2   | 0.9804   | 1.0574 |        |        |     |
|        |               | 3   | 0.9789   | 1.0319 |        |        |     |
|        |               | 4   | 0.9784   | 0.9967 |        |        |     |
|        |               | 5   | 0.9766   | 0.9526 |        |        |     |
|        |               | 6   | 0.9748   | 0.9005 |        |        |     |
|        | ■ C0200d10t20 | 1   | 0.8508   | 1.1398 | 0.6579 |        |     |
|        |               | 2   | 0.8657   | 1.1253 | 0.6308 |        |     |
|        |               | 3   | 0.8632   | 1.1010 | 0.5218 |        |     |
|        |               | 4   | 0.8612   | 1.0676 | 0.6475 |        |     |
|        |               | 5   | 0.8578   | 1.0256 | 0.5271 |        |     |
|        |               | 6   | 0.8540   | 0.9760 | 0.5448 |        |     |
|        | ■ C0200d10t40 | 1   | 0.7916   | 1.1515 |        |        |     |
|        |               | 2   | 0.8054   | 1.1386 |        |        |     |
|        |               | 3   | 0.8029   | 1.1171 |        |        |     |
|        |               | 4   | 0.8008   | 1.0876 |        |        |     |
|        |               | 5   | 0.7976   | 1.0504 |        |        |     |
|        |               | 6   | 0.7940   | 1.0063 |        |        |     |



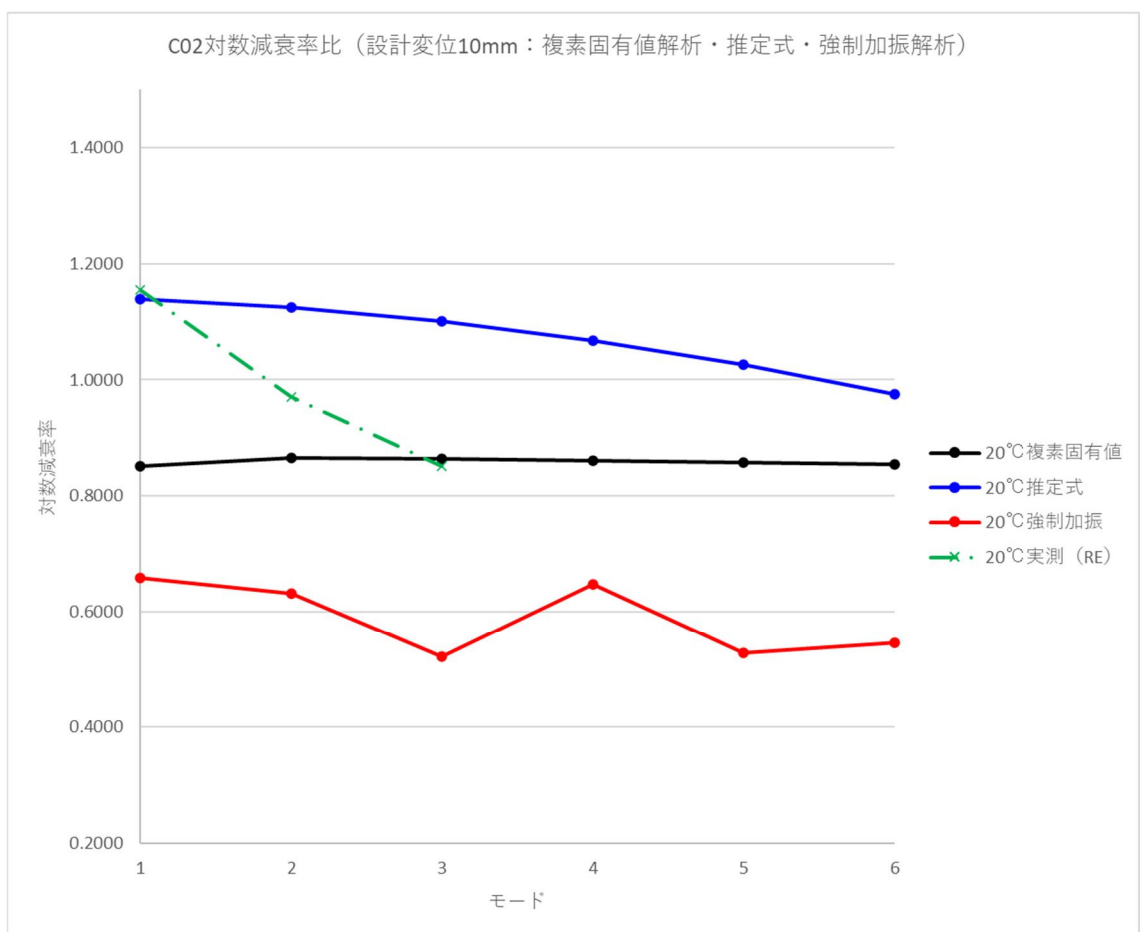
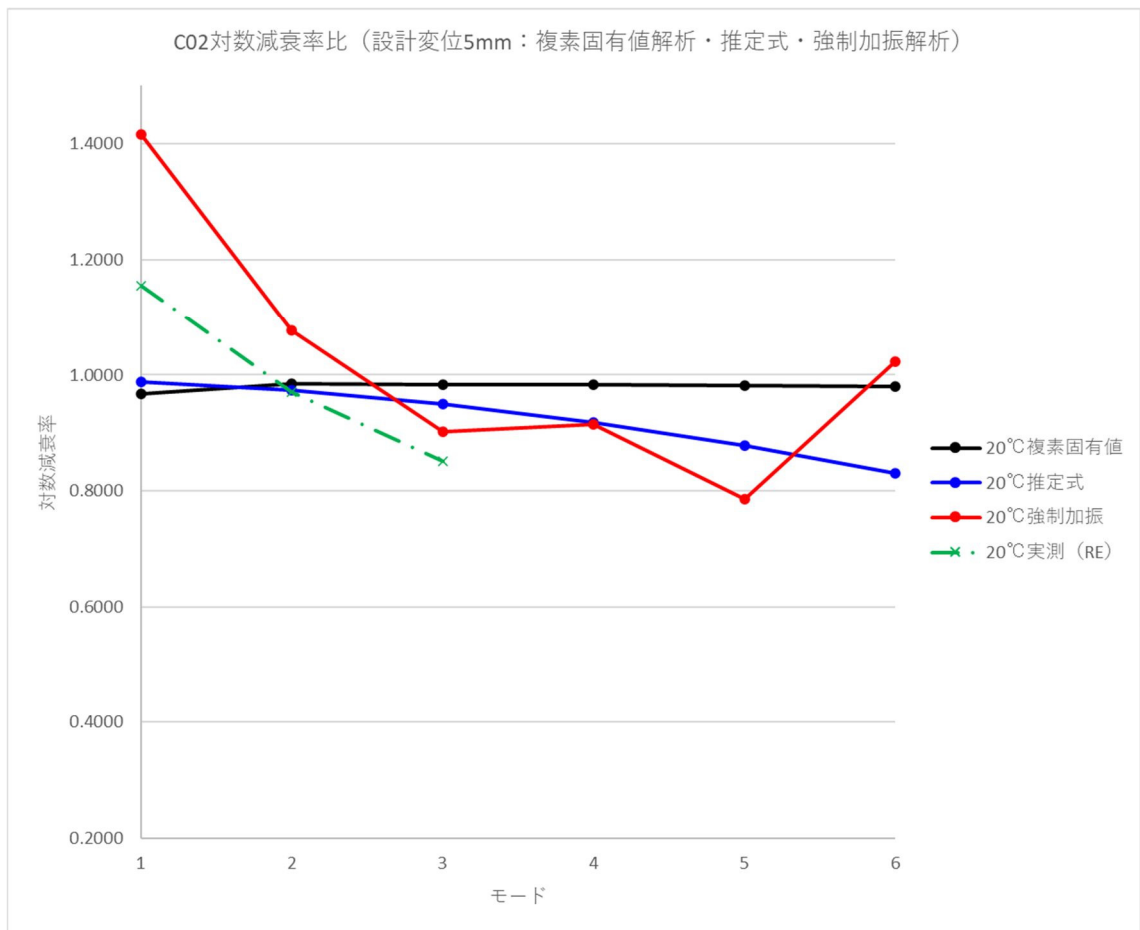


図 6-32 C02 付加減衰比率（上；設計変位 5mm，下；設計変位 10mm）

表 6-11 C03 付加減衰計算結果一覧（基本ケースに対する比率）

| ケーブル   | 設計変位<br>温度    | モード | 対数減衰率 比率 |        |        |      |     |
|--------|---------------|-----|----------|--------|--------|------|-----|
|        |               |     | 複素固有値    | 推定式    | 強制加振   | 現地加振 |     |
|        |               |     | 傾斜サグ曲げ   |        | 傾斜サグ曲げ | 実測1  | 実測2 |
| C03d05 | ■ C0300d05t00 | 1   | 1.1166   | 0.6370 |        |      |     |
|        |               | 2   | 1.1335   | 0.6270 |        |      |     |
|        |               | 3   | 1.1343   | 0.6106 |        |      |     |
|        |               | 4   | 1.1370   | 0.5881 |        |      |     |
|        |               | 5   | 1.1395   | 0.5599 |        |      |     |
|        |               | 6   | 1.1432   | 0.5267 |        |      |     |
|        | ■ C0300d05t20 | 1   | 0.9907   | 0.9480 | 1.2364 |      |     |
|        |               | 2   | 1.0044   | 0.9329 | 1.1374 |      |     |
|        |               | 3   | 1.0033   | 0.9081 | 1.0372 |      |     |
|        |               | 4   | 1.0030   | 0.8742 | 0.7679 |      |     |
|        |               | 5   | 1.0016   | 0.8319 | 0.7826 |      |     |
|        |               | 6   | 1.0001   | 0.7820 | 0.8714 |      |     |
|        | ■ C0300d05t40 | 1   | 0.9142   | 1.0910 |        |      |     |
|        |               | 2   | 0.9265   | 1.0744 |        |      |     |
|        |               | 3   | 0.9244   | 1.0471 |        |      |     |
|        |               | 4   | 0.9225   | 1.0096 |        |      |     |
|        |               | 5   | 0.9193   | 0.9627 |        |      |     |
|        |               | 6   | 0.9155   | 0.9077 |        |      |     |
| C03d10 | ■ C0300d10t00 | 1   | 0.9862   | 1.0398 |        |      |     |
|        |               | 2   | 1.0001   | 1.0232 |        |      |     |
|        |               | 3   | 0.9988   | 0.9959 |        |      |     |
|        |               | 4   | 0.9983   | 0.9586 |        |      |     |
|        |               | 5   | 0.9967   | 0.9119 |        |      |     |
|        |               | 6   | 0.9949   | 0.8570 |        |      |     |
|        | ■ C0300d10t20 | 1   | 0.8708   | 1.1309 | 0.6406 |      |     |
|        |               | 2   | 0.8823   | 1.1146 | 0.5588 |      |     |
|        |               | 3   | 0.8799   | 1.0877 | 0.6028 |      |     |
|        |               | 4   | 0.8774   | 1.0506 | 0.5122 |      |     |
|        |               | 5   | 0.8736   | 1.0044 | 0.4607 |      |     |
|        |               | 6   | 0.8692   | 0.9502 | 0.5280 |      |     |
|        | ■ C0300d10t40 | 1   | 0.8092   | 1.1525 |        |      |     |
|        |               | 2   | 0.8195   | 1.1377 |        |      |     |
|        |               | 3   | 0.8170   | 1.1135 |        |      |     |
|        |               | 4   | 0.8143   | 1.0800 |        |      |     |
|        |               | 5   | 0.8105   | 1.0383 |        |      |     |
|        |               | 6   | 0.8061   | 0.9891 |        |      |     |

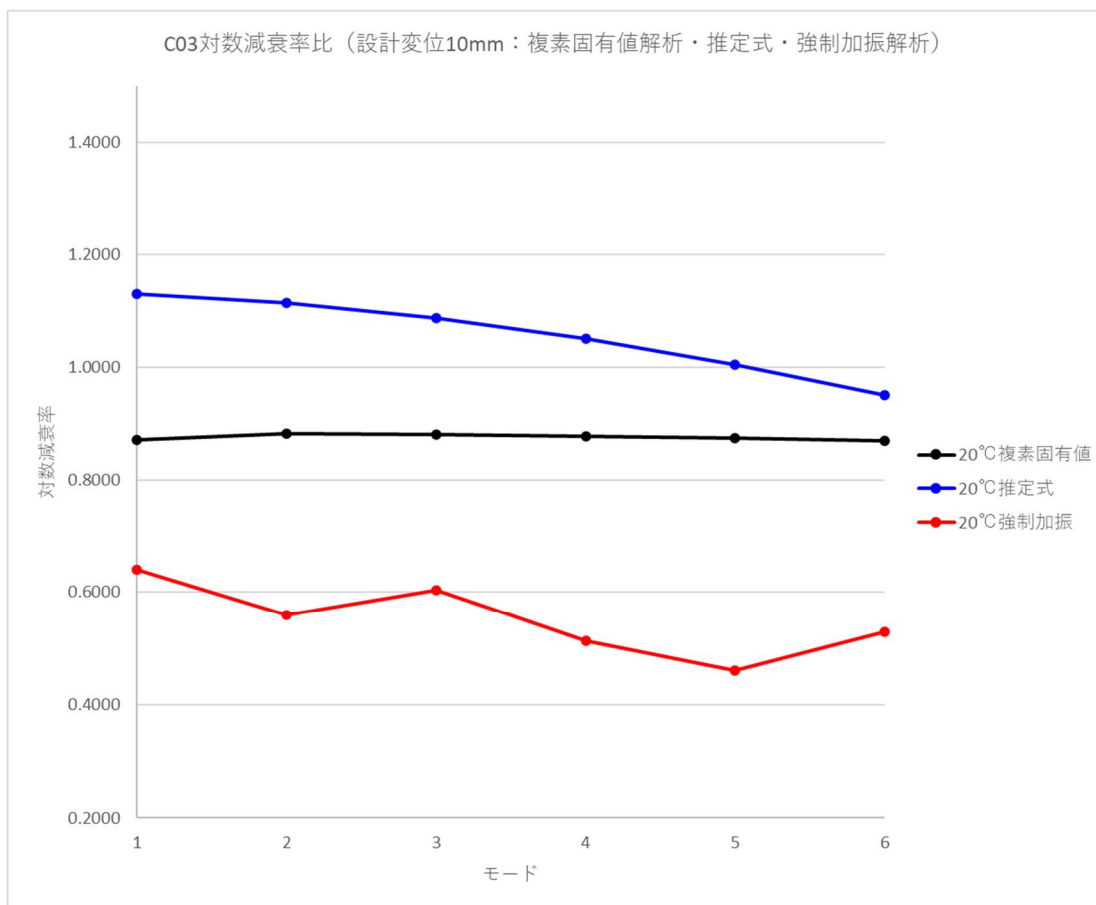
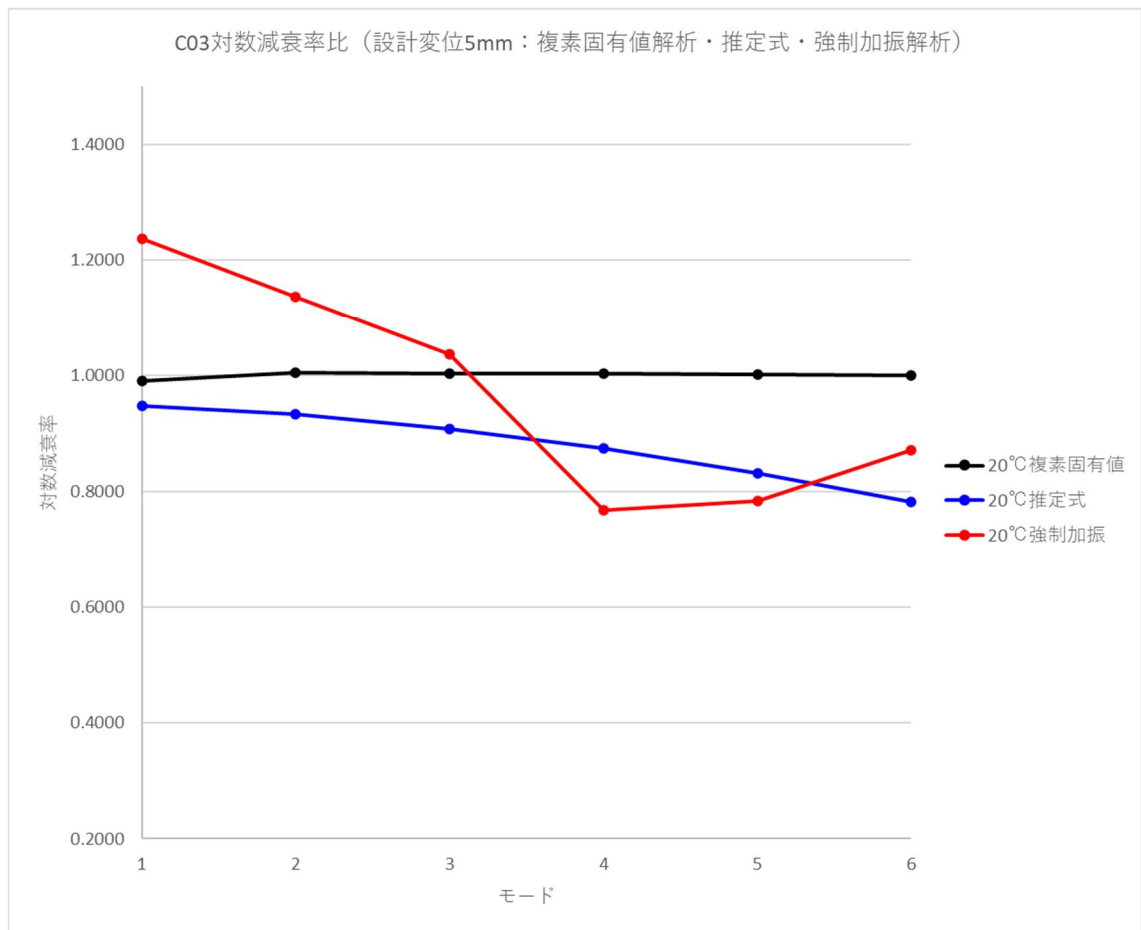


図 6-33 C03 付加減衰比率（上；設計変位 5mm，下；設計変位 10mm）

表 6-12 C17 付加減衰計算結果一覧（基本ケースに対する比率）

| ケーブル   | 設計変位<br>温度    | モード | 対数減衰率 比率 |        |        |        |        |
|--------|---------------|-----|----------|--------|--------|--------|--------|
|        |               |     | 複素固有値    | 推定式    | 強制加振   | 現地加振   |        |
|        |               |     | 傾斜サグ曲げ   |        | 傾斜サグ曲げ | 実測1    | 実測2    |
| C17d05 | ■ C1700d05t00 | 1   | 1.0302   | 0.4961 |        |        |        |
|        |               | 2   | 1.0890   | 0.4897 |        |        |        |
|        |               | 3   | 1.0888   | 0.4788 |        |        |        |
|        |               | 4   | 1.0917   | 0.4639 |        |        |        |
|        |               | 5   | 1.0936   | 0.4452 |        |        |        |
|        |               | 6   | 1.0968   | 0.4228 |        |        |        |
|        | ■ C1700d05t20 | 1   | 0.9686   | 0.8508 | 0.8174 | 0.6348 | 0.9511 |
|        |               | 2   | 1.0227   | 0.8389 | 0.8887 | 0.8473 | 1.1958 |
|        |               | 3   | 1.0218   | 0.8198 | 1.0018 | 1.0661 | 0.7217 |
|        |               | 4   | 1.0236   | 0.7934 | 1.0471 |        |        |
|        |               | 5   | 1.0242   | 0.7602 | 0.9359 |        |        |
|        |               | 6   | 1.0255   | 0.7208 | 0.7692 |        |        |
|        | ■ C1700d05t40 | 1   | 0.9264   | 1.0390 |        |        |        |
|        |               | 2   | 0.9787   | 1.0255 |        |        |        |
|        |               | 3   | 0.9771   | 1.0025 |        |        |        |
|        |               | 4   | 0.9780   | 0.9709 |        |        |        |
|        |               | 5   | 0.9776   | 0.9312 |        |        |        |
|        |               | 6   | 0.9777   | 0.8841 |        |        |        |
| C17d10 | ■ C1700d10t00 | 1   | 0.9667   | 0.9550 |        |        |        |
|        |               | 2   | 1.0214   | 0.9421 |        |        |        |
|        |               | 3   | 1.0204   | 0.9204 |        |        |        |
|        |               | 4   | 1.0221   | 0.8907 |        |        |        |
|        |               | 5   | 1.0226   | 0.8532 |        |        |        |
|        |               | 6   | 1.0239   | 0.8087 |        |        |        |
|        | ■ C1700d10t20 | 1   | 0.9014   | 1.1020 | 0.5082 |        |        |
|        |               | 2   | 0.9516   | 1.0877 | 0.5835 |        |        |
|        |               | 3   | 0.9499   | 1.0642 | 0.5664 |        |        |
|        |               | 4   | 0.9503   | 1.0319 | 0.6122 |        |        |
|        |               | 5   | 0.9495   | 0.9914 | 0.5596 |        |        |
|        |               | 6   | 0.9490   | 0.9431 | 0.4537 |        |        |
|        | ■ C1700d10t40 | 1   | 0.8624   | 1.1487 |        |        |        |
|        |               | 2   | 0.9106   | 1.1351 |        |        |        |
|        |               | 3   | 0.9088   | 1.1130 |        |        |        |
|        |               | 4   | 0.9090   | 1.0826 |        |        |        |
|        |               | 5   | 0.9076   | 1.0442 |        |        |        |
|        |               | 6   | 0.9067   | 0.9986 |        |        |        |

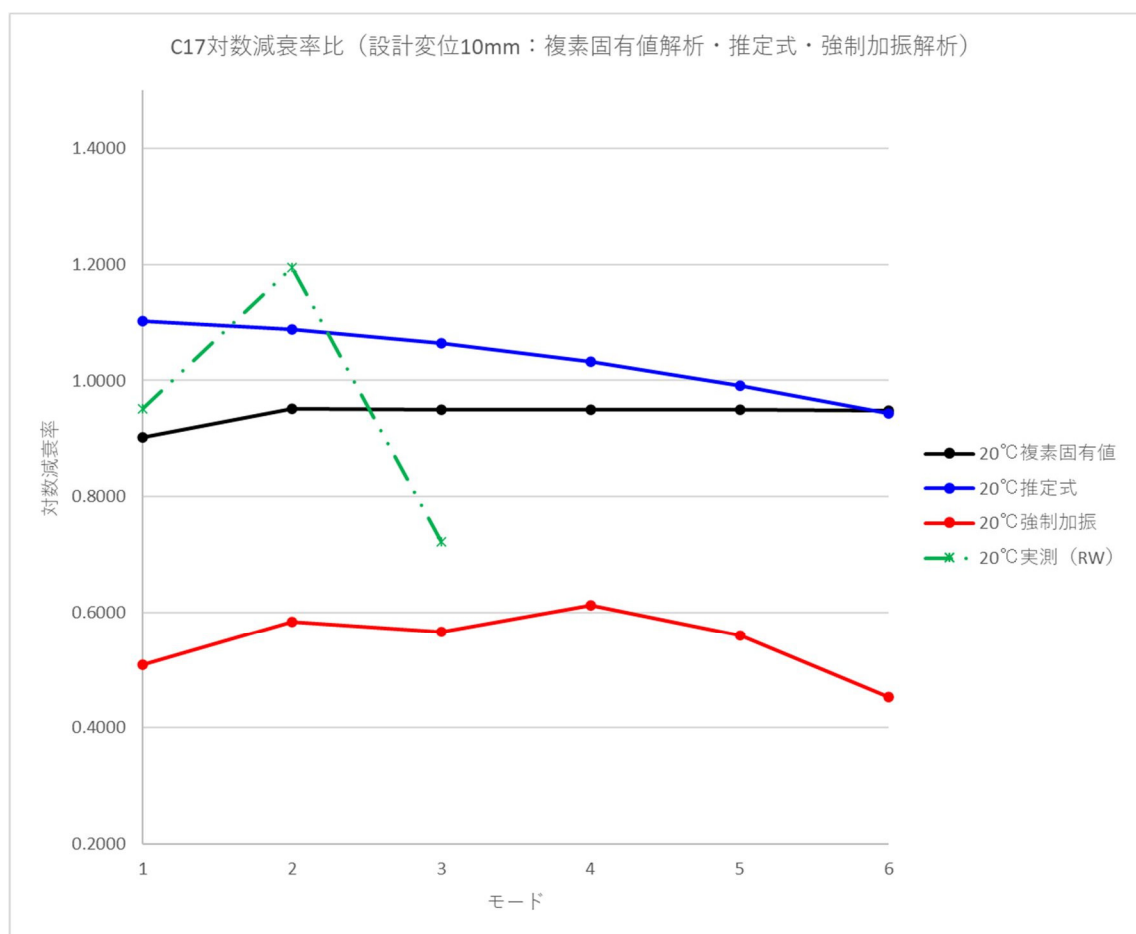
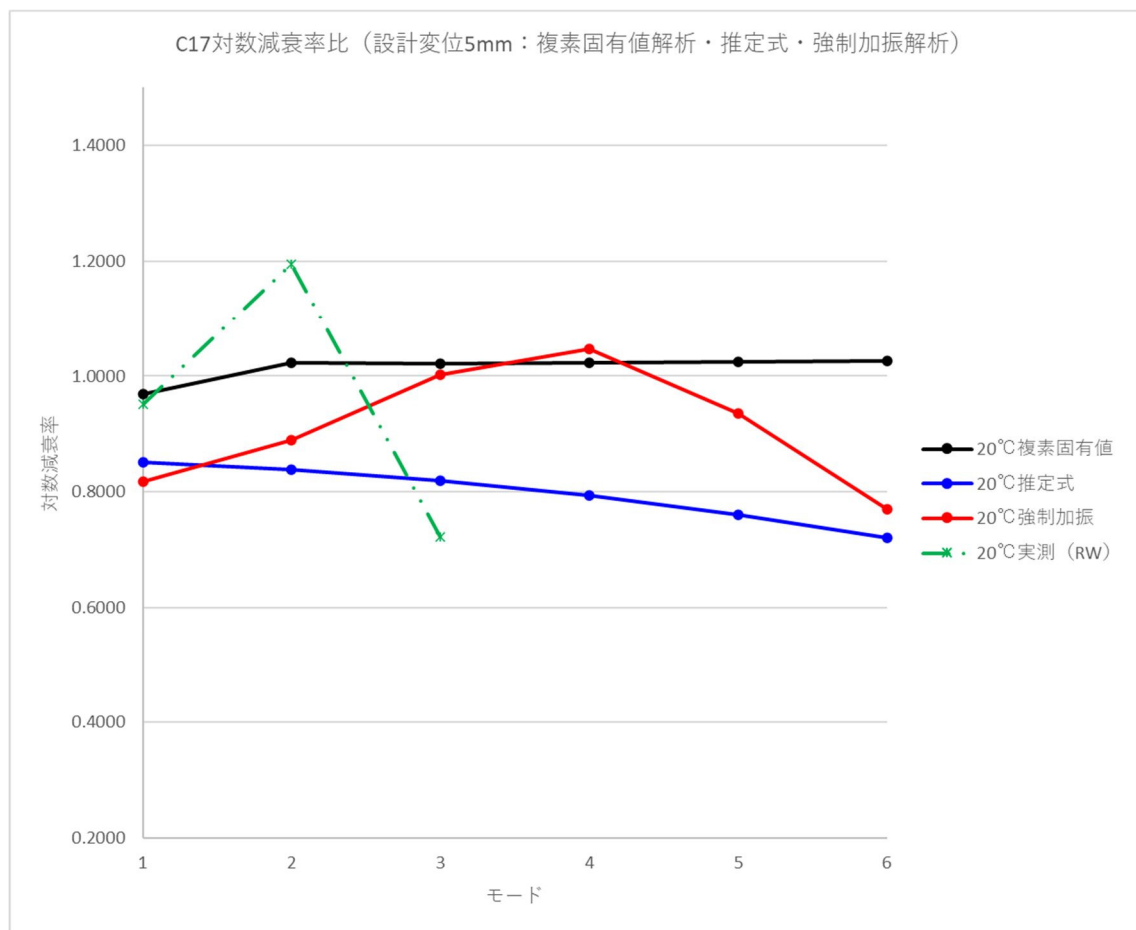


図 6-34 C17 付加減衰比率（上；設計変位 5mm，下；設計変位 10mm）

表 6-13 C18 付加減衰計算結果一覧（基本ケースに対する比率）

| ケーブル   | 設計変位<br>温度    | モード | 対数減衰率 比率        |        |                |        |        |
|--------|---------------|-----|-----------------|--------|----------------|--------|--------|
|        |               |     | 複素固有値<br>傾斜サグ曲げ | 推定式    | 強制加振<br>傾斜サグ曲げ | 現地加振   |        |
|        |               |     |                 |        |                | 実測1    | 実測2    |
| C18d05 | ■ C1800d05t00 | 1   | 1.0082          | 0.5127 | 0.6553         |        |        |
|        |               | 2   | 1.0841          | 0.5067 | 0.9725         |        |        |
|        |               | 3   | 1.0834          | 0.4965 | 1.0403         |        |        |
|        |               | 4   | 1.0868          | 0.4825 | 0.8100         |        |        |
|        |               | 5   | 1.0885          | 0.4648 | 0.8226         |        |        |
|        |               | 6   | 1.0916          | 0.4436 | 0.6403         |        |        |
|        | ■ C1800d05t20 | 1   | 0.9492          | 0.8627 | 0.7637         | 1.5383 | 1.1945 |
|        |               | 2   | 1.0207          | 0.8522 | 1.0818         | 1.2889 | 1.2951 |
|        |               | 3   | 1.0196          | 0.8347 | 1.3528         | 1.0475 | 0.9565 |
|        |               | 4   | 1.0217          | 0.8104 | 0.9524         |        |        |
|        |               | 5   | 1.0220          | 0.7795 | 1.0048         |        |        |
|        |               | 6   | 1.0235          | 0.7429 | 0.8567         |        |        |
|        | ■ C1800d05t40 | 1   | 0.9103          | 1.0459 | 0.7776         |        |        |
|        |               | 2   | 0.9782          | 1.0335 | 1.0966         |        |        |
|        |               | 3   | 0.9766          | 1.0126 | 1.3483         |        |        |
|        |               | 4   | 0.9778          | 0.9838 | 1.0245         |        |        |
|        |               | 5   | 0.9775          | 0.9473 | 0.9575         |        |        |
|        |               | 6   | 0.9779          | 0.9039 | 0.7872         |        |        |
| C18d10 | ■ C1800d10t00 | 1   | 0.9479          | 0.9660 | 0.3721         |        |        |
|        |               | 2   | 1.0191          | 0.9540 | 0.4744         |        |        |
|        |               | 3   | 1.0181          | 0.9343 | 0.4903         |        |        |
|        |               | 4   | 1.0199          | 0.9068 | 0.4195         |        |        |
|        |               | 5   | 1.0205          | 0.8723 | 0.4923         |        |        |
|        |               | 6   | 1.0219          | 0.8310 | 0.3816         |        |        |
|        | ■ C1800d10t20 | 1   | 0.8858          | 1.1054 | 0.4893         |        |        |
|        |               | 2   | 0.9523          | 1.0930 | 0.5754         |        |        |
|        |               | 3   | 0.9506          | 1.0717 | 0.6345         |        |        |
|        |               | 4   | 0.9513          | 1.0423 | 0.5365         |        |        |
|        |               | 5   | 0.9507          | 1.0053 | 0.5513         |        |        |
|        |               | 6   | 0.9507          | 0.9611 | 0.5577         |        |        |
|        | ■ C1800d10t40 | 1   | 0.8497          | 1.1489 | 0.5215         |        |        |
|        |               | 2   | 0.9130          | 1.1370 | 0.5736         |        |        |
|        |               | 3   | 0.9112          | 1.1171 | 0.6831         |        |        |
|        |               | 4   | 0.9117          | 1.0897 | 0.5677         |        |        |
|        |               | 5   | 0.9107          | 1.0549 | 0.5188         |        |        |
|        |               | 6   | 0.9103          | 1.0132 | 0.5379         |        |        |

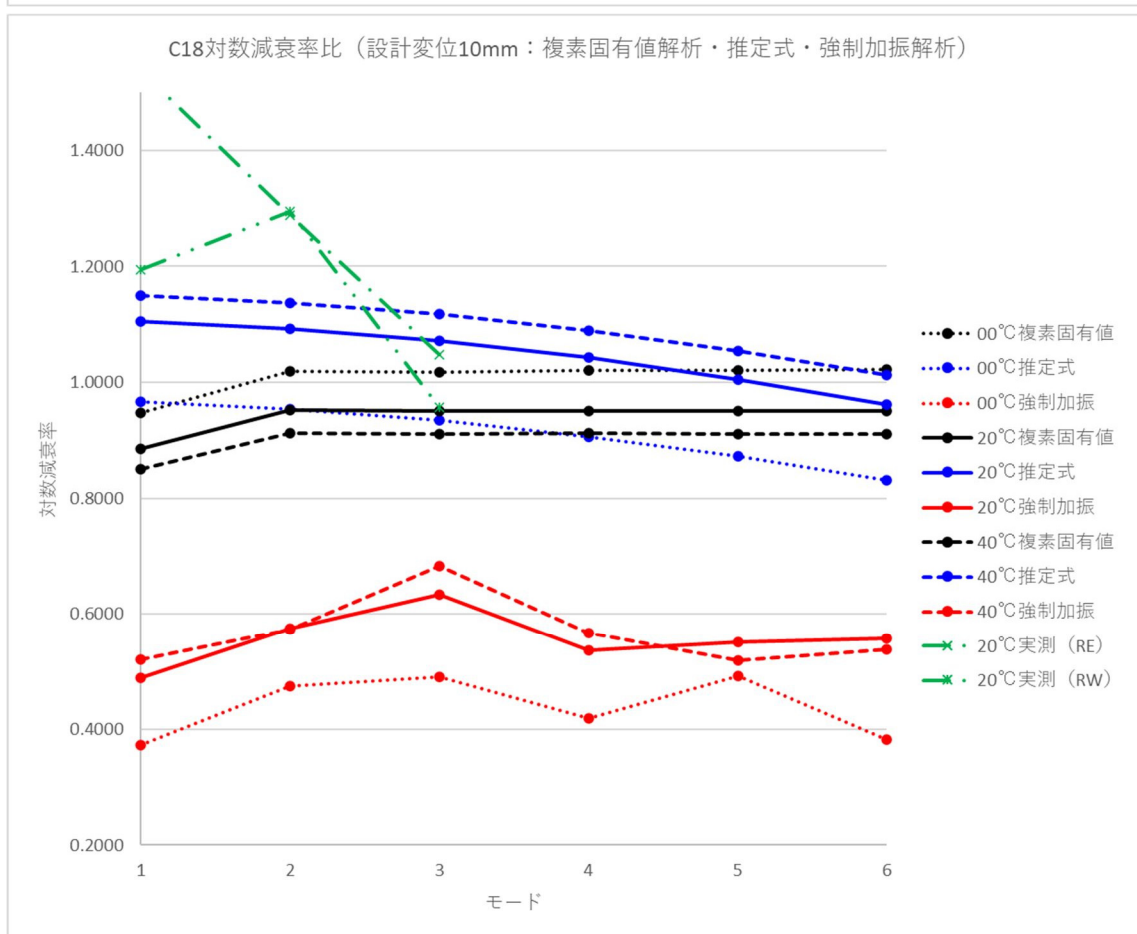
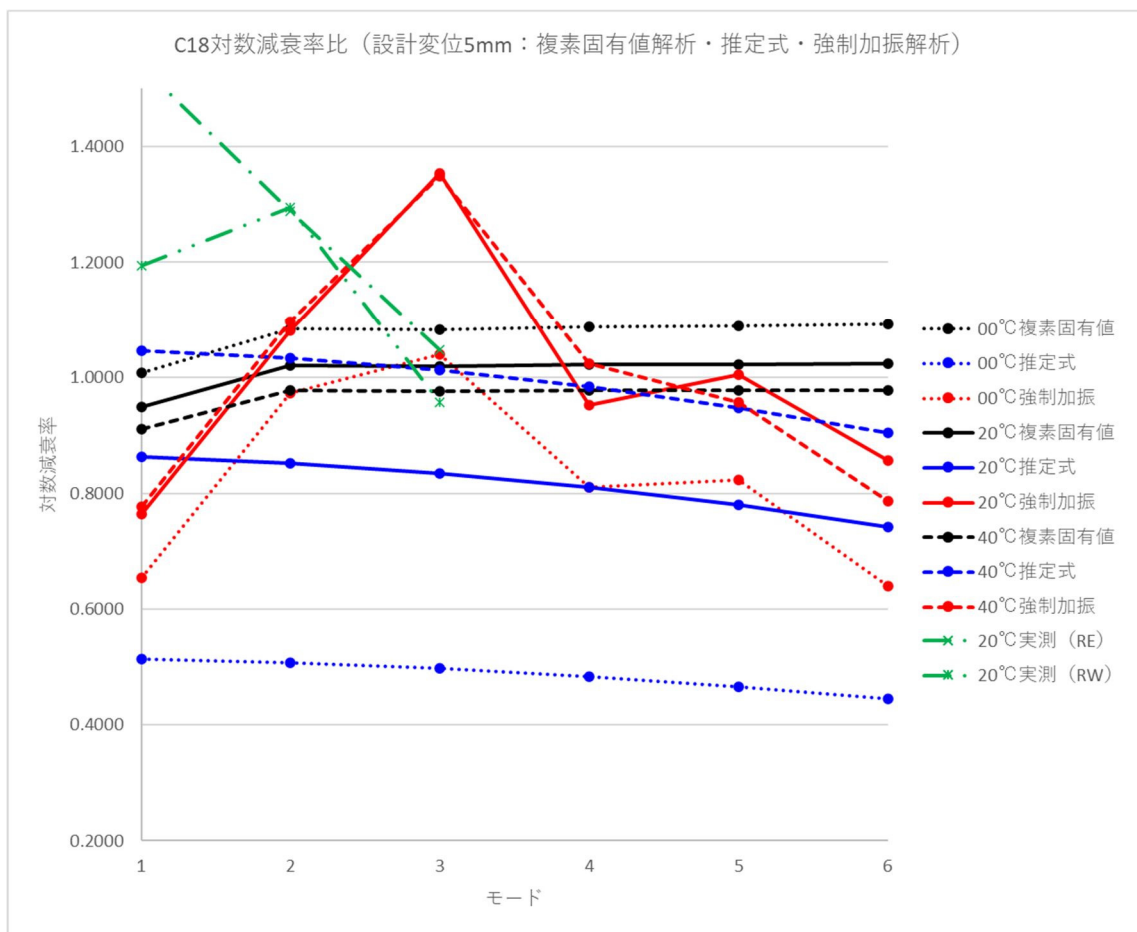


図 6-35 C18 付加減衰比率（上；設計変位 5mm，下；設計変位 10mm）

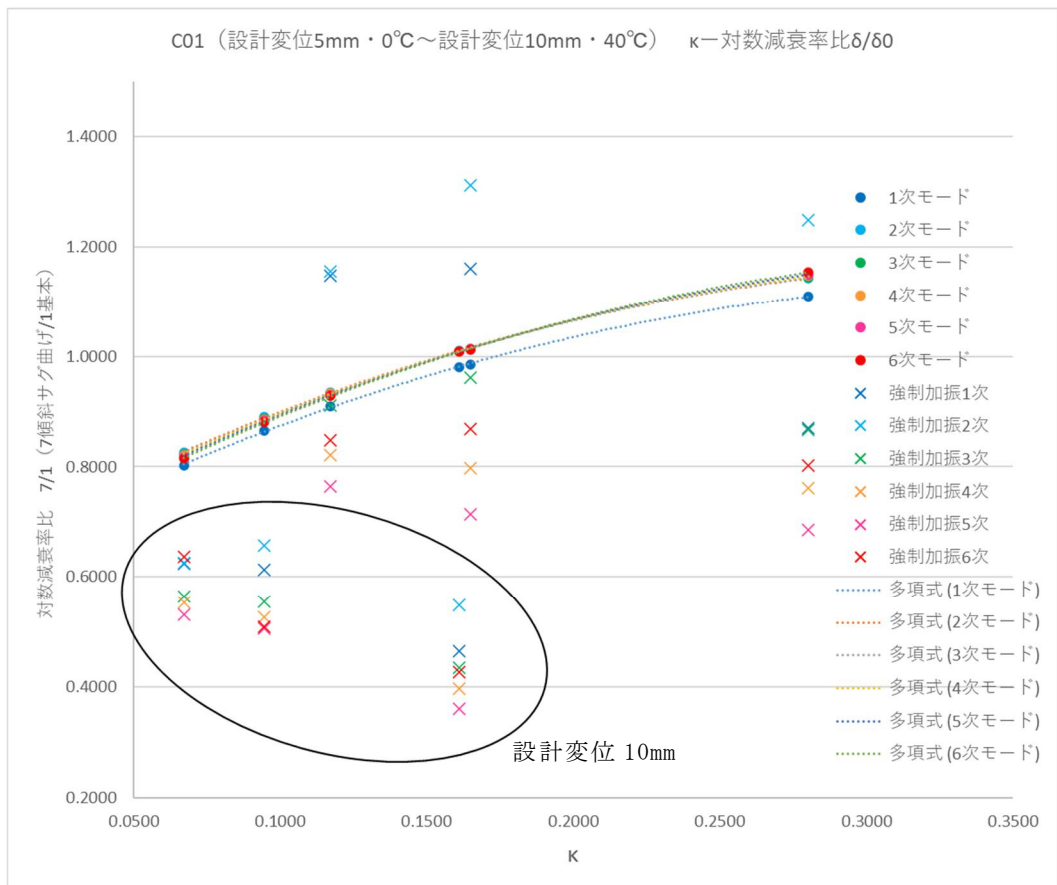


図 6-36 C01 無次元パラメータ  $\kappa$  と強制加振解析結果

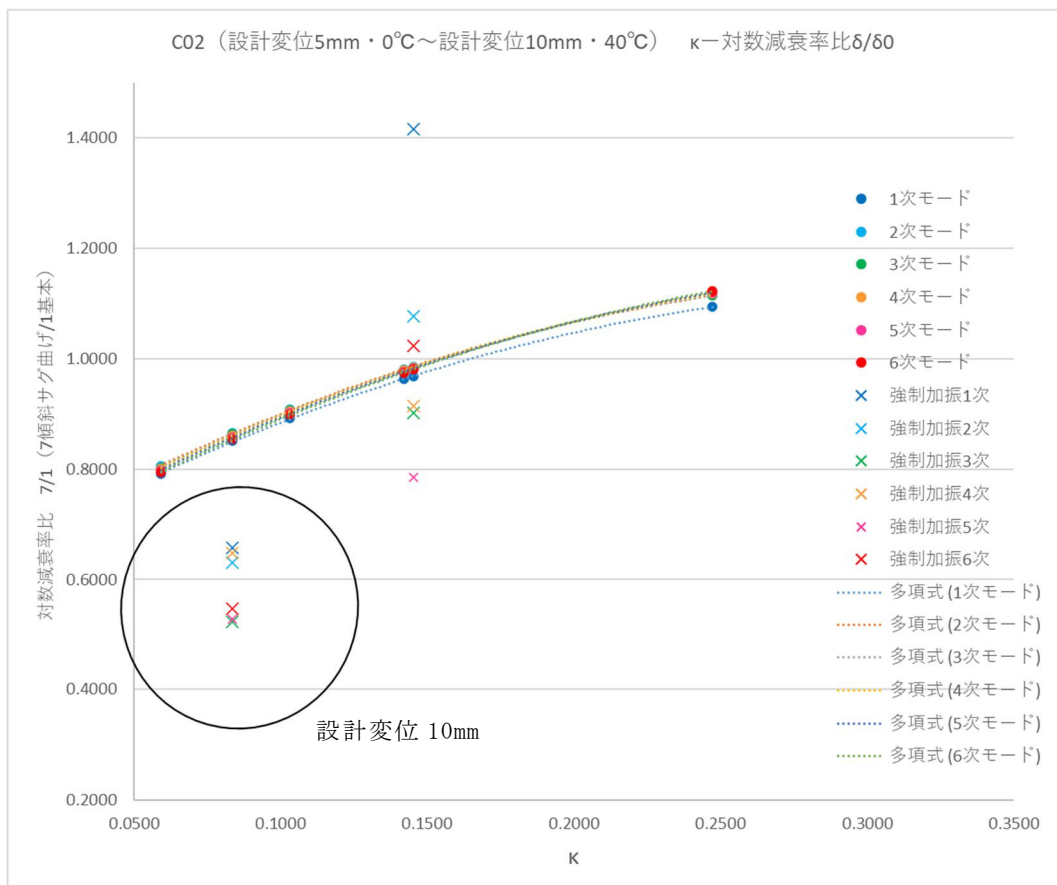


図 6-37 C02 無次元パラメータ  $\kappa$  と強制加振解析結果



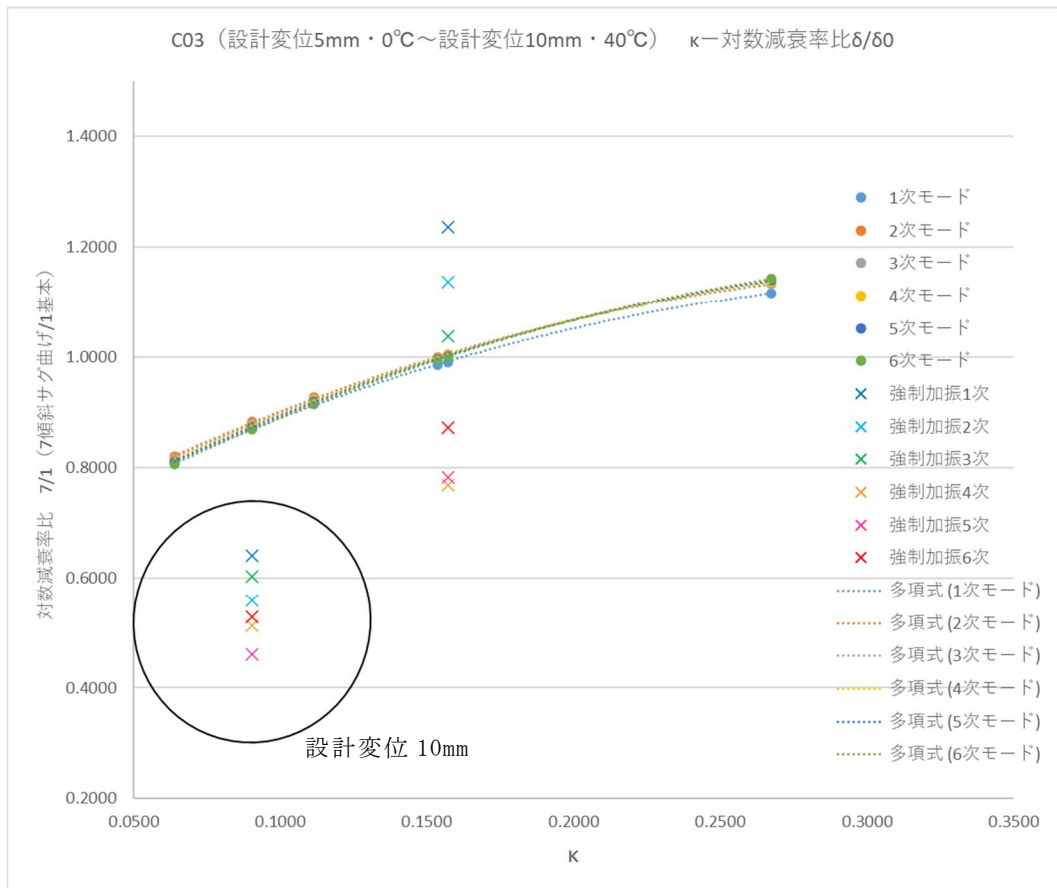


図 6-38 C03 無次元パラメータ  $\kappa$  と強制加振解析結果

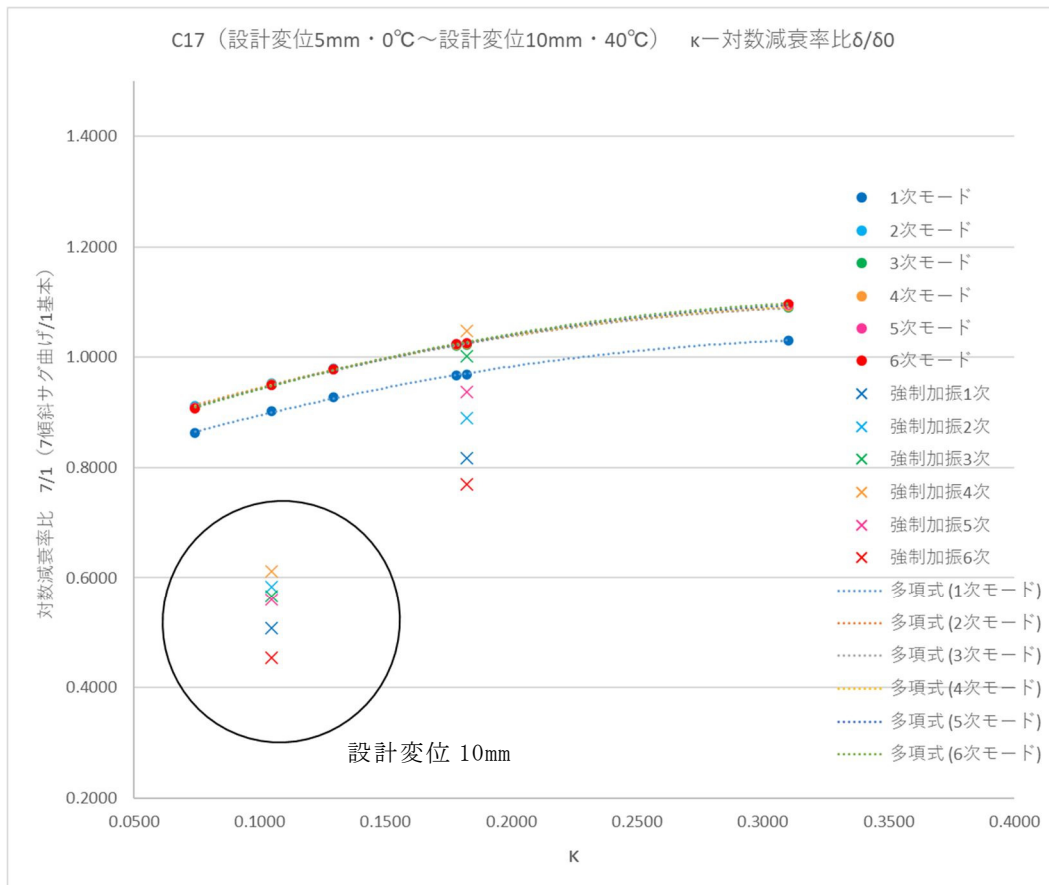


図 6-39 C17 無次元パラメータ  $\kappa$  と強制加振解析結果

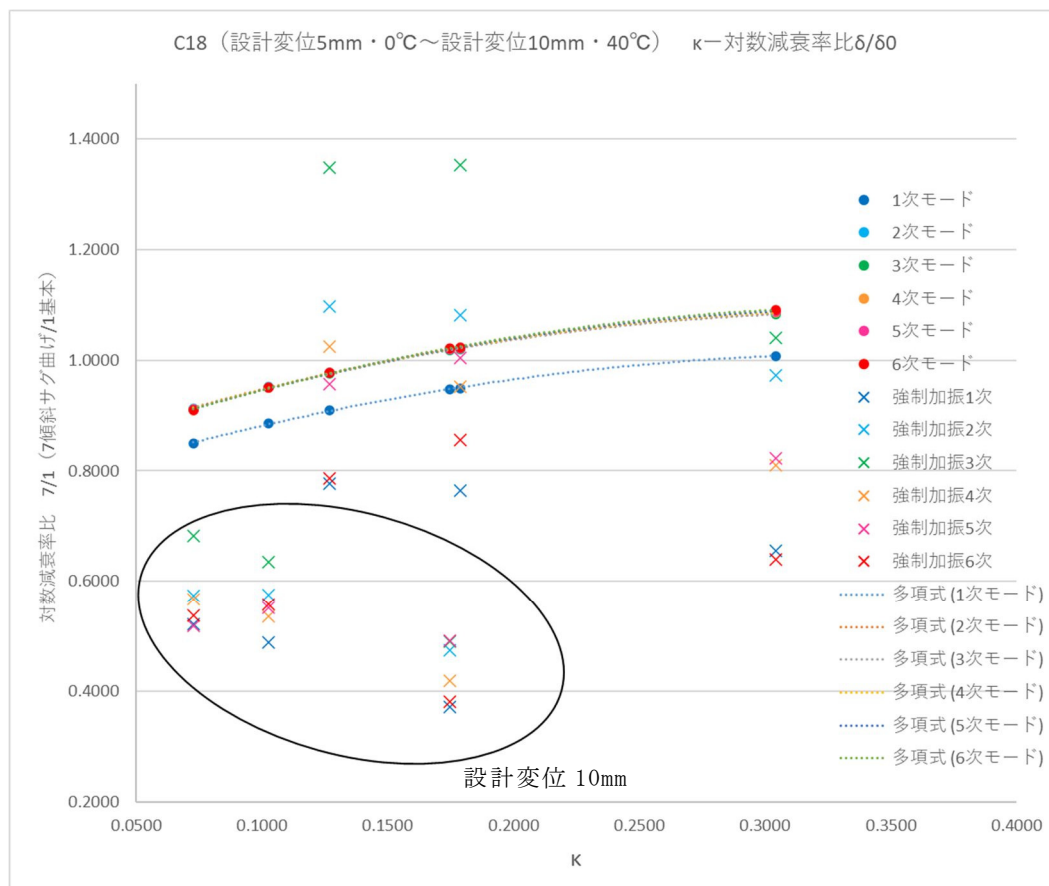


図 6-40 C18 無次元パラメータ  $\kappa$  と強制加振解析結果

#### 6.4. 高減衰ゴムダンパーがケーブル振動モードに及ぼす影響とその評価

高減衰ゴムダンパーがある場合の振動モード形状とない場合のモード形状を求め、これらの比をとったグラフを図 6-41～図 6-52 に示す。グラフは横軸にケーブル座標，縦軸に振動モード形状比（高減衰ゴムダンパーがある場合の振動モード/高減衰ゴムダンパーがない場合の振動モード）を示している。

同図より，1～5 次モードでは，振動の節近傍を除いて，モード比のグラフの形状は C01 と C18 でほぼ同形状である。6 次モードは正負が反転しているが，モード比のグラフの形状自体は C01 と C18 でほぼ同形状である。高減衰ゴムダンパーが設置されている節点のモード比は，表 6-14 に示すとおり，C01 と C18 で異なっているが，C18 のモード比に対する C01 のモード比の比は，1～6 次モードでほぼ一定である。C01 と C18 の無次元パラメータ  $\kappa$  を表 6-15，C01 と C18 の高減衰ゴムダンパーばねとケーブルばねの比を表 6-16 に示す。これらの数値から，モード比は  $\kappa$  や高減衰ゴムダンパーばねとケーブルばねの比と近い関係にあると考えられる。一方，高減衰ゴムダンパーから最も離れた節点のモード比は C01 と C18 とともに，モード次数によらず 1.043 程度となる。また，表 6-17 に示すとおり，最大変位が生じる節点のモード比は C01 と C18 でほぼ等しい。

表 6-14 高減衰ゴムダンパー位置でのモード比

| mode | C01    | C18   | C18/C01 |
|------|--------|-------|---------|
| 1    | 0.118  | 0.106 | 0.896   |
| 2    | 0.122  | 0.110 | 0.903   |
| 3    | 0.123  | 0.111 | 0.901   |
| 4    | 0.125  | 0.112 | 0.901   |
| 5    | 0.126  | 0.114 | 0.900   |
| 6    | -0.129 | 0.116 | -0.899  |

表 6-15 無次元パラメータ  $\kappa$

| C01   | C18   | C01/C18 |
|-------|-------|---------|
| 0.095 | 0.103 | 0.921   |

表 6-16 高減衰ゴムダンパーばね  $K_d$ /ケーブルばね  $K_c$

| C01   | C18   | C01/C18 |
|-------|-------|---------|
| 2.877 | 3.247 | 0.886   |

表 6-17 各モードの最大変形節点のモード比

| mode | C01    | C18   | C18/C01 |
|------|--------|-------|---------|
| 1    | 1.015  | 1.014 | 1.000   |
| 2    | 1.017  | 1.015 | 0.999   |
| 3    | 1.014  | 1.015 | 1.001   |
| 4    | 1.016  | 1.016 | 1.000   |
| 5    | 1.038  | 1.034 | 0.996   |
| 6    | -1.019 | 1.025 | -1.006  |

高減衰ゴムダンパーがケーブルの振動モードに及ぼす影響は、春日らの提案している下式のモードの低減係数（Reduction factor）で考慮されている。

$$R.F. = e^{-0.72 \frac{\omega_n x_i (L-x_i)}{TL} \cdot \frac{Kv}{\omega_n} \cdot \frac{2}{\gamma}} \quad (\text{式 6-1})$$

同式は指数部分に固有円振動数 $\omega_n$ が含まれているが、分母分子にあるため結果としてモードの影響は受けない係数となっている。また、固有円振動数 $\omega_n$ と損失係数 $\gamma$ および複素ばね虚数成分 $v$ を除くと本文で提案した無次元パラメータ $\kappa$ とほぼ同じ係数となっており、前述の振動モード比と無次元パラメータの関係も取り込まれている。

## 6.5. 現地加振試験と強制加振解析

現地加振試験結果と強制加振解析結果は 6.3.2 に示したとおりである。現地加振試験結果については第 4 章で述べたとおり、加振振幅や張力およびケーブル定着部の構造が対数減衰率に影響する可能性がある。第 5 章ではサグやケーブル曲げ剛性および傾斜角が対数減衰率に影響することを示している。また、6.3.1 に示したとおり、現地加振試験結果は加速度計の位置が高減衰ゴムダンパーに近いことから、大きめの対数減衰率となっている可能性も考えられる。このようなことから、強制加振解析では現地加振試験と同じ結果とはなっていないものの、現地加振試験の減衰波形と強制加振試験とを比較し考察する。

図 6-53 および図 6-54 に C01 ケーブルの現地加振試験および強制加振解析の自由減衰波形（+側のピーク値包絡線）を示す。また、図 6-55 および図 6-56 に自由減衰波形から 5 データきざみで対数減衰率を求め時刻歴表示したグラフを示す。両図から加振試験はほぼ一定の対数減衰率で減衰していることがわかる。一方、強制加振解析の減衰波形は直線的に減少しており、対数減衰率は減衰開始から徐々に増加している。強制加振解析では、高減衰ゴムの減衰を免震支承と同じバイリニア型の履歴減衰でモデル化している。一般的な免震橋梁の振動数範囲 0.01Hz～1Hz においては、エネルギー吸収性能のひずみ速度依存性が軽微で一定の履歴エネルギー吸収性能を示すことが、文献 28) で述べられていることを参考にしている。また、高減衰ゴムダンパーメーカーのせん断変形試験結果でも 2Hz の正弦波の入力に対しバイリニア型の履歴ループを描くことを確認している。

一方、現地加振試験ではケーブル自身が有している減衰、例えば素線間のずれや摩擦および定着部の摩擦など、高減衰ゴムダンパー以外の減衰が存在する。これらは強制加振解析では見込んでおらず、この分の減衰が付加されたことで、結果として一定の減衰を示したと考えられなくもない。高減衰ゴムの減衰のひずみ速度依存性は僅かということであるが、これも対数減衰率に影響を及ぼしていると考えられる。

なお、強制加振解析の減衰波形の主要な減衰区間の平均的な対数減衰率は強制加振解析と概ね一致しており、結果として同程度の減衰となっている。

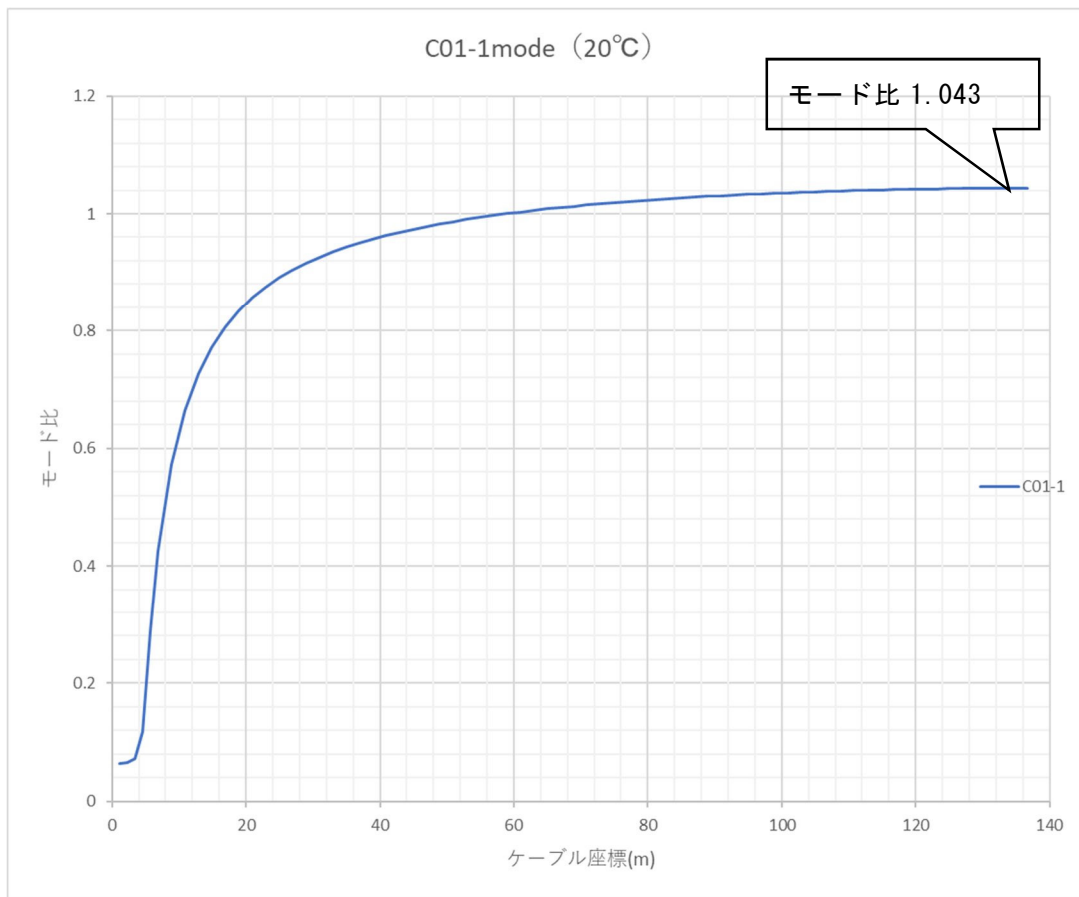


図 6-41 C01 1次モード形状比（ダンパーあり鉛直方向モード/ダンパーなし）

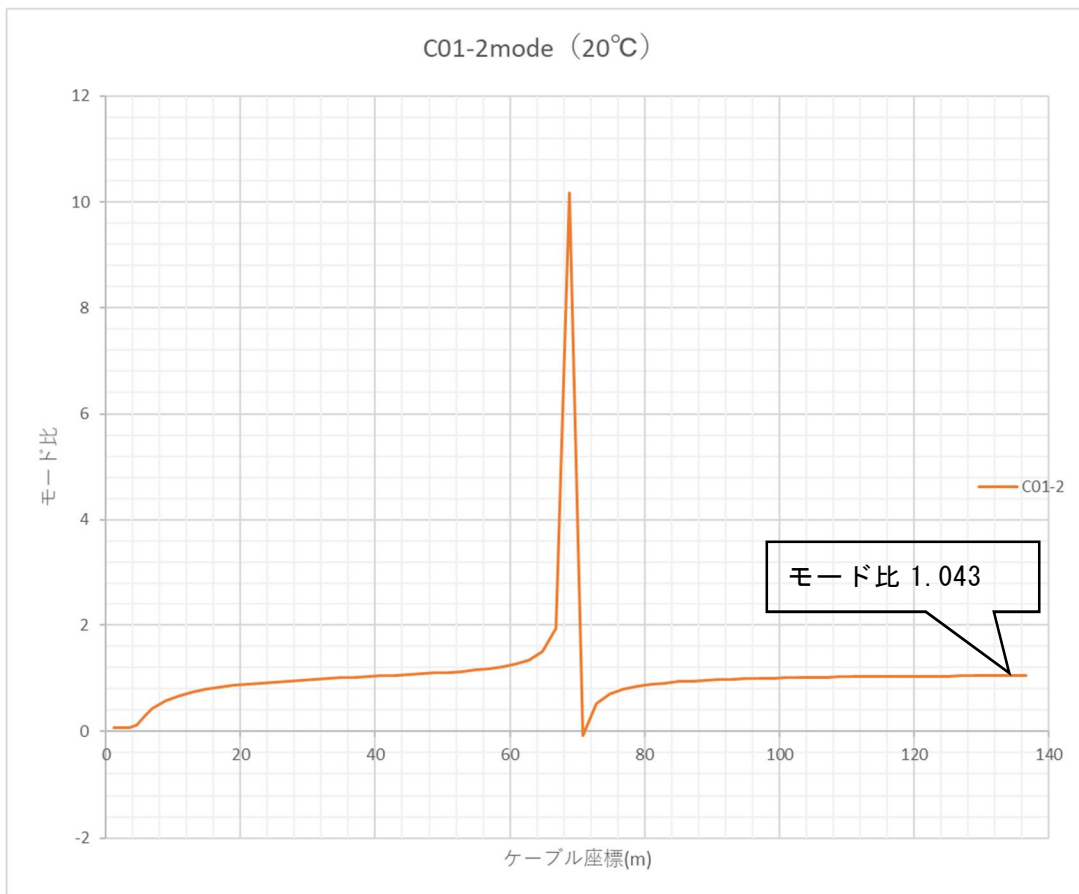


図 6-42 C01 2次モード形状比（ダンパーあり鉛直方向モード/ダンパーなし）

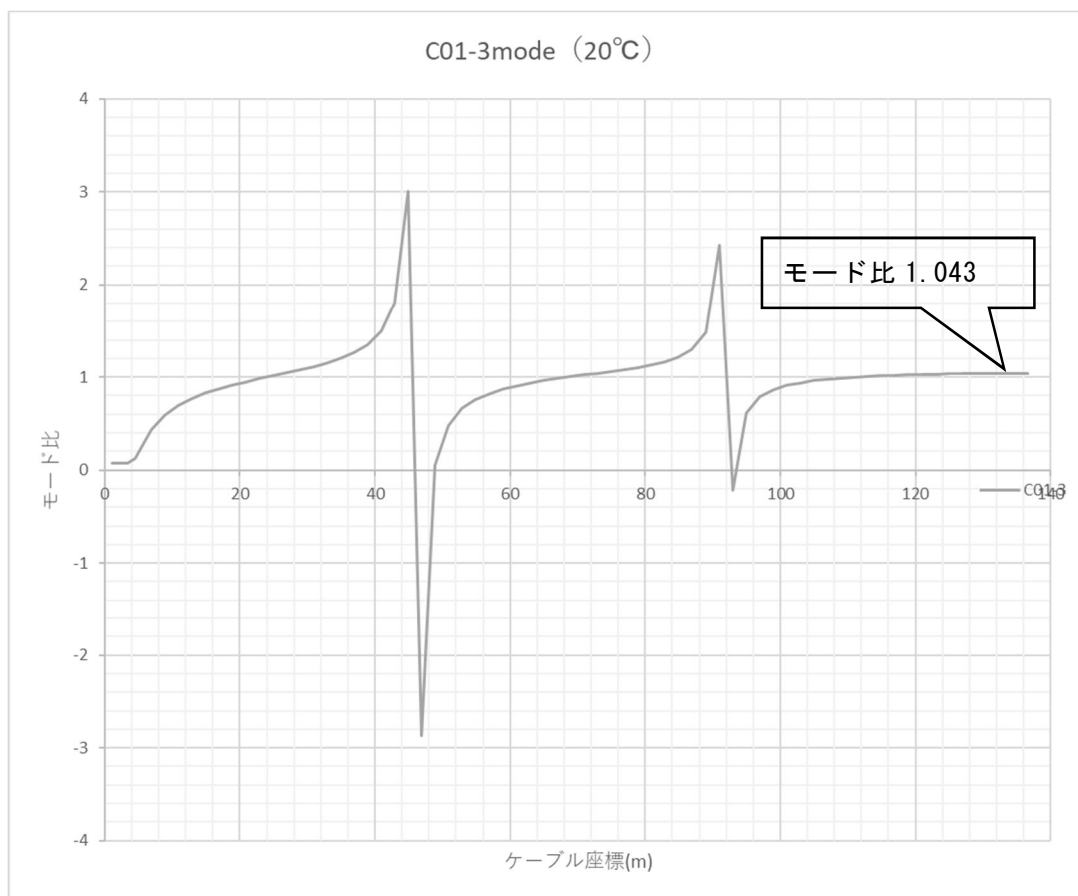


図 6-43 C01 3次モード形状比（ダンパーあり鉛直方向モード/ダンパーなし）

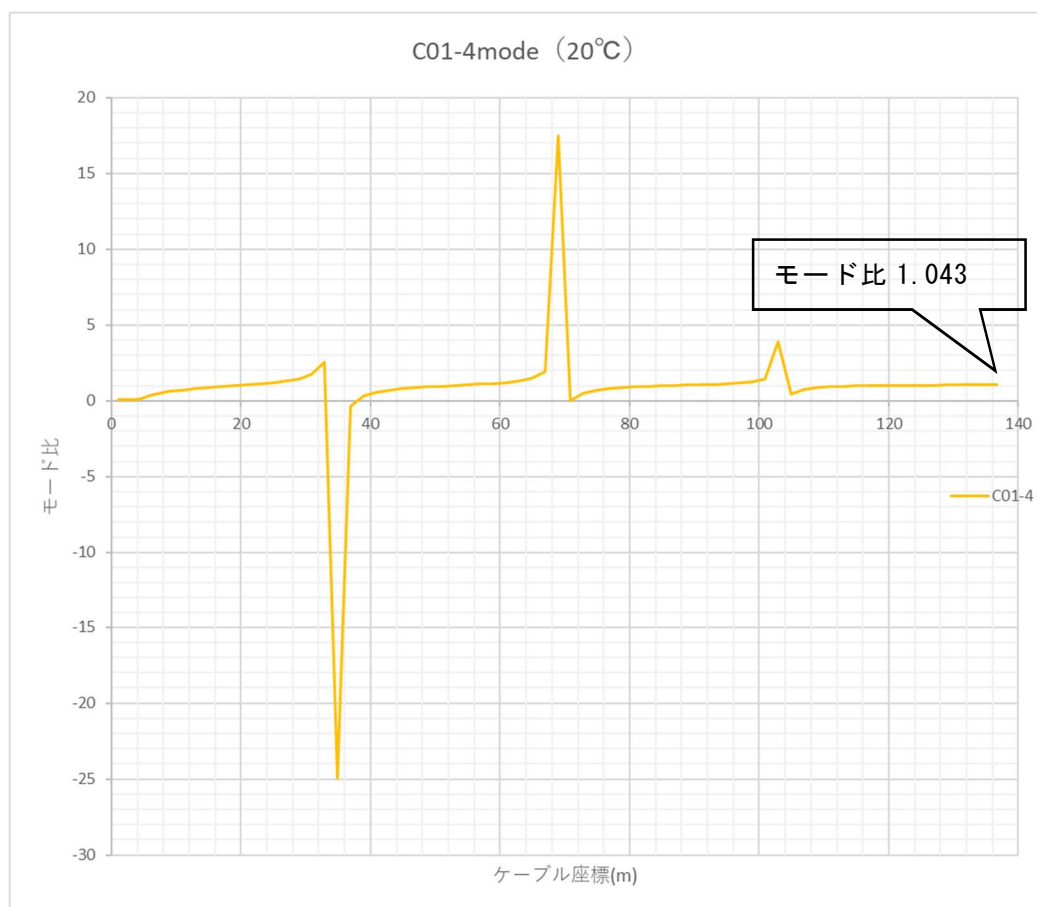


図 6-44 C01 4次モード形状比（ダンパーあり鉛直方向モード/ダンパーなし）

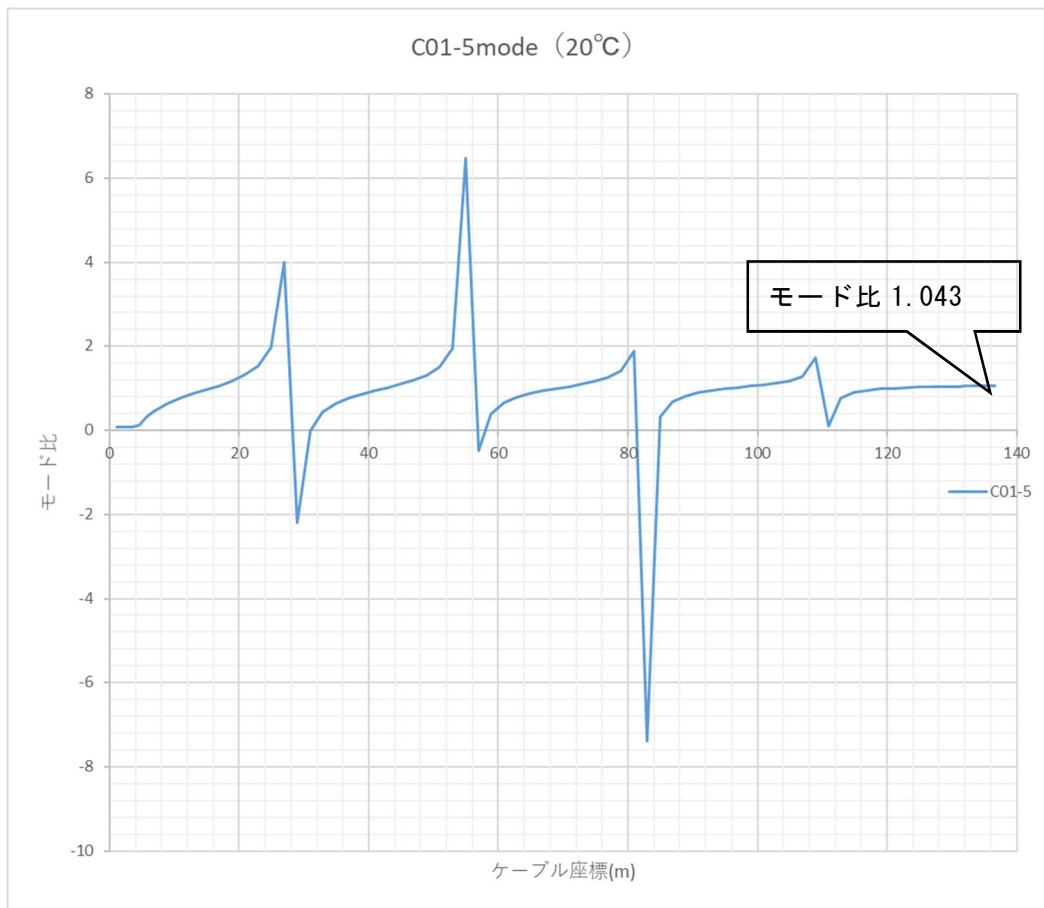


図 6-45 C01 5次モード形状比（ダンパーあり鉛直方向モード/ダンパーなし）

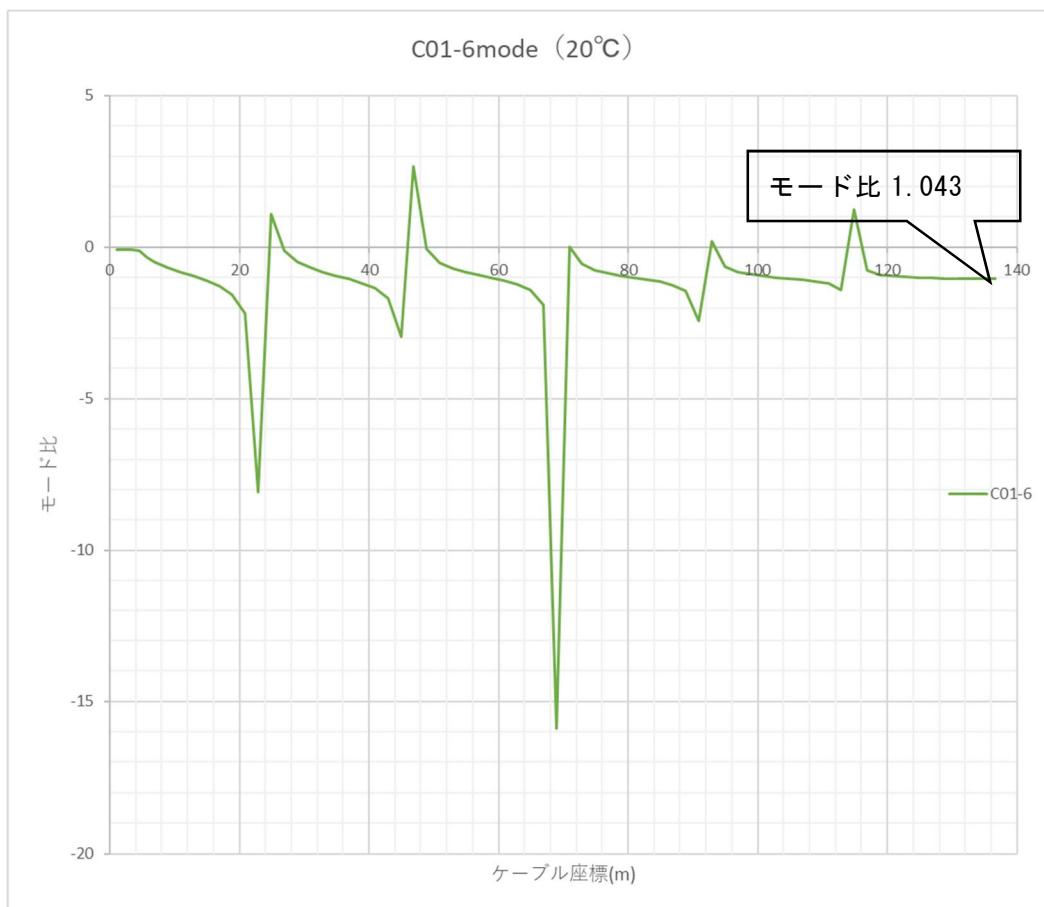


図 6-46 C01 6次モード形状比（ダンパーあり鉛直方向モード/ダンパーなし）

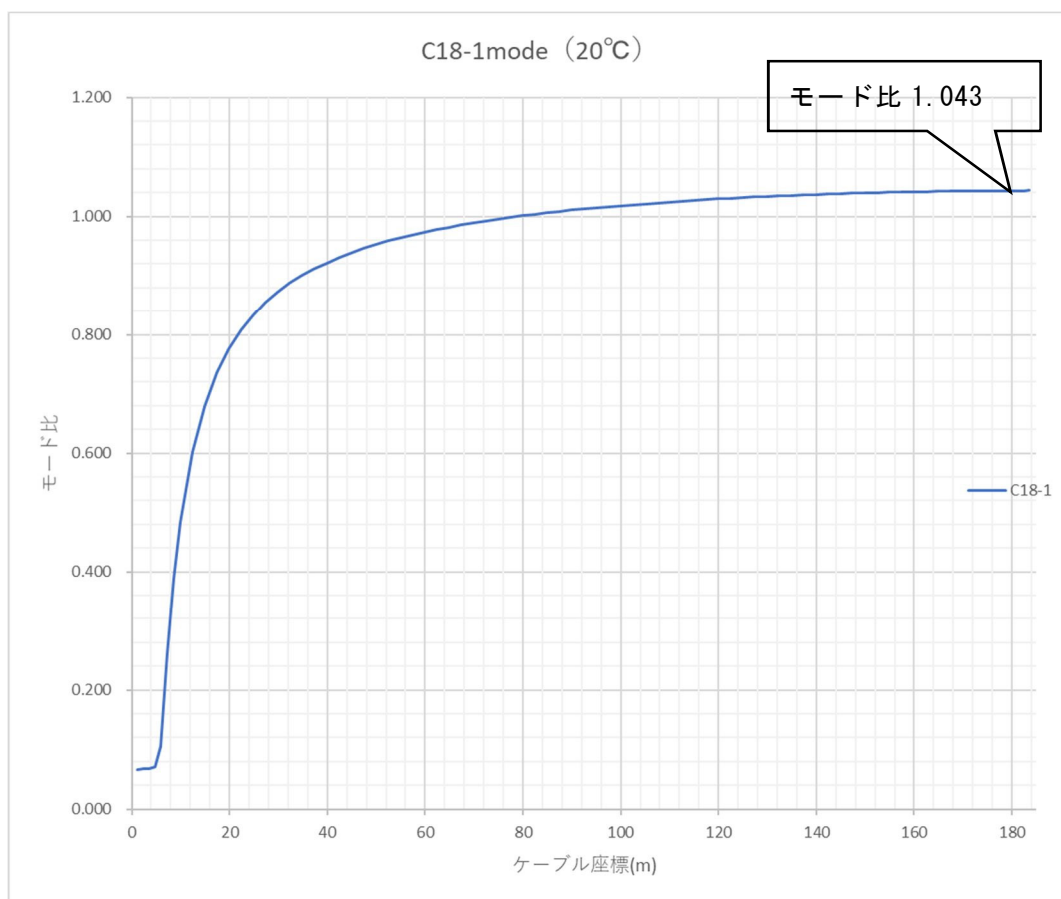


図 6-47 C18 1次モード形状比（ダンパーあり鉛直方向モード/ダンパーなし）

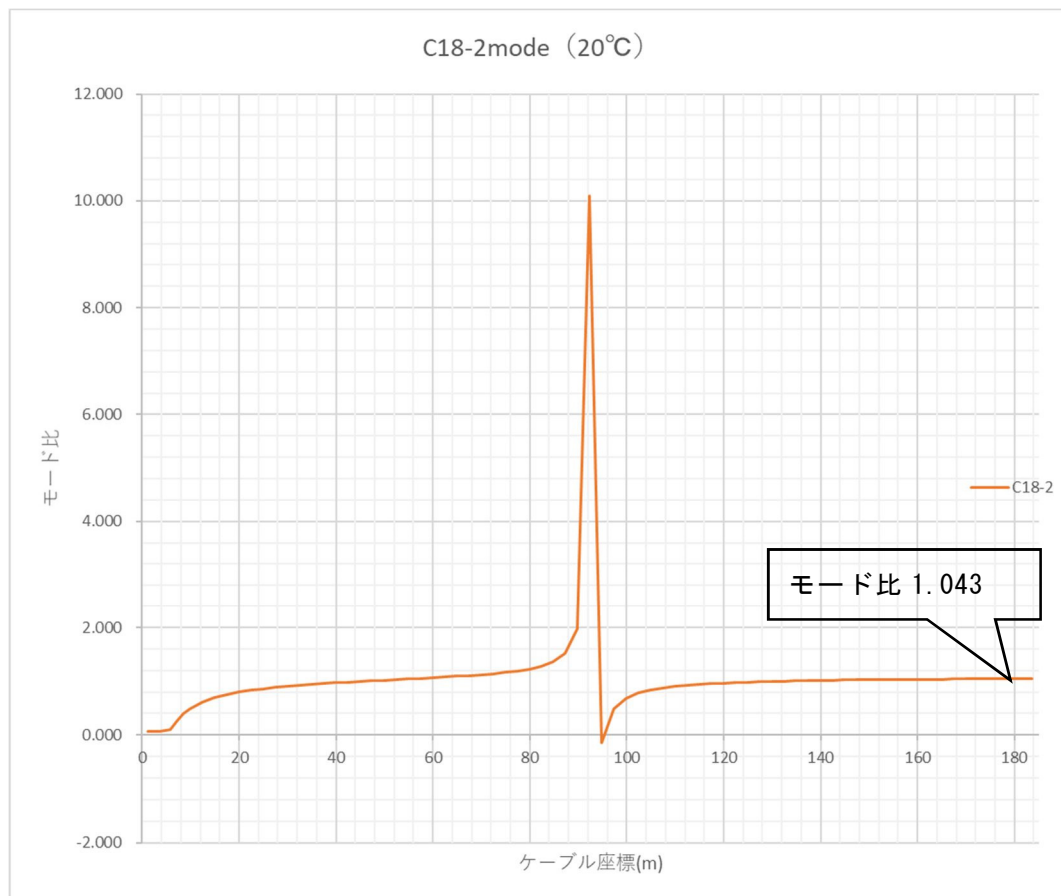


図 6-48 C18 2次モード形状比（ダンパーあり鉛直方向モード/ダンパーなし）



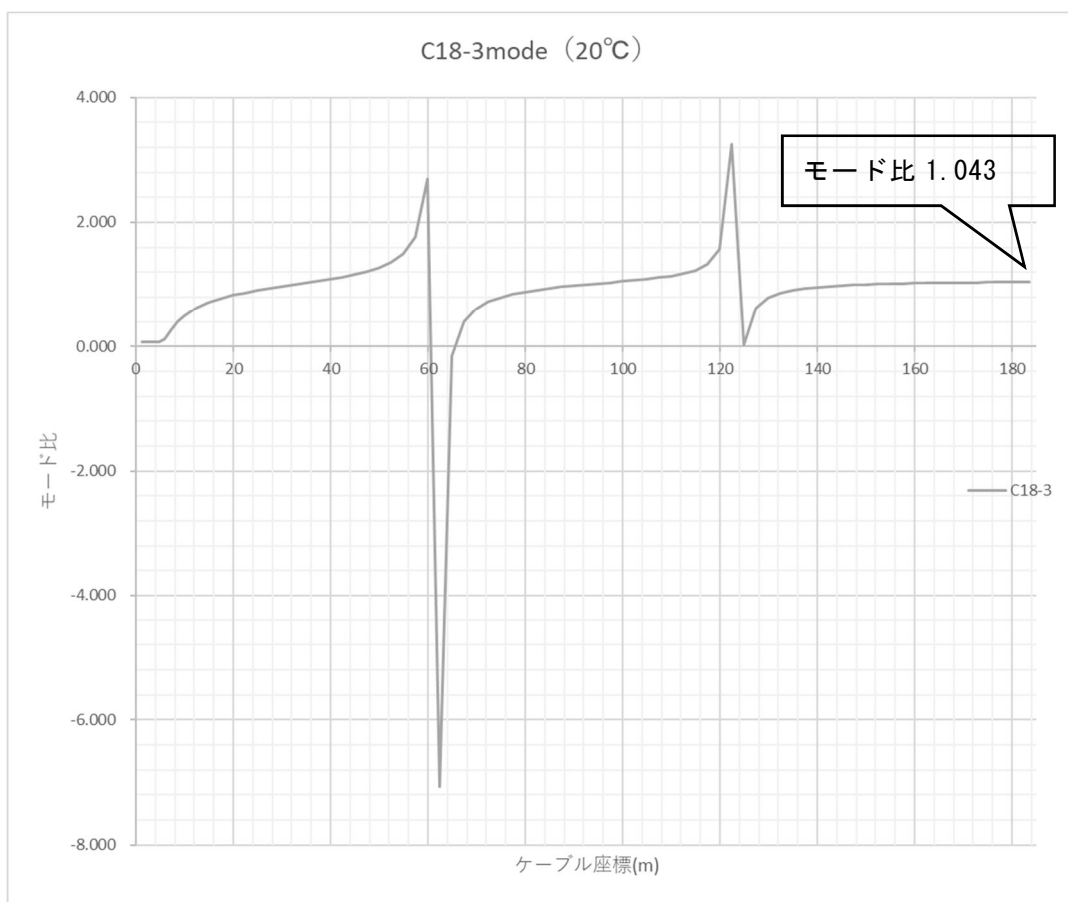


図 6-49 C18 3次モード形状比（ダンパーあり鉛直方向モード/ダンパーなし）

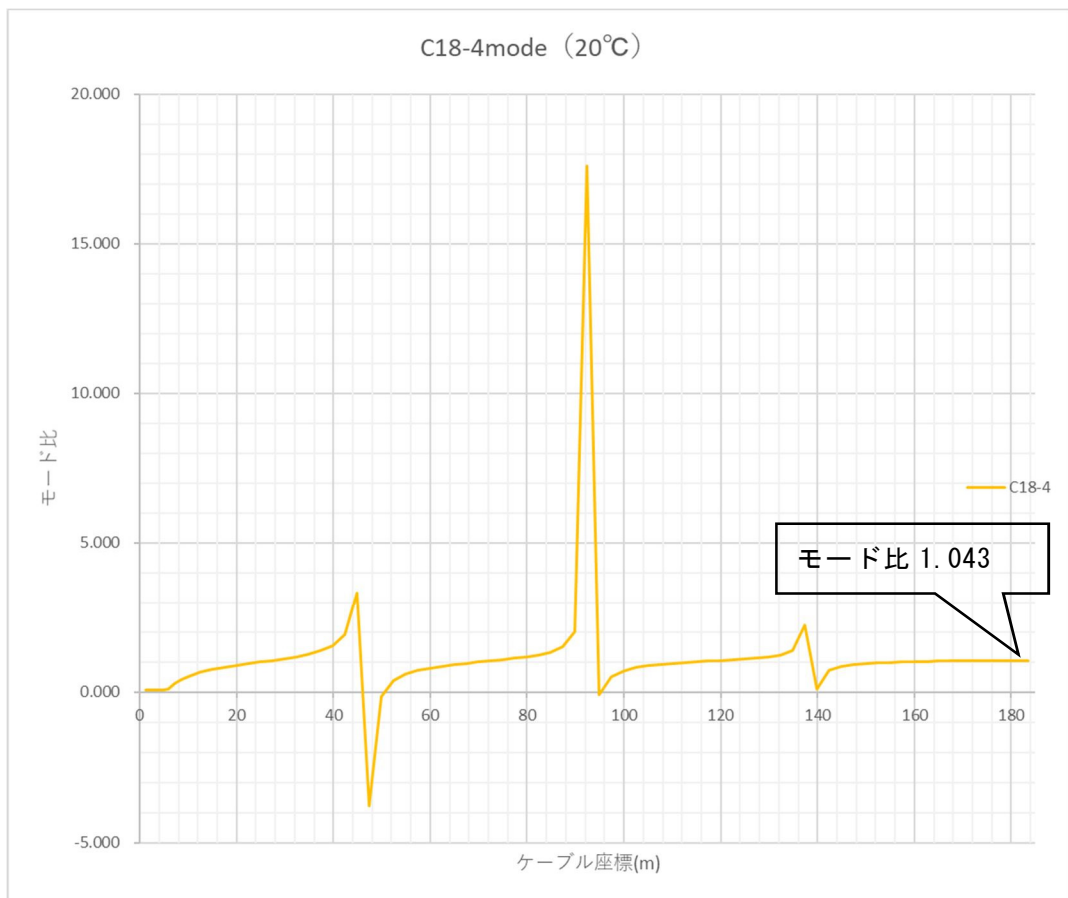


図 6-50 C18 4次モード形状比（ダンパーあり鉛直方向モード/ダンパーなし）

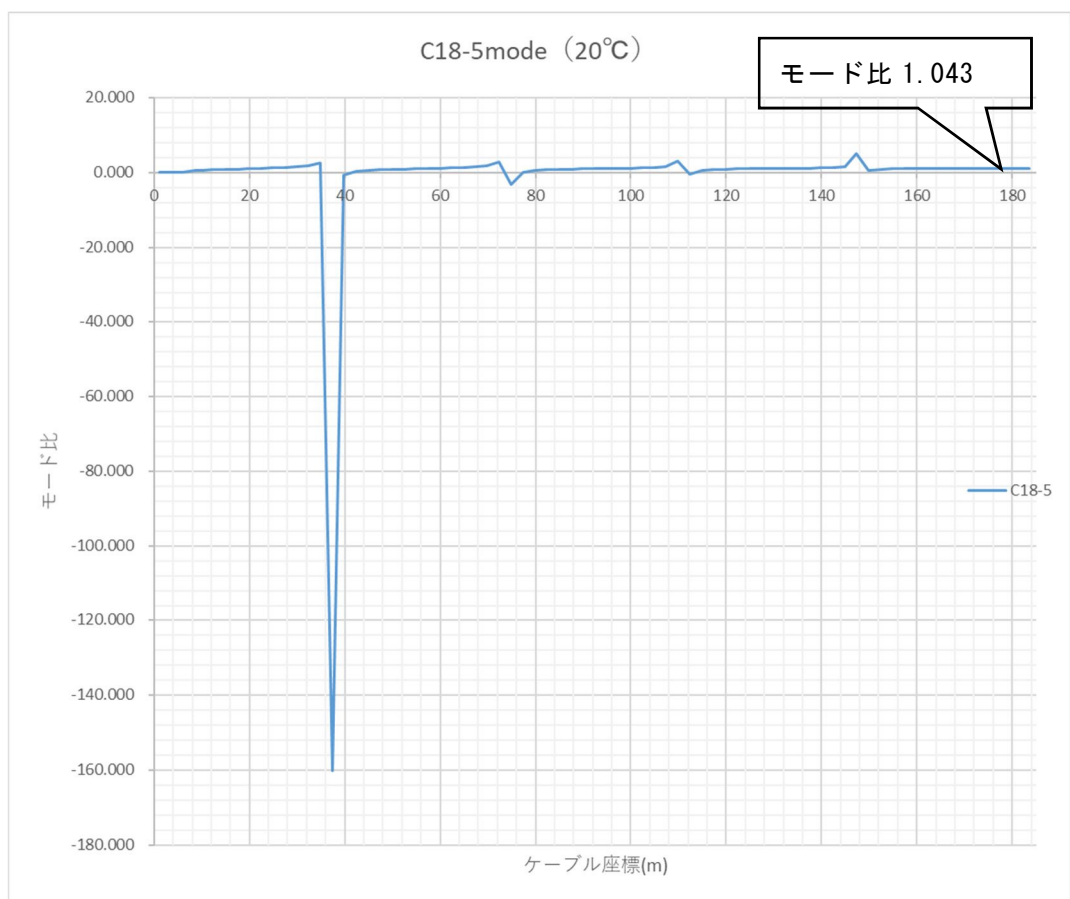


図 6-51 C18 5次モード形状比（ダンパーあり鉛直方向モード/ダンパーなし）

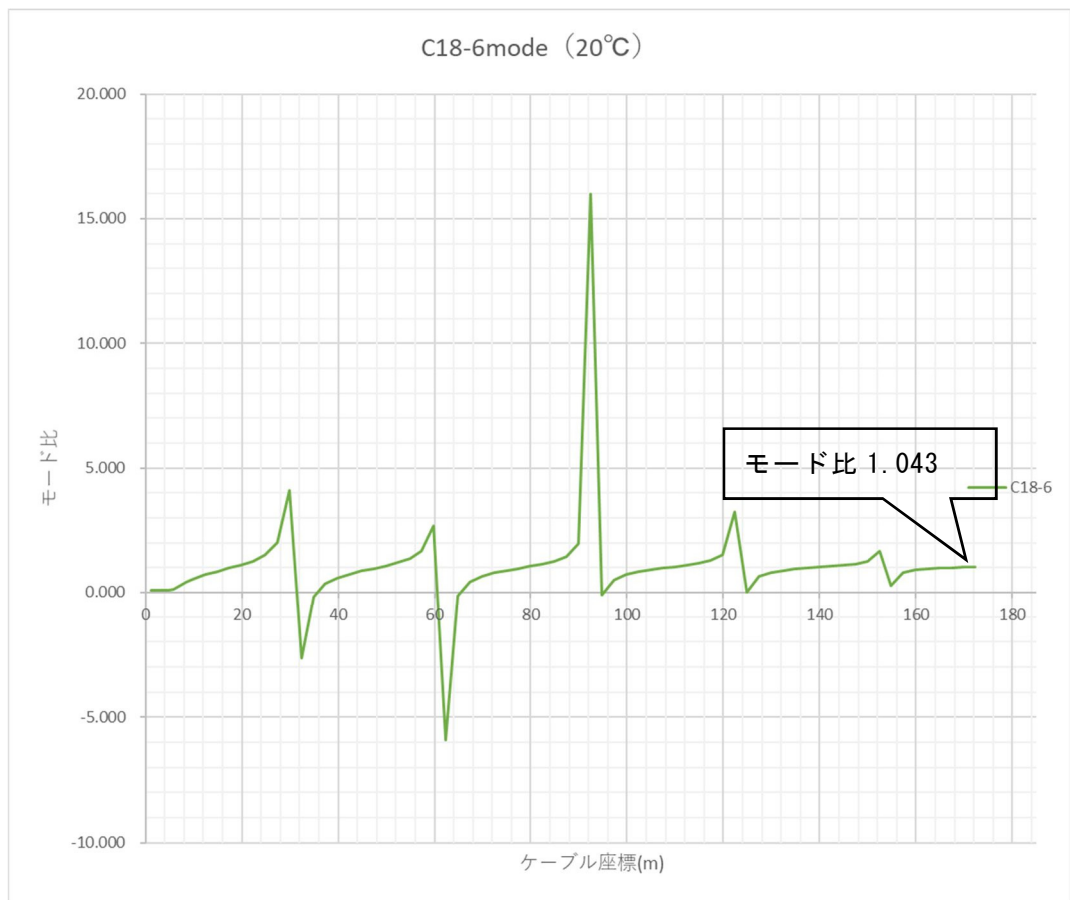


図 6-52 C18 6次モード形状比（ダンパーあり鉛直方向モード/ダンパーなし）

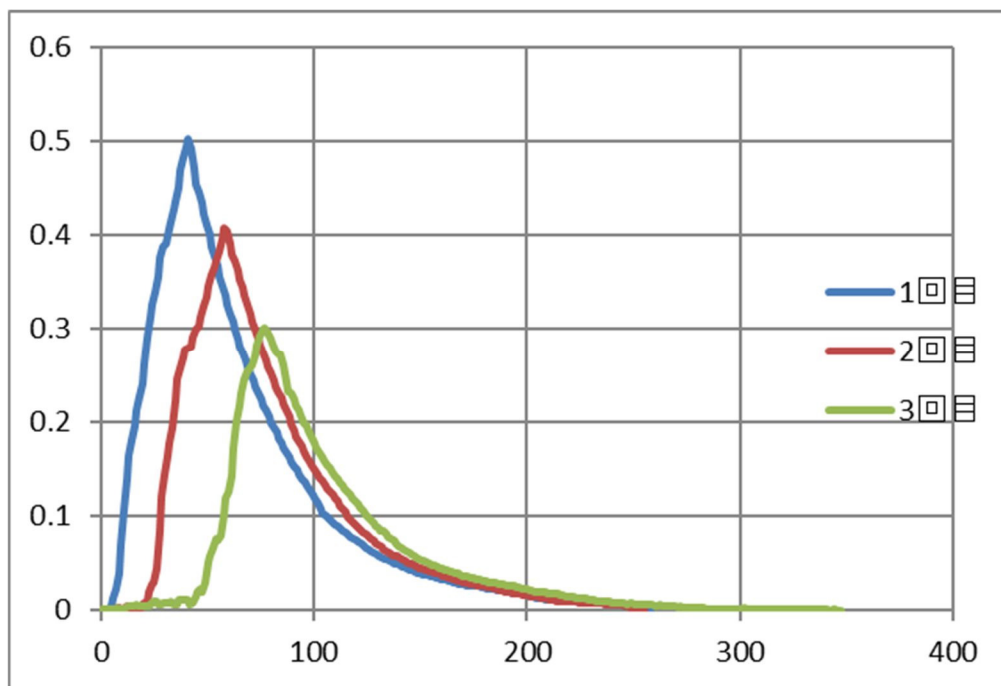


図 6-53 C01 1 次モード加振試験 自由減衰波形（+側ピーク値包絡線）

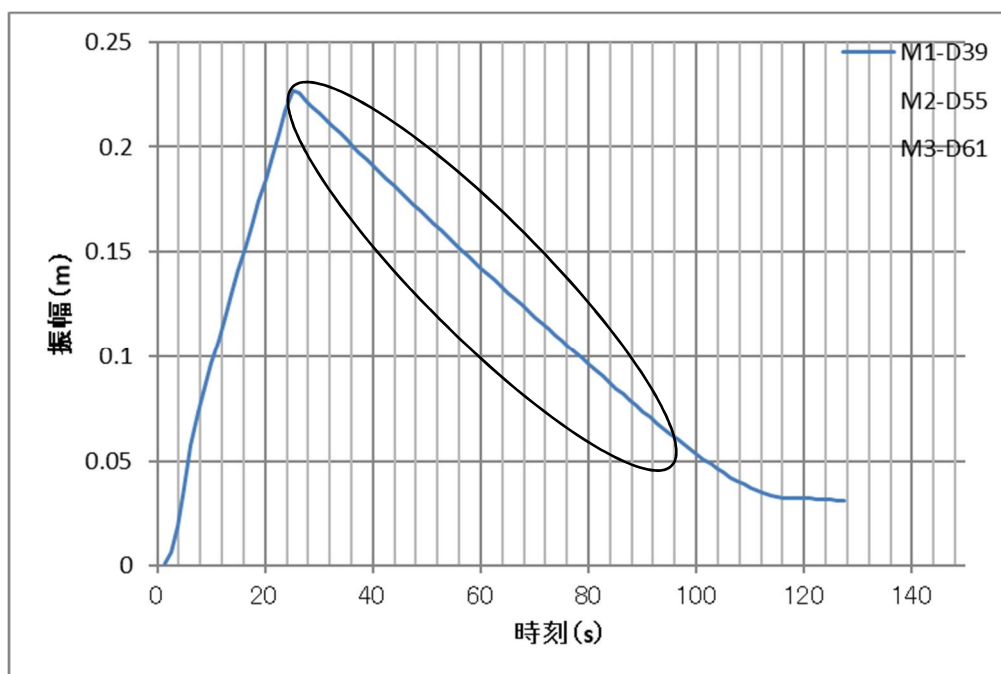


図 6-54 C01 1 次モード強制加振解析 自由減衰波形（+側ピーク値包絡線）

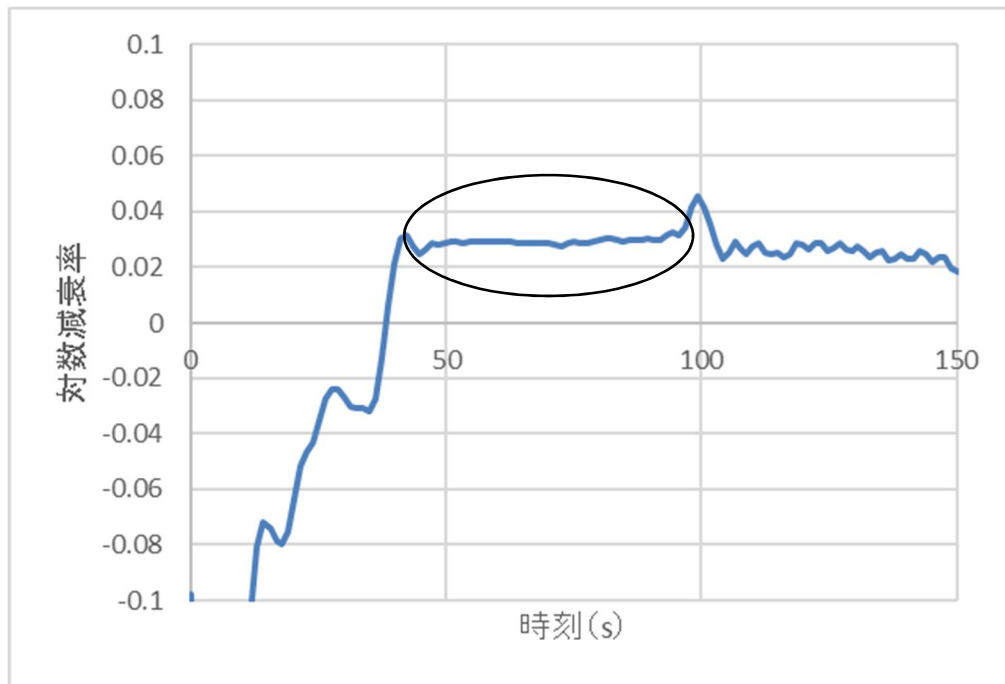


図 6-55 C01 1 次モード加振試験 対数減衰率時刻歴

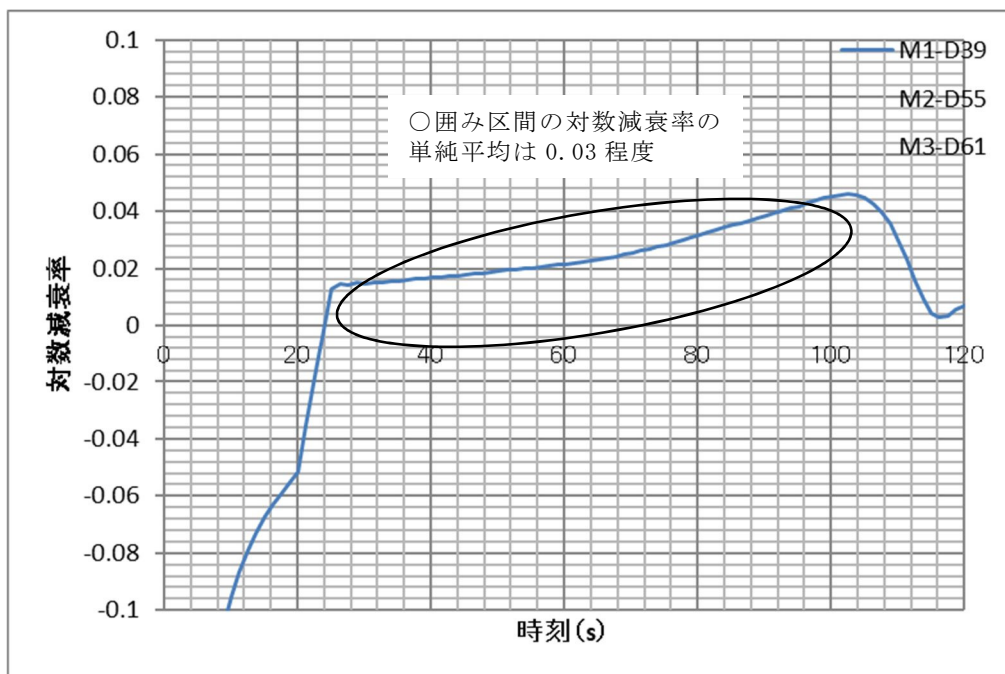


図 6-56 C01 1 次モード強制加振解析 対数減衰率時刻歴

## 第7章 高減衰ゴムダンパーの付加減衰推定式

### 7.1. 推定式の補正

前章までの複素固有値解析や強制加振解析による付加減衰の評価結果を踏まえ、高減衰ゴムダンパーの付加減衰推定式に次に示す補正係数を考慮することで、サグやケーブルの曲げ剛性及び傾斜と言った実構造を反映でき、推定精度が向上すると考えられる。

$$\delta_{(D)} = \frac{2\pi[\varphi_1(X_i)]^2}{2M\omega_n} \cdot \frac{Kv}{\omega_n} \cdot e^{-0.72\frac{\omega_n x_i(L-x_i)}{TL}} \cdot \frac{Kv}{\omega_n} \cdot \frac{2}{\gamma} \quad \times \text{補正係数 } \alpha \quad (\text{式 7-1})$$

補正係数 $\alpha$ は、5.3 (4)で整理した 図 5-34, 図 5-35, 図 5-41, 図 5-42 より、ケーブル剛性が大きく ( $K_{cb} > 0.64\text{kN/m}$ ) 傾斜角の大きい ( $\theta > 34^\circ$ ) C01・C02・C03 を基本として、無次元パラメータ $\kappa$ を用いた下式のとおりである。

$$\alpha = \alpha_1 \times \alpha_2 \times (-4.0357\kappa^2 + 2.9247\kappa + 0.6434) \quad (\text{式 7-2})$$

ここに、 $\alpha_1$  : ケーブル剛性  $K_{cb} < 0.32 \text{ kN/m}$ , 傾斜角  $\theta < 24^\circ$  の場合にこれらの影響を考慮する係数で次のとおりとする。

$$\alpha_1 = -5.7893\kappa^3 + 5.9827\kappa^2 - 2.2172\kappa + 1.2234 \quad (\text{式 7-3})$$

$\alpha_2$  : 1次モードに対するサグ比 ( $s/L$ ) の影響を考慮するための係数で次のとおりとする。

$$\alpha_2 = -26.794(s/L) + 1.0536 \quad (\text{式 7-4})$$

とする。

提案した補正係数の適用範囲は、ケーブル剛性が  $K_{cb} > 0.64\text{kN/m}$  かつ傾斜角  $\theta > 34^\circ$  , あるいはケーブル剛性  $K_{cb} < 0.32\text{kN/m}$  かつ傾斜角  $\theta < 24^\circ$  , である。

### 7.2. 補正した推定式での付加減衰算出結果

次頁以降の図 7-1～図 7-10 に各ケーブルについて補正した推定式で付加減衰を算出した結果を示す。同結果には、複素固有値解析結果（サグ・曲げ剛性・傾斜考慮）および補正前の推定式による結果もあわせて示している。

同図より、補正後の推定式で求めた付加減衰は全般に補正前に比べて複素固有値解析結果に近づくことがわかる。一部、高次モードになるほど補正後の推定式で求めた付加減衰の方が補正前の推定式より差が大きくなるケースもあるが、高減衰ゴムダンパーばねが硬い場合でモード次数が大きい場合の一部である。いずれのケーブルにおいても、設計変位 10mm に比べ 5mm の方が複素固有値解析結果との差が大きい結果であることから、高減衰ゴムダンパーばねの硬い歯に出誤差が大きくなる傾向がある。

2.2 で述べたとおり、文献 18) では高減衰ゴムの弾性ばね定数と推定式で求めた対数減衰率について複素固有値解析結果との比較が行われており、ばね定数が大きくなると推定式と複素固有値解析結果の誤差が大きくなることが示されている。特にばね定数が 750kN/m を超える範囲でそれが顕著である。本橋のケーブルでは、次のケースがその範

囲に該当し、補正した推定式の計算結果と一致する。

- ・ C01・C02・C03 : 設計変位 5mm-0℃・20℃・40℃, 設計変位 10mm-0℃
- ・ C17・C18 : 設計変位 5mm-0℃・20℃, 設計変位 10mm-0℃

図 7-11 は複素固有値解析に対する補正前の推定式および補正係数考慮後の推定式による対数減衰率の分布を示したものである。横軸は全て複素固有値解析結果の対数減衰率で、縦軸はそれに対応する補正前の推定式および補正係数考慮後の推定式による対数減衰率である。複素固有値解析結果を示している黒い直線の上側に分布する点は、複素固有値解析結果より対数減衰率を大きく推定することを意味している。逆に、直線の下側に分布する点は複素固有値解析より対数減衰率を小さく推定することを意味している。補正係数を考慮した推定式を用いることで、複素固有値解析結果より大きく推定していた部分はその誤差が小さくなり、精度向上が図られている。一方、複素固有値解析結果より小さく推定していた部分もその誤差が小さくなっているが、大きく推定していた部分に比べて改善の程度は小さい。これは、補正前の推定式の精度の問題と考えられる（補正前の推定式は高減衰ゴムダンパーばねの硬い範囲で誤差が大きくなる）。

図 7-12 は図 7-11 の縦軸を複素固有値解析結果で除したものを示している。同図から、補正前の推定式は、複素固有値解析結果に対し、0.4～1.5 程度の範囲で分布していることがわかる。補正係数考慮後の推定式は、0.4～1.2 程度の範囲で分布しており、誤差は改善されている。特に設計においては対数減衰率を課題に見込むことは危険側となることから、1.0 を超える側の推定精度が向上することは重要である。補正前の推定式および補正係数考慮後の推定式に対し、複素固有値解析結果より大きく推定する側の対数減衰率の比率を単純平均すると、補正前の推定式は 1.19, 補正係数考慮後の推定式は 1.07, となり、10%程度の精度向上が図られている。複素固有値解析結果より小さく推定する側の単純平均は、補正前の推定式が 0.76, 補正係数考慮後の推定式が 0.80, となり、6%程度の精度向上が図られている。

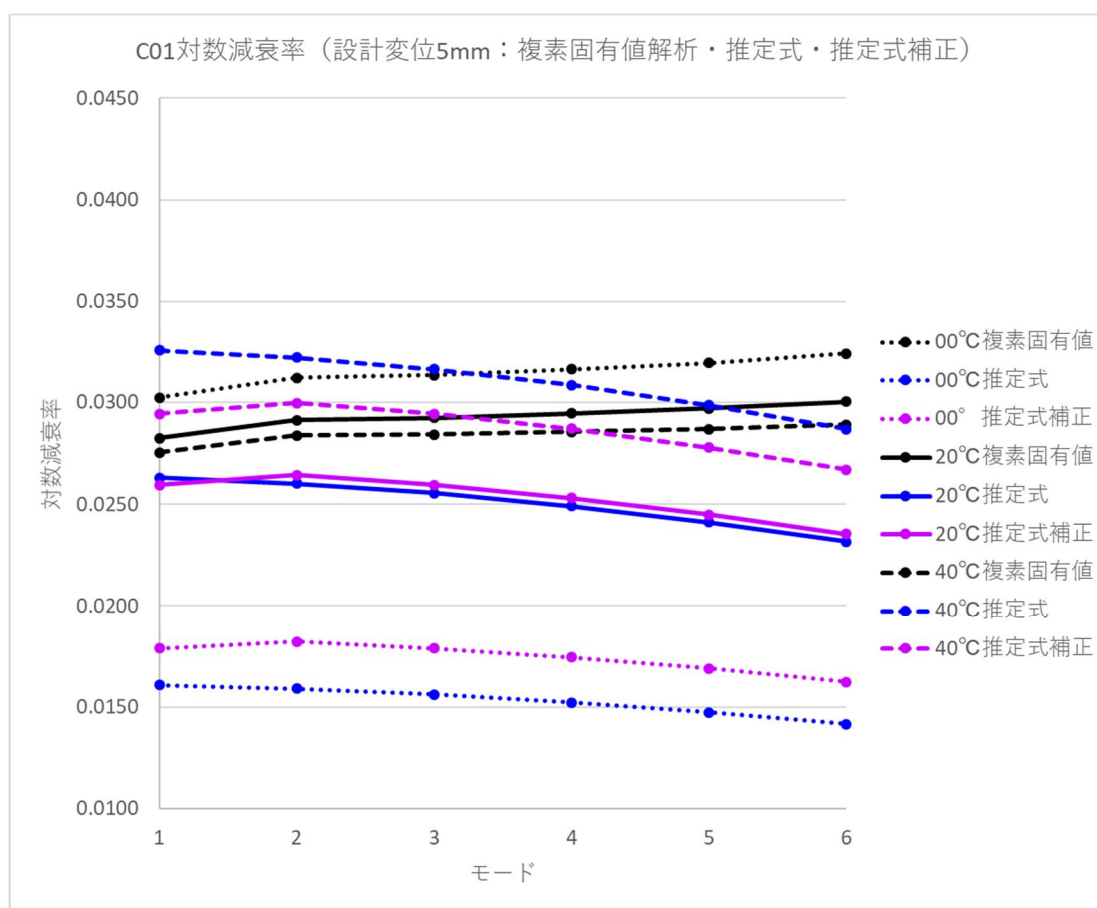


図 7-1 C01 設計変位 5mm 対数減衰率（複素固有値解析，推定式，推定式補正）

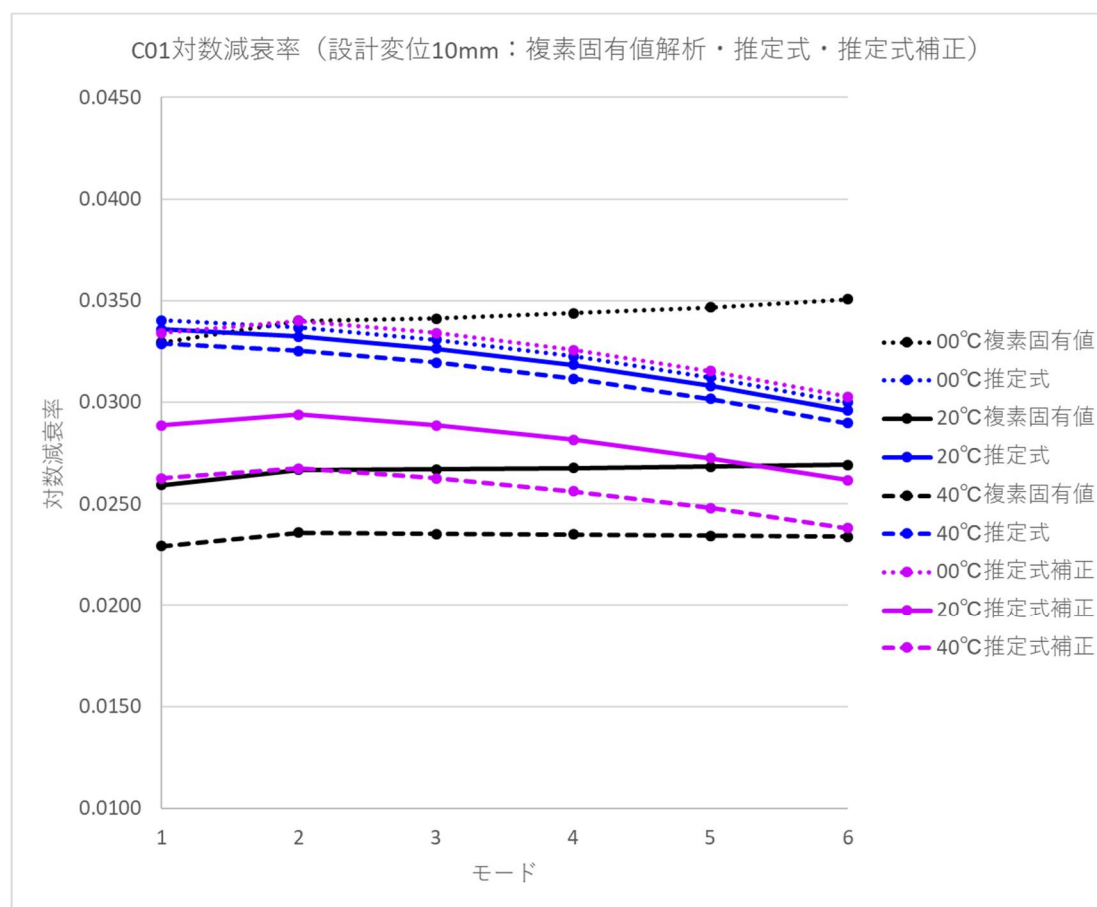


図 7-2 C01 設計変位 10mm 対数減衰率（複素固有値解析，推定式，推定式補正）

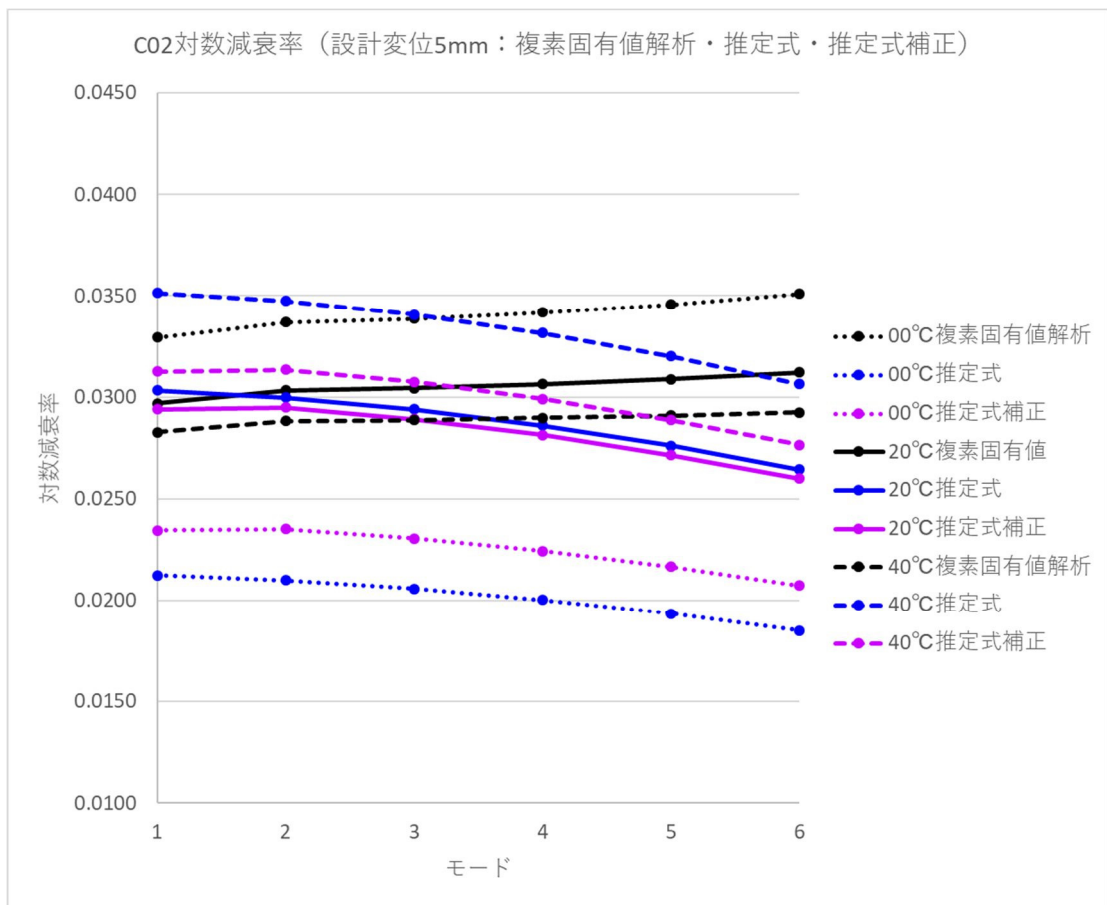


図 7-3 C02 設計変位 5mm 対数減衰率（複素固有値解析，推定式，推定式補正）

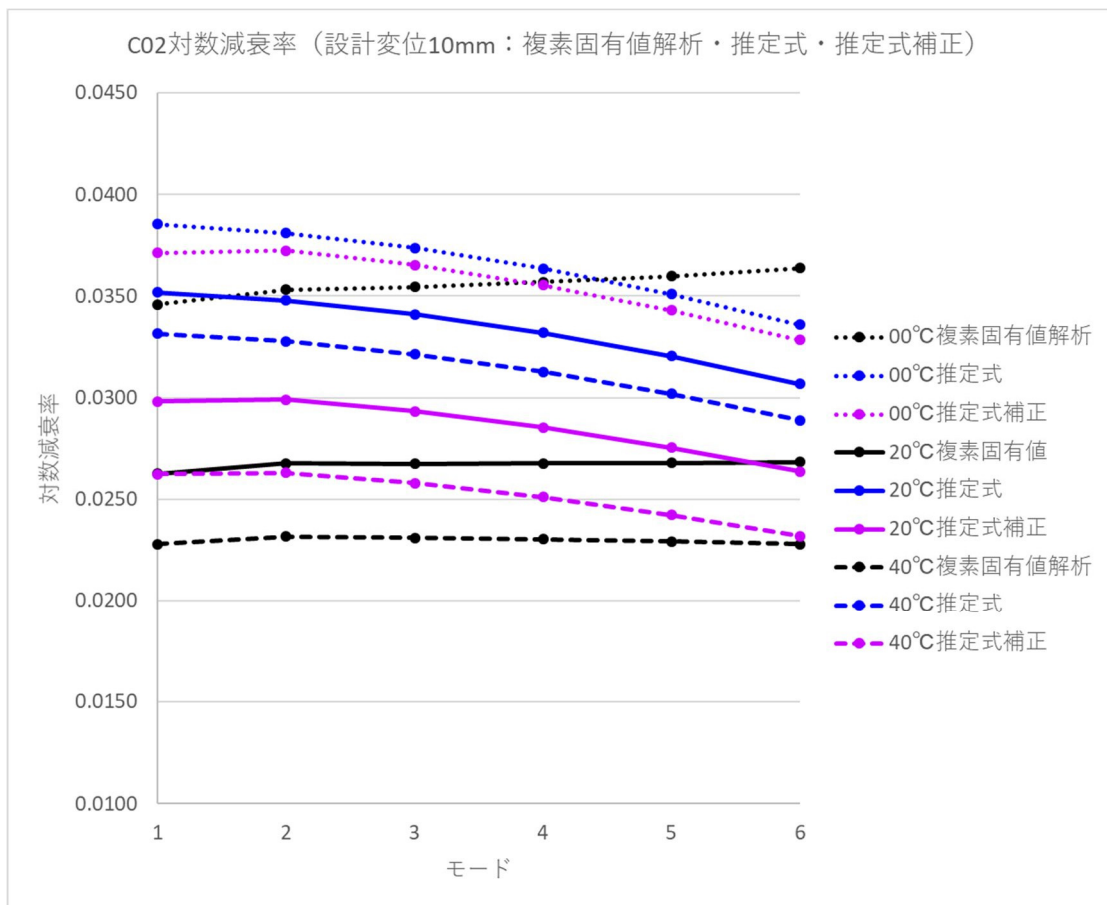


図 7-4 C02 設計変位 10mm 対数減衰率（複素固有値解析，推定式，推定式補正）



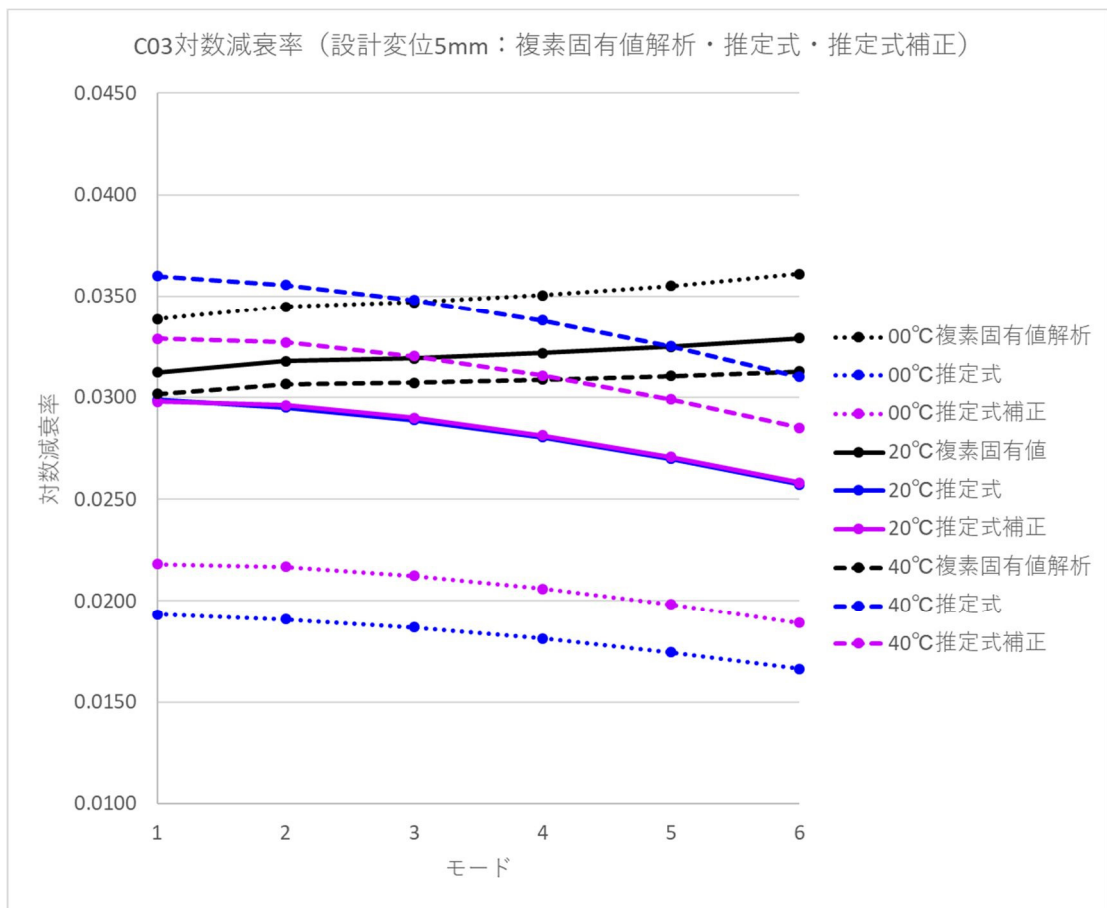


図 7-5 C03 設計変位 5mm 対数減衰率（複素固有値解析，推定式，推定式補正）

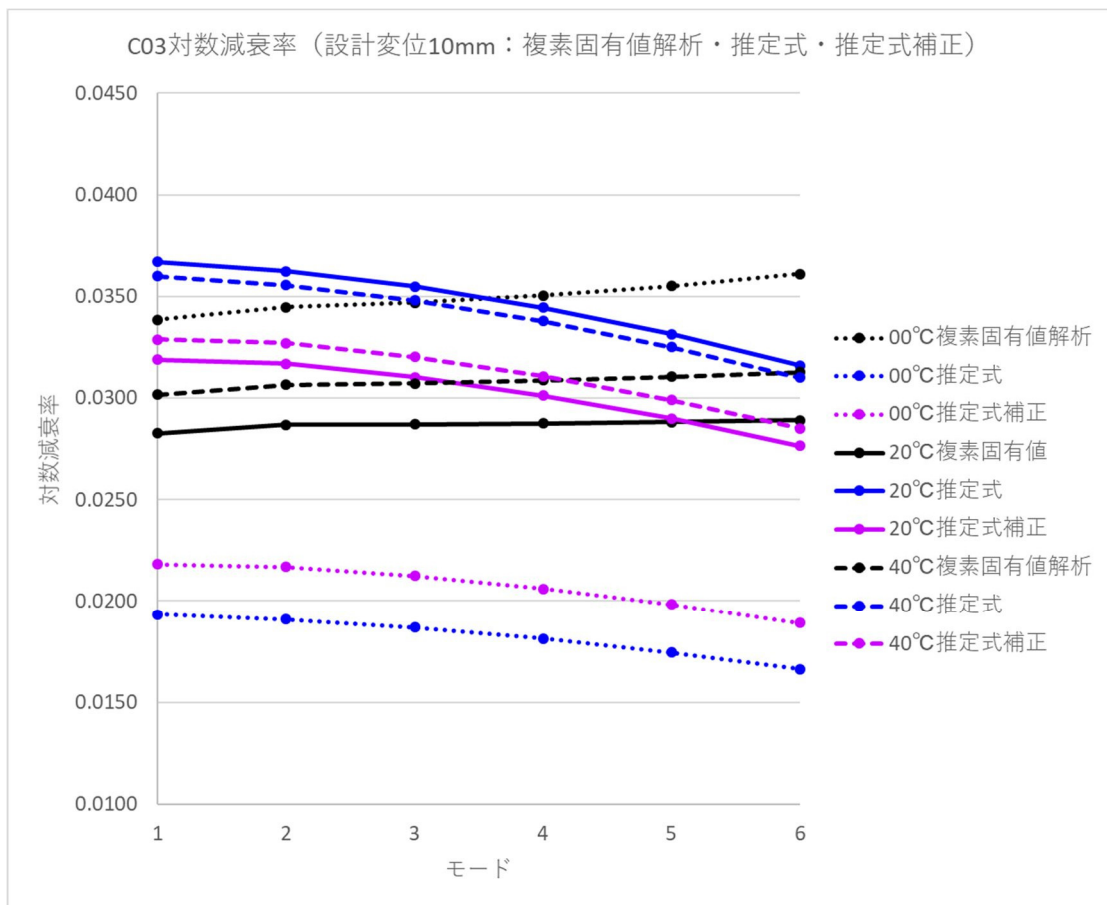


図 7-6 C03 設計変位 10mm 対数減衰率（複素固有値解析，推定式，推定式補正）

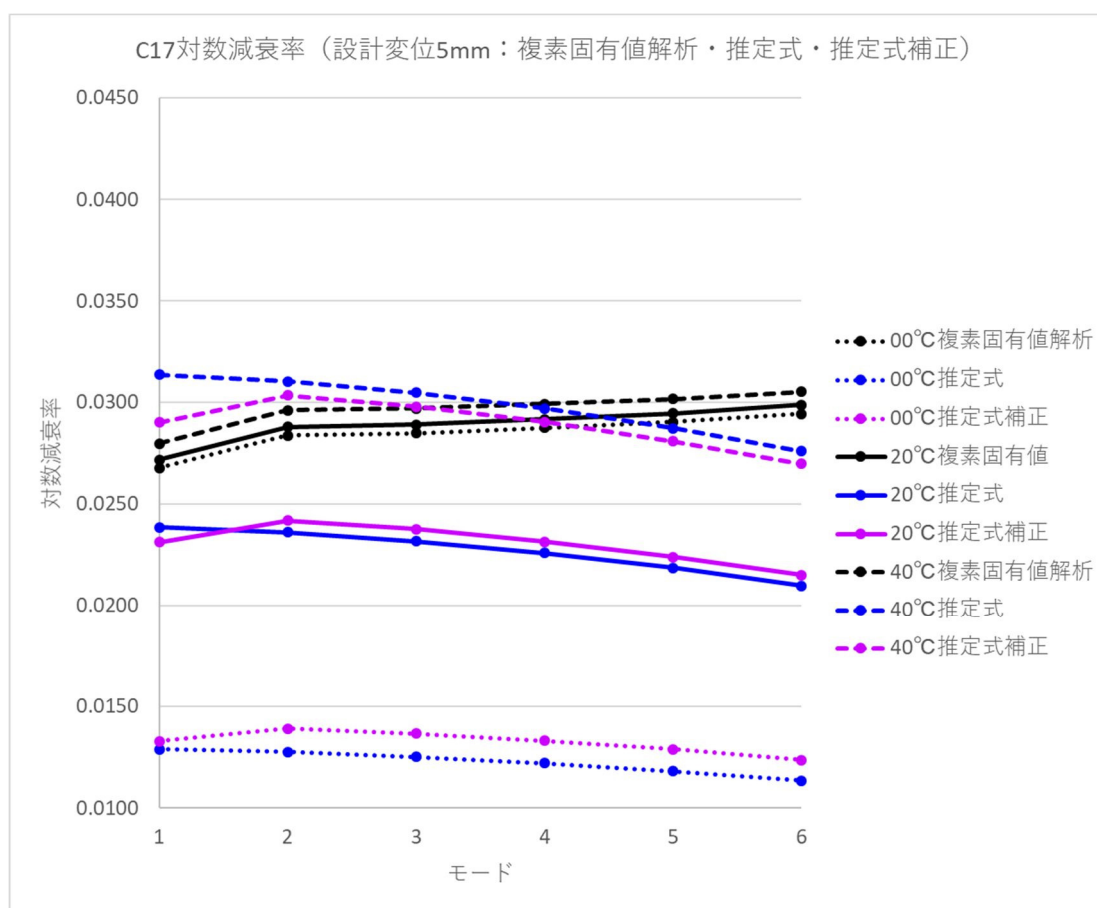


図 7-7 C17 設計変位 5mm 対数減衰率（複素固有値解析，推定式，推定式補正）

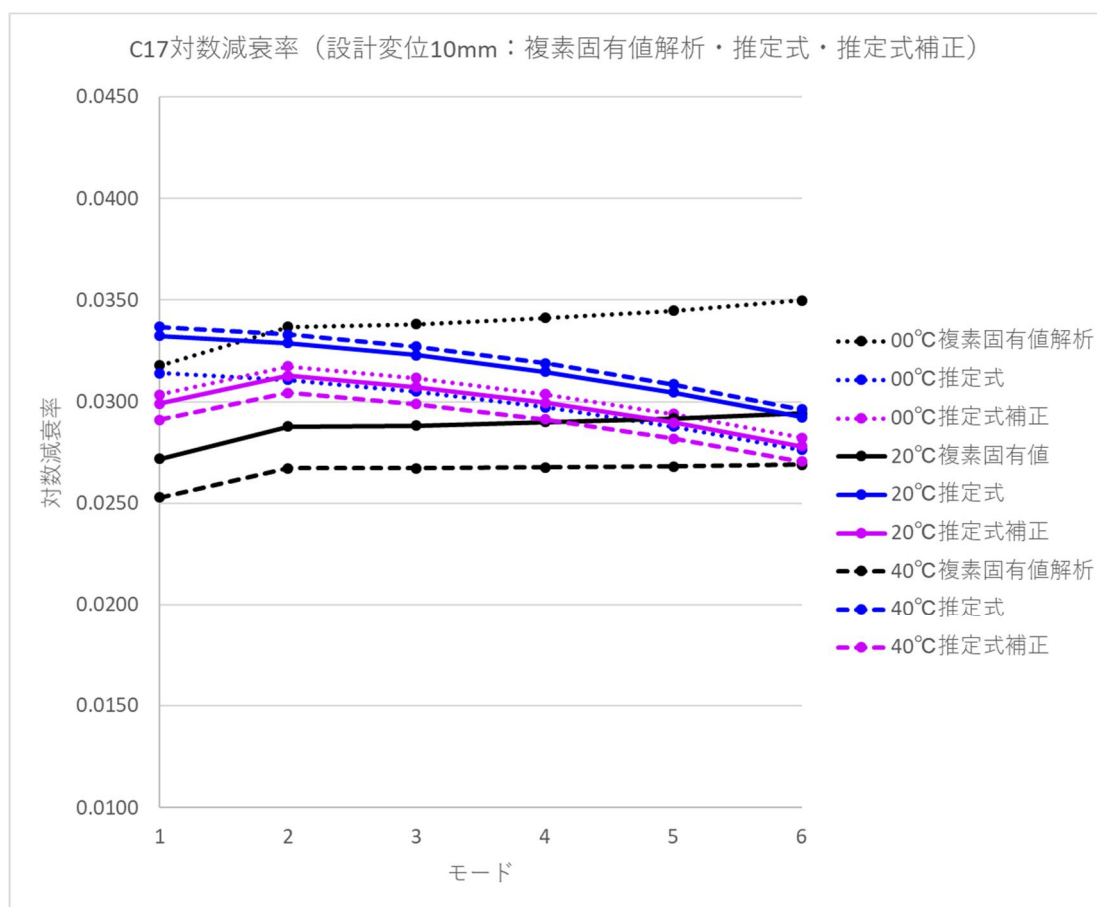


図 7-8 C17 設計変位 10mm 対数減衰率（複素固有値解析，推定式，推定式補正）

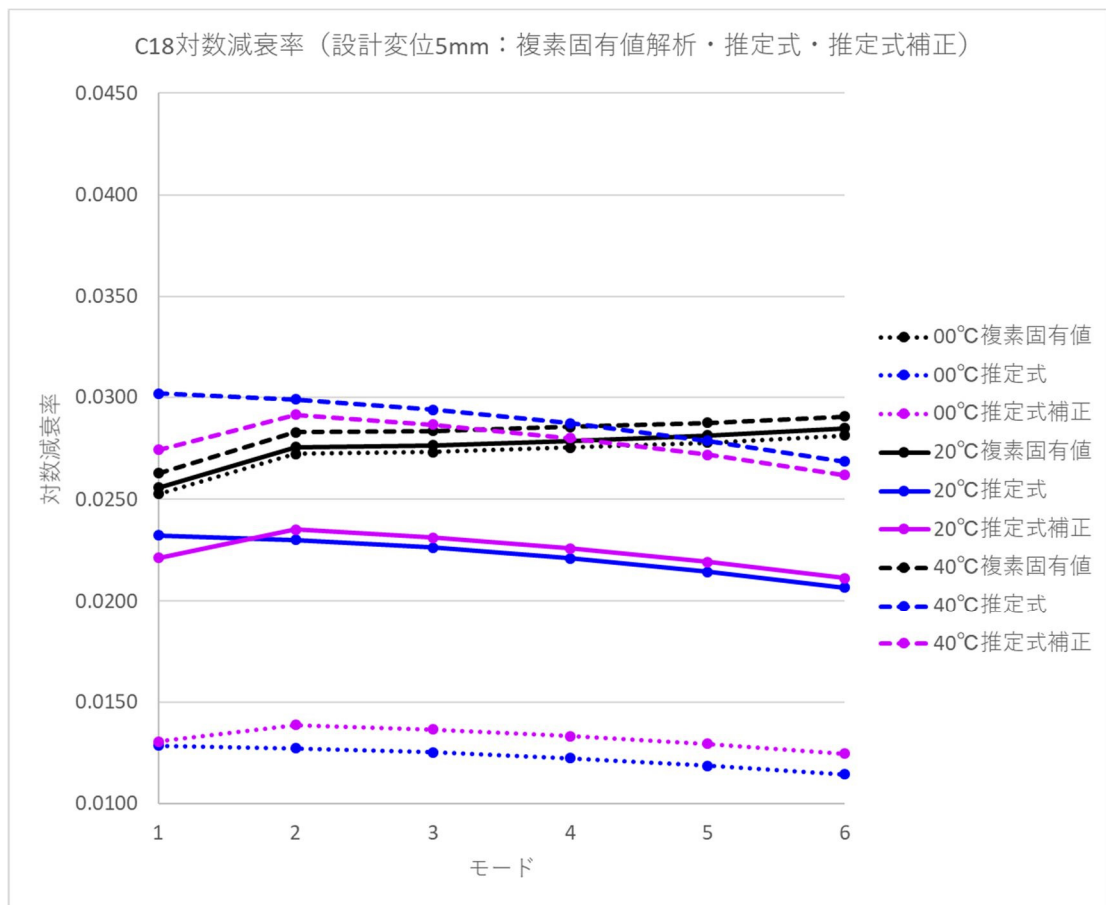


図 7-9 C18 設計変位 5mm 対数減衰率（複素固有値解析，推定式，推定式補正）

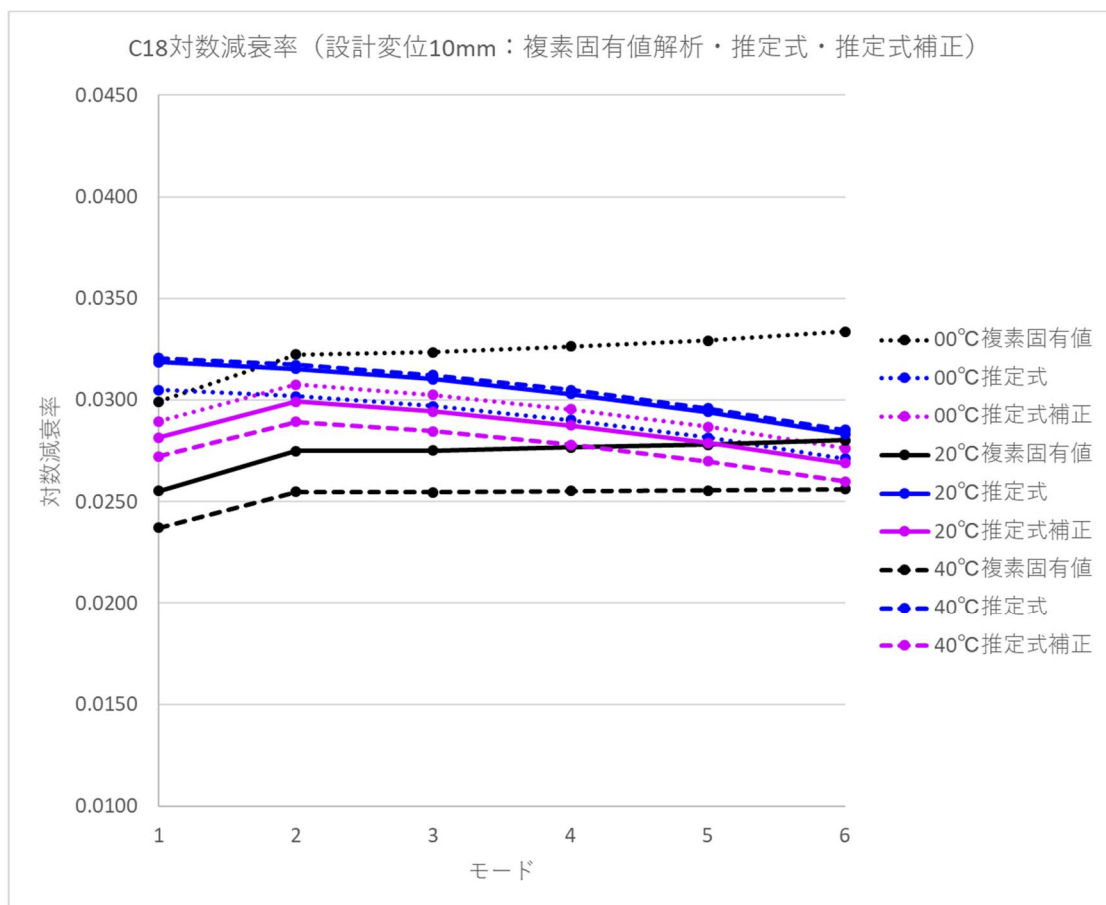


図 7-10 C18 設計変位 10mm 対数減衰率（複素固有値解析，推定式，推定式補正）

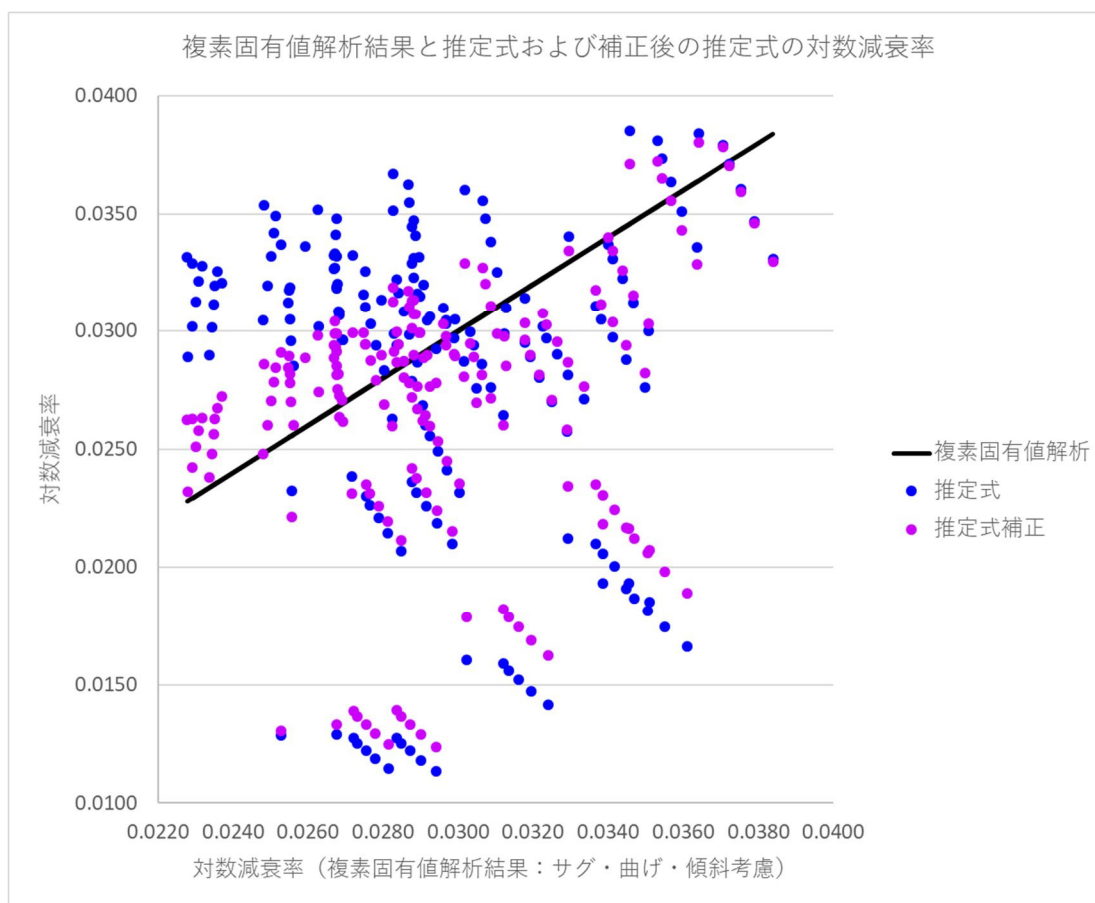


図 7-11 全ケーブル対数減衰率（複素固有値解析，推定式，推定式補正）

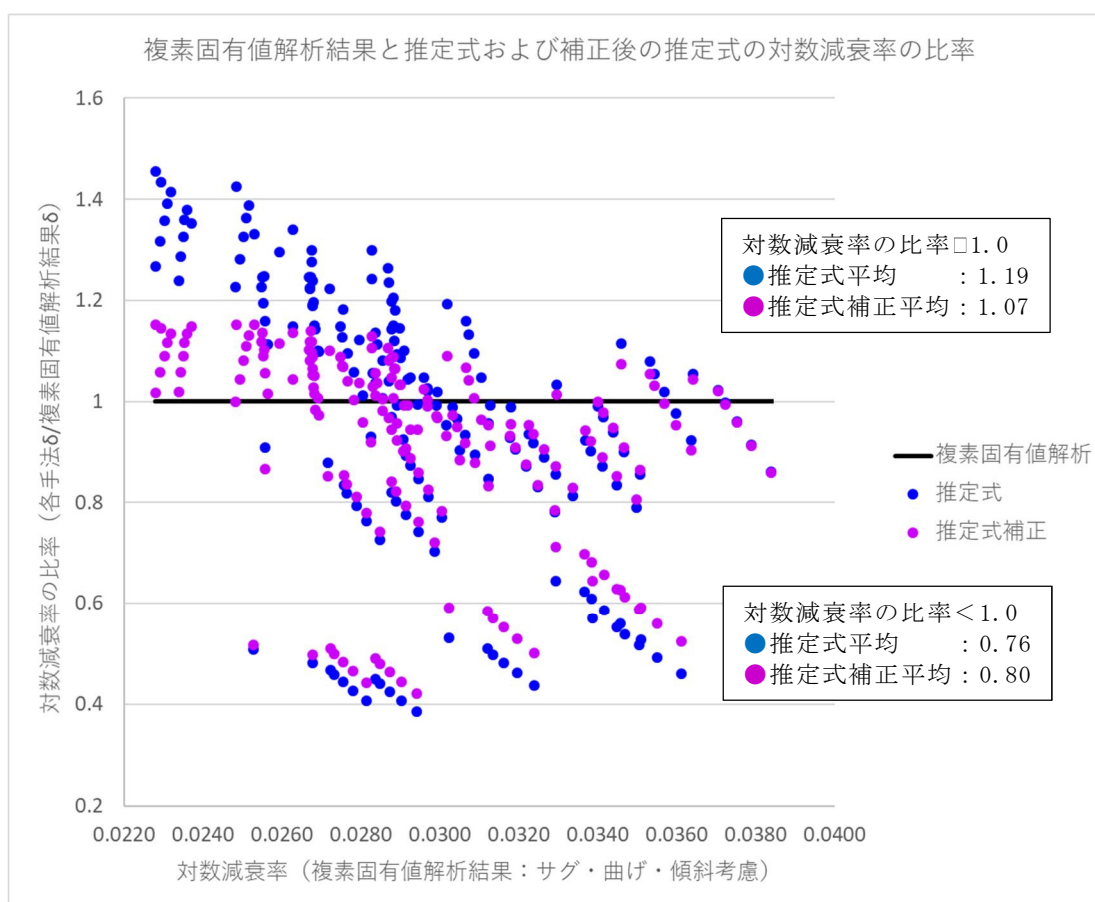


図 7-12 全ケーブル対数減衰率比（複素固有値解析，推定式，推定式補正）

### 7.3. 補正係数を考慮した推定式を使用する場合の留意点

提案した補正係数を用いた推定式を利用するにあたっては、次の点に留意しなければならない。

- ・ ケーブル剛性  $K_{cb} > 0.64\text{kN/m}$  かつ傾斜角  $\theta > 34^\circ$  , あるいはケーブル剛性  $K_{cb} < 0.32\text{kN/m}$  かつ傾斜角  $\theta < 24^\circ$  , の適用範囲から外れる場合は複素固有値解析により推定値の妥当性を確認する必要がある。
- ・ 現地加振試験で明らかになったとおり、高減衰ゴムダンパー定着部の構造が対数減衰率に影響を及ぼすが、推定式的前提は剛な支点である。そのため、この前提を実現できる構造に対して適用する必要がある。
- ・ 施工時など設計張力と異なる状況で設置する可能性がある場合は、最終完成時だけでなく施工時の張力に対しても対数減衰率を確認しておく必要がある。
- ・ 高減衰ゴムダンパーのばね定数が大きい場合は複素固有値解析結果との差が大きくなるため、その差分を考慮し余裕を持った高減衰ゴムダンパー性能を決定する必要がある。

## 第8章 まとめ

本研究では、斜張橋ケーブル制振用ダンパーの設計に関し、次のことを明らかにすることで、設計の高度化を図った。

- ・ 高減衰ダンパーによる付加減衰は、サグ・ケーブル曲げ剛性・傾斜の影響を受け、これらを考慮しない場合に比べ、0.79 倍～1.15 倍となり、その影響は無視できない。
- ・ サグの影響は 1 次モードにおいて顕著であり、1 次モードに対してのみその影響を考慮する必要がある。
- ・ 高減衰ゴムダンパーとケーブルの剛性の比、ダンパー設置位置とケーブル長の比、からなる無次元パラメータ  $\kappa$  を導入することで、サグやケーブル曲げ剛性および傾斜の影響を、補正係数という形で推定式に取り込むことができる。
- ・  $\kappa$  を用いた推定式の補正は、ケーブル剛性や傾斜角により傾向が異なることから、ケーブル剛性  $K_{cb} > 0.64\text{kN/m}$  かつ傾斜角  $\theta > 34^\circ$  の範囲と、ケーブル剛性  $K_{cb} < 0.32\text{kN/m}$  かつ傾斜角  $\theta < 24^\circ$  の範囲とに、それぞれ分けて補正する必要がある。
- ・ 補正係数を考慮した推定式を用いることで、補正係数を考慮しない場合に比べて、複素固有値解析の対数減衰率より大きい側で 10%程度、小さい側で 6%程度の精度向上が図れる。
- ・ 高減衰ゴムダンパー定着部は、設計上の仮定である固定点と見なせる剛な構造とする必要がある。

斜張橋ケーブル制振用ダンパーの設計の高度化に向けた今後の課題としては、次のようなことが考えられる。

- ・ 諸元の異なるケーブルや高減衰ゴムダンパーに対する複素固有値解析データの蓄積による、補正係数の適用範囲の拡大による汎用化
- ・ 上記とともに、推定式の更なる推定精度向上
- ・ 強制加振解析による現地加振試験を再現のための、ケーブル自身が有する減衰のモデル化方法や履歴減衰モデルを構築するための加振試験データの蓄積

以上

## 謝辞

本論文の完成にあたり，指導教員の横浜国立大学都市イノベーション学府 勝地 弘教授をはじめ，山田 均教授，田村 洋准教授，ほか多くの方々からご指導やご助言を頂きましたことに感謝の意を表します．また，高減衰ゴムダンパーの性能試験データ等を提供頂いた住友ゴム工業株式会社様にはこの場を借りて御礼申し上げます．

## 参考文献

- 1) 国土開発技術センター：斜張橋ケーブルの耐風性に関する調査検討報告書，1989 年 2 月
- 2) 国土開発技術センター：斜張橋ケーブルの耐風性に関する検討報告書，1989 年 2 月
- 3) 土木研究センター：長大斜張橋のケーブル制振対策検討報告書，1993 年 3 月
- 4) 土木研究センター：斜張橋ケーブルの耐風性検討報告書，1993 年 3 月
- 5) 日本道路協会：道路橋耐風設計便覧（平成 19 年改訂版），2007 年 12 月
- 6) 宮内，安川，赤瀬，井上：高減衰ゴムダンパーを設置した斜張橋ケーブルの自然風下における応答計測，土木学会第 50 回年次学術講演会講演概要集，I -725 部門，pp.1450-1451，1995 年 9 月
- 7) 山本，半野，山田，平瀬，早川：横浜ベイブリッジの実橋観測に基づくケーブル被覆融解損傷原因の考察，土木学会論文集，Vol.65，NO.3，pp.381-393，2009 年 9 月
- 8) 土木学会：鋼斜張橋－技術とその変遷－ [2010 年版]，2011 年 2 月
- 9) 寺田，清水：伏木富山港（新湊地区）臨港道路東西線（新湊大橋）のケーブル振動対策について，平成 26 年度北陸地方整備局事業研究発表会，2014 年 7 月
- 10) 中山，山崎：橋梁の直轄診断報告（呼子大橋）について，平成 28 年度九州国土交通研究会，2016 年 7 月
- 11) 米田昌弘・前田研一：ケーブル制振用ダンパーの粘性減衰係数設定に関する一考察，土木学会論文集，第 410 号／I -12，pp.455-458，1989 年 10 月
- 12) 烏野清・北川正一・堤一・井上朝登・中谷真二：斜張橋ケーブル制振用ダンパーの簡易設計法，構造工学論文集 Vol.37A，pp.789-798，1991 年 3 月
- 13) 春日昭夫：ケーブル制振用ダンパーの最適減衰係数に関する研究，構造工学論文集，Vol.37A，pp.799-804，1991 年 3 月
- 14) 藤野陽三・Pacheco M.Benito・Sulekh Ajai：ダンパーをつけた斜張橋ケーブルの減衰評価曲線，橋梁と基礎 Vol.92-4
- 15) 倉西茂・高橋龍夫：ダンパーをもつ梁のたわみ振動，土木学会論文報告集，第 187 号，pp.9-22，1971 年 3 月
- 16) Kovacs,I.：Zur frage de seilschwingugen und der sildampfung,Bautechnik,325-332（1982）
- 17) Pacheco,Fujino,Sulekh：Estimation curve for modal damping in stay cables with viscous damper,submitted to Jounal of Structural Engineering,ASCE for possible publication（1990）
- 18) 春日昭夫・則久芳行・新井英雄：高減衰ゴムを用いたケーブル制振用ダンパーに関する研究，土木学会第 46 回年次学術講演会概要集，I -460，pp.958-959，1991 年 9 月

- 19) 中村収志・春日昭夫・新井英雄：高減衰ゴムを用いた斜張橋ケーブルの制振装置の研究および開発，プレストレストコンクリート技術協会第4回シンポジウム論文集，pp69-72，1994年10月
- 20) 米田昌弘・望月秀之・瀬戸内秀規：斜張橋ケーブルを対象とした併用ダンパー方式の減衰評価手法とその設計方に関する研究，土木学会論文集，第516号／VI-27，pp183-196，1995年6月
- 21) 米田昌弘・下田郁夫：ケーブル制振用粘性せん断ダンパーの減衰付加特性に及ぼすばね剛性の影響とその設計用減衰評価曲線，土木学会論文集，第480号／VI-21，pp77-86，1993年12月
- 22) 濱崎義弘・岡田徹・山口宏樹・藤野陽三：ケーブルのモード減衰評価における伸びと曲げの損失係数，土木学会論文集 A Vol.62 No.2，pp279-287，2006年4月
- 23) 若原敏裕・嶋田健司・大場義人・内田秀樹・大野浩：PC 斜張橋の風によるケーブル振動とその対策，清水建設研究報告，第70号，pp3545，1999年10月
- 24) 中野龍児・金子成彦・松永義憲・片村立太：振動モードの切替えによる斜張橋斜材ケーブルの制振方法に関する研究（パラメータの設計法），Dynamics and Design Conference 2001 論文集，2001年8月
- 25) 山口宏樹・宮田利雄・伊藤学：曲げ剛性を考慮したケーブルの面内線形自由振動，土木学会論文集，第319号，pp13-19，1982年3月
- 26) 宮内秀敏・安川義行・赤瀬雅之・井上浩男：高減衰ゴムダンパーを設置した斜張橋ケーブルの自然風下における応答計測，土木学会第50回年次学術講演会概要集，pp1450-1451，1995年9月
- 27) 新家徹・広中邦汎・頭井洋・西村春久：振動法によるケーブル張力の实用算定式について，土木学会論文集，第294号，pp25-32，1993年12月
- 28) 吉田純司・阿部雅人・藤野陽三：高減衰ゴム材料の構成則，土木学会論文集，NO.710，pp209-224，2002年7月
- 29) Xu,Y.L.,Ko,J.M.,&Yu,Z.(1997).”Modal damping estimation of cable-damper systems.”Proceedings of 2nd International Symposium on Structures and Foundations in Civil Engineering, China Translation and Services Ltd., Hong Kong,China,96-102.
- 30) Krenk,S.(2000).”Vibrations of a taut cable with an external damper. ”Journal of Applied Mechanics,67,772-776.
- 31) Sergev,S.S.&Iwan,W.D.(1981).”The natural frequencies and mode shapes of cables with attached masses. ”Journal of Energy Resources Technology,103(3),237-242.
- 32) Iwan,W.D.&Jones,N.P.(1984).NATFREQ Users Manual-A Fortran IV Program for Computing the Natural Frequencies, Mode Shapes, and Drag Coefficients for Taut Strumming Cables with Attached Masses and Spring-Mass Combinations. Naval Civil Engineering Laboratory, Report Number CR 94.026.
- 33) Rayleigh,J.W.S.(1877).The Theory of Sound-Volume I.Dover Publications, Inc., New York, NY,(1945 reprint).
- 34) Tabatabai,H.& Mehrabi, A.B.(2000).”Design of mechanical viscous dampers for stay cables. ”Journal of Bridge Engineering,ASCE,5(2),114-123.



- 35) Main J.A.& Jones N.P.(2002a).”Free Vibrations of a Taut Cable with Attached Damper. I:Linear Viscous Damper. ”Journal of Engineering Mechanics,ASCE,128(10),1062-1071.
- 36) Kovacs,I.,Strommern,E.,& Hjorth-Hansen,E.(1999).”Damping devices against cable oscillations on Sunningesund Bridge. ”Proceedings of 3rd International Symposium on Cable Dymamics,A.I.M,Liege,Belgium,145-150.
- 37) Main,J.A. & Jones N.P.(2002b).”Free Vibrations of a Taut Cable with Attached Damper. II:Nonlinear Damper. ”Journal of Engineering Mechanics,ASCE,128(10),1072-1081.
- 38) Gimsing,N.J.(1983).Cable Supported Bridges-Concept and Design. John Wiley & Sons, New York, NY.
- 39) Ehsan,F.& Scanlan,R.H.(1990).”Damping stay cable with ties. ”Proceedings of the 5th U.S.-Japan Bridge Workshop,203-217.
- 40) Hirsch,G.(1991).”Cable vibration overview. ”Proceedings of the 8th International Conference on Wind Engineering(ICWE8-July),The University of Western Ontario,London,Canada,453-4464.

# 付録

斜張橋ケーブル振動に関連する文献一覧（参考文献4）より抜粋）

参考文献 (1/5)

| 論文名  | 著者                   | 振動の種類                              |                                       | 制振対策の種類      |                       |                       |                       |                                      | 出典   | 番号    | 年 月      |
|--|----------------------|------------------------------------|---------------------------------------|--------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------------------|--|-------|----------|
|  |                      | レイバ<br>ンブ<br>レ<br>ー<br>シ<br>ョ<br>ン | ウェ<br>ィ<br>ク<br>ロ<br>ッ<br>ピ<br>ン<br>グ | ダン<br>パ<br>ー | ス<br>ペ<br>ー<br>サ<br>ー | 連<br>結<br>ロ<br>ー<br>フ | 空<br>力<br>的<br>対<br>策 | ア<br>ク<br>テ<br>ィ<br>ブ<br>ロ<br>ー<br>ル |  |       |          |
| Aerodynamic Behavior of Cables of Cable-Stayed Bridges     | M. Matsumoto et al   | ○                                  | ○                                     |              |                       |                       |                       |                                      | Asian Pacific Symposium on Wind Engineering 2  |       | 1989     |
| 斜張橋ケーブルの耐風性に関する検討  | (財)国土開発技術研究センター      | ○                                  | ○                                     | ○            | ○                     | ○                     |                       |                                      | 斜張橋ケーブルの耐風性に関する検討委員会報告書                        |       | 1989. 02 |
| 斜張橋ケーブルの風による振動と対策  | 横山ほか                 | ○                                  | ○                                     | ○            | ○                     | ○                     | ○                     |                                      | 橋梁と基礎  |       | 1989. 08 |
| 菅原・城北大橋のケーブル振動について   | 大阪市、三菱重工業            | ○                                  | ○                                     |              |                       |                       |                       |                                      | 委員会資料  | 2-2-3 | 1992. 10 |
| 斜張橋ケーブルにおける相互連結の制振効果に関する考察                                 | 横山ほか                 | ○                                  | ○                                     |              |                       | ○                     |                       |                                      | 風工学シンポジウム                                      | 第12回  | 1992. 12 |
| PC斜張橋ケーブルの振動観測例（青森ベイブリッジ、白屋橋、碓氷橋）                          | 鹿島建設技術研究所            | ○                                  | ○                                     | ○            |                       |                       |                       |                                      | 委員会資料  | 3-3   | 1993. 01 |
| 斜張橋ケーブルのRain Vibrationの特徴                                  | 川上、樋上                | ○                                  |                                       |              |                       |                       |                       |                                      | 土木学会年次学術講演会                                    |       | 1985     |
| 斜張橋ケーブルのRain Vibrationの発生機構                                | 樋上ほか                 | ○                                  |                                       |              |                       |                       |                       |                                      | 土木学会年次学術講演会                                    |       | 1985     |
| 名港西大橋工事誌   | 日本道路公団               | ○                                  |                                       |              |                       |                       |                       |                                      | 名港西大橋工事誌                                       |       | 1986     |
| 斜張橋ケーブルのRain Vibration                                     | 樋上ほか                 | ○                                  |                                       |              |                       |                       |                       |                                      | 日本風工学会誌  | 第27号  | 1986. 03 |
| Rain-Wind Induced Vibration of Cable Stayed Bridge         | Y. Hikami et al      | ○                                  |                                       |              |                       |                       |                       |                                      | Jour. of Wind Eng. and Industrial Aerodynamics | 29    | 1988     |
| 東神戸大橋ケーブルの耐風安定性に関する調査研究                                    | 京都大学橋梁工学研究室、(財)防災研究所 | ○                                  |                                       |              |                       |                       |                       |                                      | 阪神高速道路公団委託研究                                   |       | 1988. 03 |
| 斜張橋ケーブルの空力不安定振動と制振対策                                       | 宮崎                   | ○                                  |                                       |              |                       |                       | ○                     |                                      | 風工学シンポジウム                                      | 第10回  | 1988. 12 |
| 傾斜円柱の空力振動特性  | 松本ほか                 | ○                                  |                                       |              |                       |                       |                       |                                      | 風工学シンポジウム                                      | 第10回  | 1988. 12 |
| 風雨条件下のケーブル振動現象に関する考察                                       | 松本ほか                 | ○                                  |                                       |              |                       |                       | ○                     |                                      | 風工学シンポジウム                                      | 第10回  | 1988. 12 |
| Rain-Wind Induced Vibration of the Cables of Aratsu Bridge | 吉村ほか                 | ○                                  |                                       | ○            |                       |                       |                       |                                      | 風工学シンポジウム                                      | 第10回  | 1988. 12 |

| 論文名  | 著者   | 振動の種類               | 制振対策の種類               |          |               |                   |                       | 出典                                    | 番号                   | 年、月      |
|--|------|---------------------|-----------------------|----------|---------------|-------------------|-----------------------|---------------------------------------|----------------------|----------|
|  |      | レイバ<br>インプレ<br>ーション | ウェ<br>ィキャ<br>ロピン<br>グ | ダン<br>パー | ス<br>ペー<br>サー | 連<br>結<br>ロー<br>プ | 空<br>力<br>的<br>対<br>策 | ア<br>コ<br>ン<br>テ<br>ィ<br>ブ<br>ロ<br>ール |                      |          |
| 荒津大橋ケーブルのレインバイプレーションの防振対策について                  | 吉村ほか | ○                   |                       | ○        |               |                   |                       |                                       | 土木学会年次学術講演会          | 1989     |
| 東神戸大橋ケーブル風洞実験 (その1)                            | 松本ほか | ○                   |                       | ○        |               |                   |                       |                                       | 土木学会年次学術講演会          | 1989     |
| 荒津大橋の振動特性とケーブルダンパーの制振効果                        | 鳥野ほか | ○                   |                       | ○        |               |                   |                       |                                       | 土木学会年次学術講演会          | 1989     |
| Rain Vibrationに及ぼす水径寸法の影響等に関する解析的研究            | 宮崎ほか | ○                   |                       |          |               |                   |                       |                                       | 土木学会年次学術講演会          | 1989     |
| 傾斜円柱の空力不安定性に関する実験的研究                           | 松本ほか | ○                   |                       |          |               |                   |                       |                                       | 土木学会構造工学論文集 Vol. 35A | 1989     |
| 東神戸大橋ケーブル風洞実験 (その2)                            | 松本ほか | ○                   |                       |          |               |                   | ○                     |                                       | 土木学会年次学術講演会          | 1989     |
| 傾斜円柱の空力特性およびRain Vibration発生機構                 | 佐野ほか | ○                   |                       |          |               |                   |                       |                                       | 土木学会年次学術講演会          | 1989     |
| ケーブルの空力振動における動的応答特性と静的空気力特性の対比                 | 桂ほか  | ○                   |                       |          |               |                   |                       |                                       | 土木学会年次学術講演会          | 1990     |
| ケーブルの空力振動に与える乱流およびスクルー<br>トン数の影響               | 佐野ほか | ○                   |                       | ○        |               |                   |                       |                                       | 土木学会年次学術講演会          | 1990     |
| 安治川橋梁ケーブルの雨・風による振動の観測                          | 宮坂ほか | ○                   |                       |          |               |                   |                       |                                       | 土木学会年次学術講演会          | 1990     |
| 斜張橋ケーブルのレインバイプレーションの振動性状とそれに及ぼす乱流およびスクルートン数の影響 | 松本ほか | ○                   |                       | ○        |               |                   |                       |                                       | 風工学シンポジウム 第11回       | 1990. 12 |
| 斜張橋ケーブルのRain Vibration発生機構における2つの要因についての考察     | 松本ほか | ○                   |                       |          |               |                   |                       |                                       | 風工学シンポジウム 第11回       | 1990. 12 |
| 斜張橋ケーブルのレインバイプレーションの対策                         | 木下ほか | ○                   |                       |          |               |                   | ○                     |                                       | 土木学会構造工学論文集 Vol. 37A | 1991     |
| 斜張橋ケーブルのレインバイプレーション発生機構と水路形成位置の関係              | 桂ほか  | ○                   |                       |          |               |                   |                       |                                       | 土木学会年次学術講演会          | 1991     |
| レインバイプレーションに対するケーブル相互連結の制振効果                   | 関谷ほか | ○                   |                       |          |               | ○                 |                       |                                       | 土木学会年次学術講演会          | 1992     |
| 斜張橋ケーブルのレインバイプレーション特性とその制振対策に関する実験的研究          | 北條   | ○                   |                       |          |               |                   | ○                     |                                       | 日本風工学会誌 第50回         | 1992. 02 |

| 論文名  | 著書                     | 振動の種類              |                                       | 制振対策の種類  |                   |                   |                       |                                       | 出典   | 番号     | 年. 月     |
|--|------------------------|--------------------|---------------------------------------|----------|-------------------|-------------------|-----------------------|---------------------------------------|--|--------|----------|
|  |                        | レイバ<br>ンブレイ<br>ション | ウェ<br>ィ<br>ク<br>ロ<br>ッ<br>ピ<br>ン<br>グ | ダン<br>パー | ス<br>ペ<br>ー<br>サー | 連<br>結<br>ロー<br>プ | 空<br>力<br>的<br>対<br>策 | ア<br>コ<br>ン<br>テ<br>ィ<br>ブ<br>ロ<br>ール |  |        |          |
| 東神戸大橋実橋のケーブル振動について   | 阪神高速道路公団               | ○                  |                                       |          |                   |                   | ○                     |                                       | 委員会資料  | 2-5    | 1992. 10 |
| 斜張橋ケーブルの振動特性と制振対策についてー東名足柄橋(PC斜張橋)ー  | 日本道路公団                 | ○                  |                                       | ○        |                   |                   |                       |                                       | 委員会資料  | 2-3-1  | 1992. 10 |
| 橋梁構造における風圧力分布と耐風性の評価に関する研究(抜粋)   | 宮崎                     | ○                  |                                       |          |                   |                   | ○                     |                                       | 委員会資料  | 2-2-2  | 1992. 10 |
| レインパイブレーション実験V-A図  | 松本                     | ○                  |                                       |          |                   |                   |                       |                                       | 委員会資料  | 2-2-1  | 1992. 10 |
| 橋梁構造における風圧力分布と耐風性の評価に関する研究   | 宮崎                     | ○                  |                                       |          |                   |                   | ○                     |                                       | 斜張橋ケーブルの耐風性検討委員会                               | C2-2-2 | 1992. 10 |
| レインパイブレーションに対する多角形断面ケーブルの制振効果  | 神戸製鋼所                  | ○                  |                                       |          |                   |                   | ○                     |                                       | 委員会資料  | 2-2-4  | 1992. 10 |
| 青森ベイブリッジ斜材制振対策   | 青森県, JR東日本, 青森ベイブリッジJV | ○                  |                                       | ○        |                   |                   |                       |                                       | 委員会資料  | 2-3-2  | 1992. 10 |
| Rain-Wind Aeroelastic Instability of the Inclined Hangers of a Suspension Bridge | A. Zasso et al         | ○                  |                                       | ○        |                   |                   |                       |                                       | 委員会資料  | 2-2-1  | 1992. 10 |
| 天保山大橋のケーブル振動とその対策  | 阪神高速道路公団, 日立造船㈱        | ○                  |                                       | ○        |                   | ○                 |                       |                                       | 委員会資料  | 2-4    | 1992. 12 |
| 天保山大橋のケーブル振動とその対策  | 森ほか                    | ○                  |                                       | ○        |                   |                   |                       |                                       | 風工学シンポジウム                                      | 第12回   | 1992. 12 |
| 毛見1号橋ケーブル振動実験  | 和歌山県下津港湾事務所, 毛見1号      | ○                  |                                       | ○        |                   |                   |                       |                                       | 委員会資料  | 3-8    | 1993. 01 |
| 荒津大橋のケーブル制振対策について  | 福岡北九州高速道路公社, 三菱重工㈱     | ○                  |                                       | ○        |                   |                   |                       |                                       | 委員会資料  | 3-2    | 1993. 01 |
| 名港西大橋のケーブル制振対策とその後   | 日本道路公団                 | ○                  |                                       |          |                   | ○                 |                       |                                       | 委員会資料  | 3-6    | 1993. 01 |
| 斜張橋の大型化に対するケーブルの振動とその防止対策  | 坂田ほか                   |                    | ○                                     |          |                   |                   |                       |                                       | 三菱重工技報   | 第14巻3  | 1977     |
| Aeroelastic Interference Effects between Slender Structures                      | H. P. Ruscheweyh       |                    | ○                                     |          |                   |                   |                       |                                       | Jour. of Wind Eng. and Industrial Aerodynamics |        | 1993     |
| 並列Bluff Bodyの空力弾性振動  | 幡手, 久保ほか               |                    | ○                                     |          |                   |                   |                       |                                       | 土木学会年次学術講演会                                    |        | 1983. 09 |

| 論文名   | 著者                 | 振動の種類 |   | 制振対策の種類   |           |      |       |       | 出典   | 番号       | 年 月      |
|---|--------------------|-------|---|-----------|-----------|------|-------|-------|--|----------|----------|
|   |                    |       |   | レイブラレーション | ウエイクロッキング | ダンパー | スプーサー | 連結ロープ | 空力的対策  |          |          |
| 本州四国連絡橋の設計施工に関する研究報告  | 建設省土木研究所           | ○     | ○ |           |           |      | ○     |       | 土木研究所資料  | 第2220号   | 1985     |
| 本州四国連絡橋の耐風に関する調査研究報告書   | 土木学会               | ○     | ○ |           |           |      |       |       | 本州四国連絡橋耐風研究小委員会                                |          | 1986     |
| On Aerodynamic Instabilities of Tandem Structures                               | N. Shiraishi et al | ○     | ○ |           |           |      |       |       | Jour. of Wind Eng. and Industrial Aerodynamics |          | 1986     |
| 本州四国連絡橋の耐風に関する調査研究報告書   | 土木学会               | ○     | ○ |           |           |      | ○     |       | 本州四国連絡橋耐風研究小委員会                                |          | 1987     |
| 樺石島橋・岩黒橋ケーブル制振装置  | 馬場ほか               | ○     | ○ |           |           |      | ○     | ○     | 本四技報   | Vol. 12N | 0 1988   |
| 直列二本田柱の空力弾性挙動と振動抑制に関する一考察   | 久保ほか               | ○     | ○ |           |           |      |       |       | 土木・構造材料論文集                                     | 第4号      | 1989. 01 |
| 弾性模型による複数円柱の空力弾性挙動について  | 久保ほか               | ○     | ○ |           |           |      |       |       | 土木学会年次学術講演会                                    |          | 1990     |
| 斜張橋ケーブルを対象にした複数円柱の空力弾性振動  | 久保ほか               | ○     | ○ |           |           |      |       |       | 風工学シンポジウム                                      | 第11回     | 1990. 12 |
| 斜張橋ケーブルを対象とした三次元複数円柱の空力弾性挙動   | 中原ほか               | ○     | ○ |           |           |      |       |       | 土木学会年次学術講演会                                    |          | 1992     |
| A Device for Suppressing Wake Galloping of Stay-Cables for Cable-Stayed Bridges | T. Yoshimura et al | ○     | ○ |           |           |      |       | ○     | 風工学シンポジウム                                      | 第12回     | 1990. 12 |
| 三次元弾性実験による斜張橋用複数ケーブルの耐風特性の検討  | 久保ほか               | ○     | ○ |           |           |      |       |       | 風工学シンポジウム                                      | 第12回     | 1990. 12 |
| 並列配置された斜張ケーブルの風による一振動例  | 藤田ほか               | ○     | ○ |           |           |      | ○     | ○     | 委員会資料  | 3-7      | 1993. 01 |
| 新たに開発したケーブル制振用粘性せん断型ダンパーの減衰付加効果について   | 米田ほか               |       |   |           |           | ○    |       |       | 風工学シンポジウム                                      | 第10回     | 1988. 12 |
| 構造用ケーブルのための小型球形ダンパーに関する実験   | ワニニシヤイほか           |       |   |           |           | ○    |       |       | 土木学会年次学術講演会                                    |          | 1989     |
| ケーブル制振用ダンパーの粘性減衰定数設定に関する一考察   | 枝元ほか               |       |   |           |           | ○    |       |       | 土木学会年次学術講演会                                    |          | 1989     |
| 構造用ケーブルの制振対策およびその評価に関する基礎研究   | 長沼ほか               |       |   |           |           | ○    |       | ○     | 土木学会年次学術講演会                                    |          | 1989     |

参考文献 (5/5)

| 論文名  | 著者                  | 振動の種類 | 制振対策の種類                            |  |              |                       |                       | 出典                    | 番号   | 年 月      |
|--|---------------------|-------|------------------------------------|--|--------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------|----------|
|  |                     |       | レイバ<br>ンブ<br>レ<br>ー<br>シ<br>ョ<br>ン | ウエ<br>ギ<br>ヤ<br>ク<br>ロ<br>ッ<br>ピ<br>ン<br>グ | ダン<br>パ<br>ー | ス<br>ペ<br>ー<br>サ<br>ー | 連<br>結<br>ロ<br>ー<br>プ | 空<br>力<br>的<br>対<br>策 |      |          |
| 横浜ベイブリッジの耐風対策  | 和田ほか                |       |                                    |  | ○            | ○                     |                       |                       |      | 1989. 8  |
| A Universal Curve for Modal Damping in Cables with Dashpot | A.Sulekh et al      |       |                                    |  | ○            |                       |                       |                       |      | 1990     |
| 斜張橋ケーブル制振用せん断型ダンパーの室内実験結果について                              | 伊関ほか                |       |                                    |  | ○            |                       |                       |                       |      | 1990     |
| ケーブル制振用ダンパーの付加対数減衰率推定法                                     | 諸富ほか                |       |                                    |  | ○            |                       |                       |                       |      | 1990     |
| 鶴見航路橋の設計施工に関する調査研究<br>(平成元年度)報告書                           | 御首都高速道路技術<br>センター   |       |                                    |  | ○            | ○                     |                       |                       |      | 1990. 03 |
| Active Stiffness Control of Cable Vibration                | P. Warnitchai et al |       |                                    |  |              |                       |                       | ○                     |      | 1991     |
| 高減衰ゴムを用いたケーブル制振用ダンパーに関する研究                                 | 春日ほか                |       |                                    |  | ○            |                       |                       |                       |      | 1991     |
| 斜張橋のアクティブ・テンドン・スティアフネス・コントロール                              | 藤野ほか                |       |                                    |  |              |                       |                       | ○                     |      | 1991. 07 |
| ケーブル制振用ダンパーの減衰付加特性について                                     | 望月ほか                |       |                                    |  | ○            |                       |                       |                       |      | 1992     |
| 斜張橋ケーブルの角折れ緩衝材による制振効果                                      | 植田ほか                |       |                                    |  | ○            |                       |                       |                       |      | 1992     |
| ケーブルの線形・非線形内部共振に着目した斜張橋の動特性と対風応答                           | 増川ほか                |       |                                    |  |              |                       |                       | ○                     |      | 1992     |
| 長大斜張橋ケーブルの制振   | 北川ほか                |       |                                    |  | ○            |                       |                       |                       |      | 1992     |
| ダンパーをつけた斜張橋ケーブルの減衰評価曲線                                     | 藤野                  |       |                                    |  | ○            |                       |                       |                       |      | 1992. 04 |
| 斜張橋用プレ防食型ケーブルの二次応力および曲げ疲労強度に関する検討                          | 坂本ほか                |       |                                    |  |              |                       |                       |                       | 1-19 | 1992. 04 |