

PC斜張橋の風によるケーブル振動とその制振対策

若原 敏裕 嶋田 健司 大場 義人 内田 秀樹 大野 浩
(技術研究所) (技術研究所) (広島支店) (土木本部) (土木本部)

Suppression of Wind-Induced Cable Vibrations in PC Cable-Stayed Bridge

by Toshihiro Wakahara, Kenji Shimada, Yoshito Ohba, Hideki Uchida and Hiroshi Ohno

Abstract

Stay-cables are essential structural elements of cable-stay bridge in spite of its extremely low damping characteristics. Many actual bridges experience various types of stay-cable vibrations, which are aeolian vibration, rain and wind-induced vibration and wake-induced galloping, with noticeable amplitude. This paper describes the full-scale measurements of wind-induced response of cables in the Naka-Noto Bridge during its construction and several vibration tests of full-scale stay-cables with/without the installed damping device using viscous-shear resiting force. The response and the damping characteristics of cable aeroelastic vibrations are investigated, and the performance of the installed damping device also discussed based on the data obtained from those experiments.

概要

斜張橋のケーブルは本質的にその構造減衰が小さいことから、わずかな風速で、渦励振、レインバイブレーション、ウェイクギャロッピング等の空力振動現象が発現し、条件次第ではかなりの大きさの振幅に達する。斜張橋のケーブルは構造系を成立させるための主要な構造要素であり、ケーブルに生じる空力振動は、利用者には不安感を与える問題も含め、橋としての使用性の低下や、構造の安全性に関わる本質的な問題をも生じさせる可能性が指摘されている。本研究は、これらの観点から、国内最大級のPC斜張橋である中能登農道橋（橋長450m、支間長230m、3径間連続PC斜張橋）の建設にあたって、その斜材ケーブルに対して行った（1）ケーブルの空力振動に関する風応答観測、（2）ケーブルの減衰特性の把握のための振動実験、（3）空力振動対策のための粘性せん断型ダンパーの設置、（4）ダンパーの減衰付加効果に関する検討、の4つの項目について報告するものである。

§1. はじめに

PC斜張橋は、コンクリート製の橋梁では、最も支間長を伸ばすことが可能な橋梁形式であり、近年、数多くの大規模橋梁に採用されている。また、構造解析技術の進歩や施工技術の向上、あるいは、コンクリートやケーブル材料の高強度化に伴い、PC斜張橋の支間長はますます長大化しており、現在、最長のものは500mを超える支間長を誇っている。

しかし、斜張橋はケーブルを主要な構造部材とする剛性の小さな橋梁形式であり、主塔から主桁を斜めに吊り上げているケーブル（斜材）の空力振動は、構造の安全性に関わる問題（たとえば、ケーブル定着部の疲労など）を引き起こす可能性があるばかりか、橋としての使用性の低下や、利用者には不安感を与える問題など、設計・施工における重要な検討課題の一つとして位置付けられている。

斜張橋の斜材ケーブルは軽量かつ高強度な部材ではあるものの、本質的にその構造減衰が小さいため、わずかな風（10m/s前後の平均風速）で、渦励振、レインバイブレーション、あるいは、並行ケーブルに特有なウェイクギャロッピング等の空力振動現象が発現し、条件次第ではかなりの大きさの振幅に達する¹⁾²⁾。特に、降雨を伴う強風時に生じるレインバイブレーション³⁾は、名港西大橋で観測されて以来、櫃石島橋、岩黒島橋、荒津大橋、天保山大橋など、国内外の多くの斜張橋で観測されており、頻繁に発生すること、その振幅がケーブル径の数倍（荒津大橋では60cmを超える振幅）にまで達することが知られている¹⁾²⁾。

このようなケーブル特有の空力振動に関しては、その発生メカニズムや応答性状などに関する基礎的な研究^{4)~6)}が行われると伴に、その制振対策（空気力学的な手法あるいは構造力学的な手法）に関する研究・開発も積極的に行われている⁷⁾⁸⁾。

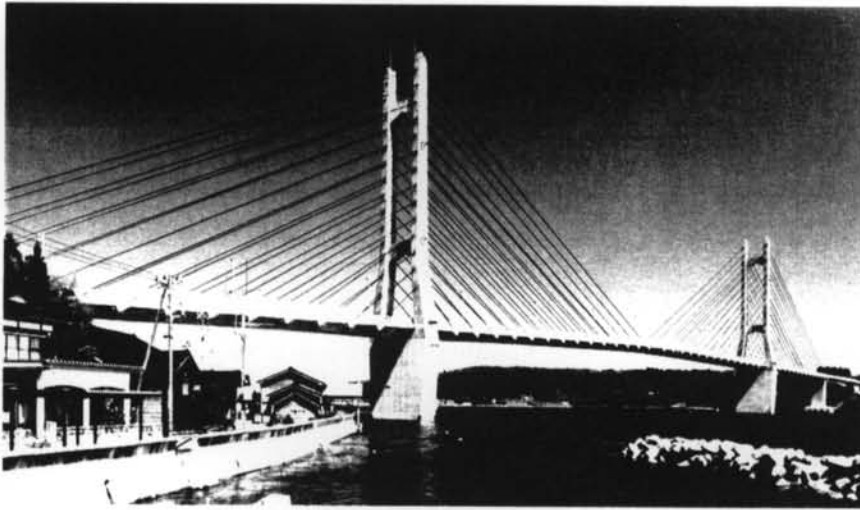


写真-1 中能登農道橋 (中島町より)

橋名	中能登農道橋 (愛称: ツインブリッジのと)
工期	平成6年3月~平成11年3月
橋種	プレストレスコンクリート橋
構造形式	P C 3 径間連続斜張橋
橋長	450.0m
支間長	109.0m+230.0m+109.0m
有効幅員	車道6.5m+歩道1.5m
主桁	1室箱桁断面P C構造
主塔	H形R C構造
斜材	準ハープ型2面吊り
基礎	A1橋台: 直接基礎 P1橋脚: 直接基礎 P2橋脚: 鋼管矢板井筒基礎

表-1 中能登農道橋の概要

空気力学的な制振対策⁷⁾としては、ケーブルの表面軸方向に平行な突起物(東神戸大橋)、Uストライプ(弓削大橋)、インデントケーブル(多々羅大橋)などケーブルの表面に特殊な加工を施す空気力学的な制振対策が挙げられる。また、構造力学的な制振対策⁸⁾として、ケーブル端部にオイルダンパー(荒津大橋など)、高減衰ゴム(鶴見つばさ橋など)、粘性せん断型ダンパー(幸魂大橋など)などのダンパーを用いる方式と面内のケーブルを互いにステンレスワイヤーで結合する制振ワイヤー方式(櫃石島橋や岩黒島橋など)があり、場合によっては、これらの方式を組み合わせる利用する場合もある。

本研究報告は、写真-1に示す中能登農道橋⁹⁾(橋長450mのP C 3 径間連続斜張橋: 詳細は表-1参照)の建設にあたって、風と雨によって生じる斜材ケーブルの空力振動(レインバイブレーション)に対する制

振対策のために行った:

- 1) ケーブルの空力振動に関する風応答観測
- 2) ケーブルの減衰特性の把握のための振動実験
- 3) 空力振動対策のための粘弾性型ダンパー設置
- 4) ダンパーの減衰付加効果に関する振動実験

の4つの項目について報告するものである。

§ 2. P C 斜張橋の概要⁹⁾

本研究報告で対象とする中能登農道橋は、能登半島国定公園に位置し、石川県中島町と七尾湾に浮かぶ能登島を結ぶ全長620mの海上橋であり、図-1に示すように橋長450mのP C 3 径間連続斜張橋と橋長170mのP C 2 径間連続箱桁橋で構成されている。また、P C 斜張橋は中央支間長が230mであり、我が国最大級

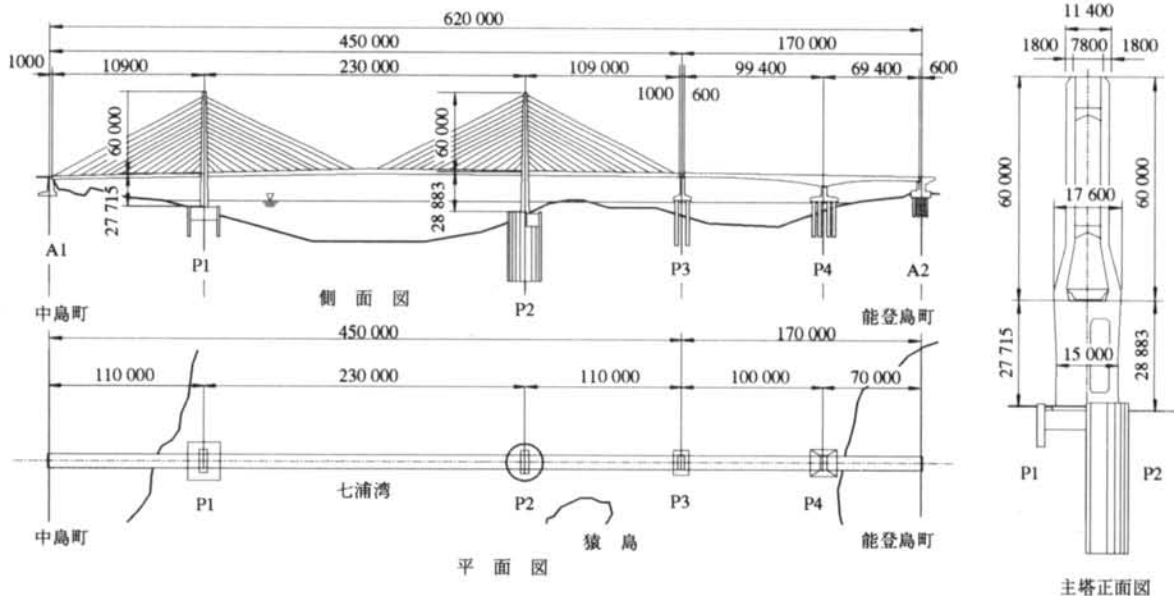


図-1 中能登農道橋の構造一般図

(竣工時点で国内第5位)の規模を誇る。

中能登農道橋PC斜張橋部は、準ハープ型2面吊り形式であり、斜材ケーブルには、 $\phi=15.2\text{mm}$ のPC鋼より線を23~37本束ねて外径 $D=145\text{mm}\sim 160\text{mm}$ のポリエチレン製の保護管(PE保護管)に収納しグラウトで防錆する現場組立てタイプのケーブルシステムを採用している⁹⁾。

§ 3. 斜張橋ケーブルの空力振動と応答観測

3.1 ケーブルに生じる振動

ケーブルの風による振動は、渦励振、レインバイブレーション、ウェイクギャロッピングの3つに大別できる。これらの空力振動の中で、本橋において発現の可能性がある振動は、並行ケーブル特有のウェイクギャロッピングを除き、渦励振とレインバイブレーションに限定できる。以下、これらの2種類の振動の特徴や制振の目安について概説する¹⁾²⁾。

3.1.1 渦励振

ケーブルの後流に発生する交番渦(カルマン渦)によって生じる振動であり、渦の発生周期とケーブルの固有周期が一致し共振(共鳴)することにより振動は成長する。渦励振はケーブル径と固有振動数から定まる特定の風速を中心とした比較的狭い風速域でのみ生じる限定振動である。また、1次モードの渦励振の発現風速は極めて低く、通常は高次モードの渦励振が発現することが多い。ただし、その励振力は弱く、橋に対して深刻な問題を引き起こす可能性は少ない。既往の観測記録から、対数減衰率で $\delta=0.010\sim 0.015$ の構造減衰があれば発現しないものと考えて良い。

3.1.2 レインバイブレーション

降雨を伴う風が特定の風向から作用する場合、傾斜ケーブルの上下面には2本の表面水路(リブレット)が形成される。このリブレットは有風時に風の力によってその位置を微妙に変えるが、このリブレットの位置と風向がある条件を満足する場合に、傾斜したケーブルの断面は空力的に不安定な状態となり、その結果、レインバイブレーションと呼ばれる空力振動が発現するとされている。特に、PE保護管のように表面が滑らかな被覆を用いた斜張橋ケーブルにおいて、多くの振動が観測されており、中には、その最大振幅がケーブル径の6倍にまで達した例も報告されている。

レインバイブレーションには、これら既往の観測記録に基づく考察結果から、以下に示すような特徴が明らかになっている⁸⁾。

- 1) PE保護管を用いたケーブルのように表面が滑らかな場合に生じる。

- 2) 平均風速 $6\sim 18\text{m/s}$ 程度の範囲で生じる限定的な振動である。
- 3) 気流の乱れの影響を受けやすく、乱れの強さが15%程度になると発現しなくなる。
- 4) 振動は1次~3次の比較的低いモードで発現し、その振動数は 3.0Hz 以下の範囲にある。
- 5) 構造減衰の増加に伴い振幅は低減し、対数減衰率で $\delta=0.020\sim 0.030$ の構造減衰があれば、振動の発現を妨げることができる。
- 6) 風に対して正姿勢(ケーブルの傾斜が風下側に下り勾配)となる風向の場合に発現し易い。

なお、最近の研究成果によれば^{4)~6)}、リブレット形成や風向きに対するリブレットの位置はレインバイブレーションが生じる直接的な原因ではなく(ただし、重要な役割を果たしているが)、雨が降らなくとも、傾斜したケーブルに、ある風向から特定の条件を満足する風速が作用すれば、ケーブル背面の軸方向の流れに伴う軸方向渦とカルマン渦の相互干渉により長周期の渦が間欠的に発生し、その渦との共振作用により空力振動が発現する「高風速渦励振」⁶⁾としての発現メカニズムの説明が可能であると言う報告がある。この場合、リブレット形成は、ケーブル断面の空力的な不安定化を促進、あるいは、顕在化させる間接的な要因の一つとして考察されている。

このように、レインバイブレーションの詳細な発現メカニズムは未解明な部分も残っており、レインバイブレーションは、軸方向流あるいは軸方向渦の存在と降雨に伴うリブレット形成と言う2つの条件が複雑に絡みあって生じていると言う考え方が最新の研究成果にあることをあわせて述べておく。

また、レインバイブレーションに対する制振対策としては、上記4)と5)にあるように、本橋では、固有振動数 $f=3.0\text{Hz}$ 未満のケーブルに対して、対数減衰率 $\delta=0.02\sim 0.03$ 以上を目安に考えることとした。

3.2 ケーブルの風応答観測

本橋では、施工時の精度管理、さらには、強風時の耐風安定性とケーブルの空力振動に対する検討の目的から、図-2に示すような計測システムを用いて常時風応答観測(常時10分毎の平均値、最大値、最小値、標準偏差などの統計量の観測)を実施している。

平成10年9月22日、斜材ケーブル張力調整を実施中、台風9807号に見舞われ、側径間側のケーブルを中心にレインバイブレーションが観測されている。

図-3は台風9807号の経路図と中能登農道橋(橋軸方向)の位置関係を表したものである。また、図-4は、台風9807号通過時に記録されたケーブル振動の応答性状を示したものである。当日(台風通過時)は張

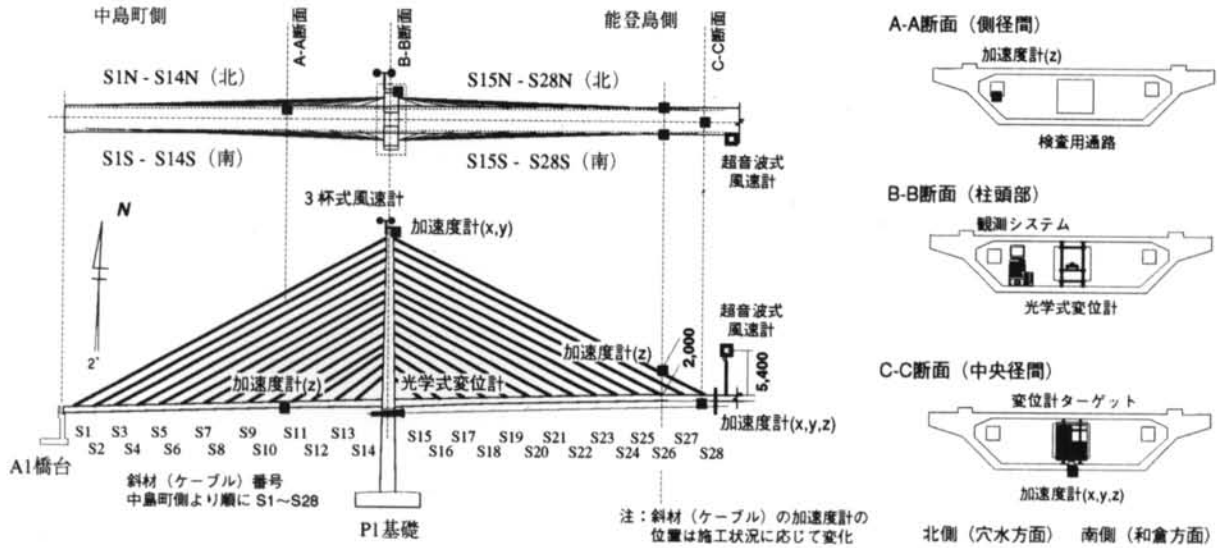


図-2 計測機器配置および斜材ケーブル番号と位置

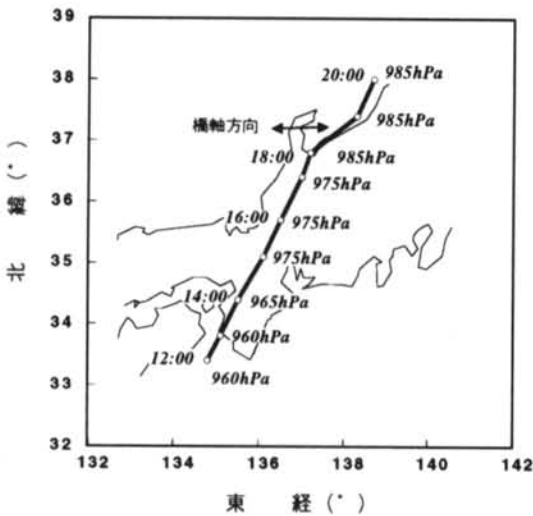


図-3 台風9807号の経路図と橋梁の位置関係

力調整後の導入力を振動法により確認するため、ケーブルの加速度計をS1ケーブル（図-4参照）に移動した状態であり、また、導入張力測定のためセンサー感度を上げており、通常の設定フルスケールを1/4（±250cm/s²）に落とした状態であった。台風9807号は強い雨域を伴っており、ケーブルの上面には降雨による明確なリブレットが形成されていたこと、ならびに、目視により確認した応答性状と風向とケーブル位置から判断して、当日観測されたケーブル振動はレインバイブレーションであると考えられる。なお、台風通過時の最大瞬間風速は30m/s程、最大瞬間風速を記録した10分間（18:30～18:40）の平均風速は20m/sである。また、平均的な乱れの強さは20%前後である。

図-4に示す観測記録より、15:30～19:30（風向NNE、平均風速で5m/s～20m/sの範囲）の間で、S1ケーブルには、極めて大きな加速度応答が生じていることが分かる。特に風上側（北側）のS1Nケーブルの加

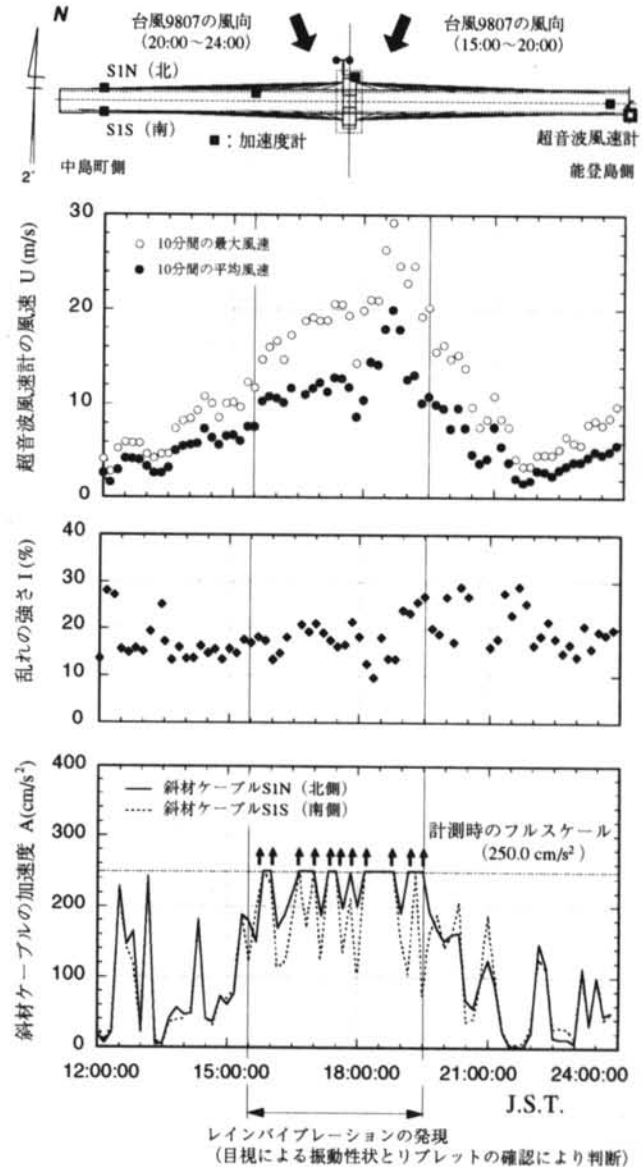


図-4 台風9807号通過時の斜材ケーブルの空力振動（S1NおよびS1Sケーブル）

速度応答は 250cm/s^2 近くに達している。また、15:30～19:00の間には、事前に設定していた計測機器のフルスケール $\pm 250\text{cm/s}^2$ を超えた加速度応答が生じており、 250cm/s^2 以上の加速度応答は記録できていない。なお、目視とビデオによる確認では、この際のレインバイブレーションの最大(片)振幅は、モードの中央点(腹)付近で、ケーブル径の1～2倍程度(15cm～30cm相当)に達していた。また、レインバイブレーションが生じた斜材ケーブルは図-2に示すS1～S10(いずれも低次の固有振動数が3.0Hz未満となるケーブル)であり、風向きに対して「正姿勢(ケーブルの傾斜が風下側に下り勾配)」となる中島町側のケーブル(側径間)に集中している。一方、これに反して「逆姿勢(ケーブルの傾斜が風下側に上り勾配)」となる能登島側(中央径間)のS15～S28では、レインバイブレーションを生じたケーブル(S1～S10)と比較して顕著な振動は生じていない。

図-5は、S1ケーブルの1次固有振動数 $f_1=0.783$ と外径 $D=16\text{cm}$ を用いて計算した無次元風速 U/fD とS1ケーブルの最大値(常時10分間)の関係をプロットしたものである。図-5に示す結果より、レインバイブレーションにより大きな振幅を生じているのは、無次元風速で $U/fD=20$ 前後、30～40、70～80、さらには、110以上の範囲であり、松本ら^{4)～6)}の斜張橋ケーブルのレインバイブレーション(あるいは、高風速渦励振)の発現メカニズムに関する一連の研究成果と良く対応しているものと考えられる。

§ 4. ケーブルの固有振動数と対数減衰率

本橋では、斜材ケーブルに対する制振対策は、設計段階においては考慮されていなかった。しかし、架設中(グラウト工事完了後より)、わずかな風で渦励振が観測されるようになったこと、また、前述のように、レインバイブレーションのような振幅の大きい空力振動の発現も懸念されることから、ケーブルの基本的な振動特性を把握する目的で、現地において振動計測(固有振動数 f と対数減衰率 δ)を実施し、ケーブルの制振対策に関する検討を行っている。

ケーブルに対する制振対策の有無は、ケーブルの固有振動数 f および対数減衰率 δ に対し、以下に示す条件a)とb)に当てはまる斜材ケーブルは、既往の実測結果や研究成果^{1)～3)}から、レインバイブレーションを生じる可能性が高いものと考え、

- a) 低次の固有振動数 $f < 3.0\text{Hz}$
- b) " 対数減衰率 $\delta < 0.02$

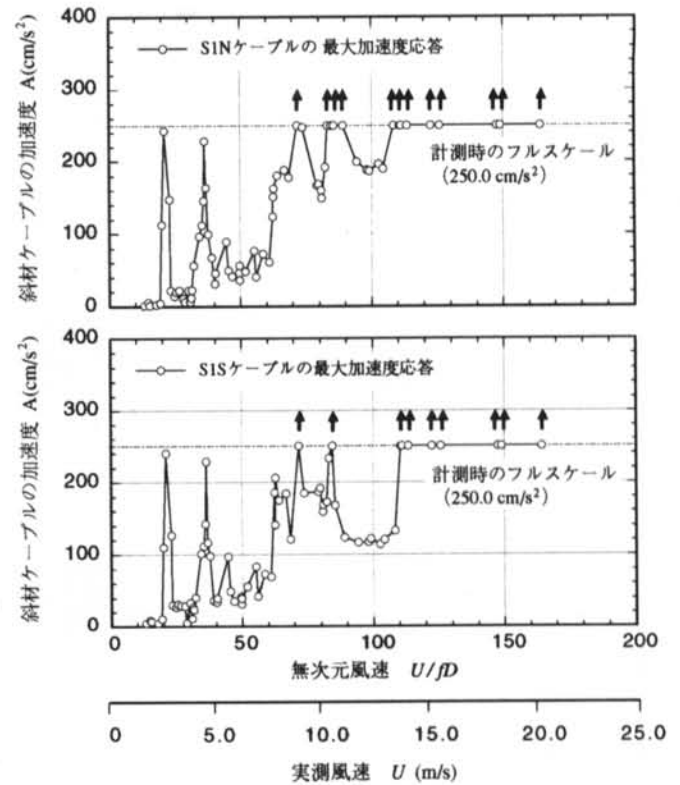


図-5 無次元風速とケーブルの応答の関係

の両者に該当する斜材ケーブルに制振対策を行う。

振動計測を実施する斜材ケーブルは、図-2に示すケーブルの内、中央径間側(能登島側)のS15～S28の14段28本である。なお、ここで説明する振動計測は張力調整に先立って行われたものであり、現地の架設状況は中央閉合直前の状態である。

斜材ケーブルに対して行う振動計測の手順は、1) 常時微動計測により各々のケーブルの固有振動数 f を求め、2) 固有振動数 f でケーブルを加振後、3) 自由振動波形を計測し、4) 各次の固有振動数 f に対し $\pm 20\%$ の範囲でバンドパスフィルターを施した減衰波形から対数減衰率 δ を算定した。

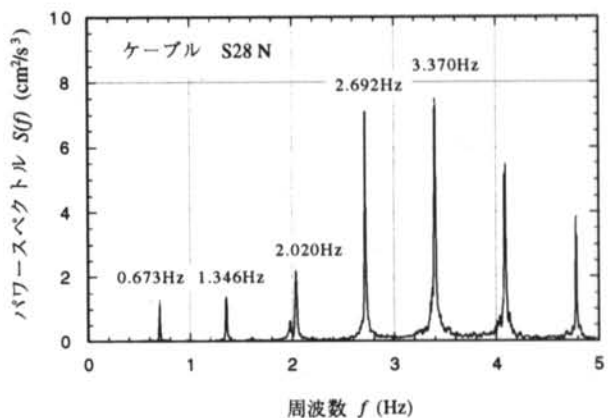
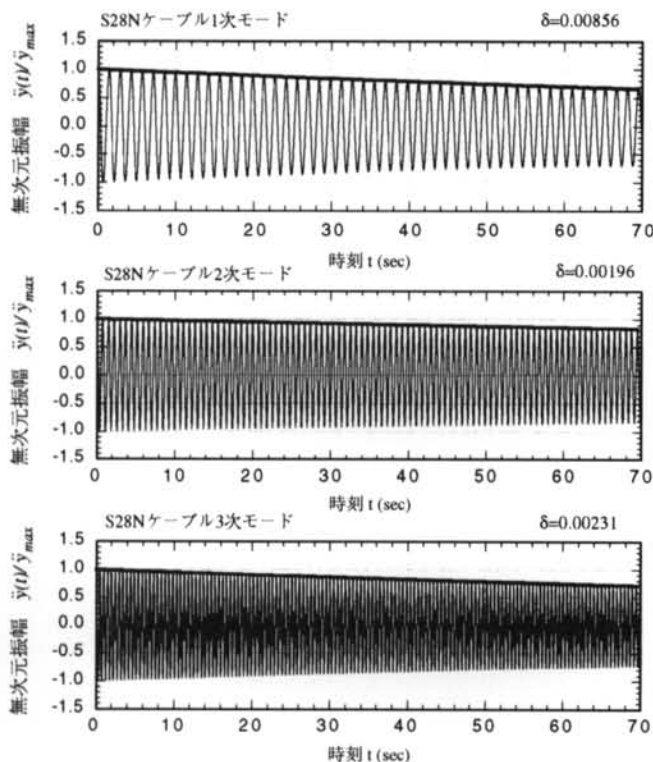


図-6 常時微動計測より得られたS28Nケーブルのパワースペクトル



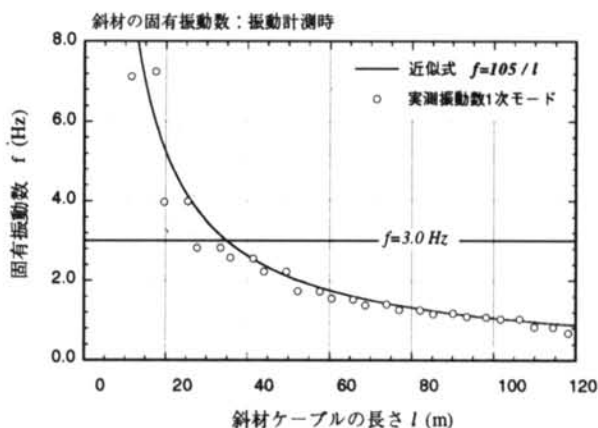
図一七 自由振動計測より得られたS28Nケーブルの減衰波形と対数減衰率

図一六は常時微動計測により得られたS28Nケーブルのパワースペクトルを示したものである。なお、S28ケーブルは、架設時にわずかな風速でしばしば渦励振を経験している。図一六に示した結果から、ケーブルの固有振動数は、1次モードで $f_1=0.673\text{Hz}$ 、2次モードで $f_2=1.346\text{Hz}$ 、3次モードで $f_3=2.020\text{Hz}$ である。

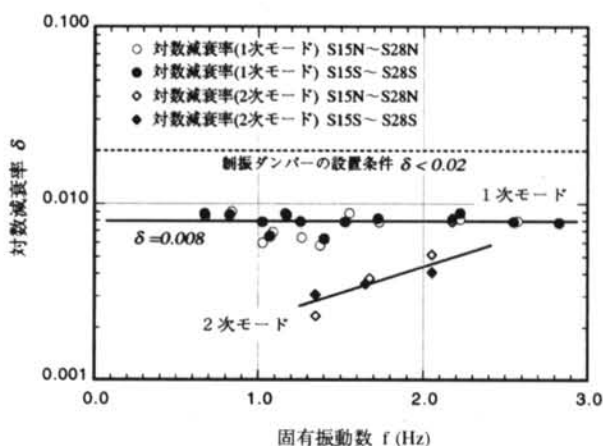
図一七は自由振動計測から得られたS28Nケーブルの1次～3次モードの減衰波形と対数減衰率 δ を示したものである。図一七から分かるように、いずれのモードの構造減衰も極めて小さな値であり、1次モードで $\delta_1=0.0086$ 、2次モードで $\delta_2=0.0020$ 、3次モードで $\delta_3=0.0023$ である。特に2次モードと3次モードの減衰は、渦励振を生じないとされる対数減衰率 $\delta=0.01$ の1/5以下の値であり、架設時（グラウト工事完了後）にしばしば渦励振を生じたことも理解できる。

図一八は中央径間側のケーブル（S15～S28）の振動計測時の固有振動数 f （実測1次モード：図中○）とケーブルの長さ l の関係を示したものである。また、参考までに、図一八には、近年建設されている斜張橋（施工中や計画中也含めて20橋程度）の実橋ケーブルの固有振動数から回帰した1次固有振動数の近似式 $f=105/l$ も同時に実線で示している⁸⁾。図一八において、今回の振動計測結果は、1次モードの固有振動数の近似式 $f=105/l$ と良く対応していることが分かる。

図一九は、各ケーブルに対する振動計測結果をまと



図一八 斜材ケーブルの長さとの振動実験による1次モードの固有振動数の関係



図一九 固有振動数と対数減衰率の関係

めたものであり、各々のケーブルの固有振動数 f と対数減衰率 δ の関係を示している。図一九に示す結果より、いずれのケーブルの対数減衰率 δ も固有振動数 f （長さ l や導入張力 T に依存）に関わらず、ほぼ一定の値となり、その値は1次モードの対数減衰率 $\delta_1=0.008$ 程度の値である。既往の観測結果から、渦励振、あるいは、レインパイプレーションの発現しない条件とされる対数減衰率 δ は0.02～0.03以上と言われており¹⁾²⁾、その条件には遠く及ばない結果となっている。また、2次モードの対数減衰率は固有振動数の増加に伴い増加傾向にあるものの、その値は、 $\delta_2=0.002\sim 0.004$ の範囲であり、平均的には1次モードの1/2程度の値の減衰でしかない。

図一九の結果より、いずれのケーブルの対数減衰率 δ も0.02未満であることから、ケーブルの制振対策（ダンパー設置の有無）は、各々のケーブル（S1～S28）の固有振動数 f が3.0Hz以上であるかどうかで判断することになる。ただし、この振動計測の実施時は中央閉合直前の状態であり、最終的には、中央閉合後、斜材ケーブルの張力調整を経て、完成系でのケーブルの固有振動数が決定される。したがって、この計測結果に

に基づき、完成系の斜材ケーブルの固有振動数を精度良く推定する必要がある。

図-10は図-8と同様に、振動計測時のS15N～S28Nケーブルの長さ*l*と実測値固有振動数*f* (図中○)の関係を示しており、以下に示す2つの算定式¹⁰⁾；

$$f = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{Tg}{\gamma}} \quad (1)$$

$$f = \frac{2.2}{2} C + \sqrt{\frac{Tg}{4\gamma l^2} + \left(\frac{2.2}{2} C\right)^2 + 2C^2} \quad (2)$$

$$\left(C = \sqrt{\frac{EIg}{\gamma l^4}} \right)$$

から求めた振動計測時の斜材ケーブルの固有振動数*f*も示している。なお、上述の式(1)(2)において、*T*は振動計測実施時の斜材ケーブルの導入張力、*g*は重力加速度(=9.8m/s²)、 γ は単位体積重量、*l*は主桁部の斜材ケーブル保護管出口から主塔部保護管出口までの距離(ケーブル長さ)、*EI*は曲げ剛性である。また、*C*はケーブルを単純梁とみなした場合の曲げ振動の固有値を表す¹⁰⁾。図-10に示す結果より、斜材ケーブルの長さが短くなるとケーブルの曲げ剛性の影響で算定式(1)は実測値に対して小さな固有振動数を与える。しかし、曲げ剛性の影響を考慮した式(2)による固有振動数値は実測結果と良く対応している。このことから、上記の式(2)を用いて、完成系の斜材ケーブルの固有振動数を推定し、その固有振動数が3.0Hz以下となった斜材ケーブルに対して、制振対策を行うこととする。

図-11は、算定式(2)を用いて完成系の斜材ケーブルの固有振動数(1次モード)を推定した結果を示したものである。なお、図-11は北側の斜材ケーブルに対する結果を示しているが、橋軸に対して対称な南側のケーブルも同様な値を示す。図-11に示す結果から、1次固有振動数が3.0Hz以上になり、レインバイブレーションの発現の可能性が小さく、制振対策が不要な斜材は主塔両側のS12～S17の斜材ケーブルである。したがって、1次固有振動数が3.0Hz未満となる側径間のS1～S11および中央径間のS18～S28、さらに、これらの斜材ケーブルと対称の位置(P2主塔側)の斜材ケーブルを加え、総計44段88本の斜材ケーブルが制振対策の対象となる。

§ 5. 斜材ケーブルの制振対策

本橋では、斜材ケーブルに対する制振対策として、レトロフィッティングが比較的容易であり、かつ、これまでの採用実績が比較的多い粘性せん断型のダ

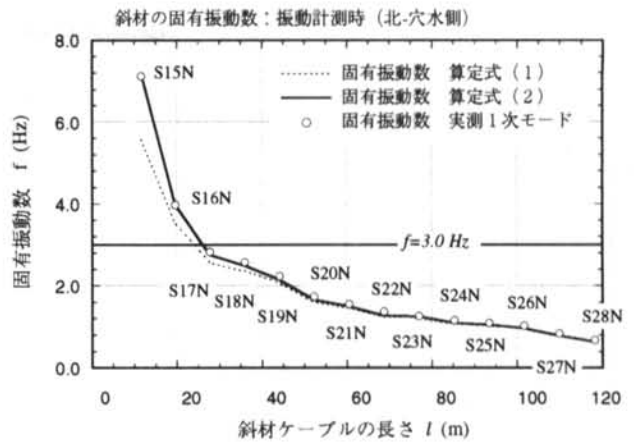


図-10 算定式(1)(2)による1次固有振動数と実測1次固有振動数の関係

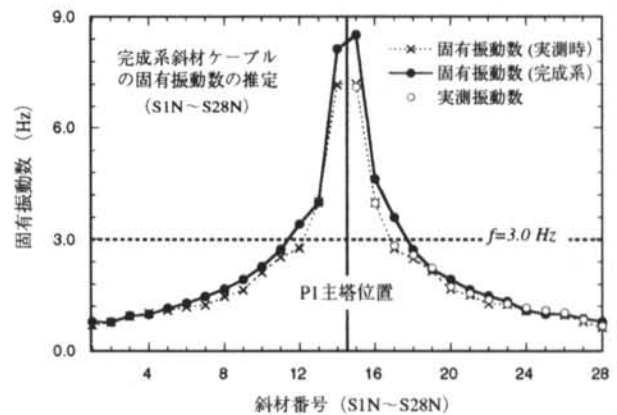


図-11 完成系の斜材ケーブルの固有振動数

ンパー¹¹⁾を用いることとし、設計の目標値としては、レインバイブレーションが発現しない条件である対数減衰率 δ が0.02～0.03を確実に上回ることをとする。

図-12は、本橋に設置した粘性せん断型ダンパーの概要を示したものである。また、写真-2は実際にダンパーをケーブルに取り付けた状況を示したものである。図-12に示した粘性せん断型ダンパーの構造は、主桁側に設置する粘性体の入った槽の部分と斜材ケーブル側に設置する連結棒(振動子)から構成されるものであり、その制振メカニズムは、粘性体と振動

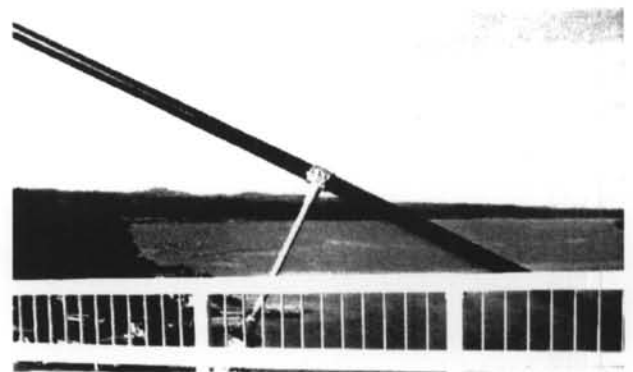


写真-2 粘性せん断型ダンパーの設置状況

子間に生じる粘性せん断抵抗によってケーブルの振動エネルギーを吸収し、ケーブル自身の振動を抑えるものである¹¹⁾。本橋で採用した粘性せん断型ダンパーは、以下に示すような特徴があることが報告されている¹¹⁾。

- 1) 1つのダンパーで面内と面外の2方向の振動に対処できる。
- 2) 封入する粘性体の量を調節することで容易に所要の粘性減衰を得られる。
- 3) 構造自体が簡単であるため、機械的接触点や取り付けに伴うガタがないことから、微振動レベルから制振可能である。

粘性せん断型ダンパーの設計を行うには、まず、その付加減衰特性を把握する必要がある。ケーブルに粘性せん断型ダンパーを設置した場合の付加減衰特性は、ダンパーの等価粘性減衰 C_e と等価ばね係数 K_e からなるVoigtモデルと曲げ剛性を抑えた梁要素でモデル化されるケーブルとで構成される解析モデルに対し、複素固有値解析を実施することで求めることができる。しかしながら、ダンパーを設置する全てのケーブルに対して複素固有値解析を行い、その結果に基づきダンパーの設計変数を決定するには、非常に煩雑で多大の苦勞を要する。このため、ここでは、米田ら^{11)~13)}が提案する簡易解析法(詳細は文献(13)を参照)を用いて、粘性せん断型ダンパーの設計を行うこととする。

ケーブル自身の構造減衰に対する粘性せん断型ダンパーの付加減衰は、ダンパーの設置位置(主桁からケーブルクランプまでの高さ)を定めれば、粘性体の物理定数、温度 t 、ダンパーの振幅 a 、固有円振動数 ω 、粘性体の量(粘性体と振動子間の粘性せん断面積 S)によって規定される¹²⁾。ここでは、所定の設計温度の範囲(-10°C~+40°C)で、所要の構造減衰、すなわち、対数減衰率 $\delta=0.02\sim0.03$ 以上の減衰を得るため、ダンパー内の粘性体の深さ h (図-12参照)をパラメータとした検討を行っている。

いま、ダンパーの設置位置として、主桁上縁からケーブルクランプまでの高さを2.0m、ダンパー内の抵抗板(振動子に結合)の幅を $B=14.5\text{cm}$ に設定、また、ケーブルとダンパー間の相対振幅 $a=0.5\text{cm}$ に想定し、所要の構造減衰を得るための粘性せん断面積 S (粘性体の深さ h で規定)を定める。なお、この際、ダンパー内の抵抗板が2枚、すなわち、せん断面が4枚あることを考慮し、せん断面積 S は $S=4B \times h$ で与えられるものとする。

粘性せん断面積 S が与えられれば、ダンパーVoigtモデルの等価粘性減衰 C_e と等価ばね係数 K_e は、上述の条件に加え、設計条件である温度 t および固有円振

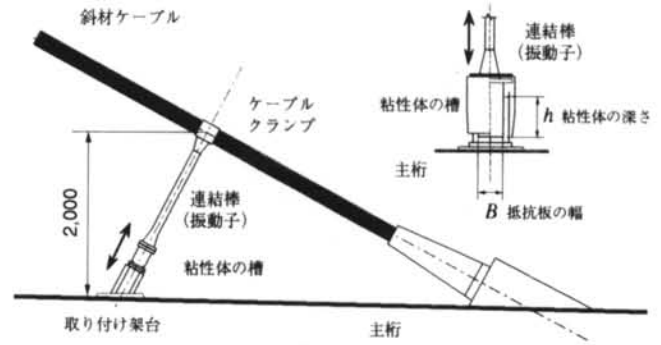


図-12 粘性せん断型制振ダンパーの概要

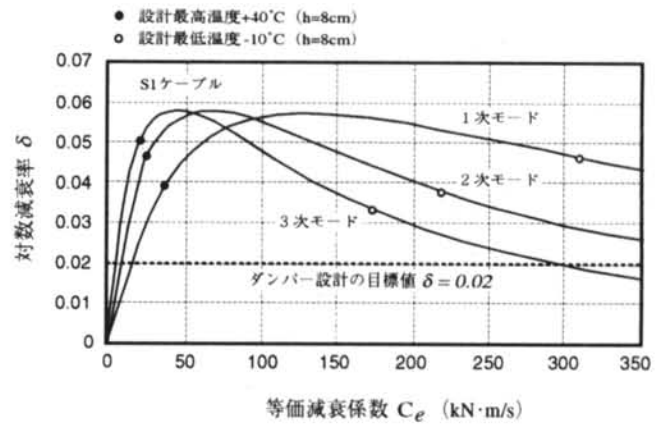


図-13 S1ケーブルの減衰評価曲線

動数 ω に応じ、米田ら^{11)~13)}の実験式を用いて定めることができ、前述の簡易解析法を用いて、粘性せん断型ダンパーの付加減衰をケーブルの固有モード毎に対数減衰率 δ として求めることができる。

図-13は、検討結果の一例として、S1ケーブルを例にとり、その1次~3次モードの減衰評価曲線を表したものである。図示した結果から、設置したダンパーの等価粘性減衰 C_e に対してケーブルの対数減衰率 δ がどのように変化するかが理解でき、等価粘性減衰 C_e を増加させることが必ずしも対数減衰率 δ を増大させることにはならないことに留意する必要がある。

表-2は、S1ケーブルに対して行った検討結果を示したものである。表-2に示す結果から、低温度下(-10°C)では、粘性体の深さ h が浅くなると付加減衰は大きくなり、また、高温度下(+40°C)では、粘性体の深さ h が深くなると付加減衰が大きくなる傾向にある。しかし、いずれの粘性体の深さ($h=6\text{cm}\sim10\text{cm}$ の範囲)の場合も、対数減衰率で0.03~0.05程度の付加減衰効果が得られる。したがって、ここでは、粘性体の深さ h が極端に浅くならない範囲で、対数減衰率 δ が0.03以上となる粘性体の深さ $h=8.0\text{cm}$ (粘性せん断面積 $S=4 \times 14.5 \times 8=464\text{cm}^2$)を定めた。なお、図-13の減衰評価曲線中のプロット●および○は、表-2における粘性体の深さ $h=8.0\text{cm}$ の場合の設計最高温度

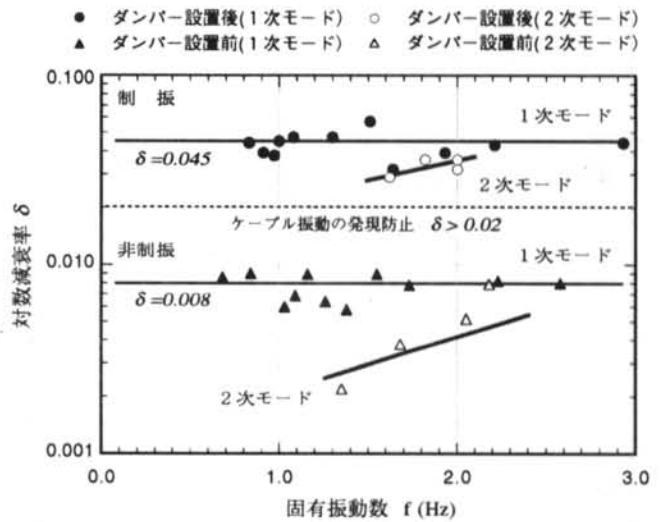
温度 t (°C)	粘性せん断面積 S (cm ²)	粘性体の深さ h (cm)	対数減衰率 δ		
			1次 ($f=0.773\text{Hz}$)	2次 ($f=1.545\text{Hz}$)	3次 ($f=2.318\text{Hz}$)
-10	348	6.0	0.052	0.045	0.040
	406	7.0	0.049	0.041	0.035
	464	8.0	0.046 (0.048)	0.037 (0.039)	0.032 (0.033)
	552	9.0	0.043	0.034	0.029
	580	10.0	0.040	0.031	0.027
+40	348	6.0	0.032	0.041	0.045
	406	7.0	0.036	0.044	0.048
	464	8.0	0.039 (0.034)	0.047 (0.042)	0.051 (0.047)
	552	9.0	0.042	0.049	0.053
	580	10.0	0.044	0.051	0.054

*) 注1: 幅 $B=14.5\text{cm}$ の抵抗板を2枚使用、せん断面は各々の抵抗板の両面を考慮し、粘性せん断面積 $S=4B \times h$ で計算。
注2: 表中 () 内の値はケーブルの剛性を無視した解析モデルによる複素固有値解析結果を示す。

表一 2 粘性体の深さと粘性せん断型ダンパーの付加減衰効果

(+40°C) と設計最低温度 (-10°C) における等価粘性減衰 C_e と対数減衰率 δ の関係を示している。また、表一 2 には、粘性体の深さ $h=8.0\text{cm}$ の場合についてのみ、複素固有値解析に基づく検討結果を示しており、簡易解析法による結果と複素固有値解析結果は良い対応関係にあることが確認できる。

図一 13 ならびに表一 2 は、S1ケーブルに対する検討結果のみを示しているが、ダンパーを設置する全ての斜材ケーブルに対して、同様な検討を行っており、その結果、粘性体の深さを $h=8.0\text{cm}$ (粘性せん断面積 $S=464\text{cm}^2$) とした場合、所定の設計温度条件で、固有振動数が 3.0Hz 以下となる全ての振動モードに対して、対数減衰率 δ が 0.02 以上 (具体的には $\delta=0.039 \sim 0.232$ の範囲) となることを確認している。

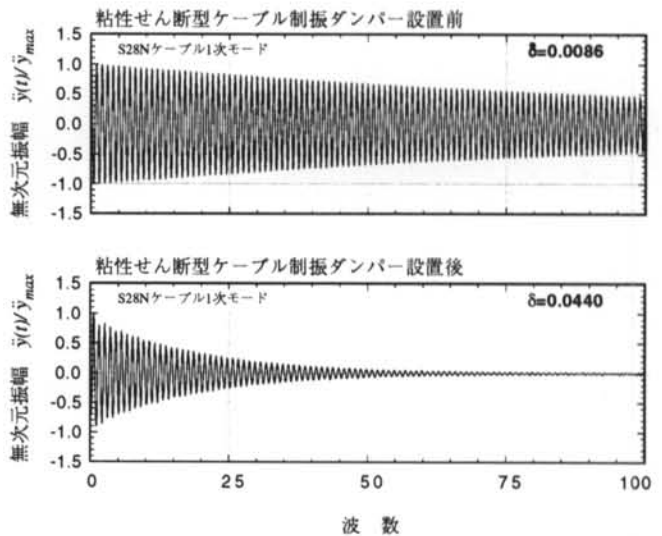


図一 14 斜材ケーブルに設置した粘性せん断型ダンパーの制振効果

§ 6. 粘性せん断型ダンパーの制振効果

本橋では、斜材ケーブルに設置した粘性せん断型ダンパーが所定の性能を発揮しているかどうかを確認する目的で、粘性せん断型ダンパー設置工事完了後、斜材ケーブルに対する振動実験を行っている。なお、振動実験を実施した斜材ケーブルは、ダンパー設置前後の減衰を比較する目的から、中央径間側 (能登島側) の S17~S28 とした。また、この際の振動実験方法は、§ 4. の「ケーブルの固有振動数と対数減衰率」で示した方法と同様である。

図一 14 は、ダンパー付き斜材ケーブルに対する振動実験結果を示したものであり、図一 9 と同様、固有振動数 f と対数減衰率 δ の関係で整理している。また、参考までに、振動計測時の外気温度は 10°C 前後であった。図一 14 に示す粘性せん断型ダンパー設置前後の対数減衰率 δ の比較から、ダンパー設置前



図一 15 粘性せん断型ダンパー設置前後の自由減衰波形の比較

は、1次モードの斜材ケーブルの対数減衰率が $\delta=0.008$ 程度(図中▲)であったのが、ダンパー設置後では $\delta=0.045$ 程度の値(図中●)となっており、粘性せん断型ダンパーの設置により、斜材ケーブルの構造減衰は、ケーブル自身の構造減衰の5倍以上の減衰となっていることが分かる。また、2次モードに関しても、ダンパー設置前では、平均的に見て対数減衰率は $\delta=0.004$ 前後の値(図中△)であった減衰が、ダンパー設置後には $\delta=0.03$ 前後の値(図中○)まで増加していることが分かる。

図-15は、一例として、ダンパー設置前後のS28ケーブルの自由減衰波形を比較したものである。ダンパー設置前の減衰波形に比べ、ダンパー設置後では、短い時間ですばやく振動が減衰していることがわかり、斜材ケーブルに設置した粘性せん断型ダンパーの減衰付加効果が伺われる。

図-14(あるいは図-15)に示した結果から、本橋に設置した粘性せん断型ダンパーは、レインバイブレーションが発現しない条件である対数減衰率 δ が0.02~0.03を確実に上回っており、当初の設計の目標値を十分達成していることが確認できる。

§ 7. おわりに

中能登農道橋の斜材ケーブルに対して行ったケーブルの空力振動に関する風応答観測、ケーブルの減衰特性の把握のための振動実験、空力振動対策のための粘性せん断型ダンパーの設置、ダンパーの減衰付加効果に関する検討、について報告した。本研究報告の主な結果をまとめると、以下のようにまとめられる。

- 1) 斜材ケーブル自身の構造減衰は極めて小さく、対数減衰率で、1次では $\delta=0.008$ 前後、2次で $\delta=0.002\sim 0.004$ 程度の値しかない。
- 2) 架設中(グラウト完了後)、比較的低い風速から渦励振が発現するばかりか、降雨を伴う強風時には、かなりの振幅に達する激しいレインバイブレーションを生じる。
- 3) レインバイブレーションの発現風速は、無次元風速で、20前後、30~40、70~80、さらには、110以上の範囲であり、高風速渦励振としての発現メカニズムに関する一連の研究成果と良く対応する。
- 4) 粘性せん断型ダンパーによる制振対策を実施後、斜材ケーブルの対数減衰率は概ね $\delta=0.03\sim 0.045$ 程度まで増加し、対策前の斜材ケーブル自身の構造減衰の5~7倍程度の値となっている。

なお、本橋はダンパーの設置工事完了の後、橋面工の施工も終え、平成11年3月27日に無事開通した。その後の空力振動の風応答観測の結果からは、斜材ケーブルに顕著な振動は観察されていない。

謝辞

本研究は、「能登島架橋検討委員会」の委員の方々、石川県七尾農林総合事務所 能登島出張所の宮坂昭夫 所長 ならびに 池田俊文 技師をはじめ、石川県関係各位の方々の御厚意により実現したものであり、ここに、深謝の意を表します。また、粘性せん断型ダンパーに関する検討にあたっては、オイレス工業(株)の竹ノ内勇氏に協力を頂いたことを記し、謝意を表します。

<参考文献>

- 1) 社団法人日本鋼構造協会[編]: “構造物の耐風工学, 第7章 7.3節 ケーブルの空力弾性振動”, pp.250~273, 東京電気大学出版局, 1997年.
- 2) 斜張橋ケーブルの耐風安定性委員会: “斜張橋ケーブルの耐風性の検討[報告書], 同[資料編]”, 財団法人土木研究センター, 1993年.
- 3) 樋上圭一: “斜張橋ケーブルのレインバイブレーション”, 日本風工学会誌, 第27号, pp.17~28, 1986年.
- 4) 松本勝, 白石成人, 白土博道, 平井滋登, 佐野祐一, 桂一詞: “斜張橋ケーブルのRain Vibrationの発生要因における二つの要因についての考察”, 第11回風工学シンポジウム論文集, pp.263~268, 1990年.
- 5) 松本勝, 青木淳, 山岸稔, 藤井大三, 白土博道: “斜張橋ケーブルの空力振動現象に関する研究”, 第13回風工学シンポジウム論文集, pp.257~262, 1994年.
- 6) 松本勝, 對馬大輔, 佐久間智, 矢木知己, 重村好則: “斜張橋ケーブルの振動特性並びに高風速渦励振の発生メカニズムに関する研究”, 第15回風工学シンポジウム論文集, pp.527~532, 1998年.
- 7) たとえば, Yamada, H.: “Control of wind-induced cable vibrations from a viewpoint of wind resistant design of cable-stayed bridges”, Proc. Int. Seminar on Cable Dynamics, Tokyo, 13 Oct. 1997, pp.129~138, 1997.
- 8) たとえば, 米田昌弘: “斜張橋ケーブルの風による振動とその制御”, 土木学会, 第2回振動制御コロキウム Part A, pp.21~40, 1993年.
- 9) 宮坂昭夫, 池田俊文, 富田憲治, 大場義人, 本田勉, 大野浩: “中能登農道橋の施工”, 橋梁と基礎 Vol.33, No.6, pp.2~10, 1999年.
- 10) 呼子大橋編集委員会: “呼子大橋工事誌”, 佐賀県農林部 佐賀県唐津農林事務所, 1989年.

- 11) 米田昌弘, 前田研一, 伊関治郎, 下田郁夫: “ケーブル制振用粘性せん断型ダンパーの開発”, 日本機械学会論文集(C編), 第58巻555号, pp.47~52, 1992年.
- 12) 望月秀之, 米田昌弘, 下田郁夫: “ケーブル制振用粘性せん断型ダンパーの減衰付加効率について”, 土木学会 第48回年次学術講演会概要集, pp.656~657, 1993年.
- 13) 米田昌弘, 下田郁夫: “ケーブル制振用粘性せん断型のより厳密な設計法”, 土木学会, 第48回年次学術講演会概要集, pp.658~659, 1993年.

