

(148) P C 斜張橋の斜材ケーブルに生じる振動とその制振対策

清水建設(株) 技術研究所 和泉研究室	非会員	○	若原 敏裕
清水建設(株) 土木本部 技術第一部	正会員		大野 浩
石川県珠洲農林総合事務所 土地改良部	非会員		宮坂 昭夫
石川県七尾農林総合事務所 土地改良部	非会員		池田 俊文

1. はじめに

斜張橋の斜材ケーブルは本質的にその構造減衰が小さいことから、比較的低い風速(10m/s前後)で、渦励振、レインバイブレーション、あるいは、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、ケーブルに生じるこのような空力振動は、利用者に不安感を与える問題も含め、橋としての使用性を損なうばかりか、構造の安全性に関する問題を生じさせる可能性も指摘されている⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾。

ケーブルの空力振動に対処する方法としては、ケーブルの表面に突起物やスリットを設ける空気力学的な制振対策⁽⁴⁾とオイルダンパーや粘弾性型ダンパー等をケーブル端部付近に設置する構造力学的な制振対策⁽⁵⁾が挙げられ、主要な制振方法として位置づけられている⁽³⁾。

本報告は、写真-1に示す国内最大級のP C斜張橋である中能登農道橋⁽⁶⁾(橋長450m、支間長230mの3径間連続P C斜張橋)の斜材ケーブルに対して行った(1)ケーブルの減衰特性の把握のための振動実験、(2)空力振動に関する風応答観測、(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. 斜材ケーブルに生じる振動

本報告で対象とする中能登農道橋は準ハープ型2面吊り形式のP C斜張橋であり、採用されている斜材ケーブルは、 $\phi=15.2\text{mm}$ のP C鋼より線を23~37本束ねて外径 $D=145\text{mm}\sim 160\text{mm}$ の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単一ケーブルシステムである。本橋において、発現の可能性が考えられる空力振動は、並列ケーブルシステムを採用していないことから、渦励振とレインバイブレーションに限定できる。特に、降雨を伴う強風

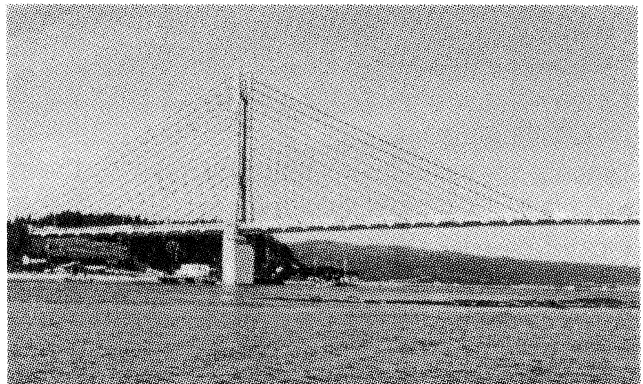


写真-1 中能登農道橋(中島町側)

時に発生するレインバイブレーションは、これまでに多くの斜張橋で観測されており、頻繁に発生することやその振幅が直径の数倍に達することから、各種の制振対策がなされている⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

ケーブルに生じる渦励振とレインバイブレーションに関して、既往の研究成果⁽³⁾によれば、

- 1) 渦励振は高次モードで発現するケースが多いが、励振力自体はそれほど強いものではなく、対数減衰率 $\delta=0.01\sim 0.015$ の構造減衰があれば発現しないものと考えて良い。
- 2) レインバイブレーションでは、振動が生じたケーブルの固有振動数 $f=3.0\text{Hz}$ 以下の範囲にあり、ケーブル端部に設置するダンパー等の付加減衰効果により、対数減衰率 $\delta=0.02\sim 0.03$ 以上の構造減衰が確保されている場合には、振動の発現を妨げることができる。

といった特徴があり、上記のケーブルの固有振動数 f および対数減衰率 δ の値は、制振対策を行う際の目安として、参考にすべき値となる。

3. 斜材ケーブルの振動計測

本橋では、斜材ケーブルに対する制振対策は設計段階では考慮されていない。しかし、架設中、斜材のグラウト工事完了後、風速5m/s前後のわずかな風で渦励振による振動がしばしば観測されるようになった。このことから、ケーブルの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、制振対策が必要かどうかの検討を行った。なお、制振対策の必要の有無の判定は、斜材ケーブルの1次固有振動数 f および対数減衰率 δ に対し、

- a) 1次の固有振動数 $f < 3.0\text{Hz}$
- b) " 対数減衰率 $\delta < 0.02$

の条件に該当する斜材ケーブルは、既往の実測結果や研究成果⁽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、上記の条件a)とb)の両者にあてはまる斜材ケーブルに制振対策を実施することとした。

振動計測を実施する斜材ケーブルは、図-1に示した斜材ケーブルの内、中央径間側（能登島側）のS15～S28の14段28本である。振動計測時の現地の状況は、張出し施工を終了し側径間を閉じた直後の状態である（中央閉合の準備段階）。

斜材ケーブルに対して行う振動計測の手順は、1) まず、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) 固有振動数でケーブルを加振後、自由振動を計測し、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後に得られる減衰波形から対数減衰率 δ を算定した。

図-2は、常時微動計測により得られたS28Nケーブル（中能登農道橋の最長ケーブル）のパワースペクトルを示したものである。S28ケーブルは、わずかな風速でしばしば高次モードの渦励振を生じたケーブルである。図-2より、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-3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。自由振動計測は、基

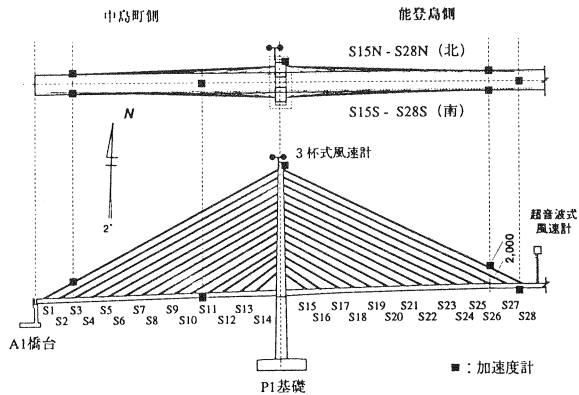


図-1 計測機器配置および斜材ケーブル番号と位置

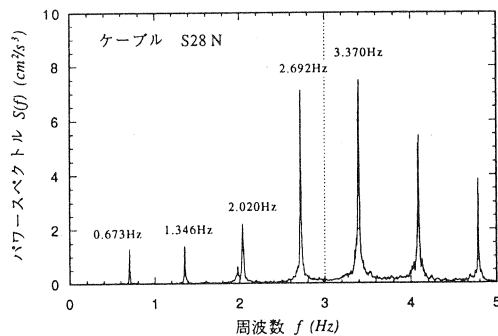


図-2 常時微動計測より得られたS28Nケーブルのパワースペクトル

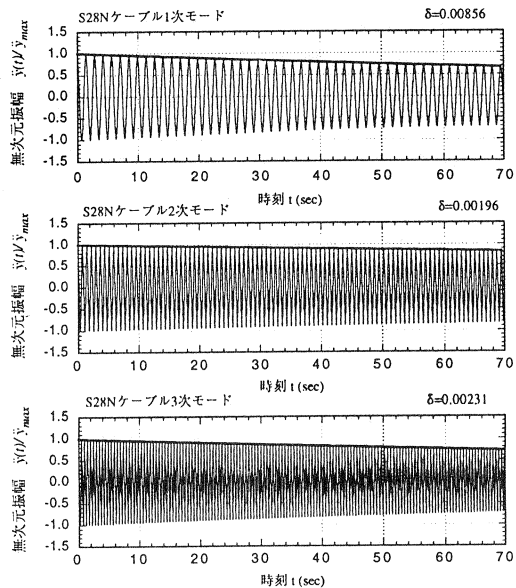


図-3 自由振動計測より得られたS28Nケーブルの減衰波形と対数減衰率

本的に各斜材の1次～3次モードに対して行うこととしたが、斜材ケーブルの長さ*l*や張力の関係で高次モードの固有振動数に対する加振が困難な場合については実験を行っていない。図-3からわかるように、いずれのモードの構造減衰も極めて小さく、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 $\delta_3=0.0023$ であり、特に高次モードの減衰は渦励振を生じないとされている対数減衰率 $\delta=0.01$ の1/5程度の値であり、架設時にわずかな風速でしばしば高次モードの渦励振を生じたことも理解できる。

図-4は振動計測結果を示したものであり、各々の斜材ケーブルの固有振動数*f*と対数減衰率 δ の関係をまとめたものである。図-4に示す結果より、いずれのケーブルも長さ*l*や導入張力*T*に関わらず、1次モードの対数減衰率 $\delta_1=0.008$ 程度の値であり、渦励振やレインバイブレーションの発現しない条件である対数減衰率 δ が0.02～0.03以上といわれる条件には遠く及ばない。また、2次モードの対数減衰率は固有振動数の増加に対して増加傾向にあるものの、 $\delta_2=0.002\sim 0.004$ の範囲にあり、平均的な値で見ると1次モードの1/2程度の減衰でしかない。

図-4に示す結果から、制振対策(ダンパーの設置)は、各々斜材の固有振動数*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、振動計測実施時は中央閉合前の段階であり、最終的には、中央閉合後の斜材の張力調整を経て完成系での斜材の導入張力*T*が決定される。したがって、本計測結果に基づき、完成系における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-5はS15N～S28Nの斜材の長さ*l*(主桁部の斜材の保護管出口から主塔部の保護管出口までの距離)と斜材ケーブルの1次モードの固有振動数*f*(実測値：図中○)の関係を示したものである。また、図-5には、以下に示す固有振動数の算定式(1)(2)から求めた固有振動数*f*についても示している。

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

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

なお、式(1)(2)において、*T*は振動計測実施時の斜材の導入張力、*g*は重力加速度(=9.8m/s²)、 γ は単位体積重量、*EI*は曲げ剛性である⁽⁷⁾。図-5に示した結果より、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)では実測値に対してわずかに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)による固有振動数の算定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以下になった斜材ケーブルに対して、制振対策(具体的には粘弾性ダンパーの設置)を行うこととする。

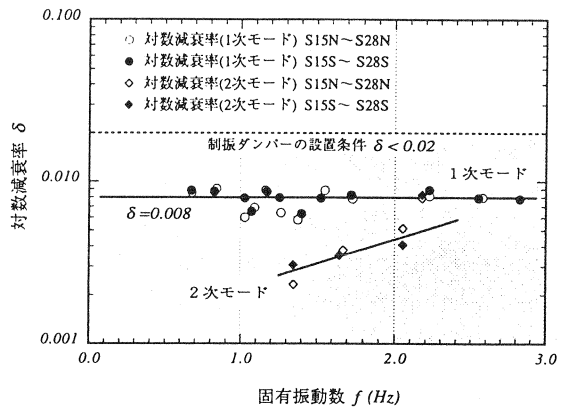


図-4 固有振動数と対数減衰率の関係の関係

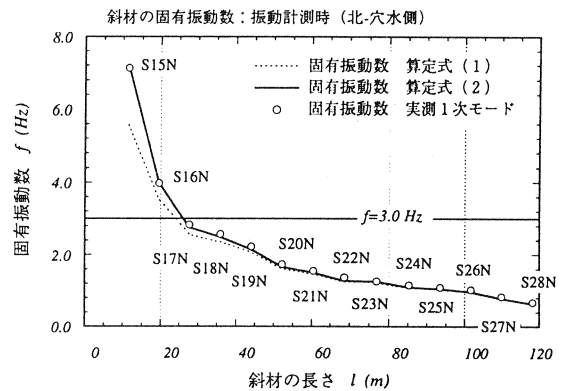


図-5 斜材の長さ1次固有振動数の関係

図-6は、式(2)を用いて完成系の斜材ケーブルの1次固有振動数を推定したものである。なお、図-6は北側の斜材に対して示しているが、橋軸に対して対称の位置にある南側のケーブルも同様な値を示す。図-6に示す結果より、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近くの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本の斜材が制振対策の対象となる。

なお、本橋の斜材ケーブルに対する制振対策としては、レトロフィッティングが容易な粘弾性型のダンパー⁽⁵⁾を用いることとし、その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。

4. 斜材ケーブルの空力振動

本橋では、施工時の精度管理の目的から、図-1に示すような計測システムを用いて常時風応答観測を実施しており、斜材ケーブルの空力振動も同時に計測している。

図-7は斜材の張力調整時の平成10年9月22日に台風7号に見舞われた際のケーブルの振動状態を示したものである。なお、前述した振動計測結果から、ケーブルの制振対策として粘弾性型のダンパーを設置することが決定していたが、台風7号通過時(張力調整時)には、粘弾性ダンパーは未設置の状況である。

図-7に示すように、台風7号通過時の最大瞬間風速は30m/s程であり、10分間平均風速で20m/sである。この際、発現した振動はレインバイブレーションであり、図-7に示すように16:00~19:00の間(風向NNE, 平均風速で5m/s~20m/sの範囲)でS1ケーブルの加速度応答は200cm/s²以上に達している。また、その間の数時間は事前に設定していた計測機器のフルスケールである250cm/s²を超えた加速度応答が生じており、設定レンジオーバーのため250cm/s²以上の値は記録できていない。なお、目視による確認では、その際のレインバイブレーションの最大振幅は15cm~30cm程度(ケーブル径の1~2倍程度の振幅)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S1~S10(いずれも低次の固有振動数が3.0Hz以下)であり、中島町側(側径間)に集中しており、能登島側(中央径間)のS15~S28では目立った振動を生じていない。このように、本橋において台風7

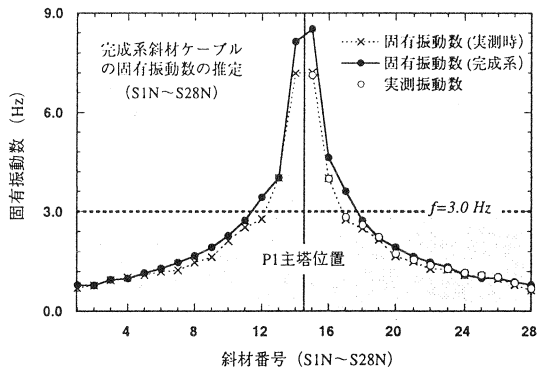


図-6 完成系の斜材ケーブルの固有振動数

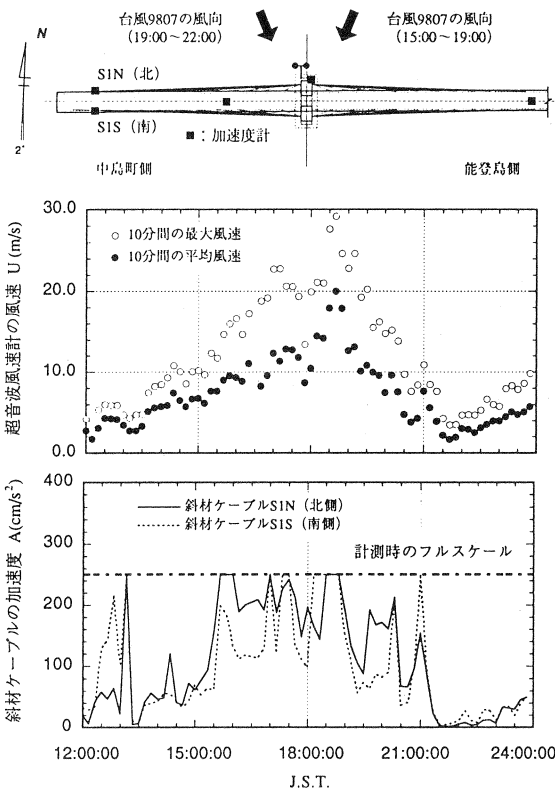


図-7 平成10年台風7号通過時の斜材ケーブルの空力振動(S1NおよびS1Sケーブル)

号通過時に観測されたレインバイブレーションの特徴は、以下に示す既往の斜張橋で観測されたケーブルのレインバイブレーションの特徴⁽³⁾：

- 1) 振動は1~3次の比較的低い次数のモードで発現し、その固有振動数が3.0Hz以下である。
 - 2) 平均風速5m/s~20m/sの範囲で生じており、無次元風速で20以上で振動が発現する。
 - 3) 風向に対して正姿勢（ケーブルが主塔に対して風下）のケーブルに振動が集中する。
- と整合している。

5. 斜材ケーブルの制振対策

本橋では、図-8に示すような粘弾性型ダンパーを斜材ケーブルの制振対策として設置することとした。粘弾性型ダンパーは主桁側に設置する粘弾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、粘弾性体と振動子の間に生じる粘性抵抗によってケーブルの振動エネルギーを吸収し、斜材ケーブル自体の振動を抑えるものである⁽⁵⁾。写真-2は、実際にダンパーを斜材ケーブルに取り付けた状況を示したものである。

ケーブル自身の構造減衰に対する粘弾性型ダンパーによる付加減衰は、ダンパーの設置位置（主桁からの高さ）を決めれば、ダンパーに注入する粘弾性体の量（粘弾性体と振動子との間の粘性せん断面積）と粘弾性体の物理定数によって規定される⁽⁵⁾。

ここで、所定の設計温度の範囲（-10°C~40°C）で、所定の構造減衰、すなわち、対数減衰率 $\delta=0.02\sim0.03$ 以上の減衰を得るための検討を行った。ダンパーの設置位置、すなわち、主桁からの高さを2.0mの位置とし、注入する粘弾性体の量（粘性せん断面積 A_v あるいは槽内の粘弾性体の高さ h ）を決める。

検討にあたっては、粘弾性型ダンパーの等価粘性減衰と等価ばね係数の実験式を用いる米田らの方法⁽⁸⁾を用いた。表-1は一例としてS28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-1に示す結果から、極端に粘弾性体の高さが小さくならない範囲で、対数減衰率 δ が0.03以上となる粘弾性体の高さ $h=8.0\text{cm}$ （粘性せん断面積 $A_v=464\text{cm}^2$ ）を定めた。なお、S28ケーブル以外に対しても粘弾性体の高さ $h=8.0\text{cm}$ として固有振動数3.0Hz以下の振動に対して対数減衰率 δ が0.03以上となることを確認している。

表-1 粘弾性体の高さ とダンパー付きケーブルの対数減衰率

温度 t (°C)	粘性せん断面積 A_v (cm ²)	粘弾性体の高さ 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	0.037	0.032
	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	0.047	0.051
	552	9.0	0.042	0.049	0.053
	580	10.0	0.044	0.051	0.054

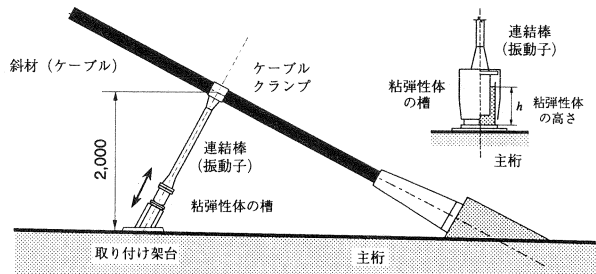


図-8 粘弾性型ケーブル制振ダンパーの概要

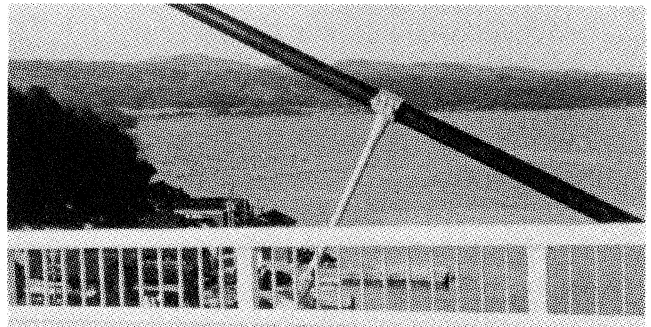


写真-2 粘弾性型ダンパーの設置状況

6. ダンパーの減衰付加効果

本橋では斜材ケーブルに設置した粘弾性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、ダンパー付き斜材ケーブルの振動実験を行った。図-9はその結果を示したものであり、固有振動数 f と対数減衰率 δ の関係を示している。図-9に示した粘弾性型ダンパー設置前後の対数減衰率 δ の比較から、ダンパー設置前では、1次モードの斜材ケーブルの対数減衰率は $\delta=0.008$ 程度であったが、ダンパー設置後は $\delta=0.045$ 程度の値となっており、ダンパーの効果は、斜材ケーブル固有の構造減衰の5倍程度の減衰付加効果となっている。また、2次モードに対しても、ダンパー設置前では、平均的に見て対数減衰率は $\delta=0.004$ 前後の値であったが、ダンパー設置後は $\delta=0.03$ 前後の値まで増加していることがわかる。

図-10は、ダンパー設置前後S28N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弾性型ダンパーの効果が伺われる。

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減衰特性把握のための振動実験、ケーブルの空力振動の風応答観測、空力振動対策として設置した粘弾性型ダンパーの効果について報告した。本報告の結果をまとめると、

- 1) 斜材ケーブルの構造減衰は小さく、対数減衰率で $\delta=0.002\sim 0.008$ 前後の値しかなく、降雨を伴う風速5m/s \sim 20m/sの風で激しいレインバイブレーションを生じる。
- 2) 粘弾性型ダンパーによる制振対策実施後は、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5 \sim 7倍程度の値となっている。

となる。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。

参考文献

- (1) 樋上：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，1986年。
- (2) 松本，白石，白土，平井，佐野，桂：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，1990年。
- (3) 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]，財団法人土木研究センター，1993年。
- (4) 松本，白土，藤井，重村：斜張橋ケーブルの断面形状変化による空力的制振対策，第14回風工学シンポジウム，1996年。
- (5) 米田，前田，伊関，下田：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)，58-555，1992年。
- (6) 宮坂，池田，富田，大場，本田，大野：中能登農道橋の施工，橋梁と基礎，1999年。
- (7) 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。
- (8) 米田：斜張橋ケーブルの風による振動とその制御，第2回振動制御コロキウム Part A，土木学会，1993年。

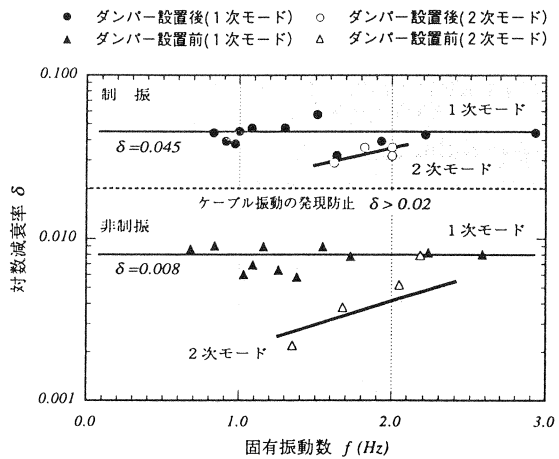


図-9 斜材ケーブルに設置した粘弾性型ダンパーの効果

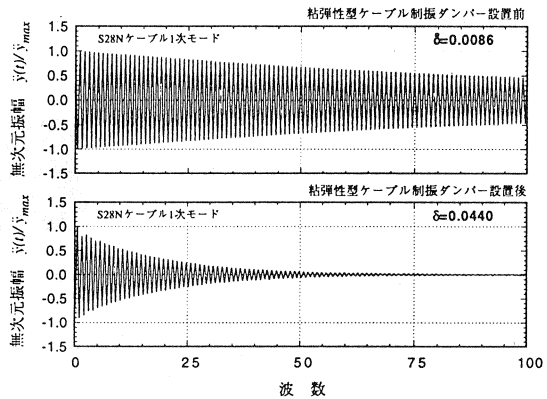


図-10 粘弾性型ダンパー設置前後の自由減衰波形の比較