

I-52

斜張橋のケーブルダンパーの低温下の特性について

北海道開発局帯広開発建設部	正 員	大串	弘哉
北海道開発局帯広開発建設部		葛西	泰弘
北海道開発局開発土木研究所	正 員	佐藤	昌志
北海道開発局開発土木研究所	正 員	金子	学
鹿島技術研究所	正 員	向	弘晴

1. まえがき

十勝大橋は、ほぼ南北に十勝川を跨ぎ、国道 241号沿いに建設中の中央スパン251mの3径間連続PC斜張橋(図-1)である。本橋の架設地点が市街地であることから完成後は車両、歩行者とも交通量が多く、交通振動による桁の振動とケーブルが連成しケーブルに振動が発生することが予想される。

斜張橋の長大化および建設事例の増加にともない、降雨時において風速10m/s 前後の風により斜張橋ケーブルがかなり大きな振幅で振動した事例(レインパイブレーション)が数多く報告されており、この振動を効果的に抑制することが重要な課題となっている^{1), 2)}。本橋の場合、架橋地点が冬季には平均風速15m/s 程度の風が常時吹く風の強い地域であることから、上記のレインパイブレーションだけでなく、風の乱れにより生じ風速の増加とともに大きくなるガスト応答などの振動にも注意する必要がある。

一般にケーブルの制振対策は、耐風設計便覧によると事後の対策でよいとされているが、本橋の場合極寒冷地であることから既存のダンパーでは粘性が増し有効に効果を発揮しないことも考えられるので事前に適切なダンパーを検討する必要がある。

本稿では、制振装置の選定およびダンパーの特性試験を実施したのでこれを報告するものである。

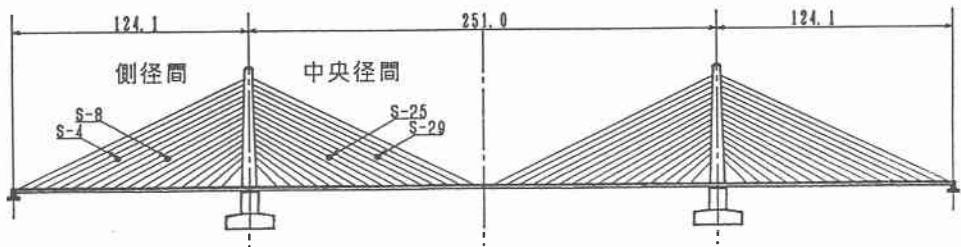


図-1 十勝大橋一般図

2. 制振装置の選定

2.1 制振対策の種類

制振装置は大別すると以下に示す4種類がある。

- ①重量を付加する方法；動的吸振装置という重りを取り付ける方法で、特定の振動数にしか効果がない。
- ②減衰を付加する方法；ダンパーをケーブル端部の桁上に取り付ける方法で、施工性、メンテナンスの面で有利であるが、美観上あまり目立たなくする必要がある。荒津大橋、天保山大橋、碓氷橋、青森ベイブリッジなど多数実績がある。
- ③剛性を付加する方法；制振ワイヤーでケーブル同士を連結する方法で、剛性だけでなく重量も同時に付加されることになる。

- ④外力を抑える方法；空力的対策と呼ばれ、ケーブルの断面形状を変化させてケーブルにかかる空気力を低

A Low Temperature Characteristic of Cable Damping of a Cable-Stayed Bridge

by Hiroya OOGUSHI, Yasuhiro KASAI, Masashi SATO, Manabu KANEKO and Hiroharu MUKAI

減させる方法。

本橋では、施工性が良く、メンテナンスが容易である②のダンパーにより減衰を付加させる方法を選んだ。ダンパーには、粘性せん断型ダンパー、オイルダンパー、高減衰ゴムダンパーなどがある。粘性せん断型のダンパーは、粘性体の温度依存性が高く寒冷地で夏冬の気温変化が大きい地域には適用が困難である。また、高減衰ゴムダンパーは、ケーブル長が長い場合は大きな減衰を付加することが困難である。一方、オイルダンパーは、温度依存性が小さく、大きな減衰を付加することが可能であるが、低温時の減衰特性が不安定で、微小振幅特性が問題となっている。

以上のことから、本橋ではオイルダンパーを選定し、さらに温度依存性が小さく、微小振幅時の特性を向上させた有効なオイルダンパーを開発することとした。

2.2 オイルダンパー

オイルダンパーは、通常用いられるピストン・シリンダー構造で、ピストン運動によってオイルが狭い通路（オリフィス）を流れるときに生じる圧力降下による減衰力を利用したものである。このタイプには速度に対して減衰力が比例する線形型と速度の自乗に比例する非線形型とがあるが、粘性減衰係数が減衰力／速度で表されるため、粘性減衰係数は、線形型では速度に対して一定となるが、非線形型では速度の増加とともに大きくなる。

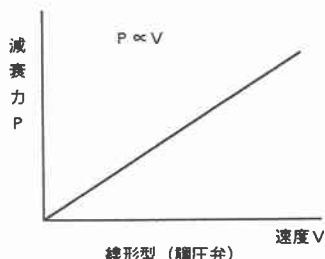


図-2 線形型ダンパー

斜張橋のケーブルの振動は、ダンパーの粘性減衰係数に大きく左右されるため、実験では粘性減衰係数が一定の図-2に示すような線形型を用いた。

さらに、低温特性、微小振幅特性を向上させるため、 -10°C 以下でオイルが凝結し始める通常のオイルを -30°C でも粘性が変化しないオイルに変更した。また1D振幅が発生する前に制振を行うことが有効と考え、ケーブルが1次モード振動しているとき中央部振幅で1/5D（D：ケーブル径）程度の微小振幅時にも同様の特性が発揮できるように、ダンパーは片振幅1mm前後の減衰力を大きく設定した。

3. オイルダンパーの設計

オイルダンパーを設計するためには、ケーブル振動を制振するために必要な所要付加減衰量を設定し、その減衰量を付加できるようなダンパーの粘性減衰係数を求める必要がある。

3.1 付加減衰の設定

ケーブルの振動は、対数減衰率 $\delta > 0.03$ で制振できると言われている^{1)・2)・3)}。また、交通振動等による連成振動は、ケーブルの振動数が1～3 Hzの範囲であると考え、振動数がこの範囲に入るすべてのケーブルの振動次数を検討する必要がある。一方、実際に設置されたダンパーによるケーブル振動への減衰付加効果は必ずしも理論値と一致しないことが報告されている。本橋の所要減衰付加量は、レインバイブレーションを対象に安全率を見込んで $\delta > 0.05$ とした。

ダンパーにより付加される減衰は、ケーブル端部から取り付け位置までの距離に比例する。また、同じ取り付け位置でもダンパーの条件によりケーブルに付加される減衰が異なる。それぞれの位置で最適なダンパーが設置され最大の減衰 $\delta_{\max}$ が得られた場合次式に示すような関係が求められている。

$$\delta_{\max} = \pi (x/L) \quad (x; \text{ケーブル固定点からダンパー取り付け位置までの距離}, L; \text{ケーブル長})$$

上式からわかるように、ケーブル長が長くなると、所要減衰量を確保するために取り付け位置を高くする必要がある。しかし、美観を考慮した場合は、ダンパーが目立たないように取り付け位置をできるだけ低く、できれば高欄で隠れるようにすることが望ましいといわれている。

本橋では、ダンパーをS-4ケーブルの定着部から5 mの位置に取り付けた場合を想定し、後述の複素固有値解析により所要減衰量を確保するために必要なダンパーの粘性減衰係数を求めた。さらにダンパーを実験的に製作して実橋に取り付け、斜材の振動実験を行って減衰効果を確認するとともに、美観を考慮した最

適な取り付け位置を求めることとした。

3.2 粘性減衰係数の決定

図-3に示すように斜張橋のケーブルは桁上のケーブル端にダンパーを取り付け減衰を付加させる。この時、ダンパーの粘性減衰係数が小さいとケーブルに作用するダンパーの減衰力が小さくなり、逆にダンパーの粘性減衰係数が大きすぎてもケーブルに作用する減衰力が大きすぎてダンパー取り付け位置が節となるような振動が生じ減衰効果が悪くなる。従ってケーブルの構造減衰 δ を設計値以上にするためには、有効なダンパーの粘性減衰係数 C の範囲が存在する。

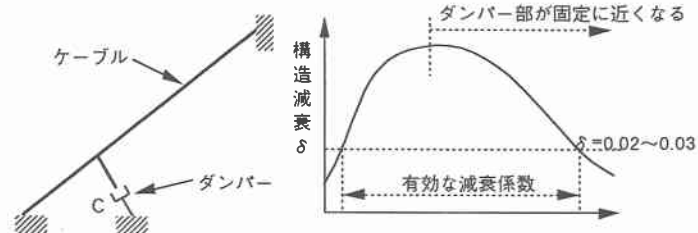


図-3 ダンパーの減衰係数とケーブルの構造減衰

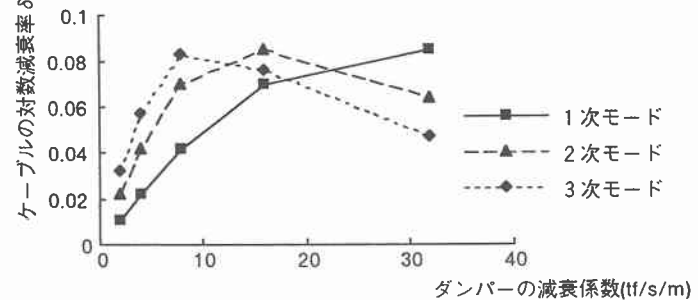


図-4 複素固有値解析結果 (S-4 ケーブル)

図-4に、複素固有値解析から求めた外から4段目のS-4ケーブルの δ - C 曲線を示す。図より、振動数が1~3 Hzの範囲内の1次モードと2次モードについて $\delta > 0.05$ を満足するダンパーの粘性減衰係数は、10~30(tf/s/m)となる。

4. オイルダンパーの室内要素試験

オイルダンパーの温度特性試験、振幅特性試験によってそれぞれの依存性について調べ、さらに低温用オイルの有効性について検討するために温度上昇特性試験によってダンパーの上昇温度を調べた。

4.1 実験条件

表-1 に実験ケースを示す。

振動数は斜材の振動数に合わせて決定した。振幅は、斜材の振動形状を放物線近似した場合、ケーブルが片振幅で1D (D ; ケーブル径) 振動した時のダンパー部の片振幅が5 mmであることを参考に決定した。

また、実験はすべて変位制御でピストン側を加振したときの減衰力をロードセルで測定して行った。実験室の温度は約30℃であった。

4.2 実験結果

図-5 は、あらかじめ恒温槽で-30℃まで冷却したダンパーを取り出して加振した時の温度と減衰力の関係を示す。ただし、温度はダンパー外壁に取り付けたT熱電対で測定したためダンパー温度はオイルの温度よりやや低い値を示していると考えられる。図より温度変化に対して、減衰力はほぼ一定で、良好な結果が得られていることがわかる。

表-1 実験ケース

	S-4 ケーブル用ダンパー		
	片振幅 (mm)	振動数 (Hz)	温度 (℃)
温度特性試験	10	1.0	-30~50
振幅特性試験	0.5~15.0	1.0	20
温度上昇特性試験	2、5	1.0	-30~0

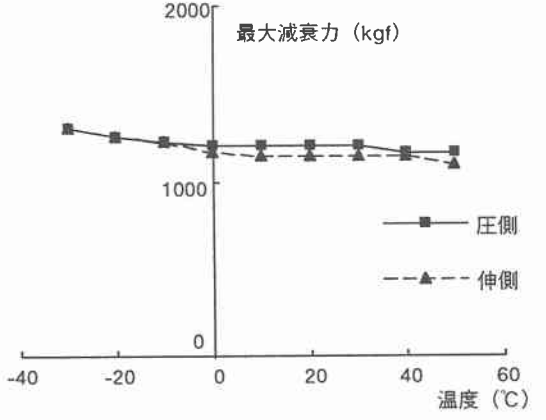


図-5 温度特性

図-6は、振動数を1Hzで固定し、振幅を変化させて測定した減衰力とピストン変位の関係を示す。これまでのダンパーは微小振幅において減衰力が小さいため減衰効果が発揮できないことが多かったが、実験で用いたダンパーは図より片振幅1mm程度の微小振幅域で減衰力/ピストン速度が大きくなっており、微小振幅特性が向上しているのがわかる。

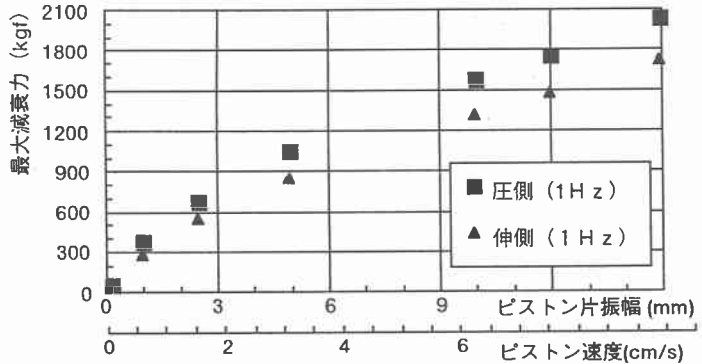


図-6 振幅特性

図-7は、ピストンを1Hzで加振し、振動エネルギーがオイルの熱エネルギーに変換されるために生じた上昇外壁温度と時間の関係を示した。実験では大気中への熱放出による温度上昇を考慮して、加振ダンパーと同様に冷却し同時に室内に取り出したダンパーの外壁温度も同時に測定した。図より片振幅2mmでは放置ダンパーの温度上昇の方が大きく加振による温度上昇はみられなかった。一方、片振幅5mmでは加振開始25分までは約13℃温度が上昇するがその後変化しない。

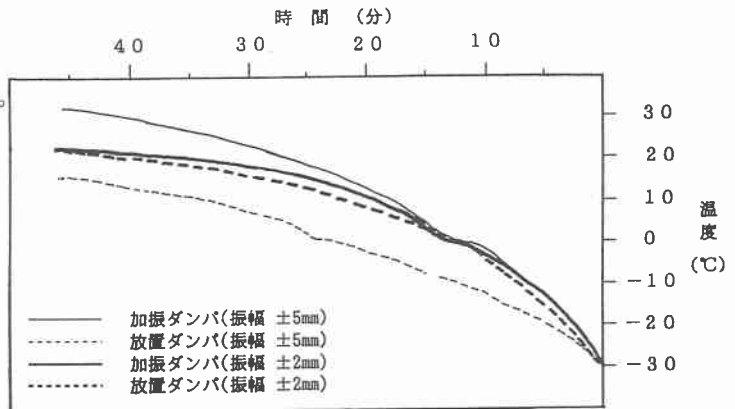


図-7 温度上昇特性

したがって、本橋のような外気温度が-30℃の斜張橋斜材に取り付けた場合、ダンパーの温度はせいぜい-17℃までしか上昇しないものと思われる。実際には、外気への熱の放出が大きいいため、ダンパーの温度上昇はそれほど期待できないものと思われる。よって通常のオイルを取り付けた場合、加振による温度上昇を考慮しても適用範囲外の温度となり、低温用オイルに交換する必要があることがわかる。

5. あとがき

今回開発した寒冷地用ダンパーは、室内実験の結果から温度依存性、振幅依存性が小さく、目標の粘性減衰係数をほぼ設計どおりに設定できることがわかった。また、S-4ケーブルにおいて、ダンパーを取り付け斜材振動実験を実施し斜材の減衰を求めたところ、1次モードで $\delta=0.07$ 、2次モードで $\delta=0.05$ の減衰が得られほぼ複素固有値解析結果と一致した。今後は、斜材の風応答観測によりその効果を確認する予定である。

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検討」，斜張橋ケーブルの耐風性に関する検討委員会報告書，昭和63年
- 2) 土研センター，「斜張橋ケーブルの耐風性検討報告書」，平成5年
- 3) 南花，森，石飛，南條「天保山大橋のケーブル振動とその対策」，第2回振動制御コロキウム講演論文集，Part B9-16, 1993
- 4) 藤野，Pacheco, Sulekh「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. 26 No. 4, 41-45, 1993