

斜張橋ケーブルのレインバイブレーションに関する研究

Rain-wind induced vibration of the cables of cable-stayed bridges

松本 勝¹⁾ 金村 宗²⁾ 藤井大三³⁾
大東 義志²⁾ 北山暢彦⁴⁾

Masaru MATSUMOTO, Takashi KANAMURA, Daizo FUJII,
Yoshiyuki DAITO, Nobuhiko KITAYAMA

- 1)工博 京都大学助教授 工学部土木工学教室 (〒606 京都市左京区吉田本町)
2)京 都 大 学 大 学 院 工学研究科環境地球工学専攻 (〒606 京都市左京区吉田本町)
3)J R 西 日 本 (研究当時 京都大学大学院) (〒530 大阪市北区芝田 2-4-24)
4)㈱石川島播磨重工業 (研究当時 京都大学工学部) (〒100-00 東京都千代田区大手町 2-2-1)

This study investigates to clear the effect of elliptical plates on cables in relation to rain-wind induced vibration. It seems that three factors make cables aerodynamically unstable. One is water rivulet formed on the cable surface, another is axial flow generated behind the inclined cable, and the other is vortex-shedding, which is excited by the three dimensionality of Karman vortex shedding along the cable axis, with long period. A series of wind tunnel tests have been conducted to comprehend the roles of these three factors for cable aerodynamic instability and clarify the effect of elliptical plates installed on cables.

Key Words: Rain-Wind Induced Vibration, Elliptical Plates, Water Rivulet,
Axial Flow, The Three Dimensionality Of Karman Vortex Shedding

1. はじめに

近年、斜張橋ケーブルのレインバイブレーションに関して、数多くの発生事例が報告されており、それに対する研究がなされてきている。その結果、レインバイブレーションの発生要因として大きく分けて3つの要因が考えられる。まず第1に、雨水による水路がケーブル表面に形成されることである¹⁾。第2に、傾斜ケーブルの断面背後に軸方向流が生じることである²⁾。そして第3に、カルマン渦の3次元性に起因したカルマン渦の間欠的2次元放出である³⁾。このレインバイブレーションに対する制振対策としては、構造力学的にケーブルの振動特性を変化させる方法と、ケーブル表面の形状や粗度を変化させる空気力学的な手法の2種類が考えられる。今までのところ実際の橋梁では前者の方法が多く採用されており、具体的にはケーブル相互をワイヤで連結したり¹⁾、定着部付近にダンパーを設置する方法がとられている。ところがこれらの方法は橋の美観や長大化という点から考えると問題点が多い。したがって後者の方法、すなわち空気力学的に制振する手法を検討する必要があった。空気力学的な制振方法としては、主にケーブル断面形状を変化させる方法がとられている。具体的な例として、例えばらせん状にベルトを巻き付ける方法⁴⁾や平行矩形

突起を付ける方法⁵⁾などが提案されており、実橋への適用例としては、ノルマンジー橋⁶⁾(スパイラル方式)、弓削大橋⁷⁾(Uストライプ方式)、東神戸大橋⁸⁾(平行突起付き)などが挙げられる。

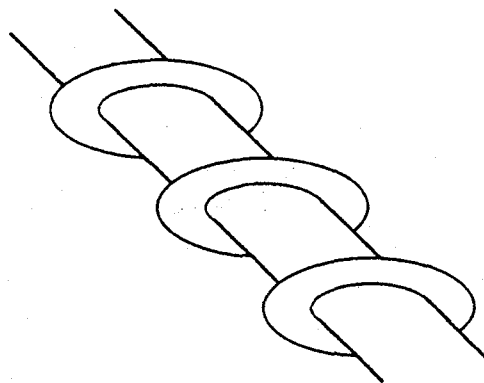


図1: 楕円板付きケーブル

この平行突起つきケーブルの採用により雨無し振動及び雨あり振動の両者が制振されるようになった。しかし、

この平行突起つきケーブル模型が風洞実験において無雨時の高速乱流中で不安定化することが報告されている⁸⁾。そこで本研究ではレインパイプレーションに対する上述の3つの要因を踏まえ、あらたに楕円板付きケーブル(図1)を提案し、楕円板の間隔や大きさ、厚さを変化させることによる制振効果について報告する。

2. 風洞実験概要

本実験では、バネ支持自由振動実験および非定常圧力測定実験という2つの実験を行った。この項ではバネ支持自由振動実験、非定常圧力測定実験についてその実験概要を個々に述べる。

本実験で使用した風洞は京都大学工学部土木工学教室内に設置された吹き出し式エッフェル型風洞(測定部長さ5.0m、高さ1.0m、幅0.7m)であり、模型設置位置での一様流の主流方向乱れの強さが時間平均風速4.0m/s付近で0.5%以下になることが確認されている。風速は0.3～15m/sの範囲で連続的に変化が可能となっている。

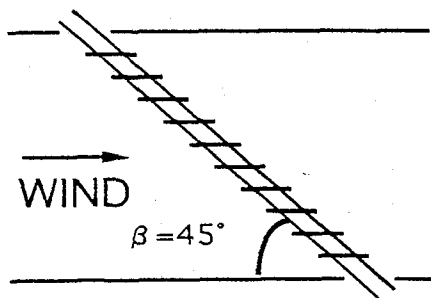


図2; ケーブル姿勢

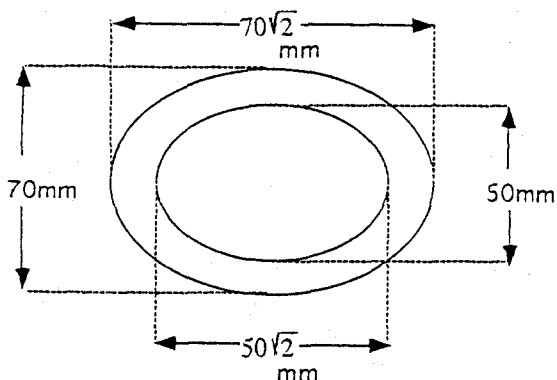


図3; 大楕円板

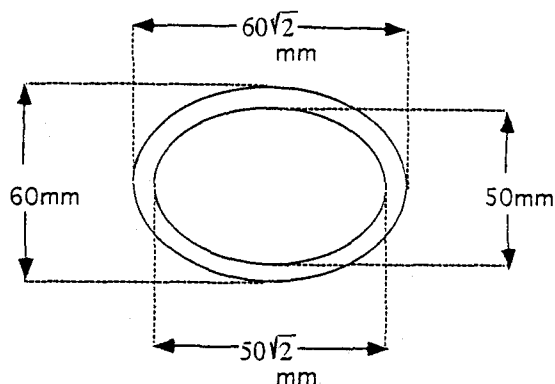


図4; 小楕円板

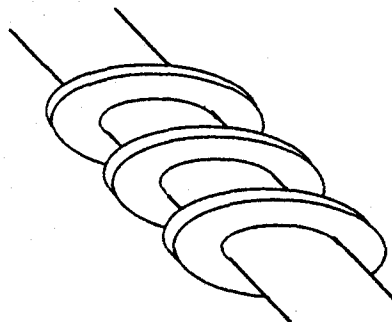


図5; 楕円突起つきケーブル

次にバネ支持自由振動実験について述べる。使用したケーブルは、円断面ケーブルとして直径50mm、長さ1400mmのアルミ製パイプを用い、楕円板つきケーブルとして上述の円断面ケーブルにスチロール製の楕円板を間隔50mm、100mm、200mm、400mmに変化させ、接着剤で固定したものを用いた。楕円板の大きさは模型を風向偏角 $\beta = 45^\circ$ に設置したとき気流方向を向くように(図2参照)、短径と長径の比を $1:\sqrt{2}$ とし、幅がそれぞれ10mm、 $10\sqrt{2}$ mmとなるもの(大楕円板と呼ぶ。図3参照)と幅がそれぞれ5mm、 $5\sqrt{2}$ mmとなるもの(小楕円板と呼ぶ。図4参照)の2種類を用意した。さらに楕円板に厚みを持たせた楕円突起つきケーブルとして同様の円断面ケーブルに楕円板幅 $5 \sim 5\sqrt{2}$ mmの小楕円板を厚さ10mmの突起上にし突起間隔25mmで固定したもの(図5参照)を用いた。

このケーブル模型の姿勢を、鉛直面内傾斜角 $\alpha = 0^\circ$ 、水平面内風向偏角 $\beta = 45^\circ$ とし、左右4本のスプリングを用いて支持した。そして、振動方向を最も空力振動

が生じやすいと考えられる気流直角方向とし、風速を変化させて振動による変位をそれぞれ求めた。

最後に非定常圧力測定実験について述べる。使用したケーブルは上述のケーブルと同じサイズのものであるが圧力を測定するために、圧力ホールが模型中央に設けられ、周方向に回転可能なパイプを用いた。そしてケーブル形状として円形ケーブルと制振効果が最もあると考えられる楕円板間隔 50mm の大楕円板つきケーブル（ただし、模型中央を境に 450mm の間だけに楕円板を付着してある。）の 2 種類を用いて実験を行った。また模型姿勢は自由振動実験と同じく、鉛直面内傾斜角 $\alpha = 0^\circ$ 、水平面内風向偏角 $\beta = 45^\circ$ とした。この圧力ホールつき模型を加振振動数 1Hz、加振倍振幅 30mm、風速 4m/s、無次元風速 $V/fD=80$ としてたわみ 1 自由度強制加振を行い、変動圧力係数 $\overline{C_p}$ 、位相差 ϕ を前方よどみ点から圧力測定ホールまでの角度 θ ごとに求めた。また同時に次式で定義される無次元仕事 W_r も計算して求めた。

$$W_r = \pi \overline{C_p} \frac{\eta}{D} \sin \phi \sin \theta$$

ただし、 $\overline{C_p}$ ；変動圧力係数、 η ；振動振幅、 D ；直径、 ϕ ；位相差、 θ ；前方よどみ点から圧力測定ホールまでの角度であり、 W_r は $W_r < 0$ のときケーブルを振動させる方向に仕事が働くように定義してある。

3. バネ支持振動実験による振動応答特性

風向偏角 $\beta = 45^\circ$ のケーブルでは軸方向流がスプリッター板と同等の働きをし、内部循環流が形成されてギャロッピングが発生することや、ギャロッピング振動の中に無次元風速 $V/fD=40, 80, 120$ 付近で限定型振動を引き起こす要因（カルマン渦の間欠的 2 次元放出）が潜在的に混在していることはよく知られている。そこで上述の実験概要に従い、 $\beta = 45^\circ$ にバネ支持し、楕円板（大

楕円板）間隔を変化させて V-A 特性を比較し、楕円板の制振効果について考察を行った。図 6 は楕円板がない場合即ち円断面ケーブルの場合の V-A 図であり、図 7、図 8、図 9、図 10 は楕円板間隔をそれぞれ 50mm、100mm、200mm、400mm とした場合の V-A 図である。図 5 より円断面ケーブルでは無次元風速 $V/fD=40$ 付近から発散型振動を示しているのに対し、楕円板間隔 50mm のケーブル（図 7）や楕円板間隔 100mm のケーブル（図 8）では振動がほとんど生じていない。

また楕円板間隔 200mm のケーブル（図 9）や楕円板間隔 400mm のケーブル（図 10）に関しても、高風速になるにつれて振動が生じてはいるものの、発散型振動は生じていない。これらのことから楕円板間隔が小さいほど振動は小さくなり、さらに発散型振動は発生しにくくなっているといえる。これは主として楕円板により軸方向流れが弱められ、流れが 2 次元のとなりカルマン渦放出の 3

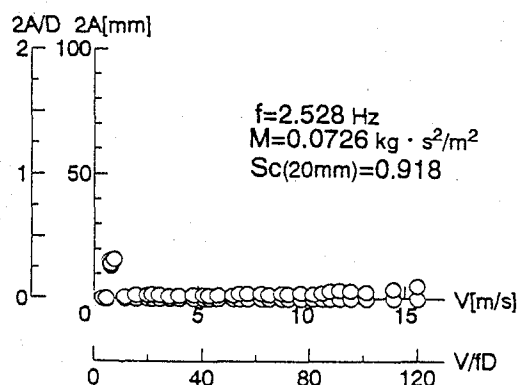


図 7; 楕円板つきケーブルの応答特性
(楕円板間隔 50mm)

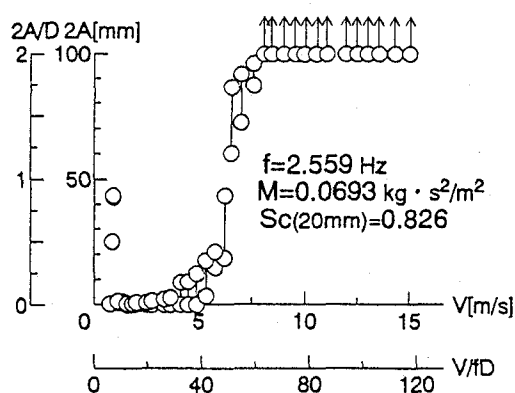


図 6; 円断面ケーブルの応答特性

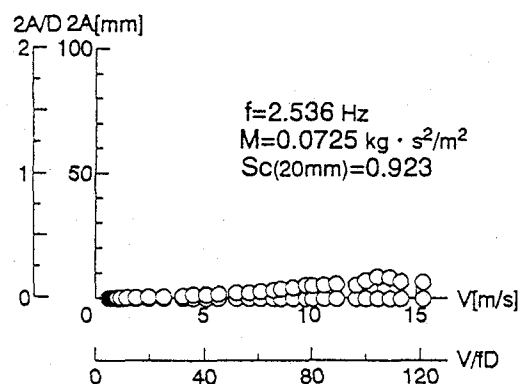


図 8; 楕円板つきケーブルの応答特性
(楕円板間隔 100mm)

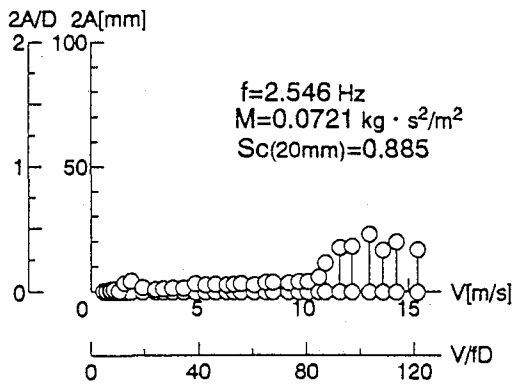


図 9; 楕円板つきケーブルの応答特性
(楕円板間隔 200mm)

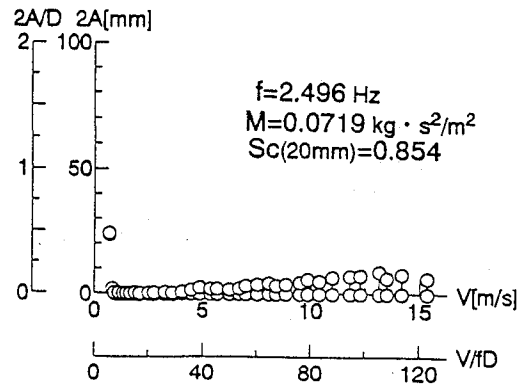


図 11; 小楕円板つきケーブルの応答特性
(楕円板間隔 50mm)

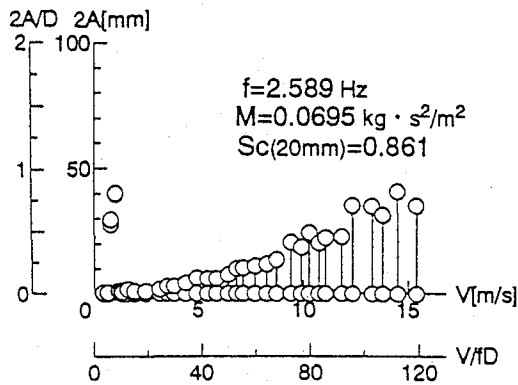


図 10; 楕円板つきケーブルの応答特性
(楕円板間隔 400mm)

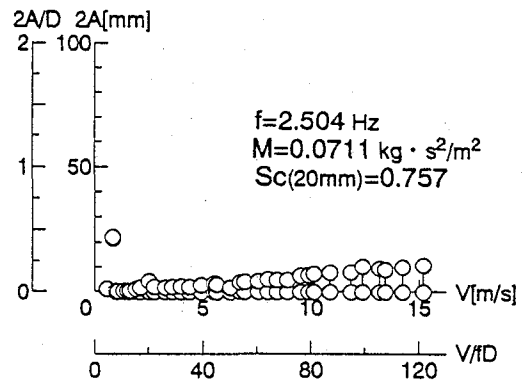


図 12; 小楕円板つきケーブルの応答特性
(楕円板間隔 100mm)

次元性に起因する低周波の渦放出が妨げられたと考えられる。一方、無次元風速 $V/ID=5 \sim 7$ 付近で発生しているカルマン渦型渦励振に着目すると、楕円板間隔 400mm(図 10)では円断面ケーブルと同じ応答を示しており、楕円板間隔 50mm(図 6)、楕円板間隔 200mm(図 9)の順にその応答が小さくなっている。さらに楕円板間隔 100mm(図 8)では応答がなく、カルマン渦励振が生じていないように見受けられる。このカルマン渦励振が生じていないように見受けられる現象に関しては原因が不明であり今後十分な検討が必要であると考えられる。

次に楕円板の大きさを小さくした場合(小楕円板)についても同様のバネ支持自由振動実験を行った。これは楕円板の実橋への適用を考えた場合、施工上、楕円板は小さいほうが有利だからである。この場合の V-A 図を楕円板間隔 50mm, 100mm, 200mm, 400mm の順に図 11, 図 12, 図 13, 図 14 に示す。

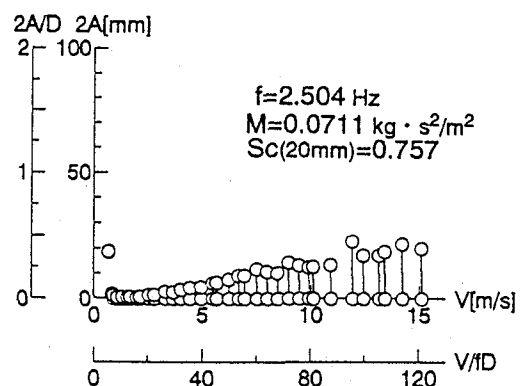


図 13; 小楕円板つきケーブルの応答特性
(楕円板間隔 200mm)

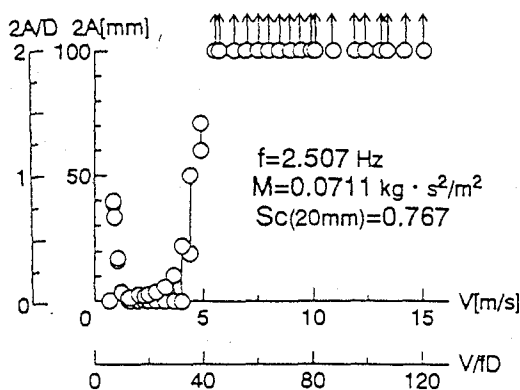


図 14; 小楕円板つきケーブルの応答特性
(楕円板間隔 400mm)

これらの図より、楕円板間隔が 50mm(図 11), 100mm(図 12), 200mm(図 13) の場合には大楕円板とほぼ同面ケーブルと同様に無次元風速 $V/fD=40$ 付近から発散振動が生じた。以上のことから楕円板間隔をあまり大きくとらなければ、楕円板を小さくしても十分制振効果があり、発散型振動の発生も抑えることができる。

さらに楕円板の厚さを変化させた場合(楕円突起)について同様の実験を行った。これもケーブルの施工上、景観上の点を考慮した場合、楕円板が厚みを持ったほうが実用的だからである。楕円突起つきケーブルの $V-A$ 図を図 15 に示す。この図よりカルマン渦励振が起こっているものの、発散型振動は抑えられていることがわかる。

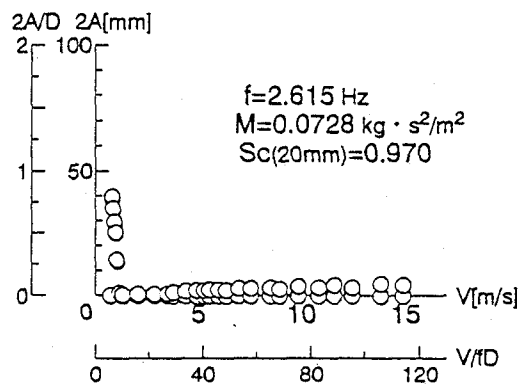


図 15; 楕円突起つきケーブルの応答特性

4. 非定常圧力特性

前節では振動応答特性から楕円板つきケーブルの制振効果について考察をおこなった。本節ではこのことを踏まえ表面圧力分布特性から検討をおこなう。上述の実験概要に基づいて圧力ホールつき模型をたわみ 1 自由度で強制加振した。この実験から求められる θ (よどみ点から圧力測定ホールまでの角度) ごとの変動圧力係数 $\tilde{C}_p$ 、位相差 ϕ 、無次元仕事 W_r を求め順に図 16, 図 17, 図 18 に示した。波形を見ると $\theta = 0 \sim 45^\circ$ では比較的定常的であるが、剥離領域と考えられる $\theta = 55^\circ$ 付近から後方では変動圧力の波形が乱れており、非定常性強いと思われる。これは剥離点付近以降の後流域では、模型加振振動数以外の周波数成分が含まれているためであり、傾斜円柱の後流域では流れのパターンが複雑となっている。しかし、変動圧力係数 $\tilde{C}_p$ (図 16) を見るとケーブル上面付近 ($\theta = 90^\circ$) では円断面ケーブルよりも楕円板つきケーブルのほうが変動圧力係数 $\tilde{C}_p$ が小さくなっており、それに起因して、無次元仕事 W_r が同じケーブル上面付近で小さくなっている。

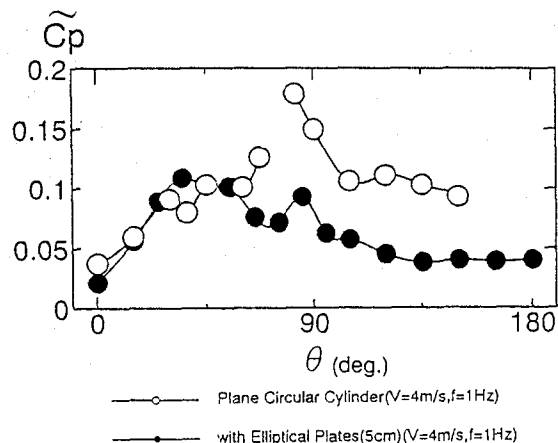


図 16; 変動圧力係数 $\tilde{C}_p$

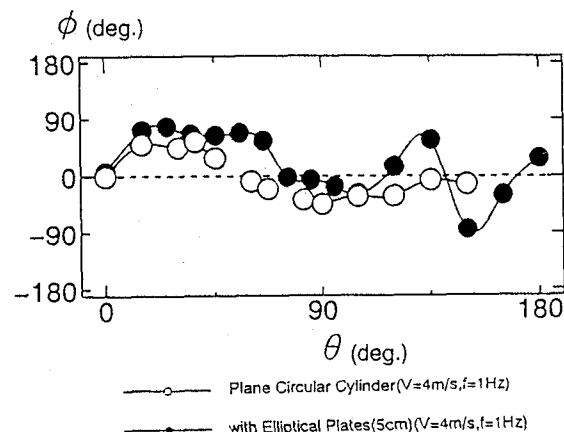


図 17; 位相差 ϕ

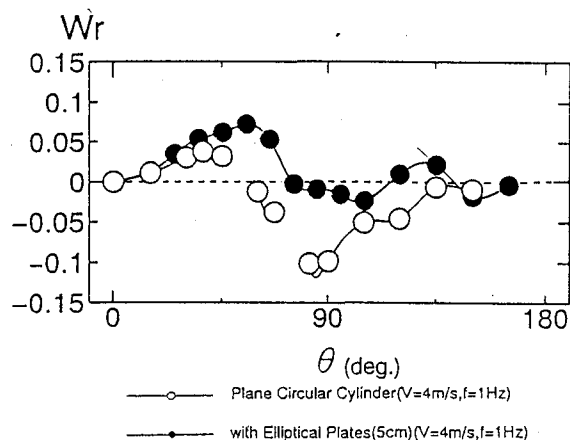


図 18; 無次元仕事 W_r

無次元仕事 W_r は振動を励起させる方向に働くので楕円板つきケーブルのほうが振動を抑えていることがわかる。これらより強制加振による非定常圧力測定からも楕円板つきケーブルの制振効果が確認できたといえる。

5. 結論

- (1) 振動応答特性および非定常圧力特性から楕円板つきケーブルの制振効果確認できた。これは楕円板がケーブルに取り付けられたことによってケーブル背後の軸方向流が弱められ、流れが2次元化され安定化するものと考えられる。
- (2) 楕円板間隔を広くしすぎなければ、楕円板を小さくしても十分制振効果を示す。

(3) 楕円突起つきケーブルについても十分制振効果がみられる。

参考文献

- 1) 樋上瑋一, 「斜張橋ケーブルの Rain Vibration」, 日本風工学会誌第 27 号, 1986
- 2) M. Matsumoto, C. Knisely, N. Shiraishi, M. Kitazawa, T. Saitoh, 「Inclined-Cable Aerodynamics, Structural Design Analysis & Testing Proc.」, Structures Congress, 1989, ASCE/San Francisco
- 3) 松本 勝, 青木 淳, 山岸 稔, 藤井大三, 白土博通, 「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, 1994
- 4) K. Ohshima, M. Nanjo, 「Aerodynamic Stability of the Cables of a Cable-Stayed Bridge subject to Rain (A Case Study of the Ajigawa Bridge)」, Proceeding of US-Japan Joint Seminar on Natural Resources, 1987
- 5) 松本 勝, 白石成人, 北沢正彦, 金 潤石, 辻井正人, 「風雨条件下のケーブル振動現象に関する考察」, 第 10 回風工学シンポジウム論文集, 1988
- 6) O. Flamand, 「Rain-wind induced vibration of cables」, Cable-Stayed and Suspension Bridges, 1994.10
- 7) 池沢, 渡辺, 淵脇, 「弓削大橋の計画と設計」, 橋梁, 1995.8
- 8) 松本 勝, 北沢正彦, 金治英貞, 岸 明信, 齊藤 通, 「東神戸大橋ケーブル風洞試験 (その 2)」, 土木学会第 44 回年次学術講演会, 1989

(1995 年 9 月 18 日受付)