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* (第3報, 制振装置の設計法)

中野龍児^{*1}, 金子成彦^{*2}, 片村立太^{*1}

A Study on Countermeasures against Wind-Induced Cable Vibrations in Cable-Stayed Bridge by Changing Vibration Modes (3rd Report, Design Method of a Control Device)

Ryuji NAKANO^{*3}, Shigehiko KANEKO and Ryuta KATAMURA

^{*3} Kajima Technical Research Institute, Advanced Technology Department,
2-19-1 Tobitakyu, Chofu-shi, Tokyo, 182-0036 Japan

In order to suppress vibrations of stay cables in cable-stayed bridges, the authors developed a new vibration reduction method called "Changing vibration modes method" using a permanent magnet. The authors have confirmed its effectiveness in former reports by both theoretical analyses and wind tunnel tests. In second report, the authors analyzed cable vibrations by taking account of only an unstable mode and clarified how the design parameters such as a gap and magnetic force affect the control efficiency. In this report, accuracy of the analysis is further improved by introducing the higher modes effects as an "equivalent aerodynamic damping". Then, a design procedure of the parameters is proposed on the basis of the improved analysis, and its validity is shown by wind tunnel test results.

Key Words: Damping, Self-Excited Vibration, Vibration Control, Vibration Mode, Stay Cable, Cable-Stayed Bridge, Wind Tunnel Test, Permanent Magnet

1. 緒言

斜張橋の斜材ケーブルには, しばしば風によってレインパイレーションやウェイクギャロッピングといった大振幅の自励振動⁽¹⁾が発生する。

これらの振動が発生すると, ケーブルの疲労損傷や利用者の不安を引き起こす恐れがあるため, ケーブルの端部付近にダンパを取り付けたり⁽²⁾, ケーブル同士をワイヤーで連結する⁽³⁾などの対策が取られている。しかしながら, 温度特性, メンテナンス性, 経済性などにおいてさらなる性能向上が望まれている。

そこで, これらの課題を解決するために「振動モード切替え制振法」と呼ぶ新たな制振対策を考案した⁽⁴⁾。本制振法は, ケーブルの空力振動現象が低次の振動モードに発生する現象である⁽¹⁾点を利用するもので, ケーブルに取って空力的に安定な高次モードを発生させることで, 振動エネルギーの減衰を促進して制振する

という新しい考え方の制振方法である。

本制振法では, ケーブルの桁側の定着点付近と橋桁の間に, 永久磁石をケーブルから少しの隙間(この隙間をギャップと呼ぶ)を開けて設置し, ケーブルが振動して磁石に達したときに拘束され, 振動が成長して復元力が磁石の吸着力を上回ったときに解放されるという拘束・解放の切替え動作をパッシブに実現することで, ケーブルの振動モードを切り替え, 高次モードを発生させている。

永久磁石は, 上記のように本制振法の実現に非常に適した機能を持っているだけでなく, この他にも温度特性が安定しており寒冷地でも使用可能である, 経年劣化がほとんどない, また粘性体を使用しないためメンテナンスフリーであるなどの特長をもっている。これらの特長は, 斜材ケーブルの制振装置に対して求められる条件を満足するものである。

第1報⁽⁴⁾では, 拘束・解放の切替え時のケーブルのエネルギー変化を解析し, 磁石に拘束されたケーブルが解放されるときにエネルギーの一部が高次モードに分配されることを理論的に確認した。さらに, 風洞実験を実施して本制振法の有効性を確認するとともに,

* 原稿受付 2001 年 10 月 25 日。

^{*1} 正員, 鹿島技術研究所先端技術研究部(☎ 182-0036 調布市飛田給 2-19-1)。

^{*2} 正員, 東京大学大学院工学系研究科。
E-mail: naka-ryu@kajima.com

シミュレーション (時刻歴解析) の妥当性を検証した。

第2報⁽⁵⁾では、自励振動が発生する振動モード (不安定モード) のみを考慮した解析を行い、設計変数 (ギャップ及び磁石の吸着力) が制振効果に与える影響を明らかにするとともに、この解析法によって制振効果の簡易的予測が可能であることを示したが、空力的に安定な振動モード (安定モード) が制振効果に与える影響の評価については課題となっていた。

本報では、不安定モードのみを考慮した解析の精度向上を図り、この解析に基づいた制振装置の設計法を提案する。はじめに、不安定モードのみを考慮した解析結果をシミュレーション結果と比較することにより、前者の解析を設計に適用するためには安定モードの影響が無視できないことを示す。続いて、「等価空力減衰比」という概念を導入することで、安定モードの影響を簡易的に考慮できることを示す。さらに、この結果に基づいて制振装置の設計変数を決定した結果を、風洞実験結果と比較し、提案した設計法の妥当性を検証する。

2. 不安定モードのみを考慮した解析の設計への適用可能性の検討

前報⁽⁵⁾で述べたように、不安定モードのみを考慮した解析により、ケーブル振動の低減に必要なギャップと吸着力の条件が解析的に得られるため、本解析は制振装置の設計に有効である。しかしながら、同じく前報において風洞実験結果との比較からその妥当性を示したが、解析精度をさらに向上させるためには安定モードの影響も考慮する必要があることを指摘している。

そこで、本章では、本解析の結果を安定モードも考慮したシミュレーションの結果と比較することで、安定モードを無視したことによる影響を明らかにし、本解析を設計に適用することの妥当性を評価する。

2・1 シミュレーションの方法 解析モデルを図1に示す。ケーブルの張力を F_T 、全長を L とし、磁石はケーブル端部から x_c の位置に設置されているものとする。さらに、磁石はケーブルの中立位置からケーブル下側にギャップ d だけ離して設置されており、その吸着力を F_m とする。ここで、磁石がケーブル中立位置 (x 軸) より下にある場合を $d > 0$ とし、 $d < 0$ は磁石が静止状態のケーブルを押し上げた状態であることを示す。

解析にあたって、ケーブルの曲げ剛性を無視し、微小振動を仮定することにより、ケーブルの振動は両端固定の弦の振動と等価になり、正弦波で表される固有モードを用いて展開できる。さらに、ケーブルに作

用する自励空気をモードごとの減衰力と考えると、ケーブルの振動は各モードの自由振動の重ね合わせとして以下のように表される。

解放状態での変位 $Y_r(x, t)$ は次のように表される。

$$Y_r(x, t) = \sum_{k=1}^{\infty} y_{r,k}(t) \cdot \Phi_{r,k}(x) \quad (1)$$

ここで、 $y_{r,k}(t)$ 及び $\Phi_{r,k}(x)$ はそれぞれモード変位及び固有モードである。

拘束状態では、ケーブルは磁石によって短スパン側 ($0 \leq x \leq x_c$) と長スパン側 ($x_c < x \leq L$) に分けられる。それぞれを独立した系として扱うと、拘束状態の短スパン側ケーブルの変位 $Y_{cs}(x, t)$ 及び長スパン側ケーブルの変位 $Y_{cl}(x, t)$ は次のように表される。

$$Y_{cs}(x, t) = -\frac{x}{x_c} d + \sum_{k=1}^{\infty} y_{cs,k}(t) \cdot \Phi_{cs,k}(x) \quad (0 \leq x \leq x_c) \quad (2)$$

$$Y_{cl}(x, t) = -\frac{L-x}{L-x_c} d + \sum_{k=1}^{\infty} y_{cl,k}(t) \cdot \Phi_{cl,k}(x) \quad (x_c < x \leq L) \quad (3)$$

ここで、 $y_{cs,k}(t)$ 及び $y_{cl,k}(t)$ はそれぞれ短スパン側ケーブル及び長スパン側ケーブルのモード変位であり、 $\Phi_{cs,k}(x)$ 及び $\Phi_{cl,k}(x)$ はそれぞれの固有モードである。

初期条件として、不安定モードに微小変位を与え、その後の振動を上記基礎式に基づいて振動モードごとに計算する。解放状態で磁石位置の変位がギャップ量に達した場合及び拘束状態で磁石に作用する力が吸着力に達した場合に状態を切り替える。状態の切替えが発生したときは、切替え前のケーブル変位及びケーブル速度を切替え後の固有モードで展開し、切替え後の状態でのモード変位及びモード速度を計算する。切替え後は、このモード変位及びモード速度を初期条件として計算する。

なお、解析モデルや状態の切替え条件についての詳細は、第1報⁽⁴⁾を参照されたい。

Fig. 1 Analytical model

2・2 不安定モードのみを考慮した解析の方法

本解析では、前節で述べた解析モデルにおいて、空力的に不安定となるモードのみを考慮する。例えば、1次モードが不安定である場合には、解放状態の1次モードと、拘束状態の長スパン側ケーブルの1次モードのみを考慮し、他のモードの影響は無視する。

解析にあたっては、前報⁽⁵⁾で述べたように、制振動作を、以下の3通りに分ける。

(i)解放ベース制振動作

(ii)中間的制振動作

(iii)拘束ベース制振動作

すると、振動低減が可能となるギャップと吸着力の関係は、(i)と(iii)の制振動作における振動低減条件から決定される。

解放ベース制振動作とは、「(a)解放状態での振動が成長して磁石に拘束され、その後、(b)拘束状態で変位が上向きに極大になる前に解放され、(c)解放状態で変位が下向きに極大になる」までの一連の動き (a)から(c)までに要する時間を1ピリオドと呼ぶ)を繰り返す制振動作である。

拘束ベース制振動作とは、「(a)拘束状態での振動が成長して磁石から解放され、その後、(b)解放状態で変位が下向きに極大になる前に磁石に拘束され、(c)拘束状態で変位が上向きに極大になる」までの一連の動き (a)から(c)までに要する時間を1ピリオドと呼ぶ)を繰り返す制振動作である。

いずれの制振動作においても、(a)でのモード変位に対する(c)でのモード変位の比 (以下、単に振幅比という) が1より小さければ振動が低減されることになる。解放ベース制振動作及び拘束ベース制振動作での振幅比をそれぞれ、 δ_r 及び δ_c とすると、振動低減条件は以下ようになる。

$$\delta_r < 1 \quad (4)$$

$$\delta_c < 1 \quad (5)$$

前節で述べた基礎式において、不安定モードのみを考慮して、上記の条件式を計算することで、振動低減に必要なギャップと吸着力の条件が得られる。

なお、本解析法の詳細については、前報⁽⁵⁾を参照されたい。

2・3 解析条件 上記で述べた2つの解析の比較は、表1及び表2に諸元及び振動特性を示したケーブルモデルについて行う。これらの値は、後述する風洞実験の結果をもとに設定した。不安定モードは、解放状態では1次モード、拘束状態では長スパン側ケ

ーブルの1次モードである。これ以外の振動モードが安定モードである。

シミュレーションでは、200次モードまで考慮した予備解析の結果によって十分な精度が得られると判断された49次モードまでを考慮した。拘束状態の短スパン側ケーブルについては、固有振動数が非常に高いため2次モードまで考慮した。初期条件としては解放状態のケーブルの1次モードのみに1mmのモード変位を与え、その他のモードのモード変位及び全モードのモード速度はゼロとした。

磁石の設置位置 $\alpha(x_c/L)$ は6%とした。

2・4 解析結果の比較 不安定モードのみを考慮した解析の結果とシミュレーション結果との比較を図2に示す。この図には、ギャップと吸着力の変化に対して、振動低減が可能かどうかを比較して示した。シミュレーションは、ギャップを-0.4mmから1mmまで0.2mm刻みで、吸着力を0(ゼロ)Nから5Nまで1N刻みで変えて行い、振動低減が可能であったギャップ

Table 1 Dimensions of the cable model

Length	L	4.58m
Diameter	D	20mm
Mass per unit length	ρ	0.75kg/m

Table 2 Vibration characteristics of the cable model

(a) Released state		
Order k	Natural frequency $\omega_{r_k}/2\pi$ (Hz)	Damping ratio ζ_{r_k} (%)
1	3.35	-0.5
2	5.87	0.2
3	8.72	
4	11.6	
5	14.5	
6	17.4	
7	20.3	
8	23.3	
$k\geq 9$	$2.87k+0.23$	

(b) Constrained state				
Order k	Longer subspan		Shorter Subspan	
	Natural frequency $\omega_{cl_k}/2\pi$ (Hz)	Damping ratio ζ_{cl_k} (%)	Natural frequency $\omega_{cs_k}/2\pi$ (Hz)	Damping ratio ζ_{cs_k} (%)
1	3.49	-0.5	55.8	0.2
2	6.22	0.2	112	-
3	9.22		-	
4	12.3			
5	15.3			
6	18.4			
7	21.6			
8	24.7			
$k\geq 9$	$3.05k+0.19$			

と吸着力の組合せは○印で、不可であった組合せは×印で示した。また、不安定モードのみを考慮した解析の結果については、図中の線①及び線②が、それぞれ $\delta_r = 1$ 及び $\delta_c = 1$ となるギャップと吸着力の関係を示しており、これらの線で挟まれた領域で振動低減が可能となる。

この図から、シミュレーション結果に比べて、不安定モードのみを考慮した解析で得られる振動低減可能な領域は大きくなっており、制振効果が大きめに評価されていることがわかる。シミュレーションでは切替え時に発生した高次モードは各モードの減衰比にした

Fig. 2 Comparison of vibration controllable area considering only an unstable mode with the simulation results considering the effect of stable modes

がって減衰すると考えているのに対し、本解析では、拘束から解放、また解放から拘束へと切替えが発生するたびに高次モードの持つエネルギーすべてが減少する計算となっている。そのため、本解析では制振効果が過大評価されることになる。

上記の結果から、本解析をそのまま設計に適用するのは難しいと判断されるが、簡便な方法で解析精度を向上できれば、設計への適用も可能になると考える。そこで、次章では、本解析で無視した安定モードの影響を、簡易的に考慮に入れる方法について検討する。

3. 等価空力減衰比を用いた簡易的設計法

本章では、「等価空力減衰比」という概念を導入することで、不安定モードのみを考慮した解析の精度を向上することを示し、さらに、風洞実験との比較により本解析法に基づく設計法の妥当性を示す。

3・1 等価空力減衰比の定義 はじめに、ギャップがゼロの場合について、シミュレーションと不安定モードのみを考慮した解析におけるケーブルのエネルギー変化の違いを考察する。図3に、 j 次モードが不安定モードである場合の両解析におけるエネルギー変化の模式図を示す。図の左側は $j=1$ とした場合のケーブル変位の時間的変化を表す。図中、(a)及び(a')はケーブルが解放される直前及び直後、(b)及び(b')はケーブルが再拘束される直前及び直後、(c)は上向きに変位が最大となった瞬間を表している。右側の2列の

Fig. 3 Schematic of variation of the energy distribution

棒グラフは、(a)から(c)の状態に対応するケーブルの不安定モードのエネルギーと安定モードのエネルギーを模式的に表したものである。左列がシミュレーションの場合を、右列が不安定モードのみ考慮した解析の場合を示している。ここで、(a)から(c)までに要する時間を1ピリオドと定義している。

まず、左列のシミュレーションの場合のエネルギーについて説明する。

(a)は、拘束状態で自励振動が発生し、磁石に作用する力が吸着力に達して解放される直前の状態を表している。このときのケーブル速度をゼロとすると、ケーブルの総エネルギーは不安定モードのポテンシャルエネルギーに等しい。このエネルギーを E_{clj} とする。図中の3本の点線のうち、外側の2本の点線で挟まれた部分はこの E_{clj} 、すなわち初めにケーブルが持っていたエネルギー量を表している。

(a')は、解放された直後を表しており、磁石の解放動作によって E_{rs} の安定モードのエネルギーが発生し、これに応じて不安定モードのエネルギーが E_{clj} から E_{rj} に減少する。左側の2本の点線で挟まれた部分は、このときの不安定モードのエネルギー量 E_{rj} を、右側の2本の点線で挟まれた部分は安定モードのエネルギー量 E_{rs} を表している。

(b)は、解放後初めて磁石位置のケーブル変位がゼロとなり、拘束状態に切り替わる直前を表している。(a')から(b)にかけて不安定モードは成長するため、そのエネルギーは増加している。一方、安定モードは減衰するため、そのエネルギーは減少している。

(b')は、拘束された直後を表している。第1報で述べたように、拘束されるときには高次モードがほとんど発生しないため、簡単のためここでは(b)のエネルギー分布が保たれると仮定している。

(c)は、拘束後初めて不安定モードのモード変位が上向きに極大となったときを表している。(a')から(b)にかけての場合と同様に、(b')から(c)にかけても、不安定モードは成長し、安定モードは減衰している。このときの安定モードのエネルギーを E_{cs} とする。 E_{cs} は、(a)から(c)までの制振動作の結果、最終的に残留した安定モードのエネルギーである。

次に、右列の不安定モードのみを考慮した解析の場合について説明する。この場合には、状態の切替え時に発生する安定モードを考慮しないため、(a')におけるケーブルエネルギーは不安定モードのエネルギー E_{rj} のみである。この不安定モードのエネルギーは、シミュレーションの場合と同様に増加する。これに対して、(c)において残留する安定モードのエネルギー

はゼロである。

したがって、1ピリオド終了時の(c)におけるケーブルの総エネルギーはシミュレーションの場合の方が上記の残留分 E_{cs} だけ大きくなる。

そこで、不安定モードのみを考慮した解析において簡易にこの残留分 E_{cs} の影響を考慮するために、 E_{cs} は解放された直後(a')での不安定モードのエネルギー E_{rj} が(c)までの間に増加した分として扱うことを考える。そして、その増加率に相当する空力減衰比を「等価空力減衰比」と定義する。これを不安定モードの空力負減衰に加えることで、安定モードを無視したことによって失われるエネルギーを簡易的に考慮することができる。

3・2 等価空力減衰比の算出 解放される直前(a)のポテンシャルエネルギー E_{clj} と解放された直後(a')の不安定モードのポテンシャルエネルギー E_{rj} との間には次式の関係が成り立つ⁽⁴⁾。

$$E_{rj} = Q_{cr-jj} E_{clj} \quad (6)$$

ここで、 Q_{cr-jj} は拘束状態の長スパン側ケーブルの j 次モードから解放状態の j 次モードへのポテンシャルエネルギーの変換係数であり、次式で表される。

$$Q_{cr-jj} = \left[\frac{2 \sin(j\pi\alpha)}{j\pi\alpha(2-\alpha)} \right]^2 (1-\alpha)^3 \quad (7)$$

(a')において発生した安定モードのエネルギー E_{rs} は、不安定モードである j 次モード以外のすべての安定モードのポテンシャルエネルギーの合計であるので、次式で表される。

$$E_{rs} = \sum_{k=1, k \neq j}^{\infty} E_{rk} \quad (8)$$

ここで、 E_{rk} は(a')における k 次モードのポテンシャルエネルギーであり、次式で得られる⁽⁴⁾。

$$E_{rk} = Q_{cr-jk} E_{clj} \quad (9)$$

ここで、 Q_{cr-jk} は拘束状態の長スパン側ケーブルの j 次モードから解放状態の k 次モードへのポテンシャルエネルギーの変換係数であり、次式で表される。

$$Q_{cr-jk} = \begin{cases} \left[\frac{2k \sin(k\pi\alpha)}{\pi[j^2 - (1-\alpha)^2 k^2]} \right]^2 (1-\alpha)^3 & (j \neq (1-\alpha)k) \\ 1-\alpha & (j = (1-\alpha)k) \end{cases} \quad (10)$$

ここでは、(b)から(b')に切り替わるときのエネルギー分布の変化を無視しているの、(a')から(c)に至るまでの間、安定モードのエネルギーは各モードの空力減衰比にしたがって減衰する。簡単のため、各モードの固有振動数と空力減衰比として解放状態の値を用いることとすると、1ピリオド後の安定モードのエネルギーの残留分 E_{c-s} は次式となる。

$$E_{c-s} = \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^{\infty} E_{r-k} \exp(-2\zeta_{r-k}\omega_{r-k}t_p) \quad (11)$$

ここで、 ζ_{r-k} 、 ω_{r-k} 及び t_p は、それぞれ解放状態の k 次モードの空力減衰比、固有振動数及び1ピリオドに要する時間を表している。

一方、前節の最後で、「 E_{c-s} は、 E_{r-j} の1ピリオド間の増加分である」と考えた場合のエネルギーの増加率に相当する空力減衰比を等価空力減衰比 ζ_{eff} と定義したが、この定義は次式で表される。

$$E_{c-s} = E_{r-j} [\exp(-2\zeta_{eff}\omega_{r-j}t_p) - 1] \quad (12)$$

ここで、以下に示すように、1ピリオドに要する時間 t_p は解放状態の j 次モードの1周期と同一であり、ケーブルの固有振動数は次数に比例すると考える。

$$t_p = \frac{2\pi}{\omega_{r-j}} \quad (13)$$

$$\omega_{r-k} = \frac{k}{j} \omega_{r-j} \quad (14)$$

Fig. 4 Comparison of vibration controllable area considering an equivalent aerodynamic damping with the simulation results considering the effect of stable modes

そして、式(11)と式(12)の右辺を等置して、式(6)、(9)、(13)及び(14)を代入し、得られた式を ζ_{eff} について解くと、等価空力減衰比 ζ_{eff} は次式のように得られる。

$$\zeta_{eff} = -\frac{1}{4\pi} \log \left[1 + \frac{\sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^{\infty} Q_{cr-k} \exp\left(\frac{-4\pi k \zeta_{r-k}}{j}\right)}{Q_{cr-j}} \right] \quad (15)$$

この式から、ケーブルのモード減衰比と磁石の設置位置さえ与えれば、吸着力やギャップによらずに等価空力減衰比 ζ_{eff} が算出できることがわかる。

3・3 シミュレーション結果との比較 安定モードの空力減衰が0.2%、磁石の設置位置が6%の場合に対して、式(15)により等価空力減衰比を計算すると $\zeta_{eff} = -0.36\%$ となる。この等価空力減衰比を不安定モードの空力減衰比(-0.5%)に足し合わせて不安定モードのみを考慮した場合の解析を行い、第2章と同様にシミュレーションと比較した結果を、図4に示す。

この図から、線①と線②で挟まれた振動低減可能な領域は、図2の場合と比べて狭くなっていることがわかる。これは、等価空力減衰比の考慮により不安定モードの成長率が大きくなったためである。

また、この2本の線で挟まれる領域は、○印で示されるシミュレーションで振動低減が可能となる領域とよく一致していることがわかる。

3・4 風洞実験結果^{(4),(5)}との比較 風洞実験の概略を図5に示す。2本のケーブルを直径の3倍の間

Fig. 5 Outline of wind tunnel test

隔で水平に並列に架設し、ウェイクギャロッピングに対してギャップと吸着力を変化させたときの制振効果を測定した。制振装置として、自励振動が発生する風下側ケーブルの端部付近に磁石を設置した。ケーブル模型は、直径 2.2mm のより線ワイヤに直径 20mm、長さ 120mm の 36 個の亚克力円柱（以下、セグメントと呼ぶ）をビス止めた構造となっている。模型の諸元は、表 1 と同様である。端部から 2 セグメント目の円柱の外周を鋼製とし、ギャップを調整可能として磁石を設置した。

実験は風速 8.7m/s の一様流中で実施し、静止状態からのケーブル中央部の上下方向の振動を光学式変位計で測定した。

送風中に実施した打撃試験で測定した解放状態と拘束状態のケーブルの減衰比を表 3 に示す。表中の値を用いて式(15)によって計算した等価空力減衰比は、-0.94%であった。

図 6 の線①及び線②には含まれた領域が、上記の等価空力減衰比を用いた不安定モードのみを考慮した解析によって得られた振動低減可能な領域である。また、設計上の許容モード変位を $0.2D$ (D : 模型ケーブル直径) とした場合の許容ギャップ量及び許容吸着力⁽⁵⁾を線③及び線④として示している。線③より右側の領域では、ギャップが許容ギャップ量よりも大きくなるため、ケーブルが磁石に吸着されることなく許容モード変位より大きく振動してしまう。また、線④より上側の領域では、吸着力が許容吸着力よりも大きくなるため、ケーブルが磁石から解放されることなく許容モード変位より大きく振動してしまう。したがって、線①、②、③及び④で囲まれた領域が、モード変位を $0.2D$ 以下に低減することが可能なギャップと吸着力の組合せを表している。

同図中には、風洞実験結果を 18 セグメント目の最

Table 3 Modal damping ratio identified from the experiment

Order k	Released state	Constrained state	
	Damping ratio ζ_{r-k} (%)	Damping ratio ζ_{cl-k} (%)	Damping ratio ζ_{cl-k} (%)
1	-0.78	-0.52	0.14*
2	0.29	0.22	
3	0.22	-0.12	
4	0.13	0.11	
5	0.12	0.17	
6	0.15	0.14*	
7	0.14	0.14*	
8	0.14*	0.14*	
$k \geq 9$	0.14*	0.14*	

*Values approximated from the experimental results

大変位の大きさごとに分類して示した。●印は最大変位が 4mm 以下であることを示し、▲印は 4mm より大きいことを示している。○印は振動低減効果が不十分であったことを示し、△印は吸着力が大きすぎて拘束状態のままリミットサイクルに達してしまっことを表している。ここで、18 セグメントの変位は 1 次モードのモード変位にほぼ等しいため、最大変位 4mm の結果がほぼ 1 次モードのモード変位 $0.2D$ の場合に相当する。

なお、ウェイクギャロッピング発生時の振動波形を分析した結果、振動発生時に磁石を設置したセグメントである 2 セグメントが 0.2mm 浮き上がる現象が確認されたため、実験で設定したギャップ量に 0.2mm を加えた量を「実質ギャップ量」と定義し、図 6 のギャップ量としてはこの値を用いている。このように、ウェイクギャロッピング発生時に風下側ケーブルの平衡位置が静的に変位する現象は、米田⁽⁶⁾によっても報告されている。

解析結果と実験結果を比較すると、解析で振動低減が可能となる線①と線②で挟まれる領域は、実験で振動低減効果が得られたことを示す●印と▲印の分布する領域とほぼ一致している。

また、解析で $0.2D$ 以下に振動低減可能であることを示す 4 本の線で囲まれた領域には、実験で 4mm 以下に低減されたことを示す●印以外に、最大変位が 4mm より大きくなったデータを表す▲印が 2 つ含まれている。このとき発生するケーブル振動は、高次モードの影響によって非正弦波的な挙動を示し、ピーク変位は 4mm を上回っているものの、二乗平均値は 2mm ($0.1D$) 以下に抑えられている。これまでに述

Fig. 6 Comparison between experimental results and analytical vibration controllable area with a magnet at the 2nd segment

べてきたことから明らかなように、本解析の目的が簡易的な設計法を得ることであり、実用的には吸着力が小さくなるよう設計することを考慮すると、この差異は設計上許容できる程度であると考えられる。

以上より、等価空力減衰比を用いた不安定モードのみを考慮した解析が本制振法の設計に有効であることが確認された。

3・5 設計法のまとめ 以上に述べた等価空力減衰比を用いた簡易的パラメータ設計法の手順を以下にまとめる。

- (a) 制振装置の設置位置とケーブルのモードごとの空力減衰比を設定する。
- (b) 式(15)により、等価空力減衰比 ζ_{eff} を算出する。
- (c) ζ_{eff} を不安定モードの空力減衰比に加算し、不安定モードのみを考慮した解析によって、振動低減に必要なギャップと吸着力の組合せ(図6の線①及び②にはさまれた領域)を得る。
- (d) 許容モード変位を設定し、ギャップと吸着力の上限(図6の線③及び④)を得る。
- (e) 上記の(c)及び(d)の両方を満たすようにギャップと吸着力を設定する(図6の線①から④で囲まれた領域内でギャップと吸着力を設定する)。

4. 結論

斜張橋斜材ケーブルの制振対策として考案した振動モード切替え制振法について、等価空力減衰比を用いた不安定モードのみを考慮した解析により、簡易的に

制振装置を設計する方法を提案した。本解析で得られたギャップ及び吸着力と制振効果の関係をシミュレーション及び風洞実験結果と比較し、提案した設計法の妥当性を確認した。

文献

- (1) 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).
- (2) 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形ダンパの開発, 日本機械学会論文集, 58-555, C (1992), 3227-3232.
- (3) 建設省土木研究所, 斜張橋並列ケーブルのウェイクギャロッピングの制振対策検討マニュアル(案), (1995), 39-43
- (4) 中野龍児・金子成彦・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, 日本機械学会論文集, 66-647, C (2000), 2173-2180.
- (5) 中野龍児・金子成彦・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 第2報 ギャップがある場合のケーブル振動解析, 日本機械学会論文集, 67-658, C (2001), 1799-1806.
- (6) 米田昌弘・宮地真一・枝元勝哉・望月秀之・瀬戸内秀規, ノーマルならびにディンプル付並列ケーブルに斜風が作用した場合のウェイクギャロッピング特性について, 土木学会論文集, No.534/VI-30, (1996), 97-108.