

斜張橋並列ケーブルの耐風制振対策（その2）

—— 種々の条件下における摩擦型減衰機能付きスペーサの有効性 ——

野村 敏雄 藤原 章博
伊藤 雅保

概要

長大斜張橋などで採用される並列ケーブルではウエイクギャロッピング現象が問題となるが、その制振対策は確立されていないのが現状である。その制振対策としてケーブル相互間に減衰機能を有するスペーサを設置する方法について、理論解析や無風時での実大模型実験、風洞実験などにより検討してきたが、減衰機能付きスペーサによりウエイクギャロッピングの発現風速をある程度高められることがこれまでに確認された。

本研究ではケーブル間隔、振動数、重量やケーブル径などの変化がスペーサの制振効果に及ぼす影響を2次元バネ支持実験を実施して検討した。また、発現風速の予測方法や非定常空気力特性について考察を加えた。その結果、種々の条件下において摩擦型減衰機能付きスペーサはウエイクギャロッピングの振動振幅を抑制し、発現風速を高める効果があることが確認された。ただし、一般の場合と異なり、振動数が低い場合や重量が小さい方が有効に作用する場合があるので、他の制振手法と組合せて使用する場合には注意が必要である。

1. はじめに

長大斜張橋、特にPC斜張橋では荷重の増加や施工性の配慮から2本以上のケーブルを並列に配置する、いわゆる並列ケーブル形式の採用が増加する傾向にある。しかし、並列ケーブルではウエイクギャロッピングと呼ばれる低風速から広い範囲で発生するケーブルの振動現象が問題となる。最近、建設省土木研究所を中心とした官民共同研究^{1), 2)}が実施されたが、ウエイクギャロッピングの特性や発生原因は完全に明らかではなく、その制振対策も十分に確立されていないために、より一層の研究が期待されているのが現状である。当社も共同研究において摩擦型減衰機能付きスペーサの開発³⁾を担当し、限られた条件のもとでその有効性を検討した。本研究はその適用範囲を拡大するために、ケーブル間隔や振動数、重量、ケーブル径などが異なる種々の条件下においてウエイクギャロッピングの発現性状と摩擦型機能付きスペーサによる振動抑制効果を風洞実験により調査した結果を報告するものである。

2. 実験方法

2.1 実験装置

Fig.1に実験装置を、Table 1に実験条件を示す。実験は当社技術研究所所有の単回路回流式密閉型風洞（高さ：3.0m、幅：3.0m、測定部長さ：9.0m）内に実験装置を設置して実施した。今回使用したバネ支持試験装置は上流および下流側のケーブル模型ともに、それぞれ4本のバネ

によって支持され、鉛直方向の振動に対して自由度を有する構造となっている。ケーブルの構造減衰は電磁式加振減衰器を用いて所要値に設定した。また、ケーブルの流れ止め装置やローリング止め装置を有している。

振動振幅は各ケーブルの両端に4箇所のターゲットを設置し、これをレーザ変位計により測定した。実験は上下流ケーブルともに静止した状態からの発振性状並びに下流側ケーブルを所用振幅において強制的に加振した後の自由減衰性状を計測することによって行った。なお、風洞内に実験装置を設置するので、装置内の気流の同一性を確認した後に実験を実施した。

ケーブル模型は直径50mmおよび100mmで表面に特別な加工や処理のないアルミ製パイプである。また、ケーブル両端に設置するスペーサは風にさらされない構造とした。

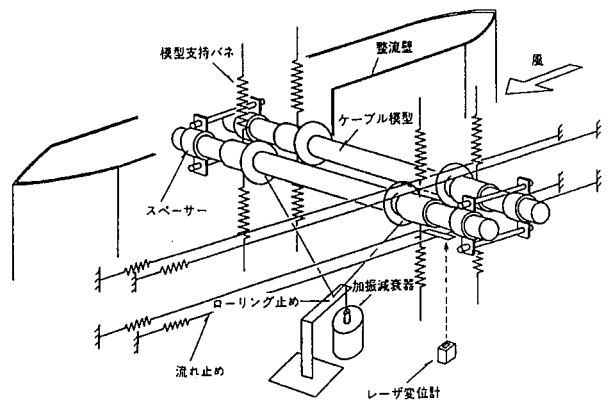


Fig.1 実験装置の概略
Outline of Spring-Mounted Rigid Model Test

2.2 スペースの減衰性能

スペースの減衰性能は摩擦力が同等でもケーブルの振動数や重量の相違により変化する。そこで、ケーブル間隔 $Sh=3.0D$, 振動数 $f=2.63\text{Hz}$, 重量 $W=6.68\text{kgf/m}$ の場合を基準のケースとして、実大模型実験³⁾で得られたスペースの減衰性能に近似させた。実大模型実験では無風時において対数減衰率 $\delta=0.1$ 程度の構造減衰が得られている。

摩擦減衰の場合には減衰性能を対数減衰率で一義的に表すことができないので、振幅と波数の関係が比例するとして比例定数を求め、これを減衰勾配と定義してスペースの減衰性能を表示した。Fig.2に示す直線1の勾配が基準の減衰性能を示している。

ケーブル振動数が4.00Hzの場合はほぼこの減衰性能にスペースモデルの調整が可能であったが、1.79Hzでは減衰が大きすぎて調整が困難であったので、基準のケースに摩擦力を一致させて実験を行った。

ここで、振幅はケーブル間の中央を回転中心とした時のねじれ成分(片振幅)を示している。

3. 実験結果と考察

3.1 自由振動応答特性

ウエイクギャロッピングの発現開始風速は多くの風による振動と異なり、概して振動数に対して鈍感な場合もあることが指摘されているので、ここでは、風洞風速により各図を表示した。また、図中の波線の記号は不安定振動の分岐点を示している。

3.1.1 ケーブル間隔の影響 Fig.3,4は振動数 $f=2.63\text{Hz}$, 対数減衰率 $\delta=0.01$ としてケーブル間隔を $Sh=2.5D\sim 6.0D$ の間で変化させた場合の風速と振幅の関係を示している。

スペースなしでは $Sh=2.5D$ および $3D$ では不安定なリミットサイクルを有するハード型、 $Sh=4D$ ではソフト型のウエイクギャロッピングがともに風速 $V=5\text{m/s}$ 程度で発現し、従来の結果⁴⁾等と同様の傾向を示した。また、ケーブル振動数は $Sh=2.5D$ および $3D$ では風速と振幅に依存して10~20%程度変化するが、 $Sh=4D$ では変化が小さい。

これらより、 $Sh=3D$ と $4D$ の間で応答が変化していることが伺える。なお、いずれの場合も上流側ケーブルはほとんど振動が生じなかった。

スペースありの場合、 $Sh=2.5D$ と $3D$ のみハード型のウエイクギャロッピングが風速 $V=13\text{m/s}$ 程度で発現し、 $Sh=4D$ 以上になると発現しなかった。

3.1.2 ケーブル振動数の影響 Fig.5,6はケーブル振動数の影響を比較したものである。

スペースなしの場合、いずれもハード型のウエイクギャロッピングが発現している。quench点は $f=1.79\text{Hz}$ と 2.63Hz が近く風速 $V=4.9$ および 5.5m/s ($V_r=55$ および 42)、 $f=4.00\text{Hz}$ では風速 $V=8.6\text{m/s}$ ($V_r=43$)とやや高くなっている。しかし、無次元風速と比較すると $f=2.63\text{Hz}$ と 4.00Hz が高風速領域での挙動を含めて一致する傾向を示し、 $f=1.79\text{Hz}$ では逆に発現風速がやや高くなっている。この

Table 1 風洞実験条件
Experiment Conditions

ケーブル径(D)	50mm, 100mm
ケーブル重量(W)	$W_N=6.68\text{kgf/m}$, $W_H=14.45\text{kgf/m}$
ケーブル振動数(f)	1.79Hz, 2.63Hz, 4.00Hz
ケーブル間隔(Sh)	2.5D, 3.0D, 4.0D, 5.0D, 6.0D
対数減衰率(δ)	0.01~0.10
スクリーン数(Sc)	43.6~944
レイノルズ数(Re)	0~ 2.74×10^5
実験風速(V)	0~40m/s
無次元風速($V_r:V/fD$)	0~450
気流	一様流
摩擦型スペースの減衰性能	0.84, 4.00 (Fig.2の直線勾配)

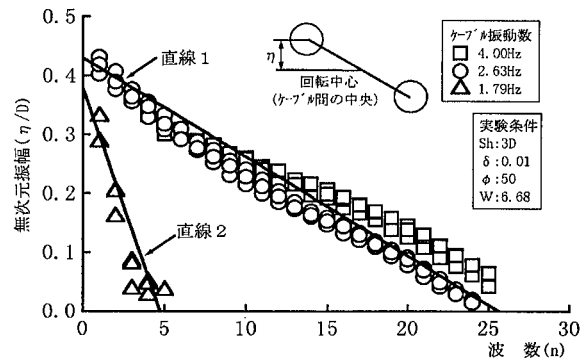


Fig.2 摩擦型スペースの減衰性能
Efficiency of an Anti-vibration Device

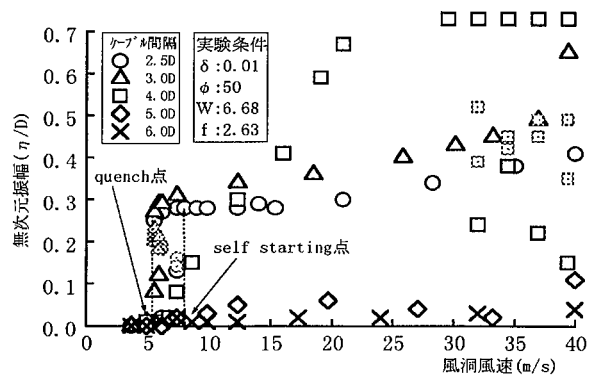


Fig.3 ケーブル間隔の影響(スペースなし)
Effect of Cable Spacing

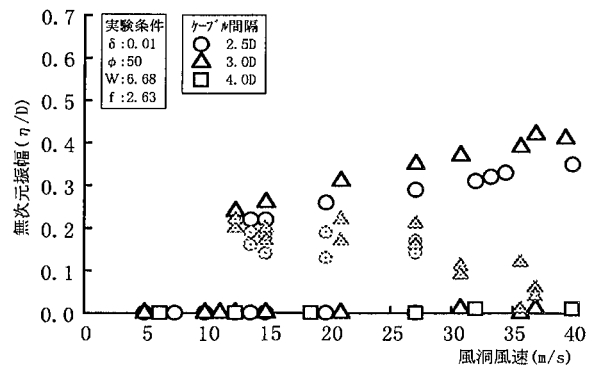


Fig.4 ケーブル間隔の影響(スペースあり)
Effect of Cable Spacing with a Device

ように、低振動数では風洞風速で、高振動数では換算風速で性状が一致する傾向を示した。

スペーサありの場合、いずれもウエイクギャロッピングの発現風速は高くなる。スペーサなしと同様に無次元風速では $f=2.63\text{Hz}$ と 4.00Hz が発現風速も含めて同様の挙動を示した。 $f=1.79\text{Hz}$ では発現風速が大きく上昇しているが、これはスペーサの摩擦力は $f=2.63\text{Hz}$ と同じであるが、振動数の低下によりFig.1に示すように減衰性能が大きくなっていることによる。したがって、摩擦力が等しい場合は低振動数の方が有利となる。

3.1.3 ケーブル重量の影響 Fig.7,8はケーブル重量を相似則による所要値である $W_N=6.68\text{kgf/m}$ および所要値よりも重い $W_H=14.45\text{kgf/m}$ とした場合である。重量のみの影響を比較するため、両者の振動数が一致するようにバネ定数をそれぞれ設定して実験を行った。

スペーサなしの場合、両者ともハード型のウエイクギャロッピングが発現している。quench点は W_N で風速 $V=4.8\text{m/s}$ ($Vr=55$), W_H で風速 $V=5.5\text{m/s}$ ($Vr=61$), また、self starting点はそれぞれ風速 $V=5.5\text{m/s}$ ($Vr=62$), $V=6.8\text{m/s}$ ($Vr=76$)であり、多少、 W_H の発現風速が高くなっている。これは、対数減衰率を変化させた場合と同様の発現風速の上昇傾向である。

スペーサありでは W_H の方がquench点は低く風速 $V=14.8\text{m/s}$ ($Vr=157$)で振動が発現している。一方、 W_N では風速 $V=25.8\text{m/s}$ ($Vr=293$)となり、 W_H と比較して大きく発現風速が高まっている。これは摩擦力が等しい場合、減衰性能は振動数と重量に依存して変化するが、前者では振動数の低下により向上した減衰性能を重量の増加が打ち消してしまうので発現風速が低下すると考えられる。

したがって、制振対策のない場合は重量が大きい方がウエイクギャロッピングの発現抑制には有利であるが、スペーサを有する場合は重量が小さい方が有利となる。

3.1.4 ケーブル径の影響 Fig.9,10はケーブル径の変化の影響を比較したものである。Sc数を一致させるために $D=100\phi$ では対数減衰率 $\delta=0.04$ とした。

スペーサなしの場合、 $D=100\phi$ ではself starting点が実験風速域において観測されなかった。また、quench点は $D=50\phi$ と比較してやや高いものの、風洞風速で比較した場合に振幅が一致する傾向を示した。

スペーサありの場合、いずれもquench点が高くなるとともにself starting点が観測されず、振動振幅にも大きな相違がない結果となった。また、同じ摩擦力のスペーサを用いているので、相対的に減衰性能が小さくなる $D=100\phi$ の方が発現風速がやや低い結果となっている。

3.2 発現風速

Fig.11は今回実施した実験におけるウエイクギャロッピングの発現開始風速と質量・減衰パラメータ(S_c)の関係を示したものである。図中の直線(マニュアル式)は「斜張橋並列ケーブルのウエイクギャロッピング制振対策マニュアル(案)」⁵⁾に示されるウエイクギャロッピングの発現開始風速の推定式であり、風洞風速に基づき次式で

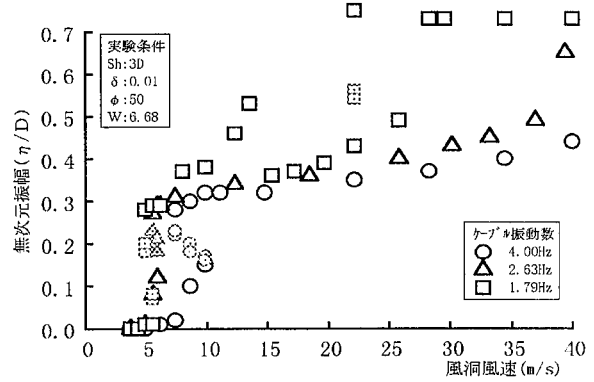


Fig.5 ケーブル振動数の影響(スペーサなし)
Effect of Natural Frequency of the Cable System

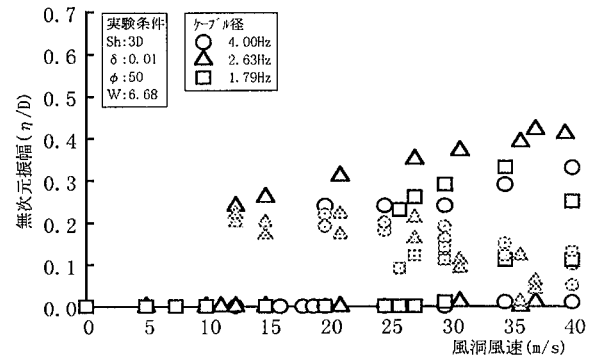


Fig.6 ケーブル振動数の影響(スペーサあり)
Effect of Natural Frequency of the Cable System with a Device

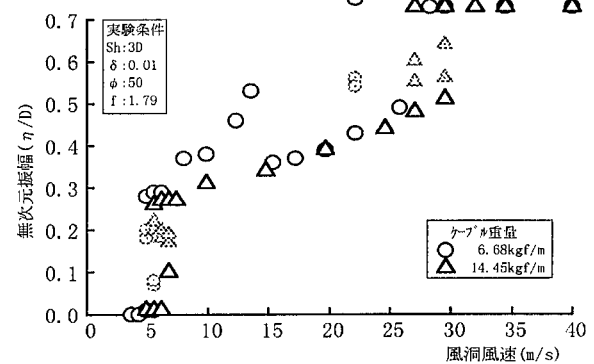


Fig.7 ケーブル重量の影響(スペーサなし)
Effect of Cable Weight

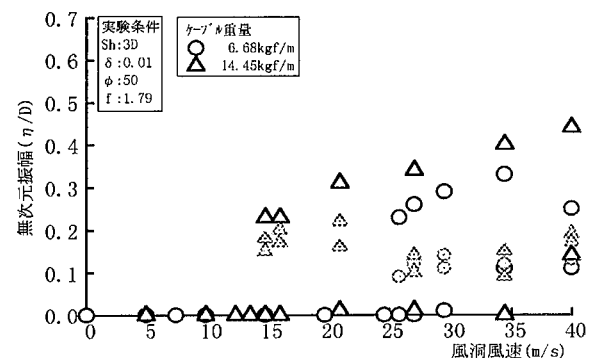


Fig.8 ケーブル重量の影響(スペーサあり)
Effect of Cable Weight with a Device

定義されている。

$$U_{cr} = 6.0 \log S_c - 5.8$$

U_{cr} : 発現開始風速, S_c : 質量・減衰パラメータ

図には構造減衰のみの相違ではなく、前節で示したケーブル間隔や振動数などの異なる実験結果が含まれている。したがって、多少のばらつきはあるが、全体的には質量・減衰パラメータに比例して発現開始風速は増加していると考えられる。その増加率はマニュアル式の勾配におおむね一致しており、マニュアル式は発現開始風速の下限となっている。また、無次元風速との関係も同様の増加傾向を示している。これは、実験を行った振動数が従来の結果と比較してやや高い領域であることに関連していると考えられ、発現開始風速の支配パラメータに関してはさらに検討する必要があると思われる。

Fig. 12はスペーサありの結果であるが、横軸は減衰勾配 (η/D) である。横軸を質量・減衰パラメータとするとスペーサ性能の影響が含まれないために相関が悪くなるので、構造減衰、質量、振動数およびスペーサの摩擦力の影響を考慮できる減衰勾配 (η/D) を採用した。この場合にも多少のばらつきがあり、スペーサの実用化に際してはより適切な指標を検討することも必要と思われるが、マニュアル(案)と同様な推定方法は可能である。

3.3 非定常空気力

下流側ケーブルに作用する非定常空気力を以下のような方法で算定した。

バネ支持された下流側ケーブルの運動方程式を、

$$M\ddot{y} + C\dot{y} + Ky = L(t) \quad (y, L: \text{上向き正})$$

として、非定常空気力を

$$L(t) = \frac{1}{2} \rho V^2 B l (C_{Lh}^R + i C_{Lh}^I) \frac{y_0}{B} e^{i\omega t}$$

B: ケーブル径, l: ケーブル長, M: ケーブル質量,
 ρ : 空気密度, V: 風速

と定義する。

$$\sigma = m / \rho B^2, \quad m: \text{ケーブル単位質量}$$

とおき、無風時の振動数および減衰率を f_0, δ_0 、有風時の任意振幅での振動数および減衰率を f, δ とすると、

$$R = f / f_0 \quad \dots \text{振動数比}$$

$$C_{Lh}^R = 8\pi^2 \left(\frac{f_0 B}{V}\right)^2 \sigma (1 - R^2) \quad \dots \text{非定常空気力係数の変位比例成分}$$

$$C_{Lh}^I = 8\pi^2 \left(\frac{f_0 B}{V}\right)^2 \sigma R (\delta_0 - R\delta) \quad \dots \text{非定常空気力係数の速度比例成分}$$

$$L_0 = \frac{1}{2} \rho V^2 \sqrt{(C_{Lh}^I)^2 + (C_{Lh}^R)^2} \quad \dots \text{非定常空気力振幅}$$

$$\beta = \tan^{-1}(C_{Lh}^I / C_{Lh}^R) \quad \dots \text{位相遅れ}$$

のように表され、空気力係数は風速と振幅に依存する振動数比および減衰率の関数となる。

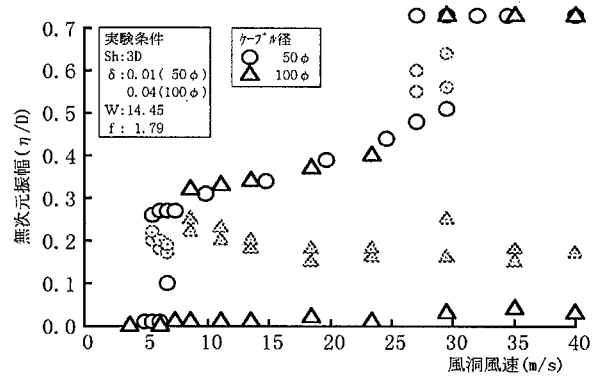


Fig. 9 ケーブル径の影響(スペーサなし)
Effect of Cable Diameter

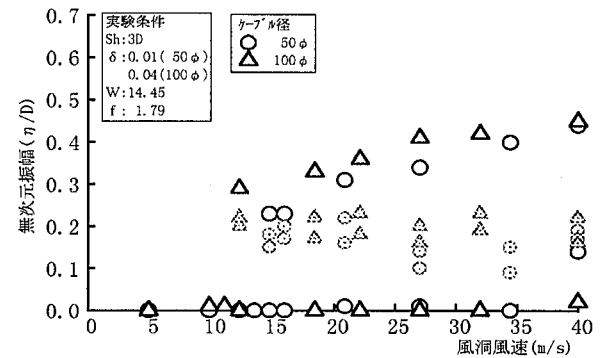


Fig. 10 ケーブル径の影響(スペーサあり)
Effect of Cable Diameter with Device

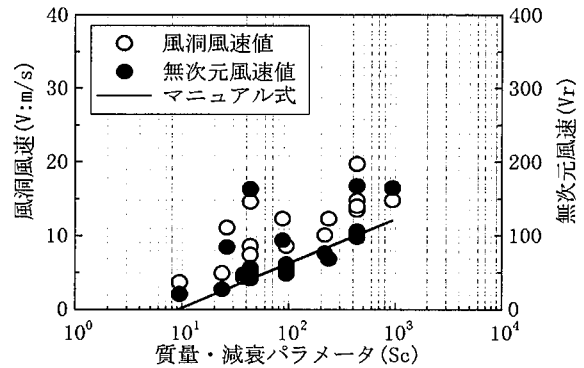


Fig. 11 発現開始風速(スペーサなし)
Onset Velocity for Vibration

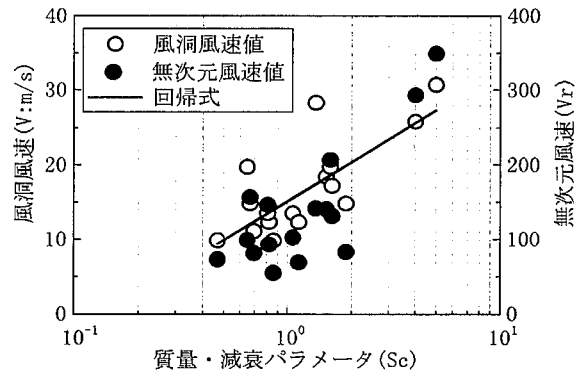


Fig. 12 発現開始風速(スペーサあり)
Onset Velocity with Device for Vibration

そこで、種々の条件が振動数比に及ぼす影響を検討した。Fig.13~16は振動数比と風速および振幅との関係を示したものである。

3.3.1 ケーブル間隔の影響 風速に比例して大きくなるが、ケーブル間隔が大きいほど勾配は小さくなり、振動数の風速依存性が弱くなっている。ケーブル間隔 $Sh=3D$ と $4D$ の間で勾配が大きく変化している。また、ケーブル間隔 $Sh=2.5D$ と $3.0D$ では無次元振幅 $\eta/D=0.25\sim 0.3$ で振動数比が最大となるが、ケーブル間隔 $Sh=4.0D$ 以上では振幅依存性を示さない。

3.3.2 ケーブル振動数の影響 風速に比例して大きくなるが、低振動数ほど変化が大きい。 $f=1.79\text{Hz}$ では最大で30%程度変化する。また、低振動数ほど小振幅で振動数比が最大となる傾向にある。

3.3.3 ケーブル重量の影響 重量を増加させると振動数比の増加が小さくなる。また、振幅に関わらず同様の傾向を示している。

3.3.4 ケーブル径の影響 $D=100\phi$ では風速の増加に伴う変化が小さくなる。また、低振幅で振動数比が増加せず、減少する傾向を示しており、レイノルズ数の相違の影響が存在すると考えられる。

3.4 応答予測

実ケーブルにおける振動を推定するためには、実験より得られた振幅を基にモード形状および気流の乱れの影響を考慮して補正する必要がある。ここではストリップ理論による応答計算を行い、前節で求めた非定常空気力の妥当性を検討した。なお、時間増分 $\Delta t=0.001$ 、加速係数 $\beta=1/12$ として計算を行った。 $\beta=1/12$ は加速度が時間の自乗に比例して変化すると仮定したことによる。

Fig.17, 18はケーブル間隔 $Sh=3.0D$ および $4.0D$ において

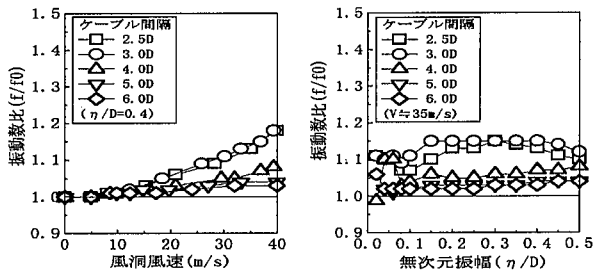


Fig.13 振動数比(ケーブル間隔)
Variation of Natural Frequency
(Effect of Cable Spacing)

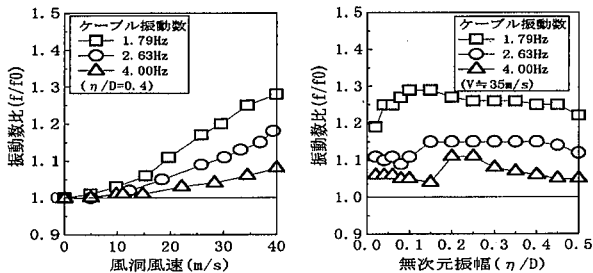


Fig.14 振動数比(ケーブル振動数)
Variation of Natural Frequency
(Effect of Natural Frequency)

それぞれ対数減衰率 $\delta=0.1, 0.02$ と大きくして実験を行った場合である。全体的には比較的良い対応を示しているが、 $Sh=3.0D$ におけるハード型のS字部分が再現されておらず、挙動の不安定な領域ではより正確に空気力係数を評価する必要がある。

Fig.19, 20はケーブル間隔 $Sh=3.0D$ および $4.0D$ において $\delta=0.01$ の場合である。それぞれの実験結果より求めた空気力係数とFig.17, 18に示す減衰率が大きい場合の空気力係数を適用した結果を示している。 $Sh=3.0D$ では減衰率大の場合はやや大きめの結果を与えるが概ね良好な対応を示している。一方、わずかな減衰率の変化で挙動が大きく相違する $Sh=4.0D$ では対応が悪くなっており、できる限り精度良く空気力係数を評価する必要がある。

実ケーブルの振動振幅の予測に適用するためには汎用的な空気力係数の表現が必要となる。本解析ではハード型部分の再現性やケーブル間隔が大きい場合の空力減衰の算定精度、空気力係数の評価方法などにまだ検討する余地が残されているが、さらにデータを蓄積することにより適用範囲を広げることが可能と考えられる。

4. まとめ

ウエイクギャロッピングの発現特性と摩擦型減衰機能付きスパーサの特性について、実験条件や実験装置、治具の製作精度などの点から十分な検討を加えられなかった点もあるが、本研究によって得られた知見をまとめると以下ようになる。

4.1 ウエイクギャロッピングの性質

- 1) ケーブル間隔 $SH=3.0D$ 以下では不安定なリミット

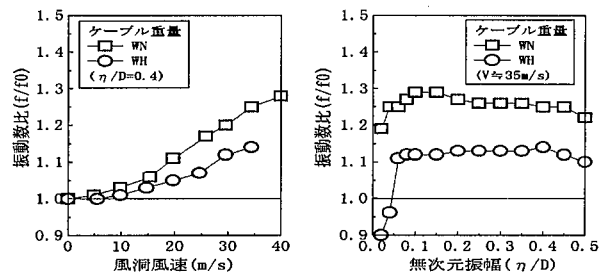


Fig.15 振動数比(ケーブル重量)
Variation of Natural Frequency
(Effect of Cable Weight)

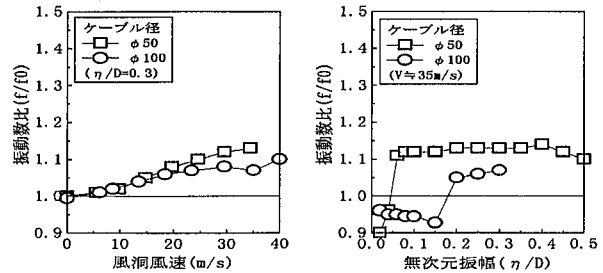


Fig.16 振動数比(ケーブル径)
Variation of Natural Frequency
(Effect of Cable Diameter)

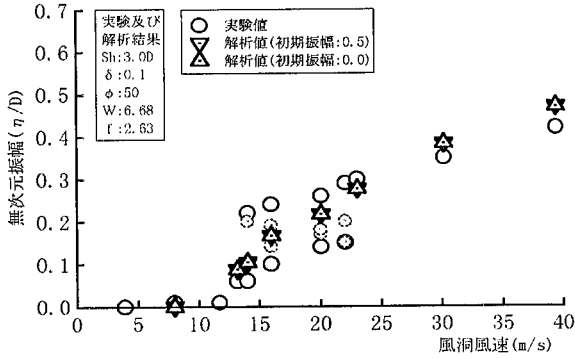


Fig. 17 応答予測
Estimated Amplitude of Vibration

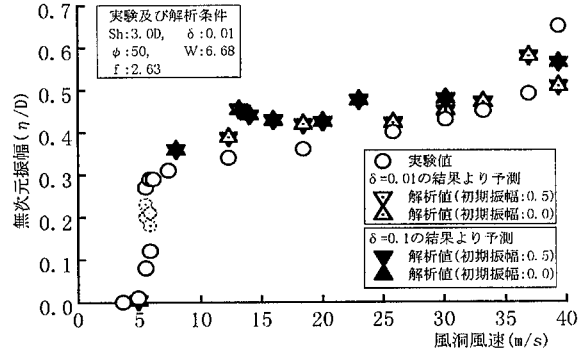


Fig. 19 応答予測
Estimated Amplitude of Vibration

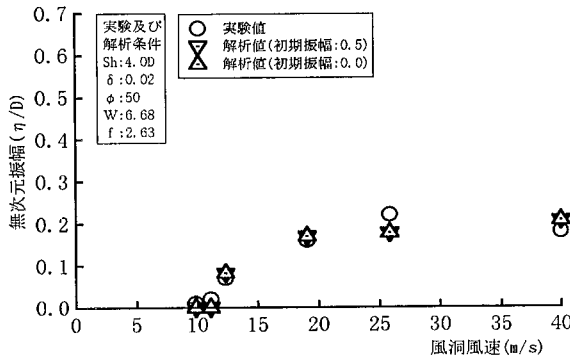


Fig. 18 応答予測
Estimated Amplitude of Vibration

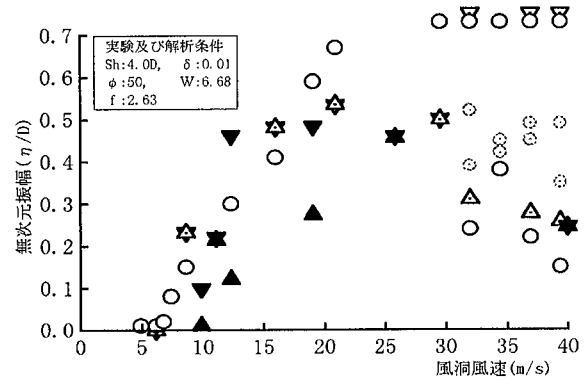


Fig. 20 応答予測
Estimated Amplitude of Vibration

サイクルを有する性状を示すのに対し、SH=4.0D以上ではソフト型の性状を示し現象が変化する。

2) ケーブル振動数が相違する場合、無次元風速で挙動が一致する場合もあり、既存の研究とやや異なる性状が確認された。

3) ケーブル重量の相違は質量・減衰パラメータが一致する減衰率変化に対応する挙動となった。

4) ケーブル径が相違する場合、風洞風速で性状が一致する部分もあるが大きく異なる点もあり、レイノルズ数の相違の影響が現れていると考えられる。したがって、風洞実験の結果を評価するに当たっては注意する必要がある。

5) ウェイクギャロッピングの発現開始風速は質量・減衰パラメータに比例して増加し、その増加の割合はマニュアル式の勾配にほぼ一致している。

6) 空力減衰の算定精度、空気力の評価方法などにまだ検討の余地が残されているが、非定常空気力係数により振動の応答予測が可能であると考えられる。

4.2 摩擦型減衰機能付きスパーサの効果

1) ケーブル間隔が4D以上では容易にウェイクギャロッピング発現を抑制することが可能である。

2) 振動数の低い方が小さい摩擦力で減衰能力を高めることができる。ケーブルのねじれ剛性にも関係するが、大幅にウェイクギャロッピングの発現風速を高めることができる可能性がある。

3) ケーブル重量が増加するとスパーサの減衰性能が

相対的に悪くなるのでスパーサなしとは逆に抑制効果が低下する。

4) スパーサを有する場合のウェイクギャロッピングの発現風速は減衰勾配により評価することが可能と考えられる。

謝 辞

本研究を実施するに当たりご指導を頂いた東京大学大学院工学系研究科の藤野陽三教授に深謝いたします。

参考文献

- 1) 建設省土木研究所；斜張橋並列ケーブル耐風制振に関する共同研究報告書(その2)，(1994.9)
- 2) 建設省土木研究所；斜張橋並列ケーブル耐風制振に関する共同研究報告書(その3)，(1995.3)
- 3) 樋口，野村，他；斜張橋並列ケーブルの耐風制振対策－摩擦型減衰機能付きスパーサの開発－，大林組技術研究所報告書，(1995.6)
- 4) 鹿島，宮崎，他；斜張橋並列ケーブルの空力制振対策，p.1072～1073，土木学会第49回年次学術講演会概要集I，(1994.9)
- 5) 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制振対策検討マニュアル(案)，(1995.9)