

斜張橋並列ケーブルのウェークギャロッピング 制振対策検討マニュアル（案）

平成7年9月

建設省土木研究所 構造研究室

石川島播磨重工業株式会社

株式会社大林組

川崎重工業株式会社

住友建設株式会社

株式会社長大

日本鋼管株式会社

日立造船株式会社

三菱重工業株式会社

財団法人土木研究センター

株式会社エスイー

鹿島建設株式会社

清水建設株式会社

住友重機械工業株式会社

飛島建設株式会社

株式会社ピー・エス

三井造船株式会社

Copyright © (1995) by P. W. R. I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P. W. R. I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

斜張橋並列ケーブルのウェークギャロッピング 制振対策検討マニュアル（案）

平成7年9月

建設省土木研究所 構造研究室

石川島播磨重工業株式会社

株式会社大林組

川崎重工業株式会社

住友建設株式会社

株式会社長大

日本鋼管株式会社

日立造船株式会社

三菱重工業株式会社

財団法人土木研究センター

株式会社エスイー

鹿島建設株式会社

清水建設株式会社

住友重機械工業株式会社

飛鳥建設株式会社

株式会社ピー・エス

三井造船株式会社

要旨

本報告書は、「斜張橋並列ケーブル耐風制振に関する共同研究」における平成4年度～6年度までの成果に基づき、斜張橋並列ケーブルにおけるウェークギャロッピングの発生予測および制振対策の設計方法について、マニュアル（案）として示したものである。

キーワード：斜張橋，ケーブル，ウェークギャロッピング，制振装置，風洞実験

ま え が き

近年、並列ケーブルを有する斜張橋の多数でウェークギャロッピングが発生している。これまでもケーブル振動に関する資料はいくつか取りまとめられているが、ウェークギャロッピングへの対処を具体的に示したものは見あたらない。このような状況の下、平成4年度から6年度まで建設省土木研究所、(財)土木研究センターおよび民間15社により、ウェークギャロッピングの特性とその制振対策に関する研究が実施された。この共同研究によって、ウェークギャロッピングの特性の把握が進み、また各種制振装置の効果が評価され、いくつかの新しい制振装置が開発された。

本マニュアル(案)は共同研究によって得られた成果が、単なる知識として終わらず、実際に利用できるような形に具体化することを目指したものである。ウェークギャロッピングは、共同研究の当初予想した以上に特性が複雑であり、その制振が困難な現象であることが共同研究の進捗と共に明らかになった。また、現時点では供用性・安全性の具体的な照査方法を示すことが困難であった。さらに、本マニュアル(案)で提案した制振対策の多くは、実験あるいは解析で一定の効果を示したものの、実橋での実績は現在のところほとんどない状況である。このため、本マニュアル(案)はウェークギャロッピングに関わるすべての問題を解決するというよりも、むしろ共同研究が終了した段階で得られた知見を用いて最善の処置を施すための手法を提案したものである。したがって、本マニュアル(案)の利用に当たっては記述された事項の背景をよく理解しておくことが望ましく、また実橋で適用された実績のない制振対策の適用にあたっては、常にその効果を確認するなど慎重な配慮が必要である。さらに、本マニュアル(案)は各制振対策の実績および今後の新たな知見によって更新されるべきものであると考えられる。本マニュアル(案)が、ウェークギャロッピングの制振対策の検討に役立ち、また今後の研究の活性化に貢献できれば幸いである。

目 次

まえがき

本書の構成	1
1 章 総説	
1.1 適用範囲	3
1.2 ケーブルの風による振動の種類および用語・記号の説明	3
2 章 ウェークギャロッピングの特性	
2.1 ウェークギャロッピングの定義と一般特性	10
2.2 振動発現風速域	11
2.3 発現振幅	12
2.4 ケーブル間隔の影響	13
2.5 迎角・偏角の影響	14
2.6 気流特性の影響	15
3 章 風およびケーブルの特性値	
3.1 風の特性	16
3.2 ケーブルの特性値	21
4 章 ウェークギャロッピングに対する検討	
4.1 一般	23
4.2 ウェークギャロッピングの発現予測	23
4.3 ウェークギャロッピングに対する安全性および供用性の照査	26
5 章 ウェークギャロッピングの制振対策の選定および設計	
5.1 制振対策の選定の考え方	28
5.2 桁位置ダンパー	31
5.3 スペーサおよびワイヤによるケーブル相互連結	39
5.4 新しい構造力学的制振装置	43
5.5 空力的制振対策	55

あとがき	61
共同研究参加企業および研究担当者	62
付属資料1 実橋および風洞実験におけるウェークギャロッピングの傾向解析	67
付属資料2 ケーブルの曲げ疲労実験に関する既往の文献整理	78
付属資料3 ウェークギャロッピングに対する安全性および供用性に関する試算例	83
付属資料4 新しい構造力学的制振装置における解析検討資料	97

本書の構成

本マニュアル（案）は全5章より構成される。安全性の判定および対策の設計に関わる本質的な部分は3章から5章である。各章の内容を以下に概説する。

1章 総説

本マニュアル（案）適用範囲，ウェークギャロッピングに関連する用語・記号の説明を示す。

2章 ウェークギャロッピングの特性

ウェークギャロッピングに対処するために必要な基礎知識として，主に「斜張橋並列ケーブル耐風制振に関する共同研究」で得られた知見をもとにウェークギャロッピングの特性を概説する。

3章 風およびケーブルの特性値

ウェークギャロッピングに対する安全性を評価する際に必要とされる，風およびケーブルの特性値を算出する方法を示す。

4章 ウェークギャロッピングに対する検討

ウェークギャロッピングの発現予測および制振対策の必要性の判定方法を示す。

5章 ウェークギャロッピングの制振対策の選定および設計

現在実用化されていないものを含めウェークギャロッピングの制振対策手法について解説し，選定の考え方および設計方法を示す。

1 章 総 説

1.1 適 用 範 囲

本マニュアル（案）は現在までに得られた知見の範囲で、斜張橋の並列ケーブルに発生するウェークギャロッピングの発生の予測および制振対策の設計方法を示すものである。本マニュアル（案）の適用範囲は2本のケーブルが並列する場合とし、橋本体については鋼斜張橋とPC斜張橋、あるいは道路橋と歩道橋などの区別を問わない。なお、3本以上の並列ケーブルは空力的性質が2本の並列ケーブルとは異なるため適用の範囲外とするが、制振対策の設計にあたり参考にすることができる。

また、まえがきにも述べたとおり、ウェークギャロッピングの特性および制振手法に関しては、未だすべての問題が解決されたとはいえず、そのため本マニュアル（案）は暫定的性格を有することに注意が必要である。

1.2 ケーブルの風による振動の種類および用語・記号の説明

1.2.1 ケーブルの風による振動の種類と性質

一般的な円断面を有する斜張橋ケーブルに発生する振動としては、渦励振、レインバイブレーション、バフエッティング、およびウェークギャロッピングなどが挙げられる。本マニュアル（案）は、ウェークギャロッピングに対するものであるが、ここで対象を明確にするためケーブル振動について概説を行う。

(1) 渦励振

流体中に円筒などを置くと、その背後にカルマン渦と呼ばれる周期的な渦列が発現することは良く知られている（図-1.2.1）。



図-1.2.1 カルマン渦

このカルマン渦の周期は風速にほぼ比例し、これが構造物の振動周期に一致することによって生じる共振振動が、ケーブルに発生する渦励振である。渦励振は、その直径と固有振動数から定まる特定の風速^{注1)}を中心とした狭い風速域でのみ発現する。振幅はケーブル質量や構造減衰などから定まり、一定値以上には大きくならない。ケーブルの場合、その直径が小さいことから、発現しやすい風速ではカル

注1) 渦励振の発振風速は、レイノルズ数の影響が小さい領域ではケーブルの直径および固有振動数に比例する。したがって、風速を直径と振動数の積で除した無次元風速 $V_r = V / f D$ を用いれば、無次元発振風速はケーブルの構造特性値によらず一定となる。ここに、 f はケーブルの固有振動数、 D はケーブル直径、 V は風速である。渦励振に限らず、橋桁などに発生する風による振動現象の多くは、無次元風速に支配されることが知られている。

マン渦の周期が比較的高く、高次の振動モードで発現することが多いようである。なお、実橋での発現事例を見ると、架設時に発現していても、グラウトの注入あるいは定着部の角折れ緩衝材の設置などにより質量あるいは減衰が向上すると、振動が抑えられているようである。このため今のところ、ケーブルでは深刻な現象とは考えられていないようである。

(2) レインバイブレーション

降雨時にケーブルに付着した雨水がケーブルを流れ落ちる水路を、リブレットと呼ぶ。このリブレットは有風時には風の力によって位置を変えるが、このリブレットの位置と風向がある条件を満たしたときに顕著に発生する振動が、レインバイブレーションと呼ばれる振動¹⁾である(図-1.2.2)。振動は、かなり広い風速範囲で発生し、高

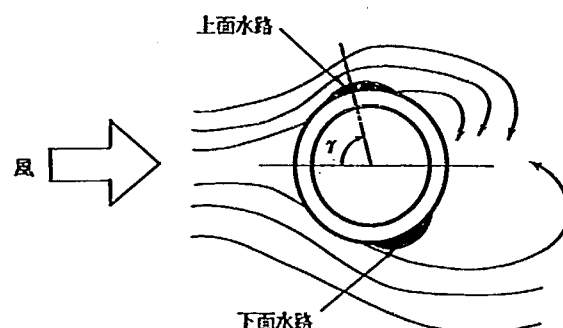


図-1.2.2 レインバイブレーション¹⁾

風速になるにしたがってリブレット位置が変化すると発生しなくなると思われるが、発生風速域に上限があるかどうかについては、完全には解明されていない。発生振幅はかなり大きく発達することもある。しかしながら、これまでの事例ではわずかな構造減衰の付加によって振動は抑制されており、ケーブルの指定着部付近にダンパーを設置することで、対処が可能と考えられている。^{注2)}

(3) バフエッティング

自然風の風速変動によって生じる不規則な強制振動。振幅は風速と共に単調に増加する。原理的にあらゆる弾性構造物で必ず発生する現象であるが、振幅が微小であれば工学的には問題とならない。斜張橋ケーブルで、バフエッティングが問題となった報告例はない。

(4) ウェークギャロッピング

以上の振動現象は単独ケーブルでも発生するが、ウェークギャロッピングは並列する複数のケーブルの特に下流側のケーブルに発生する。ウェークとは航跡あるいは後流の意味であり、上流側のケーブル背後の流れであるウェークが、発生の原因となっているため、ウェークギャロッピングと呼ばれる(図-1.2.3)。

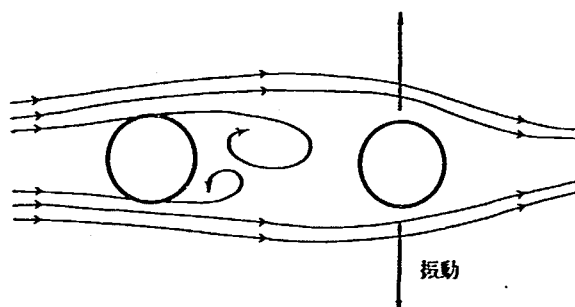


図-1.2.3 ウェークギャロッピング

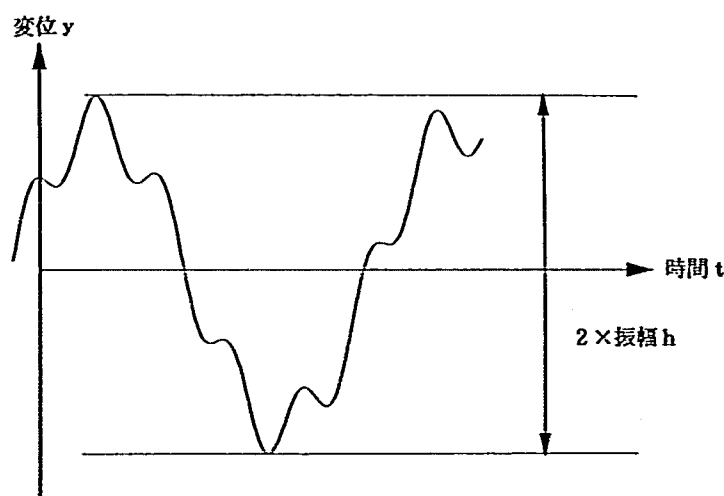
なお、並列ケーブルにも渦励振やレインバイブレーションは発生する。したがって、並列ケーブルに発生する振動のすべてがウェークギャロッピングであるというわけではない。参考までに、外見的な特徴から区別するならば、ウェークギャロッピングは1次あるいは2次といった比較的低い振動数で低風速から発現し、かなり高い風速まで発生し続ける。

注2) レインバイブレーションを抑制するのに必要な付加構造減衰は、対数減衰率で $\delta=0.02$ 程度である。

1.2.2 用語の説明

(1) ウェークギャロッピングなど振動現象に関するもの

振幅 h : 振動の過程において、変位が平均変位より大きい区間および、これに隣接する変位が平均変位より小さい区間について、それぞれ最大値および最小値を求め、その差を2で除した値（図－1.2.4）。 $y = a \sin \omega t$ で表現される定常的な正弦振動においては a のこと。



図－1.2.4 振幅

サブスパン振動 : 連結ワイヤの定着点を節として発生する振動のこと。ケーブル端のダンパーによる拘束が強すぎてダンパーとケーブルの定着点が節となる振動が発生する場合も、このように呼ぶことがある。

(2) 風の特徴に関するもの

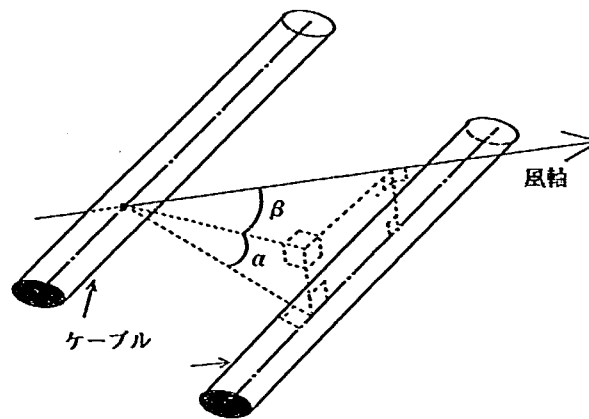
風速 U : 風の速度である。本マニュアル（案）では、 m/s の単位を用いる。なお風工学の分野では、構造物のスケールおよび固有振動数に依存しない取り扱いを可能とするために、風速を構造物の寸法と固有振動数で除して無次元化した無次元風速を用いることが多い。ウェークギャロッピングに関しては、この無次元風速を用いることに利点が少ないと判断し、本マニュアル（案）では風速はすべて有次元の実風速とした。

基本風速 U_{10} : 耐風設計の基本とする風速であり、橋梁架設地点で標準的な地表を仮定した場合の、地上10mの高度における10分間平均風速で表す。50年間にその風速を超えない確率がおよそ0.6となるように設定された値である。

設計基準風速 U_d : ケーブルの高度および地表条件を考慮して、基本風速を補正した風速である。

偏角 β : ケーブル軸と直交する平面と風軸とがなす角度をいう（図－1.2.5）。

迎角 α : あるケーブル軸および風軸を含む平面と、並列するケーブル軸を含む平面とがな



図－1.2.5 偏角 β ，迎角 α の定義

す角をいう（図－1.2.5）。本マニュアル（案）では，偏角 β と共に並列ケーブルに関する風洞実験のパラメータとして導入する。

地表粗度 : 地表面の凹凸の程度を表し，地形，植生，土地利用状況などによって変化する。

発現開始風速 $U_{e,r}$: ウェークギャロッピングが発現する最低の風速のこと。本マニュアル（案）では，最大振幅が $0.1D$ に達する風速としている。

発現終了風速 $U_{e,r}$: それ以上の風速でウェークギャロッピングが発現しなくなる最低の風速

一様気流 : 風速が時間的にも空間的にもほとんど変化しない気流をいう。

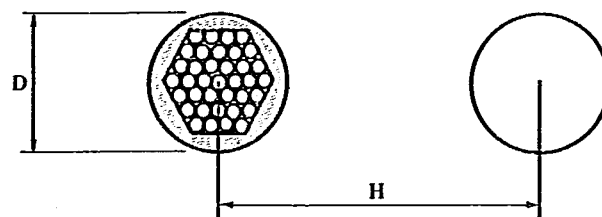
乱流 : 風速が時間的あるいは空間的に変動する気流をいう。

乱れ強さ : 風の乱れの度合いを表す指標。風速の標準偏差を平均風速で除したものである。

(3) ケーブルの特性に関するもの

ケーブル径 D : 被覆管を含むケーブルの外径（図－1.2.6）。

ケーブル間隔 H : 並列するケーブルの中心間隔（図－1.2.6）。



図－1.2.6 ケーブル径 D ，ケーブル間隔 H の定義

ケーブル長 L : ケーブル桁側および塔側の定着点間の距離とする。角折れ緩衝材を用いている場合には，角折れ緩衝材設置位置からの距離とする。例えば，緩衝ゴムを用いている場合には，緩衝ゴムからの距離がケーブル長となる。

構造減衰 δ : 構造材料の内部粘性や部材相互の摩擦などに起因する，構造固有の振動の減衰を対数減衰率で表したものをいう（図－1.2.7）。耐風設計のパラメータとなる無

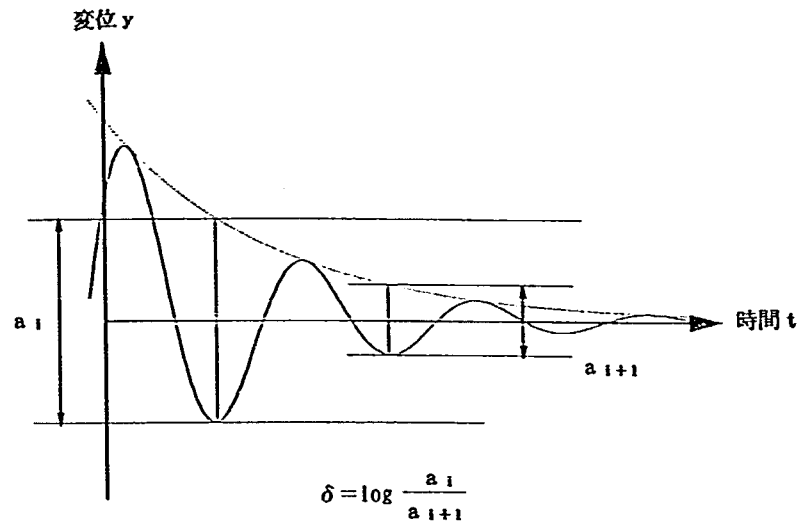


図-1.2.7 構造減衰

風時の構造減衰には、上記要因のほかに静止気流中での空力減衰が含まれる。

無次元質量 m_r : ケーブル単位長さあたりの質量を空気密度およびケーブル径の自乗で除したもの。

$$m_r = \frac{m}{\rho D^2}$$

質量・減衰パラメータ S_c : 構造減衰と無次元質量の積

$$S_c = m_r \delta = \frac{m \delta}{\rho D^2}$$

(4) 空気力学に関するもの

レイノルズ数 Re : 流体の慣性力と粘性力との比として式(1.1)に定義される。慣性力が大きくなるほどレイノルズ数は高く、風速とケーブル径の2乗の積に比例する。

$$Re = \frac{UD^2}{\nu} \dots\dots\dots (1.1)$$

ここで、

U : 風速 (m/s)

D : ケーブル径 (m)

ν : 動粘性係数(m²/s)

(5) ケーブルに関するもの

角折れ緩衝材 : ケーブルの振動や活荷重载荷に伴って発生する曲げ応力が、定着点に集中しないように、定着点からやや離れて取り付けられるゴムなどの緩衝材。ケーブルカバー付近に取り付けられることが多い。

(6) 制振装置に関するもの

桁位置ダンパー : ケーブルの桁側定着点付近と橋桁とを連結する形で設置するダンパーをいう。

相互連結手法 : 連結ワイヤによって多段に渡りケーブルを連結して振動を抑える手法をいう(図-1.2.8)。

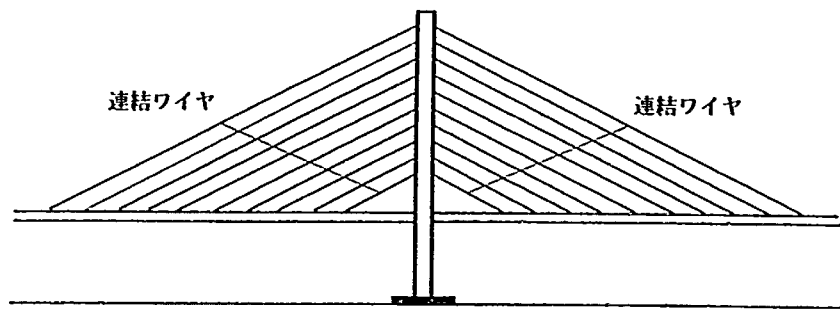


図-1.2.8 相互連結手法

スペーサ : 並列ケーブル間隔を一定に保つために、並列ケーブル間に設置される付加物という。

減衰付加型スペーサ : 並列ケーブルの相対的な動きに応じて減衰を付加する機能を有するスペーサという。

1.2.3 記号の意味

本マニュアル（案）の記号は、ことわりのない限り次の定義による。いくつかの記号は必要に応じて添字が付される場合がある。

記号	意味	単位
α	迎角	°
β	偏角	°
δ	構造減衰（対数減衰率）	—
ω	固有円振動数	rad/s
c	粘性減衰係数	kgfs/m
D	ケーブル径	m
f	固有振動数	Hz
g	重力加速度	m/s ²
H	ケーブル間隔	m
h	振幅	m
I_s	乱れ強さ	—
L	ケーブル長	m
m_r	無次元質量	—
n	振動モード次数	—
T	ケーブル張力	tf
U	風速	m/s
U_{10}	基本風速	m/s

U_d	設計基準風速	m/s
U_{e1}	発現開始風速	m/s
U_{e2}	発現終了風速	m/s
S_c	質量・減衰パラメータ	—
Re	レイノルズ数	—

【参考文献】

- 1) 植上琇一：斜張橋ケーブルのRain Vibration, 日本風工学会誌, 昭和61年3月

2 章 ウェークギャロッピングの特性

本章では、既往の研究および今回の共同研究から得られたウェークギャロッピングに関する知見をまとめ、マニュアル（案）の理解の一助とするとともに、マニュアル（案）の範囲を超えて、より詳細な検討を行う場合などの参考に供する。なお、文中で引用している共同研究で実施した実験の詳細な結果に関しては、参考文献1)を参照されたい。

2.1 ウェークギャロッピングの定義と一般特性

ウェークギャロッピングは、2本のケーブルが風向方向に並列に配置された場合、すなわち上流側ケーブルの背後にできる後流中に下流側ケーブルが置かれている場合に、主として下流側のケーブルに発生する大振幅の振動の総称である。上流側ケーブルの後流（ウェーク）が振動発生の原因と考えられるためウェークギャロッピング^{注1)}と呼ばれているが、振動発生メカニズムには未だに不明な部分もあり、したがって厳密な定義も定まっていない。ただし、発現する現象には明確な特徴があり、現在得られている知見の範囲では、これをひとつの振動現象として捉えるのが適当と思われる。

前述のように、並列ケーブルにも渦励振、レインバイブレーションなどの振動が発生する。したがって、これらの振動とウェークギャロッピングを区別するために、本マニュアル（案）で扱うウェークギャロッピングについての現象面から見た便宜的な定義を示せば、斜張橋の並列ケーブルに発生する振動現象で、1次、2次などの低い振動数で低風速から発現し、発現開始風速から終了風速までのかなり広い風速範囲で、主として下流側のケーブルが、ケーブル径と同程度以上の大振幅で振動する現象となる。^{注2)、注3)}

ウェークギャロッピングでは、下流側ケーブルの風向直角方向振動が卓越することが多いが、風向方向に大振幅の振動が発生することもある。この風向方向の振動をウェークギャロッピングと解釈することの妥当性には疑問もあるが、振動発生メカニズムが明らかでなく2種類の振動の発生要件を特定できないこと、両振動とも大振幅の激しい振動であり何らかの制振対策が必要という観点からは、これらを区別する

注1) ケーブル間隔が相対的に広い送電線などでも、下流側のケーブルが風向方向の振動を主体とした楕円軌道の振動を起こすことが知られており²⁾、同じくウェークギャロッピングと呼ばれている。両現象に本質的に差があるかどうかは明らかではないが、本マニュアル（案）では対象構造物を斜張橋の並列ケーブルと規定することによって、扱う現象をも限定することとした。具体的には、実橋の設計例や斜張橋ケーブルを対象にした実験・研究に見られる間隔を想定し、一般的には直径の6倍以下、最大でも直径の8倍以下程度の間隔の並列ケーブルに生じる現象だけを考えることにする。

注2) バフティングと区別するために、現象の定義に振幅を加えた。後述するように、ウェークギャロッピング発生にはギャップフローが密接に関係しているようである。アウターフローからギャップフローへの気流のスイッチングは、両ケーブルの風向直角方向の相対変位がある程度大きくなると生じないことから、逆にウェークギャロッピングでは大振幅が発生するという推論も可能かと思われるが、振動発生メカニズムの詳細なメカニズムが不明な現状では、小振幅の振動がウェークギャロッピングでないという明確な根拠は示せない。しかしながら、設計的な対処を考えるうえでは、大振幅であることがウェークギャロッピングを特徴づける重要な特性であることはいまでもなく、制振対策検討マニュアル（案）という観点から微小振動はウェークギャロッピングでない³⁾と解釈することとした。

注3) ウェークギャロッピングではかなり大きな振動が発生するが、振幅が、これ以上は増加しないという限界もあるようである。その意味では発散的振動に分類されるギャロッピングという呼称は適当でないという考え方もあり得るが、慣用的に用いられてきた用語であるので、本マニュアル（案）でもそのまま使用する。

ことの意義は小さいようにも思われることから、ここでは、風向方向の振動もウェークギャロッピングに含めることにした。

なお、振動の方向は、厳密には2本のケーブルの軸を含む平面に直角な方向、およびこの平面に含まれる方向であるが、ウェークギャロッピングに関する多くの研究が、橋桁の風洞実験と同様に、ケーブル軸を風向と直角にした部分模型実験によっていることから、便宜的に風向方向、風向直角方向と表現する（迎角、偏角の定義の項参照）。

実ケーブルのウェークギャロッピングでは、下流側ケーブルの振動に伴って上流側のケーブルも振動することが多い。この場合、両ケーブルは同一の振動モードで、かつ逆位相で振動するのが普通である。しかしながら、上流側を固定し、下流側ケーブルだけが振動可能な状態とした実験や、故意に上下流のケーブルの固有振動数を変えて安定な逆位相振動が生じないようにした実験¹⁾でも振動が生じたことから、上流側ケーブルが振動することはウェークギャロッピング発生必要条件ではなく、振動の原因となる不安定性は、上流側ケーブルの後流中に置かれた下流側ケーブルにあると考えられる。

既往の研究³⁾および共同研究の結果、両ケーブルの位置関係によって両ケーブルの間に収束する流れ（ギャップフロー）が生じることが、ウェークギャロッピング発生に密接に関係しているものと推定されているが（図-2.1.1参照）、詳細なメカニズムに関しては今後の研究の進展を待たざるを得ない。

以上のように、ウェークギャロッピングについては、振動発生メカニズムなど未だに不明な点も少なくないが、共同研究で実施した実験

の結果、応答に及ぼす風速、相対風向、構造減衰、レイノルズ数、ケーブル間隔の影響など、現象面に関して多くの知見が得られた。本マニュアル（案）は、これらの実験的事実あるいは実橋などから得られた経験的事実に基づき、現実的な対処方法を記述したものである。以下、本章では、マニュアル（案）の記述の根拠となった知見について、項目ごとに述べる。

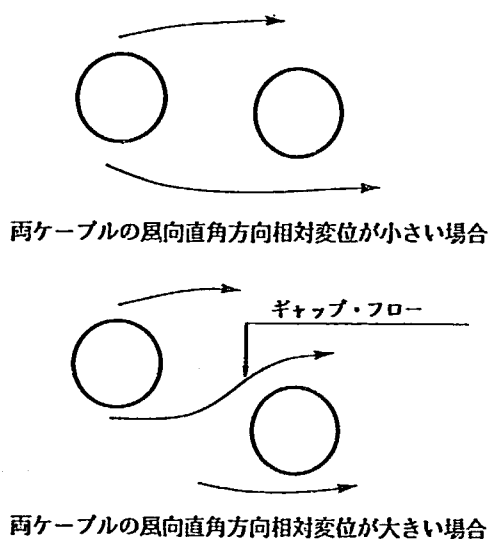


図-2.1.1 並列ケーブル周りの流れの模式図

2.2 振動発現風速域

共同研究で実施した実験の結果に基づき、本マニュアル（案）では、ウェークギャロッピングの発現風速域は、質量・減衰パラメータで定まる発現開始風速から、臨界レイノルズ数で与えられる発現終了風速までと考えることにした。

実験の結果によれば、構造減衰を付加していない無対策のケーブルでは、多少のばらつきはあるが、風速 2m/s 程度からウェークギャロッピングが発現することが多い。

一般に、風に起因する振動現象では、発現風速は構造物の固有振動数や、質量・減衰パラメータに依存することが知られている。しかしながら、固有振動数を変化させて発現開始風速を調べた実験（共同研究で実施）の結果によれば、ウェークギャロッピングの発現開始風速に対する固有振動数の影響は小さく、渦励振などに見られるような発振風速と振動数の間の顕著な比例関係は認められなかった。共同研究では、振動数を変化させた場合の非定常空気力も測定しているが、結果は同様な傾向を示した。限られた実験の結果ではあるが、これらから、ウェークギャロッピングの発現開始風速は概して振動数に対して鈍感であり、多くの風による振動現象とは異なって、無次元風速が主要なパラメータではない可能性があると思われる。

発振メカニズムや無次元風速に代わる支配パラメータが明らかになっているわけではなく、上記の発現開始風速も、取りあえず利用可能な暫定的な値に過ぎないとは言え、発現開始風速自身がかなり低風速であることを勘案すれば、ほかの風による振動現象とは異なり、耐風対策として振動数を増加させ発現風速を上昇させる方法が有効でないことは明らかである。ケーブル間隔などの主要な条件が揃っている場合、無対策の並列ケーブルは風が吹けば必ず振動するものと考えるのがよい。

発振風速を増加させる手段としての質量・減衰パラメータの増加には一定の効果があり、共同研究で行われた風洞実験では、構造減衰を0.1まで増加させた場合、発振風速が約8m/s程度まで上昇した。質量・減衰パラメータは、無次元質量と構造減衰の積である（用語の項参照）。ケーブルの場合、円形の断面が鋼でほぼ充填された構造のため、一般の構造物に比べると無次元質量が取る値の範囲はある程度限定されているものの、素線の構成や、全体積に占める被覆管の割合などによって、見かけの単位質量はかなり変化する。また、制振対策の中にはほかのケーブルとの連結などによって質量付加効果を期待するものもあるので、一般に質量の影響は無視し得ない。上記の実験は減衰だけを変化させたものであり、ウェークギャロッピングについても質量・減衰パラメータが真の支配パラメータであるかどうか、換言すれば、減衰の増加と質量の増加が同等の効果を有するかどうかは厳密には検証されていないが、ほかの現象において経験的に知られている知見などから類推して、本マニュアル（案）では、ウェークギャロッピングの発現開始風速は質量・減衰パラメータによって定まるものとした。

ケーブルの断面形状は一般的には円形であるため、断面周りの流れの状況はレイノルズ数によって変化する。共同研究で実施した実験によれば、風速が増加してケーブル周りの流れが超臨界レイノルズ数域に達するとウェークギャロッピングは発生しにくくなることが分かった。したがって、臨界レイノルズ数がウェークギャロッピングの終了風速を与えるひとつの目安となろう。超臨界レイノルズ数域では、乱流剥離に遷移することによって後流の幅が狭くなることは周知の事実であり、このことがウェークギャロッピングの安定化に密接に関係しているものと推測されるが、詳細なメカニズムは明らかでない。

以上から、本マニュアル（案）では、取りあえずウェークギャロッピングの発現風速域を本節の冒頭に記した発現開始風速から終了風速までの範囲と考えることにした。

2.3 発 現 振 幅

ウェークギャロッピングの振幅は、構造特性、気流特性、風向などの諸条件によって微妙に変化する。

振幅だけでなく振動の発生状況も一様ではない。共同研究で行われた実験結果によれば、多くの場合、振動振幅は風速とともに単調に増加するようであるが、増加の割合は種々の条件によって複雑に変化する。また、発現開始風速付近では不安定なリミットサイクル^{注4)}を伴うことも少なくない。したがって、特定の条件における振幅を簡単な式などで精度よく表現することは難しい。

そこで、本マニュアル（案）では、振動のメカニズムや応答のタイプなどには無関係に、安全性の観点から、実験値や観測値の最大値をとって、最大振幅の目安を与えることとした。様々な条件で行われた実験および観測結果の上限をとると、最大振幅の目安としては、風向直角方向振動では3.0D、風向方向振動では1.5D程度が想定される。

なお、風洞実験から示唆されるように、ウェークギャロッピングの発生にはギャップフローの存在が密接に係わっているとすれば、上下流ケーブルの風向直角方向の相対変位が極端に大きくなれば不安定性は消滅するものと考えるのが自然であろう。したがって、振幅の上限の存在を定性的には説明できるように思われるが、これを定量的に予測するためには、今後の研究の進展を待つ必要がある。

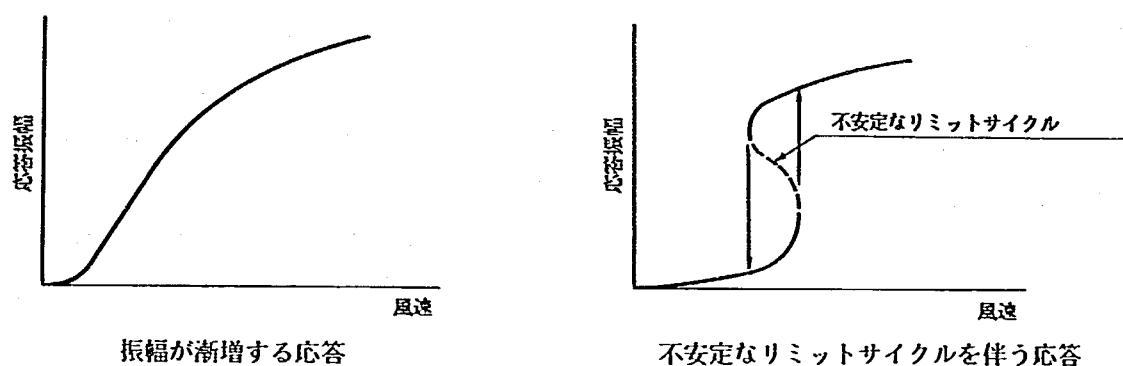


図-2.3.1 風速-応答振幅曲線のパターン

2.4 ケーブル間隔の影響

ケーブル間隔はウェークギャロッピングの特性を左右する極めて重要な因子であると同時に、設計者が決定することのできる数少ない因子でもある。

既往研究および共同研究で実施した風洞実験などを総合すると、振動が顕著に発現するケーブル間隔Hは1.5D～6D程度と言える。共同研究で実施した実験では、間隔8Dでもウェークギャロッピングが発生する場合があるとの結果が得られており、空気力学的な不安定性自体はかなり広い範囲で存在すると考えられる。しかし、実橋でウェークギャロッピングが観測されたケーブル間隔は5Dまでであること、上記の実験結果は、極めて軽く振動し易い模型（質量・減衰パラメータ S_c が実ケーブルの約1/10）を用いて得られたものであることを勘案して過度に安全側となることを避けるとすれば、ウェークギャロッピングが発生

注4) 非線形な振動系では、微小な振幅では系は安定であり時間とともに振動が減衰するのに対して、ある限界の振幅を超えると系が不安定に転じ、振動が発散する現象が見られることがある。この限界の振幅を不安定なリミットサイクルと呼ぶ。この現象を伴う場合、観測される振幅（安定なリミットサイクル）と風速の関係は連続でなくなり、ある点でジャンプすることになるので、簡単な式などによる表現が困難となる（図-2.3.1）。

するケーブル間隔の上限は、ひとまず6D程度と考えるのが妥当と思われる。

一般にケーブル間隔の増加とともに、振幅は小さくなる傾向がある。また、ケーブル間隔が3Dより小さい場合は振動発現とともに急激に振幅が増加する場合が多いのに対して、間隔が4D以上では風速の増加とともに振幅が漸増するタイプの振動が発生する傾向がある。非定常圧力の測定結果によれば、間隔2Dと4D以上では圧力分布にかなりの相違が認められるが、ケーブル周りの流れや結果としての応答との関係など、未だ未解明な部分も多い。

なお、ケーブルの上端と下端でケーブル間隔が等しくない場合、すなわち両ケーブルが完全には平行でない場合、風洞実験⁴⁾の結果によれば、ウェークギャロッピングはかなり安定化する。この場合、ケーブル軸方向に作用空気力が変化するため、振動が抑制されるものと考えられているが、詳細なメカニズムは、十分には解明されていない。

2.5 迎角・偏角の影響

斜張橋ケーブルの場合、橋軸直角以外の風向では迎角と偏角が同時に0°ではなくなるが、橋桁などと同様な2次元部分模型による実験が多いことから、ここでは、便宜上、迎角の影響と偏角の影響に分けて述べる（迎角、偏角の定義の項参照）。

共同研究で実施されたバネ支持実験によれば、一般に、迎角 α の増加とともに振幅が減少し、また、風速とともに振幅が漸増するタイプの振動に移行する傾向がある。また、ギャロッピングというよりもバフエッティング的な不規則振動に遷移することもある。一方、非定常空気力の測定では、ケーブル水平間隔が4D以上では $\alpha=0^\circ$ で安定、 $\alpha \neq 0^\circ$ で不安定という結果もあり、厳密に言えば、必ずしも常に迎角が0°の場合が最も不安定とは限らない。

しかしながら、上下流ケーブルの風方向の間隔が一定の場合、迎角の増加は両ケーブルの鉛直方向の間隔の増加を意味するから、迎角がある程度以上に大きくなると、上流側ケーブルの後流中に下流側ケーブルが入るという条件が満たされなくなる。したがって、大局的には、迎角の増加とともにウェークギャロッピングは安定化する傾向にあると考えてよいと思われる。

また、同様に共同研究において実施した偏角に関する実験によれば、偏角 β が0°から30°の範囲では下流側ケーブルに作用する空気力に大きな変化はないが、偏角の増加とともに若干加振空気力が小さくなる傾向が認められた。限られた実験ではあるが、これから、一応、偏角0°での応答を基準に耐風性を評価すれば安全側にあるものと判断される。

実ケーブルと同様、斜めに張ったケーブル模型を使用して風向を変化させた実験、すなわち迎角と水平偏角を同時に与えた実験では、偏角15°および30°において、振幅1Dに達する風向方向振動（厳密には2本のケーブル軸に含まれる平面内の振動である。偏角が0°でないため、風向と振動方向は一致しない。）が発生している。

以上の実験結果を総合すると、迎角、水平偏角は応答に影響を与えるものの、振動発生条件はこれらの因子にさほど敏感ではなく、実ケーブルでは広い範囲で風向直角あるいは風向方向の振動が発生する可能性があると考えなければならない。

2.6 気流特性の影響

共同研究で実施された乱流中での風洞実験によれば、ケーブル間隔 $6D$ 以上では気流の乱れによって振幅がかなり低下すること、間隔 $4D$ 以下では、有意な差がないことが分かった。したがって、少なくとも、気流の乱れはウェークギャロッピングの不安定性を助長することはないと考えてよく、一様流中での実験に基づいた評価は安全側の結果を与える。

ケーブル間隔が広く、 $6D$ に近いような場合の気流乱れの振幅低減効果については、データが必ずしも十分とは言えないことから、一般には参考程度にとどめるのがよいと考えられるが、風洞実験や現地風観測などの信頼できるデータがある場合には、乱流効果を考慮することも考えられよう。いずれにせよ、乱流中のウェークギャロッピングの応答特性に関しては、今後のデータの蓄積が望まれる。

【参考文献】

- 1) 建設省土木研究所ほか：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1)，平成5年
同上 ： 同上 (その2)，平成6年
同上 ： 同上 (その3)，平成7年
- 2) E. Simiu・R. Scanlan : Wind Effects on structures, A Wiley-Interscience Publication
- 3) N. Shiraishi・M. Matsumoto・H. Shirato : On aerodynamic instabilities of tandem structures, J. W. E. I. A., Vol. 23, 1986
- 4) 久保善延・前田博・加藤九州男・佐々木誠：斜張橋用複数本ケーブルの耐風挙動，第13回風工学シンポジウム，1994年

3 章 風およびケーブルの特性値

3.1 風 の 特 性

3.1.1 概 要

本節では、ウェークギャロッピングの検討のための風の特性を示す。本章の内容は、道路橋耐風設計便覧¹⁾の4章に基づいており、これをウェークギャロッピングに応用したものである。

ウェークギャロッピングの検討に必要な風の特性は風速の再現期待値および頻度である。設計基準風速 U_d は、3.1.2に示す基本風速 U_{10} をもとに、3.1.3に示す高度・地表条件などの補正を施して求めることが基本である。これらの設定に関する根拠は耐風設計便覧4.4を参照されたい。また疲労および使用性の観点から安全性を検討する場合には、これらの風速の発現頻度を知る必要があるが、これについては3.1.4に記述する。

3.1.2 基本風速 U_{10}

基本風速は、架橋地点の地理的位置に応じ、図-3.1.1に示す値を標準とする。参考のために各基本風速区分に属する地域を行政区分にしたがって示すならば表-3.1.1のようになる。基本風速は地上または海面上の高度10mにおける10分間平均風速で定義している。風速は高度あるいは地表の粗度条件などの影響を受ける。基本風速は後述の地表粗度区分Ⅱ（田園地帯）における値に換算したものである。基本風速を設定するにあたっては、全国の気象官署の年最大風速を統計処理して、50年間でその風速を超えない確率がおよそ0.6以上となるような風速値を用いた。

3.1.3 設計基準風速 U_d

設計基準風速は高度および地表粗度などの影響を考慮した10分間平均風速であり、次式により求めることを標準とする。

$$U_d = U_{10} \times E_1 \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

ここで、

U_d : 設計基準風速(m/s)

U_{10} : 基本風速(m/s)

E_1 : 高度および地表粗度に関する補正係数（表-3.1.2および表-3.1.3による）

高度 z は最長ケーブルの平均高さとし、橋梁が跨ぐ海面、水面、あるいは地表面を基準面として定義する。

地表粗度は、図-3.1.2に示すように、架橋地点を中心として橋軸に直角な2方向に対しそれぞれ $\pm 30^\circ$ の範囲、および橋梁高度のおよそ100倍の距離（ただし500m以上とする）までの範囲の地表状況を調査し、表-3.1.2に従い区分するものとする。図-3.1.2に示すように、架橋地点を中心として橋軸に直角な2方向に対しそれぞれ $\pm 30^\circ$ の範囲に考慮する。

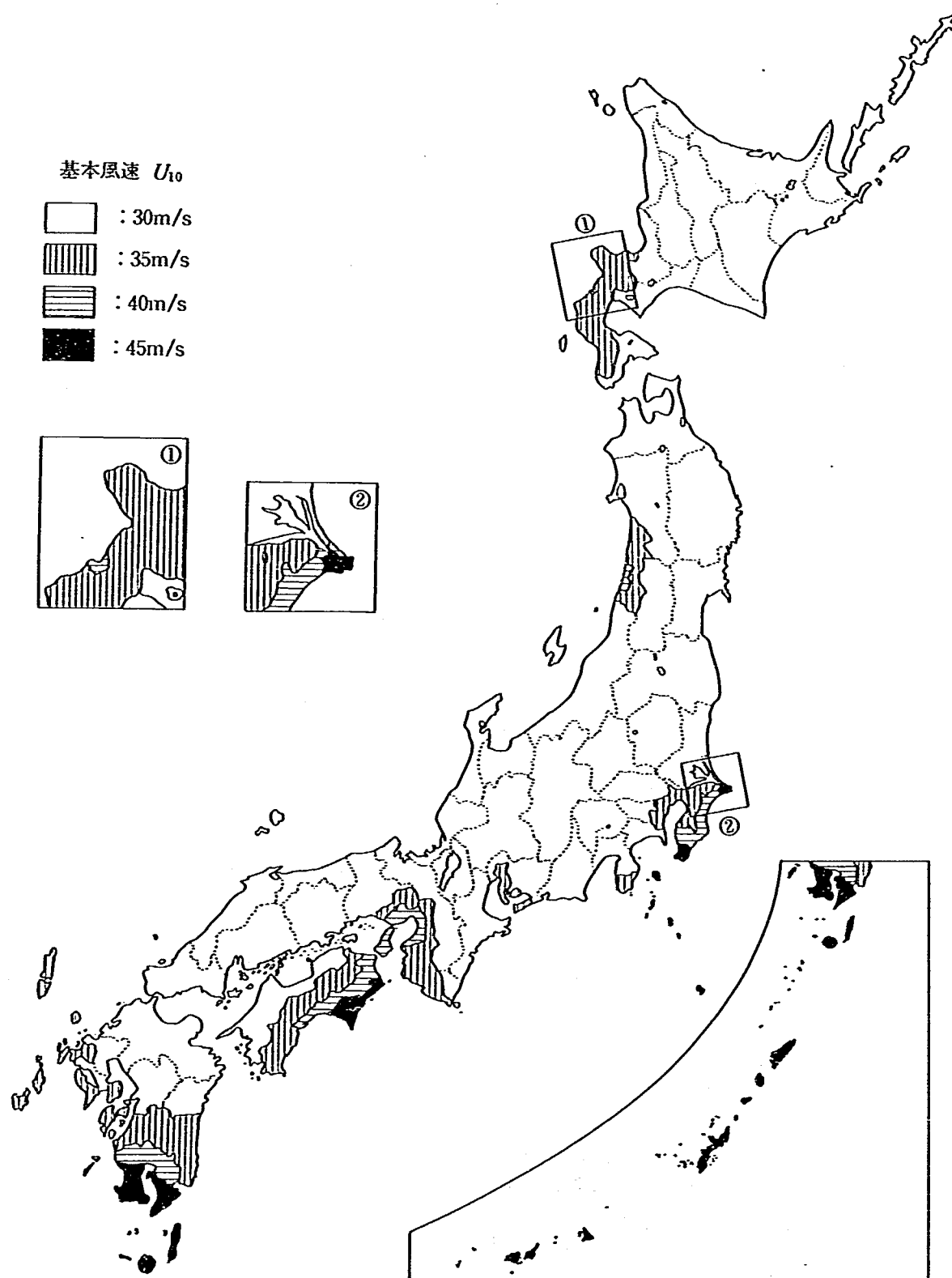


図-3.1.1 基本風速 $U_{10}^{(1)}$

表-3.1.1 基本風速（記載のない府県の基本風速は30m/s）¹⁾

都道府県名	30m/s	35m/s	40m/s	45m/s
1. 北海道	右記以外の北海道	渡島支庁の八雲町、長万部町 寿都町を除く 後志支庁 檜山支庁	後志支庁の寿都町	なし
2. 秋田県	右記以外の秋田県	本荘市 由利郡	なし	なし
3. 山形県	右記以外の山形県	東田川郡 西田川郡 飽海郡	鶴岡市 酒田市	なし
4. 茨城県	右記以外の茨城県	波崎町以外の鹿島郡	鹿島郡の波崎町	なし
5. 千葉県	右記以外の千葉県	千葉市 市川市 船橋市 松戸市 佐原市 成田市 佐倉市 習志野市 市原市 八千代市 鎌ヶ谷市 浦安市 印旛郡 千代田市、東庄町以外の香取郡 君津郡	木更津市 君津市 富津市 八日市場市 旭市 東金市 茂原市 勝浦市 鴨川市 香取郡の千代田市、東庄町 匝瑳郡 山武郡 夷隅郡 長生郡 安房郡の天津小湊	銚子市 館山市 海上郡 天津小湊以外の安房郡
6. 東京都	右記以外の東京都	23区	なし	大島支庁、三宅支庁 八丈支庁、小笠原支庁
7. 神奈川県	右記以外の神奈川県	横浜市 川崎市	なし	なし
8. 静岡県	右記を除く静岡県	下田市 賀茂郡	なし	なし
9. 愛知県	右記を除く愛知県	名古屋市 半田市 碧南市 東海市 大府市 知多市 高浜市 豊明市 知多郡 幡豆郡 瀧美郡 常滑市	なし	なし
10. 大阪府	なし	右記を除く大阪府	大阪市 堺市 岸和田市 泉大津市 貝塚市 和泉市 高石市 泉南市 泉北郡 泉南郡 泉佐野市	なし
11. 兵庫県	右記を除く兵庫県	伊丹市 宝塚市 川西市 三田市 三木市 加古川市 高砂市 川辺郡 美嚨郡 加古郡	神戸市 尼崎市 明石市 西宮市 芦屋市 洲本市 津名郡 三原郡	なし
12. 和歌山県	新宮市 東牟婁郡	左記を除く和歌山県	なし	なし
13. 徳島県	なし	阿波郡 麻植郡 美馬郡 三好郡	左記、右記を除く徳島県	阿南市 海部郡 那賀郡の那賀川町、羽ノ浦、 簗敷町
14. 香川県	右記を除く香川県	大川郡	なし	なし
15. 高知県	なし	右記を除く高知県	高知市 南国市 土佐市 須崎市 香美郡 吾川郡の春野町	室戸市 安芸市 安芸郡
16. 長崎県	佐世保市 諫早市 大村市 東彼杵郡 北高来郡	左記を除く長崎県	なし	なし
17. 熊本県	右記を除く熊本県	人吉市 水俣市 本渡市 牛深市 葦北郡 球磨郡 天草郡	なし	なし
18. 宮崎県	延岡市 日向市 東臼杵郡 西臼杵郡	左記、右記を除く宮崎県	都城市	なし
19. 鹿児島県	なし	阿久根市 出水市 大口市 出水郡 伊佐郡	川内市 薩摩郡 姦良郡 曾於郡 国分市	左記を除く鹿児島県
20. 沖縄県	なし	なし	なし	全域

対象とする範囲に複数の区分が存在する場合には、それらの面積に応じ平均化して粗度区分を定めるものとする。例えば、粗度区分ⅡとⅣとが同じ比率で存在する場合には粗度区分はⅢと分類する。ただし、粗度区分ⅡとⅢとが同じ比率で存在する場合には粗度区分は粗度が小さいⅡに分類する。これは、小さな粗度を仮定した方が多くの場合安全側の設計となるからである。

さらに、橋梁が100m程度の幅の広い河川を跨ぐ場合には、まず河川を除く周辺の地表条件より粗度区分を決定し、粗度の小さな区分へランクを1つずらす（ⅡはⅠ、ⅢはⅡ、ⅣはⅢとする）こととする。また、2つの橋軸直角方向の粗度区分が異なる場合には、小さい方の区分をその橋の地表粗度区分として用いる。これは、橋梁の風による振動を評価する場合、地表粗度は小さく判断する方が安全側の判断になるためであり、上の例に限らず、一般に粗度区分がほぼ中間的で判断し難い場合は、粗度が小さい方の区分を選ぶのがよい。

表-3.1.2 地表粗度区分¹⁾

地表粗度区分	地表状況	粗 度
I	海上、海岸	粗度が 小さい ↑ ↓
II	農地、田園、開けた土地 樹木や低層建築物が散在している地域	
III	樹木や低層建築物が密集している地域 中高層建築物が散在している地域 なだらかな丘陵地	
IV	中高建築物が密集している地域 起伏の大きい丘陵地	粗度が 大きい

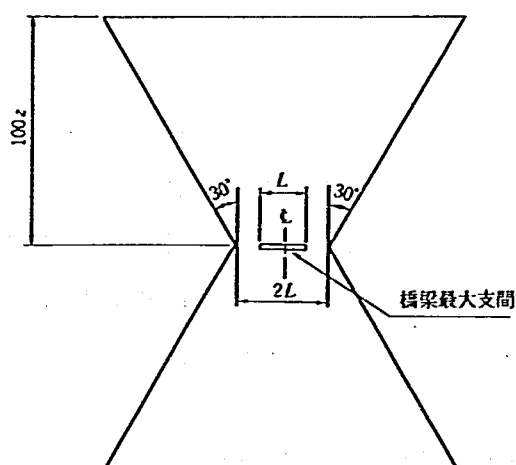


図-3.1.2 粗度区分決定のために参照する地域¹⁾

表-3.1.3 補正係数 E_z^{11}

地表粗度区分 高度(m)	I	II	III	IV
$0 < z \leq 5$	1.11	1.00	0.83	0.77
$5 < z \leq 10$	1.16	1.00	0.83	0.77
$10 < z \leq 15$	1.24	1.04	0.83	0.77
$15 < z \leq 20$	1.29	1.09	0.85	0.77
$20 < z \leq 25$	1.33	1.14	0.90	0.77
$25 < z \leq 30$	1.36	1.18	0.94	0.77
$30 < z \leq 35$	1.39	1.21	0.98	0.79
$35 < z \leq 40$	1.41	1.24	1.01	0.82
$40 < z \leq 45$	1.43	1.26	1.04	0.85
$45 < z \leq 50$	1.45	1.28	1.07	0.88
$50 < z \leq 60$	1.47	1.31	1.11	0.92
$60 < z \leq 70$	1.50	1.35	1.15	0.96
$70 < z \leq 80$	1.53	1.38	1.18	1.00
$80 < z \leq 90$	1.55	1.41	1.22	1.04
$90 < z \leq 100$	1.57	1.43	1.25	1.08
$100 < z \leq 110$	1.59	1.46	1.27	1.11
$110 < z \leq 120$	1.61	1.48	1.30	1.14
$120 < z \leq 130$	1.62	1.50	1.32	1.16
$130 < z \leq 140$	1.64	1.52	1.35	1.19
$140 < z \leq 150$	1.65	1.53	1.37	1.22
$150 < z \leq 160$	1.67	1.55	1.39	1.24
$160 < z \leq 170$	1.68	1.57	1.41	1.26
$170 < z \leq 180$	1.69	1.58	1.43	1.28
$180 < z \leq 190$	1.70	1.60	1.44	1.31
$190 < z \leq 200$	1.71	1.61	1.46	1.33

3.1.4 風速の頻度分布

疲労および使用性の観点から安全性を照査する場合には、比較的低い風速の発現頻度特性を考慮する必要がある。風速の発現頻度特性に関しては、これまでもいくつかの調査例があるが^{2), 3)}、ウェークギャロッピングに対しては式(3.2)を用いてよい。なお、架橋地点において風観測が実施され、十分なデータが蓄積されている場合には、そのデータに基づき風速の頻度分布を定めるのがよい。

$$P(U) = \exp\left\{-(U/(0.166 U_{50}))^{1.46}\right\} \quad \dots\dots\dots (3.2)$$

ここで、

$P(U)$: 10分間の平均風速が U を超える確率

U_{50} : 風速の50年再現期待値である。 $U_d/1.07$ としてもよい⁴⁾

上式は、本来、地域によってばらつきがある風速の頻度分布を概ね安全側に評価しており、架設地点によっては風速の頻度を数倍に評価する場合もあるため、この分布を使うことにより設計が著しく変わるよ

うな場合には、気象官署の観測データ、あるいは既存の資料などと比較して U_{50} やワイブル分布のパラメータなどの妥当性を検討するのがよい。

3.2 ケーブルの特性値

ここでは、ウェークギャロッピングに影響を与えるケーブルの特性を示すパラメータとして、ケーブル間隔、振動数、無次元質量、構造減衰および質量と構造減衰を同一視した質量・減衰パラメータについて示す。

(1) ケーブル間隔

ケーブル間隔は、塔側と橋桁側の定着点で必ずしも等しくない。そこで、本マニュアル（案）ではケーブル間隔を二通りの考え方で設定する。

① 相互連結の対策が施されていない場合

$$\text{ケーブル間隔 } H = \frac{H_T + H_G}{2} \quad \dots\dots\dots (3.3)$$

ここで、

H_T : 塔側定着点のケーブル間隔

H_G : 桁側定着点のケーブル間隔

ケーブルに作用する空気力はケーブルの位置によって異なる。しかし、相互連結がなされていない場合には、振動が一度発生すると、振動するモードに関わらずケーブルの全長にわたり振動が発生すると考えられる。したがって位置によって、異なるケーブル間隔の重みは等しいと考えられ、近似して平均ケーブル間隔を用いてもよい。

② 相互連結が施されている場合

ケーブル間隔 H : サブスパンのそれぞれの腹におけるケーブル間隔

相互連結が施された場合、ケーブル振動はサブスパンごとに独立して発生しやすくなる。この場合、それぞれのサブスパンにおけるケーブル振動に関しては、そのサブスパンのケーブル間隔が支配的となり、ほかのケーブルの寄与は小さくなる。そこで相互連結がなされた場合のケーブル間隔は、多少煩雑となっても、サブスパンごとに平均値を用いて設定するのがよい。

(2) 振動数

振動数 f は、ケーブルを弦とみなして式 (3.4) によって計算すれば十分な精度で得られる。

$$f = \frac{n}{2L} \sqrt{T/m} \quad \dots\dots\dots (3.4)$$

ここで、

n : ケーブルの振動次数

m : ケーブルの単位長さあたりの質量 ($\text{kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}^2$)

T : ケーブル張力 (kgf)

ただし、張力、質量はそれぞれ設計段階に設定された値で十分である。

(3) 無次元質量

質量は、風による振動問題を扱う場合、無次元化するのが便利である。無次元質量 m_r は式(3.5)によって求める。

$$m_r = m / (\rho D^2) \quad \dots\dots\dots (3.5)$$

ここで、

ρ : 空気密度(0.125kgf・s²/m⁴)

m : 単位長さあたりのケーブル質量 (kgf・s²/m²)

(4) 構造減衰

構造減衰 δ は、以下のように設定する。

$$\delta = \begin{cases} 0.01 & (\text{無対策時}) \\ \delta_{add} & (\text{対策時}) \end{cases}$$

ここで、

δ_{add} : 対策によって付加される構造減衰

観測例を参照すると、無対策のケーブルの構造減衰はほとんどの場合0.01以下と考えられる。構造減衰がこの値より小さい範囲では、ウェークギャロッピングの発現性状は実際問題として有意な差は発生しない。そこで無対策ケーブルに関しては、質量・減衰パラメータを求める便宜上0.01とした。一方、対策を設置した場合、対策によって付加される構造減衰は、無対策時の構造減衰よりもかなり大きい。したがって本マニュアル(案)では、対策時には無対策時の構造減衰を見込まないこととした。

(5) 質量・減衰パラメータ

本マニュアル(案)では、質量・減衰パラメータ S_c を式(3.6)によって計算する。

$$S_c = m_r \delta \quad \dots\dots\dots (3.6)$$

質量・減衰パラメータは、一般的に無次元質量と構造減衰に比例する量であるが、厳密な定義は必ずしも統一されていない。本マニュアル(案)は、道路橋耐風設計便覧に従ったものである。

【参考文献】

- 1) 日本道路協会：道路橋耐風設計便覧，平成3年7月
- 2) 松本勝・白石成人・高橋昇・田辺肅郎・三澤彰・村上琢哉：確率統計的手法を用いた橋梁の耐風安全性評価，構造工学論文集，Vol.36A，1990年3月
- 3) 宮田利雄・柳原正浩：風向別風速分布特性に関する地形因子解析，第9回風工学シンポジウム論文集，1986年
- 4) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説，1981年

4 章 ウェークギャロッピングに対する検討

4.1 一般

ウェークギャロッピングに対する検討は、4.2によりウェークギャロッピングの発現予測を行い、発現すると予測された場合には、発現の風速範囲および振幅を考慮し、4.3によりその安全性および供用性を確かめることとする。

ウェークギャロッピングの発現が予測された場合に、制振対策を適用する場合の照査も、制振性能を考慮して上記と同様に行うことを基本とする。なお、風洞実験などで発現しないことが確認されている場合は、本マニュアル（案）の対象外とする。

本マニュアル（案）では、ウェークギャロッピングに対する検討として、安全性および供用性について確認するものとしたが、本共同研究では、ウェークギャロッピングの発生メカニズムとその制振対策を主眼に研究を実施し、ケーブル疲労などの安全性については、文献調査を行った程度である。したがって、安全性および供用性については、検討の必要性和検討例を示したのにとどまり、検討方法を示すまでには至っていない。ここでの検討方法は、現在までの研究成果のまとめとして方向性を示したものであり、今後の研究および振動事例に基づき、さらに検討が必要である。

4.2 ウェークギャロッピングの発現予測

4.2.1 ウェークギャロッピングの発現範囲

ウェークギャロッピングは、式（4.1）に示す風速およびケーブル間隔の範囲で生じるものと想定してよい。

$$\begin{aligned} \text{風速 } U : U_{cr} \leq U \leq U_{ur} \quad (\text{m/s}) \\ \text{ケーブル間隔 } H : 1.5D \leq H \leq 6.0D \quad (\text{m}) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (4.1)$$

ここで、 U_{cr} はウェークギャロッピングの発現開始風速であり、ケーブルの質量・減衰パラメータ S_c と式（4.2）の関係にある。

$$U_{cr} = 6.0 \log S_c - 5.8 \quad (\text{m/s}) \quad \dots\dots\dots (4.2)$$

ただし、発現開始風速の下限值は、ケーブル間隔に応じて表-4.2.1の値とする。

また、 U_{ur} はウェークギャロッピングの発現終了風速であり、ケーブル径を用いて式（4.3）の関係により求めるものとする。

$$U_{ur} = \frac{3.65 \times 10^5}{D} \quad \dots\dots\dots (4.3)$$

ここで、

D : ケーブル径 (m)

表-4.2.1 発現開始風速の下限值

ケーブル間隔H	発現開始風速 U_{cr} (m/s)
$1.5D \leq H \leq 3D$	$U_{cr} \geq 2.0$
$3D < H < 4D$	$U_{cr} \geq 0.5(H-3.0)+2.0$
$4D \leq H \leq 5D$	$U_{cr} \geq 2.5$
$5D < H \leq 6D$	$U_{cr} \geq 1.0(H-5.0)+2.5$

ウェークギャロッピングの発現開始風速は、実橋の振動事例^{1)・2)}（付図－1.1参照）および各風洞実験結果³⁾（付図－1.12～付図－1.16参照）ともに2～4m/s程度の風速範囲にあり、この発現開始風速と質量・減衰パラメータとの間には、減衰を変化させた風洞実験結果から関係があることが認められている⁴⁾（付図－1.11参照）。ここでは、安全側の評価としてこれら下限グループの平均的な値を用い、質量・減衰パラメータを用いて式（4.2）を設定した。

一方、発現終了風速については、レイノルズ数が $Re=2.5 \times 10^5$ 以上となる超臨界域ではウェークギャロッピングが発生しにくくなる特性が風洞実験で認められており^{3)・5)}、さらに、実橋においても $Re=2 \times 10^5$ 以上のレイノルズ数域で発現事例がないことから^{1)・2)}（付図－1.6参照）、式（4.4）のように定めた。

$$\begin{aligned} Re &= UD/\nu \leq 2.5 \times 10^5 \\ U_{cr} &= 2.5 \times 10^5 \nu / D \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (4.4)$$

ここで、

ν : 動粘性係数 ($\nu = 1.46 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$)

ケーブル間隔については、風洞実験において1.5D以下の間隔で振動が発現しないことが確かめられており、6Dより広いケーブル間隔では振動振幅が極めて小さくなる特性が認められている³⁾。また、実橋事例では示すように6D以上のケーブル間隔での振動事例がなく（付図－1.10参照）、風洞実験結果と対応した結果となっている。なお、タウトストリップ模型による風洞実験では、間隔が6Dより広い場合にも振動の発現が認められているが、 $Iu=0.08$ の乱流試験では発現せず³⁾、地表粗度区分Ⅰの場合でも100m以下の高度では $Iu=0.10$ 以上の乱れが期待できることから、6D以上のケーブル間隔ではウェークギャロッピングは発現しないものとした。

4.2.2 ウェークギャロッピングの最大振幅

ウェークギャロッピングの最大振幅は、風向、風速、ケーブル長、モード次数、ケーブル径およびケーブル間隔を用いて式（4.5）により推定することができる。

$$\frac{h}{D}(n) = a \cdot b \cdot \frac{L}{nD} \cdot (U - U_{cr})^{0.5} \quad \dots\dots\dots (4.5)$$

ただし、 $h/D(n) \leq 3$ とする。

ここで、

h : 最大振幅 (m)

n : モード次数

a : ケーブル間隔 H による係数であり、各ケーブル間隔で表－4.2.2に示す値とする。

b : 橋軸に対する風向角度 ($0^\circ \leq W_\theta \leq 90^\circ$) の係数であり、各風向角度に対して表－4.2.3の値とする。

L : ケーブル長 (m)

U : 風速 (m/s)

表-4.2.2 ケーブル間隔による係数a

ケーブル間隔	係数a ($\times 10^{-6} \text{ s}^{1/2}/\text{m}^{1/2}$)
$H \leq 2D$	7.00
$2D < H \leq 3D$	$0.88(H-2.0)+7.00$
$3D < H \leq 4D$	$-0.35(H-3.0)+7.88$
$4D < H \leq 5D$	$-1.40(H-4.0)+7.53$
$5D < H \leq 6D$	$-0.88(H-5.0)+6.13$

表-4.2.3 各風向角度に対する係数b

風向角度 W_D	係数b
$W_D < 60.0^\circ$	W_D
$W_D \geq 60.0^\circ$	60.0

ウェークギャロッピングの最大振幅 (h/D) と風特性およびケーブル特性との関係は、実橋の振動事例で見ると、ほとんどの事例が1次モードの振動として認められている(付図-1.1~付図-1.10参照)。2次および3次モードの事例も若干認められているが、その振幅は1次モードに比べて小さい。最大振幅は、風速、風向およびケーブル長との間に比例した関係が認められ、ケーブル間隔の関係では約3Dをピークとした関係が認められる²⁾。

また、各風洞実験での最大振幅は風速と指数関数の関係で認められ^{3), 7)}(付図-1.12~付図-1.16参照)、この各風洞実験結果を包絡した関係は、ケーブル間隔ごとに式(4.6)で与えられる。

$$\begin{aligned}
 H=2D \text{ の場合 } h/D &= 0.40 (U-2.0)^{0.5} \\
 H=3D \text{ の場合 } h/D &= 0.45 (U-2.0)^{0.5} \\
 H=4D \text{ の場合 } h/D &= 0.43 (U-2.5)^{0.5} \dots\dots\dots (4.6) \\
 H=5D \text{ の場合 } h/D &= 0.35 (U-2.5)^{0.5} \\
 H=6D \text{ の場合 } h/D &= 0.30 (U-3.5)^{0.5}
 \end{aligned}$$

なお、この包絡関係は、回帰式の超過確率20%以内かつ超過振幅0.3D以内の条件により設定したものである。

次に、上記の関係を適用して風速補正した振幅と風向の関係は、式(4.7)の関係が得られる(付図-1.17)。この関係は、水平偏角を変化させた場合の風洞実験結果とも整合している³⁾。

$$\begin{aligned}
 \left(\frac{h}{D}\right)^* &= 0.025 W_D \quad W_D \leq 60^\circ \\
 \left(\frac{h}{D}\right)^* &= 1.5 \quad W_D > 60^\circ \dots\dots\dots (4.7)
 \end{aligned}$$

ただし、 $\left(\frac{h}{D}\right)^* = \frac{h}{D} \cdot \frac{1}{C (U - U_{cr})^{0.5}}$

ここで、

$$\begin{aligned}
 H=2D \text{ の場合 } C &= 0.40 \quad U_{cr} = 2.0 \\
 H=3D \text{ の場合 } C &= 0.45 \quad U_{cr} = 2.0 \\
 H=4D \text{ の場合 } C &= 0.43 \quad U_{cr} = 2.5 \\
 H=5D \text{ の場合 } C &= 0.35 \quad U_{cr} = 2.5
 \end{aligned}$$

H=6Dの場合 C=0.30 $U_{cr}=3.5$

さらに、上記の関係を適用した風速風向補正振幅とケーブル径長比(L/D)の関係は、下に示すように、式(4.8)の関係として得られる(付図-1.18参照)。

$$\left(\frac{h}{D}\right)^{**} = 0.70 \times 10^{-3} \frac{L}{D} \dots\dots\dots (4.8)$$

ただし、 $\left(\frac{h}{D}\right)^{**} = \left(\frac{h}{D}\right)^* \cdot \frac{1}{0.025b}$

したがって、ここでは式(4.5)を設定し、係数aは式(4.7)、式(4.8)の係数をまとめてケーブル間隔に応じた表-4.2.2、係数bは風向角度に応じた表-4.2.3の値を用いるものとした。なお、モード次数との関係は、2次、3次の振動事例が少なく、必ずしも明確にはなっていないが、振幅が1次のものと比べて小さく、ケーブル間の相互連結による実橋での制振効果が認められていることから^{11,2)}、ケーブル長をモード次数で除した長さとして扱った。

なお、ウェークギャロッピングでは無次元風速が主要なパラメータとは認められないことから(付図-1.3参照)、ディメンジョンの整合しない関係となった。これについては、係数にディメンジョンを有するものとして式(4.5)を定義しており、今後の検討課題である。

4.3 ウェークギャロッピングに対する安全性および供用性の照査

4.2によりウェークギャロッピングの発現予測を行った結果、発現が予測された場合には、発現風速範囲、発現確率、最大振幅、疲労などについて検討を行い、安全性および供用性について確めるものとする。

4.1で述べたように、本共同研究はウェークギャロッピングの発生メカニズム、制振対策の開発などを主目的として実施されたものである。ケーブル疲労については、文献調査を実施した程度にとどまるが、現時点では、ケーブル疲労に関する報告は、極めて少なく、本マニュアル(案)では、ケーブル疲労に対する照査方法を示すまでには至らなかった。

また、供用性に対しては、橋梁の利用者に不安感を与えるケーブル振動の目撃率としての評価が考えられるが、このようなケーブルにおける大振幅の振動は、近年の斜張橋の大型化に伴って発生したものであり、検討された資料が少ないのが現状である。

なお、既設橋梁の多くは、架設時の振動状況により制振対策が実施されており、供用性が全く考慮されていない訳ではない。本マニュアル(案)としても、現実には発生しているウェークギャロッピングに対処するための、何らかの方向性を示すことは重要と考えられる。その意味で、本共同研究から得られた知見により、将来の参考に供することを目的として、安全性および供用性に関する試算例を付属資料に示すこととした。

【参考文献】

- 1) 国土開発技術センター：昭和63年度 斜張橋ケーブルの耐風性に関する検討報告書、1989年2月
- 2) 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年3月

3) 建設省土木研究所ほか：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1)，平成5年3月

同上 : 同上 (その2)，平成6年9月

同上 : 同上 (その3)，平成7年3月

- 4) 佐藤弘史・鳥海隆一・及川孝一・竹田哲夫・向弘晴・佐野演秀：ウェイクギャロッピングに対する減衰付加の制振効果，土木学会第48回年次学術講演会概要集，平成5年9月
- 5) 斉藤通・本田明弘・逸見雄人・藤本信宏：斜張橋並列ケーブルのウェイクギャロッピング振動について，土木学会第49回年次学術講演会概要集，平成6年9月
- 6) 日本道路協会：道路橋耐風設計便覧，平成3年7月
- 7) 久保善延・前田博：ウェイクギャロッピングの発生機構について，日本風工学会誌，No. 55pp. 147～148，平成5年5月

5 章 ウェークギャロッピングの制振対策の選定および設計

5.1 制振対策の選定の考え方

5.1.1 概 要

ここでは、「4.3 ウェークギャロッピングに対する安全性および供用性の照査」で制振対策が必要と判定された場合の制振対策の選定の考え方について示す。そこで、まず制振装置の種類と特徴について述べ、次に選定にあたっての留意事項を対策の選定のフローにしたがって示す。

5.1.2 制振装置の種類

ウェークギャロッピングの制振対策は、構造力学的制振装置と空力的制振装置に分類される。構造力学的制振装置は構造減衰あるいは質量、剛性を高めることによってウェークギャロッピングを抑えようとするものである。一方の空力的制振対策は、ウェークギャロッピングを起こす空気力そのものの発生を抑えるものである。構造力学的制振装置は、桁位置ダンパー、ケーブル相互連結、スパーサ、および減衰付加型スパーサに分類され、空力的対策は配置を工夫するものと、ケーブル被覆管（ケーブル保護管）の表面を加工するものとに分類される。それぞれの設計法あるいは効果は、5.2以降に示すが、ここではこれらの機能を比較しながら、その制振機構および性能を概説する。

(I) 構造力学的制振装置

1) 桁位置ダンパー

本ダンパーについては1.2に定義したが、さらに種類を細分化すると、オイルダンパー、粘性せん断型ダンパーおよび高減衰ゴムダンパーに分けられる。この形式のダンパーは設置位置が桁位置に限られるため、高次モードまでを制振対象とした場合、100mのケーブルでは付加構造減衰は高々0.05程度までとなる。この程度の減衰では必ずしもウェークギャロッピングの制振に十分とは言えないことが多い。したがって、桁位置ダンパーは補助的に減衰を付加する目的でウェークギャロッピング対策として利用するのが望ましく、対象ケーブル長は100m以下を目安とするのがよいと考えられる。

なお、桁位置ダンパーは温度依存性、振幅依存性、制御方向などが製品によって異なる。したがって、架設地点の気温変動幅、ダンパー取付け位置でのケーブルの振幅、設置スペースなどを考慮して選定する必要がある。

2) ケーブル相互連結手法

定義は1.2に示したが、質量付加、剛性付加および構造減衰の増加を目的としている。実験レベルでは、質量の増加と、副次的に増加した構造減衰が制振に有効であると考えられている。実用上の注意点として、減衰付加が事前に効果を評価し難く、所要の成果を得るまでに、ワイヤの増設を何度か試みなければならず、また増設に伴い景観も損なわれる点があげられる。

しかしながら、桁位置ダンパーや減衰付加型スパーサにより付加できる減衰には限度があり、高風速ではウェークギャロッピングの発現を抑えられない可能性がある。この場合においては、論理的根

拠を見いだせないにせよ、現状では相互連結手法は頼りうる最終的な手段となる。

3) 減衰付加型スペーサ

重量付加、剛性付加および減衰の増加によって制振するものである。製品そのものの粘性減衰係数は桁位置ダンパーのそれと大差ないが、上流側ケーブルの質量効果を期待できる点、および任意箇所に複数個設置できるため、高次モードまで安定した効果が発揮される点から、高い減衰付加を要するウェークギャロッピングにはより適している。これまで横浜ベイブリッジに設置された例があるが、今回ウェークギャロッピングを対象としていくつかの製品を開発したので、これらも適用可能である。

なお、従来は減衰を付加しないスペーサが制振対策の一種として考えられていたが、このスペーサの単独使用は、ウェークギャロッピングにはほとんど効果がないため、本マニュアル（案）ではケーブル相互連結手法において連結ワイヤを定着するための治具としてのみ扱う。

(2) 空力的対策

1) 被覆管表面の改良

この方式はレインバイブレーション対策として採用された例はあるが、ウェークギャロッピング用としてはまだ開発中であり、今後より詳細な風洞実験により効果を確認することが必要である。この手法の採用にあたっては、製作の問題や耐久性の検討などが必要となるが、本手法は定着部の構造に特別な工夫をしなくてもケーブル間隔によってはウェークギャロッピングを完全に抑えられる可能性があり、効果的な対策の一つになり得ると思われる。

1) ケーブル配置による対策

ケーブルの配置に工夫するものとしては、ケーブル間隔をクランプによって $1.5D$ 以下とするものおよび塔側と桁側の間でケーブル間隔を変えるものが提案されている。これらの効果は風洞実験で認められており、ケーブル間隔を $1.5D$ 以下にする方法については実橋で既に採用されている。しかし、活荷重の桁への载荷などにより大きな変動応力の生じる斜張橋ケーブルの一部を曲げることになるこれらの方法の採用にあたっては、詳細な安全性の照査が必要となる。

5.1.3 制振装置の選定

本マニュアル（案）における制振対策の選定の手順を図－5.1.1，制振対策の分類を表－5.1.1に示す。以下フローにしたがって選定手順を説明する。

まず、事前に対策を施すか、あるいは施工後様子を見て、振動が発生した場合に対策を施すかを選択する。既存の斜張橋におけるウェークギャロッピング発生事例および風洞実験により、ケーブル間隔が $1.5D \leq H \leq 6D$ のときにはウェークギャロッピングが発生する可能性は高いが、ケーブル間隔が $1.5D$ 程度以下もしくは $6D$ 程度以上のときには、動態観測によりウェークギャロッピングの発現状況をしばらく観察するのが合理的と言える。

事前対策の場合は、空力的対策を選択する余地がある。空力的対策にはケーブル配置の工夫によるものと、被覆管の改良によるものがある。前者は振動をほぼ完全に抑えることが可能であり、後者についてはケーブル間隔によっては振動を発生させない可能性があることが風洞実験から示されている。したがって、

ケーブル配置の工夫もしくは被覆管の開発が可能である場合には、いずれかを選択することが望ましい。これらが不可能な場合は、構造力学的対策を選択することとなる。

構造力学的対策は各種組み合わせで採用することができるが、それぞれの対策手法には表-5.1.1に示す長所、短所がある。従来の実績を重視し、最終的に制振に成功する見込みの大きい相互連結をまず選択する場合には、制振効果を事前に評価できないため、最初は最低限の相互連結からはじめ、次いで実橋のケーブル振動の発生状況に応じて連結ワイヤあるいは減衰付加型スペーサを増設していくのがよい。また、減衰付加型スペーサおよび桁位置ダンパーを選択する場合には、付加可能な構造減衰に限りがあるため、必ずしもこれらの対策のみで安全性、供用性を満足するとは限らない。この場合には連結ワイヤの設置が必要となる。ただし、効果確認のための風洞実験の結果については、慎重な取り扱いが必要である。

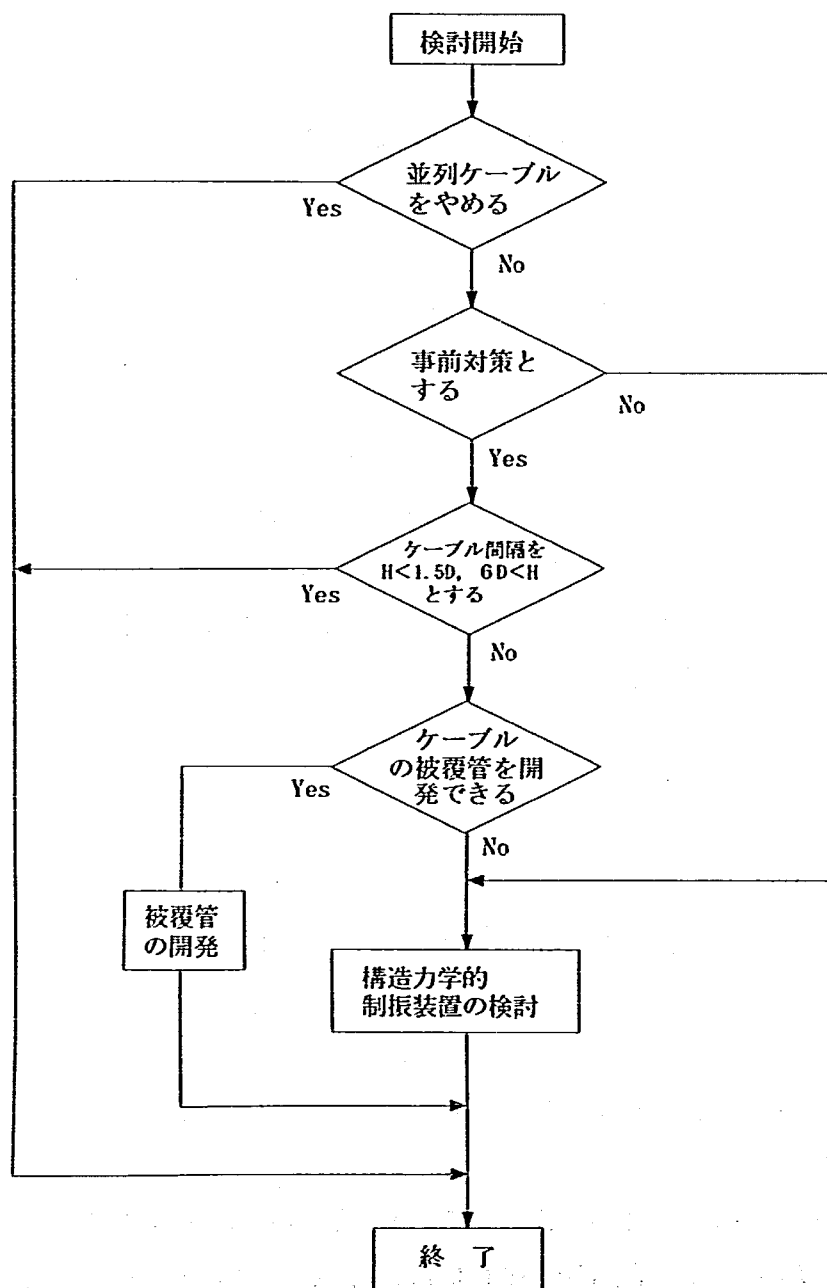


図-5.1.1 制振対策選択の手順

表-5.1.1 制振対策の分類

制振対策の分類		長 所	短 所
構 造 力 学 的 対 策	桁位置ダンパー	・実績が多い。 ・設置が比較的容易。	・付加可能な減衰が小さい。 (100mmのケーブルでは$\delta=0.05$程度) ・長いケーブルに対しては効果がほとんど期待できない。
	ケーブル相互連結	・実績が多い。 ・最終的な手段として用いることが可能。	・効果を事前に評価できないため、設置に試行錯誤を要す。 ・設置が比較的困難。 ・景観に与える影響が大きい。
	減衰付加型スペーサ	・景観に与える影響が小さい。 ・桁位置ダンパーよりも一般的に大きな減衰を付加できる。	・付加可能な減衰に限りがある。 ・実績が少ない。
空 力 的 対 策	被覆管表面の改良	・景観に与える影響が小さい。	・ウェークギャロッピング対策としては実績がない。
	ケーブル配置による対策	・振動をほぼ完全に抑えられる。 ・景観に与える影響が小さい。	・採用可能な場合が限られる。

5.2 桁位置ダンパー

5.2.1 一 般

桁位置ダンパーとは、風により振動する斜張ケーブルの制振方法として従来から実施されている、オイルダンパーや粘性せん断型ダンパーおよび高減衰ゴムダンパーなどを、ケーブルと桁を連結する形で取り付け、ケーブルに減衰を付加する制振装置のことである。図-5.2.1にダンパーの概念図を示す。

この制振装置の特徴としては、

- ① 特定のケーブルに対し必要な減衰を付加することができる

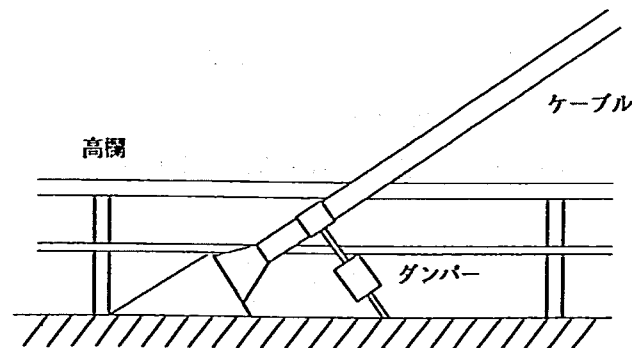


図-5.2.1 ダンパーの概念図

② ほかのケーブルとの影響を切り離して設計できる

③ 維持管理が容易である

などの長所があげられるが、その一方で、

④ 構造上付加できる構造減衰は一般に最大0.1程度（対数減衰率）であることから、ウェークギャロッピングを抑えることができない可能性がある

⑤ 装置の減衰が過大であると、設置位置が新たな節となる振動（サブスパン振動）が生じる

⑥ 美観上設置位置に限界があり、必要な制振効果が得られない場合がある

といった問題点もある。

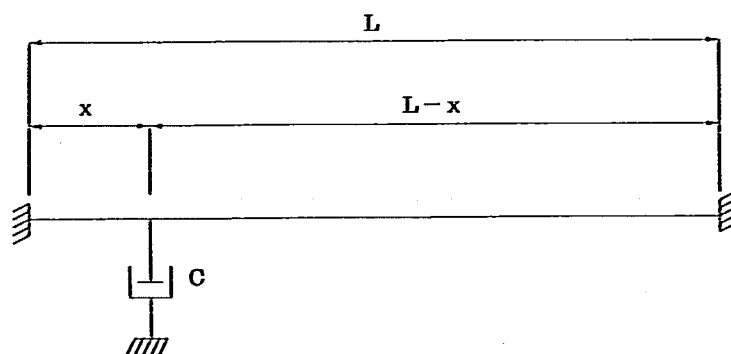
ケーブルにダンパーを設置した場合の減衰付加特性は、複素固有値解析を実施すれば計算できる。また、ケーブルにダンパーを設置した場合の減衰付加効果を比較的簡単に推定できる、簡易推定法もいくつか提案されている。

実施例としては、荒津大橋（オイルダンパー）、幸魂大橋（粘性せん断型ダンパー）、小田原ブルーウェイブリッジ（高減衰ゴムダンパー）などがある。

5.2.2 桁位置ダンパーの設計法

(1) 解析モデルおよび設計の手順

桁位置ダンパーの解析モデルを図－5.2.2示す。桁位置ダンパーにはいくつかの方式があるが、本質的な原理は同一であり、粘性係数 c の上限や温度特性の性能などに違いが見られるに過ぎない。



図－5.2.2 解析モデル

桁位置ダンパーの設計は以下の手順で行うのが一般的である。

① モードごとに所要の減衰付加量を決定する。

② すべてのモードで所要の付加減衰が得られるように、ダンパー位置 x および粘性係数 c を決定する。

③ 粘性係数 c が得られるようにダンパーを設計する。

(2) 最適な定数の決定

ケーブルに桁位置ダンパーを設置した場合における、減衰付加効果の簡易推定法を以下に示す。

桁端よりダンパー取付位置までの距離を x 、ケーブル長を L とすると、バネ剛性のないダンパーを設置した場合の n 次モードに対する最適粘性減衰係数 $C_{opt}(n)$ は、式(5.1)により推定できる^{1)・2)}。

$$C_{opt}(n) = \frac{6.25W \cdot L \cdot f_n}{g \cdot (x/L) \cdot \sin^2(n\pi x/L)} \quad \dots\dots\dots (5.1)$$

ここで、

$$f_n = \frac{n}{2L} \left(\frac{g \cdot T}{W} \right)^{1/2}$$

これに対し、ダンパーが伸び剛性を持っている場合の最適粘性減衰係数 $C^k_{opt}(n)$ は、

$$C^k_{opt}(n) = C_{opt}(n)(1 + 0.962P_{TK}) \quad \dots\dots\dots (5.2)$$

ここで、

$$P_{TK} = x(L-x)k / (T \cdot L)$$

この最適粘性減衰係数、 $C^k_{opt}(n)$ に対する最大構造減衰付加量 $\delta^k_{max}(n)$ は、

$$\delta^k_{max}(n) = R_{max} \cdot \delta_{max}(1) \quad \dots\dots\dots (5.3)$$

ただし、

$$R_{max} = \begin{cases} 1.0 & (0 \leq P_{TK} \leq 0.01) \\ -0.085 \log P_{TK} + 0.830 & (0.01 < P_{TK} \leq 0.15) \\ -0.510 \log P_{TK} + 0.480 & (0.15 < P_{TK} \leq 5.00) \\ -0.145 \log P_{TK} + 0.225 & (5.00 < P_{TK} \leq 10.0) \end{cases}$$

$$\delta_{max}(1) = (x/L)[3.125 + 6.25(x/L)]$$

以上より、任意の減衰係数に対する構造対数減衰率は、式(5.4)により得られる。

$C_n \leq 1.2$ のとき

$$\delta / \delta^k_{max}(n) = 0.116(C_n^3 - 1.245C_n^2 + 2.129C_n) \quad \dots\dots\dots (5.4)$$

$C_n \geq 1.2$ のとき

$$\delta / \delta^k_{max}(n) = -0.004C_n^3 + 0.075C_n^2 - 0.505C_n + 1.468$$

ただし、

$$C_n = c / C^k_{opt}(n)$$

以上より、 k をある一定値に仮定すると、モードごとに粘性減衰係数 c と付加減衰の関係曲線を作成でき、これによって複数のモードにおいて効果的に作用するダンパーを設計できる。

5.2.3 粘性せん断型ダンパー

(1) 構造と特徴

粘性せん断型ダンパーは、粘性体のせん断抵抗を利用したダンパーである。このダンパーの特徴は、

- ① 1つのダンパーで、2方向の振動に対処することができる
- ② 粘性体量の調整により、所用の減衰係数が得られる
- ③ 微小振動に対しても、ケーブルに付加減衰を与えることができる
- ④ 粘性体が温度の影響を受けやすく、減衰力特性とばね剛性とは変化する
- ⑤ 振動モードによって最適減衰係数が異なる

などがあげられる。図-5.2.3に粘性せん断型ダンパーの概念図を示す。

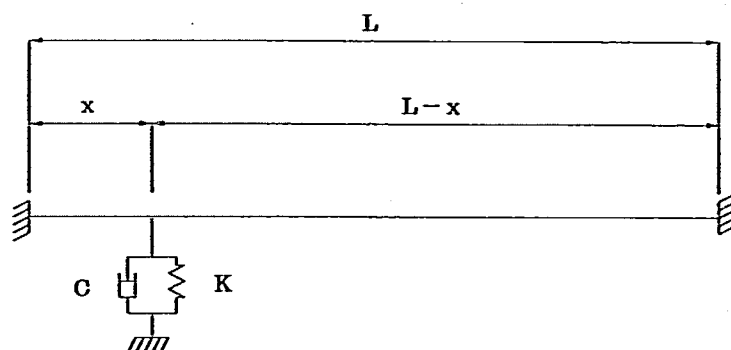


図-5.2.3 粘性せん断型ダンパーの概念図

(2) 設 計

粘性せん断型ダンパーにより付加される構造減衰は、ダンパーのバネ定数が粘性減衰係数の大きさとともに変化するため、次の手順によるのが一般的である。

- ① 適切な設計基準振幅 a を仮定する。
- ② 等価粘性減衰係数として $C_e = 1 \sim 30 \text{ tf/m/s}$ を想定し、等価バネ定数を計算する。
- ③ それぞれの粘性減衰係数とバネ定数の組合せに対し、ケーブルに付加される構造減衰を計算する。

粘性せん断型ダンパーの等価粘性減衰係数および等価バネ定数は、式(5.5)により与えられる¹⁾。

$$C_e = 0.85 e^{-0.0431 \cdot S} \cdot S \cdot a^{0.34} \cdot d^{-0.5} \cdot a^{-0.5} \cdot \omega^{-0.5} \quad \dots\dots\dots (5.5)$$

$$k_e = 0.54 d^{-0.5} \cdot a^{-0.19} \cdot \omega^{0.95} \cdot C_e$$

ここで、

C_e : 等価粘性減衰係数 (kgf・s/cm)

k_e : 等価バネ定数 (kgf/cm)

t : 粘性体温度 (°C)

d : 粘性体の厚さ (cm)

S : 粘性せん断を期待する断面積 (cm²)

a : 振幅 (cm)

ω : 固有円振動数 (rad/s)

このC、およびk、を用い、5.2.2に示した方法によって粘性せん断型ダンパーの設計ができる。

(3) 実施例

粘性せん断型ダンパーによる制振対策事例として、幸魂橋における事例を紹介する³⁾。

1) 橋梁諸元

橋 種 : 2 径間連続鋼斜張橋

橋 長 , 支 間 : 381.5m (190m+190m)

幅 員 : 27.5m

塔 高 : 80.0m

ケーブル配置形式 : ファン型1面吊り

2) ケーブル諸元 (最上段ケーブル)

ケーブル種別 : Hi Am アンカーケーブル

断面構成 : 397 ϕ 7

長 さ : 199.0m

径 : ϕ 175mm

3) 制振対策

本橋では、事前の検討により、10m/sec程度未満の風の作用で、ウェークギャロッピングやレインパイクレーションが発現する可能性が高いことが予想されたため、実橋における試験など粘性せん断型ダンパーの検討が行われた。

また、施工時には、第3ケーブル (下から3段目) が架設された段階から、ウェークギャロ

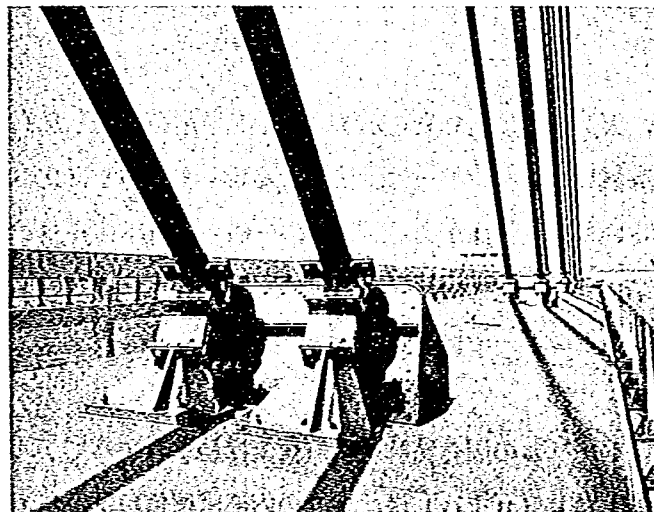
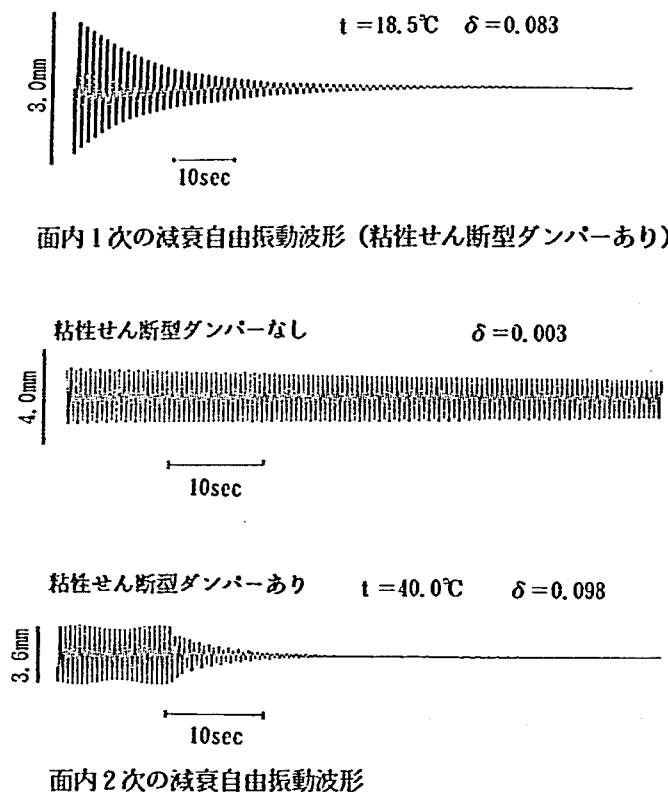


写真-5.2.1 粘性せん断型ダンパー型制振装置

ッピングと想定されるケーブル振動が、しばしば観測されたことから、全ケーブルに対して粘性せん断型ダンパーが設置されることとなった。

4) 制振効果

実橋におけるケーブルの試験結果の一例として、粘性せん断型ダンパー設置後における面内1次の減衰自由振動波形、および粘性せん断型ダンパー設置前後における面内2次の減衰自由振動波形などを、図-5.2.4に示す。



ケーブルの構造対数減衰率

面内振動、ダンパーなし

振動次数	構造対数減衰率
1	—
2	0.003
3	0.003

面内振動、ダンパーあり

振動次数	温度(°C)	構造対数減衰率
1	—	—
	18.5	0.083
	—	—
2	-0.2	0.036
	18.5	0.064
	40.0	0.098
3	0.5	0.041
	18.5	0.064
	39.8	0.091

図-5.2.4 粘性せん断型ダンパーの制振効果

5.2.4 高減衰ゴムダンパー

(1) 構造と特徴

高減衰ゴムダンパーは、天然ゴムに高減衰を示すゴムや充填剤を添加した高減衰ゴムをダンパーとして利用したものである。高減衰ゴムダンパーは、粘性せん断型ダンパーに比べ、減衰付加特性は小さいものの、温度依存性が小さいという特徴がある。また、一般に装置本体をコンパクトにできるため美観上問題とならない。

図-5.2.5に、高減衰ゴムダンパーの概念図を示す。

(2) 設計

高減衰ゴムを用いた斜張ケーブルの固有値解析は、複素ばねを有するモデルとして行う。図-5.2.5に示すモデルで、複素ばね定数 $k(u + iv)$ は、ゴムの内部摩擦係数 γ が与えられれば式(5.6)で求めることができる。

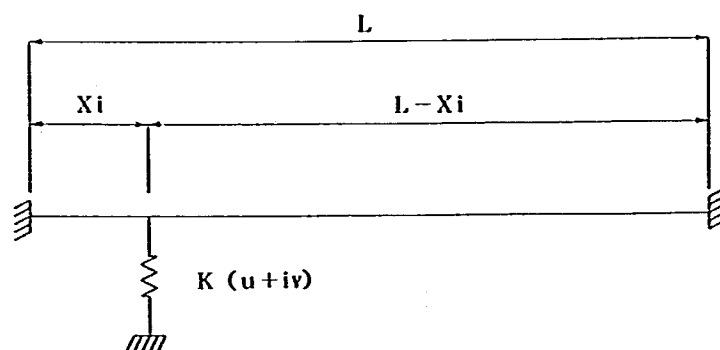


図-5.2.5 高減衰ゴムダンパーの概念図

$$u = \frac{4 - \gamma^2}{4 + \gamma^2}, \quad v = \frac{4\gamma}{4 + \gamma^2} \quad \dots\dots\dots (5.6)$$

弾性バネ定数 k は,

$$k = GA/t$$

により算出できる。ただし、 G はせん断弾性係数、 A は面積、 t はゴム厚である。

また、図-5.2.5における系の対数減衰率 δ は、近似的に式(5.7)で求められる。

$$\delta = \frac{2\pi \{\phi(x)\}^2}{2M\omega_n} \cdot \frac{k \cdot v}{\omega_n} e^{-0.72\alpha (k \cdot v / \omega_n) (2/\gamma)} \quad \dots\dots\dots (5.7)$$

ただし,

$$\alpha = \frac{\omega_n x (L - x)}{TL}$$

ここで,

T : ケーブル張力

L : ケーブル長

x : ダンパーの取付け位置までの距離

M : ケーブルの換算質量 ($= 1/2 \times \mu L$) μ : 単位重量/9.8

ω_n : n 次の円振動数 ($= n\pi \sqrt{(T/\mu)} / L$)

$\phi(x)$: 制振装置位置のモード関数 ($= \sin(n\pi x / L)$)

上式を k で微分して 0 と置くことにより、最適弾性ばね定数 k_{opt} と最大対数減衰率が決まる。

$$K_{opt} = \frac{1}{0.72\alpha} \cdot \frac{\omega_n \gamma}{2V} \quad \dots\dots\dots (5.8)$$

$$\delta_{max} = \frac{\{\phi(x)\}^2}{n^2 \pi \frac{x}{L} (1 - \frac{x}{L})} \cdot \frac{\gamma}{2} \quad \dots\dots\dots (5.9)$$

(3) 実施例

高減衰ゴムダンパーによる制振対策事例として、小田原ブルーウェイブリッジにおける事例を紹介する。

1) 橋梁諸元

橋 種：3径間連続エクストラドーズドPC橋

橋 長， 支 間：270.0m (73.3m+122.3m+73.3m)

幅 員：13m~19.92m

塔 高：10.7m

ケーブル配置形式：ファン型2面吊り

2) ケーブル諸元（最上段ケーブル）

ケーブル種別：ディビダーク外ケーブルシステム（SNPR7A相当）

断面構成：19φ15.2

長 さ：48.0m

径：φ125mm

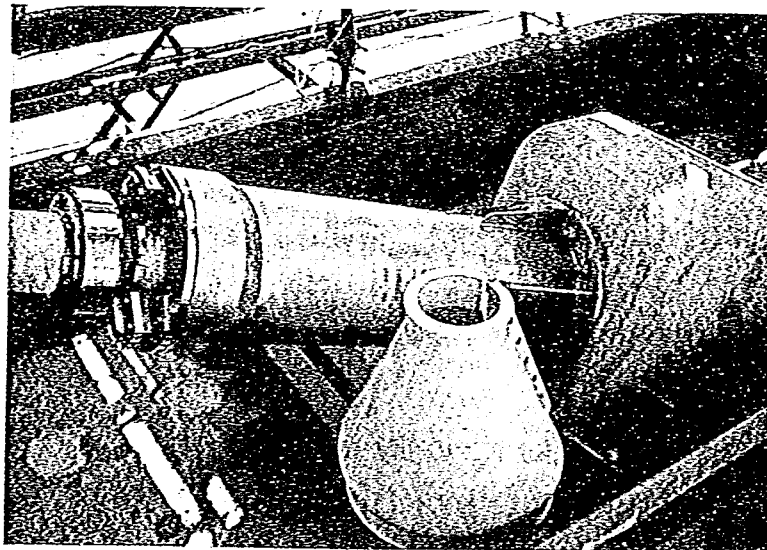


写真-5.2.2 高減衰ゴムダンパー型制振装置

3) 制振対策

本橋では、ケーブルの許容値として $0.6P_u$ を用いているため、通常の斜張橋に比べて、ケーブル張力が大きくなり、その疲労強度が小さくなるので、ケーブルの振動に対して、十分注意する必要があった。そのため、レインバイブレーション対策として高減衰ゴムダンパーが設けられた。

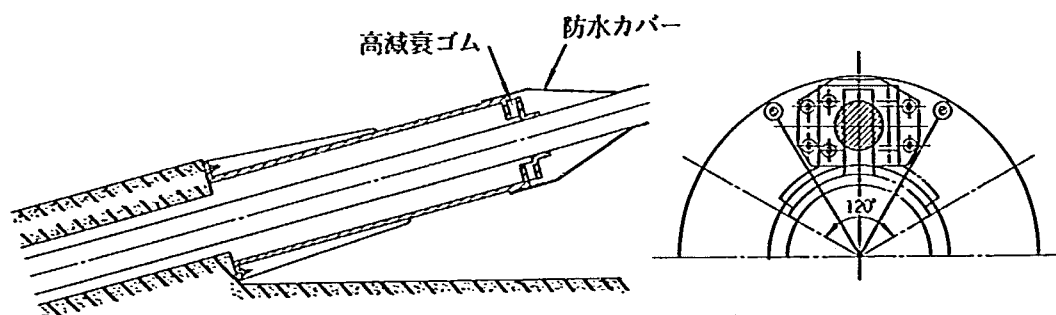


図-5.2.6 高減衰ゴムダンパー型制振装置

4) 制振効果

本橋では、ダンパーの性能確認実験が実施された。その結果、ケーブルの構造減衰は、ダンパーを取り付けていない時に対数減衰率で $\delta=0.004$ 、ダンパーを取り付けた時に $\delta=0.07$ となった。この値は、推定式で得られた値とほぼ等しいものであり、推定式の妥当性が確かめられた⁵⁾。

5.3 スペーサおよびワイヤによるケーブル相互連結

5.3.1 一般

スペーサおよびワイヤによりケーブル相互を連結する制振対策は、並列ケーブル間に設置されたスペーサにワイヤを定着して行う。この制振手法は、ワイヤによる減衰付加、振動数の上昇効果、およびケーブル同士を連結

したことによる質量効果に期待する方法である。この制振方式は、制振効果の推定を現状では経験に頼らざるを得ない、景観上好ましくない、ワイヤおよびその定着治具の主に疲労による破断が生じやすいことなどの問題点があるが、ほとんどの橋梁に適用可能であり、現時点でウェークギャロッピングの制振対策として最も実績のある対策である。そこで、本マニュアル（案）ではこの手法を採用するにあたり、ケーブル相互連結手法の方向性を示し、本研究で開発された減衰付加型ダンパーとの併用方法について示す。

なお、減衰付加機能のないスペーサについては、樫石島橋および岩黒島橋の架設段階の一時期に制振対策として単独使用されたことがあるが、スペーサ型制振装置のみでは、ケーブル振動を抑えることが困難と判断されたため、追加制振対策としてケーブル同士をワイヤで連結する方法が実施された。したがって、本マニュアル（案）では従来型スペーサ単独ではなく、ケーブル相互連結を併用した対策を扱う。

相互連結のウェークギャロッピングへの適用例としては、樫石島橋、岩黒島橋、呼子大橋、志摩丸山橋

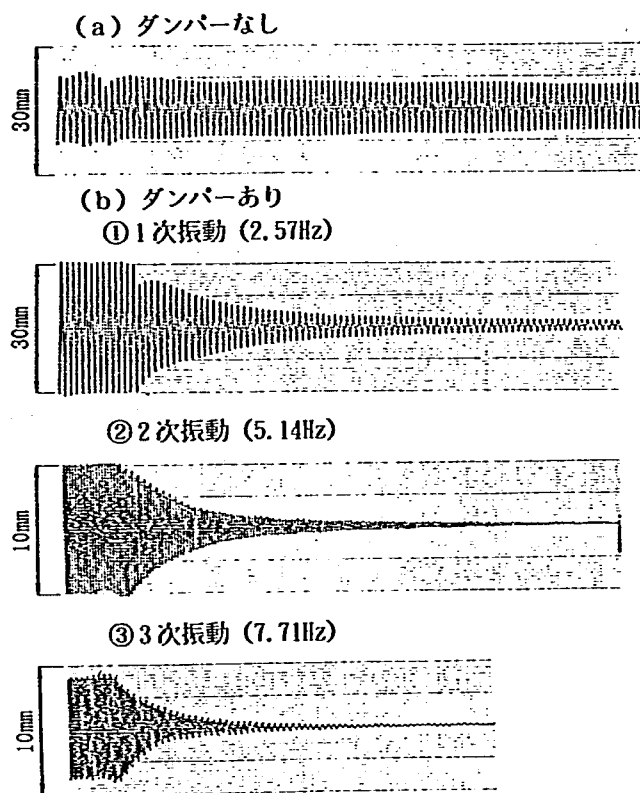


図-5.2.7 高減衰ゴムダンパーの制振効果

などで、主に振動事例発生後の制振対策として用いられている。図-5.3.1に櫃石島橋および岩黒島橋における相互連結の事例を示す。

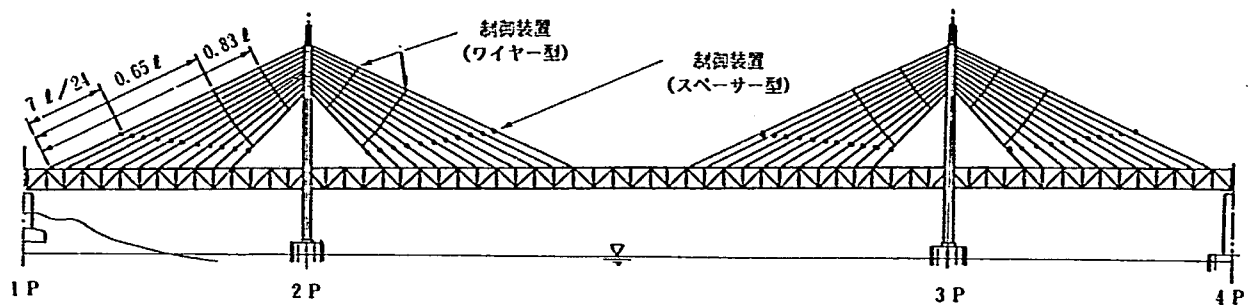


図-5.3.1 櫃石島・岩黒島橋における制振装置⁶⁾

5.3.2 斜張橋ケーブルの相互連結の制振効果

(1) ケーブルの相互連結による制振効果の要因

ケーブルの相互連結はスパーサが併用される場合も含めると、顕著に発生するウェークギャロッピングに対して最も実績の多い制振手法と言える。しかしながら、その制振効果の推定が難しく、設置後の状況に応じて連結ケーブルを増すなどの措置も時には必要となり、その対策の果たす役割の重要性に関わらず、不明確な要素が多い。

ケーブルの連結によって制振効果が発揮される原因と考えられるものを以下に示す。

- ① 剛性が増加する。
- ② 一般化質量が大きくなる。
- ③ 構造減衰が付加される。
- ④ 加振力の作用しないケーブルから空力減衰が付与される。

ここでは、以上のような要因の制振効果に対する寄与について、現時点で得られている知見^{7)・8)・9)}に基づいて考察する。

(2) 各要因の効果について

1) 剛性の増加

剛性の増加は振動数に反映される。振動数および固有振動モード形状については、ケーブルを弦として取り扱い、通常の固有振動解析を実施すれば実用上十分な推定が成しうる⁷⁾。しかし、風洞実験によると振動数の増加は振幅の低減に直結するとは言いがたい。

2) 一般化質量

固有振動モード形状が十分な精度で推定できるため、一般化加質量もこれに伴って十分な精度で推定できる。しかし風洞実験結果^{1)・9)}によると、相互連結後もすべての下流側ケーブルは振動を起こす。したがって、制振に寄与する一般化質量の増分としては加振力を受けない上流側のケーブルの寄与のみを考慮すれば単独ケーブルの2倍程度にはなると考えられる。

ただし、実際の現象においては風向やほかの構造物の影響により、振動しないケーブルが存在することもあり得る。

3) 構造減衰

構造減衰については、実橋で得られている構造減衰と理論的解析の間にギャップがある一方、材料、定着構造が十分に管理された模型実験ではある程度説明がなされている。既存の研究^{71)・72)}によると、連結によって構造減衰の大幅な向上が期待できるのは、連結ワイヤが堅すぎない場合であり、ワイヤの伸縮あるいは連結ケーブル定着部における何らかのエネルギー損失が期待できる場合である。ワイヤが剛であったり、伸縮に伴うエネルギー消費が期待できない場合は、ケーブルの特性が反映されたとわずかな減衰の増減が認められるのみである。

4) 空力減衰の付与

空力減衰の付与に関しては一般化質量と同様である。すなわち、ウェークギャロッピングはケーブル間隔および風向の条件が揃っていれば、安定して発生するため全下流側ケーブルが加振力を得ると考えるのが妥当である。

以上のように、相互連結の効果は設計段階で期待できる効果よりも、むしろ不確定な要因によるところが大きい。ため、厳密な設計法を明らかにすることは困難である。したがって、本手法を選択するにあたっては、実ケーブルの挙動を観測しながら、段階的に制振対策を行っていく方法を提案する。

5.3.3 ワイヤ型制振装置の設計法

ケーブルの相互連結の設計にあたっては、連結ワイヤの配置、連結ワイヤに導入する張力、連結ワイヤの径を適当に決定しなければならない。以下にその決定の考え方を述べる。

(1) ワイヤの配置

ワイヤ型制振装置を設置する場合の留意事項は以下の通りである。

1) ワイヤ間隔は、大きすぎるとサブスパン振動が新たに発生する可能性が高まる一方、小さすぎると景観に及ぼす影響が大きい。したがって、50m程度以上より対策を開始し、効果が不十分な場合には新たな対策として減衰付加型スペーサーやワイヤを追加する。

2) ケーブルの連結位置は、考慮するモードの腹を拘束するように、ケーブル同士を連結する。また、連結位置でウェークギャロッピングによる逆位相の振動に対抗するように図-5.3.2に示すようにケーブル同士をたすき掛けに連結する。

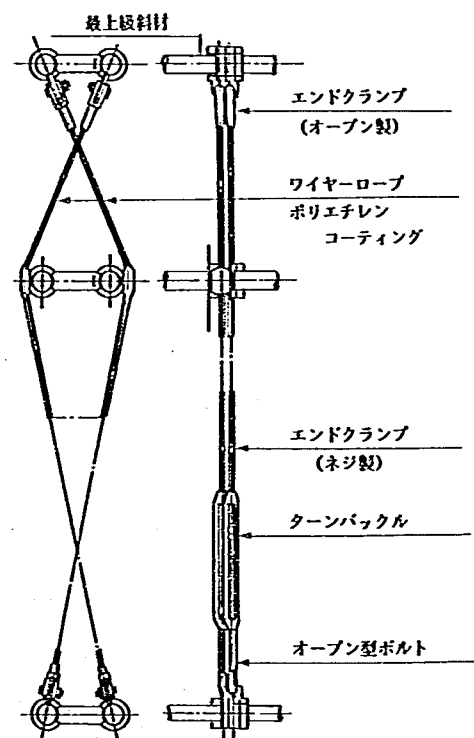


図-5.3.2 ケーブルの連結例¹⁰⁾

- 3) 隣接するケーブル同士が共振しないように、制振装置取付け後のサブスパン長はそれぞれ2 m程度の差を付ける。
- 4) 制振ワイヤは、各ケーブルに対してなるべく直交するようにする。
- 5) ケーブルの設置位置は高い位置の方がケーブルと直交させやすく、ずれ難いため構造的には望ましい反面、設置および修復は高所の作業となり作業性に劣る。したがって、設置位置については供用後の維持管理の方法も勘案して決定すべきである。

(2) 連結ワイヤに導入する張力

連結ワイヤに導入する初期張力は、微少な振動に対し張力抜けを起こさない程度とする。ケーブル径が200mm前後の太径ケーブルの実績では1 tf～2 tf程度である。

(3) 連結ワイヤの径

連結ワイヤの効果は、5.3.2に示したように不確定な要因からなる部分が大きいため、その効果を推定することは難しいが、安全側の最大振幅推定式として式(4.5)を用いることができる。考慮しうるケーブル連結の効果として、見かけのケーブル長の減少(サブスパン長をケーブル長とみなす)と、上流側とのケーブル連結による一般化質量の増加がある(5.3.1参照)。

連結ワイヤは、設計基準風速における最大振幅発生時に連結ワイヤが破断しない断面積とすることを基本とする。ただし、実橋におけるワイヤの破断は、連結ワイヤの破断事例の状況からみて、1次的な引張応力よりもケーブルとの連結部における2次的な応力が主要な原因であると推察されるため、張力が引張強度に対し2.5程度の安全率を有するように、ワイヤ径を決定するのがよい。

連結ワイヤに発生する張力の評価は、図-5.3.3に示されるモデルを用い、ケーブルに強制振動を与えることにより推定できる。

本モデルは、ワイヤが固定端となっているため、ワイヤに生じる張力は、複数本のケーブルに連結させたモデルより安全側に評価される。ただし、ウェークギャロッピングはケーブル連結後も複数本のケーブルにおいてサブスパン振動が発生した事例もあり、この場合には片側を固定させた場合と同等の張力が発生しうするため、本モデルを用いるものとした。

連結ワイヤに発生する張力の詳細な推定には固有値解析が必要となる。しかしながら、ワイヤに導入する張力が上記(2)に示される程度でかつ、最大サブスパン長に対するそれ以外のサブスパン長の比率が70%程度以下であれば、サブスパン振動を弦の振動問題と考えることにより、1次の固有角振動数は式(5.10)のように求めることができる。

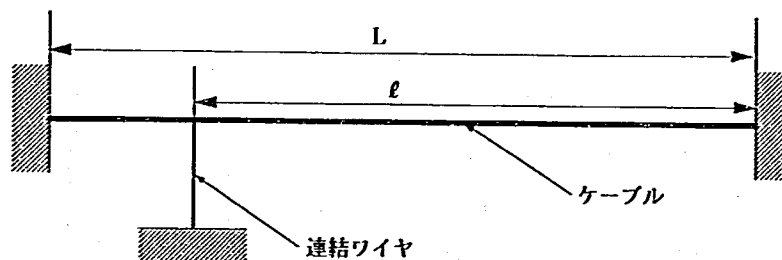


図-5.3.3 解析モデル

$$\omega = \frac{\pi}{\ell} \sqrt{\frac{T}{m}} \quad \dots\dots\dots (5.10)$$

また、連結ワイヤに発生する張力は、式(5.11)のように求められる。

$$\begin{aligned} N &= \frac{m h \omega^2 \ell}{\pi} \\ &= \frac{\pi h T}{\ell} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (5.11)$$

ここで、

- N : 連結ワイヤに発生する張力 (kgf)
- h : 最大振幅 (m)
- T : ケーブル張力 (kgf)
- ℓ : 最大サブスパン長 (m)

これより、式(5.12)より所要断面積 A_r を求めることができる。

$$A_r = \frac{N}{s \cdot \sigma_s} \quad \dots\dots\dots (5.12)$$

ここで、

- s : 安全率
- σ_s : ワイヤの引張破断強度 (kgf/mm²)
- A_r : 所要断面積 (mm²)

5.4 新しい構造力学的制振装置

5.4.1 一般

ここで取り扱う新しい構造力学的制振装置は、並列ケーブルのスペーサに、高減衰ゴムダンパーや粘性ダンパーなどを装着することにより、ケーブルに減衰を付加する減衰付加型スペーサとする。減衰付加型スペーサには、図-5.4.1に示したケーブルのケーブル軸に垂直な変位と回転変位をスペーサ部分のせん断変形に置き換えて減衰を付加するタイプのスペーサ（以下、せん断ダンパー型スペーサと呼ぶ）、および図-5.4.2に示したスペーサ部分の回転方向の相対変位に置き換えて減衰を付加するタイプのスペーサ（以下、回転ダンパー型スペーサと呼ぶ）などがある。

減衰付加型スペーサの特徴としては、

- ① 特定の段のケーブルに減衰を付加することができる
- ② ほかの段のケーブルとの影響を切り離して設計することができる

などがあげられる。

並列ケーブルに、減衰付加型スペーサを設置した場合の減衰付加特性は、複素固有値解析を実施すれば

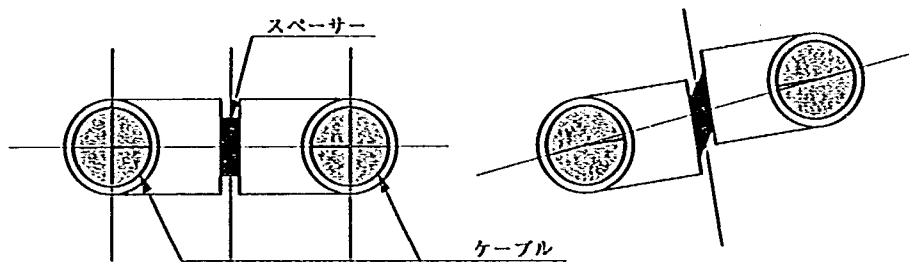


図-5.4.1 せん断ダンパー型スペーサ

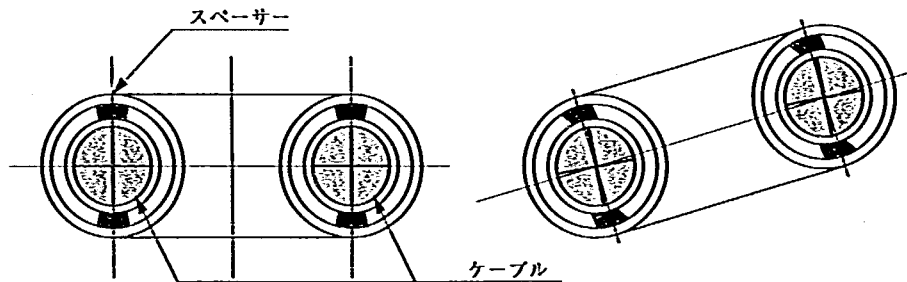


図-5.4.2 回転ダンパー型スペーサ

計算できるが、本マニュアル（案）では並列ケーブルにこのスペーサを設置した場合の、減衰付加効果を簡単に推定できる簡易式を示している。

5.4.2 減衰付加型スペーサの原理

減衰付加型スペーサの概念図を、図-5.4.3に示す。

減衰付加型スペーサの原理は、それぞれのケーブルを、ケーブルの曲げ剛性を無視して1自由度の質点とした2自由度モデルとみなすと理解しやすい。

図-5.4.4は、各ケーブルを1質点とし、各質点をケーブル曲げ剛性相当のバネで支持し、その間をバネと粘性減衰でモデル化したダンパー型スペーサで連結した2質点系モデルである。弦の振動をエネルギー原理から見ると、ケーブルの長さを L 、張力を N 、単位長さあたりの質量を ρA とすれば、振動エネルギー E は運動エネルギー U とポテンシャルエネルギー T の和として式(5.13)で表される。式(5.13)は一般的な形であり、これを1次モードについてだけ考えれば式(5.14)が得られる。さらに、式(5.15)

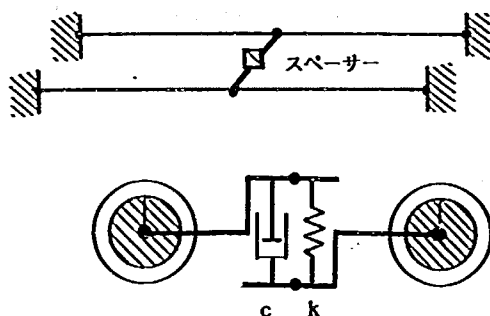


図-5.4.3 減衰付加型スペーサの概念図

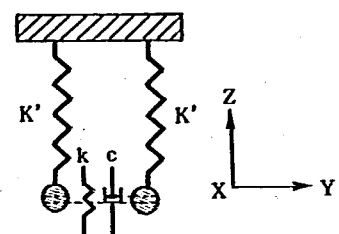


図-5.4.4 2自由度系モデル

より質点の質量 M' およびバネ定数 K' が与えられる。

$$E = P + U = \frac{\rho A}{2} \int_0^L \dot{W}(x, t)^2 dx + \frac{N^L}{2} \int_0^L \left(\frac{\delta w^2}{\delta x} \right) dx \quad \dots\dots\dots (5.13)$$

$$= \frac{\rho A L}{4} \dot{w}(x=L/2, t)^2 + \frac{N \pi^2}{4} w(x=L/2, t)^2 \quad \dots\dots\dots (5.14)$$

$$= \frac{M'}{2} \dot{\Delta}(t)^2 + \frac{K'}{2} \Delta(t)^2 \quad \dots\dots\dots (5.15)$$

式 (5.14) または式 (5.15) より求めた振動エネルギーを式 (5.16) で回帰すれば、 α は初期エネルギーであり、 β は f を固有振動数とすれば、対数減衰率 δ と式 (5.17) の関係を持つ。

$$E(t) = \alpha e^{-\beta t} \quad \dots\dots\dots (5.16)$$

$$\delta = \frac{\beta}{2 f} \quad \dots\dots\dots (5.17)$$

これにより、直接時間積分あるいは複素固有値解析を行うと、系全体の対数減衰率を求めることができる。図-5.4.5に減衰付加型スパーサを取り付けた並列ケーブルの波形を示す。

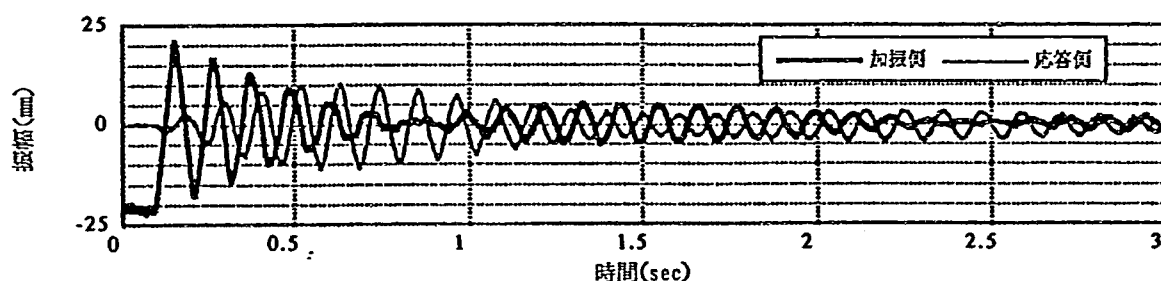


図-5.4.5 時刻歴波形

5.4.3 減衰付加型スパーサの設計法

(1) 設計手順

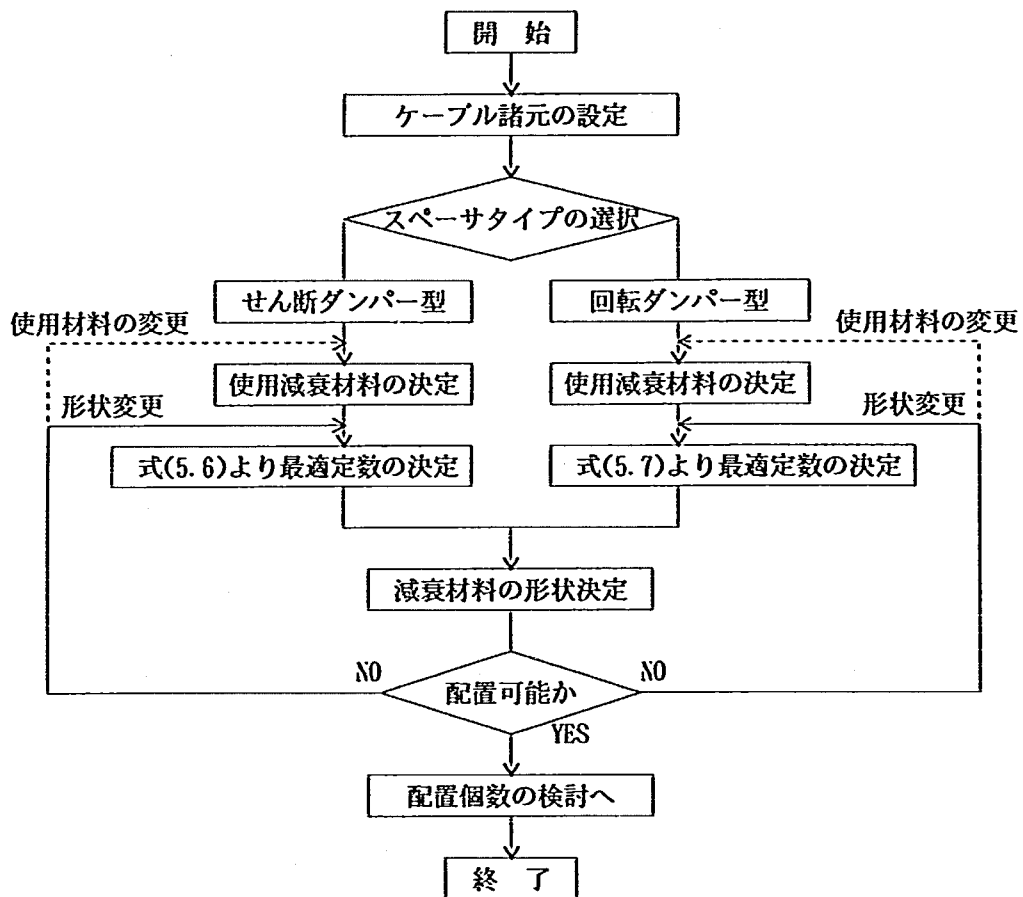
減衰付加型スパーサの設計は、次の手順にしたがって行うことができる。

並列ケーブルに減衰付加型スパーサを設置した場合、その効果は、スパーサのバネ定数、粘性減衰係数、スパーサの配置個数、配置位置およびケーブルのねじり剛性などの要素に影響を受ける。特に、ケーブルのねじり剛性の影響が大きく、これを解析に反映させるためには、3次元の解析モデルが必要となる。しかし、実際の設計において3次元モデルによる複素固有値解析により最適なスパーサの粘性減衰係数およびバネ定数を算出するには、煩雑な作業が必要となる。そこで、ここでは実用的な簡易法を示すこととする。

ただし、ここでは減衰付加型スパーサが機能する逆位相の振動モードについてのみ取り扱う。

(2) 最適定数の決定法

1) ケーブル諸元の確認

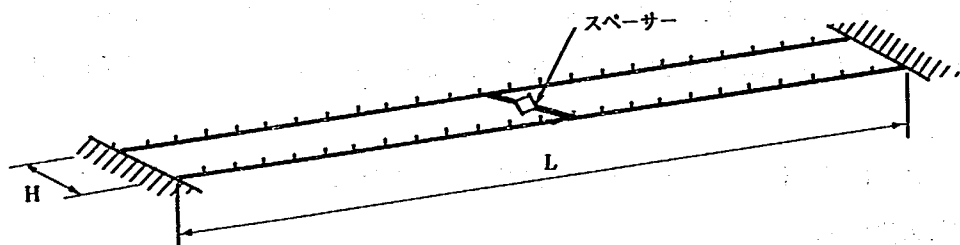


図－5.4.6 減衰付加型スぺーサの設計の手順

図－5.4.7に示した解析モデルにおいて、設計に必要なケーブル諸元は、次のとおりである。

- L : ケーブルの長さ(m)
- D : ケーブルの外径(m)
- H : ケーブルの間隔 (m)
- m : ケーブルの単位長さあたりの質量 (t/m)
- m_{ip} : ケーブルの単位長さあたりの質量慣性モーメント ($t \cdot m^2/m$)
- T : ケーブルの張力 (tf)
- GJ : ケーブルのねじり剛性 ($tf \cdot m^2$)

2本のケーブルを連結する減衰付加型スぺーサの場合、付加される構造減衰はケーブルのねじり剛



図－5.4.7 解析モデル

性に影響をうける。ケーブルのねじり剛性は、被覆管と多数のケーブル素線から構成されているケーブルの特性上、理論的に求めることが困難であることに加えて、グラウトタイプあるいはノングラウトタイプなどといったケーブルの種類によっても異なるため、試験などを行って求めることが基本である。

2) スペーサタイプの選択

製作するスペーサタイプの選択は、ケーブル間隔、ケーブル（またはケーブル被覆管）外径、美観上の配慮などを考慮して行う必要がある。スペーサタイプは、図-5.4.8に示したせん断ダンパー型、回転ダンパー型以外にも考えられるが、本マニュアルではこの2つのタイプを取り扱うものとする。

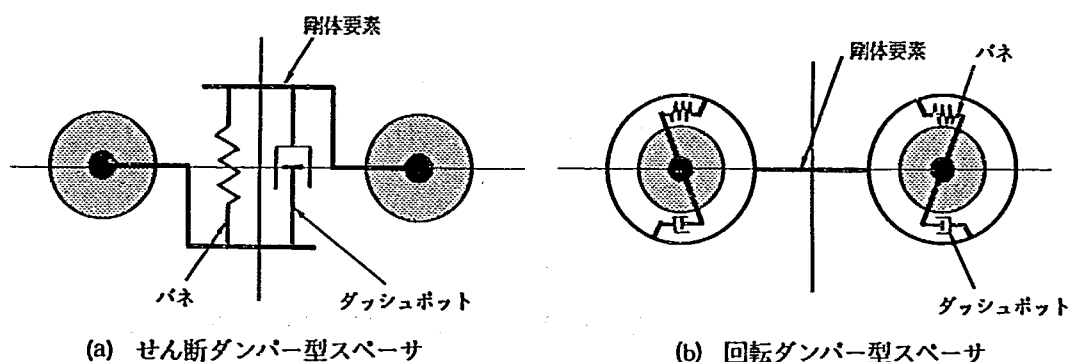


図-5.4.8 スペーサタイプ

3) 減衰材料の最適定数の決定

減衰材料は、桁端ダンパーと同様に粘性体や高減衰ゴムなどが一般的である。本マニュアルでは、設計を容易にするため、スペーサの解析モデルをバネとダッシュポットに置き換えて最適定数を算出し、使用する減衰材料の設計可能な形状範囲で任意に設定できる手法を示す。

図-5.4.7に示した解析モデルの場合、減衰付加型スペーサ（せん断ダンパー型スペーサ）によりケーブルに付加される対数減衰率は、式(5.18)で表すことができる。

$$\delta = \frac{2\pi(k_c/M)^{1/2}kt^2 \cdot c}{4(k_c+kt) \cdot k^2 + 2(2k_c+kt)kt \cdot k + 4(k_c+kt)k_c/M \cdot c^2 + k_c \cdot kt^2} \dots\dots (5.18)$$

ただし、

$$kt = k\theta - k_c \cdot M\theta/M$$

ここに、

k : スペーサのバネ定数 (tf・m/rad)

c : スペーサの粘性減衰係数 (tf・m・s/rad)

δ : ケーブルに付加される対数減衰率

k_c : ケーブルの剛性を考慮したバネ定数 $k_c = \pi^2 T / (2L)$ (tf/m)

$k\theta$: ケーブルのねじり剛性を考慮したバネ定数 $k\theta = 16GJ / (H^2 L)$ (tf/m)

M : ケーブル質量 $M=1/2 \cdot m_L$ (t)

$M\theta$: ケーブルの質量慣性モーメントを考慮した質量 $M\theta=4M_{I\theta}/H^2$ (t)

$M_{I\theta}$: ケーブル質量慣性モーメント $M_{I\theta}=3/8 \cdot m_{I\theta} \cdot L$ (tf/m²)

したがって、回転ダンパー型スーサは、式 (5.7) によりスーサの減衰係数およびバネ定数を変換することができる。

$$cs=cr/2H^2 \quad ks=kr/2H^2 \quad \dots\dots\dots (5.19)$$

ここで、

cs : セン断型スーサの粘性減衰係数 (tf・s/m)

cr : 回転型スーサの粘性減衰係数 (tf・m・s/rad)

ks : セン断型スーサのバネ定数 (tf/m)

kr : 回転型スーサのバネ定数 (tf・m/rad)

したがって、回転ダンパー型スーサによりケーブルに付加される対数減衰率は、式 (5.20) で表すことができる。

$$\delta = \frac{4 \pi H^2 (kc/M)^{1/2} kt^2 \cdot c}{4(kc+kt) \cdot k^2 + 4H^2(2kc+kt)kt \cdot k + 4(kc+kt)kc/M \cdot c^2 + 4H^4 \cdot kc \cdot kt^2} \quad \dots (5.20)$$

ここで、粘性減衰係数およびバネ定数を変換すれば、回転ダンパー型は、セン断ダンパー型に置き換えることができる。したがって、どちらのタイプを選択しても付加できる対数減衰率は同じである。回転ダンパー型は、ケーブル間隔の大小に関係なく設計が可能であるという特長を持っているが、美観上はケーブル間に配置するセン断ダンパー型の方が目立たないとも言える。

式 (5.18) および式 (5.20) は、2質点モデルとして導いたものである(付属資料4.2)。質量・減衰パラメータの算出に用いる対数減衰率は、3次元複素固有値解析で得られる対数減衰率より簡易式から求められる対数減衰率の方が5%程度大きめの値を与えることから、簡易式で算出した値に0.95を乗じて用いる方が望ましい。

本マニュアルでは、ウェークギャロッピングによる振動に着目しているため、逆位相の振動モードを対象とし、減衰付加型スーサにより付加される対数減衰率は、逆位相の振動モード時のものである。同位相の振動モードについては、減衰をまったく付加することはできないのでほかの制振装置との組合せが必要である。

(3) 配置個数の検討

1) 検討手順

配置個数の決定は、次の手順にしたがって行う。

2) 質量・減衰パラメータの算出

質量・減衰パラメータの算出は、「3.2 ケーブルの特性値」に示した式 (3.6) を用いる。付加される構造減衰は、(1)で算出した対数減衰率に0.95を乗じた値を用いる。この値は、対象ケーブルの中央に1個配置した場合の付加構造減衰であるが、複数個配置した場合にもこの値を用いることがで

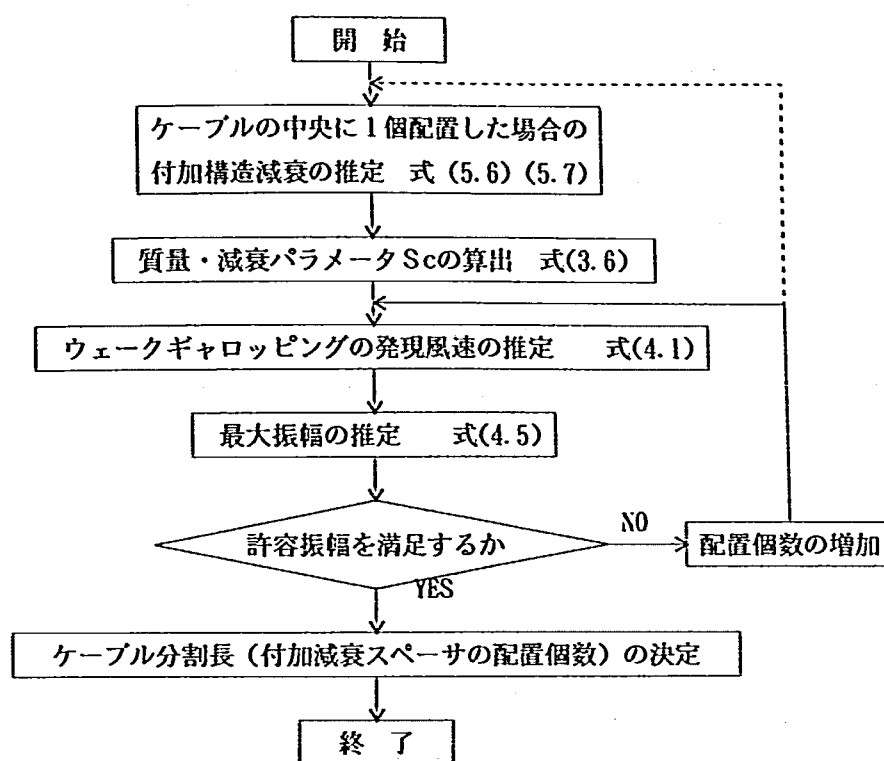


図-5.4.10 配置個数の検討手順

きる。これは、逆位相モードの一次振動に最も効果的となるように、ケーブル中央に1個を配置した場合の付加構造減衰に対して、複数個配置した場合の付加構造減衰がほとんど変わらないからである（付属資料4.1）。

ただし、桁端ダンパーで減衰を付加した場合の構造減衰は、式（5.21）にしたがってよい。

$$\delta = \delta_{\text{spacer}} + \delta_{\text{damper}} \quad \dots\dots\dots (5.21)$$

ここで、

δ_{spacer} : 減衰付加型スペーサによる構造減衰

δ_{damper} : 桁端ダンパーによる構造減衰

3) 最大振幅の推定

減衰付加型スペーサを複数個配置しても、構造減衰の増加にはそれほど効果がないため、配置個数の決定は、許容振幅の照査による。すなわち、「4章 ウェークギャロッピングに対する検討」に示した式（4.5）より、減衰付加型スペーサを配置した場合の最大振幅を推定し、許容振幅を満足しているか照査する。許容振幅を満足していなければ、満足するまでスペーサによるケーブルの分割数を増加し、改めて照査を行う。

各振動モードに対しては、次の手順で最大振幅を推定する。

① 減衰付加型スペーサが、振動の腹の位置にあるモードの場合

推定される付加構造減衰から質量・減衰パラメータを算出し、最大振幅を低減する。

② 減衰付加型スペーサが、振動の節の位置にあるモードの場合

付加構造減衰を0として式(4.5)のnを(配置個数+1)として最大振幅を低減する。

4) 複数個配置した場合の最適定数

複数個配置した場合の減衰付加型スペーサの最適定数は、式(5.18)および(5.19)で算出される対象ケーブルの中央に1個配置した場合の最適定数と同一としてよい。

ウェークギャロッピングによるケーブルの振動は、1次モードから高次モードまで予想され、それぞれのモードごとに最適定数は変化する。複素固有値解析によってモードごとの減衰定数を算出することは可能であるが、実際に発生するモードを特定することが難しいこと、式(5.18)および(5.19)で算出した結果と大差ないと考えられることから、煩雑な解析を避け、上記の方法で決定してよいこととした。

5.4.4 高減衰ゴムせん断ダンパー型スペーサ

(1) 構造と特徴

高減衰ゴムせん断ダンパー型スペーサは、2本の並列ケーブルの間に高減衰ゴムを用いたせん断型スペーサを配置し、ケーブルの回転変位をせん断変形に置き換えて減衰を付加させるものである。

特徴を以下に示す。

- ① 2本のケーブルの間に配置するため、ケーブルの径や間隔に関係なく設計できる。
- ② 高減衰ゴムを用いることによりコンパクトに設計できるため、美観を損なわない。

(2) 設 計

設計手法は、5.4.3に示したとおり、まず高減衰ゴムのバネ定数と粘性減衰係数を設定する。このスペーサの場合、高減衰ゴムの仕様により、ゴムのせん断弾性係数Gおよび内部摩擦係数 γ が決定される。

$$k = \frac{GA}{t_g} \quad c = \frac{1}{\omega} \times \frac{4\gamma}{4 + \gamma^2} \times k \quad \dots\dots\dots (5.22)$$

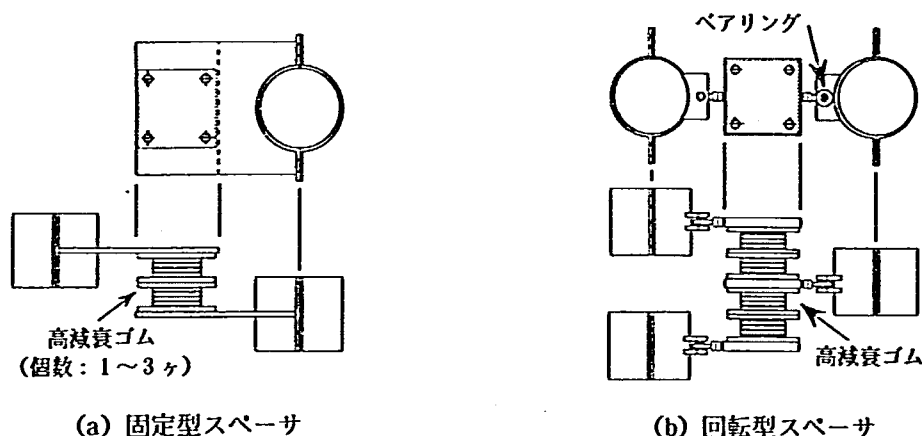


図-5.4.11 高減衰ゴムせん断ダンパー型スペーサ (その1)

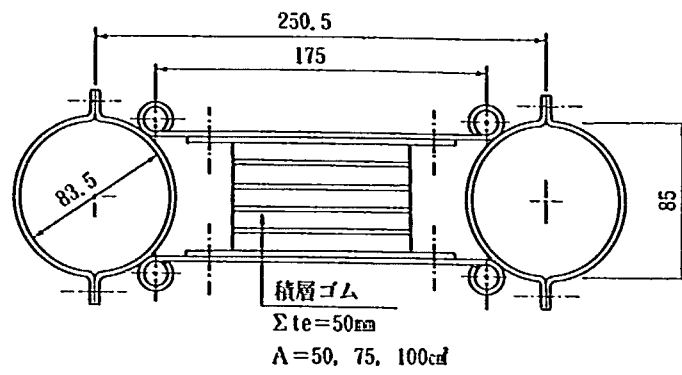


図-5.4.12 高減衰ゴムせん断ダンパー型スペーサ (その2)

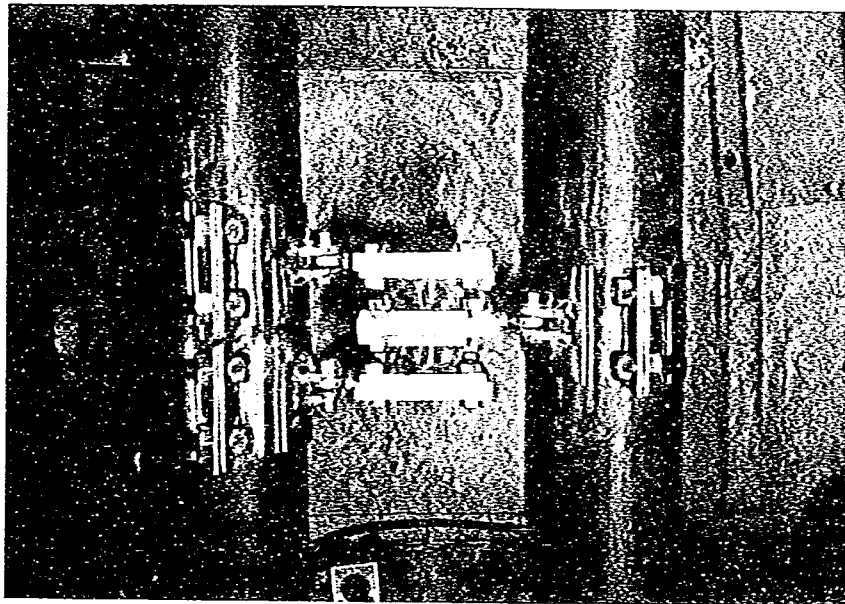


写真-5.4.1 高減衰ゴムせん断ダンパー型スペーサ (その1)

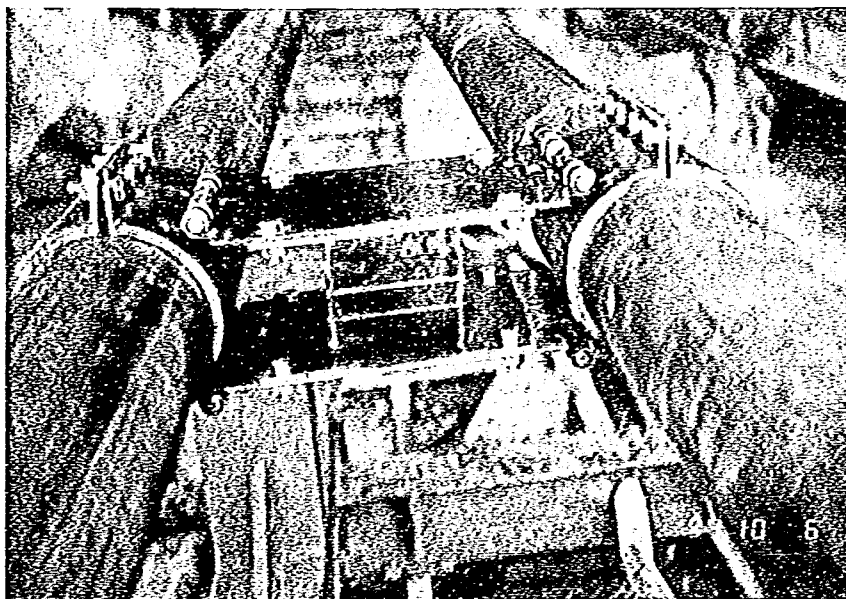


写真-5.4.2 高減衰ゴムせん断ダンパー型スペーサ (その2)

ここで、

G : 高減衰ゴムのせん断弾性係数

t_0 : 高減衰ゴムの厚さ

A : 高減衰ゴムの受圧面積

γ : 高減衰ゴムの内部摩擦係数

ω : 固有円振動数

上式を5.4.3で示した式(5.6)に適用すれば、最大対数減衰率を得るバネ定数 k と最適粘性減衰係数 c が推定され、これによりゴム厚と面積を決定できる。一般的に、バネ定数 k が、小さいほど減衰効果は高くなる。これを考慮してゴム厚 t_0 を決定すれば、高減衰ゴムの受圧面積を算出することができる。

5.4.5 高減衰ゴム回転ダンパー型スパーサ

(1) 構造と特徴

スパーサのケーブル軸回りの回転を解放するとスパーサによるケーブル振動の拘束効果はなくなり、回転を拘束すると並列ケーブルの逆位相モード(ねじれモード)の振動数が高くなる。ねじれ振動数が高くなることは、ねじれ剛性が高くなったことを意味するが、これによりケーブル軸回りの固定部に大きなせん断力が作用することになる。これより、図-5.4.13に示すように、ケーブルとスパーサ取付部の間に高減衰ゴムを挟む構造とすることにより、ねじれ振動に対して構造減衰の増加を図ることができる。

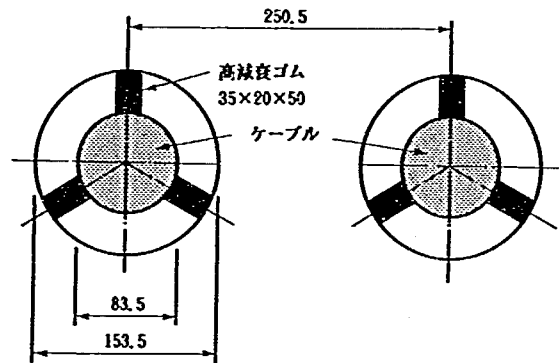


図-5.4.13 高減衰ゴム回転ダンパー型スパーサ

特徴はつぎのようである。

- ① 高減衰ゴムせん断ダンパー型に比べ、回転型の方が分割して円周上に配置できるため、設計の自由度が高い。
- ② ケーブル間隔が狭い場合でも適用できる。

(2) 設計

設計の基本は、5.4.4の高減衰ゴムを用いたせん断型ダンパーと同様である。まず、5.4.3で示した回転ダンパー型スパーサの簡易式を用いて、最大対数減衰率を得るバネ定数 k と最適粘性減衰係数 c からゴム厚と面積を決定する。次に、ケーブル円周上に配置する分割数を決定して1個あたりのゴム面積を算出すればよい。

5.4.6 摩擦回転ダンパー型スパーサ

(1) 構造と特徴

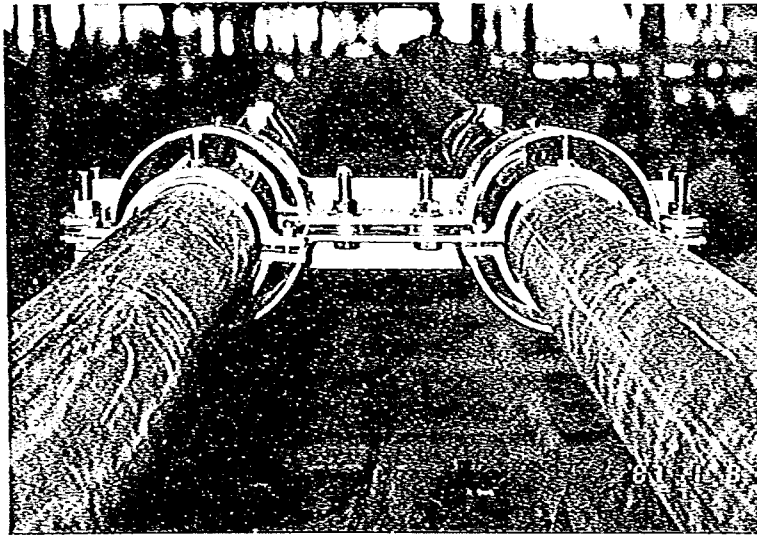


写真-5.4.3 高減衰ゴム回転ダンパー型スペーサ

摩擦回転ダンパー型スペーサは、個体摩擦のエネルギー散逸による減衰を利用するダンパー型スペーサである。図-5.4.14に本スペーサの概要を示す。この装置は、ケーブル表面に取り付けた摩擦材料とケーブルケース間のすべりを許容し、上下流ケーブルの鉛直相対変位を、摩擦材料とケーブルケース間の回転変位に変換して摩擦減衰を得るものである。

特徴は以下のようなものである。

- ① 調整ねじの締め付け力を変えることで、減衰をコントロールすることができる。
- ② 構造がシンプルである。

(2) 設 計

本スペーサも基本的には回転ダンパー型スペーサと原理は同じである。したがって5.4.3で示した回転ダンパー型スペーサの簡易式により、バネ定数 $k=0$ の場合で最適粘性減衰係数 c を算出する。しかし、本スペーサは摩擦のエネルギー散逸による減衰を利用しているため粘性体のように粘性減衰係数 c を明確に設定することはできない。したがって、本装置の力の釣り合いや抵抗力を調整して減衰係数を

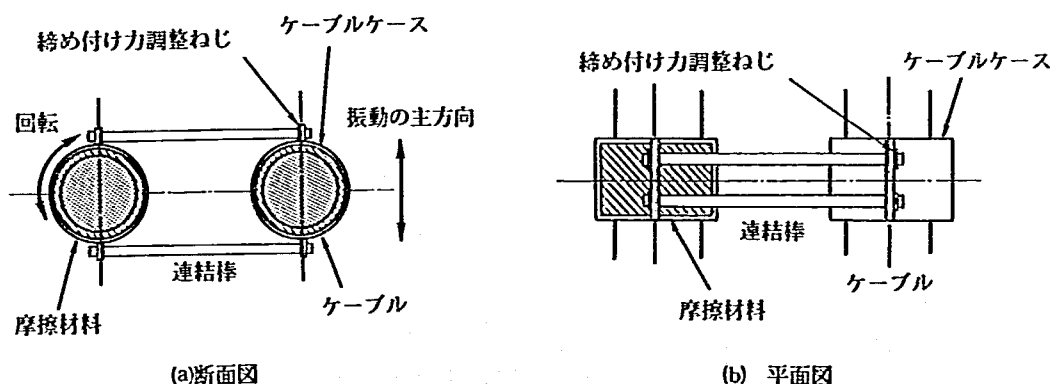
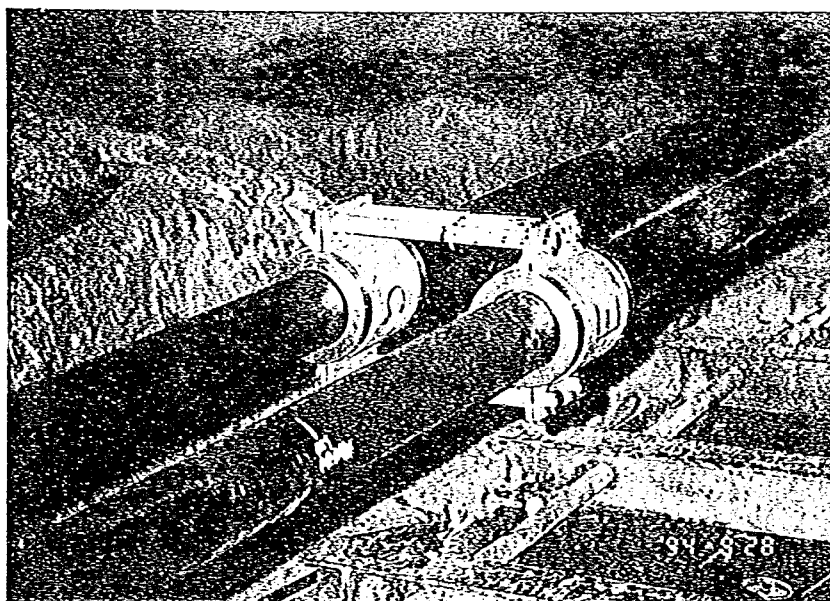


図-5.4.14 摩擦回転ダンパー型スペーサ



写真－5.4.4 摩擦回転ダンパー型スペーサ

コントロールする。また、減衰係数は、履歴減衰であることから等価減衰定数で評価され、振幅に依存する。

① 装置の等価減衰

ケーブルを1自由度にモデル化した場合、摩擦減衰を持つ1自由度系の強制振動方程式は、

$$\ddot{m}y \pm F + k y = P_0 \cos \omega_n t \quad \dots\dots\dots (5.23)$$

ここで、 F ：減衰力（摩擦力）， ω_n ：角振動数， Δ ：装置の振幅

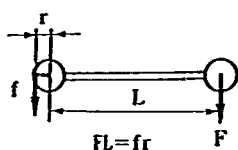
このとき、等価減衰定数 C_e は

$$C_e = \frac{4 F}{\pi \omega_n \Delta} \quad \dots\dots\dots (5.24)$$

で表される。

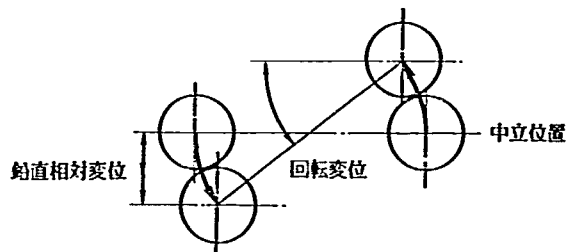
② 装置の力の釣り合い

スペーサの減衰装置の抵抗力 f と減衰力 F には、以下のような関係がある。



H ：ケーブル間隔 r ：ケーブル半径
 F ：ケーブルに作用する力
 f ：減衰装置によって得られる抵抗力

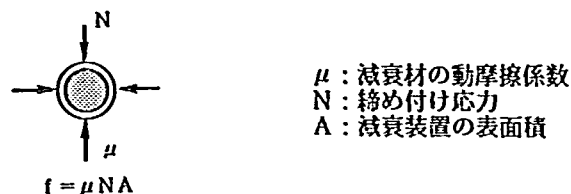
図－5.4.16 装置の力の釣り合い



図－5.4.15 変位の変換メカニズム

③ 装置の抵抗力

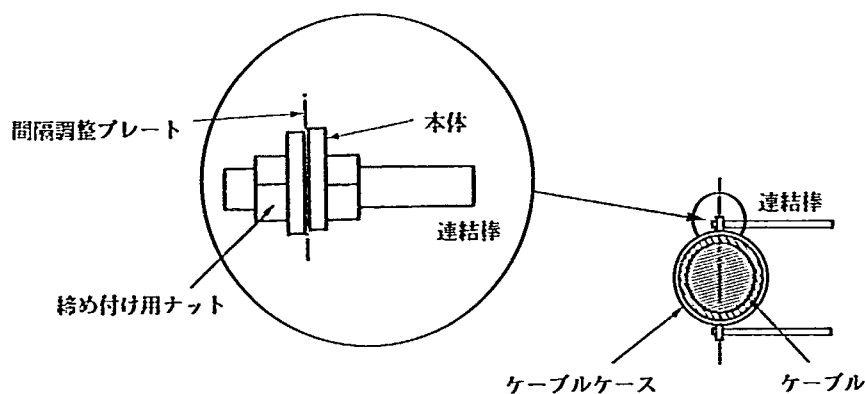
装置の減衰装置の抵抗力は、以下のモデルで算定する。



図－5.4.17 減衰装置の抵抗力

④ 減衰性能の調整

減衰装置の摩擦力は、摩擦面の締め付け力で調整を行う。摩擦面の締め付け力は、図－5.4.18に示したような間隔調整プレートでケーブルケースの外径を変化させて調整する。



図－5.4.18 締め付け力調整用間隔プレート

5.5 空力的制振対策

5.5.1 一般

空力的制振対策は、ウェークギャロッピングを起こす空気力の発生を抑えるものであり、ケーブル被覆管表面を改良するものと、ケーブルの配置によるものとがある。被覆管表面の改良による対策は、ケーブルの表面に突起などを設けることにより、後流幅を小さくする効果を持つ。実験においては、ケーブル間隔を広げるのと同じ様な効果が見られることから⁹⁾、ケーブル間隔によってはウェークギャロッピングを完全に抑えることが期待される。被覆管表面の改良は、レインバイブレーション対策としては、平行突起ケーブルが東神戸大橋に、Uストライプ方式が弓削大橋に採用された例があるが、ウェークギャロッピング対策としては現在実用化はされていない。ケーブル配置による対策については、ケーブルをクランプによって束ね、ケーブル間隔を1.5D以下にする対策が実橋において適用されている。

5.5.2 被覆管表面の改良

(1) 風洞実験に対する留意点

被覆管表面の改良の効果を検証するためには風洞実験が必要不可欠である。しかしながら、ウェークギャロッピングは従来から良く知られている空力現象にはない特徴を持つため、風洞実験の実施にあたっては、桁や主塔などの一般的な風洞実験とは異なった観点からの配慮が必要である。ウェークギャロッピングの風洞実験法としては確立されたものはないが現時点で得られている知見から、留意すべき点を以下に述べる。

- ① ウェークギャロッピングはかなり広い風速域で不安定なリミットサイクルが現れる場合がある。したがって、風洞実験の際には十分高風速まで確認する必要がある。
- ② また、そのために少なくとも2D程度までの振幅において振動性状を確認する必要がある。
- ③ ウェークギャロッピングの実験においては、レイノルズ数の影響を無視し得ない。特に、被覆管表面の改良の効果を検証する場合には表面粗度の影響が問題となるため、できるだけレイノルズ数を相似させる方向で実験を行うことが望ましい。
- ④ そのためには、実橋のケーブル径に近い模型を用いることが考えられるが、その場合ケーブルの質量を相似させること、および2D程度の振幅まで計測することが難しくなる。
- ⑤ 原因については不明ではあるが、ウェークギャロッピングは無次元風速に依存しない現象である可能性がある⁹⁾との報告もなされている。
- ⑥ 被覆管表面の改良の効果は、ケーブル配置、ケーブル径、質量・減衰パラメータ、振動数などをパラメータとした実験結果から、慎重に判断する必要がある。

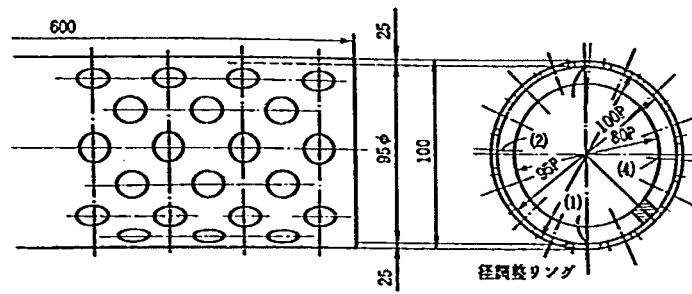
(2) 被覆管改良の例

ケーブル表面に付加される表面形状は、「斜張橋並列ケーブル耐風制振に関する共同研究」において図-5.5.1に示される円形孔、円形突起、空気抜きつき縦リブ突起、螺旋リブ突起、およびUストライプ形状のものが提案された。これらの被覆管は、ケーブル間隔3D、4D（Uストライプは2D～4D）で2次元バネ支持実験が実施されたが、いずれの場合においても一定の制振効果が確認されている。一例をあげると、Uストライプ方式については、ケーブル間隔3Dでは無対策、Uストライプともウェークギャロッピングが発生しているのに対し（図-5.5.2）、ケーブル間隔4DではUストライプ方式ではウェークギャロッピングはまったく発生せず（図-5.5.3）、ケーブル間隔によってはUストライプ方式の有効性が示されている。ただし、共同研究における一連の風洞実験のみでは、制振効果を評価するには不十分のため、さらなる風洞実験により効果を確認する必要がある。また、これらを実橋に適用するにあたっては、ケーブルの製作、表面の耐久性などについても検討する必要がある。

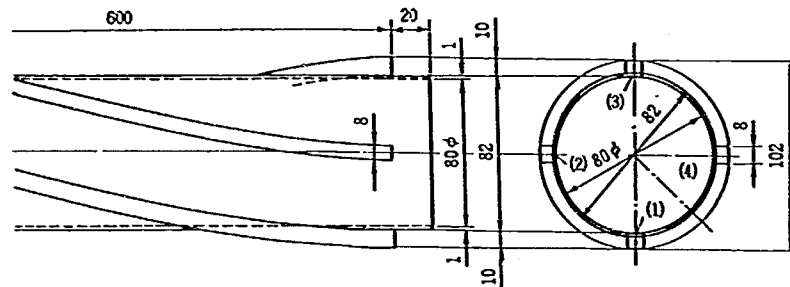
5.5.3 ケーブル配置による対策

ケーブル配置による対策は、クランプによってケーブルを束ね、ケーブル間隔を1.5D以下にする方法が、唄げんか大橋¹¹⁾および伊唐大橋¹²⁾に適用されている。

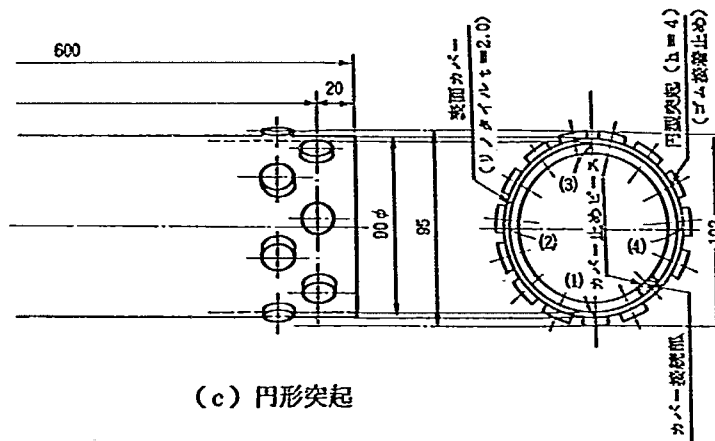
伊唐大橋では1組のケーブルに対し、クランプにより10m程度の間隔でケーブルを束ねているが、ケ



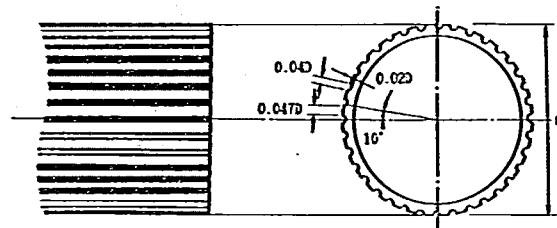
(a) 円形孔



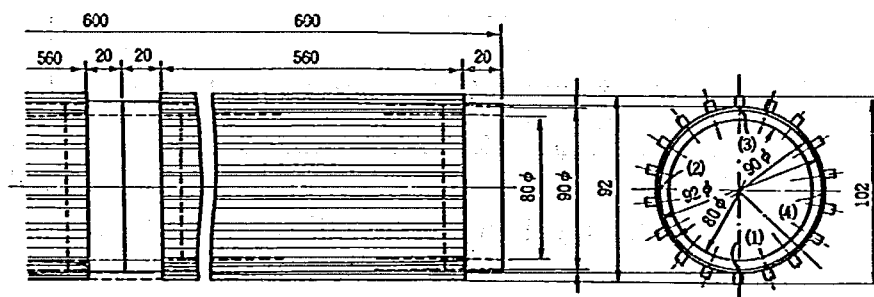
(b) 螺旋リブ突起



(c) 円形突起



(d) Uストライプ



(e) 空気抜き付き縦リブ突起

図-5.5.1 被覆管表面の改良例⁹⁾

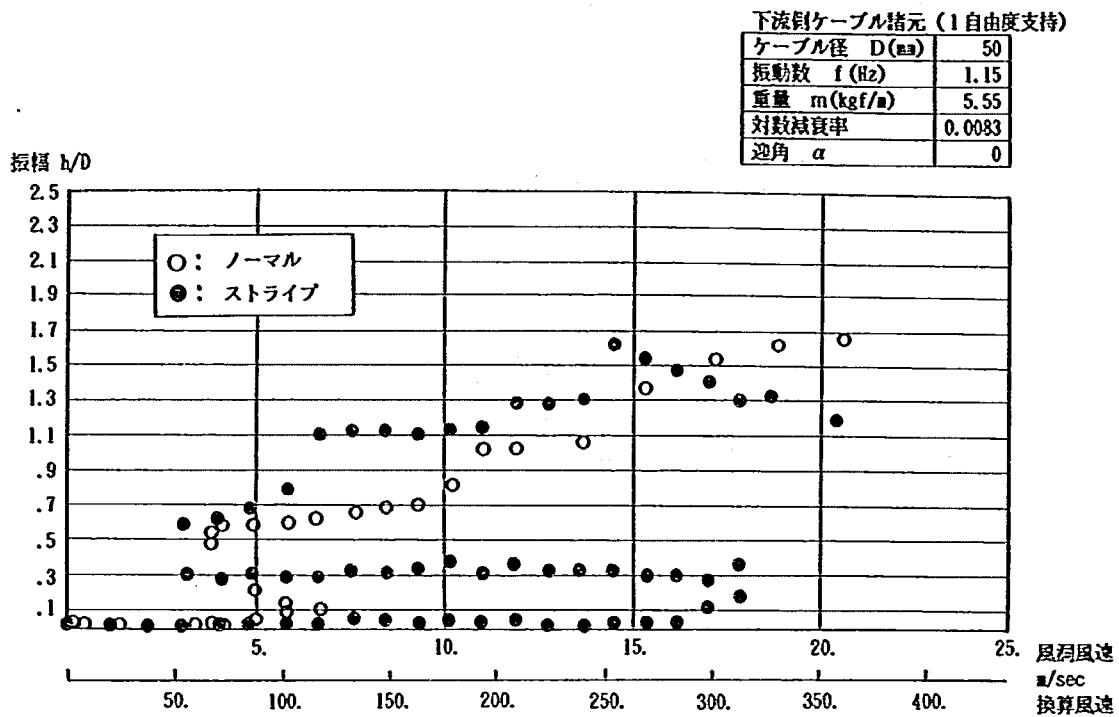


図-5.5.2 Uストライプ方式における下流側ケーブルの応答 (ケーブル間隔 $3D$)⁹⁾

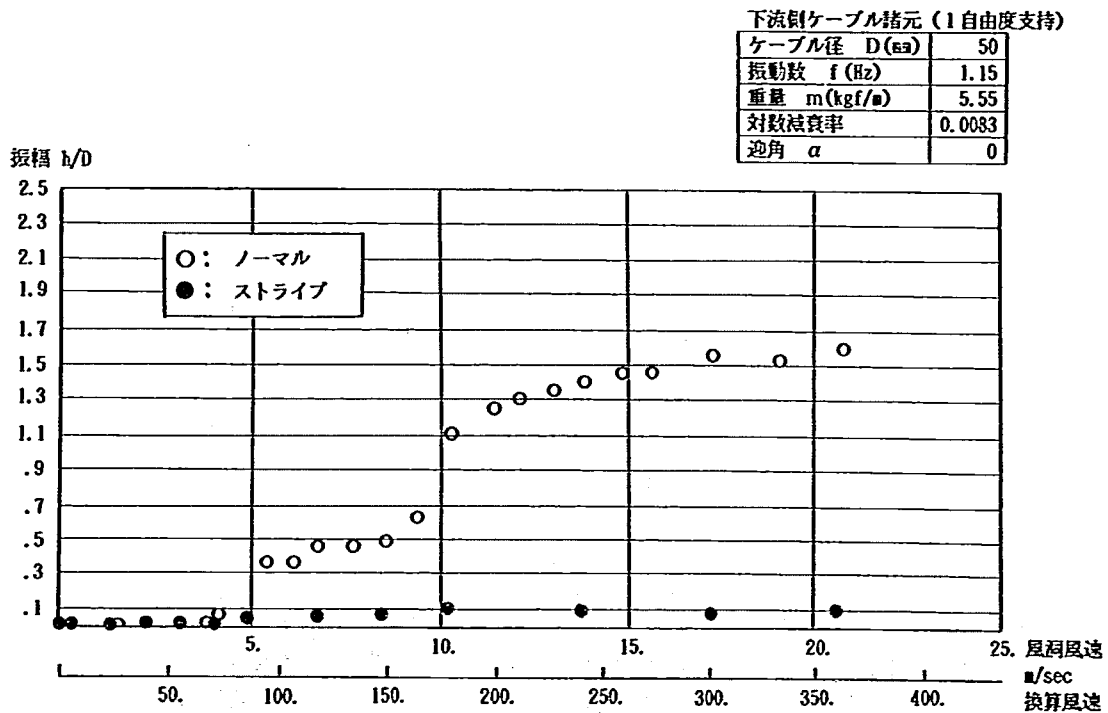


図-5.5.3 Uストライプ方式における下流側ケーブルの応答 (ケーブル間隔 $4D$)⁹⁾

ケーブル定着部においては、ある程度のケーブル間隔が必要となる。そのため、定着部に近い両端の部分については、ケーブル間隔調整治具として、中間部に用いられるクランプ (中間クランプ) とは異なった構

造のクランプ（端部クランプ）を用いる。

この対策は、振動をほぼ完全に抑えることが可能であるため、事前に採用の可否を十分に考慮することが望ましい。この対策の採用にあたっては、活荷重の桁への载荷などにより、大きな変動応力に生じるケーブルの一部を曲げることになるため、詳細な安全性の照査に加えて、施工方法、定着部の構造、ケーブル間隔の調整などに対する検討が必要である。

また、実用化はされていないが、風洞実験においては塔側と桁側の間でケーブル間隔を変化させる方法についても風洞実験により効果が確認されている¹³⁾。

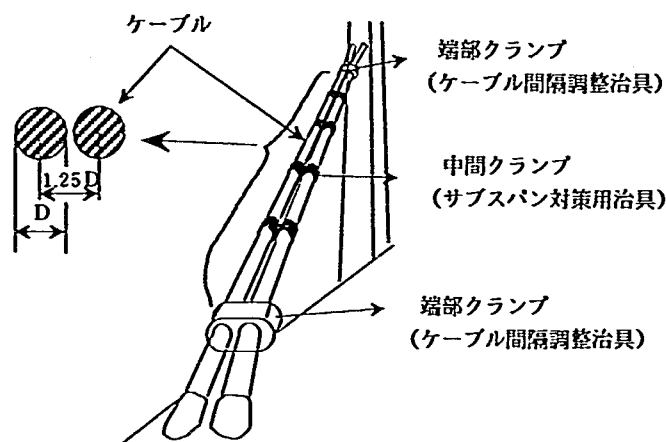


図-5.5.4 ケーブル配置による対策例（伊唐大橋）

【参考文献】

- 1) 米田昌弘：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, pp. 21～40, 1993年 8月
- 2) 米田昌弘・前田研一：ケーブル制振用ダンパーの粘性減衰係数設定に関する一考察，土木学会論文集，第410号/I-12, pp. 455～458, 1989年10月
- 3) 河田寛行・飯名勇・山本暢明・竹井光明・宮本義雄・安藤修：幸魂橋の施工と制振対策，橋梁と基礎，Vol. 26, No. 4, pp. 11～16, 1992年 4月
- 4) 春日昭夫・則久芳行・新井英雄：高減衰ゴムを用いたケーブル制振用ダンパーに関する研究，土木学会 第46回年次学術講演会講演概要集，I-460, pp. 958～959, 1991年 9月
- 5) 小野寺勇・相葉和俊・木水隆夫・松井保幸・春日昭夫：小田原港橋の施工，橋梁と基礎，pp2～6, 1994年7月
- 6) 馬場賢三・太田亨・勝地弘：岩黒島橋・樫石島橋ケーブル制振装置，本四技報，Vol. 12 No. 47, 昭和63年 7月
- 7) 横山功一・日下部毅明・関谷光昭：斜張橋ケーブルにおける相互連結の制振効果に関する考察，第12回風工学シンポジウム，平成4年12月
- 8) H. Yamaguchi, H. D. Nagahawatta: Damping Effects of Cable Cross Ties in Cable-Stayed Bridge,

9) 建設省土木研究所ほか：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)，平成6年9月

同上 ： 同上 (その3)，平成7年3月

10) 国土開発技術研究センター：昭和63年度 斜張橋ケーブルの耐風性に関する検討報告書, 平成元年2月

11) 樫島誠吾・小林康人・石橋彦実・畑中俊治・湯谷功：唄げんか大橋(PC斜張橋)上部工の施工, 橋梁と基礎, 平成5年11月

12) 永池清隆・前田勉・竹田哲夫・藤岡秀信・向弘晴：伊唐大橋束ねケーブルの耐風安定性, プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム, 平成7年10月

13) 久保喜延・前田博・加藤九州男・佐々木誠：斜張橋用複数本ケーブルの耐風挙動, 第13回風工学シンポジウム, 1994年

あ と が き

近年、斜張橋の長大化や発展に伴い、ケーブルの風による振動が顕著化し、その制振対策の確立が望まれている。その一環として、斜張橋並列ケーブル特有の風による振動「ウェークギャロッピング」に対する制振対策の確立を目指して、建設省土木研究所、(財)土木研究センターおよび民間15社が平成4年から3年間にわたって、共同で各種実験・解析などを行いながら、振動メカニズム、振動特性およびその対策について検討してきた。その結果、従来の制振対策の評価や新しい制振対策の提案を含めて、多くの知見、成果を得ることができた。

本資料は、これらの研究成果を、並列ケーブルの制振対策を検討する時に参考資料となるようにマニュアル(案)としてまとめたものである。本共同研究で考えられた新しい制振対策を含め、現在実橋に使われている制振対策を適用する時の指針となる資料である。しかし、本マニュアル(案)の制振対策ではまだ十分とは言えず、未解決の問題も多く残っており、実橋に適用する場合、さらに風洞実験の実施、実橋での風観測などによる効果の確認などが必要な部分も多い。

今後、関係各位による継続的な研究が行われるとともに、実橋での適用事例が増え、資料収集が進められることによって、合理的な制振対策が開発・確立されることを本共同研究担当者一同望むものである。

共同研究参加企業および研究担当者

団 体 ・ 企 業 名		研究担当者
建設省土木研究所	構造橋梁部長 構造橋梁部構造研究室長 構造橋梁部構造研究室主任研究員 構造橋梁部構造研究室研究員	横山功一 佐藤弘史 *日下部毅明 *松野栄明
(財)土木研究センター	専務理事 理事 企画調査部部長 専門調査役	柳田 力 小林茂敏 鷹取 勲 近藤伸治
石川島播磨重工業株式会社	技術研究所環境エネルギー開発部次長 橋梁事業部管理部課長 橋梁事業部設計部課長 技術研究所環境エネルギー開発部	樋上孫一 木本公平 吉永俊一郎 上島秀作
株式会社エスイー	取締役技術開発部長 技術開発部部長 技術開発部課長代理 工務部部長代理	鈴木昭好 大橋 渡 木部 洋 及川孝一
株式会社大林組	技術研究所土木第五研究室長 技術研究所流体研究室長 技術研究所構造第二研究室主任研究員 技術研究所構造第一研究室主任研究員 土木技術本部設計第二部課長 技術研究所流体研究室副主任研究員 技術研究所流体研究室 技術研究所土木第五研究室	後藤洋三 伊藤雅保 鈴木哲夫 大内 一 安部 要 野村敏雄 藤原章博 樋口俊一
鹿島建設株式会社	土木設計本部第二設計部次長 土木設計本部第二設計部 技術研究所第一研究部次長 技術研究所第一研究部第2研究室 技術研究所第一研究部第2研究室	和田信秀 佐野演秀 *竹田哲夫 向 弘晴 上野健治
川崎重工業株式会社	橋梁技術総括部技術部部長 橋梁技術総括部技術部係長 橋梁技術総括部技術部係長 橋梁技術総括部技術部	小川一志 斉藤敏雄 下土居秀樹 野上千秋
清水建設株式会社	土木本部技術第一部部長 土木本部技術第一部P Cグループ 技術研究所環境技術研究部	渡辺泰充 大野 浩 若原敏裕
住友建設株式会社	土木設計部第二設計課課長 技術研究所主任研究員 土木設計部第二設計課課長代理 土木設計部第二設計課主任 土木設計部第二設計課 技術研究所	*近藤真一 中井裕司 春日昭夫 中村收志 平 喜彦 松元香保里

住友重機械工業 株式会社	橋梁鉄構事業部技術室課長 技術本部総合技術研究所熱流体グループ 橋梁鉄構事業部技術室課長代理 技術本部総合技術研究所熱流体グループ	宮崎正男 斉藤善昭 中村 幸 鹿島主央
株式会社長大	長大橋事業部事業部長 長大橋事業部副技師長 長大橋第2部主任技師 技術本部 長大橋第2部グループマネージャー 長大橋第1部	柴田定昭 大月 哲 山崎康嗣 *上野武志 山崎武文 臺原 直
飛鳥建設株式会社	技術本部土木技術開発部長 技術本部土木技術開発部課長 技術本部土木技術開発部主任 技術本部土木技術開発部主任 技術本部土木技術開発部	猪俣 正 本多 新 岡本 浩 武藤正人 石川 朗
日本鋼管株式会社	基盤技術研究所都市工学研究部主幹 同 耐風構造チーム主査 同 耐風構造チーム 橋梁建設部長大橋室	*藤澤伸光 武田勝昭 村上琢哉 小泉幹男
株式会社ピー・エス	土木技術部主任研究員 土木技術部主任技師 開発技術部	久保明英 河村直彦 赤嶺文繁
日立造船株式会社	鉄構・建機事業本部橋梁設計部部長 鉄構・建機事業本部企画部部長 鉄構・建機事業本部橋梁設計部部長代理 鉄構・建機事業本部橋梁設計部 技術研究所構造・流体技術研究センター主任研究員 技術研究所構造・流体技術研究センター	中垣亮二 植田利夫 田中 洋 三河克己 砂田博幸 山口映二
三井造船株式会社	鉄構建設事業部技術部課長 鉄構建設事業部技術部 鉄構建設事業部技術部 鉄構建設事業部技術部	井上浩男 大森龍一郎 林 健一 赤瀬雅之
三菱重工業株式会社	広島製作所鉄構技術部橋梁設計課課長 広島製作所鉄構技術部橋梁設計課主任 長崎研究所流体・伝熱研究室主務 長崎研究所流体・伝熱研究室主任 長崎研究所流体・伝熱研究室 広島研究所鉄構・土木研究室主務	逸見雄人 増田伊知郎 斉藤 通 本田明弘 平井滋登 佐々木伸幸

*印 マニュアル担当幹事

付 属 資 料

付属資料. 1

実橋および風洞実験におけるウェークギャロッピングの傾向解析

付属資料. 2

ケーブルの曲げ疲労試験に関する既往の文献整理

付属資料. 3

ウェークギャロッピングに対する安全性、供用性に関する試算例

付属資料. 4

新しい構造力学的制振装置における解析検討資料

THE END

THE END OF THE WORLD IS HERE

THE END OF THE WORLD IS HERE

THE END OF THE WORLD IS HERE

THE END OF THE WORLD IS HERE

付属資料 1 実橋および風洞実験におけるウェークギャロッピングの傾向解析

実橋で観測されたウェークギャロッピングを、以下に示す関係について整理し、その傾向の把握を行った結果を、付図-1.1～付図-1.10に示す。

- 1) 風速と振幅の関係
- 2) 風向と振幅の関係
- 3) 無次元風速と振幅の関係
- 4) ケーブル長と振幅の関係
- 5) ケーブル径と振幅の関係
- 6) レイノルズ数と振幅の関係
- 7) 質量・減衰パラメータと振幅の関係
- 8) ケーブル重量と振幅の関係
- 9) ケーブル張力と振幅の関係
- 10) ケーブル間隔と振幅の関係

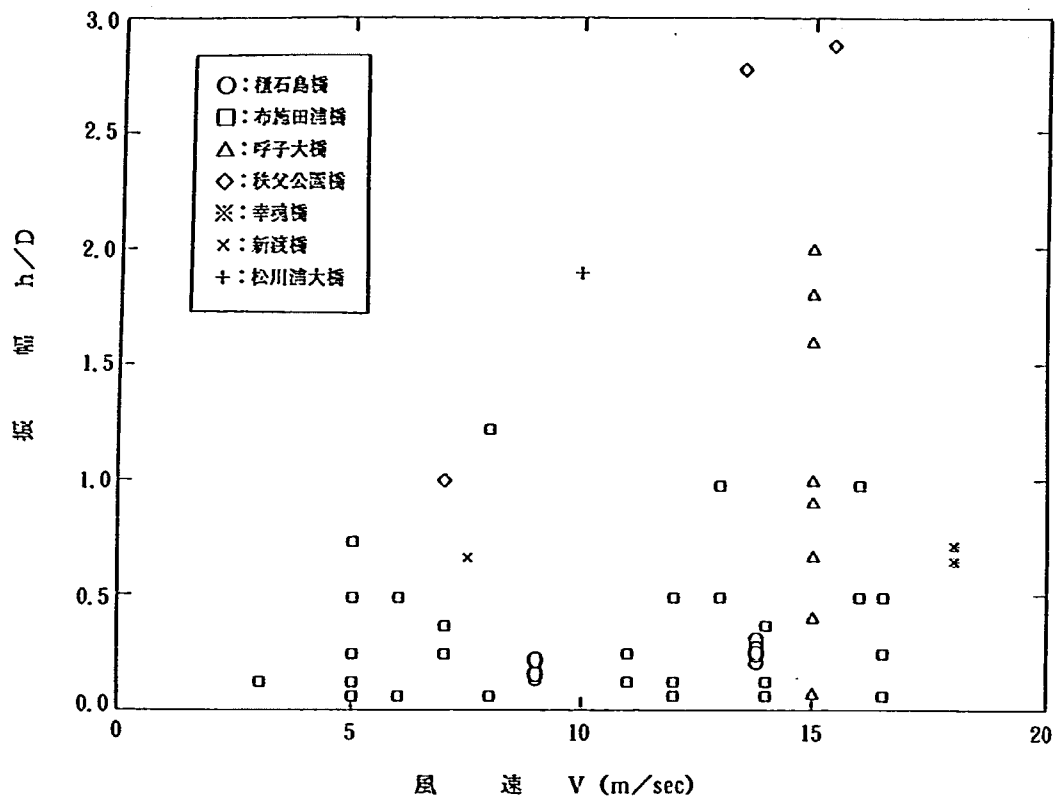
ウェークギャロッピングの最大振幅 (h/D) と風特性およびケーブル特性との関係は、実橋の振動事例 (7橋, 134事例) で見ると、ほとんどの事例が1次モードの振動として認められている。2次および3次モードでの振幅は1次モードに比べて小さい。最大振幅は、風速、風向およびケーブル長との間に比例した関係が認められ、ケーブル間隔の関係では約3Dをピークした凸型の関係が認められる。付図-1.8に示すように、ケーブル重量と振幅の間には相関関係が認められなかった。ウェークギャロッピングでは、付図-1.3に示すように、他の対風現象のような無次元風速との関係が認められないことがわかった。

各風洞実験の結果は、風速と振幅の関係をケーブル間隔および減衰について整理した。その関係を付図-1.12～付図-1.16に示す。

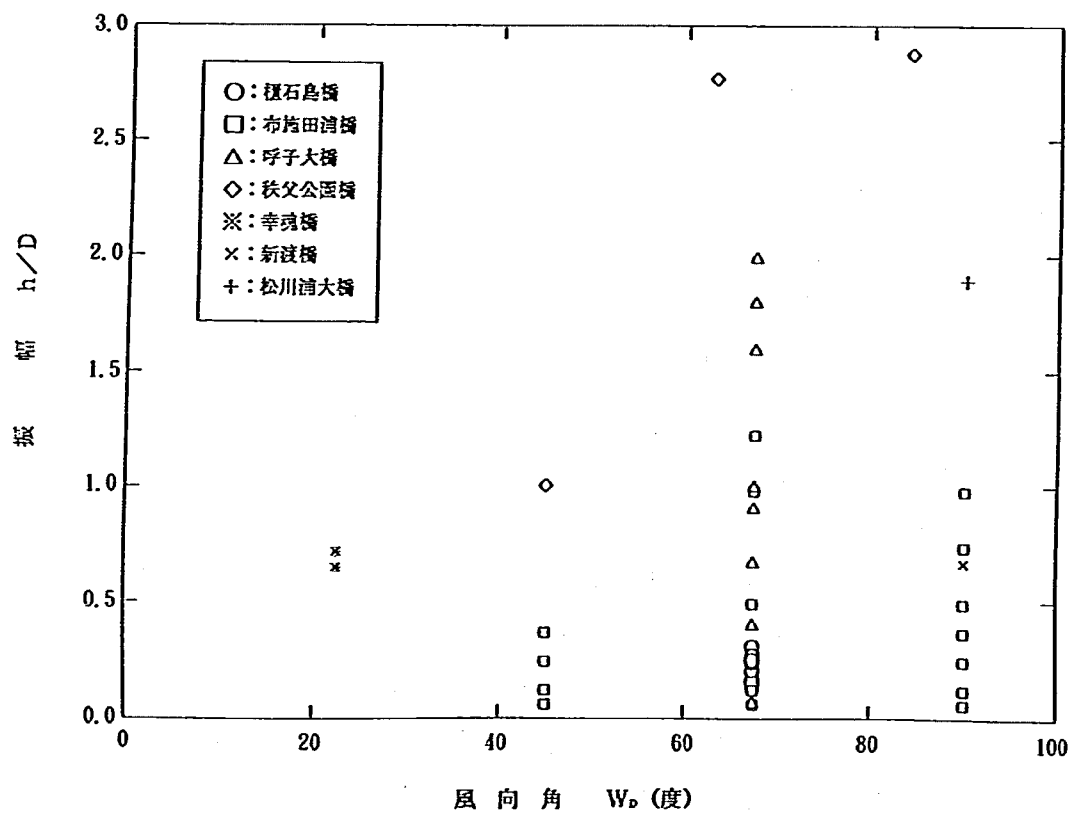
上記の関係を整理した結果、ウェークギャロッピングの発現開始風速は、実橋の振動事例および各風洞実験結果ともに2～4m/sec程度の風速範囲にあり、この発現開始風速と質量・減衰パラメータとの関係は、減衰を変化させた風洞実験結果から、付図-1.11に示す関係が認められる。

一方、発現終了風速については、レイノルズ数が $Re=2.5 \times 10^5$ 以上となる超臨界域ではウェークギャロッピングが発生しにくくなる特性が風洞実験で認められており、さらに、実橋においても $Re=2 \times 10^5$ 以上のレイノルズ数域で発現事例がないことがわかる。

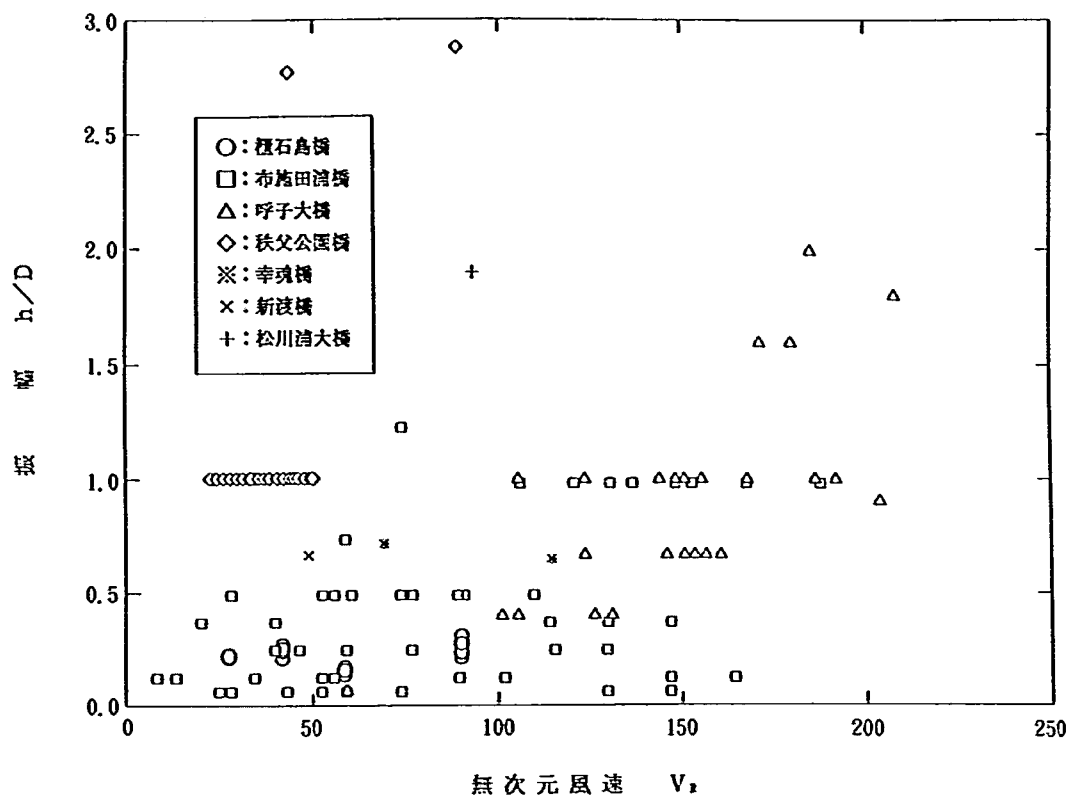
ケーブル間隔については、風洞実験において1.5D以下の間隔で振動が発現しないことが確かめられており、6Dより広いケーブル間隔では振動振幅が極めて小さくなる特性が認められている。また、実橋事例では付図-1.10に示すように、6D以上のケーブル間隔での振動事例がなく、風洞実験結果と対応した結果となっている。なお、タウト模型による風洞実験では、間隔が6Dより広い場合にも振動の発現が認められているが、 $Iu=0.08$ の乱流試験では発現していない。



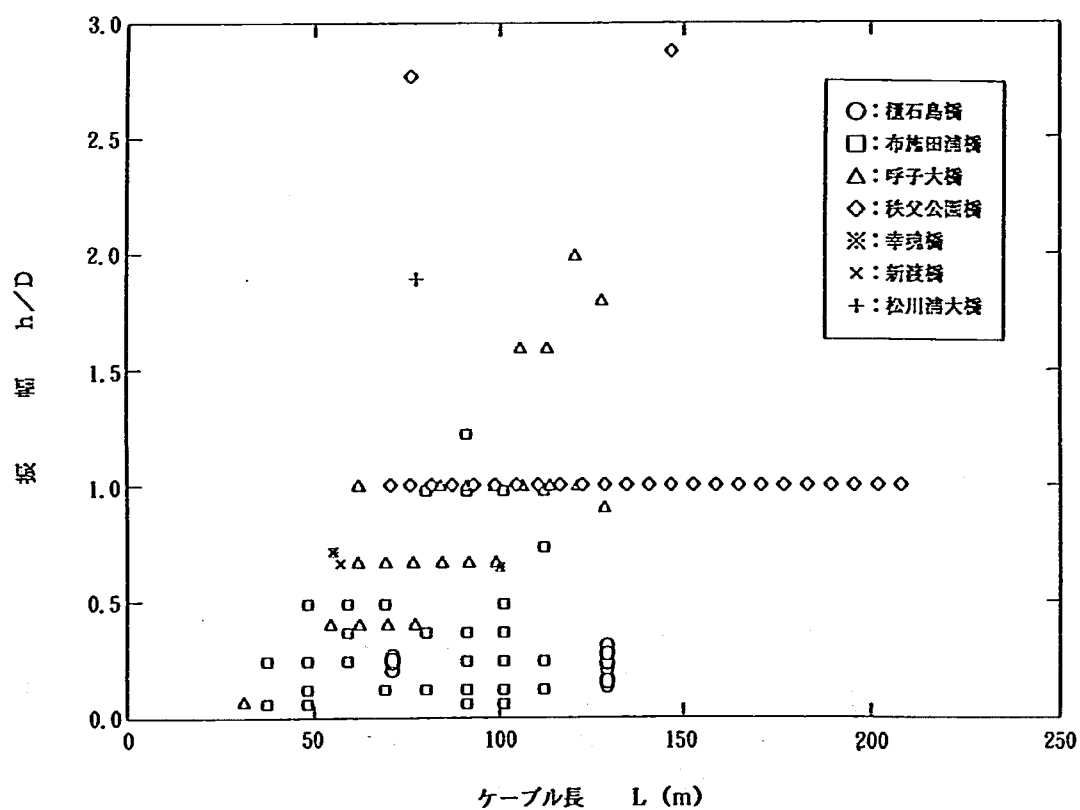
付図－1.1 実橋振動事例による風速と振幅の関係



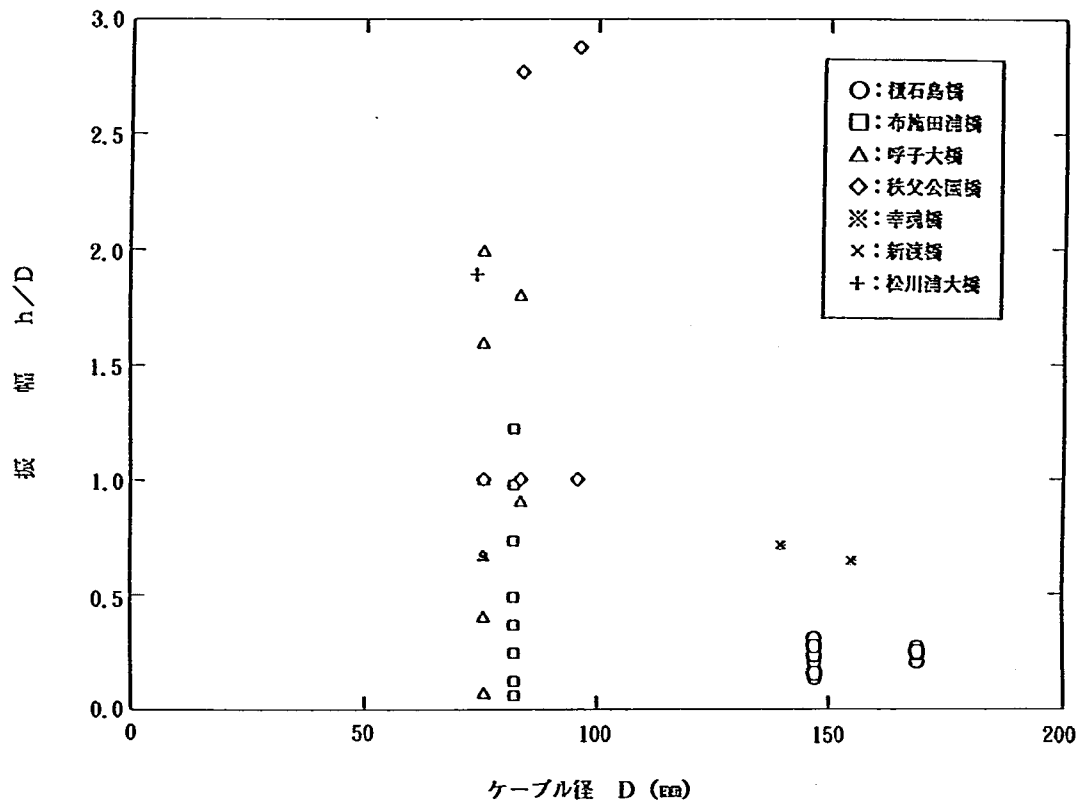
付図－1.2 実橋振動事例による風速と振幅の関係



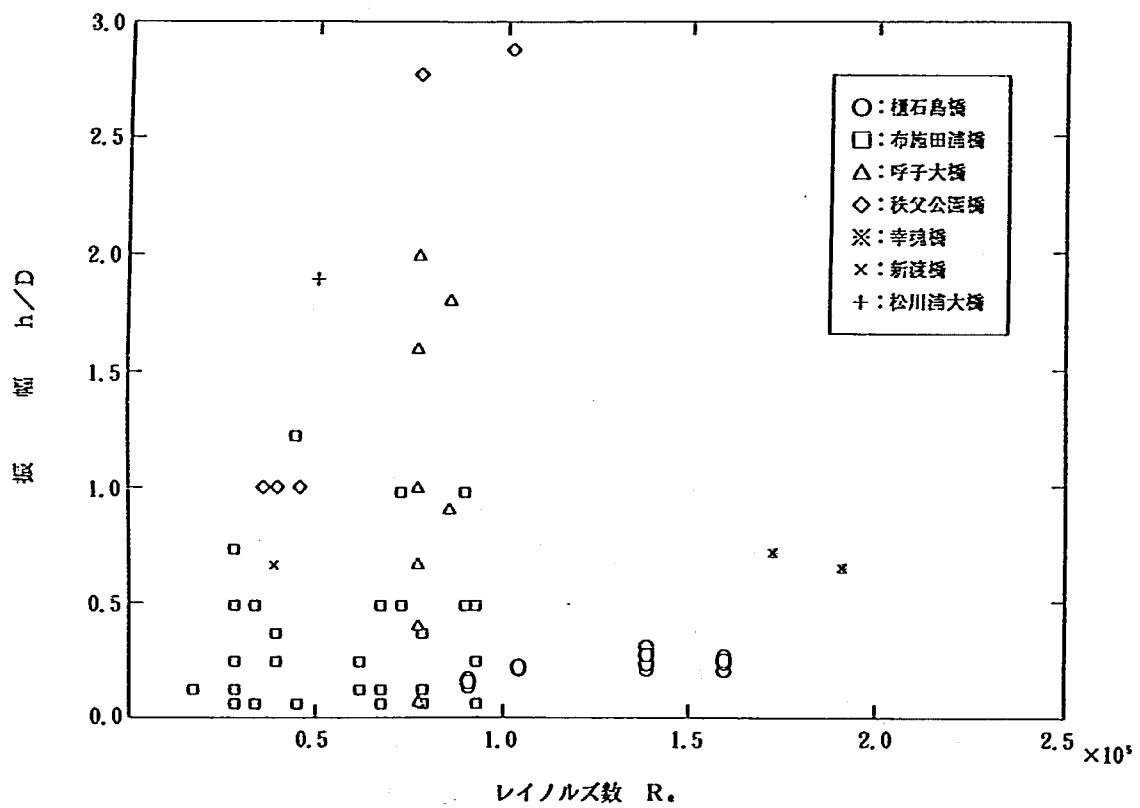
付図-1.3 実橋振動事例による無次元風速と振幅の関係



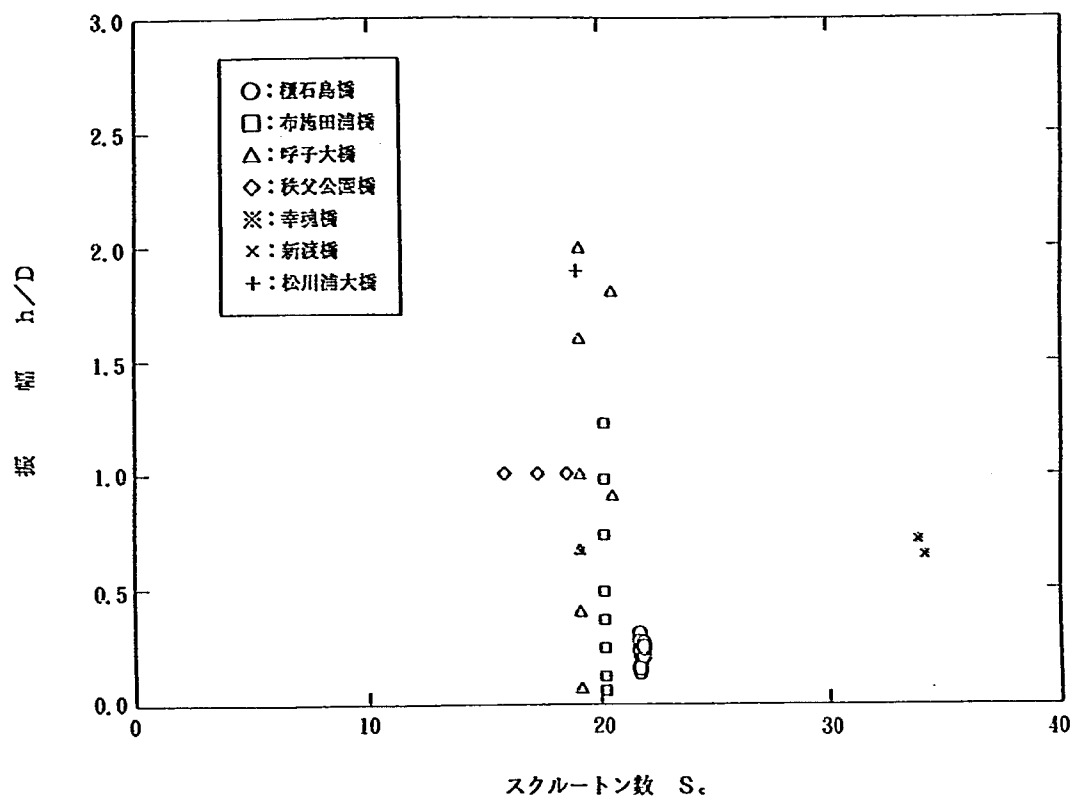
付図-1.4 実橋振動事例によるケーブル長と振幅の関係



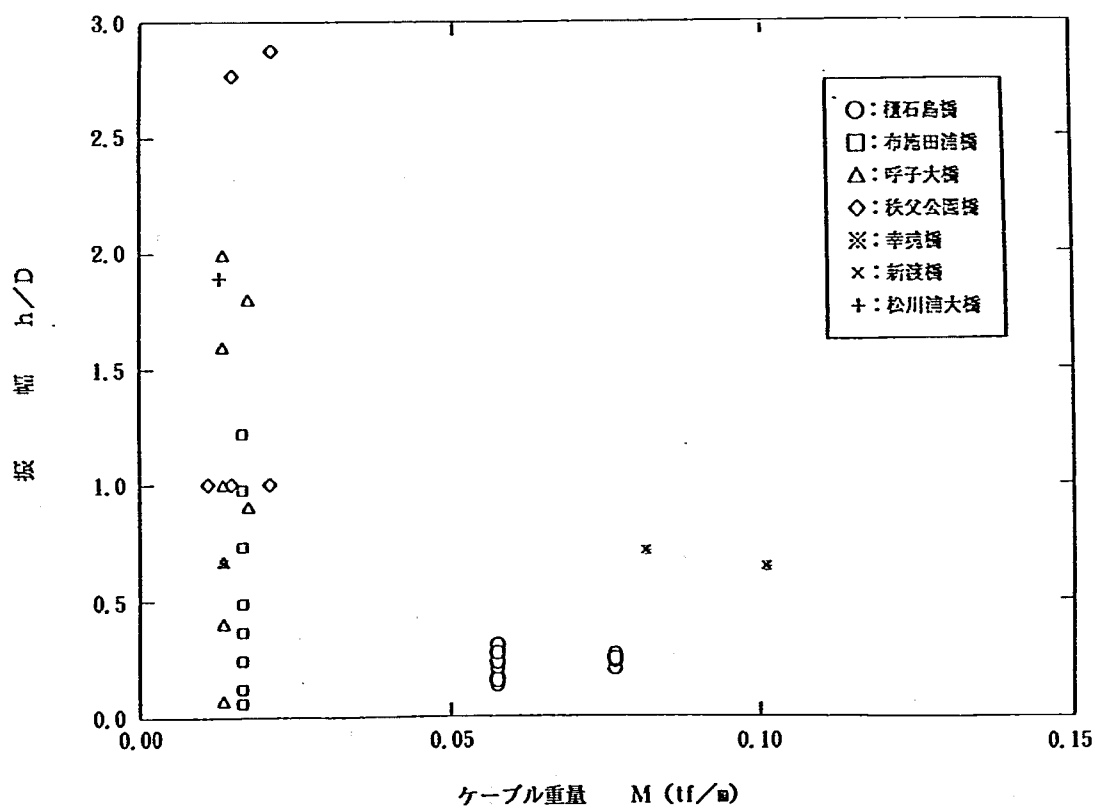
付図-1.5 実橋振動事例によるケーブル径と振幅の関係



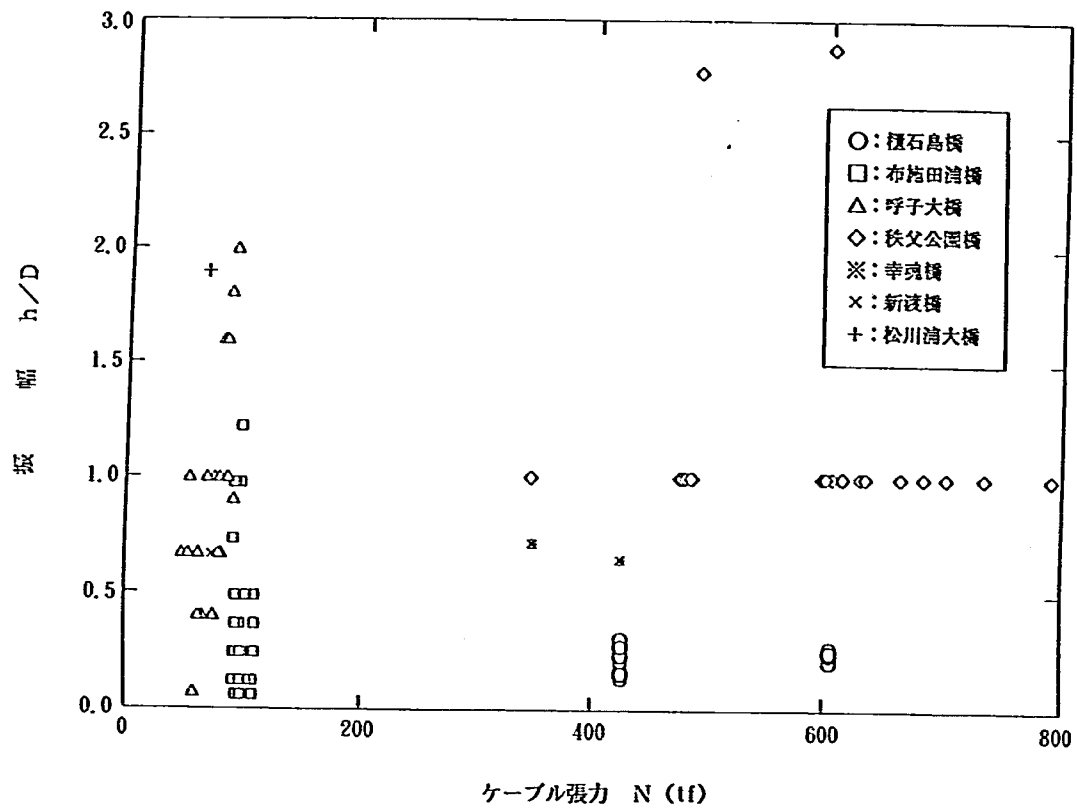
付図-1.6 実橋振動事例によるレイノルズ数と振幅の関係



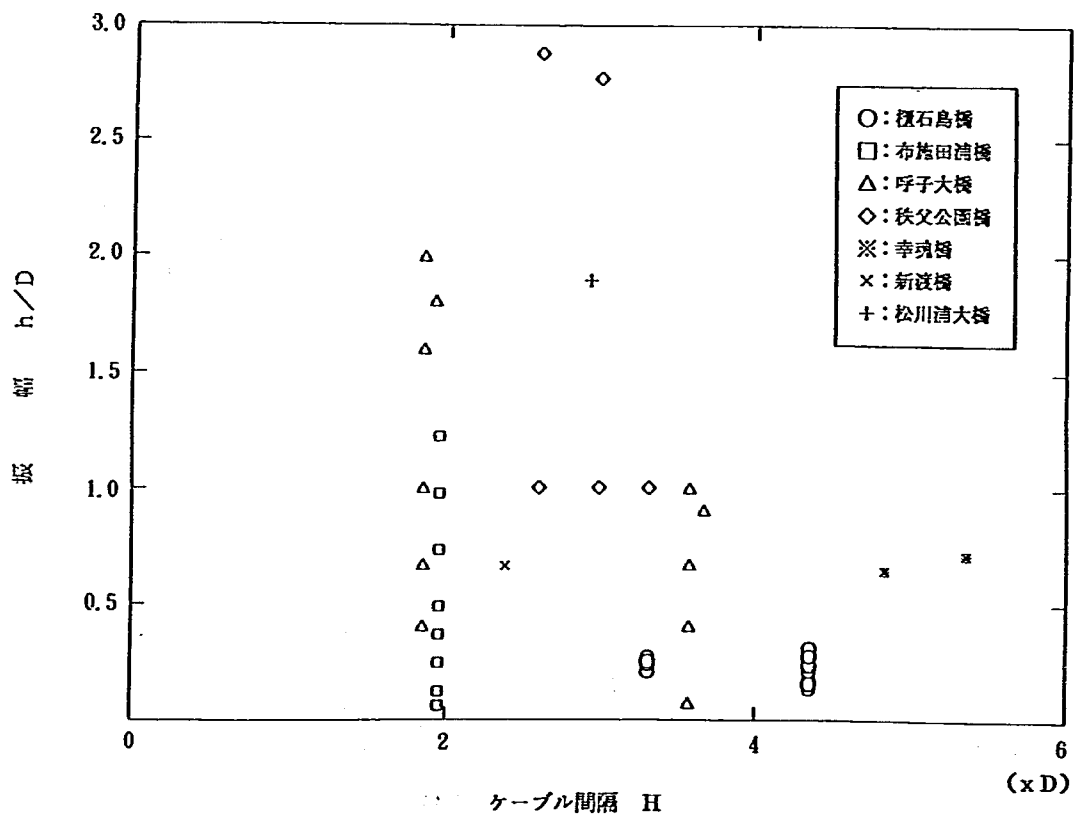
付図-1.7 実橋振動事例によるスクルートン数と振幅の関係



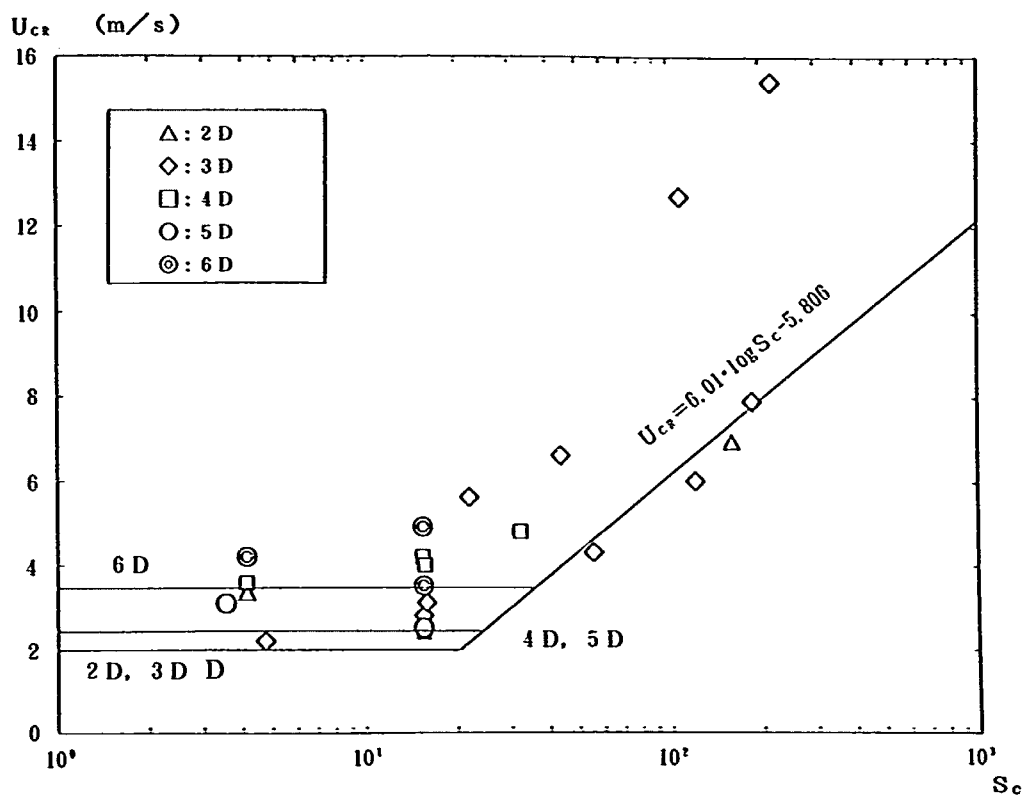
付図-1.8 実橋振動事例によるケーブル重量と振幅の関係



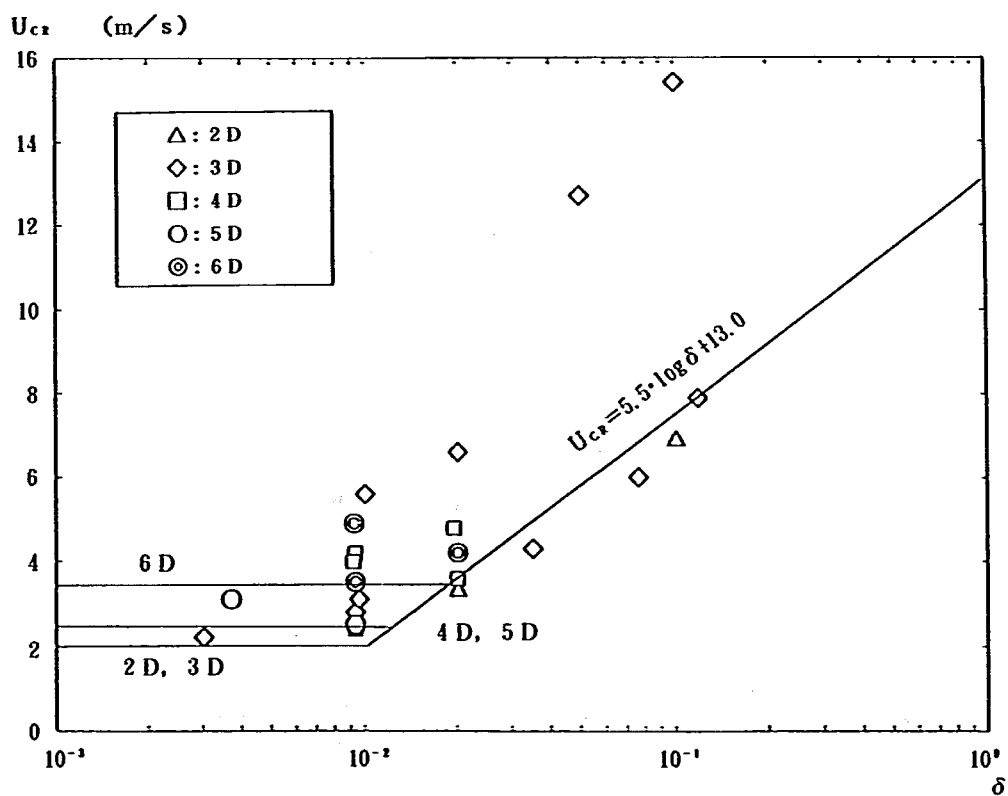
付図-1.9 実橋振動事例によるケーブル張力と振幅の関係



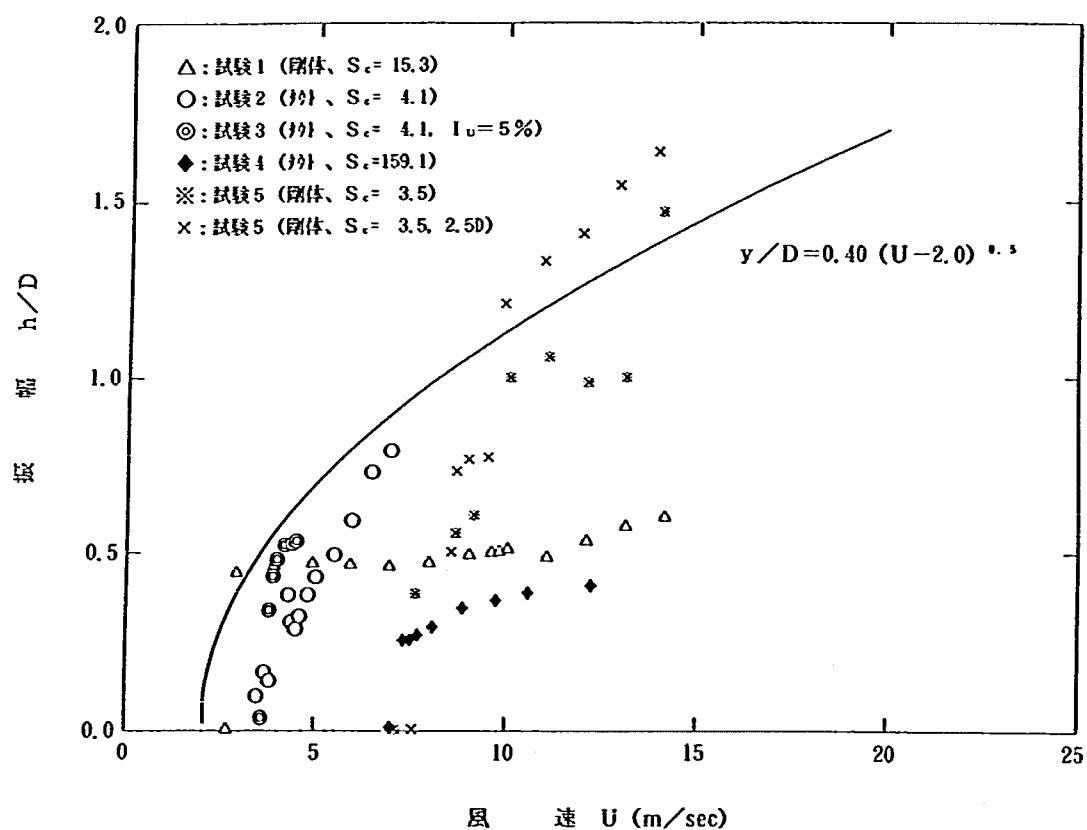
付図-1.10 実橋振動事例によるケーブル間隔と振幅の関係



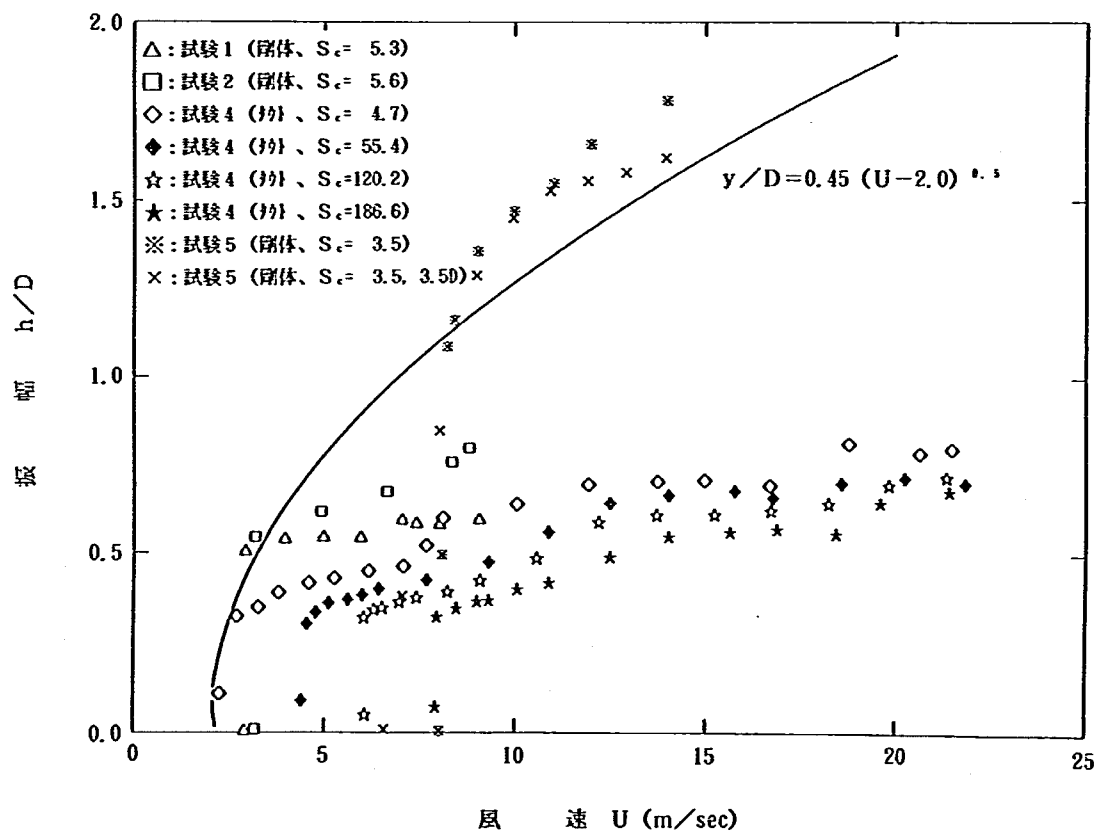
付図- 1.11(a) スクルートン数と発現開始風速の関係



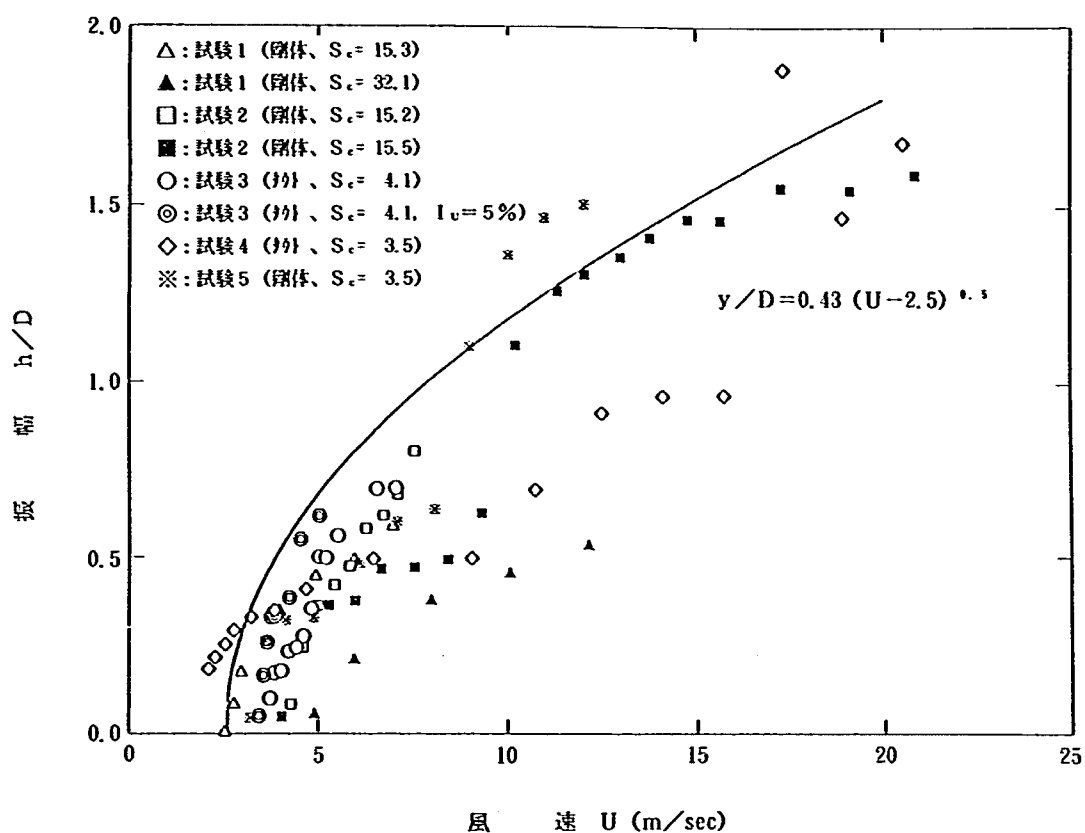
付図- 1.11(b) 減衰率と発現開始風速の関係



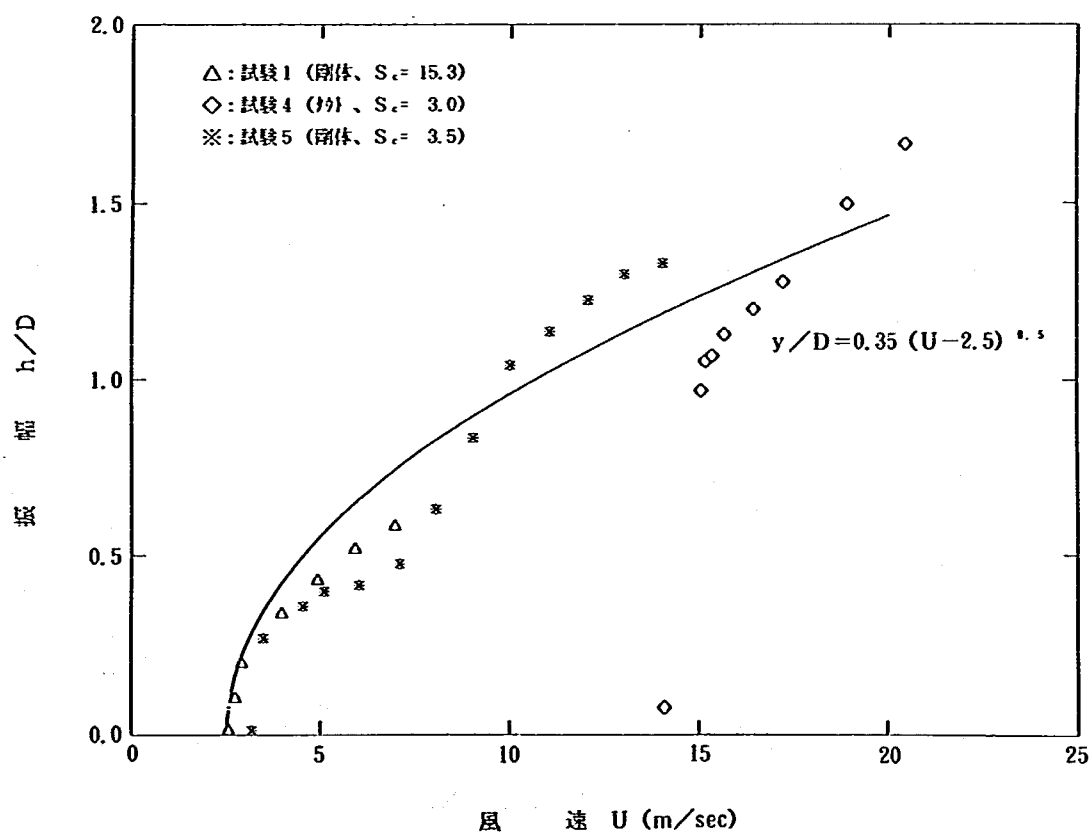
付図-1.12 風洞試験による風速と振幅の関係 ($H=2D$ の場合)



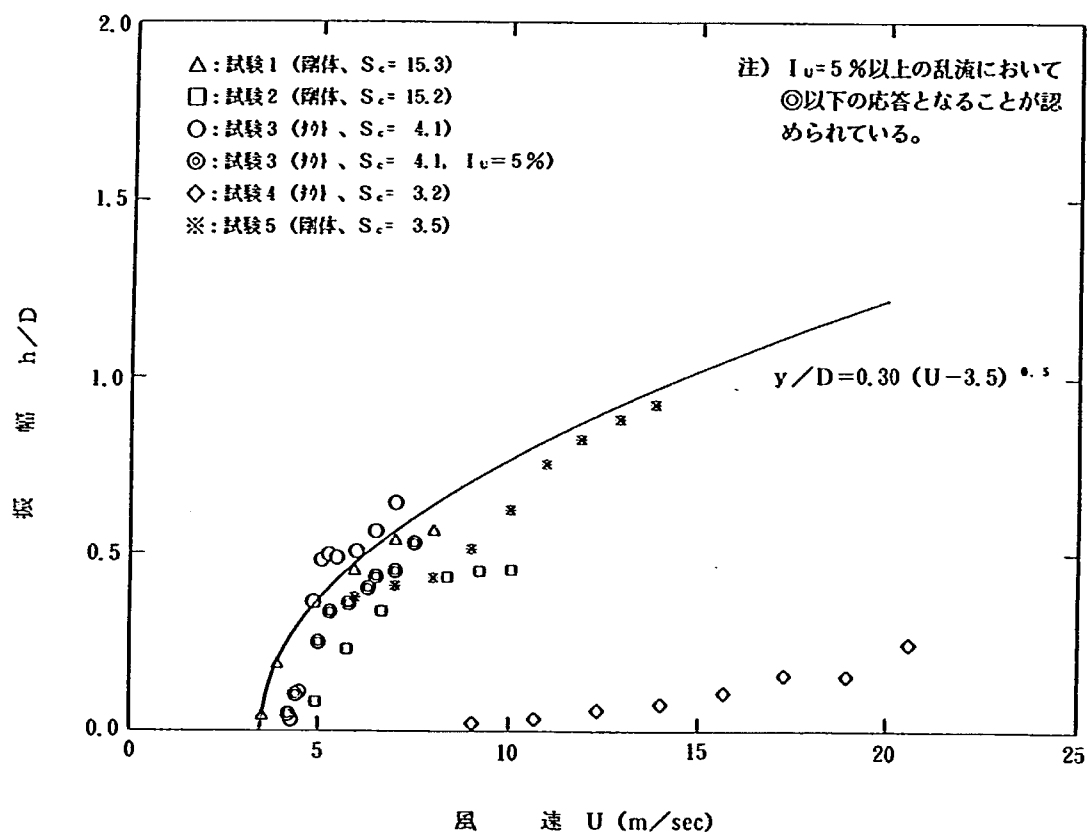
付図-1.13 風洞試験による風速と振幅の関係 ($H=3D$ の場合)



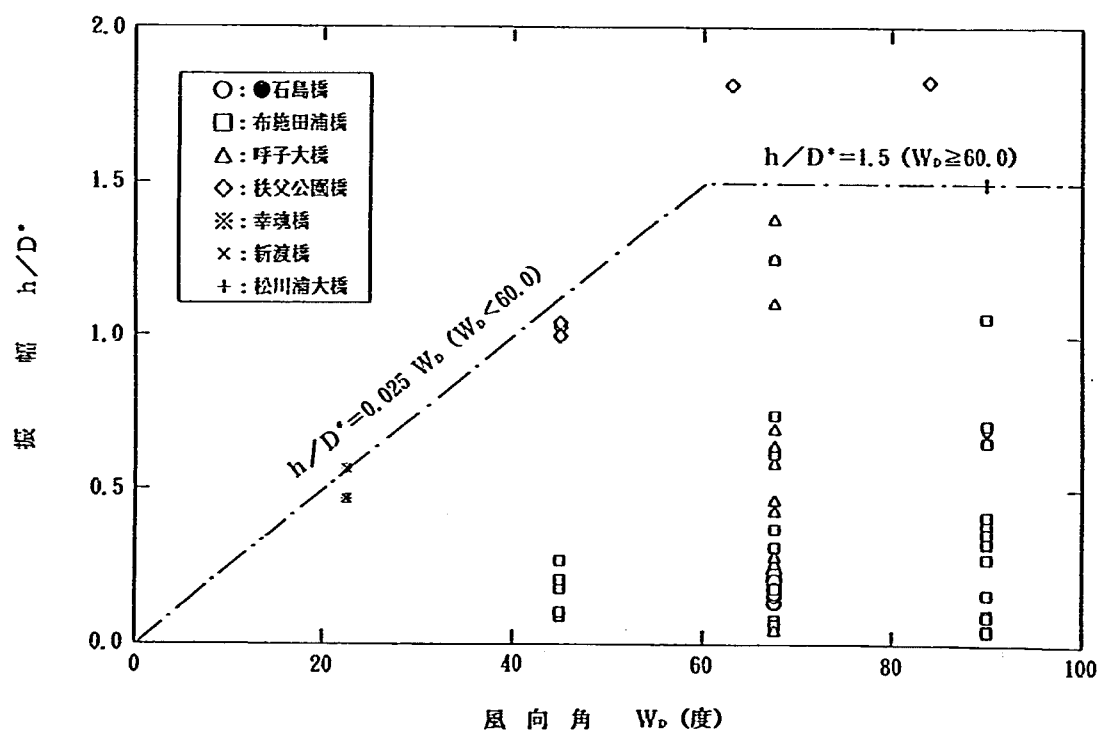
付図-1.14 風洞試験による風速と振幅の関係 ($H = 4D$ の場合)



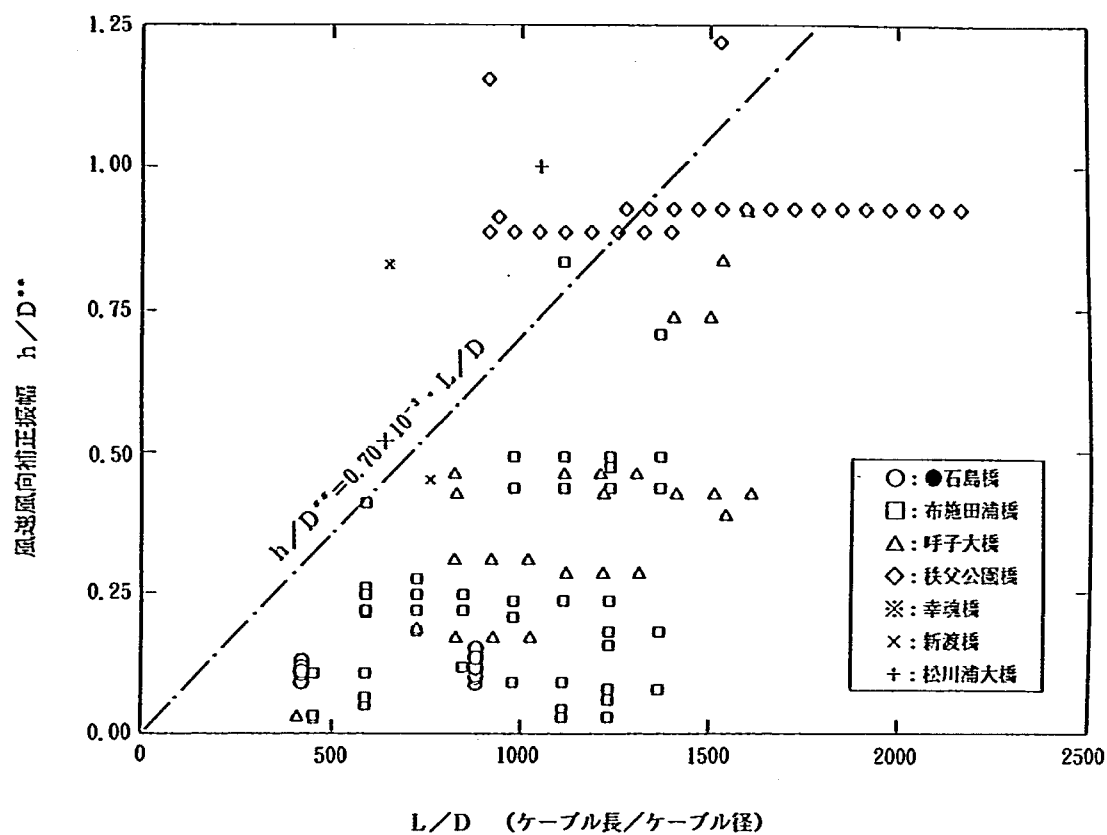
付図-1.15 風洞試験による風速と振幅の関係 ($H = 5D$ の場合)



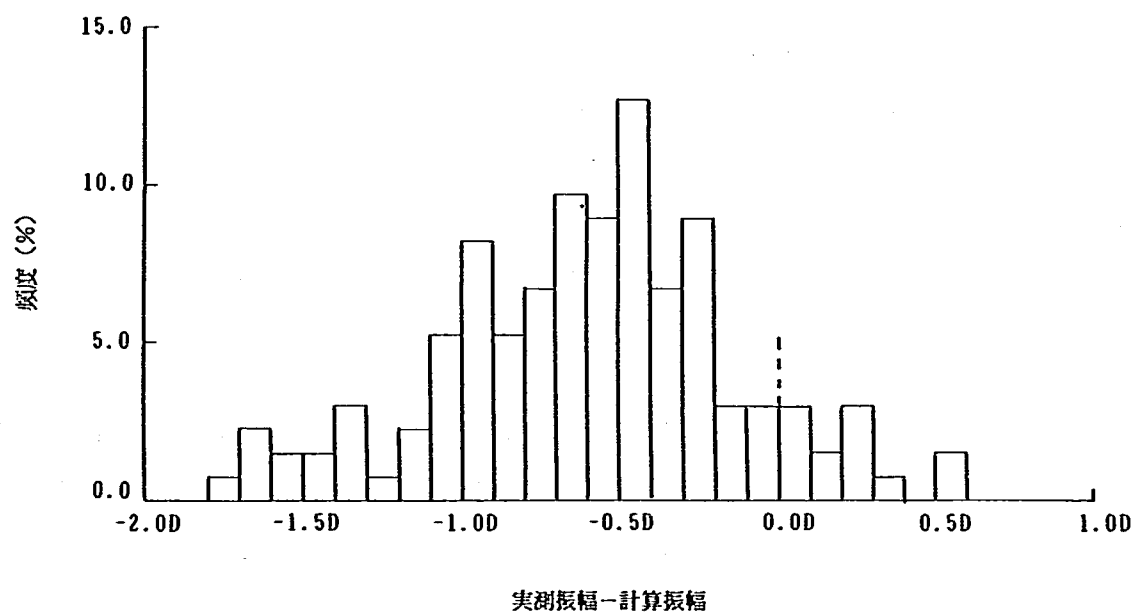
付図-1.16 風洞試験による風速と振幅の関係 ($H = 5D$ の場合)



付図-1.17 風向と風速補正振幅の関係



付図- 1.18 ケーブル径長比と風向風速補正振幅の関係



付図- 1.19 実橋振動事例における計算誤差分布

付属資料. 2 ケーブルの曲げ疲労実験に関する既往の文献整理

2.1 目 的

風により斜張橋のケーブルに大振幅の振動が生じると、曲げ疲労によりケーブルが損傷する可能性が高くなる。この曲げ疲労特性を調べるために、最近いくつか曲げ疲労実験が行われるようになった。ここでは、この曲げ疲労について検討するための資料として既往の曲げ疲労実験に関する文献^{1) 2) 3) 4) 5)}を整理した。

2.2 実験方法および実験結果

詳細はそれぞれの文献を参照することとして、ここでは供試体概要、加力方法、実験結果概要についてまとめた。

2.2.1 供試体概要

実験に用いられた斜張橋ケーブルのシステム、供試体の長さおよび断面形状を、付表-2.1に示す。

2.2.2 加力方法

付図-2.1に加力方法の概要を示す。

a) type 1

吊橋のハンガーロープの曲げ疲労強度を調べるために、実橋と同様、ソケット部が直接曲げられないように、先端をラッパ状にした亜鉛製（一部銅製）のカラーがソケット部に取り付けられている。駆動部にも両端に丸みをつけたカラーがケーブルに取り付けられ、急激な曲げ変形が生じるのを防いでいる。

b) type 2

斜張橋のケーブルの定着部の曲げ疲労強度を調べるために、実橋と同様、ソケット先端が直接曲げられるようにケーブルが取り付けられている。

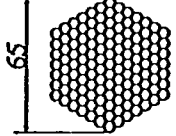
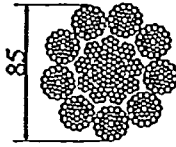
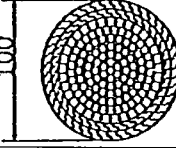
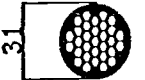
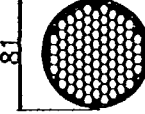
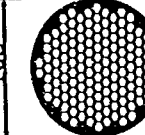
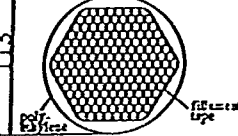
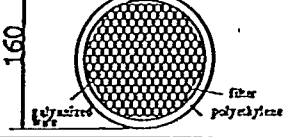
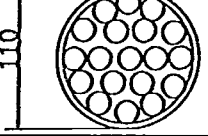
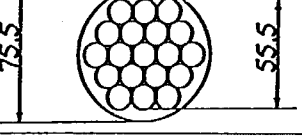
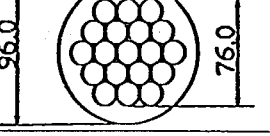
c) type 3

エクストラドーズドPC橋のケーブルの曲げ疲労強度を調べるために、実橋と同様、定着部に曲率を持つようにケーブルが取り付けられた。図中、左側が水平に曲率を持っており、右側が鉛直方向に曲率を持っている。ケーブルは鋼管に直接接している。

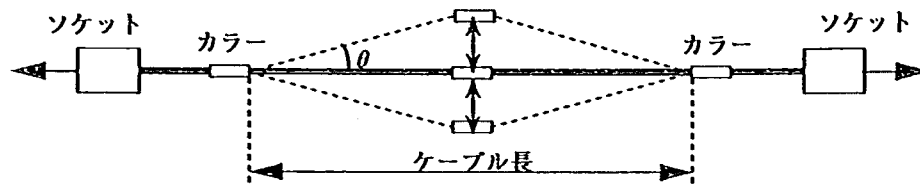
d) type 4

PC斜張橋のケーブルの定着部の曲げ疲労強度を調べるために、実橋と同様、コンクリートブロック内部にウレタンを注入し、ケーブル角折れを緩衝するためのゴムを取り付けた。また、中央の載荷点は、曲げ変形が生じないようにピン構造にした。

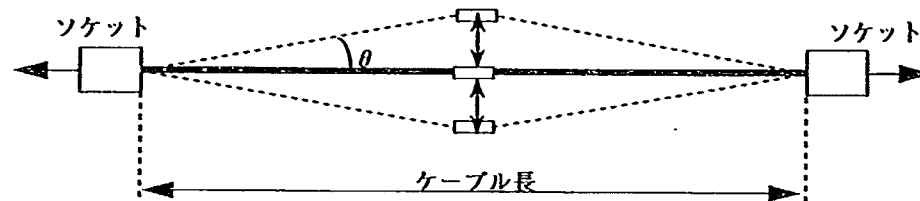
付表-2.1 供試体概要

No	システム	長さ m	断面図
1	PWS-127 ¹⁾	4.1	
2	CFRC-85 ¹⁾	4.1	
3	LCR-100 ¹⁾	4.1	
4	NEW-PWS31 ²⁾	1.64	
5	NEW-PWS85 ²⁾	5.426	
6	NEW-PWSI39 ²⁾	5.426	
7	NEW-PWS163 ¹⁾	10 8	
8	HiAm-SPWC163 ¹⁾	10 8	
9	SWPR7A19φ15 ²⁾ グラウト	7	
10	SEEE F270PH ¹⁾ 19φ11	7	
11	SEEE F500PH ¹⁾ 19φ15	7	

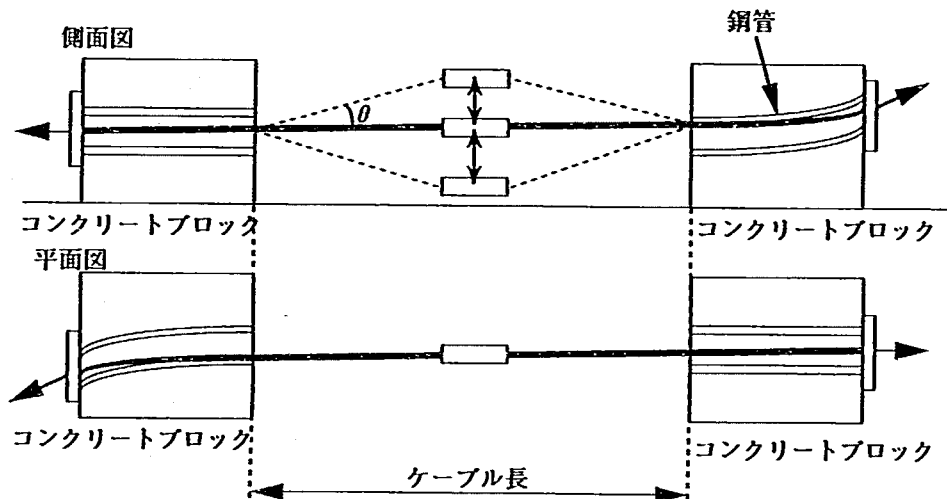
type 1 (PIS-127, CFRC-85, LCR100)



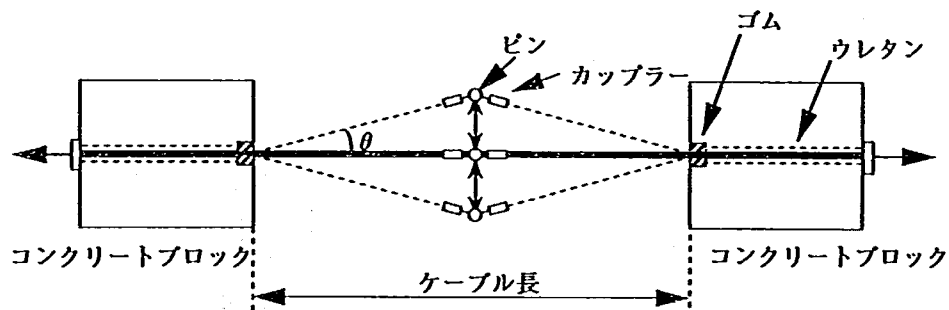
type 2 (NEV-PIS31, NEV-PIS85, NEV-PIS139, NEV-PIS163, HiAm-SPWC163)



type 3 (SVPR7A19 \phi 15)



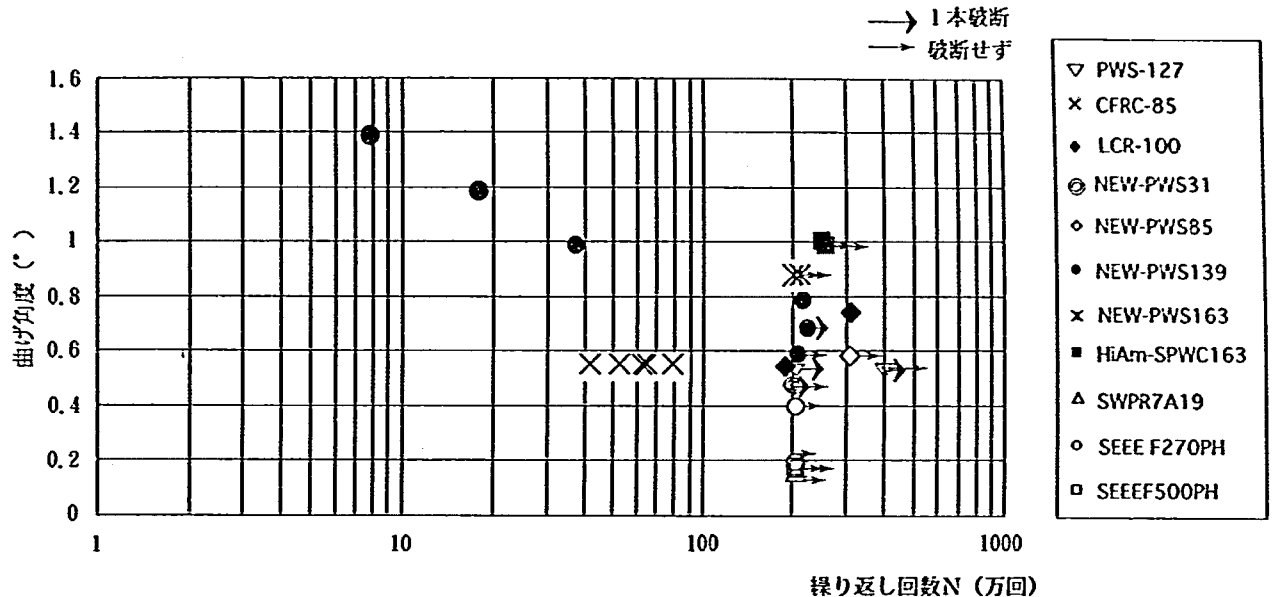
type 4 (SEEE F270PH, F500PH)



付図-2.1 ケーブル曲げ疲労実験加力方法概要図

2.2.3 実験結果

付表-2.2に曲げ疲労実験の条件および実験結果を示す。これらをもとに曲げ角度と繰返し回数の関係を整理すると、付図-2.2に示すとおりである。



付図-2.2 曲げ疲労実験結果

【参考文献】

- 1) 遠藤武夫・奥川淳志・竹之内博行・三木千寿：橋梁用ケーブルの曲げ疲労強度，鋼構造論文集，pp91-102，1994年9月
- 2) 坂本良文・北條哲夫・江口立也・矢野守俊：斜張橋用プレ防食型ケーブルの二次応力および曲げ疲労強度に関する検討，土木学会論文集，Vol.37A，1991年
- 3) 城野嘉明・小野寺勇・中道淳・塩田良一：西湘バイパス・世界初のエクストラドーズドPC橋 小田原港橋の設計と施工，橋梁，pp2-10，1994年5月
- 4) 佐賀県農林部：呼子大橋工事誌，1989年3月
- 5) 埼玉県土木部：秩父公園橋工事報告書，1994年9月

付表-2.2 ケーブル曲げ疲労実験に関する条件および結果一覧

供 試 体		曲 げ 角 度 (°)	軸 力 tf (kgf/mm ²)	最大応力 振 幅 kgf/mm ²	繰 り 返 し 回 数 (万回)	試験結果 回 数
システム	長さ m					
PWS-127 ¹⁾ ロングラウト	4.1	±0.57 ±0.57 ±0.57	175(72) 175(72) 175(72)	±7.5 ±7.5 ±7.5	400 200 400	1本破断 1本破断 破断せず
CFRC-85 ¹⁾ ロングラウト	4.1	±0.57 ±0.57 ±0.57 ±0.57 ±0.57	200(47.7) 200(47.7) 150(34.7) 150(34.7) 150(34.7)	±18.5 ±18.5 ±18.5 ±18.5 ±18.5	50.4 40.4 75.6 60.1 60.0	多数破断 多数破断 多数破断 多数破断 多数破断
LCR-100 ¹⁾ ロングラウト	4.1	±0.57 ±0.76	200(27) 200(27)	±11.5 ±15	約190 約300	多数破断 多数破断
NEW-PWS 31 ²⁾ ロングラウト	1.64 1.64	±0.5 ±0.5	76.4(64.0) 76.4(64.0)	±12.8 ±11.4	200 200	破断せず 1本破断
NEW-PWS 85 ²⁾ ロングラウト	5.426	±0.6	307(93.8)	±20.9	298	破断せず
NEW-PWS 139 ²⁾ ロングラウト	5.426 5.426 5.426 5.426 5.426 5.426	±1.2 ±0.8 ±0.6 ±1.0 ±0.7 ±1.4	285(53.3) 300(56.1) 300(56.1) 305(57.0) 320(59.8) 305(57.0)	±44.9 ±35.0 ±25.1 ±35.3 ±25.6 ±85	17.4 209 202 36.3 217 7.68	8本破断 6本破断 破断せず 8本破断 1本破断 8本破断
NEW-PWS 163 ¹⁾ ロングラウト	10 8	±0.9 ±0.9	350(55.8) 350(55.8)	±20.4 ±20.4	200 200	破断せず 破断せず
HiAm-SPWC 163 ¹⁾ ロングラウト	10 8	±1.0 ±1.0	350(55.8) 350(55.8)	±21.4 ±21.4	250 250	破断せず 破断せず
SWPR7A19φ15 ³⁾ グラウト	7	±0.18	261.7	±4	200	破断せず
SEEE F270PH ⁴⁾ ロングラウト	7	±0.21 ±0.41	93.5 93.5	±7.5 ±15	200 200	破断せず 破断せず
SEEE F500PH ⁵⁾ ロングラウト	7	±0.20 ±0.20	303 232	±6~7 ±6~7	200 200	破断せず 破断せず

付属資料 3 ウェークギャロッピングに対する安全性および供用性に関する試算例

3.1 ウェークギャロッピングに対する安全性の照査に関する試算例

ウェークギャロッピングに対する安全性照査の試算は、ケーブル疲労に着目して行った。ケーブル疲労に関する実験報告は極めて少ないのが現状であるが、現時点での実験結果を参考にし曲げ疲労に着目して安全性の照査を行うこととした。照査の手順を以下に示す。

- ① 付図-2.2に示す実験結果を基に基準曲げ角度を設定する。
- ② 本マニュアル(案)の(4.2), 式(4.3)により発現開始風速および発現終了風速を求める。
- ③ 式(3.4)により振動数を求める。
- ④ 風速1mごとの発生確率を式(3.2)により求める。
- ⑤ 3乗則に従い200万回に対する等価曲げ角度を求める。
- ⑥ 基準曲げ角度に対する許容曲げ角度を設定し、⑤で求めた等価曲げ角度と比較し安全性の照査を行う。

現時点では、並列ケーブルを有する斜張橋が、耐用年数に至っているものがなく、疲労に対する実橋事例はないのが現状である。したがって、試算例に示す曲げ角度の打ち切り限界角度、風向に対する補正係数などは、十分に検討して設定する必要があることは言うまでもない。

<試算例1>

以下に、仮想橋梁に対する1次モードの安全性の照査の試算例を示す。

仮想橋梁諸元

- ・ケーブル高度 92.0m (最上段ケーブルの平均高度)
- ・地表粗度区分 分類I (平坦な地形)
- ・設計風速 47.1m/sec (基本風速30.0m/sec×補正係数1.57)
- ・50年期待風速 44.0m/sec (設計風速47.1/1.07)
- ・ケーブル径 0.187m
- ・ケーブル長 192.0m
- ・ケーブル張力 1360tf
- ・ケーブル単位重量 0.1055tf/m
- ・ケーブル間隔 3.80D
- ・質量減衰係数 24.63 ($\delta=0.01$)

発現開始風速は式(4.2)より

$$U_{cr}=6.0 \times \log 24.63 - 5.8 = 2.54 \text{m/sec}$$

発現終了風速は式(4.3)より

$$U_{s1}=2.5 \times 10^5 \times 1.46 \times 10^{-5} / 0.187 = 19.52 \text{ m/sec}$$

各ケーブル間隔に対する係数 a は表-4.2.2 より

$$a = 7.60 \times 10^{-6} \text{ sec}^{1/2} / \text{m}^{1/2}$$

風向確率は $f=1.0$ を用いて風向角度に対する係数 b は

$$b = 60.0$$

最大曲げ角度に対する照査を行う。

基準曲げ角度 θ_s は付図-2.2 より以下の値に設定する

$$\theta_s = 0.6^\circ$$

最大曲げ角度 θ_{max} となる風速は発現終了風速で、その時の振幅は、式(4.5)より

$$h = 7.60 \times 10^{-6} \times 60.0 \times 192 \times (19.52 - 2.54)^{0.5} = 0.3608 \text{ m}$$

最大曲げ角度 θ_{max} は次式により求める

$$\theta_{max} = \sin^{-1}(2 \times h / \ell)$$

ここで、

h : θ_{max} となる振幅 (m)

ℓ : ケーブル長 (m)

$$\theta_{max} = \sin^{-1}(2 \times 0.3608 / 192) = 0.239^\circ$$

よって最大曲げ角度は基準曲げ角度 θ_s よりも小さい。

次に、発生回数と曲げ角度に対する照査を行う。

ケーブルの1次の固有振動数 f は式(3.4)より

$$f = 1 / (2 \times 192) \times (9.8 \times 1360 / 0.1055)^{0.5} = 0.926 \text{ Hz}$$

許容曲げ角度 θ_R は次式により求める。

$$\theta_R = (C_0 / n_i)^{1/m}$$

ここで、

m : 疲労設計曲線の傾きを表すための定数 ($m=3$)

$$C_0 = 2 \times 10^6 \cdot \theta_s^m$$

$$n_i = \sum n_i \times T$$

n_i : 単位期間内の曲げ角度を構成するある風速範囲の繰り返し回数

T : 耐用年数 ($T=50$ 年)

$$\theta_R = 0.0734^\circ$$

発現開始風速から発現終了風速までの等価曲げ角度を以下の式により求める。

$$\theta_d = ((\sum \theta_i^m \cdot n_i) / \sum n_i)^{1/m}$$

ここで、曲げ角度を構成する風速の範囲分布は風速1mごととした。

$$\theta_d = 0.1278^\circ$$

今、変動曲げ角度の打ち切り限界を 0.1° に設定した場合には、以下ようになる。

許容曲げ角度 θ_R は

$$\theta_R = 0.0864^\circ$$

発現開始風速から発現終了風速までの等価曲げ角度は

$$\theta_d = 0.1465^\circ$$

よって、変動曲げ角度の打ち切り限界を設定しても、無対策時には耐用年数内では等価曲げ角度は許容曲げ角度を超え何らかの制振対策が必要となる。

制振対策に減衰付加付きスーサ($\delta = 0.1$)を適用した場合の安全性の照査について示す。

減衰付加付きスーサ($\delta = 0.1$)を適用した場合の質量・減衰パラメータは

$$S_c = 246.3$$

発現開始風速は式(4.2)より

$$U_{cr} = 6.0 \times \log 246.3 - 5.8 = 8.54 \text{ m/sec}$$

最大曲げ角度に対する照査を行う。

最大曲げ角度 θ_{max} となる風速は発現終了風速で、その時の振幅は、式(4.5)より

$$h = 7.60 \times 10^{-6} \times 60.0 \times 192 \times (19.52 - 8.54)^{0.5} = 0.2901 \text{ m}$$

最大曲げ角度 θ_{max} は

$$\theta_{max} = \sin^{-1}(2 \times 0.2901 / 192) = 0.173^\circ$$

よって最大曲げ角度は基準曲げ角度 θ_d よりも小さい。

次に、発生回数と曲げ角度に対する照査を行う。

許容曲げ角度 θ_R は

$$\theta_R = 0.1065^\circ$$

発現開始風速から発現終了風速までの等価曲げ角度は

$$\theta_d = 0.1084^\circ$$

よって、等価曲げ角度は許容曲げ角度を超えている。

今、変動曲げ角度の打ち切り限界を 0.1° に設定した場合には、以下ようになる。

許容曲げ角度 θ_R は

$$\theta_R = 0.1374^\circ$$

発現開始風速から発現終了風速までの等価曲げ角度は

$$\theta_d = 0.1320^\circ$$

よって、変動曲げ角度の打ち切り限界を何らかに設定した場合(本試算例では 0.1°)には許容値以内に収まる。

<試算例2>

試算例1の仮想橋梁の最下段ケーブルに対する、1次モードの安全性照査の試算例を示す。

仮想橋梁諸元

- ・ ケーブル高度 75.0m (最下段ケーブルの平均高度)
- ・ 地表粗度区分 分類 I (平坦な地形)
- ・ 設計風速 45.9m/sec (基本風速30.0m/sec×補正係数1.53)
- ・ 50年期待風速 42.9m/sec (設計風速45.90/1.07)
- ・ ケーブル径 0.147m
- ・ ケーブル長 70.0m
- ・ ケーブル張力 650tf
- ・ ケーブル単位重量 0.0575tf/m
- ・ ケーブル間隔 3.80D
- ・ 質量減衰係数 $21.72(\delta=0.01)$

発現開始風速は式(4.2)より

$$U_{cr}=6.0 \times \log 21.72 - 5.8 = 2.22 \text{m/sec}$$

発現終了風速は式(4.3)より

$$U_{cl}=2.5 \times 10^5 \times 1.46 \times 10^{-5} / 0.147 = 24.83 \text{m/sec}$$

各ケーブル間隔に対する係数 a は表-4.2.2より

$$a = 7.60 \times 10^{-6} \text{sec}^{1/2} / \text{m}^{1/2}$$

風向確率は $f=1.0$ を用いて風向角度に対する係数 b は

$$b=60.0$$

最大曲げ角度に対する照査を行う。

基準曲げ角度 θ_s は付図-2.2より以下の値に設定する

$$\theta_s = 0.6^\circ$$

最大曲げ角度 θ_{max} となる風速は発現終了風速で、その時の振幅は、式(4.5)より

$$h = 7.60 \times 10^{-6} \times 60.0 \times 70 \times (24.83 - 2.22)^{0.5} = 0.1518 \text{m}$$

最大曲げ角度 θ_{max} は

$$\theta_{max} = \sin^{-1}(2 \times 0.1518 / 70) = 0.249^\circ$$

よって最大曲げ角度は基準曲げ角度 θ_s よりも小さい。

次に、発生回数と曲げ角度に対する照査を行う。

ケーブルの1次の固有振動数 f は式(3.4)より

$$f = 1 / (2 \times 70) \times (9.8 \times 650 / 0.0575)^{0.5} = 2.37 \text{Hz}$$

許容曲げ角度 θ_R は

$$\theta_R = 0.0513^\circ$$

発現開始風速から発現終了風速までの等価曲げ角度は

$$\theta_d = 0.1265^\circ$$

今、変動曲げ角度の打ち切り限界を 0.1° に設定した場合には、以下のようになる。

許容曲げ角度 θ_R は

$$\theta_R = 0.0631^\circ$$

発現開始風速から発現終了風速までの等価曲げ角度は

$$\theta_d = 0.1511^\circ$$

よって、変動曲げ角度の打ち切り限界を設定しても、無対策時には耐用年数内では等価曲げ角度は許容曲げ角度を超え何らかの制振対策が必要となる。

制振対策に減衰付加付きスパーサ($\delta = 0.1$)を適用した場合の安全性の照査について示す。

減衰付加付きスパーサ($\delta = 0.1$)を適用した場合の質量・減衰パラメータは

$$S_c = 217.2$$

発現開始風速は式(4.2)より

$$U_{cr} = 6.0 \times \log 217.2 - 5.8 = 8.22 \text{ m/sec}$$

最大曲げ角度に対する照査を行う。

最大曲げ角度 θ_{max} となる風速は発現終了風速で、その時の振幅は、式(4.5)より

$$h = 7.60 \times 10^{-6} \times 60.0 \times 70 \times (24.83 - 8.22)^{0.5} = 0.1301 \text{ m}$$

最大曲げ角度 θ_{max} は

$$\theta_{max} = \sin^{-1}(2 \times 0.1301 / 70) = 0.213^\circ$$

よって最大曲げ角度は基準曲げ角度 θ_d よりも小さい。

次に、発生回数と曲げ角度に対する照査を行う。

許容曲げ角度 θ_R は

$$\theta_R = 0.0723^\circ$$

発現開始風速から発現終了風速までの等価曲げ角度は

$$\theta_d = 0.1084^\circ$$

よって、等価曲げ角度は許容曲げ角度を超えている。

今、変動曲げ角度の打ち切り限界を 0.1° に設定した場合には、以下のようになる。

許容曲げ角度 θ_R は

$$\theta_R = 0.0999^\circ$$

発現開始風速から発現終了風速までの等価曲げ角度は

$$\theta_d = 0.1413^\circ$$

今、変動曲げ角度の打ち切り限界を 0.2° に設定した場合には、以下のようになる。

許容曲げ角度 θ_R は

$$\theta_R = 0.3854^\circ$$

発現開始風速から発現終了風速までの等価曲げ角度は

$$\theta_d = 0.2070^\circ$$

よって、変動曲げ角度の打ち切り限界を何らかに設定した場合（本試算例では 0.2° ）には許容値以内に収まる。

<試算例 3>

以下に、仮想橋梁の最上段ケーブルに対する、1次モードの安全性照査の試算例を示す。

仮想橋梁諸元

- ・ ケーブル高度 74.8m（最上段ケーブルの平均高度）
- ・ 地表粗度区分 分類Ⅱ（開けた地形）
- ・ 設計風速 45.9m/sec（基本風速30.0m/sec×補正係数1.53）
- ・ 50年期待風速 42.9m/sec（設計風速45.90/1.07）
- ・ ケーブル径 0.096m
- ・ ケーブル長 207.7m
- ・ ケーブル張力 791tf
- ・ ケーブル単位重量 0.02096tf/m
- ・ ケーブル間隔 2.50D
- ・ 質量減衰係数 δ 18.60（ $\delta = 0.01$ ）

発現開始風速は式（4.2）より

$$U_{cr} = 6.0 \times \log 18.60 - 5.8 = 2.00 \text{ m/sec（下限値 } 2.00 \text{ m/sec）}$$

発現終了風速は式（4.3）より

$$U_{cl} = 2.5 \times 10^5 \times 1.46 \times 10^{-5} / 0.147 = 38.02 \text{ m/sec}$$

各ケーブル間隔に対する係数 a は表-4.2.2より

$$a = 7.44 \times 10^{-6} \text{ sec}^{1/2} / \text{m}^{1/2}$$

風向確率 $f = 1.0$ を用い風向角度に対する係数 b は

$$b = 60.0$$

最大曲げ角度に対する照査を行う。

基準曲げ角度 θ_s は付図-2.2より以下の値に設定する

$$\theta_s = 0.5^\circ$$

最大曲げ角度 θ_{max} となる風速は発現終了風速で、その時の振幅は、式（4.5）より

$$h = 7.44 \times 10^{-6} \times 60.0 \times 207.7 \times (38.02 - 2.00)^{0.5} = 0.5565 \text{ m}$$

となるが振幅が3Dを超えるため最大振幅hは以下の値とする。

$$h=3 \times 0.096=0.288\text{m}$$

最大曲げ角度 θ_{max} は

$$\theta_{max}=\sin^{-1}(2 \times 0.288/207.7)=0.159^{\circ}$$

よって最大曲げ角度は基準曲げ角度 θ_d よりも小さい。

次に、発生回数と曲げ角度に対する照査を行う。

ケーブルの1次の固有振動数fは式(3.2)より

$$f=1/(2 \times 207.7) \times (9.8 \times 791/0.02096)^{0.5}=1.464\text{Hz}$$

許容曲げ角度 θ_R は

$$\theta_R=0.0502^{\circ}$$

発現開始風速から発現終了風速までの等価曲げ角度は

$$\theta_d=0.1182^{\circ}$$

今、変動曲げ角度の打ち切り限界を 0.1° に設定した場合には、以下ようになる。

許容曲げ角度 θ_R は

$$\theta_R=0.0618^{\circ}$$

発現開始風速から発現終了風速までの等価曲げ角度は

$$\theta_d=0.1396^{\circ}$$

よって、変動曲げ角度の打ち切り限界を設定しても、無対策時には耐用年数内では等価曲げ角度は許容曲げ角度を超え何らかの制振対策が必要となる。

制振対策に減衰付加付きスパーサ($\delta=0.1$)を適用した場合の安全性の照査について示す。

減衰付加付きスパーサ($\delta=0.1$)を適用した場合の質量・減衰パラメータは

$$S_c=185.7$$

発現開始風速は式(4.2)より

$$U_{cr}=6.0 \times \log 185.7-5.8=7.81\text{m/sec}$$

最大曲げ角度に対する照査を行う。

最大曲げ角度 θ_{max} となる風速は発現終了風速で、その時の振幅は、式(4.5)より

$$h=7.60 \times 10^{-6} \times 60.0 \times 207.7 \times (38.02-7.81)^{0.5}=0.5206\text{m}$$

となるが振幅が3Dを超えるため最大振幅hは以下の値とする。

$$h=3 \times 0.096=0.288\text{m}$$

最大曲げ角度 θ_{max} は

$$\theta_{max}=\sin^{-1}(2 \times 0.288/207.7)=0.159^{\circ}$$

よって最大曲げ角度は基準曲げ角度 θ_d よりも小さい。

次に、発生回数と曲げ角度に対する照査を行う。

許容曲げ角度 θ_R は

$$\theta_R = 0.0708^\circ$$

発現開始風速から発現終了風速までの等価曲げ角度は

$$\theta_d = 0.1073^\circ$$

よって、等価曲げ角度は許容曲げ角度を超えている。

今、変動曲げ角度の打ち切り限界を 0.1° に設定した場合には、以下ようになる。

許容曲げ角度 θ_R は

$$\theta_R = 0.0974^\circ$$

発現開始風速から発現終了風速までの等価曲げ角度は

$$\theta_d = 0.1369^\circ$$

今、変動曲げ角度の打ち切り限界を 0.2° に設定した場合には、最大曲げ角度が 0.2° であるために疲労照査の必要がなくなる。

よって、変動曲げ角度の打ち切り限界を何らかに設定した場合（本試算例では 0.2° ）には許容値以内に収まる。

<試算例4>

試算例3に示した、仮想橋梁の最下段ケーブルに対する1次モードの安全性の照査の試算例を示す。

仮想橋梁諸元

- ・ケーブル高度 55.0m（最下段ケーブルの平均高度）
- ・地表粗度区分 分類Ⅱ（開けた地形）
- ・設計風速 44.10m/sec（基本風速30.0m/sec×補正係数1.53）
- ・50年期待風速 41.21m/sec（設計風速45.90/1.07）
- ・ケーブル径 0.0755m
- ・ケーブル長 207.7m
- ・ケーブル張力 336tf
- ・ケーブル単位重量 0.01105tf/m
- ・ケーブル間隔 2.50D
- ・質量減衰係数 15.82（ $\delta = 0.01$ ）

発現開始風速は式（4.2）より

$$U_{cr} = 6.0 \times \log 15.82 - 5.8 = 2.00 \text{m/sec（下限値2.00m/sec）}$$

発現終了風速は式（4.3）より

$$U_{e1} = 2.5 \times 10^5 \times 1.46 \times 10^{-5} / 0.0755 = 48.34 \text{m/sec}$$

となるが、設計風速を超えるため、発現終了風速 U_{e1} は設計風速とする。

$$U_{e1} = 44.1 \text{m/sec}$$

各ケーブル間隔に対する係数 a は表-4.2.2 より

$$a = 7.44 \times 10^{-6} \text{sec}^{1/2} / \text{m}^{1/2}$$

風向確率 $f = 1.0$ を用い風向角度に対する係数 b は

$$b = 60.0$$

最大曲げ角度に対する照査を行う。

基準曲げ角度 θ_s は付図-2.2 より以下の値に設定する

$$\theta_s = 0.5^\circ$$

最大曲げ角度 θ_{max} となる風速は発現終了風速で、その時の振幅は、式(4.5)より

$$h = 7.44 \times 10^{-6} \times 60.0 \times 42.9 \times (44.1 - 2.00)^{0.5} = 0.1243 \text{m}$$

最大曲げ角度 θ_{max} は

$$\theta_{max} = \sin^{-1}(2 \times 0.1243 / 42.9) = 0.332^\circ$$

よって最大曲げ角度は基準曲げ角度 θ_s よりも小さい。

次に、発生回数と曲げ角度に対する照査を行う。

ケーブルの1次の固有振動数 f は式(3.4)より

$$f = 1 / (2 \times 42.9) \times (9.8 \times 336 / 0.01105)^{0.5} = 6.362 \text{Hz}$$

許容曲げ角度 θ_R は

$$\theta_R = 0.0309^\circ$$

発現開始風速から発現終了風速までの等価曲げ角度は

$$\theta_d = 0.1237^\circ$$

今、変動曲げ角度の打ち切り限界を 0.1° に設定した場合には、以下ようになる。

許容曲げ角度 θ_R は

$$\theta_R = 0.0385^\circ$$

発現開始風速から発現終了風速までの等価曲げ角度は

$$\theta_d = 0.1486^\circ$$

よって、変動曲げ角度の打ち切り限界を設定しても、無対策時には耐用年数内では等価曲げ角度は許容曲げ角度を超え何らかの制振対策が必要となる。

制振対策に減衰付加付きスパーサ($\delta = 0.1$)を適用した場合の安全性の照査について示す。

減衰付加付きスパーサ($\delta = 0.1$)を適用した場合の質量・減衰パラメータは

$$S_c = 158.3$$

発現開始風速は式(4.2)より

$$U_{cr} = 6.0 \times \log 158.3 - 5.8 = 7.40 \text{m/sec}$$

最大曲げ角度に対する照査を行う。

最大曲げ角度 θ_{max} となる風速は発現終了風速で、その時の振幅は、式(4.5)より

$$h = 7.60 \times 10^{-6} \times 60.0 \times 42.9 \times (44.1 - 7.40)^{0.5} = 0.1185 \text{m}$$

最大曲げ角度 θ_{max} は

$$\theta_{max} = \sin^{-1}(2 \times 0.1185 / 42.9) = 0.317^\circ$$

よって最大曲げ角度は基準曲げ角度 θ_s よりも小さい。

次に、発生回数と曲げ角度に対する照査を行う。

許容曲げ角度 θ_R は

$$\theta_R = 0.0412^\circ$$

発現開始風速から発現終了風速までの等価曲げ角度は

$$\theta_d = 0.1055^\circ$$

よって、等価曲げ角度は許容曲げ角度を超えている。

今、変動曲げ角度の打ち切り限界を 0.1° に設定した場合には、以下ようになる。

許容曲げ角度 θ_R は

$$\theta_R = 0.0569^\circ$$

発現開始風速から発現終了風速までの等価曲げ角度は

$$\theta_d = 0.1383^\circ$$

変動曲げ角度の打ち切り限界を 0.2° に設定した場合には、以下ようになる。

許容曲げ角度 θ_R は

$$\theta_R = 0.2068^\circ$$

発現開始風速から発現終了風速までの等価曲げ角度は

$$\theta_d = 0.2187^\circ$$

変動曲げ角度の打ち切り限界を 0.25° に設定した場合には、以下ようになる。

許容曲げ角度 θ_R は

$$\theta_R = 0.6027^\circ$$

発現開始風速から発現終了風速までの等価曲げ角度は

$$\theta_d = 0.2605^\circ$$

よって、変動曲げ角度の打ち切り限界を何らかに設定した場合（本試算例では 0.25° ）には許容値以内に収まる。

3.2 ウェークギャロッピングに対する供用性の照査

ウェークギャロッピングの供用性に対しては、橋梁の利用者に不安感を与える目撃率として、風速および振幅範囲の発生率を考えて検討することとした。付表-3.1の基準発生率は、振動が認められた7橋に対して、風向分布をほぼ均等と仮定し、構造減衰を10%に増加させた場合の発生率を求め、7橋のほぼ下限値をとったものである。この基準値に関しては、今後の実橋における対策事例などを蓄積し検討する必要がある、各橋梁ごとに管理者と協議して基準値を定めていくことが望まれる。

なお、以下における具体的な照査は、最上段ケーブル（最長ケーブル）におけるウェークギャロッピング

グの発生率が、付表－3.1に示す風速および振幅範囲ごとに設定されている基準発生率以下となることを照査するものとした。

付表－3.1 風速および振幅範囲の基準発生率

風速範囲 振幅範囲	～ 5m/sec	5～10m/sec	10～ U_{4m} /sec
0.1～0.5D	0.02	0.08	—
0.5～1.0D	0.0	0.05	0.10
1.0～3.0D	0.0	0.0	0.05

<試算例>

試算例において風速の発生確率は式(3.2)に従い求めた。式(4.5)の風向については、観測された風向分布を用いることが望ましいが、観測値が得られていない本試算例においては以下に示す確率分布を使用した。

平坦な地形に架設され風向分布がほぼ均等と推定される場合：

$$f(\beta=60)=0.5, f(\beta=45)=0.2, f(\beta=22.5)=0.2, f(\beta=0)=0.1$$

谷間、入り江等に架設され風向が橋軸直角方向に卓越すると推定される場合：

$$f(\beta=60)=1.0, f(\beta=45)=0.0, f(\beta=22.5)=0.0, f(\beta=0)=0.0$$

以下に、仮想橋梁に対する1次モードの供用性照査の試算例を示す。

仮想橋梁諸元

- ・ケーブル高度 92.0m (最上段ケーブルの平均高度)
- ・地表粗度区分 分類Ⅰ (平坦な地形)
- ・設計風速 47.1m/sec (基本風速30.0m/sec×補正係数1.57)
- ・50年期待風速 44.0m/sec (設計風速47.1/1.07)
- ・ケーブル径 0.187m
- ・ケーブル長 192.0m
- ・質量減衰係数 24.63 ($\delta=0.01$)
- ・ケーブル間隔 3.80D

発現開始風速は式(4.2)より

$$U_{cr}=6.0 \times \log 24.63 - 5.806 = 2.54 \text{m/sec}$$

発現終了風速は式(4.3)より

$$U_{cl}=2.5 \times 10^5 \times 1.46 \times 10^{-5} / 0.187 = 19.52 \text{m/sec}$$

各ケーブル間隔に対する係数aは表－4.2.2より

$$a = 7.60 \times 10^{-6} \text{sec}^{1/2} / \text{m}^{1/2}$$

となる。風向分布は前述の平坦な地形での風向分布に対応すると判断される。

今、風向角度に対する係数が $b = 60.0$ の範囲では、振幅 $0.1D$ となる風速は式(4.5)より

$$U(0.1D) = \{(0.1 \times 0.187) / (7.60 \times 10^{-6} \times 60.0 \times 192.0)\}^2 + 2.54 \\ = 2.59 \text{ m/sec}$$

同様に振幅 $0.5D$, $1.0D$, $2.0D$, $3.0D$ に対する風速は、

$$U(0.5D) = 3.68 \text{ m/sec}$$

$$U(1.0D) = 7.10 \text{ m/sec}$$

$$U(3.0D) = \infty \text{ m/sec}$$

となる。なお、風速が ∞ の場合でも $h/D \leq 3$ であり、 $U(3.0D) = \infty \text{ m/sec}$ となる。

よって、付表-3.1の1行1列目に対応した風速範囲の発生率は、

$$P(\beta=60, U=0 \sim 5, h/D=0.1 \sim 0.5) \\ = 0.5 \times \{ \exp \{ -(2.59/0.166/44.0)^{1.46} \} - \exp \{ -(3.68/0.166/44.0)^{1.46} \} \} \\ = 0.110$$

となり、同様に各行各列の発生率を求めると付表-3.2のように算出される。

付表-3.2 風向角度に対する係数 $b = 60.0$ の場合の発生率

風速範囲 振幅範囲	～ 5m/sec	5～10m/sec	10～ U_m /sec
0.1～0.5D	0.055	—	—
0.5～1.0D	0.065	0.090	—
1.0～3.0D	—	0.089	0.095

次に、風向角度に対する係数が $b = 45.0$ の範囲では、上記と同様に

$$U(0.1D) = 2.62 \text{ m/sec}$$

$$U(0.5D) = 4.57 \text{ m/sec}$$

$$U(1.0D) = 10.65 \text{ m/sec}$$

$$U(3.0D) = \infty \text{ m/sec}$$

となり、付表-3.1に対応した風速範囲の発生率は、付表-3.3のように算出される。

付表-3.3 風向角度に対する係数 $\beta = 45.0$ の場合の発生率

風速範囲 振幅範囲	～ 5m/sec	5～10m/sec	10～ U_m /sec
0.1～0.5D	0.039	—	—
0.5～1.0D	0.008	0.071	0.006
1.0～3.0D	—	—	0.032

さらに、風向角度に対する係数が $\beta=22.5$ の範囲では、

$$U(0.1D) = 2.86\text{m/sec}$$

$$U(0.5D) = 10.65\text{m/sec}$$

$$U(1.0D) = 34.98\text{m/sec}$$

$$U(3.0D) = \infty\text{m/sec}$$

となり、付表-3.1に対応した風速範囲の発生率は、付表-3.4のように算出される。

付表-3.4 風向角度に対する係数 $\beta=22.5$ の場合の発生率

風速範囲 振幅範囲	～ 5m/sec	5～10m/sec	10～ U_{∞} m/sec
0.1～0.5D	0.043	0.071	0.006
0.5～1.0D	—	—	0.032
1.0～3.0D	—	—	—

以上の付表-3.2～付表-3.4の発生率を合計すると仮想橋梁のウェークギャロッピング発生率は付表-3.5のように算出される。

付表-3.5 仮想橋梁のウェークギャロッピング発生率

風速範囲 振幅範囲	～ 5m/sec	5～10m/sec	10～ U_{∞} m/sec
0.1～0.5D	0.137	0.071	0.006
0.5～1.0D	0.073	0.161	0.038
1.0～3.0D	0.000	0.089	0.127

この結果は基準発生率を越えており、制振対策が必要となる。

ここでは、制振対策として次章に示す減衰付加型スパーサ ($\delta=0.1$)を考えてみる。なお、制振装置の機構については次章を参照されたい。

減衰付加型スパーサ ($\delta=0.1$)を適用した場合の質量・減衰パラメータは

$$S_c = 246.3$$

発現開始風速は式(4.2)より

$$U_{cr} = 6.0 \times \log 246.3 - 5.806 = 8.54\text{m/sec}$$

となる。この発現開始風速8.54m/secを用いて、上記の制振対策が無い場合と同様に、減衰付加型スパーサ適用の場合の発生率を算出すると付表-3.6のように得られる。

これらの発生率は付表-3.1に示す基準発生率以下の値となることから、減衰付加型スパーサにより減衰増加 ($\delta=0.1$)した場合には、供用制を満足することが判る。

付表-3.6 減衰付加型スパーサ ($\delta=0.1$) を適用した
場合のウェークギャロッピング発生率

風速範囲 振幅範囲	～ 5m/sec	5～10m/sec	10～ U_{am} /sec
0.1～0.5D	0.000	0.057	0.039
0.5～1.0D	0.000	0.008	0.088
1.0～3.0D	0.000	0.000	0.045

相互連結を適用した場合についても、式(4.5)におけるケーブル長 L としてサブスパン長を用いることにより、上記と同様に発生率が算出される。

付属資料. 4 新しい構造力学的制振装置における解析検討資料

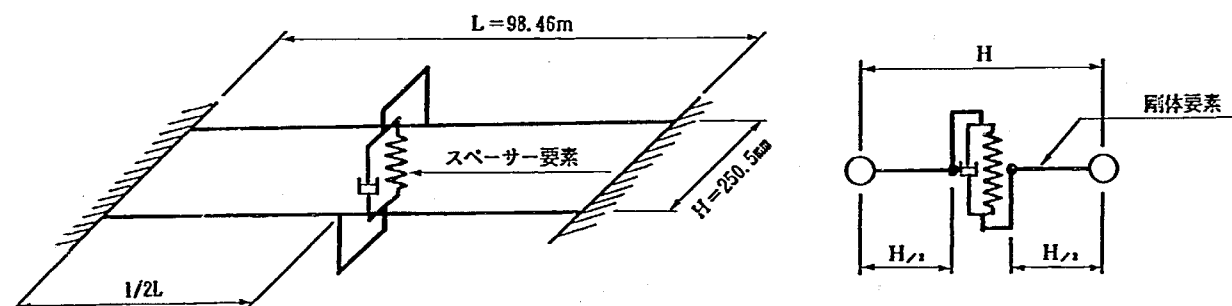
4.1 減衰付加型スーサの効果

(1) 検討モデル

3次元複素固有値解析モデルにより、減衰付加型スーサの効果確認を行う。ケーブルは曲げ剛性の小さい梁要素としてモデル化し、初期張力から剛性を計算する。要素分割は24等分とし、スーサは、付図-4.1に示すように、せん断ダンパー型スーサを想定し、ダッシュポット、バネおよび剛体要素でモデル化する。ケーブルの諸元は、付表-4.1とする。

付表-4.1 並列ケーブルの諸元

項 目	値	備 考
ケーブル長さ	$L=96.46\text{m}$	
ケーブル外径	$D=83.5\text{mm}$	
ケーブル間隔	$H=250.5\text{mm}$	$=3D$
単位長さ当りの質量	$m=1.891\times 10^{-3}\text{t/m}$	
単位長さ当りの質量慣性モーメント	$m_{ip}=1.041\times 10^{-6}\text{tf}\cdot\text{m}^2/\text{m}$	
ケーブル張力	$T=165\text{tf}$	
みかけのねじり剛性	$GJ=0.511\text{tf}\cdot\text{m}^2$	(実測値)
鉛直方向振動数	$f=1.500\text{Hz}$	$=1/2L\cdot\sqrt{T/m}$
ねじり振動数	$f_\theta=3.558\text{Hz}$	$=1/2L\cdot\sqrt{GJ/mI_p}$



付図-4.1 3次元複素固有値解析のモデル化

ケーブルの1/2点に1個設置した場合については、スーサの粘性減衰係数、バネ定数を仮定し、3次元複素固有値解析を行う。各モードごとに対数減衰率が算出される。

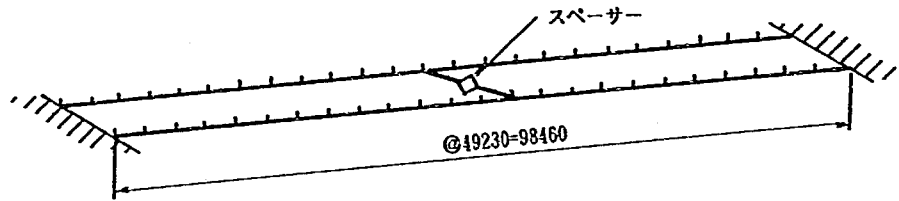
(2) スーサの特性をパラメータとした解析

付図-4.2のようにスーサをケーブルの1/2点に1個設置した場合について、スーサの粘性減衰係数、バネ定数を付表-4.2に示す範囲で変化させて、3次元複素固有値解析を行う。

得られたケーブルの対数減衰率とスーサの特性との関係を、付図-4.3に示す。ケーブルの対数減衰率は1次の逆位相モードのものである。

付表－4.2 減衰係数、バネ定数の範囲

粘性減衰係数 c	0.01～0.20 tf・s/m
バネ定数 k	0.01～10.0 tf/m

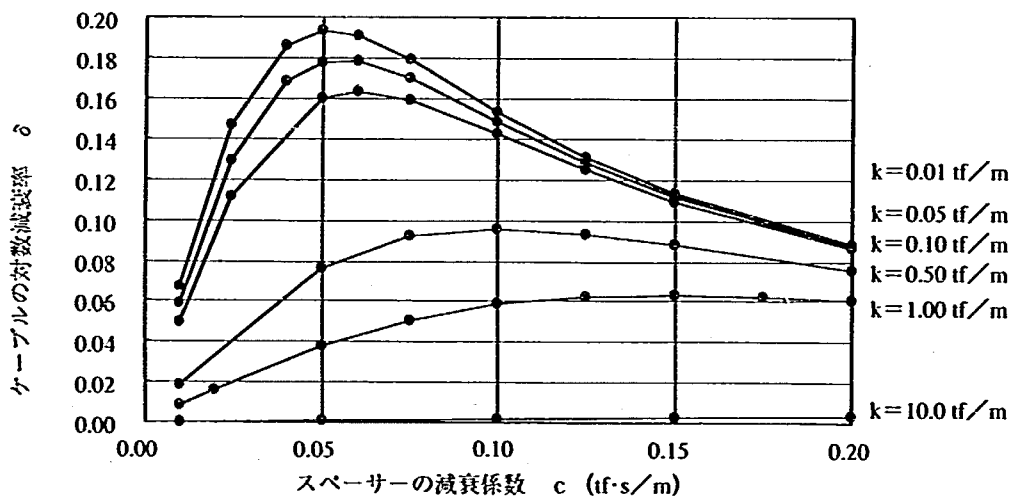


付図－4.2 スペーサ1個の解析モデル

この図から、

- ① スペーサのバネ定数が小さいほど、ケーブルに付加される減衰が大きくなること
- ② スペーサの粘性減衰係数には最適値があること

がわかる。



付図－4.3 スペーサの粘性減衰係数 c とバネ定数 k の影響

(3) ケーブルのねじり剛性をパラメータとした解析

スペーサをケーブルの1/2点に1個設置し、スペーサの粘性減衰係数、バネ定数を固定して、ケーブルのねじり剛性のみを付表－4.3のように変化させて解析を行う。

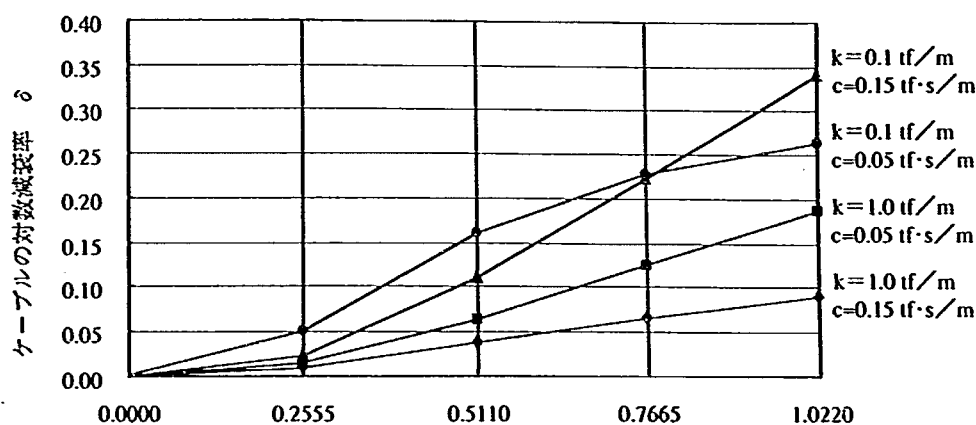
得られたケーブルの対数減衰率とケーブルのねじり剛性との関係を、付図－4.4に示す。

この図から、

- ① ケーブルに付加される減衰はケーブルのねじり剛性に大きく影響されること
- ② ケーブルのねじり剛性が増加すると概ね線形的にケーブルの対数減衰率も増加することがわかる。

付表-4.3 ケーブルのねじり剛性

解析ケース	ねじり剛性GJ(tf・m ²)	備 考
1	0.2555	=実測値×0.5
2	0.5110	=実測値×1.0
3	0.7665	=実測値×1.5
4	1.0220	=実測値×2.0



付図-4.4 ケーブルのねじり剛性の影響

(4) スペーサの個数をパラメータとした解析

付表-4.4に示すように、粘性減衰係数、バネ定数を設置個数分したスペーサを複数個設置した場合について解析を行い、1個設置した場合のケーブルに付加される対数減衰率と比較する。スペーサは、付図-4.5に示すように等分点に設置する。

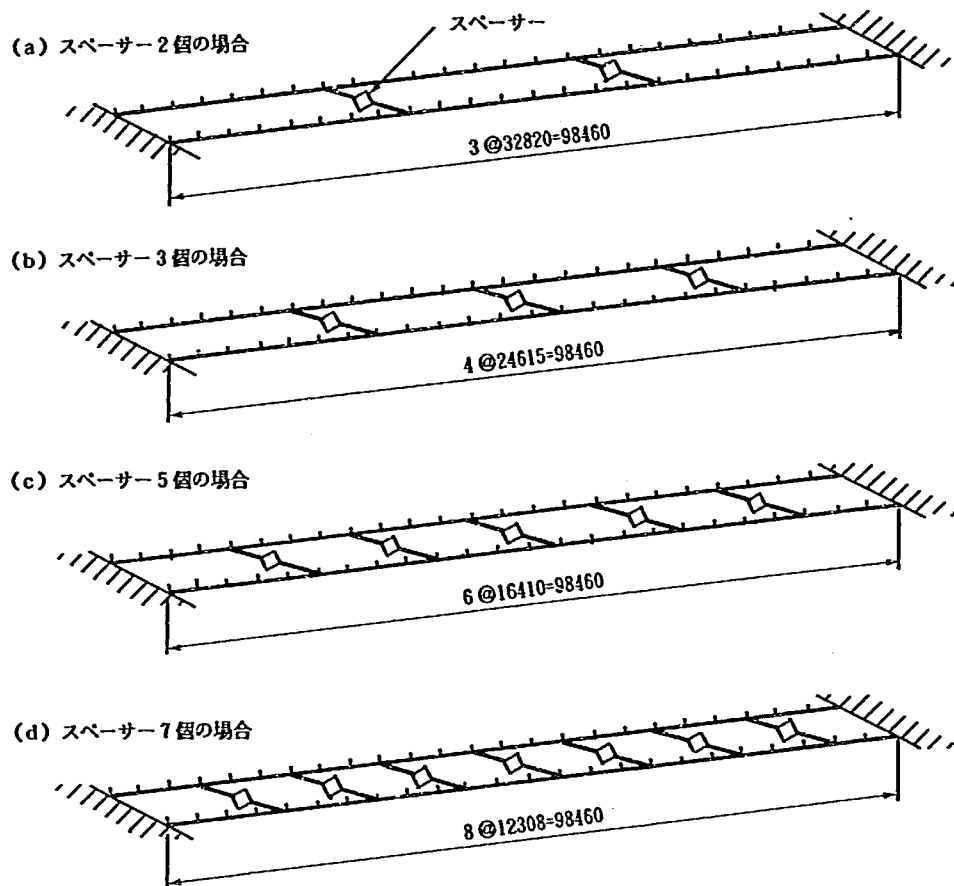
付表-4.4 スペーサ個数とスペーサの特性

解析ケース	スペーサ個数	1	2	3	4	5
1	c (tf・s/m)	0.0500	0.0250	0.0167	0.0100	0.0071
	k (tf/m)	0.100	0.050	0.033	0.020	0.014
2	c (tf・s/m)	0.0750	0.0375	0.0250	0.0150	0.0107
	k (tf/m)	0.500	0.250	0.167	0.100	0.071
3	c (tf・s/m)	0.1000	0.0500	0.0333	0.0200	0.0143
	k (tf/m)	1.000	0.500	0.333	0.200	0.143

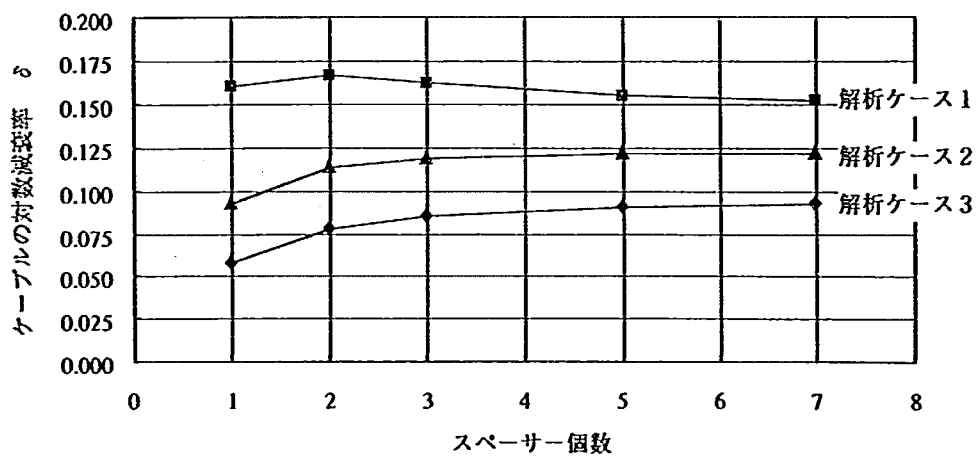
得られたケーブルの対数減衰率とスペーサの個数との関係を付図-4.6に、ケーブルの振動数とスペーサの個数との関係を付図-4.7に示す

これらの図から、スペーサの粘性減衰係数、バネ定数を設置個数分したスペーサを複数個設置した場合

- ① ケーブルに付加される減衰はスペーサの個数を増加させても、ほとんど変化しないこと
- ② ケーブルの固有振動数はスペーサの個数を増加させても、ほとんど変化しないこと



付図-4.5 スペーサーを複数個設置した場合の解析モデル



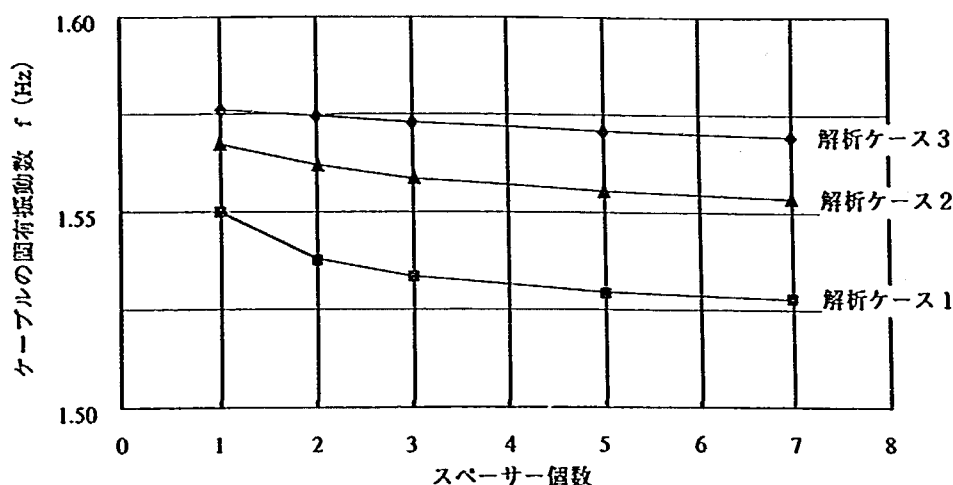
付図-4.6 スペーサーの個数の影響

がわかる。

以上を総括すると次のようになる。

① スペーサーの特性について

- ・バネ定数は、設計可能な範囲で小さくすることが望ましい。



付図-4.7 スペーサの個数がケーブルの振動数に与える影響

・最適粘性減衰係数は、ケーブル条件などによりそれぞれ異なるため、簡易式より推定してから設計を行う必要がある。

② ケーブルのねじり剛性について

・減衰付加型スペーサは、ケーブルのねじり剛性に大きく依存するため、あらかじめその値を算定し、実験により把握しておく必要がある。

・ケーブルのねじり剛性が大きいケーブルの場合、減衰付加型スペーサは効果的に作用する。

③ スペーサの設置個数について

・減衰付加型スペーサの設置個数を増加しても、対数減衰率を大幅に増加させることはできない

・設置個数は、想定するケーブルの位相モードを考慮して決定する必要がある。

4.2 簡易式の誘導

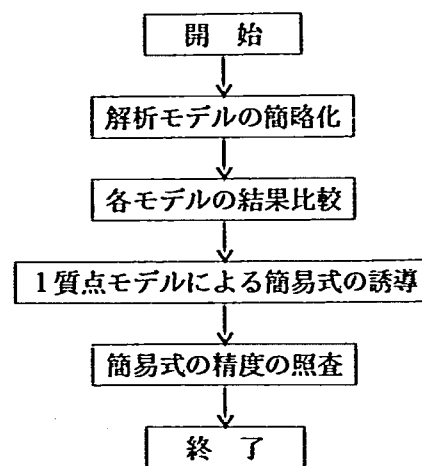
(1) 誘導の手順

簡易式の誘導は、次の手順に従って行う。

(2) 解析モデルによる結果比較

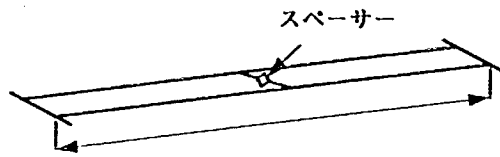
付図-4.9に示した①並列ケーブル3次元モデル、②1ケーブル3次元モデル、③1ケーブル1質点2次元モデル、④2質点モデルの順に、解析モデルを簡略化し、複素固有値解析を行う。解析モデル①は、基本的には前項の3次元モデルと同様であるが、ケーブルの要素分割を2等分とし、1/2点に質量慣性モーメントを集中させる。ケーブルの諸元は、付表-4.1とし、スペーサの特性は粘性減衰係数 $c = 0.05 \text{ tf} \cdot \text{s/m}$ 、バネ定数 $k = 0.1 \text{ tf/m}$ 、個数は1個の場合で試算を行う。

簡略化した解析モデルを用いて計算されたケーブルの対数減衰率と次項の3次元複素固有値解析から



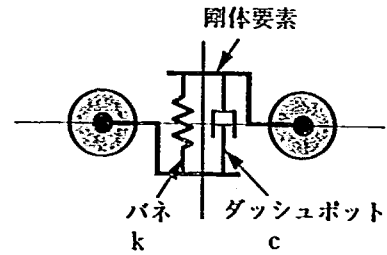
付図-4.8 簡易式の誘導手順

解析モデル①・・・並列ケーブル3次元モデル



【ケーブル諸元】

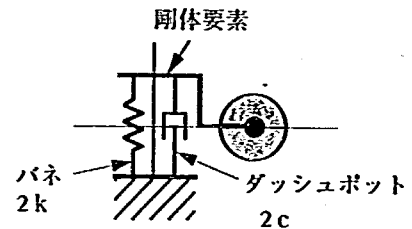
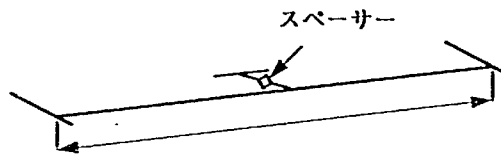
ケーブル長さ	$\ell = 98.46 \text{ m}$
ケーブル間隔	$s = 0.2505 \text{ m}$
ケーブル張力	$T = 165 \text{ tf}$
ケーブルねじり剛性	$GJ = 0.511 \text{ tf} \cdot \text{m}^2$
ケーブル質量	$M = 1/2 \cdot m \ell = 0.0931 \text{ t}$
ケーブル質量慣性モーメント	$Mlp = 3/8 \cdot mlp \ell = 3.844 \times 10^{-5} \text{ t} \cdot \text{m}^2$



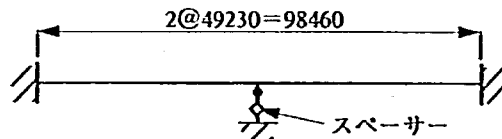
【スパーサー諸元】

$c = 0.05 \text{ tf} \cdot \text{s/m}$
$k = 0.1 \text{ tf/m}$

解析モデル②・・・1ケーブル3次元モデル



解析モデル③・・・1ケーブル1質点2次元モデル

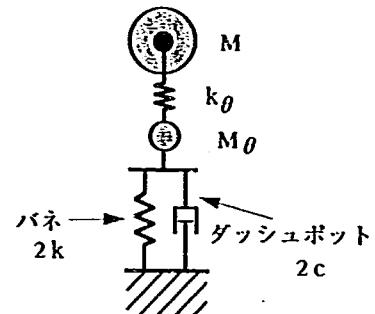


ケーブルのねじり剛性を考慮したバネ定数

$$k_{\theta} = 16GJ/s^2 \ell = 1.323 \text{ tf/m}$$

ケーブルの質量慣性モーメントを考慮した質量

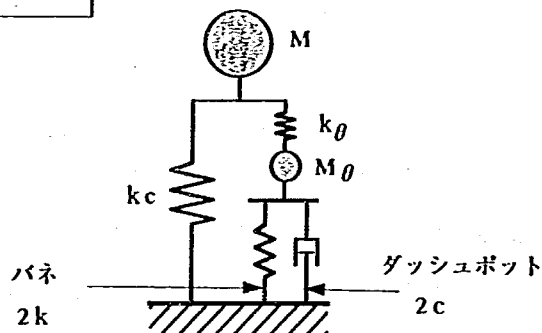
$$M_{\theta} = 4Mlp/s^2 = 2.450 \times 10^{-3} \text{ t}$$



解析モデル④・・・2質点モデル

ケーブル剛性を考慮したバネ定数

$$k_c = \pi^2 T/2 \ell = 8.044 \text{ tf/m}$$



付図-4.9 解析モデルの簡略化

得られたケーブルの対数減衰率を比較した結果を付表－4.5に示す。これより、最も簡略化した解析モデル④であっても、ある程度ケーブルの対数減衰率を可能と考えられる。

付表－4.5 簡略化した解析モデルで計算されたケーブルの対数減衰率

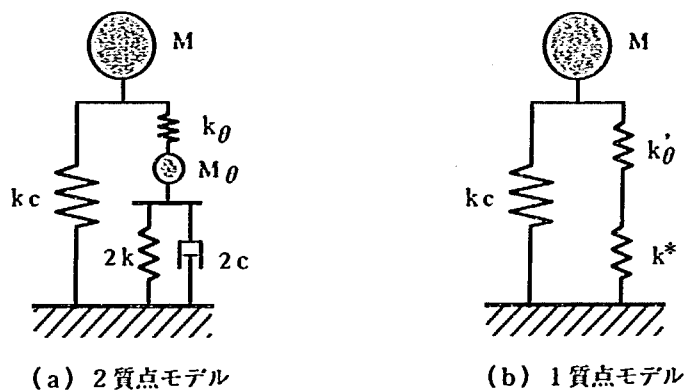
解析モデル	振動数 f (Hz)	対数減衰率 δ
3次元複素固有値解析	1.500 (1.00)	0.160 (1.00)
解析モデル①	1.525 (0.98)	0.167 (1.04)
解析モデル②	1.525 (0.98)	0.167 (1.04)
解析モデル③	1.520 (0.98)	0.246 (1.54)
解析モデル④	1.520 (0.98)	0.246 (1.54)

注) () 内の数値は3次元複素固有値解析の結果に対する比率である。

(3) 1質点モデルによる簡易式の誘導

次に、解析モデル④(2質点モデル)について簡易式を導く。

①②により付図－4.10(a)の2質点モデルを付図－4.10(b)の1質点モデルとする。



付図－4.10 簡易モデル

① ケーブルの質量慣性モーメントとねじり剛性を考慮したバネを次式によってバネ定数 $k\theta'$ に取り込む。

$$k\theta' = k\theta - \omega^2 M\theta$$

ここで、

$k\theta$: ケーブルのねじり剛性を考慮したバネ定数 $= 16GJ/s^2 L$

$M\theta$: ケーブルの質量慣性モーメントを考慮した質量 $= 3mlpL/2s^2$

ω : 系の円周振動数

② スペーサのバネとダッシュポットを次式により複素バネ k^* として表す。

$$k^* = 2k + i(2\omega c)$$

上記の系の固有円振動数 ω が、ケーブルの固有円振動数と等しいと仮定し、全体のバネ定数 k^* を求める。

$$\omega = \sqrt{(kc/M)}$$

ここで、

kc : ケーブルの剛性を考慮したバネ定数 $= \pi^2 T / 2L$

M : ケーブルの質量 $= mL / 2$

$$k^* = k^* k_{\theta'} / (k^* + k_{\theta'}) + kc = a + ib$$

ここで、

$$a = \frac{2k(k_{\theta'} - \omega^2 M \theta') (2k + k_{\theta'} - \omega^2 M \theta') + 4(\omega c)^2 (k_{\theta'} - \omega^2 M \theta')}{(2k + k_{\theta'} - \omega^2 M \theta')^2 + 4(\omega c)^2} + kc$$

$$b = \frac{2\omega c (k_{\theta'} - \omega^2 M \theta')^2}{(2k + k_{\theta'} - \omega^2 M \theta')^2 + 4(\omega c)^2}$$

また、複素固有値 p は次式となる。

$$p = \left(-\frac{K^*}{M} \right)^{1/2} = \left(\frac{a}{M} + i \frac{b}{M} \right)^{1/2} i$$

これより、固有振動数 f および減衰定数 h は次式で求まる。

$$f = \frac{\text{Im}(p)}{2\pi} = \frac{r}{2\pi} \cos \frac{\theta}{2}$$

$$h = \frac{\text{Re}(p)}{\text{Im}(p)} = \tan \frac{\theta}{2}$$

ここで、

$$r = \frac{(a^2 + b^2)^{1/4}}{M}$$

$$\theta = \tan^{-1} (b/a)$$

また、対数減衰率は次式となる。

$$\delta = 2\pi h / \sqrt{1 - h^2}$$

さらに、

$$\delta \approx 2\pi h = 2\pi \tan(\theta/2) \approx \pi b/a$$

とすると、簡易式は誘導できる。

減衰付加型スペーサ（せん断ダンパー型スペーサ）によりケーブルに付加される対数減衰率

$$\delta = \frac{2\pi (kc/M)^{1/2} kt^2 \cdot c}{4(kc + kt) \cdot k^2 + 2(2kc + kt) kt \cdot k + 4(kc + kt) kc/M \cdot c^2 + kc \cdot kt^2}$$

$$kt = k\theta - kc \cdot M\theta / M$$

ここで,

L : ケーブルの長さ(m)

H : ケーブルの間隔 (m)

m : ケーブルの単位長さ当たりの質量 (t/m)

ml_p : ケーブルの単位長さ当たりの質量慣性モーメント ($t \cdot m^2/m$)

T : ケーブルの張力 (tf)

GJ : ケーブルのねじり剛性 (tf $\cdot m^2$)

k : スペーサのバネ定数 (tf $\cdot m/rad$)

c : スペーサの粘性減衰係数 (tf $\cdot m \cdot s/rad$)

δ : ケーブルに付加される対数減衰率

kc : ケーブルの剛性を考慮したバネ定数 $kc = \pi^2 T / (2L)$ (tf/m)

$k\theta$: ケーブルのねじり剛性を考慮したバネ定数 $k\theta = 16GJ / (H^2 L)$ (tf/m)

M : ケーブル質量 $M = 1/2 \cdot mL$ (t)

$M\theta$: ケーブルの質量慣性モーメントを考慮した質量 $M\theta = 4ml_p / H^2$ (t)

Ml_p : ケーブル質量慣性モーメント $Ml_p = 3/8 \cdot m_l_p \cdot L$ (tf $\cdot m^2$)

回転ダンパー型スペーサは、次式によりスペーサの減衰係数およびバネ定数を変換することにより、変換することができる。

$$cs = cr / 2H^2 \quad ks = kr / 2H^2$$

ここで,

cs : せん断型スペーサの粘性減衰係数 (tf $\cdot s/m$)

cr : 回転型スペーサの粘性減衰係数 (tf $\cdot m \cdot s/rad$)

ks : せん断型スペーサのバネ定数 (tf/m)

kr : 回転型スペーサのバネ定数 (tf $\cdot m/rad$)

減衰付加型スペーサ (回転ダンパー型スペーサ) によりケーブルに付加される対数減衰率

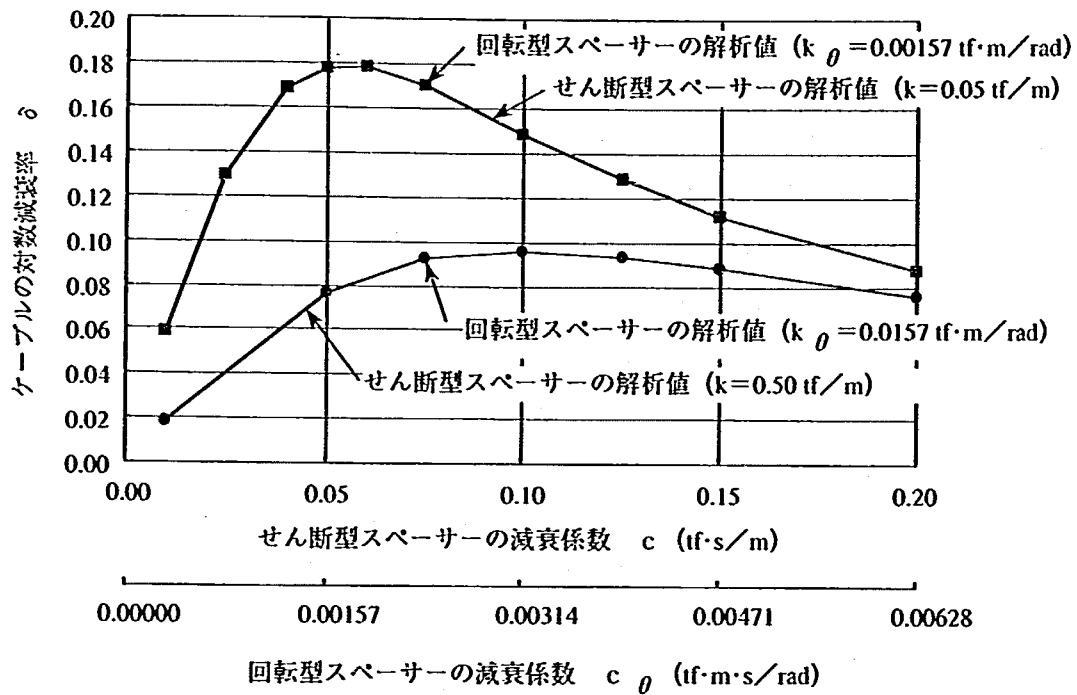
$$\delta = \frac{4 \pi H^2 (kc/M)^{1/2} kt^2 \cdot c}{4 (kc + kt) \cdot k^2 + 4H^2 (2kc + kt) kt \cdot k + 4(kc + kt) kc/M \cdot c^2 + 4H^4 \cdot kc \cdot kt^2}$$

付図-4.11から2つの式から得られたケーブルの対数減衰率は一致しており、粘性減衰係数およびバネ定数を変換すれば、回転ダンパー型スペーサはせん断ダンパー型スペーサに置き換え可能であることが確認できる。

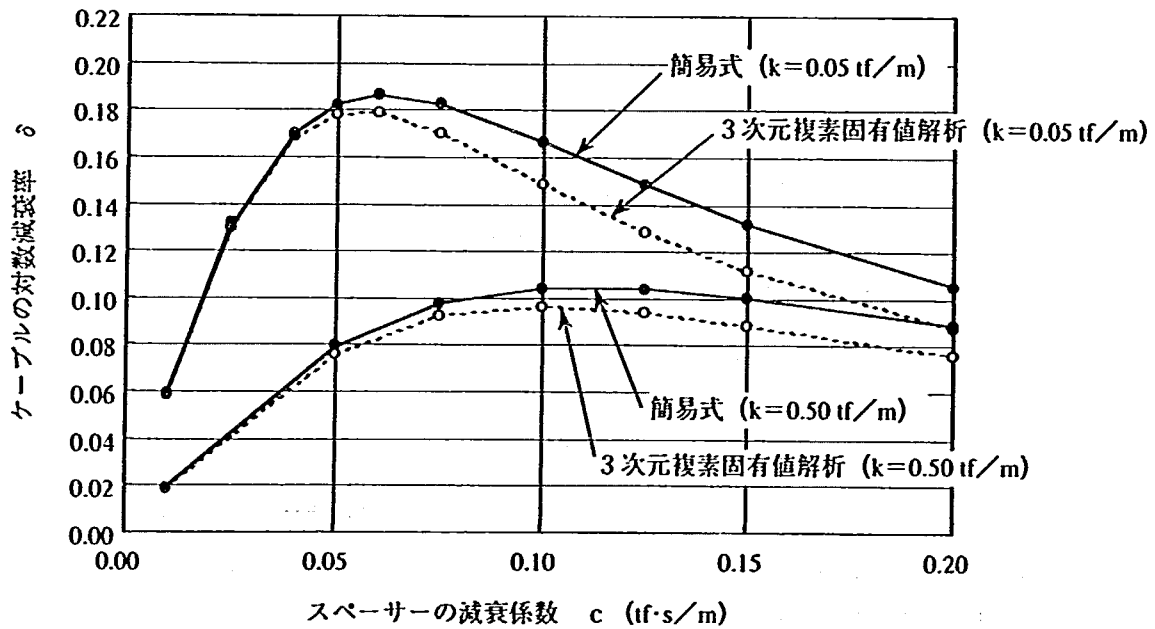
(4) 簡易式の精度

3次元複素固有値解析で得られたケーブルの対数減衰率と簡易式から求まるケーブルの対数減衰率を比較した結果を付図-4.12に示す。付加される対数減衰率は、3次元複素固有値解析で得られる値より簡易式から求められる値の方が5%程度大きめの値を与えるが、最適値は、ほぼ一致している。したがって、質量・減衰パラメータの算出に用いる対数減衰率は、簡易式で算出した値に0.95を乗じて用いる

方が望ましい。



付図-4.11 回转型スペーサとせん断型スペーサの比較



付図-4.12 3次元複素固有値解析と簡易式の比較